

รายงานการวิจัย

การออกแบบและสร้างไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกตเป็นฉนวน Design and Fabrication of Insulated Gate Bipolar Transistor

คณะผู้วิจัย

1. นายสุรศักดิ์ เนียมเจริญ
2. นายพอล รุจน์พิชญ์
3. นายบัญชา กิตติรังสี

สถานที่ทำการวิจัย

ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
โทร. 3267980

ได้รับทุนสนับสนุนจาก สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

ReH ปีงบประมาณ 2538

TK

๗๘๗๑.๙๖

๘๕๕

๘๕๕๔๕

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน..... 32257

วัน, เดือน, ปี 1.1 ส.ค. 2542

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	I
คำนำ	II
สารบัญตาราง	IV
สารบัญภาพ	V
สัญลักษณ์	VIII
ศัพท์เทคนิค	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมา	1
1.2 ชนิดอุปกรณ์กำลังชนิดมอส-ไบโพลาร์	2
1.3 การเปรียบเทียบระหว่างไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกทเป็นฉนวน มอสเฟตกำลัง และไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์กำลัง	3
บทที่ 2 ทฤษฎี IGBT	5
2.1 บทนำ	5
2.2 โครงสร้างพื้นฐาน	5
2.3 หลักการทำงานเบื้องต้น	6
2.4 การวิเคราะห์การทำงาน	7
2.4.1 ความสามารถในการปิดกั้นย้อนกลับ	8
2.4.2 ความสามารถในการปิดกั้นตรง	8
2.4.3 การนำกระแสไปหน้า	9
2.4.3.1 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ กับแรงดันคอลเลคเตอร์-อิมิตเตอร์ในช่วงเชิงเส้นของ IGBT โดยใช้แบบจำลอง P-i-N เร็กตีไฟเออร์/มอสเฟต	10
2.4.3.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ กับแรงดันคอลเลคเตอร์-อิมิตเตอร์ในช่วงเชิงเส้นของ IGBT โดยใช้แบบจำลองมอสเฟต/ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์	12
2.4 แลตซ์-ออฟ	14
2.5 แรงดันพังทลายของทรานซิสเตอร์แบบเบสเปิด	15

	หน้า
บทที่ 3 การออกแบบ IGBT	17
3.1 การเลือกแผ่นผลึกเริ่มต้น	17
3.2 การออกแบบโครงสร้าง IGBT	17
3.2.1 การออกแบบโครงสร้างในแนวระนาบ	18
3.2.2 การออกแบบโครงสร้างในแนวตั้ง	18
3.2.3 การแพร่สารเจือ	19
3.2.3.1 Predeposition	19
3.2.3.2 การขัปลึ้ก	22
3.2.4 การแพร่สารเจือในส่วน P-base	23
3.3 ความกว้างของชั้น N-base	23
3.4 การออกแบบและสร้างกระจกต้นแบบ	24
บทที่ 4 กระบวนการสร้าง IGBT	31
4.1 การลำดับขั้นตอนการสร้าง IGBT	31
4.2 รายละเอียดของขั้นตอนการสร้าง IGBT	33
4.3 การเก็บบรรจุ	47
4.3.1 การตัดแยกชิพ	48
4.3.2 การติดชิพบนตัวถัง	48
4.3.3 การต่อสาย	48
4.3.4 การพ่นกัฟ	48
4.3.5 การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าครั้งสุดท้าย	49
บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง	50
5.1 การทดสอบโครงสร้างเรขาคณิตพื้นฐานของ IGBT	50
5.1.1 IGBT โครงสร้างในแนวระนาบ	50
5.1.1.1 การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อพี-เอ็น	50
5.1.1.2 การทดสอบการทำงานของ IGBT ในลักษณะของทรานซิสเตอร์	53
5.1.2 IGBT โครงสร้างในแนวตั้ง	57
5.1.2.1 การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อพี-เอ็น	57
5.1.2.2 การทดสอบการทำงานของ IGBT ในลักษณะของทรานซิสเตอร์	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ IGBT กับมอสเฟตกำลังแบบคิมอส	60
5.3 การศึกษาผลของชั้น N-base ที่มีต่อความสามารถในการนำกระแสของ IGBT	63
5.3.1 ผลของความกว้างของชั้น N-base ที่มีต่อกระแสคอลเลคเตอร์	64
5.3.2 ผลของความกว้างของชั้น N-base ต่อค่าทรานคอนดักแตนซ์	65
5.3.3 ผลของความกว้างของชั้น N-base ที่มีต่อค่าความต้านทานในภาชนะนำกระแส	66
5.4 การศึกษาปรากฏการณ์แลตซ์-ฮัพในอุปกรณ์ IGBT	68
5.5 การศึกษาการตอบสนองความถี่ของอุปกรณ์ IGBT	69
บทที่ 6 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	73
กิตติกรรมประกาศ	75
เอกสารอ้างอิง	76
ภาคผนวก ก ชาร์ทสีของ SiO ₂	77
ภาคผนวก ข 1. ค่าคงที่ทางฟิสิกส์	78
2. คุณสมบัติของซิลิกอนไดออกไซด์	78
3. คุณสมบัติของซิลิกอน	79
บทความวิจัย	80
การสร้างไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกตเป็นฉนวน	81
ความกว้างของชั้น N-base ที่มีผลต่อความสามารถในการนำกระแสของ IGBT	86
ประวัติผู้วิจัย	93

การออกแบบและสร้างไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกทเป็นฉนวน

Design and Fabrication of Insulated Gate Bipolar Transistor

บทคัดย่อ

ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกทเป็นฉนวนเป็น อุปกรณ์ที่มีโครงสร้างในลักษณะของการรวมตัวกันของเทคโนโลยีมอสเฟตและไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ ทำให้ได้รับผลดีจากโครงสร้างทั้งสอง โดยในสถานะการนำกระแสไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกทเป็นฉนวนจะมีอินพุตอิมพีแดนซ์และความหนาแน่นกระแสไปหน้าสูงมาก

ในรายงานการวิจัยนี้จะได้กล่าวถึง การออกแบบ และการสร้างไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกทเป็นฉนวนด้วยกระบวนการสร้างที่คล้ายคลึงกับเอ็น-แชนแนลมอสเฟตกำลัง แต่จะแพร่สารเจือส่วน P^+ -collector แทนส่วน N^+ -drain จากนั้นนำไปทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าพื้นฐานของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกทเป็นฉนวนทั้งในแนวระนาบและในแนวตั้ง แล้วนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับมอสเฟตกำลัง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกทเป็นฉนวนให้ความหนาแน่นการนำกระแสสูงกว่าดีมอสมาก ในขณะที่พารามิเตอร์อื่น ๆ ใกล้เคียงกัน และจากผลการทดลองทั้งหมดสรุปได้ว่า การออกแบบและสร้างไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกทเป็นฉนวนของห้องปฏิบัติการ ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ สจล. สามารถสร้างขึ้นได้ และสามารถนำไปใช้ในวงจรรขยายสัญญาณได้ ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะเป็นประโยชน์ในการพิจารณาการพัฒนาไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกทเป็นฉนวนให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นในอนาคตต่อไป

ABSTRACT

The Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) is a recently developed semiconductor device which created by functional integration of the existing MOSFET and Bipolar transistor technology to achieve the best attributes of both. Thus, IGBT have a high input impedance and high forward conduction current density.

In this report outlines and investigates the design and fabrication of IGBT device. The fabrication process is similar to that of n-channel power MOSFET but a P^+ -collector is diffused instead of N^+ -drain region. The experiment results of planar and vertical IGBT are then compared with power MOSFET. It is shown that the current density of IGBT is higher than power MOSFET while other parameters are compatible. The experimental results will be also useful for future development and fabrication of higher efficiency IGBT with the applications in both switching and linear circuit.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีทางด้านสารกึ่งตัวนำได้ถูกพัฒนาไปมากเพื่อให้สอดคล้องกับความต้องการในการใช้งานและมีราคาถูกลง สำหรับอุปกรณ์กำลังได้ถูกพัฒนามาตั้งแต่ทศวรรษที่ 50 โดยเริ่มแรกจะเป็นไดโอดและทรานซิสเตอร์ แต่ได้มีการพัฒนาต่อมาเรื่อยๆอย่างต่อเนื่องจนถึงยุคของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์กำลังซึ่งพัฒนาขึ้นในทศวรรษที่ 70 โดยสามารถทำให้ทนแรงดันได้สูงถึง 3000 โวลต์และทนกระแสได้สูงถึง 1000 แอมแปร์ หลังจากนั้นจนถึงปัจจุบันก็เป็นยุคของมอสเฟตกำลัง ซึ่งเป็นโครงสร้างที่พัฒนาขึ้นมาโดยอาศัยความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำอีกชนิดหนึ่ง อย่างไรก็ตามมอสเฟตกำลังก็ยังไม่ใช่โครงสร้างที่มีคุณสมบัติดีกว่าไบโพลาร์ ทรานซิสเตอร์กำลังในทุกด้าน ถึงแม้ว่ามอสเฟตกำลังจะมีคุณสมบัติในหลายๆด้านที่ดีกว่า แต่ก็ไม่สามารถที่จะนำกระแสได้สูงเท่ากับไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์กำลัง ในปี พ.ศ. 2526 จึงได้มีผู้คิดค้นอุปกรณ์กำลังชนิดใหม่ขึ้นมาเรียกว่า คอมเฟต (Conductivity-Modulated Field Effect Transistor : COMFET) [1] หรือที่เรารู้จักกันดีในปัจจุบันในชื่อของ ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกทเป็นฉนวน (Insulated Gate ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ : IGBT) ซึ่งอุปกรณ์ชนิดนี้ได้รวมเอาโครงสร้างเกทแบบมอสเฟตกับการนำกระแสแบบไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ทำให้อุปกรณ์ชนิดนี้สามารถทำงานในความถี่ระดับเดียวกับมอสเฟตกำลังและยังสามารถนำกระแสได้สูงกว่ามอสเฟตกำลัง จึงเหมาะที่จะใช้งานในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังแทนอุปกรณ์แบบเก่า

สำหรับการสร้างอุปกรณ์กำลังในประเทศไทย หอปฏิบัติการของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ได้เริ่มสร้างขึ้นเมื่อปี พ.ศ. 2530 โดยเป็นอุปกรณ์กำลังประเภทมอสเฟตชนิดดีมอส และได้มีการพัฒนาต่อมาเรื่อยๆเป็นมอสเฟตกำลังแบบวีมอส จนกระทั่งปี พ.ศ. 2536 ได้ทำศึกษาหาข้อมูล เพื่อแก้ไขปัญหาที่มอสเฟตกำลังมีค่าความต้านทานในภาวนำกระแสสูง และในปี พ.ศ. 2537 จึงได้เริ่มทำการออกแบบและสร้างอุปกรณ์กำลังชนิดที่มีโครงสร้างผสมระหว่างมอสเฟตกับไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ซึ่งโครงสร้างดังกล่าว คือ ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกทเป็นฉนวน และเพื่อเป็นการรองรับเทคโนโลยีของอุปกรณ์ชนิดนี้ในอนาคต จึงได้ทำการศึกษาทฤษฎี การออกแบบ และกระบวนการสร้างโดยใช้เทคโนโลยีที่เป็นมาตรฐานของหอปฏิบัติการของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ สำหรับในรายงานการวิจัยนี้ได้กล่าวถึงโครงสร้างพื้นฐาน การออกแบบ กระบวนการสร้าง การทดสอบและบทสรุปของการสร้างและพัฒนาอุปกรณ์ชนิดนี้ภายในประเทศ โดยแบ่งเนื้อหาเป็นส่วนต่างๆ ตามลำดับได้ดังต่อไปนี้

บทที่ 1 เป็นบทที่เสนอถึงความเป็นมาตั้งแต่มีการคิดค้นพัฒนาอุปกรณ์กำลังจนกระทั่งมาถึงการเริ่มต้นคิดค้น IGBT ต่อจากนั้นจะเป็นเรื่องของประเภทของอุปกรณ์กำลังซึ่งเป็นการแจกแจงอุปกรณ์กำลังประเภทต่างๆ รวมถึง IGBT ด้วย สำหรับตอนท้ายของบทนี้จะกล่าวถึงการเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียระหว่าง IGBT กับมอสเฟตกำลังและไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์กำลัง

บทที่ 2 เป็นการเสนอทฤษฎีพื้นฐานของ IGBT โดยเริ่มจากโครงสร้างและหลักการทำงานพื้นฐานของ IGBT ที่ผสมกันระหว่างโครงสร้างของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์กับมอสเฟต ดังนั้นทฤษฎีของ IGBT จึงสามารถอธิบายได้โดยอาศัยทฤษฎีของโครงสร้างทั้งสองแบบที่กล่าวมา จากนั้นจะเป็นการวิเคราะห์การทำงานของ IGBT ซึ่งในส่วนนี้จะกล่าวถึงความสามารถต่างๆของ IGBT ที่มีลักษณะเด่นกว่าอุปกรณ์ประเภทอื่นรวมถึงเรื่องของปรากฏการณ์การเกิด แลทช์-อัฟ (latch-up) ใน IGBT และท้ายสุดในบทนี้จะกล่าวถึงเรื่องของแรงดันพังทลายในลักษณะของทรานซิสเตอร์แบบเบสเปิด

บทที่ 3 เป็นการนำเสนอในส่วนของ การออกแบบ IGBT ซึ่งในการออกแบบ IGBT นั้นจะทำโดยอาศัยข้อมูลที่ได้จากการออกแบบและสร้างมอสเฟตกำลังแบบคิมอสที่สร้างโดยห้องทดลองศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์เป็นหลัก ซึ่งเนื้อหาในบทนี้จะเริ่มจากการเลือกแผ่นผลึกซิลิกอนเริ่มต้นจากนั้นจะเป็นการออกแบบโครงสร้างทั้งในแนวระนาบและแนวตั้ง รวมถึงการคำนวณปริมาณอะตอมสารเจือที่แพร่และความลึกที่เกิดจากการซบลึกโดยใช้ความร้อน ต่อไปเป็นการแพร่สารเจือในส่วน P-base และสุดท้ายเป็นเรื่องของการออกแบบและสร้างกระจกตันแบบ

บทที่ 4 เป็นส่วนของกระบวนการสร้างและการเก็บบรรจุ ซึ่งกล่าวถึงขบวนการสร้างและเก็บบรรจุเป็นขบวนการ มาตรฐานของห้องปฏิบัติการศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์

บทที่ 5 เป็นเรื่องของ การทดลองและผลการทดลอง ซึ่งเป็นผลที่เกิดจากการทดลองโดยการควบคุมพารามิเตอร์บางตัวหรือการเปลี่ยนแปลงปรับปรุงโครงสร้างดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 ซึ่งผลการทดลองที่น่าเสนอได้แก่ การทดสอบโครงสร้างทางเรขาคณิตของ IGBT การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ IGBT กับมอสเฟตกำลังแบบคิมอส การศึกษาผลของความกว้างชั้น N-base ต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ IGBT การศึกษาปรากฏการณ์แลทช์-อัฟในอุปกรณ์ IGBT การศึกษาการตอบสนองความถี่ของ IGBT

บทที่ 6 เป็นบทที่นำเสนอบทสรุปที่ได้จากการวิเคราะห์และการทดลอง

จากเนื้อหาทั้งหมดที่ได้กล่าวมาจะทำให้เห็นได้ว่า IGBT เป็นอุปกรณ์กำลังชนิดใหม่ที่กำลังน่าสนใจตัวหนึ่ง ซึ่งเหมาะที่จะนำมาใช้งานแทนอุปกรณ์กำลังแบบเก่าที่ยังมีข้อดีอยู่ สำหรับการสร้าง IGBT ในประเทศไทยนั้นยังเป็นสิ่งใหม่มาก แต่ถึงอย่างไรก็ตามเนื้อหาที่ได้กล่าวมาทั้งหมดนี้ก็เพียงพอที่จะใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบ สร้างและพัฒนา IGBT โดยอาศัยเทคโนโลยีการแพร่สารเจือโดยความร้อน ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อทั้งในทางการศึกษาและในทางอุตสาหกรรมต่อไป

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 เปรียบเทียบตัวแปรของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกทเป็นฉนวน มอสเฟตกำลังและไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์กำลัง	4
ตารางที่ 3.1 แสดงสารประกอบแหล่งกำเนิดสารเจือ	21
ตารางที่ 4.1 สรุปลำดับขั้นตอนทั้งหมดที่ใช้สร้าง IGBT	31
ตารางที่ 5.1 แสดงค่าตัวแปรต่างๆของ IGBT และมอสเฟตกำลังแบบดีมอส	62
ตารางที่ 5.2 แสดงผลของความเร็วในการสวิตช์ของอุปกรณ์ IGBT	71
ตารางที่ ก1 แสดงชาร์ตสีของ SiO ₂ จากกระบวนการออกซิเดชันด้วยความร้อน โดยสังเกตภายใต้แสงฟลูออเรสเซนส์	77



สารบัญญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 (ก) ภาพตัดขวางและ (ข) วงจรสมมูลของไทริสเตอร์ที่มีเกทแบบมอส	2
รูปที่ 1.2 (ก) ภาพตัดขวางและ (ข) วงจรสมมูลของมอสควบคุมไทริสเตอร์	2
รูปที่ 1.3 (ก) ภาพตัดขวางและ (ข) วงจรสมมูลของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกทเป็นฉนวน	3
รูปที่ 2.1 ภาพตัดขวางของอุปกรณ์ (ก) ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกทเป็นฉนวน (ข.) มอสเฟตกำลัง	5
รูปที่ 2.2 คุณสมบัติของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของ IGBT	7
รูปที่ 2.3 ก.) ภาพตัดขวางของ IGBT ที่แสดงแบบจำลองแบบ P-i-N/MOS ข.) วงจรสมมูลของแบบจำลองแบบ P-i-N/MOS	9
รูปที่ 2.4 คุณสมบัติการนำกระแสไปหน้าของ IGBT ในช่วงเชิงเส้น	12
รูปที่ 2.5 (ก.) ภาพตัดขวาง IGBT ที่แสดงแบบจำลองแบบมอสเฟต/ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ (ข.) วงจรสมมูลของแบบจำลองแบบมอสเฟต/ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์	12
รูปที่ 2.6 วงจรสมมูลของ IGBT ที่แสดงทรานซิสเตอร์ N-P-N แฝงและถ้าทรานซิสเตอร์ นี้ทำงานจะทำให้เกิดปรากฏการณ์แลตซ์-ออฟ เมื่อ $V_{Rp} = 0.7 V$	15
รูปที่ 2.7 แรงดันพังทลายของโครงสร้างทรานซิสเตอร์แบบเบสเปิด	15
รูปที่ 3.1 โครงสร้าง $N^+ - P - N - P^+$ ในแนวระนาบของ IGBT	18
รูปที่ 3.2 โครงสร้าง $N^+ - P - N - P^+$ ในแนวตั้งของ IGBT	18
รูปที่ 3.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Solid solubility ของสารเจือต่างๆ ในซิลิคอน	20
รูปที่ 3.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมสารเจือต่างชนิดกับ อุณหภูมิ	20
รูปที่ 3.5 กราฟนอร์มอลไลซ์เพื่อหาการกระจายของสารเจือทั้งแบบ erfc และ Gaussian	21
รูปที่ 3.6 การกระจายความหนาแน่นอะตอมสารเจือหลังจากการ predeposition และการ ขับลิค	22
รูปที่ 3.7 โครงสร้าง IGBT ที่มีส่วน P^+ -sinker ในโครงสร้าง	23
รูปที่ 3.8 ลวดลายทั้งหมดของ IGBT ในแนวระนาบที่ออกแบบบนกระดาษกราฟไข	25
รูปที่ 3.9 ลวดลายทั้งหมดของ IGBT ในแนวตั้งที่ออกแบบบนกระดาษกราฟไข	25
รูปที่ 3.10 ฟิล์มกระจกที่ออกแบบใช้สำหรับการกระบวนการสร้าง IGBT โครงสร้างในแนวระนาบ (ก) ฟิล์มกระจกสำหรับสร้างชั้น N-buffer (ข) ฟิล์มกระจกสำหรับสร้างชั้น P^+ -collector (ค) ฟิล์มกระจกสำหรับสร้างชั้น P-base (ง) ฟิล์มกระจกสำหรับสร้างชั้น N^+ -emitter (จ) ฟิล์มกระจกสำหรับสร้างเกตออกไซด์ (ฉ) ฟิล์มกระจกสำหรับเปิดช่องสัมผัสโลหะ (ช) ฟิล์มกระจกสำหรับสร้างขั้วสัมผัสโลหะ	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.11	ฟิล์มกระจกที่ออกแบบใช้สำหรับกระบวนการสร้าง IGBT โครงสร้างในแนวดิ่ง	
	(ก) ฟิล์มกระจกสำหรับสร้างชั้น P-base (ข) ฟิล์มกระจกสำหรับสร้างชั้น N ⁺ -emitter	
	(ค) ฟิล์มกระจกสำหรับสร้างเกตออกไซด์ (ง) ฟิล์มกระจกสำหรับเปิดช่องสัมผัสโลหะ	
	(จ) ฟิล์มกระจกสำหรับสร้างขั้วสัมผัสโลหะ	29
รูปที่ 3.12	การตัดลวดลายต้นแบบบนแผ่น โพลีเอสเตอร์ด้วยเครื่อง ไมโครคัตเตอร์	29
รูปที่ 3.13	แผ่นโพลีเอสเตอร์ต้นแบบที่ตัดเสร็จแล้ว	30
รูปที่ 3.14	กระจกต้นแบบที่พร้อมสำหรับกระบวนการสร้างอุปกรณ์ IGBT	30
รูปที่ 4.1	การทำความสะอาดแผ่นผลึกซิลิกอน	34
รูปที่ 4.2	เตาที่ใช้ในกระบวนการออกซิเดชัน	36
รูปที่ 4.3	โพลีซาร์ทแสดงลำดับขั้นตอนกระบวนการโฟโวลติโทกราฟี	37
รูปที่ 4.4	การถ่ายภาพจากกระจกต้นแบบลงบนแผ่นผลึกซิลิกอน	38
รูปที่ 4.5	การแพร่สารเจือโบรอน	40
รูปที่ 4.6	การเคลือบอะลูมิเนียมในสุญญากาศด้วยเครื่อง Vacuum evaporator	43
รูปที่ 4.7	ภาพถ่ายของ IGBT ที่ได้สร้างเสร็จเรียบร้อยแล้วบนแผ่นผลึกซิลิกอน	44
รูปที่ 4.8	กระบวนการสร้าง IGBT โครงสร้างแนวนอนและกระจกต้นแบบ	45
รูปที่ 4.9	กระบวนการสร้าง IGBT โครงสร้างแนวดิ่งและกระจกต้นแบบ	46
รูปที่ 4.10	การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าครั้งแรกของอุปกรณ์บนแผ่นผลึกซิลิกอน	47
รูปที่ 4.11	ตัวถังกระป๋องโลหะที่ใช้เก็บบรรจุชิพของ IGBT	
	(ก.) ตัวถังกระป๋องแบบ TO-5 (ข.) ตัวถังกระป๋องแบบ TO-3	49
รูปที่ 5.1	ภาพถ่ายด้านบนของรอยต่อพี-เอ็นที่สร้างเสร็จแล้ว	51
รูปที่ 5.2	กราฟคุณสมบัติกระแสและแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น ระหว่าง N-base กับ P ⁺ -collector	51
รูปที่ 5.3	กราฟคุณสมบัติกระแสและแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น ระหว่าง P-base กับ N-base	52
รูปที่ 5.4	กราฟคุณสมบัติกระแสและแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น ระหว่าง N ⁺ -emitter กับ P-base	52
รูปที่ 5.5	ภาพถ่ายด้านบนของ IGBT โครงสร้างในแนวนอน	54
รูปที่ 5.6	ภาพตัดขวางและลวดลายด้านบนของอุปกรณ์ IGBT โครงสร้างในแนวนอน	54
รูปที่ 5.7	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลกเตอร์กับแรงดันคอลเลกเตอร์-อิมิตเตอร์ (0.5V/step,9step,Ver:5mA/Div.,Hor:1V/Div.)	55
รูปที่ 5.8	แรงดันขีดเริ่ม V _T (Ver:5mA/Div.,Hor:0.5V/Div.)	55
รูปที่ 5.9	กระแสรั่วไหล (Ver:0.05mA/Div.,Hor:1V/Div.)	55
รูปที่ 5.10	แรงดันปิดกั้นตรง (Ver:5mA/Div.,Hor:20V/Div.)	56

	หน้า
รูปที่ 5.11 Diode Knee (0.2V/step,7step,Hor:0.05mA/Div.,Ver:0.2V/Div.)	56
รูปที่ 5.12 ภาพถ่ายด้านบนของทรานซิสเตอร์ที่ใช้ทดสอบรอยต่อพี-เอ็นที่สร้างเสร็จแล้ว	57
รูปที่ 5.13 กราฟคุณสมบัติกระแสและแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น ระหว่าง N-base กับ P ⁺ -collector	58
รูปที่ 5.14 กราฟคุณสมบัติกระแสและแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น ระหว่าง P-base กับ N-base	58
รูปที่ 5.15 กราฟคุณสมบัติกระแสและแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น ระหว่าง N ⁺ -emitter กับ P-base	58
รูปที่ 5.16 ภาพถ่ายด้านบนของ IGBT ในแนวตั้ง	59
รูปที่ 5.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลกเตอร์กับแรงดันคอลเลกเตอร์-อิมิตเตอร์ (1V/step,9step,5mA/Div.,Hor:1V/Div.)	60
รูปที่ 5.18 (ก) โครงสร้าง IGBT (ข) โครงสร้างมอสเฟตกำลังในแนวระนาบ	61
รูปที่ 5.19 (ก) โครงสร้าง IGBT (ข) โครงสร้างมอสเฟตกำลังในแนวตั้ง	62
รูปที่ 5.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลกเตอร์ในช่วงอิมิตต์กับความกว้าง ของชั้น N-base ที่ $V_G=3.5V$. และ $V_{DD}=10V$.	64
รูปที่ 5.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าทรานคอนดักเตนซ์กับค่าความกว้างของชั้น N-base	66
รูปที่ 5.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานในสภาวะนำกระแสกับค่าความ กว้างของชั้น N-base	67
รูปที่ 5.23 ก.) ลักษณะกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I_C กับ V_{CE} ของ IGBT ขณะเกิด แลทซ์-ออฟ	
ข.) วงจรสมมูลแสดงการไหลของกระแสคอลเลกเตอร์ขณะเกิดแลทซ์-ออฟ	68
รูปที่ 5.24 (ก) วงจรวัดการตอบสนองสัญญาณไฟฟ้ารูปสี่เหลี่ยม	
(ข) สัญญาณไฟฟ้ารูปสี่เหลี่ยมที่ใช้วัดค่า t_r , t_f , $t_{d(on)}$, $t_{d(off)}$	70
รูปที่ 5.25 สัญญาณ Input และ Output ของอุปกรณ์ IGBT ที่วัดโดย (ก) $V_C = + 10 V$. (ข) $V_C = + 15 V$.	71

สัญลักษณ์

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
V_{CB}	แรงดันคอลเลกเตอร์-อิมิตเตอร์	V
V_F	แรงดันตกคร่อม IGBT	V
$V_{F,MOS}$	แรงดันตกคร่อม โครงสร้างแผ่นมอสเฟตใน IGBT	V
$V_{F,PIN}$	แรงดันตกคร่อม โครงสร้างแผ่นพี-ไอ-เอ็นใน IGBT	V
V_G	แรงดันไบอัสที่ขั้วเกต	V
V_m	แรงดันปิดกั้นสูงสุด	V
V_T	แรงดันขีดเริ่ม	V
W	ความกว้างของช่องทางเดินกระแส	μm
W_N	ความกว้างของบริเวณไม่ปลดปล่อยประจุพาหะในชั้น N-base	μm
W_R	ความยาวของเซลล์เชิงเส้น	μm
X	ระยะลึกในแผ่นผลึกซิลิกอน	μm
X_j	ความลึกของรอยต่อ	μm
X_{jn}	ความลึกของรอยต่อ N ⁺ -emitter	μm
X_{jp}	ความลึกของรอยต่อ P-base	μm
X_{jp+}	ความลึกของรอยต่อ P ⁺ -collector	μm
ϵ_s	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสารกึ่งตัวนำ	-
α_{PNP}	อัตราการขยายกระแสของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ PNP	-
α_T	base transport factor	-
ρ_{exp}	พิกัดความต้านทานจากการทดลอง	$\Omega\text{-cm}$
μ_e	ความคล่องตัวของอิเล็กตรอน	$\text{cm}^2/\text{V-s}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศัพท์เทคนิค

กระจกต้นแบบ	photo mask
กระบวนการเก็บบรรจุสารกึ่งตัวนำ	assembly process
กระบวนการโซลลอสกี	Czochralski process
กระบวนการโฟลทโซน	flood zone process
กระบวนการโฟโวลลิโธกราฟี	photolithography process
กระบวนการสร้างลวดลายโลหะ	metalization process
กระบวนการสร้างในแนวระนาบ	Planar process
กระบวนการออกซิเดชัน	oxidation process
กระบวนการออกซิเดชันแบบชื้น	wet oxidation process
กระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง	dry oxidation process
กระบวนการอพิทาซี	epitaxy process
กระแสแลตซ์จิง	latching current
กระแสรั่วไหล	leakage current
การกัด	etching
การฉีดประจุพาหะส่วนน้อย	minorrrity carrier injection
การตอบสนองความถี่	frequency response
การติดชิพ	die bonding
การตัดแยกชิพ	scribing
การปรับตำแหน่ง	alignment
การพ่นึกฝา	excapslate
การมอดูเลตสภาพนำ	conductivity modulation
การรวมตัว	recombination
การเชื่อมลวด	wire bonding
การแพร่สารเจือด้วยความร้อน	thermal diffusion
ความกว้างของช่องทางเดินกระแส	chanel width
ความคล่องตัว	mobility
ความต้านทานในสถานะนำกระแส	on-resistance
ความถี่คัท-ออฟ	cut-off frequency
ความยาวของช่องทางเดินกระแส	chanel length
ความหนาแน่นกระแส	current density

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าการณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเร็วในการสวิตชิง	switching speed
คาบเริ่มต้น	initial period
เครื่องบันทึก XY	XY recorder
โครงสร้างแบบสมมาตร	symmetry structure
โครงสร้างแบบไม่สมมาตร	asymmetry structure
โครงสร้างแฝง P-N-P-N แบบไทรสเตอร์	parasitic P-N-P-N thyristor
โครงสร้างในแนวตั้ง	verticle structure
โครงสร้างในแนวระนาบ	lateral structure
ช่วงอายุ	lifetime
ช่วงอิ่มตัว	saturation region
ช่วงเชิงเส้น	linear region
ชั้นนำ	conduction layer
เซลล์เชิงเส้น	linear cell
ตัดกระแส	turn-off
ตัวประกอบการคูณ	multiplication factor
แถบพลังงานต้องห้าม	band gap
ทรานคอนดักแตนซ์	transconductance
ไทรสเตอร์	Thyristor
ไทรสเตอร์ที่มีเกตแบบมอส	MOS Gate Thyristor
นำกระแส	turn-on
บริเวณปลอดประจุพาหะ	depletion region
บริเวณไม่ปลอดประจุพาหะ	undepletion region
เบสทรานสปอร์ตแฟกเตอร์	base transport factor
ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์	Bipolar Transistor
ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกตเป็นฉนวน	Insulated Gate Bipolar Transistor
ประจุพาหะส่วนน้อย	minority carrier
แผ่นผลึก	crystal wafer
P-i-N เรกติไฟเออร์	P-i-N rectifier
P-i-N ไดโอด	P-i-N diode
ฟิลด์ริงค์	field ring
ฟิล์มบาง	error function complementary
มอสควบคุมไทรสเตอร์	MOS controlled thyristor
มอสเฟตกำลัง	Power MOSFET

เอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รอยสัมผัสแบบโอห์มิก	ohmic contact
ระดับความหนาแน่นอะตอมสารเจือพื้นฐาน	background doping level
ระยะการแพร่	diffusion length
แรงดันขีดเริ่ม	threshold voltage
แรงดันพังทลายแบบพินช์ทรู	punch-through breakdown
แรงดันพังทลายแบบอะวาลานซ์	avalanche breakdown
แลทซ์-อัฟ	latch-up
แลททิซ	lattice
วงจรขับ	drive circuit
วงจรรวมกำลัง	Power IC.
ศูนย์กลางการรวมตัว	recombination center
สถานะนำกระแสไปหน้า	forward conducting mode
สถานะปิดกั้นตรง	forward blocking mode
สถานะปิดกั้นย้อนกลับ	reverse blocking mode
สัมประสิทธิ์การแพร่	diffusion coefficient
องค์ประกอบของฟังก์ชันคลาดเคลื่อน	error function
อินทรีนซิก	intrinsic
อุปกรณ์กำลังชนิดมอส-ไบโพลาร์	Power MOS-Bipolar device
อัตราขยายกระแส	current gain

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกทเป็นฉนวน (Insulated Gate Bipolar Transistor) หรือเรียกสั้นๆ ว่า IGBT เป็นอุปกรณ์กำลังชนิดใหม่ที่กำลังมีบทบาทสำคัญในงานอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ มากขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากคุณสมบัติที่เด่นในหลายๆ ด้านที่ดีกว่าอุปกรณ์กำลังแบบเก่า

1.1 ความเป็นมา

ปัจจุบันเทคโนโลยีของอุปกรณ์กำลังที่ใช้ซิลิกอนเป็นผลึกเริ่มต้น ได้ถูกพัฒนาไปอย่างมาก เนื่องจากเป็นอุปกรณ์กำลังที่มีความสำคัญในระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในงานหลายๆ อย่างและมีราคาถูก อย่างไรก็ตามอุปกรณ์กำลังที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบันก็มีเพียงไม่กี่ชนิดตัวอย่างเช่น SCR, TRIAC, ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์กำลังหรือมอสเฟตกำลัง โดยเฉพาะไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์กำลังและมอสเฟตกำลังซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่นิยมใช้กันมากที่สุด และมีการพัฒนามาตลอดในช่วง 30 - 40 ปีที่ผ่านมา อย่างไรก็ตามอุปกรณ์ทั้งสองชนิดดังกล่าวก็ยังมีข้อด้อยของแต่ละชนิดที่แตกต่างกันออกไปทำให้มีข้อจำกัดในการใช้งาน

สำหรับอุปกรณ์กำลังชนิดมอส-ไบโพลาร์ สร้างขึ้นสำเร็จสมบูรณ์ครั้งแรกในปี พ.ศ. 2522 ซึ่งเป็นโครงสร้างของไทรสเตอร์ที่มีเกทเป็นฉนวน (MOS gate thyristor) ต่อมาในปี พ.ศ. 2523 ได้มีการสร้างโครงสร้างไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกทเป็นฉนวน (IGBT : Insulated Gate Bipolar Transistor) ขึ้นซึ่งเป็นโครงสร้างอุปกรณ์กำลังชนิดใหม่ที่จะเข้ามาแทนอุปกรณ์ชนิดเก่าซึ่งมีข้อจำกัดในการใช้งาน โดยอุปกรณ์ชนิดนี้จะรวบรวมเอาข้อดีของอุปกรณ์ชนิดไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์กำลังและมอสเฟตกำลังเข้าไว้ด้วยกัน กล่าวคือ เป็นการรวมโครงสร้างเกทแบบมอสเฟตเข้ากับการนำกระแสแบบไบโพลาร์ ทำให้อุปกรณ์ที่ได้สามารถนำกระแสได้สูงเช่นเดียวกับไบโพลาร์ แต่ขณะเดียวกันก็สามารถควบคุมการไหลของกระแสได้โดยการใช้เกทที่ส่วนเกท นอกจากนั้นยังทำให้ได้อุปกรณ์ที่มีอินพุตที่แรงดันสูงและมีความต้านทานในสภาวะนำกระแสต่ำ ทำให้มีการสูญเสียกำลังทางด้านอินพุตต่ำและมีความหนาแน่นกระแสสูง เมื่อเทียบกับอุปกรณ์กำลังชนิดอื่นในขนาดที่เท่ากัน

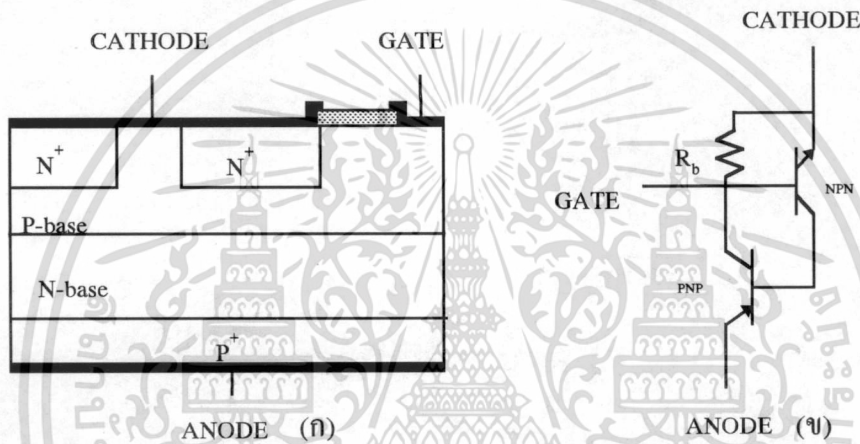
ในเชิงพาณิชย์ IGBT ยังเหมาะที่จะสร้างเป็น วงจรรวมกำลัง (Power Integrated Circuits) ที่ใช้ในระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังต่างๆซึ่งจะทำให้สามารถลดต้นทุนการผลิตลงได้ถึง 10 เท่า หรือมากกว่านั้นซึ่งจะทำให้ IGBT เติบโตขึ้นอย่างรวดเร็วในตลาดของอุปกรณ์กำลังและในอนาคตคาดว่าจะมีอุปกรณ์เข้ามาแทนอุปกรณ์กำลังแบบเก่าโดยจะทำให้สามารถพัฒนาระบบอิเล็กทรอนิกส์กำลังได้สูงขึ้นไปอีกขั้นหนึ่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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 ชนิดอุปกรณ์กำลังชนิดมอส-ไบโพลาร์ [2]

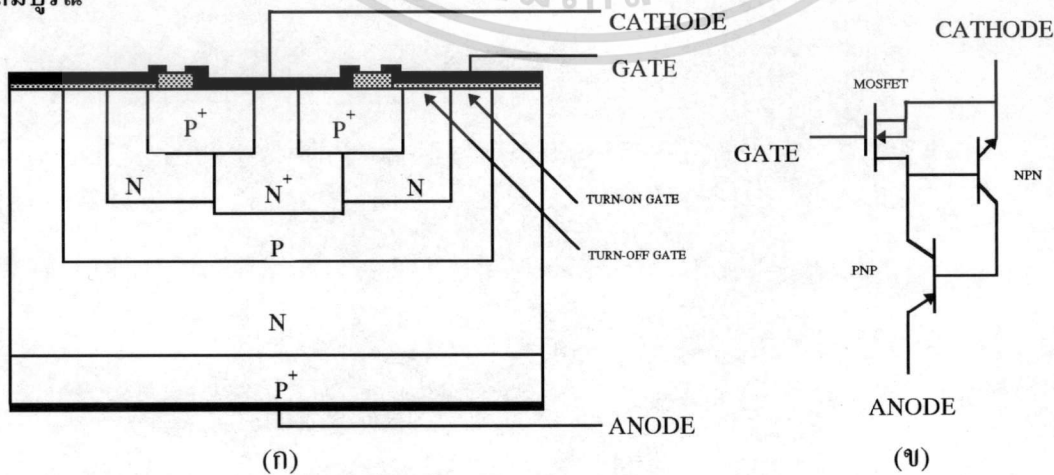
เนื่องจากโครงสร้างของอุปกรณ์กำลังชนิดมอส-ไบโพลาร์เป็นการนำเอาโครงสร้างเกทแบบมอสเฟตและการนำกระแสแบบไบโพลาร์มารวมในโครงสร้างเดียวกัน เหมือนกันหมดดังนั้นการแบ่งประเภทของอุปกรณ์ชนิดนี้จึงเป็นการแบ่งแบบตามความแตกต่างของลักษณะโครงสร้างและการใช้งาน ซึ่งในปัจจุบันมีด้วยกัน 3 ชนิดคือ

1. ไทริสเตอร์ที่มีเกทแบบมอส (MOS Gate Thyristor) เป็นโครงสร้างที่รวมเอาลักษณะทางกายภาพของอุปกรณ์แบบไบโพลาร์และมอสเข้าไว้ด้วยกันซึ่งเป็นโครงสร้างแรกที่ทำให้เสร็จสมบูรณ์ โดยในอุปกรณ์ชนิดนี้จะเกิดจากการรวมกันของโครงสร้างเกทแบบมอสเฟตและโครงสร้างสี่ชั้นแบบไทริสเตอร์ ทำให้ได้อุปกรณ์ที่สามารถนำกระแสได้โดยการให้แรงดันไบอัสที่เกทเท่านั้น



รูปที่ 1.1 (ก) ภาพตัดขวางและ (ข) วงจรสมมูลของ ไทริสเตอร์ที่มีเกทแบบมอส

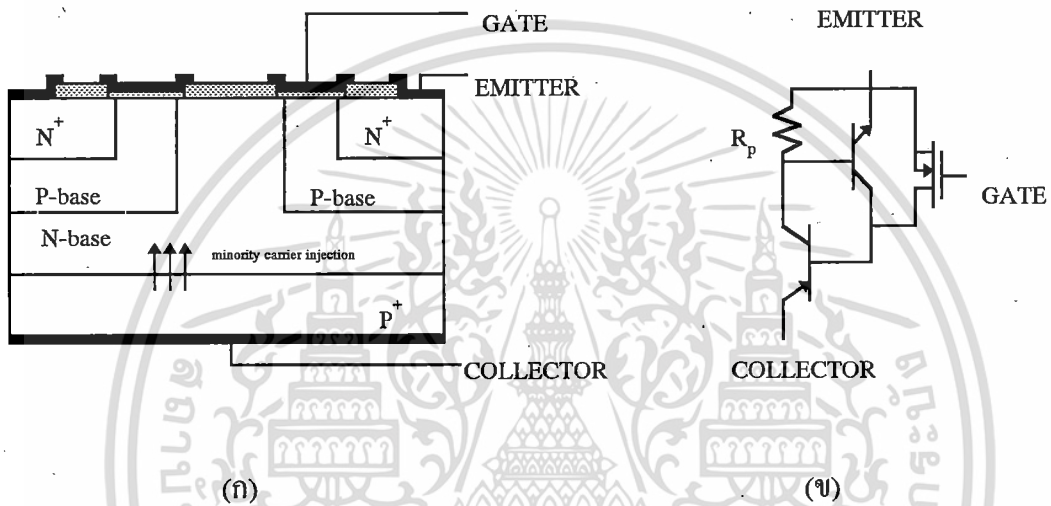
2. มอสควบคุมไทริสเตอร์ (Mos controlled thyristor : MCT) เป็นโครงสร้างที่แตกต่างจากไทริสเตอร์มีเกทเป็นจนวน คือ สามารถที่จะนำกระแสกระแสได้โดยการให้สัญญาณ(signal) เข้าไปที่ขั้วเกทเท่านั้นซึ่งโครงสร้างนี้จะไม่แสดงลักษณะของเกทที่ควบคุมลักษณะเอาท์พุทอย่างสมบูรณ์



