

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษา ออกแบบ และสร้าง ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกทเป็นฉนวน

STUDY ON DESIGN AND FABRICATION OF
INSULATED GATE BIPOLAR TRANSISTOR



นายพอล รุจนพิชญ์
MR. POOPOL RUJANAPICH

วิทยานิพนธ์
ห้ามนำออกนอกห้องสมุด

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2538

ISBN 974-621-324-5

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้ง

เลขหม.....

เลขทะเบียน..... 23568

วันที่..... 6 มี.ค. 2538

**STUDY ON DESIGN AND FABRICATION OF
INSULATED GATE BIPOLAR TRANSISTOR**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FUFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
GRADUATE SCHOOL
KING MONGKUT'S INSTITUE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

1995

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ ISBN 974-621-324-5 นี้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษา ออกแบบและสร้าง ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ ที่มีเกทเป็นฉนวน
นักศึกษา	นายพอล รุจนพิชญ์
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ.วิสุทธิ์ ชูติรุ่งเรือง
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม	อ.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ
ระดับการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
ภาควิชา	อิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ ทหารลาดกระบัง
พ.ศ.	2538

บทคัดย่อ

ปัจจุบันอุปกรณ์กำลังที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในวงจรอิเล็กทรอนิกส์โดยทั่วไปได้แก่ ทรานซิสเตอร์กำลังและมอสเฟตกำลัง แต่เนื่องจากอุปกรณ์ทั้งสองยังมีข้อจำกัดในการทำงานที่แตกต่างกันออกไปกล่าวคือ ทรานซิสเตอร์กำลังจะมีอัตราการสูญเสียสภาพความนำในสภาวะนำกระแสต่ำ ทนแรงดันและขยายกระแสได้สูงแต่มีการตอบสนองความถี่อยู่ในระดับปานกลาง ในขณะที่มอสเฟตกำลังนั้นจะมีลักษณะที่ตรงกันข้ามคือมีการตอบสนองความถี่ในระดับสูงกว่า แต่อัตราการสูญเสียสภาพความนำในสภาวะนำกระแสก็สูงเช่นกัน จึงได้มีการคิดค้นอุปกรณ์กำลังอีกชนิดหนึ่งขึ้นมาเพื่อแก้ไขข้อจำกัดในการทำงานของอุปกรณ์ทั้งสอง โดยเรียกอุปกรณ์ชนิดนี้ว่า ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกทเป็นฉนวน (Insulated Gate Bipolar Transistor: IGBT) อุปกรณ์ชนิดนี้จะรวมเอาข้อได้เปรียบของอุปกรณ์ทั้งสองที่กล่าวมาเข้าไว้ด้วยกัน ซึ่งจะทำให้ อุปกรณ์ชนิดนี้สามารถทำงานที่ความถี่ระดับต่ำและกลางได้ดีและยังสามารถเพิ่มกำลังได้โดยการเพิ่มทั้งกระแสและแรงดัน จึงเหมาะที่จะนำมาใช้งานแทนอุปกรณ์กำลังแบบเก่าในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ได้เป็นอย่างดี

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะได้นำเสนอถึงแนวทางการออกแบบกระบวนการสร้างมาตรฐาน กระบวนการเก็บบรรจุ และการทดลองและผลการทดลองของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกทเป็นฉนวนทั้งในโครงสร้างในแนวระนาบและโครงสร้างในแนวตั้ง ในลักษณะของอุปกรณ์เดี่ยวๆ โดยใช้เทคนิคการแพร่อะตอมสารเจือ 2 ครั้งลงบนแผ่นผลึกซิลิกอนแบบอพิทาซี ชนิด N/P⁺ ซึ่งไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกทเป็นฉนวนที่ได้จะมีโครงสร้างผสมกันระหว่างโครงสร้างเกตแบบมอสเฟตและการนำกระแสแบบไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ ทำให้มีอินพุทอิมพีแดนซ์สูงและมีความต้านทานในสภาวะนำกระแสต่ำ ส่งผลให้มีการสูญเสียกำลังด้านอินพุตต่ำและมีความหนาแน่นกระแสสูง อย่างไรก็ตามระหว่างช่วงคอลเลกเตอร์กับอิมิตเตอร์จะมีโครงสร้างแผ่น

ของ P-N-P-N ไทริสเตอร์อยู่ ซึ่งจะเป็นสาเหตุให้เกิดปรากฏการณ์แลตช์-อัฟขึ้น ทำให้เกทแบบมอสเฟตไม่สามารถควบคุมการไหลของกระแสได้

สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการศึกษา ออกแบบ และสร้างอุปกรณ์ IGBT โดยเริ่มจากการศึกษาความสามารถในการนำกระแส ความต้านทานในสภาวะนำกระแส ความสามารถในการทนแรงดันพังทลาย ปรากฏการณ์เกิดแลตช์-อัฟ ความเร็วในการสวิตช์ซิ่ง ตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกทเป็นฉนวน รวมถึงการศึกษการพัฒนาโครงสร้างเพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการทำงานของอุปกรณ์ IGBT



Thesis Title	Study On Design And Fabrication of Insulated Gate Bipolar Transistor
Student	Mr.Poopol Rutjanapich
Thesis Advisor	Assit.Prof.Wisut Titiroongroung
Thesis Co-Advisor	Mr.Surasak Niemcharoen
Level of Study	Master of Electrical Engineering
Year	1995

ABSTRACT

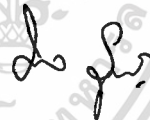
Power Bipolar Transistor and Power MOSFET are the most commercial advanced devices. Each device has characteristics that complement each other in some respects. Power Bipolar Transistors have lower conduction losses in the on-state, larger blocking voltages, but low switching speed. In contrast Power MOSFETs can switch faster, but conduction losses in on-state are higher. Now a days, the new structure has been designed in order to overcome to the performance limitations of Power Bipolar Transistor and Power MOSFET. Such the device is know as the **Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT)** . This device has significant superior characteristics for low and medium frequency applications compared to Power Bipolar Transistors and Power MOSFETs. Furthermore, its power rating can be improved by increasing both current and voltage. For this reason, this device more preferable over Power Bipolar Trasistors and Power MOSFETs in many electronic systems and applications.

The design, , the fabrication process, the packing assembly and the experimental results of discrete planar and verticle IGBT are studied and reported in this thesis. The device is fabricated by using the double diffusion technique N/P⁺ type silicon epitaxial initial wafers. With the combination of MOS gate structure and bipolar current conduction, the IGBT structure can give not only a very high input impedance but also the high operating forward current density. However, on the other side, such a structure has a parasitic P-N-P-N thyristor occurs between its collector and emitter terminals. This parasitic structure causes the latch-up effect in IGBT that makes the current to be no longer controlled by the MOS gate. This research begins with a study on parameters that can affect current conduction capability, on-resistance, breakdown voltge and switching speed.

กิตติกรรมประกาศ

การที่วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์เป็นรูปเล่มขึ้นมานั้นก็ด้วยความร่วมมือและช่วยเหลือจากอาจารย์และเจ้าหน้าที่ทุกท่านในศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล. ทางผู้วิจัยขอขอบคุณทุกท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ขอขอบคุณ รศ.ดร.สมเกียรติ สุขเกษ ผู้ให้คำปรึกษาตลอดจนชี้แนะแนวทางให้งานวิจัยต่างๆ ได้บรรลุเป้าหมาย ขอขอบคุณ ผศ.วิสุทธิ์ ชูติรุ่งเรือง ผู้ให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทางในการแก้ปัญหาทั้งทางทฤษฎีและปฏิบัติ อีกทั้งยังช่วยเหลือสนับสนุนในเรื่องของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวิจัยและตรวจทานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอขอบคุณ อ.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ ผู้ให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทางในการแก้ปัญหาทั้งทางทฤษฎีและปฏิบัติและตรวจทานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอขอบคุณ นายภควัต สรวายสุวรรณ ผู้ให้ความช่วยเหลือในการปฏิบัติงานวิจัย ขอขอบคุณ นส.จริยา สุปัญญาโชติสกุล ที่ให้ความช่วยเหลือในการพิมพ์วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอขอบคุณมูลนิธิเพื่อการศึกษาคอมพิวเตอร์และการสื่อสาร ที่ให้ความสนับสนุนทุนการศึกษาแก่ผู้ทำวิจัยในปีการศึกษา 2535-2536 และขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย สจล. ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อและคุณแม่ ผู้ให้การสนับสนุนทางการศึกษามาโดยตลอด



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	III
กิตติกรรมประกาศ	IV
สารบัญ	V
สารบัญตาราง	IX
สารบัญภาพ	X
สัญลักษณ์	XV
ศัพท์เทคนิค	XVII
คำนำ	XX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมา	1
1.2 ประเภทของอุปกรณ์กำลังชนิดมอส-ไบโพลาร์	2
1.3 การเปรียบเทียบระหว่าง IGBT มอสเฟตกำลังและทรานซิสเตอร์	4
บทที่ 2 ทฤษฎี IGBT	5
2.1 โครงสร้างและหลักการทำงานขั้นพื้นฐานของอุปกรณ์ IGBT	5
2.2 การวิเคราะห์การทำงานของอุปกรณ์ IGBT	8
2.2.1 ความสามารถในการปิดกั้นย้อนกลับ	8
2.2.2 ความสามารถในการปิดกั้นไปหน้า	9
2.2.3 การนำกระแสไปหน้า	10
2.2.3.1 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลกเตอร์	10
กับแรงดันคอลเลกเตอร์-อิมิตเตอร์โดยใช้แบบจำลองพี-ไอ-เอ็น	
เร็กติไฟเออร์/มอสเฟต	
2.2.3.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลกเตอร์กับ	13
แรงดันคอลเลกเตอร์-อิมิตเตอร์โดยใช้แบบจำลอง มอสเฟต	
/ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์	
2.2.4 แลทซ์-ออฟ	15
2.3 การตอบสนองความถี่ภาวะชั่วคราว	16
2.3.1 การควบคุมการตัดกระแส	16
2.3.2 ช่วงเวลาตัดกระแส	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 แรงดันพังทลายของทรานซิสเตอร์แบบเบสเปิด	19
2.5 IGBT โครงสร้างแบบไม่สมมาตร	20
2.6 การแพร่สารเจือ	21
2.6.1 Predeposition	21
2.6.2 การขั้บลึก	25
บทที่ 3 การออกแบบอุปกรณ์ IGBT	26
3.1 การเลือกแผ่นผลึกเริ่มต้น	26
3.2 การออกแบบโครงสร้าง	26
3.2.1 การออกแบบอุปกรณ์ IGBT โครงสร้างในแนวระนาบ	27
3.2.2 การออกแบบอุปกรณ์ IGBT โครงสร้างในแนวตั้ง	28
3.3 การออกแบบเพื่อศึกษาผลของความกว้างของชั้น N-base	29
3.4 การออกแบบโครงสร้างฟิลดริงค์ใน IGBT	29
3.5 การออกแบบความกว้างของเกทออกไซด์	30
3.6 โครงสร้างแบบไม่สมมาตร	31
3.7 การออกแบบและสร้างกระเจกต้นแบบ	32
บทที่ 4 กระบวนการสร้างและเก็บบรรจุอุปกรณ์ IGBT	40
4.1 กระบวนการสร้างสารกึ่งตัวนำในแนวระนาบ	42
4.1.1 การปลูกผลึกซิลิกอน	43
4.1.1.1 วิธีโซครอสติค	43
4.1.1.2 วิธีโฟลทโซน	44
4.1.2 กระบวนการอิพิทาซี	44
4.1.3 กระบวนการออกซิเดชัน	45
4.1.4 กระบวนการโฟโวลติโทกราฟี	46
4.1.5 กระบวนการแพร่สารเจือ	47
4.1.6 กระบวนการสร้างลวดลายโลหะ	47
4.2 กระบวนการเก็บบรรจุสารกึ่งตัวนำ	48
4.2.1 การตัดแยกชิพ	48
4.2.2 การติดชิพลงตัวถัง	48
4.2.3 การต่อสาย	49
4.2.4 การฉนึ่กฝา	49
4.2.5 การตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าครั้งสุดท้าย	49
4.3 กระบวนการสร้างมาตรฐานและเก็บบรรจุอุปกรณ์ IGBT	50

4.3.1	กระบวนการสร้างมาตรฐาน	50
4.3.2	กระบวนการเก็บบรรจุ IGBT	52
บทที่ 5	การทดลองและผลการทดลอง	56
5.1	การทดสอบโครงสร้างทางเรขาคณิตของ IGBT	56
5.1.1	การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อพี-เอ็น ของ IGBT	56
5.1.2	การทดสอบการทำงานของ IGBT ในลักษณะทรานซิสเตอร์	59
5.1.3	การศึกษาผลของการฉีดยุโรปะจุพาหะส่วนน้อยต่อความสามารถในการนำกระแส ของ IGBT	62
5.2	การศึกษาผลของความกว้างชั้น N-base ต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ IGBT	65
5.2.1	ผลของความกว้างชั้น N-base ต่อกระแสคอลเลกเตอร์	65
5.2.2	ผลของความกว้างชั้น N-base ต่อค่าทรานคอนดักแตนซ์	67
5.2.3	ผลของความกว้างชั้น N-base ต่อความต้านทานในสภาวะนำกระแส	69
5.3	การศึกษาปรากฏการณ์แลตซ์-ออฟในอุปกรณ์ IGBT	71
5.3.1	การศึกษาผลของความกว้างของชั้น N-base ต่อกระแสแลตซ์-ออฟใน IGBT	71
5.3.2	การศึกษาผลของชั้น P ⁺ -sinker ต่อกระแสแลตซ์-ออฟ	73
5.4	การศึกษาผลของ P ⁺ -guardring ต่อความสามารถในการทำงานของ IGBT	75
5.4.1	ผลของ P ⁺ -guardring ต่อการป้องกันกระแสรั่ว	75
5.4.2	ผลของ P ⁺ -guardring ต่อความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลกเตอร์ กับแรงดันคอลเลกเตอร์-อิมิตเตอร์	78
5.5	การศึกษาผลของความกว้างของเกทออกไซด์ต่อความสามารถในการนำ กระแสของอุปกรณ์ IGBT	83
5.6	การศึกษาความเร็วในการสวิตช์ของ IGBT	86
5.7	การศึกษาโครงสร้างแบบไม่สมมาตรของอุปกรณ์ IGBT .	88
5.7.1	การศึกษาแรงดันพังทลายของอุปกรณ์ IGBT โครงสร้างแบบไม่สมมาตร	88
5.7.2	ผลของโครงสร้างแบบไม่สมมาตรต่อช่วงเวลาตัดกระแส	90
5.8	การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการทำงานของ IGBT	92
5.8.1	การนำกระแสไปหน้า	92
5.8.4	ความเร็วในการสวิตช์	95
5.9	การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ IGBT กับมอสเฟตกำลังแบบตีมอส	97
5.10	การทดสอบ IGBT ที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่	99
บทที่ 6	สรุปและวิจารณ์	102

ภาคผนวก ก		107
	1. ค่าคงที่ทางฟิสิกส์	107
	2. คุณสมบัติของซิลิกอนไดออกไซด์	107
	3. คุณสมบัติของซิลิกอน	108
ภาคผนวก ข	รายละเอียดกระบวนการสร้าง IGBT	109
ภาคผนวก ค	1. การหาความหนาแน่นอะตอมสารเจือ	119
	2. การหาความลึกของรอยต่อ (X _j) ด้วยวิธี grooving	119
ประวัติผู้เขียน		122



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 เปรียบเทียบตัวแปรของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกทเป็นฉนวน มอสเฟตกำลังและไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์กำลัง	4
ตารางที่ 2.1 แสดงสารประกอบแหล่งกำเนิดสารเจือ	24
ตารางที่ 4.1 กระบวนการสร้าง IGBT บนแผ่นผลึกฐานรองชนิดซิลิกอน	50
ตารางที่ 4.2 กระบวนการเก็บและบรรจุ IGBT	52
ตารางที่ 5.1 แสดงผลของความเร็วในการสวิตซ์ของอุปกรณ์ IGBT	88
ตารางที่ 5.2 แสดงค่าตัวแปรต่างๆของ IGBT และมอสเฟตกำลังแบบดีมอส	98
ตารางที่ 5.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของ IGBT โครงสร้างขนาดใหญ่	101



สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 ภาพตัดขวางและวงจรมูลของทรานซิสเตอร์ที่มีเกทแบบมอส	2
รูปที่ 1.2 ภาพตัดขวางและวงจรมูลของมอสควมคุมทรานซิสเตอร์	2
รูปที่ 1.3 ภาพตัดขวางและวงจรมูลของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกทเป็นฉนวน	3
รูปที่ 1.4 วงจรมูลอย่างง่ายและสัญลักษณ์ที่ใช้แทน IGBT	3
รูปที่ 2.1 โครงสร้างภาพตัดขวางของอุปกรณ์	5
ก.) ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกทเป็นฉนวน	
ข.) มอสเฟตกำลังแบบคิมอส	
รูปที่ 2.2 แสดงการให้แรงดันไบอัสกับอุปกรณ์ IGBT เพื่อให้ทำงานในลักษณะ ปิดกั้นย้อนกลับ	6
รูปที่ 2.3 แสดงการให้แรงดันไบอัสกับอุปกรณ์ IGBT เพื่อให้ทำงานในลักษณะ ปิดกั้นไปหน้า	6
รูปที่ 2.2 แสดงการให้แรงดันไบอัสกับอุปกรณ์ IGBT เพื่อให้ทำงานในลักษณะ นำกระแสไปหน้า	7
รูปที่ 2.5 คุณสมบัติของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของ IGBT	8
รูปที่ 2.6 ก.) ภาพตัดขวางของ IGBT ที่แสดงแบบจำลองแบบ พี-ไอ-เอ็น/มอส	10
ข.) วงจรมูลของแบบจำลองแบบ พี-ไอ-เอ็น/มอส ของ IGBT	
รูปที่ 2.7 คุณสมบัติการนำกระแสไปหน้าของ IGBT ในช่วงเชิงเส้น	13
รูปที่ 2.8 (ก.) ภาพตัดขวาง IGBT ที่แสดงแบบจำลองแบบมอสเฟต/ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์	13
(ข.) วงจรมูลอย่างง่ายของแบบจำลองแบบมอสเฟต/ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์	
รูปที่ 2.9 กราฟรูปคลื่นของการตัดกระแสด้วยการควบคุมแรงดันที่เกทใน IGBT	17
รูปที่ 2.10 กราฟรูปคลื่นของช่วงเวลาตัดกระแสที่ความต้านทานที่เกทค่าต่างกัน	17
รูปที่ 2.11 ช่วงเวลาในการตัดกระแสของ IGBT ที่กระแสคอลเลกเตอร์ค่าต่างกัน	18
รูปที่ 2.12 แรงดันพังทลายของโครงสร้างทรานซิสเตอร์แบบเบสเปิด	19
รูปที่ 2.13 การกระจายสนามไฟฟ้าของ IGBT	21
(ก.) โครงสร้างแบบสมมาตร (ข.) โครงสร้างแบบไม่สมมาตร	
รูปที่ 2.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Solid solubility ของสารเจือต่างๆในซิลิกอน	23
รูปที่ 2.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมสารเจือต่างชนิดกับ อุณหภูมิ	23
รูปที่ 2.16 กราฟเฟอร์มิเลเวลเพื่อหาการกระจายของสารเจือทั้งแบบ erf และ Gaussian	24

รูปที่ 2.17 การกระจายความหนาแน่นอะตอมสารเจือหลังจากการ predeposition และการ ขบลิค	25
รูปที่ 3.1 โครงสร้าง $N^+ - P - N - P^+$ ในแนวระนาบของ IGBT	27
รูปที่ 3.2 โครงสร้าง $N^+ - P - N - P^+$ ในแนวตั้งของ IGBT	28
รูปที่ 3.3 โครงสร้าง IGBT ที่มีส่วน P^+ -sinker ในโครงสร้างส่วนที่เป็นมอสเฟต	29
รูปที่ 3.4 ทิศทางการไหลของกระแสในอุปกรณ์ IGBT กรณีที่มีฟิลต์ริงค์	30
รูปที่ 3.5 โครงสร้างในแนวระนาบที่ใช้ศึกษาความกว้างของเกตออกไซด์ที่เหมาะสม	31
รูปที่ 3.6 ภาพตัดขวางของ IGBT โครงสร้างแบบไม่สมมาตร	31
รูปที่ 3.7 ลวดลายทั้งหมดของ IGBT ในแนวระนาบที่ออกแบบบนกระดาษกราฟไข	33
รูปที่ 3.8 ลวดลายทั้งหมดของ IGBT ในแนวตั้งที่ออกแบบบนกระดาษกราฟไข	33
รูปที่ 3.9 ฟิล์มกระจกที่ออกแบบใช้สำหรับกระบวนการสร้าง IGBT โครงสร้างในแนว ระนาบ	35
ก.) ฟิล์มกระจกสำหรับสร้างชั้น N-buffer	
ข.) ฟิล์มกระจกสำหรับสร้างชั้น P^+ -collector	
ค.) ฟิล์มกระจกสำหรับสร้างชั้น P-base	
ง.) ฟิล์มกระจกสำหรับสร้างชั้น N^+ -emitter	
จ.) ฟิล์มกระจกสำหรับสร้างเกตออกไซด์	
ฉ.) ฟิล์มกระจกสำหรับเปิดช่องสัมผัสโลหะ	
ช.) ฟิล์มกระจกสำหรับสร้างขั้วสัมผัสโลหะ	
รูปที่ 3.10 ฟิล์มกระจกที่ออกแบบใช้สำหรับกระบวนการสร้าง IGBT โครงสร้างในแนวตั้ง	37
ก.) ฟิล์มกระจกสำหรับสร้างชั้น P-base	
ข.) ฟิล์มกระจกสำหรับสร้างชั้น N^+ -emitter	
ค.) ฟิล์มกระจกสำหรับสร้างเกตออกไซด์	
ง.) ฟิล์มกระจกสำหรับเปิดช่องสัมผัสโลหะ	
จ.) ฟิล์มกระจกสำหรับสร้างขั้วสัมผัสโลหะ	
รูปที่ 3.11 การออกแบบลวดลายต้นแบบลงบนกระดาษกราฟไข	37
รูปที่ 3.12 การตัดลวดลายต้นแบบบนแผ่น โพลีเอสเตอร์ด้วยเครื่องมือโครคัตเตอร์	38
รูปที่ 3.13 แผ่น โพลีเอสเตอร์ต้นแบบที่ตัดเสร็จแล้ว	38
รูปที่ 3.14 กระจกต้นแบบที่พร้อมสำหรับกระบวนการสร้างอุปกรณ์ IGBT	39
รูปที่ 4.1 กระบวนการสร้างทั้งหมดของอุปกรณ์ IGBT	41

รูปที่ 4.2	ขั้นตอนพื้นฐานของกระบวนการสร้างในแนวระนาบ ก.) ผลึกซิลิกอนชนิด P ⁺ ข.) อีพิตาซี ค.) ออกซิเดชัน ง.) โฟโวลีโทกราฟี จ.) การแพร่สารเจือ ฉ.) การสร้างลวดลายโลหะ	42
รูปที่ 4.3	การปลูกผลึกแบบโซคลาสกี	43
รูปที่ 4.4	การปลูกผลึกแบบโฟลทโซน	44
รูปที่ 4.5	กระบวนการโฟโวลีโทกราฟี	46
รูปที่ 4.6	ตัวถังโลหะที่ใช้เก็บบรรจุสารกึ่งตัวนำ (ก.) ตัวถังแบบ TO-5 (ข.) ตัวถังแบบ TO-3	49
รูปที่ 4.7	กระบวนการสร้าง IGBT ในแนวระนาบและกระจกดันแบบ	54
รูปที่ 4.8	กระบวนการสร้าง IGBT ในแนวตั้งและกระจกดันแบบ	55
รูปที่ 5.1	กราฟคุณสมบัติ I-V ของรอยต่อพี-เอ็น ระหว่าง N-base กับ P ⁺ -collector	57
รูปที่ 5.2	กราฟคุณสมบัติ I-V ของรอยต่อพี-เอ็น ระหว่าง P-base กับ N-base	57
รูปที่ 5.3	กราฟคุณสมบัติ I-V ของรอยต่อพี-เอ็น ระหว่าง N ⁺ -emitter กับ P-base	58
รูปที่ 5.4	ภาพถ่ายด้านบนของ IGBT โครงสร้างในแนวระนาบที่มีความกว้างของชั้น N-base เท่ากับ 120 μm	59
รูปที่ 5.5	ภาพตัดขวางและลวดลายด้านบนของอุปกรณ์ IGBT โครงสร้างในแนวระนาบ	60
รูปที่ 5.6	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลกเตอร์กับแรงดันคอลเลกเตอร์-อิมิตเตอร์ (0.5V/step, 9step, 5mA/Div., 1V/Div.)	60
รูปที่ 5.7	แรงดันขีดเริ่ม V_T (5mA/D, 0.5V/Div.)	61
รูปที่ 5.8	กระแสรั่วไหล (0.05mA/D, 1V/Div.)	61
รูปที่ 5.9	แรงดันปิดกั้นไปหน้า	61
รูปที่ 5.10	Diode Knee (0.2V/step, 7step, 0.05mA/D, 0.2V/Div.)	62
รูปที่ 5.11	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลกเตอร์กับแรงดันคอลเลกเตอร์-อิมิตเตอร์ ของ IGBT	64
รูปที่ 5.12	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเดรน-ซอสของ DMOS	64
รูปที่ 5.13	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลกเตอร์ในช่วงอิมิตต์กับความกว้าง ของชั้น N-base ที่ $V_G=3.5\text{V}$. และ $V_{DD}=10\text{V}$.	66
รูปที่ 5.14	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าทรานคอนดักแตนซ์กับค่าความกว้างของชั้น N-base	68
รูปที่ 5.15	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานในสภาวะนำกระแสกับค่าความ กว้างของชั้น N-base	70

รูปที่ 5.16 ก.) ลักษณะกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I_C กับ V_{CE} ของ IGBT ขณะเกิด แลตซ์-ออฟ	72
ข.) วงจรสมมูลแสดงการไหลของกระแสคอลเลกเตอร์ขณะเกิดแลตซ์-ออฟ	72
รูปที่ 5.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสที่เกิดปรากฏการณ์ แลตซ์-ออฟกับค่าความกว้างของชั้น N-base	73
รูปที่ 5.18 ภาพตัดขวางของอุปกรณ์ IGBT โครงสร้างที่มีชั้น P^+ -sinker	74
รูปที่ 5.19 ภาพตัดขวางและลวดลายด้านบนของอุปกรณ์ IGBT ที่มีโครงสร้าง P^+ -sinker	74
รูปที่ 5.20 ภาพตัดขวางและลวดลายด้านบนของอุปกรณ์ IGBT ที่มีโครงสร้าง P^+ -guardring	76
รูปที่ 5.21 ภาพถ่ายด้านบนของอุปกรณ์ IGBT ที่มีโครงสร้างในแนวระนาบและมี P^+ -guardring เท่ากับ $20 \mu m$	77
รูปที่ 5.22 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกระแสรั่วไหลในโครงสร้าง IGBT กับความ กว้างของ P^+ -guardring	78
รูปที่ 5.23 กราฟสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการนำกระแส กับความกว้างของ P^+ -guardring ของอุปกรณ์ IGBT โครงสร้างแนวระนาบ ($V_G = 7 V.$ และ $V_{CE} = 10 V.$)	79
รูปที่ 5.24 ลักษณะของกราฟคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลกเตอร์กับแรง ดันคอลเลกเตอร์-อิมิตเตอร์ ที่ความกว้างของ P^+ -guardring ค่าต่างๆ	80
รูปที่ 5.25 ลักษณะการขยายตัวของบริเวณปลอดประจุพาหะในโครงสร้าง IGBT ก.) ไม่มี guardring ข.) มี guardring แต่แรงดัน V_{CE} ต่ำ ค.) มี guardring แต่แรงดัน V_{CE} สูง	82
รูปที่ 5.26 ภาพถ่ายด้านบนของอุปกรณ์ IGBT ที่มี $L = 5 \mu m, W = 4,800 \mu m,$ $L_{N-base} = 60 \mu m$ และ $L_{gate} = 20 \mu m$	83
รูปที่ 5.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลกเตอร์ในช่วงอิมิตต์กับความกว้างของ เกตออกไซด์ (ที่ $V_G = 7 V.$ และ $V_{CE} = 10 V.$)	84
รูปที่ 5.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลกเตอร์กับแรงดันคอลเลกเตอร์- อิมิตเตอร์ของ อุปกรณ์ IGBT ที่มี $L = 5 \mu m, W = 4,800 \mu m$ และ $L_{N-base} =$ $60 \mu m$ โดยมีความกว้างของเกตคือ ก.) $10 \mu m$ ข.) $15 \mu m,$ ค.) $20 \mu m,$ ง.) $30 \mu m$ จ.) $40 \mu m$ และ ฉ.) $50 \mu m$	85
รูปที่ 5.29 ก.) วงจรวัดการตอบสนองสัญญาณไฟฟ้ารูปสี่เหลี่ยม ข.) สัญญาณไฟฟ้ารูปสี่เหลี่ยมที่ใช้วัดค่า $t_r, t_f, t_{d(on)}, t_{stg}$	87

รูปที่ 5.30 สัญญาณ Input และ Output (invers) ของอุปกรณ์ IGBT ที่วัดโดย (ก.) $V_{CE} = +10 \text{ V}$. (ข.) $V_{CE} = +15 \text{ V}$	87
รูปที่ 5.31 ภาพตัดขวางและลวดลายด้านบนของอุปกรณ์ IGBT โครงสร้างแบบ ไม่สมมาตร	89
รูปที่ 5.32 ผลการตอบสนองสัญญาณไฟฟ้ารูปสี่เหลี่ยมของอุปกรณ์ IGBT ก.) Input duty cycle = 2 % , pulse width = 0.4 μs (Ver:1V/div,Hor:0.1 $\mu\text{s}/\text{div}$) ข.) Output ของโครงสร้างแบบสมมาตร (Ver:1V/div,Hor:0.1 $\mu\text{s}/\text{div}$) ค.) Output ของโครงสร้างแบบไม่สมมาตร (Ver:1V/div,Hor:0.1 $\mu\text{s}/\text{div}$)	91
รูปที่ 5.33 รูปถ่ายชุดทดสอบวัดการตอบสนองสัญญาณคลื่นรูปสี่เหลี่ยม	92
รูปที่ 5.34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานในสภาวะนำกระแสของ IGBT กับอุณหภูมิ	93
รูปที่ 5.35 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าทรานคอนดักแตนซ์ของ IGBT กับอุณหภูมิ	94
รูปที่ 5.36 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันตกคร่อมรอยต่อ P ⁺ -collector กับ N-base ใน IGBT กับอุณหภูมิ	94
รูปที่ 5.37 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลกเตอร์ใน IGBT กับอุณหภูมิ (ที่ $V_G = 3.5 \text{ V}$)	94
รูปที่ 5.38 รูปถ่ายอุปกรณ์ที่ใช้วัดผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงสัญญาณรูปคลื่น สี่เหลี่ยม	96
รูปที่ 5.39 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาที่ตัดกระแสกับอุณหภูมิ	96
รูปที่ 5.40 เปรียบเทียบโครงสร้างระหว่าง IGBT กับ DMOS	98
รูปที่ 5.41 ลวดลายตัวอย่างด้านบนของอุปกรณ์ IGBT โครงสร้างแนวตั้งขนาดใหญ่	100
รูปที่ 5.42 ภาพถ่ายด้านบนของอุปกรณ์ IGBT โครงสร้างแนวตั้งขนาดใหญ่	100

สัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
C_{OX}	ความจุไฟฟ้าของออกไซด์	A/cm^2
D_a	สัมประสิทธิ์การแพร่	cm^2/s
D_1	สัมประสิทธิ์การแพร่ในการ Predeposition	cm^2/s
D_2	สัมประสิทธิ์การแพร่ในการ Drive-in	cm^2/s
$2d$	ความกว้างของชั้น N-base ที่แรงดันปิดกั้นสูงสุด	μm
$erfc$	องค์ประกอบของฟังก์ชันคลาดเคลื่อน	-
f_T	ความถี่คัท-ออฟ	MHz
g_{msat}	ค่าทรานคอนดักแตนซ์ในช่วงอิ่มตัว	$m\Omega^{-1}$
I_E	กระแสอิ่มิตเตอร์	A
I_c	กระแสที่เกิดจากการไหลของอิเล็กตรอน	A
I_h	กระแสที่เกิดจากการไหลของโฮล	A
$J_{F,PIN}$	ความหนาแน่นกระแสพี-ไอ-เอ็น	A/cm^2
k	ค่าคงที่ของโบสมันต์	J/k
L	ความยาวของช่องทางเดินกระแส	μm
L_a	ระยะการแพร่	μm
L_p	ระยะการแพร่ของประจุพาหะส่วนน้อย	μm
l	ความกว้างของบริเวณปลอดประจุพาหะในชั้น N-base	μm
N_A	ความหนาแน่นอะตอมสารเจือผู้รับ	cm^{-3}
N_{BG}	ความหนาแน่นอะตอมสารเจือพื้นหลัง	cm^{-3}
N_D	ความหนาแน่นอะตอมสารเจือผู้ให้	cm^{-3}
N_i	ความหนาแน่นอะตอมสารเจืออินทรินซิก	cm^{-3}
N_0	ค่า solid solubility ของสารเจือ	cm^{-3}
Q	ความหนาแน่นอะตอมสารเจือทั้งหมด	cm^{-3}
q	ค่าประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน	C
R_{on}	ความต้านทานในสภาวะนำกระแส	Ω
R_p	ความต้านทานในชั้น N-base	Ω
T	อุณหภูมิสัมบูรณ์	K
t_1	เวลาในการ deposition	s
t_2	เวลาในการขับเคลื่อน	s

V_{BV}	แรงดันพังทลาย	V
V_{CE}	แรงดันคอลเลกเตอร์-อิมิตเตอร์	V
V_F	แรงดันตกคร่อม IGBT	V
$V_{F, MOS}$	แรงดันตกคร่อมโครงสร้างแฟงมอสเฟตใน IGBT	V
$V_{F, PIN}$	แรงดันตกคร่อมโครงสร้างแฟงพี-ไอ-เอ็นใน IGBT	V
V_G	แรงดัน ไบอัสที่ขั้วเกต	V
V_m	แรงดันปิดกั้นสูงสุด	V
V_T	แรงดันพังทลาย	V
W	ความกว้างของช่องทางเดินกระแส	μm
W_N	ความกว้างของบริเวณไม่ปลอดประจุพาหะในชั้น N-base	μm
W_R	ความยาวของเซลล์เชิงเส้น	μm
X	ระยะลึกในแผ่นผลึกซิลิกอน	μm
X_j	ความลึกของรอยต่อ	μm
X_{jn}	ความลึกของรอยต่อ N^+ -emitter	μm
X_{jp}	ความลึกของรอยต่อ P-base	μm
X_{jp+}	ความลึกของรอยต่อ P^+ -collector	μm
ϵ_s	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสารกึ่งตัวนำ	-
α_{PNP}	อัตราขยายกระแสของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ PNP	-
ρ_{ex}	พิกัดความต้านทานจากการทดลอง	$\Omega\text{-cm}$
μ_n	ความคล่องตัวของอิเล็กตรอน	$\text{cm}^2/\text{V-s}$

ศัพท์เทคนิค

กระจกต้นแบบ	photo mask
กระบวนการเก็บบรรจุสารกึ่งตัวนำ	assembly process
กระบวนการโซลลอสกี	Czochralski process
กระบวนการฟลอตโซน	float zone process
กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี	photolithography process
กระบวนการสร้างลวดลายโลหะ	metalization process
กระบวนการสร้างในแนวระนาบ	Planar process
กระบวนการออกซิเดชัน	oxidation process
กระบวนการออกซิเดชันแบบชื้น	wet oxidation process
กระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง	dry oxidation process
กระบวนการอพิทาซี	epitaxy process
กระแสเลตซิง	latching current
กระแสรั่วไหล	leakage current
การกัด	etching
การฉีดประจุพาหะส่วนน้อย	minority carrier injection
การตอบสนองความถี่	frequency response
การติดชิพ	die bonding
การตัดแยกชิพ	scribing
การปรับตำแหน่ง	alignment
การฉนึกฝา	encapsulate
การมอดูเลตสภาพนำ	conductivity modulation
การรวมตัว	recombination
การเชื่อมลวด	wire bonding
การแพร่สารเจือด้วยความร้อน	thermal diffusion
ความกว้างของช่องทางเดินกระแส	channel width
ความคล่องตัว	mobility
ความต้านทานในสภาวะนำกระแส	on-resistance
ความถี่คัท-ออฟ	cut-off frequency
ความยาวของช่องทางเดินกระแส	channel length
ความหนาแน่นกระแส	current density

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนาแน่นกระแสไปหน้า	forward conduction current density
ความเร็วในการสวิตชิง	switching speed
คาบเริ่มต้น	initial period
เครื่องบันทึก XY	XY recorder
โครงสร้างแบบสมมาตร	symmetry structure
โครงสร้างแบบไม่สมมาตร	asymmetry structure
โครงสร้างแฝง P-N-P-N แบบไทรสเตอร์	parasitic P-N-P-N thyristor
โครงสร้างในแนวตั้ง	verticle structure
โครงสร้างในแนวระนาบ	lateral structure
ช่วงอายุ	lifetime
ช่วงอิ่มตัว	saturation region
ช่วงเชิงเส้น	linear region
ชั้นนำ	conduction layer
เซลล์เชิงเส้น	linear cell
ตัดกระแส	turn-off
ตัวประกอบการคูณ	multiplication factor
แถบพลังงานต้องห้าม	forbiddenband
ทรานคอนดักแตนซ์	transconductance
ไทรสเตอร์	Thyristor
ไทรสเตอร์ที่มีเกตแบบมอส	MOS Gate Thyristor
นำกระแส	turn-on
บริเวณปลอดประจุพาหะ	depletion region
บริเวณไม่ปลอดประจุพาหะ	undepletion region
เบสทรานสปอร์ตแฟกเตอร์	base transport factor
ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์	Bipolar transistor
ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกตเป็นฉนวน	Insulated Gate Bipolar transistor
ประจุพาหะส่วนน้อย	minority carrier
แผ่นผลึก	crystal wafer
พี-ไอ-เอ็น เรกติไฟเออร์	P-i-N rectifier
พี-ไอ-เอ็น ไดโอด	P-i-N diode
ฟิลด์ริงค์	field ring

เอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการ thin film นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอสควบคุมไทริสเตอร์	MOS controlled thyristor
มอสเฟตกำลัง	Power MOSFET
รอยสัมผัสแบบโอมที่มีค	ohmic contact
ระดับความหนาแน่นอะตอมสารเจือพื้นฐาน	background doping level
ระยะการแพร่	diffusion length
ระยะหาง	tail
แรงดันขีดเริ่ม	threshold voltage
แรงดันพังทลายแบบพังก์ทรู	punch-through breakdown
แรงดันพังทลายแบบอะวาแลนซ์	avalanche breakdown
แลทซ์-อัฟ	latch-up
แลททิซ	lattice
วงจรรขับ	drive circuit
วงจรรวมกำลัง	Power IC.
ศูนย์กลางการรวมตัว	recombination center
สภาวะนำกระแสไปหน้า	forward conducting mode
สภาวะปิดกั้นไปหน้า	forward blocking mode
สภาวะปิดกั้นย้อนกลับ	reverse blocking mode
สัมประสิทธิ์การแพร่	diffusion coefficient
องค์ประกอบของฟังก์ชันคลาดเคลื่อน	error function
อินทรินซิก	intrinsic
อุปกรณ์กำลังชนิดมอส-ไบโพลาร์	Power MOS-Bipolar device
อัตราขยายกระแส	current gain

กันำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีทางด้านสารกึ่งตัวนำได้ถูกพัฒนาไปมากเพื่อให้สอดคล้องกับความต้องการในการใช้งานและมีราคาถูกลง สำหรับอุปกรณ์กำลังได้ถูกพัฒนามาตั้งแต่ทศวรรษที่ 50 โดยเริ่มแรกจะเป็นไดโอดและทรานซิสเตอร์ แต่ได้มีการพัฒนาต่อมาเรื่อยๆอย่างต่อเนื่องจนถึงยุคของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์กำลังซึ่งถูกพัฒนาขึ้นในทศวรรษที่ 70 โดยสามารถทำให้ทนแรงดันได้สูงถึง 3000 โวลต์และทนกระแสได้สูงถึง 1000 แอมแปร์ หลังจากนั้นจนถึงปัจจุบันก็เป็นยุคของมอสเฟตกำลัง ซึ่งเป็นโครงสร้างที่พัฒนาขึ้นมาโดยอาศัยความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำอีกชนิดหนึ่ง อย่างไรก็ตามมอสเฟตกำลังก็ยังไม่ใช่โครงสร้างที่มีคุณสมบัติดีกว่าไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์กำลังในทุกด้าน ถึงแม้ว่ามอสเฟตกำลังจะมีคุณสมบัติในหลายๆด้านที่ดีกว่า แต่ก็ไม่สามารถที่จะนำกระแสได้สูงเท่ากับไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์กำลัง ในปี ค.ศ. 1983 จึงได้มีการคิดค้นอุปกรณ์กำลังชนิดใหม่ขึ้นมาเรียกว่า คอมเฟต (Conductivity-Modulated Field Effect Transistor : COMFET) [1] หรือที่เรารู้จักกันดีในปัจจุบันในชื่อของ ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกทเป็นฉนวน (Insulated Gate Bipolar Transistor : IGBT) โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้ตัวย่อ IGBT แทนไบโพลาร์-ทรานซิสเตอร์ที่มีเกทเป็นฉนวนเพื่อความสะดวกและรวดเร็วในการอธิบาย ซึ่งอุปกรณ์ชนิดนี้ได้รวมเอาโครงสร้างเกทแบบมอสเฟตกับการนำกระแสแบบไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ซึ่งเป็นข้อดีของโครงสร้างเข้าไว้ด้วยกัน ทำให้อุปกรณ์ชนิดนี้สามารถทำงานในความถี่ระดับเดียวกับมอสเฟตกำลังและยังสามารถนำกระแสได้สูงกว่ามอสเฟตกำลัง จึงเหมาะที่จะใช้งานในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังแทนอุปกรณ์แบบเก่า

สำหรับการสร้างอุปกรณ์กำลังในประเทศไทย ห้องปฏิบัติการของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ได้เริ่มสร้างขึ้นเมื่อปี 1987 โดยเป็นอุปกรณ์กำลังประเภทมอสเฟตชนิดดีมอส และได้มีการพัฒนาต่อมาเรื่อยๆเป็นมอสเฟตกำลังแบบวีมอส จนกระทั่งปี 1992 ได้ทำการออกแบบและสร้างอุปกรณ์กำลังชนิดที่มีโครงสร้างผสมระหว่างมอสเฟตกับไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ซึ่งโครงสร้างดังกล่าวก็คือไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกทเป็นฉนวน และเพื่อเป็นการรองรับเทคโนโลยีของอุปกรณ์ชนิดนี้ในอนาคต จึงได้ทำการศึกษาทฤษฎี การออกแบบ และกระบวนการสร้างโดยใช้เทคโนโลยีที่เป็นมาตรฐานของห้องปฏิบัติการ ของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ สำหรับในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะได้กล่าวถึงโครงสร้างพื้นฐาน การออกแบบ กระบวนการสร้าง การทดลองและบทสรุปของการสร้างและพัฒนาอุปกรณ์ชนิดนี้ภายในประเทศ โดยแบ่งเนื้อหาเป็นส่วนต่างๆตามลำดับได้ดังต่อไปนี้

บทที่ 1 เป็นบทที่เสนอถึงความเป็นมาตั้งแต่มีการคิดค้นพัฒนาอุปกรณ์กำลังจนกระทั่งมาถึงการเริ่มต้นคิดค้น IGBT ต่อจากนั้นจะเป็นเรื่องของประเภทของอุปกรณ์กำลังซึ่งเป็นการแจกแจงอุปกรณ์กำลังประเภทต่างๆรวมถึง IGBT ด้วย สำหรับตอนท้ายของบทนี้จะกล่าวถึงการเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียระหว่าง IGBT กับมอสเฟตกำลังและไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์กำลัง

บทที่ 2 เป็นการเสนอทฤษฎีพื้นฐานของ IGBT โดยเริ่มจากโครงสร้างและหลักการทํางานพื้นฐานของ IGBT ที่ผสมกันระหว่างโครงสร้างของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์กับมอสเฟต ดังนั้นทฤษฎีของ IGBT จึงสามารถอธิบายได้โดยอาศัยทฤษฎีของโครงสร้างทั้งสองแบบที่กล่าวมา จากนั้นจะเป็นการวิเคราะห์การทำงานของ IGBT ซึ่งในส่วนนี้จะกล่าวถึงความสามารถต่างๆของ IGBT ที่มีลักษณะเด่นกว่าอุปกรณ์ประเภทอื่นรวมถึงเรื่องของปรากฏการณ์การเกิด แลทซ์-อัฟ (latch-up) ใน IGBT ตามด้วยเรื่องของ การตอบสนองความถี่และท้ายสุดในบทนี้จะกล่าวถึงเรื่องของแรงดันพังทลายในลักษณะของทรานซิสเตอร์แบบ open-base

บทที่ 3 เป็นการนำเสนอในส่วนของการออกแบบ IGBT ซึ่งในการออกแบบ IGBT นั้นจะทำโดยอาศัยข้อมูลที่ได้จากการออกแบบและสร้างมอสเฟตกำลังแบบคิมอสที่สร้างโดยห้องทดลองศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์เป็นหลัก ซึ่งเนื้อหาในบทนี้จะเริ่มจากการเลือกแผ่นสลิกซิลิกอนเริ่มต้นจากนั้นจะเป็นการออกแบบโครงสร้างทั้งในแนวระนาบและแนวตั้ง รวมถึงการคำนวณปริมาณอะตอมสารเจือที่แพร่และความลึกที่เกิดจากการขับลึกโดยใช้ความร้อน ต่อไปเป็นการแพร่สารเจือในส่วน P-base จากนั้นจะเป็นการทดลองออกแบบโครงสร้างพิเศษที่คาดว่าจะเพิ่มความสามารถของ IGBT คือการสร้างฟิลดริงค์และการหาความกว้างของเกตออกไซด์ที่เหมาะสมจากนั้นจะเป็นการออกแบบเพื่อลดแลทซ์-อัฟโดยใช้โครงสร้าง IGBT แบบไม่สมมาตรและสุดท้ายเป็นเรื่องของการออกแบบและสร้างกระเจดักต้นแบบ

บทที่ 4 เป็นส่วนของกระบวนการสร้างและการเก็บบรรจุ ซึ่งกล่าวถึงขบวนการสร้างและเก็บบรรจุเป็นขบวนการ มาตรฐานของห้องปฏิบัติการศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์

บทที่ 5 เป็นเรื่องของ การทดลองและผลการทดลอง ซึ่งเป็นผลที่เกิดจากการทดลองโดยการควบคุมพารามิเตอร์บางตัวหรือการเปลี่ยนแปลงปรับปรุงโครงสร้างดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 ซึ่งผลการทดลองที่น่าเสนอได้แก่ การทดสอบโครงสร้างทางเรขาคณิตของ IGBT, การศึกษาผลของความกว้างชั้น N-base ต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ IGBT, การศึกษาปรากฏการณ์แลทซ์-อัฟในอุปกรณ์ IGBT, การศึกษาผลของ P⁺-guardring ต่อความสามารถในการทำงานของ IGBT การศึกษาผลของความกว้างของเกตออกไซด์ต่อความสามารถในการนำกระแสของอุปกรณ์ IGBT, การศึกษาการตอบสนองความถี่ของ IGBT, การศึกษาโครงสร้างแบบไม่สมมาตรของอุปกรณ์ IGBT, การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการทำงานของ IGBT, การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ IGBT กับมอสเฟตกำลังแบบคิมอสและการทดสอบ IGBT ที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่

เอกสารนี้ บทที่ 6 เป็นบทที่นำเสนอบทสรุปที่ได้จากการวิเคราะห์และการทดลอง ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากเนื้อหาทั้งหมดที่ได้กล่าวมาจะทำให้เห็นได้ว่า IGBT เป็นอุปกรณ์กำลังชนิดใหม่ที่ กำลังน่าสนใจตัวหนึ่ง ซึ่งเหมาะที่จะนำมาใช้งานแทนอุปกรณ์กำลังแบบเก่าที่ยังมีข้อดีอยู่ สำหรับการสร้าง IGBT ในประเทศไทยนั้นยังเป็นสิ่งใหม่มาก แต่ถึงอย่างไรก็ตามเนื้อหาที่ได้กล่าว มาทั้งหมดนี้ก็เพียงพอที่จะใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบ สร้างและพัฒนา IGBT โดยอาศัย เทคโนโลยีการแพร่สารเจือด้วยความร้อน ซึ่งเป็นจะประโยชน์ต่อทั้งในทางการศึกษาและในทาง อุตสาหกรรมต่อไป



บทที่ 1

บทนำ

ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกทเป็นฉนวน (Insulated Gate Bipolar Transistor) หรือเรียกสั้นๆว่า IGBT เป็นอุปกรณ์กำลังชนิดใหม่ที่กำลังมีบทบาทสำคัญในงานอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ มากขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากคุณสมบัติที่เด่นในหลายๆด้านที่ดีกว่าอุปกรณ์กำลังแบบเก่า

1.1 ความเป็นมา

ปัจจุบันเทคโนโลยีของอุปกรณ์กำลังชนิดซิลิกอนได้ถูกพัฒนาไปอย่างมากเนื่องจากเป็นอุปกรณ์กำลังที่มีความสำคัญในระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในงานหลายๆอย่าง อย่างไรก็ตามอุปกรณ์กำลังที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบันก็มีเพียงไม่กี่ชนิดตัวอย่างเช่น SCR, TRIAC, ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์หรือมอสเฟตกำลัง โดยเฉพาะไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์กำลังและมอสเฟตกำลังซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่นิยมใช้กันมากที่สุด และมีการพัฒนาตลอดในช่วง 30 - 40 ปีที่ผ่านมา อย่างไรก็ตามอุปกรณ์ทั้งสองชนิดดังกล่าวก็ยังมีข้อด้อยของแต่ละชนิดที่แตกต่างกันออกไปทำให้มีข้อจำกัดในการใช้งาน

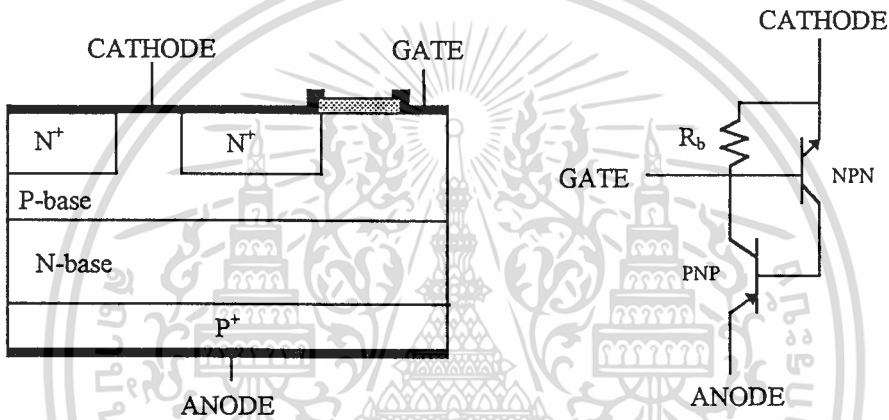
สำหรับอุปกรณ์กำลังชนิดมอส-ไบโพลาร์ สร้างขึ้นสำเร็จสมบูรณ์ครั้งแรกในปี ค.ศ. 1979 ซึ่งเป็นโครงสร้างของไทรสเตอร์ที่มีเกทเป็นฉนวน (MOS gate thyristor) ต่อมาในปี ค.ศ. 1980 ได้มีการสร้างโครงสร้างไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกทเป็นฉนวน (IGBT : Insulated Gate Bipolar Transistor) ขึ้นซึ่งเป็นโครงสร้างอุปกรณ์กำลังชนิดใหม่ที่จะเข้ามาแทนอุปกรณ์ชนิดเก่าซึ่งมีข้อจำกัดในการใช้งาน โดยอุปกรณ์ชนิดนี้จะรวบรวมเอาข้อดีของอุปกรณ์ชนิดไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์กำลังและมอสเฟตกำลังเข้าไว้ด้วยกัน กล่าวคือเป็นการรวมโครงสร้างเกทแบบมอสเฟตเข้ากับการนำกระแสแบบไบโพลาร์ ทำให้อุปกรณ์ที่ได้สามารถนำกระแสได้สูงเช่นเดียวกับไบโพลาร์ แต่ขณะเดียวกันก็สามารถควบคุมการไหลของกระแสได้โดยการไบอัสที่ส่วนเกท นอกจากนี้ยังทำให้ได้อุปกรณ์ที่มีอินพุทอิมพีแดนซ์สูงและมีความต้านทานในสภาวะนำกระแสต่ำ ทำให้มีการสูญเสียกำลังทางด้านอินพุตต่ำและมีความหนาแน่นกระแสสูงเมื่อเทียบกับอุปกรณ์กำลังชนิดอื่นในขนาดที่เท่ากัน

ในเชิงพาณิชย์ IGBT ยังเหมาะที่จะสร้างเป็น วงจรรวมกำลัง (Power Integrated Circuits) ที่ใช้ในระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังต่างๆซึ่งจะทำให้สามารถลดต้นทุนการผลิตลงได้ถึง 10 เท่า หรือมากกว่านั้นซึ่งจะทำให้ IGBT เติบโตขึ้นอย่างรวดเร็วในตลาดของอุปกรณ์กำลังและในอนาคตคาดว่าจะมีอุปกรณ์เข้ามาแทนอุปกรณ์กำลังแบบเก่าโดยจะทำให้สามารถพัฒนาระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ได้สูงขึ้นไปอีกขั้นหนึ่ง

1.2 ชนิดอุปกรณ์กำลังชนิดมอส-ไบโพลาร์ [2]

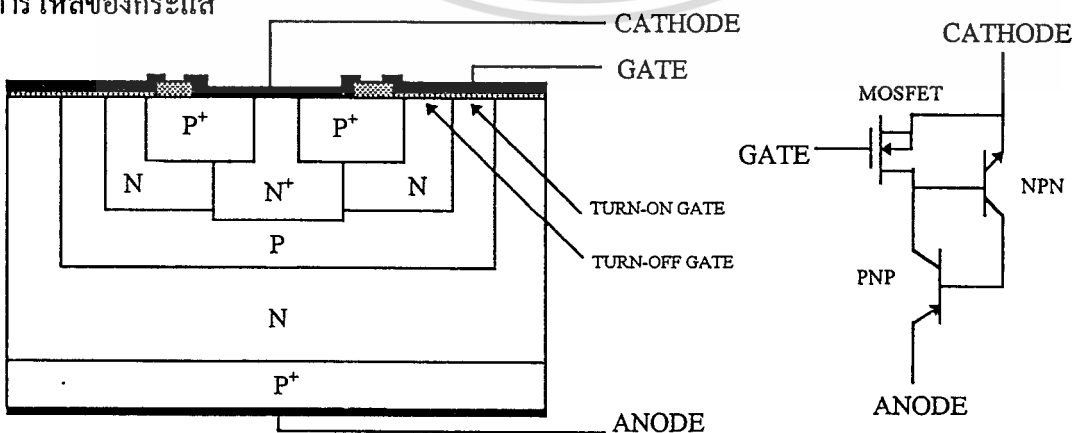
เนื่องจากโครงสร้างของอุปกรณ์กำลังชนิดมอส-ไบโพลาร์เป็นการนำเอาโครงสร้างเกทแบบมอสเฟตและการนำกระแสแบบไบโพลาร์มารวมในโครงสร้างเดียวกัน เหมือนกันหมดดังนั้นการแบ่งประเภทของอุปกรณ์ชนิดนี้จึงเป็นการแบ่งแบบตามความแตกต่างของลักษณะโครงสร้างและการใช้งาน ซึ่งในปัจจุบันมีด้วยกัน 3 ชนิดคือ

1. ไทริสเตอร์ที่มีเกทแบบมอส (MOS Gate Thyristor) เป็นโครงสร้างที่รวมเอาลักษณะทางกายภาพของอุปกรณ์แบบไบโพลาร์และมอสเข้าไว้ด้วยกันซึ่งเป็นโครงสร้างแรกที่ทำให้ได้เสร็จสมบูรณ์ โดยในอุปกรณ์ชนิดนี้จะเกิดจากการรวมกันของโครงสร้างเกทแบบมอสเฟตและโครงสร้างสี่ชั้นแบบไทริสเตอร์ ทำให้ได้อุปกรณ์ที่สามารถนำกระแสได้โดยการให้แรงดันไบอัสที่เกทเท่านั้น



