

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของซิลิคอนไดโอดชนิด Alloyed p⁺-i-n⁺

THE STUDY OF ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF ALLOYED p⁺-i-n⁺
SILICON DIODE



ชลิดา จรรยาหาญ

CHALIDA JARNYAHARN

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน 49636

วัน, เดือน, ปี 25 ก.พ. 2547

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน ISBN 974-324-219-8 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**THE STUDY OF ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF ALLOYED $p^+ - i - n^+$
SILICON DIODE**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRONIC ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2003

ISBN 974-324-219-8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2003

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของซิลิคอนไดโอดชนิด Alloyed p ⁺ -i-n ⁺
นักศึกษา	นางสาว ชลิดา จรรยาหาญ
รหัสประจำตัว	42061305
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
พ.ศ.	2546
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. สมเกียรติ ศุภเดช

บทคัดย่อ

ได้มีการศึกษาและรายงานถึงการเกิดคุณสมบัติความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยกระแสหรือ Current Controlled Negative Resistance (CCNR) ในซิลิคอนไดโอดชนิด p⁺-i-n⁺ มาแล้ว โดยในส่วน i (intrinsic) มีระดับพลังงานแบบลึก (deep impurity level) อยู่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะกล่าวถึงการออกแบบและกระบวนการสร้างแบบใหม่ของซิลิคอนไดโอดชนิด p⁺-i-n⁺ ที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมทองคำ เมื่อส่วนแอโนด (p⁺) ถูกสร้างด้วยวิธีการอัลลอยทำให้ไดโอดสามารถแสดงคุณสมบัติสวิทชิงค์และความต้านทานเชิงลบได้ในขณะที่ได้รับไบแอสตรงค่าหนึ่ง แม้ส่วน i มีระยะเพียง 60 ไมโครเมตร ทำให้สามารถลดขนาดของอุปกรณ์ลงได้ โดยทำการศึกษาคูสมบัติทางไฟฟ้า, ศึกษากลไกการเกิดคุณสมบัติสวิทชิงค์ และความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยกระแส, ศึกษาผลของการครีตต่อการเกิดคุณสมบัติความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยกระแส จากผลการทดลองพบว่าครีตเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้ไดโอดสามารถแสดงคุณสมบัติสวิทชิงค์และความต้านทานเชิงลบได้อย่างชัดเจน, ศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงขนาดพื้นที่ของส่วนแอโนดและแคโทด และทำการศึกษาปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยแรงดัน หรือ Voltage Controlled Negative Resistance (VCNR) ซิลิคอนไดโอดชนิด p⁺-i-n⁺ โดยวิธีการอัลลอย ซึ่งในส่วน i มีเกทชนิดพีอยู่ พบว่าแม้ส่วนเกทจะเกิดจากการอัลลอยหรือจากการแพร่สารเจือไดโอดก็สามารถแสดงปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบออกมาได้อย่างชัดเจน ซึ่งเป็นข้อดีของการสร้างไดโอดจากเทคนิคการอัลลอยเนื่องจากทำให้ไดโอดสามารถแสดงคุณสมบัติสวิทชิงค์และความต้านทานเชิงลบได้อย่างชัดเจนแม้ระยะ i มีระยะสั้นๆทำให้สามารถพัฒนาเป็นอุปกรณ์สวิทชิงค์ขนาดเล็กต่อไปได้

Thesis Title	The Study of Electrical Characteristics of Alloyed $p^+ - i - n^+$ Silicon Diode
Student	Miss. Chalida Jamyaharn
Student ID.	42061305
Degree	Master of Engineering
Program	Electronic Engineering
Year	2003
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. Somkiat Supadech

ABSTRACT

There have been extensive studies on the occurrence of Current Controlled Negative Resistance (CCNR) in $p^+ - i - n^+$ silicon diodes of which the intrinsic regions contain deep impurity energy level.

This thesis deals with the design and new fabrication process of gold compensated $p^+ - i - n^+$ silicon diodes. When the anode (p^+) was fabricated by using alloyed process. The diode shows good switching characteristics and negative resistance in the forward bias region even though the i -region is as short as 60 micrometers, that is good to development of diode for being the device which has small size. Then we study the electrical characteristics, the phenomenological model of the operation, the effect of guardring in Alloyed $p^+ - i - n^+$ silicon diodes, show that guardring is an important part in reducing and preventing the surface leakage current, Cathode and Anode Area dependence of switching characteristics and negative resistance and the study of the occurrence of voltage controlled negative resistance (VCNR) in Alloyed $p^+ - i - n^+$ silicon diodes of which the hole-injection- p^+ -gate is formed in an intrinsic region and placed between the anode(p^+) and the cathode (n^+). The experimental results show that gate part can be fabricated from alloyed process and diffusion process. The result from this study and this experiment, by using the alloyed process can be fabricated short i -region diodes that performed good switching characteristics and the negative resistance phenomena. These advantages may be possible to develop switching microelectronic device in the future.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ร.ศ. ดร. สมเกียรติ สุภเดช อาจารย์ที่ปรึกษาที่ให้คำแนะนำและคำปรึกษา ในการวางแนวทางวิจัย พร้อมทั้งการแก้ปัญหาต่างๆทั้งทางด้านทฤษฎีและปฏิบัติ

