

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาโครงสร้างและวัดสมบัติของไดโอดกำลัง



นางสาวประไพพรรณ หมวกเทพ
นางสาวอารีรัตน์ เจริญสุข

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 104925
วัน,เดือน,ปี..... 1.ด. พ.ย. 2552

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

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาฟิสิกส์ประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A Study of Structure and Characteristics of Power Diode



**A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for
The Degree of Bachelor of Science
Program in Applied Physics
Faculty of Science
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Academic Year 2008**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาโครงสร้างและวัตสมบัติของไดโอดกำลัง

A Study of Structure and Characteristics of Power Diode



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาฟิสิกส์ประยุกต์


คณะวิทยาศาสตร์


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง การศึกษาโครงสร้างและวัสดุสมบัติของไดโอดกำลัง
นักศึกษา นางสาวประไพพรรณ หมวกเทพ
นางสาวอารีรัตน์ เจริญสุข
หลักสูตร วิทยาศาสตร์บัณฑิต
สาขา ฟิสิกส์ประยุกต์
ปีการศึกษา 2551
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.จิตติ หนูแก้ว
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม คุณมนตรี แสนละมุล

สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังอนุมัติให้โครงการพิเศษฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ ประจำปีการศึกษา 2551

คณะกรรมการตรวจสอบ	ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ รศ.ดร.วิษณุ เพชรภา	
กรรมการ ดร.ปิติพร ถนอมงาม	
กรรมการ อาจารย์เบญจพล คันธุ์	
กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.จิตติ หนูแก้ว	
กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม นายมนตรี แสนละมุล	


(รองศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา ยูพาพิน)


(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีรวัฒน์ มงคลอัสวรัตน์)

คณบดี

ลิขสิทธิ์ของสาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง	การศึกษาโครงสร้างและวัดสมบัติของไดโอดกำลัง
นักศึกษา	นางสาวประไพพรรณ หมวกเทพ นางสาวอารีรัตน์ เจริญสุข
หลักสูตร	วิทยาศาสตร์บัณฑิต
สาขา	ฟิสิกส์ประยุกต์
ปีการศึกษา	2551
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์.ดร.จิตติ หนูแก้ว
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	คุณมนตรี แสนละมุล

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษฉบับนี้นำเสนอการศึกษาโครงสร้างและวัดสมบัติของไดโอดกำลัง 3 ชนิด คือ ฟินไดโอด, ซอตต์กีไดโอด และ เอ็ม พี เอสไดโอด ซึ่งทำการสร้างที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC). โดยใช้เครื่องมือวัดกระแสต่อแรงดันยี่ห้อ Keithley รุ่น 2410 ไบอัสย้อนกลับ ซึ่งใช้โปรแกรม TestCore-Base Version 2.0 (Dual 2410) กำหนดค่าและประมวลผลในการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า เพื่อเก็บเป็นข้อมูลอ้างอิง จากนั้นทำการอิเล็กทรอนิกส์ด้วยสารละลายยอนิกเกิดโดยใช้เวลาต้ม 15 นาทีและอบด้วยความร้อน 15 นาที และวัดสมบัติทางไฟฟ้าเพื่อเก็บข้อมูล นำมาต่อขั้วไฟฟ้าและทำการวัดค่าอีกครั้ง จากนั้นบรรจุภัณฑ์ด้วยตัวทำแข็งผสมกับเรซินในอัตราส่วน 2:1 ทิ้งไว้ 1 คืน และวัดสมบัติทางไฟฟ้าวิเคราะห์ผลของแสง ทดสอบชิ้นงานที่อุณหภูมิต่างๆ ได้แก่ อุณหภูมิห้อง, 40 , 50 และ 60 องศาเซลเซียส โดยวัดสมบัติทางไฟฟ้า นำข้อมูลทั้งหมดที่วัดได้มาเปรียบเทียบกับข้อมูลอ้างอิง วิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นได้ว่าฟินไดโอดจะมีกระแสรั่วที่น้อยที่สุด รองลงมาคือ เอ็ม พี เอสไดโอด และมากที่สุด คือ ซอตต์กีไดโอด ผลการตอบสนองต่อแสงทำให้กระแสรั่วเพิ่มมากขึ้นทั้ง 3 โครงสร้างและการวัดอุณหภูมิเพิ่มขึ้นครั้งละ 10 องศาเซลเซียสส่งผลให้ไดโอดทั้ง 3 แบบมีกระแสรั่วเพิ่มขึ้น โดยที่ 40 องศาเซลเซียส ฟินไดโอดเพิ่มขึ้น 2.81 เท่า, ซอตต์กีเพิ่ม 1.08 เท่า, เอ็ม พี เอสไดโอดเพิ่ม 2.11 เท่า ส่วนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ฟินไดโอดเพิ่มขึ้น 1.55 เท่า, ซอตต์กีเพิ่ม 1.30 เท่า, เอ็ม พี เอสไดโอดเพิ่ม 1.40 และอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ฟินไดโอดเพิ่มขึ้น 1.43 เท่า, ซอตต์กีเพิ่ม 1.38 เท่า, เอ็ม พี เอสไดโอดเพิ่ม 2.41 เท่า จากนั้นนำไปวัดสมบัติการเป็นสวิตช์ที่ความต้านทาน 1 กิโลโอห์ม คิดค่าเวลาการฟื้นตัว 10 % ได้ผลว่า ซอตต์กีไดโอดจะมีระยะเวลาในการฟื้นตัวเร็วที่สุด 4.44 ไมโครวินาที, รองลงมา คือ เอ็ม พี เอสไดโอด 100 ไมโครวินาที และ น้อยที่สุด คือ ฟินไดโอด 116 ไมโครวินาที ไดโอดในการทดลองสร้างขึ้นที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) เป็นครั้งแรก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรก ดังนั้นการวิเคราะห์ครั้งนี้จะนำไปสู่การพัฒนาชิ้นงานให้สามารถนำไปใช้งานจริงได้ตามความเหมาะสมในอนาคตต่อไป.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title	A Study of Structure and Characteristics of Power Diode
Students	Miss.Prapaipan Muakthep Miss.Areerat Charoensuk
Curriculum	Bachelor of Science
Program	Applied Physics
Special Project Advisor	Assoc.Prof.Dr. Jiti Nookeaw
Special Project Co-Advisor	Mr. Montree Sanlamoon

ABSTRACT

This special project presents A Study of Structure and Characteristics of Power Diode 3 types were P-i-N diodes, Schottky diodes and Merged P-i-n Schottky Diodes at Thai Micro Electronics Center project. Using Keithley 2410 for reverse biased, Test Core-Base Version 2.0 (Dual 2410) set and evaluate Electrical Characteristics for referable. In next programs Electroless by Nickel solution 15 minutes for boiling and baking drily were saving data for analysis. After programs build electricity poles and test Electrical Characteristics. Pakaging by mix hardener with resin 2 to 1 rate coated devices protected the light from the periphery delay all night and then test Electrical Characteristics again. Next programs test temperature Characteristics at room temperature, 40, 50 and 60 degree Celsius. Analysis from data Electrical Characteristics in all programs compare referable data the P-i-N diodes have least leakage current , the MPS diodes have more than and the Schottky diodes have the most leakage current. Its increase 3 type diodes in light effect test and temperature effect test. 40 degrees Celsius the P-i-N diodes have leakage current more 2.81 times, the Schottky diodes more 1.08 times and the MPS diodes 2.11 times. 50 degrees Celsius the P-i-N diodes have leakage current more 1.55 times, the Schottky diodes more 1.30 times and the MPS diodes 1.40 times .And 60 degrees Celsius the P-i-N diodes have leakage current more 1.43 times, the Schottky diodes more 1.38 times and the MPS diodes 2.41 times. Last programs test switching diode the Schottky diodes have recovery time 4.44 μ S, the MPS Diode 100 μ S and the P-i-N Diode 116 μ S. This special project is ultimate truth for Thai Micro Electronics Center developed in to the future.

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้านางสาวประไพพรรณ หมวกเทพ และนางสาวอารีรัตน์ เจริญสุข นักศึกษาชั้นปีที่ 4 ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ (โซลิตสเตทอิเล็คทรอนิกส์) คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ได้จัดทำโครงการพิเศษในครั้งนี้นำสำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี ด้วยความกรุณาจากหลายฝ่ายดังนี้

รศ.ดร.จิติ หนูแก้ว ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ คอยช่วยให้คำปรึกษา ช่วยเหลือและให้โอกาสในการทำโครงการพิเศษ

ดร.อัมพร โพธิ์ไย ผู้อำนวยการศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็คทรอนิกส์ ที่เห็นความสำคัญของการศึกษา เอื้อเพื่อเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆในการทำโครงการ

นายมนตรี แสนละมุล ผู้ช่วยนักวิจัย ที่ดูแลให้คำปรึกษาและแนะนำรวมทั้งจัดอุปกรณ์โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยไมโครอิเล็คทรอนิกส์ทุกคน ที่ให้คำปรึกษาและดูแลเป็นอย่างดี เพื่อนๆ ฟิสิกส์รุ่นที่ 24 ทุกคน ที่ให้คำปรึกษาและกำลังใจ

ครอบครัว ที่ให้การสนับสนุนและให้กำลังใจ ในทุกๆเรื่อง จนโครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

นางสาวประไพพรรณ หมวกเทพ

นางสาวอารีรัตน์ เจริญสุข

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 เป้าหมาย	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.5 ขั้นตอนการศึกษา	2
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	
2.1 ทฤษฎีรอยต่อ พี-เอ็น	3
2.2 การพังทลายที่รอยต่อพี-เอ็น (p-n junction breakdown)	14
2.3 การพังทลายของรอยต่อแบบอะวาแลนช์ (Avalanche breakdown)	15
2.4 การพังทลายแบบซีเนอร์ (Zener breakdown)	16
2.5 ปรากฏการณ์การพุ่งทะลุ (Punch Through Phenomena)	16
2.6 กระแส R-G (Recombination-Generation current)	16
2.7 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติของรอยต่อพี-เอ็น	18
2.8 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของไดโอดในทางปฏิบัติ	18
2.9 รอยต่อแบบลาดเชิงเส้น (Linearly graded junction)	19
2.10 ความจุไฟฟ้าของไดโอดแบบรอยต่อ p-n (Capacitance of the p-n junction diode)	21
2.10.1 ความจุไฟฟ้าเนื่องจากรอยต่อ (C_j) หรือความจุไฟฟ้าทรานซิชัน (C_T)	21
(Junction or Transition capacitance)	
2.10.2 ความจุไฟฟ้าจากการแพร่ หรือ ความจุไฟฟ้าจากประจุสะสม	22
(Diffusion Capacitance or Charge storage capacitance)	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.11 วงจรสมมูลของไดโอดกรณีสัญญาณขนาดเล็ก (Small signal equivalent circuits)	25
2.11.1 ความต้านทานของไดโอด	25
2.11.2 วงจรสมมูลของไดโอด	25
2.12 สมบัติการเป็นสวิตช์ของไดโอด	26
2.12.1 ช่วงเวลาปิด (Turn off time)	27
2.13 อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ	29
2.13.1 ไดโอดกำลัง (Power diode)	30
2.13.2 สมบัติและขอบเขตการใช้งานของไดโอดกำลัง	32
2.13.3 ประโยชน์และการใช้งานไดโอดกำลัง	33
2.14 การบรรจุภัณฑ์ไดโอดกำลัง	33
2.15 ทฤษฎีไดโอดกำลัง (Power Diode) ที่ใช้ในการทดลอง	33
2.15.1 ขอตักไดโอด (Schottky diode)	33
2.15.2 ไดโอดพิน (PIN Diode)	34
2.15.3 MPS Diode (Merged Pin Schottky Diode)	35
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	
ตอนที่ 1 การศึกษาโครงสร้างของไดโอดกำลัง	36
ตอนที่ 2 เรียนรู้วิธีการวัดและทำการวัดสมบัติทางไฟฟ้า ของ Power Diode ก่อนนำไปบรรจุภัณฑ์	37
ตอนที่ 3 เรียนรู้วิธีการบรรจุภัณฑ์ และศึกษาผลกระทบจากแสง	48
ตอนที่ 4 การทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดเมื่อได้รับอุณหภูมิค่าต่างๆ	51
ตอนที่ 5 การทดสอบวัดสมบัติการเป็นสวิตช์ของไดโอดกำลังทั้ง 3 ชนิด	52
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	
4.1 ผลการทดลอง	54
4.1.1 ตอนที่ 1 การศึกษาโครงสร้างของไดโอดกำลัง	54
4.1.2 ตอนที่ 2 เรียนรู้วิธีการวัดและทำการวัดสมบัติ ทางไฟฟ้าของ Power Diode	56
4.1.3 ตอนที่ 3 เรียนรู้วิธีการบรรจุภัณฑ์และศึกษาผลกระทบจากแสง	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.4 ตอนที่ 4 การทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอด เมื่อได้รับอุณหภูมิค่าต่างๆ	56
4.1.5 ตอนที่ 5 การวัดสมบัติการเป็นสวิตช์ของไดโอด	62
4.2 อภิปรายผล	64
4.2.1 พี-เอ็นไดโอด	64
4.2.2 ซอตตี้ไค ไดโอด	65
4.2.3 MPS ไดโอด	66
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดลองตอนที่ 1 และตอนที่ 2	67
5.2 สรุปผลการทดลองตอนที่ 3	67
5.3 สรุปผลการทดลองตอนที่ 4	67
5.4 สรุปผลการทดลองตอนที่ 5	68
5.5 ข้อเสนอแนะ	68
เอกสารอ้างอิง	69
ภาคผนวก	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 4.1 แสดงผลการวัดค่ากระแสรั่วของพินไดโอดที่อุณหภูมิห้อง, 40, 50, 60 องศาเซลเซียส	57
ตารางที่ 4.2 แสดงผลการวัดค่ากระแสรั่วของขอตักไดโอดที่อุณหภูมิห้อง, 40, 50, 60 องศาเซลเซียส	59
ตารางที่ 4.3 แสดงผลการวัดค่ากระแสรั่วของ MPS ไดโอดที่อุณหภูมิห้อง, 40, 50, 60 องศาเซลเซียส	61
ตารางที่ 4.4 แสดงผลการวัดและคำนวณจากการวัดคุณสมบัติการเป็นสวิตช์ ของไดโอดทั้ง 3 ชนิด	63

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 (ก) โครงสร้างง่ายๆของรอยต่อพี-เอ็น	3
รูปที่ 2.1 (ข) สัญลักษณ์ของรอยต่อพี-เอ็น	3
รูปที่ 2.1 (ค) โครงสร้างที่ใช้งานจริงของไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น	3
รูปที่ 2.2 (ก) แสดงลักษณะการกระจายของอะตอมสารเจือ	4
รูปที่ 2.2 (ข) แสดงความหนาแน่นของพาหะที่ด้านทั้งสองของรอยต่อพี-เอ็น ชนิดชั้นบันไดก่อนเกิดรอยต่อ	4
รูปที่ 2.3 ทิศทางการเคลื่อนที่ของโฮลและอิเล็กตรอนเนื่องจากการแพร่และการครีพท์ และทิศทางของกระแสที่เกิดขึ้นบริเวณปอดพาหะ	5
รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็นในภาวะสมดุล	7
รูปที่ 2.5 ไดโอดหรือรอยต่อพี-เอ็น ที่ได้รับการไบอัสตรง	9
รูปที่ 2.6 ลักษณะแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็น ขณะที่มีแรงดัน ไบอัสตรง	10
รูปที่ 2.7 การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของกระแสอิเล็กตรอนและโฮล	11
รูปที่ 2.8 ไดโอดหรือรอยต่อพี-เอ็น ที่ได้รับการไบอัสย้อนกลับ	12
รูปที่ 2.9 ลักษณะแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็น ขณะที่มีแรงดัน ไบอัสย้อนกลับ	13
รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์กระแสและแรงดันของไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็น ในขณะที่ได้รับไบอัสตรงและไบอัสย้อนกลับ	14
รูปที่ 2.11 กราฟแสดงคุณสมบัติ I-V ของไดโอดอย่างง่าย	19
รูปที่ 2.12 แสดงสมบัติต่างๆของรอยต่อแบบลาดเชิงเส้น	20
รูปที่ 2.12 (ก) การกระจายความหนาแน่นของอะตอมสารเจือ	20
รูปที่ 2.12 (ข) การกระจายความหนาแน่นประจุไฟฟ้า	20
รูปที่ 2.12 (ค) การกระจายสนามไฟฟ้า	20
รูปที่ 2.12 (ง) การกระจายศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อ	20
รูปที่ 2.13 (ก) โครงสร้างบริเวณรอยต่อ พี – เอ็น	22
รูปที่ 2.13 (ข) โครงสร้างของตัวเก็บประจุ ไฟฟ้าแบบแผ่น โลหะขนาน	22
รูปที่ 2.14 การฉีด โฮลเข้าไปทางด้านเอ็นขณะรอยต่อได้รับไบอัสตรง	23
รูปที่ 2.15 วงจรสมมูลของไดโอดแบบรอยต่อพีเอ็นขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง	24
รูปที่ 2.16 แสดงวงจรมูลของไดโอดแบบรอยต่อพีเอ็น ในภาวะต่างๆ	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.16 (ก) ขณะได้รับไบแอสย้อนกลับ	26
รูปที่ 2.16 (ข) ขณะได้รับไบแอสตรง	26
รูปที่ 2.17 กราฟคุณสมบัติกระแสและแรงดันของสวิตช์อุดมคติกับไดโอดแบบรอยต่อ	26
รูปที่ 2.18 วงจรไดโอดอย่างง่าย	27
รูปที่ 2.19 แสดงช่วงเวลาปิดของไดโอด	27
รูปที่ 2.19 (ก) การเปลี่ยนแปลงของกระแสไหลผ่านไดโอดที่เวลาต่างๆ ขณะได้รับไบแอสย้อนกลับ	27
รูปที่ 2.19 (ข) การเปลี่ยนแปลงการกระจายความหนาแน่นของพาหะส่วนน้อยที่เวลา t ค่าต่างๆ	28
รูปที่ 2.19 (ค) การลดลงของประจุไฟฟ้าที่สะสมอยู่ในด้านเอ็น	28
รูปที่ 2.19 (ง) การลดลงของแรงดันที่ตกคร่อมไดโอดที่เวลาต่างๆ	28
รูปที่ 2.20 แสดงการแบ่งชนิดของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำกำลังตามชนิดของวัสดุ	30
รูปที่ 2.21 อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำกำลังชนิดต่างๆ	31
รูปที่ 2.22 โครงสร้างของไดโอดกำลังชนิดแรงดันพังทลายสูงโดยมีการ์ดริง	31
รูปที่ 2.23 กราฟแสดงอัตราการทนได้อ่อนกระแสเสิร์จของไดโอด	32
รูปที่ 2.24 แสดงสัญลักษณ์ของขอตั๊กไดโอด	33
รูปที่ 2.25 แสดงโครงสร้างภายในพื้นฐานของขอตั๊กไดโอด	33
รูปที่ 2.26 แสดงตัวอย่างไดโอดพิน	34
รูปที่ 2.26 (ก) โครงสร้างภายในของไดโอดพิน	34
รูปที่ 2.26 (ข) การไบแอสย้อนกลับ	34
รูปที่ 2.26 (ค) การไบแอสไปหน้า (forward bias)	34
รูปที่ 2.27 แสดงคุณลักษณะของไดโอดพิน	35
รูปที่ 2.28 แสดงโครงสร้างของ MPS diode	35
รูปที่ 3.1 ตัวอย่างของ P-N diode	36
รูปที่ 3.2 ตัวอย่างของ Schottky diode	36
รูปที่ 3.3 ตัวอย่าง MPS	37
รูปที่ 3.4 (ก) เครื่องมือที่ใช้ในการจ่ายกระแสให้แก่ตัวไดโอด	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.5 (ข) วงจรการวัดสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดกำลัง	37
รูปที่ 3.5 แสดงเครื่อง Plasma ใช้ในการ Dry Etching	46
รูปที่ 3.6 แสดงปั๊มปรับค่าต่างๆ	47
รูปที่ 3.7 แสดงการต้ม electroless	47
รูปที่ 3.8 แสดงความแตกต่างของไดโอดเมื่อทำการอิเล็กโตรเลส	48
รูปที่ 3.8 (ก) ไดโอดก่อนการต้ม	48
รูปที่ 3.8 (ข) หลังการต้ม	48
รูปที่ 3.9 แสดงเครื่องอบและปั๊มปรับค่าต่างๆ	48
รูปที่ 3.10 แสดงอุปกรณ์ในการบัดกรีต่อขั้วไฟฟ้า	49
รูปที่ 3.11 (ก) พื้นที่บัดกรีต่อขั้วไฟฟ้าด้านหน้า	49
รูปที่ 3.11 (ข) การต่อขั้วด้านหลัง	50
รูปที่ 3.12 แสดงชิ้นงานที่ต่อขั้วไฟฟ้าเรียบร้อยแล้ว	50
รูปที่ 3.13 แสดงวัสดุอุปกรณ์ในการบรรจุภัณฑ์	50
รูปที่ 3.14 ไดโอดที่ผ่านการบรรจุภัณฑ์	51
รูปที่ 3.15 แบบจำลองชุดอุปกรณ์ทดสอบประสิทธิภาพต่ออุณหภูมิ	51
รูปที่ 3.16 (ก) ชุดอุปกรณ์ทดลองจริง	52
รูปที่ 3.16 (ข) ภายในกล่องทดลอง	52
รูปที่ 3.17 วงจรการทดลองสมบัติการเป็นสวิตช์ของไดโอด	53
รูปที่ 4.1 แสดงโครงสร้างพิน ไดโอด	54
รูปที่ 4.2 แสดงโครงสร้างขอตัดก็ ไดโอด	55
รูปที่ 4.3 แสดงโครงสร้างเอ็ม พี เอส ไดโอด	55
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงผลการวัดไดโอดชนิดพิน	56
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงผลการวัดไดโอดชนิดพินที่อุณหภูมิค่าต่างๆ	58
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงผลการวัดไดโอดชนิดขอตัดก็	58
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงผลการวัดไดโอดชนิดขอตัดก็ที่อุณหภูมิค่าต่างๆ	60
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงผลการวัดไดโอดชนิด MPS	60
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงผลการวัดไดโอดชนิด MPS ที่อุณหภูมิค่าต่างๆ	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงสมบัติการเป็นสวิตช์ของพินไดโอด	63
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงสมบัติการเป็นสวิตช์ของหลอดคัทกีไดโอด	63
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงสมบัติการเป็นสวิตช์ของ MPS ไดโอด	64



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ

ปัจจุบันมีการวิจัยพัฒนาอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำกำลัง เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับงานควบคุมในอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย และได้มีการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำกำลังเพิ่มขึ้นอีกมากมายหลายประเภท ตามความต้องการนำไปใช้งาน ซึ่งสามารถแบ่งกว้าง ๆ ได้ คือ ไดโอดกำลัง ทรานซิสเตอร์กำลัง ฯลฯ อุปกรณ์เหล่านี้จะถูกออกแบบให้ทนต่ออุณหภูมิสูง เพื่อนำไปใช้งานที่มีกำลังและกระแสไฟฟ้าสูง นิยมใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เช่น วงจรเรียงกระแส หรือใช้เป็นสวิตช์ในการถ่ายโอนพลังงานระหว่างองค์ประกอบในวงจรหยุดกระแส

ไดโอดกำลัง (Power Diode) เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้าง 2 ชั้น คือ แอนโนด ซึ่งต่อกับสารกึ่งตัวนำชนิดพี และแคโทดต่อกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ถูกออกแบบให้บริเวณรอยต่อมีช่วงกว้างกว่าไดโอดทั่วไป การเก็บบรรจุภัณฑ์ (package) ไดโอดกำลังถือเป็นเรื่องที่มีความสำคัญเพราะเป็นไดโอดซึ่งทำงานที่กระแสสูง จึงมีความร้อนเกิดขึ้น หากการระบายความร้อนไม่ดีจะมีผลให้เกิดความร้อนได้ง่าย อาจทำให้ตัวอุปกรณ์เสียหายได้

สำหรับปริญญาโทฉบับนี้ได้ทำการศึกษา โครงสร้างกระบวนการสร้างการบรรจุภัณฑ์ การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าและการวิเคราะห์ เพื่อศึกษาผลกระทบต่อค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ โดยเน้นไปที่กระแสรั่ว ขณะที่ไดโอดกำลังได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ มีการบรรจุภัณฑ์แบบต่างๆ และที่อุณหภูมิค่าต่างๆ เพื่อศึกษาสมบัติของไดโอดที่ทำการสร้างภายในศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (Thai Microelectronics Center TMEC)

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาวิธีการบรรจุภัณฑ์ไดโอดกำลังในรูปแบบต่างๆ
2. ศึกษาโครงสร้างและหลักการทำงานของไดโอดกำลังที่การไบอัสย้อนกลับ
3. ศึกษาผลกระทบของแสงที่มีผลต่อกระแสของไดโอดกำลัง
4. ศึกษาสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของไดโอดกำลังที่การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิค่าต่างๆ
5. ศึกษาสมบัติการเป็นสวิตช์ของไดโอดกำลังแต่ละชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 เป้าหมาย

เพื่อศึกษาการบรรจุภัณฑ์ ขั้นตอนการวัดไดโอดที่อุณหภูมิค่าต่างๆ ของโครงสร้างไดโอดกำลัง ต่อค่ากระแสและแรงดัน เพื่อให้มีกระแสรั่วน้อยที่สุด เมื่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

ขอบเขตปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้กล่าวถึงอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำกำลังที่เรียกว่า ไดโอดกำลัง เริ่มศึกษาวิธีการบรรจุภัณฑ์ไดโอดกำลัง ในรูปแบบต่างๆ จากนั้นทำการทดลองวัดผลกระทบที่เกิดจากการบรรจุภัณฑ์ โดยศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์ที่แรงดันไบอัสย้อนกลับค่าสูง ที่อุณหภูมิค่าต่างๆ และศึกษาสมบัติการเป็นสวิตช์ของไดโอด

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

1. ศึกษาหลักการทำงานของไดโอด
2. ศึกษาโครงสร้างที่ใช้ในการสร้างไดโอดกำลัง
3. ศึกษาและจัดทำกระบวนการบรรจุภัณฑ์ไดโอดกำลัง
4. ศึกษาและวัดผลกระทบของแสงที่มีผลต่อกระแสของไดโอดกำลัง
5. ศึกษาและวัดผลความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดกำลังที่อุณหภูมิค่าต่างๆ
6. ศึกษาและวัดค่าการฟื้นตัวย้อนกลับของไดโอดกำลัง
7. วิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้
8. รวบรวมข้อมูลและจัดทำรายงาน

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับ

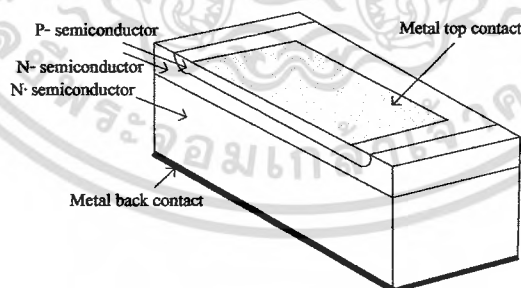
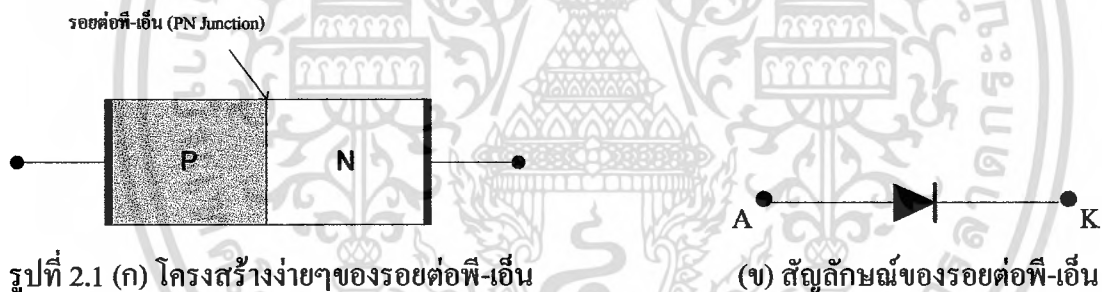
ได้ศึกษาขั้นตอนการบรรจุภัณฑ์ ขั้นตอนการวัดสมบัติกระแสต่อแรงดันที่อุณหภูมิค่าต่างๆ และการวิเคราะห์ผลในการสร้างไดโอดกำลัง เพื่อให้มีกระแสรั่วน้อยที่สุด

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 ทฤษฎีรอยต่อ พี-เอ็น

อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างง่ายที่สุดคือ โครงสร้างรอยต่อพี-เอ็น (p-n junction) ซึ่งได้แก่ ไดโอดชนิดต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำสองส่วนคือ ส่วนที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพีและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ขั้วของสารกึ่งตัวนำชนิดพีเรียกว่า “แอนโนด” (Anode) หรือ ขั้วบวก และขั้วของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นเรียกว่า “แคโทด” (Cathode) หรือขั้วลบ ที่บริเวณรอยต่อของสารกึ่งตัวนำชนิดพีและชนิดเอ็น ถูกเรียกว่า “รอยต่อพี-เอ็น” หรือ “p-n junction” ที่รอยต่อพี-เอ็นนี้จะมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆที่น่าสนใจและเป็นประโยชน์อย่างยิ่ง สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้เป็นอย่างดี ดังนั้นการศึกษาคุณสมบัติและทฤษฎีของรอยต่อพี-เอ็น จึงมีความสำคัญมาก เพราะความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับทฤษฎีรอยต่อพี-เอ็น จะทำให้ง่ายต่อการศึกษาและเข้าใจการทำงานของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำชนิดอื่นๆแม้ว่าสิ่งประดิษฐ์นั้นๆจะมีโครงสร้างซับซ้อนและยุ่งยากเพียงใดก็ตาม



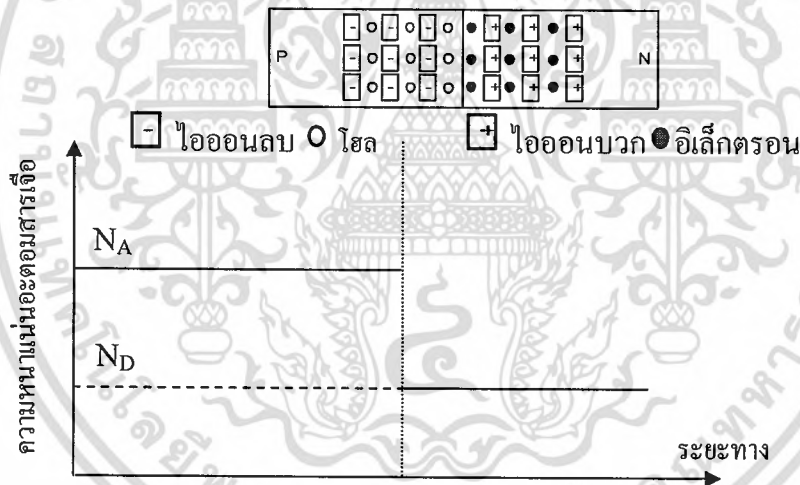
คุณสมบัติที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งของรอยต่อพี-เอ็น หรือ ไดโอด คือการที่ยอมให้กระแสไหลได้เป็นอย่างดี เมื่อมีการให้ไบอัสกระแสแก่รอยต่อ โดยศักย์ไฟฟ้าที่ด้านพี มีค่าเป็นบวกเมื่อเทียบกับศักย์ไฟฟ้าทางด้านเอ็น หรือศักย์ด้านพีสูงกว่าด้านเอ็น เรียกการไบอัสแบบนี้ว่า “ไบอัสตรง” (Forward bias) และกระแสที่ไหลในภาวะนี้ถูกเรียกว่า “กระแสตรง” (Forward current) และในทางตรงกันข้ามถ้าให้ศักย์ไฟฟ้าด้านพีมีค่าเป็นลบเมื่อเทียบกับด้านเอ็น หรือศักย์ด้านเอ็นสูงกว่าด้านพี เรียกว่า “ไบอัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารทสวงนเวสหาหรับการใชงานเพื่การศึกษาเท่านั้น ไม่นุญขาดเหนาไปเซประยชนดานการคา
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

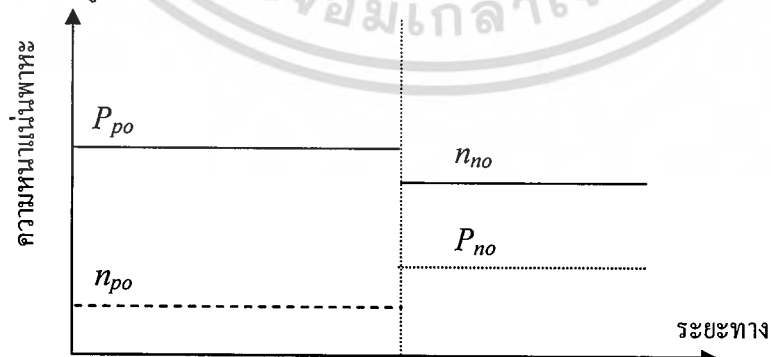
ย้อนกลับ” (Reverse bias) ไดโอดจะไม่ยอมให้กระแสไหลผ่านหรือไหลได้น้อยมาก เรียกว่า “กระแสย้อนกลับ” (Reverse current)

2.1.1 คุณสมบัติของรอยต่อพี-เอ็นในสภาวะสมดุล (PN Junction at equilibrium)

รอยต่อพี-เอ็นถูกสร้างขึ้นได้ด้วยวิธีต่างๆหลายวิธี และจะทำให้ได้รอยต่อที่มีลักษณะต่าง ๆ กัน เริ่มพิจารณาถึงรอยต่อพี-เอ็นชนิดขั้นบันได (step junction) ซึ่งด้านพีจะมีอะตอมสารเจือชนิดพีกระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอ เช่นเดียวกับด้านเอ็นก็จะมีอะตอมสารเจือชนิดเอ็นกระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอเช่นกัน ดังรูปที่ 2.2 (ก) รอยต่อแบบขั้นบันไดในลักษณะนี้สามารถสร้างได้ด้วยวิธีการอัลลอย (alloy) หรือวิธีการอีพิแทกซ์ (epitaxy process) สำหรับรอยต่อพี-เอ็นที่ได้จากวิธีการแพร่สารเจือ (diffusion process) โดยที่จริงแล้วจะมีลักษณะเป็นรอยต่อชนิดลาด (graded junction) แต่อาจอนุโลมให้มีรูปแบบเป็นรอยต่อชนิดขั้นบันไดได้ เช่น ในกรณีที่ การกระจายความหนาแน่นของสารเจือบริเวณรอยต่อมีความชัน (slop) สูงๆ ผลที่ได้จากการวิเคราะห์รอยต่อพี-เอ็นชนิดขั้นบันได สามารถนำไปปรับใช้กับกรณีรอยต่อชนิดลาดได้



รูปที่ 2.2 (ก) แสดงลักษณะการกระจายของอะตอมสารเจือ



(ข) แสดงความหนาแน่นของพาหะที่ด้านทั้งสองของรอยต่อพี-เอ็น ชนิดขั้นบันไดก่อนเกิดรอยต่อ p_{p0} คือ ความหนาแน่นของโฮลทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพี ซึ่งเป็นพาหะส่วนมาก (majority carrier concentration)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

n_{po} คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพี ซึ่งเป็นพาหะส่วนน้อย (minority carrier concentration)

n_{no} คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ซึ่งเป็นพาหะส่วนมาก

p_{no} คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ซึ่งเป็นพาหะส่วนน้อย

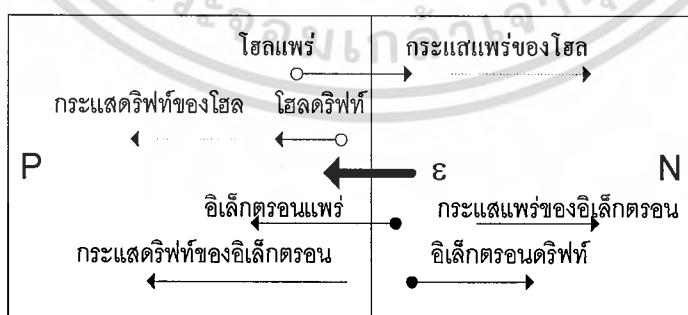
$\boxed{+}$ หรือ N_D^+ คือ สัญลักษณ์ของอะตอมผู้ให้ที่กลายเป็น ไอออนบวก (positively ionized donor atoms) ซึ่งมีสภาพเป็นประจุบวก และไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ (immobile positive charge)

$\boxed{-}$ หรือ N_A^- คือ สัญลักษณ์ของอะตอมผู้รับที่กลายเป็น ไอออนลบ (negatively ionized acceptor atoms) ซึ่งมีสภาพเป็นประจุไฟฟ้าลบ และไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ (immobile negative charge)

