

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาโครงสร้างและสร้างไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็น
ในแนวระนาบที่มีเกตเป็นฉนวน

STUDY ON STRUCTURE AND FABRICATION OF LATERAL INSULATED
GATE BIPOLAR TRANSISTOR



โดย

นางสาวกนกพรรณ อินทรรุจิกุล 39014003

นางสาวกนกวรรณ ถาวรกุล 39014004

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2542

เลขหมึก.....
เลขทะเบียน.....**36931**.....
วัน, เดือน, ปี.....**29 ส.ค. 2542**.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
โดยไม่ได้รับอนุญาต หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูง และขอแจ้งให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาโครงสร้างและสร้างไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็น
ในแนวระนาบที่มีเกตเป็นฉนวน

**STUDY ON STRUCTURE AND FABRICATION OF LATERAL INSULATED
GATE BIPOLAR TRANSISTOR**

โดย

นางสาวกนกพรรณ อินทรจุฑกุล 39014003

นางสาวกนกวรรณ ถาวรกุล 39014004

อาจารย์ที่ปรึกษา

อ. สุรศักดิ์ เนียมเจริญ

ปริญญาานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2542

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์ การศึกษาโครงสร้างและสร้างไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นในแนว
ระนาบที่มีเกตเป็นฉนวน

STUDY ON STRUCTURE AND FABRICATION OF LATERAL
INSULATED GATE BIPOLAR TRANSISTOR

ชื่อนักศึกษา

นางสาวกนกพรหม อินทรจุฑิต รหัสประจำตัว 39014003

นางสาวกนกวรรณ ถาวรกุล รหัสประจำตัว 39014004

โครงการได้รับการตรวจสอบแล้ว พร้อมทั้งจะทำการสอบได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ ปีการศึกษา 2542


ภาควิชา วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาโครงสร้างและสร้างไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นในแนวระนาบที่มีเกทเป็น
ฉนวน

ผู้จัดทำ

1. นางสาวกนกพรรณ อินทรจุฑกุล
2. นางสาวกนกวรรณ ถาวรกุล


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อ. สุรศักดิ์ เนียมเจริญ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาโครงสร้างและสร้างไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็น ในแนวระนาบที่มีเกทเป็นฉนวน

นางสาวกนกพรรณ อินทรภูจิกุล

นางสาวกนกวรรณ ถาวรกุล

อ. สุรศักดิ์ เนียมเจริญ (อาจารย์ที่ปรึกษา)

ปีการศึกษา 2542

บทคัดย่อ

ปัจจุบันอุปกรณ์กำลังที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในวงจรรีเลย์ทรอนิกส์ โดยทั่วไปได้แก่ ทรานซิสเตอร์กำลังและมอสเฟตกำลัง แต่อุปกรณ์ทั้งสองยังมีข้อจำกัดในการทำงานที่แตกต่างกัน ออกไป จึงได้มีการคิดค้นอุปกรณ์กำลังอีกชนิดหนึ่งขึ้นมาเพื่อแก้ไขข้อจำกัดในการทำงานของอุปกรณ์ทั้งสอง โดยเรียกอุปกรณ์ชนิดนี้ว่า ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นในแนวระนาบที่มีเกทเป็นฉนวน (Lateral Insulated Gate Bipolar Transistor : LIGBT) ซึ่งอุปกรณ์ LIGBT นี้มีความต้านทานในสถานะนำกระแสต่ำและมีความหนาแน่นกระแสสูงกว่า Lateral double Diffusion MOS Transistor (LDMOST) ถึง 79.97% นอกจากนี้ในเทคโนโลยีสมัยใหม่วงจรรวมเข้ามามีบทบาทสำคัญมากขึ้นและเป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย ซึ่งภายในจะมีวงจรรูปแบบต่างๆซึ่งประกอบไปด้วย อุปกรณ์ขยายมากมาย รวมทั้งอุปกรณ์กำลังด้วย การนำอุปกรณ์ LIGBT มาเป็นภาคขยายสุดท้ายของวงจรรวมทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของวงจรรวมนั้นดีขึ้น นอกจากนี้ยังเป็นการลดพื้นที่ภายในวงจรรวมลงอย่างเห็นได้ชัดอีกด้วย จึงทำให้อุปกรณ์ LIGBT นี้เป็นที่น่าสนใจและน่าศึกษาเป็นอย่างยิ่ง

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการสร้าง LIGBT โดยผ่านกระบวนการไมโครอิเล็กทรอนิกส์พื้นฐานเช่น การสร้างชั้นฉนวนซิลิคอนไดออกไซด์, การแพร่สารเจือ, การสร้างขั้วสัมผัส เป็นต้น ผลจากการทำงานได้ของLIGBT และนำมาทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานตามที่กล่าวเบื้องต้น และได้ผลเป็นที่น่าพอใจ ดังแสดงในตารางผลการทดลอง

STUDY ON STRUCTURE AND FABRICATION OF LATERAL INSULATED GATE BIPOLAR TRANSISTOR

Miss Kanokpan Intararujikul

Miss Kanokwan Thawonkun

Mr. Surasuk Niemcharoung (Advisor)

1999

ABSTRACT

This project presents fabrications of a electronics device called Lateral Insulated Gate Bipolar Transistor (LIGBT). Power transistors and Power MOSFET's play important roles in electronics circuits this results in development of a new structure of the device for lower resistivity when conducting current and higher current density as high as 79.97% than the Lateral Double Diffusion MOS Transistor (LDMOST). The better characteristics and specifications of the new device results to better operation efficiency when used as the final amplifier. Also, LIGBT helps to reduce the size of the whole circuit that is one of the main part circuit designs.

In conclusion, we are able to fabricate LIGBT that meets the basic specifications. The test results have been shown in the report in both Tables and Plots.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยดี เนื่องด้วยได้รับคำปรึกษาชี้แนวทางในด้านต่างๆ ทั้งทางทฤษฎีและปฏิบัติ รวมทั้งช่วยแก้ปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้น อีกทั้งยังสนับสนุนในเรื่องของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวิจัย จึงขอขอบคุณ คุณภควัต สรวยสุวรรณ คุณนรินทร์ อติวงศ์แสงทอง คุณรังสรรค์ เมืองเหลือ คุณอภิณัย ฤทธิรัตน์ และคุณศรายุทธ วิสวแสวงสูงที่ให้ความช่วยเหลือในด้านการปฏิบัติงานวิจัยตลอดมา รวมทั้งขอขอบคุณศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ สจล. ที่ทำให้ผู้ทำปริญญานิพนธ์ได้มีการศึกษาการปฏิบัติงานและสร้างชิ้นงานได้เป็นผลสำเร็จ

กนกพรณ อินทรจุฑกุล

(นางสาวกนกพรณ อินทรจุฑกุล)

กนกพรณ อติวงศ์แสงทอง

(นางสาวกนกพรณ อติวงศ์แสงทอง)

ผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	A
ABSTRACT	B
กิตติกรรมประกาศ	C
สารบัญ	D
สารบัญตาราง	F
สารบัญภาพ	G
คำนำ	J
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมา	1
1.2 การเปรียบเทียบระหว่าง IGBT, มอสเฟตกำลังและ ไอพอลาร์ทรานซิสเตอร์	2
1.3 โครงสร้างในแนวระนาบของ IGBT	3
1.4 โครงสร้างในแนวตั้งของ IGBT	3
บทที่ 2 ทฤษฎี LIGBT	5
2.1 โครงสร้างและหลักการทำงานพื้นฐาน	5
2.1.1 สภาวะปิดกั้นย้อนกลับ (Reverse Blocking Mode)	6
2.1.2 สภาวะปิดกั้นไปหน้า (Forward Blocking Mode)	6
2.1.3 สภาวะนำกระแสไปหน้า (Forward Conduction Mode)	7
2.2 การวิเคราะห์หลักการทำงาน	9
2.2.1 ความสามารถในการปิดกั้นย้อนกลับ (Reverse Blocking Capability)	10
2.2.2 ความสามารถในการปิดกั้นไปหน้า (Forward Blocking Capability)	11
2.2.3 ความสามารถในการนำกระแสไปหน้า (Forward Conduction)	11
2.3 แลทช์-อัฟ (Latch-up)	15
บทที่ 3 กระจกต้นแบบและกระบวนการสร้าง LIGBT	16
3.1 การเลือกแผ่นซิลิคอนเริ่มต้น	16
3.2 การออกแบบโครงสร้าง LIGBT	17
3.3 การออกแบบและสร้างกระจกต้นแบบ	17
3.4 กระบวนการสร้างสารกึ่งตัวนำในแนวระนาบ (Planar process)	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.1 การปลูกผลึกซิลิคอน	23
3.4.2 กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation)	24
3.4.3 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี (Photolithography)	25
3.4.4 กระบวนการแพร่อะตอมสารเจือ (Diffusion)	25
3.4.5 กระบวนการสร้างลวดลายโลหะ (Metalization)	27
3.5 กระบวนการสร้างมาตรฐาน	27
3.5.1 กระบวนการสร้างมาตรฐานของ LIGBT	28
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	32
4.1 การทดสอบรอยต่อพี-เอ็น	32
4.2 การทดสอบรอยต่อและนวนซิลิคอนไดออกไซด์ภายใต้เกทของโครงสร้าง LIGBT	35
4.3 การทดสอบการทำงานของ LIGBT ในลักษณะของทรานซิสเตอร์	39
4.4 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆของ LIGBT	44
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	50
เอกสารอ้างอิง	
รายละเอียดกระบวนการสร้าง LIGBT	

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 เปรียบเทียบตัวแปรของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นในแนวระนาบ ที่มีเกทเป็นฉนวน, มอสเฟตกำลังและไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์กำลัง	2
ตารางที่ 3.1 กระบวนการสร้าง LIGBT บนแผ่นผลึกฐานรองซิลิคอนชนิดเอ็น	28
ตารางที่ 4.1 ค่าตัวแปรต่างๆของ LIGBT และ LDMOST	47
ตารางที่ 4.2 ผลของความเร็วในการสวิตชิงของ LIGBT	49



สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 โครงสร้างภาพตัดขวางของ IGBT ในแนวระนาบ	3
รูปที่ 1.2 โครงสร้างภาพตัดขวางของ IGBT ในแนวตั้ง	3
รูปที่ 2.1 โครงสร้างภาพตัดขวางของอุปกรณ์เปรียบเทียบกับระหว่าง (ก) ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ชนิดเอ็นในแนวระนาบที่มีเกทเป็นฉนวน (LIGBT) (ข) มอสเฟตกำลังแบบคิมอส (LDMOST)	5
รูปที่ 2.2 การให้แรงดันไบอัสกับ LIGBT เพื่อให้ทำงานในสภาวะปิดกั้นย้อนกลับ	6
รูปที่ 2.3 การให้แรงดันไบอัสกับ LIGBT เพื่อให้ทำงานในสภาวะปิดกั้นไปหน้า	6
รูปที่ 2.4 การให้แรงดันไบอัสกับ LIGBT เพื่อให้ทำงานในสภาวะนำกระแสไปหน้า	7
รูปที่ 2.5 รอยต่อ โครงสร้างของ LIGBT	8
รูปที่ 2.6 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของ LIGBT	9
รูปที่ 2.7 (ก) วงจรสมมูลของ LIGBT (ข) สัญลักษณ์ทางไฟฟ้าของ LIGBT	11
รูปที่ 2.8 โครงสร้างภาพตัดขวางของ LIGBT	12
รูปที่ 2.9 วงจรสมมูลของ LIGBT ที่ประกอบด้วยไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์แบบ P-N-P ต่อแบบคาร์ลิงตันกับมอสเฟต ในขณะที่ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์แบบ N-P-N ไม่ทำงาน	12
รูปที่ 3.1 โครงสร้าง N^+P-N-P^+ ในแนวระนาบของ LIGBT	16
รูปที่ 3.2 การตัดลวดตายจากกระดาศกราฟต้นแบบที่ออกแบบไว้บนแผ่น โปลิเอสเตอร์ ด้วยเครื่องมือ โครคัตเตอร์	17
รูปที่ 3.3 การนำแผ่น โปลิเอสเตอร์ต้นแบบที่ตัดลวดตายแล้วไปถ่ายย่ส่วน 50 เท่า ลงบนกระจกต้นแบบ	18
รูปที่ 3.4 กระจกต้นแบบที่พร้อมสำหรับกระบวนการสร้างอุปกรณ์ LIGBT	18
รูปที่ 3.5 ลวดตายหนึ่งชนิดเซลล์ของ LIGBT โครงสร้างในแนวระนาบที่ออกแบบบน กระดาศกราฟไฟ	19
รูปที่ 3.6 กระบวนการสร้างทั้งหมด	21
รูปที่ 3.7 ขั้นตอนพื้นฐานของกระบวนการสร้างในแนวระนาบ	22
รูปที่ 3.8 การปลูกผลึกแบบ โซคราตสกี	23
รูปที่ 3.9 กระบวนการ โฟโตลิโทกราฟี	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.10 ภาพถ่ายของ LIGBT ที่สร้างเสร็จเรียบร้อยแล้ว	30
รูปที่ 3.11 กระบวนการสร้าง LIGBT ตาม โครงสร้างในแนวระนาบและกระจัดแบบ	31
รูปที่ 4.1 การนำชิ้นงานที่สร้างเรียบร้อยแล้วมาวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าโดยใช้เครื่อง Transistor Curve Tracer	32
รูปที่ 4.2 (ก) รอยต่อพี-เอ็นระหว่าง P ⁺ -collector กับ N-base ของ โครงสร้าง Test Pattern (Hor:50 V/div, Ver:5 mA/div)	33
รูปที่ 4.2 (ข) รอยต่อพี-เอ็นระหว่าง P-base กับ N-base ของ โครงสร้าง Test Pattern (Hor:50 V/div, Ver:5 mA/div)	34
รูปที่ 4.2 (ค) รอยต่อ N ⁺ -P-N ของ โครงสร้าง Test Pattern (Hor:50 V/div, Ver:5 mA/div)	34
รูปที่ 4.3 (ก) กราฟรอยต่อระหว่างขั้วเกตกับขั้วอิมิตเตอร์ (Hor:0.5 V/div, Ver:2 mA/div)	35
รูปที่ 4.3 (ข) กราฟรอยต่อระหว่างขั้วเกตกับขั้วคอลเลคเตอร์ (Hor:0.5 V/div, Ver:2 mA/div)	36
รูปที่ 4.3 (ค) กราฟรอยต่อระหว่างขั้วคอลเลคเตอร์กับขั้วอิมิตเตอร์และภาพตัดขวางของรอยต่อ (Hor:20 V/div, Ver:5 mA/div)	36
รูปที่ 4.3 (ง) กราฟรอยต่อระหว่าง P-base กับ N-base (Hor:50 V/div, Ver:5 mA/div)	37
รูปที่ 4.3 (จ) กราฟรอยต่อระหว่าง P ⁺ -collector กับ N-base (Hor:50 V/div, Ver:5 mA/div)	37
รูปที่ 4.4 (ก) กราฟรอยต่อระหว่างขั้วเกตกับขั้วซอส (Hor:0.5 V/div, Ver:2 mA/div)	38
รูปที่ 4.4 (ข) กราฟรอยต่อระหว่างขั้วเกตกับขั้วเดรน (Hor:0.5 V/div, Ver:2 mA/div)	38
รูปที่ 4.4 (ค) กราฟรอยต่อระหว่างขั้วเดรนกับขั้วซอส (Hor:0.5 V/div, Ver:2 mA/div)	39
รูปที่ 4.5 (ก) กราฟแรงดันขีดเริ่ม (V _T :Threshold Voltage) ของ LIGBT (Hor:1 V/div, Ver:2 mA/div)	40
รูปที่ 4.5 (ข) กราฟแรงดันขีดเริ่ม (V _T :Threshold Voltage) ของ LDMOST (Hor:1 V/div, Ver:2 mA/div)	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.5 (ค) กราฟกระแสรั่วไหล (I_{CES}) ของ LIGBT (Hor:1 V/div, Ver:0.05 mA/div)	41
รูปที่ 4.5 (ง) กราฟกระแสรั่วไหล (I_{DSS}) ของ LDMOST (Hor:1 V/div, Ver:0.05 mA/div)	41
รูปที่ 4.5 (จ) การทนแรงดันปิดกั้นไปหน้าของ LIGBT (Hor:20 V/div, Ver:10 mA/div)	42
รูปที่ 4.5 (ฉ) การทนแรงดันปิดกั้นไปหน้าของ LDMOST (Hor:20 V/div, Ver:10 mA/div)	42
รูปที่ 4.5 (ช) ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์กับแรงดันคอลเลคเตอร์-อิมิตเตอร์ ของ LIGBT (Hor:0.5 V/div, Ver:10 mA/div)	43
รูปที่ 4.5 (ซ) ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรนกับแรงดันเดรน-ซอสของ LDMOST (Hor:0.5 V/div, Ver:10 mA/div)	43
รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายด้านบนของ LIGBT โครงสร้างในแนวระนาบ	44
รูปที่ 4.7 แรงดันขั้วเริ่ม (V_T) ของ LIGBT (Hor:0.5 V/div, Ver:5 mA/div)	44
รูปที่ 4.8 แรงดันไปหน้า (Built in voltage) ของ LIGBT (Hor:0.2 V/div, Ver:5 mA/div)	45
รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I_C และแรงดัน V_{CE} ของ LIGBT (Hor:1 V/div, Ver:5 mA/div, 0.5 V/step, 7step)	45
รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส I_D และแรงดัน V_{DS} ของ LDMOST (Hor:1 V/div, Ver:5 mA/div, 0.5 V/step, 7step)	46
รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส I_C และแรงดัน V_{CE} ของ LIGBT ที่ทำงานใน โหมดของไทรสเตอร์ (Hor:0.5 V/div, Ver:10 mA/div, 1 V/step, 6step)	47
รูปที่ 4.12 ผลการตอบสนองสัญญาณ ไฟฟ้ารูปสี่เหลี่ยมของ LIGBT (ตัวบน: 5 V/div, ตัวล่าง:5 V/div, 0.1 μ S/div)	48

คำนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีทางด้านสารกึ่งตัวนำได้ถูกพัฒนาไปอย่างต่อเนื่อง เพื่อตอบสนองต่อความต้องการในการใช้งานที่มากขึ้น และสำหรับอุปกรณ์กำลังได้ถูกพัฒนามาเรื่อยๆ โดยเริ่มแรกจะเป็นไคโอดและทรานซิสเตอร์ และมีการพัฒนาต่อมาเรื่อยๆ จนถึงยุคของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์กำลังซึ่งมีความสามารถในด้านทนแรงดันได้สูง และจากนั้นจนถึงปัจจุบันก็เป็นยุคของมอสเฟตกำลัง แต่อย่างไรก็ตามมอสเฟตกำลังก็ยังมิใช่โครงสร้างที่มีคุณสมบัติดีกว่าไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์กำลังในทุกด้าน คือไม่สามารถนำกระแสได้สูงเท่ากับไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์กำลัง และในปี ค.ศ. 1983 จึงได้มีผู้คิดค้นอุปกรณ์กำลังชนิดใหม่ขึ้นมา เรียกว่า คอมฟต (Conductivity Modulated Field Effect Transistor : COMFET) ซึ่งในปัจจุบันเป็นที่รู้จักกันดีในชื่อของ ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกทเป็นฉนวน (Insulated Gate Bipolar Transistor : IGBT) ซึ่งอุปกรณ์ชนิดนี้ได้รวมเอาข้อดีของโครงสร้างเกทแบบมอสเฟต กับการนำกระแสแบบไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ไว้ด้วยกัน ทำให้เหมาะที่จะนำไปใช้งานในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เราจึงเลือกที่จะทำการศึกษา และสร้างอุปกรณ์กำลังชนิดนี้เพื่อนำไปพัฒนาต่อไป และสำหรับปริญญาโทฉบับนี้จะกล่าวถึงความเป็นมา โครงสร้างพื้นฐาน กระบวนการสร้าง การทดลอง และบทสรุปของการสร้างอุปกรณ์ชนิดนี้ในห้องปฏิบัติการของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อุปกรณ์ที่สร้างขึ้นนี้เป็นชนิดเอ็น-แซนแนล เอ็นฮานเมนต์โหมด ซึ่งเราทำการแบ่งเนื้อหาเป็นส่วนๆ ตามลำดับดังต่อไปนี้

บทที่ 1 เป็นบทที่เสนอความเป็นมาของ IGBT ซึ่งมีลักษณะหลายประการที่น่าสนใจ และทำการเปรียบเทียบระหว่างไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกทเป็นฉนวน มอสเฟตกำลัง และไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์กำลัง

บทที่ 2 เป็นการเสนอทฤษฎีพื้นฐานของ IGBT (Lateral IGBT) ซึ่งเป็น IGBT ที่มีโครงสร้างในแนวระนาบ ซึ่งการศึกษาจะมุ่งไปที่โครงสร้างในแนวระนาบนี้ โดยเริ่มศึกษาจากโครงสร้างและหลักการทํางานพื้นฐาน รวมทั้งวิเคราะห์หลักการทํางานของ IGBT ในลักษณะต่างๆ

บทที่ 3 เป็นการกล่าวถึงกระบวนการสร้างของ IGBT โดยเริ่มจากการเลือกแผ่นผลึกซิลิคอนเริ่มต้น ไปจนถึงกระบวนการสร้างมาตรฐาน

บทที่ 4 เป็นการกล่าวถึงการทดลองและผลการทดลอง

บทที่ 5 เป็นการกล่าวถึงบทสรุปและวิจารณ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลอง

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา

ปัจจุบันไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกทเป็นฉนวน (Insulated Gate Bipolar Transistor) หรือเรียกสั้นๆ ว่า IGBT เป็นอุปกรณ์กำลังรูปแบบใหม่ที่กำลังเข้ามามีบทบาทมากขึ้นในระบบ อิเล็กทรอนิกส์กำลังต่างๆ และมีแนวโน้มที่จะเข้ามาแทนอุปกรณ์กำลังรูปแบบเก่าได้มาก เนื่องจาก คุณสมบัติที่เด่นกว่าอุปกรณ์กำลังรูปแบบเก่าหลายประการ เช่น ทนกำลังสูง ความต้านทานอินพุท ที่สูง หรือ การตอบสนองความถี่สูงได้ดี เป็นต้น ซึ่ง IGBT นี้จะรวมข้อดีของทั้งมอสเฟตกำลัง และไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์กำลังประกอบเข้าด้วยกัน ที่เห็นชัดคือ การรวมโครงสร้างแบบเกท ของมอสเฟตกำลังกับการนำกระแสของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ ทำให้อุปกรณ์ชนิดนี้มีความ สามารถในการนำกระแสได้สูง และสามารถควบคุมการไหลของกระแสโดยการให้แรงดันไบอัสที่ ขั้วเกท ซึ่งการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกทเป็นฉนวน มอส เฟตกำลัง และไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ จะกล่าวในหัวข้อถัดไป

เนื่องจาก IGBT นี้มีลักษณะเด่นหลายประการที่น่าสนใจจึงได้มีการศึกษาถึงโครงสร้าง การออกแบบและนำไปสู่การสร้างและการทดลองจริง เพื่อศึกษาถึงผลกระทบที่อาจจะเกิดขึ้นกับ พารามิเตอร์ต่างๆในระหว่างกระบวนการสร้าง ซึ่งในปัจจุบันสภาพแวดล้อมภายในห้องปฏิบัติการ ได้เปลี่ยนแปลงจากเดิมไปมากพอสมควร ดังนั้นการปรับปรุงกระบวนการสร้างจึงเป็นไปตาม ความเหมาะสมภายในห้องปฏิบัติการ

