

การผลิตและการศึกษาลักษณะสมบัติกระแสตรงของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์โครงสร้าง
ระนาบชนิดหัวต่อต่างชนิดคู่ของ GaAlAs/GaAs โดยการแพร่ซึมสังกะสี

นางสาว ยุพาวดี ตีลธิรพีพัฒน์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2543

ISBN 974-346-764-5

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**FABRICATION AND STUDY ON THE DC CHARACTERISTIC OF ZINC
DOPED PLANAR GaAlAs/GaAs DOUBLE HETEROJUNCTION BIPOLAR
TRANSISTOR**

Miss Yuparwadee Deesirapipat

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering**

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2000

ISBN 974-346-764-5

ยิวาดี ดีศิริพิพัฒน์ : การผลิตและการศึกษาลักษณะสมบัติกระแสตรงของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์โครงสร้างระนาบชนิดหัวต่อต่างชนิดคู่ของ GaAlAs/GaAs โดยการแพร่ซึมสังกะสี (FABRICATION AND STUDY ON THE DC CHARACTERISTIC OF ZINC DOPED PLANAR GaAlAs/GaAs DOUBLE HETEROJUNCTION BIPOLAR TRANSISTOR)

อ.ที่ปรึกษา : รศ.ดร. ชุมพล อัครเสน , 91 หน้า. ISBN 974-346-764-5

วิทยานิพนธ์นี้ได้เสนอวิธีการผลิตไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์โครงสร้างระนาบชนิดหัวต่อต่างชนิดซึ่งใช้ GaAlAs/GaAs ทั้งที่หัวต่ออิมิตเตอร์-เบส และหัวต่อคอลเล็กเตอร์-เบส ในการนี้ชั้นผลึกคอลเล็กเตอร์ ชั้นผลึกเบส ชั้นผลึกอิมิตเตอร์ ชั้นผลึกผิวสัมผัสอิมิตเตอร์ พร้อมด้วยชั้นผลึกหนา 6 ไมครอนของชั้นหน้ากาก $Ga_{0.6}Al_{0.4}As$ ที่ไม่มีการเจือสารถูกปลูกอย่างต่อเนื่องกันตามลำดับด้วยวิธีเอพิแทกซิสสถานะของเหลวลงบนแวนผลึก GaAs(n^+) หลังจากนั้นชั้นผลึกหน้ากากบริเวณที่กำหนดให้เป็นขั้วโลหะเบสจะถูกกัดออกด้วยสารเคมี เพื่อเป็นพื้นที่สำหรับแพร่ซึมสารเจือ โดยนำกลับเข้าสู่เตาปลูกผลึกอีกครั้ง เพื่อปลูกชั้นผลึกของ $Ga_{0.6}Al_{0.4}As$ ที่เจือด้วยสังกะสี สังกะสีจะแพร่เข้าสู่ชั้นเบสในขณะที่ปลูกผลึก หลังจากขั้นตอนนี้ ชั้น $Ga_{0.6}Al_{0.4}As$ ของชั้นแพร่ซึมและของชั้นหน้ากากจะถูกกัดออกหมดด้วย HF ก่อนนำไปสร้างผิวสัมผัสโอห์มมิกของอิมิตเตอร์ คอลเล็กเตอร์ และเบส ตามลำดับ จากนั้นทรานซิสเตอร์จะถูกทดสอบความสามารถในการทำงาน ซึ่งพบว่าสามารถทำงานได้ทั้งในโหมดปกติ และในโหมดกลับทาง โดยอัตราขยายกระแสในทั้งสองโหมดนั้นมีความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์หลายตัว ได้แก่ ความเข้มข้นของสารเจือปนในชั้นต่างๆ รวมทั้งปริมาณอลูมิเนียมในชั้นอิมิตเตอร์และคอลเล็กเตอร์ รวมถึงความลาดของหัวต่ออิมิตเตอร์-เบส และหัวต่อคอลเล็กเตอร์-เบส และจากผลการคำนวณทางทฤษฎีและวิเคราะห์ผลการทดลองสรุปว่า ค่าอัตราขยายกระแสในโหมดปกติจะมีค่าเพิ่มขึ้นก็ต่อเมื่อเพิ่มสัดส่วนของอลูมิเนียมในชั้นอิมิตเตอร์หรือลดสัดส่วนของอลูมิเนียมในชั้นคอลเล็กเตอร์ ส่วนค่าอัตราขยายกระแสในโหมดกลับทางจะมีค่าเพิ่มขึ้นก็ต่อเมื่อลดสัดส่วนของอลูมิเนียมในชั้นอิมิตเตอร์ หรือเพิ่มสัดส่วนของอลูมิเนียมในชั้นคอลเล็กเตอร์ อย่างไรก็ตามจะต้องคำนึงถึงความลาดของหัวต่อทั้งสอง โดยถ้าความลาดของหัวต่อลดลง จะส่งผลเสียแก่อัตราขยายกระแสทั้งโหมดปกติและโหมดกลับทาง นอกจากนี้ยังศึกษาเพื่อหาโครงสร้างที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดความสมมาตรระหว่างหัวต่ออิมิตเตอร์-เบส และหัวต่อคอลเล็กเตอร์-เบส ท้ายสุดได้เสนอแบบจำลองวงจรสมมูลของโครงสร้างที่ได้ออกแบบไว้