รูปที่ 1.2 (ก) ภาพตัดขวางและ (ข) วงจรสมมูลของ มอสควบคุมไทริสเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



รูปที่ 1.3 (ก) ภาพตัดขวางและ (ข) วงจรสมมูลของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกทเป็นฉนวน

สำหรับในรายงานวิจัยนี้จะเป็นการศึกษาเฉพาะไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกทเป็นฉนวนเท่านั้น เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่มีความหนาแน่นกระแสสูงมากและใช้งานได้ง่าย เหมาะที่จะใช้งานทั่วไป ซึ่งจะได้อธิบายหลักการทํางานและพารามิเตอร์ต่างๆ ที่สำคัญของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกทเป็นฉนวนในบทต่อไป

1.3 การเปรียบเทียบระหว่างไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกทเป็นฉนวนมอสเฟตกำลังและไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์กำลัง

เพื่อแสดงให้เห็นถึงข้อเด่นหรือข้อได้เปรียบของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกทเป็นฉนวนเมื่อเทียบกับโครงสร้างแบบมอสเฟตกำลังและไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์กำลัง ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1.1 เปรียบเทียบตัวแปรของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกทเป็นฉนวน มอสเฟตกำลัง และไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์กำลัง

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

จากตารางที่ 1.1 จะเห็นได้ว่าไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกทเป็นฉนวนเป็นอุปกรณ์ที่น่าสนใจมากสำหรับงานที่ต้องการกำลังสูงและต้องการการตอบสนองความถี่สูง แต่ก็ยังมีราคาแพงถึงอย่างไรก็ตามไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกทเป็นฉนวนก็ยังเป็นอุปกรณ์ที่น่าสนใจมากและคาดว่าจะเข้ามามีบทบาทแทนอุปกรณ์กำลังแบบเดิม

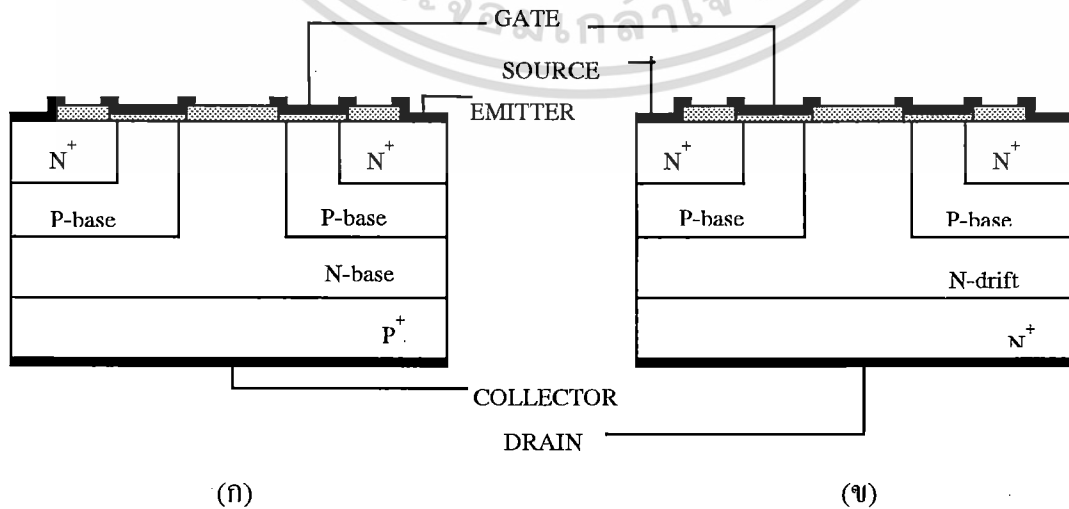
บทที่ 2 ทฤษฎี IGBT

2.1 บทนำ

IGBT เป็นอุปกรณ์ที่ค่อนข้างใหม่ โดยเฉพาะในตลาดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในประเทศไทย ซึ่งเริ่มจะมีใช้กันบ้างแล้วราว 2-3 ปีที่ผ่านมา และมีจำหน่ายเพียงไม่กี่ชนิด จากความเป็นอุปกรณ์ใหม่นี้ จึงทำให้ผู้ที่สนใจที่จะนำ IGBT ไปประยุกต์ใช้งานมีความเข้าใจในหลักการทำงานของ IGBT ไม่มากพอ และเกิดปัญหาในการใช้งานอย่างมาก เพื่อให้เข้าใจในหลักการทำงานของ IGBT ดังนั้นรายละเอียดของบทนี้จึงกล่าวถึง ส่วนประกอบโครงสร้าง หลักการทำงานเบื้องต้น และพารามิเตอร์ต่างๆ ของ IGBT รวมถึงสมการการวิเคราะห์ผลของพารามิเตอร์ต่างๆ เหล่านี้ด้วย

2.2 โครงสร้างพื้นฐาน [2]

IGBT เป็นโครงสร้างที่เกิดขึ้นจากการรวมเอาโครงสร้างเกทแบบมอสเฟตกับการนำกระแสแบบไบโพลาร์เข้าไว้ด้วยกัน โดยโครงสร้างประกอบด้วย 4 ชั้น คือ ชั้น N^+ -emitter , P-base , N-base และชั้น P^+ -collector และ 3 ขั้ว คือ เกท อิมิตเตอร์ และคอลเลกเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ก ซึ่งลักษณะเด่นของโครงสร้างชนิดนี้คือ มีการฉีดประจุพาหะส่วนน้อยจาก P^+ -collector เข้าไปยังชั้น N-base ในสถานะนำกระแสไปหน้า (Forward conduction) ซึ่งจะส่งผลให้อุปกรณ์ชนิดนี้มีความต้านทานในสถานะนำกระแสที่ต่ำลงจึงสามารถทำให้มีความหนาแน่นกระแสได้สูง อีกทั้งยังสามารถที่จะควบคุมการไหลของกระแสได้โดยการควบคุมแรงดันไบอัสที่ขั้วเกทจึงเป็นการลดความยุ่งยากของวงจรขับทำให้ IGBT เป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่น่าสนใจอย่างมาก ส่วนในรูปที่ 2.1 ข เป็นโครงสร้างของมอสเฟตกำลัง ซึ่งแสดงให้เห็นมีเพียงส่วน P^+ -collector ของ IGBT ในกรณีมอสเฟตกำลัง จะกลายเป็นส่วน N^+ -drain



รูปที่ 2.1 ภาพตัดขวางของ (ก) ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกทเป็นฉนวน (ข) มอสเฟตกำลัง
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือสงวนเพื่อการค้าเท่านั้น ผู้อ่านและผู้เขียนขอสงวนสิทธิ์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 หลักการทำงานเบื้องต้น [2]

IGBT เป็นอุปกรณ์กึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างเกิดจากการรวมโครงสร้างเกทแบบมอสเฟตและการนำกระแสแบบไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์เข้าไว้ด้วยกัน ดังนั้นการทำงานของ IGBT จึงสามารถที่จะทำได้ง่ายโดยการเหนี่ยวนำให้เกิดช่องทางเดินกระแส ด้วยการให้แรงดันไบอัสค่าบวกที่ขั้วเกททำให้อิเล็กตรอนสามารถที่จะเคลื่อนที่จากบริเวณ N^+ -emitter ผ่านชั้น P-base มายังชั้น N-base ได้เช่นเดียวกับมอสเฟตกึ่งตัวนำ นอกจากนั้นในสภาวะนำกระแสไปหน้า ทำให้เกิดการฉีดประจุพาหะส่วนน้อยจาก P^+ -collector เข้าไปยังชั้น N-base ทำให้เกิดการ มอดูเลตสภาพนำ (Conductivity Modulation) ส่งผลให้ความต้านทานในสภาวะนำกระแสของ IGBT มีค่าลดลงต่ำกว่าโครงสร้างมอสเฟตกึ่งตัวนำ

สำหรับการทำงานของอุปกรณ์ IGBT สามารถแบ่งเป็นสภาวะใหญ่ๆ ได้ 3 สภาวะด้วยกัน คือ

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

2 สภาวะปิดกั้นตรง (Forward Blocking Mode) เกิดจากการให้แรงดันไบอัสค่าบวกที่ขั้วคอลเลคเตอร์ โดยลัดวงจรขั้วอิมิตเตอร์กับขั้วเกทเข้าด้วยกัน ทำให้รอยต่อระหว่าง P-base กับ N-base อยู่ในสภาวะถูกไบอัสย้อนกลับกระแสจึงไม่สามารถไหลผ่านรอยต่อได้เช่นกัน

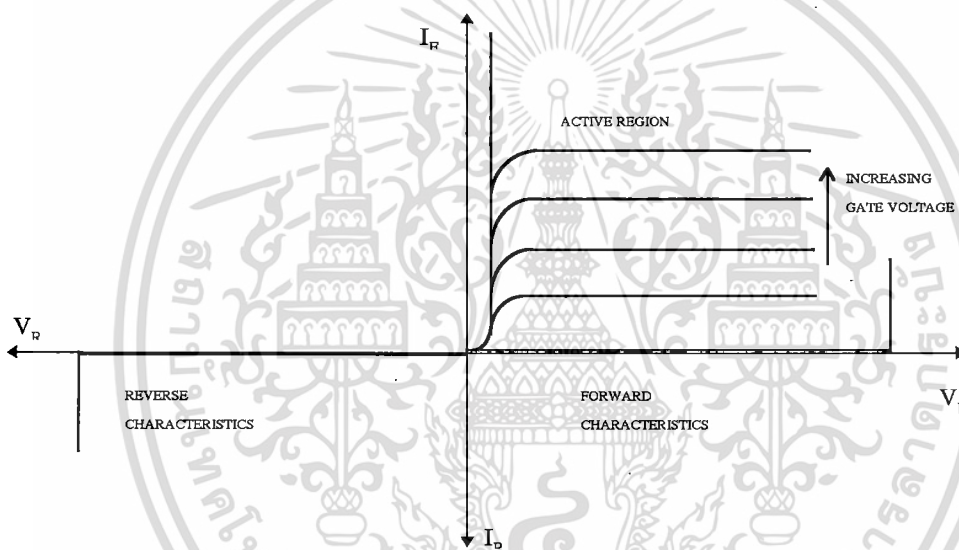
3 สภาวะนำกระแสไปหน้า (Forward Conducting Mode) เกิดจากการให้แรงดันไบอัสค่าบวกที่ขั้วคอลเลคเตอร์เหมือนกันกับสภาวะปิดกั้นตรง แต่ในกรณีนี้จะให้แรงดันไบอัสที่ขั้วเกทเป็นบวก เทียบกับอิมิตเตอร์ด้วย ซึ่งที่ค่าแรงดันไบอัสที่ขั้วเกทมีค่ามากกว่าแรงดันขีดเริ่มจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดชั้นนำ (conduction layer) ขึ้นที่บริเวณผิวส่วน P-base ที่อยู่บริเวณใต้ส่วนเกท ชั้นนำนี้จะทำหน้าที่เป็นช่องทางเดินกระแสทำให้อิเล็กตรอนสามารถที่จะไหลผ่านจากขั้ว N^+ -emitter ไปยังบริเวณชั้น N-base ได้

จากการทำงานทั้งสามสภาวะที่กล่าวมา สภาวะนำกระแสไปหน้าเป็นสภาวะที่น่าสนใจและถูกใช้งานมากที่สุด ที่สภาวะนี้จะเห็นได้ว่ารอยต่อ P^+ -collector กับ N-base จะอยู่ในสภาวะถูกไบอัสไปหน้าทำให้เกิดการฉีดประจุพาหะส่วนน้อยจาก P^+ -collector เข้าไปยังชั้น N-base และจะฉีดมากขึ้นเมื่อเพิ่มค่าแรงดันไบอัสที่ขั้วคอลเลคเตอร์ จนถึงจุดหนึ่งซึ่งความเข้มข้นของประจุพาหะส่วนน้อยเท่ากับระดับความหนาแน่นอะตอมสารเจือพื้นฐาน (background doping level) ของชั้น N-base ณ จุดนี้สภาวะของชั้น N-base จะเปลี่ยนไปเหมือนกับเป็นชั้นอินทรินซิก (intrinsic) ดังนั้นการทำงานของอุปกรณ์ในสภาวะนี้จึงมีลักษณะเหมือนกับ P-i-N ไดโอด ที่อยู่ในสภาวะนำกระแสไปหน้า อย่างไรก็ตามความสามารถในการนำกระแสของช่องทางเดินกระแสที่ถูกเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่วนเวสสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า เสนอข้อมูลเท่านั้น ไม่ใช่วางข้อคิดเห็นใดๆ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้เกิดขึ้นก็มีขีดจำกัดทั้งนี้เนื่องจากเกิดศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมช่องทางเดินกระแส ส่งผลให้กระแสไปหน้า (forward current) มีค่าคงที่ที่ค่าๆหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.2

การเปลี่ยนสถานะการทำงานของ IGBT จาก ON ไปสู่ OFF สามารถทำได้โดยการตัดช่องทางเดินกระแสที่ผิวของชั้น P-base บริเวณใต้เกต ด้วยการลัดวงจรระหว่างขั้วเกตเข้ากับอิมิตอร์ ทำให้อิเล็กตรอนซึ่งเป็นประจุพาหะส่วนมากไม่สามารถที่จะไหลผ่านไปยังชั้น N-base ได้ อย่างไรก็ตามการตัดช่องทางเดินกระแสเป็นเพียงการตัดการไหลของอิเล็กตรอนเท่านั้น แต่ในส่วนของโฮลซึ่งเป็นประจุพาหะส่วนน้อยที่ถูกฉีดเข้าไปในชั้น N-base จะยังคงมีความหนาแน่นสูงอยู่ในตอนแรกหลังจากตัดช่องทางเดินกระแสและจะค่อยๆลดลงขึ้นอยู่กับค่าช่วงอายุ (lifetime) ของประจุพาหะส่วนน้อย ส่งผลให้ไม่สามารถตัดกระแส (turn-off) ได้ทันที ทำให้มีความเร็วในการสวิตซ์ (Switching Speed) ของ IGBT มีค่าต่ำกว่ามอสเฟตกำลัง



รูปที่ 2.2 คุณสมบัติของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของ IGBT

ปรากฏการณ์ที่สำคัญอีกอย่างที่พบในโครงสร้าง IGBT ก็คือโครงสร้างแฝง P-N-P-N แบบ ไทริสเตอร์ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดปรากฏการณ์แลทช์-อัป (latch-up) ขึ้นในขณะที่ IGBT ทำงาน ส่งผลให้โครงสร้างเกตแบบมอสเฟตไม่สามารถที่จะควบคุมการไหลของกระแสได้ ดังนั้นสิ่งสำคัญอย่างหนึ่งในการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ IGBT ก็คือการหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดการทำงานในสถานะไทริสเตอร์

2.4 การวิเคราะห์การทำงาน

เนื่องจากอุปกรณ์ IGBT เป็นอุปกรณ์ที่เกิดจากการรวมโครงสร้างเกตแบบมอสเฟตเข้ากับการนำกระแสแบบไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ ดังนั้นในการวิเคราะห์การทำงานของ IGBT จึงต้อง

พิจารณาในลักษณะที่แตกต่างไปจากอุปกรณ์กำลังโดยทั่วไปและที่สำคัญก็คือจะพิจารณาเฉพาะในกรณีที่ไม่มีเกิดโครงสร้างแฝงแบบทรินสเตอร์เท่านั้น

2.4.1 ความสามารถในการปิดกั้นย้อนกลับ

การทำงานของ IGBT ในสภาวะปิดกั้นย้อนกลับเกิดจากการให้แรงดันไบอัสค่าลบที่ขั้วคอลเลกเตอร์ ทำให้รอยต่อ P⁺-collector กับ N-base อยู่ในสภาวะถูกไบอัสย้อนกลับทำให้เกิดบริเวณปลอดประจุพาหะ (depletion region) ขยายเข้าไปในบริเวณ N-base โดยที่แรงดันพังทลาย ในขณะที่อยู่ในสภาวะปิดกั้นย้อนกลับจะถูกกำหนดโดยโครงสร้างแฝงไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์แบบเบสเปิด ที่เกิดขึ้นจากชั้น P⁺-collector N-base และ P-base ซึ่งสามารถคำนวณหาได้จากสมการ (2.23) โดยรอยต่อระหว่าง P⁺-collector กับ N-base จะเป็นตัวกำหนดความสามารถในการปิดกั้นย้อนกลับของอุปกรณ์ ดังนั้นในการออกแบบอุปกรณ์ IGBT เพื่อให้ได้ความสามารถในการปิดกั้นย้อนกลับตามที่ต้องการจึงต้องคำนึงถึงความต้านทานและความหนาของชั้น N-base ที่เหมาะสมทั้งนี้เพื่อป้องกันการเกิดแรงดันพังทลายแบบพินซ์ทรู (punch-through breakdown) ขึ้นได้ถ้าความหนาแน่นอะตอมสารเจือของชั้น N-base มีค่าน้อย

ในการคำนวณหาความหนาที่แท้จริงของชั้น N-base [3] ในสภาวะปิดกั้นย้อนกลับสามารถหาได้จากความกว้างของบริเวณปลอดประจุพาหะที่แรงดันสูงสุดบวกกับระยะการแพร่ (diffusion length) ของประจุพาหะและความกว้างของชั้น N-base จะสัมพันธ์กับค่าแรงดันปิดกั้นดังสมการ

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

โดยที่

- 2d คือ ความกว้างของชั้น N-base
- V_m คือ ค่าแรงดันปิดกั้นสูงสุด
- L_p คือ ระยะการแพร่ของประจุพาหะส่วนน้อย
- N_D คือ ระดับความหนาแน่นอะตอมสารเจือผู้ให้
- ϵ_s คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสารกึ่งตัวนำ
- q คือ ค่าประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน

2.4.2 ความสามารถในการปิดกั้นตรง

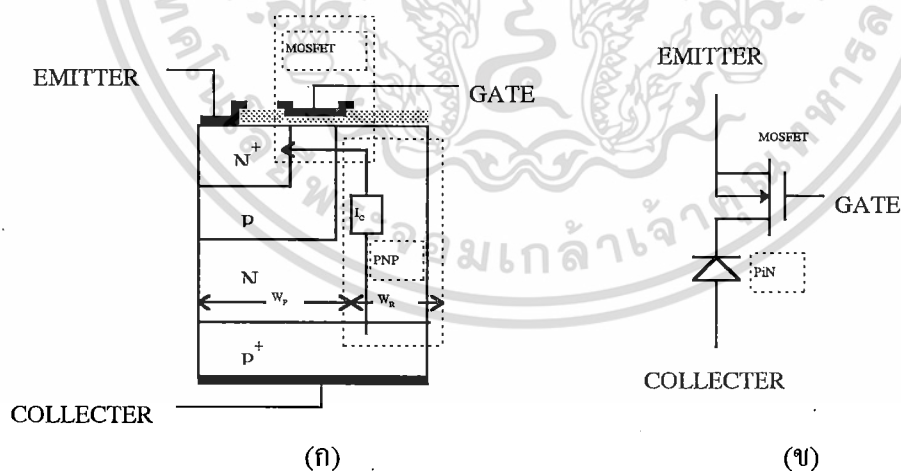
การทำงานของ IGBT ในสภาวะปิดกั้นตรง เกิดได้โดยการให้แรงดันไบอัสค่าบวกที่ขั้วคอลเลกเตอร์ทำให้รอยต่อระหว่าง N-base กับ P-base อยู่ในสถานะถูกไบอัสย้อนกลับ ในขณะที่เดียวกันก็ลัดวงจรระหว่างขั้วอิมิตเตอร์เข้ากับเกทเพื่อป้องกันการเกิดช่องทางเดินกระแสขึ้นที่ผิวเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของชั้น P-base ทำให้รอยต่อระหว่าง N-base กับ P-base เป็นตัวกำหนดความสามารถในการปิดกั้นตรง และนอกจากนั้นความหนาแน่นอะตอมสารเจือในชั้น P-base ยังเป็นตัวกำหนดค่าแรงดันขีดเริ่มของทางเดินกระแสอีกด้วย ดังนั้นในการออกแบบ IGBT ความกว้างของชั้น N-base จึงต้องมีค่ามากพอที่จะป้องกันไม่ให้เกิดแรงดันพังทลายแบบ พันซ์ทรู มาถึงชั้น N^+ -emitter ได้ซึ่งสามารถพิจารณาได้จาก Doping Profile ของรอยต่อ

2.4.3 การนำกระแสไปหน้า

การทำงานของ IGBT ในสภาวะนำกระแสไปหน้าเกิดจากการให้แรงดันไบอัสค่าบวกที่ขั้วเกตเทียบกับอิมิตเตอร์ ในขณะที่เดียวกันก็ให้แรงดันไบอัสค่าบวกที่ขั้วคอลเลคเตอร์เช่นกัน ซึ่งการให้แรงดันค่าบวกที่ขั้วเกตเทียบกับอิมิตเตอร์สูงกว่าแรงดันขีดเริ่ม (threshold voltage : V_T) จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดช่องการเดินกระแสขึ้นที่บริเวณผิวของชั้น P-base ได้ส่วนเกตและการให้แรงดันไบอัสค่าบวกที่ขั้วคอลเลคเตอร์จะทำให้รอยต่อ P^+ -collector กับ N-base อยู่ในสภาวะถูกไบอัสไปหน้าส่งผลให้เกิดการมอดูเลตสภาพนำ ทำให้อุปกรณ์มีความต้านทานในสภาวะนำกระแสต่ำ และสามารถที่จะทำงานได้ที่ความหนาแน่นกระแสค่าสูงๆในสภาวะนำกระแสไปหน้า

ในการวิเคราะห์การนำกระแสไปหน้าของอุปกรณ์ IGBT สามารถพิจารณาได้โดยอาศัยวงจรสมมูลสองแบบดังแสดงในรูปที่ 2.3 (ก) และ 2.5 (ข) ซึ่งในวงจรสมมูลแต่ละแบบจะมีความเหมาะสมที่จะอธิบายคุณสมบัติของอุปกรณ์ IGBT ที่แตกต่างกันไป



รูปที่ 2.3 ก.) ภาพตัดขวางของ IGBT ที่แสดงแบบจำลองแบบ P-i-N/MOS

ข.) วงจรสมมูลของแบบจำลองแบบ P-i-N/MOS

2.4.3.1 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลกเตอร์กับแรงดันคอลเลกเตอร์-อิมิตเตอร์ในช่วงเชิงเส้นของ IGBT โดยใช้แบบจำลอง P-i-N เร็กติไฟเออร์/มอสเฟต

ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลกเตอร์กับแรงดันคอลเลกเตอร์-อิมิตเตอร์ โดยอาศัยแบบจำลอง P-i-N เร็กติไฟเออร์/มอสเฟต ทำได้โดยอาศัยภาพตัดขวางและวงจรมูลตั้งรูปที่ 2.3 (ก.) และ (ข.) ตามลำดับ โดยแสดงให้เห็นถึงมอสเฟตกำลังที่ต่ออนุกรมกับ P-i-N เร็กติไฟเออร์ ซึ่งจากรูปที่ 2.3 (ข.) จะเห็นได้ว่าแรงดันตกคร่อมอุปกรณ์จะเท่ากับ

$$V_F = V_{F, PiN} + V_{F, MOS} \quad (2.2)$$

โดยที่ V_F คือ แรงดันตกคร่อมตัว IGBT

$V_{F, MOS}$ คือ แรงดันตกคร่อมส่วนที่เป็นโครงสร้างมอสเฟตใน IGBT

$V_{F, PiN}$ คือ แรงดันตกคร่อมส่วนที่เป็นโครงสร้าง P-i-N เร็กติไฟเออร์ใน IGBT

เมื่อพิจารณาในส่วนของความหนาแน่นกระแสไปหน้าของ P-i-N (Forward Conduction Current Density) สามารถหาได้จาก

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

โดยที่

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

เมื่อ $J_{F, PiN}$ คือ ความหนาแน่นกระแสไปหน้าของ P-i-N (A/cm^2)

N_i คือ ระดับความหนาแน่นอะตอมสารเจืออินทรีนซิก (cm^{-3})

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

L_a คือ ระยะการแพร่ (Diffusion length) (μm)

k คือ ค่าคงที่ของโบสมันต์ (J/K)

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

$$J_{F, PiN} = \frac{I_c}{W_R W} \quad (2.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

W คือความกว้างของช่องทางเดินกระแส (μm)

W_R คือ ความยาวของเซลล์เชิงเส้น (μm)

เมื่อแทนค่า $J_{F,PIN}$ จากสมการ (2.4) ลงใน (2.3) เพื่อหาค่า $V_{F,PIN}$ ดังนั้นจะได้ $V_{F,PIN}$ เป็น

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

สำหรับในส่วนมอสเฟตสามารถที่จะหาปริมาณกระแสที่ไหลผ่านช่องทางเดินกระแสได้ เช่นเดียวกับในมอสเฟตโดยทั่วไป คือ

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

เมื่อ L คือ ความยาวของช่องทางเดินกระแส (μm)

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

V_G คือ แรงดันที่ขั้วเกต (V)

V_T คือ แรงขีดเริ่ม (V) [3]

C_{OX} คือ ค่าความเก็บประจุที่ออกไซด์ (pF)

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

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

ดังนั้นจะได้แรงดันตกคร่อมส่วนที่เป็นมอสเฟตดังสมการ

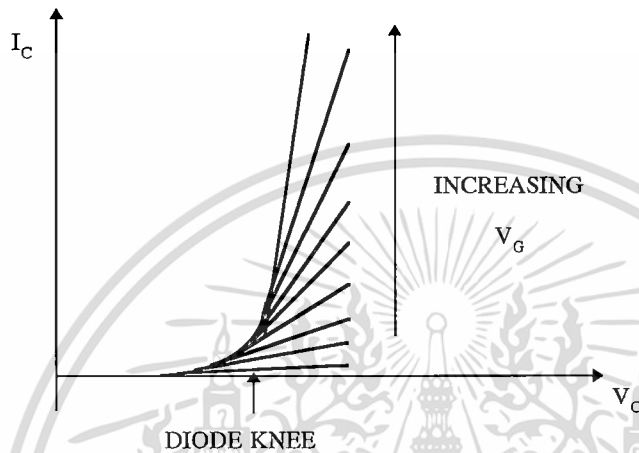
$$V_{F,MOS} = \frac{I_C L}{\mu_n C_{OX} W (V_G - V_T)} \quad (2.9)$$

จากสมการที่ (2.2) (2.6) และ (2.7) จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

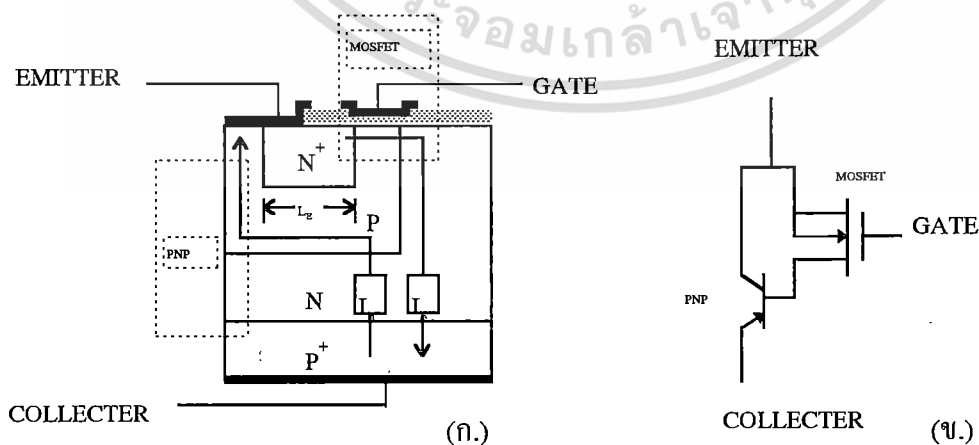
ซึ่งจากสมการที่ (2.10) เราสามารถที่จะใช้อธิบายคุณสมบัติของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลกเตอร์กับแรงดันคอลเลกเตอร์-อิมิตเตอร์ในช่วงเชิงเส้นได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 2.4 คุณสมบัติการนำกระแสไปหน้าของ IGBT ในช่วงเชิงเส้น

2.4.3.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลกเตอร์และแรงดันคอลเลกเตอร์-อิมิตเตอร์ในช่วงอิมิตตัวโดยใช้แบบจำลองมอสเฟต/ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์

ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลกเตอร์กับแรงดันคอลเลกเตอร์-อิมิตเตอร์โดยอาศัยแบบจำลอง ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์/มอสเฟต ทำได้โดยอาศัยวงจรมอดูลรูปที่ 2.5 (ข) และภาพตัดขวางดังรูปที่ 2.5 (ก) ซึ่งประกอบด้วยไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ P-N-P ที่มีเบสกว้าง (width base P-N-P bipolar transistor) ซึ่งถูกขับโดยมอสเฟตที่ต่อกันแบบ Darlington



รูปที่ 2.5 (ก) ภาพตัดขวาง IGBT ที่แสดงแบบจำลองแบบมอสเฟต/ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์

เอกสารนี้เป็น (ข) วงจรสมมูลของแบบจำลองแบบมอสเฟต/ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยจากวงจรสมมูลจะเห็นได้ว่า

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

และ

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

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

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

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

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

ในการคำนวณหากระแสอิเล็กตรอนที่ไหลผ่านช่องทางเดินกระแสในช่วงอิมตัวสามารถพิจารณาได้เช่นเดียวกับกรณีของมอสเฟตกำลังโดยทั่วไป คือ

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

ดังนั้นจากสมการที่ (2.13) และ (2.15) เราสามารถคำนวณหากระแสคอลเลกเตอร์ในสภาวะอิมตัวได้จากสมการ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการจะเห็นได้ว่ากระแสคอลเลคเตอร์จะขึ้นอยู่กับอัตราขยายกระแสของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ P-N-P ที่มีเบสกว้าง

2.4 แลทซ์-อัฟ (Latch-up)

ปรากฏการณ์ แลทซ์-อัฟ ในโครงสร้าง IGBT เกิดขึ้นจากการเกิดโครงสร้างแฝงสี่ชั้นแบบ ไทริสเตอร์ขึ้นในโครงสร้าง IGBT ทำให้ไม่สามารถควบคุมการไหลของกระแสได้ โดยการควบคุมแรงดันไบอัสที่เกท หมายความว่ากระแสไอเล็กตรอนจะไหลผ่านจากอิมิตเตอร์ไปคอลเลคเตอร์ได้ โดยผ่านจาก N^+ -emitter \rightarrow P-base \rightarrow N-base \rightarrow P⁺-collector ตามแนวตั้ง (ดูได้จากโครงสร้างที่แสดงในรูปที่ 2.5 ก) และสามารถส่งผลให้เกิดความเสียหายกับอุปกรณ์

แลทซ์-อัฟจะเกิดขึ้นเมื่อความหนาแน่นกระแสไปหน้ามีค่ามากกว่าค่าหนึ่งที่ทำให้อุปกรณ์แสดงโครงสร้างแฝงของไทริสเตอร์ขึ้นมา ดังนั้นจึงไม่สามารถวิเคราะห์การทำงานของ IGBT โดยใช้สมมติฐานอย่างที่ผ่านมาได้ อย่างไรก็ตามในการวิเคราะห์ปรากฏการณ์การเกิดแลทซ์-อัฟ สามารถวิเคราะห์ได้ว่าเกิดจากผลของกระแสไอ I_h ที่เคลื่อนที่ผ่านทางด้านใต้ของบริเวณ N^+ -emitter เป็นระยะทาง L_E ดังแสดงในรูปที่ 2.5 (ก.) ซึ่งจะส่งผลให้แรงดันตกคร่อมบริเวณรอยต่อ N^+ -emitter กับ P-base มีค่าสูงขึ้น โดยแรงดันตกคร่อมบริเวณดังกล่าว (V_A)สามารถหาได้จากสมการ

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

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

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

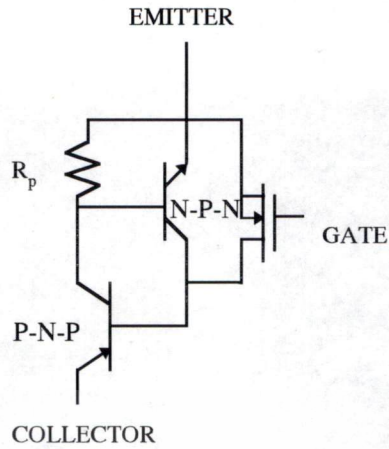
ดังนั้นการที่ทรานซิสเตอร์ N-P-N ที่แฝงในโครงสร้างของ IGBT ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ทำงาน และเกิดเป็นปรากฏการณ์แลทซ์-อัฟ ซึ่งจะต้องสอดคล้องกับเงื่อนไขของสมการ

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

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

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

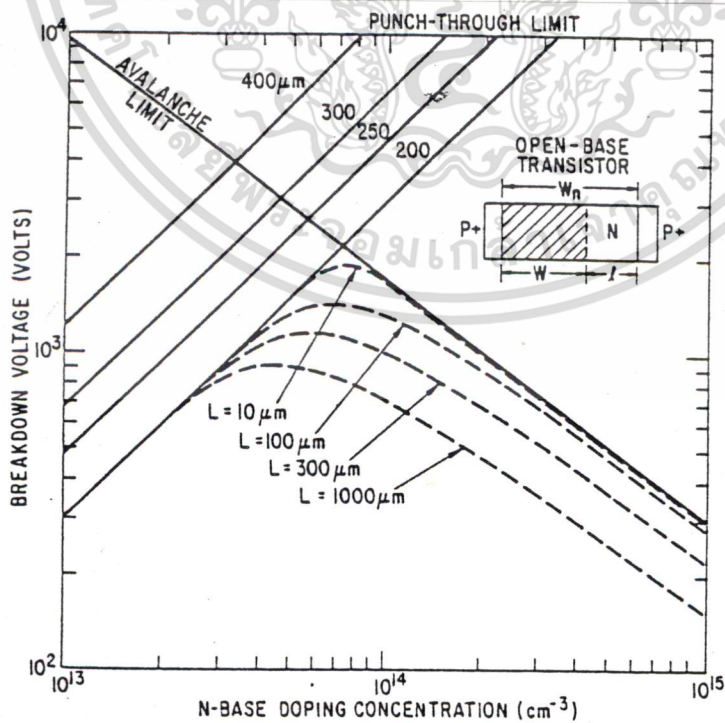
จากสมการที่ (2.20) จะเห็นได้ว่าความต้านทานในชั้น P-base และอัตราขยายกระแสของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ P-N-P จะมีผลโดยตรงต่อกระแสแลทซ์-อัฟ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 วงจรสมมูลของ IGBT ที่แสดงทรานซิสเตอร์ N-P-N แฉง และถ้าทรานซิสเตอร์นี้ทำงาน จะทำให้เกิดปรากฏการณ์แลตซ์-ออฟ เมื่อ $V_{Rp} = 0.7 \text{ V}$

2.5 แรงดันพังทลายของทรานซิสเตอร์แบบเบสเปิด (open-base Transistor Breakdown)

ในโครงสร้างของอุปกรณ์กำลังส่วนใหญ่มักจะพบรอยต่อพี-เอ็นที่ต่อกันแบบ back-to-back ที่แฉงอยู่ในโครงสร้างของอุปกรณ์กำลังเสมอทำให้ความสามารถในการทนแรงดันสูงสุดของ อุปกรณ์ถูกจำกัด โดยแรงดันพังทลายของทรานซิสเตอร์แบบเบสเปิดที่แฉงอยู่ในโครงสร้างของ อุปกรณ์กำลัง ซึ่งผลของแรงดันพังทลายดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับความต้านทานและระยะห่างระหว่าง รอยต่อพี-เอ็นในอุปกรณ์แต่ละตัว



รูปที่ 2.7 แรงดันพังทลายของโครงสร้างทรานซิสเตอร์แบบเบสเปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.7 แสดงถึงลักษณะของโครงสร้างทรานซิสเตอร์แบบเบสเปิดที่มีรอยต่อพี-เอ็น รอยต่อหนึ่งถูกไบอัสย้อนกลับ ซึ่งรอยต่อดังกล่าวเปรียบเทียบกับรอยต่อของคอลเลคเตอร์กับ รอยต่อของอิมิตเตอร์ในอุปกรณ์ IGBT เมื่อความกว้างของชั้น N-base มีค่ามากกว่าความกว้าง ของบริเวณปลอดประจุของรอยต่อคอลเลคเตอร์ที่ถูกไบอัสย้อนกลับ แรงดันพังทลายของรอยต่อ คอลเลคเตอร์จะถูกจำกัดโดยแรงดันพังทลายแบบอะวอลานซ์ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันพัง ทลายแบบอะวอลานซ์กับความต้านทานในชั้น N-base แสดงได้ดังรูปที่ 2.7 โดยจะเห็นได้ว่าแรง ดันพังทลายแบบอะวอลานซ์จะลดลงเมื่อระดับอะตอมสารเจือในชั้น N-base เพิ่มขึ้น

ในกรณีที่ N-base มีระยะแคบๆ แรงดันพังทลายของทรานซิสเตอร์แบบ เบสเปิด จะเกิด ขึ้นจากการฉีดอิเล็กตรอนจากอิมิตเตอร์เหมือนกับว่าชั้นปลอดประจุพาหะของคอลเลคเตอร์แพร่เข้าไป เกือบถึงรอยต่อของอิมิตเตอร์ แต่ในกรณีที่ระยะการแพร่ของประจุพาหะส่วนน้อยในชั้น N-base มีค่าน้อยมาก แรงดันพังทลายของคอลเลคเตอร์จะเกิดเมื่อเกิดทะลุถึงกันของบริเวณปลอดประจุ พาหะ ซึ่งในกรณีนี้แรงดันพังทลายของรอยต่อแบบ abrupt สามารถหาได้จากสมการ

$$V_{PT} = \frac{qN_D}{2\epsilon_s} W_N^2 \quad (2.21)$$

เมื่อ N_D คือ ระดับอะตอมสารเจือในชั้น N-base

W_N คือ ความกว้างของบริเวณไม่ปลอดประจุพาหะในชั้น N-base

สำหรับกรณีที่ความกว้างของ N-base ที่มีค่ามาก แรงดันพังทลายแบบพังทลายจะลดลงเมื่อ เพิ่มความต้านทานในชั้น N-base ดังแสดงในรูปที่ 2.7

อย่างไรก็ตามแรงดันพังทลายของอุปกรณ์อาจจะถูกจำกัดโดยแรงดันพังทลายแบบอะวอลานซ์ (avalanch) หรือพังทลาย (punch-through) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความกว้างและความต้านทานของ ชั้น N-base ซึ่งในทางปฏิบัติระดับสูงสุดของแรงดันพังทลายไม่สามารถกำหนดได้โดยจุดตัด ระหว่างขีดจำกัดของแรงดันพังทลายแบบอะวอลานซ์กับพังทลายดังแสดงในรูปที่ 2.7 เนื่องจากขีด จำกัดของระยะการแพร่ของประจุพาหะส่วนน้อยในชั้น N-base ซึ่งจะเกิดเมื่อผลรวมของ ตัว ประกอบการคูณ (multiplication factor) และ base transport factor (α_T) มีค่าเท่ากับหนึ่ง ดังนั้นจึง สามารถหาค่า base transport factor ได้จาก

$$\alpha_T = \frac{1}{\cosh\left(\frac{l}{L_p}\right)} \quad (2.22)$$

โดยที่ l คือความกว้างของบริเวณปลอดประจุพาหะในชั้น N-base และ L_p คือระยะการ แพร่ของโฮล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบ IGBT

ในการออกแบบอุปกรณ์กำลังให้มีประสิทธิภาพสูงที่สุดนั้น จำเป็นที่จะต้องศึกษาถึงโครงสร้างและหลักการทำงานของอุปกรณ์อย่างละเอียดเสียก่อน อย่างไรก็ตามสิ่งสำคัญอีกประการหนึ่งที่จะเป็นตัวกำหนดขอบเขตการออกแบบก็คือความสามารถของเทคโนโลยีที่ใช้ในการสร้างสำหรับในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการออกแบบสร้างอุปกรณ์ IGBT ที่เหมาะสมกับกระบวนการสร้างโดยใช้เทคโนโลยีการแพร่สารเจือโดยใช้ความร้อน

3.1 การเลือกแผ่นผลึกเริ่มต้น

ในการเลือกแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำเริ่มต้นเพื่อใช้ในกระบวนการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำนั้น สิ่งแรกที่ต้องพิจารณาคือชนิดของสารหรือสารประกอบของแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำเริ่มต้น โดยทั่วไปนิยมใช้กันอยู่ 2 ชนิดคือซิลิกอน ทั้งนี้เนื่องจากหาง่าย ราคาถูกและไม่ทำให้เกิดให้สารพิษจากกระบวนการสร้างด้วย โดยแผ่นผลึกซิลิกอนที่ใช้ได้จากกระบวนการ โซโคราลสกี (Czochralski) หรือวิธีฟลอตโซน (Float zone) แล้วนำมาตัดเป็นแผ่นบางๆ เส้นผ่าศูนย์กลาง 50-200 mm. จากนั้นจึงนำไปขัดผิวให้เรียบพร้อมที่จะนำไปใช้ในกระบวนการสร้างสารกึ่งตัวนำต่อไป และนอกจากนั้นในการเลือกแผ่นผลึกซิลิกอนที่เหมาะสมที่จะสร้าง IGBT ยังต้องคำนึงถึงความคล่องตัวของประจุพาหะและความหนาแน่นของอะตอมสารเจือของฐานรอง เพื่อที่จะได้อุปกรณ์ที่สามารถนำกระแสได้สูงและมีความสามารถในการทนแรงดันพังทลายสูงตามต้องการ