สำหรับการออกแบบวงจรรวมจะเป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย ซึ่งภายในจะมีวงจรภาค ต่างๆ ซึ่งประกอบไปด้วยอุปกรณ์ขยายมากมาย รวมทั้งอุปกรณ์กำลังด้วย ตามหน้าที่การทำงานขอ วงจรรวมแบบอนาลอกนั้นๆ ในภาคขยายสุดท้ายส่วนมากจะเป็นมอสเฟตกำลังหรือไบโพลาร์ ทรานซิสเตอร์กำลัง เพื่อการนำกระแสที่สูง จากการที่เราทราบคุณสมบัติเด่นของ IGBT เรา สามารถนำ IGBT ประกอบเข้าเป็นส่วนหนึ่งภายในวงจรรวมได้ ด้วยเป้าหมายที่จะให้ IGBT เป็นส่วนประกอบภายในวงจรรวม การออกแบบโครงสร้างจะมุ่งไปที่โครงสร้างในแนวระนาบ (Lateral IGBT : LIGBT) มากกว่าที่จะเป็นโครงสร้างในแนวตั้ง (Vertical IGBT : VIGBT) เนื่องจากโครงสร้างในแนวตั้งชั้นคอลเลคเตอร์จะอยู่ด้านล่าง หากนำไปใช้เป็นส่วนหนึ่งภายในวง จจรรวมแล้ว ทำให้เกิดความยุ่งยากในการ Isolation หรือ อาจจะทำให้เกิดการลัดวงจรกับฐานรอง ซิลิคอนได้จึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นส่วนหนึ่งภายในวงจรรวม ไม่เหมือนกับโครงสร้างใน

แนวระนาบซึ่งจะมีชั้นคอลเลกเตอร์อยู่ด้านบน ทำให้สะดวกในการนำไปใช้งาน รายละเอียดเกี่ยวกับรูปแบบโครงสร้างของทั้ง 2 จะกล่าวต่อไปภายหลัง

ดังนั้น LIGBT ในเชิงพาณิชย์จะเป็นการผลิตในรูปแบบที่เรียกว่า วงจรรวมกำลัง (Power Integrated Circuits) ที่ใช้ในระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังต่างๆ ซึ่งจะเป็นการลดต้นทุนการผลิตได้ด้วยตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานของ LIGBT มีดังนี้ การขับเคลื่อนมอเตอร์, การควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้า, การควบคุมแสง และการควบคุมอัตโนมัติภายในโรงงาน เป็นต้น หากในอนาคตอันใกล้ LIGBT เป็นที่รู้จักยิ่งขึ้นแล้ว ความสามารถของมันก็จะดีเยี่ยมกว่ามอสเฟตกำลังและไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์แน่นอน และสามารถใช้แทนอุปกรณ์ทั้ง 2 ชนิดนี้ได้

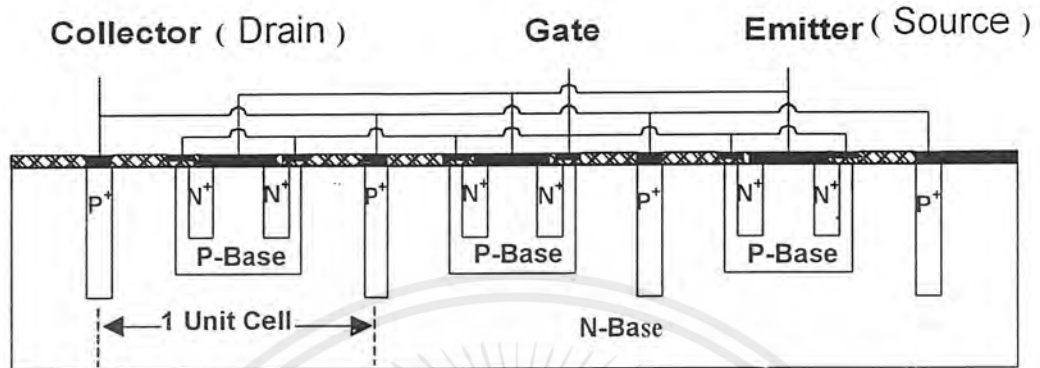
1.2 การเปรียบเทียบระหว่างไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกทเป็นฉนวน มอสเฟตกำลัง และไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์กำลัง

ตารางที่ 1.1 การเปรียบเทียบระหว่างไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกทเป็นฉนวน มอสเฟตกำลัง และไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์กำลัง

พารามิเตอร์	ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกทเป็นฉนวน	มอสเฟตกำลัง	ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์กำลัง
การทนกำลัง	สูง	ปานกลาง	สูง
ความต้านทานอินพุท	สูง	สูง	ต่ำ
ความต้านทานในสภาวะนำกระแส	ต่ำ	สูง	ต่ำ
การตอบสนองความถี่	สูง	สูง	ปานกลาง
ระบบระบายความร้อน	เล็ก	เล็ก	ใหญ่
การสูญเสียกำลังด้านอินพุท	ต่ำ	ต่ำ	สูง
ความยุ่งยากและราคาของวงจรขับ (drive circuit)	น้อย	น้อย	มาก
ราคา	แพง	แพง	ปานกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

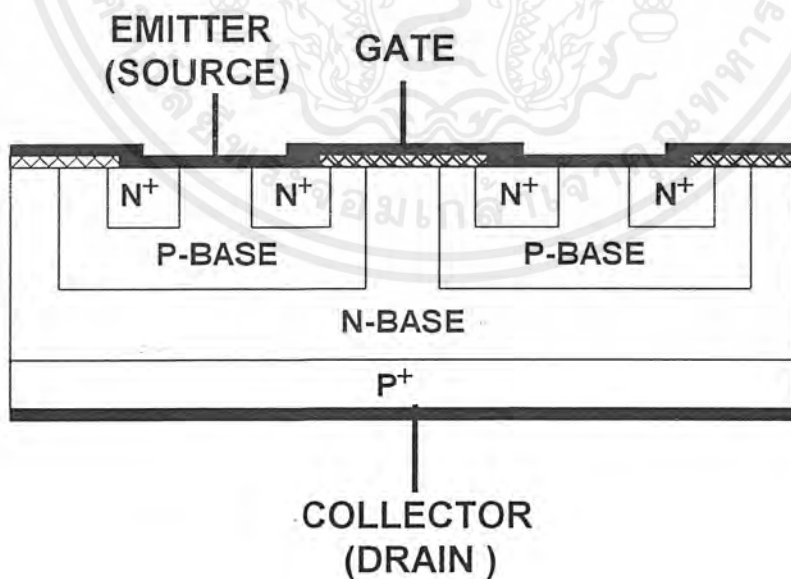
1.3 โครงสร้างในแนวระนาบของ IGBT



รูปที่ 1.1 โครงสร้างภาพตัดขวางของ IGBT ในแนวระนาบ

จากรูปที่ 1.1 จะเห็นว่า ขั้วต่อคอลเลคเตอร์จะอยู่ด้านบน ซึ่งจะสะดวกต่อการนำไปใช้งาน เป็นส่วนหนึ่งในวงจรรวม

1.4 โครงสร้างในแนวตั้งของ IGBT



รูปที่ 1.2 โครงสร้างภาพตัดขวางของ IGBT ในแนวตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 1.2 จะมองไม่เห็นขั้วต่อคอลเลกเตอร์ด้านบนแผ่นซิลิคอน เนื่องจากการออกแบบให้ชั้นคอลเลกเตอร์อยู่ด้านล่าง ดังนั้นจึงไม่เหมาะที่จะนำไปใช้งานในวงจรรวม แต่จะเหมาะกับการใช้งานเป็นอุปกรณ์เดี่ยวๆมากกว่า

จากตารางที่ 1.1 จะเห็นว่า IGBT เป็นอุปกรณ์ที่น่าสนใจมากสำหรับงานที่ต้องการกำลังสูง และต้องการการตอบสนองความถี่สูง แต่ยังมีข้อจำกัดในด้านราคาอยู่ หากในอนาคต IGBT ถูกพัฒนาให้เป็นที่รู้จักยิ่งขึ้นแล้ว ข้อจำกัดทางด้านนี้จะไม่มีและจะเข้ามาแทนอุปกรณ์กำลังแบบเดิม



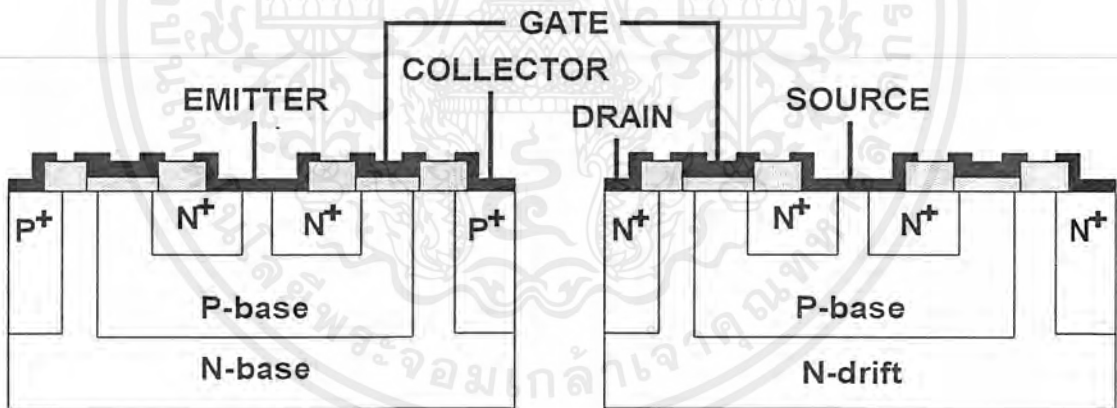
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎี LIGBT

LIGBT เป็นโครงสร้างที่เกิดจากการรวมโครงสร้างระหว่างโครงสร้างเกทแบบมอสเฟตกับการนำกระแสแบบไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์เข้าด้วยกัน ซึ่งลักษณะเด่นของโครงสร้างชนิดนี้คือ มีการฉีดประจุพาหะส่วนน้อยจากบริเวณ P^+ -collector เข้าไปที่ชั้น N -base ในสภาวะนำกระแสไปหน้า (forward conduction) ส่งผลให้อุปกรณ์ชนิดนี้มีความต้านทานในสภาวะนำกระแสที่ต่ำลงจึงทำให้มีความหนาแน่นกระแสสูง และยังสามารถควบคุมการไหลของกระแสได้โดยการควบคุมแรงดันไบอัสที่ขั้วเกท จึงเป็นการลดความยุ่งยากของวงจรขับลงได้ ทำให้ LIGBT เป็นอุปกรณ์ที่น่าสนใจชนิดหนึ่ง

2.1 โครงสร้างและหลักการทำงานพื้นฐาน



(ก)

(ข)

รูปที่ 2.1 โครงสร้างภาพตัดขวางของอุปกรณ์เปรียบเทียบกันระหว่าง

(ก) ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกทเป็นฉนวน (LIGBT)

(ข) มอสเฟตกำลังแบบดีมอส (LDMOST)

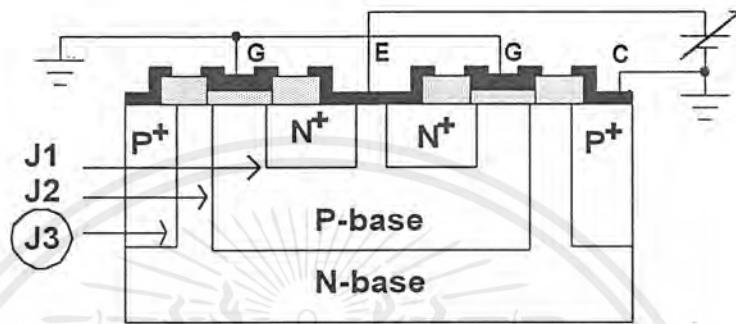
LIGBT ประกอบด้วยโครงสร้าง 4 ชั้น คือ ชั้น N^+ -emitter , P -base , N -base และชั้น P^+ -collector

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ 3 ขั้วคือ เกท , อิมิตเตอร์ และคอลเลคเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.1

การทำงานของ LIGBT สามารถแบ่งเป็นสภาวะใหญ่ๆ ได้ 3 สภาวะด้วยกันคือ

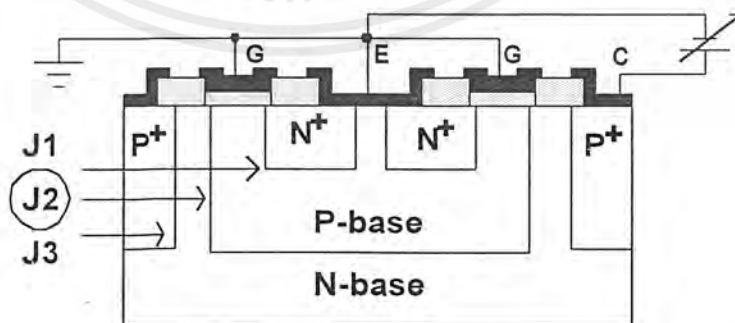
2.1.1 สภาวะปิดกั้นย้อนกลับ (Reverse Blocking Mode)



รูปที่ 2.2 การให้แรงดันไบอัสกับ LIGBT เพื่อให้ทำงานในสภาวะปิดกั้นย้อนกลับ

เกิดจากการให้แรงดันค่าลบที่ขั้วคอลเลคเตอร์ ทำให้รอยต่อระหว่าง P⁺-collector กับ N-base ในรูปที่ 2.2 อยู่ในสภาวะถูกไบอัสย้อนกลับ กระแสจึงไม่สามารถไหลได้จนกว่าจะถึงแรงดันพังทลายของรอยต่อ P⁺-collector กับ N-base ซึ่งจะเกิดกระแสไหลและกระแสที่ไหลได้จะไม่สามารถควบคุมได้อีกต่อไป ดังแสดงในกราฟคุณสมบัติกระแสและแรงดันส่วนที่ I ในรูปที่ 2.6

2.1.2 สภาวะปิดกั้นไปหน้า (Forward Blocking Mode)

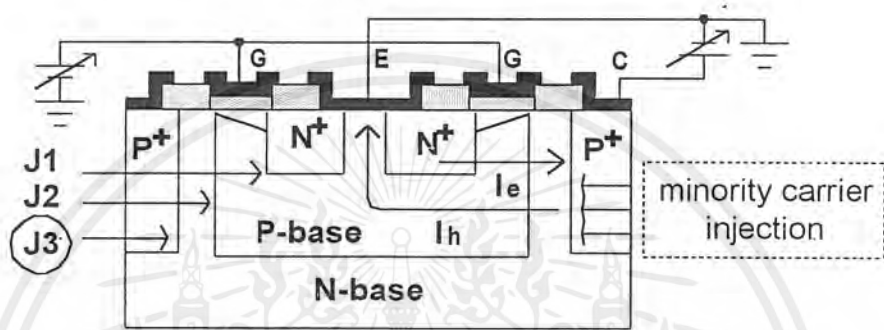


รูปที่ 2.3 การให้แรงดันไบอัสกับ LIGBT เพื่อให้ทำงานในสภาวะปิดกั้นไปหน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดจากการให้แรงดันไบอัสค่าบวกที่ขั้วคอลเลคเตอร์ แล้วทำการลัดวงจรที่ขั้วอิมิตเตอร์กับขั้วเกตเข้าด้วยกัน ทำให้รอยต่อ P-base กับ N-base ในรูปที่ 2.3 อยู่ในสภาวะถูกไบอัสย้อนกลับ กระแสจึงไม่สามารถไหลได้ ดังแสดงในส่วนที่ II รูปที่ 2.6

2.1.3 สภาวะนำกระแสไปหน้า (Forward Conduction Mode)

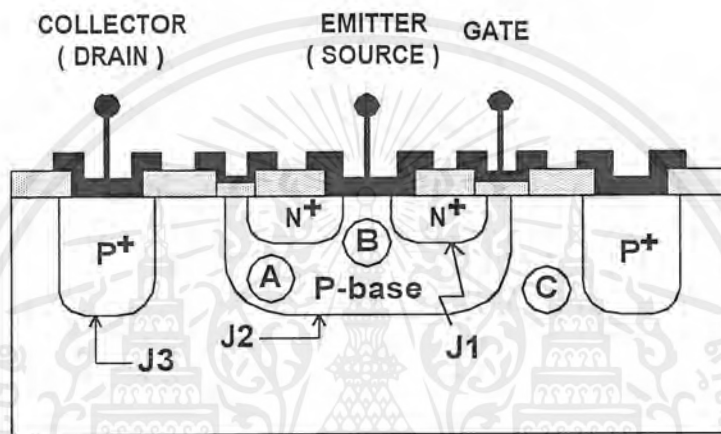


รูปที่ 2.4 การให้แรงดันไบอัสกับ LIGBT เพื่อให้ทำงานในสภาวะนำกระแสไปหน้า

เกิดจากการให้แรงดันไบอัสค่าบวกที่ขั้วคอลเลคเตอร์เช่นเดียวกับสภาวะปิดกั้นไปหน้า แต่จะให้แรงดันไบอัสค่าบวกที่ขั้วเกตเทียบกับขั้วอิมิตเตอร์ด้วยดังในรูปที่ 2.4 เมื่อค่าแรงดันไบอัสที่ขั้วเกตมีค่ามากกว่าแรงดันขั้วเดมิ แล้วจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดช่องทางเดินกระแสหรือชั้นนำกระแส (conduction layer) ขึ้นที่บริเวณผิวส่วน P-base บริเวณใต้ส่วนเกต ซึ่งชั้นนำนี้จะทำหน้าที่เป็นช่องทางเดินกระแสให้อิเล็กตรอนสามารถไหลผ่านจากบริเวณ N⁺-emitter ไปสู่ชั้น N-base ได้ ดังแสดงในส่วนที่ III

ตามที่กล่าวมาแล้ว LIGBT เป็นอุปกรณ์กำลังที่เกิดจากการโครงสร้างเกตแบบมอสเฟตและการนำกระแสของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์เข้าด้วยกัน ดังนั้นการทำงานของ LIGBT ที่แสดงในรูปที่ 2.5 สามารถทำได้โดยการให้แรงดันไบอัสค่าบวกที่ขั้วเกต ซึ่งจะเหนี่ยวนำให้เกิดช่องทางเดินกระแส ทำให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนผ่านจากบริเวณ N⁺-emitter ผ่านชั้น P-base ซึ่งเป็นชั้นนำไปยังชั้น N-base ได้ เหมือนการทำงานของมอสเฟตกำลัง โดยขณะนี้ LIGBT ทำงานในสภาวะนำกระแส และในสภาวะนำกระแสไปหน้านี้ ที่รอยต่อระหว่าง P⁺-collector และ N-base จะอยู่ในสภาวะนำกระแสไปหน้าด้วย ทำให้เกิดการฉีดประจุพาหะส่วนน้อยจากบริเวณ P⁺-collector ไปยังชั้น N-base เมื่อการไบอัสเพิ่มขึ้นที่ขั้วคอลเลคเตอร์ ความหนาแน่นของประจุพาหะส่วนน้อยจะ

เพิ่มชั้นจันทรทังทำกักับความหนาแน่นของอะตอมสารเจือฐานรอง (background doping level) ของชั้น N-base ณ จุดนี้สภาวะของชั้น N-base จะเปลี่ยนไปเป็นเหมือนกับชั้นอินทรินซิก (intrinsic) คุณสมบัตินี้ก็จะคล้ายกับการทำงานของ PIN diode ขณะที่อยู่ในสภาวะนำกระแสไปหน้า ซึ่งอุปกรณ์ชนิดนี้ก็จะสามารถทำงานที่กระแสสูงๆ ได้ ถึงแม้ว่าอุปกรณ์จะถูกออกแบบมาให้ใช้งานที่แรงดันสูงๆ ก็ตาม



รูปที่ 2.5 รอยต่อโครงสร้างของ LIGBT

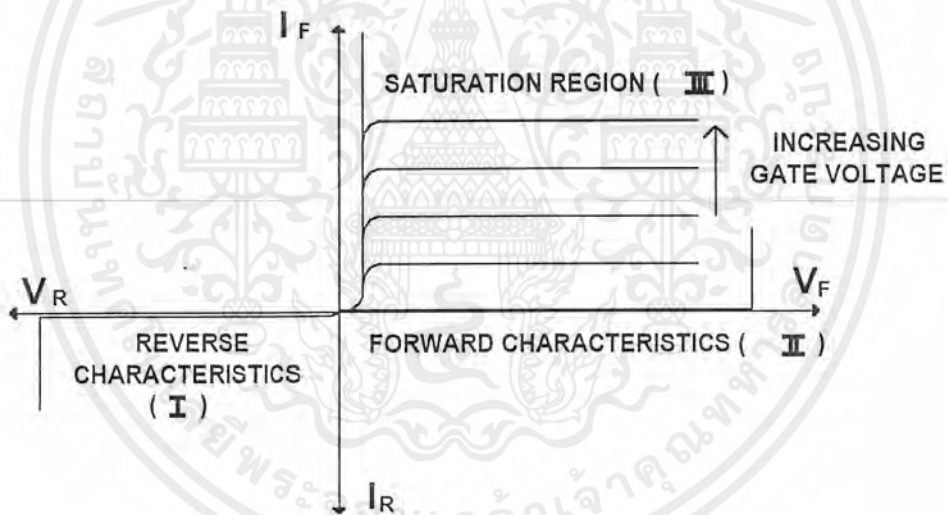
เมื่อพิจารณาที่แรงดันไบอัสที่ขั้วเกทมีค่ามากเพียงพอที่จะสร้างช่องทางเดินกระแส เพื่อเป็นทางเดินของอิเล็กตรอนจาก N^+ -emitter ไปยังชั้น N-base ได้แล้ว LIGBT จะทำงานอยู่ในสภาวะนำกระแสไปหน้าและคุณสมบัติของ LIGBT จะเหมือน PIN diode แต่ความสามารถในการนำกระแสของช่องทางเดินกระแสที่ถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นก็มีขีดจำกัด ทั้งนี้เนื่องจากเกิดศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมช่องทางเดินกระแส ส่งผลให้กระแสไปหน้า (forward current) มีค่าคงที่ที่ต่ำๆ หนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.6

สำหรับการเปลี่ยนสภาวะเปิด (ON-state) ไปสู่สภาวะปิด (OFF-state) ของ LIGBT สามารถทำได้โดยการลัดวงจรที่ขั้วเกทกับขั้วอิมิตเตอร์เข้าด้วยกัน ซึ่งเป็นการตัดช่องทางเดินกระแสที่ผิวของชั้น P-base บริเวณใต้ส่วนเกท ทำให้อิเล็กตรอนซึ่งเป็นประจุพาหะส่วนมากไม่สามารถไหลผ่านไปยังชั้น N-base ได้ อย่างไรก็ตามกระแสภายใน LIGBT ไม่ใช่จะมีเพียงกระแสอิเล็กตรอนเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนกระแสไหลซึ่งเป็นประจุพาหะส่วนน้อยที่ถูกฉีดเข้าไปในชั้น N-base ในตอนแรกจะยังคงมีความหนาแน่นสูงแต่ต่อมาจะค่อยๆ ลดลงตามช่วงชีวิต (life time) ของประจุพาหะส่วนน้อย ทำให้ไม่สามารถตัดกระแส (turn off) ได้ทันที ดังนั้นความเร็วในการสวิตช์ (switching speed) ของ IGBT มีค่าต่ำกว่ามอสเฟตกำลัง

นอกจากนี้ IGBT ยังมีโครงสร้างของ P-N-P-N thyristor แฝงอยู่ด้วย ซึ่งจะอยู่ระหว่างขั้วคอลเลกเตอร์และขั้วอิมิตเตอร์ หากโครงสร้างของไทรสเตอร์ปรากฏขึ้นจะทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า แลทช์-อัพ (Latch up) ซึ่งจะไม่สามารถควบคุมกระแสเอาที่พู่ทได้ โดยการควบคุมแรงดันไบอัสที่ขั้วเกต เพราะเมื่อเกิดแลทช์-อัพแล้ว กระแสจะไหลตามแนวระนาบอยู่ภายในชั้น P-base จำนวนมาก ดังนั้นสิ่งสำคัญอย่างหนึ่งในการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ IGBT ก็คือการหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดการทำงานในสภาวะไทรสเตอร์ โดยควรออกแบบให้ความกว้างของ N^+ -emitter แคบๆ และความต้านทานของชั้น P-base ค่าต่ำๆ



รูปที่ 2.6 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของ IGBT

2.2 การวิเคราะห์หลักการทำงาน

IGBTเกิดจากการรวมโครงสร้างเกตแบบมอสเฟตและการนำกระแสของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ ดังนั้นในการวิเคราะห์การทำงานของ IGBT จึงต้องพิจารณาในลักษณะที่แตกต่างไปจากอุปกรณ์กำลังชนิดอื่นๆ ซึ่งจะเป็นการพิจารณาการทำงานร่วมกันของมอสเฟตกำลังและไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ โดยในที่นี้จะพิจารณากรณีที่ไมเกิดโครงสร้างแฝงแบบไทรสเตอร์เท่านั้น