ขอขอบพระคุณ ผศ. สุรศักดิ์ เนียมเจริญ หัวหน้าศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ที่ให้คำปรึกษาและอำนวยความสะดวกสำหรับเครื่องมือในการทำวิจัย

ขอขอบคุณ คุณเนาวรัตน์ สังข์จิ้น และคุณสรายุทธ วิสวเสวงสุข ในการให้ความช่วยเหลือ ในการวิจัยจนสามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ ความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจาก คุณรังสรรค์ คุณกัตไทย คุณโสภณ และพี่ๆทุกคนในศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์

สุดท้าย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อและคุณแม่ ที่อยู่เคียงข้างเสมอ

ชลิตา จรรยาหาญ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
สัญลักษณ์.....	XVII
ศัพท์เทคนิค.....	XIX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาทางวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย.....	1
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	4
2.1 คุณสมบัติของซิลิคอนที่ถูกแพร่ด้วยทองคำ.....	4
2.1.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของทองคำ.....	4
2.1.2 ลักษณะระดับพลังงานของทองคำในซิลิคอน.....	6
2.1.3 กลไกการแพร่ของทองคำในซิลิคอน.....	8
2.1.4 การเพิ่มขึ้นของสภาพต้านทานของสารที่มีสารเจือขัปลึ้ก.....	9
2.1.5 ทองคำเป็นตัวควบคุมช่วงอายุพาหะ.....	11
2.2 ความต้านทานเชิงลบ.....	14
2.2.1 ประเภทของความต้านทานเชิงลบ.....	14
2.2.1.1 ความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยกระแส.....	14
2.2.1.2 ความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยแรงดัน.....	14
2.3 การฉีดประจุคู่ควบ.....	15
2.4 ปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยกระแสในซิลิคอน ไดโอดชนิด p^+i-n^+	16
2.5 ปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยแรงดันในซิลิคอน ไดโอดชนิด IG p^+i-n^+	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.5.1 High Resistivity ในช่วง $0 < V_{AC} < V_R$	22
2.5.2 Current Rising ในช่วง $V_R < V_{AC} < V_P$	23
2.5.3 Peak Point ขณะที่ $V_{AC} = V_P$	24
2.5.4 VCNR ในช่วง $V_P < V_{AC} < V_M$	24
2.5.5 Switch Off $V_M < V_{AC} < V_{th}$	24
2.6 รอยต่อแบบอัลลอย(Alloyed Junction).....	28
บทที่ 3 การออกแบบและกระบวนการสร้าง.....	30
3.1 การสร้างกระจกต้นแบบ.....	30
3.2 กระบวนการสร้างซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - n^+$ โดยวิธีการอัลลอย.....	36
3.2.1 ขั้นตอนการเตรียมฐานรอง.....	36
3.2.2 การทำความสะอาดผิวซิลิคอนครั้งแรก.....	36
3.2.3 การทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นมาตรฐาน.....	37
3.2.4 Slice Etching (ก่อนการออกซิเดชัน).....	37
3.2.5 กระบวนการออกซิเดชัน(Oxidation).....	37
3.2.6 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี(Photolithography).....	38
3.2.7 กระบวนการแพร่อะตอมสารเจือ (Diffusion).....	39
3.2.7.1 กระบวนการแพร่อะตอมสารเจือโบรอน (Boron Deposition).....	39
3.2.7.2 กระบวนการแพร่อะตอมสารเจือฟอสฟอรัส (Phosphorus Deposition).....	40
3.2.7.3 กระบวนการแพร่อะตอมทองคำ.....	40
3.2.8 กระบวนการเคลือบอะลูมิเนียมเพื่อสร้างขั้วโลหะ (Metallization).....	41
3.2.9 กระบวนการซินเตอร์ริง (Sintering).....	42

