

รายงานการวิจัย

ชั้นเอ็น - บัฟเฟอร์กับคุณสมบัติทางไฟฟ้าของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกทเป็นฉนวน

N - Buffer layer with device Characteristics of Insulated Gate Bipolar Transistor

คณะผู้วิจัย

1. รศ.ดร. สมเกียรติ สุขเดชา

2. อาจารย์ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ

3. นาย เกียรติชัย มากเกษม

สถานที่ทำการวิจัย

ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ได้รับทุนสนับสนุนจาก

RCH

TK

7871-96

B55

๙๖๖๖๖

งบประมาณหมวดเงินอุดหนุนการวิจัย

ประจำปี 2539

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน... 28194

วัน, เดือน, ปี ๒๙ ก.ค. 2540

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สถาบันฯ อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชั้นเอ็นบัฟเฟอร์กับคุณสมบัติทางไฟฟ้าของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกตเป็นฉนวน

N-Buffer layer with Device Characteristics of Insulated Gate Bipolar Transistor

บทคัดย่อ

อุปกรณ์กำลังที่เรียกว่า Insulated gate Bipolar Transistor : IGBT หรือ ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกตเป็นฉนวน ถูกนำมาใช้งานด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ดีโดยรวมเอาข้อดีของอุปกรณ์กำลังชนิดไบโพลาร์และมอสเฟตกำลังเข้าด้วยกัน

ในรายงานฉบับนี้ได้กล่าวถึงผลการศึกษาผลของชั้น N-buffer ใน IGBT ซึ่งชั้น N-buffer จะถูกสร้างขึ้นมาติดกับขั้วของคอลเลกเตอร์และมีความหนาแน่นอะตอมสารเจือสูงกว่าในชั้น N-base จากการทดลองพบว่า IGBT ซึ่งมีชั้น N-base จะให้คุณสมบัติที่ดีสามารถทนแรงดันพังทลายได้สูงขึ้น 37เปอร์เซ็นต์ และค่าของช่วงเวลาตัดกระแสจะมีค่าน้อยลงราว 36 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ IGBT ที่มีชั้น N-buffer เหมาะที่จะนำไปใช้ในงานวงจรไฟฟ้ากระแสตรงและวงจรสวิตชิงได้ดี

Abstract

Insulated Gate Bipolar Transistor or IGBT is widely used as a power device in power electronics application because it combines the most important advantages of power bipolar device and power MOS device.

In this report the effects of N-Buffer layer in the IGBT structure is presented. The design and fabrication of IGBT with and without N- Buffer layer are described, the experiments and experimental results are also reported and compared. It is evident that the breakdown voltage of IGBT with N- Buffer layer is increased about 37% while the turn of time is reduced 36%. So the IGBT with N- Buffer layer is good for DC circuits and switching circuits applications.

1. บทนำ

ในปัจจุบันนี้สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำมีบทบาทเป็นอย่างยิ่งต่องานด้านไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ และสำหรับงานด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลัง (Power electronics) สารกึ่งตัวนำประเภทกำลัง (Power devices) ถือเป็นอุปกรณ์สำคัญและถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวาง โดยปกติทั่ว ๆ ไป อุปกรณ์กำลังที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายได้แก่ ทรานซิสเตอร์กำลังแบบไบโพลาร์ (Bipolar Power Transistor) และอีกชนิดหนึ่งก็คือ ทรานซิสเตอร์กำลังแบบมอสเฟต (Power MOS FET) แต่เนื่องจากอุปกรณ์ทั้งสองชนิดนี้ต่างก็มีข้อจำกัดด้านคุณสมบัติที่แตกต่างกัน เช่น ทรานซิสเตอร์กำลังแบบไบโพลาร์ แม้จะทำงานได้ดีทนแรงดันพังทลายได้สูง มีอัตราการขยายกระแสสูง แต่คุณสมบัติการตอบสนองต่อความถี่สูงก็ไม่ดีนัก นอกจากนี้ยังมีอัตราการสูญเสียสภาพความนำในสภาวะนำกระแสต่ำอีกด้วย ส่วนทรานซิสเตอร์กำลังแบบมอสเฟต สามารถทำงานที่ความถี่สูงได้ดีกว่าแบบไบโพลาร์ แต่อัตราการสูญเสียสภาพความนำในสภาวะนำกระแสต่ำก็ยังมีค่าสูงเช่นเดียวกัน ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาตัวทรานซิสเตอร์ชนิดใหม่ที่จะช่วยแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นดังกล่าวนี้ อุปกรณ์ชนิดใหม่ได้แก่ ไบโพลาร์ ทรานซิสเตอร์ชนิดที่มีเกตเป็นฉนวน (Insulate Gate Bipolar Transistor : IGBT) ซึ่งอุปกรณ์ชนิดนี้ได้รวมเอาข้อดีของทรานซิสเตอร์กำลังทั้งชนิดไบโพลาร์และชนิดมอสเฟตเข้าด้วยกันทำให้ได้ อุปกรณ์ที่มีคุณสมบัติที่ดี มีประโยชน์และนำไปใช้งานได้อย่างกว้างขวางและมีประสิทธิภาพ และใช้แทนอุปกรณ์กำลังแบบเก่าได้เป็นอย่างดี ได้มีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบ กระบวนการสร้าง IGBT มาโดยลำดับโดยการศึกษาความสามารถในการในกระแส ความต้านทานในสภาวะนำกระแส ความสามารถในการทนแรงดันพังทลาย ปรากฏการณ์ แลท-ฮัพ ความเร็วในการสวิทชิงค์ และศึกษาและวิจัยถึงผลกระทบอื่น ๆ ที่มีต่อคุณสมบัติ ซึ่คความสามารถและประสิทธิภาพในการทำงานของ IGBT

สำหรับในรายงานฉบับนี้จะกล่าวถึง ผลการศึกษาและการวิจัย ผลของชั้นเอ็นบีพีเฟอร์ที่มีต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกตเป็นฉนวน โดยผลการทดลองที่ได้ จะเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาและพัฒนาโครงสร้างของ IGBT ให้มีคุณสมบัติและประสิทธิภาพที่ดียิ่ง ๆ ขึ้นไป

2. ทฤษฎีและการทำงานของ IGBT

2.1 ลักษณะโครงสร้างของ IGBT

ลักษณะโครงสร้างของ IGBT อาจจัดแบ่งเป็น 2 ลักษณะ คือ

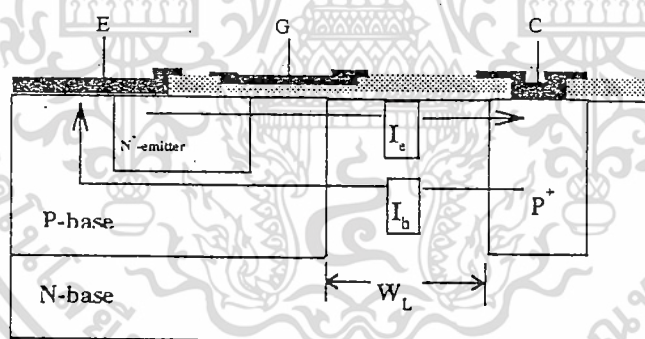
ก. IGBT แบบแนวระนาบ

ข. IGBT แบบแนวตั้ง

ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

IGBT แบบแนวระนาบ (Planar IGBT)

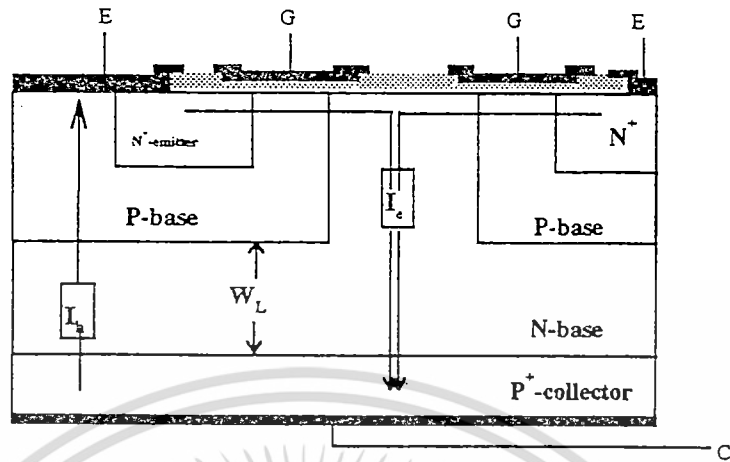
ลักษณะโครงสร้าง IGBT แบบ นี้จะประกอบไปด้วยชั้นของสารกึ่งตัวนำ 4 ชั้น คือ $N^+ - P - N - P^+$ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 แต่ละชั้นเหล่านี้ถูกสร้างขึ้นด้วยกระบวนการแพร่สารเจือด้วยความร้อน โดยเริ่มจากแผ่นผลึกซิลิกอน ชนิด N ระนาบ (100) จากนั้นทำการแพร่อะตอมสารเจือชนิด P^+ เข้าไปเพื่อสร้างส่วน P^+ -Collector แล้วจึงทำการสร้างส่วน P-base และ N^+ -emitter ต่อมาตามลำดับ



รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะโครงสร้างของ IGBT แนวระนาบ

IGBT แบบแนวตั้ง (Vertical IGBT)