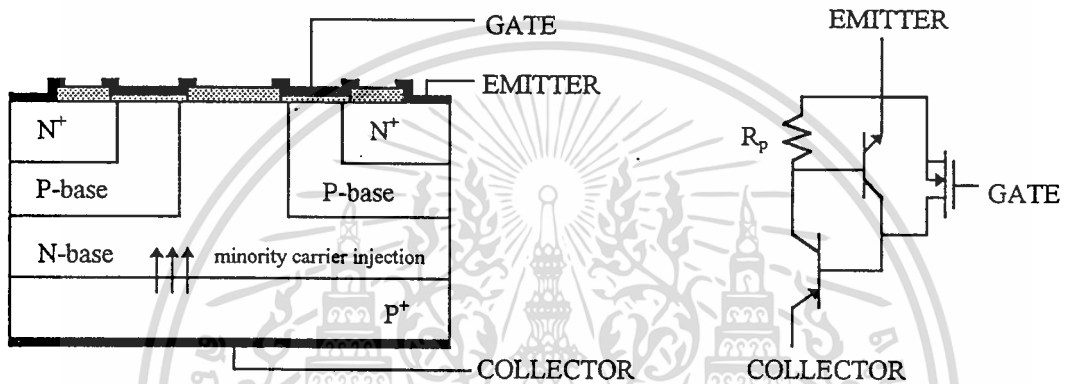
รูปที่ 1.1 ภาพตัดขวางและวงจรสมมูลของ ไทริสเตอร์ที่มีเกทแบบมอส

2. มอสควบคุมไทริสเตอร์ (Mos controlled thyristor : MCT) เป็นโครงสร้างที่แตกต่างจากไทริสเตอร์มีเกทเป็นจำนวนคือสามารถที่จะนำกระแสกระแสได้โดยการให้สัญญาณ (signal) เข้าไปที่ขั้วเกทเท่านั้น ซึ่งเมื่อเกิดกระแสไหลในตัวอุปกรณ์แล้วเกทก็จะหมดหน้าที่ในการควบคุมการไหลของกระแส



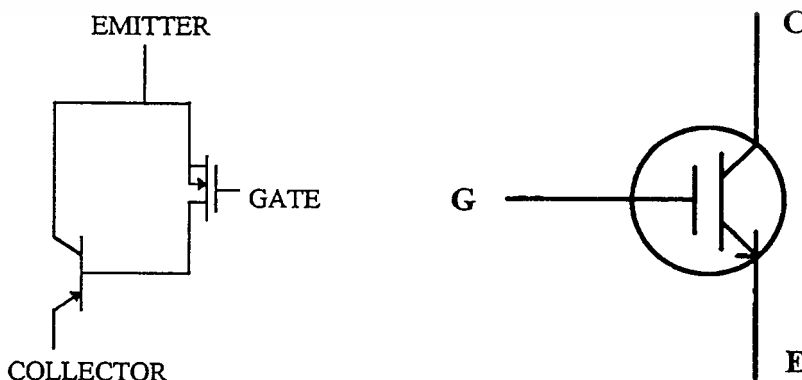
รูปที่ 1.2 ภาพตัดขวางและวงจรสมมูลของ มอสควบคุมไทริสเตอร์ มีอนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกทเป็นฉนวน (Insulated Gate Bipolar Transistor : IGBT) โครงสร้างนี้เป็นโครงสร้างที่น่าสนใจมาก เนื่องจากเป็นโครงสร้างที่เกิดจากการนำกระแสไบโพลาร์มารวมเข้ากับโครงสร้างเกทแบบมอสเฟตซึ่งทำให้สามารถควบคุมการไหลของกระแสโดยการไบอัสที่เกทเหมือนกับอุปกรณ์มอส-ไบโพลาร์ทั่วไปแล้ว ทำให้ในสภาวะนำกระแสของอุปกรณ์ชนิดนี้นอกจากจะมีอิเล็กตรอนที่ถูกฉีดจากขั้วอิมิตเตอร์แล้วยังมีโฮสที่ถูกฉีดจากคอลเลกเตอร์เป็นพาหะอีกตัวหนึ่งด้วย ทำให้อุปกรณ์ชนิดนี้มีความต้านทานในสภาวะนำกระแส (on-resistance: r_{on}) ต่ำและมีความหนาแน่นกระแสสูงมาก



รูปที่ 1.3 ภาพตัดขวางและวงจรสมมูลของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกทเป็นฉนวน

อย่างไรก็ตามในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นการศึกษาเฉพาะไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกทเป็นฉนวนเท่านั้น เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่มีความหนาแน่นกระแสสูงมากและใช้งานได้ง่าย เหมาะที่จะใช้งานทั่วไป โดยในการอธิบายการทำงานของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกทเป็นฉนวนในบทต่อไปในกรณีที่ไม่เกิดโครงสร้างแผ่นสี่ชั้นแบบไทรสเตอร์ (ซึ่งรายละเอียดจะได้กล่าวในบทต่อไป) จะแทนด้วยวงจรสมมูลอย่างง่ายและสัญลักษณ์ในรูปที่ 1.4



รูปที่ 1.4 วงจรสมมูลอย่างง่ายและสัญลักษณ์ที่ใช้แทน IGBT นั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 การเปรียบเทียบระหว่างไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกทเป็นฉนวนมอสเฟตกำลังและไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์กำลัง

เพื่อแสดงให้เห็นถึงข้อเด่นหรือข้อได้เปรียบของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกทเป็นฉนวนเมื่อเทียบกับโครงสร้างแบบมอสเฟตกำลังและไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์กำลังดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 เปรียบเทียบตัวแปรของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกทเป็นฉนวน มอสเฟตกำลัง และไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์กำลัง

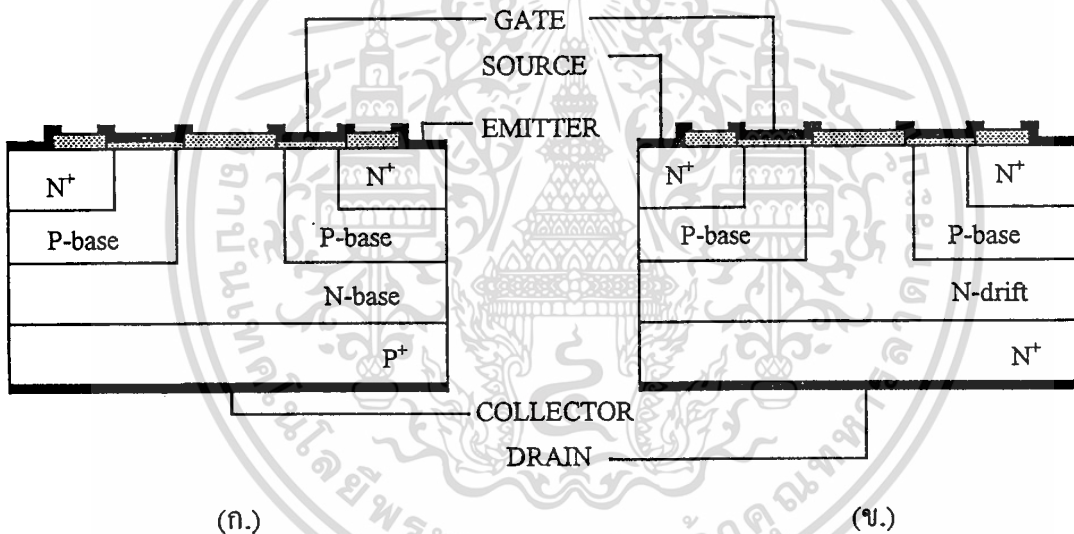
พารามิเตอร์	ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกทเป็นฉนวน	มอสเฟตกำลัง	ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์กำลัง
การทนกำลัง	สูง	ปานกลาง	สูง
ความต้านทานอินพุต	สูง	สูง	ต่ำ
ความต้านทานในสถานะนำกระแส	ต่ำ	สูง	ต่ำ
การตอบสนองความถี่	สูง	สูง	ปานกลาง
ระบบระบายความร้อน	เล็ก	เล็ก	ใหญ่
การสูญเสียกำลังด้านอินพุต	ต่ำ	ต่ำ	สูง
ความยุ่งยากและราคาของวงจรขับ (drive circuit)	น้อย	น้อย	มาก
ราคา	แพง	แพง	ปานกลาง

จากตารางที่ 1.1 จะเห็นได้ว่าไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกทเป็นฉนวนเป็นอุปกรณ์ที่น่าสนใจมากสำหรับงานที่ต้องการกำลังสูงและต้องการการตอบสนองความถี่สูง แต่ก็ยังมีราคาแพงมาก ถึงอย่างไรก็ตามไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกทเป็นฉนวนก็ยังเป็นอุปกรณ์ที่น่าสนใจมากและคาดว่าจะป็นอุปกรณ์กำลังแบบใหม่ที่จะเข้ามาแทนอุปกรณ์กำลังแบบเดิม

บทที่ 2

ทฤษฎี IGBT

IGBT เป็นโครงสร้างที่เกิดขึ้นจากการรวมเอาโครงสร้างเกทแบบมอสเฟตกับการนำกระแสแบบไบโพลาร์เข้าไว้ด้วยกัน โดยโครงสร้างประกอบด้วย 4 ชั้น คือ ชั้น N^+ -emitter , P-base , N-base และชั้น P^+ -collector และ 3 ขั้ว คือ เกท,อิมิตเตอร์และคอลเลคเตอร์ (ดังแสดงในรูปที่ 2.1) ซึ่งลักษณะเด่นของโครงสร้างชนิดนี้คือ มีการฉีดประจุพาหะส่วนน้อยจาก P^+ -collector เข้าไปยังชั้น N-base ในสภาวะนำกระแสไปหน้า (Forward conduction) ซึ่งจะส่งผลให้อุปกรณ์ชนิดนี้มีความต้านทานในสภาวะนำกระแสที่ต่ำลงจึงสามารถทำให้มีความหนาแน่นกระแสได้สูง อีกทั้งยังสามารถที่จะควบคุมการไหลของกระแสได้โดยการควบคุมแรงดันไบอัสที่ขั้วเกทจึงเป็นการลดความยุ่งยากของวงจรขับทำให้ IGBT เป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่น่าสนใจอย่างมาก



รูปที่ 2.1 โครงสร้างภาพตัดขวางของอุปกรณ์

(ก.) ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกทเป็นฉนวน

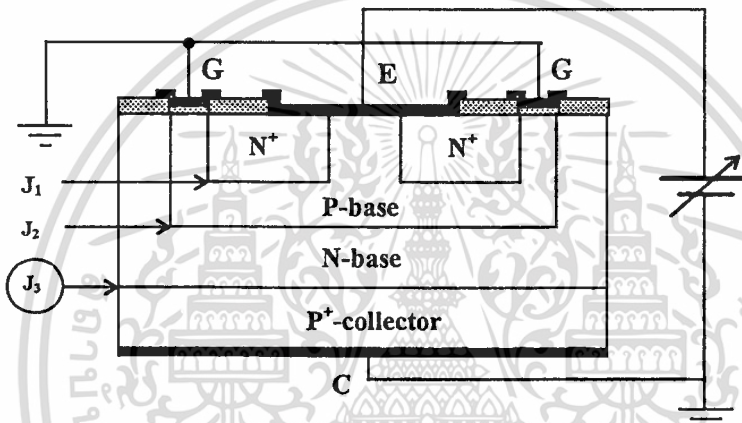
(ข.) มอสเฟตกำลังแบบคิมอส

2.1 โครงสร้างและหลักการทำงานพื้นฐาน [2]

IGBT เป็นอุปกรณ์กำลังที่มีโครงสร้างเกิดจากการรวมโครงสร้างเกทแบบมอสเฟตและการนำกระแสแบบไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์เข้าไว้ด้วยกัน ดังนั้นการทำงานของ IGBT จึงสามารถที่จะทำได้ง่ายโดยการเหนี่ยวนำให้เกิดช่องทางเดินกระแส ด้วยการให้แรงดันไบอัสค่าบวกที่ขั้วเกททำให้อิเล็กตรอนสามารถที่จะเคลื่อนที่จากบริเวณ N^+ -emitter ผ่านชั้น P-base มายังชั้น N-base ได้ เช่นเดียวกับมอสเฟตกำลัง นอกจากนี้ในสภาวะนำกระแสไปหน้ารอยต่อระหว่าง P^+ -collector กับชั้น N-base จะอยู่ในสภาวะนำกระแสไปหน้า จึงทำให้เกิดการฉีดประจุพาหะส่วนน้อยจากไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

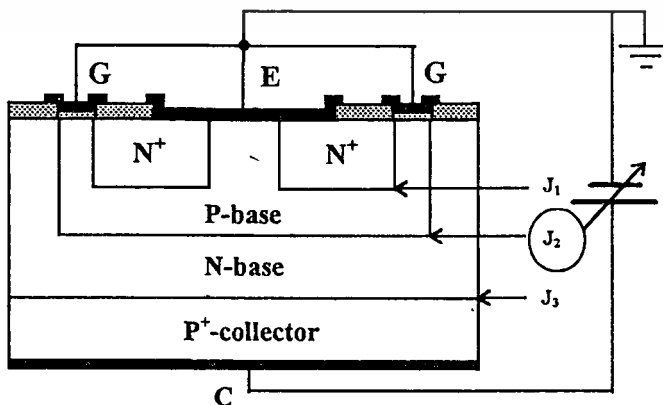
P^+ -collector เข้าไปยังชั้น N-base ทำให้เกิดการ มอดูเลตสภาพนำ (Conductivity Modulation) ส่งผลให้ความต้านทานในสภาวะนำกระแสของ IGBT มีค่าลดลงต่ำกว่าโครงสร้างมอสเฟตกำลัง สำหรับการ ทำงานของอุปกรณ์ IGBT สามารถแบ่งเป็นสภาวะใหญ่ๆได้ 3 สภาวะด้วยกัน คือ

2.1.1 สภาวะปิดกั้นย้อนกลับ (Reverse Blocking Mode) เป็นกรณีที่เกิดจากการให้แรงดันค่าลบที่ขั้วคอลเลคเตอร์ ทำให้รอยต่อระหว่าง P^+ -collector กับ N-base อยู่ในสภาวะถูกไบอัสย้อนกลับ กระแสจึงไม่สามารถไหลผ่านรอยต่อนี้ไปได้จนกว่าจะถึงแรงดันพังทลายของรอยต่อ P^+ -collector กับ N-base กระแสจึงจะสามารถไหลได้โดยไม่สามารถควบคุมการไหลของกระแสได้



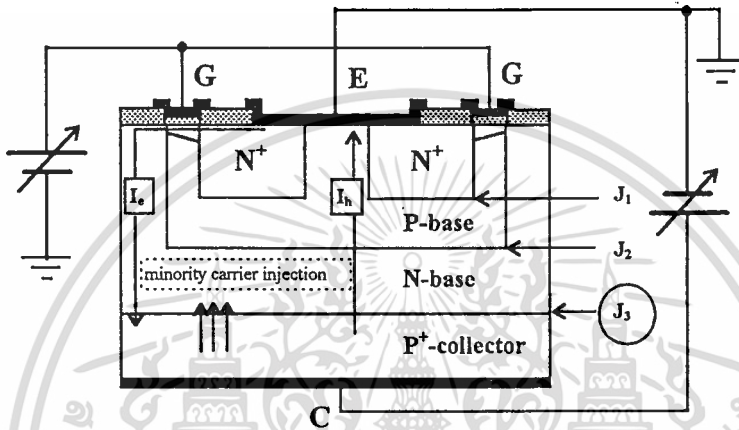
รูปที่ 2.2 แสดงการให้แรงดันไบอัสกับอุปกรณ์ IGBT เพื่อให้ทำงานในสภาวะปิดกั้นย้อนกลับ

2.1.2 สภาวะปิดกั้นไปหน้า (Forward Blocking Mode) เกิดจากการให้แรงดันไบอัสค่าบวกที่ขั้วคอลเลคเตอร์ โดยลัดวงจรขั้วอิมิตเตอร์กับขั้วเกตเข้าด้วยกัน ทำให้รอยต่อระหว่าง P-base กับ N-base อยู่ในสภาวะถูกไบอัสย้อนกลับกระแสจึงไม่สามารถไหลผ่านรอยต่อได้เช่นกัน



รูปที่ 2.3 แสดงการให้แรงดันไบอัสกับอุปกรณ์ IGBT เพื่อให้ทำงานในสภาวะปิดกั้นไปหน้า ขนด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 สถานะนำกระแสไปหน้า (Forward Conducting Mode) เกิดจากการให้แรงดันไบอัสค่าบวกที่ขั้วคอลเลคเตอร์เหมือนกับสถานะปิดกั้นไปหน้า แต่ในกรณีนี้จะให้แรงดันไบอัสที่ขั้วเกตเป็นบวก เทียบกับอิมิตเตอร์ด้วย ซึ่งที่ค่าแรงดันไบอัสที่ขั้วเกตมีค่ามากกว่าแรงดันขีดเริ่มจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดชั้นนำ (conduction layer) ขึ้นที่บริเวณผิวส่วน P-base ที่อยู่บริเวณใต้ส่วนเกต ชั้นนำนี้จะทำหน้าที่เป็นช่องทางเดินกระแสทำให้อิเล็กตรอนสามารถที่จะไหลผ่านจากขั้ว N^+ -emitter ไปยังบริเวณชั้น N-base ได้



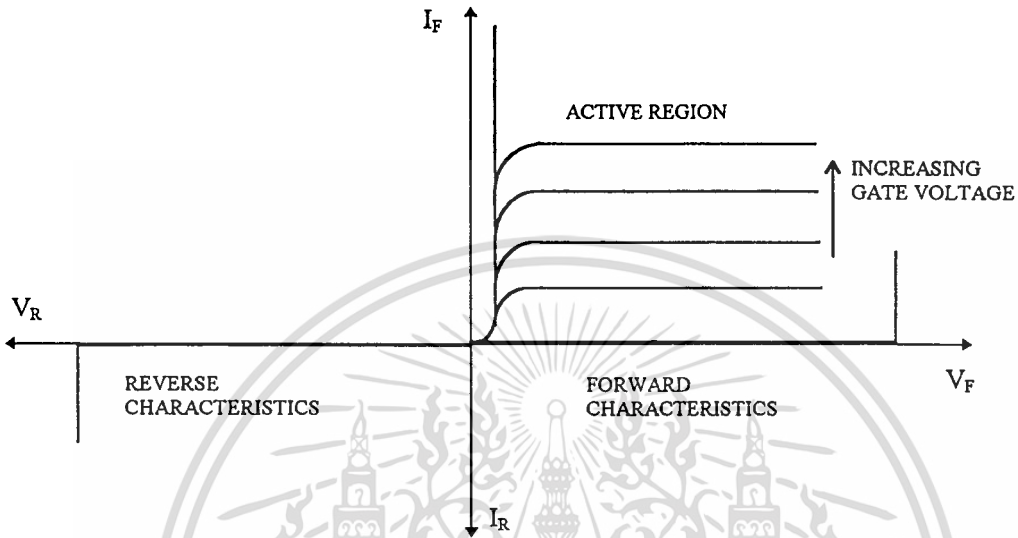
รูปที่ 2.4 แสดงการให้แรงดันไบอัสกับอุปกรณ์ IGBT เพื่อให้ทำงานในสถานะนำกระแสไปหน้า

จากการทำงานทั้งสามสถานะที่กล่าวมา สถานะนำกระแสไปหน้าเป็นสถานะที่น่าสนใจและถูกใช้งานมากที่สุด ที่สถานะนี้จะเห็นได้ว่ารอยต่อ P^+ -collector กับ N-base จะอยู่ในสถานะถูกไบอัสไปหน้าทำให้เกิดการฉีดประจุพาหะส่วนน้อยจาก P^+ -collector เข้าไปยังชั้น N-base และจะฉีดมากขึ้นเมื่อเพิ่มค่าแรงดันไบอัสที่ขั้วคอลเลคเตอร์ จนถึงจุดหนึ่งซึ่งความเข้มข้นของประจุพาหะส่วนน้อยเท่ากับระดับความหนาแน่นอะตอมสารเจือพื้นฐาน (background doping level) ของชั้น N-base ณ จุดนี้สถานะของชั้น N-base จะเปลี่ยนไปเหมือนกับเป็นชั้นอินทรินซิก (intrinsic) ดังนั้นการทำงานของอุปกรณ์ในสถานะนี้จึงมีลักษณะเหมือนกับพี-ไอ-เอ็นไดโอด (P-i-N diode) ที่อยู่ในสถานะนำกระแสไปหน้า อย่างไรก็ตามความสามารถในการนำกระแสของช่องทางเดินกระแสที่ถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นก็มีขีดจำกัดทั้งนี้เนื่องจากเกิดศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมช่องทางเดินกระแส ส่งผลให้กระแสไปหน้า (forward current) มีค่าคงที่ที่ค่าๆหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.5

การเปลี่ยนสถานะการทำงานของ IGBT จาก ON ไปสู่ OFF สามารถทำได้โดยการตัดช่องทางเดินกระแสที่ผิวของชั้น P-base บริเวณใต้เกต ด้วยการลัดวงจรระหว่างขั้วเกตเข้ากับอิมิตเตอร์ ทำให้อิเล็กตรอนซึ่งเป็นประจุพาหะส่วนมากไม่สามารถที่จะไหลผ่านไปยังชั้น N-base ได้ อย่างไรก็ตามการตัดช่องทางเดินกระแสเป็นเพียงการตัดการไหลของอิเล็กตรอนเท่านั้น แต่ในส่วนของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โพลซึ่งเป็นประจุพาหะส่วนน้อยที่ถูกฉีดเข้าไปในชั้น N-base จะยังคงมีความหนาแน่นสูงอยู่ในตอนแรกหลังจากตัดช่องทางเดินกระแสและจะค่อยๆลดลงขึ้นอยู่กับค่าช่วงอายุ (lifetime) ของประจุพาหะส่วนน้อย ส่งผลให้ไม่สามารถตัดกระแส (turn-off) ได้ทันที ทำให้มีความเร็วในการสวิตซิ่ง (Switching Speed) ของ IGBT มีค่าต่ำกว่ามอสเฟตกำลัง



รูปที่ 2.5 คุณสมบัติของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของ IGBT

ปรากฏการณ์ที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งที่พบในโครงสร้าง IGBT ก็คือโครงสร้างแฝง P-N-P-N แบบ ไทริสเตอร์ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดปรากฏการณ์แลตซ์-อ์พขึ้นในขณะที่ IGBT ทำงาน ส่งผลให้โครงสร้างเกตแบบมอสเฟตไม่สามารถที่จะควบคุมการไหลของกระแสได้ ดังนั้นสิ่งสำคัญอย่างหนึ่งในการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ IGBT ก็คือการหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดการทำงานในสภาวะไทริสเตอร์

2.2 การวิเคราะห์การทำงาน

เนื่องจากอุปกรณ์ IGBT เป็นอุปกรณ์ที่เกิดจากการรวมโครงสร้างเกตแบบมอสเฟตเข้ากับการนำกระแสแบบไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ ดังนั้นในการวิเคราะห์การทำงานของ IGBT จึงต้องพิจารณาในลักษณะที่แตกต่างไปจากอุปกรณ์กำลังโดยทั่วไปและที่สำคัญก็คือจะพิจารณาเฉพาะในกรณีที่ไม่เกิดโครงสร้างแฝงแบบ ไทริสเตอร์เท่านั้น

2.2.1 ความสามารถในการปิดกั้นย้อนกลับ

การทำงานของ IGBT ในสภาวะปิดกั้นย้อนกลับเกิดจากการให้แรงดันไบอัสค่าลบที่ขั้วคอลเลคเตอร์ ทำให้รอยต่อ P^+ -collector กับ N-base อยู่ในสภาวะถูกไบอัสย้อนกลับทำให้เกิดบริเวณปลอดประจุพาหะ (depletion region) ขยายเข้าไปในบริเวณ N-base โดยที่แรงดันพังทลาย ในขณะที่อยู่ในสภาวะปิดกั้นย้อนกลับจะถูกกำหนดโดยโครงสร้างแฝงไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์แบบไม่ว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เบสเปิด ที่เกิดขึ้นจากชั้น P^+ -collector, N-base และ P-base ซึ่งสามารถคำนวณหาได้จากสมการ (2.22) โดยรอยต่อระหว่าง P^+ -collector กับ N-base จะเป็นตัวกำหนดความสามารถในการปิดกั้นย้อนกลับของอุปกรณ์ ดังนั้นในการออกแบบอุปกรณ์ IGBT เพื่อให้ได้ความสามารถในการปิดกั้นย้อนกลับตามที่ต้องการจึงต้องคำนึงถึงความต้านทานและความหนาของชั้น N-base ที่เหมาะสม ทั้งนี้เพื่อป้องกันการเกิดแรงดันพังทลายแบบพังก์ทรู (punch-through breakdown) ขึ้นได้ถ้าความหนาแน่นอะตอมสารเจือของชั้น N-base มีค่าน้อย

ความกว้างของชั้น N-base [3] ที่ทำให้อุปกรณ์สามารถทนแรงดันปิดกั้นสูงสุดจะมีค่าใกล้เคียงกับ ผลรวมของความกว้างของบริเวณปลอดประจุพาหะที่แรงดันสูงสุดบวกกับระยะการแพร่ (diffusion length) ของประจุพาหะและความกว้างของชั้น N-base จะสัมพันธ์กับค่าแรงดันปิดกั้น ซึ่งสามารถคำนวณหาได้จากสมการ

$$2d \cong \sqrt{\frac{2 \epsilon_s V_m}{q N_D}} + L_p \quad (2.1)$$

โดยที่

$2d$ คือ ความกว้างของชั้น N-base ที่แรงดันปิดกั้นสูงสุด

V_m คือ ค่าแรงดันปิดกั้นสูงสุด

L_p คือ ระยะการแพร่ของประจุพาหะส่วนน้อย

N_D คือ ระดับความหนาแน่นอะตอมสารเจือผู้ให้

ϵ_s คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสารกึ่งตัวนำ

q คือ ค่าประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน

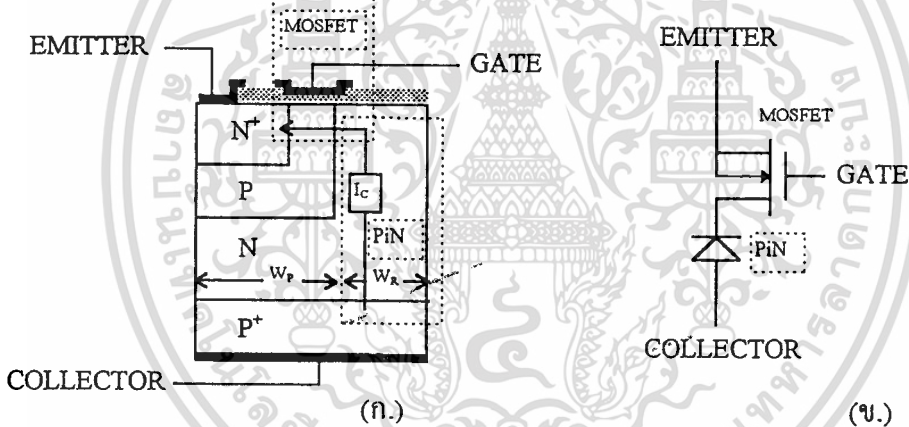
2.2.2 ความสามารถในการปิดกั้นไปหน้า

การทำงานของ IGBT ในสภาวะปิดกั้นไปหน้า เกิดได้โดยการให้แรงดันไบอัสค่าบวกที่ขั้วคอลเลคเตอร์ทำให้รอยต่อระหว่าง N-base กับ P-base อยู่ในสถานะถูกไบอัสย้อนกลับ ในขณะที่เดียวกันก็ลดวงจรระหว่างขั้วอิมิตเตอร์เข้ากับเกทเพื่อป้องกันการเกิดช่องทางเดินกระแสขึ้นที่ผิวของชั้น P-base ทำให้รอยต่อระหว่าง N-base กับ P-base เป็นตัวกำหนดความสามารถในการปิดกั้นไปหน้า และนอกจากนั้นความหนาแน่นอะตอมสารเจือในชั้น P-base ยังเป็นตัวกำหนดค่าแรงดันขีดเริ่มของทางเดินกระแสอีกด้วย ดังนั้นในการออกแบบ IGBT ความกว้างของชั้น N-base จึงต้องมีค่ามากพอที่จะป้องกันไม่ให้เกิดแรงดันพังทลายแบบ พังก์ทรู มาถึงชั้น N^+ -emitter ได้ซึ่งสามารถพิจารณาได้จาก Doping Profile ของรอยต่อ

2.2.3 การนำกระแสไปหน้า

การทำงานของ IGBT ในสถานะนำกระแสไปหน้าเกิดจากการให้แรงดันไบอัสค่าบวกที่ขั้วเกตเทียบกับอิมิตเตอร์ ในขณะที่เดียวกันก็ให้แรงดันไบอัสค่าบวกที่ขั้วคอลเลกเตอร์เช่นกัน ซึ่งการให้แรงดันค่าบวกที่ขั้วเกตเทียบกับอิมิตเตอร์สูงกว่าแรงดันขีดเริ่ม (threshold voltage : V_T) จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดช่องการเดินกระแสขึ้นที่บริเวณผิวของชั้น P-base ได้ส่วนเกตและการให้แรงดันไบอัสค่าบวกที่ขั้วคอลเลกเตอร์จะทำให้รอยต่อ P⁺-collector กับ N-base อยู่ในสถานะถูกไบอัสไปหน้าส่งผลให้เกิดการมอดูเลตสภาพนำ ทำให้อุปกรณ์มีความต้านทานในสถานะนำกระแสต่ำ และสามารถที่จะทำงานได้ที่ความหนาแน่นกระแสค่าสูงๆในสถานะนำกระแสไปหน้า

ในการวิเคราะห์การนำกระแสไปหน้าของอุปกรณ์ IGBT สามารถพิจารณาได้โดยอาศัยวงจรสมมูลสองแบบดังแสดงในรูปที่ 2.6 (ก) และ 2.8(ข) ซึ่งในวงจรสมมูลแต่ละแบบจะมีความเหมาะสมที่จะอธิบายคุณสมบัติของอุปกรณ์ IGBT ที่แตกต่างกันไป



รูปที่ 2.6 (ก.) ภาพตัดขวางของ IGBT ที่แสดงแบบจำลองแบบ พี-ไอ-เอ็น/มอส

(ข.) วงจรสมมูลของแบบจำลองแบบ พี-ไอ-เอ็น/มอส

2.2.3.1 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสคอลเลกเตอร์กับ แรงดันคอลเลกเตอร์-อิมิตเตอร์ในช่วงเชิงเส้นของ IGBT โดยใช้แบบจำลอง พี-ไอ-เอ็น เร็กติไฟเออร์/มอสเฟต

ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลกเตอร์กับแรงดันคอลเลกเตอร์-อิมิตเตอร์โดยอาศัยแบบจำลองพี-ไอ-เอ็นเร็กติไฟเออร์/มอสเฟต ทำได้โดยอาศัยภาพตัดขวางและวงจรสมมูลดังรูปที่ 2.6 (ก.) และ (ข.) ตามลำดับ โดยแสดงให้เห็นถึงมอสเฟตกำลังที่ต่ออนุกรมกับ พี-ไอ-เอ็นเร็กติไฟเออร์ ซึ่งจากรูปที่ 2.6 (ข.) จะเห็นได้ว่าแรงดันตกคร่อมอุปกรณ์จะเท่ากับ

$$V_F = V_{F,PN} + \tilde{V}_{F,MOS} \quad (2.2)$$

โดยที่ V_F คือ แรงดันตกคร่อมตัว IGBT

$V_{F,MOS}$ คือแรงดันตกคร่อมส่วนที่เป็นโครงสร้างมอสเฟตใน IGBT

$V_{F,PN}$ คือแรงดันตกคร่อมส่วนที่เป็นโครงสร้างพี-ไอ-เอ็น เรกติไฟเออร์ใน IGBT

เมื่อพิจารณาในส่วนของความหนาแน่นกระแสไปหน้าของพี-ไอ-เอ็น (Forward Conduction Current Density) สามารถหาได้จาก

$$J_{F,PN} = \frac{2qD_a N_i}{d} F\left(\frac{d}{L_a}\right) e^{\frac{qV_{F,PN}}{kT}} \quad (2.3)$$

โดยที่

$$F\left(\frac{d}{L_a}\right) = \frac{\left[\left(\frac{d}{L_a}\right) \tanh\left(\frac{d}{L_a}\right)\right]}{\sqrt{1 - \frac{1}{4} \tanh^4\left(\frac{d}{L_a}\right)}} e^{-\left(\frac{qV_F}{kT}\right)} \quad (2.4)$$

เมื่อ $J_{F,PN}$ คือ ความหนาแน่นกระแสไปหน้าของพี-ไอ-เอ็น (A/cm^2)

N_i คือ ระดับความหนาแน่นอะตอมสารเจืออินทรินซิก (cm^{-3})

D_a คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient) (cm^2/s)

L_a คือ ระยะการแพร่ (Diffusion length) (μm)

k คือ ค่าคงที่ของ โบสมันด์ (J/K)

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

$$J_{F,PN} = \frac{I_C}{W_R W} \quad (2.5)$$

W คือความกว้างของช่องทางเดินกระแส (μm)

W_R คือ ความยาวของเซลล์เชิงเส้น (μm)

เมื่อแทนค่า $J_{F,PN}$ จากสมการ (2.5) ลงใน (2.3) เพื่อหาค่า $V_{F,PN}$ ดังนั้นจะได้ $V_{F,PN}$ เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{F,PN} = \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{I_c d}{2qW_R W D_a n_i F \left(\frac{d}{L_a} \right)} \right] \quad (2.6)$$

สำหรับในส่วนมอสเฟตสามารถที่จะหาปริมาณกระแสที่ไหลผ่านช่องทางเดินกระแสได้ เช่นเดียวกับในมอสเฟตโดยทั่วไปคือ

$$I_C = \frac{\mu_n C_{ox} W}{2L} \left[2(V_G - V_T) V_{F,MOS} - V_{F,MOS}^2 \right] \quad (2.7)$$

เมื่อ L คือความยาวของช่องทางเดินกระแส (μm)

W คือความกว้างของช่องทางเดินกระแส (μm)

μ_n คือค่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอน ($\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)

V_G คือแรงดันที่ขั้วเกต (V.)

V_T คือแรงขีดเริ่ม (V.)

C_{ox} คือค่าความเก็บประจุที่ออกไซด์ (pF)

ซึ่งในสถานะนำกระแสไปหน้าและมอสเฟตกำลังทำงานในช่วงเชิงเส้นซึ่ง $V_{F,MOS} \ll (V_G - V_T)$ ทำให้ $V_{F,MOS}^2$ ในสมการที่ (2.7) มีค่าน้อยมากสามารถตัดทิ้งได้

$$I_C = \frac{\mu_n C_{ox} W}{L} (V_G - V_T) V_{F,MOS} \quad (2.8)$$

ดังนั้นจะได้แรงดันตกคร่อมส่วนที่เป็นมอสเฟตดังสมการ

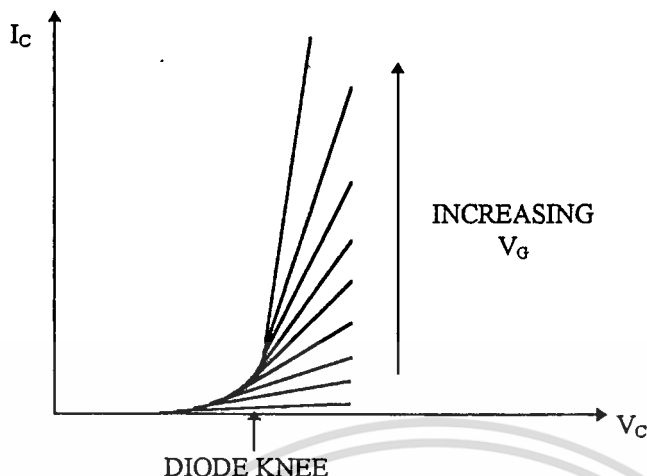
$$V_{F,MOS} = \frac{I_C L}{\mu_n C_{ox} W (V_G - V_T)} \quad (2.9)$$

จากสมการที่ (2.2),(2.6)และ(2.9) จะได้ว่า

$$V_F = \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{I_c d}{2qW_R D_a W n_i F \left(\frac{d}{L_a} \right)} \right] + \frac{I_C L}{\mu_n C_{ox} W (V_G - V_T)} \quad (2.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

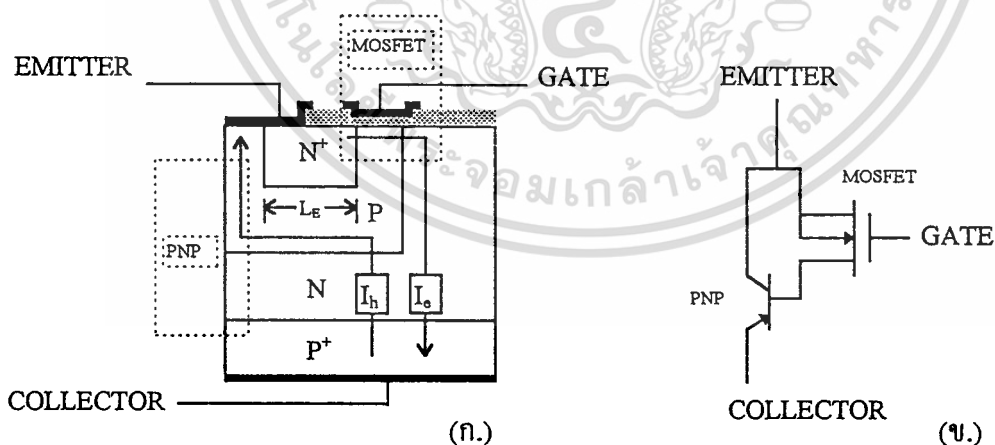
ซึ่งจากสมการที่ (2.10) เราสามารถใช้อธิบายคุณสมบัติของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์กับแรงดันคอลเลคเตอร์-อิมิตเตอร์ในช่วงเชิงเส้นได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 2.7 คุณสมบัติการนำกระแสไปหน้าของ IGBT ในช่วงเชิงเส้น

2.2.3.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์และแรงดันคอลเลคเตอร์-อิมิตเตอร์ในช่วงอิมิตต์ว โดยให้แบบจำลองมอสเฟต/ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์

ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์กับแรงดันคอลเลคเตอร์-อิมิตเตอร์ โดยอาศัยแบบจำลอง ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์/มอสเฟต ทำได้โดยอาศัยวงจรดังรูปที่ 2.8 (ข.) และภาพตัดขวางดังรูปที่ 2.8 (ก.) ซึ่งประกอบด้วยไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ P-N-P ที่มีเบสกว้าง (width base P-N-P bipolar transistor) ซึ่งถูกขับโดยมอสเฟตที่ต่อกันแบบ Darlington



รูปที่ 2.8 (ก.) ภาพตัดขวาง IGBT ที่แสดงแบบจำลองแบบมอสเฟต/ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ (ข.) วงจรสมมูลอย่างง่ายของแบบจำลองแบบมอสเฟต/ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์

โดยจากวงจรสมมูลจะเห็นได้ว่า

$$I_h = \left(\frac{\alpha_{PNP}}{1 - \alpha_{PNP}} \right) I_e \quad (2.11)$$

และ

$$I_E = I_h + I_e \quad (2.12)$$

$$I_E = \frac{1}{(1 - \alpha_{PNP})} I_e \quad (2.13)$$

เมื่อ I_E คือกระแสเอมิเตอร์ I_h คือกระแสที่เกิดจากการไหลของโฮล และ I_e คือกระแสที่เกิดจากการไหลของอิเล็กตรอน และ α_{PNP} คืออัตราขยายกระแส (current gain) ของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ P-N-P แต่ถึงอย่างไรก็ตามเพื่อให้มีความสามารถในการปิดกั้นตรงและย้อนกลับสูงจึงต้องออกแบบให้ทรานซิสเตอร์ P-N-P มีเบสกว้างมาก ดังนั้นอัตราขยายกระแสของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ P-N-P จึงประมาณได้เท่ากับเบสทรานสปอร์ตแฟกเตอร์ (base transport factor: α_T) [4]

$$\alpha_{PNP} = \alpha_T = \frac{1}{\cosh\left(\frac{W_N}{L_a}\right)} \quad (2.14)$$

เมื่อ W_N คือความกว้างของ N-base บริเวณไม่ปลดประจุพาหะ (Undepletion base width) และ L_a คือ ambipolar diffusion length ซึ่งความกว้างของชั้น N-base บริเวณที่ไม่ปลดประจุพาหะจะมีค่าใกล้เคียงกับความหนาของชั้น N-base ทั้งนี้เนื่องจากความกว้างบริเวณปลดประจุพาหะมีน้อยมากในสภาวะนำกระแสไปหน้า

ในการคำนวณหากระแสอิเล็กตรอนที่ไหลผ่านช่องทางเดินกระแสในช่วงอิมิตัวสามารถพิจารณาได้เช่นเดียวกับกรณีของมอสเฟตกำลัง โดยทั่วไปคือ

$$I_e = \frac{\mu_n C_{ox}}{2} \frac{W}{L} (V_G - V_T)^2 \quad (2.15)$$

ดังนั้นจากสมการที่ (2.13) และ (2.15) เราสามารถคำนวณหากระแสคอลเลกเตอร์ในสภาวะอิมิตัวได้จากสมการ

$$I_{C,sat} = \frac{1}{(1 - \alpha_{PNP})} \frac{\mu_n C_{ox}}{2} \frac{W}{L} (V_G - V_T)^2 \quad (2.16)$$

จากสมการจะเห็นได้ว่ากระแสคอลเลกเตอร์จะขึ้นอยู่กับอัตราการขยายกระแสของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ P-N-P ที่มีเบสกว้าง

2.2.4 แลทซ์-อัฟ (Latch-up)

ปรากฏการณ์ แลทซ์-อัฟ ในโครงสร้าง IGBT เกิดขึ้นจากการเกิดโครงสร้างแฝงสี่ชั้นแบบ ไทริสเตอร์ขึ้นในโครงสร้าง IGBT ทำให้ไม่สามารถควบคุมการไหลของกระแสได้โดยการควบคุมแรงดันไบอัสที่เกต ส่งผลให้เกิดความเสียหายกับอุปกรณ์

แลทซ์-อัฟ จะเกิดขึ้นเมื่อความหนาแน่นกระแสไปหน้ามีค่ามากกว่าค่าหนึ่งที่ทำให้ อุปกรณ์แสดงโครงสร้างแฝงของ ไทริสเตอร์ขึ้นมา ดังนั้นจึงไม่สามารถวิเคราะห์การทำงานของ IGBT โดยใช้สมมติฐานอย่างที่ผ่านมาได้ อย่างไรก็ตามในการวิเคราะห์ปรากฏการณ์การเกิดแลทซ์-อัฟ สามารถวิเคราะห์ได้ว่าเกิดจากผลของกระแส I_h ที่เคลื่อนที่ผ่านทางด้านใต้ของบริเวณ N^+ -emitter เป็นระยะทาง L_E ดังแสดงในรูปที่ 2.8 (ก.) ซึ่งจะส่งผลให้แรงดันตกคร่อมบริเวณรอยต่อ N^+ -emitter กับ P-base มีค่าสูงขึ้น โดยแรงดันตกคร่อมบริเวณดังกล่าว (V_A) สามารถหาได้จากสมการ

$$V_A = R_p I_h \quad (2.17)$$

เมื่อ R_p คือความต้านทานของชั้น P-base บริเวณใต้ชั้น N^+ -emitter และจากสมการ (2.11) และ (2.13) จะได้ว่า

$$V_A = \alpha_{PNP} R_p I_C \quad (2.18)$$

ดังนั้นการที่ทรานซิสเตอร์ N-P-N ทำงานจะเกิดปรากฏการณ์ แลทซ์-อัฟ จะต้องสอดคล้องกับเงื่อนไขของสมการ

$$\alpha_{NPN} + \alpha_{PNP} = 1 \quad (2.19)$$

และในกรณีที่แรงดันตกคร่อมรอยต่อ N^+ -emitter กับ P-base มีค่ามากกว่า 0.7 V สามารถที่จะหากระแสแลทซ์-อัฟ ได้จากสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{L,ss} = \frac{0.7}{\alpha_{PNP} R_p} \quad (2.20)$$

จากสมการที่ (2.20) จะเห็นได้ว่าความต้านทานในชั้น P-base และอัตราขยายกระแสของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ P-N-P จะมีผลโดยตรงต่อกระแสเลกซ์-ออฟ

2.3 การตอบสนองในภาวะชั่วคราว (Transient response)

2.3.1 การควบคุมตัดกระแส (turn off) ด้วยเกท

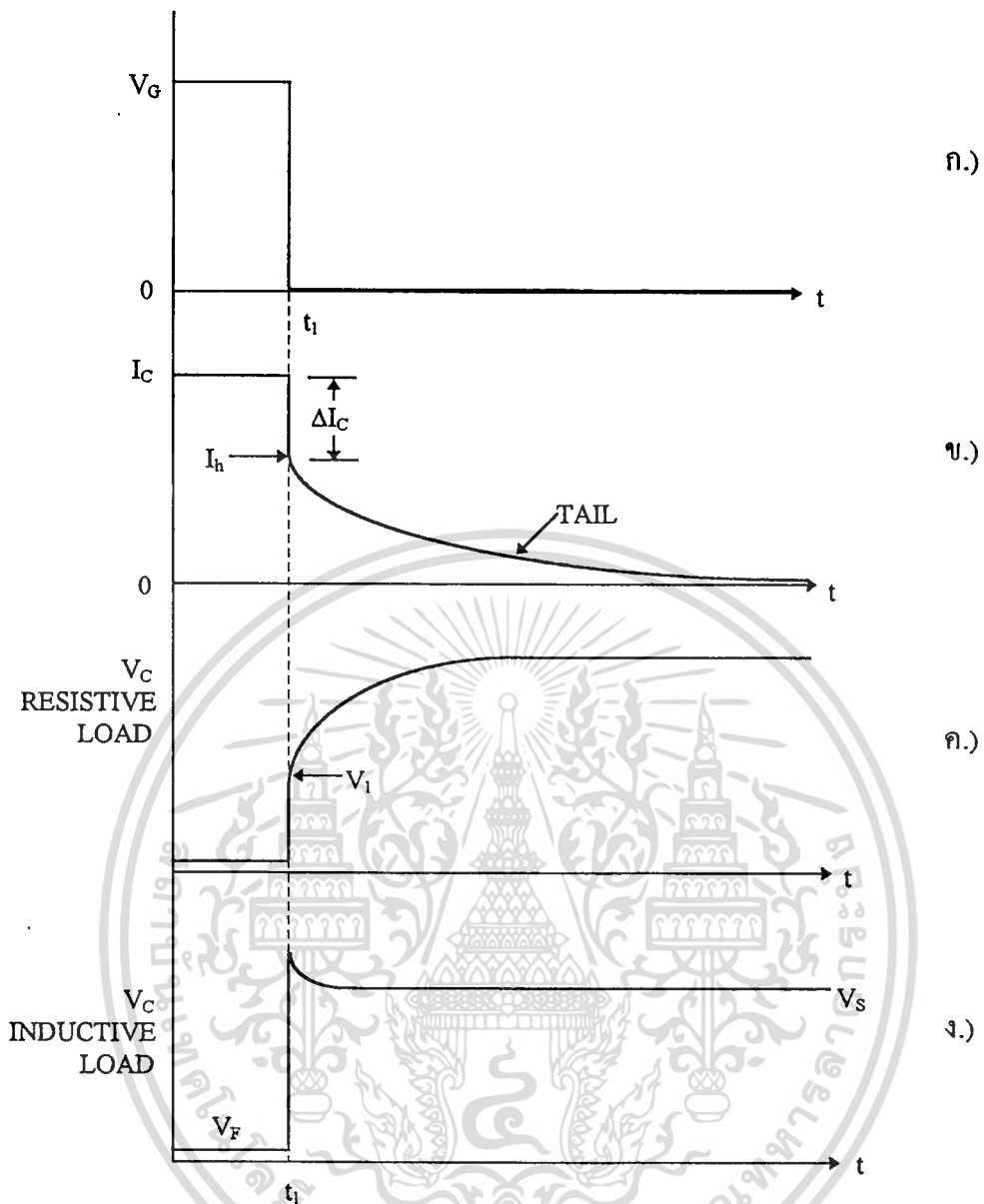
คุณสมบัติที่สำคัญประการหนึ่งของ IGBT ก็คือความสามารถในการควบคุมการตัดกระแสโดยเกท ซึ่งสามารถทำได้โดยลดแรงดันที่ขั้วเกทลงเป็นศูนย์อย่างรวดเร็วทำให้ช่องทางเดินกระแสในส่วนมอสของ IGBT ขาด อิเล็กตรอนจึงไม่สามารถไหลผ่านช่องทางเดินกระแสได้และหยุดไหลในทันที แต่ในขณะที่ตัดกระแสอิเล็กตรอนโดยทันทีนั้นกระแสโฮล I_h ที่ไหลอยู่ไม่ได้ลดลงในทันทีแต่จะค่อยๆลดลง ทำให้ยังคงมีกระแสคอลเลคเตอร์ไหลอยู่อย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้เนื่องจากประจุพาหะส่วนน้อยที่ถูกฉีดเข้าไปในชั้น N-base ยังคงมีความหนาแน่นสูงและจะค่อยๆลดลงโดยการเกิดการรวมตัว (recombination) ทำให้ไม่สามารถตัดกระแสคอลเลคเตอร์ได้ในทันที ส่งผลให้ IGBT มีความเร็วในการสวิตช์ต่ำกว่ามอสเฟตกำลังโดยทั่วไป

จากตัวอย่างในรูปที่ 2.9 ข) กระแสที่ลดลงอย่างรวดเร็วเป็นผลมาจากกระแสอิเล็กตรอน I_e ถูกตัดขาดในทันทีที่เวลา t_f ดังนั้นเราสามารถที่จะคำนวณปริมาณกระแสที่ลดลงอย่างรวดเร็วที่เวลา $t_f (\Delta I_C)$ ได้จากสมการ

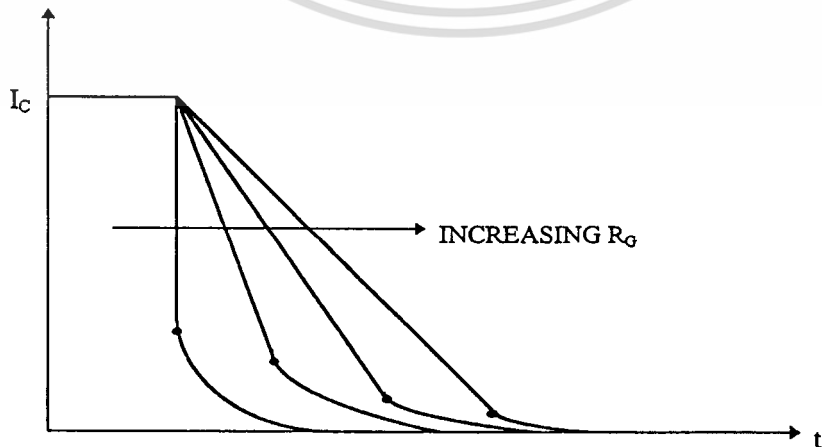
$$\Delta I_C = I_e = (1 - \alpha_{PNP}) I_C \quad (2.21)$$

โดยที่ตัวอย่างรูปกราฟของแรงดันที่คอลเลคเตอร์ในกรณีที่เป็น Resistive Load ก็จะมีลักษณะตรงกันข้ามกับกระแสคอลเลคเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ค)

อย่างไรก็ตามเราสามารถที่จะเปลี่ยนแปลงจุดเริ่มของ I_C ได้โดยการเปลี่ยนแปลงแรงดันเกทระหว่างตัดกระแสดังแสดงในรูปที่ 2.10 ทั้งนี้เนื่องจากตัวเก็บประจุขาของเกทจะจ่ายประจุผ่านความต้านทานขาออกของเกททำให้เสียเวลาในการตัดกระแสเพิ่มขึ้น ซึ่งจากตัวอย่างในรูปที่ 2.10 จะเห็นได้ว่า ΔI_C จะช้าลง เนื่องจากความต้านทานที่เกท (R_G) เพิ่มขึ้น แต่ในขณะที่เดียวกันขนาดของสัญญาณขาของรูปคลื่นจะมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดการรวมตัวระหว่างคาบเริ่มต้น (initial period)



รูปที่ 2.9 กราฟรูปคลื่นของการตัดกระแสด้วยการควบคุมแรงดันที่เกตใน IGBT



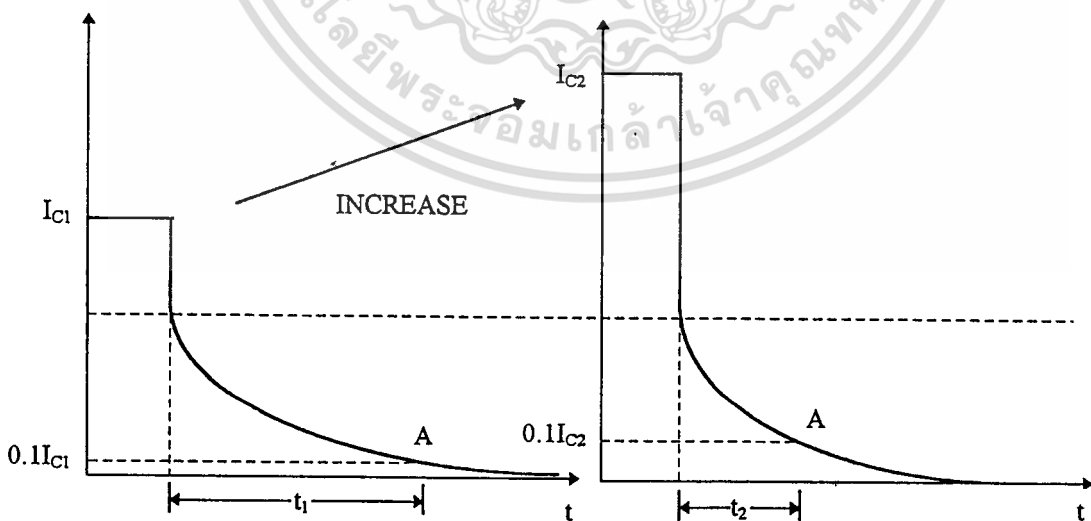
รูปที่ 2.10 กราฟรูปคลื่นของช่วงเวลาตัดกระแสที่ค่าความต้านทานที่เกตต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 ช่วงเวลาตัดกระแส (turn-off time)

ในการเพิ่มความเร็วในการสวิตช์ของ IGBT สามารถทำได้โดยการสร้างศูนย์กลางการรวมตัว (recombination center) ในชั้น N-base เพื่อลดช่วงอายุ (lifetime) ของประจุพาหะส่วนน้อย ซึ่งโดยทั่วไปสามารถทำได้ 2 วิธี โดยทั้งสองวิธีที่จะกล่าวถึงจะเป็นการทำให้เกิด deep level ขึ้นในแถบพลังงานต้องห้าม วิธีแรกก็คือ การแพร่อะตอมสารเจืออย่างเช่นทองคำเข้าไปในเนื้อซิลิกอน เพื่อให้คุณสมบัติของซิลิกอนในชั้น N-base เปลี่ยนไป ซึ่งวิธีนี้อุปสรรคจะอยู่ที่การควบคุมปริมาณอะตอมสารเจือและการควบคุมความลึกของอะตอมที่แพร่เข้าไป อีกทั้งยังทำให้มีสิ่งสกปรกติดเข้าไปในขบวนการสร้างด้วยจึงไม่เป็นที่นิยม ส่วนวิธีที่สองก็โดยการยิงอนุภาคที่มีพลังงานสูงเข้าไปเพื่อทำให้แลตทิซ (lattice) เกิดความเสียหายแต่ช่วยลดช่วงอายุของประจุพาหะส่วนน้อยลงได้และเป็นวิธีที่สะอาดอีกทั้งยังสามารถทำได้ที่อุณหภูมิห้องแต่ทำได้ยากเนื่องจากต้องมีอุปกรณ์ที่จะใช้ยิงอนุภาคเข้าไปในเนื้อซิลิกอนซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีราคาแพงมาก

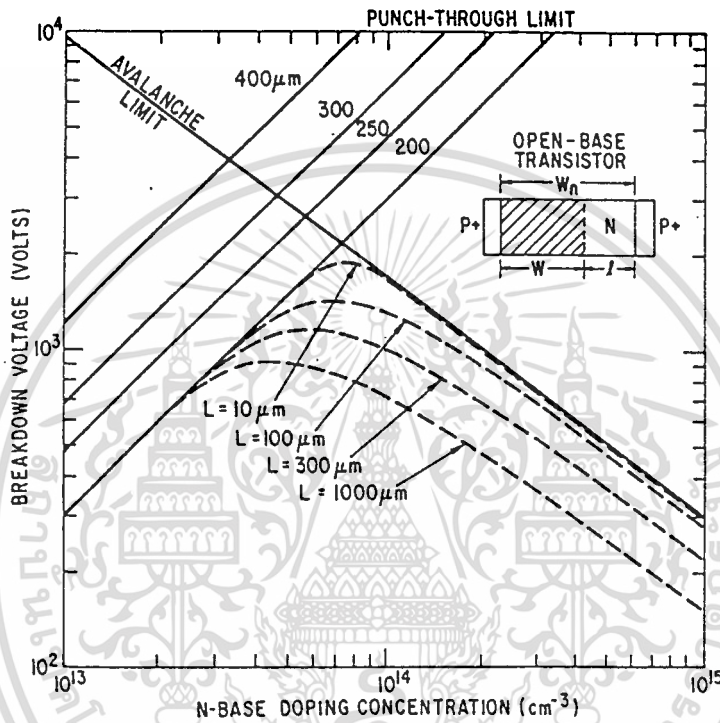
อย่างไรก็ตามปรากฏการณ์ที่พบบ่อยครั้งใน IGBT คือการลดเวลาในการตัดกระแสเมื่อเพิ่มกระแสคอลเลกเตอร์ดังแสดงในตัวอย่างรูปที่ 2.11 ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อเพิ่มกระแสคอลเลกเตอร์โดยที่อัตราการใช้กระแสของทรานซิสเตอร์ P-N-P ยังคงมีค่าเท่าเดิม ดังนั้นกระแสคอลเลกเตอร์ส่วนที่เพิ่มขึ้นจึงเป็นการเพิ่มกระแสที่ไหลผ่านช่องทางเดินกระแส (ΔI_C) เท่านั้น โดยที่เวลาในการตัดกระแสยังคงเป็นเช่นเดิมคือนับจากเวลาในช่วงตั้งแต่จุดที่กระแสคอลเลกเตอร์เริ่มลดจนกระทั่งถึงจุดที่กระแสคอลเลกเตอร์ลดเหลือ 10 % ของกระแสคอลเลกเตอร์เริ่มต้น จึงทำให้เวลาในการตัดกระแสของ IGBT ลดลงเมื่อเพิ่มกระแสคอลเลกเตอร์