ดังนั้นในการสร้างอุปกรณ์ IGBT สำหรับโครงสร้างแนวระนาบ (lateral structure) นั้นเลือกใช้แผ่นผลึกซิลิกอนชนิด ระนาบเชิงเดี่ยวระนาบ (100) พิกัดความต้านทาน 8-12 Ω -cm. ส่วนโครงสร้างในแนวตั้ง (vertical structure) ใช้แผ่นชนิดอีพิทาคีระนาบ (100) พิกัดความต้านทานชั้นอีพิทาคีเท่ากับ 40-50 Ω -cm ทั้งนี้เนื่องจากความคล่องตัวของอิเล็กตรอนในระนาบ (100) ที่ผิวแผ่นผลึกมีค่ามากกว่าในระนาบ (111) และค่าความต้านทานของแผ่นผลึกฐานรองก็พอที่จะสามารถรองรับแรงดันพังทลายตามที่ต้องการได้

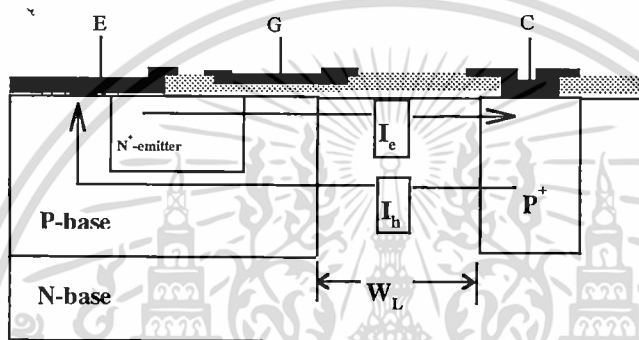
3.2 การออกแบบโครงสร้าง IGBT

โดยทั่วไปอุปกรณ์กำลังจำเป็นต้องมีขนาดใหญ่เพื่อให้มีความสามารถในการนำกระแสและทนแรงดันพังทลายสูง ดังนั้นจึงนิยมสร้างโดยอาศัยโครงสร้างในแนวตั้งเพื่อลดขนาดของตัวอุปกรณ์ แต่ถึงอย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบอุปกรณ์ IGBT ทั้งโครงสร้างในแนวระนาบและแนวตั้ง ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างในแนวระนาบสามารถที่จะเปลี่ยนแปลงตัวแปรทางเรขาคณิตได้ง่าย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จึงเหมาะที่จะออกแบบ เพื่อศึกษาผลของตัวแปรทางเรขาคณิตต่างๆ ที่มีต่อการการทำงานของ IGBT ส่วนโครงสร้างในแนวดิ่งนั้นออกแบบสำหรับทำงานที่กำลังสูงๆ

3.2.1 การออกแบบโครงสร้างในแนวระนาบ

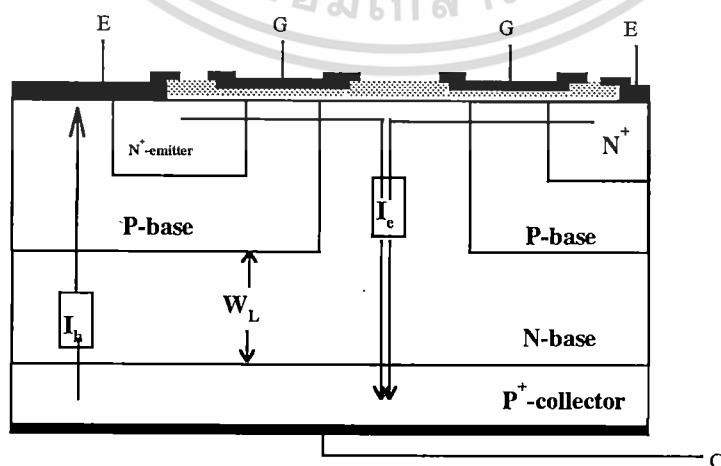
โครงสร้าง IGBT ประกอบด้วย 4 ชั้น คือ N^+ -P-N- P^+ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 สร้างขึ้นโดยขบวนการแพร่สารเจือด้วยความร้อน โดยเริ่มจากแผ่นผลึกซิลิกอนแบบระนาบเชิงเดี่ยวชนิด N ระนาบ (100) จากนั้นจึงแพร่อะตอมสารเจือโดยจะทำการแพร่อะตอมสารเจือในส่วน P^+ -collector ก่อนแล้วจึงทำการแพร่อะตอมสารเจือในส่วน P-base และ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



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

3.2.2 การออกแบบโครงสร้างในแนวดิ่ง

สำหรับการออกแบบโครงสร้างในแนวดิ่งของอุปกรณ์ IGBT ดังแสดงในรูปที่ 3.2 สามารถทำได้เช่นเดียวกันกับในแนวระนาบจะต่างกันตรงที่ ใช้แผ่นผลึกซิลิกอนพื้นฐานชนิดอพิแทกเซียล N/ P^+ ระนาบ(100) ส่วนการแพร่สารเจือในส่วนต่างๆยังคงเป็นเช่นเดียวกับโครงสร้างในแนวระนาบ ยกเว้นการแพร่สารเจือในส่วน P^+ -collector



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 การแพร่สารเจือ [5]

การแพร่สารเจือโดยกระบวนการแพร่สารเจือด้วยความร้อนเป็นการเติมและควบคุมปริมาณของอะตอมสารเจือให้เข้าไปในผลึกสารกึ่งตัวนำในบริเวณที่ต้องการโดยอาศัยความร้อน ในทางปฏิบัติกระบวนการแพร่จะถูกแบ่งออกเป็นสองขั้นตอนตามลำดับต่อไปนี้คือ

3.2.3.1 Predeposition

การ Predeposition เป็นการแพร่ขั้นต้นเพื่อกำหนดและควบคุมปริมาณสารเจือที่จะเข้าไปในผลึกสารกึ่งตัวนำ ซึ่งอะตอมสารเจือจะแพร่เข้าไปในผลึกซิลิกอนได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่า "Solid Solubility" ของอะตอมสารเจือซึ่งจะมีค่าจำกัดที่อุณหภูมิค่าหนึ่ง ซึ่งเราสามารถคำนวณหาการกระจายของอะตอมสารเจือได้จากสมการ

$$N_{(x,t)} = N_0 \operatorname{erfc} \left(\frac{X}{2\sqrt{D_1 t_1}} \right) \quad (3.1)$$

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

erfc คือ ค่าองค์ประกอบของฟังก์ชันคลาดเคลื่อน (error function complementary)

X คือ ระยะทางจากผิวหน้าถึกลงไปในแผ่นผลึก (cm)

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

t_1 คือ เวลาในการ deposition (s)

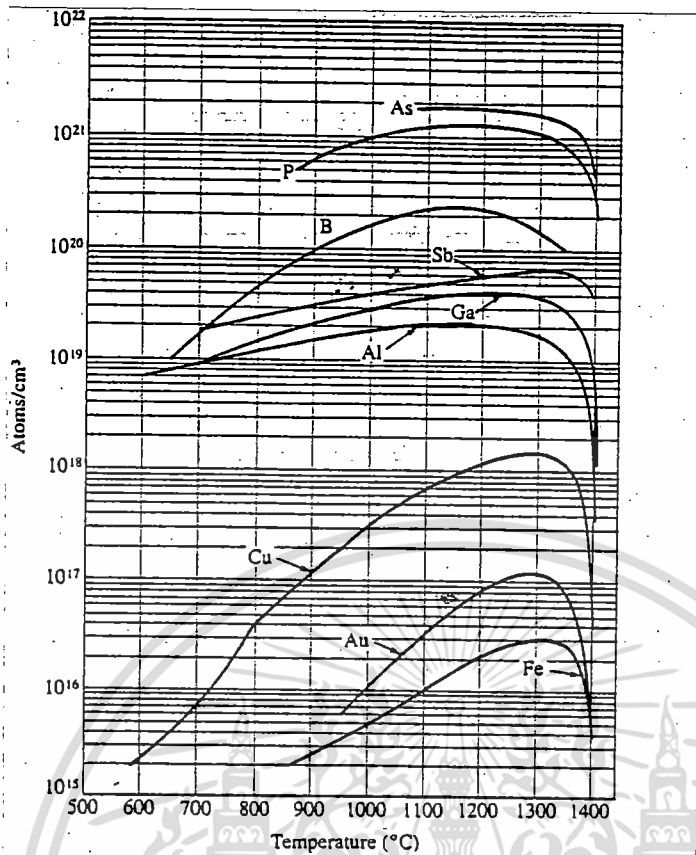
โดยที่ค่า N_0, D_1 และ erfc หาค่าได้จากกราฟในรูปที่ 3.3, 3.4 และ 3.5 ตามลำดับและจำนวนความหนาแน่นอะตอมสารเจือทั้งหมด (Q) จากการ predeposition จะเป็นตามสมการ

$$Q = \int_0^{\infty} N(X, t) dx = \frac{2}{\sqrt{\pi}} N_0 \sqrt{D_1 t_1} \quad (3.2)$$

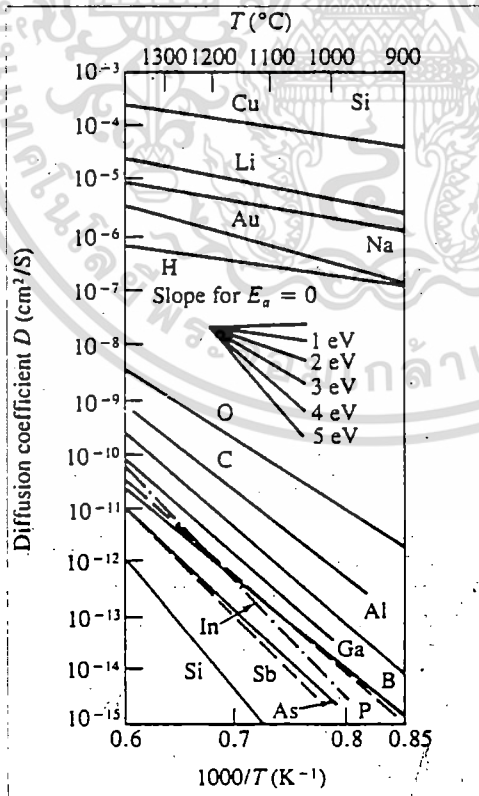
ส่วนความลึกของรอยต่อที่ได้หลังจาก predeposition จะได้โดยเงื่อนไขของเขตของ $N(x, t) = N_{BG}$ ดังนั้นจะได้

$$X_j = \sqrt{4D_1 t_1} \operatorname{erfc}^{-1} \left[\frac{N_{BG}}{N_0} \right] \quad (3.3)$$

เมื่อ N_{BG} คือ ความหนาแน่นอะตอมสารเจือพื้นฐาน (Background Doping Concentration) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และสงวนสิทธิ์ในเนื้อหาและข้อมูลทั้งหมดโดยไม่เปิดเผยหรือจำหน่าย การคัดลอกหรือการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



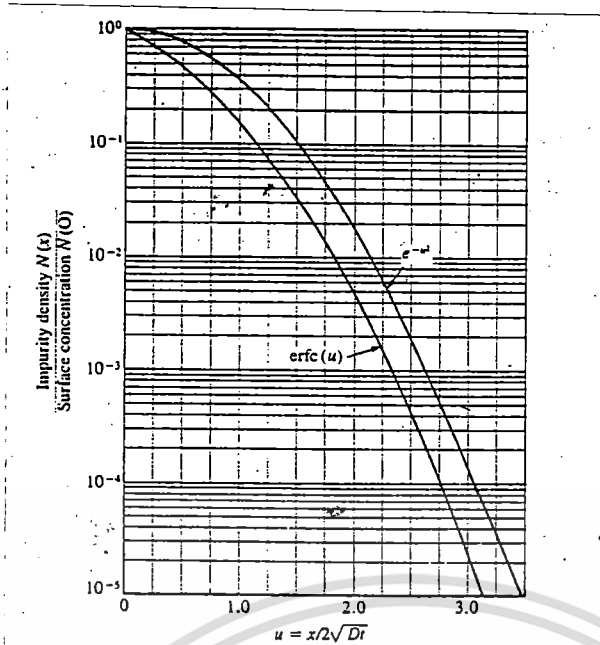
รูปที่ 3.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Solid solubility ของสารเจือต่างๆ ในซิลิกอน



รูปที่ 3.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมสารเจือต่างชนิดในแผ่นผลึก

ซิลิกอนกับบอรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 กราฟนอร์มอลไลซ์เพื่อหาการกระจายของสารเจือทั้งแบบ erfc และ Gaussian

ตารางที่ 3.1 แสดงสารประกอบแหล่งกำเนิดสารเจือ [5]

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3.2 การขับลึก (Drive-in)

การขับลึกเป็นกระบวนการที่ทำต่อจากการ predeposition เพื่อที่จะทำให้อะตอมสารเจือแพร่ลึกเข้าไปในผลึกซิลิกอนตามต้องการซึ่งในขั้นตอนนี้มักจะมีการสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ที่ผิวของแผ่นผลึกด้วยเพื่อใช้เป็นหน้ากากในการแพร่อะตอมสารเจือครั้งต่อไป อย่างไรก็ตามการกำหนดช่วงเวลาของการขับลึกอุณหภูมิและก๊าซในบรรยากาศทำให้สามารถกำหนดค่าต่อไปนี้ได้คือ

1. ความลึกของรอยต่อในขั้นสุดท้าย
2. ความหนาของชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้นใหม่เหนือบริเวณที่ถูก predeposition
3. การกระจายของอะตอมสารเจือในผลึกซิลิกอนอย่างถูกต้อง

โดยที่ลักษณะการกระจายของอะตอมสารเจือหลังการขับลึกจะเป็นไปตามกราฟดังรูปที่ 3.6 ซึ่งเป็นการกระจายแบบ Gaussian ซึ่งสามารถคำนวณหาได้โดยอาศัยสมการ

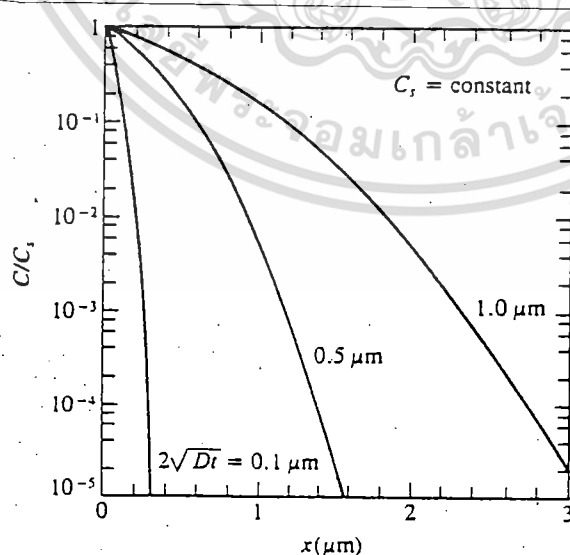
$$N_{(x,t)} = \frac{Q \cdot \exp(-x^2)}{\sqrt{XD_2t_2} \cdot 4D_2t_2} \quad (3.4)$$

D_2 คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ในการขับลึก (cm²/s)

t_2 คือ เวลาในการขับลึก (s)

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

$$X_j^2 = 4D_2t_2 \cdot \ln\left(\frac{Q}{N_{BG} \sqrt{XD_2t_2}}\right) \quad (3.5)$$



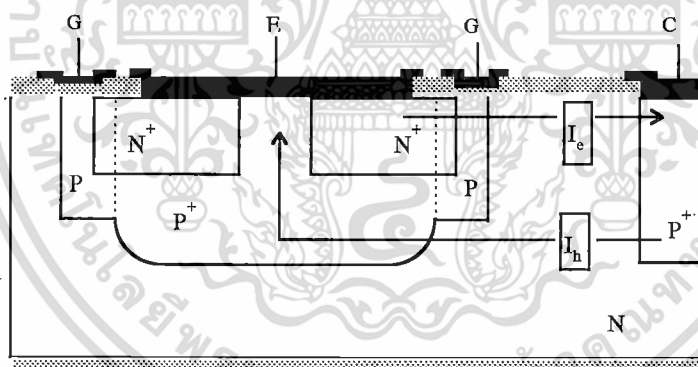
รูปที่ 3.6 การกระจายความหนาแน่นอะตอมสารเจือหลังจากการ predeposition และการขับลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4 การแพร่สารเจือในส่วน P-base

ในจำนวนตัวแปรทางโครงสร้างทั้งหมดที่มีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ IGBT บริเวณ P-base เป็นส่วนที่มีความสำคัญมากที่สุดเนื่องจากในกรณีที่ความหนาแน่นอะตอมสารเจือในส่วน P-base มีค่านำน้นคือความต้านทานผิวของชั้น P-base ที่อยู่ใต้ชั้น N^+ -emitter จะมีค่าน้อยลง ทำให้ความหนาแน่นของกระแสแลตซ์ (latching current) เพิ่มขึ้นหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือความหนาแน่นของกระแสที่จะทำให้เกิดปรากฏการณ์แลตซ์-ออฟฟลัดลง แต่ในทางตรงกันข้ามจะส่งผลให้แรงดันขีดเริ่มมีค่าสูงขึ้นด้วย ดังนั้นในการออกแบบความหนาแน่นอะตอมสารเจือในชั้น P-base จึงต้องคำนึงถึงสองสิ่งที่กล่าวมา สำหรับในการวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบความหนาแน่นอะตอมสารเจือไว้ที่ระดับประมาณ 10^{16} - 10^{17} cm⁻³

อย่างไรก็ตาม สำหรับการออกแบบโครงสร้างเพื่อแก้ปัญหาที่กล่าวมาข้างต้นสามารถทำได้โดยออกแบบให้ชั้น P-base มี 2 ส่วน ดังแสดงในรูปที่ 3.7 ส่วนแรกจะเป็นส่วน P-base ที่มีความหนาแน่นอะตอมสารเจือขึ้นอยู่กับแรงดันขีดเริ่มต้นที่ต้องการและส่วนที่สองจะเป็นส่วน P^+ ซึ่งมีความหนาแน่นอะตอมสูง ทั้งนี้เพื่อลดค่าความต้านทาน R_p ของชั้น P-base บริเวณที่อยู่ใต้ชั้น N^+ -emitter ทำให้ระดับความหนาแน่นกระแสที่จะทำให้เกิดปรากฏการณ์แลตซ์-ออฟฟลัดลง ซึ่งจะเรียกชั้น P^+ ที่เพิ่มขึ้นมานี้ว่าชั้น " P^+ -sinker"



รูปที่ 3.7 โครงสร้าง IGBT ที่มีส่วน P^+ -sinker ในโครงสร้าง

3.3 ความกว้างของชั้น N-base

จากทฤษฎี IGBT พบว่าความกว้างของชั้น N-base มีผลต่ออัตราการขยายกระแสของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ P-N-P ในโครงสร้าง IGBT ดังนั้นจึงมีผลโดยตรงต่อปริมาณกระแสโวลต์ที่ถูกฉีดเข้าไปยังชั้น N-base ซึ่งเท่ากับส่งผลต่อความสามารถในการนำกระแสของ IGBT ในสภาวะนำกระแสไปหน้าด้วย ทั้งนี้เนื่องจากโวลต์ที่ถูกฉีดเข้าไปในชั้น N-base จะทำให้เกิดการมอดดูเลตสภาพ นำส่งผลให้ความต้านทานในสภาวะนำกระแสของอุปกรณ์ลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางปฏิบัติการเปลี่ยนแปลงความกว้างของชั้น N-base โดยใช้โครงสร้างในแนวดิ่งทำได้ยากและสิ้นเปลือง ดังนั้นในการออกแบบ เพื่อศึกษาผลของความกว้างของชั้น N-base ในงานวิจัยนี้ จึงเลือกที่จะใช้โครงสร้างในแนวระนาบในการศึกษาผลของความกว้างของชั้น N-base ทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ IGBT ที่มีความกว้างของชั้น N-base หลากๆ ค่า

3.4 การออกแบบและสร้างกระจกต้นแบบ

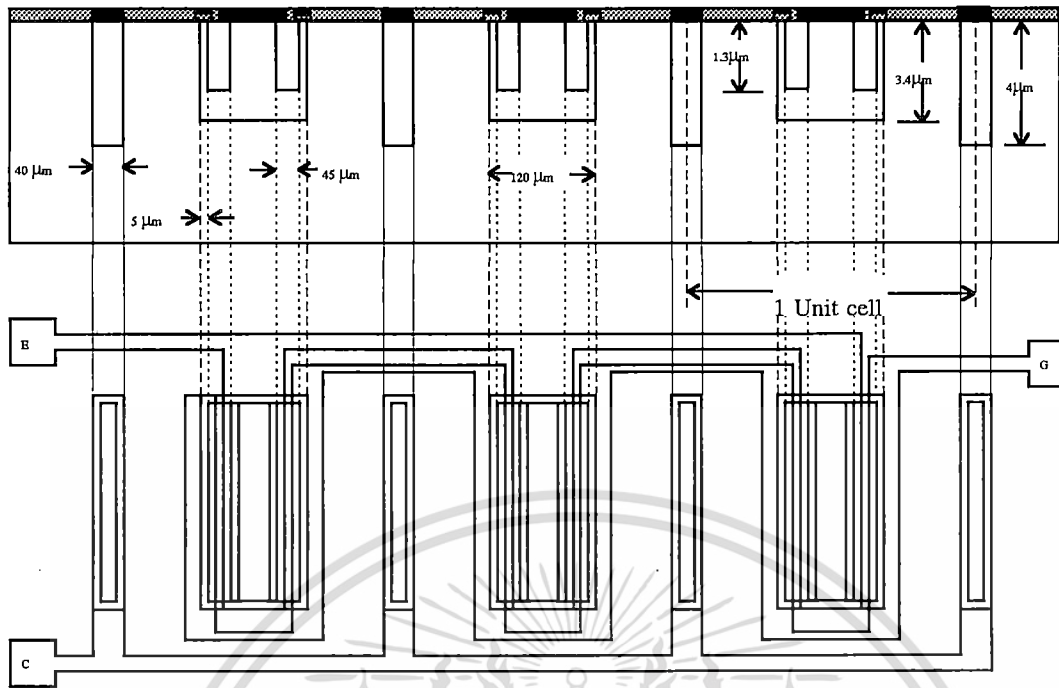
เมื่อทำการศึกษาโครงสร้างและคุณสมบัติของตัวแปรต่างของ IGBT จนละเอียดแล้วจึงทำการออกแบบลวดลายต่างๆ ลงบนกระดาษกราฟต้นแบบ โดยออกแบบให้มีขนาดใหญ่เป็น 50 เท่าของอุปกรณ์จริงด้วยการออกแบบลวดลายทุกชั้นลงบนกระดาษกราฟต้นแบบแผ่นเดียวกัน เพื่อป้องกันการคลาดเคลื่อนจากนั้นจึงนำไปทาบด้วยแผ่นโฟลลิเอสเตอร์บนโต๊ะตัดไมโครคัทเตอร์ เพื่อตัดเป็นลวดลายแต่ละชั้นตามที่ต้องการไว้ แล้วจึงนำต้นแบบที่ได้ไปถ่ายย่อส่วน 50 เท่าลงบนกระจกต้นแบบ (Photo mask) ขนาด 3" x 3" ซึ่งในการวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบกระจกต้นแบบสำหรับสร้างอุปกรณ์ IGBT โครงสร้างในแนวระนาบไว้ทั้งหมดรวม 7 แผ่น โดยเป็นกระจกต้นแบบพิเศษ 1 แผ่น คือ กระจกต้นแบบที่ใช้สำหรับสร้างชั้น P⁺-sinker โดยเป็นกระจกต้นแบบ สำหรับการสร้าง IGBT พื้นฐาน 6 แผ่นด้วยกันดังต่อไปนี้

แผ่นที่ 1	เป็น	P ⁺ - collector mask
แผ่นที่ 2	เป็น	P - base mask
แผ่นที่ 3	เป็น	N ⁺ - emitter mask
แผ่นที่ 4	เป็น	Gate oxide mask
แผ่นที่ 5	เป็น	Contact mask
แผ่นที่ 6	เป็น	Metal mask
(แผ่น 7	เป็น	P ⁺ -sinker [กระจกต้นแบบพิเศษ])

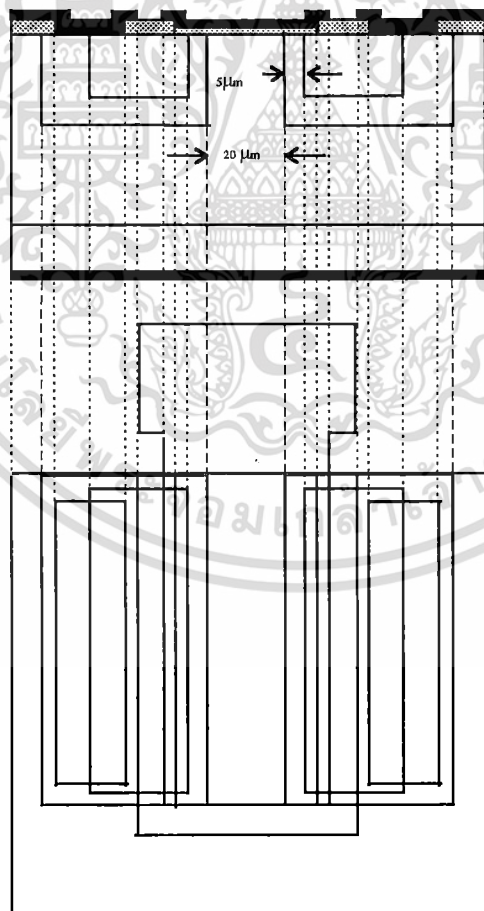
ในการออกแบบโครงสร้างในแนวดิ่ง ได้ทำการออกแบบกระจกต้นแบบ สำหรับสร้างอุปกรณ์ IGBT ในแนวดิ่งไว้ทั้งหมดรวม 5 แผ่นด้วยกันดังต่อไปนี้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

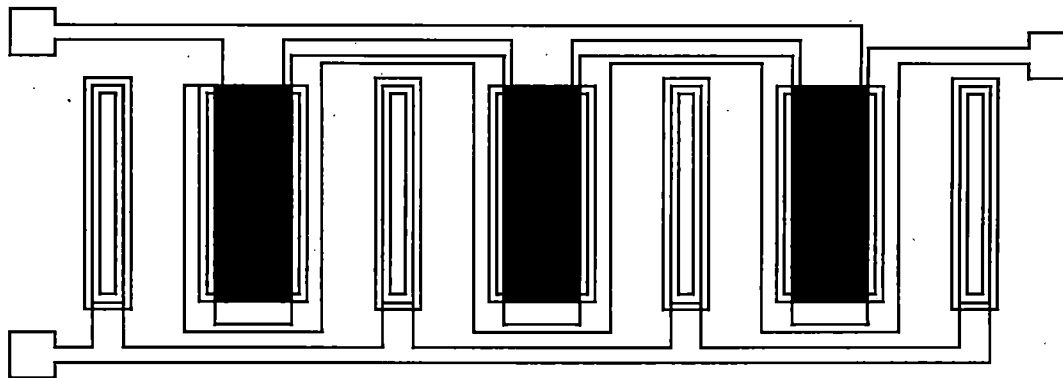


รูปที่ 3.8 ลวดลายทั้งหมดของ IGBT โครงสร้างในแนวระนาบที่ออกแบบบนกระดาษกราฟไข

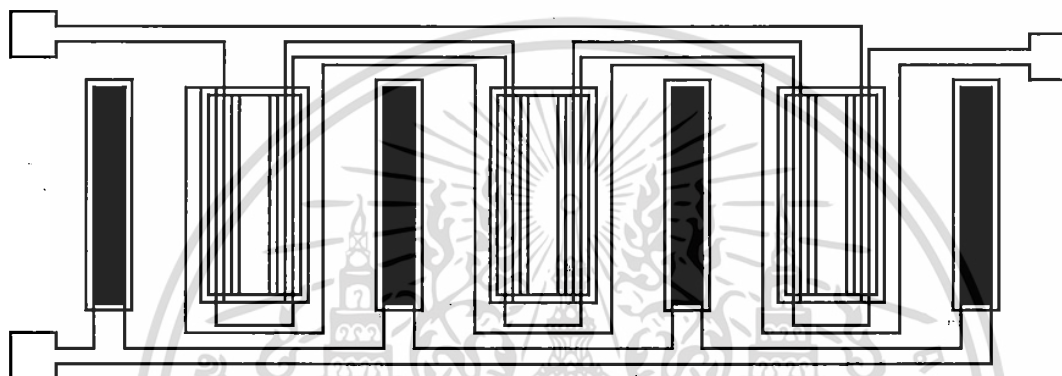


รูปที่ 3.9 ลวดลายด้านบนของ IGBT โครงสร้างในแนวตั้งที่ออกแบบบนกระดาษกราฟไข

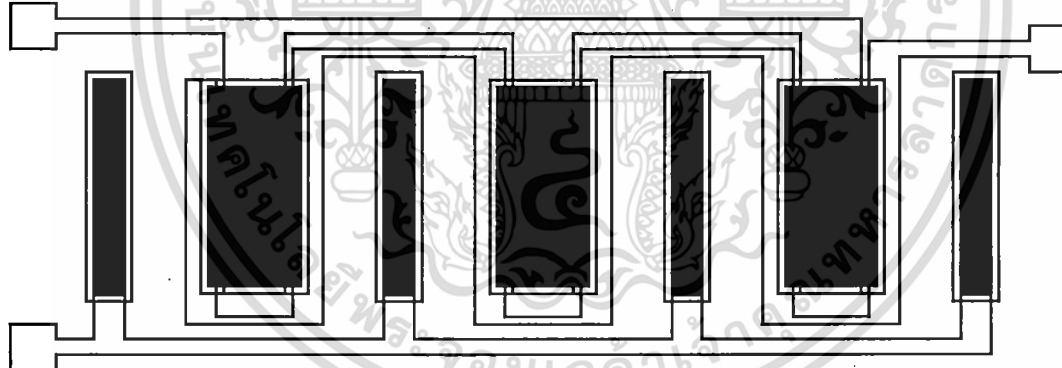
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



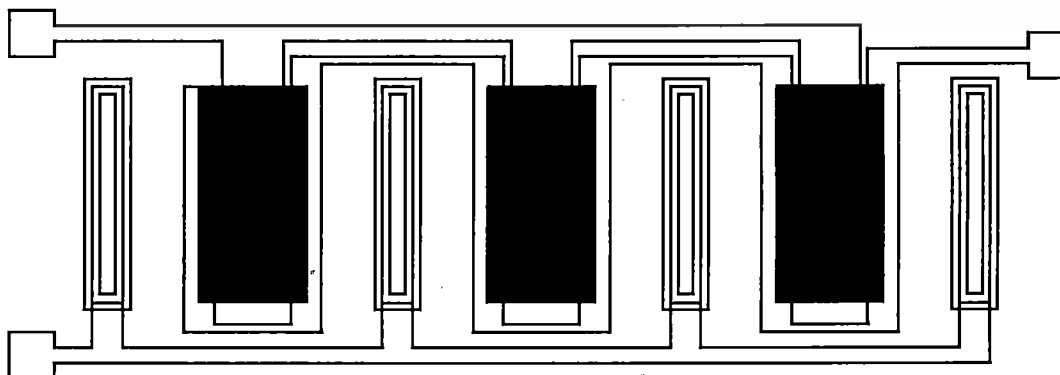
ก.) फिल्मกระจกสำหรับสร้างชั้น N-buffer



ข.) फिल्मกระจกสำหรับสร้างชั้น P⁺-collector

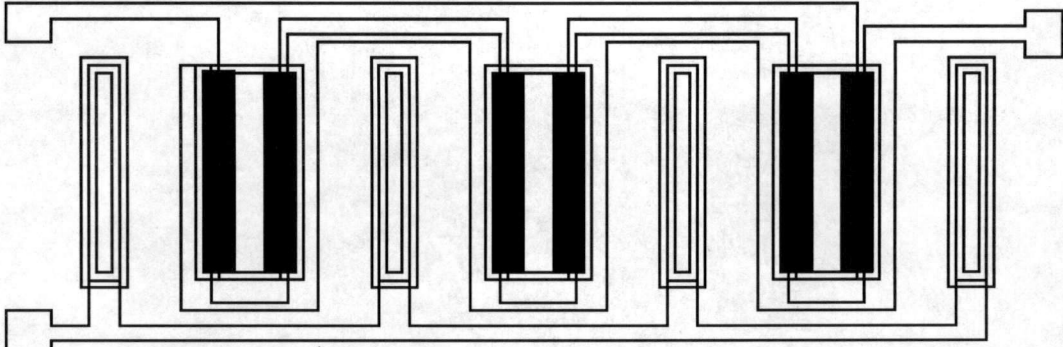


ค.) फिल्मกระจกสำหรับสร้างชั้น P⁺-collector และ P⁺-sinker

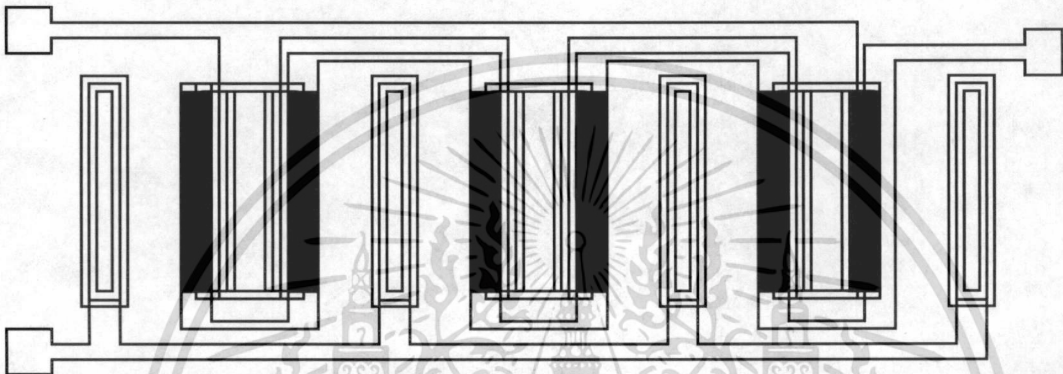


ง.) फिल्मกระจกสำหรับสร้างชั้น P-base

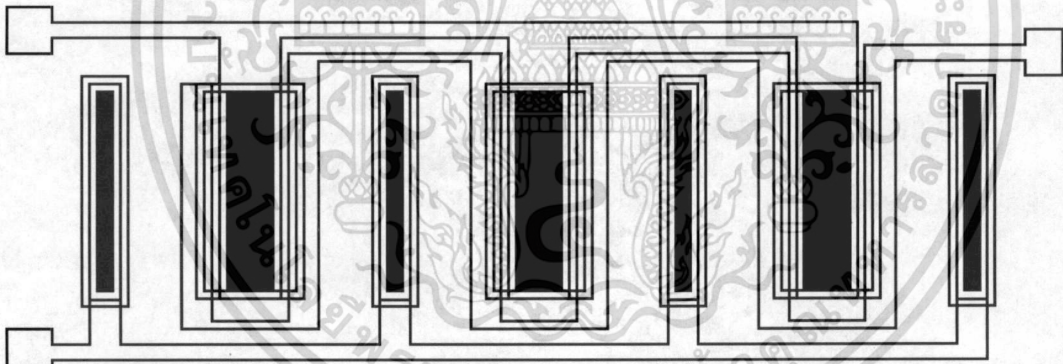
เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันวิจัยและพัฒนาเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



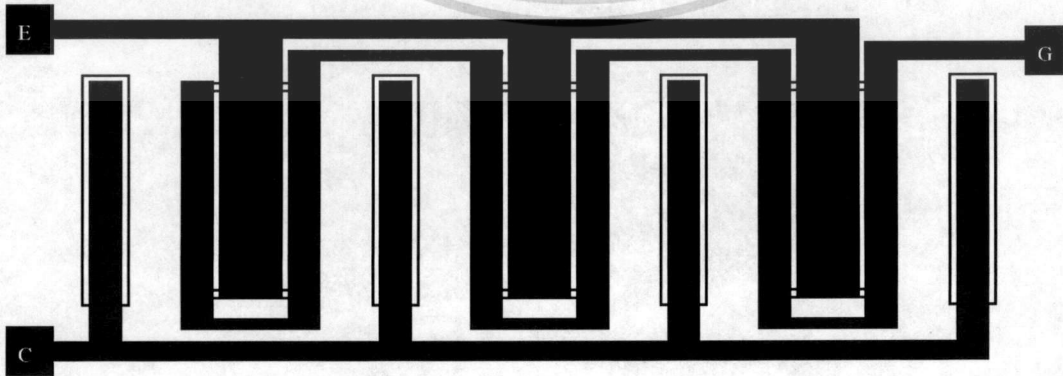
จ.) फिल्मกระจกสำหรับสร้างชั้น N⁺-emitter



ฉ.) फिल्मกระจกสำหรับสร้างเกตออกไซด์

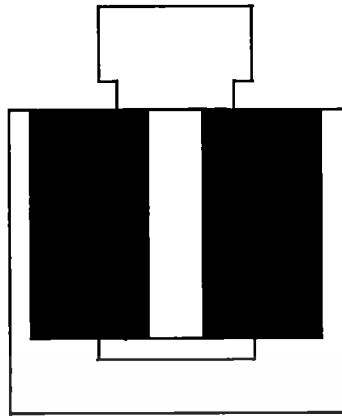


ช.) फिल्मกระจกสำหรับเปิดช่องสัมผัสโลหะ

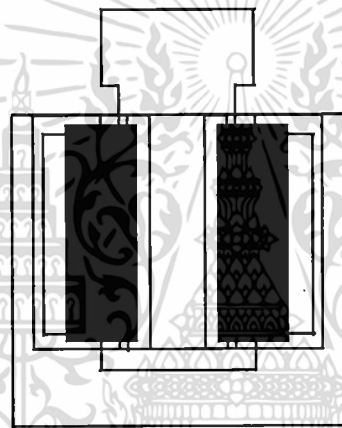


ซ.) फिल्मกระจกสำหรับสร้างขั้วสัมผัสโลหะ

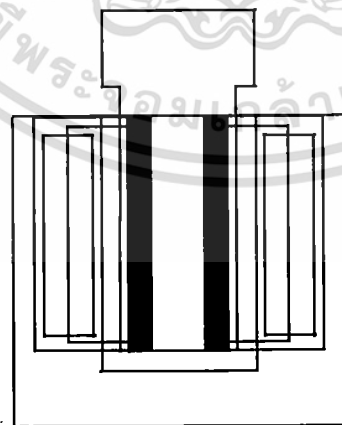
รูปที่ 3.10 फिल्मกระจกที่ออกแบบใช้สำหรับกระบวนการสร้าง IGBT โครงสร้างในแนวนอน
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก.) फिल्मกระจกสำหรับสร้างชั้น P-base

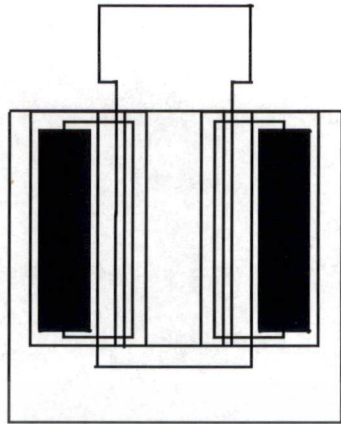


ข.) फिल्मกระจกสำหรับสร้างชั้น N⁺-emitter

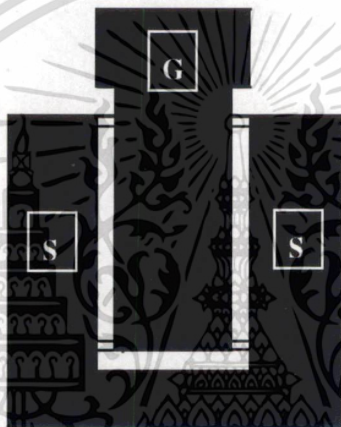


ค.) फिल्मกระจกสำหรับสร้างเกตออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