- คือ สัญลักษณ์ของอิเล็กตรอนอิสระ (free electron) มีประจุเป็นลบและเคลื่อนที่ได้ (mobile negative charge)

- คือ สัญลักษณ์ของโฮล (hole) มีประจุเป็นบวก และเคลื่อนที่ได้ (mobile positive charge)

ในขณะที่รอยต่อพี-เอ็นยังไม่ถูกสร้างขึ้น ด้านพีและด้านเอ็นจะถูกแยกจากกัน และเมื่อรอยต่อพี-เอ็นถูกสร้างขึ้น จะเห็นว่าเนื่องจากด้านทั้งสองของรอยต่อพี-เอ็นมีความหนาแน่นของพาหะไม่เท่ากันเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดมีแรงกระทำต่อพาหะ เป็นเหตุให้พาหะเคลื่อนที่แพร่ไปยังด้านตรงข้าม เพื่อให้ด้านทั้งสองมีความหนาแน่นของประจุพาหะเท่ากัน ดังนั้น ทันทีที่เกิดรอยต่อจะเกิดการแพร่ของอิเล็กตรอนและโฮลจากด้านที่มีความหนาแน่นสูงกว่าไปยังด้านที่มีความหนาแน่นต่ำกว่า โดยโฮลจะเริ่มแพร่จากด้านพีไปยังด้านเอ็น และอิเล็กตรอนจะแพร่จากด้านเอ็นเข้าไปในด้านพี ทำให้เริ่มมีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นที่บริเวณรอยต่อเรียกว่า “สนามไฟฟ้าภายใน” (built in electric field) ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ทิศทางการเคลื่อนที่ของโฮลและอิเล็กตรอนเนื่องจากการแพร่และการดริฟท์และทิศทางของกระแสที่เกิดขึ้นบริเวณปอดพาหะ

สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้จะต่อต้านการเคลื่อนที่ของโฮลจากด้านพีและต่อต้านการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากด้านเอ็น อัตราการแพร่จะค่อยๆลดลง ในขณะที่สนามไฟฟ้าที่รอยต่อจะมีค่าเพิ่มขึ้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรื่อยๆ เพราะมีประจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้นในที่สุด สนามไฟฟ้าที่รอยต่อจะมีค่ามากพอที่จะยับยั้งการแพร่ของ อิเล็กตรอนและโฮล ได้พอดี อิเล็กตรอนและโฮลจึงไม่สามารถแพร่ข้ามรอยต่อได้อีกต่อไป

สมการ (2.1) ของกระแสโฮลรวมหรือกระแสโฮลสุทธิที่ไหลผ่านรอยต่อพี-เอ็น ได้ด้วยสมการของกระแสการแพร่ดังนี้

$$J_p(\text{total}) = J_p(\text{diff}) + J_p(\text{drift}) \quad (2.1)$$

หรือ

$$J_p(\text{diff}) + J_p(\text{drift}) = 0 \quad (2.2)$$

สมการ (2.2) ในสภาวะสมดุลจะเกิดขึ้นเมื่อสนามไฟฟ้าภายในมีค่ามากพอที่จะต่อต้านการเคลื่อนที่ของโฮลข้ามรอยต่อ หรือก็คือ กระแสโฮลสุทธิเท่ากับศูนย์ กระแสที่เกิดจากการแพร่ของพาหะ (diffusion current) จะเท่ากับกระแสครีฟท์ของพาหะ (drift current) ที่เกิดจากสนามไฟฟ้าภายในรอยต่อ ซึ่งกระแสทั้งสองนี้มีทิศทางตรงกันข้าม กระแสรวมจึงเป็นศูนย์ เรียกภาวะนี้ว่า “ภาวะสมดุล” หรือ (equilibrium)

โดยที่ p ความหนาแน่นของโฮล (hole concentration)
 D_p สัมประสิทธิ์การแพร่ของโฮล (hole's diffusion coefficient)
 μ_p สภาพคล่องของโฮล (hole's mobility)
 E สนามไฟฟ้าภายในรอยต่อ (built in electric field)

บริเวณรอยต่อที่มีสนามไฟฟ้านี้จะไม่มีพาหะอยู่ เนื่องจากถูกอิทธิพลจากสนามไฟฟ้าพัดพาหรือปิดออกไป ดังนั้นย่านนี้จึงถูกเรียกว่า “บริเวณปลดพาหะ” หรือ (depletion region, space charge region, transition region : w) แสดงว่ามีความต่างศักย์เกิดขึ้นระหว่างด้านพีและด้านเอ็น ซึ่งเป็นผลจากการสัมผัสกันของสารกึ่งตัวนำชนิดพีและชนิดเอ็น เรียกว่า “ศักย์สัมผัส” (contact potential) บางครั้งอาจเรียกว่า “กำแพงศักย์ภายใน” หรือ “ ศักย์ภายใน” (built-in potential barrier or built in potential: V_{bi}) ขนาดของศักย์ภายในนี้จะขึ้นอยู่กับค่าความหนาแน่นของอะตอมสารเจือที่ด้านทั้งสองของรอยต่อ และอุณหภูมิที่รอยต่อ

ค่าแรงดัน ไฟฟ้าของกำแพงศักย์ [5] จะมีค่าประมาณ

- 0.2 - 0.3 V ในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่สร้างจากเยอรมันเนียม
- 0.6 - 0.8 V ในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่สร้างจากซิลิกอน
- 1.2 – 1.8 V ในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่สร้างจากสารประกอบแกลเลียม เช่น GaAs, GaP, GaSb

ในกรณีของรอยต่อพี-เอ็นแบบชั้นบันได ซึ่งด้านพีถูกเติมด้วยอะตอมผู้รับ N_A และด้านเอ็นถูกเติมด้วยอะตอมผู้ให้ N_D ดังนั้น

$$n(x_n) = n_n = N_D \quad (2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$n(-x_p) = n_p = \frac{n_i^2}{N_A} \quad (2.4)$$

จะได้สมการค่าแรงดันที่ตกคร่อมบริเวณรอยต่อ

$$V_{bi} = \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right] \quad (2.5)$$

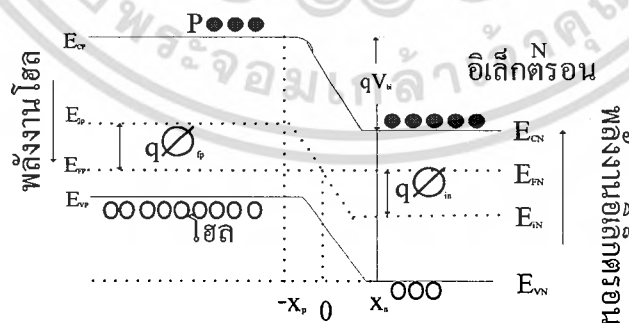
โดยที่ N_D ความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้
 N_A ความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ
 q ประจุไฟฟ้า
 n_i ค่าเฉพาะของสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิด

สมการ (2.6) แสดงถึงความสัมพันธ์ของศักย์ภายใน กับอัตราส่วนของความหนาแน่นของโฮลและอิเล็กตรอนที่กระจายอยู่ที่ด้านทั้งสองของรอยต่อพี-เอ็น

$$\frac{p_p}{p_n} = \frac{n_n}{n_p} = e^{qV_{bi}/kT} \quad (2.6)$$

ความสัมพันธ์นี้จะมีประโยชน์อย่างยิ่งในการคำนวณหาคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของรอยต่อพี-เอ็นต่อไป

เนื่องจากความหนาแน่นของ โฮลและอิเล็กตรอนในด้านทั้งสองไม่เท่ากันจึงเกิดการแพร่ข้ามรอยต่อของพาหะนี้ จากด้านที่มีความหนาแน่นสูงกว่า ไปยังด้านที่มีความหนาแน่นต่ำกว่า โดยโฮลจะแพร่จากด้านพีไปยังเอ็น และอิเล็กตรอนจะแพร่จากด้านเอ็น ไปยังด้านพี ดังแสดงได้ในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็นในภาวะสมดุล

ค่าของ ϕ_p ศักย์เฟอร์มีของสารชนิดพี (Fermi potential of p-type)

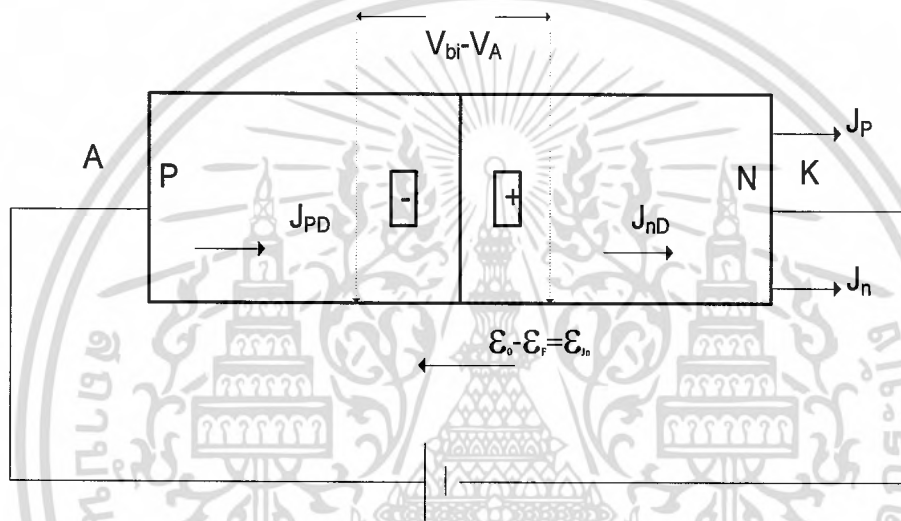
ค่าของ ϕ_n ศักย์เฟอร์มีของสารชนิดเอ็น (Fermi potential of n-type)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานในชั้นเรียน กรุณาอย่าให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รอยต่อไม่เท่ากัน ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะที่รอยต่อ ส่วนใหญ่จะขยายเข้าไปทางด้านซึ่งมีความหนาแน่นสารเจือต่ำ

2.1.2 คุณสมบัติของรอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง (p-n junction at forward biasing)

เมื่อรอยต่อพี-เอ็น ถูกให้ไบอัสตรง (Forward bias) โดยให้ศักย์ไฟฟ้าที่ด้านพีเป็นบวก เมื่อเทียบกับด้านเอ็น ซึ่งทำได้โดยต่อขั้วโลหะด้านพี หรือขั้วแอนโนด เข้ากับขั้วบวกของแบตเตอรี่ และขั้วโลหะด้านเอ็น หรือขั้วแคโทด ต่อเข้ากับขั้วลบของแบตเตอรี่ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ไดโอดหรือรอยต่อพี-เอ็น ที่ได้รับการไบอัสตรง

จะเห็นว่ามีการไหลในวงจร โดยออกจากขั้วบวกของแบตเตอรี่เข้าด้านพี ผ่านรอยต่อออกมาทางด้านเอ็น ไปยังขั้วลบ และกระแสไฟฟ้านี้เป็นผลรวมของกระแสที่เกิดจากอิเล็กตรอน J_n และ J_p

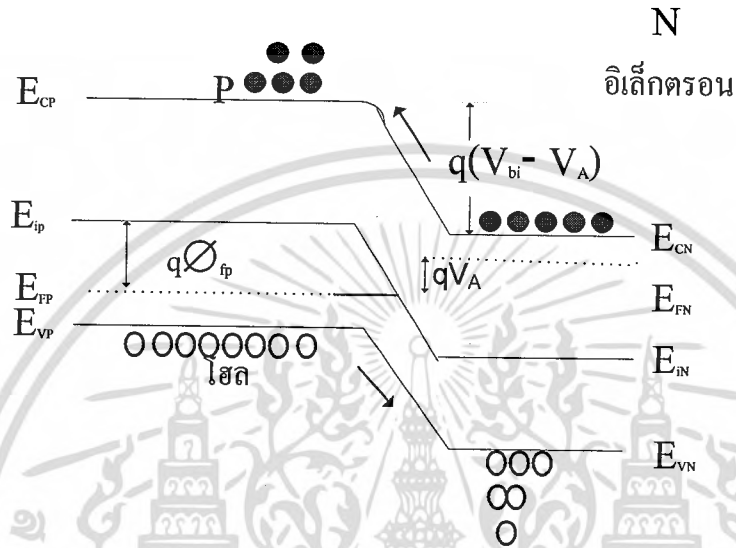
$$\text{กระแสไฟฟ้ารวม } J_T = J_n + J_p \quad (2.11)$$

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าบริเวณปลอดพาหะ (W) เป็นบริเวณที่มีค่าความต้านทานสูง

($R_{\text{depletion region}} \gg R_p + R_n$) แรงดันไฟฟ้าที่ไดโอด (V_A) จึงไปตกคร่อมที่บริเวณรอยต่อซึ่งแรงดันทำให้เกิดสนามไฟฟ้า (E_F) มีทิศทางดังรูปที่ 2.5 จะเห็นว่าตรงข้ามกับสนามไฟฟ้า (E_0) ที่มีอยู่ภายในสนามไฟฟ้าสุทธิที่รอยต่อ E_{nN} มีค่าลดลงเป็น $E_{nN} = E_0 + E_F$ ทำให้สนามไฟฟ้าที่ต่อต้านการแพร่ลดลงเป็นผลทำให้โฮลสามารถแพร่จากด้านพีไปยังด้านเอ็นได้เพิ่มขึ้น และอิเล็กตรอนอิสระแพร่จากด้านเอ็นไปยังด้านพีได้เพิ่มขึ้น เนื่องจากด้านพีมีโฮลจำนวนมากมาย เช่นเดียวกัน ด้านเอ็นก็มีจำนวนอิเล็กตรอนอิสระมากมาย เป็นผลทำให้เกิดกระแส I_F ค่าสูงมากไหลในวงจรหรืออาจสรุปได้ว่า กระแสที่ไหลในวงจรเป็นกระแสที่เกิดจากการแพร่ของประจุส่วนมาก ซึ่งเป็นกระแสที่มีค่าสูงมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ยืมได้เห็นว่าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในสภาวะสมดุลกึ่งตัวนำ (V_{bi}) จะมีขนาดเป็นค่าๆหนึ่ง ดังแสดงได้ในรูปที่ 2.6 แต่เมื่อมีแรงดันไบอัสตรงจะทำให้กึ่งตัวนำลดลงเป็น (V_{bi}-V_A) ระดับพลังงานเฟอร์มิ (E_F) ของทั้งสองด้านของรอยต่อพี-เอ็นมีความแตกต่างเท่ากับ q(V_{bi}-V_A)



รูปที่ 2.6 ลักษณะแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็น ขณะที่มีแรงดันไบอัสตรง

ความชันที่ลดลงจะแสดงถึงการลดลงของสนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อ ระดับค่าพลังงานเฟอร์มิที่แตกต่างกันของทั้งสองด้าน เป็นผลให้พาหะอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากด้านเอ็น ข้ามกำแพงศักย์ (potential barrier) ที่รอยต่อแพร่ไปยังด้านพี ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลเนื่องจากอิเล็กตรอน ไหลจากด้านพีไปด้านเอ็น ส่วนพาหะ โฮลจะเคลื่อนที่จากพีข้ามกำแพงศักย์ที่รอยต่อ แล้วแพร่เข้าไปยังด้านเอ็น ทำให้มีกระแสไฟฟ้าเนื่องจากโฮลไหลจากด้านพีไปยังด้านเอ็น

สมการระยะการแพร่ของอิเล็กตรอน หมายถึง ระยะทางเฉลี่ยที่อิเล็กตรอน (electron diffusion length: L_n) จะสามารถแพร่ไปได้ก่อนที่จะถูกรวมตัวใหม่กับ โฮลและหมดไปในที่สุด

$$L_n = \sqrt{D_n \cdot \tau_n} \tag{2.12}$$

โดยที่ D_n สัมประสิทธิ์การแพร่ของโฮล (electron's diffusion coefficient)

τ_n อายุเฉลี่ยของอิเล็กตรอน

สมการระยะการแพร่ของโฮล หมายถึง ระยะทางเฉลี่ยที่โฮล (hole diffusion length: L_p) จะสามารถแพร่ไปได้ก่อนที่จะถูกรวมตัวใหม่กับอิเล็กตรอนและหมดไปในที่สุด

$$L_p = \sqrt{D_p \cdot \tau_p} \tag{2.13}$$

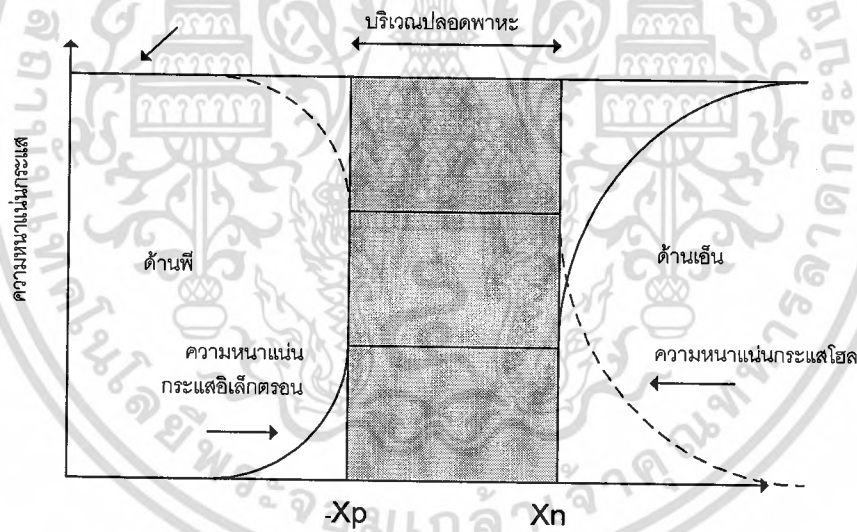
โดยที่ D_p สัมประสิทธิ์การแพร่ของโฮล (hole's diffusion coefficient)

เอกสารนี้เป็นเอกสารภายใต้ลิขสิทธิ์ของสถาบันพระปกเกล้า สำนักงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พาหะส่วนน้อยทางด้านพีและเอ็นบริเวณใกล้ๆกับรอยต่อจะมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น โดยที่โฮลจะเคลื่อนที่แพร่ลึกเข้าไปทางด้านเอ็นตรง ไปยังปลายขั้วแคโทด และเนื่องจากการรวมตัวใหม่ (recombination) กับอิเล็กตรอนซึ่งเป็นพาหะส่วนมากทางด้านเอ็น ความหนาแน่นของโฮลจึงลดลง ในทำนองเดียวกัน อิเล็กตรอนจะแพร่ลึกเข้าไปยังด้านพีตรง ไปยังขั้วแอโนด และจากการรวมตัวใหม่ที่เกิดขึ้น ทำให้ปริมาณลดลง และหมดไปในที่สุด เรียกพาหะส่วนน้อยเหล่านี้ว่า “พาหะส่วนเกิน” (excess carrier) ซึ่งพาหะส่วนเกินที่ถูกฉีดจะมีปริมาณที่น้อยมากเมื่อเทียบกับพาหะส่วนมากที่มีอยู่ในสารกึ่งตัวนำนั้น

ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะของรอยต่อขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง คำนวณเหมือนกับในสถานะสมดุล โดยการแทนค่าแรงดัน ด้วยค่า $(V_{bi} - V_A)$ ดังแสดงได้ด้วยสมการ

$$W = \left[\frac{2\epsilon}{q} \left(\frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right) (V_{bi} - V_A) \right]^{1/2} \tag{2.14}$$



รูปที่ 2.7 การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของกระแสอิเล็กตรอนและโฮล

สำหรับความหนาแน่นของกระแสโฮลและอิเล็กตรอน จะมีการเปลี่ยนแปลงดังแสดงได้ในรูปที่ 2.7 ทำให้กระแสรวมที่ไหลผ่านรอยต่อพี-เอ็นของไดโอด เป็นผลรวมของกระแสอิเล็กตรอนและโฮลที่ไหลผ่านบริเวณปลอดพาหะ แสดงได้ด้วยสมการ

$$J = J_n(-x_p) + J_p(x_n) \tag{2.15}$$

$$I_0 = qAn_i^2 \left(\frac{D_n}{L_n N_A} + \frac{D_p}{L_p N_D} \right) \tag{2.16}$$

แทนค่า I_0 จะได้สมการที่ (2.17)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (2.17) การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยสามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไบอัสของไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็น ได้เรียกว่า สมการไดโอดอุดมคติ (ideal diode 's equation) หรือ สมการช็อกเคิลีย์ (Shockley 's equation)

$$I \approx I_0 \cdot e^{(qV_A/kT-1)} \quad (2.18)$$

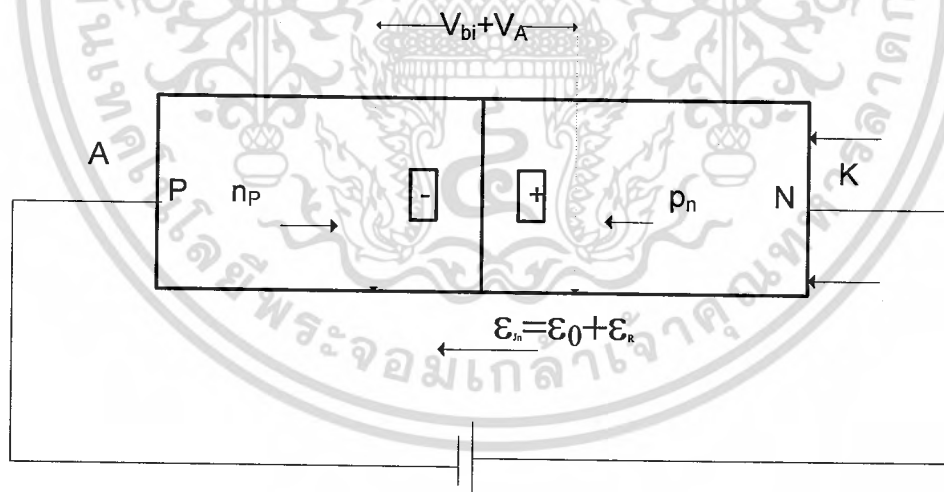
ถ้าให้ E_G คือ ความกว้างของช่องว่างพลังงาน (Energy gap) ของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ จะได้ว่า

$$I \propto e^{(qV_A - E_G)/kT} \quad (2.19)$$

ที่แรงดันไบอัสตรงค่าเดียวกัน กระแสที่ไหลผ่านไดโอดซึ่งสร้างจากสารกึ่งตัวนำที่มีขนาดความกว้างของช่องว่างพลังงานค่าน้อย จะมีค่าสูงกว่าขนาดช่องว่างพลังงานค่ามาก

2.1.3 คุณสมบัติของรอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ (p-n junction at for reverse biasing)

กรณีที่ให้แรงดันไบอัสแก่รอยต่อพี-เอ็น โดยศักย์ที่ขั้วแอนโนดหรือด้านพีเป็นลบเมื่อเทียบกับขั้วแคโทดหรือด้านเอ็น ดังแสดงในรูปที่ 2.8

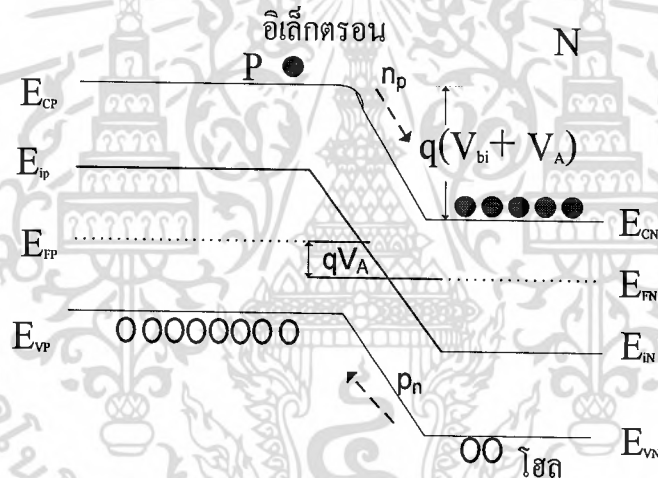


รูปที่ 2.8 ไดโอดหรือรอยต่อพี-เอ็น ที่ได้รับการไบอัสย้อนกลับ

ผลของแรงดันไบอัสย้อนกลับ ($-V_A$) จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นที่บริเวณรอยต่อ เช่นเดียวกับกรณีไบอัสตรงแต่กรณีนี้จะมีทิศทางเดียวกันกับสนามไฟฟ้าภายในรอยต่อ E_n ดังนั้นสนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อจึงมีค่าเพิ่มมากขึ้นเป็น $E_n = E_0 + E_r$ สนามไฟฟ้านี้จะยิ่งต่อต้านการแพร่ของประจุพาหะส่วนมากโฮลและอิเล็กตรอนที่อยู่ใกล้ๆกับขอบของบริเวณปลอดพาหะ จะถูกสนามไฟฟ้านี้พัดพาให้เคลื่อนห่างออกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกไป จากรอยต่อมากยิ่งขึ้น จึงทำให้ความกว้างบริเวณปลอดพาหะขยายกว้างมากขึ้นและกำแพงศักย์ที่รอยต่อจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น $(V_{bi} + V_A)$ ทำให้โฮลจากด้านพี และอิเล็กตรอนจากด้านเอ็นมีพาหะส่วนน้อยคือ n_p และ p_n ปรากฏอยู่ อิเล็กตรอน n_p จากด้านพี สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อไปเข้าทางด้านเอ็นได้ และ โฮล p_n จากด้านเอ็นก็สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อเข้าไปทางด้านพีได้ ทำให้เกิดมีกระแสค่าหนึ่งที่มีค่าน้อยๆ เพราะพาหะดังกล่าวนี้มีปริมาณน้อยมาก นั่นคือพาหะส่วนน้อย ไหลผ่านรอยต่อ โดยมีทิศทางตรงข้ามหรือย้อนกลับกับกระแสที่ไหลในกรณีไบอัสตรง ซึ่งจะมีค่าราว $10^{-6} - 10^{-15}$ แอมแปร์ (ขึ้นกับพื้นที่รอยต่อ) และมีค่าคงที่ ที่อุณหภูมิคงที่ค่าๆหนึ่ง จึงถูกเรียกว่า “กระแสอิ่มตัว” (Saturation Current : I_0) หรือ เรียกว่า “กระแสอิ่มตัวย้อนกลับ” (Reverse-bias Saturation Current: I_R)

บริเวณปลอดพาหะที่กว้างขึ้นทำให้ระดับแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็นจะมีขนาดแตกต่างกันเท่ากับ qV_A โดยที่ระดับเฟอร์มีด้านพี จะสูงกว่าระดับเฟอร์มีด้านเอ็น ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ลักษณะแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็น ขณะที่มีแรงดันไบอัสย้อนกลับ

สนามไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นที่บริเวณปลอดพาหะ เห็นได้จากความชันของแถบพลังงานซึ่งเพิ่มขึ้นที่บริเวณปลอดพาหะ โดยที่สามารถหาค่าความกว้างบริเวณปลอดพาหะรวมได้จากสมการ (2.20)

$$w = \left[\frac{2\epsilon}{q} \left(\frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right) (V_{bi} - (-V_A)) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.20)$$

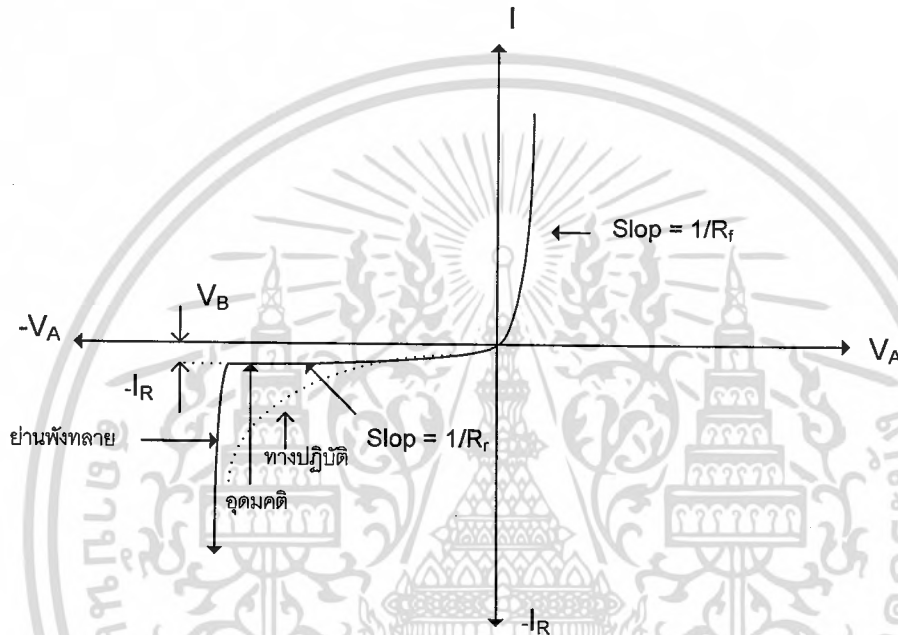
ขณะที่รอยต่อพี-เอ็นได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ โฮลทางด้านเอ็นและอิเล็กตรอนทางด้านพี จะเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อ ทำให้ความหนาแน่นของพาหะส่วนน้อยที่ด้านทั้งสองของรอยต่อ มีค่าลดลงจากสภาวะสมดุล โดยกระแสที่ไหลผ่านไดโอดจะหาได้จากสมการที่ (2.21)

$$I_R \approx -I_0 = -qA n_i^2 \left(\frac{D_n}{L_n p_{pp}} + \frac{D_p}{L_p n_{nn}} \right) \quad (2.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 การพังทลายที่รอยต่อพี-เอ็น (p-n junction breakdown)

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น แสดงได้ดังรูปที่ 2.10 จะเห็นว่า รอยต่อยอมให้กระแสไหลผ่านได้ดี ขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง และกระแสจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วกับแรงดันไบอัสตรง อย่างเอ็กซ์โปเนนเชียล



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์กระแสและแรงดันของไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็น
ในขณะได้รับไบอัสตรงและไบอัสย้อนกลับ

ความต้านทานของไดโอดแบบรอยต่อในกรณีนี้จะมีค่าน้อยมาก “ความต้านทานไบอัสตรง” (forward biased resistance : R_f) สังเกตได้จากความชันของกราฟที่มีค่าสูงมาก โดยที่ความชันของกราฟเท่ากับส่วนกลับของค่าความต้านทานหรือ $\frac{\Delta I}{\Delta V} = \frac{1}{R}$ แต่เมื่อไบอัสย้อนกลับ รอยต่อจะกลับมีค่าความต้านทานสูงมากๆ “ความต้านทานไบอัสย้อนกลับ” (Reverse biased resistance : R_r) กราฟช่วงนี้จะมีค่าความชันน้อยมากๆ กระแสที่ไหลขณะนี้เป็นกระแสอิ่มประมาณว่าคงที่ และมีขนาดค่าน้อยๆ คุณสมบัติของกราฟนี้ ถูกเรียกว่า Rectifier ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานต่อไปได้เป็นอย่างดี การพังทลายของรอยต่อพี-เอ็นสามารถอธิบายด้วยกลไกได้ 2 ลักษณะ คือ การพังทลายแบบอะวาลันซ์ และการพังทลายแบบซีเนอร์

2.2.1 การพังทลายขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

ในทางปฏิบัติจะพบว่าเมื่อรอยต่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ จะมีกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ I_0 หรือ I_R ซึ่งปกติมีค่าน้อยมากและพบว่าเมื่อค่าเกือบบางที จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและมีค่าเข้าสู่อนันต์ในที่สุด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตเห็นาเปไซประโยชน์ดานการค่า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แม้ว่าจะเพิ่มแรงดันไบอัสแต่กระแสนี้จะไม่เปลี่ยนแปลงหรือเปลี่ยนแปลงน้อยมาก เมื่อให้แรงดันไบอัสย้อนกลับสูงถึงค่าหนึ่ง (V_B) กระแสนี้จะเพิ่มขึ้นอย่างมากและรวดเร็ว ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า “การพังทลายของรอยต่อ” (Junction Breakdown phenomena) เมื่อเกิดแล้วตัวไดโอดจะมีค่าความต้านทานน้อยมากเกือบเป็นศูนย์ ทำให้เกิดความร้อนจนไหม้และเสียหายได้ แรงดันไบอัสซึ่งทำให้เกิดปรากฏการณ์นี้เรียกว่า “แรงดันพังทลาย” (Breakdown voltage : V_B) หลังจากที่เกิดพังทลายแล้วจะมีเพียงกระแสเท่านั้นที่เพิ่ม ส่วนแรงดันที่ตกคร่อมไดโอดจะมีค่าคงที่ คุณสมบัติดังกล่าวนี้จะถูกนำไปใช้งานเป็น “ตัวควบคุมแรงดันให้คงที่” (voltage regulator) ในอุปกรณ์จ่ายแรงดันคงที่ Regulated voltage supply

2.3 การพังทลายของรอยต่อแบบอะวาลันซ์ (Avalanche breakdown)

การพังทลายของรอยต่อแบบนี้จะเกิดขึ้นกับ ไดโอดทั่วๆ ไป ซึ่งด้านทั้งสองของรอยต่อมีความหนาแน่นอะตอมสารเจือในระดับปกติ ขณะที่รอยต่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ ในค่าที่ไม่สูงมาก และน้อยกว่าแรงดันพังทลาย (V_B) กระแสอิมพัลส์ที่ไหลผ่าน ไดโอดเป็นกระแสของพาหะส่วนน้อยที่เคลื่อนที่ผ่านรอยต่อหรือบริเวณปลอดพาหะที่มีสนามไฟฟ้า ด้วยความเร็วค่าหนึ่ง มีพลังงานจลน์และเคลื่อนที่ผ่านบริเวณนี้จะเกิดการชนกับอะตอมอยู่เสมอ ทำให้พาหะมีการสูญเสียพลังงาน เมื่อแรงดันเพิ่มขึ้น มีพลังงานที่เพิ่มขึ้นพอที่จะชนอะตอมและทำให้เกิดการ ไอออไนซ์ขึ้น ได้คู่อิเล็กตรอน-โฮล โดยอิเล็กตรอนตัวใหม่จะได้รับพลังงานจากการถูกชนและกระโดดขึ้นไปอยู่ในแถบความนำ กลายเป็นอิเล็กตรอนนำไฟฟ้า เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “การ ไอออไนซ์เนื่องจากการชน” (impact ionization) และจะมีการเกิดของปรากฏการณ์นี้อย่างต่อเนื่อง ดังนั้นกระแสอิมพัลส์ย้อนกลับจึงมีค่าเพิ่มขึ้นกว่าเดิมอย่างรวดเร็ว และจะเพิ่มขึ้นไปเรื่อยๆ กับการเพิ่มขึ้นของแรงดันไบอัสย้อนกลับจนถึงแรงดันพังทลาย ปริมาณของพาหะจะมีค่าสูงมาก และกระแสอิมพัลส์สูงมากจนเป็นค่าอนันต์

การเพิ่มขึ้นของกระแสก่อนการพังทลายเกี่ยวกับปริมาณพาหะ แสดงได้ด้วยค่า “แฟกเตอร์การคูณ” (Multiplication factor: M) แทนได้ด้วยสมการ (2.22)

$$M \equiv \frac{I}{I_0} \quad (2.22)$$

ขณะที่กระแสไหลมีค่าสูงมากและเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว เรียกว่า ช่วงเริ่มพังทลาย หรือ soft breakdown

แรงดันพังทลายของรอยต่อสามารถเปลี่ยนแปลงและควบคุมได้ โดยกำหนดความหนาแน่นอะตอมสารเจือในสารกึ่งตัวนำจะ ได้ดังสมการ (2.23)

$$V_B \propto \frac{1}{(N_B)^{0.75}} \quad (2.23)$$

ที่อุณหภูมิสูงขึ้นค่าของสนามไฟฟ้าวิกฤติ E_c จะเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าแรงดันพังทลายแบบอะวาลันซ์มีค่าสูงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นด้วย เป็นคุณสมบัติเฉพาะของการพังทลายชนิดนี้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 การพังทลายแบบซีเนอร์ (Zener breakdown)

จะเกิดกับรอยต่อพี-เอ็นที่ถูกเติมสารเจือปนปริมาณที่สูงมาก จะทำให้ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะแคบมาก สนามไฟฟ้าบริเวณรอยต่อจึงมีค่าสูง เป็นผลให้เกิดการปลดปล่อยด้วยสนามไฟฟ้า ของอะตอมสารกึ่งตัวนำบริเวณรอยต่อ และอิเล็กตรอนอิสระที่เกิดขึ้นจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าและเคลื่อนที่เข้าไปด้านเอ็น ส่วนโฮลเคลื่อนที่ไปด้านพี ทำให้เกิดกระแสย้อนกลับเป็นจำนวนมากไหลผ่านไดโอด มักใช้ปรากฏการณ์การทะลุผ่านกำแพงศักย์ (Tunneling effect) ในทฤษฎีควอนตัมซึ่งกล่าวถึงการทะลุผ่านกำแพงศักย์ของอนุภาคอธิบายการเกิดของปรากฏการณ์นี้ ว่าการการทะลุผ่านจะมีค่ามากขึ้น ถ้าขนาดความกว้างของกำแพงศักย์มีค่าน้อยลง เมื่อแรงดันไบอัสสูงขึ้น จำนวนอิเล็กตรอนวาเลนซ์ในแถบวาเลนซ์ด้านพีสามารถทะลุผ่านกำแพงศักย์ไปยังแถบความนำของด้านเอ็นมากขึ้น ทำให้กระแสเพิ่มขึ้น