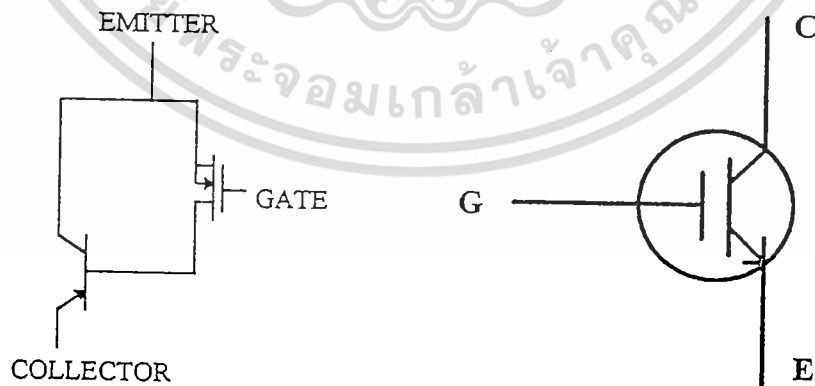
ลักษณะโครงสร้างของ IGBT แบบแนวตั้งแสดงดังในรูปที่ 2.2 ซึ่งเริ่มจากแผ่นผลึกซิลิกอน ชนิด P^+ และมีชั้นอิพิทชนิด N ระนาบ (100) ทั้งสองส่วนนี้จะทำหน้าที่เป็น N-base และ P^+ -collector จากนั้นส่วน P-base และ N^+ -emitter จะถูกสร้างขึ้นโดยการแพร่อะตอมเจือด้วยความร้อน



รูปที่ 2.2 ลักษณะโครงสร้างของ IGBT แบบแนวตั้ง

2.2 วงจรสมมูล และสัญลักษณ์

วงจรสมมูลและสัญลักษณ์ของ IGBT แสดงได้ดังในรูปที่ 2.3 ซึ่งประกอบด้วยขั้ว emitter, collector และ gate ดังในรูป

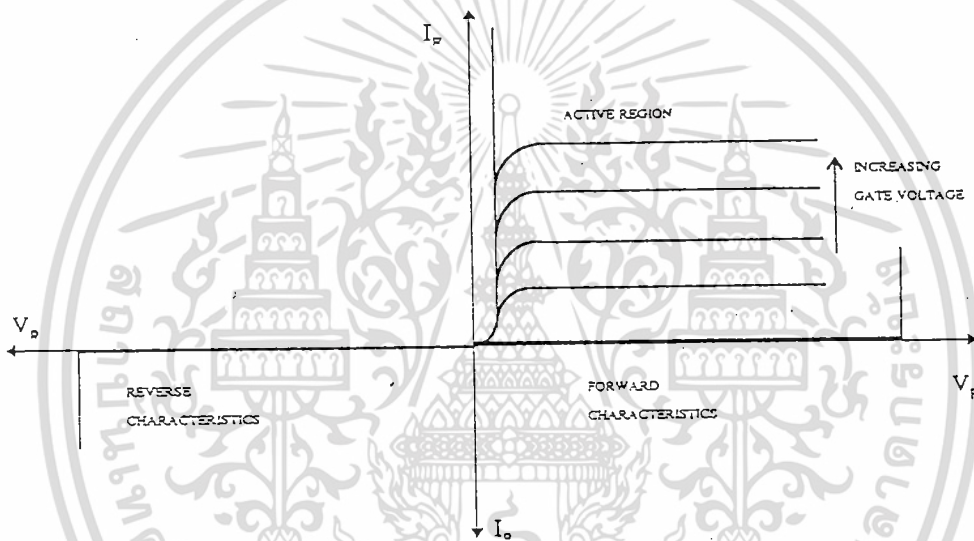


รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะวงจรสมมูลและสัญลักษณ์ของ IGBT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้เกิดขึ้นก็มีขีดจำกัด ทั้งนี้เนื่องจากเกิดศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมช่องทางเดินกระแส ส่งผลให้กระแสไปหน้า (forward current) มีค่าคงที่ที่ค่าหนึ่ง ดังแสดงใน รูปที่ 2.4

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



รูปที่ 2.4 คุณสมบัติของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของ IGBT

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

2.4 การวิเคราะห์การทำงาน

เนื่องจากอุปกรณ์ IGBT เป็นอุปกรณ์ที่เกิดจากการรวมโครงสร้างเกตแบบมอสเฟตเข้ากับการนำกระแสแบบไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ ดังนั้นในการวิเคราะห์การทำงานของ IGBT จึงต้อง

พิจารณาในลักษณะที่แตกต่างไปจากอุปกรณ์กำลังโดยทั่วไปและที่สำคัญก็คือจะพิจารณาเฉพาะในกรณีที่ไม่เกิดโครงสร้างแฝงแบบทรานซิสเตอร์เท่านั้น

2.4.1 ความสามารถในการปิดกั้นย้อนกลับ

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

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

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

โดยที่

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

2.4.2 ความสามารถในการปิดกั้นตรง

การทำงานของ IGBT ในสภาวะปิดกั้นตรง เกิดได้โดยการให้แรงดันไบอัสค่าบวกที่ขั้วคอลเลกเตอร์ทำให้รอยต่อระหว่าง N-base กับ P-base อยู่ในสถานะถูกไบอัสย้อนกลับ ในขณะที่เดียวกันก็ลึดวงจรระหว่างขั้วอิมิตเตอร์เข้ากับเกทเพื่อป้องกันการเกิดช่องทางเดินกระแสขึ้นที่ผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลกเตอร์กับแรงดันคอลเลกเตอร์-อิมิตเตอร์ โดยอาศัยแบบจำลอง P-i-N เรกติไฟเออร์/มอสเฟต ทำให้โดยอาศัยภาพตัดขวางและวงจรมูลตั้งรูปที่ 2.5 (ก.) และ (ข.) ตามลำดับ โดยแสดงให้เห็นถึงมอสเฟตกำลังที่ต่ออนุกรมกับ P-i-N เรกติไฟเออร์ ซึ่งจากรูปที่ 2.5 (ข.) จะเห็นได้ว่าแรงดันตกคร่อมอุปกรณ์จะเท่ากับ

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

โดยที่ V_F คือ แรงดันตกคร่อมตัว IGBT

$V_{F,MOS}$ คือ แรงดันตกคร่อมส่วนที่เป็นโครงสร้างมอสเฟตใน IGBT

$V_{F,PIN}$ คือ แรงดันตกคร่อมส่วนที่เป็นโครงสร้าง P-i-N เรกติไฟเออร์ใน IGBT

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

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

โดยที่

$$F\left(\frac{d}{L_a}\right) = \frac{\left[\left(\frac{d}{L_a}\right) \tanh\left(\frac{d}{L_a}\right)\right]}{\sqrt{1 - \frac{1}{4} \tanh^2\left(\frac{d}{L_a}\right)}} e^{-\left(\frac{qV_M}{kT}\right)} \quad (2.4)$$

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

N_i คือ ระดับความหนาแน่นอะตอมสารเจืออินทรินซิก (cm^{-3})

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

L_a คือ ระยะการแพร่ (Diffusion length) (μm)

k คือ ค่าคงที่ของโบสมันต์ (J/K)

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

W คือความกว้างของช่องทางเดินกระแส (μm)

W_R คือ ความยาวของเซลล์เชิงเส้น (μm)

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

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

สำหรับในส่วนมอสเฟตสามารถที่จะหาปริมาณกระแสที่ไหลผ่านช่องทางเดินกระแสได้ เช่นเดียวกับในมอสเฟตโดยทั่วไป คือ

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

เมื่อ L คือ ความยาวของช่องทางเดินกระแส (μm)

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

V_G คือ แรงดันที่ขั้วเกต (V)

V_T คือ แรงขีดเริ่ม (V) [3]

C_{ox} คือ ค่าความเก็บประจุที่ออกไซด์ (pF)

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

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

ดังนั้นจะได้แรงดันตกคร่อมส่วนที่เป็นมอสเฟตดังสมการ

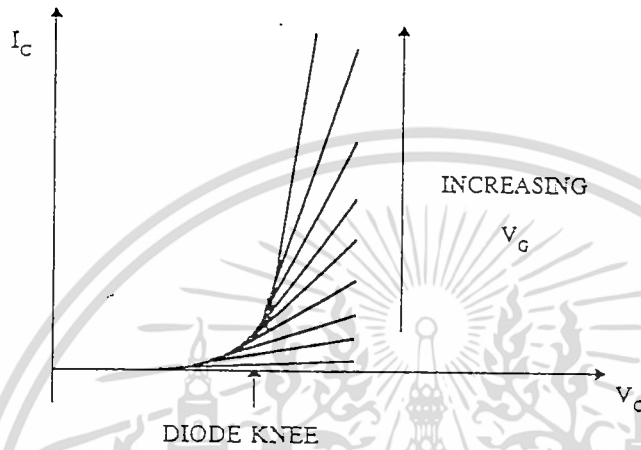
$$V_{F,MOS} = \frac{I_C L}{\mu_n C_{ox} W (V_G - V_T)} \quad (2.9)$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