รูปที่ 2.11 ช่วงเวลาในการตัดกระแสของ IGBT ที่กระแสคอลเลกเตอร์ค่าต่างกัน

2.4 แรงดันพังทลายของทรานซิสเตอร์แบบเบสเปิด (open-base Transistor Breakdown)

ในโครงสร้างของอุปกรณ์กำลังส่วนใหญ่มักจะพบรอยต่อพี-เอ็นที่ต่อกันแบบ back-to-back ที่แฝงอยู่ในโครงสร้างของอุปกรณ์กำลังเสมอทำให้ความสามารถในการทนแรงดันสูงสุดของอุปกรณ์ถูกจำกัดโดยแรงดันพังทลายของทรานซิสเตอร์แบบเบสเปิดที่แฝงอยู่ในโครงสร้างของอุปกรณ์กำลัง ซึ่งผลของแรงดันพังทลายดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับความต้านทานและระยะห่างระหว่างรอยต่อพี-เอ็นในอุปกรณ์แต่ละตัว



รูปที่ 2.12 แรงดันพังทลายของโครงสร้างทรานซิสเตอร์แบบเบสเปิด

จากรูปที่ 2.12 แสดงถึงลักษณะของโครงสร้างทรานซิสเตอร์แบบเบสเปิดที่มีรอยต่อพี-เอ็น รอยต่อหนึ่งถูกไบอัสย้อนกลับ ซึ่งรอยต่อดังกล่าวเปรียบเทียบกับรอยต่อของคอลเลคเตอร์กับ รอยต่อของอิมิตเตอร์ในอุปกรณ์ IGBT เมื่อความกว้างของชั้น N-base มีค่ามากกว่าความกว้าง ของบริเวณปลอดประจุของรอยต่อคอลเลคเตอร์ที่ถูกไบอัสย้อนกลับ แรงดันพังทลายของรอยต่อ คอลเลคเตอร์จะถูกจำกัดโดยแรงดันพังทลายแบบอะวาแลนซ์ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันพัง ทลายแบบอะวาแลนซ์กับความต้านทานในชั้น N-base แสดงได้ดังรูปที่ 2.12 โดยจะเห็นได้ว่าแรง ดันพังทลายแบบอะวาแลนซ์จะลดลงเมื่อระดับอะตอมสารเจือในชั้น N-base เพิ่มขึ้น

ในกรณีที่ N-base มีระยะแคบๆ แรงดันพังทลายของทรานซิสเตอร์แบบ เบสเปิด จะเกิด ขึ้นจากการฉีดอิเล็กตรอนจากอิมิตเตอร์เหมือนกับว่าชั้นปลอดประจุพาหะของคอลเลคเตอร์แพร่เข้าไป เกือบถึงรอยต่อของอิมิตเตอร์ แต่ในกรณีที่ระยะการแพร่ของประจุพาหะส่วนน้อยในชั้น N-base

มีค่าน้อยมาก แรงดันพังทลายของคอลเลกเตอร์จะเกิดเมื่อเกิดทะลุถึงกันของบริเวณปลดประจุพาหะ ซึ่งในกรณีนี้แรงดันพังทลายของรอยต่อแบบ abrupt สามารถหาได้จากสมการ

$$V_{PT} = \frac{qN_D}{2\epsilon_s} W_N^2 \quad (2.22)$$

เมื่อ N_D คือระดับอะตอมสารเจือในชั้น N-base

สำหรับกรณีที่ความกว้างของ N-base ที่มีค่ามาก แรงดันพังทลายแบบพื้นที่ทรูจะลดลงเมื่อเพิ่มความต้านทานในชั้น N-base ดังแสดงในรูปที่ 2.12

อย่างไรก็ตามแรงดันพังทลายของอุปกรณ์อาจจะถูกจำกัดโดยแรงดันพังทลายแบบอะวาแลนช์ (avalanch) หรือพื้นที่ทรู (punch-through) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความกว้างและความต้านทานของชั้น N-base ซึ่งในทางปฏิบัติระดับสูงสุดของแรงดันพังทลายไม่สามารถกำหนดได้โดยจุดตัดระหว่างขีดจำกัดของแรงดันพังทลายแบบอะวาแลนช์กับพื้นที่ทรูดังแสดงในรูปที่ 2.12 เนื่องจากขีดจำกัดของระยะการแพร่ของประจุพาหะส่วนน้อยในชั้น N-base ซึ่งจะเกิดเมื่อผลรวมของตัวประกอบการคูณ (multiplication factor) และ base transport factor (α_T) มีค่าเท่ากับหนึ่ง ดังนั้นจึงสามารถหาค่า base transport factor ได้จาก

$$\alpha_T = \frac{1}{\cosh\left(\frac{l}{L_p}\right)} \quad (2.23)$$

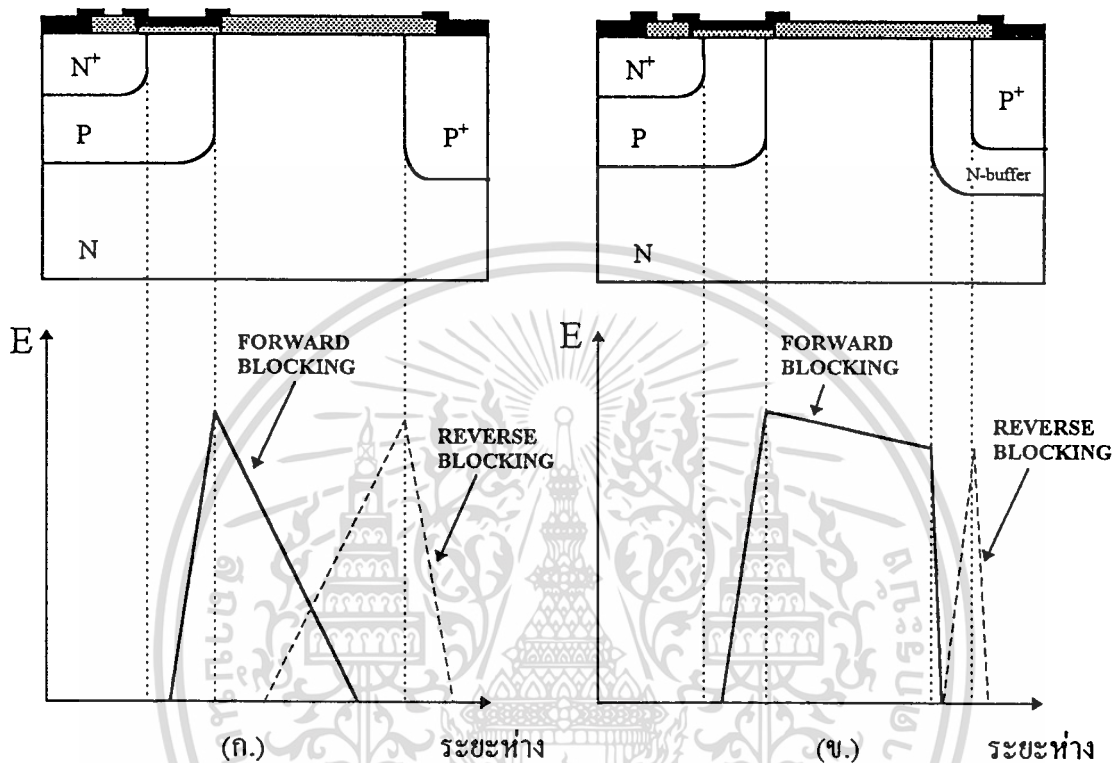
โดยที่ l คือความกว้างของบริเวณปลดประจุพาหะในชั้น N-base และ L_p คือระยะการแพร่ของโฮล

2.5 IGBT โครงสร้างแบบไม่สมมาตร (Asymmetry Structure) [2],[9]

ในการใช้งานอุปกรณ์ IGBT ในวงจรไฟฟ้ากระแสตรงนั้นเงื่อนไขในการทำงานจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการปิดกั้นไปหน้าเท่านั้นส่วนความสามารถในการปิดกั้นย้อนกลับของอุปกรณ์จะไม่มีผลสำคัญเหมือนกับการใช้งานในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ ดังนั้นในการพัฒนาอุปกรณ์ IGBT เพื่อเพิ่มความสามารถในการปิดกั้นไปหน้าสำหรับการใช้งานในวงจรไฟฟ้ากระแสตรงจึงไม่จำเป็นที่จะต้องคำนึงถึงความสามารถในการปิดกั้นย้อนกลับ ซึ่งสามารถทำได้โดยการใช้โครงสร้างแบบไม่สมมาตร โดยจะมีความแตกต่างกับโครงสร้างแบบสมมาตร (symmetry structure) คือในโครงสร้างแบบไม่สมมาตรจะมีบริเวณ N-base แบ่งเป็น 2 ชั้น ชั้นแรกจะมีลักษณะเหมือนกับโครงสร้างแบบสมมาตร ในส่วนชั้นที่สองที่เพิ่มขึ้นมาเรียกว่าชั้น "N-buffer" ซึ่งจะอยู่ติดกับขั้ว

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คอสเลคเตอร์ โดยมีโครงสร้างและการกระจายของสนามไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 2.13 (ข.) ซึ่งชั้น N-buffer นี้จะทำให้การกระจายของสนามไฟฟ้าเปลี่ยนจากรูปสามเหลี่ยมในโครงสร้างแบบสมมาตรไปเป็นรูปสี่เหลี่ยมในกรณีของโครงสร้างแบบไม่สมมาตร โดยที่ประจุที่อยู่ภายในชั้น N-buffer จะไปทำให้สนามไฟฟ้าในชั้น N-buffer ลดลงเป็นศูนย์



รูปที่ 2.13 การกระจายสนามไฟฟ้าของ IGBT

(ก.) โครงสร้างแบบสมมาตร (ข.) โครงสร้างแบบไม่สมมาตร

2.6 การแพร่สารเจือ [5]

การแพร่สารเจือโดยกระบวนการแพร่สารเจือด้วยความร้อนเป็นการเติมและควบคุมปริมาณของอะตอมสารเจือให้เข้าไปในผลึกสารกึ่งตัวนำในบริเวณที่ต้องการ โดยอาศัยความร้อนในทางปฏิบัติกระบวนการแพร่จะถูกแบ่งออกเป็นสองขั้นตอนตามลำดับต่อไปนี้คือ

2.6.1 Predeposition

การ Predeposition เป็นการแพร่ชั้นต้นเพื่อกำหนดและควบคุมปริมาณสารเจือที่จะเข้าไปในผลึกสารกึ่งตัวนำ ซึ่งอะตอมสารเจือจะแพร่เข้าไปในผลึกซิลิกอนได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่า "Solid Solubility" ของอะตอมสารเจือซึ่งจะมีค่าจำกัดที่อุณหภูมิค่าหนึ่ง ซึ่งเราสามารถคำนวณหาการกระจายของอะตอมสารเจือได้จากสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$N_{(x,t)} = N_0 \operatorname{erfc}\left(\frac{X}{2\sqrt{D_1 t_1}}\right) \quad (2.24)$$

เมื่อ N_0 คือค่า Solid solubility ของสารเจือ (cm^{-3})

erfc คือค่าฟังก์ชันประกอบของฟังก์ชันคลาดเคลื่อน (error function complementary)

X คือ ระยะทางจากผิวหน้าลึกลงไปในแผ่นผลึก (cm)

D_1 คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ (diffusion coefficient) ในการ Predeposition (cm^2/s)

t_1 คือ เวลาในการ deposition (s)

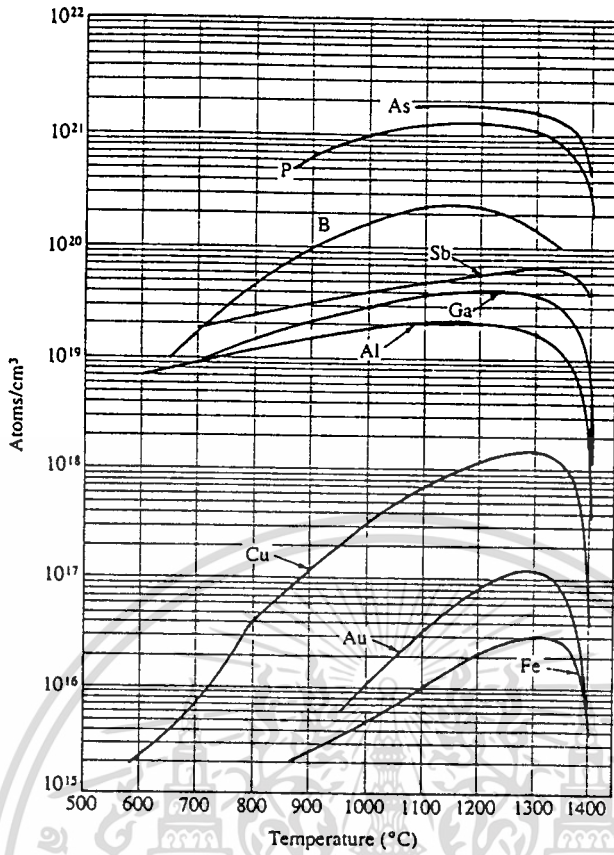
โดยที่ค่า N_0, D_1 และ erfc หาได้จากกราฟในรูปที่ 2.14, 2.15 และ 2.16 ตามลำดับและจำนวนความหนาแน่นอะตอมสารเจือทั้งหมด (Q) จากการ predeposition จะเป็นตามสมการ

$$Q = \int_0^{\infty} N(X,t) dx = \frac{2}{\sqrt{\pi}} N_0 \sqrt{D_1 t_1} \quad (2.25)$$

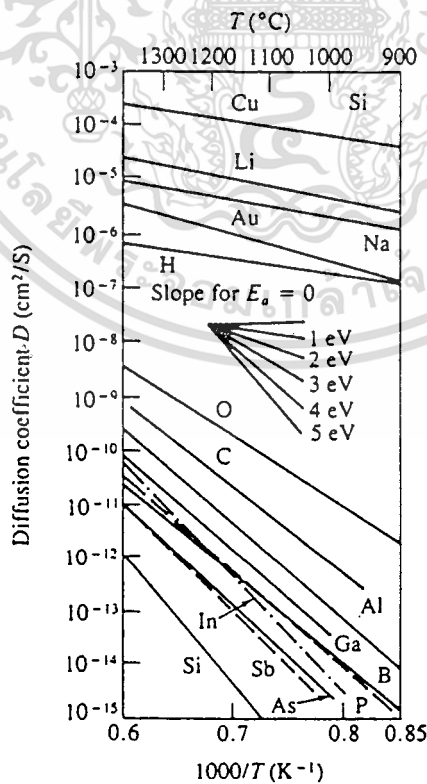
ส่วนความลึกของรอยต่อที่ได้หลังจาก predeposition จะได้โดยเงื่อนไขของเขตของ $N(x,t) = N_{BG}$ ดังนั้นจะได้

$$X_j = \sqrt{4D_1 t_1} \operatorname{erfc}^{-1} \left[\frac{N_{BG}}{N_0} \right] \quad (2.26)$$

เมื่อ N_{BG} คือความหนาแน่นอะตอมสารเจือพื้นฐาน (Blackground Doping Concentration)

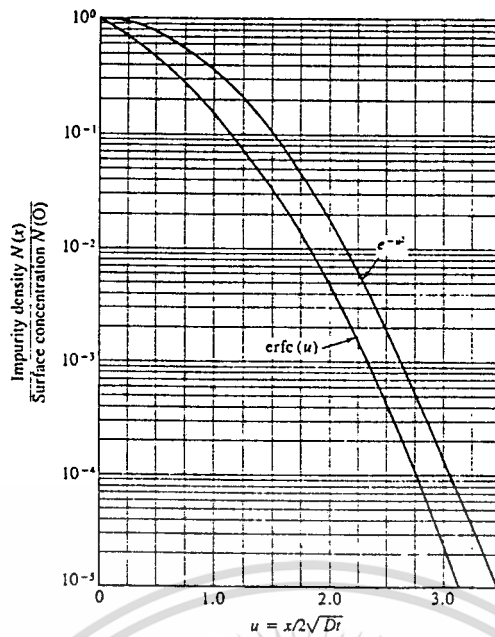


รูปที่ 2.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Solid solubility ของสารเจือต่างๆในซิลิกอน



รูปที่ 2.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมสารเจือต่างชนิดในแผ่น

เอกสารนี้เป็นผลิตภัณฑ์ของงานวิจัยที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 กราฟนอร์มอลไลซ์เพื่อหาการกระจายของสารเจือทั้งแบบ erfc และ Gaussian

ตารางที่ 2.1 แสดงสารประกอบแหล่งกำเนิดสารเจือ [5]

ชนิดธาตุ	ชื่อธาตุ	ค่า solid solubility	สปสการแพร่ (1100 °C) (cm ² /s)	ชื่อสารประกอบ	สูตร	สถานะ
เอ็น	พลวง	7 X 10 ¹⁹ (1250 °C)	2.5 X 10 ⁻¹⁴	antimony trioxide	Sb ₂ O ₃	แข็ง
	สารหนู	1.8 X 10 ²¹ (1150 °C)	3 X 10 ⁻¹⁴	arsenic trioxide	As ₂ O ₃	แข็ง
				arsenic	AsH ₃	ก๊าซ
	ฟอสฟอรัส	1.4 X 10 ²¹ (1150 °C)	3 X 10 ⁻¹³	phos. pentoxide	P ₂ O ₅	แข็ง
				phos. oxychloride	POCl ₃	เหลว
				phosphide	PH ₃	ก๊าซ
silicon pyrophosphate				SiP ₂ O ₇	แข็ง	
บี	โบรอน	5 X 10 ²¹ (1250 °C)	3 X 10 ⁻¹³	boron trioxide	B ₂ O ₃	แข็ง
				boron tribomide	BBr ₃	เหลว
				diborane	B ₂ H ₆	ก๊าซ
				boron trichloride	BCl ₃	ก๊าซ
				boron nitride	BN	แข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่หรือใช้ซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.2 การขับลึก (Drive-in)

การขับลึกเป็นกระบวนการที่ทำต่อจากการ predeposition เพื่อที่จะทำให้อะตอมสารเจือแพร่ลึกเข้าไปในผลึกซิลิกอนตามต้องการซึ่งในขั้นตอนนี้มักจะมีการสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ที่ผิวของแผ่นผลึกด้วยเพื่อใช้เป็นหน้ากากในการแพร่อะตอมสารเจือครั้งต่อไป อย่างไรก็ตามการกำหนดช่วงเวลาของการขับลึกอุณหภูมิและก๊าซในบรรยากาศทำให้สามารถกำหนดค่าต่อไปนี้ได้คือ

1. ความลึกของรอยต่อในขั้นสุดท้าย
2. ความหนาของชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้นใหม่เหนือบริเวณที่ถูก predeposition
3. การกระจายของอะตอมสารเจือในผลึกซิลิกอนอย่างถูกต้อง

โดยที่ลักษณะการกระจายของอะตอมสารเจือหลังการขับลึกจะเป็นไปตามกราฟดังรูปที่ 2.14 ซึ่งเป็นการกระจายแบบ Gaussian ซึ่งสามารถคำนวณหาได้โดยอาศัยสมการ

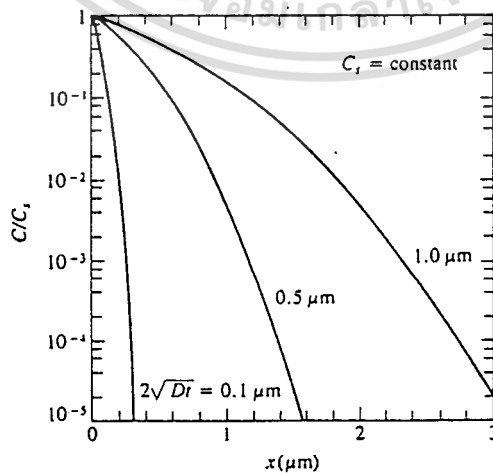
$$N_{(x,t)} = \frac{Q \cdot \exp(-x^2)}{\sqrt{XD_2t_2} \cdot 4D_2t_2} \quad (2.27)$$

D_2 คือสัมประสิทธิ์การแพร่ในการขับลึก (cm^2/s)

t_2 คือเวลาในการขับลึก (s)

ส่วนความลึกของรอยต่อภายหลังจากการขับลึกโดยเงื่อนไขขอบเขตที่ $N(x,t) = N_{BG}$ จะได้เป็น

$$X_j^2 = 4D_2t_2 \cdot \ln\left(\frac{Q}{N_{BG} \sqrt{XD_2t_2}}\right) \quad (2.28)$$



รูปที่ 2.17 การกระจายความหนาแน่นอะตอมสารเจือหลังจากการ predeposition และการขับลึก

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบ IGBT

ในการออกแบบอุปกรณ์กำลังให้มีประสิทธิภาพสูงที่สุดนั้น จำเป็นที่จะต้องศึกษาถึงโครงสร้างและหลักการทำงานของอุปกรณ์อย่างละเอียดเสียก่อน อย่างไรก็ตามสิ่งสำคัญอีกประการหนึ่งที่จะเป็นตัวกำหนดขอบเขตการออกแบบก็คือความสามารถของเทคโนโลยีที่ใช้ในการสร้างสำหรับในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการออกแบบสร้างอุปกรณ์ IGBT ที่เหมาะสมกับกระบวนการสร้างโดยใช้เทคโนโลยีการแพร่สารเจือโดยใช้ความร้อน

3.1 การเลือกแผ่นผลึกเริ่มต้น

ในการเลือกแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำเริ่มต้นเพื่อใช้ในกระบวนการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำนั้น สิ่งแรกที่ต้องพิจารณาคือชนิดของสารหรือสารประกอบของแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำเริ่มต้น โดยทั่วไปนิยมใช้กันอยู่ 2 ชนิดคือซิลิกอนและแกลเลียมอะเซไนด์ แต่สำหรับวิทยานิพนธ์ชิ้นนี้เลือกใช้แผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำชนิดซิลิกอน ทั้งนี้เนื่องจากหาง่าย ราคาถูกและไม่ทำให้เกิดให้สารพิษจากกระบวนการสร้าง โดยแผ่นผลึกซิลิกอนที่ใช้ได้จากกระบวนการ โซโคราลสกี (Czochralski) หรือวิธี ฟลอยทโซน (Float zone) แล้วนำมาตัดเป็นแผ่นบางๆเส้นผ่าศูนย์กลาง 50-200 mm. จากนั้นจึงนำไปขัดผิวให้เรียบพร้อมที่จะนำไปใช้ในขบวนการสร้างสารกึ่งตัวนำต่อไป และนอกจากนั้นในการเลือกแผ่นผลึกซิลิกอนที่เหมาะสมที่จะสร้าง IGBT ยังต้องคำนึงถึงความคล่องตัวของประจุพาหะและความหนาแน่นของอะตอมสารเจือของฐานรอง เพื่อที่จะได้อุปกรณ์ที่สามารถนำกระแสได้สูงและมีความสามารถในการทนแรงดันพังทลายสูงตามต้องการ

ดังนั้นในการสร้างอุปกรณ์ IGBT สำหรับโครงสร้างแนวระนาบ (lateral structure) นั้นเลือกใช้แผ่นผลึกซิลิกอนชนิด N ระนาบเชิงเตี้ยระนาบ (100) พิกัดความต้านทาน 8-12 Ω -cm. ส่วนโครงสร้างในแนวตั้ง (verticle structure) ใช้แผ่นชนิด N แบบอพิทาซีระนาบ (100) พิกัดความต้านทานชั้นอพิทาซีเท่ากับ 40-50 Ω -cm ทั้งนี้เนื่องจากความคล่องตัวของอิเล็กตรอนในระนาบ (100) มีมากกว่าในระนาบ (111) และค่าความต้านทานของแผ่นผลึกฐานรองก็พอที่จะสามารถรองรับแรงดันพังทลายตามที่ต้องการได้

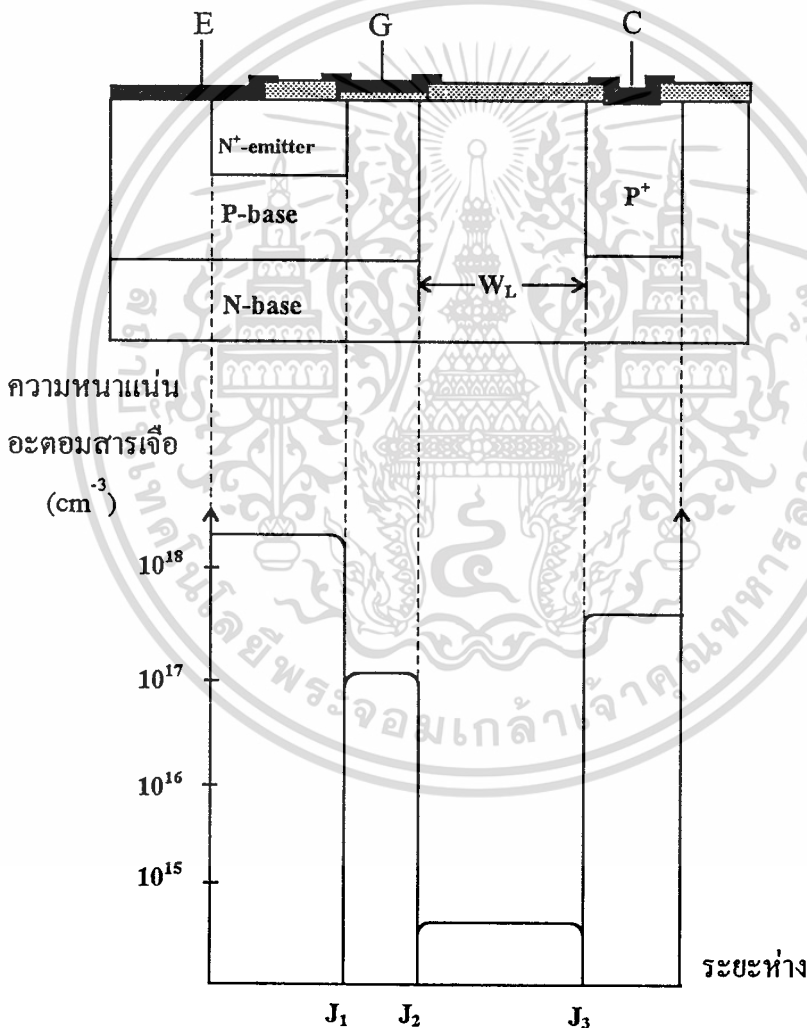
3.2 การออกแบบโครงสร้าง IGBT

โดยทั่วไปอุปกรณ์กำลังจำเป็นต้องมีขนาดใหญ่เพื่อให้มีความสามารถในการนำกระแสและทนแรงดันพังทลายสูง ดังนั้นจึงนิยมสร้างโดยอาศัยโครงสร้างในแนวตั้งเพื่อลดขนาดของตัวอุปกรณ์ แต่ถึงอย่างไรก็ตามในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการออกแบบอุปกรณ์ IGBT ทั้งโครงสร้างในแนวระนาบและแนวตั้ง ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างในแนวระนาบสามารถที่จะเปลี่ยนแปลงตัวไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แปรทางเรขาคณิตได้ง่ายจึงเหมาะที่จะออกแบบเพื่อศึกษาผลของตัวแปรทางเรขาคณิตต่างๆที่มีต่อการการทำงานของ IGBT ส่วนโครงสร้างในแนวตั้งนั้นออกแบบสำหรับทำงานที่กำลังสูงๆ

3.2.1 การออกแบบโครงสร้างในแนวระนาบ

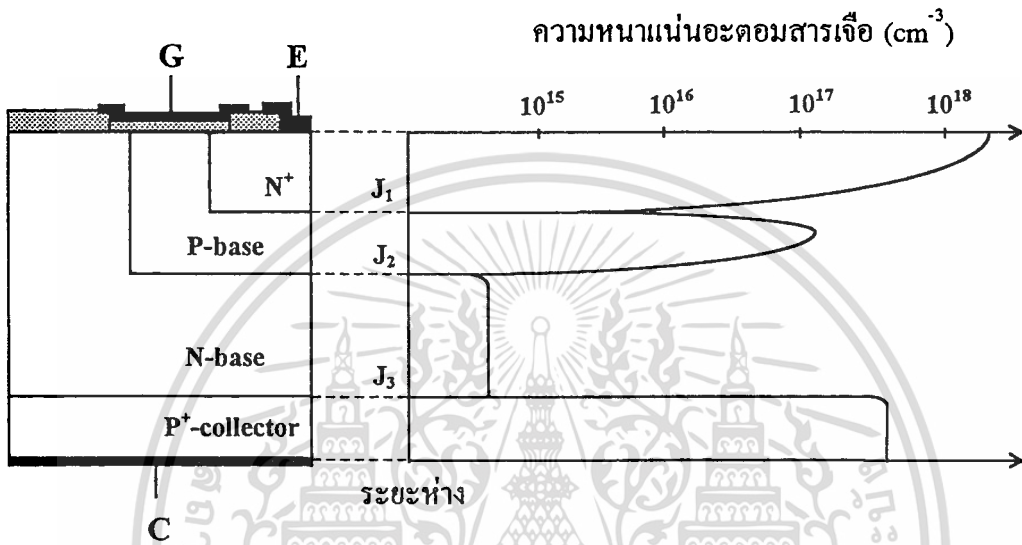
โครงสร้าง IGBT ประกอบด้วย 4 ชั้น คือ N^+ -P-N- P^+ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 สร้างขึ้นโดยขบวนการแพร่สารเจือด้วยความร้อน โดยเริ่มจากแผ่นผลึกซิลิกอนแบบระนาบเชิงเดี่ยวชนิด N ระนาบ(100) จากนั้นจึงแพร่อะตอมสารเจือโดยจะทำการแพร่อะตอมสารเจือในส่วน P^+ -collector ก่อนแล้วจึงทำการแพร่อะตอมสารเจือในส่วน P-base และ N^+ - emitter ตามลำดับ ทำให้ได้โครงสร้าง N^+ -P-N- P^+ ในแนวระนาบ



รูปที่ 3.1 โครงสร้าง N^+ -P-N- P^+ ในแนวระนาบของ IGBT

3.2.2 การออกแบบโครงสร้างในแนวดิ่ง

สำหรับการออกแบบโครงสร้างในแนวดิ่งของอุปกรณ์ IGBT ดังแสดงในรูปที่ 3.2 สามารถทำได้เช่นเดียวกันกับในแนวระนาบจะต่างกันตรงที่ ใช้แผ่นสลิคซิลิกอนพื้นฐานชนิดอิพิแทกเซียล N/P⁺ ระบาย (100) ส่วนการแพร่สารเจือในส่วนต่างๆยังคงเป็นเช่นเดียวกับโครงสร้างในแนวระนาบ ยกเว้นการแพร่สารเจือในส่วน P⁺-collector



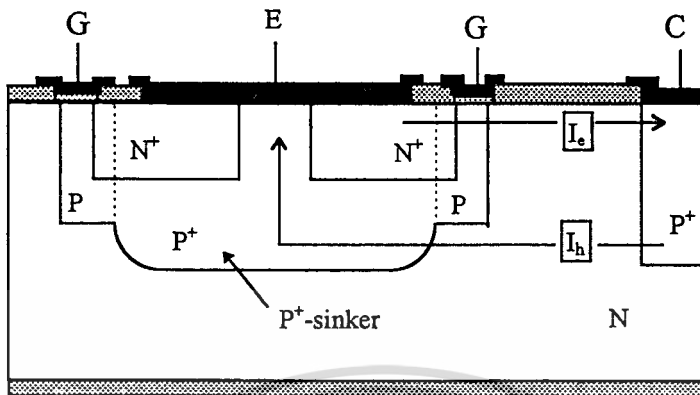
รูปที่ 3.2 โครงสร้าง N⁺-P-N-P⁺ ในแนวดิ่งของ IGBT

3.3 การออกแบบ P-base แบบสองชั้น

ในจำนวนตัวแปรทางโครงสร้างทั้งหมดที่มีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ IGBT บริเวณ P-base เป็นส่วนที่มีความสำคัญมากที่สุดเนื่องจากในกรณีที่ความหนาแน่นอะตอมสารเจือในส่วน P-base มีค่ามากนั่นคือความต้านทานของชั้น P-base ที่อยู่ใต้ชั้น N⁺-emitter จะมีค่าน้อยลง ทำให้ความหนาแน่นของกระแสแลตชิ่ง (latching current) เพิ่มขึ้นหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือความหนาแน่นของกระแสจะทำให้เกิดปรากฏการณ์แลตซ์-ออฟลดลง แต่ในทางตรงกันข้ามจะส่งผลให้แรงดันซิดเริ่มมีค่าสูงขึ้นด้วย ดังนั้นในการออกแบบความหนาแน่นอะตอมสารเจือในชั้น P-base จึงต้องคำนึงถึงสองสิ่งที่กล่าวมา สำหรับในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการออกแบบความหนาแน่นอะตอมสารเจือไว้ที่ระดับประมาณ 10¹⁶-10¹⁷ cm⁻³

อย่างไรก็ตามสำหรับการออกแบบโครงสร้างเพื่อแก้ปัญหาดังที่กล่าวมาข้างต้นสามารถทำได้โดยออกแบบให้ชั้น P-base มี 2 ส่วนดังแสดงในรูปที่ 3.3 ส่วนแรกจะเป็นส่วน P-base ที่มีความหนาแน่นอะตอมสารเจือขึ้นอยู่กับแรงดันซิดเริ่มต้นที่ต้องการและส่วนที่สองจะเป็นส่วน P⁺ ซึ่งมีความหนาแน่นอะตอมสูง ทั้งนี้เพื่อลดค่าความต้านทาน R_o ของชั้น P-base บริเวณที่อยู่ใต้ชั้น

N^+ -emitter ทำให้ระดับความหนาแน่นกระแสที่จะทำให้เกิดปรากฏการณ์แลตซ์-ฮอฟสูงขึ้นซึ่งจะเรียกชั้น P^+ ที่เพิ่มขึ้นมานี้ว่าชั้น " P^+ -sinker"



รูปที่ 3.3 โครงสร้าง IGBT ที่มีส่วน P^+ -sinker ในโครงสร้างมอสเฟต

3.3 การออกแบบเพื่อศึกษาผลของความกว้างของชั้น N-base

จากทฤษฎี IGBT พบว่าความกว้างของชั้น N-base มีผลต่ออัตราการขยายกระแสของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ P-N-P ในโครงสร้าง IGBT ดังนั้นจึงมีผลโดยตรงต่อปริมาณกระแสโวลท์ที่ถูกฉีดเข้าไปยังชั้น N-base ซึ่งเท่ากับส่งผลต่อความสามารถในการนำกระแสของ IGBT ในสภาวะนำกระแสไปหน้าด้วย ทั้งนี้เนื่องจากโวลท์ที่ถูกฉีดเข้าไปในชั้น N-base จะทำให้เกิดการมอดดูเลตสภาพนำส่งผลให้ความต้านทานในสภาวะนำกระแสของอุปกรณ์ลดลง

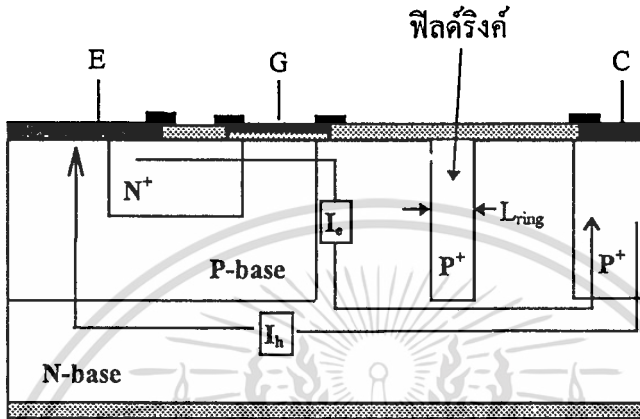
ในทางปฏิบัติการเปลี่ยนแปลงความกว้างของชั้น N-base โดยใช้โครงสร้างในแนวตั้งทำได้ยากและสิ้นเปลือง ดังนั้นในการออกแบบเพื่อศึกษาผลของความกว้างของชั้น N-base ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเลือกที่จะใช้โครงสร้างในแนวระนาบในการศึกษาผลของความกว้างของชั้น N-base ทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ IGBT ที่มีความกว้างของชั้น N-base หลากๆค่า ตั้งแต่ 60 ไปจนถึง 250 μm

3.4 การออกแบบโครงสร้างฟิล์ดริงค์ใน IGBT

ในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำโดยทั่วไปที่มีโครงสร้างในแนวระนาบมักจะประสบปัญหาในเรื่องของกระแสรั่วไหลอันเนื่องจาก surface state ดังนั้นในการศึกษาการป้องกันกระแสรั่วไหลอันเนื่องจาก surface state และเพื่อศึกษาทิศทางกระแสของกระแสภายในอุปกรณ์ IGBT ในโครงสร้างในแนวระนาบจึงทำการออกแบบฟิล์ดริงค์กั้นกึ่งกลางบริเวณชั้น N-base เพื่อปิดกั้นทางเดินของประจุพาหะบริเวณผิวของอุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ทั้งนี้เมื่ออุปกรณ์ทำงานในสภาวะนำกระแสไปหน้ากระแสที่ไหลที่ผิวจะถูกปิดกั้นโดยฟิล์ดริงค์ทำให้เปลี่ยนทิศทางเคลื่อนที่สำหรับการออกแบบฟิล์ดริงค์ที่คืนนั้นจะต้องออกแบบให้มีความกว้างของฟิล์ดริงค์ที่เหมาะสมที่จะ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้สามารถป้องกันการไหลของกระแสที่ไม่ต้องการให้เกิดได้และต้องไม่กระทบกระเทือนต่อทิศทางการไหลของกระแสในอุปกรณ์ที่มีโครงสร้างในแนวระนาบด้วย โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการออกแบบสร้างฟิล์ดริงค์ที่จุดกึ่งกลางระหว่างชั้น P-base กับชั้น P⁺-collector โดยมีความกว้างของฟิล์ดริงค์ (L_{ring}) ตั้งแต่ 6 จนถึง 20 μm



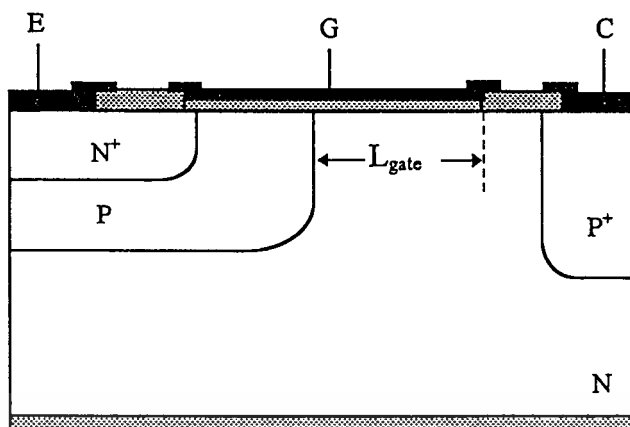
รูปที่ 3.4 ทิศทางการไหลของกระแสในอุปกรณ์ IGBT กรณีที่มีฟิล์ดริงค์

3.5 การออกแบบความกว้างของเกตออกไซด์

เกตออกไซด์เป็นตัวแปรหนึ่งที่มีความสำคัญมากในอุปกรณ์ตระกูลมอส เนื่องจากเป็นส่วนที่ใช้ควบคุมการไหลของกระแส ทั้งนี้เนื่องจากความหนาของเกตออกไซด์จะมีผลต่อแรงดันที่จะใช้ในการขับเคลื่อนและยังมีผลต่อค่าทรานคอนดักแตนซ์ในโครงสร้างมอสอีกด้วย ซึ่งโดยทั่วไปของมอสเฟตกำลังและ IGBT จะมีความหนาประมาณ 1000 \AA

สำหรับความกว้างของเกตออกไซด์ก็เป็นตัวแปรหนึ่งที่จะต้องมามีค่าที่เหมาะสมเพื่อให้ได้อุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูงสุด ทั้งนี้เนื่องจากในสภาวะนำกระแสไปหน้าแรงดันไบอัสค่าบวกที่ให้กับส่วนเกต นอกจากจะเหนี่ยวนำให้เกิดช่องทางเดินกระแสที่ผิวของชั้น P-base ที่อยู่ภายใต้เกตแล้วส่วนที่ยื่นออกในส่วน P-base ยังมีผลต่อความสามารถในการนำกระแสของ IGBT ด้วย ทั้งนี้เนื่องจากจะเหนี่ยวนำประจุรวมกันที่ผิวของชั้น P-base ทำให้บริเวณดังกล่าวมีความต้านทานน้อยและจะส่งผลต่อความสามารถในการนำกระแสของอุปกรณ์และผลของความกว้างของเกตออกไซด์ที่ยื่นเข้าไปในชั้น P-base ยังจะส่งผลต่อความกว้างของบริเวณปลอดประจุพาหะที่ขอบของรอยต่อ P-base กับ N-base ด้วย [8] ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ดังนั้นในการพิจารณาออกแบบตามความกว้างของเกตออกไซด์จึงต้องคำนึงถึงค่าที่เหมาะสม เพื่อให้ได้อุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูงสุดตามต้องการ โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการออกแบบสร้างเกตออกไซด์ที่มีส่วนซ้อนทับบนชั้น N-base (L_{gate}) ตั้งแต่ 10 ถึง 50 μm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

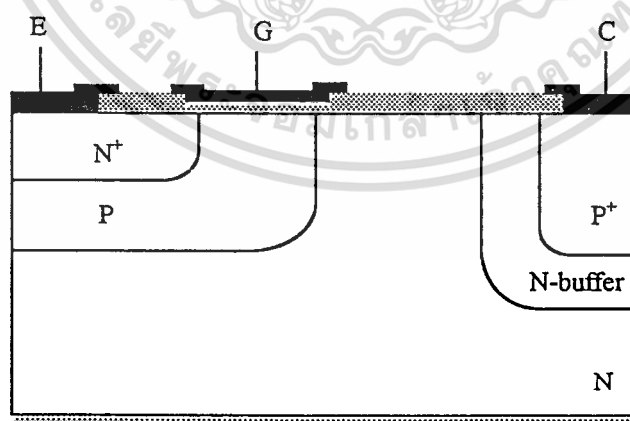


รูปที่ 3.5 IGBT โครงสร้างในแนวระนาบที่ใช้ศึกษาความกว้างของเกตออกไซด์ที่เหมาะสม

3.6 การออกแบบโครงสร้างแบบไม่สมมาตร

สำหรับการออกแบบโครงสร้างแบบไม่สมมาตรเพื่อเพิ่มความสามารถในการปิดกั้นตรงนั้นสามารถทำได้ง่ายเพียงเพิ่มชั้น N-buffer เข้าไปในโครงสร้างเดิมที่เป็นโครงสร้างแบบสมมาตร

โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการสร้าง IGBT โครงสร้างแบบไม่สมมาตรโดยการสร้างชั้น N-buffer ที่มีความหนาแน่นอะตอมสารเจือประมาณ $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ก่อนแล้วจึงสร้างชั้น P⁺-collector โดยที่ความกว้างที่ผิวด้านบนของชั้น N-buffer จะมีขนาดกว้างกว่าชั้น P⁺-collector ช้างละ 10 μm โดยรูปที่ 3.6 แสดงโครงสร้างภาพตัดขวางของอุปกรณ์ IGBT ที่มีโครงสร้างแบบไม่สมมาตร



รูปที่ 3.6 ภาพตัดขวางของ IGBT โครงสร้างแบบไม่สมมาตร

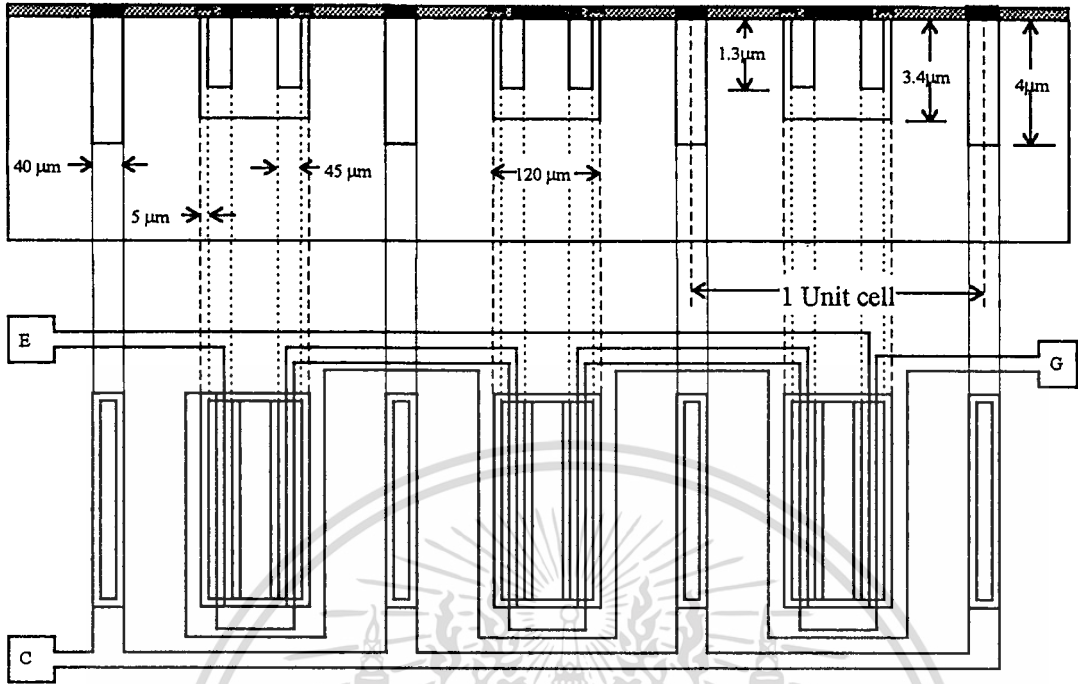
3.7 การออกแบบและสร้างกระจกต้นแบบ

เมื่อทำการศึกษาโครงสร้างและคุณสมบัติของตัวแปรต่างของ IGBT จนละเอียดแล้วจึงทำการออกแบบลวดลายต่างๆลงบนกระดาษกราฟต้นแบบ โดยออกแบบให้มีขนาดใหญ่เป็น 50 เท่าของอุปกรณ์จริง ด้วยการออกแบบลวดลายทุกชั้นลงบนกระดาษกราฟต้นแบบแผ่นเดียวกันเพื่อป้องกันการคลาดเคลื่อน จากนั้นจึงนำไปทาบด้วยแผ่นโปลิเอสเตอร์บนโต๊ะตัดไมโครคัทเตอร์เพื่อตัดเป็นลวดลายแต่ละชั้นตามทีออกแบบไว้ แล้วจึงนำต้นแบบที่ได้ไปถ่ายย่อส่วน 50 เท่าลงบนกระจกต้นแบบ (Photo mask) ขนาด 3" X 3" ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการออกแบบกระจกต้นแบบสำหรับสร้างอุปกรณ์ IGBT โครงสร้างในแนวระนาบไว้ทั้งหมดรวม 8 แผ่น โดยเป็นกระจกต้นแบบพิเศษ 2 แผ่น คือ กระจกต้นแบบที่ใช้สำหรับสร้างชั้น N-buffer และกระจกต้นแบบที่ใช้สำหรับสร้างชั้น P⁺-sinker และเป็นกระจกต้นแบบสำหรับกระบวนการสร้าง IGBT พื้นฐาน 6 แผ่นด้วยกันดังต่อไปนี้

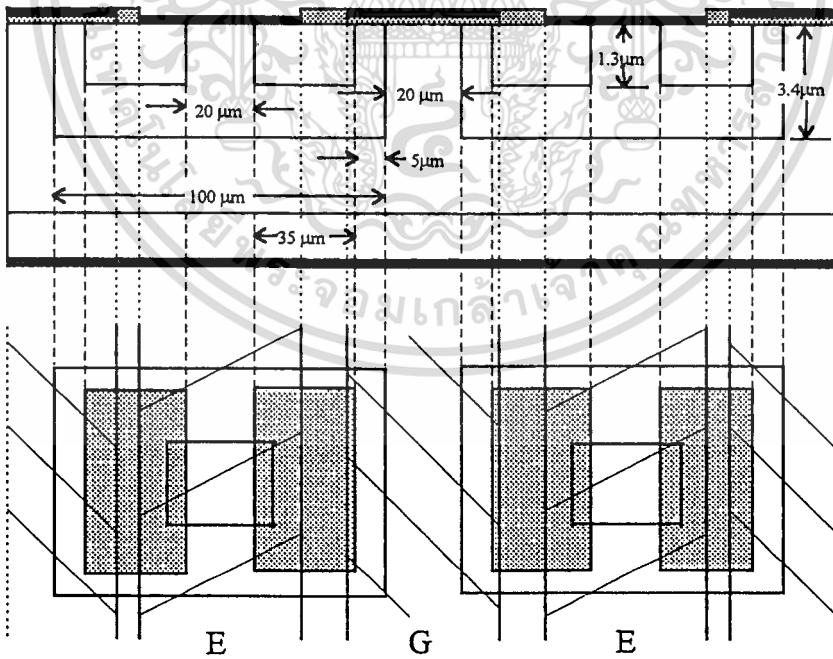
แผ่นที่ 1	เป็น	P ⁺ - collector mask
แผ่นที่ 2	เป็น	P - base mask
แผ่นที่ 3	เป็น	N ⁺ - emitter mask
แผ่นที่ 4	เป็น	Gate oxide mask
แผ่นที่ 5	เป็น	Contact mask
แผ่นที่ 6	เป็น	Metal mask

ในการออกแบบโครงสร้างในแนวตั้ง ได้ทำการออกแบบกระจกต้นแบบสำหรับสร้างอุปกรณ์ IGBT โครงสร้างในแนวตั้งไว้ทั้งหมดรวม 5 แผ่นด้วยกันดังต่อไปนี้

แผ่นที่ 1	เป็น	P - base mask
แผ่นที่ 2	เป็น	N ⁺ - emitter mask
แผ่นที่ 3	เป็น	Gate oxide mask
แผ่นที่ 4	เป็น	Contact mask
แผ่นที่ 5	เป็น	Metal mask

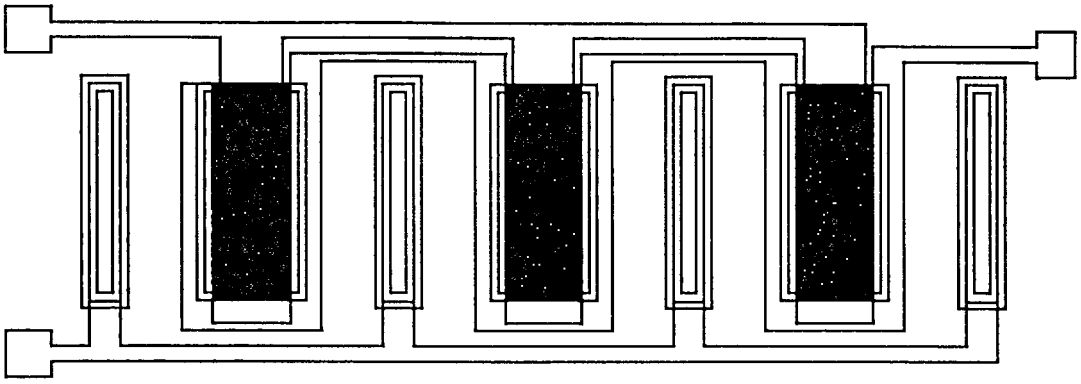


รูปที่ 3.7 ลวดลายทั้งหมดของ IGBT โครงสร้างในแนวระนาบที่ออกแบบบนกระดาษกราฟไข

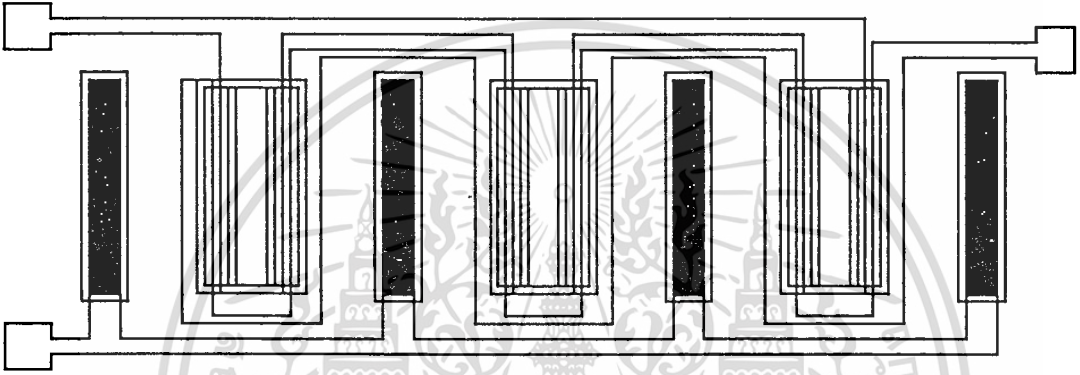


รูปที่ 3.8 ลวดลายด้านบนของ IGBT โครงสร้างในแนวตั้งที่ออกแบบบนกระดาษกราฟไข

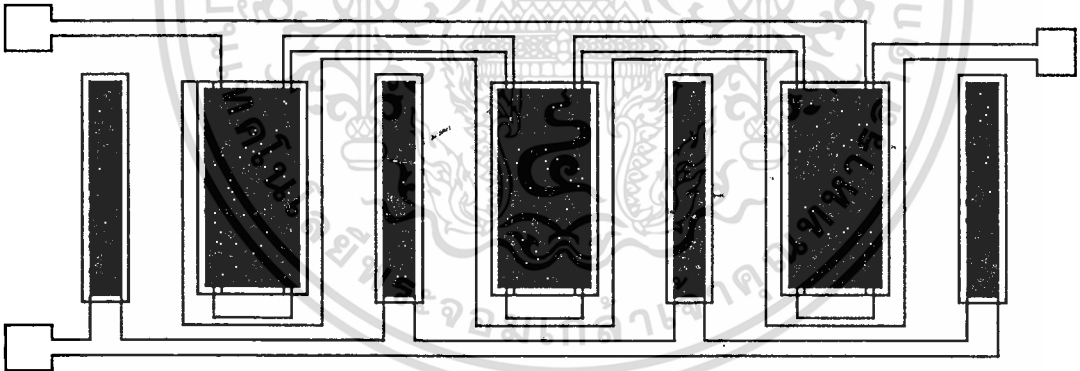
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



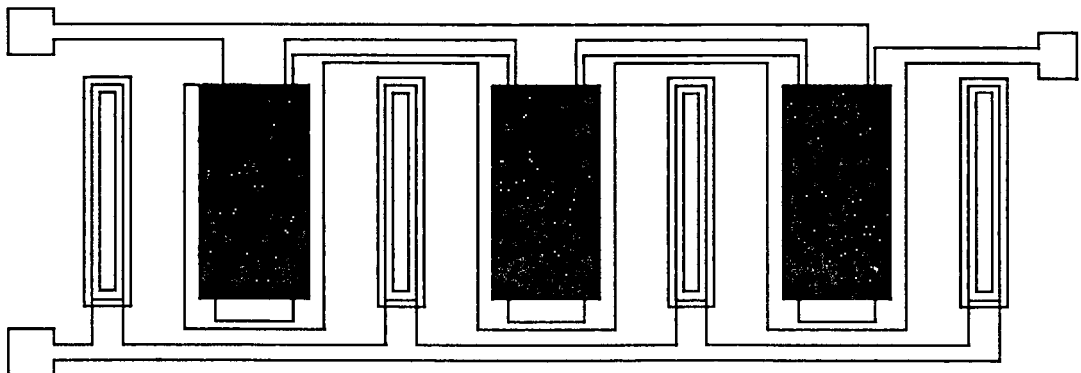
ก.) फिल्मกระจกสำหรับสร้างชั้น N-buffer



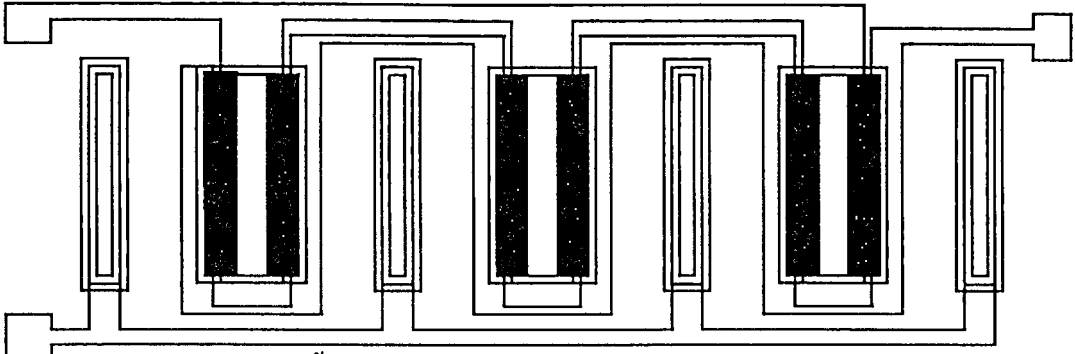
ข.) फिल्मกระจกสำหรับสร้างชั้น P⁺-collector