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....
ปีการศึกษา.....2543.....

ลายมือชื่อนิสิต.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4170469421 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD : DOUBLE HETEROJUNCTION BIPOLAR TRANSISTOR (DHBТ), LIQUID PHASE EPITAXY (LPE), NORMAL MODE GAIN, INVERTED MODE GAIN, ZINC DIFFUSION, PLANAR STRUCTURE

YUPARWADEE DEESIRAPIPAT : FABRICATION AND STUDY ON THE DC CHARACTERISTIC OF ZINC DOPED PLANAR GaAlAs/GaAs DOUBLE HETEROJUNCTION BIPOLAR TRANSISTOR.

THESIS ADVISOR : Assoc. Prof. CHOOMPOL ANTARASENA, Dr.Ing.

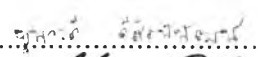
ISBN 974-346-764-5


Double heterojunction bipolar transistors have been designed using GaAlAs and GaAs with planar structure. Five layers of collector, base, emitter, emitter contact and mask layer, a 6- μm non-doped $\text{Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As}$ layer, have been grown consecutively by liquid phase epitaxy on GaAs (n^+) substrate. After etching the mask layer to open a region for base diffusion, the sample was carried back to the LPE furnace to grow the Zn-doped $\text{Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4}\text{As}$ in order to diffuse Zn to the p-type base. After the process, both the diffusion layer and the mask layer were selectively etched by a HF-containing solution. Ohmic contacts to emitter, collector and base are then made. After all the processes, the transistor performances were tested. DC current gains in both normal and inverted modes depend on various parameters, such as impurity concentrations in emitter layer, base layer and collector layer including aluminium and heterojunction grading. Therefore, the effect of aluminium contents in both emitter and collector and the effect of junction gradings in both emitter-base junction and collector-base junction on the DC characteristics of the transistor were studied. Heterojunction transistors having aluminium content ranging from 0.2 to 0.35 were investigated. Both simulation and experimental results show that when the aluminium content of the emitter layer increases, the normal mode gain increases whereas the inverted mode gain decreases. It is also found that when the aluminium content of the collector layer increases, the normal mode gain decreases whereas the inverted mode gain increases. In addition, when both heterojunction gradings decrease, both of the gains would be affected. In our study, the optimum values of aluminium contents in both the emitter and the collector were found. Finally, we proposed a circuit model for the optimized structure.