ค่าแรงดันพังทลายสามารถช่วยบอกชนิดการพังทลายได้ และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าแรงดันพังทลายชนิดนี้จะเปลี่ยนแปลงลดลง การเพิ่มขึ้นของกระแสการพังทลายแบบซีเนอร์ จะมีลักษณะเป็นไปแบบทันทีทันใด รวดเร็วกว่าการพังทลายแบบอะวาแลนซ์

2.5 ปรากฏการณ์การพันซ์ทรู (Punch Through Phenomena)

เป็นปรากฏการณ์หนึ่งที่มีเกิดกับ ไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น ที่มีขนาดของส่วนเอ็นหรือส่วนพีแคบๆ narrow base diode ขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ บริเวณปลอดพาหะของรอยต่อพี-เอ็นด้านที่แคบกว่าหรือด้านที่ถูกเติมด้วยสารเจือปนปริมาณสูงกว่าจะขยายกว้างออกไป เมื่อถึงที่แรงดันค่าหนึ่ง บริเวณปลอดพาหะของรอยต่อพี-เอ็นจะขยายออกไปจนถึงขั้วสัมผัสของอีกด้าน ทำให้กระแสนย้อนกลับมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและมีค่าสูงมาก และจะเกิดการพังทลายที่รอยต่อของไดโอดขึ้น เรียกแรงดันที่ทำให้เกิดการพันซ์ทรูว่า “แรงดันพันซ์ทรู” (Punch through voltage : V_{pt})

2.6 กระแส R-G (Recombination-Generation current)

ขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ ในทางอุดมคติจะเป็นค่าที่น้อยมากและคงที่ประมาณ 10^{-15} A ไม่เปลี่ยนแปลงกับแรงดันไบอัส หรือที่เรียกว่ากระแสอิ่มตัว แต่ในทางปฏิบัติแล้วไม่เป็นจริงตามนี้ ซึ่งกระแสนย้อนกลับจะมีค่ามากกว่าที่คำนวณได้และไม่คงที่ เปลี่ยนแปลงตามแรงดันไบอัส อาจเป็นสาเหตุมาจาก ผลึกสารกึ่งตัวนำที่นำมาสร้างเป็นไดโอด ทำให้ลักษณะแถบพลังงานของผลึกสารกึ่งตัวนำต่างจากกรณีอุดมคติ คือมีระดับพลังงานแปลกปลอมอื่นๆ ขึ้นที่ช่องว่างพลังงาน ซึ่งระดับพลังงานเหล่านี้มักจะอยู่ใกล้ๆกับระดับกึ่งกลางของแถบพลังงานและถูกเรียกว่า “ระดับลึก” (deep level) ทำหน้าที่เป็น “ระดับปลดปล่อย” (generation) หรือ “กับดัก” (trap level) หรือ “ศูนย์กลางการรวมตัว” (recombination center) ของอิเล็กตรอนและโฮลได้ ในไดโอดเมื่อมีระดับพลังงานแปลกปลอมเหล่านี้ อยู่ที่บริเวณปลอดพาหะ ขณะที่อุณหภูมิสูงกว่าศูนย์เคลวิน และไดโอดได้รับแรงดันไบอัส จะมีกระแสชนิดใหม่เกิดขึ้นอีกชนิดหนึ่ง ที่บริเวณปลอดพาหะซึ่งเรียกว่า กระแสรวมตัวใหม่และกระแสการเกิด

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริเวณปลอดพาหะ หรือ Depletion-layer Recombination-Generation current หรือเรียกสั้นๆว่า “กระแส R-G” ซึ่งเป็นผลรวมที่เกิดจากการรวมตัวและการเกิด ของพาหะที่บริเวณปลอดพาหะ ทำให้มีกระแสย้อนกลับอีกชนิดหนึ่งเกิดขึ้น เรียกว่า “กระแสเนื่องจากการเกิด” (Generation current : I_{Gen}) สามารถหาค่ากระแส R-G ได้จากสมการ 2.24 โดยที่

$$I_{Ro} = \frac{Aq n_i W}{2\tau_o} \quad (2.24)$$

เมื่อ A คือ พื้นที่หน้าตัดของรอยต่อ

$$I_{R-G} = I_R = I_{Ro} (e^{\frac{qVA}{2kT}} - 1) \quad (2.25)$$

ดังนั้นสมการไดโอดที่ใช้งานจริง คือ

$$I = I_{ideal} + I_{R-G} \quad (2.26)$$

สำหรับรอยต่อที่ได้รับแรงดันไบอัสตรง ความหนาแน่นของพาหะส่วนน้อยที่บริเวณใกล้เคียงกับย่านปลอดพาหะ จะมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าระดับภาวะสมดุลปกติ และเนื่องจากมีระดับพลังงานศูนย์กลางการรวมตัว (E_r) อยู่ด้วย จึงทำให้มีการรวมตัวของพาหะในบริเวณปลอดพาหะได้เป็นอย่างดี จึงเกิดกระแสชนิดใหม่เพิ่มขึ้นจากปกติ เรียกว่า “กระแสเนื่องจากการรวมตัวใหม่” (Recombination current : I_r)

การเกิด (Generation) และการรวมตัวใหม่ (Recombination) ของอิเล็กตรอน-โฮล ในย่านปลอดพาหะของไดโอดโดยผ่านระดับ “ศูนย์กลางการเกิดและการรวมตัวใหม่” (Generation-Recombination center : E_r) ขณะได้รับไบอัส ทำให้มีกระแสชนิดใหม่เกิดขึ้น เรียกรวมว่า กระแสการรวมตัวใหม่และการเกิด หรือ กระแส R-G คือกระแสอีกส่วนหนึ่งที่ไหลผ่านไดโอด สามารถหาค่ากระแสรวมได้จากสมการที่ (2.27) และ (2.28)

กรณีไบอัสตรง จะได้กระแสรวม

$$I_{for} = I_o (e^{\frac{qVA}{kT}} - 1) + I_{Ro} (e^{\frac{qVA}{kT}} - 1) \quad (2.27)$$

กรณีไบอัสย้อนกลับ จะได้กระแสรวม

$$I_{rev} \approx -I_{Ro} = -\frac{Aq n_i W}{2\tau_o} \quad (2.28)$$

ผลของกระแส R-G ที่มีต่อคุณสมบัติของไดโอด เมื่อให้ η คือแฟกเตอร์อุดมคติ (ideality factor)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (2.29) การค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติของรอยต่อพี-เอ็น

การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมิผลต่อขนาดของกระแสที่ไหลผ่านรอยต่อพี-เอ็น ทั้งในสภาวะไบอัสด้านหน้าและไบอัสย้อนกลับ โดยการวิเคราะห์ทางทฤษฎีจากสมการไดโอดได้ตั้งจากสมการช็อกเคิลีย์ (Shockley's equation) สมการ (2.18)

จากสมการจะเห็นว่าพารามิเตอร์ I_0 และพจน์เอกโพเนนเชียล qV_A/kT ที่ขึ้นกับอุณหภูมิ และจะเห็นว่า I_0 จะขึ้นกับอุณหภูมิ T โดยผ่านค่า n_i^2 จะได้สมการ (2.30)

$$n_i^2 = AT^3 \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right) \quad (2.30)$$

ดังนั้น I_0 สามารถเขียนได้เป็น

$$I_0 = CT^3 \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right) \quad (2.31)$$

โดยที่ C เป็นการรวมค่าคงที่ทุกพจน์ที่ประมาณว่าไม่ขึ้นกับ T

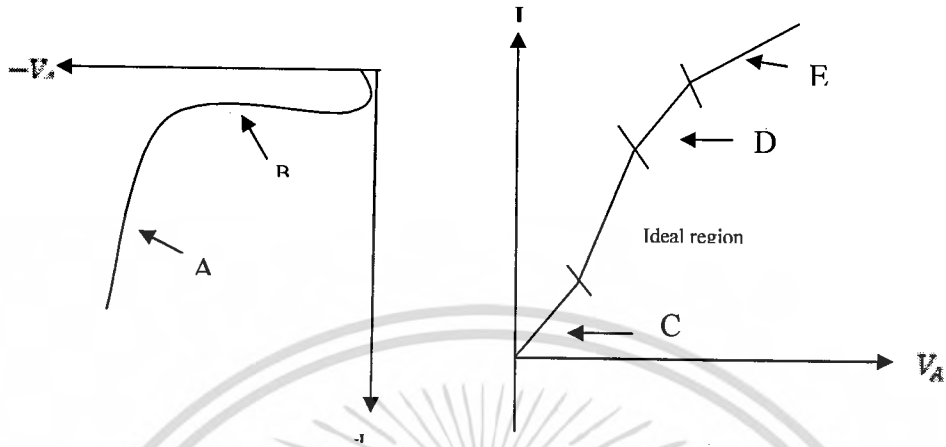
$$\frac{1}{I_0} \frac{dI_0}{dT} = \frac{d}{dT} (\ln I_0) = \frac{d}{dT} \left(\ln C + 3 \ln T - \frac{E_g}{kT} \right) = \frac{3}{T} + \frac{E_g}{kT^2} \quad (2.32)$$

สำหรับ Si ซึ่งมีค่า $E_g = 1.1$ eV ที่อุณหภูมิห้อง 300 K การเปลี่ยนแปลงของ I_0 มีค่าประมาณ 15% K ภายใต้สภาวะการไบอัสย้อนกลับ กระแส I_{GR} ตามสมการ (2.33) จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ T อันเนื่องจาก n_i พบว่า si จะมีการเปลี่ยนแปลงของ I_{GR} มีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของ I_0 ดังนั้นการขึ้นอยู่กั T ของ V_A ที่ค่ากระแสคงที่ จะได้

$$\left. \frac{\partial V_A}{\partial T} \right|_{I=\text{คงที่}} = -\frac{(n/q)(3kT + E_g) - V_A}{T} \quad (\text{VK}^{-1}) \quad (2.33)$$

2.8 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของไดโอดในทางปฏิบัติ

จากการวิเคราะห์คุณสมบัติของไดโอด ขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง ทั้งกรณี การฉีดระดับต่ำ การฉีดระดับสูง และขณะได้รับการไบอัสย้อนกลับ โดยการพิจารณาเงื่อนไขและผลปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้น จะทำให้ได้คุณสมบัติความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของไดโอดในทางปฏิบัติ โดยประมาณ ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 กราฟแสดงคุณสมบัติ I-V ของไดโอดอย่างง่าย ๆ ซึ่งแสดงกระแสย้อนต่างๆ ที่เกิดจากผลของปรากฏการณ์ต่างๆในทางปฏิบัติ

ในช่วง A กระแสที่ไหลได้แก่ กระแสพังทลาย (Breakdown current) ซึ่งอาจเป็นการพังทลายแบบอะวาลันซ์ หรือ แบบซีเนอร์ก็ได้ ช่วง B,C กระแสที่ไหลในช่วงนี้ ส่วนใหญ่เป็นผลมาจากการเกิดกระแส R-G (Recombination Generation) ซึ่งเกิดจากบริเวณปลอดพาหะ ช่วงอุดมคติ (Ideal region) เป็นช่วงที่ตรงกับการวิเคราะห์ห้อย่างอุดมคติ และคุณสมบัติเป็นไปตามสมการของไดโอด ช่วง D กระแสที่ไหลจะเป็นไปตามผลของกรณีการฉีดระดับสูง และช่วง E กระแสที่ไหลจะเป็นไปตามผลของกรณีการฉีดระดับสูง และช่วง E กระแสที่ไหลจะเป็นผลที่เกิดจากความต้านทานอนุกรม ของส่วนเอ็นและพีนอกบริเวณปลอดพาหะ

2.9 รอยต่อแบบลาดเชิงเส้น (Linearly graded junction)

การสร้างรอยต่อประเภทนี้ทำได้โดยวิธีการแพร่อะตอมของสารเจือชนิดหนึ่งชนิดใดเข้าไปในผลึกสารกึ่งตัวนำที่มีอะตอมของสารเจือชนิดตรงข้ามกระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอ อย่างไรก็ตาม ความสำเร็จของรอยต่อมีขนาดคืบหน้ามาก อาจพิจารณาเป็นรอยต่อแบบขั้นบันไดได้ ดังนั้นความลึกของรอยต่อค่ามากๆ จะทำให้รอยต่อชนิดลาดเชิงเส้นสมบูรณ์ เพื่อง่ายต่อการวิเคราะห์ในเบื้องต้น เราพิจารณารอยต่อแบบลาดเชิงเส้น (Linearly graded junction) ซึ่งการกระจายของอะตอมสารเจือแสดงได้ดังรูปที่ 2.12 (ก) และเขียนเป็นสมการเส้นตรงได้ดังนี้

$$N_D - N_A = ax \tag{2.30}$$

โดยที่ a คือความชันของกราฟการกระจายอะตอมของสารเจือสุทธิที่ตำแหน่งรอยต่อ หรือเรียกว่า “ค่าคงที่ความชัน (grading constant)” ถ้ากำหนดให้ความกว้างบริเวณปลอดพาหะมีค่า W ดังนั้นพิจารณาบริเวณปลอดพาหะตั้งแต่ $X = -\frac{W}{2}$ จนถึง $X = \frac{W}{2}$ จะได้ว่า ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าที่บริเวณปลอดพาหะในช่วง $-\frac{W}{2} \leq X \leq \frac{W}{2}$ ก็คือ

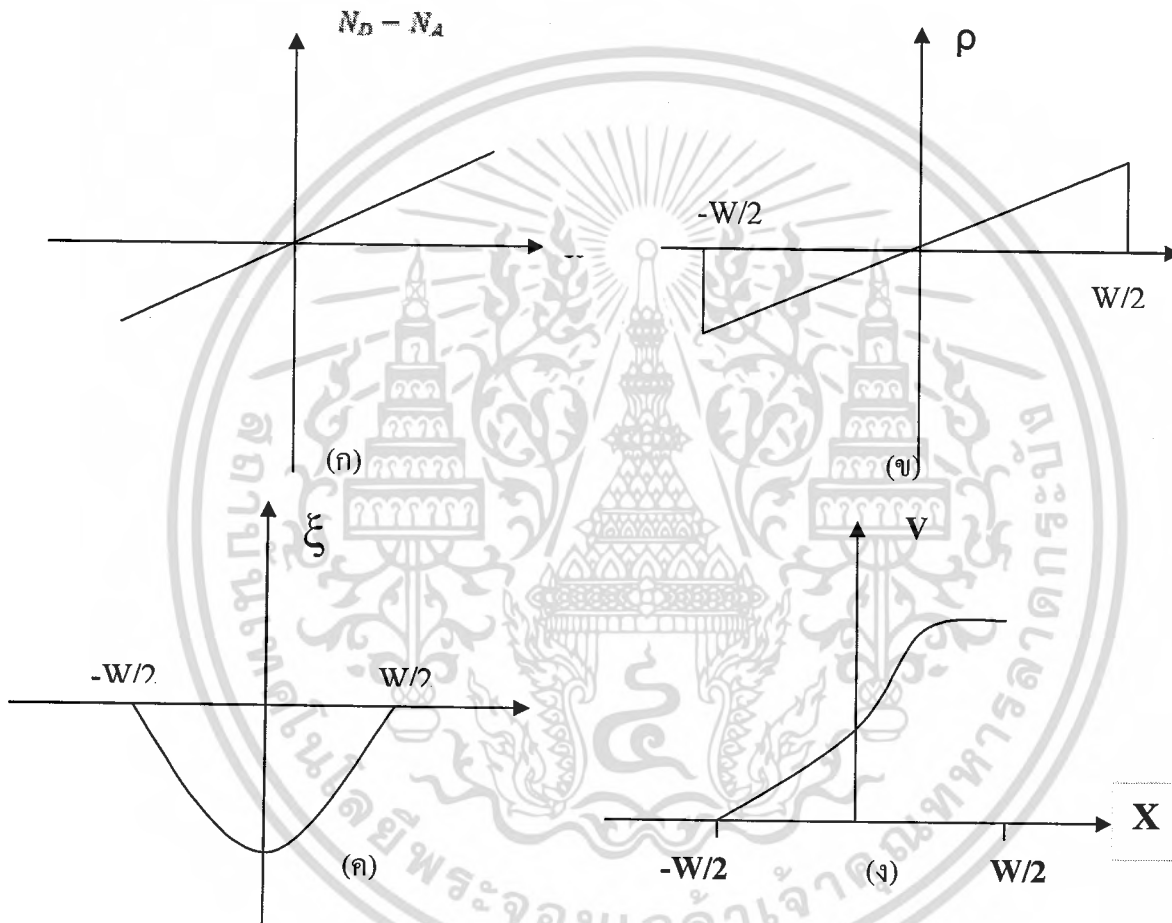
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\rho(x) = q \cdot a \cdot x \quad (2.31)$$

นอกจากนี้ที่บริเวณที่อยู่นอกย่านปลอดพาหะหรือ $-\frac{W}{2} \leq x \leq \frac{W}{2}$

$$\rho(x) = 0 \quad (2.32)$$

จะเห็นได้ว่าความหนาแน่นประจุไฟฟ้า มีลักษณะสมมาตรรอบๆ จุด $x=0$



รูปที่ 2.12 แสดงคุณสมบัติต่างๆของรอยต่อแบบลาดเชิงเส้น

(ก) การกระจายความหนาแน่นของอะตอมสารเจือ (ข) การกระจายความหนาแน่นประจุไฟฟ้า

(ค) การกระจายสนามไฟฟ้า

(ง) การกระจายศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อ

ดังนั้นความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ w หาได้โดยพิจารณาว่า แรงดันที่ตกคร่อมบริเวณปลอดพาหะมีค่าเท่ากับ $(V_{bi} - V_A)$ หรือ ก็คือที่ $x = \frac{W}{2}, V(x) = V_{bi} \pm V_A$

โดยกรณีไบอัสตรง $V(x) = V_{bi} - V_A$ และในกรณีไบอัสย้อนกลับ $V(x) = V_{bi} + V_A$

ดังนั้นสมการที่ได้ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$W = \left[\frac{12\varepsilon}{qa} (V_{bi} \pm V_A) \right]^{\frac{1}{3}} \quad (2.33)$$

จะสังเกตเห็นได้ว่า ในรอยต่อแบบลาดเชิงเส้น ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะจะแปรตามรากที่สามของแรงดันที่รอยต่อ หรือ

$$W \propto (V_{bi} \pm V_A)^{\frac{1}{3}} \quad (2.34)$$

2.10 ความจุไฟฟ้าของไดโอดแบบรอยต่อ p-n (Capacitance of the p-n junction diode)

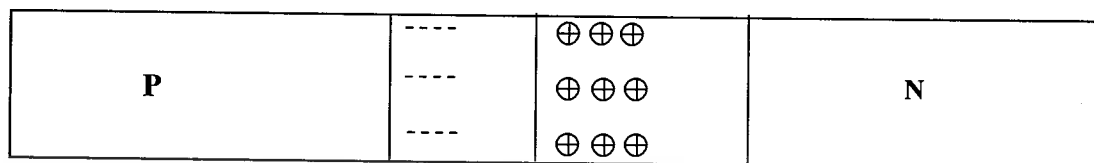
ไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น สามารถแสดงคุณสมบัติตัวเก็บประจุได้ โดยจะทำให้เกิดความจุทางไฟฟ้า(capacitance) ได้ 2 แบบ คือ

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

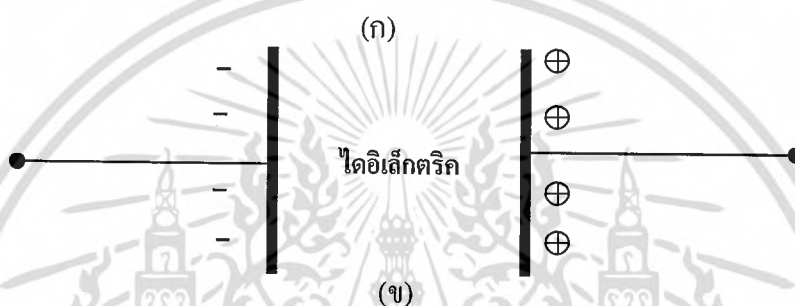
ที่บริเวณรอยต่อพี-เอ็น แบบชันบันได ในภาวะสมดุลจะเห็นว่า บริเวณปลอดพาหะ หรือบางที่เรียกว่า “บริเวณทรานซิชัน”(Transition-region) จะประกอบด้วย ประจุไฟฟ้าบวกที่เกิดจากไอออนบวกของอะตอมผู้ให้ และ ไอออนลบ ของอะตอมผู้รับ ซึ่งย่านนี้มีความกว้างเท่ากับ W และมีสภาพคล้ายสาร ไดอิเล็กตริก (dielectric) ทำหน้าที่แยกด้านเอ็นและด้านพีของไดโอดออกจากกัน จึงถูกพิจารณาว่ามีโครงสร้างเหมือนกับ ตัวเก็บประจุแบบแผ่นโลหะที่ขนานกัน (parallel plate capacitor) ต่างกันเฉพาะ กรณีของไดโอด ประจุไฟฟ้าจะกระจายอยู่ทั่วไปในบริเวณปลอดพาหะดังรูปที่ 2.12 (ก) แต่กรณีของตัวเก็บประจุแบบแผ่นโลหะขนาน ประจุไฟฟ้าจะปรากฏเฉพาะที่แผ่นโลหะทั้งสองเท่านั้น ในส่วนของสารไดอิเล็กตริก จะไม่มีประจุไฟฟ้าดังในรูปที่ 2.13(ข)

ดังนั้น ที่บริเวณรอยต่อพี-เอ็นจึงมีคุณสมบัติเป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้าได้ และค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า “ความจุไฟฟ้าที่รอยต่อ”(junction capacitance: C_j) หรือความจุไฟฟ้าบริเวณปลอดพาหะ(depletion-layer capacitance or space charge capacitance) หรือ “ความจุไฟฟ้าบริเวณทรานซิชัน” (Transition barrier capacitance)

บริเวณปลอดพาหะ



← W →



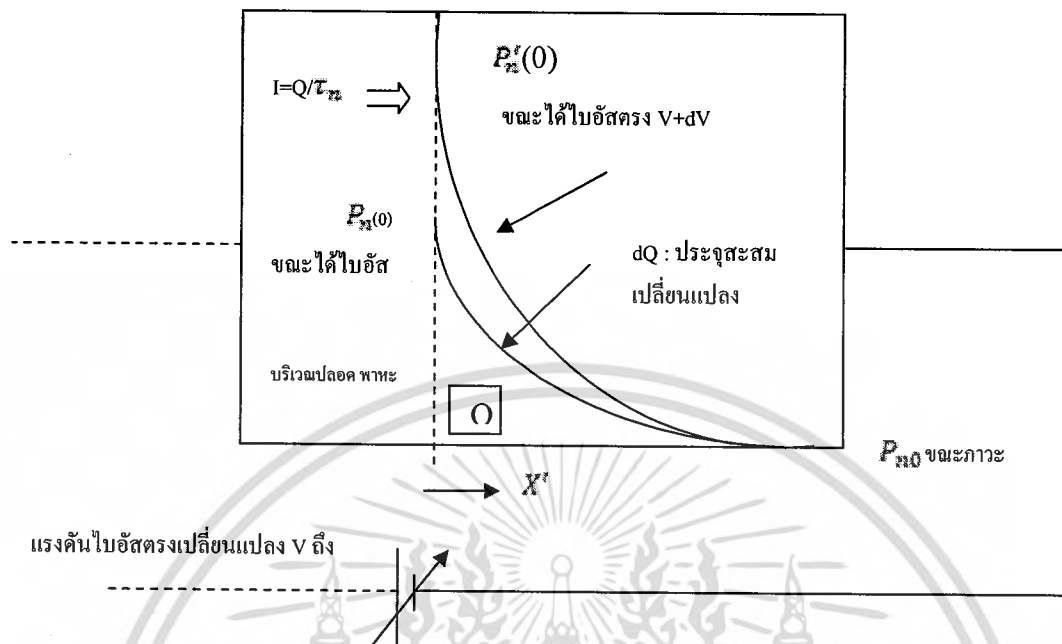
รูปที่ 2.13 (ก) โครงสร้างบริเวณรอยต่อ พี - เอ็น

(ข) โครงสร้างของตัวเก็บประจุไฟฟ้าแบบแผ่น โลหะขนาน

2.10.2 ความจุไฟฟ้าจากการแพร่ หรือ ความจุไฟฟ้าจากประจุสะสม (Diffusion Capacitance or Charge storage capacitance)

ที่แล้วมาเราได้พิจารณาค่าความจุไฟฟ้าที่รอยต่อ ซึ่งเกิดจากประจุไฟฟ้าบวกและลบของไอออนอะตอมสารเจือที่บริเวณปลอดพาหะของรอยต่อ และเราเรียกความจุไฟฟ้านี้ว่า “ความจุไฟฟ้าที่รอยต่อ” (Junction capacitance : C_j) หรือ “ความจุไฟฟ้าทรานซิชัน” (Transition capacitance) ในตอนนี้เราจะพิจารณาว่า ในขณะที่รอยต่อพี - เอ็นได้รับแรงดันไบอัสตรง นอกจากจะมีการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของพาหะขึ้นที่บริเวณใกล้ ๆ กับรอยต่อ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของความกว้างบริเวณปลอดพาหะแล้ว ยังมีการเปลี่ยนแปลงของประจุไฟฟ้าเนื่องจากการฉีดของพาหะข้ามรอยต่อเข้าไปยังด้านตรงข้าม อีกด้วย กล่าวคือมีโฮล ถูกฉีดจากด้านพี ข้ามรอยต่อแล้วแพร่เข้าไปยังด้านเอ็น และอิเล็กตรอน ถูกฉีดด้านเอ็น แพร่เข้าไปในด้านพี โดยความหนาแน่นของพาหะจะมีค่าลดลงกับระยะทางที่ห่างออกไปจากรอยต่อเพราะมีการรวมตัว (recombination) ระหว่างพาหะส่วนน้อย เหล่านี้กับพาหะส่วนมากเกิดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.14

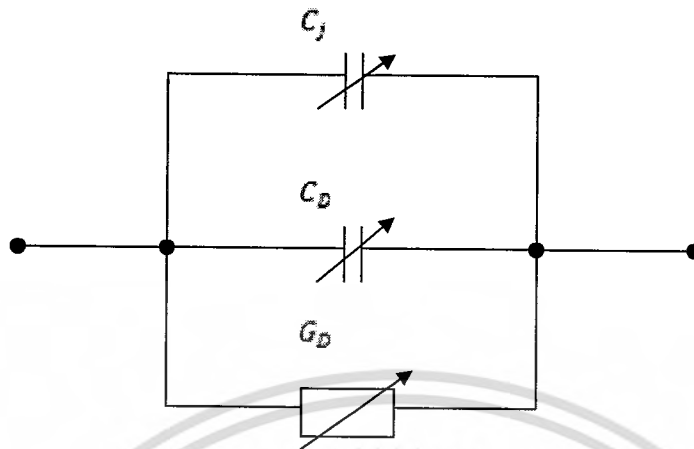
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 การฉีดโฮลเข้าไปทางด้านเอ็น ขณะรอยต่อได้รับไบอัสตรง เมื่อแรงดันไบอัสตรงเปลี่ยนแปลงโวลต์ ทำให้ประจุสะสมเปลี่ยนแปลงจึงเกิดมีประจุไฟฟ้าเนื่องจากประจุสะสม

ดังนั้นจึงมีการสะสม (storage) ประจุไฟฟ้าของพาหะส่วนน้อยเหล่านี้บริเวณใกล้ ๆ รอยต่อทั้งสองด้านปริมาณของพาหะส่วนน้อยที่จะสะสมอยู่ที่นี่ จะมีค่ามากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับขนาดของแรงดันไบอัสตรงที่ไดโอดได้รับ และเมื่อแรงดันไบอัสตรงเปลี่ยนแปลง (dV) จะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงของประจุไฟฟ้าเกิดขึ้น (dQ) ดังแสดงในรูปที่ 2.14 อัตราส่วนระหว่างการเปลี่ยนแปลงของประจุกับการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน ก็คือค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดจากประจุที่สะสม หรือความจุไฟฟ้าจากการแพร่ของพาหะ

ดังนั้น ขณะที่รอยต่อได้รับไบอัสตรงจึงเกิดมีค่าความจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอีกชนิดหนึ่ง “ความจุไฟฟ้าจากการแพร่ของพาหะ” (Diffusion capacitance : C) หรือความจุไฟฟ้าจากประจุสะสม (Storage capacitance : C_s) และสรุปได้ว่า ขณะที่รอยต่อได้รับแรงดันไบอัสตรงจะปรากฏตัวเก็บประจุขึ้นสองชนิด คือความจุไฟฟ้าทรานซิสชันและความจุจากการแพร่ ดังแสดงด้วยวงจรสมมูลในรูปที่ 2.15 แต่ความจุไฟฟ้าทรานซิสชันที่รอยต่อมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความจุไฟฟ้าจากการแพร่ของพาหะ ($C \ll C_s$) ดังนั้น กรณีไบอัสตรงจึงอาจพิจารณาโดยประมาณได้ว่ามีเพียงความจุไฟฟ้าจากการแพร่เพียงอย่างเดียว แต่กรณีไม่มีไบอัส หรือ ไบอัสย้อนกลับ ความจุไฟฟ้าของไดโอดหาได้จากความจุไฟฟ้าทรานซิสชัน C ที่กล่าวมาแล้วเท่านั้น



รูปที่ 2.15 วงจรสมมูลของไดโอดแบบรอยต่อพีเอ็นซึ่งได้รับแรงดันไบอัสตรง

C_j : Junction capacitance, C_D : Diffusion capacitance และ G_D : diode conductance

การวิเคราะห์หาสมการความจุไฟฟ้าของการแพร่ทำได้โดยพิจารณาว่าเมื่อรอยต่อพีเอ็น ได้รับแรงดันไบอัสตรง V โวลต์ กำแพงศักย์ที่รอยต่อจะลดลง ทำให้อิเล็กตรอน และ โฮลถูกผลักข้ามรอยต่อไป ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไบอัสตรง จะทำให้ปริมาณ โฮล และอิเล็กตรอนที่ถูกกัก และแพร่ข้ามรอยต่อมีการเปลี่ยนแปลงประจุไฟฟ้าบริเวณรอยต่อจึงเปลี่ยนแปลงด้วย อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงระหว่าง และ ก็คือ “ความจุไฟฟ้าของการแพร่” (Diffusion capacitance) หรือ “ความจุไฟฟ้าจากประจุไฟฟ้าสะสม” เขียนด้วยสัญลักษณ์ ค่าความจุไฟฟ้าของการแพร่ของพาหะที่รอยต่อ พิจารณาได้โดยจาก

$$C_D = \frac{dQ}{dV} \quad (2.35)$$

จะได้ว่า

$$C_D = \frac{\tau dI}{dV} = \frac{\tau}{r} = \tau g_d \quad (2.36)$$

โดยที่ τ คือ อายุเฉลี่ยของพาหะ (Mean carrier lifetime) หรือ บางครั้งเรียกว่า “เวลาคงที่ของการแพร่” (Diffusion constant)

L คือ ระยะการแพร่ของพาหะ (Diffusion length)

D คือ ค่าคงที่ของการแพร่ (Diffusion constant)

r_d คือค่าความต้านทานของรอยต่อ (resistance)

g_d คือความนำไฟฟ้าของรอยต่อ (Junction Conductance)

ถ้านำสมการกระแสไดโอด มาแทนในสมการที่ (2.36) และกำหนดให้ $V_A \gg kT/q$ จะได้ว่า

$$C_D = \frac{\tau q}{kT} I_0 e^{\frac{qV_A}{kT}} \quad (2.37)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งการแพร่ของโฮลและอิเล็กตรอน จะทำให้เกิดความจุไฟฟ้าเนื่องจากการแพร่ของโฮล และความจุไฟฟ้าเนื่องจากการแพร่ของอิเล็กตรอน ตามลำดับ และความจุไฟฟ้าเนื่องจากการแพร่รวม ก็คือผลรวมของค่าความจุไฟฟ้าทั้งสองนี้

$$C_{Dp} = \frac{q}{kT} \tau_p A q n_i^2 \left(\frac{D_p}{N_D L_p} + \frac{D_n}{N_A L_n} \right) e^{\frac{qV_A}{kT}} \quad (2.38)$$

2.11 วงจรสมมูลของไดโอดกรณีสัญญาณขนาดเล็ก (Small signal equivalent circuits)

2.11.1 ความต้านทานของไดโอด

ค่าความต้านทานของไดโอด ขณะที่ทำงาน ในกรณีสัญญาณขนาดเล็ก (small signal) พิจารณาหาได้จากสมการที่ (2.39)

$$r_d = \frac{dV_A}{dI} \quad (2.39)$$

กรณีของไดโอดแบบ $p^+ - n$ ซึ่ง $N_A \gg N_D$ จะได้ว่า $n_p \approx p_n$ และถ้าให้ $V_A \approx kT/q$ ดังนั้นจากสมการกระแสของไดโอด

$$I = \left(\frac{A q n_i^2}{N_D L_p} \right) \exp\left(\frac{qV_A}{kT}\right) \quad (2.40)$$

เมื่อนำไปแทนลงในสมการที่ (2.39) จะได้

$$r_d = \frac{dV_A}{dI} = \frac{kT}{qI} \quad (2.41)$$

ผลคูณของความจุไฟฟ้าเนื่องจากการแพร่ กับความต้านทานของไดโอด ก็คือ

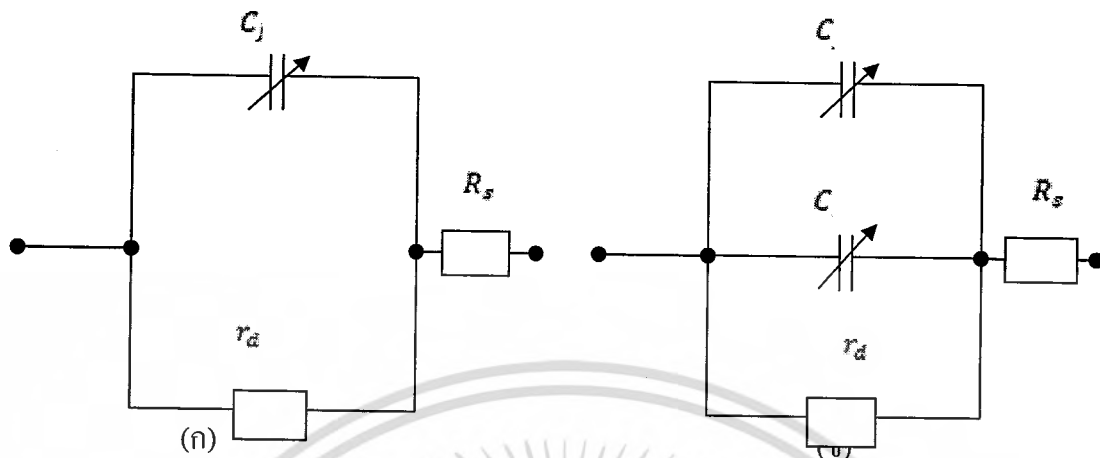
$$r_d \cdot C_D = \frac{kT}{qI} \times \frac{\tau_p q I}{kT} = \tau_p = \frac{L_p^2}{D_p} \quad (2.42)$$

จากสมการที่ (2.42) จะเห็นว่าค่าเวลาคงที่ของไดโอด เท่ากับอายุของโฮลในด้านเอ็นนั่นเอง

2.12.2 วงจรสมมูลของไดโอด

จากการพิจารณาว่าเมื่อไดโอดทำงานที่สัญญาณขนาดเล็กภายในของไดโอดประกอบด้วยตัวต้านทาน และ ตัวเก็บประจุไฟฟ้า ลักษณะวงจรสมมูลของไดโอด จึงเขียนได้ดังใน รูปที่ 2.16 โดยขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ วงจรสมมูลจะประกอบด้วย ตัวต้านทาน และตัวเก็บประจุไฟฟ้าทรานซิสชัน ซึ่งต่อขนานกัน และต่ออนุกรมกับความต้านทานของเนื้อสารกึ่งตัวนำส่วนที่อยู่นอกกรอบต่อความต้านทานส่วนนี้ถูกเรียกว่า “ตัวต้านทานอนุกรม” (series resistance) หรือ “Bulk resistance” ดังในรูปที่ 2.16 (ก) กรณีของแรงดัน ไบอัสตรง นอกจากจะมีความจุไฟฟ้าทรานซิสชัน แล้วยังมีความจุไฟฟ้าจากการแพร่อีกด้วย ซึ่งวงจรสมมูลกรณีไบอัสตรงแสดงดังในรูปที่ 2.16 (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