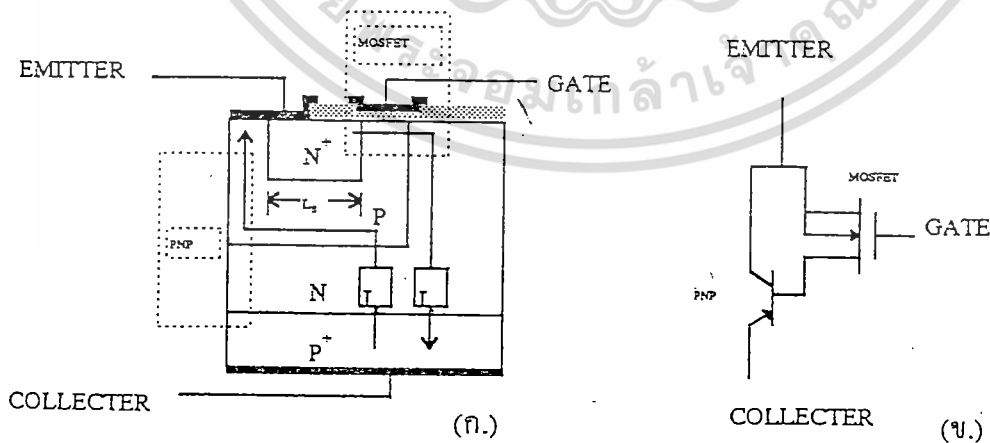
ซึ่งจากสมการที่ (2.10) เราสามารถที่จะใช้อธิบายคุณสมบัติของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์กับแรงดันคอลเลคเตอร์-อิมิตเตอร์ในช่วงเชิงเส้นได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 2.6 คุณสมบัติการนำกระแสไปหน้าของ IGBT ในช่วงเชิงเส้น

2.4.3.2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์และแรงดันคอลเลคเตอร์-อิมิตเตอร์ในช่วงอิมิตต์ โดยใช้แบบจำลองมอสเฟต/ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์

ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลคเตอร์กับแรงดันคอลเลคเตอร์-อิมิตเตอร์ โดยอาศัยแบบจำลอง ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์/มอสเฟต ทำได้โดยอาศัยวงจรดัง รูปที่ 2.7 (ข) และ ภาพตัดขวางดัง รูปที่ 2.7 (ก) ซึ่งประกอบด้วยไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ P-N-P ที่มีเบสกว้าง (width base P-N-P bipolar transistor) ซึ่งถูกขับโดยมอสเฟตที่ต่อกันแบบ Darlington



รูปที่ 2.7 (ก) ภาพตัดขวาง IGBT ที่แสดงแบบจำลองแบบมอสเฟต/ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์

(ข) วงจรสมมูลของแบบจำลองแบบมอสเฟต/ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยจากวงจรสมมูลจะเห็นได้ว่า

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

และ

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

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

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

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

เมื่อ W_N คือความกว้างของ N-base บริเวณไม่ปลดปล่อยพาหะ (Undepletion base width) และ L_a คือ ambipolar diffusion length ซึ่งความกว้างของชั้น N-base บริเวณที่ไม่ปลดปล่อยพาหะจะมีค่าใกล้เคียงกับความหนาของชั้น N-base ทั้งนี้เนื่องจากความกว้างบริเวณปลดปล่อยพาหะมีน้อยมากในสภาวะนำกระแสไปหน้า

ในการคำนวณหากระแสอิเล็กตรอนที่ไหลผ่านช่องทางเดินกระแสในช่วงอิมิตต์สามารถพิจารณาได้เช่นเดียวกับกรณีของมอสเฟตกำลังโดยทั่วไป คือ

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

ดังนั้นจากสมการที่ (2.13) และ (2.15) เราสามารถคำนวณหากระแสคอลเลกเตอร์ในสภาวะอิมิตต์ได้จากสมการ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการจะเห็นได้ว่ากระแสคอลเลกเตอร์จะขึ้นอยู่กับอัตราขยายกระแสของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ P-N-P ที่มีเบสกว้าง

2.5 แลทซ์-อัฟ (Latch-up)

ปรากฏการณ์ แลทซ์-อัฟ ในโครงสร้าง IGBT เกิดขึ้นจากการเกิดโครงสร้างแฝงสี่ชั้นแบบ ไทริสเตอร์ขึ้นในโครงสร้าง IGBT ทำให้ไม่สามารถควบคุมการไหลของกระแสได้ โดยการควบคุมแรงดันไบอัสที่เกต หมายความว่ากระแสอิเล็กตรอนจะไหลผ่านจากอิมิตเตอร์ไปคอลเลกเตอร์ได้ โดยผ่านจาก N^- -emitter \rightarrow P-base \rightarrow N-base \rightarrow P⁺-collector ตามแนวตั้ง (ดูได้จากโครงสร้างที่แสดงในรูปที่ 2.7 ก) และสามารถส่งผลให้เกิดความเสียหายกับอุปกรณ์

แลทซ์-อัฟจะเกิดขึ้นเมื่อความหนาแน่นกระแสไปหน้ามีค่ามากกว่าค่าหนึ่งที่ทำให้อุปกรณ์แสดงโครงสร้างแฝงของไทริสเตอร์ขึ้นมา ดังนั้นจึงไม่สามารถวิเคราะห์การทำงานของ IGBT โดยใช้สมมติฐานอย่างที่ผ่านมาได้. อย่างไรก็ตามในการวิเคราะห์ปรากฏการณ์การเกิดแลทซ์-อัฟ สามารถวิเคราะห์ได้ว่าเกิดจากผลของกระแสโฮล I_h ที่เคลื่อนที่ผ่านทางด้านใต้ของบริเวณ N^- -emitter เป็นระยะทาง L_E ดังแสดงในรูปที่ 2.๗ (ก.) ซึ่งจะส่งผลให้แรงดันตกคร่อมบริเวณรอยต่อ N^- -emitter กับ P-base มีค่าสูงขึ้น โดยแรงดันตกคร่อมบริเวณดังกล่าว (V_A) สามารถหาได้จากสมการ

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

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

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

ดังนั้นการที่ทรานซิสเตอร์ N-P-N ที่แฝงในโครงสร้างของ IGBT ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ; ทำงาน และเกิดเป็นปรากฏการณ์แลทซ์-อัฟ ซึ่งจะต้องสอดคล้องกับเงื่อนไขของสมการ

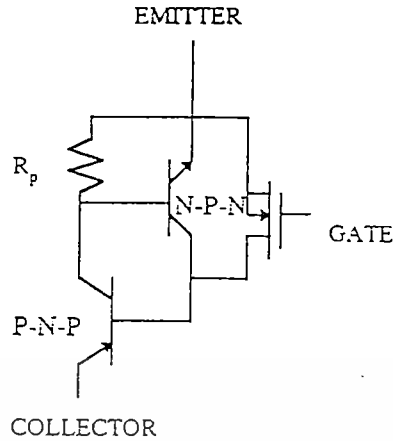
$$\alpha_{NPN} + \alpha_{PNP} = 1 \quad (2.19)$$

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

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

จากสมการที่ (2.20) จะเห็นได้ว่าความต้านทานในชั้น P-base และอัตราขยายกระแสของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ P-N-P จะมีผลโดยตรงต่อกระแสแลทซ์-อัฟ

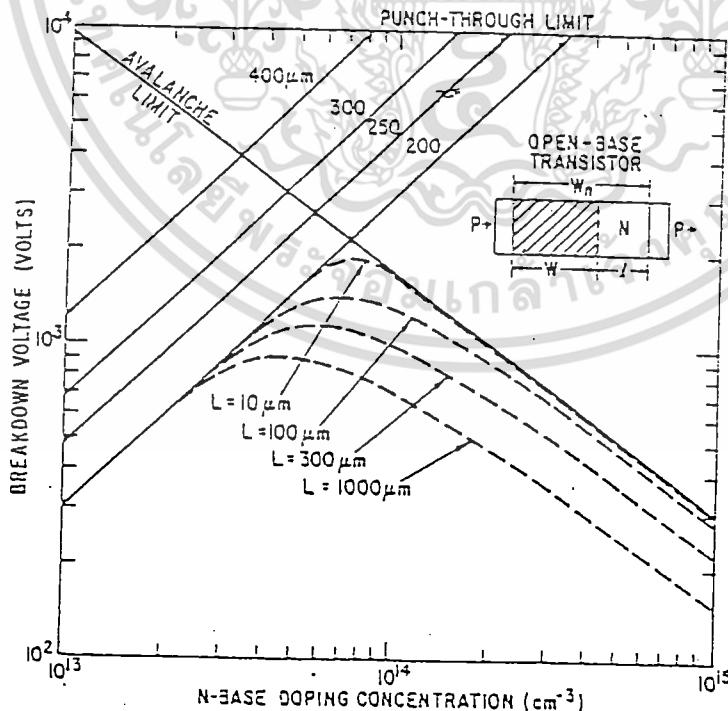
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 วงจรสมมูลของ IGBT ที่แสดงทรานซิสเตอร์ N-P-N แฉง และต่ำทรานซิสเตอร์นี้ทำงาน จะทำให้เกิดปรากฏการณ์แลทซ์-ออฟ เมื่อ $V_{Rp} = 0.7 \text{ V}$

2.6 แรงดันพังทลายของทรานซิสเตอร์แบบเบสเปิด (open-base Transistor Breakdown)