Department วิศวกรรมไฟฟ้า

Field of study วิศวกรรมไฟฟ้า

Academic year 2543

Student's signature..... 

Advisor's signature..... 

Co-advisor's signature.....



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับคำแนะนำที่มีคุณค่าเป็นอย่างมากจาก รศ.ดร. ชุมพล อันตรเสน ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอขอบพระคุณคณาจารย์ประจำห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ (SDRL) และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ซึ่งได้แก่ ศ.ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว รศ.ดร. มนตรี สวัสดิ์ศฤงฆาร ผศ.ดร. สมชัย รัตนธรรมพันธ์ และ รศ.ดร. ชุมพล อันตรเสน

นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณสุกโขก ไทน้อย คุณ ขวัญเรือน ไทน้อย คุณพรชัย ช่วงม่วง และพี่ๆ ที่ให้คำแนะนำและให้ความช่วยเหลือด้านเทคนิคต่างๆ

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัย SDRL ที่ให้การศึกษาริปัญญาโทแก่ผู้วิจัย และขอขอบคุณโครงการศิษย์ก้นกุฏิที่ให้ทุนสนับสนุนบางส่วนในการทำวิจัยนี้

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ได้ให้กำลังใจในการศึกษาและทำวิจัย มาโดยตลอด

สารบัญ

| | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | จ |
| กิตติกรรมประกาศ | ฉ |
| สารบัญ | ช |
| สารบัญตาราง | ฐ |
| สารบัญภาพ | ฅ |
| บทที่ | |
| 1. บทนำ | 1 |
| 1.1 ที่มาของปัญหา | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ | 2 |
| 1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ | 3 |
| 1.4 เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ | 3 |
| 2. ทฤษฎีพื้นฐานของ Double Heterojunction Bipolar Transistor | 4 |
| 2.1 ทฤษฎีพื้นฐานทางด้านกระแสตรง | 4 |
| 2.1.1 ลักษณะสมบัติ (J_C, V_{BE}) | 5 |
| 2.1.2 อัตราขยายกระแส (Current gain) | 17 |
| 2.2 พารามิเตอร์ที่มีผลต่อการทำงานของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ | |
| หัวต่อต่างชนิด | 23 |
| 2.2.1 ผลของปริมาณอูมิเนียมในชั้นคอลเล็กเตอร์ | 23 |
| 2.2.2 ผลที่เกิดจากความลาดของหัวต่อต่างชนิด | |
| คอลเล็กเตอร์-เบส | 24 |
| 2.2.3 ผลกระทบจากปริมาณสารเจือในชั้นคอลเล็กเตอร์ N_{DC} | 25 |
| 2.2.4 ผลกระทบจากแรงดันคอลเล็กเตอร์-เบส V_{BC} | 25 |
| 3. กระบวนการสร้าง Double Heterojunction Bipolar Transistor | |
| แบบระนาบ | 30 |
| 3.1 การออกแบบไบโพลาร์ ทรานซิสเตอร์ชนิดหัวต่อต่างชนิดคู่ | |
| โครงสร้างระนาบ | 30 |

สารบัญ (ต่อ)