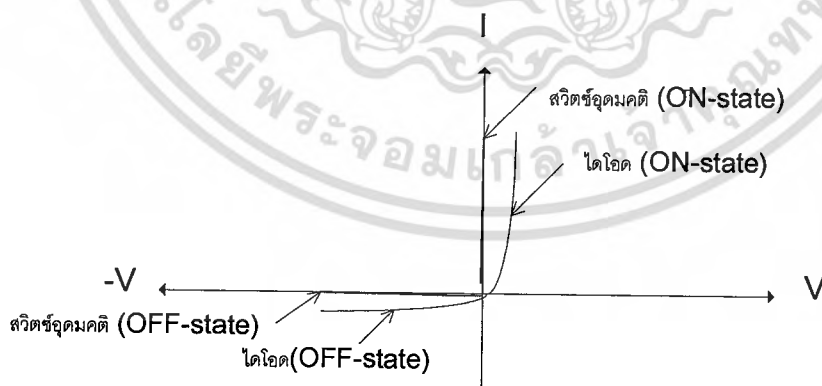
รูปที่ 2.16 แสดงวงจรสมมูลของไดโอดแบบรอตอพีเอ็นในภาวะต่าง ๆ

(ก) ขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ (ข) ขณะได้รับไบอัสตรง

ค่าความต้านทานของไดโอด r_d คำนวณได้จากสมการที่ (2.41) โดยกรณีไบอัสตรงค่า r_d จะมีค่าต่ำ แต่กรณีไบอัสย้อนกลับ r_d จะมีค่าสูงมากหรือประมาณเป็นค่าอนันต์ในทางอุดมคติ

2.12 คุณสมบัติการเป็นสวิตช์ของไดโอด

ขณะได้รับการไบอัสตรง ไดโอดจะทำงานยอมให้กระแสผ่านได้ดี เรียกว่า สถานะปิด และหากได้รับไบอัสย้อนกลับ ซึ่งมีค่าแรงดันต่ำกว่าแรงดันพังทลาย ไดโอดจะแสดงตัวคล้ายกับเป็นสถานะปิดคือ ไม่ยอมให้กระแสไหลผ่าน นั่นคือ การทำงานเป็นสวิตช์ [8] ความเร็วในการเปลี่ยนสถานะ ถูกเรียกว่า อัตราเร็วในการสวิตช์ (switching speed)



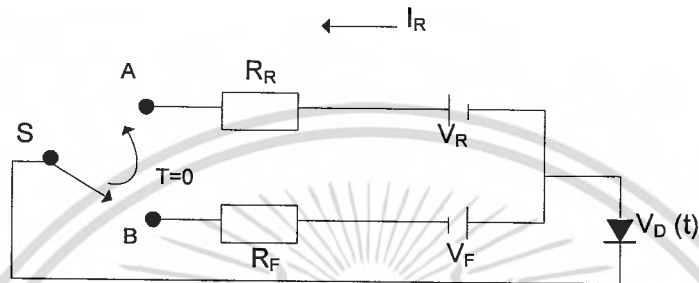
รูปที่ 2.17 กราฟคุณสมบัติกระแสและแรงดันของสวิตช์อุดมคติกับไดโอดแบบรอตอ

อัตราเร็วในการสวิตช์ของไดโอดดังแสดงในรูปที่ 2.17 เกี่ยวข้องกับช่วงเวลาของการสวิตช์ (switching time) ไดโอดมีช่วงเวลาหนึ่งในการสะสมประจุไฟฟ้า (charge storage) ของพาหะส่วนน้อยที่ด้านทั้งสองของรอตอพี-เอ็นขณะไบอัสตรงและจะเคลื่อนย้ายประจุไฟฟ้า (remove หรือ decay) เมื่อไบอัสเอกซาร์นี้เป็นเอกซาร์ที่สวอนไวสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ย้อนกลับ เรียกช่วงเวลาเปลี่ยนสถานะปิดไปเป็นเปิดนี้ว่า ช่วงเวลาเปิด (Turn on time) และเรียกช่วงเวลาเปลี่ยนจากสถานะปิดไปเป็นเปิดว่า ช่วงเวลาปิด (Turn off time)

2.12.1 ช่วงเวลาปิด (Turn off time)

ที่เวลา $t = 0$ สวิตช์ S ถูกสับมาที่ตำแหน่ง B ดังแสดงในรูปที่ 2.18 ไดโอดได้รับไบอัสย้อนกลับ

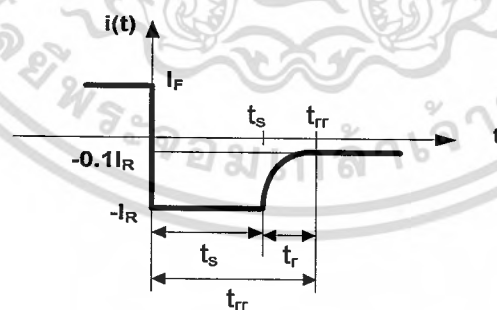


รูปที่ 2.18 วงจรไดโอดอย่างง่าย

กระแสไหลผ่านไดโอดจะเปลี่ยนแปลงจากค่ามาก I_F เป็นกระแสวนกลับ I_R ไหลในทิศทางตรงข้ามกับ I_F ซึ่งจะมีค่ามากกว่ากระแสอ้อมตัวของไดโอดปกติ (I_0) แสดงได้ดังสมการ (2.43)

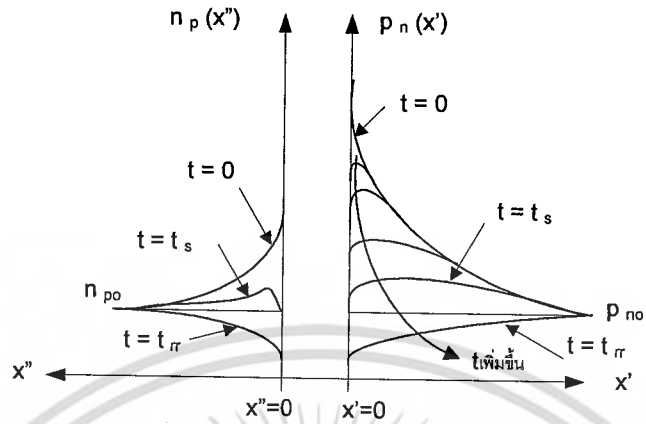
$$I = \frac{V_R - V_a}{R_R} \approx \frac{V_R}{R_R} \quad (2.43)$$

ทันทีที่ไดโอดได้รับไบอัสย้อนกลับ ประจุไฟฟ้าของโฮลที่ถูกสะสมอยู่ที่ด้านเอ็นบริเวณใกล้รอยต่อ จะเริ่มแพร่กลับเข้าไปยังด้านพี ทำให้การกระจายความหนาแน่นของโฮลในด้านเอ็นเปลี่ยนแปลงจากเดิม ดังแสดงในรูปที่ 2.19

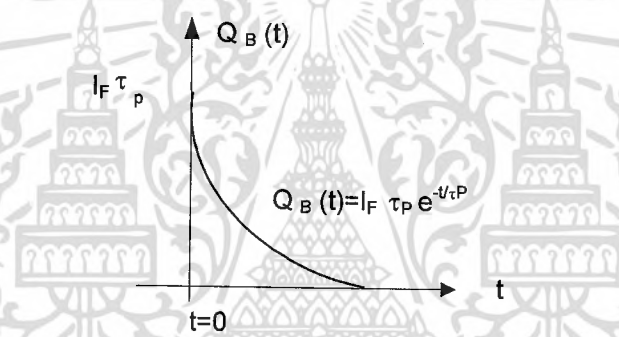


(ก) การเปลี่ยนแปลงของกระแสไหลผ่านไดโอดที่เวลาต่างๆ ขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ

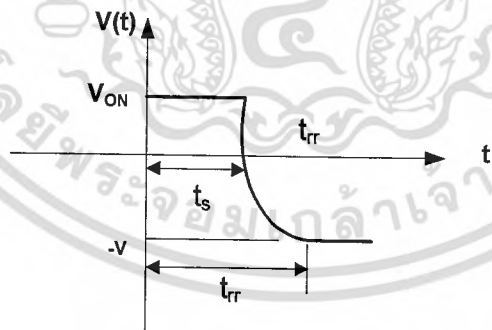
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) การเปลี่ยนแปลงการกระจายความหนาแน่นของพาหะส่วนน้อยที่เวลา t ค่าต่างๆ



(ค) การลดลงของประจุไฟฟ้าที่สะสมอยู่ในด้านเอ็น



(ง) การลดลงของแรงดันที่ตกคร่อมไดโอดที่เวลา t ค่าต่างๆ

รูปที่ 2.19 แสดงช่วงเวลาปิดของไดโอด

ทันทีที่ไบอัสย้อนกลับ ประจุไฟฟ้าของโฮลที่ถูกสะสมอยู่ที่ด้านเอ็นบริเวณใกล้รอยต่อ จะเริ่มแพร่กลับเข้าพี ทำให้การกระจายความหนาแน่นของโฮลด้านเอ็นเปลี่ยนแปลง ดังรูปที่ 2.19 (ข) ประจุที่สะสมอยู่ก่อนหน้านี้ลดลง (decay) กับเวลา ดังรูปที่ 2.19 (ค) ความหนาแน่นของโฮลซึ่งเป็นพาหะส่วนเกิน (excess carrier) ลดลงเรื่อยๆอย่างต่อเนื่องจนมีค่าเป็นศูนย์ ความหนาแน่นโฮลด้านเอ็นมีค่ากลับคืนสู่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้เพื่อการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถานะสมดุลความร้อน ($p=p_{no}$) เรียกว่า เวลาสะสม (storage time: t_s) กระแสไหลผ่านไดโอดคงที่และเท่ากับกระแส I_R เมื่อเวลามากขึ้น ($t > t_s$) ดังรูป (ข) กระแสย้อนกลับ ($-I_R$) มีค่าลดลงกับเวลาและมีค่ากระแสอิมพัลส์ ($-I_0$) ช่วงเวลาในการลดลงของ $-I_R$ จนถึง $-0.1I_R$ หรือ $-I_0$ เรียกว่า เวลาฟื้นตัว (recovery time : t_r) เวลาในการเปลี่ยนสถานะเขียนได้ดังสมการ (2.44)

$$t_{rr} = t_s + t_r \quad (2.44)$$

โดยที่

$$t_s = \tau_p \ln \left[1 + \frac{I_F}{I_R} \right] \quad (2.45)$$

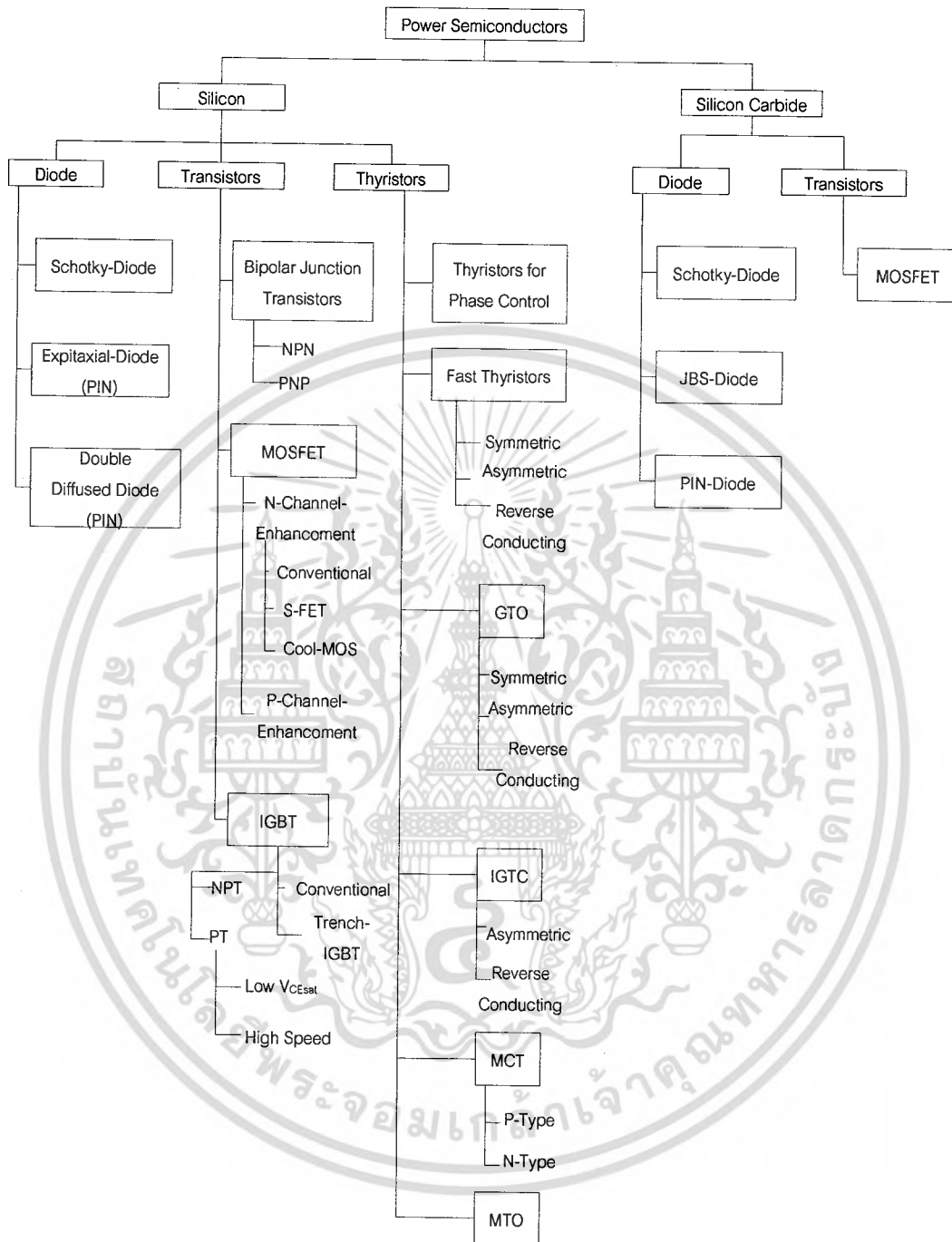
$$t_r \approx 2.3R_R C_j \quad (2.46)$$

ไดโอดเข้าสู่สถานะปิด คือ การทำให้ตัวเก็บประจุมีการคายประจุ (discharge) ที่สะสมอยู่หมดไป สมการ (2.46) แสดงให้เห็นว่ากระแสย้อนกลับยังมีค่ามาก การแพร่กลับของโฮลจะเกิดเร็ว อายุพาหะส่วนน้อยที่มีค่าต่ำๆ มีการลดลงอย่างรวดเร็ว

2.13 อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำกำลัง

อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่นิยมใช้ในปัจจุบันสามารถแบ่งออกได้ตามรูปแบบในการควบคุมเป็น 3 กลุ่มด้วยกันคือ

1. ควบคุมการนำและไม่นำกระแสได้จากวงจรกำลัง เช่น ไดโอดกำลัง
2. ควบคุมการนำกระแสจากวงจรควบคุม เช่น ไทรสเตอร์
3. ควบคุมการนำและหยุดนำกระแสได้จากวงจรควบคุม เช่น ทรานซิสเตอร์กำลัง (บีจีที) จีทีโอ ไทรสเตอร์ ซึ่งควบคุมด้วยกระแสไฟฟ้า ส่วนมอสเฟตกำลังและไอจีบีทีจะควบคุมด้วยแรงดันไฟฟ้า

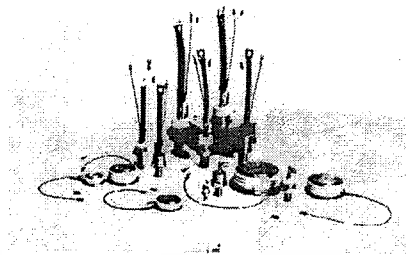


รูปที่ 2.20 แสดงการแบ่งชนิดของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำกำลังตามชนิดของวัสดุ

2.13.1 ไดโอดกำลัง (Power diode)

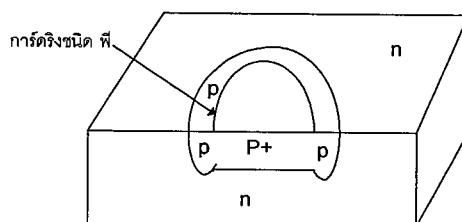
หลังจากปี คศ. 1970 ได้มีการพัฒนาและสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำกำลังเพิ่มขึ้นอย่างมากหลายรูปแบบ เช่นทรานซิสเตอร์กำลัง ไดโอดกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.21 อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำกำลังชนิดต่างๆ

บางครั้งไดโอดกำลังอาจถูกเรียกว่า ไดโอดเรกติไฟร์ (Rectifier diode) ได้แก่ ไดโอดที่นิยมนำไปใช้งาน เป็นตัวเรียงกระแส (rectifier) โดยทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นกระแสตรง ซึ่งมักจะทนต่อกระแสและแรงดันสูงๆ ดังนั้นไดโอดประเภทนี้จึงเป็นไดโอดที่มีคุณสมบัติเด่นด้านกำลัง (power) สูง ปกติอาจสร้างมาจากสารกึ่งตัวนำซิลิกอน หรือเยอรมันเนียมก็ได้แต่ในปัจจุบัน ส่วนใหญ่สร้างมาจากผลึกรูปเดี่ยวของซิลิกอนเพราะสามารถทนต่ออุณหภูมิสูงได้ดีกว่า และมีกระแสรั่วได้น้อยกว่า การสร้างรอยต่อพี-เอ็น ทำได้โดยเทคนิคการแพร่อะตอมสารเจือ (Impurity atom diffusion) เข้าไปในสารกึ่งตัวนำชนิดตรงข้าม ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือที่ด้านทั้งสองของไดโอดจะเป็นตัวกำหนดพารามิเตอร์ที่สำคัญ เช่น แรงดันพังทลาย (breakdown voltage: V_B), แรงดันภายในรอยต่อ (built in voltage: V_{bi}), และความต้านทานอนุกรมของไดโอด (series resistance: R_s) เป็นต้น ในกรณีที่ความหนาแน่นของสารเจือในด้านทั้งสองของสารเจือไม่เท่ากัน คุณสมบัติของไดโอดจะถูกกำหนดโดยด้านที่มีสารเจือต่ำ การควบคุมให้ไดโอดมีแรงดันพังทลายสูงสามารถทำได้โดยการเติมสารเจืออย่างเจือจาง แต่จะทำให้ความต้านทานอนุกรมมีค่าสูง ทำให้เกิดความร้อนได้ง่าย ทำให้ไดโอดเสียหายได้ง่าย เพื่อลดค่าความต้านทานอนุกรมโดยไม่ต้องเพิ่มความเข้มข้นของสารเจือ ก็สามารถทำได้ด้วยการเพิ่มขนาดของพื้นที่หน้าตัดของไดโอด และลดความยาวของไดโอดให้สั้นลง แต่ต้องระวังการเกิด พันซ์ทรู (Punch through) ระวังการพังทลายที่บริเวณขอบมุมโดยทำ “การ์ดริง” (Guardring) ล้อมรอบรอยต่อ ดังแสดงได้ในรูปที่ 2.22 เพื่อลดความโค้งของขอบรอยต่อ ทำให้ความเข้มข้นไฟฟ้าบริเวณนี้ลดลง ลดการพังทลายบริเวณของรอยต่อได้



รูปที่ 2.22 โครงสร้างของไดโอดกำลังชนิดแรงดันพังทลายสูง โดยมีการ์ดริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไดโอดที่จะสามารถทำงานในย่านกระแสและแรงดันสูงนั้นต้องมีขนาดใหญ่ นอกจากนี้ยังมีปัญหารอยต่อ $p^+ - n$ หรือ รอยต่อแบบ $p - n^+$ จากการสร้างขั้วสัมผัสโอห์มิก เพื่อป้องกันจึงให้บริเวณส่วนปลายของด้านที่มีความเข้มข้นสารเจือตำ ถูกเติมอะตอมสารเจืออย่างเข้มข้น และถ้าส่วนที่อยู่กลางของไดโอดมีอะตอมสารเจือน้อย มีขนาดสั้น ขณะที่ได้รับการไบอัสตรงปริมาณของพาหะส่วนเกินที่ถูกฉีดเข้ามาจะมีผลทำให้ความนำไฟฟ้าสูงขึ้น เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Conductivity modulation จะเป็นประโยชน์กับไดโอดกำลังซึ่งทำงานที่กระแสสูงๆ เมื่อไบอัสย้อนกลับชั้นของไดโอดที่มีขนาดสั้นจะเกิดทำให้พังทลายได้ง่าย

ขณะที่เราไบอัสย้อนกลับให้ไดโอดมากถึงค่าแรงดันพังทลาย ไดโอดนี้จะมีการนำกระแสลักษณะคุณสมบัติของ ไดโอดกำลังจะขึ้นกับอุณหภูมิ คือเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะมีกระแสรั่วไหลเพิ่มขึ้นเมื่อไบอัสย้อนกลับมากยิ่งขึ้น

2.13.2 คุณสมบัติและขอบเขตการใช้งานของไดโอดกำลัง

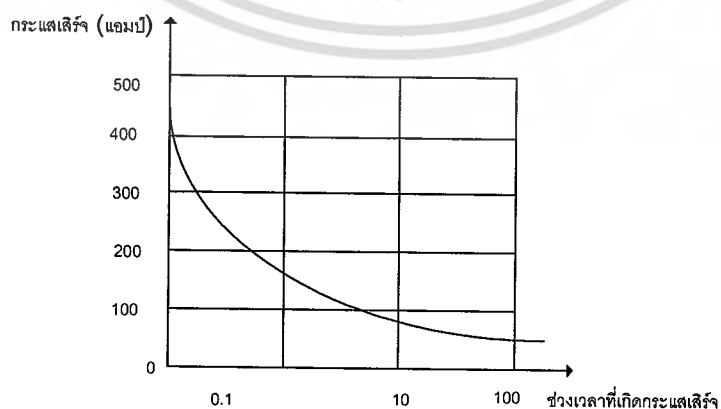
แรงดันไบอัสกลับสูงสุด ค่าแรงดันนี้บอกถึงขอบเขตการใช้งานกับแรงดันได้สูงสุดเพียงใด หากใช้งานที่แรงดันสูงเกินกว่าค่านี้ก็จะเป็นการเสี่ยงต่อความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับไดโอดได้

กระแสไบอัสตรงสูงสุด ค่านี้บอกในรายละเอียดของข้อมูลกำหนดให้มีได้หลายแบบ เช่นเป็นค่ากระแสเฉลี่ย (I_{AV}) กระแสสูงสุด (I_M) และ (I_{RMS}) ค่าความสัมพันธ์ของกระแสเหล่านี้เป็นดังสมการ (2.47) และ (2.48)

$$I_M = \pi I_{AV} \quad (2.47)$$

$$I_{RMS} = I_M \sqrt{2} \quad (2.48)$$

กระแสเล็กร์ กระแสส่วนนี้เป็นกระแสที่เราไม่ต้องการให้เกิดขึ้น แต่มักมีมารบกวนเสมอ กระแสเล็กร์ที่ไดโอดทนได้ขึ้นกับช่วงเวลาที่กระแสไหลผ่าน เช่น ถ้ากระแสเล็กร์เกิดขึ้นในเวลาสั้นๆ มาก ไดโอดจะทนต่อกระแสเล็กร์ได้สูงขึ้น ดังแสดงได้ดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 กราฟแสดงอัตราการทำงานได้ต่อกระแสเล็กร์ของไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสกำลังสองคูณเวลา (I^2t) สามารถคำนวณหาค่ากำลังไฟฟ้าได้จาก สมการ (2.49)

$$P=I^2R \tag{2.49}$$

และถ้าหากพิจารณาในแง่ของพลังงานสามารถเขียนแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการ (2.50)

$$E= I^2Rt \tag{2.50}$$

2.13.3 ประโยชน์และการใช้งานของไดโอดกำลัง

ไดโอดกำลังนิยมใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังเช่น วงจรเรียงกระแสหรือใช้เป็นสวิตช์ ในการถ่ายโอนพลังงานระหว่างองค์ประกอบในวงจรหยุดกระแสของทรานซิสเตอร์ เป็นต้น

2.14 การบรรจุภัณฑ์ (package)

การเก็บบรรจุไดโอดกำลังเป็นเรื่องที่สำคัญ เพราะไดโอดทำงานที่กระแสสูง จึงมีความร้อนเกิดขึ้น หากการระบายความร้อนไม่ดี อาจเป็นสาเหตุให้เกิดความเสียหายได้ วัสดุที่ใช้จึงต้องเป็นตัวถังที่สามารถระบายความร้อนได้ ไม่เช่นนั้นจะเสียหายได้ ปกติซิลิกอนไดโอดมักถูกติดตั้งบนแผ่น โมลิบดีนัม (molybdenum) หรือ แผ่นทังสเตน (Tungsten) ซึ่งมีคุณสมบัติการขยายตัวเนื่องจากความร้อนใกล้เคียงกับซิลิกอน แผ่นโลหะดังกล่าวจะถูกยึดติดกับแท่งหมุดทองแดงหรือโลหะอื่นที่นำความร้อนได้ดี และแท่งหมุดนี้ก็มีเกลียวที่สามารถขันติดกับแผ่นระบายความร้อนได้

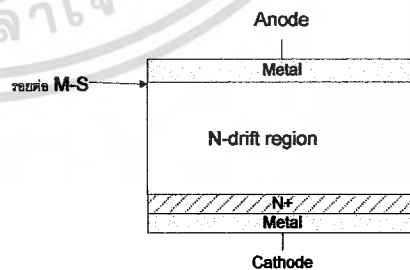
2.15 ทฤษฎีไดโอดกำลัง (Power Diode) ที่ใช้ในการทดลอง

2.15.1 ขอตต์กีไดโอด (Schottky diode)

Schottky Diode ถูกนำมาใช้งานครั้งแรกในความถี่สูงและการสลับด้วยความเร็วสูง รู้จักกันในอีกชื่อว่า ไดโอดพาหะร้อน(hot-carrier diode) สัญลักษณ์ขอตต์กีไดโอดเป็นดังแสดงในรูปที่ 2.24 ถูกสร้างขึ้นโดยการเจือปนบริเวณรอยต่อสารกึ่งตัวนำ (โดยปกติเป็นชนิดเอ็น) ที่มีโลหะ เช่น ทองคำ เงิน หรือทองคำขาว เป็นต้น ดังนั้นค่อนข้างจะเป็นมากกว่ารอยต่อพีเอ็น คือเป็นรอยสารกึ่งตัวนำ-โลหะเหมือนดังแสดงในรูปที่ 2.25 แรงดันตกไปหน้าสำหรับไดโอดประเภทนี้มีค่าประมาณ 0.3 V



รูปที่ 2.24 แสดงสัญลักษณ์ของขอตต์กีไดโอด



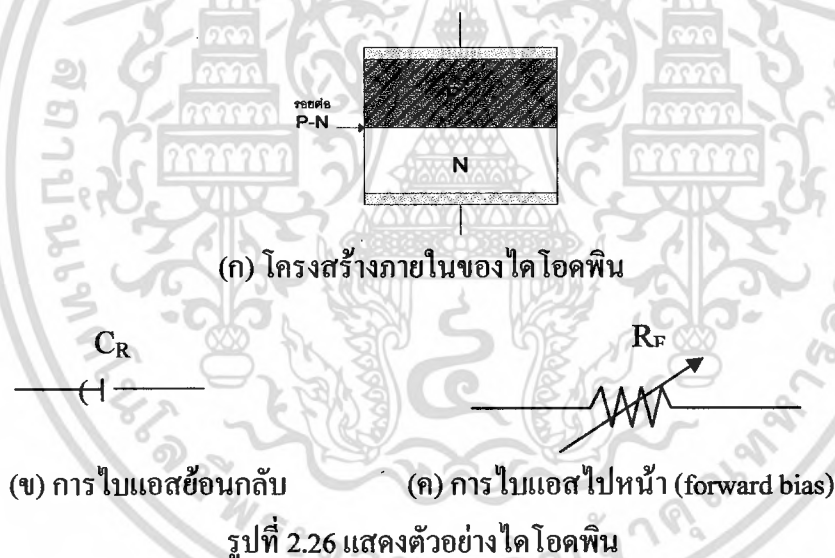
รูปที่ 2.25 แสดงโครงสร้างภายในพื้นฐานของขอตต์กีไดโอด

ขอตต์กีไดโอดทำงานด้วยพาหะส่วนใหญ่เพียงอย่างเดียว โดยไม่มีพาหะส่วนน้อยและดังนั้นจึงไม่มีกระแสรั่วย้อนกลับเหมือนกับไดโอดชนิดอื่น บริเวณโลหะเป็นบริเวณที่มีการเกิดแถบนำไฟฟ้า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

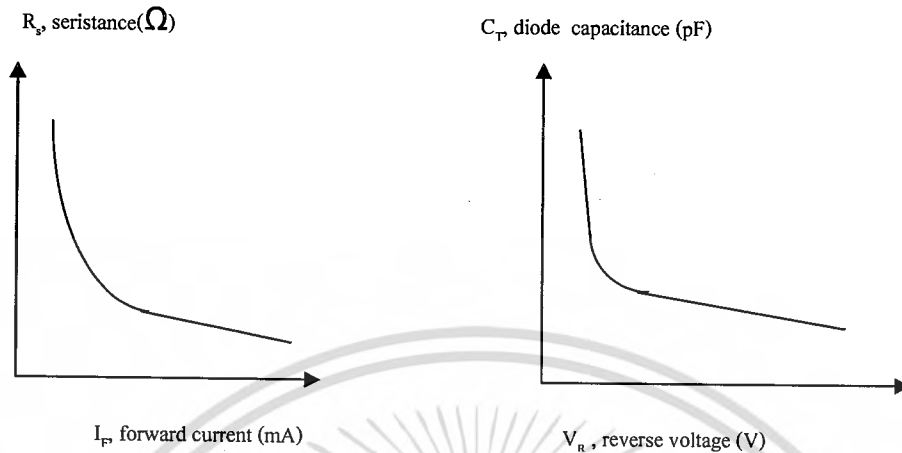
อิเล็กตรอนจำนวนมากและบริเวณสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นเป็นการถูกฉีด (injected) เข้าไปในบริเวณโลหะที่มีการให้พลังงานมากเกินความจำเป็น เนื่องจากไม่มีพาหะส่วนน้อยเหมือนกับไดโอดตัวเรียงกระแสธรรมดา จึงมีการตอบสนองอย่างรวดเร็วในการเปลี่ยนแปลงการไบแอสขอตต์กีเป็นไดโอดที่การสลับด้วยความเร็วสูง จึงมักพบว่ามีให้นำขอตต์กีไดโอดมาใช้ในงานในวงจรความถี่สูงและในวงจรดิจิทัลที่ต้องการลดเวลาการสลับลง

2.15.2 ไดโอดพิน (PIN Diode)

ไดโอดพินประกอบด้วย การเจือปนบริเวณพีและเอ็นที่แยกออกจากกันด้วยบริเวณสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (i) อย่างหนัก เหมือนดังแสดงในรูปที่ 2.26 (ก) เมื่อมีการไบแอสย้อนกลับ ไดโอดพินทำตัวใกล้เคียงกับความจุไฟฟ้าคงที่ เมื่อเป็นการไบแอสไปหน้า (forward bias) มันจะคล้ายความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงค่าได้โดยการควบคุมกระแส เหมือนดังแสดงในรูปที่ 2.26 (ข) และรูป (ค) ความต้านทานไปหน้า (forward bias) ต่ำของบริเวณสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ลดลงจะมีกระแสเพิ่มขึ้น



คุณลักษณะความต้านทานอนุกรมไปหน้าและคุณลักษณะความจุไฟฟ้าย้อนกลับของไดโอดพิน เป็นดังแสดงในรูปที่ 2.27

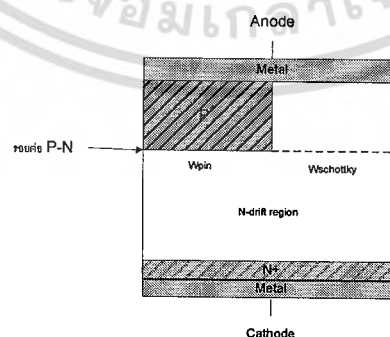


รูปที่ 2.27 แสดงคุณลักษณะของไดโอดพิน

ไดโอดพินถูกนำมาใช้ทำงานเหมือนเป็นสวิตช์ไมโครเวฟที่ใช้ควบคุมกระแสตรงโดยการเปลี่ยนแปลงการไบแอสอย่างรวดเร็วหรือเป็นเหมือนอุปกรณ์การกล้ำสัญญาณที่นำข้อดีของคุณลักษณะความต้านทานไปหน้ามาใช้ เนื่องจากไม่มีการเรียงกระแสเกิดขึ้นที่รอยต่อพีเอ็นสัญญาณความถี่สูงจึงสามารถถูกกล้ำ(เปลี่ยนแปรค่าได้) โดยการเปลี่ยนแปรค่าการไบแอสความถี่ต่ำกว่าไดโอดพินสามารถนำมาใช้งานในตัวลดทอนสัญญาณเพราะความต้านทานสามารถถูกควบคุมได้ด้วยจำนวนของกระแส ไดโอดพินบางชนิดถูกใช้งานเหมือนไดโอดพลังแสงในระบบเส้นใยนำแสง

2.15.3 MPS Diode (Merged Pin Schottky Diode)

คุณสมบัติของพินไดโอดและชอตต์กีไดโอด จึงถูกนำมาพัฒนาเป็น MPS Diode (Merged Pin Schottky Diode) ให้สามารถใช้ได้ในงานที่กว้างขึ้นโดยใช้พื้นฐานการกรองสัญญาณของชอตต์กีและคุณสมบัติการสวิตซ์ของไดโอด ถูกออกแบบให้มีโครงสร้างไดโอดทั้งสองชนิดรวมกัน [1] ดังแสดงในรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 แสดงโครงสร้างของ MPS diode

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

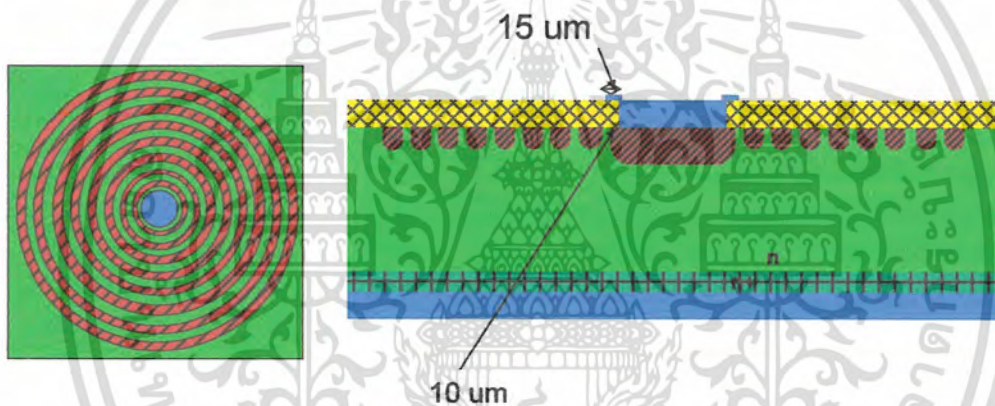
บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ตอนที่ 1 การศึกษาโครงสร้างของไดโอดกำลัง

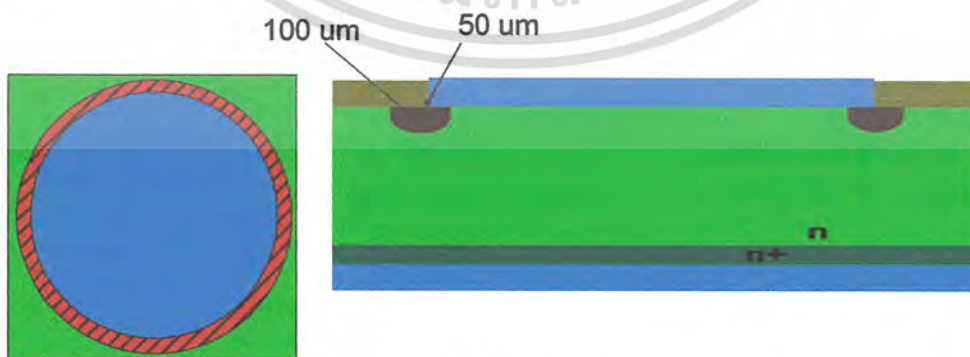
ไดโอดกำลังในปัจจุบันมีหลายชนิดด้วยกัน ทำหน้าที่แตกต่างกันออกไปแล้วแต่การนำไปใช้งาน ในการทดลองครั้งนี้จะศึกษาโครงสร้างของไดโอด 3 ชนิดด้วยกัน คือ P-i-N diode, Schottky diode, MPS diode สังเกตความแตกต่างในโครงสร้างเพื่อนำไปวิเคราะห์สมบัติในขั้นตอนต่อไป

