

การจำลองแบบคุณสมบัติที่เหมาะสมของชั้นฝังชนิดพีต่อการทนแรงดันพังทลาย
ของไอจีบีทีชนิดเกตแบบขุด

SIMULATION FOR THE OPTIMIZATION OF P-BURIED LAYER
TO BREAKDOWN VOLTAGE OF TRENCH GATE IGBT



เลขหมู่ 2557
เลขทะเบียน 132716
วัน,เดือน,ปี 1 ส.ค. 2557

b. 1862557/อ
i.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2557

KMITL-2014-EN-M-043-030

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SIMULATION FOR THE OPTIMIZATION OF P-BURIED LAYER
TO BREAKDOWN VOLTAGE OF TRENCH GATE IGBT



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN MICROELECTRONICS ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2014
KMITL-2014-EN-M-043-030

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2014

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การจำลองแบบคุณสมบัติที่เหมาะสมของชั้นฝังชนิดพีต่อการทนแรงดันพังทลายของไอจีบีทีชนิดเกตแบบซุด

Thesis Title Simulation for Optimization of P-buried Layer to Breakdown Voltage of Trench Gate IGBT

นักศึกษา นางสาวอมรรัตน์ เกิดประดิษฐ์

รหัสประจำตัว 55612506

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.วิสุทธิ จูติรุ่งเรือง

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2014-EN-M-043-030

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.สุรศักดิ์	เนียมเจริญ	
ดร.โยธิน	วงศ์ประเสริฐ	
ดร.อัมพร	โพธิ์ไย	
ดร.นรินทร์	อดิวงศ์แสงทอง	
รศ.ดร.วิสุทธิ	จูติรุ่งเรือง	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพฤหัสบดีที่ 6 มีนาคม พ.ศ. 2557 เวลา 10.00-12.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ห้อง E12-305

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(ศาสตราจารย์ ดร.สุชัชวีร์ สุวรรณสวัสดิ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงแหล่งที่มาของเอกสารที่มีการนำไปใช้

วันที่ 6 มีนาคม พ.ศ. 2557

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การจำลองแบบคุณสมบัติที่เหมาะสมของชั้นฝังชนิดพีต่อการทนแรงดันพังทลายของไอจีบีทีชนิดเกิดแบบขุด
นักศึกษา	นางสาวอมรรรัตน์ เกิดประดิษฐ์
รหัสนักศึกษา	55612506
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
พ.ศ.	2557
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอผลการพัฒนาโครงสร้างไอจีบีทีแบบนอนพื้นขทรูชนิดเกิดแบบขุด (NPT-TIGBT) โครงสร้างนี้ได้มีการนำเสนอและตรวจสอบการจำลองโดยใช้โปรแกรม T-CAD Sentaurus เพื่อเป็นการคาดการณ์ผลลัพธ์และปรับปรุงความสามารถการทนต่อแรงดันพังทลาย ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่สำคัญสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง จากนั้นทำการออกแบบโครงสร้างโดยเพิ่มชั้นฝังชนิดพี (P-buried: P_b) ซึ่งจะช่วยลดความหนาแน่นสนามไฟฟ้าที่รอบมุมเกิดแบบขุดโครงสร้างไอจีบีทีแบบนอนพื้นขทรู (NPT-TIGBT) โดยที่ชั้นฝังชนิดพี ความเข้มข้นสารเจือค่าเท่ากับ $5.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ถูกสร้างชั้นบริเวณใต้เกิดแบบขุด (Trench gate) ภายในชั้นฐานรองชนิดเอ็น (n-drift layer) จากการจำลองได้ทำการปรับค่าความลึกและความเข้มข้นสารเจือของชั้นฝังชนิดพี ให้มีความเหมาะสม ผลการจำลองพบว่าเมื่อเพิ่มชั้นฝังชนิดพี ได้เกิดแบบขุดในโครงสร้างไอจีบีทีแบบนอนพื้นขทรูชนิดเกิดแบบขุด (NPT-TIGBT) สามารถลดความหนาแน่นสนามไฟฟ้าบริเวณใต้เกิดแบบขุดซึ่งเป็นสาเหตุของการพังทลาย เมื่อทำการเปรียบเทียบกับโครงสร้างดั้งเดิม แรงดันพังทลายเพิ่มขึ้นประมาณ 30 % คือเปลี่ยนแปลงจาก 1,615V เป็น 2,150V เมื่อเทียบกับไอจีบีทีชนิดเกิดแบบขุดปกติ โดยความลึกของชั้นฝังชนิดพี ก็ยังส่งผลต่อแรงดันพังทลายอีกด้วย โดยที่ค่าแรงดันพังทลายสูงสุดประมาณ 2,150V เมื่อมีความลึก 1.80 μm กับความเข้มข้นสารเจือ $5.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ นอกจากนี้แล้วพบว่าเมื่อเพิ่มชั้นฝังชนิดพี จะไม่ส่งผลต่อปริมาณกระแสและแรงดันตกคร่อมในขณะนำไฟฟ้าอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Simulation for optimization of P-buried Layer to Breakdown Voltage of Trench Gate IGBT
Student	Miss Amonrat Kerdpradist
Student ID.	55612506
Degree	Master of Engineering
Program	Microelectronics Engineering
Year	2014
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Wisut Titiroongruang

ABSTRACT

This thesis presents education of the development of Non Punch through Trench gate Insulated Gate Bipolar Transistor (NPT-TIGBT) structure. The structures were propose and verified by T-CAD Sentuarus. To predict and improvement of Breakdown Voltage, which electrical properties were important for power electronic devices. Then,we introduced a P-buried (P_b) layer under trench gate which relieved the electric field crowding in the Non Punch Through Trench gate Insulated Gate Bipolar Transistor (NPT-TIGBT) structure. The P_b layer,with carrier concentration of $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, was created underneath the trench gate within the n-drift layer .The simulation showed that putting the P_b layer under trench gate of NPT-TIGBT could relieve electric field concentration around the bottom of trench gate. This was a result from the reduction of field crowding under the trench gate region. In comparison with the conventional structure, the breakdown voltage increased by 30 % from 1,615 V to 2,150 V. The location and doping concentration of the buried P_b layer could also affect the breakdown voltage. The highest breakdown voltage was 2,150 V at 1.8 μm with doping concentration of $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Furthermore, the forward current did not degrade the on-state voltage drop.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาของ รองศาสตราจารย์ ดร.วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งที่อุปการะทุนสนับสนุนและการให้ คำปรึกษาทางวิชาการที่ติดต่อตมารวมไปถึงการปลุกฝังสิ่งที่ตั้งงามให้กับลูกศิษย์ทุกคน

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์.ดร. สุรศักดิ์ เนียมเจริญ สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะ วิศวกรรมศาสตร์ กรรมการพิจารณาหัวข้อ ที่คอยให้คำชี้แนะที่เป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณ ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และ คอมพิวเตอร์แห่งชาติ สวทช. โดยคุณมนตรี แสนละมุล และดร.อัมพร โพธิ์โย เป็นอย่างยิ่งที่ให้ความรู้ คำแนะนำในการใช้โปรแกรมเพื่อวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลองและสนับสนุนอุปกรณ์ในงานวิจัยนี้จน กระทั่งประสบความสำเร็จได้เป็นอย่างดี

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่เมตตาประสิทธิ์ประสาทวิชาและให้การ อบรมสั่งสอน

ขอขอบคุณนักศึกษาปริญญาโทและนักศึกษาปริญญาเอก ในศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้า คุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือและกำลังใจเสมอมา

สุดท้ายนี้สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดา มารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชา ความรู้ให้แก่ข้าพเจ้า

อมรรัตน์ เกิดประติษฐ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	3
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	3
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้วิจัย.....	4
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	4
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการทำงาน.....	6
2.1 โครงสร้างและหลักการทำงานพื้นฐานของอุปกรณ์ไอจีบีที.....	7
2.1.1 สภาวะปิดกั้นย้อนกลับ.....	7
2.1.2 สภาวะปิดกั้นไปหน้า.....	8
2.1.3 สภาวะนำกระแสไปหน้า.....	8
2.2 วงจรเทียบเท่าอุปกรณ์ไอจีบีที.....	10
2.3 เทคโนโลยีโครงสร้างของอุปกรณ์ไอจีบีที.....	11
2.3.1 เทคโนโลยีโครงสร้างไอจีบีทีแบบสมมาตร.....	11
2.3.2 เทคโนโลยีโครงสร้างไอจีบีทีแบบไม่สมมาตร.....	11
2.3.3 การเปรียบเทียบระหว่างเทคโนโลยีโครงสร้างไอจีบีทีแบบสมมาตรกับโครงสร้างไอจีบีทีแบบไม่สมมาตร.....	12
2.4 การวิเคราะห์การทำงานของโครงสร้างไอจีบีทีแบบสมมาตร.....	14
2.4.1 ความสามารถการปิดกั้นย้อนกลับโครงสร้างสมมาตร.....	14
2.4.2 ความสามารถปิดกั้นไปหน้าโครงสร้างสมมาตร.....	16
2.4.3 สภาวะนำกระแสไปหน้าโครงสร้างสมมาตร.....	16
2.4.4 กระแสรั่วของโครงสร้างไอจีบีทีสมมาตร.....	21
2.4.5 คุณลักษณะของโครงสร้างไอจีบีทีแบบสมมาตร.....	22
2.4.5.1 คุณลักษณะกระแสแรงดันของโครงสร้างไอจีบีทีแบบสมมาตร.....	22
2.4.5.2 คุณลักษณะการถ่ายโอนของไอจีบีที.....	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.5 การตอบสนองในภาวะชั่วคราว.....	25
2.5.1 การควบคุมตัดกระแส (turn off) ด้วยเกด.....	25
2.5.2 ช่วงเวลาดัดกระแส.....	27
2.6 โครงสร้างเกดแบบชุด.....	28
2.6.1 พื้นที่การทำงานปลอดภัย.....	28
บทที่ 3 การออกแบบและการจำลองไอจีบีที.....	30
3.1 การเลือกแผ่นผลึกเริ่มต้น.....	30
3.2 กระบวนการจำลองไอจีบีที.....	30
3.3 การออกแบบของหน่วยเซลล์ไอจีบีที.....	31
3.3.1 การออกแบบโครงสร้างไอจีบีที.....	32
3.3.2 การออกแบบชั้นฝังชนิดพีของโครงสร้างไอจีบีที.....	32
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง.....	35
4.1 การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของไอจีบีที.....	35
4.1.1 การทดสอบความสามารถในการทนแรงดันปิดกั้นไปหน้าของอุปกรณ์ไอจีบีที.....	35
4.1.2 การทดสอบแรงดันขีดเริ่มของอุปกรณ์ไอจีบีที.....	44
4.1.3 การทดสอบช่วงเวลาการตอบสนองอุปกรณ์ไอจีบีที NPT-TIGBT.....	47
4.2 การทดสอบการกระจายความหนาแน่นสนามไฟฟ้าภายในอุปกรณ์ไอจีบีที.....	48
4.3 การทดสอบคุณสมบัติการไอออนภายในอุปกรณ์ไอจีบีที.....	52
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	53
เอกสารอ้างอิง.....	55
ภาคผนวก.....	57
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	61
ประวัติผู้เขียน.....	74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การเปรียบเทียบระหว่างเทคโนโลยีโครงสร้างไอจีบีทีแบบสมมาตร (NPT-IGBT) กับ โครงสร้างไอจีบีทีแบบไม่สมมาตร (PT-IGBT).....	12
3.1 พารามิเตอร์สำคัญๆ ในการจำลองแบบโครงสร้าง NPT-TIGBT ปกติและ NPT-TIGBT ร่วม กับชั้นฝังชนิดพี.....	33



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 วิวัฒนาการของอิเล็กทรอนิกส์กำลัง.....	1
1.2 เปรียบเทียบขนาดแรงดันไฟฟ้าและกระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังต่าง.....	2
1.3 การประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังสำหรับระดับพลังงานและความถี่ต่างๆ.....	2
2.1 โครงสร้างภาพตัดขวางของอุปกรณ์ (ก.) ไอจีบีที (ข.) วงจรเทียบเท่าของไอจีบีที.....	6
2.2 การให้แรงดันไบอัสอุปกรณ์ไอจีบีที เพื่อให้ทำงานในสภาวะปิดกั้นย้อนกลับ.....	7
2.3 การให้แรงดันไบอัสอุปกรณ์ไอจีบีที เพื่อให้ทำงานในสภาวะปิดกั้นไปหน้า.....	8
2.4 การให้แรงดันไบอัสกับอุปกรณ์ไอจีบีที เพื่อให้ทำงานในสภาวะนำกระแสไปหน้า.....	8
2.5 คุณสมบัติของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไอจีบีที.....	9
2.6 ไทริสเตอร์ปรสิตภายในโครงสร้างอุปกรณ์ไอจีบีที.....	10
2.7 วงจรเทียบเท่าสำหรับโครงสร้างอุปกรณ์ไอจีบีที.....	10
2.8 โครงสร้างภาพตัดขวางของอุปกรณ์ไอจีบีที (ก.) โครงสร้างไอจีบีทีแบบสมมาตร (ข.) โครงสร้างไอจีบีทีแบบไม่สมมาตร.....	11
2.9 ลักษณะการกระจายและการกระจายสนามไฟฟ้าใน (ก) โครงสร้างไอจีบีทีแบบสมมาตร (NPT-IGBT) และ (ข) โครงสร้างไอจีบีทีแบบไม่สมมาตร (PT-IGBT).....	13
2.10 ลักษณะการแพร่กระจายชั้นดีพลีชั่น (Depletion) (ก) โครงสร้างไอจีบีทีแบบสมมาตร (NPT-IGBT) และ (ข) โครงสร้างไอจีบีทีแบบไม่สมมาตร (PT-IGBT).....	14
2.11 การทำงานของไอจีบีทีแบบสมมาตร (NPT-IGBT) (ก) สภาวะปิดกั้นย้อนกลับ (ข) สภาวะปิดกั้นไปหน้า (ค) สภาวะนำกระแสไปหน้า.....	15
2.12 การกระจายของชั้นดีพลีชั่นในเซลล์ Central และ Peripheral ภายในอุปกรณ์.....	17
2.13 การกระจายสนามไฟฟ้าระหว่างโหนดปิดกั้นไปหน้าในโครงสร้างไอจีบีทีสมมาตร.....	18
2.14 กระแสรั่วสำหรับโครงสร้างไอจีบีทีสมมาตรที่อุณหภูมิต่างๆ.....	21
2.15 คุณสมบัติเฉพาะจุด กระแส-แรงดัน ของไอจีบีทีแบบสมมาตร.....	22
2.16 การเปรียบเทียบคุณลักษณะเฉพาะจุดของ NPT-IGBT และ PT-IGBT.....	22
2.17 คุณสมบัติการถ่ายโอน (transfer) ของไอจีบีทีที่อุณหภูมิต่างๆ.....	23
2.18 ปรากฏการณ์สวิตช์แบค (Switchback) ในไอจีบีที.....	24
2.19 กราฟรูปคลื่นของการตัดกระแสด้วยการควบคุมแรงดันที่เกิดในไอจีบีที.....	26
2.20 กราฟรูปคลื่นของช่วงเวลาตัดกระแสที่ค่าความต้านทานที่เกิดต่างกัน.....	26
2.21 ช่วงเวลาในการตัดกระแสของไอจีบีที ที่กระแสคอลเลคเตอร์ค่าต่างกัน.....	27
2.22 โครงสร้างไอจีบีทีที่เกิดแบบขุดสมมาตร.....	28
2.23 กระแสไหลภายในโครงสร้างเกิดแบบขุด.....	29
3.1 (ก) โปรแกรมส่วนติดต่อของผู้ใช้แบบกราฟิกของ Sentaurus Workbench (ข) ภาคตัดขวางจากโปรแกรม Techplot SV (ค) ภาคตัดขวางของอุปกรณ์ NPT-TIGBT ปกติ (ง) ผลการทดสอบอุปกรณ์จากโปรแกรม Inspect.....	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.2 โครงสร้างอุปกรณ์ NPT-TIGBT ปกติ.....	32
3.3 โครงสร้างอุปกรณ์ NPT-TIGBT ร่วมกับชั้นฝังชนิดพี.....	32
3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสารเจือแนวตั้งสำหรับการจำลองโครงสร้าง NPT-TIGBT ร่วมกับชั้นฝังชนิดพี.....	34
3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสำหรับการจำลองโครงสร้าง NPT-TIGBT ร่วมกับชั้นฝัง ชนิดพี.....	34
4.1 (ก) โครงสร้างอุปกรณ์ NPT-TIGBT ร่วมกับชั้นฝังชนิดพี ที่มีความเหมาะสม (ข) แสดงการให้แรงดันไบอัสกับอุปกรณ์ NPT-TIGBT ร่วมกับชั้นฝังชนิดพี เพื่อให้ทำงานใน สภาวะปิดกั้นไปหน้า.....	35
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงกระแสป้องกัน (Blocking current) ต่อแรงดัน (Voltage bias) ของ NPT-TIGBT ปกติ ในสภาวะปิดกั้นไปหน้า.....	36
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงกระแสป้องกันต่อแรงดันไฟฟ้าของ NPT-TIGBT ร่วม กับชั้นฝังชนิดพี ที่ระยะ $L_7=0$ ในสภาวะปิดกั้นไปหน้า.....	36
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงกระแสป้องกันต่อแรงดันไฟฟ้าของ NPT-TIGBT ร่วม กับชั้นฝังชนิดพี ที่ระยะ $L_7=0.2$ ในสภาวะปิดกั้นไปหน้า.....	37
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงกระแสป้องกันต่อแรงดันไฟฟ้าของ NPT-TIGBT ร่วม กับชั้นฝังชนิดพี ที่ระยะ $L_7=0.4$ ในสภาวะปิดกั้นไปหน้า.....	37
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงกระแสป้องกันต่อแรงดันไฟฟ้าของ NPT-TIGBT ร่วม กับชั้นฝังชนิดพี ที่ระยะ $L_7=0.6$ ในสภาวะปิดกั้นไปหน้า.....	38
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงกระแสป้องกันต่อแรงดันไฟฟ้าของ NPT-TIGBT ร่วม กับชั้นฝังชนิดพี ที่ระยะ $L_7=0.8$ ในสภาวะปิดกั้นไปหน้า.....	38
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงกระแสป้องกันต่อแรงดันไฟฟ้าของ NPT-TIGBT ร่วม กับชั้นฝังชนิดพี ที่ระยะ $L_7=1.0$ ในสภาวะปิดกั้นไปหน้า.....	39
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงกระแสป้องกันต่อแรงดันไฟฟ้าของ NPT-TIGBT ร่วม กับชั้นฝังชนิดพี ที่ระยะ $L_7=1.2$ ในสภาวะปิดกั้นไปหน้า.....	39
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงกระแสป้องกันต่อแรงดันไฟฟ้าของ NPT-TIGBT ร่วม กับชั้นฝังชนิดพี ที่ระยะ $L_7=1.4$ ในสภาวะปิดกั้นไปหน้า.....	40
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงกระแสป้องกันต่อแรงดันไฟฟ้าของ NPT-TIGBT ร่วม กับชั้นฝังชนิดพี ที่ระยะ $L_7=1.6$ ในสภาวะปิดกั้นไปหน้า.....	40
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงกระแสป้องกันต่อแรงดันไฟฟ้าของ NPT-TIGBT ร่วม กับชั้นฝังชนิดพี ที่ระยะ $L_7=1.8$ ในสภาวะปิดกั้นไปหน้า.....	41
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงกระแสป้องกันต่อแรงดันไฟฟ้าของ NPT-TIGBT ร่วม กับชั้นฝังชนิดพี ที่ระยะ $L_7=2.0$ ในสภาวะปิดกั้นไปหน้า.....	41
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงกระแสป้องกันต่อแรงดันไฟฟ้าของ NPT-TIGBT ร่วม กับชั้นฝังชนิดพี ที่ระยะ $L_7=2.5$ ในสภาวะปิดกั้นไปหน้า.....	42

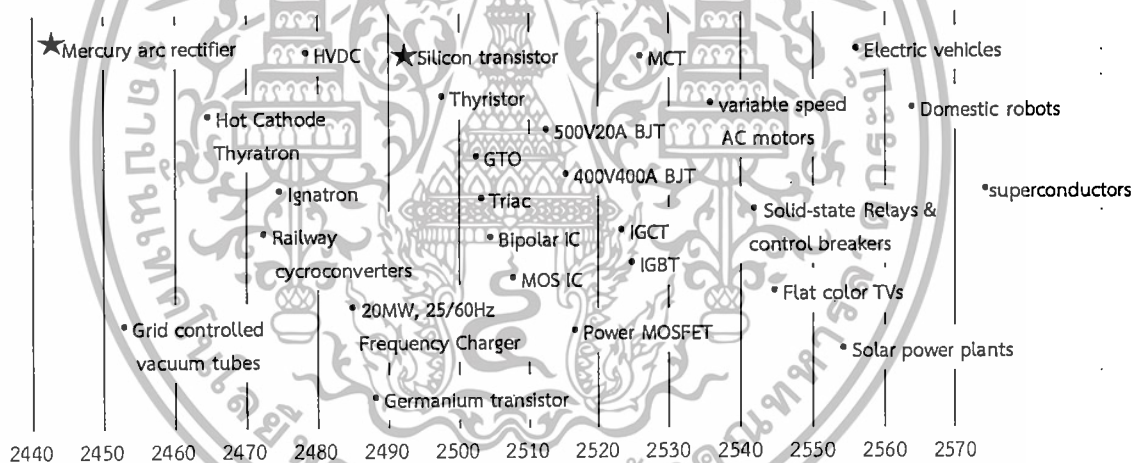
สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงกระแสป้องกันต่อแรงดันไฟฟ้าของ NPT-TIGBT ร่วมกับชั้นฝังชนิดพี ที่ระยะ $L_7=3.0$ ในสภาวะปิดกั้นไปหน้า.....	42
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการทนแรงดันพังทลายต่อความลึกของชั้นฝังชนิดพี ในสภาวะปิดกั้นไปหน้า.....	43
4.17 ความสามารถการทนแรงดันพังทลายต่อความเข้มข้นสารเจือของชั้นฝังชนิดพีในสภาวะปิดกั้นไปหน้า.....	43
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ (Collector current) กับแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมเกต (Gate Voltage drop) ของ NPT-TIGBT ปกติ.....	44
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ (Collector current) กับแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมเกต (Gate Voltage drop) ของ NPT-TIGBT ร่วมกับชั้นฝังชนิดพี.....	44
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงกระแสต่อแรงดันเมื่อทำการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นสารเจือของชั้นฝังชนิดพีในสภาวะไบอัสไปหน้า.....	45
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์กับแรงดันไฟฟ้าคอลเลคเตอร์-อิมิตเตอร์ของ NPT-TIGBT ปกติ เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้า V_{CE} ที่ 0 V ถึง 5 V และ V_{GE} เท่ากับ 1.00, 3.25, 5.50 และ 10 V.....	46
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์กับแรงดันไฟฟ้าคอลเลคเตอร์-อิมิตเตอร์ ของ NPT-TIGBT ร่วมกับชั้นฝังชนิดพี P_b เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้า V_{CE} ที่ 0 V ถึง 5 V และ V_{GE} เท่ากับ 1.00, 3.25, 5.50 และ 10 V.....	46
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ (Collector current) และแรงดันไฟฟ้าที่เกต (Gate Voltage) เมื่อเทียบกับเวลา (Time) ของ NPT-TIGBT ปกติ.....	47
4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ (Collector current) และแรงดันไฟฟ้าที่เกต (Gate Voltage) เมื่อเทียบกับเวลา (Time) ของ NPT-TIGBT ร่วมกับชั้นฝังชนิดพี.....	47
4.25 การกระจายความหนาแน่นสนามไฟฟ้า เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความลึกของชั้นฝังชนิดพี ภายในโครงสร้าง NPT-TIGBT.....	48
4.26 การเปลี่ยนแปลงเส้นสนามไฟฟ้า (solid line) โดยทำการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นสารเจือของชั้นฝังชนิดพี ที่แรงดันไฟฟ้า V_{CE} เท่ากับ 1,000 โวลต์.....	49
4.27 การเปลี่ยนแปลงเส้นสนามไฟฟ้า (solid line) โดยทำการปรับเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าที่ $V_{CE}=800, 1000, 1500, 1800, 2020, 2100$ V ของชั้นฝังชนิดพี ที่ความลึกและความหนาแน่นสารเจือ เท่ากับ $1.8 \mu\text{m } 5.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ตามลำดับ.....	49
4.28 ภาพ 3 มิติ แสดงค่าความหนาแน่นสนามไฟฟ้าของ (ก) NPT-TIGBT ปกติ และ (ข) NPT-TIGBT ร่วมกับชั้นฝังชนิดพี.....	51
4.29 การโออโนซ์ภายใน (ก) โครงสร้าง NPT-TIGBT ปกติ (ข) การโออโนซ์ภายในโครงสร้าง NPT-TIGBT ร่วมกับชั้นฝังชนิดพี ที่แรงดันไฟฟ้า V_{CE} เท่ากับ 1,000 V.....	52

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันความก้าวหน้าของเทคโนโลยี ทำให้เกิดสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญของระบบอิเล็กทรอนิกส์ ทั้งประสิทธิภาพ ขนาด และราคา มีความต้องการที่เพิ่มจำนวนขึ้นอย่างรวดเร็ว เพราะมีความสำคัญและเข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันของมนุษย์อย่างมาก อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังถูกนำมาประยุกต์ใช้งานที่หลากหลายดังนั้นก็มีการค้นคว้าวิจัยและพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังอย่างต่อเนื่อง เมื่อเทียบกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังดั้งเดิมที่สำคัญๆ ได้แก่ ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ (BJT), ไดโอดกำลังชนิดสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor power diode), เอสซีอาร์ (Silicon Controlled Rectifier, SCR) จากนั้นก็มี ไทริสเตอร์ (Thyristor) และทรานซิสเตอร์รูปแบบต่างๆ มากมาย ได้แก่ GTO, triac, MOSFET, IGBT, IGCT, MCT, MTO และ MTO ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาใช้ในงานอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ดังแสดงในรูปที่ 1.1

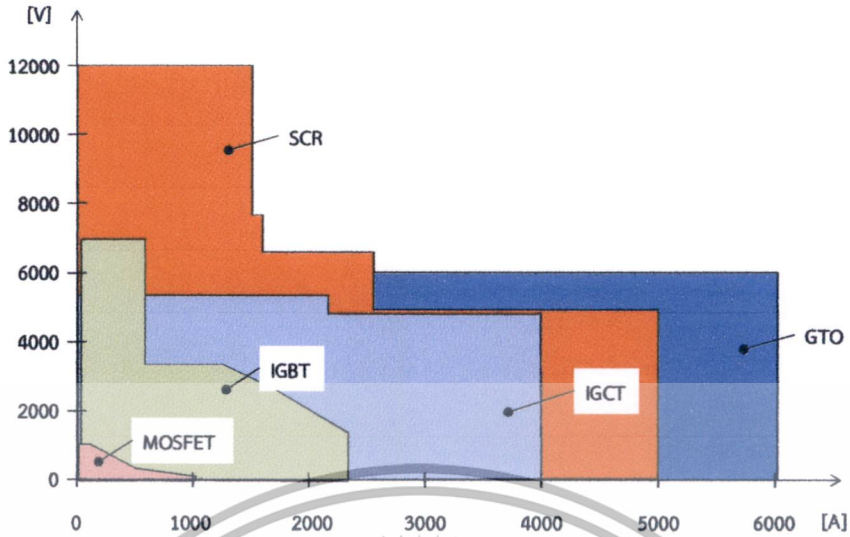


รูปที่ 1.1 วิวัฒนาการของอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

ในอดีตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเพิ่งเริ่มพัฒนา สวิตซ์สารกึ่งตัวนำกำลังจะมีขนาดที่ต่ำมาก ๆ ในระดับกำลังเป็นร้อยวัตต์ ดังนั้นงานควบคุมกำลังไฟฟ้าขนาดสูง ๆ ก็ยังจำเป็นต้องใช้วิธีดั้งเดิมอยู่ แต่เนื่องด้วยข้อดีของการใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังในการควบคุมกำลังไฟฟ้า ทำให้สิ่งเหล่านี้เป็นแรงกระตุ้นให้เกิดการพัฒนาด้านสวิตซ์สารกึ่งตัวนำกำลังอย่างต่อเนื่องจนสามารถพัฒนาให้สวิตซ์สารกึ่งตัวนำกำลังมีพิกัดกำลังไฟฟ้าระดับสูงหรือกลุ่มเมกะวัตต์ โดยเริ่มจากอุปกรณ์กำลังชนิดมอส-ไบโพลาร์ ซึ่งเป็นโครงสร้างของไทริสเตอร์ที่มีเกตเป็นฉนวน (Mos gate thyristor) หลังจากนั้นได้มีการสร้างอุปกรณ์ไอจีบีทีซึ่งเป็นโครงสร้างไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกตเป็นฉนวน (Insulated Gate Bipolar Transistor :IGBT) ขึ้นซึ่งเป็นโครงสร้างอุปกรณ์กำลังชนิดใหม่ที่จะเข้ามาแทนอุปกรณ์ชนิดเก่าซึ่งมีขีดจำกัดในการใช้งาน ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้ได้ทำการจำลองเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพของอุปกรณ์ไอจีบี

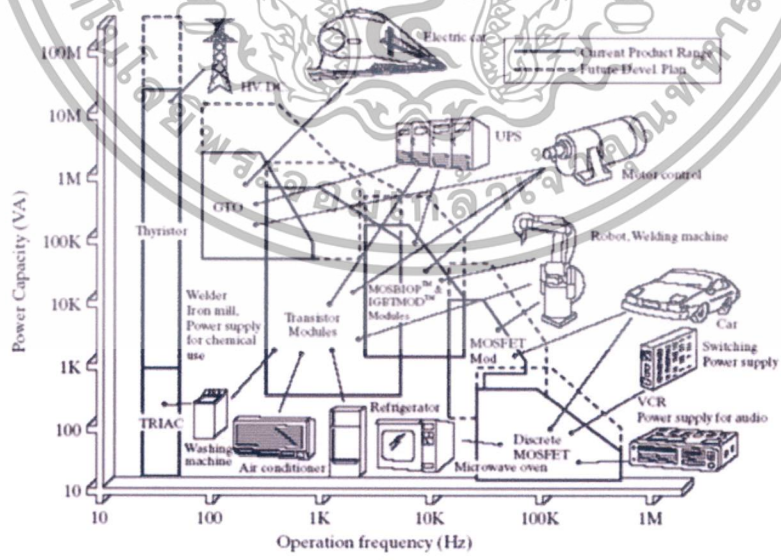
ทีในช่วงระดับไฟฟ้าขนาดกลาง (1,000-2,500V) ให้มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 1.2 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาคู่เท่านั้น เมื่อนุญาดเห็นาไปใช้ประเษนด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.2 เปรียบเทียบขนาดแรงดันไฟฟ้าและกระแสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังต่าง ๆ

ลักษณะเด่นของอุปกรณ์กำลังชนิดนี้จะรวบรวมเอาข้อดีของอุปกรณ์ชนิดมอสเฟตกำลัง และ ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์เข้าไว้ด้วยกัน กล่าวคือเป็นการรวมโครงสร้างเกตแบบมอสเฟตเข้ากับการนำกระแสแบบไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ ทำให้ได้อุปกรณ์ที่สามารถนำกระแสได้สูงเช่นเดียวกับไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ และขณะเดียวกันก็สามารถควบคุมการไหลของกระแสได้โดยการใช้เกต นอกจากนี้ยังทำให้ได้อุปกรณ์ที่มีอินพุตต่ำและมีความหนาแน่นกระแสสูงเมื่อเทียบกับอุปกรณ์กำลังชนิดอื่นในขนาดที่เท่ากัน ซึ่งในปัจจุบันมีการใช้งานไอจีบีทีนี้กันอย่างแพร่หลาย เช่น วงจรควบคุมการหมุนของมอเตอร์, หุ่นยนต์, เครื่องสำรองไฟ (UPS), ระบบอัตโนมัติในรถยนต์ และ รถไฟฟ้า เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.3 การประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังสำหรับระดับพลังงานและความถี่ต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ในปัจจุบันสามารถพบรายงานวิจัยเกี่ยวกับไอจีบีทีได้อย่างต่อเนื่อง โดยที่โครงสร้างของไอจีบีทีนี้จะมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์ โดยสามารถแบ่งออกเป็นสองประเภทคือ โครงสร้างไอจีบีทีแบบแนวราบ (Lateral IGBT: LIGBT) และโครงสร้างไอจีบีทีแบบแนวตั้ง (Vertical IGBT: VIGBT) ซึ่งความแตกต่างกันก็คือโครงสร้างในแนวตั้งชั้นคอลเลคเตอร์จะอยู่ด้านล่าง การออกแบบโครงสร้างจะมุ่งไปที่โครงสร้างไอจีบีทีในแนวตั้ง มากกว่าที่จะเป็นโครงสร้างไอจีบีทีแบบแนวราบ เนื่องจากโดยทั่วไปอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังจำเป็นต้องมีขนาดใหญ่ เพื่อให้มีความสามารถในการนำกระแสและทนแรงดันพังทลายสูง มีความเหมาะสมกับการใช้งานเป็นอุปกรณ์เดี่ยวๆมากกว่า โครงสร้างไอจีบีทีแบบแนวราบเนื่องจากโครงสร้างนี้เป็นการผลิตเพื่อใช้กับวงจรรวมกำลัง (Power Integrated Circuit)