2.2.1 ความสามารถในการปิดกั้นย้อนกลับ (Reverse Blocking Capability)

ความสามารถในการปิดกั้นย้อนกลับของ LIGBT จะพิจารณาที่รอยต่อ J3 (รูปที่ 2.5) เมื่อให้แรงดันไบอัสค่าลบที่ขั้วคอลเลคเตอร์ ที่รอยต่อ J3 จะอยู่ในสภาวะถูกไบอัสย้อนกลับ และความกว้างของบริเวณปลอดประจุพาหะ (depletion region) จะแผ่ขยายเข้าไปในบริเวณ N-base ที่มีความหนาแน่นอะตอมสารเจือน้อยกว่า การพิจารณาแรงดันพังทลายในสภาวะปิดกั้นย้อนกลับจะพิจารณาโครงสร้างไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์แบบเบสเปิดที่เกิดขึ้นจากชั้น P⁺-collector , N-base และ P-base โดยรอยต่อระหว่าง P⁺-collector กับ N-base จะเป็นตัวกำหนดความสามารถในการปิดกั้นย้อนกลับของอุปกรณ์ ดังนั้นในการออกแบบอุปกรณ์ LIGBT เพื่อให้ได้ความสามารถในการปิดกั้นย้อนกลับตามที่ต้องการจึงต้องคำนึงถึงความต้านทานและความหนาของชั้น N-base ที่เหมาะสมทั้งนี้เพื่อป้องกันการเกิดแรงดันพังทลายแบบพังก์ทรู (punch-through breakdown) ขึ้นได้ ถ้าความหนาแน่นอะตอมสารเจือของชั้น N-base มีค่าน้อย

การกำหนดความสามารถในการปิดกั้นย้อนกลับ จะขึ้นอยู่กับความต้านทานและความหนาของชั้น N-base ที่เหมาะสม ดังนั้นความกว้างของชั้น N-base ที่ทำให้อุปกรณ์สามารถทนแรงดันปิดกั้นได้สูงสุดมีค่าเท่ากับ ผลรวมของความกว้างของบริเวณปลอดประจุพาหะที่แรงดันสูงสุด กับ ระยะการแพร่ (diffusion length) ของประจุพาหะ และสามารถคำนวณหาได้จากสมการ

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

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

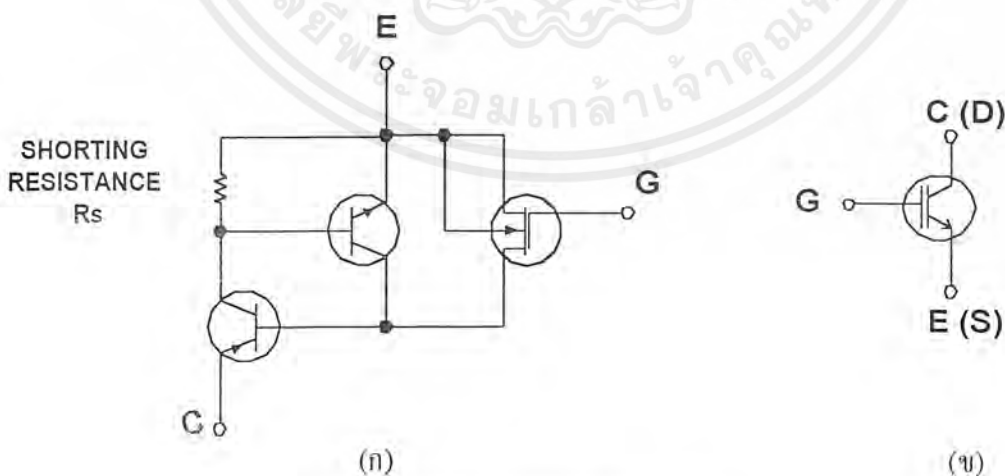
หากพิจารณาที่แรงดันปิดกั้นสูงสุดมีค่ามากๆ และความกว้างของบริเวณปลอดประจุพาหะจะกว้างกว่าระยะการแพร่ของประจุพาหะส่วนน้อย แล้วความกว้าง N-base มีค่าประมาณเท่ากับรากที่สองของค่าแรงดันปิดกั้นสูงสุด

2.2.2 ความสามารถในการปิดกั้นไปหน้า (Forward Blocking Capability)

ความสามารถในการปิดกั้นไปหน้าของ LIGBT จะพิจารณาที่รอยต่อ J2 (รูปที่ 2.5) LIGBT จะทำงานอยู่ในสภาวะปิดกั้นไปหน้า เมื่อให้แรงดันไบอัสค่าบวกที่ขั้วคอลเลคเตอร์ และลัดวงจรที่ขั้วเกตกับขั้วอิมิตเตอร์เข้าด้วยกัน เพื่อป้องกันการเกิดช่องทางเดินกระแสบริเวณผิวภายใต้ ส่วนเกต ทำให้รอยต่อระหว่าง P-base และ N-base ถูกไบอัสย้อนกลับ นอกจากนี้การพิจารณาความสามารถในการปิดกั้นไปหน้ายังขึ้นอยู่กับความหนาแน่นอะตอมสารเจือในชั้น P-base ด้วย ซึ่งความหนาแน่นอะตอมสารเจือในชั้น P-base นี้ จะเป็นตัวกำหนดค่าแรงดันขีดเริ่มของทางเดินกระแส มอสเฟต และยังทำให้ทราบว่าบริเวณปลอดประจุพาหะที่รอยต่อ J2 ที่เข้าไปยังบริเวณ P-base ไม่ทำให้เกิดการพังทลายแบบพันธะทรูมาถึงชั้น N^+ -emitter ดังนั้นการกำหนดในส่วน P-base จึงมีความสำคัญมาก

2.1.3 ความสามารถในการนำกระแสไปหน้า (Forward Conduction)

ในสภาวะนำกระแสไปหน้าของ LIGBT เกิดจากการให้แรงดันไบอัสค่าบวกที่ขั้วคอลเลคเตอร์และให้แรงดันไบอัสค่าบวกที่ขั้วเกตเทียบกับขั้วอิมิตเตอร์ด้วย ถ้าค่าแรงดันไบอัสที่เกตเทียบกับอิมิตเตอร์มีค่ามากกว่าค่าแรงดันขีดเริ่มแล้ว จะเหนี่ยวนำทำให้เกิดช่องทางเดินกระแส ความต้านทานภายในช่องทางเดินกระแสต่ำลง และเมื่อพิจารณาที่ขั้วคอลเลคเตอร์ที่ให้แรงดันไบอัสค่าบวก จะไปทำให้ที่รอยต่อ P^+ -collector กับ N-base ถูกไบอัสไปหน้า ทำให้ความต้านทานในชั้น N-base ลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของการมอดดูเลทสภาพนำของประจุพาหะที่ถูกฉีดเข้าไป ส่งผลให้ความต้านทานในสภาวะนำกระแสไปหน้ามีค่าลดลง



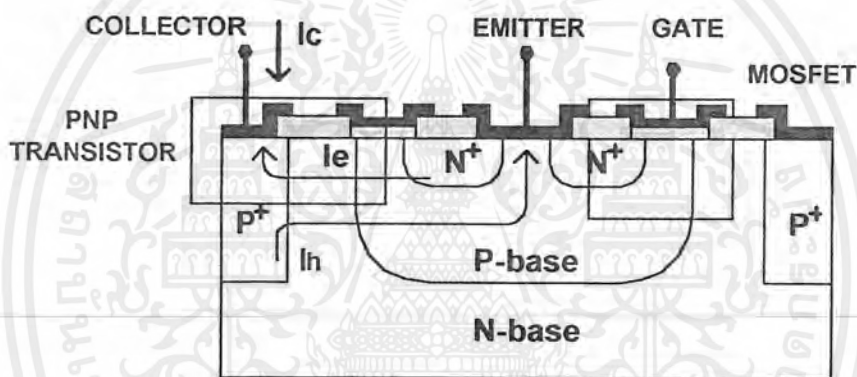
รูปที่ 2.7 (ก) วงจรสมมูลของ LIGBT

(ข) สัญลักษณ์ทางไฟฟ้าของ LIGBT

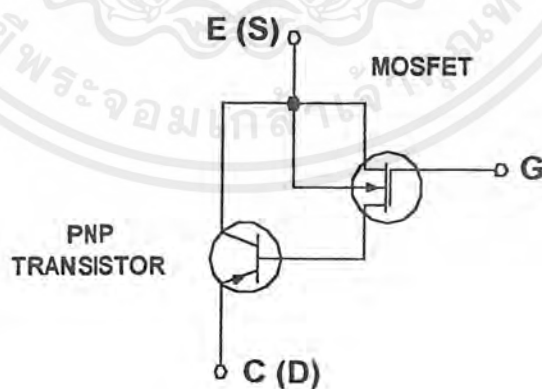
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก่อนที่จะพิจารณาการวิเคราะห์คุณสมบัติของการนำกระแสไปหน้าของ LIGBT เราจะมาพิจารณาวงจรสมมูลของ LIGBT ดังแสดงในรูปที่ 2.7 (ก) วงจรสมมูลนี้ประกอบด้วยคู่ทรานซิสเตอร์ PNP และ NPN แทนโครงสร้างแผ่นสี่ชั้นของไทรสเตอร์ กับมอสเฟตซึ่งขนานกับ NPN ทรานซิสเตอร์ นอกจากนี้มี R_s (shorting resistance) ต่อระหว่างขั้วอิมิตเตอร์กับขั้วเบสของ NPN ทรานซิสเตอร์ ค่าของ R_s นี้จะขึ้นอยู่กับความต้านทานของชั้น P-base และระยะระหว่างขอบของ N^+ -emitter ที่จุด A จนถึงรอยสัมผัสที่จุด B (ดูจากรูปที่ 2.5) ถ้าให้ค่า R_s มีค่าน้อยมากจนกระทั่งที่รอยต่อ N^+ -emitter ไม่สามารถถูกไบอัสไปหน้าได้ในสภาวะการนำกระแสไปหน้าแล้ว NPN ทรานซิสเตอร์ จะไม่สามารถทำงานได้เลย

ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของการนำกระแสไปหน้าของ LIGBT เราจะพิจารณาโดยใช้แบบจำลองมอสเฟตกับไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์



รูปที่ 2.8 โครงสร้างภาพตัดขวางของ LIGBT



รูปที่ 2.9 วงจรสมมูลของ IGBT ที่ประกอบด้วยไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์แบบ PNP ต่อแบบคาร์ลิงตันกับมอสเฟต ในขณะที่ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์แบบ NPN ไม่ทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.8 และรูปที่ 2.9 แสดงโครงสร้างภาพตัดขวางและวงจรมุมซึ่งประกอบด้วยไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ PNP ที่มีเบสกว้าง ถูกจับด้วยมอสเฟตที่ต่อกันแบบคาร์ลิงตัน ในรูปจะเห็นว่ากระแสอิเล็กตรอน (I_e) จะไหลผ่านส่วนที่เป็นช่องทางเดินกระแสของมอสเฟตและกระแสโฮล (I_h) จะไหลผ่านส่วนภาพตัดขวางของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ PNP ซึ่งกระแสทั้ง 2 นี้จะมีความสัมพันธ์กับอัตราขยายกระแสของทรานซิสเตอร์ PNP ที่มีเบสกว้าง ดังนี้

$$I_h = \left(\frac{\alpha_{PNP}}{1 - \alpha_{PNP}} \right) I_e \quad (2.2)$$

และจากกระแสอิเล็กตรอนเท่ากับ ผลรวมของกระแสอิเล็กตรอนกับกระแสโฮล

$$I_E = I_e + I_h \quad (2.3)$$

จะได้

$$I_E = \frac{1}{(1 - \alpha_{PNP})} I_e \quad (2.4)$$

เนื่องจากความต้านทานอินพุตที่สูงมากของโครงสร้างมอสเฟต จึงไม่มีองค์ประกอบของกระแสเกทอยู่ด้วย สรุปก็คือ กระแส I_e เป็นเศษส่วนของกระแสคอลเลคเตอร์

เพื่อให้ได้แรงดันปัดกันไปหน้าและย้อนกลับตามต้องการ ทรานซิสเตอร์ PNP ควรจะมีความกว้างเบสที่กว้างมาก ดังนั้นอัตราขยายกระแส α_{PNP} จะหาได้จากค่าเบสทรานสปอร์ตแฟคเตอร์ α_T

$$\alpha_{PNP} = \alpha_T = \frac{1}{\cosh(W_N/L_a)} \quad (2.5)$$

โดยที่

W_N คือ ความกว้างของ N- base ที่ไม่ปลอดประจุพาหะ

L_a คือ ambipolar diffusion length

ความกว้างของ N- base ที่ไม่ปลอดประจุพาหะจะเท่ากับความหนาของชั้น N- base เนื่องจากความกว้างบริเวณปลอดประจุพาหะจะแคบมากในสภาวะนำกระแสไปหน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาคุณสมบัติการนำกระแสไปหน้า สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันตกคร่อมไปหน้ากับกระแส I_c และ I_n ได้ โดยแรงดันตกคร่อมที่ช่องทางเดินกระแสของสเฟตที่มีกระแส I_c ไหล สามารถพิจารณาเหมือนกับแบบจำลอง PIN rectifier กับมอสเฟต คือ

$$V_F = \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{I_c d}{2qW_R W D_n n_i F(d/L_a)} \right] + \frac{I_c L}{\mu_n C_{ox} W (V_G - V_T)} \quad (2.6)$$

แทน I_c ด้วย I_e จะได้

$$V_F = \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{I_e d}{2qW_R W D_n n_i F(d/L_a)} \right] + \frac{I_e L}{\mu_n C_{ox} W (V_G - V_T)} \quad (2.7)$$

และกระแสคอลเลคเตอร์มีความสัมพันธ์กับกระแส I_e จากสมการ (2.4)

$$V_F = \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{(1 - \alpha_{PNP}) I_e d}{2qW_R W D_n n_i F(d/L_a)} \right] + \frac{(1 - \alpha_{PNP}) I_e L}{\mu_n C_{ox} W (V_G - V_T)} \quad (2.8)$$

จากสมการ (2.8) สามารถอธิบายคุณสมบัติการนำกระแสไปหน้าได้เช่นเดียวกับแบบจำลอง PIN rectifier กับมอสเฟต แต่จะต่างตรงที่กระแส I_c จะถูกอธิบายโดยไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ PNP

องค์ประกอบกระแสไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ I_n พิจารณาอยู่ในช่วงกระแสอิมิต์ กระแส I_e ที่ไหลผ่านช่องทางเดินกระแสในช่วงอิมิต์สามารถพิจารณาเช่นเดียวกับมอสเฟตกำลังทั่วไปคือ

$$I_e = \frac{\mu_n C_{ox} W}{2 L} (V_G - V_T)^2 \quad (2.9)$$

เพราะฉะนั้นจากสมการ (2.4) และ (2.9) จะได้สมการกระแสคอลเลกเตอร์ ดังนี้

$$I_{C,sat} = \frac{1}{(1-\alpha_{PNP})} \frac{\mu_n C_{ox} W}{2 L} (V_G - V_T)^2 \quad (2.10)$$

จากสมการจะเห็นว่า กระแส I_C จะขึ้นอยู่กับอัตราขยายกระแสของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ PNP ที่มีเบสกว้าง

2.3 แลทช์-อัฟ (Latch-up)

ปรากฏการณ์แลทช์-อัฟในโครงสร้างของ LIGBT เกิดขึ้นจากการเกิดโครงสร้างแฝงสี่ชั้นแบบทรานซิสเตอร์ชั้นในโครงสร้าง LIGBT ทำให้ไม่สามารถควบคุมการไหลของกระแสได้โดยการควบคุมแรงดันไบอัสที่เกท ส่งผลให้เกิดความเสียหายขึ้นกับอุปกรณ์

แลทช์-อัฟ จะเกิดขึ้นเมื่อความหนาแน่นกระแสไปหน้ามีค่ามากกว่าค่าหนึ่งที่ทำให้อุปกรณ์แสดงโครงสร้างแฝงของทรานซิสเตอร์ชั้นในมา ดังนั้นจึงไม่สามารถวิเคราะห์การทำงานของ LIGBT โดยใช้สมมติฐานอย่างที่ผ่านมาได้ อย่างไรก็ตามในการวิเคราะห์ ปรากฏการณ์การเกิดแลทช์-อัฟ สามารถวิเคราะห์ได้จากรูปที่ 2.7(ก) ซึ่งเป็นวงจรมุมที่แท้จริงของ LIGBT จะประกอบด้วย ทรานซิสเตอร์ 2 ตัว คือ NPN ทรานซิสเตอร์ตัวบนและ PNP ทรานซิสเตอร์ตัวล่างต่อเข้าด้วยกันเหมือนกับโครงสร้าง 4 ชั้นแบบทรานซิสเตอร์ที่มีอสเฟตต่อขนานกับ NPN ทรานซิสเตอร์ตัวบน ซึ่งจะแตกต่างจากวงจรมุมที่ได้ในรูปที่ 2.9 ที่พิจารณาว่า NPN ทรานซิสเตอร์ตัวบนไม่ทำงาน ดังนั้นจึงตัด NPN ทรานซิสเตอร์ตัวบนออกไป สำหรับในรูปที่ 2.7(ก) NPN ทรานซิสเตอร์ตัวบนสามารถทำงานได้ ถ้าแรงดันที่ R_s มีค่ามากกว่า 0.6 โวลต์ การทำงานที่เกิดขึ้นจากเงื่อนไขนี้ ทำให้ LIGBT ทำงานเหมือนกับทรานซิสเตอร์ กล่าวคือ กระแสคอลเลกเตอร์จะไม่ถูกควบคุมด้วยส่วนเกท แต่จะไหลจาก P⁻-collector ไปยัง N⁻-emitter ได้ โดยผ่านรอยต่อระหว่าง N⁻-emitter กับ P-base แทนที่จะผ่านช่องทางเดินกระแสตามโครงสร้างของ LIGBT ซึ่งเป็นผลของกระแสโฮล (I_p) ที่เคลื่อนที่ผ่านทางด้านใต้ของบริเวณ N⁻-emitter ดังแสดงในรูปที่ 2.8

บทที่ 3

กระเจกต้นแบบและกระบวนการสร้าง LIGHT

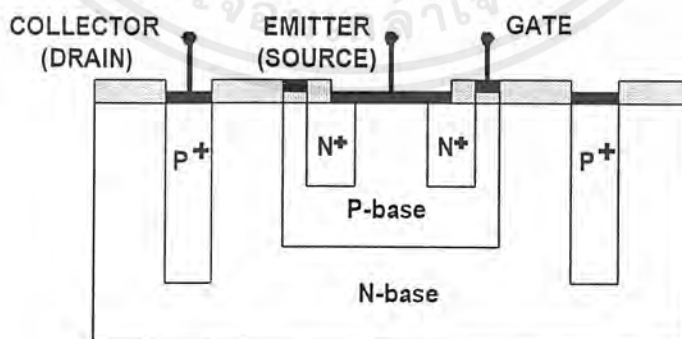
ในบทนี้จะกล่าวถึงการทำต้นแบบและกระบวนการสร้างอุปกรณ์ LIGHT ลงบนแผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น โดยใช้เทคโนโลยีการแพร่อะตอมสารเจือโดยใช้ความร้อน แต่ก่อนที่เราจะกล่าวถึงกระบวนการสร้างอุปกรณ์ LIGHT นั้น ควรจะรู้ถึงขั้นตอนนี้คร่าวๆ ทั้งหมดของการสร้าง LIGHT ซึ่งมีดังนี้

3.1 การเลือกแผ่นผลึกเริ่มต้น

สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการเลือกแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำเพื่อใช้ในกระบวนการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ คือ ชนิดของสารประกอบของแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำเริ่มต้น ที่นิยมใช้กันมาก มีซิลิคอน เพราะหาง่าย ราคาถูก นอกจากชนิดของสารประกอบของแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำเริ่มต้นแล้ว ยังต้องคำนึงถึงความคล่องตัวของประจุพาหะและความหนาแน่นของอะตอมสารเจือของฐานรอง เพื่อให้ได้อุปกรณ์ที่สามารถนำกระแสได้สูงและมีความสามารถในการทนแรงดันพังทลายสูงได้

ดังนั้นในการออกแบบสร้าง LIGHT เป็นโครงสร้างแนวระนาบ (lateral structure) เนื่องจากโครงสร้างแนวระนาบเหมาะสมที่จะนำมาเป็นโครงสร้างภายในวงจรรวม โดย LIGHT จะเป็นภาคขยายสุดท้ายให้กับวงจรรวมที่มีการทนกระแสและแรงดันที่สูง ซึ่งจะแทนมอสเฟตกำลังหรือไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์กำลังนั่นเอง

สำหรับการเลือกใช้แผ่นผลึกซิลิคอน จะใช้แผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การออกแบบโครงสร้าง LIGBT

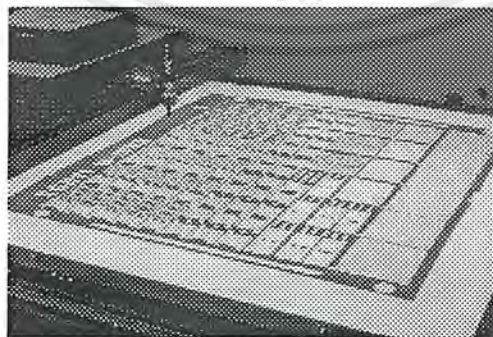
การออกแบบโครงสร้างในแนวระนาบของ LIGBT ประกอบด้วย 4 ชั้น ดังแสดงในรูปที่ 3.1 สร้างโดยกระบวนการแพร่สารด้วยความร้อน โดยเริ่มจากแผ่นผลึกซิลิคอนชนิด N จากนั้นแพร่อะตอมสารเจือปนในส่วน P⁻ collector ก่อน แล้วตามด้วยการแพร่อะตอมสารเจือปนในส่วน P-base และ N⁻-emitter ตามลำดับ

3.3 การออกแบบและสร้างกระจกฉนวนแบบ

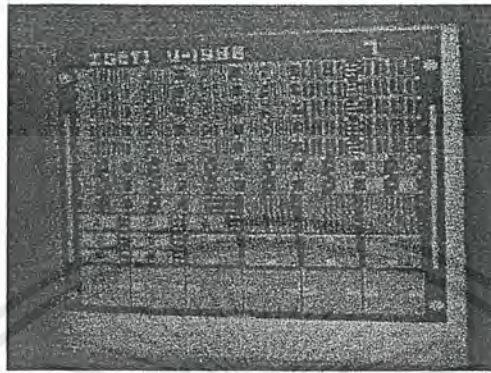
ต่อมาทำการวาดลวดลายต่าง ๆ ลงบนกระดาษกราฟฉนวนแบบ โดยออกแบบให้มีขนาดใหญ่เป็น 50 เท่าของอุปกรณ์จริง การวาดลวดลายลงบนกระดาษกราฟฉนวนแบบต้องทำบนกระดาษกราฟแผ่นเดียว เพื่อกันความคาดเคลื่อน จากนั้นทำการตัดลวดลายแต่ละชั้นตามที้ออกแบบไว้ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 แล้วจึงนำฉนวนแบบไปถ่ายย่อส่วน 50 เท่าลงบนกระจกฉนวนแบบ (Photo mask) ขนาด 3" x 3" ดังแสดงในรูปที่ 3.3 และ 3.4 ตามลำดับ

การออกแบบกระจกฉนวนแบบสำหรับสร้าง LIGBT โครงสร้างในแนวระนาบมีทั้งหมด 6 แผ่น ดังนี้