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	44
4.1 การศึกษารอยต่อพีเอ็น โดยเทคนิคการอัลลอย.....	44
4.2 ปรัชญาการค้นคว้าความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยกระแส(CCNR) ในซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอย($n^+ - i - Al$).....	46
4.2.1 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของแอโนดและแคโทดเมื่อระยะ i มีค่าต่างๆ.....	48
4.2.2 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่าง V_p, V_n กับระยะ i ของซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอยและแพร่สารเจือ.....	51
4.2.3 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่าง V_p/V_n กับระยะ i ของซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอยและแพร่สารเจือ.....	53
4.2.4 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอยและ $p^+ - i - p^+$ โดยวิธีการอัลลอย.....	54
4.3 การศึกษาผลของการครีงที่มีผลต่อการเกิดความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยกระแส(CCNR).....	54
4.3.1 คุณสมบัติของซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอยเมื่อส่วนแคโทดไม่มีอาร์คริงล้อมรอบ, มีอาร์คริงขนาด 10 และ 20 ไมโครเมตรล้อมรอบที่ระยะ i มีค่าต่างๆ.....	55
4.3.2 คุณสมบัติของซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอยและแพร่สารเจือเมื่อส่วนมีอาร์คริงขนาด 10 และ 20 ไมโครเมตรล้อมรอบที่ระยะ i ต่างๆ.....	62
4.4 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของขนาดพื้นที่ส่วนแอโนดและแคโทดต่อการเกิดความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยกระแส(CCNR).....	65
4.4.1 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันเมื่อพื้นที่ส่วนแอโนดและแคโทดมีขนาดเท่ากัน.....	66
4.4.2 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันเมื่อพื้นที่ส่วนแอโนดคงที่และแคโทดมีการเปลี่ยนแปลงขนาด.....	71
4.4.3 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันเมื่อพื้นที่ส่วนแคโทดคงที่และแอโนดมีการเปลี่ยนแปลงขนาด.....	76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.5	ปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยแรงดันในซีลิกอนไดโอดชนิด $n^+ - i - Al$ injection gate.....	81
4.5.1	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแอดโนด(I_{AC}) และ แรงดันแอดโนด-แคโทด (V_{AC})ของซีลิกอนไดโอดชนิด $n^+ - i - Al$ injection gate.....	84
4.5.2	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสค้ำยอด (I_p), แรงดันค้ำยอด (V_p) และ แรงดันขึ้น (V_R) เมื่อแรงดันที่เททมีค่าต่างๆ.....	86
4.5.3	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสค้ำยอด (I_p), แรงดันค้ำยอด (V_p) และ แรงดันขึ้น (V_R) เมื่อระยะระหว่างแคโทดและแอดโนด(L_{AC})มีค่าต่างๆ.....	87
4.5.4	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสค้ำยอด (I_p), แรงดันค้ำยอด (V_p) และ แรงดันขึ้น (V_R) เมื่อระยะระหว่างแคโทดและเทท(L_{CG}) มีค่าต่างๆ.....	88
4.6	ปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยแรงดันในซีลิกอนไดโอดชนิด $n^+ - i - n^+$ injection gate.....	91
4.7	ปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยกระแสในซีลิกอนไดโอดชนิด Bi-directional $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัดลอม.....	93
4.8	ปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยกระแสในซีลิกอนไดโอดชนิด Bi-directional $n^+ - i - n^+$	95
บทที่ 5	สรุปและวิจารณ์.....	100
	เอกสารอ้างอิง.....	103
	ภาคผนวก.....	105
	ภาคผนวก ก.....	105
	ภาคผนวก ข.....	111
	ประวัติผู้เขียน.....	116

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 Capture Cross Sections of Gold in Silicon.....	13
ข-1 สีของซิลิคอนไดออกไซด์ที่ความหนาต่าง ๆ.....	113
ข-2 Capture and Generation Processes for a Single-Process Trap and Field-Dependent Effect.....	115