นอกจากนี้แล้วโครงสร้างไอจีบีทีแบบแนวตั้งยังสามารถแบ่งเทคโนโลยีการสร้างได้อีกสองประเภทคือ เทคโนโลยีนอนพินชทรู (Non-punch through IGBT: (NPT-IGBT)) และเทคโนโลยีพินชทรู (Punch through IGBT : (PT-IGBT)) ซึ่งความแตกต่างกันคือ เทคโนโลยีพินชทรู (PT-IGBT) จะมีชั้นเอ็นบีพีเฟอร์ที่ช่วยในการสวิตชิง เพราะช่วยในการกำจัดโฮลซึ่งเป็นพาหะส่วนน้อยในชั้นเอ็นดริฟท์ (n-drift) แต่เป็นเทคโนโลยีที่ใช้การสร้างที่ต้องใช้แผ่นอีพิแทกเซียล (Epitaxial) มีราคาแพงและยากต่อการผลิต รวมทั้งเทคโนโลยีพินชทรู (PT-IGBT) ยังมีความสามารถในการทนแรงดันได้และความสามารถด้านอื่นๆ ที่ต่ำกว่า เทคโนโลยีนอนพินชทรู (NPT-IGBT) ดังนั้นเราจึงเลือกใช้เทคโนโลยีนอนพินชทรู (NPT-IGBT)

รวมทั้งเทคโนโลยีการสร้างเกตซึ่งสามารถแบ่งออกได้อีกเป็นสองประเภท โครงสร้างเกตแบบระนาบ (Planar Structure) และ โครงสร้างเกตแบบขุด (Trench Structure) ซึ่งความแตกต่างกันก็คือ โครงสร้างเกตแบบระนาบคือการสร้างโพลีเกตในแนวราบหรือบนฐานรองซิลิคอน ส่วนโครงสร้างเกตแบบขุด คือการสร้างโพลีเกตในแนวตั้งหรือในเนื้อซิลิคอน และจากการศึกษาพบว่าโครงสร้างเกตแบบขุดนี้ยังสามารถจัดการผลของ แรงดันตกคร่อมสถานะ on ที่ต่ำกว่า (lower on-state voltage drop) และ กระแสแลทซ์ซิงที่สูงกว่า (higher latching current)

ในการศึกษานี้จึงนำเสนอการพัฒนาโครงสร้างไอจีบีทีชนิดเกตแบบขุด โดยใช้เทคโนโลยีการผลิตแบบนอนพินชทรู (NPT-IGBT) เพื่อเพิ่มสมรรถนะของโครงสร้างไอจีบีทีชนิดเกตแบบขุด ให้มีความสามารถต่อการทนแรงดันพังทลายสูงและปริมาณกระแสสูงขณะนำไฟฟ้า

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

เมื่อพิจารณาโครงไอจีบีทีที่สร้างดั้งเดิม (NPT-TIGBT) คือ ไม่มีชั้นฝังชนิดพี จากนั้นทำการทดสอบ ความสามารถทนแรงดันพังทลายของโครงสร้างไอจีบีที (NPT-TIGBT) พบว่าอิทธิพลส่วนใหญ่ของอุปกรณ์จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสนามไฟฟ้าใกล้กับมุมล่างของเกตแบบขุด ซึ่งเมื่อให้แรงดันสูงความเข้มข้นของสนามไฟฟ้าที่รอบมุมเกตแบบขุดจะเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าเมื่อเทียบกับการให้แรงดันต่ำ จากสาเหตุดังกล่าวจึงทำให้ไอจีบีทีโครงสร้างดั้งเดิม มีประสิทธิภาพในการทนแรงดันพังทลายต่ำ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราจึงทำการศึกษาวิธีการลดความเข้มข้นสนามไฟฟ้า ซึ่งบริเวณดังกล่าวถูกนำมาศึกษาและหาแนวทางลดความเข้มข้นสนามไฟฟ้าได้ เพื่อทำการพัฒนาอุปกรณ์ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการจำลองแบบเพื่อพัฒนาไอจีบีที โดยทำการศึกษาวิธีการแก้ไขปัญหานี้ด้วยการเพิ่มชั้นฝังชนิดพี ในโครงสร้างไอจีบีที (NPT-TIGBT) เพื่อลดความหนาแน่นสนามไฟฟ้าบริเวณใต้โพลีเกตและกระจายความหนาแน่นสนามไฟฟ้าจากโพลีเกตมายังชั้นฝังชนิดพี เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความสามารถทนแรงดันพังทลายได้มากขึ้น

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้วิจัย

ในการปรับปรุงคุณสมบัติการทนแรงดันพังทลายของโครงสร้างไอจีบีที (NPT-TIGBT) ด้วยวิธีการลดความเข้มข้นสนามไฟฟ้าบริเวณดังกล่าวถูกนำมาศึกษาและหาแนวทางลดได้หลายวิธี เช่น วิธีการสร้างก้อนออกไซด์ (Rectangular Oxide) ติดกับด้านล่างของโพลีเกต ซึ่งการสร้างก้อนออกไซด์นี้จำเป็นต้องใช้เทคนิคการปลูกผลึกเดี่ยว (Epitaxial Technique) ทำให้มีราคาแพงและมีกระบวนการสร้างที่ซับซ้อน, วิธีการสร้างชั้นฝังลอยพีความเข้มข้นสารเจือสูง (Floating P^+ : P_p) ล้อมรอบมุมด้านล่างของโพลีเกต วิธีนี้จะส่งผลให้อุปกรณ์สามารถเพิ่มแรงดันพังทลายได้แต่กระแสจะลดลง, วิธีการสร้างชั้นฝังชนิดพี (P-buried layer) ซึ่งวิธีนี้สามารถเพิ่มการทนแรงดันพังทลายในสภาวะปิดกั้นไปหน้า (forward breakdown หรือ Off state) การเพิ่มชั้นฝังชนิดพี สามารถสร้างได้จริงโดยการยิงฝังประจุโบรอนที่ระดับพลังงานล้านโวลต์ อย่างไรก็ตามความลึกและปริมาณสารเจือของชั้นฝังชนิดพี เป็นตัวแปรสำคัญที่จะต้องมีความเหมาะสมในการใช้งาน เพื่อลดความหนาแน่นสนามไฟฟ้าบริเวณใต้โพลีเกตและกระจายความหนาแน่นสนามไฟฟ้าจากโพลีเกตมายังชั้นฝังชนิดพี และเพิ่มประสิทธิภาพและความสามารถทนแรงดันพังทลายของอุปกรณ์ได้มากขึ้น

1.5 ขอบเขตการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการจำลองแบบเพื่อพัฒนาไอจีบีทีชนิดเกตแบบซุด โดยการเริ่มต้นจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับไอจีบีที จากนั้นทำการออกแบบและจำลองโครงสร้างต้นแบบด้วยโปรแกรม T-CAD Sentuarus และทำการจำลองโดยการเพิ่มชั้นฝังชนิดพี โดยทำการปรับเปลี่ยนระยะความลึกและความเข้มข้นของชั้นฝังชนิดพี นำผลการทดลองและคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆ ที่ระยะความลึกและความเข้มข้นนั้นๆ มาวิเคราะห์ เพื่อตรวจสอบหาโครงสร้างไอจีบีที (NPT-TIGBT) ที่มีชั้นฝังชนิดพี ที่เหมาะสม และทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆ ของทั้งโครงสร้างไอจีบีทีต้นแบบ (NPT-TIGBT) และโครงสร้างไอจีบีที (NPT-TIGBT) ที่มีชั้นฝังชนิดพีที่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บท โดยในแต่ละบทมีรายละเอียดดังต่อไปนี้
 บทที่ 1 เป็นบทนำ โดยจะกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา สมมติฐานของการศึกษา ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้วิจัย ขอบเขตการวิจัย และรายละเอียดของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 เป็นทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับไอจีบีที โดยจะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการทำงาน

บทที่ 3 เป็นขั้นตอนการออกแบบ โดยจะกล่าวถึงขั้นตอนการจำลองผลและการออกแบบด้วยโปรแกรม T-CAD Sentuarus

บทที่ 4 เป็นผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยจะกล่าวถึงผลการทดสอบจากการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าจากโครงสร้างไอจีบีทีต้นแบบ และโครงสร้างไอจีบีทีที่มีชั้นฝังชนิดพี

บทที่ 5 เป็นบทสรุปผลการวิจัยและวิจารณ์

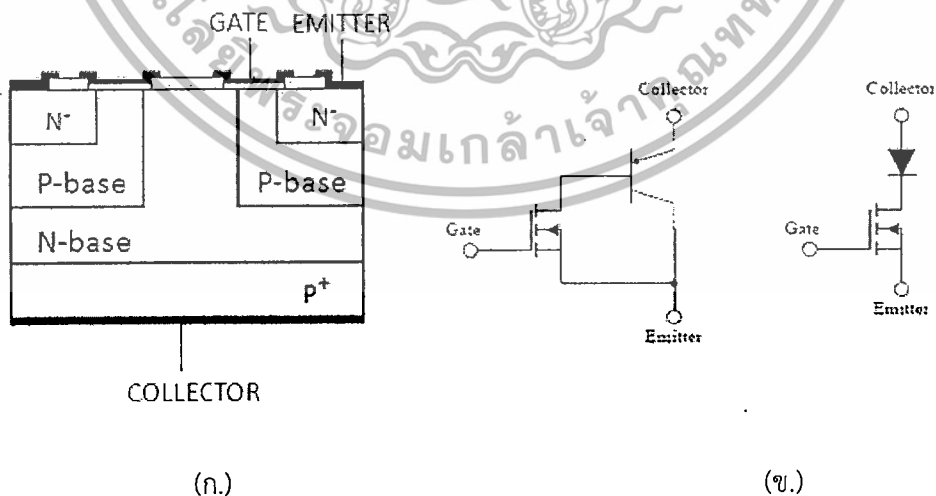


บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการทำงาน

ในบทนี้จะอธิบายโครงสร้างพื้นฐานและหลักการทำงานของอุปกรณ์ไอจีบี การวิเคราะห์ความสามารถการปิดกั้นไปหน้าและการปิดกั้นย้อนกลับของอุปกรณ์ไอจีบี แล้วตามด้วยการอภิปรายคุณลักษณะสถานะ on ของไอจีบีที่ โครงสร้างไอจีบีที่แสดงให้คุณลักษณะเหมือนพี-ไอ-เอ็น เรคตีไฟล์, พฤติกรรมการ สวิตซ์ของไอจีบี, การกระจายพาหะสถานะ on, การตอบสนองในภาวะชั่วคราว รวมทั้งการวิเคราะห์โครงสร้างไอจีบีเกิดแบบชุด

ไอจีบีที (Insulated Gate Bipolar Transistor: IGBT) เป็นโครงสร้างที่เกิดขึ้นจากการรวมโครงสร้างเกิดแบบมอสเฟตกับการนำกระแสแบบไบโพลาร์เข้าไว้ด้วยกัน โดยโครงสร้างประกอบไปด้วย 4 ชั้นคือ เอ็นอิมิตเตอร์(N^+ -emitter), พีเบส(P-base),เอ็นเบส (N-base) และชั้นพีคอลเลคเตอร์ (P^+ -collector) และมี 3 ขั้วคือ เกต (Gate) , อิมิตเตอร์ (Emitter), คอลเลคเตอร์ (Collector) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งลักษณะเด่นของโครงสร้างไอจีบีที่ชนิดนี้คือ มีการฉีดประจุพาหะส่วนน้อยจาก พีคอลเลคเตอร์ (P^+ -collector) เข้าไปยังชั้นเอ็นเบส (N-base) ในสภาวะนำกระแสไปหน้า (Forward conduction) ซึ่งจะส่งผลให้อุปกรณ์ชนิดนี้มีความต้านทานในสภาวะนำกระแสที่ต่ำลง จึงสามารถทำให้มีความหนาแน่นกระแสได้สูง อีกทั้งยังสามารถที่จะควบคุมการไหลของกระแสได้โดยการควบคุมแรงดันไบอัสที่ขั้วเกตจึงเป็นการลดความยุ่งยากของวงจรขับทำให้ไอจีบีที เป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่น่าสนใจอย่างมาก



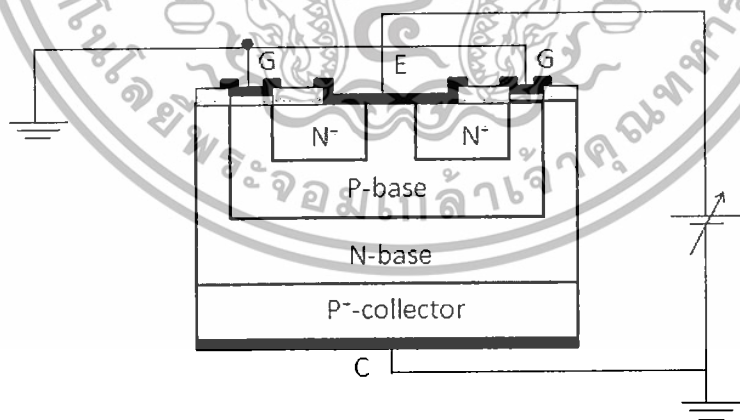
รูปที่ 2.1 โครงสร้างภาพตัดขวางของอุปกรณ์ (ก.) ไอจีบีที (ข.) วงจรเทียบเท่าของไอจีบีที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1 โครงสร้างและหลักการทำงานพื้นฐานของอุปกรณ์ไอจีบีที [3]

ไอจีบีทีเป็นอุปกรณ์กำลังที่มีโครงสร้างเกิดจากการรวมโครงสร้างเกตแบบมอสเฟตและการนำกระแสแบบไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์เข้าไว้ด้วยกัน ดังนั้นการทำงานของไอจีบีที จึงสามารถที่จะทำได้ง่ายโดยการเหนี่ยวนำให้เกิดช่องทางเดินกระแส ด้วยการให้แรงดันไบอัสค่าบวกที่ขั้วเกตทำให้ อิเล็กตรอนสามารถที่จะเคลื่อนที่จากบริเวณเอ็นอีมิเตอร์ (N^+ -emitter) ผ่านชั้นพีเบส (P-base) มายังชั้นเอ็นเบส (N-base) ได้ เช่นเดียวกับมอสเฟตกำลัง นอกจากนั้นในสภานำกระแสไปหน้า รอยต่อระหว่างพีคอลเลคเตอร์ (P^+ -collector) กับชั้นเอ็นเบส (N-base) จะอยู่ในสภานำกระแสไปหน้า จึงทำให้เกิดการฉีดประจุพาหะส่วนน้อยจากพีคอลเลคเตอร์ (P^+ -collector) เข้าไปยังชั้นเอ็นเบส (N-base) ทำให้เกิดการมอดูเลตสภาพนำ (Conductivity Modulation) ส่งผลให้ความต้านทานใน สภานำกระแสของไอจีบีที มีค่าลดลงต่ำกว่าโครงสร้างมอสเฟตกำลัง สำหรับการดำเนินงานของ อุปกรณ์ไอจีบีทีสามารถแบ่งเป็นสภาวะใหญ่ๆ ได้ 3 สภาวะด้วยกัน คือ สภาวะปิดกั้นย้อนกลับ , สภาวะปิดกั้นไปหน้า , สภานำกระแสไปหน้า

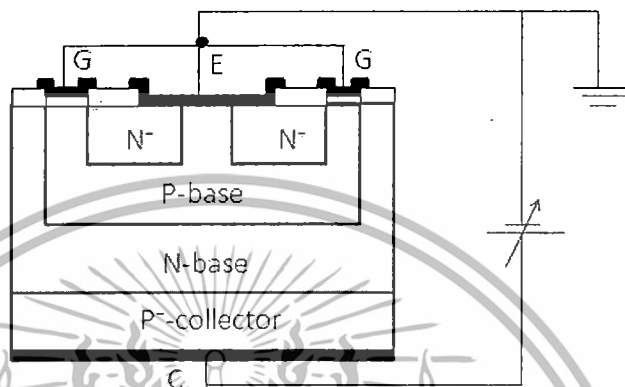
2.1.1 สภาวะปิดกั้นย้อนกลับ (Reverse Blocking Mode) เป็นกรณีเกิดจากการให้แรงดันค่าลบที่ขั้วคอลเลคเตอร์ ทำให้รอยต่อระหว่างพีคอลเลคเตอร์ (P^+ -collector) กับชั้นเอ็นเบส (N-base) อยู่ในสภาวะถูกไบอัสย้อนกลับ กระแสจึงไม่สามารถไหลผ่านรอยต่อนี้ไปได้จนกว่าจะถึงแรงดันพังทลายของรอยต่อพีคอลเลคเตอร์ (P^+ -collector) กับชั้นเอ็นเบส (N-base) กระแสจึงสามารถไหลได้โดยไม่สามารถควบคุมการไหลได้



รูปที่ 2.2 การให้แรงดันไบอัสอุปกรณ์ไอจีบีที เพื่อให้ทำงานในสภาวะปิดกั้นย้อนกลับ

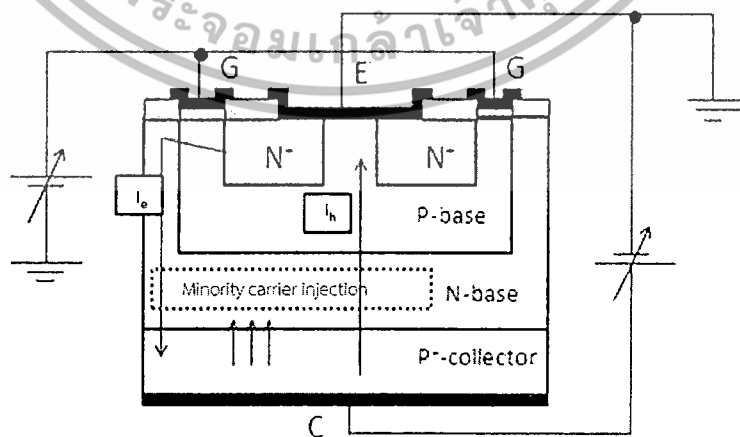
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 สภาวะปิดกั้นไปหน้า (Forward Blocking Mode) เกิดจากการให้แรงดันไบอัสค่าบวกที่ คอลเลคเตอร์ (Collector) โดยลัดวงจรขั้วอิมิตเตอร์ (Emitter) กับเกต (Gate) เข้าด้วยกัน ทำให้รอยต่อระหว่าง พีเบส (P-base) กับ เอ็นเบส (N-base) อยู่ในสภาวะไบอัสย้อนกลับกระแสจึงไม่สามารถไหลผ่านรอยต่อได้เช่นกัน



รูปที่ 2.3 การให้แรงดันไบอัสอุปกรณ์ไอจีบีที เพื่อให้ทำงานในสภาวะปิดกั้นไปหน้า

2.1.3 สภาวะนำกระแสไปหน้า (Forward Conduction Mode) เกิดจากการให้แรงดันไบอัสค่าบวกที่คอลเลคเตอร์ (Collector) เหมือนกันกับสภาวะปิดกั้นหน้า แต่กรณีนี้ให้เกตเป็นบวก เทียบกับ อิมิตเตอร์ (Emitter) ด้วย ซึ่งค่าแรงดันไบอัสที่ขั้วเกตมีค่ามากกว่าแรงดันขีดเริ่มจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำ ชั้นนี้จะทำหน้าที่เป็นช่องทางเดินกระแสทำให้อิเล็กตรอนสามารถไหลผ่านจากเอ็นอิมิตเตอร์ (N^+ -emitter) ไปยังบริเวณชั้นเอ็นเบส (N-base) ได้

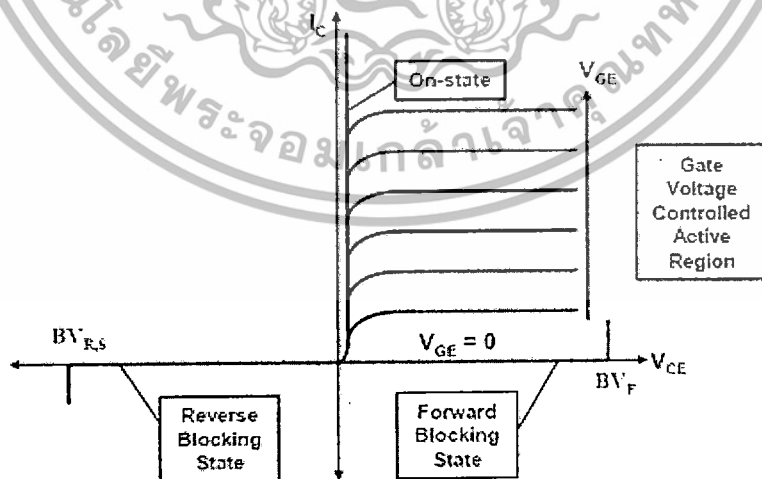


รูปที่ 2.4 การให้แรงดันไบอัสกับอุปกรณ์ไอจีบีที เพื่อให้ทำงานในสภาวะนำกระแสไปหน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทำงานทั้ง 3 สภาวะที่กล่าวมา สภาวะนำกระแสไปหน้าเป็นสภาวะที่น่าสนใจและถูกใช้งานมากที่สุด ที่สภาวะนี้จะเห็นได้ว่ารอยต่อพีคอลเลคเตอร์ (P^+ -collector) กับชั้นเอ็นเบส (N-base) จะอยู่ในสภาวะถูกไบอัสไปหน้าทำให้เกิดการฉีดพาหะส่วนน้อยจากพีคอลเลคเตอร์ (P^+ -collector) เข้าไปยังชั้นเอ็นเบส (N-base) และจะฉีดมากขึ้นเมื่อเพิ่มค่าแรงดันไบอัสที่ขั้วคอลเลคเตอร์จนถึงจุดหนึ่งซึ่งความเข้มข้นของประจุพาหะส่วนน้อยเท่ากับระดับความหนาแน่นอะตอมสารเจือพื้นฐาน (background doping level) ของชั้นเอ็นเบส (N-base) ณ จุดนี้สภาวะของชั้นเอ็นเบส (N-base) จะเปลี่ยนไปเหมือนกับเป็นชั้นอินทรินซิก (intrinsic) ดังนั้นการทำงานของอุปกรณ์ในสภาวะนี้จึงมีลักษณะเหมือนพี-ไอ-เอ็นไดโอด (P-i-N diode) ที่อยู่ในสภาวะนำกระแสไปหน้า อย่างไรก็ตามความสามารถในการนำกระแสของช่องทางเดินกระแสที่ถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นก็มีขีดจำกัดทั้งนี้เนื่องจากเกิดศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมช่องทางเดินกระแส ส่งผลให้กระแสไปหน้า (forward current) มีค่าคงที่ที่ค่าหนึ่งๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.5

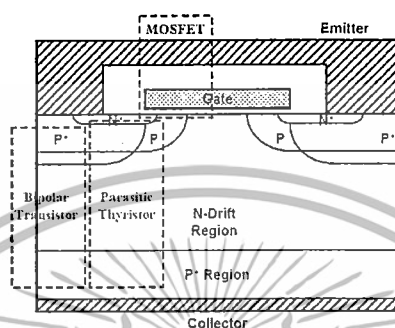
การเปลี่ยนสถานการณ์ทำงานของไอจีบีทีจาก ON ไปสู่ OFF สามารถทำได้โดยการตัดช่องทางเดินกระแสที่ผิวของชั้นพีเบส (P-base) บริเวณใต้เกต ด้วยการลัดวงจรระหว่างขั้วเกตเข้ากับอิมิตเตอร์ ทำให้อิเล็กตรอนซึ่งเป็นประจุพาหะส่วนน้อยไม่สามารถที่จะไหลผ่านไปยังชั้นเอ็นเบส (N-base) ได้ อย่างไรก็ตามการตัดช่องทางเดินกระแสเป็นเพียงการตัดการไหลของอิเล็กตรอนเท่านั้น แต่ส่วนของโฮลซึ่งเป็นประจุพาหะส่วนน้อยที่ถูกฉีดเข้าไปในชั้นเอ็นเบส (N-base) จะยังคงมีความหนาแน่นสูงอยู่ในตอนแรกหลังจากตัดช่องทางเดินกระแสและจะค่อยๆ ลดลงขึ้นอยู่กับอายุประจุพาหะส่วนน้อย (lifetime) ส่งผลให้ไม่สามารถตัดกระแส (turn-off) ได้ทันที ทำให้มีความเร็วในการสวิตซิ่ง (Switching Speed) ของไอจีบีทีที่มีค่าต่ำกว่ามอสเฟตกำลัง



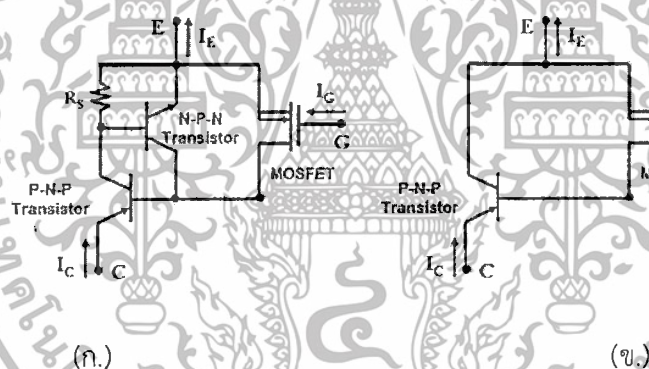
รูปที่ 2.5 คุณสมบัติของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไอจีบีที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปรากฏการณ์ที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งที่พบในโครงสร้างไอจีบีที คือ โครงสร้างแฝง พี-เอ็น-พี-เอ็น (P-N-P-N) แบบไทรสเตอร์ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดปรากฏการณ์แลทซ์-อัฟขึ้นในขณะที่ไอจีบีทีทำงาน ส่งผลให้โครงสร้างเกตแบบมอสเฟตไม่สามารถที่จะควบคุมการไหลของกระแสได้ ดังนั้นสิ่งสำคัญอย่างหนึ่งในการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ไอจีบีที ก็คือการหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดการทำงานในสภาวะไทรสเตอร์



รูปที่ 2.6 ไทรสเตอร์ปรสิตภายในโครงสร้างอุปกรณ์ไอจีบีที



รูปที่ 2.7 วงจรเทียบเท่าสำหรับโครงสร้างอุปกรณ์ไอจีบีที

2.2 วงจรเทียบเท่าอุปกรณ์ไอจีบีที (Device Equivalent Circuit)

วงจรเทียบเท่าอุปกรณ์แทนโครงสร้างของไอจีบีที แสดงในรูปที่ 2.7(ก.) วงจรคู่พี-เอ็น-พีทรานซิสเตอร์ (P-N-P transistor) และเอ็น-พี-เอ็นทรานซิสเตอร์ (N-P-N transistor) รูปแบบปรสิตทรานซิสเตอร์ เช่นเดียวกับมอสเฟต ขั้วกระแสเบสสำหรับพี-เอ็น-พีทรานซิสเตอร์ (P-N-P transistor) ถึงแม้ว่าย่านเอ็นอิมิตเตอร์ (N^+ emitter) และพีเบส (P-base regions) ในโครงสร้างไอจีบีทีคือการลัดวงจรโดยขั้วไฟฟ้าอิมิตเตอร์ มีความต้านทานจำกัด สำหรับกระแสไบโพลาร์ไหลที่ขั้วไฟฟ้าอิมิตเตอร์ที่ระบุโดยตัวต้านทาน R_s ถ้าความต้านทานนี้ขนาดเล็กมากจะทำให้เอ็น-พี-เอ็นทรานซิสเตอร์ (N-P-N transistor) ภายในโครงสร้างไอจีบีที ไม่สามารถใช้งานได้ ในกรณีนี้วงจรสมมูลสำหรับไอจีบีที จะกลายเป็นไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ขับเคลื่อนด้วยทรานซิสเตอร์มอสเฟต ดังแสดงในรูปที่ 2.7(ข.)

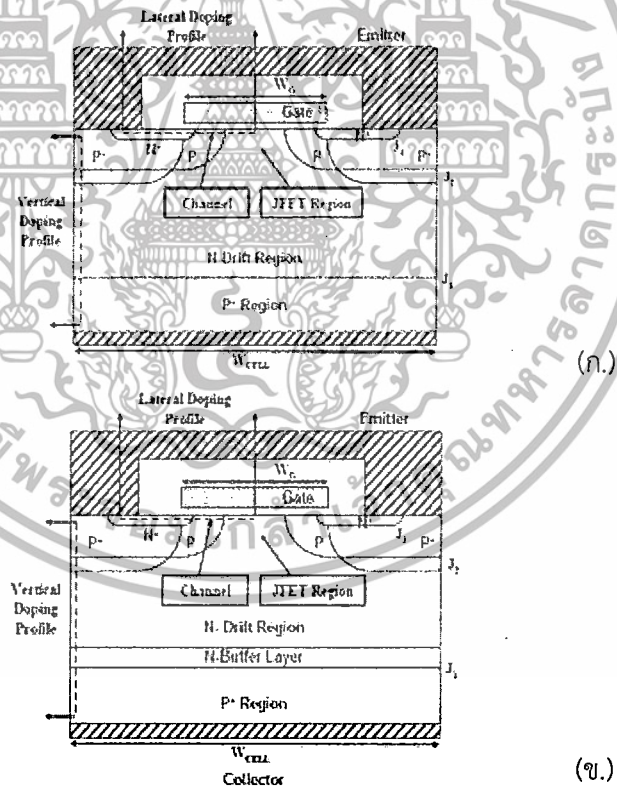
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 เทคโนโลยีโครงสร้างของอุปกรณ์ไอจีบีที (IGBT Structure) [1]

สำหรับเทคโนโลยีโครงสร้างของอุปกรณ์ไอจีบีที สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ

2.3.1 เทคโนโลยีโครงสร้างไอจีบีทีแบบสมมาตร สภาวะการปิดกั้นมักจะถูกเรียกว่าเป็น โครงสร้างไอจีบีทีแบบนอนพันทซทรู (Non punch-through: (NPT)) เนื่องจากสนามไฟฟ้าไม่ขยาย ผ่านความกว้างของส่วนเจือเบาของส่วนเอ็นดริฟท์ (N-drift region) (ดังแสดงในรูปที่ 2.8(ก.))

2.3.2 เทคโนโลยีโครงสร้างไอจีบีทีแบบไม่สมมาตร ลักษณะเด่นหลักของโครงสร้าง ไอจีบีทีที่ไม่ สมมาตรคือ มีชั้นอินบัพเฟอร์ (N-buffer) ภายในส่วนเอ็นดริฟท์ (N-drift region) ชั้นนี้บางครั้งจะ เรียกว่าเป็นชั้น “field-stop” ความสามารถการปิดกั้นแรงดันไปหน้า ได้รับการสนับสนุนในเอ็น ดริฟท์ (N-drift region) บางๆส่งผลในการลดแรงดันตกคร่อมสถานะ on โครงสร้างแบบนี้มักจะถูก เรียกว่าโครงสร้างไอจีบีทีแบบ พันทซทรู (Punch-through: (PT)) เพราะสนามไฟฟ้า “พันทซทรู” เจาะ ผ่านส่วนเจือทั้งหมดของ ส่วนเอ็นดริฟท์ (N-drift region) โครงสร้างไอจีบีทีนี้เหมาะสำหรับการใช้ งานวงจรกระแสตรง (DC circuits) ไม่มีการไบอัสย้อนกลับ นำมาใช้กับอุปกรณ์ได้เนื่องจากจะทำงาน เฉพาะในด้านแรกของ กราฟ I-V (ดังแสดงในรูปที่ 2.8(ข.))



รูปที่ 2.8 โครงสร้างภาพตัดขวางของอุปกรณ์ไอจีบีที (ก.) โครงสร้างไอจีบีทีแบบสมมาตร (ข.)