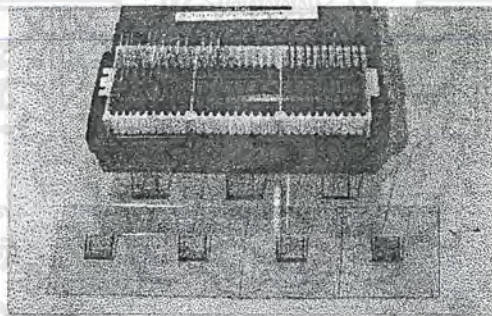
แผ่นที่ 1	เป็น	P ⁻ -collector mask
แผ่นที่ 2	เป็น	P- base mask
แผ่นที่ 3	เป็น	N ⁻ - emitter mask
แผ่นที่ 4	เป็น	Gate oxide mask
แผ่นที่ 5	เป็น	Contact mask
แผ่นที่ 6	เป็น	Metal mask



รูปที่ 3.2 การตัดลวดลายจากกระดาษกราฟฉนวนแบบที่ออกแบบไว้บนแผ่น โปลิเอสเตอร์ ด้วยเครื่องไมโครคัตเตอร์

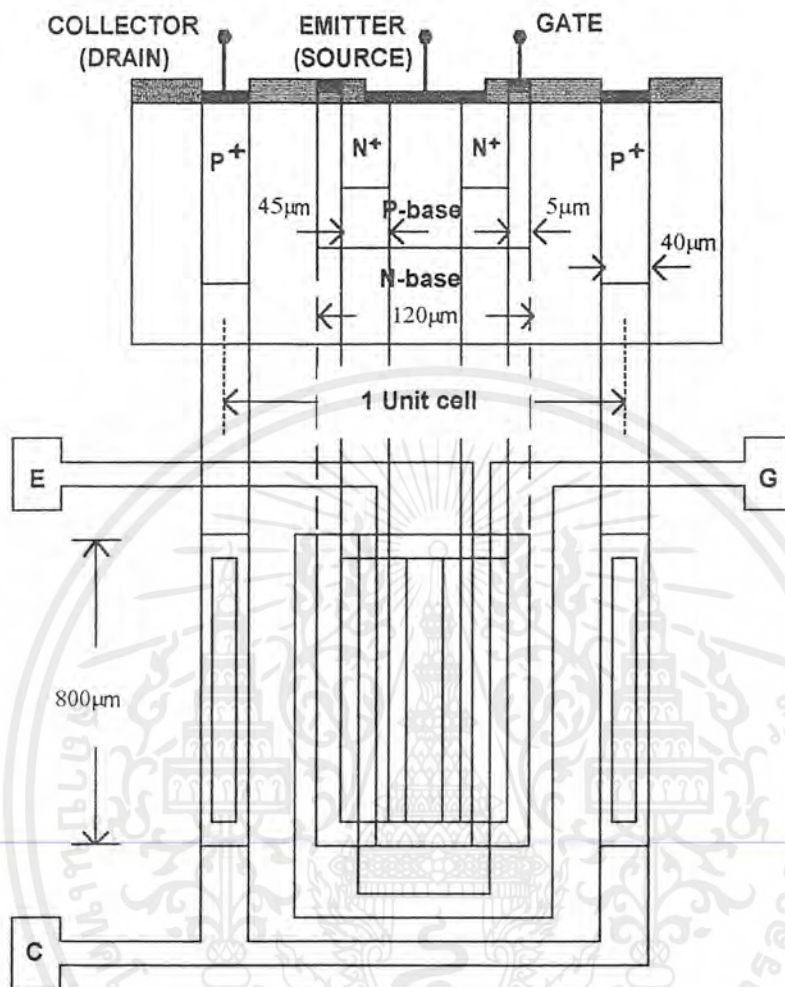


รูปที่ 3.3 การนำแผ่น โพลีเอสเตอร์ต้นแบบที่ตัดลวดตายแล้ว
ไปถ่ายย่อส่วน 50 เท่าลงบนกระจกต้นแบบ



รูปที่ 3.4 กระจกต้นแบบที่พร้อมสำหรับกระบวนการสร้างอุปกรณ์ LGBT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 ลวดลายหนึ่งยูนิตเซลล์ของ LIGBT โครงสร้างในแนวระนาบ
ที่ออกแบบบนกระดาษกราฟไข

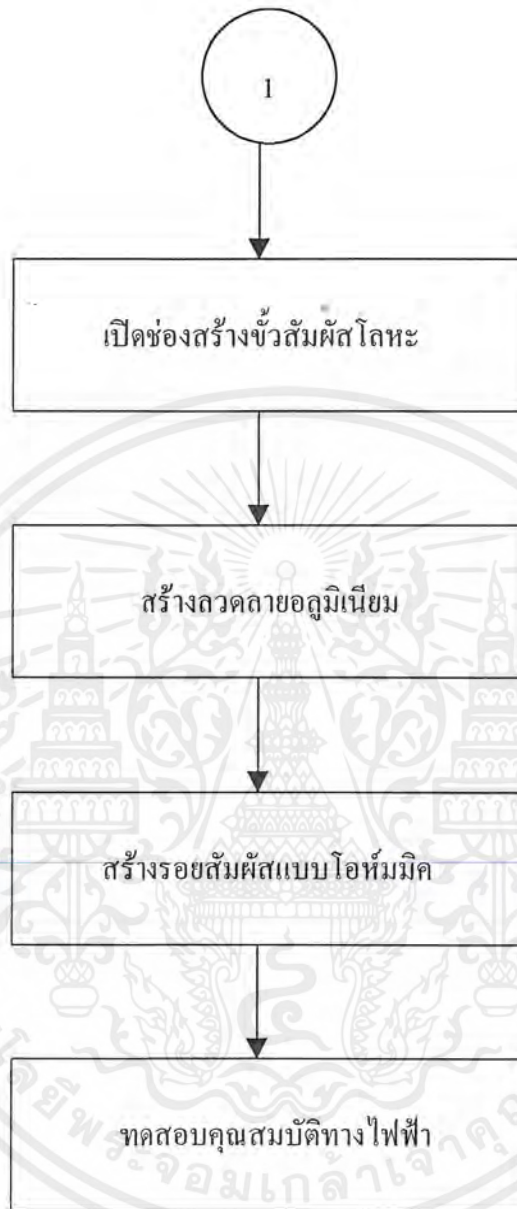
ในการออกแบบกระจกต้นแบบสำหรับสร้าง LIGBT ได้มีการออกแบบกระจกต้นแบบไว้เรียบร้อยแล้ว จึงได้นำกระจกต้นแบบนั้น ๆ มาใช้เลยเพื่อลดระยะเวลาในการเตรียมต้นแบบและจะทำการศึกษาเฉพาะในส่วนของคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ LIGBT

ต่อไปจะกล่าวถึงกระบวนการสร้างอุปกรณ์ LIGBT ลงบนแผ่นผลึกซิลิคอนชนิด N โดยใช้เทคโนโลยีการแพร่สารเจือด้วยความร้อน โดยที่กระบวนการสร้าง LIGBT ได้ปรับปรุงมาจากกระบวนการสร้างมาตรฐานสำหรับสร้างมอสเฟตกำลังแบบดีมอส ต่อไปนี้จะเป็นขั้นตอนต่างๆ ทั้งหมดในการสร้าง LIGBT ภายในห้องปฏิบัติการสารกึ่งตัวนำของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ดังแสดงในรูปที่ 3.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 กระบวนการสร้างทั้งหมดของ IGBT

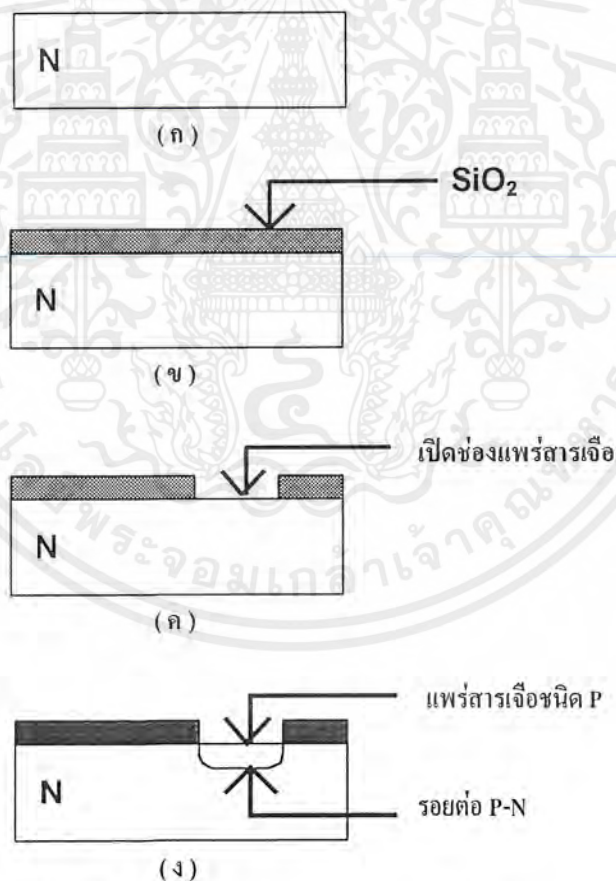
3.4 กระบวนการสร้างสารกึ่งตัวนำในแนวระนาบ (Planar process)

กระบวนการสร้างสารกึ่งตัวนำในระนาบเป็นกระบวนการสร้างสารกึ่งตัวนำวิธีหนึ่งที่น่านิยมกันมาก และยังเหมาะสำหรับงานสร้างวงจรรวมอีกด้วย โดยมีข้อได้เปรียบของการสร้าง 2 ประการใหญ่ ๆ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. รอยต่อของสารกึ่งตัวนำจะถูกปกคลุมด้วยชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ ซึ่งจะป้องกันไม่
ให้รอยต่อทำปฏิกิริยาโดยตรงกับอากาศ หรือสิ่งเจือปนอื่น ๆ ที่ไม่ต้องการ ทำให้เกิด
กระแสรั่วไหลที่ต่ำมาก อุปกรณ์จึงมีความแน่นอนสูง
2. การออกแบบต้นแบบและเทคนิคการกัดซึ่งใช้กำหนดขนาดของโครงสร้างทำให้
สามารถลดขนาดของอุปกรณ์ให้เล็กลงได้ และสะดวกในการสร้างที่จำนวนมาก ๆ
พร้อมกันบนแผ่นผลึกซิลิคอนแผ่นเดียว

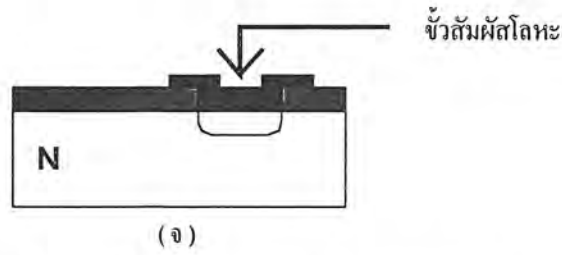
กระบวนการสร้างในแนวระนาบประกอบด้วยกระบวนการสร้างพื้นฐาน 6 ขั้นตอนด้วยกัน
คือ การปลูกผลึก, ออกซิเดชัน (oxidation), โฟโตลิโทกราฟี (photolithography), การแพร่สารเจือ
(diffusion) และการสร้างลวดลายโลหะ (metallization) ดังแสดงในรูปที่ 3.7 เป็นการแสดงถึงภาพ
ตัดขวางของขั้นตอนการสร้างพื้นฐานในแนวระนาบบนแผ่นผลึกซิลิคอน



รูปที่ 3.7 ขั้นตอนพื้นฐานของกระบวนการสร้างในแนวระนาบ

- ก.) ผลึกซิลิคอนชนิด N ข.) ออกซิเดชัน
ค.) โฟโตลิโทกราฟี ง.) การแพร่สารเจือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

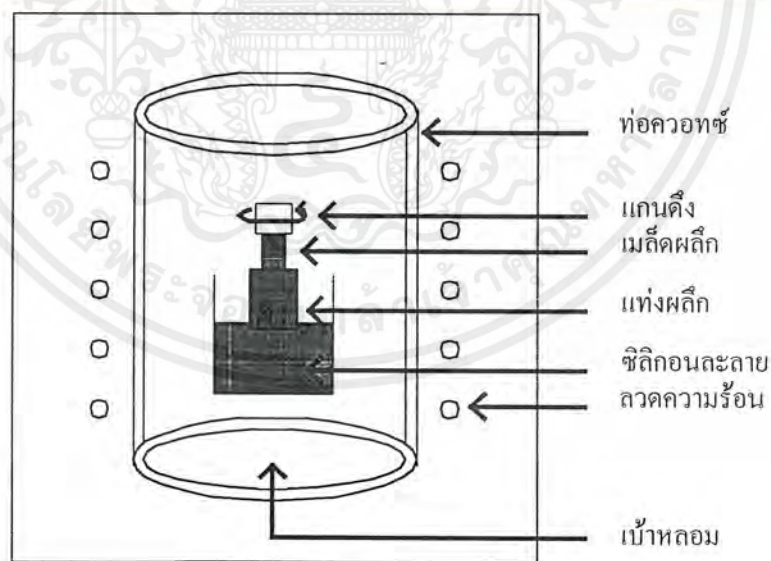


รูปที่ 3.7 ขั้นตอนพื้นฐานของกระบวนการสร้างในแนวระนาบ (ต่อ)
จ.) การสร้างลวดลายโลหะ

จากกระบวนการสร้างพื้นฐานที่กล่าวไป สามารถอธิบายแยกในแต่ละขั้นตอนได้ แต่จะไม่อธิบายละเอียดมากในบางขั้นตอน

3.4.1 การปลูกผลึกซิลิคอน

ปัจจุบันนิยมใช้กันอยู่ 2 วิธี คือ วิธีของโซคราลสกี (Czochralski:CZ) และวิธีโฟลตโซน (Float Zone:FZ) แต่จะกล่าวถึงวิธีที่นำมาใช้ คือ วิธีโซคราลสกี ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 การปลูกผลึกแบบโซคราลสกี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีโซคราลสกี

การนำผลึกหลายรูปของซิลิกอนไปหลอมละลายในเป้าหลอมควอทซ์ (SiO_2) ที่อุณหภูมิ $1416\text{ }^\circ\text{C}$ ในบรรยากาศของอาร์กอน ภายในจะมีแกนหมุนอยู่ตลอดเวลาเพื่อให้ทุกส่วนได้รับความร้อนอย่างสม่ำเสมอ เมื่ออุณหภูมิของซิลิกอนคงที่และสม่ำเสมอ จะใช้แทนที่มีเม็ดผลึกเป็นตัวอย่างอยู่ ปลายแล้วนำลงไปหลอมละลายเป็นเนื้อเดียวกับซิลิกอนในเป้าหลอม และค่อย ๆ ดึงขึ้นช้า ๆ ทำให้ซิลิกอนติดเม็ดผลึกขึ้นมา เราสามารถควบคุมขนาดของเม็ดผลึกและแท่งผลึกได้ โดยการควบคุมอุณหภูมิของเป้าหลอมและอัตราการหมุนของเป้าหลอม นอกจากนี้ยังสามารถเติมอะตอมสารเจือชนิดต่าง ๆ ลงไปละลายในเป้าหลอมได้ ทำให้ได้แท่งผลึกสารกึ่งตัวนำที่ต้องการ จากนั้นนำมาตัดเป็นแผ่นและขัดผิวหน้าและกัดด้วยสารเคมีให้มันเหมือนกระจก (polishing) แต่ไม่สามารถทำเองได้ภายในห้องปฏิบัติการของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ จึงนำแผ่นผลึกซิลิกอนเริ่มต้นสำเร็จรูปเพื่อนำมาสร้างเป็น LIGBT ในห้องปฏิบัติการของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ต่อไป

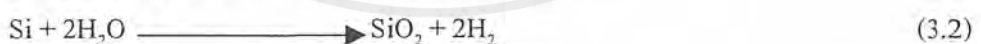
3.4.2 กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation)

ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นสารที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนมีลักษณะโปร่งใสใช้เป็นสารเคลือบผิวหน้าของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำได้ดี ชั้นของซิลิกอนไดออกไซด์สามารถสร้างได้โดยกระบวนการออกซิเดชัน โดยทิ้งให้แผ่นผลึกซิลิกอนทำปฏิกิริยากับออกซิเจนหรือไอน้ำอิมพัล ในเตาที่มีอุณหภูมิสูงประมาณ $800 - 1100\text{ }^\circ\text{C}$ ปฏิกิริยาเคมีของการเกิดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ มีสมการดังต่อไปนี้

1. กระบวนการของออกซิเดชันแบบแห้ง (Dry Oxidation)



2. กระบวนการของออกซิเดชันชื้น (Wet Oxidation)



ชั้นของซิลิกอนไดออกไซด์ภายในกระบวนการสร้างอุปกรณ์ LIGBT มีหน้าที่ดังนี้

1. ใช้เป็นส่วนปกคลุมผิวของซิลิกอนและป้องกันสิ่งเจือปนจากภายนอกที่ไม่ต้องการให้ทำปฏิกิริยากับผิวของซิลิกอน (Passivation Layer)
2. เป็นหน้ากักกันการแพร่สารเจือเข้าไปในส่วนที่ไม่ต้องการ
3. ใช้เป็นส่วนเกต หรือที่เรียกว่า เกตออกไซด์ ซึ่งเป็นส่วนที่มีความสำคัญอย่างมากในอุปกรณ์ประเภทมอสเฟต เนื่องจากเป็นส่วนที่เหนียวนำไปเกิดช่องทางเดินกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ใช้เป็นฉนวนบนผิวซิลิคอน เพื่อป้องกันการลัดวงจรของลวดลายอลูมิเนียมกับผิวซิลิคอนในส่วนอื่น ๆ

จากหน้าที่ของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ตามที่กล่าวมา ทำให้ต้องการชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีความหนาที่แตกต่างกันไป เช่น ในสิ่งของเทออกไซด์จะมีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์หนาประมาณ 1000 \AA และต้องการเป็นออกไซด์ที่มีคุณภาพดีด้วย จึงต้องใช้กระบวนการสร้างซิลิคอนไดออกไซด์แบบแห้ง แต่สำหรับในส่วนที่ใช้สร้างเป็นหน้ากากป้องกันการแพร่อะตอมสารเจือชั้นซิลิคอนออกไซด์จำเป็นต้องมีความหนาประมาณ $4000 - 5000 \text{ \AA}$ ขึ้นไป ซึ่งความหนาขนาดนี้ จะสร้างโดยใช้วิธีการสร้างซิลิคอนไดออกไซด์แบบแห้งอย่างเดียวเช่นนั้นต้องใช้เวลานานและสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายมาก ดังนั้นจึงเป็นการสร้างแบบแห้งสลับกับแบบชื้นและแบบแห้งซ้ำอีกครั้ง ทั้งนี้เนื่องจากการสร้างซิลิคอนไดออกไซด์แบบชื้นสามารถสร้างความหนาได้เร็วแต่มีคุณภาพต่ำหรือมีรูพรุนมาก จึงจำเป็นต้องใช้สลับกับการสร้างแบบแห้ง

3.4.3 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี (Photolithography)

กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี เป็นขบวนการที่ใช้สำหรับการถ่ายแบบจากกระจกต้นแบบลงบนผิวของแผ่นสลิคโดยการใช้น้ำยาไวแสง เพื่อเปิดช่องซิลิคอนไดออกไซด์สำหรับการแพร่อะตอมสารเจือในขอบเขตที่กำหนดจากกระจกต้นแบบ โดยที่ความสามารถในการเปิดช่องซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีขนาดเล็กมากและความถูกต้องแม่นยำ จะขึ้นอยู่กับ การปรับตำแหน่ง (alignment) และความคมชัดของกระจกต้นแบบ จากรูปที่ 3.9 แสดงขั้นตอนต่าง ๆ ของกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี

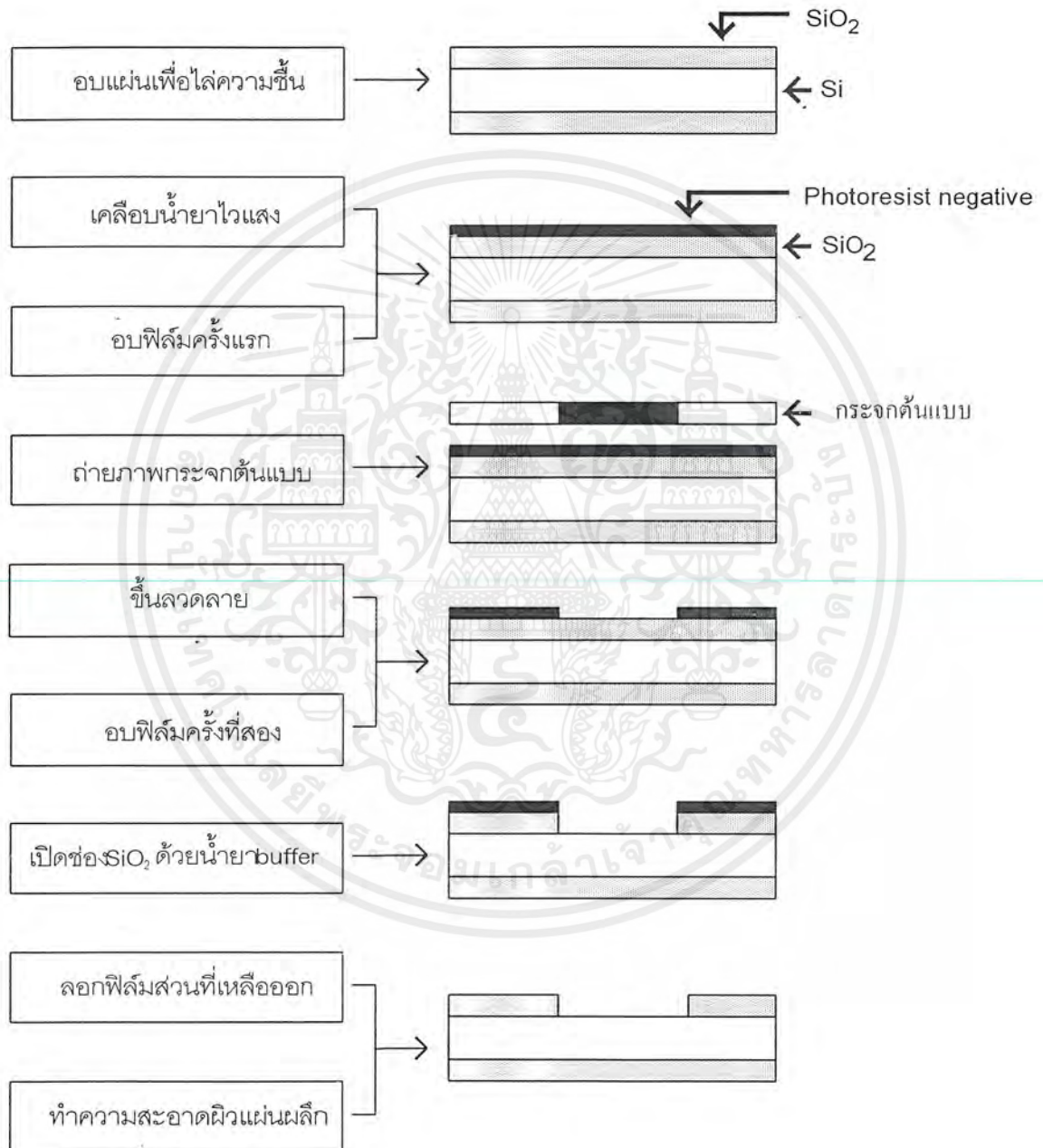
3.4.4 กระบวนการแพร่อะตอมสารเจือ (Diffusion)

กระบวนการแพร่อะตอมสารเจือเป็นการเติมและควบคุมปริมาณของอะตอมสารเจือให้เข้าไปในผลึกสารกึ่งตัวนำในบริเวณที่ต้องการทำให้เกิดรอยต่อพี.เอ็น แหล่งจ่ายอะตอมสารเจือสามารถแบ่งได้ตามประเภทของอะตอมสารเจือ 2 ประเภท คือ

1. แหล่งจ่ายอะตอมสารเจือชนิดเอ็น เช่น ฟลวง, สารหนู, ฟอสฟอรัส เป็นต้น ซึ่งเป็นธาตุที่อยู่ในกลุ่ม 5A
 2. แหล่งจ่ายอะตอมสารเจือชนิดพี เช่น โบรอน เป็นต้น ซึ่งเป็นธาตุที่อยู่ในกลุ่ม 3A
- โดยแต่ละประเภทสามารถแบ่งตามสถานะได้ 3 ประเภท คือ
1. แหล่งจ่ายอะตอมสารเจือชนิดของแข็ง เช่น Sb_2O_3 , As_2O_3 เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. แหล่งจ่ายอะตอมสารเจือชนิดของเหลว เช่น POCl_3 หรือ BBr_3 เป็นต้น
3. แหล่งจ่ายอะตอมสารเจือชนิดของก๊าซ เช่น AsH_3 , PH_3 และ B_2H_2 เป็นต้น