ในโครงสร้างของอุปกรณ์กำลังส่วนใหญ่มักจะพบรอยต่อพี-เอ็นที่ต่อกันแบบ back-to-back ที่แฉงอยู่ในโครงสร้างของอุปกรณ์กำลังเสมอทำให้ความสามารถในการทนแรงดันสูงสุดของ อุปกรณ์ถูกจำกัดโดยแรงดันพังทลายของทรานซิสเตอร์แบบเบสเปิดที่แฉงอยู่ในโครงสร้างของ อุปกรณ์กำลัง ซึ่งผลของแรงดันพังทลายดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับความต้านทานและระยะห่างระหว่าง รอยต่อพี-เอ็นในอุปกรณ์แต่ละตัว



รูปที่ 2.9 แรงดันพังทลายของโครงสร้างทรานซิสเตอร์แบบเบสเปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.9 แสดงถึงลักษณะของโครงสร้างทรานซิสเตอร์แบบเบสเปิดที่มีรอยต่อพี-เอ็น รอยต่อหนึ่งถูกไบอัสย้อนกลับ ซึ่งรอยต่อดังกล่าวเปรียบเทียบกับรอยต่อของคอลเลกเตอร์กับ รอยต่อของอิมิตเตอร์ในอุปกรณ์ IGBT เมื่อความกว้างของชั้น N-base มีค่ามากกว่าความกว้าง ของบริเวณปลอดประจุของรอยต่อคอลเลกเตอร์ที่ถูกไบอัสย้อนกลับ แรงดันพังทลายของรอยต่อ คอลเลกเตอร์จะถูกจำกัดโดยแรงดันพังทลายแบบอะวาลานซ์ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันพัง ทลายแบบอะวาลานซ์กับความต้านทานในชั้น N-base แสดงได้ดังรูปที่ 2.9 โดยจะเห็นได้ว่าแรง ดันพังทลายแบบอะวาลานซ์จะลดลงเมื่อระดับอะตอมสารเจือในชั้น N-base เพิ่มขึ้น

ในกรณีที่ N-base มีระยะแคบๆ แรงดันพังทลายของทรานซิสเตอร์แบบ เบสเปิด จะเกิด ขึ้นจากการฉีดอิเล็กตรอนจากอิมิตเตอร์เหมือนกับว่าชั้นปลอดประจุพาหะของคอลเลกเตอร์แพร่เข้าไป เกือบถึงรอยต่อของอิมิตเตอร์ แต่ในกรณีที่ระยะการแพร่ของประจุพาหะส่วนน้อยในชั้น N-base มีค่าน้อยมาก แรงดันพังทลายของคอลเลกเตอร์จะเกิดเมื่อเกิดทะลุถึงกันของบริเวณปลอดประจุ พาหะ ซึ่งในกรณีนี้แรงดันพังทลายของรอยต่อแบบ abrupt สามารถหาได้จากสมการ

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

เมื่อ N_D คือ ระดับอะตอมสารเจือในชั้น N-base

W_N คือ ความกว้างของบริเวณไม่ปลอดประจุพาหะในชั้น N-base

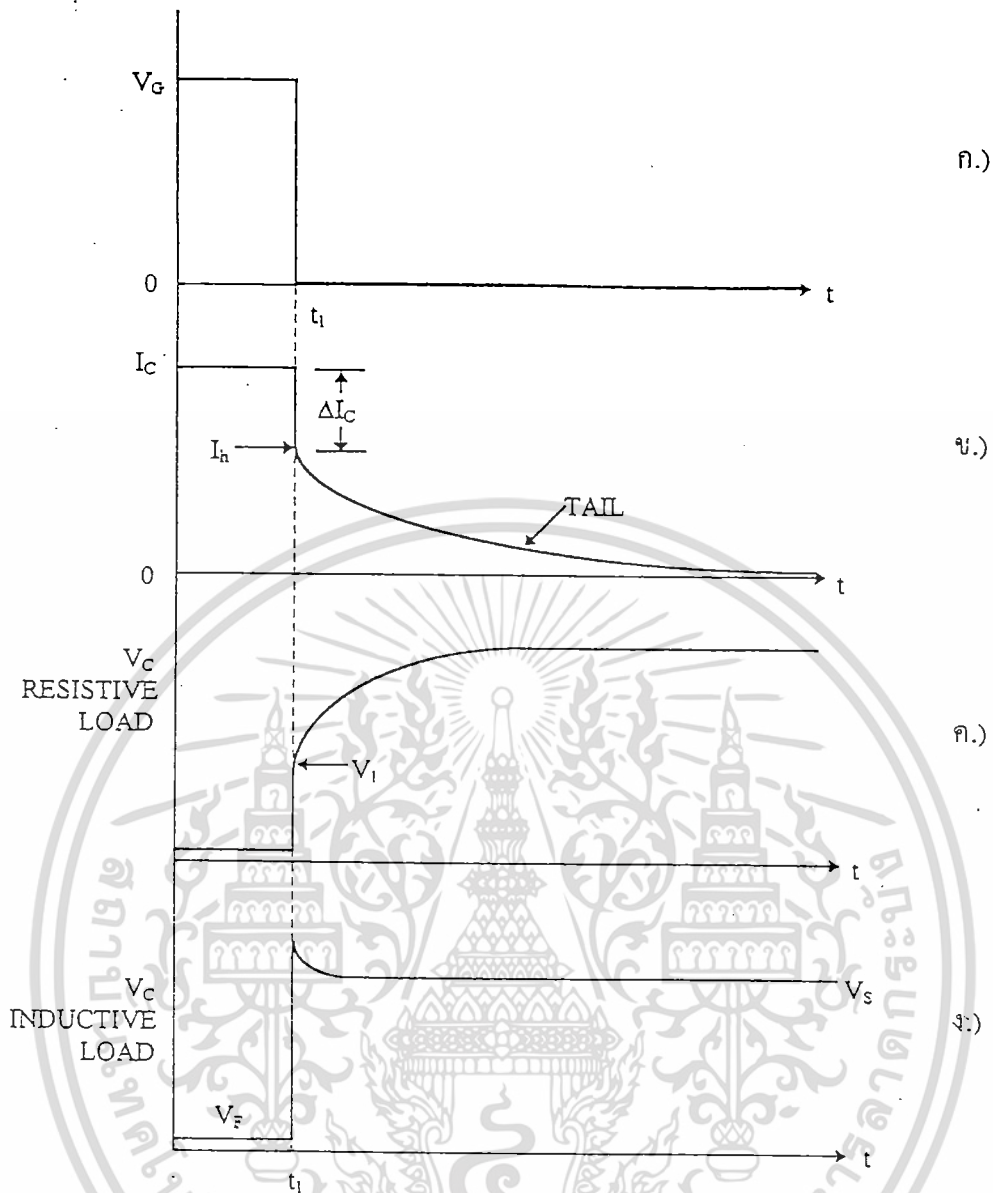
สำหรับกรณีที่ความกว้างของ N-base ที่มีค่ามาก แรงดันพังทลายแบบพังทลายจะลดลงเมื่อ เพิ่มความต้านทานในชั้น N-base ดังแสดงในรูปที่ 2.9

อย่างไรก็ตามแรงดันพังทลายของอุปกรณ์อาจจะถูกจำกัดโดยแรงดันพังทลายแบบอะวา ลานซ์ (avalanch) หรือพังทลาย (punch-through) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความกว้างและความต้านทานของ ชั้น N-base ซึ่งในทางปฏิบัติระดับสูงสุดของแรงดันพังทลายไม่สามารถกำหนดได้โดยจุดตัด ระหว่างขีดจำกัดของแรงดันพังทลายแบบอะวาลานซ์กับพังทลายดังแสดงใน รูปที่ 2.9 เนื่องจากขีด จำกัดของระยะการแพร่ของประจุพาหะส่วนน้อยในชั้น N-base ซึ่งจะเกิดเมื่อผลรวมของ ตัว ประกอบการคูณ (multiplication factor) และ base transport factor (α_T) มีค่าเท่ากับหนึ่ง ดังนั้นจึง สามารถหาค่า base transport factor ได้จาก

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

โดยที่ l คือความกว้างของบริเวณปลอดประจุพาหะในชั้น N-base และ L_p คือระยะการ แพร่ของโฮล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



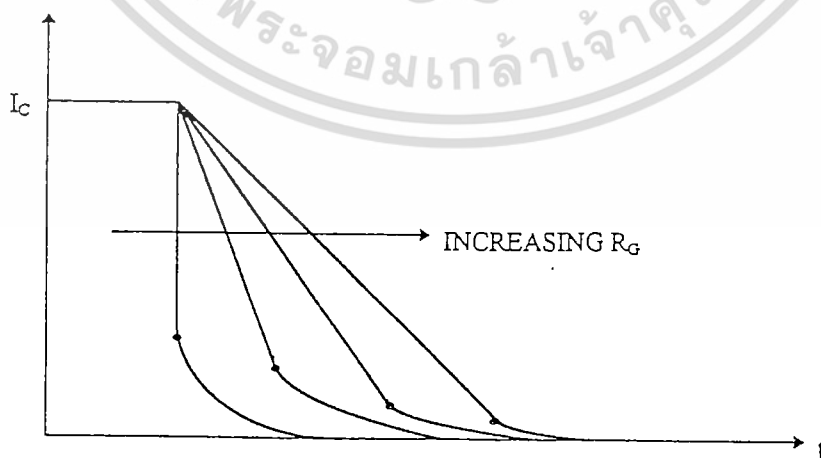
ก.)

ข.)

ค.)

ง.)