บทที่

หน้า

| | | |
|-----|--|----|
| 3.2 | การคำนวณลักษณะสมบัติกระแสตรงเพื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ ของทรานซิสเตอร์ | 30 |
| 3.3 | เทคโนโลยีในการปลูกผลึก GaAs และ GaAlAs | 35 |
| 3.4 | เทคโนโลยีในการแพร่ซึมสังกะสี | 37 |
| 3.5 | ขั้นตอนการเตรียมแผ่นผลึกฐานและวัสดุของสารละลาย | 40 |
| | 3.5.1 การเตรียมผลึกแผ่นฐาน | 40 |
| | 3.5.2 การเตรียมวัสดุของสารละลาย | 40 |
| | 3.5.3 การผลิตสิ่งประดิษฐ์ | 53 |
| 4. | ผลการทดลองและการวิเคราะห์ | 64 |
| 4.1 | ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน (I_C-V_{CE}), (I_E-V_{CE}) | 64 |
| 4.2 | ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน หัวต่อต่างชนิดพี-เอ็นของ GaAs (p^+)/Ga _{1-x} Al _x As (n) | 73 |
| 4.3 | การวิเคราะห์ผลการทดลอง | 79 |
| | 4.3.1 อัตราขยายกระแสใน Normal Mode | 79 |
| | 4.3.2 อัตราขยายกระแสใน Inverted Mode | 80 |
| | 4.3.3 DHBT โครงสร้างเมฆา | 83 |
| 5. | บทสรุปและข้อเสนอแนะ | 87 |
| 5.1 | บทสรุป | 87 |
| 5.2 | ข้อเสนอแนะ | 88 |
| | รายการอ้างอิง | 89 |
| | ประวัติผู้วิจัย | 91 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|---|------|
| 1.1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างซิลิกอน และแกเลียมอาร์เซไนด์ | 2 |
| 2.1 พารามิเตอร์ต่างๆของทรานซิสเตอร์พร้อมค่าตัวอย่าง | 23 |
| 3.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการออกแบบ | 31 |
| 3.2 น้ำหนักของสารที่ใช้ในแต่ละหลุมในโครงสร้างแบบที่ 1 | 48 |
| 3.3 น้ำหนักของสารที่ใช้ในแต่ละหลุมในโครงสร้างแบบที่ 2 | 49 |
| 3.4 น้ำหนักของสารที่ใช้ในแต่ละหลุมในโครงสร้างแบบที่ 3 | 50 |
| 3.5 น้ำหนักของสารที่ใช้ในแต่ละหลุมในโครงสร้างแบบที่ 4 | 51 |
| 3.6 น้ำหนักของสารที่ใช้ในแต่ละหลุมในโครงสร้างแบบที่ 5 | 52 |
| 4.1 การเปรียบเทียบอัตราขยายกระแสทั้งใน โมดปกติและ โมดกลับทาง รวมทั้ง V_{CESat} และค่าแรงดันพังทลาย V_{CEO} ของทรานซิสเตอร์โครงสร้างต่างๆ | 73 |
| 4.2 แสดงค่า $V_{Cut\ in}$ และแรงดันพังทลายของหัวต่ออิมิตเตอร์-เบส และคอลเล็กเตอร์-เบส ของทรานซิสเตอร์โครงสร้างต่างๆ | 79 |
| 4.3 แสดงค่าอัตราขยายกระแสที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากทฤษฎี คำนวณที่ L_{gE} และ L_{gC} ต่างๆ | 82 |