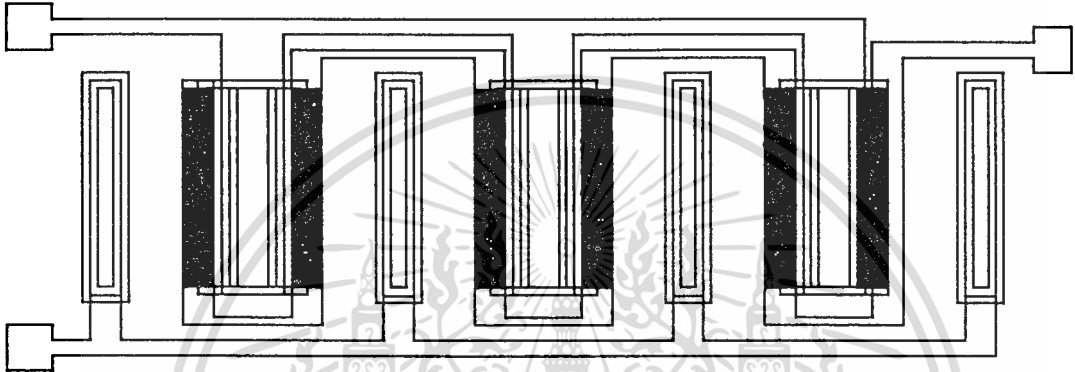
ค.) फिल्मกระจกสำหรับสร้างชั้น P⁺-collector และ P⁺-sinker



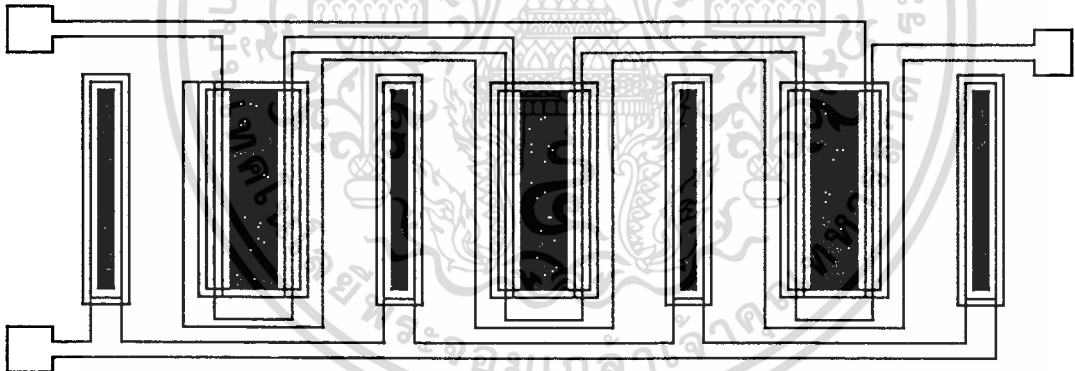
เอง.) फिल्मกระจกสำหรับสร้างชั้น P-base ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



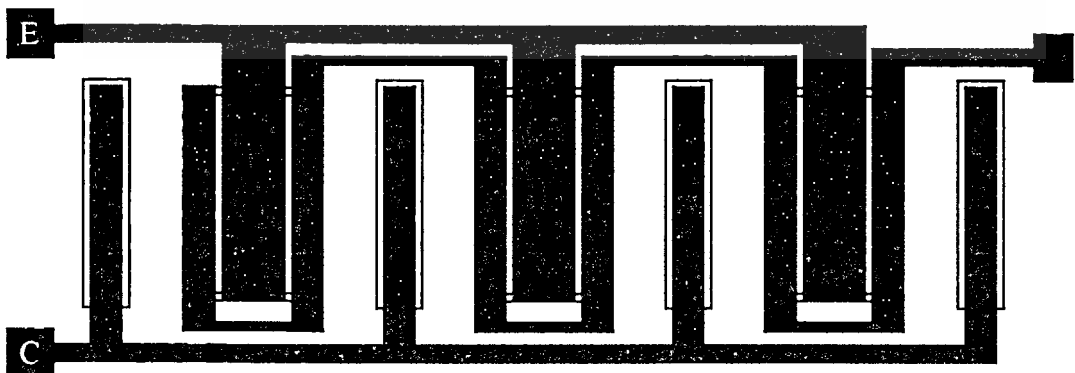
จ.) फिल्मกระจกสำหรับสร้างชั้น N^+ -emitter



ฉ.) फिल्मกระจกสำหรับสร้างเกตออกไซด์

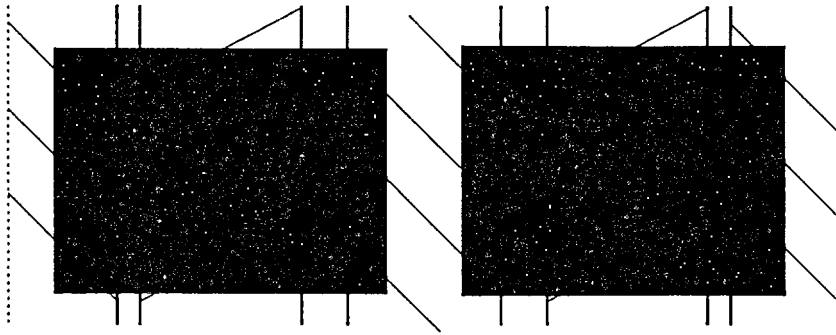


ช.) फिल्मกระจกสำหรับเปิดช่องสัมผัสโลหะ

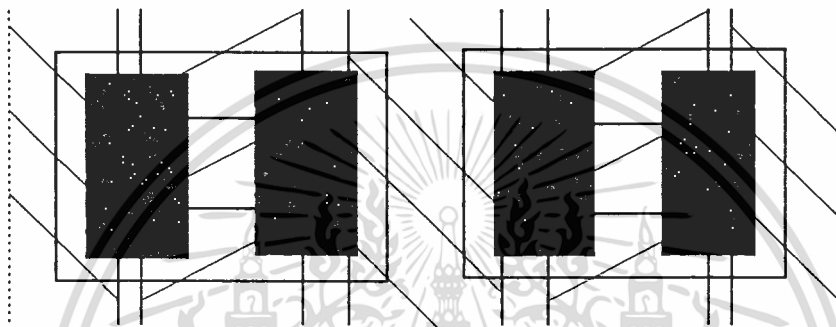


ซ.) फिल्मกระจกสำหรับสร้างขั้วสัมผัสโลหะ

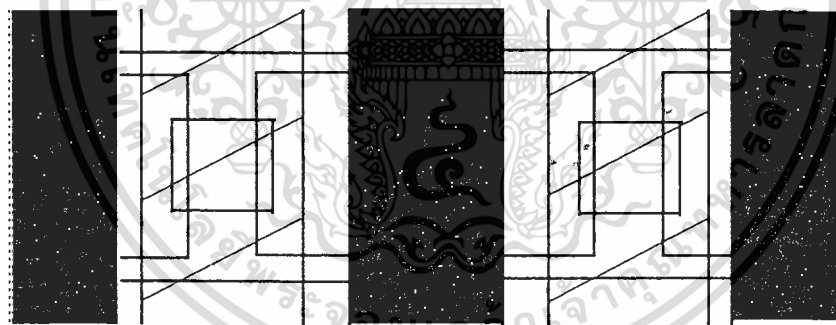
รูปที่ 3.9 फिल्मกระจกที่ออกแบบใช้สำหรับกระบวนการสร้าง IGBT โครงสร้างในแนวระนาบ
 แม้ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



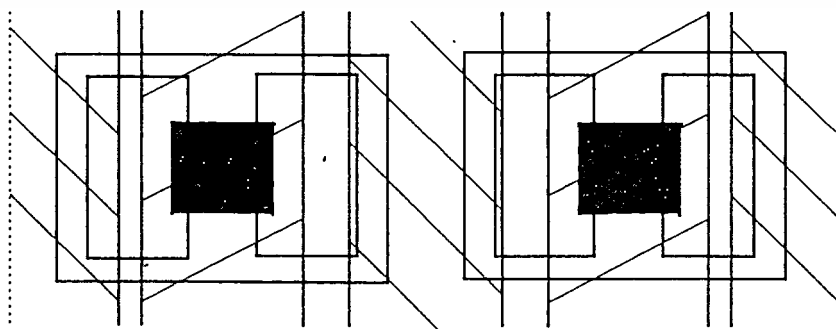
ก.) फिल्मกระจกสำหรับสร้างชั้น P-base



ข.) फिल्मกระจกสำหรับสร้างชั้น N⁺-emitter

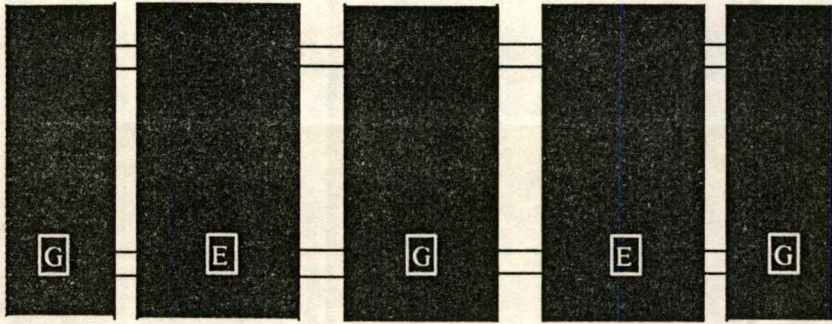


ค.) फिल्मกระจกสำหรับสร้างเกตออกไซด์



ง.) फिल्मกระจกสำหรับเปิดช่องสัมผัสโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



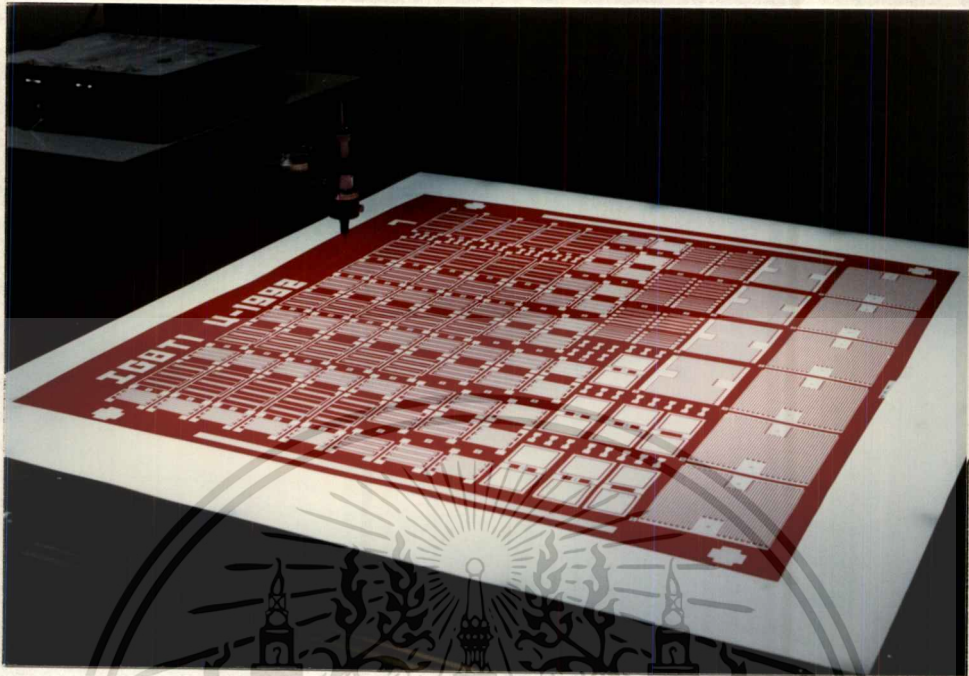
จ.) ฟิล์มกระจกสำหรับสร้างขั้วสัมผัสโลหะ

รูปที่ 3.10 ฟิล์มกระจกที่ออกแบบใช้สำหรับกระบวนการสร้าง IGBT โครงสร้างในแนวดิ่ง

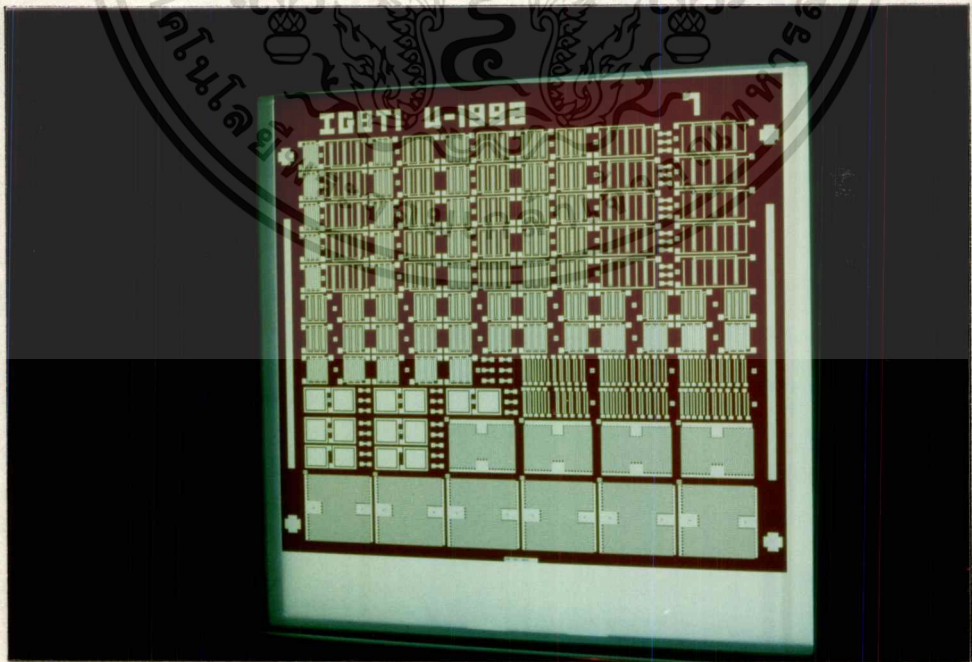


รูปที่ 3.11 การออกแบบลวดลายต้นแบบลงบนกระดาษกราฟไข

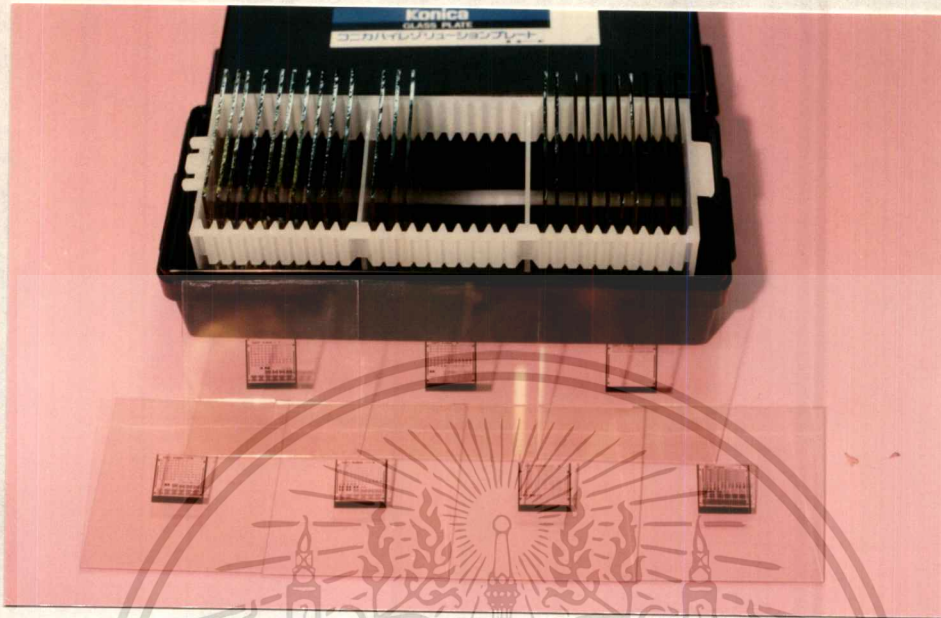
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 การตัดลวดลายต้นแบบบนแผ่นโพลีเอสเตอร์ด้วยเครื่องไมโครคัตเตอร์



รูปที่ 3.13 แผ่นโพลีเอสเตอร์ต้นแบบที่ตัดเสร็จแล้ว ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 กระจกต้นแบบที่พร้อมสำหรับกระบวนการสร้างอุปกรณ์ IGBT

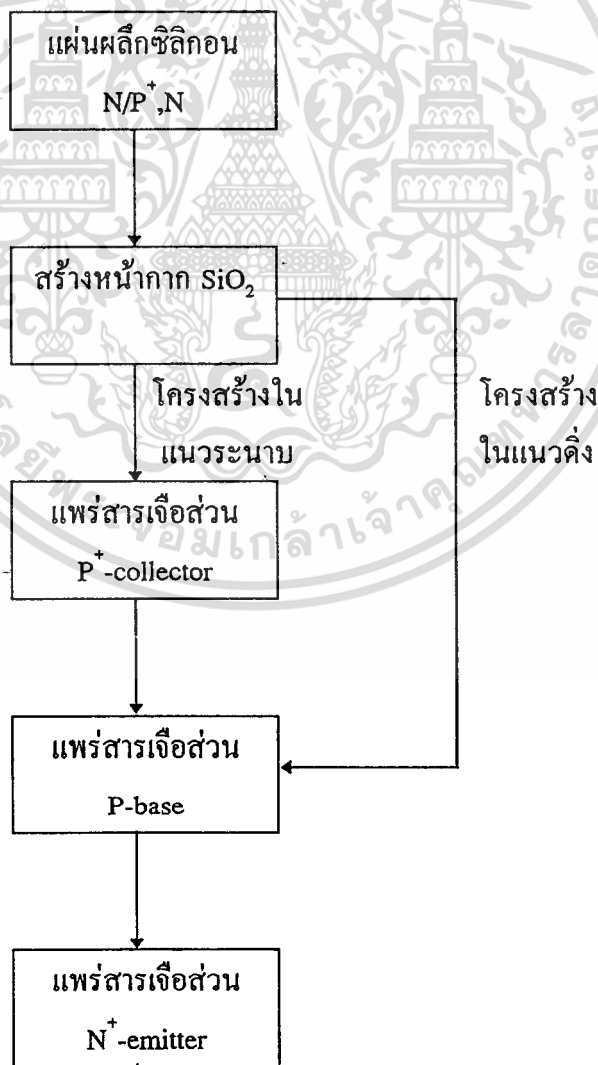
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

กระบวนการสร้างและเก็บประจุ IGBT

จากการศึกษาถึงทฤษฎีและหลักการทํางานตลอดจนทํากรอบแบบอุปกรณ์ IGBT เป็นที่เรียบร้อยแล้วดังที่ได้กล่าวในบทที่ผ่านมาจนได้เป็นกระจกต้นแบบหรือที่เรียกกันว่าโฟโต้มาร์คเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปที่เราจะกล่าวถึงในบทนี้ก็คือกระบวนการสร้างอุปกรณ์ IGBT ลงบนแผ่นผลึกซิลิกอนโดยใช้เทคโนโลยีการแพร่สารเจือโดยใช้ความร้อนไปจนถึงวิธีการเก็บประจุอุปกรณ์ IGBT ลงบนตัวถังเพื่อใช้ในการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่อไป

ในส่วนของกระบวนการสร้าง IGBT ในบทนี้เป็นกระบวนการที่ได้ปรับปรุงมาจากกระบวนการสร้างมาตรฐานสำหรับสร้างมอสเฟตกำลังแบบเดิมอส [10] เฉพาะในห้องปฏิบัติการสารกึ่งตัวนำของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งขั้นตอนต่างๆทั้งหมดแสดงได้ดังรูปที่ 4.1





รูปที่ 4.1 กระบวนการสร้างทั้งหมดของอุปกรณ์ IGBT

4.1 กระบวนการสร้างสารกึ่งตัวนำในแนวระนาบ (Planar process)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

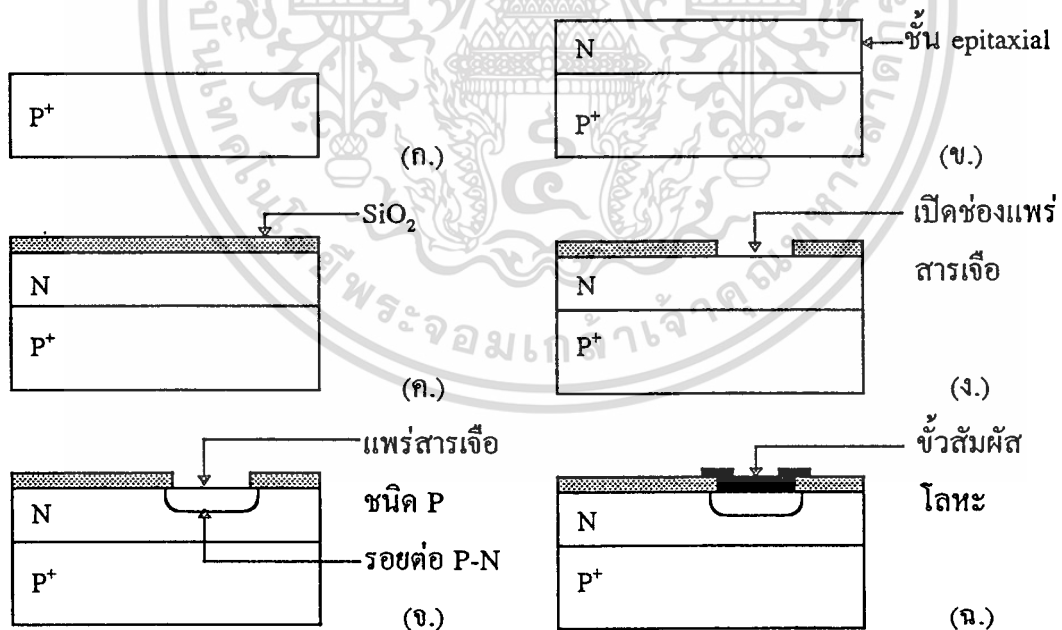
4.1 กระบวนการสร้างสารกึ่งตัวนำในแนวระนาบ (Planar process)

กระบวนการสร้างสารกึ่งตัวนำในแนวระนาบเป็นกระบวนการสร้างสารกึ่งตัวนำวิธีหนึ่งซึ่งนิยมกันมากเนื่องจากมีข้อได้เปรียบที่ดีกว่าวิธีการสร้างแบบเก่าอย่างเช่น วิธีอัลลอยด์ และยังเหมาะสำหรับงานสร้างวงจรรวมอีกด้วย โดยสามารถที่จะจำแนกข้อได้เปรียบของการสร้างโดยวิธีการสร้างในแนวระนาบได้ 2 ประการใหญ่ๆคือ

1. รอยต่อของสารกึ่งตัวนำจะถูกคลุมด้วยชั้นของซิลิกอนไดออกไซด์ ซึ่งจะป้องกันไม่ให้เกิดการทำให้ปฏิกิริยาโดยตรงกับอากาศหรือสิ่งเจือปนอื่นๆที่ไม่ต้องการ ทำให้เกิดกระแสรั่วไหลที่ต่ำมาก ดังนั้นอุปกรณ์จึงมีความแน่นอนสูง

2. การออกแบบต้นแบบและเทคนิคการกัดซึ่งใช้กำหนดขนาดของโครงสร้างทำให้สามารถลดขนาดของอุปกรณ์ให้เล็กลงได้ และสะดวกในการสร้างที่จำนวนมากๆพร้อมกันบนแผ่นผลึกซิลิกอนแผ่นเดียว

กระบวนการสร้างในแนวระนาบจะประกอบด้วยกระบวนการสร้างพื้นฐาน 6 ขั้นตอนด้วยกันคือการปลูกผลึก, อีพิทาซี (epitaxy), ออกซิเดชัน (oxidation), โฟโตลิโทกราฟี (photolithography), การแพร่สารเจือ (diffusion) และการสร้างลวดลายโลหะ (metallization) ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งจะเป็นการแสดงให้เห็นถึงภาพตัดขวางของขั้นตอนการสร้างพื้นฐานในแนวระนาบบนแผ่นผลึกซิลิกอน



รูปที่ 4.2 ขั้นตอนพื้นฐานของกระบวนการสร้างในแนวระนาบ

- ก.) ผลึกซิลิกอนชนิด P⁺ ข.) อีพิทาซี ค.) ออกซิเดชัน ง.) โฟโตลิโทกราฟี
จ.) การแพร่สารเจือ ฉ.) การสร้างลวดลายโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

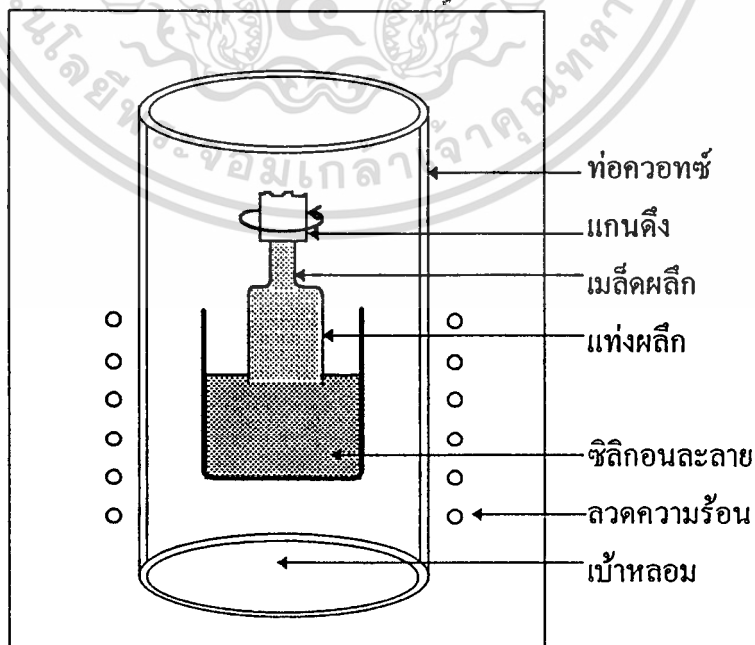
โดยที่กระบวนการดังกล่าวที่กล่าวถึงในข้างต้นทั้ง 5 ขั้นตอนสามารถที่จะอธิบายแยกในแต่ละขั้นตอนได้ดังต่อไปนี้

4.1.1 การปลูกผลึกซิลิกอน [5]

วิธีการปลูกผลึกซิลิกอนรูปเดี่ยวซิลิกอนซึ่งในปัจจุบันนิยมใช้กันอยู่ 2 วิธีคือวิธีของโซคราลสกี (Czochralski : CZ) และวิธีโฟลตโซน (Float Zone : FZ)

4.1.1.1 วิธีโซคราลสกี

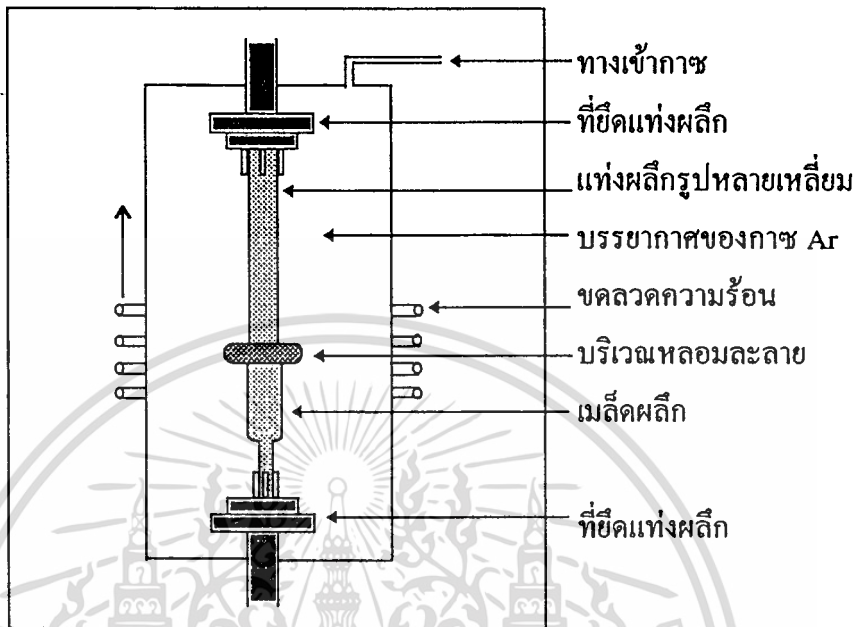
ทำโดยการนำผลึกหลายรูปของซิลิกอนไปหลอมละลายในเบ้าหลอมควอทซ์ (SiO_2) ที่อุณหภูมิ 1416°C ในบรรยากาศของอาร์กอน โดยจะถูกหมุนอยู่ตลอดเวลาเพื่อให้ทุกส่วนได้รับความร้อนอย่างสม่ำเสมอ เมื่ออุณหภูมิของซิลิกอนคงที่และสม่ำเสมอ จึงใช้แกนที่มีเมล็ดผลึกชั้นเล็กๆติดอยู่ที่ปลาย และทำการดึงผลึกขึ้นมาดังแสดงในรูปที่ 4.3 โดยใช้แกนลงไปสัมผัสกับผิวของซิลิกอนที่หลอมละลายอยู่อย่างช้าๆ เม็ดผลึกที่ติดอยู่ที่ปลายจะหลอมละลายเป็นเนื้อเดียวกับซิลิกอนในเบ้าหลอมและแกนจะถูกดึงขึ้นอย่างช้าๆทำให้ซิลิกอนที่ละลายอยู่ในเบ้าหลอมติดเม็ดผลึกขึ้นมาและเย็นตัวลงมีลักษณะเหมือนกับเม็ดผลึกที่นำมาใช้หล่อ โดยสามารถควบคุมขนาดของเม็ดผลึกและแท่งผลึกได้จากการควบคุมอุณหภูมิของเบ้าหลอมและอัตราการหมุนของเบ้าหลอม นอกจากนี้ยังสามารถเติมอะตอมสารเจือชนิดต่างๆได้โดยการละลายสารเจือลงในเบ้าหลอม ทำให้ได้แท่งผลึกสารกึ่งตัวนำชนิดที่ต้องการ



รูปที่ 4.3 การปลูกผลึกแบบโซคราลสกีงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1.2 วิธีโฟลทโซน

สำหรับวิธีโฟลทโซน เป็นการปลูกผลึกรูปเดี่ยวที่เริ่มจากการนำแท่งหลายรูปมาวางในแนวตั้งภายในอุปกรณ์ที่ใช้สร้างดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 การปลูกผลึกแบบโฟลทโซน

ปลายด้านหนึ่งของแท่งซิลิกอนจะสัมผัสกับเมล็ดผลึกรูปเดี่ยว จากนั้นทำให้แท่งซิลิกอนร้อนเฉพาะในบริเวณแคบๆ โดยใช้ขดลวดเหนี่ยวนำความร้อนสูงภายในบรรยากาศของก๊าซเฉื่อย ดังนั้นบริเวณแคบๆของแท่งซิลิกอนซึ่งเริ่มจากบริเวณที่สัมผัสกับเมล็ดผลึกจะหลอมละลาย จากนั้นโดยการเปลี่ยนตำแหน่งของขดลวดเหนี่ยวนำอย่างช้าๆ จะทำให้บริเวณหลอมละลายของแท่งซิลิกอนเปลี่ยนแปลงไปตลอดทั้งความยาวของแท่งผลึกอย่างช้าๆ ส่วนที่ละลายนี้เมื่อเย็นตัวลงเป็นของแข็งก็จะมีสภาพเป็นผลึกรูปเดี่ยวเช่นเดียวกับเมล็ดผลึกที่ใช้ล่อ สำหรับการเติมอะตอมสารเจือจะต้องเติมลงในแท่งผลึกรูปหลายเหลี่ยมก่อนที่จะนำมาปลูกโดยวิธีโฟลทโซน

จากที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.1.1.1 และ 4.1.1.2 ทำให้ได้แท่งผลึกซิลิกอนรูปเดี่ยวที่พร้อมจะนำไปตัดเป็นแผ่นบางๆหรือเรียกว่า แผ่นผลึก (Crystal wafer) เพื่อนำไปสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำต่างๆต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ก.)

4.1.2 กระบวนการอพิทาซี [5]

ขบวนการอพิทาซี เป็นขบวนการสร้างผลึกรูปเดี่ยวขึ้นบนฐานรองโดยที่โครงสร้างของผลึกที่เกิดขึ้นใหม่กับผลึกฐานรองจะต่อเนื่องกันอย่างสมบูรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ข.) การสร้างเอ็กสตรินเจอร์สำหรับผลิตสารกึ่งตัวนำที่หนึ่งหรือการนำเอาแผ่นผลึกซิลิกอนมาขึ้นรูปเป็นวงรีโดยการทำให้ร้อนในเตาที่อุณหภูมิสูงๆ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชั้นอิพิทาคีนี้ในอุปกรณ์กำลังก็เพื่อให้ได้แรงดันพังทลายมีค่าสูง ในขณะที่ส่วนฐานรองเป็นแผ่นผลึกซิลิกอนที่มีความหนาแน่นอะตอมสูงเพื่อให้มีความต้านทานต่ำ โดยอาจจะเป็นชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดของชั้นอิพิทาคีที่สร้างขึ้นก็ได้

โดยทั่วไปการสร้างชั้นอิพิทาคีซิลิกอน อาจสร้างขึ้นได้โดยวิธี vacuum deposition อย่างเช่นการ sputtering หรือ เทคนิค evaporator แต่อย่างไรก็ตามวิธีการสร้างดังกล่าวไม่เป็นนิยมทั้งนี้เนื่องจาก อัตราการเกิดชั้นอิพิทาคีต่ำ และคุณภาพของชั้นผลึกที่ได้ไม่ดีพอ ดังนั้นในงานทางอุตสาหกรรมหรืองานที่ต้องการคุณภาพสูงจะสร้างชั้นอิพิทาคีโดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่า Vapor phase Epitaxy (VPE)หรือChemical Vapor Deposition (CVD) ซึ่งจะทำได้ชั้นอิพิทาคีที่มีคุณภาพดีและมีรอยสัมผัสกับแผ่นผลึกฐานรองอย่างต่อเนื่องสมบูรณ์ โดยปกติทั่วไปแล้วชั้นอิพิทาคีที่ใช้จะมีความหนาอยู่ในช่วง 1-20 μm ขึ้นอยู่กับประเภทของงานที่ต้องการใช้

อย่างไรก็ตามทั้งในหัวข้อที่ 4.1.1 และ 4.1.2 เราไม่สามารถทำได้ในห้องปฏิบัติการของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ แต่เพื่อต้องการให้อุปกรณ์ที่สร้างมีประสิทธิภาพสูงจึงจำเป็นต้องสั่งแผ่นผลึกซิลิกอนที่สร้างชั้นอิพิทาคีแล้วมาใช้ในงานสร้างอุปกรณ์ IGBT ที่มีโครงสร้างในแนวดิ่ง

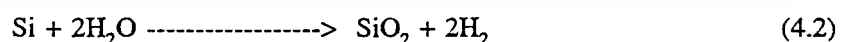
4.1.3 กระบวนการออกซิเดชัน

ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นสารที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนลักษณะโปร่งใสใช้เป็นสารเคลือบผิวหน้าของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำได้เป็นอย่างดีดังแสดงในรูปที่ 4.2 ค.) ชั้นของซิลิกอนไดออกไซด์สามารถสร้างได้โดยกระบวนการออกซิเดชัน โดยทิ้งให้แผ่นผลึกซิลิกอนทำปฏิกิริยากับออกซิเจนแห้งหรือไอน้ำในอุณหภูมิ 1000-1200 $^{\circ}\text{C}$ โดยมีปฏิกิริยาเคมีของการเกิดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ ดังสมการต่อไปนี้

1. กระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง (Dry Oxidation)



2. กระบวนการออกซิเดชันแบบชื้น (Wet Oxidation)



สำหรับหน้าที่สำคัญของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ในกระบวนการสร้างอุปกรณ์ ประการแรกคือ ใช้เป็นส่วนปกคลุมผิวของซิลิกอนและป้องกันสิ่งเจือปนจากภายนอกที่ไม่ต้องการไม่ให้ทำปฏิกิริยากับผิวของซิลิกอน (passivation layer) ประการที่สองก็คือ เป็นหน้ากักป้องกันการแพร่สารเจือเข้าไปในส่วนที่ไม่ต้องการ ประการที่สามใช้เป็นส่วนเกทหรือที่เรียกว่าเกทออกไซด์ ซึ่งเป็นส่วนที่มีความสำคัญอย่างมากในอุปกรณ์ประเภทมอสเฟต เนื่องจากจะเป็นส่วนที่เหนี่ยวนำให้เกิดช่องทางเดินกระแส ประการสุดท้ายใช้เป็นฉนวนบนผิวซิลิกอน เพื่อป้องกันการลัดวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่เชิงพาณิชย์บนต้นฉบับการคำนวณ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของลวดลายอะลูมิเนียมกับผิวซิลิกอนในส่วนอื่นๆ และจากวัตถุประสงค์ในการใช้งานชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ที่กล่าวมา ทำให้ต้องการที่จะใช้ซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีความหนาที่แตกต่างกัน เช่น ซิลิกอนไดออกไซด์ในส่วนของเกตออกไซด์จะใช้ความหนาประมาณ 1000 \AA และต้องเป็นออกไซด์ที่มีคุณภาพดีจึงจำเป็นที่จะต้องใช้กระบวนการสร้างซิลิกอนไดออกไซด์แบบแห้ง ส่วนซิลิกอนไดออกไซด์ในส่วนที่จะใช้เป็นหน้ากปกป้องกันการแพร่อะตอมสารเจือ จำเป็นที่จะต้องมีความหนาประมาณ $4000-5000 \text{ \AA}$ ขึ้นไป ซึ่งความหนาขนาดนี้การสร้างโดยใช้วิธีการสร้างซิลิกอนไดออกไซด์แบบแห้งอย่างเดียวจะทำให้ต้องใช้เวลานานและสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายมาก ดังนั้นในกรณีของออกไซด์ที่ใช้เป็นหน้ากจะทำกรสร้างโดยใช้วิธีการสร้างแบบแห้งสลับกับแบบชื้นและแบบแห้งทับอีกครั้ง ทั้งนี้เนื่องจากการสร้างซิลิกอนไดออกไซด์แบบชื้นสามารถสร้างความหนาได้เร็ว แต่มีคุณภาพต่ำหรือมีรูพรุนมาก จึงจำเป็นจะต้องใช้สลับกับการสร้างแบบแห้ง

4.1.4 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี (Photolithography)

กระบวนการโฟโตลิโทกราฟีเป็นขบวนการที่ใช้สำหรับการถ่ายภาพแบบจากกระจกต้นแบบลงบนผิวของแผ่นผลึกโดยการใช้ลำแสง เพื่อเปิดช่องซิลิกอนไดออกไซด์สำหรับการแพร่อะตอมสารเจือในขอบเขตที่กำหนดจากกระจกต้นแบบ ดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ง.) โดยที่ความสามารถในการเปิดช่องซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีขนาดเล็กมากและความถูกต้องแม่นยำจะขึ้นอยู่กับ การปรับตำแหน่ง (alignment) และความคมชัดของกระจกต้นแบบ ซึ่งขั้นตอนต่างๆของกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี แสดงดังลำดับขั้นตอนในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการแพร่สารเจือเป็นการเติมและควบคุมปริมาณของอะตอมสารเจือให้เข้าไปในผลึกสารกึ่งตัวนำในบริเวณที่ต้องการทำให้เกิดรอยต่อพี-เอ็น โดยที่แหล่งจ่ายอะตอมสารเจือสามารถแบ่งได้ตามประเภทของอะตอมสารเจือ 2 ประเภท คือ แหล่งจ่ายอะตอมสารเจือชนิด เอ็น เช่น พลวง, สารหนู, ฟอสฟอรัส และแหล่งจ่ายอะตอมสารเจือชนิด พี เช่น โบรอน โดยในแต่ละประเภทก็จะสามารถแบ่งได้ตามสถานะของแหล่งจ่ายสารเจือ 3 ประเภท คือ 1) แหล่งจ่ายอะตอมสารเจือชนิดของแข็งอย่างเช่น Sb_2O_3 , As_2O_3 และ SiP_2O_7 เป็นต้น 2.) แหล่งจ่ายอะตอมสารเจือชนิดของเหลวอย่างเช่น $POCl_3$ หรือ BBr_3 เป็นต้น 3.) แหล่งจ่ายอะตอมสารเจือชนิดกาซอย่างเช่น AsH_3 , PH_3 และ B_2H_2 เป็นต้น สำหรับในห้องปฏิบัติการสารกึ่งตัวนำของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ สจล. เลือกที่จะใช้แหล่งจ่ายอะตอมสารเจือชนิดเอ็นเป็น SiP_2O_7 และแหล่งจ่ายอะตอมสารเจือชนิดพี เป็น BN ซึ่งทั้งสองชนิดมีสถานะเป็นของแข็ง ทั้งนี้เนื่องจากแหล่งจ่ายอะตอมสารเจือชนิดของแข็ง ทำให้เกิดมลภาวะที่เป็นพิษเนื่องจากกาซพิษที่แพร่ออกมาจากปฏิกิริยาน้อยที่สุด และยังคงคงอยู่ในการใช้งาน

สำหรับขั้นตอนในการปฏิบัติของกระบวนการแพร่สารเจือสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ขั้นตอนคือ

1. การ Predeposition เป็นการแพร่ชั้นต้นเพื่อกำหนดและควบคุมปริมาณของสารเจือที่เข้าไปในแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำ
2. การ Drive-in เป็นการควบคุมความลึกของรอยต่อและกำหนดการกระจายของสารเจือที่เข้าไปในแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำ

4.1.6 กระบวนการสร้างลวดลายโลหะ

กระบวนการสร้างลวดลายโลหะเป็นการนำโลหะมาเคลือบที่ผิวบนแผ่นผลึกเพื่อทำหน้าที่เป็นรอยสัมผัสโอห์มมิกหรือเป็นแกนความนำต่อเชื่อมภายในระหว่างสิ่งประดิษฐ์ต่างๆ ในวงจรรวมหรือเป็นขั้วสำหรับต่อกับอุปกรณ์ภายนอก โดยบริเวณที่ต้องการสร้างรอยสัมผัสจะต้องถูกเปิดช่องซิลิกอนไดออกไซด์ก่อนที่จะทำการเคลือบโลหะ โดยลักษณะของโลหะที่เคลือบจะมีลักษณะเป็นฟิล์มบาง (Thin-Film) โดยมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้คือ

1. ทำให้เกิดรอยสัมผัสกับซิลิกอนที่มีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าต่ำ
2. โลหะที่ใช้ต้องมีความนำไฟฟ้าสูง
3. ทำให้ติดแน่นกับผิวของซิลิกอนไดออกไซด์หรือสารไดอิเล็กทริกอื่นๆ ได้ดี
4. สามารถต่อเข้ากับสายลวดความนำภายนอกได้ดี

สำหรับกระบวนการสร้างลวดลายโลหะที่ทำการสร้างที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ สจล. จะเลือกใช้โลหะอลูมิเนียม (Al) โดยใช้เครื่องเคลือบโลหะในสุญญากาศ ทำการเคลือบโลหะลงบนผิวของแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำความหนาประมาณ 1 ไมครอนแล้วจึงนำไปถ่ายฟิล์มโดยขบวนการโฟ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โด้ลิโทกราฟฟีและกัดเป็นลวดลายตามที่ออกแบบไว้ จากนั้นจึงนำไปผ่านขบวนการซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 500°C ประมาณ 15 นาที เพื่อให้รอยสัมผัสระหว่างอลูมิเนียมกับซิลิกอนเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิก

4.2 กระบวนการเก็บบรรจุสารกึ่งตัวนำ

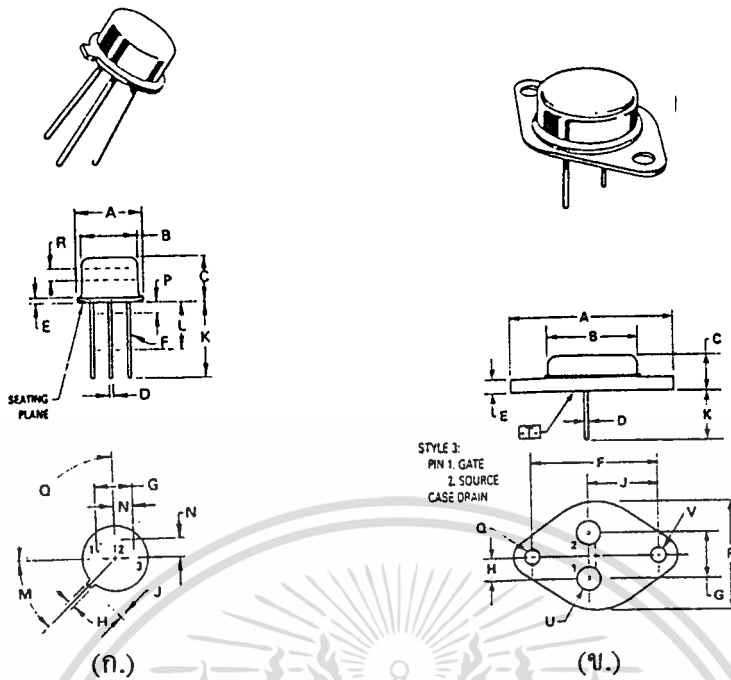
กระบวนการเก็บบรรจุสารกึ่งตัวนำเป็นการนำอุปกรณ์ที่สร้างเสร็จและผ่านการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าครั้งแรกและตัดแยกชิปแล้วมาติดลงบนตัวถังแล้วทำการต่อสายจากขั้วสัมผัสโลหะในอุปกรณ์ไปยังขาของตัวถัง จากนั้นทำการปิดผนึกฝาและทำการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าครั้งสุดท้ายเพื่อความมั่นใจว่าอุปกรณ์ที่สร้างนั้นสามารถนำไปใช้งานได้ตามคุณสมบัติที่กำหนดไว้ โดยขั้นตอนดังที่กล่าวมานั้นสามารถแยกอธิบายโดยสังเขปได้ดังนี้

4.2.1 การตัดแยกชิป

เป็นการตัดแบ่งแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำออกเป็นชิ้นย่อยๆแต่ละตัวเพื่อให้สามารถติดตั้งบนตัวถังได้และยังเป็นการเลือกเฉพาะอุปกรณ์ที่ใช้งานได้มาใช้งาน สำหรับการตัดแยกชิปที่ใช้ในห้องปฏิบัติการสารกึ่งตัวนำของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์จะทำการตัดโดยใช้ใบมีดหัวเพชรที่กดบนแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำแล้วหักตามรอยตัดจากนั้นจึงนำเฉพาะชิปที่ใช้งานได้ไปติดตั้งลงบนตัวถังต่อไป

4.2.2 การติดชิปลงตัวถัง

ตัวถังที่ใช้ในห้องปฏิบัติการสารกึ่งตัวนำ ของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์มีอยู่สองชนิดด้วยกัน คือ ตัวถังแบบ TO-3 และ TO-5 ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ดังนั้นการติดชิปลงบนตัวถังจึงทำได้สองวิธีด้วยกัน วิธีแรกก็คือการใช้ความร้อนหลอมผิวของตัวถังให้ติดกับอุปกรณ์ วิธีการนี้จำเป็นที่จะต้องใช้ตัวถังที่มีโลหะหลอมง่ายและนำไฟฟ้าได้ดีเคลื่อนที่อย่างเช่น ตัวถัง TO-5 ซึ่งมีทองคำเคลือบอยู่ซึ่งทองคำจะหลอมที่อุณหภูมิประมาณ 500°C ส่วนวิธีที่สองก็คือการใช้กาวเงิน (Silver paste) เป็นตัวเชื่อมระหว่างอุปกรณ์กับฐานของตัวถัง โดยลักษณะของกาวเงินนี้ต้องมีลักษณะเป็นตัวนำที่ดี ตัวถังที่ใช้จะเป็นตัวถัง TO-3 ซึ่งเป็นโลหะแข็ง หลังจากติดกาวเงินแล้วต้องนำไปอบที่อุณหภูมิประมาณ 100°C ประมาณ 1 ชั่วโมง เพื่อให้กาวเงินที่ติดแห้งตัวสนิทและมีคุณสมบัติเป็นตัวนำที่ดี



รูปที่ 4.6 ตัวถังโลหะที่ใช้เก็บบรรจุสารกึ่งตัวนำ

(ก.) ตัวถังแบบ TO-5 (ข.) ตัวถังแบบ TO-3

4.2.3 การต่อสาย

เป็นการเชื่อมลวดโลหะที่มีสภาพความนำสูงอย่างเช่น อลูมิเนียมหรือทองคำระหว่างชั้นสัมผัสโลหะของอุปกรณ์กับขาของตัวถัง ซึ่งทำได้โดยการใช้เครื่องเชื่อมลวดอลูมิเนียมแบบหัวสั้น ความถี่สูง โดยทั่วไปตัวถังโลหะแบบ TO-5 จะใช้ลวดที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 25 ไมครอน ส่วนตัวถังโลหะแบบ TO-3 จะใช้ลวดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 125 ไมครอน

4.2.4 การฉนวนไฟฟ้า

การฉนวนไฟฟ้าโลหะเข้ากับตัวถังเป็นการป้องกันความเสียหายที่อาจจะเกิดกับชิพเนื่องจากสิ่งสกปรก สารเคมีภายนอกและการกระทบกับลวดโลหะที่เชื่อมระหว่างชิพกับตัวถังนอกจากนั้นยังเป็นแผ่นช่วยระบายความร้อนที่เกิดกับอุปกรณ์ได้อีกด้วย

4.2.5 การตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าครั้งสุดท้าย

เป็นการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ก่อนที่จะนำไปใช้งานจริง ซึ่งคุณสมบัติที่ต้องพิจารณาก็คือ การวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน การวัดค่าความจุไฟฟ้าของรอยต่อและเกตออกไซด์หรือการวัดการตอบสนองความถี่เป็นต้น เพื่อให้เกิดแน่นอนอนถูกต้องของอุปกรณ์

4.3 กระบวนการสร้างมาตรฐานและกระบวนการเก็บบรรจุ IGBT

ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 กระบวนการสร้างมาตรฐานและกระบวนการเก็บบรรจุ IGBT

4.3.1 กระบวนการสร้างมาตรฐานของ IGBT

กระบวนการสร้าง IGBT ซึ่งสร้างขึ้น ณ ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ สจล. เป็นขบวนการสร้างโดยอาศัยเทคโนโลยีการแพร่สารเจือโดยใช้ความร้อน โดยมีขั้นตอนต่างๆดังแสดงในตารางที่ 4.1 และแสดงผังรูปภาพตัดขวางในรูปที่ 4.7 ทั้งนี้กระบวนการดังกล่าวถือเป็นกระบวนการสร้างมาตรฐาน IGBT ของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์

ตารางที่ 4.1 กระบวนการสร้าง IGBT บนแผ่นผลึกฐานรองชนิดซิลิกอน

กระบวนการ	ขั้นตอน	เงื่อนไข	หมายเหตุ
แผ่นผลึกซิลิกอนเริ่มต้น	-	-	โครงสร้างแนวระนาบ : Si แบบระนาบเชิงเดี่ยว ระนาบ (100) , $\rho = 8-12 \Omega\text{-cm}$ โครงสร้างแนวตั้ง Si แบบอพิทาซี ระนาบ(100) ,หนา 30 μm $\rho = 40-50 \Omega\text{-cm}$
ทำความสะอาดผิวแผ่นผลึกเริ่มต้น	กำจัดโลหะหนัก กำจัดไขมัน	กรดไนตริก ไตรโคลโร เอทิลีน	-
สร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ครั้งแรก	ออกซิเดชันแบบแห้งและชื้น	1100 °C แห้ง 2 ชม. ชื้น 1 ชม. แห้ง 1 ชม.	SiO ₂ หนาประมาณ 5000 Å ⁰
โฟโวลติโกราฟีส่วน P ⁺ -collector	ทำฟิล์ม เปิดช่อง SiO ₂	way coat สารละลาย บัฟเฟอร์	กระจกดินแบบแผ่นที่ 1 อัตราการกัด 1000 Å ⁰ /นาที เฉพาะโครงสร้างแนวระนาบ
แพร่สารเจือส่วน P ⁺ -collector	predeposition	BN,970 °C , 1 ชม. , N ₂	Na ประมาณ 4.53 X 10 ¹⁷ cm ⁻³ เฉพาะโครงสร้างแนวระนาบ
	Drive-in และสร้าง SiO ₂	1100 °C แห้ง 1.5 ชม. ชื้น 1.5 ชม. แห้ง 1 ชม.	X _{jp} ประมาณ 4 μm SiO ₂ ที่สร้างใหม่ประมาณ 4000 Å ⁰

โฟโวลติโกราฟี ส่วน P-base	ทำฟิล์ม กัด SiO ₂	way coat สารละลาย บัฟเฟอร์	กระจกตันแบบแผ่นที่ 2
แพร่สารเจือส่วน P-base	predeposition	BN, 970 °C 30 นาที, N ₂	N _A ประมาณ 1.65 X 10 ¹⁷ cm ⁻³
	Drive-in และ สร้าง SiO ₂	O ₂ , 1100 °C , 14 ชม.	X _{jp} ประมาณ 3.4 μm SiO ₂ ใหม่ประมาณ 4000 Å ⁰
โฟโวลติโกราฟี ส่วน N ⁺ -emitter	ทำฟิล์ม กัด SiO ₂	way coat สารละลาย บัฟเฟอร์	กระจกตันแบบแผ่นที่ 3
แพร่สารเจือส่วน N ⁺ -emitter	predeposition	SiP ₂ O ₇ , 1050 °C, 15 นาที, N ₂	N _D ประมาณ 2.57 X 10 ¹⁸ cm ⁻³
	Drive-in และ สร้าง SiO ₂	1000 °C, 10 นาที, O ₂	X _{jn} ประมาณ 1.3 μm SiO ₂ ใหม่ ประมาณ 700 Å ⁰
โฟโวลติโกราฟี ส่วนเกตออกไซด์	ทำฟิล์ม กัด SiO ₂	way coat สารละลาย บัฟเฟอร์	กระจกตันแบบแผ่นที่ 4
สร้างเกตออกไซด์	ออกซิเดชันแบบ แห้ง	1100 °C, 30 นาที, O ₂	SiO ₂ = 1000 Å ⁰
โฟโวลติโกราฟี ส่วนขั้วสัมผัส	ทำฟิล์ม กัด SiO ₂	way coat สารละลาย บัฟเฟอร์	กระจกตันแบบแผ่นที่ 5
เคลือบโลหะ	เคลือบฟิล์มบาง อลูมิเนียม	เครื่องเคลือบ สูญญากาศ, ลวดอะลูมิ- เนียม	ความดัน = 1.8 X 10 ⁻⁶ Torr ฟิล์มบางอลูมิเนียมหนา 1 μm
โฟโวลติโกราฟีลวดลาย โลหะ	ทำฟิล์ม กัดอลูมิเนียม	AZ-1350 ส่วนผสม กรดฟอสฟอ- ริก	กระจกตันแบบแผ่นที่ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้วยการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซินเตอร์รีง	-	500 °C , 10 นาที่ , N ₂	สร้างขั้วสัมผัสโอห์มมิก
ทดสอบคุณสมบัติ ทางไฟฟ้าครั้งแรก	รอยต่อพี-เอ็น และคุณสมบัติ กระแส-แรงดัน	เครื่องโพรบ สเตชันและ เครื่องวัดคุณสมบัติของ ทรานซิส- เตอร์	ตรวจสอบคุณภาพและตัดแยกตัว ที่เสีย

4.3.2 กระบวนการเก็บบรรจุอุปกรณ์ IGBT

สำหรับกระบวนการเก็บบรรจุอุปกรณ์ IGBT สามารถทำได้ทั้งตัวถังชนิด TO-5 ซึ่งใช้ลวดขนาด 25 ไมครอน สำหรับกรณีที่ต้องการทดสอบคุณสมบัติในกรณีไม่ต้องการกระแสค่าสูงๆและตัวถังชนิด TO-3 ซึ่งใช้ลวดขนาด 125 ไมครอน สำหรับกรณีที่ต้องการทดสอบคุณสมบัติในกรณีที่ต้องการกระแสค่าสูงๆ อย่างไรก็ตามในห้องปฏิบัติการสารกึ่งตัวนำของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ สจล.สามารถที่จะทำการเชื่อมลวดโลหะได้เพียงขนาด 25 ไมครอน เท่านั้น สำหรับกรณีของตัวถัง TO-3 ซึ่งใช้ลวด 125 ไมครอน จำเป็นที่จะต้องได้รับความช่วยเหลือจากโรงงานประกอบวงจรรวม โดยที่ขั้นตอนในการเก็บบรรจุอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำในศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์มีดังตารางที่ 4.2 และภาพที่ 4.7

ตารางที่ 4.2 กระบวนการเก็บและบรรจุ IGBT

กระบวนการ	ขั้นตอน	เงื่อนไข	หมายเหตุ
การตัดแยกชิฟ	ตัดด้วยใบมีดหัวเพชร หักตามรอยตัด	-	-
ติดชิฟลงตัวถัง	ความร้อน กาวเงิน	IGBT โครงสร้าง ขนาดเล็ก IGBT โครงสร้าง ขนาดใหญ่	TO-5 TO-3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เชื่อมลวดโลหะ	เครื่องเชื่อมลวดโลหะ โดยใช้การสั่นความถี่ สูง	IGBT โครงสร้าง ขนาดเล็ก IGBT โครงสร้าง ขนาดใหญ่	ลวดขนาด 25 μm ลวดขนาด 125 μm
การผลึกฝ้า	-	กาว	-
ทดสอบคุณสมบัติ ครั้งสุดท้าย	ทดสอบตัวแปรต่างๆ ที่สำคัญ	-	เครื่องมือวัดต่างๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



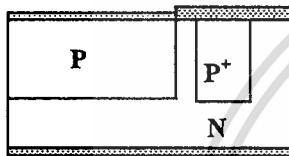
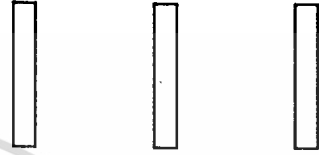
แผ่นผลึกซิลิกอนชนิด N
(100) , $\rho = 10 \Omega\text{-cm}$.