รูปที่ 2.10 กราฟรูปคลื่นของการตัดกระแสด้วยการควบคุมแรงดันที่เกทใน IGBT



รูปที่ 2.11 กราฟรูปคลื่นของช่วงเวลาตัดกระแสที่ค่าความต้านทานที่เกทต่างกัน

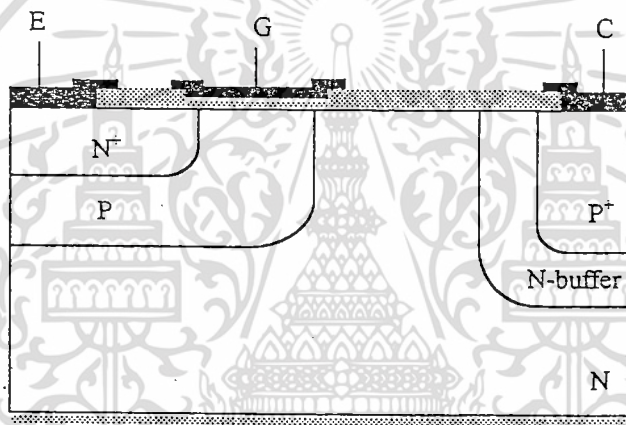
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การออกแบบและกระบวนการสร้าง IGBT ซึ่งมีชั้น N-Buffer

N-Buffer

3.1 การออกแบบ

สำหรับโครงสร้างของ IGBT แบบแนวระนาบและมีชั้น N-Buffer แสดงได้ดังในรูปที่ 3.1 โดยชั้นของ P⁺-Collector จะอยู่ภายใน N- Buffer ส่วนของ N- Buffer จะมีความหนาแน่นของอะตอมเจือประมาณ $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ และส่วนของ N-Buffer จะมีขนาดกว้างกว่าชั้นของ P⁺-Collector ข้างละ 10 ไมครอน



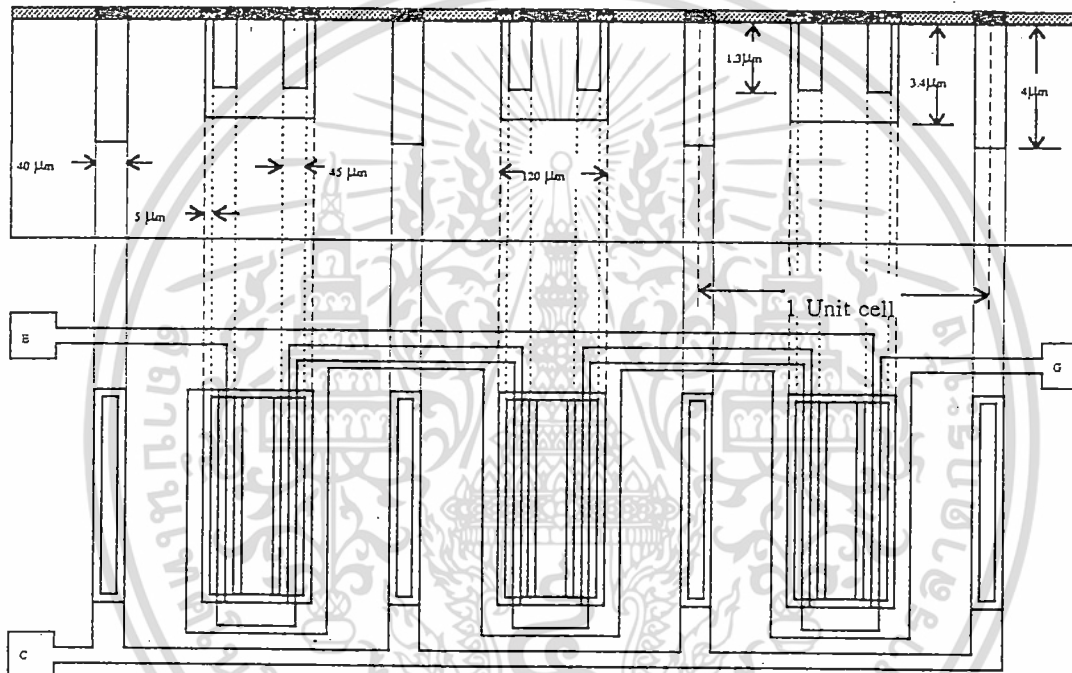
รูปที่ 3.1 แสดงลักษณะภาคตัดขวางของโครงสร้าง IGBT ซึ่งมีชั้น N-Buffer

กระจกต้นแบบที่ใช้สำหรับการสร้าง IGBT ที่มีชั้น N- Buffer ประกอบด้วยลวดลายของชั้นต่างๆ จำนวนทั้งสิ้น 7 แผ่น ดังนี้

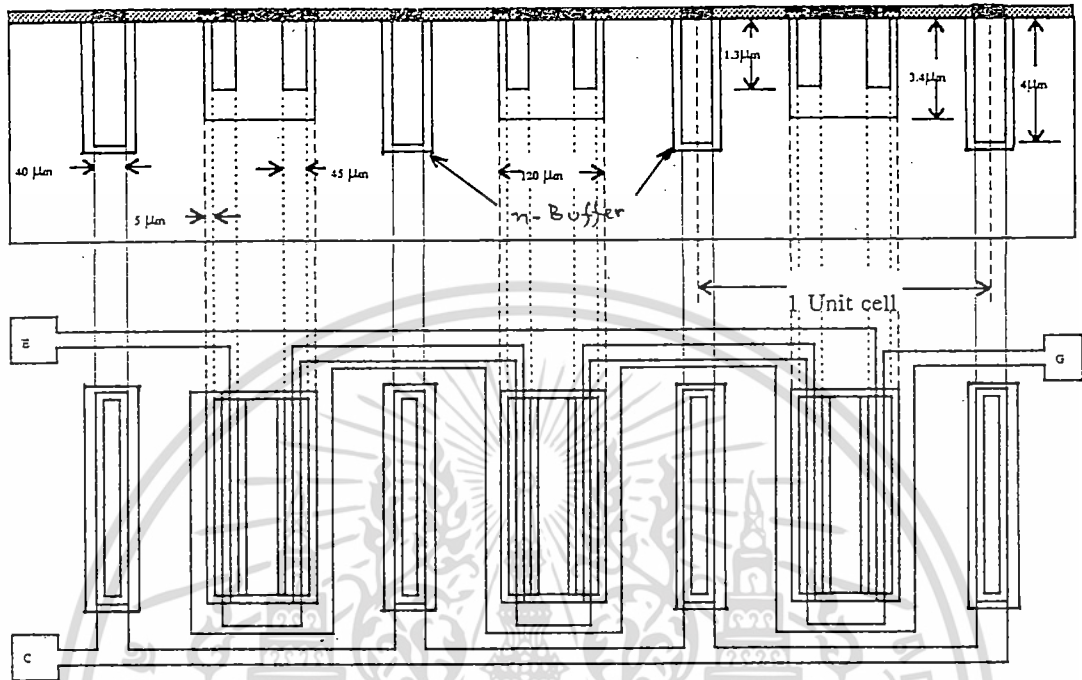
1. N-Buffer mask คือ กระจกต้นแบบแผ่นที่ 1 สำหรับการสร้างส่วน N-Buffer
2. P⁺ - Collector P⁺ -Sinker mask คือ กระจกต้นแบบแผ่นที่ 2 สำหรับการสร้างส่วน P⁺ -Collector และ P⁺ Sinker
3. P-base mask คือ กระจกต้นแบบแผ่นที่ 3 สำหรับการสร้างส่วน P-base
4. N⁺ -emitter mask คือกระจกต้นแบบแผ่นที่ 4 สำหรับการสร้างส่วน N⁺ -emitter
5. Gate mask คือ กระจกต้นแบบแผ่นที่ 5 สำหรับการสร้างส่วน Gate oxide
6. Contact mask คือ กระจกต้นแบบแผ่นที่ 6 สำหรับการสร้างส่วน Contact window
7. Metal mask คือ กระจกต้นแบบแผ่นที่ 7 สำหรับการสร้างส่วน Metal contact

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะโครงสร้างของ IGBT แบบแนวระนาบ และภาพพลวดลายของกระจกคืนแบบที่ใช้ในการสร้างแสดงดังในรูปที่ 3.2 และ 3.3 โดยที่ รูป 3.2 เป็น โครงสร้างของ IGBT แบบธรรมดา และรูปที่ 3.2 เป็น โครงสร้าง IGBT แบบที่มี N-Buffer