โครงสร้างไอจีบีทีแบบไม่สมมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 การเปรียบเทียบระหว่างเทคโนโลยีโครงสร้างไอจีบีทีแบบสมมาตร (NPT-IGBT) กับ โครงสร้างไอจีบีทีแบบไม่สมมาตร (PT-IGBT)

เพื่อแสดงให้เห็นถึงข้อเด่นหรือข้อด้อยของเทคโนโลยีโครงสร้างไอจีบีทีจึงได้มีการเปรียบเทียบกับโครงสร้างแบบสมมาตร กับโครงสร้างแบบไม่สมมาตร แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างแบบสมมาตร กับโครงสร้างแบบไม่สมมาตร

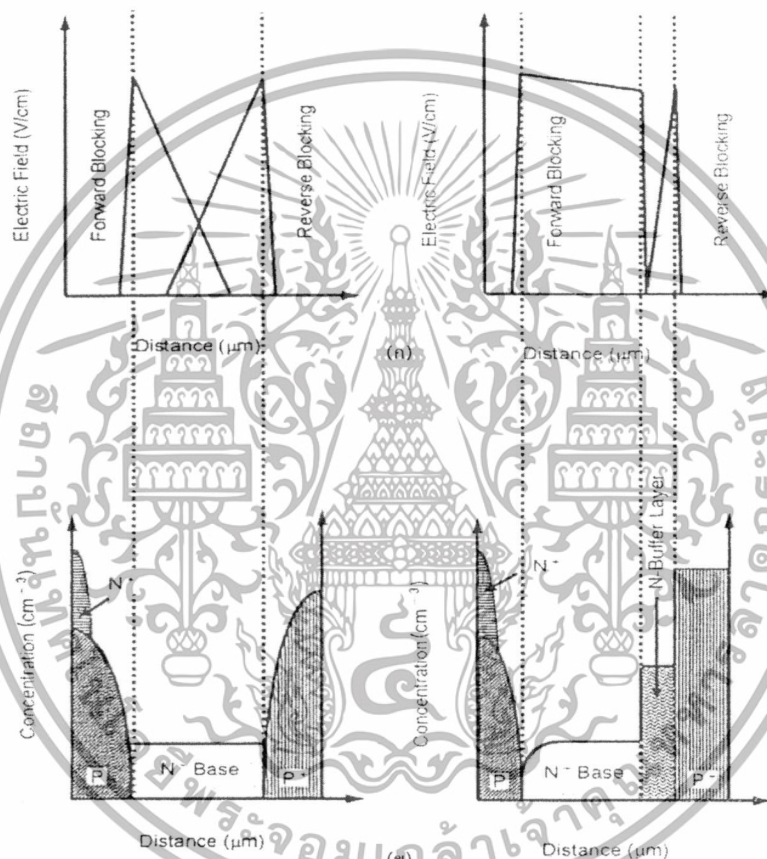
Serial No.	คุณลักษณะ	โครงสร้างสมมาตร NPT-IGBT	โครงสร้างไม่สมมาตร PT-IGBT
1	เทคโนโลยีกระบวนการสร้างและราคา-ประสิทธิภาพ	ใช้ขั้นตอนการแพร่เป็นกระบวนการสร้างราคาถูกกว่า	ใช้เทคนิคการปลูกผลึกเดี่ยว ทำให้มีราคาแพงและมีกระบวนการสร้างที่ซับซ้อน
2	ความหนาของชั้น N-base และ N-buffer	ไม่มีชั้น N-buffer ส่วนชั้น N-base มีความสามารถทนต่อการปิดกั้นแรงดันได้ 2 ทิศทาง	ชั้น N-buffer มีความบางผ่านทะเล depletion region ส่วนชั้น N-base มีความสามารถทนต่อการปิดกั้นแรงดันได้ต่ำกว่า
3	อายุพหะใน N-base การนำแบบมอดดูเลชั่น	มีอายุพหะสูง ผลลัพธ์คือ แรงดันตกคร่อมไปหน้าต่ำ low forward drop	มีอายุพหะต่ำกว่า การมอดดูเลชั่นขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพการฉีดพหะของฐานรอง P+substrate
4	ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของแรงดันตกคร่อม forward	ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิสูงกว่า	ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิต่ำกว่า
5	การเชื่อมต่อ collector และเวลา turn-off	เจือสารพี (P) บางๆ อิเล็กตรอนฉีดพหะจาก N-base ไป P collector ให้เป็นนำพหะเวลา turn-off	เจือสารพี (P+) หนักขึ้น N-buffer ทำให้ประสิทธิภาพการฉีดพหะลดลง กระแสจึงมีค่าลดลง
6	การสูญเสีย turn-off	มีความไวมากกว่า	มีความไวน้อยกว่า
7	ความเสถียรของอุณหภูมิ	อุณหภูมิเสถียรมากกว่า	อุณหภูมิเสถียรต่ำกว่า
8	Short-circuit failure	โหมดลัมเหลวต่ำกว่า	โหมดลัมเหลวสูงกว่า

จากตารางที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าโครงสร้างไอจีบีทีแบบสมมาตร (NPT-IGBT) กับโครงสร้างไอจีบีทีแบบไม่สมมาตร(PT-IGBT) ได้เปรียบเทียบความแตกต่างของการสร้างและการทำงานได้แบ่งความแตกต่างของคุณลักษณะ พฤติกรรม ระดับอุณหภูมิของอุณหภูมิของอุณหภูมิ ซึ่งโครงสร้างไอจีบีทีแบบสมมาตร มีความเป็นไปได้ในกระบวนการสร้างได้จริง เนื่องจากผลิตด้วยเทคโนโลยีการแพร่สารเจือเป็นกระบวนการสร้างราคาถูกกว่าและมีความสามารถในความสามารถทนต่อการปิดกั้นได้สูงกว่า และสามารถปิดกั้นแรงดันได้ 2 ทิศทางคือ ความสามารถทนต่อการปิดกั้นไปหน้า (Forward breakdown voltages) และความสามารถทนต่อการปิดกั้นย้อนกลับ (Reverse breakdown voltages) สามารถนำไปใช้งานในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ (AC circuits) ส่วนแบบไม่สมมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(PT-IGBT) นี้ นำไปใช้งานในวงจรไฟฟ้ากระแสตรง (DC circuits) เมื่ออุปกรณ์จำเป็นต้องการปิดกั้นแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ

ลักษณะการเจือสารของโครงสร้างไอจีบีทีแบบสมมาตรและแบบไม่สมมาตรส่งผลต่อการกระจายสนามไฟฟ้า ดังแสดงดังรูปที่ 2.9 โดยการพังทลายสนามไฟฟ้าวิกฤตถูกสมมติว่าไม่ขึ้นอยู่กับระดับการเจือสาร ในโครงสร้างไอจีบีทีแบบไม่สมมาตรการกระจายสนามไฟฟ้าจะเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู ส่วนโครงสร้างไอจีบีทีแบบสมมาตรการกระจายสนามไฟฟ้าจะเป็นรูปสามเหลี่ยม ซึ่งจุดที่สนามไฟฟ้าวิกฤตนั้นอยู่ใกล้กับบริเวณ deep P+ region/N-base ที่รอยต่อ (J_2) จุดสนามไฟฟ้าวิกฤตนี้ส่งผลให้เกิดแรงดันพังทลาย

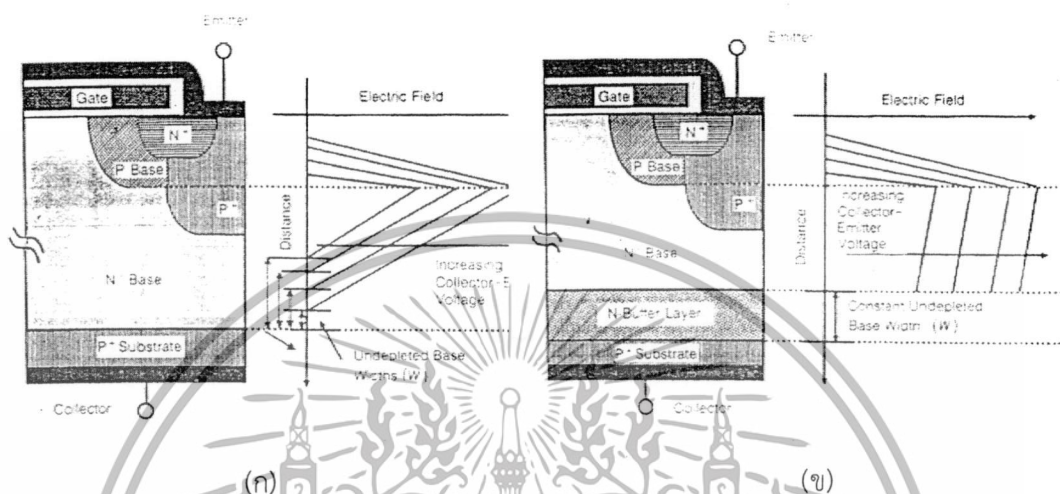


รูปที่ 2.9 ลักษณะการเจือสารและการกระจายสนามไฟฟ้าใน (ก) โครงสร้างแบบสมมาตร(NPT-IGBT) และ (ข) โครงสร้างแบบไม่สมมาตร (PT-IGBT)

ลักษณะของความกว้างของชั้นดีพลีชัน (Depletion) ของโครงสร้างไอจีบีทีแบบสมมาตรและแบบไม่สมมาตรกับการเพิ่มขึ้นของแรงดันคอลเลคเตอร์-อิมิตเตอร์ (V_{CE}) ดังแสดงดังรูปที่ 2.10 พิจารณากรณีโครงสร้างไอจีบีทีแบบสมมาตร ความกว้างของชั้นดีพลีชัน (Depletion) ที่เพิ่มขึ้นกับแรงดันคอลเลคเตอร์-อิมิตเตอร์ ผลก็คือความกว้างอันดีพลีชัน (undepletion) ในส่วนเอ็นเบส (N-base) แคบลง ทำให้อัตราการขยายกระแส (gain current) ของพี-เอ็น-พีทรานซิสเตอร์ (P-N-P transistor) เพิ่มขึ้นเป็นไปตามสมการที่ (2.6)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาโครงสร้างไอจีบีทีแบบไม่สมมาตรมีความกว้างแอนติฟิลิชั่น (undepletion) ในส่วนเอ็นเบส (N-base) คงที่ เนื่องจากมีชั้นเอ็นบัฟเฟอร์ (N-buffer) กั้นอยู่ กระแสและแรงดันคอลเลคเตอร์-อิมิตเตอร์ จะมีลักษณะคล้ายกับมอสเฟตกำลัง โดยที่กระแสจะเป็นไปตามช่องทางเดินกระแสที่ลดลงกับและแรงดันคอลเลคเตอร์-อิมิตเตอร์



รูปที่ 2.10 ลักษณะการแพร่กระจายชั้นดีฟลิชั่น (Depletion) (ก) โครงสร้างไอจีบีทีแบบสมมาตร (NPT-IGBT) และ (ข) โครงสร้างไอจีบีทีแบบไม่สมมาตร (PT-IGBT)

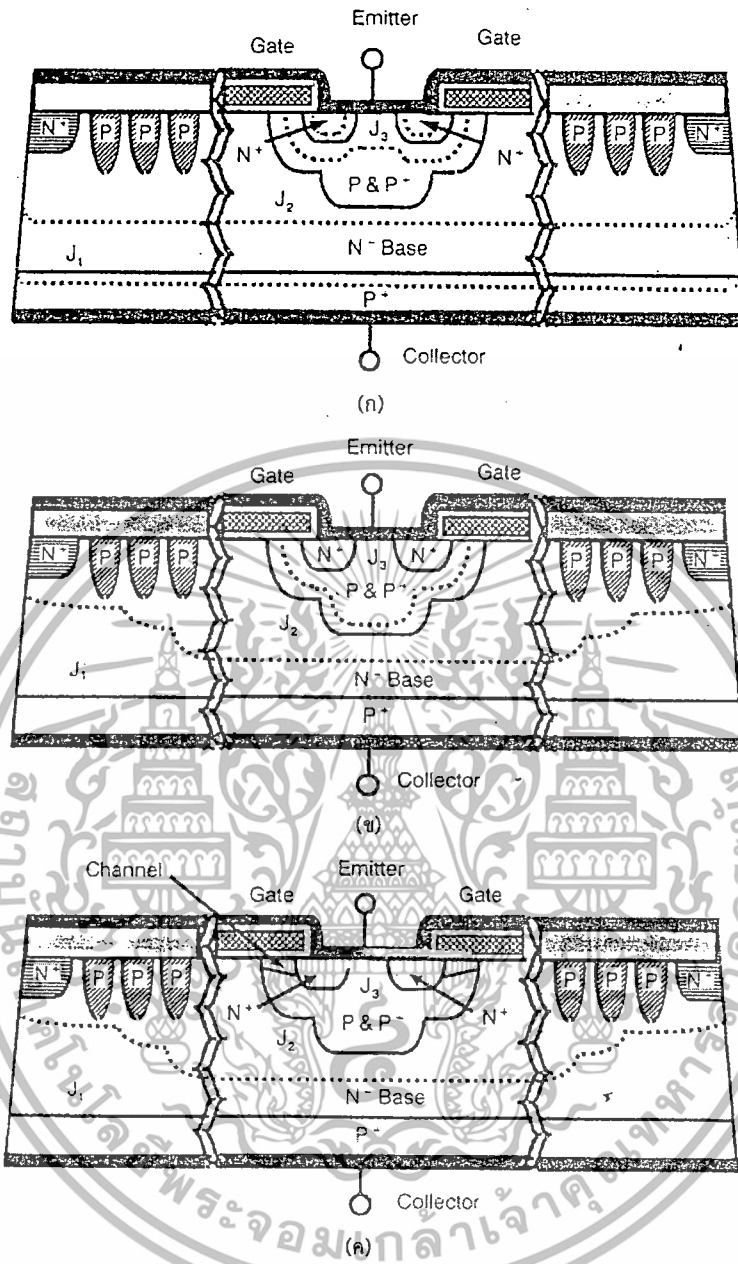
2.4 การวิเคราะห์การทำงานของโครงสร้างไอจีบีทีแบบสมมาตร

เนื่องจากอุปกรณ์ไอจีบีที เป็นอุปกรณ์ที่เกิดจากการรวมโครงสร้างเกตแบบมอสเฟตเข้ากับการนำกระแสแบบไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ และในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เทคโนโลยีไอจีบีทีแบบสมมาตร (NPT-IGBT) โครงสร้างเกตแบบขุด ดังนั้นการวิเคราะห์การทำงานของไอจีบีทีจึงต้องพิจารณาในลักษณะที่แตกต่างไปจากอุปกรณ์กำลังโดยทั่วไปและที่สำคัญก็คือ จะพิจารณาเฉพาะกรณีที่ไม่เกิดโครงสร้างแฝงแบบทรินสเตอร์เท่านั้น

2.4.1 ความสามารถในการปิดกั้นย้อนกลับโครงสร้างสมมาตร

การทำงานของโครงสร้างไอจีบีทีแบบสมมาตร (NPT-IGBT) ในสภาวะปิดกั้นย้อนกลับ เมื่อให้แรงดันไบอัสค่าบวกไปยังเอ็นอิมิตเตอร์ (N^+ -emitter) ขณะที่จ่ายแรงดันไบอัสค่าลบไปยังพีคอลเลคเตอร์ (P^+ -collector) ดังแสดงในรูปที่ 2.11 (ก) ในเงื่อนไข รอยต่อ J_1 และ J_3 เป็นการไบอัสย้อนกลับ (reverse-bias) ขณะที่รอยต่อ J_2 เป็นไบอัสตรง (forward-bias) การปิดกั้นแรงดันย้อนกลับผ่าน รอยต่อ J_1 และ J_3 จะยับยั้งการไหลของกระแส เข้าสู่โหมดความสามารถในการปิดกั้นย้อนกลับ แรงดันส่วนใหญ่ผ่าน รอยต่อ J_1 กับชั้นดีฟลิชั่น (depletion region) ขยายส่วนใหญ่ภายในส่วน เอ็นเบส (N-base) และแรงดันส่วนน้อยผ่านไปยังพีคอลเลคเตอร์ (P^+ -collector)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 การทำงานของไอจีบีทีแบบสมมาตร (NPT-IGBT) (ก) สภาวะปิดกั้นย้อนกลับ (ข) สภาวะปิดกั้นไปหน้า (ค) สภาวะนำกระแสไปหน้า

การปิดกั้นแรงดันย้อนกลับนั้นถูกกำหนดโดย ทรานซิสเตอร์แบบเบสเปิด ประกอบไปด้วยพีคอลเลคเตอร์ (P^+ -collector), เอ็นเบส (N-base) และส่วนพีเบส (P-base) ทรานซิสเตอร์นี้อาจเกิดการพังทลายโดยการผ่านเข้าถึงของเอ็นเบส (N-base) สภาพต้านทานและความหนาของเอ็นเบส (N-base) ต้องมีความเหมาะสมสำหรับความต้องการแรงดันพังทลาย โดยความหนาของเอ็นเบส (N-base) (d) เท่ากับความกว้างชั้นบริเวณปลอดประจุพาหะ ทำงานที่แรงดันปิดกั้นสูงสุด (V_{max}) รวมกับความยาวของการกระจายพาหะส่วนน้อย (L_p) ดังสมการที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$d = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_s V_{\max}}{qN_D}} + L_P \quad (2.1)$$

เมื่อ ε_0 คือ ค่ายินยอมในสุญญากาศ

ε_s คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของซิลิคอน

q คือ ค่าประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน

N_D คือ ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือชั้น N-base

หากพิจารณาที่แรงดันปิดกั้นสูงสุด เทอมความหนาของชั้น N-base จะแปรผันตรงกับ รากที่สองของค่าแรงดันปิดกั้นสูงสุด ($d \propto \sqrt{V_{\max}}$)

2.4.2 ความสามารถปิดกั้นไปหน้าโครงสร้างสมมาตร

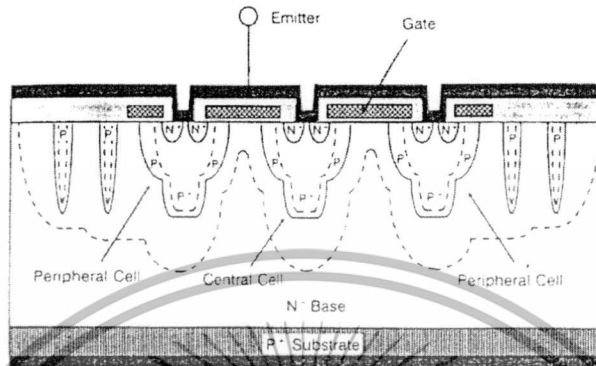
การทำงานของโครงสร้างไอจีบีทีแบบสมมาตร (NPT-IGBT) ในสภาวะปิดกั้นไปหน้า เมื่อไบอัสแรงดันบวกไปยังขั้วคอลเลคเตอร์ และลัดวงจรที่ขั้วเกตกับขั้วอิมิตเตอร์เข้าไว้ด้วยกัน เพื่อป้องกันการเกิดช่องทางเดินกระแสบริเวณผิวภายใต้ส่วนเกต รอยต่อ J_1 และ J_2 เป็นการไบอัสตรง ขณะที่รอยต่อ J_2 เป็นการไบอัสย้อนกลับ ความสามารถต่อการทนการปิดกั้นไปหน้ายังขึ้นอยู่กับความหนาแน่นอะตอมสารเจือของพีเบส (P-base) แสดงดังรูปที่ 2.11(ข) นอกจากนี้ชั้นบริเวณปลอดพาหะที่รอยต่อ J_2 จะเป็นตัวกำหนดค่าแรงดันขีดเริ่มของช่องทางเดินกระแส การแพร่กระจายของชั้นปลอดพาหะของแต่ละหน่วยเซลล์กับเซลล์ข้างเคียง แสดงดังรูปที่ 2.12 ที่บริเวณของอุปกรณ์ได้มีการแบ่งบริเวณได้อย่างเหมาะสมทั้งแรงดันไฟฟ้าและรูปร่างของบริเวณปลอดพาหะที่เหมาะสม

2.4.3 สภาวะนำกระแสไปหน้าโครงสร้างสมมาตร

ไอจีบีทีในสภาวะการปิดกั้นไปหน้าสามารถส่งผ่าน สภาวะนำกระแสไปหน้า เมื่อไบอัสแรงดันบวกไปยังที่ขั้วเกตกับขั้วอิมิตเตอร์ที่ลัดวงจรเข้าไว้ด้วยกัน ถ้าค่าแรงดันไบอัสที่เกิดเมื่อเทียบกับอิมิตเตอร์มีค่ามากกว่าแรงดันขีดเริ่มแล้ว จะเหนี่ยวนำทำให้เกิดช่องทางเดินกระแส ดังรูปที่ 2.11 (ค)

การนำช่องทางเดินกระแสชนิดเอ็นที่เกิดขึ้นในพีเบส (P-base region) เป็นสะพานไปยัง เอ็นอิมิตเตอร์ (N^+ -emitter) และเอ็นเบส (N-base) เส้นทางนี้เป็นช่องทางเดินกระแสอิเล็กตรอนจาก เอ็นอิมิตเตอร์ (N^+ -emitter) ไปยังเอ็นเบส (N-base) การไหลของอิเล็กตรอนนี้จะไปเอ็นเบส (N-base) ที่มีศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่าของ N^+ region ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ P^+ collector/ N -base diode กลายเป็นการไบอัสไปหน้า ภายใต้การไบอัสไปหน้า ความหนาแน่นสูงของพาหะโฮลส่วนน้อยได้ถูกฉีดจาก พีคอลเลคเตอร์ (P^+ collector) ไปยังเอ็นเบส (N-base) พิจารณาว่าการไบอัสคอลเลคเตอร์แรงดันสูง การฉีดพาหะมีค่าสูงมากกว่าความหนาแน่นสารเจือของเอ็นเบส (N-base) มาก จะเกิดเงื่อนไขการฉีดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พาหะระดับสูง (high-level injection) ในเอ็นเบส (N-base region) การฉีดพาหะโฮลจากพีคอลเลคเตอร์ (P^+ collector) โดยบริเวณใต้โอมิตเตอร์เบส (emitter-base) จะลัดวงจรทางเดินซึ่งเป็นเส้นตรง บริเวณปลอดพาหะ N-base/P base จนกระทั่งมาถึงขั้วโอมิตเตอร์ (contact emitter)



รูปที่ 2.12 การกระจายของชั้นดีพลีชันในเซลล์ Central และ Peripheral ภายในอุปกรณ์

โฮลนี้จะถูกขับออกจากบริเวณใต้เกต (gate region) ใต้เกตนี้เป็นผลมาจากการไล่ของประจุบวกในชั้นสะสมที่มีอยู่ใต้เกตและทำให้เบนไปยังบริเวณปลอดพาหะ P base/ N-base การเคลื่อนที่ภายใต้เอ็นโอมิตเตอร์ (N^+ emitter) และส่วนพีบวก (P^+ region) โฮลจะถูกจับโดยขั้วโอมิตเตอร์ (contact emitter) ดังนั้นเมื่อจ่ายแรงดันคอลเลคเตอร์สูง จะเกิด “พลาสมาของโฮล (plasma of holes)” ในเอ็นเบส (N-base) พลาสมานี้ทำให้โฮลกับอิเล็กตรอนจากขั้วโอมิตเตอร์ (contact emitter) ทำให้ประจุไฟฟ้าส่วนใหญ่เป็นกลาง รูปแบบนี้เป็นการประมาณความหนาแน่นของโฮลและอิเล็กตรอนที่มากขึ้นไปที่รวมอยู่ในเอ็นเบส (N-base) การขยายตัวของอิเล็กตรอนและโฮลอย่างรุนแรงนี้ทำให้เกิดการนำไฟฟ้าในเอ็นเบส (N-base) กลไกการนำไฟฟ้านี้ถูกเรียกว่า “Conductivity modulation”

เมื่อพิจารณาการไหลของกระแสอิเล็กตรอนจาก N^+ emitter, N channel, N-base และจนกระทั่งเข้าไปยัง P^+ base นี้เป็น Conductivity modulation ของ N-base มีการเปลี่ยนแปลงเกิดเป็นการนำไฟฟ้าสูง การไหลของอิเล็กตรอนกลับไม่ส่งผลและยังทำให้การปิดกั้นแรงดันตกคร่อมไปหน้ามีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญอีกด้วย

จากการอธิบายคุณสมบัติสถานะนำกระแสของไอจีบีทีที่สามารถทำให้เห็นได้ว่า ไอจีบีทีมีการทำงานแบบพี-ไอ-เอ็น เรกติไฟล์ (P-I-N rectifier) ที่มีกระแสเอาต์พุตเป็นตัวบังคับการไหลของช่องทางเดินกระแส ซึ่งเป็นการควบคุมกระแสพี-ไอ-เอ็น ไดโอด (P-I-N diode) ดังนั้นพื้นฐานของไอจีบีทีที่สามารถมองได้ว่าเป็นการต่อแบบอนุกรมของ มอสเฟต (MOSFET) และ พี-ไอ-เอ็น เรกติไฟล์ (P-I-N rectifier)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและข้อมูลอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสามารถในการทนแรงดันพังทลาย จะเกิดบริเวณส่วนภายใต้ deep P⁺ region ใช้บังคับกับความสามารถในการปิดกั้นแรงดันไฟฟ้า (blocking voltage) สนามไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ P+ region/N-base รอยต่อ (J₂) ในอีกแง่หนึ่ง ถ้าความกว้างของย่านเอ็นเบส (N-base) มีขนาดใหญ่มาก เทียบกับความกว้างชั้นดีพลีชั่น (depletion) ความสามารถในการปิดกั้นแรงดันจะถูกจำกัดโดยแรงดันอวาลานซ์เมื่อสนามไฟฟ้าสูงสุด (E_m) กลายเป็นจุดวิกฤตสนามไฟฟ้า สอดคล้องกับสัมประสิทธิ์การคูณ (M) กลายเป็นอนันต์ แรงดันพังทลายอวาลานซ์จะเป็นไปตามสมการที่ (2.2);

$$BV_F = 5.34 \times 10^{13} N_D^{-3/4} \tag{2.2}$$

อย่างไรก็ตาม ความกว้างของ N-base region ขนาดใหญ่มาก จะทำให้แรงดันตกคร่อมสถานะ on ของโครงสร้างไอจีบีทีเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.13 การกระจายสนามไฟฟ้าระหว่างโหนดปิดกั้นไปหน้าในโครงสร้างไอจีบีทีสมมาตร

แต่ถ้าความกว้างของส่วนเอ็นเบส (N-base region) มีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับความกว้างย่าน depletion สามารถขยายไปถึงผ่าน N-base region ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ในขณะที่สนามไฟฟ้าสูงสุดที่รอยต่อเป็นสนามไฟฟ้าวิกฤต สำหรับการวิเคราะห์ นี่คือการปรากฏการณ์ที่เรียกว่าเงื่อนไข “reach-through” เมื่อ depletion region จากไบอัสย้อนกลับ รอยต่อ J₂ ถึง ไบอัสไปหน้า รอยต่อ J₁ โวลต์ดีพาหะจากรอยต่อ J₁ เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในกระแสแอมโตน ปรากฏการณ์นี้จะจำกัดความสามารถปิดกั้นสูงสุดของโครงสร้างไอจีบีที แรงดันพังทลาย reach-through จะกำหนดโดยสมการที่ (2.3):

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$BV_{RT} = \frac{qN_D}{2\epsilon_s} W_N^2 \quad (2.3)$$

เมื่อ N_D คือ ความเข้มข้นการเจือสารของ N-base region

W_N คือ ความกว้างของ Depletion region

แรงดันพังทลายที่แท้จริงสำหรับสำหรับโครงสร้างไอจีบีทีที่สมมาตร ในโหมดปิดกั้นไปหน้า (Forward blocking) อยู่ระหว่างขีดจำกัดข้างต้น และถูกควบคุมโดยปรากฏการณ์แรงดันพังทลายของทรานซิสเตอร์แบบเบสเปิด ในการวิเคราะห์ปรากฏการณ์นี้จะพิจารณากระแสไหลที่ขอบของย่าน depletion ดังแสดงในรูปที่ 2.13 กระแสประกอบด้วยกระแสรั่วไหลเนื่องจากกระบวนการภายในย่าน depletion และ การขยายกระแสคอลเลคเตอร์โดยอัตราการขยายกระแสทรานซิสเตอร์ P-N-P ขึ้นอยู่กับการใช้งาน “Kirchhoff’s current law” กับโครงสร้างไอจีบีที ในกรณีที่ไม่มีกระแสเกต

$$I_C = \alpha_{PNP} I_C + I_L = I_E \quad (2.4)$$

นำไปสู่ความสัมพันธ์

$$I_C = \frac{I_L}{(1 - \alpha_{PNP})} \quad (2.5)$$

ซึ่งสามารถสรุปได้ว่ากระแสคอลเลคเตอร์จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่ออัตราการขยายกระแสเบสปกติของ P-N-P ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ภายในโครงสร้างไอจีบีที เข้าใกล้อนันต์ เมื่อไบอัสแรงดันคอลเลคเตอร์ค่าบวกเพิ่มมากขึ้น ความกว้างของส่วน undepleted ของย่าน N-base เพิ่มขึ้นเล็กน้อยในเบสทรานสปอร์ตเตอร์ (α_T) ในขณะที่เดียวกันสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ J_2 มีขนาดใหญ่กว่าที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การคูณเพิ่มขึ้น ปรากฏการณ์ทั้งสองเพิ่มขึ้นทั้งอัตราการขยายกระแสเบส กับการเพิ่มขึ้นของการไบอัสจนกระทั่งเท่ากับผลลัพธ์ของแรงดันพังทลายของทรานซิสเตอร์แบบเบสเปิด การวิเคราะห์เบส เจื่อนไขแรงดันพังทลายของทรานซิสเตอร์แบบเบสเปิด ในการโครงสร้างไอจีบีที คือ

$$\alpha_{PNP} = (\gamma_E \alpha_T)_{PNP} M = 1 \quad (2.6)$$

ประสิทธิภาพการฉีดพาหะ (γ_E) ของ P⁺ collector/N-base รอยต่อ (J_1) ใกล้เคียงกับหนึ่ง เพราะความเข้มข้นการเจือสารที่ค่อนข้างสูงใน P⁺ collector region และการเจือสารที่ความเข้มข้นค่อนข้างต่ำใน N-base region ความสำคัญของอีกสองเงื่อนไขในสมการข้างต้นเป็นฟังก์ชันของการไบอัสคอลเลคเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เบสทรานสปอร์ตแฟคเตอร์ (base transport factor) ถูกกำหนดโดยความกว้าง (l) ของส่วน undepleted ในย่าน N-drift (ดูรูปที่ 2.13):

$$\alpha_T = \frac{l}{\cosh(l/L_p)} \quad (2.7)$$

กับ

$$l = W_N - \sqrt{\frac{2\epsilon_s V_C}{qN_D}} \quad (2.8)$$

เมื่อ V_C คือ การไบอัสบวกไปยังขั้วไฟฟ้าคอลเลคเตอร์

L_p คือ ความยาวการแพร่สำหรับโฮลใน N-base region

ขณะที่ไบอัสคอลเลคเตอร์เพิ่มขึ้น ความกว้างของส่วน undepleted ของ N-base region หดตัวลงผลลัพธ์ในการเพิ่มเบสทรานสปอร์ตแฟคเตอร์ (base transport factor) แฟคเตอร์ผลคูณถูกกำหนดโดยการไบอัสคอลเลคเตอร์สัมพันธ์กับแรงดันพังทลายอวาลานซ์ของ deep P+ region/N-base junction (BV_{PP}):

$$M = \frac{1}{1 - (V_C/BV_{PP})^n} \quad (2.9)$$

ในกรณีของ P⁺/N diode สัมประสิทธิ์ผลคูณเพิ่มขึ้นด้วยการไบอัสคอลเลคเตอร์เพิ่มขึ้น แรงดันพังทลายของทรานซิสเตอร์แบบเบสเปิด และความสามารถปิดกั้นไปหน้า ถูกกำหนดโดยแรงดันคอลเลคเตอร์โดยมีหลายปัจจัยทำให้สามารถเชื่อมโยงกับเบสทรานสปอร์ตแฟคเตอร์

ความสามารถปิดกั้นแรงดันไปหน้าของโครงสร้างไอจีบีทีสมมาตรนอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิไอออนไนซ์ค่าสัมประสิทธิ์มีผลกระทบจะลดลงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การคูณลดลง ขณะเดียวกันเบสทรานสปอร์ตแฟคเตอร์เพิ่มขึ้นเนื่องจากอายุพาหะส่วนน้อยเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นยังส่งผลให้การไอออนไนซ์ลดลง ทำให้ความสามารถปิดกั้นแรงดันไปหน้าของโครงสร้างไอจีบีทีสมมาตรเพิ่มขึ้น

2.4.4 กระแสรั่วของโครงสร้างไอจีบีทีสมมาตร [2]

กระแสรั่วในรอยต่อการปิดกั้นย้อนกลับคือการสร้าง space-charge ภายใน depletion region ในกรณีของโครงสร้างไอจีบีทีสมมาตรในโหมดปิดกั้นไปหน้า การสร้างกระแส space-charge ที่ไบอัสแรงดันย้อนกลับ deep P⁺/N-base รอยต่อ J₂ ถูกขยายโดยอัตราของภายในทรานซิสเตอร์ P-N-P:

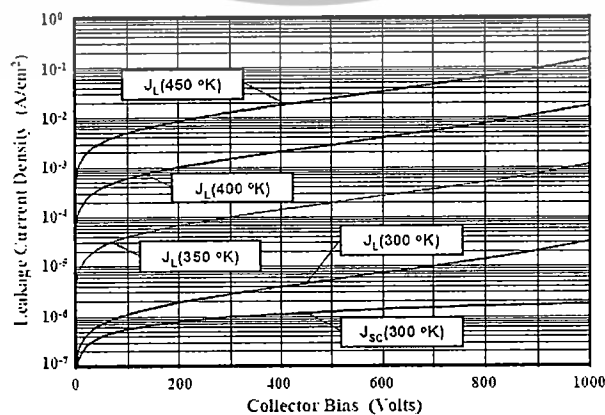
$$J_L = \frac{J_{SCG}}{1 - \alpha_{PNP}} \quad (2.10)$$

เมื่อความหนาแน่นกระแส Space-charge generation เป็นไปตามสมการ:

$$J_{SCG} = \frac{qW_D n_i}{\tau_{SC}} = \frac{n_i}{\tau_{SC}} \sqrt{\frac{2q\epsilon_s V_c}{N_D}} \quad (2.11)$$

กระแส Space-charge generation เพิ่มขึ้นกับการไบอัสคอลเลคเตอร์เพิ่มขึ้น ควบคู่กันไปด้วย อัตราการขยายกระแส (α_{PNP}) ของทรานซิสเตอร์ P-N-P นอกจากนี้ยังมีฟังก์ชันของการไบอัสแรงดันคอลเลคเตอร์ เบสทรานสปอร์ตแฟคเตอร์ (base transport factor) และ แฟคเตอร์ผลคูณเมื่อไบอัสคอลเลคเตอร์เพิ่มขึ้น ที่การไบอัสแรงดันคอลเลคเตอร์น้อยกว่า 80 % ของแรงดันพังทลายแบบเบสเปิด แฟคเตอร์ผลคูณยังคงอยู่ใกล้เคียงกับหนึ่ง ดังนั้นจึงพอเพียงสำหรับการเพิ่มขึ้นในเบสทรานสปอร์ตแฟคเตอร์ที่มีการไบอัสคอลเลคเตอร์ตามสมการ (2.7) และ (2.8)

กรณีของโครงสร้างไอจีบีทีสมมาตรการออกแบบที่มีความสามารถในการปิดกั้นไปหน้า 1,200 โวลต์ ความหนาแน่นกระแสรั่ว (J_{sc}) ที่ 300 K เนื่องจากการสร้าง space-charge ไม่มีการขยายโดยอัตราการขยายของทรานซิสเตอร์ P-N-P จะเห็นได้ว่ากระแสเพิ่มขึ้นกับการไบอัสแรงดันคอลเลคเตอร์ เนื่องจากการขยายตัวของความกว้างของ depletion region อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นในกระแสรั่วเกิดขึ้นที่การไบอัสคอลเลคเตอร์ 800 โวลต์ เมื่อทรานซิสเตอร์ P-N-P รวมอยู่ในการวิเคราะห์ ในรูปนี้ กระแสรั่วที่อุณหภูมิสูง พล็อตเป็นฟังก์ชันของการไบอัสคอลเลคเตอร์ ความเข้มข้นพาหะอินทรินซิกเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญกับอุณหภูมิที่เพิ่มมากขึ้นกับกระแสการรั่วเมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้น 300-400 K

