

ผลกระทบของการฉายรังสีเอ็กซ์โดยตรงต่อลักษณะสมบัติของ

ไดโอดชนิดรอยต่อ พี-เอ็น

Effect of Direct X-Ray Radiation on P-N Junction

Diode Characteristics



T119420

โดย

นายกันต์ชนก	ฉิมจรรย์กุล	รหัส	50010076
นายกานนท์	ทองสง	รหัส	50010089
นายกิตติชัย	ชัยเจริญธร	รหัส	50010109

อาจารย์ที่ปรึกษา

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน **119420**
วัน,เดือน,ปี...-7 S.ค. 2554

ผศ.ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ

b.	119420
i.	

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ ผลกระทบของการฉายรังสีเอ็กซ์โดยตรงต่อลักษณะสมบัติของไดโอดชนิด
รอยต่อ พี-เอ็น

Effect of Direct X-Ray Radiation on P-N Junction Diode Characteristics

จัดทำโดย นายกัณฑ์ชนก ลี้มจรียากุล รหัส 50010076
 นายกานนท์ ทองสง รหัส 50010089
 นายกิตติรัช ชัยเกริธร รหัส 50010109

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ



รายงานฉบับนี้ได้ทำการตรวจสอบโดยอาจารย์ที่ปรึกษาแล้ว

ชื่อ.....*สุรศักดิ์ เนียมเจริญ*.....(อาจารย์ที่ปรึกษา)

(.....)

วันที่...../...../.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลกระทบบของการฉายรังสีเอกซ์โดยตรงต่อลักษณะสมบัติของ ไดโอดชนิดรอยต่อ พี-เอ็น

นายกันต์ชนก ลิ้มจรียากุล รหัส 50010076

นายกานนท์ ทองสง รหัส 50010089

นายกิตติรัช ชัยเกียรติ รหัส 50010109

ผศ.ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2553

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาลักษณะสมบัติของไดโอดรอยต่อพี-เอ็นซึ่งนำมาใช้เป็นตัวตรวจจับรังสีเอกซ์ หลังจากได้รับการฉายรังสีเอกซ์แบบ โดยตรง โดยทำการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติ กระแส-แรงดัน, ความจุไฟฟ้า-แรงดัน, ความหนาแน่นอะตอมสารเจือและอายุการเกิดพาหะ ของ ไดโอดรอยต่อพี-เอ็นก่อนและหลังการฉายรังสีเอกซ์ ไดโอดถูกฉายรังสีด้วยพลังงาน 40, 55 และ 70 keV เป็นเวลา 5, 55 และ 205 วินาทีตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่ากระแสรั่วไหลของไดโอดที่ถูกฉายรังสีเอกซ์ด้วยพลังงาน 70 keV มีค่าลดลง ในขณะที่กระแสรั่วไหลของไดโอดที่ถูกฉายรังสีด้วยพลังงาน 40 และ 55 keV มีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้เป็นประเด็นที่น่าสนใจจึงทำการศึกษาไดโอดที่ถูกฉายรังสีเอกซ์ด้วยพลังงาน 70 keV เพิ่มเติม โดยจะพิจารณาความหนาแน่นของพาหะและอายุการเกิดพาหะ พบว่าการฉายรังสีเอกซ์พลังงาน 70 keV เป็นเวลา 5 วินาทีที่มีผลทำให้อายุการเกิดพาหะมีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลให้กระแสรั่วไหลของไดโอดรอยต่อพี-เอ็นลดลง

คำสำคัญ: รอยต่อพี-เอ็น, รังสีเอกซ์, ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันและความจุไฟฟ้า-แรงดัน, ความหนาแน่นของพาหะ, อายุการเกิดพาหะ

Effect of Direct X-Ray Radiation on P-N Junction

Diode Characteristics

Mr.Kanchanok Limjariyakul Student ID. 50010076

Mr.Kanon Thongsong Student ID 50010089

Mr.Kittitat Chaipareethron Student ID 50010109

Assist.Prof.Dr.Surasak Niemchatroen (Advisor)

Educational Year 2010

Abstract

This article presents the characteristics of a p-n junction diode which was used as an x-ray detector. In this experiment, reports of analyzing current-voltage (I-V), capacitance-voltage (C-V) characteristics, generation carrier lifetime and activation energy of the p-n junction diodes before and after x-ray irradiation have been presented. Diodes were irradiated with energy of 40, 55 and 70 keV all for 5, 55 and 205 seconds. The results showed that leakage current of diodes irradiated with energy 70 keV was reduced, while leakage currents of diodes irradiated with energy 40 and 55 keV were increased which is quite an interesting issue. Therefore, the diode, irradiated with X-ray has been carried out in detail. Carrier concentration and generation carrier lifetime were investigated. The results were found that the energy of irradiated 70 keV gives results of higher generation carrier lifetime and lower number of defects at pn junction of the device.

Keywords: p-n junction, x-ray, I-V and C-V characteristics, carrier concentration, generation carrier lifetime

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จเป็นรูปเล่มโดยสมบูรณ์ ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาจาก ผศ.ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ ซึ่งอาจารย์เป็นผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์ ข้าพเจ้ารู้สึกทราบบ้างในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ และกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกคนที่ได้ประสิทธิ์ ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ รุ่นพี่ ปริญญาโทและเอก สุรดา เอื้อมานะพงษ์, ยวดี สุนทรสารทูล และ อิศระ ศรีธนชัย ที่ให้คำแนะนำปรึกษา ปัญหาต่าง ๆ รวมทั้งส่งสอน วิชาความรู้ตั้งแต่แรกเริ่มเกี่ยวกับโครงการวิจัย ครั้งนี้ ให้สำเร็จลุล่วงไปไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณ เพื่อนๆ ในกลุ่มโครงการ ที่ให้ความร่วมมือ การค้นคว้า และการให้คำปรึกษาเกี่ยวกับ ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และญาติพี่น้อง ของข้าพเจ้า ที่ให้การ สนับสนุน และเป็นกำลังใจทางด้าน การเรียนมาโดยตลอด ทำให้ข้าพเจ้า สามารถทำปริญญาานิพนธ์ ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบอบแด่ ผู้มีพระคุณทุกท่าน

กัณฑ์ชนก ลิ้มจริยากุล

กานนท์ ทองสง

กิตติรัช ชัยเกียรติ

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
สารบัญ.....	III
สารบัญรูป.....	IV
สารบัญตาราง.....	V
บทที่ 1	
บทนำ.....	1
1.1 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
บทที่ 2	
ทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 รังสีเอ็กซ์.....	5
2.1.1 ประวัติการค้นพบรังสีเอ็กซ์.....	5
2.1.2 ลักษณะและคุณสมบัติของรังสีเอ็กซ์.....	7
2.1.3 การกำเนิดรังสีเอ็กซ์.....	7
2.2 การนำรังสีเอ็กซ์ไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ.....	9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.2.1 การประยุกต์ใช้ทางการแพทย์.....	9
2.2.2 การประยุกต์ใช้งานด้านความปลอดภัย.....	10
2.2.3 การประยุกต์ใช้งานด้านการเกษตร.....	11
2.2.4 การประยุกต์ใช้งานรังสีเอ็กซ์ด้านอื่นๆ.....	11
2.3 ชนิดของตัวตรวจจ็บริ่งสีเอ็กซ์.....	11
2.3.1 ฟิล์มรังสีเอ็กซ์.....	11
2.3.2 น้ำยาไวแสง.....	12
2.3.3 เซนเนลอิเล็กทรอนิกส์พลาซมาเออร์.....	12
2.3.4 ตัวตรวจจ็บริ่งประเภทแก๊ส.....	12
2.3.5 ตัวตรวจจ็บริ่งประเภทซิลิคอน.....	12
2.3.5.1 โฟโตไดโอดชนิด PN.....	13
2.3.5.2 โฟโตไดโอดชนิด PIN.....	14
2.3.5.3 โฟโตไดโอดชนิดอะวาแลนซ์.....	15
2.3.5.4 โฟโตไดโอดชนิด MSM.....	16
2.4 หลักการพื้นฐานของตัวตรวจจ็บริ่งสีเอ็กซ์แบบโฟโตไดโอด.....	17
2.4.1 กระบวนการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ.....	18
2.4.2 หลักการทำงานของตัวตรวจจ็บริ่งสีเอ็กซ์แบบโฟโตไดโอด.....	20
2.4.3 วงจรสมมูลของตัวตรวจจ็บริ่งสีเอ็กซ์แบบโฟโตไดโอด.....	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.5 วิธีการตรวจจ็ับรังสีเอ็กซ์.....	21
2.6 คุณสมบัติของรอยต่อพี-เอ็นในภาวะสมดุล.....	23
2.6.1 ปรากฏการณ์ที่รอยต่อแบบชั้นบันไดในภาวะสมดุล.....	23
2.6.2 ศักย์ไฟฟ้าภายในของรอยต่อ.....	29
2.6.3 แถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็นในภาวะสมดุล.....	31
2.7 คุณลักษณะของรอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดัน ไบอัสตรง	35
2.7.1 ปรากฏการณ์ที่รอยต่อขณะได้รับ ไบอัสตรง.....	35
2.7.2 แถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็นในขณะได้รับไบอัสตรง.....	38
2.7.3 สมการไดโอดในทางอุดมคติ (Ideal diode's equation)	40
2.8 รอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดัน ไบอัสย้อนกลับ (Reverse biasing)	41
2.8.1 ปรากฏการณ์ที่รอยต่อขณะได้รับแรงดัน ไบอัสย้อนกลับ.....	41
2.8.2 แถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ.....	43
2.8.3 การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของพาหะส่วนน้อยบริเวณรอยต่อ.....	44
2.8.4 กระแสอิ่มตัวย้อนกลับ (Reverse bias saturation current)	45
2.9 ความจุไฟฟ้าของ ไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็น.....	47
2.9.1 ความจุไฟฟ้าเนื่องจากรอยต่อ (C_j) หรือความจุไฟฟ้าทรานซิสชัน(C_T)	47
2.10 อายุพาหะ.....	49

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3	
การออกแบบและกระบวนการสร้าง.....	51
3.1 ขั้นตอนการสร้างมาส์ค.....	51
3.2 กระบวนการสร้างไดโอรอยต่อพี-เอ็น.....	53
บทที่ 4	
การทดลอง ผลการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	57
4.1 การทดลอง.....	57
4.1.1 การทดสอบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอรอยต่อพี-เอ็น.....	57
4.1.2 เงื่อนไขการฉายรังสีเอ็กซ์ไปยังไดโอรอยต่อพี-เอ็นแบบโดยตรง.....	58
4.2 ผลการทดลอง.....	59
4.2.1 การทดสอบสมบัติของรอยต่อพี-เอ็น.....	59
4.2.2 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของไดโอรอยต่อพี-เอ็น.....	60
4.2.3 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของไดโอรอยต่อพี-เอ็น.....	64
บทที่ 5	
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	66
กิตติกรรมประกาศ.....	67
บรรณานุกรม.....	68

สารบัญรูป

รูปที่

หน้า

2.1 แผนภูมิสเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า.....	4
2.2 วิลเฮม คอนราด เรินท์เกน ผู้ที่ค้นพบรังสีเอ็กซ์เป็นคนแรก.....	6
2.3 ภาพถ่ายรังสีเอ็กซ์ภาพแรก ซึ่งเป็นภาพถ่ายมือซ้ายของภรรยาเรินท์เกน.....	6
2.4 การประยุกต์ใช้รังสีเอ็กซ์ (ก)CT scan (ข) ภาพที่สร้างจาก CT scan.....	9
2.5ภาพ 3มิติที่สร้างจากเครื่อง CT scanner แสดงเห็นถึงอวัยวะ.....	10
2.6 แสดงภาพโฟโตไดโอดชนิดต่างๆ ที่มีผู้ผลิตขายในปัจจุบัน.....	13
2.7โฟโตไดโอดชนิด PN(ก)โครงสร้างภาคตัดขวางขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ (ข) แถบพลังงานแสดงการเคลื่อนที่ของพาหะ	13
2.8 โครงสร้างภาคตัดขวางของโฟโตไดโอดชนิด PIN โฟโตไดโอดชนิด ADP (ก) โครงสร้างภาคตัดขวาง (ข) แถบพลังงานแสดงการเคลื่อนที่ของพาหะ.....	14
2.9 โฟโตไดโอดชนิด ADP (ก) โครงสร้างภาคตัดขวาง (ข) แถบพลังงานแสดงการเคลื่อนที่ ของพาหะ.....	15
2.10 ไดโอดชนิด MSM.....	16
2.11 วงจรสำหรับต่อร่วมกับตัวตรวจจ็บบรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอด.....	17
2.12 กระบวนการดูดกลืนแสงใตสารกึ่งตัวนำ.....	18
2.13 แสงสเปกตรัมของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ.....	19
2.14 โครงสร้างภาคตัดขวางโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อ พี-เอ็น.....	20
2.15 วงจรสมมูลของตัวตรวจจ็บบรังสีเอ็กซ์แบบโฟโตไดโอด.....	21
2.16 กลไกการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ของตัวตรวจจ็บบรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PN แบบแนวตั้ง (ก) วิธีการตรวจจ็บบโดยตรง (ข) วิธีการตรวจจ็บบโคอ้อม.....	22
2.17 (ก) แสดงลักษณะการกระจายของอะตอมสารเจือ และ (ข) แสดงความหนาแน่นของ พาหะที่ด้านทั้งสองของรอยต่อพี-เอ็นชนิดชั้นบันไดก่อนเกิดรอยต่อ.....	24

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.18 แสดงปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น (ก) ก่อนเกิดรอยต่อ (ข) หลังจากเกิดรอยต่ออิเล็กทรอนิกส์ และ โสลดแพร่ข้ามรอยต่อ ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าภายในที่รอยต่อ และ (ค) รอยต่อพี-เอ็นในภาวะสมดุลอิเล็กทรอนิกส์ และ โสลดไม่สามารถข้ามรอยต่อได้.....	26
2.19 แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของ โสลดและอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากการแพร่และการครีฟท์ และทิศทางของกระแสที่เกิดขึ้นบริเวณปลอดพาหะ.....	28
2.20 แสดงลักษณะการกระจายของ(ก) ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้า (ข) สนามไฟฟ้าภายใน และ (ค) ศักย์ไฟฟ้าภายใน ที่ปรากฏบริเวณรอยต่อพี-เอ็นในภาวะสมดุล.....	30
2.21 แสดงลักษณะแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็นในภาวะต่างๆ (ก)ก่อนเกิดรอยต่อ (ข) ขณะเกิดรอยต่อ (ค) ขณะรอยต่ออยู่ในภาวะสมดุล.....	32
2.22 แสดงระดับพลังงานของโลหะสองชนิดที่แตกต่างกัน เมื่อนำมาสัมผัสกัน (ก) ภาวะก่อนสัมผัส (ข) ขณะสัมผัส และ (ค) ภาวะสมดุล.....	34
2.23 การให้ไบอัสตรง V_A แก่รอยต่อพี-เอ็น.....	36
2.24 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของความกว้างบริเวณปลอดพาหะประจุไฟฟ้า สนามไฟฟ้า และศักย์ภายในรอยต่อ ขณะที่ ก. แรงดันไบอัสเป็นศูนย์ ข. ได้รับไบอัสตรง V_A	37
2.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของขนาดความกว้างของบริเวณปลอดพาหะกับค่าความหนาแน่นของอะตอมสารเจือในตำแหน่งที่มีค่าต่ำ ของรอยต่อ $p^+ - n$ และ $n^- - p$ ที่อุณหภูมิ 300 K ขณะไม่มีแรงดันไบอัสและได้รับแรงดันไบอัส 0.5 , -10 โวลต์.....	38
2.26 ลักษณะแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็นขณะที่ (ก) ไม่มีแรงดัน ไบอัส และ(ข) ขณะที่ได้รับแรงดันไบอัสตรง V_A	39
2.27 แสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของกระแสอิเล็กทรอนิกส์ J_n และ โสลด J_p ที่ตำแหน่งต่างๆ ภายในไดโอด แบบรอยต่อพี-เอ็นและกระแสรวม ในขณะที่ได้รับแรงดันไบอัส.....	40
2.28 ลักษณะการให้ไบอัสย้อนกลับ - V_A แก่ไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็น.....	41

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่

หน้า

2.29	เปรียบเทียบและแสดงการเปลี่ยนแปลงของความกว้างบริเวณปลอดพาหะ, ประจุไฟฟ้า, สนามไฟฟ้าและศักย์ภายในที่รอยต่อขณะที่ (ก) แรงดันไบอัสเป็นศูนย์ (ข) ได้รับไบอัสย้อนกลับ $-V_A$	42
2.30	ลักษณะแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็นในขณะที่ (ก) ไม่มีแรงดันไบอัสใดๆ และ (ข) ขณะที่ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ $-V_A$	43
2.31	การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของพาหะส่วนน้อยที่ด้านทั้งสองของรอยต่อ (ก) ขณะอยู่ในภาวะสมดุล (ข) ขณะที่ได้รับไบอัสย้อนกลับ $-V_A$	45
2.32	(ก) กราฟและ (ข) ภาพถ่ายซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็น ในขณะที่ได้รับไบอัสตรงและไบอัสย้อนกลับ.....	46
2.33	(ก) โครงสร้างบริเวณรอยต่อพี-เอ็น และ (ข) โครงสร้างของตัวเก็บประจุไฟฟ้าแบบแผ่นโลหะขนาน.....	48
2.34	กลไกการรวมตัว-การเกิดของรอยต่อพี-เอ็น (ก) ขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง และ (ข) ขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ.....	49
3.1	กระงกมาสค์ทั้ง 5 ชั้น.....	52
3.2	ลวดลายตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ซึ่งมีโครงสร้างรอยต่อพี-เอ็น.....	52
4.1	ชุดเครื่อง HP4156B ที่ใช้ในการคุณลักษณะทางไฟฟ้าและวิธีการ โพรบอุปกรณ์.....	58
4.2	ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ที่สร้างเสร็จสมบูรณ์และบรรจุลงในตัวถัง.....	58
4.3	เครื่องฉายรังสีเอ็กซ์ C-ARM SIEMENS SIREMOBIL COMPACT 650 135.....	59
4.4	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันของรอยต่อพี-เอ็น.....	60
4.5	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนกลับของความจุไฟฟ้ากำลังสอง-แรงดันของรอยต่อพี-เอ็น.....	60
4.6	ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยต่อพี-เอ็นที่ถูกฉายรังสีเอ็กซ์ด้วยพลังงานต่างๆ (ก) 40 keV (ข) 55 keV และ (ค) 70 keV ทั้งก่อนและหลังการฉายรังสีเอ็กซ์.....	61
	ลักษณะกระแสรั่วไหลของไดโอดรอยต่อพี-เอ็นที่ถูกฉายรังสีเอ็กซ์ด้วยพลังงานต่างๆ (ก) 40 keV (ข) 55 keV และ (ค) 70 keV ทั้งก่อนและหลังการฉายรังสีเอ็กซ์.....	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่

หน้า

- 4.7 ลักษณะกระแสรั่วไหลของไดโอดรอยต่อพี-เอ็นที่ถูกฉายรังสีเอ็กซ์ด้วยพลังงานต่างๆ (ก) 40 keV (ข) 55 keV และ (ค) 70 keV ทั้งก่อนและหลังการฉายเอ็กซ์.....63
- 4.8 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของรอยต่อพี-เอ็นที่ถูกฉายรังสีเอ็กซ์ด้วยพลังงานต่างๆ (ก) 40 keV (ข) 55 keV และ (ค) 70 keV ทั้งก่อนและหลังการฉายเอ็กซ์.....65
- 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นอะตอมพาหะกับความกว้างบริเวณปลอดพาหะของรอยต่อพี-เอ็นที่ถูกฉายรังสีเอ็กซ์ด้วยพลังงานต่างๆ (ก) 40 keV (ข) 55 keV และ (ค) 70 keV ทั้งก่อนและหลังการฉายเอ็กซ์.....66
- 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่วไหลกับความกว้างบริเวณปลอดพาหะของรอยต่อพี-เอ็นที่ถูกฉายรังสีเอ็กซ์ด้วยพลังงานต่างๆ (ก) 40 keV (ข) 55 keV และ (ค) 70 keV ทั้งก่อนและหลังการฉายรังสีเอ็กซ์.....68
- 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการเกิดพาหะกับความกว้างบริเวณปลอดพาหะของรอยต่อพี-เอ็นที่ถูกฉายรังสีเอ็กซ์ด้วยพลังงานต่างๆ (ก) 40 keV (ข) 55 keV และ (ค) 70 keV ทั้งก่อนและหลังการฉายรังสีเอ็กซ์.....69

สารบัญตาราง

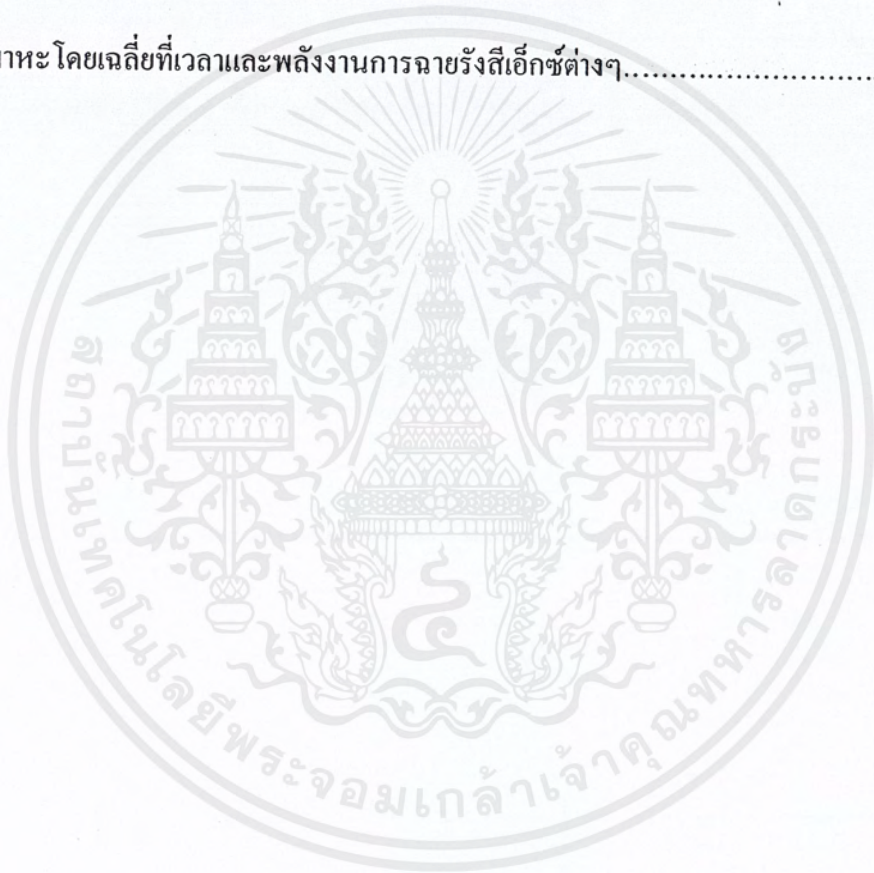
ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของสารเรืองแสงประเภทต่างๆ.....	23
4.1 การแบ่งกลุ่มไดโอดที่ใช้ในการทดลอง.....	57
4.2 ความหนาแน่นอะตอมพาหะที่เวลาและพลังงานการฉายรังสีเอ็กซ์ต่างๆ.....	64
4.3 อายุการเกิดพาหะโดยเฉลี่ยที่เวลาและพลังงานการฉายรังสีเอ็กซ์ต่างๆ.....	67



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของสารเรืองแสงประเภทต่างๆ.....	23
4.1 การแบ่งกลุ่มไดโอดที่ใช้ในการทดลอง.....	57
4.2 ความหนาแน่นอะตอมพาหะที่เวลาและพลังงานการฉายรังสีเอ็กซ์ต่างๆ.....	64
4.3 อายุการเกิดพาหะโดยเฉลี่ยที่เวลาและพลังงานการฉายรังสีเอ็กซ์ต่างๆ.....	67



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

ในปัจจุบันยังคงมีการพัฒนาประสิทธิภาพของไดโอดรอยต่อพี-เอ็น บนฐานรองซิลิคอนอย่างต่อเนื่องรายงานฉบับนี้จึงนำเสนอการศึกษาผลกระทบของรังสีเอ็กซ์ที่มีต่อไดโอดรอยต่อพี-เอ็นบนฐานรองซิลิคอน โดยทำการวิเคราะห์คุณลักษณะกระแส-แรงดัน, ความจุไฟฟ้า-แรงดันของไดโอดรอยต่อพี-เอ็นก่อนและหลังการฉายรังสีเอ็กซ์ โดยไดโอดถูกฉายรังสีด้วยพลังงาน 40, 55 และ 70 keV เป็นเวลา 5, 55 และ 205 วินาทีตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่ากระแสรั่วไหลของไดโอดที่ถูกฉายรังสีด้วยพลังงาน 40 และ 55 keV มีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก แต่กระแสรั่วไหลของไดโอดที่ถูกฉายรังสีด้วยพลังงาน 70 keV กลับมีค่าลดลงซึ่งมีความน่าสนใจอย่างมาก นอกจากนี้พบว่าความจุไฟฟ้าของไดโอดหลังการฉายรังสีเอ็กซ์นั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับก่อนการฉายรังสีเอ็กซ์ในทุกๆพลังงาน

การประยุกต์ใช้งานรังสีเอ็กซ์ที่สามารถพบในชีวิตประจำวัน เช่น ภาพทางการแพทย์ หรือการสร้างภาพ เพื่อตรวจสอบชิ้นส่วนผลิตภัณฑ์นั้น อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจจับรังสีเอ็กซ์ซึ่งมีความเหมาะสมกับการใช้งานในลักษณะนี้คือ ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ประเภทซิลิคอนซึ่งทำหน้าที่ในการรับพลังงานจากรังสีเอ็กซ์ และเปลี่ยนเป็นกระแสไฟฟ้า เพื่อนำค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้ไปประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อสร้างเป็นภาพ 2 หรือ 3 มิติ ในปัจจุบันนี้ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ประเภทซิลิคอนมีอยู่หลายชนิด แต่ที่นิยมใช้กันมากคือ โฟโตไดโอดชนิดพี-เอ็น (p-n photodiode) จากความสำคัญดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะศึกษาตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบไดโอดรอยต่อพี-เอ็น (p-n junction diode) โดยใช้สารกึ่งตัวนำในการสร้างอุปกรณ์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์การสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำซิลิคอนทั่วไปสามารถสร้างให้มีขนาดเล็กและเป็นวงจรรวมได้ โดยสร้างให้อยู่ร่วมกับชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์อื่นๆบนแผ่นซิลิคอนชิ้นเดียวกัน

1.1 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN ได้ ถูกออกแบบและสร้างขึ้นเป็นครั้งแรกของประเทศไทย ที่ห้องปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์คณะวิศวกรรมศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยงานวิจัยนี้จะดำเนินการสร้างไดโอด โครงสร้างพี-เอ็นเพื่อที่จะศึกษา ผลกระทบของรังสีเอ็กซ์ที่มีต่อไดโอดเพื่อ เป็นแนวทางในการ พัฒนาไดโอดที่สามารถใช้งานกับย่านของรังสีเอ็กซ์ได้ดังนี้

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาการสร้างไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็นบนฐานรองซิลิคอน
2. เพื่อศึกษาถึงผลกระทบต่อคุณสมบัติด้าน โครงสร้างเมื่อถูกฉายด้วยรังสีเอ็กซ์ลงบน ไดโอด รอยต่อพี-เอ็นและปรับปรุงคุณภาพของไดโอดชนิดนี้
3. เพื่อศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของ ไดโอดรอยต่อพี-เอ็นหลังจากถูกฉายด้วยรังสีเอ็กซ์

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

1. สามารถสร้าง ไดโอดรอยต่อพี-เอ็นบนชั้นฐานรองซิลิคอนได้
2. กระแสมีคของ ไดโอดรอยต่อพี-เอ็นจะมีค่าน้อยลงหลังจาก ไดโอดรอยต่อพี-เอ็นถูกฉายด้วย รังสีเอ็กซ์แล้ว
3. ได้เงื่อนไขที่เหมาะสมกับการพัฒนาคุณสมบัติการสร้าง ไดโอดรอยต่อพี-เอ็น
4. สามารถออกแบบและสร้างอุปกรณ์การตรวจจับรังสีเอ็กซ์เรย์ได้โดยมีประสิทธิภาพดีเยี่ยม

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความรู้และความสามารถในการสร้าง ไดโอดรอยต่อพี-เอ็นบนชั้นฐานรองซิลิคอน
2. มีความรู้ความชำนาญในการวัดและวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยเครื่อง HP4156B
3. ทราบพารามิเตอร์ที่มีผลต่อลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของ ไดโอดรอยต่อพี-เอ็น
4. ได้เรียนรู้เกี่ยวกับกระบวนการวิธีการสร้าง ไดโอดรอยต่อพี-เอ็นต่างๆ เช่น การทำความสะอาดแผ่นซิลิคอน , กระบวนการยึงฝังประจุ, กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี, กระบวนการ ออกซิเดชัน, การสร้างขั้วโลหะ
5. สามารถนำความรู้ที่ได้ไปพัฒนา ไดโอดรอยต่อพี-เอ็นให้มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

ในปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการศึกษา และพัฒนาตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PN โดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้าง คุณสมบัติทางไฟฟ้า ต่อการตอบสนองของรังสีเอ็กซ์ ก่อนและหลัง ซึ่งมีหัวข้อในการศึกษาดังนี้

การศึกษาคงสมบัติพื้นฐานของไดโอดรอยต่อพี-เอ็น

1. ศึกษาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้า ก่อนฉายแสงรังสีเอ็กซ์
2. ศึกษาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้า หลังฉายแสงรังสีเอ็กซ์
3. ศึกษาลักษณะความจุ-แรงดันไฟฟ้าก่อนฉายแสงรังสีเอ็กซ์
4. ศึกษาลักษณะความจุ-แรงดันไฟฟ้า หลังฉายแสงรังสีเอ็กซ์

เนื้อหาในวิทยานิพนธ์จะแบ่งเนื้อหาออกเป็นบทต่างๆ ตามรายละเอียดดังนี้

บทที่ 1 บทนำเป็นการกล่าวถึงประเด็นที่มาของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ แนวคิดที่ใช้ และขั้นตอนการศึกษาวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เพื่อทำความเข้าใจภาพรวมของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบรอยต่อพี-เอ็นกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานรังสีเอ็กซ์ ทฤษฎีพื้นฐานของตัวจับรังสีเอ็กซ์แบบไดโอดรอยต่อพี-เอ็น

บทที่ 3 กระบวนการสร้าง การออกแบบ การทดลอง กล่าวถึงเทคโนโลยีที่ใช้ในการสร้างตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์การออกแบบโฟโตมาสค์ กระบวนการสร้างตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์วิธีการวัดและการจัดชุดการทดลองเพื่อวัดผลต่างๆ

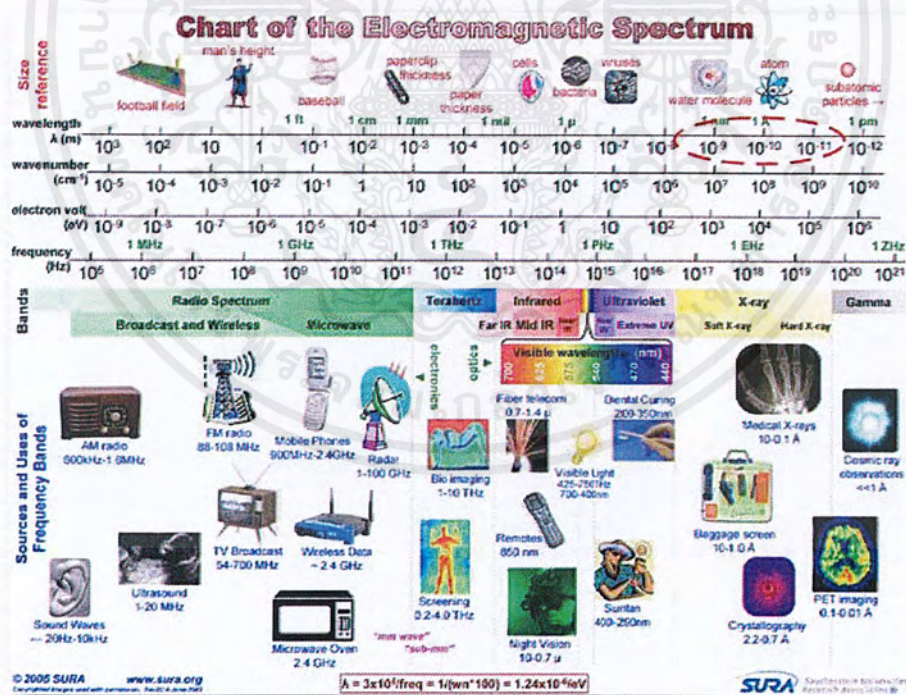
บทที่ 4 ผลการทดลอง กล่าวอภิปรายถึงการศึกษาคงสมบัติพื้นฐาน และพารามิเตอร์การออกแบบต่างๆ ของตัวจับรังสีเอ็กซ์ชนิดไดโอดรอยต่อพี-เอ็น