รูปที่ 3.2 แสดง โครงสร้างและพลวดลายของกระจกคืนแบบสำหรับสร้าง IGBT แบบธรรมดา

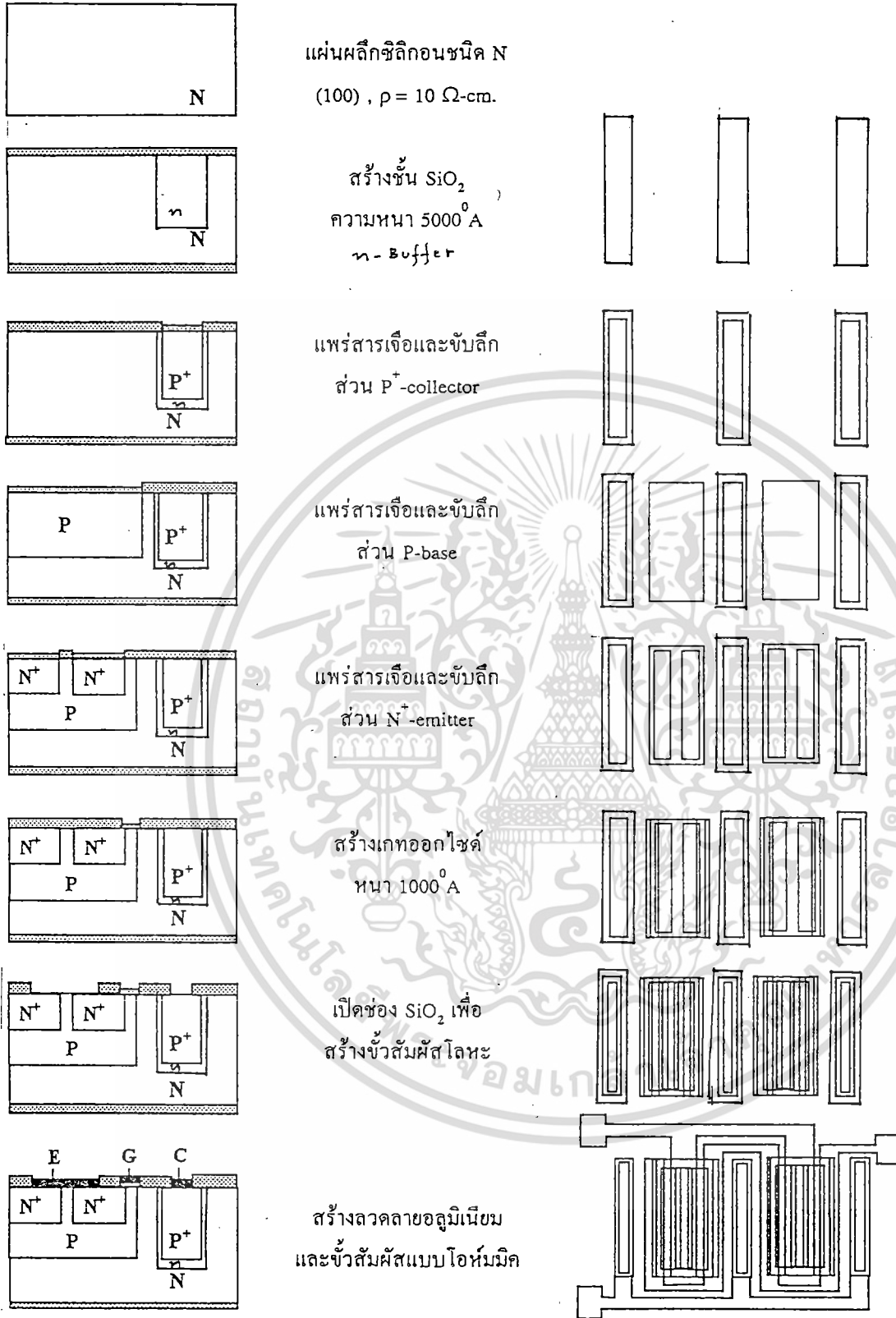


รูปที่ 3.3 แสดง โครงสร้างและขนาดของกระจกต้นแบบสำหรับสร้าง IGBT แบบที่มีชั้น N-Buffer

3.2 กระบวนการสร้าง

สำหรับการสร้าง IGBT ซึ่งมีชั้น N-Buffer สามารถทำได้โดยการเริ่มจากผลึกซิลิกอนชนิด N ระบาย (100) มีค่าความต้านทานจำเพาะ = 10 โอห์ม - ซม. สร้างชั้นออกไซด์ ด้วยกระบวนการ Oxidation ได้ความหนา ของ SiO_2 ประมาณ 5000 Å ใช้กระจกต้นแบบแผ่นที่ 1 ทำการ Photo etching แล้วแพร่อะตอมสารเจือ ชนิด n เพื่อสร้างส่วน n-Buffer โดยมีความหนาแน่นของชั้น N-Buffer ประมาณ $1.07 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ จากนั้นสร้างส่วน P^+ Collector โดยใช้ P^+ -collector mask โดยได้ความหนาแน่นของส่วน P^+ เท่ากับ $4.53 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ แล้วจึงสร้างส่วน p-base ด้วย P-base mask ได้ความหนาแน่นเท่ากับ $1.65 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ จากนั้นทำการสร้างส่วน n^+ -emitter ด้วยการ ใช้ n^+ -emitter mask และแพร่อะตอมฟอสฟอรัส ได้ความหนาแน่นเท่ากับ $2.57 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ใช้ Gate oxide ได้ความหนาของเกตเท่ากับ 1000 Å แล้วเปิด Contact ของส่วนต่างๆออกโดยใช้ Contact mask นำไปทำการ Metallization ด้วยการสร้างชั้นอะลูมิเนียมโดยวิธี Vacuum evaporation และ ชั้นตอนสุดท้ายทำลวดลายอะลูมิเนียมด้วย Metal mask ลำดับขั้นตอนต่างๆของกระบวนการสร้าง ดังกล่าวนี้แสดงได้ดังในรูปที่ 3.4

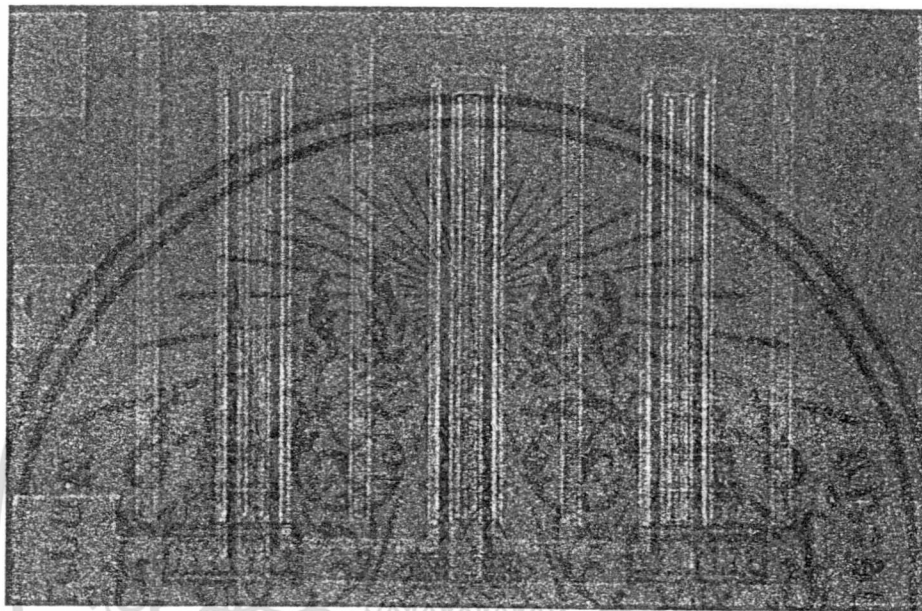
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 แสดงลำดับขั้นตอนของกระบวนการสร้าง IGBT ที่มีชั้น N-Buffer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพถ่ายด้านบนของ IGBT ที่สร้างขึ้น แสดงได้ดังในรูปที่ 3.5



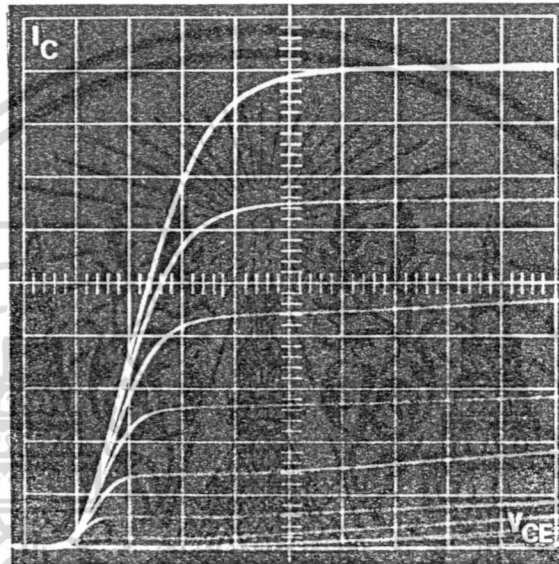
รูปที่ 3.5 แสดงภาพถ่ายด้านบนของ IGBT ที่สร้างเสร็จสมบูรณ์ ชั้น N-base=120 μ m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

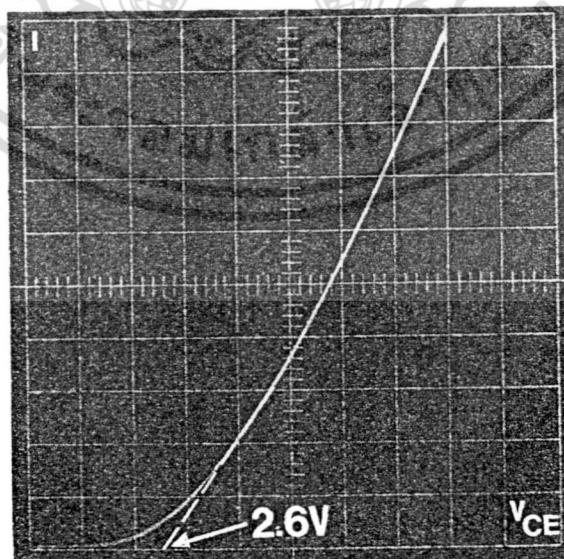
4. การทดลองและผลการทดลอง

4.1 คุณสมบัติทั่วไปของ IGBT

ทำการทดลองวัดคุณสมบัติของ IGBT ที่สร้างขึ้น โดยวัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลกเตอร์ กับแรงดันคอลเลกเตอร์-อิมิตเตอร์ โดยใช้ Curve Tracer ทำการทดลองวัดหาค่าแรงดันขีตเริ่ม (V_T) ทำการวัดหาค่ากระแสรั่ว และวัดค่าแรงดันปิดกั้นไปหน้าของ IGBT ผลการทดลองแสดงดังในรูปที่ 4.1, 4.2, 4.3, และ 4.4 ตามลำดับ