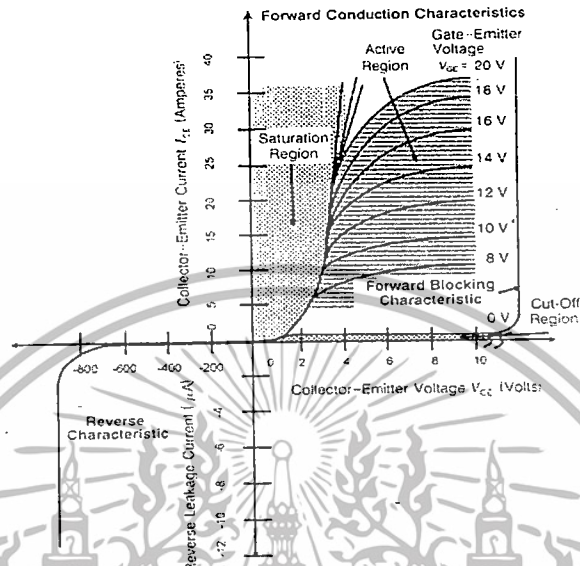


รูปที่ 2.14 กระแสรั่วสำหรับโครงสร้างไอจีบีทีสมมาตรที่อุณหภูมิต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

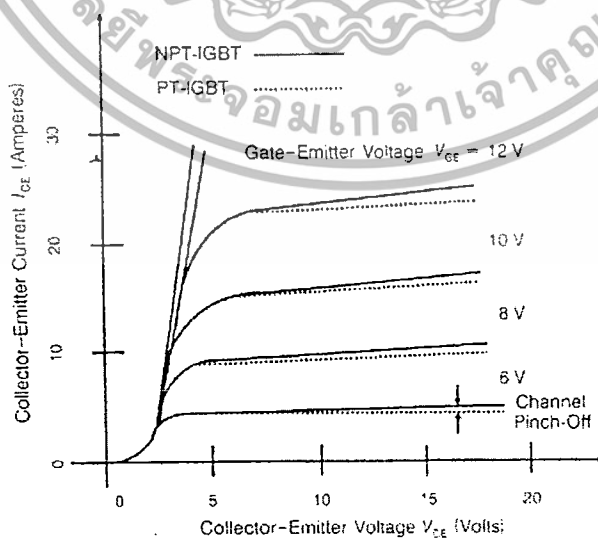
2.4.5 คุณสมบัติของโครงสร้างไอจีบีทีแบบสมมาตร[1]

2.4.5.1 คุณสมบัติกระแส-แรงดันของโครงสร้างไอจีบีทีแบบสมมาตร



รูปที่ 2.15 คุณสมบัติเอาต์พุต กระแส-แรงดัน ของไอจีบีทีแบบสมมาตร

ลักษณะเอาต์พุตของโครงสร้างไอจีบีทีแบบสมมาตร แสดงในรูปที่ 2.15 ประกอบไปด้วยการทำงานสองส่วน คือ ลักษณะกระแส-แรงดันไปหน้า พล็อตในควอดรันต์แรกของกราฟ ขณะที่ลักษณะกระแส-แรงดันย้อนกลับ พล็อตในควอดรันต์ที่สามของกราฟ

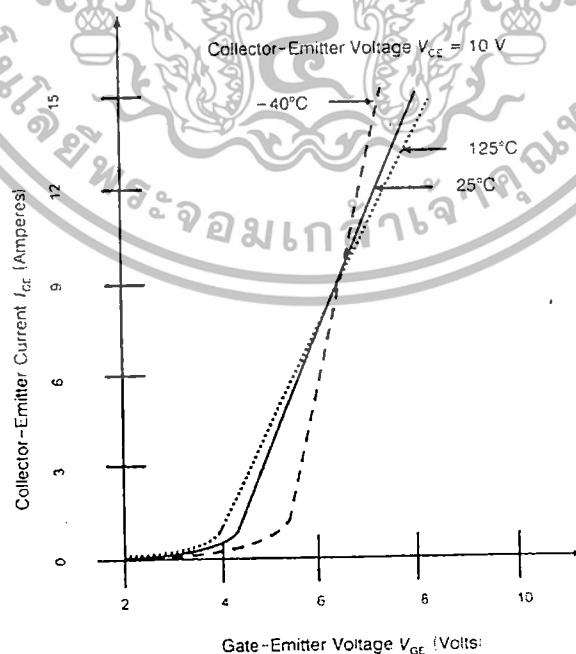


รูปที่ 2.16 การเปรียบเทียบคุณสมบัติเอาต์พุตของ NPT-IGBT และ PT-IGBT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

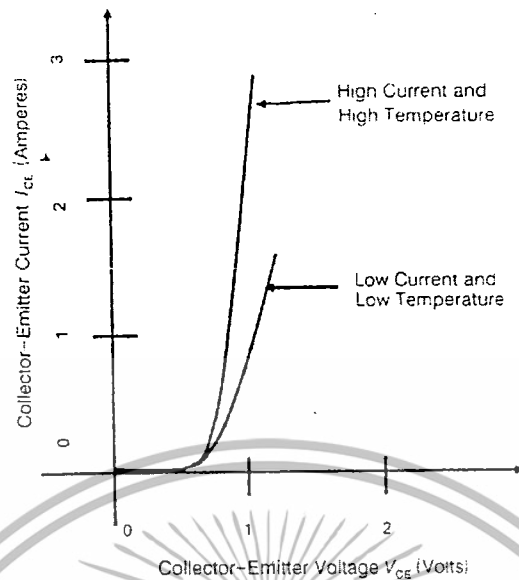
คุณลักษณะไปหน้าของไอจีบีทีที่ประกอบไปด้วย เส้นโค้ง แต่ละเส้นสอดคล้องกับแรงดันเกต-อิมิตเตอร์ (V_{GE}) ของแต่ละค่า กระแสคอลเลคเตอร์-อิมิตเตอร์ (I_{CE}) เป็นการวัดเหมือนฟังก์ชันของแรงดันคอลเลคเตอร์-อิมิตเตอร์ (V_{CE}) คุณลักษณะไปหน้ามีลักษณะคล้ายกับมอสเฟต จะสังเกตได้ว่าเมื่อเปรียบเทียบอัตราแรงดันและกระแส ของไอจีบีทีกับมอสเฟตกำลังมีลักษณะคล้ายกันเมื่อไอจีบีทีเทียบกับมอสเฟตกำลังที่อัตรากระแสและแรงดันเดียวกัน แรงดัน offset มีค่า 0.7 V การแทนที่มอสเฟตในไอจีบีทีที่เกิดขึ้นโดย N^+ substrate ของมอสเฟตกับ P^+ substrate ของไอจีบีที และมีรอยต่อ P-N เพิ่มเข้ามารวมเข้าไว้ด้วยกันในอุปกรณ์ ซึ่งรอยต่อนี้ทำงานแตกต่างจากการทำงานของมอสเฟต เนื่องจากแรงดันตกคร่อมทั้งหมดของไอจีบีทีที่เป็นผลรวมของแรงดันตกคร่อมรอยต่อ P-N และ การขั้วมอสเฟต ซึ่งไม่เหมือนกับ มอสเฟตกำลัง แรงดันตกคร่อมทั้งหมดจะมีค่าไม่ต่ำกว่าแรงดันขีดเริ่มของไดโอด

แรงดันตกคร่อมผ่านรอยต่อ P^+ Collector/N-base ของไอจีบีทีที่เพิ่มขึ้น กระแส I_{CE} จะสูงขึ้นกับแรงดัน V_{CE} เป็นลักษณะเส้นตรงคล้ายกับการทำงานของมอสเฟต หลังจากนั้น ช่องทางเดินกระแส “pinched off” แสดงถึงการจำกัดจุดนี้ กระแสจะไม่สูงขึ้นกับการเพิ่มขึ้นของแรงดัน V_{CE} นี้ จะสังเกตได้ว่าการอิมิตตัวของกระแส (ปรากฏการณ์ช่องทางเดินกระแส pinched off) ถ้าแรงดันที่เกต-อิมิตเตอร์ (V_{GE}) เพิ่มขึ้น ระดับกระแสอิมิตตัวจะสูงกว่าสำหรับค่าแรงดัน V_{GE} ที่สูงกว่าและกระแส I_{CE} เพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.17 โดยปกติแล้ว กราฟเส้นโค้ง $I_{CE}-V_{CE}$ จะเลื่อนขึ้นไปสัมพันธ์กับเส้นโค้ง V_{GE} ที่ต่ำกว่า ในกรณีนี้จะแตกต่างและสังเกตได้จากค่าของ V_{GE} แสดงดังในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.17 คุณลักษณะการถ่ายโอน (transfer) ของไอจีบีทีที่อุณหภูมิต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 ปฏิกิริยาการสวิตช์แบค (Switchback) ในไอจีบีที

อาจจะตั้งข้อสังเกตว่าไอจีบีทีทำงานรวดเร็วมาก โดยการฆ่าอายุพาหะ ปฏิกิริยาการนี้เรียกว่า สวิตช์แบค “switchback” แสดงดังรูปที่ 2.18 แรงดันตกคร่อมจะสูงกว่าที่กระแสต่ำและอุณหภูมิต่ำ แต่แรงดันตกคร่อมจะลดลงตามกระแสหรืออุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

คุณลักษณะย้อนกลับถูกบ่งชี้ด้วยรอยต่อ P-N diode กระแสย้อนกลับมีค่าต่ำมาก ประมาณนาโนแอมป์ (~nA) ที่แรงดันต่ำ แต่จะเพิ่มอย่างรวดเร็วเมื่อแรงดันเกิดการพังทลาย

2.4.5.2 คุณลักษณะการถ่ายโอนของไอจีบีที

คุณลักษณะการถ่ายโอนหรืออัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแส เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันที่อินพุต (transconductance ; g_m) ของไอจีบีที ดังแสดงในรูปที่ 2.17 เป็นการเปลี่ยนแปลงของกระแสคอลเลคเตอร์-อิมิตเตอร์ (I_{CE}) กับแรงดันคอลเลคเตอร์-อิมิตเตอร์ (V_{CE}) ที่ค่าอุณหภูมิต่างกัน คือ 25°C , 125°C , และ -40°C เส้นกราฟที่ลาดชันของคุณลักษณะการถ่ายโอนที่อุณหภูมิเพื่อวัดคุณลักษณะการถ่ายโอน ของอุปกรณ์ที่อุณหภูมินั้นๆ:

$$g_m = \left. \frac{\partial I_{CE}}{\partial V_{CE}} \right|_{V_{GE} = \text{constant}} \quad (2.12)$$

สำหรับการควบคุมความสามารถกระแสสูงกับการขับแรงดันเกตต่ำ อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแส (g_m) จะต้องมีขนาดใหญ่ ทั้งอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแส (g_m) และความต้านทาน on ของไอจีบีทีที่ถูกควบคุมโดยความยาวช่องทางเดินกระแส กำหนดโดยความแตกต่างความลึกของ P-base และ N^+ emitter ความเข้มข้นสารเจือ P-base น้อยกว่า $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ชั้น depletion ขยายออกมากกว่า 1 ไมครอนภายใน P-base ดังนั้นถ้าความยาวช่องทางเดินกระแสเล็ก

กว่า 1 ไมครอน ย่อมได้สำหรับแรงดันต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะการถ่ายโอนไอจีบีทีในกรณีระดับกระแสสูงมีลักษณะคล้ายกับการถ่ายโอนมอสเฟต จุดที่มาบรรจบกันของคุณลักษณะการถ่ายโอนกำหนดโดยแรงดันขีดเริ่ม V_{th} รากที่สองของกระแสคอลเลคเตอร์-อิมิตเตอร์ ($\sqrt{I_{CE}}$) พล็อตกับแกน V_{GE} ผลกราฟที่ได้เป็นเส้นตรงกับแกน V_{GE} แรงดันขีดเริ่ม V_{th} ถูกกำหนดโดยค่าแรงดันเกต-อิมิตเตอร์ (V_{GE}) จ่ายกระแส I_{CE} เท่ากับ 1 mA และแรงดัน V_{CE} เท่ากับ 10 V แรงดันขีดเริ่มมีค่าประมาณ 3-4 V

2.5 การตอบสนองในภาวะชั่วคราว (Transient response)

2.5.1 การควบคุมตัดกระแส (turn off) ด้วยเกต

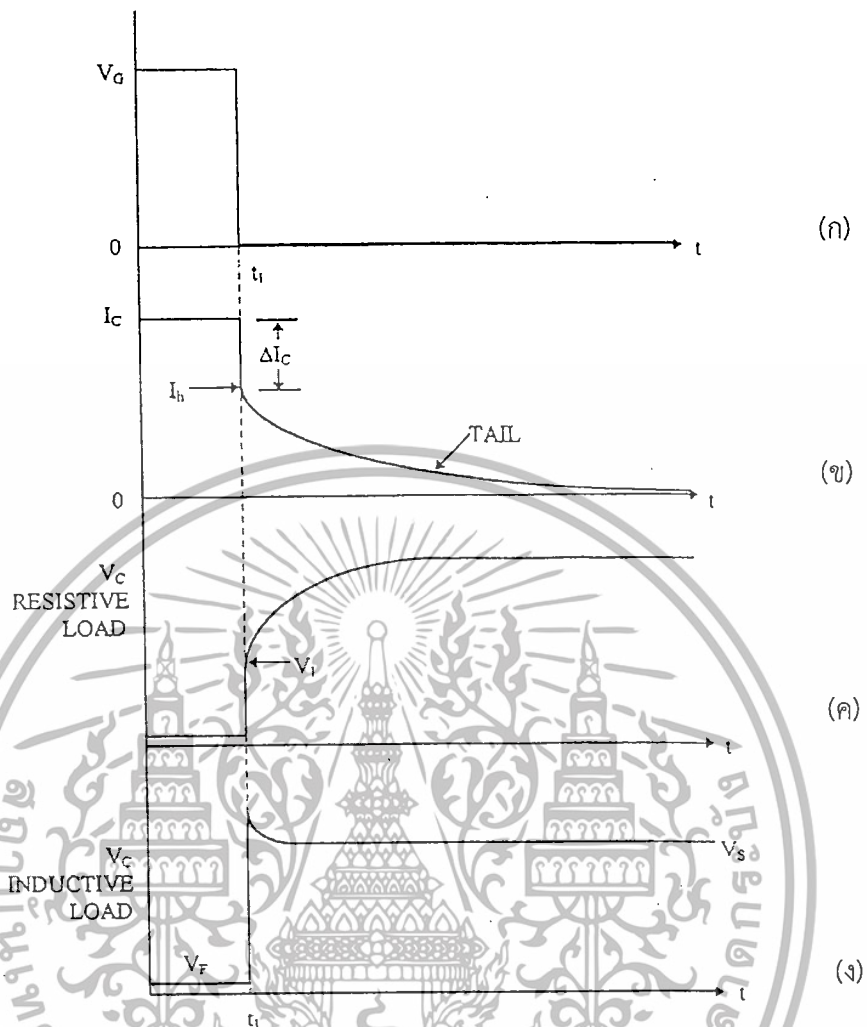
คุณสมบัติที่สำคัญประการหนึ่งของไอจีบีที ก็คือความสามารถในการควบคุมการตัดกระแสโดยเกต ซึ่งสามารถทำได้โดยลดแรงดันที่ขั้วเกตลงเป็นศูนย์อย่างรวดเร็วทำให้ช่องทางเดินกระแสในส่วนมอสของ ไอจีบีทีขาดอิเล็กตรอนจึงไม่สามารถไหลผ่านช่องทางเดินกระแสได้และหยุดไหลในทันที แต่ในขณะที่ตัดกระแสอิเล็กตรอนโดยทันทีนั้นกระแสไหล I_h ที่ไหลอยู่ไม่ได้ลดลงในทันทีแต่จะค่อยๆ ลดลง ทำให้ยังคงมีกระแสคอลเลคเตอร์ไหลอยู่อย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้เนื่องจากประจุพาหะส่วนน้อยที่ถูกฉีดเข้าไปในชั้น N-base ยังคงมีความหนาแน่นสูงและจะค่อยๆ ลดลงโดยการเกิดการรวมตัว (recombination) ทำให้ไม่สามารถตัดกระแสคอลเลคเตอร์ได้ในทันที ส่งผลให้ไอจีบีที มีความเร็วในการสวิตซ์ซึ่งต่ำกว่ามอสเฟตกำลังโดยทั่วไป

จากตัวอย่างในรูปที่ 2.19 ข.) กระแสที่ลดลงอย่างรวดเร็วเป็นผลมาจากกระแสอิเล็กตรอน I_e ถูกตัดขาดในทันทีที่เวลา t_1 ดังนั้นเราสามารถที่จะคำนวณปริมาณกระแสที่ลดลงอย่างรวดเร็วที่เวลา t_1 (ΔI_c) ได้จากสมการ

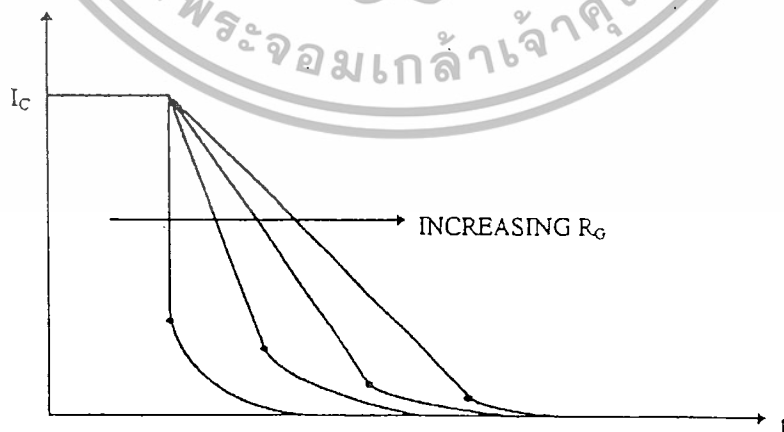
$$\Delta I_c = I_c = (1 - \alpha_{PNP}) I_c \quad (2.13)$$

โดยที่ตัวอย่างรูปกราฟของแรงดันที่คอลเลคเตอร์ในกรณีที่เป็น Resistive Load ก็จะมีลักษณะตรงกันข้ามกับกระแสคอลเลคเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 2.19 ค.)

อย่างไรก็ตามเราสามารถที่จะเปลี่ยนแปลงจุดเริ่มต้น I_c ได้โดยการเปลี่ยนแปลงแรงดันเกตระหว่างตัดกระแสดังรูปที่ 2.20 ทั้งนี้เนื่องจากตัวเก็บประจุขาเข้าของเกตจะจ่ายประจุผ่านความต้านทานขาออกของเกตทำให้เสียเวลาในการตัดกระแสเพิ่มขึ้น ซึ่งจากตัวอย่างในรูปที่ 2.20 จะเห็นได้ว่า ΔI_c จะช้าลง เนื่องจากความต้านทานที่เกต (R_G) เพิ่มขึ้น แต่ในขณะเดียวกันขนาดของสัญญาณขาหลงของรูปคลื่นจะมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดการรวมตัวระหว่างคาบเริ่มต้น (initial period)



รูปที่ 2.19 กราฟรูปคลื่นของการตัดกระแสด้วยการควบคุมแรงดันที่เกิดขึ้นในไอจีบีที



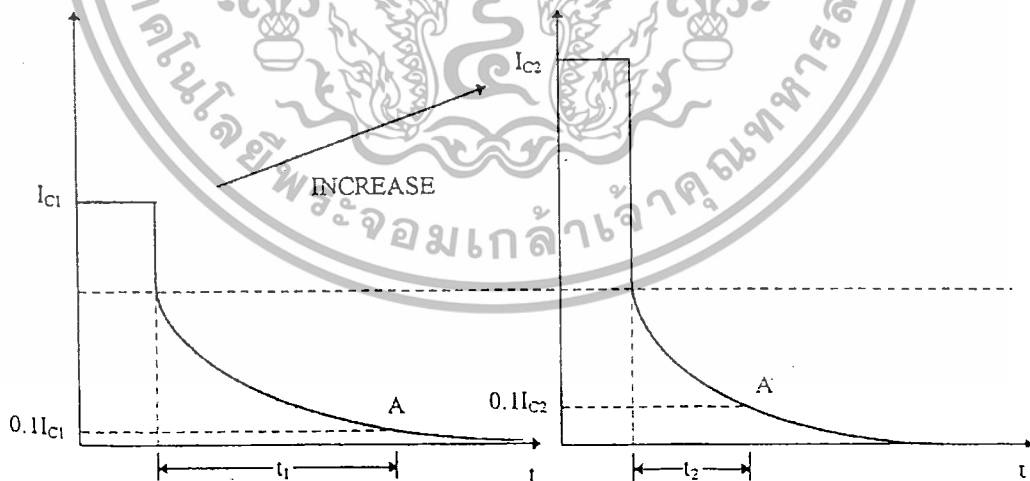
รูปที่ 2.20 กราฟรูปคลื่นของช่วงเวลาตัดกระแสที่ค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 ช่วงเวลาตัดกระแส (turn-off time)

ในการเพิ่มความเร็วในการสวิตชิงของไอจีบีที สามารถทำได้โดยการสร้างศูนย์กลางรวมตัว (recombination center) ในชั้น N-base เพื่อลดช่วงอายุ (lifetime) ของประจุพาหะส่วนน้อย ซึ่งโดยทั่วไปสามารถทำได้ 2 วิธี โดยทั้งสองวิธีที่จะกล่าวถึงจะเป็นการทำให้เกิด deep level ขึ้นในแถบพลังงานต้องห้าม วิธีแรกคือ การแพร่อะตอมสารเจืออย่างเช่นทองคำเข้าไปในซิลิคอน เพื่อให้คุณสมบัติของซิลิคอนในชั้น N-base เปลี่ยนไป ซึ่งวิธีนี้อุปกรณ์จะอยู่ที่การควบคุมปริมาณอะตอมสารเจือและการควบคุมความลึกของอะตอมที่แพร่เข้าไป อีกทั้งยังทำให้มีสิ่งสกปรกติดเข้าไปในขบวนการสร้างด้วยจึงไม่เป็นที่นิยม ส่วนวิธีที่สองก็โดยการยิงอนุภาคที่มีพลังงานสูงเข้าไปเพื่อทำให้เกิดแลตทิซ (lattice) เกิดความเสียหายแต่ช่วยลดช่วงอายุของประจุพาหะส่วนน้อยลงได้และเป็นวิธีที่สะอาดอีกทั้งยังสามารถทำได้ที่อุณหภูมิห้องแต่ทำได้ยากเนื่องจากต้องมีอุปกรณ์ที่จะใช้ยิงอนุภาคเข้าไปในเนื้อซิลิคอนซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีราคาแพงมาก

อย่างไรก็ตามปรากฏการณ์ที่พบบ่อยครั้งในไอจีบีที คือการลดเวลาในการตัดกระแสเมื่อเพิ่มกระแสคอลเลคเตอร์ดังแสดงในตัวอย่างรูปที่ 2.11 ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มกระแสคอลเลคเตอร์โดยที่อัตราการใช้กระแสของทรานซิสเตอร์ P-N-P ยังคงมีค่าเท่าเดิม ดังนั้นกระแสคอลเลคเตอร์ส่วนที่เพิ่มขึ้นจึงเป็นการเพิ่มกระแสที่ไหลผ่านช่องทางเดินกระแส (ΔI_c) เท่านั้น โดยที่เวลาในการตัดกระแสยังคงเป็นเช่นเดิมคือนับจากเวลาในช่วงตั้งแต่จุดที่กระแสคอลเลคเตอร์เริ่มลดจนกระทั่งถึง จุดที่กระแสคอลเลคเตอร์ลดเหลือ 10 % ของกระแสคอลเลคเตอร์เริ่มต้น จึงทำให้เวลาในการตัดกระแสของไอจีบีที ลดลงเมื่อเพิ่มกระแสคอลเลคเตอร์

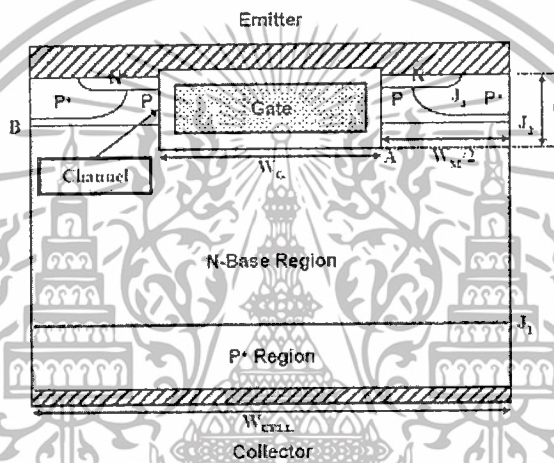


รูปที่ 2.21 ช่วงเวลาในการตัดกระแสของไอจีบีที ที่กระแสคอลเลคเตอร์ค่าต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 โครงสร้างเกตแบบขุด (Trench-Gate Structure) [2]

โครงสร้างเกตแบบขุด เป็นโครงสร้างที่น่าสนใจ เนื่องจากสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของโครงสร้างมอสเฟตกำลังของอุปกรณ์ไอจีบีที สามารถปรับปรุงโดยโดยใช้โครงสร้างเกตแบบขุด ความหนาแน่นของช่องทางที่สูงขึ้นสำหรับส่วนมอสเฟตในโครงสร้างไอจีบีที และไม่มีควมต้านทานเจฟต (JFET) นอกจากนี้ความเข้มข้นพาหะอิสระ N-base region ใกล้กับอิมิตเตอร์เพิ่มมากขึ้น ปรากฏการณ์เหล่านี้ทำให้แรงดันตกคร่อมสถานะ on ลดลงเมื่อเทียบกับอุปกรณ์โครงสร้างเกตแบบระนาบที่ความสามารถในการปิดกันเดียวกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับอุปกรณ์ที่มีความเร็วสวิตชิ่งสูง



รูปที่ 2.22 โครงสร้างไอจีบีทีเกตแบบขุดสมมาตร

2.6.1 พื้นที่การทำงานปลอดภัย (Safe Operating Area)

กระบวนการสร้างสำหรับโครงสร้างเกตแบบขุด ช่วยให้ความยาว N^+ emitter ลดลงและปรับเส้นทางการไหลของกระแสโพลาร์ โครงสร้างเกตแบบขุดนี้จะช่วยให้อุปกรณ์ที่สามารถรอดพ้นจากปรากฏการณ์แลทซ์ออฟ ซึ่งปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นเมื่อแรงดันตกคร่อม P-base region โดยการไหลของกระแสไหลเท่ากับ built-in potential รอยต่อ P-N กระแสไหลมีแนวโน้มที่จะไหลใกล้กับแหล่งจ่ายอิเล็กทรอนิกส์ไปยังประจุเป็นกลาง เส้นทางการกำจัดกระแสไหลจะแสดงในรูปที่ 2.23

เกณฑ์แลทซ์ออฟสำหรับโครงสร้างไอจีบีทีเกตแบบขุดคือ

$$I_p R_B = V_{bi} \quad (2.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสไหลเท่ากับผลของความหนาแน่นกระแสไหลและพื้นที่เซลล์ ($W_{CELL} Z$) ความต้านทานของ P-base region จะเป็นไปตามสมการ :

$$R_B = \frac{\rho_P L_P}{(x_{J,P} - x_{J,N+})} = \frac{\rho_{SP} L_P}{Z} \quad (2.15)$$

เมื่อ ρ_{SP} คือ ความต้านทานแผ่น ด้านล่าง N+ emitter region
 Z คือ ความยาวของเซลล์โอบีบีที่ ตั้งฉากกับภาคตัดขวาง



รูปที่ 2.23 กระแสไหลภายในโครงสร้างเกตแบบขุด

ในสมการที่ (2.15) แสดงถึงความต้านทานของส่วนของ P-base region ที่มีการแพร่ P+ สันนิษฐานว่าไม่สำคัญ ความต้านทาน (ρ_P) และความเข้มข้นสารเจือ (N_{AP}) ของ P-base region ที่เหมาะสมถูกกำหนดโดยเพียงแค่ส่วนหนึ่งของการแพร่ชนิด P-base อยู่ด้านล่าง N+ region รวมความสัมพันธ์เหล่านี้จะได้ความหนาแน่นกระแสไหลที่ข้อ:

$$J_{C,L} \text{ (trench - gate)} = \frac{2V_{bi}}{\alpha_{PNP,ON} \rho_{SP} L_P W_{CELL}} \quad (2.16)$$

จากข้างต้นสามารถบอกถึงจุดเด่นของโครงสร้างเกตแบบขุด โครงสร้างนี้เป็นการสร้างโพสิเกตในเนื้อสารซิลิคอน ซึ่งในปัจจุบันนี้มีความนิยมในการสร้างโครงสร้างเกตแบบขุดมากกว่าโครงสร้างเกตแบบระนาบ เนื่องจากพบว่าโครงสร้างเกตแบบขุดมีความสามารถจัดการผลของแรงดันตกคร่อมสถานะ on ที่ต่ำกว่า และมีกระแสไหลที่ซึ่งสูงกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบและการจำลองไอจีบีที

การออกแบบอุปกรณ์ไอจีบีทีหรือไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกทเป็นฉนวนนี้ จะแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรกการศึกษาโครงสร้างอุปกรณ์และโปรแกรมที่ใช้จำลองเพื่อทำการออกแบบอุปกรณ์ ขั้นตอนที่สองเป็นการจำลองผลด้วยโปรแกรม T-CAD Sentaurus และ ขั้นตอนที่สามเป็นทดสอบโครงสร้างด้วยโปรแกรม T-CAD Sentaurus เพื่อหาคุณสมบัติที่ทำให้อุปกรณ์ไอจีบีทีนี้มีความเหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งจะกล่าวถึงดังต่อไปนี้

3.1 การเลือกแผ่นผลึกเริ่มต้น

การออกแบบเพื่อสร้างอุปกรณ์ของไอจีบีทีนั้น ขั้นตอนแรกคือการเลือกแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำเพื่อใช้ในการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ โดยทั่วไปนิยมใช้กันอยู่ 2 ชนิด คือซิลิคอน ทั้งนี้เนื่องจากหาง่าย ราคาถูกและไม่ทำให้เกิดสารพิษจากกระบวนการสร้างด้วย โดยแผ่นผลึกซิลิคอนที่ได้จากกระบวนการ โซโคราลสกี (Czochralski) หรือวิธีโพลโทโซน การเลือกแผ่นซิลิคอนที่เหมาะสม ต้องคำนึงถึงความคล่องตัวของประจุพาหะและความหนาแน่นของอะตอมสารเจือของฐานรอง เพื่อที่จะได้อุปกรณ์ที่สามารถนำกระแสได้สูงและมีความสามารถในการทนแรงดันฟิงทลายสูงตามต้องการ

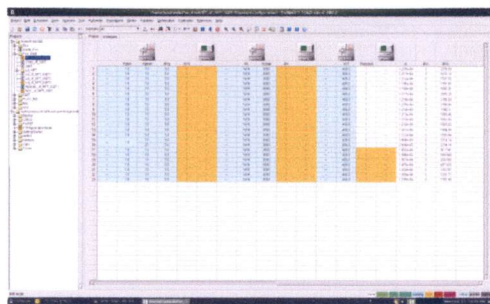
ในงานวิทยานิพนธ์นี้ การออกแบบอุปกรณ์แบบ Non-punch through IGBT (NPT-IGBT) เป็นโครงสร้างในแนวตั้ง (vertical structure) เลือกใช้แผ่นผลึกซิลิคอนขนาด 6 นิ้วชนิดระนาบเชิงเดี่ยว ระบาย <100> ชนิดเอ็น เนื่องจากค่าความคล่องตัวของอิเล็กตรอนในระนาบ<100> ที่ผิวแผ่นผลึกมีค่ามากกว่าในระนาบ<111> และค่าความต้านทานของแผ่นผลึกฐานรองก็เพียงพอที่จะสามารถรองรับแรงดันฟิงทลายได้

3.2 กระบวนการจำลองไอจีบีที

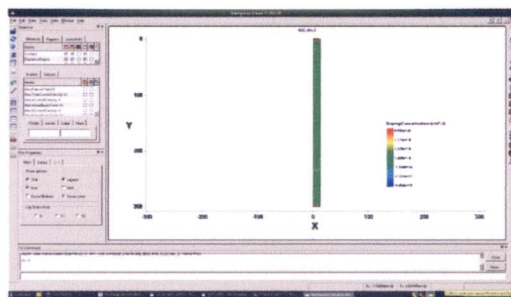
การจำลองไอจีบีทีที่ใช้โปรแกรม T-CAD Sentaurus ของบริษัท Synopsys โดยใช้เครื่องจากศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ได้ดำเนินการจัดซื้อลิขสิทธิ์โปรแกรมดังกล่าวในรูปที่ 3.1(ก) โปรแกรมส่วนติดต่อของผู้ใช้แบบกราฟิกของ Sentaurus Workbench

Sentaurus Workbench เป็นหน้าต่างหลักแบบกราฟิกที่แสดงการทำงานร่วมกันของส่วนต่างๆ ของโปรแกรมส่วนติดต่อกับผู้ใช้เป็นแบบกราฟิก ใช้เพื่อการออกแบบและการจัดการด้าน simulation เพื่อการวิจัยและการผลิตสารกึ่งตัวนำ Simulations ถูกจัดเก็บในรูปแบบ Project และในส่วนของโปรแกรม Techplot SV ซึ่งแสดงในรูปที่3.1 (ข) เป็นการพล็อตรูปแบบ 2D และ 3D มีความสามารถในการวิเคราะห์และแสดงผลข้อมูลจาก simulation และการทดลอง

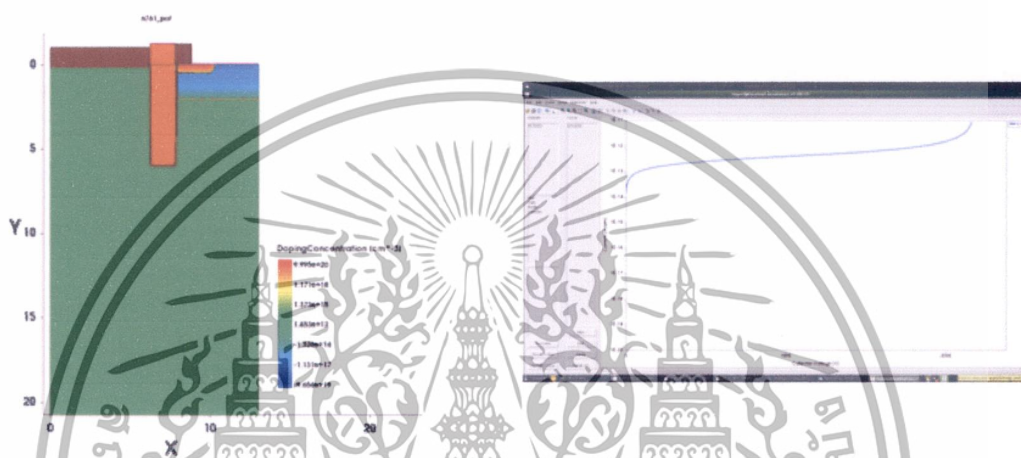
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