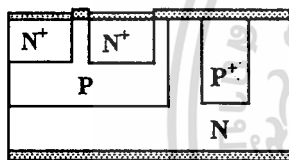
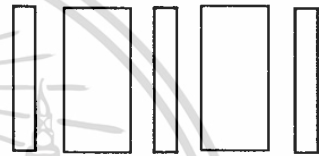
สร้างชั้น SiO₂
ความหนา 5000 Å



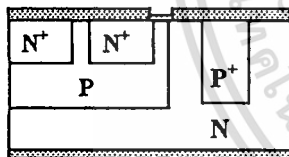
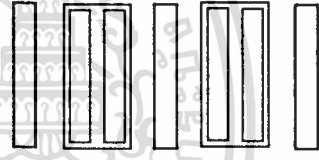
แพร่สารเจือและขั้วลึก
ส่วน P⁺-collector



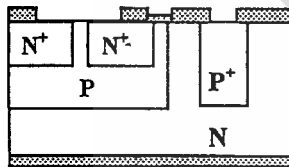
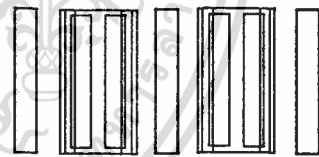
แพร่สารเจือและขั้วลึก
ส่วน P-base



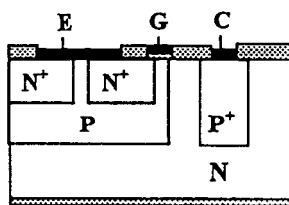
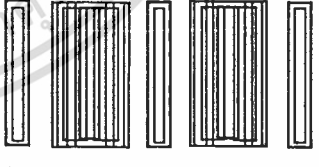
แพร่สารเจือและขั้วลึก
ส่วน N⁺-emitter



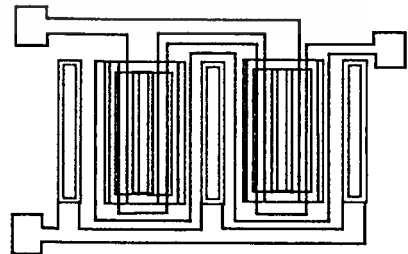
สร้างเกตออกไซด์
หนา 1000 Å



เปิดช่อง SiO₂ เพื่อ
สร้างขั้วสัมผัสโลหะ

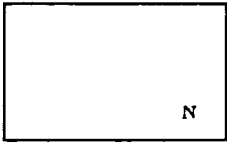


สร้างลวดลายอลูมิเนียม
และขั้วสัมผัสแบบโอห์มมิก

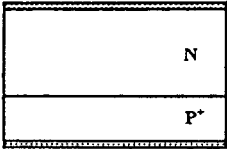


รูปที่ 4.7 กระบวนการสร้าง IGBT โครงสร้างแนวระนาบและกระจัดคันแบบ

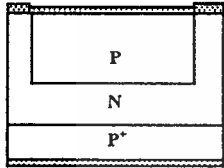
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



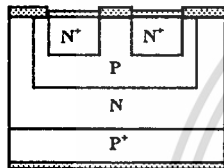
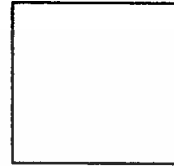
แผ่นผลึกซิลิกอนชนิด N/P^+
(100) , $\rho = 40 \Omega\text{-cm}$.



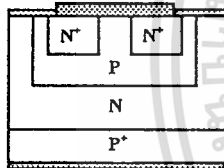
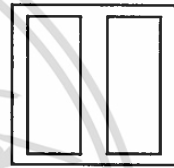
สร้างชั้น SiO_2
ความหนา 5000 \AA



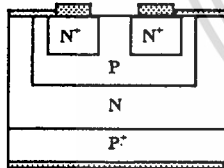
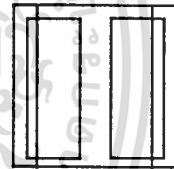
แพร่สารเจือและขั้วบล็อก
ส่วน P-base



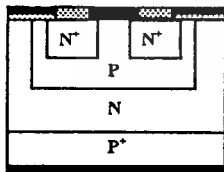
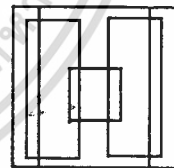
แพร่สารเจือและขั้วบล็อก
ส่วน N^+ -emitter



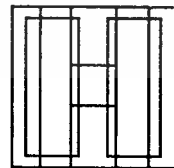
สร้างเกตออกไซด์
หนา 1000 \AA



เปิดช่อง SiO_2 เพื่อ
สร้างขั้วสัมผัสโลหะ



สร้างลวดลายอลูมิเนียม
และขั้วสัมผัสแบบโอห์มมิก



รูปที่ 4.8 กระบวนการสร้าง IGBT ในแนวตั้งและกระจกต้นแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การทดลองและผลการทดลอง

ในอุปกรณ์กำลังโดยทั่วไปไม่ว่าจะตระกูลใดก็ตามต่างก็ต้องการที่จะพัฒนาให้มีความสามารถในการทนกำลังได้สูง นั่นคือมีการนำกระแสและทนแรงดันสูงและยังต้องมีการตอบสนองความถี่ที่สูงอีกด้วย ในการทำให้อุปกรณ์มีความสามารถในการทนกำลังที่สูงได้นั้นอุปกรณ์จำเป็นที่จะต้องมีความถี่ใหญ่ตามไปด้วยอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ซึ่งการสร้างอุปกรณ์ที่มีขนาดใหญ่เพื่อที่จะศึกษาตัวแปรขั้นพื้นฐานของอุปกรณ์กำลังนั้นเป็นสิ่งที่ทำได้ยาก เนื่องจากจะทำให้เกิดคุณสมบัติบางอย่างที่แฝงอยู่ในโครงสร้างทำให้ยากแก่การวิเคราะห์ ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้การออกแบบอุปกรณ์ IGBT เพื่อศึกษาตัวแปรพื้นฐานและสะดวกในการเปลี่ยนแปลงตัวแปรทางเรขาคณิตและเพื่อบันทึกเป็นข้อมูลที่ต้องการมากขึ้นจากผลสรุปที่ได้จากข้อมูลจำนวนมากๆ จึงทำการออกแบบอุปกรณ์ IGBT ที่มีโครงสร้างในแนวระนาบและมีขนาดเล็ก สำหรับการศึกษาค้นคว้าความสามารถในการทนกำลังสูงนั้นจะทำการศึกษาจากโครงสร้างขนาดใหญ่ที่ทำการออกแบบไว้เช่นกัน

5.1 การทดสอบโครงสร้างเรขาคณิตพื้นฐานของ IGBT [11]

5.1.1 การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อ พี-เอ็น ใน IGBT

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อพี-เอ็น เป็นคุณสมบัติพื้นฐานที่มีความสำคัญอย่างมากของ IGBT ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องทดสอบคุณสมบัติของรอยต่อต่างๆเพื่อให้มีคุณสมบัติตามที่ต้องการและเหมาะสำหรับการใช้งานในโครงสร้าง IGBT โครงสร้าง IGBT จะประกอบด้วยรอยต่อพี-เอ็น 3 รอยต่อด้วยกัน คือ รอยต่อ N^+ -emitter กับ P-base , รอยต่อ P-base กับ N-base และ รอยต่อ N-base กับ P^+ -collector

การออกแบบและสร้าง

ในการทดสอบคุณสมบัติของรอยต่อของ IGBT สามารถทำได้โดยอาศัยโครงสร้างไดโอดเพื่อวัดคุณสมบัติของแต่ละรอยต่อต่างๆโดยใช้เงื่อนไขของความหนาแน่นอะตอมสารเจือและความลึกของรอยต่อเช่นเดียวกับรอยต่อต่างๆที่สร้างใน IGBT

ในกระบวนการสร้างไดโอดเพื่อวัดคุณสมบัติของรอยต่อพี-เอ็นนี้มีรายละเอียดเช่นเดียวกับที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 โดยเลือกใช้แผ่นผลึกซิลิกอนแบบ ระนาบเชิงเดี่ยว ชนิด N ระนาบ (100) พิกัดความต้านทาน 8-12 Ω -cm โดยทำการแพร่สารเจือโบรอนในส่วน P^+ เท่ากับ $4.53 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, ในส่วน P เท่ากับ $1.65 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ และแพร่สารเจือฟอสฟอรัสในส่วน N^+ เท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

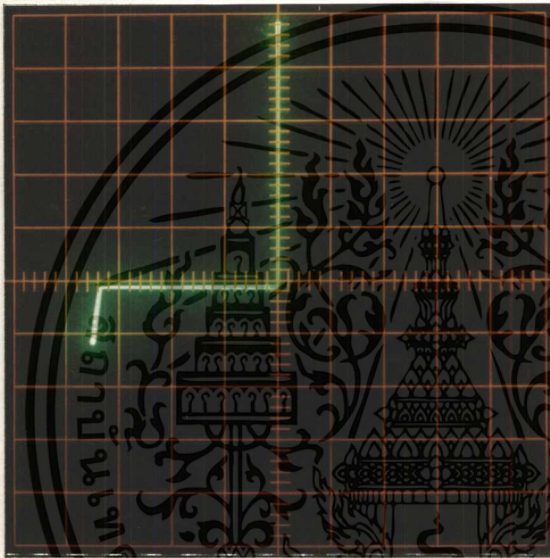
$2.57 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ จากนั้นสร้างขั้วสัมผัสโลหะในไดโอดแต่ละตัว โดยการคำนวณหาความหนาแน่นอะตอมสารเจือสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5.1)

$$N = \frac{1}{q\mu_n\rho_{\text{exp}}} \quad (5.1)$$

เมื่อ ρ_{exp} คือ พิกัดความต้านทานจากการทดลอง

การทดลองและผลการทดลอง

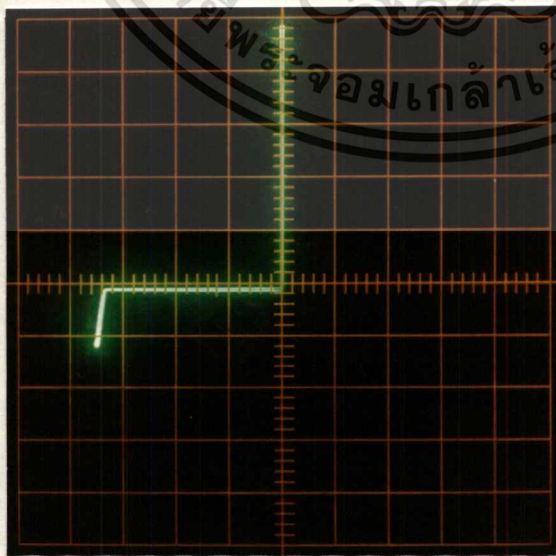
นำไดโอดที่ทำการสร้างเสร็จมาวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อพี-เอ็น โดยใช้เครื่องวัดคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์ (Transistor Curve Tracer) ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 5.1, 5.2 และ 5.3



Ver : 10 mA/div.

Hor : 50 V/div.

รูปที่ 5.1 กราฟคุณสมบัติ I-V ของรอยต่อพี-เอ็นระหว่าง N-base กับ P⁺-collector



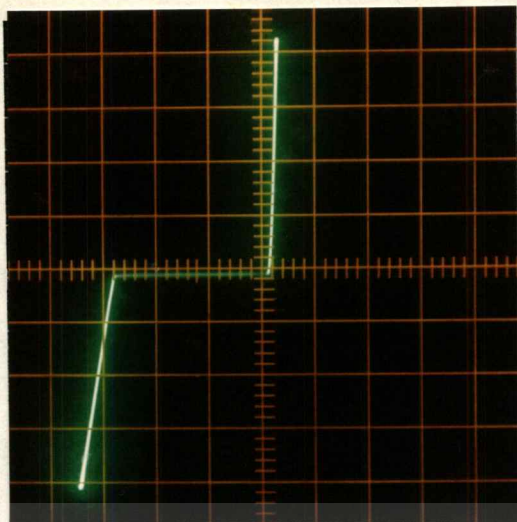
Ver : 10 mA/div.

Hor : 50 V/div.

รูปที่ 5.2 กราฟคุณสมบัติ I-V ของรอยต่อพี-เอ็น ระหว่าง P-base กับ N-base

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Ver : 10 mA/div.

Hor : 5 V/div.

รูปที่ 5.3 กราฟคุณสมบัติ I-V ของรอยต่อพี-เอ็น ระหว่าง N^+ -emitter กับ P-base

จากผลการทดลองในรูปที่ 5.1 ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ของรอยต่อพี-เอ็น ระหว่าง N-base กับ P^+ -collector ซึ่งเป็นรอยต่อที่มีความสำคัญอย่างมากต่อคุณสมบัติทางความสามารถในการปิดกั้นย้อนกลับ (Reverse Blocking Capability) และคุณสมบัติทางความสามารถในการนำกระแสไปหน้า (Forward Conduction Capability) โดยการทนแรงดันย้อนกลับของรอยต่อนี้จะเป็นตัวกำหนดความสามารถในการปิดกั้นย้อนกลับของ IGBT และการทนแรงดัน จากการทดลองพบว่ามีความดันไปหน้าตกคร่อม 0.6 V และสามารถทนแรงดันไปอ้อนกลับได้ถึง 170 V แสดงให้เห็นได้ว่ารอยต่อระหว่าง N-base กับ P^+ -collector เหมาะสมที่จะสร้างเป็นรอยต่อของ IGBT ได้

สำหรับผลที่แสดงในรูปที่ 5.2 เป็นกราฟ I-V ของรอยต่อ พี-เอ็น ระหว่างชั้น P-base กับ N-base ซึ่งมีความสำคัญในการทำงานในสภาวะปิดกั้นตรง (Forward Blocking Capability) และความหนาแน่นของอะตอมสารเจือในส่วน P-base ยังเป็นตัวกำหนดแรงดันขีดเริ่มของ IGBT อีกด้วย ซึ่งจากการทดลองพบว่าความสามารถในการทนแรงดันพังทลายของรอยต่อ P-base กับ N-base สามารถทนได้ถึง 155 V ซึ่งเหมาะสมที่จะใช้ในโครงสร้างของ IGBT เช่นกัน

ในส่วนของรอยต่อ N^+ -emitter กับ P-base เป็นส่วนที่มีผลในความสามารถในการนำกระแสของโครงสร้างแผ่นมอสเฟตในโครงสร้าง IGBT โดยจากการทดลองพบว่ามีความดันพังทลาย 14 โวลต์ แต่อย่างไรก็ตามความสำคัญของแรงดันพังทลายของรอยต่อนี้มีน้อยมาก ทั้งนี้เนื่องจากในโครงสร้างของ IGBT ส่วน N^+ -emitter จะถูกเชื่อมต่อกับส่วน P-base โดยขั้วอะลูมิเนียมอยู่แล้ว ทั้งนี้เพื่อที่จะทำให้ศักย์ไฟฟ้าในส่วนทั้งสองมีค่าเท่ากันเพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงการเกิดโครงสร้างแผ่นแบบไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์

จากผลการทดลองดังกล่าวมาแล้วจะเห็นได้ว่า รอยต่อต่างๆเหมาะสมที่จะประกอบขึ้นเป็นโครงสร้าง IGBT แต่ส่วนที่สำคัญที่สุดก็คือความหนาแน่นอะตอมสารเจือในชั้น P-base เพราะนอกจากจะเป็นตัวกำหนดความสามารถในการทนแรงดันสูงสุดของรอยต่อ P-base แล้วยังเป็นตัวกำหนดค่าแรงดันขีดเริ่มอีกด้วยซึ่งจะได้กล่าวถึงในบทต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนลิขสิทธิ์ของงานวิจัยในเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

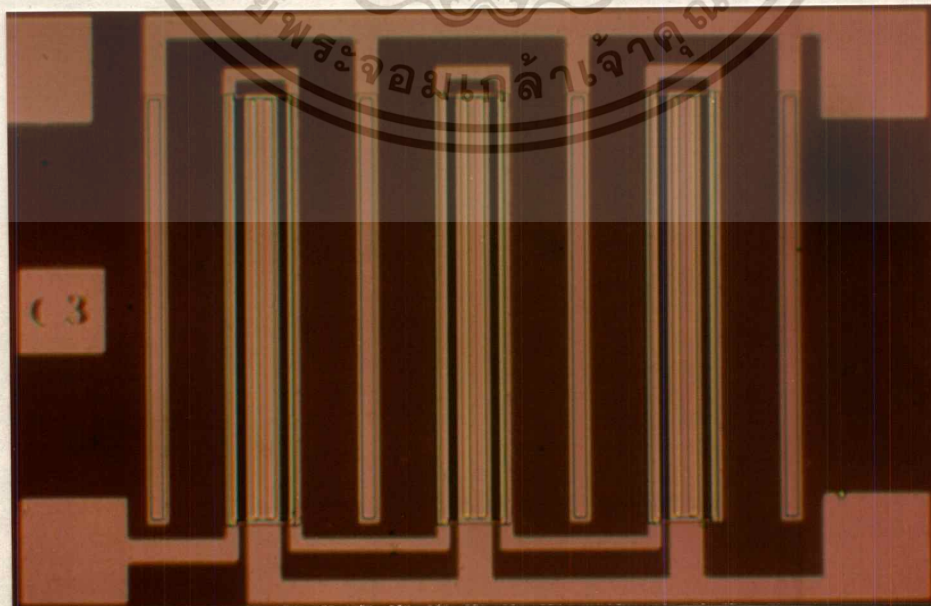
5.1.2 การทดสอบการทำงานของ IGBT ในลักษณะของทรานซิสเตอร์

ในการทดสอบโครงสร้างทางเรขาคณิตของอุปกรณ์ IGBT ที่สร้างขึ้นว่าสามารถที่จะทำงานในลักษณะของทรานซิสเตอร์ได้หรือไม่นั้น สามารถทำได้โดยการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ (I_C) กับแรงดันคอลเลคเตอร์-อิมิตเตอร์ (V_{CE}) ทั้งนี้เนื่องจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I_C กับ V_{CE} สามารถบอกได้ถึงความสามารถในการนำกระแส, ความต้านทานในสภาวะนำกระแส (R_{on}), ค่าทรานคอนดักแตนซ์ (g_{msat}) ตลอดจนถึงกระแสรั่วไหล ดังผลการทดลองต่อไปนี้

การออกแบบสร้าง

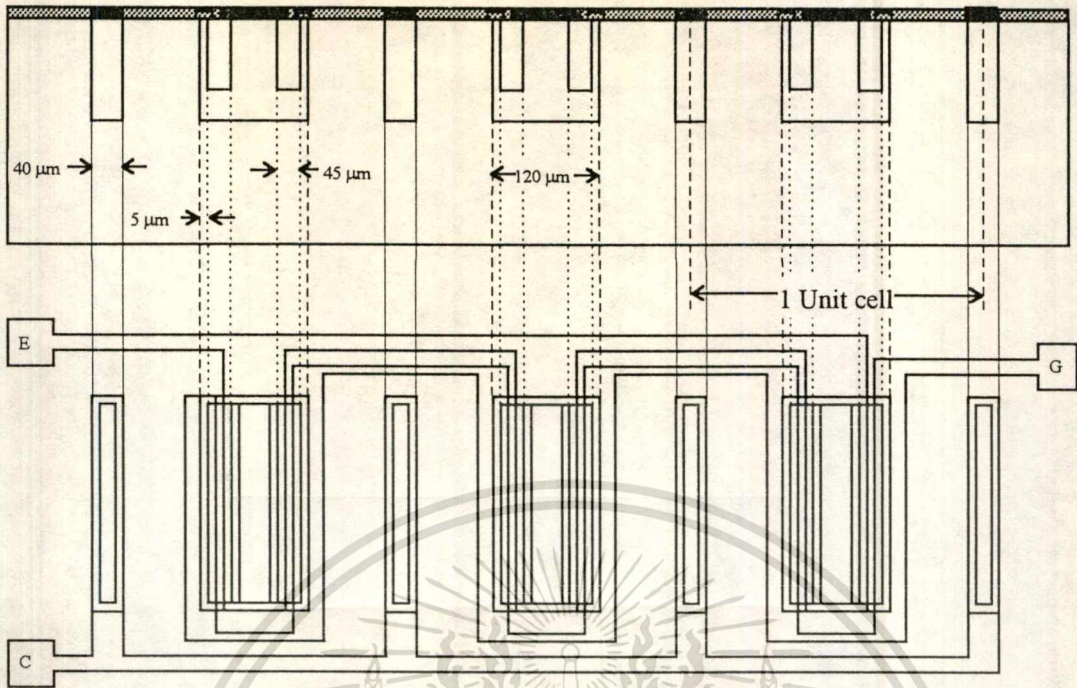
ในการศึกษาการทำงานของ IGBT ในลักษณะทรานซิสเตอร์ในบทนี้จะทำการศึกษาจากโครงสร้างในแนวระนาบ ที่มีความยาวและความกว้างของช่องทางเดินเท่ากับ $5 \mu\text{m}$ และ $4,800 \mu\text{m}$ ตามลำดับ โดยทำการออกแบบให้ส่วน N^+ -emitter และ P-base ต่อเข้ากันด้วยชั้นอลูมิเนียมเพื่อป้องกันการเกิดโครงสร้างแฝงไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ ซึ่งจะทำให้กระแสอิเล็กตรอน (I_C) ไม่สามารถไหลในแนวตั้งได้

สำหรับกระบวนการสร้างอุปกรณ์ IGBT เพื่อใช้ในการทดสอบการทำงานในลักษณะทรานซิสเตอร์ของ IGBT นั้น สามารถทำได้โดยอาศัยกระบวนการสร้างที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 โดยเลือกใช้แผ่นผลึกซิลิกอน ระบายเชิงเดี่ยว ชนิด N ระบาย (100) พิกัดความต้านทาน 8-12 $\Omega\text{-cm}$ โดยทำการแพร่สารเจือโบรอนในส่วน P^+ -collector เท่ากับ $4.53 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ และส่วน P-base เท่ากับ $1.65 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ และทำการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสเพื่อสร้างชั้น N^+ -emitter เท่ากับ $2.57 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ จากนั้นทำการสร้างขั้วสัมผัสโลหะในส่วนต่างๆดังแสดงในรูปที่ 5.4



เอกรูปที่ 5.4 ภาพถ่ายด้านบนของ IGBT โครงสร้างในแนวระนาบที่มีความกว้างของชั้น N^+ -base = $120 \mu\text{m}$ การค้า

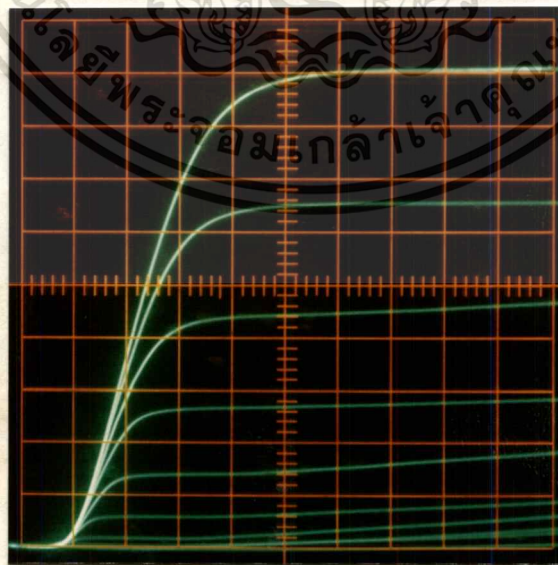
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.5 ภาพตัดขวางและลวดลายด้านบนของอุปกรณ์ IGBT โครงสร้างในแนวระนาบ

การทดสอบและผลการทดลอง

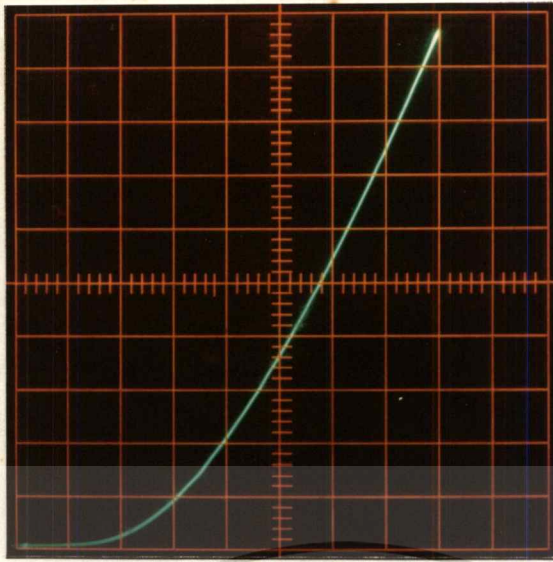
นำอุปกรณ์ IGBT ที่สร้างเสร็จแล้วมาวัดคุณสมบัติของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลกเตอร์กับแรงดันคอลเลกเตอร์-อิมิตเตอร์โดยใช้เครื่องวัดคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์ ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 5.6 - 5.10



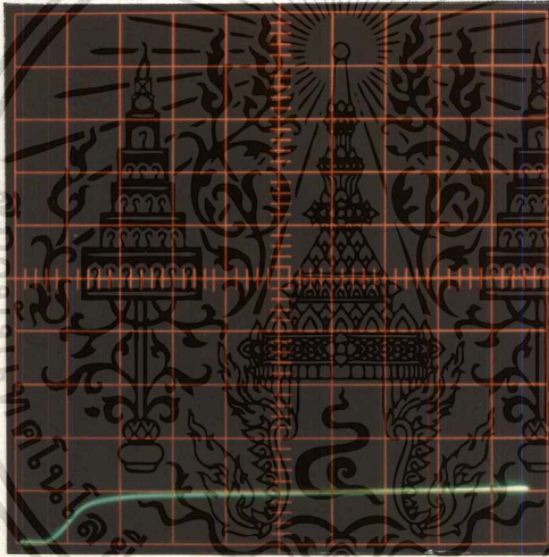
รูปที่ 5.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลกเตอร์กับแรงดันคอลเลกเตอร์-อิมิตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารของงานวิจัยที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

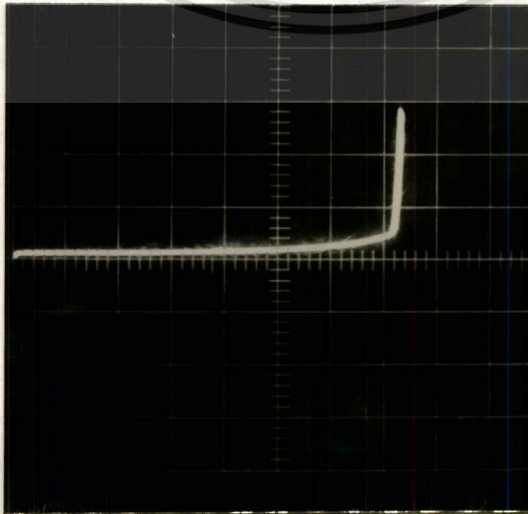
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.7 แรงดันขีดเริ่ม V_T (Ver:5mA/Div.,Hor:1V/Div.)

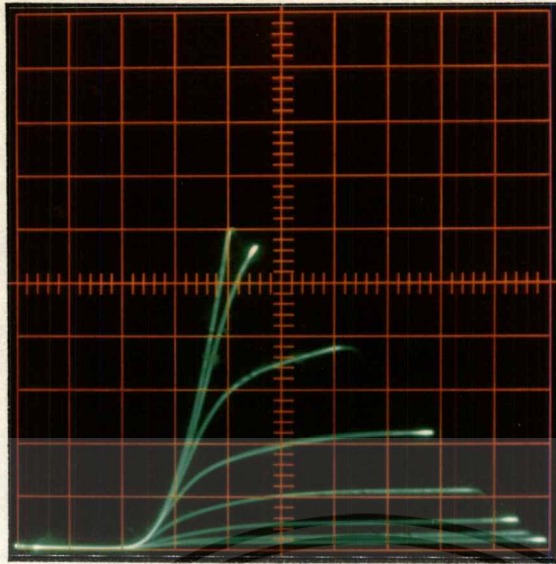


รูปที่ 5.8 กระแสรั่วไหล (Ver:0.05mA/Div.,Hor:1V/Div.)



รูปที่ 5.9 แรงดันปิดกั้นไปหน้า (Ver:5mA/Div.,Hor:20V/Div.)

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.10 Diode Knee (0.2V/step,7step,0.05mA/Div.,0.2V/Div.)

จากผลการทดลองในรูปที่ 5.6 แสดงให้เห็นว่า IGBT ที่สร้างขึ้นสามารถที่จะทำงานในลักษณะของทรานซิสเตอร์ได้เป็นอย่างดีและยังสามารถที่จะนำ IGBT ที่สร้างขึ้นไปใช้งานในวงจรขยายสัญญาณไฟฟ้าได้เหมือนกับอุปกรณ์กำลังโดยทั่วไป จากผลการทดลองสามารถวัดค่าทรานคอนดักแตนซ์ (g_{msat}) ของ IGBT ที่สร้างขึ้นได้เท่ากับ $25 \text{ m}\Omega^{-1}$ (ที่ $V_G = 3.5 \text{ V}$. และ $V_{CE} = 10 \text{ V}$.) และความต้านทานในสภาวะนำกระแสมีค่าเท่ากับ 53.33Ω ในรูปที่ 5.7 แสดงถึงแรงดันขีดเริ่ม (V_T) ของ IGBT ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.6 V . สำหรับกระแสรั่วไหลที่แสดงในรูปที่ 5.8 สามารถวัดได้ 0.05 mA ซึ่งมีค่าน้อยมาก สำหรับความสามารถในการปิดกั้นตรงของอุปกรณ์ IGBT ที่สร้างมีค่าเท่ากับ 144 V . ดังแสดงในรูปที่ 5.9 และในรูปที่ 5.10 จะแสดงให้เห็นถึง Diode Knee ของโครงสร้าง IGBT ซึ่งเกิดจากการที่แรงดันที่ให้กับขั้วคอลเลกเตอร์มีค่าต่ำทำให้ไม่เกิดการฉีดประจุพาหะจากรอยต่อ N-base กับ P⁺-collector เข้าไปในบริเวณ N-base จึงไม่ทำให้เกิดการมอดดูเลตสภาพนำ

5.1.3 การศึกษาผลของการฉีดประจุพาหะส่วนน้อยต่อความสามารถในการนำกระแสของ IGBT

จุดเด่นของโครงสร้าง IGBT ก็คือปรากฏการณ์ที่เกิดจากการฉีดประจุพาหะส่วนน้อยจากชั้น P⁺-collector เข้าไปในชั้น N-base ทำให้เกิดการมอดดูเลตสภาพนำ ส่งผลให้ความต้านทานในสภาวะนำกระแสของ IGBT มีค่าต่ำลง ดังนั้นการทดลองในบทนี้จึงเป็นการทดสอบถึงผลของประจุพาหะส่วนน้อยต่อความต้านทานในสภาวะนำกระแสของ IGBT และเพื่อให้เห็นผลชัดเจนยิ่งขึ้นจึงได้ทำการเปรียบเทียบกับความต้านทานในสภาวะนำกระแสของมอสเฟตกำลังแบบดีมอสที่เงื่อนไขเดียวกันทั้งในการสร้างและการทดลองดังการทดลองต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบและสร้าง

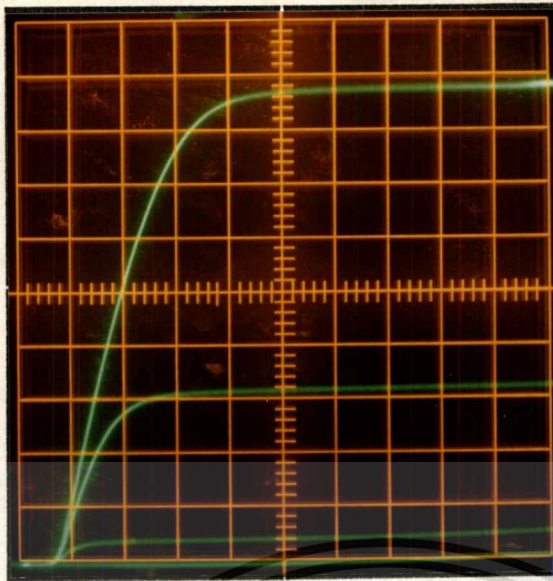
ในการออกแบบอุปกรณ์ IGBT และมอสเฟตกำลังแบบเดิมอสเพื่อศึกษาผลของประจุพาหะส่วนน้อยต่อความต้านทานในสภาวะนำกระแสของ IGBT สามารถทำได้โดยการออกแบบให้ IGBT และมอสเฟตกำลังแบบเดิมอสที่มีโครงสร้างในแนวระนาบและมีขนาดทางเรขาคณิตเท่ากันทุกอย่าง โดยออกแบบให้มีความกว้างและความยาวของช่องทางเดินกระแสเท่ากับ 4800 และ 5 μm ตามลำดับ

ในการสร้างทั้ง IGBT และมอสเฟตกำลังแบบเดิมอส เพื่อให้ได้เงื่อนไขในการสร้างเหมือนกันและเพื่อความประหยัดจึงทำการสร้างอุปกรณ์ทั้งสองพร้อมกันโดยจะแตกต่างกันที่การสร้างชั้น P^+ -collector ใน IGBT กับชั้น N^+ -drain ในมอสเฟตกำลังแบบเดิมอสเท่านั้น และทำโดยใช้กระบวนการสร้างมาตรฐานของ IGBT ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 โดยเลือกทำการแพร่สารเจือโบรอนในส่วน P^+ -collector ให้มีความหนาแน่นอะตอมสารเจือเท่ากับ $4.53 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ และในส่วนของชั้น P-base จะมีความหนาแน่นอะตอมสารเจือเท่ากับ $1.65 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ จากนั้นทำการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสเพื่อสร้างชั้น N^+ -emitter ใน IGBT และสร้างชั้น N^+ -source และ N^+ -drain ในมอสเฟตกำลังแบบเดิมอส ที่ความหนาแน่นอะตอมสารเจือเท่ากับ $2.57 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ แล้วทำการสร้างชั้นเกตออกไซด์และเคลือบโลหะอลูมิเนียมโดยใช้เครื่องเคลือบโลหะในสุญญากาศ จากนั้นกัดเป็นลวดลายส่วนต่างๆตามที่ได้ออกแบบไว้

การทดสอบและผลการทดลอง

นำอุปกรณ์ IGBT และมอสเฟตกำลังแบบเดิมอสที่สร้างเสร็จแล้วมาวัดความต้านทานในสภาวะนำกระแสโดยใช้เครื่องวัดคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 5.11 และ 5.12 จากนั้นทำการคำนวณค่าความต้านทานในสภาวะนำกระแสของอุปกรณ์ทั้งสองโดยอาศัยสมการที่ (5.2)

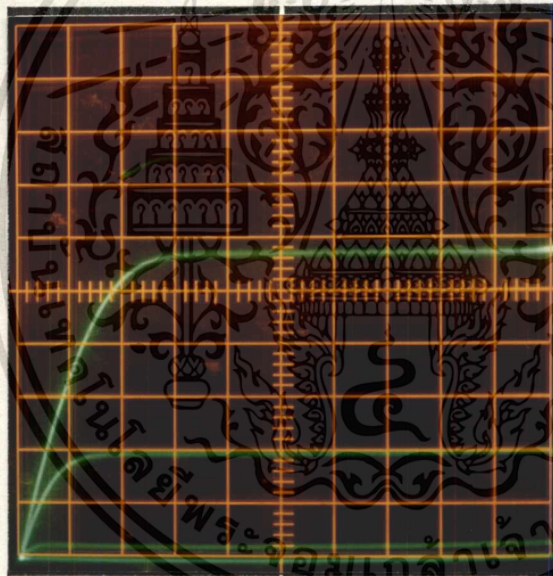
$$R_{on} = \frac{\Delta V_{CE}}{\Delta I_C} \Big|_{V_G = \text{constant}} \quad (5.2)$$



Ver : 5 mA/div.

Hor : 1 V./div.

รูปที่ 5.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลกเตอร์กับแรงดันคอลเลกเตอร์-อิมิตเตอร์ของ IGBT



Ver : 5 mA/div.

Hor : 1 V./div.

รูปที่ 5.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเดรน-ซอสของ DMOS

จากผลการทดลองในรูปที่ 5.11 เปรียบเทียบกับรูปที่ 5.12 จะเห็นได้ว่าที่เงื่อนไขการสร้างเหมือนกันทุกประการปรากฏว่า ความต้านทานในสภาวะนำกระแสของ IGBT วัดได้ 25.0 Ω ส่วน ความต้านทานในสภาวะนำกระแสของมอสเฟตกำลังแบบดีมอสวัดได้ 29.2 Ω หรือความต้านทานในสภาวะนำกระแสของ IGBT มีค่าเป็น 85.62 % ของความต้านทานในสภาวะนำกระแสของดีมอส ทั้งนี้เนื่องจากผลของประจุพาหะส่วนน้อยที่ถูกฉีดเข้าไปในชั้น N-base ทำให้ปริมาณประจุพาหะในชั้น N-base มีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความต้านทานในชั้น N-base ลดลงตามไปด้วย IGBT จึงมีความต้านทานในสภาวะนำกระแสต่ำกว่ามอสเฟตกำลังแบบดีมอส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 การศึกษาผลของชั้น N-base ที่มีต่อความสามารถในการนำกระแสของ IGBT [12]

ในการพัฒนาอุปกรณ์กำลังโดยทั่วไปสิ่งสำคัญก็คือการพยายามที่จะเพิ่มความสามารถในการนำกระแสของอุปกรณ์ ดังเช่นผลงานวิจัยที่ได้เคยนำเสนอในการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 14 ซึ่งเป็นการพัฒนาความสามารถในการนำกระแสของดีมอสโดยการเพิ่มอัตราส่วนระหว่างความกว้างกับความยาวของช่องทางเดินกระแสด้วยการสร้างเกทเป็นรูปตัววีหรือที่เรียกว่า "วีมอส" (VMOS) [13] ในส่วนของอุปกรณ์ IGBT การเพิ่มความสามารถในการนำกระแสสามารถที่จะทำได้หลายวิธี วิธีหนึ่งก็คือการเปลี่ยนแปลงความกว้างของชั้น N-base โดยจากสมการที่(2.15) จะเห็นได้ว่าที่ความกว้างและความยาวของช่องทางเดินกระแสเท่ากันความสามารถในการนำกระแสของ IGBT จะขึ้นอยู่กับอัตราขยายกระแสของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ P-N-P (α_{PNP}) และจากสมการที่ (2.13) อัตราขยายกระแสของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ P-N-P จะขึ้นอยู่กับขนาดของความกว้างของชั้น N-base ดังนั้นในรายงานฉบับนี้จึงพิจารณาถึงผลของกระแสไหลที่ทำให้อัตราขยายกระแสของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ P-N-P ที่แผ่ภายในโครงสร้างของ IGBT เพิ่มขึ้นโดยการเปลี่ยนแปลงความกว้างของชั้น N-base และเพื่อความสะดวกในการทดลองสร้าง IGBT ที่มีความกว้างของชั้น N-base ค่าต่างๆ ในรายงานฉบับนี้จึงพิจารณา IGBT ที่มีโครงสร้างในแนวระนาบซึ่งมีหลักการทำงานเช่นเดียวกับ IGBT ที่มีโครงสร้างในแนวตั้ง

5.2.1 ผลของความกว้างของชั้น N-base ที่มีต่อกระแสคอลเลคเตอร์

กระแสคอลเลคเตอร์เป็นตัวแปรหลักที่จะบอกถึงความสามารถในการนำกระแสของอุปกรณ์ได้โดยตรง ดังนั้นจึงทำการทดลองหาผลของความกว้างของชั้น N-base ที่มีต่อปริมาณกระแสที่ขั้วคอลเลคเตอร์

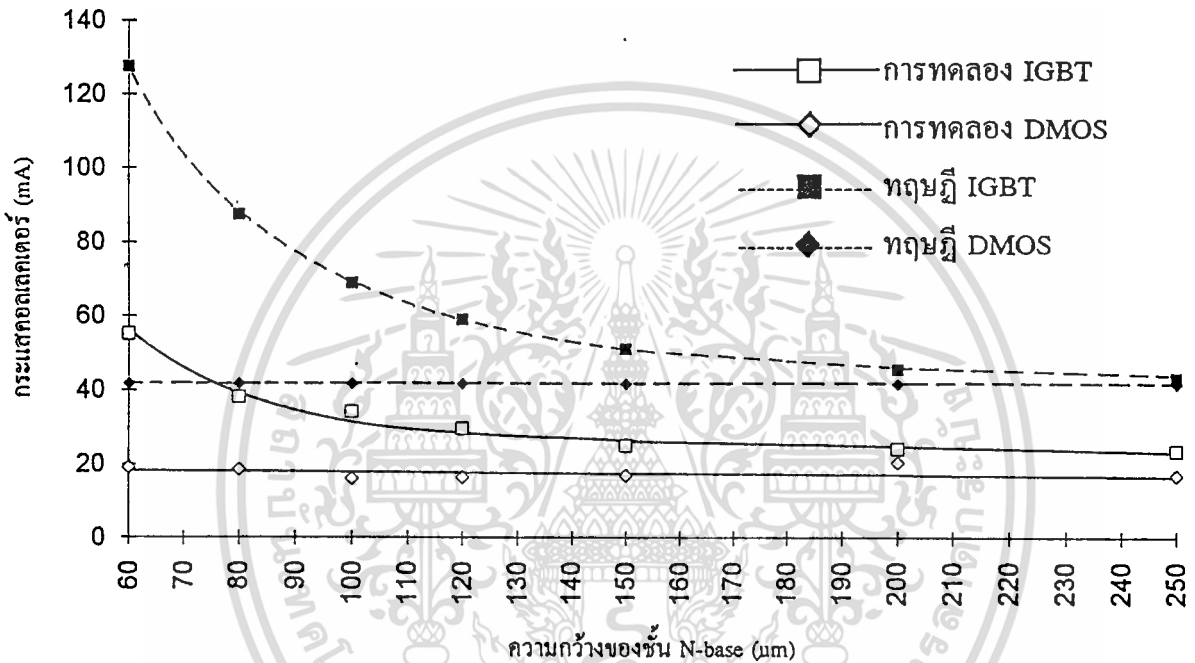
การออกแบบและสร้าง

เพื่อศึกษาผลของความกว้างของชั้น N-base ต่อความสามารถในการนำกระแสของ IGBT จึงได้ทำการออกแบบสร้าง IGBT ที่มีความกว้างและความยาวของช่องทางเดินกระแสเท่ากับ 4800 และ 5 μm ตามลำดับ ส่วนความกว้างของชั้น N-base จะเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 60,80,100,120 ,150,200และ250 μm

ในส่วนของการสร้างอุปกรณ์ IGBT ทำโดยอาศัยกระบวนการสร้าง IGBT ตามที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 โดยใช้แผ่นผลึกซิลิกอนชนิด N ระนาบ (100) ความหนา 400 μm ค่าพิคัดความต้านทาน 8-10 $\Omega\text{-cm}$. ทำการแพร่สารเจือโบรอนเพื่อสร้างชั้นคอลเลคเตอร์ที่ความหนาแน่นอะตอมสารเจือเท่ากับ $4.53 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ แล้วทำการแพร่สารเจือโบรอนอีกครั้งเพื่อสร้างชั้นเบสที่ $1.65 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ต่อไปทำการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสเพื่อสร้างชั้นอิมิตเตอร์ที่ $2.57 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ จากนั้นทำการ

การทดลองและผลการทดลอง

ทำโดยการวัดค่ากระแสคอลเลคเตอร์ในช่วงอิมิต์ที่แรงดันเกตคงที่ค่าหนึ่ง จากกราฟระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์กับแรงดันคอลเลคเตอร์-อิมิตเตอร์ของอุปกรณ์ IGBT แต่ละตัวที่มีความกว้างของชั้น N-base ค่าต่างๆมาเขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์กระแสคอลเลคเตอร์กับความกว้างของชั้น N-base ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 5.13 ซึ่งพิจารณาที่แรงดันเกตเท่ากับ 3.5 V. และ $V_{DD} = 10$ V. โดยเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองสร้าง IGBT กับค่าที่ได้จากการทดลองสร้างดีมอสและค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีของทั้ง IGBT และดีมอส



รูปที่ 5.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ในช่วงอิมิต์กับความกว้างของชั้น N-base ที่ $V_G = 3.5$ V. และ $V_{DD} = 10$ V.

จากการทดลองวัดความสามารถในการนำกระแสของ IGBT ที่สร้างขึ้นโดยการพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ กับแรงดันคอลเลคเตอร์-อิมิตเตอร์ เมื่อเปรียบเทียบค่ากระแสคอลเลคเตอร์ในช่วงอิมิต์ที่วัดแรงดันเกตคงที่ กับความกว้างของชั้น N-base ของ IGBT พบว่า เมื่อความกว้างของชั้น N-base เพิ่มมากขึ้น ค่ากระแสคอลเลคเตอร์ของ IGBT จะลดลงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล โดยจากผลการทดลองเมื่อเพิ่มความกว้างของชั้น N-base จาก 60 เป็น 250 μm ปรากฏว่าค่ากระแสคอลเลคเตอร์จะลดลงถึง 57.27 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้เนื่องจากกระแสที่ไหลภายในโครงสร้างของ IGBT สามารถที่จะพิจารณาแบ่งได้เป็นสองส่วนคือ กระแสอิเล็กตรอน (I_n) และกระแสโฮล (I_p) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 (ก.) ซึ่งจะเห็นได้ว่ากระแสอิเล็กตรอนจะไหลผ่านในส่วนโครงสร้างที่เป็นมอสเฟตโดยสามารถพิจารณาได้เช่นเดียวกับกรณีกระแสที่ไหลในโครงสร้างมอสเฟตโดยทั่วไป ไปได้ โดยที่ความสามารถในการนำกระแสหรือปริมาณกระแสที่ไหลในช่องไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางเดินกระแสจะขึ้นอยู่กับความกว้างและความยาวของช่องทางเดินกระแสเท่านั้น แต่สำหรับใน ส่วนของกระแสไหลจะไหลผ่านในส่วนของโครงสร้างทรานซิสเตอร์ P-N-P ที่ฝังอยู่ในโครงสร้าง IGBT ปริมาณกระแสที่ไหลส่วนนี้นั้นจะสัมพันธ์กับอัตราขยายกระแสของโครงสร้างไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ P-N-P ใน IGBT แต่เนื่องจากอัตราขยายกระแสของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ P-N-P แปรผกผันกับความกว้างของชั้น N-base เพราะว่าเมื่อความกว้างของชั้น N-base มีค่ามากขึ้นโอกาสที่โฮลที่ถูกฉีดเข้าไปในบริเวณ N-base จะรวมตัวกับอิเล็กตรอนในบริเวณ N-base ก็จะมากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นเมื่อความกว้างของชั้น N-base มากขึ้นจึงทำให้ปริมาณกระแสโฮลที่ไหลในโครงสร้าง IGBT ลดลง ส่งผลให้กระแสคอลเลกเตอร์ลดลงด้วย เมื่อพิจารณาผลการทดลองที่ได้จากการวัด IGBT กับผลการทดลองที่ได้จากการวัดแกมมาแกมมาแบบดิมอส จะเห็นได้ว่าที่ความกว้างของชั้น N-base ค่าน้อยๆ ค่ากระแสคอลเลกเตอร์ใน IGBT จะมีค่าสูงกว่ากระแสเดรน-ซอส ในดิมอสมาก แต่เมื่อความกว้างของชั้น N-base เพิ่มขึ้นค่ากระแสทั้งสองจะมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งเป็นการยืนยันว่ากระแสโฮลที่ถูกฉีดเข้าไปในชั้น N-base ซึ่งมีกระแสอิเล็กตรอนไหลอยู่จะทำให้เกิดการมอดูเลตสภาพนำทำให้มีกระแสไหลมากขึ้น ส่วนในดิมอสกระแสส่วนใหญ่จะเป็นกระแสอิเล็กตรอน ทั้งนี้เนื่องจากที่ความกว้างของชั้น N-base น้อยๆ ค่าอัตราขยายกระแสของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ P-N-P มีค่าสูง ทำให้กระแสโฮลไหลมาก เมื่อรวมกับกระแสอิเล็กตรอนแล้วจึงมีค่าสูงกว่ากระแสเดรน-ซอส ของดิมอสมากแต่เมื่อความกว้างของชั้น N-base มากขึ้น อัตราขยายกระแสของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ P-N-P มีค่าต่ำทำให้ปริมาณกระแสโฮลมีค่าน้อยกระแสรวมจึงมีค่าใกล้เคียงกับกระแสเดรน-ซอสในดิมอส ซึ่งกระแสส่วนใหญ่เป็นกระแสอิเล็กตรอน

5.2.2 ผลของความกว้างของชั้น N-base ต่อค่าทรานคอนดักแตนซ์

ค่าทรานคอนดักแตนซ์ (g_{msl}) เป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่สามารถบ่งบอกถึงความสามารถในการนำกระแสของอุปกรณ์ IGBT ได้โดยตรง ดังนั้นในการทดลองในบทนี้จึงทำการทดลองศึกษาผลของความกว้างของชั้น N-base หรือกล่าวอีกในหนึ่งก็คือผลของอัตราขยายกระแสของไบโพลาร์ P-N-P ที่มีต่อค่าทรานคอนดักแตนซ์

การออกแบบและสร้าง

ในการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ IGBT เพื่อศึกษาผลของความกว้างของชั้น N-base ที่มีต่อค่าทรานคอนดักแตนซ์สามารถทำได้โดยอาศัยเงื่อนไขเดียวกับในหัวข้อที่ 5.2.1 ทุกอย่างกล่าวคือทำการออกแบบสร้าง IGBT ที่มีความกว้างและความยาวของช่องทางเดินกระแสเท่ากับ 4800 และ 5 μm ตามลำดับ ส่วนความกว้างของชั้น N-base จะเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 60,80,100,120,150, 200 และ 250 μm การที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คือทำการออกแบบสร้าง IGBT ที่มีความกว้างและความยาวของช่องทางเดินกระแสเท่ากับ 4800 และ 5 μm ตามลำดับ ส่วนความกว้างของชั้น N-base จะเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 60,80,100,120,150, 200 และ 250 μm

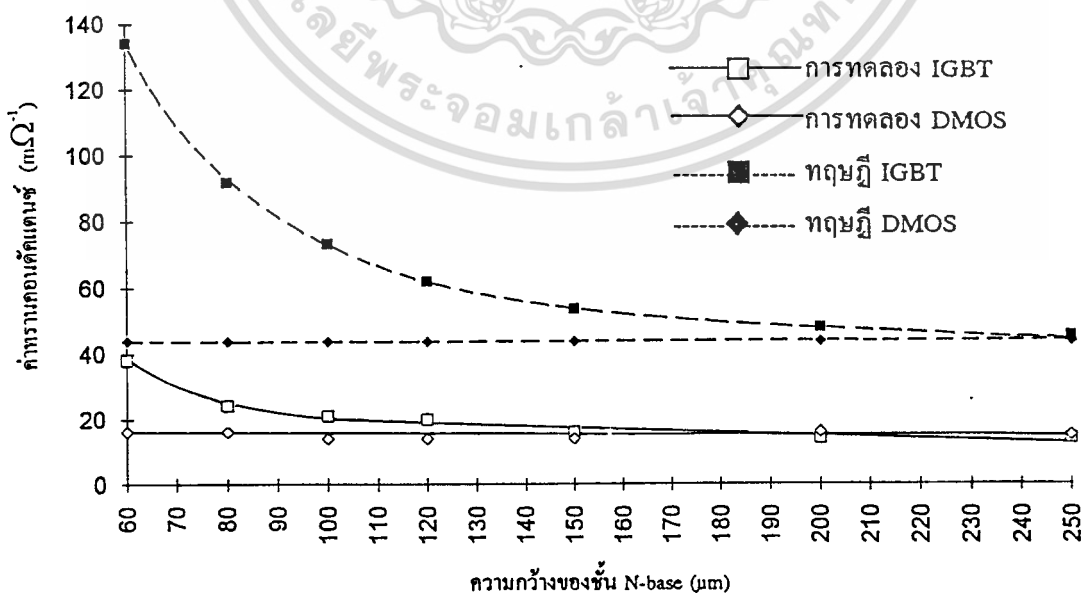
ในส่วนของการสร้างอุปกรณ์ IGBT ทำโดยอาศัยกระบวนการสร้าง IGBT ตามที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 โดยใช้แผ่นผลึกซิลิกอนชนิด N ระบาย (100) ความหนา 400 μm ค่าพิคัดความต้านทาน 8-10 $\Omega\text{-cm}$. ทำการแพร่สารเจือโบรอนเพื่อสร้างชั้นคอลเลกเตอร์และเบสที่ความหนาแน่นอะตอมสารเจือเท่ากับ $4.53 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ และ $1.65 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ตามลำดับ ต่อไปทำการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสเพื่อสร้างชั้นอิมิตเตอร์ที่ $2.57 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ จากนั้นทำการสร้างเกทออกไซด์และสุดท้ายทำการสร้างขั้วสัมผัสโลหะโดยเคลือบอลูมิเนียมในเครื่องเคลือบสุญญากาศ แล้วกัดเป็นลวดลายส่วน อิมิตเตอร์,เกทและคอลเลกเตอร์

การทดลองและผลการทดลอง

ทำการคำนวณค่าทรานคอนดักแตนซ์ (g_{msat}) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลกเตอร์กับแรงดันคอลเลกเตอร์-อิมิตเตอร์ โดยอาศัยสมการ

$$g_{msat} = \left. \frac{\Delta I_C}{\Delta V_{CG}} \right|_{V_{CE} = \text{constant}} \quad (5.3)$$

จากนั้นนำค่าที่ได้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าทรานคอนดักแตนซ์กับค่าความกว้างของชั้น N-base ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 5.14 โดยจะแสดงถึงผลที่ได้จากการทดลองสร้าง IGBT เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองสร้างคิมอสและผลที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีของทั้ง IGBT และ คิมอส



รูปที่ 5.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าทรานคอนดักแตนซ์กับค่าความกว้างของชั้น N-base

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าทรานคอนดักแตนซ์กับความกว้างของชั้น N-base ดังแสดงในรูปที่ 5.14 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มความกว้างของชั้น N-base จาก 60 ไปถึง 250 ไมครอน พบว่าค่าคอนดักแตนซ์จะลดลงไปถึง 61.17 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้เนื่องจากค่าทรานคอนดักแตนซ์พิจารณาในช่วงกระแสอิ่มตัวและขึ้นอยู่กับค่าอัตราการขยายกระแสของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ P-N-P ดังนั้นจึงแปรผกผันกับความกว้างของชั้น N-base เช่นเดียวกับกระแสคอลเลคเตอร์

5.2.3 ผลของความกว้างของชั้น N-base ที่มีต่อค่าความต้านทานในสภาวะนำกระแส

ค่าความต้านทานในสภาวะนำกระแสของ IGBT เป็นตัวแปรหนึ่งของ IGBT ที่ทำให้ IGBT มีลักษณะเด่นเหนือกว่าอุปกรณ์กำลังชนิดอื่นๆ ทั้งนี้เนื่องจากผลของประจุพาหะส่วนน้อยที่ถูกฉีดเข้าไปในชั้น N-base ทำให้ IGBT มีความต้านทานในสภาวะนำกระแสต่ำกว่าอุปกรณ์อื่น ดังนั้นในการศึกษาผลของความกว้างของชั้น N-base ซึ่งมีผลโดยตรงต่อการฉีดประจุพาหะส่วนน้อยจึงต้องคำนึงถึงผลที่เกิดกับความต้านทานในสภาวะนำกระแสด้วยดังการทดลองต่อไปนี้

การออกแบบและสร้าง

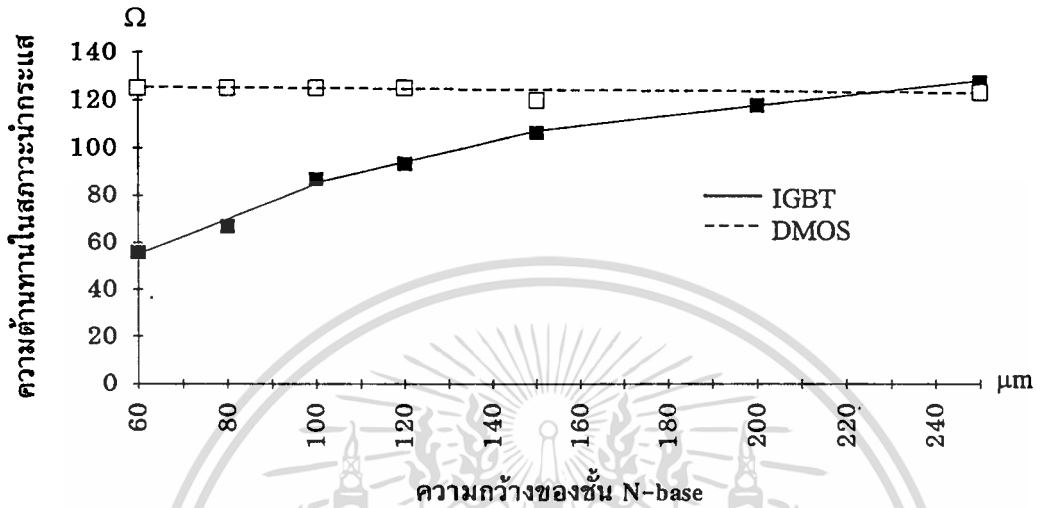
ในการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ IGBT เพื่อศึกษาผลของความกว้างของชั้น N-base ที่มีต่อค่าความต้านทานในสภาวะนำกระแสสามารถทำได้โดยอาศัยเงื่อนไขเดียวกับในหัวข้อที่ 5.2.1 ทุกอย่างกล่าวคือทำการออกแบบสร้าง IGBT ที่มีความกว้างและความยาวของช่องทางเดินกระแสเท่ากับ 4800 และ 5 μm ตามลำดับ ส่วนความกว้างของชั้น N-base จะเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 60,80,100,120,150,200 และ 250 μm

ในส่วนของการสร้างอุปกรณ์ IGBT ทำได้โดยอาศัยกระบวนการสร้าง IGBT ตามที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 โดยใช้แผ่นสลิคซิลิคอนชนิด N ระบาย (100) ความหนา 400 μm ค่าพิคัดความต้านทาน 8-10 $\Omega\text{-cm}$. ทำการแพร่สารเจือโบรอนเพื่อสร้างชั้นคอลเลคเตอร์และเบสที่ความหนาแน่นอะตอมสารเจือเท่ากับ $4.53 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ และ $1.65 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ตามลำดับ ต่อไปทำการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสเพื่อสร้างชั้นอิมิตเตอร์ที่ $2.57 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ จากนั้นทำการสร้างเกตออกไซด์และสุดท้ายทำการสร้างขั้วสัมผัสโลหะโดยเคลือบอะลูมิเนียมในเครื่องเคลือบสุญญากาศ แล้วกัดเป็นลวดลายส่วน อิมิตเตอร์,เกตและคอลเลคเตอร์

การทดลองและผลการทดลอง

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์กับแรงดันคอลเลคเตอร์-อิมิตเตอร์ ทำการคำนวณค่าความต้านทานในสภาวะนำกระแส (R_{on}) โดยอาศัยสมการที่ (5.2)

จากนั้นนำค่าที่ได้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานในสภาวะนำกระแสกับความกว้างของชั้น N-base ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 5.15 โดยจะแสดงถึงผลที่ได้จากการทดลองสร้าง IGBT เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองสร้างดีมอส



รูปที่ 5.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานในสภาวะนำกระแสกับค่าความกว้างของชั้น N-base

พิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานในสภาวะนำกระแสกับความกว้างของชั้น N-base ดังแสดงในรูปที่ 5.15 ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าความต้านทานในสภาวะนำกระแสของ IGBT จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความกว้างของชั้น N-base โดยจากผลการทดลองเมื่อเพิ่มความกว้างของชั้น N-base จาก 60 ไปถึง 250 μm ปรากฏว่าความต้านทานในสภาวะนำกระแสเพิ่มขึ้นถึง 2.29 เท่า ซึ่งแตกต่างจากความต้านทานในสภาวะนำกระแสของดีมอสซึ่งมีค่าคงที่ ทั้งนี้เนื่องจากความต้านทานในสภาวะนำกระแสของดีมอสจะขึ้นอยู่กับความกว้างและความยาวของช่องทางเดินกระแส เนื่องจากความต้านทานในสภาวะนำกระแสของดีมอสส่วนใหญ่เป็นผลของความต้านทานในส่วน N-base ซึ่งมีค่าคงที่ขึ้นกับชนิดของแผ่นผลึกฐานรอง แต่ใน IGBT ความต้านทานในสภาวะนำกระแสส่วนใหญ่ก็ยังเป็นความต้านทานในส่วน N-base เช่นกันแต่สามารถที่จะเปลี่ยนแปลงให้ลดลงได้ขึ้นอยู่กับปริมาณโฮลที่ถูกฉีดเข้าไปในชั้น N-base ดังนั้นเมื่อความกว้างของชั้น N-base มีค่าน้อย อัตราการขยายกระแสของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ P-N-P จะมีค่าสูงซึ่งจะทำให้มีปริมาณกระแสโฮลที่ถูกฉีดเข้าไปในชั้น N-base มีค่าสูงตามไปด้วย ทำให้ความต้านทานในส่วน N-base มีค่าลดลงมาก ส่งผลให้ความต้านทานในสภาวะนำกระแสของ IGBT มีค่าต่ำลงไปด้วย ในทางตรงกันข้าม เมื่อความกว้างของชั้น N-base มากขึ้น อัตราการขยายกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในเชิงพาณิชย์
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ P-N-P จึงมีค่าทำให้ปริมาณกระแสไหลที่ถูกฉีดเข้าไปในชั้น N-base มีค่าน้อยลงเช่นกัน ส่งผลให้ความต้านทานในสภาวะนำกระแสของ IGBT มีค่าสูงขึ้น เข้าใกล้ความต้านทานในสภาวะนำกระแสของคิมอส

5.3 การศึกษาปรากฏการณ์แลตซ์-ออฟในอุปกรณ์ IGBT

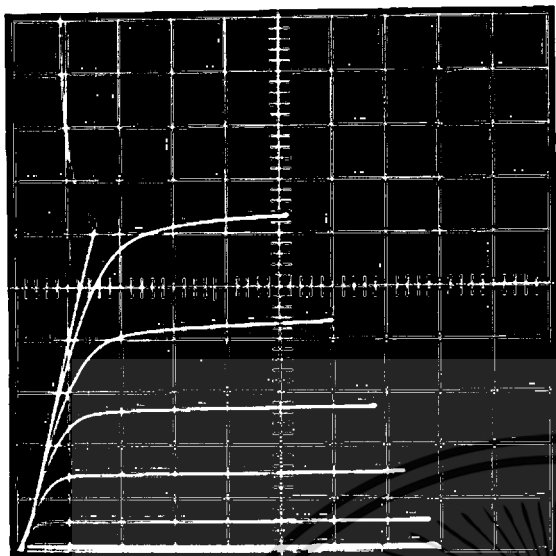
ปรากฏการณ์แลตซ์-ออฟเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากการเกิดโครงสร้างแฝงสี่ชั้นแบบทรินสเตอร์ขึ้นในโครงสร้าง IGBT ทำให้ไม่สามารถควบคุมการไหลของกระแสได้โดยการควบคุมแรงดันที่ขั้วเกต ดังนั้นในอุปกรณ์ IGBT จึงพยายามหลีกเลี่ยงการเกิดปรากฏการณ์แลตซ์-ออฟ ทั้งนี้ นอกจากจะทำให้ไม่สามารถควบคุมการไหลของกระแสแล้วยังทำให้อุปกรณ์เกิดความเสียหายได้

5.3.1 การศึกษาผลของความกว้างของชั้น N-base ต่อกระแสแลตซ์-ออฟใน IGBT

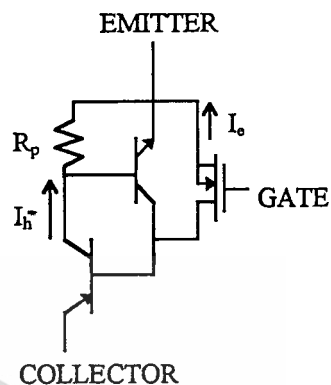
จากสมการที่ (2.19) จะเห็นได้ว่าตัวแปรหนึ่งที่มีผลโดยตรงต่อปริมาณกระแสที่เกิดแลตซ์-ออฟก็คืออัตราการขยายกระแสของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ P-N-P ที่แฝงอยู่ในโครงสร้าง IGBT หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ ปริมาณกระแสที่เกิดแลตซ์-ออฟจะขึ้นอยู่กับความกว้างของชั้น N-base ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 5.2 ดังนั้นจึงทำการทดลองเพื่อศึกษาผลของความกว้างของชั้น N-base ที่มีต่อปริมาณกระแสที่เกิดแลตซ์-ออฟใน IGBT ดังต่อไปนี้

การออกแบบและสร้าง

การออกแบบอุปกรณ์ IGBT เพื่อศึกษาผลของความกว้างของชั้น N-base ที่มีผลต่อปริมาณกระแสที่เกิดแลตซ์-ออฟสามารถทำได้เช่นเดียวกับการทดลองในหัวข้อที่ 5.2 คือทำการออกแบบสร้างอุปกรณ์ IGBT ที่มีความยาวและความกว้างของช่องทางเดินกระแสเท่ากับ 5 และ 4800 ไมครอน ตามลำดับ โดยทำการเปลี่ยนแปลงความกว้างของชั้น N-base ตั้งแต่ 60,80,100,120,150, 200 และ 250 μm ตามลำดับ



ก.)