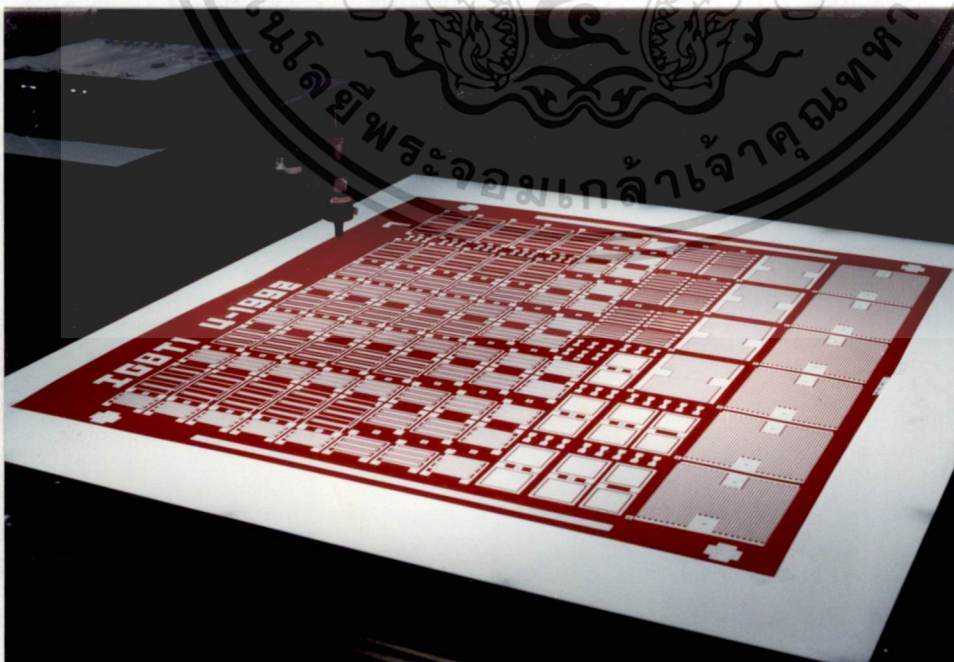


ง.) फिल्मกระจกสำหรับเปิดช่องสัมผัสโลหะ



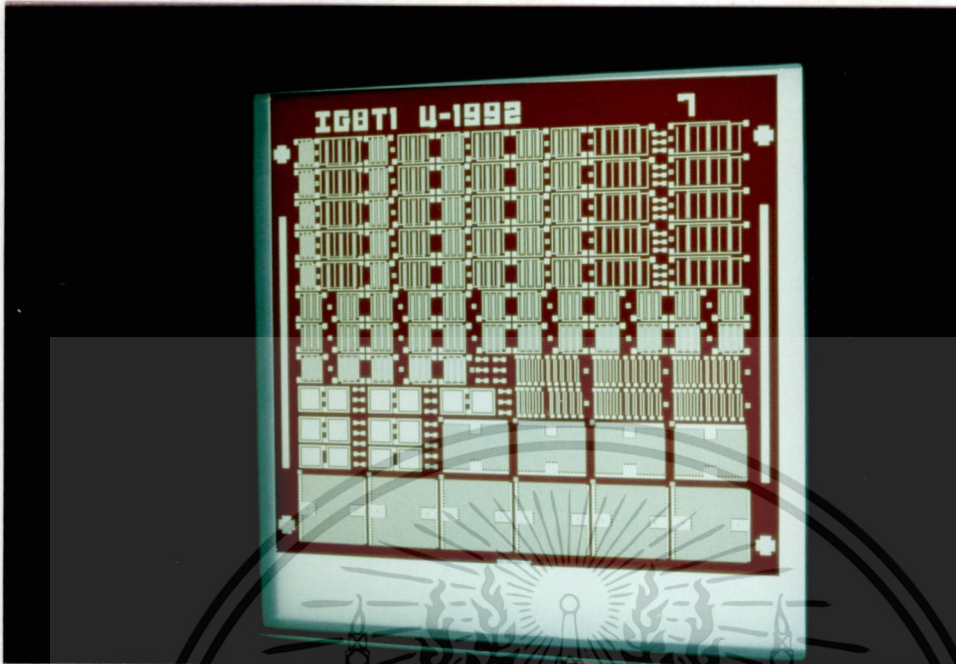
จ.) फिल्मกระจกสำหรับสร้างขั้วสัมผัสโลหะ

รูปที่ 3.11 फिल्मกระจกที่ออกแบบใช้สำหรับกระบวนการสร้าง IGBT โครงสร้างในแนวดิ่ง

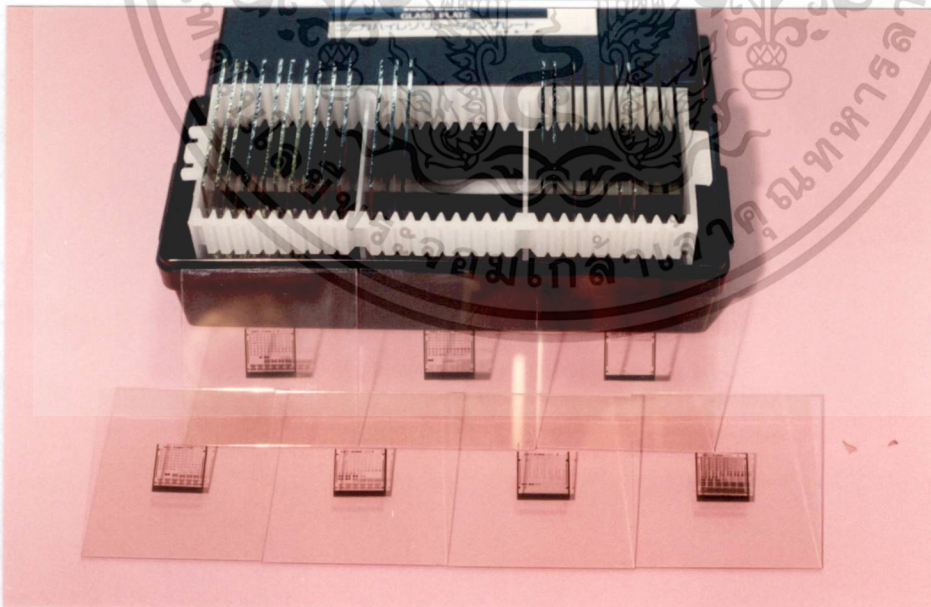


รูปที่ 3.12 การตัดลวดลายต้นแบบบนแผ่นโพลีเอสเตอร์ด้วยเครื่องไมโครคัตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 แผ่นโพลีเอสเตอร์ต้นแบบที่ตัดเสร็จแล้ว



รูปที่ 3.14 กระจกต้นแบบที่พร้อมสำหรับกระบวนการสร้างอุปกรณ์ IGBT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

กระบวนการสร้าง IGBT

IGBT ที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 จะใช้กระบวนการสร้างในแนวระนาบ (planar process technology) เป็นแบบเกตโลหะ (metal gate) และใช้กระบวนการแพร่สารเจือด้วยความร้อน (thermal diffusion) ซ้อนกัน 2 ครั้ง คล้ายกับกระบวนการสร้างมอสเฟตกำลังแบบดีมอส เพียงแต่เปลี่ยนส่วน N^+ -drain ให้เป็นส่วน P^+ -collector โดยสร้างที่ด้านหน้าหรือด้านหลังของแผ่นผลึก ตามลักษณะชนิดของโครงสร้าง IGBT

4.1 การลำดับขั้นตอนการสร้าง IGBT

ตารางที่ 4.1 สรุปลำดับขั้นตอนทั้งหมดที่ใช้สร้าง IGBT

ขั้นตอนที่	ชื่อกระบวนการ
1	การเลือกคุณสมบัติของแผ่นผลึกเริ่มต้น
2	การทำความสะอาด
3	การสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์หนาประมาณ 5000 อังสตรอม
4	โฟโตลิโทกราฟี I ใช้น้ำยาไวแสงชนิดลบ เพื่อสร้างส่วน P^+ -collector <ul style="list-style-type: none">- การกัดซิลิกอนไดออกไซด์- การลอกฟิล์ม- การทำความสะอาด
5 *	การแพร่สารเจือโบรอนส่วน P^+ -collector
6	การขั้วลึกรอยต่อส่วน P^+ -collector และสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ใหม่ <ul style="list-style-type: none">- โฟโตลิโทกราฟี II ใช้น้ำยาไวแสงชนิดลบ เพื่อสร้างส่วน P-base- การกัดซิลิกอนไดออกไซด์- การลอกฟิล์ม- การทำความสะอาด

หมายเหตุ *ขั้นตอนที่ 5 เมื่อสร้างเป็น IGBT ในแนวตั้ง จะแพร่สารเจือส่วน P^+ -collector ด้านหลังแผ่นผลึกและ เมื่อสร้างเป็น IGBT ในแนวระนาบ จะแพร่สารเจือส่วน P^+ -collector ด้านหน้าแผ่นผลึก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

ขั้นตอนที่	ชื่อกระบวนการ
7	การแพร่สารเจือโบรอนส่วน P-base การขัปลึกรอยต่อส่วน P-base และสร้างชั้นซีกอนไดออกไซด์ใหม่
8	โฟโวลีโทกราฟี III ใช้น้ำยาไวแสงชนิดลบ เพื่อสร้างส่วน N ⁺ -source - การกัดซีกอนไดออกไซด์ - การลอกฟิล์ม - การทำความสะอาด
9	การแพร่สารเจือฟอสฟอรัสส่วน N ⁺ -source การขัปลึกรอยต่อส่วน N ⁺ -source และสร้างชั้นซีกอนไดออกไซด์ใหม่
10	โฟโวลีโทกราฟี IV ใช้น้ำยาไวแสงชนิดลบ เพื่อสร้างส่วนเกต - การกัดซีกอนไดออกไซด์ - การลอกฟิล์ม - การทำความสะอาด
11	การสร้างชั้นซีกอนไดออกไซด์สำหรับส่วนเกต หนาประมาณ 1000 อังสตรอม
12	โฟโวลีโทกราฟี V ใช้น้ำยาไวแสงชนิดลบ เพื่อสร้างส่วนสัมผัสอะลูมิเนียม - การกัดซีกอนไดออกไซด์ - การลอกฟิล์ม - การทำความสะอาด
13	การเคลือบอะลูมิเนียมในสุญญากาศด้านหน้าแผ่นผลึก
14	โฟโวลีโทกราฟี VI ใช้น้ำยาไวแสงชนิดบวก เพื่อสร้างลวดลายอะลูมิเนียมส่วนเกตและส่วนอิมิตเตอร์ - การกัดอะลูมิเนียม - การลอกฟิล์ม - การทำความสะอาด
15	การเคลือบอะลูมิเนียมในสุญญากาศด้านหลังแผ่นผลึก เพื่อสร้างเป็นส่วนคอลเลคเตอร์
16	การชินเตอริง
17	การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าครั้งแรก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

ขั้นตอนที่	ชื่อกระบวนการ
18	การเก็บบรรจุดีมอส <ul style="list-style-type: none"> - การตัดแยกชิพ - การติดชิพบนตัวถัง - การต่อสาย - การฉีกฝา
19	การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าครั้งสุดท้าย

4.2 รายละเอียดของขั้นตอนสร้าง IGBT

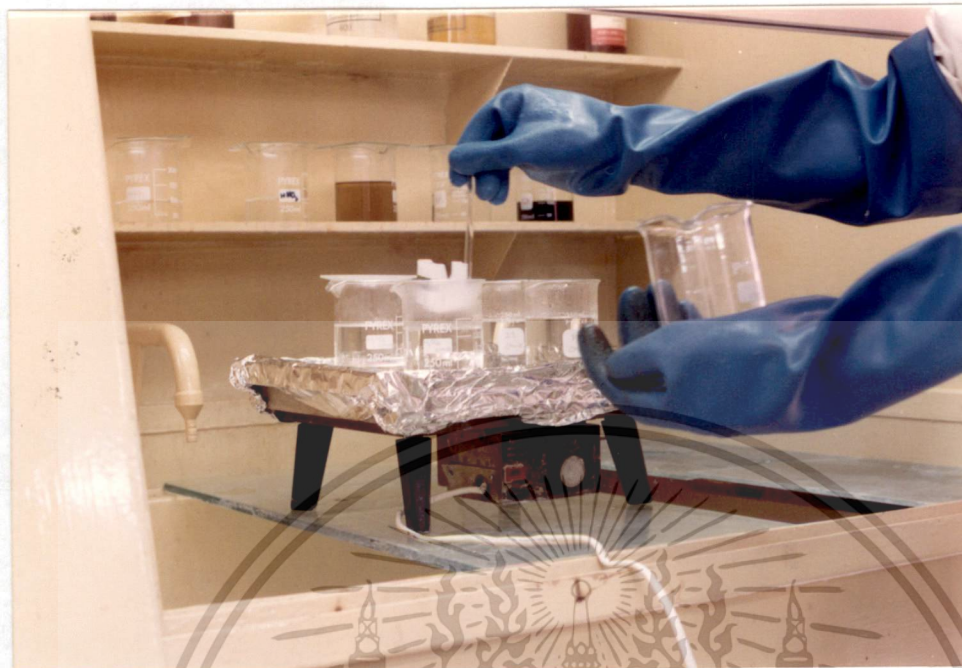
1. เลือกแผ่นผลึกเริ่มต้น

- ใช้แผ่นผลึกซิลิกอนรูปเดี่ยว (single crystal) ที่มีผิวหน้าขัดมันเป็นกระจกเงา (mirror polished)
- ชนิด N ระบาย (100) แผ่นผลึกหนา 180-400 μm
- สภาพความต้านทานของชั้นฐานรอง (N_{sub} หรือ N-base) 5-12 $\Omega\text{-cm}$

2. การทำความสะอาดผิวแผ่นผลึกเริ่มต้น (Initial cleaning) แสดงในรูปที่ 4.1

- ทำความสะอาดผิวด้วยน้ำบริสุทธิ์ (Deionized water) ในเครื่องสันความถี่สูง
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ ที่มีค่าความต้านทานสูง $\approx 18 \text{ M}\Omega$
- กัดผิวหน้าแผ่นผลึกด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) 5% เป็นเวลา 2 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- ต้มในกรดไนตริก (HNO_3) เป็นเวลา 10 นาที เพื่อกำจัดเศษโลหะหนักที่ผิว
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- ต้มในน้ำบริสุทธิ์ 2 ครั้ง ครั้งละ 5 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ต้มในไตรโคลเอททีลีน (Trichloethylene) เป็นเวลา 5 นาที เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกประเภทไขมัน
- ล้างด้วยอะซิโตน (Acetone) ในเครื่องสันความถี่สูงเป็นเวลา 3 นาที เพื่อกำจัดฝุ่นละอองส่วนที่ยังติดค้างอยู่และชะล้างไตรโคลเอททีลีน
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ และเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 การทำความสะอาดแผ่นผลึกซิลิกอน

3. กระบวนการออกซิเดชันครั้งแรก (First oxidation)

การทำความสะอาดก่อนกระบวนการออกซิเดชัน

- จุ่มลงในกรด HF 5% เป็นเวลา 10-20 วินาที เพื่อกำจัดชั้น Oxide ชั้นบางๆที่เกิดขึ้นและกำจัดสิ่งสกปรกเจือปนอื่น ๆ ออกไป
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

ทำการสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ ให้มีขนาดความหนาไม่น้อยกว่า 5,000 Å ซึ่ง เพื่อใช้สร้างเป็นหน้ากปกป้องกันการแพร่สารเจือ ดังนั้นจึงต้องทำกระบวนการออกซิเดชัน ดังในรูปที่ 4.2 โดยนำแผ่นผลึกซิลิกอนที่ทำความสะอาดแล้ว ทิ้งไว้ในบรรยากาศของก๊าซออกซิเจนที่อุณหภูมิ 1,100°C โดยมีรายละเอียดดังนี้ คือ

เงื่อนไขและขั้นตอนของกระบวนการ

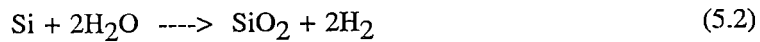
- ทำการออกซิเดชัน แบบแห้ง เป็นเวลา 2 ชม.
- ทำการออกซิเดชัน แบบชื้น เป็นเวลา 1 ชม.
- ทำการออกซิเดชัน แบบแห้ง เป็นเวลา 2 ชม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการการออกซิเดชัน แบบแห้ง



สมการการ Oxidation แบบชื้น

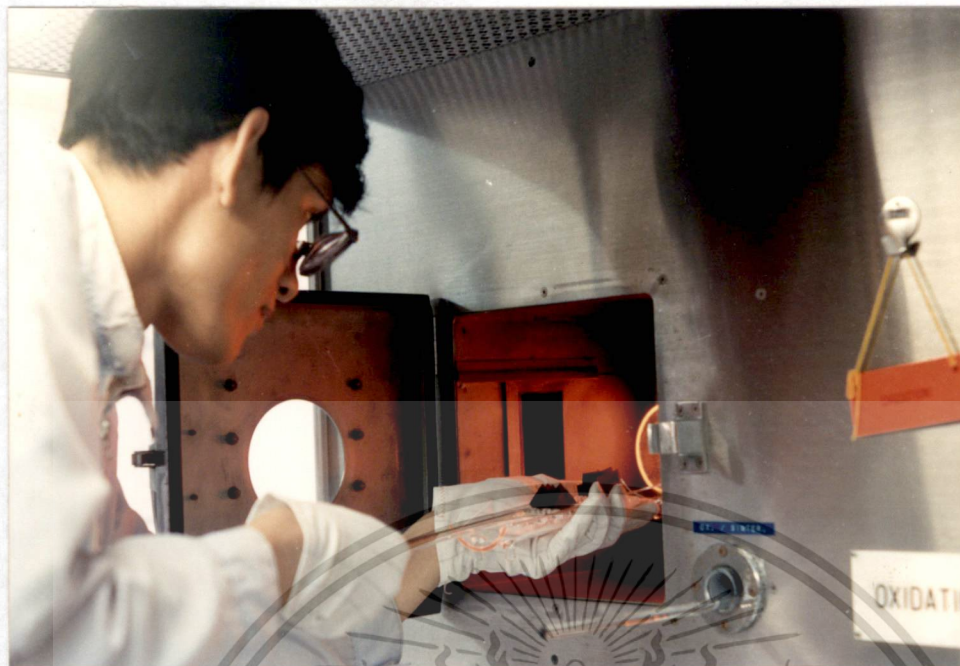


รายละเอียดกระบวนการออกซิเดชัน ครั้งแรก

- ปรับอุณหภูมิเตาออกซิเดชันให้คงที่ ที่ $T=1100^\circ\text{C}$
- ปรับก๊าซ O_2 ไหลผ่านเข้าไปในเตาด้วยอัตราการไหล 1.2 ลิตร/นาที
- นำแผ่นซิลิกอนวางลงบน Boat นำไปอุ่นที่ปากเตา เพื่อให้แผ่นซิลิกอนปรับอุณหภูมิ เป็นเวลา 5 นาที
- ค่อยๆดัน Boat เข้าไปในกลางเตาอย่างช้าๆ โดยใช้เวลาประมาณ 5 นาที
- ทิ้งแผ่นซิลิกอน ไว้ในเตา 2 ชั่วโมง
- ปลอ่ยไอน้ำเข้าไปในเตาพร้อมก๊าซ O_2 ที่ไหลด้วยอัตรา 1.0 ลิตร/นาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- หยุดการให้ไอน้ำเปิดเฉพาะก๊าซ O_2 ที่มีอัตราการไหล 1.2 ลิตร/นาที เป็นเวลาอีก 2 ชั่วโมง
- เสร็จแล้วค่อย ๆ ดึง Boat ให้ออกมาจากเตาอย่างช้าๆ โดยใช้เวลา 5 นาที
- ทิ้งไว้ที่ปากเตาราว 5 นาที เพื่อให้ปรับอุณหภูมิลดลง จากนั้นจึงนำแผ่นผลึกออกจากเตา

เมื่อสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์เสร็จแล้วและพิจารณาความหนาจากสีของผิวผลึกพบว่าผิวหน้าผลึกเป็นสีเขียว และนำไปเทียบกับตารางที่ ก1 ภาคผนวก ก ความหนาของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์มีโอกาสที่จะมีความหนาเป็น $7,200 \text{ \AA}$ หรือ $5,200 \text{ \AA}$ แต่เมื่อนำแผ่นซิลิกอนนี้ไปผ่านกระบวนการโฟโต้ลิโทกราฟี I แล้วทำการกัดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ออกด้วยสารละลายบัฟเฟอร์ ซึ่งกัดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ออกได้ด้วยอัตรา $1,000 \text{ \AA/s}$ ปรากฏว่าใช้เวลา 5 นาที และวัดความหนาจากกราฟ C-V ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ที่ได้สร้างขึ้นนั้นมีความหนาประมาณ $5,200 \text{ \AA}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 เตาที่ใช้ในกระบวนการออกซิเดชัน

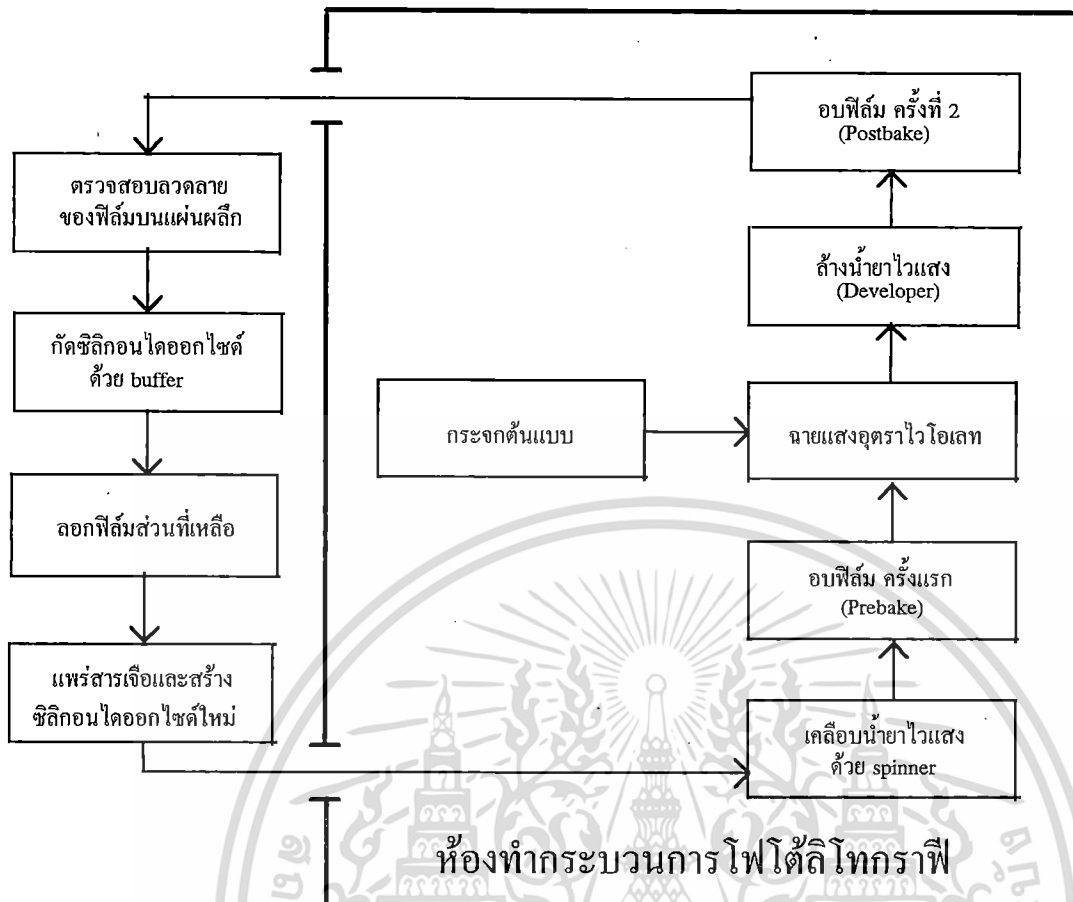
4. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี (Photolithography) I

กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี เป็นกระบวนการพิมพ์ลวดลายบนแผ่นผลึกซิลิกอน เพื่อเปิดช่องของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ออก สำหรับการแพร่สารเจือหรือเปิดช่องเพื่อทำขั้วโลหะ โดยใช้เทคนิคการถ่ายภาพ (photo-graphic technique) เข้าช่วย ขนาดของช่องเปิดซิลิกอนไดออกไซด์สามารถสร้างให้มีขนาดเล็ก ๆ ได้ และความถูกต้องแม่นยำที่ได้รับจะขึ้นกับการปรับ (alignment) และความคมชัดของกระจกต้นแบบ สำหรับขั้นตอนของกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี แบ่งได้เป็น 2 ส่วน ในส่วนแรกเป็นการทำฟิล์ม (ส่วนที่อยู่ในกรอบสี่เหลี่ยม) และส่วนที่สองเป็นการกัดซิลิกอนไดออกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 4.3

กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี สามารถใช้น้ำยาไวแสงได้ทั้งชนิดลบและชนิดบวก แต่ในขั้นตอนนี้จะใช้น้ำยาไวแสงชนิดลบ (น้ำยา waycoat) เคลือบบนแผ่นผลึกซิลิกอน (ส่วนลำดับขั้นตอนการใช้น้ำยาไวแสงชนิดบวกจะได้กล่าวในโอกาสต่อไป) สำหรับรายละเอียดของกระบวนการโฟโตลิโทกราฟีมีดังนี้ คือ

- อบแห้งเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 60 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสง โดยใช้อุปกรณ์ "spinner" ความเร็ว 5000 รอบ/นาที เป็นเวลา 30 วินาที
- อบครั้งแรก (prebake) ให้น้ำยาแห้งที่อุณหภูมิ 90-100 °C เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 โพลีชาร์ทแสดงลำดับขั้นตอนของกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี

- ฉายแสงผ่านกระจกต้นแบบ แผ่นที่ 1 ด้วยอุปกรณ์ "mask aligner" ซึ่งจะให้แสงอุตราไวโอเลตออกมาแหล่งฉายแสง คือ หลอดเมอร์คิวรี ($\lambda = 5000$ อังสตรอม) เป็นเวลา 10 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 4.4
- การล้างภาพ
 - จุ่มในน้ำยาล้างภาพ (xylene) 2 ครั้ง ๆ ละ 1 นาที
 - จุ่มในน้ำยาทำความสะอาด (isopropyl) 3 ครั้ง ๆ ละ 30 วินาที
 - ล้างในน้ำบริสุทธิ์ แล้วเป่าให้แห้งทันทีด้วยก๊าซไนโตรเจน
- อบครั้งที่สอง (postbake) ให้แผ่นฟิล์มที่เหลืออยู่แห้งที่อุณหภูมิ 90-100 °C เป็นเวลา 30 นาที
- ทาด้านหลังแผ่นผลึกด้วยน้ำยาไวแสง waycoat แล้วนำไปอบแห้งอีกครั้ง เป็นเวลา 30 นาที
- นำไปกัดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ด้วยสารละลายเคมี ซึ่งมีส่วนผสมของกรดกัดแก้วเป็นหลัก ทำการละลายชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ตรงบริเวณที่ต้องการเปิดออก สารละลายที่ใช้ในการกัดซิลิกอนไดออกไซด์นี้ เรียกว่า สารละลาย buffer มีอัตราการกัดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ประมาณ 1000 อังสตรอม/นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- นำไปลอกชั้นสารไวแสงชนิดลบที่ยังคงค้างอยู่บนแผ่นผลึกซิลิกอนออก โดย
 - ต้มในกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) เป็นเวลา 10 นาที
 - ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
 - ต้มในน้ำบริสุทธิ์ เป็นเวลา 5 นาที
 - ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
 - เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- แล้วนำไปทำความสะอาดผิวผลึก
 - ต้มในไตรโคโลโรเอททีลีน (Trichloroethylene) เป็นเวลา 5 นาที เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกประเภทไขมัน
 - ล้างด้วยอะซิโตน (Acetone) ในเครื่องสั่นความถี่สูง เป็นเวลา 3 นาที
 - ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
 - จุ่มในกรดกัดแก้ว HF 5% เป็นเวลา 20 วินาที
 - ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
 - เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



รูปที่ 4.4 การถ่ายภาพจากกระจกต้นแบบลงบนแผ่นผลึกซิลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.กระบวนการแพร่สารเจือ และ ขับลิท ส่วน P⁺-collector

กระบวนการแพร่สารเจือ เป็นกระบวนการควบคุมปริมาณและการกระจายความหนาแน่นอะตอมของสารเจือที่เติมให้แก่แผ่นผลึกซิลิกอน ที่อุณหภูมิสูง 800 - 1000 °C เป็นผลให้เกิดเป็นรอยต่อพี-เอ็นขึ้น สำหรับการแพร่อะตอมสารเจือในแผ่นผลึกซิลิกอน โบรอนจะเป็นสารเจือที่แพร่หลายสำหรับสร้างเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี ในขณะที่ฟอสฟอรัสจะใช้สร้างเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น โดยแหล่งจ่ายอะตอมสารเจือเหล่านี้จะมาจากหลาย ๆ ลักษณะ คือ แหล่งจ่ายสารเจือแผ่นแข็ง เช่น BN และ SiP₂O₇ เป็นต้น แหล่งจ่ายสารเจือของเหลว เช่น BBr₃ และ POCl₃ เป็นต้น และแหล่งจ่ายสารเจือก๊าซ เช่น B₂H₆ และ PH₃ เป็นต้น

ในทางปฏิบัติกระบวนการแพร่จะแบ่งได้ออกเป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้ คือ

1. ขั้นตอนการแพร่สารเจือ predeposition เป็นการแพร่ขั้นต้น เพื่อกำหนดและควบคุมปริมาณของสารเจือที่จะเข้าไปในแผ่นผลึกของสารกึ่งตัวนำ
2. ขั้นตอนการขับลิท (drive in) เป็นขั้นตอนที่ทำต่อเนื่องจากขั้นตอน predeposition ทั้งนี้ เพื่อควบคุมความลึกของรอยต่อ และกำหนดลักษณะการกระจายของสารเจือที่เข้าไปในผลึกสารกึ่งตัวนำ

5.1 ขั้นตอนการแพร่อะตอมสารเจือ โบรอน

การแพร่สารเจือโบรอน เพื่อสร้างเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี ในส่วน P⁺-collector ด้วยแหล่งจ่ายอะตอมสารเจือ BN (A-grade) ที่อุณหภูมิ 950 °C ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ซึ่งมีเงื่อนไขต่าง ๆ ดังนี้

- ทำการ activation แหล่งจ่ายสารเจือโบรอนเป็นเวลา 30 นาที ในบรรยากาศของก๊าซออกซิเจน อัตราการไหล 0.6 ลิตร/นาที

- แล้วทำการ stabilize 30 นาที ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน ที่มีอัตราการไหล 0.6 ลิตร/นาที เพื่อให้อะตอมสารเจือกระจายอย่างสม่ำเสมอ และได้ก๊าซออกซิเจนที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา ออกจากระบบให้มากที่สุด เพราะก๊าซออกซิเจนที่เหลือจะสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ ซึ่งจะเป็หน้าปกป้องกันการแพร่สารเจือ

- จากนั้นทำการแพร่สารเจือ (predeposition) โดยนำแผ่นผลึกที่ได้เปิดช่องซิลิกอนไดออกไซด์เรียบร้อยแล้วเข้าไป พร้อมกับแหล่งจ่ายสารเจือ เป็นเวลา 30 นาที ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 0.6 ลิตร/นาที

- หลังจากทำการแพร่สารเจือเสร็จแล้ว จึงนำไปลอกชั้น borosilicate glass (BSG) โดย

- จุ่มแผ่นผลึกลงใน กรดแก้ว 5% เป็นเวลา 15 วินาที

- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์

- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

- วัดค่าสภาพต้านทานแผ่น (Sheet resistivity) เพื่อตรวจสอบว่าอะตอมสารเจือโบรอนได้แพร่

เข้าไปในแผ่นผลึกซิลิกอน ตามที่ได้กำหนดไว้หรือไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2. กระบวนการขัปลึก/สร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ใหม่

ทำการขัปลึกอะตอมสารเจือโบรอนพร้อมทั้งสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ขึ้นด้วยที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที โดยมีขั้นตอนของกระบวนการดังนี้ คือ

- ออกซิเดชันแบบแห้ง เป็นเวลา 30 นาที โดยมีอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1 ลิตร/นาที
- ออกซิเดชันแบบชื้น เป็นเวลา 30 นาที โดยมีอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1 ลิตร/นาที
- ออกซิเดชันแบบแห้ง เป็นเวลา 30 นาที โดยมีอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1 ลิตร/นาที



รูปที่ 4.5 การแพร่สารเจือโบรอน

6. กระบวนการโฟลด์ลิโทกราฟี II

เป็นกระบวนการเปิดช่องซิลิกอนไดออกไซด์ เพื่อแพร่สารเจือชนิดอื่น เป็นส่วน P-base ในขั้นตอนนี้จะใช้กระจกต้นแบบแผ่นที่ 2 โดยมีลำดับขั้นตอนเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 4

7. กระบวนการแพร่สารเจือส่วน P-base

7.1 กระบวนการแพร่สารเจือโบรอน ด้วยแหล่งจ่ายสารเจือ BN (A-grade) ที่อุณหภูมิ 820°C เป็นเวลา 20 นาที ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 0.6 ลิตร/นาที จากนั้นจึงนำไปลอกชั้น boro-silicate glass (BSG) โดย

- จุ่มแผ่นผลึกลงใน กรดแก้ว 5% เป็นเวลา 15 วินาที

- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- แล้ววัดค่าสภาพต้านทานแผ่น (Sheet resistivity) เพื่อตรวจสอบว่าจะตอมสารเจือโบรอนได้แพร่เข้าไปในแผ่นผลึกซิลิกอน ตามที่ได้กำหนดไว้หรือไม่

7.2. กระบวนการขับลึก/สร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ใหม่

ทำการขับลึกอะตอมสารเจือโบรอนพร้อมทั้งสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ขึ้นด้วยที่อุณหภูมิ 1100 °C เป็นเวลา 14 ชั่วโมง โดยมีขั้นตอนของกระบวนการดังนี้ คือ

- ออกซิเดชันแบบแห้ง เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยมีอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1 ลิตร/นาที
- ออกซิเดชันแบบชื้น เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยมีอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1 ลิตร/นาที
- ออกซิเดชันแบบแห้ง เป็นเวลา 14 ชั่วโมง โดยมีอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1 ลิตร/นาที

8. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี III

เป็นกระบวนการเปิดช่องซิลิกอนไดออกไซด์ เพื่อแพร่สารเจือชนิดอื่น เป็นส่วน N⁺-source ในขั้นตอนนี้จะใช้กระจกต้นแบบแผ่นที่ 3 โดยมีลำดับขั้นตอนเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 4

9. กระบวนการแพร่สารเจือส่วน N⁺-source

เป็นกระบวนการแพร่สารเจือฟอสฟอรัส ด้วยแหล่งสารเจือ SiP₂O₇ (PH1000) ที่อุณหภูมิ 1040 °C เป็นเวลา 15 นาที ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 0.6 ลิตร/นาที แล้วทำการลอกชั้น phosphorosilicate glass (PSG) โดย

- จุ่มแผ่นผลึกลงในกรดกัดแก้ว 5% เป็นเวลา 10 วินาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

10. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี IV

เป็นกระบวนการเปิดช่องซิลิกอนไดออกไซด์ เพื่อสร้างส่วนเกตออกไซด์ ในขั้นตอนนี้จะใช้กระจกต้นแบบแผ่นที่ 4 โดยมีลำดับขั้นตอนเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 4

11. การสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์สำหรับส่วนเกต (Dry oxidation for gate oxide)

ทำการสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์บริเวณส่วนเกต โดยกระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง ที่อุณหภูมิ 1100°C เวลา 30 นาที โดยมีอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1 ลิตร/นาที ได้ชั้นซิลิกอนไดออกไซด์หนาประมาณ 1000Å

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี V

เป็นกระบวนการเปิดช่องซิลิกอนไดออกไซด์ เพื่อสร้างส่วนเกทขั้วสัมผัสโลหะอะลูมิเนียม ในขั้นตอนนี้จะใช้กระจกต้นแบบแผ่นที่ 5 โดยมีลำดับขั้นตอนเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 4

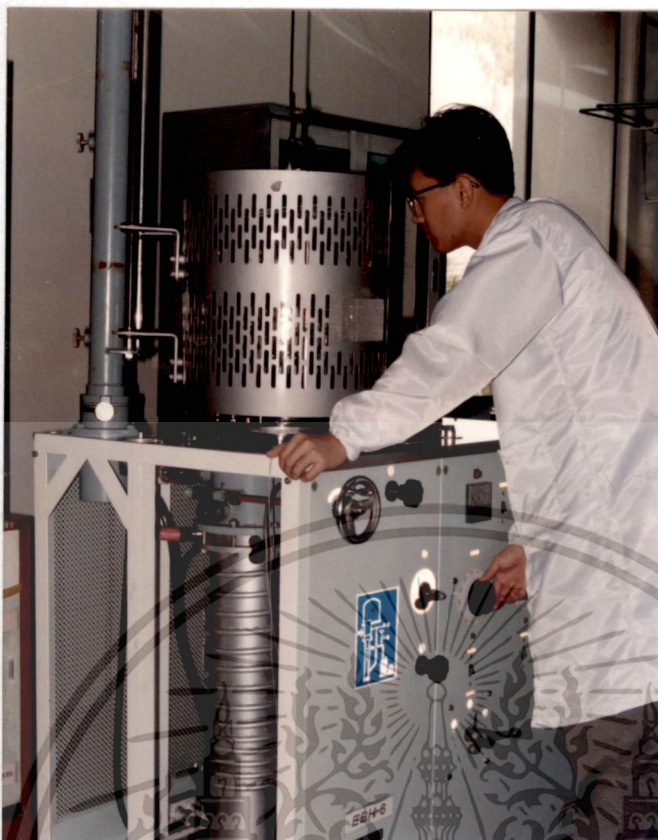
13. การเคลือบชั้นอะลูมิเนียมในสุญญากาศ (Aluminium evaporation) ด้านหน้า

เพื่อสร้างอะลูมิเนียมส่วนเกทและส่วนขอส โดยการใช้เครื่องมือ Vacuum evaporator ดังในรูปที่ 4.6 ซึ่งมีบรรยากาศภายในครอบแก้ว (chamber) ประมาณ 1×10^{-6} Torr แล้วให้ความร้อนแก่เส้นลวดอะลูมิเนียมยาวประมาณ 1 เซนติเมตรประมาณ 6-10 เส้น จนการเป็นไออะลูมิเนียมไปเกาะที่ผิวหน้าแผ่นผลึกซิลิกอน โดยทั่วไปการเคลือบอะลูมิเนียมที่ผิวหน้าแผ่นผลึกจะมีความหนาประมาณ $1 \mu\text{m}$

14. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี VI

กระบวนการโฟโตลิโทกราฟีนี้ ใช้น้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ-1350) ซึ่งใช้ในการสร้างลวดลายอะลูมิเนียมด้านบนแผ่นผลึกจากกระจกต้นแบบแผ่นที่ 6 มีลำดับขั้นตอนดังนี้ คือ

- อบแห้งแผ่นผลึกที่เคลือบอะลูมิเนียมเพื่อไล่ความชื้น ที่อุณหภูมิ $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสง โดยใช้อุปกรณ์ spinner ความเร็ว 5,000 รอบ/นาที เป็นเวลา 30 วินาที
- อบครั้งแรก (prebake) ให้น้ำยาแห้งที่อุณหภูมิ $85-90 \text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 30 นาที
- ฉายแสงผ่านกระจกต้นแบบด้วยอุปกรณ์ mask aligner เป็นเวลา 10 วินาที
- การล้างภาพ จุ่มในน้ำยา AZ-developer 2 ครั้ง ๆ ละ 30 วินาที
- ล้างในน้ำบริสุทธิ์ แล้วเป่าให้แห้งทันทีด้วยก๊าซไนโตรเจน
- อบครั้งที่สอง (postbake) ให้นำแผ่นฟิล์มที่เหลืออยู่แห้งที่อุณหภูมิ $85-90 \text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 30 นาที
- นำแผ่นผลึกไปกัดชั้นอะลูมิเนียมด้วยสารละลาย ซึ่งมีส่วนผสมของกรดฟอสฟอริกเป็นหลัก จุ่มแผ่นผลึกที่เสร็จจากขั้นตอนที่แล้วลงในสารละลายนี้ ซึ่งมีอุณหภูมิราว $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 2-3 นาที
- นำไปลอกชั้นน้ำยาไวแสงชนิดบวกที่ยังคงค้างบนแผ่นผลึกออก โดย
 - จุ่มแผ่นผลึกลงในอะซิโตน ประมาณ 1 นาที 2 ครั้ง
 - ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
 - เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



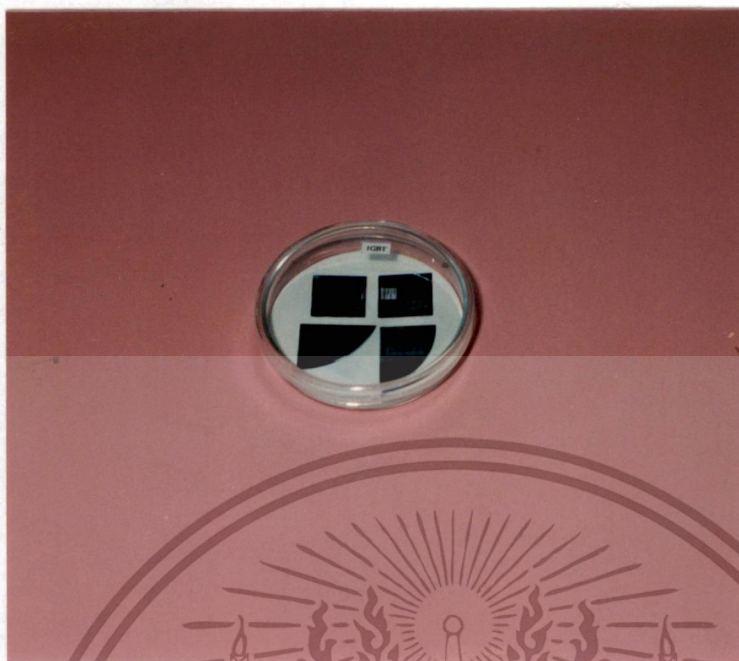
รูปที่ 4.6 การเคลือบอะลูมิเนียมในสุญญากาศด้วยเครื่อง Vacuum evaporator

15. การเคลือบชั้นอะลูมิเนียมในสุญญากาศ (Aluminium evaporation) ด้านหลัง เพื่อสร้างอะลูมิเนียมส่วนเดรน ด้านหลังแผ่นผลึกซิลิกอน โดยมีลำดับขั้นตอนเหมือนกับหัวข้อที่ 11

16. กระบวนการ Sintering

ทำการ Sintering เพื่อให้ส่วนโลหะกับเนื้อซิลิกอนในส่วนขั้วสัมผัสเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิก โดยการทิ้งแผ่นผลึกไว้ในบรรยากาศไนโตรเจน ที่มีอัตราการไหล 1 ลิตร/นาที เป็นเวลา 10 นาที ที่ อุณหภูมิ 500 °C หลังจากกระบวนการ Sintering แล้ว จะเสร็จสิ้นกระบวนการสร้างมาตรฐานของ IGBT สำหรับในรูปที่ 4.7 จะแสดงถึง IGBT ที่สร้างแล้วบนแผ่นผลึกซิลิกอน ในรูปที่ 4.8 เป็นสรุปภาพตัดขวางของ IGBT ที่ได้จากกระบวนการสร้างในแนวระนาบ ส่วนรูปที่ 4.9 เป็นสรุปภาพตัดขวางของ IGBT ที่ได้จากกระบวนการสร้างในแนวตั้ง

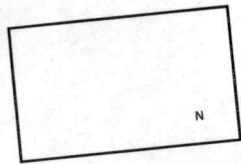
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



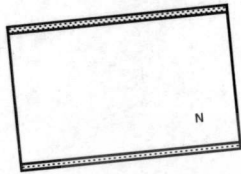
รูปที่ 4.7 ภาพถ่ายของ IGBT ที่ได้สร้างเสร็จเรียบร้อยแล้วบนผลิตภัณฑ์



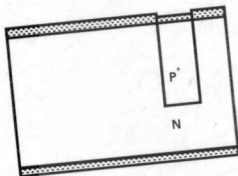
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



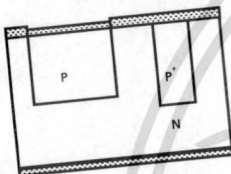
แผ่นผลึกซิลิกอนชนิด N
(100) , $\rho = 10 \Omega\text{-cm.}$



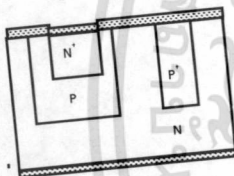
สร้างชั้น SiO_2
ความหนา 5000 \AA



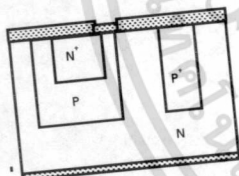
แพร่สารเจือและขั้วลึกลับ
ส่วน P^+ -collector



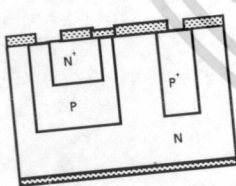
แพร่สารเจือและขั้วลึกลับ
ส่วน P-base



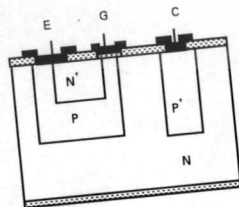
แพร่สารเจือและขั้วลึกลับ
ส่วน N^+ -emitter



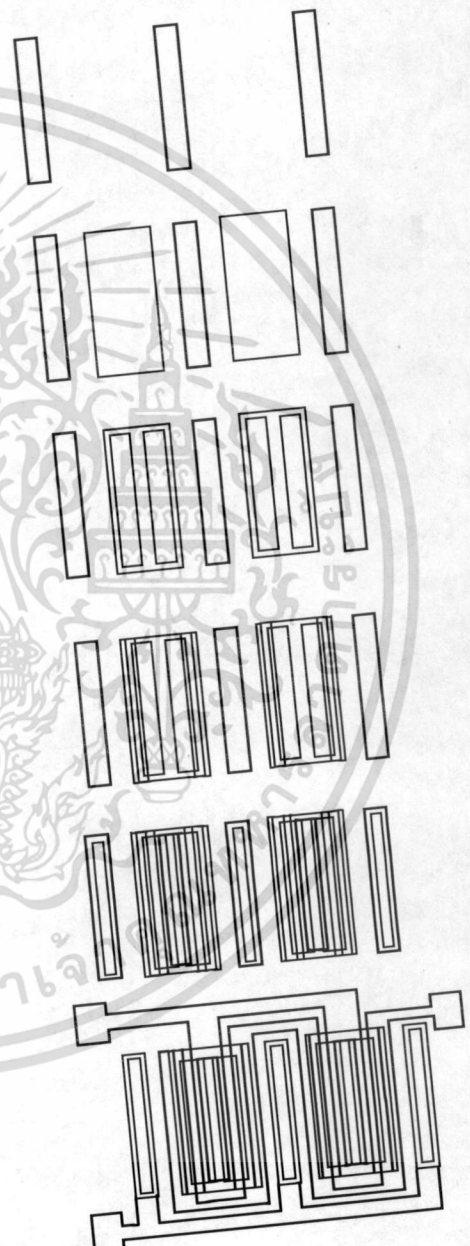
สร้างเททออกไซด์
หนา 1000 \AA



เปิดช่อง SiO_2 เพื่อ
สร้างขั้วสัมผัสโลหะ

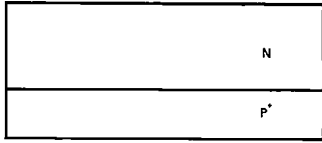


สร้างลวดลวดอะลูมิเนียม
และขั้วสัมผัสแบบโอห์มมิก

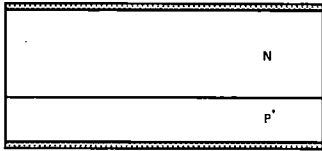


รูปที่ 4.8 กระบวนการสร้าง IGBT โครงสร้างแนวระนาบและกระจัดต้นแบบ

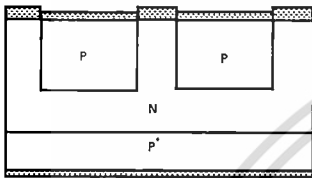
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



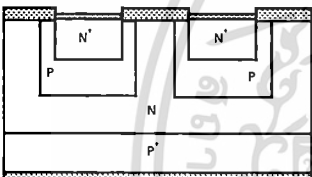
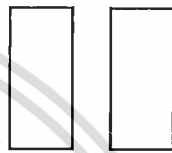
แผ่นผลึกซิลิกอนชนิด N/P⁺
(100) , ρ = 40 Ω-cm.



