สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การพัฒนากระบวนการประกอบไดโอดกำลังชนิดเซลล์

DEVELOPMENT OF ASSEMBLY PROCESS FOR CELL RECTIFIER DIODE

โดย

นายธีระ ปราบ ณ ศักดิ์

นายองอาจ บัวช่วง

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 73167
วัน,เดือน,ปี - 6 ก.ค. 2550

.b 11782480
.i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพัฒนากระบวนการประกอบไดโอดกำลังชนิดเซลล์

DEVELOPMENT OF ASSEMBLY PROCESS FOR CELL RECTIFIER DIODE

โดย

นายธีระ ปราบ ณ ศักดิ์ 46015266

นายองอาจ บัวช่วง 46015289

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง

ปริญญานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ ปีการศึกษา 2548

ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่องการพัฒนากระบวนการประกอบไดโอดกำลังชนิดเซลล์

ผู้จัดทำ

1. นายธีระ ปราบ ณ ศักดิ์

2. นายองอาจ บัวช่วง

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร.วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงาน

การพัฒนากระบวนการประกอบไดโอดกำลังชนิดเซล์

นายธีระ ปราบ ณ ศักดิ์ 46015266

นายองอาจ บัวช่วง 46015289

รศ.ดร. วิสุทธิ์ จิติรุ่งเรือง (อาจารย์ที่ปรึกษา)

ภาคการศึกษาที่ 1 ปีการศึกษา 2548

บทคัดย่อ

โครงงานนี้เป็นการนำเสนอถึงการประกอบไดโอดในอุตสาหกรรม ซึ่งในปัจจุบันมีกระบวนการผลิตไดโอด ขั้นตอนดังนี้ คือ การตัดแผ่นสารกึ่งตัวนำ, การบัดกรีขั้วไดโอด, การกัดชิ้นส่วนที่ไม่ต้องการ, การเคลือบป้องกันไดโอด และการทดสอบคุณสมบัติของไดโอด ในการผลิตไดโอดนั้นพบว่าผลิตภัณฑ์ส่วนหนึ่งมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าไม่ผ่านเกณฑ์ตามความต้องการ เช่น มีปริมาณกระแสรั่ว สูงเกินกำหนดและยังพบว่ามีฟองอากาศ ที่บริเวณรอยสัมผัสของขั้วโลหะกับชิ้นงานในบางส่วน นอกจากนั้นยังพบว่าคุณสมบัติความสัมพันธ์กระแสกับแรงดันของชิ้นงานบางตัวเกิดการสั่นขึ้นและบางตัวเกิดการเปลี่ยนแปลงกระแสตามเวลา ซึ่งล้วนเป็นสาเหตุของการไม่ผ่านเกณฑ์ของตัวชิ้นงานที่ผลิตขึ้นมา

ดังนั้นในโครงงานนี้นอกจากเราจะศึกษาการประกอบไดโอดแล้ว เรายังศึกษาปัญหาต่างๆข้างต้น เพื่อแก้ไขปัญหาที่เกิดในกระบวนการประกอบไดโอด เพื่อลดผลิตภัณฑ์ที่ไม่ผ่านเกณฑ์ที่ต้องการให้น้อยลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Project Title
DEVELOPMENT OF ASSEMBLY PROCESS FOR CELL RECTIFIER DIODE

Mr. Theera Prab na sak 46015266
Mr. Ongarge Buachoung 46015289

Assoc.Prof.Dr. Wisut Titiroongruang
(Project Advisor)

ABSTRACT

This project presents the diode assembly process in industry. At present time, this process is composed of sawing process, soldering process, etching process, coating process and testing process. But some products from the process do not pass the standard characteristics because of leakage current, gap and bubble at contact between dice and metal joint, unexpected I-V characteristics, the ringing round and IR digital.

So, this project will study the problem in the assembly process to decrease the failure of products from the process.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา	1
1.2 ทฤษฎีและแนวความคิดในปริญญานิพนธ์	1
1.3 รายละเอียดของปริญญานิพนธ์	1
บทที่ 2 ทฤษฎีการทำงานของไดโอด	3
2.1 รอยต่อพี-เอ็นในภาวะสมดุล	3
2.2 รอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง	4
2.3 รอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ	6
2.4 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของรอยต่อ พี-เอ็น	8
2.5 กระแสรั่วที่รอยต่อพีเอ็น	9
2.6 คุณสมบัติการพังทลายที่รอยต่อ พี-เอ็น	11
2.7 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของไดโอดในทางปฏิบัติ	12
2.8 รอยสัมผัสโลหะและสารกึ่งตัวนำ (Metal-Semiconductor Contact)	13
2.9 ลักษณะแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำในอุดมคติก่อนสัมผัส	14
2.10 การนำไดโอดไปใช้งาน	16
2.10.1 ไดโอดกำลัง (Power Diode)	16
2.10.2 ไดโอดสวิตซ์ (Switching Diode)	17
2.10.3 ซีเนอร์ไดโอด (Zener Diode)	17
2.10.4 แบคเวิร์ดไดโอด (Backward Diode)	17
2.10.5 ทันเนลไดโอด (Tunnel Diode)	17
2.10.6 แวแรคเตอร์ไดโอด (Varactor Diode)	18
2.11 คุณสมบัติที่สำคัญของวัสดุที่ทำหน้าสัมผัสทางไฟฟ้า	18
2.12 กระแสไฟฟ้าและความนำไฟฟ้า	19
2.13 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของขั้วโลหะที่มีพื้นที่ขนาดใหญ่	22
บทที่ 3 กระบวนการประกอบและวัสดุที่ใช้ในการผลิตไดโอดกำลังชนิด Cell ในอุตสาหกรรม	24
3.1 กระบวนการตัดแผ่น	24
3.2 กระบวนการทำความสะอาดแผ่นซิลิคอน	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 กระบวนการหลอมเหลวแผ่นตะกั่ว 25
3.3.1 ขั้นตอนการวางชิ้นงานก่อนการ Soldering 26
3.3.2 เตาที่ใช้ในการหลอมเหลวแผ่นตะกั่ว (Soldering) จะแยกเป็นทั้งหมด 6 ส่วน 26
3.3.3 การ Flow Nitrogen 27
3.4 กระบวนการกัดแผ่นซิลิคอน 27
3.5 กระบวนการเคลือบ 28
3.6 กระบวนการทดสอบ 29
3.7 วัสดุที่ใช้ในการผลิตไดโอดกำลังชนิด CELL 30
3.7.1 Dice 30
3.7.2 Slug 31
3.7.3 Solder 32
บทที่ 4 ปัญหาและแนวทางการแก้ไข 33
4.1 วิธีดำเนินการวิเคราะห์ปัญหา 33
4.1.1 ศึกษาปัญหาในแต่ละกระบวนการผลิตจริง 34
4.1.2 ศึกษาปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตจริง 35
4.1.3 สรุปและวิเคราะห์ปัญหาเบื้องต้น 38
4.2 ลักษณะของกราฟ I-V Characteristic ของไดโอดที่ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานในทางอุตสาหกรรม 38
4.2.1 DVR 38
4.2.2 VB-Low 39
4.2.3 Short 40
4.2.4 Ringing Round 40
4.2.5 High leakage current after baking 41
4.3 ปัญหาเรื่องฟองอากาศ 41
4.4 ปัญหาเรื่องสนามไฟฟ้าบริเวณขอบของขั้วโลหะ 42
4.5 ปัญหาการกัดกร่อนบริเวณขอบของซิลิคอนในกระบวนการกัดแผ่นซิลิคอน 42
4.6 แนวทางการแก้ไขปัญหา 42
บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง 44
5.1 การทดลองแก้ไขปัญหาวิธีที่หนึ่ง เพิ่มความหนาของแผ่นตะกั่ว โดยเพิ่มอีก 1 แผ่นที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่าเดิม 4 เท่า 44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 การทดลองแก้ไขปัญหาวิธีที่สอง 45
5.3 การทดลองแก้ไขปัญหาวิธีที่สาม การ Anneal ก่อนกระบวนการ Soldering 46
5.4 การทดลองแก้ไขปัญหาวิธีที่สี่ การลดจำนวนฟองอากาศโดยการเจาะรูตรง 50
กลางขั้วโลหะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 มิลลิเมตร
5.5 การทดลองแก้ไขปัญหาวิธีที่ห้า เปรียบเทียบการประกบขั้วโลหะทั้ง 4 แบบ 51
เพื่อหารูปแบบการประกบขั้วโลหะที่เหมาะสมที่สุด
5.6 การทดลองแก้ไขปัญหาวิธีที่หก การเลือกใช้การประกบแบบ (ง) 54
และทำการทดลองด้วยโครงสร้างแบบตะกั่ว 2 แผ่น
5.7 การทดลองแก้ไขปัญหาวิธีที่เจ็ด เปลี่ยนเวลาการ Etching เพื่อหาเวลา 55
ที่เหมาะสมการทดลองใช้แบบ (ง) ตะกั่ว 2 แผ่น
5.7.1 เวลาที่ใช้ในการ Etching 2 นาที 56
5.7.2 เวลาที่ใช้ในการ Etching 2 นาที 30 วินาที 56
5.7.3 เวลาที่ใช้ในการ Etching 3 นาที 57
5.7.4 เวลาที่ใช้ในการ Etching 3 นาที 30 วินาที 57
5.7.5 เวลาที่ใช้ในการ Etching 4 นาที 58
5.7.6 เวลาที่ใช้ในการ Etching 4 นาที 30 วินาที 58
5.8 การทดลองแก้ไขปัญหาวิธีที่แปด เปลี่ยนเวลาการ Etching เพื่อหา 60
เวลาที่เหมาะสม
5.8.1 เวลาที่ใช้ในการ Etching 2 นาที 60
5.8.2 เวลาที่ใช้ในการ Etching 2 นาที 30 วินาที 61
5.8.3 เวลาที่ใช้ในการ Etching 3 นาที 61
5.8.4 เวลาที่ใช้ในการ Etching 3 นาที 30 วินาที 62
5.8.5 เวลาที่ใช้ในการ Etching 4 นาที 62
5.8.6 เวลาที่ใช้ในการ Etching 4 นาที 30 วินาที 63
5.9 การทดลองแก้ไขปัญหาวิธีเก้า โดย Process ปกติ ซึ่งไม่สามารถ 64
กำหนดรูปแบบ การประกบ Slug ได้ และใช้เวลาในการ Etching 3:30 นาที
5.10 การทดลองแก้ไขปัญหาวิธีที่สิบ ข้อมูลบางส่วนในโรงงานเมื่อเปลี่ยน 65
เวลา Etching จากเดิม 5 นาที ให้เหลือเพียง 3:30 นาที
5.11 การทดลองแก้ไขปัญหาวิธีที่สิบเอ็ด การทดลองเรื่อง High leakage 66
after baking
5.12 ทำการแก้ไขปัญหาโดยใช้ Silica gel ใส่ไว้ในถุงชิ้นงานก่อนทำการวัด 70
และจัดเก็บ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง 71
เอกสารอ้างอิง 73
ภาคผนวก 74
ภาคผนวก ก
ภาคผนวก ข
ภาคผนวก ค
ภาคผนวก ง
ภาคผนวก จ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	ขนาดของวัตถุดิบชนิด Cell Rectifier Diode (CRD)	24
4.1	ผลของ High leakage current after baking	41
5.1	สรุปเปรียบเทียบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของชิ้นงานทั้ง 4 แบบ	53
5.2	ผลการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของชิ้นงานทั้ง 6 ค่า (แบบ (ง) โดยใช้วิธีตะกั่ว 2 แผ่น)	59
5.3	ผลการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของชิ้นงานทั้ง 6 ค่า (แบบ ง. ตะกั่ว 1 แผ่น)	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	ลักษณะของไดโอดในทางอุดมคติ	3
2.2	รอยต่อพี-เอ็น ขณะไม่ได้รับแรงดันไบอัส	4
2.3	การให้แรงดันไบอัสตรง V_A แก่รอยต่อพี-เอ็น	5
2.4	ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็นขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง V_A	5
2.5	การให้ไบอัสย้อนกลับ $-V_A$ แก่รอยต่อพี-เอ็น	7
2.6	ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ $-V_A$	7
2.7	ลักษณะความสัมพันธ์ของกระแสแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น	9
2.8	การเกิดของพาหะและการรวมของพาหะโดยระดับพลังงาน Deep level	10
2.9	การพังทลายของรอยต่อพีเอ็น (V_B) และแรงดันพังทลาย (V_Z)	11
2.10	กราฟคุณสมบัติ I-V ของไดโอดอย่างง่าย ๆ ซึ่งแสดงกระแสย่านต่าง ๆ ที่เกิดจากผลของปรากฏการณ์ต่าง ๆ ในทางปฏิบัติ	12
2.11	ลักษณะรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ (ก) รอยสัมผัสโอห์มิค (ข) รอยสัมผัสเรคติไฟร์ของ ช๊อตคีย์ไดโอด	13
2.12	ลักษณะแถบพลังงานและระดับพลังงานต่าง ๆ ที่สำคัญในวัสดุ (ก) โลหะ (ข) สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ขณะที่ยังไม่ได้สัมผัสกัน	14
2.13	การนำกระแสของอิเล็กตรอนในโลหะ	20
2.14	การประกอบขั้วโลหะไดโอดชนิด Cell	22
3.1	ลักษณะแผ่น Boat	25
3.2	ลักษณะการวางแผ่นสลักลงบนแผ่น Boat	25
3.3	ลักษณะการวางแผ่นตะกั่วลงบนแผ่นสลักในแผ่น Boat	26
3.4	ลักษณะการวางแผ่น Dice ลงบนแผ่นตะกั่วในแผ่น Boat	26
3.5	ภาพตัดขวางการวางชิ้นงานก่อนกระบวนการ Soldering	26
3.6	ภาพ Diode cell เมื่อผ่านกระบวนการหลอมเหลวแผ่นตะกั่ว (Soldering)	27
3.7	ลักษณะไดโอดชนิด CELL ที่ผ่านกระบวนการผลิต	28
3.8	เครื่อง TVR-600 (Auto Test)	29
3.9	เครื่อง Curve tracer high volt	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.10	เครื่อง DC-Digital Tester	29
3.11	ลักษณะแผ่น Dice ที่ผ่านกระบวนการ Sawing	30
3.12	กราฟการวัดชิ้น Dice ด้วย X-ray Spectrum	30
3.13	ลักษณะแผ่น Slug (ขั้วโลหะ)	31
3.14	กราฟการวัด Slug ด้วย X-ray Spectrum	31
3.15	ลักษณะแผ่น Solder (แผ่นตะกั่ว)	32
3.16	กราฟการวัดแผ่นตะกั่วด้วย X-ray Spectrum	32
4.1	การเปรียบเทียบคุณสมบัติ I-V Characteristics แต่ละกระบวนการผลิต	34
4.2	**(ก)** กราฟแสดงผลของ DVR ที่เกิดขึ้นในไดโอด **(ข)** กราฟแสดงคุณสมบัติของไดโอดปกติ V_B = 900V	35
4.3	**(ก)** กราฟแสดงผลของ Ringing Round ที่เกิดขึ้นในไดโอด **(ข)** กราฟแสดงคุณสมบัติของไดโอดปกติ V_B = 700V	35
4.4	**(ก)** กราฟแสดงคุณสมบัติของ VB-Low ที่เกิดขึ้นในไดโอด **(ข)** กราฟแสดงคุณสมบัติของไดโอดปกติ V_B = 240V	35
4.5	**(ก)** กราฟแสดงคุณสมบัติของ Short ที่เกิดขึ้นในไดโอด **(ข)** กราฟแสดงคุณสมบัติของไดโอดปกติ V_B = 700V	36
4.6	**(ก),(ข)** กราฟแสดงข้อมูลคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ผ่านและไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน	37
4.7	การวัดค่า DVR ในทางอุตสาหกรรม	39
4.8	การวัดค่า VB-Low ในทางอุตสาหกรรม	39
4.9	ไดโอดที่เกิดการ Short ในทางอุตสาหกรรม	40
4.10	การเกิด Ringing Round ในทางอุตสาหกรรม	40
4.11	ลักษณะของฟองอากาศที่เกิดขึ้นภายในไดโอดชนิด CELL	41
4.12	ลักษณะ Slug ด้านที่มีเหลี่ยมและด้านที่มน **(ก)** การประกบ Slug แบบด้านมนเข้าหากัน **(ข)** การประกบ Slug แบบด้านเหลี่ยมเข้าหากัน	42
4.13	ลักษณะการประกอบไดโอดชนิด CELL	42
5.1	กราฟคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานโดยใช้วิธีเพิ่มตะกั่วอีก 1 แผ่น	44
5.2	ลักษณะฟองอากาศเมื่อทำการเพิ่มตะกั่ว 2 แผ่น **(ก)** ลักษณะฟองอากาศบริเวณขั้วโลหะด้านล่าง **(ข)** ลักษณะฟองอากาศบริเวณขั้วโลหะด้านบน	45
5.3	ลักษณะฟองอากาศเมื่อใช้ตะกั่ว 1 แผ่น **(ก)** ลักษณะฟองอากาศบริเวณขั้วโลหะด้านล่าง **(ข)** ลักษณะฟองอากาศบริเวณขั้วโลหะด้านบน	45
5.4	ลักษณะการวางชิ้นงานบนแผ่น Boat ก่อนกระบวนการหลอมเหลวแผ่นตะกั่ว	46
5.5	ลักษณะการวางแผ่นกดทับ 1 แผ่น ด้วยกระบวนการผลิตอุตสาหกรรม	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.6	ลักษณะการวางแผ่นกดทับ 2 แผ่น	46
5.7	การวิเคราะห์โลหะที่เคลือบบนผิวผลึกซิลิคอนด้วย X-ray Spectroscopy	47
5.8	แสดงผลของการ Anneal	48
5.9	กราฟแสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานโดยใช้วิธีแอนนีลก่อนกระบวนการหลอมเหลวแผ่นตะกั่ว	49
5.10	ลักษณะฟองอากาศเมื่อทำการแอนนีลโดยใช้แผ่นตะกั่ว 1 แผ่น **(ก)** ลักษณะฟองอากาศบริเวณขั้วโลหะด้านล่าง **(ข)** ลักษณะฟองอากาศบริเวณขั้วโลหะด้านบน	49
5.11	กราฟคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานโดยใช้วิธีเจาะรู ขั้วโลหะบน,ล่าง	50
5.12	ลักษณะฟองอากาศเมื่อทำการเจาะรู Slug บนและล่าง โดยใช้แผ่นตะกั่ว 1 แผ่น **(ก)** ลักษณะฟองอากาศบริเวณขั้วโลหะด้านล่าง **(ข)** ลักษณะฟองอากาศบริเวณขั้วโลหะด้านบน	50
5.13	การเรียง Slug ทั้ง 4 แบบก่อนกระบวนการ Soldering	51
5.14	กราฟแสดงเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของการประกบ Slug แบบ (ก)-(ง)	52
5.15	ตรวจสอบปริมาณฟองอากาศการประกบ Slug แบบ (ก)	53
5.16	ตรวจสอบปริมาณฟองอากาศการประกบ Slug แบบ (ข)	53
5.17	ตรวจสอบปริมาณฟองอากาศการประกบ Slug แบบ (ค)	54
5.18	ตรวจสอบปริมาณฟองอากาศการประกบ Slug แบบ (ง)	54
5.19	กราฟการทดสอบเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้าโดยใช้แบบ (ง) โดยวิธีตะกั่ว 2 แผ่น	54
5.20	การวาง Slug แบบ (ง) โดยวิธีตะกั่ว 2 แผ่น	55
5.21	การวาง Slug แบบ (ง) โดยใช้วิธีตะกั่ว 2 แผ่น	55
5.22	กราฟทดสอบเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้าใช้แบบ ง. ตะกั่ว 2 แผ่นที่เวลา Etching 2 นาที	56
5.23	กราฟทดสอบเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้าใช้แบบ ง. ตะกั่ว 2 แผ่นที่เวลา Etching 2:30 นาที	56
5.24	กราฟทดสอบเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้าใช้แบบ ง. ตะกั่ว 2 แผ่นที่เวลา Etching 3 นาที	57
5.25	กราฟทดสอบเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้าใช้แบบ ง. ตะกั่ว 2 แผ่นที่เวลา Etching 3:30 นาที	57
5.26	กราฟทดสอบเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้าใช้แบบ ง. ตะกั่ว 2 แผ่นที่เวลา Etching 4 นาที	58
5.27	กราฟทดสอบเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้าใช้แบบ ง. ตะกั่ว 2 แผ่นที่เวลา Etching 4:30 นาที	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.28 การประกบ Slug แบบ (ง) โดยใช้ตะกั่ว 1 แผ่นตามกระบวนการผลิตมาตรฐาน 60
5.29 กราฟทดสอบเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้าใช้แบบ ง. ตะกั่ว 1 แผ่น ที่เวลา Etching 2 นาที 60
5.30 กราฟทดสอบเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้าใช้แบบ ง. ตะกั่ว 1 แผ่น ที่เวลา Etching 2:30 นาที 61
5.31 กราฟทดสอบเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้าใช้แบบ ง. ตะกั่ว 1 แผ่น ที่เวลา Etching 3 นาที 61
5.32 กราฟทดสอบเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้าใช้แบบ ง. ตะกั่ว 1 แผ่น ที่เวลา Etching 3:30 นาที 62
5.33 กราฟทดสอบเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้าใช้แบบ ง. ตะกั่ว 1 แผ่น ที่เวลา Etching 4 นาที 62
5.34 กราฟทดสอบเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้าใช้แบบ ง. ตะกั่ว 1 แผ่น ที่เวลา Etching 4 :30 นาที 63
5.35 กราฟทดสอบเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้าใช้กระบวนการผลิตปกติที่เวลา Etching 3:30 นาที (ไม่กำหนดรูปแบบการประกบสลัก) 64
5.36 กราฟทดสอบเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้าใช้กระบวนการผลิตปกติที่เวลา Etching 3:30 นาที 65
5.37 กราฟทดสอบเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้าใช้กระบวนการผลิตปกติที่เวลา Etching 5 นาที 65
5.38 กราฟการวัด High Leakage Current after Baking โดยใช้ไดโอด V_B= 900 Volt ที่ อุณหภูมิ 220 ° C 1 ชั่วโมง 66
5.39 กราฟการวัด High Leakage Current after Baking โดยใช้ไดโอด V_B= 700 Volt ที่ อุณหภูมิ 220 ° C 1 ชั่วโมง 67
5.40 กราฟการวัด High Leakage Current after Baking โดยใช้ไดโอด V_B= 480 Volt ที่ อุณหภูมิ 220 ° C 1 ชั่วโมง 67
5.41 กราฟการวัด High Leakage Current after Baking โดยใช้ไดโอด V_B= 900 Volt ที่ อุณหภูมิ 220 ° C 10 ชั่วโมง 68
5.42 กราฟการวัด High Leakage Current after Baking โดยใช้ไดโอด V_B= 700 Volt ที่ อุณหภูมิ 220 ° C 10 ชั่วโมง 68
5.43 กราฟการวัด IIigh Leakage Current after Baking โดยใช้ไดโอด V_B= 480 Volt ที่ อุณหภูมิ 220 ° C 10 ชั่วโมง 69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.44 กราฟการวัด High Leakage Current after Baking ก่อนใส่ Silica Gel และ หลังใส่ Silica gel 70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

ในปัจจุบันอุตสาหกรรมที่เกี่ยวกับอุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ และคอมพิวเตอร์ได้มีการพัฒนาและส่งเสริมให้มีความเจริญก้าวหน้าอย่างไม่หยุดนิ่ง โดยเฉพาะชิ้นส่วนของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นสารกึ่งตัวนำอย่างเช่นไดโอด และพัฒนามาเป็นวงจรรวม (Integrated Circuit) จนถึงปัจจุบัน หน้าที่ของไดโอดจะมีความสำคัญมากในวงจรอิเล็กทรอนิกส์เกือบจะทุกวงจร โดยเฉพาะจะทำหน้าที่เรียงกระแสสลับให้เป็นกระแสตรง สามารถนำไปใช้ในวงจรเพาเวอร์ซัพพลายเกือบทุกประเภท ดังนั้นจะพบว่าไดโอดนั้นมีความสำคัญมากต่อวงการอิเล็กทรอนิกส์ในปัจจุบัน

1.1 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อต้องการทราบถึงปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตจริง
2. เพื่อต้องการแก้ไขหรือลดปริมาณไดโอดที่เกิดการเสียหายในกระบวนการประกอบไดโอด

1.2 ทฤษฎีและแนวความคิดในปริญญานิพนธ์

ในการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ได้มีการนำทฤษฎีพื้นฐานของสารกึ่งตัวนำมาใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นเป็นหลัก อย่างเช่นทฤษฎีรอยต่อพี-เอ็น และการนำไฟฟ้าในโลหะ รอยสัมผัสระหว่างสารกึ่งตัวนำ – โลหะ จากการศึกษาในกระบวนการผลิตไดโอดชนิดเซลล์พบว่าแผ่นเวเฟอร์ที่นำมาทำการประกอบนั้นได้ทำการเคลือบโลหะอยู่สองชนิดคือนิเกลและทองคำ ส่วนขั้วโลหะจะเคลือบด้วยเงินเพื่อที่จะนำไปทำขั้วสัมผัสในการประกอบไดโอดต่อไป

1.3 รายละเอียดของปริญญานิพนธ์

ในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บทและภาคผนวกอีก 3 ภาค โดยในแต่ละบทมีรายละเอียดต่อไปนี้

บทที่ 1 เป็นการกล่าวนำ ถึงวัตถุประสงค์ ทฤษฎีและแนวความคิดที่ใช้ในการทำปริญญานิพนธ์พร้อมทั้งรายละเอียดของปริญญานิพนธ์ในแต่ละบท

บทที่ 2 เป็นการกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการ ที่ใช้ในการแก้ไขปัญหาในการประกอบไดโอด

บทที่ 3 เป็นการกล่าวถึงรายละเอียดกระบวนการประกอบไดโอดชนิดเซลล์ทั่วไปในอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4 เป็นการกล่าวถึงปัญหา และการวิเคราะห์ปัญหาเพื่อแก้ไขปัญหา

บทที่ 5 เป็นการทดลอง และผลการทดลอง โดยเริ่มจากการนำแนวทางการวิเคราะห์ที่ได้ตั้งสมมุติฐานมาทำการปฏิบัติที่ได้วางแผนไว้

บทที่ 6 เป็นการสรุปผลการทดลองที่ได้นำเสนอในปริญญานิพนธ์พร้อมทั้งได้นำเสนอแนวทางในการแก้ไขปัญหา

ในส่วนสุดท้ายของปริญญานิพนธ์ จะเป็นภาคผนวกซึ่งจะรวบรวมเอกสารเกี่ยวกับเครื่องมือที่ใช้ในการประกอบไดโอดและเครื่องมือวัดในอุตสาหกรรมดังมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

เอกสารอ้างอิง

ภาคผนวก ก. กระบวนการสร้างรอยต่อ พี - เอ็น ในอุตสาหกรรม และเคมีภัณฑ์ที่ใช้ในการผลิตไดโอดชนิดเซลล์

ภาคผนวก ข. ค่าคงที่ทางฟิสิกส์ คุณสมบัติของซิลิคอนไดออกไซด์ คุณสมบัติของซิลิคอน

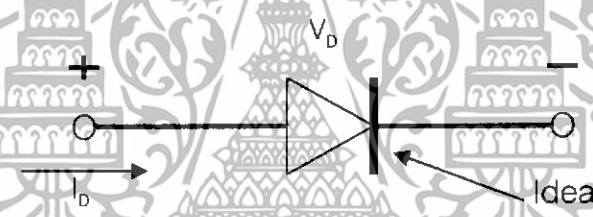
ภาคผนวก ค. เครื่องมือวัดต่างๆ สำหรับไดโอดชนิดเซลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีการทำงานของไดโอด

คุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (Intrinsic Semiconductor) เราสามารถที่จะควบคุมชนิดและจำนวนของประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำได้โดยการเติมสารเจือเพียงเล็กน้อยอย่างพิถีพิถันก็จะได้สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและสารชนิดพีและสามารถทำให้เกิดรอยต่อพี-เอ็น บนผลึกสารกึ่งตัวนำเดียวกันแบบเอกพันธุ์ (Homogeneous) โดยการเติมสารเจือผู้ให้ด้านหนึ่งและสารเจือผู้รับอีกด้านหนึ่งซึ่งรอยต่อพี-เอ็นนี้คือโครงสร้างพื้นฐานของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำทุกชนิด เมื่อกล่าวถึงคุณสมบัติต่างๆของรอยต่อพี-เอ็น ซึ่งรอยต่อพี-เอ็นก็เป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งซึ่งถูกเรียกว่า "ไดโอด"

ไดโอดในทางอุดมคติ (Ideal Diode) เป็นไดโอดที่ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ทางเดียว กระแสจะไหลย้อนกลับไม่ได้ สัญลักษณ์ของไดโอดจะแสดงเป็นรูปลูกศร โดยจะมีทิศทางการไหลของกระแสตามลักษณะของลูกศรดังรูปที่ 2.1



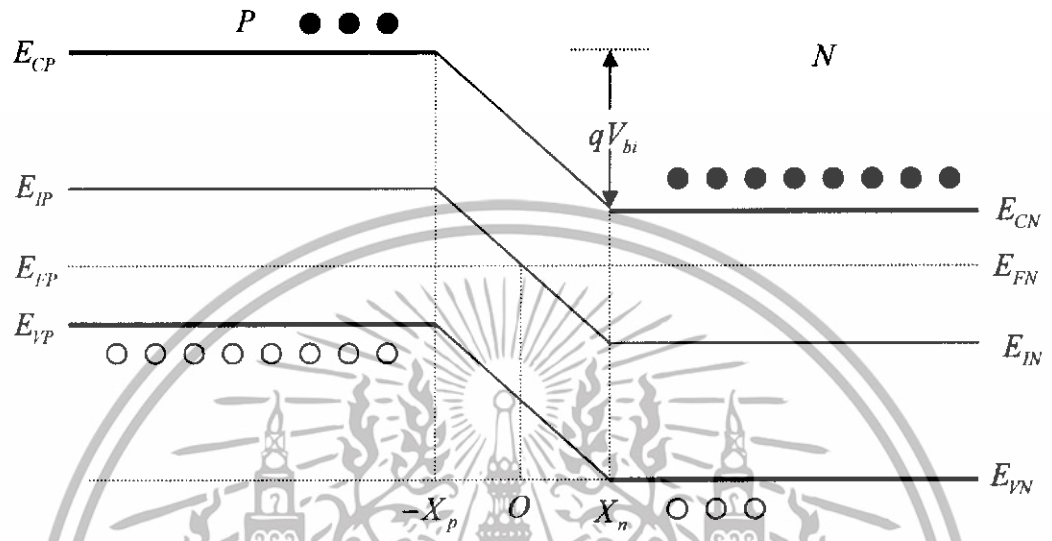
รูปที่ 2.1 ลักษณะของไดโอดในทางอุดมคติ

2.1 รอยต่อพี-เอ็นในภาวะสมดุล

โครงสร้างของไดโอดสามารถสร้างได้โดยการแพร่อะตอมสารเจือชนิดเอ็นหรือชนิดพีเข้าไปในผลึกฐานรองซึ่งเป็นชนิดตรงข้ามจะทำให้เกิดเป็นบริเวณที่เรียกว่า "รอยต่อพี-เอ็น" เนื่องจากด้านทั้งสองของรอยต่อมีความแตกต่างกันของความหนาแน่นของพาหะ ทำให้เกิดมีแรงกระทำต่อพาหะให้เคลื่อนที่ข้ามรอยต่อ พาหะจากด้านซึ่งมีความหนาแน่นสูงกว่าจะแพร่ไปทางด้านซึ่งมีความหนาแน่นน้อยกว่า การแพร่ของพาหะข้ามรอยต่อนี้จะเกิดขึ้นที่บริเวณใกล้ๆรอยต่อเป็นอันดับแรก การแพร่ข้ามรอยต่อของพาหะเหล่านี้จะยังคงดำเนินอยู่ต่อไปจนกระทั่งสนามไฟฟ้าภายในที่เกิดขึ้นมีผลพอดีทำให้โฮลและอิเล็กตรอนไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อได้ ซึ่งเราเรียกภาวะนี้ว่า "ภาวะสมดุล" ที่บริเวณรอยต่อซึ่งมีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นจะเป็นบริเวณซึ่งไม่มีพาหะอยู่เนื่องจากพาหะจะถูกอิทธิพลจากสนามไฟฟ้านี้ปัดออกไปจากบริเวณนี้ เราเรียกบริเวณดังกล่าวนี้ว่า "บริเวณปลอดพาหะ" (depletion region) บริเวณปลอดพาหะนี้ โดยทั่วไปมีความกว้างราว 1 ไมครอน และเนื่องจากการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีสนามไฟฟ้าตกคร่อมรอยต่อพี-เอ็น ในบริเวณปลอดพาหะนี้เองจะทำให้เกิดความต่างศักย์ระหว่างด้านพีและด้านเอ็น ซึ่งเราเรียกว่า "ศักย์สัมผัส" (contact potential) V_O. หรือบางครั้งเรียกว่า "แรงดันภายใน" (built in voltage) ขนาดของศักย์สัมผัสนี้จะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอะตอมสารเจือและอุณหภูมิที่รอยต่อ