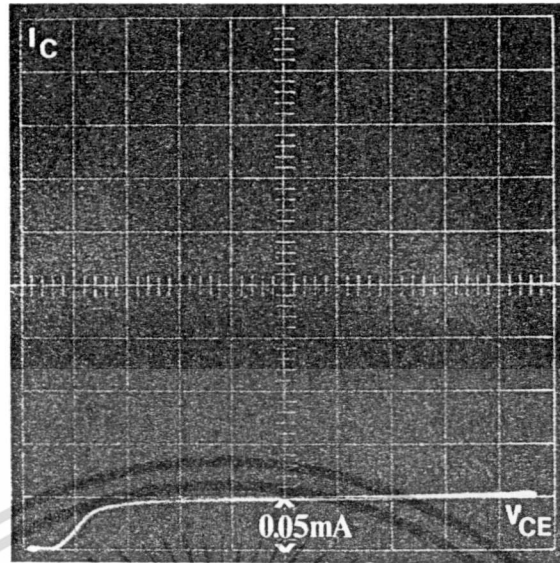


รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคอลเลกเตอร์กับแรงดันคอลเลกเตอร์-อิมิตเตอร์
(0.5V/step, 9step, Ver:5mA/Div., Hor:1V/Div.)

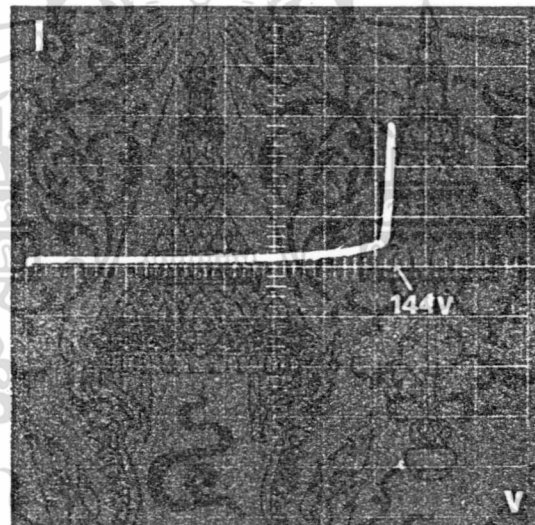


รูปที่ 4.2 แรงดันขีตเริ่ม V_T (Ver:5mA/Div., Hor:1V/Div.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 กระแสรั่วไหล (Ver:0.05mA/Div.,Hor:1V/Div.)



รูปที่ 4.4 แรงดันปิดกั้นไปหน้า (Ver:5mA/Div.,Hor:20V/Div.)

4.2 ผลของชั้น N-Buffer ที่มีต่อค่าแรงดันปิดกั้นไปข้างหน้า

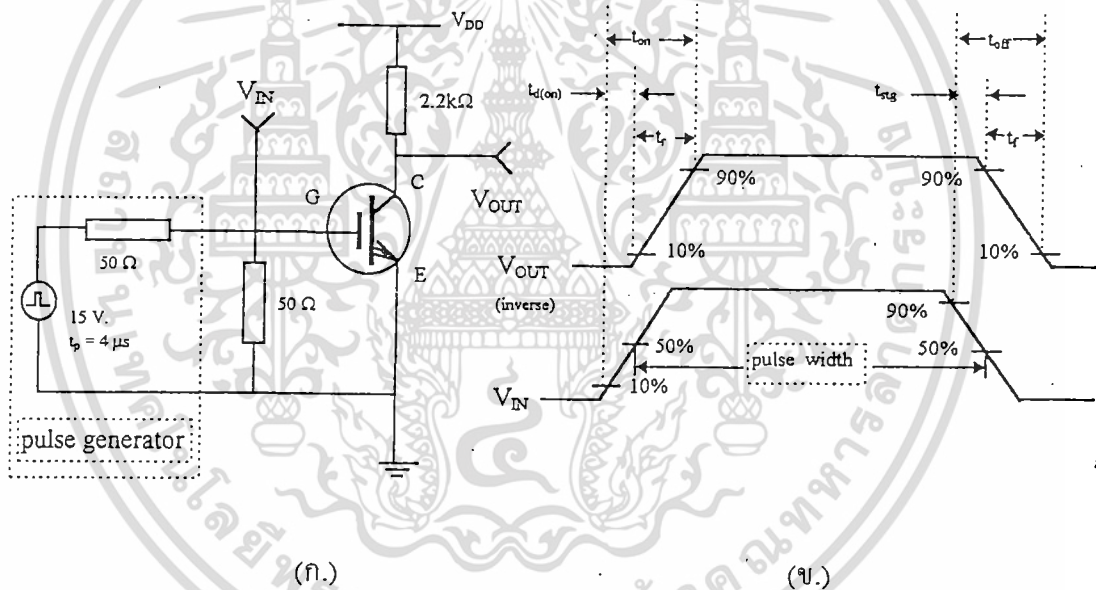
จากการวัดและเปรียบเทียบคุณสมบัติ ค่าแรงดันปิดกั้นไปข้างหน้า ระหว่าง IGBT แบบ แนวระนาบที่ไม่มีชั้น N-Buffer กับ IGBT ซึ่งมีชั้น N-Buffer จากผลการทดลองจะพบว่า ในกรณีที่มีค่าความกว้างของชั้น N-base ที่เท่ากับค่าของแรงดันปิดกั้นไปข้างหน้าของโครงสร้างที่มี ชั้น N-Buffer มีค่าเท่ากับ 185 โวลต์ แต่สำหรับโครงสร้างที่ไม่มีชั้น N-Buffer ค่าแรงดันปิดกั้นไปข้างหน้ามีค่าเท่ากับ 135 โวลต์ ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า โครงสร้างแบบที่มีชั้น N-Buffer จะมีความสามารถในการปิดกั้นไปหน้าที่สูงกว่าจึงเหมาะที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านวงจรไฟฟ้า กระแสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลของชั้น N-Buffer ที่มีต่อช่วงเวลาตัดกระแส

ช่วงเวลาตัดกระแส นับได้ว่าเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งสำหรับอุปกรณ์กำลัง เช่น IGBT ทั้งนี้เนื่องจากความเร็วในการสวิตชิง ของ IGBT นั้น จะมีค่ามากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับช่วงเวลาตัดกระแสเป็นสำคัญ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาถึงผลของชั้น N-Buffer ในโครงสร้างของ IGBT แบบแวนเดอราบ ที่มีต่อคุณสมบัติของช่วงเวลาตัดกระแสของ IGBT โดยทำการออกแบบและสร้าง IGBT โดยทำการออกแบบและสร้าง IGBT 2 ชุด ซึ่งมีลักษณะทางโครงสร้างอื่นๆ ที่เหมือนกันทุกประการ แต่ชุดหนึ่งมีชั้น N-Buffer แล้วนำคุณสมบัติและผลการวัดการทดลองมาวิเคราะห์และเปรียบเทียบ ซึ่งจะได้กล่าวถึงต่อไป

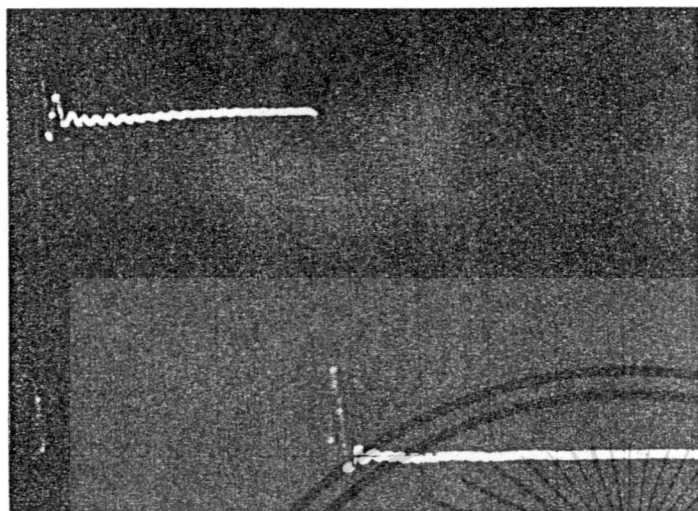
โดยการนำเอา IGBT ที่สร้างเสร็จสมบูรณ์มาทำการวัดคุณสมบัติในการตอบสนองต่อความถี่ โดยการป้อนสัญญาณแรงดันรูปคลื่นสี่เหลี่ยม ดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 (ก.) วงจรวัดการตอบสนองสัญญาณไฟฟ้ารูปสี่เหลี่ยม
(ข.) สัญญาณไฟฟ้ารูปสี่เหลี่ยมที่ใช้วัดค่า t_r , t_f , $t_{d(on)}$, t_{stg}