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมสารเจือในซิลิคอนที่อุณหภูมิต่างๆ.....	4
2.2 ค่าความสามารถในการละลายได้ในซิลิคอนของสารเจือเมื่ออุณหภูมิต่างๆ.....	5
2.3 ระดับพลังงานของอะตอมสารเจือต่างๆ ในซิลิคอน.....	6
2.4 ระดับพลังงานของทองคำในซิลิคอน เมื่อไม่เติมระดับพลังงานแบบคีน(a) และ เมื่อเติมระดับพลังงานของสารเจือแบบคีนชนิดอื่นและชนิดพี(b)และ(c)ตามลำดับ.....	6
2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพิกัดความต้านทานและความหนาแน่นของอะตอมที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลวินในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น(a) และชนิดพี(b) เมื่อความหนาแน่นของสาร กึ่งตัวนำชนิดเอ็นและชนิดพี (cm^{-3}) มีค่าต่างๆ ดังนี้ A : 1×10^{13} ; B : 2×10^{13} ; C : 5×10^{13} ; D : 1×10^{14} ; E : 2×10^{14} ; F : 5×10^{14} ; G : 1×10^{15} H : 2×10^{15} ; I : 5×10^{15} ; J : 1×10^{16} ; K : 2×10^{16} ; L : 5×10^{16} ; M : 1×10^{17}	8
2.6 ค่าความหนาแน่นสูงสุดของทองคำ(N_{Au}) ในซิลิคอนที่อุณหภูมิการแพร่ทองคำค่าต่างๆ.....	9
2.7 พิกัดความต้านทานของซิลิคอนหลังจากแพร่ด้วยทองคำที่ภาวะอิ่มตัว(ρ_p) และค่าพิกัด ความต้านทานก่อนแพร่ทองคำ(ρ_p) ที่อุณหภูมิการแพร่ทองคำค่าต่างๆ (T_{Au}).....	10
2.8 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของ lifetime เมื่ออุณหภูมิตั้งใช้ในการแพร่ทองเปลี่ยนไป.....	13
2.9 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของคุณสมบัติความต้านทานเชิงลบ.....	14
2.10 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของคุณสมบัติความต้านทานเชิงลบ แบบควบคุมด้วยกระแส.....	15
2.11 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของคุณสมบัติความต้านทานเชิงลบ แบบควบคุมด้วยแรงดัน.....	15
2.12 การฉีดประจุคู่ควบ (Double Injection) และการเกิดความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วย กระแส.....	16
2.13 โครงสร้างทั่วไปของซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$	17
2.14 ระดับพลังงานของซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ ที่สภาวะสมดุลความร้อน.....	17
2.15 ระดับพลังงานของซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ ภายใต้การให้แรงดันไบอัสตรง.....	18
2.16 ภาวะเมื่อแรงดันไบอัสเท่ากับศูนย์โดยอิเล็กตรอนถูกจับจนเต็ม trapping center ซึ่งยัง ไม่มีกระแสไหลผ่านส่วน i.....	18
2.17 ภาวะเมื่อให้แรงดันไบอัสค่าต่ำๆ ทำให้เกิด single injection ของอิเล็กตรอน.....	19
2.18 ภาวะเมื่อแรงดันไบอัสมีค่าใกล้เคียงแรงดันวิกฤติและ trapping center จับ โฮลเกือบเต็ม.....	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารทศวงนเวสสาหรับการเขางานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขอขณาด้านการคำ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.19 ภาวะ trapping center จับอิเล็กตรอนและโฮลจนเต็มทำให้เกิดการฉีดพาหะคู่ควม (double injection)และเกิดความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยกระแส.....	20
2.20 ช่วงการทำงานของไดโอดซึ่งแบ่งได้เป็นสองช่วงคือช่วง Low Conductivity และ High Conductivity.....	20
2.21 คุณสมบัติกระแสและแรงดันของความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยแรงดัน.....	22
2.22 การกระจายของสนามไฟฟ้าขณะที่แรงดัน V_{AC} มีค่า $0 < V_{AC} < V_R$	23
2.23 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนขณะที่ $V_R < V_{AC} < V_P$	24
2.24 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนขณะที่ $V_P < V_{AC} < V_M$	25
2.25 ภาวะช่วง switch off เมื่อ $V_M < V_{AC}$	25
2.26 ลักษณะแรงดัน ไปอัสแอนโนด-แคโทด(V_{AC}) และแรงดันเกต(V_G)(a) และลักษณะ การกระจายแบบเชิงเส้นของแรงดันระหว่างแอนโนด-โทดและ แคโทด-เกต(b).....	27
2.27 การสร้างรอยต่อพี-เอ็นจากการอัลลอย.....	29
3.1 ลักษณะ โครงสร้างของซีลิกอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีแพร่สารเจือโดยมีการ์ดริง ชนิดพีล้อมรอบส่วนแคโทดขนาด 10 ไมโครเมตร และเปลี่ยนแปลงระยะ i ตั้งแต่ 50-180 ไมโครเมตร.....	31
3.2 ลักษณะ โครงสร้างของซีลิกอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีแพร่สารเจือโดยมีการ์ดริง ชนิดพีล้อมรอบส่วนแคโทดขนาด 20 ไมโครเมตรและเปลี่ยนแปลงระยะระหว่าง i ตั้งแต่ 60-180 ไมโครเมตร.....	31
3.3 ลักษณะ โครงสร้างของซีลิกอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอยโดยส่วนแคโทด ไม่มีมีการ์ดริงล้อมรอบ และเปลี่ยนแปลงระยะ i ตั้งแต่ 20-180 ไมโครเมตร.....	31
3.4 ลักษณะ โครงสร้างของซีลิกอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอยโดยมีการ์ดริง ชนิดพีล้อมรอบส่วนแคโทดขนาด 10 ไมโครเมตร และเปลี่ยนแปลงระยะ i ตั้งแต่ 50-150 ไมโครเมตร.....	32
3.5 ลักษณะ โครงสร้างของซีลิกอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอยโดยมีการ์ดริงชนิดพี ล้อมรอบส่วนแคโทดขนาด 20 ไมโครเมตร และทำการเปลี่ยนแปลงระยะ ระหว่างส่วนแค โทดและแอนโนด(ส่วน i) ตั้งแต่ 60-160 ไมโครเมตร.....	32

