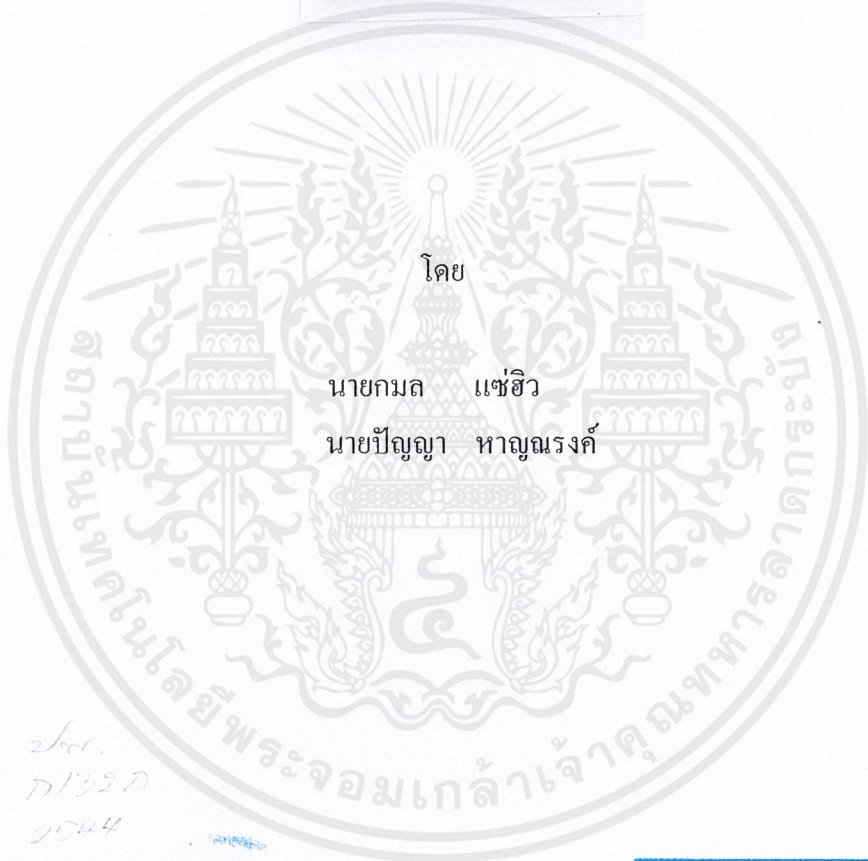


การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของทรานซิสเตอร์แบบชอตткиอินเจกชันชนิดเอ็นแชนแนล
STUDY ON ELECTRICAL CHARACTER OF SCHOTTKY INJECTION FIELD
EFFECT TRANSISTOR N-TYPE



โดย
นายกมล แซ่ฮิว
นายปัญญา หาญณรงค์

2/ค.
71327
2544

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 46219
วัน, เดือน, ปี 2 1 ส.ค. 2546

b.....
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของทรานซิสเตอร์แบบชอตткиอินเจคชันชนิดเอ็นเซนแนล
STUDY ON ELECTRICAL CHARACTER OF SCHOTTKY INJECTION FIELD EFFECT
TRANSISTOR N-TYPE



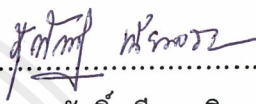
ปริญญาานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของทรานซิสเตอร์ชนิดอินเจกชันชนิดเอ็นแชนแนล
STUDY ON ELECTRICAL CHARACTER OF SCHOTTKY INJECTION
FIELD EFFECT TRANSISTOR N-TYPE

ชื่อนักศึกษา 1. นายกมล แซ่ฮิว รหัส 42015163
2. นายปัญญา หาญณรงค์ รหัส 42515734

โครงการได้รับการตรวจสอบแล้ว พร้อมทั้งจะทำการสอบได้


.....
(ผศ.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ)
อาจารย์ที่ปรึกษา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของทรานซิสเตอร์ชนิดอินเจกชันชนิดเอ็นแชนแนล

นายกมล แซ่ฮิว

นายปัญญา หาญณรงค์

ผศ.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2544

บทคัดย่อ

ปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการออกแบบและสร้างชิพชนิดเอ็นแชนแนล ซึ่งโครงสร้างของชิพมีลักษณะคล้ายกับดีมอสทรานซิสเตอร์และไอจีบีที โดยทำการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าในประเด็นของกระแสและแรงดัน แรงดันขีดเริ่ม แรงดันพังทลาย ซึ่งในการออกแบบลวดลายต้นแบบได้กำหนดให้ค่าความยาวช่องทางเดินกระแสเท่ากับ 10 ไมโครเมตร และค่าความกว้างของช่องทางเดินกระแสที่ค่าต่างๆกันดังนี้ 2400 , 3600 , 4800 และ 5400 ไมโครเมตร และจากลักษณะโครงสร้างของชิพที่ประกอบด้วยรอยสัมผัสแบบซีดตี้ จึงได้ทำการศึกษาซีดตี้โคโอดโดยการกำหนดเงื่อนไขของการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 300 °C ซึ่งเป็นลักษณะรอยสัมผัสแบบซีดตี้และที่อุณหภูมิ 500 °C ซึ่งเป็นลักษณะรอยสัมผัสแบบอัลลอย จากผลการทดลองที่ได้รอยสัมผัสแบบซีดตี้จะทำงานได้ดีกว่ารอยสัมผัสแบบอัลลอย ดังนั้นจึงทำการสร้างชิพที่อุณหภูมิซินเตอร์ที่ 300 °C และ 500 °C เพื่อเปรียบเทียบกัน สำหรับเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่สนใจจะทำการศึกษาคือต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Study on Electrical Character of Schottky Injection Field Effect Transistor N-type

Mr. Kamol Saehiw

Mr. Panya Hannarong

Ass.Prof. Surasak Neamchalearn (Advisor)

Academic year 2544

Abstract

This thesis is to study and fabricate SINFET n-type which the structure is as same as the DMOS transistor and IGBT for studying electrical characteristics such as current and voltage threshold voltage and breakdown voltage. The designing of mask define the channel length to be equal to 10 micrometers and the channel width are varies such 2400 , 3600 , 4800 and 5400 micrometers. The stucture of SINFET consist of schottky contact. Therefor to study Schottky diode by specify sintering temperature at 300 and 500 °C which are the character of schottky contact and the alloy contact . The result of the experiment is shown the schottky contact will be better than alloy contact. Thus the process for fabrication define to compare with the sintering temperature at 300 °C and 500 °C. Which the result of the experiment useful for the other who want to study in the future.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
สารบัญ	III
สารบัญตาราง	V
สารบัญภาพ	VI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 การเปรียบเทียบระหว่างซินเฟต, คีมอสทรานซิสเตอร์และไอจีบีที	1
1.2 การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์	3
1.3 ขอบเขตของการดำเนินการ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีรอยสัมผัสแบบซีดกี้	6
2.1 บทนำ	6
2.2 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำ	6
2.3 รอยสัมผัสระหว่าง โลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นแบบเรกติไฟร์ในขณะสมดุลความร้อน	7
2.4 การให้ไบอัสแก่ซีดกี้ไดโอด	9
2.4.1 การให้ไบอัสตรง	9
2.4.2 การให้ไบอัสกลับ	10
2.4.3 กราฟคุณสมบัติกระแสและแรงดันของรอยสัมผัสแบบซีดกี้	11
2.5 ทฤษฎีการไหลของกระแสในรอยสัมผัสโลหะและสารกึ่งตัวนำ	12
2.6 การวัดค่าความสูงของกำแพงศักย์	14
2.6.1 การหาค่าความสูงกำแพงศักย์ด้วยวิธีความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดัน	14
2.6.2 การหาค่าความสูงกำแพงศักย์ด้วยวิธีวัดค่าความจุไฟฟ้าที่รอยต่อ	15
บทที่ 3 ทฤษฎีซินเฟต	17
3.1 บทนำ	17
3.2 โครงสร้างและหลักการทำงานพื้นฐาน	17
3.2.1 สภาวะปิดกั้นย้อนกลับ	18
3.2.2 สภาวะปิดกั้นไปหน้า	18

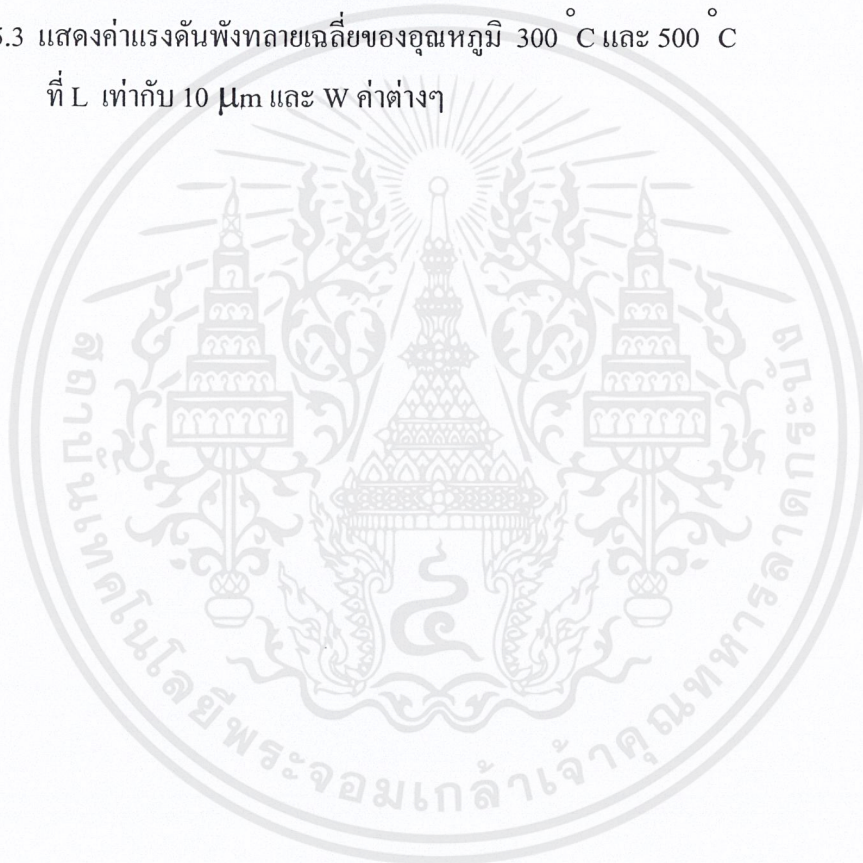
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3	สถานะการนำกระแสไปหน้า	18
3.2.4	กราฟคุณสมบัติกระแสอาโนดและแรงดันอาโนด-คาโอดของซินเฟต	19
บทที่ 4	การออกแบบกระบวนการสร้าง	21
4.1	การออกแบบและกระบวนการสร้างรอยสัมผัสแบบซีดตี	21
4.2	การออกแบบซินเฟต	23
4.3	กระบวนการสร้างซินเฟต	26
บทที่ 5	การทดลองและผลการทดลอง	32
5.1	การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของซีดตี	32
5.1.1	การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วย Transistor curve tracer	32
5.1.2	การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์(HP VEE)	36
5.2	การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของซินเฟต	38
5.2.1	การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของซินเฟตชนิดเอ็นเซนแนล	39
5.2.2	การทดสอบคุณสมบัติของกระแสอาโนดและแรงดันอาโนดคาโอด	39
5.2.3	การวัดค่าแรงดันซีดตีเริ่ม	44
5.2.4	การวัดค่าแรงดันพังทลาย	52
บทที่ 6	สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	54
	ภาคผนวก	
	กิตติกรรมประกาศ	
	หนังสืออ้างอิง	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของซินเฟต, ไอจีบีทีและคีมอสทรานซิสเตอร์	3
ตารางที่ 5.1 ค่าความสูงของกำแพงศักย์เฉลี่ยที่ได้จากการวัดกระแสและแรงดัน	38
ตารางที่ 5.2 แสดงค่าแรงดันจีดเริ่มเฉลี่ยของอุณหภูมิ 300 °C และ 500 °C ที่ L เท่ากับ 10 μ m และ W ค่าต่างๆ	51
ตารางที่ 5.3 แสดงค่าแรงดันพังทลายเฉลี่ยของอุณหภูมิ 300 °C และ 500 °C ที่ L เท่ากับ 10 μ m และ W ค่าต่างๆ	53



สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 (ก.) ซินเฟต ที่รอยสัมผัสระหว่างอะลูมิเนียมขั้ว A กับสารกึ่งตัวนำส่วน N-drif จะเป็นรอยสัมผัสแบบช็อตก็	2
(ข.) ไอจีบีที ที่ขั้ว C เป็นรอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำส่วน P ⁺ กับ N- drif	2
(ค.) ดิมอสทรานซิสเตอร์ ที่ขั้ว D เป็นรอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำส่วน N ⁺ กับ N- drif	3
รูปที่ 2.1 ระดับพลังงานของ โลหะและสารกึ่งตัวนำก่อนการสัมผัสกัน	7
รูปที่ 2.2 แถบพลังงานของ โลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นภายหลังจากการสัมผัส	8
รูปที่ 2.3 (ก.) การให้ไบอัสตรงแก่รอยต่อ	9
(ข.) ระดับแถบพลังงานเมื่อ ได้รับ ไบอัสตรง	9
รูปที่ 2.4 (ก.) การให้ไบอัสย้อนกลับแก่รอยต่อ	10
(ข.) ระดับแถบพลังงานเมื่อ ได้รับ ไบอัสย้อนกลับ	10
รูปที่ 2.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของรอยสัมผัสแบบช็อตก็	11
รูปที่ 2.6 การหาค่าแรงดัน V_{bi} ของรอยสัมผัสแบบช็อตก็ด้วยการนำเอากราฟคุณสมบัติกระแสและแรงดัน มาพล็อตเป็นกราฟใหม่	11
รูปที่ 2.7 กลไกในการนำกระแสของรอยสัมผัสแบบช็อตก็ขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง	12
รูปที่ 2.8 การหาค่า J_s จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสและแรงดันของรอยสัมผัส	15
รูปที่ 2.9 การหาค่า V_i จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C^2$ กับแรงดันของรอยต่อ	16
รูปที่ 3.1 (ก.) โครงสร้างภาพตัดขวาง	
(ข.) วงจรสมมูลของซินเฟต	17
รูปที่ 3.2 การให้แรงดัน ไบอัสกับซินเฟต เพื่อให้ทำงานในสภาวะปิดกั้นย้อนกลับ	18
รูปที่ 3.3 การให้แรงดัน ไบอัสกับซินเฟตเพื่อให้ทำงานในสภาวะปิดกั้นไปหน้า	19
รูปที่ 3.4 การให้แรงดัน ไบอัสกับซินเฟตเพื่อให้ทำงานในสภาวะนำกระแสไปหน้า	19
รูปที่ 3.5 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของซินเฟต	20
รูปที่ 4.1 แสดงการออกแบบรอยสัมผัสแบบช็อตก็	21
รูปที่ 4.2 กระบวนการสร้างรอยสัมผัสแบบช็อตก็	22
รูปที่ 4.3 แสดงชิ้นงานที่สร้างเสร็จแล้ว	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.4	ลวดลายทั้งหมดของซินเฟต โครงสร้างในแนวระนาบที่ออกแบบบนกระดาษไข	24
รูปที่ 4.5	ภาพด้านบนของกระจกต้นแบบต่างๆ ที่ใช้สำหรับกระบวนการสร้างซินเฟต โครงสร้างในแนวระนาบ	25
รูปที่ 4.6	กระจกต้นแบบที่ใช้ในการสร้างซินเฟต	26
รูปที่ 4.7	แสดงชิ้นงานที่ได้หลังผ่านกระบวนการสร้าง	30
รูปที่ 4.8	แสดงลวดลายโครงสร้างของซินเฟต	31
รูปที่ 5.1	แสดงการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของซ็อกเก็ตด้วย Transistor Curve Tracer	32
รูปที่ 5.2	แสดงคุณสมบัติของกระแสและแรงดันเมื่อได้รับ ใบอัสตรง No-sintering (Hor:0.1V/div, Ver:0.1mA/div)	33
รูปที่ 5.3	แสดงคุณสมบัติของกระแสและแรงดันเมื่อได้รับ ใบอัสตรง Sintering 300°C เวลา 15 นาที (Hor:0.1V/div, Ver:0.1mA/div)	33
รูปที่ 5.4	แสดงคุณสมบัติของกระแสและแรงดันเมื่อได้รับ ใบอัสตรง Sintering 400°C เวลา 15 นาที (Hor:0.1V/div, Ver:0.1mA/div)	34
รูปที่ 5.5	แสดงคุณสมบัติของกระแสและแรงดันเมื่อได้รับ ใบอัสตรง Sintering 500°C เวลา 15 นาที (Hor:0.1V/div, Ver:0.1mA/div)	34
รูปที่ 5.6	แสดงคุณสมบัติของกระแสและแรงดันเมื่อได้รับ ใบอัสย้อนกลับ Sintering 300°C เวลา 15 นาที (Hor:20V/div, Ver:0.1mA/div)	35
รูปที่ 5.7	แสดงคุณสมบัติของกระแสและแรงดันเมื่อได้รับ ใบอัสย้อนกลับ Sintering 400°C เวลา 15 นาที (Hor:20V/div, Ver:0.1mA/div)	35
รูปที่ 5.8	แสดงคุณสมบัติของกระแสและแรงดันเมื่อได้รับ ใบอัสย้อนกลับ Sintering 500°C เวลา 15 นาที (Hor:20V/div, Ver:0.1mA/div)	36
รูปที่ 5.9	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแส-แรงดันที่ได้จากการวัด กระแสและแรงดันจากชิ้นงานที่ซินเตอร์จริง ณ อุณหภูมิต่างๆ	37
รูปที่ 5.10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันเมื่อได้รับ ใบอัสตรง	37
รูปที่ 5.11	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันเมื่อได้รับ ใบอัสย้อนกลับ	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.12	แสดงการต่อวงจรเพื่อใช้วัดคุณสมบัติ ของกระแสไอโนด และแรงดันไอโนดคาโอดของซินเฟตชนิดเอ็นแซนแนล	39
รูปที่ 5.13	กราฟแสดงคุณสมบัติของกระแสไอโนดและแรงดันเกตคาโอด ที่ W เท่ากับ 2400 μm L เท่ากับ 10 μm อุณหภูมิซินเตอร์ริง 300 $^{\circ}\text{C}$ (Hor:1V/div,Ver:0.5mA/div)	40
รูปที่ 5.14	กราฟแสดงคุณสมบัติของกระแสไอโนดและแรงดันเกตคาโอด ที่ W เท่ากับ 3600 μm L เท่ากับ 10 μm อุณหภูมิซินเตอร์ริง 300 $^{\circ}\text{C}$ (Hor:1V/div,Ver:1mA/div)	40
รูปที่ 5.15	กราฟแสดงคุณสมบัติของกระแสไอโนดและแรงดันเกตคาโอด ที่ W เท่ากับ 4800 μm L เท่ากับ 10 μm อุณหภูมิซินเตอร์ริง 300 $^{\circ}\text{C}$ (Hor: 1V/div, Ver: 1mA/div)	41
รูปที่ 5.16	กราฟแสดงคุณสมบัติของกระแสไอโนดและแรงดันเกตคาโอด ที่ W เท่ากับ 5400 μm L เท่ากับ 10 μm อุณหภูมิซินเตอร์ริง 300 $^{\circ}\text{C}$ (Hor:1V/div,Ver:1mA/div)	41
รูปที่ 5.17	กราฟแสดงคุณสมบัติของกระแสไอโนดและแรงดันเกตคาโอด ที่ W เท่ากับ 2400 μm L เท่ากับ 10 μm อุณหภูมิซินเตอร์ริง 500 $^{\circ}\text{C}$ (Hor:1V/div,Ver:0.5mA/div)	42
รูปที่ 5.18	กราฟแสดงคุณสมบัติของกระแสไอโนดและแรงดันเกตคาโอด ที่ W เท่ากับ 3600 μm L เท่ากับ 10 μm อุณหภูมิซินเตอร์ริง 500 $^{\circ}\text{C}$ (Hor:1V/div,Ver:1mA/div)	42
รูปที่ 5.19	กราฟแสดงคุณสมบัติของกระแสไอโนดและแรงดันเกตคาโอด ที่ W เท่ากับ 4800 μm L เท่ากับ 10 μm อุณหภูมิซินเตอร์ริง 500 $^{\circ}\text{C}$ (Hor:1V/div,Ver:1mA/div)	43
รูปที่ 5.20	กราฟแสดงคุณสมบัติของกระแสไอโนดและแรงดันเกตคาโอด ที่ W เท่ากับ 5400 μm L เท่ากับ 10 μm อุณหภูมิซินเตอร์ริง 500 $^{\circ}\text{C}$ (Hor:1V/div,Ver:1mA/div)	43
รูปที่ 5.21	แสดงการต่อวงจรเพื่อใช้วัดค่าแรงดันขีดเริ่ม	44
รูปที่ 5.22	กราฟแสดงคุณสมบัติของแรงดันขีดเริ่ม W= 2400 μm ที่อุณหภูมิ 300 $^{\circ}\text{C}$ (Hor:1V/div,Ver:0.5mA/div)	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

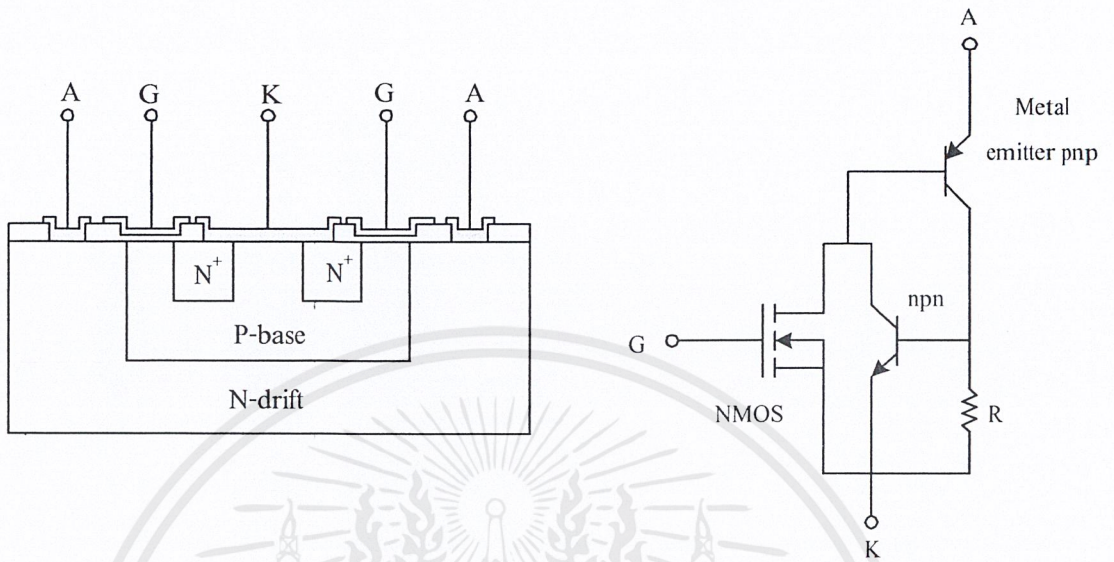
บทที่ 1

บทนำ

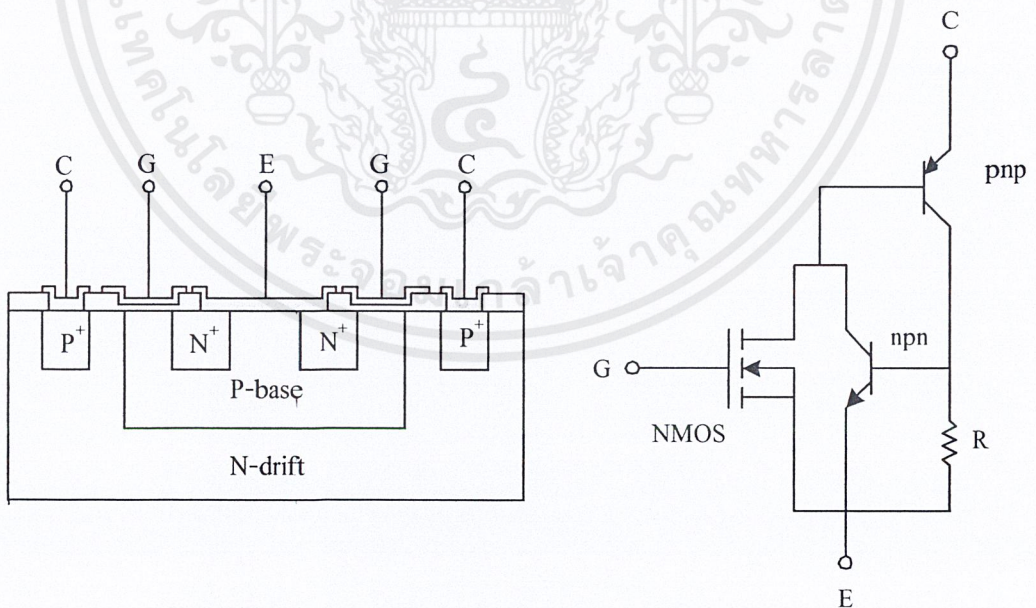
ซินเฟต (SINFET: Schottky Injection Field Effect Transistor) เป็นอุปกรณ์ที่มีลักษณะโครงสร้างคล้ายกับไอจีบีที (IGBT: Insulated Gate Bipolar Transistor) และมอสเฟตกำลังแบบดิมอส (DMOS: Double Diffusion Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) โดยจุดเด่นของอุปกรณ์ประเภทนี้ คือมีคุณสมบัติทางด้านการทำงานในด้านสวิทชิงหรือความเร็วในการทำงาน ซึ่งอุปกรณ์จำพวกนี้มักเป็นส่วนประกอบในการสร้างสวิทชิงเพาเวอร์ซัพพลาย เพื่อจ่ายกำลังงานให้แก่วงจรถิเล็กทรอนิกส์, อินเวอร์เตอร์และคอนเวอร์เตอร์ในบทนี้จะกล่าวถึงการเปรียบเทียบระหว่างซินเฟต ดิมอสทรานซิสเตอร์และไอจีบีทีตามด้วยการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของทรานซิสเตอร์ทั้งสามชนิดและในหัวข้อสุดท้ายจะพูดถึงขอบเขตการดำเนินงานการศึกษาออกแบบและสร้างซินเฟตชนิดอื่น