รูปที่ 3.9 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับกระบวนการแพร่อะตอมสารเจือภายในห้องปฏิบัติการสารกึ่งตัวนำของศูนย์วิจัย อิเล็กทรอนิกส์ สจล. จะเลือกใช้แหล่งจ่ายอะตอมสารเจือชนิดอื่น เป็น SiP_2O_7 (ซิลิคอนไพโรฟอสเฟต) และแหล่งจ่ายอะตอมสารเจือชนิดที่ เป็น BN (โบรอนไนไตรด์) ซึ่งทั้งสองชนิดมีสถานะเป็นของแข็ง ทั้งนี้เนื่องจากแหล่งจ่ายของอะตอมสารชนิดของแข็งสะดวกอย่างยิ่งในการใช้งาน และควบคุมปริมาณสารเจือได้ง่ายกว่า

ขั้นตอนในกระบวนการแพร่อะตอมสารเจือ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ขั้นตอน คือ

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

3.4.5 กระบวนการสร้างลวดลายโลหะ (Metalization)

กระบวนการสร้างลวดลายโลหะเป็นการนำโลหะมาเคลือบที่ผิวบนแผ่นผลึกเพื่อทำหน้าที่เป็นรอยสัมผัสโอห์มมิก หรือเป็นแกนความนำต่อเชื่อมภายในระหว่างสิ่งประดิษฐ์ต่าง ๆ ในวงจรรวม หรือเป็นขั้วสำหรับต่อกับอุปกรณ์ภายนอก โดยบริเวณที่จะสร้างรอยสัมผัสต้องเปิดช่องซิลิคอนไดออกไซด์ที่ปกคลุมบนผิวแผ่นผลึกออกก่อน โดยลักษณะของโลหะที่เคลือบจะมีลักษณะเป็นฟิล์มบาง (Thin-Film) โดยมีคุณสมบัติต่อไปนี้ คือ

1. ทำให้เกิดรอยสัมผัสกับซิลิคอนที่มีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าต่ำ
2. โลหะที่ใช้ต้องมีความนำไฟฟ้าสูง
3. ทำให้ติดแน่นกับผิวซิลิคอนไดออกไซด์ หรือสารไดอิเล็กทริกอื่น ๆ ได้ดี
4. สามารถต่อเข้ากับสารลวดความนำภายนอกได้ดี

สำหรับกระบวนการสร้างลวดลายโลหะ ภายในห้องปฏิบัติการสร้างกึ่งตัวนำของศูนย์วิจัย อิเล็กทรอนิกส์ สจล. จะเลือกใช้โลหะอลูมิเนียม (Al) โดยใช้เครื่องเคลือบโลหะในสุญญากาศ ทำการเคลือบโลหะลงบนผิวของแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำความหนาประมาณ $1 \mu\text{m}$ แล้วจึงนำไปถ่ายฟิล์มโดยกระบวนการโป้โดลิโทกราฟีและกัดเป็นลวดลายตามที่ต้องการไว้ จากนั้นจึงนำไปผ่านกระบวนการซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 500°C ประมาณ 10 นาที เพื่อให้รอยสัมผัสระหว่างอลูมิเนียมกับซิลิคอนเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิก

3.5 กระบวนการสร้างมาตรฐาน

ในกระบวนการสร้างมาตรฐาน เราจะทำการสร้างทั้ง LIGHT และ DMOST ควบคู่กันไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อนำมาเปรียบเทียบคุณสมบัติทางไฟฟ้า จะได้เห็นชัดถึงความสามารถของ IGBT ที่ดีกว่า DMOST

3.5.1 กระบวนการสร้างมาตรฐานของ IGBT

กระบวนการสร้าง IGBT ที่สร้างภายในห้องปฏิบัติการสารกึ่งตัวนำของศูนย์อิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เป็นกระบวนการสร้างโดยอาศัยเทคโนโลยีการแพร่อะตอมสารเจือโดยใช้ความร้อน โดยมีขั้นตอนต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.1 และแสดงผังรูปภาพตัดขวางในรูปที่ 3.10

ตารางที่ 3.1 กระบวนการสร้าง IGBT บนแผ่นผลึกฐานรองซิลิกอนชนิดเอ็น

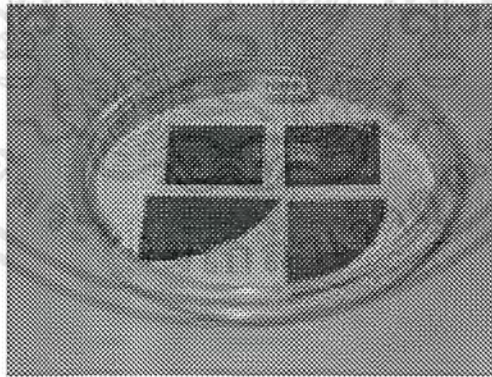
กระบวนการ	ขั้นตอน	เงื่อนไข	หมายเหตุ
เตรียมแผ่นผลึกซิลิกอนเริ่มต้น	-	-	โครงสร้างแนวระนาบ : Si แบบ n ระนาบ (100) , หนา 400 μm , $\rho = 7-13$ $\Omega - \text{cm}$
ทำความสะอาดผิวแผ่นผลึกเริ่มต้น	กำจัดโลหะหนัก กำจัดไขมัน	กรดไนตริก ไตรโคลโรเอทธี ลิ้น	-
สร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ครั้งแรก	ออกซิเดชันแบบแห้งและชื้น	Set 1100 °C แห้ง 2 ชม. ชั้น 1 ชม. แห้ง 1 ชม.	SiO ₂ หนาประมาณ 5000Å°
โฟโตลิโทกราฟีส่วน P ⁺ - collector	ทำฟิล์มเปิดช่อง SiO ₂	Way coat, สารละลาย บัฟเฟอร์	กระจกต้นแบบแผ่นที่ 1 ด้วยอัตราการกัด 1000 Å/นาที
แพร่อะตอมสารเจือลงในส่วน P ⁺ -collector	Predeposition	BN, set 860 °C, 30 นาที N ₂	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	Drive in และ สร้าง SiO ₂	Set 1100 °C ,N ₂ แห้ง 30 นาที ชื้น 30 นาที แห้ง 30 นาที	SiO ₂ ที่สร้างใหม่ประมาณ 4000 Å°
โฟโตกราฟฟี ส่วน P-base	ทำฟิล์ม กัด SiO ₂	Way coat , สารละลายบัพเฟอร์	กระจกต้นแบบแผ่นที่ 2
แพร่สารเจือลงใน ส่วน P-base	Predeposition	BN, Set 780 °C 20 นาที, N ₂	
	Drive in และ สร้าง SiO ₂	Set 1100 °C , O ₂ 14 ชั่วโมง	SiO ₂ ที่สร้างใหม่ประมาณ 4000 Å°
โฟโตลิโทกราฟฟี ส่วน N ⁺ -emitter	ทำฟิล์ม กัด SiO ₂	Way coat , สารละลายบัพเฟอร์	กระจกต้นแบบแผ่นที่ 3
แพร่สารเจือลงใน ส่วน N ⁺ -emitter	Predeposition	SiP ₂ O ₇ , Set 1014 °C 12 นาที, N ₂	
	Drive in และ สร้าง SiO ₂	Set 1100 °C , O ₂ 10 นาที	SiO ₂ ที่สร้างใหม่ประมาณ 700 Å°
โฟโตลิโทกราฟฟี ส่วนเกตออกไซด์	ทำฟิล์ม กัด SiO ₂	Way coat , สารละลายบัพเฟอร์	กระจกต้นแบบแผ่นที่ 4
ทำการสร้างเกตออก ไซด์	ออกซิเดชัน แบบแห้ง	Set 950 °C , O ₂ 30 นาที	SiO ₂ = 1000 Å°
โฟโตลิโทกราฟฟี ส่วนขั้วสัมผัส	ทำฟิล์ม กัด SiO ₂	Way coat , สารละลายบัพเฟอร์	กระจกต้นแบบแผ่นที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เคลือบโลหะ	เคลือบฟิล์มบาง อลูมิเนียม	เครื่องเคลือบ สุญญากาศ, ลวด อลูมิเนียม	ความดัน 18×10^{-6} torr ฟิล์มบางอลูมิเนียมหนา $1 \mu\text{m}$
โฟโตลิโทกราฟฟีลวด ลายโลหะ	ทำฟิล์มกัก อลูมิเนียม	AZ-1350 ส่วนผสม กรดฟอสฟอริก	กระจกต้นแบบแผ่นที่ 6
ซินเตอร์ริง		Set 500°C 10 นาที, N_2	สร้างขั้วสัมผัสโอห์มมิก
การทดสอบคุณสมบัติ ทางไฟฟ้า	รอยต่อพีเอ็น, คุณสมบัติกระแส และแรงดัน	เครื่อง โพรบ- สเตรชันและ เครื่องวัดคุณ- สมบัติของ ทรานซิสเตอร์	ตรวจสอบคุณภาพ



รูปที่ 3.10 ภาพถ่ายของ LIGHT ที่สร้างเสร็จเรียบร้อยแล้ว

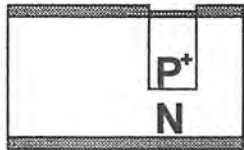
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



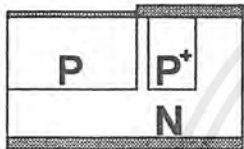
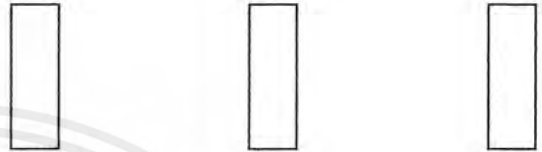
แผ่นผลึกซิลิคอนชนิด N
 $\rho = 7-13 \Omega\text{-cm}$



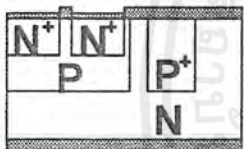
สร้างชั้น SiO_2
 ความหนา 5000 \AA



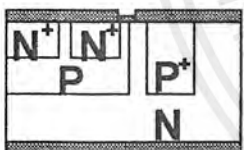
แพร่สารเจือและขั้วลึกลง
 ส่วน P^+ -collector



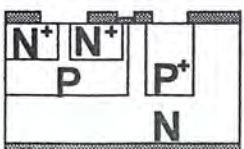
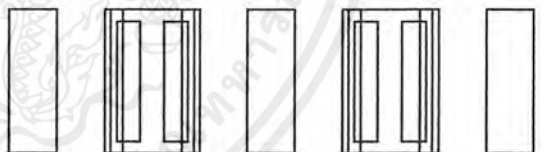
แพร่สารเจือและขั้วลึกลง
 ส่วน P-base



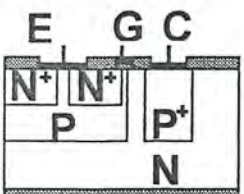
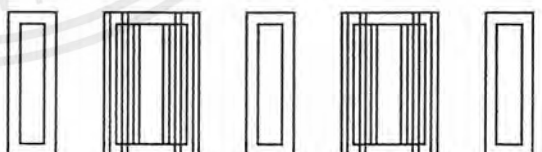
แพร่สารเจือและขั้วลึกลง
 ส่วน N^+ -emitter



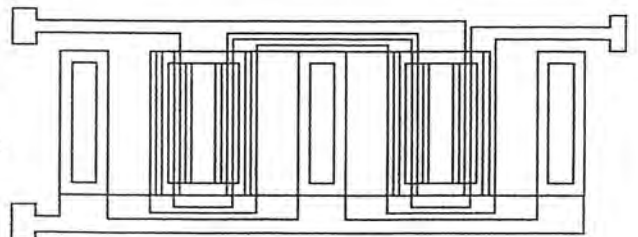
สร้างเขตออกไซด์
 หนา 1000 \AA



เปิดช่อง SiO_2 เพื่อ
 สร้างขั้วสัมผัสโลหะ



สร้างตลาดลายอลูมิเนียม
 และขั้วสัมผัสแบบโลหะ



รูปที่ 3.11 กระบวนการสร้าง LIGBT ตามโครงสร้างในแนวระนาบและกระจกคั่นแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

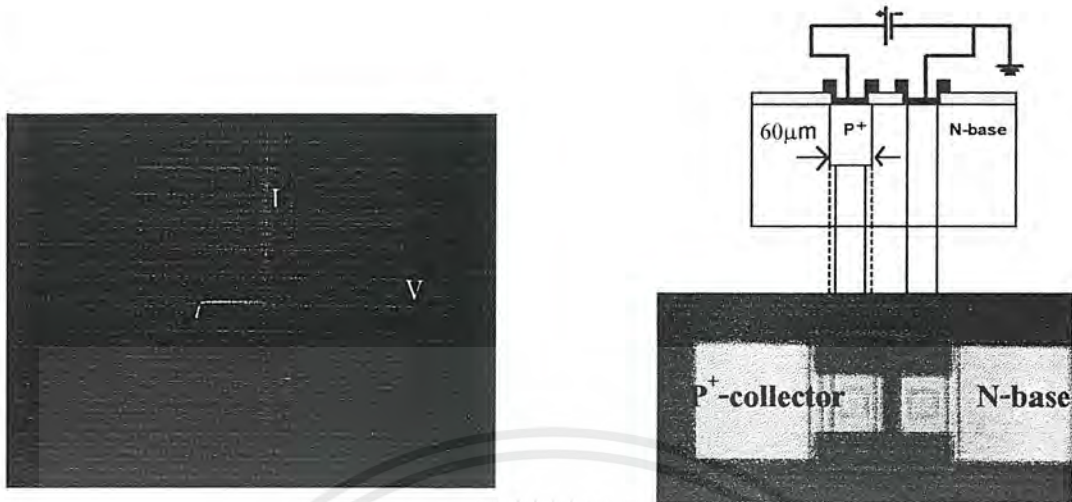
หลังจากทำการสร้าง LIGBT เสร็จแล้ว และนำมาวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า (DC characteristics) โดยใช้เครื่อง Transistor Curve Tracer พบว่าการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลกเตอร์กับแรงดันคอลเลกเตอร์-อิมิตเตอร์ หรือ I-V Characteristics สามารถบ่งบอกถึง LIGBT ที่ถูกสร้างขึ้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการใช้งานได้ ฉะนั้นในบทนี้จะเป็นการแสดงให้เห็นว่า LIGBT มีผลการทดลองของกราฟคุณสมบัติกระแสและแรงดันให้ผลการทดลองที่น่าพอใจพอสมควรแล้ว ยังแสดงให้เห็นถึงผลการตรวจสอบรอยต่อแต่ละส่วนตามโครงสร้างของ LIGBT มีลักษณะรูปร่างหน้าตาเป็นอย่างไร และนอกจากนี้ยังนำ LDMOST ที่สร้างขึ้นบนแผ่นซิลิคอนเดี่ยวกับ LIGBT มาเปรียบเทียบกับ LIGBT เพื่อแสดงให้เห็นถึงจุดเด่นของ LIGBT ที่ได้รับความสนใจในเชิงพาณิชย์ในปัจจุบัน สำหรับผลการทดลองแสดงได้ดังนี้



รูปที่ 4.1 การนำชิ้นงานที่สร้างเรียบร้อยแล้วมาวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า โดยใช้เครื่อง Transistor Curve Tracer

4.1 การทดสอบรอยต่อพี-เอ็น

ในการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานในช่วงแรกนี้จะทำการทดสอบรอยต่อต่างๆ ของกวดลายที่ออกแบบเป็นพิเศษ ที่สร้างพร้อมกันกับตัวอุปกรณ์ LIGBT และภาพตัดขวางของกวดลาย จากภาพตัดขวางสามารถทำการวัดรอยต่อได้ดังนี้คือ รอยต่อ P⁻-collector กับ N-base ,รอยต่อ P-base กับ N-base และรอยต่อ N⁺-P-N ซึ่งผลการทดลองสามารถแสดงดังรูปที่ 4.2

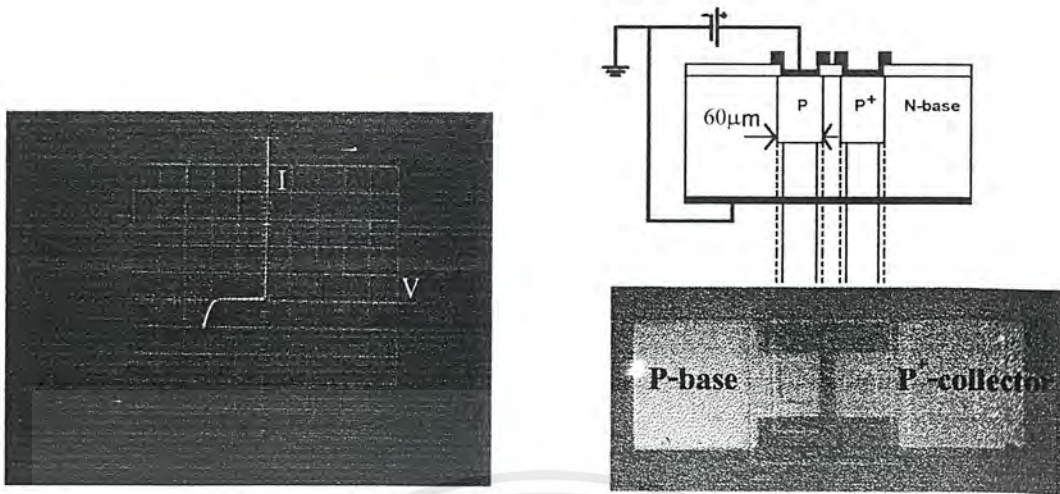


รูปที่ 4.2 (ก) รอยต่อพี-เอ็นระหว่าง P⁺-collector กับ N-base ของโครงสร้าง Test Pattern
(Hor:50 V/div, Ver:5 mA/div)

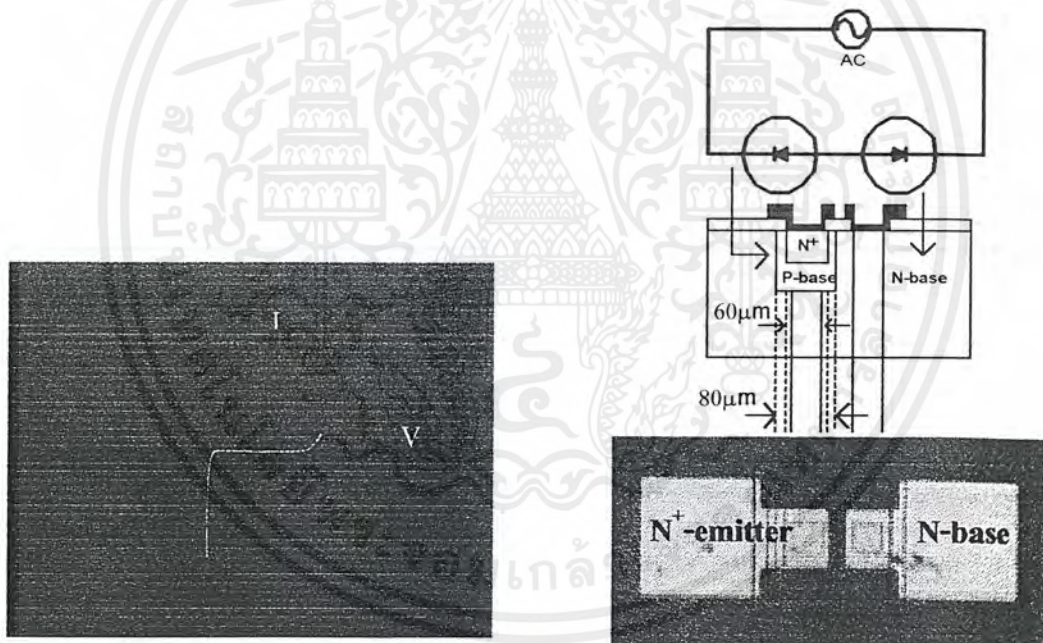
จากผลการทดสอบรอยต่อพี-เอ็น โดยใช้เครื่อง Transistor Curve Tracer พบว่ารอยต่อต่างๆ สามารถทำงานได้สอดคล้องกับรอยต่อพี-เอ็น ทางทฤษฎี ทั้งในส่วนไบอัสตรงและไบอัสกลับ จากรูปที่ 4.2 (ก) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของรอยต่อพี-เอ็นระหว่าง P⁺-collector กับ N-base ซึ่งเป็นรอยต่อที่มีความสำคัญอย่างมากต่อคุณสมบัติทางความสามารถในการปิดกั้นย้อนกลับ (Reverse Blocking Capability) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแรงดันไฟฟ้าภายในคกคร่อมบริเวณรอยต่อ P⁺-collector กับ N-base (V_{bi} : build in voltage) ประมาณ 0.6 โวลต์ และสามารถทนแรงดันย้อนกลับได้ 120 โวลต์ ซึ่งเป็นการบ่งบอกถึงความสามารถในการปิดกั้นย้อนกลับ ที่สูงพอสมควรที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานได้ ในอุปกรณ์ที่ต้องการแรงดันสูงปานกลาง แต่ถ้าต้องการให้แรงดันย้อนกลับสูงกว่านี้สามารถทำได้โดยการเลือกแผ่นซิลิคอนชนิดที่มีสภาพต้านทานสูงกว่านี้

ถ้าสำหรับผลที่แสดงในรูปที่ 4.2 (ข) เป็นกราฟรอยต่อพี-เอ็นระหว่างชั้น P-base กับ N-base ซึ่งมีความสำคัญในการทำงานในสภาวะปิดกั้นไปหน้า (Forward Blocking Capability) และความหนาแน่นอะตอมสารเจือในส่วนของชั้น P-base ยังเป็นตัวกำหนดค่าแรงดันขีดเริ่ม (V_T : Threshold Voltage) ให้กับอุปกรณ์ LIGBT ด้วย เมื่อทำการทดสอบแล้วรอยต่อนี้สามารถทนแรงดันย้อนกลับได้ 100 โวลต์ ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการปิดกั้นไปหน้า ที่สูงพอสมควรที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานได้ ในอุปกรณ์ที่ต้องการแรงดันสูงปานกลาง แต่ถ้าต้องการให้แรงดันย้อนกลับสูงกว่านี้สามารถทำได้โดยการเลือกแผ่นซิลิคอนชนิดที่มีสภาพต้านทานสูงกว่านี้เช่นเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 (ข) รอยต่อพี-เอ็นระหว่างชั้น P-base กับ N-base
(Hor:50 V/div, Ver:5 mA/div)



รูปที่ 4.2 (ค) รอยต่อ N^+ -P-N
(Hor:50 V/div, Ver:5 mA/div)

ในส่วนของรอยต่อ N^+ -P-N ดังแสดงในรูปที่ 4.2 (ค) พบว่า เมื่อไบอัสไฟกระแสสลับเข้าที่ขั้วของรอยต่อ N^+ -P-N แล้ว ที่รอยต่อนี้จะเสมือนเป็นไดโอดสองตัวต่อหัวกลับกันหรือเรียกว่า Back to Back Diode