บทที่ 5 เป็นการสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ เป็นการสรุปผลการทดลองที่ได้จากบทที่ 4 พร้อมทั้งข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์

บทที่ 2

ทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้อง

รังสีเอ็กซ์ เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่มีอำนาจทะลุทะลวงสูงในปัจจุบันนี้รังสีเอ็กซ์ได้เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันมากขึ้นเช่นการแพทย์การเกษตร หรือระบบทางด้านการรักษาความปลอดภัย เป็นต้น อุปกรณ์อย่างหนึ่งซึ่งจำเป็นอย่างยิ่งในการประยุกต์ใช้งานรังสีเอ็กซ์คือ ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ ซึ่งตรวจจับรังสีเอ็กซ์นี้สามารถแบ่งได้หลายชนิดตามการใช้งาน แต่หากจะกล่าวถึงระบบการสร้างภาพจากการประมวลผลของคอมพิวเตอร์แล้ว ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ที่เหมาะสมกับการใช้งานร่วมกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์คือ ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอน ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอน คือ อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ ชนิดหนึ่ง ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานจากรังสีเอ็กซ์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า



รูปที่ 2.1 แผนภูมิสเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.1 แสดงแผนภูมิสเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า และการประยุกต์ใช้งานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความยาวช่วงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งใช้งานอิเล็กทรอนิกส์ทางแสง (optoelectronic)

2.1 รังสีเอ็กซ์

รังสีเอ็กซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นในช่วง 0.01-10 nm คุณสมบัติของรังสีเอ็กซ์คล้ายคลึงกับแสงสว่างธรรมดาเป็นส่วนใหญ่ แต่คุณสมบัติพิเศษของรังสีเอ็กซ์คือ อำนวยความสะดวกทะลุผ่านวัตถุต่างๆ ได้มากน้อยบ้าง ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นทึบ และน้ำหนักของอะตอมของวัตถุที่รังสีเอ็กซ์ผ่าน นอกจากนั้น ยังทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งทางเคมีชีวและอื่นๆ อีกด้วย ในเบื้องต้นมีการใช้รังสีเอ็กซ์สำหรับถ่ายภาพ เพื่อการวินิจฉัยโรคและงานผลิตศาสตร์ รังสีเอ็กซ์เป็นการแผ่รังสีแบบแตกตัวเป็นไอออน และมีอันตรายต่อมนุษย์

ทฤษฎีอิเล็กตรอนสมัยปัจจุบันอธิบายถึงการเกิดรังสีเอ็กซ์ว่าธาตุประกอบด้วยอะตอมจำนวนมากในอะตอมแต่ละตัวมีนิวเคลียสเป็นใจกลาง และมีอิเล็กตรอนวิ่งวนอยู่หลายชั้น ธาตุเบาจะมี อิเล็กตรอนวิ่งวนอยู่น้อยชั้น และธาตุหนักมีอิเล็กตรอนอยู่หลายชั้น เมื่ออะตอมธาตุหนักถูกยิงด้วยอิเล็กตรอน จะทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ชั้นในถูกชนกระเด็นออกมาวิ่งวนอยู่รอบนอก ซึ่งมีภาวะไม่เสถียรและตกไปวิ่งวนในชั้นในอีก พร้อมกับปล่อยพลังงานออกมาในรูปรังสี ถ้าอิเล็กตรอนที่ชนเข้าไปมีพลังงานมากจะชนอิเล็กตรอนในชั้นลึกๆ ทำให้ได้รังสีเอ็กซ์ที่มีพลังงานมากเรียกว่า ฮาร์ดเอ็กซ์เรย์ (hard x-ray) ถ้าอิเล็กตรอนที่ชนมีพลังงานน้อยเข้าไปได้ไม่ลึกนัก จะให้รังสีที่เรียกว่า ซอฟท์เอ็กซ์เรย์ (soft x-ray)

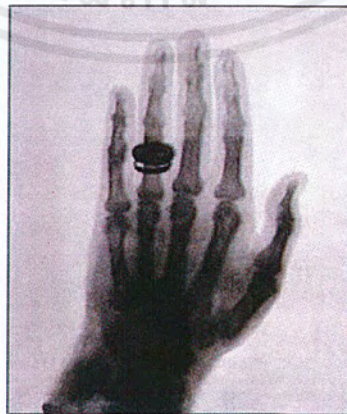
2.1.1 ประวัติการค้นพบรังสีเอ็กซ์

ผู้ค้นพบรังสีเอ็กซ์เป็นคนแรกคือ นักฟิสิกส์ชาวเยอรมัน ชื่อวิลเฮล์ม คอนราด เรินท์แกน (Wilhelm Conrad Roentgen) การค้นพบนี้เกิดในตอนเย็นของวันที่ 8 พฤษภาคม ค.ศ. 1895 ภายในห้องทดลองที่มหาวิทยาลัยวูชบรุคประเทศเยอรมัน[1]



รูปที่ 2.2 วิลเฮม คอนราด เรินท์เกน ผู้ที่ค้นพบรังสีเอ็กซ์เป็นคนแรก

เรินท์เกนได้ค้นพบรังสีเอ็กซ์โดยบังเอิญในขณะที่ทดลองเรื่องการดูดกลืนของหลอดรังสีแคโทด โดยใช้หลอดทดลองเรียกว่า crooke's tube เรินท์เกนสังเกตเห็นว่าหลอดรังสีแคโทด ทำให้กระดาษแข็งที่ฉาบด้วยเบเรียมบลาติโนไซยาไนด์ (barium platinocyanide) เกิดการเรืองแสงขึ้น โดยระยะไกลที่สุดที่ยังมีการเรืองแสงลงบนกระดาษแข็งคือ 120 cm ในขณะที่เดียวกัน เรินท์เกนสังเกตเห็นว่า ตัวอักษร "A" ที่เคลือบด้วยเบเรียมบลาติโนไซยาไนด์ซึ่งอยู่ห่างออกไปเกือบยี่สิบฟุต เกิดการเรืองแสงขึ้นด้วย ทั้งๆที่ไม่ได้อยู่ในระยะของหลอดรังสีแคโทด เรินท์เกนจึงได้ค้นพบรังสีชนิดใหม่ และให้ชื่อว่า "รังสีเอ็กซ์" (X-ray) เรินท์เกนได้ใช้เวลาอีกหลายสัปดาห์ต่อมาทำการสังเกตการทะลุทะลวง (penetration) ของรังสีเอ็กซ์ผ่านโลหะ หรือแม้กระทั่ง ผ่านคน และเขาได้ถ่ายภาพรังสีของมือภรรยาเขาไว้ด้วย ในที่สุดเรินท์เกนจึงได้ประกาศว่าเขาได้ค้นพบรังสีเอ็กซ์เป็นคนแรก



รูปที่ 2.3 ภาพถ่ายรังสีเอ็กซ์ภาพแรก ซึ่งเป็นภาพถ่ายมือซ้ายของภรรยาเรินท์เกน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 ลักษณะและคุณสมบัติของรังสีเอ็กซ์

- 1) เป็นรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีช่วงคลื่นสั้นมาก คืออยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.01 - 10 nm. หรืออยู่ในช่วงระหว่างรังสีแกมมาและรังสีอัลตราไวโอเล็ต
- 2) มีคุณสมบัติเหมือนกับแสงสว่างธรรมดา เช่น เดินทางเป็นเส้นตรง ความเร็วการเดินทางในสุญญากาศมีความเร็วเท่ากับแสงคือ 3.8×10^8 m/s นอกจากนี้แล้ว ยังมีการสะท้อนกลับการหักเหและเบี่ยงเบน ได้เช่นเดียวกับแสงสว่างธรรมดา
- 3) ไม่หักเหโดยสนามไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็ก
- 4) เกิดจากอนุภาคอิเล็กตรอนที่มีความเร็วสูงวิ่งเข้าชนเป้า โลหะหนัก อิเล็กตรอนดังกล่าวนี้จะไปชนอิเล็กตรอนตัวอื่นๆที่อยู่ในวงโคจร ของอะตอมโลหะหนัก ให้หลุดออกนอกวงโคจร
- 5) ทำให้เกิดการเรืองแสง ในสารพิเศษบางอย่าง
- 6) คุกคามโดยสสารทุกชนิด มากบ้างน้อยบ้างขึ้นอยู่กับความหนาแน่นและน้ำหนักอะตอมของสารนั้น
- 7) ทำให้เกิดการไอออนไนเซชัน (ionization) เมื่อผ่านไปสู่อากาศหรือก๊าซ
- 8) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เช่น เมื่อรังสีเอ็กซ์ไปถูกฟิล์มถ่ายรูปจะทำให้ฟิล์มนั้นดำ จึงนำผลนี้ มาใช้ในการบันทึกภาพลงบนแผ่นฟิล์มรังสีเอ็กซ์
- 9) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางชีวะ เช่น ทำให้เซลล์ของร่างกายมีการเปลี่ยนแปลง หรือ เกิดการผ่าเหล่า (mutation) ถ้าได้รับรังสีเป็นจำนวนมากและนานพอ
- 10.) มีอำนาจในการทะลุทะลวงสูง สามารถผ่านเนื้อมนุษย์ และสัตว์ได้แต่ไม่สามารถผ่านแผ่นตะกั่วหรือคอนกรีตหนาๆ ได้

2.1.3 การกำเนิดรังสีเอ็กซ์

รังสีเอ็กซ์เกิดขึ้น โดยอนุภาคของอิเล็กตรอนที่มีความเร็วสูงเคลื่อนที่ชนเป้าโลหะ ผลทำให้เกิดเป็นรังสีเอ็กซ์และความร้อน การกำเนิดรังสีเอ็กซ์นั้นอาศัยองค์ประกอบสำคัญ 5 ประการ คือ

1) ทำให้เกิดอนุภาคอิเล็กตรอน หรือการแยกอิเล็กตรอนออกจากอะตอมของโลหะ

อิเล็กตรอนจะเกิดขึ้น หรือแยกออกจากอะตอมของโลหะที่ทำเป็นไส้หลอดรังสีเอ็กซ์ โดยการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในไส้หลอด (filament) จนกระทั่งไส้หลอดร้อนขึ้นประมาณ 2,000 c หรือมากกว่านั้น มีผลทำให้เกิด เทอร์มิโอนิกอิมิชัน (thermionic emission) คืออิเล็กตรอนหลุดออกมาจากวงโคจร เมื่อถูกความร้อน อิเล็กตรอนที่หลุดออกมานี้ จะมารวมตัวกันอยู่ที่ผิวหน้าของโลหะ จนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้หาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลายเป็นกลุ่ม (cloud) เรียกว่า space charge สาเหตุที่อิเล็กตรอนไม่สามารถหลุดพ้นไปจากผิวหน้าโลหะได้ เนื่องจากแรงดึงดูด ระหว่างอิเล็กตรอน และอะตอมของโลหะยังมีอยู่

2) การทำอนุภาคอิเล็กตรอนหลุด และเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง

วิธีที่จะทำให้อนุภาคอิเล็กตรอนหลุดจากอะตอมไปได้คือห้องหาสิ่งที่มีพลังงานหรือแรงดึงดูดมากกว่าแรงดึงดูดระหว่างอิเล็กตรอนและอะตอมโลหะมาดึงดูดอิเล็กตรอน สิ่งนั้นคือไฟฟ้าแรงสูง (high voltage) ไฟฟ้าแรงสูงนี้ นอกจากจะทำให้อิเล็กตรอนหลุดจากผิวหน้าของ โลหะระหว่าง ขั้วบวกและขั้วลบให้ต่างกัน ความต่างศักย์นี้ยังมีค่ามากขึ้นเท่าใด ก็ยิ่งทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจาก ผิวหน้าของ โลหะหลุดได้มากขึ้นเท่านั้น และเคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วสูงขึ้น ที่ความต่างศักย์ 100 kV จะทำให้อิเล็กตรอนมีความเร็วประมาณ 165 km./s

3) การทำให้เส้นทางที่อิเล็กตรอนวิ่งผ่านไม่ต้องไม่มีสิ่งกีดขวาง

การที่อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงได้ จะต้องไม่มีสิ่งกีดขวาง ดังนั้น ภายในหลอดรังสีเอ็กซ์จึงเป็นสุญญากาศ เพราะถ้ามีอากาศหรือแก๊สอยู่ภายในหลอดแม้เพียงเล็กน้อยก็ตาม ความเร็วของอิเล็กตรอนจะลด ลง เนื่องจากเกิดการไอออน ไนเซชัน

4) การทำให้อิเล็กตรอนมีความเข้มข้น (concentration of electron)

ต้องมีวิธีการที่จะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปในแนวและทิศทางเดียวกันคือ พุ่งไปหาจุด โฟกัสของ เป่าด้วยปริมาณความเข้มข้นที่มากพอสมควร ซึ่งทำได้โดยการใช้เครื่องมือที่เรียกว่า “electron focusing device” คอยควบคุมให้อิเล็กตรอนส่วนใหญ่ไปตกในบริเวณจุด โฟกัสของเป่า

5) การทำให้อิเล็กตรอนหยุดอย่างทันทีทันใด

การที่จะทำให้อิเล็กตรอนที่วิ่งเข้ามาด้วยความเร็วสูงนี้หยุดอย่างทันทีทันใด ทำได้โดยหาวัตถุ มาถนัด หรือขวางอิเล็กตรอน วัตถุนั้นคือ เป่าโลหะ ผลที่เกิดขึ้นคือ เกิดการชน หรือกระทบกัน ระหว่างอิเล็กตรอนที่อยู่ในวง โคจรของอะตอมเป่านั้น ให้หลุดออกนอกวง โคจร และจะมีอิเล็กตรอน จากวงโคจรอื่นๆที่อยู่ถัด ไปวิ่งเข้ามาแทน แต่เนื่องจากพลังงานของอิเล็กตรอนในแต่ละวงโคจรไม่ เท่ากัน ดังนั้น จึงมีการคายพลังงานส่วนเกินออกมา ในรูปของรังสีเอ็กซ์และความร้อนซึ่งส่วนใหญ่ เป็นความร้อน กล่าวคือ จากพลังงานของอิเล็กตรอนทั้งหมดที่วิ่งไปสู่เป่าโลหะนั้น 99.8% จะ เปลี่ยนเป็นความร้อน และ 0.2% จะเปลี่ยนเป็นรังสีเอ็กซ์

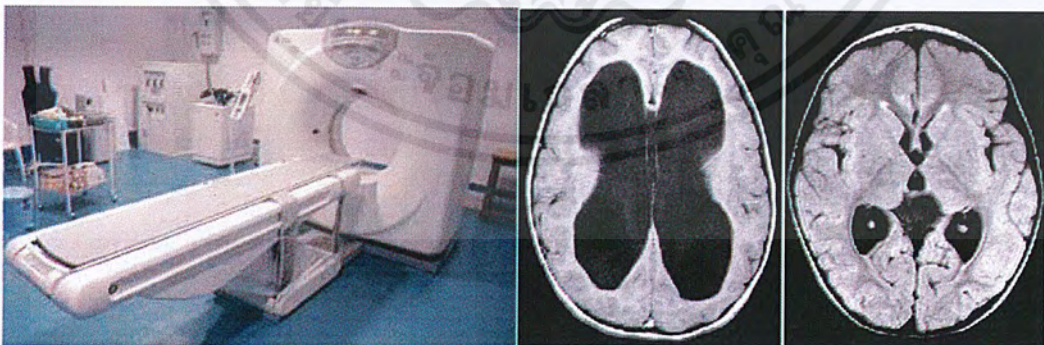
2.2 การนำรังสีเอกซ์ไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ

2.2.1 การประยุกต์ใช้ทางการแพทย์

ตั้งแต่การค้นพบของเรินท์เกน ว่ารังสีเอกซ์สามารถบอกรูปร่างของกระดูกได้ รังสีเอกซ์ได้ถูกพัฒนาเพื่อนำมาใช้ในการถ่ายภาพทางการแพทย์ นำไปสู่สาขาวิชาที่เรียกว่า รังสีวิทยาโดยนักรังสีวิทยาได้ใช้ภาพถ่ายที่ได้มาใช้ในการช่วยวินิจฉัยโรค

รังสีเอกซ์มักถูกนำมาใช้ในการตรวจสอบหาสภาพทางพยาธิวิทยาของกระดูก แต่ก็สามารถหาความผิดปกติของบางโรคที่เป็นเนื้อเยื่อทั่วไปได้ ตัวอย่างที่พบเห็นได้ทั่วไป เช่น การเอ็กซ์เรย์ปอด ซึ่งสามารถบอกลักษณะผิดปกติได้หลายโรค เช่น โรคปอดบวม (pneumonia) โรคมะเร็งปอด (lung cancer) หรือน้ำท่วมปอด (pulmonary edema) รวมถึงการเอ็กซ์เรย์ช่องท้อง เช่น การตรวจภาวะอุดตันในลำไส้เล็ก (ileus) ภาวะลม หรือของเหลวคั่งในช่องท้อง ในบางครั้งยังใช้การตรวจหานิวไคนด์น้ำดีหรือนิวไคนด์ในกระเพาะปัสสาวะได้ รวมทั้งในบางกรณีสามารถใช้ในการถ่ายภาพเนื้อเยื่อบางชนิด เช่น สมองและกล้ามเนื้อได้

ปัจจุบันการถ่ายภาพเนื้อเยื่อส่วนใหญ่ถูกพัฒนาโดยใช้เทคนิคการสร้างภาพจากคอมพิวเตอร์ (computed tomography : CT) CT scanner เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวินิจฉัยอาการจากรูปภาพที่สร้างจากรังสีเอกซ์ ซึ่งจะใช้ควบคู่กับเทคโนโลยีทางคอมพิวเตอร์ เพื่อให้ได้ภาพออกมาจากรูปภาพที่ได้ออกมาจะแสดงถึงส่วนต่างๆ ของร่างกาย เช่นกระดูก กล้ามเนื้อ ไขมัน อวัยวะ ซึ่ง CT scanner สามารถบ่งบอกถึงรายละเอียดต่างๆ ได้ดีกว่าการตรวจจากรังสีเอกซ์



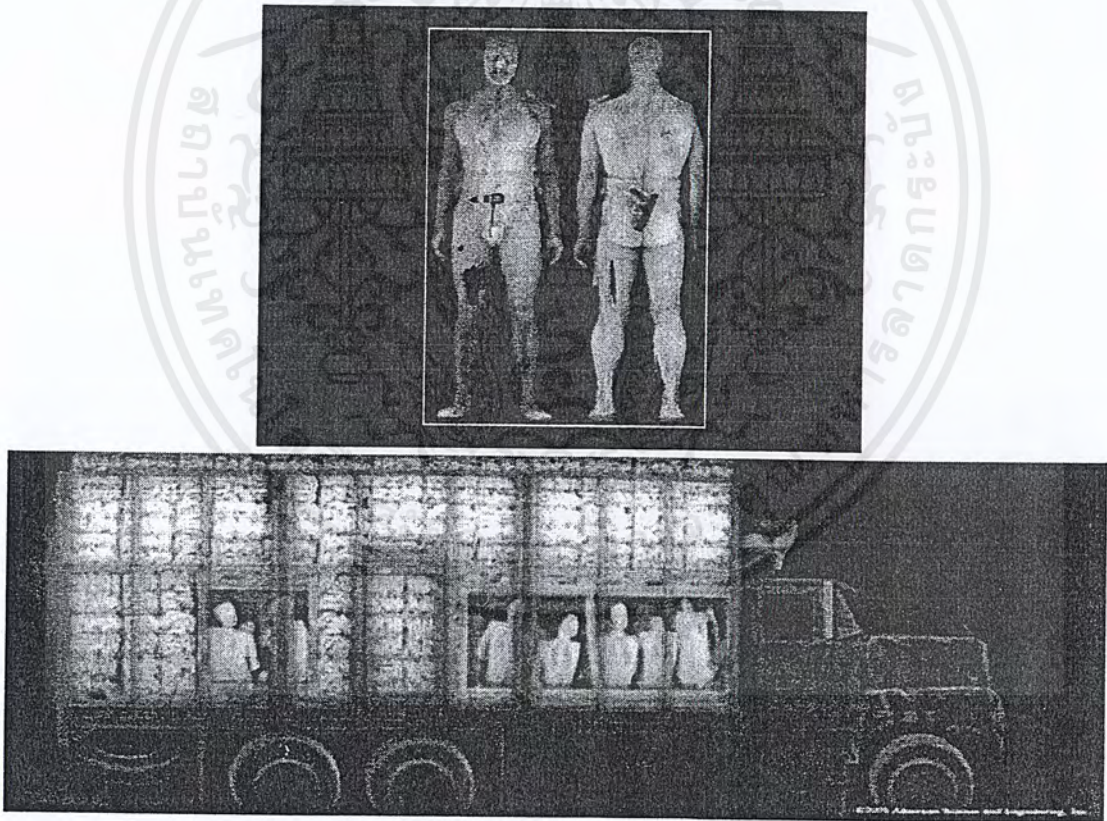
(ก)

(ข)

รูปที่ 2.4 การประยุกต์ใช้รังสีเอกซ์ (ก) CT scan (ข) ภาพที่สร้างจาก CT scan

2.2.2 การประยุกต์ใช้งานด้านความปลอดภัย

ในแต่ละวันผู้คนมากมายเดินทางข้ามประเทศจากซีกโลกหนึ่งไปยังอีกซีกโลกหนึ่ง ผ่านท่าอากาศยาน สัมภาระและกระเป๋าเดินทางจะถูกตรวจสอบหาวัตถุระเบิดและวัตถุอันตราย หรือแม้กระทั่งของเหลวทุกชนิดก็ถูกห้ามนำติดตัวไปกับผู้โดยสาร เทคโนโลยีที่มีชื่อเสียงในการสแกนหาวัตถุต้องสงสัย คือ เครื่อง เอ็กซ์เรย์คอมพิวเตอร์โทโมกราฟี (computerized tomography) หรือหาวัตถุต้องสงสัย คือ เรียกอีกอย่างว่า CT scanner ใช้ในทางการแพทย์มาก่อน โดยใช้ในการสแกนอวัยวะต่างๆ ของร่างกาย เทคโนโลยีนี้ได้ช่วยชีวิตคนมานับไม่ถ้วน โดยการตรวจสอบหาอาการต่างๆ เช่นมะเร็ง โดยเครื่องนี้จะให้ภาพรายละเอียด ของร่างกาย โดยใช้คอมพิวเตอร์ร่วมกับเครื่อง X-ray ที่หมุนได้รอบ โดยภาพที่ได้จะเป็นภาพตัดขวางของอวัยวะต่างๆ เช่น สมอง หัวใจ เป็นต้น



รูปที่ 2.5 ภาพ 3มิติที่สร้างจากเครื่อง CT scanner แสดงเห็นถึงอาวุธปืนของผู้ก่อการร้ายและการบรรจุทุกคน ในรถบรรทุก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 การประยุกต์ใช้งานด้านการเกษตร

ปัจจุบันได้มีการนำรังสีเอ็กซ์นำมาใช้ประโยชน์ด้านการเกษตร โดยมีประโยชน์หลัก 4 ด้าน คือ

- 1) การใช้รังสีเพื่อถนอมอาหาร หรือยืดอายุการเก็บรักษา
- 2) ยับยั้งการงอก หรือควบคุมการงอก และชะลอการสุกผลผลิต เช่น หอมหัวใหญ่ มันฝรั่ง
- 3) มาเชื้อโรคและพยาธิในอาหารหรือผลิตภัณฑ์ เช่น แหนม มันฝรั่ง พริกแห้ง พริกไทย เป็นต้น ใช้กำจัดแมลงศัตรูพืช เช่น ทำหมัน แมลงวันทอง การทำหมันแมลงผลไม้ เป็นต้น ไล่ศัตรูพืช ในพืชผักผลไม้ ไม้ดอก ในเมล็ดพืช ธัญพืช เช่น มะม่วง มะขามหวาน กระจับปี่ข้าว กล้วย ไม้
- 4) ใช้ในการปรับปรุงพันธุ์พืชหรือสร้างพันธุ์พืชใหม่ที่สวยงามและมีคุณสมบัติที่ดีกว่าเดิม

2.2.4 การประยุกต์ใช้งานรังสีเอ็กซ์ด้านอื่นๆ

รังสีเอ็กซ์ได้ถูกพัฒนานำไปใช้งานในหลายสาขา เช่น การวิเคราะห์ลักษณะของอะตอมและการผลิต โดยอาศัยการเบี่ยงเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray crystallography) การผลิตภาพในขนาดเล็ก (X-ray microscopic analysis) รวมทั้งการตรวจหารอยร้าวขนาดเล็กในโลหะ การติดตามผลของตัวอย่างในการวินิจฉัย การติดตามผลของตัวอย่างในการวินิจฉัยโดยอาศัยคุณสมบัติของรังสีเอ็กซ์ (X-ray fluorescence)

2.3 ชนิดของตัวตรวจจ็ับรังสีเอ็กซ์

การสร้างภาพจากรังสีเอ็กซ์นั้น สิ่งที่ทำเป็นอย่างยิ่งคือ อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจจ็ับรังสีเอ็กซ์ซึ่งมีอยู่ด้วยกันหลายชนิด และแต่ละชนิดจะมีความเหมาะสมกับรังสีเอ็กซ์ที่มีพลังงานต่างๆ กันไป ตามการใช้งาน ซึ่งชนิดของตัวตรวจจ็ับรังสีเอ็กซ์แบ่งได้ดังนี้

2.3.1 ฟิล์มรังสีเอ็กซ์ (X-ray film)

ฟิล์มรังสีเอ็กซ์เป็นวิธีที่ยังใช้กันโดยมาก ซึ่งมีหลักการเหมือนกับการถ่ายภาพ โดยการใช้งานเป็นการตรวจจ็ับรังสีเอ็กซ์ลงบนฟิล์ม แล้วนำไปล้างเพื่อขึ้นลาย ทำให้เกิดเป็นภาพเช่นเดียวกับภาพถ่ายทั่วไปโดยไม่มีกระบวนการใดๆอีก แม้ว่าฟิล์มจะง่ายต่อการใช้งานและให้ภาพที่มีความละเอียดสูง แต่มีข้อเสียคือ การแยกแยะความต่างของพลังงานยังไม่ชัดเจน

2.3.2 น้ำยาไวแสง (resist)

น้ำยาไวแสง ประกอบด้วยโพลิเมอร์สายโซ่ยาว โดยทั่วไปมีทั้งชนิดบวกและลบ เคลือบอยู่บนชั้นฐานรองด้วยความหนาประมาณ 50-200 nm. โดยมีคุณสมบัติที่หลังจากการตรวจจ็รังสีเอ็กซ์จะเกิดปฏิกิริยาเคมีทำให้ผิวมีลักษณะเหมือนรูปร่างของรังสีที่ตกกระทบ น้ำยาไวแสงมีการตอบสนองต่อรังสีอย่างไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งเหมาะกับการบันทึกข้อมูลที่รูปที่มีเพียงสองระดับสี เช่น การทำมาร์คของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ

2.3.3 แชนแนลอิเล็กตรอนมัลติพลายเออร์ (channel electron multipliers : CEMs)

แชนแนลอิเล็กตรอนมัลติพลายเออร์ ถูกนำไปใช้งานที่ต้องการตรวจนับโฟตอนของรังสีเอ็กซ์ โดยมากเป็นซอฟต์แวร์เอ็กซ์เรย์ (soft X-ray) เช่น X-ray spectroscopy และ X-ray astronomy อาศัยความสามารถในการตรวจนับโฟตอนที่เข้ามา และบางครั้งถูกนำไปใช้เพื่อเพิ่มการปล่อยโฟตอนของโคโค โดยโฟตอนของรังสีเอ็กซ์ สามารถตรวจนับได้โดย photocathode และ electron multiplication scheme ซึ่งต่อมาได้มีการพัฒนา CEMs ให้มีลักษณะเป็นช่องเล็กๆและนำมาประกอบกันเป็นอาร์เรย์ ซึ่งมีรูปร่างเป็นเพลต เรียกว่า micro channel plates (MCPs)

2.3.4 ตัวตรวจจ็ประเภทแก๊ส (gas detector)

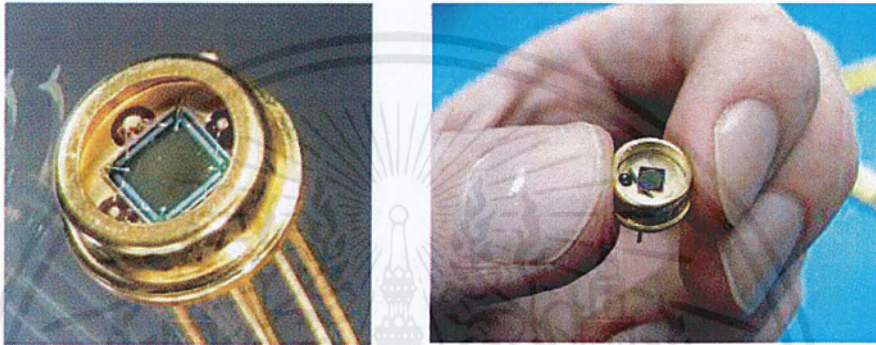
เมื่ออะตอมของแก๊สได้รับรังสีเอ็กซ์จะทำให้เกิดการแตกตัวเป็นประจุบวกและประจุลบแล้วใช้อุปกรณ์ขยายมาตรวจจ็ประจุเหล่านี้ หลักการนี้ใช้ได้กับรังสีเอ็กซ์ในทางดาราศาสตร์และกล้องจุลทรรศน์รังสีเอ็กซ์ แก๊สที่ใช้ในอุปกรณ์นี้ได้แก่ ฮีเลียม (He), อาร์กอน (Ar), คริปทอน (Kr), และซีนอน (Xe)

2.3.5 ตัวตรวจจ็ประเภทซิลิคอน (silicon detector)

เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำประเภทโฟโตไดโอดและโฟโตทรานซิสเตอร์สามารถนำเข้ามาประยุกต์กับการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ได้ โดยเมื่ออุปกรณ์สารกึ่งตัวนำดูดกลืนโฟตอนของรังสีเอ็กซ์ จะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน – โฮลขึ้น ส่งผลกระทบให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลในวงจร โดยปกติอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำจะถูกนำมาประยุกต์ใช้กับรังสีเอ็กซ์ในช่วงพลังงานประมาณ 1-100 keV และสามารถปรับปรุงคุณสมบัติการใช้งานต่างๆให้ดีขึ้นด้วยการออกแบบโครงสร้างอุปกรณ์ให้มีโครงสร้างที่เหมาะสมกับการใช้งานในย่านต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

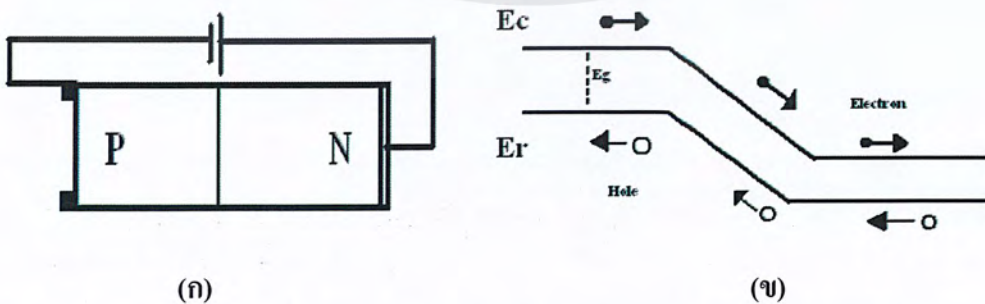
ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ประเภทซิลิคอนนั้น นิยมนำโฟโตไดโอดมาประยุกต์ใช้สำหรับตรวจจับรังสีเอ็กซ์เนื่องจากมีประสิทธิภาพทางควอนตัมสูง และความจุไฟฟ้าต่ำ โดยโฟโตไดโอดทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า โดยทั่วไปอยู่ในรูปกระแสไฟฟ้า ซึ่งสามารถแบ่งตามลักษณะโครงสร้าง และมีการนำไปใช้งานทั่วไป ได้แก่ โฟโตไดโอดชนิด PIN โฟโตไดโอดชนิดอะวาแลนซ์โฟโตไดโอดชนิด MSM โดยในรูป 2.6 แสดงภาพโฟโตไดโอดชนิดต่างๆ ที่มีผู้ผลิตขายในปัจจุบัน