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.6 ลักษณะโครงสร้างซึ่งส่วนแอนโนด 1 สร้างจากการแพร่สารเจือชนิดพี และส่วนแอนโนด 2 สร้างจากการอัลลอยโดยมีกัณฑ์ริงชนิดพีล้อมรอบส่วนแคโทดขนาด 20 ไมโครเมตร และเปลี่ยนแปลงระยะ i ตั้งแต่ 60-120 ไมโครเมตร.....	32
3.7 ลักษณะโครงสร้างของซิลิคอนไดออกไซด์ชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการแพร่สารเจือและอัลลอยโดยมีกัณฑ์ริงชนิดพีล้อมรอบส่วนแคโทดและแอนโนดขนาด 20 ไมโครเมตรโดยเปลี่ยนแปลงขนาดพื้นที่ส่วนแอนโนดและแคโทดพร้อมกันคือ 120, 160 และ 200 ตารางไมโครเมตร และเปลี่ยนแปลงระยะ i ตั้งแต่ 60-160 ไมโครเมตร.....	33
3.8 ลักษณะโครงสร้างของซิลิคอนไดออกไซด์ชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการแพร่สารเจือและอัลลอยโดยมีกัณฑ์ริงชนิดพีล้อมรอบส่วนแคโทดและแอนโนดขนาด 20 ไมโครเมตรโดยพื้นที่ส่วนแอนโนดมีขนาดคงที่คือ 200 ตารางไมโครเมตร แต่เปลี่ยนแปลงขนาดพื้นที่ส่วนแคโทดคือ 120, 160 และ 200 ตารางไมโครเมตร และเปลี่ยนแปลงระยะ i ตั้งแต่ 60-160 ไมโครเมตร.....	33
3.9 ลักษณะโครงสร้างของซิลิคอนไดออกไซด์ชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอยโดยมีกัณฑ์ริงชนิดพีล้อมรอบส่วนแคโทดและแอนโนดขนาด 20 ไมโครเมตร โดยพื้นที่ส่วนแคโทดมีขนาดคงที่คือ 200 ตารางไมโครเมตร แต่เปลี่ยนแปลงขนาดพื้นที่ส่วนแอนโนดคือ 120, 160 และ 200 ตารางไมโครเมตร และเปลี่ยนแปลงระยะ i ตั้งแต่ 60-160 ไมโครเมตร.....	34
3.10 ลักษณะโครงสร้างของซิลิคอนไดออกไซด์ชนิด $n^+ - i - Al$ injection gate โดยส่วนเกตสร้างจากการแพร่สารเจือชนิดพี เปลี่ยนแปลงระยะระหว่างส่วนแคโทดและเกตคือ 60 และ 80 ไมโครเมตร และเปลี่ยนแปลงระยะ i ตั้งแต่ 120-220 ไมโครเมตร.....	34
3.11 ลักษณะโครงสร้างของซิลิคอนไดออกไซด์ชนิด $n^+ - i - Al$ injection gate โดยส่วนเกตสร้างจากการอัลลอย เปลี่ยนแปลงระยะระหว่างส่วนแคโทดและเกตคือ 60 และ 80 ไมโครเมตร และเปลี่ยนแปลงระยะ i ตั้งแต่ 140-240 ไมโครเมตร.....	35
3.12 ลักษณะโครงสร้างของซิลิคอนไดออกไซด์ชนิด $n^+ - i - n^+$ injection gate โดยส่วนเกตสร้างจากการแพร่สารเจือชนิดพี ทำการเปลี่ยนแปลงระยะระหว่างส่วนแคโทดและเกตคือ 60 และ 80 ไมโครเมตร และเปลี่ยนแปลงระยะ i ตั้งแต่ 120-220 ไมโครเมตร.....	35
3.13 ลักษณะโครงสร้างของซิลิคอนไดออกไซด์ชนิด $n^+ - i - n^+$ injection gate โดยส่วนเกตสร้างจากการอัลลอยทำการเปลี่ยนแปลงระยะระหว่างส่วนแคโทดและเกตคือ 60 และ 80 ไมโครเมตร และเปลี่ยนแปลงระยะ i ตั้งแต่ 120-220 ไมโครเมตร.....	35