รูปที่ 2.2 รอยต่อพี-เอ็น ขณะไม่ได้รับแรงดันไบอัส

E_{CP} คือ แถบความนำทางด้านพี

E_{CN} คือ แถบความนำทางด้านพี

E_{IP} คือ ระดับพลังงานกึ่งกลางทางด้านพี

E_{IN} คือ ระดับพลังงานกึ่งกลางทางด้านเอ็น

E_{FP} คือ ระดับพลังงานเฟอร์มิทางด้านพี

E_{FN} คือ ระดับพลังงานเฟอร์มิทางด้านเอ็น

E_{VP} คือ แถบวาเลนซ์ทางด้านพี

E_{VN} คือ แถบวาเลนซ์ทางด้านเอ็น

qV_{bi} คือ ระยะห่างระหว่างแถบความนำทางด้านพีกับแถบความนำทางด้านเอ็น

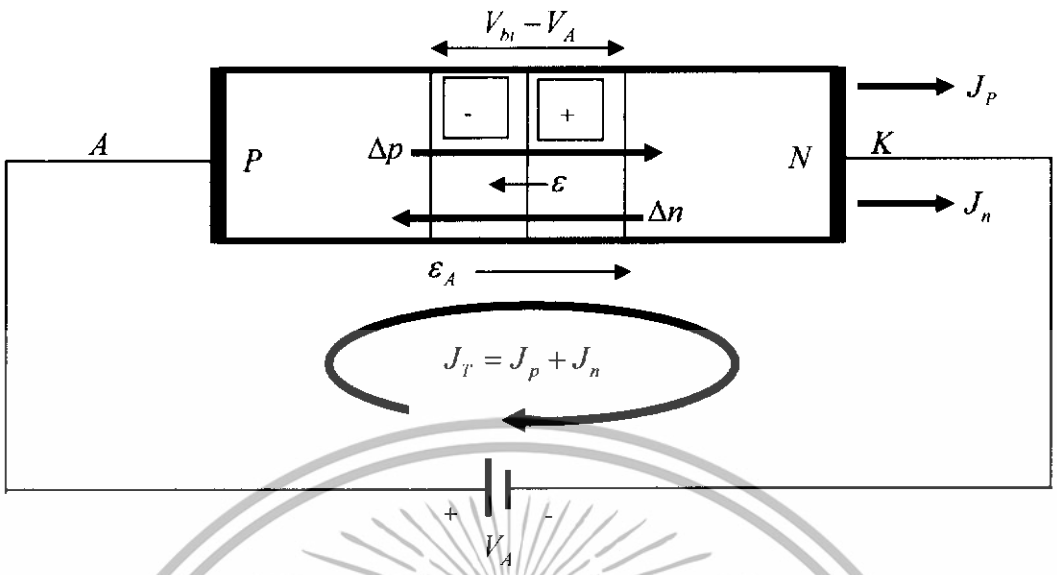
$-X_p$ คือ ความกว้างบริเวณปลอดพาหะทางด้านพี

X_n คือ ความกว้างบริเวณปลอดพาหะทางด้านเอ็น

2.2 รอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง

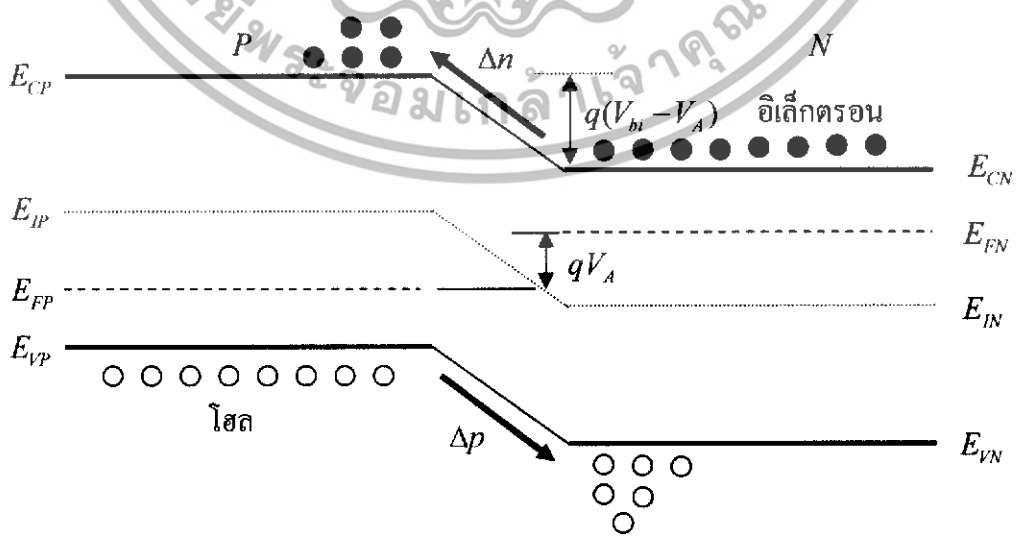
กรณีที่รอยต่อพี-เอ็นได้รับแรงดันไบอัสตรง โดยการต่อขั้วลบของแบตเตอรี่เข้าที่ด้านเอ็นและต่อขั้วบวกเข้าที่ด้านพี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 การให้แรงดันไบอัสตรง V_A แก่รอยต่อพี-เอ็น

โดยการพิจารณาว่า ความต้านทานของเนื้อสารกึ่งตัวนำทั้งชนิดพีและชนิดเอ็นมีค่าน้อยมาก ดังนั้น แรงดันไบอัสตรงภายนอก V_A จากแบตเตอรี่ทั้งหมดจะไปปรากฏที่รอยต่อพี-เอ็นและอยู่ในลักษณะที่หักล้าง ดังนั้นแรงดันที่ตกคร่อมรอยต่อในขณะนี้ก็คือ $V_{bi}-V_A$ นั่นคือศักดาไฟฟ้าภายในรอยต่อมีค่าลดลง รอยต่อพี-เอ็นขณะนี้จึงทำตัวเสมือนเป็นตัวนำยอมให้กระแสไหลผ่านได้เป็นอย่างดี ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะในขณะนี้ก็จะลดลงและแคบกว่าในกรณีที่ยังไม่ได้รับไบอัส ขณะที่รอยต่อได้รับแรงดันไบอัสตรง จะทำให้ระดับเฟอร์มิของด้านทั้งสองของรอยต่อแตกต่างกัน นี่เองที่เราใช้อธิบายว่าจะเกิดมีกระแสพาหะส่วนมากไหลข้ามรอยต่อได้ ดังในรูปที่ 2.4 ซึ่งเป็นภาวะที่ไม่สมดุล



รูปที่ 2.4 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็นขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง V_A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.3 เมื่อพิจารณาดูที่รอยต่อจะเห็นว่า กระแสที่ไหลผ่านรอยต่อก็คือกระแสของการแพร่ของพาหะส่วนน้อย โดยแยกเป็นกระแสการแพร่ของโฮลและอิเล็กตรอนตามลำดับ

$$J_p(x') = -qD_p \frac{d\delta p(x')}{d(x')} \tag{2.1}$$

กระแสโฮล $$J_p(x = x_n) = J_p(x' = 0) = q\frac{D_p}{L_p}\frac{n_i^2}{N_D}\left(e^{qV_A/kT} - 1\right) \tag{2.2}$$

และในขณะเดียวกันจะได้ว่า

กระแสอิเล็กตรอน $$J_n(x = -x_p) = J_n(x'' = 0) = q\frac{D_n}{L_n}\frac{n_i^2}{N_A}(e^{qV_A/kT} - 1) \tag{2.3}$$

แต่เนื่องจากกระแสของอิเล็กตรอนและโฮลเคลื่อนที่สวนกัน ดังนั้นกระแสสมมุติจะกลายเป็นผลรวมของกระแสทั้งสอง นั่นคือ

$$\begin{aligned} I(total) &= A(J_p + J_n) \\ &= A.q(D_p p_{no}/L_p + D_n n_{po}/L_n)(e^{qV_A/kT} - 1) \end{aligned} \tag{2.4}$$

โดยที่ A คือ พื้นที่ของรอยต่อพีเอ็น

และถ้ากำหนดให้ I_O คือ กระแสอิ่มตัว โดย

$$I_0 = A.q(D_p p_{no}/L_p + D_n n_{po}/L_n)$$

หรือ

$$I_0 = A.qn_i^2(D_p/L_p n_n + D_n/L_n p_p) \tag{2.5}$$

โดยที่

$$n_{no}.p_{no} = n_i^2$$

$$p_{po}.n_{po} = n_i^2$$

$$n_{no} = n_n$$

$$p_{po} = p_p$$

แล้วดังนั้นสมการที่ (2.6) จะกลายเป็น

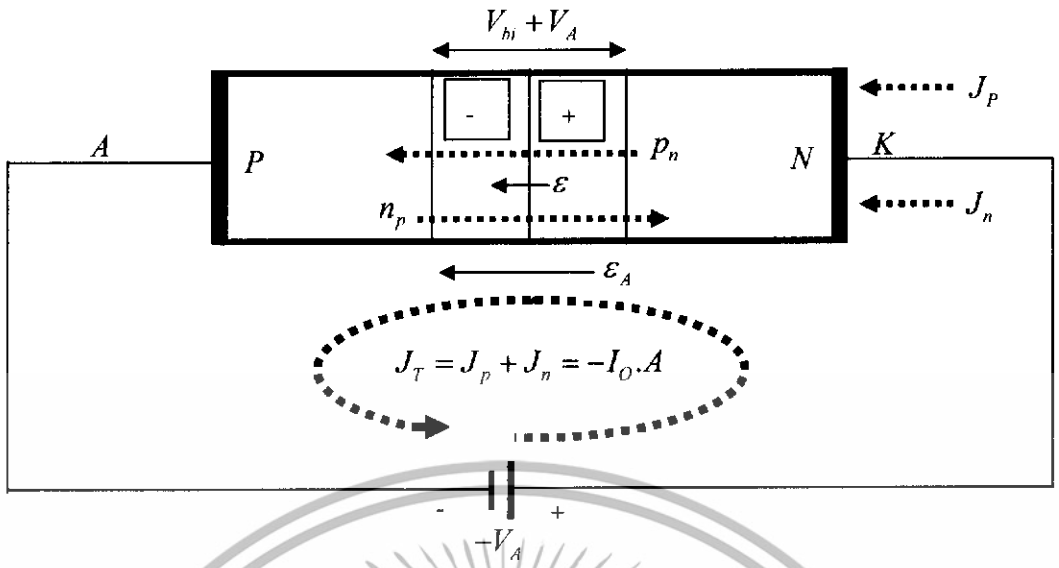
$$I = I_O(e^{qV_A/kT} - 1) \tag{2.6}$$

ซึ่งสมการนี้เป็นสมการของไดโอดหรือเรียกว่า Shockley diode equation หรือสมการเรคติไฟร์

2.3 รอยต่อพี-เอ็นขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

การให้ไบอัสไดโอดโดยต่อขั้วบวกเข้ากับสารชนิดเอ็นและขั้วลบเข้ากับสารชนิดพี ดังรูปที่ 2.5

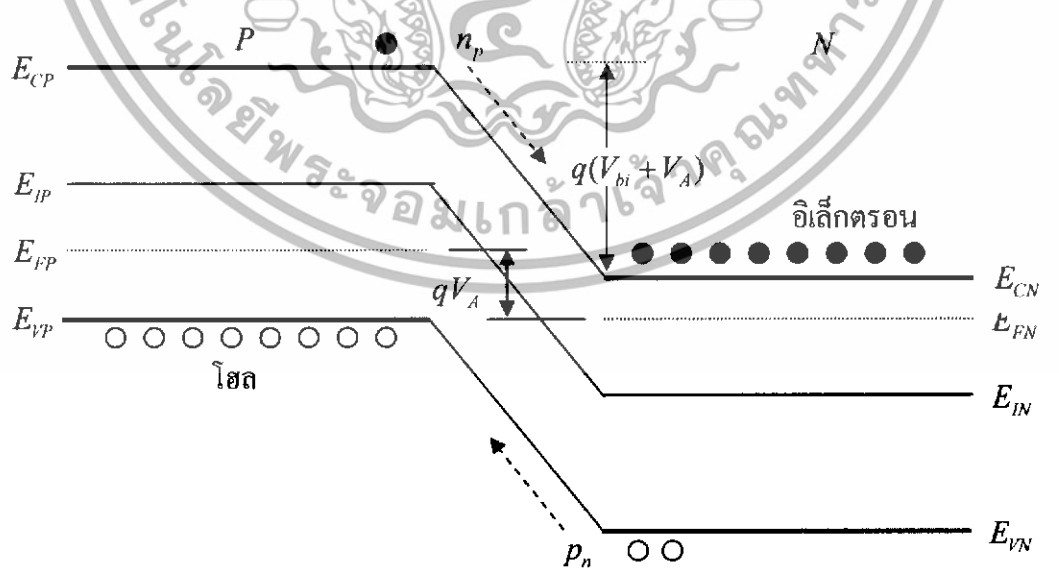
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 การให้ไบอัสย้อนกลับ $-V_A$ แก่รอยต่อพี-เอ็น

แรงดันไบอัสย้อนกลับ $-V_A$ จากภายนอกจะไปช่วยเพิ่มแรงดันภายในที่รอยต่อให้มีค่าสูงขึ้นจากเดิม ดังนั้นแรงดันที่ตกคร่อมรอยต่อในขณะนี้ก็คือ $V_{bi}+V_A$ นั่นคือ ศักดาไฟฟ้าในรอยต่อจะมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้พาหะส่วนมากไม่มีโอกาสที่จะแพร่ข้ามรอยต่อไปได้ รอยต่อพี-เอ็นในขณะนี้จึงทำตัวเสมือนเป็นฉนวนไม่ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ และความกว้างของบริเวณปลอดพาหะในขณะนี้จึงมีค่าเพิ่มขึ้น และกว้างมากกว่าในกรณีที่ยังไม่ได้รับแรงดันไบอัส

ขณะที่รอยต่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับจะทำให้ระดับเฟอร์มิของด้านทั้งสองของรอยต่อแตกต่างกัน และนี่เองทำให้เกิดมีกระแสของพาหะส่วนน้อยไหลข้ามรอยต่อได้แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อพีเอ็นขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ $-V_A$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากแรงดันไบอัสย้อนกลับ $-V_A$ จะทำให้โฮลจากส่วนเอ็นและอิเล็กตรอนจากส่วนพีซึ่งเป็นพาหะส่วนน้อยไหลข้ามรอยต่อได้ ดังนั้นจึงทำให้ปริมาณความหนาแน่นของพาหะส่วนน้อยใกล้ ๆ บริเวณปลอดพาหะมีจำนวนลดลง และสามารถหาได้จากกฎของรอยต่อโดย

จากสมการเมื่อให้แรงดันไบอัสตรง V_A

$$I = I_O(e^{qV_A/kT} - 1) \tag{2.7}$$

เมื่อแทนค่าแรงดันไบอัสย้อนกลับ - V_A ลงไปจะได้ว่า

$$I = I_O(e^{-qV_A/kT} - 1) \tag{2.8}$$

โดยปกติอุณหภูมิห้อง T = 300K เมื่อแทนค่าในสมการแล้วจะมีค่าน้อยกว่า 1 มาก ดังนั้นสมการที่ (2.8) จะกลายเป็น

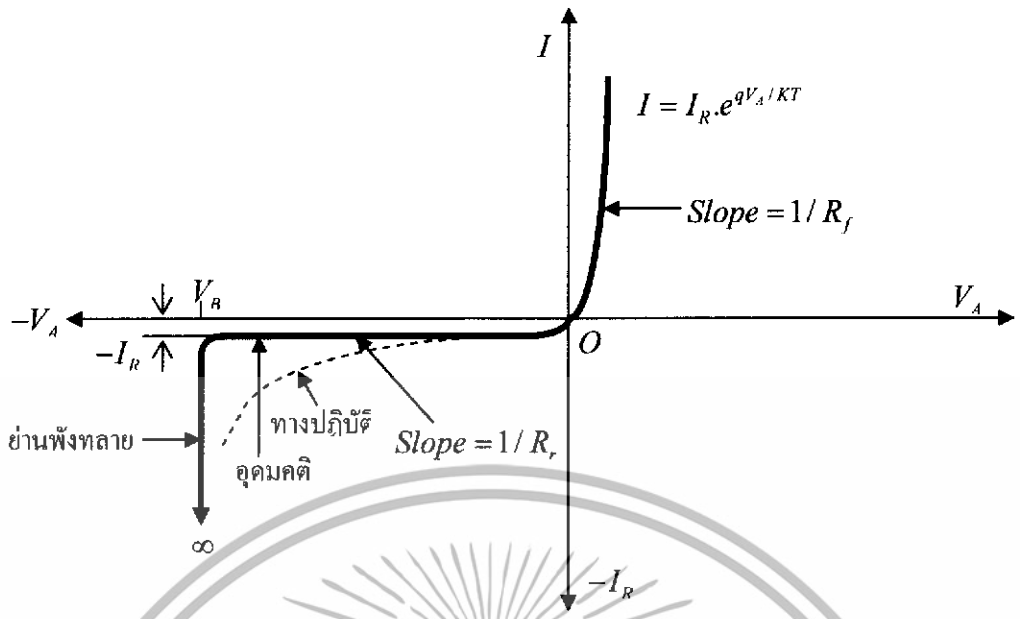
$$I \cong -I_O \tag{2.9}$$

ซึ่งเครื่องหมายลบแสดงว่าเป็นกระแสย้อนกลับ ซึ่งมีทิศทางตรงข้ามกับกระแสในกรณีได้รับไบอัสตรงจะเห็นว่า I_O เป็นกระแสอิ่มตัวย้อนกลับซึ่งจะมีค่าน้อยมาก

2.4 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของรอยต่อ พี-เอ็น

ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น ซึ่งแกนนอนคือแรงดันไบอัสที่ตกคร่อมรอยต่อและแกนตั้งคือค่ากระแสที่ไหลผ่านรอยต่อค่าของแรงดันซึ่งปรากฏอยู่ในสมการของไดโอดนั้นคือแรงดันที่เราให้เป็นไบอัสซึ่งปรากฏตกคร่อมรอยต่อและจะมีแรงดันเพียงเล็กน้อยเท่านั้นที่ตกคร่อมอยู่ภายในเนื้อสารของส่วนพีและเอ็น นอกบริเวณปลอดพาหะ ดังนั้นแรงดันไบอัสที่ให้เกือบทั้งหมดจะปรากฏตกคร่อมที่บริเวณปลอดพาหะ แต่อย่างไรก็ดีในกรณีที่กระแสผ่านรอยต่อมีค่าสูงๆ จะทำให้มีแรงดันตกคร่อมเนื้อสารนอกบริเวณปลอดพาหะมีค่ามากเมื่อจะคิดหาค่าของแรงดันที่ตกคร่อมรอยต่อ จะต้องนำค่านี้ไปลบจากแรงดันที่เราให้ไบอัสก่อนจึงสามารถนำไปแทนค่าในสมการของไดโอดได้แสดงได้ดังรูปที่ 2.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 ลักษณะความสัมพันธ์ของกระแสแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น

จากรูปที่ 2.7 แสดงลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน จะเห็นว่ารอยต่อ พี- เอ็น จะยอมให้กระแสไหลผ่านได้ดี ขณะได้รับแรงดัน ไบอัสตรง และกระแสจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วกับแรงดัน ไบอัสตรง ความต้านทานของไดโอดแบบรอยต่อในกรณีนี้จะมีค่าน้อยมาก และถูกเรียกว่า "**ความต้านทานไบอัสตรง**" ซึ่งสังเกตได้จากความชันของกราฟที่มีค่าสูงมาก โดยที่ความชันของกราฟเท่ากับส่วนกลับของความต้านทานหรือ $\frac{\Delta I}{\Delta V} = \frac{1}{R_f}$ แต่เมื่ออยู่ในสภาวะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ รอยต่อจะมีค่าความต้านทานสูงมากๆ และถูกเรียกว่า "**ความต้านทานไบอัสย้อนกลับ**" สังเกตได้ว่ากราฟในช่วงนี้จะมีค่าความชันน้อยมากๆ กระแสไหลในขณะนี้เป็นกระแสอิ่มตัวประมาณว่าคงที่ และมีขนาดค่าน้อยๆ ซึ่งคุณลักษณะ ของกราฟ I-V นี้ถูกเรียกว่า คุณสมบัติ "เรคติไฟร์" (Rectifier) ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานต่างๆได้ อย่างไรก็ดีในทางปฏิบัติ จะพบว่าเมื่อรอยต่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับค่าสูงๆ จนถึงค่าๆ หนึ่ง กระแสอิ่มตัว ซึ่งปกติมีค่าน้อยมากนี้จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและมีค่าเข้าสู่อนันต์ในที่สุดปรากฏการณ์นี้เรียกว่า "**ปรากฏการณ์การพังทลายของรอยต่อ**" (Junction Breakdown phenomena) แรงดันไบอัสซึ่งทำให้เกิดปรากฏการณ์พังทลายถูกเรียกว่า "**แรงดันพังทลาย**" (Breakdown Voltage : V_B)

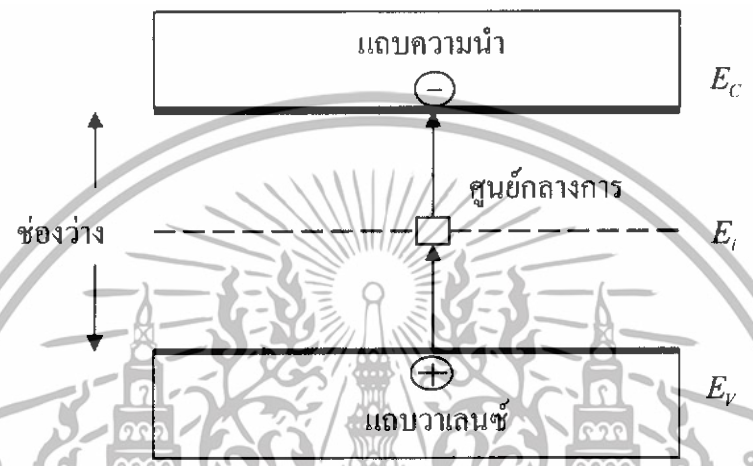
2.5 กระแสรั่วที่รอยต่อพีเอ็น

กระแสรั่ว (Leakage current) ที่เกิดขึ้นที่รอยต่อนั้นจะประกอบด้วยกระแสหลายชนิดและกระแสอิ่มตัวย้อยกลับ (I_o) นั้นก็เป็นกระแสรั่วชนิดหนึ่งที่ไม่ขึ้นต่อแรงดันไบอัส และมีค่าน้อยมากส่วนกระแสรั่วชนิดอื่นๆ ที่เกิดขึ้นก็ได้แก่กระแส generation recombination หรือเรียกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแส "G-R" โดยสิ่งซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดกระแส G-R นี้ก็คือความไม่สมบูรณ์ของผลึกซึ่งสามารถแยกได้เป็น 1. Metallic Impurities 2. Crystalline Defects

ทั้งสองสาเหตุนี้จะทำให้ผลึกเกิดความไม่สมบูรณ์และเกิดมีระดับพลังงานที่เรียกว่า Deep level เกิดขึ้นในช่องว่างของแถบพลังงานและแสดงตัวเป็นบันไดที่พักสำหรับพาหะอิเล็กตรอนหรือโฮลขณะเคลื่อนที่ระหว่างแถบวาเลนซ์และแถบความนำแสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การเกิดของพาหะและการรวมของพาหะโดยระดับพลังงาน Deep level

ในขณะที่รอยต่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับแรงดันทั้งหมดจะตกคร่อมรอยต่อในส่วนของบริเวณปลอดพาหะ ดังนั้นที่บริเวณปลอดพาหะนี้จะไม่มีพาหะอยู่เลยแต่อย่างไรก็ดีหากผลึกไม่สมบูรณ์แล้ว ระดับพลังงาน Deep level ซึ่งอยู่บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างพลังงานจะแสดงตัวเป็น "ศูนย์กลางการรวมตัว" (Recombination Center) ซึ่งสามารถทำให้เกิดพาหะขึ้นได้โดยอัตราการเกิดพาหะ ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

$$g = \frac{n_i}{2\tau_0} \tag{2.10}$$

โดย g คือ อัตราการเกิดของพาหะเนื่องจากความร้อน

τ_0 คือ อายุของพาหะส่วนน้อย ของอิเล็กตรอนหรือโฮล ที่บริเวณปลอดพาหะ

สมการกระแส R-Gในกรณี ไบอัสตรง คือ

$$I_{R-G} = I_R = I_{Ro}\left(e^{qV_A/2kT} - 1\right) \tag{2.11}$$

ดังนั้นกระแสของ R-G ที่เกิดขึ้นในบริเวณปลอดพาหะ ซึ่งกว้าง W โดยมีพื้นที่ของรอยต่อ A สามารถเขียนได้เป็น

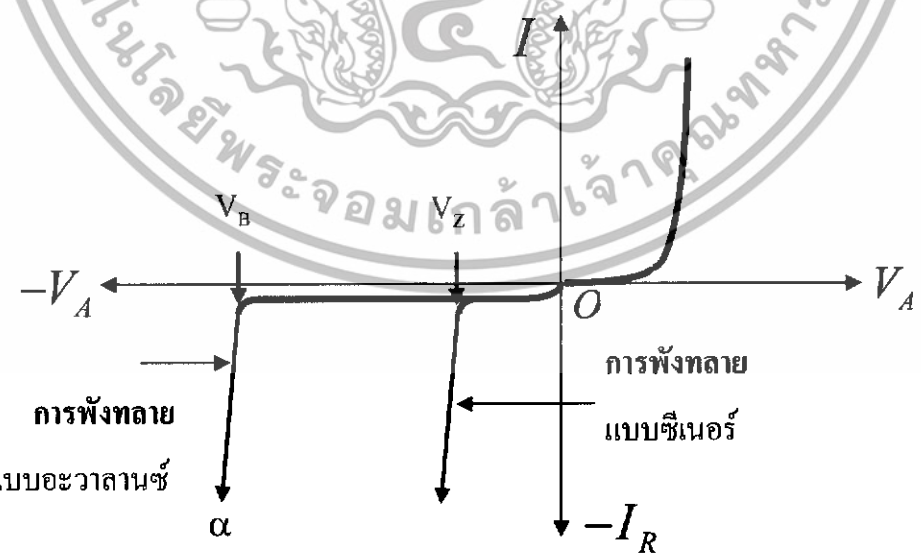
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{Ro} = \frac{Aqn_i}{2\tau_0} w \qquad (2.12)$$

จะเห็นว่ากระแส Ig จะเปลี่ยนแปลงตามค่า W ซึ่งเป็นฟังก์ชั่นของแรงดันไบอัส ดังนั้นกระแสรั่วชนิดนี้จึงขึ้นอยู่กับแรงดันไบอัส พื้นที่รอยต่อและอุณหภูมิ

2.6 คุณสมบัติการพังทลายที่รอยต่อ พี-เอ็น

ในขณะที่รอยต่อพี-เอ็นได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับและมีกระแสย้อนกลับค่าคงที่ไหลผ่านไดโอดนี้เมื่อแรงดันย้อนกลับมีค่าเพิ่มขึ้นไปเรื่อยๆ แรงดันที่บริเวณรอยต่อจะมีค่าสูงและสนามไฟฟ้าภายในก็จะมีค่าสูงด้วย ในขณะนี้ประจุพาหะส่วนน้อยทั้งอิเล็กตรอนและโฮลที่เคลื่อนผ่านบริเวณนี้จะได้รับอิทธิพลจากสนามไฟฟ้าค่าสูงทำให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง ซึ่งพาหะจะมีพลังงานจนล์ค่าสูงที่แรงดันย้อนกลับสูงค่าหนึ่งทำให้พาหะมีพลังงานจนล์สูงพอที่จะทำให้เกิดการชนกับอะตอมสารกึ่งตัวนำเป็นเหตุทำให้เกิดอิเล็กตรอน-โฮล คู่ใหม่เกิดขึ้นในบริเวณรอยต่อนี้ซึ่งมีสนามไฟฟ้าทำให้จำนวนของพาหะนำกระแสมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นกระแสย้อนกลับในวงจรจึงมีค่าเพิ่มมากขึ้นการเกิดอิเล็กตรอน-โฮลคู่ใหม่นี้จะดำเนินต่อไปคล้ายปฏิกิริยาลูกโซ่จนในที่สุดเป็นอนันต์ กระแสย้อนกลับก็จะเป็นอนันต์ด้วย ดังนั้นปกติจึงมีตัวต้านทานต่อนุกรมกับไดโอดเพื่อช่วยจำกัดกระแสในวงจรและไม่ให้เกิดความเสียหายได้ในภาวะนี้เรียกว่า "ภาวะการพังทลาย" (Breakdown Voltage) ดังแสดงในรูป 2.10 และการพังทลายลักษณะนี้เราเรียกว่า "**การพังทลายแบบอะวาลานซ์**" (Avalanche Breakdown) จะมีค่าหลายสิบโวลท์หรือ 100 โวลท์ แสดงได้ดังรูป 2.10



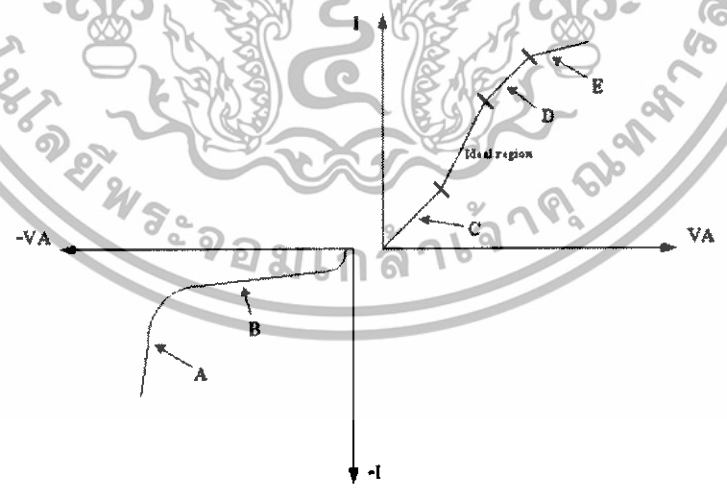
รูปที่ 2.9 การพังทลายของรอยต่อพีเอ็น (V_B) และแรงดันพังทลาย (V_Z)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.10 ปรากฏการณ์การพังทลายแบบซีเนอร์ มักจะเกิดขึ้นกับรอยต่อของไดโอดที่มีหนาแน่นของอะตอมสารเจือค่าสูงๆ (p^+- n) เช่นมีค่าสูงกว่า 10^{17} อะตอม / ลบ.ซม. ดังนั้น ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะที่รอยต่อจะมีขนาดแคบมาก จึงทำให้สนามไฟฟ้าบริเวณรอยต่อมีค่าสูงมาก แม้ว่าจะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ เพียงไม่กี่โวลท์ก็ตาม จึงเป็นสาเหตุของการเกิด การปลดปล่อยอิเล็กตรอนด้วยสนามไฟฟ้า หรือ Field emission หรือ Field ionization ของอะตอมสารกึ่งตัวนำบริเวณรอยต่อ และอิเล็กตรอนอิสระที่เกิดขึ้นจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าและเคลื่อนที่เข้าไปด้านเอ็นส่วนโฮลเคลื่อนที่ไปด้านพี ทำให้เกิดกระแสย้อนกลับเป็นจำนวนมากไหลผ่านไดโอด และปรากฏการณ์เช่นนี้ ถูกเรียกว่า "**การพังทลายแบบซีเนอร์ หรือ ปรากฏการณ์ซีเนอร์**" แรงดันพังทลายแบบซีเนอร์นี้ จะมีค่าต่ำประมาณ 1-10 โวลท์และในขณะที่ภาวะพังทลายนี้ แรงดันตกคร่อมไดโอดจะมีค่าคงที่แม้ว่าจะเพิ่มแรงดันไบอัสก็ตาม ดังนั้นจึงนิยมนำไปใช้งานเป็นตัวควบคุมแรงดันให้คงที่ (Voltage Regulator) ซึ่งไดโอดชนิดนี้ถูกเรียกว่า "**ซีเนอร์ไดโอด**"

2.7 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของไดโอดในทางปฏิบัติ

คุณสมบัติของไดโอด ขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง ทั้งแบบการฉีดระดับต่ำการฉีดระดับสูง และขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ โดยพิจารณาเงื่อนไขและผลของปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นจะทำให้ได้คุณสมบัติความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของไดโอดในทางปฏิบัติโดยประมาณ ดังแสดงในรูปที่ 2.10