1.1 การเปรียบเทียบระหว่างซินเฟต, ดิมอสทรานซิสเตอร์และไอจีบีที

1.1.1 จากลักษณะโครงสร้างของอุปกรณ์ทั้งสามชนิด จะเห็นได้ว่าจะมีส่วนที่เหมือนกันคือส่วนของโครงสร้างของมอสเฟต และส่วนของโครงสร้างที่แตกต่างกันก็คือ ในส่วนของขา A (ซินเฟต), ขา C (ไอจีบีที : Insulated Gate Bipolar Transistor) และขา D (ดิมอสเฟต : Double Diffusion Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) โดยจะเห็นได้ว่าซินเฟตที่ขา A จะเป็นรอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ ซึ่งเป็นลักษณะของรอยสัมผัสช็อคกี้ (Schottky contact) หรือรอยสัมผัสแบบเรกติไฟร์ (Rectify contact) แต่จากลักษณะโครงสร้างของมอสเฟตที่ขา D จะเป็นรอยต่อแบบโอห์มมิก (Ohmic contact) และจากโครงสร้างของไอจีบีทีที่ขา C จะเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิกเช่นเดียวกับมอสเฟตแต่รอยสัมผัสจะเป็นการต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำชนิดพีกับโลหะอลูมิเนียมดังแสดงในรูปที่ 1.1

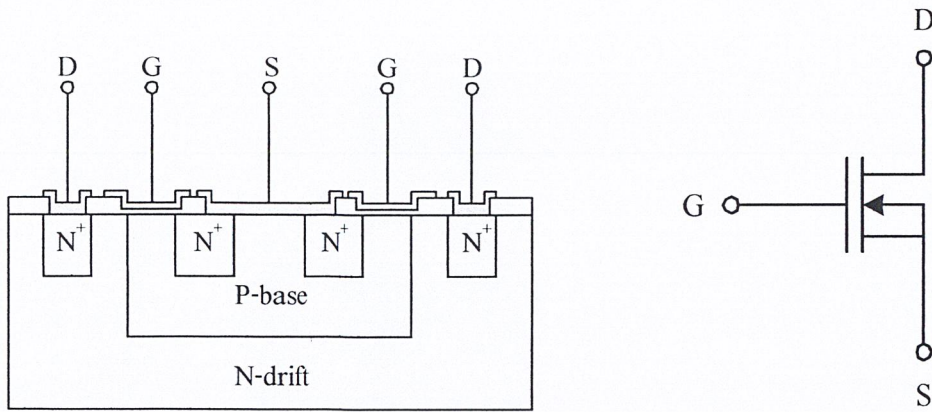


(ก) ซินเฟต ที่รอยสัมผัสระหว่างอะลูมิเนียมขั้ว A กับสารกึ่งตัวนำส่วน N-drift จะเป็นรอยสัมผัสแบบช็อคกี



(ข) ไอจีบีที ที่ขั้ว C เป็นรอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำส่วน P⁺ กับ N-drift

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) ดิมอสทรานซิสเตอร์ ที่ขั้ว D เป็นรอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำส่วน N^+ กับ N-drift

รูปที่ 1.1 โครงสร้างและสัญลักษณ์ของอุปกรณ์ชนิดต่างๆ

1.2 การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์

จากลักษณะโครงสร้างของอุปกรณ์ทั้งสามแบบจะเห็นได้ว่า โครงสร้างของซินเฟตจะเป็นส่วนประกอบของซ้อตส์ไคโอดที่เพิ่มเข้าไปที่ขา A ซึ่งเป็นรอยซึ่งระหว่างอูมิเนียมและส่วนเอ็น-ดริฟท์ (N-drift) สาเหตุที่ใช้โครงสร้างนี้ เนื่องจากว่าเป็นวิธีที่ง่ายและประหยัดค่าใช้จ่ายและการทำงานของซ้อตส์ไคโอดยังเป็นการทำงานของประจุข้างมาก ทำให้ไม่เกิดผลกระทบถึงการกำจัดประจุพาหะข้างน้อยในช่วงหยุดการทำงาน (Off state) เหมือนกับรอยต่อพี-เอ็น ดังนั้นจึงมีความเร็วในการสวิตชิงสูง ซึ่งเหตุผลที่เลือกทำการศึกษาและออกแบบสร้างซินเฟต เนื่องมาจากเป็นอุปกรณ์ที่มีจุดเด่นในตัวเองหลายประการ ซึ่งเราได้เปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆ กับดิมอสทรานซิสเตอร์และไอจีบีทีดังแสดงในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติของซินเฟต, ไอจีบีทีและดิมอสทรานซิสเตอร์

พารามิเตอร์	ซินเฟต	ดิมอสทรานซิสเตอร์	ไอจีบีที
การทนกำลัง	สูง	ปานกลาง	สูง
ความต้านทานอินพุท	สูง	สูง	สูง
ความต้านทานในสถานะนำกระแส	ต่ำ	สูง	ต่ำ
การตอบสนองความถี่	สูง	สูง	ปานกลาง
การสูญเสียกำลังด้านอินพุท	ต่ำ	ต่ำ	ต่ำ
ความเร็วในการสวิตชิง	สูง	สูง	ปานกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 1.1 จะเห็นว่าซินเฟตเป็นอุปกรณ์ที่น่าสนใจมาก สำหรับงานที่ต้องการกำลังและต้องการความเร็วในการสวิตชิงสูง ซึ่งทำให้ซินเฟตสามารถตอบสนองต่อความถี่สูงได้ด้วยโดยสังเกตได้จากคุณสมบัติในด้านต่างๆ ที่ซินเฟตรวมเอาข้อดีของไอจีบีทีและดีมอสทรานซิสเตอร์ไว้ด้วยกัน คือความสามารถในการนำกระแสของซินเฟตจะดีกว่าดีมอสทรานซิสเตอร์ และความสามารถในการสวิตชิงสูงกว่าไอจีบีที ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวนี้เองปริญญาโทฉบับนี้ จึงเลือกศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ของซินเฟต

1.3 ขอบเขตของการดำเนินการ

ขอบเขตของการดำเนินการศึกษาและออกแบบสร้างซินเฟตชนิดเอ็น-แชนแนลนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ

1. ในขั้นตอนแรกจะทำการออกแบบลวดลายต้นแบบ (Mask) และทำการถ่ายแบบลงบนกระจกมาส์คเพื่อนำไปสร้างซินเฟต โดยกำหนดเงื่อนไขในการออกแบบดังนี้

กำหนดให้ความกว้างของช่องทางเดินกระแส (L) เท่ากับ 10 ไมโครเมตรเปลี่ยนแปลงความกว้างของช่องทางเดินกระแส (W) จาก 2,400 um , 3,600 um , 4,800 um และ 5,400 um เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของกระแสที่เปลี่ยนแปลงไป และจากลักษณะโครงสร้างของซินเฟตที่ประกอบด้วยรอยต่อแบบช็อตก็

2. ขั้นตอนการหาเงื่อนไขในการสร้างรอยสัมผัสแบบช็อตก็ไดโอด เพื่อให้ได้เงื่อนไขที่เหมาะสม ในการนำไปเป็นส่วนประกอบในการสร้างซินเฟต ซึ่งเงื่อนไขของการสร้างรอยต่อช็อตก็ไดโอดคือการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและเวลาในการซินเตอร์ริง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

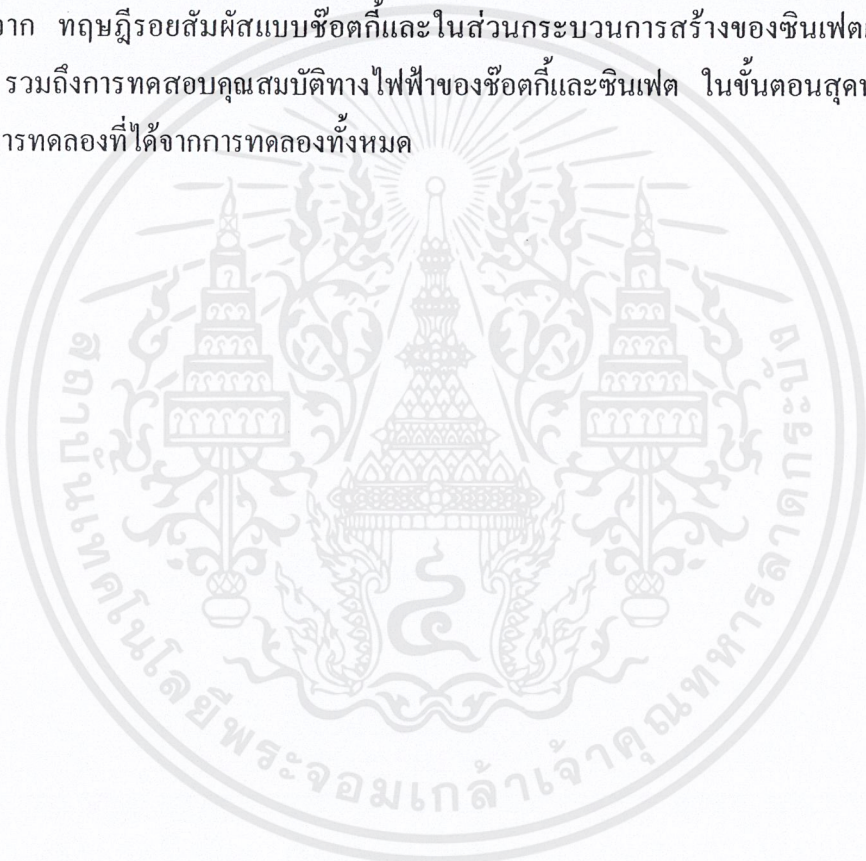
1. ไม่มีการซินเตอร์ริง
2. ซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 500 °C เวลา 20 นาที
3. ซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 400 °C เวลา 20 นาที
4. ซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 300 °C เวลา 20 นาที
5. ซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 500 °C เวลา 15 นาที
6. ซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 400 °C เวลา 15 นาที
7. ซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 300 °C เวลา 15 นาที

หลังจากนั้นนำช็อตก็ไดโอดที่สร้างขึ้นจากเงื่อนไขต่างๆ ไปทดสอบคุณสมบัติทางด้านกระแสและแรงดันนำผลที่ได้นี้ไปเป็นส่วนประกอบในการสร้างซินเฟตต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ในขั้นตอนที่สองนี้จะนำกระจกหลายชั้นแบบ (Photo mask) มาทำกระบวนการสร้างชิปเฟดด้วยวิธีการแพร่สารเจือ (Diffusion method) รวมถึงการนำเอาเงื่อนไขที่เหมาะสมจากการศึกษาเกี่ยวกับซีดคี้โคโดมาเป็นส่วนประกอบในการสร้างชิปเฟดด้วย กระบวนการสุดท้ายจะเป็นการทดสอบคุณสมบัติทางด้านกระแสและแรงดัน ผลการตอบสนองสัญญาณไฟฟ้าของชิปเฟด รวมถึงการสรุปผลการทดลองที่ได้ เพื่อเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่ทำการศึกษาค้นคว้าต่อไป

จากที่ได้กล่าวแล้วว่า การทดลองสร้างชิปเฟดครั้งนี้มีองค์ประกอบอยู่สองส่วน คือ ส่วนของรอยสัมผัสแบบซีดคี้โคโด และส่วนของชิปเฟด ดังนั้นเนื้อหาทั้งหมดจะเกี่ยวเนื่องกันทั้งสองส่วน โดยเริ่มจาก ทฤษฎีรอยสัมผัสแบบซีดคี้โคโดและในส่วนกระบวนการสร้างของชิปเฟดและผลการทดลอง รวมถึงการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของซีดคี้โคโดและชิปเฟด ในขั้นตอนสุดท้ายเป็นการสรุปผลการทดลองที่ได้จากการทดลองทั้งหมด



บทที่ 2

ทฤษฎีรอยสัมผัสขั้วตึก

2.1 บทนำ

ในกรณีรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำที่เป็นไปได้มีอยู่ทั้งหมด 4 กรณีด้วยกัน ทั้งนี้เนื่องจากสารกึ่งตัวนำอาจเป็นไปได้ทั้งสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและชนิดพี และยังขึ้นกับค่าฟังก์ชันงานของโลหะ (Work function : ϕ_m) ซึ่งอาจจะมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าค่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ (ϕ_s) ในบรรดารอยสัมผัสทั้งสี่กรณีนี้ ถ้าเราพิจารณาถึงแถบพลังงานศักย์ (Energy band diagram) ที่เกิดขึ้นจากรอยสัมผัสดังกล่าวแล้วพบว่ามียู่สองกรณีที่จะทำให้รอยสัมผัสดังกล่าวเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิก (Ohmic contact) ซึ่งสามารถนำกระแสได้ทั้งสองด้านและอีกสองกรณีที่เหลือจะทำให้รอยสัมผัสดังกล่าวเป็นรอยสัมผัสแบบทางเดียว (Rectify contact) จากลักษณะโครงสร้างของซินเฟตในบทที่ 1 แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างที่ขั้วอานอด (Anode) นั้นเป็นรอยสัมผัสแบบขั้วตึก ดังนั้นรายละเอียดในบทนี้จึงขอกล่าวถึงเฉพาะรอยสัมผัสแบบเรกติไฟร์หรือแบบขั้วตึกของสารกึ่งตัวนำชนิดอนชนิดเอ็นกับอลูมิเนียมเท่านั้น เนื่องจากเป็นส่วนประกอบที่สำคัญที่กำหนดความเร็วในการทำงานของซินเฟต และสามารถสร้างได้ภายในห้องปฏิบัติการของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

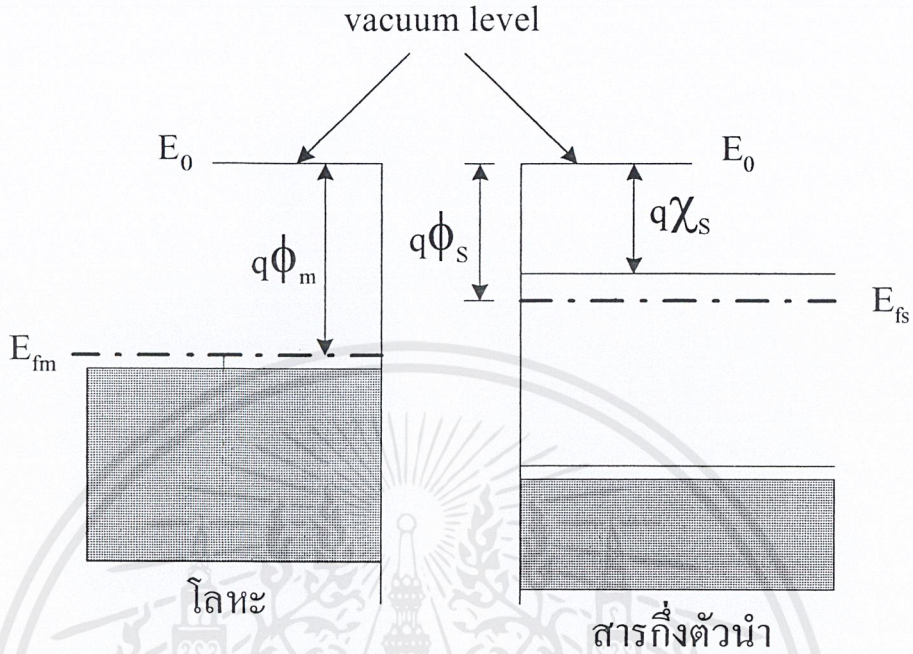
2.2 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำ

จากรูปที่ 2.1 แสดงแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นก่อนการสัมผัสกันและระบบยังไม่เข้าสู่ภาวะสมดุลทางความร้อน เมื่อเปรียบเทียบระดับพลังงานของของแข็งทั้งสอง จะเห็นว่าระดับพลังงานอ้างอิงของสารทั้งสองที่มีค่าคงที่ คือ ระดับพลังงาน E_0 (Vacuum Level) เป็นระดับพลังงานที่อิเล็กตรอนเป็นอิสระมีค่าพลังงานเท่ากับศูนย์ ส่วนระดับพลังงานชั้นอื่นๆ มีค่าเป็นลบ

ฟังก์ชันงาน (Work function) คือ ความแตกต่างของระดับพลังงาน E_0 กับระดับพลังงานเฟอร์มิ (fermi level) ของสารแต่ละชนิด โดยในสารกึ่งตัวนำเอ็กทรินซิก (Extrinsic semiconductor) ค่าฟังก์ชันงานจะมีค่าไม่คงที่ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของสารเจือที่แพร่เข้าไป ส่วนค่าฟังก์ชันงานของโลหะแต่ละชนิดจะมีค่าคงที่ จากรูปที่ 2.1 ค่าฟังก์ชันของโลหะจะมีค่า $E_0 - q\phi_m$ และสำหรับค่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำจะมีค่า $E_0 - q\phi_s$

อิเล็กตรอนอффินิตี (Electron affinity : χ_s) คือ ระดับพลังงานที่ต้องการเพื่อปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากแถบความนำเคลื่อนไปสู่ระดับพลังงานอ้างอิง (E_0) ของสารกึ่งตัวนำ จากแถบระดับ

พลังงานในรูปที่ 2.1 ค่า χ_s คือ ระดับความแตกต่างระหว่างระดับพลังงาน E_0 กับระดับพลังงานในชั้นความนำ E_c ในสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 2.1 ระดับพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำก่อนการสัมผัสกัน

2.3 รอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นแบบเรกติไฟร์ในขณะสมดุลความร้อน

สมมติให้ $\phi_m > \phi_s$ ระดับพลังงานเฟอร์มิในสารกึ่งตัวนำจึงสูงกว่าระดับเฟอร์มิของโลหะ เมื่อนำโลหะและสารกึ่งตัวนำมาสัมผัสกัน อิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำซึ่งมีระดับพลังงานสูงกว่าก็จะถ่ายเทไปสู่โลหะจนเกิดความสมดุล และการถ่ายเทของประจุพาหะจากสารกึ่งตัวนำจะหยุดลง ระดับเฟอร์มิของสารทั้งสองชนิดจะอยู่ที่ระดับเดียวกันตลอดรอยสัมผัส ดังรูปที่ 2.2 ปรากฏการณ์ที่กล่าวมาอธิบายได้ว่า เนื่องจากอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อเข้าไปทางด้านโลหะจึงทำให้เกิดมีประจุลบขึ้นทางด้านโลหะ และเกิดมีอ็อนบวกของอะตอมสารเจือผู้ให้ที่สารกึ่งตัวนำ ทำให้เกิดมีสนามไฟฟ้าภายในชั้นที่บริเวณรอยสัมผัส ซึ่งมีทิศทางจากขวามือมาซ้ายมือ สนามไฟฟ้างกล่าวนี้มีทิศทางต่อต้านการแพร่ของอิเล็กตรอน ทำให้เกิดการโค้งงอของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่บริเวณรอยสัมผัสกับโลหะขึ้นหรือกล่าวได้ว่าเกิดกำแพงศักย์ขึ้น เพื่อป้องกันการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนไปยังโลหะโดยที่ความสูงของกำแพงศักย์ (Barrier height; ϕ_{bn}) สามารถหาได้จากสมการที่ (2.1) คือ

$$q\phi_{bn} = q(\phi_m - \chi_s) \dots\dots\dots(2.1)$$

เมื่อ q คือ ประจุอิเล็กตรอน [มีหน่วยเป็นคูลอมบ์ (C)]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และแรงดันภายใน (Built-in potential : V_{bi}) ที่เกิดขึ้นบริเวณรอยสัมผัสมีค่าเท่ากับ

$$V_{bi} = q(\phi_m - \phi_s) \quad \dots\dots\dots(2.2)$$

เมื่อ ϕ_{bn} คือ ความสูงกำแพงศักย์ (Barrier height) [มีหน่วยเป็น โวลต์ (V)]

V_{bi} คือ แรงดันภายใน (Built-in potential) [มีหน่วยเป็น โวลต์ (V)]

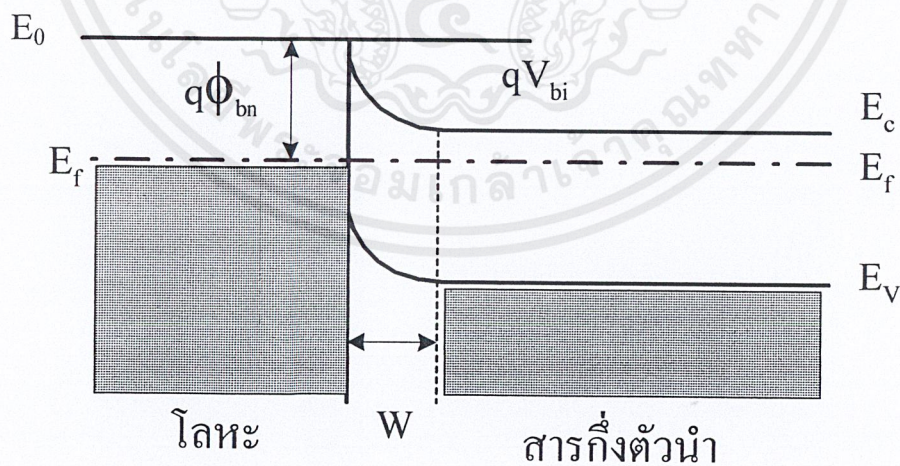
ϕ_m คือ ฟังก์ชันงานของโลหะ [มีหน่วยเป็นอิเล็กตรอนโวลต์ (eV)]

$q\phi_s$ คือ ฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ [มีหน่วยเป็นอิเล็กตรอน โวลต์ (eV)]

χ_s คือ อิเล็กตรอนอัฟฟินิตี (Electron affinity) [มีหน่วยเป็นอิเล็กตรอน โวลต์ (eV)]

จากที่กล่าวมาสามารถอธิบายได้ว่า ที่ภาวะสมดุลทางความร้อนจะเกิดกำแพงศักย์ขยับขึ้นการแพร่ของอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำจนไม่สามารถแพร่เข้าไปยังด้านโลหะได้ ดังนั้นที่ภาวะสมดุลทางความร้อนจึงไม่มีกระแสใดๆ และบริเวณปลอดพาหะมีความกว้างเท่ากับ

$$W_0 = \sqrt{\frac{2\epsilon_s v_{bi}}{qNd}} \quad \dots\dots\dots(2.3)$$



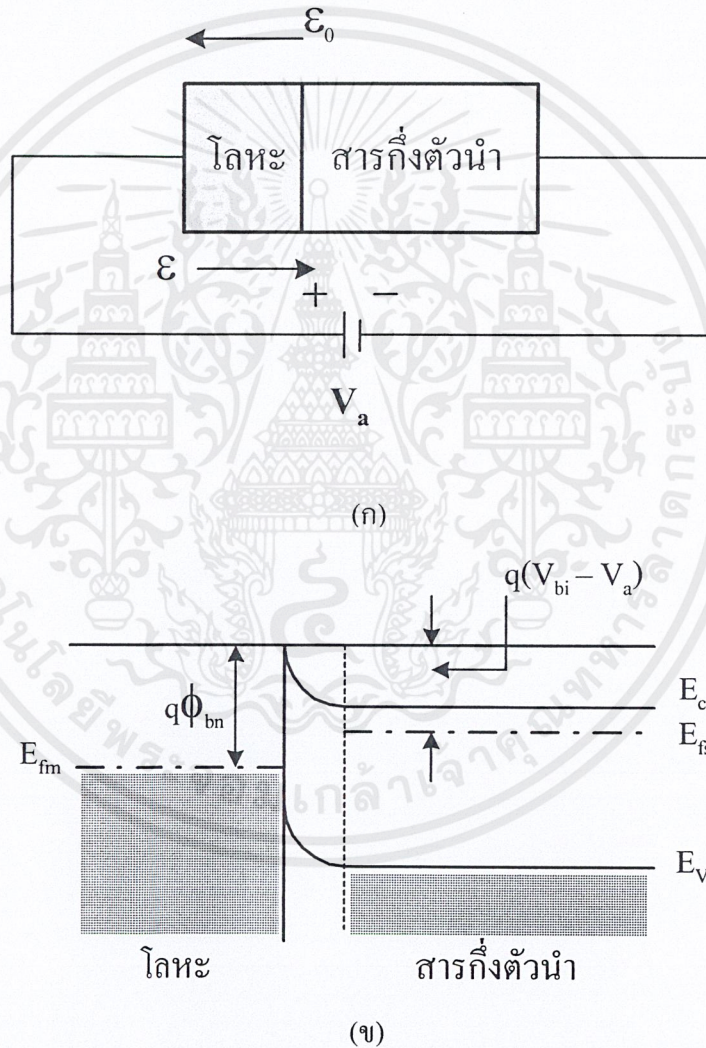
รูปที่ 2.2 แถบพลังงานของ โลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นภายหลังจากการสัมผัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 การให้ไบอัสแก่ข้อตักไดโอด

2.4.1 การให้ไบอัสตรง (Forward bias)