(ค)

(ง)

รูปที่ 3.1 (ก) โปรแกรมส่วนติดต่อของผู้ใช้แบบกราฟิกของ Sentaurus Workbench
 (ข) ภาควัดขวางจากโปรแกรม Techplot SV
 (ค) ภาควัดขวางของอุปกรณ์ NPT-TIGBT ปกติ
 (ง) ผลการทดสอบอุปกรณ์จากโปรแกรม Inspect

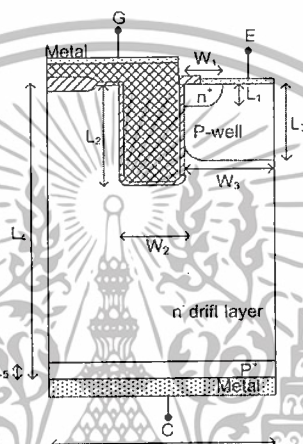
3.3 การออกแบบของหน่วยเซลล์ไอจีบีที

การออกแบบอุปกรณ์ไอจีบีทีนั้น เป็นการออกแบบโครงสร้างไอจีบีทีที่มีขนาดใหญ่โดยทำการจำลองเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพของไอจีบีทีในช่วงระดับไฟฟ้าขนาดกลาง (1,000-2,500V) ให้มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีขึ้นเช่น การเพิ่มความสามารถในการทนแรงดันพังทลายและปริมาณกระแสสูงขณะนำไฟฟ้า เพื่อนำไปใช้เป็นแบบจำลองในการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ดีต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1 การออกแบบโครงสร้างไอจีบีที

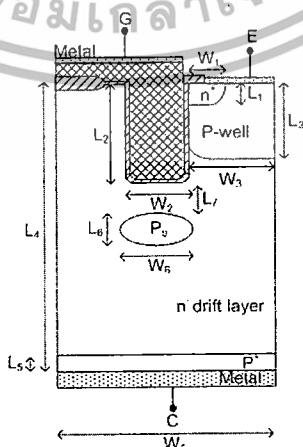
สำหรับการออกแบบจะเป็นโครงสร้าง เริ่มต้นจากการจำลองโครงสร้าง NPT-TIGBT เป็นโครงสร้างในแนวดิ่ง ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.2 เพื่อเป็นโครงสร้างเริ่มต้น โดยประกอบไปด้วยชั้นการใช้งาน 3 ชั้น คือ อิมิตเตอร์ Emitter (E) , คอลเลคเตอร์ Collector (C) และ เกต Gate (G) โครงสร้างของ NPT-IGBT ประกอบไปด้วยส่วนหลักๆ คือ อิมิตเตอร์ (N^+ Emitter) พีคอลลเลคเตอร์ (P^+ Collector) ฐานรอนเอ็น (N drift base) บ่อพี (P-well) และ โพลีเกต (Poly-gate) โดยมีพารามิเตอร์ที่สำคัญๆ ในการจำลองแบบการสร้างแสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 3.2 โครงสร้างอุปกรณ์ NPT-TIGBT ปกติ

3.3.2 การออกแบบชั้นฝังชนิดพี P_b ของโครงสร้างไอจีบีที

เมื่อทำการจำลองโครงสร้างปกติแล้ว จากนั้นทำการจำลองโครงสร้าง NPT-TIGBT โดยเพิ่มชั้นฝังชนิดพี P_b บริเวณมุมโพลีเกตแบบขุดจะแสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 โครงสร้างอุปกรณ์ NPT-TIGBT ร่วมกับชั้นฝังชนิดพี

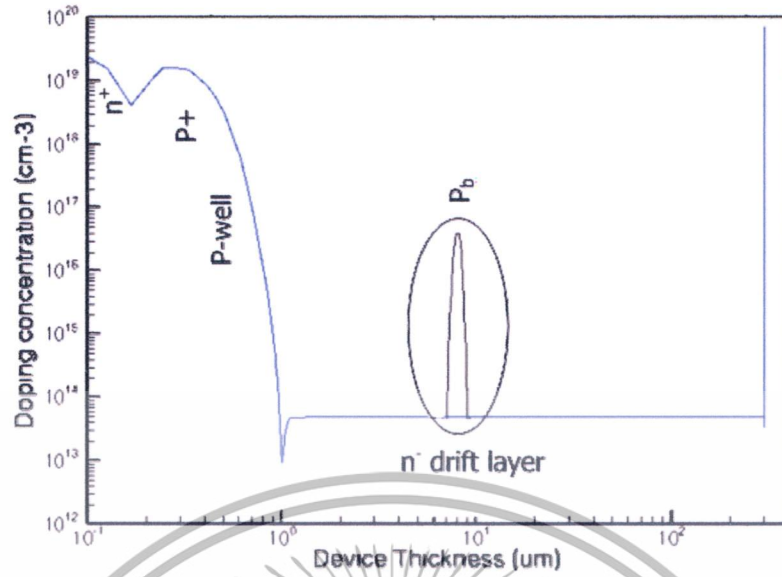
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์สำคัญๆ ในการจำลองแบบโครงสร้าง NPT-TIGBT ปกติและ NPT-TIGBT ร่วมกับชั้นฝังชนิดพี

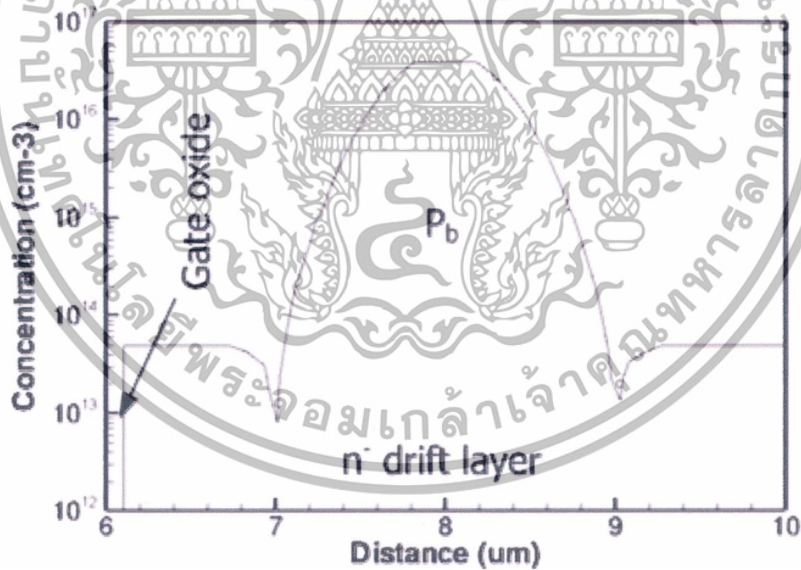
Name	Explain	Value
L ₁	n ⁺ Emitter depth (μm)	0.5
L ₂	Trench gate depth (μm)	6.0
L ₃	P-well depth (μm)	3.0
L ₄	n ⁻ drift thickness (μm)	300
L ₅	P ⁺ Collector depth (μm)	1.0
L ₆	P _b vertical width (μm)	2.0
L ₇	Depth of P _b from trench gate	0-3.0
W ₁	n ⁺ Emitter length (μm)	3.0
W ₂	Width of trench gate (μm)	2.0
W ₃	P-well length (μm)	5.0
W ₄	n ⁻ drift width (μm)	13.0
W ₆	P _b width (μm)	3.0
D ₁	n ⁺ Emitter concentration (cm ⁻³)	1 × 10 ²¹
D ₂	P-well concentration (cm ⁻³)	5 × 10 ¹⁷
D ₃	n ⁻ drift concentration (cm ⁻³)	5 × 10 ¹³
D ₄	P ⁺ Collector concentration (cm ⁻³)	1 × 10 ²⁰
D ₆	P _b concentration (cm ⁻³)	1 × 10 ¹⁵ - 1 × 10 ¹⁹
T _g	Poly gate concentration (cm ⁻³)	1 × 10 ²⁰
G _{ox}	Gate oxide thickness (μm)	0.1

ในขั้นตอนการจำลองผลได้ทำการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญในการจำลองคือ ความลึกของชั้นฝังชนิดพีที่บริเวณรอบมุมเกตแบบซุดเป็นการปรับเปลี่ยนความลึกจาก 0 - 2.5 μm เพื่อให้ได้ค่าความสามารถในการทนแรงดันพังทลายของอุปกรณ์ไอจีบีที เมื่อได้ตำแหน่งที่เหมาะสมแล้วทำการปรับค่าความหนาแน่นของอะตอมสารเจือของชั้นฝังชนิดพี จาก 1 × 10¹⁵ - 1 × 10¹⁹ cm⁻³ เพื่อหาปริมาณกระแสในขณะนำไฟฟ้าให้มีความเหมาะสมและประสิทธิภาพที่ดีของอุปกรณ์ไอจีบีที แล้วทำการทดสอบคุณสมบัติต่างๆซึ่งจะกล่าวในการทดลองและผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสารเจือแนวตั้งสำหรับการจำลองโครงสร้าง NPT-TIGBT ร่วมกับความสัมพันธ์ฝั่งชนิดพี



รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นสำหรับการจำลองโครงสร้าง NPT-TIGBT ร่วมกับระยะของชั้นฝั่งชนิดพี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

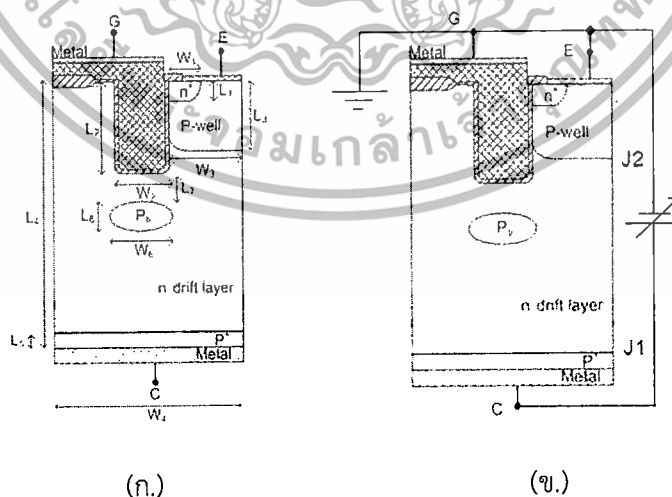
ในวิทยานิพนธ์นี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบโครงสร้างต่างๆ เพื่อให้ทราบถึงค่าคุณลักษณะทางกายภาพของไอจีบีที โดยใช้วิธีทดสอบค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้า ซึ่งทดสอบที่โครงสร้างและคุณสมบัติต่างๆของไอจีบีที โดยการใช้การจำลองไอจีบีทีที่ปกติและไอจีบีทีที่มีชั้นฝังชนิดพี (P_b) ที่มีความลึกและความเข้มข้นสารเจือที่ค่าต่างๆ ด้วยโปรแกรม T-CAD Sentaurus

4.1 การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของไอจีบีที

ในการออกแบบและจำลองเพื่อพัฒนาไอจีบีที โดยงานวิจัยนี้เน้นความสามารถต่อการทนแรงดันพังทลายของอุปกรณ์ไอจีบีทีให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ซึ่งการทดสอบทางไฟฟ้านี้จะประกอบไปด้วย การทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงกระแสป้องกันต่อแรงดันไฟฟ้า การทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์กับแรงดันไฟฟ้าคอลเลคเตอร์-อิมิตเตอร์ การทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์กับแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมเกต การทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์และแรงดันไฟฟ้าที่เกิดเมื่อเทียบกับเวลา การกระจายความหนาแน่นสนามไฟฟ้าของอุปกรณ์ไอจีบีที

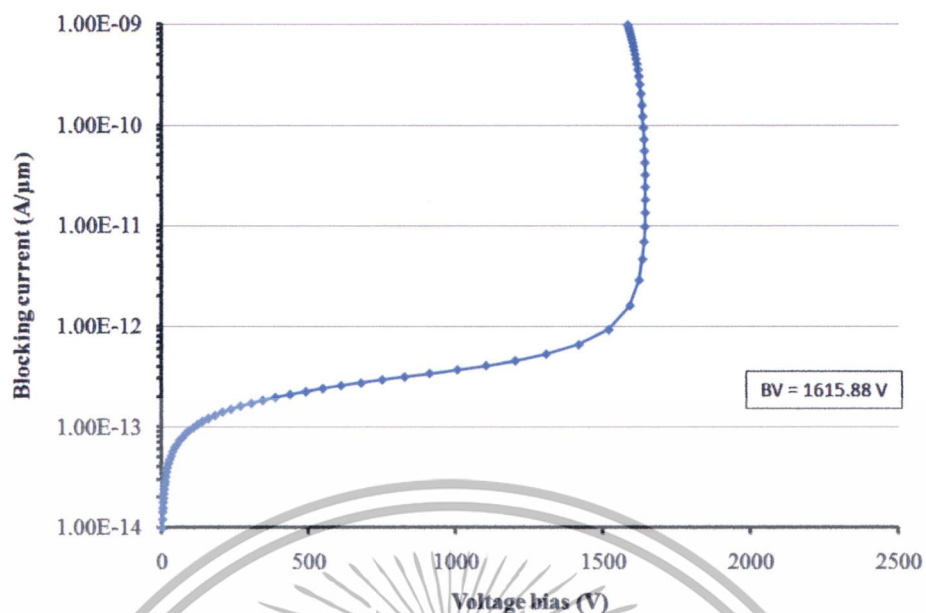
4.1.1 การทดสอบความสามารถในการทนแรงดันปิดกั้นไปหน้าของอุปกรณ์ไอจีบีที

การทดสอบในสภาวะการทนแรงดันปิดกั้นไปหน้า โดยป้อนแรงดันไฟฟ้า V_{CE} เริ่มตั้งแต่ 0 V กระทั่งถึงแรงดันพังทลายในขณะที่จ่าย V_{CE} เท่ากับ 0 V โดยเริ่มจากการทดสอบโครงสร้าง NPT-TIGBT ปกติ จากนั้นทดสอบโครงสร้าง NPT-TIGBT ร่วมกับชั้นฝังชนิดพีที่ระยะ $L_7 = 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0, 2.5$ และ 3.0 ตามลำดับ

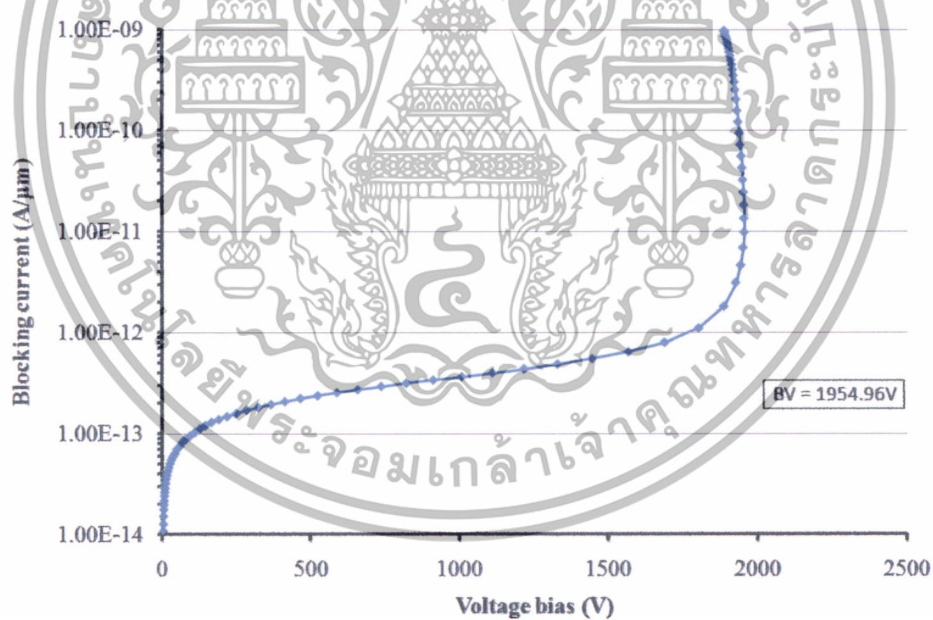


รูปที่ 4.1 (ก) โครงสร้างอุปกรณ์ NPT-TIGBT ร่วมกับชั้นฝังชนิดพี (ข) การให้แรงดันไบอัสกับอุปกรณ์ NPT-TIGBT ร่วมกับชั้น P_b เพื่อให้ทำงานในสภาวะไบอัสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

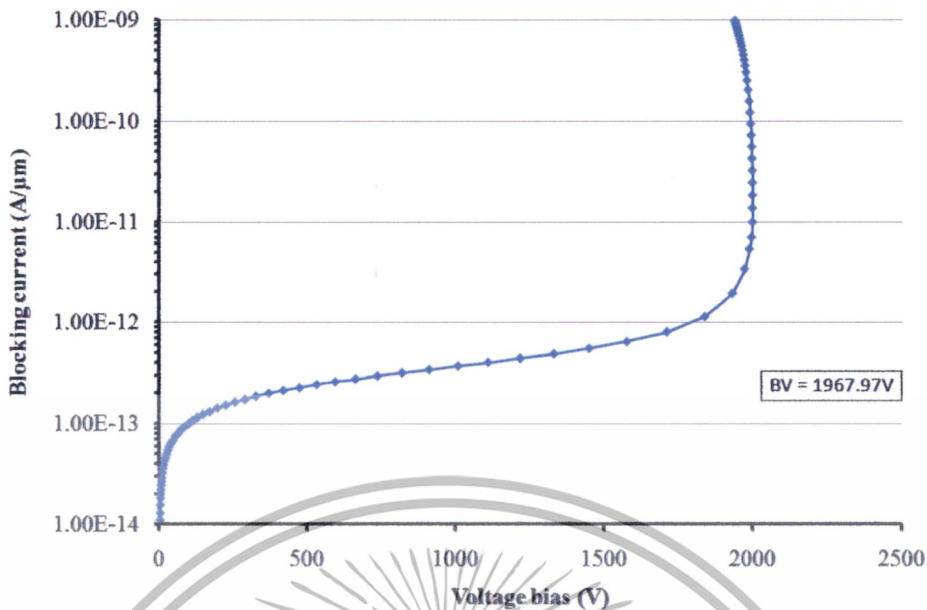


รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงกระแสปิดกั้น (Blocking current) ต่อแรงดันไฟฟ้า (Voltage bias) ของ NPT-TIGBT ปกติ ในสภาวะไบอัสตรง

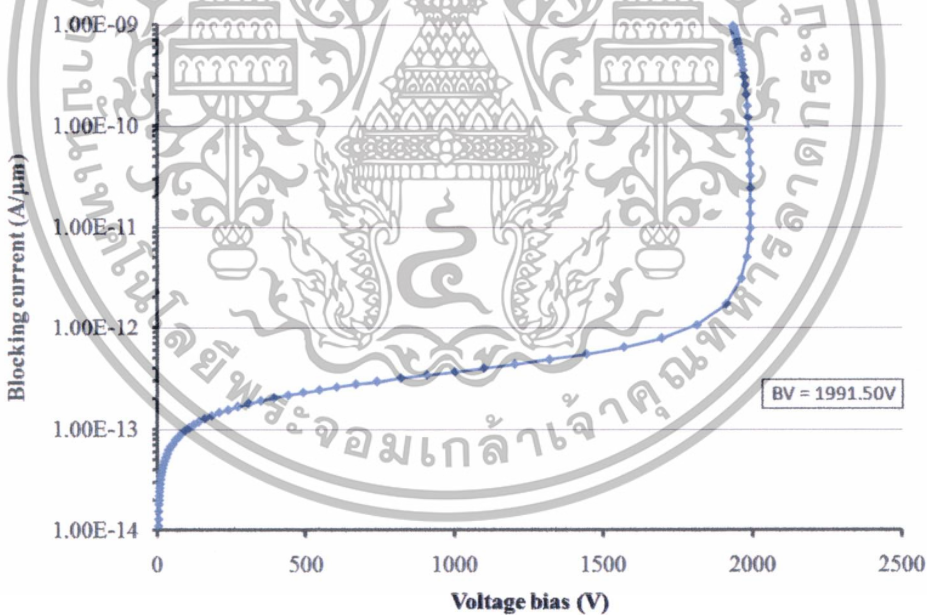


รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงกระแสปิดกั้นต่อแรงดันไฟฟ้าของ NPT-TIGBT ร่วมกับชั้นฝังชนิดพี ที่ระยะ $L_7=0$ ในสภาวะไบอัสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

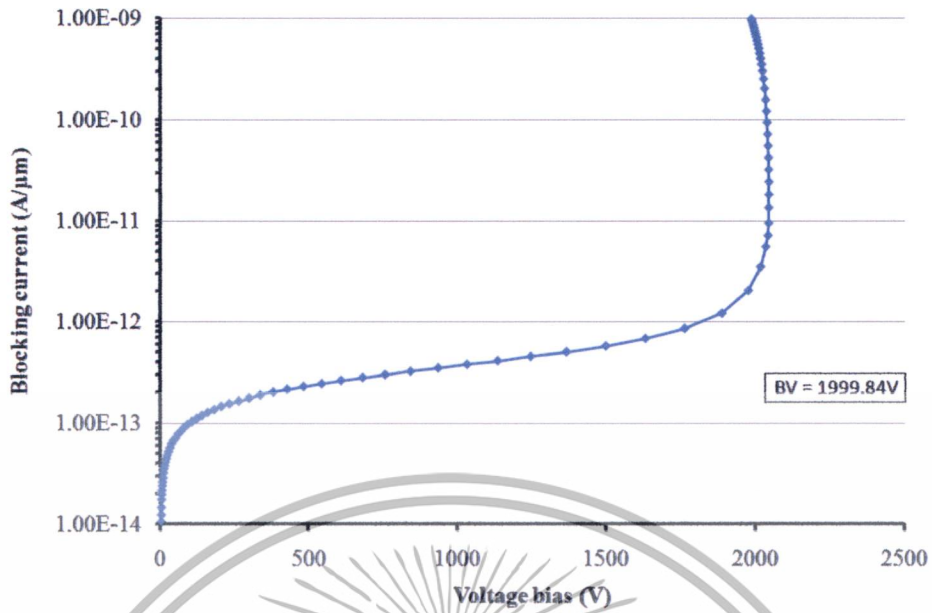


รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงกระแสปิดกั้นต่อแรงดันไฟฟ้าของ NPT-TIGBT ร่วมกับชั้นฝังชนิดพี ที่ระยะ $L_7=0.2$ ในสภาวะไบอัสตรง

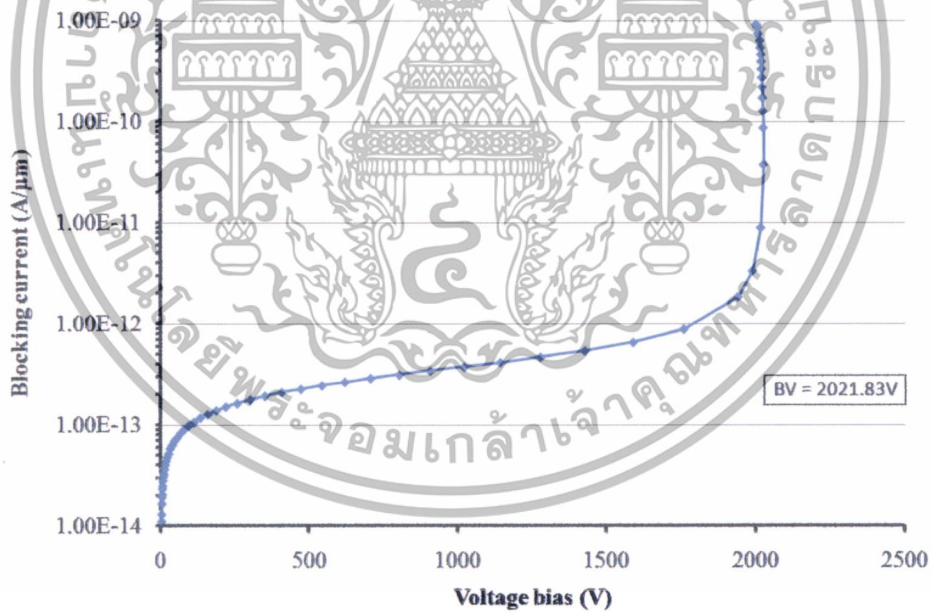


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงกระแสปิดกั้นต่อแรงดันไฟฟ้าของ NPT-TIGBT ร่วมกับชั้นฝังชนิดพี ที่ระยะ $L_7=0.4$ ในสภาวะไบอัสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

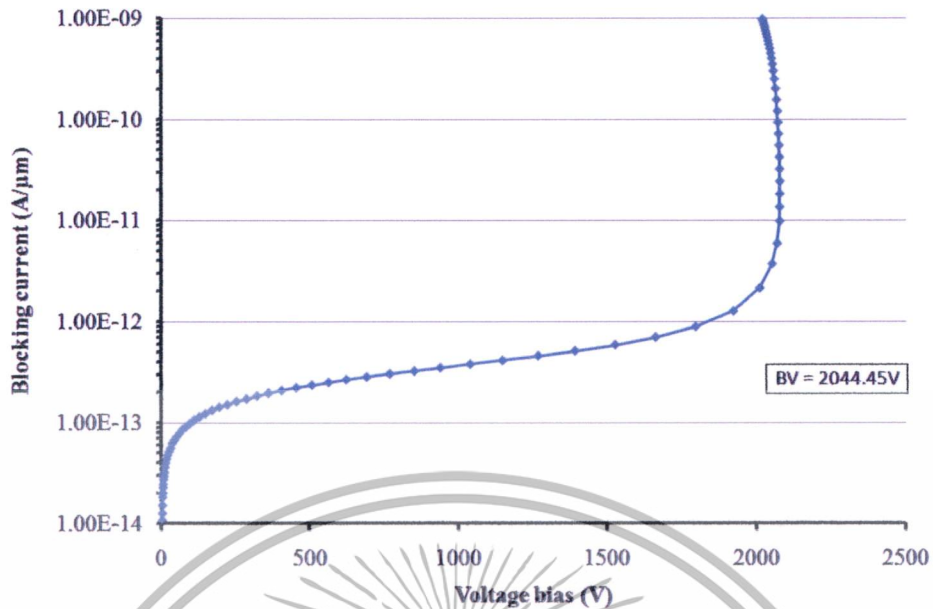


รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงกระแสปิดกั้นต่อแรงดันไฟฟ้า NPT-TIGBT ร่วมกับชั้นฝังชนิดพี ที่ระยะ $L_7=0.6$ ในสภาวะไบอัสตรง

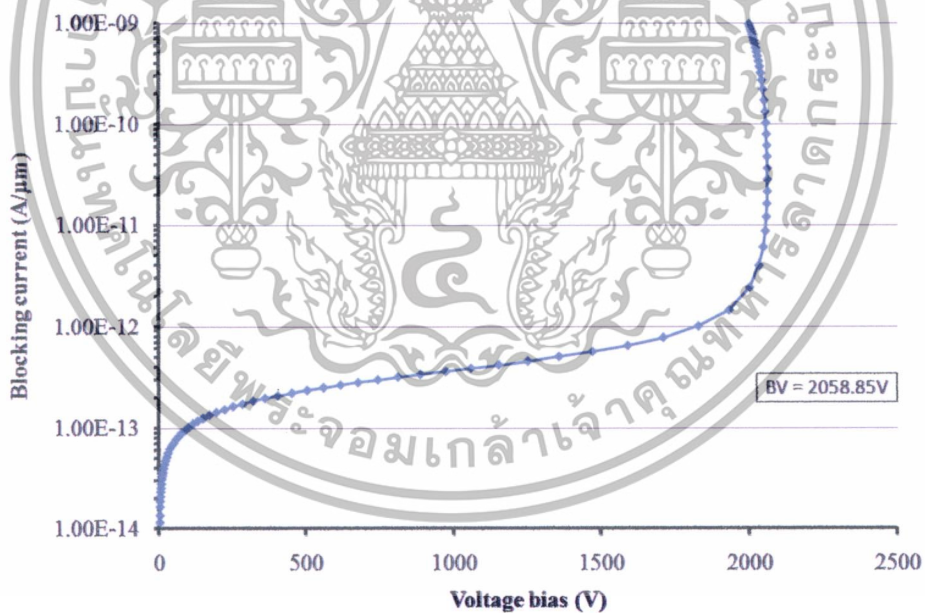


รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงกระแสปิดกั้นต่อแรงดันไฟฟ้าของ NPT-TIGBT ร่วมกับชั้นฝังชนิดพี ที่ระยะ $L_7=0.8$ ในสภาวะไบอัสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

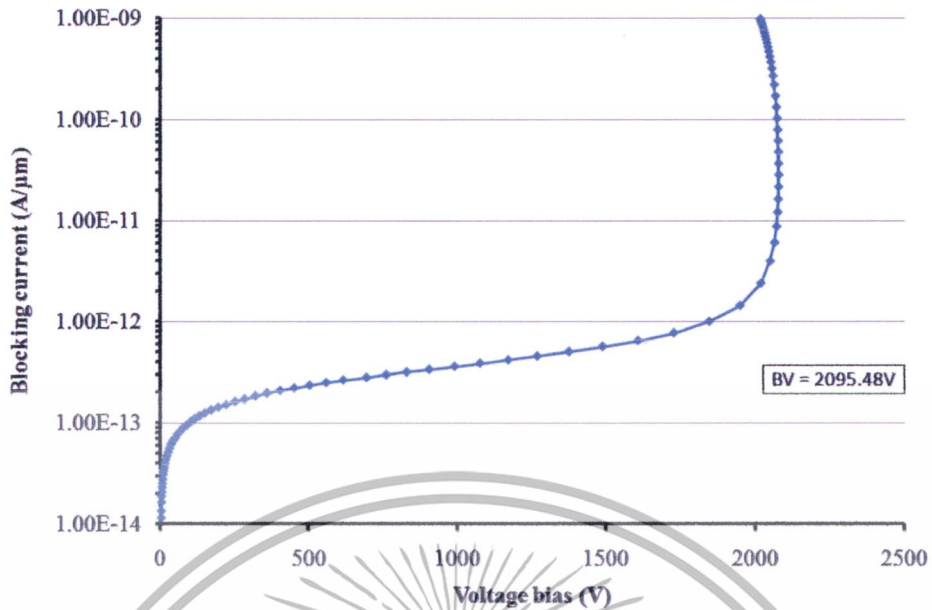


รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงกระแสปิดกั้นต่อแรงดันไฟฟ้าของ NPT-TIGBT ร่วมกับชั้นฝังชนิดพี ที่ระยะ $L_7=1.0$ ในสภาวะไบอัสตรง

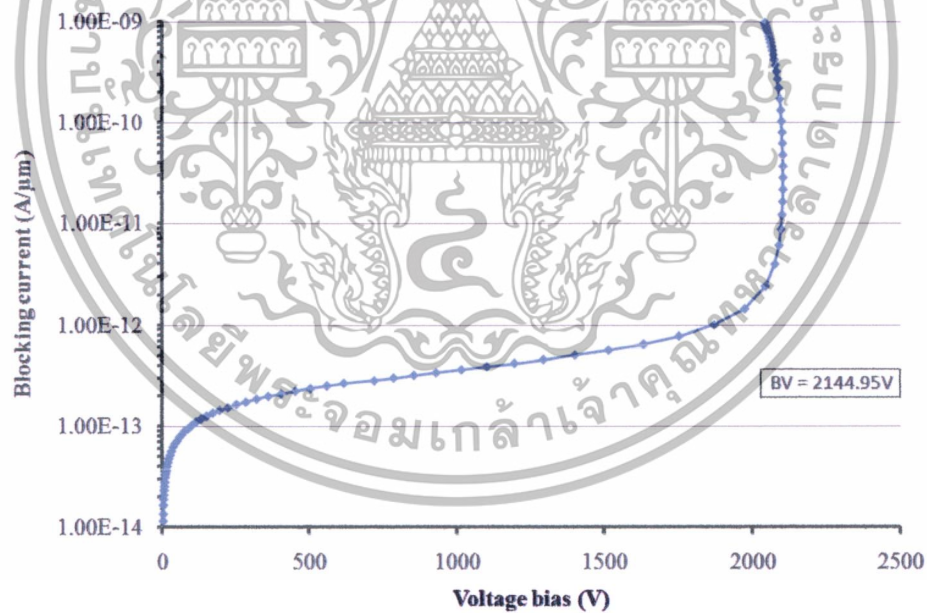


รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงกระแสปิดกั้นต่อแรงดันไฟฟ้า NPT-TIGBT ร่วมกับชั้นฝังชนิดพี ที่ระยะ $L_7=1.2$ ในสภาวะไบอัสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