รูปที่ 2.6 แสดงภาพโฟโตไดโอดชนิดต่างๆ ที่มีผู้ผลิตขายในปัจจุบัน

2.3.5.1 โฟโตไดโอดชนิดPN

โฟโตไดโอดชนิด PN มีโครงสร้างพื้นฐานเหมือนกับไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็นทั่วไป แต่ได้ถูกออกแบบให้แสงสามารถตกกระทบบนรอยต่อพี-เอ็นได้ โครงสร้างทั่วไปของโฟโตไดโอดและแถบพลังงานของพี-เอ็นโฟโตไดโอด แสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ไดโอดรอยต่อพี-เอ็น(ก) โครงสร้างภาคตัดขวางขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ

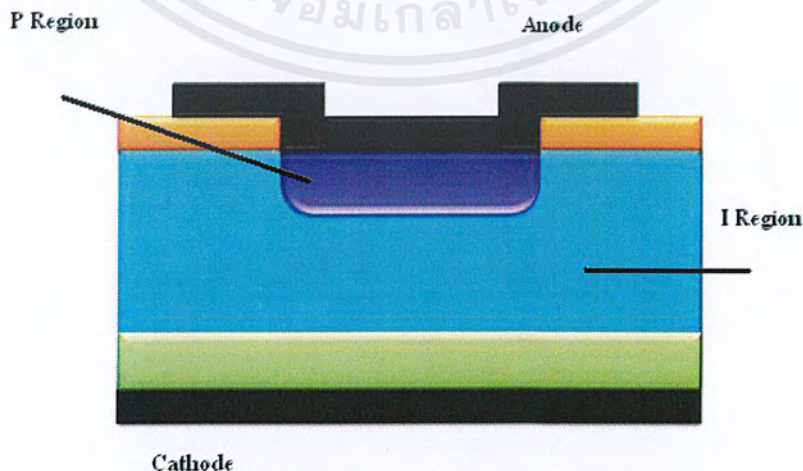
(ข) แถบพลังงานแสดงการเคลื่อนที่ของพาหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขณะที่รอยต่อพี-เอ็นได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับทำให้สนามไฟฟ้าภายในมีค่าสูงขึ้น และบริเวณปลอดพาหะกว้างมากขึ้น เมื่อมีแสงมาตกกระทบ และโฟตอนของแสงมีค่ามากกว่าช่องแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ($h\nu > E_g$) แล้วแสงจะถูกสารกึ่งตัวนำดูดกลืน โดยที่พลังงานของแสงจะไปกระตุ้นให้อิเล็กตรอนเปลี่ยนระดับพลังงานจากแถบวาเลนซ์ไปสู่แถบนำไฟฟ้าและทำให้เกิดโฮลขึ้นที่แถบวาเลนซ์ การเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลนั้นเกิดขึ้นได้ทั้งในชั้นพี บริเวณปลอดพาหะและชั้นเอ็น ซึ่งอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในแถบนำไฟฟ้าในชั้นพีจะแพร่ไปสู่ในชั้นเอ็น และอิเล็กตรอนที่เกิดในแถบนำไฟฟ้าที่บริเวณปลอดพาหะจะถูกศักย์ไฟฟ้าภายในทำให้เกิดการเคลื่อนที่ไปสู่ชั้นเอ็น ส่วนโฮลก็จะไหลในทิศทางตรงกันข้ามกับอิเล็กตรอนดังรูปที่ 2.7 (ข) ทำให้เกิดเป็นกระแสไฟฟ้าไหลออกสู่วงจรภายนอกจำนวนการเกิดคู่อิเล็กตรอน โฮลแปร โดยตรงกับความเข้มแสงที่สารกึ่งตัวนำดูดกลืน

2.3.5.2 โฟโตไดโอดชนิด PIN

โฟโตไดโอดชนิด PIN มีโครงสร้างที่คล้ายกับโฟโตไดโอดชนิด PN แต่แตกต่างที่โฟโตไดโอดชนิด PIN มีการสร้างชั้นสารกึ่งตัวนำที่มีความบริสุทธิ์สูง (เจือสารปริมาณน้อยมาก) หรือสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิก (i) ระหว่างรอยต่อ พี - เอ็น ดังในรูปที่ 2.8 ขณะที่ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าจะเต็มชั้นอินทรีนซิก เนื่องจากชั้นอินทรีนซิกมีสภาพต้านทานสูงกว่าด้านพีเข้มชั้นและด้านเอ็นเข้มชั้น เป็นผลให้เมื่อโฟโตไดโอดชนิด PIN ได้รับแรงดันไบอัสจะทำให้เกิดบริเวณปลอดพาหะขยายเข้าไปในส่วนของชั้นอินทรีนซิก



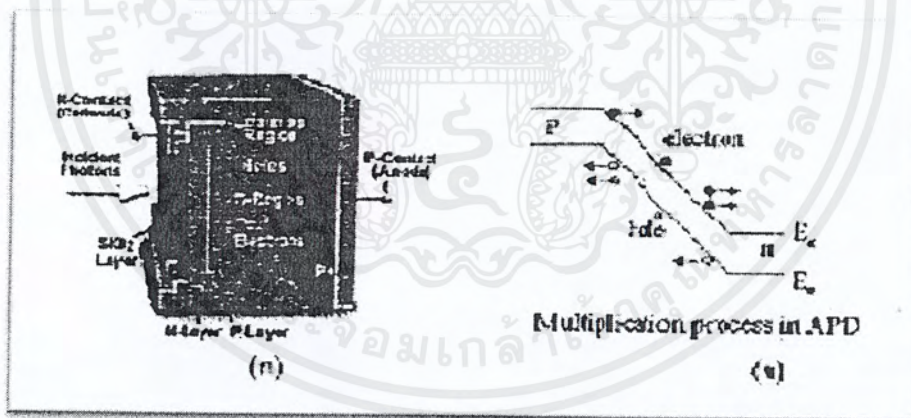
รูปที่ 2.8 โครงสร้างภาคตัดขวางของโฟโตไดโอดชนิด PIN

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากแรงดันที่ตกคร่อมส่วนที่อินทรีนซิคจะทำให้มีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นตลอดชั้นอินทรีนซิค จึงทำให้ค่าความจุไฟฟ้าของรอยต่อมีค่าน้อย ส่งผลให้ โฟโตไดโอดชนิด PIN มีผลตอบสนองด้านเวลารวดเร็วมาก ซึ่งเหมาะกับการนำไปใช้กับระบบที่ต้องการทำงานที่รวดเร็ว เช่น ระบบการสื่อสารด้วยแสง อุปกรณ์ฮาร์ดดิสก์ หรือรีโมทคอนโทรลด้วยแสง เป็นต้น นอกจากนี้จะมีผลการตอบสนองด้านเวลารวดเร็วแล้ว โฟโตไดโอดชนิด PIN ยังมีประสิทธิภาพควอนตัมสูงกว่าโฟโตไดโอดชนิด PN เนื่องจากมีชั้นดูดกลืนแสงที่กว้างกว่าบริเวณปลอดพาหะที่เกิดจากรอยต่อพี-เอ็น

2.3.5.3 โฟโตไดโอดชนิดอะวาลานซ์

โฟโตไดโอดชนิดอะวาลานซ์ คือโฟโตไดโอดชนิด PIN หรืออาจเป็นแบบ Metal-Semiconductor Photodiode: APD ก็ได้แสดงในรูปที่ 2.9 แต่จะถูกออกแบบเป็นพิเศษให้โฟโตไดโอดทำงานใกล้ๆ กับจุดพังทลาย (break down point) ด้วยแรงดันไบอัสย้อนกลับประมาณ 100 โวลต์ ทำให้เกิดปรากฏการณ์อะวาลานซ์ขึ้น



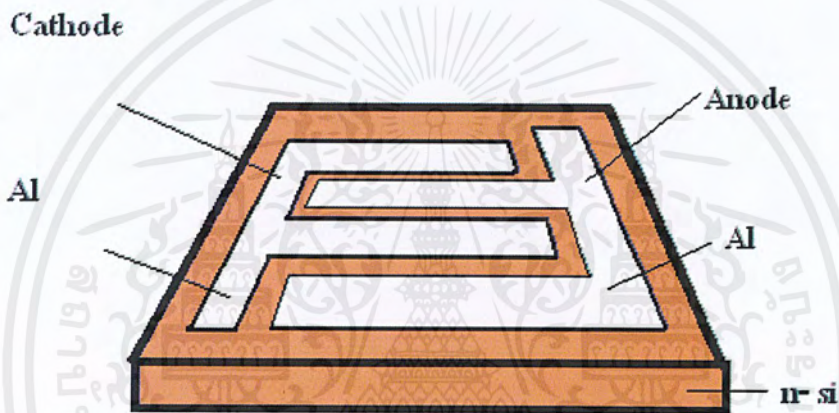
รูปที่ 2.9 โฟโตไดโอดชนิด ADP (ก) โครงสร้างภาคตัดขวาง (ข) แถบพลังงานแสดงการเคลื่อนที่ของพาหะ

เนื่องจากที่ใกล้ๆ กับจุดพังทลาย สนามไฟฟ้าในบริเวณปลอดพาหะ หรือในชั้นอินทรีนซิค มีค่าสูงมาก จึงทำให้ปรากฏการณ์ “การทวีคูณของพาหะ” (carrier multiplication) ได้ ดังนั้นในภาวะนี้ กระแสแสงจะมีค่าสูงมาก ซึ่งข้อได้เปรียบของอะวาลานซ์โฟโตไดโอด คือเป็นโฟโตไดโอดที่มีการตอบสนองสูง และมีอัตราการขยายสัญญาณ (gain) ซึ่งมากกว่าโฟโตไดโอดชนิด PIN 50-300 เท่า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่มีข้อเสียเปรียบคือ ต้องใช้แรงดันไบอัสย้อนกลับที่สูงมากกว่า ทำให้สัญญาณเอาท์พุทมีลักษณะความเป็นเชิงเส้นที่ไม่ดีเมื่อเปรียบเทียบกับกำลังของแสงอินพุท และสนามไฟฟ้าที่ได้จากแรงดันไบอัส นอกจากนี้สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นมีค่าสูงเนื่องจาก มีอัตราการขยายในโฟโตไดโอด

2.3.5.4 โฟโตไดโอดชนิด MSM

โฟโตไดโอดชนิด MSM (Metal-semiconductor-metal) สร้างขึ้นจากรอยสัมผัสชนิดกึ่งระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ โดยชั้นดูดกลืนแสง อยู่ระหว่างขั้วโลหะทั้งสอง โครงสร้างชนิด MSM ของโฟโตไดโอด แสดงได้ดังรูปที่ 2.10



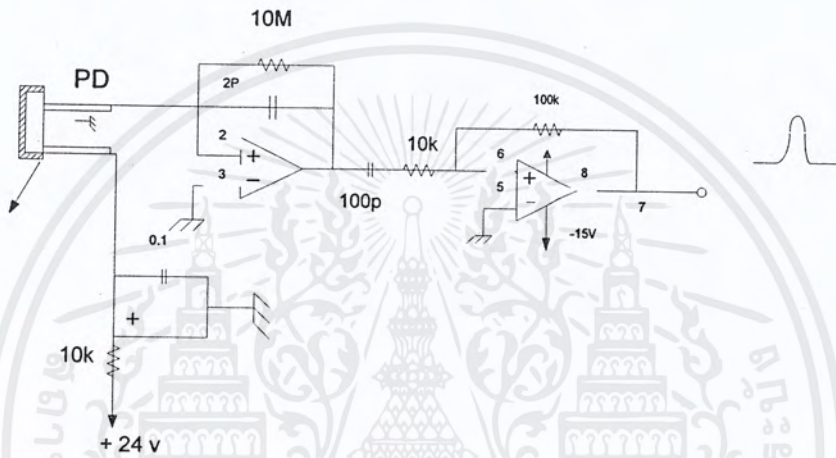
รูปที่ 2.10 ไดโอดชนิด MSM

เมื่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับจะเกิดบริเวณปลอดพาหะขึ้นได้และขอบของโลหะโฟตอนที่เกิดกระทบจะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ขึ้นในชั้นสารกึ่งตัวนำซึ่งอยู่ในบริเวณปลอดพาหะเปรียบเทียบกับโฟโตไดโอดชนิด PIN แล้วโฟโตไดโอดชนิด MSM จะมีชั้นดูดกลืนแสงแคบกว่าทำให้ค่าเวลาส่งผ่านมีค่าน้อย นอกจากนี้โครงสร้างชนิด MSM ยังมีค่าความต้านทานและค่าความจุไฟฟ้าต่ำจึงทำให้สามารถใช้งานที่ความถี่สูง

อย่างไรก็ตามเนื่องจากชั้นดูดกลืนแสงที่แคบจะส่งผลให้มีค่าประสิทธิภาพควอนตัมต่ำ ในส่วนของชั้นโลหะด้านหน้ายังสามารถสะท้อนแสง ได้สูงทำให้การส่งผ่านแสงน้อยลง อีกทั้งยังไม่สามารถทำงานที่อุณหภูมิสูงได้ นอกจากนี้ผลของระดับพลังงานที่ปรากฏอยู่ในช่องว่างพลังงานบริเวณผิวสัมผัสที่เรียกว่า สถานะผิว ซึ่งทำหน้าที่เป็นระดับจับอิเล็กตรอนและระดับจับโฮล หรือเป็นศูนย์กลางการรวมตัวใหม่ จะทำให้คุณสมบัติรอยสัมผัสเปลี่ยนแปลงไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้งานส่วนใหญ่ตัวตรวจจ็รับรังสีเอ็กซ์ประเภทซิลิคอนจะถูกต่อเข้ากับวงจรขยายเพื่อทำการขยายสัญญาณให้ใหญ่ขึ้นก่อนนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป ในส่วนของภาครับนั้นตัวตรวจจ็รับรังสีเอ็กซ์เป็นส่วนประกอบที่สำคัญเพราะทำหน้าที่เปลี่ยนรังสีเอ็กซ์ให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งเป็นตัวกำหนดประสิทธิภาพการทำงานของวงจรรภาครับ ดังนั้นตัวตรวจจ็รับรังสีเอ็กซ์ต้องมีความไวสูงตอบสนองเร็ว กระแสมีคต่ำ ราคาถูก และมีเสถียรภาพการทำงานดี นอกจากนี้วงจขยายก็ต้องมีความเหมาะสมกับลักษณะการใช้งานด้วย ไม่ว่าจะผ่านอัตราขยาย ความไว แบนด์วิด และสัญญาณรบกวนเป็นต้น



รูปที่ 2.11 วงจรสำหรับต่อร่วมกับตัวตรวจจ็รับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอด

รูปที่ 2.11 วงจรสำหรับตัวตรวจจ็รับรังสีแกมมา และรังสีเอ็กซ์ เมื่อรังสีถูกดูดกลืน หรือ กระเซิงในโฟโตไดโอด ทำให้เกิดประจุไฟฟ้าในบริเวณดังกล่าว ซึ่งประจุไฟฟ้าเหล่านี้กลายเป็นสัญญาณเอาต์พุทไหลสู่วงจรรภายนอก ในวงจรนี้ A1 เป็นวงจขยายประจุ ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนประจุไฟฟ้าที่เกิดจากชั้นที่ผ่านมาให้อยู่ในรูปของพัลส์แรงดัน ออปแอมป์จึงต้องมีค่าอัตราส่วสูงๆ แต่กินกระแสไบอัสต่ำ

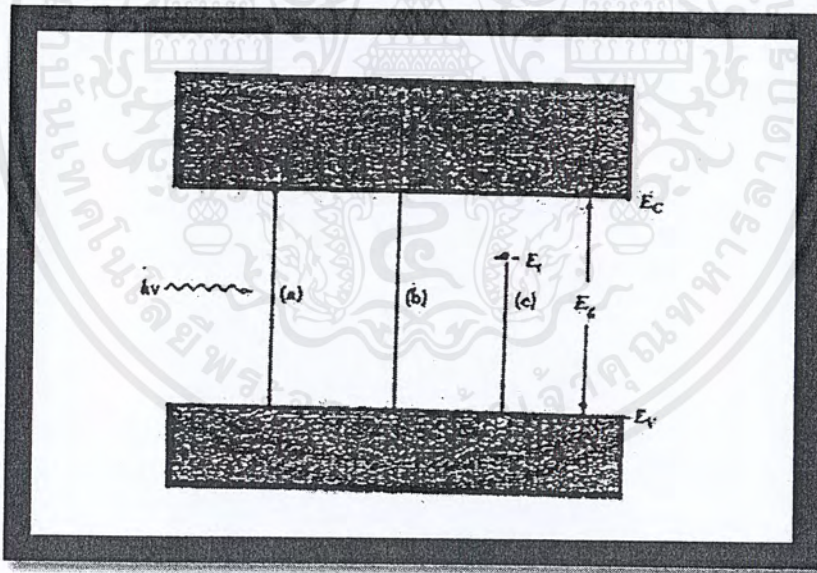
2.4 หลักการพื้นฐานของตัวตรวจจ็รับรังสีเอ็กซ์แบบโฟโตไดโอด

ตัวตรวจจ็รับรังสีเอ็กซ์แบบโฟโตไดโอดคือ โฟโตไดโอดซึ่งเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่สามารถตรวจจ็แสงหรือรังสีเพื่อเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้า โดยนำมาประยุกต์ใช้งานในการตรวจจ็รับรังสีเอ็กซ์ ซึ่งโฟโตไดโอดคือ ไดโอดแบบรอยต่อพีเอ็นหรือพิน(PIN)ต่างๆ ไปแต่เนื่องจากต้องทำงานเกี่ยวกับการรับแสงหรือรังสีต่างๆ ดังนั้นจึงถูกออกแบบให้สามารถสร้างรับแสงหรือรังสีได้ในขณะ

ใช้งาน โดยทั่วไปการทำงานพื้นฐานจะมี 3 ขั้นตอนหลัก คือ ขั้นตอนการแรกเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล เนื่องจากการดูดกลืนแสง ขั้นตอนที่สอง คู่อิเล็กตรอนที่ผ่านชั้นดูดกลืนแสง และขั้นตอนที่สาม คู่อิเล็กตรอนที่ไปยังขั้วไฟฟ้าของอุปกรณ์และเกิดเป็นกระแสไฟฟ้าไหลในวงจรต่อไป

2.4.1 กระบวนการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ

รูปที่ 2.12 แสดงกระบวนการทางแสงในสารกึ่งตัวนำ เป็นกระบวนการที่สารกึ่งตัวนำได้รับแสงแล้วเกิดกลไกภายใน ประกอบด้วยการดูดกลืนพลังงานของแสงที่ตกกระทบแล้วทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล กลไกการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลในสารกึ่งตัวนำจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อมีโฟตอนที่มีพลังงานมากกว่าช่องว่างพลังงาน Energy Gap ของสารกึ่งตัวนำตกกระทบลงบนสารกึ่งตัวนำและจะถูกดูดกลืนพลังงานจากโฟตอนและกระตุ้นให้อิเล็กตรอนเปลี่ยนระดับพลังงานจากแถบวาเลนซ์ข้ามช่องว่างพลังงานขึ้นไปอยู่ในแถบนำไฟฟ้าได้ กลายเป็นอิเล็กตรอนนำไฟฟ้าที่มีสภาพเป็นอิสระและทำให้เกิดโฮลขึ้นที่แถบวาเลนซ์



รูปที่ 2.12 กระบวนการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ

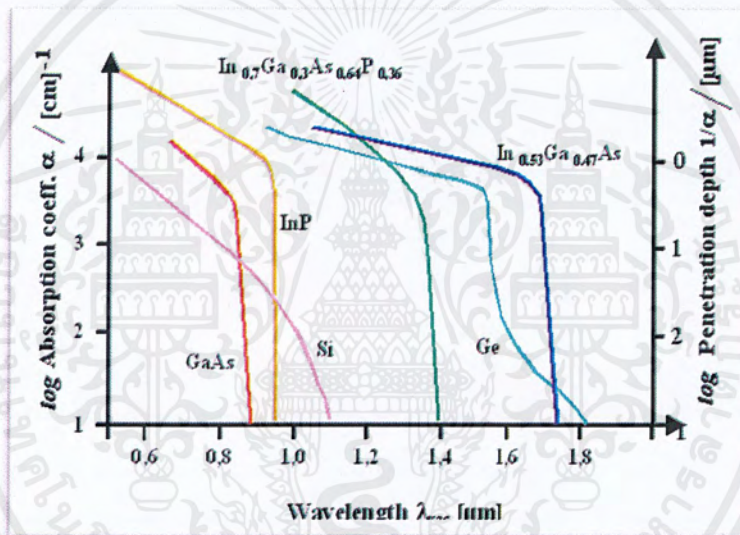
เมื่อได้รับแสง โฟตอนในแสงสีที่มีพลังงานสูงกว่าขนาดช่องว่างพลังงาน E_g ของสารกึ่งตัวนำ หรือ $h\nu > E_g$ จะทำให้มีการดูดกลืน โฟตอนในสารกึ่งตัวนำ โดยหนึ่งโฟตอนของแสงจะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลซึ่งถูกเรียกว่า อิเล็กตรอนแสง (photo Electron) และโฟตอนแสง (Photo hole)

ในทางอุดมคติบริเวณที่เข้มข้นและเย็นเข้มข้นในส่วนของเนื้อสาร (Bulk) ของสารกึ่งตัวนำเป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริเวณที่ไม่มีสนามไฟฟ้า ดังนั้นคู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้นในบริเวณนี้จึงรวมตัวกันเอง (Recombination) โดยไม่มีผลให้เกิดกระแสไฟฟ้าใดๆ แต่โฟตอนในลำแสงที่ตกกระทบและผ่านเข้าไปถึงบริเวณปลอดพาหะจะผลึกให้อิเล็กตรอนและโฮลเคลื่อนที่ออกไปจากบริเวณนี้อย่างรวดเร็ว โดยอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปยังด้านเอ็นเข้มข้น และโฮลเคลื่อนที่ออกไปยังด้านพีเข้มข้น

ถ้าสมมติว่าให้สารกึ่งตัวนำถูกตรวจจับด้วยแสงที่มีพลังงานมากกว่าช่องว่างพลังงานและจะมีฟลักซ์โฟตอนที่ตกกระทบต่อหน่วยพื้นที่ เมื่อฟลักซ์โฟตอนเคลื่อนที่ผ่านสารกึ่งตัวนำบางส่วนจะถูกดูดกลืน ดังนั้นจำนวน โฟตอนที่ถูกดูดกลืนจะเพิ่มขึ้นตามระยะทาง X และเป็นไปตามฟังก์ชัน โดยที่ α คือสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$I(x) = I_0 e^{-\alpha x}$$



รูปที่ 2.13 แสดงสเปกตรัมของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ

สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเป็นฟังก์ชันของ $h\nu$ รูปที่ 2.13 แสดงสเปกตรัมของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ ที่ใช้สร้างเป็นตัวตรวจจับแสง จะเห็นว่า สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ลดลงอย่างทันทีทันใดเมื่อถึงจุดความยาวคลื่นคัทออฟ(λ_c) ตามความสัมพันธ์ของสมการที่ 2.1

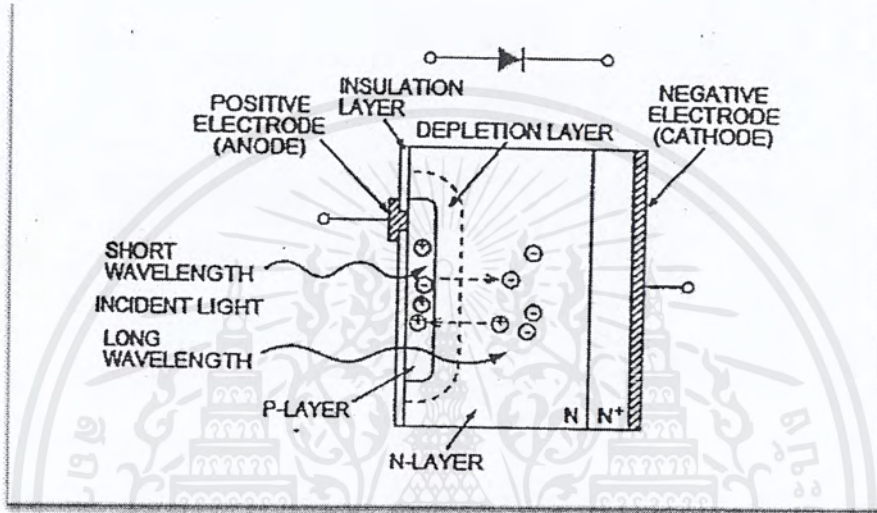
$$\lambda_c = \frac{hc}{E_g} = \frac{1.24(m)}{E_g(ev)} \quad (2.1)$$

โดยที่ h คือค่าคงที่ของพลังค์ มีค่าเท่ากับ 4.136×10^{-15} eV-sec

c คือความเร็วแสงมีค่าเท่ากับ 3×10^8 m/s

2.4.2 หลักการทำงานของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบโฟโตไดโอด

โครงสร้างภาคตัดขวางแสดงดังรูปที่ 2.14 เมื่อแสงตกกระทบบนรอยต่อ พี-เอ็น โฟตอนจากภายนอกเข้ามาในบริเวณหรือใกล้ๆ กับบริเวณปลอดพาหะ โดยโฟตอนนั้นต้องมีพลังงานค่าหนึ่ง ที่มากกว่าหรือเท่ากับช่องว่างพลังงานของสารที่ใช้สร้าง ไดโอดนั้นคือ $h\nu > E_g$ ก็จะทำให้อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ กระโดดขึ้นไปอยู่ในแถบคอนดักชันได้ทำให้เกิดรอยต่อคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้น



รูปที่ 2.14 โครงสร้างภาคตัดขวางโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อ พี-เอ็น

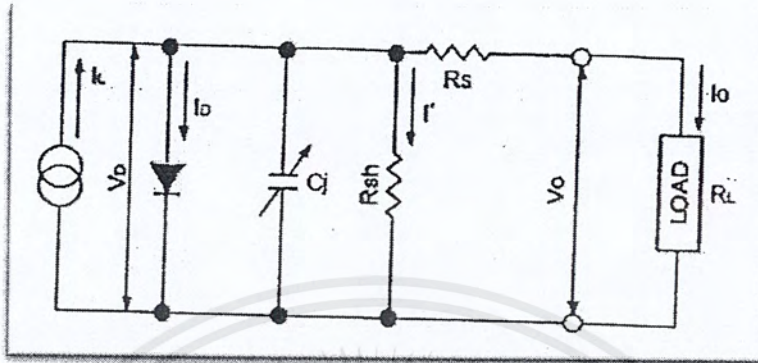
การเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลนั้น สามารถเกิดได้ทั้งในชั้นพี บริเวณปลอดพาหะ และชั้นเอ็นคู่อิเล็กตรอน-โฮล อิเล็กตรอนในชั้นพีจะแพร่ไปสู่ชั้นเอ็น และอิเล็กตรอนในบริเวณปลอดพาหะจะถูกสนามไฟฟ้าที่บริเวณปลอดพาหะพัดพาไปสู่ชั้นเอ็น ส่วนกรณีของโฮลนั้นจะเคลื่อนที่ทิศตรงกันข้ามกับอิเล็กตรอน กล่าวคือ โฮลในชั้นเอ็นจะแพร่ไปสู่ชั้นพี และโฮลในบริเวณปลอดพาหะจะถูกสนามไฟฟ้าบริเวณที่ปลอดพาหะพัดพาไปสู่ชั้นพี ซึ่งจำนวนของการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลนี้จะแปรผันตรงกับจำนวนโฟตอนแสง (photon flux) ที่สารกึ่งตัวนำดูดกลืน กระแสที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของพาหะจะเพิ่มขึ้นจากกระแสรั่วไหลย้อนกลับเดิมที่มีอยู่เรียกว่า กระแสแสง โดยเรียกอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่ออกแบบมาเพื่อตรวจจับแสงนี้ว่า โฟโตไดโอด

2.4.3 วงจรสมมูลของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบโฟโตไดโอด

วงจรสมมูลของโฟโตไดโอดจะเห็นว่า กระแสเนื่องจากแสงแทนแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า

(IL) กระแสไฟฟ้าที่ออกมาในทิศทางตรงกันข้ามกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านรอยต่อพี-เอ็น โดยมีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความต้านทานของรอยต่อแบบชันคัมมีค่ามาก ความจุไฟฟ้าย่อยต่อ ความต้านทานอนุกรมมีค่าน้อย ต่ออยู่ในรูปที่ 2.15 โดยที่พารามิเตอร์ต่างๆ นั้นคือ



รูปที่ 2.15 วงจรสมมูลของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบโฟโตไดโอด

เมื่อ I_L คือกระแสเนื่องจากแสง

C_j คือความจุไฟฟ้าย่อยต่อ

V_D คือแรงดันตกคร่อมไดโอด

V_O คือกระแสคมีด

R_{sh} คือกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน R_{sh}

I' คือกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตจากวงจรนี้สามารถคำนวณกระแสเอาต์พุตได้ดังนี้

$$I_o = I_L - I_D - I' = I_L - I_s \left(\exp \frac{qV_D}{kT} - 1 \right) - I'$$

โดยที่ I_s คือ กระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับของโฟโตไดโอด

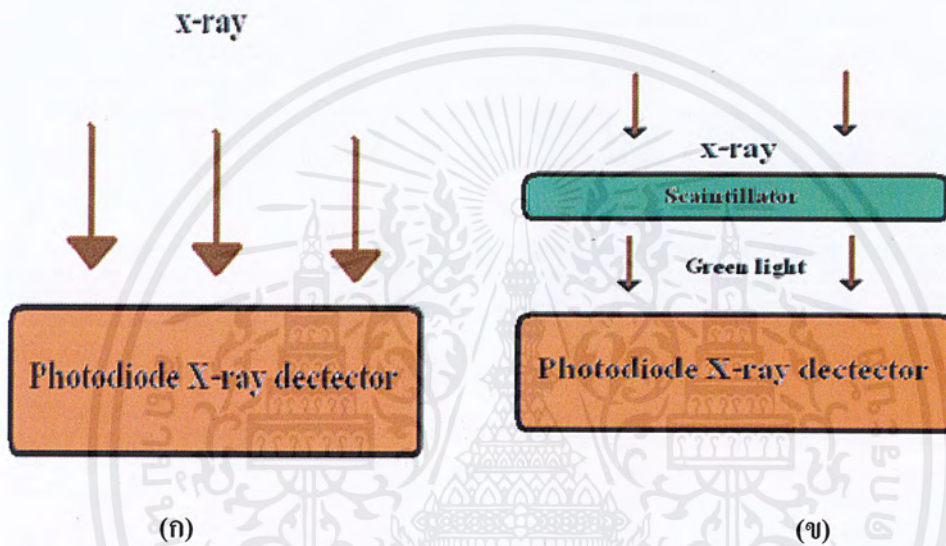
ถ้าสมมติให้ว่า I' มีค่าน้อยมาก เนื่องจากค่าความต้านทานของรอยต่อแบบชันคัมมีค่ามากจึงสามารถไม่คิดค่า I' ดังนั้น กระแสไฟฟ้าเอาต์พุตคือ ผลต่างของกระแสเนื่องจากแสงกับกระแสคมีดนั่นเอง