ข.)

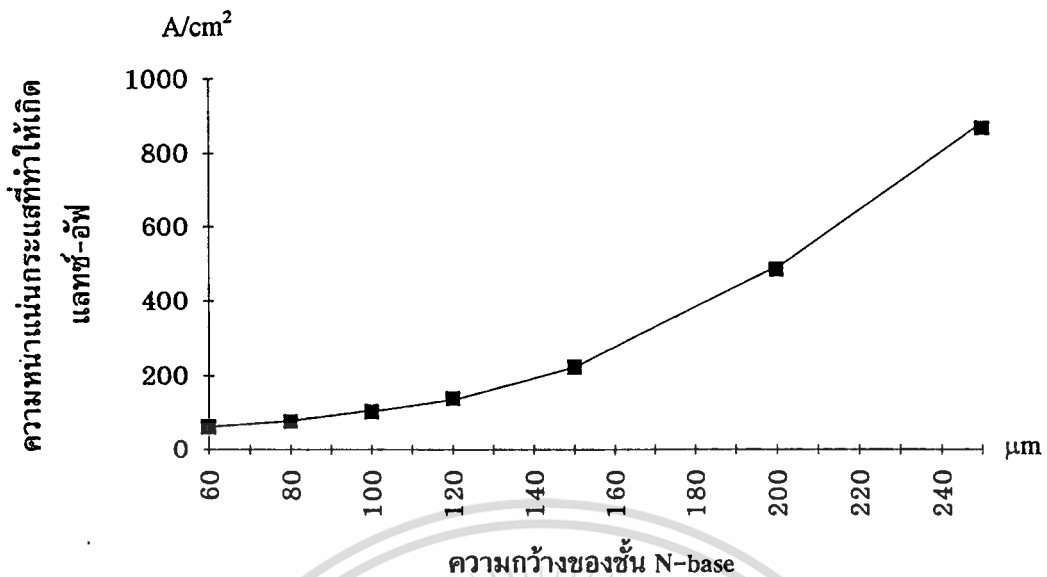
รูปที่ 5.16 ก.) ลักษณะกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I_C กับ V_{CE} ของ IGBT ขณะเกิดแลตซ์-ออฟ

ข.) วงจรสมมูลแสดงทิศทางการไหลของกระแสคอลเลกเตอร์ขณะเกิดแลตซ์-ออฟ

สำหรับกระบวนการสร้างสามารถทำได้โดยอาศัยกระบวนการสร้างมาตรฐานดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 4 โดยเลือกใช้แผ่นซิลิกอนเริ่มต้นชนิด N หนา $100 \mu\text{m}$ พิกัดความต้านทาน $8-12 \Omega\text{-cm}$. แล้วทำการแพร่สารเจือโบรอนเพื่อสร้างชั้น P⁺-collector และชั้น P-base ที่ความหนาแน่นอะตอมสารเจือเท่ากับ $4.53 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ และ $1.65 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ตามลำดับ จากนั้นแพร่สารเจือฟอสฟอรัสเพื่อสร้างชั้น N⁺-emitter ที่ $2.57 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ จากนั้นทำการสร้างเกตออกไซด์และขั้วสัมผัสโลหะ

การทดลองและผลการทดลอง

นำอุปกรณ์ IGBT ที่สร้างเสร็จสมบูรณ์มาต่อเข้ากับเครื่องวัดคุณสมบัติความเป็นทรานซิสเตอร์ โดยให้แรงดันไบอัสที่ขั้วคอลเลกเตอร์เทียบกับอิมิตเตอร์ (V_{CE}) เพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนกระทั่งเกิดปรากฏการณ์แลตซ์-ออฟดังแสดงในรูปที่ 5.16 จากนั้นนำค่าปริมาณกระแสที่เกิดแลตซ์-ออฟที่วัดได้ของอุปกรณ์ IGBT แต่ละตัวที่มีความกว้างแตกต่างกันมาเขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสที่เกิดแลตซ์-ออฟกับค่าความกว้างของชั้น N-base ดังแสดงในรูปที่ 5.17



รูปที่ 5.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสที่เกิดปรากฏการณ์แลตซ์-ออฟ กับค่าความกว้างของชั้น N-base

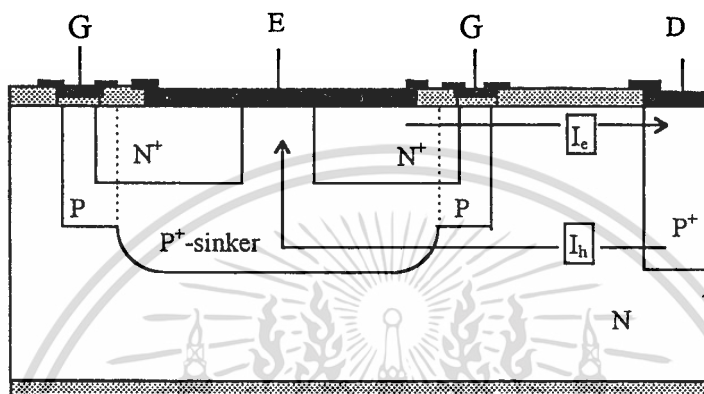
จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มความกว้างของชั้น N-base มากขึ้น ระดับความหนาแน่นกระแสที่เกิดแลตซ์-ออฟจะเพิ่มขึ้นด้วย ทั้งนี้เนื่องจาก เมื่อเพิ่มความกว้างของชั้น N-base มากขึ้นจะทำให้อัตราขยายกระแสของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ P-N-P มีค่าลดลง ทำให้ปริมาณประจุพาหะส่วนน้อยหรือโฮลที่ถูกฉีดโดยรอยต่อ P^+ -collector กับ N-base เข้าไปในชั้น N-base มีค่าลดลง ประจุพาหะส่วนน้อยที่ไหลผ่านชั้น P-base จึงลดลงตามไปด้วยทำให้แรงดันตกคร่อมชั้น P-base มีค่าต่ำลง ส่งผลให้มีระดับความหนาแน่นกระแสที่เกิดแลตซ์-ออฟสูงขึ้นดังจะเห็นได้จากผลการทดลอง

5.3.2 การศึกษาผลของชั้น P^+ -sinker ต่อกระแสแลตซ์-ออฟใน IGBT

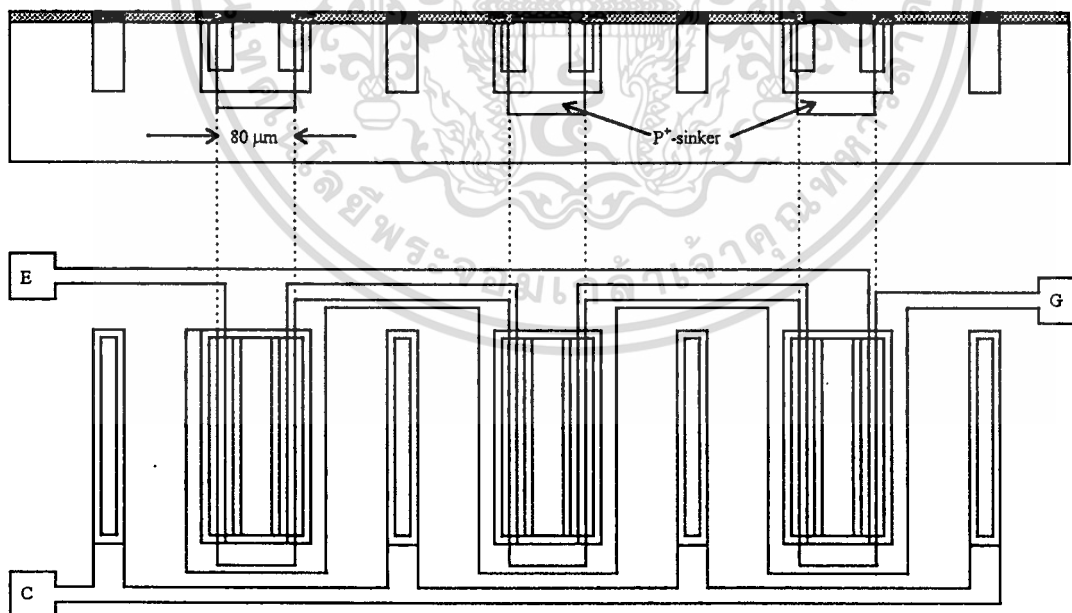
ความหนาแน่นอะตอมสารเจือในชั้น P-base เป็นตัวแปรสำคัญอย่างมากต่อปริมาณกระแสแลตซ์-ออฟ ทั้งนี้เนื่องจากความต้านทานในชั้น P-base จะแปรผกผันกับปริมาณกระแสแลตซ์-ออฟ อย่างไรก็ตามไม่เพียงแต่กระแสแลตซ์-ออฟเท่านั้นที่ขึ้นกับความต้านทานในชั้น P-base ยังมีค่าแรงดันขั้วเริ่มอีกตัวแปรหนึ่งที่ขึ้นอยู่กับความต้านทานหรือความหนาแน่นอะตอมสารเจือในชั้น P-base เช่นกัน ดังนั้นเพื่อรักษาระดับแรงดันให้ได้ตามต้องการและเพื่อเพิ่มระดับกระแสแลตซ์-ออฟใน IGBT จึงทำการทดลองใช้โครงสร้าง P-base 2 ชั้น โดยชั้นที่เพิ่มขึ้นเรียกว่า " P^+ -sinker" [7]

การออกแบบและสร้าง

ในการออกแบบโครงสร้าง P-base 2 ชั้น ในอุปกรณ์ IGBT สามารถได้โดยการออกแบบให้มีการเพิ่มการแพร่อะตอมสารเจือเพื่อสร้างชั้น P⁺-sinker บริเวณกึ่งกลางของชั้น P-base ดังแสดงในรูปภาพตัดขวางในรูปที่ 5.18 โดยมีความกว้างและความยาวของช่องทางเดินกระแสเท่ากับ 4,800 และ 5 μm ตามลำดับ ส่วนความกว้างของชั้น N-base กำหนดไว้ที่ 60 μm



รูปที่ 5.18 ภาพตัดขวางของอุปกรณ์ IGBT โครงสร้างที่มีชั้น P⁺-sinker



รูปที่ 5.19 ภาพตัดขวางและลวดลายด้านบนของอุปกรณ์ IGBT ที่มีโครงสร้าง P⁺-sinker

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งการสร้างอุปกรณ์ IGBT ที่มีโครงสร้าง P-base 2 ชั้นนี้สามารถทำได้โดยอาศัยกระบวนการสร้างมาตรฐานดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 4 โดยออกแบบให้มีการแพร่อะตอมสารเจือในส่วน P⁺-sinker พร้อมกันกับส่วน P⁺-collector เพื่อความสะดวกในการสร้างและทำการสร้างโดยใช้แผ่นผลึกซิลิกอนพื้นฐาน ระบายเชิงเดี่ยว ชนิด N ระบาย (100) พิกัดความต้านทาน 8-12 Ω-cm ทำการแพร่อะตอมสารเจือโบรอนเพื่อสร้างชั้น P⁺-collector และ P⁺-sinker ที่ความหนาแน่นอะตอมสารเจือเท่ากับ $4.53 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ และชั้น P-base ที่ $1.65 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ จากนั้นทำการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสเพื่อสร้างชั้น N⁺-emitter ที่ความหนาแน่นอะตอมสารเจือเท่ากับ $2.57 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ สุดท้ายทำการสร้างเกตออกไซด์และขั้วสัมผัสโลหะ

การทดลองและผลการทดลอง

นำอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นมาต่อเข้ากับเครื่องวัดคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์เพื่อศึกษาปริมาณกระแสที่เกิดปรากฏการณ์แลตซ์-ออฟและค่าแรงดันขั้วเริ่มของอุปกรณ์ โดยทำการวัดเปรียบเทียบอุปกรณ์ IGBT ที่มีโครงสร้าง P⁺-sinker กับอุปกรณ์ IGBT โครงสร้างปกติที่สร้างโดยเงื่อนไขเดียวกันทุกประการ ผลการทดลองที่ได้พบว่าอุปกรณ์ IGBT ที่มีโครงสร้าง P⁺-sinker จะมีปริมาณกระแสแลตซ์-ออฟที่ 85 mA หรือ 87.45 A/cm^2 โดยมีแรงดันขั้วเริ่มเท่ากับ 2.63 V. ส่วนอุปกรณ์ IGBT โครงสร้างปกติจะมีปริมาณกระแสแลตซ์-ออฟ 60 mA หรือ 61.73 A/cm^2 และมีแรงดันขั้วเริ่มเท่ากับ 2.60 V. ซึ่งจะเห็นได้ว่าอุปกรณ์ที่มีโครงสร้าง P⁺-sinker จะมีระดับกระแสแลตซ์-ออฟที่สูงกว่า โดยที่มีแรงดันขั้วเริ่มที่ใกล้เคียงกันทั้งนี้เนื่องจากชั้น P⁺-sinker จะลดความต้านทาน R_p ในชั้น P-base ทำให้ปริมาณกระแสโฮลที่ไหลผ่านบริเวณชั้น P-base ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของแรงดันตกคร่อมรอยต่อระหว่าง P-base กับ N⁺-emitter น้อยลงในขณะที่ที่บริเวณ P-base จะยังคงรักษาระดับของแรงดันเริ่มให้ได้ตามต้องการ

5.4 การศึกษาผลของ P⁺-guardring ต่อความสามารถในการทำงานของ IGBT

5.4.1 ผลของ P⁺-guardring ต่อความสามารถในการป้องกันกระแสรั่วไหล

ปัญหาการเกิดกระแสรั่วไหลในอุปกรณ์กำลังเป็นปัญหาหนึ่งที่มีความสำคัญมาก โดยเฉพาะอุปกรณ์กำลังที่มีโครงสร้างในแนวระนาบที่จะพัฒนาไปเป็นวงจรรวมกำลัง (power IC) ทั้งนี้เนื่องจากจากอุปกรณ์ที่มีโครงสร้างในแนวระนาบนั้นกระแสส่วนใหญ่จะไหลที่บริเวณผิวของอุปกรณ์ทำให้สามารถเกิดกระแสรั่วไหลได้ง่าย ทั้งนี้เนื่องจาก surface state ที่เกิดที่ผิวของอุปกรณ์ การแก้ไขการเกิดกระแสรั่วไหลอันเนื่องมาจาก surface state วิธีหนึ่งก็คือ การใช้ guardring กันทางเดินกระแสที่ผิวของอุปกรณ์ เพื่อกำหนดทิศทางกระแสไหลของกระแสในอุปกรณ์ให้ลึกลงไปจากผิวตามความลึกของ guardring เพื่อป้องกันการไหลของกระแสที่ผิวอันอาจจะเกิดจาก surface state แต่อย่างไร

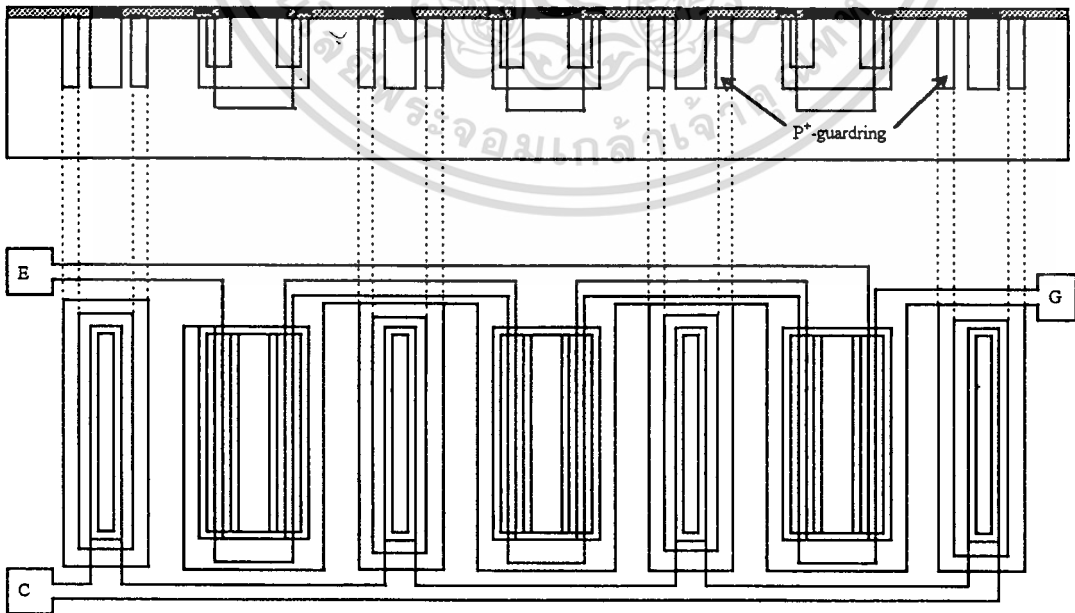
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก็ตามการสร้าง guardring อาจจะทำให้เกิดผลอย่างอื่นที่ไม่ต้องการตามมาด้วยเช่นกัน ดังที่จะได้กล่าวในหัวข้อต่อไป

การออกแบบและสร้าง

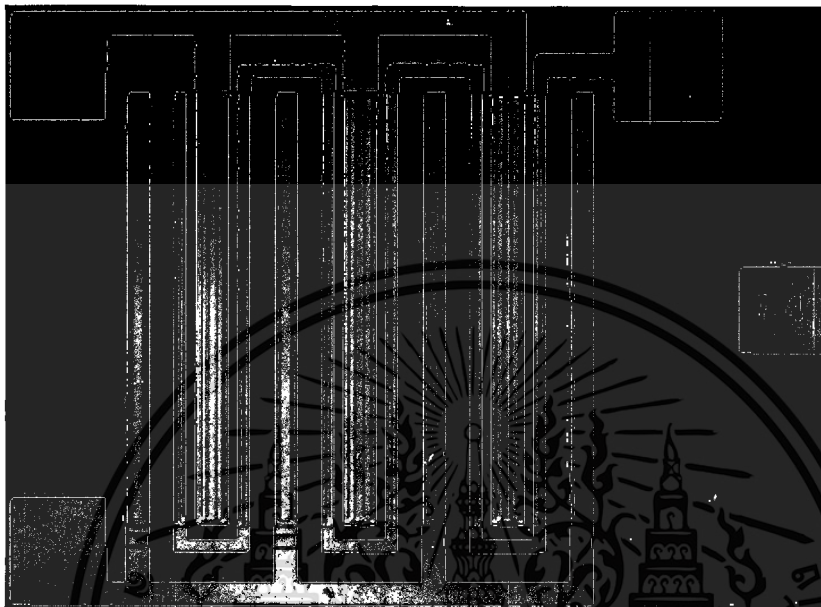
ในการออกแบบอุปกรณ์ IGBT เพื่อทดสอบผลของ P⁺-guardring ในโครงสร้างแนวระนาบในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการออกแบบ IGBT โครงสร้างในแนวระนาบที่มีความยาวและความกว้างของช่องทางเดินกระแสเท่ากับ 5 และ 4,800 μm ตามลำดับและมีความกว้างของชั้น N-base เท่ากับ 60 μm จากนั้นทำการออกแบบสร้าง P⁺-guardring โดยที่กึ่งกลางของ guardring จะอยู่กึ่งกลางของชั้น N-base และเปลี่ยนแปลงความกว้างของ P⁺-guardring ตั้งแต่ 6,10,16 และ 20 μm ตามลำดับ

กระบวนการสร้าง IGBT เพื่อพิจารณาผลของ P⁺-guardring สามารถทำได้โดยอาศัยกระบวนการสร้าง IGBT มาตรฐาน ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 4 โดยใช้แผ่นผลึกซิลิกอนเริ่มต้นชนิดระนาบเชิงเดี่ยว N ระนาบ (100) พิกัดความต้านทาน 8-12 $\Omega\text{-cm}$ โดยแพร่สารเจือโบรอนในส่วน P⁺-collector และ P⁺-guardring เท่ากับ $4.53 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ส่วน P-base เท่ากับ $1.65 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ และแพร่สารเจือฟอสฟอรัสเป็นส่วน N⁻-emitter เท่ากับ $2.57 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ จากนั้นทำการสร้างเกตออกไซด์และขั้วสัมผัสโลหะ ดังตัวอย่างภาพถ่ายด้านบนของอุปกรณ์ IGBT ในแนวระนาบที่มี P⁺-guardring ดังแสดงในรูปที่ 5.21



รูปที่ 5.20 ภาพตัดขวางและลวดลายด้านบนของอุปกรณ์ IGBT ที่มีโครงสร้าง P⁺-guardring

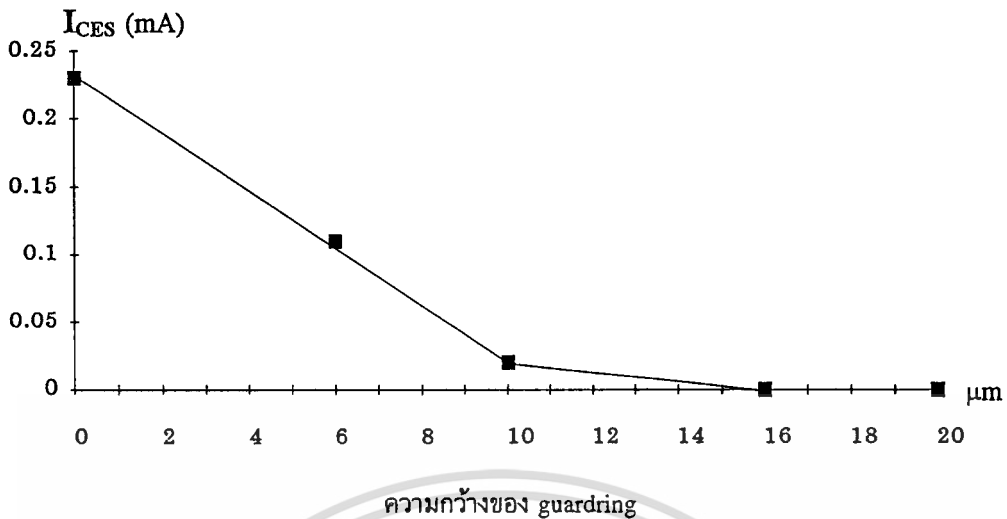
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.21 ภาพถ่ายด้านบนของอุปกรณ์ IGBT ที่มีโครงสร้างในแนวระนาบและมีความกว้างของ P⁺-guardring เท่ากับ 20 μm

การทดลองและผลการทดลอง

นำ IGBT ที่สร้างเสร็จแล้วมาวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์กับแรงดันคอลเลคเตอร์-อิมิตเตอร์ ที่แรงดันเกตเท่ากับ 0 V. เพื่อทดสอบกระแสที่รั่วไหลในโครงสร้าง IGBT โดยใช้เครื่องวัดคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์ ได้ผลการทดลองดังแสดงในกราฟรูปที่ 5.22



รูปที่ 5.22 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกระแสรั่วไหลในโครงสร้าง IGBT กับความกว้างของ P^+ -guardring

จากผลการทดลองในรูปที่ 5.19 จะเห็นได้ว่าโครงสร้าง P^+ -guardring สามารถลดปริมาณกระแสรั่วไหลใน IGBT โครงสร้างในแนวระนาบได้แต่ต้องมีความกว้างที่เหมาะสม โดยจากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าที่ความกว้างของ P^+ -guardring เท่ากับ $6 \mu\text{m}$ สามารถที่จะป้องกันกระแสรั่วไหลที่ผิวได้เพียงบางส่วนและกระแสรั่วไหลจะลดลงเมื่อเพิ่มความกว้างของ P^+ -guardring จนกระทั่งมีความกว้างของ P^+ -guardring เท่ากับ $16 \mu\text{m}$ ขึ้นไปจะเห็นได้ว่าสามารถที่จะป้องกันกระแสรั่วไหลที่ผิวได้ทั้งหมด

5.4.2 ผลของ P^+ -guardring ต่อความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์กับแรงดันคอลเลคเตอร์-อิมิตเตอร์

จากการพิจารณาการแก้ปัญหากระแสรั่วไหลที่ผิวใน IGBT โครงสร้างแนวระนาบดังกล่าว ทดลองในหัวข้อที่ 5.4.1 พบว่าผลกระทบที่ตามมาจากการใช้โครงสร้าง P^+ -guardring จะเกิดกับความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์กับแรงดันคอลเลคเตอร์-อิมิตเตอร์อย่างแน่นอนทั้งนี้เนื่องจากส่วนของ P^+ -guardring สร้างขึ้นในบริเวณ N-base ซึ่งเป็นบริเวณที่มีผลอย่างมากต่ออัตราการขยายกระแสของโครงสร้างแฝงไปโพลาไรทรานซิสเตอร์ P-N-P (α_{PNP}) ในโครงสร้าง IGBT

การออกแบบและสร้าง

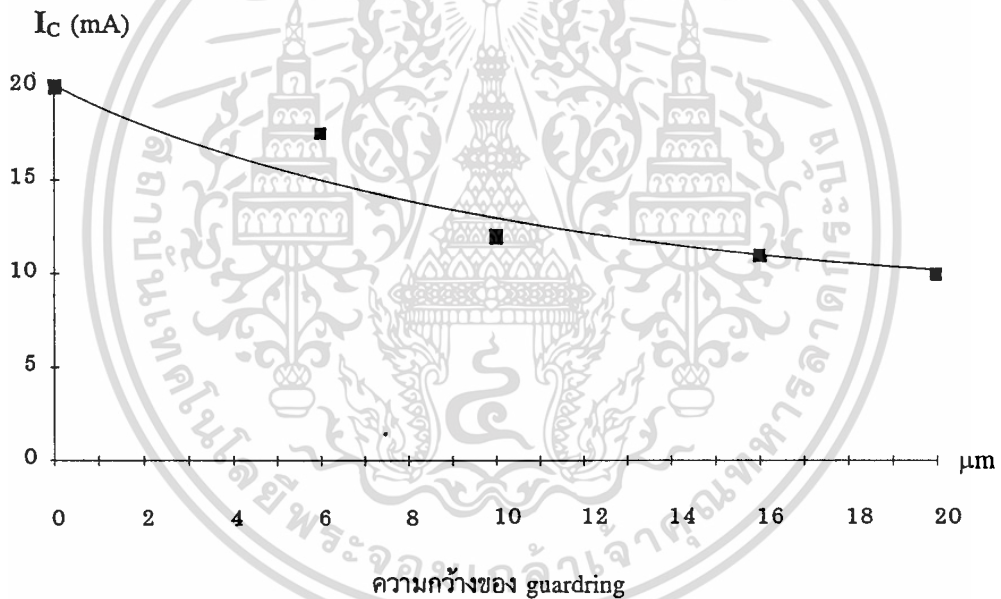
เงื่อนไขในการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ IGBT โครงสร้างในแนวระนาบเพื่อศึกษาผลกระทบของโครงสร้าง P^+ -guardring ต่อความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์กับแรงดันคอลเลคเตอร์-อิมิตเตอร์

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

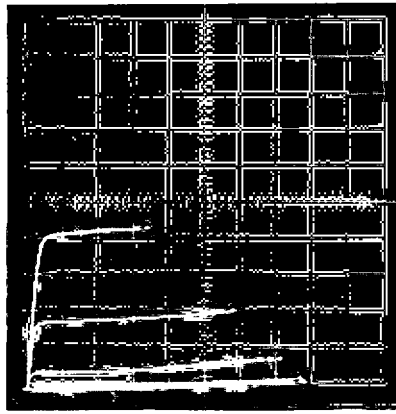
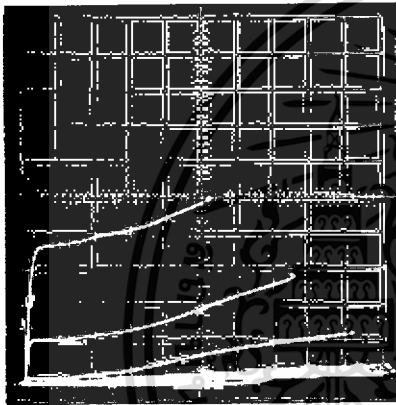
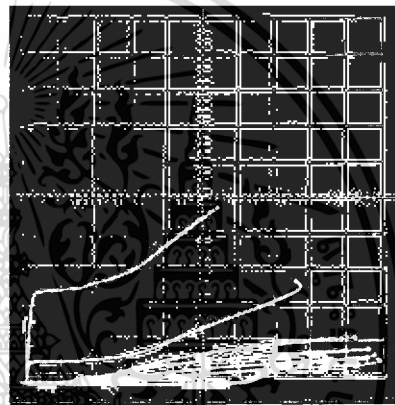
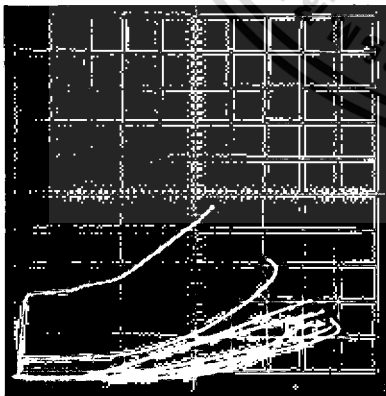
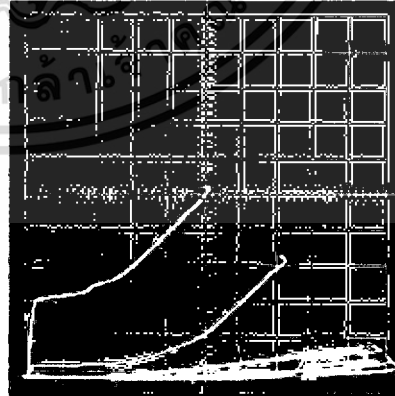
เตอร์-อิมิตเตอร์นั้นจะใช้เงื่อนไขเดียวกันกับที่สร้างเพื่อศึกษาความสามารถในการป้องกันกระแสรั่วไหลในหัวข้อที่ 5.4.1 ทุกอย่าง ทั้งนี้เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบข้อดี ข้อเสียของโครงสร้าง P⁺-guardring ได้อย่างชัดเจน

การทดลองและผลการทดลอง

นำอุปกรณ์ IGBT ที่สร้างเสร็จแล้วมาวัดคุณสมบัติความเป็นทรานซิสเตอร์เพื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลกเตอร์กับแรงดันคอลเลกเตอร์-อิมิตเตอร์ โดยผลของความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการนำกระแสของอุปกรณ์ IGBT กับค่าความกว้างของ P⁺-guardring แสดงดังกราฟรูปที่ 5.23 และลักษณะของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลกเตอร์กับแรงดันคอลเลกเตอร์-อิมิตเตอร์ของ IGBT ที่มีโครงสร้าง P⁺-guardring ความหนาต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 5.24 ก.) ถึง จ.)



รูปที่ 5.23 กราฟสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการนำกระแสของอุปกรณ์ IGBT โครงสร้างแนวระนาบกับความกว้างของ P⁺-guardring ที่ $V_G = 7$ V. และ $V_{CE} = 10$ V.

(ก.) P^+ -guardring = 0 μm (ข.) P^+ -guardring = 6 μm (ค.) P^+ -guardring = 10 μm (ง.) P^+ -guardring = 16 μm (จ.) P^+ -guardring = 20 μm

รูปที่ 5.24 ลักษณะของกราฟคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลกเตอร์กับแรงดันคอลเลกเตอร์-อิมิตเตอร์ ที่ความกว้างของ P^+ -guardring ค่าต่างๆ

(5 mA/Div., 5V/Div.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้เพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟรูปที่ 5.23 จะเห็นได้ว่าที่ความกว้างของชั้น P⁺-guardring มากขึ้นความสามารถในการนำกระแสของอุปกรณ์ IGBT จะลดลงทั้งนี้เนื่องจากในโครงสร้างแนวระนาบกระแสส่วนใหญ่จะไหลบริเวณผิวของอุปกรณ์ ดังนั้นการสร้าง P⁺-guardring ก็นจึงเป็นการเปลี่ยนทิศทางการไหลของกระแสจากทิศทางการไหลปกติทำให้ระยะทางการเคลื่อนที่ของพาหะนำกระแสมากขึ้น ดังนั้นโอกาสที่ประจุพาหะจะรวมตัวกับประจุอิสระจึงมีมากขึ้นความสามารถในการนำกระแสของอุปกรณ์จึงลดลง

เมื่อพิจารณาจากกราฟที่แสดงดังรูปถ่ายในรูปที่ 5.24 ก.) ถึง จ.) จะเห็นลักษณะการเพิ่มขึ้นของกระแสในช่วงอิมิตัวอย่างรวดเร็วผิดปกติ โดยลักษณะการเพิ่มขึ้นของกระแสอิมิตัวในช่วงแรกๆจะค่อยๆเพิ่มและเมื่อถึงจุดๆหนึ่งจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและยังสามารถสังเกตเห็นได้อีกว่าที่ความกว้างของ P⁺-guardring มากขึ้น การเพิ่มขึ้นของกระแสคอลเลคเตอร์ในสภาวะอิมิตัวจะยิ่งเกิดขึ้นเร็วยิ่งขึ้น ซึ่งปรากฏการณ์ทั้งหมดที่กล่าวมาสามารถที่จะอธิบายได้โดยอาศัยสมการที่ (5.4), (5.5) และจากแบบจำลองในรูปที่ 5.25 ก.) และ ข.) ดังที่จะได้กล่าวถึงต่อจากนี้

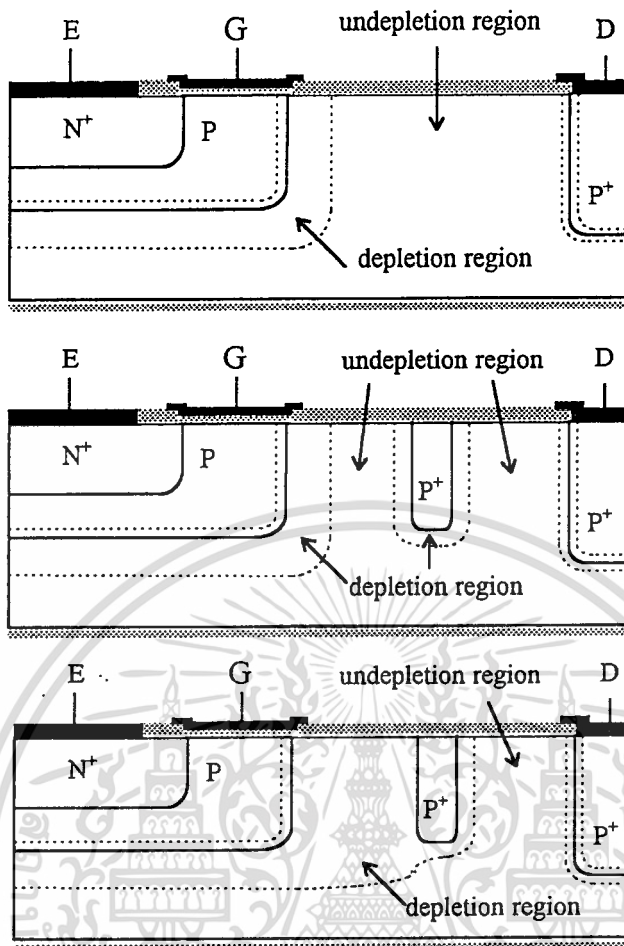
พิจารณาในส่วนของกระแสอิมิตัวที่ค่อยๆเพิ่มเป็นอันดับแรก สำหรับการค่อยๆเพิ่มขึ้นของกระแสคอลเลคเตอร์ในสภาวะอิมิตัวของ IGBT นั้นถือว่าเป็นเหตุการณ์ปกติ ทั้งนี้สามารถอธิบายได้โดยอาศัยสมการ

$$\alpha_{\text{PNP}} = \alpha_T = \frac{1}{\cosh\left(\frac{W_N}{L_a}\right)} \quad (5.4)$$

โดยที่ความกว้างของบริเวณไม่ปลอดประจุพาหะในชั้น N-base (W_N) สามารถหาได้จากสมการ

$$W_N = 2d - \sqrt{\frac{2 \epsilon_s V_c}{qN_D}} \quad (5.5)$$

ซึ่งจากสมการที่ (5.4) ,(5.5) และรูปที่ 5.25 (ข.) จะเห็นได้ว่าเมื่อแรงดันที่คอลเลคเตอร์ V_{CE} เพิ่มขึ้นบริเวณปลอดประจุพาหะจะขยายกว้างขึ้นทำให้ค่าความกว้างของบริเวณไม่ปลอดประจุพาหะในชั้น N-base จึงมีค่าลดลง ส่งผลให้อัตราการขยายกระแสของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ P-N-P มีค่าสูงขึ้น ปริมาณกระแสโวล I_h ที่ถูกฉีดเข้าไปในชั้น N-base จะเพิ่มขึ้นทำให้สังเกตเห็นการค่อยๆเพิ่มขึ้นของกระแสในสภาวะอิมิตัว



รูปที่ 5.25 ลักษณะการขยายตัวของบริเวณปลอดประจุพาหะในโครงสร้าง IGBT

- ก.) ไม่มี guardring ข.) มี guardring แต่แรงดัน V_{CE} ต่ำ
ค.) มี guardring แต่แรงดัน V_{CE} สูง

และเมื่อพิจารณาในจุดที่กระแสในตัวเริ่มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว สามารถอธิบายได้จากจุด B ในแบบจำลองในรูปที่ 5.25 ค.) โดยจะเห็นได้ว่าเมื่อรอยต่อกรณีสที่แรงดันที่คอลเลกเตอร์ V_{CE} เพิ่มมากขึ้น ทำให้บริเวณปลอดประจุพาหะขยายกว้างขึ้นไปอีกจนถึงส่วนของ P^+ -guardring ทำให้เกิดการพันซ์ทรูระหว่าง P^+ -guardring กับรอยต่อ P-base-N-base ซึ่งจะทำให้บริเวณปลอดประจุพาหะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้บริเวณไม่ปลอดประจุพาหะในชั้น N-base ลดลงอย่างรวดเร็วด้วยเช่นกัน อัตราการขยายกระแสของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ P-N-P จึงมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้สังเกตเห็นการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของกระแสคอลเลกเตอร์ในสภาวะอิมิตัว

ในเหตุผลเดียวกับที่กล่าวมาข้างต้น ในกรณีที่ P^+ -guardring กว้างมากการที่จะเกิดพันซ์ทรูระหว่าง P^+ -guardring กับรอยต่อ P-base-N-base สามารถเกิดขึ้นได้ที่ V_{CE} ค่าต่ำกว่า ทั้งนี้เนื่องจากระยะห่างระหว่างขอบของ P^+ -guardring กับรอยต่อ P-base-N-base มีค่าน้อยลงดังจะเห็น

ได้จากผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

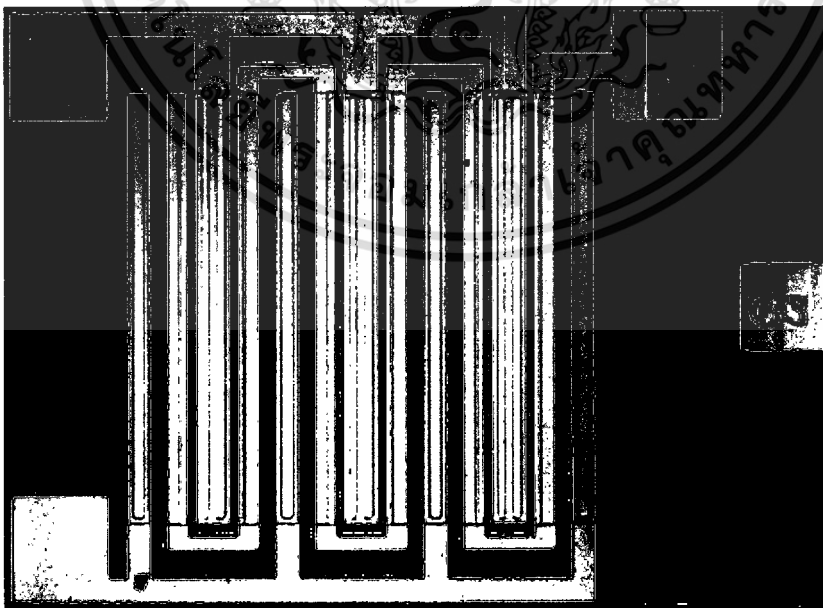
5.5 การศึกษาผลของความกว้างของเกตออกไซด์ต่อความสามารถในการนำกระแสของ IGBT

ความกว้างของเกตออกไซด์เป็นตัวแปรหนึ่งที่มีผลต่อความสามารถในการนำกระแสของ IGBT ซึ่งความกว้างของเกตออกไซด์ที่เหมาะสมจะทำให้ความสามารถของอุปกรณ์เพิ่มขึ้น จึงทำการศึกษาหาความกว้างของเกตออกไซด์ที่เหมาะสมที่สุดในการสร้างอุปกรณ์ IGBT โครงสร้างในแนวระนาบ

การออกแบบและสร้าง

ในการออกแบบอุปกรณ์ IGBT เพื่อศึกษาความกว้างของเกตออกไซด์ที่เหมาะสมในโครงสร้าง IGBT ทำได้โดยการออกแบบสร้างอุปกรณ์ IGBT ในแนวระนาบที่มีความยาวและความกว้างของช่องทางเดินกระแสเท่ากับ 5 และ 4,800 μm ตามลำดับและความกว้างของชั้น N-base เท่ากับ 60 μm โดยมีความกว้างของเกตออกไซด์เท่ากับ 10,15,20,30,40 และ 50 μm ตามลำดับ

สำหรับกระบวนการสร้างอุปกรณ์ IGBT เพื่อศึกษาระยะความกว้างของเกตออกไซด์ที่เหมาะสมที่สุดในโครงสร้าง IGBT สามารถทำได้โดยอาศัยขบวนการสร้างอุปกรณ์ IGBT มาตรฐานดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 4 โดยใช้แผ่นสลิคซิลิกอนเริ่มต้นชนิดระนาบเชิงเดี่ยวชนิด N ระนาบ (100) พิกัดความต้านทาน 8-12 $\Omega\text{-cm}^{-3}$ โดยแพร่สารเจือโบรอนเป็นส่วน P⁺-collector และ P-base เท่ากับ $4.53 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ และ $1.65 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ แล้วทำการแพร่อะตอมสารเจือฟอสฟอรัสเพื่อสร้างชั้น N⁺-emitter จากนั้นสร้างเกตออกไซด์และขั้วสัมผัสโลหะ ดังตัวอย่างที่แสดงดังรูปที่ 5.27



รูปที่ 5.26 ภาพถ่ายด้านบนของอุปกรณ์ IGBT ที่มี $L = 5 \mu\text{m}$, $W=4,800 \mu\text{m}$,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 $L_{\text{N-base}} = 60 \mu\text{m}$ และ $L_{\text{gate}} = 20 \mu\text{m}$
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองและผลการทดลอง

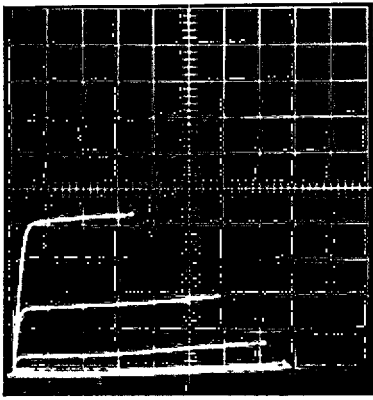
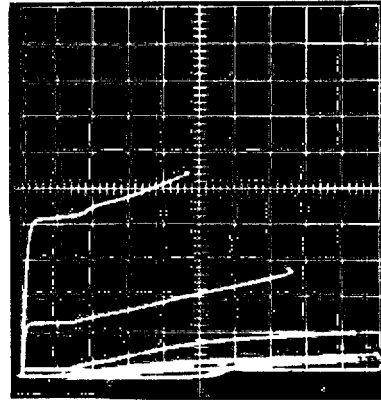
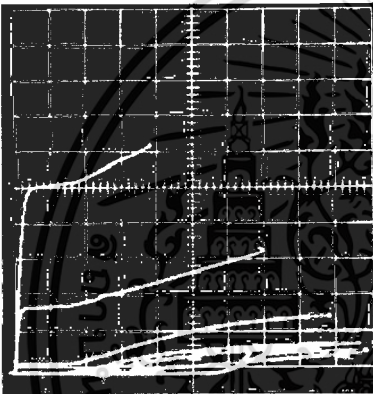
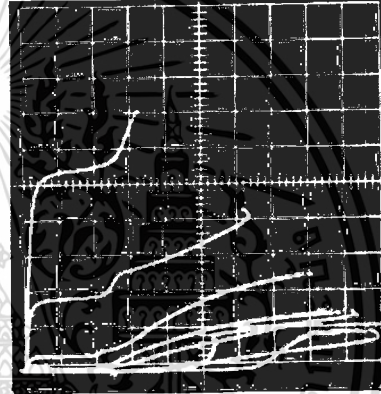
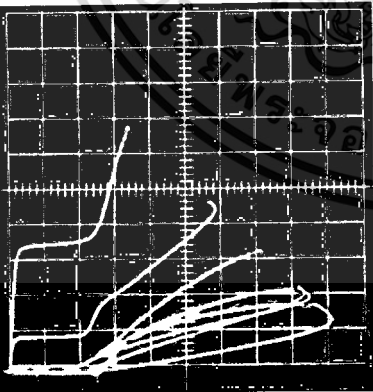
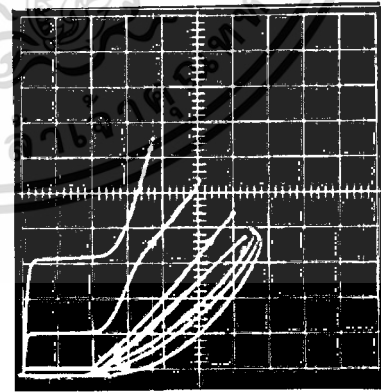
นำอุปกรณ์ IGBT ที่สร้างขึ้นมาต่อเข้ากับเครื่องวัดคุณสมบัติความเป็นทรานซิสเตอร์ เพื่อดูผลของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์กับแรงดันคอลเลคเตอร์-อิมิตเตอร์ได้ผลการทดลองดังกราฟรูปที่ 5.27 และ 5.28



ความกว้างของเกตออกไซด์ที่ซ้อนทับกับบริเวณ N-base

รูปที่ 5.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ในช่วงอิมิตต์กับความกว้างของเกตออกไซด์ที่ $V_G = 7 \text{ V}$. และ $V_{CE} = 10 \text{ V}$.