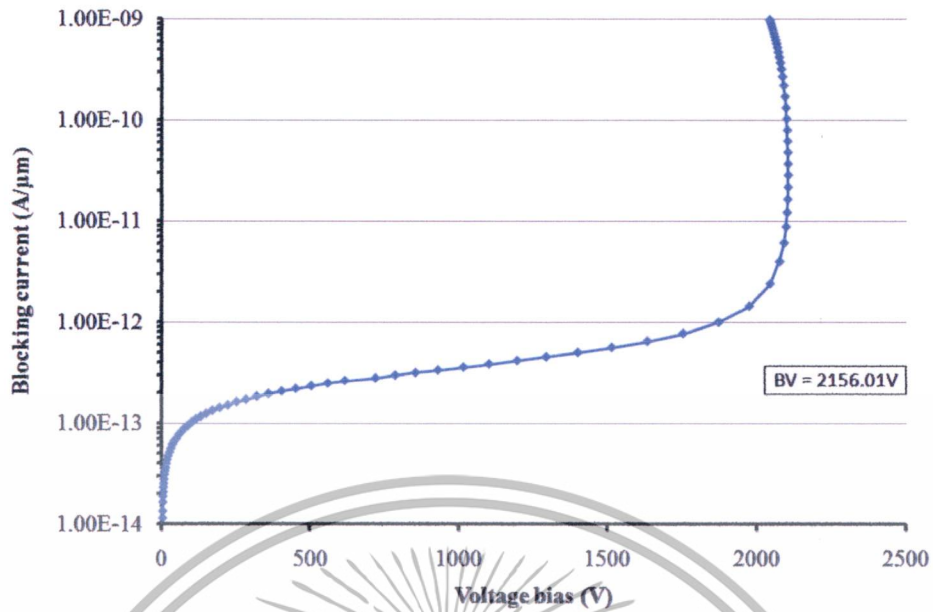


รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงกระแสปิดกั้นต่อแรงดันไฟฟ้า NPT-TIGBT ร่วมกับชั้นฝังชนิดพี ที่ระยะ $L_7=1.4$ ในสภาวะไบอัสตรง

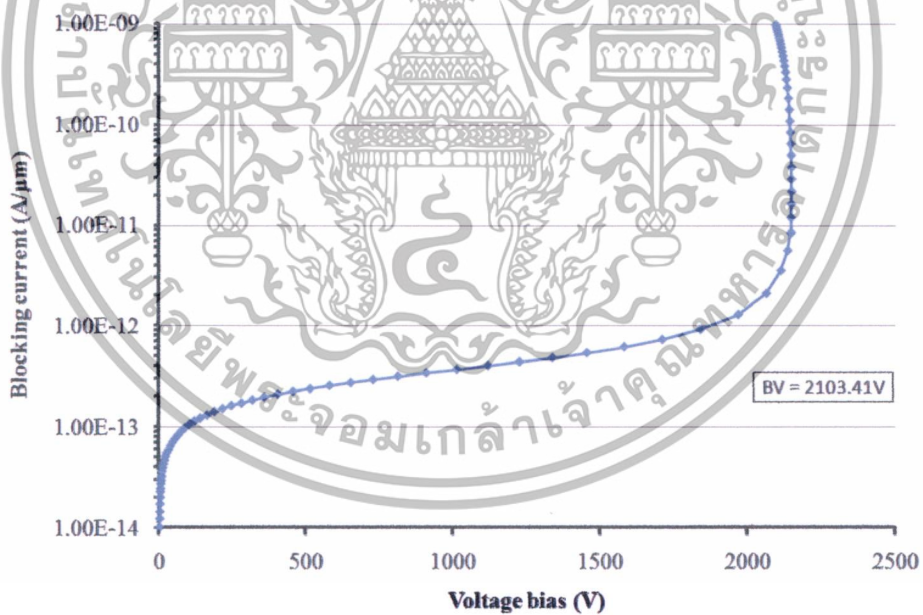


รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงกระแสปิดกั้นต่อแรงดันไฟฟ้า NPT-TIGBT ร่วมกับชั้นฝังชนิดพี ที่ระยะ $L_7=1.6$ ในสภาวะไบอัสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

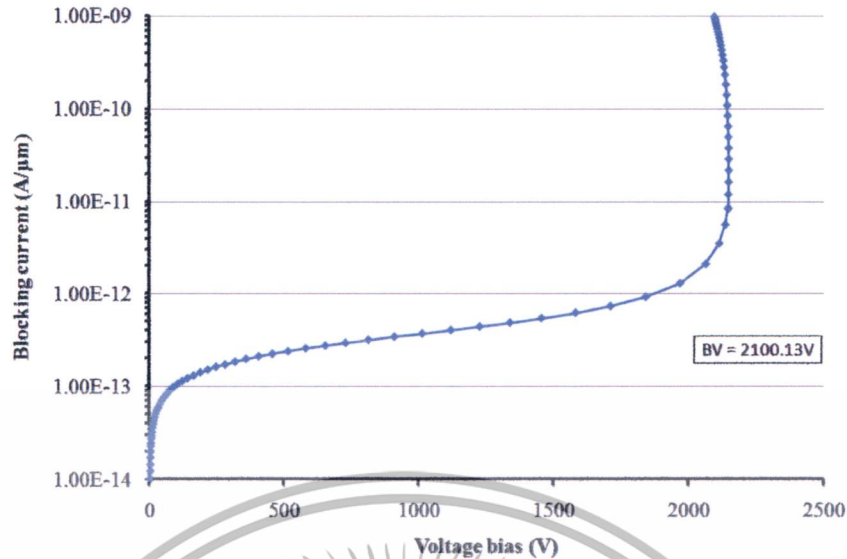


รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงกระแสปิดกั้นต่อแรงดันไฟฟ้า NPT-TIGBT ร่วมกับชั้นฝังชนิดพี ที่ระยะ $L_7=1.8$ ในสภาวะไบอัสตรง

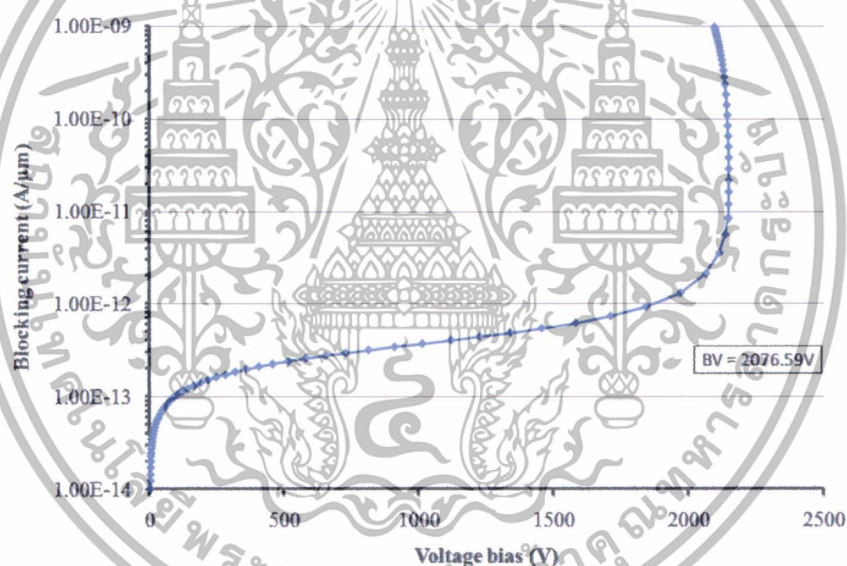


รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงกระแสปิดกั้นต่อแรงดันไฟฟ้า NPT-TIGBT ร่วมกับชั้นฝังชนิดพี ที่ระยะ $L_7=2.0$ ในสภาวะไบอัสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



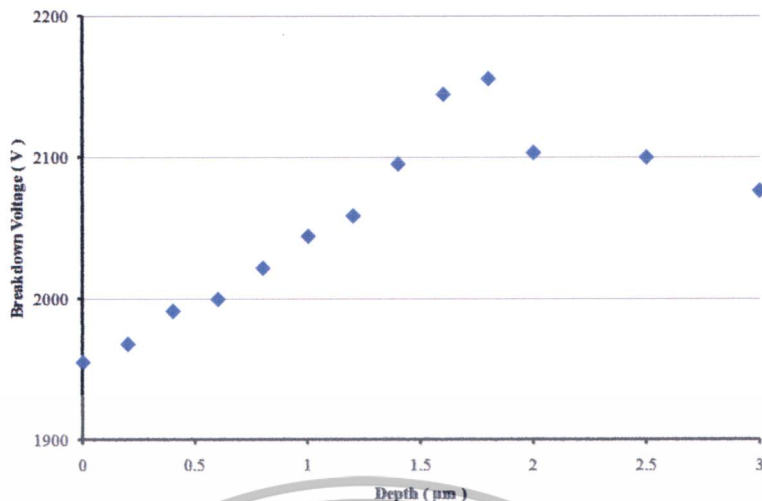
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงกระแสปิดกั้นต่อแรงดันไฟฟ้า NPT-TIGBT ร่วมกับชั้นฝังชนิดพี ที่ระยะ $L_7=2.5$ ในสภาวะไบอัสตรง



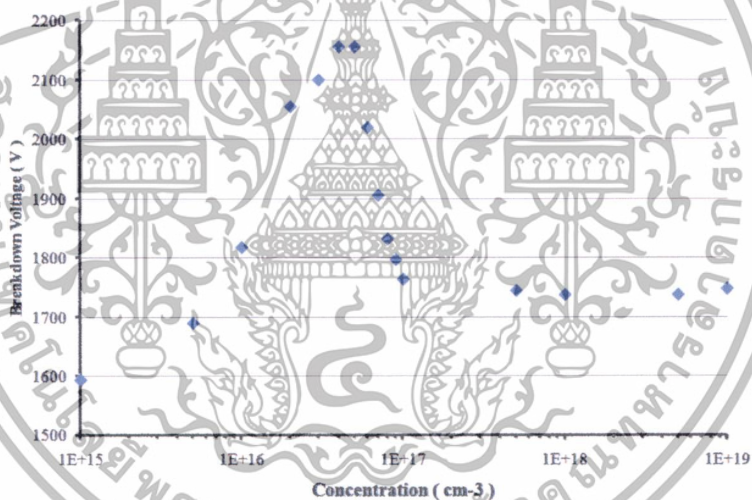
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงกระแสปิดกั้นต่อแรงดันไฟฟ้า NPT-TIGBT ร่วมกับชั้นฝังชนิดพี ที่ระยะ $L_7=3.0$ ในสภาวะไบอัสตรง

จากการทดสอบเมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่าความลึกของชั้น P_b ตั้งแต่ $0 \mu\text{m}$ (ติดกับส่วนโพลีเกต) กระทั่งถึงความลึกที่ประมาณ $3.0 \mu\text{m}$ (ความเข้มข้นสารเจือของชั้น P_b เท่ากับ $5.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) ความสามารถในการทนแรงดันพังทลายในสภาวะปิดกั้นไปหน้า พบว่าเมื่อระยะความลึกของชั้น P_b เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้แรงดันพังทลายมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น โดยมีค่ามากที่สุดที่ความลึกที่ระยะ $L_7 = 1.8 \mu\text{m}$ มีค่าเท่ากับ $2,144.95 \text{ V}$ จะมีความสามารถทนแรงดันพังทลายมากขึ้นประมาณ 529.37 V จากแบบปกติหรือประมาณ 30 % แสดงในรูปที่ 4.12 แต่เมื่อระยะความลึกมากกว่า $1.8 \mu\text{m}$ กลับมีแนวโน้มลดลง แสดงในรูปที่ 4.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการทนแรงดันพังทลายต่อความลึกของชั้นฝังชนิดพี ในสภาวะไบอัสตรง



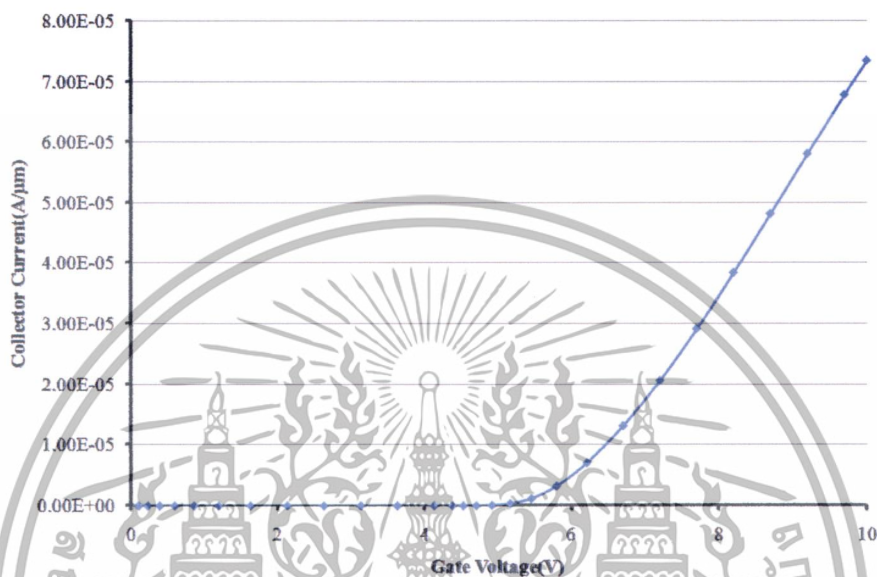
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถการทนแรงดันพังทลายต่อความเข้มข้นสารเจือของชั้น ฝังชนิดพีในสภาวะไบอัสตรง

เมื่อทราบถึงความลึกของชั้นฝังชนิดพี P_b ที่เหมาะสมแล้ว จึงทำการปรับเปลี่ยนค่าความเข้มข้นสารเจือของชั้นฝังชนิดพี P_b จากการทดสอบเมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่าความเข้มข้นสารเจือของชั้น P_b ตั้งแต่ $1.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ กระทั่งถึง $1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ (ความลึกของชั้น P_b 1.8 μm) ความสามารถในการทนแรงดันพังทลายในสภาวะปิดกั้นไปหน้าแสดงดังรูปที่ 5 จากรูปพบว่าเมื่อความเข้มข้นสารเจือของชั้น P_b เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้แรงดันพังทลายมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น โดยมีค่ามากที่สุดที่ความเข้มข้นสารเจือประมาณ $5.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ มีค่าเท่ากับ 2144.95 V แต่เมื่อความเข้มข้นสารเจือเพิ่มมากกว่า $5.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ กลับมีแนวโน้มลดลงและคงที่ แสดงในรูปที่ 4.17

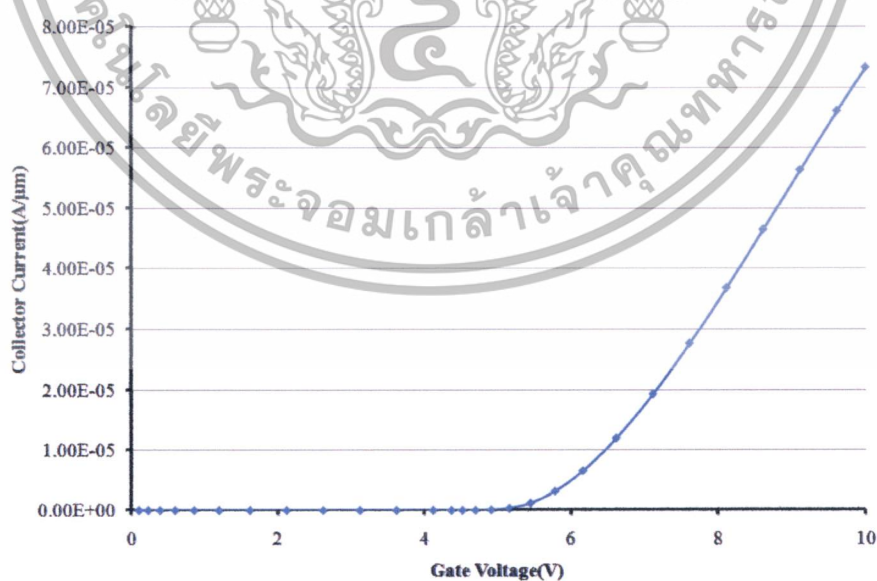
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 การทดสอบแรงดันขีดเริ่มของอุปกรณ์ไอจีบีที NPT-TIGBT

การทดสอบแรงดันขีดเริ่มของอุปกรณ์ไอจีบีที NPT-TIGBT ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์กับแรงดันไฟฟ้าคอลเลคเตอร์-อิมิตเตอร์ โดยการป้อนแรงดันไฟฟ้า V_{CE} ที่ 5 V และ V_{GE} เท่ากับ 10 V ในสภาวะการไบอัสไปหน้า



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ (Collector current) กับแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมเกต (Gate Voltage drop) ของ NPT-TIGBT ปกติ

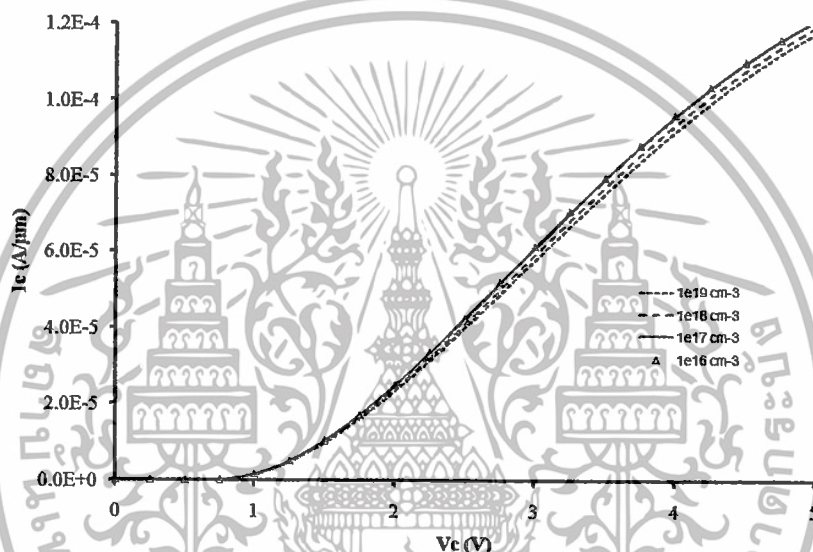


รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ (Collector current) กับแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมเกต (Gate Voltage drop) ของ NPT-TIGBT ร่วมกับชั้นฝังชนิดพี P_b

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการวัดค่ากระแสคอลเลคเตอร์ (I_{CE}) ต่อแรงดันไฟฟ้าตกรวมเกต (V_{GE}) เพื่อหาค่าแรงดันขีดเริ่มที่ NPT-TIGBT ทำงาน แสดงกราฟความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.18 และ 4.19 จากรูปพบว่าอุปกรณ์ NPT-TIGBT ปกติและ NPT-TIGBT ร่วมกับชั้นฝังชนิดพี จะทำงานในสภาวะไบอัสตรง ต้องป้อน V_{GE} อย่างน้อย 5 V

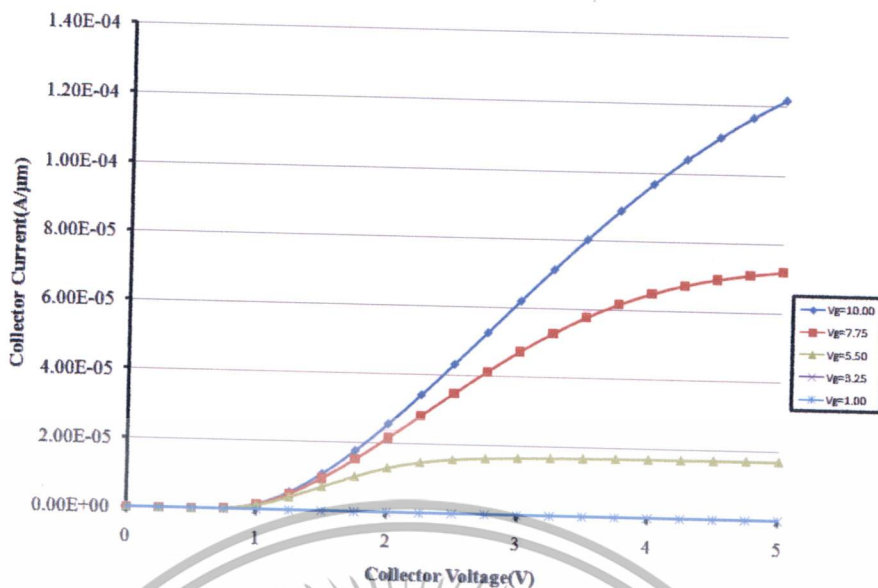
การทดสอบแรงดันขีดเริ่มของอุปกรณ์ไอจีบีที NPT-TIGBT เมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่าความเข้มข้นสารเจือของชั้น P_b ตั้งแต่ $1.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ กระทั่งถึง $1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ (ความลึกของชั้น P_b 1.8 μm) สามารถทดสอบโดยการป้อนแรงดันไฟฟ้า V_{CE} ที่ 0 V ถึง 5 V และ V_{GE} เท่ากับ 10 V ในสภาวะการไบอัสไปหน้า



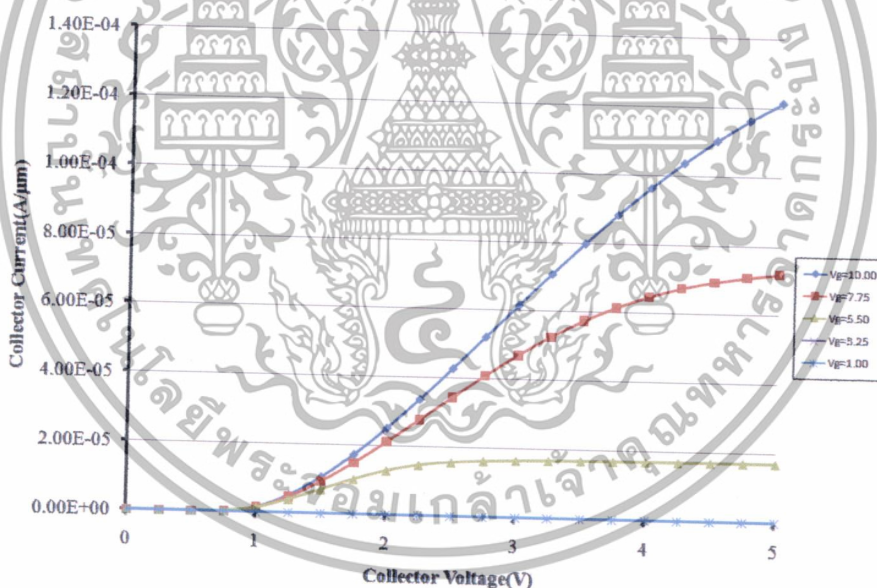
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงกระแสต่อแรงดันเมื่อทำการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นสารเจือของชั้นฝังชนิดพี ในสภาวะไบอัสตรง

จากผลการทดสอบพบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นสารเจือของชั้นฝังชนิดพี ในโครงสร้าง NPT-TIGBT พบว่ากระแสในอุปกรณ์กลับมีขนาดลดลง ดังนั้นจึงต้องหาความเข้มข้นสารเจือของชั้นฝังชนิดพี ที่มีความเหมาะสมจึงจะทำให้อุปกรณ์มีประสิทธิภาพที่ดี ชั้นฝังชนิดพีที่มีค่าประมาณ $1.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ดังแสดงในรูปที่ 4.20 จะให้ปริมาณกระแสสูงสุดในขณะนำไฟฟ้า

การทดสอบทางไฟฟ้าในสภาวะปิดกั้นไปหน้า (Forward bias mode) เกิดจากการให้แรงดันไบอัสที่คอลเลคเตอร์เป็นค่าบวก V_{CE} ที่ 0 V ถึง 5 V โดยลัดวงจรขั้วอิมิตเตอร์กับขั้วเกตเข้าไว้ด้วยกัน โดยทำการปรับเปลี่ยนแรงดันตกรวมเกต V_{GE} ตั้งแต่ 1 V ถึง 10 V กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I_{CE} และ V_{CE} ที่แรงดัน V_{GE} ต่างๆ ในสภาวะไบอัสตรง



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์กับแรงดันไฟฟ้าคอลเลคเตอร์-อิมิตเตอร์ ของ NPT-TIGBT ปกติ เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้า V_{CE} ที่ 0 V ถึง 5 V และ V_{GE} เท่ากับ 1.00, 3.25, 5.50 และ 10 V



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์กับแรงดันไฟฟ้าคอลเลคเตอร์-อิมิตเตอร์ ของ NPT-TIGBT ร่วมกับชั้นฝั่งชนิดพี เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้า V_{CE} ที่ 0 V ถึง 5 V และ V_{GE} เท่ากับ 1.00, 3.25, 5.50 และ 10 V

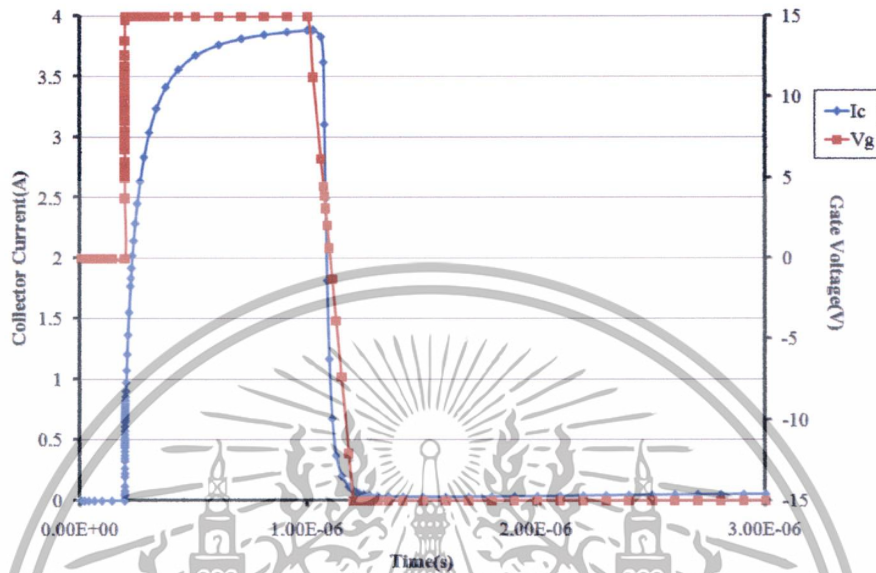
จากการทดสอบแรงดันขีดเริ่มการทำงานของ NPT-TIGBT ปกติและ NPT-TIGBT ร่วมกับชั้นฝั่งชนิดพี จะต้องมามีค่า V_{GE} อย่างน้อย 5 V และ V_{CE} ประมาณ 1 V ประมาณกระแส I_{CE} จะมากขึ้นเมื่อทำการเพิ่มแรงดัน V_{GE} (พิจารณาที่ V_{CE} เท่ากัน) ซึ่งเป็นคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

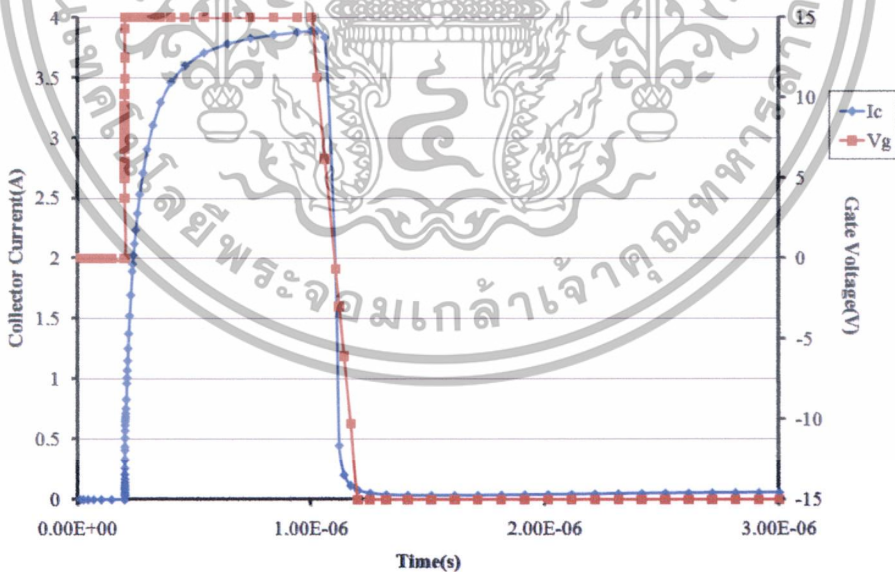
4.1.3 การทดสอบช่วงเวลากการตอบสนองอุปกรณ์ไอจีบีที NPT-TIGBT

การทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์และแรงดันไฟฟ้าที่เกต เมื่อเทียบกับ

เวลา



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ (Collector current) และแรงดันไฟฟ้าที่เกต (Gate Voltage) เมื่อเทียบกับเวลา (Time) ของ NPT-TIGBT ปกติ

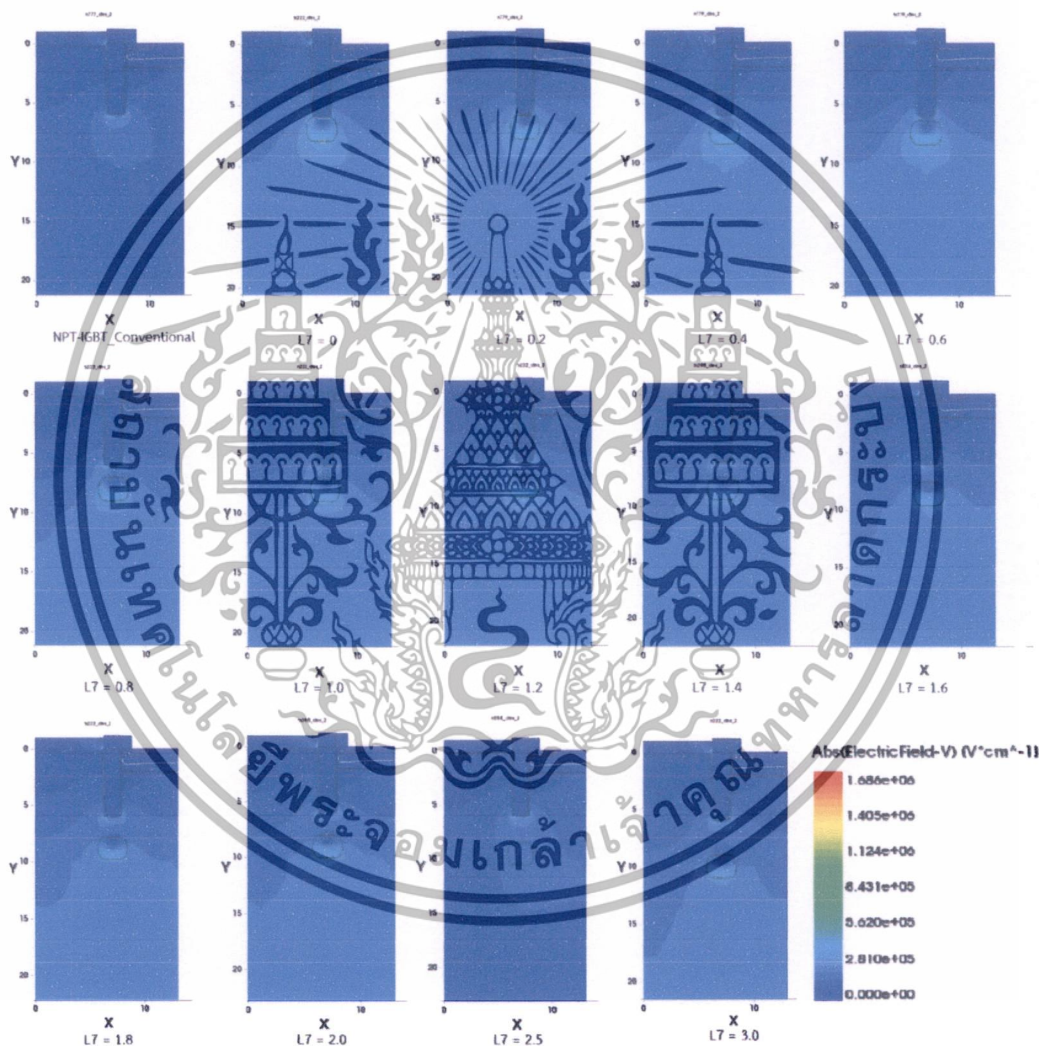


รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์ (Collector current) และแรงดันไฟฟ้าที่เกต (Gate Voltage) เมื่อเทียบกับเวลา (Time) ของ NPT-TIGBT ร่วมกับชั้นฝั่งชนิดพี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

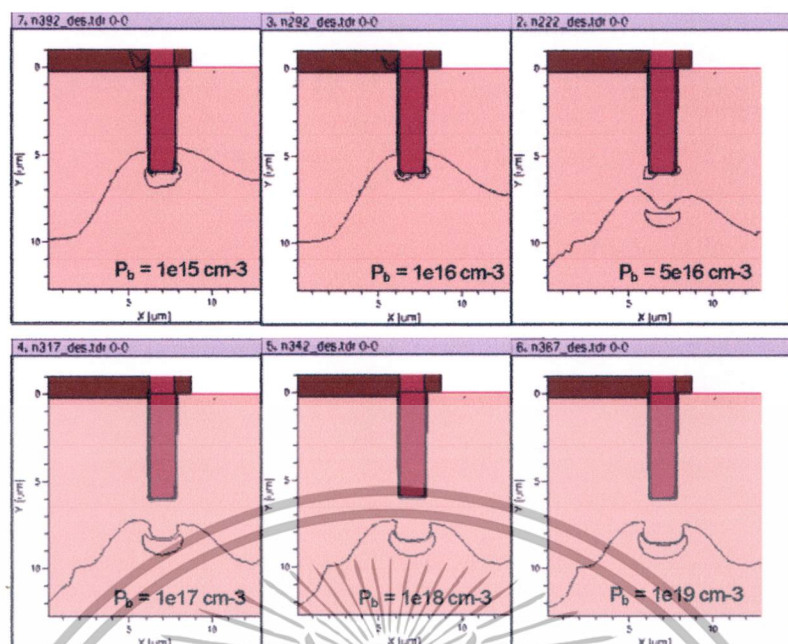
4.2 การทดสอบการกระจายความหนาแน่นสนามไฟฟ้าภายในอุปกรณ์ไอจีบีที

การทดสอบการกระจายความหนาแน่นสนามไฟฟ้าในสภาวะ Forward blocking breakdown ที่แรงดันไฟฟ้า V_{CE} เท่ากับ 1,000 V ภายในอุปกรณ์ NPT-TIGBT ปกติ และ NPT-TIGBT ร่วมกับชั้นฝังชนิดพี ที่ระยะ $L_7 = 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0, 2.5$ และ 3.0 ตามลำดับ เนื่องจากสนามไฟฟ้าภายในอุปกรณ์เป็นสาเหตุสำคัญต่อการเกิดการพังทลายของอุปกรณ์