2.5 วิธีการตรวจจับรังสีเอ็กซ์

รังสีเอ็กซ์ลงบนตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์โดยตรง ในกรณีนี้คู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้น จะเกิดจากการที่ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ ดูดกลืนพลังงานจากรังสีเอ็กซ์โดยตรง 2 วิธีการตรวจจับโดยอ้อม เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การฉายรังสีเอ็กซ์ลงบนตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์โดยผ่านชั้นสารเรืองแสง ในย่านความยาวคลื่นของแสงที่ตามองเห็นได้ และตกกระทบพื้นที่รับแสงของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์โดยผ่านชั้นสารเรืองแสง ชั้นสารเรืองแสงนี้เมื่อได้รับรังสีเอ็กซ์จะมีการเรืองแสงในย่านความยาวคลื่นของแสงที่ตามองเห็นได้ และตกกระทบพื้นที่รับแสงของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ ดังนั้นในกรณีนี้ คู่อิเล็กทรอนิกส์-โฮล ที่เกิดขึ้นจะเกิดจากการที่ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ดูดกลืนแสงย่านความยาวคลื่นของแสงที่ตามองเห็นได้แทนการดูดกลืนแสงรังสีเอ็กซ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.16 และตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของสารเรืองแสงประเภทต่างๆ



รูปที่ 2.16 กลไกการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอด ชนิด PIN แบบแนวตั้ง (ก) วิธีการตรวจจับ โดยตรง (ข)วิธีการตรวจจับ โดยอ้อม

เมื่อเปรียบเทียบการตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบ โดยตรงและแบบ โดยอ้อมผ่านสารเรืองแสง กรณีการตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบ โดยอ้อม ซิลิคอนโฟโตไดโอดสามารถถ่ายกระแสแสงได้มากกว่ากรณีการตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบ โดยอ้อม เนื่องจากซิลิคอนสามารถตอบสนองความยาวคลื่นช่วงแสงที่ตามองเห็น ได้ดีกว่าความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์นั่นเอง

สารเรืองแสงนั้นมีอยู่ด้วยกันหลายชนิด ซึ่งแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติทางฟิสิกส์แตกต่างกันออกไป แสดงดังตารางที่ 2.1

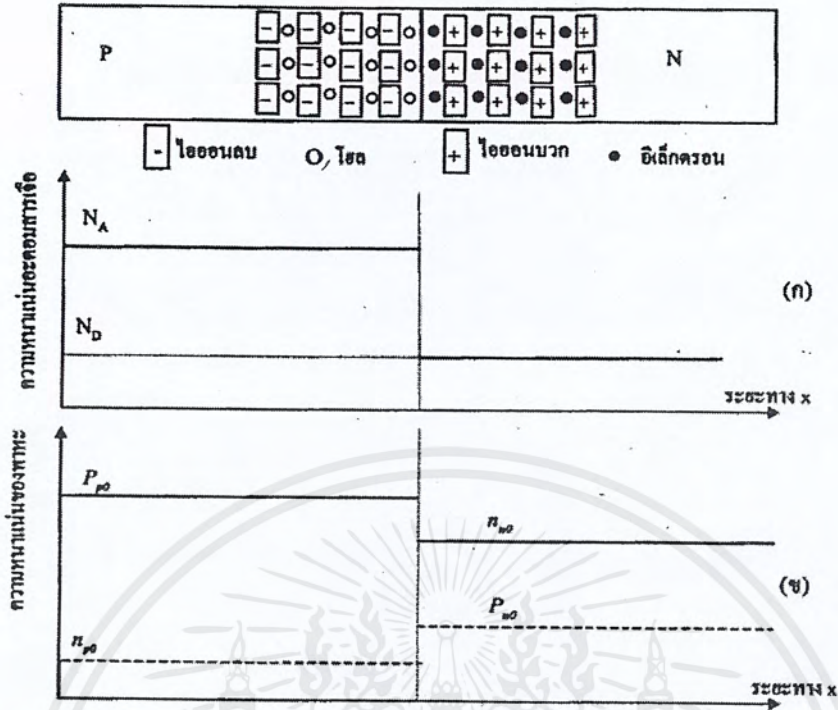
ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของสารเรืองแสงประเภทต่างๆ

คุณสมบัติทางฟิสิกส์	ชนิดสารเรืองแสง		
	NE102A	Gd ₅ O ₅ S:Tb	CsI:TI
Density (g/cm ³)	1.032	7.3	4.5
Z _{eff} /A _{eff}	0.5	0.41	0.42
Eff.excitation potential(eV)	6.5x10 ¹	4.9x10 ²	5.5x10 ²
Scintillation eff (%)	6.3	18	9.2
Light escape fraction(%)	95	22	22
Peak wavelength (nm)	423	544	580
Energy per photon (ev)	2.29	2.24	2.14
Light decay time (μs)	0.0024	2.4	1
Effectivethickness (mg/cm ²)	25	33.7	45

2.6 คุณสมบัติของรอยต่อพี-เอ็นในภาวะสมดุล

2.6.1 ปრაกฏการณ์ที่รอยต่อแบบชันบันไดในภาวะสมดุล

รอยต่อพี-เอ็นชนิดชันบันได (step junction) ซึ่งด้านพีจะมีอะตอมสารเจือชนิดพีกระจายอยู่สม่ำเสมอ เช่นเดียวกับด้านเอ็นก็จะมีอะตอมสารเจือชนิดเอ็นกระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 2.17(ก.) ซึ่งรอยต่อแบบชันบันไดในลักษณะนี้ สามารถสร้างได้ด้วยวิธีการอัลลอย (alloy process) หรือวิธีการอีพิแทกซี (epitaxy process) สำหรับรอยต่อพี-เอ็นที่ได้จากวิธีการแพร่สารเจือ (diffusion process) โดยที่จริงแล้วจะมีลักษณะเป็นรอยต่อชนิดลาด (graded junction) อย่างไรก็ตาม อาจอนุโลมให้มีรูปแบบเป็นรอยต่อชนิดชันบันไดได้ เช่นในกรณีที่กระจายความหนาแน่นของสารเจือบริเวณรอยต่อมีความชันสูงๆ นอกจากนี้ผลที่ได้จากการวิเคราะห์รอยต่อพี-เอ็น ชนิดชันบันไดนี้ ก็สามารถนำไปปรับใช้กับกรณีของรอยต่อชนิดลาดได้โดยง่ายและสะดวกอีกด้วย [2-5]



รูปที่ 2.17 (ก) แสดงลักษณะการกระจายของอะตอมสารเจือ และ (ข) แสดงความหนาแน่นของพาหะที่ด้านทั้งสองของรอยต่อพี-เอ็นชนิดชั้นบับโคก่อนเกิดรอยต่อ

ในการพิจารณารอยต่อชนิดชั้นบับโคนี้ ในเบื้องต้น จะสมมติการไหลของกระแสเพียง 1 มิติ เฉพาะในทิศทางแกน x เท่านั้น ซึ่งกระแสนี้มีทิศตั้งฉาก กับพื้นที่หน้าตัดของรอยต่อที่มีขนาด สม่ำเสมอตลอดแนวแกน x แต่โดยความเป็นจริงแล้วจะมีกระแสที่ไหลในทิศอื่นๆด้วย และ แบบจำลองของรอยต่อพี-เอ็น ควรมีลักษณะเป็นแบบ 3 มิติ ซึ่งการวิเคราะห์จะยุ่งยากมากขึ้นจากรูป ที่ 2.1 กำหนดให้สัญลักษณ์ ต่างๆมีความหมายดังต่อไปนี้

p_{po} คือ ความหนาแน่นของโฮลทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพี ซึ่งเป็นพาหะส่วนมาก(majority carrier concentration)

n_{no} คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพี ซึ่งเป็นพาหะส่วนน้อย(minority carrier concentration)

n_{no} คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ซึ่งเป็นพาหะส่วนมาก

p_{po} คือ ความหนาแน่นของโฮลทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ซึ่งเป็นพาหะส่วนน้อย

+ หรือ N_D^+ คือ สัญลักษณ์ของอะตอมผู้ให้ที่กลายเป็นไอออนบวก(positively ionized donor atoms) ซึ่งมีสภาพเป็นประจุไฟฟ้าบวก และไม่สามารถเคลื่อนที่ได้(immobile positive charge)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- หรือ N_A^- คือ สัญลักษณ์ของอะตอมผู้รับที่กลายเป็นไอออนลบ (negatively ionized acceptor atoms) ซึ่งมีสภาพเป็นประจุไฟฟ้าลบ และไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ (immobile negative charge)

● คือ สัญลักษณ์ของอิเล็กตรอนอิสระ (free electron) มีประจุเป็นลบเคลื่อนที่ได้ (mobile negative charge)

○ คือ สัญลักษณ์ของโฮล(hole) มีประจุบวก และเคลื่อนที่ได้ (mobile positive charge)

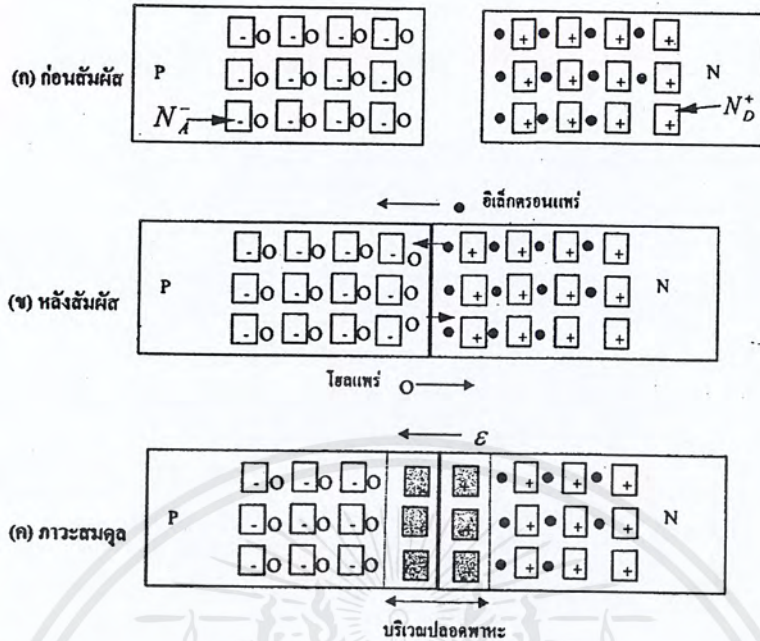
ในขณะที่รอยต่อพี-เอ็นยังไม่ถูกสร้างขึ้น ด้านพีและด้านเอ็นจะถูกแยกจากกันดังแสดงในรูปที่ 2.18 (ก) โดยที่ด้านพี จะมีโฮลที่เกิดจากอะตอมผู้รับ (Acceptor atom) และมีประจุเป็น (+q) โดยความหนาแน่นของโฮล (p_p) จะประมาณเท่ากับ ความหนาแน่นของอะตอมผู้รับที่ถูกไอออไนซ์เป็นไอออนลบ (N_A^-) จึงทำให้ด้านพียังคงมีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า เพราะประจุบวกเท่ากับประจุลบ ส่วนด้านเอ็นจะมีอิเล็กตรอนอิสระหรือ อิเล็กตรอนนำไฟฟ้าที่เกิดจากอะตอมผู้ให้ (Donor atom) และมีประจุลบ (-q) โดยความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (n_n) จะเท่ากับความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ที่ถูกไอออไนซ์เป็นไอออนบวก (N_D^+) จึงทำให้ด้านเอ็นก็ยังมีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้าด้วยเช่นกัน และเมื่อรอยต่อพี-เอ็นถูกสร้างขึ้น จะเห็นว่าเนื่องจากด้านทั้งสองของรอยต่อพี-เอ็นมีความหนาแน่นพาหะไม่เท่ากัน โดยที่โฮลทางด้านพีมีความหนาแน่นสูงกว่าโฮลทางด้านเอ็นและอิเล็กตรอนอิสระทางด้านเอ็นมีความหนาแน่นสูงกว่าอิเล็กตรอนในด้านพี และนี่เองเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดมีแรงกระทำต่อพาหะ เป็นเหตุให้พาหะเคลื่อนที่แพร่ไปยังด้านตรงข้าม เพื่อให้ด้านทั้งสองมีความหนาแน่นของประจุพาหะเท่ากัน ดังนั้น ทันทีที่รอยต่อขึ้นจะเกิดการแพร่ของอิเล็กตรอนและโฮลจากทางด้านที่มีความหนาแน่นสูงกว่าไปยังด้านที่มีความหนาแน่นต่ำกว่า โดยโฮลจะเริ่มแพร่จากด้านพีไปยังด้านเอ็น และอิเล็กตรอนจะแพร่จากด้านเอ็นเข้าไปในด้านพี ดังแสดงในรูปที่ 2.18(ข)

การแพร่ของพาหะไปยังด้านตรงข้ามนี้ จะเริ่มเกิดขึ้นที่บริเวณใกล้ๆกับรอยต่อเป็นอันดับแรก ดังนั้น ไอออนของอะตอมผู้ให้ และ ไอออนของอะตอมผู้รับซึ่งเป็นประจุที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ จึงสามารถแสดงประจุไฟฟ้าออกมาได้ โดยไอออนบวกของอะตอมผู้ให้แสดงประจุไฟฟ้าบวกและไอออนลบของอะตอมผู้รับแสดงประจุไฟฟ้าลบ ดังนั้นจึงทำให้เริ่มมีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นที่บริเวณภายในรอยต่อและเรียกว่า “สนามไฟฟ้าภายใน” (built in electric field) ดังแสดงในรูปที่ 2.18(ค) สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้จะต่อต้านการเคลื่อนที่ของโฮลจากด้านพี และต่อต้านการเคลื่อนที่ของ

อิเล็กตรอนจากด้านเอ็น ไม่ให้ข้ามไปยังด้านตรงข้าม อย่างไรก็ตาม ในช่วงแรกๆเนื่องจากสนามไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 แสดงปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น (ก) ก่อนเกิดรอยต่อ (ข) หลังจากเกิดรอยต่ออิเล็กตรอน และโฮลแพร่ข้ามรอยต่อ ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าภายในที่รอยต่อ และ (ค) รอยต่อที่เย็นในภาวะสมดุลอิเล็กตรอน และโฮลไม่สามารถข้ามรอยต่อได้

นี้มีค่าน้อย แรงจากสนามไฟฟ้าที่ต่อต้านการเคลื่อนที่ของพาหะจึงมีค่าน้อยทำให้แรงที่เกิดจากการแพร่มีค่ามากกว่า ดังนั้น อิเล็กตรอนและโฮล จึงสามารถแพร่ข้ามรอยต่อได้ต่อไป แต่อัตราการแพร่จะค่อยๆลดลง ในขณะที่สนามไฟฟ้าที่รอยต่อจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เพราะมีประจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ในที่สุดสนามไฟฟ้าที่รอยต่อจะมีค่ามากพอที่จะยับยั้งการแพร่ของอิเล็กตรอนและโฮลได้พอดี อิเล็กตรอนและโฮลจึงไม่สามารถแพร่ข้ามรอยต่อได้อีกต่อไป ในภาวะนี้กระแสของพาหะสุทธิ จะเป็นศูนย์ หรือก็คือ กระแสที่เกิดจากการแพร่ของพาหะ(diffusion current) จะเท่ากับกระแสครีฟท์ของพาหะ(drift current) ที่เกิดจากสนามไฟฟ้าภายในรอยต่อ ซึ่งกระแสทั้งสองนี้มีทิศทางตรงกันข้าม กระแสรวมจึงเป็นศูนย์ เราเรียกสภาวะนี้ว่า “ภาวะสมดุล” หรือ“equilibrium” บริเวณรอยต่อซึ่งมีสนามไฟฟ้าปรากฏอยู่ จะเป็นบริเวณที่แทบจะไม่มีพาหะอยู่เลย เนื่องจากพาหะถูกอิทธิพลจากสนามไฟฟ้าพัดพาออกไปหรือปิดออกไปนอกบริเวณนี้ ดังนั้นย่านนี้ จึงถูกเรียกว่า “บริเวณปลอดพาหะ” หรือ “depletion region” และการที่เกิดมีสนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อหรือบริเวณปลอดพาหะ แสดงว่ามีความต่างศักย์เกิดขึ้นระหว่างด้านพี และด้านเอ็น ซึ่งเป็นผลจากการสัมผัสกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของสารกึ่งตัวนำชนิดพีและชนิดเอ็น ความต่างศักย์นี้ถูกเรียกว่า "ศักย์สัมผัส" หรือ "Contact potential" และศักย์สัมผัสที่ปรากฏบริเวณปลดคพาหะนี้ บางครั้งถูกเรียกว่า "กำแพงศักย์ภายใน" หรือ "ศักย์ภายใน" (built-in potential barrier or built in potential) ขนาดของศักย์ภายในนี้ (V_{bi}) จะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอะตอมสารเจือที่ด้านทั้งสองของรอยต่อและอุณหภูมิที่รอยต่อ แต่โดยทั่วไป จะมีค่าน้อยกว่า 1 โวลต์ สมการของกระแสที่เกิดจากการแพร่ของพาหะข้ามรอยต่อ เขียนได้ด้วยสมการ 2.2 ของกระแสการแพร่ดังนี้

กรณีของกระแสโฮลจากด้านพี

$$J_{p(diff)} = -q D_p \frac{dp}{dx} \quad (2.2)$$

สนามไฟฟ้าภายในรอยต่อที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดกระแสครีฟท์ของ โฮลซึ่งเขียนเป็นสมการ 2.3 ได้ดังนี้

$$J_{p(drift)} = pq\mu_p \mathcal{E} \quad (2.3)$$

ดังนั้นกระแสโฮลรวมหรือกระแสโฮลสุทธิที่ไหลผ่านรอยต่อพี-เอ็นสมการ 2.4 คือ

$$J_{p(total)} = J_{p(drift)} + J_{p(diff)} \quad (2.4)$$

ในภาวะสมดุลจะเกิดขึ้นเมื่อ สนามไฟฟ้าภายในมีค่ามากพอดี ที่จะต่อต้านการเคลื่อนที่ของโฮลข้ามรอยต่อหรือก็คือกระแสโฮลสุทธิเท่ากับศูนย์ ดังนั้น จะได้สมการ 2.5

$$J_{p(drift)} + J_{p(diff)} = 0 \quad (2.5)$$

โดยที่ p คือ ความหนาแน่นของโฮล(hole concentration)

D_p คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของโฮล(hole's diffusion coefficient)

μ_p คือ สภาพคล่องของโฮล(hole's mobility)

\mathcal{E} คือ สนามไฟฟ้าภายในรอยต่อ(built in electric field)

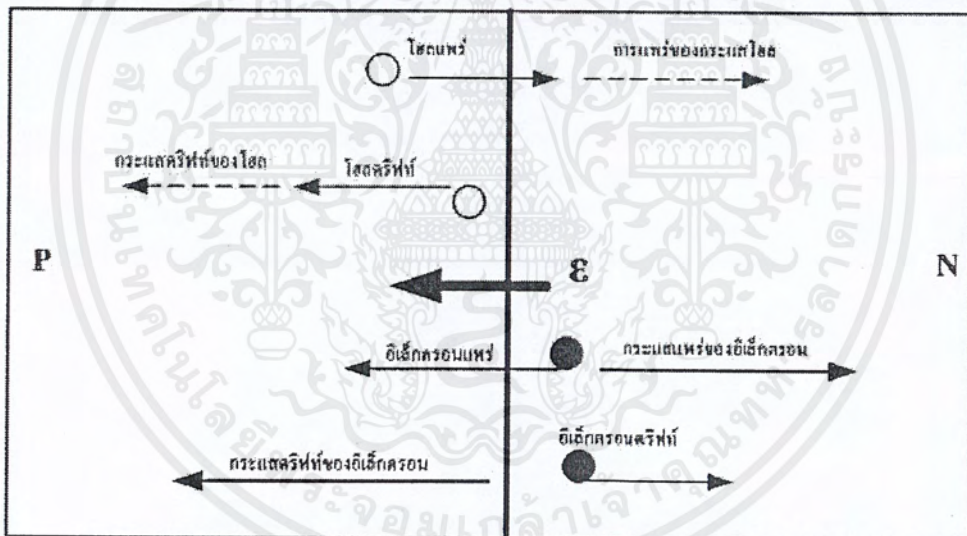
และสำหรับกรณีอิเล็กตรอนจากด้านอื่น ก็สามารถพิจารณาได้ทำนองเดียวกันกับกรณีของโฮล
กล่าวคือในภาวะสมดุล กระแสการแพร่ของอิเล็กตรอนจะเท่ากับกระแสครีฟท์ของอิเล็กตรอน หรือ

$$J_{n(\text{diff})} + J_{n(\text{drift})} = 0$$

โดยที่ $J_{n(\text{diff})}$ คือ กระแสการแพร่ของอิเล็กตรอน

และ $J_{n(\text{drift})}$ คือ กระแสครีฟท์ของอิเล็กตรอน

สำหรับทิศทางการเคลื่อนที่ของโฮลและอิเล็กตรอน เนื่องจากการแพร่และการครีฟท์และทิศทาง
ของกระแสที่เกิดขึ้นที่บริเวณรอยต่อ พี-เอ็น แสดงได้ดังในรูปที่ 2.19



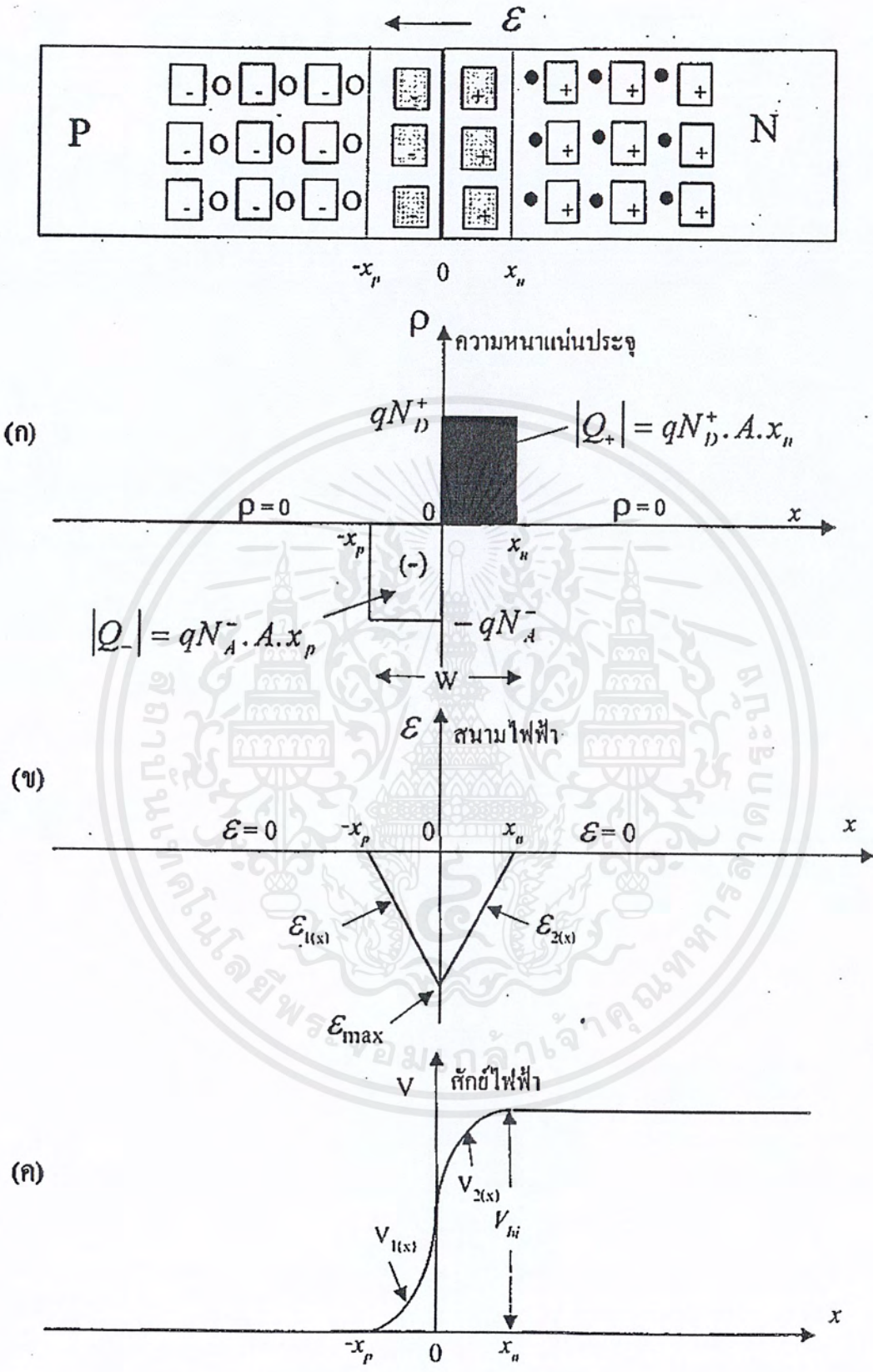
รูปที่ 2.19 แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของโฮลและอิเล็กตรอน เนื่องจากการแพร่และการครีฟท์ และ
ทิศทางของกระแสที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อพี-เอ็น

ขณะที่รอยต่อพี-เอ็นอยู่ในภาวะสมดุล การกระจายของความหนาแน่นของประจุไฟฟ้า,
สนามไฟฟ้า ภายใน และศักย์ภายใน ที่เกิดขึ้นที่บริเวณรอยต่อพี-เอ็น แสดงได้ดังรูปที่ 2.21(ก), (ข)
และ (ค) ตามลำดับ

2.6.2 ศักย์ไฟฟ้าภายในของรอยต่อ (Built-in Potential: V_{bi})

แรงดันที่ตกคร่อมบริเวณปลอดพาหะ หรือบริเวณรอยต่อที่ถูกเรียกว่า “ศักย์ภายใน” หรือ “แรงดันภายใน” (built in voltage: V_{bi}) ในขณะที่รอยต่อพี-เอ็นเข้าสู่ภาวะสมดุล สามารถถูกพิจารณาและหาสมการแสดงศักย์ภายในที่ปรากฏในบริเวณปลอดพาหะ ในช่วงจากด้านพีที่ตำแหน่ง $-x_p$ ถึงด้านเอ็นที่ตำแหน่ง x_n โดยที่ $x = 0$ เป็นตำแหน่งที่อยู่ตรงกลางของรอยต่อ เนื่องจากเมื่อรอยต่อ





รูปที่ 2.20 แสดงลักษณะการกระจายของ (ก) ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้า (ข) สนามไฟฟ้าภายใน และ (ค) ศักย์ไฟฟ้าภายใน ที่ปรากฏบริเวณรอยต่อพี-เอ็นในภาวะดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เข้าสู่ภาวะสมดุล กระแสครีฟท์และกระแสแพร่จะเท่ากัน ทำให้กระแสสุทธิเป็นศูนย์ เช่นกรณีของ กระแสอิเล็กตรอนจะได้ว่า

$$J_{n(x)} = J_{n(\text{drift})} + J_{n(\text{diff})} = 0$$

จะได้ว่าแรงดันตกคร่อมรอยต่อพี-เอ็นคือ

$$V_{bi} = \frac{kT}{q} \ln\left[\frac{n_n}{n_p}\right]$$

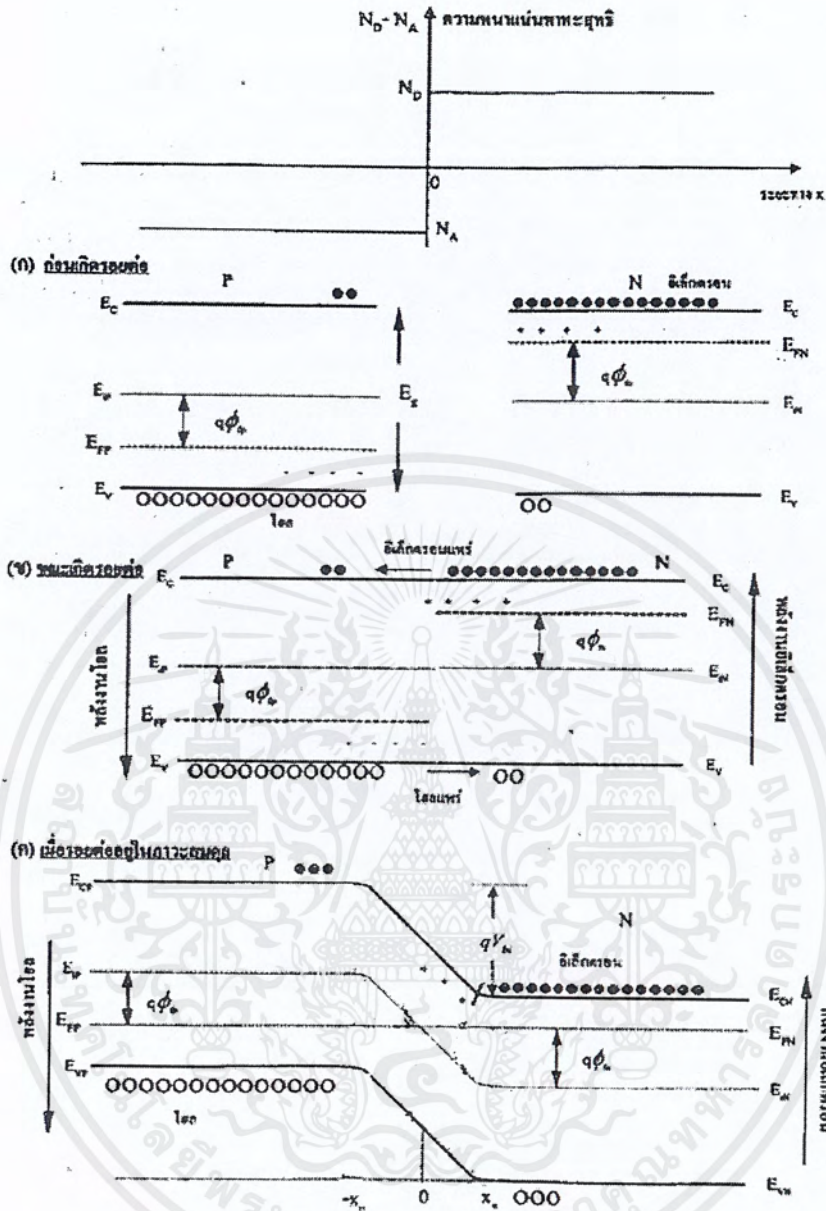
หรือ

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

2.6.3 แถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็นในภาวะสมดุล

ในตอนนี้อะเราจะพิจารณาลักษณะของแถบพลังงาน(Energy band)ของรอยต่อพี-เอ็นในภาวะสมดุล โดยเริ่มพิจารณาดังแต่ในขณะที่ยังไม่เกิดรอยต่อ จนกระทั่งเกิดรอยต่อขึ้น และจนในที่สุด รอยต่อเข้าสู่ภาวะสมดุล รูปที่ 2.21 (ก) แสดงแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำด้านพีและด้านเอ็น ในขณะที่ยังไม่เกิดรอยต่อ ซึ่งเนื่องจากเป็น

สารกึ่งตัวนำชนิดเดียวกัน ขนาดของช่องว่างพลังงาน (E_g) จึงเท่ากัน ระดับเฟอร์มี (Fermi level: E_{Fp}) ของสารชนิดพี จะอยู่ต่ำกว่าระดับอินทรินซิก (intrinsic level: E_{ip}) และระดับเฟอร์มี (Fermi level: E_{Fn}) ของสารชนิดเอ็น จะอยู่สูงกว่าระดับอินทรินซิก (intrinsic level: E_{in})



รูปที่ 2.21 แสดงลักษณะแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็นในภาวะต่างๆ (ก) ก่อนเกิดรอยต่อ (ข) ขณะเกิดรอยต่อ (ค) ขณะรอยต่ออยู่ในภาวะสมดุล

จากรูปที่ 2.21 ค่าของ Φ_p ถูกเรียกว่า “ศักย์เฟอร์มิของสารชนิดพี”(Fermi potential of p-type) และค่าของ Φ_n ถูกเรียกว่า “ศักย์เฟอร์มิของสารชนิดเอ็น”(Fermi potential of n-type) เมื่อเกิดเป็นรอยต่อพี-เอ็นแล้ว เนื่องจากความหนาแน่นของโฮลและอิเล็กตรอนในด้านทั้งสองไม่เท่ากัน จึงเกิดการแพร่ข้ามรอยต่อของพาหุนี้ จากด้านที่มีความหนาแน่นสูงกว่า ไปยังด้านที่มีความหนาแน่นต่ำ