สารบัญภาพ

รูปที่

หน้า

| | | |
|------|--|----|
| 2.1 | แผนผังแถบพลังงานของไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ชนิดหัวต่อต่างชนิดของ GaAlAs(N)/GaAs(P)/GaAlAs(N) เมื่อถูกไบแอสใช้งานใน โมคปกติ | 6 |
| 2.2 | ค่าของ $\frac{1}{n}$, $\frac{1}{p}$, $\frac{n}{n_i^2}$ และ $\frac{p}{n_i^2}$ บริเวณหัวต่อต่างชนิดของ GaAs(p)/Ga _{0.4} Al _{0.6} As(n) | 10 |
| 2.3 | ศักดาไฟฟ้าบริเวณหัวต่อ | 13 |
| 2.4 | แผนภาพแถบพลังงานต้องห้ามบริเวณหัวต่อ เบส คอลเล็กเตอร์ | 15 |
| 2.5 | แสดงการเปลี่ยนแปลงค่า η_E และ η_C กับแรงดันที่หัวต่อ V_{BE} และ V_{BC} ที่ L_{gE} และ L_{gC} ค่าต่างๆกัน ตามลำดับ | 18 |
| 2.6 | ลักษณะสมบัติ J_C , V_{BE} ที่ได้จากสมการ (2-1) และ (2-2) โดยตรง เปรียบเทียบ กับที่ได้วิเคราะห์ | 20 |
| 2.7 | พาหะส่วนเกินในเบส | 20 |
| 2.8 | ผลของความลาดเอียงที่มีต่อประสิทธิภาพในการฉีด และแฟกเตอร์ การขนถ่ายพาหะ | 22 |
| 2.9 | ผลของปริมาณอลูมิเนียม x_{AlC} ในชั้นคอลเล็กเตอร์ ต่อ | |
| | ก) ลักษณะสมบัติกระแสแรงดัน J_C, V_{BE} | 26 |
| | ข) อัตราขยายกระแสอินทรีนซิก h_{FE}^* | 26 |
| | ค) แผนภาพแถบพลังงานบริเวณหัวต่อเบส-คอลเล็กเตอร์ | 26 |
| 2.10 | ผลของความลาด L_{gC} ของหัวต่อคอลเล็กเตอร์-เบส ต่อ | |
| | ก) ลักษณะสมบัติกระแสแรงดัน J_C, V_{BE} | 27 |
| | ข) อัตราขยายกระแสอินทรีนซิก h_{FE}^* | 27 |
| | ค) แผนภาพแถบพลังงานบริเวณหัวต่อเบส-คอลเล็กเตอร์ | 27 |
| 2.11 | ผลกระทบจากสารเจือในชั้นคอลเล็กเตอร์ N_{DC} ต่อ | |
| | ก) ลักษณะสมบัติกระแสแรงดัน J_C, V_{BE} | 28 |
| | ข) อัตราขยายกระแสอินทรีนซิก h_{FE}^* | 28 |
| | ค) แผนภาพแถบพลังงานบริเวณหัวต่อเบส-คอลเล็กเตอร์ | 28 |
| 2.12 | ผลกระทบจากแรงดันคอลเล็กเตอร์-เบส ต่อ | |
| | ก) ลักษณะสมบัติกระแสแรงดัน J_C, V_{BE} | 29 |
| | ข) อัตราขยายกระแสอินทรีนซิก h_{FE}^* | 29 |
| | ค) แผนภาพแถบพลังงานบริเวณหัวต่อเบส-คอลเล็กเตอร์ | 29 |