1.1) P-i-N Diode ซึ่งมีโครงสร้างหลายแบบ เช่น



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างของ P-i-N diode ซึ่งมีพารามิเตอร์ค่า Active area 2x2 mm, 8 guard ring size 10 μm, spacing (x)= 18 μm

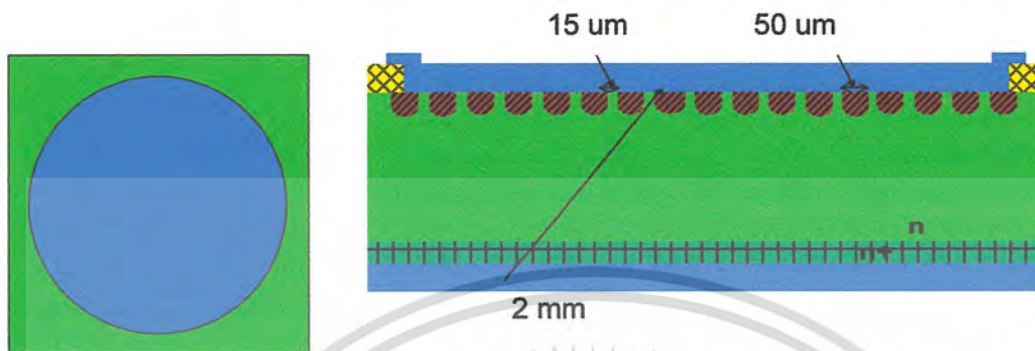
1.2) Schottky Diode ซึ่งมีโครงสร้างหลายแบบ เช่น



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างของ Schottky diode ซึ่งมีพารามิเตอร์ค่า Active area 2x2 mm, guard ring size 100 μm

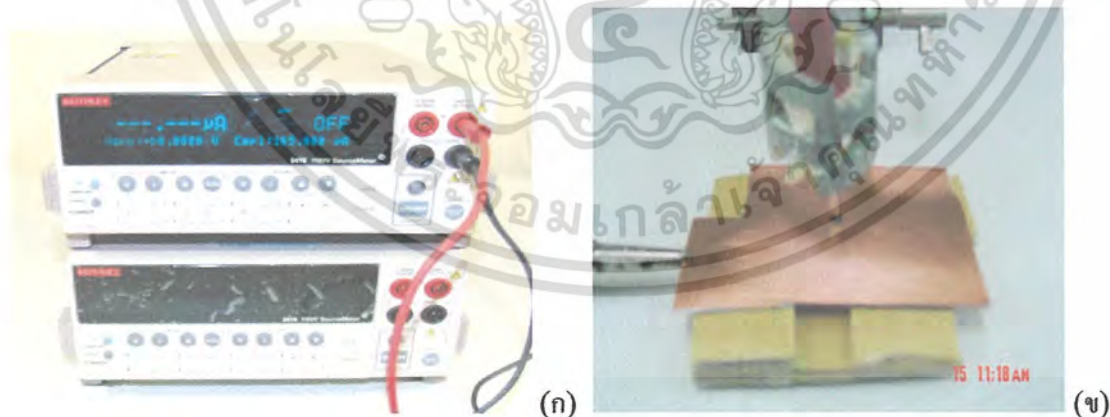
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3) MPS ซึ่งมีโครงสร้างหลายแบบ เช่น



รูปที่ 3.3 ตัวอย่าง MPS ซึ่งมีพารามิเตอร์ค่า MPS %30 SD active area 2x2 mm,
1 guard ring size 50 μm , spacing (x)= 15 μm

ตอนที่ 2 เรียนรู้วิธีการวัดและทำการวัดสมบัติทางไฟฟ้าของ Power Diode ก่อนนำไปบรรจุภัณฑ์ ไดโอดกำลังที่ถูกออกแบบและผ่านกระบวนการสร้างที่ดีแล้วจะต้องนำมาตรวจสอบประสิทธิภาพการทำงาน โดยการวัดคุณสมบัติกระแสต่อแรงดัน ซึ่งใช้ในการจำแนกโครงสร้างจากค่ากระแสรั่วและแรงดันพังทลายที่วัดได้ เพื่อให้ได้ไดโอดที่เหมาะสมนำไปใช้งานตามที่ต้องการ ซึ่งสามารถทำได้โดยใช้ชุดทดลองดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 (ก) เครื่องมือที่ใช้ในการจ่ายกระแสให้แก่ตัวไดโอด

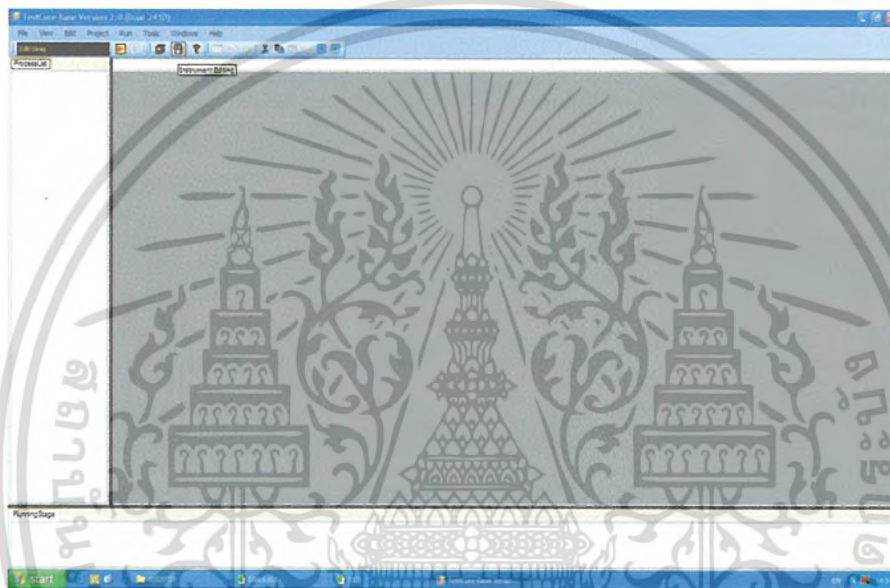
(ข) วงจรการวัดสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

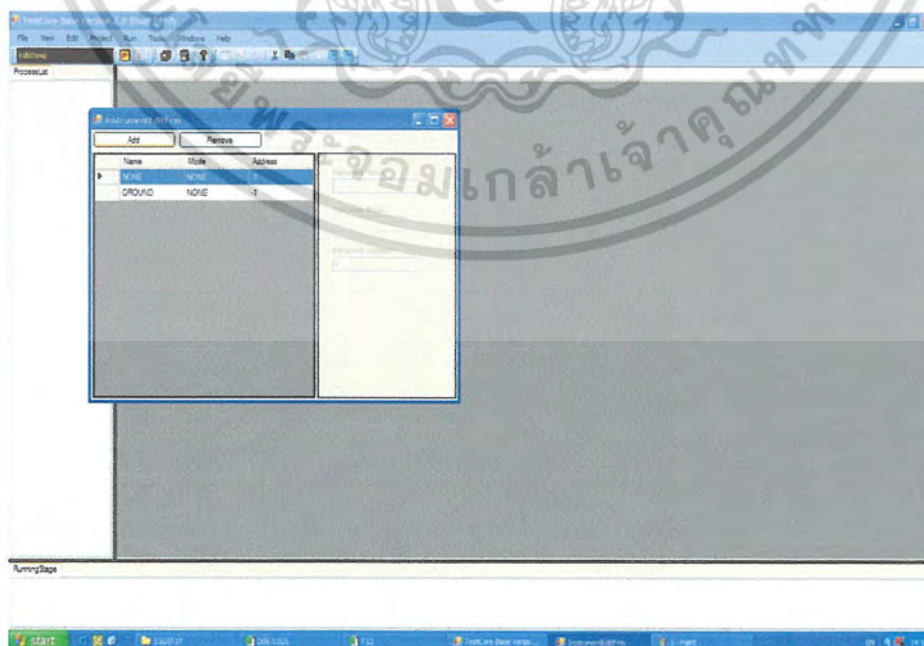
การวัดสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่อง Keithley 2410 จะทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้า (Voltage) และวัดค่ากระแสไฟฟ้า (Current) โดยใช้โปรแกรม TestCore-Base Version 2.0 (Dual 2410) ในการกำหนดค่าต่างๆ ในการทดลอง และประมวลผลแสดงไปยังหน้าจอคอมพิวเตอร์ ขณะทำการวัดค่า

ขั้นตอนการใช้โปรแกรม TestCore-Base Version 2.0 (Dual 2410)

- 1.) เปิดโปรแกรม TestCore-Base Version 2.0 (Dual 2410)

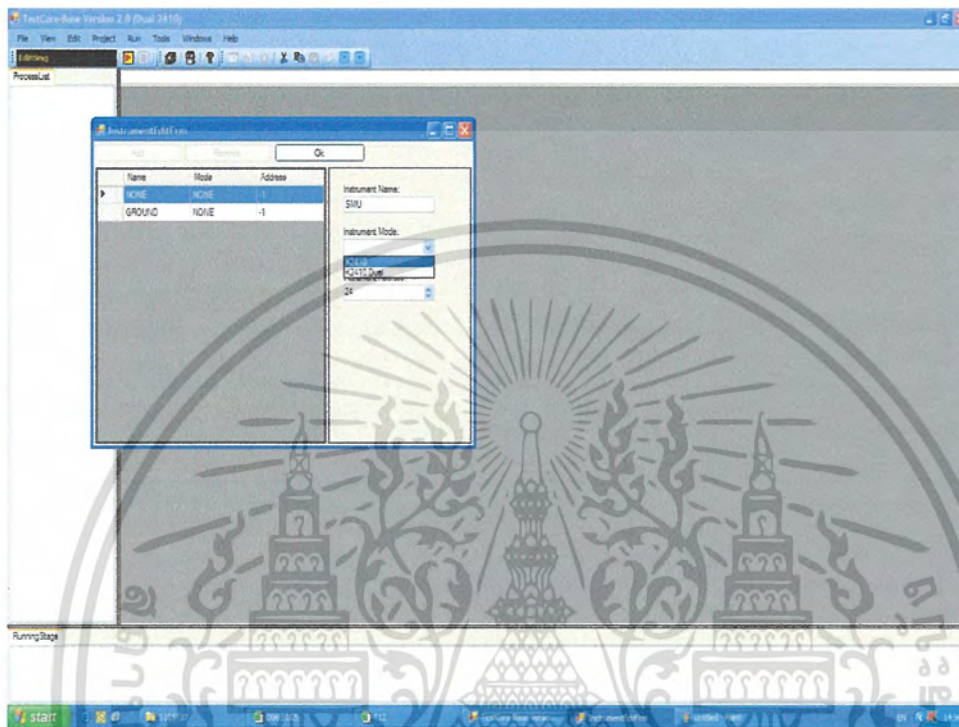


- 2.) คลิกไอคอน Instrument Edit Form

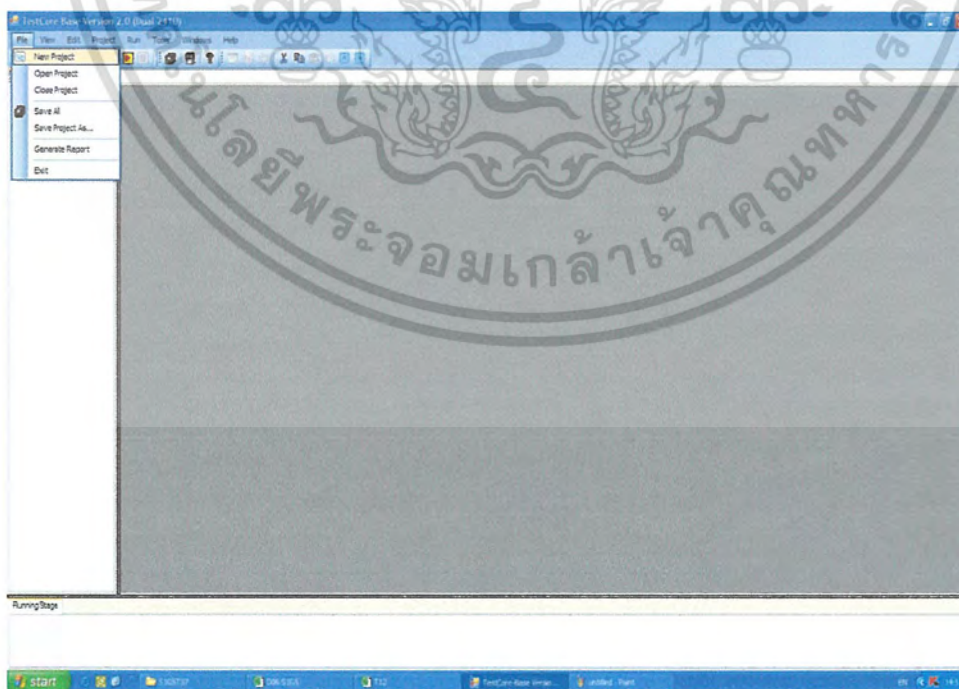


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3.) Set ค่า Instrument Name เป็น SMU และ Set ค่า Instrument mode เป็น K2410 เมื่อต้องการใช้พอร์ต Input กับ Output 1 พอร์ต ถ้า Set เป็น K2410 Dual จะใช้เป็น 2 พอร์ต และ กด Ok

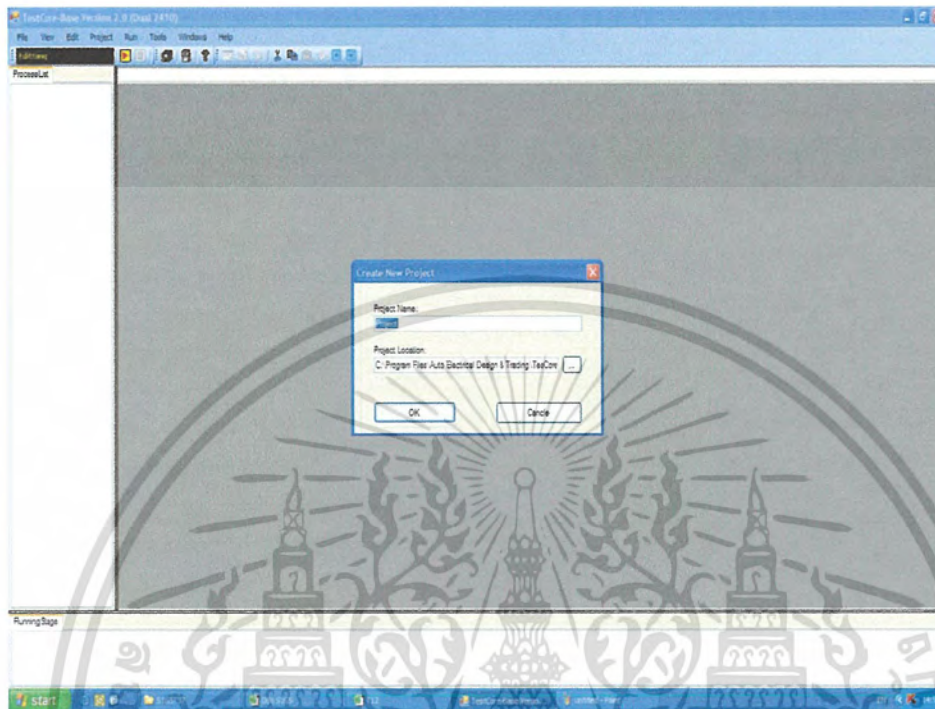


- 4.) File < New Project

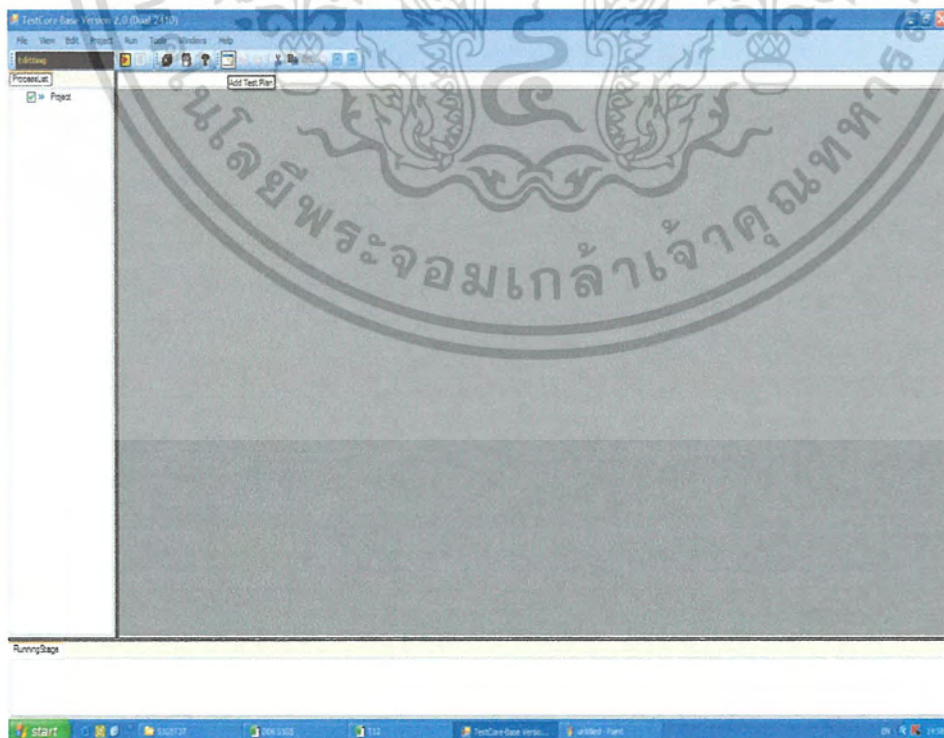


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

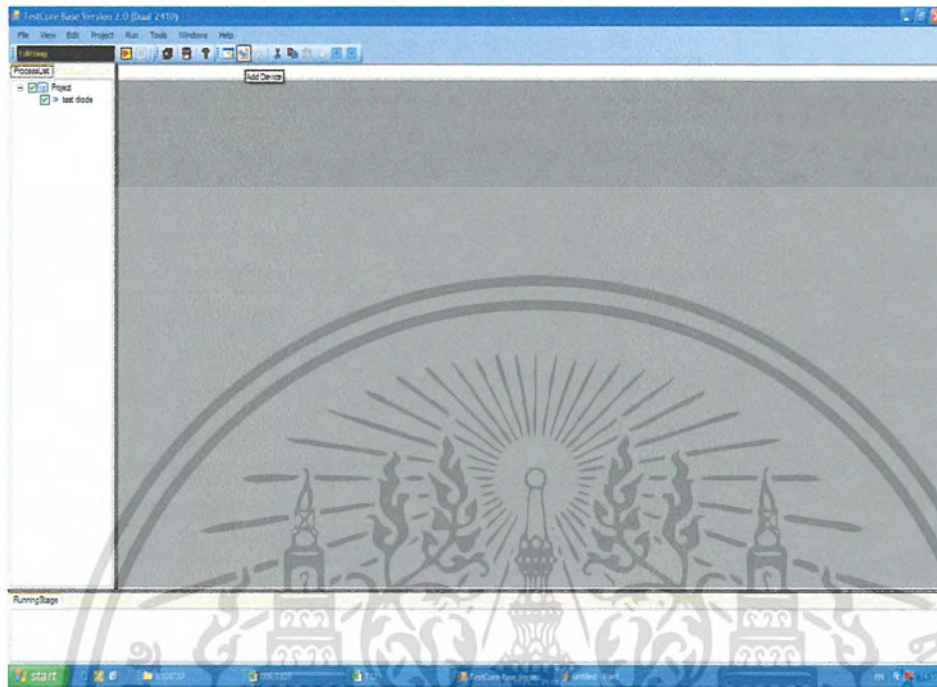
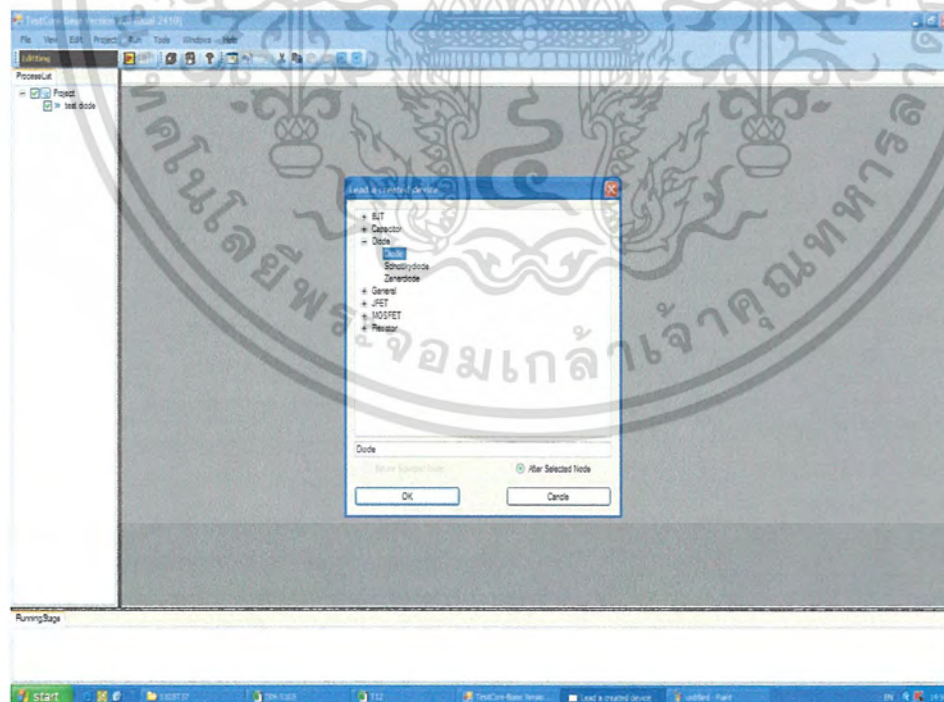
5.) Project name < OK



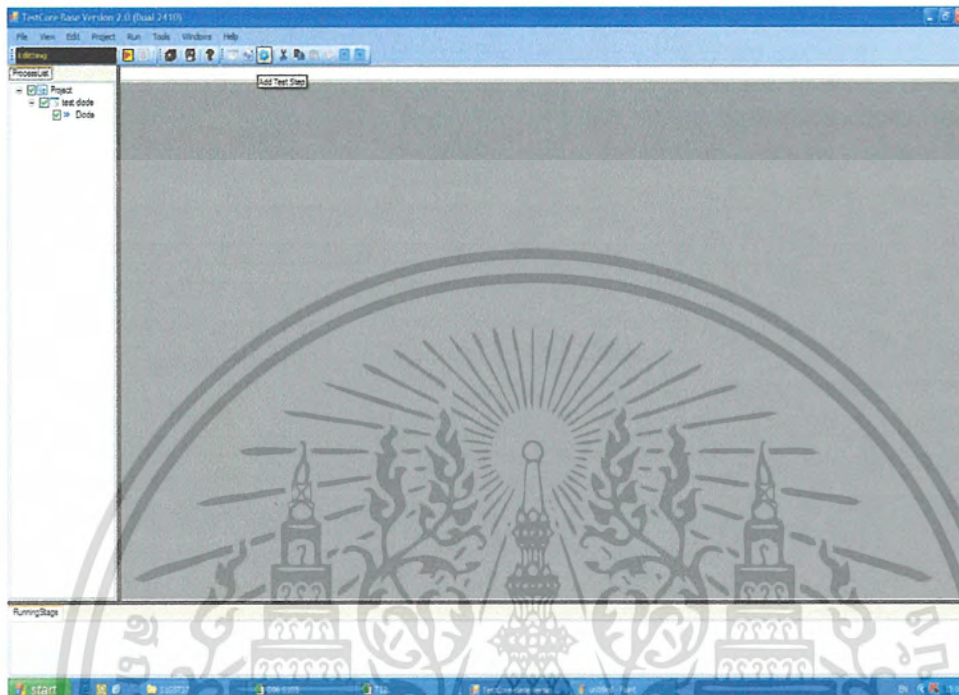
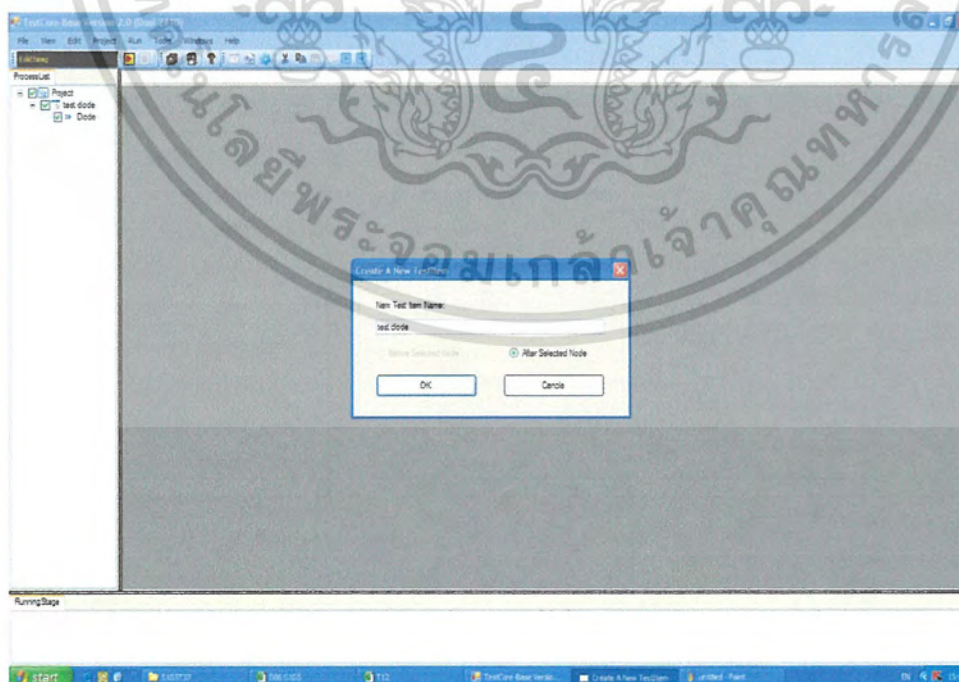
6.) คลิกปุ่ม Add test pant



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

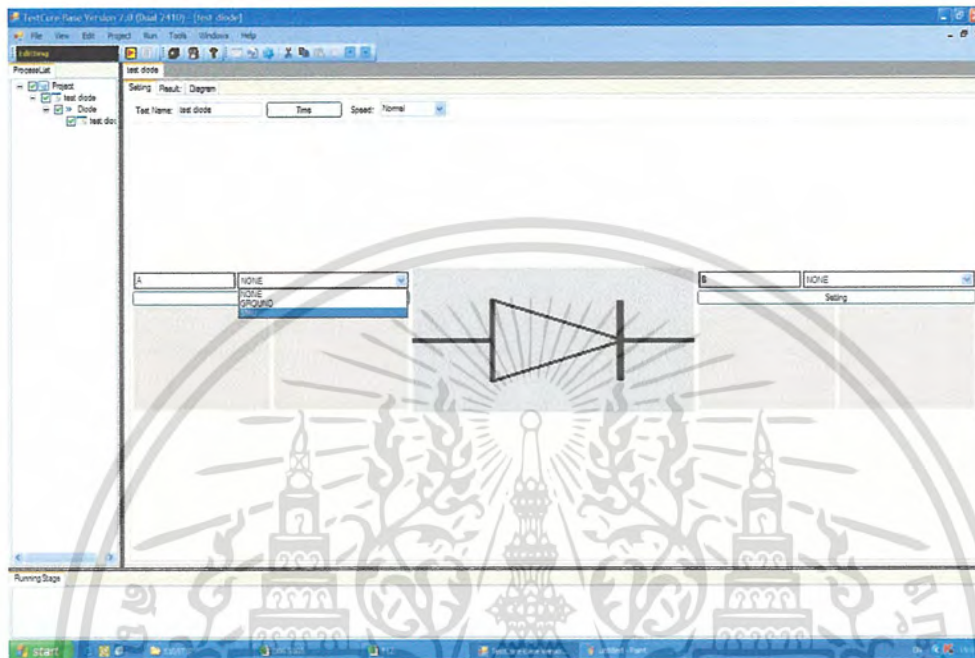
7.) **คลิกปุ่ม Add Device**8.) **คลิกปุ่ม Lead a created device เลือกชิ้นงานที่ต้องการวัด < คลิกเลือก Diode < Ok**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

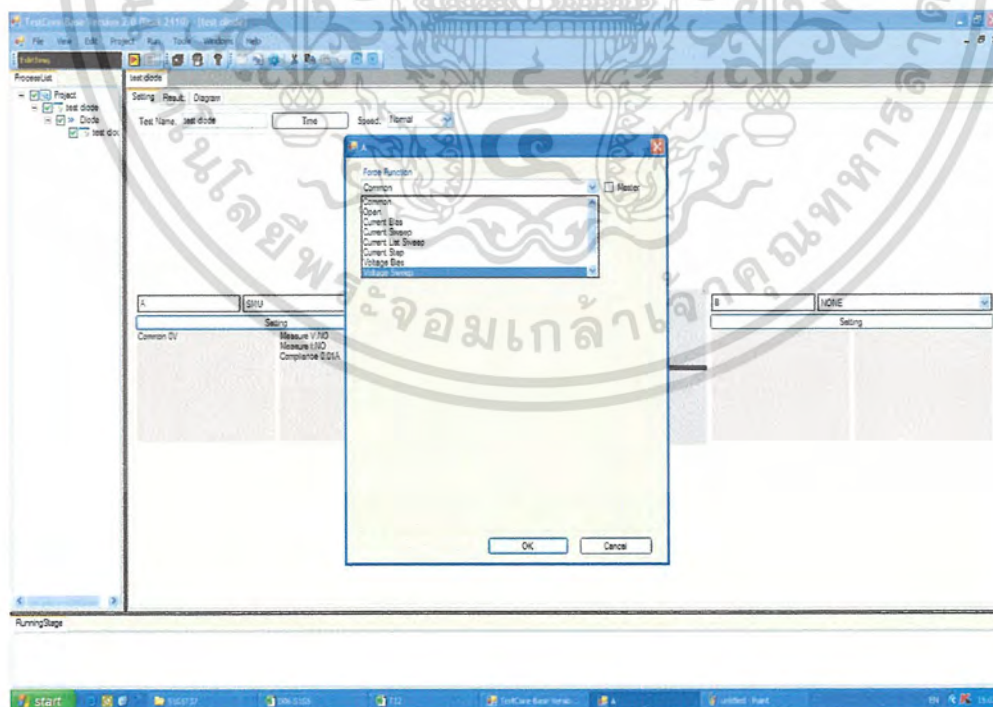
9.) **คลิกปุ่ม Add Test Step**10.) **คลิกปุ่ม Create A New Test Item < ตั้งชื่อที่ New Test Item Name < Ok**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11.) Set ค่าเป็น SMU

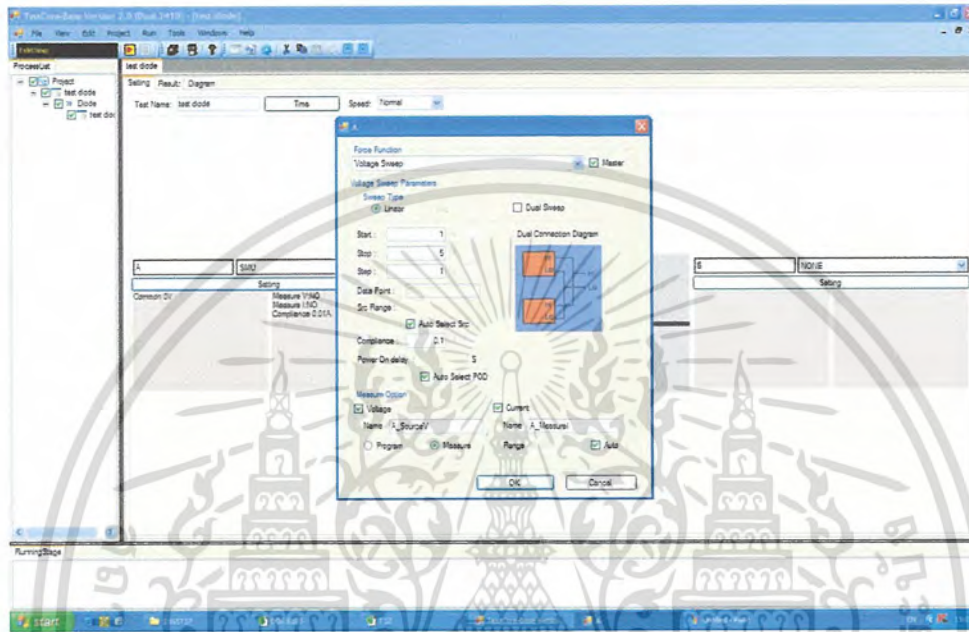


12.) คลิกปุ่ม Setting < เลือก Voltage Sweep < Ok

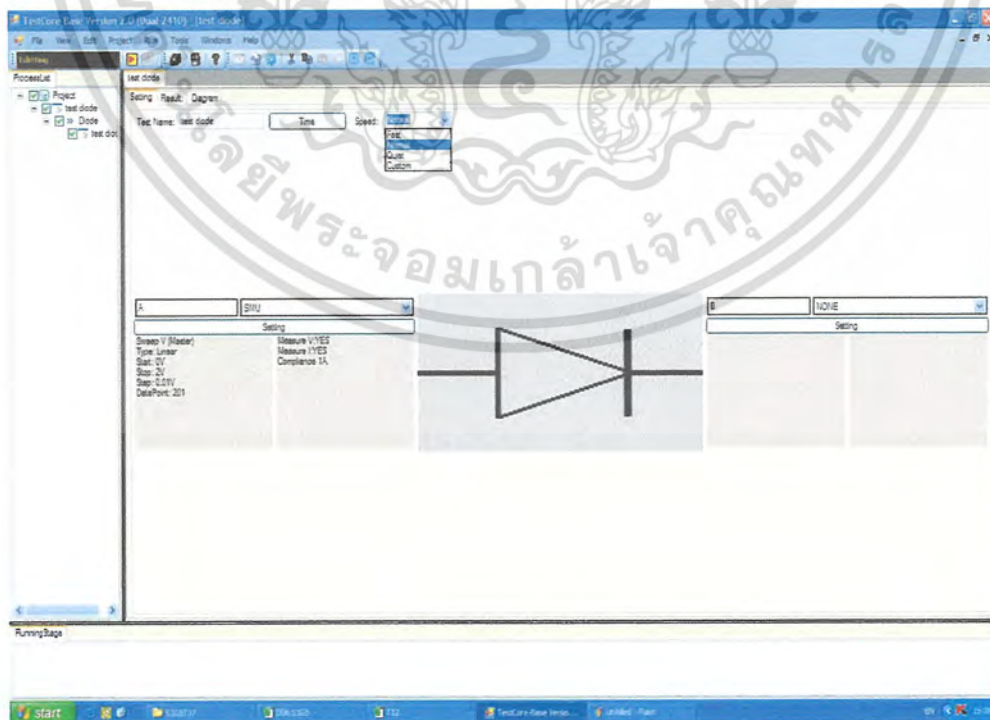


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13.) Set ค่า Voltage และ Current โดยจะ Set ตามการ Bias กระแส โดยค่า Voltage จะ Set ที่ Start , Step , Stop และ Current จะ Set ที่ Compliance ซึ่งถ้าเป็นการ Forward bias จะ Set เป็น 0,0.1,2,1 ตามลำดับ ส่วน Reverse bias จะ Set เป็น 0,1,800,0.001 ตามลำดับ และคลิก Ok