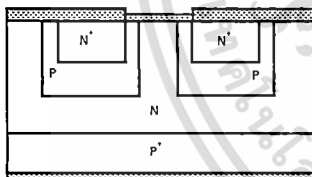
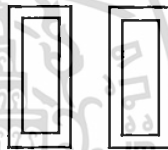
สร้างชั้น SiO₂
ความหนา 5000 Å



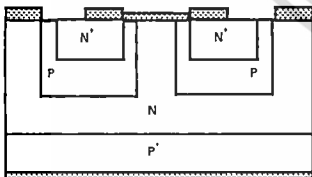
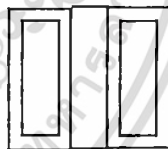
แพร่สารเจือและขั้วลึก
ส่วน P-base



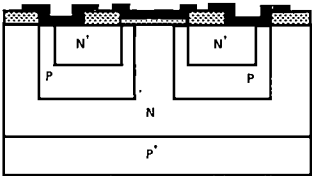
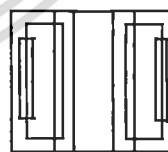
แพร่สารเจือและขั้วลึก
ส่วน N⁺-emitter



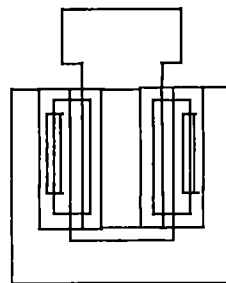
สร้างเกตออกไซด์
หนา 1000 Å



เปิดช่อง SiO₂ เพื่อ
สร้างขั้วสัมผัสโลหะ



สร้างลวดลายอะลูมิเนียม
และขั้วสัมผัสแบบโอห์มมิก

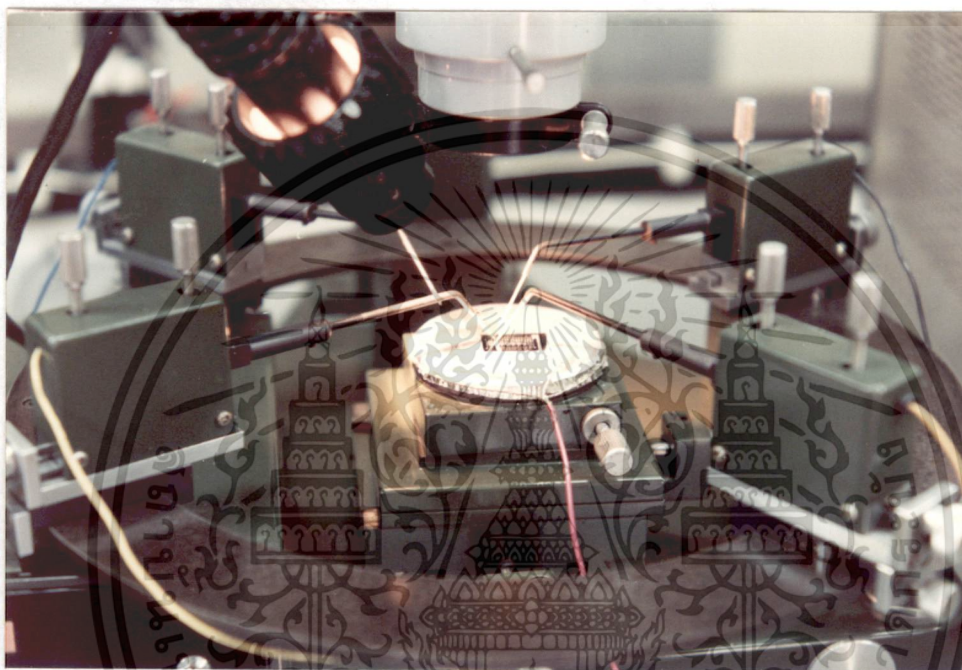


รูปที่ 4.9 กระบวนการสร้าง IGBT โครงสร้างแนวดิ่งและกระจัดต้นแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ว่าห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

15. การทดสอบอุปกรณ์บนแผ่นผลึกซิลิกอน (On wafer test)

ก่อนที่จะนำแผ่นผลึกซิลิกอนที่สร้างเสร็จแล้วไปตัดแบ่งออกเป็นชิพ จะมีการตรวจสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าก่อน โดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่า Probe station ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ซึ่งใช้เข็มจิ้มลงไปอยู่ที่จุดต่อสาย (bonding pad) ที่ 2 ขั้วคือ ขั้วเกต และขั้วซอส ส่วนฐานรองของแผ่นผลึกซิลิกอนจะเป็นส่วนเดรน แล้วต่อสายโลหะเข้ากับเครื่องวัดคุณสมบัติทรานซิสเตอร์ (transistor curve tracer) เพื่อดูว่ามีชิพใดทำงานได้ หรือไม่ได้ ส่วนชิพที่เสียก็จะถูกทำเครื่องหมายไว้และจะไม่นำไปเก็บบรรจุ



รูปที่ 4.10 การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าครั้งแรกของอุปกรณ์บนแผ่นผลึกซิลิกอน

4.3 การเก็บบรรจุ IGBT

กระบวนการเก็บบรรจุอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (assembly process) เป็นการนำเอาอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่สร้างเสร็จเรียบร้อยแล้วบนแผ่นผลึกซิลิกอนที่ผ่านการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าครั้งแรกมาทำการตัดแยกชิพ แล้วตัดแยกชิพที่ทำงานได้มาติดลงบนตัวถัง ทำการต่อสายด้วยลวดอะลูมิเนียมระหว่างชิพกับขาตัวถังจากนั้นปิดฉนวนฝาเข้ากับตัวถัง และทำการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าครั้งสุดท้าย จนมั่นใจว่าอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่สร้างขึ้นนี้สามารถนำไปใช้งานได้ตามคุณสมบัติที่กำหนดไว้จากการออกแบบและสามารถใช้ร่วมกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดอื่น ๆ

สำหรับตัวถังส่วนใหญ่ที่ใช้ในการเก็บบรรจุจะมีอยู่ 3 ชนิด คือ ตัวถังแบบตัวตะขาบ (dual-in-line package หรือ DIP package), ตัวถังแบบกระป๋องโลหะ (metal cans) และตัวถัง แบบแบน (flat

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

packs) ในกรณีของ IGBT จะเลือกใช้ตัวถังแบบกระป๋องโลหะ เพราะว่ามันนอกจากจะนำไปใช้ร่วมกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ภายนอกได้แล้ว ยังช่วยระบายความร้อนบางส่วนด้วย

กระบวนการเก็บบรรจุ อธิบายสรุปพอสังเขปได้ดังต่อไปนี้ คือ

4.3.1 การตัดแยกชิพ

การตัดแยกชิพ (scribing) เป็นการตัดแบ่งแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำออกเป็นชิ้นเล็ก ๆ โดยเครื่องมือที่เรียกว่า เครื่องตัดแผ่นผลึก (sawing machine) ซึ่งควบคุมการตัดด้วยใบมีดที่หมุนด้วยความเร็วประมาณ 500 รอบต่อวินาที แผ่นผลึกชิ้นเล็ก ๆ ที่ได้ในที่นี้ คือ โมสเฟตกำลังหนึ่งตัว ซึ่งเรียกว่า ชิพ (chip) หรือ ไคซ์ (die) แล้วคัดแยกชิพที่ทำงานได้ดี เพื่อนำไปติดบนตัวถังต่อไป

4.3.2 การติดชิพบนตัวถัง

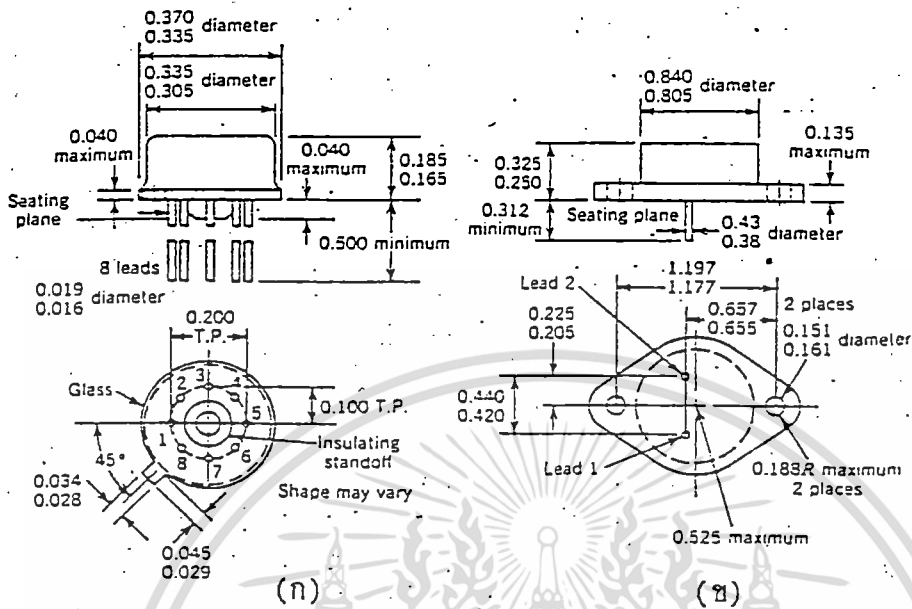
การติดชิพ (die bonding) เป็นการนำเอาชิพที่ทำงานได้หลังจากที่ผ่านการทดสอบครั้งแรกและตัดออกเป็นชิพเรียบร้อยแล้ว มาติดบนตัวถังกระป๋องโลหะแบบ TO-5 สำหรับ IGBT ที่มีขนาดเล็ก และตัวถังกระป๋องโลหะแบบ TO-3 สำหรับ IGBT ที่มีขนาดใหญ่ โดยชิพขนาดเล็กที่นำมาติดบนตัวถังกระป๋องโลหะแบบ TO-5 จะใช้เครื่องติดชิพที่ให้ความร้อนสูงประมาณ 400°C ช่วยในการยึดชิพให้ติดกับผิวของตัวถังที่เป็นทอง ส่วนชิพขนาดใหญ่ที่ติดบนตัวถังกระป๋องโลหะแบบ TO-3 จะใช้กาวเงิน (silver press) ติดชิพเข้ากับตัวถัง แล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิประมาณ 100°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง สำหรับในรูปที่ 4.11 เป็นตัวถังกระป๋องโลหะแบบ TO-5 และ TO-3 ซึ่งแสดงขนาดต่าง ๆ ของตัวถัง (หน่วยเป็นนิ้ว)

4.3.3 การต่อสาย

การต่อสาย (wire bonding) เป็นการเชื่อมต่อลวดอะลูมิเนียมระหว่างชิพกับขาของตัวถังที่จะต่อไปใช้กับงานภายนอก ซึ่งในการต่อสายจะให้หลักการของความถี่สูง ในกรณีของตัวถังกระป๋องโลหะแบบ TO-5 จะใช้ลวดอะลูมิเนียมเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 25 μm ส่วนตัวถังกระป๋องโลหะแบบ TO-3 จะใช้ลวดอะลูมิเนียมเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 125 μm

4.3.4 การพนักฝา

การพนักฝา (encapsulate) เป็นการปิดฝาโลหะเข้ากับตัวถัง เพื่อป้องกันไม่ให้ชิพเกิดเสียหายอันเนื่องมาจากสิ่งสกปรก สารเคมีภายนอก และการกระทบกับลวดโลหะที่ใช้ต่อสาย นอกจากนี้ในขณะที่ทำงานยังช่วยระบายความร้อนบางส่วนที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์



รูปที่ 4.11 ตัวถังกระป๋องโลหะที่ใช้เก็บบรรจุชิพของ IGBT

(ก) ตัวถังกระป๋องโลหะแบบ TO-5 (ข) ตัวถังกระป๋องโลหะแบบ TO-3

4.3.5 การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าครั้งสุดท้าย

เมื่อนำอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำมาเก็บบรรจุเสร็จเรียบร้อยแล้ว จะต้องมีการตรวจสอบการทำงานของอุปกรณ์อย่างละเอียดอีกครั้ง ซึ่งเรียกว่า การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าครั้งสุดท้าย (final test) อาทิเช่น การวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน เป็นต้น เพื่อนำไปสรุปเป็นข้อมูล (data sheet) ที่จะนำไปใช้กับงานอิเล็กทรอนิกส์ทั่ว ๆ ไป หรือนำมาปรับปรุงกระบวนการสร้างใหม่ ในกรณีที่อุปกรณ์ยังมีข้อบกพร่อง

บทที่ 5

การทดลองและผลการทดลอง

ในอุปกรณ์กำลัง โดยทั่วไปไม่ว่าจะตระกูลใดก็ตามต่างก็ต้องการที่จะพัฒนาให้มีความสามารถในการทนกำลังได้สูง นั่นคือมีการนำกระแสและทนแรงดันสูงและยังต้องมีการตอบสนองความถี่ที่สูงอีกด้วย ในการทำให้อุปกรณ์มีความสามารถในการทนกำลังที่สูงได้นั้นอุปกรณ์จำเป็นที่จะต้องมีขนาดใหญ่ตามไปด้วยอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ซึ่งการสร้างอุปกรณ์ที่มีขนาดใหญ่เพื่อที่จะศึกษาตัวแปรขั้นพื้นฐานของอุปกรณ์กำลังนั้นเป็นสิ่งที่ทำได้ยาก เนื่องจากจะทำให้เกิดคุณสมบัติบางอย่างที่แฝงอยู่ในโครงสร้างทำให้ยากแก่การวิเคราะห์ ดังนั้นในรายงานการวิจัยนี้การออกแบบอุปกรณ์ IGBT เพื่อศึกษาตัวแปรพื้นฐานและสะดวกในการเปลี่ยนแปลงตัวแปรทางเรขาคณิตและเพื่อบันทึกเป็นข้อมูลที่ถูกต้องมากขึ้น จากผลสรุปที่ได้จากข้อมูลจำนวนมากๆ จึงทำการออกแบบอุปกรณ์ IGBT โครงสร้างในแนวระนาบและในแนวตั้งที่มีขนาดเล็ก

5.1 การทดสอบโครงสร้างเรขาคณิตพื้นฐานของ IGBT

5.1.1 IGBT โครงสร้างในแนวระนาบ

5.1.1.1 การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อพี-เอ็น

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

การออกแบบและสร้าง

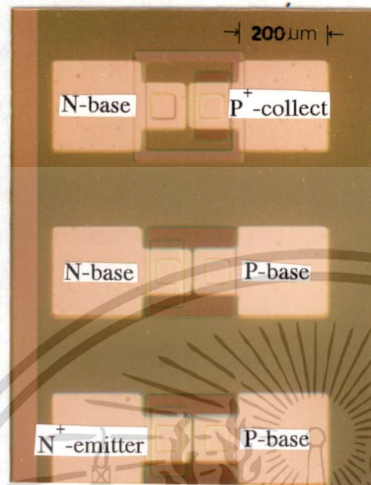
ในการทดสอบคุณสมบัติของรอยต่อของ IGBT สามารถทำได้ โดยอาศัยโครงสร้างไดโอด (สร้างขึ้นบนแผ่นผลึกเดียวกับ IGBT ในแนวระนาบ) เพื่อวัดคุณสมบัติของแต่ละรอยต่อต่างๆโดยใช้เงื่อนไขของความหนาแน่นอะตอมสารเจือและความลึกของรอยต่อเช่นเดียวกับรอยต่อต่างๆ ที่สร้างใน IGBT

ในกระบวนการสร้างไดโอดเพื่อวัดคุณสมบัติของรอยต่อพี-เอ็นนี้มีรายละเอียดเช่นเดียวกับที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 โดยเลือกใช้แผ่นผลึกซิลิกอนแบบ ระนาบเชิงเดี่ยว ชนิด N ระนาบ (100) พิกัดความต้านทาน 8-12 Ω -cm หนา 400 μm โดยทำการแพร่สารเจือโบรอนในส่วน P^+ เท่ากับ $4.53 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, ในส่วน P เท่ากับ $1.65 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ และแพร่สารเจือฟอสฟอรัสในส่วน N^+ เท่ากับ $2.57 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ โดยการคำนวณหาความหนาแน่นอะตอมสารเจือสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (5.1) จากนั้นสร้างขั้วสัมผัสโลหะในไดโอดแต่ละตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เมื่อ ρ_{exp} คือ พิกัดความต้านทานจากการทดลอง

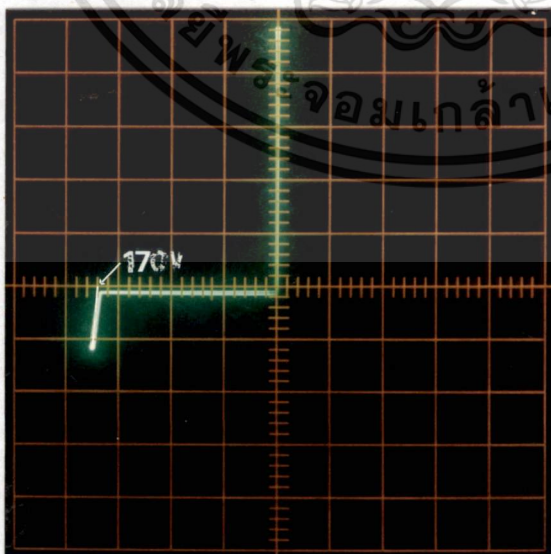


รูปที่ 5.1 ภาพถ่ายด้านบนของรอยต่อพี-เอ็นที่สร้างเสร็จแล้ว

การทดลองและผลการทดลอง

นำไดโอดที่สร้างเสร็จแล้ว ดังแสดงในรูปที่ 5.1 มาวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อพี-เอ็น โดยใช้เครื่องวัดคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์ (Transistor curve tracer) ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 5.2 , 5.3 และ

5.4

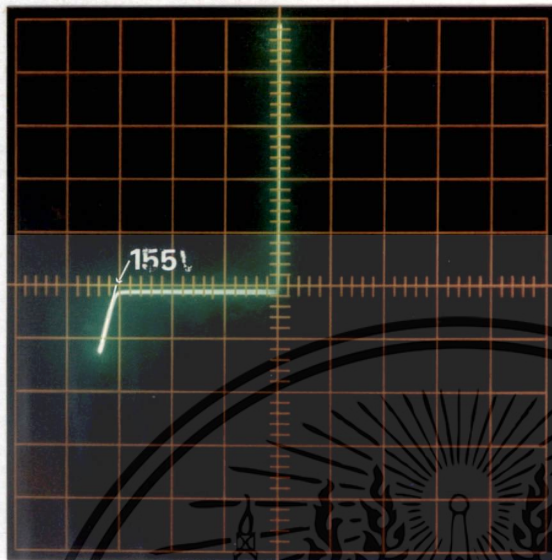


Ver : 10 mA/div.

Hor : 50 V/div.

รูปที่ 5.2 กราฟคุณสมบัติกระแสและแรงดันของรอยต่อพี-เอ็นระหว่าง N-base กับ P⁺-collector

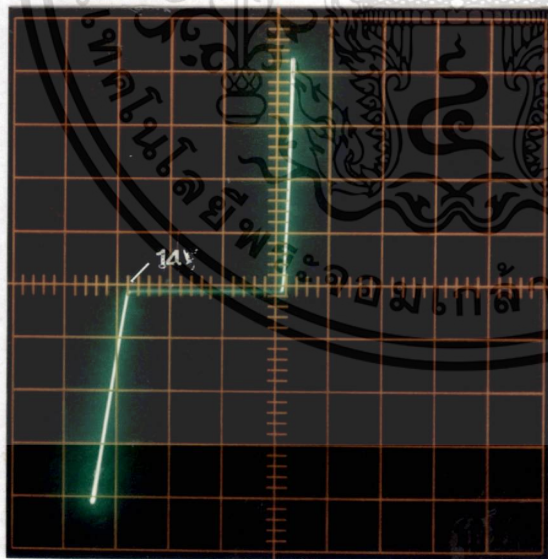
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Ver : 10 mA/div.

Hor : 50 V/div.

รูปที่ 5.3 กราฟคุณสมบัติกระแสและแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น ระหว่าง P-base กับ N-base



Ver : 10 mA/div.

Hor : 5 V/div.

รูปที่ 5.4 กราฟคุณสมบัติกระแสและแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น ระหว่าง N⁺-emitter กับ P-base

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองในรูปที่ 5.2 ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ของรอยต่อพี-เอ็นระหว่าง N-base กับ P⁺-collector ซึ่งมีความสำคัญอย่างมากต่อคุณสมบัติทางความสามารถในการปิดกั้นย้อนกลับ (Reverse Blocking Capability) และคุณสมบัติทางความสามารถในการนำกระแสไปหน้า (Forward Conduction Capability) โดยการทนแรงดันย้อนกลับของรอยต่อนี้จะเป็นตัวกำหนดความสามารถในการปิดกั้นย้อนกลับของ IGBT และการทนแรงดัน จากการทดลองพบว่ามีความดันไปหน้าตกคร่อม 0.6 V และสามารถทนแรงดันไบอัสย้อนกลับได้ถึง 170 V แสดงให้เห็นได้ว่ารอยต่อระหว่าง N-base กับ P⁺-collector เหมาะสมที่จะสร้างเป็นรอยต่อของ IGBT ได้

สำหรับผลที่แสดงในรูปที่ 5.3 เป็นกราฟความสัมพันธ์ของรอยต่อพี-เอ็น ระหว่างชั้น P-base กับ N-base ซึ่งมีความสำคัญในการทำงานในสภาวะปิดกั้นตรง (Forward Blocking Capability) และความหนาแน่นของอะตอมสารเจือในส่วน P-base ยังเป็นตัวกำหนดแรงดันขีดเริ่มของ IGBT อีกด้วย ซึ่งจากการทดลองพบว่าความสามารถในการทนแรงดันพังทลายของรอยต่อ P-base กับ N-base สามารถทนได้ถึง 155 V ซึ่งเหมาะสมที่จะใช้ในโครงสร้างของ IGBT เช่นกัน

ส่วนรอยต่อ N⁺-emitter กับ P-base ในรูปที่ 5.4 เป็นส่วนที่มีผลในความสามารถในการนำกระแสของโครงสร้างแผ่นมอสเฟตในโครงสร้าง IGBT โดยจากการทดลองพบว่ามีความดันพังทลาย 14 โวลต์ แต่อย่างไรก็ตาม ความสำคัญของแรงดันพังทลายของรอยต่อนี้มีน้อยมาก ทั้งนี้เนื่องจากในโครงสร้างของ IGBT ส่วน N⁺-emitter จะถูกเชื่อมต่อกับส่วน P-base โดยขั้วอะลูมิเนียมอยู่แล้ว ทั้งนี้เพื่อที่จะทำให้ศักย์ไฟฟ้าในส่วนทั้งสองมีค่าเท่ากันเพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงการเกิดโครงสร้างแผ่นไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์

จากผลการทดลองดังที่กล่าวมาแล้วจะเห็นได้ว่า รอยต่อต่างๆ เหมาะสมที่จะประกอบขึ้นเป็นโครงสร้าง IGBT ในแนวระนาบ แต่ส่วนที่สำคัญที่สุด คือ ความหนาแน่นอะตอมสารเจือในชั้น P-base เพราะนอกจากจะเป็นตัวกำหนดความสามารถในการทนแรงดันสูงสุดของรอยต่อ P-base แล้วยังเป็นตัวกำหนดค่าแรงดันขีดเริ่มอีกด้วย

5.1.1.2 การทดสอบการทำงานของ IGBT ในลักษณะของทรานซิสเตอร์

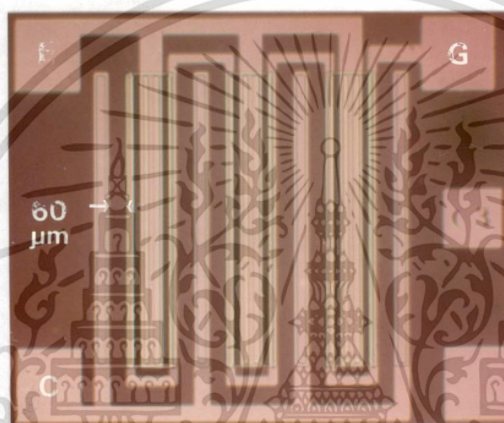
ในการทดสอบโครงสร้างทางเรขาคณิตของอุปกรณ์ IGBT ที่สร้างขึ้นว่าสามารถที่จะทำงานในลักษณะของทรานซิสเตอร์ได้หรือไม่นั้น สามารถทำได้โดยการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลกเตอร์ (I_C) กับแรงดันคอลเลกเตอร์-อิมิตเตอร์ (V_{CB}) ทั้งนี้เนื่องจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I_C กับ V_{CB} สามารถบอกได้ถึงความสามารถในการนำกระแส, ความต้านทานในสภาวะนำกระแส (R_{on}), ค่าทรานคอนดักแตนซ์ (g_{msat}) ตลอดจนถึงกระแสรั่วไหล ดังผลการทดลองต่อไปนี้

การออกแบบสร้าง

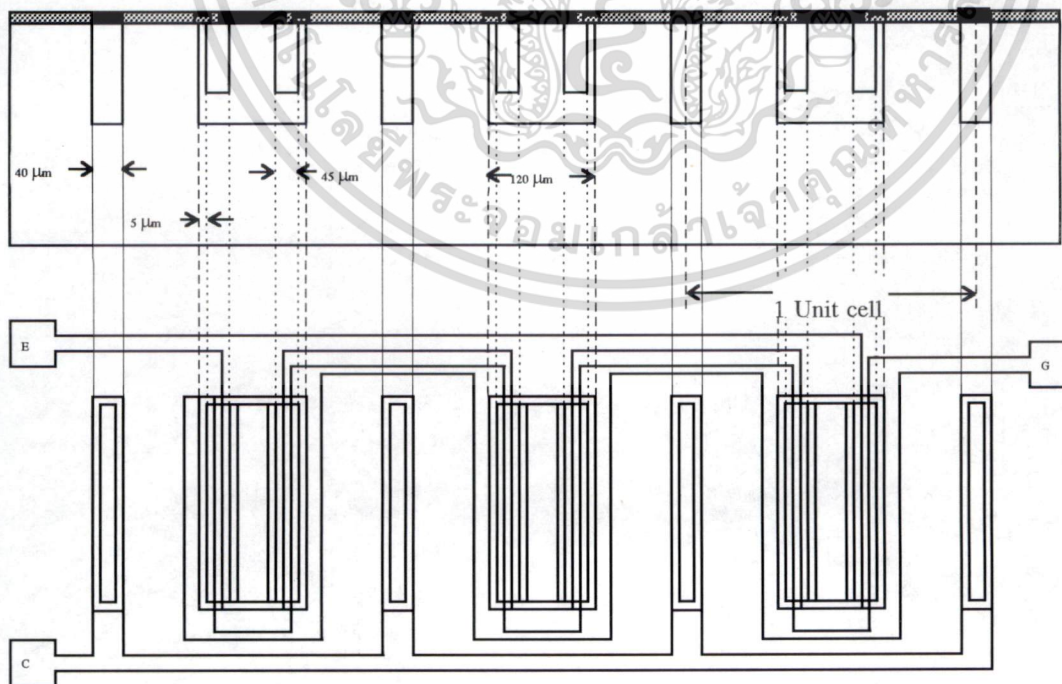
ในการศึกษาการทำงานของ IGBT ในลักษณะทรานซิสเตอร์ในบทนี้จะทำการศึกษาจากโครงสร้างในแนวระนาบ (planar) ที่มีความยาวและความกว้างของช่องทางเดินเท่ากับ 5 μm และ 4,800 μm ตามลำดับ (ความกว้างของชั้น N-base = 60 μm) โดยทำการออกแบบให้ส่วน N⁺-emitter และ P-base ต่อเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เข้ากันด้วยชั้นอะลูมิเนียมเพื่อป้องกันการเกิดโครงสร้างแฝงไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ ซึ่งจะทำให้กระแสอิเล็กตรอน (I_E) ไหลจากอิมิตเตอร์ไปคอลเลกเตอร์ โดยไม่ผ่านช่องทางเดินกระแส และคุณสมบัติที่ได้นี้จะไม่ใช่คุณสมบัติของทรานซิสเตอร์

สำหรับกระบวนการสร้างอุปกรณ์ IGBT เพื่อใช้ในการทดสอบการทำงานในลักษณะทรานซิสเตอร์นั้น สามารถทำได้โดยอาศัยกระบวนการสร้างที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 โดยเลือกใช้แผ่นผลึกซิลิกอนระนาบเชิงเดี่ยว ชนิด N ระนาบ (100) พิกัดความต้านทาน 8-12 $\Omega\text{-cm}$ หนา 400 μm โดยทำการแพร่สารเจือโบรอนในส่วน P^+ -collector เท่ากับ $4.53 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ และส่วน P-base เท่ากับ $1.65 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ และทำการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสเพื่อสร้างชั้น N^+ -emitter เท่ากับ $2.57 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ จากนั้นทำการสร้างขั้วสัมผัสโลหะในส่วนต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 5.5, 5.6



รูปที่ 5.5 ภาพถ่ายด้านบนของ IGBT โครงสร้างในแนวระนาบ

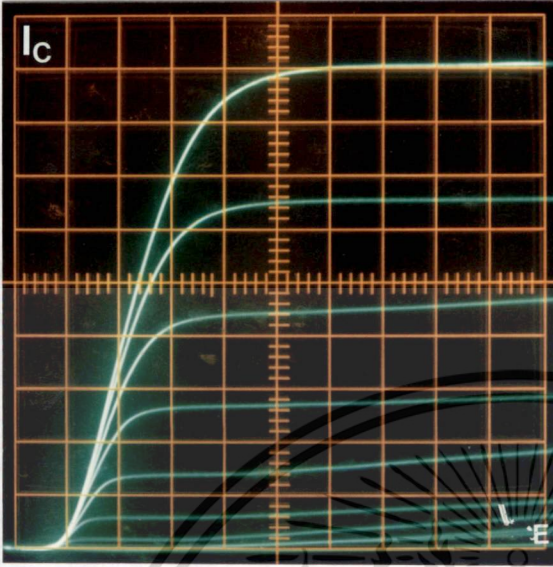


รูปที่ 5.6 ภาพตัดขวางและลวดลายด้านบนของอุปกรณ์ IGBT โครงสร้างในแนวระนาบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

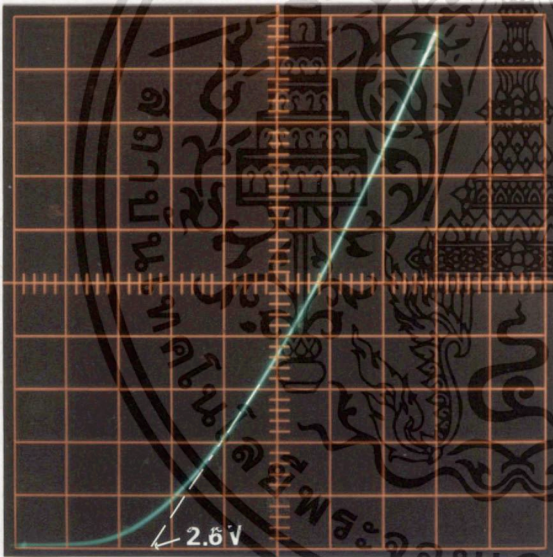
การทดสอบและผลการทดลอง

นำอุปกรณ์ IGBT ที่สร้างเสร็จแล้ว มาวัดคุณสมบัติของความสัมพันธ์ระหว่าง I_C กับ V_{CE} โดยใช้เครื่องวัดคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์ ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 5.7 - 5.11



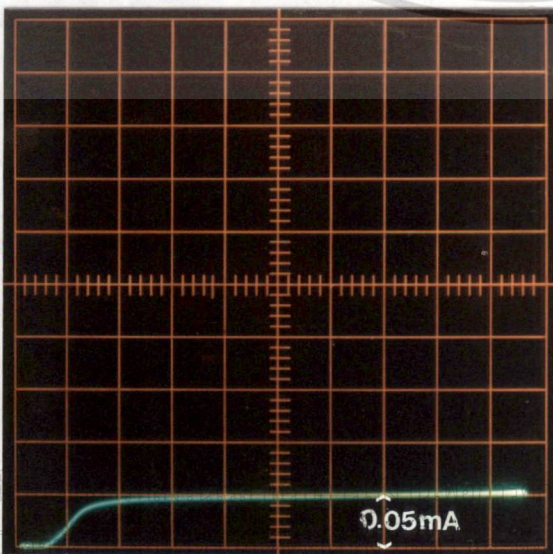
0.5 V/step , 9 step,
Ver: 5 mA/Div.,Hor: 1 V/Div.

รูปที่ 5.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลกเตอร์กับแรงดันคอลเลกเตอร์-อิมิตเตอร์



Ver: 5 mA/Div.,Hor: 1 V/Div.

รูปที่ 5.8 แรงดันขีดเริ่ม V_T

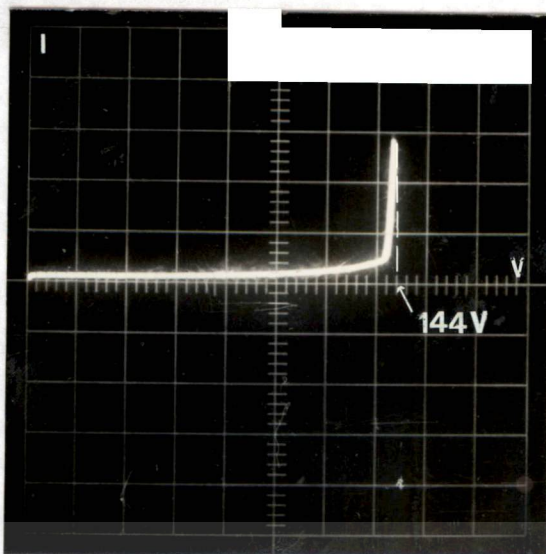


Ver: 0.05 mA/Div.,Hor: 1 V/Div.

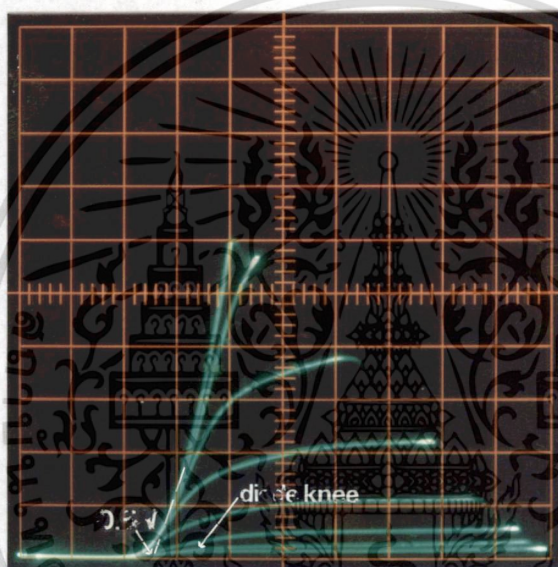
เอกสารนี้
ไม่ว่ากรณี

รูปที่ 5.9 กระแสรั่วไหล

ษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.10 แรงดันปิดกั้นตรง (Ver:5mA/Div.,Hor:20V/Div.)



รูปที่ 5.11 Diode Knee (0.2V/step,7step,0.05mA/Div.,0.2V/Div.)

จากผลการทดลองในรูปที่ 5.7 แสดงให้เห็นว่า IGBT ที่สร้างขึ้นสามารถที่จะทำงานในลักษณะของทรานซิสเตอร์ได้เป็นอย่างดีและยังสามารถที่จะนำ IGBT ที่สร้างขึ้นไปใช้งานในวงจรขยายสัญญาณไฟฟ้าได้เหมือนกับอุปกรณ์กำลังโดยทั่วไป จากผลการทดลองสามารถวัดค่าทราน-คอนดักแตนซ์ (g_{msat}) ของ IGBT ที่สร้างขึ้นได้เท่ากับ $25 \text{ m}\Omega^{-1}$ (ที่ $V_G = 3.5 \text{ V}$. และ $V_{CE} = 10 \text{ V}$.)และความต้านทานในสถานะนำกระแสมีค่าเท่ากับ 53.33Ω ในรูปที่ 5.8 แสดงถึงแรงดันขีดเริ่ม (V_T) ของ IGBT ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.6 V . สำหรับกระแสรั่วไหลที่แสดงในรูปที่ 5.9 สามารถวัดได้ 0.05 mA ซึ่งมีค่าน้อยมาก สำหรับความสามารถในการเปิดกั้นตรงของอุปกรณ์ IGBT ที่สร้างมีค่าเท่ากับ 144 V . ดังแสดงในรูปที่ 5.10 และในรูปที่ 5.11 จะแสดงให้เห็นถึง Diode Knee ของโครงสร้าง IGBT ซึ่งเกิดจากการที่แรงดันที่ให้กับขั้วคอลเลคเตอร์มีค่าต่ำทำให้ไม่เกิดการฉีดประจุพาหะจากรอยต่อ N-base กับ P^+ -collector เข้าไปในบริเวณ N-base จึงไม่ทำให้เกิดการมอดดูเลตสภาพนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

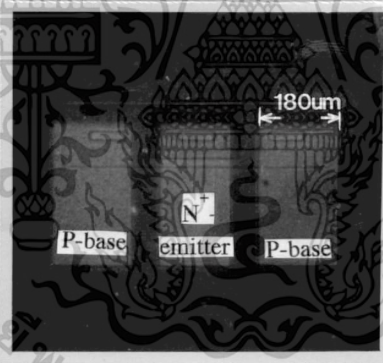
5.1.2 IGBT โครงสร้างในแนวดิ่ง

5.1.2.1 การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อ พี-เอ็น

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อพี-เอ็นของ IGBT ในแนวดิ่ง จะประกอบด้วยรอยต่อพี-เอ็น 3 รอยต่อดังกล่าว คือ รอยต่อ N^+ -emitter กับ P-base , รอยต่อ P-base กับ N-base และรอยต่อ N-base กับ P^+ -collector เหมือนกับในแนวระนาบ ดังนั้นสามารถใช้โครงสร้างของไดโอดทดสอบได้ แต่ในกรณีนี้จะใช้โครงสร้างของไบโพลาร์ทดสอบแทน ซึ่งสร้างพร้อมกับ IGBT ในแนวดิ่ง ดังแสดงในรูปที่ 5.12

การออกแบบและสร้าง

ในกระบวนการสร้างไดโอดเพื่อวัดคุณสมบัติของรอยต่อพี-เอ็นนี้มีรายละเอียดเช่นเดียวกับที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 โดยเลือกใช้แผ่นผลึกซิลิกอนแบบ ระนาบเชิงเดี่ยว ชนิด N ระนาบ (100) พิกัดความต้านทาน $5 \Omega\text{-cm}$ หนา $180 \mu\text{m}$ โดยทำการแพร่สารเจือโบรอนในส่วน P^+ เท่ากับ $2.17 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, ในส่วน P เท่ากับ $4.17 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ และแพร่สารเจือฟอสฟอรัสในส่วน N^+ เท่ากับ $1.28 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

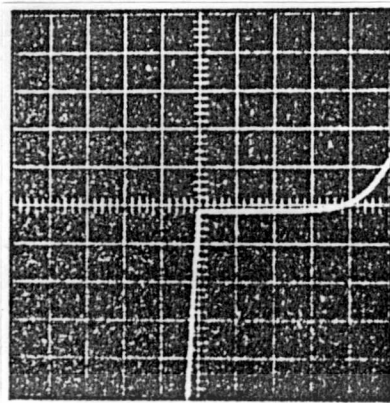


รูปที่ 5.12 ภาพถ่ายด้านบนของทรานซิสเตอร์ที่ใช้ทดสอบรอยต่อพี-เอ็นที่สร้างเสร็จแล้ว

การทดลองและผลการทดลอง [6]

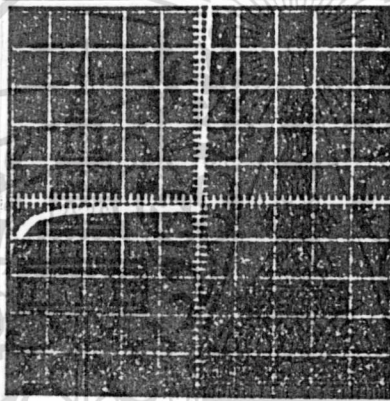
นำไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่สร้างเสร็จแล้ว ดังแสดงในรูปที่ 5.12 มาวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อพี-เอ็น โดยใช้เครื่องวัดคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์ (Transistor curve tracer) ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 5.13 , 5.14 และ 5.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Ver : 5 mA/div.