โดยการป้อนศักดาบวกที่ด้านโลหะ และศักดาลบที่ด้านสารกึ่งตัวนำ ดังรูปที่ 2.3 (ข.) เมื่อป้อนแรงดันไบอัสตรงให้แก่รอยสัมผัสทำให้เกิดสนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำ ซึ่งทิศทางของสนามไฟฟ้าที่ (\mathcal{E}) เกิดขึ้นมีทิศทางจากโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำ ซึ่งมีทิศทางตรงกันข้ามกับสนามไฟฟ้าเดิม (\mathcal{E}_0) ที่มีอยู่ ทำให้สนามไฟฟ้าบริเวณรอยสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำมีค่าลดลง เป็นผลให้อิเล็กตรอนจากด้านสารกึ่งตัวนำสามารถแพร่ข้ามรอยสัมผัสมายังด้านโลหะได้เพิ่มขึ้นระดับของแถบพลังงานดังในรูปที่ 2.3 (จ)



รูปที่ 2.3 รอยต่อ โลหะ-สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

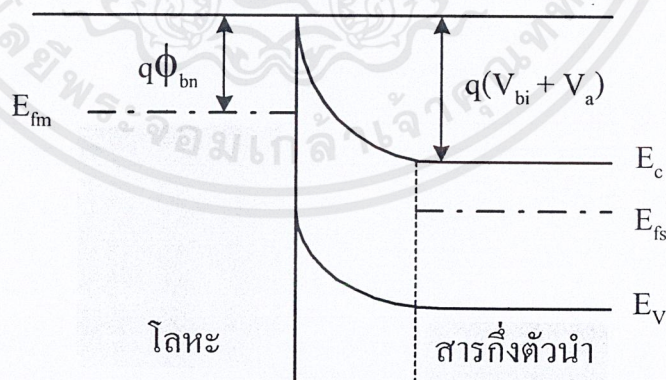
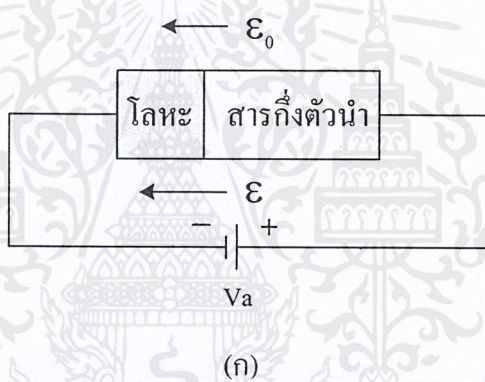
(ก) การให้ไบอัสตรงแก่รอยต่อ

(ข) ระดับแถบพลังงานเมื่อได้รับไบอัสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 การให้ไบอัสย้อนกลับ (Reverse bias)

โดยการป้อนศักดาลบที่ด้านโลหะ และศักดาบวกที่ด้านสารกึ่งตัวนำดังแสดงในรูปที่ 2.4 (ก) เมื่อป้อนแรงดันไบอัสกลับให้แก่รอยสัมผัส ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำ ซึ่งทิศทางสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น (\mathcal{E}) มีทิศทางจากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะ ซึ่งเป็นทิศทางเดียวกับสนามไฟฟ้าเดิม (\mathcal{E}_0) ที่มีอยู่ ทำให้สนามไฟฟ้าของรอยสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำมีค่าเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (ข) ทำให้กระแสอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำถูกขัดขวางด้วยกำแพงศักย์ที่มีขนาดสูงมาก จึงทำให้อิเล็กตรอนไม่สามารถแพร่เข้าไปในสารกึ่งตัวนำได้ อย่างไรก็ตามอิเล็กตรอนด้านโลหะบางส่วนยังสามารถที่จะแพร่ข้ามรอยสัมผัสเข้าไปในสารกึ่งตัวนำได้ โดยปริมาณของกระแสนี้ไม่เกี่ยวข้องกับแรงดันไบอัส แต่จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของรอยต่อ ซึ่งเรียกว่า กระแสรั่วไหลของรอยสัมผัส



(ข)

รูปที่ 2.4 รอยต่อโลหะ- สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

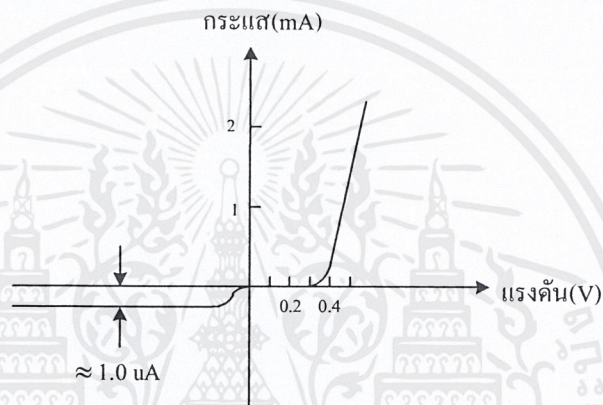
(ก) การให้ไบอัสย้อนกลับแก่รอยต่อ

(ข) ระดับแถบพลังงานเมื่อได้รับไบอัสย้อนกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

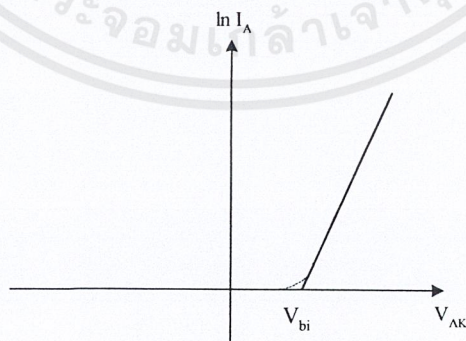
2.4.3 กราฟคุณสมบัติกระแสและแรงดันของรอยสัมผัสแบบซีดกี

จากแถบระดับพลังงานในรูปที่ 2.3 และ 2.4 จะเห็นว่ากระแสสามารถที่จะไหลผ่านรอยสัมผัสได้เฉพาะในช่วงที่รอยสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำได้รับการไบแอสตรงเท่านั้น อย่างไรก็ตามในช่วงที่รอยสัมผัสได้รับไอส์สย้อนกลับปรากฏว่า ยังมีกระแสส่วนหนึ่งสามารถที่จะไหลข้ามรอยสัมผัสจากโลหะมายังสารกึ่งตัวนำได้ แต่มีปริมาณน้อยมาก ($\approx 1.0 \mu\text{A}$) ซึ่งเรียกว่ากระแสรั่วไหลที่รอยสัมผัส ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของรอยสัมผัสแบบซีดกี

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันในรูปที่ 2.5 เราสามารถที่จะหาค่า V_{bi} ได้ โดยการนำค่ากระแสมาพล็อตกราฟในฟังก์ชันลอการิทึม ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การหาค่าแรงดัน V_{bi} ของรอยสัมผัสแบบซีดกีด้วยการนำเอากราฟคุณสมบัติกระแสและแรงดัน มาพล็อตเป็นกราฟใหม่

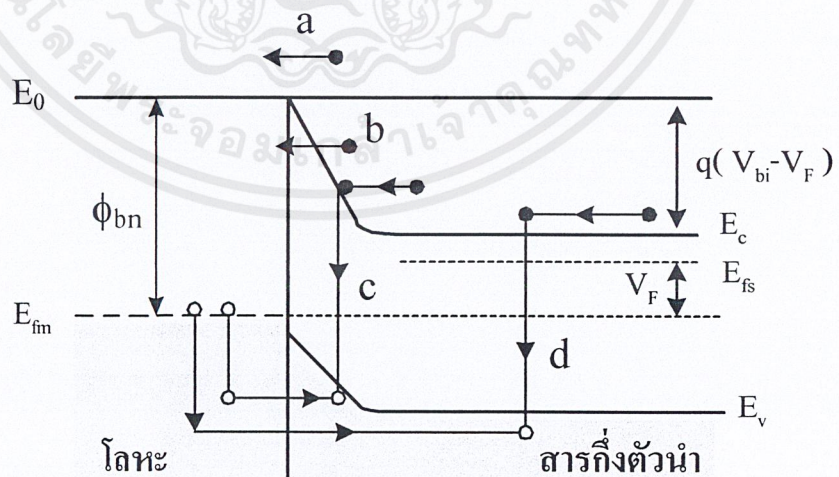
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 ทฤษฎีการไหลของกระแสในรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ

กระแสที่ไหลระหว่างรอยต่อโลหะกับสารกึ่งตัวนำ ส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นเนื่องจากประจุพาหะข้างมาก (Majority carrier) ในกรณีที่เราให้ไบอัสตรงแก่รอยต่อก็คือ ให้ศักดาบวกที่ขั้วโลหะและศักดาลบที่ขั้วสารกึ่งตัวนำ ดังในรูปที่ 2.3 (ก) กระแสที่เกิดขึ้นที่รอยสัมผัสสามารถที่จะอธิบายได้ว่า อาจเกิดจากกระบวนการพื้นฐาน 4 กระบวนการ คือ

1. เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำข้ามกำแพงศักย์เข้าสู่โลหะ เรียกว่ากระแสที่เกิดจากการแผ่กระจายอนุภาคด้วยความร้อน (Thermionic emission current)
2. เกิดจากการทะลุผ่านกำแพงศักย์ของประจุไฟฟ้า เรียกว่ากระแสทะลุผ่าน (Tunnelling current)
3. เป็นกระแสที่ไหลในบริเวณปลอดพาหะ เรียกว่ากระแสการรวมตัว (Recombination current)
4. เกิดจากการฉีดของ โฮลจากโลหะเข้าสู่สารกึ่งตัวนำเรียกว่า กระแสพาหะข้างน้อย (Minority carrier current)

ซึ่งกลไกในการนำกระแสของรอยสัมผัสแบบขี้อัดก็ทั้ง 4 กระบวนการ แสดงดังรูปที่ 2.7 โดยกระแส (a) คือ กระแสที่เกิดจากการแผ่อนุภาคความร้อน, กระแส (b) คือ กระแสทะลุผ่าน, กระแส (c) คือ กระแสการรวมตัว และกระแส (d) คือ กระแสพาหะข้างน้อย



รูปที่ 2.7 กลไกในการนำกระแสของรอยสัมผัสแบบขี้อัดขณะได้รับแรงดัน ไบอัสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีของ schottky power rectifiers ซึ่งการแพร่สารเจือผู้ให้อยู่ในระดับปริมาณที่ต่ำเพื่อให้สามารถทนแรงดันพังทลายได้สูง ดังนั้นขนาดของกำแพงศักย์จึงไม่บางพอที่จะเกิดปรากฏการณ์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ เพื่อทำให้เกิดกระแสทะลุผ่านได้ ส่วนกระแสที่เกิดจากการรวมตัวในบริเวณปลอดพาหะหรือ recombination current มีลักษณะเดียวกันกับไดโอดรอยต่อพี-เอ็น ซึ่งมีค่าความหนาแน่นกระแสน้อยมาก ส่วนกระแสที่เกิดจากการฉีดของประจุพาหะข้างน้อยจะมีค่าน้อยมากเช่นกัน เว้นแต่เราจะสร้างให้ขนาดของกำแพงศักย์มีค่าสูงๆ แต่การสร้างกำแพงศักย์ให้มีขนาดสูงมากมักไม่ได้รับความนิยมในการสร้าง schottky power rectifier เพราะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมรอยสัมผัสขณะที่ยังมีกระแสได้รับแรงดันไบอัสตรงค่าสูงๆ (High forward voltage drop) จะส่งผลต่อการไหลของกระแสของรอยสัมผัสแบบช็อตตี้

ดังนั้นกระแสที่สำคัญที่ไหลข้ามรอยสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำที่เป็นรอยต่อแบบเร็คตีไฟร์ก็คือ กลไกการเคลื่อนที่ของกระแสที่เกิดจากการแผ่กระจายอนุภาคด้วยความร้อน (Thermionic emission) ในกรณีของสารกึ่งตัวนำที่มีความคล่องตัวสูง (High mobility) เช่นซิลิคอน แกลเลียมอาแซไนต์ ที่มีการแพร่สารเจือในปริมาณที่ต่ำ ทฤษฎีการแผ่กระจายโดยอนุภาคความร้อน สามารถอธิบายถึงกระแสที่ไหลข้ามรอยสัมผัสแบบช็อตตี้ ดังในสมการที่ (2.4) คือ

$$J = A^{**} T^2 e^{-\Phi_{bn}/kT} [e^{(qV_a/kT)} - 1] \quad \text{.....(2.4)}$$

เมื่อ A^{**} คือ ค่าคงที่ของ Richardson = $4\pi m^* q^2 / h^3 = 1.2 \times 10^6$ (m^*/m) มีหน่วยเป็น $A/cm^2 \cdot K^2$

T คือ ค่าสัมบูรณ์ของอุณหภูมิ [มีหน่วยเป็นองศาเคลวิน (K)]

Q คือ ประจุของอิเล็กตรอน [มีหน่วยเป็นคูลอมบ์ (C)]

k คือ ค่าคงที่ของ Boltzmann [มีหน่วยเป็น JK^{-1}]

V คือ แรงดันไบอัสที่ป้อนให้กับรอยสัมผัส [มีหน่วยเป็นโวลต์ (V)]

สำหรับซิลิคอนชนิดเอ็นค่าคงที่ของ Richardson (A^{**}) จะเท่ากับ $120 A/cm^2 \cdot K^2$ และ แกลเลียมอาแซไนต์ ค่าคงที่ของ Richardson (A^{**}) จะเท่ากับ $140 A/cm^2 \cdot K^2$ [2]

ในขณะที่ได้รับแรงดันไบอัสตรง เทอมหลังของสมการ (2.4) จะมีค่ามากกว่าหนึ่งมาก ($e^{qV_a/kT} \gg 1$) ดังนั้น จะได้ว่า

$$J_F = A^{**} T^2 e^{-\Phi_{bn}/kT} [e^{(qV_F/kT)}] \quad \text{.....(2.5)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ V_F คือ แรงดันที่ตกคร่อมรอยสัมผัสแบบช็อตกี ในกรณีของรอยต่อแบบช็อตกี จากสมการที่ (2.5) สามารถที่จะเขียนใหม่ได้เป็นสมการที่ (2.6)

$$V_F = \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{J_F}{A * T^2 \exp(-q\Phi_{bn} / kT)} \right] \quad \dots\dots\dots(2.6)$$

หรือ

$$V_F = \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{J_F}{J_S} \right] \quad \dots\dots\dots(2.7)$$

เทอม J_S หมายถึงกระแสอิ่มตัวของรอยสัมผัสแบบช็อตกี ซึ่งสัมพันธ์กับความสูงกำแพงศักย์ตามสมการที่ (2.8)

$$J_S = A * T^2 \exp(-q\Phi_{bn} / kT) \quad \dots\dots\dots(2.8)$$

จะเห็นได้ว่า กระแสอิ่มตัว J_S เป็นฟังก์ชันโดยตรงกับความสูงกำแพงศักย์ (Φ_{bn}) และ อุณหภูมิ (T)

2.6 การวัดค่าความสูงของกำแพงศักย์

การวัดค่าความสูงกำแพงศักย์ของรอยสัมผัสแบบช็อตกีสามารถที่จะทำได้หลายวิธี แต่ที่นิยมใช้ในห้องปฏิบัติการของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ มี 2 วิธี คือ

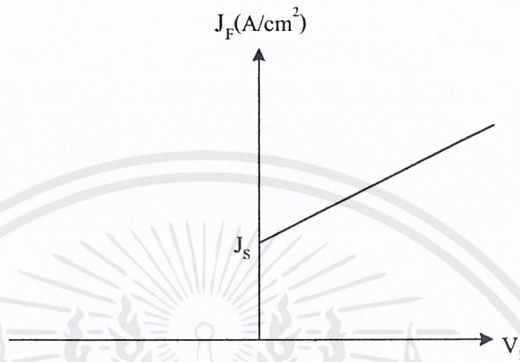
1. การหาจากการวัดกระแสและแรงดัน
2. การหาจากการวัดค่าความจุไฟฟ้าและแรงดัน

2.6.1 การหาความสูงกำแพงศักย์ด้วยวิธีการหาจากความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดัน

การหาค่าความสูงกำแพงศักย์โดยวิธีนี้ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.9) ซึ่ง J_S เป็นความหนาแน่นของกระแสอิ่มตัวที่แรงดันไบอัสเท่ากับศูนย์ ซึ่งสามารถหาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสและแรงดัน ดังรูปที่ 2.8

จากรูปที่ 2.8 เมื่อ J_S คือ ความหนาแน่นของกระแสที่แรงดันไบอัสเท่ากับศูนย์ มีหน่วยเป็น A/cm^2 เมื่อหาค่า J_S ได้จากกราฟ แทนค่า J_S ลงในสมการที่ (2.9) เพื่อค่าความสูงกำแพงศักย์

$$\Phi_{bn} = \left(\frac{kT}{q} \right) \ln \left[\frac{A^{**} T^2}{J_s} \right] \dots\dots\dots(2.9)$$



รูปที่ 2.8 การหาค่า J_s จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสและแรงดันของรอยสัมผัส

2.6.2 การหาค่าความสูงกำแพงศักย์ด้วยวิธีวัดค่าความจุไฟฟ้าที่รอยต่อ

ความสูงของกำแพงศักย์ยังสามารถที่จะคำนวณได้จากวิธีวัดค่าความจุกับแรงดัน เมื่อมีสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับซ้อนทับมาทับกับสัญญาณไบอัสซึ่งเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงจะทำให้เกิดประจุไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงกับแรงดันขึ้น ซึ่งสัมพันธ์กับบริเวณปลอดพาหะของรอยสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำ ความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้าและแรงดัน ดังสมการที่ (2.10)

$$C = \frac{|\partial Q|}{\partial V} = \frac{2q\epsilon_s N_d}{2(V_{bi} - V - kT/q)} \dots\dots\dots(2.10)$$

สำหรับการหาความสูงกำแพงศักย์โดยเทคนิคการวัดความจุไฟฟ้าที่รอยต่อสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.11) โดยค่า V_i หาได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C^2$ กับแรงดันไบอัสดังรูปที่ 2.9 และ V_n สามารถหาได้จากสมการที่ (2.12) โดยค่า $d(1/C^2)/dv$ ในสมการที่ (2.13) หาได้จากความชันของกราฟระหว่าง $1/C^2$ กับแรงดันไบอัส

$$\Phi_{bn} = V_i + V_n \dots\dots\dots(2.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $V_n = \left(\frac{kT}{q} \right) \ln \left(\frac{N_c}{N_d} \right)$ (2.12)

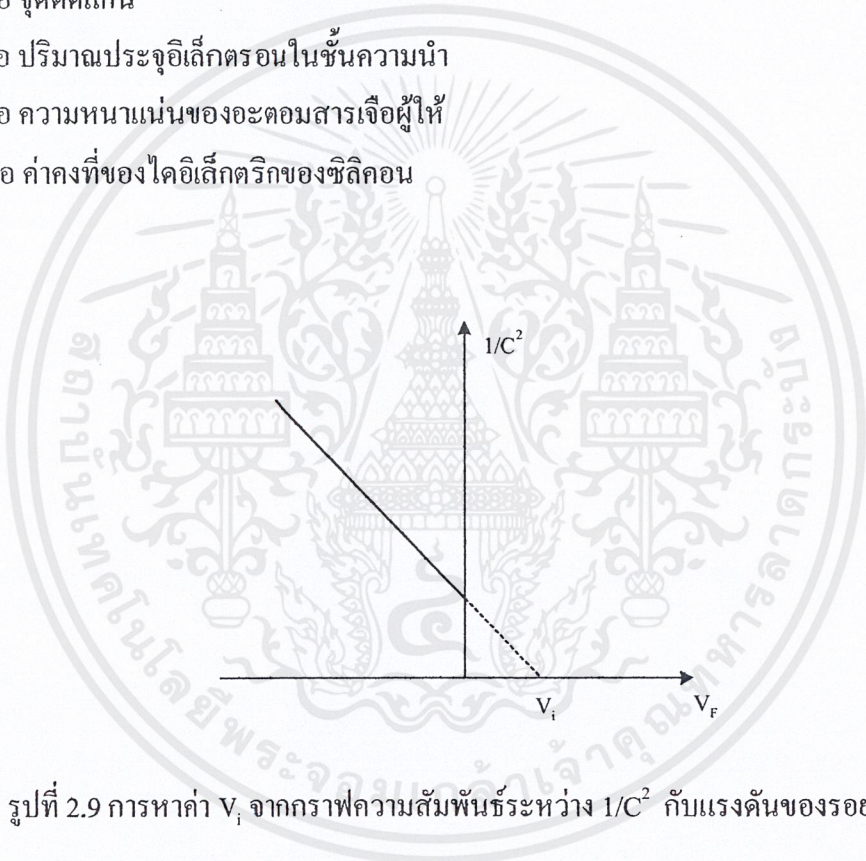
$$N_d = \frac{2}{q\epsilon_s\epsilon_0 A^2} \frac{\Delta V_R}{\Delta(1/C^2)}$$
(2.13)

เมื่อ V_i คือ จุดตัดแกน

N_c คือ ปริมาณประจุอิเล็กตรอนในชั้นความนำ

N_d คือ ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือผู้ให้

ϵ_s คือ ค่าคงที่ของไดอิเล็กตริกของซิลิคอน



รูปที่ 2.9 การหาค่า V_i จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C^2$ กับแรงดันของรอยต่อ

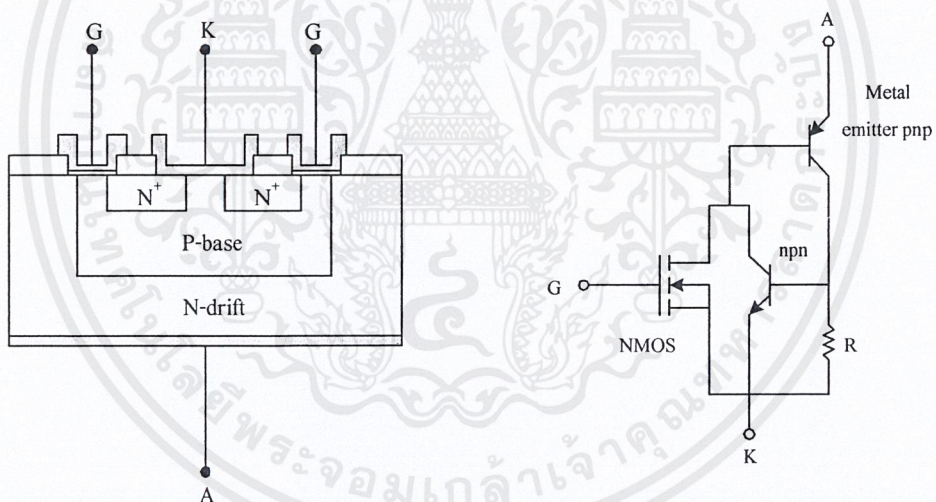
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ทฤษฎีซินเฟต

3.1 บทนำ

โครงสร้างของซินเฟตจะมีลักษณะเดียวกันกับโครงสร้างของไอจีบีที คือเกิดจากการรวมเอาโครงสร้างเกทแบบมอสเฟตกับการนำกระแสแบบไบโพลาร์เข้าไว้ด้วยกัน[5] จากลักษณะโครงสร้างในรูปที่ 3.1 มีการจัดของประจุพาหะข้างมากจากขั้วอาโนด เข้าไปยังชั้น N-drift ในสถานะนำกระแสไปหน้า (Forward conduction) ทำให้มีการมอดคูเลตในชั้น N-drift ส่งผลให้อุปกรณ์ประเภทนี้มีความต้านทานในสถานะนำกระแสต่ำ เช่นเดียวกับไอจีบีที แต่ส่วนที่แตกต่างกันของอุปกรณ์ทั้งสองคือ รอยสัมผัสที่ขั้วอาโนดของซินเฟตจะเป็นรอยต่อแบบช็อคกี แทนที่จะเป็นรอยต่อแบบพี-เอ็น ซึ่งเป็นการแก้ข้อจำกัดของไอจีบีทีเรื่อง storage time ซึ่งทำให้ไอจีบีทีมีข้อจำกัดการใช้งานด้านสวิตซ์สูง ซึ่งคุณสมบัติข้อนี้เองที่เป็นลักษณะเด่นของซินเฟตที่ดีกว่าไอจีบีที



รูปที่ 3.1 (ก) โครงสร้างภาพตัดขวาง

(ข) วงจรสมมูลของซินเฟต

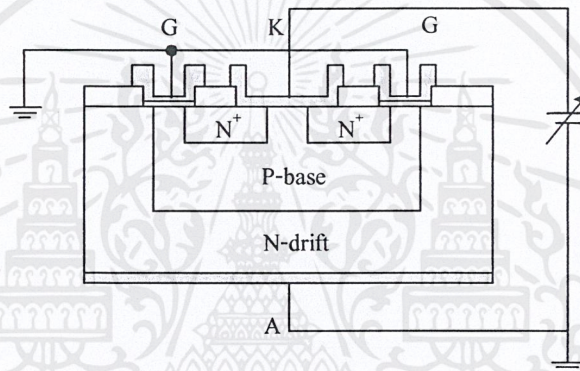
3.2 โครงสร้างและหลักการทำงานพื้นฐาน

เนื่องจากซินเฟต เป็นโครงสร้างที่เกิดจากการรวมกันระหว่างโครงสร้างเกทแบบมอสเฟตและการนำกระแสแบบไบโพลาร์ เช่นเดียวกับไอจีบีที ดังนั้นการทำงานของซินเฟต จึงสามารถทำได้โดยการเหนี่ยวนำให้เกิดช่องทางเดินกระแส ด้วยการให้แรงดันไบอัสที่ขั้วเกททำให้อิเล็กตรอนสามารถที่จะเคลื่อนที่จากขั้วอาโนดผ่านชั้น N-drift มายังขั้วคาโทดได้เช่นเดียวกับไอจีบีที และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอสเฟตกำลัง นอกจากนี้ในภาชนะนำกระแสไปหน้า ทำให้เกิดการฉีดประจุพาหะข้างน้อย จากขั้วโลหะเข้าไปยังชั้น N-drift ทำให้เกิดการมอดดูเลตสภาพความนำ (Conductivity modulation) ส่งผลให้ความต้านทานในสถานะนำกระแสของซิมเฟตค่าต่ำ สำหรับการทำงานของซิมเฟต สามารถแบ่งการทำงานออกเป็น 3 สถานะ คือ

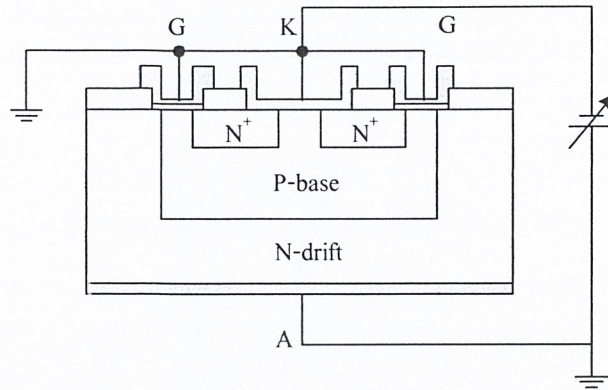
3.2.1 สถานะปิดกั้นย้อนกลับ (Reverse blocking mode) เกิดจากการให้แรงดันไบอัสค่าลบที่ขั้วอาโนด ทำให้รอยต่อระหว่างขั้วโลหะกับชั้น N-drift อยู่ในสถานะถูกไบอัสย้อนกลับ กระแสจึงไม่สามารถไหลผ่านรอยต่อไปได้จนกว่าจะถึงแรงดันพังทลายของรอยต่อระหว่างขั้วโลหะกับ N-drift กระแสจะสามารถไหลได้ โดยไม่สามารถควบคุมการไหลของกระแสได้



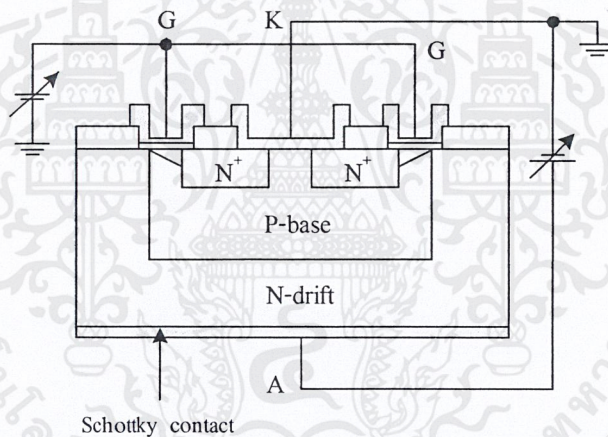
รูปที่ 3.2 การให้แรงดันไบอัสกับซิมเฟต เพื่อให้ทำงานในสถานะปิดกั้นย้อนกลับ

3.2.2 สถานะปิดกั้นไปหน้า (Forward blocking mode) เกิดจากการให้ไบอัสค่าบวกที่ขั้วอาโนด โดยลัดวงจรที่ขั้วคาโทดและขั้วเกตเข้าด้วยกัน แสดงดังรูปที่ 3.3 ทำให้รอยต่อระหว่าง N-drift กับ P-base อยู่ในสถานะถูกไบอัสย้อนกลับ กระแสจึงไม่สามารถไหลผ่านรอยต่อนี้ไปได้

3.2.3 สถานะนำกระแสไปหน้า (Forward conducting mode) เกิดจากการให้แรงดันไบอัสค่าบวกที่ขั้วอาโนดเหมือนกับสถานะปิดกั้นไปหน้า แต่ในกรณีนี้จะให้แรงดันไบอัสที่ขั้วเกตเป็นบวกเทียบกับคาโทดด้วยแสดงดังรูปที่ 3.4 ที่ค่าแรงดันไบอัสที่ขั้วเกตมีค่ามากกว่าแรงดันขีดเริ่ม (Threshold voltage) ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดชั้นนำ (Conduction layer) ขึ้นที่บริเวณส่วนผิวของ P-base ที่อยู่บริเวณใต้ส่วนเกต ชั้นนำนี้จะทำหน้าที่เป็นช่องทางเดินกระแสให้อิเล็กตรอนสามารถที่จะไหลผ่านจากขั้วคาโทดไปยังบริเวณชั้น N-drift ได้



รูปที่ 3.3 การให้แรงดันไบอัสกับซินเฟต เพื่อให้ทำงานในสภาวะปิดกั้นไปหน้า



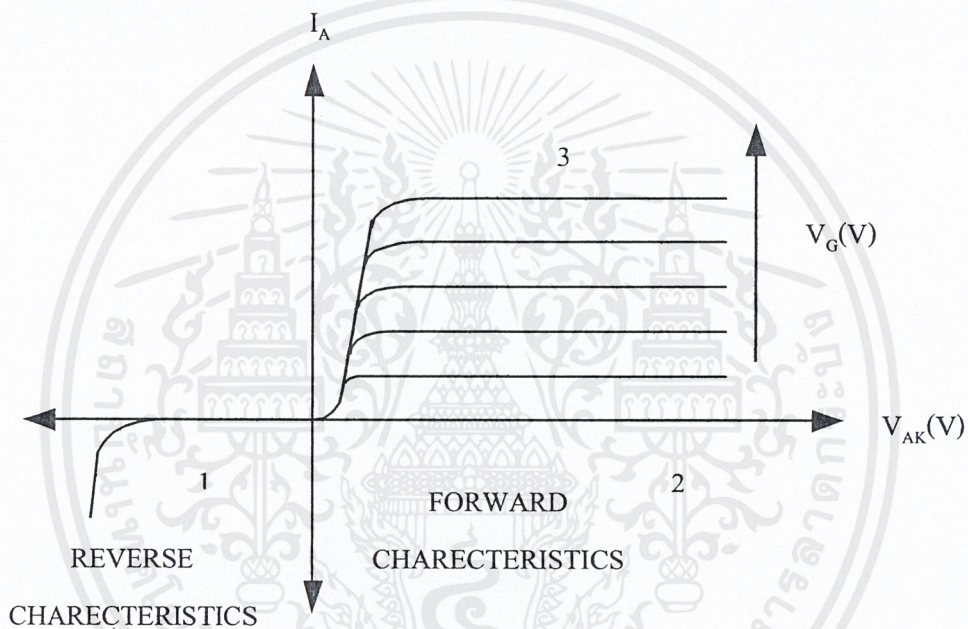
รูปที่ 3.4 การให้แรงดันไบอัสกับซินเฟต เพื่อให้ทำงานในสภาวะนำกระแสไปหน้า

3.2.4 กราฟคุณสมบัติกระแสเอาโนดและแรงดันเอาโนด-คาโอดของซินเฟต ในหัวข้อข้างต้นสามารถแสดงได้ในรูปที่ 3.5 ซึ่งเป็นกราฟคุณสมบัติกระแสเอาโนดและแรงดันเอาโนด-คาโอด โดยส่วน 1 แสดงถึงสภาวะปิดกั้นย้อนกลับ ส่วน 2 แสดงถึงสภาวะปิดกั้นไปหน้า และส่วน 3 แสดงสภาวะนำกระแสไปหน้า

จากการทำงานทั้งสามสภาวะที่กล่าวมา สำหรับสภาวะนำกระแสไปหน้า (ส่วน 3 ในรูปที่ 3.5) เป็นสภาวะที่น่าสนใจและถูกใช้งานมากที่สุด ที่สภาวะนี้จะเห็นได้ว่ารอยต่อระหว่างซิลิคอนกับ N-drift จะอยู่ในสภาวะไบอัสไปหน้าทำให้เกิดการฉีดประจุพาหะข้างน้อยจากโลหะเข้าไปในชั้นของ N-drift และจะฉีดมากขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเพิ่มค่าแรงดันไบอัสที่ขั้วเอาโนดอย่างไรก็ตามความสามารถเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการนำกระแสของช่องทางเดินกระแสที่ถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นก็มีขีดจำกัด ทั้งนี้เนื่องจากเกิดศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมช่องทางเดินกระแสส่งผลให้กระแสไปหน้า (forward current) มีค่าคงที่ค่าหนึ่ง

การเปลี่ยนแปลงสถานะการทำงานของอินเฟตจาก on ไป off สามารถทำได้ โดยการตัดช่องทางเดินกระแสที่ผิวของชั้น P-base บริเวณใต้เกต ด้วยการลัดวงจรระหว่างขั้วเกตเข้ากับคาโอด ทำให้อิเล็กตรอนซึ่งเป็นประจุส่วนมากไม่สามารถที่จะไหลผ่านชั้น N-drift ไปได้ซึ่งเป็นการเปลี่ยนสถานะการทำงานจาก on เป็น off ได้แบบทันทีทันใด โดยไม่มีปัญหาในการฉีดของโฮลที่เป็นพาหะส่วนน้อย ซึ่งเป็นปัญหาที่ทำให้ไอจีบีทีไม่สามารถหยุดนำกระแสได้ทันที ซึ่งจุดนี้เองที่เป็นจุดเด่นของอินเฟตที่ดีกว่าไอจีบีที



รูปที่ 3.5 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของอินเฟตโดยที่

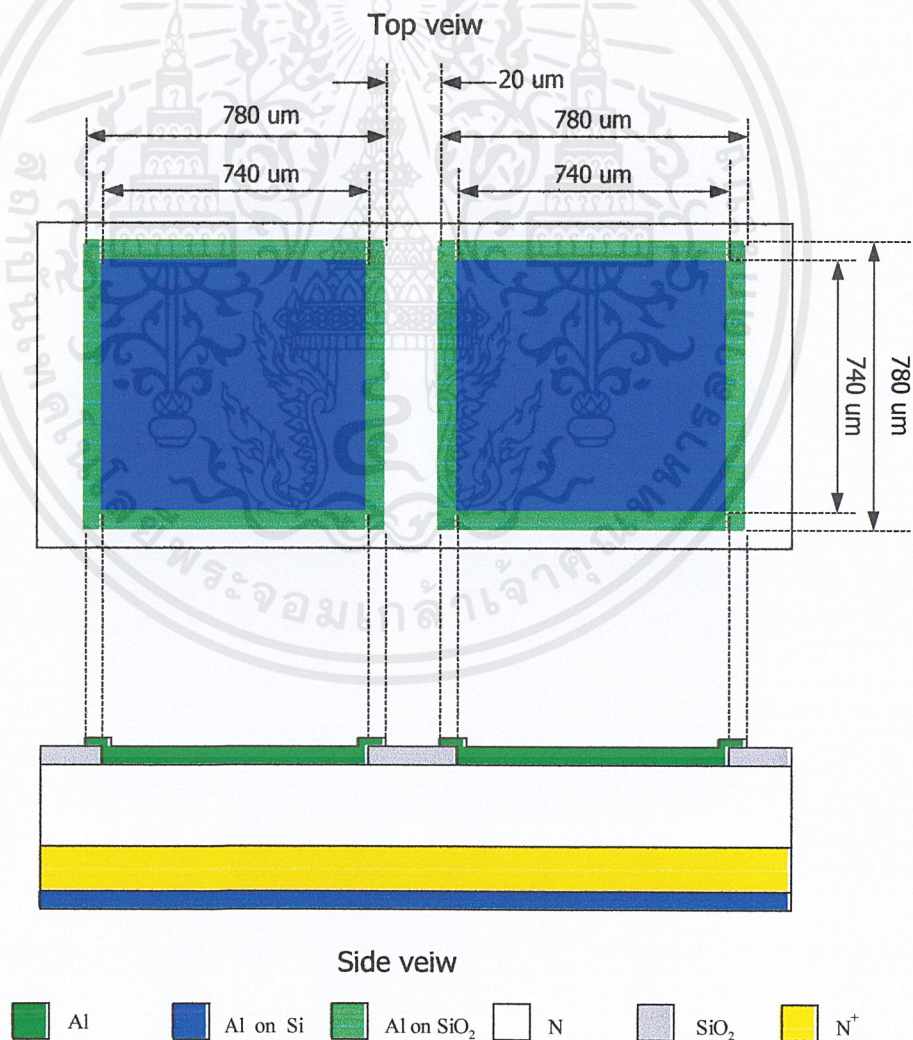
- 1 เป็นสภาวะปิดกั้นย้อนกลับ
- 2 เป็นสภาวะปิดกั้นไปหน้า
- 3 เป็นสภาวะนำกระแสไปหน้า

บทที่ 4

การออกแบบและกระบวนการสร้าง

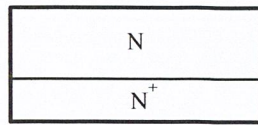
4.1 การออกแบบและกระบวนการสร้างรอยสัมผัสแบบซ้อตตี้

ในกระบวนการสร้างได้ออกแบบให้พื้นที่ของรอยสัมผัสระหว่างอะลูมิเนียมกับซิลิคอนมีค่าเท่ากับ $740 \mu\text{m} \times 740 \mu\text{m}$ จากนั้นนำแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็นระนาบ (100) ความต้านทาน $20 \Omega\text{cm}$ มาทำการสร้างซิลิคอนไดออกไซด์ปิดผิวหน้าของแผ่นซิลิคอน หลังจากนั้นใช้กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี (Photolithography) เปิดช่องซิลิคอนไดออกไซด์ เพื่อสร้างเป็นรอยสัมผัส ในขั้นตอนต่อไปเป็นการเคลือบอะลูมิเนียมด้านหน้าของแผ่น ด้วยเทคนิคการเคลือบโลหะในสุญญากาศที่ความดันประมาณ 1.6×10^{-6} ทอร์ แล้วนำไปผ่านกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี เพื่อสร้างขั้วสัมผัส

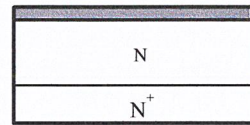
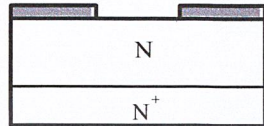


รูปที่ 4.1 แสดงการออกแบบรอยสัมผัสแบบซ้อตตี้

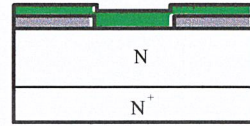
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



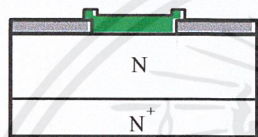
(ก) แผ่นซิลิคอน

(ข) สร้าง SiO_2 

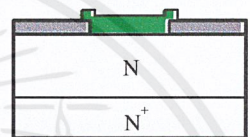
(ค) เปิดช่องรอยสัมผัส



(ง) เคลือบอะลูมิเนียมด้านหน้า



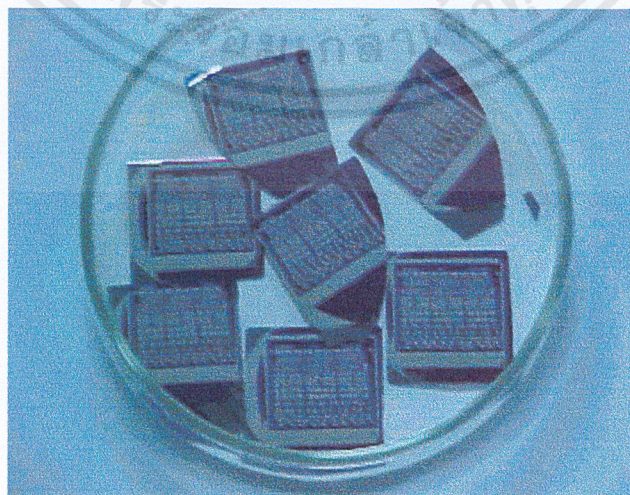
(จ) สร้างขั้วอะลูมิเนียม



(ฉ) เคลือบอะลูมิเนียมด้านหลัง

รูปที่ 4.2 กระบวนการสร้างรอยสัมผัสแบบช็อตก็

อะลูมิเนียม หลังจากนั้นเคลือบอะลูมิเนียมที่ด้านหลังแผ่นอีกครั้งหนึ่ง และนำชิ้นงานไปขึ้นเตอริงที่อุณหภูมิ 300°C , 400°C และ 500°C ตามลำดับเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นจึงใช้การวัดกระแส-แรงดันและความจุไฟฟ้าที่รอยสัมผัส เพื่อหาค่าความสูงของกำแพงสัคย์ต่อไป



รูปที่ 4.3 แสดงชิ้นงานที่สร้างเสร็จแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การออกแบบซินเฟต (SINFET)

จากลักษณะ โครงสร้างของซินเฟตที่คล้ายคลึงกับโครงสร้างของไอจีบีทีและคิมอสเฟต ซึ่งการออกแบบลวดลายต่างๆ ลงบนกระดาษกราฟดินแบบ โดยออกแบบให้มีขนาดใหญ่เป็น 50 เท่าของอุปกรณ์จริงด้วยการออกแบบลวดลายทุกชั้นตอนลงบนกระดาษกราฟดินแบบแผ่นเดียวกัน เพื่อป้องกันความคลาดเคลื่อน จากนั้นนำไปทาบลงบนแผ่นโพลีเอสเตอร์บนโต๊ะตัดไมโครคัตเตอร์เพื่อตัดเป็นลวดลายตามที่ออกแบบไว้ แล้วจึงนำดินแบบที่ได้ไปถ่ายย่อส่วน 50 เท่า ลงบนกระจกดินแบบ(Photomask) ด้วยกล้องย่อส่วน(Reduction camera) ซึ่งการออกแบบกระจกดินแบบสำหรับกระบวนการสร้างซินเฟตในแนวระนาบประกอบด้วยกระจกดินแบบทั้งหมด 5 แผ่นคือ

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

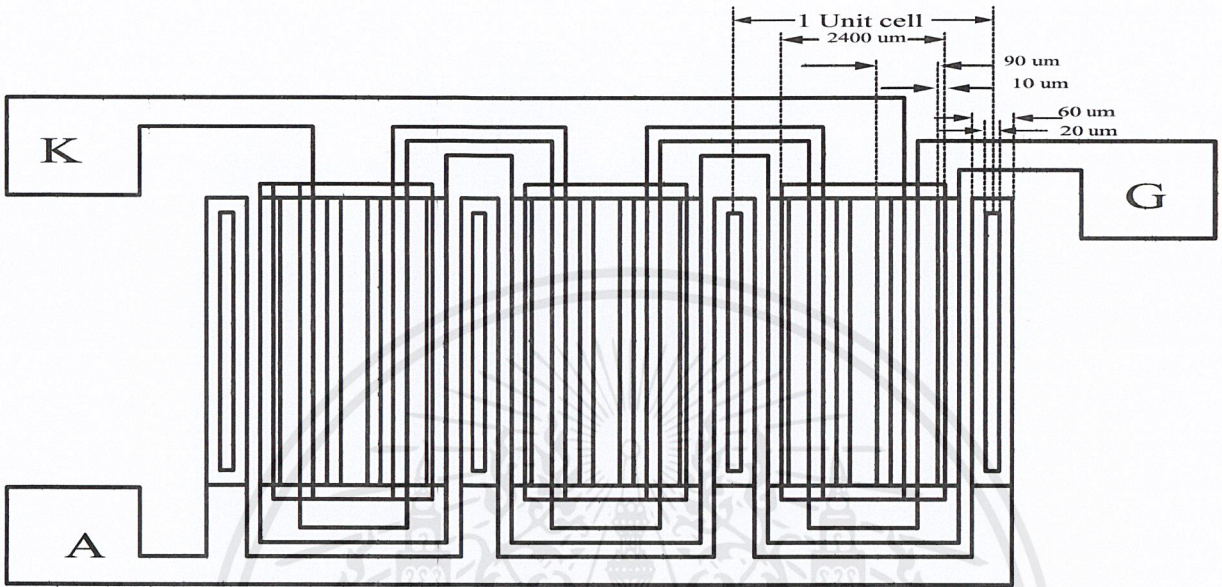
ในกระบวนการออกแบบ ต้องการศึกษาค่าผลของกระแสที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อความกว้างของช่องทางเดินกระแสเปลี่ยน ซึ่งพารามิเตอร์ที่กำหนดในขั้นตอนการออกแบบสร้างซินเฟต กำหนดให้ความยาวของช่องทางเดินกระแส (L) เท่ากับ 10 μm แต่จะเปลี่ยนแปลงความกว้างของช่องทางเดินกระแส (W) ดังนี้

$$L = 10 \mu\text{m}, \quad W = 2,400 \mu\text{m}$$

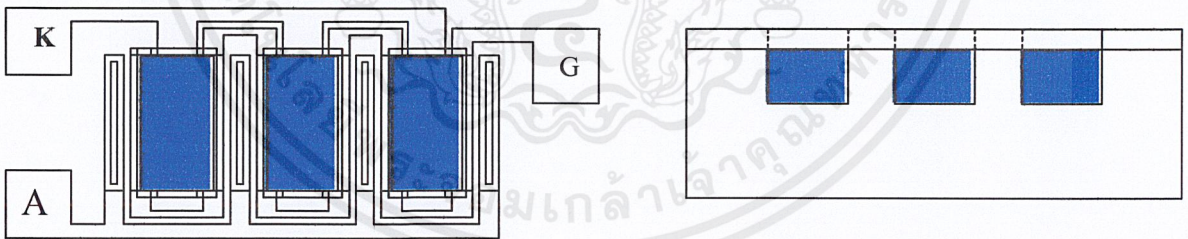
$$L = 10 \mu\text{m}, \quad W = 3,600 \mu\text{m}$$

$$L = 10 \mu\text{m}, \quad W = 4,800 \mu\text{m}$$

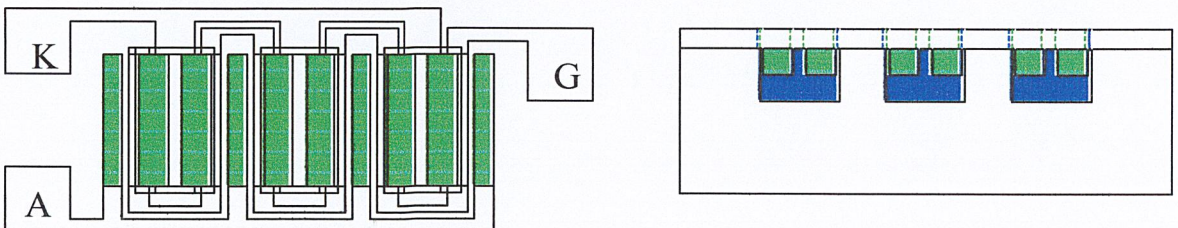
$$L = 10 \mu\text{m}, \quad W = 5,400 \mu\text{m}$$



รูปที่ 4.4 ลวดลายทั้งหมดของซินเฟด โครงสร้างในแนวระนาบที่ออกแบบบนกระดาษไข

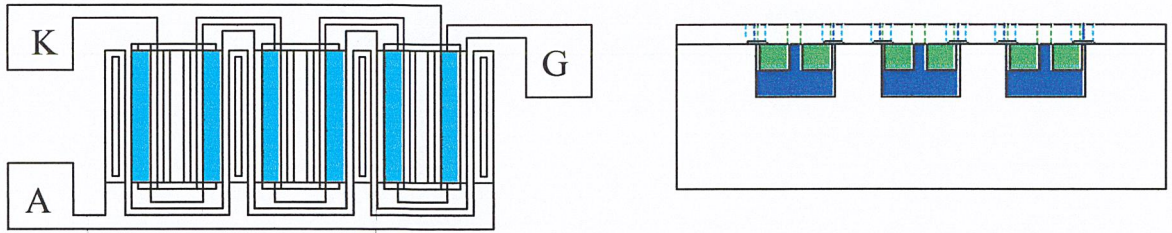


Mask 1 P - base

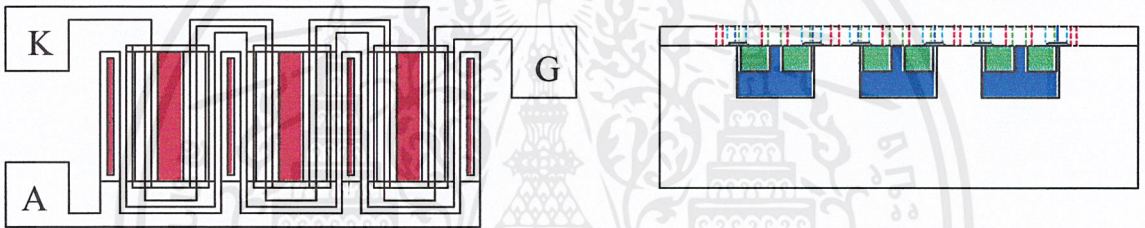


Mask 2 N⁺

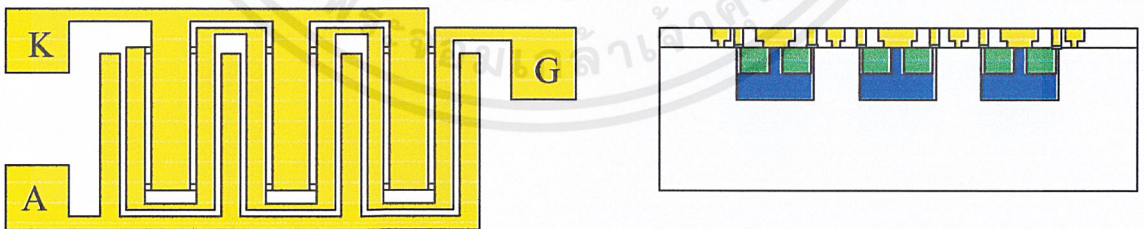
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Mask 3 Gate oxide



Mask 4 Contact



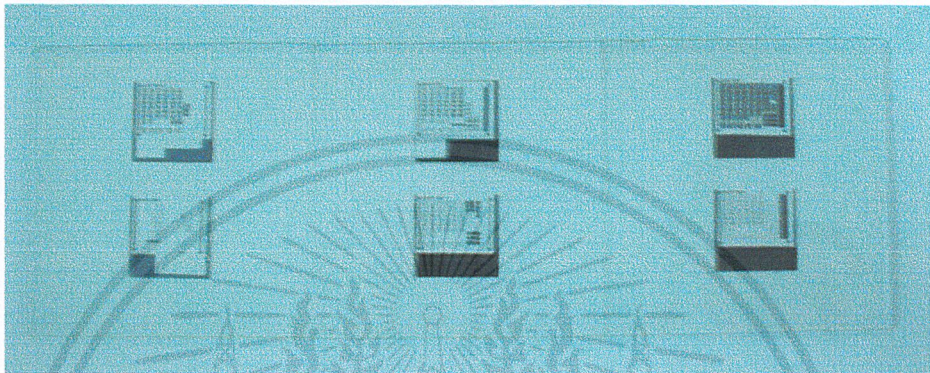
Mask 5 Metal

รูปที่ 4.5 ภาพด้านบนของกระจกต้นแบบต่างๆ ที่ใช้สำหรับกระบวนการสร้างชิปเฟด
โครงสร้างในเนวระนาบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 กระบวนการสร้างซินเฟต

ซินเฟตที่ทำการสร้าง เป็นชนิดเอ็นแซนแนล 3 แผ่นที่มีเงื่อนไขของอุณหภูมิในการซินเฟตที่ต่างกันคือ ที่อุณหภูมิ 300°C และ 500°C สำหรับกระจกต้นแบบที่ใช้ในกระบวนการสร้างนี้แสดงดังในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.6 กระจกต้นแบบที่ใช้ในการสร้างซินเฟต
ขั้นตอนการสร้าง

1. ขั้นตอนการเตรียมแผ่นซิลิกอนและการตรวจสอบคุณสมบัติแผ่นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น 3 แผ่น หนา $400\ \mu\text{m}$ ระบาย (100) มีค่าสภาพต้านทาน $20\ \Omega\text{-cm}$
2. การทำความสะอาดผิวซิลิกอนครั้งแรก
 - 2.1 ทำความสะอาดผิวด้วยน้ำบริสุทธิ์
 - 2.2 กัดผิวหน้าแผ่นผลึกด้วยกรดกัดแก้ว HF 5% เป็นเวลา 2 นาที
 - 2.3 ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
 - 2.4 ต้มในกรดไนตริก (HNO_3) เป็นเวลา 10 นาที
 - 2.5 ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
 - 2.6 ต้มในน้ำบริสุทธิ์ เป็นเวลา 5 นาที
 - 2.7 ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
 - 2.8 เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
3. การทำความสะอาดผิวหน้า
 - 3.1 ต้มในไตรโคลโรเอททีลีน (Trichlorethylene) เป็นเวลา 5 นาที
 - 3.2 ล้างด้วยอะซิโตน (Acetone) ในเครื่องสั่นความถี่สูง เป็นเวลา 3 นาที
 - 3.3 ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3.4 จุ่มในกรดกัดแก้ว HF 5% เป็นเวลา 10 วินาที
- 3.5 ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- 3.6 เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
4. กระบวนการออกซิเดชัน ที่อุณหภูมิ 1100 °C
 - 4.1 Dry Oxidation โดยมีอัตราการไหลผ่านของ O₂ เท่ากับ 1200 CC/min 120 นาที
 - 4.2 Wet Oxidation โดยมีอัตราการไหลผ่านของ O₂ เท่ากับ 1000 CC/min 100 นาที
 - 4.3 Dry Oxidation โดยมีอัตราการไหลผ่านของ O₂ เท่ากับ 1100 CC/min 120 นาที
5. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีมาสก์ที่ 1
 - 5.1 อบแห้งที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 30 นาที
 - 5.2 เคลือบน้ำยาไวแสง (waycoat) โดยใช้เครื่อง Spinner ที่ความเร็ว 5000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 วินาที
 - 5.3 อบครั้งแรก ให้น้ำยาแห้งที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 30 นาที
 - 5.4 ฉายแสงผ่านกระจกมาสก์ที่ I ด้วยอุปกรณ์ Mask aligner ซึ่งจะให้แสงอุลตราไวโอเลตออกมา แหล่งของแสง คือ หลอดเมอร์คิวรี $\lambda = 5000 \text{ \AA}$ เป็นเวลา 10 วินาที
 - 5.5 การล้างภาพ จุ่มในน้ำยาล้างภาพ (Xylene) 2 ครั้งๆ ละ 90 วินาที จุ่มในน้ำยาทำความสะอาด (Isoprophy) 3 ครั้งๆ ละ 30 วินาที ล้างในน้ำบริสุทธิ์ 2 แก้ว แล้วเป่าให้แห้งทันที ด้วยก๊าซไนโตรเจน
 - 5.6 อบครั้งที่สอง ให้นำแผ่นฟิล์มที่เหลืออยู่แห้งที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นเอาออกมาทางด้านหลังแผ่นผลึกด้วยน้ำยาไวแสงแล้วนำไปอบแห้งอีกครั้ง เป็นเวลา 30 นาที
6. การสกัดชั้นออกไซด์
7. กระบวนการลอกฟิล์ม

สารไวแสงที่ถูกแสง และยังคงค้างอยู่บนแผ่นผลึกซิลิคอน สามารถลอกทิ้งได้ โดย

 - 7.1 ต้มในกรดซัลฟูริก (H₂SO₄) 2 ครั้งๆ ละ 5 นาที
 - 7.2 ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

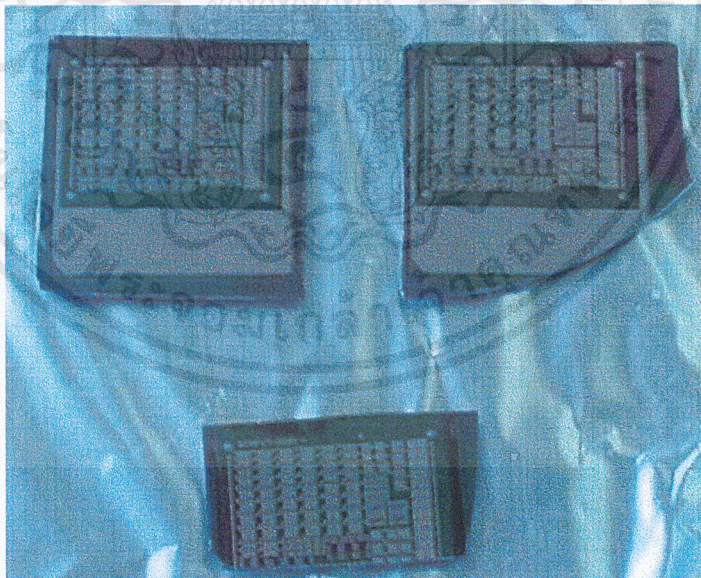
- 7.3 ต้มในน้ำบริสุทธิ์ 2 ครั้งๆ ละ 5 นาที
- 7.4 ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- 7.5 เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
8. การทำความสะอาดผิวหน้า (ดูหัวข้อที่ 3)
9. กระบวนการ predeposition โดยใช้ Boron ซอสแข็ง
 - 9.1 ทำการ Activation โดยมีอัตราการไหลผ่านของ O_2 เท่ากับ 700 CC/min 30 นาที
 - 9.2 ทำการ Stabilize โดยมีอัตราการไหลผ่านของ N_2 เท่ากับ 700 CC/min 30 นาที
 - 9.3 Predeposition โดยมีอัตราการไหลผ่านของ N_2 เท่ากับ 700 CC/min 20 นาที
10. ลอกชั้น Boron glass
 - 10.1 จุ่มแผ่นผลึกในกรดกัดแก้ว HF 5% For Boron
 - 10.2 ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
 - 10.3 เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
11. กระบวนการ drive-in และ reoxidation ที่อุณหภูมิ $1100^\circ C$ เป็นเวลา 14 ชม.
 - 11.1 Dry Oxidation โดยมีอัตราการไหลผ่านของ O_2 เท่ากับ 1000 CC/min 8 ชม.
 - 11.2 Flow Nitrogen โดยมีอัตราการไหลผ่านของ O_2 เท่ากับ 700 CC/min 4 ชม.
12. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟีมาสก์ที่ 2 (ดูหัวข้อที่ 5)
13. การสกัดชั้นออกไซด์
14. กระบวนการลอกฟิล์ม (ดูหัวข้อที่ 7)
15. การทำความสะอาดผิวหน้า (ดูหัวข้อที่ 3)
16. กระบวนการ predeposition โดยใช้ Phosphorus ซอสเหลว
 - 16.1 ทำการ Spin ด้วย Liquid source 3000 รอบต่อนาที
 - 16.2 อบที่อุณหภูมิ $150^\circ C$ เป็นเวลา 10 นาที
17. ลอกชั้น Phosphorus glass
 - 17.1 จุ่มแผ่นผลึกในกรดกัดแก้ว HF 5% For Phosphorus
 - 17.1 ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 17.2 เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
18. การทำความสะอาดผิวหน้า (ดูหัวข้อที่ 3)
19. กระบวนการ drive-in และ reoxidation ที่อุณหภูมิ 1100 °C เป็นเวลา 1.20 ชม.
- 19.1 Dry Oxidation โดยมีอัตราการไหลผ่านของ O₂ เท่ากับ 1200 CC/min 20 นาที
- 19.2 Wet Oxidation โดยมีอัตราการไหลผ่านของ O₂ เท่ากับ 1000 CC/min 40 นาที
- 19.3 Dry Oxidation โดยมีอัตราการไหลผ่านของ O₂ เท่ากับ 1200 CC/min 20 นาที
20. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีมาสก์ที่ 3 (ดูหัวข้อที่ 5)
21. การสกัดชั้นออกไซด์
22. กระบวนการลอกฟิล์ม (ดูหัวข้อที่ 7)
23. การทำความสะอาดผิวหน้า (ดูหัวข้อที่ 3)
24. กระบวนการสร้าง Gate Oxide ที่อุณหภูมิ 1100 °C
- 24.1 Dry Oxidation โดยมีอัตราการไหลผ่านของ O₂ 1200 CC/min 30 นาที
25. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีมาสก์ที่ 4 (ดูหัวข้อที่ 5)
26. การสกัดชั้นออกไซด์
27. กระบวนการลอกฟิล์ม (ดูหัวข้อที่ 7)
28. การทำความสะอาดผิวหน้า (ดูหัวข้อที่ 3)
29. เคลือบแผ่นอลูมิเนียมด้านหน้าแผ่นในสุญญากาศ
30. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีมาสก์ที่ 5
- ใช้กระจกมาสก์ที่ 5 เป็นต้นแบบในการกัดส่วนของอลูมิเนียมที่ไม่ต้องการออกขั้นตอนนี้ใช้น้ำยาไวแสงชนิดบวก AZ มีลำดับขั้นตอนดังนี้ คือ
- 30.1 อบแห้งที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 30 นาที
- 30.2 เคลือบน้ำยาไวแสง โดยใช้เครื่อง Spinner ที่ความเร็ว 5000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 วินาที
- 30.3 อบครั้งแรก ให้น้ำยาแห้งที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 30 นาที
- 30.4 ฉายแสงผ่านกระจกมาสก์ที่ 5 ด้วยอุปกรณ์ Mask aligner เป็นเวลา 10 วินาที
- 30.5 ล้างภาพโดยการจุ่มในน้ำยา AZ-Developer 2 ครั้งๆ ละ 30 วินาที

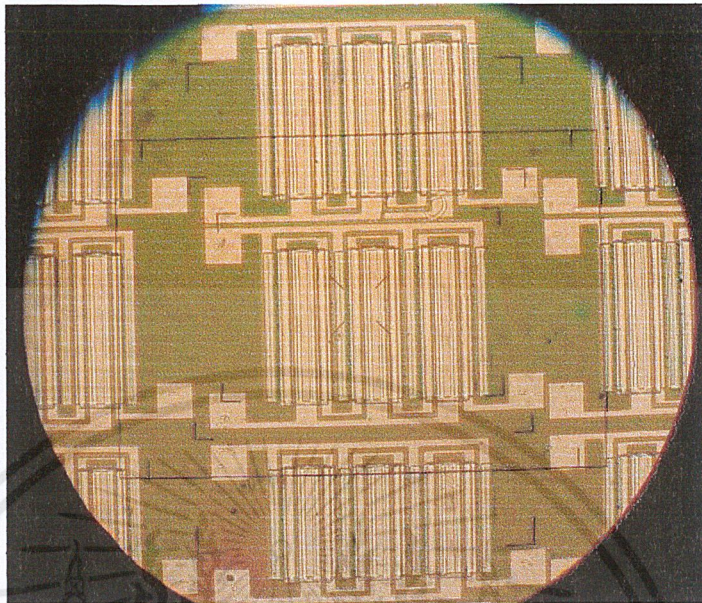
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 30.5 ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- 30.6 เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- 30.7 อบครั้งที่สอง ให้แผ่นฟิล์มที่เคลืออยู่แห้งที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 15 นาที
31. การกักชั้นออลูมิเนียม
- 31.1 จุ่มแผ่นผลึกลงในสารละลายผสมซึ่งมีกรดฟอสฟอริกเป็นหลัก ในอุณหภูมิราว 50°C เป็นเวลา 10 วินาที
32. กระบวนการลอกฟิล์ม
- 32.1 จุ่มแผ่นผลึกลงในอะซิโตน ประมาณ 1 นาที
- 32.2 ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- 32.3 เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
33. กระบวนการซินเตอร์ริง
- ทำการ ซินเตอร์ริง โดยทิ้งแผ่นผลึกไว้ในบรรยากาศของไนโตรเจน เป็นเวลา 15 นาที โดยแบ่งเงื่อนไขของอุณหภูมิเป็น 300°C และ 500°C



รูปที่ 4.7 แสดงชิ้นงานที่ได้หลังจากกระบวนการสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 แสดงทลายโครงสร้างของซินเฟต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

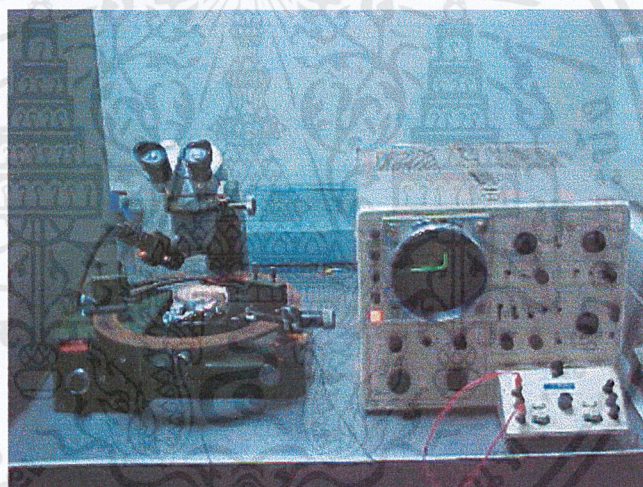
การทดลองและผลการทดลอง

ในการทดลองเราได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนแรกเป็นการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของซีดกี และในส่วนที่สองเป็นการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของซินเฟด

5.1 การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของซีดกี

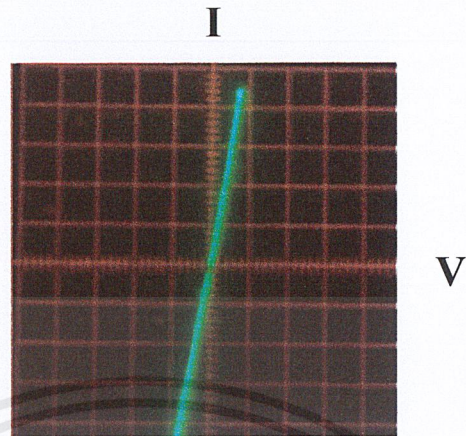
5.1.1 การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วย Transistor curve tracer

เมื่อได้ชิ้นงานที่สร้างเสร็จตามกระบวนการในบทที่ 4 จากนั้นนำผลงานที่ได้มาวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่องมือวัดคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์ (Transistor curve tracer) ได้ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 5.2 ถึงรูปที่ 5.8

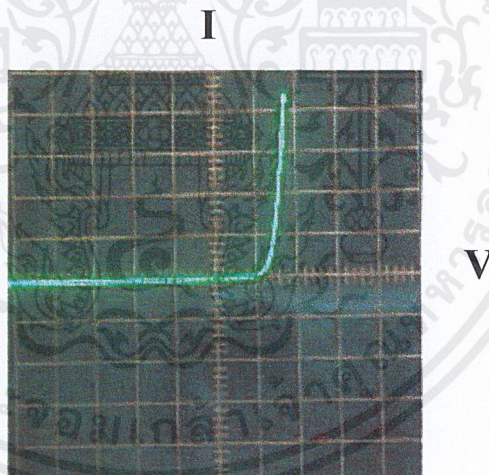


รูปที่ 5.1 แสดงการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของซีดกีด้วย Transistor Curve Tracer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

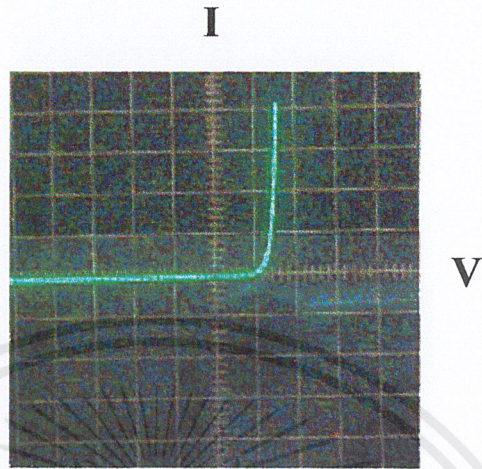


รูปที่ 5.2 แสดงคุณสมบัติของกระแสและแรงดันเมื่อได้รับ ไป้อตรง
No-sintering
(Hor:0.1V/div,Ver:0.1mA/div)

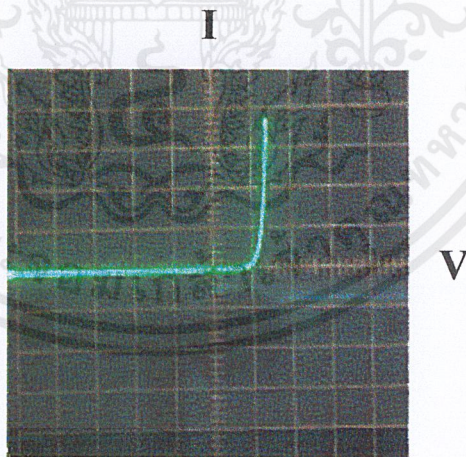


รูปที่ 5.3 แสดงคุณสมบัติของกระแสและแรงดันเมื่อได้รับ ไป้อตรง
Sintering 300°C เวลา 15 นาที
(Hor:0.1V/div,Ver:0.1mA/div)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

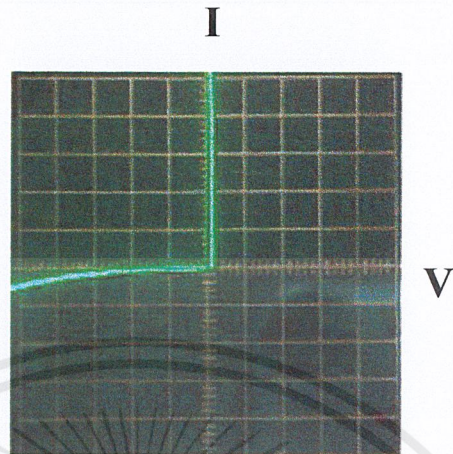


รูปที่ 5.4 แสดงคุณสมบัติของกระแสและแรงดันเมื่อได้รับไบอัสตรง
Sintering 400°C เวลา 15 นาที
(Hor:0.1V/div, Ver:0.1mA/div)

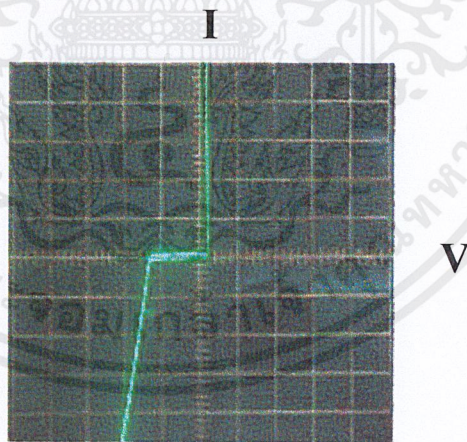


รูปที่ 5.5 แสดงคุณสมบัติของกระแสและแรงดันเมื่อได้รับไบอัสตรง
Sintering 500°C เวลา 15 นาที
(Hor:0.1V/div, Ver:0.1mA/div)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

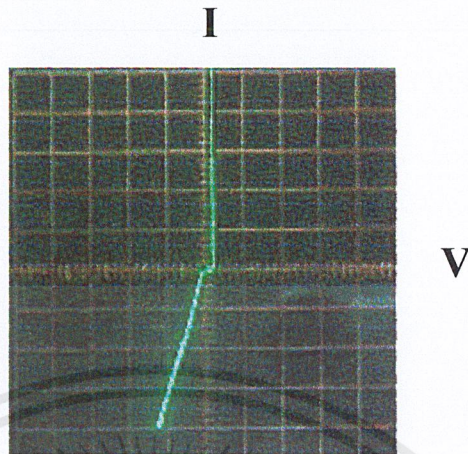


รูปที่ 5.6 แสดงคุณสมบัติของกระแสและแรงดันเมื่อได้รับไบอัสย้อนกลับ
Sintering 300°C เวลา 15 นาที
(Hor:20V/div, Ver:0.1mA/div)



รูปที่ 5.7 แสดงคุณสมบัติของกระแสและแรงดันเมื่อได้รับไบอัสย้อนกลับ
Sintering 400°C เวลา 15 นาที
(Hor:20V/div, Ver:0.1mA/div)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

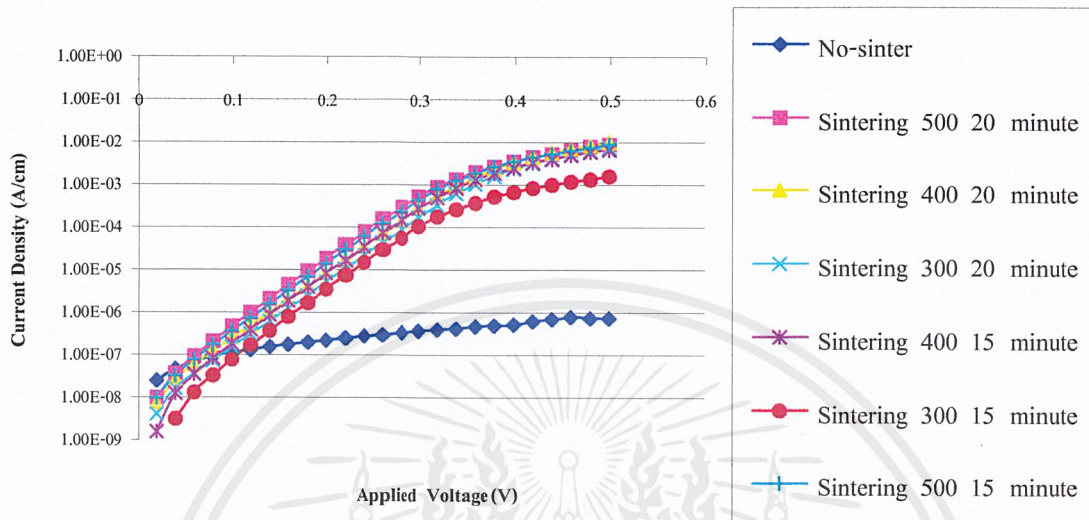


รูปที่ 5.8 แสดงคุณสมบัติของกระแสและแรงดันเมื่อได้รับไบอัสย้อนกลับ
Sintering 500°C เวลา 15 นาที
(Hor:20V/div, Ver:0.1mA/div)

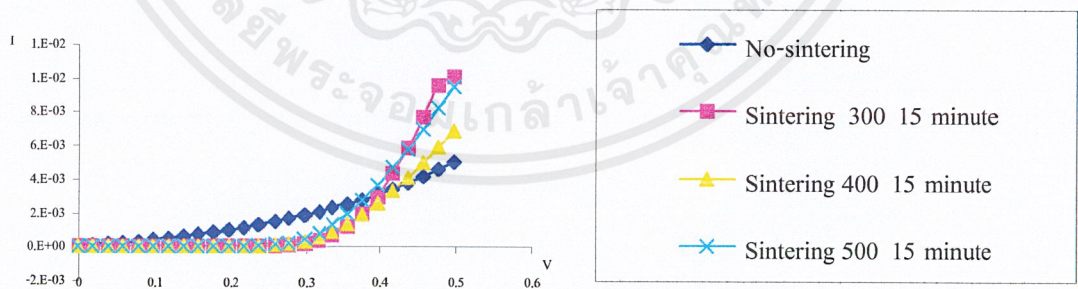
จากรูปที่ 5.2 ผลจากการไม่ซินเตอร์ริงทำให้มีกระแสรั่วไหลในช่วงไบอัสกลับสูงมากอีก ทั้งในช่วงไบอัสตรงกระแสและแรงดันยังไม่เป็นไปตามคุณสมบัติของรอยสัมผัสแบบซ็อตตี้ ซึ่งในกรณีนี้ไม่สมควรนำมาสร้างเป็นส่วนประกอบของซินเฟด ส่วนในรูปที่ 5.3 ถึง 5.8 ได้แสดงคุณสมบัติของกระแสและแรงดันของซ็อตตี้ไดโอด ในกรณีที่ได้รับไบอัสตรงและไบอัสกลับที่เงื่อนไขต่างกัน จะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่อุณหภูมิ 300°C , 400°C และ 500°C กรณีไบอัสตรงจะให้ค่าแรงดันขีดเริ่มที่ใกล้เคียงกันแต่ในกรณีไบอัสกลับที่อุณหภูมิ 300°C จะสามารถทนแรงดันไบอัสกลับได้สูงสุด

5.1.2 การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (HP VEE)

เพื่อให้แน่ใจว่าผลของการวัดด้วยเครื่องมือวัดคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์ (Transistor curve tracer) นั้นถูกต้องจึงใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ (HP VEE) ทำการวัดหาค่าคุณสมบัติของกระแสและแรงดันว่าชิ้นงานที่สร้างขึ้นมีคุณสมบัติของรอยสัมผัสแบบซ็อตตี้หรือไม่ ซึ่งผลที่ได้นำมาพล็อตกราฟแสดงในรูปที่ 5.9 ถึงรูปที่ 5.11

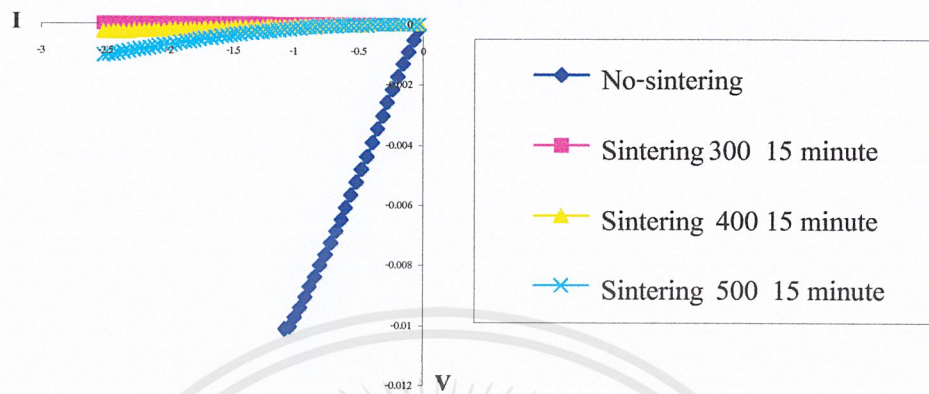


รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแส-แรงดันที่ได้จากการวัดกระแสและแรงจากชิ้นงานที่ซินเตอร์ริง ณ อุณหภูมิต่างๆ



รูปที่ 5.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันเมื่อได้รับ ไบอัสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันเมื่อได้รับไบอัสย้อนกลับ

จากรูปกราฟที่ 5.10 จะเห็นว่ากรณีไบอัสไปตรงที่อุณหภูมิ 300°C จะมีแรงดันขีดเริ่มที่ประมาณ 0.2 V ซึ่งค่าแรงดันดังกล่าวจะต่ำกว่าค่าแรงดันขีดเริ่มของชิ้นงานที่อุณหภูมิ 400°C และ 500°C ส่วนในกรณีไม่ซินเตอร์ค่าแรงดันขีดเริ่มจะมีค่าน้อยมากประมาณ $0-0.1\text{ V}$ ก็นำกระแสแล้ว แต่เมื่อเราพิจารณารูปกราฟที่ 5.11 จะเห็นได้ว่าในกรณีที่ได้รับไบอัสกลับชิ้นงานที่อุณหภูมิ 400°C , 500°C และไม่ซินเตอร์จึงจะมีค่ากระแสรั่วไหลเป็นจำนวนมากเมื่อเทียบกับกรณีที่อุณหภูมิ 300°C

จากนั้นนำค่าที่ได้จากการวัดด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (HP VEE) มาทำการหาค่าความสูงกำแพงศักย์โดยนำค่าที่ได้มาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแส-แรงดันเพื่อหาค่า J_c ดังรูปที่ 5.9 จะได้ค่าความสูงของกำแพงศักย์ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ค่าความสูงของกำแพงศักย์เฉลี่ยที่ได้จากการวัดกระแสและแรงดัน

อุณหภูมิที่ใช้ ($^{\circ}\text{C}$)	ค่าความสูงของกำแพงศักย์จากการวัดกระแส-แรงดัน(V)
300	0.62
400	0.72
500	0.74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่ได้จากการวัดค่ากระแสและแรงดัน จะมีค่าแตกต่างกัน แต่การเปลี่ยนแปลงของค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่วัดได้ก่อนข้างจะคงที่ในช่วงอุณหภูมิ 300°C และจะมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 400°C และ 500°C

5.2 การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของซินเฟต

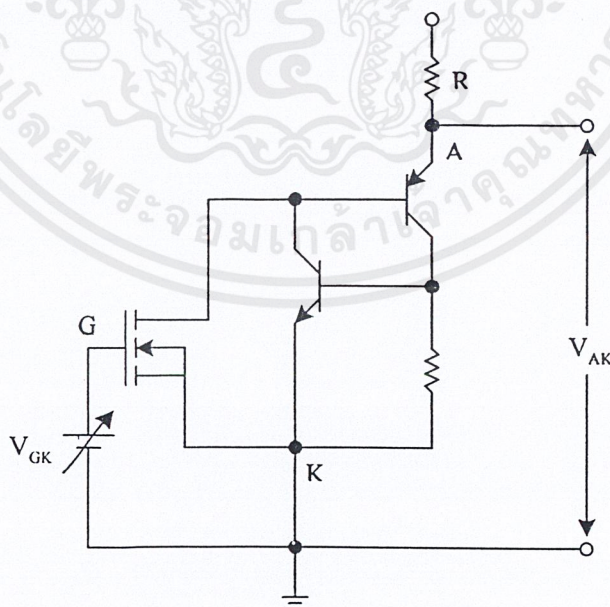
5.2.1 การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของซินเฟตชนิดเอ็นแซนแนล

นำชิ้นงานที่ได้มาทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วย Probe station และ Transistor curve tracer โดยทำการวัดคุณสมบัติของกระแสและแรงดัน แรงดันซีดีเริ่ม แรงดันพังทลาย จากลักษณะโครงสร้างของซินเฟตที่สร้างขึ้นจะมีความยาวของช่องทางเดินกระแส (L) เท่ากับ $10\ \mu\text{m}$ มีความกว้างของช่องทางเดินกระแส (W) ที่ต่างกันคือ $W = 2400\ \mu\text{m}, 3600\ \mu\text{m}, 4800\ \mu\text{m}, 5400\ \mu\text{m}$ โดยเงื่อนไขของอุณหภูมิที่ใช้ในการซินเตอร์มี 2 เงื่อนไขคือ

1. ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 300°C เวลา 15 นาที
2. ซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 500°C เวลา 15 นาที

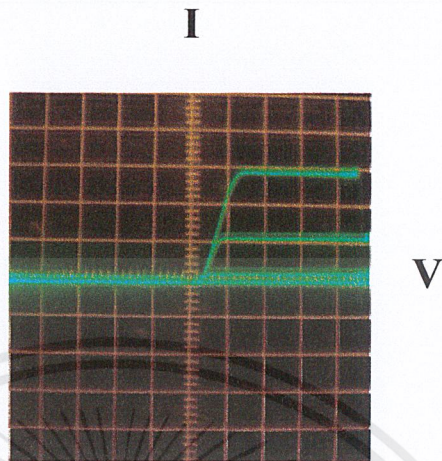
5.2.2 การวัดค่าของกระแสไอโหนดและแรงดันไอโหนดคาโถกของซินเฟตชนิดเอ็นแซนแนล

คุณสมบัติของกระแสและแรงดันของซินเฟตชนิดเอ็นแซนแนล สามารถวัดค่าได้จาก Probe station และ Transistor curve tracer ซึ่งมีการต่อวงจรวัดค่าดังรูปที่ 5.12

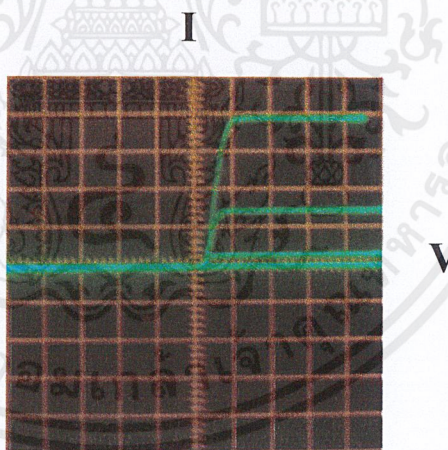


รูปที่ 5.12 แสดงการต่อวงจรเพื่อใช้วัดคุณสมบัติ ของกระแสไอโหนดและแรงดัน ไอโหนดคาโถกของซินเฟตชนิดเอ็นแซนแนล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

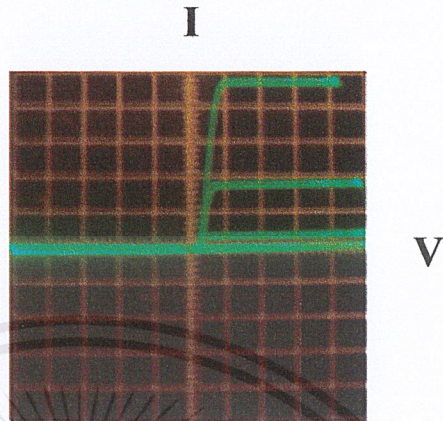


รูปที่ 5.13 กราฟแสดงคุณสมบัติของกระแสอาโนดและแรงดันเกทคาโอด
ที่ W เท่ากับ $2400 \mu\text{m}$ L เท่ากับ $10 \mu\text{m}$ อุณหภูมิชิวิตจริง 300°C
(Hor:1V/div, Ver:0.5mA/div)

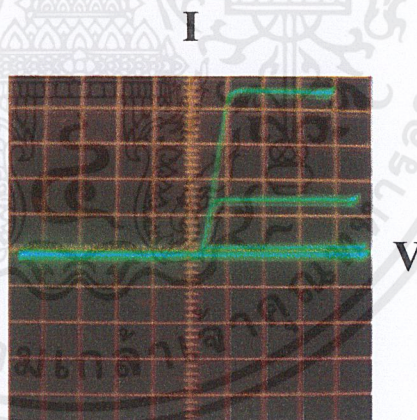


รูปที่ 5.14 กราฟแสดงคุณสมบัติของกระแสอาโนดและแรงดันเกทคาโอด
ที่ W เท่ากับ $3600 \mu\text{m}$ L เท่ากับ $10 \mu\text{m}$ อุณหภูมิชิวิตจริง 300°C
(Hor:1V/div, Ver:1mA/div)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

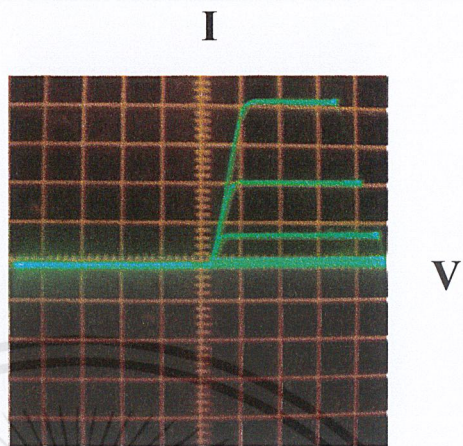


รูปที่ 5.15 กราฟแสดงคุณสมบัติของกระแสอาโนดและแรงดันเกตคาโอด
ที่ W เท่ากับ $4800 \mu\text{m}$ L เท่ากับ $10 \mu\text{m}$ อุณหภูมิชิวิตจริง 300°C
(Hor:1V/div, Ver:1mA/div)

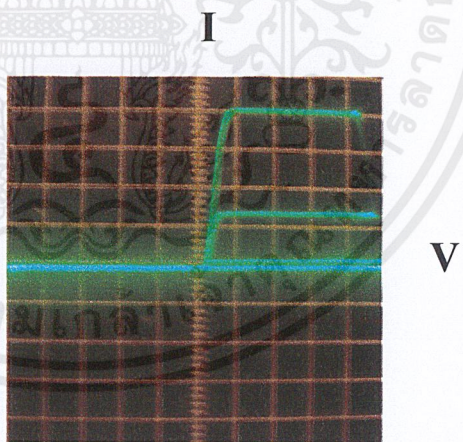


รูปที่ 5.16 กราฟแสดงคุณสมบัติของกระแสอาโนดและแรงดันเกตคาโอด
ที่ W เท่ากับ $5400 \mu\text{m}$ L เท่ากับ $10 \mu\text{m}$ อุณหภูมิชิวิตจริง 300°C
(Hor:1V/div, Ver:1mA/div)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

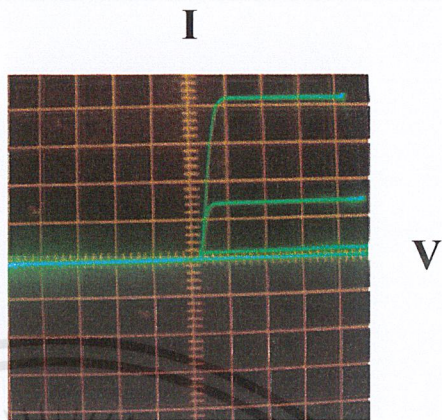


รูปที่ 5.17 กราฟแสดงคุณสมบัติของกระแสอาโนดและแรงดันเกตคาโอด
ที่ W เท่ากับ $2400 \mu\text{m}$ L เท่ากับ $10 \mu\text{m}$ อุณหภูมิซินเตอร์ริง 500°C
(Hor:1V/div, Ver:0.5mA/div)

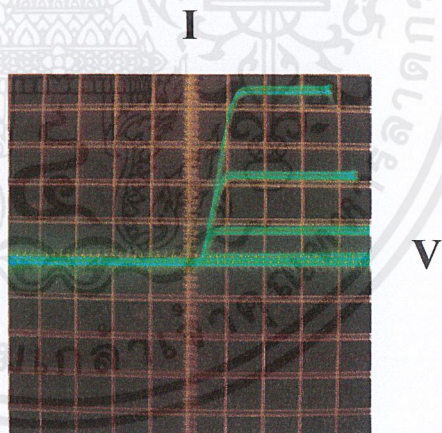


รูปที่ 5.18 กราฟแสดงคุณสมบัติของกระแสอาโนดและแรงดันเกตคาโอด
ที่ W เท่ากับ $3600 \mu\text{m}$ L เท่ากับ $10 \mu\text{m}$ อุณหภูมิซินเตอร์ริง 500°C
(Hor:1V/div, Ver:1mA/div)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.19 กราฟแสดงคุณสมบัติของกระแสอาโนดและแรงดันเกทคาโอด
ที่ W เท่ากับ $4800 \mu\text{m}$ L เท่ากับ $10 \mu\text{m}$ อุณหภูมิชิวิตจริง 500°C
(Hor:1V/div, Ver:1mA/div)

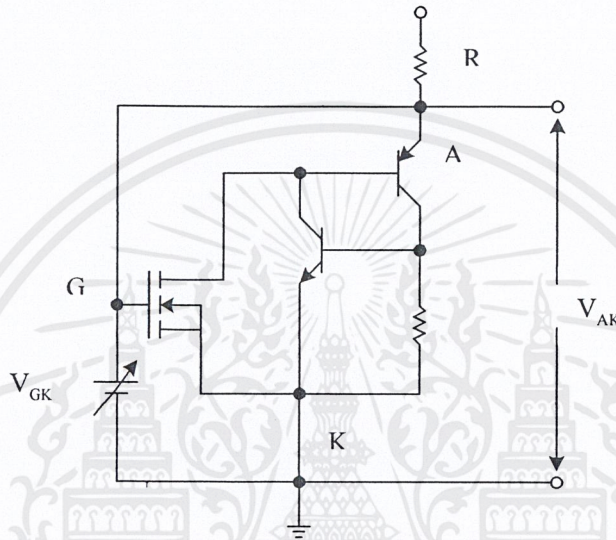


รูปที่ 5.20 กราฟแสดงคุณสมบัติของกระแสอาโนดและแรงดันเกทคาโอด
ที่ W เท่ากับ $5400 \mu\text{m}$ L เท่ากับ $10 \mu\text{m}$ อุณหภูมิชิวิตจริง 500°C
(Hor:1V/div, Ver:1mA/div)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.3 การวัดแรงดันขั้วเริ่ม

ในการวัดค่าแรงดันขั้วเริ่ม จะทำการวัดโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ HP VEE วงจรที่ใช้ในการวัดแสดงในรูปที่ 5.21



รูปที่ 5.21 แสดงการต่อวงจรเพื่อใช้วัดค่าแรงดันขั้วเริ่ม

ผลของการวัดค่าแรงดันขั้วเริ่ม (V_T) แสดงดังรูปที่ 5.30 และรูปที่ 5.32 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส I_A และแรงดัน V_{GK} จากนั้นนำกราฟที่ได้ไปคำนวณเพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างรากที่สองของ I_A กับ V_{GK} ดังรูปที่ 5.31 และรูปที่ 5.33 ในการคำนวณหาค่าแรงดันขั้วเริ่ม วงจรที่ใช้วัดค่าแรงดันขั้วเริ่มมีลักษณะการวัดเช่นเดียวกับการวัดค่าแรงดันขั้วเริ่มของมอสทรานซิสเตอร์ในช่วงอิมิตัว ดังนั้นจากสมการกระแสช่วงอิมิตัวของมอสทรานซิสเตอร์คือ

$$I_D = \frac{\beta}{2} (V_{GS} - V_T)^2 \quad 5.1$$

เมื่อ
$$\beta = \frac{(\mu C_{ox} w)}{L}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

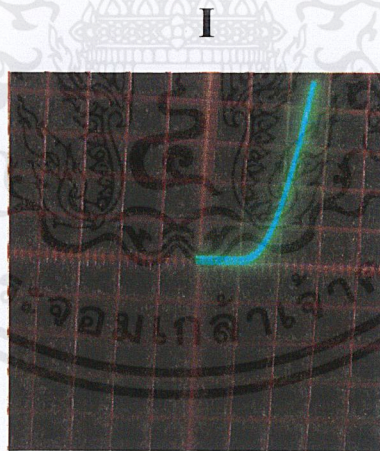
จากสมการที่ 5.1 จะได้สมการของซินเฟตในแบบเดียวกับมอสทรานซิสเตอร์ คือ

$$I_A = \frac{\beta}{2} (V_{GK} - V_T)^2 \quad 5.2$$

ทำการแก้สมการจะได้

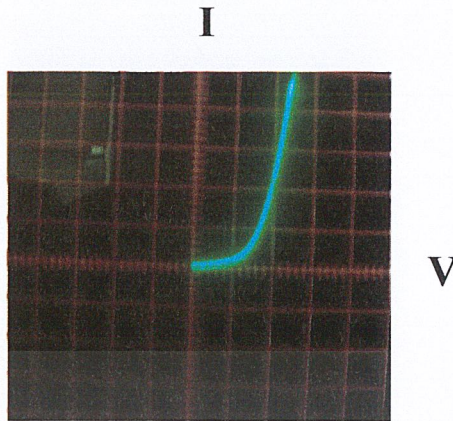
$$\sqrt{\frac{2I_A}{\beta}} = V_{GK} - V_T \quad 5.3$$

ถ้าให้ $I_A = 0$ แล้วจะได้ $V_{GK} = V_T$ ดังนั้นในการอ่านค่าแรงดันขีดเริ่มจากรูปที่ 5.31 จะต้องลากเส้นตรงต่อจากเส้นกราฟมาตัดที่แกนของ V_{GK} ค่าที่ได้จะเป็นแรงดันขีดเริ่มของซินเฟตและผลจากการวัดค่าแรงดันขีดเริ่มที่ได้มีค่า $L = 10 \mu\text{m}$ ที่ค่า W ค่าต่างๆแสดงดังตารางที่ 5.2

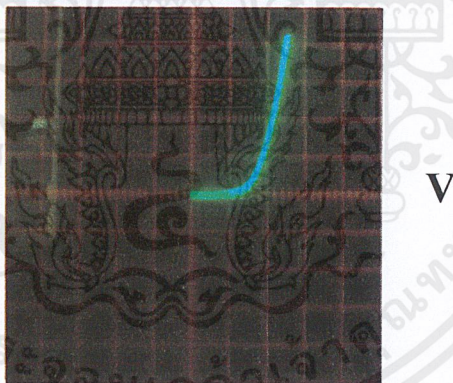


รูปที่ 5.22 กราฟแสดงคุณสมบัติของแรงดันขีดเริ่ม $W = 2400 \mu\text{m}$ ที่อุณหภูมิ 300°C
(Hor: 1V/div, Ver: 0.5mA/div)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

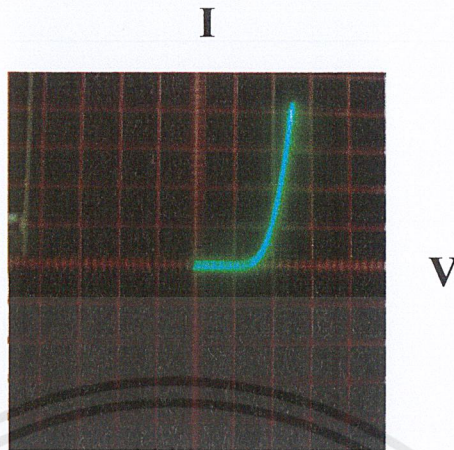


รูปที่ 5.23 กราฟแสดงคุณสมบัติของแรงดันขีดเริ่ม $W = 3600 \mu\text{m}$ ที่อุณหภูมิ 300°C
(Hor:1V/div, Ver:0.5mA/div)

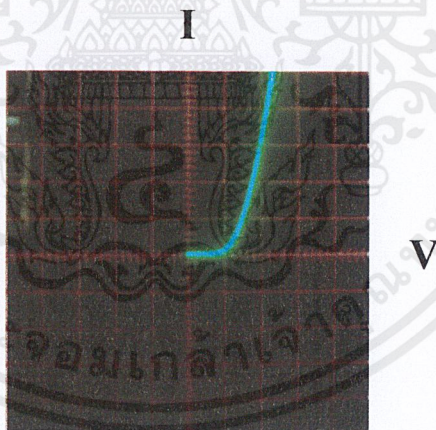


รูปที่ 5.24 กราฟแสดงคุณสมบัติของแรงดันขีดเริ่ม $W = 4800 \mu\text{m}$ ที่อุณหภูมิ 300°C
(Hor:1V/div, Ver:0.5mA/div)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

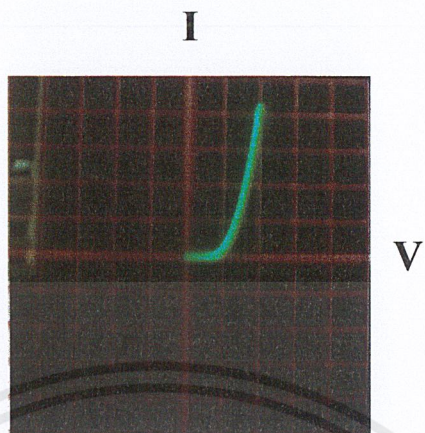


รูปที่ 5.25 กราฟแสดงคุณสมบัติของแรงดันขีดเริ่ม $W = 5400 \mu\text{m}$ ที่อุณหภูมิ 300°C
(Hor: 1V/div, Ver: 0.5mA/div)

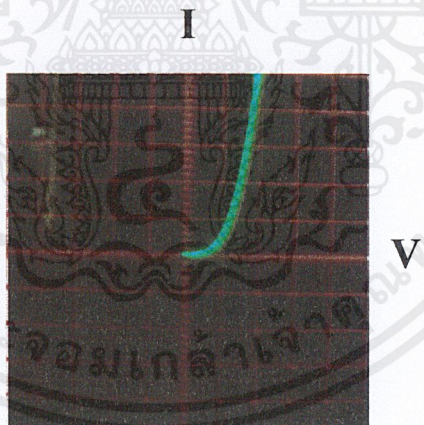


รูปที่ 5.26 กราฟแสดงคุณสมบัติของแรงดันขีดเริ่ม $W = 2400 \mu\text{m}$ ที่อุณหภูมิ 500°C
(Hor: 1V/div, Ver: 0.5mA/div)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

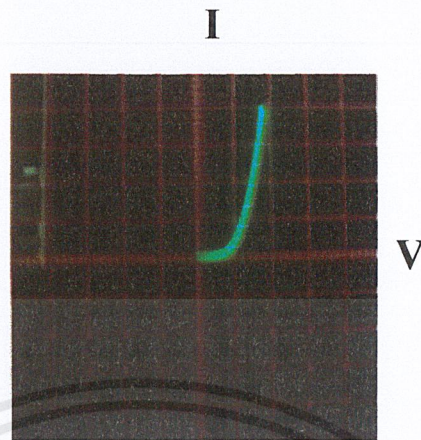


รูปที่ 5.27 กราฟแสดงคุณสมบัติของแรงดันขีดเริ่ม $W = 3600 \mu\text{m}$ ที่อุณหภูมิ 500°C
(Hor:1V/div, Ver:0.5mA/div)

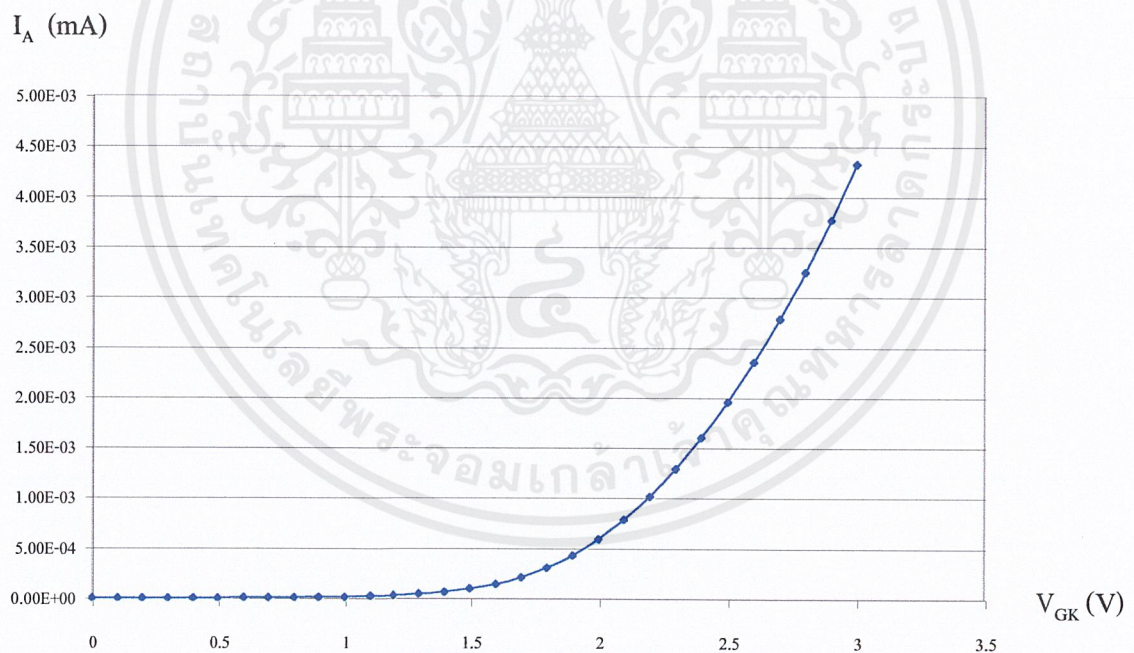


รูปที่ 5.28 กราฟแสดงคุณสมบัติของแรงดันขีดเริ่ม $W = 4800 \mu\text{m}$ ที่อุณหภูมิ 500°C
(Hor:1V/div, Ver:0.5mA/div)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

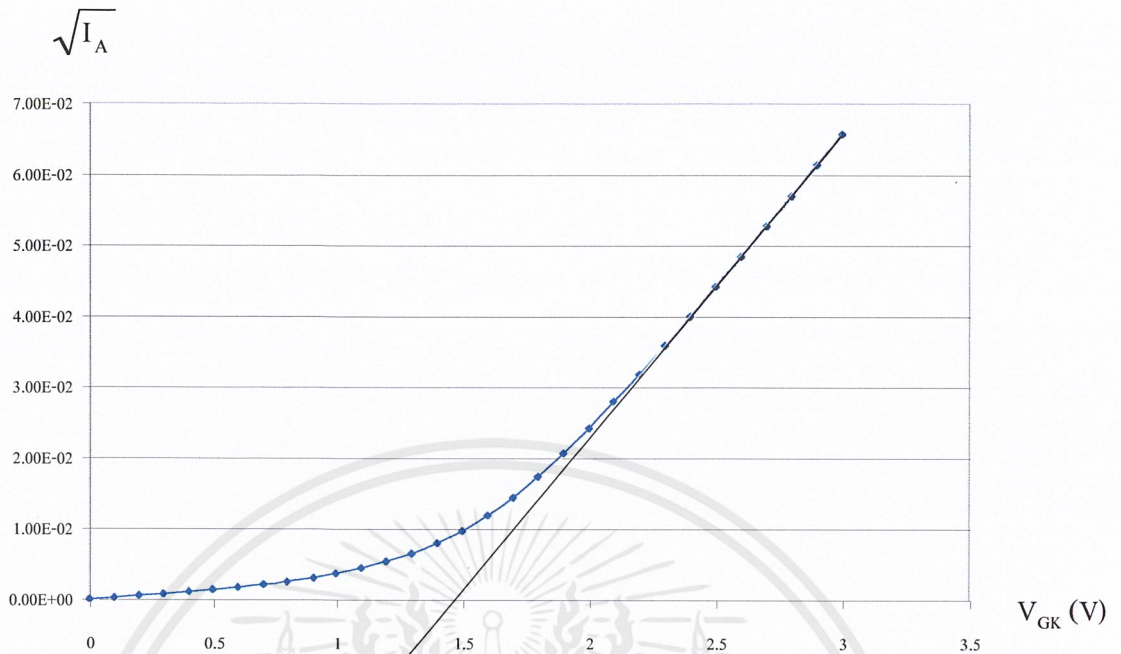


รูปที่ 5.29 กราฟแสดงคุณสมบัติของแรงดันขีดเริ่ม $W = 5400 \mu\text{m}$ ที่อุณหภูมิ 500°C
(Hor:1V/div, Ver:0.5mA/div)

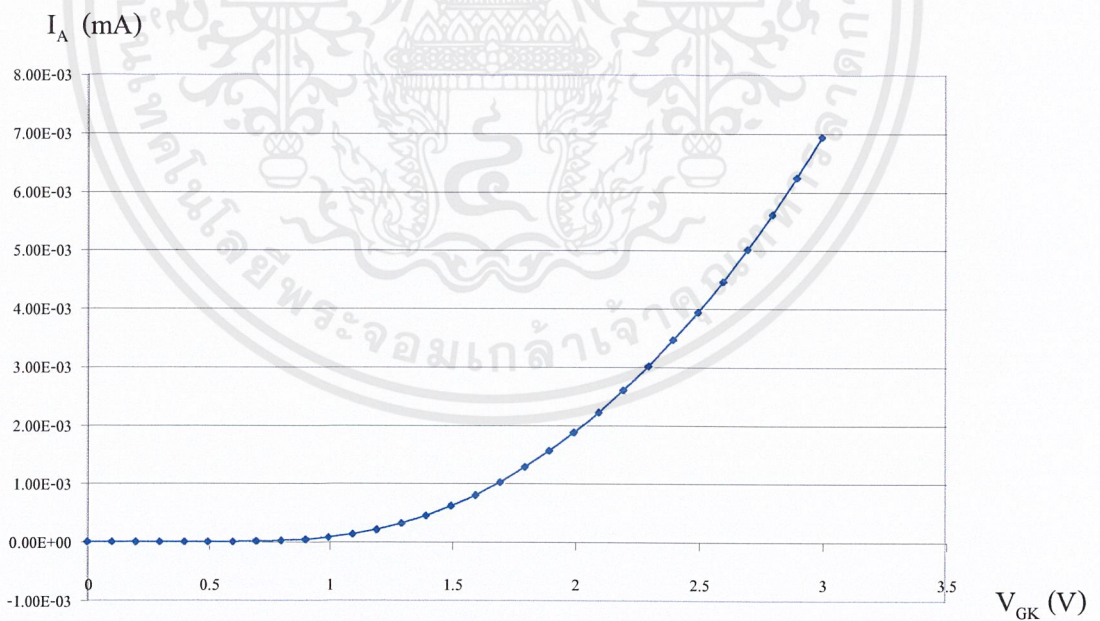


รูปที่ 5.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I_A กับ V_{GK} ที่อุณหภูมิชนิดจริง 300°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

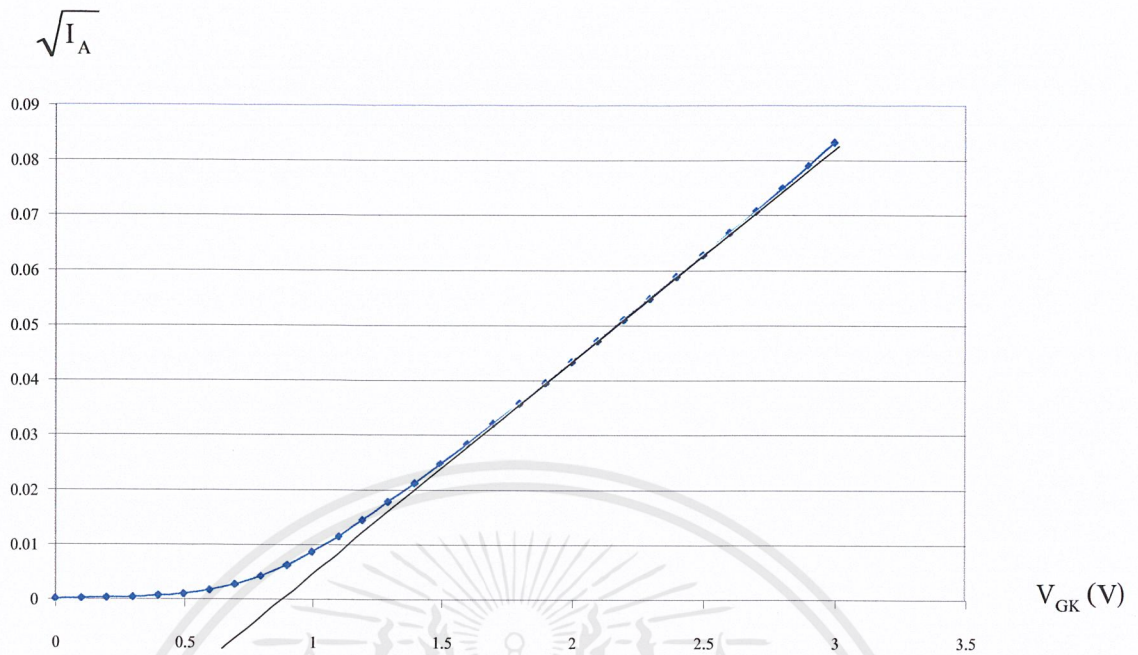


รูปที่ 5.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างรากที่สองของ I_A กับ V_{GK} ที่อุณหภูมิซินเตอร์ริง 300 °C



รูปที่ 5.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง I_A กับ V_{GK} ที่อุณหภูมิซินเตอร์ริง 500 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างรากที่สองของ I_A กับ V_{GK} ที่อุณหภูมิขึ้นเตอริง 500°C

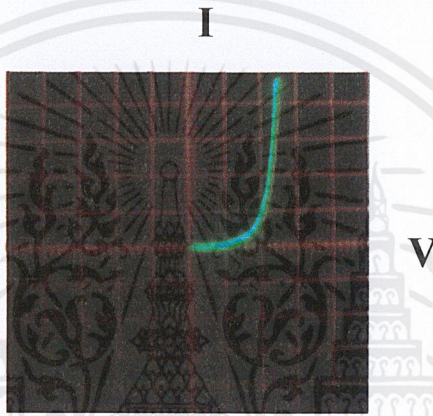
ตารางที่ 5.2 แสดงค่าแรงดันขีดเริ่มเฉื่อยของอุณหภูมิ 300°C และ 500°C ที่ L เท่ากับ $10\ \mu\text{m}$ และ W ค่าต่างๆ ดังต่อไปนี้

W/L ($\mu\text{m}/\mu\text{m}$)	V_T (V) ที่ 300°C	V_T (V) ที่ 500°C
2400/10	1.35	0.90
3600/10	1.40	0.98
4800/10	1.38	1.11
5400/10	1.39	1.10

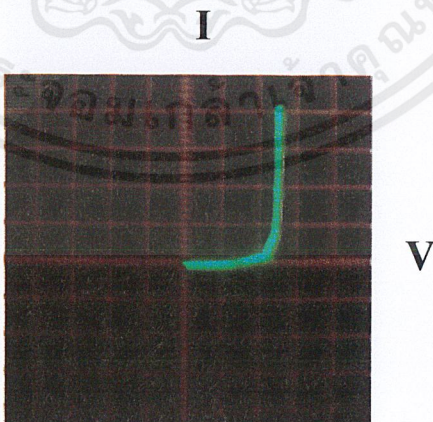
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.4 การวัดค่าแรงดันพังทลาย

ในกระบวนการสุดท้ายทำการวัดค่าแรงดันพังทลาย ด้วยเครื่องมือ Probe station และ Transistor curve tracer โดยการให้แรงดันไบอัส ระหว่างขาอาโนดและขาคาโธด ส่วนแรงดันที่ขาเกตมีแรงดันเท่ากับศูนย์ โวลต์ ซึ่งแสดงได้ดังรูปกราฟที่ 5.34 ถึง 5.35 และในตารางที่ 5.3 แสดงค่าแรงดันพังทลายที่วัดได้ ที่ค่าช่องทางเดินกระแส (L) เท่ากับ $10\mu\text{m}$ และค่าความกว้างช่องทางเดินกระแสที่ค่าต่างๆ โดยมีเงื่อนไขในการชินเตอร์ที่ $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ $500\text{ }^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 5.34 กราฟแสดงค่าแรงดันพังทลายที่อุณหภูมิ $300\text{ }^{\circ}\text{C}$
(Hor:50V/div, Ver:0.5mA/div)

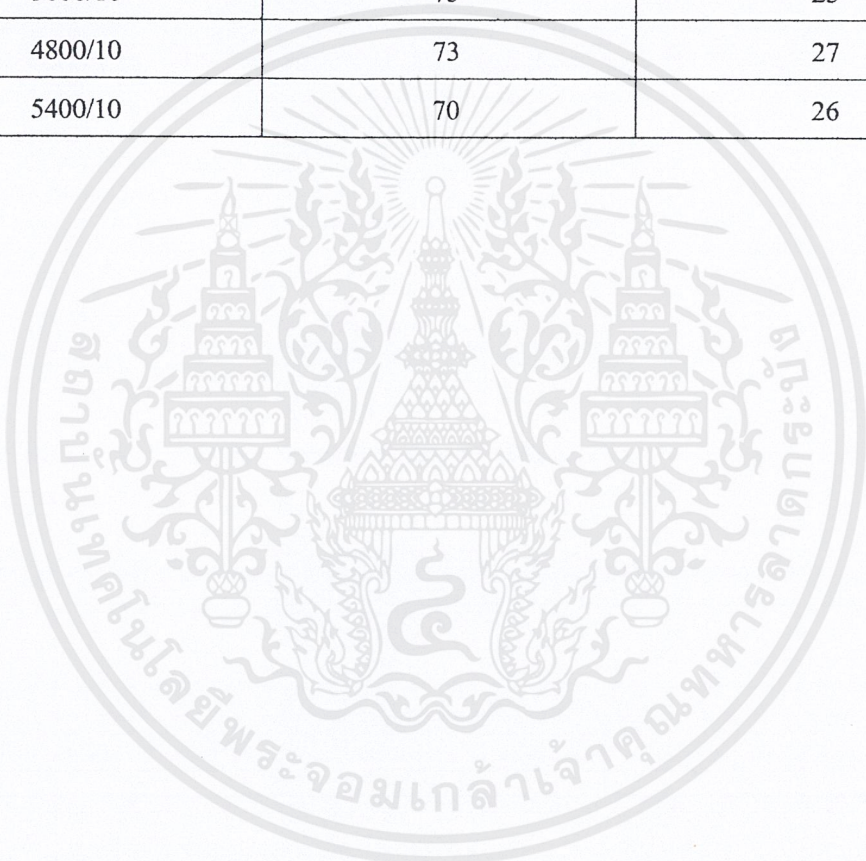


รูปที่ 5.35 กราฟแสดงค่าแรงดันพังทลายที่อุณหภูมิ $500\text{ }^{\circ}\text{C}$
(Hor:10V/div, Ver:0.5mA/div)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.3 แสดงค่าแรงดันพังทลายเฉลี่ยของอุณหภูมิ 300 °C และ 500 °C ที่ L เท่ากับ 10 μm และ W ค่าต่างๆ ดังต่อไปนี้

W/L ($\mu\text{m}/\mu\text{m}$)	V_{BV} (300 °C)	V_{BV} (500 °C)
2400/10	80	22
3600/10	75	25
4800/10	73	27
5400/10	70	26



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

6.1 ซ็อตที่ไดโอด

การนำเอารอยสัมผัสแบบซ็อตที่มาสสร้างเป็นอุปกรณ์ซินเฟต โดยการแพร่สารเจือด้วยความร้อนในห้องปฏิบัติการศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ เป็นการประยุกต์ใช้งานรอยสัมผัสแบบซ็อตที่อย่างหนึ่งเข้ากับโครงสร้างอุปกรณ์ประเภท ไอจีบีทีและมอสเฟตเพื่อให้ได้อุปกรณ์ชนิดใหม่ และจากการสร้างรอยสัมผัสแบบซ็อตที่เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสม ในการนำไปสร้างซินเฟต โดยการซินเตอร์ที่เงื่อนไขต่างๆ คือ

ไม่มีการซินเตอร์

500°C เป็นเวลา 20 นาที

500°C เป็นเวลา 15 นาที

400°C เป็นเวลา 20 นาที

400°C เป็นเวลา 15 นาที

300°C เป็นเวลา 20 นาที

300°C เป็นเวลา 15 นาที

จากการตรวจสอบคุณสมบัติความเป็นรอยสัมผัสแบบซ็อตที่สามารถทำได้โดยการหาความสูงกำแพงศักย์ (ϕ_{bn}) ซึ่งสามารถสรุปผลได้ดังนี้

การตรวจสอบความเป็นรอยสัมผัสแบบซ็อตที่โดยการคำนวณหาค่าความสูงกำแพงศักย์จากการทดลองพบว่า พื้นที่ของขั้วโลหะมีขนาด $740 \times 740 \mu\text{m}$ ค่าความสูงกำแพงศักย์ที่ได้จากการซินเตอร์ที่ 300°C เป็นเวลา 15 นาที มีค่าประมาณ 0.6V และจากการนำค่ากระแสและแรงดันมาพล็อตกราฟเพื่อหาค่าแรงดันเริ่มนำกระแส จากเงื่อนไขดังกล่าวจะเห็นว่าการซินเตอร์ที่ 400°C และ 500°C เป็นเวลา 15 นาที มีคุณสมบัติไม่เป็นซ็อตที่ถึงแม้ว่าจะมีความสามารถในการนำกระแสสูงแต่ก็มีกระแสรั่วไหลมากตามไปด้วย (ดูรูปที่ 5.7 และ 5.8 ประกอบ) ซึ่งถือว่ารอยสัมผัสดังกล่าวเป็นรอยสัมผัสแบบอัลลอยที่ไม่เหมาะสมนำไปเป็นเงื่อนไขในการสร้างซินเฟต

เนื่องจากอะลูมิเนียมมีจุดหลอมเหลวที่ 660°C ดังนั้นในช่วงอุณหภูมิที่อยู่ใกล้กับจุดหลอมเหลว ทำให้อะลูมิเนียมสามารถแพร่ลงไปในซิลิคอนได้มาก จากผลการทดลองในช่วงอุณหภูมิ 400°C และ 500°C เป็นช่วงที่วัดค่าความสูงกำแพงศักย์ได้มากกว่าช่วงอื่น แสดงว่าในช่วงนี้ อะลูมิเนียมได้แพร่ลงไปในซิลิคอนมากกว่าช่วงอื่น ทำให้โครงสร้างของรอยสัมผัสที่ได้ไม่ใช่ซ็อตที่ แต่เป็นรอยสัมผัสแบบอัลลอย ดังนั้นในการสร้างรอยต่อแบบซ็อตที่ด้วยเทคนิคการเคลือบโลหะในสุญญากาศควรที่จะซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 300°C และเมื่อเรานำชิ้นงานที่สร้างเสร็จแล้วมาทำการทดสอบคุณสมบัติของกระแสและแรงดันโดยใช้เครื่องวัด Transister Curve Tracer จะเห็นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ว่าจากรูปกราฟที่วัดได้สามารถบ่งบอกว่ารอยสัมผัสแบบซ็อตคัทที่ได้นั้น สามารถนำไปใช้งานได้หรือไม่ โดยในรูปที่ 5.2 ถึงรูปที่ 5.8 แสดงคุณสมบัติของกระแสและแรงดันของซ็อตคัทไดโอดในกรณีที่ได้รับไบอัสตรงและไบอัสกลับที่เงื่อนไขต่างกัน ส่วนในรูปที่ 5.10 และ 5.11 เป็นการแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของรอยสัมผัสแบบซ็อตคัทที่วัดได้จากการใช้การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์(HP VEE) ซึ่งจากรูปที่ 5.10 กรณีได้รับไบอัสตรงที่อุณหภูมิ 300°C จะมีแรงดันขีดเริ่มที่ประมาณ 0.2 V ซึ่งค่าแรงดันดังกล่าวจะต่ำกว่าค่าแรงดันขีดเริ่มของชิ้นงานที่อุณหภูมิ 400°C และ 500°C ส่วนในกรณีไม่ซินเตอร์ค่าแรงดันขีดเริ่มจะมีค่าน้อยมากประมาณ $0-0.1\text{ V}$ ก็จะเกิดการนำกระแสขึ้น แต่เมื่อเราพิจารณารูปกราฟที่ 5.11 จะเห็นได้ว่าในกรณีที่ได้รับไบอัสกลับชิ้นงานที่อุณหภูมิ 400°C , 500°C และไม่ซินเตอร์จะมีค่ากระแสรั่วไหลเป็นจำนวนมากเมื่อเทียบกับกรณีอุณหภูมิ 300°C ทำให้ผลการทดลองดังกล่าวบอกให้เราทราบว่าชิ้นงานที่อุณหภูมิ 300°C เหมาะกับการนำไปทำเป็นรอยสัมผัสแบบซ็อตคัทมากที่สุด

6.2 ซินเฟต

จากเงื่อนไขในการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 300°C ทำให้ได้รอยสัมผัสแบบซ็อตคัทไดโอดเป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมในการนำไปสร้างซินเฟต เมื่อได้ทำการสร้างซินเฟตจึงทำการสร้างโดยกำหนดเงื่อนไขในการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 300°C และ 500°C เพื่อทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางไฟฟ้า ซึ่งจากผลการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของซินเฟตได้ให้ผลลัพธ์ดังนี้

1. จากการวัดคุณสมบัติกระแสอาโนดและแรงดันอาโนดคาโทด

จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิซินเตอร์ 300°C และ 500°C การนำกระแสของซินเฟตจะเป็นไปตามลักษณะเดียวกันคือจะเริ่มนำกระแสที่ค่าแรงดันประมาณ $0.2-0.3\text{ V}$ ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขของซ็อตคัทไดโอดโดยจากรูปคุณสมบัติกระแสอาโนดและแรงดันอาโนดคาโทด จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามค่าของอัตราส่วนระหว่างความกว้างของช่องทางเดินกระแสและความยาวของช่องทางเดินกระแส ตามสมการกระแสอาโนดและแรงดันอาโนดคาโทดที่ 5.2

2. แรงดันขีดเริ่ม

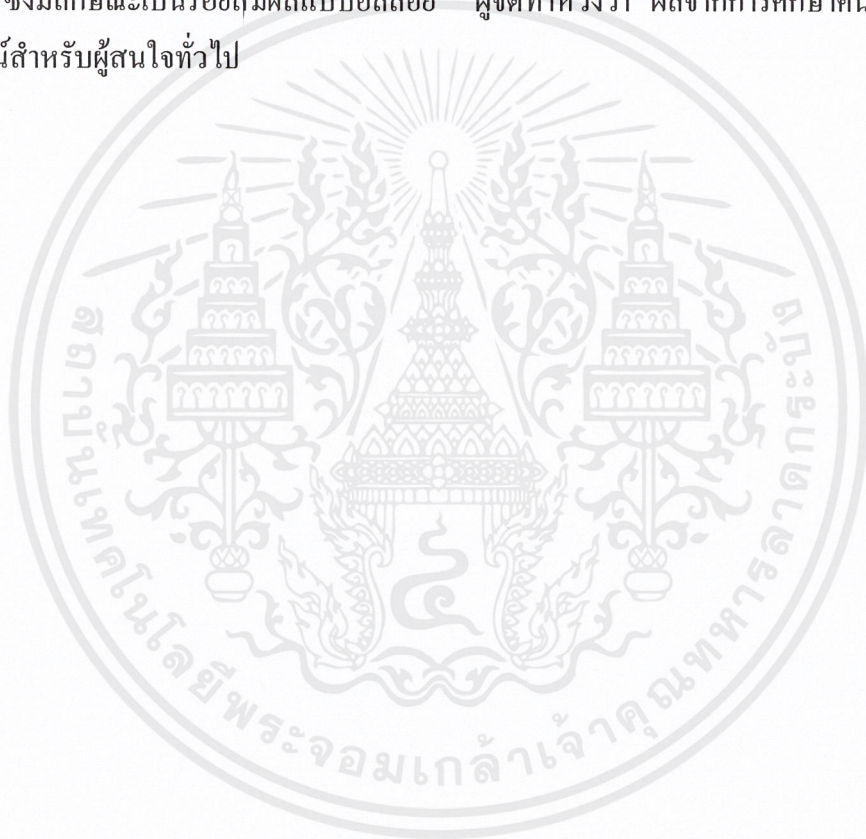
จากผลการทดลองที่ อุณหภูมิ 300°C ค่าแรงดันขีดเริ่มจะมีค่าเฉลี่ยประมาณ $1.35-1.4\text{ V}$ ส่วนที่อุณหภูมิ ซินเตอร์ที่ 500°C มีค่าแรงดันขีดเริ่มอยู่ในช่วง $0.9-1.1\text{ V}$ ทั้งนี้เนื่องจากในกระบวนการสร้าง P Well หลังจากการ Predeposition และ Drive in เป็นเวลา 14 ชม. เมื่อวัดค่าสภาพความต้านทานแผ่น(P) จะเห็นได้ว่าจากแผ่นที่ซินเตอร์ที่ 500°C จะได้ค่าสภาพความต้านทานแผ่นมากกว่าแผ่นที่ ซินเตอร์ที่ 300°C ส่งผลให้ความหนาแน่นของอะตอมมีค่าน้อยกว่า ทำให้ค่าแรงดันขีดเริ่มมีค่าน้อยตามไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. แรงดันพังทลาย

จากผลการวัดค่าแรงดันพังทลายของซินเฟตที่ได้ จะไม่ขึ้นอยู่กับค่าของ W/L แต่จะขึ้นอยู่กับค่าอุณหภูมิที่ใช้จะเห็นได้จากตารางที่ค่าแรงดันพังทลายของแผ่นที่ซินเตอร์ingat อุณหภูมิ 300 °C มีค่าอยู่ในช่วง 70-80 โวลต์ ส่วนที่อุณหภูมิซินเตอร์ingat ที่ 500 °C มีค่าประมาณ 22-27 โวลต์

จากผลการทดลองที่ได้จะเห็นได้ว่าการสร้างซินเฟตโดยการซินเตอร์ingat ที่อุณหภูมิ 300 °C ซึ่งได้รอยสัมผัสเป็นลักษณะของซ็อดกัหรือเร็คตีไฟร์มีความเหมาะสมกว่าการซินเตอร์ingat ที่อุณหภูมิ 500 °C ซึ่งมีลักษณะเป็นรอยสัมผัสแบบอัลลอย ผู้จัดทำหวังว่า ผลจากการศึกษาค้นคว้าจะเป็นประโยชน์สำหรับผู้สนใจทั่วไป



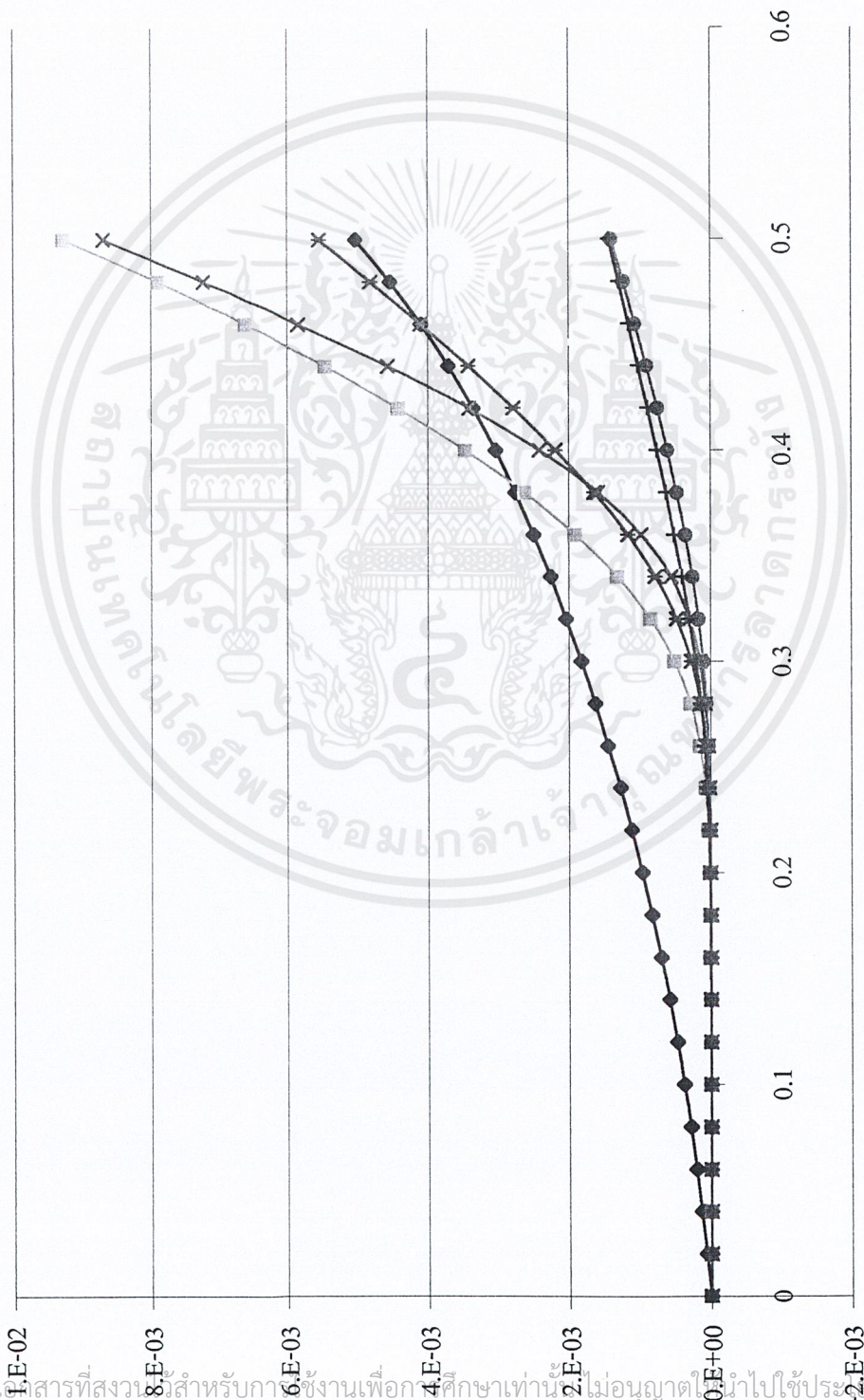
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

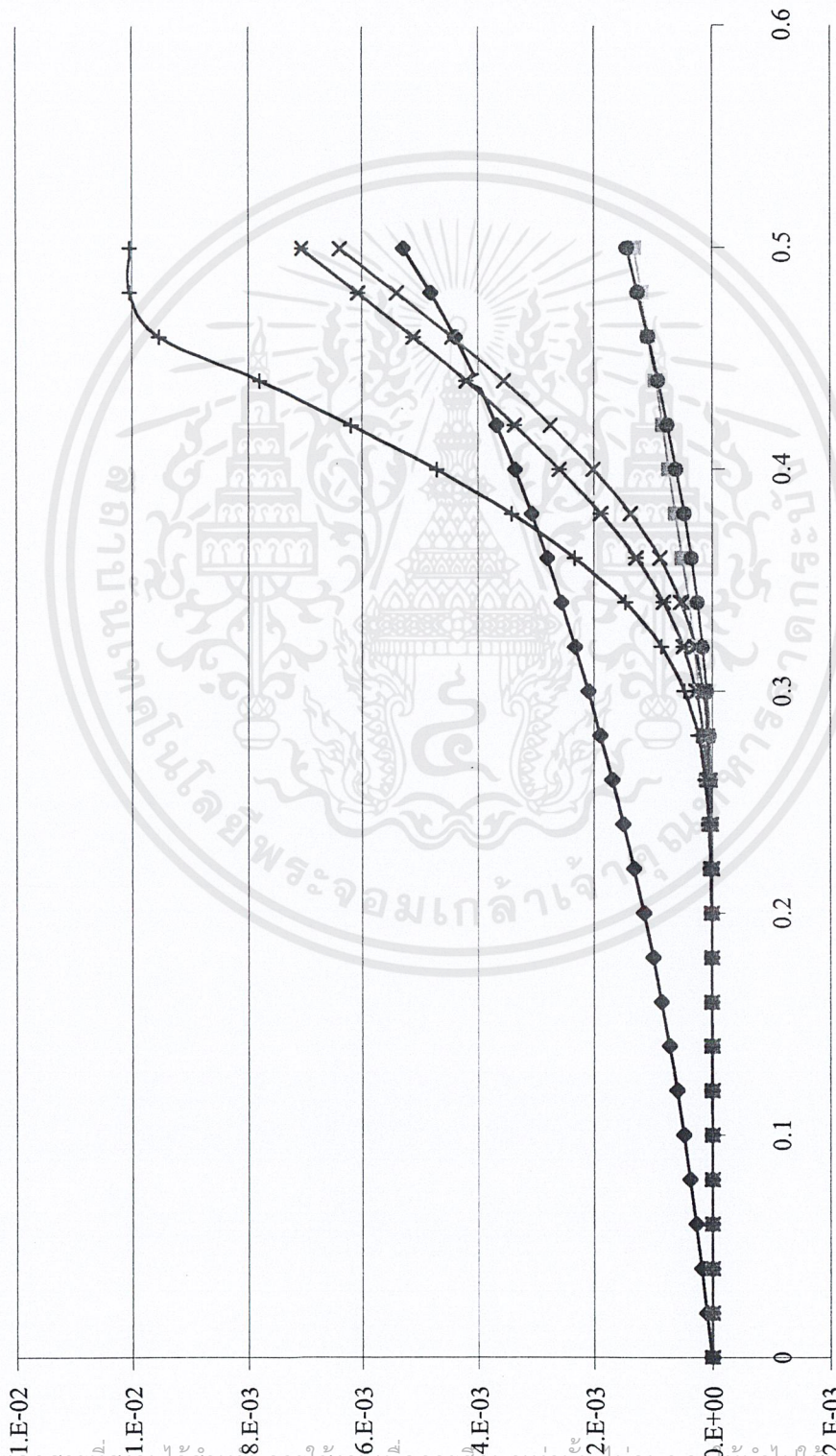
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันกรรณีไบอัสไปหน้า



รูปที่ ก1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

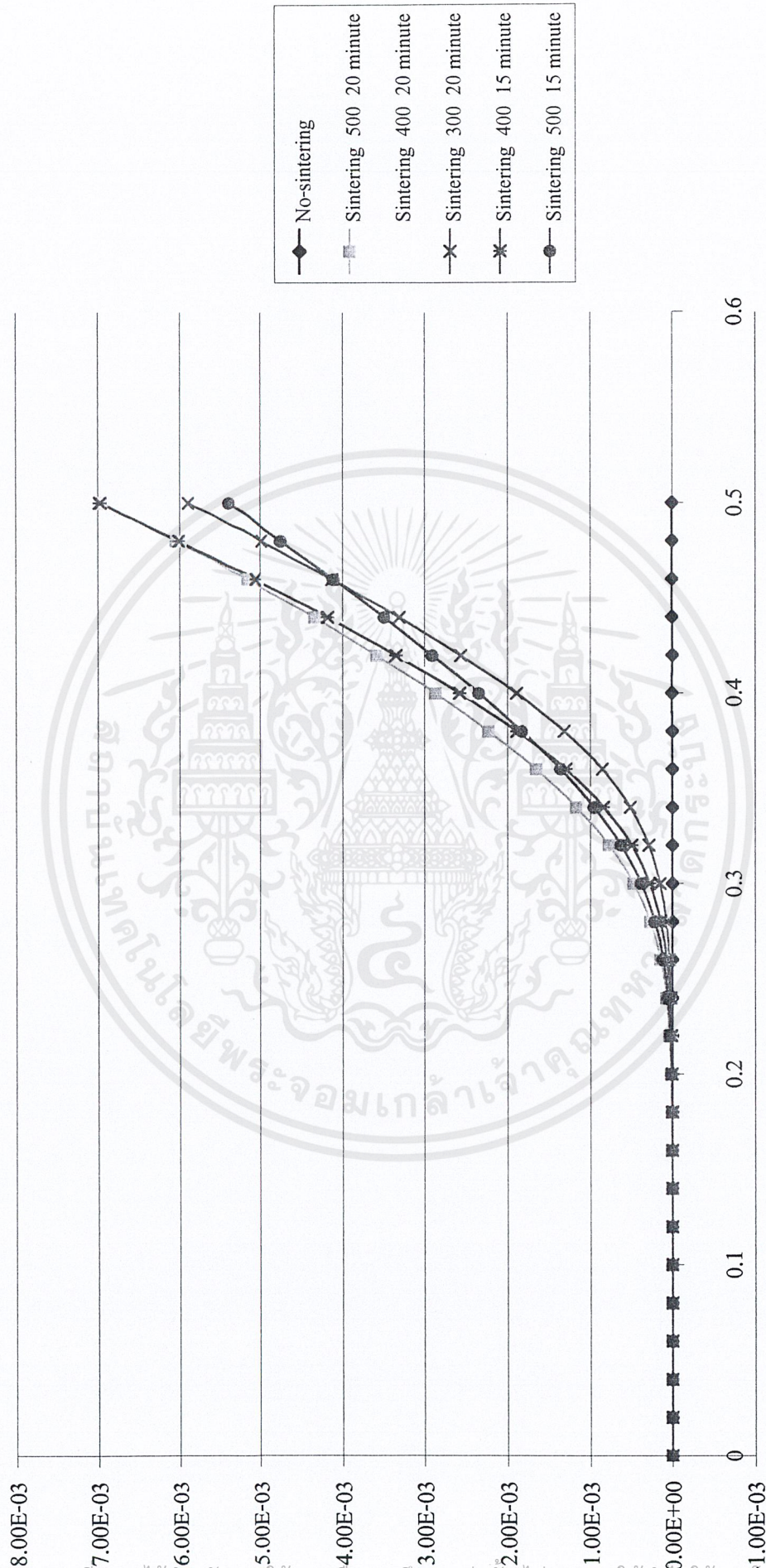
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันกรณิโบอัลไปหน้า



รูปที่ ก2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

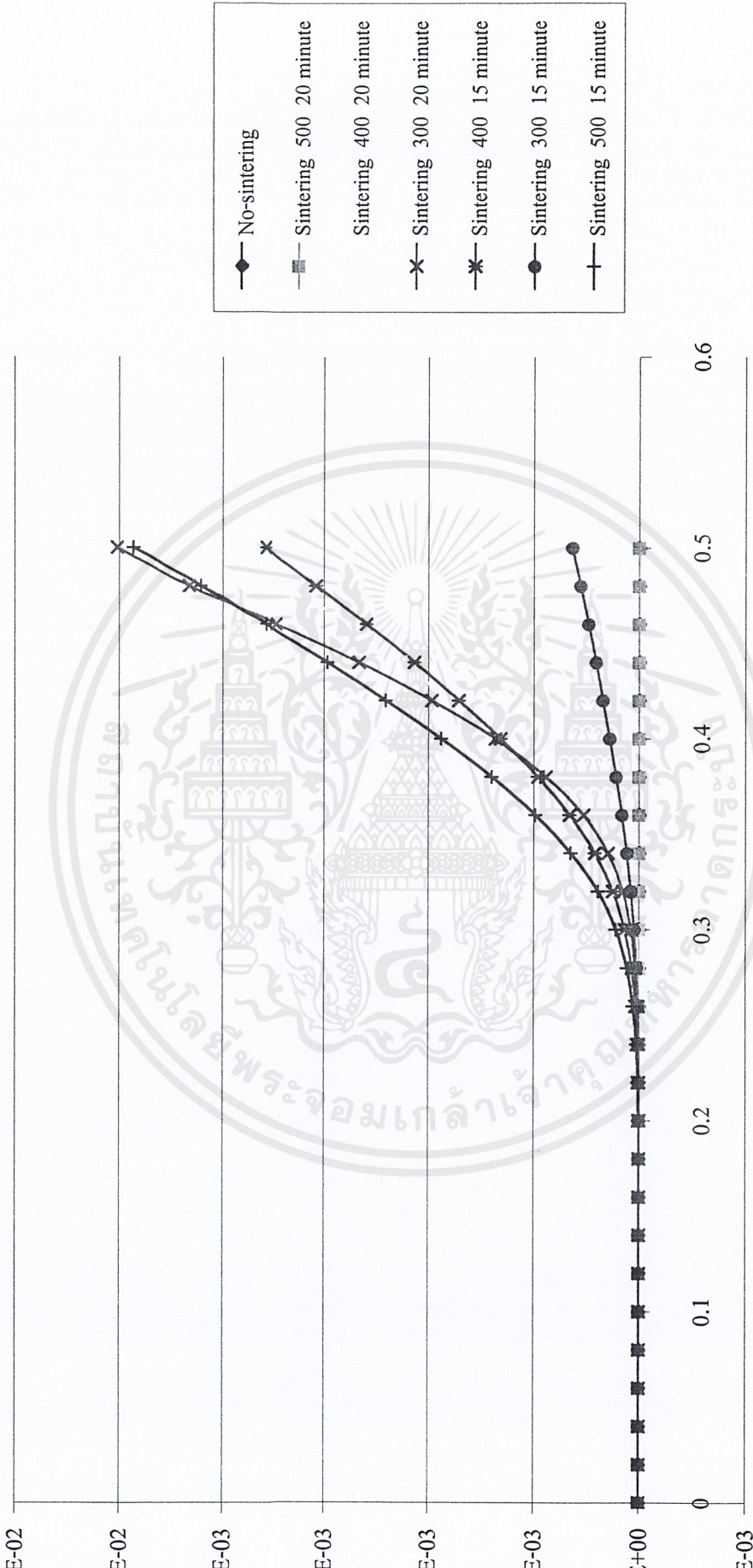
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแรงดันกับอัตราป้อนน้ำ



รูปที่ ก3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

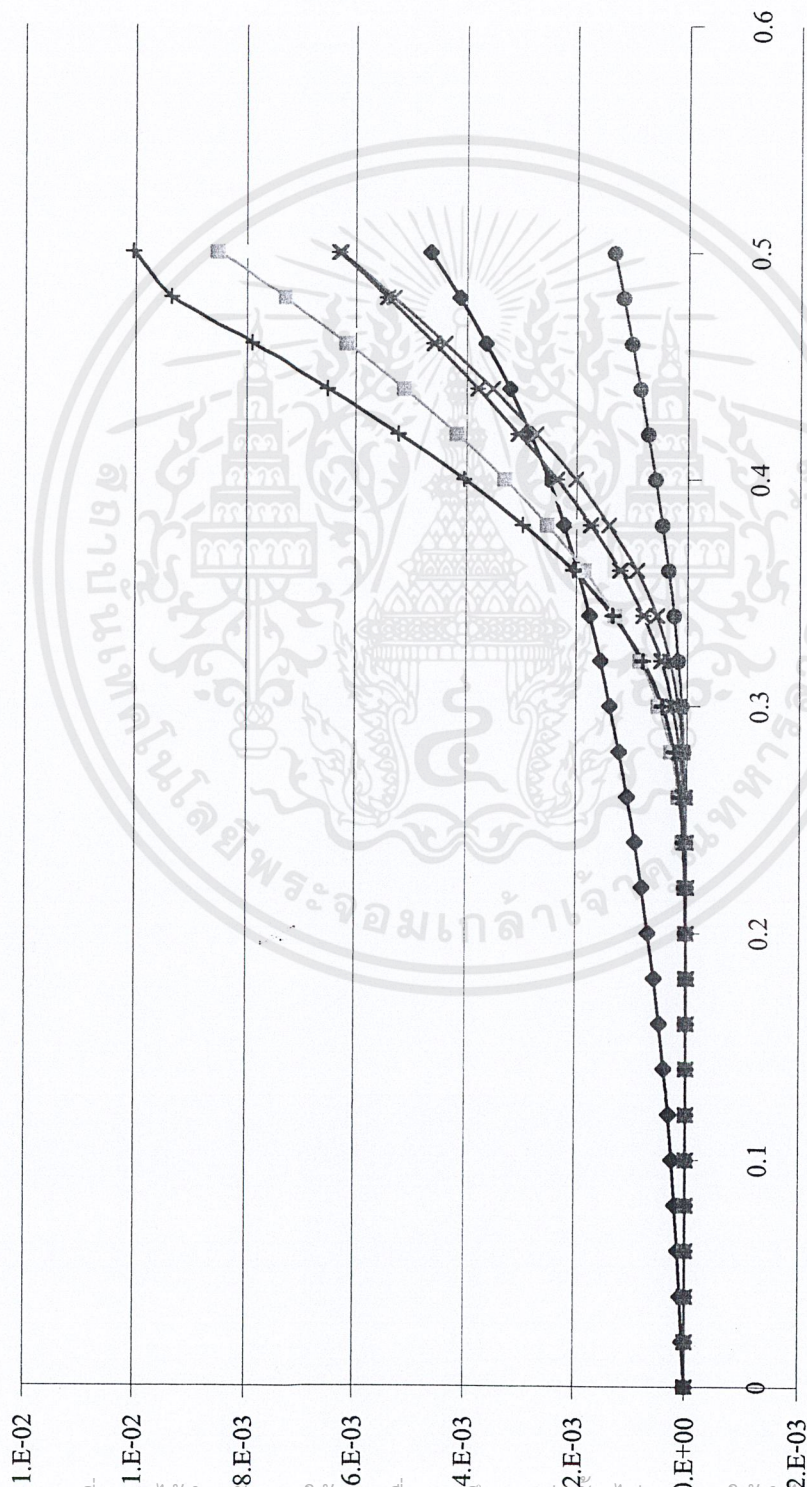
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันกรณินโอบอลไปหน้า



รูปที่ ก4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแรงดันกับอัตราไหล



รูปที่ ๓

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

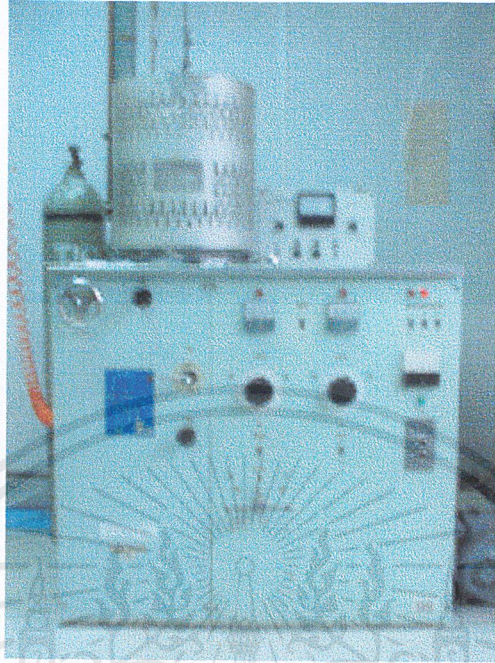


รูปที่ ก.6 เตาแพร่สารเจือชนิดพี



รูปที่ ก.7 เตาแพร่สารเจือชนิดเอ็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

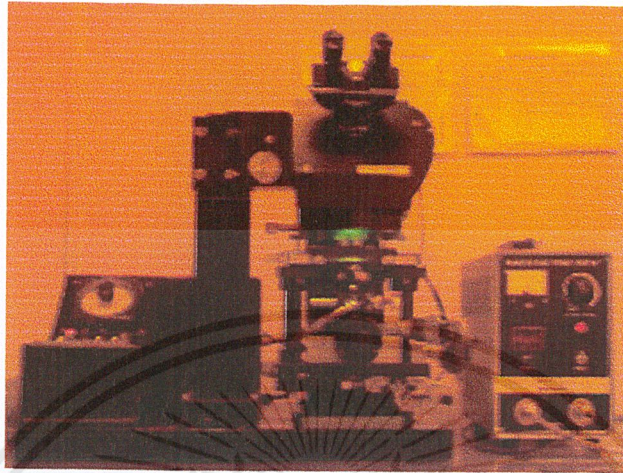


รูปที่ ก.8 เครื่องเคลือบ โลหะในสุญญากาศ (Vacuum Evaporator)



รูปที่ ก.9 เตาอบแผ่นซิลิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.10 เครื่องปรับชั้นกระจกต้นแบบ (Mask Aligner)

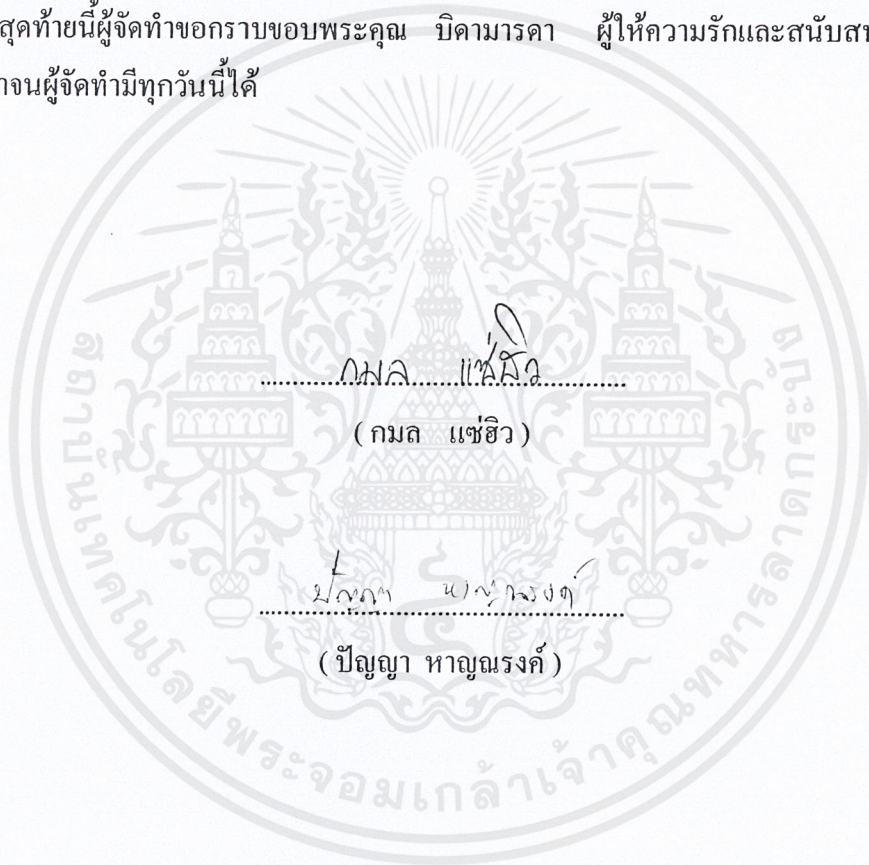


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาโทฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ที่ปรึกษา ศศ.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ ที่ได้ช่วยกรุณาให้คำแนะนำและวางขอบเขตการทำงานพร้อมกับการแก้ ปัญหาตลอดจนการตรวจทานรายงานฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ขอขอบคุณรุ่นพี่ปริญญาโทและเพื่อนๆทุกคนที่ได้ใช้ประสบการณ์ และความสามารถของแต่ละคนที่คอยให้คำปรึกษาและช่วยเหลือในทุกๆด้าน

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา ผู้ให้ความรักและสนับสนุนทางด้านการศึกษานผู้จัดทำมีทุกวันนี้ได้



..... กมล แซ่ฮิว

(กมล แซ่ฮิว)

..... ปัญญา หาญณรงค์

(ปัญญา หาญณรงค์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนังสืออ้างอิง

- 1) Johnny K.O. Sin, C. Andre T. Samala, Li-Zhang Hou, “Transient Characteristics of N-Channel Hybrid Schottky Injection FET’s”, IEEE Transactions on Electron Device.Val.36, No.5, p 933
- 2) พอพล รุจนพิชญ์, “การศึกษา ออกแบบ และสร้าง ไขโพลาไรท์ทรานซิสเตอร์ที่มีเกทเป็นฉนวน” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. พ.ศ.2538
- 3) สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, “การศึกษา ออกแบบ และพัฒนามอสเฟตกำลัง”, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. พ.ศ.2535
- 4) S.M. Sze, PHYSICS OF SEMICONDUCTOR DEVICES, John Wiley & Sons Ltd., 1976
- 5) B.Jayant Baliga, MODERN POWER DEVICE, John Wiley & Sons Ltd., 1987
- 6) รศ.ดร.สมเกียรติ ศุภเดช, “สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ” คณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. พ.ศ.2540

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้