จากผลการทดลองในรูปที่ 5.27 พบว่า เมื่อเราเพิ่มความกว้างของเกตออกไซด์มากขึ้นความสามารถในการนำกระแสของอุปกรณ์ IGBT จะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งระยะความกว้างของเกตออกไซด์มีค่าเท่ากับ $30 \mu\text{m}$ ความสามารถในการนำกระแสของอุปกรณ์มีค่าสูงที่สุด แต่เมื่อพิจารณาประกอบกับผลการทดลองในรูปที่ 5.28 ซึ่งจะเห็นได้ว่ายิ่งเพิ่มความกว้างของเกตออกไซด์มากขึ้นการเพิ่มขึ้นของกระแสคอลเลคเตอร์ในสภาวะอิมิตต์ก็ยิ่งเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการในระหว่างการทำงานของอุปกรณ์เนื่องจากไม่สามารถควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ได้อย่างสมบูรณ์ทั้งนี้เนื่องจากเกตออกไซด์ที่ยื่นเข้าไปในชั้น P-base จะเหนี่ยวนำให้ประจุพาหะมารวมกันที่ผิวของชั้น N-base ได้ส่วนเกตทำให้ความต้านทานในบริเวณดังกล่าวมีค่าลดลง ส่งผลให้กระแสสามารถไหลผ่านได้มากขึ้นกระแสคอลเลคเตอร์จึงมีค่าเพิ่มขึ้นและเมื่อเพิ่มความกว้างของเกตออกไซด์ออกไปบริเวณที่มีความต้านทานต่ำก็จะขยายตามไปด้วยทำให้ปริมาณกระแสคอลเลคเตอร์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงอิมิตต์

(ก.) $L_{\text{gate}} = 10 \mu\text{m}$ (ข.) $L_{\text{gate}} = 15 \mu\text{m}$ (ค.) $L_{\text{gate}} = 20 \mu\text{m}$ (ง.) $L_{\text{gate}} = 30 \mu\text{m}$ (จ.) $L_{\text{gate}} = 40 \mu\text{m}$ (ฉ.) $L_{\text{gate}} = 50 \mu\text{m}$

รูปที่ 5.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์กับแรงดันคอลเลคเตอร์-อิมิตเตอร์ของอุปกรณ์ IGBT ที่มี $L = 5 \mu\text{m}$, $W = 4,800 \mu\text{m}$ และ $L_{\text{N-base}} = 60 \mu\text{m}$ โดยมีความกว้างของของเกทคือ ก.) $10 \mu\text{m}$ ข.) $15 \mu\text{m}$, ค.) $20 \mu\text{m}$, ง.) $30 \mu\text{m}$ จ.) $40 \mu\text{m}$ และ ฉ.) $50 \mu\text{m}$

(5 mA/Div. , 5 V/Div)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.6 การศึกษาความเร็วในการสวิตช์ของอุปกรณ์ IGBT

IGBT เป็นอุปกรณ์ที่มีความเร็วในการสวิตช์ซึ่งต่ำ ทั้งนี้เป็นผลมาจากการค่อยๆลดลงของกระแสคอลเลกเตอร์หลังจากตัดแรงดันไบอัสที่ขั้วเกท ซึ่งทำให้เวลาช่วงขอบขาของกราฟรูปคลื่นของกระแสคอลเลกเตอร์มีค่ามาก เนื่องจากประจุพาหะส่วนน้อยจะไม่หมดลงทันทีหลังจากตัดแรงดันที่ขั้วเกทเหมือนกับประจุพาหะส่วนมากหรืออิเล็กตรอน แต่ประจุพาหะส่วนน้อยจะลดลงได้โดยการเกิดการรวมตัวเท่านั้น ทำให้เป็นข้อเสียเปรียบของอุปกรณ์ IGBT สำหรับแนวทางการลดช่วงเวลาตัดกระแสของ IGBT สามารถทำได้โดยการลดช่วงอายุของประจุพาหะส่วนน้อยในชั้น N-base โดยการสร้างจุดศูนย์กลางการรวมตัวขึ้นในชั้น N-base ซึ่งโดยทั่วไปสามารถทำได้สองวิธีคือ การแพร่อะตอมสารเจืออย่างเช่น ทองคำ (Au) เข้าไปเพื่อเปลี่ยนแปลงสภาพโครงสร้างของซิลิกอนในชั้น N-base แต่วิธีนี้ไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากทำให้เกิดความสกปรกและยังควบคุมความลึกและปริมาณอะตอมทองคำได้ยาก ซึ่งจะมีปัญหามากกับอุปกรณ์ที่มีการแพร่อะตอมสารเจือ 2 ชั้นอย่างเช่น DMOS หรือ IGBT ส่วนวิธีที่สองเป็นการ bombard ชั้นซิลิกอนด้วยอนุภาคที่มีพลังงานสูง ซึ่งจะก่อให้เกิดความเสียหายกับผลึกทำให้โครงสร้างของซิลิกอนในชั้น N-base เปลี่ยนไป ซึ่งเป็นวิธีที่ดีและสะอาดมากกว่าแต่ต้องใช้ขบวนการที่ยุ่งยากและมีค่าใช้จ่ายสูงมากเช่นกัน อย่างไรก็ตามปรากฏการณ์ที่พบเห็นได้ง่ายทำให้ช่วงเวลาตัดกระแสของ IGBT ลดลงก็คือการเพิ่มแรงดันไบอัสที่ขั้วคอลเลกเตอร์ ซึ่งรายละเอียดและผลการทดลองจะได้กล่าวดังต่อไปนี้

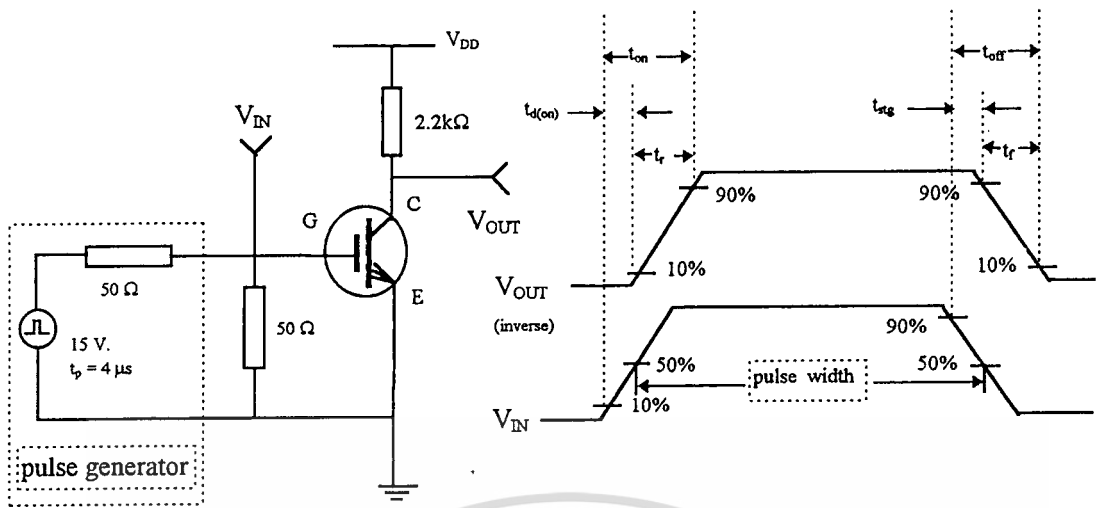
การออกแบบและสร้าง

ในการออกแบบสร้างอุปกรณ์ IGBT เพื่อศึกษาการตอบสนองความถี่สามารถได้เช่นเดียวกับขบวนการสร้างปกติที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 โดยเลือกให้มีความกว้างความยาวของช่องทางเดินกระแสเท่ากับ $4,800 \mu\text{m}$ และ $5 \mu\text{m}$ ตามลำดับ และเลือกใช้แผ่นผลึกซิลิกอนเริ่มต้น ระบายเชิงเดี่ยว ชนิด N ระบาย (100) พิกัดความต้านทาน $8-12 \Omega\text{-cm}$ ทำการแพร่อะตอมสารเจือโบรอน ในชั้น P^+ -collector = $4.53 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ และชั้น P -base = $1.65 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ แล้วทำการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสเพื่อสร้างชั้น N^+ -emitter = $2.57 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ จากนั้นสร้างเกตออกไซด์และขั้วสัมผัสโลหะ

การทดลองและผลการทดลอง

หลังจากทดสอบคุณสมบัติความเป็นทรานซิสเตอร์ของอุปกรณ์ เพื่อพิสูจน์ว่าอุปกรณ์ตัวที่สนใจสามารถทำงานได้จริงตามที่ต้องการแล้ว นำอุปกรณ์ดังกล่าวมาวัดการตอบสนองสัญญาณไฟฟ้ารูปคลื่นสี่เหลี่ยมคางหมูแสดงในรูปที่ 5.29 (ข.) โดยใช้วงจรรูปที่ 5.29 (ก.) เพื่อหาค่า t_r , t_f , $t_{d(on)}$ และ t_{sg} ผลการทดลองที่ได้แสดงดังตารางที่ 5.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

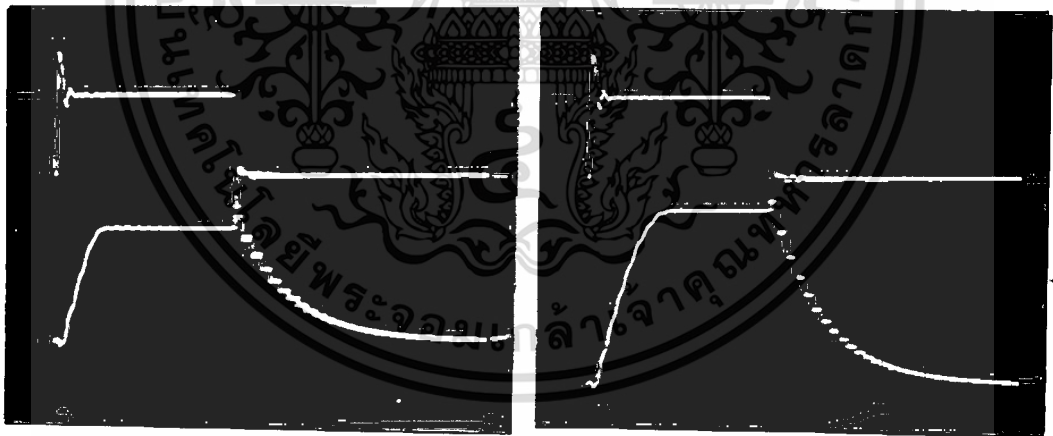


(ก.)

(ข.)

รูปที่ 5.29 (ก.) วงจรวัดการตอบสนองสัญญาณไฟฟ้ารูปสี่เหลี่ยม

(ข.) สัญญาณไฟฟ้ารูปสี่เหลี่ยมที่ใช้วัดค่า t_r , t_f , $t_{d(on)}$, t_{stg}



(ก.)

(ข.)

Ver : 5 V./div.

Ver : 5 V./div.

Hor : 0.1 µs/div.

Hor : 0.1 µs/div.

รูปที่ 5.30 สัญญาณ Input และ Output (inverse) ของอุปกรณ์ IGBT ที่วัดโดย

(ก.) $V_{CE} = +10$ V. (ข.) $V_{CE} = +15$ V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 แสดงผลของความเร็วในการสวิตช์ของอุปกรณ์ IGBT

พารามิเตอร์	แรงดันที่ขั้วคอลเลกเตอร์		หน่วย
	+ 10 V.	+ 15 V.	
W	4800	4800	μm
L	5	5	μm
ϵ_{msat}	28	28	$\text{m}\Omega^{-1}$
t_f	0.07	0.10	μs
t_r	0.28	0.24	μs
$t_{d(\text{on})}$	0.08	0.11	μs
t_{stg}	0.30	0.26	μs

*หมายเหตุ: สัญญาณ Input duty cycle = 2 % และความกว้างของพัลส์ (pulse width) = 0.4 μs

จากผลการทดลองเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มแรงดันที่ขั้วคอลเลกเตอร์จาก +10 V ไปเป็น +15 V จะทำให้ช่วงเวลาตัดกระแสลดลง กล่าวคือ t_f จะลดลงจาก 0.28 μs ไปเป็น 0.24 μs หรือลดลง 14.28 % ทั้งนี้จากสมการที่ (5.4) และ (5.5) ถึงแม้ว่าเมื่อเพิ่มแรงดัน V_{CE} จะทำให้อัตราการขยายกระแสของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ P-N-P เพิ่มขึ้นแต่ก็เพิ่มเพียงเล็กน้อย เนื่องจากรอยต่อ P^+ -collector กับ N-base อยู่ในสภาวะถูกไบอัสไปหน้าทำให้ความกว้างของบริเวณปลอดประจุพาหะรอบรอยต่อนี้มีค่าน้อยมากจึงมีผลต่ออัตราการขยายกระแสของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ P-N-P น้อยมาก แต่สิ่งสำคัญเมื่อมีการเพิ่ม V_{CE} ก็คือจะทำให้ปริมาณประจุพาหะส่วนมากหรืออิเล็กตรอนที่ไหลในช่องทางเดินกระแสของส่วนที่เป็นมอสเฟตเพิ่มมากขึ้นทำให้แอมพลิจูดของสัญญาณขาออกสูงขึ้น ซึ่งเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2.8 และ 5.29 ข) แล้วจะเห็นได้ว่าช่วงเวลา t_f คือช่วงเวลาจาก 90% จนถึง 10% ของความสูงของสัญญาณขาออกในช่วงขอบขาลงจะมีค่าลดลงจึงทำให้ความเร็วในการสวิตช์ของ IGBT สูงขึ้นตามไปด้วย

5.7 การศึกษาโครงสร้างแบบไม่สมมาตรของ IGBT (Asymmetrical IGBT)

5.7.1 การศึกษาแรงดันพังทลายของโครงสร้างแบบไม่สมมาตร

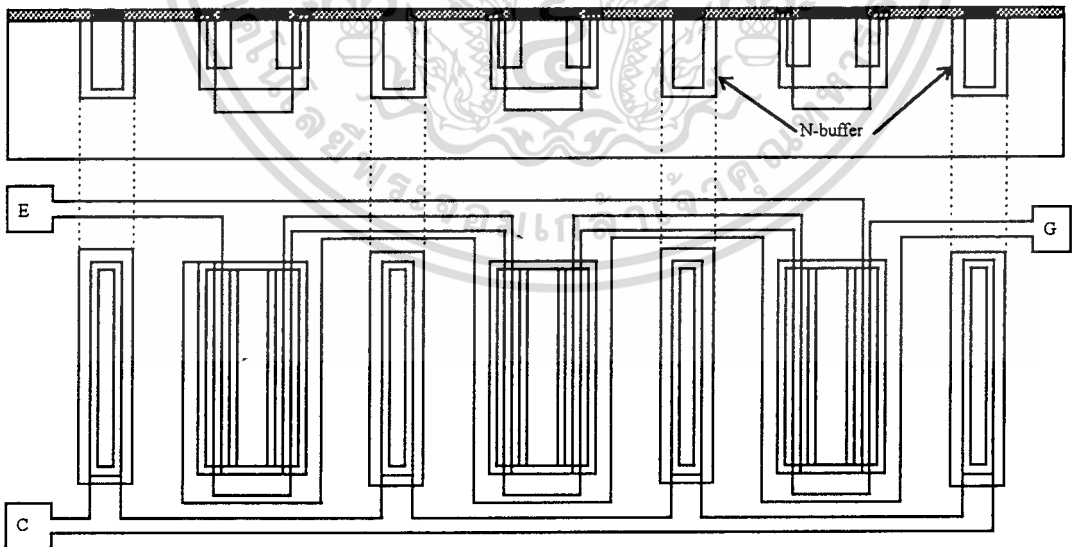
ใน IGBT โครงสร้างแบบสมมาตร (symmetrical IGBT) ความสามารถในการปิดกั้นไปหน้าของอุปกรณ์จะเท่ากับความสามารถในการปิดกั้นย้อนกลับ ซึ่งเหมาะสำหรับการใช้งานในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ แต่สำหรับงานที่ใช้กับวงจรไฟฟ้ากระแสตรงแล้วความสามารถในการปิดกั้นย้อนกลับแทบจะไม่มีค่าเป็นเลข ดังนั้นในการพัฒนาอุปกรณ์ IGBT ที่จะใช้กับวงจรไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสนั้นมุ่งที่จะพัฒนาให้อุปกรณ์มีความสามารถในการปิดกั้นไปหน้าสูงโดยไม่คำนึงถึงความสามารถในการปิดกั้นย้อนกลับ ซึ่งวิธีหนึ่งที่จะทำให้อุปกรณ์มีความสามารถในการปิดกั้นไปหน้าสูงก็คือการใช้โครงสร้างแบบไม่สมมาตร ดังที่จะกล่าวในการทดลองต่อไป

การออกแบบและสร้าง

ในการออกแบบอุปกรณ์ IGBT โครงสร้างแบบไม่สมมาตรนั้นสามารถทำได้โดยการสร้างส่วน N-base ให้มี 2 ชั้น โดยชั้นแรกจะมีลักษณะเช่นเดียวกับโครงสร้างแบบสมมาตรโดยทั่วไป ส่วนในชั้นที่ 2 จะมีความหนาแน่นของอะตอมสารเจือสูงกว่าชั้นแรก ซึ่งเราเรียกชั้นที่ 2 นี้ว่าชั้น "N-buffer" ดังแสดงในรูปที่ 5.28 ในการสร้างอุปกรณ์ IGBT โครงสร้างแบบไม่สมมาตรสามารถทำได้โดยใช้กระบวนการสร้างมาตรฐานที่กล่าวไว้ในบทที่ 4 เช่นเดียวกับโครงสร้างแบบสมมาตรโดยทั่วไป เพียงแต่เพิ่มชั้น N-buffer เท่านั้น ซึ่งสามารถสร้างควบคู่ไปกับโครงสร้างแบบสมมาตรได้เพื่อให้มีเงื่อนไขในการเปรียบเทียบเหมือนกันกับโครงสร้างแบบสมมาตร โดยเลือกสร้างจากแผ่นผลึกซิลิกอนพื้นฐาน ระบายเชิงเดี่ยว ชนิด N ระบาย (100) พิกัดความต้านทาน 8-12 Ω -cm ทำการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสในส่วน N-buffer ก่อน โดยมีความหนาแน่นอะตอมสารเจือเท่ากับ $1.07 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ จากนั้นทำการแพร่สารเจือโบรอนเพื่อสร้างชั้น P⁺-collector และ P-base ที่ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือเท่ากับ $4.53 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ และ $1.65 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ตามลำดับ จากนั้นทำการแพร่อะตอมสารเจือฟอสฟอรัสอีกครั้งเพื่อสร้างชั้น N⁺-emitter เท่ากับ $2.57 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ สุดท้ายทำการสร้างเกตออกไซด์และขั้วสัมผัสโลหะ



รูปที่ 5.31 โครงสร้างภาพตัดขวางและลวดลายด้านบนของอุปกรณ์ IGBT โครงสร้างแบบไม่สมมาตร

การทดลองและผลการทดลอง

นำ IGBT ที่สร้างเสร็จแล้วมาทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าโดยต่อเข้ากับเครื่องวัดคุณสมบัติ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของทรานซิสเตอร์เพื่อวัดความสามารถในการปิดกั้นไปหน้า โดยเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างแบบสมมาตรกับโครงสร้างแบบไม่สมมาตร ซึ่งจากผลการทดลองจะพบว่าในกรณีของโครงสร้างแบบไม่สมมาตรที่มีความกว้างของชั้น N-base เท่ากัน จะมีความสามารถในการปิดกั้นไปหน้าเท่ากับ 135 V. และเมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างแบบสมมาตรที่มีความกว้างของชั้น N-base เท่ากัน พบว่ามีความสามารถในการปิดกั้นไปหน้าเท่ากับ 185 V. จะเห็นได้ว่าโครงสร้างแบบไม่สมมาตร จะมีความสามารถในการปิดกั้นไปหน้าที่สูงกว่าจึงเหมาะที่จะใช้กับงานไฟฟ้ากระแสตรง

5.7.2 ผลของโครงสร้างแบบไม่สมมาตรต่อช่วงเวลาตัดกระแส

ช่วงเวลาตัดกระแสเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญอย่างมากในอุปกรณ์กำลัง IGBT ทั้งนี้เนื่องจากความเร็วในการสวิตช์ของ IGBT มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับช่วงเวลาตัดกระแสเป็นสำคัญ ดังนั้นจึงทำการศึกษาผลของชั้น N-buffer ในโครงสร้างแบบไม่สมมาตรต่อช่วงเวลาในการตัดกระแสของ IGBT โดยเปรียบเทียบกับโครงสร้างแบบสมมาตร

การออกแบบและสร้าง

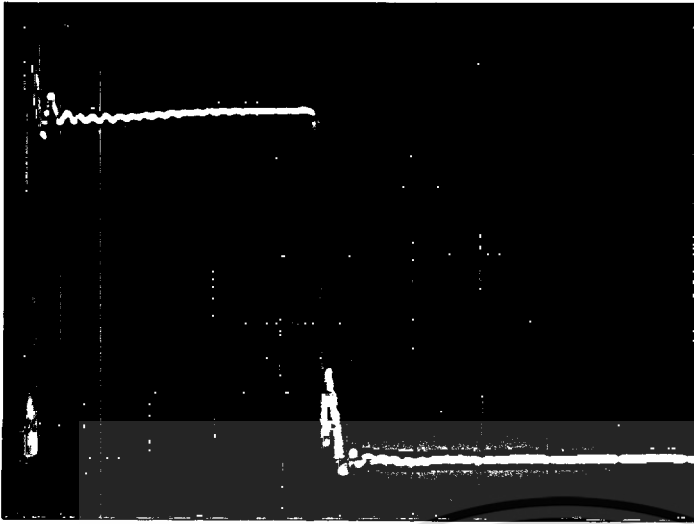
การออกแบบและสร้างอุปกรณ์ IGBT โครงสร้างแบบไม่สมมาตรเพื่อการศึกษาช่วงเวลาตัดกระแสสามารถทำได้โดยใช้เงื่อนไขเดียวกันทุกประการกับการสร้าง IGBT โครงสร้างไม่สมมาตรที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 5.7.1

การทดลองและผลการทดลอง

นำ IGBT ที่สร้างเสร็จแล้วมาวัดความสามารถในการตอบสนองความถี่โดยการใช้สัญญาณไฟฟ้ารูปคลื่นสี่เหลี่ยมดังแสดงในรูปที่ 5.29 (ข.) และใช้วงจรดังแสดงในรูปที่ 5.29 (ก.) เพื่อพิจารณาผลของช่วงเวลาตัดกระแสเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จาก IGBT โครงสร้างแบบสมมาตรที่สร้างโดยใช้เงื่อนไขเดียวกันทุกประการดังแสดงในรูปที่ 5.32

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าช่วงเวลาตัดกระแสของอุปกรณ์ IGBT โครงสร้างแบบไม่สมมาตรจะมีค่าเท่ากับ $0.18 \mu\text{s}$ ซึ่งน้อยกว่าโครงสร้างแบบสมมาตรซึ่งวัดได้เท่ากับ $0.28 \mu\text{s}$ ทั้งนี้เนื่องจากผลของชั้น N-buffer ที่สร้างขึ้นติดกับขั้วคอลเลกเตอร์มีความหนาแน่นอะตอมสารเจือสูงกว่าในชั้น N-base ทำให้โอกาสที่ประจุพาหะส่วนน้อยหรือโฮลที่ถูกฉีดออกมาจากชั้นคอลเลกเตอร์จะเกิดการรวมตัวกับอิเล็กตรอนในชั้น N-buffer จึงมีมากกว่าในโครงสร้างแบบสมมาตรซึ่งมีแต่ชั้น N-base ธรรมชาติทำให้ปริมาณประจุพาหะส่วนน้อยที่ถูกฉีดเข้ามาในชั้น N-base จริงๆมีน้อยกว่ากรณีโครงสร้างแบบสมมาตร ดังนั้นเวลาที่ใช้ในการรวมตัวจนหมดของประจุพาหะส่วนน้อยหลังจากตัดแรงดันที่ขั้วเกตจึงน้อยตามไปด้วย อุปกรณ์ที่มีโครงสร้างแบบไม่สมมาตรจึงมีความเร็วในการสวิตช์ซึ่งสูงกว่าโครงสร้างแบบสมมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

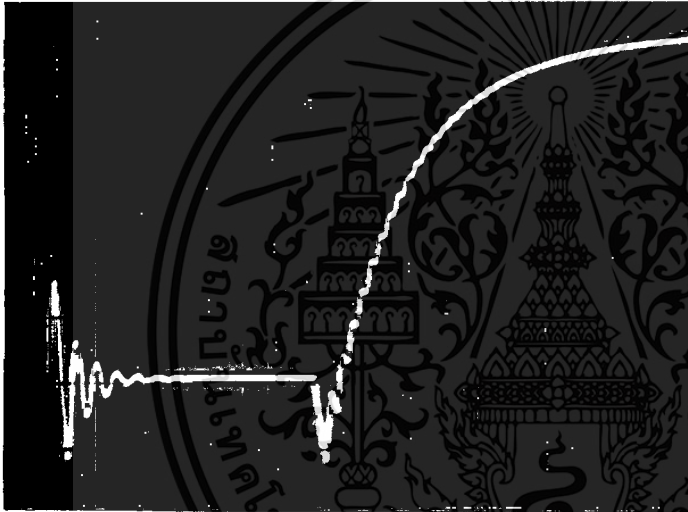


(ก.) INPUT

duty cycle = 2 %

pulse with = 0.4 μ s

(Ver:1V/div,Hor:0.1 μ s/div)

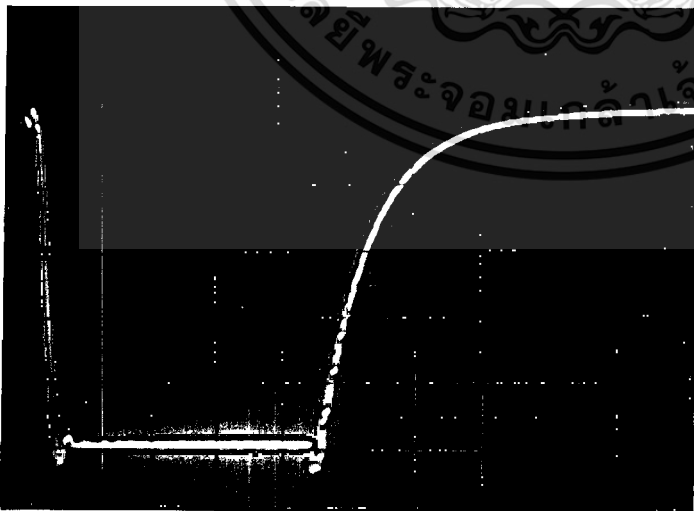


(ข.) OUTPUT

โครงสร้างแบบสมมาตร

$t_r = 0.28 \mu$ s

(Ver:1V/div,Hor:0.1 μ s/div)



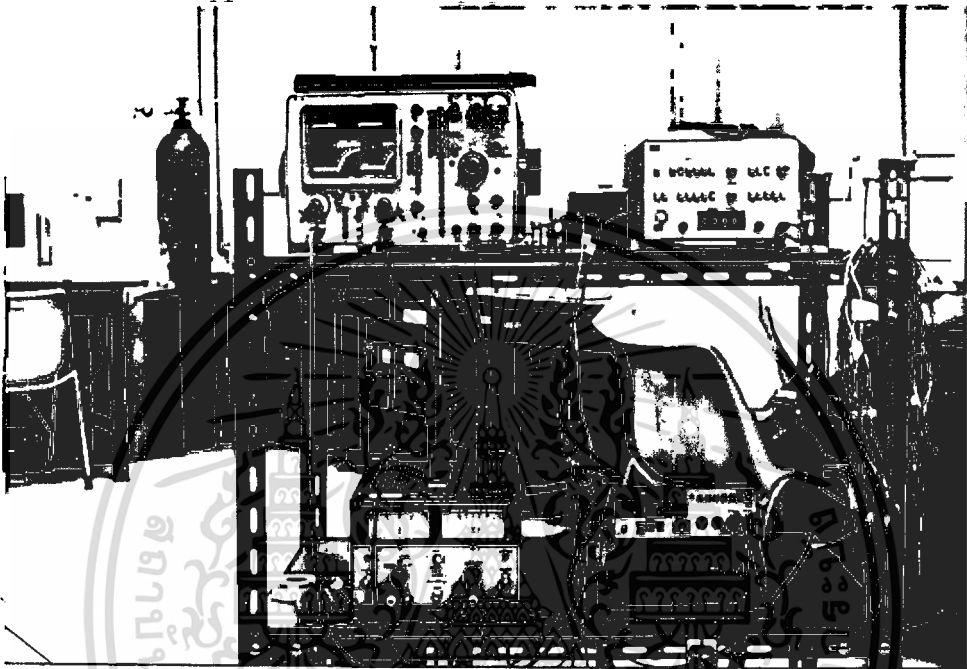
(ค.) OUTPUT

โครงสร้างแบบไม่สมมาตร

$t_r = 0.18 \mu$ s

(Ver:1V/div,Hor:0.1 μ s/div)

รูปที่ 5.32 ผลการตอบสนองสัญญาณไฟฟ้ารูปสี่เหลี่ยมของอุปกรณ์ IGBT
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการเรียนการสอน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.33 รูปถ่ายชุดทดลองวัดการตอบสนองสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม

5.8 การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการทำงานของ IGBT

เงื่อนไขสำคัญประการหนึ่งในการทำงานของอุปกรณ์ IGBT ก็คือความสามารถในการทำงานที่อุณหภูมิสูง ทั้งนี้เนื่องจากอุปกรณ์ที่สามารถทำงานได้ดีในสภาพที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมากจะเป็นข้อได้เปรียบของอุปกรณ์ ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาดทดลองเพื่อทดสอบการทำงานที่อุณหภูมิสูงดังต่อไปนี้

5.8.1 การนำกระแสไปหน้า

คุณสมบัติในการนำกระแสไปหน้า เป็นคุณสมบัติพื้นฐานและมีความสำคัญมากที่สุดของอุปกรณ์ IGBT ดังนั้นในการพิจารณาผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อความสามารถของ IGBT นั้นจึงจำเป็นต้องพิจารณาที่คุณสมบัติการนำกระแสไปหน้าเป็นสำคัญดังต่อไปนี้

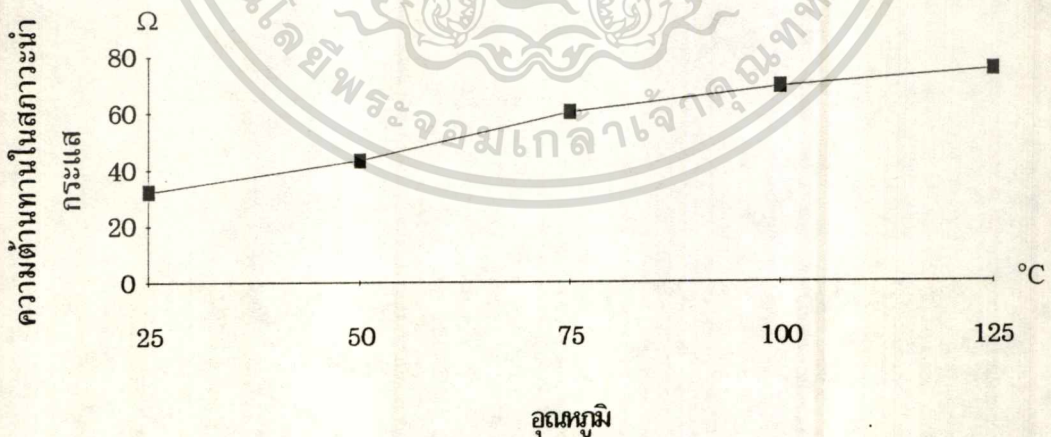
การออกแบบและสร้าง

ในการออกแบบอุปกรณ์ IGBT เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมินั้นสามารถทำได้เช่นเดียวกับการศึกษาตัวแปรพื้นฐานอื่นๆ โดยทำการออกแบบ IGBT โครงสร้างในแนวระนาบที่มีความยาวและความกว้างของช่องทางเดินกระแสเท่ากับ 5 และ 4800 μm ตามลำดับ

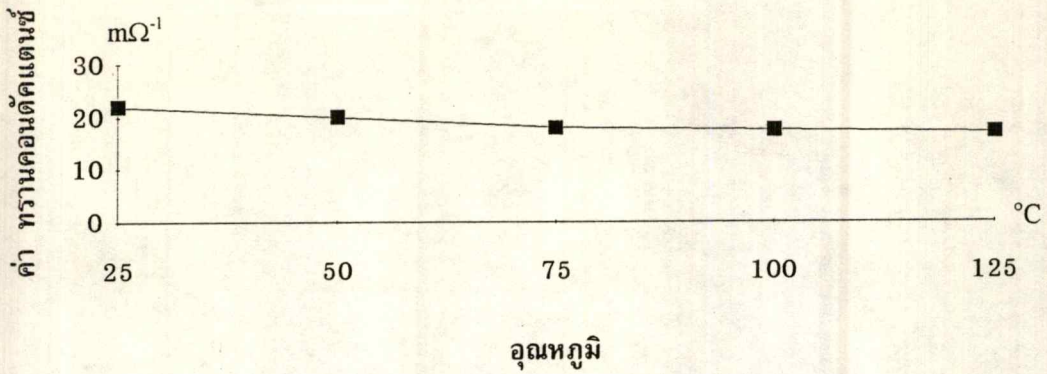
สำหรับกระบวนการสร้างสามารถทำได้โดยใช้กระบวนการสร้างมาตรฐานดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 4 โดยเลือกใช้แผ่นผลึกซิลิกอนเริ่มต้น ระนาบเชิงเดียว ชนิด N ระนาบ (100) พิกัดความต้านทาน 8-12 $\Omega\text{-cm}$ ทำการแพร่สารเจือโบรอนเพื่อสร้างส่วน P⁺-collector และ P-base ที่ความหนาแน่นอะตอมสารเจือเท่ากับ $4.53 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ และ $1.65 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ตามลำดับ จากนั้นทำการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสเพื่อสร้างชั้น N⁺-emitter ที่ $2.57 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ แล้วสร้างเกตออกไซด์และขั้วสัมผัสโลหะตามลำดับ

การทดลองและผลการทดลอง

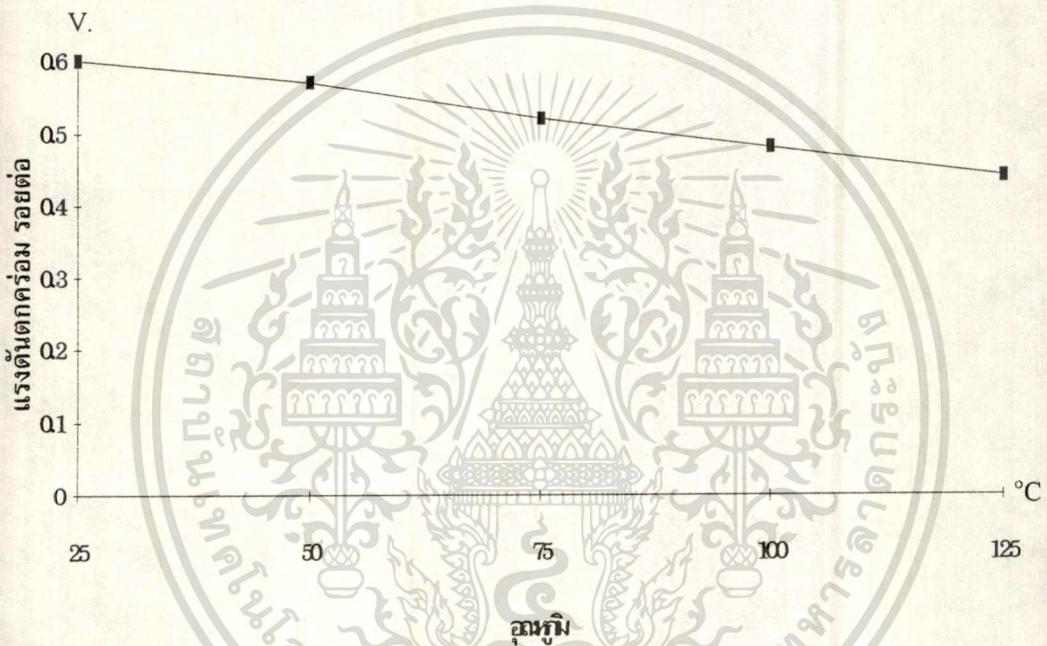
นำอุปกรณ์ IGBT ที่สร้างเสร็จมาวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลกเตอร์กับแรงดันคอลเลกเตอร์-อิมิตเตอร์ ภายในตู้อบ โดยใช้เครื่องบันทึก XY และใช้วงจรดังรูปที่ 5.26 และ 5.30 โดยกำหนดค่าแรงดันที่เกตคงที่ +3.5 V. จากนั้นทำการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิจาก 25^oC ไปจนถึง 125^oC ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 5.34, 5.35, 5.36 และ 5.37



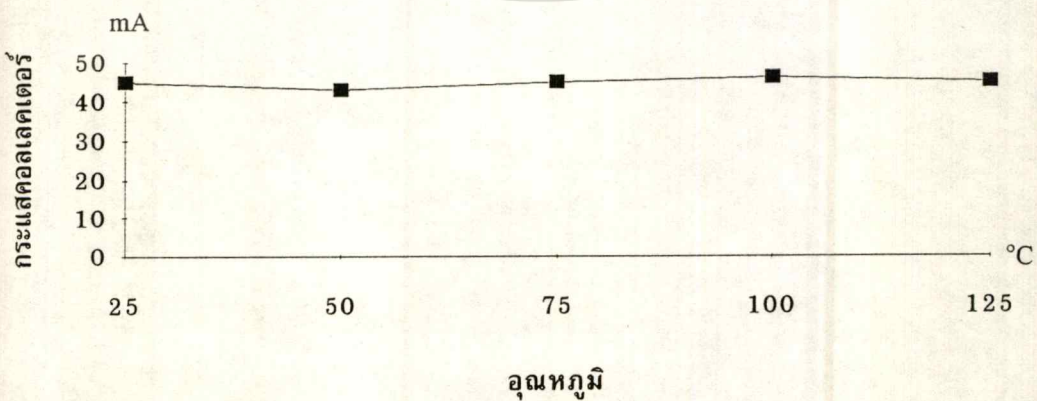
รูปที่ 5.34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานในสถานะนำกระแสกับอุณหภูมิ



รูปที่ 5.35 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าทหรานคอนดักแตนท์ของ IGBT กับอุณหภูมิ



รูปที่ 5.36 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันตกคร่อมรอยต่อ P-collector กับ N-base ใน IGBT กับอุณหภูมิ



รูปที่ 5.37 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ใน IGBT กับอุณหภูมิ (ที่ $V_G=3.5$ V.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองในรูปที่ 5.33 และ 5.35 จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นความต้านทานในสถานะนำกระแสจะเพิ่มขึ้นแต่ค่าทรานคอนดักเตนซ์จะลดลง ทั้งนี้เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงขึ้นอะตอมของสารกึ่งตัวนำในชั้น P-base จะถูกกระตุ้นให้แตกตัวออกเป็นคู่อิเล็กตรอน-โฮลอิสระมากขึ้น ทำให้โอกาสที่ประจุพาหะที่เคลื่อนที่ในชั้น P-base จะชนกับคู่อิเล็กตรอน-โฮลอิสระมีมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามจากกราฟรูปที่ 5.36 จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นแรงดันตกคร่อมส่วนที่เป็นไดโอดหรือรอยต่อพี-เอ็นระหว่างชั้น P⁺-collector กับ N-base มีค่าลดลง ซึ่งจะเป็นการชดเชยกับความต้านทานในสถานะนำกระแสที่เพิ่มขึ้นทำให้ความสามารถในการนำกระแสไปหน้าของอุปกรณ์ IGBT ไม่ได้รับการกระทบกระเทือนมากนักจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิซึ่งยืนยันได้จากผลการทดลองในรูปที่ 5.37 และจุดนี้เองทำให้ IGBT เป็นอุปกรณ์ที่มีข้อได้เปรียบอุปกรณ์อื่นในการทำงานที่อุณหภูมิสูง

5.8.2 ความเร็วในการสวิตชิง

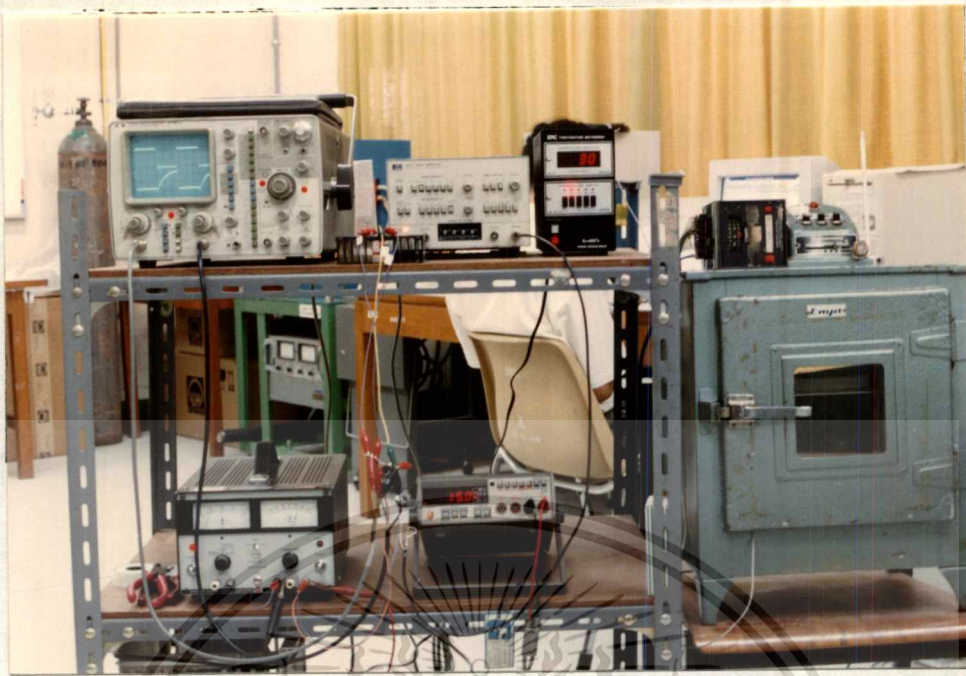
ความเร็วในการสวิตชิงของอุปกรณ์ IGBT เป็นตัวแปรหนึ่งที่มีความสำคัญอย่างมาก ทั้งนี้เนื่องจาก IGBT มีจุดค้อยู่ที่ช่วงเวลาดับกระแสที่มีค่าสูงทำให้ความเร็วในการสวิตชิงต่ำกว่าอุปกรณ์อื่นดังที่ได้กล่าวไว้ในบททดลองที่ 5.6 ดังนั้นในการศึกษาผลของอุณหภูมิจึงต้องคำนึงถึงผลของความเร็วในการสวิตชิงเป็นหัวข้อสำคัญอันหนึ่ง โดยจะเน้นไปที่ช่วงเวลาในการดับกระแส ซึ่งเป็นจุดที่สำคัญมากต่อความสามารถในการสวิตชิงของอุปกรณ์ IGBT

การออกแบบและสร้าง

สำหรับการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ IGBT เพื่อศึกษาผลของการอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงของความเร็วในการสวิตชิงของอุปกรณ์ IGBT สามารถทำได้โดยใช้เงื่อนไขเดียวกับทุกประการกับการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อความสามารถในการนำกระแสไปหน้าในหัวข้อที่ 5.8.1

การทดลองและผลการทดลอง

นำอุปกรณ์ IGBT ที่สร้างเสร็จแล้วมาวัดความสามารถในการตอบสนองสัญญาณไฟฟ้ารูปสี่เหลี่ยม โดยใช้วงจรดังแสดงในรูปที่ 5.29 และ 5.38 เพื่อวัดช่วงเวลาดับกระแสที่เปลี่ยนไปเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 25 °C ไปจนถึง 125 °C ซึ่งจะได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 5.39



รูปที่ 5.38 รูปถ่ายอุปกรณ์ที่ใช้วัดผลของอุณหภูมิต่อการเปลี่ยนแปลงสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม



รูปที่ 5.39 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาตัดกระแสกับอุณหภูมิ

จากผลการทดลองในรูปที่ 5.39 พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นช่วงเวลาตัดกระแสจะเพิ่มขึ้นด้วย ทั้งนี้เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้ช่วงอายุของประจุพาหะส่วนน้อยในชั้น N-base เพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งจะส่งผลให้เวลาในกระบวนการรวมตัวของประจุพาหะส่วนน้อยในชั้น N-base มีค่ามากขึ้น และยังเป็นการเพิ่มอัตราการขยายกระแสของโครงสร้างไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ P-N-P ภายใน IGBT อีกด้วย ซึ่งทั้งสองสาเหตุนี้ส่งผลอย่างมากต่อการเพิ่มขึ้นของช่วงเวลาตัดกระแสของอุปกรณ์ IGBT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

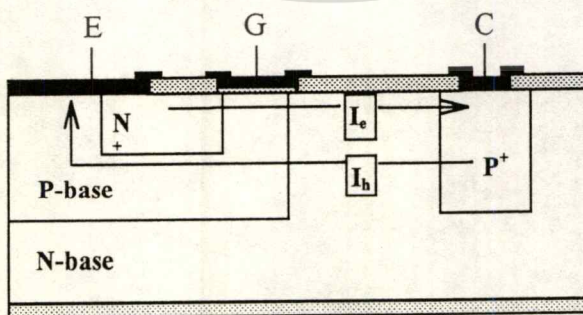
5.9 การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ IGBT กับมอสเฟตกำลังแบบดีมอส

โครงสร้างของอุปกรณ์ IGBT เกิดจากการรวมเอาข้อได้เปรียบของมอสเฟตคือ โครงสร้างเกตแบบมอสเฟตมารวมเข้ากับข้อได้เปรียบของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์คือ การนำกระแสแบบไบโพลาร์ ดังนั้นเพื่อเป็นการศึกษาความแตกต่างของคุณสมบัติต่างๆรวมทั้งข้อดีและข้อด้อย เพื่อที่จะเป็นประโยชน์อย่างมากต่อการเลือกใช้งานอุปกรณ์ในเงื่อนไขต่างๆ โดยในการทดลองในบทนี้จะเน้นไปที่อุปกรณ์กำลังที่ต้องการแรงดันขั้วที่ค่าต่างๆจึงทำการพิจารณาระหว่าง IGBT กับมอสเฟตกำลังแบบดีมอสเท่านั้น

การออกแบบและสร้าง

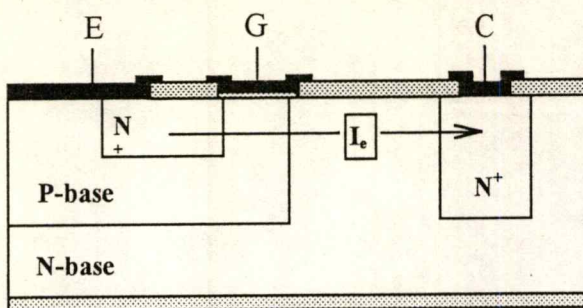
ในการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ IGBT เพื่อเปรียบเทียบกับมอสเฟตกำลังแบบดีมอสนั้น จำเป็นที่จะต้องออกแบบให้มีเงื่อนไขทางเรขาคณิตของอุปกรณ์ทั้งสองเท่ากัน จึงทำการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ IGBT และดีมอสที่มีความกว้างและความยาวของช่องทางเดินกระแสเท่ากับ 4800 และ 5 μm ตามลำดับโดยที่มีความกว้างของชั้น N-base ที่เท่ากันคือ 60 μm

ในส่วนของกระบวนการสร้างสามารถที่จะสร้างในกระบวนการสร้างเดียวกัน ทั้งนี้จะส่งผลดีให้เงื่อนไขต่างๆในการสร้างอุปกรณ์มีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุด โดยใช้กระบวนการสร้างมาตรฐานดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 4 โดยเริ่มจากเลือกแผ่นผลึกซิลิกอนเริ่มต้นชนิด N ระนาบ (100) พิกัดความต้านทาน 8-12 $\Omega\text{-cm}$ โดยทำการสร้างชั้น P⁺-collector ใน IGBT โดยการแพร่สารเจือโบรอนให้มีความหนาแน่นอะตอมสารเจือเท่ากับ $4.53 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ทำการแพร่สารเจืออีกครั้งเพื่อสร้างชั้น P-base ของทั้ง IGBT และดีมอสที่มีความหนาแน่นอะตอมสารเจือประมาณ $1.65 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ และทำการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสเพื่อสร้างชั้น N⁺-emitter ใน IGBT หรือชั้น N⁺-source ในดีมอสที่มีความหนาแน่นอะตอมสารเจือเท่ากับ $2.57 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ จากนั้นทำการสร้างเกตออกไซด์และขั้วสัมผัสโลหะ



โครงสร้าง IGBT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



โครงสร้าง DMOS

รูปที่ 5.40 เปรียบเทียบโครงสร้างระหว่าง IGBT กับ DMOS

การทดลองและผลการทดลอง

นำอุปกรณ์ IGBT และคิมอสที่สร้างเสร็จแล้วมาทำการวัดตัวแปรค่าต่างๆเพื่อพิจารณาความแตกต่างระหว่าง IGBT กับมอสเฟตกำลังแบบคิมอส

ตารางที่ 5.2 แสดงค่าตัวแปรต่างๆของ IGBT และมอสเฟตกำลังแบบคิมอส

ตัวแปร	IGBT	DMOS	หน่วย
W	4800	4800	μm
L	5	5	μm
I_C^* , I_{DS}^*	55	19	mA
R_{ON}	55	125	$\text{m}\Omega$
g_{msat}	28	16	$\text{m}\Omega^{-1}$
I_{CSS}^{**} , I_{DSS}^{**}	0.05	0.03	mA
V_T	2.55	2.80	V
t_r^{***}	0.07	0.10	μs
t_f^{***}	0.28	0.20	μs
$t_{d(on)}^{***}$	0.08	0.08	μs
t_{stg}^{***}	0.30	0.22	μs
f_T^{***}	2.81	5.57	MH_z

* วัดที่ $V_G = 3.5 \text{ V}$., $V_{DD} = 10 \text{ V}$. ** วัดที่ $V_G = 0 \text{ V}$., $V_{DD} = 50 \text{ V}$.

*** สัญญาณ input duty cycle = 2 % และความกว้างของพัลส์ = $0.4 \mu\text{s}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองในตารางที่ 5.2 จะเห็นได้ว่าข้อเด่นของ IGBT ก็คือความสามารถในการนำกระแส , ความต้านทานในสภาวะนำกระแสและค่าทรานคอนดักเตนซ์ ทั้งนี้เนื่องจากผลของประจุพาหะส่วนน้อยที่ถูกฉีดเข้าไปในชั้น N-base ทำให้เกิดการมอดดูเลตสภาพนำ ส่งผลให้สามารถนำกระแสได้สูงขึ้นและค่าทรานคอนดักเตนซ์มีค่าสูงขึ้น นอกจากนั้นประจุพาหะส่วนน้อยที่ถูกฉีดเข้าไปในชั้น N-base ยังทำให้ประจุพาหะในชั้น N-base เพิ่มขึ้น ทำให้ในชั้น N-base มีความต้านทานลดต่ำลงส่งผลให้ความต้านทานรวมในสภาวะนำกระแสลดต่ำลงไปด้วย ส่วนข้อด้อยของ IGBT จะอยู่ที่ความสามารถในการตอบสนองความถี่โดยเฉพาะในช่วงเวลาชอบขาลง ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีค่ามากกว่าในดีมอสมากพอสมควรทั้งนี้เนื่องจากการที่ใน IGBT ไม่สามารถกำจัดประจุพาหะส่วนน้อยให้หมดไปทันทีหลังจากตัดแรงดัน ไบอัสที่เกตได้จึงทำให้ใช้เวลาในช่วงชอบขาลงมากกว่าในดีมอสซึ่งไม่มีผลของประจุพาหะส่วนน้อย

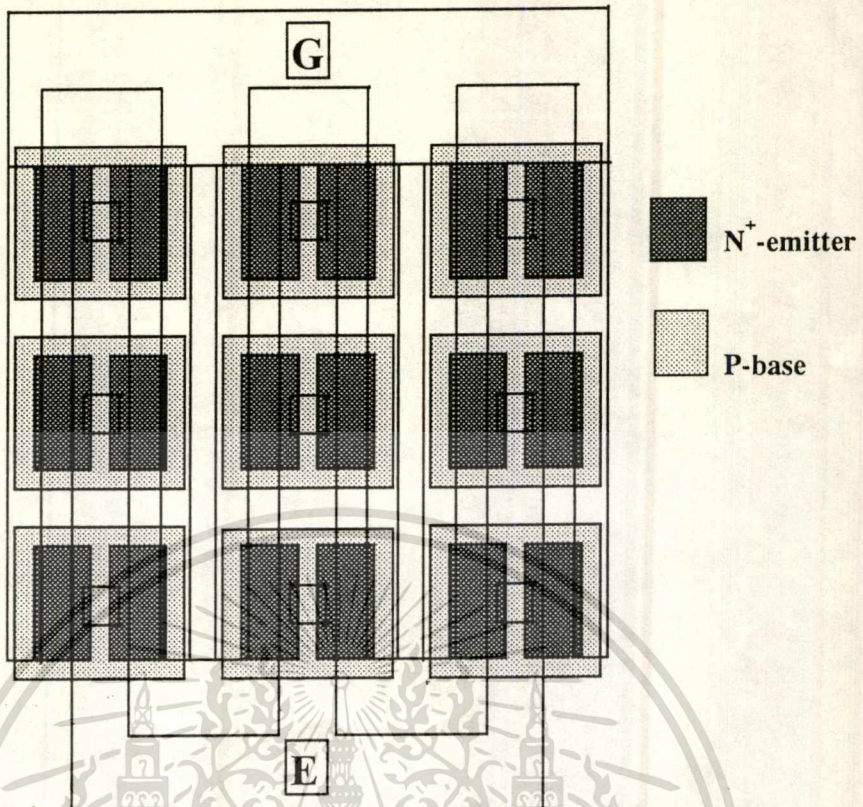
5.10 การทดสอบ IGBT โครงสร้างขนาดใหญ่

หลังจากทำการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ IGBT ที่มีโครงสร้างขนาดเล็กจนได้ผลเป็นที่พอใจเรียบร้อยแล้ว จึงได้นำเอาข้อมูลต่างๆจากการทดลองเหล่านี้มาทำการออกแบบและสร้างเป็นอุปกรณ์ IGBT ที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่

การออกแบบและสร้าง

ในการออกแบบ IGBT ที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่เพื่อให้มีความสามารถในการนำกระแสสูงนั้น จำเป็นที่จะต้องใช้พื้นที่บนแผ่นผลึกซิลิกอนมาก ดังนั้นเพื่อเป็นการประหยัดพื้นที่บนแผ่นผลึกซิลิกอนจึงได้ทำการออกแบบอุปกรณ์เป็นโครงสร้างในแนวคิง โดยให้มีความกว้างและความยาวของช่องทางเดินกระแสเท่ากับ 56800 และ 5 μm ตามลำดับ

ในส่วนของกระบวนการสร้างสามารถทำได้โดยอาศัยกระบวนการสร้างมาตรฐานดังในบทที่ 4 โดยใช้แผ่นซิลิกอนเริ่มต้นชนิดอีพิแทกเซียล N/P⁺ ความหนาชั้นอีพิแทกเซียล 30 μm ระบาย (100) พิกัดความต้านทาน 40 $\Omega\text{-cm}$ โดยแพร่สารเจือในส่วน P-base เท่ากับ $1.65 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ และแพร่สารเจือในส่วน N⁺-emitter เท่ากับ $2.57 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ แล้วจึงนำไปสร้างเกตออกไซด์และขั้วสัมผัสโลหะ



รูปที่ 5.41 ลวดลายตัวอย่างด้านบนของอุปกรณ์ IGBT โครงสร้างแนวตั้งขนาดใหญ่



รูปที่ 5.42 ภาพถ่ายด้านบนของอุปกรณ์ IGBT โครงสร้างแนวตั้งขนาดใหญ่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองและผลการทดลอง

นำ IGBT โครงสร้างขนาดใหญ่ที่สร้างเสร็จแล้วมาทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆในทำนองเดียวกับการทดลองที่ผ่านมา ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของ IGBT โครงสร้างขนาดใหญ่

ตัวแปร	IGBT	หน่วย
W	56800	μm
L	5	μm
I_C ($V_G=10\text{V.}, V_{DD}=10\text{V.}$)	1.65	A
R_{ON} ($V_G=10\text{V.}, I_C=1.0\text{A.}$)	12.4	Ω
g_{msat} ($V_G=10\text{V.}, V_{CE}=10\text{V.}$)	44.59	$\text{m}\Omega^{-1}$
I_{CSS} ($V_G=0\text{V.}, V_{DD}=50\text{V.}$)	0.06	mA
V_T	2.6	V
V_{BV} ($V_G=0\text{V.}$)	470	V
f_T^*	1.98	MHz

* สัญญาณ input duty cycle = 2 % และความกว้างของพัลส์ = 0.4 μs

จากผลการทดลองแสดงว่า IGBT โครงสร้างขนาดใหญ่ที่สร้างขึ้นสามารถที่จะนำไปใช้ในงานวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังปานกลางได้เป็นอย่างดี โดยจากผลการทดลองพบว่าอุปกรณ์ IGBT โครงสร้างขนาดใหญ่ที่สร้างขึ้นมีความสามารถในการนำกระแสสูงสุดที่ประมาณ 1.65 A (ที่แรงดันเกตเท่ากับ 10 V.) ส่วนในตัวแปรค่าอื่นๆให้ผลการทดลองในแนวโน้มเดียวกันกับผลที่ได้จากการทดลองสร้าง IGBT โครงสร้างขนาดเล็ก แต่ถึงอย่างไรก็ตามในการสร้างอุปกรณ์ IGBT ที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่ นั้นทำให้เกิดปัญหาในการสร้างมากขึ้นตามไปด้วย ทั้งนี้เนื่องมาจากโอกาสที่จะเกิดความผิดพลาดในส่วนใดส่วนหนึ่งของอุปกรณ์มีมากทำให้ผลผลิตและความน่าเชื่อถือของอุปกรณ์ลดลงจึงจำเป็นที่จะต้องมีการพัฒนาและปรับปรุงกระบวนการต่างๆในการผลิตต่อไปเพื่อให้ได้อุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือเพิ่มมากขึ้น

บทที่ 6

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

การสร้างอุปกรณ์ IGBT โดยการแพร่สารเจือด้วยความร้อนในห้องปฏิบัติการศูนย์วิจัย-อิเล็กทรอนิกส์นั้นสามารถสร้างขึ้นเป็นผลสำเร็จและมีประสิทธิภาพดีในระดับหนึ่ง ทั้งนี้เนื่องจากยังมีปัญหาอีกหลายประการที่ต้องวิเคราะห์และแก้ไขซึ่งจะได้ทำการพัฒนาต่อไปเพื่อให้ได้อุปกรณ์ IGBT ที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดเท่าที่จะสามารถทำได้ แต่อย่างไรก็ตามจากการที่ได้ทำการศึกษา ค้นคว้า วิจัยและทดลองนานถึง 3 ปี ทำให้พอที่จะสามารถหาข้อสรุปเพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ IGBT ที่เป็นมาตรฐานได้ในระดับหนึ่ง โดยเริ่มจากการทดลองสร้าง IGBT โดยใช้กระจกต้นแบบที่ออกแบบไว้สำหรับสร้างมอสเฟตกำลังแบบดีมอสเพื่อดูความเป็นไปได้ในการที่จะสร้างอุปกรณ์ IGBT โดยสมบูรณ์ จากนั้นได้ทำการศึกษาตัวแปรต่างๆที่เป็นพื้นฐานในการปรับปรุงประสิทธิภาพของตัวอุปกรณ์ ซึ่งในการทดลองเพื่อหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมจะทำการทดลองโดยใช้โครงสร้างในแนวระนาบ ทั้งนี้เนื่องจากสามารถที่จะเปลี่ยนแปลงขนาดทางเรขาคณิตได้ง่าย ซึ่งผลการทดลองที่ได้สามารถที่จะนำไปใช้เป็นข้อมูลได้ทั้งในโครงสร้างในแนวระนาบและโครงสร้างในแนวตั้ง จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้จากการทดลองสร้าง IGBT โครงสร้างขนาดเล็กไปเป็นข้อมูลในการพิจารณาออกแบบและสร้างอุปกรณ์ IGBT ที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่ต่อไป และจากการทดลองสร้าง IGBT ที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่ซึ่งมีขนาด 2.84 mm^2 โดยมีความกว้างและความยาวของช่องทางเดินกระแสเท่ากับ 56800 และ $5 \text{ }\mu\text{m}$ ตามลำดับ สามารถที่จะนำกระแสคอลเลคเตอร์ได้ 1.65 A . ที่แรงดันไบอัสที่ขั้วเกตเท่ากับ 10 V . หรือคิดเป็นความหนาแน่นกระแสต่อพื้นที่ได้เท่ากับ 58.1 A/cm^2 แต่อย่างไรก็ตามในการทดลองออกแบบและสร้าง IGBT ที่ผ่านมาก็พอที่จะเป็นแนวทางในการออกแบบ สร้างและพัฒนาที่จะนำไปสู่การสร้างอุปกรณ์ IGBT ที่มีประสิทธิภาพสูงต่อไปในอนาคต โดยจากผลการทดลองออกแบบและสร้าง IGBT ที่ผ่านมาสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