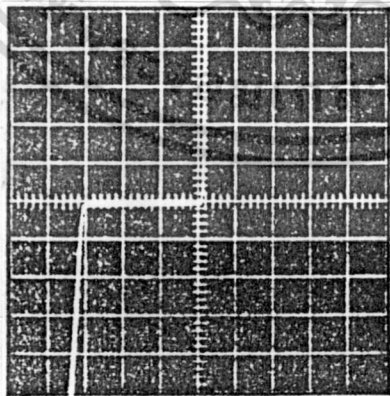
Hor : 50 V/div.

รูปที่ 5.13 กราฟคุณสมบัติกระแสและแรงดันของรอยต่อพี-เอ็นระหว่าง N-base กับ P⁺-collector

Ver : 20 mA/div.

Hor : 50 V/div.

รูปที่ 5.14 กราฟคุณสมบัติกระแสและแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น ระหว่าง P-base กับ N-base



Ver : 10 mA/div.

Hor : 5 V/div.

รูปที่ 5.15 กราฟคุณสมบัติกระแสและแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น ระหว่าง N⁺-emitter กับ P-base

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองในรูปที่ 5.13 ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ของรอยต่อพี-เอ็นระหว่าง N-base กับ P⁺-collector พบว่ามีแรงดันไปหน้าตกคร่อม 0.6 V และสามารถทนแรงดันไบอัสย้อนกลับได้ถึง 200 V แสดงให้เห็นได้ว่ารอยต่อระหว่าง N-base กับ P⁺-collector เหมาะสมที่จะสร้างเป็นรอยต่อของ IGBT ได้

สำหรับผลที่แสดงในรูปที่ 5.14 เป็นกราฟความสัมพันธ์ของรอยต่อ พี-เอ็น ระหว่างชั้น P-base กับ N-base พบว่าความสามารถในการทนแรงดันพังทลายของรอยต่อ P-base กับ N-base สามารถทนได้ถึง 190 V ซึ่งเหมาะสมที่จะใช้ในโครงสร้างของ IGBT เช่นกัน และรอยต่อ N⁺-emitter กับ P-base ในรูปที่ 5.15 พบว่ามีแรงดันพังทลาย 15 โวลต์

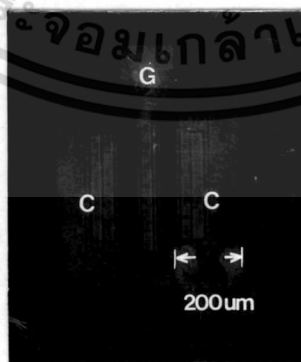
จากผลการทดลองดังที่กล่าวมาแล้วจะเห็นได้ว่า รอยต่อต่างๆ เหมาะสมที่จะสร้างขึ้นเป็น IGBT ในแนวคิดได้ดีเหมือนกับในกรณีของ IGBT ในแนวระนาบ ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่แล้ว

5.1.2.2 การทดสอบการทำงานของ IGBT ในลักษณะของทรานซิสเตอร์

การออกแบบสร้าง

ในการศึกษาการทำงานของ IGBT ในแนวคิดในลักษณะทรานซิสเตอร์นี้จะทำการศึกษาจาก IGBT ที่มีความยาวและความกว้างของช่องทางเดินเท่ากับ 6 μm และ 800 μm ตามลำดับ

สำหรับกระบวนการสร้างอุปกรณ์ IGBT เพื่อใช้ในการทดสอบการทำงานในลักษณะทรานซิสเตอร์นั้น สามารถทำได้โดยอาศัยกระบวนการสร้างที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 โดยเลือกใช้แผ่นผลึกซิลิกอนระนาบเชิงเดี่ยว ชนิด N ระนาบ (100) พิกัดความต้านทาน 5 $\Omega\text{-cm}$ หนา 180 μm โดยทำการแพร่สารเจือโบรอนในส่วน P⁺-collector เท่ากับ $2.17 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ และส่วน P-base เท่ากับ $4.17 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ และทำการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสเพื่อสร้างชั้น N⁺-emitter เท่ากับ $1.28 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ จากนั้นทำการสร้างขั้วสัมผัสโลหะในส่วนต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 5.16



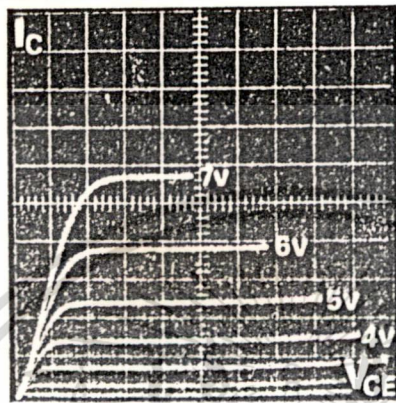
รูปที่ 5.16 ภาพถ่ายด้านบนของ IGBT ในแนวคิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบและผลการทดลอง

นำอุปกรณ์ IGBT ที่สร้างเสร็จแล้วมาวัดคุณสมบัติของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลกเตอร์กับแรงดันคอลเลกเตอร์-อิมิตเตอร์โดยใช้เครื่องวัดคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์ ได้ผลการทดลองดังรูปที่

5.17



รูปที่ 5.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลกเตอร์กับแรงดันคอลเลกเตอร์-อิมิตเตอร์

(1V/step, 9step, Ver:5mA/Div., Hor:5V/Div.)

จากผลการทดลองในรูปที่ 5.7 แสดงให้เห็นว่า IGBT ในแนวคิดที่สร้างขึ้นสามารถที่จะทำงานในลักษณะของทรานซิสเตอร์ได้เป็นอย่างดี จากผลการทดลองสามารถวัดค่าทรานคอนดักแตนซ์ (g_{msat}) ของ IGBT ที่สร้างขึ้นได้เท่ากับ $9 \text{ m}\Omega^{-1}$ (ที่ $V_G = 7 \text{ V}$. และ $V_{CE} = 15 \text{ V}$.) และความต้านทานในสถานะนำกระแสมีค่าเท่ากับ 333Ω แรงดันขั้วเริ่มเท่ากับ 1.10 V . สำหรับกระแสรั่วไหลเท่ากับ 0.08 mA ซึ่งมีค่าน้อยมากสำหรับความสามารถในกรณีปิดกั้นตรงของอุปกรณ์ IGBT เท่ากับ 200 V .

5.2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ IGBT กับมอสเฟตกำลังแบบดีมอส

โครงสร้างของอุปกรณ์ IGBT เกิดจากการรวมเอาข้อได้เปรียบของมอสเฟต คือ โครงสร้างแบบมอสเฟตมารวมเข้ากับข้อได้เปรียบของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์คือ การนำกระแสแบบไบโพลาร์ ดังนั้น เพื่อเป็นการศึกษาความแตกต่างของคุณสมบัติต่างๆ รวมทั้งข้อดีและข้อเสีย เพื่อที่จะเป็นประโยชน์อย่างมากต่อการเลือกใช้งานอุปกรณ์ในเงื่อนไขต่างๆ

การออกแบบและสร้าง

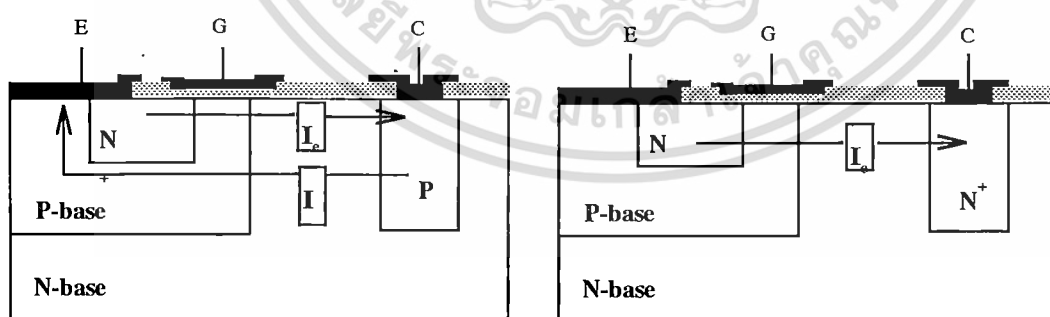
ในการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ IGBT เพื่อเปรียบเทียบกับมอสเฟตกำลังแบบดีมอสนั้นจำเป็นที่จะต้องออกแบบให้มีเงื่อนไขทางเรขาคณิตของอุปกรณ์ทั้งสองเท่ากันจึงทำการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ในแนวระนาบของ IGBT และดีมอสที่มีความกว้างและความยาวของช่องทางเดินกระแสเท่ากับ $4800 \mu\text{m}$ ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ 5 μm ตามลำดับ ส่วนในแนวตั้ง IGBT และดีมอสจะมีความกว้างและความยาวของช่องทางเดินกระแสเท่ากับ 800 และ 6 μm ตามลำดับ

ในส่วนของกระบวนการสร้างสามารถที่จะสร้างในกระบวนการสร้างเดียวกัน ทั้งนี้จะส่งผลดีให้เงื่อนไขต่างๆในการสร้างอุปกรณ์มีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุด โดยใช้กระบวนการสร้างมาตรฐานดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 4

กรณีของ IGBT และดีมอสในแนวระดับ เริ่มจากเลือกแผ่นผลึกซิลิกอนเริ่มต้นชนิด N ระบาย (100) พิกัดความต้านทาน 8-12 $\Omega\text{-cm}$ หนา 400 μm โดยทำการสร้างชั้น P^+ -collector ใน IGBT โดยการแพร่สารเจือโบรอนให้มีความหนาแน่นอะตอมสารเจือเท่ากับ $4.53 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ จากนั้นทำการแพร่สารเจืออีกครั้งเพื่อสร้างชั้น P-base ของทั้ง IGBT และดีมอสที่มีความหนาแน่นอะตอมสารเจือประมาณ $1.65 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ จากนั้นทำการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสเพื่อสร้างชั้น N^+ -emitter ใน IGBT หรือชั้น N^+ -source ในดีมอสที่มีความหนาแน่นอะตอมสารเจือเท่ากับ $2.57 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ จากนั้นทำการสร้างเกตออกไซด์และขั้วสัมผัสโลหะ

กรณีของ IGBT และดีมอสในแนวตั้ง เริ่มจากเลือกแผ่นผลึกซิลิกอนเริ่มต้นชนิด N ระบาย (100) พิกัดความต้านทาน 5 $\Omega\text{-cm}$ หนา 180 μm โดยทำการสร้างชั้น P^+ -collector ใน IGBT โดยการแพร่สารเจือโบรอนให้มีความหนาแน่นอะตอมสารเจือเท่ากับ $2.17 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ จากนั้นทำการแพร่สารเจืออีกครั้งเพื่อสร้างชั้น P-base ของทั้ง IGBT และดีมอสที่มีความหนาแน่นอะตอมสารเจือประมาณ $4.17 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ จากนั้นทำการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสเพื่อสร้างชั้น N^+ -emitter ใน IGBT หรือชั้น N^+ -source ในดีมอสที่มีความหนาแน่นอะตอมสารเจือเท่ากับ $1.28 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ จากนั้นทำการสร้างเกตออกไซด์และขั้วสัมผัสโลหะ

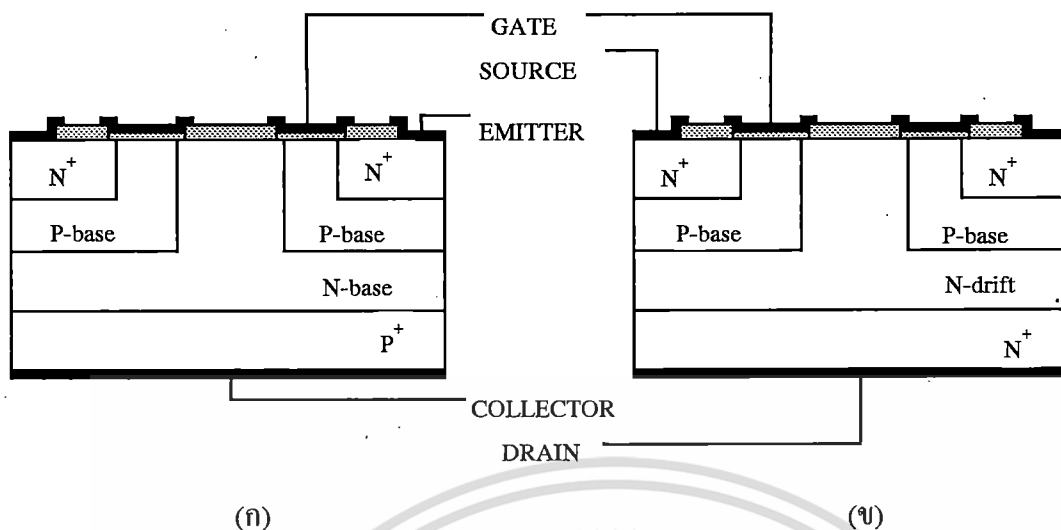


(ก)

(ข)

รูปที่ 5.18 (ก) โครงสร้าง IGBT (ข) โครงสร้างมอสเฟตกำลังในแนวระนาบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.19 (ก) โครงสร้าง IGBT (ข) โครงสร้างมอสเฟตกำลังในแนวตั้ง
การทดลองและผลการทดลอง

นำอุปกรณ์ IGBT และดีมอสที่สร้างเสร็จแล้วมาทำการวัดตัวแปรค่าต่างๆ เพื่อพิจารณาความแตกต่างระหว่าง IGBT กับมอสเฟตกำลังแบบดีมอส

จากผลการทดลองในตารางที่ 5.1 จะเห็นได้ว่าข้อเด่นของ IGBT คือความสามารถในการนำกระแส ความต้านทานในสภาวะนำกระแสและค่าทรานคอนดักเตนซ์ ทั้งนี้เนื่องจากผลของประจุพาหะส่วนน้อยที่ถูกฉีดเข้าไปในชั้น N-base ทำให้เกิดการมอดดูเลตสภาพนำ ส่งผลให้สามารถนำกระแสได้สูงขึ้นและค่าทรานคอนดักเตนซ์มีค่าสูงขึ้น นอกจากนั้นประจุพาหะส่วนน้อยที่ถูกฉีดเข้าไปในชั้น N-base ยังทำให้ประจุพาหะในชั้น N-base เพิ่มขึ้น ทำให้ในชั้น N-base มีความต้านทานลดต่ำลงส่งผลให้ความต้านทานรวมในสภาวะนำกระแสลดต่ำลงไปด้วย

ตารางที่ 5.1 แสดงค่าตัวแปรต่างๆของ IGBT และมอสเฟตกำลังแบบดีมอส

ตัวแปร	อุปกรณ์ในแนวระนาบ		อุปกรณ์ในแนวตั้ง		หน่วย
	IGBT	DMOS	IGBT	DMOS	
W	4800	4800	6	6	μm
L	5	5	800	800	μm
I_C^* , I_{DS}^*	55 ⁽¹⁾	19 ⁽¹⁾	28 ⁽²⁾	20 ⁽²⁾	mA
I_{CSS}^{**} , I_{DSS}^{**}	0.05 ⁽³⁾	0.03 ⁽³⁾	0.08 ⁽³⁾	0.05 ⁽³⁾	mA
R_{ON}	55 ⁽¹⁾	125 ⁽¹⁾	333 ⁽²⁾	400 ⁽²⁾	m Ω
g_{msat}	28 ⁽¹⁾	16 ⁽¹⁾	9 ⁽²⁾	5 ⁽²⁾	m Ω^{-1}
V_T	1.55	1.80	1.10	1.15	V
V_{CES}^{**} , V_{DSS}^*	200	200	200	210	V

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับหน่วยงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- หมายเหตุ (1) วัดที่ $V_G = 3.5 \text{ V}$.
 (2) วัดที่ $V_G = 7 \text{ V}$
 (3) วัดที่ $V_G = 0 \text{ V}$, $V_{DD} = 50 \text{ V}$.

5.3 การศึกษาผลของชั้น N-base ที่มีต่อความสามารถในการนำกระแสของ IGBT [7]

ในการพัฒนาอุปกรณ์กำลังโดยทั่วไปสิ่งสำคัญ คือ การพยายามที่จะเพิ่มความสามารถในการนำกระแสของอุปกรณ์ ดังเช่นผลงานวิจัยที่ได้เคยนำเสนอในการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 14 ซึ่งเป็นการพัฒนาความสามารถในการนำกระแสของดีมอสโดยการเพิ่มอัตราส่วนระหว่างความกว้างกับความยาวของช่องทางเดินกระแสด้วยการสร้างเกทเป็นรูปตัววีหรือที่เรียกว่า "วีมอส" (VMOS) [8] ในส่วนของอุปกรณ์ IGBT การเพิ่มความสามารถในการนำกระแสสามารถที่จะทำได้หลายวิธี วิธีหนึ่งก็คือการเปลี่ยนแปลงความกว้างของชั้น N-base โดยจากสมการที่ (2.15) จะเห็นได้ว่าที่ความกว้างและความยาวของช่องทางเดินกระแสเท่ากันความสามารถในการนำกระแสของ IGBT จะขึ้นอยู่กับอัตราการขยายกระแสของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ P-N-P (α_{PNP}) และจากสมการที่ (2.13) อัตราการขยายกระแสของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ P-N-P จะขึ้นอยู่กับขนาดของความกว้างของชั้น N-base ดังนั้นในรายงานฉบับนี้จึงพิจารณาถึงผลของกระแสไอส์ที่ทำให้อัตราการขยายกระแสของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ P-N-P ที่แฝงภายในโครงสร้างของ IGBT เพิ่มขึ้นโดยการเปลี่ยนแปลงความกว้างของชั้น N-base และเพื่อความสะดวกในการทดลองสร้าง IGBT ที่มีความกว้างของชั้น N-base ค่าต่างๆ ในรายงานฉบับนี้จึงพิจารณา IGBT ที่มีโครงสร้างในแนวระนาบซึ่งมีหลักการทำงานเช่นเดียวกับ IGBT ที่มีโครงสร้างในแนวตั้ง

การออกแบบและสร้าง

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

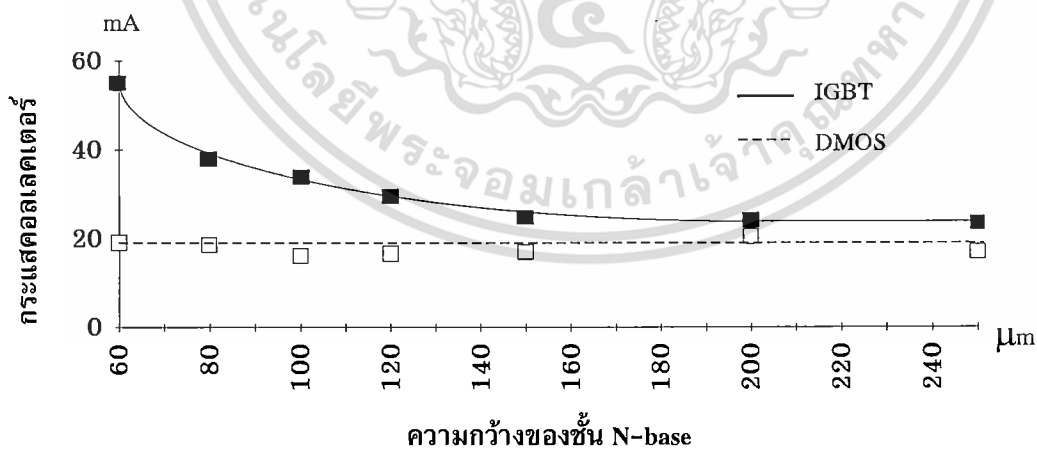
ในส่วนของการสร้างอุปกรณ์ IGBT ทำโดยอาศัยกระบวนการสร้าง IGBT ตามที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 โดยใช้แผ่นผลึกซิลิคอนชนิด N ระนาบ (100) ความหนา 400 μm ค่าพิถิตความต้านทาน 8-10 $\Omega\text{-cm}$. ทำการแพร่สารเจือโบรอนเพื่อสร้างชั้นคอลเลคเตอร์ที่ความหนาแน่นอะตอมสารเจือเท่ากับ $4.53 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ แล้วทำการแพร่สารเจือโบรอนอีกครั้ง เพื่อสร้างชั้น P-base $1.65 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ต่อไปทำการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสเพื่อสร้างชั้นอิมิตเตอร์ที่ $2.57 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ จากนั้นทำการสร้างเกทออกไซด์ สุดท้ายทำการสร้างขั้วสัมผัสโลหะโดยเคลือบอะลูมิเนียมในเครื่องเคลือบสุญญากาศ แล้วกัดเป็นลวดลายส่วน อิมิตเตอร์, เกทและคอลเลคเตอร์

การทดลองและผลการทดลอง

5.3.1 ผลของความกว้างของชั้น N-base ที่มีต่อกระแสคอลเลคเตอร์

ทำโดยการวัดค่ากระแสคอลเลคเตอร์ในช่วงอิมิตัวที่แรงดันเกตคงที่ค่าหนึ่ง จากกราฟระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์กับแรงดันคอลเลคเตอร์อิมิตเตอร์ของอุปกรณ์ IGBT แต่ละตัวที่มีความกว้างของชั้น N-base ค่าต่างๆมาเขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์กระแสคอลเลคเตอร์กับความกว้างของชั้น N-base ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 5.20 ซึ่งพิจารณาที่แรงดันเกตเท่ากับ 3.5 V. และ $V_{DD} = 10$ V. โดยเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองสร้าง IGBT กับค่าที่ได้จากการทดลองสร้างคิมอสและค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีของทั้ง IGBT และคิมอส

จากการทดลองวัดความสามารถในการนำกระแสของ IGBT ที่สร้างขึ้นโดยการพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ กับแรงดันคอลเลคเตอร์-อิมิตเตอร์ เมื่อเปรียบเทียบค่ากระแสคอลเลคเตอร์ในช่วงอิมิตัวที่วัดแรงดันเกตคงที่ กับความกว้างของชั้น N-base ของ IGBT พบว่า เมื่อความกว้างของชั้น N-base เพิ่มมากขึ้น ค่ากระแสคอลเลคเตอร์ของ IGBT จะลดลงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล โดยจากผลการทดลองเมื่อเพิ่มความกว้างของชั้น N-base จาก 60 เป็น 250 μm ปรากฏว่าค่ากระแสคอลเลคเตอร์จะลดลงถึง 57.27 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้เนื่องจากกระแสที่ไหลภายในโครงสร้างของ IGBT สามารถที่จะพิจารณาแบ่งได้เป็นสองส่วนคือ กระแสอิเล็กตรอน (I_e) และกระแสโฮล (I_h) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 (ก.) จะเห็นได้ว่ากระแสอิเล็กตรอนจะไหลผ่านในส่วนของโครงสร้างที่เป็นมอสเฟต โดยสามารถพิจารณาได้เช่นเดียวกับกรณีกระแสที่ไหลในโครงสร้างมอสเฟตโดยทั่วไป ที่ความสามารถในการนำกระแสหรือปริมาณกระแสที่ไหลในช่องทางเดินกระแสจะขึ้นอยู่กับความกว้างและความยาวของช่องทางเดินกระแสเท่านั้น แต่สำหรับในส่วนของกระแสโฮลจะไหลผ่านในส่วนของโครงสร้าง



รูปที่ 5.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ในช่วงอิมิตัวกับความกว้างของชั้น

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

ทรานซิสเตอร์ P-N-P ที่ฝังอยู่ในโครงสร้าง IGBT ปริมาณกระแสที่ไหลส่วนนี้นั้นจะสัมพันธ์กับอัตราขยายกระแสของโครงสร้างไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ P-N-P ใน IGBT แต่เนื่องจากอัตราการขยายกระแสไม่พียงแต่เพียงอย่างเดียวอีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของไบโพลาร์-ทรานซิสเตอร์ P-N-P แปรผกผันกับความกว้างของชั้น N-base เพราะว่าเมื่อความกว้างของชั้น N-base มีค่ามากขึ้นโอกาสที่โฮลที่ถูกฉีดเข้าไปในบริเวณ N-base จะรวมตัวกับอิเล็กตรอนในบริเวณ N-base ก็จะมีมากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นเมื่อความกว้างของชั้น N-base มากขึ้นจึงทำให้ปริมาณกระแสโฮลที่ไหลในโครงสร้าง IGBT ลดลง ส่งผลให้กระแสคอลเลกเตอร์ลดลงด้วย เมื่อพิจารณาผลการทดลองที่ได้จากการวัด IGBT กับผลการทดลองที่ได้จากการวัดมอสเฟตกำลังแบบเดิม จะเห็นได้ว่าที่ความกว้างของชั้น N-base ค่าน้อยๆ ค่ากระแสคอลเลกเตอร์ใน IGBT จะมีค่าสูงกว่ากระแสเดรน-ซอส ในเดิมมอสมาก แต่เมื่อความกว้างของชั้น N-base เพิ่มขึ้นค่ากระแสทั้งสองจะมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งเป็นการยืนยันว่ากระแสโฮลที่ถูกฉีดเข้าไปในชั้น N-base ซึ่งมีกระแสอิเล็กตรอนไหลอยู่จะทำให้เกิดการมอดูเลตสภาพนำทำให้มีกระแสไหลมากขึ้น ส่วนในเดิมมอสกระแสส่วนใหญ่จะเป็นกระแสอิเล็กตรอน ทั้งนี้เนื่องจากที่ความกว้างของชั้น N-base น้อยๆ ค่าอัตราขยายกระแสของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ P-N-P มีค่าสูงทำให้กระแสโฮลไหลมาก เมื่อรวมกับกระแสอิเล็กตรอนแล้วจึงมีค่าสูงกว่ากระแสเดรน-ซอส ของเดิมมอสมาก แต่เมื่อความกว้างของชั้น N-base มากขึ้น อัตราการขยายกระแสของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ P-N-P มีค่าต่ำทำให้ปริมาณกระแสโฮลมีค่าน้อยกระแสรวมจึงมีค่าใกล้เคียงกับกระแสเดรน-ซอสในเดิมมอส ซึ่งกระแสส่วนใหญ่เป็นกระแสอิเล็กตรอน

5.3.2 ผลของความกว้างของชั้น N-base ต่อค่าทรานคอนดักแตนซ์

ค่าทรานคอนดักแตนซ์ (g_{msat}) เป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่สามารถบ่งบอกถึงความสามารถในการนำกระแสของอุปกรณ์ IGBT ได้โดยตรง ดังนั้นในการทดลองในบทนี้จึงทำการทดลองศึกษาผลของความกว้างของชั้น N-base หรือกล่าวอีกในหนึ่งก็คือผลของอัตราการขยายกระแสของไบโพลาร์ P-N-P ที่มีต่อค่าทรานคอนดักแตนซ์

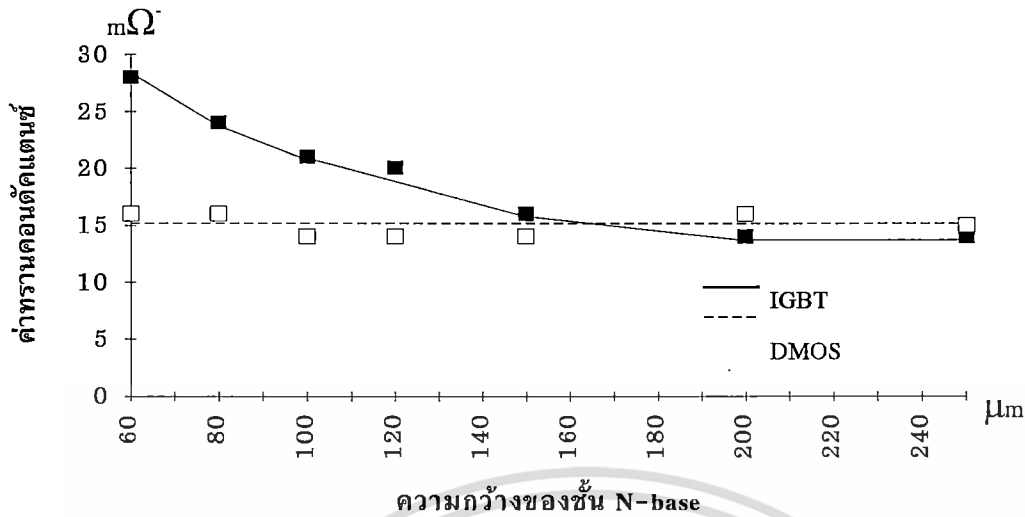
การทดลองและผลการทดลอง

ทำการคำนวณค่าทรานคอนดักแตนซ์ (g_{msat}) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลกเตอร์กับแรงดันคอลเลกเตอร์-อิมิตเตอร์ โดยอาศัยสมการ (5.2)

$$g_{msat} = \left. \frac{\Delta I_C}{\Delta V_G} \right|_{V_{CE} = \text{constant}} \quad (5.2)$$

จากนั้นนำค่าที่ได้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าทรานคอนดักแตนซ์กับค่าความกว้างของชั้น N-base ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 5.21 โดยจะแสดงถึงผลที่ได้จากการทดลองสร้าง IGBT เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองสร้างเดิมมอสและผลที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีของทั้ง IGBT และ เดิมมอส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าทรานคอนดักแตนซ์กับค่าความกว้างของชั้น N-base

เมื่อพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าทรานคอนดักแตนซ์กับค่าความกว้างของชั้น N-base ดังแสดงในรูปที่ 5.21 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มความกว้างของชั้น N-base จาก 60 ไปถึง 250 ไมครอน พบว่าค่าคอนดักแตนซ์จะลดลงไปถึง 61.17 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้เนื่องจากค่าทรานคอนดักแตนซ์พิจารณาในช่วงกระแสอิ่มตัวและขึ้นอยู่กับค่าอัตราขยายกระแสของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ P-N-P ดังนั้นจึงแปรผกผันกับความกว้างของชั้น N-base เช่นเดียวกับกระแสคอลเลกเตอร์

5.3.3 ผลของความกว้างของชั้น N-base ที่มีต่อค่าความต้านทานในสภาวะนำกระแส

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

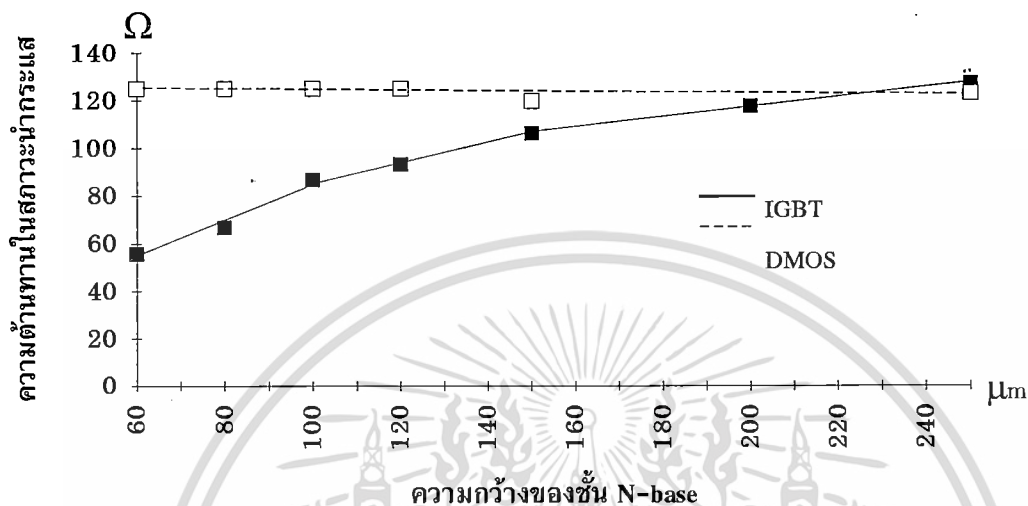
การทดลองและผลการทดลอง

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลกเตอร์กับแรงดันคอลเลกเตอร์-อิมิตเตอร์ ทำการคำนวณค่าความต้านทานในสภาวะนำกระแส (R_{on}) โดยอาศัยสมการที่ (5.3)

$$R_{on} = \left. \frac{\Delta V_C}{\Delta I_C} \right|_{V_{CE} = \text{constant}} \quad (5.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นนำค่าที่ได้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานในสภาวะนำกระแสกับความกว้างของชั้น N-base ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 5.22 โดยจะแสดงถึงผลที่ได้จากการทดลองสร้าง IGBT เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองสร้างดีมอส



รูปที่ 5.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานในสภาวะนำกระแสกับค่าความกว้างของชั้น N-base

พิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานในสภาวะนำกระแสกับความกว้างของชั้น N-base ดังแสดงในรูปที่ 5.22 ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าความต้านทานในสภาวะนำกระแสของ IGBT จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความกว้างของชั้น N-base โดยจากผลการทดลองเมื่อเพิ่มความกว้างของชั้น N-base จาก 60 ไปถึง 50 μm ปรากฏว่าความต้านทานในสภาวะนำกระแสเพิ่มขึ้นถึง 2.29 เท่า ซึ่งแตกต่างจากความต้านทานในสภาวะนำกระแสของดีมอสซึ่งมีค่าคงที่ ทั้งนี้เนื่องจากความต้านทานในสภาวะนำกระแสของดีมอสจะขึ้นอยู่กับความกว้างและความยาวของช่องทางเดินกระแส เนื่องจากความต้านทานในสภาวะนำกระแสของดีมอสส่วนใหญ่เป็นผลของความต้านทานในส่วน N-base ซึ่งมีค่าคงที่ขึ้นกับชนิดของแผ่นผลึกฐานรอง แต่ใน IGBT ความต้านทานในสภาวะนำกระแสส่วนใหญ่ก็ยังเป็นความต้านทานในส่วน N-base เช่นกันแต่สามารถที่จะเปลี่ยนแปลงให้ลดลงได้ขึ้นอยู่กับปริมาณโฮลที่ถูกฉีดเข้าไปในชั้น N-base ดังนั้นเมื่อความกว้างของชั้น N-base มีค่าน้อย อัตราการขยายกระแสของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ P-N-P จะมีค่าสูงซึ่งจะทำให้มีปริมาณกระแสโฮลที่ถูกฉีดเข้าไปในชั้น N-base มีค่าสูงตามไปด้วย ทำให้ความต้านทานในส่วน N-base มีค่าลดลงมาก ส่งผลให้ความต้านทานในสภาวะนำกระแสของ IGBT มีค่าต่ำลงไปด้วย ในทางตรงกันข้าม เมื่อความกว้างของชั้น N-base มากขึ้น อัตราการขยายกระแสของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ P-N-P จึงมีค่าต่ำทำให้ปริมาณกระแสโฮลที่ถูกฉีดเข้าไปในชั้น N-base มีค่าน้อยลงเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่งผลให้ความต้านทานในสภาวะนำกระแสของ IGBT มีค่าสูงขึ้น เข้าใกล้ความต้านทานในสภาวะนำกระแสของดีมอส

5.4 การศึกษาปรากฏการณ์แลตซ์-ออฟในอุปกรณ์ IGBT

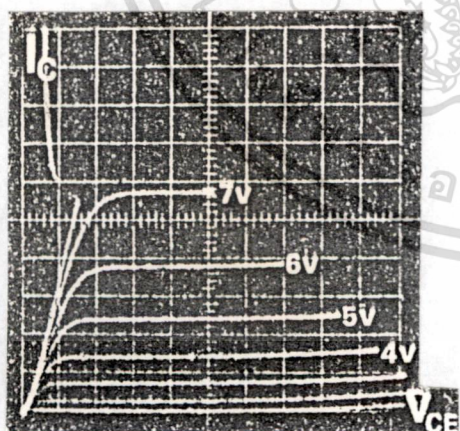
ปรากฏการณ์แลตซ์-ออฟเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากการเกิดโครงสร้างแฝงลิ้นแบบไทรส-เตอร์ขึ้นในโครงสร้าง IGBT ทำให้ไม่สามารถควบคุมการไหลของกระแสได้โดยการควบคุมแรงดันที่ขั้วเกต ดังนั้นในอุปกรณ์ IGBT จึงพยายามหลีกเลี่ยงการเกิดปรากฏการณ์แลตซ์-ออฟ ทั้งนี้นอกจากจะทำให้ไม่สามารถควบคุมการไหลของกระแสแล้วยังสามารถทำให้อุปกรณ์เกิดความเสียหายได้

การออกแบบและสร้าง

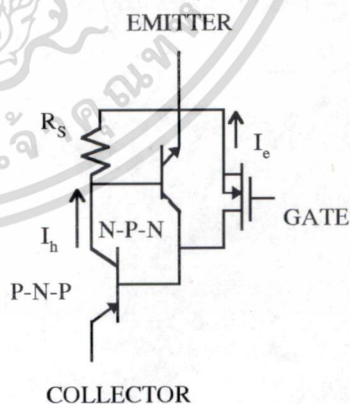
จะใช้อุปกรณ์ IGBT ในแนวคิดที่สร้างจากหัวข้อ 5.1.1.2 ดังนั้นการออกแบบและการสร้างอุปกรณ์ IGBT รายละเอียดได้ในหัวข้อ 5.1.1.2

การทดลองและผลการทดลอง

นำอุปกรณ์ IGBT ที่สร้างเสร็จสมบูรณ์มาต่อเข้ากับเครื่องวัดคุณสมบัติความเป็นทรานซิสเตอร์ โดยให้แรงดันไบอัสที่ขั้วคอลเลคเตอร์เทียบกับอิมิตเตอร์ (V_{CE}) เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งเกิดปรากฏการณ์แลตซ์-ออฟดังแสดงในรูปที่ 5.23 (ก)



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.23 (ก) ลักษณะกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I_c กับ V_{CE} ของ IGBT ขณะเกิดแลตซ์-ออฟ

(ข) วงจรสมมูลแสดงทิศทางการไหลของกระแสคอลเลคเตอร์ขณะเกิดแลตซ์-ออฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับผูกมัดให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองจะเกิดแลตซ์-ออฟขึ้นเส้น $V_G = 8 \text{ V}$ กระแสคอลเลคเตอร์ = 28 mA สาเหตุที่เกิดแลตซ์-ออฟ เพราะว่าไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ N-P-N ที่แฝงอยู่ในโครงสร้างของ IGBT ดังแสดงในรูปที่ 5.23 (ข) เกิดการทำงานขึ้น เนื่องมาจากกระแสโฮลจากส่วน P^+ -collector เคลื่อนที่ผ่านรอยต่อพี-เอ็นเข้าไปในส่วน P-base ทำให้แรงดันคร่อมเบส-อิมิตเตอร์ของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ N-P-N มีค่า 0.7 V ทำให้กระแสอิเล็กตรอนทั้งหมดไหลจากอิมิตเตอร์ไปสู่คอลเลคเตอร์ โดยไม่จำเป็นต้องผ่านส่วนเกทที่ควบคุมอยู่ เป็นผลให้ IGBT ไม่สามารถทำงานได้ในลักษณะของทรานซิสเตอร์ จากการทดลองเราสามารถคำนวณความต้านทานส่วน P-base มีค่าเท่ากับ 25 Ω การเกิดแลตซ์-ออฟนี้จะทำให้เกิดการจำกัดการนำกระแสซึ่งเป็นผลเสียที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างของ IGBT ดังนั้นจึงต้องหาวิธีแก้ไข ซึ่งมีหลายวิธีแต่จะมีความเหมาะสมในการสร้างที่แตกต่างกันไป ซึ่งความเหมาะสมเหล่านี้จะต้องมีการวิจัยในโอกาสต่อไป แต่พอสรุปวิธีแก้ไขได้ คือ 1. ลดค่าความต้านทานในส่วน P-base โดยเพิ่มส่วน P-sinker แสดงในรูปที่ 3.7 (2) ลดปริมาณกระแสโฮลจาก P^+ -collector (3) สร้างส่วนที่ลดปริมาณกระแสโฮล ที่เรียกว่า N-buffer และ (4) เพิ่มจำนวนเซลล์ของ IGBT ให้มาก โดยแต่ละเซลล์จ่ายกระแสน้อยกว่าจุดแลตซ์-ออฟ ซึ่งสามารถทำให้ได้รับกระแสคอลเลคเตอร์รวมได้มาก แต่จะได้ทำให้ชิพมีขนาดใหญ่

5.5 การศึกษาการตอบสนองความถี่ของอุปกรณ์ IGBT

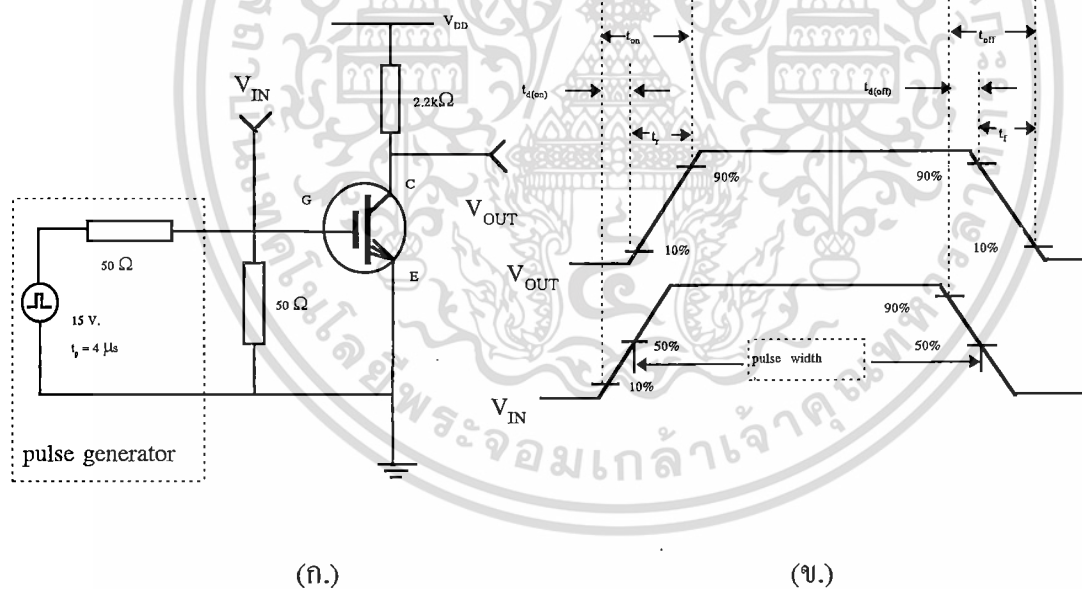
IGBT เป็นอุปกรณ์ที่มีความเร็วในการสวิตช์ที่ต่ำกว่า MOSFET กำลัง ทั้งนี้เป็นผลมาจากการค่อยๆ ลดลงของกระแสคอลเลคเตอร์หลังจากตัดแรงดันไบอัสที่ขั้วเกท ซึ่งทำให้เวลาช่วงขอบขาของกราฟรูปคลื่นของกระแสคอลเลคเตอร์มีค่ามาก เนื่องจากประจุพาหะส่วนน้อยจะไม่หมดลงทันทีหลังจากตัดแรงดันที่ขั้วเกทเหมือนกับประจุพาหะส่วนมากหรืออิเล็กตรอน แต่ประจุพาหะส่วนน้อยจะลดลงได้โดยการเกิดการรวมตัวเท่านั้น ทำให้เป็นข้อเสียเปรียบของอุปกรณ์ IGBT สำหรับแนวทางการลดช่วงเวลาดัดกระแสของ IGBT สามารถทำได้โดยการลดช่วงอายุของประจุพาหะส่วนน้อยในชั้น N-base โดยการสร้างจุดศูนย์กลางการรวมตัวขึ้นในชั้น N-base ซึ่งโดยทั่วไปสามารถทำได้สองวิธีคือ การแพร่อะตอมสารเจืออย่างเช่น ทองคำ (Au) เข้าไปเพื่อเปลี่ยนแปลงสภาพโครงสร้างของซิลิกอนในชั้น N-base แต่วิธีนี้ไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากทำให้เกิดความสกปรกและยังควบคุมความลึกและปริมาณอะตอมทองคำได้ยาก ซึ่งจะมีปัญหาหากับอุปกรณ์ที่มีการแพร่อะตอมสารเจือ 2 ชั้นอย่างเช่น DMOS หรือ IGBT ส่วนวิธีที่สองเป็นการ bombard ชั้นซิลิกอนด้วยอนุภาคที่มีพลังงานสูง ซึ่งจะก่อให้เกิดความเสียหายกับผลึกทำให้โครงสร้างของซิลิกอนในชั้น N-base เปลี่ยนไป ซึ่งเป็นวิธีที่ดีและสะอาดมากกว่าแต่ต้องใช้ขบวนการที่ยุ่งยากและมีค่าใช้จ่ายสูงมากเช่นกัน อย่างไรก็ตามปรากฏการณ์ที่พบเห็นได้ง่ายทำให้ช่วงเวลาดัดกระแสของ IGBT ลดลงก็คือ การเพิ่มแรงดันไบอัสที่ขั้วคอลเลคเตอร์ ซึ่งรายละเอียดและผลการทดลองจะได้กล่าวดังต่อไปนี้

การออกแบบและสร้าง

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

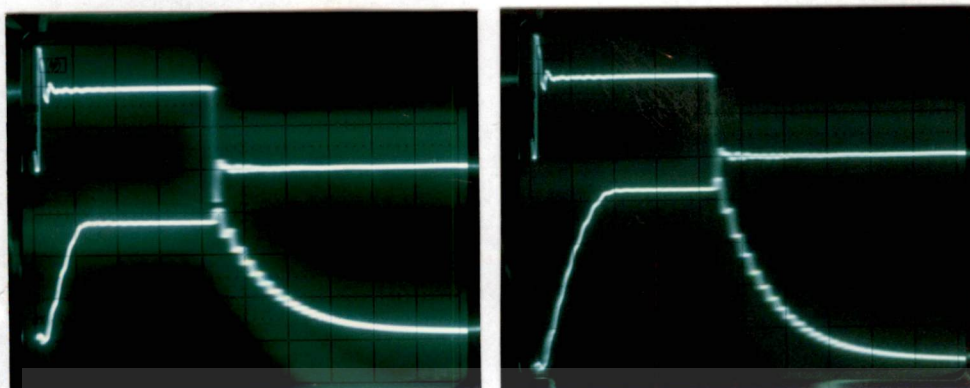
การทดลองและผลการทดลอง

หลังจากทดสอบคุณสมบัติความเป็นทรานซิสเตอร์ของอุปกรณ์ เพื่อพิสูจน์ว่าอุปกรณ์ตัวที่สนใจสามารถทำงานได้จริงตามที่ต้องการแล้ว นำอุปกรณ์ดังกล่าวมาวัดการตอบสนองสัญญาณไฟฟ้ารูปสี่เหลี่ยมที่แสดงในรูปที่ 5.24 (ข.) โดยใช้วงจรดังรูปที่ 5.24 (ก.) เพื่อหาค่า t_r , t_f , $t_{d(\text{on})}$ และ $t_{d(\text{off})}$ ผลการทดลองที่ได้แสดงดังตารางที่ 5.1



รูปที่ 5.24 (ก.) วงจรวัดการตอบสนองสัญญาณไฟฟ้ารูปสี่เหลี่ยม

(ข.) สัญญาณไฟฟ้ารูปสี่เหลี่ยมที่ใช้วัดค่า t_r , t_f , $t_{d(\text{on})}$, $t_{d(\text{off})}$



(ก.)