สารบัญญภาพ (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 3.1 ผลของอลูมิเนียมในคอลเล็กเตอร์ต่ออัตราขยายกระแสอินทรีนซิก โดยสัดส่วนอลูมิเนียมในชั้นอิมิตเตอร์เป็น 0.35, 0.3 และ 0.2 ส่วนค่าอื่น ๆ มีค่าตามตาราง | 32 |
| 3.2 ผลของอลูมิเนียมในคอลเล็กเตอร์ต่ออัตราขยายกระแสอินทรีนซิก โดยสัดส่วนอลูมิเนียมในชั้นอิมิตเตอร์เป็น 0.35, 0.3 และ 0.2 ส่วนค่าอื่น ๆ มีค่าตามตาราง | 32 |
| 3.3 ผลของอลูมิเนียมในคอลเล็กเตอร์ต่ออัตราขยายกระแสอินทรีนซิก โดยสัดส่วนอลูมิเนียมในชั้นอิมิตเตอร์เป็น 0.35, 0.3 และ 0.2 ส่วนค่าอื่น ๆ มีค่าตามตาราง | 33 |
| 3.4 ผลของอลูมิเนียมในคอลเล็กเตอร์ต่ออัตราขยายกระแสอินทรีนซิก โดยสัดส่วนอลูมิเนียมในชั้นอิมิตเตอร์เป็น 0.35, 0.3 และ 0.2 ส่วนค่าอื่น ๆ มีค่าตามตาราง | 33 |
| 3.5 ผลของอลูมิเนียมในคอลเล็กเตอร์ต่ออัตราขยายกระแสอินทรีนซิก โดยสัดส่วนอลูมิเนียมในชั้นอิมิตเตอร์เป็น 0.35, 0.3 และ 0.2 ส่วนค่าอื่น ๆ มีค่าตามตาราง | 34 |
| 3.6 ผลของอลูมิเนียมในคอลเล็กเตอร์ต่ออัตราขยายกระแสอินทรีนซิก โดยสัดส่วนอลูมิเนียมในชั้นอิมิตเตอร์เป็น 0.35, 0.3 และ 0.2 ส่วนค่าอื่น ๆ มีค่าตามตาราง | 34 |
| 3.7 (ก) เตาเอพิแทกซ์ซี | 36 |
| (ข) แสดงรายละเอียดของเบ้ารองรับสารละลาย | 36 |
| 3.8 (ก) กราฟแสดงความลึกของการแพร่ซึมสังกะสีในท่อเปิด ที่อุณหภูมิ 600°C ที่เวลาต่างๆ | 38 |
| (ข) ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของหัวต่อพี-เอ็นที่อาศัยวิธีการแพร่ซึมสังกะสีในท่อเปิด ที่อุณหภูมิ 600°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง | 38 |
| 3.9 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของหัวต่อพี-เอ็นของหัวต่ออิมิตเตอร์-เบสที่อาศัยวิธีการแพร่ซึมสังกะสีโดยการปลูกชั้นสารด้วยเตา LPE | 39 |
| 3.10 กราฟจำนวนเศษส่วนอะตอมของอาร์เซนิกในสารละลายอิมิตัว GaAs ที่อุณหภูมิต่างๆ | 42 |
| 3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของพาหะกับเศษส่วนโมลของดีบุกที่สัดส่วนอลูมิเนียมต่างๆ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส | 42 |
| 3.12 กราฟความสัมพันธ์ของเศษส่วนอะตอมดีบุกกับเศษส่วนอะตอมของอลูมิเนียมที่สัดส่วนอลูมิเนียมค่าใดๆ ใน GaAlAs ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส | 43 |
| 3.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของพาหะกับเศษส่วนอะตอมของสารเจือปนชนิดต่างๆ ใน GaAs ที่ 800 องศาเซลเซียส | 43 |

สารบัญภาพ (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 3.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเศษส่วนอะตอมของอาร์เซนิกกับอลูมิเนียม | 44 |
| 3.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเศษส่วนโมลของ AIAs กับเศษส่วนอะตอมของอลูมิเนียมใน GaAIAs ที่อุณหภูมิต่างๆ | 45 |
| 3.16 แสดงความหนาของผลึกในชั้นต่างๆ | 53 |
| 3.17 อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการปลูกผลึกชั้นต่างๆ | 53 |
| 3.18 อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการปลูกผลึกชั้นต่างๆเพื่อการแพร่สังกะสี | 55 |
| 3.19 Mask ที่ใช้ในกระบวนการผลิตทรานซิสเตอร์ | 58 |
| 3.20 แสดงผลที่ได้หลังจากกระทำตามขั้นตอนต่างๆในการผลิตทรานซิสเตอร์ | 63 |
| 3.21 ทรานซิสเตอร์ที่ทำการผลิต | 63 |
| 4.1 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของทรานซิสเตอร์ใน Inverted Mode ของ TR(0.2,0.2) | 65 |
| 4.2 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของทรานซิสเตอร์ใน Normal Mode ของ TR(0.3,0.3) | 65 |
| 4.3 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของทรานซิสเตอร์ใน Inverted Mode ของ TR(0.3,0.3) | 66 |
| 4.4 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของทรานซิสเตอร์ใน Normal Mode ของ TR(0.35,0.35) | 66 |
| 4.5 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของทรานซิสเตอร์ใน Normal Mode ของ TR(0.2,0.35) | 67 |
| 4.6 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของทรานซิสเตอร์ใน Inverted Mode ของ TR(0.2,0.35) | 67 |
| 4.7 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของทรานซิสเตอร์ใน Normal Mode ของ TR(0.35,0.2) | 68 |
| 4.8 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของทรานซิสเตอร์ใน Inverted Mode ของ TR(0.2,0.35) | 68 |
| 4.9 กราฟอัตราขยายกระแสที่กระแสอิ่มตัวค่าใดๆใน Inverted Mode ของ TR(0.2,0.2) | 69 |
| 4.10 กราฟอัตราขยายกระแสที่กระแสคอลเล็กเตอร์ค่าใดๆใน Normal Mode ของ TR(0.3,0.3) | 69 |