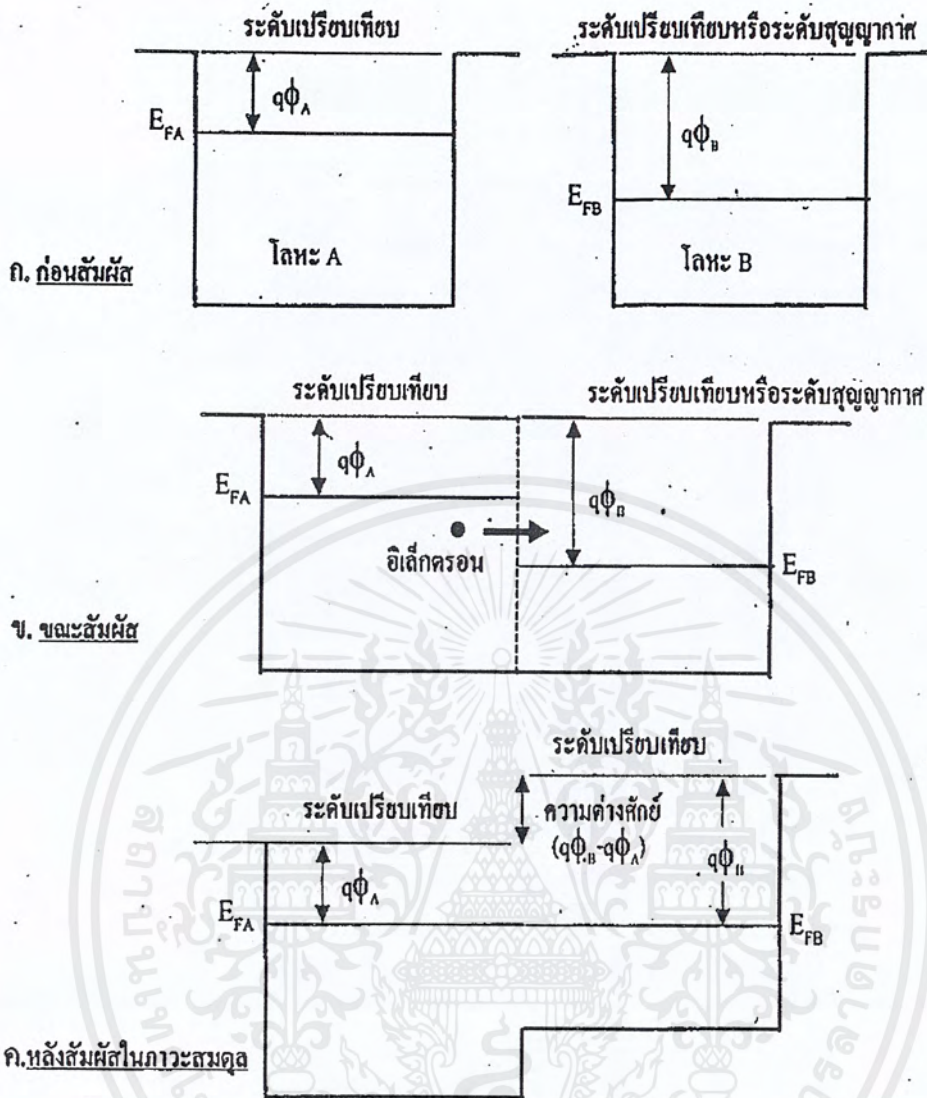
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กว่า โดลจะแพร่จากด้านพีไปยังด้านเอ็น และอิเล็กตรอนจะแพร่จากด้านเอ็นไปยังด้านพีดังแสดงในรูปที่ 2.21(ข)

ดังนั้นจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของพาหะบริเวณรอยต่อ และทำให้เกิดมีประจุไฟฟ้าบวกและลบของไอออนอะตอมสารเจือ มีผลทำให้มีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นที่บริเวณรอยต่อ และสนามไฟฟ้านี้จะต่อต้านการแพร่ข้ามรอยต่อของพาหะ เมื่อรอยต่อเข้าสู่ภาวะสมดุล สนามไฟฟ้านี้จะมีค่ามากพอที่จะยับยั้งการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและ โดล ไม่ให้เคลื่อนที่ข้ามรอยต่อได้ หรืออีกนัยหนึ่งก็คือ กระแสครีฟท์จะเท่ากับกระแสแพร่ ดังนั้นกระแสรวมเป็นศูนย์ ระดับเฟอร์มิ E_F ของด้านทั้งสองจะอยู่ในระดับเดียวกัน ทำให้เกิดมีความต่างศักย์ระหว่างด้านทั้งสอง (V_{bi}) เสมือนกับเป็นกำแพงศักย์ (potential barrier) ต่อต้านไม่ให้อิเล็กตรอนและ โดล เคลื่อนที่ข้ามรอยต่อ ทุกอย่างที่ยุติจึงดูคล้ายสงบนิ่ง เราเรียกสภาวะนี้ว่า "ภาวะสมดุล" ดังแสดงในรูปที่ 2.21 (ค) ความชันของกราฟบริเวณปลายคพาหะ เป็นสิ่งแสดงขนาดของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในรอยต่อ จากรูปที่ 2.21(ค) ซึ่งแสดงลักษณะแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็นขณะอยู่ในภาวะสมดุล จะเห็นว่ากำแพงศักย์ที่รอยต่อ (V_{bi}) หรือศักย์สัมผัส หมายถึง ความแตกต่างของระดับพลังงานระหว่างด้านพีและด้านเอ็นและเขียนสมการ 2.6 ได้ดังนี้

$$V_{bi} = V(x_n) - V(x_p) \quad (2.6)$$

$$\text{หรือ } V_{bi} = 1/q [(E_i - E_{F_{p\text{-side}}}) + (E_F - E_{i_{n\text{-side}}})]$$



รูปที่ 2.22 แสดงระดับพลังงานของโลหะสองชนิดที่แตกต่างกัน เมื่อนำมาสัมผัสกัน (ก) ภาวะก่อนสัมผัส (ข) ขณะสัมผัส และ (ค) ภาวะสมดุล

เมื่อนำสารทั้งสองชนิดนี้มาสัมผัสกันหรือมาต่อเชื่อมเป็นเนื้อเดียวกัน จะเกิดการถ่ายเทของพาหะเกิดขึ้น โดยอิเล็กตรอนจะไหลจากโลหะด้านที่มีระดับเฟอร์มิที่สูงกว่าไปยังด้านโลหะที่มีระดับเฟอร์มิต่ำกว่า เช่น ถ้า $\Phi_B > \Phi_A$ จะได้ว่า $E_{FA} > E_{FB}$ ดังนั้นอิเล็กตรอนจากด้านโลหะ A จะไหลไปยังด้านโลหะ B ดังรูปที่ 2.22(ข) ทำให้เกิดการสะสมของประจุไฟฟ้าลบในด้านโลหะ B และที่ด้านโลหะ A จะมีสภาพเป็นประจุไฟฟ้าบวกและทำให้เกิดความต่างศักย์เกิดขึ้นที่ด้านทั้งสองของโลหะ หรือก็คือ ระดับพลังงานเปรียบเทียบใดๆในสารทั้งสองชนิดนี้จะมีค่าต่างกัน การถ่ายเทของอิเล็กตรอน จะทำให้ระดับเฟอร์มิในโลหะ A ลดลงและ ระดับเฟอร์มิในโลหะ B เพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และในที่สุด เมื่อเข้าสู่สมดุล ระดับเฟอร์มิของด้านทั้งสองก็จะอยู่ที่ระดับเดียวกัน ในภาวะนี้การถ่ายเทของอิเล็กตรอนจะหยุดลง และระดับพลังงานเปรียบเทียบใดๆ ในสารทั้งสองจะแตกต่างกัน ทำให้มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเกิดขึ้นที่ปลายด้านทั้งสองของโลหะ และเรียกศักย์ที่แตกต่างกันนี้ว่า “ศักย์สัมผัส” หรือ “ศักย์ภายใน” ดังแสดงในรูปที่ 2.22(ค)

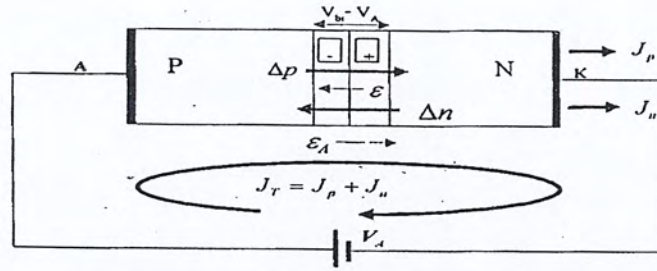
2.7 คุณสมบัติของรอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง

คุณสมบัติที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งของรอยต่อพี-เอ็น หรือไดโอด ก็คือการที่ไดโอดยอมให้กระแสไหลได้เป็นอย่างดี เมื่อมีการไบอัสแกรรรอยต่อ โดยศักย์ไฟฟ้าที่ด้านพี มีค่าเป็นบวกเมื่อเทียบกับศักย์ไฟฟ้าที่ด้านเอ็น หรือศักย์ด้านพีมีค่าสูงกว่าด้านเอ็น ซึ่งเราเรียกการให้ไบอัสแบบนี้ว่า “ไบอัสตรง” (Forward bias) และกระแสที่ไหลในภาวะนี้ถูกเรียกว่า “กระแสตรง” (Forward current) และในทางตรงข้ามถ้าให้ศักย์ไฟฟ้าด้านพีมีค่าเป็นลบเมื่อเทียบกับด้านเอ็น หรือศักย์ด้านเอ็นสูงกว่าด้านพี ซึ่งการไบอัสแบบนี้เรียกว่า ไบอัสย้อนกลับ (Reverse bias) ไดโอดจะไม่ยอมให้กระแสไหลผ่านหรือไหลได้น้อยมาก ซึ่งกระแสน้อยนี้ถูกเรียกว่า กระแสย้อนกลับ (Reverse current) ในตอนนี้เราจะพิจารณารายละเอียดเกี่ยวกับ คุณสมบัติหรือคุณลักษณะของรอยต่อพี-เอ็น ทั้งในกรณีที่ได้รับแรงดันไบอัสตรง และไบอัสย้อนกลับและอยู่ในภาวะ Steady state

2.7.1 ปฏิกิริยาการที่รอยต่อขณะได้รับไบอัสตรง

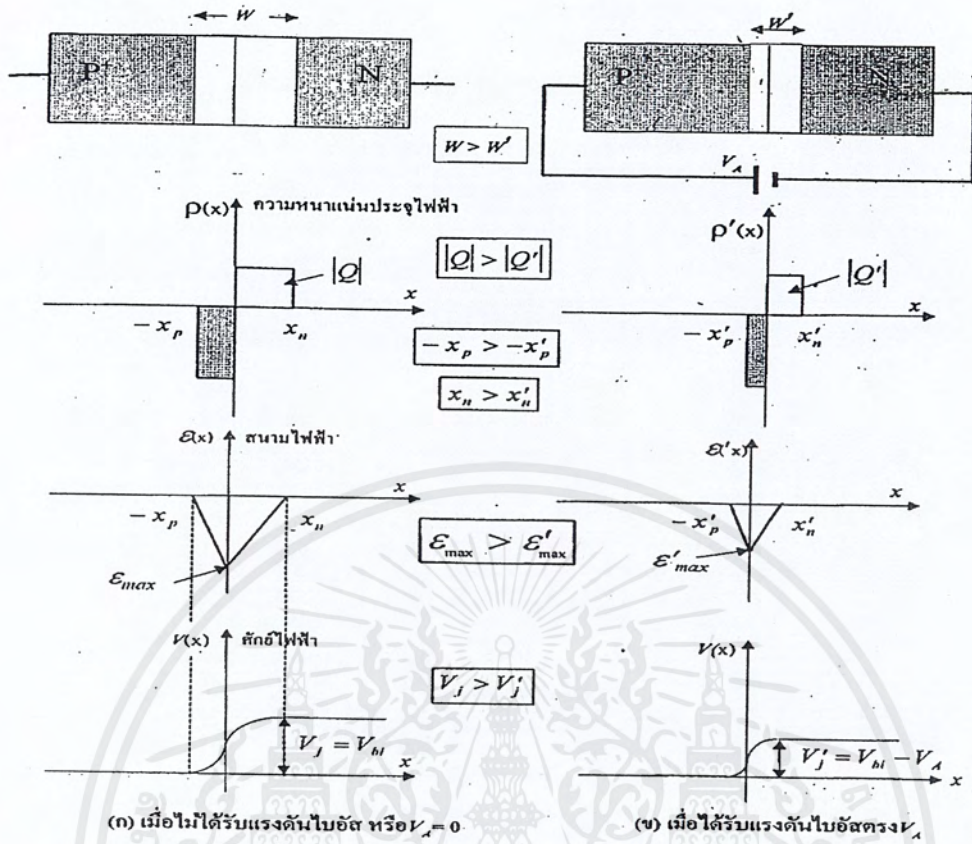
ในขณะที่รอยต่อพี-เอ็น อยู่ในภาวะสมดุล โดยไม่มีแรงดันไบอัสใดๆ ให้แกรรรอยต่อพี-เอ็นจะพบว่าไม่มีกระแสใดๆ ไหลผ่านรอยต่อ ทั้งนี้ เนื่องจากมีสนามไฟฟ้าภายใน หรือศักย์ภายในปรากฏอยู่ที่บริเวณรอยต่อ ซึ่งศักย์สัมผัสภายในรอยต่อนี้ จะทำหน้าที่ขัดขวางหรือต่อต้านการเคลื่อนที่แพร่ข้ามรอยต่อของพาหะ

เมื่อรอยต่อพี-เอ็นถูกให้ไบอัสตรง (forward bias) โดยให้ศักย์ไฟฟ้าที่ด้านพีเป็นบวก เมื่อเทียบกับด้านเอ็น ซึ่งทำได้โดยต่อขั้วโลหะด้านพี หรือขั้วแอโนด เข้ากับขั้วบวกของแบตเตอรี่ และขั้วโลหะด้านเอ็น หรือขั้วแคโทด ต่อเข้ากับขั้วลบของแบตเตอรี่ดังแสดงในรูปที่ 2.23



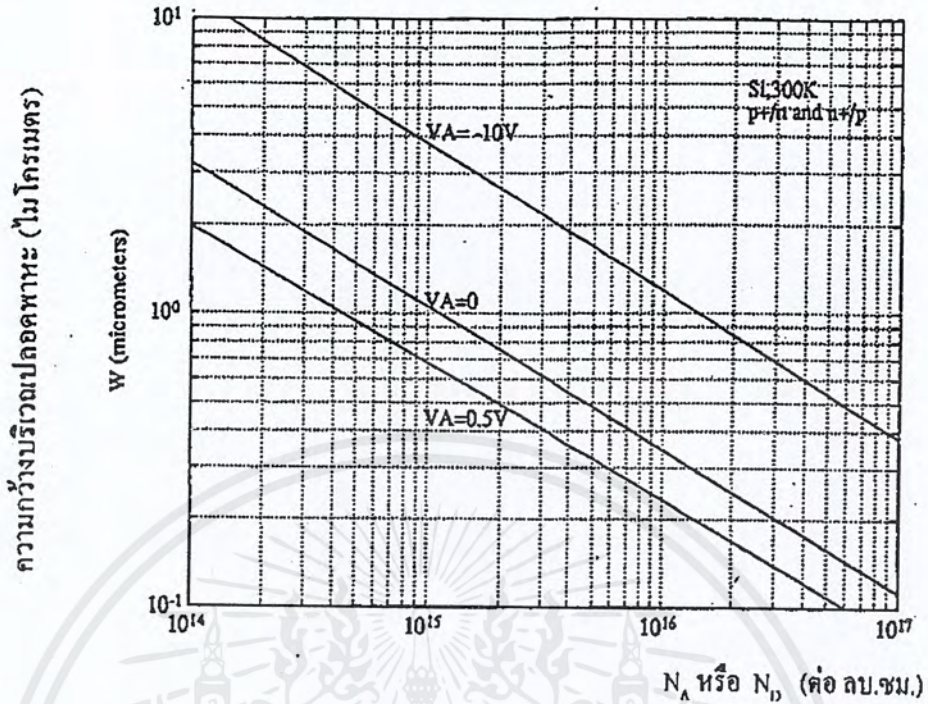
รูปที่ 2.23 การให้ไบอัสตรง V_A แก่รอยต่อพี-เอ็น

โดยการตั้งสมมติฐานและกำหนดให้ค่าความต้านทานในส่วนของเนื้อสารกึ่งตัวนำ ทั้งชนิดพีและชนิดเอ็น มีค่าน้อยมาก และเป็นกรณีของการฉีดระดับต่ำ (low level injection) ซึ่งหมายถึงกรณีที่กระแสมีค่าไม่สูงมาก ดังนั้น จึงพิจารณาได้ว่าไม่มีแรงดันตกคร่อมในส่วนของสารกึ่งตัวนำ ทั้งในด้านพีและด้านเอ็น รวมทั้งในเส้นลวดตัวนำ ดังนั้น ถ้าแรงเคลื่อนไฟฟ้าของแบตเตอรี่มีค่า V_A โวลต์ แรงดัน V_A ทั้งหมดนี้จะไปปรากฏที่บริเวณรอยต่อพี-เอ็น และมีทิศทางตรงกันข้ามกับศักย์ภายในที่รอยต่อ จึงทำให้เกิดการหักล้างของแรงดัน โดยศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อหรือกำแพงศักย์ ในขณะนี้มีค่าเป็น $V_{bi} - V_A$ นั่นคือ กำแพงศักย์จะมีขนาดลดลงจากเดิม หรืออีกนัยหนึ่งก็คือสนามไฟฟ้าเนื่องจากแรงดันไบอัสภายนอก มีทิศทางตรงกันข้ามกับสนามภายใน ทำให้สนามไฟฟ้าภายในรอยต่อมีขนาดลดลง ดังนั้น โสไลต์ส่วนหนึ่ง Δp จากด้านพี จึงสามารถฉีด (injection) ข้ามรอยต่อเข้าไปยังด้านเอ็น และอิเล็กตรอนส่วนหนึ่ง Δn จากด้านเอ็นก็สามารถฉีดข้ามรอยต่อ เข้าไปยังด้านพีได้โดยสะดวก ผลจากการที่มีพาหะเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อ จึงทำให้เกิดมีกระแสไฟฟ้าไหลในวงจรซึ่งเราเรียกว่า “กระแสตรง” (Forward current) ปริมาณของกระแสหาได้จากผลรวมของกระแสโฮลและอิเล็กตรอน และการที่สนามไฟฟ้าบริเวณรอยต่อลดลง จะทำให้ขนาดของความกว้างบริเวณรอยต่อลดพาหะลดลง หรือ ก็คือ การลดลงของประจุไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อนั่นเอง การเปลี่ยนแปลงความกว้างของบริเวณลดพาหะ สนามไฟฟ้า และ ศักย์ภายในบริเวณรอยต่อเนื่องจาก แรงดันไบอัสตรงแสดงดังในรูปที่ 2.24



รูป 2.24 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของความกว้างบริเวณปลอดพาหะประจุไฟฟ้า สนามไฟฟ้า และศักย์ภายในรอยต่อ ขณะที่ ก. แรงดันไบอัสเป็นศูนย์ ข. ได้รับไบอัสตรง V_A

การเปลี่ยนแปลงขนาดความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ (w) กับค่าความหนาแน่นของอะตอมสารเจือด้านที่มีค่าต่ำ ของรอยต่อ $p^+ - n$ หรือ $n^+ - p$ ในขณะที่ไม่มีแรงดันไบอัสและขณะได้รับไบอัสตรงแสดงการเปรียบเทียบได้ดังในรูปที่ 2.25



รูป 2.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของขนาดความกว้างของบริเวณปลอดพาหะกับค่าความหนาแน่นของอะตอมสารเจือในด้ายที่มีค่าต่ำ ของรอยต่อ $p^+ - n$ และ $n^+ - p$ ที่อุณหภูมิ 300 K ขณะไม่มีแรงดันไบอัสและได้รับแรงดันไบอัส 0.5 , -10 โวลต์

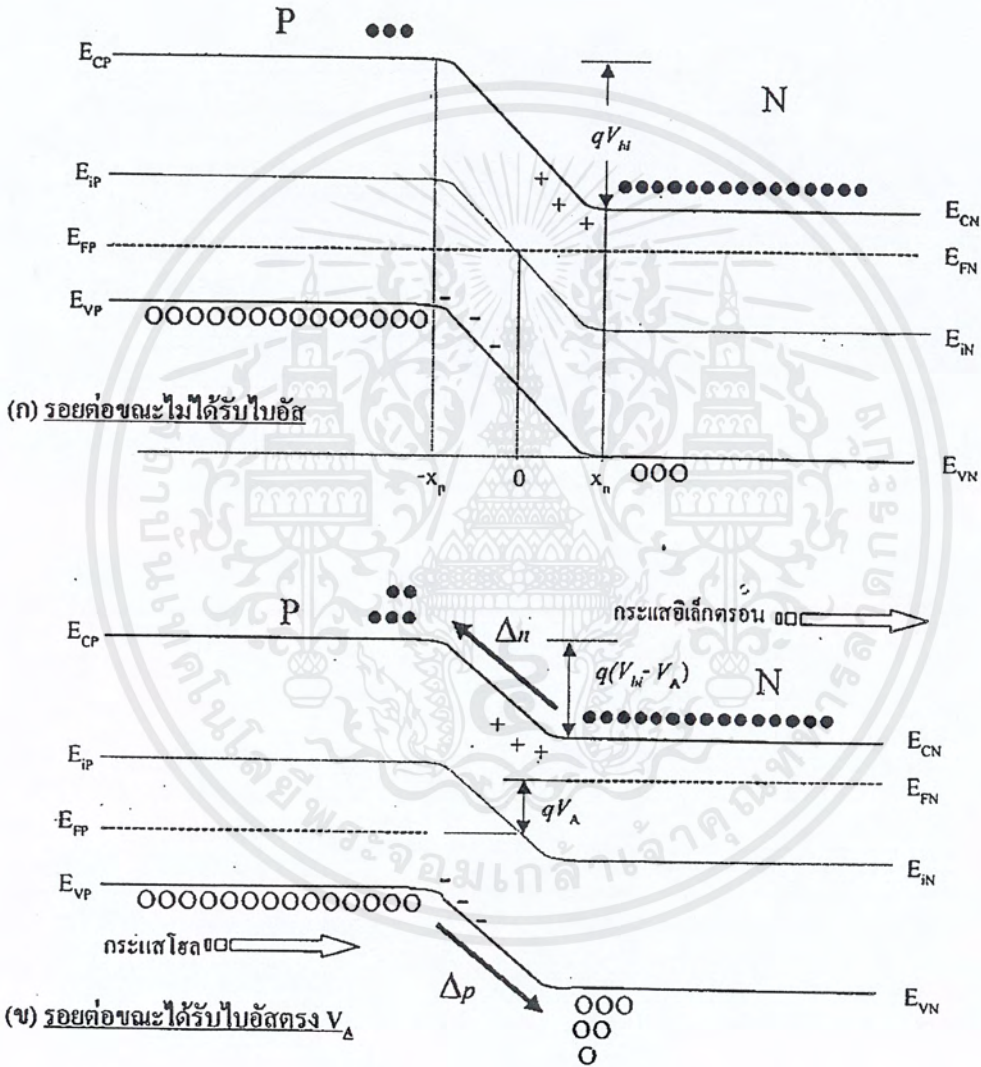
2.7.2 แถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็นในขณะได้รับไบอัสตรง

เนื่องจากรอยต่อพี-เอ็นได้รับแรงดันไบอัสตรง V_A จึงทำให้กำแพงศักย์ V_{bi} มีขนาดลดลงเป็น $(V_{bi} - V_A)$ ทำให้มีโฮลจากด้านพีและอิเล็กตรอนจากด้านเอ็น สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อได้ และเกิดเป็นกระแสไหลในวงจร ระดับพลังงานเฟอร์มิของด้านทั้งสอง ของรอยต่อพี-เอ็นขณะนี้จะมีความแตกต่างกันเท่ากับ $q \cdot V_A$ ดังแสดงในรูปที่ 2.26 ซึ่งขนาดของความชันของกราฟแถบพลังงานที่บริเวณปลอดพาหะในรูปที่ 2.30(ก) มีค่ามากกว่าในรูป 2.26(ข) การลดลงของความชันของกราฟนี้มีความหมายแสดงให้เห็นถึงการลดลงของสนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อ ในกรณีที่ได้รับไบอัสตรงนั่นเอง ความแตกต่างของระดับพลังงานต่างๆ ของด้านทั้งสองจะมีค่าเท่ากับ $q(V_{bi} - V_A)$ และเนื่องจากระดับเฟอร์มิของด้านทั้งสองของรอยต่อมีระดับต่างกัน พาหะอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จาก

ด้านเอ็น ข้ามกำแพงศักย์ (potential barrier) ที่รอยต่อ แล้วแพร่เข้าไปยังด้านพี ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากอิเล็กตรอน ไหลจากด้านพีไปด้านเอ็น ส่วนพาหะโฮลจะเคลื่อนที่จากด้านพีข้ามกำแพงศักย์ที่รอยต่อแล้วแพร่เข้าไปยังด้านเอ็น ทำให้มีกระแสไฟฟ้าเนื่องจาก โฮลไหลจากด้านพีไปยังด้านเอ็น ดังนั้นจะเห็นว่า มีกระแสไหลในวงจร โดยออกจากขั้วบวกของแบตเตอรี่เข้าด้านพี ผ่านรอยต่อออกมาทางด้านเอ็นไปยังขั้วลบ และกระแสไฟฟ้านี้เป็นผลรวมของกระแสที่เกิดจากอิเล็กตรอน J_n และ โฮล J_p



รูปที่ 2.26 ลักษณะแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็นขณะที่ (ก) ไม่มีแรงดันไบอัส และ(ข) ขณะที่ได้รับแรงดันไบอัสตรง V_A

2.7.4 สมการไดโอดในทางอุดมคติ(Ideal diode's equation)

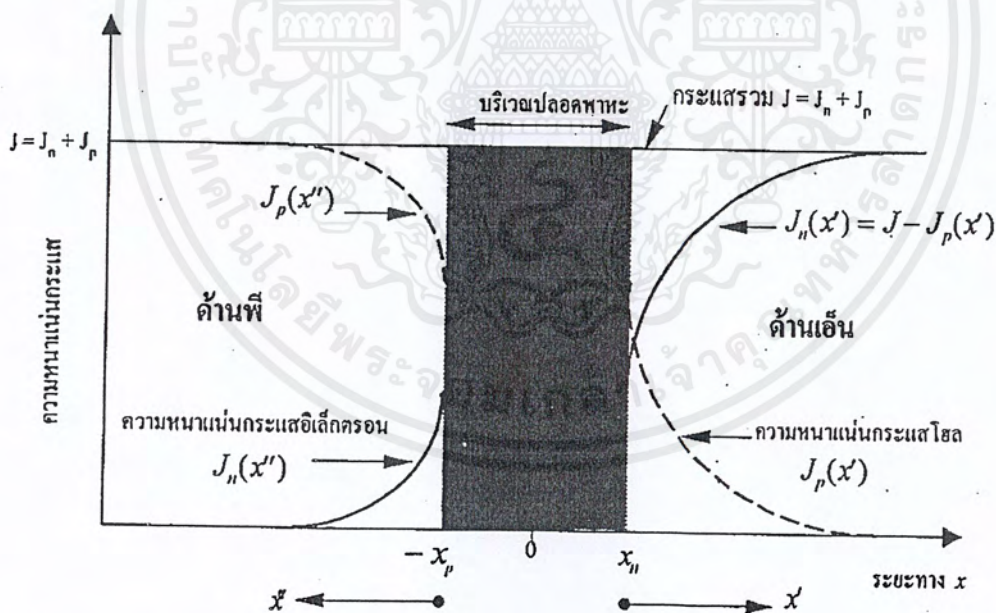
เนื่องจากการกระจายความหนาแน่นของพาหะอิเล็กตรอนและโฮล ซึ่งถูกฉีดข้ามรอยต่อเข้าไปยังด้านพีและเอ็น มีการกระจายอย่างไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นจะเกิดมีกระแสโฮลที่จุด x' ใดๆ ในส่วนของด้านเอ็น แสดงได้โดย

$$J_p(x_n = x_p) = J_p(x' = 0) = q \frac{D_p n_i^2}{L_p N_D} (e^{\frac{qV_{bi}}{kT}} - 1)$$

สำหรับกรณีอิเล็กตรอน ความหนาแน่นกระแสการแพร่ของอิเล็กตรอน ในด้านพีที่ตำแหน่ง x'' ใดๆ หาได้จาก

$$J_p(x'') = q \frac{D_n n_i^2}{L_n N_A} (e^{\frac{qV_{bi}}{kT}} - 1) e^{-\frac{x''}{L_n}}$$

การเปลี่ยนแปลงของกระแสโฮล และอิเล็กตรอนถูกนำมาเขียนแสดงได้ดังในรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 แสดงการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของกระแสอิเล็กตรอน J_n และโฮล J_p ที่ตำแหน่งต่างๆภายในไดโอด แบบรอยต่อพี-เอ็นและกระแสรวม ในขณะที่ได้รับแรงดันไบอัส

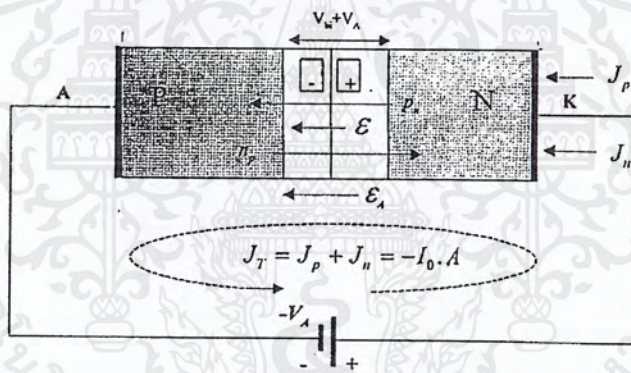
สมการที่เป็นสมการที่แสดงความสัมพันธ์ ระหว่างกระแส และแรงดันไบอัสของไดโอด แบบรอยต่อพี-เอ็น ถูกเรียกว่า “สมการไดโอดในอุดมคติ”(ideal diode's equation) และบางครั้งนิยมเรียกกันว่า “สมการของช็อกเคิลีย์”(Shockley's equation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 รอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ (Reverse biasing)