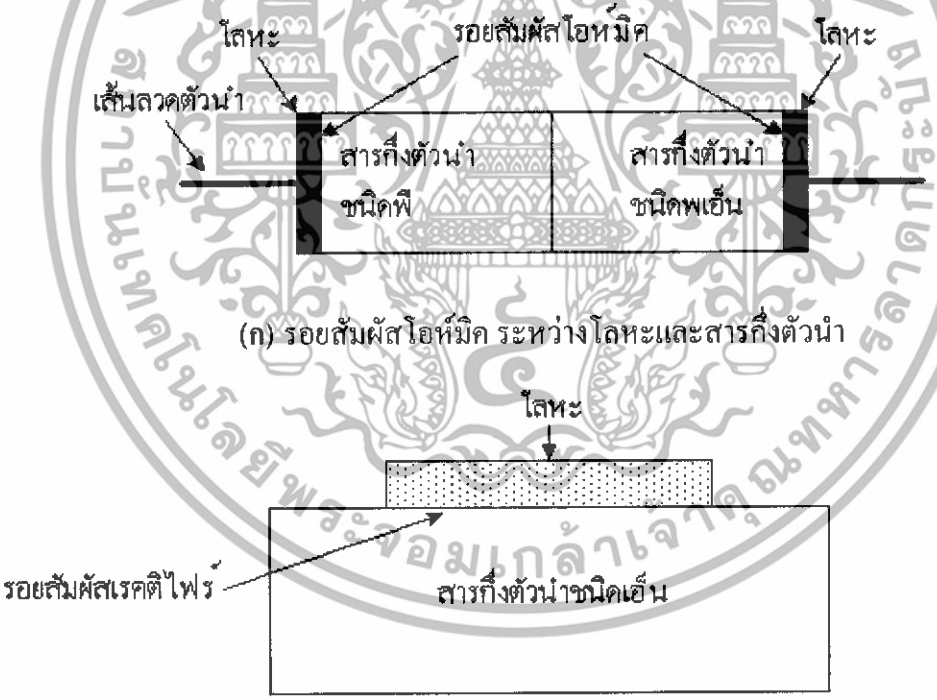
รูปที่ 2.10 กราฟคุณสมบัติ I-V ของไดโอดอย่างง่ายๆ ซึ่งแสดงกระแสย่านต่างๆ ที่เกิดจากผลของปรากฏการณ์ต่างๆ ในทางปฏิบัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในช่วง A กระแสที่ไหลได้แก่ กระแสพังทลาย (Breakdown current) ซึ่งอาจเป็นการพังทลายแบบอะวาลันซ์ หรือ แบบซีเนอร์ก็ได้ ช่วง B, C กระแสที่ไหลในช่วงนี้ ส่วนใหญ่เป็นผลมาจากการเกิดกระแส R-G (Recombination Generation) ซึ่งเกิดจากบริเวณปลอดพาหะ **ช่วงอุดมคติ** (Ideal region) เป็นช่วงที่ตรงกับการวิเคราะห์อย่างอุดมคติ และคุณสมบัติเป็นไปตามสมการไดโอดใน **ช่วง D** กระแสที่ไหลจะเป็นไปตามผลของกรณีการฉีดระดับสูง และ**ช่วง E** กระแสที่ไหลจะเป็นผลที่เกิดจาก ความต้านทานอนุกรม ของส่วนเอ็นและพีนอกบริเวณปลอดพาหะ

2.8 รอยสัมผัสโลหะและสารกึ่งตัวนำ (Metal-Semiconductor Contact)

โดยปกติภายหลังจากที่อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำถูกสร้างขึ้นมาเสร็จเรียบร้อยแล้ว จำเป็นจะต้องมีการต่อขาโลหะออกไปภายนอก เพื่อต่อเชื่อมกับอุปกรณ์ภายนอกอื่น ๆ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องสร้างรอยสัมผัส (contact) ระหว่างโลหะ และสารกึ่งตัวนำ ที่เป็นส่วนต่าง ๆ ของตัวอุปกรณ์เช่นขั้วสัมผัสส่วนต่าง ๆ ของทรานซิสเตอร์ และของไดโอดดังแสดงในรูปที่ 2.11 (ก)



(ข) รอยสัมผัสเรคติไฟร์ ระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ

รูปที่ 2.11 ลักษณะรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ **(ก)** รอยสัมผัสโอห์มิค **(ข)** รอยสัมผัสเรคติไฟร์ของ ซ๊อตคีย์ไดโอด

รอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำในลักษณะนี้ โดยปกติจะมีคุณสมบัติเป็น "**รอยสัมผัสโอห์มิค**" (Ohmic Contact) กล่าวคือ จะไม่มีผลเกี่ยวข้องกับทิศทางการไหลของกระแส โดยกระแส

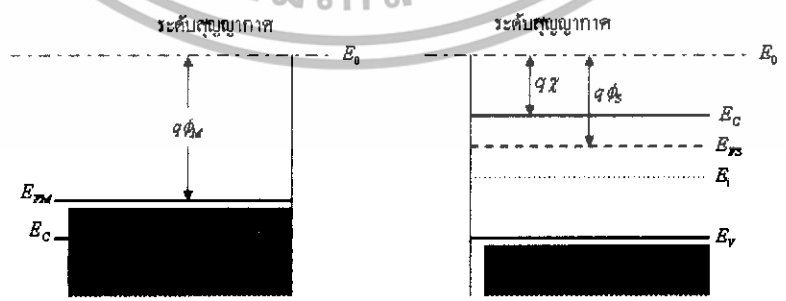
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฟฟ้าสามารถไหลผ่านได้ทั้งสองทิศทาง และเป็นรอยสัมผัสที่มีค่าความนำไฟฟ้าสูง ไม่มีแรงดันตกคร่อมที่รอยสัมผัส สำหรับโลหะที่ใช้มักเป็นอะลูมิเนียม และทองคำเป็นต้น

อย่างไรก็ดี รอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำนี้ในบางกรณี ดังในรูปที่ 2.11 (ข) อาจจะไม่ใช่รอยสัมผัสโอห์มิคก็ได้ เช่น บางครั้งอาจแสดงคุณสมบัติเป็นเรคติไฟร์ได้ ซึ่งคล้ายกับไดโอดโดยยอมให้กระแสไหลผ่านได้ในทิศทางหนึ่งทิศทางใดเท่านั้น และรอยสัมผัสเช่นนี้ถูกเรียกว่า "**รอยสัมผัสเรคติไฟร์**" (Rectifier Contact) บางครั้งเรียกว่า **ไดโอดชนิดโลหะ - สารกึ่งตัวนำ** หรือ Metal-Semiconductor diode หรือ "**ช็อตต์คีย์ไอโอด**" (Schottky diode) ซึ่งไดโอดชนิดนี้สามารถนำไปใช้งาน เช่นในวงจรความถี่สูง และวงจรสวิตช์ได้เป็นอย่างดี โดยมีอัตราเร็วในการสวิตช์สูงกว่าไดโอดแบบรอยสัมผัสพี-เอ็นปกติ ดังนั้นจึงกล่าวสรุปได้ว่า รอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ สามารถให้คุณสมบัติได้ 2 ลักษณะ คือ อาจเป็น "**รอยสัมผัสแบบโอห์มิค**" หรือ "**รอยสัมผัสเรคติไฟร์**" ก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะและสารกึ่งตัวนำที่นำมาสร้างให้เป็นรอยสัมผัส

2.9 ลักษณะแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำในอุดมคติก่อนสัมผัส

ก่อนการสัมผัส แถบพลังงานของโลหะโดยทั่วไป เช่นทองคำ หรืออะลูมิเนียม สามารถแสดงได้ดังในรูปที่ 2.13 (ก) และสำหรับสารกึ่งตัวนำเช่นซิลิคอนเอ็น แสดงได้ดังในรูปที่ 2.13 (ข) ระดับพลังงาน E_0 หมายถึง ระดับพลังงานที่ใช้เป็นระดับอ้างอิง เพื่อการเปรียบเทียบระดับพลังงานระหว่างสารต่างชนิดกัน นิยมเรียกว่า "**ระดับสุญญากาศ**" (Vacuum Level) และนิยามได้ว่า เป็นระดับพลังงานของอิเล็กตรอนที่หลุดออกไปจากเนื้อสารของแข็ง และหยุดนิ่งอยู่บริเวณผิวภายนอกของสาร หรืออีกนัยหนึ่งก็คือ พลังงานของอิเล็กตรอนที่เป็นอิสระจากโลหะนั้นหรือสารของแข็งนั้น ๆ ดังนั้นระดับพลังงาน E_0 จะมีค่าเท่ากับ $0\ eV$ ส่วนระดับพลังงานอื่น ๆ ที่ปรากฏในรูปจะมีค่าพลังงานเป็นค่าลบ ระดับสุญญากาศของสารทุกชนิดพิจารณาว่าเป็นระดับเดียวกัน หรือมีค่าเท่ากัน



(ก) โลหะ (ข) สารกึ่งตัวนำ

รูปที่ 2.12 ลักษณะแถบพลังงานและระดับพลังงานต่าง ๆ ที่สำคัญในวัสดุ (ก)โลหะ (ข)สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ขณะที่ยังไม่สัมผัสกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนของโลหะ ระดับเฟอร์มิของโลหะหรือ E_{FM} จะอยู่สูงกว่าระดับพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า (E_C) เล็กน้อย และถูกนิยามว่าเป็นค่าพลังงานเฉลี่ยของอิเล็กตรอนส่วนใหญ่อยู่ภายในโลหะนั้น ค่าความแตกต่างระหว่างระดับเฟอร์มิและระดับสุญญากาศถูกเรียกว่า "**ฟังก์ชั่นงาน**" (work Function) ของโลหะ และมีค่าเท่ากับ $q\phi_M$ ซึ่งหมายถึง พลังงานค่าน้อยที่สุด ที่อิเล็กตรอนในโลหะต้องการ เพื่อทำให้อิเล็กตรอนนั้นสามารถหลุดออกมาหยุดนิ่งอยู่ที่ผิวด้านนอกของโลหะนั้น ๆ และเป็นอิสระโดยสมบูรณ์ ในโลหะที่ต่างชนิดกัน จะมีค่าฟังก์ชั่นงานที่แตกต่างกัน เช่น ฟังก์ชั่นงานของแมกนีเซียม = 3.66 eV ของอะลูมิเนียม = 4.3 eV ของทองคำ = 4.8 eV และสำหรับนิกเกิล = 5.15 eV เป็นต้น และต่างก็เป็นคุณสมบัติประจำตัวของสารนั้น ๆ ซึ่งมีค่าที่ไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นจะได้ว่าฟังก์ชั่นงานของโลหะคือ

$$q\phi_M = E_O - E_{FM} \tag{2.13}$$

สำหรับแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ดังในรูปที่ 2.13 (ข) ระดับเฟอร์มิจะอยู่ในช่องว่าพลังงานโดยอยู่สูงกว่าระดับ E_i (ระดับกึ่งกลางของช่องว่างพลังงาน) และต่ำกว่าระดับ E_C ค่าฟังก์ชั่นงานของสารกึ่งตัวนำ ($q\phi_S$) มีค่าเท่ากับความแตกต่างของระดับพลังงานสุญญากาศ E_O และระดับเฟอร์มิ E_{FS} ดังนั้น จะได้ว่า ฟังก์ชั่นงานของสารกึ่งตัวนำคือ

$$q\phi_s = E_O - E_{FS} \tag{2.14}$$

นอกจากนี้ สำหรับในสารกึ่งตัวนำ ความแตกต่างของพลังงานระดับสุญญากาศ E_O กับระดับนำไฟฟ้า E_C ของสารกึ่งตัวนำถูกเรียกว่า " **อิเล็กตรอนแอฟฟินิตี้** " (electron Affinity) โดยเขียนแทนด้วย $q\chi$ และสัญลักษณ์ χ เป็นตัวอักษรกรีก (Chi) ซึ่ง **"อิเล็กตรอนแอฟฟินิตี้"** ถูกนิยามว่าเป็นค่าพลังงานที่อิเล็กตรอนจากระดับพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า E_C ต้องการเพื่อจะเคลื่อนที่ออกไปหยุดนิ่งอยู่ที่ผิวภายนอกของสารกึ่งตัวนำ ค่านี้ถือเป็นคุณสมบัติพื้นฐานของสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิด เช่น ในเยอรมันเนียม, ซิลิคอน และแกลเกลียมอาเซไนด์ จะมีค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี้ $q\chi$ ต่าง ๆกัน คือ 4.15 eV , 4.03 eV และ 4.07 eV ตามลำดับซึ่งเป็นค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง ค่าฟังก์ชั่นงานและอิเล็กตรินแอฟฟินิตี้ของสารกึ่งตัวนำมีความสัมพันธ์กันดังสมการที่ (2.15)

$$q\phi_S = q\chi + \left(E_C - E_F\right)\Big|_{F \quad B} \tag{2.15}$$

โดยที่อิเล็กตรอนแอฟฟินิตี้

$$q\chi = \left(E_O - E_F\right)\Big|_{\text{ที่บริเวณผิว}} \tag{2.16}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ $(E_C - E_F)|_{F\ B}$ หมายถึง ความแตกต่างของระดับ E_C และระดับ E_F ที่บริเวณผิวสัมผัสในภาวะ **"แถบราบ"** (flat Band) หรือในภาวะที่ไม่มีสนามไฟฟ้าตกคร่อม ตำแหน่งระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำ E_{FS} มีค่าไม่คงที่ แต่จะเปลี่ยนแปลงกับขนาดของความหนาแน่นของอะตอมสารเจือที่อยู่ในสารกึ่งตัวนำนั้น ๆ สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นระดับเฟอร์มิ จะอยู่สูงกว่าระดับกึ่งกลางของช่องว่างพลังงาน E_i และในสารกึ่งตัวนำชนิดพีระดับเฟอร์มิ จะปรากฏอยู่ที่ระดับซึ่งอยู่ต่ำกว่าระดับ E_i

2.10 การนำไดโอดไปใช้งาน

จะเห็นได้ว่าจากสมการกระแสและแรงดันของไดโอด ไดโอดเป็นอุปกรณ์ที่จะยอมให้กระแสไหลผ่านได้ดีในกรณีที่ได้รับไบอัสตรง (Forward bias) และกระแสจะไหลต่ำมากในทิศทางของการได้รับไบอัสย้อนกลับ (Reverse bias) ซึ่งจากคุณสมบัติพื้นฐานนี้ เราจะสามารถนำไดโอดไปเป็นตัวเรคติไฟร์ (Rectifier) หรือตัวเรียงกระแส ซึ่งหมายถึงการเปลี่ยนแปลงไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นกระแสตรง ซึ่งจะมีขนาดของแรงดันหรือขนาดของสัญญาณสูง เช่น ในภาคจ่ายกำลังเพาเวอร์ซับพลาย แต่จริงๆแล้วเราสามารถที่จะนำไดโอดไปประยุกต์ใช้งานในวงจรอิเล็กทรอนิคส์ได้อีกมากมายขึ้นอยู่กับการออกแบบที่เหมาะต่อการนำไปใช้งานเฉพาะอย่าง ตัวอย่างเช่น เราสามารถที่จะนำไดโอดไปใช้เป็นตัวรักษาระดับแรงดัน (Regulator) ซึ่งเรียกว่า "ซีเนอร์ไดโอด" โดยการออกแบบให้อะตอมสารเจือมีค่าสูง หรือสามารถนำไดโอดไปใช้ควบคุมวงจรจูน (tune circuit) เนื่องจากสามารถเปลี่ยนแปลงค่าความจุที่รอยต่อของไดโอดได้ด้วยแรงดันไบอัสซึ่งเรียกว่า Varicap (Variable Capacitor) หรือสามารถนำไปใช้ในการสื่อสารโทรคมนาคมที่ใช้ใยแก้วนำแสง (Fiber Optical) ซึ่งจะใช้ไดโอดเป็นตัวตรวจจับ (Detector) ข้อมูลที่ปลายทาง ซึ่งเรียกว่า "โฟโต้ไดโอด" (Photo diode) และอื่นๆ อีกมากมาย

2.10.1 ไดโอดกำลัง (Power Diode)

ไดโอดกำลัง ได้แก่ไดโอดที่นำไปใช้งาน เป็นตัวเรียงกระแส ที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง ไดโอดประเภทนี้มีคุณสมบัติเด่นตรงที่ด้านกำลังสูง ส่วนใหญ่สร้างจากผลึกรูปเดี่ยวของซิลิคอนเพราะทนต่ออุณหภูมิสูงๆได้ การควบคุมให้ไดโอดมีแรงดันพังทลายสูงสามารถทำได้ โดยการเติมอะตอมสารเจือจาง แต่จะทำให้ความต้านทานอนุกรมสูง เกิดความร้อนได้ง่าย จากสูตรคือ I^2R_S เพื่อลดค่าความต้านทานอนุกรม สามารถทำได้โดยการเพิ่มขนาดของพื้นที่หน้าตัดของไดโอด และลดความยาวของไดโอดให้สั้นลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

2.10.2 **ไดโอดสวิตช์ (Switching Diode)**

ไดโอดสวิตช์ เป็นไดโอดที่ออกแบบเพื่อนำไปใช้งานเป็นสวิตช์ (Switching Circuits) ไดโอดจะต้องมีอัตราเร็วในการสวิตช์สูง ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับ "ช่วงเวลาเปิด" (Turn on time) และช่วง

เวลาปิด (Turn off time) อัตราเร็วในการสวิตช์ถูกกำหนดโดย อายุของพาหะส่วนน้อย (τ) และปริมาณของประจุสะสม (Q_B) ในขณะที่ไดโอดได้รับไบอัสตรง อายุของพาหะและปริมาณประจุสะสม ยิ่งมีค่าน้อย จะทำให้อัตราเร็วในการสวิตช์มีค่าสูง

2.10.3 **ซีเนอร์ไดโอด** (Zener Diode)

ไดโอดชนิดนี้บางครั้งอาจถูกเรียกว่า "Voltage Regulator diode" เป็นไดโอดที่ด้านทั้งสองของรอยต่อพี-เอ็นถูกเติมด้วยอะตอมสารเจืออย่างเข้มข้น ทำให้เมื่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับจะมี ปรากฏการณ์ การพังทลายแบบซีเนอร์เกิดขึ้น ขนาดของแรงดันพังทลาย (V_B) ถูกกำหนดด้วยความหนาแน่นอะตอมสารเจือ ปกติมีค่าระหว่าง 3 ถึง 15 โวลท์ ขณะได้รับไบอัสตรงจะเหมือนกับไดโอดทั่วไป หากแต่มีแรงดันพังทลายต่ำกว่าในขณะที่ได้รับไบอัสย้อนกลับ

2.10.4 **แบคเวิร์ดไดโอด** (Backward diode)

เป็นไดโอดซึ่งด้านทั้งสองของรอยต่อพี-เอ็น ถูกเติมด้วยอะตอมสารเจืออย่างเข้มข้น และมากกว่าซีเนอร์ไดโอด ระดับพลังงานเฟอร์มิ (Fermi level) ของด้านพีจะอยู่ใกล้กับระดับวาเลนซ์มาก หรือ $E_{F_p} \approx E_V$ และระดับพลังงานเฟอร์มิ (Fermi level) ของด้านเอ็นจะอยู่ใกล้กับระดับนำไฟฟ้ามาก หรือ $E_{F_n} \approx E_C$ ที่ไบอัสต่ำสูง จะสามารถทำให้กระแสไหลได้ เช่นเดียวกับไดโอดทั่วไป กระแสช่วงนี้จะแปรกับแรงดันตามสมการของไดโอด โดยเพิ่มขึ้นเป็นเอ็กโปเนนเชียลกับแรงดัน จะเห็นว่าคุณสมบัติของไดโอดชนิดนี้มีลักษณะตรงข้ามกับไดโอดปกติ นั่นคือ ในย่านไบอัสย้อนกลับสามารถนำไฟฟ้าได้ดีกว่าย่านไบอัสตรง ไดโอดชนิดนี้จึงถูกเรียกว่า "แบคเวิร์ดไดโอด" หรือ "Backward diode" ก็คือการกลับข้างไดโอดนั่นเอง

2.10.5 **ทันเนลไดโอด** (Tunnel diode)

ไดโอดชนิดนี้ถูกเติมด้วยอะตอมสารเจืออย่างเข้มข้น ประมาณสูงกว่า 10^{18} อะตอมต่อลบ.ซม. กระทั่งกลายเป็น "สารกึ่งตัวนำดีเจนเนอร์เรต" (Degenerated Semiconductor) กล่าวคือในสารกึ่งตัวนำชนิดพี ระดับพลังงานเฟอร์มิจะเข้าไปอยู่ในแถบวาเลนซ์ หรือ $E_{FP}<E_V$ เรียกสารนี้ว่า degenerated n – type semiconductor และในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ระดับพลังงานเฟอร์มิของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

73167

สารชนิดเอ็น จะเข้าไปอยู่ในแถบนำไฟฟ้าหรือ $E_{FN}>E_C$ เรียกสารนี้ว่า degenerated p- type semiconductor เมื่อทั้งสองเกิดความสมดุล จะทำให้ขนาดของกำแพงศักย์จะมีค่าสูง ในกรณีของทันเนลไดโอดจะมีการเหลื่อมซ้อนกันมากกว่าของ แบคเวิร์ดไดโอด คือเมื่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับระดับ E_{F_n} จะอยู่ต่ำกว่าระดับ E_{F_p} ดังนั้นอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ของทางด้านพีที่มีพลังงานต่ำกว่าระดับ E_{F_p} ซึ่งเราเรียกว่า "สถานะเต็ม" (Fill state) จะสามารถทะลุผ่านอุโมงค์ (tunneling) บริเวณปลอดพาหะแคบๆนี้เข้าไปยังสถานะว่าง (Empty state) ที่มีพลังงานสูงกว่าระดับ E_{F_n} ซึ่งอยู่ในแถบนำไฟฟ้าของด้านเอ็น

2.10.6 **แวแรคเตอร์ไดโอด** (Varactor diode)

เป็นความหมายเดียวกันกับ Variable reactor หรือ Voltage variable capacitance ซึ่งหมายถึงตัวเก็บประจุที่เปลี่ยนค่าได้ ด้วยแรงดันไบอัส เนื่องจากที่รอยต่อพี-เอ็น จะมีความจุไฟฟ้าที่รอยต่อเกิดขึ้น และถูกควบคุมด้วยแรงดันไบอัส ในขณะใช้งานจะถูกให้ไบอัสย้อนกลับ ทั้งนี้เพื่อไม่ให้กระแสไหลผ่านไดโอดขณะเป็นตัวเก็บประจุ ถ้าเทียบกับตัวเก็บประจุโดยทั่วไป จะมีขนาดที่เล็กกว่ามาก ทำให้มีค่าความจุที่น้อยด้วย แต่สามารถเปลี่ยนแปลงได้อย่างรวดเร็วกับแรงดัน จึงนิยมใช้ในงานความถี่สูง

2.11 คุณสมบัติที่สำคัญของวัสดุที่ทำหน้าสัมผัสทางไฟฟ้า

1. มีค่าความนำไฟฟ้าสูง
2. มีสัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิของความต้านทานต่ำเพื่อให้หน้าสัมผัสมีความต้านทานคงที่
3. มีค่านำสภาพความร้อนสูงเพื่อให้สามารถระบายความร้อนจากผิวหน้าสัมผัสได้เร็วลดสภาพการเกิดรวมตัวของออกซิเจน
4. มีจุดหลอมเหลวสูงเพื่อป้องกันหน้าสัมผัสเยิ้มติดกันเกิดการสูญเสียผิวหน้าและหน้าสัมผัสเกิดเป็นหลุม
5. มีจุดเดือดสูงเพื่อป้องกันการระเหยของผิวหน้าเป็นจุดๆซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียวัสดุขณะเกิดการอาร์ค
6. มีความต้านทานการกัดกร่อนสูง เพื่อป้องกันไม่ให้หน้าสัมผัสมีความต้านทานสูงขึ้น

คุณสมบัติการเชื่อมตัวกันยากไม่ติดกัน

7. มีความแข็งและความเหนียวสูงเพื่อป้องกันการสึกหรอ และการแตกร้าวเมื่อใช้งานที่ความถี่สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.12 กระแสไฟฟ้าและความนำไฟฟ้า

พิจารณาการนำไฟฟ้าของตัวนำ เช่นโลหะ โดยจะกล่าวถึงสมการกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเมื่อตัวนำได้รับสนามไฟฟ้า การเคลื่อนที่และทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระสมการสภาพความนำ (Conductivity: σ) สภาพต้านทาน (Resistivity: ρ) สมการความต้านทาน (Resistance:R) และความนำ (Conductance: G) เป็นต้น

$$J = \sigma\varepsilon \tag{2.17}$$

โดย J คือความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า มีหน่วยเป็นแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

σ คือสภาพนำไฟฟ้า (Conductivity) ของตัวนำเป็นค่าคงที่ของตัวนำแต่ละชนิดมีหน่วยเป็นโมห์ต่อเซนติเมตรหรือ 1 / โอห์ม.เซนติเมตร

ε คือสนามไฟฟ้าที่ให้แก่ตัวนำ มีหน่วยเป็นโวลท์ต่อเซนติเมตร

เมื่อพิจารณาแท่งโลหะแท่งหนึ่งซึ่งมีพื้นที่หน้าตัด A มีความยาวเป็น L มีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนเป็น n และถูกสนามไฟฟ้า ε_x ในทิศทางบวก x ดังแสดงในรูปที่ 2.18 จะพบว่าเนื่องจากสนามไฟฟ้าจะทำให้เกิดมีแรงกระทำต่ออิเล็กตรอนซึ่งมีประจุไฟฟ้าเป็นลบ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่แบบดริฟท์ (Drift) ด้วยความเร็ว(V_x) ค่าหนึ่งซึ่งเรียกว่า "ความเร็วดริฟท์" (Drift Velocity) โดยมีทิศทางตรงกันข้ามกับสนามไฟฟ้าคือทิศลบ -x การเคลื่อนที่ของประจุอิเล็กตรอนทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลในทิศทางตรงกันข้ามกับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน หรือก็คือมีกระแสไฟฟ้าไหลในทิศทางเดียวกันกับ ทิศของสนามไฟฟ้า ดังนั้นสมการความหนาแน่นกระแสคือ

$$J = \frac{Q}{tA} \tag{2.18}$$

โดยQ คือ ประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่มีหน่วยเป็นคูลอมบ์

t คือ เวลาที่ประจุใช้ในการเคลื่อนที่มีหน่วยเป็นวินาที

A คือ พื้นที่หน้าตัดของแท่งโลหะมีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตร

จากรูปที่ 2.14 ประจุไฟฟ้าทั้งหมดในแท่งโลหะที่เกิดจากอิเล็กตรอนคือ

$$Q = n.q.A.L \tag{2.19}$$

แทนสมการที่ (2.18) ลงใน (2.19) ดังนั้น

$$J = \frac{nqAL}{tA} = \frac{nqL}{t} \tag{2.20}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ $J = nqv_D$ สมการที่ (2.20)

โดย v_D คือ ความเร็วดริฟท์ของอิเล็กตรอน

q คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน = -1.6 x 10^{-19} คูลอมบ์

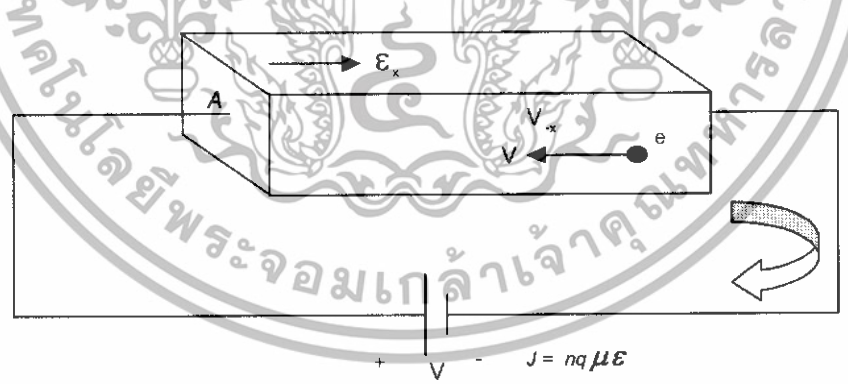
เนื่องจากอิเล็กตรอนมีประจุเป็นลบ และความเร็วก็มีทิศทางเป็นบวกดังนั้นสมการ (2.20) จะมีค่าเป็นบวก ซึ่งหมายถึงกระแสมีทิศทางเป็นบวก x เมื่ออิเล็กตรอนซึ่งมีประจุไฟฟ้า -q คูลอมบ์ ได้รับสนามไฟฟ้า ε_x ทำให้เกิดแรงกระทำต่ออิเล็กตรอน F โดยจะได้ว่า

$$F = -q\varepsilon_x \qquad (2.21)$$

และจากการทดลอง พบว่าความเร็วของอิเล็กตรอน แปรผันโดยตรงกับค่าสนามไฟฟ้าที่ได้รับนั่นคือ $v \alpha -\varepsilon$ หรือ

$$v_d = -\mu\varepsilon_x \qquad (2.22)$$

โดย μ คือค่าคงที่ซึ่งเรียกว่า "สภาพคล่อง" (Mobility) และอาจหมายถึงความเร็วต่อหนึ่งหน่วยสนามไฟฟ้า



รูปที่ 2.13 การนำกระแสของอิเล็กตรอนในโลหะ

แทนสมการ (2.20) ในสมการ (2.22) จะได้

ความหนาแน่นกระแส

$$J = nq\mu\varepsilon \qquad (2.23)$$

สภาพนำ (Conductivity)

$$\sigma = nq\mu \qquad (2.24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และถ้ากำหนดให้สภาพต้านทาน

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \tag{2.25}$$

ดังนั้น สภาพต้านทาน (Resistivity)

$$\rho = \frac{1}{nq\mu} \tag{2.26}$$

ความหนาแน่นกระแสอาจเขียนใหม่ได้เป็น

$$V = \varepsilon L \tag{2.27}$$

$$\varepsilon = \frac{V}{L} \tag{2.28}$$

แทนสมการ (2.28) ลงในสมการ (2.17) จะได้

$$J = \sigma \frac{V}{L} \tag{2.29}$$

$$J = \frac{I}{A} \tag{2.30}$$

ดังนั้นจะได้เป็น

$$\frac{I}{A} = \sigma \frac{V}{L} \tag{2.31}$$

หรือ

$$I = \sigma \frac{A}{L} V \tag{2.32}$$

และอาจเขียนใหม่เป็น

$$I = GV \tag{2.33}$$

โดยที่

$$G = \sigma \frac{A}{L} \tag{2.34}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งในที่นี้ G ถูกเรียกว่า "ความนำ" หรือ Conductance มีหน่วยเป็นโมห์ ($\mho$)
ถ้ากำหนดให้ R คือความต้านทาน (Resistance) และมีค่าเป็นส่วนกลับของความนำดังนั้น

$$R = \frac{1}{G} = \frac{1}{\sigma}\frac{L}{A} \tag{2.35}$$

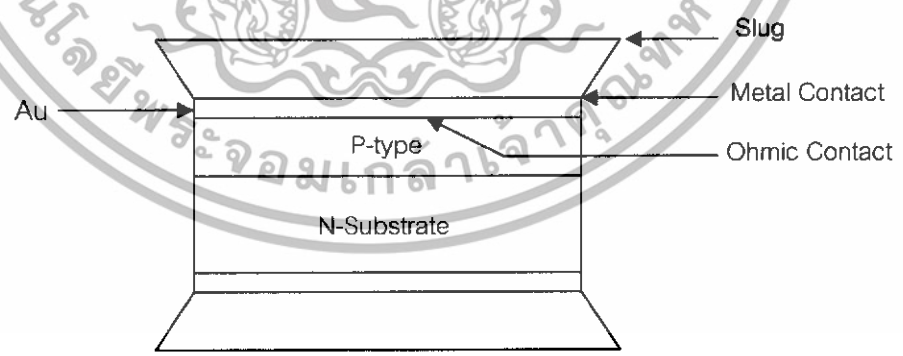
หรือ $$R = \rho\frac{L}{A} \tag{2.36}$$

โดยที่ R คือความต้านทาน มีหน่วยเป็นโอห์ม (Ω)
ดังนั้นสมการที่ (2.35) เขียนใหม่ได้ว่า

$$I = \frac{V}{R} \tag{2.37}$$

ซึ่งเป็นสมการที่รู้จักกันดีตามกฎของโอห์ม โดยที่ R คือความต้านทานมีหน่วยเป็นโอห์ม
โดย I คือ กระแสที่ไหลผ่านมาจากแท่งโลหะ มีหน่วยเป็น แอมแปร์
V คือ แรงดันที่ให้แก่แท่งโลหะ มีหน่วยเป็นโวลท์

2.13 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของขั้วโลหะที่มีพื้นที่ขนาดใหญ่



รูปที่ 2.14 การประกอบขั้วโลหะไดโอดชนิด Cell

ความนำไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนขั้วโลหะ (Slug) สามารถกำหนดได้จากสมการดังนี้

$$R = \rho\frac{L}{A} \tag{2.38}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

R คือ ความต้านทานมีหน่วยเป็นโอห์ม(Ω)

ρ คือ สภาพความต้านทานมีหน่วยเป็นโมห์($\mho$)

L คือ ความยาวมีหน่วยเป็นเมตร

A คือ เส้นผ่านศูนย์กลางและสมการกำลังทางไฟฟ้า คือ

$$P = I^2 R \tag{2.39}$$

P คือ กำลังงานไฟฟ้ามีหน่วยเป็นวัตต์ (W)

I คือ กระแสมีหน่วยเป็นแอมแปร์ (A)

R คือ ความต้านทานมีหน่วยเป็นโอห์ม (Ω)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

กระบวนการประกอบและวัสดุที่ใช้ในการผลิต ไดโอดกำลังชนิด Cell ในอุตสาหกรรม

กระบวนการผลิตไดโอดชนิด CELL สามารถแยกกระบวนการผลิตได้ทั้งหมด 6 กระบวนการ ผลิตโดยแต่ละกระบวนการผลิตมีดังต่อไปนี้

กระบวนการผลิตที่ 1 กระบวนการตัดแผ่น (Sawing)

กระบวนการผลิตที่ 2 กระบวนการทำความสะอาดแผ่นซิลิคอน (Cleaning Dice)

กระบวนการผลิตที่ 3 กระบวนการหลอมเหลวแผ่นตะกั่ว (Soldering)

กระบวนการผลิตที่ 4 กระบวนการกัดแผ่นซิลิคอน (Etching)

กระบวนการผลิตที่ 5 กระบวนการเคลือบ (Coating)