Ver : 5 V./div.

Hor : 0.1 μ s/div.

(ข.)

Ver : 5 V./div.

Hor : 0.1 μ s/div.

รูปที่ 5.25 สัญญาณ Input และ Output ของอุปกรณ์ IGBT ที่วัดโดย

(ก.) $V_C = +10$ V. (ข.) $V_C = +15$ V

ตารางที่ 5.2 แสดงผลของความเร็วในการสวิตช์ของอุปกรณ์ IGBT

พารามิเตอร์	แรงดันที่ขั้วคอลเลคเตอร์		หน่วย
	+ 10 V.	+ 15 V.	
W	4800	4800	μ m
L	5	5	μ m
g_{msat}	28	28	$m\Omega^{-1}$
t_r	0.07	0.10	μ s
t_f	0.28	0.24	μ s
$t_{d(on)}$	0.08	0.11	μ s
$t_{d(off)}$	0.30	0.26	μ s

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองในรูปที่ 5.25 และตารางที่ 5.2 เห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มแรงดันที่ขั้วคอลเลกเตอร์จาก +10 V ไปเป็น +15 V จะทำให้ช่วงเวลาดัดกระแสลดลง กล่าวคือ t_f จะลดลงจาก 0.28 μs ไปเป็น 0.24 μs หรือลดลง 14.28 % ทั้งนี้สามารถอธิบายได้โดยอาศัยสมการที่ (5.1) และ (5.2) ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มแรงดัน V_C จะทำให้อัตราการขยายกระแสของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ P-N-P ลดลง ส่งผลให้ปริมาณประจุพาหะส่วนน้อยที่ถูกฉีดเข้าไปในชั้น N-base ลดลง การสะสมประจุพาหะส่วนน้อยในชั้น N-base จึงน้อยลงทำให้ลดเวลาที่ใช้ในการรวมตัวของประจุพาหะส่วนน้อยจนหมดหลังจากตัดแรงดันที่ขั้วเกต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

การสร้างอุปกรณ์ IGBT โดยการแพร่สารเจือด้วยความร้อนในห้องปฏิบัติการศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์นั้นสามารถสร้างขึ้นเป็นผลสำเร็จและมีประสิทธิภาพดีพอสมควร ทั้งนี้เนื่องจากยังมีปัญหาอีกหลายประการที่ต้องวิเคราะห์และแก้ไขซึ่งจะได้ทำการพัฒนาต่อไปเพื่อให้ได้อุปกรณ์ IGBT ที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดเท่าที่จะสามารถทำได้ แต่อย่างไรก็ตามจากการที่ได้ทำการศึกษา ค้นคว้า วิจัยและทดลอง โดยเริ่มจากการทดลองสร้าง IGBT โดยใช้กระจกต้นแบบที่ออกแบบไว้สำหรับสร้างมอสเฟตกำลังแบบเดิมอสเพื่อความเป็นไปได้ในการที่จะสร้างอุปกรณ์ IGBT โดยสมบูรณ์ จากนั้นได้ทำการศึกษาตัวแปรต่างๆที่เป็นพื้นฐานในการปรับปรุงประสิทธิภาพของตัวอุปกรณ์ ซึ่งในการทดลองเพื่อหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมจะทำการทดลองโดยใช้โครงสร้างในแนวระนาบ ทั้งนี้เนื่องจากสามารถที่จะเปลี่ยนแปลงขนาดทางเรขาคณิตได้ง่าย ซึ่งผลการทดลองที่ได้สามารถที่จะนำไปใช้เป็นข้อมูลได้ทั้งในโครงสร้างในแนวระนาบและโครงสร้างในแนวตั้ง และเป็นแนวทางในการออกแบบ สร้างและพัฒนาที่จะนำไปสู่การสร้างอุปกรณ์ IGBT ที่มีประสิทธิภาพสูงต่อไปในอนาคต โดยจากผลการทดลองออกแบบและสร้าง IGBT ที่ผ่านมาสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

จากการทดลองทดสอบโครงสร้างทางเรขาคณิตพื้นฐานของ IGBT โดยทำการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อพี-เอ็นและทดสอบการทำงานในลักษณะของทรานซิสเตอร์ พบว่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อพี-เอ็นที่สร้างขึ้นเป็นไปตามที่กำหนดและเหมาะสมที่จะสร้างเป็น IGBT ทั้งในแนวตั้งและในแนวระนาบ สำหรับในส่วนของการทำงานในลักษณะของทรานซิสเตอร์พบว่าความสามารถในการนำกระแสคอลเลกเตอร์อยู่ในระดับที่ดี มีค่าทรานคอนดักแตนซ์สูงและมีความต้านทานในสถานะนำกระแสต่ำ

เมื่อเปรียบเทียบการทำงานระหว่าง IGBT กับมอสเฟตกำลังแบบเดิมอสที่มีขนาดทางเรขาคณิตที่เท่ากันพบว่า IGBT มีกระแสคอลเลกเตอร์และค่าทรานคอนดักแตนซ์สูงกว่าเดิมอส ซึ่งเกิดจากการมอดูเลตสภาพนำของ P-N-P ทรานซิสเตอร์ เป็นผลให้มีความต้านทานในสถานะนำกระแสต่ำกว่าเดิมอส ดังนั้น IGBT จึงมีความเหมาะสมที่จะใช้แทนมอสเฟตกำลังที่ต้องการให้มีสถานะการนำกระแสสูง ๆ ได้เป็นอย่างดี

จากการพิจารณาผลของความกว้างของชั้น N-base ที่มีต่อกระแสคอลเลกเตอร์และค่าทรานคอนดักแตนซ์พบว่า เมื่อทดลองเพิ่มความกว้างของชั้น N-base จาก 60 ไปจนถึง 250 μm กระแสคอลเลกเตอร์และค่าทรานคอนดักแตนซ์ลดลง 57.27 และ 61.17 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ แต่ในส่วนของคุณต้านทานในสถานะนำกระแสจะเพิ่มขึ้น ประมาณ 2.29 เท่า ซึ่งจากผลการทดลองเมื่อพิจารณาเฉพาะในแง่ของความสามารถในการนำกระแสสามารถสรุปได้ว่ายิ่งความกว้างของชั้น N-base น้อยลงเท่าใดก็ยิ่งจะเป็นผลดีต่อความสามารถในการนำกระแส แต่ในการออกแบบสร้างจริง ๆ นั้นจะต้องคำนึงถึงความสามารถในการทนแรงดันพังทลายของอุปกรณ์อีกอย่างหนึ่งด้วย

สำหรับการเกิดปรากฏการณ์แลตซ์-ออฟในรายงานนี้ แสดงให้เห็นเพียงลักษณะคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่เกิดการเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากเกิดการทำงานของ N-P-N ทรานซิสเตอร์ที่แฝงในโครงสร้าง อย่างไรก็ตาม การศึกษาในเรื่องของแลตซ์-ออฟ จะต้องได้รับการศึกษาต่อไปในอนาคต เพื่อจะได้แก้ไขให้ IGBT มีการนำกระแสได้มากขึ้นกว่าเดิม ด้วยการควบคุมการนำกระแส ด้วยโครงสร้างของมอสเฟต

สำหรับการตอบสนองความถี่ของ IGBT ปัญหาอยู่ที่ช่วงเวลาดัดกระแสเน้นการปรับปรุงทางโครงสร้างสามารถทำได้ยากมากอีกทั้งสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายสูง ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการทดลองเฉพาะผลของแรงดัน ไบอัสที่ขั้วคอลเลคเตอร์ต่อช่วงเวลาดัดกระแส โดยจากผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มแรงดันไบอัสที่ขั้วคอลเลคเตอร์จาก +10 V. ไปเป็น +15 V. พบว่าช่วงเวลาดัดกระแสลดลงประมาณ 15 เปอร์เซ็นต์

จากผลการศึกษา ออกแบบ สร้างและปรับปรุง IGBT ที่ใช้เทคโนโลยีการแพร่สารเจือด้วยความร้อน ที่กล่าวมาข้างต้น นับได้ว่าเป็นก้าวหนึ่งในการพัฒนาการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำกำลังสูงขึ้นในประเทศไทยและข้อมูลต่างๆเหล่านี้จะมีประโยชน์อย่างยิ่งในการพัฒนาอุปกรณ์กำลังแบบ IGBT ให้มีประสิทธิภาพสูงยิ่งขึ้นไปในอนาคต



กิตติกรรมประกาศ

รายงานการวิจัยฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์เป็นรูปเล่มขึ้นมาอันก็ด้วยความร่วมมือและช่วยเหลือจาก อาจารย์และเจ้าหน้าที่ทุกท่านในศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล. ทางผู้วิจัยขอขอบคุณทุกท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งขอขอบคุณ รศ.ดร.สมเกียรติ สุขเกษ ผู้ให้คำปรึกษาตลอดจนชี้แนะแนวทางให้ งานวิจัยต่างๆ ได้บรรลุเป้าหมาย ขอขอบคุณ ผศ.วิสุทธิ จูติรุ่งเรือง อ.สมศักดิ์ เขียวศิริกุล และดร. สมศักดิ์ ชุมช่วยผู้ให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทางในการแก้ปัญหาทั้งทางทฤษฎีและปฏิบัติ สุดท้ายนี้ต้องขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติที่ให้สนับสนุนทุกวิจัยในครั้งนี้ ทำให้โครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี



๕

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. J. P. Russell, A. M. Goodman, L. A. Goodman, and J. M. Neilson, "The COMFET-A New High Conductance MOS-Gate Device", IEE Electron Device Letters, Vol. EDL-4, No. 3, p 63-65
2. B.J. Baliga, MODERN POWER DEVICES, John Wiley & Sons Ltd., 1987
3. Oliver J. Mccarthy, "MOS Devie and Circuit Design", John Wiley & Sons Ltd., 1982
4. B. Jayant Baliga, "Analysis of the Output Conductance of Insulated Gate Transistors", IEE Electron Device Letters, Vol. EDL-7, No.12, p 686-688
5. ศศ.สมเกียรติ สุภเดช, ปฏิบัติการเทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำ, วารสารอิเล็กทรอนิกส์ เวลด์, พ.ศ. 2525
6. พอล รุจนพิชญ์, สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, ศศ.วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง, และ รศ.ดร.สมเกียรติ สุภเดช, การสร้างไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกทเป็นฉนวน , ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 15, พ.ศ.2535
7. พอล รุจนพิชญ์, สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, ศศ.วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรืองและรศ.ดร.สมเกียรติ สุภเดช, ความกว้างของN-base ที่มีผลต่อความสามารถในการนำกระแสของ IGBT , ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 17, พ.ศ.2537
8. พอล รุจนพิชญ์, สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, ศศ.วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง,และรศ.ดร.สมเกียรติ สุภเดช, การออกแบบและสร้างมอสเฟटक้ำดั่งแบบวีมอส , ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 14, พ.ศ.2534

ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก1 แสดงชาร์ตสีของ SiO_2 จากกระบวนการออกซิเดชันด้วยความร้อน โดยสังเกตภายใต้แสงฟลูออเรสเซนต์

Film thickness, μm	Color and comments	Film thickness, μm	Color and comments
0.05	Tan	0.63	Violet red
0.07	Brown	0.68	"Bluish" (Not blue but
0.10	Dark violet to red violet		borderline between vio-
0.12	Royal blue		let and blue green. It
0.15	Light blue to metallic		appears more like a
	blue		mixture between violet
0.17	Metallic to very light		red and blue green and
	yellow green		looks grayish)
0.20	Light gold or yellow—	0.72	Blue green to green
	slightly metallic		(quite broad)
0.22	Gold with slight yellow	0.77	"Yellowish"
	orange	0.80	Orange (rather broad for
0.25	Orange to melon		orange)
0.27	Red violet	0.82	Salmon
0.30	Blue to violet blue	0.85	Dull, light red violet
0.31	Blue	0.86	Violet
0.32	Blue to blue green	0.87	Blue violet
0.34	Light green	0.89	Blue
0.35	Green to yellow green	0.92	Blue green
0.36	Yellow green	0.95	Dull yellow green
0.37	Green yellow	0.97	Yellow to "yellowish"
0.39	Yellow	0.99	Orange
0.41	Light orange	1.00	Carnation pink
0.42	Carnation pink	1.02	Violet red
0.44	Violet red	1.05	Red violet
0.46	Red violet	1.06	Violet
0.47	Violet	1.07	Blue violet
0.48	Blue violet	1.10	Green
0.49	Blue	1.11	Yellow green
0.50	Blue green	1.12	Green
0.52	Green (broad)	1.18	Violet
0.54	Yellow green	1.19	Red violet
0.56	Green yellow	1.21	Violet red
0.57	Yellow to "yellowish"	1.24	Carnation pink to
	(not yellow but is in the		salmon
	position where yellow is	1.25	Orange
	to be expected. At times	1.28	"Yellowish"
	it appears to be light	1.32	Sky blue to green blue
	creamy gray or metal-	1.40	Orange
	lic)	1.45	Violet
0.58	Light orange or yellow to	1.46	Blue violet
	pink borderline	1.50	Blue
0.60	Carnation pink	1.54	Dull yellow green

เอกสารนี้เป็นเอกสารราชการ อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

1. ค่าคงที่ทางฟิสิกส์

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

2. คุณสมบัติของซิลิกอนไดออกไซด์

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. คุณสมบัติของซิลิกอน

ตัวแปร	ค่าคงที่	หน่วย
เลขอะตอม	14	
น้ำหนักอะตอม	28.086	
ความหนาแน่นอะตอม	2.96×10^{22}	cm^{-3}
ความหนาแน่น	2.328	g/cm^3
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก	11.7	
พลังงานแถบต้องห้าม	1.115	eV
สัมประสิทธิ์ทางอุณหภูมิของพลังงานแถบต้องห้าม	-2.3×10^{-4}	$\text{eV}/^\circ\text{C}$
จุดหลอมเหลว	1417	$^\circ\text{C}$
ความคล่องตัวของอิเล็กตรอนที่ผิวของ Si ระนาบ (100)	580	$\text{cm}^2/\text{V-s}$
ความคล่องตัวของอิเล็กตรอนที่ผิวของ Si ระนาบ (111)	190	$\text{cm}^2/\text{V-s}$
ความคล่องตัวของอิเล็กตรอนในเนื้อสารของ Si ระนาบ (100)	1260	$\text{cm}^2/\text{V-s}$
ความคล่องตัวของอิเล็กตรอนในเนื้อสารของ Si ระนาบ (111)	1350	$\text{cm}^2/\text{V-s}$
ความคล่องตัวของโฮลที่ผิวของ Si ระนาบ (100)	230	$\text{cm}^2/\text{V-s}$
ความคล่องตัวของโฮลที่ผิวของ Si ระนาบ (111)	-	$\text{cm}^2/\text{V-s}$
ความคล่องตัวของโฮลในเนื้อสารของ Si ระนาบ (100)	400	$\text{cm}^2/\text{V-s}$
ความคล่องตัวของโฮลในเนื้อสารของ Si ระนาบ (111)	480	$\text{cm}^2/\text{V-s}$
ดัชนีหักเห	3420	
การนำความร้อน	1.57	W/cm
การขยายตัวเนื่องจากความร้อน	2.6×10^{-6}	$(^\circ\text{C})^{-1}$
ค่าคงที่ของผลึก	5.4307	$^\circ\text{A}$
ความดันต่อหน่วยปริมาตร	0.98×10^{12}	cm^2/dyn
ฟังก์ชันงานของโฟโตอิมิตอน	5.05	eV
ความแข็ง	7.0	MOHscale
พลังงานความร้อนในการหลอมเหลว	1000	J/g
ความหนาแน่นของพาหะของซิลิกอนบริสุทธิ์	1.45×10^{10}	cm^{-3}
ความดันไอ	2.8×10^{-4}	mm.Hg
โครงสร้างผลึก	f_{CC} diamond	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

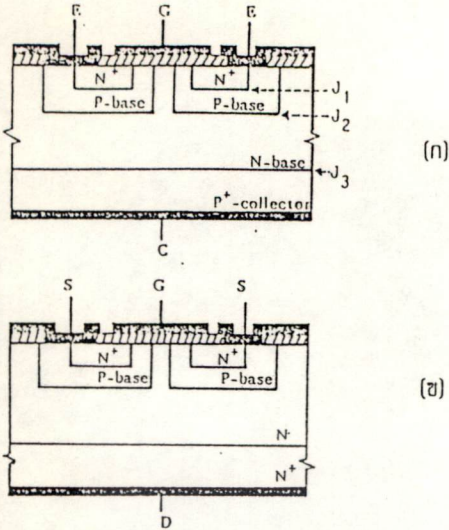
บทความวิจัย

จากการสนับสนุนทุนวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยได้นำเสนอบทความวิจัย โดยได้รับการตีพิมพ์ในการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า จำนวน 2 เรื่อง คือ

1. การสร้างไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกทเป็นฉนวน
Fabrication of Insulation Gate Bipolar Transistor
2. ความกว้างของชั้น N-base ที่มีผลต่อความสามารถในการนำกระแสของ IGBT
Effect of N-base Width on Current Conduction Capability of IGBT



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



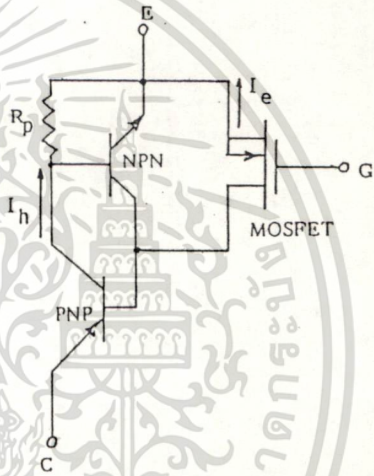
รูปที่ 1 ภาพตัดขวางโครงสร้างของ (ก) IGBT (ข) ดิมอส

จากรูปที่ 1(ก) เมื่อให้แรงดันไบอัสบวกแก่คอลเลคเตอร์ เมื่อเทียบกับอิมิตเตอร์ ในขณะที่เกตลวดจรเข้ากับขั้วอิมิตเตอร์ ร้อยต่อ J2 จะเป็นไบอัสย้อนกลับ ทำให้อุปกรณ์ทำงานในโหมดปิดกั้นตรง (forward blocking mode) เมื่อเพิ่มแรงดันไบอัสบวกแก่เกตมากพอที่จะสร้างชั้นกลับ (inversion layer) ชั้นที่ผิวของส่วน P-base ภายใต้เกต จะทำให้ IGBT นำกระแสอิเล็กตรอนไหลผ่านส่วน N'-emitter ไปยังส่วน N-base ส่วนรอยต่อ J3 จะเป็นการไบอัสตรง ดังนั้นโฮลในส่วน P'-collector จะถูกฉีดเข้าไปในส่วน N-base และเมื่อไบอัสตรงมากขึ้น ความหนาแน่นของโฮลที่ฉีดเข้าไปจะมากขึ้นด้วย จนกระทั่งมากเกินกว่าระดับความหนาแน่นสารเจือส่วน N-base ทำให้อุปกรณ์ทำงานเหมือนกับการไบอัสตรงของ P-i-N ไดโอด ซึ่งจะช่วยลดความต้านทานในภาวะนำกระแส เป็นผลให้ IGBT มีความหนาแน่นกระแสสูงขึ้น

แต่ถ้าต้องการให้ IGBT หยุดทำงาน สามารถควบคุมได้ง่ายๆ โดยนำเกตลวดจรกับขั้วอิมิตเตอร์ ทำให้ช่องทางเดินกระแสหายไป จะไม่มีกระแสไหลผ่านตัวอุปกรณ์

3. IGBT ทำงานในโหมดของไทรสเตอร์

พิจารณาในรูปที่ 3 พบว่า วงจรสมมูลที่แท้จริงของ IGBT จะประกอบด้วย ทรานซิสเตอร์ 2 ตัว คือ N-P-N ทรานซิสเตอร์ตัวบน และ P-N-P ทรานซิสเตอร์ตัวล่างต่อเข้าด้วยกันเหมือนกับโครงสร้าง 4 ชั้นแบบไทรสเตอร์ที่มีมอสเฟตต่อขนานกับ N-P-N ทรานซิสเตอร์ตัวบน ซึ่งจะแตกต่างกับวงจรสมมูลที่ได้ในรูปที่ 2(ก) ที่ถูกพิจารณาว่า N-P-N ทรานซิสเตอร์ตัวบนไม่ทำงาน ดังนั้นจึงตัด N-P-N ทรานซิสเตอร์ตัวบนออกไป สำหรับในรูปที่ 3 N-P-N ทรานซิสเตอร์ตัวบนสามารถทำงานได้ ถ้าแรงดันที่ K_p มีค่ามากกว่า 0.6 โวลต์ การทำงานที่เกิดขึ้นจากเงื่อนไข ทำให้ IGBT ทำงานเหมือนกับไทรสเตอร์ กล่าวคือ กระแสคอลเลคเตอร์จะไม่ถูกควบคุมด้วยส่วนเกต แต่จะไหลจาก P'-collector ไปยัง N'-emitter ได้ โดยผ่านรอยต่อ J1 แทนที่จะผ่านช่องทางเดินกระแส การทำงานในลักษณะนี้จะเรียกว่า การเกิดแลตช์-อัพ (latch-up) ในโครงสร้างของ IGBT

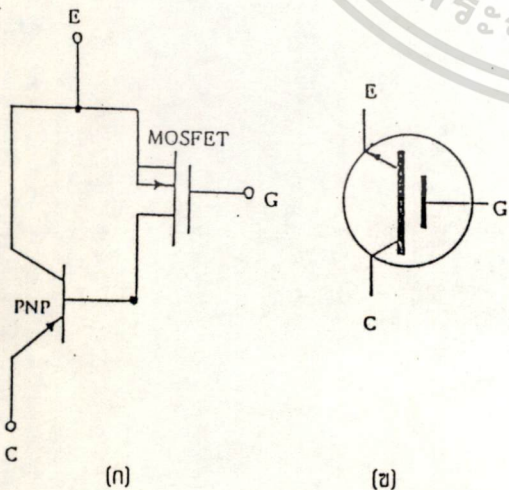


รูปที่ 3 วงจรสมมูลของ IGBT ที่ใช้พิจารณาการทำงานในลักษณะของไทรสเตอร์ที่เรียกว่า แลตช์-อัพ

4. การสร้าง

เพื่อศึกษาโครงสร้างและทำความเข้าใจหลักการการทำงานของ IGBT รวมถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นกับ IGBT เนื่องจากโครงสร้างแผง 4 ชั้นแบบไทรสเตอร์ ดังนั้นจึงได้ทำการสร้าง IGBT ให้มีขนาดความยาวและความกว้างของช่องทางเดินกระแสเป็น 6 ไมครอน และ 800 ไมครอน ตามลำดับ โดยใช้ลวดลายต้นแบบเดียวกันกับที่ใช้สร้างดิมอส ซึ่งมีรายละเอียดของกระบวนการสร้าง ดังนี้ คือ

การสร้าง IGBT จะใช้แผ่นผลึกซิลิคอนชนิด N หนา 100 ไมครอน ความต้านทาน 5 โอห์ม-เซนติเมตร หนา 180 ไมครอน ด้านหลังแผ่นผลึกจะแพร่สารเจือโบรอน $2.17 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ให้เป็นส่วน P'-collector และใช้เป็นขั้วคอลเลคเตอร์ ส่วนด้านบนแผ่นผลึกจะแพร่สารเจือโบรอน $4.17 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ เพื่อสร้างเป็นส่วน P-base ซึ่งถูกกำหนดให้เป็นส่วนที่เกิดช่องทางเดินกระแส ดังนั้นความหนาแน่นอะตอมสารเจือในส่วนนี้จะสัมพันธ์กับแรงดันขีดเริ่ม (V_T) ซึ่งสามารถกำหนดได้เหมือนกับกรณีของดิมอส[4] แล้วจึงแพร่สารเจือฟอสฟอรัส $1.28 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ เพื่อสร้างเป็นส่วน N'-emitter

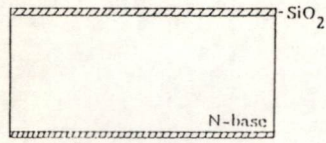


รูปที่ 2 (ก) วงจรสมมูลอย่างง่าย ของ IGBT และ(ข) สัญลักษณ์

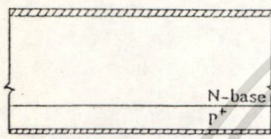
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และใช้เป็นขั้ว อิมิตเตอร์ จากนั้นจึงสร้างซิลิกอนไดออกไซด์ที่ส่วน
เกทให้ความหนา 1000 อังสตรอม เพื่อใช้เป็นส่วนควบคุมการทำ
งานของ IGBT แล้วสร้างขั้วสัมผัสโลหะและลวดลายอะลูมิเนียมโดยมี
ขั้วเกทและขั้วอิมิตเตอร์อยู่ด้านบนแผ่นผลึก ส่วนขั้วคอลเลคเตอร์
จะอยู่ด้านหลังแผ่นผลึก

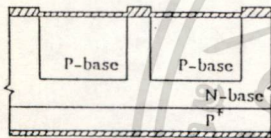
ในรูปที่ 4 เป็นภาพตัดขวางแสดงโครงสร้างของ IGBT ที่ได้ใน
แต่ละขั้นตอนของกระบวนการสร้าง ส่วนในรูปที่ 5 เป็นภาพถ่าย
ด้านบนของอุปกรณ์ที่สร้างเสร็จแล้วและใช้ทดสอบคุณสมบัติทาง
ไฟฟ้าต่าง ๆ



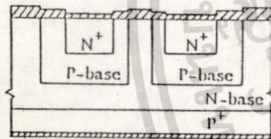
1. สร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์



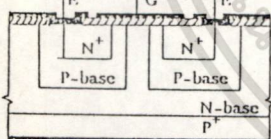
2. สร้างชั้น P+ collector



3. สร้างชั้น P-base

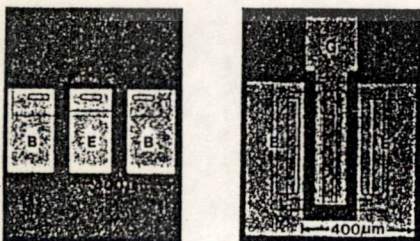


4. สร้างชั้น N+ emitter และเกทออกไซด์



5. สร้างชั้นอะลูมิเนียม

รูปที่ 4 ภาพตัดขวางแสดงลำดับการสร้าง IGBT

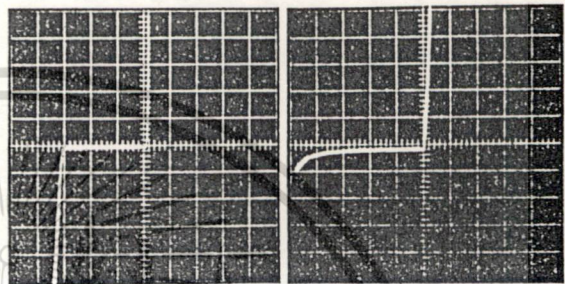


รูปที่ 5 ภาพถ่ายด้านบนของอุปกรณ์ ที่สร้างเสร็จแล้ว
(ก) โปไลลาร์ทรานซิสเตอร์ที่ใช้วัดรอยต่อ พี-เอ็น
(ข) IGBT ที่วัดคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์ และ
คุณสมบัติทางไฟฟ้าอื่น ๆ

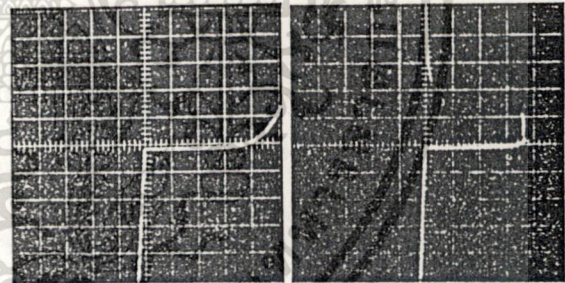
5. การทดลองและผลการทดลอง

5.1 การทดสอบรอยต่อ พี-เอ็น

ในการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานนั้น จะนำเอาโพลาร์
ทรานซิสเตอร์ที่สร้างพร้อมกับ IGBT ดังแสดงในรูปที่ 5(ก) มาต่อ
เข้ากับเครื่องวัดคุณสมบัติทรานซิสเตอร์แล้วทำการวัดรอยต่อ J1
(ระหว่าง N+ emitter กับ P-base), J2 (ระหว่าง P-base กับ N-
base), J3 (ระหว่าง N-base กับ P+ collector) และโครงสร้าง
N-P-N-P ซึ่งได้ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 6



(ก) Ver. : 1 mA/div. (ข) Ver. : 20 mA/div.
Hor. : 5 V/div. Hor. : 50 V/div.

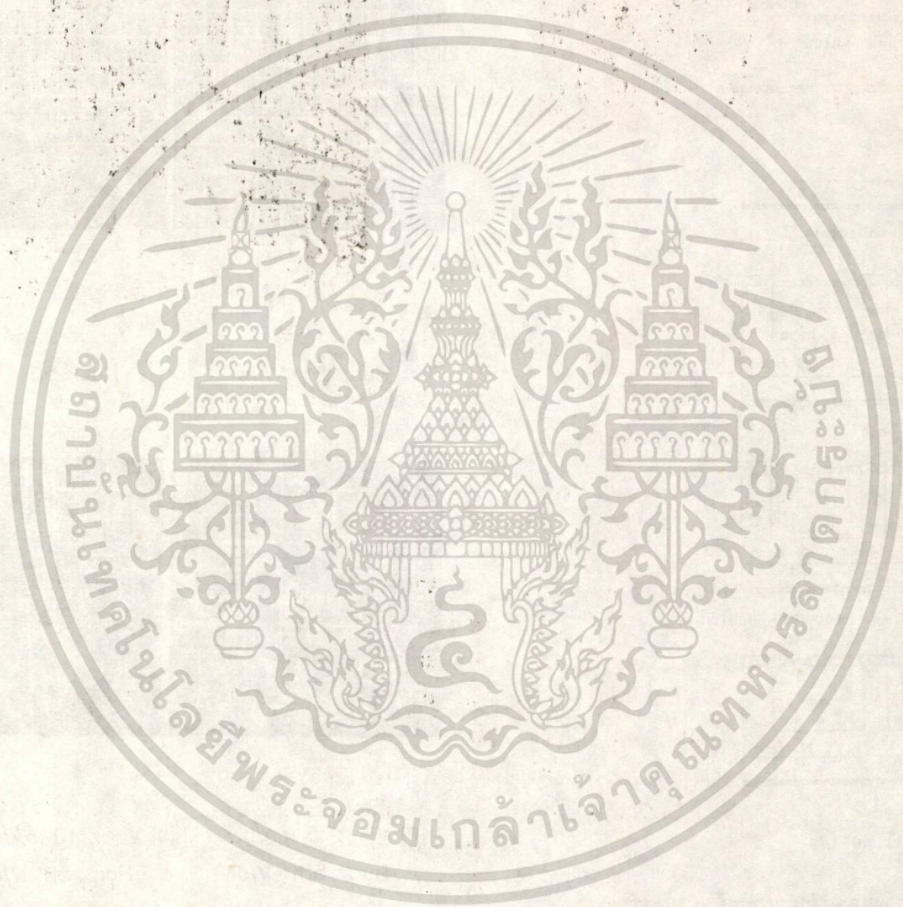


(ค) Ver. : 5 mA/div. (ด) Ver. : 10 mA/div.
Hor. : 50 V/div. Hor. : 50 V/div.

รูปที่ 6 (ก) รอยต่อ J1 (ข) รอยต่อ J2
(ค) รอยต่อ J3 (ง) โครงสร้าง N-P-N-P

จากการทดสอบรอยต่อ พี-เอ็นส่วนใหญ่เป็นไปตามที่กำหนดไว้
ยกเว้นรอยต่อ J3 ซึ่งด้านไบอัสย้อนกลับมีแรงดันพังหลายค่า เป็น
ผลมาจากการแพร่สารเจือ P+ collector ที่ไม่สม่ำเสมอทำให้
อุปกรณ์ไม่สามารถทำงานในโหมดปิดกั้นย้อนกลับได้ อย่างไรก็ตาม
สำหรับในโหมดปิดกั้นตรง IGBT สามารถทำงานได้เป็นอย่างดี โดย
แรงดันพังหลายของอุปกรณ์มีค่าสูง 200 โวลท์ ซึ่งถูกกำหนด
จากรอยต่อ J2 ส่วนการทดสอบโครงสร้าง N-P-N-P ที่กระแส 26
มิลลิแอมป์ หรือ แรงดัน 190 โวลท์ จะทำให้เกิดการสวิตช์เป็นผลให้
นำกระแสสูงมากและแรงดันคร่อมรอยต่อลดลง ซึ่งเป็นลักษณะการ
ทำงานของทรานซิสเตอร์

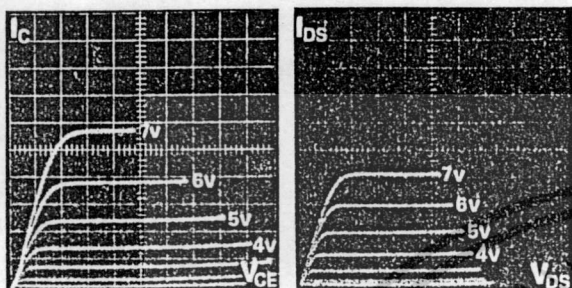
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน

นำเอา IGBT ที่แสดงในรูปที่ 5(ข) มาวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ (I_C) กับแรงดันคอลเลคเตอร์-อิมิตเตอร์ (V_{CE}) ด้วยเครื่องวัดคุณสมบัติทรานซิสเตอร์ ผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 7(ก) ต่อจากนั้นจึงนำดีมอสที่มีขนาดเดียวกันและสร้างพร้อมกันมาวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเดรน (I_{DS}) กับแรงดันเดรน-ซอส (V_{DS}) ซึ่งแสดงผลการทดลองในรูปที่ 7(ข) แล้วนำมาเปรียบเทียบกับ IGBT



(ก)

(ข)

Ver. : 5 mA/div. , Hor. : 5 V/div.

Step : 1 V , No. of step : 7

รูปที่ 7 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่าง I_C กับ V_{CE} ของ IGBT

(ข) ความสัมพันธ์ระหว่าง I_{DS} กับ V_{DS} ของ ดีมอส

จากผลการทดลองพบว่า IGBT สามารถทำงานในโหมดของทรานซิสเตอร์ได้อย่างดี จากกราฟในรูปที่ 7(ก),(ข) และตารางที่ 7.1 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบตัวแปรต่าง ๆ ระหว่าง IGBT กับ ดีมอสพบว่าการนำกระแส , ทรานคอนดักแตนซ์ และความต้านทานในภาวนำกระแสของ IGBT ให้ผลที่ได้ดีกว่าในกรณีของดีมอส โดยเฉพาะในกรณีของความต้านทานในภาวนำกระแสของ IGBT จะมีค่าลดลง คือมีค่าประมาณ 83%ของดีมอส เนื่องมาจากกระแสไหลที่ฉีดเข้าไปในส่วน N-base จากกราฟในรูปที่ 7(ก) ที่แรงดัน V_{CE} มากกว่า 1.25 โวลต์จะทำให้กระแสไหลที่ฉีดเข้าไปในส่วน N-base เริ่มจะมีผลทำให้ความต้านทานในภาวนำกระแสลดลง จึงทำให้กระแสคอลเลคเตอร์ของ IGBT ไหลได้มากกว่ากระแสเดรนของดีมอส

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบคุณสมบัติทางไฟฟ้าระหว่าง IGBT กับ ดีมอส

พารามิเตอร์	IGBT	DMOS	หน่วย
$I_C \cdot I_{DS}$	28	20	มิลลิแอมป์
$I_{CES} \cdot I_{DSS}$	0.08	0.05	มิลลิแอมป์
$V_{CES} \cdot V_{DSS}$	200	210	โวลต์
V_T	1.10	1.15	โวลต์
G_{mset}	9.0	5.0	มิลลิโอม
R_{on}	333	400	โอห์ม

หมายเหตุ I_{CES} คือ กระแสรั่วไหลที่ลัดวงจรเกตเข้ากับอิมิตเตอร์

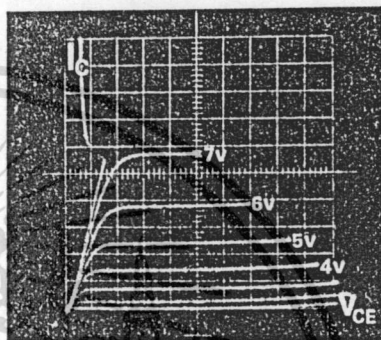
V_{CES} คือ แรงดันพังทลายที่ลัดวงจรเกตเข้ากับอิมิตเตอร์

* วัดที่ V_{GS} หรือ $V_{GE} = 7$ โวลต์

** วัดที่ V_{DS} หรือ $V_{CE} = 50$ โวลต์

5.3 การทำงานในโหมดของทรานซิสเตอร์

วัด IGBT ในทำนองเดียวกับหัวข้อที่ 5.2 โดยให้แรงดันไบอัสที่ส่วนเกตสูงจนสังเกตเห็นการทำงานในโหมดของทรานซิสเตอร์ ผลการทดลองแสดงในรูปที่ (8)



Ver. : 5 mA/div. , Hor. : 5 V/div.