2.8.1 ปฏิกิริยาการที่รอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

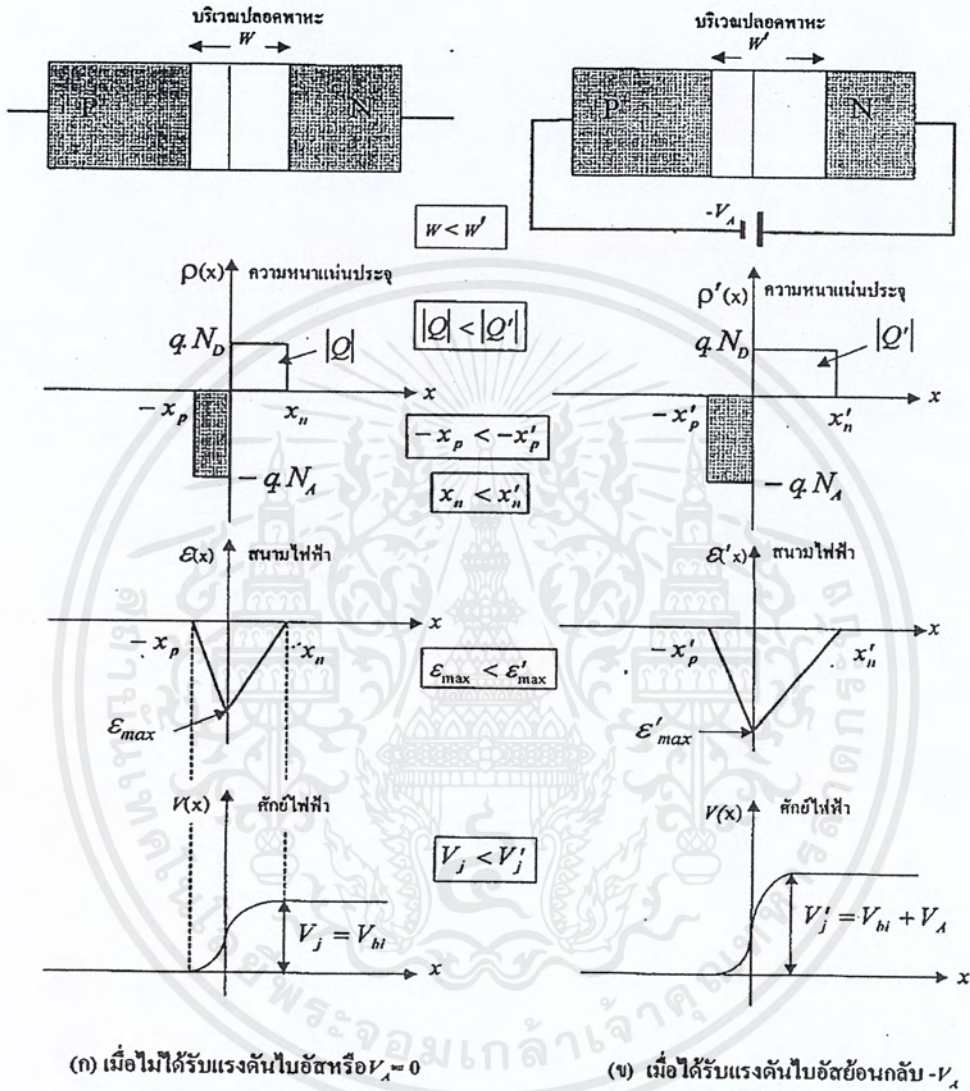
ในกรณีที่ให้แรงดันไบอัสแก่รอยต่อพี-เอ็น โดยที่ขั้วแอโนดหรือด้านพี มีศักย์เป็นลบเมื่อเทียบกับด้านแคโทดหรือด้านเอ็น ดังแสดงในรูปที่ 2.28 การให้ไบอัสลักษณะนี้ถูกเรียกว่า “ไบอัสย้อนกลับ” (Reverse biasing) ผลของแรงดันไบอัสย้อนกลับ ($-V_A$) จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่บริเวณรอยต่อ เช่นเดียวกับกรณีไบอัสตรง แต่กรณีนี้สนามไฟฟ้าจากแรงดันไบอัส ($-V_A$) จะมีทิศทางเดียวกัน กับสนามไฟฟ้าภายในของรอยต่อ ดังนั้น สนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อจึงมีค่าเพิ่มมากขึ้น โสลและอิเล็กตรอนที่อยู่ใกล้ๆกับขอบของบริเวณปลอดพาหะ จะถูกสนามไฟฟ้านี้พัดพาให้เคลื่อนที่ห่างออกไป จากรอยต่อมากยิ่งขึ้น จึงทำให้ความกว้างบริเวณปลอดพาหะขยายกว้างมากขึ้น และค่าแอมแปร์ที่รอยต่อจะมีค่าเพิ่มขึ้น ($V_{bi} + V_A$)



รูปที่ 2.28 ลักษณะการให้ไบอัสย้อนกลับ $-V_A$ แก่ไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็น

การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติต่างๆที่รอยต่อในขณะที่ได้รับไบอัสย้อนกลับ แสดงได้ดังในรูปที่ 2.28 การเพิ่มขึ้นของค่าแอมแปร์ที่รอยต่อ ทำให้โฮลจากด้านพี และอิเล็กตรอนจากด้านเอ็นไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อได้ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากในด้านพีและด้านเอ็นมีพาหะส่วนน้อยคือ n_p และ p_n ปรากฏอยู่ตามลำดับ ดังนั้นในลักษณะเช่นนี้ อิเล็กตรอน n_p จากด้านพี สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อเข้าทางด้านเอ็นได้ และโฮล p_n จากด้านเอ็นก็สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อเข้าไปทางพีได้จึงทำให้เกิดมีกระแสค่าหนึ่งที่มีขนาดน้อยๆ เพราะพาหะดังกล่าวนี้มีปริมาณน้อยมาก โสลผ่านรอยต่อโดยมีทิศทางตรงข้าม หรือย้อนกลับกับกระแสที่ไหลในกรณีไบอัสตรง กระแสที่ไหลนี้ พบว่ามีขนาดน้อยมาราว $10^{-6} - 10^{-15}$ แอมแปร์ (ขึ้นอยู่กับพื้นที่ของรอยต่อ) และมีค่าคงที่ ที่อุณหภูมิคงที่ค่า

หนึ่งๆ ดังนั้นจึงถูกเรียกว่า “กระแสอิ่มตัว”(Saturation Current) หรือ “กระแสอิ่มตัวย้อนกลับ”(Reverse-bias Saturation Current)



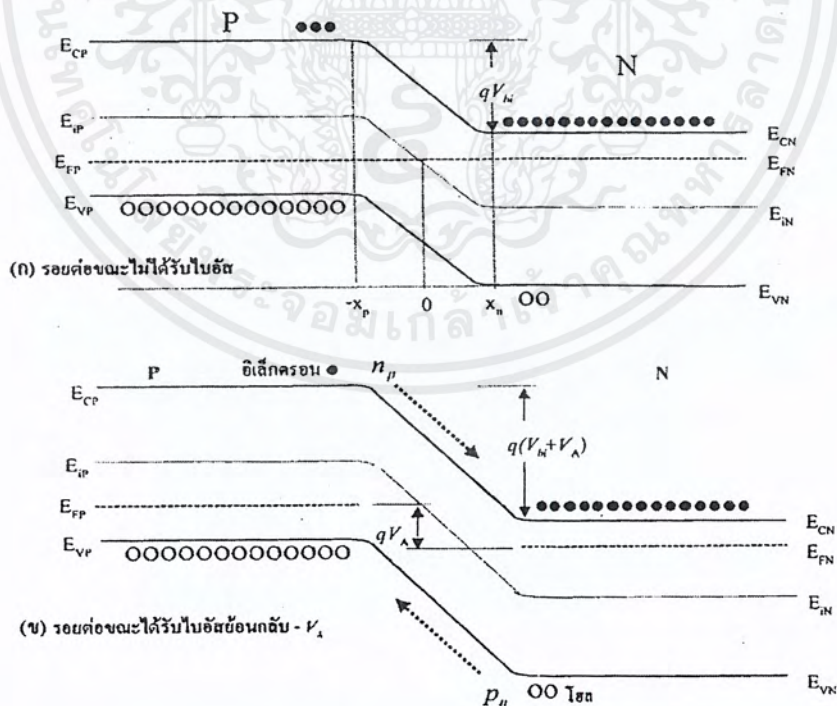
รูปที่ 2.29 เปรียบเทียบและแสดงการเปลี่ยนแปลงของความกว้างบริเวณปลอดพาหะ, ประจุไฟฟ้า, สนามไฟฟ้าและศักย์ภายในที่รอยต่อขณะ (ก) แรงดันไบอัสเป็นศูนย์ (ข) ได้รับไบอัสย้อนกลับ $-V_A$

ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะของรอยต่อในขณะที่ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ คำนวณได้จากสมการ(W)ของไบอัสตรงแต่แทนค่าแรงดันที่รอยต่อ V_{bi} ด้วยค่า $(V_{bi} + V_A)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.2 แถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ

แถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับแสดงได้ดังในรูปที่ 2.30 (ข) เนื่องจากรอยต่อพี-เอ็น ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ $-V_A$ จึงทำให้กำแพงศักย์ที่รอยต่อเพิ่มขึ้นเป็น $V_{bi} + V_A$ ดังนั้นอิเล็กตรอนในด้ายเอ็นและโฮลในด้ายพีจะไม่สามารถเคลื่อนข้ามรอยต่อได้นอกจากนี้โฮลในด้ายพีและอิเล็กตรอนในด้ายเอ็นบริเวณรอยต่อ จะถูกสนามไฟฟ้าภายใน ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นนี้ ผลักให้เคลื่อนห่างออกไปจากรอยต่อมากขึ้น บริเวณปลอดพาหะจึงมีการขยายกว้างมากขึ้น ระดับพลังงานเฟอร์มิของด้ายเอ็นและด้ายพีของรอยต่อ จะมีขนาดแตกต่างกันเท่ากับ qV_A โดยที่ระดับเฟอร์มิด้ายพีสูงกว่าระดับเฟอร์มิด้ายเอ็น ดังแสดงในรูปที่ 2.30(ข) สนามไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นที่บริเวณปลอดพาหะ สามารถสังเกตเห็นได้จากความชันของแถบพลังงานซึ่งเพิ่มขึ้นที่บริเวณปลอดพาหะ แม้ว่าพาหะส่วนมากจากด้ายทั้งสอง สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อได้ แต่พาหะส่วนน้อยจากด้ายทั้งสอง คืออิเล็กตรอนจากด้ายพี (n_p) และโฮลจากด้ายเอ็น (p_n) บริเวณใกล้ๆ กับย่านปลอดพาหะ สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อไปยังด้ายตรงข้ามได้ ดังในรูปที่ 2.30(ข) และทำให้เกิด “กระแสอิ่มตัว”(saturation current : I_0) ไหลผ่านรอยต่อได้



รูปที่ 2.30 ลักษณะแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็น ในกรณีที่ (ก) ไม่มีแรงดันไบอัสใดๆ และ(ข) ขณะที่ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ- V_A

2.8.3 การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของพาหะส่วนน้อยบริเวณรอยต่อ

ในขณะที่รอยต่อพี-เอ็นได้แรงดันไบอัสย้อนกลับ $-V_A$ โหมดทางด้านเอ็น และอิเล็กตรอนทางด้านพีจะเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อ ทำให้ความหนาแน่นของพาหะส่วนน้อยที่ด้านทั้งสองของรอยต่อพี-เอ็นมีค่าลดลงจากภาวะสมดุล ดังแสดงในรูปที่ 2.31(ข) จากสมการ 2.7 กฎของรอยต่อ ความหนาแน่นของโฮลที่ตำแหน่ง x_n ในด้านเอ็นคือ

$$p_{(xn)} = p_{n0} \cdot e^{qV_A/kT} \quad (2.7)$$

เมื่อแทนค่า แรงดันไบอัสด้วย $-V_A$ จะได้สมการ 2.8 ว่า

$$p_{(xn)} = p_{n0} \cdot e^{q \cdot (-V_A)/kT} \quad (2.8)$$

ดังนั้นปริมาณโฮล ในส่วนที่ลดลง ที่ตำแหน่ง x_n จะได้สมการ 2.9 ว่า

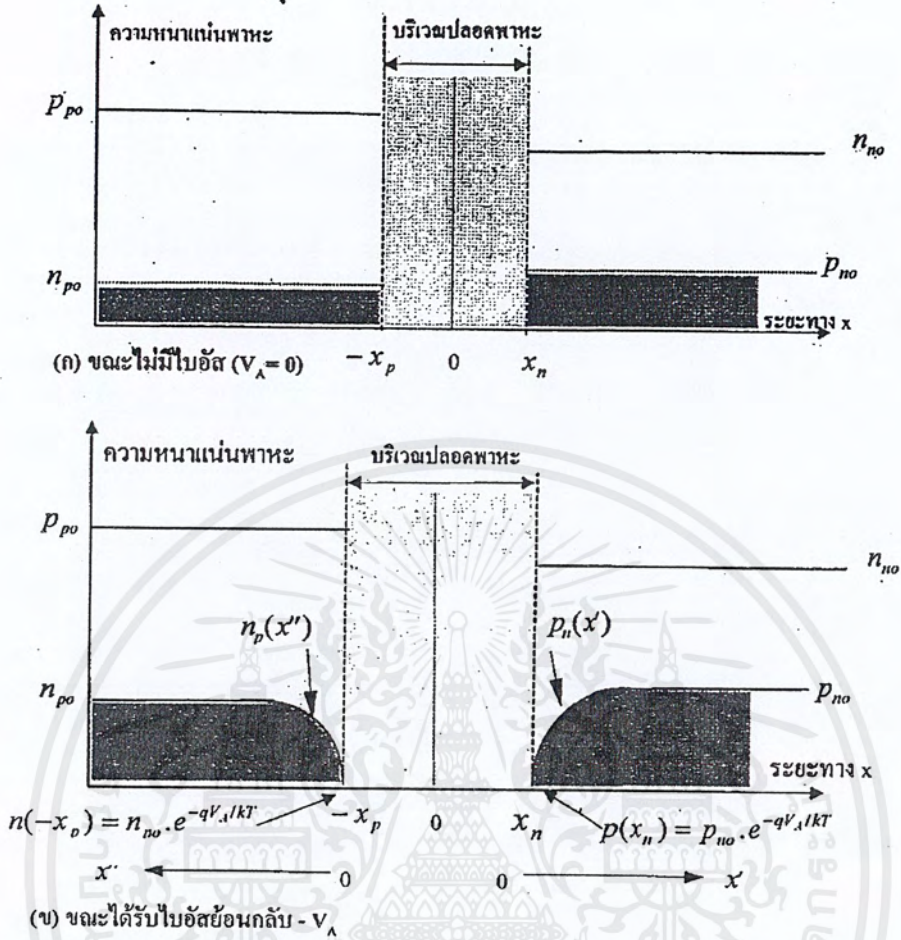
$$\Delta p_{(xn)} = p_{n0} \cdot (e^{q \cdot (-V_A)/kT} - 1) \quad (2.9)$$

และทำนองเดียวกัน ในกรณีของอิเล็กตรอน ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่ตำแหน่ง $-x_p$ ในด้านพี สมการ 2.10 คือ

$$n_{(-xp)} = n_{p0} \cdot e^{q \cdot (-V_A)/kT} \quad (2.10)$$

และปริมาณของอิเล็กตรอนในส่วนที่ลดลงที่ตำแหน่ง $-x_p$ จะได้สมการ 2.11

$$\Delta n_{(-xp)} = n_{p0} \cdot e^{q \cdot (-V_A)/kT} - 1 \quad (2.11)$$



รูปที่ 2.31 การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของพาหะส่วนน้อยที่ด้านทั้งสองของรอยต่อ (ก) ขณะอยู่ในภาวะสมดุล (ข) ขณะที่ได้รับไบอัสย้อนกลับ $-V_A$

2.8.4 กระแสมัดตัวย้อนกลับ (Reverse bias saturation current)

ในขณะที่รอยต่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ $-V_A$ สมการ 2.12 กระแสที่ไหลผ่านไดโอดอาจพิจารณาได้จากสมการไดโอดในอุดมคติ โดยแทนค่า V_A ด้วย $-V_A$ จะได้ว่า

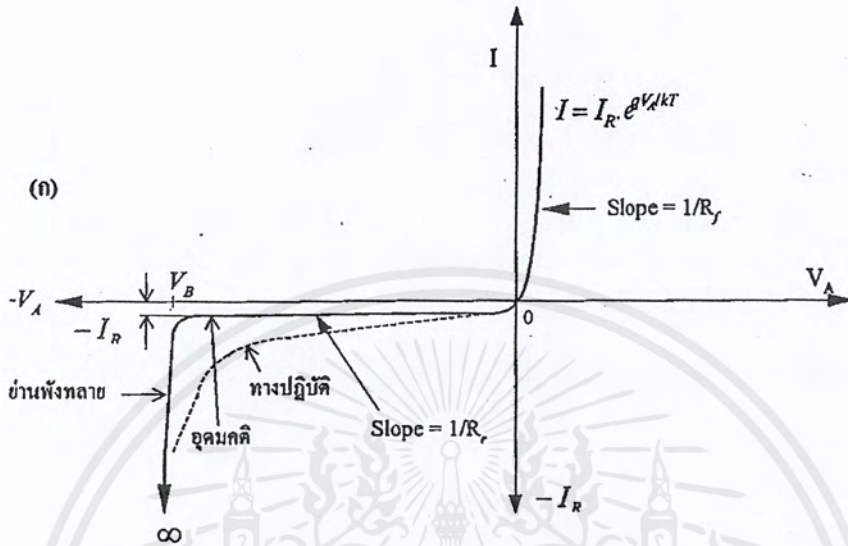
$$I_R = I_0 \cdot (e^{-qV_A/kT} - 1) \tag{2.12}$$

ที่แรงดัน $-V_A$ ค่าสูงๆ เทอมของ $e^{-qV_A/kT}$ จะมีค่าน้อยกว่า 1 มากๆ ดังนั้นสมการ 2.13

$$I_R = -qA \cdot n_i^2 (D_n/L_n p_p) \tag{2.13}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการของไดโอดในทางอุดมคติ ตามสมการของ I และ I_R ถูกนำมาเขียนเป็นกราฟแสดงคุณลักษณะ ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันได้ดังในรูปที่ 2.32



รูปที่ 2.32 (ก) กราฟและ (ข) ภาพถ่ายซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็น ในขณะที่ได้รับไบอัสตรงและไบอัสย้อนกลับ

จะเห็นว่ารอยต่อพี-เอ็นจะยอมให้กระแสไหลผ่านได้ดี ขณะที่ได้รับแรงดันไบอัสตรง และกระแสจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วกับแรงดันไบอัสตรง อย่างเอ็กซ์โปเนนเชียล ความต้านทานของไดโอดแบบรอยต่อในกรณีนี้จะมีค่าน้อยมาก และถูกเรียกว่า “ความต้านทานไฟตรง” (forward biased resistance : R_f) ซึ่งสังเกตได้จากความชันของกราฟที่มีค่าสูงมาก โดยที่ความชันของกราฟเท่ากับส่วนกลับของค่าความต้านทาน แต่เมื่ออยู่ในภาวะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ รอยต่อจะกลับมีค่าความต้านทานสูงมากๆ และถูกเรียกว่า “ความต้านทานไบอัสย้อนกลับ” (Reverse biased resistance : R_r) สังเกตได้ว่ากราฟในช่วงนี้จะมีค่าความชันน้อยมากๆ กระแสที่ไหลขณะนี้เป็นกระแสอิมิตัว ประมาณว่าคงที่ และมีขนาดค่าน้อยๆ ซึ่งคุณลักษณะ ของกราฟ I-V ดังในรูปที่ 2.32 นี้ถูกเรียกว่า คุณสมบัติ “เรกติไฟร์” (Rectifier) ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานต่างๆ ได้เป็นอย่างดี

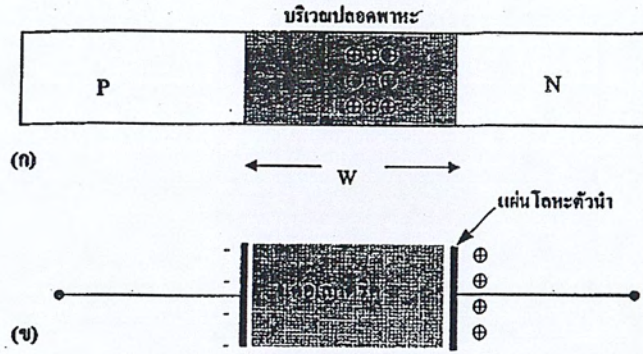
2.9 ความจุไฟฟ้าของไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็น (Capacitance of the p-n junction diode)

ไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น สามารถแสดงคุณสมบัติ เป็นตัวเก็บประจุ(capacitor) ได้โดยจะทำให้เกิด ความจุไฟฟ้า(capacitance) ได้ 2 แบบ ซึ่งแตกต่างกัน ได้แก่ ความจุไฟฟ้าจากรอยต่อ(junction capacitance : C_j) และความจุไฟฟ้าจากการแพร่ซึม(diffusion capacitance : C_D) เนื่องจากความกว้างของบริเวณปลอดพาหะจะเปลี่ยนแปลงตามแรงดันไบอัสที่ได้รับ ดังนั้นความจุไฟฟ้าจากรอยต่อจึงเปลี่ยนแปลงตามแรงดันไบอัส

2.9.1 ความจุไฟฟ้าเนื่องจากรอยต่อ (C_j)หรือความจุไฟฟ้าทรานซิชัน(C_T)(Junction or Transition capacitance)

ที่บริเวณรอยต่อพี-เอ็นแบบชั้นบันได ในภาวะสมดุลจะเห็นว่า บริเวณปลอดพาหะ หรือบางที่เรียกว่า “บริเวณทรานซิชัน” (Transition-region) จะประกอบด้วย ประจุไฟฟ้าบวก ที่เกิดจากไอออนบวกของอะตอมผู้ให้ และไอออนลบ ของอะตอมผู้รับ ซึ่งย่านนี้มีความกว้างเท่ากับ W และมีสภาพคล้ายกับสารไดอิเล็กตริก(dielectric) ทำหน้าที่แยกด้านเอ็นและด้านพีของไดโอด ออกจากกัน จึงถูกพิจารณาว่ามีโครงสร้างที่เหมือนกับ ตัวเก็บประจุไฟฟ้าแบบแผ่น โลหะที่ขนานกัน(parallel plate capacitor) จะต่างกันก็เฉพาะกรณีของไดโอดประจุไฟฟ้าจะกระจายอยู่ทั่วไป ในบริเวณปลอดพาหะ ดังรูปที่ 2.33(ก) แต่กรณีของตัวเก็บประจุแบบแผ่นโลหะ ประจุไฟฟ้าจะปรากฏเฉพาะที่แผ่นโลหะทั้งสองเท่านั้น ในส่วนของสารไดอิเล็กตริก จะไม่มีประจุไฟฟ้างในรูปที่ 2.33(ข)

ดังนั้นที่รอยต่อพี-เอ็นนี้จึงมีคุณสมบัติเป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้าได้ และค่าความจุไฟฟ้า ที่เกิดขึ้นนี้ถูกเรียกว่า “ความจุไฟฟ้าที่รอยต่อ” (junction capacitance : C_j) หรือ “ความจุไฟฟ้าทรานซิชัน” (Transition barrier capacitance)



รูปที่ 2.33 (ก) โครงสร้างบริเวณรอยต่อพี-เอ็น และ (ข) โครงสร้างของตัวเก็บประจุไฟฟ้าแบบแผ่นโลหะขนาน

นอกจากนี้แล้ว การวิเคราะห์หาค่าความจุไฟฟ้าจากรอยต่อของไดโอด อาจทำได้อย่างง่าย โดยพิจารณาว่าที่บริเวณรอยต่อของไดโอด มีลักษณะโครงสร้างคล้ายกับ โครงสร้างของตัวเก็บประจุไฟฟ้าแบบแผ่นโลหะขนาน(parallel metal plates) ดังนั้นจะได้สมการ 2.13 ว่า

$$C_j = \epsilon \cdot A / W \quad (2.13)$$

เมื่อ C_j คือ ความจุไฟฟ้าจากรอยต่อพี-เอ็น

ϵ คือ ค่าเปอร์มิตติวิตีของสารกึ่งตัวนำ

A คือ พื้นที่ของรอยต่อพี-เอ็น

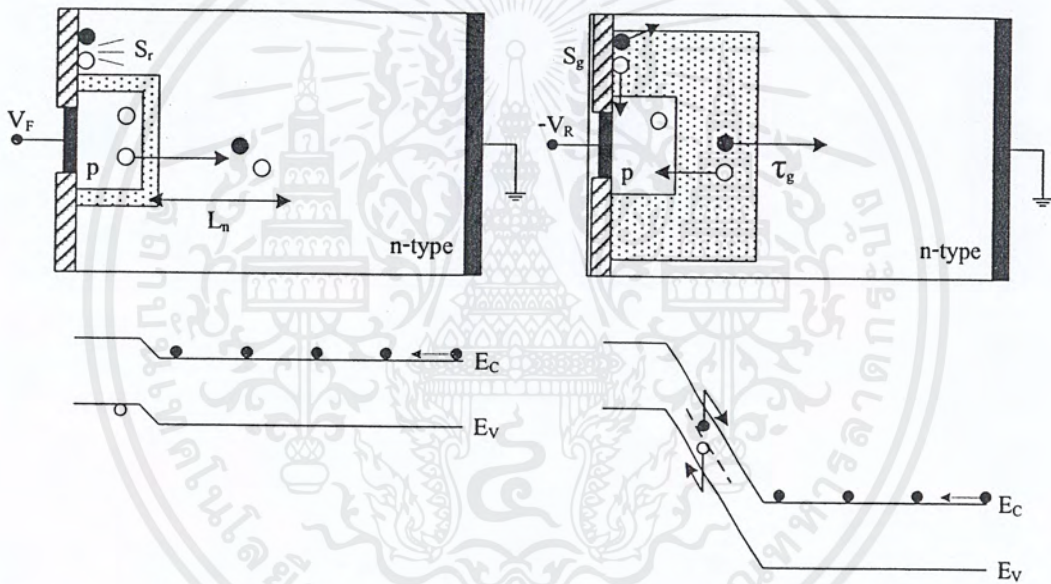
W คือ ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ

สำหรับรอยต่อชนิด step junction หาได้จากสมการ 2.14

$$C_j = A \left[\frac{q\epsilon}{2} \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} \frac{1}{(V_{bi} \pm V_A)} \right]^{1/2} \quad (2.14)$$

2.10 อายุพาหะ (Carrier lifetime)

อายุพาหะสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ [7] คือ อายุการรวมตัว (recombination lifetime: τ_r) และ อายุการเกิด (generation lifetime: τ_g) โดยอายุการรวมตัวจะพิจารณาเมื่อพาหะส่วนเกินค่อยๆ ลดลงจากผลของการรวมตัว และอายุการเกิดจะถูกพิจารณาเมื่อพาหะจำนวนเล็กน้อยในบริเวณปลอดพาหะขณะอุปกรณ์ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ และอุปกรณ์พยายามปรับเข้าสู่ภาวะสมดุล และในระหว่างการรวมตัวกันของกลุ่มพาหะอิเล็กตรอน-โฮลหลังจากเลยช่วงเวลาเฉลี่ยการรวมตัว แสดงดังรูปที่ 2.34(ก) ทำนองเดียวกันกับอายุการเกิดซึ่งเป็นเวลาเฉลี่ยที่กลุ่มพาหะอิเล็กตรอน-โฮลเกิด แสดงดังรูปที่ 2.34(ข)



รูปที่ 2.34 กลไกการรวมตัว-การเกิดของรอยต่อพี-เอ็น (ก) ขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง และ (ข) ขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

ในกรณีขณะให้แรงดันไบอัสย้อนกลับ กระแสอิ่มตัว (saturation current: I_0) นั้นจะประกอบไปด้วย กระแสที่เกิดจากการแพร่ (I_d) และกระแสที่เกิดในบริเวณปลอดพาหะ (I_g) อายุการเกิดของพาหะสัมพันธ์กับกระแส I_g ดังนั้นการพิจารณาอายุการเกิดของพาหะจึงเป็นไปตามความสัมพันธ์ ซึ่งได้มาจากสมการ 2.15

$$I_0 = I_d + \frac{qn_i W}{\tau_g} \quad (2.15)$$

หรือเขียนใหม่ได้สมการ 2.16 ว่า

$$\tau_g = \frac{qn_i W A}{(I_0 - I_d)} \quad (2.16)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

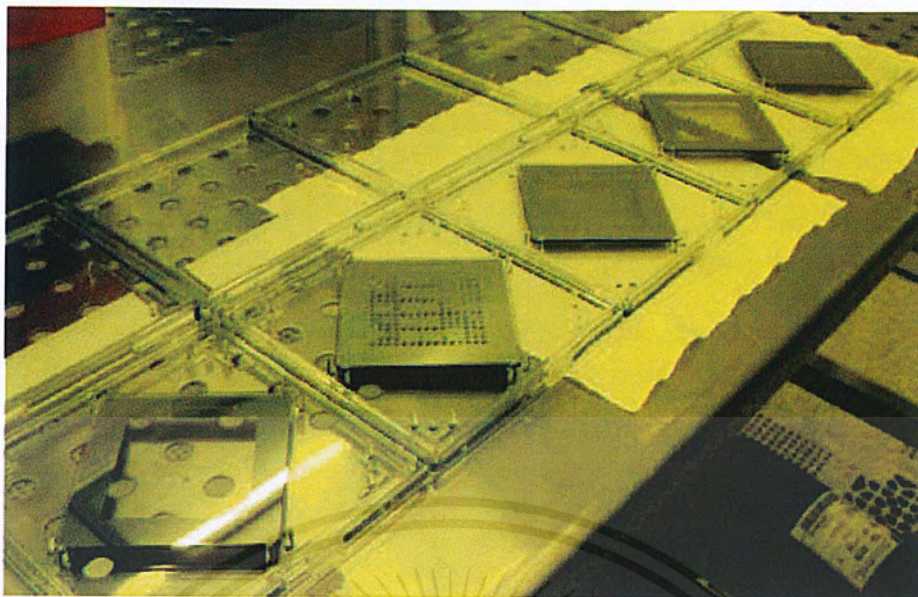
การออกแบบและกระบวนการสร้าง

การสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำทุกชนิดนั้นการออกแบบ (layout design) และการสร้างมาสก์ (mask) เป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากรูปร่าง ขนาด และฟังก์ชันการทำงานของอุปกรณ์ทั้งหมดจะถูกกำหนดด้วยการออกแบบ จากนั้นลวดลายที่ต้องการจะถูกนำมาถ่ายทอดลงบนมาสก์ และใช้มาสก์เป็นต้นแบบในการสร้างลวดลายบนอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ ในบทนี้จะกล่าวถึงเทคโนโลยีที่ใช้ในการสร้างตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์รอยต่อพี-เอ็น การออกแบบลวดลายต่างๆและกระบวนการสร้างตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์รอยต่อพี-เอ็น

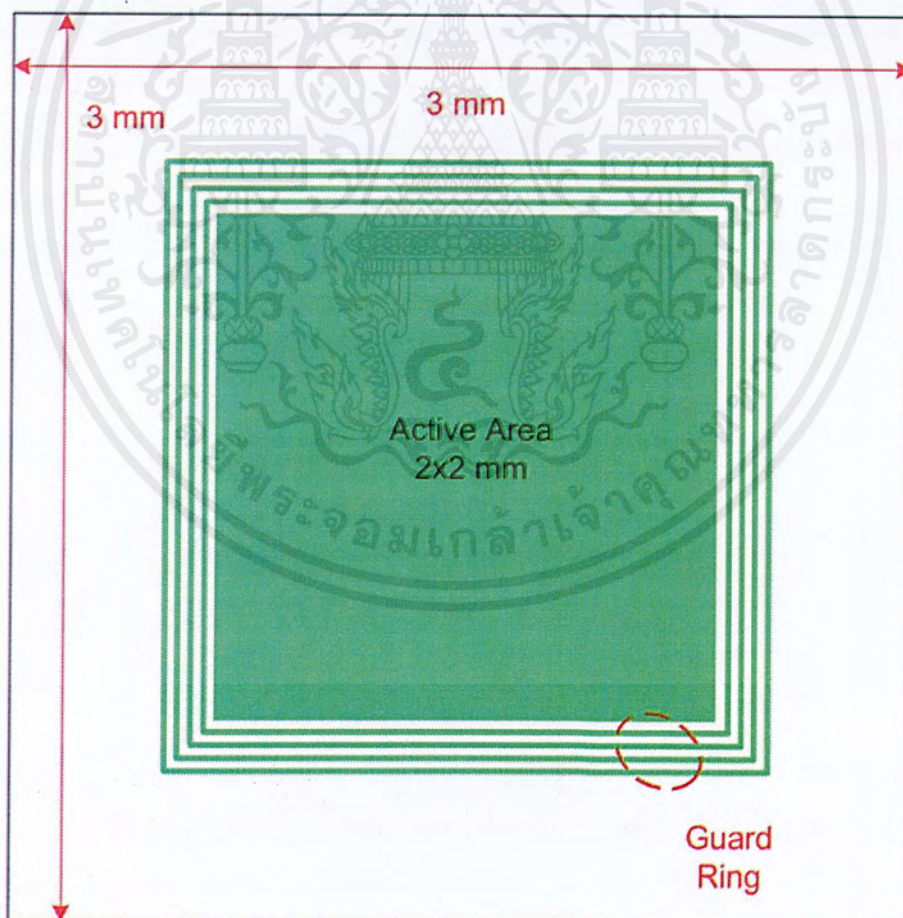
3.1 ขั้นตอนการสร้างมาสก์(Mask Fabrication)

เมื่อทำการออกแบบลวดลายเป็นที่เรียบร้อยแล้ว จากนั้นนำลวดลายมาทำการสร้างมาสก์ ขั้นตอนการสร้างมาสก์มีดังนี้