กระบวนการผลิตที่ 6 กระบวนการทดสอบ (Testing)

3.1 กระบวนการตัดแผ่น

เป็นกระบวนการนำแผ่นซิลิคอนมาทำการตัดให้ได้ตามขนาดตามกระบวนการผลิต

ตารางที่ 3.1 ขนาดของวัตถุดิบ ชนิด Cell Rectifier Diode (CRD)

ชนิดของ CRD.	ETCHING (sec)	DICE ขนาด (mil)	SLUG ขนาด (mil)	SOLDER (กว้าง),(หนา),(อุณหภูมิ)
3 A	2.30 นาที	88 * 88	125 * 20 / 156 * 15	2.40 , 0.05 , 280
5 A	3 นาที	108 * 108	156 * 20 / 186 * 15	2.80 , 0.05 , 310
8 A	4 นาที	134 * 134	190 * 20 / 215 * 15	3.30 , 0.05 , 310
18 A	4.30 นาที	150 * 150	215 * 20 / 244 * 15	4.0 , 0.05 , 280
25 A	5 นาที	184 HEX	215 * 20 / 244 * 15	4.6 , 0.05 , 280

1 นิ้ว = 25.4 mm, 1 mil = 0.001 นิ้ว หรือ = 0.0253 mm, 1 Foot =304.8 mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 กระบวนการทำความสะอาดแผ่นซิลิคอน

เป็นกระบวนการที่ทำความสะอาดบริเวณผิวหน้าของ DICE ก่อนนำไปทำการ Soldering โดยกระบวนการล้างมีทั้งหมด 8 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ผสมน้ำยาเพื่อใช้ในการล้างทำความสะอาด Dice ดังนี้

HAEMO – SOL N.S (120 Gs): DI Water (20 Lit)

2. HAEMO-SOL ที่ผสมแล้ว + น้ำ (65°C) อัตราส่วน 1:2 Ultrasonic เป็นเวลา 15 นาที

3. ล้างน้ำ DI ที่อุณหภูมิ 65°C จนหมดฟอง

4. นำ Dice แช่น้ำ DI ที่อุณหภูมิ 65°C แล้วทำการ Ultrasonic เป็นเวลา 5 นาที

5. ล้างด้วยน้ำ DI 1 ครั้ง

6. ล้างด้วย Acetone 1 ครั้ง

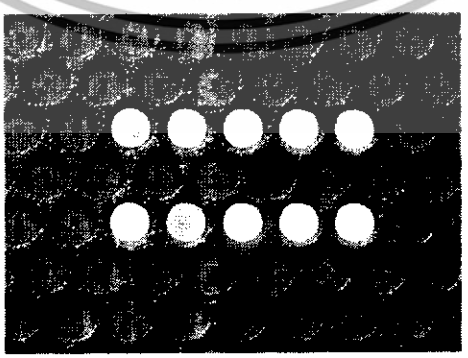
7. นำ Dice แช่ใน Acetone แล้วทำการ Ultrasonic เป็นเวลา 5 นาที

8. อบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 30 นาที

3.3 กระบวนการหลอมเหลวแผ่นตะกั่ว

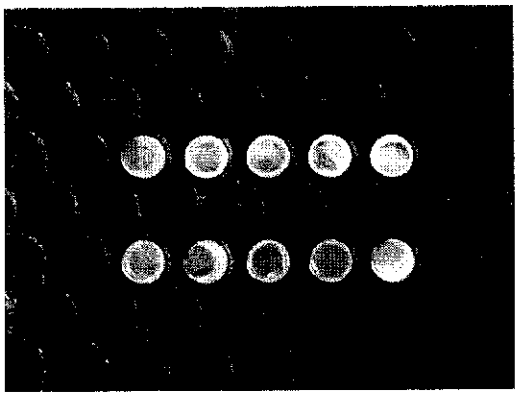
กระบวนการหลอมเหลวแผ่นตะกั่ว เป็นกระบวนการสำหรับทำหน้าที่เพื่อให้แผ่นตะกั่วหลอมละลายทำให้ขั้วโลหะ (Slug) ยึดติดกับ Dice ในการวางชิ้นงานก่อนการหลอมเหลวแผ่นตะกั่วแสดงได้ดังรูปที่ 3

รูปที่ 3.1 ลักษณะแผ่น Boat

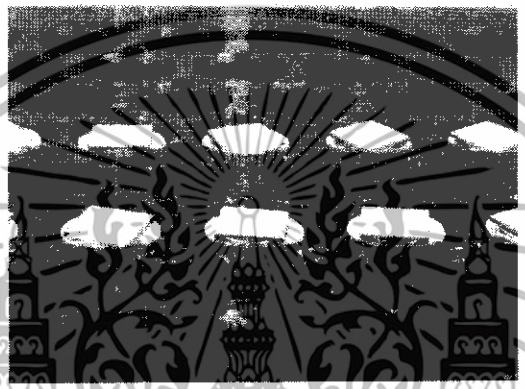


รูปที่ 3.2 ลักษณะการวางแผ่นสลักลงบนแผ่น Boat

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 ลักษณะการวางแผ่นตะกั่วลงบนแผ่นสลักในแผ่น Boat



รูปที่ 3.4 ลักษณะการวางแผ่น Dice ลงบนแผ่นตะกั่วในแผ่น Boat

3.3.1 ขั้นตอนการวางชิ้นงานก่อนการ Soldering

ในขั้นตอนนี้เราสามารถมองเห็นด้วยภาพตัดขวางเพื่อให้เข้าใจได้ง่ายได้ดังรูปที่ 3.5

รูปที่ 3.5 ภาพตัดขวางการวางชิ้นงานก่อนกระบวนการ Soldering

3.3.2 เตาที่ใช้ในการหลอมเหลวแผ่นตะกั่ว (Soldering) จะแยกเป็นทั้งหมด 6 ส่วน

เตา Soldering ส่วนที่ 1. อุณหภูมิที่ 460^{O}C

เตา Soldering ส่วนที่ 2. อุณหภูมิที่ 480^{O}C

เตา Soldering ส่วนที่ 3. อุณหภูมิที่ 480^{O}C

เตา Soldering ส่วนที่ 4. อุณหภูมิที่ 450^{O}C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

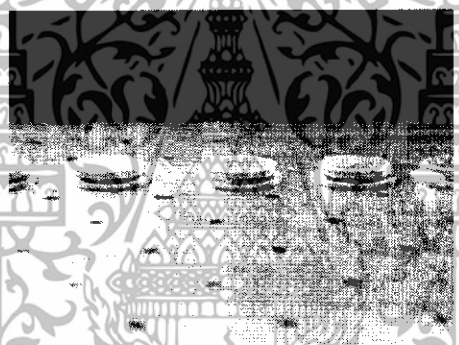
เตา Soldering ส่วนที่ 5. อุณหภูมิที่ 440^{O}C

เตา Soldering ส่วนที่ 6. อุณหภูมิที่ 40^{O}C

3.3.3 การ Flow Nitrogen

เพื่อไม่ให้เกิด Oxide ในขณะที่ทำการให้ความร้อนกับชิ้นงานซึ่งจะทำการ Flow ดังนี้

1. ทำการ Flow Nitrogen ในอัตราส่วน 150 mm/min. ให้กับเตาในส่วนที่ 1
2. ทำการ Flow Nitrogen ในอัตราส่วน 200 mm/min. ให้กับเตาในส่วนที่ 2
3. ทำการ Flow Nitrogen ในอัตราส่วน 200 mm/min. ให้กับเตาในส่วนที่ 3
4. ทำการ Flow Nitrogen ในอัตราส่วน 170 mm/min. ให้กับเตาในส่วนที่ 4
5. ทำการ Flow Nitrogen ในอัตราส่วน 200 mm/min. ให้กับเตาในส่วนที่ 5
6. ทำการ Flow Water เพื่อระบายความร้อนให้กับแผ่น Boat เพื่อลดความร้อนในชิ้นงาน และเมื่อผ่านกระบวนการหลอมเหลวแผ่นตะกั่วดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ภาพ Diode cell เมื่อผ่านกระบวนการหลอมเหลวแผ่นตะกั่ว (Soldering)

3.4 กระบวนการกัดแผ่นซิลิคอน

เป็นกระบวนการกัดแผ่นซิลิคอนที่ผ่านกระบวนการตัดแผ่นบริเวณรอยต่อขณะที่ทำการหลอมเหลวแผ่นตะกั่ว (Soldering) รวมไปถึงแผ่นตะกั่วที่อาจไหลมาติดบริเวณขั้วโลหะกับขั้วโลหะ เพื่อไม่ให้เกิดการช็อต (Short) และทำการลบมุมของแผ่นซิลิคอนที่ผ่านกระบวนการตัดแผ่นหรือเรียกว่า **Dice** มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 Mix Acid

$HNO_3 + HF + CH_3COOH + H_2SO_4$ เป็นเวลา 5 นาที

ขั้นตอนที่ 2 Cleaning

$H_2O_2 + H_3PO_4 + H_2O(50^{O}C)$ เป็นเวลา 40 วินาที

ขั้นตอนที่ 3 กัด Slug

$NH_4OH + H_2O_2 + H_2O$ เป็นเวลา 10 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 4 ล้างสารเคมี

ทำการ Ultrasonic ด้วย DI เป็นเวลา 10 นาที (2 ครั้ง)

ขั้นตอนที่ 5 ทำให้น้ำไม่เกาะติดชิ้นงาน

ทำการ Ultrasonic ด้วย IPA เป็นเวลา 10 นาที

ขั้นตอนที่ 6 ทำให้น้ำไม่เกาะติดชิ้นงาน

ทำการแช่ IPA เป็นเวลา 2 นาที

ขั้นตอนที่ 7 อบชิ้นงานให้แห้ง

อบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

3.5 กระบวนการเคลือบ

เป็นกระบวนการเคลือบชิ้นงานเพื่อป้องกันสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ไม่ให้กระโดดข้ามบริเวณรอยต่อได้ ซึ่งจะเป็นสาเหตุทำให้มีกระแสรั่วในชิ้นงานมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การหยอดซิลิโคน

นำซิลิโคนรับเบอร์ หยอดลงบริเวณช่องว่างด้านข้างระหว่างขั้วโลหะกับขั้วโลหะ

ขั้นตอนที่ 2 การไล่ฟองอากาศ

นำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหลอมเหลวแผ่นตะกั่วมาเข้าตู้สุญญากาศที่ 76 Torr เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

ขั้นตอนที่ 3 ทำให้ซิลิโคนยึดติดกับชิ้นงาน

อบที่อุณหภูมิต่ำ (Soft-Baking) 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

ขั้นตอนที่ 4 ทำให้ซิลิโคนแข็งตัวและแห้งสนิท

อบที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง แสดงได้ดังรูปที่ 3.7

รูปที่ 3.7 ลักษณะไดโอดชนิด CELL ที่ผ่านกระบวนการผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 กระบวนการทดสอบ

เป็นกระบวนการทดสอบคุณสมบัติของไดโอดที่ได้ผ่านกระบวนการผลิตเพื่อให้ได้ตามมาตราฐานที่ได้กำหนดขึ้น โดยจะใช้เครื่องมือทดสอบดังต่อไปนี้

1. เครื่อง TVR-600 (Auto Test) ทำหน้าที่แยกแรงดันไฟฟ้าต่างๆ, ช๊อต (Short), แรงดันต่ำกว่ามาตรฐาน ($V_{B_}$Low) และ ผลต่างของแรงดันสองค่าทางด้าน Reverse Bias (DVR) แสดงได้ดังรูปที่ 3.8

2. เครื่อง Curve tracer high volt ทำหน้าที่ดูกราฟ IV-Characteristics แสดงได้ดังรูปที่ 3.9

3. เครื่อง DC-Digital Tester ทำหน้าที่วัดค่า IR ของ Power Diode เช่น Ringing Round เป็นต้น แสดงได้ดังรูปที่ 3.10

รูปที่ 3.8 เครื่อง TVR-600 (Auto Test)

รูปที่ 3.9 เครื่อง Curve tracer high volt

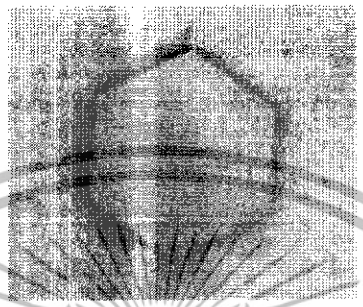
รูปที่ 3.10 เครื่อง DC-Digital Tester

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7 วัสดุที่ใช้ในการผลิตไดโอดกำลังชนิด CELL

3.7.1 Dice

คือแผ่นซิลิคอนที่ได้ทำการสร้างรอยต่อพีและเอ็นไว้แล้วโดยวิธีการแพร่สารเจือหลังจากนั้นจะนำแผ่นซิลิคอนมาทำการตัดตามขนาด โดยขนาดของแผ่นที่จะทำการตัดนั้นจะต้องคำนึงถึงขนาดพื้นที่ต่อกระแส ที่จะนำไปใช้งานด้วยดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 ลักษณะแผ่น Dice ที่ผ่านกระบวนการ Sawing

จากการตรวจสอบคุณสมบัติของแผ่น Dice ที่นำมาจากโรงงานโดยใช้เครื่อง x-ray Spectrum ดังแสดงในรูปที่ 3.12

รูปที่ 3.12 กราฟการวัดชิ้น Dice ด้วย X-ray Spectrum

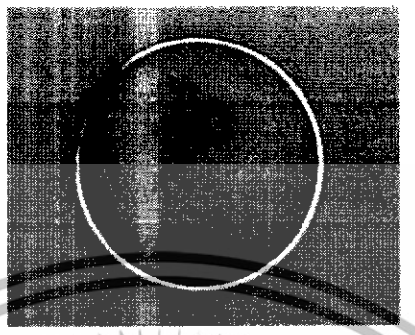
จากรูปที่ 3.12 พบว่า Dice นั้นมีสารโลหะเคลือบอยู่ซึ่งมีองค์ประกอบของธาตุต่างๆดังนี้

C (Carbon)	=	7.97 %
Ne (Neon)	=	1.46 %
P (Phosphorus)	=	4.65 %
Ni (Nikel)	=	85.91%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.2 Slug

คือแผ่นโลหะมีลักษณะเป็นแผ่นวงกลมเล็กๆ โดยคุณสมบัติของแผ่น Slug ก็คือใช้ทำเป็นขั้วโลหะเพื่อต่อใช้งานของไดโอดกำลังชนิด CELL ดังแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ลักษณะแผ่น Slug (ขั้วโลหะ)

จากการตรวจสอบคุณสมบัติของแผ่น Slug ที่นำมาจากโรงงานโดยใช้เครื่อง x-ray Spectrum ดังแสดงในรูปที่ 3.14

รูปที่ 3.14 กราฟการวัด Slug ด้วย X-ray Spectrum

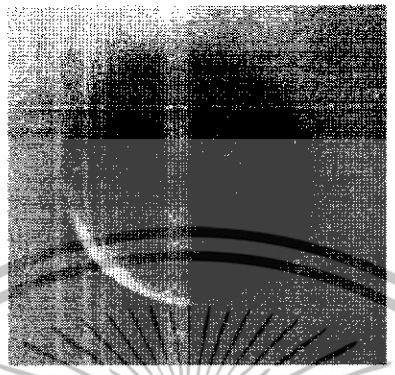
จากรูปที่ 3.14 พบว่าขั้วโลหะ (Slug) มีองค์ประกอบของธาตุต่างๆดังนี้

C (Carbon)	=	5.14 %
Mg (Manganese)	=	0.30 %
Ar (Argon)	=	3.22 %
Ag (Silver)	=	91.34 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.3 Solder

คือแผ่นตะกั่วมีลักษณะเป็นแผ่นวงกลมเล็กๆ โดยคุณสมบัติของ Solder ก็คือเป็นตัวเชื่อมต่อระหว่างแผ่นซิลิคอนที่ได้ทำการสร้าง P-N Junction กับ Slug จุดหลอมเหลวอยู่ที่ 280 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 ลักษณะแผ่น Solder (แผ่นตะกั่ว)

จากการตรวจสอบคุณสมบัติของแผ่น Solder ที่นำมาจากโรงงานโดยใช้เครื่อง x-ray Spectrum ดังแสดงในรูปที่ 3.16

รูปที่ 3.16 กราฟการวัดแผ่นตะกั่วด้วย X-ray Spectrum

จากรูปที่ 3.15 พบว่าแผ่นตะกั่ว (Solder) มีองค์ประกอบของธาตุต่างๆดังนี้

C (Carbon)	=	8.94 %
Pb (Solder)	=	85.69 %
Ag (Silver)	=	1.28 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ปัญหาและแนวทางการแก้ไข

กระบวนการประกอบ Power Diode ชนิด Cell ในปัจจุบันนั้นมีขั้นตอนประกอบไม่ยุ่งยาก โดยนำแผ่นตะกั่ว (Solder) และขั้วโลหะ (Slug) มาประกบกับแผ่นซิลิคอนที่ได้ทำการสร้างรอยต่อพีเอ็นไว้แล้ว (Dice) หลังจากนั้นนำไปทำการให้ความร้อน เพื่อให้ซิลิคอนติดกับแผ่นโลหะเกิดเป็นขั้วของไดโอด หลังจากนั้นจึงนำไปทำการตรวจสอบปริมาณฟองอากาศ ในการตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดนั้นพบว่า คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน ของชิ้นงานบางตัวไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ซึ่งล้วนเป็นสาเหตุของการคัดทิ้งตัวชิ้นงานที่ผลิตขึ้น ปัญหาที่พบมีอยู่ด้วยกัน 5 ประเด็นคือ

1. ปัญหาเรื่อง DVR (Difference Voltage Reverse) ผลต่างของแรงดัน 2 ค่าทางด้าน Reverse Bias เกินจากค่าที่กำหนด
2. ปัญหาเรื่อง Breakdown Voltage Low (VB-Low) แรงดันพังทลายทางด้าน Reverse Bias ต่ำกว่าค่ามาตรฐาน
3. ปัญหาเรื่องฟองอากาศ
4. ปัญหาเรื่อง Short (ตะกั่วที่ใช้ในการ Soldering ไหลมาติดระหว่างโลหะทั้งสองด้าน)
5. ปัญหาเรื่อง Ringing Round (กระแสรั่วทางด้าน Reverse Bias เกิดการสั่นตามเวลา)

4.1 วิธีดำเนินการวิเคราะห์ปัญหา

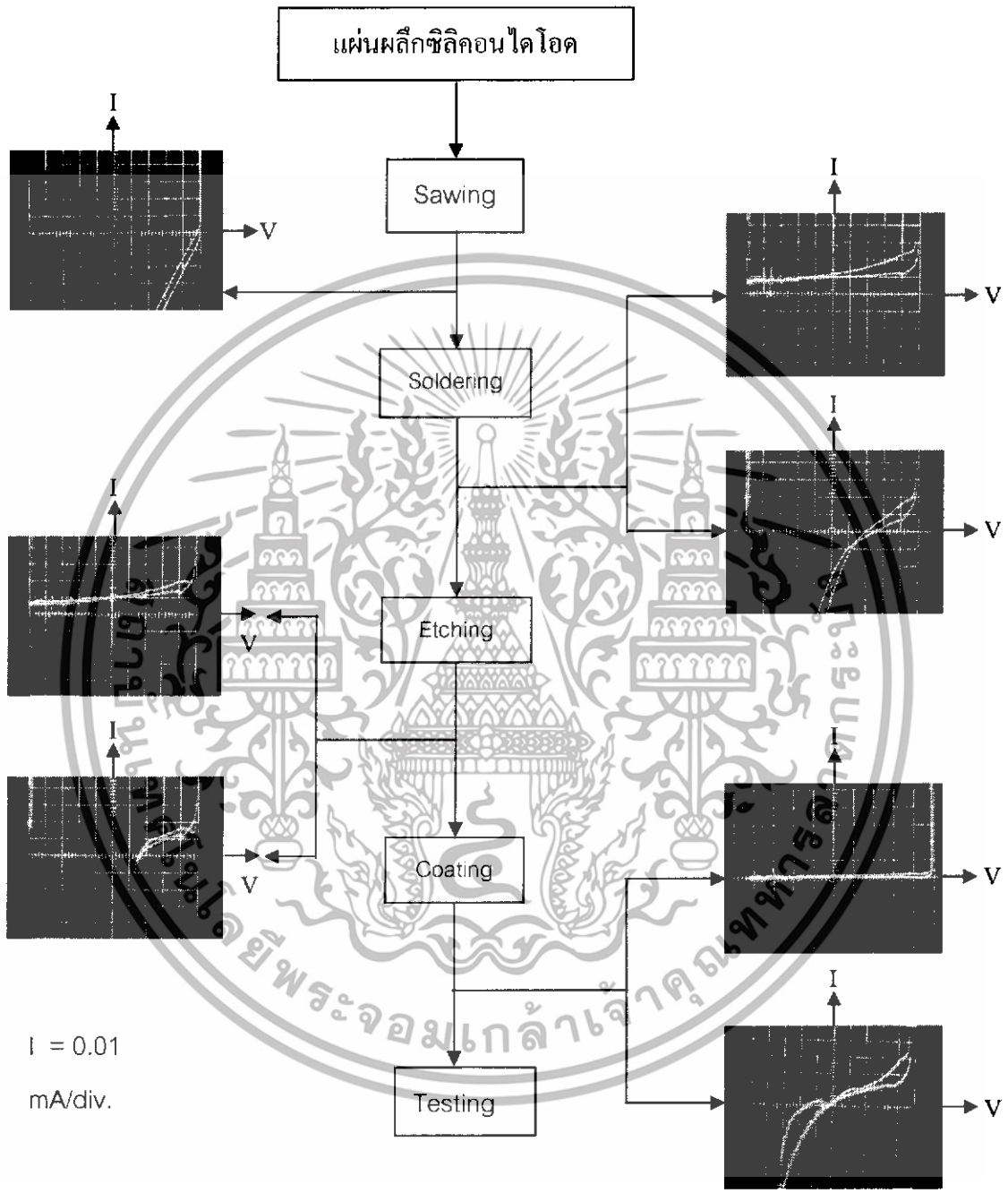
การดำเนินการแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้ทำการทดลองที่บริษัทอุตสาหกรรมอิเล็กโทรนิกส์ (มหาชน)จำกัด (EIC) การดำเนินการแก้ไขปัญหาในครั้งนี้ได้วางแผนดำเนินงานแก้ไขปัญหา เป็นขั้นตอนดังนี้

1. ศึกษาปัญหาในแต่ละกระบวนการผลิต
2. ศึกษาปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตจริง
3. สรุปและวิเคราะห์ปัญหาเบื้องต้น

จากที่ได้ทำการวางแผนไว้แล้วนั้นจึงได้ทำการศึกษาปัญหาในกระบวนการผลิตจริง โดยนำชิ้นงานของแต่ละกระบวนการผลิตมาทำการวัด I-V Characteristics เพื่อทำการเปรียบเทียบ I-V Characteristics ชิ้นงานที่ผลิตขึ้นใน Process เดียวกันเพื่อที่จะนำข้อมูลมาทำการวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1 ศึกษาปัญหาในแต่ละกระบวนการผลิตจริง



รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติ I-V Characteristics แต่ละกระบวนการผลิต

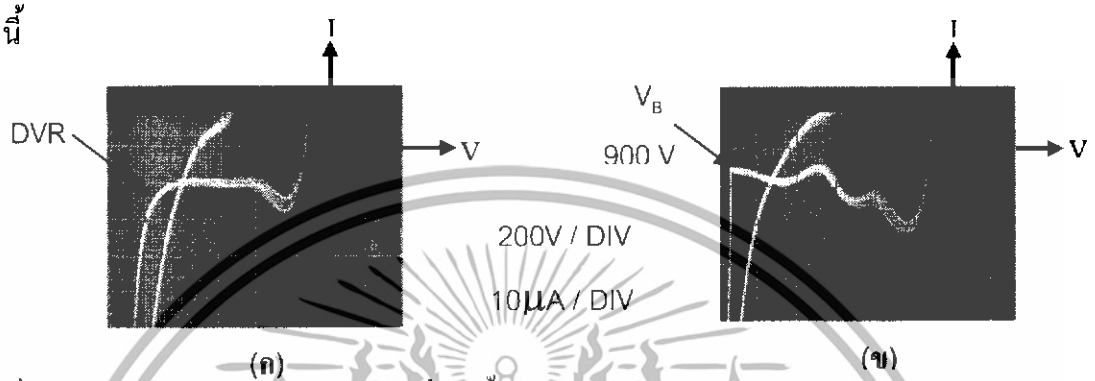
จากที่ได้เก็บตัวอย่างชิ้นงาน ทุกขั้นตอนของกระบวนการผลิต ตามมาตรฐานของบริษัท อุตสาหกรรมอิเล็กโทรนิกส์(มหาชน)จำกัด (EIC) ที่ดำเนินการอยู่แล้วนำมาทำการวัดคุณสมบัติ I-V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

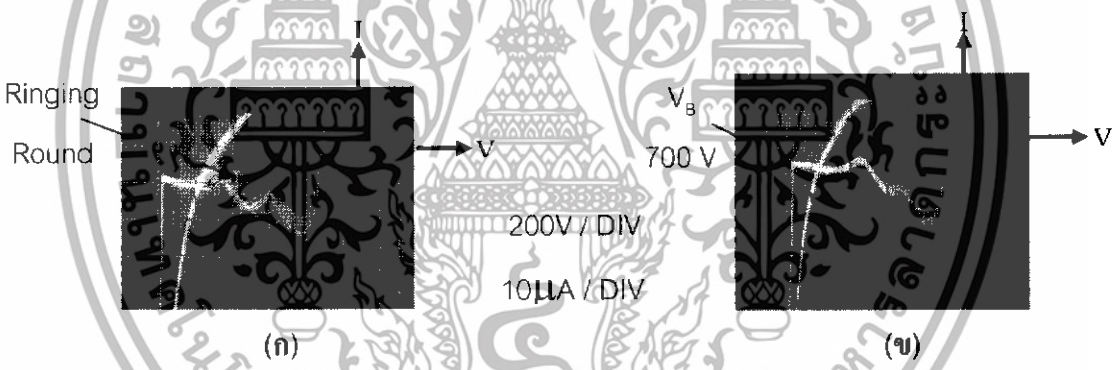
Characteristics ของทุกชิ้นงานตัวอย่างที่เก็บมานั้น ที่ห้องปฏิบัติการศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ สจล. (ERC) โดยสรุปเป็นแผนผังลำดับขั้นตอนกระบวนการผลิต ผลการตรวจสอบแสดงได้ดังรูปที่ 4.1

4.1.2 ศึกษาปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตจริง

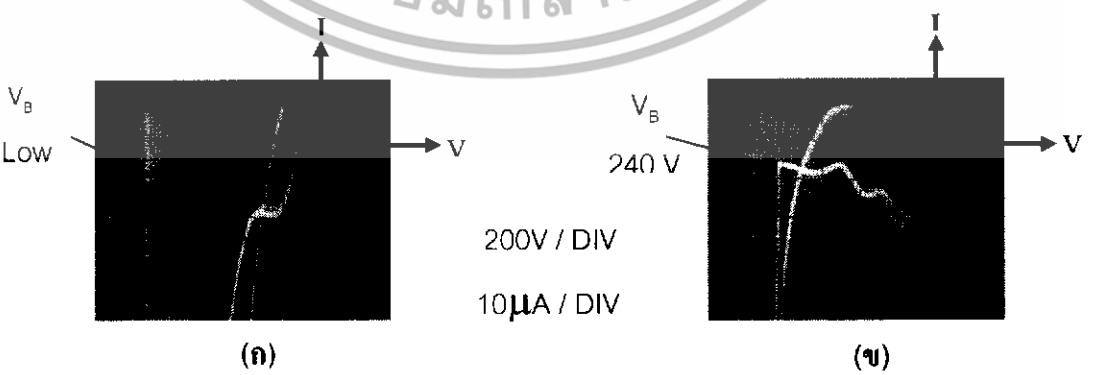
นำชิ้นงานที่ได้ทำการผลิตตามขั้นตอนของบริษัท มาทำการวัดคุณสมบัติไฟฟ้า I-V Characteristics ตามมาตรฐานของบริษัทโดยสรุปเป็นกราฟ I-V Characteristics ที่เกิดปัญหาได้ดังนี้



รูปที่ 4.2 **(ก)** กราฟแสดงผลของ DVR ที่เกิดขึ้นในไดโอด **(ข)** กราฟแสดงคุณสมบัติของไดโอดปกติ V_B=900 V

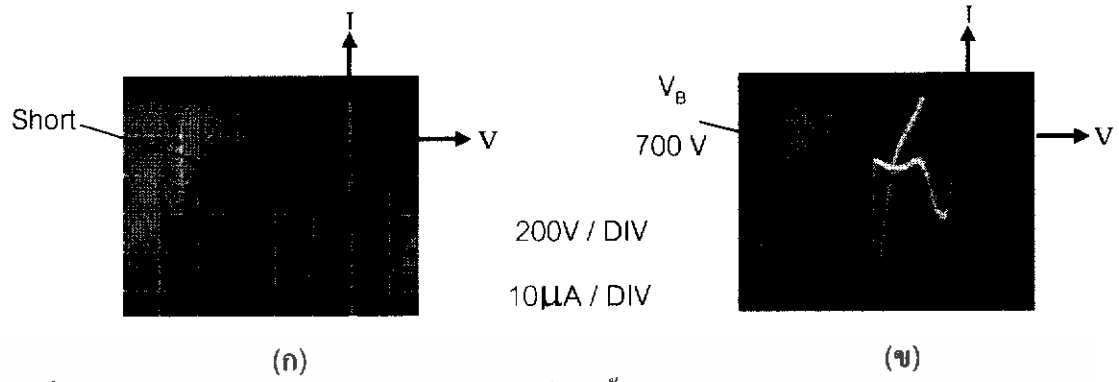


รูปที่ 4.3 **(ก)** กราฟแสดงผลของRinging Roundที่เกิดขึ้นในไดโอด **(ข)** กราฟแสดงคุณสมบัติของไดโอดปกติ V_B=700 V



รูปที่ 4.4 **(ก)** กราฟแสดงคุณสมบัติของ VB-Low ที่เกิดขึ้นในไดโอด **(ข)** กราฟแสดงคุณสมบัติของ ไดโอดปกติ V_B=240 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

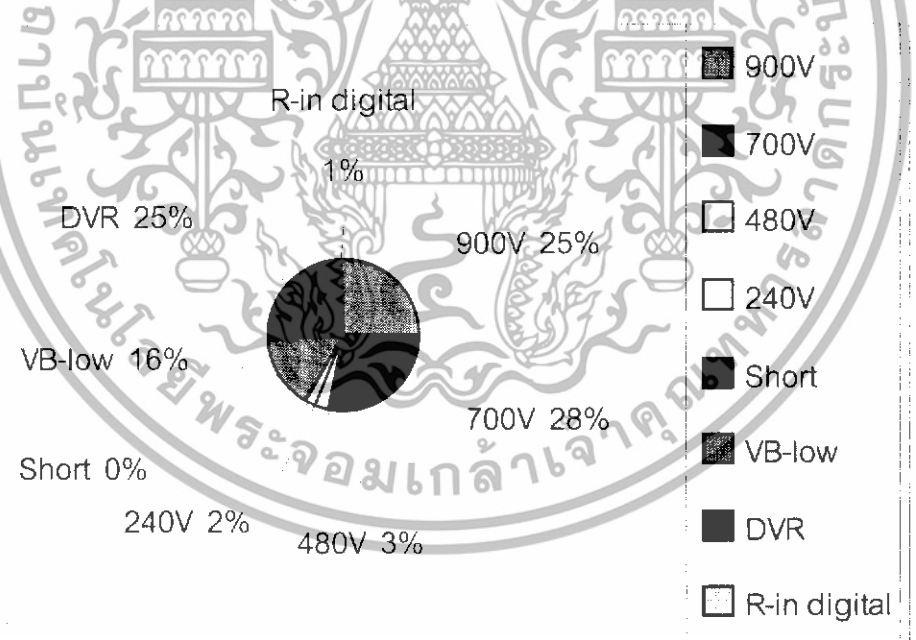


(ก) (ข)

รูปที่ 4.5 **(ก)** กราฟแสดงคุณสมบัติของ Short ที่เกิดขึ้นในไดโอด **(ข)** กราฟแสดงคุณสมบัติของไดโอดปกติ V_B=700 V

จากการที่ได้ไปศึกษาถึงกระบวนการผลิตโดยรวมของบริษัทและได้เก็บข้อมูลบางส่วนที่น่าจะมีประโยชน์ต่องานวิจัยเพื่อจะได้นำมาทดลองและแก้ไขปัญหาให้ถูกจุดต่อไป

ตัวอย่างข้อมูลบางส่วนที่ทำการผลิตจากบริษัทอุตสาหกรรมอิเล็กโทรนิกส์(มหาชน)จำกัด (EIC) ซึ่งแสดงเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 4.6 (ก), (ข)