สารบัญภาพ (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 4.11 กราฟอัตราขยายกระแสที่กระแสอิมิตเตอร์ค่าใดๆใน Inverted Mode ของ TR(0.3,0.3) | 70 |
| 4.12 กราฟอัตราขยายกระแสที่กระแสคอลเล็กเตอร์ค่าใดๆใน Normal Mode ของ TR(0.35,0.35) | 70 |
| 4.13 กราฟอัตราขยายกระแสที่กระแสคอลเล็กเตอร์ค่าใดๆใน Normal Mode ของ TR(0.2,0.35) | 71 |
| 4.14 กราฟอัตราขยายกระแสที่กระแสอิมิตเตอร์ค่าใดๆใน Inverted Mode ของ TR(0.2,0.35) | 71 |
| 4.15 กราฟอัตราขยายกระแสที่กระแสคอลเล็กเตอร์ค่าใดๆใน Normal Mode ของ TR(0.35,0.2) | 72 |
| 4.16 กราฟอัตราขยายกระแสที่กระแสอิมิตเตอร์ค่าใดๆใน Inverted Mode ของ TR(0.35,0.2) | 72 |
| 4.17 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของหัวต่ออิมิตเตอร์-เบส ของ TR(0.2,0.2) | 74 |
| 4.18 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของหัวต่อคอลเล็กเตอร์-เบส ของ TR(0.2,0.2) | 74 |
| 4.19 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของหัวต่ออิมิตเตอร์-เบส ของ TR(0.3,0.3) | 75 |
| 4.20 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของหัวต่อคอลเล็กเตอร์-เบส ของ TR(0.3,0.3) | 75 |
| 4.21 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของหัวต่ออิมิตเตอร์-เบส ของ TR(0.35,0.35) | 76 |
| 4.22 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของหัวต่อคอลเล็กเตอร์-เบส ของ TR(0.35,0.35) .. | 76 |
| 4.23 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของหัวต่ออิมิตเตอร์-เบส ของ TR(0.2,0.35) | 77 |
| 4.24 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของหัวต่อคอลเล็กเตอร์-เบส ของ TR(0.2,0.35) ... | 77 |
| 4.25 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของหัวต่ออิมิตเตอร์-เบส ของ TR(0.35,0.2) | 78 |
| 4.26 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของหัวต่อคอลเล็กเตอร์-เบส ของ TR(0.35,0.2) ... | 78 |
| 4.27 ทรานซิสเตอร์โครงสร้างเมซา | 83 |
| 4.28 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของทรานซิสเตอร์โครงสร้างเมซาใน Normal Mode ของ TR(0.35,0.4) | 84 |
| 4.29 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของทรานซิสเตอร์โครงสร้างเมซาใน Inverted Mode ของ TR(0.35,0.4) | 84 |
| 4.30 (a) แสดงกระแสรั่วด้านข้างของโครงสร้างระนาบเมื่อทำงานใน โมดปกติ | 86 |
| 4.30 (b) แสดงกระแสรั่วด้านข้างของโครงสร้างระนาบเมื่อทำงานใน โมดกลับทาง ... | 86 |