- 1) เตรียมแผ่นกระจกควอตซ์ที่มีชั้นโครเมียมอยู่ด้านบน จากนั้นเคลือบน้ำยาช่วยประสาน HexaMethylDiSilazane (HMDS) เพื่อให้หน้ายาไวแสงติดกับโครเมียมได้ดี
- 2) ทำการเคลือบน้ำยาไวแสง แล้วอบความร้อนด้วยอุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 100 วินาที
- 3) ทำการเขียนลวดลายที่ออกแบบไว้ในขั้นตอนที่ 1) ด้วยเครื่องเขียนกระจกมาสก์ด้วยเลเซอร์ (Direct Write Laser: DWL)
- 4) ทำการลอกน้ำยาไวแสงออกด้วยน้ำยาล้างฟิล์มไวแสง (developer) แล้วอบอีกครั้งด้วยอุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 1.30 นาที จากนั้นทำการกัดโครเมียม แล้วลอกน้ำยาไวแสงและปิ่นแห้ง
- 5) ทำการวัดขนาดลวดลายด้วยเครื่องมือต่างๆ เช่น Spectrophotometer, Microscope และ FESEM เป็นต้น เป็นอันเสร็จกระบวนการสร้างมาสก์และจะได้กระจกมาสก์ที่มีลวดลายตามที่ออกแบบไว้ ซึ่งต้องสร้างกระจกมาสก์ทั้งหมด 5 แผ่น กระจกมาสก์ทั้งหมดแสดงดังรูปที่ 3.1 และลวดลายของไดโอรอยต่อพี-เอ็นแสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 กระจกมาสค์ทั้ง 5 ชั้น



รูปที่ 3.2 ลวดลายตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ซึ่งมีโครงสร้างรอยต่อพี-เอ็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 กระบวนการสร้างไดโอดรอยต่อพี-เอ็น

เมื่อทำการสร้างกระจกมาส์กต้นแบบเป็นที่เรียบร้อยแล้ว จากนั้นทำการสร้างไดโอดรอยต่อพี-เอ็นบนฐานรองซิลิคอนชนิดเอ็นที่มีระนาบ (111) สภาพด้านทาน $120 \Omega\text{-cm}$ และมีความหนา $300 \mu\text{m}$ โดยขั้นตอนกระบวนการสร้างมีดังนี้

- 1) นำแผ่นผลึกซิลิคอนมาทำความสะอาดด้วยสารเคมี
- 2) ทำการสร้างลวดลายชั้นที่ 1 ด้วยมาส์กที่ 1 ด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (photolithography)
- 3) ทำการกัดแผ่นซิลิคอนแบบแห้ง (dry etching) เพื่อทำเป็นชั้น Alignment Mark Layer จากนั้นทำการลอกน้ำยาไวแสงออกด้วยการ strip resist
- 4) สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์หนา 250 \AA จำนวน 2 ครั้ง เพื่อเป็นชั้น sacrificial (SAC) oxide และเป็นชั้นช่วยลดความเสียหายบริเวณผิวหน้าแผ่นในการยิงฝังประจุ (implantation)
- 5) ทำการสร้างรอยต่อสัมผัสโอมิก (ohmic contact) ด้วยการยิงฝังประจุฟอสฟอรัส (P) ด้วยพลังงาน 120 keV ปริมาณสารเจือเท่ากับ $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ ที่ด้านหลังของแผ่นซึ่งจะเป็นขั้วแคโทด (cathode) ต่อไป
- 6) ทำการสร้างลวดลายชั้นที่ 2 ด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี และทำการยิงฝังประจุโบรอน (B) ด้วยพลังงาน 120 keV ปริมาณสารเจือเท่ากับ $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ เพื่อสร้างรอยต่อพี-เอ็นและ FFR
- 7) ลอกน้ำยาไวแสงด้วยการ strip resist และทำความสะอาดด้วยสารเคมี จากนั้นทำการแอนนัล (anneal) ด้วยอุณหภูมิ 1050°C เป็นเวลา 600 นาที
- 8) ทำการลอกชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ออกด้วยกระบวนการกัดแบบเปียก (wet etching)
- 9) ทำการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ใหม่ โดยสร้าง dry oxide หนา 250 \AA และใช้เทคนิค PECVD สร้างซิลิคอนไดออกไซด์หนา 20000 \AA
- 10) ทำการสร้างลวดลายชั้นที่ 3 ด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีเพื่อสร้างรอยต่อสัมผัสระหว่างสารกึ่งตัวนำชนิดพีกับโลหะ ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนด (anode) ต่อไป
- 11) กัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์หนาประมาณ 20250 \AA ออกแล้วทำการลอกน้ำยาไวแสงโดยการ strip resist
- 12) ทำการสร้างชั้นโลหะที่ด้านหน้าและด้านหลังหนา 10000 \AA
- 13) ทำการสร้างลวดลายชั้นที่ 4 ด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีเพื่อทำการกัดชั้นโลหะ
- 14) กัดชั้นโลหะออก แล้วทำการลอกชั้นน้ำยาไวแสงด้วยสารเคมี ด้วยการ strip resist
- 15) สร้างชั้นกันความชื้น ด้วยชั้นซิลิคอนไดออกไซด์และซิลิคอนไนไตรด์หนา 5000 \AA และ 10000 \AA ตามลำดับ
- 16) ทำการสร้างลวดลายชั้นที่ 5 ด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี เพื่อกัดชั้นกันความชื้น

- 17) กัดชั้นซิลิคอนไนไตรด์และซิลิคอนไดออกไซด์ตามลำดับและทำการตัดแบ่งให้เป็นไดโอดแต่ละตัว
- 18) ทำความสะอาดด้วยสารเคมีและน้ำบริสุทธิ์ (DI water) เป็นอันเสร็จสิ้นกระบวนการสร้างไดโอดรอยต่อพี-เอ็น

สรุปกระบวนการสร้างไดโอดรอยต่อพี-เอ็นเพื่อเป็นตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ได้ดังนี้



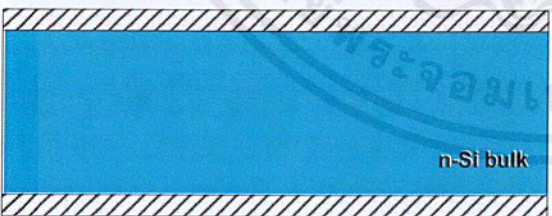
ทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น



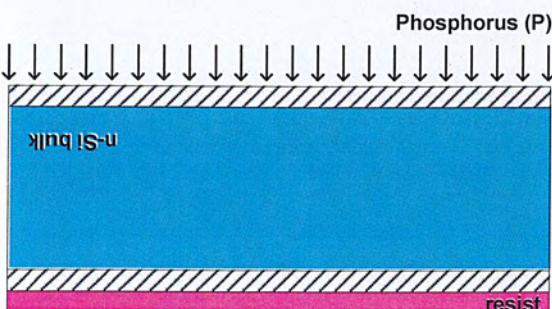
กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีมาสก์ที่ 1 เพื่อสร้าง Alignment Mark Layer



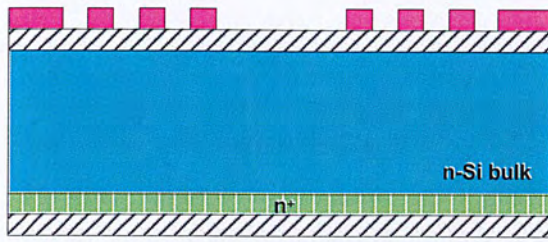
กัดแผ่นซิลิคอนแบบแห้ง (dry etching) และทำการลอกน้ำยาไวแสงออกด้วยการ strip resist



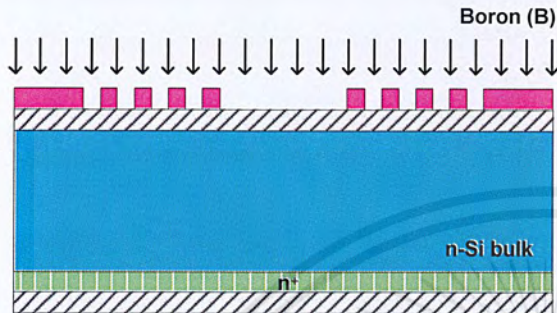
สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์หนา 250 Å จำนวน 2 ครั้ง



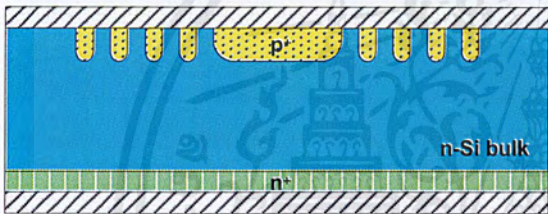
ยิงฟุ้งประจุฟอสฟอรัส (P) ด้วยพลังงาน 120 keV ปริมาณสารเจือเท่ากับ $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ ที่ด้านหลังแผ่นซิลิคอน



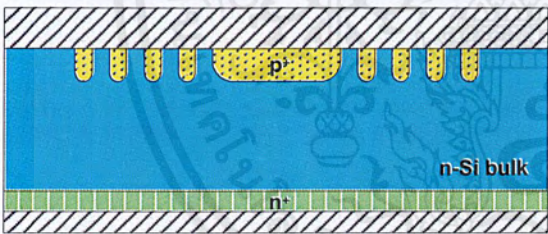
กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีมาส์คที่ 2 เพื่อสร้างรอยต่อพี-เอ็นและ FFR



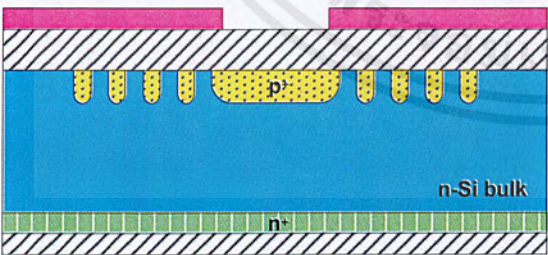
ยิงฝังประจุโบรอน (B) ด้วยพลังงาน 120 keV ปริมาณสารเจือเท่ากับ $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$



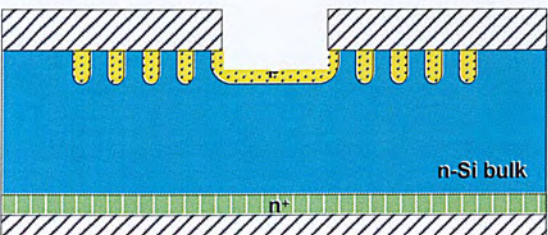
ลอกน้ำยาไวแสงด้วยการ strip resist และทำการแอนนีสล (anneal) ด้วยอุณหภูมิ 1050°C เป็นเวลา 600 นาที



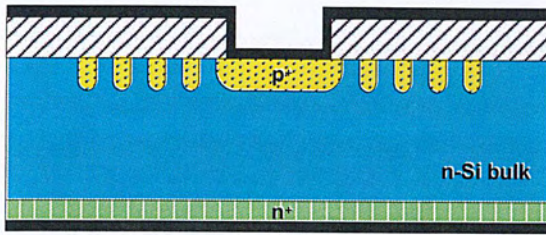
ลอกชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ออกไซด์ออกด้วยกระบวนการกัดแบบเปียก (wet etching) และสร้าง dry oxide หนา 250 Å และใช้เทคนิค PECVD สร้างซิลิคอนไดออกไซด์หนา 20000 Å



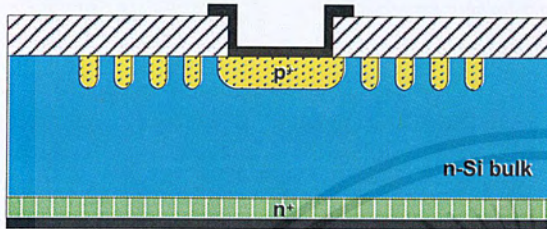
กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีมาส์คที่ 3 เพื่อสร้างขั้วโลหะ



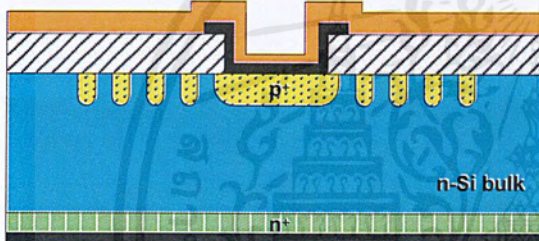
กัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ออกไซด์หนาประมาณ 20250 Å ออก แล้วทำการลอกน้ำยาไวแสงโดยการ strip resist



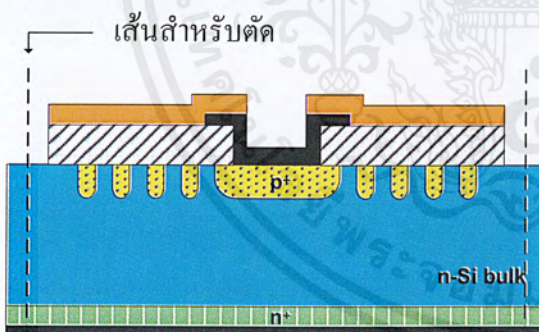
สร้างชั้นโลหะที่ด้านหน้าและด้านหลังหนา 10000 Å



กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีมาส์คที่ 4 เพื่อทำการกัดชั้นโลหะและกัดชั้นโลหะ



สร้างชั้นกันความชื้น ด้วยชั้นซิลิคอนไดออกไซด์และซิลิคอนไนไตรด์หนา 5000 Å และ 10000 Å ตามลำดับ



กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีมาส์คที่ 5 เพื่อกัดชั้นกันความชื้น และกัดชั้นซิลิคอนไนไตรด์และซิลิคอนไดออกไซด์ตามลำดับและทำการตัดแบ่งให้เป็นไดโอดแต่ละตัว

บทที่ 4

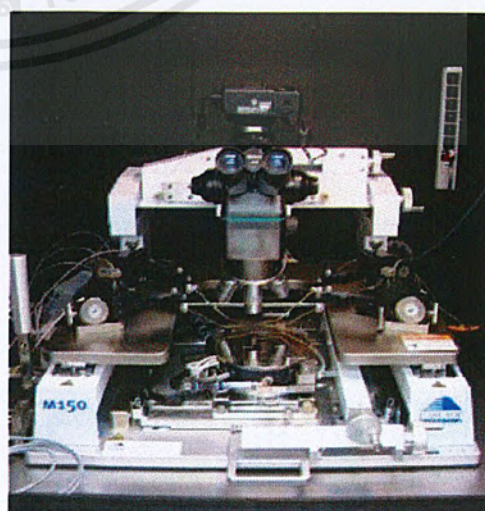
การทดลอง ผลการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลอง

โครงการวิจัยนี้มุ่งหวังศึกษาและวิเคราะห์ผลกระทบของรังสีเอ็กซ์ที่มีต่อไดโอดรอยต่อพี-เอ็น เพื่อที่จะปรับปรุงและพัฒนาประสิทธิภาพของตัวตรวจจذبรังสีเอ็กซ์ซึ่งมีโครงสร้างรอยต่อพี-เอ็น โดยจะทำการเปรียบเทียบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันและความจุไฟฟ้าแรงดันก่อนและหลังการฉายรังสีเอ็กซ์แบบโดยตรง ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการทดสอบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า, ขั้นตอนการทดลอง, และเงื่อนไขการฉายรังสีเอ็กซ์

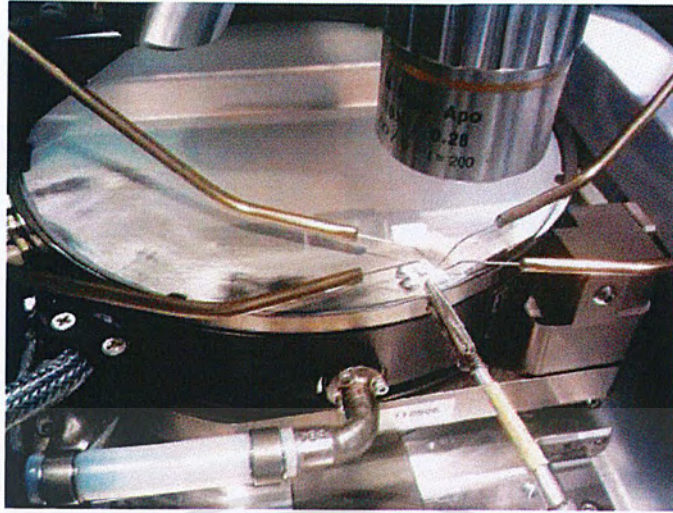
4.1 การทดลอง

4.1.1 การทดสอบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดรอยต่อพี-เอ็น

หลังจากทำการสร้างไดโอดรอยต่อพี-เอ็นเป็นภายในห้องสะอาดเป็นที่เรียบร้อยแล้ว นำไดโอดมาตัดแบ่งให้เป็นแต่ละตัว จากนั้น ไดโอดทุกตัวถูกวัดคุณลักษณะทางไฟฟ้าอัน ด้วยเครื่อง Cascade Microtech Model M150 probe station แสดงดังรูปที่ 4.1 ที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) โดยวัดที่อุณหภูมิ 30, 40, 50, และ 60 °C ตามลำดับ การวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันที่แรงดันไบอัส -10 ถึง +1 V โดยป้อนแรงดันที่ละ 25 mV การวัดความจุไฟฟ้า-แรงดัน ที่แรงดันไบอัส -10 ถึง 0 V ที่ความถี่ 100 kHz และตัวตรวจจذبรังสีเอ็กซ์ที่สร้างเสร็จสมบูรณ์และบรรจุลงในตัวถังแล้วแสดงดังรูปที่ 4.2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 ชุดเครื่อง C-ARM SIEMENS SIREMOBIL COMPACT 650 135 ที่ใช้ในการคุณลักษณะทางไฟฟ้าและวิธีการโพรบอุปกรณ์



รูปที่ 4.2 ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ที่สร้างเสร็จสมบูรณ์และบรรจุลงในตัวถัง

4.1.2 เงื่อนไขการฉายรังสีเอ็กซ์ไปยังไดโอดรอยต่อพี-เอ็นแบบโดยตรง

เมื่อวัดลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของ ไดโอดเรียบร้อยแล้วทำการแบ่งไดโอดออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ 1) กลุ่มไดโอดที่ถูกฉายรังสีเอ็กซ์ด้วยพลังงาน 40 keV 2) กลุ่มไดโอดที่ถูกฉายรังสีเอ็กซ์ด้วยพลังงาน 55 keV และ 3) กลุ่มไดโอดที่ถูกฉายรังสีเอ็กซ์ด้วยพลังงาน 70 keV นอกจากนี้ไดโอดแต่ละกลุ่มจะถูกแบ่งออกเป็นอีก 3 กลุ่ม ซึ่งจะถูกรังสีเอ็กซ์เป็นเวลา 5 วินาที, 55 วินาที, และ 205 วินาที ตามลำดับ การแบ่งกลุ่มไดโอดที่ถูกฉายรังสีเอ็กซ์แสดงดังตารางที่ 4.1 การฉายรังสีเอ็กซ์นั้นได้ใช้เครื่องฉายรังสีเอ็กซ์ของภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกล้าพระนครเหนือ เครื่องฉายรังสีเอ็กซ C-ARM SIEMENS SIREMOBIL COMPACT 650 135
แสดงดังรูปที่ 4.3

ตารางที่ 4.1 การแบ่งกลุ่มไดโอดที่ใช้ในการทดลอง

	ไดโอดกลุ่มที่ 1	ไดโอดกลุ่มที่ 2	ไดโอดกลุ่มที่ 3
พลังงานรังสีเอ็กซ	40 keV	55 keV	70 keV
เวลาการฉายรังสีเอ็กซ	5 วินาที	5 วินาที	5 วินาที
	55 วินาที	55 วินาที	55 วินาที
	205 วินาที	205 วินาที	205 วินาที



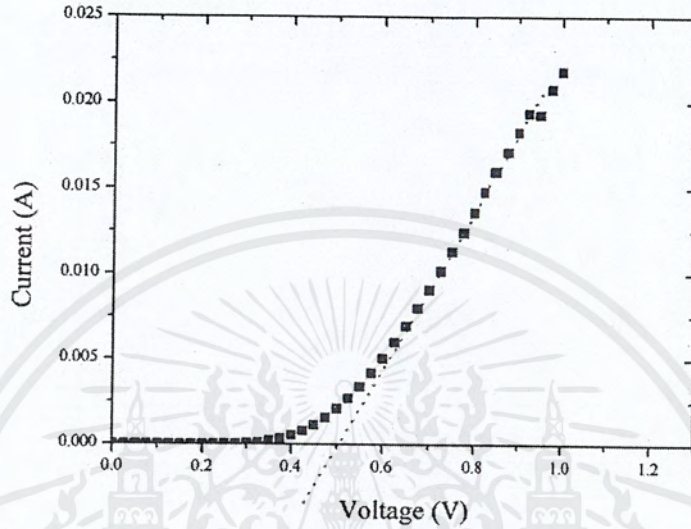
รูปที่ 4.3 เครื่องฉายรังสีเอ็กซ C-ARM SIEMENS SIREMOBIL COMPACT 650 135

4.2 ผลการทดลอง

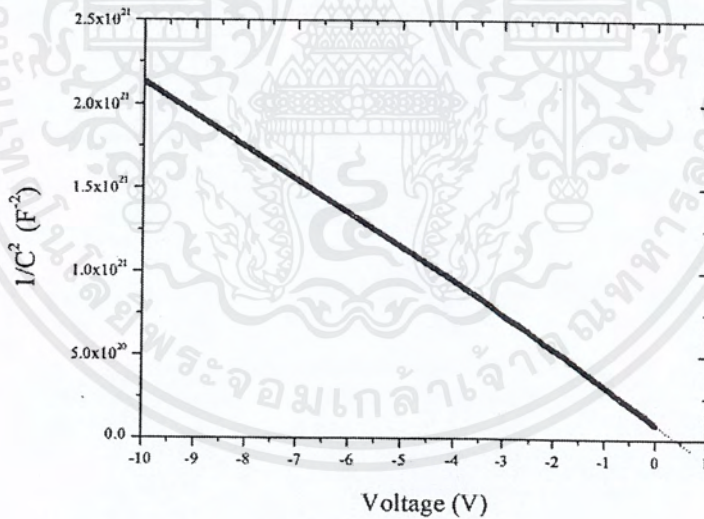
4.2.1 การทดสอบสมบัติของรอยต่อพี-เอ็น

การตรวจสอบสมบัติของรอยต่อพี-เอ็นเป็นสิ่งสำคัญ หลังจากทำการสร้างไดโอดรอยต่อพี-เอ็น จำเป็นต้องมีการทดสอบว่าไดโอดนี้มีโครงสร้างใด โดยทำการวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันและความจุไฟฟ้า-แรงดันของไดโอดและนำมาหาค่าแรงดันภายใน (V_{bi}) สมบัติของรอยต่อพี-เอ็นนี้มีค่าแรงดันภายในอยู่ในช่วง 0.4-0.7 V การหาค่าแรงดันภายในสามารถหาได้ 2 วิธี ซึ่งแสดงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดั่งกราฟที่ 4.4 และ 4.5 ค่าแรงดันภายในที่หาได้จากลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันมีค่าเท่ากับ 0.5 V และค่าแรงดันภายในที่หาได้จากลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันมีค่าเท่ากับ 0.5 V เช่นกัน ทำให้สรุปได้ว่าไดโอดรอยต่อพี-เอ็นที่ทำการสร้างขึ้นเป็นตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์นี่เป็นรอยต่อพี-เอ็น



รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันของรอยต่อพี-เอ็น



รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนกลับของความจุไฟฟ้ากำลังสอง-แรงดันของรอยต่อพี-เอ็น

4.2.2 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของไดโอดรอยต่อพี-เอ็น

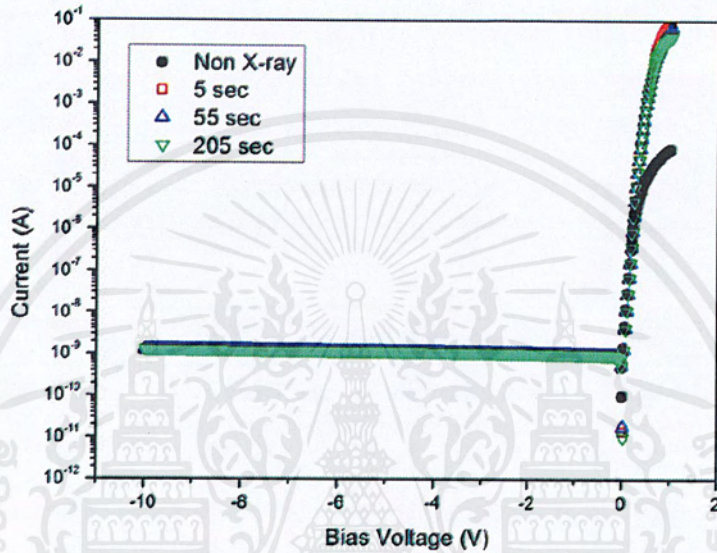
เมื่อทำการทดสอบคุณลักษณะทางไฟฟ้าก่อนและหลังการฉายรังสีเอ็กซ์แล้ว ลักษณะกระแส-แรงดันของไดโอดรอยต่อพี-เอ็น แสดงดังรูปที่ 4.6 โดยมีความสัมพันธ์ตามสมการที่ (4.1) ดังนี้

$$I = I_0 [\exp(qV / kT) - 1] \quad (4.1)$$

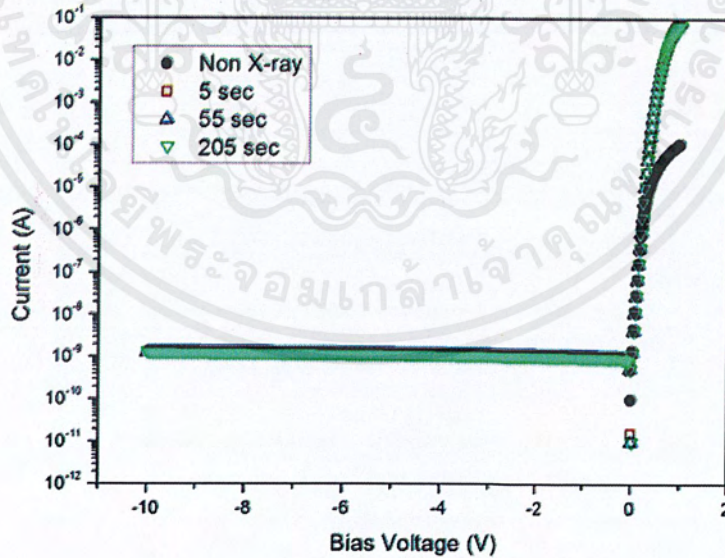
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- โดย I_0 คือ กระแสอิ่มตัว
 v คือ แรงดันไบอัส
 k คือ ค่าคงที่โบลทซ์มันน์
 q คือ ประจุอิเล็กตรอน
 T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์

(ก) 40 keV

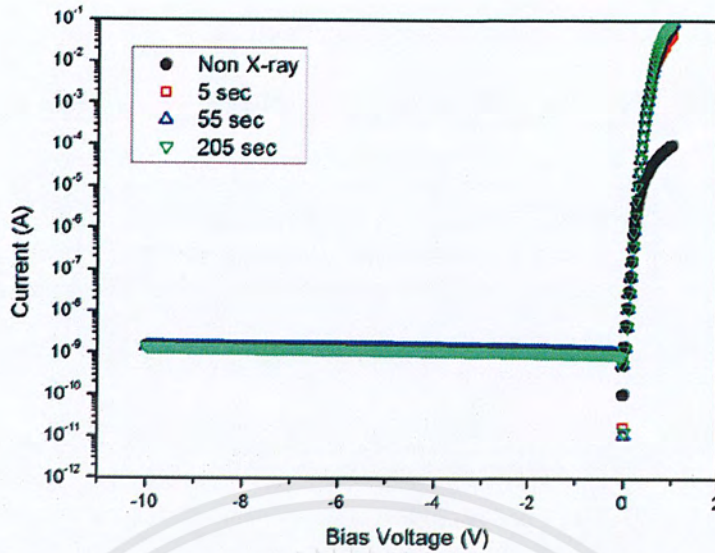


(ข) 55 keV



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ค) 70 keV



รูปที่ 4.6 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยต่อพี-เอ็นที่ถูกฉายรังสีเอ็กซ์ด้วยพลังงานต่างๆ (ก) 40 keV (ข) 55 keV และ (ค) 70 keV ทั้งก่อนและหลังการฉายรังสีเอ็กซ์

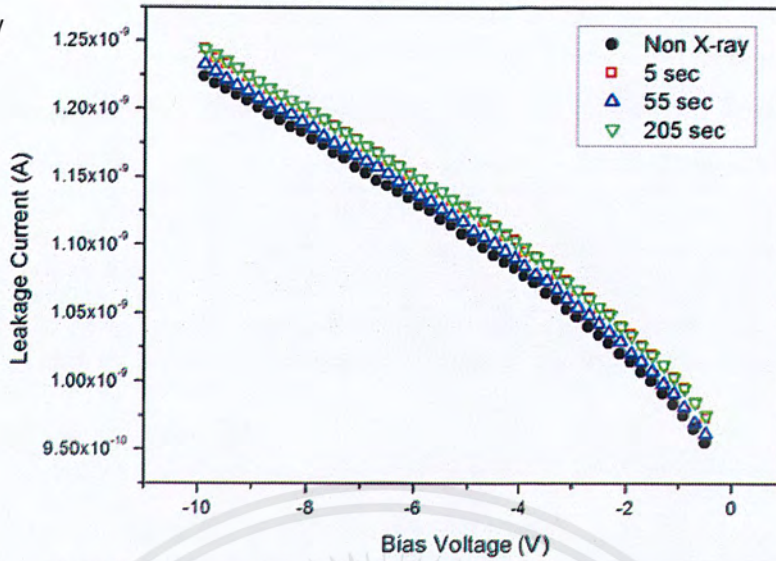
ในกรณีไบอัสกระแสย้อนกลับ กระแสอิ่มตัวจะประกอบไปด้วยกระแสที่เกิดจากการแพร่ (diffusion current, I_d) และกระแสที่เกิดในบริเวณหลอดพาหะ (generation current, I_g) ดังสมการที่ (4.2) และ (4.3) จากผลการทดลองพบว่าไดโอดที่ถูกฉายรังสีเอ็กซ์ด้วยพลังงาน 40 และ 55 keV มีกระแสรั่วไหลเปลี่ยนแปลงน้อยเมื่อเทียบกับก่อนการฉายรังสีเอ็กซ์ แต่กระแสรั่วไหลของไดโอดที่ถูกฉายรังสีเอ็กซ์ด้วยพลังงาน 70 keV พบว่ามีค่าต่ำลงเมื่อเทียบกับก่อนการฉายรังสีเอ็กซ์ จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจอย่างมาก ปรากฏการณ์เช่นนี้อาจนำไปปรับปรุงประสิทธิภาพของตัวตรวจจับสนุรังสีเอ็กซ์ได้ จึงต้องมีการศึกษาและวิเคราะห์เพิ่มเติม ลักษณะกระแสรั่วไหลของไดโอดรอยต่อพี-เอ็นที่ถูกฉายรังสีเอ็กซ์ด้วยพลังงานต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.7

$$I_0 = I_d + I_g \quad (4.2)$$

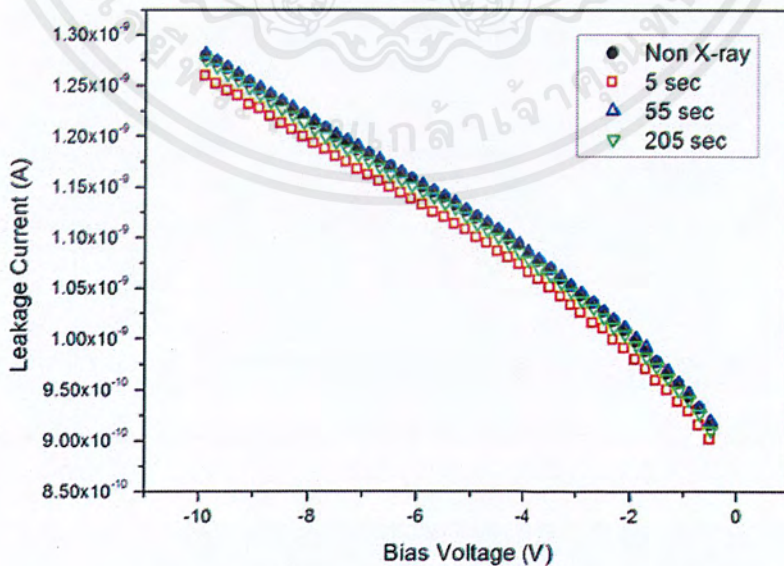
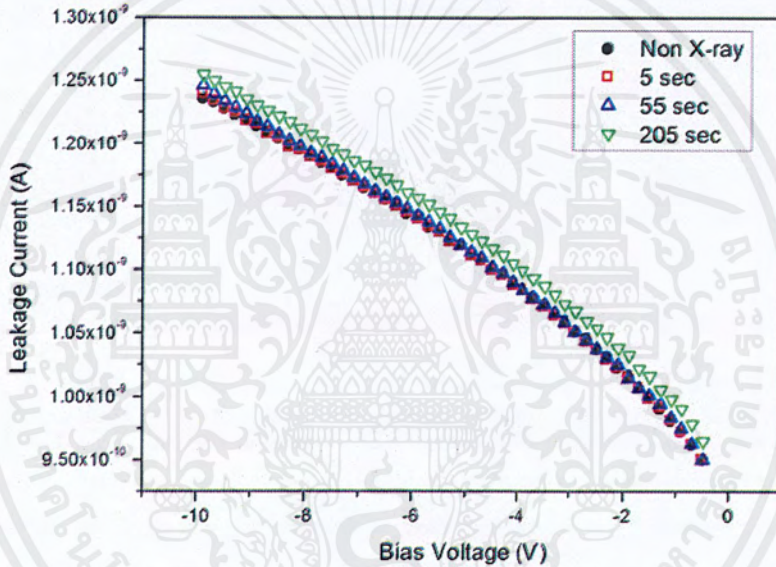
$$I_0 = I_d + Aq n_i W / \tau_g \quad (4.3)$$