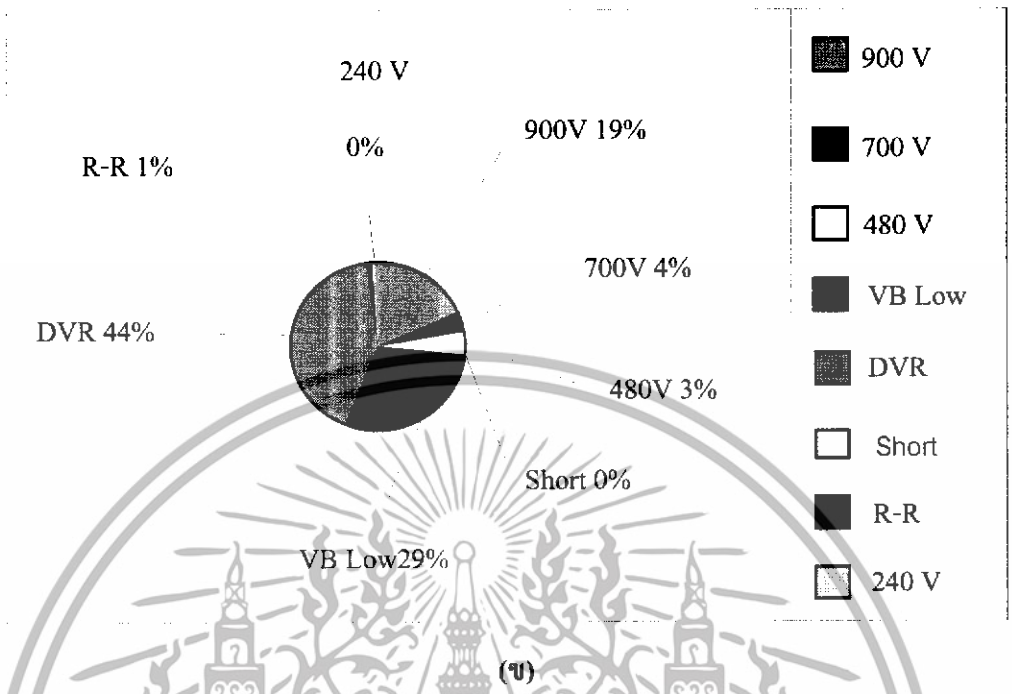


(ก)

การผลิตมีจำนวน 5084 ตัว ทดสอบผ่านตามเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ต้องการเพียง 2920 ตัว คิดเป็น 58% (แจกแจงเป็นค่าแรงดันพังทลายค่าต่างๆได้ดังนี้ V_B = 900V จำนวน 25 % ,V_B = 700V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำนวน 28 % , V_B = 480V จำนวน 3 %, V_B =240V จำนวน 2 %) ซึ่งนับว่ามีปริมาณไดโอดที่เสียอยู่รวมทั้งสิ้นถึง 42% นับว่าเป็นปริมาณที่สูงมาก



(ข)

รูปที่ 4.6 (ก), (ข) กราฟแสดงข้อมูลคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ผ่านและไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน

จากข้อมูลจากข้อมูลของไดโอดทั้ง 2 Lot (ก).พบว่าไดโอดที่ผ่านเข้ากระบวนการผลิตมีจำนวน 5100 ตัว ทดสอบผ่านตามเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ต้องการเพียง 1073 ตัว คิดเป็น 21 เปอร์เซ็นต์ (แจกแจงเป็นค่าแรงดันพังทลายค่าต่างๆ ได้ดังนี้ V_B = 900V จำนวน 19 เปอร์เซ็นต์, VB = 700V จำนวน 4 เปอร์เซ็นต์, V_B = 480V จำนวน 1 เปอร์เซ็นต์) ซึ่งนับว่ามีปริมาณไดโอดที่เสียอยู่รวมทั้งสิ้นถึง 79 เปอร์เซ็นต์ นับว่าเป็นปริมาณที่สูงมาก ตัวอย่างข้อมูล(ข). พบว่าไดโอดที่ผ่านเข้ากระบวนการผลิตมีจำนวน 5100 ตัว ทดสอบผ่านตามเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ต้องการเพียง 1200 ตัว คิดเป็น 26% (แจกแจงเป็นค่าแรงดันพังทลายค่าต่างๆ ได้ดังนี้ V_B = 900V จำนวน 19 เปอร์เซ็นต์, VB = 700V จำนวน 4 เปอร์เซ็นต์, V_B = 480V จำนวน 3 เปอร์เซ็นต์) ซึ่งนับว่ามีปริมาณไดโอดที่เสียอยู่รวมทั้งสิ้นถึง 79 เปอร์เซ็นต์ นับว่าเป็นปริมาณที่สูงมากเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 สรุปและวิเคราะห์ปัญหาเบื้องต้น

จากข้อมูล I-V Characteristics ของชิ้นงานที่ผลิตพบว่า หลังเสร็จสิ้นกระบวนการผลิต I-V Characteristics ของบางชิ้นงานจะเปลี่ยนแปลงโดยมีกระแสรั่วมากขึ้น หรือมีแรงดันพังทลาย (Breakdown Voltage) ลดลง ดังตัวอย่างที่สายการผลิตสำรวจไว้สำหรับไดโอดชนิด Cell ขนาด 25A ซึ่งคาดหวังที่จะได้ค่าแรงดันพังทลายที่สูงขึ้น จากการสังเกตุพบว่าในการผลิตนั้นมีฟองอากาศเกิดขึ้นระหว่างหน้าสัมผัสของโลหะกับซิลิคอนมีจำนวนมากซึ่งอาจจะเป็นสาเหตุของชิ้นงานที่ถูกคัดทิ้ง จากข้อมูลของไดโอดทั้ง 2 Lot พบว่าไดโอดที่ทดสอบผ่านตามเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ต้องการมีเพียงประมาณ 23 เปอร์เซ็นต์ เท่านั้นจึงควรหาวิธีเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตให้สูงขึ้นนอกจากนั้นจากการเปิดชิ้นงานยังพบฟองอากาศจำนวนมาก ซึ่งอาจเป็นสาเหตุของการเกิด DVR, VB-low ,Ringing Round, และ Short เป็นต้น

4.2 ลักษณะของกราฟ I-V Characteristic ของไดโอดที่ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานในทางอุตสาหกรรม

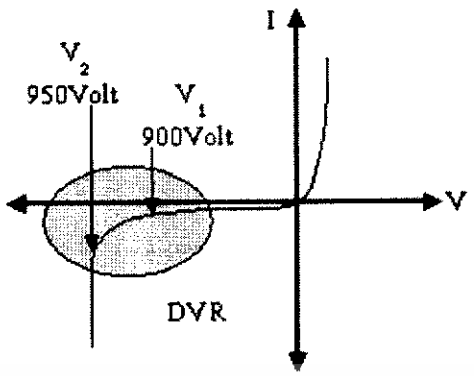
ลักษณะไดโอดที่เกิดการเสียหายหลังจากการประกอบไดโอดกำลังชนิดเซลล์ ในโรงงานอุตสาหกรรม มีลักษณะการเกิดความเสียหายในตัวไดโอดอยู่ 5 ประเภทดังนี้

1. DVR (Different Voltage Reverse Bias)
2. VB-Low
3. Short
4. Ringing Round
5. High leakage current after baking

4.2.1 DVR

หมายถึงผลต่างของแรงดัน 2 ค่าทางด้าน Reverse Bias เกินจากค่าที่ทำการกำหนดไว้ ณ เครื่องมือที่ทำการตรวจสอบไดโอด ซึ่งตามทฤษฎีของไดโอดโดยทั่วไปแล้วจะเรียกว่า Soft breakdown แต่ถ้าในโรงงานอุตสาหกรรมแล้วจะเรียกว่า DVR แสดงได้ดังรูปที่ 4.7 กราฟ I-V Characteristics แสดงการวัดค่า DVR ในอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

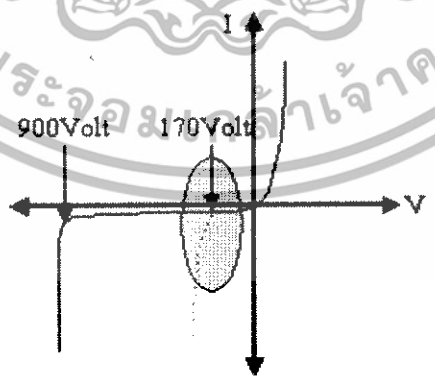


รูปที่ 4.7 การวัดค่า DVR ในทางอุตสาหกรรม

ในการวัดค่า DVR นั้นเป็นการวัดค่าแรงดัน 2 ค่าทางด้าน Reverse bias บริเวณช่วง Breakdown Voltage จากรูปจะแสดงให้เห็นค่า V_1, V_2 จะถูกกำหนดตั้งค่าไว้ที่เครื่องมือวัด ค่าที่ทำการตั้งก็จะเป็นไปตามมาตรฐานของบริษัทอย่างเช่น V_1 = 900 Volt, V_2 = 950 Volt ผลต่างเท่ากับ 50 Volt เป็นต้น ซึ่งถ้าไดโอดตัวใดไม่ผ่านตามเกณฑ์ก็จะถูกเครื่องมือทำการคัดออก

4.2.2 VB-Low

หมายถึง Volt Breakdown ที่วัดได้ต่ำกว่าค่าที่ตั้งไว้ที่เครื่องวัด อย่างเช่นตั้งค่าไว้ที่เครื่องถ้า VB ต่ำกว่า 100 Volt ให้ทำการคัดออก แต่ไม่ได้หมายความว่าไดโอดที่ถูกทำการคัดออกนั้นเป็นไดโอดที่เสียแล้ว เพียงแต่ว่าไดโอดตัวนั้น VB ต่ำเกินกว่าที่จะนำไปใช้ในงานเฉพาะทางได้ อาจจะนำไปใช้ในงานอื่นได้แสดงได้ดังรูปที่ 4.8

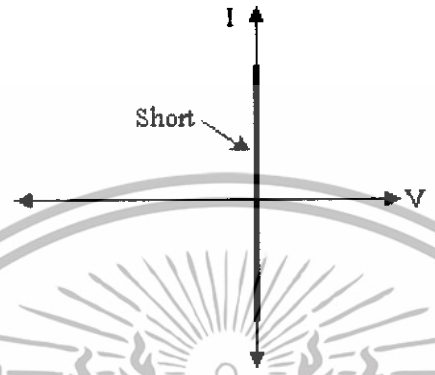


รูปที่ 4.8 การวัดค่า VB-Low ในทางอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 Short

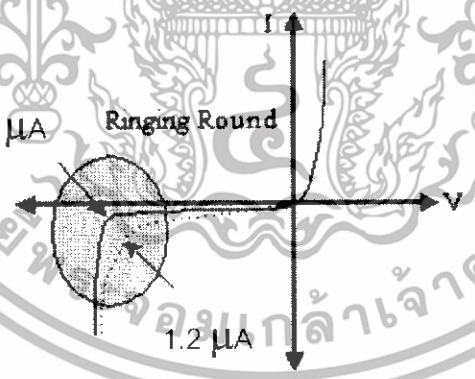
หมายถึง เกิดจากการประกอบไดโอดเมื่อตะกั่วไหลมาติดกันก็ทำให้เกิดการ Short ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะไม่พบมากนักซึ่งเป็นส่วนน้อยที่เกิดขึ้น สาเหตุส่วนใหญ่มาจากการวางแผ่นตะกั่วไม่ตรงชิ้นงาน คือมีการเหลื่อมระหว่างชิ้นงานเกิดขึ้นแสดงได้ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ไดโอดที่เกิดการ Short ในทางอุตสาหกรรม

4.2.4 Ringing Round

หมายถึงกระแสรั่วทางด้าน Reverse bias เกิดการเปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งการเปลี่ยนแปลงจะเป็นแบบ Swing แสดงได้ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 การเกิด Ringing Round ในทางอุตสาหกรรม

ในการวัดค่า Ringing Round นั้นเป็นการวัดค่ากระแสรั่วทางด้าน Reverse bias ว่าเกินจากค่าที่กำหนดไว้หรือไม่ โดยทั่วไปแล้วทางบริษัทจะทำการตั้งค่าไว้ที่ไม่เกิน 1 μA แต่ในกรณีของ Ringing Round ขณะทำการวัดกระแสรั่วไม่เกิน 1 μA แต่เมื่อเวลาผ่านไปกระแสรั่วจะเพิ่มขึ้นเป็น 1.2 μA เมื่อเวลาผ่านไปกระแสรั่วจะลดลง 0.6 μA จะเป็นอย่างนี้อย่างต่อเนื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.5 High leakage current after baking

หมายถึง หลังจากนำชิ้นงานไปทำการอบที่อุณหภูมิตามมาตรฐานของบริษัทแล้วนำมาวัด พบว่ากระแสรั่วทางด้าน Reverse bias มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ดังตัวอย่าง

ตารางที่ 4.1 **ผลของ** High leakage current after baking

ตัว / ที่ทดลอง	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ก่อนอบ	0.42 μA	0.45	0.42	0.41	0.38	0.37	0.35	0.41	0.35	0.36
หลังอบ	0.81 μA	0.87	0.61	0.75	0.52	0.73	0.74	0.84	0.74	0.76

จากข้อมูลพบว่ากระแสรั่วทางด้าน Reverse bias ก่อนทำการ Baking กระแสรั่วยังมีแนวโน้มว่ายังต่ำอยู่ แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบกับข้อมูลหลังอบจะเห็นว่ากระแสรั่วทางด้าน Reverse bias จะเพิ่มขึ้นจากเดิมซึ่งเป็นปัญหาหนึ่งในทางอุตสาหกรรม

สาเหตุที่อาจจะทำให้ไดโอดเกิดปัญหาต่างๆขึ้นในกระบวนการผลิตน่าจะมา จากสาเหตุดังรูปที่ 4.11

4.3 ปัญหาเรื่องฟองอากาศ

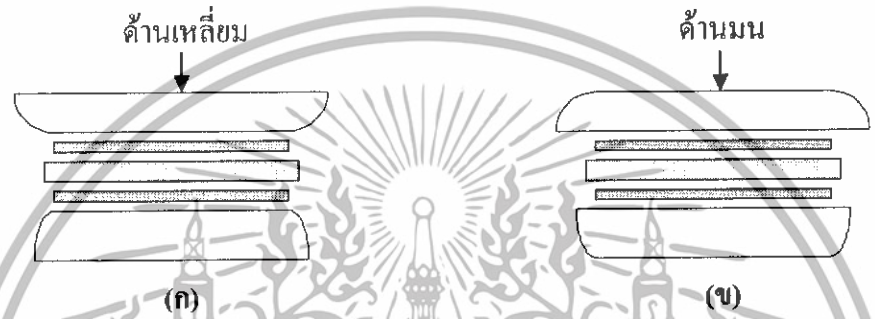
ฟองอากาศที่เกิดขึ้นนี้ จะเกิดขึ้นหลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการหลอมเหลวแผ่นตะกั่ว (Soldering) เพื่อต้องการให้ขั้วโลหะ (Slug) ยึดติดกับแผ่นซิลิคอน (Dice) ที่ได้ทำการสร้างขั้วโลหะบางๆ (Plating) ไว้แล้ว และเมื่อนำไดโอดที่ผ่านกระบวนการหลอมเหลวแผ่นตะกั่วแล้วนำมาแกะออกดูจะพบว่ามีฟองอากาศอยู่บริเวณภายในสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.11

รูปที่ 4.11 ลักษณะของฟองอากาศที่เกิดขึ้นภายในไดโอดชนิด CELL

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ปัญหาเรื่องสนามไฟฟ้าบริเวณขอบของขั้วโลหะ

การเกิดสนามไฟฟ้าบริเวณขอบของขั้วโลหะบริเวณที่เป็นเหลี่ยม ซึ่งสามารถอธิบายเกี่ยวกับขั้วโลหะ (Slug) ได้ดังนี้ขอบของ Slug ซึ่ง Slug แต่ละแผ่นจะมีด้านที่มีความมนและด้านที่มีความเป็นเหลี่ยมไม่ว่าจะเป็น Slug ด้านบนหรือ Slug ด้านล่างก็จะมีลักษณะคล้ายกันซึ่งจะแตกต่างกันตรงที่มีความหนาและความกว้างไม่เท่ากัน นอกจากนั้นแล้วยังสังเกตได้อีกว่าการประกบ Slug นั้นยังแตกต่างกันซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.12 (ก), (ข)

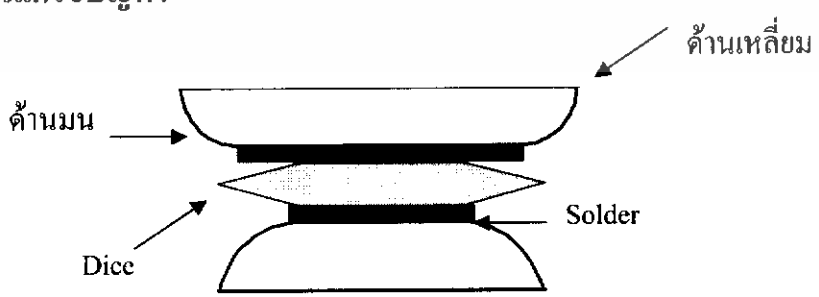


รูปที่ 4.12 ลักษณะ Slug ด้านที่มีเหลี่ยมและด้านที่มน **(ก)** การประกบ Slug แบบด้านมนเข้าหากัน **(ข)** การประกบ Slug แบบด้านเหลี่ยมเข้าหากัน

4.5 ปัญหาการกัดกร่อนบริเวณขอบของซิลิคอน ในกระบวนการกัดแผ่นซิลิคอน

ในกระบวนการ Etching จะเป็นกระบวนการกัดกร่อนบริเวณขอบของซิลิคอนหลังจากที่ได้ผ่านกระบวนการต่างๆ มาแล้วดังข้างต้น เพื่อต้องการให้บริเวณขอบของซิลิคอนมีความเรียบมากขึ้นพร้อมกับการกัดตะกั่วที่อาจจะไหลมาติดบริเวณขอบของจังชั่น เพื่อไม่ให้เกิดการช็อตจังชั่นของไดโอดด้วย ถ้าหาเวลาที่ไม่เหมาะสมในการกัดอาจจะทำให้พื้นที่ของกระแสมีค่าลดลง อาจจะทำให้เป็นสาเหตุของงานถูกคัดทิ้งมากขึ้นเป็นต้น

4.6 แนวทางการแก้ไขปัญหา



รูปที่ 4.13 ลักษณะการประกอบไดโอดชนิด CELL

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.13 สังเกตได้ว่า Slug นั้นสามารถที่จะทำการเปลี่ยนรูปแบบการประกบได้ และสามารถที่จะเพิ่มแผ่นตะกั่วได้ รวมถึงการเพิ่มน้ำหนักกดให้มากขึ้นได้นอกจากนั้นยังสามารถที่จะลดหรือเพิ่มเวลาในการ Etching ได้ด้วย จึงได้วางแนวทางในการแก้ไขปัญหาไว้ทั้งหมด 6 วิธีดังนี้

1. เพิ่มความหนาของแผ่น Solder
2. เพิ่มแผ่นกดทับให้มีแรงกดมากขึ้น
3. การเจาะรู ตรงกลาง Slug ทั้ง Slug บนและล่าง
4. ทำการแก้ไขโดยการเพิ่มขั้นตอนการ Anneal ก่อนการ Soldering
5. แก้ไขลักษณะการประกบ Slug
6. เปลี่ยนเวลาการ Etching เพื่อหาเวลาที่เหมาะสม

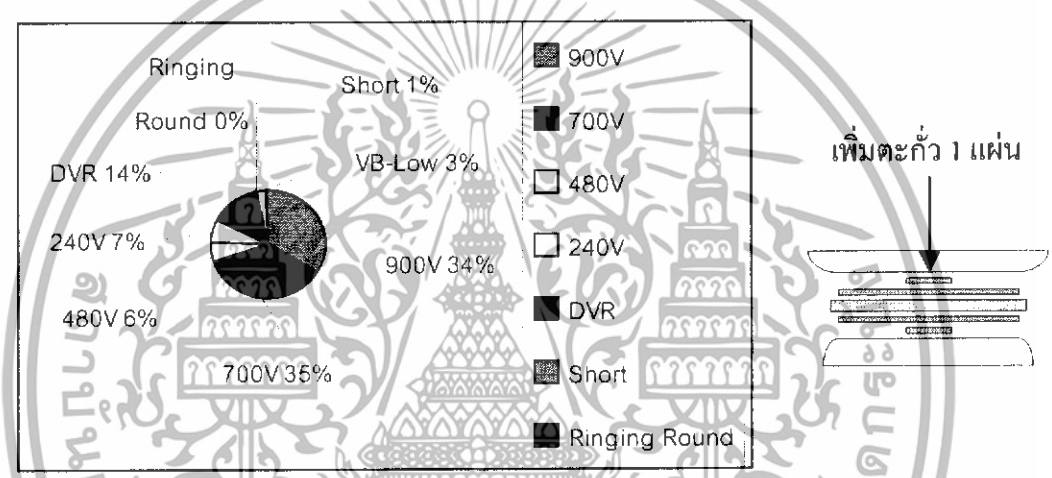
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การทดลอง และผลการทดลอง

5.1 การทดลองแก้ไขปัญหาวิธีที่หนึ่ง เพิ่มความหนาของแผ่นตะกั่วโดยเพิ่มอีก 1 แผ่นที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่าเดิม4 เท่า

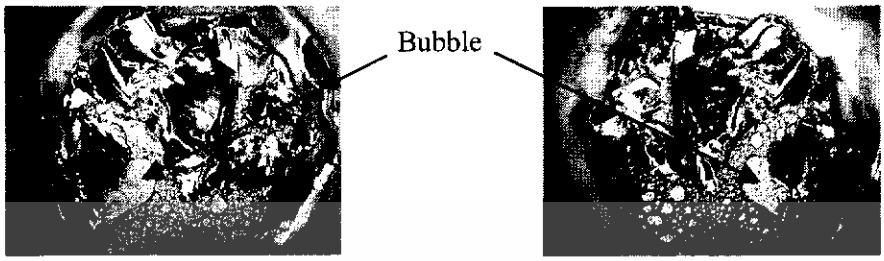
เพิ่มความหนาของแผ่นตะกั่ว (แผ่นโลหะตะกั่วผสม ดีบุกและเงิน)โดยเพิ่มอีก 1 แผ่นที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่าเดิม 4 เท่าพบว่าจะทำให้ชิ้นงานที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานมีจำนวนเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 กราฟคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานโดยใช้วิธีเพิ่มตะกั่วอีก 1 แผ่น

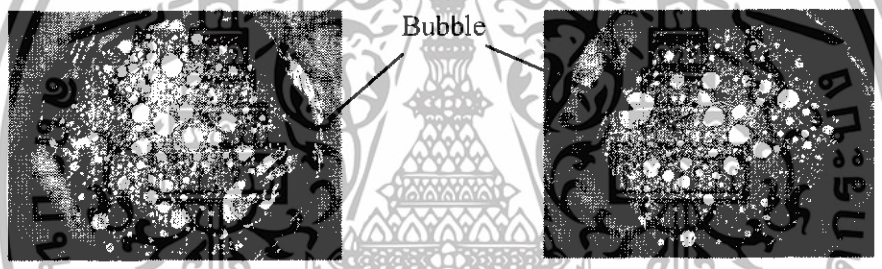
จากรูปที่ 5.1 ทำการทดลองไดโอดจำนวน 100 ตัว พบว่าไดโอดที่ผ่านเข้ากระบวนการผลิตนั้นสามารถ ทดสอบผ่านตามเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ต้องการคิดเป็น 82 เปอร์เซ็นต์ (แจกแจงเป็นค่าแรงดันพังทลายค่าต่างๆได้ดังนี้ V_B = 900V จำนวน 34 เปอร์เซ็นต์,V_B = 700V จำนวน 35 เปอร์เซ็นต์, V_B = 480V จำนวน 6 เปอร์เซ็นต์, V_B = 240V จำนวน 7 เปอร์เซ็นต์) และไม่ผ่านเกณฑ์มีเพียง 18 เปอร์เซ็นต์ หลังจากได้ทำการทดลองและวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าตามมาตรฐานแล้วนั้น จึงได้นำชิ้นงานบางส่วนจากการทดลองมาทำการตรวจสอบปริมาณฟองอากาศแสดงได้ดังรูปที่ 5.14 และรูปที่ 5.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) (ข)

รูปที่ 5.2 ลักษณะฟองอากาศเมื่อทำการเพิ่มตะกั่ว 2 แผ่น **(ก)** ลักษณะฟองอากาศบริเวณขั้วโลหะด้านล่าง **(ข)** ลักษณะฟองอากาศบริเวณขั้วโลหะด้านบน



(ก) (ข)

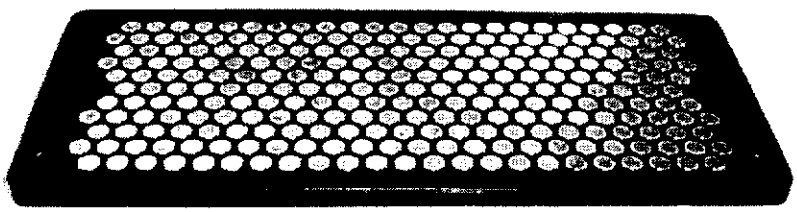
รูปที่ 5.3 ลักษณะฟองอากาศเมื่อใช้ตะกั่ว1แผ่น **(ก)** ลักษณะฟองอากาศบริเวณขั้วโลหะด้านล่าง **(ข)** ลักษณะฟองอากาศบริเวณขั้วโลหะด้านบน

จากการแก้ไขปัญหาโดยวิธีที่ 5. ซึ่งเป็นการเพิ่มแผ่นตะกั่วอีกหนึ่งแผ่นที่มีขนาดเล็กกว่าเดิม 4 เท่า พบว่าสามารถแก้ไขปัญหาเกี่ยวกับฟองอากาศได้และมี เปอร์เซ็นต์ผ่านเกณฑ์มาตรฐานมากขึ้น ต่อไปเป็นการทดลองแก้ไขปัญหาวิธีที่ 5.6

5.2 การทดลองแก้ไขปัญหาวิธีที่สอง

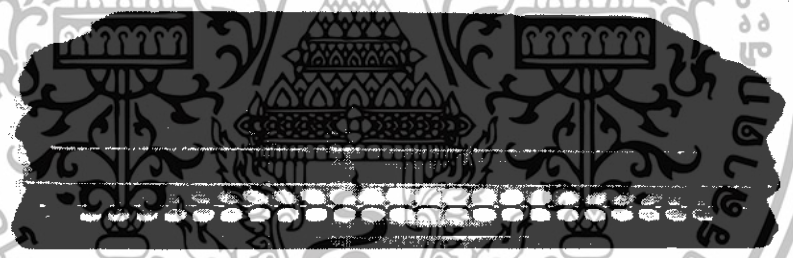
ใช้แผ่นตะกั่วจำนวน 1 แผ่นเท่าเดิมแต่เพิ่มน้ำหนักกดมากขึ้น โดยเพิ่มแผ่นกดทับอีก 1 แผ่นแสดงได้ดังรูปที่ 5.6 ผลปรากฏว่าอุณหภูมิที่ใช้ปกตินั้นไม่เพียงพอที่จะหลอมแผ่นตะกั่วได้ (ซึ่งวิธีนี้ไม่สามารถนำมาใช้ในการทดลองได้เนื่องจากอุณหภูมิไม่เพียงพอที่จะหลอมเหลวตะกั่วได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.4 ลักษณะการวางชิ้นงานบนแผ่น Boat ก่อนกระบวนการหลอมเหลวแผ่นตะกั่ว

รูปที่ 5.5 ลักษณะการวางแผ่นกดทับ 1 แผ่นด้วยกระบวนการผลิตอุตสาหกรรม



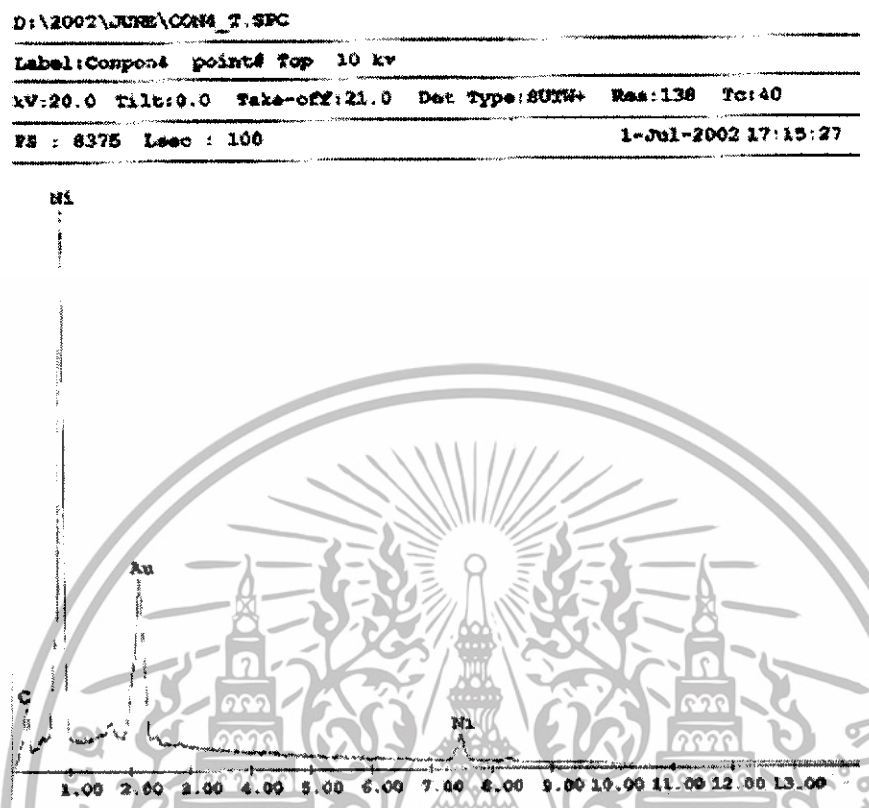
รูปที่ 5.6 ลักษณะการวางแผ่นกดทับ 2 แผ่น

การแก้ปัญหาด้วยวิธีทั้งสองที่กล่าวมาจึงไม่สามารถทำได้เนื่องจากไม่สามารถหาวัสดุSolder ที่มีความหนาที่เหมาะสมได้และไม่สามารถเพิ่มอุณหภูมิในกระบวนการหลอมเหลวแผ่นตะกั่วได้ เพราะจะมีผลกระทบกับขั้นตอนการผลิตของสายงานปกติ

5.3 การทดลองแก้ไขปัญหาวิธีที่สามการ Anneal ก่อนกระบวนการ Soldering

ทำการแก้ไขโดยการเพิ่มขั้นตอนการ Anneal ก่อนกระบวนการหลอมเหลวแผ่นตะกั่วเพื่อให้โลหะที่เคลือบมาจากโรงงานผู้ผลิตยึดติดสัมผัสกับแผ่นผลึกซิลิคอนให้ดีที่สุด ดังนั้นจึงต้องนำแผ่นผลึกซิลิคอนไดโอดไปทำการตรวจสอบชนิดของโลหะที่เคลือบเป็นขั้วสัมผัสด้วยวิธี x-ray Spectroscopy แสดงผลการตรวจสอบได้ดังรูปที่ 5.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.7 การวิเคราะห์โลหะที่เคลือบบนผิวผลึกซิลิคอนด้วย x-ray Spectroscopy

จากรูปที่ 5.7 ซึ่งผลการตรวจสอบพบว่าเป็นโลหะนิเกิลและทองคำ ดังนั้นจึงกำหนดอุณหภูมิในการแอนนีลไม่เกิน 400 องศาเซลเซียส ซึ่งในการหาอุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสมกับการAnnealing จะกำหนดดังนี้

ก. 200 องศาเซลเซียส 1 นาที

ข. 250 องศาเซลเซียส 1 นาทีและ 5 นาที

ค. 300 องศาเซลเซียส 1 นาทีและ 5 นาที

ง. 350 องศาเซลเซียส 1 นาทีและ 5 นาที

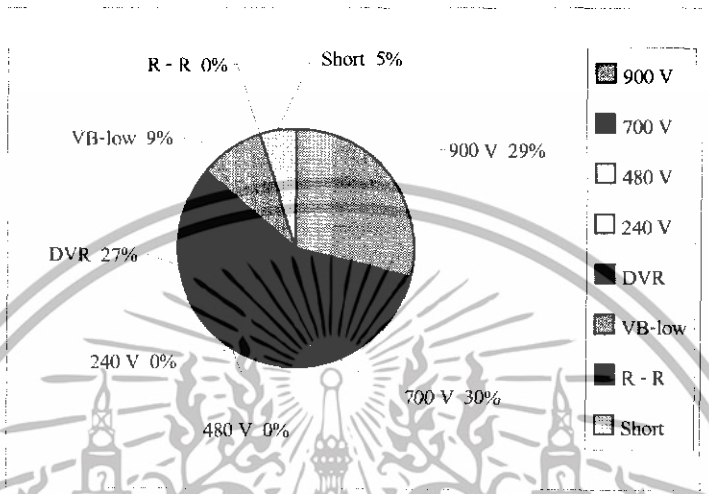
จ. 400 องศาเซลเซียส 1 นาทีและ 5 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.8 แสดงผลของการAnneal

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

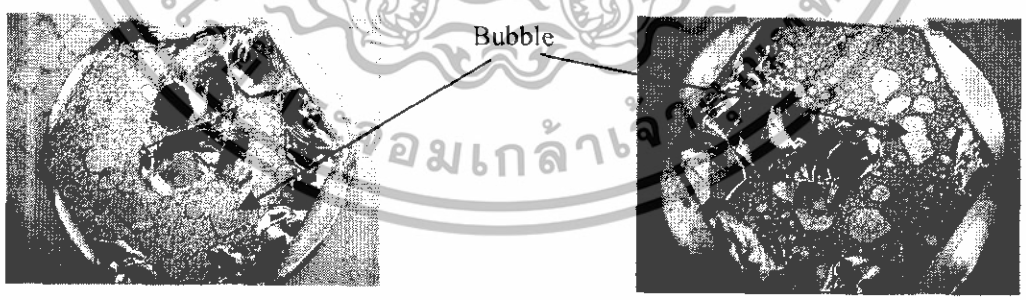
จากข้อมูลการแอนนีลก่อนกระบวนการหลอมเหลวแผ่นตะกั่ว ดังข้างต้นจึงได้ทำการทดลองโดยนำชิ้นงานจำนวน 100 ตัวมาทำการทดลองตามกระบวนการผลิตปกติแสดงได้ดังรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 กราฟแสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานโดยใช้วิธีแอนนีลก่อนกระบวนการหลอมเหลวแผ่นตะกั่ว