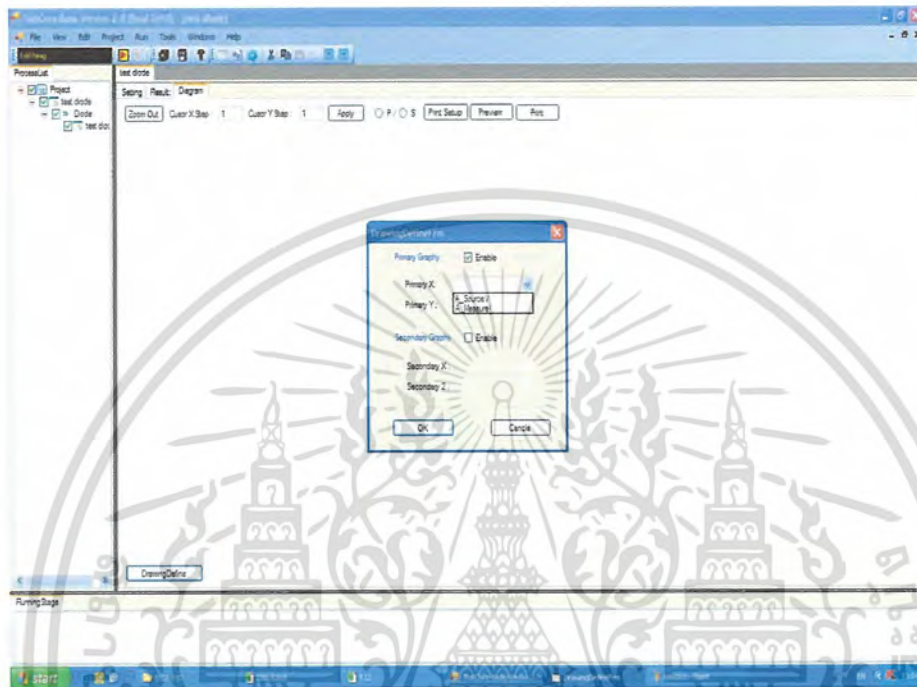


14.) เลือก Fast ที่ช่อง Speed

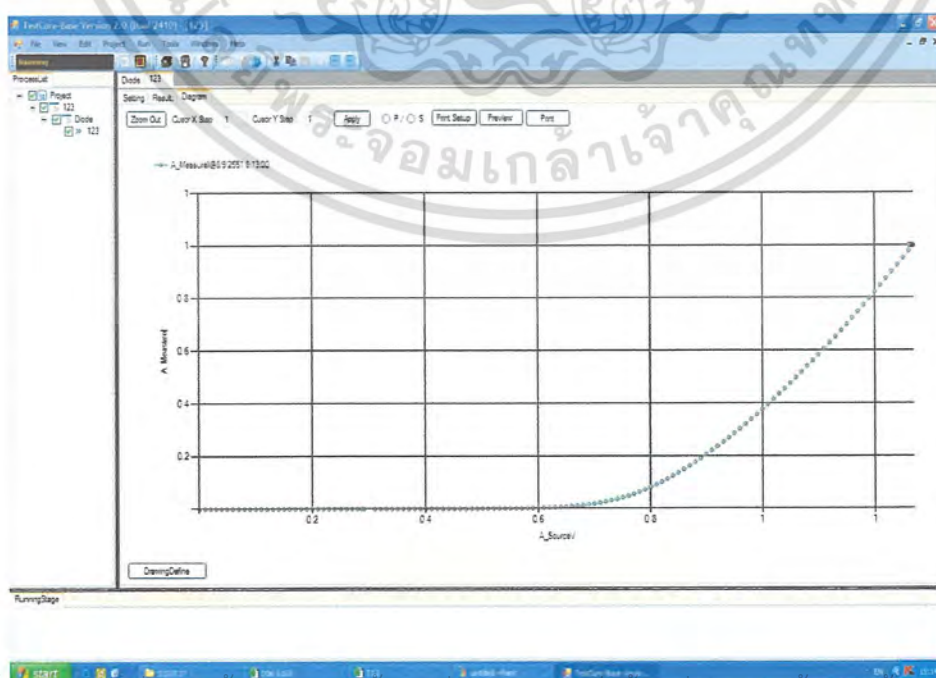


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 15.) คลิกปุ่ม Diagram < Set ค่า Primary X เป็น A_SourceV , Primary Y เป็น A_MeasureI <
Ok



- 16.) คลิกเลือก Diagram และ คลิกปุ่ม Start รอ โปรแกรม Run จนเสร็จ ก็จะได้กราฟ Forward หรือ Reverse มาวิเคราะห์



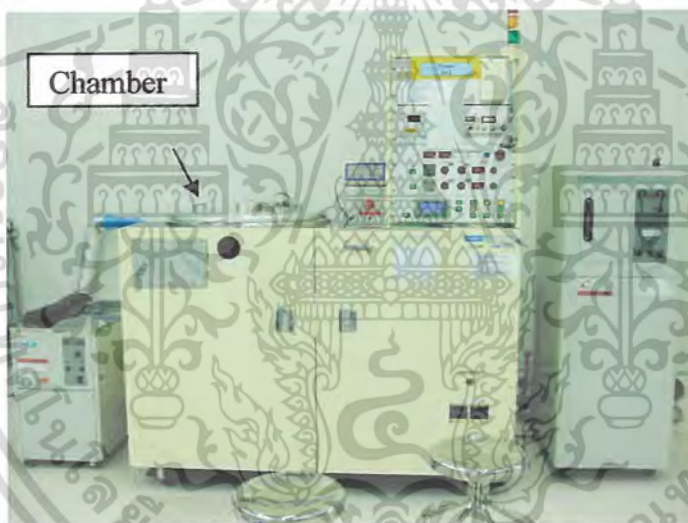
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

18.) นำผลที่ได้จากการวัดมาวิเคราะห์หว่านเป็น โครงสร้างของ Diode ชนิดโคโดยวิเคราะห์จาก กระแสรั่วและแรงดันพังทลายที่เกิดขึ้น ทั้งการไบอัสตรงและไบอัสย้อนกลับ

ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานและการทดลอง

1. ก่อนการวัดสมบัติทางไฟฟ้า ต้องเข้าสู่ขั้นตอนการ DRY Etching เพื่อกัดไทเทเนียมไน ไตรด์ (TiN₂) ที่มาจากกระบวนการสร้างออก โดยมีขั้นตอนดังนี้

1.1.) เปิดเครื่อง กดปุ่ม open เพื่อเปิด chamber (หากเครื่องอยู่ในสภาวะ standby) ดังรูป ที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงเครื่อง Plasma ใช้ในการ Dry Etching

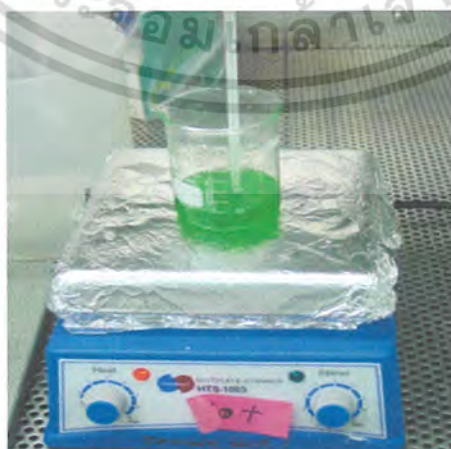
- 1.2.) นำชิ้นงานวางบน substate ที่อยู่ภายใน chamber
- 1.3.) กดปุ่ม close ค้างไว้เพื่อปิด chamber โดยต้องปิดปุ่มทางด้านซ้ายและขวาค้างไว้ พร้อมกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.6
- 1.4.) ปรับค่า RF Count ไปที่ตำแหน่ง 063 จากนั้นกดเลือก CF₄ Process (สังเกตให้ไฟ กระพริบ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 แสดงปุ่มปรับค่าต่างๆ

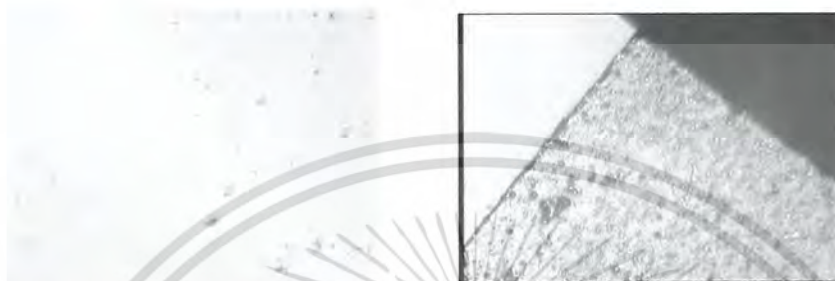
- 1.5.) Set timer 2 นาที และ FWD 500 W จากนั้นรอกจนเสร็จ
 - 1.6.) กดเปิดเครื่องโดยกดปุ่ม Reset ตามด้วย ปุ่ม Open สังเกตลักษณะชิ้นงาน
 - 1.7.) Set timer อีกครั้งที่ 10 นาที ทำตามขั้นตอนข้อ 1.5) - 1.6) รอกจนครบเวลา (สังเกตลักษณะคราบบนชิ้นงาน หากยังมีคราบอีกก็ให้ ทำตามข้อ 1.5) - 1.6) อีกครั้ง โดยใช้เวลาตามสมควร)
2. นำชิ้นงานที่ผ่านการ Dry Etching แล้ว มาทำการวัดสมบัติกระแสต่อแรงดันเพื่อเก็บผลไว้สำหรับอ้างอิงในขั้นตอนต่อไป
 3. จากนั้นนำชิ้นงานมาทำการ Electroless ด้วย Ni ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส ขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แสดงการต้ม electroless

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1) ทดลองหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม โดยเริ่มต้นทดลองที่เวลาในการต้ม 10, 15, 20, 25, 30 นาที ใช้เงื่อนไขที่ทำให้ निकเกิดเกาะติดอะลูมิเนียมมากและติดแน่นที่สุดเมื่อนำไปต่อขั้วไฟฟ้าในภายหลัง ดังแสดงได้ในรูปที่ 3.8



(ก) ไคโอดก่อนการต้ม

(ข) หลังการต้ม

รูปที่ 3.8 แสดงความแตกต่างของไคโอดเมื่อทำการอิเล็กโตรเลส

3.2) จากนั้นนำไปอบที่เวลาทดลอง 5, 10, 15 นาที ด้วยอุณหภูมิ



รูปที่ 3.9 แสดงเครื่องอบและปุ่มปรับค่าต่างๆ

4. นำไปวัดสมบัติกระแสต่อแรงดันครั้งที่ 2 ด้วยชุดทดลองในรูปที่ 3.4 สังเกตการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น

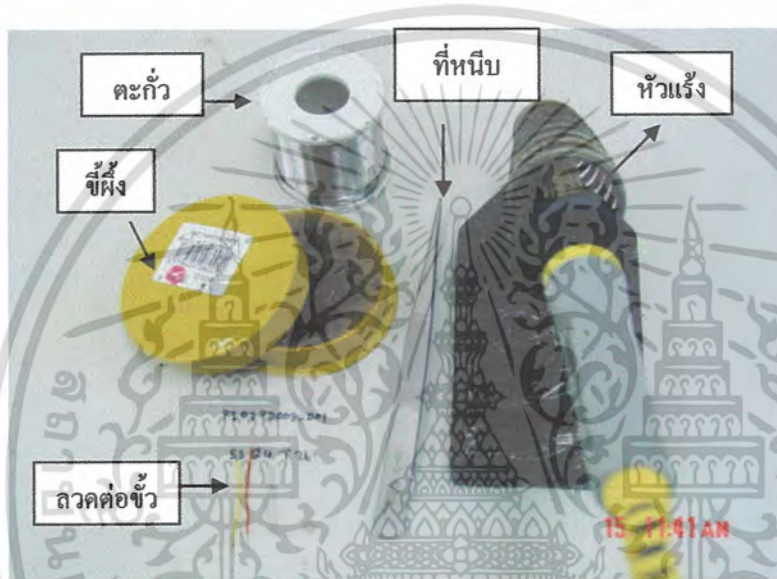
ตอนที่ 3 เรียนรู้วิธีการบรรจุภัณฑ์ และศึกษาผลกระทบจากแสง

นอกจากคุณสมบัติทางไฟฟ้าแล้ว เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีผลกระทบจากแสงน้อยที่สุดก่อนนำไปใช้งานจริงนั้นสิ่งที่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั้งหลายรวมทั้งไคโอดกำลังต้องคำนึงถึงอีกอย่างคือ คุณสมบัติทางแสง ซึ่งสามารถทดสอบได้ด้วยชุดอุปกรณ์ทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานและการทดลอง

1. เพื่อให้สะดวกในการทดสอบประสิทธิภาพในด้านต่างๆ โดยที่ไม่กระทบต่อผิวชิ้นงาน จึงต้องมีการต่อขั้วไฟฟ้าซึ่งสามารถทำได้ด้วยการใช้กาวเงินหรือใช้เส้นลวดที่นำไฟฟ้า บัดกรีต่อเข้ากับบริเวณด้านหน้าตรงส่วน active area (ขั้วบวก) ตรงนี้ต้องระวังอย่าให้เลยออกมานอก active area และด้านหลัง (ขั้วลบ) ในการทดลองขั้นตอนนี้ต้องระมัดระวังเป็นพิเศษเพื่อป้องกันชิ้นงานเสียหาย ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แสดงอุปกรณ์ในการบัดกรีต่อขั้วไฟฟ้า



รูปที่ 3.11 (ก) พื้นที่บัดกรีต่อขั้วไฟฟ้าด้านหน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข) การต่อขั้วด้านหลัง

2. ภายหลังจากการต่อขั้วไฟฟ้าแล้ว จะต้องนำไปวัดสมบัติกระแสต่อแรงดันเป็นครั้งที่ 3 ด้วยชุดทดลองในตอนที่ 2 ศึกษาผลที่เกิดขึ้น

รูปที่ 3.12 แสดงชิ้นงานที่ต่อขั้วไฟฟ้าเรียบร้อยแล้ว

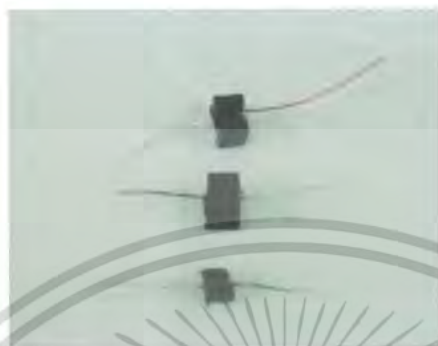
3. นำชิ้นงานไปทำการเคลือบด้วยเรซินสีดำที่ผสมกับตัวทำแข็ง ดังแสดงในรูปที่ 3.13 การทดลองครั้งนี้ศึกษาโดยใช้อัตราส่วน 2:1 และ 1: 1 เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมที่ทำให้ชิ้นงานแห้งและแข็งหลังจากนั้นทิ้งไว้ให้แห้ง 1 คืน



รูปที่ 3.13 แสดงวัสดุอุปกรณ์ในการบรรจุภัณฑ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

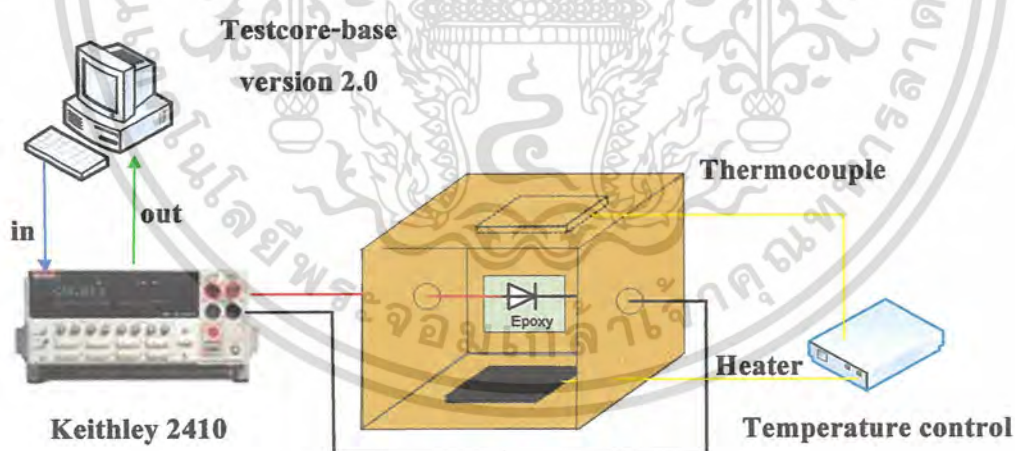
4. จะใช้ชิ้นงานดังรูปที่ 3.14 และนำไปวัดคุณสมบัติกระแสต่อแรงดันเป็นครั้งที่ 4 เพื่อศึกษาผลกระทบของแสงที่มีต่อชิ้นงาน



รูปที่ 3.14 ไดโอดที่ผ่านการบรรจุภัณฑ์

ตอนที่ 4 การทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดเมื่อได้รับอุณหภูมิค่าต่างๆ

ชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบประสิทธิภาพในด้านไฟฟ้า และทางด้านแสงแล้ว จำเป็นต้องทดสอบอุณหภูมิ เพื่อให้ชิ้นงานสามารถนำไปพัฒนาใช้งานได้กว้างขวางต่อไป โดยสามารถทดสอบได้โดยใช้ชุดอุปกรณ์ทดลองดังรูปที่ 3.15



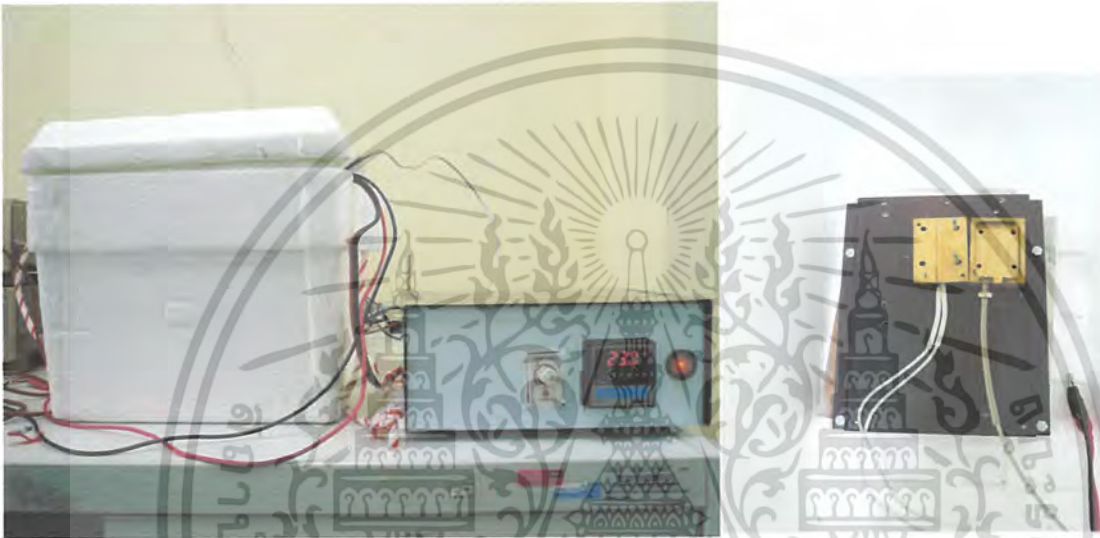
รูปที่ 3.15 แบบจำลองชุดอุปกรณ์ทดสอบประสิทธิภาพต่ออุณหภูมิ

ชุดอุปกรณ์ประกอบไปด้วย Thermocouple เป็นตัววัดอุณหภูมิ มี Heater อยู่ด้านล่างควบคุมอุณหภูมิด้วย Temperature control ใช้ Keithley 2410 เป็นตัวจ่ายแรงดันไฟฟ้า และใช้โปรแกรม Test core-base Version 2.0 ในการกำหนดค่าแรงดันไฟฟ้า และประมวลผลแสดงไปยังหน้าจอคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการทดลอง

1. นำชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบผลจากแสงเรียบร้อยแล้วในตอนที 3 มาทำการทดสอบผลของอุณหภูมิด้วยชุดอุปกรณ์ทดลองดังรูปที่ 3.16 (ก)
2. นำชิ้นงานใส่ในชุดทดลอง ดังรูปที่ 3.16 (ข) จากนั้นทำการวัดผลค่ากระแสต่อแรงดันเหมือนเช่นเดียวกับในตอนที 2 และตอนที 3



รูปที่ 3.16 (ก) แสดงชุดอุปกรณ์ทดลองจริง

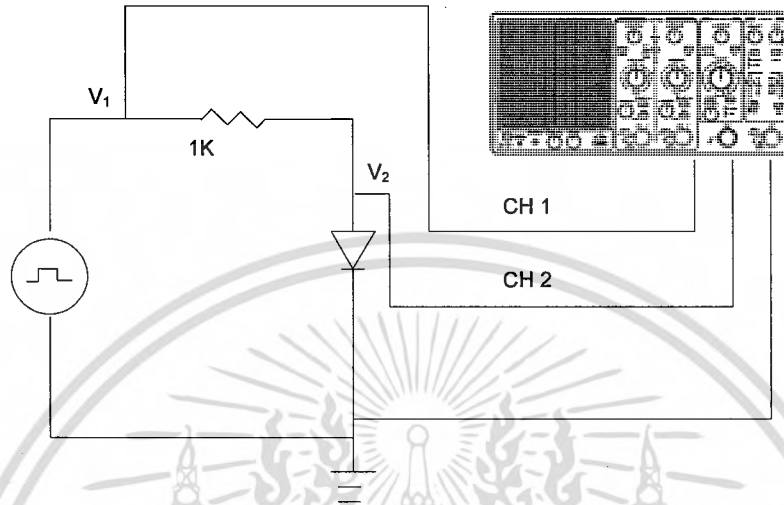
(ข) ภายในกล่องทดลอง

3. ทำการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิเพิ่มขึ้นครั้งละ 10 องศาเซลเซียส ตั้งแต่อุณหภูมิห้องจนถึง 60 องศาเซลเซียส สังเกตผลและบันทึกผลที่เกิดขึ้น
4. นำค่าที่วัดได้ไปเปรียบเทียบกับในตอนที 2 และตอนที 3 วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น โดยใช้การวัดครั้งที่ 1 เป็นข้อมูลอ้างอิง

ตอนที่ 5 การทดสอบวัดสมบัติการเป็นสวิตซ์ของ ไดโอดกำลังทั้ง 3 ชนิด

สมบัติการเป็นสวิตซ์ของ ไดโอดแต่ละชนิดจะแตกต่างกันสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ เพื่อแบ่งแยกชนิดได้ โดยใช้การทดลองดังรูปที่ 3.17

1. ต่อวงจรดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 วงจรการทดลองสมบัติการเป็นสวิตช์ของไดโอด

2. ทำการวัดค่า ΔV โดยการกดปุ่ม cersor แล้วเส้นในแนวแกนอนเส้นที่ 1 เป็น V_1 ให้อยู่ในตำแหน่งที่สูงที่สุดของกราฟ และเส้นในแนวแกนอนเส้นที่ 2 เป็น V_2 ให้อยู่ในต่ำสุดของกราฟแล้วบันทึกค่า ΔV

3. นำค่า ΔV มาคำนวณหาค่า I_R (reverse bias current) โดยใช้สูตร $I_R = -\frac{V_R}{R_R}$

$$(V_R = \Delta V)$$

4. ทำการวัดค่า t_r (reverse recovery time) และ T_f โดยขีดค่า V_2 จาก 10% แล้วเลื่อนเส้น cersor V_1 ให้เท่ากับ 10% ที่ขีดได้จาก V_2 กราฟจุดที่ตัดกับเส้นของ V_1 คือค่า t_r แล้วบันทึกค่า T_f

5. ทำการวัดค่า V_F โดยใช้เส้น cersor ในแนวอนวัตจุดสูงสุดของกราฟแล้วบันทึกค่า

6. นำค่า V_F (forward bias voltage) มาคำนวณหาค่า I_F (forward bias current) โดยใช้

$$\text{สูตร } I_F = \frac{V_F}{R_F}$$

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

การทดลองครั้งนี้จะศึกษาโครงสร้างของไดโอด 3 ชนิดด้วยกัน คือ P-i-N diode, Schottky diode, MPS diode สังเกตความแตกต่างในโครงสร้าง จากนั้นนำไปทดสอบสมบัติทางไฟฟ้า (กระแส-แรงดัน) โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 4 ตอนด้วยกัน คือ

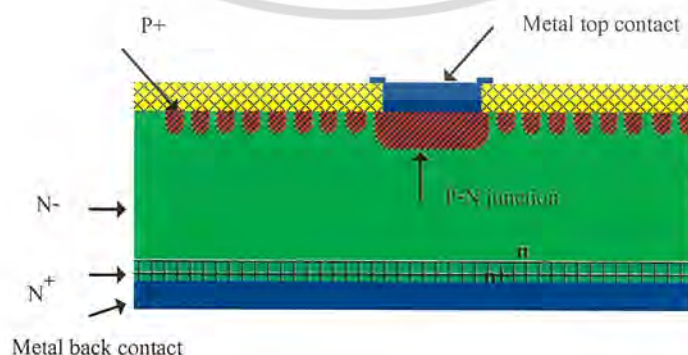
- ตอนที่ 1 การศึกษาโครงสร้างของไดโอดกำลัง
- ตอนที่ 2 เรียนรู้วิธีการวัดและทำการวัดสมบัติทางไฟฟ้าของ Power Diode ทำการ Dry Etching และ Electroless ด้วยนิกเกิล แล้ววัดสมบัติทางไฟฟ้า (กระแส-แรงดัน)
- ตอนที่ 3 เรียนรู้วิธีการบรรจุภัณฑ์และศึกษาผลกระทบจากแสงภายหลังการบรรจุภัณฑ์ ก่อนการทดลองจะต้องนำชิ้นงาน ไปทำการต่อขั้วไฟฟ้าแล้วเคลือบด้วยเรซิน จากนั้นวัดสมบัติทางไฟฟ้า (กระแส-แรงดัน) ภายหลังการบรรจุภัณฑ์
- ตอนที่ 4 การทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดเมื่อได้รับอุณหภูมิค่าต่างๆ
- ตอนที่ 5 การวัดสมบัติการเป็นสวิตช์ของไดโอด

4.1 ผลการทดลอง

4.1.1 ตอนที่ 1 การศึกษาโครงสร้างของไดโอดกำลัง

- โครงสร้างของ P-i-N diode

พินไดโอดประกอบด้วยกรือปนบริเวณพีและเอ็นที่แยกออกจากกันด้วยบริเวณสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (i) ดังแสดงในรูปที่ 4.1



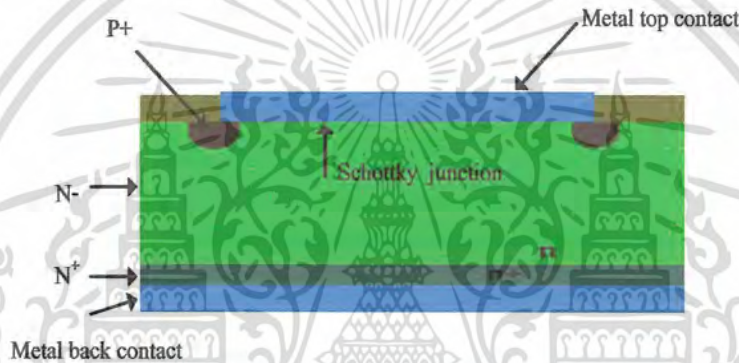
รูปที่ 4.1 แสดงโครงสร้างพินไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งของศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ เป็นแบบ lightly doped (N) โดย TMEC ทำโครงสร้าง P⁺-N-N⁺ โดยที่ชั้น i มีความเข้มข้นสารเจือประมาณ 1x10¹³ cm⁻³ รอยต่อพี-เอ็น จากลักษณะดังกล่าวทำให้เกิดรอยต่อพี-เอ็น ซึ่งเป็นตัวกำหนดสมบัติของไดโอด

- โครงสร้างของ Schottky diode

เป็นการสร้างรอยต่อระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ เรียกว่า รอยต่อชอตต์กี โลหะที่ใช้ คือ Al สร้างรอยต่อกับสารกึ่งตัวนำ N ที่มีความเข้มข้นสารเจือ 1x10¹³ cm⁻³ ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ด้วยสมบัติของ Al และ Si ชนิด N ทำให้เกิดรอยต่อชอตต์กี

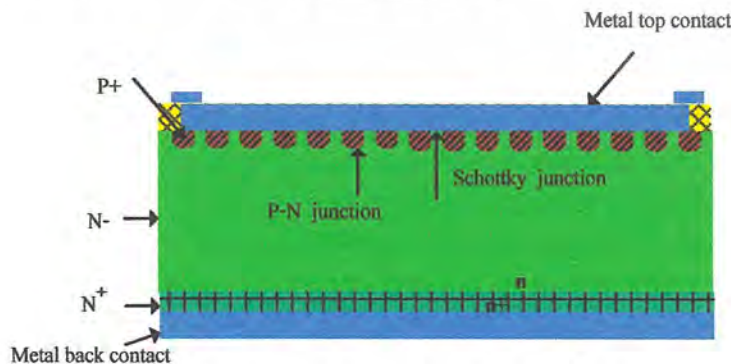


รูปที่ 4.2 แสดงโครงสร้างชอตต์กี ไดโอด

ชอตต์กี ไดโอดทำงานด้วยพาหะส่วนใหญ่เพียงอย่างเดียว ทำให้มีกระแสอิ่มตัวย้อนกลับมากกว่าพิน ไดโอด แต่อัตราเร็วในการสวิตซ์ซึ่งสูงกว่าแบบพิน ไดโอด ให้ความหนาแน่นกระแสสูงกว่พิน ไดโอด และเริ่มทำงานที่แรงดันต่ำกว่า

- โครงสร้างของ MPS diode

เป็นการรวมเอาโครงสร้างพิน ไดโอด รวมกับ ชอตต์กี ไดโอด ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แสดงโครงสร้างเอ็ม พี เอส ไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

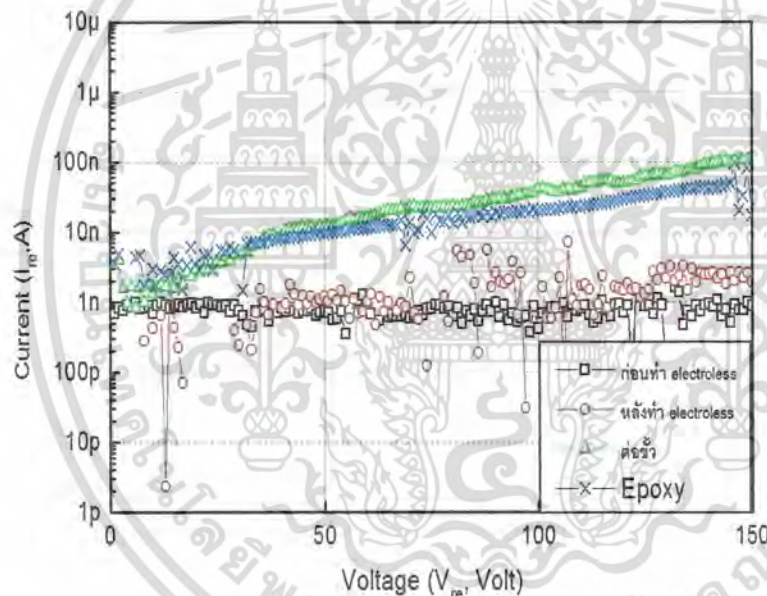
ทำให้สมบัติที่ได้เรียงกระแสได้ดีกว่าขอตักโคโอดทั่วไป [1] และมีการสวิตซิ่งสูงกว่าพินโคโอด รวมทั้งกระแสรั่วอยู่ระหว่างพินโคโอด กับ ขอตักโคโอด [2]

4.1.2 ตอนที่ 2 เรียนรู้วิธีการวัดและทำการวัดสมบัติทางไฟฟ้าของ Power Diode

4.1.3 ตอนที่ 3 เรียนรู้วิธีการบรรจุภัณฑ์ และศึกษาผลกระทบจากแสง

4.1.4 ตอนที่ 4 การทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของโคโอดเมื่อได้รับอุณหภูมิค่าต่างๆ

- ผลการทดลองวัดสมบัติทางไฟฟ้า (แรงดัน-กระแส) ของพินโคโอดเมื่อได้รับไบอัสย้อนกลับ โดยใช้โคโอดพารามิเตอร์ Active area 2x2 mm, 8 guard ring size 10 μm , spacing (x)= 18 μm



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงผลการวัดโคโอดชนิดพิน

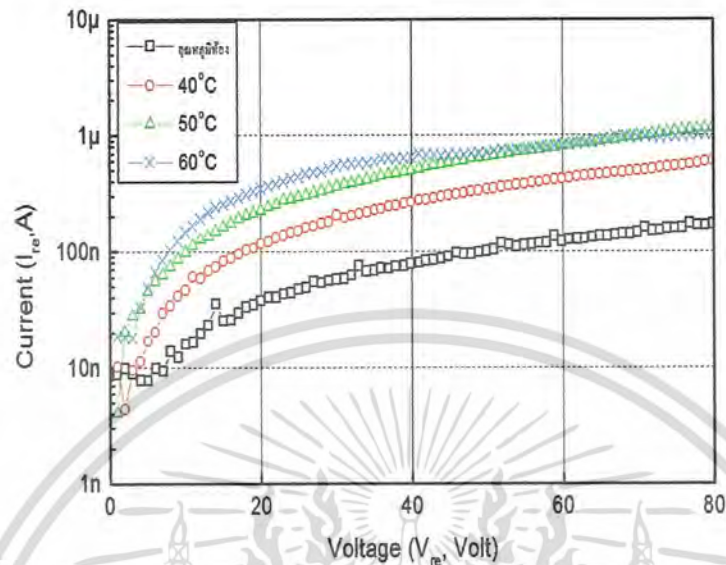
จากกราฟดังรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการป้อนแรงดันไบอัสย้อนกลับ จะมีกระแสย้อนกลับ มีค่าเพิ่มขึ้นหากมีการเพิ่มแรงดันไบอัสขึ้นเรื่อยๆ แต่จะมีการเปลี่ยนแปลงที่ค่อนข้างน้อยมาก ภายหลังจากทำอิลเลคโตรเลสที่การต้มใช้เวลา 15 นาที ตามด้วยอบอีก 15 นาที จะได้ผิวหน้าที่มีนิกเกิลเกาะติดแน่นมากที่สุด เมื่อนำไปวัดค่ากระแสรั่วพบว่า กระแสย้อนกลับหรือกระแสรั่วจะเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับก่อนทำอิลเลคโตรเลส การต่อขั้วไฟฟ้าในขั้นตอนถัดไปกระแสรั่วที่วัดค่าได้เพิ่มขึ้น การบรรจุภัณฑ์ด้วยการเคลือบเรซินในอัตราส่วนตัวทำแข็งต่อเรซิน 2 : 1 หากทิ้งไว้ 1 คืนจะแห้งไม่และเหมาะสมแก่การนำไปใช้เพื่อป้องกันแสง จะทำให้กระแสรั่วมีค่าลดลงเล็กน้อย [4] ขั้นตอนต่อไปเป็นการทดสอบอุณหภูมิได้ผลดังตารางที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ลงนามเวลาหรือการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการวัดค่ากระแสรั่วของพินไดโอดที่อุณหภูมิห้อง, 40, 50, 60 องศาเซลเซียส

Voltage (V_{re} , Volt)	Current (I_{re} , A)			
	อุณหภูมิห้อง 25-28 °C	40 °C	50 °C	60 °C
0	1.64E-08	2.76E-08	2.23E-09	2.99E-09
10	2.43E-08	5.29E-08	1.05E-07	2.14E-07
20	4.80E-08	1.12E-07	2.17E-07	7.54E-08
30	8.86E-08	1.69E-07	3.32E-07	6.67E-07
40	1.76E-07	2.26E-07	4.46E-07	8.97E-07
50	1.89E-07	2.78E-07	5.67E-07	1.14E-06
60	1.47E-07	3.29E-07	6.81E-07	1.38E-06
70	3.09E-07	3.77E-07	8.00E-07	1.62E-06
80	6.31E-07	1.13E-06	1.86E-06	3.00E-06
90	3.52E-06	6.07E-06	7.98E-06	7.94E-06
100	1.19E-05	1.78E-05	2.37E-05	2.79E-05
110	2.36E-05	3.57E-05	4.82E-05	5.80E-05
120	4.27E-05	6.18E-05	8.10E-05	9.77E-05
130	7.34E-05	1.01E-04	1.26E-04	1.51E-04
140	1.19E-04	1.58E-04	2.10E-04	2.18E-04
150	1.88E-04	2.39E-04	2.91E-04	3.06E-04

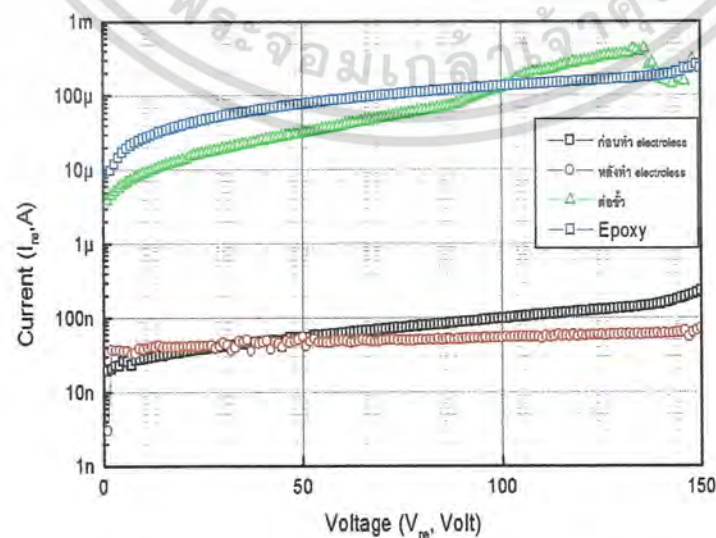
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงผลการวัดไดโอดชนิดพินที่อุณหภูมิค่าต่างๆ

จากรูปที่ 4.5 ผลการทดสอบประสิทธิภาพไดโอดที่อุณหภูมิห้อง, 40, 50, 60 องศาเซลเซียส พบว่ากระแสรั่วที่ได้ขณะ 40 องศาเซลเซียสเพิ่มขึ้น 2.81 เท่า, 50 องศาเซลเซียสเพิ่มขึ้น 1.55 เท่าและ 60 องศาเซลเซียสเพิ่มขึ้น 1.43 เท่าพบว่าที่การไบอัสย้อนกลับสูงขึ้นกระแสรั่วจะมีค่าเพิ่มขึ้นแต่มีการเพิ่มขึ้นน้อยลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทุกๆ 10 องศาเซลเซียส

- ผลการทดลองวัดสมบัติทางไฟฟ้า (แรงดัน-กระแส) ของขอตักไดโอด เมื่อได้รับไบอัสย้อนกลับ โดยใช้ไดโอด มีพารามิเตอร์ค่า Active area 2x2 mm, guard ring size 100 um.