โดย A คือ ขนาดพื้นที่ของรอยต่อพี-เอ็น
 n_i คือ ความเข้มข้นพาหะอินทรินซิก
 w คือ ความกว้างบริเวณหลอดพาหะ
 τ_g คือ อายุการเกิดพาหะ

(ก) 40 keV



(ข) 55 keV



รูปที่ 4.7 ลักษณะกระแสรั่วไหลของไดโอดรอยต่อพี-เอ็นที่ถูกฉายรังสีเอ็กซ์ด้วยพลังงานต่างๆ

(ก) 40 keV (ข) 55 keV และ (ค) 70 keV ทั้งก่อนและหลังการฉายรังสีเอ็กซ์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของไดโอดรอยต่อพี-เอ็น

ผลการวัดลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของไดโอดรอยต่อพี-เอ็นตามความสัมพันธ์สมการที่ (4.4) แสดงดังรูปที่ 4.7 จากกราฟลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ (reverse bias) พบว่าค่าความจุไฟฟ้าของไดโอดรอยต่อพี-เอ็นที่ถูกฉายรังสีเอ็กซ์ทุกพลังงานมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากหรือไม่เปลี่ยนแปลงเลย จากนั้นได้ทำการหาความหนาแน่นอะตอมพาหะในทุกๆพลังงานการฉายรังสีเอ็กซ์และที่เวลาต่างๆกันแสดงดังรูปที่ 4.8 ซึ่งความหนาแน่นอะตอมพาหะนี้ได้ทำการคำนวณจากความชันความสัมพันธ์สมการที่ (4.5) เมื่อทำการเฉลี่ยค่าความหนาแน่นอะตอมพาหะพบว่าเมื่อเปรียบเทียบในพลังงานเดียวกัน ความหนาแน่นอะตอมพาหะก่อนและหลังการฉายรังสีเปลี่ยนแปลงน้อยมาก เช่นเดียวกับการเปรียบเทียบกันด้วยเวลาการฉายรังสีที่เท่ากันแต่ต่างพลังงาน ความหนาแน่นอะตอมพาหะก่อนและหลังการฉายรังสีแทบไม่เปลี่ยนแปลงดังแสดงในตารางที่ 4.2

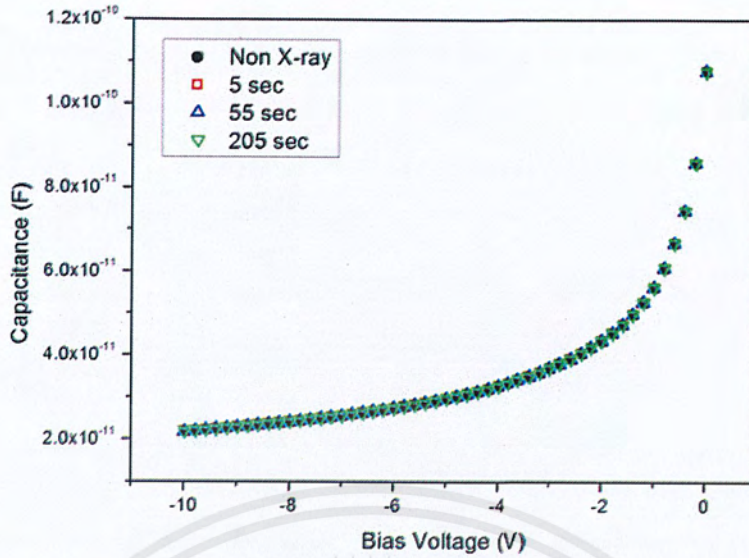
$$C_j = \frac{\epsilon_s}{W} = \sqrt{\frac{q\epsilon_s N_D}{2(V_{bi} + V_R)}} \quad (4.4)$$

$$\frac{1}{C_j^2} = \frac{2(V_{bi} + V_R)}{q\epsilon_s N_D} \quad (4.5)$$

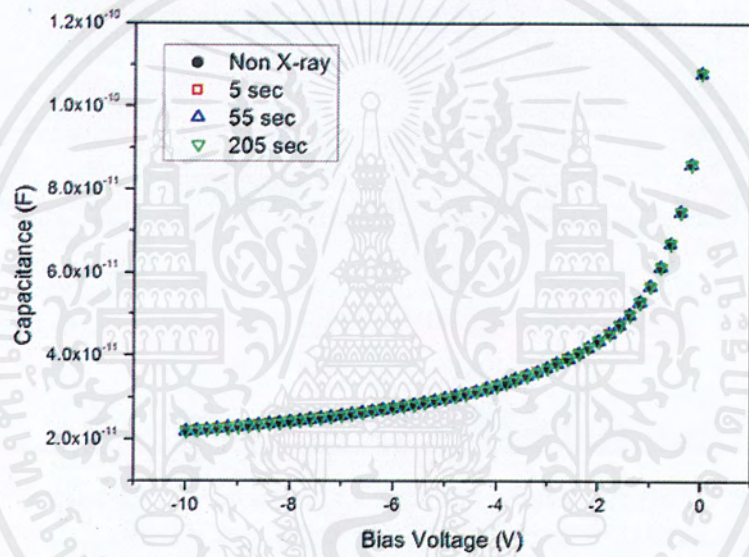
ตารางที่ 4.2 ความหนาแน่นอะตอมพาหะที่เวลาและพลังงานการฉายรังสีเอ็กซ์ต่างๆ

		ความหนาแน่นอะตอมพาหะ (/cm ³)		
		40 keV	55 keV	70 keV
เวลา	พลังงาน			
	ก่อนฉายรังสีเอ็กซ์	3.819 x 10 ¹³	3.790 x 10 ¹³	3.769 x 10 ¹³
	5 วินาที	3.773 x 10 ¹³	3.779 x 10 ¹³	3.786 x 10 ¹³
	55 วินาที	3.776 x 10 ¹³	3.782 x 10 ¹³	3.784 x 10 ¹³
	205 วินาที	3.747 x 10 ¹³	3.769 x 10 ¹³	3.761 x 10 ¹³

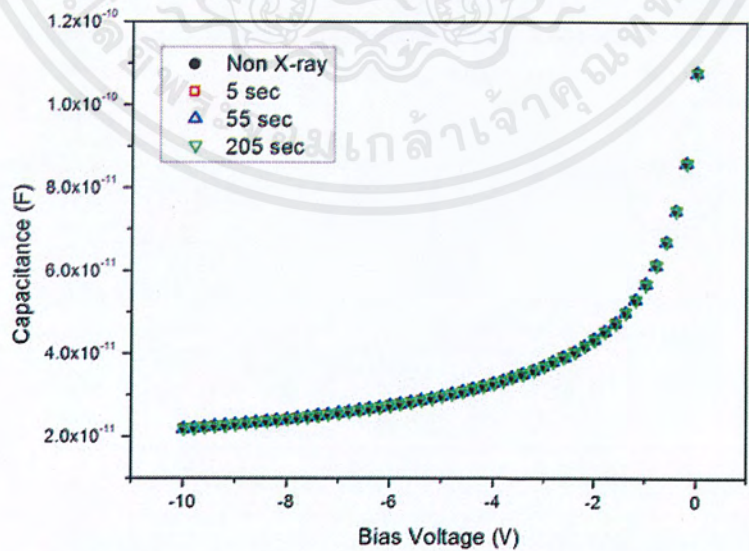
(ก) 40 keV



(ข) 55 keV



(ค) 70 keV

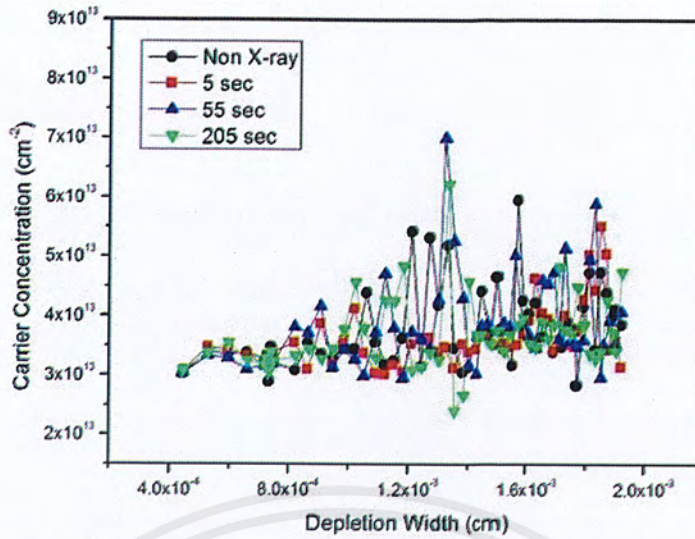


รูปที่ 4.8 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของรอยต่อพี-เอ็นที่ถูกฉายรังสีเอ็กซ์ด้วยพลังงานต่างๆ

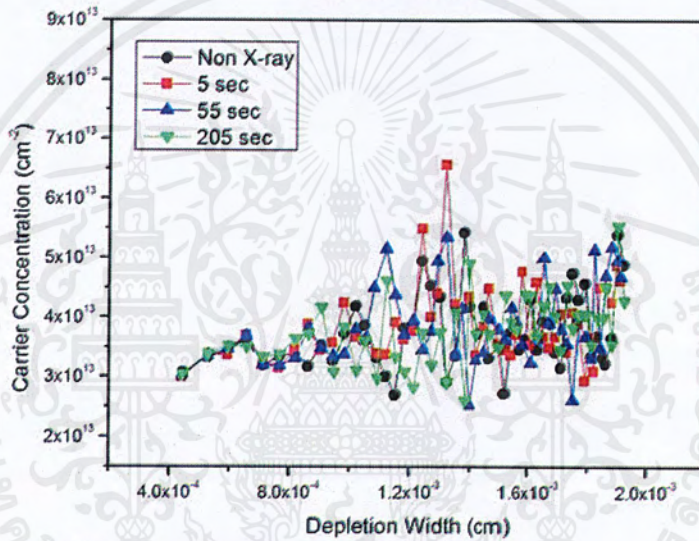
(ก) 40 keV (ข) 55 keV และ (ค) 70 keV ทั้งก่อนและหลังการฉายรังสีเอ็กซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

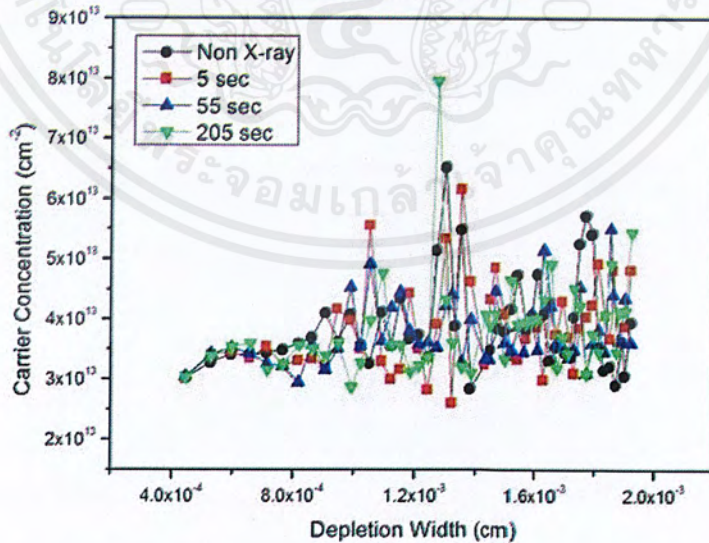
(ก) 40 keV



(ข) 55 keV



(ค) 70 keV



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นอะตอมพาหะกับความกว้างบริเวณปลอดพาหะของรอยต่อพี-เอ็นที่ถูกฉายรังสีเอ็กซ์ด้วยพลังงานต่างๆ (ก) 40 keV (ข) 55 keV และ (ค) 70 keV ทั้งก่อนและหลังการฉายรังสีเอ็กซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 อายุพาหะ

จากผลของกระแสรั่วไหลที่ถูกการฉายรังสีเอ็กซ์ แล้วทำให้มีค่าลดลงจากเดิมจึงทำการพิจารณาอายุการเกิดพาหะซึ่งมีความสัมพันธ์กับกระแสรั่วไหลตามสมการที่ (4.3) เมื่อทำการจัดรูปใหม่จะได้เป็นสมการที่ (4.6) เนื่องจากอายุการเกิดจะถูกพิจารณาเมื่อพาหะจำนวนเล็กน้อยในบริเวณปลอดพาหะขณะอุปกรณ์ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ โดยค่าอายุการเกิดพาหะสามารถคำนวณได้จากความชันเฉลี่ยของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่วไหล (I_0) กับความกว้างบริเวณปลอดพาหะ (W) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.9 ในกรณีที่สมมติให้อายุการเกิดพาหะมีความสม่ำเสมอจึงเป็นการหาแบบเฉลี่ย และอายุการเกิดพาหะแบบเฉลี่ยนี้แสดงดังในตารางที่ 4.3

$$\tau_g = \frac{qn_i W}{(I_0 - I_d)} \quad (4.6)$$

ตารางที่ 4.3 อายุการเกิดพาหะโดยเฉลี่ยที่เวลาและพลังงานการฉายรังสีเอ็กซ์ต่างๆ

เวลา	พลังงาน	กระแสการแพร่ ($\times 10^{-10}$ A)			อายุการเกิดพาหะ ($\times 10^{-4}$ sec)		
		40 keV	55 keV	70 keV	40 keV	55 keV	70 keV
ก่อนฉายรังสีเอ็กซ์		8.29	8.14	8.42	3.48	3.21	2.62
5 วินาที		8.44	8.15	8.24	3.44	3.22	2.63
55 วินาที		8.32	8.13	8.42	3.43	3.18	2.61
205 วินาที		8.46	8.29	8.35	3.46	3.20	2.61

อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติ อายุการเกิดพาหะอาจไม่มีความสม่ำเสมอ จึงได้ทำการคำนวณอายุการเกิดพาหะอย่างละเอียด โดยเบื้องต้นต้องทำให้หาค่ากระแสการแพร่ (I_d) โดยพิจารณาว่ากระแสการแพร่ นั้นไม่ขึ้นอยู่กับการไบอัส กระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นนี้เป็นผลส่วนใหญ่มาจากกระแสที่เกิดในบริเวณปลอดพาหะ ดังนั้นกระแสการแพร่จะหาได้จากเมื่อกำหนดให้ $W=0$ m ก็จะหาค่ากระแสการแพร่ได้ กระแสการแพร่ที่หาได้นั้นแสดงในตารางที่ 4.3

เมื่อได้กระแสการแพร่เป็นที่เรียบร้อยแล้วจึงนำไปแทนในสมการที่ (4.6) ก็จะได้ค่าอายุการเกิดพาหะ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.10 จะเห็นว่าขณะที่ความกว้างบริเวณปลอดพาหะยังไม่ขยายกว้างมากนักประมาณ $5 \mu\text{m}$ อายุการเกิดพาหะมีแนวโน้มต่ำลง และเมื่อความกว้างบริเวณปลอดพาหะขยายมากขึ้นอายุการเกิดพาหะมีค่าเพิ่มขึ้น และเริ่มลดลงอีกครั้งเมื่อความกว้างบริเวณปลอดพาหะขยาย

4.3.3 อายุพาหะ

จากผลของกระแสรั่วไหลที่ถูกการฉายรังสีเอ็กซ์ แล้วทำให้มีค่าลดลงจากเดิมจึงทำการพิจารณาอายุการเกิดพาหะซึ่งมีความสัมพันธ์กับกระแสรั่วไหลตามสมการที่ (4.3) เมื่อทำการจัดรูปใหม่จะได้เป็นสมการที่ (4.6) เนื่องจากอายุการเกิดจะถูกพิจารณาเมื่อพาหะจำนวนเล็กน้อยในบริเวณปลอดพาหะขณะอุปกรณ์ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ โดยค่าอายุการเกิดพาหะสามารถคำนวณได้จากความชันเฉลี่ยของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่วไหล (I_0) กับความกว้างบริเวณปลอดพาหะ (W) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.9 ในกรณีที่สมมติให้อายุการเกิดพาหะมีความสม่ำเสมอจึงเป็นการหาแบบเฉลี่ย และอายุการเกิดพาหะแบบเฉลี่ยนี้แสดงดังในตารางที่ 4.3

$$\tau_g = \frac{qn_i W}{(I_0 - I_d)} \quad (4.6)$$

ตารางที่ 4.3 อายุการเกิดพาหะโดยเฉลี่ยที่เวลาและพลังงานการฉายรังสีเอ็กซ์ต่างๆ

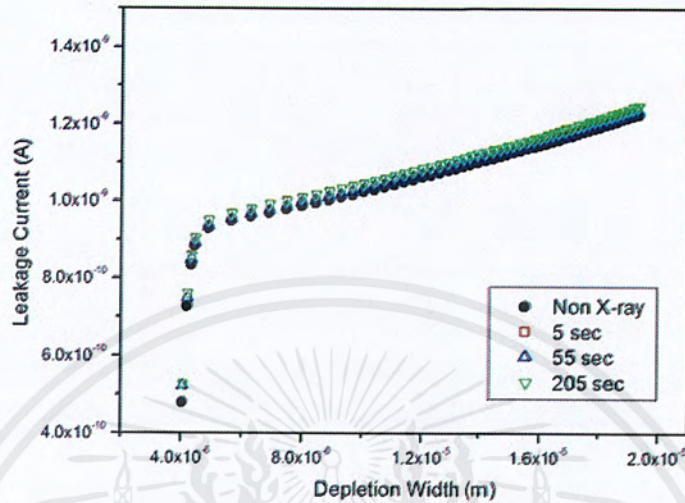
เวลา \ พลังงาน	กระแสการแพร่ ($\times 10^{-10}$ A)			อายุการเกิดพาหะ ($\times 10^{-4}$ sec)		
	40 keV	55 keV	70 keV	40 keV	55 keV	70 keV
ก่อนฉายรังสีเอ็กซ์	8.29	8.14	8.42	3.48	3.21	2.62
5 วินาที	8.44	8.15	8.24	3.44	3.22	2.63
55 วินาที	8.32	8.13	8.42	3.43	3.18	2.61
205 วินาที	8.46	8.29	8.35	3.46	3.20	2.61

อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติ อายุการเกิดพาหะอาจไม่มีความสม่ำเสมอ จึงได้ทำการคำนวณอายุการเกิดพาหะอย่างละเอียด โดยเบื้องต้นต้องทำได้หากระแสการแพร่ (I_0) โดยพิจารณาว่ากระแสการแพร่ นั้นไม่ขึ้นอยู่กับการไบอัส กระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นนี้เป็นผลส่วนใหญ่มาจากกระแสที่เกิดในบริเวณปลอดพาหะ ดังนั้นกระแสการแพร่จะหาได้จากเมื่อกำหนดให้ $W=0$ m ก็จะหากระแสการแพร่ได้ กระแสการแพร่ที่หาได้นั้นแสดงในตารางที่ 4.3

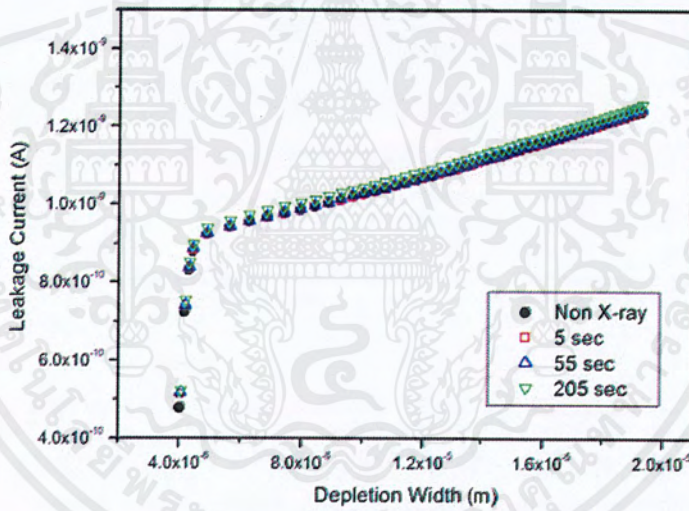
เมื่อได้กระแสการแพร่เป็นที่เรียบร้อยแล้วจึงนำไปแทนในสมการที่ (4.6) ก็จะได้ค่าอายุการเกิดพาหะ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.10 จะเห็นว่าขณะที่ความกว้างบริเวณปลอดพาหะยังไม่ขยายกว้างมากนักประมาณ $5 \mu\text{m}$ อายุการเกิดพาหะมีแนวโน้มต่ำลง และเมื่อความกว้างบริเวณปลอดพาหะขยายมากขึ้นอายุการเกิดพาหะมีค่าเพิ่มขึ้น และเริ่มลดลงอีกครั้งเมื่อความกว้างบริเวณปลอดพาหะขยาย

ไป 10 μm นอกจากนี้จะสังเกตว่าที่พลังงานการฉายรังสีเอ็กซ์ 70 keV อายุการเกิดพาหะที่การฉายเป็นเวลา 5 วินาที มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับพลังงานค่าอื่นๆ ดังนั้นอาจเป็นไปได้ว่าจะส่งผลให้กระแสรั่วไหลลดลง

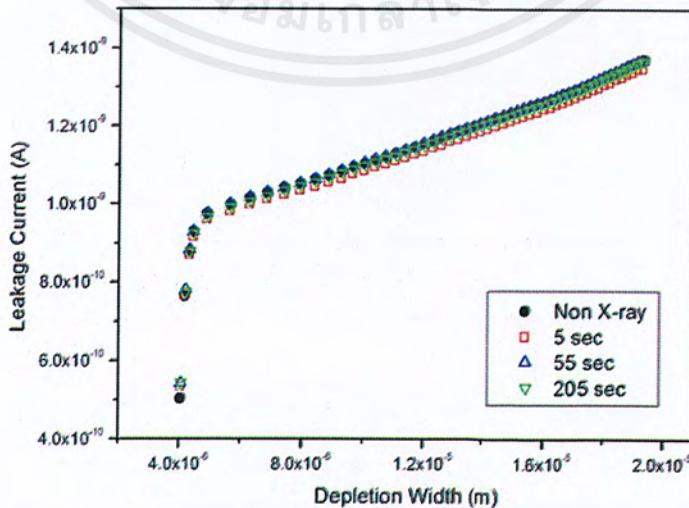
(ก) 40 keV



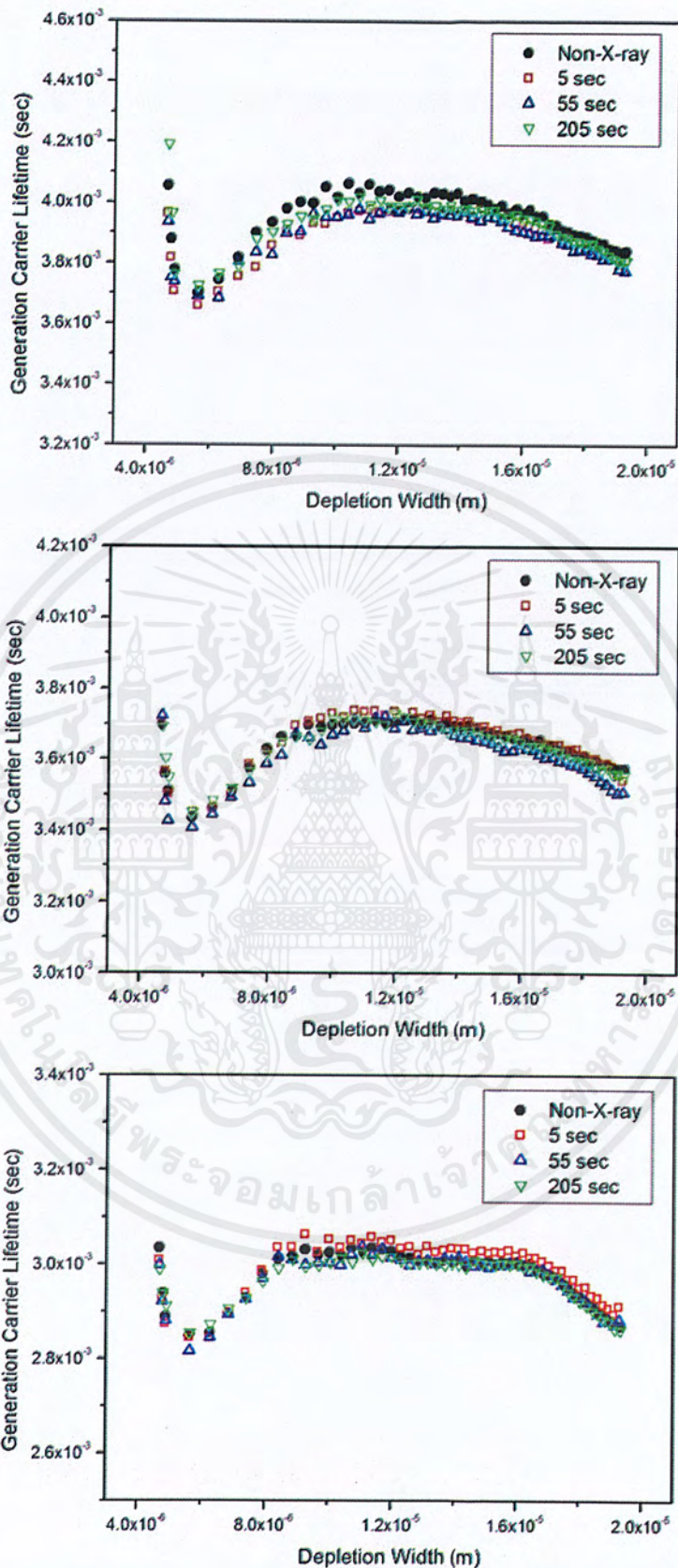
(ข) 55 keV



(ค) 70 keV



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสรั่วไหลกับความกว้างบริเวณปลอดพาหะของรอยต่อพี-เอ็นที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา
ถูกฉายรังสีเอ็กซ์ด้วยพลังงานต่างๆ (ก) 40 keV (ข) 55 keV และ (ค) 70 keV ทั้งก่อนและหลังการฉาย
รังสีเอ็กซ์



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการเกิดพาหะกับความกว้างบริเวณปลอดพาหะของรอยต่อพี-เอ็น

ที่ถูกฉายรังสีเอ็กซ์ด้วยพลังงานต่างๆ (ก) 40 keV (ข) 55 keV และ (ค) 70 keV ทั้งก่อนและหลังการ

เอกสารนี้ซึ่งมีลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ฌายรังสีเอ็กซ์
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ปริญญานิพนธ์นี้นำเสนอการศึกษาผลกระทบของรังสีเอ็กซ์ต่อลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดรอยต่อพี-เอ็น (p-n junction diode) ที่สร้างบนฐานรองซิลิคอน ดังนั้นจึงต้องมีการศึกษาเรียนรู้ทฤษฎีรอยต่อพี-เอ็นและรังสีเอ็กซ์ จากนั้นทำการสร้างไดโอดรอยต่อพี-เอ็นซึ่งทำการสร้างที่ศูนย์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) หลังจากสร้างเสร็จเรียบร้อยแล้วทำการวัดคุณสมบัติรอยต่อโดยพิจารณาค่าแรงดันภายใน (built-in voltage) ทำการคำนวณ 2 วิธีคือ คำนวณจากกระแสและความจุไฟฟ้า ซึ่งได้ค่าแรงดันภายในเท่ากับ 0.5 V ทั้งสองวิธี ซึ่งสรุปได้ว่ารอยต่อที่ได้ทำการสร้างขึ้นนี้มีคุณสมบัติเป็นรอยต่อพี-เอ็น

การทดลองการฉายรังสีเอ็กซ์ได้ทำการแบ่ง ไดโอดออกเป็น 3 กลุ่ม แล้วนำไปฉายรังสีเอ็กซ์ด้วยพลังงาน 40, 55, 70 keV เป็นเวลา 5, 55, 205 วินาทีตามลำดับ จากนั้นทำการวัดลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอด ได้แก่ กระแส-แรงดัน (I-V characteristics) ความจุไฟฟ้า-แรงดัน (C-V characteristics) ความหนาแน่นของอะตอมพาหะ (carrier concentration) และอายุการเกิดพาหะ (generation carrier lifetime) ของไดโอดรอยต่อพี-เอ็นก่อนและหลังการฉายรังสีเอ็กซ์ ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดนี้วัดด้วยเครื่อง Cascade Microtech Model M150 probe station นำผลการทดลองมาเปรียบเทียบและทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของลักษณะสมบัติต่างๆที่เกิดขึ้น

จากผลการทดลองพบว่าลักษณะกระแสรั่วไหลของไดโอดที่ถูกฉายรังสีเอ็กซ์ด้วยพลังงาน 70 keV

มีแนวโน้มลดลง และมีค่าลดลงต่ำมากที่สุดที่เวลาการฉาย 5 วินาที ส่วนกรณีการฉายที่พลังงานอื่นๆ พบว่า ทำให้กระแสรั่วไหลมีค่าเพิ่มขึ้นในทุกๆเวลาการฉายรังสีเอ็กซ์ นอกจากนี้ความจุไฟฟ้าที่ทดสอบได้พบว่าเปลี่ยนแปลงน้อยมากหรือไม่มีการเปลี่ยนแปลงเลยในทุกๆเงื่อนไขการฉายรังสี จากนั้นทำการพิจารณาความหนาแน่นอะตอมพาหะ พบว่าเปลี่ยนแปลงน้อยมากเช่นกัน

สิ่งที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นว่า หลังการฉายรังสีเอ็กซ์ด้วยพลังงาน 70 keV สามารถทำให้กระแสรั่วไหลลดลงเมื่อเทียบกับก่อนการฉายรังสีเอ็กซ์ ในขณะที่การฉายด้วยพลังงาน 40 และ 50 keV กลับทำให้กระแสรั่วไหลเพิ่มมากขึ้น จึงทำการศึกษาอายุการเกิดพาหะซึ่งเป็นตัวแปรที่สัมพันธ์กับ

กระแสรั่วไหล พบว่าอายุการเกิดพาหะในกรณีพิจารณาว่ามีความสม่ำเสมอ ที่การฉายรังสีเอ็กซ์ด้วย

บรรณานุกรม

- [1] จักรพันธ์ ศรียาภย์, “การศึกษาคุณสมบัติและกระบวนการสร้างตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล. 2552
- [2] S.M. Sze, “*Physics of semiconductor devices*”, John Wiley & Sons, New York, 1981.
- [3] Gerold W. Neudeck, “*The pn junction diode*”, 2nd Modular series on solid state devices, Eds Gerold W. Neudeck and Robert F. Pierret, Addison-Wesley Publishing Company, 1989.
- [4] สมเกียรติ สุภเดช. เขมิตอนคัคเตอร์ดีไวซ์. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์ ลาดกระบัง.2545
- [5] สมเกียรติ สุภเดช. เขมิตอนคัคเตอร์ฟิสิกส์. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์ ลาดกระบัง.2545
- [6] มนตรี แสนละมุล, “การศึกษาผลของโพลติ่งพีวลิ้งต่อค่าแรงดันพังทลายของไดโอดกำลัง”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล. 2552
- [7] D.K.Schroder, “Carrier lifetime in silicon”, IEEE Trans. Electron Devices, ED-44, p.160 (1997)