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

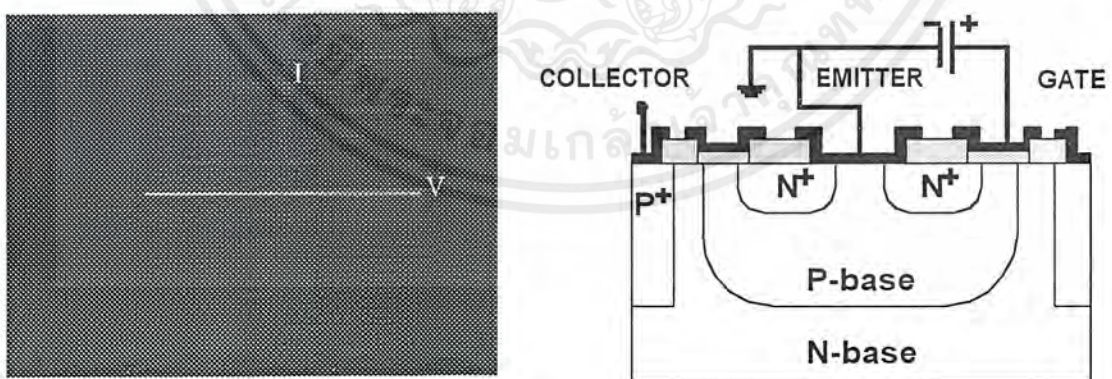
โดยเมื่อไบอัสกระแสซีกบวก จะเห็นว่าไดโอดตัวบนอยู่ในสภาวะไบอัสย้อนกลับ (Reverse bias) และไดโอดตัวล่างจะอยู่ในสภาวะไบอัสตรง (Forward bias) เมื่อให้ไบอัสเพิ่มไปเรื่อยๆ ไดโอดตัวบนจะเข้าสู่สภาวะแรงดันพังทลาย

แต่เมื่อไบอัสกระแสซีกลบ จะเห็นว่า ไดโอดตัวบนอยู่ในสภาวะไบอัสตรง (Forward bias) และไดโอดตัวล่างจะอยู่ในสภาวะไบอัสย้อนกลับ (Reverse bias) เมื่อให้ไบอัสเพิ่มไปเรื่อยๆ ไดโอดตัวล่างจะเข้าสู่สภาวะแรงดันพังทลายเช่นกัน เป็นการแสดงให้เห็นว่ารอยต่อนี้สามารถทำงานได้ดี

สำหรับรอยต่อ N^+ -emitter กับ P-base ไม่สามารถทำการทดสอบได้ เนื่องจากในกระบวนการสร้างไม่ได้มีรูปแบบของรอยต่อนี้ หากจะพิจารณาการรอยต่อนี้ในโครงสร้างของ LIGBT ชั้น N^+ -emitter กับ P-base จะถูกเชื่อมเข้าด้วยกันด้วยอะลูมิเนียมเพื่อลดผลของการเกิดแลทช์-อัป (latch-up) ในโครงสร้างของ LIGBT

4.2 การทดสอบรอยต่อและฉนวนซิลิคอน ไดออกไซด์ภายใต้เกทของโครงสร้าง LIGBT

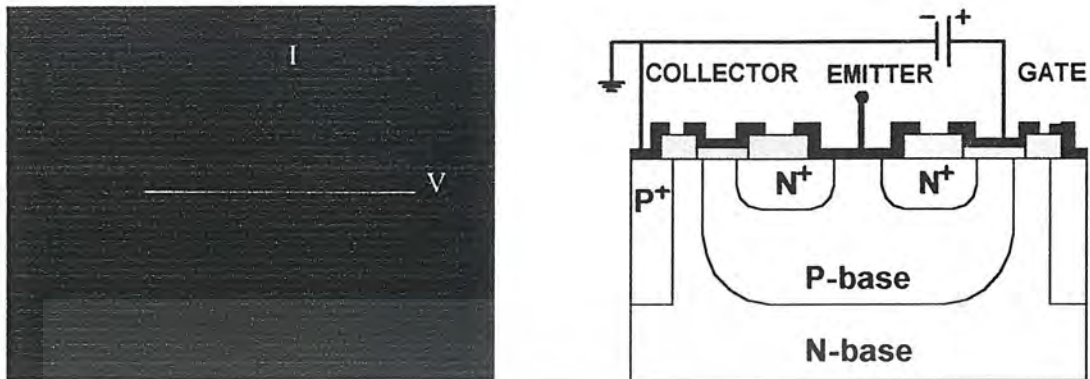
นอกจากการทดสอบคุณสมบัติของรอยต่อพี-เอ็นที่ใช้ในการสร้าง LIGBT แล้ว เพื่อเป็นการยืนยันให้เห็นว่าในโครงสร้าง LIGBT ที่สร้างขึ้นสามารถทำงานได้ ดังนั้นจึงทำการทดสอบรอยต่อต่างๆ ภายในตัวโครงสร้าง LIGBT และยังสามารถทดสอบวัตรอยต่อต่างๆ ภายในตัวโครงสร้าง LDMOST ที่สร้างขึ้นพร้อมกันบนซิลิคอนเดียวกันด้วย เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.3 และ 4.4



รูปที่ 4.3 (ก) กราฟรอยต่อระหว่างขั้วเกทกับขั้วอิมิตเตอร์

(Hor:0.5 V/div, Ver:2mA/div)

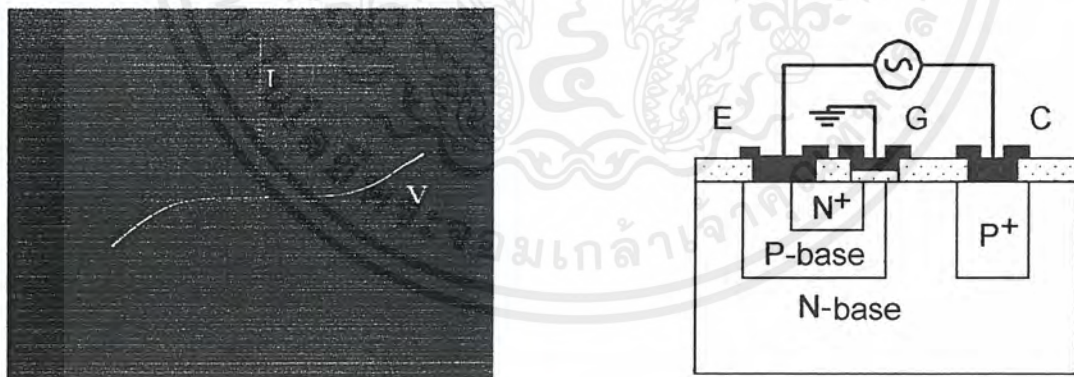
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 (ข) กราฟรอยต่อระหว่างขั้วเกตกับขั้วคอลเลกเตอร์

(Hor:0.5 V/div, Ver:2mA/div)

จากผลการทดลองรูปที่ 4.3(ก)และ(ข) เป็นกราฟแสดงรอยต่อระหว่างขั้วเกตกับขั้วอิมิตเตอร์และระหว่างขั้วเกตกับขั้วคอลเลกเตอร์ ซึ่งรอยต่อของทั้งสองนี้จะไม่เชื่อมต่อกันเนื่องจากมีชั้นฉนวนของซิลิคอนไดออกไซด์กั้นอยู่ ดังนั้นแสดงให้เห็นว่าความต้านทานสูงมากจึงไม่มีกระแสไหล



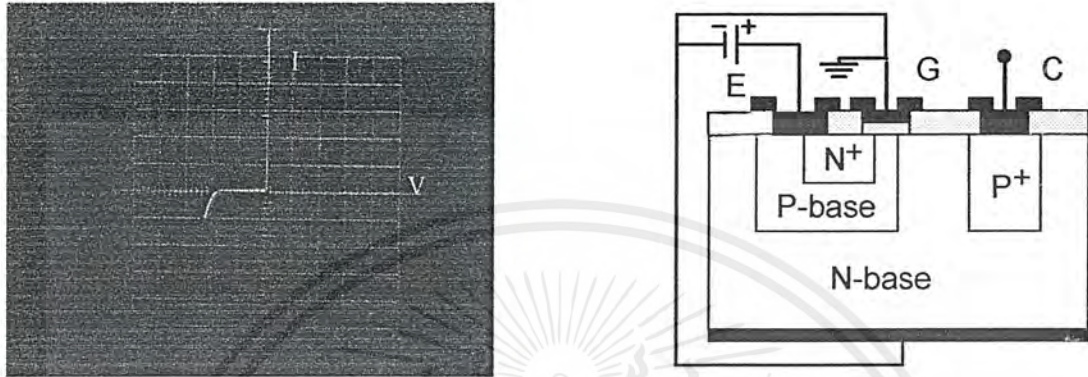
รูปที่ 4.3 (ค) กราฟรอยต่อระหว่างขั้วอิมิตเตอร์กับขั้วคอลเลกเตอร์ และภาพตัดขวางของรอยต่อ

(Hor:20 V/div, Ver:5mA/div)

จากผลการทดลองรูปที่ 4.3 (ค) เป็นกราฟแสดงรอยต่อระหว่างขั้วอิมิตเตอร์กับขั้วคอลเลกเตอร์ เนื่องจากชั้น N^+ -emitter กับ P-base ถูกเชื่อมต่อกันด้วยขั้วลูนีเนียม ทำให้ศักย์ไฟฟ้าในชั้น

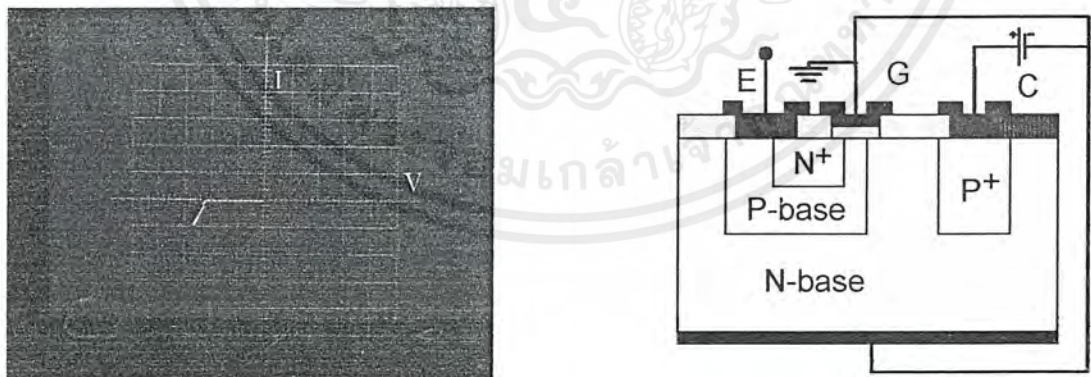
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งสองนี้มีค่าเท่ากันตามที่กล่าวมาแล้ว รอยต่อที่สามารถทำการทดสอบได้คือรอยต่อ P-N- P^+ และพบว่าการทำงานของรอยต่อนี้ยังคงอยู่ใน 2 สถานะคือ สถานะปิดกั้นย้อนกลับและสถานะปิดกั้นไปหน้า ดังที่กล่าวไว้ในส่วนทฤษฎี



รูปที่ 4.3 (ง) กราฟรอยต่อระหว่าง P-base กับ N-base
(Hor:50 V/div, Ver:5mA/div)

จากผลการทดลองรูปที่ 4.3 (ง) เป็นกราฟแสดงรอยต่อระหว่าง P-base กับ N-base เช่นเดียวกับกราฟรูปที่ 4.2 (ข)



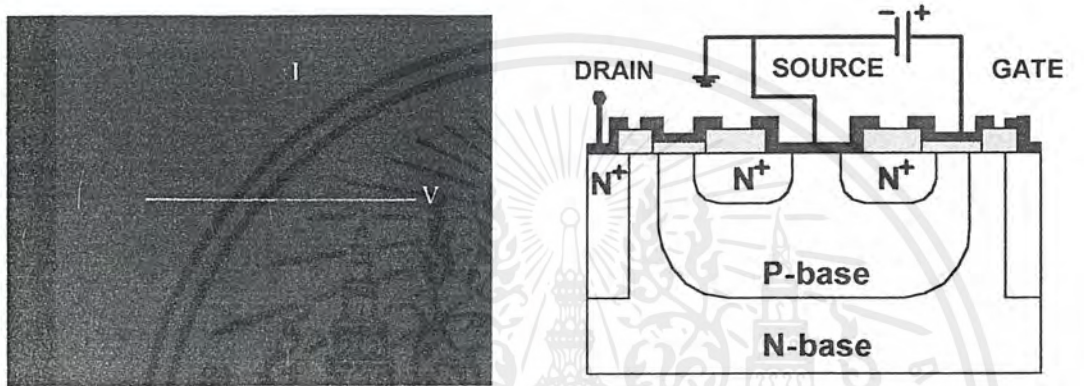
รูปที่ 4.3 (จ) กราฟรอยต่อระหว่าง P^+ -collector กับ N-base
(Hor:50V/div, Ver:5 mA/div)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

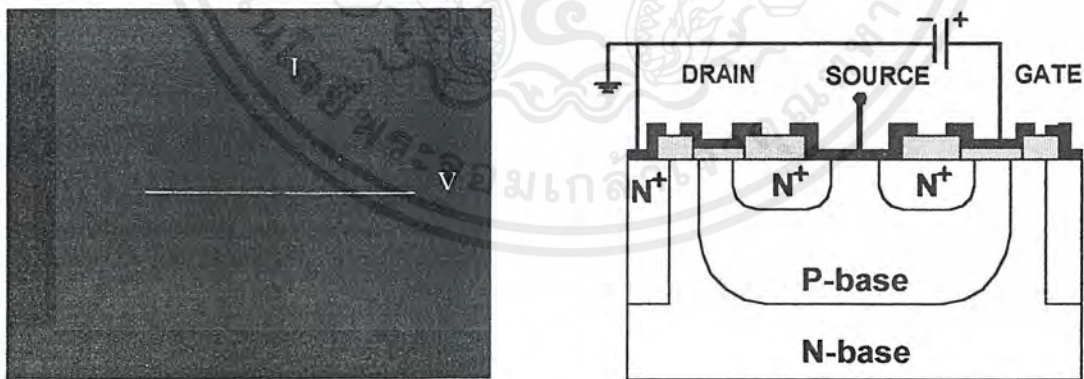
จากผลการทดลองรูปที่ 4.3 (จ) เป็นกราฟแสดงรอยต่อระหว่าง P⁺-collector กับ N-base เช่นเดียวกับกราฟรูปที่ 4.2 (ก)

เมื่อเปรียบเทียบกับกราฟทดสอบรอยต่อพี-เอ็นข้างต้น จะเห็นว่ามีผลใกล้เคียงกัน ถึงแม้กราฟที่ได้จะมีลักษณะแตกต่างกันไปบ้าง

ในระหว่างกระบวนการสร้าง LIGBT ได้ทำการสร้าง LDMOST ไปด้วยพร้อมกัน ดังนั้นจึงนำ LDMOST ที่สร้างพร้อมกันนี้มาทดสอบรอยต่อภายในตัวโครงสร้างด้วย



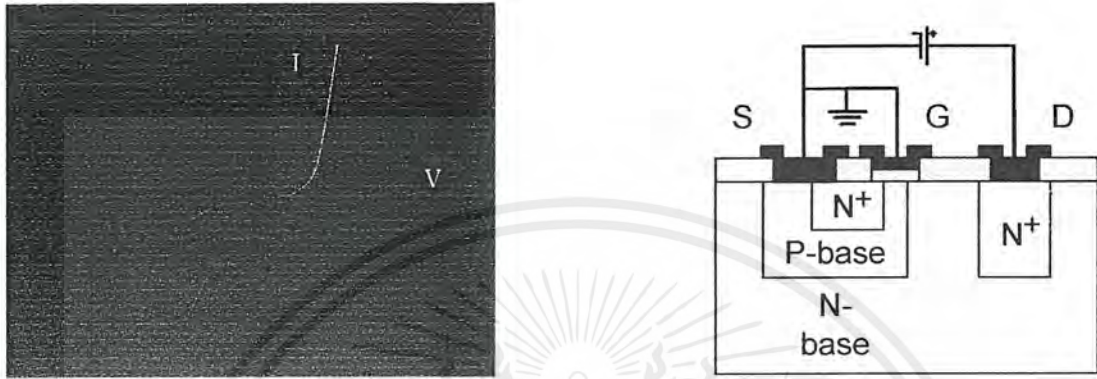
รูปที่ 4.4 (ก) กราฟรอยต่อระหว่างขั้วเกตกับขั้วซอส
(Hor:0.5 V/div, Ver:2 mA/div)



รูปที่ 4.4 (จ) กราฟรอยต่อระหว่างขั้วเกตกับขั้วเดรน
(Hor:0.5 V/div, Ver:2 mA/div)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองรูปที่ 4.4(ก)และ(ข) เป็นกราฟแสดงรอยต่อระหว่างขั้วเกตกับขั้วซอส และระหว่างขั้วเกตกับขั้วเดรน ซึ่งรอยต่อของทั้งสองนี้จะไม่เชื่อมต่อกันเนื่องจากมีชั้นของฉนวนซิลิคอนไดออกไซด์กั้นอยู่



รูปที่4.4 (ค) กราฟรอยต่อระหว่างขั้วเดรนกับขั้วซอส
(Hor:0.5 V/div, Ver:2mA/div)

จากผลการทดลองรูปที่ 4.4 (ค) เป็นกราฟแสดงรอยต่อระหว่างขั้วเดรนกับขั้วซอส เนื่องจากชั้น N^+ -emitter กับ P-base ถูกเชื่อมต่อกันด้วยขั้วอลูมิเนียม ทำให้ศักย์ไฟฟ้าในชั้นทั้งสองนี้มีค่าเท่ากันตามที่กล่าวมาแล้ว ทำให้การทดสอบรอยต่อเป็นรอยต่อพี-เอ็นธรรมดาหรือรอยต่อP-base กับ N^+ -drain ซึ่งรอยต่อนี้จะมีลักษณะเหมือนกับกราฟรูปที่ 4.3 (ง)

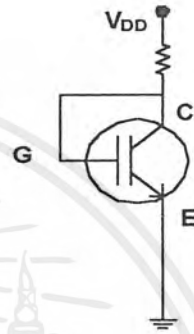
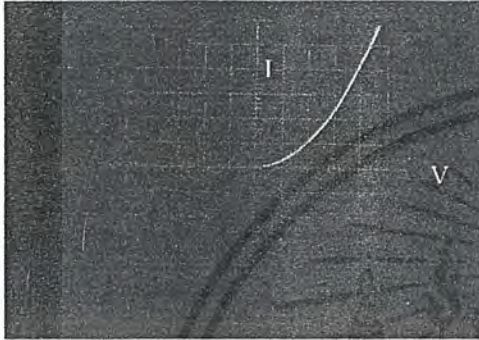
จากการตรวจสอบรอยต่อต่างๆ ของ LIGBT กับ LDMOST ก็เพื่อต้องการให้เรียนรู้และเข้าใจโครงสร้างแต่ละชั้นและแต่ละรอยต่อว่าทำงานอย่างไร เหมาะสมหรือไม่ที่จะนำมาใช้ในการสร้างเป็นตัวอุปกรณ์ซึ่งจากการตรวจสอบแล้วพบว่าเหมาะสมที่จะนำมาใช้สร้างตัวอุปกรณ์ได้ เมื่อรอยต่อทำงานถูกต้องแล้ว ต่อมาทำการวัดคุณสมบัติทางทรานซิสเตอร์ต่างๆ ของ LIGBT กับ LDMOST เช่น แรงดันขีดเริ่ม ($V_{T,0}$), กระแสรั่วไหล, แรงดันพังทลายของตัวอุปกรณ์ และความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างอุปกรณ์ทั้งสอง ดังจะกล่าวต่อไป

4.3 การทดสอบการทำงานของ LIGBT ในลักษณะของทรานซิสเตอร์

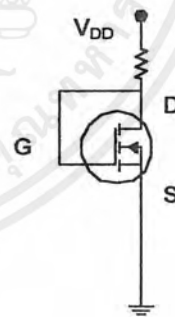
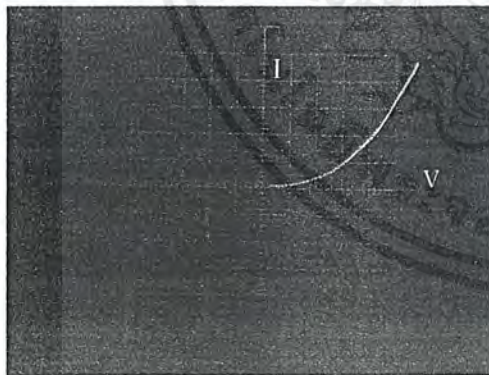
ในการทดสอบโครงสร้างทางเรขาคณิตของอุปกรณ์ LIGBT ที่สร้างขึ้นมาว่าสามารถทำงานในลักษณะของทรานซิสเตอร์ได้หรือไม่นั้น สามารถทำได้โดยการทดสอบความสัมพันธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่างกระแสคอลเลกเตอร์ (I_C) กับแรงดันคอลเลกเตอร์-อิมิตเตอร์ (V_{CE}) ทั้งนี้เนื่องจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I_C กับ V_{CE} สามารถบอกได้ถึงความสามารถในการนำกระแส, ความต้านทานในสถานะนำกระแส (R_{on}), ค่าทรานคอนดักแตนซ์ (g_{msat}), แรงดันปิดกั้นไปหน้า ตลอดจนกระแสรั่วไหล แล้วนำ LDMOST มาเปรียบเทียบกับเพื่อแสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติที่ได้เปรียบของ LIGBT ให้เห็นเด่นชัดยิ่งขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.5



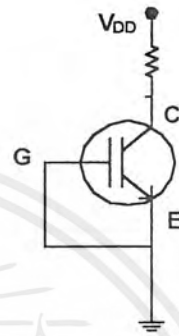
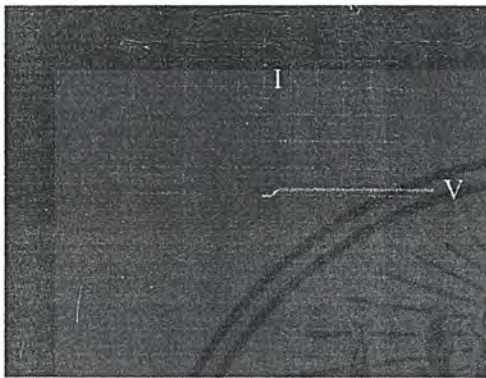
รูปที่ 4.5 (ก) กราฟแรงดันขีดเริ่ม (V_T : Threshold Voltage) ของ LIGBT
(Hor: 1V/div, Ver: 2 mA/div)



รูปที่ 4.5 (ข) กราฟแรงดันขีดเริ่ม (V_T : Threshold Voltage) ของ LDMOST
(Hor: 1 V/div, Ver: 2 mA/div)

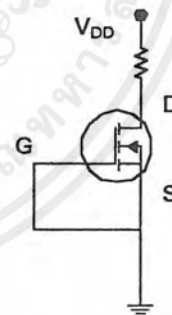
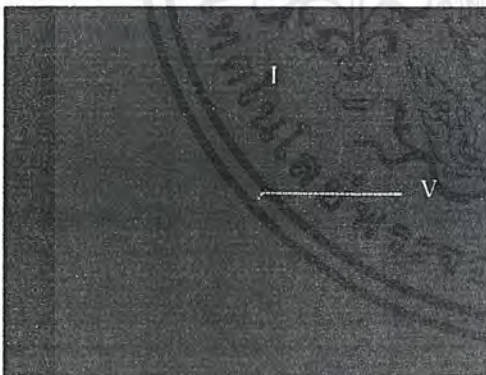
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.5 (ก) เป็นรูปแสดงค่าแรงดันขีดเริ่ม (V_T) ของ LIGBT มีค่าประมาณ 1.8 โวลต์ เปรียบเทียบกับ V_T ของ LDMOST ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (ข) ซึ่งมีค่า 2.3 โวลต์ จะเห็นว่า V_T ของ อุปกรณ์ทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.5 (ค) กราฟกระแสรั่วไหล (I_{CES}) ของ LIGBT

(Hor:1 V/div, Ver:0.05 mA/div)

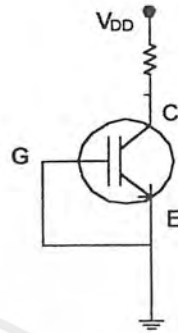
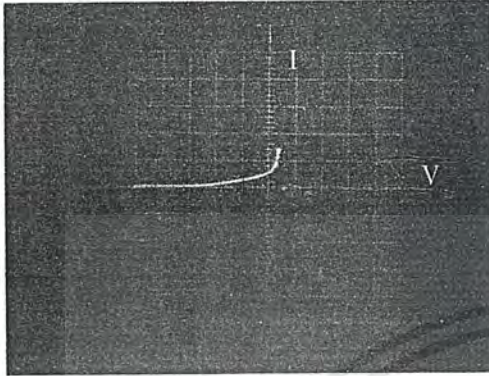