เพื่อพิจารณาผลของช่วงเวลาตัดกระแส เปรียบเทียบแบบผลการทดลองที่ได้จาก IGBT ซึ่งมีโครงสร้างที่มี N-Buffer และ ไม่มี N-Buffer จะได้ผลการทดลอง ลักษณะของสัญญาณที่ด้านเอาต์พุตดังในรูปที่ 4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

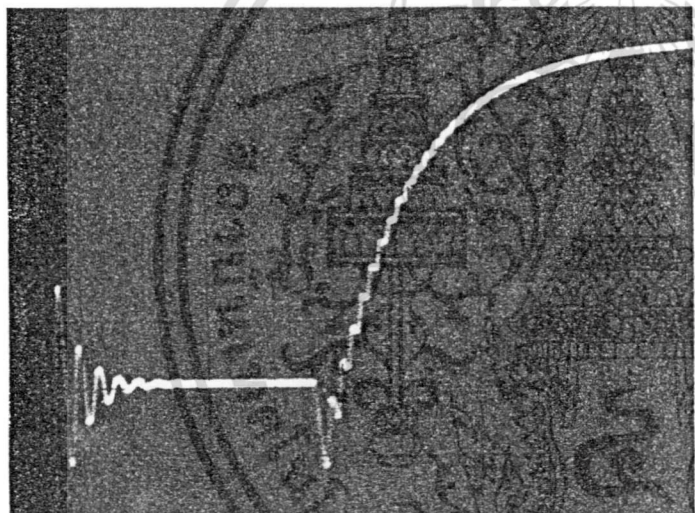


(ก.) INPUT

duty cycle = 2 %

pulse width = 0.4 μ s

(Ver:1V/div,Hor:0.1 μ s/div)

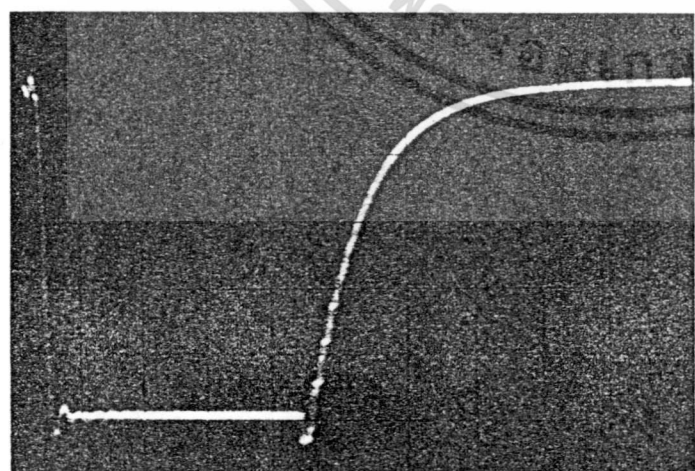


(ข.) OUTPUT

โครงสร้างแบบสมมาตร

$t_f = 0.28 \mu$ s

(Ver:1V/div,Hor:0.1 μ s/div)



(ค.) OUTPUT

โครงสร้างแบบไม่สมมาตร

$t_f = 0.18 \mu$ s

(Ver:1V/div,Hor:0.1 μ s/div)

รูปที่ 4.6 ผลการตอบสนองของสัญญาณไฟฟ้ารูปสี่เหลี่ยมของอุปกรณ์ IGBT อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองซึ่งแสดงในรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าช่วงเวลาตัดกระแสของอุปกรณ์ IGBT ซึ่งมีชั้น N-Buffer จะมีช่วงเวลาตัดกระแสเท่ากับ $0.18 \mu\text{s}$ สำหรับ IGBT ซึ่งไม่มีชั้น N-Buffer จะมีช่วงเวลาตัดกระแสเท่ากับ $0.28 \mu\text{s}$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. สรุปผลการทดลองและวิจารณ์

จากการออกแบบและสร้าง IGBT ขึ้นมาโดยกระบวนการแพร่อะตอม สารเจือด้วยความร้อน ในห้องปฏิบัติการโซลิดสเตทของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พบว่าสามารถได้อุปกรณ์กำลังที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมนำไปใช้งานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังได้ดีกว่า อุปกรณ์กำลังแบบ ไบโพลาร์ หรือ แบบ MOSFET

และจากการทดลองศึกษาผลเกี่ยวกับชั้น N-Buffer ใน IGBT พบว่า ชั้นของ N-Buffer จะทำให้ IGBT สามารถทนแรงดันพังทะลายได้สูง ทำให้ค่าแรงดันปิดกั้นไปหน้ามีค่าสูงมากกว่า IGBT ที่ไม่มีชั้น N-Buffer ถึง 37 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจึงเหมาะที่จะนำไปใช้งานในวงจรไฟฟ้ากระแสตรง

นอกจากนี้จากการทดลองวัดค่าช่วงเวลาตัดกระแสพบว่าโครงสร้าง IGBT ที่มีชั้น N-Buffer จะมีค่าน้อยกว่าแบบที่ไม่มีชั้น N-Buffer ถึง 36 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวนี้ อาจพิจารณาได้ว่าเป็นผลอันเนื่องมาจากชั้น N-Buffer ที่ถูกสร้างขึ้นมาติดกับขั้วคอลเลกเตอร์ โดยมีความหนาแน่นอะตอมสารเจือสูงกว่าในชั้น N-base จึงทำให้โอกาสที่ประจุพาหะส่วนน้อย หรือก็คือ โสลที่ถูกฉีดออกมาจากชั้นคอลเลกเตอร์จะเกิดมีการรวมตัวกับอิเล็กตรอนในชั้น N-buffer อย่างมาก ส่งผลให้ปริมาณพาหะส่วนน้อยที่ถูกฉีดเข้าไปถึงชั้น N-base มีค่าน้อย ดังนั้นช่วงเวลาที่ใช้ในการรวมตัวของประจุพาหะส่วนน้อย หลังจากตัดแรงดันที่ขั้วเกทจึงมีค่าน้อยตามไปด้วย ดังนั้นอุปกรณ์ IGBT ซึ่งมีชั้น N-buffer จึงมีคุณสมบัติในการสวิตชิ่งสูง หรือก็คือ มีความเร็วในการทำงานสูงขึ้น

ผลที่ได้จากการทดลองดังกล่าวนี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์เป็นข้อมูลในการพิจารณาศึกษาและพัฒนาคุณสมบัติของ IGBT ให้ดียิ่งขึ้นได้อีกด้วย

6 เอกสารอ้างอิง

1) พอพล รุจนพิชญ์, สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, ผศ.วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง, และ รศ.ดร.สมเกียรติ ศุภเดช, "การสร้างไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกทเป็นฉนวน", ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 15, พ.ศ.2535

2) พอพล รุจนพิชญ์, สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, ผศ.วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรืองและรศ.ดร.สมเกียรติ ศุภเดช, "ความกว้างของ N-base ที่มีผลต่อความสามารถในการนำกระแสของ IGBT", ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 17, พ.ศ.2537

3) พอพล รุจนพิชญ์, สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, ผศ.วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง,และรศ.ดร.สมเกียรติ ศุภเดช, "การออกแบบและสร้างมอสเฟตกำลังแบบวีมอส", ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 14, พ.ศ.2534

4) B.J. Baliga, "Analysis of Insulated Gate Transistor Turn-off Characteristics", IEEE Electron Device Letters, Vol. EDL-6, No.2, p 74-77

5) ผศ.สมเกียรติ ศุภเดช, ปฏิบัติการเทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำ, วารสารอิเล็กทรอนิกส์ เวิลด์, พ.ศ. 2525

6) Deva N. Pattanayak, A. L. Robinson, T. Paul Chow, Michael S. Adler, B. Jayant Baliga, and Eric J. Wildi, "n-Channel Lateral Insulated Gate Transistors : Part I - Steady-State Characteristics", IEEE Transection on Electron Devices, Vol. ED-33, No. 12, p 1956-1963

7) B. J. Baliga, M. S. Adler, P. V. Gray, and R. P. Love, "Supressing Latch-up in Insulated Gate Transistors", IEE Electron Device Letters, Vol. EDL-5, No.8, p 323-325

8) ภควัต สรวายสุวรรณ, พอพล รุจนพิชญ์, สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, ผศ.วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง, และ รศ.ดร.สมเกียรติ ศุภเดช, "การพิจารณาการออกแบบดีมอสทนแรงดันสูงด้วยฟิลด์ริงค์และฟิลด์เพลต", ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 16, พ.ศ.2536, หน้า 389-393

9) A. L. Robinson, Deva N. Pattanayak, Michael S. Adler, B. Jayant Baliga, and Eric J. Wildi, " Lateral Insulated Gate Trasistors with Improved Latching Characteristics", IEE Electron Device Letters, Vol. EDL-7, No.2, p 16-63

10) ภควัต สรวายสุวรรณ, พอพล รุจนพิชญ์, สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, ผศ.วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง,

และ รศ.ดร.สมเกียรติ ศุภเดช, "การพัฒนาดีมอสให้มีความทนแรงดันพังทลายสูง", ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 16, พ.ศ.2536 , หน้า 385-388

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับว่าผิดเห็นไปเซบระยะไซชนด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม ขอสงวนสิทธิ์ในสิ่งที่ปรากฏ และขอสงวนสิทธิ์ในชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้