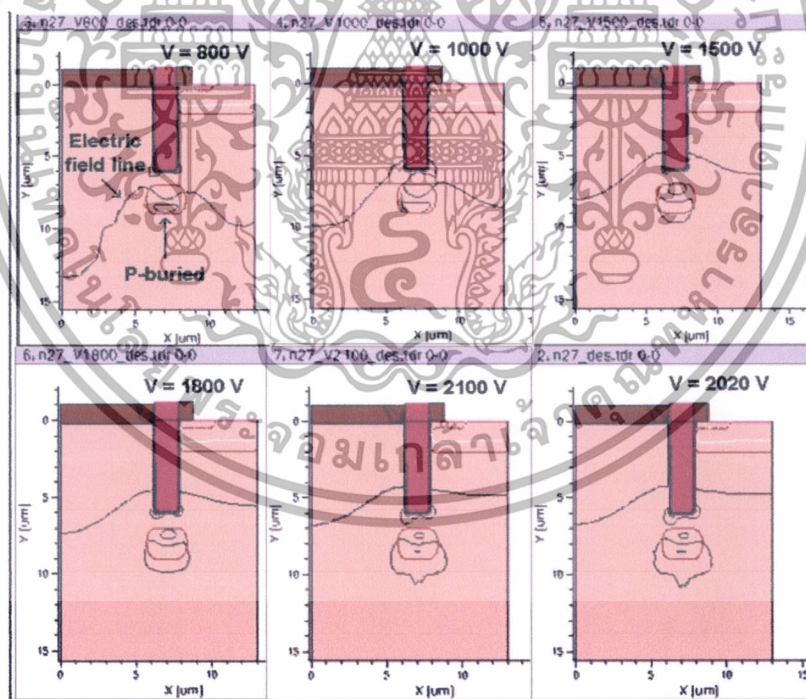


รูปที่ 4.25 การกระจายความหนาแน่นสนามไฟฟ้า เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความลึกของชั้นฝังชนิดพี ภายในโครงสร้าง NPT-TIGBT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.26 การเปลี่ยนแปลงเส้นสนามไฟฟ้า (solid line) โดยทำการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นสารเจือของชั้นฝังชนิดพี ที่แรงดันไฟฟ้า V_{CE} เท่ากับ 1,000 โวลต์



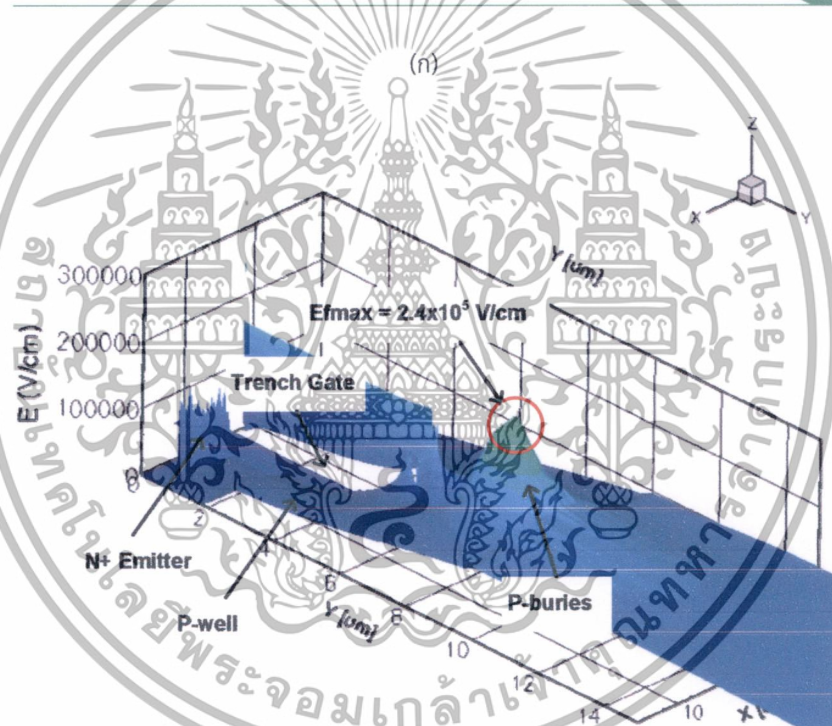
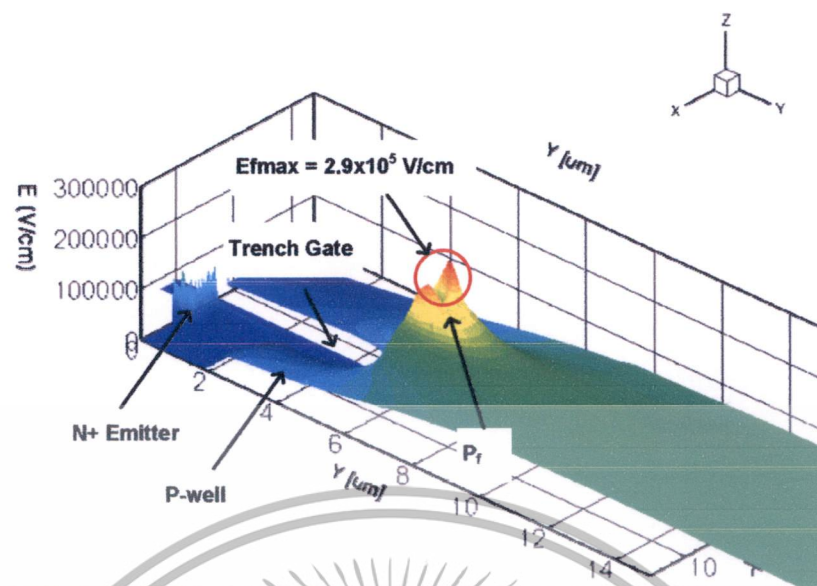
รูปที่ 4.27 การเปลี่ยนแปลงเส้นสนามไฟฟ้า (solid line) โดยทำการปรับเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าที่ $V_{CE}=800, 1000, 1500, 1800, 2020, 2100$ V ของชั้นฝังชนิดพี ที่ความลึกและความหนาแน่นสารเจือเท่ากับ $1.8 \mu\text{m}$ $5.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดสอบพบว่าที่ความลึกของชั้นฝังชนิดพี น้อยความหนาแน่นสนามไฟฟ้า จะเกิดขึ้นเฉพาะส่วนมุมด้านล่างของโพลีเกตแบบขุดเพียงอย่างเดียว เมื่อมีความลึกเพิ่มมากขึ้นความหนาแน่นสนามไฟฟ้าจะแบ่งออกมายังชั้น P_b ทำให้ความหนาแน่นบริเวณเกตลดลงส่งผลให้อุปกรณ์สามารถทนแรงดันพังทลายได้มากขึ้น โดยการทดลองพบว่าที่ความลึกประมาณ $1.8 \mu\text{m}$ มีการกระจายของสนามไฟฟ้าระหว่างโพลีเกตและชั้น P_b ที่เหมาะสม (มีแรงดันพังทลายสูงสุด) แต่เมื่อความลึกเพิ่มมากขึ้นการกระจายความหนาแน่นสนามไฟฟ้าบริเวณชั้น P_b และโพลีเกตไม่เหมาะสมส่งผลให้ความสามารถในการทนแรงดันพังทลายลดลง การเปลี่ยนแปลงการกระจายความหนาแน่นสนามไฟฟ้าเมื่อทำการปรับเปลี่ยนความลึกของชั้น P_b แสดงดังรูปที่ 4.25

จากนั้นทำการทดสอบโดยปรับเปลี่ยนค่าความเข้มข้นสารเจือของชั้น P_b ตั้งแต่ $1.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ กระทั่งถึง $1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ (ความลึกของชั้น P_b ประมาณ $1.8 \mu\text{m}$) ความสามารถในการทนแรงดันพังทลายในสภาวะ forward blocking breakdown โดยการกระจายตัวของเส้นสนามไฟฟ้า (solid line) เมื่อทำการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นสารเจือแสดงดังรูปที่ 4.26 จากรูปพบว่าที่ความเข้มข้นสารเจือของชั้น P_b น้อย เกิดความหนาแน่นสนามไฟฟ้าบริเวณมุม โพลีเกตเพียงอย่างเดียว ในขณะที่ปริมาณสารเจือเพิ่มมากขึ้นในช่วงความเข้มข้นสารเจือตั้งแต่ $1.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ถึง $1.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ทำให้เกิดการกระจายความหนาแน่นสนามไฟฟ้าของทั้ง 2 บริเวณ คือ มุมโพลีเกตและชั้น P_b จากรูปพบว่าที่ปริมาณความเข้มข้นสารเจือ $5.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ทำให้อุปกรณ์สามารถทนแรงดันพังทลายได้สูงสุด แต่เมื่อความเข้มข้นสารเจือเพิ่มมากขึ้นความหนาแน่นสนามไฟฟ้าจะเกิดที่บริเวณชั้น P_b เพียงอย่างเดียว ส่งผลให้อุปกรณ์มีความสามารถทนการพังทลายได้น้อยลง

จากการทดสอบอุปกรณ์โดยทำการปรับเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าที่ $V_{CE}=800,1000,1500,1800,2020,2100 \text{ V}$ ของชั้นฝังชนิดพี ที่ความลึก และความหนาแน่นสารเจือเท่ากับ $1.8 \mu\text{m}$ $5.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.27 พบว่าที่แรงดัน V_{CE} น้อยเส้นสนามไฟฟ้าอยู่บริเวณชั้นฝังชนิดพีที่ V_{CE} เท่ากับ 1000 V เส้นสนามไฟฟ้าจากเคลื่อนจากชั้นฝังชนิดพี มายังรอบมุมโพลีเกตที่ V_{CE} สูงเส้นสนามไฟฟ้าจะอยู่รอบมุมโพลีเกตและชั้นฝังชนิดพี จนกระทั่งเกิดการพังทลายภายในอุปกรณ์



(ข.)

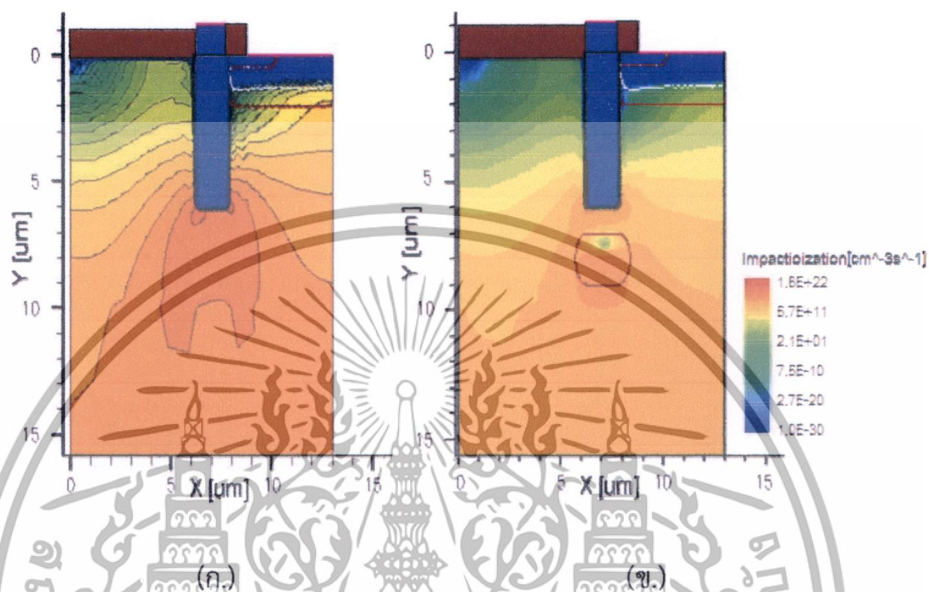
รูปที่ 4.28 ภาพ 3 มิติ แสดงค่าความหนาแน่นสนามไฟฟ้าของ (ก.) NPT-TIGBT ปกติ และ (ข.) NPT-TIGBT ร่วมกับชั้นฝังชนิดพี

เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นสนามไฟฟ้าโดยทำการป้อนศักย์ไฟฟ้าตกร่วมอุปกรณ์ทั้ง 2 ชนิดที่ 1,000V พบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นสนามไฟฟ้า (V/cm) แสดงในรูปแบบ 3 มิติ ดังรูปที่ 4.28 พบว่าการเพิ่มชั้น P_b ทำให้ความหนาแน่นสนามไฟฟ้าบริเวณใต้เกตแบบขุดลดลงเหลือ 2.4×10^5 V/cm จากเดิม 2.9×10^5 V/cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การทดสอบคุณสมบัติการไอออนไนซ์ภายในอุปกรณ์ไอจีบีที

การทดสอบลักษณะการไอออนไนซ์ภายในโครงสร้าง NPT-IGBT ปกติ และโครงสร้าง NPT-IGBT ร่วมกับชั้นฝังชนิดพีที่ V_{CE} เท่ากับ 1000 V



รูปที่ 4.29 การไอออนไนซ์ภายใน (ก.) โครงสร้าง NPT-IGBTปกติ (ข.)การไอออนไนซ์ภายในโครงสร้าง NPT-IGBTร่วมกับชั้นฝังชนิดพีที่แรงดันไฟฟ้า V_{CE} เท่ากับ 1,000 V

ผลการทดสอบพบว่า การไอออนไนซ์เนื่องจากการชน (Impact ionization) นี้เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการพังทลายแบบอะวาลันซ์ (Avalanche breakdown) โดยพบว่า การเพิ่มขึ้นของกระแสก่อนพังทลาย จะเกี่ยวข้องกับการเพิ่มขึ้นของปริมาณพาหะ ซึ่งพาหะนี้จะเกิดในสนามไฟฟ้าบริเวณปลอดพาหะบริเวณรอบมุมโพลีเกิดแบบขุด มีความหนาแน่นสนามไฟฟ้าสูงมากแสดงในรูปที่ 4.29 (ก) ส่งผลทำให้เกิดความหนาแน่นพาหะจำนวนมาก เมื่อมีชั้นฝังชนิดพี ที่เหมาะสมในโครงสร้าง NPT-TIGBT จะพบว่า การไอออนไนซ์ของพาหะในบริเวณใกล้เคียงจะย้ายไปในทิศทางชั้นฝังชนิดพี แสดงในรูปที่ 4.29 (ข) และนำไปสู่ความหนาแน่นสนามไฟฟ้าในบริเวณรอบมุมแบบขุดลดลง เนื่องจากการสะสมของคู่อิเล็กตรอน-โฮลบนพื้นผิวชั้นฝังชนิดพี

บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ มีเนื้อหาที่สอดคล้องกับความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษาที่ได้กำหนดไว้ ซึ่งเป็นการศึกษาเกี่ยวกับการจำลองและการออกแบบไอจีบีทีเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ให้ดียิ่งขึ้น ในบทนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

การจำลองแบบการสร้างชั้นฝังชนิดพี ที่เหมาะสมในโครงสร้างอุปกรณ์เอ็นพีที-ไอจีบีทีชนิดเกิดแบบขุด (NPT-TIGBT) ต่อการทนแรงดันพังทลาย ชั้นฝังชนิดพี ซึ่งมีความเข้มข้นสารเจือประมาณ $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ถูกสร้างขึ้นภายในชั้นฐานรองชนิดเอ็น (n-drift layer) บริเวณใต้เกิดแบบขุด (Trench gate) ชั้นฝังชนิดพี ผลการจำลองด้วยโปรแกรม T-CAD Sentuarus พบว่าชั้นฝังชนิดพี ทำให้อุปกรณ์สามารถทนแรงดันพังทลายได้มากขึ้น โดยเพิ่มขึ้นประมาณ 30% คือเปลี่ยนแปลงจาก 1,615 V เป็น 2,156 V เมื่อเทียบกับ NPT-TIGBT ปกติ และเมื่อทำการเพิ่มปริมาณความเข้มข้นสารเจือของชั้นฝังชนิดพี ทำให้อุปกรณ์ทนแรงดันพังทลายได้คงที่ แต่ปริมาณกระแสในขณะนำไฟฟ้ามีแนวโน้มลดลง โดยความเข้มข้นสารเจือและความลึกของชั้นฝังชนิดพี ที่เหมาะสมที่ให้ค่าแรงดันพังทลายและปริมาณกระแสในขณะนำไฟฟ้าสูงสุดมีค่าประมาณ $5.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ และ $1.8 \text{ }\mu\text{m}$ ตามลำดับ

จากการทดสอบการกระจายความหนาแน่นสนามไฟฟ้าเพื่อเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นสนามไฟฟ้าโดยทำการป้อนศักย์ไฟฟ้าตกรวมอุปกรณ์ทั้ง 2 ชนิด คือโครงสร้าง NPT-TIGBT และโครงสร้าง NPT-TIGBT ร่วมกับชั้นฝังชนิดพี ที่มีความเหมาะสม ที่ 1,000 V พบว่าการเพิ่มชั้นฝังชนิดพี ทำให้ความหนาแน่นสนามไฟฟ้าบริเวณใต้เกิดแบบขุดลดลงเหลือ $2.4 \times 10^5 \text{ V/cm}$ จากเดิม $2.9 \times 10^5 \text{ V/cm}$ จะเห็นได้ว่าชั้นฝังชนิดพี สามารถลดความหนาแน่นสนามไฟฟ้าบริเวณใต้เกิดแบบขุด ซึ่งเป็นสาเหตุของการพังทลายได้ คุณสมบัตินี้ทำให้อุปกรณ์สามารถทนแรงดันพังทลายได้มากขึ้น

จากการทดสอบคุณสมบัติไฟฟ้าและผลกระทบไอออนไนซ์ด้วยโปรแกรม T-CAD Sentuarus ในโครงสร้าง NPT-TIGBT พบว่า การไอออนไนซ์เนื่องจากการชน (Impact ionization) เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการพังทลายแบบอะวาลันซ์ (Avalanche breakdown) โดยพบว่าการเพิ่มขึ้นของกระแสก่อนพังทลาย จะเกี่ยวข้องกับการเพิ่มขึ้นของปริมาณพาหะ ซึ่งพาหะนี้จะเกิดในสนามไฟฟ้าบริเวณปลอดพาหะบริเวณมุมโพลีเกิดแบบขุด มีความหนาแน่นสนามไฟฟ้าสูงมาก ส่งผลทำให้เกิดความหนาแน่นพาหะจำนวนมาก เมื่อมีชั้นฝังชนิดพี ในโครงสร้าง NPT-TIGBT จะพบว่าการไอออนไนซ์ของพาหะในบริเวณใกล้เคียงจะย้ายไปในทิศทางชั้นฝังชนิดพี และนำไปสู่ความหนาแน่นสนามไฟฟ้าในบริเวณรอบมุมเกิดแบบขุดลดลง เนื่องจากการสะสมของคู่อิเล็กตรอน-โฮล บนพื้นผิวชั้นฝังพี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการจำลองแบบคุณสมบัติที่เหมาะสมของชั้นผึ้งชนิดที่ต่อการทนแรงดันพังทลายของไอจีซีที่ชนิดเกิดแบบขุดนี้จะเป็นพื้นฐานในการศึกษาและพัฒนางานวิจัยการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ไอจีซีทีในประเทศไทยต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Vinod Kumar Khanna. *IGBT Theory and Design*. Wiley-IEEE Press. 2003.
- [2] B. Jayant Baliga. *Fundamentals of Power Semiconductor Devices*. New York: Springer-Verlag, 2008.
- [3] พอพล รุณพิชญ์, 2538 .การศึกษาออกแบบและสร้างไปโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกทเป็นฉนวน, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [4] L. Lorenz, "Power Semiconductor Devices-Development Trends and System Interactions," in Proc. Power Conversion Conference (PCC'07), pp. 348-354, April. 2007.
- [5] Shin H H, Lee H S, Sung M Y, "A study on the breakdown voltage characteristics with process and design parameters in trench gate IGBT", J. KIEEME, vol. 20, no. 5, pp. 403-406, 2007.
- [6] มนตรี แสนละมุดการุณ แสงจอก , และคณะ, "การจำลองผลของชั้นฝังชนิดพีต่อแรงดันพังทลายของโครงสร้างเอ็นพีทีไอจีบีที", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 34, 30 พ.ย.-2 ธ.ค. 2554, หน้า 865-868
- [7] B.J. Baliga, *Power Semiconductor Devices*, 1st ed, PWS, 1996.
- [8] Designing a High-Voltage IGBT Structure with TCAD, SILVACO, April, May, June 2010
- [9] 2-D MODELLING AND OPTIMISATION OF TRENCH INSULATED GATE BIPOLAR TRANSISTORS (TIGBT) F.Udrea and G.A.J. Amaratunga department of Engineering, Cambridge University,
- [10] Theoretical and Numerical Comparison Between DMOS and Trench Technologies for Insulated Gate Bipolar Transistors Florin Udrea and Gehan A.J. Amaratunga, Member, IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, VOL. 42, NO. 7, JULY 1995
- [11] A Novel Trench IGBT With a Deep P+ Layer Beneath the Trench Emitter, Sinsu Kyoung, Jong-Seok Lee, Sang-Hyeon Kwak, Ey-Goo Kang, and Man Young Sung, Member, IEEE ELECTRON DEVICE LETTERS, VOL. 30, NO. 1, JANUARY 2009
- [12] Novel Trench IGBT with a Rectangular Oxide beneath the Trench Gate, Jae In Lee, Jongchan Choi, Young-seok Bae, Man Young Sung, Department of Electrical Engineering, Korea University National Science & Technology Development Agency. Downloaded on March 09, 2010 at 20:00:07 EST from IEEE Xplore

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] **A Systematic Hard- and Soft-Switching Performances Evaluation of 1200 V Punchthrough IGBT Structures** Stéphane Azzopardi, Jean-Michel Vinassa, Eric Woigard, Member, IEEE, Christian Zardini, Member, IEEE, and Olivier Briat, IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 19, NO. 1, JANUARY 2004
- [14] **Temperature Effects on Trench-Gate Punch-Through IGBTs** Enrico Santi, Senior Member, IEEE, Xiaosong Kang, Associate Member, IEEE, Antonio Caiafa, Student Member, IEEE, Jerry L. Hudgins, Senior Member, IEEE, Patrick R. Palmer, Member, IEEE, Dale Q. Goodwine, and Antonello Monti, Senior Member, IEEE
- [15] **The Semi-Superjunction IGBT**, Marina Antoniou, Florin Udrea, Friedhelm Bauer, and Iulian Nistor, IEEE ELECTRON DEVICE LETTERS, VOL. 31, NO. 6, JUNE 2010
- [16] Synopsys Inc. "Aurora User Guide, version Z-2007." [Compact Disc]. USA Synopsys Inc. 2007



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าคงที่ทางฟิสิกส์

ตารางที่ ก.1 ค่าคงที่ทางฟิสิกส์

พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	ค่า	หน่วย
มวลนิ่งของอิเล็กตรอน	m_e	9.1091×10^{-31}	kg
มวลนิ่งของโปรตรอน	m_p	1.6726×10^{-31}	kg
มวลนิ่งของนิวตรอน	m_n	1.675×10^{-31}	kg
ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน	q	1.6021×10^{-19}	C
อัตราส่วนระหว่างประจุกับมวลนิ่งของอิเล็กตรอน	q/m_e	1.75879×10^{-11}	C/kg
ความเร็วแสงในสุญญากาศ	c	2.9979×10^8	m/s
เปอร์มิตทิวิตีในสุญญากาศ	ϵ_0	8.8542×10^{-12}	F/m
		8.8542×10^{-14}	F/cm
ค่าคงที่โบลทซ์มันน์	k	1.3805×10^{-23}	J/K
		8.6171×10^{-5}	eV/K
ค่าคงที่ของแพลงค์	h	6.6256×10^{-34}	J·s
		4.135×10^{-15}	eV·s
เลขอะโวกาโด	μ_0	6.0221×10^{23}	1/mol
ค่าเปอร์มีอะบิลิตีในสุญญากาศ	m_r	1.2566×10^{-6}	N·A ²
ค่าคงที่ของแรงคูลอมบ์	$k_e = 1/4\pi\epsilon_0$	8.9876×10^9	N·m ² /C ²
ค่ารัศมีของบอร์ก	α_0	5.2918×10^{-11}	m
ค่าคงที่ของริคเบอร์ก	R_∞	1.0974×10^7	1/m
ค่าคงที่ของสเตฟาน	σ	5.6704×10^{-8}	W/m ²
ค่าบอห์แมกนีตรอน	μ_B	9.274×10^{-24}	J/T
ค่าพลังงานจูล	J	6.242×10^{18}	eV
ค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์	K	$^{\circ}\text{C} + 273.15$	K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน่วยในระบบเอสไอ

ตารางที่ ข.1 หน่วยในระบบเอสไอ (International System Unit : SI Unit)

ปริมาณ	ชื่อหน่วย	หน่วยอนุพันธ์	หน่วยฐาน
ความยาว (Length)	Meter	-	M
มวล (Mass)	Kilogram	-	Kg
เวลา (Time)	Second	-	s
กระแสไฟฟ้า (Current)	Ampere	-	A
ความถี่ (Frequency)	Hertz	Hz	1/s
แรง (Force)	Newton	N	$\text{kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2$
แรงดัน (Pressure)	Pascal	Pa	$\text{N}/\text{m}^2 = \text{kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2$
พลังงาน (Energy)	Joule	J	$\text{N}\cdot\text{m} = \text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2$
กำลังไฟฟ้า (Power)	Watt	W	$\text{V}\cdot\text{A} = \text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^3$
ประจุไฟฟ้า (Electric Charge)	Coulomb	C	$\text{A}\cdot\text{s}$
ศักย์ไฟฟ้า (Potential)	Volt	V	$\text{J}/\text{C} = \text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{A}\cdot\text{s}^3$
ความนำไฟฟ้า (Conductance)	Siemens	S	$\Omega^{-1} = \text{A}^2\cdot\text{s}^3/\text{kg}\cdot\text{m}^2$
ความต้านทานไฟฟ้า (Resistance)	Ohm	Ω	$\text{V}/\text{A} = \text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{A}\cdot\text{s}^3$
ความจุไฟฟ้า (Capacitance)	Farad	F	$\text{C}/\text{V} = \text{A}^2\cdot\text{s}^4/\text{kg}\cdot\text{m}^2$
ฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic Flux)	Weber	Wb	$\text{V}\cdot\text{s} = \text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{A}\cdot\text{s}^2$
ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic Flux Density)	Tesla	T	$\text{Wb}/\text{m}^2 = \text{kg}/\text{A}\cdot\text{s}^2$
ความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (Inductance)	Henry	H	$\text{Wb}/\text{A} = \text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{A}^2\cdot\text{s}^2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าคงที่ทางฟิสิกส์

ตารางที่ ค.1 คำอุปสรรค หรือ คำนำหน้าหน่วย(Prefix)

10^n	คำอุปสรรค	ตัวย่อ	ความหมาย	ตัวเลข	
10^{24}	ยอตตะ	yotta-	Y	ล้านล้านล้านล้าน	1,000,000,000,000,000,000,000,000
10^{21}	เซตตะ	zetta-	Z	พันล้านล้านล้าน	1,000,000,000,000,000,000,000
10^{18}	เอกซะ	exa-	E	ล้านล้านล้าน	1,000,000,000,000,000,000
10^{15}	เพตะ	peta-	P	พันล้านล้าน	1,000,000,000,000,000
10^{12}	เทระ	tera-	T	ล้านล้าน	1,000,000,000,000
10^9	จิกะ	giga-	G	พันล้าน	1,000,000,000
10^6	เมกะ	mega-	M	ล้าน	1,000,000
10^3	กิโล	kilo-	k,K	พัน	1,000
10^2	เฮกโต	hecto-	H	ร้อย	100
10^1	เดคา	deca-	da	สิบ	10
10^{-1}	เดซี	deci-	d	หนึ่งส่วนสิบ	0.1
10^{-2}	เซนติ	centi-	c	หนึ่งส่วนร้อย	0.01
10^{-3}	มิลลิ	milli-	m	หนึ่งส่วนพัน	0.001
10^{-6}	ไมโคร	micro-	μ	หนึ่งส่วนล้าน	0.000 001
10^{-9}	นาโน	nano-	n	หนึ่งส่วนพันล้าน	0.000 000 001
10^{-12}	พิโก	pico-	p	หนึ่งส่วนล้านล้าน	0.000 000 000 001
10^{-15}	เฟมโต	femto-	f	หนึ่งส่วนพันล้านล้าน	0.000 000 000 000 001
10^{-18}	อัตโต	atto-	a	หนึ่งส่วนล้านล้านล้าน	0.000 000 000 000 000 001
10^{-21}	เซปโต	zepto-	z	หนึ่งส่วนพันล้านล้านล้าน	0.000 000 000 000 000 000 001
10^{-24}	ยอกโต	yocto-	y	หนึ่งส่วนล้านล้านล้านล้าน	0.000 000 000 000 000 000 000 001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประชุวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 35
The 35th Electrical Engineering Conference

ACCET

BANGKOK UNIVERSITY

50th NECTEC

กระทรวงศึกษาธิการ

สนับสนุนโดย

EGCO ABB genetron IRCT NATIONAL INSTRUMENTS TESTO TECHSOURCE
 true online ETOA COGNEX ส.ท.ว. RÖHDE & SCHWARZ KOGAKI PTS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติที่เหมาะสมของชั้นฝังชนิดพีต่อการทนแรงดันพังทลายของไอจีบีทีชนิดเกตแบบขุด

The Optimization of P-buried Layer to Breakdown Voltage of Trench gate IGBT

อมรรัตน์ เกิดประดิษฐ์¹ มนตรี แสนละมุล¹ วิสันต์ ตั้งวงษ์เจริญ¹ อัมพร โพธิ์ไธ¹ และ วิสุทธิ์ จูติรุ่งเรือง¹

¹ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

²ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ สวทช.

51/4 หมู่ที่ 1 ถ. สุวินทวงศ์ ต. วังตะเคียน อ. เมือง จังหวัดฉะเชิงเทรา 24000 โทรศัพท์: 038-857-100-9 E-mail: montree.saenlamool@nectec.or.th

³สาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3 หมู่ที่ 2 ถ.ฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทรศัพท์: 0-2739-0643, 02-329-8400 ถึง 8411 E-mail: rain_16_@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลการจำลองแบบการสร้างชั้นฝังชนิดพี (P_b) ที่เหมาะสมในโครงสร้างอุปกรณ์เอ็นพีที-ไอจีบีทีชนิดเกตแบบขุด (NPT-TIGBT) ต่อการทนแรงดันพังทลาย ชั้น P_b ถูกสร้างขึ้นภายในชั้นจุ่มร่องชนิดเอ็น (n-drift layer) บริเวณใต้เกตแบบขุด (Trench gate) ชั้น P_b สามารถลดความหนาแน่นสนามไฟฟ้าบริเวณใต้เกตแบบขุดซึ่งเป็นสาเหตุของการพังทลายได้ คุณสมบัตินี้ทำให้อุปกรณ์สามารถทนแรงดันพังทลายได้มากขึ้น ผลการจำลองด้วยโปรแกรม T-CAD Sentaurus พบว่า ชั้น P_b ทำให้อุปกรณ์สามารถทนแรงดันพังทลายได้มากขึ้น โดยเพิ่มขึ้นประมาณ 25% คือเปลี่ยนแปลงจาก 1,602 V เป็น 2,020 V เมื่อเทียบกับ NPT-TIGBT ปกติ โดยความเข้มข้นสารเจือและความลึกของชั้น P_b ที่เหมาะสมมีค่าประมาณ 5.0x10¹⁶ cm⁻³ และ 1.75 μm ตามลำดับ บทความนี้จะจะเป็นพื้นฐานที่สำคัญในการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ไอจีบีทีต่อไป

คำสำคัญ: ไอจีบีที, ไอจีบีที, ชั้นฝังชนิดพี, เกตแบบขุด

Abstract

In this paper, we introduced a P-buried (P_b) layer under trench gate which relieved the electric field crowding in the Non-Punch Through Trench gate Insulated Gate Bipolar Transistor (NPT-TIGBT) structure. The P_b layer was created underneath the trench gate within the n-drift layer. In this way, the concentration of electric field at the trench bottom corner decreased. As a result, the breakdown voltage characteristics of NPT-TIGBT improved. The structures were proposed and verified by T-CAD Sentaurus simulation. From the simulation results, the breakdown voltage increased by approximately 25% compared with conventional NPT-TIGBT, from 1,602V to 2,020V. The optimized of concentration and depth of P_b layer is 5.0x10¹⁶ cm⁻³ and 1.75 μm respectively.