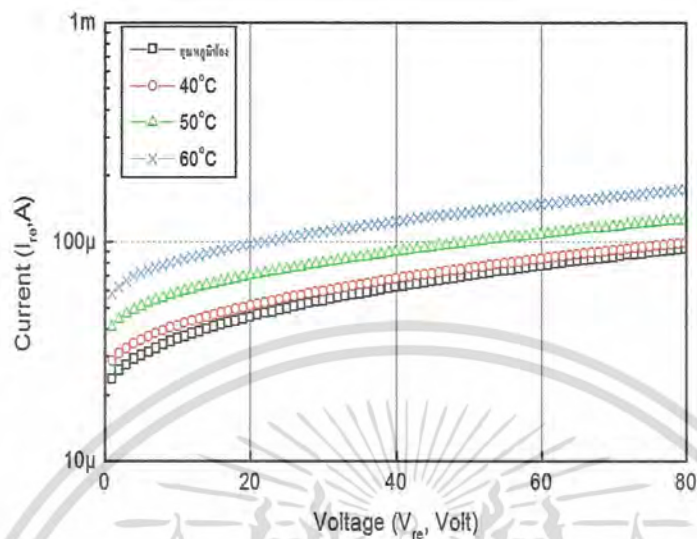
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการวิจัยและพัฒนาเท่านั้นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.6 พบว่าเมื่อให้แรงดันไบอัสย้อนกลับ จะมีกระแสย้อนกลับหรือกระแสรั่วไหลผ่านช่วงไบอัสค่าต่างๆ มีกระแสเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และจะลดลงเมื่อไบอัสย้อนกลับค่าที่สูงขึ้น จนถึงจุดๆ หนึ่ง และจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนถึงย่านการพังทลาย ภายหลังจากทำอิลเลคโตรเลสด้วยสารละลายนิกเกิลที่การต้ม 15 นาที ตามด้วยอบ 15 นาที จะได้ผิวหนังที่มีนิกเกิลเกาะแน่นเหมาะสำหรับการต่อขั้วไฟฟ้าในขั้นตอนต่อไป กระแสรั่วที่วัดได้จะน้อยลงเมื่อเทียบกับก่อนทำ การต่อขั้วไฟฟ้าทำให้กระแสรั่วเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด หลังจากนั้นไปเคลือบด้วยเรซินในอัตราส่วนตัวทำแข็งต่อเรซิน 2 : 1 หากทิ้งไว้ 1 คืนจะแห้งเป็นการบรรจุภัณฑ์ กระแสรั่วที่วัดได้ลดลงเล็กน้อย นำชิ้นงานไปทดสอบที่อุณหภูมิห้อง, 40, 50, 60 องศาเซลเซียส ได้ผลดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการวัดค่ากระแสรั่วของขดตักโคโอดที่อุณหภูมิห้อง, 40, 50, 60 องศาเซลเซียส

Voltage (V_r , Volt)	Current (I_r , A)			
	อุณหภูมิห้อง 25-28 °C	40 °C	50 °C	60 °C
0	3.59E-05	4.92E-05	6.00E-05	6.78E-05
10	8.76E-05	6.51E-05	7.05E-05	8.24E-05
20	7.46E-05	7.54E-05	8.30E-05	9.98E-05
30	8.05E-05	8.81E-05	9.84E-05	1.19E-04
40	8.90E-05	1.02E-04	1.16E-04	1.38E-04
50	1.00E-04	1.16E-04	1.33E-04	1.60E-04
60	1.14E-04	1.32E-04	1.56E-04	1.80E-04
70	1.29E-04	1.48E-04	1.78E-04	2.01E-04
80	1.42E-04	1.63E-04	1.98E-04	2.24E-04
90	1.57E-04	1.79E-04	2.20E-04	2.46E-04
100	1.73E-04	1.97E-04	2.37E-04	2.69E-04
110	1.82E-04	2.15E-04	2.56E-04	2.92E-04
120	1.97E-04	2.33E-04	2.77E-04	3.16E-04
130	2.14E-04	2.52E-04	3.00E-04	3.41E-04
140	2.30E-04	2.71E-04	3.21E-04	3.66E-04
150	2.47E-04	2.89E-04	3.44E-04	3.91E-04

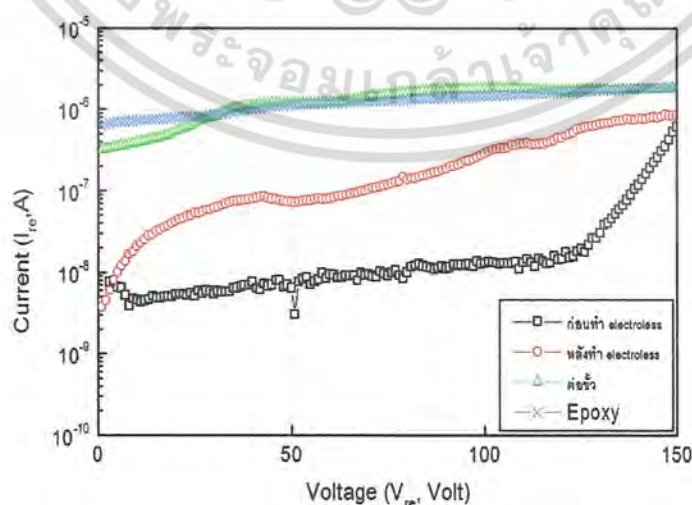
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลนี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงผลการวัดโคโอดชนิดขอตักที่อุณหภูมิค่าต่างๆ

จากรูปที่ 4.7 พบว่ากระแสรั่วที่ได้เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเช่นเดียวกับพินโคโอด และที่การไบอัสย้อนกลับสูงขึ้นกระแสรั่วจะมีค่าเพิ่มขึ้นทุกๆ 10 องศาเซลเซียส โดยที่ 40 องศาเซลเซียสเพิ่มขึ้น 1.08 เท่า, 50 องศาเซลเซียสเพิ่มขึ้น 1.30 เท่าและ 60 องศาเซลเซียสเพิ่มขึ้น 1.38 เท่า การไบอัสย้อนกลับสูงขึ้นกระแสรั่วจะมีค่าเพิ่มขึ้น

- ผลการทดลองวัดสมบัติทางไฟฟ้า (แรงดัน-กระแส) ของ เอ็ม พี เอส โคโอด โดยใช้โคโอด พารามิเตอร์ค่า MPS %30 SD active area 2x2 mm, 1 guard ring size 50 μm, spacing (x)= 15 μm



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงผลการวัดโคโอดชนิด เอ็ม พี เอส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

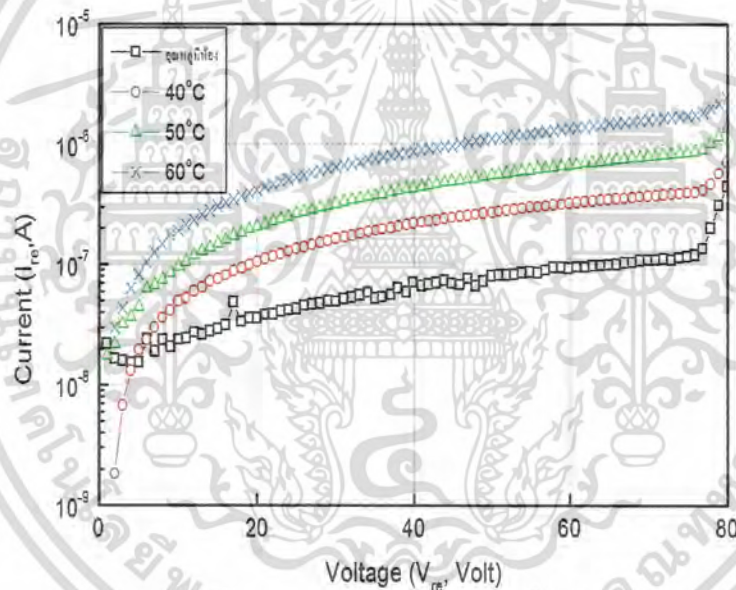
จากโครงสร้างที่มี 2 ส่วนรวมกันของพี-เอ็น ใด โอดและซอด้ตักใด โอด เป็นผลให้เมื่อจ่ายแรงดันไบอัสย้อนกลับจะมีกระแสย้อนกลับหรือกระแสรั่วที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงระหว่างพิน ใด โอดและซอด้ตักใด โอด จากนั้นเมื่อทำการเพิ่มแรงดันไบอัส ทำให้มีค่ากระแสรั่วลดน้อยลงแต่จะเพิ่มขึ้นลักษณะที่ช้ากว่าช่วงแรกเมื่อไบอัสย้อนกลับมากขึ้น หลังจากนำไปทำการอิเล็กทรอนิกส์ด้วยนิกเกิลที่เวลาดัม 15 นาที อบอีก 15 นาที นิกเกิลเกาะแน่นและมากจนเกือบทั่วผิวหน้าชิ้นงานแล้วพบว่ากระแสรั่วเพิ่มขึ้น โดยจะแสดงลักษณะเช่นเดียวกันก่อนทำอิเล็กทรอนิกส์ การต่อขั้วไฟฟ้าทำให้กระแสรั่วในใด โอดชนิด MPS เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับในพิน ใด โอดและซอด้ตักใด โอด หากนำไปบรรจุภัณฑ์เคลือบด้วยเรซินที่อัตราส่วนตัวทำแข็งต่อเรซิน 2 : 1 หากทิ้งไว้ 1 คืนให้แห้งเพื่อป้องกันแสงจากภายนอกเช่นเดียวกับพิน ใด โอดและซอด้ตักใด โอด กระแสรั่วที่วัดได้ลดลงเล็กน้อยด้วยเช่นกัน นำชิ้นงานไปทดสอบที่อุณหภูมิห้อง, 40, 50, 60 องศาเซลเซียส ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการวัดค่ากระแสรั่วของ เอ็ม พี เอส ใด โอดที่อุณหภูมิห้อง, 40, 50, 60 องศาเซลเซียส

Voltage (V_{re} , Volt)	Current (I_{re} , A)			
	อุณหภูมิห้อง 25-28 °C	40 °C	50 °C	60 °C
0	1.64E-08	2.76E-08	2.23E-09	2.99E-09
10	2.43E-08	5.29E-08	1.05E-07	2.14E-07
20	3.80E-08	1.12E-07	2.17E-07	7.54E-08
30	5.16E-08	1.69E-07	3.32E-07	6.67E-07
40	6.61E-08	2.26E-07	4.46E-07	8.97E-07
50	8.15E-08	2.78E-07	5.67E-07	1.14E-06
60	9.52E-08	3.29E-07	6.81E-07	1.38E-06
70	1.09E-07	3.77E-07	8.00E-07	1.62E-06
80	6.31E-07	1.13E-06	1.86E-06	3.00E-06
90	3.52E-06	6.07E-06	7.98E-06	7.94E-06
100	1.19E-05	1.78E-05	2.37E-05	2.79E-05
110	2.36E-05	3.57E-05	4.82E-05	5.80E-05

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปโดยไม่ขออนุญาตจากเจ้าของเอกสาร
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Voltage (V_{re} , Volt)	Current (I_{re} , A)			
	อุณหภูมิห้อง 25-28 °C	40 °C	50 °C	60 °C
120	4.02E-05	5.83E-05	7.71E-05	9.33E-05
130	7.34E-05	1.01E-04	1.26E-04	1.51E-04
140	1.19E-04	1.58E-04	2.10E-04	2.18E-04
150	1.88E-04	2.39E-04	2.91E-04	3.06E-04



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงผลการวัดไดโอดชนิด MPS ที่อุณหภูมิค่าต่างๆ

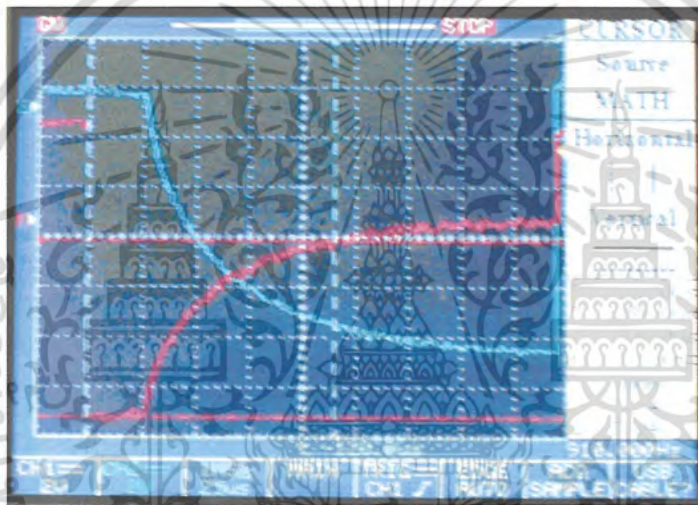
จากรูปที่ 4.9 ผลการทดสอบประสิทธิภาพไดโอดที่อุณหภูมิห้อง, 40, 50, 60 องศาเซลเซียส พบว่ากระแสรั่วที่ได้เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเช่นเดียวกับพี-เอ็นไดโอดและซอต์คทีไดโอด ที่การไบอัสย้อนกลับสูงขึ้น ขณะ 40 องศาเซลเซียสเพิ่มขึ้น 2.11 เท่า, 50 องศาเซลเซียสเพิ่มขึ้น 1.48 เท่าและ 60 องศาเซลเซียสเพิ่มขึ้น 1.41 เท่า พบว่ากระแสรั่วมีการเพิ่มขึ้นน้อยลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทุกๆ 10 องศาเซลเซียส

4.1.5 ตอนที่ 5 การวัดสมบัติการเป็นสวิตช์ของไดโอด

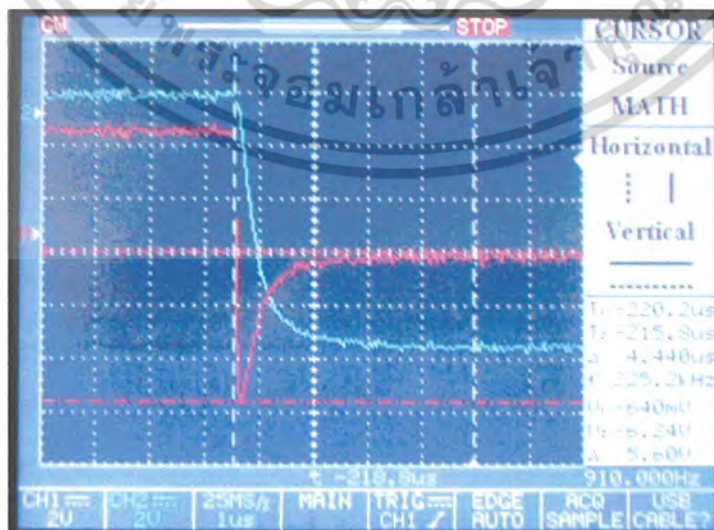
จากการทดลองเพื่อศึกษาสมบัติการเป็นสวิตช์ของไดโอดโดยใช้ชุดการทดลองดังรูปที่ 3.16 ได้ผลการวัดค่าดังแสดงได้ดังตารางที่ 4.4 ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการวัดและคำนวณจากการวัดสมบัติการเป็นสวิตช์ของไดโอดทั้ง 3 ชนิด

ชนิดไดโอด	การทดลอง						การคำนวณ	
	V_1 (V)	V_2 (V)	ΔV (V)	V_F (V)	T_{rr} (μ s)	T_1 (μ s)	I_F (mA)	I_R (mA)
P-i-N	-0.8	-7.92	-7.12	0.64	116	-221	6.4	-7.12
Schottky	-0.64	-6.24	-5.6	0.8	4.44	-220.2	8	-5.6
MPS	-0.8	-7.76	-6.96	0.8	100	-220	8	-6.96

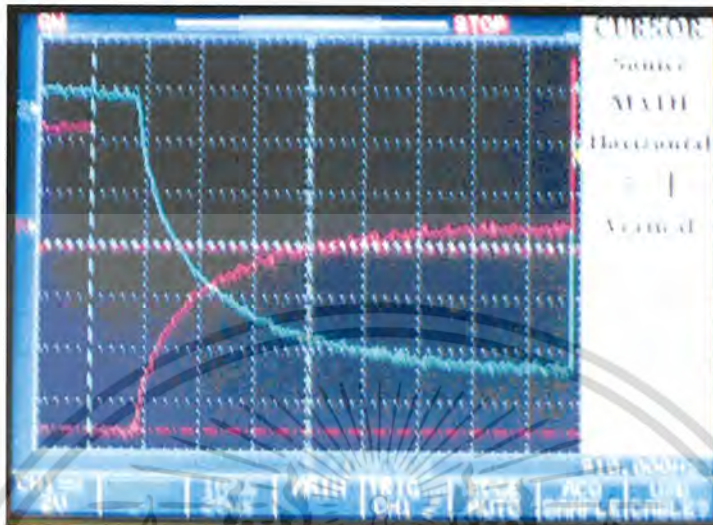


รูปที่ 4.10 กราฟแสดงสมบัติการเป็นสวิตช์ของ P-i-N Diode



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงสมบัติการเป็นสวิตช์ของ Schottky Diode

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการแข่งขันเพื่อการแข่งขันเท่านั้น เมื่อผู้ผู้เห็นได้เห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงสมบัติของ MPS Diode

ผลที่ได้จากการวัดสมบัติของการเป็นสวิตช์ของไดโอดกำลังทั้ง 3 ชนิด (P-i-N Diode , Schottky Diode , MPS Diode) โดยทำการวัดในขณะที่ทำงานในสถานะปิด (off state) หรือขณะได้รับการไบอัสย้อนกลับ ซึ่งกระแสที่ไหลผ่านไดโอดกำลัง ทั้ง 3 ชนิด จะเปลี่ยนแปลงทันที จากกระแส I_F (จากการคำนวณจากสูตร $I_F = \frac{V_F}{R_F}$) ไปเป็นกระแสย้อนกลับ I_R (จากการคำนวณจากสูตร $I_R = -\frac{V_R}{R_R}$) โดยเปรียบเทียบจากตารางผลการทดลองที่ 4.4 และค่า t_{rr} (reverse recovery time) ที่ได้จากการทดลองนี้ จะเป็นตัวบอกค่าความเร็วในการฟื้นตัวของไดโอดกำลังทั้ง 3 ชนิด ซึ่งจากการทดลอง Schottky Diode จะมีระยะเวลาในการฟื้นตัวเร็วที่สุด เมื่อเทียบกับ MPS Diode ซึ่งจะมีระยะเวลาในการฟื้นตัวเร็วรองลงมา และ P-i-N Diode จะมีระยะเวลาในการฟื้นตัวน้อยที่สุด

4.2 อภิปรายผล

4.2.1 พี-เอ็นไดโอด

- กระแสอิมิตัวย้อนกลับกรณีไบอัสย้อนกลับ ที่วัดได้นั้น เป็นดังเช่นสมการนี้ [9]

$$I_{rev} \approx -(I_{Ro}) = -\frac{Aq n_i W}{2\tau_o}$$

ช่วงก่อนการพังทลาย ศูนย์กลางการรวมตัว (recombination center) จะแสดงตัวเป็นศูนย์กลางการเกิด (generation center) ซึ่งปรากฏอยู่ในช่องว่างพลังงาน แสดงตัวเป็นขั้นบันไดให้อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ ซึ่งถูกกระตุ้นด้วยพลังงานความร้อนให้เคลื่อนที่ผ่านไปถึงแถบนำไฟฟ้า ขณะที่ป้อนแรงดันเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไบอัสย้อนกลับสนามไฟฟ้าจะแยกคู่อิเล็กตรอน-โฮล ที่เกิดออกจากกัน ทำให้กระแสรั่วเพิ่มขึ้น เมื่อ I_{rev} เพิ่มขึ้น เพราะ I_{RO} เพิ่มขึ้น กระแส I_{rev} จะเพิ่มขึ้นตาม depletion region ซึ่งจะขยายตามแรงดันไบอัสย้อนกลับ เป็นลักษณะของการเกิดปรากฏการณ์อะวาลานซ์ (Avalanche effect)

- หลังจากการทำอิเลคโตรเลสด้วยนิกเกิลแล้วสามารถนำกระแสเพิ่มขึ้นทำให้กระแสรั่วเพิ่มขึ้น
- ความร้อนขณะทำการต่อขั้วไฟฟ้ามีผลให้เกิดปรากฏการณ์ทางความร้อนบนชิ้นงาน อุณหภูมิจะไม่สม่ำเสมอเท่ากันตลอดทั้งชิ้นงาน [11] ส่งผลต่อค่าความหนาแน่นกระแส ความต้านทานจำเพาะของไดโอดลดลง จึงมีกระแสรั่วเพิ่มขึ้น
- การบรรจุภัณฑ์ด้วยการเคลือบเรซิน ทำให้กระแสรั่วลดลงเนื่องจากพลังงานที่ให้แก่วาลเลนซ์อิเล็กตรอน ในแถบวาเลนซ์จะลดลง เพราะเกือบจะไม่มีพลังงานโฟตอนจากแสงเลย ทำให้การนำไฟฟ้าลดลงกระแสรั่วก็ลดลงตามไปด้วยเช่นกัน จะต้องให้พลังงานเพิ่มขึ้นจึงจะสามารถนำไฟฟ้าได้ดีกว่าเดิม [4]
- กระแสรั่วที่เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นนั้น อุณหภูมิที่สูงขึ้น ทำให้ n_i มีค่ามากขึ้น [10] ส่งผลให้ I_{rev} มีค่าเพิ่มมากขึ้น ดังสมการต่อไปนี้

$$n_i^2 = AT^3 \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right)$$

4.2.2 ขอตักไดโอด

- กระแสรั่วที่ลดลงภายหลังการทำอิเลคโตรเลสด้วยสารละลายนิกเกิลมีสาเหตุมาจาก ระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำนั้นคือ อะลูมิเนียมกับซิลิกอน อยู่แล้วเมื่อทำอิเลคโตรเลสด้วยนิกเกิลที่มีสมบัติเป็นโลหะเช่นเดียวกับอะลูมิเนียมทำให้ค่า $q\phi_{nk}$ ของนิกเกิลกับอะลูมิเนียมรวมกันและมีค่ามากกว่า $q\phi_{nk}$ [10] ทำให้บริเวณปลอดพาหะกว้างขึ้น ทำให้กระแสรั่วที่ลดลง
- การต่อขั้วไฟฟ้าเช่นเดียวกับพี-เอ็นไดโอด ปรากฏการณ์ทางความร้อนทำให้เกิดลักษณะของอุณหภูมิภายในชิ้นงานไม่คงที่ ทำให้ความหนาแน่นกระแสในชิ้นงานปั่นป่วนจึงได้กระแสรั่วที่สูงขึ้น
- การบรรจุภัณฑ์ กระแสรั่วที่วัดได้ลดลงเมื่อเทียบกับก่อนทำ , หลังทำ electroless และหลังต่อขั้ว เนื่องจากการนำไฟฟ้าที่ลดลงเป็นผลจากแถบวาเลนซ์ได้รับพลังงานน้อยลง เกิดการนำไฟฟ้าน้อยลงตามไปด้วย จึงมีกระแสรั่วเกิดน้อย
- กระแสรั่วที่เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นนั้น อุณหภูมิที่สูงขึ้น [2] เป็นไปตามสมการต่อไปนี้

$$-I_{RO} = -AA^{**}T^2 e^{-q\phi_{bnk}/kT}$$

โดยที่ A device area, A^{**} effective Richardson constant, T absolute temperature, q electron charge,

k Boltzmann's constant, ϕ_{bnk} ค่าแฟกซ์ระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 MPS ไดโอด

- เกิดเป็นสองช่วง โดยในช่วงแรกแรงดันค่าต่ำๆ จะแสดงคุณสมบัติของขอตักไดโอด ในส่วนของพี-เอ็น จะไม่มีการใช้งาน กระแสจะเพิ่มขึ้นหากแรงดันไบอัสย้อนกลับสูงขึ้น [1]
- การอิเล็กทรอนิกส์ด้วยนิเกิลทำให้ไดโอดแสดงคุณสมบัติขอตักไดโอดในช่วงแรกของการไบอัสแรงดันค่าสูงขึ้นกระแสที่ได้จะเป็นผลจากส่วนของพินไดโอด ซึ่งกระแสที่เปลี่ยนแปลงไปเป็นผลจากความร้อน ขณะคัมและอบส่งผลต่อความหนาแน่นพาหะ กระแสที่วัดได้จึงเพิ่มขึ้น
- การต่อขั้วไฟฟ้าทำให้เกิดลักษณะของอุณหภูมิภายในขึ้น ไม่เท่ากันสม่ำเสมอตลอดทั้งหมด ทำให้ความหนาแน่นกระแสในชิ้นงานปั่นป่วน จึงได้กระแสที่สูงขึ้นตามไปด้วย
- การบรรจุภัณฑ์ทำให้กระแสลดลงเนื่องจากลดการคูลกิ้นในสารกึ่งตัวนำ
- กระแสที่เกิดขึ้นจะเพิ่มเมื่อได้รับอุณหภูมิมากขึ้นเป็นไปดังสมการของพินไดโอดและขอตักไดโอด ดังนั้นกระแสจึงมากขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลองตอนที่ 1 และตอนที่ 2

1. พินไดโอดมีโครงสร้างเป็นรอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวชนิดเอ็นและสารกึ่งตัวนำชนิดพี, ขอตต์กีไดโอดมีโครงสร้างเป็นรอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ เช่น A1 และสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น, เอ็มพีเอส ไดโอด มีโครงสร้างผสมระหว่างพินไดโอดและขอตต์กีไดโอด

2. ไดโอดที่มีโครงสร้างแตกต่างกัน จะมีสมบัติด้านต่างๆที่แตกต่างกัน เช่น กระแสรั่วและ switching time เป็นต้น การวัดสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่อง Keithley 2410 โดยใช้โปรแกรม TestCore-Base Version 2.0 (Dual 2410) ในการกำหนดค่าต่างๆ ในการทดลอง และประมวลผลแสดงไปยังหน้าจอคอมพิวเตอร์ ช่วยให้การวัดสมบัติทางไฟฟ้าและสะดวกขึ้น อีกทั้งสามารถนำไปใช้กับอุปกรณ์ตัวอื่นด้วย เช่น ทรานซิสเตอร์ เป็นต้น

3. พินไดโอดมีกระแสรั่วที่น้อยที่สุด รองลงมาคือเอ็ม พี เอสไดโอด และขอตต์กีไดโอดจะมากที่สุด

4. พินไดโอดมีแรงดันพังทลายที่มากที่สุด รองลงมาเป็นเอ็ม พี เอส ไดโอด และน้อยที่สุดเป็นขอตต์กีไดโอด

5.2 สรุปผลการทดลองตอนที่ 3

1. การทำอิเล็กโตรเลส (Electroless) ในนิกเกิลที่เวลาดำม 15 นาทีและเวลาอบ 15 นาที จะให้ผลดีที่สุด คือนิกเกิลเกาะมากและแน่นที่สุด หลังจากการดำมนิกเกิลแล้วกระแสรั่วที่วัดได้ของพินไดโอดและ เอ็ม พี เอสไดโอด จะมีค่าเพิ่มขึ้น ต่างจากของขอตต์กีที่มีค่าลดลง

2. การต่อขั้วไฟฟ้ามีผลต่อค่ากระแสรั่วมากกว่าขั้นตอนอื่น

3. การบรรจุภัณฑ์เคลือบด้วยตัวทำแข็งผสมกับเรซินในอัตราส่วน 2:1 จะทำให้ชิ้นงานแห้งและแข็งที่สุดการบรรจุภัณฑ์ที่ดีช่วยให้กระแสรั่วน้อยลงได้

4. เมื่อมีการบรรจุภัณฑ์กระแสรั่วที่วัดได้จะมีค่าลดลงเป็นผลของการลดการดูดกลืนแสงในชิ้นงาน

5.3 สรุปผลการทดลองตอนที่ 4

1. ที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นทุกๆ 10 องศาเซลเซียส กระแสรั่วจะเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นตามแรงดันที่ไบอัส พินไดโอดจะเปลี่ยนแปลงมากที่สุด รองลงมาคือ เอ็ม พี เอสไดโอดและเปลี่ยนแปลงน้อยสุดคือขอตต์กีไดโอด

2. พินไดโอดจะมีกระแสรั่วที่ใกล้เคียงกับ เอ็ม พี เอสไดโอดที่ ส่วนขอตต์กีไดโอดจะมากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. กระแสรั่วที่เปลี่ยนแปลงไป อุณหภูมิมีผลกระทบน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับขั้นตอนอื่นก่อนหน้านี โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทุกๆ 10 องศาเซลเซียส 40 องศาเซลเซียส ฟินไดโอดเพิ่มขึ้น 2.81 เท่า, ซอตต์กีเพิ่ม 1.08 เท่า, เอ็ม พี เอสไดโอดเพิ่ม 2.11 เท่า ส่วนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ฟินไดโอดเพิ่มขึ้น 1.55 เท่า, ซอตต์กีเพิ่ม 1.30 เท่า, เอ็ม พี เอสไดโอดเพิ่ม 1.40 และอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ฟินไดโอดเพิ่มขึ้น 1.43 เท่า, ซอตต์กีเพิ่ม 1.38 เท่า, เอ็ม พี เอสไดโอดเพิ่ม 2.41 เท่า

5.4 สรุปผลการทดลองตอนที่ 5

ฟินไดโอดมีช่วงเวลาที่ฟื้นตัวย้อนกลับช้าที่สุด, เอ็ม พี เอสไดโอดรองลงมา, ซอตต์กีไดโอด จะมีช่วงเวลาที่ฟื้นตัวย้อนกลับเร็วที่สุด

5.5 ข้อเสนอแนะ

1. ในขั้นตอนการวัดควรให้หัววัดสัมผัสผิวหน้าชิ้นงานเบามือที่สุด เพราะอาจเกิดการเสียหายของผิวหน้าได้ ส่งผลกระทบต่อสมบัติทางไฟฟ้าได้
2. ในการวัดควรวัดค่าครั้งแรกและกระแสที่จ่ายในการวัดค่าไม่ควรสูงเกินไป เพราะชิ้นงานจะเกิดความร้อนสะสมและมีประจุสะสมได้ ทำให้เกิดการพังและสมบัติทางไฟฟ้าเปลี่ยนไปได้
3. ขณะทำอิลเลคโตรเลส ควรเติมน้ำ DI อย่างสม่ำเสมอเป็นการปรับค่าความเข้มข้นของสารละลาย นิกเกิลให้มีความเข้มข้นมากขึ้น ซึ่งจะทำให้สารละลายนิกเกิลเกาะกับตัวไดโอดได้ดี
4. หลังจากต้มในสารละลายนิกเกิลเสร็จ ไม่ควรใช้ก๊าซในโตรเจนเป่า เพราะอาจทำให้นิกเกิลที่เกาะผิวหน้าชิ้นงานหลุดร่อนได้ ควรใช้ผ้าสะอาดซับเบาๆ หลังจากล้างด้วยน้ำ DI แล้ว จากนั้นจึงนำเข้าตู้อบ
5. ในการบัดกรีต่อขั้วไฟฟ้า ควรใช้ความร้อน 110 โวลต์ และขณะบัดกรีใช้เวลาสัมผัสระหว่างลวดนำไฟฟ้าและผิวหน้าชิ้นงานให้น้อยที่สุด เพื่อป้องกันปรากฏการณ์ทางความร้อนที่อาจเกิดขึ้น ทำให้มีผลต่อสมบัติทางไฟฟ้าที่วัดได้
6. การบรรจุภัณฑ์ ควรผสมเรซินกับตัวทำแข็งในอัตราส่วนที่เหมาะสม มิเช่นนั้นอาจจะไม่แห้งได้
7. ควรปรับอุณหภูมิให้คงที่ก่อนทำการวัด จะทำให้ได้ค่าที่เชื่อถือได้
8. ในการวัดสมบัติการเป็นสวิตช์ของไดโอดกำลังควรวัดค่าต่างๆ ให้อยู่ในช่วงที่ละเอียดที่สุด

เอกสารอ้างอิง

[1] Shankar Suwant and B.Jayant Baliga, "4kV Merged PiN Schottky (MPS) Rectifiers", IEEE tran. Power Semiconductor Device& ICs, November 17, 2008.

[2] Salvatore Musumeci, Angelo Raciti, Ferruccio Frisina, Maurizio Melito, and Mario Giuseppe Saggio, "Performance Analysis of Merged p-i-n Schottky Diodes With Doping Compensation of the Drift Region", IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, Vol. 43, No. 3, May/June 2007

[3] กรกฎ วัฒนวิเชียร, "โซลิตสเททอิล็กทอนิกส์", สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.

[4] ดร. คุณิต เครื่องงาม, "โซลิตสเททฟิสิกส์", ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2535.

[5] ดร. มงคล เชนกรินทร์และดร.ชาติ ศรีไพพรรณ, "ไดโอดสารกึ่งตัวนำ", อิเล็กทรอนิกส์พื้นฐาน, ซีเอ็ด, หน้า 45-58, 2542.

[6] นพดล สิทธิผล, "การพัฒนากระบวนการประกอบไดโอดกำลังชนิดเซลล์", วิทยานิพนธ์คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2548..

[7] มงคล ทองสงคราม, 2547, "สารกึ่งตัวนำและไดโอด", อิเล็กทรอนิกส์เบื้องต้น, ห้างหุ้นส่วนจำกัด วี.เจ.พรินต์ติ้ง, หน้า 11-12, 2542.

[8] รศ. สุรพล รักวิชัย, 2550 "อิเล็กทรอนิกส์สำหรับอุตสาหกรรม".