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.14 ลักษณะ โครงสร้างของซิลิคอน ไดโอดชนิด Bi-directional $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอย และเปลี่ยนแปลงระยะ i ตั้งแต่ 50-120 ไมโครเมตร.....	36
3.15 ลักษณะ โครงสร้างของซิลิคอน ไดโอดชนิด Bi-directional $n^+ - i - n^+$ ซึ่งส่วนแคโทดและ แอโนดสร้างจากการแพร่สารเจือชนิดอื่นโดยส่วน แคโทดไม่มีคาร์ดริงล้อมรอบ และ เปลี่ยนแปลงระยะ i ตั้งแต่ 20-220 ไมโครเมตร.....	36
3.16 กระบวนการสร้างซิลิคอน ไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอย.....	42
4.1 ลักษณะ โครงสร้างของไดโอดที่เกิดจากการอัลลอย.....	44
4.2 เครื่อง HP 4061 A ซึ่งต่ออยู่กับคอมพิวเตอร์ในการควบคุมและเก็บข้อมูล.....	44
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดได้รับแรงดันไบอัสตรง.....	45
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ.....	46
4.5 โครงสร้างของไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ ที่สร้างจากการแพร่สารแบบเดิม(a) และจาก เทคนิคการอัลลอย(b).....	47
4.6 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$	47
4.7 วงจรวัดความสัมพันธ์ของกระแสแอโนด(I_{AC}) และ แรงดันแอโนด-แคโทด(V_{AC}).....	48
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ แบบอัลลอยและ แบบแพร่สารเจือ.....	49
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง V_g, V_h กับระยะ i ของไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ แบบอัลลอย และ แบบแพร่สารเจือ.....	52
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง V_h / V_g กับระยะ i ของไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ แบบอัลลอยและ แบบแพร่สารเจือ.....	53
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ แบบอัลลอย(a) และ $p^+ - i - p^+$ โดยวิธีการอัลลอย(b).....	54
4.12 โครงสร้างของซิลิคอน ไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอยเมื่อส่วนแคโทดไม่มี คาร์ดริง(a)และมีคาร์ดริงล้อมรอบ(b).....	55
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอย เมื่อส่วนแคโทดไม่มีคาร์ดริงและมีคาร์ดริงขนาด 10 และ 20 ไมโครเมตรล้อมรอบ.....	56
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง V_g กับระยะ i ของไดโอดทั้งสาม โครงสร้าง.....	60
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง I_g กับระยะ i ของไดโอดทั้งสาม โครงสร้าง.....	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง I_s กับระยะ i ของไดโอดทั้งสามโครงสร้าง.....	61
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดเมื่อระยะ i มีค่า 60 ไมโครเมตร.....	61
4.18 ลักษณะทางเดินของกระแสเมื่อมีและไม่มีการ์ดริงล้อมรอบส่วนแคโทด.....	62
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่าง V_s, V_n กับระยะ i ของไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ แบบอัลลอย ($n^+ - i - Al$) และแบบแพร่สารเจือ($p^+ - i - n^+$) เมื่อการ์ดริงมีขนาด 10 ไมโครเมตร.....	63
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่าง V_s, V_n กับระยะ i ของไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ แบบอัลลอย ($n^+ - i - Al$) และแบบแพร่สารเจือ($p^+ - i - n^+$) เมื่อการ์ดริงมีขนาด 20 ไมโครเมตร.....	63
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่าง I_s กับระยะ i ของไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ แบบอัลลอย($n^+ - i - Al$) และแบบแพร่สารเจือ($p^+ - i - n^+$) เมื่อการ์ดริงมีขนาด 10 และ 20 ไมโครเมตร.....	64
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง I_s กับระยะ i ของไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ แบบอัลลอย($n^+ - i - Al$) และแบบแพร่สารเจือ($p^+ - i - n^+$) เมื่อการ์ดริงมีขนาด 10 และ 20 ไมโครเมตร.....	64
4.23 โครงสร้างของไดโอดเมื่อพื้นที่ส่วนแอโนดและแคโทดมีขนาดเท่ากัน.....	66
4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดเมื่อพื้นที่ส่วนแอโนดและแคโทดมีขนาดเท่ากัน.....	67
4.25 ความสัมพันธ์ระหว่าง V_s และขนาดของแอโนดและแคโทดของซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอย(a)และวิธีแพร่สารเจือ(b).....	68
4.26 ความสัมพันธ์ระหว่าง V_n และขนาดของแอโนดและแคโทดของซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอย(a)และวิธีแพร่สารเจือ(b).....	69
4.27 ความสัมพันธ์ระหว่าง I_s และขนาดของแอโนดและแคโทดของซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอย(a)และวิธีแพร่สารเจือ(b).....	70
4.28 โครงสร้างของไดโอดเมื่อพื้นที่ส่วนแอโนดคงที่และแคโทดมีการเปลี่ยนแปลงขนาด.....	71
4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดเมื่อพื้นที่ส่วนแอโนดคงที่และแคโทดมีการเปลี่ยนแปลงขนาด.....	72
4.30 ความสัมพันธ์ระหว่าง V_s และขนาดของแคโทดของซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอย(a)และวิธีแพร่สารเจือ(b).....	74
4.31 ความสัมพันธ์ระหว่าง V_n และขนาดของแคโทดของซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอย(a)และวิธีแพร่สารเจือ(b).....	75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.32 ความสัมพันธ์ระหว่าง I_s และขนาดของแคโทดของซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอย(a)และวิธีแพร่สารเจือ(b).....	76
4.33 โครงสร้างของไดโอดเมื่อพื้นที่ส่วนแคโทดคงที่และแอนโอดมีการเปลี่ยนแปลงขนาด.....	77
4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดเมื่อพื้นที่ส่วนแคโทดคงที่และแอนโอดมีการเปลี่ยนแปลงขนาด.....	77
4.35 ความสัมพันธ์ระหว่าง V_s และขนาดของแอนโอดของซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอย(a)และวิธีแพร่สารเจือ(b).....	79
4.36 ความสัมพันธ์ระหว่าง V_h และขนาดของแอนโอดของซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอย(a)และวิธีแพร่สารเจือ(b).....	80
4.37 ความสัมพันธ์ระหว่าง I_s และขนาดของแอนโอดของซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอย(a)และวิธีแพร่สารเจือ(b).....	81
4.38 ลักษณะโครงสร้างทั่วไปของซิลิคอนไดโอดชนิด $n^+ - i - Al$ injection gate.....	82
4.39 ลักษณะโครงสร้างด้านบนซิลิคอนไดโอดชนิด $n^+ - i - Al$ injection gate เมื่อส่วนเกตสร้างจากการแพร่อะตอมสารเจือโบรอน 3(a) และจากการอัลลอยระหว่างอะลูมิเนียมและซิลิคอน (b).....	83
4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของซิลิคอนไดโอดชนิด $n^+ - i - Al$ injection gate.....	83
4.41 วงจรวัดความสัมพันธ์ของกระแสแอนโอด(I_{AC}) และแรงดันแอนโอด-แคโทด(V_{AC}).....	84
4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแอนโอด(I_{AC}) และแรงดันแอนโอด-แคโทด(V_{AC})ของซิลิคอนไดโอดชนิด $n^+ - i - Al$ injection gate.....	85
4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันค้ำยอด (V_R) เมื่อแรงดันที่เกตมีค่าต่างๆ.....	86
4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันค้ำยอด (V_p) เมื่อแรงดันที่เกตมีค่าต่างๆ.....	86
4.45 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสค้ำยอด (I_p)เมื่อแรงดันที่เกตมีค่าต่างๆ.....	87
4.46 ความสัมพันธ์ระหว่าง $V_R - L_{AC}$	87
4.47 ความสัมพันธ์ระหว่าง $V_p - L_{AC}$	88
4.48 ความสัมพันธ์ระหว่าง $I_p - L_{AC}$	88
4.49 ความสัมพันธ์ระหว่าง $V_R - L_{CG}$	89
4.50 ความสัมพันธ์ระหว่าง $V_p - L_{CG}$	89