Keyword: IGBT, NPT-TIGBT, P-buried layer, Trench gate

1. บทนำ

ไอจีบีที หรือ Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) คือ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังซึ่งรวมเอาข้อดีของมอสเฟตทรานซิสเตอร์และไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ไว้ด้วยกัน [1-3] โครงสร้าง Non Punch Through IGBT (NPT-IGBT) นิยมใช้กับวงจรกำลังชนิดเอซี (AC circuit) [4] ปัจจุบัน IGBT โครงสร้างเกตแบบแบนวนอน (Planar Gate IGBT) ถูกแทนที่ด้วยโครงสร้างเกตแบบขุด (Trench Gate IGBT: TIGBT) เพราะจากการศึกษาและงานวิจัยพบว่าโครงสร้างเกตแบบขุดสามารถจัดการผลของ lower on-state voltage drop (และ higher latching current [3,5,6] ได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามแรงดันพังทลายของ TIGBT จะเกิดจากความหนาแน่นสนามไฟฟ้าบริเวณใกล้กับมุมล่างของโครงสร้างโพลีเกตแบบขุด วิธีการลดความเข้มข้นสนามไฟฟ้าบริเวณดังกล่าวถูกนำมาศึกษาและหาแนวทางลดได้หลายวิธีเช่น การสร้างก้อนออกไซด์ (Rectangular Oxide) การสร้าง TIGBT ร่วมกับชั้นพีชนิดความเข้มข้นสารเจือสูง (P⁺) ใกล้กับส่วนอิมิตเตอร์แบบขุด (Trench Emitter Layer) การสร้างชั้นฝังลอยที่ความเข้มข้นสารเจือสูง (Floating P⁺: P_b) ล้อมรอบมุมด้านล่างของโพลีเกต ซึ่งที่มงานได้อ้างอิงไว้ในบทความในงาน EECON 34 และในงานเดียวกันที่มงานได้นำเสนอการเพิ่มแรงดันพังทลายของ NPT-TIGBT โดยการสร้างชั้นฝังชนิดพี (P-buried layer) ซึ่งสามารถเพิ่มการทนแรงดันพังทลายในสถานะ forward breakdown หรือ Off state (จ่ายไฟฟ้าเข้าอิมิตเตอร์และคอลเลคเตอร์ในสภาวะการนำไฟฟ้าในขณะที่ป้อนแรงดันที่ขาเกตเป็นศูนย์) การเพิ่มชั้นฝังชนิดพีสามารถสร้างได้จริงโดยการยิงฝังประจุโบรอนที่ระดับพลังงานล้านอิเล็กตรอนโวลต์ [5] อย่างไรก็ตามความลึกและปริมาณสารเจือของชั้นฝังชนิดพีซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญที่จะต้องมีความเหมาะสมในการใช้งาน ดังนั้นบทความนี้จะทำการจำลองความลึกและปริมาณสารเจือของชั้นฝังชนิดพี โดยใช้โปรแกรม T-CAD sentaurus เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสนามไฟฟ้าในโครงสร้างอุปกรณ์ NPT-TIGBT ซึ่งคุณสมบัตินี้มีผลต่อแรงดันพังทลายและกระแสของอุปกรณ์ ดังจะอธิบายในการทดลองต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ผู้ใช้จำเป็นต้องปฏิบัติตามเงื่อนไข และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารฉบับนี้ที่มีการนำไปใช้ การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 35 (EECON-35) 12 - 14 ธันวาคม 2555 มหาวิทยาลัยกรุงเทพและศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ

FL002

2. โครงสร้างและการทดลอง

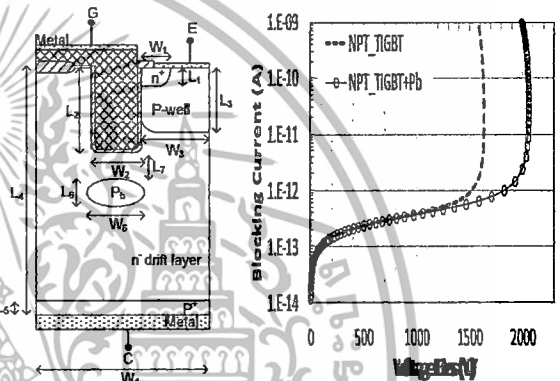
โครงสร้าง NPT-TIGBT ร่วมกับชั้น P_b แสดงดังรูปที่ 1 โดยที่โครงสร้างของ NPT-TIGBT ประกอบไปด้วยส่วนหลักๆ คือเอ็นอิมิตเตอร์ (N^+ Emitter) ที่คอลเลคเตอร์ (P^+ Collector) ฐานรองเอ็น (N drift base) บ่อพี (P-well) และ โพลีเกต (Poly-gate) ในการจำลองด้วยโปรแกรม T-CAD sentaurus มีพารามิเตอร์ที่สำคัญๆ แสดงในตารางที่ 1 การทดลองนี้ทำการเปลี่ยนแปลงค่าความลึกของชั้น P_b (Depth of P_b from trench gate) โดยทำการปรับเปลี่ยนตั้งแต่ 0 μm (ติดกับส่วนโพลีเกต) กระทั่งถึงความลึกที่ประมาณ 2.5 μm และทำการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มข้นสารเจือ (P_b concentration) โดยทำการปรับเปลี่ยนตั้งแต่ $1.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ กระทั่งถึง $1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ จากนั้นทำการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าซึ่งการใช้งาน IGBT จะมีขั้วหลักๆ 3 ขั้วคือ Emitter (E), Collector (C) และ Gate (G) การทดสอบทางไฟฟ้าในสภาวะ Forward bias โดยการป้อนแรงดันไฟฟ้า V_{CE} ที่ 0 V ถึง 5 V และ V_{GE} เท่ากับ 10 V และทดสอบในสภาวะ Forward blocking breakdown โดยป้อนแรงดันไฟฟ้า V_{CE} เริ่มตั้งแต่ 0 V กระทั่งถึงแรงดันพังทลายในขณะที่จ่าย V_{GE} เท่ากับ 0 V

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์สำคัญๆ ในการจำลองแบบโครงสร้าง NPT-TIGBT ร่วมกับชั้น P_b

Name	Explain	Value
L_1	n^+ Emitter depth (μm)	0.5
L_2	Trench gate depth (μm)	6.0
L_3	P-well depth (μm)	3.0
L_4	n^- drift thickness (μm)	150
L_5	P^+ Collector depth (μm)	1.0
L_6	P_b vertical width (μm)	2.0
L_7	Depth of P_b from trench gate	0.0-0.2.5
W_1	n^+ Emitter length (μm)	1.0
W_2	Width of trench gate (μm)	3.0
W_3	P-well length (μm)	3.0
W_4	n^- drift width (μm)	9.0
W_6	P_b width (μm)	4.0
D_1	n^+ Emitter concentration (cm^{-3})	5×10^{19}
D_2	P-well concentration (cm^{-3})	5×10^{17}
D_3	n^- drift concentration (cm^{-3})	6×10^{13}
D_4	P^+ Collector concentration (cm^{-3})	1×10^{19}
D_6	P_b concentration (cm^{-3})	$1 \times 10^{15} - 1 \times 10^{19}$
T_6	Poly gate concentration (cm^{-3})	1×10^{20}
G_{ox}	Gate oxide thickness (μm)	0.1

3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

ความสามารถในการป้องกันแรงดันพังทลายของอุปกรณ์ NPT-TIGBT ในสภาวะ Forward blocking breakdown แสดงดังรูปที่ 1 จากรูปพบว่าแรงดันพังทลายของ NPT-TIGBT ปกติ และ NPT-TIGBT ร่วมกับชั้น P_b (NPT-TIGBT+ P_b) มีค่า 1,602 V และ 2,020 V ตามลำดับ ดังนั้นโครงสร้าง NPT-TIGBT ร่วมกับชั้น P_b จะมีความสามารถทนแรงดันพังทลายมากขึ้นประมาณ 418 V จากแบบปกติหรือประมาณ 25% การเปลี่ยนแปลงค่าความหนาแน่นสนามไฟฟ้า (V/cm) แสดงในรูปแบบ 3 มิติ ดังรูปที่ 2 โดยทำการป้อนศักย์ไฟฟ้าปกครอมอุปกรณ์ทั้ง 2 ชนิดที่ 1,000V จากรูปพบว่าการเพิ่มชั้น P_b ทำให้ความหนาแน่นสนามไฟฟ้าบริเวณใต้เกตแบบขุดลดลงเหลือ $2.4 \times 10^5 \text{ V/cm}$ จากเดิม $2.9 \times 10^5 \text{ V/cm}$

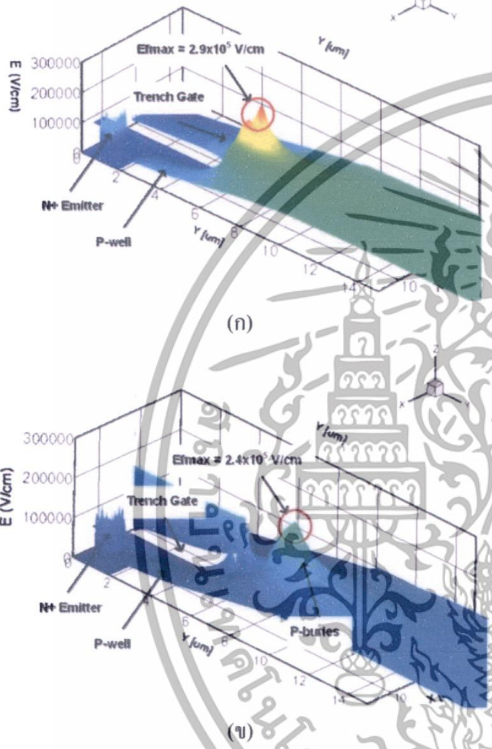


รูปที่ 1 (ก) โครงสร้างอุปกรณ์ NPT-TIGBT ร่วมกับชั้น P_b (ข) การเปลี่ยนแปลงกระแสป้องกัน (Blocking current) ต่อแรงดันไฟฟ้า (Voltage bias) ของ NPT-TIGBT และ NPT-TIGBT ร่วมกับชั้น P_b ในสภาวะ forward blocking breakdown

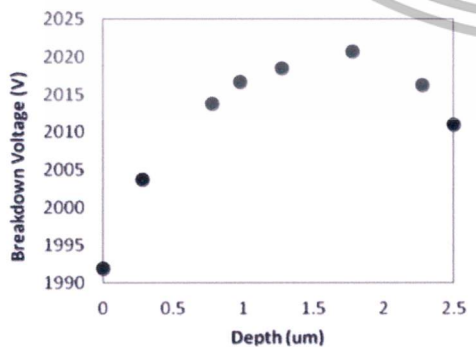
เมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่าความลึกของชั้น P_b ตั้งแต่ 0 μm (ติดกับส่วนโพลีเกต) กระทั่งถึงความลึกที่ประมาณ 2.5 μm (ความเข้มข้นสารเจือของชั้น P_b เท่ากับ $5.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) ความสามารถในการทนแรงดันพังทลายในสภาวะ forward blocking breakdown แสดงดังรูปที่ 3 จากรูปพบว่าเมื่อระยะความลึกของชั้น P_b เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้แรงดันพังทลายมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น โดยมีค่ามากที่สุดที่ความลึกประมาณ 1.75 μm แต่เมื่อระยะความลึกมากกว่า 1.75 μm กลับมีค่าลดลง

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นสนามไฟฟ้า (electric field crowding) ในสภาวะ forward blocking breakdown ที่แรงดันไฟฟ้า V_{CE} เท่ากับ 1,000 V ในโครงสร้าง NPT-TIGBT ร่วมกับชั้น P_b พบว่าเมื่อความลึกของชั้น P_b น้อย ความหนาแน่นสนามไฟฟ้า (เส้นทึบ) จะเกิดขึ้นเฉพาะส่วนมุมด้านข้างของโพลีเกตแบบขุดเพียงอย่างเดียว เมื่อมีความลึกของชั้น P_b เพิ่มมากขึ้น ความหนาแน่นสนามไฟฟ้าจะแบ่ง

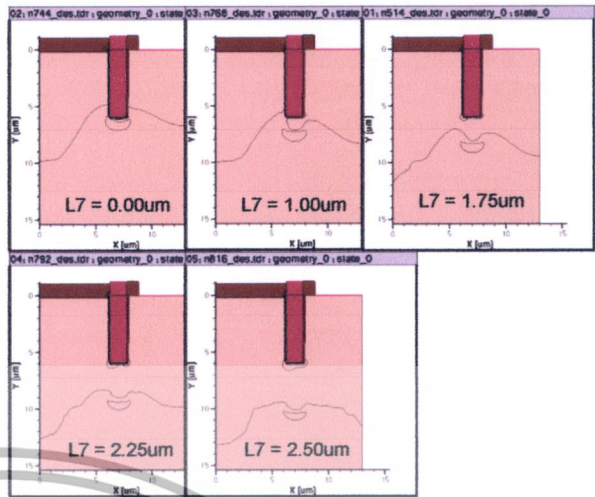
ออกมายังชั้น P_0 ทำให้ความหนาแน่นบริเวณเกตลดลงส่งผลให้อุปกรณ์สามารถทนแรงดันพังทลายได้มากขึ้น โดยการทดลองพบว่าความลึกประมาณ $1.75 \mu\text{m}$ มีการกระจายของสนามไฟฟ้าระหว่างโพลีเกตและชั้น P_0 ที่เหมาะสม (มีแรงดันพังทลายสูงสุด) แต่เมื่อความลึกเพิ่มมากขึ้นการกระจายความหนาแน่นสนามไฟฟ้าบริเวณชั้น P_0 และโพลีเกตไม่เหมาะสมส่งผลให้ความสามารถในการทนแรงดันพังทลายลดลง การเปลี่ยนแปลงเส้นสนามไฟฟ้าเมื่อทำการปรับเปลี่ยนความลึกของชั้น P_0 แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 2 ภาพ 3 มิติ แสดงค่าความหนาแน่นสนามไฟฟ้าของ TIGBT (ก) NPT-TIGBT ปกติ และ (ข) NPT-TIGBT ร่วมกับชั้น P_0



รูปที่ 3 ความสามารถในการทนแรงดันพังทลายต่อความลึกของชั้น P_0 (Depth) ในสภาวะ forward blocking breakdown



รูปที่ 4 การเปลี่ยนแปลงเส้นสนามไฟฟ้า (เส้นทับ) เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความลึกของชั้น P_0 ในโครงสร้าง NPT-TIGBT

เมื่อทำการปรับเปลี่ยน ค่าความเข้มข้นสารเจือของชั้น P_0 ตั้งแต่ $1.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ กระทั่งถึง $1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ (ความลึกของชั้น P_0 ประมาณ $1.75 \mu\text{m}$) ความสามารถในการทนแรงดันพังทลายในสภาวะ forward blocking breakdown แสดงดังรูปที่ 5 จากรูปพบว่าเมื่อความเข้มข้นสารเจือของชั้น P_0 เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้แรงดันพังทลายมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น โดยมีค่ามากที่สุดที่ความเข้มข้นสารเจือประมาณ $5.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ แต่เมื่อความเข้มข้นสารเจือเพิ่มมากกว่า $5.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ กลับมีแนวโน้มลดลงและคงที่ ดังรูปที่ 6

การกระจายตัวของ เส้นสนามไฟฟ้า (เส้นทับ) เมื่อทำการปรับเปลี่ยน ความเข้มข้นสารเจือ แสดงดังรูปที่ 6 จากรูปพบว่าความเข้มข้นสารเจือของชั้น P_0 น้อย เกิดความหนาแน่นสนามไฟฟ้าบริเวณมุมโพลีเกตเพียงอย่างเดียว ในขณะที่ปริมาณสารเจือเพิ่มมากขึ้นในช่วงความเข้มข้นสารเจือตั้งแต่ $1.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ถึง $1.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ทำให้เกิดการกระจายความหนาแน่นสนามไฟฟ้าของทั้ง 2 บริเวณ คือ มุม โพลีเกตและชั้น P_0 จากรูปพบว่าที่ปริมาณความเข้มข้นสารเจือ $5.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ทำให้อุปกรณ์สามารถทนแรงดันพังทลายได้สูงสุด แต่เมื่อความเข้มข้นสารเจือเพิ่มมากขึ้นความหนาแน่นสนามไฟฟ้าจะเกิดที่ บริเวณชั้น P_0 เพียงอย่างเดียว ส่งผลให้อุปกรณ์ทนการพังทลายได้น้อยลง

การเปลี่ยนแปลงเส้นสนามไฟฟ้าเมื่อทำการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นสารเจือของชั้น P_0 แสดงดังรูปที่ 6 เมื่อพิจารณาในสภาวะ Forward bias โดยการป้อนแรงดันไฟฟ้า V_{CE} ที่ 0 V ถึง 5 V และ V_{GE} เท่ากับ 10 V ยังส่งผลให้กระแสไฟฟ้าลดลง การเปลี่ยนแปลงกระแสต่อแรงดันเมื่อทำการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นสารเจือของชั้น P_0 ในสภาวะ Forward bias แสดงดังรูปที่ 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Advanced Materials Research Vol. 717 (2013) pp 158-163
 Online available since 2013/Jul/15 at www.scientific.net
 © (2013) Trans Tech Publications, Switzerland
 doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.717.158

An Improvement of the Breakdown Voltage Characteristics of NPT-TIGBT by Using a P-buried Layer

Phasapon Manosukritkul^{1,a}, Amonrat Kerdpardist^{2,b},
 Montree Saenlamool^{3,c}, Ekalak Chaowicharat^{3,c}, Amporn Poyai^{3,c}
 Wisut Titiroongruang^{2,b}

¹ Department of Electronics Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Chumphon Campus, Chumphon, Thailand

² Electronics Research Center (ERC), Department of Electronics Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

³ Thai Microelectronics Center (TMEC), National Electronics and Computer Technology Center (NECTEC), National Science and Technology Development Agency (NSTDA) 51/4 Moo 1, Wangtakien District, Amphur Mueang, Chachoengsao 24000, Thailand

^aPhasapon@gmail.com, ^bAmonrat.Kerdpardist@gmail.com, ^cmontree.saenlamool@nectec.or.th

Keywords: T-CAD Sentuarus simulation, Electric field crowding, Insulated gate bipolar transistor, Trench gate

Abstract. In this paper, we introduced a P-buried (P_b) layer under trench gate which relieved the electric field crowding in the Non Punch Through Trench gate Insulated Gate Bipolar Transistor (NPT-TIGBT) structure. The P_b layer, with carrier concentration of $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, was created underneath the trench gate within the n-drift layer. In this way, the concentration of electric field at the trench bottom corner decreased. As a result, the breakdown voltage characteristics of NPT-TIGBT improved. The structures were proposed and verified by T-CAD Sentuarus simulation. From the simulation results, the breakdown voltage increased by approximately 30% compared with conventional NPT-TIGBT.

Introduction

An insulated gate bipolar transistor (IGBT) is a power semiconductor device that is becoming the key switching device in the power electronic applications because of its combination of key characteristics from both the bipolar transistor and MOSFET structures in a single device [1-2].

More recently, the planar gate IGBT structure is being replaced by Trench gate IGBT (TIGBT) structure due to lower on-state voltage drop and higher latching current [3]. However, the breakdown voltage of a TIGBT is highly influenced by the concentration of electric field near the bottom corner of the trench gate [4]. There are many ways to relieve this electric field concentration. For example, by creating a rectangular oxide layer beneath the trench gate. This method reduces the field concentration resulting in higher breakdown voltage. However, it is expensive and requires complex process as a result of epitaxial technique [5]. Moreover, forming a deep P^+ layer beneath the trench emitter can also reduce electric field. However, the JFET effect can occur when the P^+ region is deeper than P-base region. This causes forward current to decrease [6]. The prevention of high electric field can be achieved by placing a floating heavily doped P^+ region (P_f) around the trench bottom corner. This increases the breakdown voltage but degrades the on-state voltage drop due to a JFET contribution during forward mode [7].

In this paper, we investigated a P_b layer under trench gate in NPT-TIGBT structure which could also relieve electric field concentration. This study proposed and verified this new technique by T-CAD Sentuarus simulation. Furthermore, the fabrication technique of P_b layer was demonstrated and compared with the simulation

All rights reserved. No part of contents of this paper may be reproduced or transmitted in any form or by any means without the written permission of TTP, www.ttp.net. (ID: 161.246.28.216-01/08/13,06:46:55)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Device structure and experiment

A. NPT-TIGBT structure simulation.

Figure 1 shows (a) conventional NPT-TIGBT (C-NPT-TIGBT) structure, (b) NPT-TIGBT with P_f and (c) NPT-TIGBT with P_b layer. These structures were prepared and verified with the Sentaurus Device simulation software. The two-dimensional numerical simulation with all NPT-TIGBT relevant parameters are listed in Table 1.

The IGBT structure had three terminals, namely, Gate (G), Emitter (E) and Collector (C). During the forward mode, positive bias was applied to the Collector with respect to the Emitter (V_{CE}) and the internal NMOS was turned on by applying a positive biasing voltage to the Gate (V_{GE}) terminal. When V_{GE} was higher than the threshold voltage (V_{th}), that device was in forward current state. In the case of forward blocking mode, the protect current state, negative voltage was applied to V_{CE} with zero voltage applied to Gate terminal.

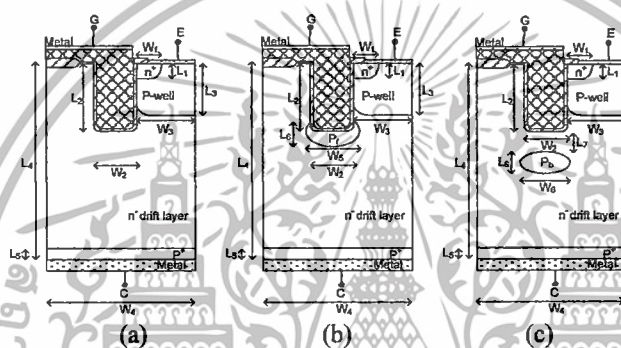


Fig.1. Cross-section of NPT-TIGBT structure (a) Conventional IGBT structure, (b) NPT-TIGBT with P_f structure, and (c) NPT-TIGBT with P_b structure.

TABLE 1. The relevant parameters of C-NPT-TIGBT, NPT-TIGBT with P_f and NPT-TIGBT with P_b structures in the T-CAD Sentaurus Device

Name	Description	Value
L_1	n^+ Emitter depth (μm)	0.5
L_2	Trench gate depth (μm)	6.0
L_3	P-well depth (μm)	3.0
L_4	n^- drift thickness (μm)	300
L_5	P^+ Collector depth (μm)	1.0
L_6	P_b vertical width (μm)	1.5
L_7	Depth of P_b from trench gate	1.0
W_1	n^+ Emitter length (μm)	1.0
W_2	Width of trench gate (μm)	3.0
W_3	P-well length (μm)	3.0
W_4	n^- drift width (μm)	9.0
W_5	P_f width (μm)	4.5
W_6	P_b width (μm)	4.0
D_1	n^+ Emitter concentration (cm^{-3})	5×10^{19}
D_2	P-well concentration (cm^{-3})	5×10^{17}
D_3	n^- drift concentration (cm^{-3})	6×10^{13}
D_4	P^+ Collector concentration (cm^{-3})	1×10^{19}
D_5	P_f concentration (cm^{-3})	5×10^{18}
D_6	P_b concentration (cm^{-3})	5×10^{16}
T_p	Poly gate concentration (cm^{-3})	1×10^{21}
G_{ox}	Gate oxide thickness (μm)	0.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Result and discussion

B. Simulation result.

Figure 2 illustrates results in the forward blocking mode. All of NPT-IGBT structures showed blocking capability for high voltage as verified by Sentaurus Devices. In comparison, it was found that the device could sustain reverse bias voltage of up to 2020V for the NPT-TIGBT with P_b compared with 1600 V for the conventional NPT-TIGBT.

The highest electric field under trench gate area was reduced with P_f layer. Figure 3 shows the 3D electric field distribution around the trench gate of NPT-TIGBT with P_b and NPT-TIGBT with P_f structures with reverse bias voltage of 1000 V at V_{CE} . The maximal electric field of 2.4×10^5 V/cm for the NPT-TIGBT with P_b layer was significantly lower than the electric field of 2.9×10^5 V/cm for the NPT-TIGBT with P_f . This decreasing of electrical field was a result from the reduction of field crowding under the trench gate region. Moreover, NPT-TIGBT with P_b structure had the peak electric field crowding locating around P_b layer instead of directly at the bottom of trench gate area.

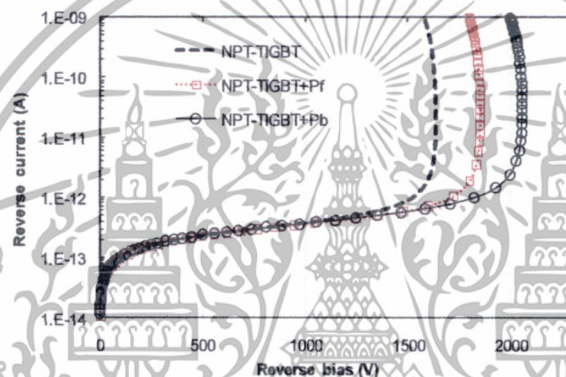


Fig.2. The IV characteristic of C-NPT-TIGBT, NPT-TIGBT with P_f and NPT-TIGBT with P_b structure during reverse biasing condition.

From figure 2, the NPT-TIGBT with P_b shows the highest breakdown voltage. With P_b layer at varying depth from the bottom of trench gate, the breakdown changed as shown in Figure 4. The peak breakdown voltage (2020 V) occurred at the P_b layer depth of $1.75 \mu\text{m}$. This phenomena can be explained with the distribution of electric field (solid line) surrounding the P_b layer as shown in Figure 5. It shows that with P_b right at the bottom of trench gate, the electric field tends to concentrate only around the corners of the trench gate.

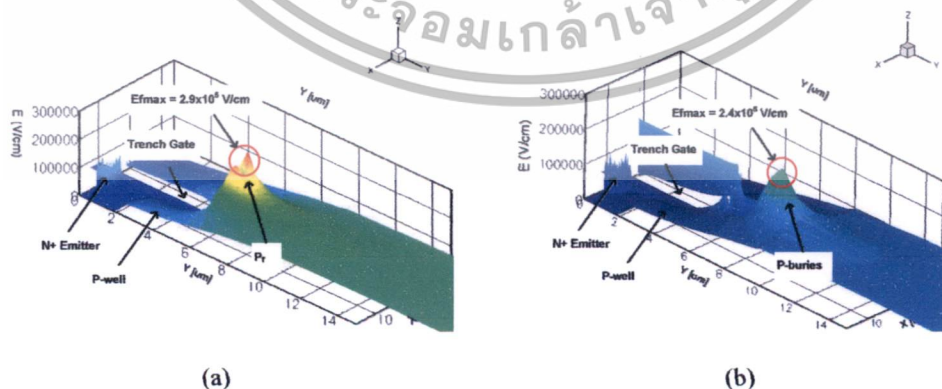


Fig. 3. The 3D-E-Field distributions at biasing voltage = 1000 V (a) NPT-TIGBT with P_f structure, (b) NPT-TIGBT with P_b structure.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

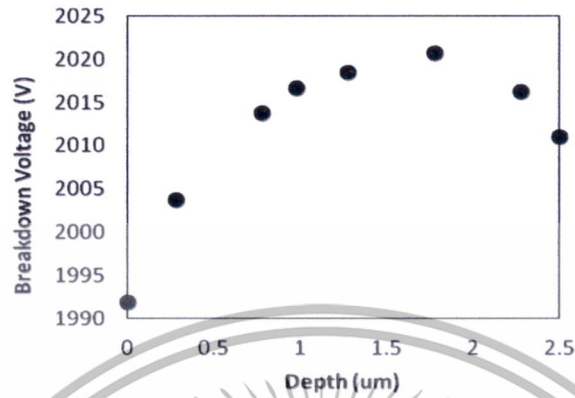


Fig. 4. The relationship between depth of P_b layer and breakdown voltage of NPT-TIGBT.

However, as the P_b layer was moved further down, the electric field distribution also moved further down toward the P_b layer as well. As a result, the electric field concentration around the trench gate will be lower and hence decreasing the chance of breakdown for a given voltage.

However, adding further depth (2.25 and 2.50 μm) caused the electric field concentration to become lower around the P_b layer. This, in turn, increased the electric field concentration around the trench gate, and hence higher opportunity for breaking down at lower voltage.

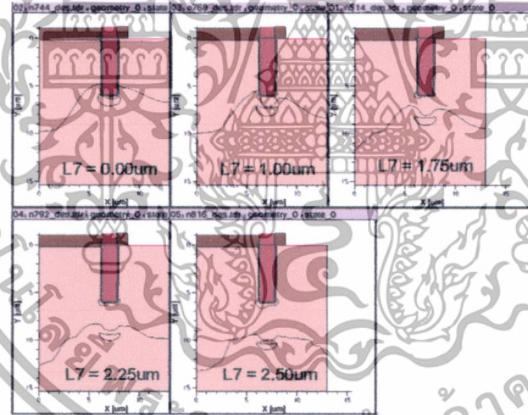


Fig. 5. The electric field distribution at various depths of P_b layer with $V_{cc} = 1000 \text{ V}$.

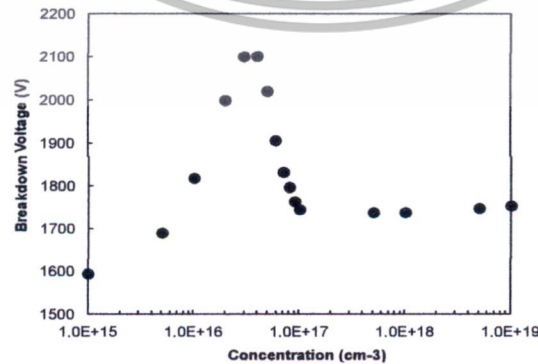


Fig. 6. The relationship between breakdown voltage and doping concentration of the buried P_b layer.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Figure 6 shows the relationship between the breakdown voltage and doping concentration of the P_b layer. As the concentration was increased from $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, the breakdown voltage also increased with the peak value of 2100 V between 3×10^{16} to $4 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$.

The distribution of electric field (solid line) at different doping concentrations is shown in figure 7. At low P_b doping level ($1 \times 10^{15} - 1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$), there existed high electric field concentration only at the corners of trench gate. Whereas the doping concentration between 5×10^{16} and $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ produced high electric field concentration at both trench gate and the P_b layer. From figure 6 and 7, it was discovered that the doping concentration of $3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ offered the highest breakdown voltage of 2100 V. However, at higher doping concentration, the electric field only concentrated around the P_b layer. As a result, the device could withstand only lower level of applied voltage.

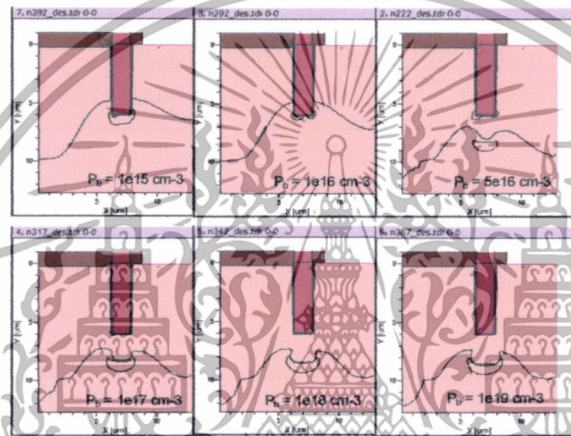


Fig. 7. The electric field distribution at different P_b layer doping concentration for $V_{cc} = 1000 \text{ V}$.

In forward mode, the IV characteristics were studied by V_{cc} from 0 V to 5 V with V_g at 10 V. Figure 8 shows the relationship between collector current (I_c) and collector voltage (V_c). At higher doping concentration, P_b layer could also cause a JFET effect.

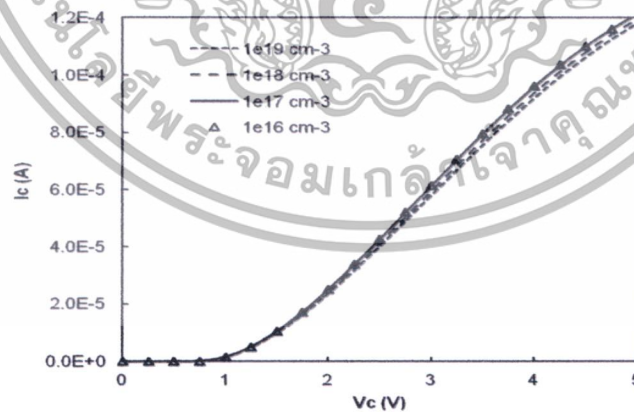


Fig. 8. The IV characteristic of NPT-TIGBT at different P_b layer doping concentration with $V_g = 10 \text{ V}$ during forward bias.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Summary

The simulation showed that putting the P_b layer under trench gate of NPT-TIGBT could relieve electric field concentration around the bottom of trench gate. This was a result from the reduction of field crowding under the trench gate region. In comparison with the conventional structure, the breakdown voltage increased by 30 % from 1602 V to 2100 V. The location and doping concentration of the buried P_b layer could also affect the breakdown voltage. The highest breakdown voltage was 2100 V at 1.75 μm with doping concentration of $3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$.

References

- [1] L. Lorenz, "Power Semiconductor Devices-Development Trends and System Interactions," *Proceeding of Power Conversion Conference (PCC'07)*, pp. 348-354, Apr. 2007.
- [2] B.J. Baliga, *Power Semiconductor Devices*, 1st ed, PWS, 1996.
- [3] Florin Udrea, Gehan Amaratunga, "The Trench Insulated Gate Bipolar Transistor a High Power Switching Device," *Proceedings of MIEL '95*, Vol. 1, pp. 369-374, Sep. 1995.
- [4] Marina Antoniou, Florin Udrea, Friedhelm Bauer, Iulian Nistor, "The Semi-Superjunction IGBT," *IEEE ELECTRON DEVICE LETTERS*, Vol. 31, No. 6, pp. 591-593, Jun. 2010.
- [5] Jae In Lee, Jongcha Choi, Young-seok Bae, Man Young Sung, "A Novel Trench IGBT with Rectangular Oxide beneath the Trench Gate," *ASQED 2009*, pp. 370-373, Jul. 2009.
- [6] Sinsu Kyoung, Jong-Seok Lee, Sang-Hyeon Kwak, Ey-Goo Kang, Man Young Sung, "A Novel Trench IGBT With a Deep P+ Layer Beneath the Trench Emitter," *IEEE ELECTRON DEVICE LETTERS*, Vol. 30, No. 1, pp. 82-84, Jan. 2009.
- [7] Lee J S, Shin H H, "The effect of a shielding layer on breakdown voltage in trench gate IGBT, " *ICPE'07*, pp. 62-65, Oct. 2007.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน	นางสาวอมรรัตน์ เกิดประดิษฐ์
เกิดเมื่อ	วันที่ 16 กันยายน พ.ศ.2533
ภูมิลำเนา	จังหวัดกรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	ปี พ.ศ.2554 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรฟิสิกส์ประยุกต์ สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] อมรรัตน์ เกิดประดิษฐ์ มนตรี แสนละมุล อัมพร โพธิ์ไย และ วิสุทธิ์ จิตรุ่งเรือง “คุณสมบัติที่เหมาะสมของชั้นฝังชนิดที่ต่อการทำงานแรงดันพังทลายของไอจีบีทีชนิดเกตแบบซุด” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 35 (EECON 35), หน้า 751-754
- [2] Phasapon Manosukritkul , Amonrat Kerdpardist ,Montree Saenlamool , Ekalak Chaowicharat ,Amporn Poyai , Wisut Titiroongruang “An Improvement of the Breakdown Voltage Characteristics of NPT-TIGBT by Using a P-buried Layer” Advanced Materials Research Vol. 717 (2013) pp 158-163

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้