จากรูปที่ 5.9 พบว่าไดโอดที่ผ่านเข้ากระบวนการผลิตมีจำนวน 100 ตัว ทดสอบผ่านตามเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ต้องการคิดเป็น 59 %

หลังจากได้ทำการทดลองและวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าตามมาตรฐานแล้วนั้น จึงได้นำชิ้นงานบางส่วนจากการทดลองมาทำการตรวจสอบปริมาณฟองอากาศแสดงได้ดังรูปที่ 5.10



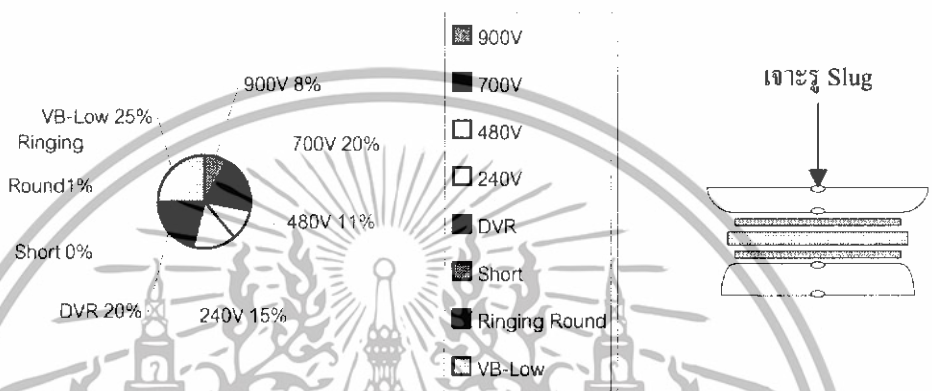
(ก) **(ข)**

รูปที่ 5.10 ลักษณะฟองอากาศเมื่อทำการแอนนีลโดยใช้แผ่นตะกั่ว 1 แผ่น **(ก)** ลักษณะฟองอากาศบริเวณขั้วโลหะด้านล่าง **(ข)** ลักษณะฟองอากาศบริเวณขั้วโลหะด้านบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

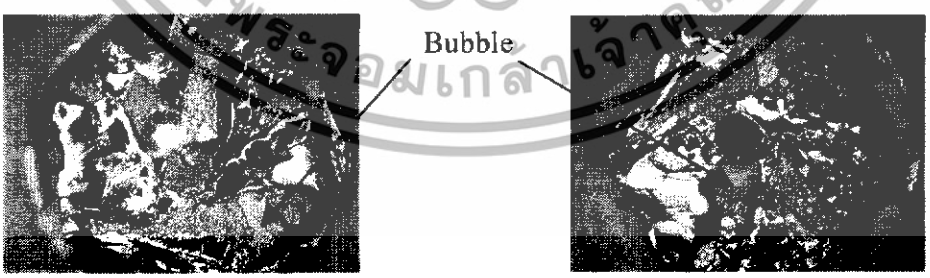
5.4 การทดลองแก้ไขปัญหาวิธีที่สี่ การลดจำนวนฟองอากาศโดยการเจาะรูตรงกลางขั้วโลหะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 มิลลิเมตร

ซึ่งเป็นการเจาะขั้วโลหะทั้งด้านบนและด้านล่าง ก่อนนำไปเข้ากระบวนการหลอมเหลวแผ่นตะกั่วโดยใช้แผ่นตะกั่ว1แผ่นและนำชิ้นงานไปตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าพบว่าดีขึ้นเพียงเล็กน้อย เท่านั้น แสดงได้ดังรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.11 กราฟคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานโดยใช้วิธีเจาะรู ขั้วโลหะบน, ล่าง

จากรูปที่ 5.11 พบว่าไดโอดที่ผ่านเข้ากระบวนการผลิตมีจำนวน 100 ตัว ทดสอบผ่านตามเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ต้องการคิดเป็น 54 เปอร์เซ็นต์ (แจกแจงเป็นค่าแรงดันพังทลายค่าต่างๆได้ดังนี้ V_B = 900V จำนวน 8 เปอร์เซ็นต์, V_B = 700V จำนวน 20 เปอร์เซ็นต์, V_B = 480V จำนวน 11 เปอร์เซ็นต์, V_B = 240V จำนวน 15 เปอร์เซ็นต์) ซึ่งนับว่ามีปริมาณไดโอดที่เสียอยู่รวมทั้งสิ้นถึง 46 เปอร์เซ็นต์ นับว่าเป็นปริมาณที่สูงมาก หลังจากได้ทำการทดลองและวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าตามมาตรฐานแล้วนั้น จึงได้นำชิ้นงานบางส่วนจากการทดลองมาทำการตรวจสอบ ปริมาณฟองอากาศแสดงได้ดังรูปที่ 5.12



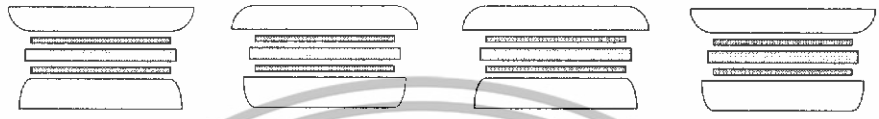
(ก) **(ข)**

รูปที่ 5.12 ลักษณะฟองอากาศเมื่อทำการเจาะรูSlugบนและล่าง โดยใช้แผ่นตะกั่ว1แผ่น **(ก)** ลักษณะฟองอากาศบริเวณขั้วโลหะด้านล่าง **(ข)** ลักษณะฟองอากาศบริเวณขั้วโลหะด้านบน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

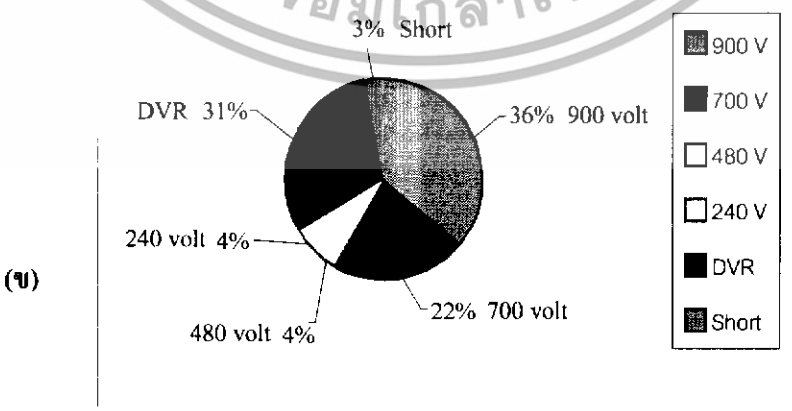
5.5 การทดลองแก้ไขปัญหาวิธีที่ห้า เปรียบเทียบการประกบขั้วโลหะทั้ง 4 แบบเพื่อหารูปแบบการประกบขั้วโลหะที่เหมาะสมที่สุด

จากการสังเกตพบว่า Slug แต่ละด้านจะมีด้านที่เป็นเหลี่ยมและด้านมน ดังนั้นจึงพิจารณาการประกบ Slug ได้เป็น 4 แบบดังรูปที่ 5.16



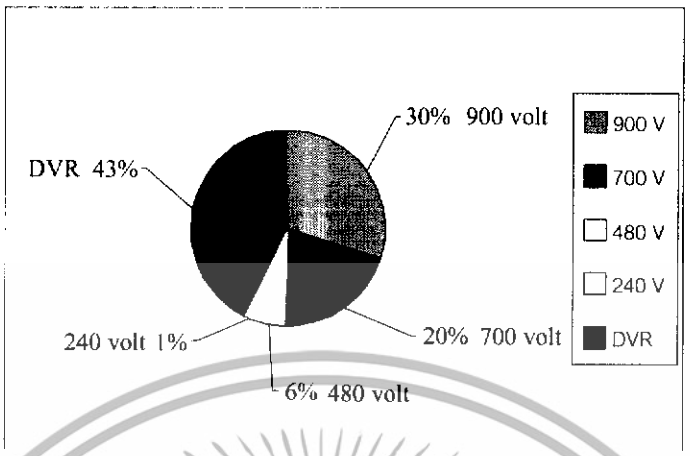
รูปที่ 5.13 การเรียง Slug ทั้ง 4 แบบก่อนกระบวนการ Soldering

การทดลองการประกบ Slug แบบ(ก), (ข), (ค) และ(ง) ได้ทำการทดลองแบบละ 100 ตัว ซึ่งสามารถแสดงเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 5.17 (ก) – (ง)

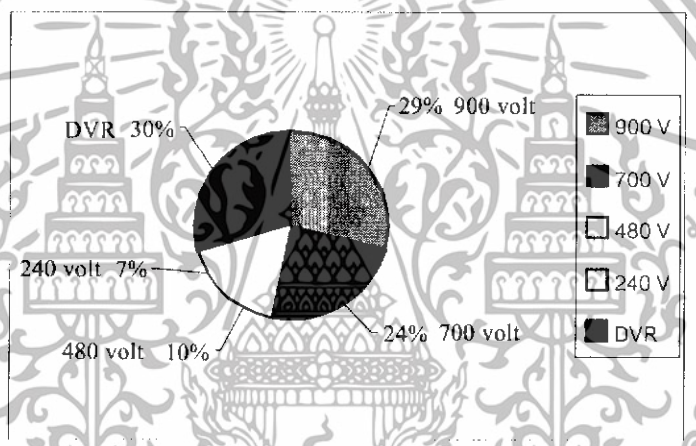


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ค)



(ง)



รูป ที่5.14 กราฟแสดงเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของการประกบ Slug แบบ (ก) - (ง)

จากกราฟในรูปที่ 5.14 **(ก)** ได้ทำการหันหน้า Slug ที่มีด้านมลเข้าหากันพบว่าไดโอดทดสอบผ่านตามเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ต้องการมีจำนวน 64 เปอร์เซ็นต์

จากกราฟในรูปที่ 5.14 **(ข)** ได้ทำการหันหน้า Slug ที่มีด้านเหลี่ยมเข้าหากันพบว่าไดโอดทดสอบผ่านตามเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ต้องการมีจำนวน 66 เปอร์เซ็นต์

จากกราฟในรูปที่ 5.14 **(ค)** ได้ทำการหันหน้า Slug ที่มีด้านเหลี่ยมไว้ด้านบนส่วนด้านมลไว้ด้านล่างประกบเข้าหากันพบว่าไดโอดทดสอบผ่านตามเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้ามีจำนวน 57 เปอร์เซ็นต์

จากกราฟในรูปที่ 5.14 (ง) ได้ทำการหันหน้า Slug ที่มีด้านมลไว้ด้านบนส่วนด้านเหลี่ยมไว้ด้านล่างประกบเข้าหากันพบว่าไดโอดทดสอบผ่านตามเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้ามีจำนวน 70 เปอร์เซ็นต์

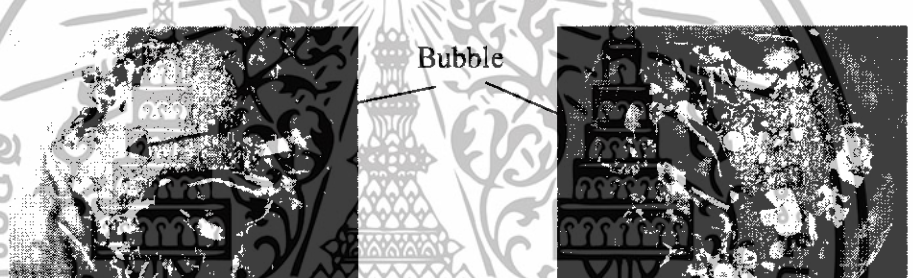
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของชิ้นงานทั้ง 4 แบบสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 5.1

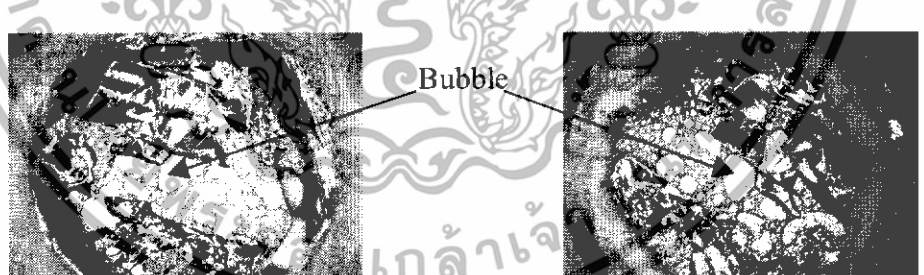
ตารางที่ 5.1 สรุปเปรียบเทียบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของชิ้นงานทั้ง 4 แบบ

แบบที่	900 Volt	700 Volt	480 Volt	240 Volt	DVR	VB-Low	Short
(ก)	39%	18%	5%	2%	30%	0	6%
(ข)	36%	22%	4%	4%	31%	0	3%
(ค)	30%	20%	6%	1%	43%	0	0
(ง)	29%	24%	10%	7%	30%	0	0

หลังจากนั้นนำชิ้นงานที่ทำการประกบทั้ง 4 แบบและได้ผ่านขั้นตอนการผลิตทุกขั้นตอนมาทำการตรวจสอบปริมาณของ Bubbleที่เกิดบนแต่ละด้านของ Slug ทั้งด้านบนและด้านล่างสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.15 –5.18

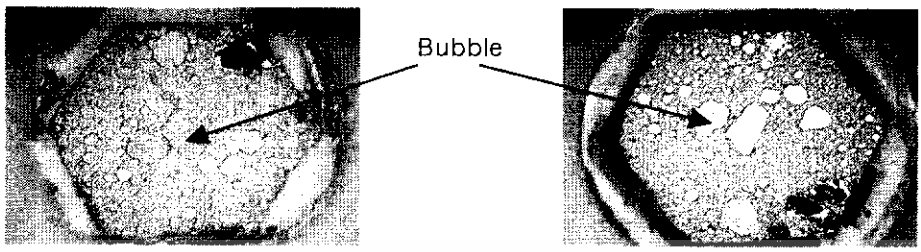


รูปที่ 5.15 ตรวจสอบปริมาณฟองอากาศการประกบ Slug แบบ(ก)

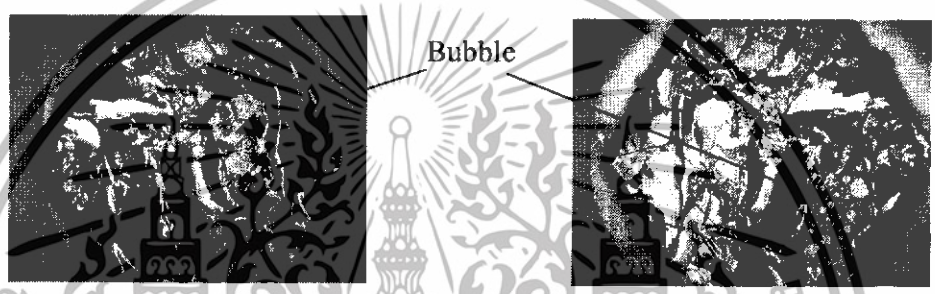


รูปที่ 5.16 ตรวจสอบปริมาณฟองอากาศการประกบ Slug แบบ(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



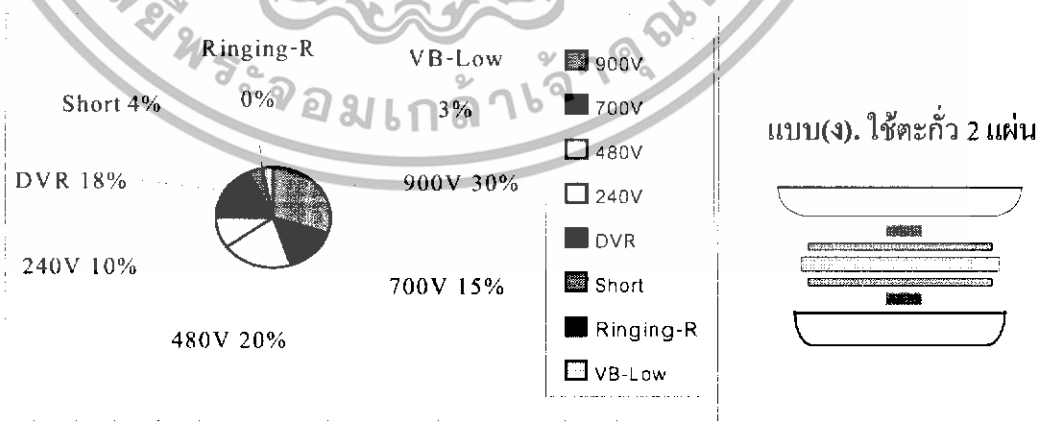
รูปที่ 5.17 ตรวจสอบปริมาณฟองอากาศการประกบ Slug แบบ(ค)



รูปที่ 5.18 ตรวจสอบปริมาณฟองอากาศการประกบ Slug แบบ(ง)

5.6 การทดลองแก้ไขปัญหาวิธีที่หก การเลือกใช้การประกบแบบ(ง) และทำการทดลองด้วยโครงสร้างแบบตะกั่ว 2 แผ่น

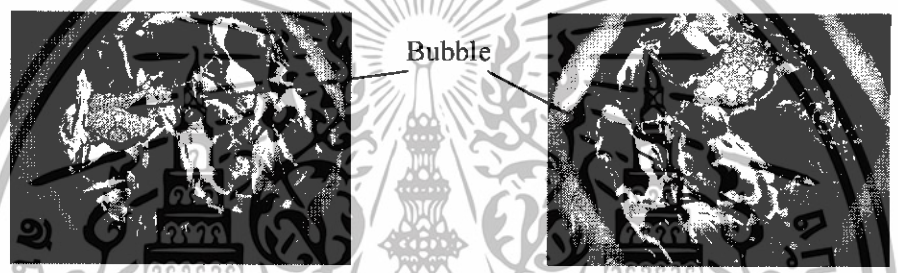
จากผลการทดลองดังข้างต้นพบว่าโครงสร้างทั้ง 4 แบบนั้น "**แบบ (ง)**" มีแนวโน้มที่ผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานมากกว่าแบบ(ก),(ข) และแบบ(ค) จึงได้นำเอาโครงสร้างที่ใช้ตะกั่ว 2 แผ่นซึ่งมีขนาดเล็กกว่าเดิม 4 เท่าตัว มาทำการทดลองร่วมกับ "แบบ(ง)" ผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 5.19



รูปที่ 5.19 กราฟการทดสอบเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้าโดยใช้แบบ(ง) โดยวิธีตะกั่ว 2 แผ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่5.19 พบว่าไดโอดที่ผ่านเข้ากระบวนการผลิตมีจำนวน 100 ตัว ทดสอบผ่านตามเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ต้องการคิดเป็น 75 เปอร์เซ็นต์ (แจกแจงเป็นค่าแรงดันพังทะลายค่าต่างๆได้ดังนี้ V_B = 900V จำนวน 30 เปอร์เซ็นต์, VB = 700V จำนวน 15 เปอร์เซ็นต์, V_B = 480V จำนวน 20 เปอร์เซ็นต์, V_B = 240V จำนวน 10 เปอร์เซ็นต์) มีปริมาณไดโอดที่เสีย 25 เปอร์เซ็นต์ แสดงได้ว่ามีแนวโน้มที่ดีขึ้นตามที่ได้คาดการณ์ไว้ล่วงหน้า หลังจากผ่านขั้นตอนการผลิตทั้งหมดมาทำการตรวจสอบปริมาณของฟองอากาศที่เกิดบนแต่ละด้านของ Slug ทั้งด้านบนและด้านล่างสามารถแสดงดังรูปที่ 5.20

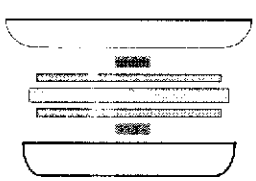


รูปที่ 5.20 การวาง Slug แบบ(ง) โดยวิธีตะกั่ว 2 แผ่น

จากการทดลองที่ได้กระทำมาเมื่อนำข้อมูลทั้งหมดมาวิเคราะห์แล้วพบว่าสิ่งที่ยังไม่ได้ทำการทดลองก็คือเวลาที่ใช้ในการ Etching ซึ่งจากเดิมได้ทำการทดลองที่เวลา 5 นาทีมาโดยตลอดจึงได้ทำการเปลี่ยนแปลงเวลา Etching เพื่อหาเวลาที่เหมาะสมที่สุดต่อไป

5.7 การทดลองแก้ไขปัญหาวิธีที่เจ็ด เปลี่ยนเวลาการ Etching เพื่อหาเวลาที่เหมาะสมการทดลองใช้ แบบ(ง) ตะกั่ว 2 แผ่น

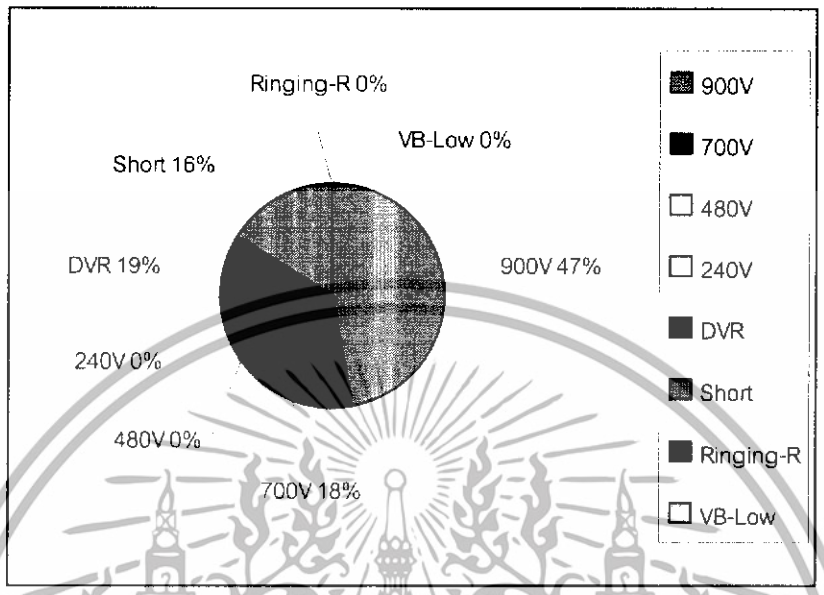
เวลาที่เราได้ทำการวางแผนไว้มีอยู่ด้วยกัน 6 ค่าคือ 2, 2:30, 3, 3:30, 4, 4:30 นาที ในการทดลองครั้งนี้ได้ทำการทดลองแต่ละค่าเวลา จำนวนละ 100 ตัว ซึ่งผลการทดลองแสดงได้ดังตารางที่ 5.2



รูปที่ 5.21 การวาง Slug แบบ(ง) โดยใช้วิธีตะกั่ว 2 แผ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

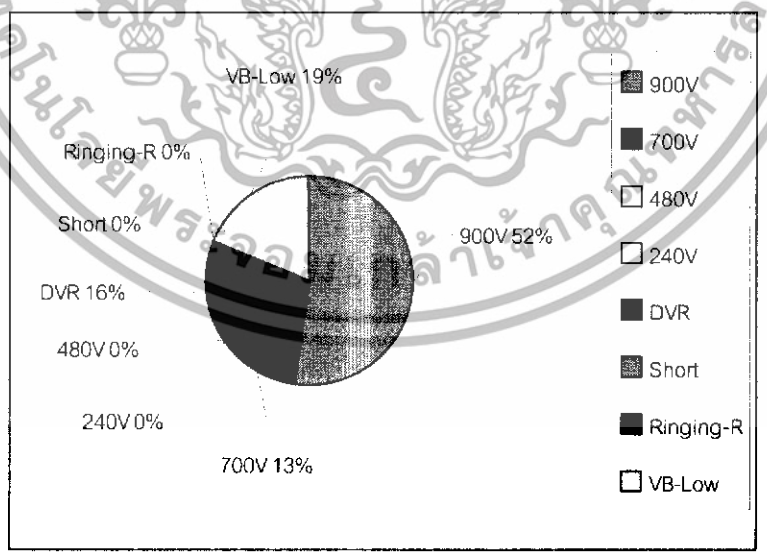
5.7.1 เวลาที่ใช้ในการ Etching 2 นาที (แบบ(ง) โดยใช้วิธีตะกั่ว 2 แผ่น)



รูปที่ 5.22 กราฟทดสอบเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้าใช้แบบ ง. ตะกั่ว 2 แผ่นที่เวลา Etching 2 นาที

จากรูปที่ 5.22 พบว่าไดโอดทดสอบผ่านตามเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้ามีจำนวน 65 เปอร์เซ็นต์

5.7.2 **เวลาที่ใช้ในการ Etching 2 นาที 30 วินาที** (แบบ(ง) โดยใช้วิธีตะกั่ว 2 แผ่น)

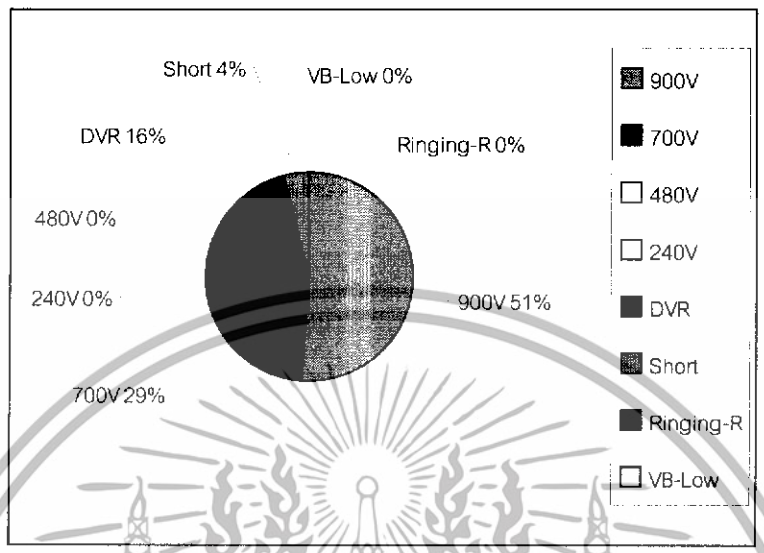


รูปที่ 5.23 กราฟทดสอบเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้าใช้แบบ ง. ตะกั่ว 2 แผ่นที่เวลา Etching 2:30 นาที

จากรูปที่ 5.23 พบว่าไดโอดทดสอบผ่านตามเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้ามีจำนวน 73 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

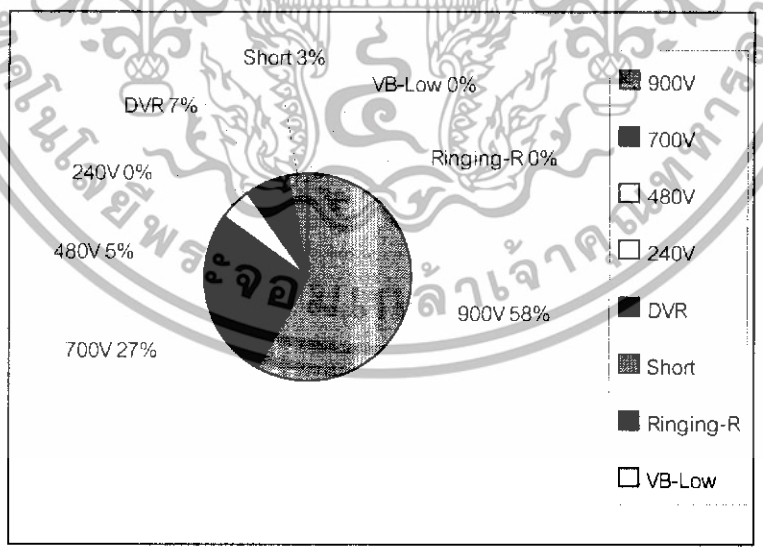
5.7.3 เวลาที่ใช้ในการ Etching 3 นาที (แบบ(ง) โดยใช้วิธีตะกั่ว 2 แผ่น)



รูปที่ 5.24 กราฟทดสอบเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้าใช้แบบ ง. ตะกั่ว 2 แผ่นที่เวลา Etching 3 นาที

จากรูปที่ 5.24 พบว่าได โอดทดสอบผ่านตามเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้ามีจำนวน 65 เปอร์เซ็นต์

5.7.4 เวลาที่ใช้ในการ Etching 3 นาที 30 วินาที (แบบ(ง) โดยใช้วิธีตะกั่ว 2 แผ่น)

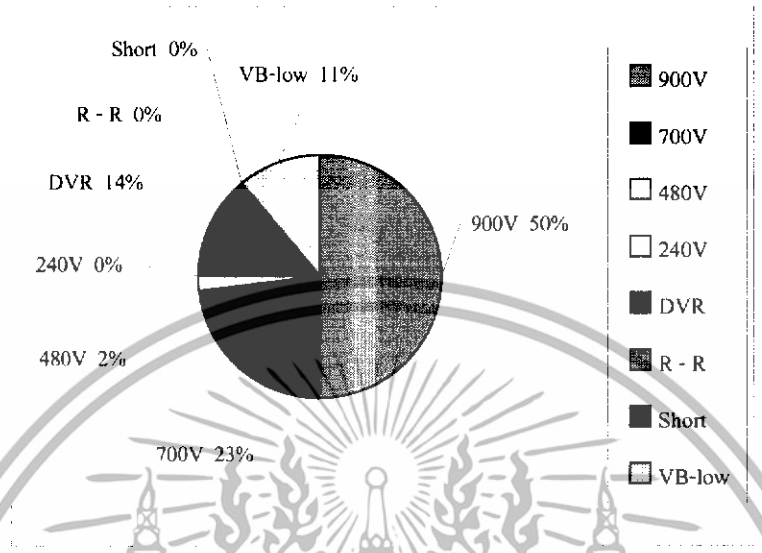


รูปที่ 5.25 กราฟทดสอบเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้าใช้แบบ ง. ตะกั่ว 2 แผ่นที่เวลา Etching 3:30 นาที

จากรูปที่ 5.25 พบว่าได โอดทดสอบผ่านตามเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้ามีจำนวน 90 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

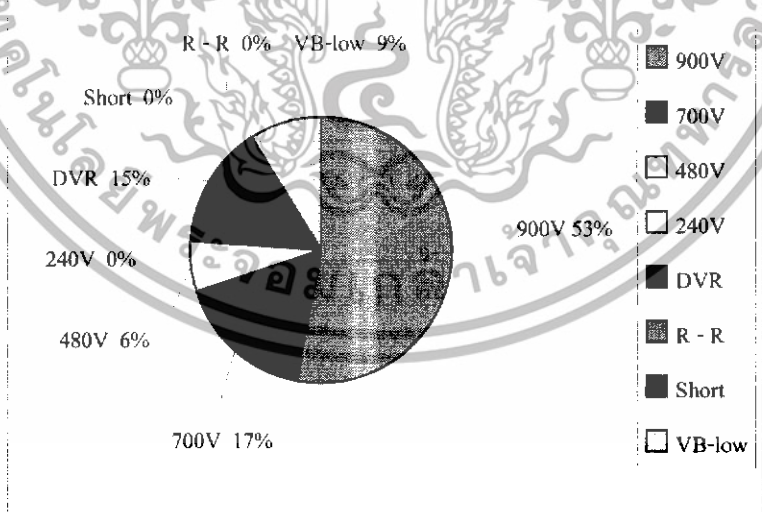
5.7.5 เวลาที่ใช้ในการ Etching 4 นาที (แบบ(ง) โดยใช้วิธีตะกั่ว 2 แผ่น)



รูปที่ 5.26 กราฟทดสอบเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้าใช้แบบ ง. ตะกั่ว 2 แผ่นที่เวลา Etching 4 นาที

จากรูปที่ 5.26 พบว่าไดโอดทดสอบผ่านตามเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้ามีจำนวน 75 เปอร์เซ็นต์

5.7.6 เวลาที่ใช้ในการ Etching 4 นาที 30 วินาที (แบบ(ง) โดยใช้วิธีตะกั่ว 2 แผ่น)



รูปที่ 5.27 กราฟทดสอบเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้าใช้แบบ ง. ตะกั่ว 2 แผ่นที่เวลา Etching 4:30 นาที

จากรูปที่ 5.37 พบว่าไดโอดทดสอบผ่านตามเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้ามีจำนวน 76 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่5.22 ไดโอดที่ผ่านการทดสอบเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้าใช้แบบ ง. ตะกั่ว 2 แผ่น ที่เวลา Etching 2 นาที พบว่าไดโอดทดสอบผ่านตามเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้ามีจำนวน 65 เปอร์เซ็นต์

จากรูปที่5.23 ไดโอดที่ผ่านการทดสอบเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้าใช้แบบ ง. ตะกั่ว 2 แผ่น ที่เวลา Etching 2:30 นาที พบว่าไดโอดทดสอบผ่านตามเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้ามีจำนวน 73 เปอร์เซ็นต์

จากรูปที่5.24 ไดโอดที่ผ่านการทดสอบเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้าใช้แบบ ง. ตะกั่ว 2 แผ่น ที่เวลา Etching 3 นาที พบว่าไดโอดทดสอบผ่านตามเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้ามีจำนวน 65 เปอร์เซ็นต์