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.51 ความสัมพันธ์ระหว่าง $I_p - L_{CG}$	89
4.52 ความสัมพันธ์ระหว่าง $I_{AC} - V_{AC}$ เมื่อ $V_R < V_{AC} < V_p$ ที่ระยะ L_{AC} มีค่าต่างๆ.....	90
4.53 โครงสร้างของซิลิคอนไดโอดชนิด $n^+ - i - n^+$ injection gate เมื่อส่วนเกตสร้างจากการแพร่อะตอมสารเจือโบรอน(a) และจากการอัลลอยระหว่างอะลูมิเนียมและซิลิคอน(b).....	91
4.54 ความความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของซิลิคอนไดโอดชนิด $n^+ - i - n^+$ injection gate.....	92
4.55 ลักษณะซิลิคอนไดโอดชนิด Bi-directional $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอย.....	93
4.56 คุณสมบัติกระแสและแรงดันของซิลิคอนไดโอดชนิด Bi-directional $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอย.....	94
4.57 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของซิลิคอนไดโอดชนิด Bi-directional $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอย.....	94
4.58 ลักษณะโครงสร้างของซิลิคอนไดโอดชนิด Bi-directional $n^+ - i - n^+$	96
4.59 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของซิลิคอนไดโอดชนิด Bi-directional $n^+ - i - n^+$	96
ก-1 โครงสร้างชุดที่ 1.....	107
ก-2 โครงสร้างชุดที่ 2.....	107
ก-3 โครงสร้างชุดที่ 3.....	107
ก-4 โครงสร้างชุดที่ 4.....	107
ก-5 โครงสร้างชุดที่ 5.....	107
ก-6(a) โครงสร้างชุดที่ 6(a).....	107
ก-6(b) โครงสร้างชุดที่ 6(b).....	108
ก-6(c) โครงสร้างชุดที่ 6(c).....	108
ก-7(a) โครงสร้างชุดที่ 7(a).....	108
ก-7(b) โครงสร้างชุดที่ 7(b).....	108
ก-7(c) โครงสร้างชุดที่ 7(c).....	108
ก-8(a) โครงสร้างชุดที่ 8(a).....	108
ก-8(b) โครงสร้างชุดที่ 8(b).....	109
ก-8(c) โครงสร้างชุดที่ 8(c).....	109