รูปที่ 4.5 (ง) กราฟกระแสรั่วไหล (I_{DSS}) ของ LDMOST

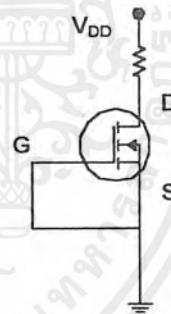
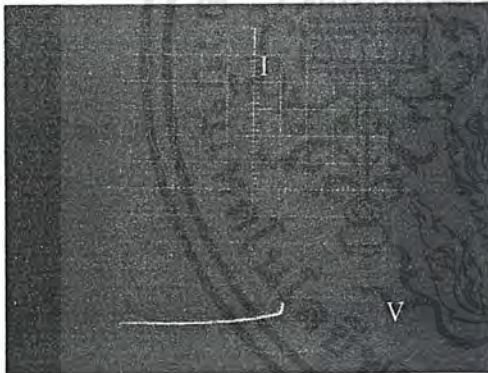
(Hor:1 V/div, Ver:0.05 mA/div)

จากรูปที่ 4.5 (ค) เป็นรูปแสดงกระแสรั่วไหล (I_{CES}) ของ LIGBT มีค่า $15 \mu\text{A}$ เปรียบเทียบกับ I_{DSS} ของ LDMOST ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (ง) ซึ่งมีค่า $10 \mu\text{A}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



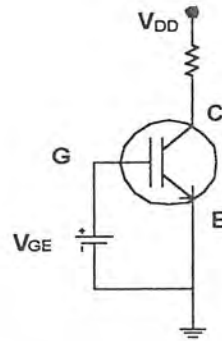
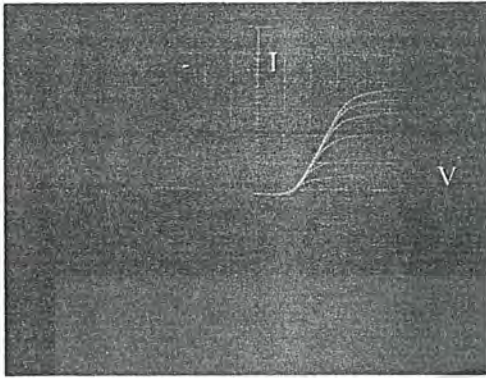
รูปที่ 4.5 (จ) การทนแรงดันปิดกั้นไปหน้าของ LIGBT
(Hor:20 V/div, Ver:10 mA/div)



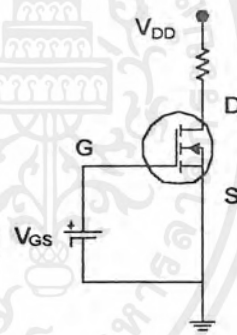
รูปที่ 4.5 (ฉ) การทนแรงดันปิดกั้นไปหน้าของ LDMOST
(Hor:20 V/div, Ver:10 mA/div)

จากรูปที่ 4.5 (จ) เป็นรูปแสดงการทนแรงดันปิดกั้นไปหน้าของ LIGBT มีค่า 100 โวลต์
เปรียบเทียบกับของ LDMOST ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (ฉ) มีค่า 120 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ (I_C) กับแรงดันคอลเลคเตอร์-อิมิตเตอร์ (V_{CE}) ของ LIGBT (Hor:0.5 V/div, Ver:10 mA/div)

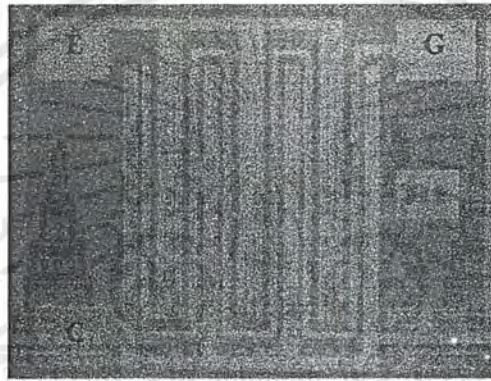


รูปที่ 4.5 (ค) ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรน (I_{DS}) กับแรงดันเดรน-ซอส (V_{DS}) (Hor:0.5 V/div, Ver:10 mA/div)

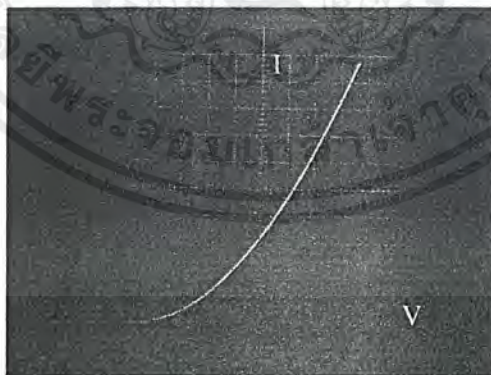
จากรูปที่ 4.5(ข) เป็นรูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ (I_C) กับแรงดันคอลเลคเตอร์-อิมิตเตอร์ (V_{CE}) ของ LIGBT เปรียบเทียบกับของ LDMOST ที่มีขนาดเดียวกันและสร้างพร้อมกันมาวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรน (I_{DS}) กับแรงดันเดรน-ซอส (V_{DS}) ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (ค) จะเห็นว่า LIGBT สามารถทำงานในโหมดของทรานซิสเตอร์ได้อย่างดี

4.4 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆของLIGBT

ในหัวข้อที่ผ่านมาเป็นการทดสอบรอยต่อพี-เอ็นของLIGBT ที่ออกแบบเป็นพิเศษ และเปรียบเทียบการทำงานของรอยต่อพี-เอ็นภายในโครงสร้างระหว่าง LIGBT กับ LDMOST นอกจากนี้ยังทดสอบการทำงานของ LIGBT ในลักษณะของทรานซิสเตอร์เปรียบเทียบกับ LDMOST ด้วยซึ่งแสดงให้เห็นว่า LIGBT ที่สร้างขึ้นนี้สามารถทำงานได้ผลดี สำหรับหัวข้อนี้เป็นการพิจารณาพารามิเตอร์ต่างๆของ LIGBT ดังต่อไปนี้



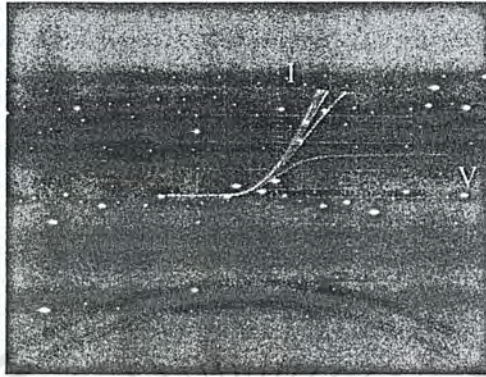
รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายด้านบนของ LIGBT โครงสร้างในแนวระนาบ



รูปที่ 4.7 แรงดันขั้วเริ่ม (V_T) ของ LIGBT

(Hor:0.5 V/div, Ver:5 mA/div)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



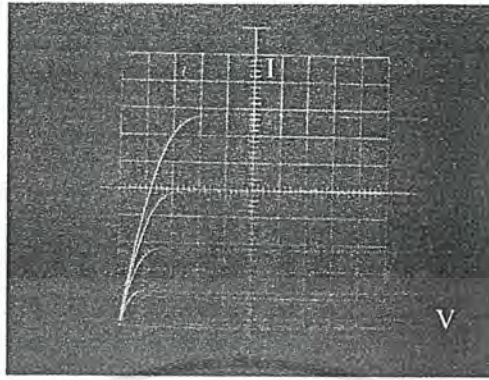
รูปที่ 4.8 แรงดัน ไปหน้า (Built in voltage) 0.6 โวลต์
(Hor:0.2 V/div, Ver:5mA/div)

จากรูปที่ 4.7 แสดงถึงแรงดันขั้วเริ่ม (V_T) ของ LIGBT ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.8 โวลต์ และรูปที่ 4.8 จะแสดงให้เห็นถึงแรงดันไปหน้า (Built in voltage) 0.6 โวลต์



รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส I_C และแรงดัน V_{CE} ของ LIGBT
(Hor:1 V/div, Ver:5 mA/div, 0.5 V/step, 7 step)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า, ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส I_D และแรงดัน V_{DS} ของ LDMOST

(Hor:1 V/div, Ver:5 mA/div, 0.5 V/step, 7 step)

จากตารางที่ 4.1 เป็นการเปรียบเทียบตัวแปรต่างๆ ระหว่าง LIGBT กับ LDMOS พบว่าการนำกระแส, ทรานคอนดักแตนซ์ และความต้านทานในสภาวะนำกระแสของ LIGBT ให้ผลที่ได้ดีกว่าในกรณีของ LDMOST โดยเฉพาะในกรณีของความต้านทานในสภาวะนำกระแสของ LIGBT จะมีค่าลดลง คือประมาณ 79.97% ของ LDMOST ทั้งนี้เนื่องจากผลของประจุพาหะส่วนน้อยที่ถูกฉีดเข้าไปในชั้น N-base ทำให้ปริมาณประจุพาหะในชั้น N-base มีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความต้านทานในชั้น N-base ลดลงตามไปด้วย LIGBT จึงมีความต้านทานในสภาวะนำกระแสต่ำกว่า LDMOST ค่าต่างๆ ในตารางสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$g_m \text{ (เชิงเส้น)} = \frac{I_C}{V_G} \quad (V_{CE} \text{ คงที่}) \quad (4.1)$$

$$g_{CE} \text{ (เชิงเส้น)} = \frac{I_{CE}}{V_{CE}} \quad (V_G \text{ คงที่}) \quad (4.2)$$

$$R_{on} = \frac{1}{g_{CE}} \quad (4.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$g_{msat} = \frac{I_{Csat}}{V_G} \quad (4.4)$$

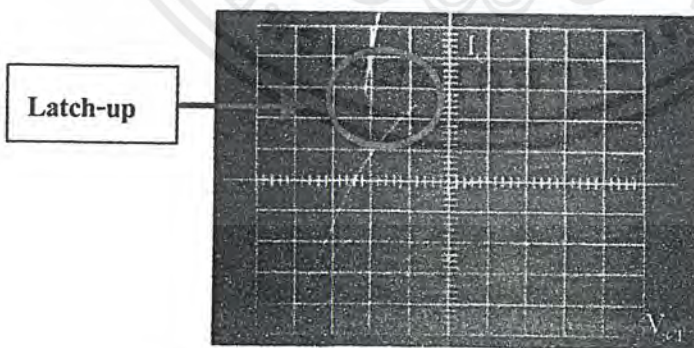
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าตัวแปรต่างๆของ LIGBT และ LDMOST

PARAMETER	LIGBT	LDMOST	UNIT
W	4800	4800	μm
L	5	5	μm
I_C, I_{DS}	55	39	mA
R_{ON}	59.98	75	Ω
g_{ce}, g_{ds}	16.67	13.33	mS
g_m	12.24	10	mS
g_{msat}	13.75	9.75	mS
V_T	1.8	2.3	volt
I_{CES}, I_{DSS}	15	10	μA
V_{CES}, V_{DSS}	100	120	V

หมายเหตุ

I_D, I_C วัดที่ $V_G = 3.5 \text{ V.}, V_{DD} = 10 \text{ V.}$

I_{CES}, I_{DSS} วัดที่ $V_G = 0 \text{ V.}, V_{DD} = 50 \text{ V.}$



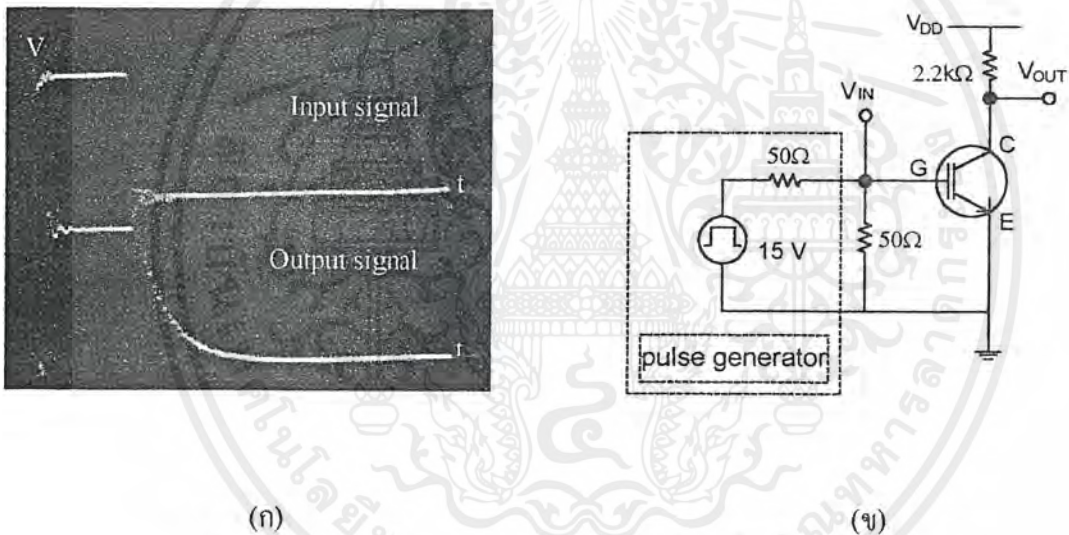
รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I_C และ V_{CE} ของ LIGBT

ที่ทำงานในโหมดของไทรสเตอร์

(Hor:0.5 V/div, Ver:10 mA/div, 0.5 V/step, 6 step)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.11 เป็นการวัดการทำงานในโหมดของไทรสเตอร์ โดยให้แรงดันไบอัสที่ส่วนเกทสูงจนสังเกตเห็นการทำงานในโหมดของไทรสเตอร์ ซึ่งเมื่อให้แรงดันไบอัสที่เกทตั้งแต่ 4.5 โวลต์ขึ้นไปจะทำให้ LIGBT ประพฤติตัวเหมือนกับไทรสเตอร์ เป็นผลให้นำกระแสคอลเลคเตอร์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและแรงดันคอคกร้อมตัวอุปกรณ์จะลดลง เนื่องจากมีกระแสที่ไหลผ่านความต้านทาน R_s ที่แสดงในวงจรสมมูลในรูปที่ 2.7(ก) มีค่ามากขึ้นจนทำให้แรงดันคร่อม R_s มีค่ามากกว่า 0.6 โวลต์ เป็นผลให้ NPN ทรานซิสเตอร์ตัวบนทำงาน กระแสคอลเลคเตอร์จึงไหลผ่าน NPN ทรานซิสเตอร์ตัวบนแทนที่จะไหลผ่านช่องทางเดินกระแสได้ส่วนเกท ซึ่งกระแสที่ไหลผ่าน R_s คือกระแสไฮล (I_h) ซึ่งจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับกระแสคอลเลคเตอร์ นั่นคือ ที่กระแสคอลเลคเตอร์มากกว่า 55 มิลลิแอมป์ จะทำให้กระแสไฮลมีค่าสูงมากพอที่จะทำให้ LIGBT ทำงานในโหมดของไทรสเตอร์



รูปที่ 4.12 (ก) ผลการตอบสนองสัญญาณไฟฟ้ารูปสี่เหลี่ยมของ LIGBT

(ข) วงจรทดสอบความเร็วในการสวิตช์

(ตัวบน: 5 V/div, ตัวล่าง: 5 V/div, 0.1 μ S/div)

จากรูปที่ 4.12(ข) เป็นวงจรทดสอบความเร็วในการสวิตช์ของอุปกรณ์ LIGBT และรูปที่ 4.12(ก) แสดงถึงผลการตอบสนองสัญญาณไฟฟ้ารูปสี่เหลี่ยมของ LIGBT หลังจากทำการวัดการตอบสนองสัญญาณไฟฟ้ารูปสี่เหลี่ยมแล้ว พบว่า เมื่อตัดแรงดันไบอัสที่ขั้วเกทแล้วทำให้เวลาช่วงขอบขาลงของกราฟรูปที่ 4.12(ก) จะมีค่ามาก ซึ่งเป็นผลมาจากการค้อยๆลดลงของกระแสคอลเลคเตอร์หลังจากตัดแรงดันไบอัสที่ขั้วเกท ทั้งนี้เนื่องจากประจุพาหะส่วนน้อยจะไม่หมดลงทันทีหลัง

จากคัตแรงดันที่ชั่วเกทเหมือนกับประจุพาหะส่วนมากหรืออิเล็กตรอน แต่ประจุพาหะส่วนน้อยจะลดลงได้โดยการเกิดการรวมตัวเท่านั้นตามช่วงอายุ (life time) ของประจุพาหะส่วนน้อย จากตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ที่วัดได้แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการสวิตชิงของ LIGBT

ตารางที่ 4.2 แสดงผลของความเร็วในการสวิตชิงของอุปกรณ์ LIGBT

PARAMETER	LIGBT	UNIT
t_r	0.08	μS
t_f	0.29	μS
$t_{d(\text{on})}$	0.09	μS
$t_{d(\text{off})}$	0.32	μS

หมายเหตุ : สัญญาณ Input duty cycle = 2% และความกว้างของพัลส์ (pulse width) = 0.25 μS

บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

การสร้างอุปกรณ์ LIGBT โดยการแพร่สารเจือด้วยความร้อนในห้องปฏิบัติการศูนย์วิจัย อิเล็กทรอนิกส์นั้นสามารถสร้างชิ้นเป็นผลสำเร็จและมีประสิทธิภาพดีในระดับหนึ่ง ทั้งนี้เนื่องจาก สภาพแวดล้อมภายในห้องปฏิบัติการเปลี่ยนแปลงไป แต่สามารถปรับกระบวนการสร้างต่างๆ ให้ เข้ากับสภาพแวดล้อมภายในห้องปฏิบัติการนั้นๆ ได้ เพื่อให้ได้อุปกรณ์ LIGBT ที่มีประสิทธิภาพสูง สุดเท่าที่จะสามารถทำได้ อย่างไรก็ตามจากการที่ได้ทำการศึกษา มา 2 ภาคการศึกษา ทำให้พอที่จะ สามารถหาข้อสรุปเพื่อเป็นแนวทางในการสร้างอุปกรณ์ LIGBT ที่เป็นมาตรฐาน ซึ่งสามารถใช้เป็น แนวทางในการพัฒนา LIGBT ให้มีกำลังสูงขึ้นเพื่อไปใช้เป็นภาคขยายสุดท้ายของวงจรรวมกำลัง (Power Integrated Circuit) ได้ต่อไปในอนาคตทั้งในแง่ของการออกแบบ การสร้างรวมถึงการชด เชยคุณสมบัติบางประการ โดยเริ่มจากการทดลองสร้าง LIGBT โดยใช้กระจกต้นแบบที่ออกแบบ ไว้เรียบร้อยแล้ว เพื่อความเป็นไปได้ในการที่จะสร้างอุปกรณ์ LIGBT โดยสมบูรณ์ จากนั้นได้ทำ การศึกษาตัวแปรต่างๆที่เป็นพื้นฐานในการปรับปรุงประสิทธิภาพของตัวอุปกรณ์ โดยจากผลการ ทดลองสร้าง LIGBT ที่ผ่านมาสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

ทดลองทดสอบโครงสร้างทางเรขาคณิตพื้นฐานของ LIGBT โดยทำการทดสอบคุณสมบัติ ทางไฟฟ้าของรอยต่อพี-เอ็นของ โครงสร้าง test pattern ที่ออกแบบเป็นพิเศษ และทดสอบคุณสมบัติ ทางไฟฟ้าของรอยต่อและฉนวนซิลิคอนไดออกไซด์ภายใต้เกทของโครงสร้าง LIGBT นอกจากนี้ยัง ทำการทดสอบการทำงานของ LIGBT ในลักษณะของทรานซิสเตอร์ ซึ่งจะนำมาเปรียบเทียบกับ LDMOST พบว่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อพี-เอ็นที่สร้างขึ้นเป็นไปตามที่กำหนดและเหมาะสม ที่จะสร้างเป็น LIGBT สำหรับในส่วนของการทำงานในลักษณะของทรานซิสเตอร์พบว่าความ สามารถในการนำกระแสคอลเลคเตอร์อยู่ในระดับที่ดี มีค่าทรานคอนดักแตนซ์สูงและมีความต้านทานในสภาวะนำกระแสต่ำ ที่กล่าวมาข้างต้นมีรายละเอียดคือ

1. การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อพี-เอ็นจากโครงสร้าง test pattern ของ LIGBT

พบว่าที่รอยต่อพี-เอ็นระหว่าง P⁺-collector กับ N-base มีแรงดันไฟฟ้าภายในตกคร่อม (V_{bi} : built in voltage) ประมาณ 0.6 โวลต์ และสามารถทนแรงดันย้อนกลับได้ 120 โวลต์ ซึ่งเป็นการบ่งบอกถึงความสามารถในการปิดกั้นย้อนกลับที่สูงพอสมควรที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งาน ได้ในอุปกรณ์ที่ต้องการแรงดันสูงปานกลาง แต่ถ้าต้องการให้แรงดันย้อนกลับสูงกว่านี้สามารถทำได้ โดยการเลือกแผ่นซิลิคอนชนิดที่มีสภาพต้านทานสูง เช่นเดียวกับรอยต่อพี-เอ็นระหว่างชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

P-base กับ N-base สามารถทนแรงดันย้อนกลับได้ 100 โวลต์ ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการปิดกั้นไปหน้าที่สูงพอสมควร

สำหรับรอยต่อ N⁻-P-N จะทำหน้าที่เสมือนเป็นไดโอดสองตัวต่อกลับหัวกัน (back to back diode) ซึ่งไดโอดเสมือนสองตัวนี้จะทำหน้าที่สลับกัน คือถ้าตัวหนึ่งอยู่ในสภาวะไบอัสย้อนกลับแล้วอีกตัวหนึ่งจะอยู่ในสภาวะไบอัสตรง จึงเห็นได้ว่า ผลที่ได้จากการทดสอบโครงสร้าง test pattern ของ LIGBT ที่สร้างขึ้นพร้อมกับอุปกรณ์ LIGBT สามารถทำงานได้ดีพอสมควร(ตามเกณฑ์มาตรฐานของอุปกรณ์กำลังปานกลาง : $V_{BV} \cong 100-200$ โวลต์)

2. การทดสอบรอยต่อและฉนวนซิลิคอนไดออกไซด์ภายใต้เกทของโครงสร้าง LIGBT

ซึ่งทำการเปรียบเทียบไปพร้อมกับ LDMOST ที่สร้างขึ้นพร้อมกันบนแผ่นซิลิคอนเดียวกัน พบว่ารอยต่อระหว่างขั้วเกทกับขั้วอิมิตเตอร์และรอยต่อระหว่างขั้วเกทกับขั้วคอลเลคเตอร์ ได้ผลเหมือนกันคือระหว่างรอยต่อทั้งสองนี้ไม่เชื่อมต่อถึงกัน เนื่องจากมีชั้นฉนวนของซิลิคอนไดออกไซด์คั่นอยู่ เช่นเดียวกับรอยต่อระหว่างขั้วเกทกับขั้วซอสและรอยต่อระหว่างขั้วเกทกับขั้วเบรคของ LDMOST

ในส่วนของรอยต่อระหว่างขั้วอิมิตเตอร์กับขั้วคอลเลคเตอร์ สามารถทำงานเป็นรอยต่อ P-N-P⁺ ซึ่งบ่งบอกถึงความสามารถในการปิดกั้นย้อนกลับและความสามารถในการปิดกั้นไปหน้าที่ได้ดี เมื่อเปรียบเทียบกับ LDMOST ระหว่างขั้วซอสกับขั้วเบรค สามารถทำงานเป็นรอยต่อพี-เอ็นธรรมดา

นอกจากนี้รอยต่อระหว่าง P-base กับ N-base และ P⁺-collector กับ N-base มีผลเช่นเดียวกันกับการทดสอบโครงสร้าง test pattern ของ LIGBT ที่กล่าวมาแล้ว จะเห็นได้ว่า การทดสอบภายในโครงสร้างของ LIGBT มีผลใกล้เคียงกับการทดสอบโครงสร้าง test pattern ของ LIGBT และจากการเปรียบเทียบกับ LDMOST ทำให้บ่งบอกได้ถึงการทำงานของรอยต่อต่างๆของ LIGBT ที่สร้างขึ้น สามารถทำงานได้ถูกต้องและเหมาะสมที่จะนำมาใช้สร้างตัวอุปกรณ์ได้