Step : 1 V , No. of step : 8

รูปที่ 8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง I_C และ V_{CE} ของ IGBT ที่ทำงานในโหมดของทรานซิสเตอร์

จากรูปที่ 8 พบว่าเมื่อให้แรงดันไบอัสที่เกตตั้งแต่ 8 โวลต์ขึ้นไปจะทำให้ IGBT ประพฤติตัวเหมือนกับทรานซิสเตอร์เป็นผลให้นำกระแสคอลเลคเตอร์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและแรงดันตกคร่อมตัวอุปกรณ์จะมีค่าลดลง เนื่องจากมีกระแสที่ไหลผ่านความต้านทาน R_p ที่แสดงในวงจรสมมูลรูปที่ 3 มีค่ามากขึ้นจนทำให้แรงดันคร่อม R_p มีค่ามากกว่า 0.6 โวลต์ เป็นผลให้ N-P-N ทรานซิสเตอร์ตัวบนทำงานกระแสคอลเลคเตอร์จึงไหลผ่าน N-P-N ทรานซิสเตอร์ตัวบนแทนที่จะไหลผ่านช่องทางเดินกระแสได้ส่วนเกต ซึ่งกระแสที่ไหลผ่าน R_p คือกระแสไหล (I_p) ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับกระแสคอลเลคเตอร์ นั่นคือ ที่กระแสคอลเลคเตอร์มากกว่า 28 มิลลิแอมป์ จะทำให้กระแสไหลมีค่าสูงมากพอที่จะทำให้ IGBT ทำงานในโหมดของทรานซิสเตอร์ได้

6. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาโครงสร้างและผลการทดลองพบว่า IGBT มีความเหมาะสมที่จะพัฒนาไปเป็นอุปกรณ์กำลังได้และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับดีมอส IGBT จะมีความต้านทานในภาวนำกระแสเพียง 83% ของดีมอส จึงทำให้ IGBT มีคุณสมบัติเด่นกว่าในเรื่องความทนทานแก่กระแสที่สูงกว่า ในขณะที่คุณสมบัติทางไฟฟ้าอื่น ๆ มีค่าใกล้เคียงกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตามปัญหาเรื่องการเกิดแลทซ์-ฮัพ ในโครงสร้างของ IGBT จะเป็นอุปสรรคต่อการพัฒนาโครงสร้างนี้ให้เป็นอุปกรณ์กำลัง ดังนั้นจึงต้องหาวิธีแก้ไขปัญหานี้ ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การลดความต้านทาน R_p ในส่วน P-base ให้ระยะห่างระหว่างรอยต่อ J1 กับ J2 ห่างกันมาก ๆ ลดการฉีดกระแสโฮลที่เข้าไปในส่วน N-base ด้วยการลดความหนาแน่นสารเจือส่วน P⁺-collector แต่วิธีนี้จะมีผลให้ความต้านทานในภาวนำกระแสสูงขึ้น หรือใช้เทคนิคพิเศษแบบอื่น ๆ เป็นต้น

สำหรับ IGBT ที่สร้างขึ้น สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานใน โหมดของทรานซิสเตอร์ได้ โดยจะได้กระแสคอลเลคเตอร์สูงสุดไม่เกิน 28 มิลลิแอมป์ และสามารถทนแรงดันได้สูงถึง 200 โวลต์ แต่ถ้าต้องการนำไปใช้งานในโหมดของทรานซิสเตอร์สามารถทำได้ โดยการป้อนแรงดันเกตให้มีค่ามากกว่า 8 โวลต์ ซึ่งทำให้กระแสคอลเลคเตอร์มากกว่า 28 มิลลิแอมป์ ส่งผลให้กระแสโฮลมีค่าสูงขึ้นจึงทำให้ IGBT ทำงานในโหมดของทรานซิสเตอร์

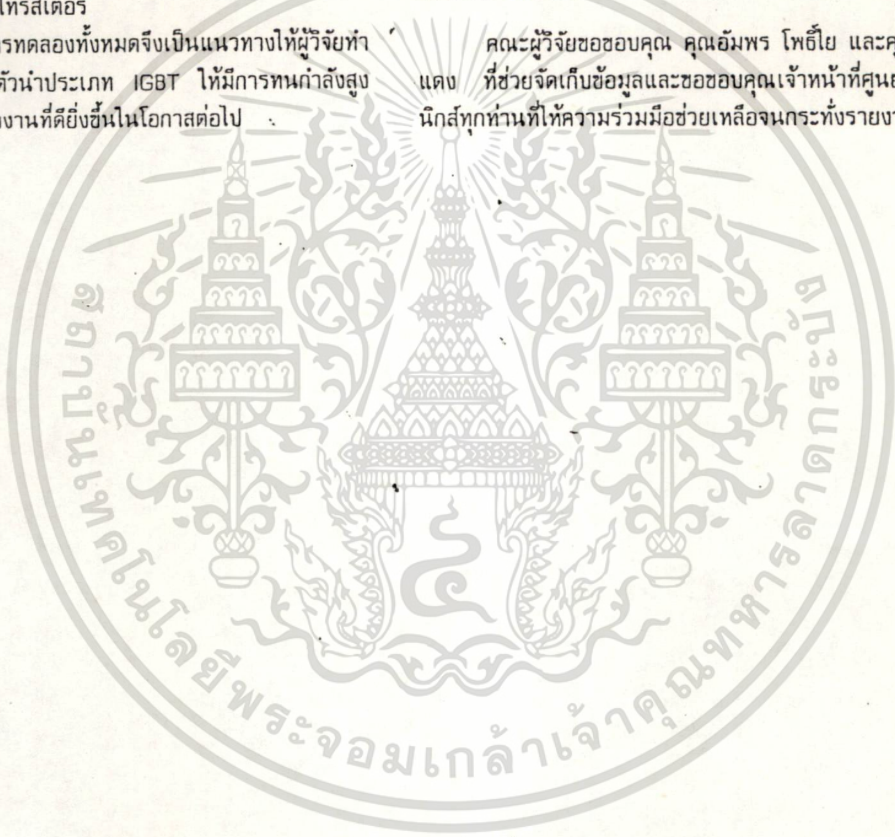
สุดท้ายนี้จากผลการทดลองทั้งหมดจึงเป็นแนวทางให้ผู้วิจัยทำการพัฒนาอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำประเภท IGBT ให้มีการทนกำลังสูง และมีเสถียรภาพในการทำงานที่ดียิ่งขึ้นในโอกาสต่อไป

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] T. Laska, G. Miller and J. Niedermey, "A 2000V Non-punchthrough IGBT with High Ruggedness", Vol. 35, No. 5, p. 681-685
- [2] B. Jayant Baliga, "Modern Power Device", John Wiley & Sons, p. 350-378
- [3] Paul D. Taylor, "Thyristor Design and Realization", John Wiley & sons, 1987, p. 1-37
- [4] สรุศักดิ์ เนียมเจริญ, วิสุทธิ์ ชูติรุ่งเรือง และ สมเกียรติ ศุภเดช, "การควบคุมและการเปลี่ยนแปลงแรงดันขั้วเริ่ม ของมอสเฟตกำลังแบบดีมอส", วารสารการประชุมวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า 9 สถาบันอุดมศึกษา, ครั้งที่ 13, พ.ศ. 2533, หน้า 239-250

8. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณอัมพร โพธิ์โย และคุณนริศ จันทร์แดง ที่ช่วยจัดเก็บข้อมูลและขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ทุกท่านที่ให้ความร่วมมือช่วยเหลือจนกระทั่งรายงานนี้สมบูรณ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความกว้างของชั้น N-base ที่มีผลต่อความสามารถในการนำกระแสของ IGBT
Effect of N-base Width on Current Conduction Capability of IGBT

ภกวัต ทรายสุวรรณ พอพพล รุจนพิชญ์

สุรศักดิ์ เนียมเจริญ ศศ.วิสุทธี "ฐิติรุ่งเรือง" รศ.ดร.สมเกียรติ สุขเดช

นักศึกษาปริญญาโท "อาจารย์ประจำภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์

ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกทเป็นฉนวนหรือ IGBT เป็นอุปกรณ์ที่มีโครงสร้างผสมระหว่างการนำกระแสแบบไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์และโครงสร้างเกทแบบมอสเฟต ความสามารถในการนำกระแสของ IGBT จึงขึ้นอยู่กับอัตราขยายกระแสของโครงสร้างไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่แฝงอยู่ภายในโครงสร้าง IGBT โดยที่อัตราขยายกระแสของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ P-N-P จะแปรผกผันกับความกว้างของชั้น N-base

ในรายงานฉบับนี้ได้กล่าวถึงผลการทดลองหาความกว้างของชั้น N-base ในโครงสร้าง IGBT ที่มีผลต่อ ความสามารถในการนำกระแส ค่าทรานคอนดักแตนซ์และค่าความต้านทานในสภาวะนำกระแส โดยจะเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้จากการสร้าง IGBT กับผลการทดลองที่ได้จากการสร้าง คิมอสและค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีของทั้ง IGBT และคิมอส ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าเมื่อให้ IGBT มีความกว้างของชั้น N-base มากขึ้นจาก 60 ไมครอน ไปสู่ 250 ไมครอน จะพบว่าความสามารถในการนำกระแสของ IGBT ลดลงประมาณ 57.27 เปอร์เซ็นต์ ค่าทรานคอนดักแตนซ์จะลดลง 61.17 เปอร์เซ็นต์ และค่าความต้านทานในสภาวะนำกระแสเพิ่มขึ้นถึง 2.29 เท่า ซึ่งจากผลการทดลองนี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการออกแบบ IGBT ให้มีประสิทธิภาพสูงต่อไป

Abstract. The IGBT structure is combination of bipolar current conduction and MOSFET gate structure. The current conduction capability is depend on current gain of parasitic bipolar transistor in IGBT, and current gain of bipolar transistor is inversely proportional of N-base width.

This paper reports the result of the effect of N-base width on current conduction capability, transconductance and ON-resistance of IGBT, and comparison with the experimental results of Power DMOSFET and theoretical of IGBT and Power DMOS. From the experimental results show that when the N-base width has increased from 60 to 250 microns, the current conduction capability and transconductance decreased 57.72 and 61.17 percents respectively, but ON-resistance increased in factor 2.29. The experimental results will be useful for the development and fabrication of IGBT.

1. บทนำ

ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกทเป็นฉนวน (Insulated Gate Bipolar Transistor : IGBT) เป็นอุปกรณ์ที่ได้รับความนิยมเข้าได้เปรียบของทั้งมอสเฟตกำลัง และ ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์เข้าไว้ด้วยกัน กล่าวคือ นำโครงสร้างเกทแบบมอสเฟตมารวมเข้ากับการนำกระแสแบบไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ส่งผลให้

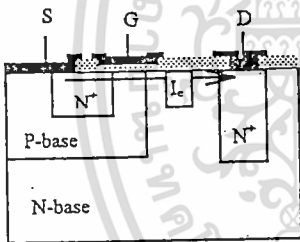
IGBT มีความสามารถในการนำกระแสได้ดีเช่นเดียวกับไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ ในขณะที่เดียวกันก็สามารถควบคุมการไหลของกระแสได้ง่ายเช่นเดียวกับมอสเฟตกำลังทั่วไป โดยโครงสร้างภาคตัดขวางและวงจรมูลอย่างง่ายของ IGBT แสดงดังรูปที่ 1 (ข) ซึ่งจะเห็นได้ว่า ในสภาวะนำกระแสไปหน้า (Forward Conduction) กระแสไหลจาก I_c จะไหลผ่านช่อง

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

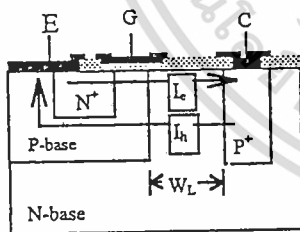
ทางเดินกระแสของส่วนที่เป็นมอสเฟต ในขณะที่กระแสไอโอด I_h จะไหลผ่านในส่วนของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ P-N-P โดยไม่ผ่านช่องทางเดินกระแสของมอสเฟต ดังนั้นวิธีการหนึ่งที่จะสามารถเพิ่มความสามารถในการนำกระแสของ IGBT ทำได้ โดยการเพิ่มอัตราขยายกระแสของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ P-N-P ซึ่งจะเป็นส่วนสำคัญในการพิจารณาในรายงานฉบับนี้

เพื่อความสะดวกในการทดลองสร้าง IGBT ที่มีความกว้างของชั้น N-base ค่าต่างๆ ในรายงานฉบับนี้จึงพิจารณา IGBT ที่มีโครงสร้างในแนวระนาบ (lateral structure) ซึ่งมีหลักการทำงานเช่นเดียวกับ IGBT ที่มีโครงสร้างในแนวตั้ง (vertical structure) [1]

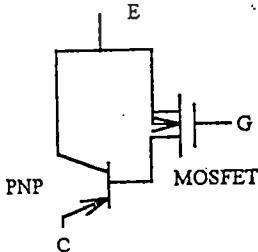
โดยในรายงานฉบับนี้จะนำเสนอถึงผลการทดลองสร้าง IGBT ที่มีความกว้างของชั้น N-base ค่าต่างๆ เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการนำกระแสของ IGBT ที่เปลี่ยนไป พร้อมทั้งเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากการสร้างคิมอสที่มีโครงสร้างดังรูปที่ 1 (ก) ที่เงื่อนไขเดียวกันและค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีของ IGBT และคิมอส



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



$$(ข) \quad I_E = I_h + I_e \quad (2)$$



$$(ค) \quad I_E = \frac{1}{(1 - \alpha_{PNP})} I_o \quad (3)$$

2. ผลของความกว้างของ N-base

ในการพัฒนาอุปกรณ์กำลังโดยทั่วไป สิ่งสำคัญก็คือการพยายามที่จะเพิ่มความสามารถในการนำกระแสของอุปกรณ์ ซึ่งในส่วนของอุปกรณ์ IGBT สามารถที่จะทำได้หลายวิธี แต่วิธีที่ใช้ในรายงานฉบับนี้จะพิจารณาผลของกระแสไอโอด ที่ทำให้เพิ่มอัตราขยายกระแสของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ P-N-P ที่แฝงภายในโครงสร้างของ IGBT โดยการเปลี่ยนแปลงความกว้างของชั้น N-base

ในการวิเคราะห์การนำกระแสของอุปกรณ์ IGBT โดยใช้วงจรอย่างง่ายดังแสดงในรูปที่ 1 (ค) จะเห็นได้ว่าเบสของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ P-N-P จะถูกขับโดยกระแสที่มาจากส่วนที่เป็นโครงสร้างของมอสเฟต ซึ่งส่วนประกอบและทิศทางการไหลของกระแสในส่วนต่างๆแสดงดังรูปที่ 1 (ข) จากรูปที่ 1 (ข) จะเห็นได้ว่ากระแสไอโอด I_e จะไหลผ่านในส่วนที่เป็นช่องทางเดินกระแสของมอสเฟต ส่วนกระแสไอโอดจะไหลผ่านโครงสร้างส่วนที่เป็นไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ P-N-P ดังนั้นกระแสไอโอดที่ไหลผ่านไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ P-N-P จึงสามารถหาได้จากสมการ

โดยที่กระแสไอโอดก็คือผลรวมของกระแสไอโอดกับกระแสไอโอดที่ไหลใน IGBT ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการกระแสไอโอดได้ดังสมการ

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

$$(2) \quad I_E = I_h + I_e \quad (2)$$

$$(3) \quad I_E = \frac{1}{(1 - \alpha_{PNP})} I_o \quad (3)$$

โดยที่ค่า α_{PNP} คืออัตราขยายกระแสของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ P-N-P ซึ่งสามารถหาได้จากค่า α_T ซึ่งหาได้จากสมการ

$$(4) \quad \alpha_{PNP} = \alpha_T = \frac{1}{\cosh\left(\frac{W_L}{L_a}\right)}$$

รูปที่ 1 ก) โครงสร้างภาคตัดขวางของ DMOS
ข) โครงสร้างภาคตัดขวางของ IGBT

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ w_L คือบริเวณไม่ปลอดประจุพาหะ (undepletion region) ของส่วนเบสในทรานซิสเตอร์ P-N-P และ L_a คือ ambipolar diffusion length

เมื่อพิจารณาที่ช่วงกระแสอิ่มตัว เราสามารถคำนวณหากระแสอิเล็กตรอนได้จากสมการกระแสที่ไหลในช่องทางเดินกระแสของมอสเฟตเช่นเดียวกับมอสเฟตโดยทั่วไป โดยปริมาณกระแสจะถูกจำกัดด้วยความกว้างและความยาวของช่องทางเดินกระแส [2] ตามสมการ

$$I_e = \frac{\mu_{ns} C_{ox}}{2} \frac{Z}{L_C} (V_G - V_T)^2 \quad (5)$$

ดังนั้นจากสมการที่ 3) และ 5) เราสามารถเขียนสมการกระแสคอลเลคเตอร์ในสภาวะอิ่มตัว ได้ดังสมการ

$$I_{E,sat} = \frac{1}{(1 - \alpha_{PNP})} \frac{\mu_{ns} C_{ox}}{2} \frac{Z}{L_C} (V_G - V_T)^2 \quad (6)$$

และจากสมการที่ 6) เราสามารถหาค่าทรานคอนดักแตนซ์ (g_{msat}) ของ IGBT ได้จากสมการ

$$\begin{aligned} g_{msat} &= \frac{\partial I_E}{\partial V_G} \\ &= \frac{1}{(1 - \alpha_{PNP})} \mu_{ns} C_{ox} \frac{Z}{L_C} (V_G - V_T) \quad (7) \end{aligned}$$

จากสมการที่ 6) และ 7) จะเห็นได้ว่าที่ความกว้างและความยาวของช่องทางเดินกระแสเท่ากัน ความสามารถในการนำกระแสของ IGBT จะขึ้นอยู่กับอัตราขยายกระแสของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ P-N-P (α_{PNP})

3. การออกแบบและสร้าง

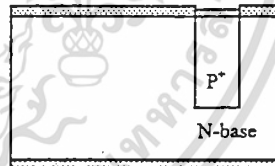
เพื่อศึกษาผลของความกว้างของชั้น N-base ต่อความสามารถในการนำกระแสของ IGBT จึงได้ทำการออกแบบสร้าง IGBT ที่มีความกว้างและความยาวของช่องทางเดินกระแสเท่ากับ 4800 และ 5 ไมครอน ตามลำดับ ส่วนความกว้างของชั้น N-base จะเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 60,80,100,120,150,200 และ 250 ไมครอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

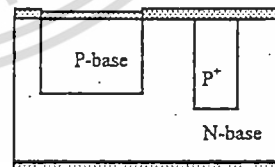
ในส่วนของการสร้างอุปกรณ์ IGBT ทำโดยอาศัยกระบวนการสร้าง IGBT ตามที่ได้เคยเสนอในการประชุมวิชาการที่ผ่านมา [1] โดยใช้แผ่นสลิคซิลิกอนชนิด N หนา 100 ความหนา 400 ไมครอน ค่าพิทความต้านทาน 8-10 $\Omega\text{-cm}$. ทำการแพร่สารเจือโบรอนเพื่อสร้างชั้นคอลเลคเตอร์ ที่อุณหภูมิ 900°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และขั้วลึกร่วมทั้งสร้างชั้น SiO₂ ที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วทำการแพร่สารเจือโบรอนอีกครั้งเพื่อสร้างชั้นเบส ที่อุณหภูมิ 830°C เป็นเวลา 25 นาที และทำการขั้วลึกร่วมทั้งสร้างชั้น SiO₂ ที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 14 ชั่วโมง ต่อไปทำการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสเพื่อสร้างชั้นอิมิตเตอร์ ที่อุณหภูมิ 1040°C เป็นเวลา 12 นาที แล้วทำการขั้วลึกร่วมทั้งสร้างชั้น SiO₂ ที่อุณหภูมิ 980°C เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นทำการสร้างเกตออกไซด์ที่ความหนา 800Å สุดท้ายทำการสร้างขั้วสัมผัสโลหะโดยเคลือบอะลูมิเนียมในเครื่องเคลือบสุญญากาศ แล้วกัดเป็นลวดลายส่วน อิมิตเตอร์,เกตและคอลเลคเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2



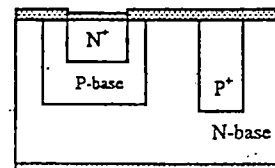
1. สร้างชั้น SiO₂



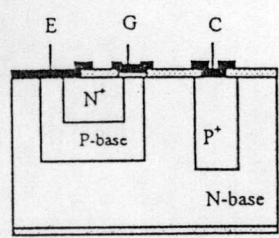
2. สร้างชั้น P⁺-collector



3. สร้างชั้น P-base



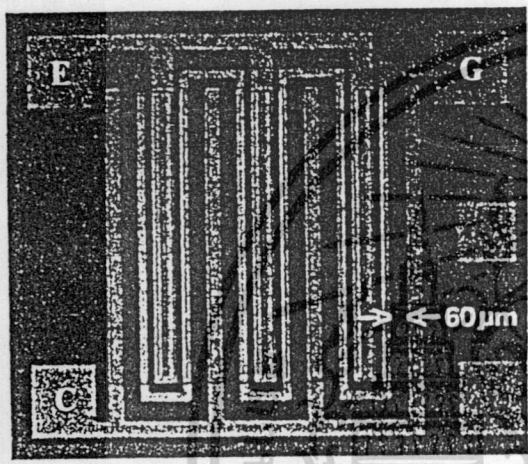
4. สร้างชั้น N⁺-emitter และสร้างชั้นเกตออกไซด์



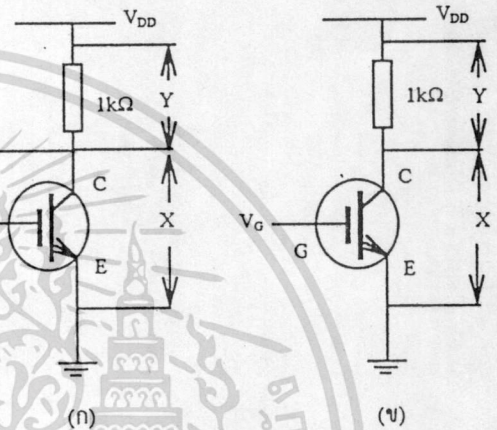
5. สร้างขั้วอะลูมิเนียม
รูปที่ 2 กระบวนการสร้างอุปกรณ์ IGBT

4. การทดลองและผลการทดลอง

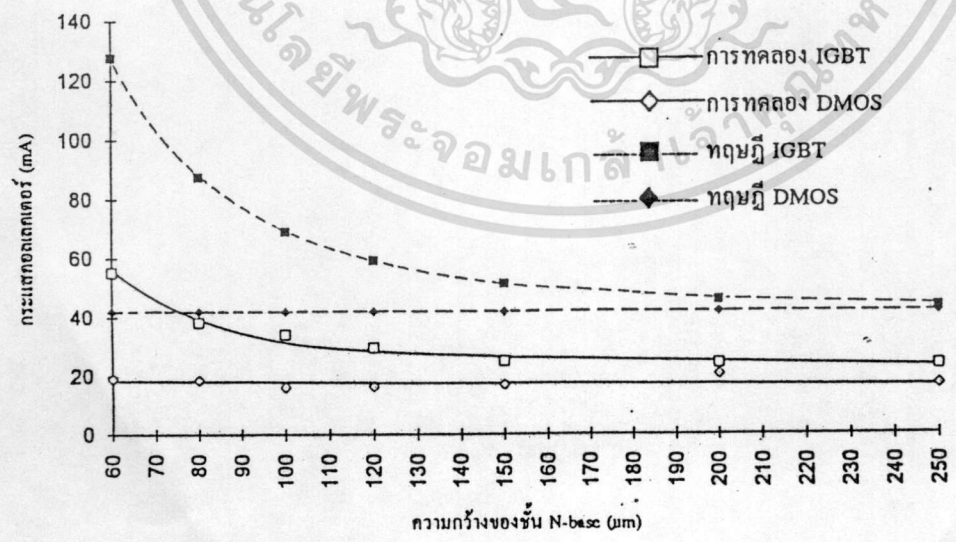
นำอุปกรณ์ IGBT ที่สร้างขึ้นที่ความกว้างของชั้น N-base (W_N) ที่แตกต่างกันตั้งแต่ 60,80,100,120,150,200,และ250 ไมครอน มาวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า โดยจะวัดค่าแรงดันขั้วเริ่ม โดยอาศัยวงจรดังรูปที่ 4 (ก) ได้ค่าแรงดันขั้วเริ่มเท่ากับ 1.6 V. และวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลกเตอร์กับแรงดันคอลเลกเตอร์-อิมิตเตอร์โดยอาศัยวงจรในรูปที่ 4(ข) จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้มาเขียนความสัมพันธ์เป็นกราฟดังต่อไปนี้



รูปที่ 3 ภาพถ่ายด้านบนของอุปกรณ์ IGBT โครงสร้างในแนวระนาบ(plamar) ที่สร้างขึ้น



รูปที่ 4 (ก) วงจรที่ใช้วัดค่าแรงดันขั้วเริ่ม
(ข) วงจรที่ใช้ในการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลกเตอร์กับแรงดันคอลเลกเตอร์-อิมิตเตอร์



รูปที่ 5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลกเตอร์ในช่วงอิ่มตัวกับความกว้างของชั้น N-base ที่ $V_G = 3.5 \text{ V}$. และ $V_{DD} = 10 \text{ V}$.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1 การหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์กับความกว้างของชั้น N-base

ทำโดยการวัดค่ากระแสคอลเลคเตอร์ในช่วงอิมิตวี่ที่แรงดันเกทกึ่งที่ค่าหนึ่ง จากกราฟระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์กับแรงดันคอลเลคเตอร์อิมิตเตอร์ของอุปกรณ์ IGBT แต่ละตัวที่มีความกว้างของชั้น N-base ค่าต่างๆมาเขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์กระแสคอลเลคเตอร์กับความกว้างของชั้น N-base ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งพิจารณาที่แรงดันเกทเท่ากับ 3.5 V. และ $V_{DD} = 10$ V. โดยเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองสร้าง IGBT กับค่าที่ได้จากการทดลองสร้างคิมอสและค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีของทั้ง IGBT และคิมอส

จากการทดลองวัดความสามารถในการนำกระแสของ IGBT ที่สร้างขึ้นโดยการพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ กับแรงดันคอลเลคเตอร์-อิมิตเตอร์เมื่อเปรียบเทียบกับกระแสคอลเลคเตอร์ในช่วงอิมิตวี่ที่วัดแรงดันเกทกึ่งที่กับความกว้างของชั้น N-base ของ IGBT พบว่า เมื่อความกว้างของชั้น N-base เพิ่มมากขึ้น ค่ากระแสคอลเลคเตอร์ของ IGBT จะลดลงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล โดยจากการทดลองเมื่อเพิ่มความกว้างของชั้น N-base จาก 60 เป็น 250 ไมครอน ปรากฏว่าค่ากระแสคอลเลคเตอร์จะลดลงถึง 57.27 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากทฤษฎีจะเห็นได้ว่ามีแนวโน้มเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องจากกระแสที่ไหลภายในโครงสร้างของ IGBT สามารถที่จะพิจารณาแบ่งได้เป็นสองส่วนคือ กระแสอิเล็กตรอน (I_n) และกระแสโฮล (I_p) ดังแสดงในรูปที่ 1(ข) ซึ่งจะเห็นได้ว่ากระแสอิเล็กตรอนจะไหลผ่านในส่วนของโครงสร้างที่เป็นมอสเฟตโดยสามารถพิจารณาได้เช่นเดียวกับกรณีกระแสที่ไหลในโครงสร้างมอสเฟตโดยทั่วไป โดยที่ความสามารถในการนำกระแสหรือปริมาณกระแสที่ไหลในช่องทางเดินกระแสจะขึ้นอยู่กับความกว้างและความยาวของช่องทางเดินกระแสเท่านั้น แต่สำหรับในส่วนของกระแสโฮลจะไหลผ่านในส่วนของโครงสร้างทรานซิสเตอร์ P-N-P ที่ฝังอยู่ในโครงสร้าง IGBT ปริมาณกระแสที่ไหลส่วนนี้นั้นจะสัมพันธ์กับอัตราขยายกระแสของโครงสร้างไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ P-N-P ใน IGBT แต่เนื่องจากอัตราขยายกระแสของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ P-N-P แปรผกผันกับความกว้างของชั้น N-base เพราะว่าเมื่อความกว้างของชั้น N-base มีค่ามากขึ้นโอกาสที่โฮลจะถูกฉีดเข้าไปในบริเวณ N-base จะรวมตัวกับอิเล็กตรอนในบริเวณ N-base ก็จะมากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นเมื่อความกว้างของชั้น

N-base มากขึ้นจึงทำให้ปริมาณกระแสโฮลที่ไหลในโครงสร้าง IGBT ลดลง ส่งผลให้กระแสคอลเลคเตอร์ลดลงด้วย เมื่อพิจารณาผลการทดลองที่ได้จากการวัด IGBT กับผลการทดลองที่ได้จากการวัดมอสเฟตกำลังแบบคิมอส จะเห็นได้ว่าที่ความกว้างของชั้น N-base ค่าน้อยๆ ค่ากระแสคอลเลคเตอร์ใน IGBT จะมีค่าสูงกว่ากระแสทรานซิสเตอร์ ในคิมอสมาก แต่เมื่อความกว้างของชั้น N-base เพิ่มขึ้นค่ากระแสทั้งสองจะมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งเป็นการยืนยันว่ากระแสโฮลที่ถูกฉีดเข้าไปในชั้น N-base ซึ่งมีกระแสอิเล็กตรอนไหลอยู่จะทำให้เกิดการมอดคูเลชัน (conductivity modulation) ทำให้มีกระแสไหลมากขึ้น ส่วนในคิมอสกระแสส่วนใหญ่จะเป็นกระแสอิเล็กตรอน ทั้งนี้เนื่องจากที่ความกว้างของชั้น N-base น้อยๆ ค่าอัตราขยายกระแสของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ P-N-P มีค่าสูง ทำให้กระแสโฮลไหลมาก เมื่อรวมกับกระแสอิเล็กตรอนแล้วจึงมีค่าสูงกว่ากระแสทรานซิสเตอร์ ของคิมอสมากแต่เมื่อความกว้างของชั้น N-base มากขึ้น อัตราการขยายกระแสของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ P-N-P มีค่าต่ำทำให้ปริมาณกระแสโฮลมีค่าน้อย กระแสรวมจึงมีค่าใกล้เคียงกับกระแสทรานซิสเตอร์ ในคิมอส ซึ่งกระแสส่วนใหญ่เป็นกระแสอิเล็กตรอน

4.2 การหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าทรานคอนดักแตนซ์กับความกว้างของชั้น N-base

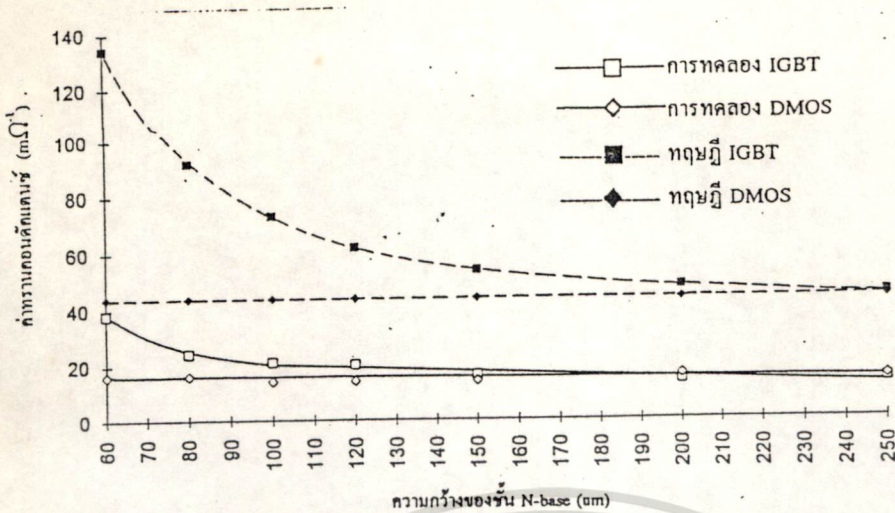
ทำได้โดยการคำนวณค่าทรานคอนดักแตนซ์ (g_{msat}) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์กับแรงดันคอลเลคเตอร์-อิมิตเตอร์ โดยอาศัยสมการ

$$g_{msat} = \left. \frac{\Delta I_c}{\Delta V_G} \right|_{V_{CE} = \text{constant}} \tag{8}$$

จากนั้นนำค่าที่ได้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าทรานคอนดักแตนซ์กับความกว้างของชั้น N-base ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 6 โดยจะแสดงถึงผลที่ได้จากการทดลองสร้าง IGBT เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองสร้างคิมอสและผลที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีของทั้ง IGBT และคิมอส

เมื่อพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าทรานคอนดักแตนซ์กับความกว้างของชั้น N-base ดังแสดงในรูปที่ 6 จะเห็นได้ว่าทั้งผลที่ได้จากการทดลองและค่าที่คำนวณได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าทรานคอนดักแตนซ์กับความกว้างของชั้น N-base

ทฤษฎีจะมีแนวโน้มเช่นเดียวกับผลของกระแสคอลเลคเตอร์กับความกว้างของชั้น N-base โดยเมื่อเพิ่มความกว้างของชั้น N-base จาก 60 ไปถึง 250 ไมครอน พบว่าค่าคอนดักแตนซ์จะลดลงไปถึง 61.17 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้เนื่องจากค่าทรานคอนดักแตนซ์พิจารณาในช่วงกระแสอิ่มตัวและขึ้นอยู่กับอัตราขยายกระแสของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ P-N-P ดังนั้นจึงแปรผกผันกับความกว้างของชั้น N-base เช่นเดียวกับกระแสคอลเลคเตอร์

4.3 การหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานในสภาวะนำกระแสกับความกว้างของชั้น N-base

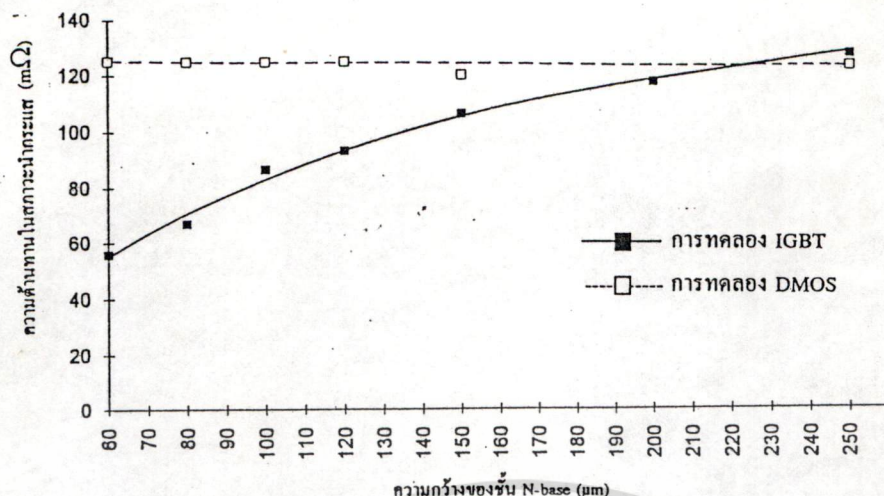
ทำได้โดยการคำนวณค่าความต้านทานในสภาวะนำกระแส (R_{on}) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์กับแรงดันคอลเลคเตอร์-อิมิตเตอร์ โดยอาศัยสมการ

$$R_{on} = \frac{\Delta V_{CE}}{\Delta I_C} \Big|_{V_G = constant} \tag{9}$$

จากนั้นนำค่าที่ได้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานในสภาวะนำกระแสกับความกว้างของชั้น N-base ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 7 โดยจะแสดงถึงผลที่ได้จากการทดลองสร้าง IGBT เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองสร้างคิมอส

พิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานในสภาวะนำกระแสกับความกว้างของชั้น N-base ดังแสดง

ในรูปที่ 7 ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าความต้านทานในสภาวะนำกระแสของ IGBT จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความกว้างของชั้น N-base โดยจากผลการทดลองเมื่อเพิ่มความกว้างของชั้น N-base จาก 60 ไปถึง 50 ไมครอน ปรากฏว่าความต้านทานในสภาวะนำกระแสเพิ่มขึ้นถึง 2.29 เท่า ซึ่งแตกต่างจากความต้านทานในสภาวะนำกระแสของคิมอสซึ่งมีค่าคงที่ ทั้งนี้เนื่องจากความต้านทานในสภาวะนำกระแสของคิมอสจะขึ้นอยู่กับความกว้างและความยาวของช่องทางเดินกระแส เนื่องจากความต้านทานในสภาวะนำกระแสของคิมอสส่วนใหญ่เป็นผลของความต้านทานในส่วน N-base ซึ่งมีค่าคงที่ขึ้นกับชนิดของแผ่นสลิทฐานรอง แต่ใน IGBT ความต้านทานในสภาวะนำกระแสส่วนใหญ่ก็ยังเป็นความต้านทานในส่วน N-base เช่นกันแต่สามารถที่จะเปลี่ยนแปลงให้ลดลงได้ขึ้นอยู่กับปริมาณโพลีซิลิคอนที่ฉีดเข้าไปในชั้น N-base ดังนั้นเมื่อความกว้างของชั้น N-base มีค่าน้อย อัตราการขยายกระแสของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ P-N-P จะมีค่าสูงซึ่งจะทำให้มีปริมาณกระแสโพลีซิลิคอนที่ฉีดเข้าไปในชั้น N-base มีค่าสูงตามไปด้วย ทำให้ความต้านทานในส่วน N-base มีค่าลดลงมาก ส่งผลให้ความต้านทานในสภาวะนำกระแสของ IGBT มีค่าต่ำลงไปด้วย ในทางตรงกันข้าม เมื่อความกว้างของชั้น N-base มากขึ้น อัตราการขยายกระแสของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ P-N-P จึงมีค่าต่ำทำให้ปริมาณกระแสโพลีซิลิคอนที่ฉีดเข้าไปในชั้น N-base มีค่าน้อยลงเช่นกัน ส่งผลให้ความต้านทานในสภาวะนำกระแสของ IGBT มีค่าสูงขึ้น เข้าใกล้ความต้านทานในสภาวะนำกระแสของคิมอส



รูปที่ 7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันทานในสถานะนำกระแสกับค่าความกว้างของชั้น N-base

5. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองทั้งหมดที่ได้นำเสนอในรายงานฉบับนี้จะเห็นได้ว่ายิ่งความกว้างของชั้น N-base มีค่าน้อยลงเท่าใดความสามารถในการนำกระแสของคิมอสก็จะมีค่าน้อยลง โดยจากผลการทดลองเมื่อเพิ่มความกว้างของชั้น N-base จาก 60 เป็น 250 ไมครอน ปรากฏว่าค่ากระแสคอลเลคเตอร์จะลดลงถึง 57.27 เปอร์เซ็นต์ แต่อย่างไรก็ตามการพิจารณาออกแบบสร้าง IGBT หรืออุปกรณ์กำลังโดยทั่วไปจะต้องคำนึงถึงความสามารถในการทนแรงดันพังทลายของอุปกรณ์ด้วยซึ่งความสามารถดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับความกว้างของชั้น N-base [3],[4] ดังนั้นในการพิจารณาการออกแบบสร้าง IGBT จึงต้องคำนึงถึงความกว้างของชั้น N-base ที่ทำให้อุปกรณ์มีความสามารถในการนำกระแสที่เต็มขณะเดียวกันก็ต้องสามารถที่จะทนแรงดันได้ตามต้องการด้วย เพื่อให้ได้อุปกรณ์ IGBT ที่มีประสิทธิภาพในการทำงานสูงสุดตามต้องการ

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] พอล รุณพิชญ์ , สุรศักดิ์ เนียมเจริญ , วิสุทธิ์ จูติรุ่งเรือง และ สมเกียรติ สุขเกษ , “การสร้างไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกทเป็นฉนวน” , ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 15 , พ.ศ. 2535
- [2] B. Jayant Baliga , “Modern Power Device” , John Wiley & Sons , p.350-387
- [3] T.P. Chow and B.J. Baliga , “Comparision of 300- , 600- , and 1200-V n-Channel Insulated Gate Transistors” , IEEE Electron Device Letters , Vol. EDL-6 , NO. 4 , p. 161-163
- [4] ภกวัต สรวชสุวรรณ , พอล รุณพิชญ์ , สุรศักดิ์ เนียมเจริญ , วิสุทธิ์ จูติรุ่งเรือง และ สมเกียรติ สุขเกษ , “การพัฒนาคิมอสให้มีแรงดันพังทลายสูง” , ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 16 , พ.ศ. 2536

8. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้จัดทำขอขอบคุณเจ้าหน้าที่และนักศึกษาของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ทุกท่านที่ให้ความร่วมมือเป็นอย่างดี ช่วยให้รายงานฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์

ข้อบัญญัติ

ข้อบัญญัติฉบับนี้ มีผลใช้บังคับตั้งแต่วันที่ ๑๕ ตุลาคม ๒๕๖๓ เป็นต้นไป
โดยมีผลใช้บังคับเฉพาะโรงเรียนที่สังกัดสำนักงานเขตพื้นที่การศึกษามุกดาหาร
และโรงเรียนที่สังกัดสำนักงานเขตพื้นที่การศึกษาศรีสะเกษ เขต ๓
ทั้งนี้ ให้มีผลใช้บังคับเฉพาะโรงเรียนที่สังกัดสำนักงานเขตพื้นที่การศึกษามุกดาหาร
และโรงเรียนที่สังกัดสำนักงานเขตพื้นที่การศึกษาศรีสะเกษ เขต ๓
โดยมีผลใช้บังคับตั้งแต่วันที่ ๑๕ ตุลาคม ๒๕๖๓ เป็นต้นไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้วิจัย



นายสุรศักดิ์ เนียมเจริญ สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีสาขาวิทยาศาสตร์ จากมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ พ.ศ. 2528 และ ปริญญาโทสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2535 ปัจจุบันเป็นอาจารย์ และ นักวิจัย ทำงานวิจัยทางด้านการสร้างอุปกรณ์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์, อุปกรณ์ อิเล็กทรอนิกส์กำลังและการจำลองการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์



นายพอล รุจนพิชญ์ สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ จากมหาวิทยาลัยศิลปากร พ.ศ. 2533 และปริญญาโทสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2538 ปัจจุบันเป็นนักวิจัยทำงานวิจัยทางด้านอุปกรณ์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์และอิเล็กทรอนิกส์กำลังประเภท IGBT



นายบัญชา กิตติรังสี สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีสาขาวิทยาศาสตร์ จากมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ พ.ศ. 2535 และปัจจุบันเป็นนักศึกษาระดับปริญญาโทสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทำงานวิจัยทางด้านการสร้างและประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง