การศึกษาโครงสร้างและพัฒนาเทคนิคการสร้างไดโอดกำลัง

นายคุณ ถวัลย์วงศ์ศรี

วิทยานิพนธ์นี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2527

ISBN 974-563-858-7

010014

A Study on Structure and Development of Fabrication Techniques of Power Diodes

Mr. Khoon Tawanwongsri

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering

Department of Electrical Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

1984

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาโครงสร้างและพัฒนาเทคนิคการสร้างไดโอดกำลัง
โดย	นาย คุณ ถวัลย์วงศ์ศรี
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุประดิษฐ์ บุนนาค)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ดร.สุทิน เวทย์วัฒนะ)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.มนตรี สวัสดิ์ศฤงฆาร)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนา กุลวิทิต)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ชาตรี ศรีไพพรรณ)

.....กรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาโครงสร้างและพัฒนา เทคนิคการสร้างไดโอดกำลัง
ชื่อนิสิต	นายคุณ ถวัลย์วงศ์ศรี
อาจารย์ที่ปรึกษา	ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว
ภาควิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา	2527

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้มี เนื้อหาคลอบคลุมถึงการศึกษาโครงสร้างและ เทคนิคการผลิตไดโอดกำลังชนิดหัวต่อพี- เอ็น แว่นผลึก เริ่มต้นได้แก่ ซิลิกอนชนิดพีที่มีความต้านทานจำ เพาะ 10 โอห์ม- เซนติ- เมตร หนาประมาณ 220 ไมโคร เมตร ชั้นแพร่ซึมชนิด เอ็นลึกประมาณ 3.8 ไมโคร เมตร และมีความ เข้มข้นของสาร เจือปนประมาณ 10^{19} อะตอมต่อ ลูกบาศก์ เซนติ เมตร โดยมีพื้นที่ของหัวต่อ 2.5 ตารางมิลลิ เมตร ขั้วโลหะที่ใช้ต่อตัวสิ่งประดิษฐ์ ได้แก่ อลูมิ เนียมและนิ เกิล ซึ่งให้คุณสมบัติ เป็นผิวสัมผัสแบบโอห์มมิคที่ดี และมีความแข็งแรงของขั้วต่อที่สามารถทนแรงดึงได้ประมาณ 78 กิโลกรัมต่อตาราง เซนติ เมตร

ไดโอดกำลังที่ทดลองสร้างขึ้นนี้มีแรงดันพังทะลุ 100 โวลท์ ผ่านกระแสได้ 3 แอมแปร์ ที่อุณหภูมิหัวต่อ 107 องศา เซล เซียส และที่แรงดัน 1.4 โวลท์ กระแสอิ่มตัวย้อนกลับที่อุณหภูมิหัวต่อ 27.2 องศา เซล เซียส มีค่า 1.5 มิลลิแอมแปร์ และมีค่า เวลาการฟื้นตัวย้อนกลับ 1.3×10^{-6} วินาที ที่กระแสตาม 78 มิลลิแอมแปร์ และกระแสย้อน เท่ากับ 50 มิลลิแอมแปร์

Thesis Title	A Study on Structure and Development of Fabrication Techniques of Power Diodes
Name	Mr. Khoon Tawanwongsri
Thesis Advisor	Professor Somsak Panyakeow, Ph. D.
Department	Electrical Engineering
Academic Year	1984

ABSTRACT

This thesis concerns the study of the structure and production technology of power P-N junction diodes. The starting materials were p-type silicon wafers with resistivity of 10 ohm-centimeters and thickness of 220 micrometers. The depth of n-diffused layer layer was 3.8 micrometers. The impurity concentration was approximately 10^{19} atoms per cubic centimeter. The junction area of the diode was 2.5 square millimeters. Nickel on Aluminium electrode provides a good ohmic contact and tensile strength of 78 kilogram per square centimeter.

The fabricated power diode had a breakdown voltage of 100 volts and could pass a forward current of 3 amperes with a voltage drop of 1.4 volts at junction temperature of 107 degree celsius. The reverse saturation current of this diode was 1.5 milliamperes at junction temperature of 27.2 degree celsius. The reverse recovery time was measured to be 1.3×10^{-6} seconds at forward current of 78 milliamperes and reverse current of 50 milliamperes.

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความช่วยเหลือจาก ศ. ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว รศ. ดร.มนตรี สวัสดิ์ศฤงฆาร ผศ. ดร.บรรยง โตประเสริฐพงศ์ ผศ. ดร.ยุทธนา กุลวิทิต อาจารย์ ดร.สุทิน เวทย์วัฒนะ รศ. ดร.ชาตรี ศรีไพพรรณ และอาจารย์ ดร.วิโรจน์ ตันตราภรณ์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำในการทำวิจัยและแก้ปัญหาต่างๆ ตลอดจนถึงการให้ความสะดวกในด้านตำราและเอกสารที่ใช้ประกอบการทำวิทยานิพนธ์ ผู้เขียนจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ผู้เขียนขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และเพื่อนร่วมงานที่ได้ช่วยเหลือในงานวิจัยและด้านธุรการมาด้วยดีโดยตลอด

ท้ายสุดนี้ ขอขอบคุณต่อทบวงมหาวิทยาลัยฯ บัณฑิตวิทยาลัย และห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ในการให้ทุนสำหรับงานวิจัยแก่ผู้เขียนเป็นอย่างมาก

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ฆ

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ง

กิตติกรรมประกาศ ..... จ

รายการตารางประกอบ ..... ช

รายการรูปประกอบ ..... ฌ

รายการสัญญลักษณ์ ..... ฐ

บทที่

1. บทนำ 1

2. ทฤษฎีหัวต่อพี- เอ็น 3

2.1 ศักย์ไฟฟ้าบริ เวณหัวต่อ 3

2.2 ความกว้างของบริ เวณหัวต่อ 5

2.3 ประจุที่บริ เวณปลอดพาหะ 8

2.4 คุณสมบัติของกระแสและแรงดัน 8

2.5 การพังทะลุ 12

2.6 ความโค้งที่บริ เวณปลอดพาหะ 14

2.7 การฟื้นตัวย้อนกลับ 18

3. การแพร่ซึมสาร เจือปน 19

3.1 การแพร่ซึมสาร เจือปน (ฟอสฟอรัส) ลงในซิลิกอน 19

3.2 การปลูกซิลิกอนไดออกไซด์ 25

3.3 การทำขั้วต่อแบบโอห์มมิค 29

4. การประดิษฐ์ไดโอด 31

4.1 ลำดับขั้นตอนการประดิษฐ์ไดโอด 31

4.2 โฟว์ชาร์ทของขั้นตอนการประดิษฐ์ไดโอด 33

4.3 ขั้นตอนการประดิษฐ์ไดโอดอย่างละ เอียด 34

4.4 หน้ากากที่ใช้ทำไดโอด 50

4.5 สรุปผลการประดิษฐ์และปัญหาในทางปฏิบัติ 52

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5. การวัดและผลการทดลอง 55

5.1 ขอบข่ายและคุณลักษณะที่ต้องการ 55

5.2 การทดสอบ 57

5.3 สรุป 85

6. การพิจารณาในประเด็นที่น่าสนใจ เพื่อเป็นแนวทางในการประดิษฐ์ไดโอดกำลัง 87

6.1 ส่วนที่มีผลต่อกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ 87

6.2 ส่วนที่มีผลต่อแรงดันพังทะลุ 89

6.3 อุณหภูมิหัวต่อ 90

7. สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง 92

7.1 ข้อสรุปจากการทดลอง 92

7.2 ข้อสรุปจากการวัดและทดสอบทางไฟฟ้า 93

7.3 ข้อเสนอแนะ 94

เอกสารอ้างอิง 96

ภาคผนวก 99

ประวัติผู้เขียน 109

รายการตารางประกอบ

ตารางที่		หน้า
3.1	อุณหภูมิและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโลหะ	29
5.1	แสดงค่าแส้นผ่าศูนย์กลางบริเวณการแพร่ซึม (D) ความหนาแน่นของพาหะ (N_B) และแรงดันที่ตกคร่อมหัวต่อ (V_{Bi}) ของไดโอด	67
5.2	แสดงค่าเปรียบเทียบระหว่างไดโอดที่ประดิษฐ์ขึ้นกับไดโอด 1N4001 และ 1N5406	85
6.1	แสดงค่าคุณสมบัติอุณหภูมิของวัสดุ	91

รายการรูปประกอบ

รูปที่		หน้า
2.1	แสดงหัวต่อแบบพี- เอ็น	3
2.2	แสดงศักย์ไฟฟ้าสำหรับหัวต่อแบบชันในซิลิกอน เทียบกับความ เข้มข้นของพาหะ	5
2.3	แสดงหัวต่อแบบพี- เอ็น กับการกระจายของสนามไฟฟ้า	6
2.4	แสดงค่าความกว้างของบริ เวณปลอดพาหะกับความ เข้มข้นของพาหะ	7
2.5	แสดงการกระจายของพาหะด้านพีและด้าน เอ็น	9
2.6	แสดงคุณสมบัติกระแสและแรงดันของซิลิกอนไดโอด	11
2.7	การพังทะลุในหัวต่อพี- เอ็น	12
2.8	หัวต่อพี- เอ็น (n^+- p) ถูกแรงดันย้อนกลับ	13
2.9	แรงดันพังทลุสำหรับหัวต่อแบบชัน X_j เป็นความหนาของการแพร่ซึม	14
2.10	ลักษณะโค้งของบริ เวณ เขตปลอดพาหะ	15
2.11	ลักษณะส่วนโค้งที่ได้จากการแพร่ซึมสาร เจือปน	16
2.12	แรงดันพังทะลุสำหรับหัวต่อที่มีความโค้ง เป็นแบบ cylindrical และ spherical	17
2.13	แสดง เวลาการฟื้นตัวย้อนกลับและการกระจายพาหะส่วนน้อยที่ระยะใดๆ ..	18
3.1	ความ เข้มข้นของอะตอมของสาร เจือปนชนิดต่างๆที่อุณหภูมิต่างๆ	20
3.2	แสดงความ เข้มข้นของสาร เจือปน เทียบกับระยะทาง X ที่ เวลาต่างๆ กัน .	21
3.3	การวิ เคราะห์กราฟให้สมบูรณ์สำหรับ erfc α และ $e^{-\alpha^2}$ ค่าละ เอียดดูได้จากตารางในภาคผนวก ค.	22
3.4	ความสามารถในการแพร่ซึม เทียบกับอุณหภูมิของสาร เจือปนชนิดต่างๆ	23
3.5	แสดง profiles ของขั้นตอน predeposition และ drive-in	25
3.6	แสดง เตาปลูกซิลิกอนไดออกไซด์	26
3.7	กราฟการปลูก SiO_2 ของห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ (จุฬา)	27
3.8	ความหนา SiO_2 ต่ำสุดที่ต้องการ เพื่อป้องกันการแพร่ซึมสาร เจือปน phosphorus ที่อุณหภูมิและ เวลาต่างๆ	28
3.9	ความหนา SiO_2 ต่ำสุดที่ต้องการ เพื่อป้องกันการแพร่ซึมสาร เจือปน boron ที่อุณหภูมิและ เวลาต่างๆ	29

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.10	อุณหภูมิและอัตราส่วนผสมของอลูมิเนียมกับซิลิกอน	30
4.1	แสดงรูปโครงสร้างของไดโอด	31
4.2	แบบสำหรับเปิดช่อง SiO_2 เพื่อเตรียมการแพร่ซึมสารเจือปนฟอสฟอรัส	51
4.3	แบบสำหรับเปิดช่อง SiO_2 เพื่อเตรียมการฉาบอลูมิเนียม	51
4.4	ซิลิกอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นหลังจากขั้นตอนการ drive-in	52
5.1	โครงสร้างของไดโอดหัวต่อพี-เอ็น แบบชัน	55
5.2	แสดงขนาดของหน้ากากที่ใช้ในการเปิดช่อง SiO_2 เพื่อเตรียมการแพร่ซึมสารฟอสฟอรัสในขั้นตอน predeposition	56
5.3	แสดงขนาดของหน้ากากที่ใช้เปิดช่อง SiO_2 เพื่อเตรียมการฉาบอลูมิเนียม	57
5.4	ภาพถ่าย Si และ SiO_2 ที่ถูกสารเคมีกัดออกเพื่อทำ mesa pattern	60
5.5	ภาพถ่าย Si และ SiO_2 (mesa pattern) ที่ถูกขยายขึ้นโดยใช้กล้องขยาย scanning microscope	60
5.6	แสดงไดโอดที่เตรียมไว้สำหรับการวัดคุณสมบัติประจุที่บริเวณปลอดพาหะกับแรงดันย้อนกลับ	63
5.7	แสดงเครื่องมือที่นำมาทดสอบคุณสมบัติประจุที่บริเวณปลอดพาหะกับแรวดันย้อนกลับ	64
5.8 ก)	แสดงคุณสมบัติแรงดันย้อนกลับกับค่าประจุบริเวณปลอดพาหะของไดโอด B_1 ,B_2 ,B_3	65
5.8 ข)	แสดงคุณสมบัติแรงดันย้อนกลับกับค่าประจุบริเวณปลอดพาหะของไดโอด 1N4001 และ 1N5406	66
5.9	แสดงไดโอดที่เตรียมไว้เพื่อทดสอบคุณสมบัติกระแสและแรงดัน	69
5.10	วงจรที่ใช้วัดคุณสมบัติกระแสและแรงดัน	69
5.11	กราฟแสดงคุณสมบัติกระแสและแรงดันของไดโอดที่อุณหภูมิ 27.2 องศาเซลเซียส	73
5.12	การฟแสดงคุณสมบัติกระแสและแรงดันของไดโอดในรูป 5.9 ที่อุณหภูมิต่างๆ	74
5.13	การฟแสดงคุณสมบัติกระแสและแรงดันย้อนกลับของไดโอดในรูป 5.9 ที่อุณหภูมิต่างๆ	75

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
5.14	แสดงวิธีทดลองหาคุณสมบัติกระแสและแรงดันของไดโอดที่อุณหภูมิต่างๆ	76
5.15	แสดงการหาอุณหภูมิและแรงดันของ thermo-couple ที่ฝังลงในแผ่น copper bar	77
5.16	ก) ภาพถ่ายแสดงการวัดหากระแสจำกัด (current rating) กับอุณหภูมิ	80
5.16	ข) แสดงการต่อวงจรเพื่อการวัดค่าหากระแสจำกัด (current rating)	80
5.17	การพแสดงอุณหภูมิและแรงดันที่ได้จาก thermo-couple ที่ฝังในแผ่น copper bar	82
5.18	แสดงรูปการทดสอบหาเวลาการฟื้นตัวย้อนกลับ	83
5.19	แสดงวงจรที่ใช้ทดลองหาเวลาการฟื้นตัวย้อนกลับ	83
5.20	การพแสดงการฟื้นตัวย้อนกลับของไดโอด 1N4001 ,1N5406 และ B_4	84
6.1	โครงสร้างไดโอดที่ประดิษฐ์ขึ้น	88
6.2	โครงสร้างของไดโอดเพื่อลดความต้านทานอนุกรมให้ต่ำลง	89
6.3	แสดงบริเวณส่วนโค้งที่เกอดขึ้นจากการแพร่ซึมสารเจือปน และบริเวณเส้นประเป็นแนวของการทำ mesa pattern	89
6.4	แสดงตัวอย่างความต้านทานทางอุณหภูมิของไดโอด	90
7.1	แสดงโครงสร้างของไดโอดกำลังที่เสนอแนะเพื่อเพิ่มพื้นที่หัวต่อโอห์มมิคโดยใช้หน้ากากที่เปิดช่องซิลิกอนไดออกไซด์เป็นรูปวงกลมเต็มเมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างในรูป 5.1	95

รายการสัญญลักษณ์

J	=	จำนวนพาหะที่ไหลผ่านหนึ่งหน่วยพื้นที่ในหนึ่งหน่วย เวลา
q	=	1.6×10^{-19} คูลอมบ์
μ	=	ความคล่องตัวของพาหะ
ξ	=	สนามไฟฟ้า
D	=	สัมประสิทธิ์การแพร่ซึม
k	=	ค่าคงที่ของ Boltzman
T	=	อุณหภูมิสัมบูรณ์
V	=	แรงดันไฟฟ้า
P_p	=	ความ เข้มข้นของโฮลที่ขอบของย่านพี
P_n	=	ความ เข้มข้นของโฮลที่ขอบของย่าน เอ็น
N_A	=	ความ เข้มข้นพาหะด้านพี
N_D	=	ความ เข้มข้นพาหะด้าน เอ็น
N_B	=	ความ เข้มข้นของอะตอมสาร เจือปนในแว่นผลึก เดิม
n_i	=	intrinsic concentration
W	=	ความกว้างของบริ เวณปลอดพาหะ
ε	=	permittivity of free space
C_j	=	ค่าประจุบริ เวณหัวต่อ
L_p	=	hole diffusion length
τ_p	=	เวลาชีวิตพาหะ
n	=	แฟค เตอร์ เอ็น หรือไอ เดียริตี้แฟค เตอร์ (ideality factor)
BV	=	แรงดันพังทะลุ
W'	=	ความกว้างของบริ เวณปลอดที่แรงดันพังทะละ
r	=	รัศมีความโค้งที่ เกิดจากการแพร่ซึมสาร เจือปน
x_j	=	ความลึกของหัวต่อพี- เอ็น
R	=	ความต้านทานแผ่น

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการสัญญลักษณ์ (ต่อ)

ρ = ค่าความต้านทานจำเพาะ

t_{rr} = เวลาการฟื้นตัวย้อนกลับ

T_j = อุณหภูมิบริเวณหัวต่อพี-เอ็น