3. การทดสอบการทำงานของ LIGBT ในลักษณะของทรานซิสเตอร์

ซึ่งมีการเปรียบเทียบไปพร้อมกับ LDMOST พบว่า แรงดันขีดเริ่ม (V_T : Threshold Voltage) ของ LIGBT มีค่าประมาณ 1.8 โวลต์ ส่วน LDMOST มีค่า 2.3 โวลต์ ซึ่งค่า V_T ของทั้งสองมีค่าแตกต่างกันบ้าง อาจเป็นผลเนื่องจากความหนาของชั้นฉนวนเกตออกไซด์ไม่สม่ำเสมอในระหว่างกระบวนการสร้าง

สำหรับกระแสรั่วไหล (I_{CES}) ของ LIGBT มีค่า 15 ไมโครแอมป์ ส่วน LDMOST กระแสรั่วไหล (I_{DSS}) มีค่า 10 ไมโครแอมป์ ซึ่งถือว่าน้อย และการทนแรงดันปิดกั้นไปหน้าที่ของ

LIGBT มีค่า 100 โวลต์ ส่วนของ LDMOST มีค่า 120 โวลต์ ซึ่งค่าแรงดันปิดกันไปหน้าของทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน

ในส่วนของคุณสมบัติระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ (I_C) กับแรงดันคอลเลคเตอร์-อิมิตเตอร์ (V_{CE}) ของ LIGBT เห็นได้ว่า LIGBT สามารถทำงานในโหมดของทรานซิสเตอร์ได้เป็นอย่างดี

1. การวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆของ LIGBT

ได้ว่า ค่าแรงดันขีดเริ่มมีค่า 1.8 โวลต์และแรงดันไปหน้า(build in voltage) เท่ากับ 0.6 โวลต์ เมื่อนำตัวแปรต่างๆระหว่าง LIGBT กับ LDMOST มาเปรียบเทียบกัน เห็นได้อย่างชัดเจนว่าค่าการนำกระแส, ค่าทรานคอนดักแตนซ์ และค่าความต้านทานในสภาวะนำกระแสของ LIGBT ให้ผลที่ดีกว่ากรณีของ LDMOST โดยเฉพาะในกรณีของความต้านทานในสภาวะนำกระแสของ LIGBT จะมีค่าต่ำกว่า LDMOST 79.97% นั่นคือ LIGBT มีค่าทรานคอนดักแตนซ์สูงกว่า LDMOST โดยมีความหนาแน่นกระแส (กระแสต่อหน่วยพื้นที่) = 52.58 A/cm^2

2. สำหรับการงานของ LIGBT ในโหมดของไทรสเตอร์หรือการเกิดแลทช์-อัฟ (latch-up)

จะเกิดขึ้นเมื่อแรงดันไบอัสที่ขั้วเกทมีค่าตั้งแต่ 4.5 โวลต์ขึ้นไป โดยกระแสคอลเลคเตอร์จะไหลผ่านที่รอยต่อ N⁻-emitter กับ P-base แทนที่จะไหลผ่านช่องทางเดินกระแสได้ส่วนเกทจึงไม่สามารถควบคุมกระแสโดยขั้วเกทได้ ซึ่งกระแสคอลเลคเตอร์ที่ทำให้เกิดแลทช์-อัฟได้ เมื่อมีค่ามากกว่า 55 มิลลิแอมป์ การแก้ไขที่ช่วยลดการเกิดแลทช์-อัฟมีหลายวิธีแต่วิธีที่ได้รับความนิยมคือการเพิ่มจำนวนเซลล์ของ LIGBT โดยจำกัดกระแสไว้ที่ค่าหนึ่งที่ไม่ทำให้เกิดแลทช์-อัฟ ซึ่งสามารถได้ LIGBT ที่ทนกระแสได้สูงตามที่กำหนดและยังไม่เกิดปรากฏการณ์แลทช์-อัฟขึ้น แต่จะทำให้ LIGBT มีขนาดใหญ่ได้

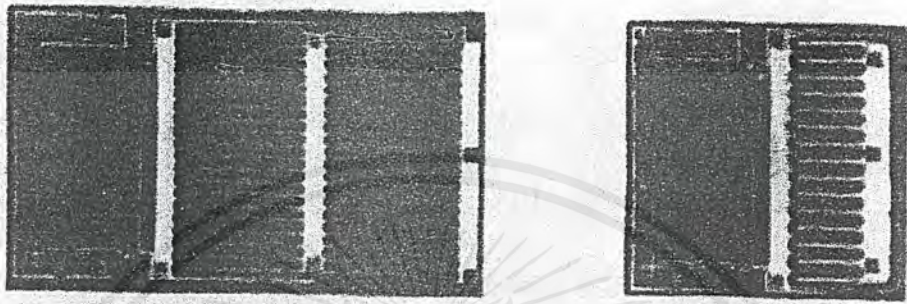
3. การทดสอบความเร็วในการสวิตชิงของอุปกรณ์ LIGBT

โดยวัดผลตอบสนองไฟฟ้ารูปคลื่นสี่เหลี่ยม ได้ว่า t_r มีค่า 0.08 ไมโครวินาทีและ t_f มีค่า 0.290 ไมโครวินาที ซึ่งความถี่ในการตอบสนองของ LIGBT ที่ได้นี้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ สำหรับการลดค่า t_r ให้มีค่าต่ำลง เพื่อการสวิตชิงที่เร็วขึ้น โดยทางโครงสร้างแล้วทำได้ยากและสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายสูง

จากการศึกษาโครงสร้าง หลักการทำงานและศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆของ LIGBT ที่ใช้เทคโนโลยีการแพร่สารเจือด้วยความร้อนที่กล่าวมาข้างต้น นับว่าเป็นก้าวหนึ่งที่สำคัญในการพัฒนาการสร้งอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่เหมาะสมเพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นส่วนหนึ่งภายในวงจรรวม ที่สร้างขึ้นด้วยกระบวนการสร้างแบบพลาร์นา(planar process) และมีการเจาะแยก(Isolation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบง่าย ๆ แบบ Self Isolation ได้ ดังแสดงในรูปที่ 5.1 ซึ่งเปรียบเทียบให้เห็นถึงขนาดที่ลดลง 3-4 เท่า และยังเป็น การลดต้นทุนค่าใช้จ่ายในการสร้างอีกด้วย



(ก)

(ข)

รูปที่ 5.1 เปรียบเทียบวงจรรวมที่สร้างขึ้นโดยใช้ LIGBT และ LDMOST

(ก) LDMOST

(ข) LIGBT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนังสืออ้างอิง

- 1) B. Jayant Baliga, **MODERN POWER DEVICES**, John Wiley & Sons Inc.,1987
- 2) Muhammad Harunur Rashid, **POWER ELECTRONICS CIRCUITS,DEVICES,AND APPLICATION**, Prentice-Hall International Inc.,1988
- 3) B. Murari, F. Bertotti, G.A. Vignola, **SMART POWER Ics Technologies and Applications**, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York , 1995



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายละเอียดกระบวนการสร้าง LIGBT

1. การทำความสะอาดผิวผลึกเริ่มต้น (Initial Cleaning)

- ทำความสะอาดผิวด้วยน้ำบริสุทธิ์ (deionized water) ในเครื่องสั่นความถี่สูง (supersonic cleaning)
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- กัดผิวหน้าของแผ่นผลึกด้วยกรดกัดแก้ว (HF 5%) 2 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- ดมในกรดไนตริก (HNO₃) เพื่อกำจัดเศษ โลหะที่ผิว เป็นเวลา 10 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- ดมในน้ำบริสุทธิ์ 5 นาที
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N₂)
- ดมใน ไตร โคล ไรโอทีลีน (trichloroethylene) เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกประเภทไขมัน เป็นเวลา 5 นาที
- ล้างด้วยอะซิโตน (acetone) ในเครื่องสั่นความถี่สูง 3 นาที เพื่อล้าง ไตร โคล ไรโอทีลีน
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- จุ่มใน HF 5% 20 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าแห้งด้วยก๊าซ N₂

2. กระบวนการออกซิเดชันครั้งแรก (First Oxidation)

2.1 สร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ความหนา 5000 Å โดยวางไว้ในบรรยากาศก๊าซออกซิเจน (O₂) ที่อุณหภูมิ 1100°C ซึ่งมีชั้นตอนย่อยต่างๆ ดังนี้

- ทำการออกซิเดชันแบบแห้ง 120 นาที โดยมีอัตราการไหลของก๊าซ O₂ 1.2 l/min
- ทำการออกซิเดชันแบบชื้น 60 นาที โดยมีอัตราการไหลของก๊าซ O₂ 1.0 l/min
- ทำการออกซิเดชันแบบแห้ง 60 นาที โดยมีอัตราการไหลของก๊าซ O₂ 1.2 l/min

3. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี (Photolithography)

เป็นกระบวนการพิมพ์ลวดลายลงบนแผ่นซิลิกอน เพื่อเปิดช่องซิลิกอนไดออกไซด์สำหรับแพร่สารเจือ เพื่อทำขั้วโลหะและเพื่อสร้างลวดลายโลหะด้านบน โดยการเคลือบน้ำยาไวแสงลงบนแผ่นผลึกซิลิกอน ด้วย Spinner แล้วนำไปอบแห้ง จากนั้นนำไปทำการพิมพ์ภาพด้วยกระจกดินแบบ

3.1 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี มาส์คที่ 1 (P⁺-collector)

- อบแผ่นไต่ความชื้นที่ 95°C 30 นาที (ถ้าเพิ่งออกจากเตาไม่จำเป็นต้องอบ)
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดลบ (way coat) spin 5000 rpm อบฟิล์มที่ 95°C 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Alignment Expose
- Develop ฟิล์ม โดย
 - จุ่มลงใน Xylene แก้วที่หนึ่ง 90 วินาที (ใช้ลอกฟิล์มส่วนที่ไม่ถูกแสง)
 - จุ่มลงใน Xylene แก้วที่สอง 90 วินาที
 - จุ่มลงใน Isopropyl Alcohol แก้วที่หนึ่ง 30 วินาที
 - จุ่มลงใน Isopropyl Alcohol แก้วที่สอง 30 วินาที
 - จุ่มลงใน Isopropyl Alcohol แก้วที่สาม 30 วินาที
 - จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
 - จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
 - เป่าให้แห้งด้วย N_2
- อบฟิล์มที่ $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ 10 นาที
- เคลือบฟิล์มด้านหลัง
- อบฟิล์มที่ $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ 30 นาที
- 4. การใช้สารละลายสกัดชั้นออกไซด์ (oxide etching)
 - จุ่มลงในสารละลายบัฟเฟอร์
 - จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
 - จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
 - เป่าแห้งด้วย N_2
- 5. กระบวนการลอกฟิล์ม
 - ต้มในกรด H_2SO_4 (กรดซัลฟูริก) แก้วที่หนึ่ง 5 นาที
 - ต้มในกรด H_2SO_4 (กรดซัลฟูริก) แก้วที่สอง 5 นาที
 - จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง 5 นาที
 - จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง 5 นาที
 - เป่าแห้งด้วย N_2
- 6. การทำความสะอาดผิวหน้า
 - ต้มใน Trichloroethylene 5 นาที
 - Ultrasonic ใน Acetone 5 นาที
 - จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง 5 นาที
 - จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง 5 นาที
 - จุ่มในน้ำบริสุทธิ์
 - เป่าแห้งด้วย N_2
 - จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง 5 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง 5 นาที
- เป่าแห้งด้วย N_2

7. การ Slice Etching

- จุ่มในสารละลาย HF 5% 10 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง 5 นาที
- เป่าแห้งด้วย N_2

8. กระบวนการ Pre-deposition

8.1 Boron deposition ที่อุณหภูมิ 860 °C

- Activation แหล่งจ่ายสารเชื้อโบรอน 30 นาที ใน O_2 700 cc/min
- Stabilite ใน N_2 700 cc/min 30 นาที
- Deposition โดยการนำแผ่นผลึกและแผ่นจ่ายสารเชื้อเข้าเตาพร้อมกัน ใน N_2 700 cc/min 30 นาที
- ลอกชั้น boron glass โดย
 - แช่ในสารละลาย HF 5% 10 นาที
 - จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
 - จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
 - เป่าแห้งด้วย N_2

9. การทำความสะอาดผิวหน้า

- ต้มใน Trichloethylene 5 นาที
- Ultrasonic ใน Acetone 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์
- เป่าแห้งด้วย N_2
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง 5 นาที
- เป่าแห้งด้วย N_2

10. กระบวนการ Drive-in

10.1 Boron drive-in ที่อุณหภูมิ 1100°C

- Dry O_2 1200 cc/min 30 นาที
- Wet O_2 1000 cc/min 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Dry O₂ 1200 cc/min 30 นาที

11. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี มาส์คที่ 2 (P-base)

- อบแผ่นไลต์ความชื้นที่ 95 °C 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดลบ (way coat) spin 5000 rpm อบฟิล์มที่ 95 °C 30 นาที
- Alignment Expose
- Develop ฟิล์ม โดย
 - จุ่มลงใน Xylene แก้วที่หนึ่ง 90 วินาที (ใช้ลอกฟิล์มส่วนที่ไม่ถูกแสง)
 - จุ่มลงใน Xylene แก้วที่สอง 90 วินาที
 - จุ่มลงใน Isopropyl Alcohol แก้วที่หนึ่ง 30 วินาที
 - จุ่มลงใน Isopropyl Alcohol แก้วที่สอง 30 วินาที
 - จุ่มลงใน Isopropyl Alcohol แก้วที่สาม 30 วินาที
 - จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
 - จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
 - เป่าให้แห้งด้วย N₂
- อบฟิล์มที่ 95 °C 10 นาที
- เคลือบฟิล์มด้านหลัง
- อบฟิล์มที่ 95 °C 30 นาที

12. การใช้สารละลายสกัดชั้นออกไซด์ (oxide etching)

- จุ่มลงในสารละลายบัพเฟอร์
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าแห้งด้วย N₂

13. กระบวนการลอกฟิล์ม

- ต้มในกรด H₂SO₄ (กรดซัลฟูริก) แก้วที่หนึ่ง 5 นาที
- ต้มในกรด H₂SO₄ (กรดซัลฟูริก) แก้วที่สอง 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง 5 นาที
- เป่าแห้งด้วย N₂

14. การทำความสะอาดผิวหน้า

- ต้มใน Trichloroethylene 5 นาที
- Ultrasonic ใน Acetone 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง 5 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์
- เป่าแห้งด้วย N_2

15. กระบวนการ Pre-deposition

15.1 Boron deposition ที่อุณหภูมิ 780 °C

- Activation แหล่งจ่ายสารเจือโบรอน 30 นาที ใน O_2 700 cc/min
- Stabilite ใน N_2 700 cc/min 30 นาที
- Deposition โดยการนำแผ่นผลึกและแผ่นจ่ายสารเจือเข้าเตาพร้อมกัน ใน N_2 700 cc/min 20 นาที
- ลอกชั้น boron glass โดย
 - แช่ในสารละลาย HF 5% 10 นาที
 - จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
 - จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
 - เป่าแห้งด้วย N_2

16. การทำความสะอาดผิวหน้า

- คัดใน Trichloethylene 5 นาที
- Ultrasonic ใน Acetone 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์
- เป่าแห้งด้วย N_2
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง 5 นาที
- เป่าแห้งด้วย N_2

17. กระบวนการ Drive-in

17.1 Boron drive-in ที่อุณหภูมิ 1100°C

- O_2 1200 cc/min 14 ชั่วโมง

18. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี มาสค์ที่ 3 (N^+ -emitter)

- อบแผ่นไล่ความชื้นที่ 95 °C 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดลบ (way coat) spin 5000 rpm อบฟิล์มที่ 95 °C 30 นาที
- Alignment Expose
- Develop ฟิล์ม โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- จุ่มลงใน Xylene แก้วที่หนึ่ง 90 วินาที (ใช้ลอกฟิล์มส่วนที่ไม่ถูกแสง)
- จุ่มลงใน Xylene แก้วที่สอง 90 วินาที
- จุ่มลงใน Isopropyl Alcohol แก้วที่หนึ่ง 30 วินาที
- จุ่มลงใน Isopropyl Alcohol แก้วที่สอง 30 วินาที
- จุ่มลงใน Isopropyl Alcohol แก้วที่สาม 30 วินาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วย N_2

- อบฟิล์มที่ $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ 10 นาที
- เคลือบฟิล์มด้านหลัง
- อบฟิล์มที่ $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ 30 นาที

19. การใช้สารละลายกัดชั้นออกไซด์ (oxide etching)

- จุ่มลงในสารละลายบัฟเฟอร์
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าแห้งด้วย N_2

20. กระบวนการลอกฟิล์ม

- ต้มในกรด H_2SO_4 (กรดซัลฟูริก) แก้วที่หนึ่ง 5 นาที
- ต้มในกรด H_2SO_4 (กรดซัลฟูริก) แก้วที่สอง 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง 5 นาที
- เป่าแห้งด้วย N_2

21. การทำความสะอาดผิวหน้า

- ต้มใน Trichloroethylene 5 นาที
- Ultrasonic ใน Acetone 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์
- เป่าแห้งด้วย N_2

22. กระบวนการ Pre-deposition

22.1 Phosphorus deposition ที่อุณหภูมิ $1014\text{ }^{\circ}\text{C}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Deposition โดยการนำแผ่นผลึกและแผ่นจ่ายสารเจือเข้าเตาพร้อมกัน ใน N_2 700 cc/min 12 นาที
- ลอกชั้น boron glass โดย
 - แช่ในสารละลาย HF 5% 10 นาที
 - จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
 - จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
 - เป่าแห้งด้วย N_2

23. การทำความสะอาดผิวหน้า

- คัดใน Tricholoethylene 5 นาที
- Ultrasonic ใน Acetone 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์
- เป่าแห้งด้วย N_2
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง 5 นาที
- เป่าแห้งด้วย N_2

24. กระบวนการ Drive-in

24.1 Phosphorus drive-in ที่อุณหภูมิ 1100°C

- O_2 1200 cc/min 10 นาที

25. กระบวนการ โฟโตลิโทกราฟี มาสค์ที่ 4 (gate)

- อบแผ่นไล่ความชื้นที่ 95 °C 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดลบ (way coat) spin 5000 rpm อบฟิล์มที่ 95 °C 30 นาที
- Alignment Expose
- Develop ฟิล์ม โดย
 - จุ่มลงใน Xylene แก้วที่หนึ่ง 90 วินาที (ใช้ลอกฟิล์มส่วนที่ไม่ถูกแสง)
 - จุ่มลงใน Xylene แก้วที่สอง 90 วินาที
 - จุ่มลงใน Isopropyl Alcohol แก้วที่หนึ่ง 30 วินาที
 - จุ่มลงใน Isopropyl Alcohol แก้วที่สอง 30 วินาที
 - จุ่มลงใน Isopropyl Alcohol แก้วที่สาม 30 วินาที
 - จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
 - จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เป่าให้แห้งด้วย N_2
 - อบฟิล์มที่ $95^\circ C$ 10 นาที
 - เคลือบฟิล์มด้านหลัง
 - อบฟิล์มที่ $95^\circ C$ 30 นาที
26. การใช้สารละลายสกัดชั้นออกไซด์ (oxide etching)
- จุ่มลงในสารละลายบัพเฟอร์
 - จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
 - จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
 - เป่าแห้งด้วย N_2
27. กระบวนการลอกฟิล์ม
- ต้มในกรด H_2SO_4 (กรดซัลฟูริก) แก้วที่หนึ่ง 5 นาที
 - ต้มในกรด H_2SO_4 (กรดซัลฟูริก) แก้วที่สอง 5 นาที
 - จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง 5 นาที
 - จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง 5 นาที
 - เป่าแห้งด้วย N_2
28. การทำความสะอาดผิวหน้า
- ต้มใน Trichloroethylene 5 นาที
 - Ultrasonic ใน Acetone 5 นาที
 - จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง 5 นาที
 - จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง 5 นาที
 - จุ่มในน้ำบริสุทธิ์
 - เป่าแห้งด้วย N_2
29. Gate Oxidation ที่อุณหภูมิ $950^\circ C$
- O_2 1200 cc/min 30 นาที
- (เมื่อผ่านกระบวนการ Gate Oxidation จะให้ความหนาของออกไซด์ $\cong 1000^\circ A$ ได้จากการดูสี จะเป็นสีม่วงเข้ม)
30. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี มาส์คที่ 5 (ช่อง contact)
- อบแผ่นไต่ความชื้นที่ $95^\circ C$ 30 นาที
 - เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดลบ (way coat) spin 5000 rpm อบฟิล์มที่ $95^\circ C$ 30 นาที
 - Alignment Expose
 - Develop ฟิล์มโดย
 - จุ่มลงใน Xylene แก้วที่หนึ่ง 90 วินาที (ใช้ลอกฟิล์มส่วนที่ไม่ถูกแสง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- จุ่มลงใน Xylene แก้วที่สอง 90 วินาที
- จุ่มลงใน Isopropyl Alcohol แก้วที่หนึ่ง 30 วินาที
- จุ่มลงใน Isopropyl Alcohol แก้วที่สอง 30 วินาที
- จุ่มลงใน Isopropyl Alcohol แก้วที่สาม 30 วินาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าให้แห้งด้วย N_2

- อบฟิล์มที่ $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ 10 นาที
- เคลือบฟิล์มด้านหลัง
- อบฟิล์มที่ $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ 30 นาที

31. การใช้สารละลายสกัดชั้นออกไซด์ (oxide etching)

- จุ่มลงในสารละลายบัฟเฟอร์
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าแห้งด้วย N_2

32. กระบวนการลอกฟิล์ม

- ต้มในกรด H_2SO_4 (กรดซัลฟูริก) แก้วที่หนึ่ง 5 นาที
- ต้มในกรด H_2SO_4 (กรดซัลฟูริก) แก้วที่สอง 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง 5 นาที
- เป่าแห้งด้วย N_2

33. การทำความสะอาดผิวหน้า

- ต้มใน Trichloroethylene 5 นาที
- Ultrasonic ใน Acetone 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์
- เป่าแห้งด้วย N_2

34. การเคลือบชั้นอลูมิเนียมในสุญญากาศ ด้วยเครื่อง Evaporator ที่ความดัน $2 \times 10E-6$ torr

(ทำการเคลือบสารอลูมิเนียม)

35. กระบวนการ โฟโตลิโทกราฟี มาส์คที่ 6 (ลวดลายอลูมิเนียม)

- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ) spin 5000 rpm อบฟิล์มที่ $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 20 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Alignment Expose
- Develop फिल्म โดย
 - จุ่มลงใน Xylene แก้วที่หนึ่ง 90 วินาที (ใช้ลอกฟิล์มส่วนที่ไม่ถูกแสง)
 - จุ่มลงใน Xylene แก้วที่สอง 90 วินาที
 - จุ่มลงใน Isopropyl Alcohol แก้วที่หนึ่ง 30 วินาที
 - จุ่มลงใน Isopropyl Alcohol แก้วที่สอง 30 วินาที
 - จุ่มลงใน Isopropyl Alcohol แก้วที่สาม 30 วินาที
 - จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
 - จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
 - เป่าให้แห้งด้วย N_2
- อบฟิล์มที่ $85^\circ C$ 20 นาที

36. การใช้สารละลายสกัดชั้นอลูมิเนียม (Al-etching)

- จุ่มลงในสารละลาย Al-etching ที่อุณหภูมิประมาณ 40 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง
- เป่าแห้งด้วย N_2

37. กระบวนการลอกฟิล์ม

- จุ่มใน Acetone แก้วที่หนึ่ง 5 นาที
- จุ่มใน Acetone แก้วที่สอง 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่หนึ่ง 5 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่สอง 5 นาที
- เป่าแห้งด้วย N_2

38. กระบวนการ Sintering ที่อุณหภูมิ $500^\circ C$

Dry N_2 1000 cc/min 10 นาที

(เพื่อให้อลูมิเนียมเป็นเนื้อเดียวกับซิลิกอนเพื่อ โอห์มมิก)