[9] รศ.ดร. สมเกียรติ สุขเกษ, 2542, "เซมิคอนดักเตอร์ดีไอโอด", แผนกตำราคณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

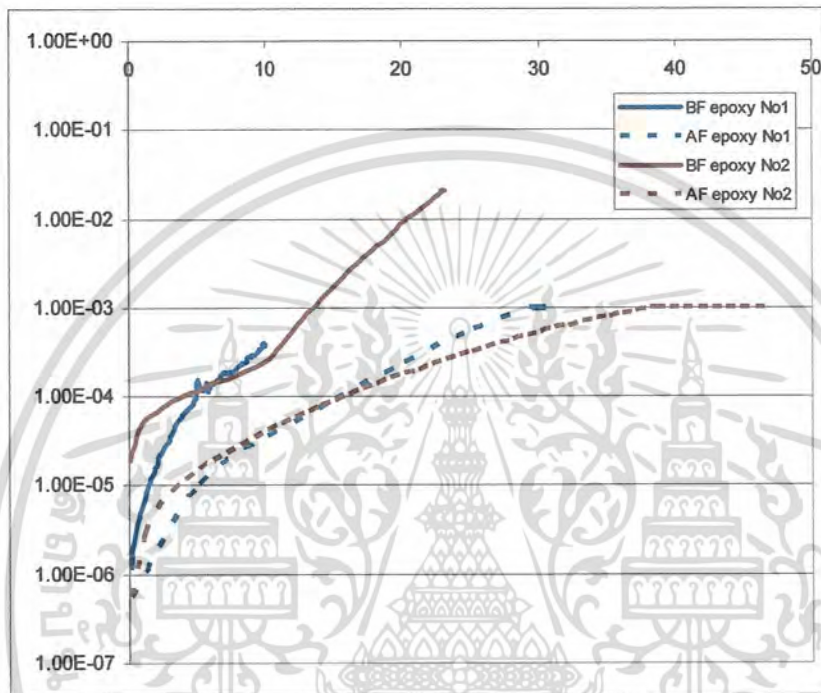
[10] รศ.ดร. สมเกียรติ สุขเกษ, 2542, "เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์", แผนกตำราคณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

[11] ผศ.ดร.อารีย์ วิเชียรฉาย, 2539, "การวัดคุณสมบัติพื้นฐานของสารกึ่งตัวนำด้วยวิธีการต่างๆ" เครื่องมือและการวัดทางฟิสิกส์ของสารกึ่งตัวนำ, ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

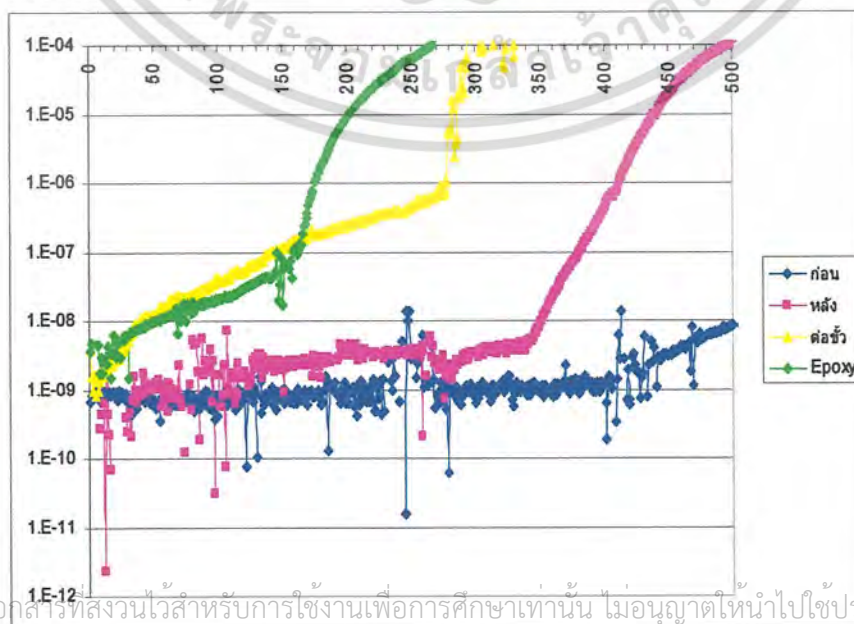
ไดโอดใช้ทดสอบผลกระทบของแสงก่อนทดลองจริง



กราฟผลการวัดไดโอดชนิดพิน

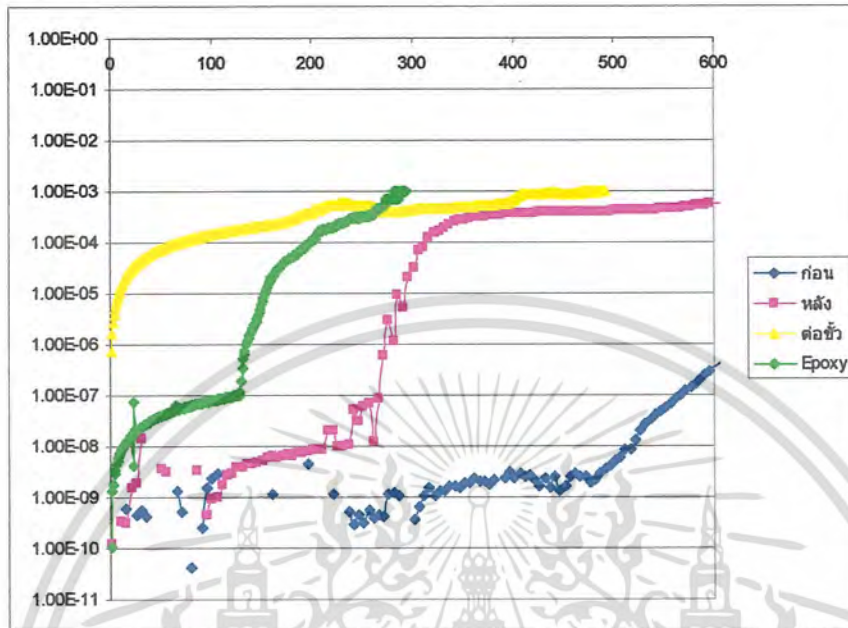
ผลหลังต่อขั้ว+ epoxy

- S2G1T15

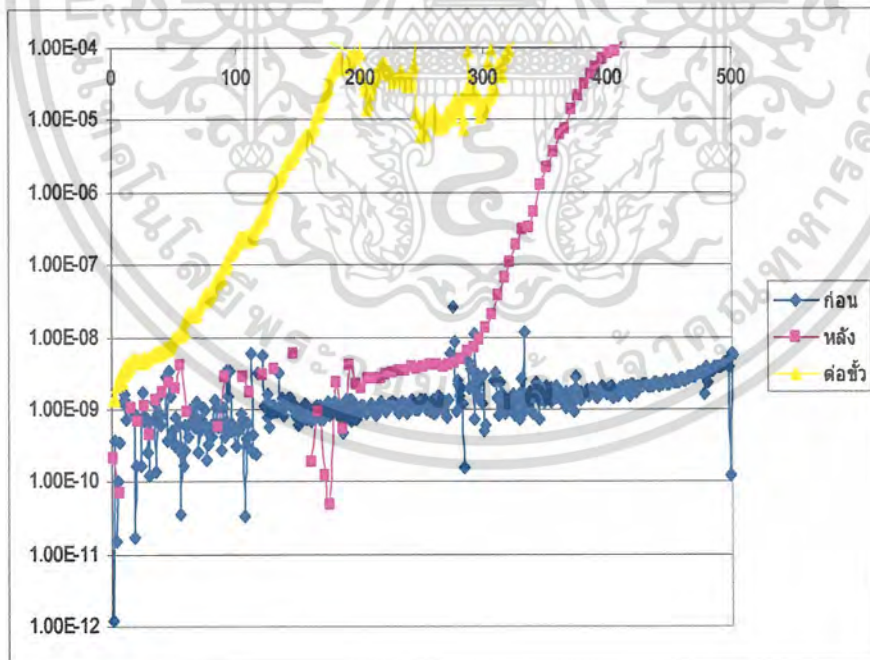


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

S2G4T15



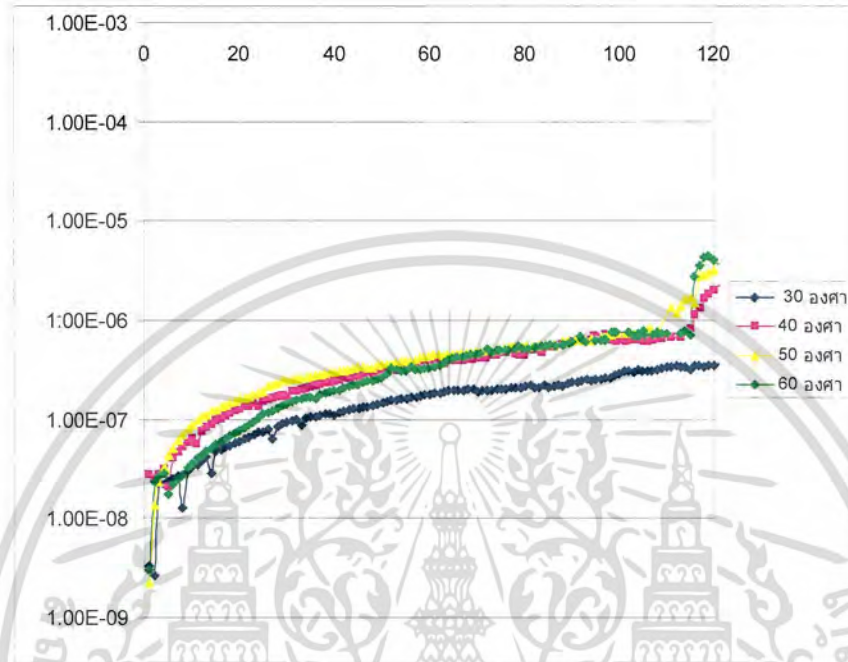
S1G1T15



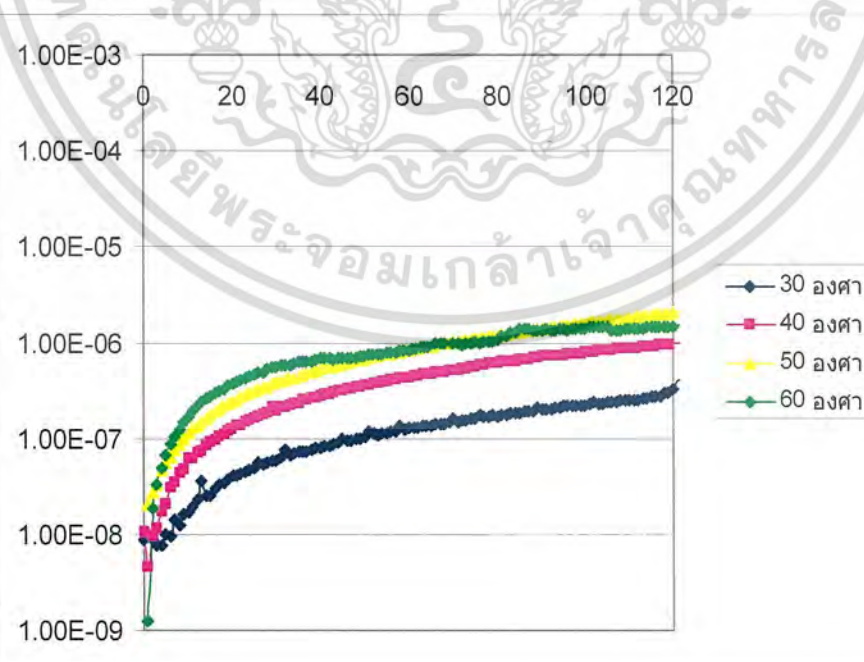
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลคูณทงุมิ

- S2G4T15



- S4G4T15

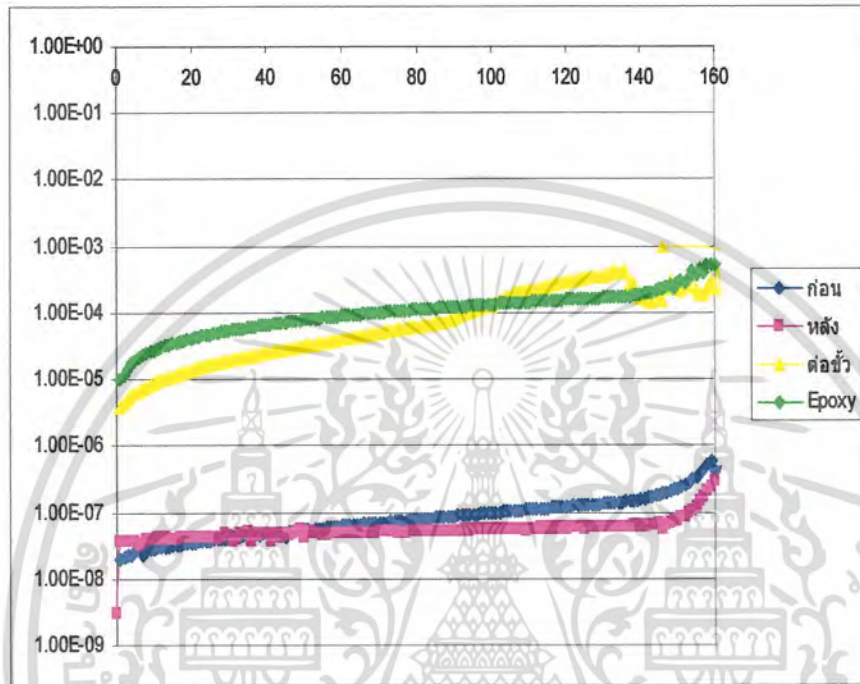


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

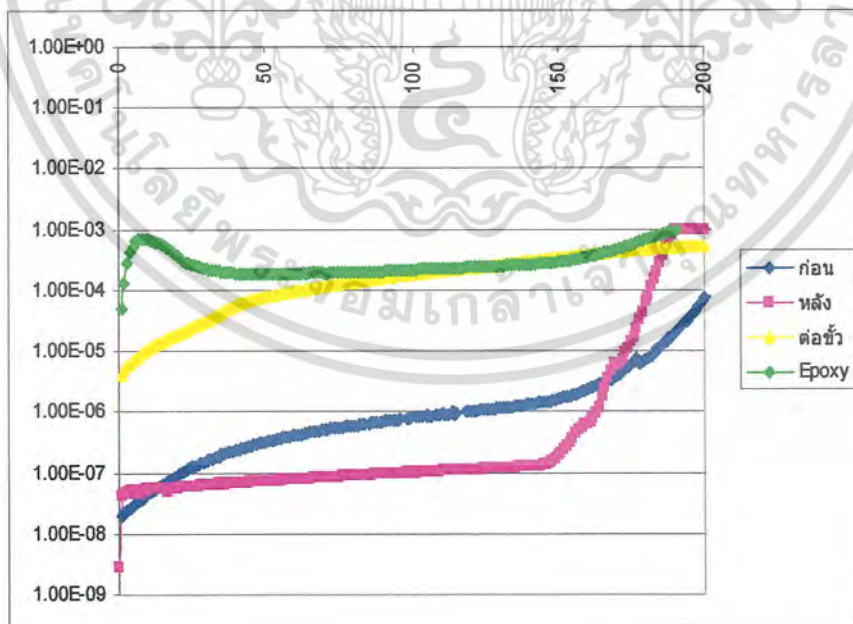
กราฟผลการวัดไดโอดชนิดชนิดขอตัก

ผลหลังต่อขั้ว+ epoxy

- S3G5T21



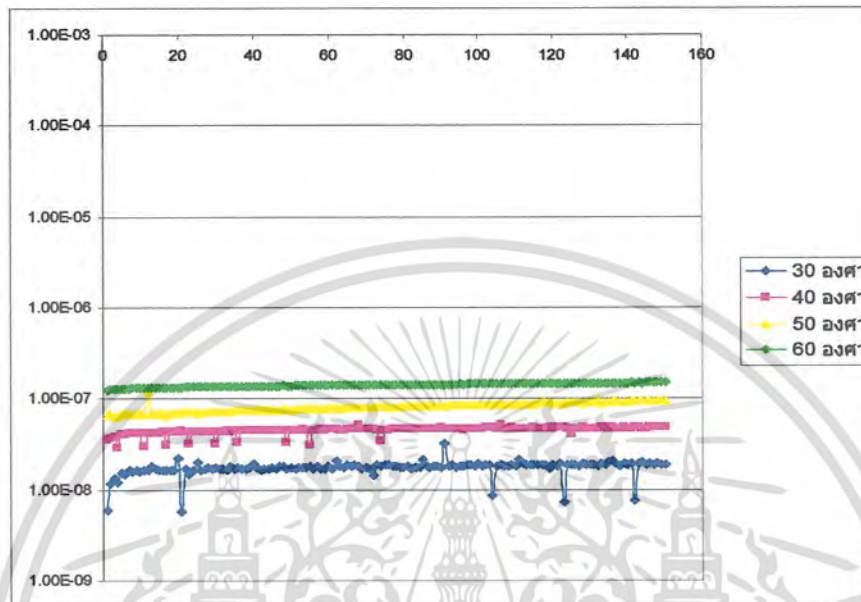
- S3G4T21



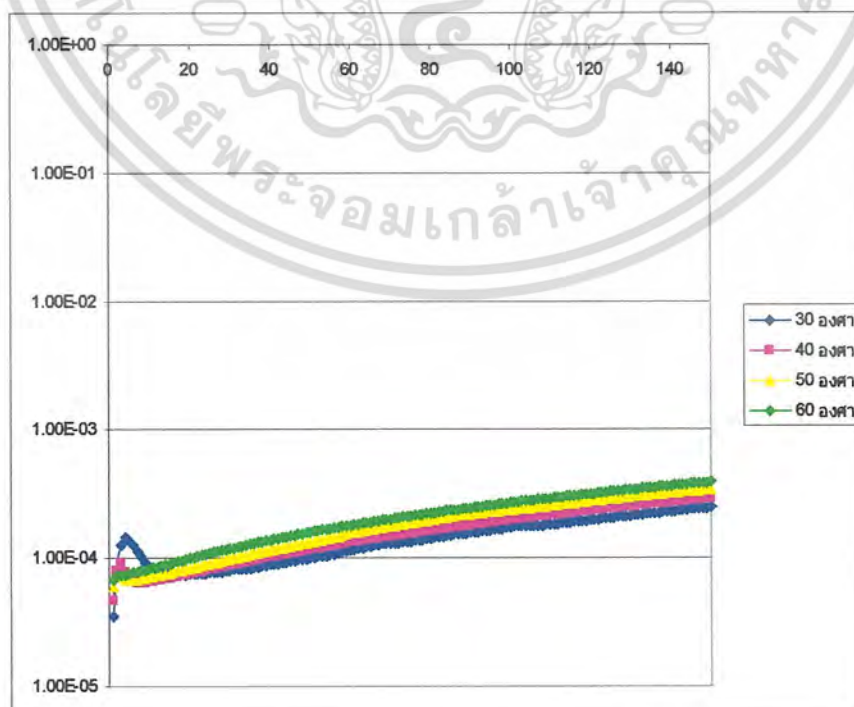
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลคูณหมุมิ

- S1G2T21

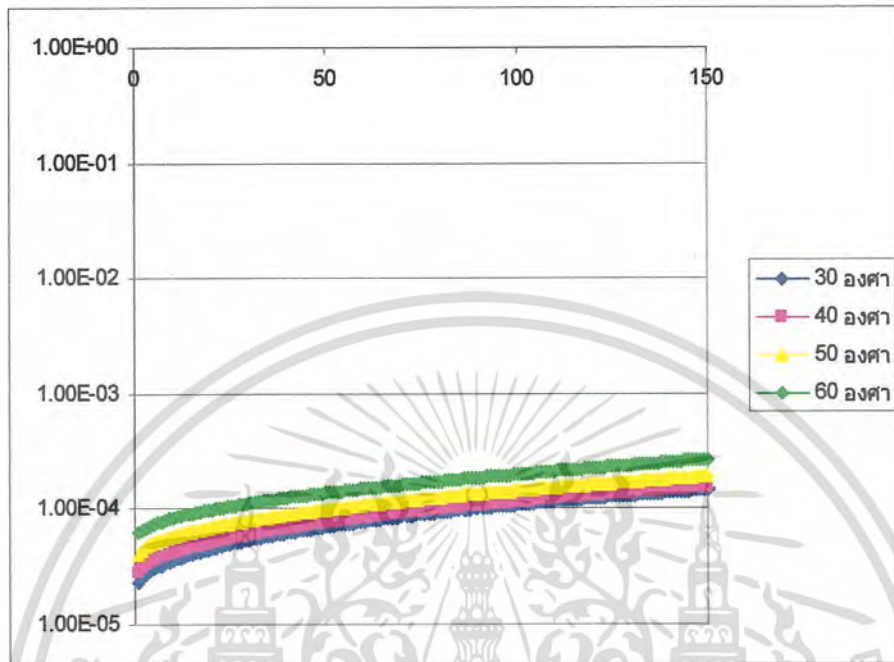


- S3G4T21



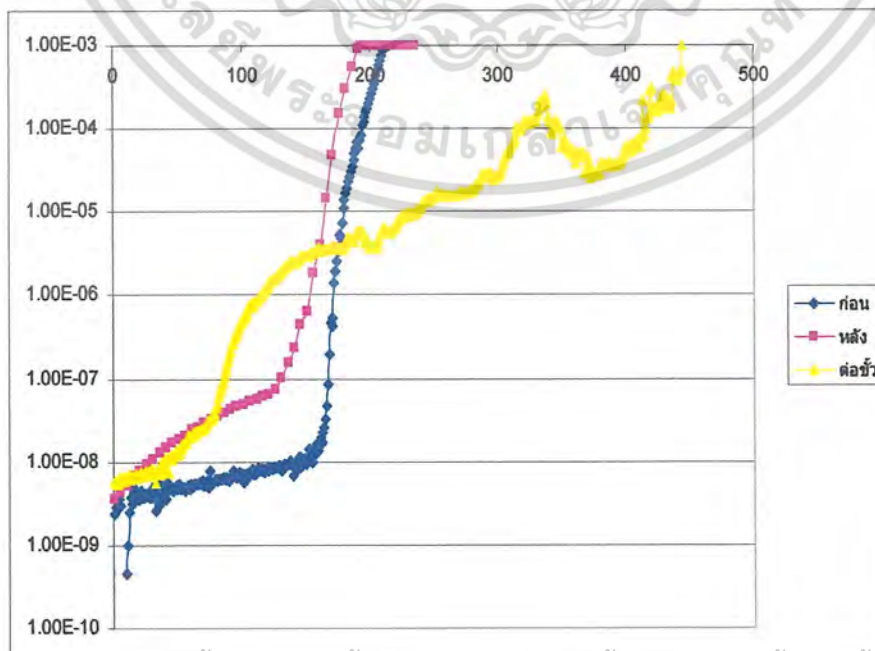
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- S3G5T21



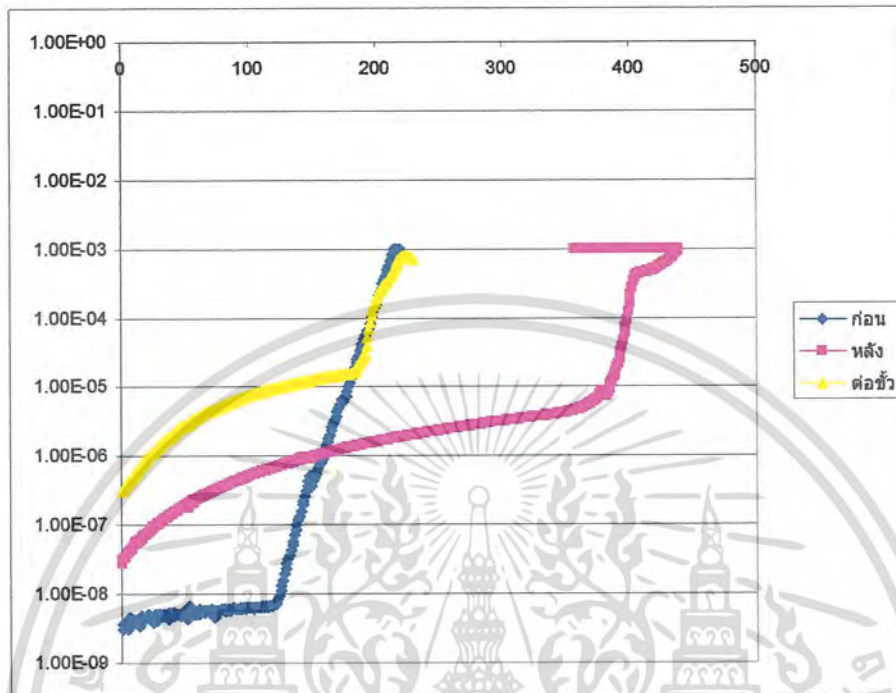
กราฟผลการวัดเอ็ม พี เอส ไคโอค
ผลหลังต่อหัว

- S2G4T26

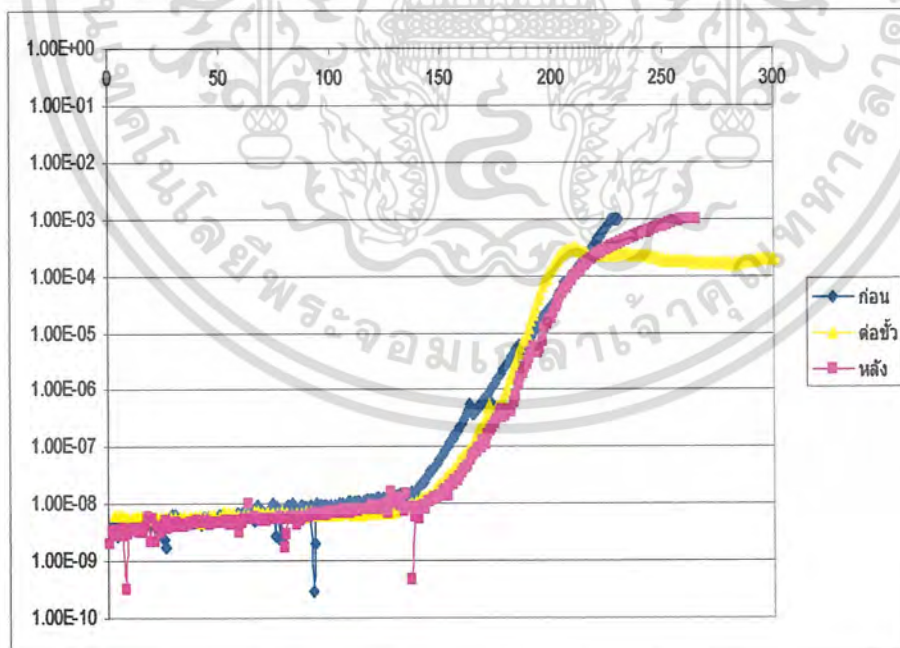


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

S4G4T26



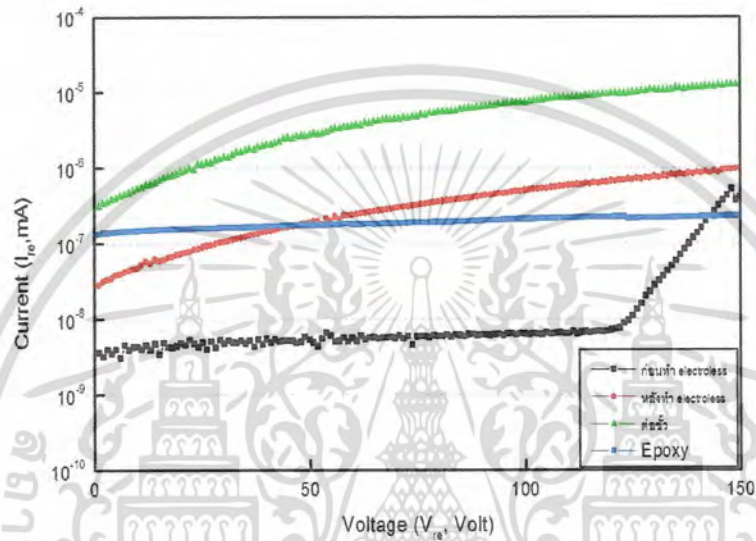
S3G5T26



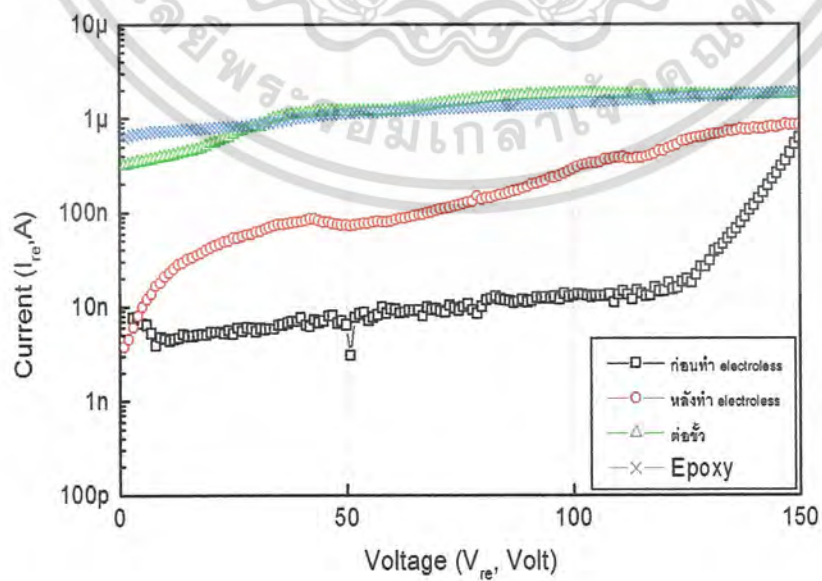
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลหลัง epoxy

- S4G4T26



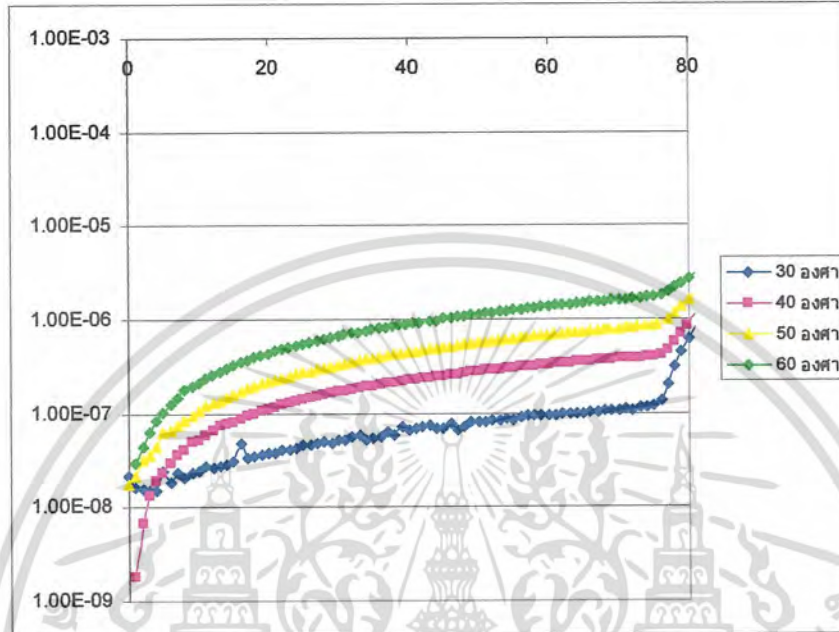
- S2G2T26



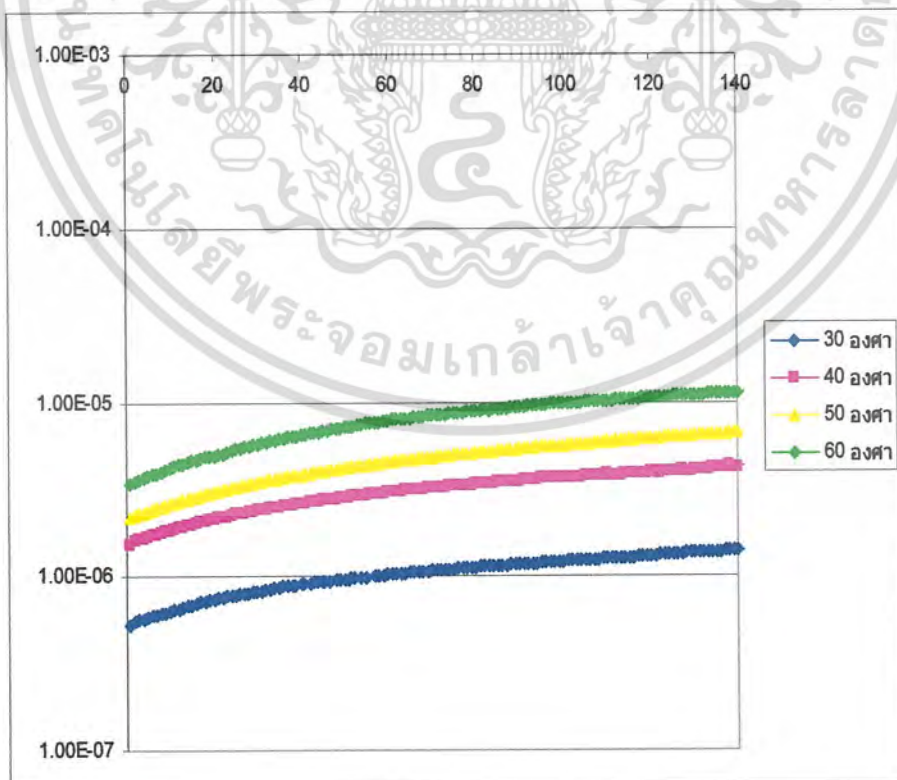
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลอุณหภูมิ

- S2G2T26

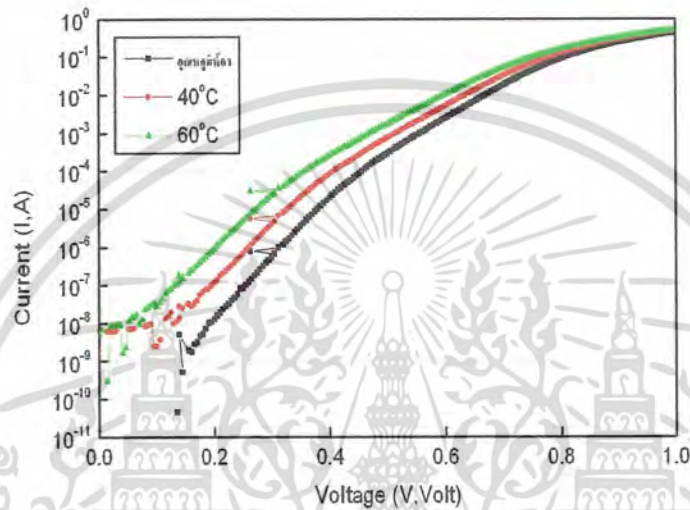


- S4G4T26

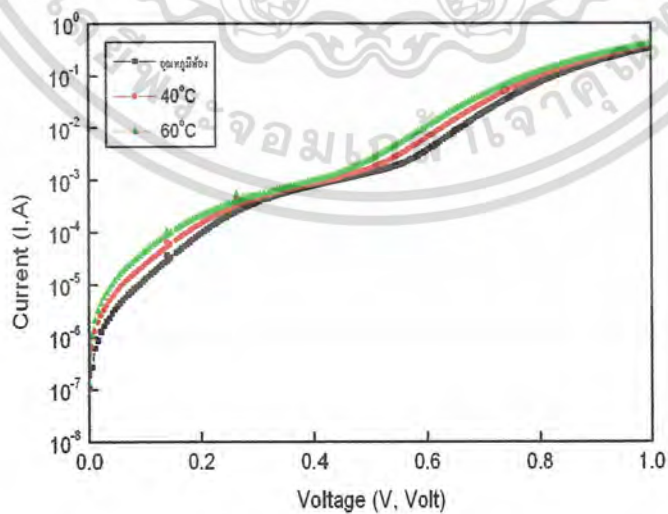


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

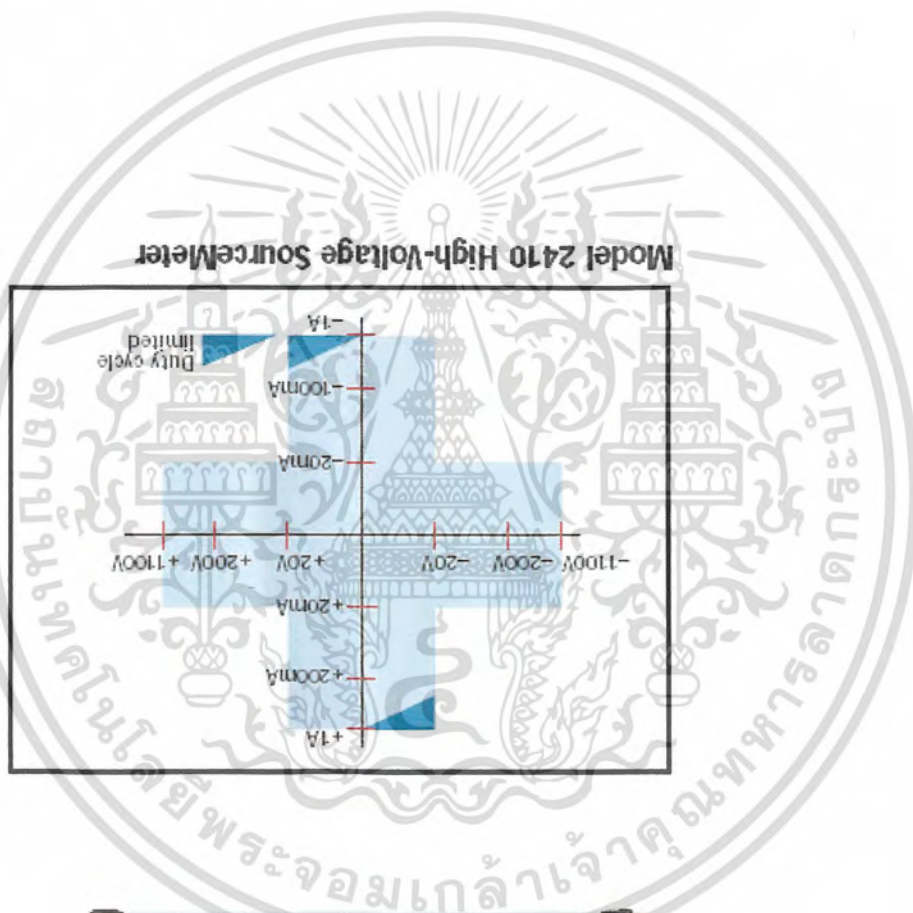
- กราฟแสดงผลการวัด ไดโอดชนิดพิน เมื่อทำการ ไบแอสตรงที่อุณหภูมิห้อง, 40 และ60 องศาเซลเซียส



- กราฟแสดงผลการวัด ไดโอดชนิดขอตัก เมื่อทำการ ไบแอสตรงที่อุณหภูมิห้อง, 40 และ60 องศาเซลเซียส



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Keithley 2410 1100V, 1A, 20W SourceMeter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 18 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้