จากรูปที่5.25 ไดโอดที่ผ่านการทดสอบเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้าใช้แบบ ง. ตะกั่ว 2 แผ่น ที่เวลา Etching 3:30 นาที พบว่าไดโอดทดสอบผ่านตามเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้ามีจำนวน 90 เปอร์เซ็นต์

จากรูปที่5.26 ไดโอดที่ผ่านการทดสอบเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้าใช้แบบ ง. ตะกั่ว 2 แผ่น ที่เวลา Etching 4 นาที พบว่าไดโอดทดสอบผ่านตามเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้ามีจำนวน 75 เปอร์เซ็นต์

จากรูปที่5.27 ไดโอดที่ผ่านการทดสอบเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้าใช้แบบ ง. ตะกั่ว 2 แผ่น ที่เวลา Etching 3:30 นาที พบว่าไดโอดทดสอบผ่านตามเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้ามีจำนวน 76 เปอร์เซ็นต์

จากรูปที่5.22 – รูปที่5.27 สามารถแจกแจงไดโอดที่ผ่านและไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานได้ดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ผลการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของชิ้นงานทั้ง 6 ค่า (แบบ(ง) โดยใช้วิธีตะกั่ว 2 แผ่น)

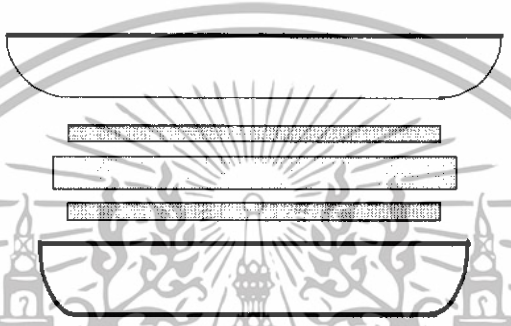
เวลา (นาที)	900 Volt	700 Volt	480 Volt	240 Volt	DVR	VB Low	Short	R-R	Total %
2	47	18	0	0	19	0	16	0	65
2:30	52	13	0	0	16	19	0	0	73
3	51	29	0	0	16	0	4	0	65
3:30	58	27	5	0	7	0	4	0	90
4	50	23	2	0	14	11	0	0	75
4:30	53	17	6	0	15	9	0	0	76

ผลการทดลองโดยใช้แบบ (ง) โดยใช้ตะกั่ว 2 แผ่นพบว่าการใช้เวลา Etching ที่ 3:30 นาที ไดโอดที่ทดสอบเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้าจะมีมากขึ้นถึง 90 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

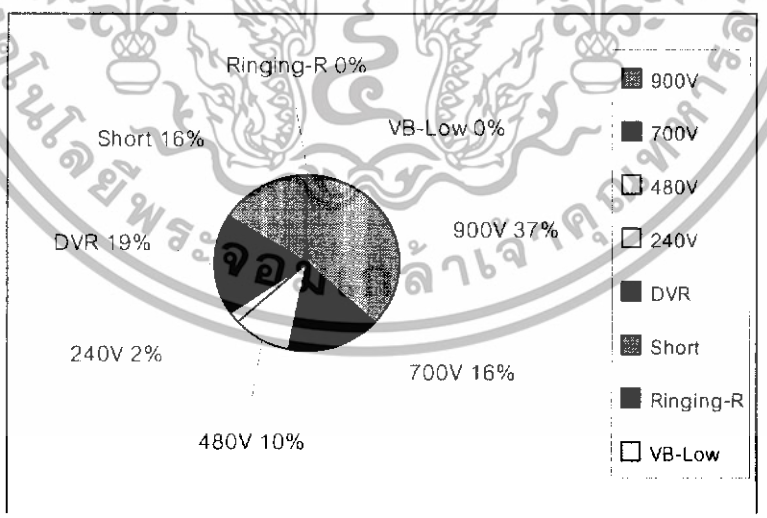
5.8 การทดลองแก้ไขปัญหาวิธีที่แปด เปลี่ยนเวลาการ Etching เพื่อหาเวลาที่เหมาะสม (การประกบ Slug แบบ(ง) ตะกั่ว 1 แผ่น)

เวลาที่เราได้ทำการวางแผนไว้มีอยู่ด้วยกัน 6 ค่าคือ2, 2:30, 3, 3:30, 4, 4:30 นาที เลือก "**แบบ (ง)**" มาใช้ในการทดลองโดยใช้ตะกั่ว 1 แผ่นทำการทดลองในการทดลองครั้งนี้ได้ทำการทดลองแต่ละค่าเวลา จำนวนละ 100 ตัว ซึ่งผลการทดลองแสดงได้ดังตารางที่5.3



รูปที่ 5.28 การประกบ Slug แบบ(ง)โดยใช้ตะกั่ว 1 แผ่นตามกระบวนการผลิตมาตรฐาน

5.8.1 **เวลาที่ใช้ในการ Etching 2 นาที** (แบบ(ง) โดยใช้วิธีตะกั่ว 1 แผ่น)

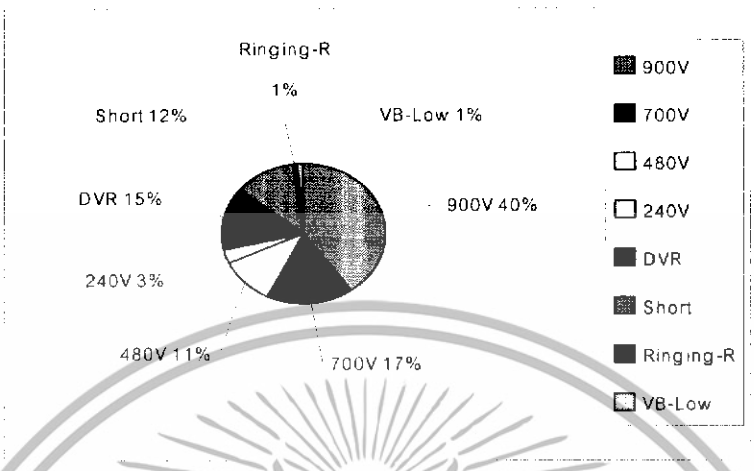


รูปที่ 5.29กราฟทดสอบเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้าใช้แบบ ง. ตะกั่ว 1 แผ่น ที่เวลา Etching 2 นาที

จากรูปที่5.29 พบว่าไดโอดทดสอบผ่านตามเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้ามีจำนวน 65 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

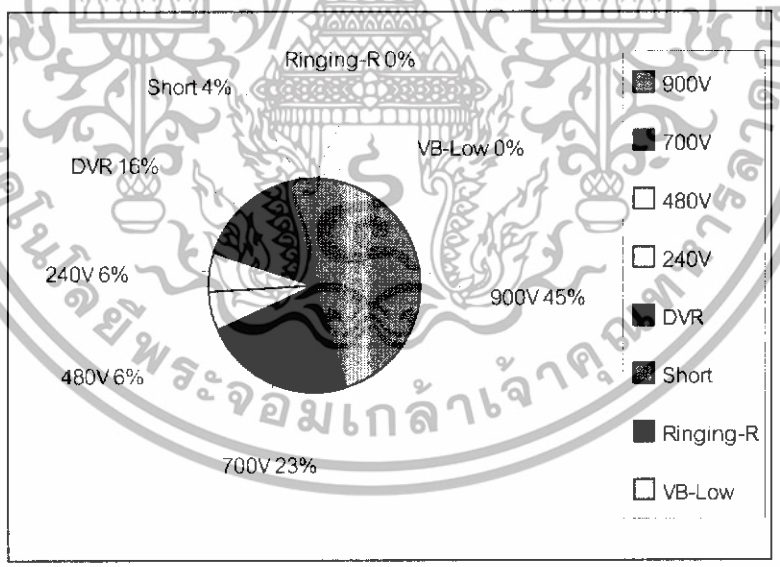
5.8.2 เวลาที่ใช้ในการ Etching 2:30 นาที (แบบ(ง) โดยใช้วิธีตะกั่ว 1 แผ่น)



รูปที่ 5.30 กราฟทดสอบเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้าใช้แบบ ง. ตะกั่ว 1 แผ่นที่เวลา Etching 2 :30 นาที

จากรูปที่ 5.30 พบว่าไดโอดทดสอบผ่านตามเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้ามีจำนวน 71 เปอร์เซ็นต์

5.8.3 เวลาที่ใช้ในการ Etching 3 นาที (แบบ(ง) โดยใช้วิธีตะกั่ว 1 แผ่น)

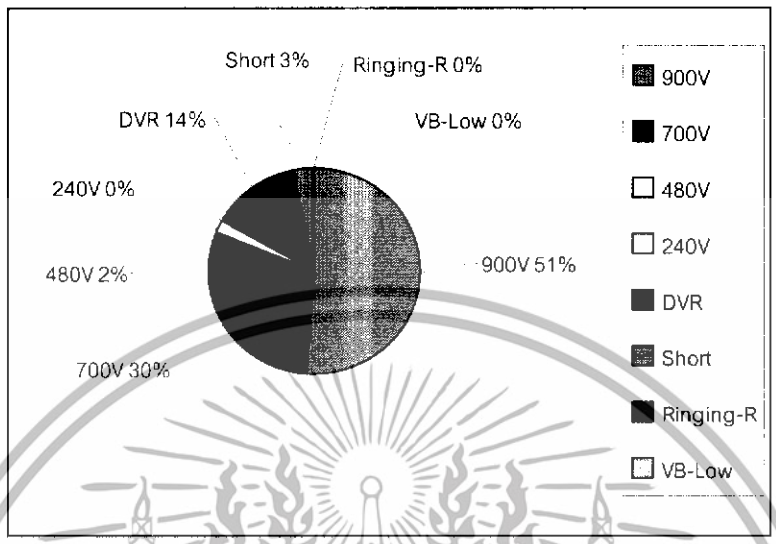


รูปที่ 5.31 กราฟทดสอบเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้าใช้แบบ ง. ตะกั่ว 1 แผ่นที่เวลา Etching 3 นาที

จากรูปที่ 5.31 พบว่าไดโอดทดสอบผ่านตามเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้ามีจำนวน 80 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

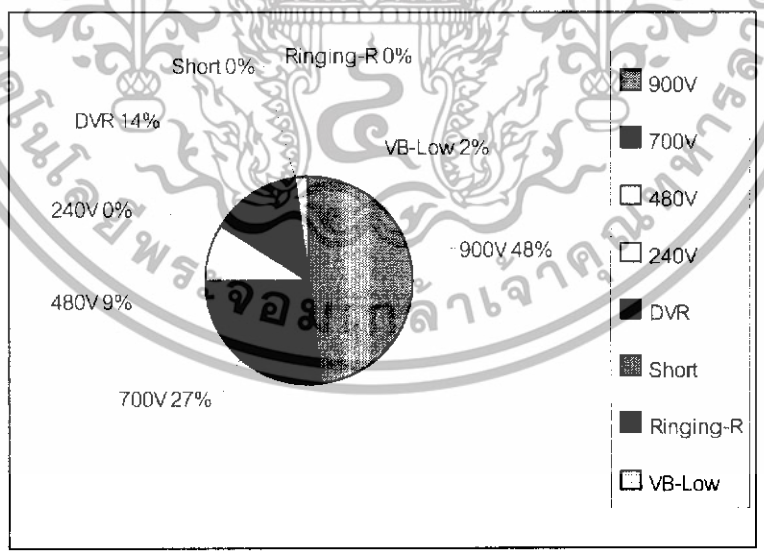
5.8.4 เวลาที่ใช้ในการ Etching 3:30 นาที (แบบ(ง) โดยใช้วิธีตะกั่ว 1 แผ่น)



รูปที่ 5.32 กราฟทดสอบเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้าใช้แบบ ง. ตะกั่ว 1 แผ่นที่เวลา Etching 3 :30 นาที

จากรูปที่ 5.32 พบว่าได โอดทดสอบผ่านตามเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้ามีจำนวน 83 เปอร์เซ็นต์

5.8.5 **เวลาที่ใช้ในการ** Etching 4 นาที (แบบ(ง) โดยใช้วิธีตะกั่ว 1 แผ่น)

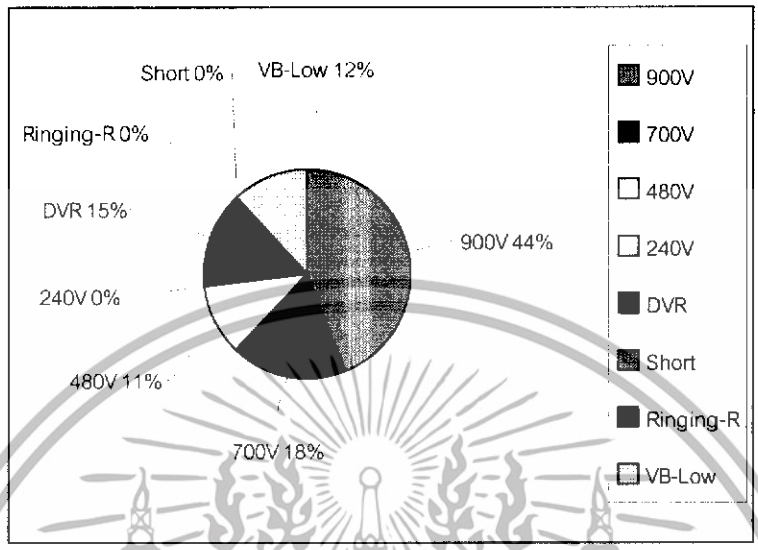


รูปที่ 5.33 กราฟทดสอบเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้าใช้แบบ ง. ตะกั่ว 1 แผ่นที่เวลา Etching 4 นาที

จากรูปที่ 5.33 พบว่าได โอดทดสอบผ่านตามเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้ามีจำนวน 84 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.8.6 เวลาที่ใช้ในการ Etching 4:30 นาที (แบบ(ง) โดยใช้วิธีตะกั่ว 1 แผ่น)



รูปที่ 5.34 กราฟทดสอบเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้าใช้แบบ ง. ตะกั่ว 1 แผ่นที่เวลา Etching 4 :30 นาที

จากรูปที่ 5.29 ไดโอดที่ผ่านการทดสอบเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้าใช้แบบ ง. ตะกั่ว 1 แผ่น ที่เวลา Etching 2 นาที พบว่าไดโอดทดสอบผ่านตามเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้ามีจำนวน 65 เปอร์เซ็นต์

จากรูปที่ 5.30 ไดโอดที่ผ่านการทดสอบเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้าใช้แบบ ง. ตะกั่ว 1 แผ่น ที่เวลา Etching 2:30 นาที พบว่าไดโอดทดสอบผ่านตามเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้ามีจำนวน 71 เปอร์เซ็นต์

จากรูปที่ 5.31 ไดโอดที่ผ่านการทดสอบเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้าใช้แบบ ง. ตะกั่ว 1 แผ่น ที่เวลา Etching 3 นาที พบว่าไดโอดทดสอบผ่านตามเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้ามีจำนวน 80 เปอร์เซ็นต์

จากรูปที่ 5.32 ไดโอดที่ผ่านการทดสอบเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้าใช้แบบ ง. ตะกั่ว 1 แผ่น ที่เวลา Etching 3:30 นาที พบว่าไดโอดทดสอบผ่านตามเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้ามีจำนวน 83 เปอร์เซ็นต์

จากรูปที่ 5.33 ไดโอดที่ผ่านการทดสอบเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้าใช้แบบ ง. ตะกั่ว 1 แผ่น ที่เวลา Etching 4 นาที พบว่าไดโอดทดสอบผ่านตามเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้ามีจำนวน 84 เปอร์เซ็นต์

จากรูปที่ 5.34 ไดโอดที่ผ่านการทดสอบเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้าใช้แบบ ง. ตะกั่ว 1 แผ่น ที่เวลา Etching 3:30 นาที พบว่าไดโอดทดสอบผ่านตามเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้ามีจำนวน 73 เปอร์เซ็นต์

จากรูปที่ 5.28 – รูปที่ 5.33 สามารถแจกแจงไดโอดที่ผ่านและไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานได้ดังตารางที่ 5.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

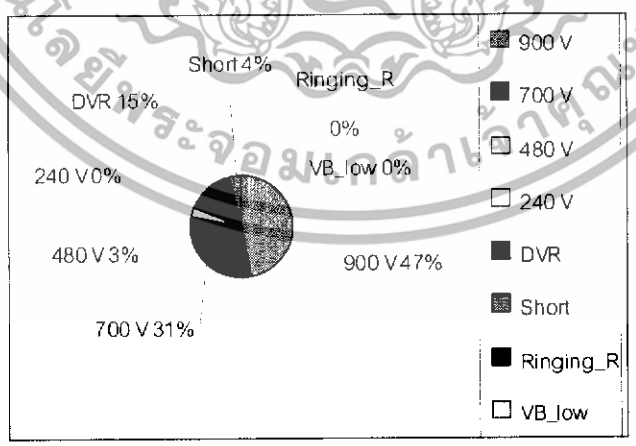
ตารางที่ 5.3 ผลการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของชิ้นงานทั้ง 6 ค่า (แบบ ง. ตะกั่ว 1 แผ่น)

เวลา (นาที)	900 Volt	700 Volt	480 Volt	240 Volt	DVR	VB Low	Short	R-R
2	37	16	10	2	19	0	16	0
2:30	40	17	11	3	15	1	12	1
3	45	23	6	6	16	0	4	0
3:30	51	30	2	0	14	0	3	0
4	48	27	9	0	14	2	0	0
4:30	44	18	11	0	15	12	0	0

ผลจากการทดลองโดยใช้แบบ ง. ตะกั่ว 1 แผ่นพบว่าในการใช้เวลา Etching 3:30 นาทีและ 4 นาที ไดโอดที่ทดสอบเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้าจะมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อเทียบกันระหว่างไดโอดที่ผ่านเกณฑ์ 900 Volt แล้วที่เวลา Etching 3:30 วินาทีจะมีมากกว่าและเวลาที่ใช้นั้นก็น้อยลงด้วย ดังนั้นที่เวลา Etching 3:30 นาที จึงเหมาะสมที่สุด

5.9 การทดลองแก้ไขปัญหาวิธีที่เก้า โดย Process ปกติ ซึ่งไม่สามารถกำหนดรูปแบบ การประกบ Slug ได้ และ ใช้เวลาในการ Etching 3:30 นาที

การทดลองโดยกระบวนการผลิตปกติแต่เปลี่ยนเวลา Etching เพื่อต้องการลดปริมาณไดโอดที่ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ทำการทดลองไดโอดจำนวน 100 ตัว ผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 5.34



การประกบ Slug ไม่กำหนดรูปแบบ

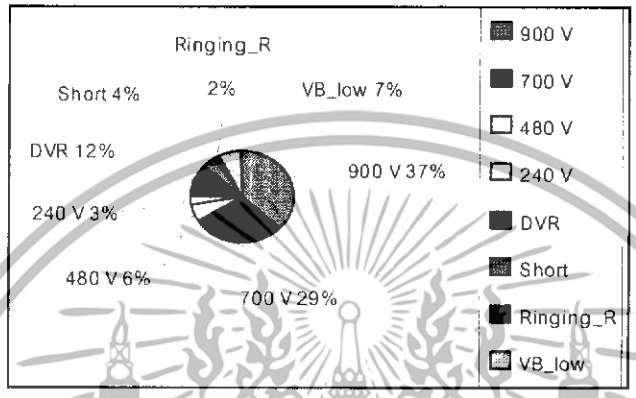
รูปที่ 5.35 กราฟทดสอบเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้าใช้กระบวนการผลิตปกติที่เวลา Etching 3:30 นาที

จากรูปที่ 5.35 พบว่าไดโอดทดสอบผ่านตามเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้ามีจำนวน 81 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.10 การทดลองแก้ไขปัญหาวิธีที่สิบ ข้อมูลบางส่วนในโรงงานเมื่อเปลี่ยนเวลา Etching จากเดิม 5 นาที ให้เหลือเพียง 3:30 นาที

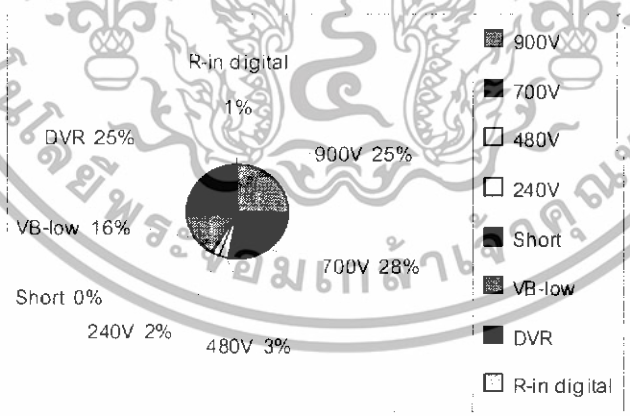
ข้อมูลบางส่วนที่ได้จากโรงงาน การผลิตจำนวน 5100 ตัว เมื่อเปลี่ยนเวลา Etching เป็น 3:30 นาที ผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 5.36



รูปที่ 5.36 กราฟทดสอบเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้าใช้กระบวนการผลิตปกติที่เวลา Etching 3:30 นาที

จากรูปที่ 5.36 พบว่าไดโอดทดสอบผ่านตามเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้ามีจำนวน 75 เปอร์เซ็นต์

จากตัวอย่างข้อมูลบางส่วน ที่ทำการผลิตจากบริษัทอุตสาหกรรมเมื่อทำการผลิต 5084 ตัว ใช้เวลาในการ Etching 5 นาที และทำการเปรียบเทียบกับข้อมูลบางส่วนที่ได้จากโรงงานเมื่อทำการผลิตจำนวน 5100 ตัว และเปลี่ยนเวลา Etching เป็น 3:30 นาทีแสดงได้ดังรูปที่ 5.37



รูปที่ 5.37 กราฟทดสอบเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้าใช้กระบวนการผลิตปกติที่เวลา Etching 5 นาที

จากรูปที่ 5.37 พบว่าไดโอดทดสอบผ่านตามเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้ามีจำนวน 58 เปอร์เซ็นต์

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเปลี่ยนเวลา Etching จากเดิม 5 นาที ให้เหลือเพียง 3:30 นาที จะทำให้ไดโอดผ่านเกณฑ์มาตรฐานเพิ่มขึ้นถึง 17 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

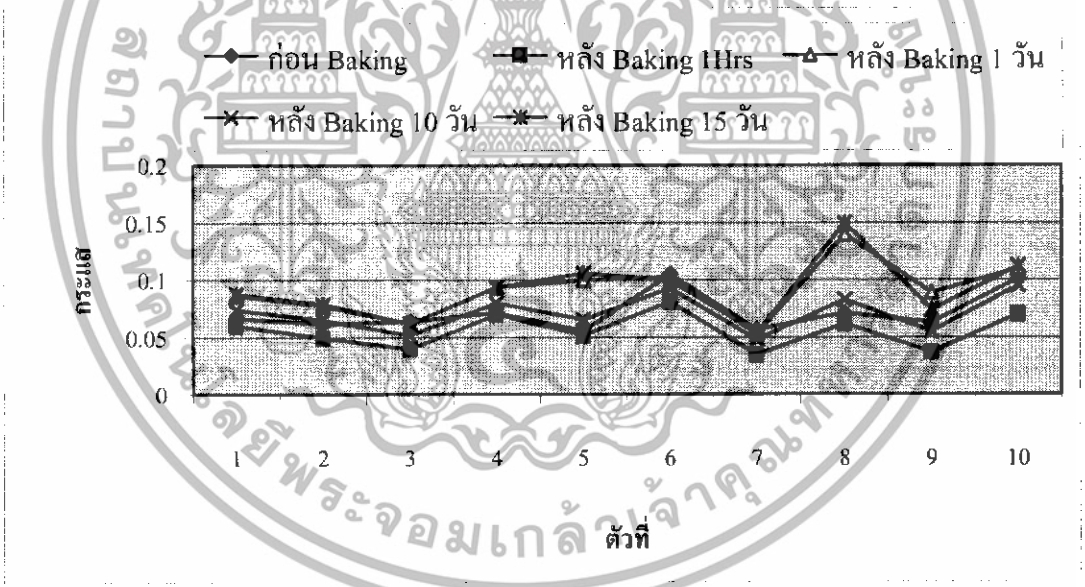
5.11 การทดลองแก้ไขปัญหาวิธีที่สิบเอ็ด การทดลองเรื่อง High leakage after baking

5.11.1 เป็นการทดลองในขั้นตอนของกระบวนการอบ(Baking)โดยใช้อุณหภูมิและเวลา ดังผลการทดลองเพื่อดูผลของคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่มีต่อ Power diode ชนิด CELL โดยเฉพาะกระแสรั่วทางด้าน Reverse Bias โดยจะทำการทดลองเป็นขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. Baking 220 ^{O}C 1 Hrs

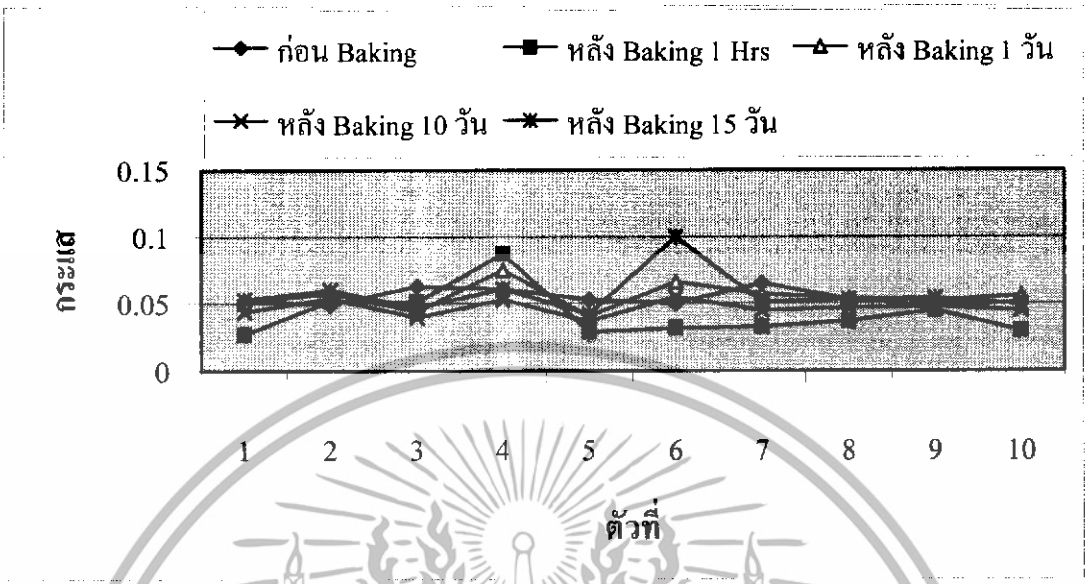
2. Baking 220 ^{O}C 10 Hrs

ทำการทดลองด้วยวิธีนำไดโอดที่ได้ค่า $V_B = 900V$, $V_B = 700V$, $V_B = 480V$ มาทำการทดลอง โดยจะแบ่งช่วงเวลาในการวัด IV-Characteristic ของไดโอดคือ ก่อนทำการ Baking, หลัง Baking 1 Hr, หลัง Baking 24 Hrs, หลัง Baking 1 วัน, หลัง Baking 15 วัน หลังจากนั้นจะนำข้อมูลทั้งหมดมาทำการวิเคราะห์ถึงผลกระทบว่าเกี่ยวข้องกันหรือไม่ระหว่างการ Baking กับกระแสรั่วของไดโอดแสดงได้ดังรูปที่ 5.37 – รูปที่ 5.43

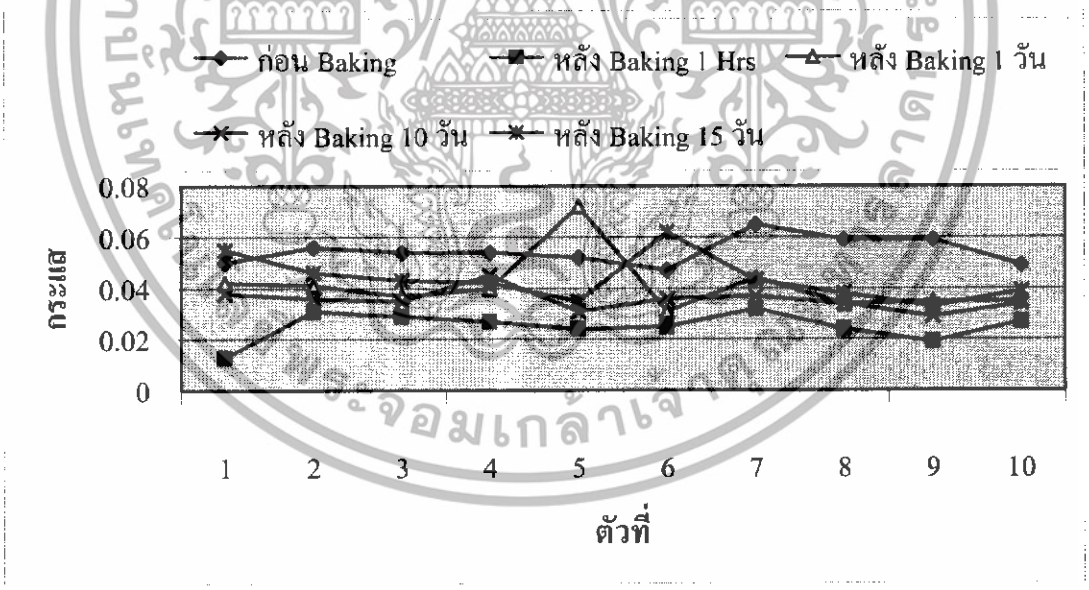


รูปที่ 5.38 กราฟการวัด High Leakage Current after Baking โดยใช้ไดโอด V_B = 900 Volt ที่อุณหภูมิ 220^{0}C 1 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

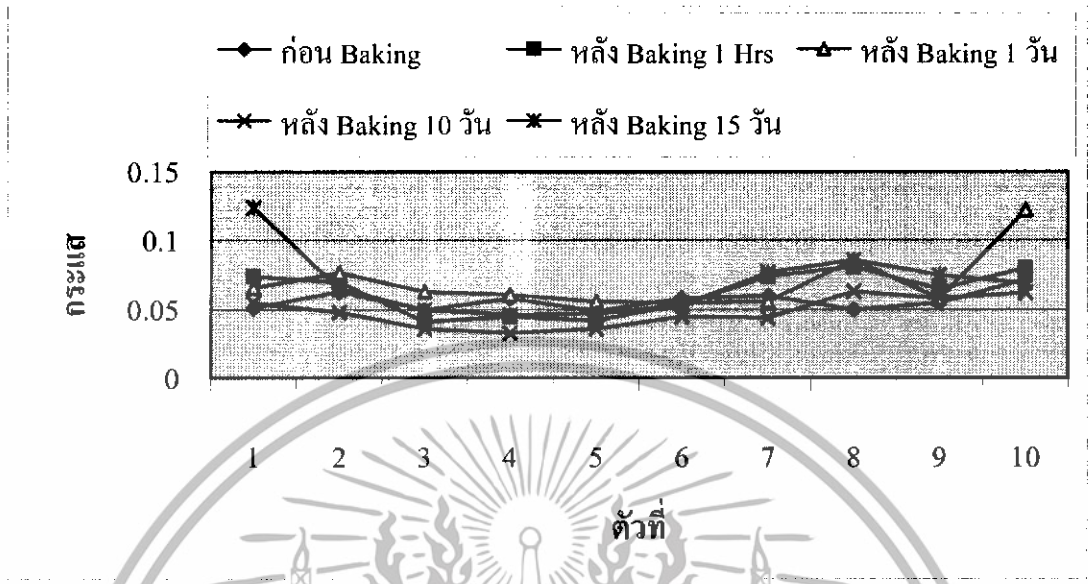


รูปที่ 5.39 กราฟการวัด High Leakage Current after Baking โดยใช้ไดโอด V_B = 700 Volt ที่อุณหภูมิ 220^{0}C 1 ชั่วโมง

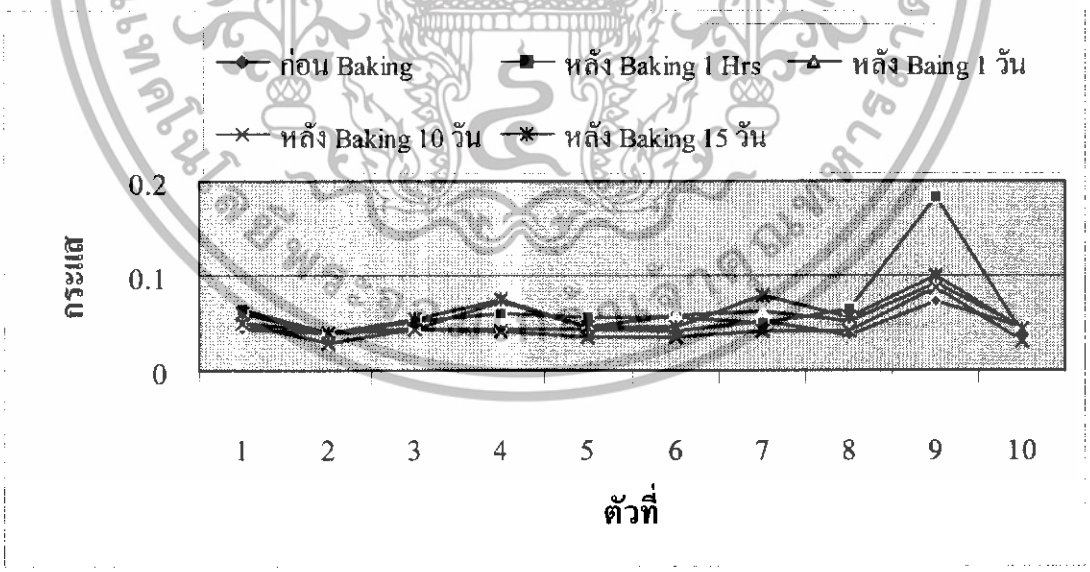


รูปที่ 5.40 กราฟการวัด High Leakage Current after Baking โดยใช้ไดโอด V_B = 480 Volt ที่อุณหภูมิ 220^{0}C 1 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