จากการทดลองทดสอบโครงสร้างทางเรขาคณิตพื้นฐานของ IGBT โดยทำการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อพี-เอ็นและทดสอบการทำงานในลักษณะของทรานซิสเตอร์ พบว่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อพี-เอ็นที่สร้างขึ้นเป็นไปตามที่กำหนดและเหมาะสมที่จะสร้างเป็น IGBT สำหรับในส่วนของการทำงานในลักษณะของทรานซิสเตอร์พบว่าความสามารถในการนำกระแสคอลเลคเตอร์อยู่ในระดับที่ดี มีค่าทรานคอนดักแตนซ์สูงและมีความต้านทานในสภาวะนำกระแสต่ำ

จากการพิจารณาผลของความกว้างของชั้น N-base ที่มีต่อกระแสคอลเลคเตอร์และค่าทรานคอนดักแตนซ์พบว่า เมื่อทดลองเพิ่มความกว้างของชั้น N-base จาก 60 ไปจนถึง $250 \text{ }\mu\text{m}$ กระแสคอลเลคเตอร์และค่าทรานคอนดักแตนซ์ลดลง 57.27 และ 61.17 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ แต่ในส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของความต้านทานในสถานะนำกระแสและระดับความหนาแน่นกระแสที่เกิดแลตซ์-ออฟจะเพิ่มขึ้นประมาณ 2.29 และ 14 เท่าตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดลองเมื่อพิจารณาเฉพาะในแง่ของความสามารถในการนำกระแสสามารถสรุปได้ว่ายิ่งความกว้างของชั้น N-base น้อยลงเท่าใดก็ยิ่งจะเป็นผลดีต่อความสามารถในการนำกระแส แต่ในการออกแบบสร้างจริง ๆ นั้นจะต้องคำนึงถึงความสามารถในการทนแรงดันพังทลายของอุปกรณ์อีกด้วย

สำหรับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเบสของ IGBT โดยใช้โครงสร้างเบสแบบ 2 ชั้น คือชั้น P-base เดิมและชั้น P⁺-sinker ที่เพิ่มขึ้น พบว่าทำให้ระดับความหนาแน่นกระแสที่เกิดแลตซ์-ออฟสูงขึ้น 41.67 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่แรงดันขั้วเริ่มมีค่าใกล้เคียงกับโครงสร้างเบสแบบชั้นเดียว จึงเห็นได้ว่าโครงสร้างเบสแบบ 2 ชั้นจึงเหมาะสมที่จะใช้ในการออกแบบ IGBT เพื่อให้มีขีดจำกัดในการทำงานน้อยลงส่งผลให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

ในการเพิ่มโครงสร้างฟิลดริงค์ในโครงสร้าง IGBT แนวระนาบนั้น ทำให้สามารถป้องกันกระแสรั่วไหลที่ผิวอันเนื่องมาจาก surface state ได้แต่ต้องมีความกว้างของฟิลดริงค์ที่เหมาะสม ทั้งนี้จากการทดลองพบว่าที่ความกว้างฟิลดริงค์ตั้งแต่ 16 μm ขึ้นไปสามารถที่จะป้องกันกระแสรั่วไหลที่ผิวได้เกือบทั้งหมด แต่ผลกระทบตามมาที่พบเมื่อความกว้างของฟิลดริงค์เพิ่มขึ้นก็คือทำให้ความสามารถในการนำกระแสลดลงและยังไม่สามารถควบคุมระดับกระแสคอลเลคเตอร์ในสถานะอิมตัวได้ ดังนั้นความกว้างของฟิลดริงค์ที่เหมาะสมที่สุดก็ควรจะเป็นความกว้างที่น้อยที่สุดที่สามารถป้องกันกระแสรั่วไหลที่ผิวได้ ทั้งนี้เพื่อหลีกเลี่ยงผลเสียที่จะตามมาเมื่อฟิลดริงค์มีความกว้างมากๆ

ในส่วนของ การทดลองเปลี่ยนแปลงความกว้างของเกทออกไซด์นั้นพบว่า เมื่อเพิ่มความกว้างของเกทออกไซด์จาก 10 μm ไปจนถึง 50 μm นั้น ที่ความกว้างของเกทออกไซด์เท่ากับ 30 μm จะทำให้ความสามารถในการนำกระแสของ IGBT มีค่าสูงสุด แต่เมื่อพิจารณาร่วมกับกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์กับแรงดันคอลเลคเตอร์อิมิตเตอร์แล้วจะเห็นได้ว่าเมื่อความกว้างของเกทออกไซด์มากขึ้นค่ากระแสคอลเลคเตอร์ในช่วงอิมตัวก็จะยิ่งเพิ่มมากขึ้นและเพิ่มเร็วขึ้นทำให้ไม่สามารถควบคุมการไหลของกระแสคอลเลคเตอร์ในช่วงอิมตัวได้ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้น ดังนั้นจึงเห็นว่าความกว้างของเกทออกไซด์ที่ขึ้นออกไปในชั้น N-base นั้น ยิ่งน้อยเท่าใดยิ่งเป็นผลดี

สำหรับการตอบสนองความถี่ของ IGBT ปัญหาอยู่ที่ช่วงเวลาตัดกระแสนั้นการปรับปรุงทางโครงสร้างสามารถทำได้ยากมากอีกทั้งสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายสูง ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการทดลองเฉพาะผลของแรงดันไบอัสที่ขั้วคอลเลคเตอร์ต่อช่วงเวลาตัดกระแส โดยจากผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มแรงดันไบอัสที่ขั้วคอลเลคเตอร์จาก +10 V. ไปเป็น +15 V. พบว่าช่วงเวลาตัดกระแสลดลงประมาณ 15 เปอร์เซ็นต์ แต่ถึงอย่างไรก็ตามผลพลอยได้จากการทดลองสร้าง

IGBT โครงสร้างแบบไม่สมมาตรพบว่าในช่วงเวลาตัดกระแสมีน้อยกว่าโครงสร้างแบบสมมาตรถึงประมาณ 36 เปอร์เซ็นต์

ในการศึกษา ออกแบบและสร้าง IGBT โครงสร้างแบบไม่สมมาตรเพื่อให้ออกมาความสามารถในการปิดกั้นไปหน้าหรือสามารถทนแรงดันพังทลายสูงและเหมาะสมกับการใช้งานในวงจรไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งทำได้โดยการเพิ่มชั้น N-buffer เข้าไปนั้น จากผลการทดลองพบว่า IGBT โครงสร้างแบบไม่สมมาตรสามารถทนแรงดันพังทลายได้สูงกว่าโครงสร้างแบบสมมาตรถึงประมาณ 37 เปอร์เซ็นต์

จากการทดสอบการทำงานของ IGBT ในสถานะที่มีอุณหภูมิสูง โดยเพิ่มอุณหภูมิแวดล้อมของการทำงานของ IGBT จาก 25°C ไปจนถึง 125°C พบว่าไม่ทำให้ความสามารถในการนำกระแสของ IGBT เปลี่ยนไปมากนัก ถึงแม้ว่าความต้านทานในสถานะนำกระแสจะเพิ่มขึ้นและค่าทรานคอนดักแตนซ์จะลดลงแต่ก็ถูกชดเชยด้วยความต้านทานตกคร่อมรอยต่อ P⁻-collector กับ N-base ที่ลดลงทำให้ความสามารถในการนำกระแสของ IGBT ไม่เปลี่ยนไปมากซึ่งเป็นข้อดีของ IGBT

เมื่อเปรียบเทียบการทำงานระหว่าง IGBT กับมอสเฟตกำลังแบบดีมอสที่มีขนาดทางเรขาคณิตที่เท่ากันพบว่า IGBT มีกระแสคอลเลคเตอร์และค่าทรานคอนดักแตนซ์สูงกว่าดีมอสประมาณ 2.9 และ 1.75 เท่าตามลำดับ และมีความต้านทานในสถานะนำกระแสมีน้อยกว่าดีมอส 55.56 เปอร์เซ็นต์ แต่ในเรื่องของการตอบสนองความถี่พบว่า f_T ของดีมอส จะเป็น 1.98 เท่าของ IGBT จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าของเสียเปรียบของ IGBT จะอยู่ที่ความเร็วในการตอบสนองความถี่เท่านั้น ดังนั้นถ้าในอนาคตสามารถที่จะพัฒนา IGBT ให้มีความเร็วในการตอบสนองความถี่เท่ากันหรือมากกว่าดีมอสแล้วก็จะทำให้ IGBT เข้ามาแทนอุปกรณ์แบบเก่าในงานทางด้านวงจรกำลังได้อย่างสมบูรณ์

จากข้อมูลทั้งหมดที่ได้ทำการทดลองสร้าง IGBT โครงสร้างขนาดเล็กสามารถที่จะนำมาใช้ในการสร้าง IGBT โครงสร้างขนาดใหญ่ โดยทำการออกแบบให้มีความกว้างและความยาวของช่องทางเดินกระแสเท่ากับ 56800 และ $5\ \mu\text{m}$ ตามลำดับ ได้ผลการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าหลักๆเป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้คือ กระแสคอลเลคเตอร์เท่ากับ 1.65 A. (ที่ $V_G = 10\ \text{V}$) ทนแรงดันได้ 470 V และมี f_T เท่ากับ 1.98 MHz

จากผลการศึกษา ออกแบบ สร้างและปรับปรุง IGBT ที่ใช้เทคโนโลยีการแพร่สารเจือโดยความร้อนที่กล่าวมาข้างต้น นับได้ว่าเป็นก้าวหนึ่งในการพัฒนาการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำกำลังสูงขึ้นในประเทศไทยและข้อมูลต่างๆเหล่านี้จะมีประโยชน์อย่างยิ่งในการพัฒนาอุปกรณ์กำลังแบบ IGBT ให้มีประสิทธิภาพสูงยิ่งขึ้นไปในอนาคต

บทความอ้างอิง:

- 1) J. P. Russell, A. M. Goodman, L. A. Goodman, and J. M. Neilson, "The COMFET-A New High Conductance MOS-Gate Device", IEE Electron Device Letters, Vol. EDL-4, No. 3, p 63-65
- 2) B.J. Baliga, MODERN POWER DEVICES, J. Wiley & Sons Inc., 1987
- 3) B. Jayant Baliga, "Analysis of the Output Conductance of Insulated Gate Transistors", IEE Electron Device Letters, Vol. EDL-7, No.12, p 686-688
- 4) B.J. Baliga, "Analysis of Insulated Gate Transistor Turn-off Characteristics", IEEE Electron Device Letters, Vol. EDL-6, No.2, p 74-77
- 5) ผศ.สมเกียรติ สุภเดช, ปฏิบัติการเทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำ, วารสารอิเล็กทรอนิกส์ เวลด์, พ.ศ. 2525
- 6) Deva N. Pattanayak, A. L. Robinson, T. Paul Chow, Michael S. Adler, B. Jayant Baliga, and Eric J. Wildi, "n-Channel Lateral Insulated Gate Transistors : Part I - Steady-State Characteristics", IEEE Transaction on Electron Devices, Vol. ED-33, No. 12, p 1956-1963
- 7) B. J. Baliga, M. S. Adler, P. V. Gray, and R. P. Love, "Suppressing Latch-up in Insulated Gate Transistors", IEE Electron Device Letters, Vol. EDL-5, No.8, p 323-325
- 8) ภควัด สรวยสุวรรณ, พอล รุจนพิชญ์, สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, ผศ.วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง, และ รศ.ดร.สมเกียรติ สุภเดช, "การพิจารณาการออกแบบดีมอสทรานซิสเตอร์แรงดันสูงด้วยฟิลด์ริงค์และฟิลด์เพลต", ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 16, พ.ศ.2536, หน้า 389-393
- 9) A. L. Robinson, Deva N. Pattanayak, Michael S. Adler, B. Jayant Baliga, and Eric J. Wildi, "Lateral Insulated Gate Transistors with Improved Latching Characteristics", IEE Electron Device Letters, Vol. EDL-7, No.2, p 16-63
- 10) ภควัด สรวยสุวรรณ, พอล รุจนพิชญ์, สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, ผศ.วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง, และ รศ.ดร.สมเกียรติ สุภเดช, "การพัฒนาดีมอสไอเอ็มแรงดันพ่วงหลายสูง", ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 16, พ.ศ.2536 , หน้า 385-388
- 11) พอล รุจนพิชญ์, สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, ผศ.วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง, และ รศ.ดร.สมเกียรติ สุภเดช, "การสร้างไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกทเป็นฉนวน", ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 15, พ.ศ.2535

- 12) พอพล รุจนพิชญ์, สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, ศศ.วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรืองและรศ.ดร.สมเกียรติ สุภเดช, “ความกว้างของ N-base ที่มีผลต่อความสามารถในการนำกระแสของ IGBT” , ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 17, พ.ศ.2537
- 13) พอพล รุจนพิชญ์, สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, ศศ.วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง,และรศ.ดร.สมเกียรติ สุภเดช, “การออกแบบและสร้างมอสเฟตกำลังแบบวีมอส” , ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 14, พ.ศ.2534



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

1. ค่าคงที่ทางฟิสิกส์

ชื่อ	สัญลักษณ์	ขนาด	หน่วย
ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน	q	1.60×10^{-19}	C
ค่าคงที่ของ โบสมัน	k	1.38×10^{-23}	J/K
ค่าคงที่ของแพลงค์	h	6.63×10^{-34}	J-s
ค่าเพอร์มิตติวิตีของสุญญากาศ	ϵ_0	8.85×10^{-14}	F/cm
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของซิลิกอน	ϵ_s	11.7	F/cm
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของออกไซด์	ϵ_{ox}	3.97	F/cm
ความหนาแน่นของประจุที่ผิวสัมผัสระหว่าง SiO ₂ กับ Si (100)	Q _{ss}	1.4×10^{-8}	C/cm ²
	SiO ₂ กับ Si (111)	Q _{ss}	8×10^{-8}
แรงดันเนื่องจากความร้อน (ที่อุณหภูมิห้อง , 300K)	kT/q	0.0259	mV

2. คุณสมบัติของซิลิกอน ไดออกไซด์

ตัวแปร	ค่า	หน่วย
น้ำหนักอะตอม	60.08	-
ความหนาแน่น	2.3×10^{22}	cm ⁻³
ความต้านทาน (ที่ 300K)	$> 10^{16}$	Ω -cm
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ_{ox})	3.9	-
จุดหลอมเหลว	≈ 1700	$^{\circ}\text{C}$
ความร้อนจำเพาะ	1.0	J/g $^{\circ}\text{C}$
การนำความร้อน	0.014	W/cm $^{\circ}\text{C}$
การขยายตัวเนื่องจากความร้อน	0.5×10^{-6}	($^{\circ}\text{C}$) ⁻¹

3. คุณสมบัติของซิลิกอน

ตัวแปร	ค่าคงที่	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
สัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิของพลังงานแถบต้องห้าม	-2.3×10^{-4}	$\text{eV}/^{\circ}\text{C}$
จุดหลอมเหลว	1417	$^{\circ}\text{C}$
ความคล่องตัวของอิเล็กตรอนที่ผิวของ Si ระนาบ (100)	580	$\text{cm}^2/\text{V-s}$
ความคล่องตัวของอิเล็กตรอนที่ผิวของ Si ระนาบ (111)	190	$\text{cm}^2/\text{V-s}$
ความคล่องตัวของอิเล็กตรอนในเนื้อสารของ Si ระนาบ (100)	1260	$\text{cm}^2/\text{V-s}$
ความคล่องตัวของอิเล็กตรอนในเนื้อสารของ Si ระนาบ (111)	1350	$\text{cm}^2/\text{V-s}$
ความคล่องตัวของโฮลที่ผิวของ Si ระนาบ (100)	230	$\text{cm}^2/\text{V-s}$
ความคล่องตัวของโฮลที่ผิวของ Si ระนาบ (111)	-	$\text{cm}^2/\text{V-s}$
ความคล่องตัวของโฮลในเนื้อสารของ Si ระนาบ (100)	400	$\text{cm}^2/\text{V-s}$
ความคล่องตัวของโฮลในเนื้อสารของ Si ระนาบ (111)	480	$\text{cm}^2/\text{V-s}$
ดัชนีหักเห	3420	-
การนำความร้อน	1.57	W/cm
การขยายตัวเนื่องจากความร้อน	2.6×10^{-6}	$(^{\circ}\text{C})^{-1}$
ค่าคงที่ของผลึก	5.4307	$^{\circ}\text{A}$
ความดันต่อหน่วยปริมาตร	0.98×10^{12}	cm^2/dyn
ฟังก์ชันงานของโฟโตอิมิตอน	5.05	eV
ความแข็ง	7.0	MOHscale
พลังงานความร้อนในการหลอมเหลว	1000	J/g
ความหนาแน่นของพาหะของซิลิกอนบริสุทธิ์	1.45×10^{10}	cm^{-3}
ความดันไอ	2.8×10^{-4}	mm.Hg
โครงสร้างผลึก	f_{CC} , diamond	-

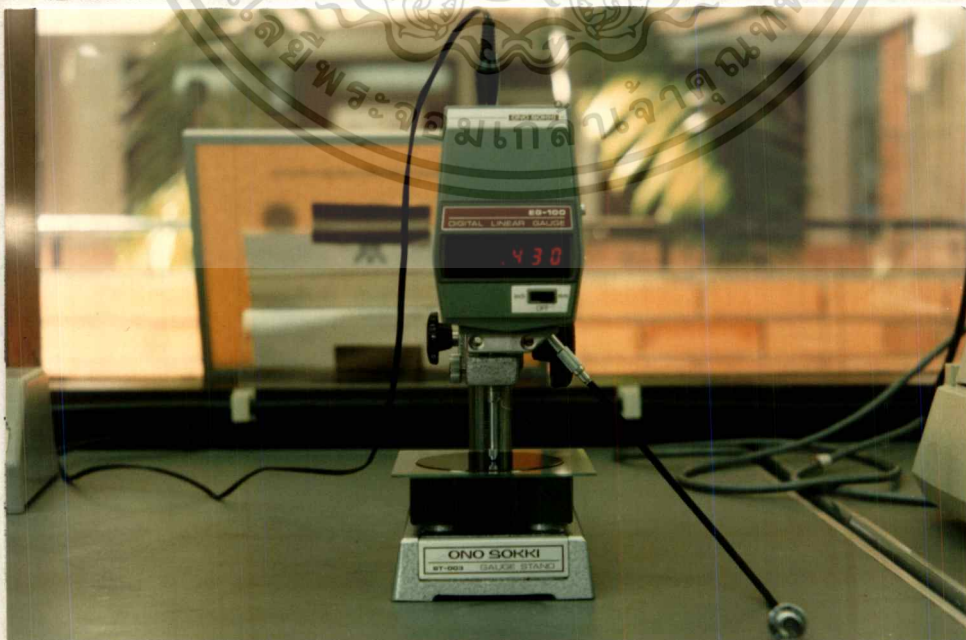
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

รายละเอียดกระบวนการสร้าง IGBT

1. การทำความสะอาดผิวผลึกเริ่มต้น (initial cleaning)

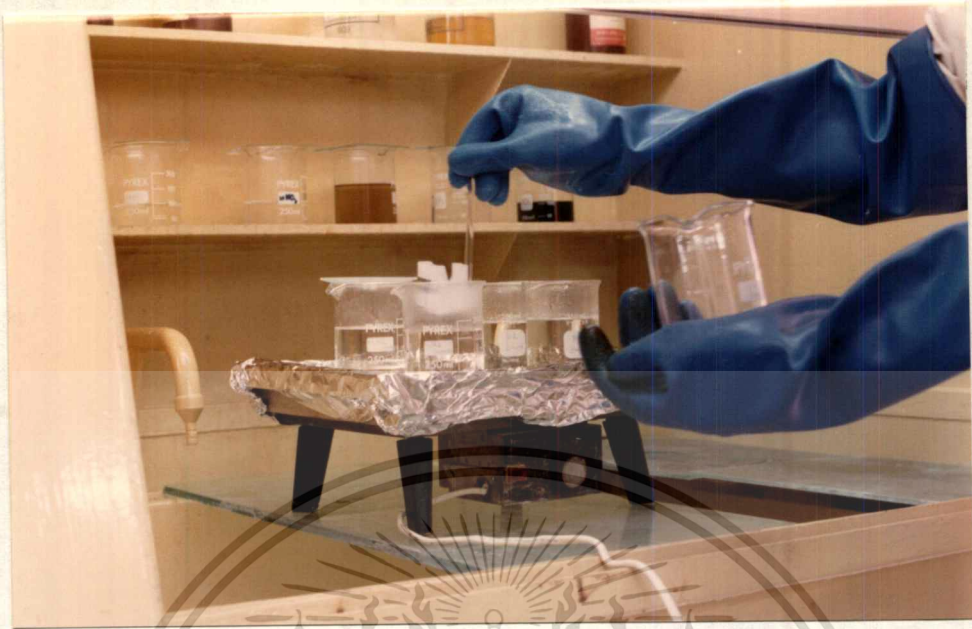
- ทำความสะอาดผิวด้วยน้ำบริสุทธิ์ (deionized water) ในเครื่องสั่นความถี่สูง (supersonic cleaning)
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- กัดผิวหน้าของแผ่นผลึกด้วยกรดกัดแก้ว HF 5% 2 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- ดมในกรดไนตริก (HNO_3) เป็นเวลา 10 นาที เพื่อกำจัดเศษโลหะที่ผิว
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- ดมในน้ำบริสุทธิ์ 5 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ดมในไตรโคลโรเอททีลีน (trichloroethylene) 5 นาทีเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกประเภทไขมัน
- ล้างด้วยอะซิโตน (acetone) ในเครื่องสั่นความถี่สูง 3 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- จุ่มใน HF 5% 20 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



รูปที่ ข1 เครื่องวัดความหนาแผ่นผลึกซิลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข2 การทำความสะอาดแผ่นสลิกซิลิกอน

2. กระบวนการออกซิเดชันครั้งแรก (First Oxidation)

การสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ความหนาไม่น้อยกว่า 4000 \AA สามารถทำได้โดยทิ้งไว้ในบรรยากาศออกซิเจนที่อุณหภูมิ $1100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ แล้วทำการ

- ทำออกซิเดชันแบบแห้ง 120 นาที โดยมีอัตราการไหลผ่านของก๊าซออกซิเจน 1.2 l/min
- ทำออกซิเดชันแบบชื้น 60 นาที โดยมีอัตราการไหลผ่านของก๊าซออกซิเจน 1.0 l/min
- ทำออกซิเดชันแบบแห้ง 60 นาที โดยมีอัตราการไหลผ่านของก๊าซออกซิเจน 1.2 l/min

3. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี (Photolithography)

เป็นกระบวนการพิมพ์ลวดลายลงบนแผ่นซิลิกอน เพื่อเปิดช่องซิลิกอนไดออกไซด์สำหรับแพร่สารเจือ เพื่อทำขั้วโลหะและเพื่อสร้างลวดลายโลหะด้านบน โดยการเคลือบน้ำยาไวแสงลงบนแผ่นสลิกซิลิกอน ด้วย Spinner แล้วนำไปอบแห้ง จากนั้นนำไปทำการพิมพ์ภาพด้วยกระจกต้นแบบ โดยมีรายละเอียดแบ่งตามชนิดน้ำยาไวแสงที่ใช้ได้ 2 แบบคือ

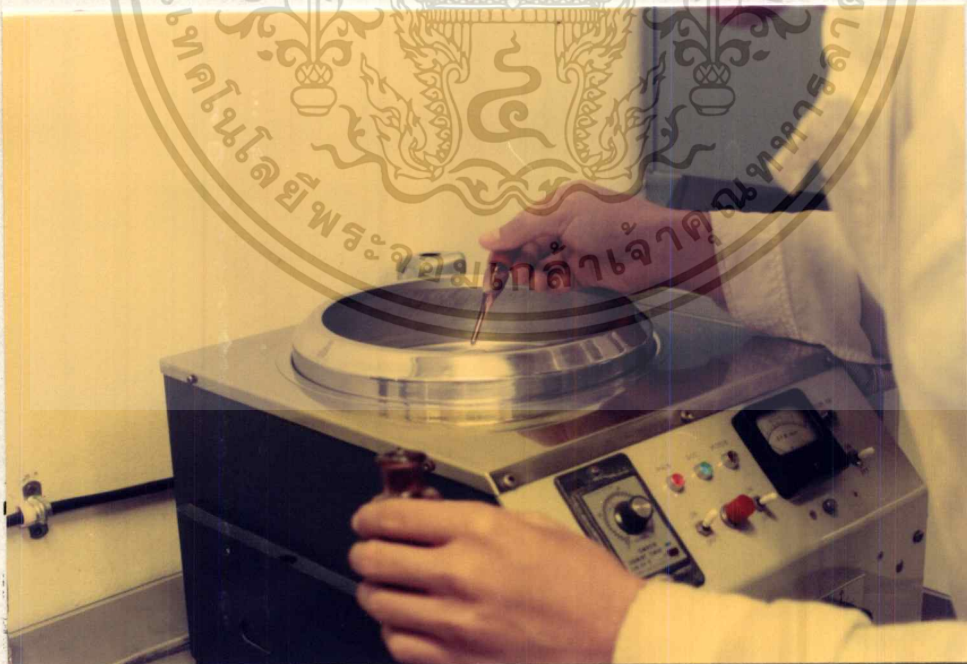
3.1 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟีโดยใช้น้ำยาไวแสงชนิดลบ (way coat) มีลำดับขั้นตอนดังต่อไปนี้

- อบแห้งเพื่อไล่ความชื้นที่ $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงด้วย Spinner ที่ความเร็ว 5000 รอบ/ นาที 30 นาที
- อบครั้งแรก (prebake) เพื่อให้แห้งที่อุณหภูมิ $90\text{-}100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานาน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

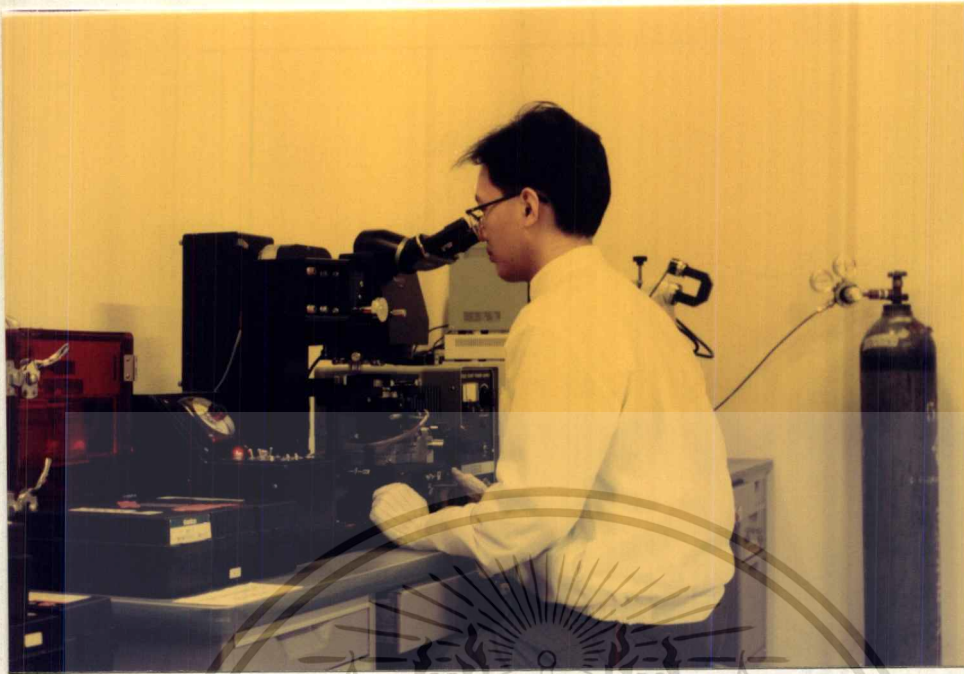
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ฉายแสงผ่านกระจกต้นแบบด้วยเครื่อง mask aligner ที่ใช้หลอดเมอร์คิวรี ($\lambda=5000\text{ \AA}$) ซึ่งจะให้แสง อุลตราไวโอเลต เป็นเวลา 10 นาที
- ล้างภาพโดย
 - ล้างในน้ำยาล้างภาพ (xylene) 2 ครั้งๆละ 2 นาที
 - ล้างในน้ำยาทำความสะอาด (isopropyl) 3 ครั้งๆละ 30 วินาที
 - ล้างในน้ำบริสุทธิ์ แล้วเป่าแห้งทันทีที่แห้งด้วยกาซไนโตรเจน
- อบครั้งที่สอง (posbake) เพื่อให้ฟิล์มแห้งที่อุณหภูมิ $90-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 30 นาที
- ทาด้านหลังแผ่นผลึกด้วยน้ำยาไวแสง (waycoat) แล้วอบแห้งอีกครั้ง 20 นาที
- กัดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ด้วยสารละลาย buffer โดยมีอัตราการกัดที่ $1000\text{ }^{\circ}\text{C/นาท}$
- ลอกน้ำยาไวแสงโดย
 - ต้มในกรด ซัลฟูริก (H_2SO_4) 10 นาที
 - ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
 - ต้มในน้ำบริสุทธิ์ 5 นาที
 - ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
 - เป่าแห้งด้วยกาซออกซิเจน
- นำไปทำความสะอาดของผิวผลึก
- ทำความสะอาดผิวผลึก



รูปที่ ข3 การเคลือบฟิล์มลงบนแผ่นผลึกซิลิกอนโดยใช้เครื่อง spinner

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข4 การถ่ายภาพจากกระจกต้นแบบลงบนแผ่นผลึกซิลิกอน

3.2 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี โดยใช้น้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ-1350) โดยมีวิธีการดังต่อไปนี้

- อบแห้งเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 100°C 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงโดย Spinner ที่ความเร็ว 5000 รอบ/นาที 30 วินาที
- ฉายแสงผ่านกระจกต้นแบบ 10 วินาที
- ล้างภาพโดยใช้น้ำยา AZ-developer 2 ครั้งๆละ 30 วินาที แล้วล้างออกด้วยน้ำบริสุทธิ์ แล้วเป่าแห้งด้วยกาซไนโตรเจน
- อบครั้งที่สองให้แผ่นแห้งที่ $85-90^{\circ}\text{C}$ 30 นาที
- กัดโลหะโดยใช้กรดกัดโลหะ
- ลอกน้ำยาไวแสงออกโดย
 - ล้างในอะซิโตน 1 นาที
 - ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
 - เป่าแห้งด้วยไนโตรเจน

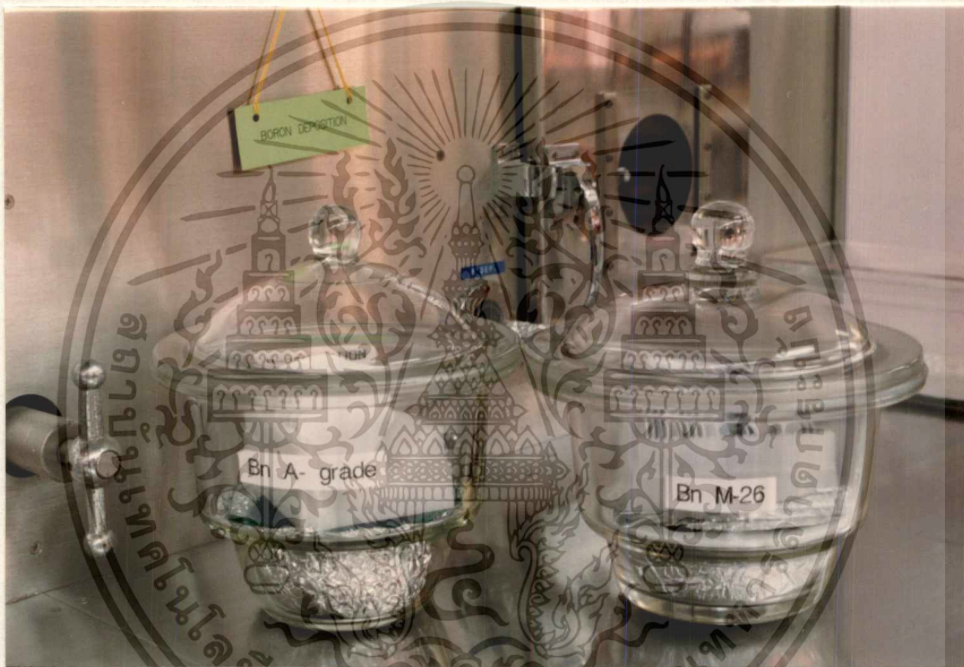
4. กระบวนการแพร่สารเจือส่วน P^+ -collector และ P-base (P^+ -collector/P-base deposition)

กระบวนการแพร่สารเจือโบรอนโดยใช้แหล่งจ่ายสารเจือ BN(A) ที่อุณหภูมิ 820°C มี

เงื่อนไขดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Activation แหล่งจ่ายสารเจือโบรอน 30 นาที ในบรรยากาศของออกซิเจนที่มีอัตราการไหล 0.6 ลิตร/นาที
- Stabilite ในบรรยากาศไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 0.6 ลิตร/นาที เป็นเวลา 30 นาที
- Predeposition โดยการนำแผ่นผลึกและแหล่งจ่ายสารเจือเข้าเตาพร้อมกัน ในบรรยากาศไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 0.6 ลิตร/นาที เป็นเวลา 30 นาที
- ลอกชั้น borosilicate glass (BGS) โดย
 - แซ่ไครดกัดแก้ว 5% 10 นาที
 - ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
 - เป่าแห้งด้วยกาซออกซิเจน



รูปที่ ข5 แหล่งจ่ายสารเจือชนิดของแข็ง

5. กระบวนการขับเคลื่อนส่วน P^+ -collector และ P -base / สร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ใหม่ (P^+ -collector and P -base drive-in/Reoxidation)

การขับเคลื่อนสารเจือโบรอนพร้อมทั้งสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 1100 °C 14 ชั่วโมง โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

สำหรับชั้น P^+ -collector

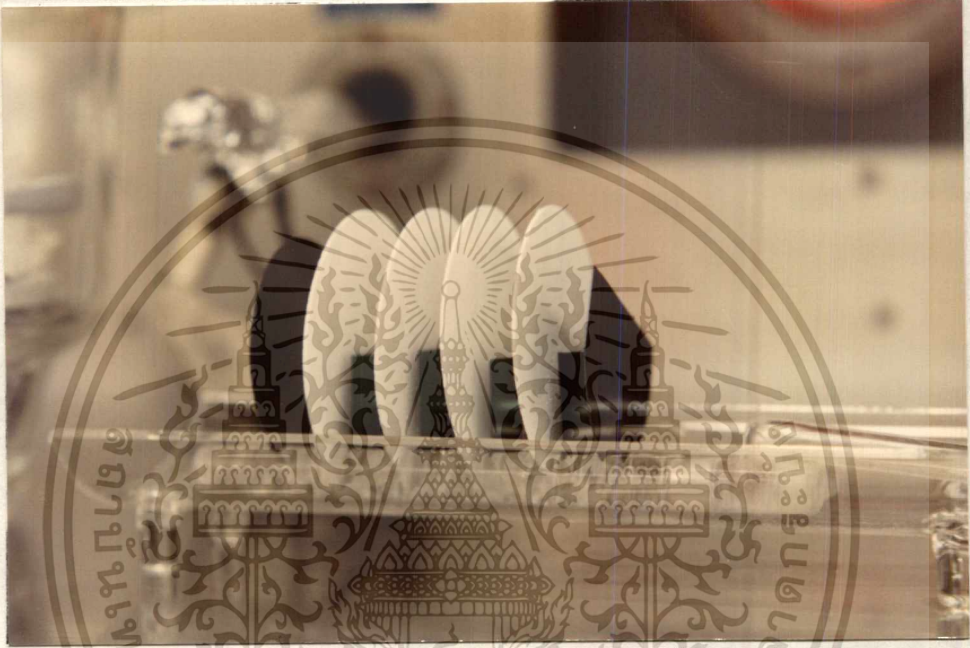
- ออกซิเดชันแบบแห้ง 1 ชั่วโมง โดยมีอัตราการไหลของกาซออกซิเจน 1 ลิตร/นาที
- ออกซิเดชันแบบชื้น 0.5 ชั่วโมง โดยมีอัตราการไหลของกาซออกซิเจน 0.8 ลิตร/นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

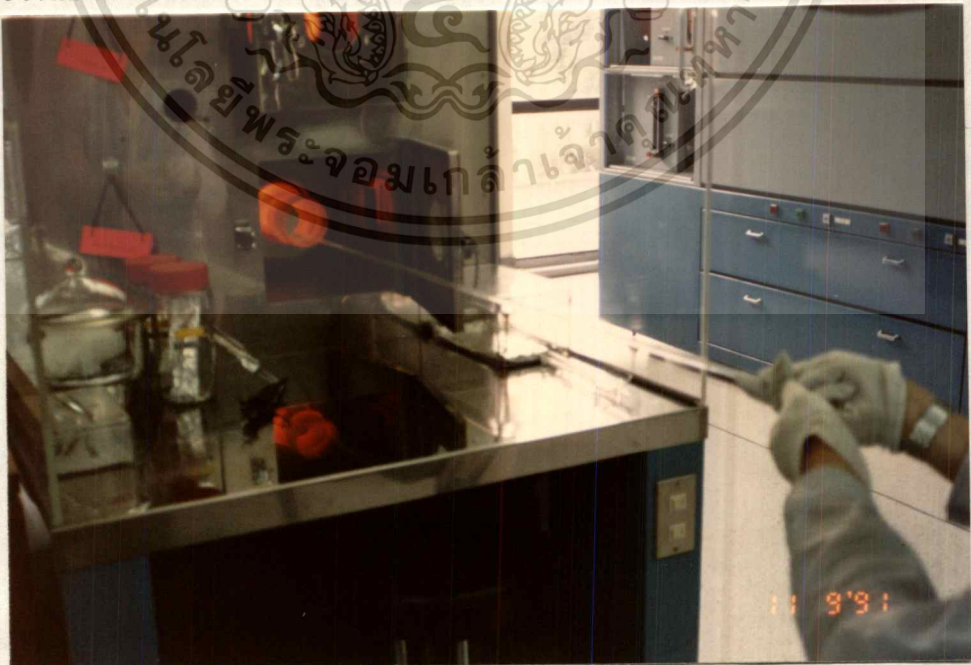
- ออกซิเดชันแบบแห้ง 0.5 ชั่วโมง โดยมีอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1 ลิตร/นาที่

สำหรับชั้น P-base

- ออกซิเดชันแบบแห้ง 12 ชั่วโมง โดยมีอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1 ลิตร/นาที่
- ออกซิเดชันแบบชื้น 20 นาที โดยมีอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 0.8 ลิตร/นาที่
- ออกซิเดชันแบบแห้ง 100 นาที โดยมีอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1 ลิตร/นาที่



รูปที่ ข6 การวางแผ่นผลึกซิลิกอนประกบกับแหล่งจ่ายสารเจือก่อนนำเข้าเตาแพร่สารเจือ



รูปที่ ข7 การดันแผ่นผลึกซิลิกอนเข้าเตาแพร่สารเจือ

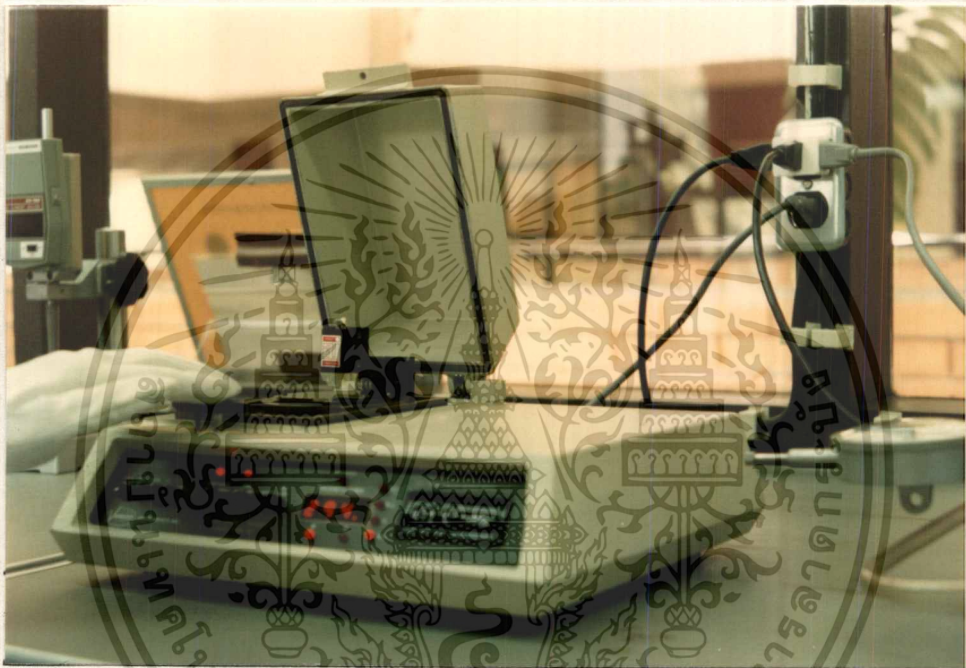
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. กระบวนการแพร่สารเจือส่วน N^+ -emitter (N^+ -emitter deposition)

กระบวนการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสด้วยแหล่งจ่ายสารเจือ SiP_2O_7 (PH1000) ที่อุณหภูมิ $1040^\circ C$ 15 นาที ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 0.6 ลิตร/นาที แล้วลอกชั้น phosphorosilicate glass (PSG) โดย

- แช่ในกรดกัดแก้ว 5% 10 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



รูปที่ ข8 เครื่องวัดความต้านทานผิวเพื่อบอกค่าความหนาแน่นอะตอมสารเจือ

7. การสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์สำหรับขั้วเกต (Dry oxidation for gate oxide)

การสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ที่ส่วนเกตโดยการออกซิเดชันแบบแห้งที่อุณหภูมิ $1100^\circ C$ 30 วินาที ในบรรยากาศของออกซิเจนที่มีอัตราการไหลของออกซิเจน 1 ลิตร/นาที จะได้ชั้นซิลิกอนไดออกไซด์หนาประมาณ 1000 \AA

8. การเคลือบอลูมิเนียมในสุญญากาศ (Aluminium evaporator)

ทำการเคลือบอลูมิเนียมในสุญญากาศโดยใช้เครื่องเคลือบสุญญากาศ (Vacuum evaporator) ที่ความหนาของชั้นอลูมิเนียมประมาณ 1 ไมครอน

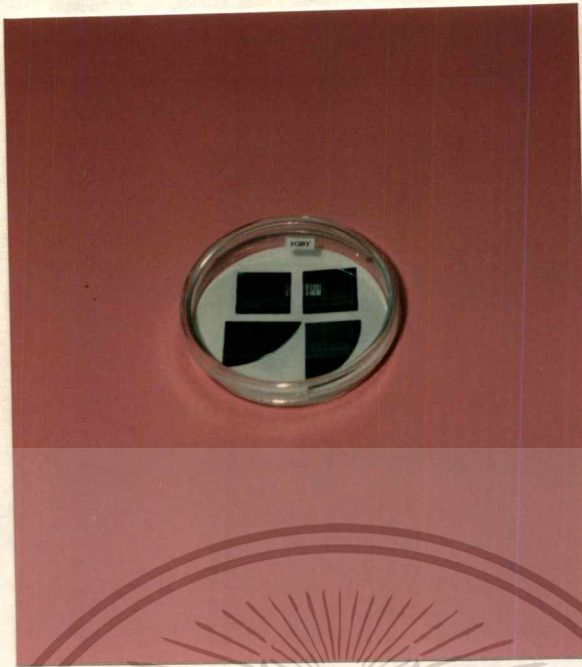
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข9 การเคลือบอลูมิเนียมในสุญญากาศ โดยใช้เครื่องเคลือบสุญญากาศ

9 การทดสอบอุปกรณ์บนแผ่นผลึกซิลิกอน (On wafer test)

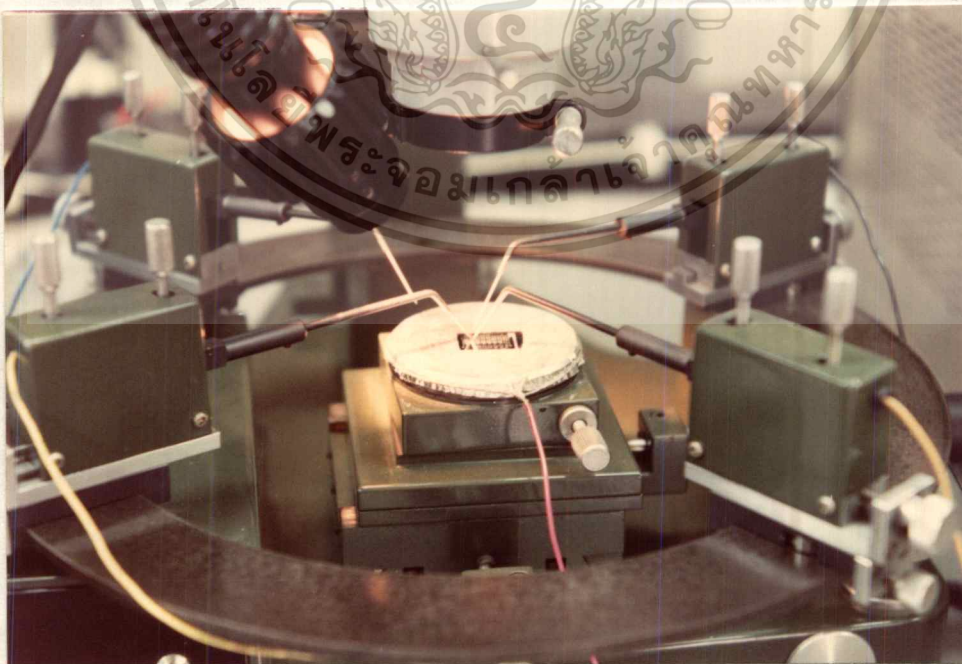
หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการสร้างทุกขั้นตอนแล้ว ก่อนจะตัดแบ่งอุปกรณ์ที่สร้างเสร็จแล้ว จะต้องมีการตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าก่อนโดยใช้ Probe station ซึ่งเป็นเข็มที่ใช้จิ้มลงไปบนจุดต่อสาย (bonding pad) ของส่วนต่างของตัวอุปกรณ์ ซึ่งจะต่อเข้ากับเครื่องวัดคุณสมบัติทรานซิสเตอร์ (Transistor curve tracer) เพื่อทดสอบการทำงานของอุปกรณ์แต่ละตัว โดยที่อุปกรณ์ตัวที่ไม่สมบูรณ์จะถูกคัดออก



รูปที่ ข10 ภาพถ่าย IGBT ที่สร้างเสร็จเรียบร้อย

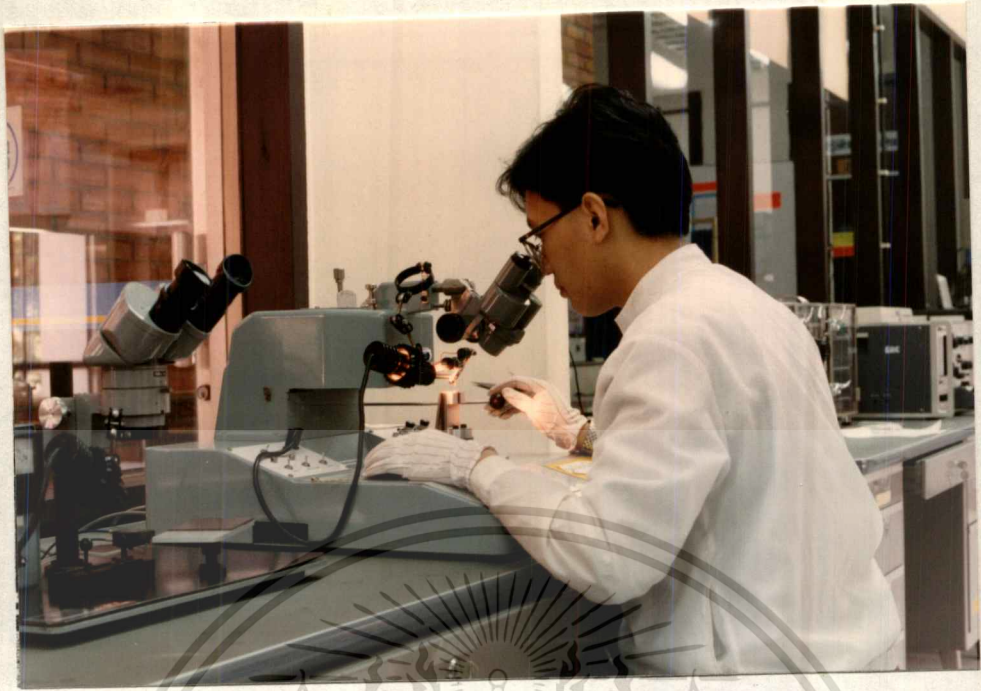
10 การเก็บบรรจุอุปกรณ์ IGBT ลงบนตัวถัง

หลังจากผ่านการทดสอบคุณสมบัติครั้งแรกแล้ว นำอุปกรณ์ตัวที่สมบูรณ์ไปทำการตัดและบรรจุลงบนตัวถัง โดยจะทำการเชื่อมลวดโลหะระหว่างตัวอุปกรณ์กับตัวถังด้วยเครื่องเชื่อมลวดโลหะความถี่สูงแล้วจึงทำการปิดฝาตัวถัง หลังจากนั้นอุปกรณ์ก็พร้อมที่จะใช้งานได้



รูปที่ ข11 การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าครั้งแรกของอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข12 การเชื่อมลวดโลหะโดยใช้เครื่องเชื่อมลวดโลหะความถี่สูงอุปกรณ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

1. การหาความหนาแน่นอะตอมสารเจือ

ก่อนที่จะทำการคำนวณหาความหนาแน่นอะตอมสารเจือในกระบวนการสร้าง นอกจากจะต้องทราบค่าความต้านทานที่ได้จากการวัดแล้วยังต้องทราบถึงค่าความลึกของรอยต่อ ซึ่งวิธีการวัดจะได้กล่าวถึงในหัวข้อถัดไป ในหัวข้อนี้เราสามารถคำนวณหาค่าพิคกความต้านทานซึ่งเป็นตัวแปรหนึ่งที่ใช้ในการคำนวณหาความหนาแน่นอะตอมสารเจือได้จากสมการ

$$\rho = \rho_s \cdot X_j \quad (I)$$

เมื่อ ρ_s คือความต้านทานแผ่น (sheet resistivity) ซึ่งได้จากการวัดด้วยเครื่อง four point probe ในระหว่างกระบวนการสร้าง (Ω/\square)

X_j คือความลึกของรอยต่อ (cm)

จากนั้นนำค่าพิคกความต้านทานที่คำนวณได้ไปคำนวณหาความหนาแน่นอะตอมสารเจือได้จากสมการ

$$N = \frac{1}{q\mu\rho} \quad (II)$$

เมื่อ q คือค่าประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน (C)

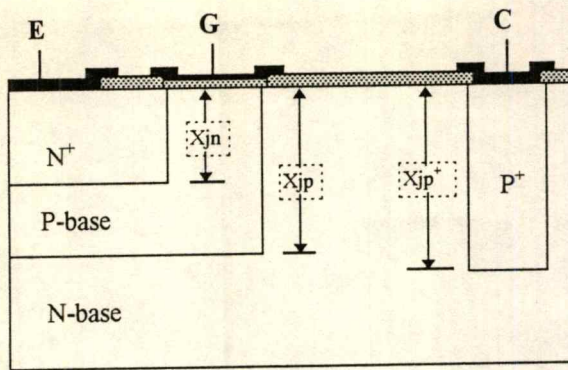
μ คือความคล่องตัวของประจุพาหะ ($\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)

2. การหาความลึกของรอยต่อ (X_j) ด้วยวิธี grooving

grooving machine เป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่ใช้ในการหาค่าความลึกของรอยต่อ อุปกรณ์ชนิดนี้จะประกอบด้วยวงล้อเส้นผ่าศูนย์กลาง(D) 4 cm. โดยจะหมุนและขุดลงไปบนแผ่นผลึกประมาณ 75-100 รอบ ทำให้เกิดหลุมรูปวงรี จากนั้นนำไปข้อมสีโดยใช้สารละลายซึ่งผสมกันระหว่างกรดกัดแก้ว (HF) กับกรดไนตริก (HNO_3) อัตราส่วน 500:1 เมื่อข้อมสีแล้วชั้นพีจะมีสีเข้มกว่าชั้นเอ็น ดังตัวอย่างในรูปที่ ค2 จากนั้นวัดค่า X และ Y แล้วนำไปหาค่าความลึกของรอยต่อโดยอาศัยสมการ

$$X_j = \frac{XY}{D} \quad (III)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก1 ลักษณะ โครงสร้างของรอยต่อ เมื่อ

X_{jp+} คือความลึกของรอยต่อของชั้น P^+ -collector

X_{jp} คือความลึกของรอยต่อของชั้น P-base

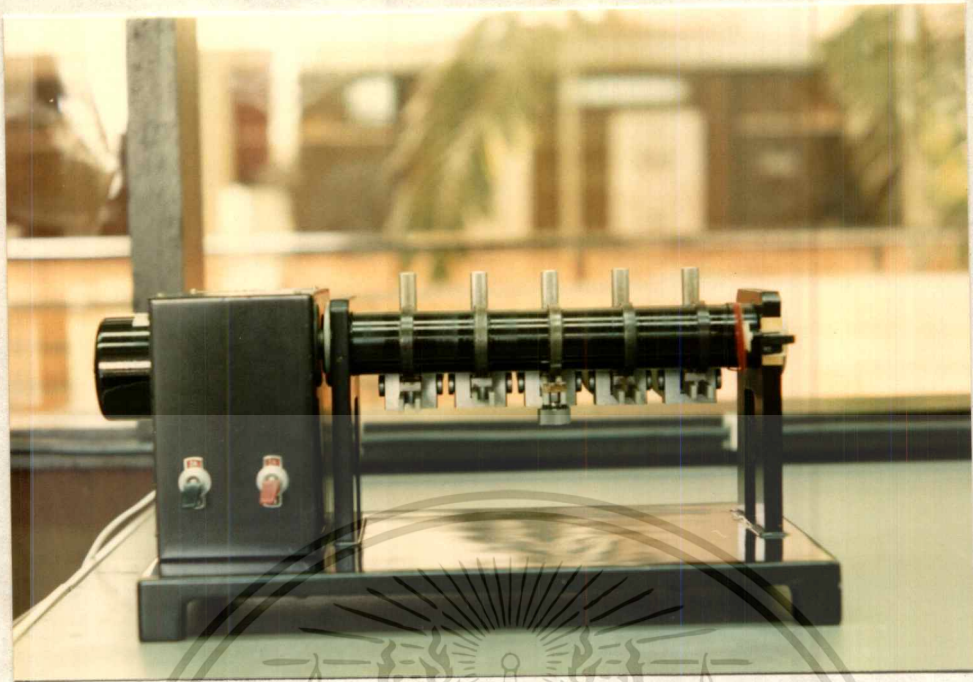
X_{jn} คือความลึกของรอยต่อของชั้น N^+ -emitter

D คือเส้นผ่าศูนย์กลางกลางของวงล้อที่ใช้ชุดใน grooving machine



รูปที่ ก2 ภาพถ่ายจริงของรอยต่อที่ผ่านการ grooving แล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก2 เครื่อง grooving



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายพอล รุจนพิชญ์ เกิดเมื่อวันที่ 21 ตุลาคม พ.ศ. 2511 ที่จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ จากมหาวิทยาลัยศิลปากร ปีการศึกษา 2533 จากนั้นเข้าทำการศึกษาต่อในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2535 มีผลงานที่เป็นที่ยอมรับนอกเหนือจากวิทยานิพนธ์ จำนวน 6 เรื่องคือ 1.การพิจารณาการออกแบบดีมอสทอนแรงดันสูงด้วยฟิล์ดริ่งค์และฟิลด์เพลต 2.การพัฒนาดีมอสให้มีแรงดันพังทลายสูง 3.การออกแบบและสร้างมอสเฟตกำลังแบบวีมอส 4.การสร้างไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกทเป็นฉนวน 5.ความกว้างของ N-base ที่มีผลต่อความสามารถในการนำกระแสของ IGBT และ 6. Generalization of Ramo's Theorem and Its Application to Semiconducting Materials ปัจจุบันรับราชการในตำแหน่งเจ้าหน้าที่วิจัยระดับ 4 ที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