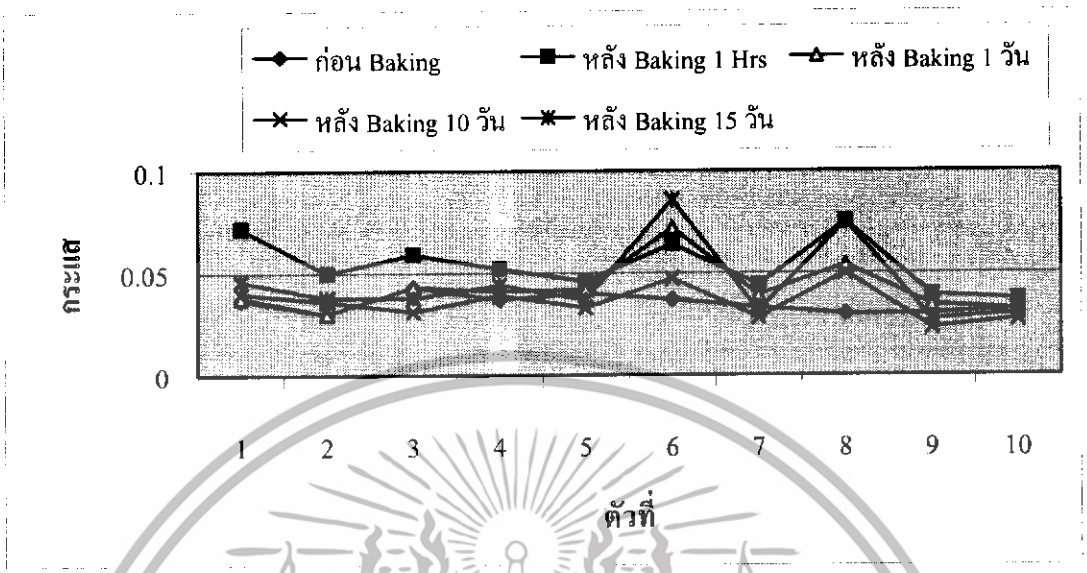


รูปที่ 5.41 กราฟการวัด High Leakage Current after Baking โดยใช้ไดโอด V_B = 900 Volt ที่อุณหภูมิ 220^{0}C 10 ชั่วโมง



รูปที่ 5.42กราฟแสดงการวัด High Leakage Current after Baking โดยใช้ไดโอด V_B = 700 Volt ที่อุณหภูมิ 220^{0}C 10 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



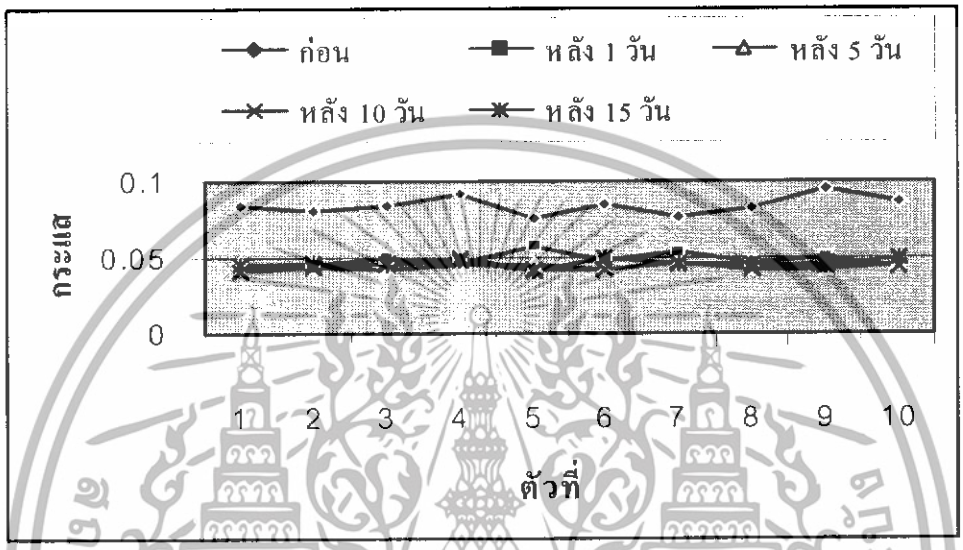
รูปที่5.43 กราฟแสดงการวัด High Leakage Current after Baking โดยใช้ไดโอด V_B = 480 Volt ที่อุณหภูมิ 220^{0}C 10 ชั่วโมง

จากการทดลองเรื่อง High Leakage Current after Baking พบว่าค่าของ Leakage Current ของแต่ละชิ้นงานจะลดลงหลังจากเวลาผ่านไปหนึ่งชั่วโมง เมื่อทำการทิ้งช่วงเวลาในการวัดเพิ่มขึ้นเป็นหนึ่งวันค่าของ Leakage Current ก็จะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยแต่ไม่มาก ทิ้งช่วงเวลาในการวัดเป็นสิบวันค่าของ Leakage Current มีค่าลดลงแต่ก็ไม่มาก และเมื่อทิ้งช่วงเวลาเป็นสิบห้าวันค่าของ Leakage Current ก็มีค่าใกล้กับก่อนที่จะทำการ Baking จากการวิเคราะห์แล้วน่าจะมาจากความชื้นที่มีผลต่อชิ้นงาน เพราะว่าจากข้อมูลที่ได้ทำมาทั้งหมดสังเกตุได้ว่ามีความกระเพื่อมของกระแสรั่วอยู่ในระดับ10 nA เท่านั้น แต่ในเกณฑ์มาตรฐานของทางบริษัทอยู่ที่ไม่เกิน 1 μA ดังนั้นในการ Baking ที่อุณหภูมิ 220^0C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จึงไม่มีผลกระทบกับชิ้นงาน และเมื่อทำการทดลองที่อุณหภูมิ 220^0C เป็นเวลา 10 ชั่วโมง เมื่อสังเกตุจากข้อมูลดังข้างต้นแล้วก็ไม่มีผลกระทบกับชิ้นงานเช่นเดียวกันแต่ปัญหาที่เกิดขึ้นนั้นน่าจะมาจากสาเหตุของความชื้นที่มีผลต่อชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.11.2 ทำการแก้ไขปัญหาโดยใช้ Silica gel ใส่ไว้ในถุงชิ้นงานก่อนทำการวัดและจัดเก็บ

การแก้ไขปัญหาเรื่อง High leakage current after baking โดยใช้ Silica gel ใส่ไว้ในถุงชิ้นงานก่อนทำการวัดและจัดเก็บผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 5.44



รูปที่ 5.44 กราฟการวัด High Leakage Current after Baking ก่อนใส่ Silica gel และหลังใส่ Silica gel

โดยใช้ไดโอด V_R = 900 Volt

จากรูปที่ 5.44 พบว่าเมื่อทำการใส่ Silica gel ลงไปในถุงชิ้นงานแล้วค่า Leakage Current จะมีความคงที่ของ Leakage Current แสดงให้เห็นว่าความชื้นจะมีผลกระทบต่อชิ้นงานอย่างมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6
สรุปผลการทดลอง

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นงานวิจัยเพื่อศึกษาและพัฒนากระบวนการผลิตไดโอดกำลังในทางอุตสาหกรรมให้มีปริมาณการผ่านเกณฑ์มาตรฐานมากขึ้น ในส่วนแรกของโครงงานนี้จะเป็นการศึกษาถึงปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตจริงทั้งหมด แล้วนำเอาข้อมูลที่ได้มานั้นมาทำการสรุปและวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต

ในการแก้ไขปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นกับไดโอดกำลังชนิด CELL ได้ทำการทดลองแก้ไขตามที่ได้วางแผนไว้ดังนี้คือเพิ่มความหนาของแผ่น Solder, เพิ่มแผ่นกดทับให้มีแรงกดมากขึ้น, การเจาะรู ตรงกลาง Slug ทั้ง Slug บนและล่าง, ทำการแก้ไขโดยการเพิ่มขั้นตอนการ Anneal ก่อนกระบวนการ Soldering, แก้ไขลักษณะการประกบ Slug และเปลี่ยนเวลาการ Etching เพื่อหาเวลาที่เหมาะสม

จากการทดลอง พบว่ารูปแบบการประกบSlug แบบ(ง) และเพิ่มตะกั่วอีก 1 แผ่นที่มีขนาดเล็กกว่าเดิม 4 เท่า โดยใช้เวลาในการ Etching 3:30 นาที ทำให้ไดโอดผ่านตามเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้าถึง 90%

แต่ในกระบวนการสร้างตามมาตรฐานโรงงาน ไม่สามารถกำหนดรูปแบบการประกบ Slug และการเพิ่มแผ่นตะกั่วได้จึงพิจารณาเวลาในการ Etching ที่ 3:30 นาทีเท่านั้น พบว่าจากข้อมูลบางส่วนของโรงงานที่ใช้เวลาในการ Etching มาตรฐานที่ 5 นาที ไดโอดที่ผ่านเกณฑ์ทั้งสิ้น 58 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อเราเปลี่ยนเวลา Etching เป็น 3:30 นาที มีไดโอดที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานทั้งสิ้น 75% **ซึ่งเพิ่มขึ้นจากเดิมถึง 17 เปอร์เซ็นต์**

จากการศึกษาถึงปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นในกระบวนการประกอบไดโอดชนิด CELL ที่บริษัทอุตสาหกรรมอีเล็คโทรนิคส์จำกัด(มหาชน) พบว่าปัญหาที่สำคัญที่ทำให้ไดโอดชนิด CELL ถูกคัดทิ้งมากที่สุดคือเรื่องของ DVR และ V_B-Low จากการทดลองถึงวิธีการแก้ปัญหาเพื่อลดจำนวนของไดโอดที่ถูกคัดทิ้งสามารถทำได้โดยการ

1. จัดรูปแบบการประกบ Slug
2. เพิ่มตะกั่วเป็น 2 ชั้น(โดยขนาดของตะกั่วที่เพิ่มเข้าไปมีขนาดเล็กลง 4 เท่า
3. เปลี่ยนเวลาการ Etching จากเดิม 5 นาที เป็น 3:30 นาที

จากผลการทดลองที่ได้พบว่า ไดโอดที่ผ่านเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้ามีถึง 90% (ที่จำนวนการทดลอง 100 ตัว)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ในกระบวนการสร้างที่โรงงานไม่สามารถ กำหนดรูปแบบการประกบ Slug และการเพิ่มตะกั่วได้ จึงพิจารณาเวลาในการ Etching ที่ 3:30 นาทีเท่านั้น จากผลที่ได้ทำให้จำนวนไดโอดที่ผ่านเกณฑ์คุณสมบัติทางไฟฟ้า เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกระบวนการสร้างเดิมของบริษัทถึง 17 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่าการแก้ปัญหาโดยวิธีดังกล่าว ทำให้บริษัทได้ผลกำไรเพิ่มขึ้นอย่างมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] รองศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ ศุภเดช. 2545. เซมิคอนดัคเตอร์ดีไวซ์: ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพมหานคร.

[2] ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมเกียรติ ศุภเดช. 2525. ปฏิบัติการณ์เทคโนโลยี สารกึ่งตัวนำ. : วารสารอิเล็กทรอนิกส์ เวิลด์. พิมพ์ครั้งที่ 1.

[3] D.A. Fraser. **The physics of Semiconductor devices.** E.J. Burge, D.J.E. Ingram, J.A.D Mathew. 1983

[4] EIC Discrete Semiconductors short form Catalog., 2002

[5] S.M. SZE. **Semiconductor devices Physics and technology**. AT& T Bell Laboratories Murray Hill. New Jersey, John wiley & Sons Sze, S.M. 1936

[6] Richard C. Jaeger . Volume V Introduction to. **Microelectronic Fabrication.** Reprinted with corrections July, 1989

[7] S.M Sze. **Physics of Semiconductor Device**. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 1969.

[8] Mauro Zambuto. **Semiconductor Devices**. Singapore: McGraw-Hill.1989

[9] นพดล สิทธิพล และคณะ. "การพัฒนากระบวนการประกอบไดโอดกำลังชนิดเซลล์". วิศวสารลาดกระบัง. คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. ฉบับที่3. ปีที่21. กันยายน 2547. หน้าที่7.

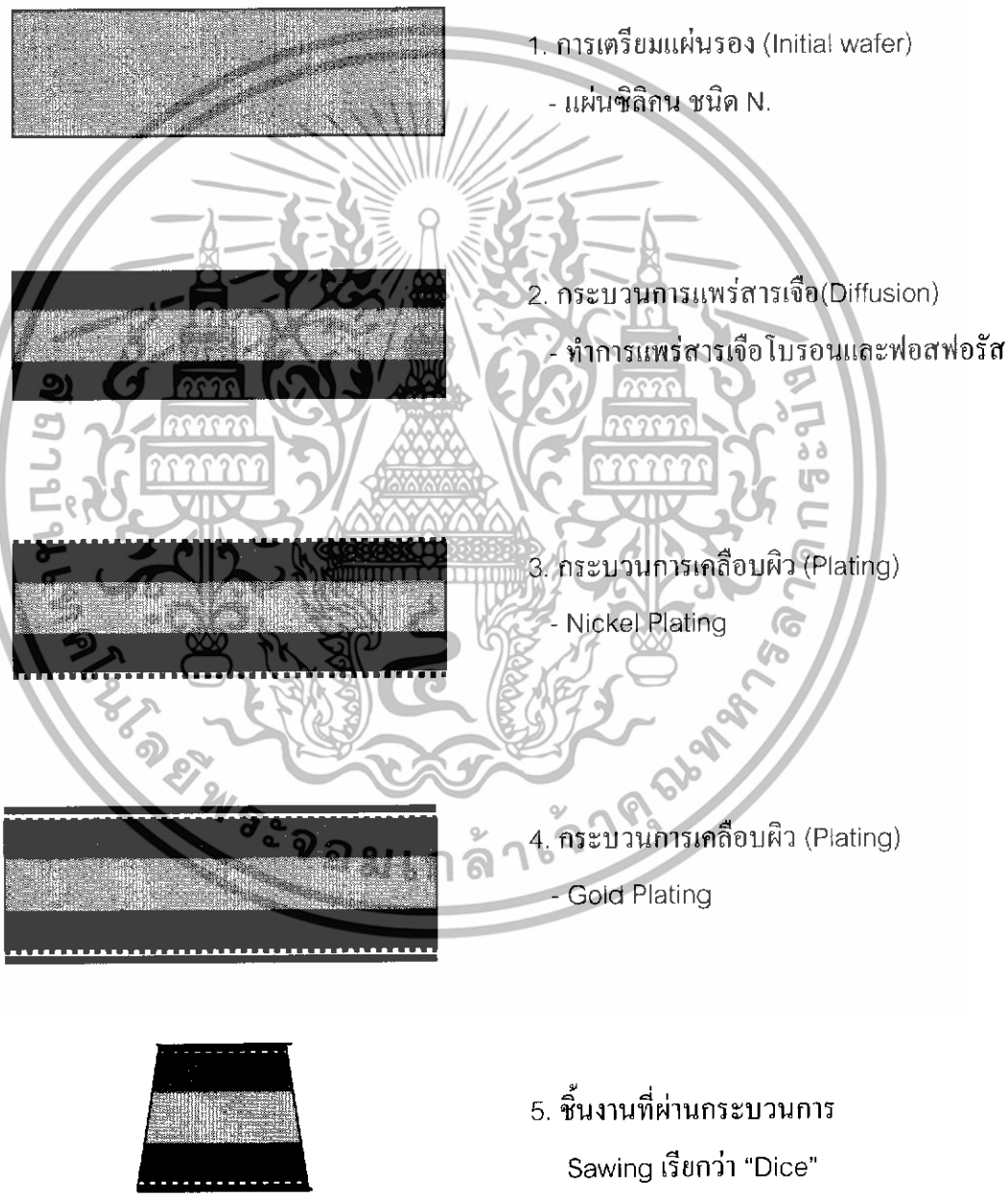
[10] M. S. Tyagi. **Introduction to Semiconductor Materials and Devices. New** York: John Wiley & Son, Inc. 1991.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

กระบวนการสร้างรอยต่อ P-N junction ในอุตสาหกรรม

กระบวนการสร้างรอยต่อพี-เอ็น จังชัน ด้วยกระบวนการแพร่สารเจือ(Diffusion Process) ซึ่งมีขั้นตอนคร่าวๆ ดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 กระบวนการสร้างรอยต่อ พี-เอ็น ในทางอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เคมีภัณฑ์ที่ใช้ในการผลิตไดโอดชนิดเซลล์

Phosphoric acid (CH_3COOH): กรดฟอสเฟอริค

เป็นกรดใช้ในกระบวนการเอทชิ่ง สำหรับไดโอดชนิดเซลล์ ซึ่งเป็นส่วนผสมของ Mix acid เพื่อกัดขอบแผ่นผลึกซิลิคอน (Dice)

Acetic acid (H_3PO_4): กรดอะเซติค

เป็นกรดใช้ในกระบวนการเอทชิ่ง ซึ่งจะทำหน้าที่เพื่อทำให้ความเป็นกรด Mix acid อ่อนลง เมื่อเป็นส่วนผสม Cleaning ในการผลิตไดโอดชนิดเซลล์

Ammonium Hydroxide (NH_4OH): แอมโมเนียมไฮดร็อกไซด์

เป็นเบสแก่ใช้ในการกัดขั้วโลหะเมื่อผสมกับสารเคมีชนิดอื่นในกระบวนการเอทชิ่ง

Sulfuric acid (H_2SO_4): กรดกำมะถัน

เป็นกรดแก่ใช้ในการทำความสะอาดแผ่นผลึกซิลิกอนและละลายสารไวแสงบนแผ่นผลึกภายหลังกระบวนการโฟโตลิโทกราฟฟี่

Nitric acid: (NHO_3)

เป็นกรดแก่ ซึ่งใช้สำหรับทำความสะอาดผิวหน้าของแผ่นผลึก เพื่อกำจัดเศษโลหะต่างๆ

Hydrofluoric acid (HF): กรดกัดแก้ว

เป็นกรดแก่ใช้สำหรับการสกัดชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ (Sio_2) โดยผสมกับสารละลายอื่น ๆ

Boron (B): โบรอน

เป็นธาตุในกลุ่มที่ 3 ใช้เป็นอะตอมสารเจือชนิด p ในการแพร่เพื่อสร้างเป็นส่วนเดรนและซอสในทรานซิสเตอร์ชนิดพีมอส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Isopropyl alcohol: ไอโซโปรพิล แอลกอฮอล์

เป็นสารละลายชนิดหนึ่ง ซึ่งใช้สำหรับการล้างทำความสะอาดแผ่นผลึกครั้งสุดท้ายก่อนทำให้แห้ง

Methylalcohol: เมทิลแอลกอฮอล์

เป็นสารละลาย ซึ่งใช้สำหรับล้างแผ่นผลึกในขั้นสุดท้าย เพื่อขจัดสารอื่น ๆ ก่อนทำให้แห้ง

Nitrogen: (N_2)

เป็นก๊าซเฉื่อยที่ใช้สำหรับทำหน้าที่ "carrier gas" ในการแพร่สารเจือลงไปในผลึกซิลิกอนหรือใช้สำหรับเป่าแผ่นผลึกให้แห้งภายหลังจากการล้าง

Oxygen (N_2): ออกซิเจน

เป็นก๊าซซึ่งใช้สำหรับกระบวนการออกซิเดชั่นเพื่อสร้างชั้นของซิลิกอนไดออกไซด์ขึ้น

Phosphorus: ฟอสฟอรัส

เป็นธาตุในกลุ่มที่ 5 ใช้เป็นอะตอมสารเจือชนิด n ในการแพร่เพื่อสร้างส่วนเดรนและซอสในพีมอส ทรานซิสเตอร์ทั่ว ๆไป

Silicon dioxide (SiO_2): ซิลิคอน ไดออกไซด์

ใช้เป็นชั้นป้องกันการแพร่ของสารเจือ และเป็นชั้นป้องกันผิวหน้าของแผ่นผลึกที่เสร็จสมบูรณ์แล้ว เตรียมได้ด้วยกระบวนการออกซิเดชั่น

Trichloroethylene: ไตรโคโรเอทีลีน

เป็นสารละลายซึ่งใช้สำหรับล้างไขมันและสิ่งสกปรกที่อยู่บนผิวแผ่นผลึกซิลิกอน หรือภาชนะอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

1. ค่าคงที่ทางฟิสิกส์

สัญลักษณ์	ความหมาย	ขนาด	หน่วย
q	ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน	1.60×10^{-19}	C
k	ค่าคงที่ของโบสมัน	1.38×10^{-23}	J/K
h	ค่าคงที่ของแพลงค์	6.63×10^{-34}	J-S
ε_o	ค่าเปอร์มิตติวิตี้ของสุญญากาศ	8.85×10^{-14}	F/cm
ε_s	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ของซิลิคอน	11.7	F/cm
ε_{ox}	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ของออกไซด์	3.97	F/cm
Q_{ss}	ความหนาแน่นของประจุที่ผิวสัมผัส		-
	ระหว่าง SiO กับ -ระนาบ(100)	1.4×10^{-8}	C/cm^2
Q_{ss}	-ระนาบ(111)	8.0×10^{-8}	C/cm^2
KT/q	แรงดันเนื่องจากความร้อน	0.0259	mV

2. คุณสมบัติของซิลิคอนไดออกไซด์

ชื่อ	ขนาด	หน่วย
น้ำหนักอะตอม	60.08	-
ความหนาแน่นอะตอม	2.3×10^{22}	cm^{-3}
ความต้านทาน(ที่300K)	$>10^{16}$	Ω-cm
ค่าไดอิเล็กตริก(ε_{ox})	3.9	-
จุดหลอมเหลว	≈1700	^oC
ความร้อนจำเพาะ	1.0	$j/g\,^oC$
การนำความร้อน	0.014	$W/cm\,^oC$
การขยายตัวเนื่องจากความร้อน	0.5×10^{-6}	$(^oC)^{-1}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. คุณสมบัติของซิลิคอน

ชื่อ	ขนาด	หน่วย
เลขอะตอม	14	-
น้ำหนักอะตอม	28.086	-
ความหนาแน่นอะตอม	2.96×10^{22}	cm^{-3}
ความหนาแน่น	2.328	g/cm^3
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก	11.7	-
พลังงานแถบต้องห้าม	1.115	eV
สัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิของพลังงานต้องห้าม	-2.3×10^{-24}	$eV/^oC$
จุดหลอมเหลว	1417	^oC
ความคล่องตัวของอิเล็กตรอนที่ผิว –ระนาบ(100)	580	$cm^2/V\text{-}s$
–ระนาบ(111)	190	$cm^2/V\text{-}s$
ความคล่องตัวของอิเล็กตรอนในเนื้อสาร –ระนาบ(100)	1260	$cm^2/V\text{-}s$
–ระนาบ(111)	1350	$cm^2/V\text{-}s$
ความคล่องตัวของโฮลที่ผิว –ระนาบ(100)	230	$cm^2/V\text{-}s$
–ระนาบ(111)	230	$cm^2/V\text{-}s$
ความคล่องตัวของโฮลในเนื้อสาร –ระนาบ(100)	400	$cm^2/V\text{-}s$
–ระนาบ(111)	480	$cm^2/V\text{-}s$
ดัชนีหักเห	3420	-
การนำความร้อน	1.57	$W/cm\Omega$
การขยายตัวเนื่องจากความร้อน	2.6×10^{-6}	$(^oC)^{-1}$
ค่าคงที่ของผลึก	5.4307	^oA
ความดันต่อหน่วยปริมาตร	0.98×10^{12}	cm^2/dyn
ฟังก์ชั่นงานของโฟโตอิเล็กตรอน	5.05	eV
ความแข็ง	7.0	MOHscale
ความร้อนในการละลาย	1000	J/g
ความหนาแน่นของพาหะของซิลิคอนบริสุทธ์	1.45×10^{10}	cm^{-3}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อ	ขนาด	หน่วย
ความดันไอ	$2.8x10^{-14}$	mm Hg
โครงสร้างผลึก	f_{∞}diamond	-
โครงสร้างผลึก	f_{∞}diamond	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

น้ำยาล้าง Dice

HAEMO – SOL (No-Scrub Cleaner)

ล้างแบบไม่ต้องขัดสำหรับการทำความสะอาดทันทีหลังจากการใช้ใน ห้องแล็บ , การผ่าตัด, และอุปกรณ์ส่วนกลาง ,อุปกรณ์ต่างๆ , เข็มฉีดยา,หลอดฉีดยา ,อุปกรณ์ที่ทำจากแก้ว, ท่อ , ยาง,พลาสติก HAEMO – SOL เป็นเครื่องหมายทางการค้า ของ Haemo- sol, Inc

สำหรับการทำความสะอาดด้วยมือและทำความสะอาดด้วยเครื่องอุลตราโซนิค

วิธีการใช้ : ใช้เพียง 0.5 ออนซ์ ต่อน้ำร้อน 1 แกลลอน (125 องศาเซลเซียส) แช่ไว้ 10 นาทีแล้วทำการล้างโดยการเขย่าในน้ำร้อน ยกเว้นอุปกรณ์จำพวกแก้ว และอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดประกายไฟ โดยเฉพาะการใช้กับอุปกรณ์ที่ทำจากแก้วที่มีความบาง ใช้ HAEMO – SOL 1/3 ถึง1/2 ออนซ์ต่อแกลลอน ในเครื่องอุลตราโซนิค ใช้ HAEMO – SOL N.S. (non – sudsing)แบบไม่ทำให้เกิดฟอง ในสภาวะความดันของเครื่องเมื่อไม่ได้ใช้ล้างในทันทีใช้ HAEMO – SOL E.A (Enzyme-Active)

วัสดุ Coating

Low visc Diode Coating

ข้อควรระวังในการใช้และการจัดการ

วัสดุนี้อาจทำให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนที่ติดไฟ ควรหลีกเลี่ยงการสัมผัสกับน้ำ แอลกอฮอล์, กรด ,เบส, และวัสดุที่ไวต่อปฏิกิริยา

สำหรับจุดประสงค์การวิจัยและพัฒนา(R&D) เท่านั้น : คุณสมบัติของสารประกอบยังไม่ได้ทำการศึกษาอย่างสมบูรณ์ วัสดุนี้หรืออย่างน้อยที่สุดส่วนประกอบของวัสดุนี้นั้นไม่ได้ขึ้นบัญชีเป็นสารเคมีที่เป็นสารพิษที่ต้องควบคุม การใช้และการกำจัดวัสดุนี้ควรที่จะถูกควบคุมอย่างมีประสิทธิภาพ

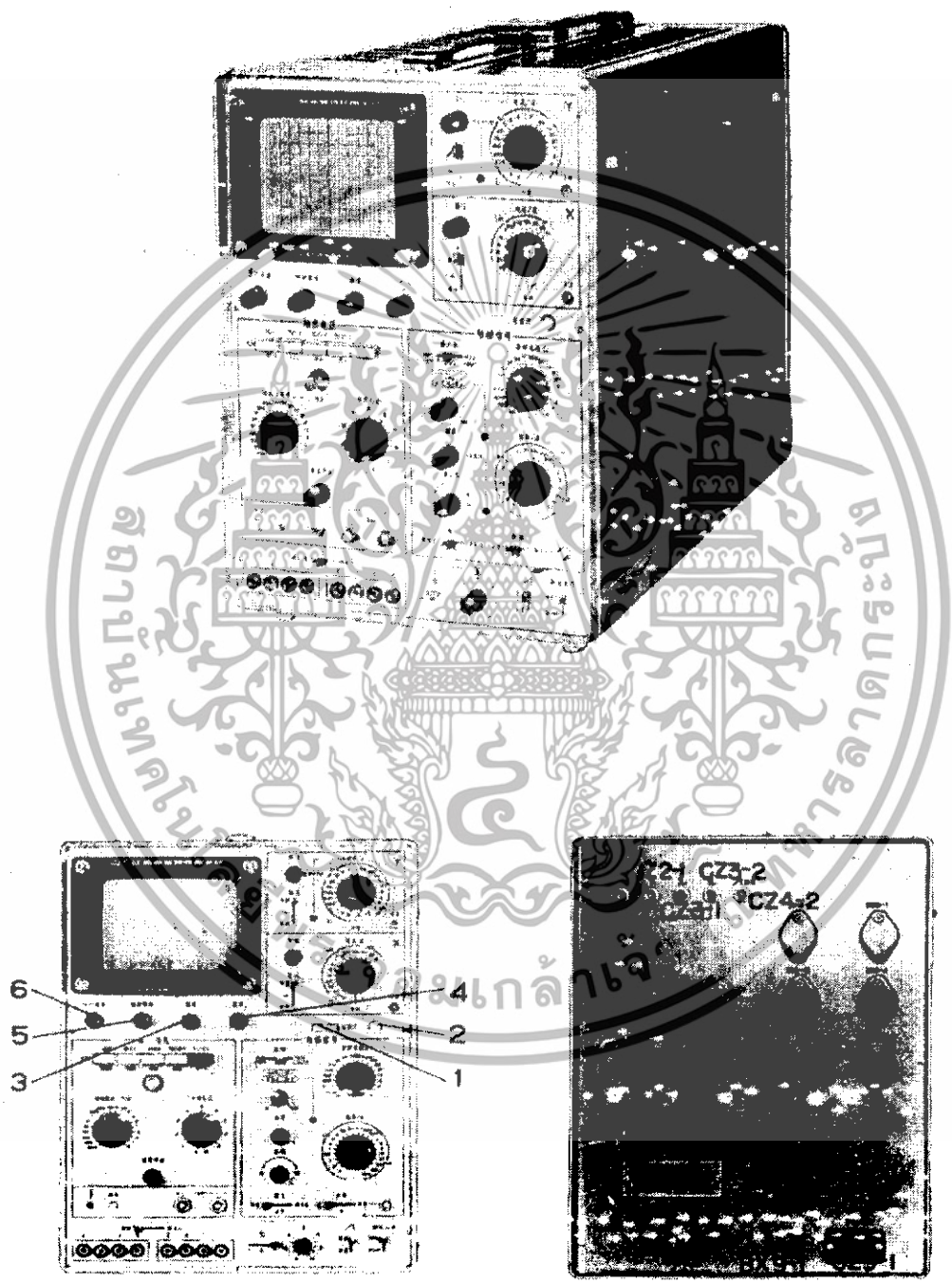
ฟอร์มาลดีไฮด์

เมื่อให้ความร้อนถึงอุณหภูมิมากกว่า 180 องศาเซลเซียส(356 องศาฟาเรนไฮด์) ในอากาศ, ผลผลิตที่ได้อาจจะทำให้เกิดไอของฟอร์มาลดีไฮด์ ข้อมูลความอันตรายของสารสามารถหาได้จาก Dow Corning Corporation และ Material Safety Data Sheet (รายละเอียดในการใช้สารนี้อย่างปลอดภัย)

มีคุณสมบัติเป็นฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง



รูปที่ ก-16 ลักษณะของเครื่อง High Curve Tracer (1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

คุณสมบัติของตะกั่ว

ทั่วไป

สัญลักษณ์	Pb
หมายเลขในตารางธาตุ	82
อนุกรมเคมี	โลหะหลังทรานซิชั่น
หมู่	14
คาบ	6
บล็อก	p
มวลอะตอม	207.21 กรัม/โมล
การจัดเรียงอิเล็กตรอน	[Xe] $4f^{14}$ $5d^{10}$ $6s^2$ $6p^2$

คุณสมบัติทางกายภาพ

ความหนาแน่น(ใกล้ r.t)	11.34 ก./ลบ.ซม.
ความหนาแน่นของของเหลวที่ m.p.	10.66 ก./ลบ.ซม.
จุดหลอมเหลว	600.61 K (1749°C)
จุดเดือด	2022 K(1749 °C)
ความร้อนของการหลอมเหลว	4.77 กิโลจูล/โมล
ความร้อนของการกลายเป็นไอ	179.5 กิโลจูล/โมล
ความร้อนจำเพาะ	(25 °C) 26.650 J/(mol·K)

คุณสมบัติของอะตอม

โครงสร้างผลึก	cubic face centered
สถานะออกซิไดเซชัน	4,2 (amphoteric oxide)
อิเล็กโตรเนกาติวิตี	2.33 (Pauling scale)

อื่นๆ

ความต้านทานไฟฟ้า	(20 °C) 208 nΩ·m
การนำความร้อน	(300 K) 35.3 W/(m·K)
การขยายตัวจากความร้อน	(25 °C) 28.9 µm/(m·K)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงTensile and Shear Strengths ของLead-free Solder Alloys:

Lead-free Solder Alloy	Temperature (°F)		Tensile Strength (psi)	Shear Strength (psi)	Density (g/cm^3)
	Solidus	Liquidus			
Sn (pure)	450	450	1800	2560	7.31
Sn-3.5Ag	430	430	8900	4600	7.36
Sn-5Ag	430	473	10100	8400	7.45
Sn-3Cu	441	635	6420	NA	7.34
Sn-5Sb	450	464	5900	6200	7.26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้