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก-9 โครงสร้างชุดที่ 9.....	109
ก-10 โครงสร้างชุดที่ 10.....	109
ก-11 โครงสร้างชุดที่ 11.....	109
ก-12 โครงสร้างชุดที่ 12.....	109
ก-13 โครงสร้างชุดที่ 13.....	110
ก-14 โครงสร้างชุดที่ 14.....	110
ก-15 โครงสร้างชุดที่ 15.....	110
ข-1 ความสัมพันธ์ของความหนาของซิลิคอนไดออกไซด์บนพื้นผลึกซิลิคอนกับ เวลาและอุณหภูมิสำหรับการออกซิเดชันแบบแห้ง.....	111
ข-2 ความสัมพันธ์ของความหนาของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บนชั้นซิลิคอนกับ เวลาและอุณหภูมิสำหรับการออกซิเดชันแบบชื้น.....	112

สัญลักษณ์

สัญลักษณ์

ความหมาย

n_i	ความหนาแน่นอะตอมของสารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีนซิค
N_A	ความหนาแน่นอะตอมสารเจือผู้รับ
N_D	ความหนาแน่นอะตอมสารเจือผู้ให้
N_{AU}	ความหนาแน่นของอะตอมทองคำ
E_A	ระดับพลังงานอะตอมสารเจือผู้รับ
E_D	ระดับพลังงานอะตอมสารเจือผู้ให้
K	ค่าคงตัวของโบลทซ์มันน์
T	อุณหภูมิสัมบูรณ์
D_I	สัมประสิทธิ์การแพร่แบบแทนที่ของทอง
D_S	สัมประสิทธิ์การแพร่แบบแทนที่ของทอง
D_{eff}	สัมประสิทธิ์การแพร่สุทธิ
ρ_b	พิกัดความต้านทานของซิลิคอนก่อนการแพร่ด้วยทองคำ
ρ_a	พิกัดความต้านทานของซิลิคอนหลังจากแพร่ด้วยทองคำ
T_{AU}	อุณหภูมิการแพร่ทองคำค่าต่างๆ
τ_p	ช่วงอายุของโฮล
τ_n	ช่วงอายุของอิเล็กตรอน
σ_p	trapping cross section ของโฮล
σ_n	trapping cross section ของอิเล็กตรอน
N_{AU}	trapping cross section ของทอง
i	intrinsic
e	ขนาดของประจุ
μ_p	ความคล่องตัวของโฮล
μ_n	ความคล่องตัวของอิเล็กตรอน
E_F	ระดับเฟอร์มิของ Intrinsic
I_{th}	Threshold Current

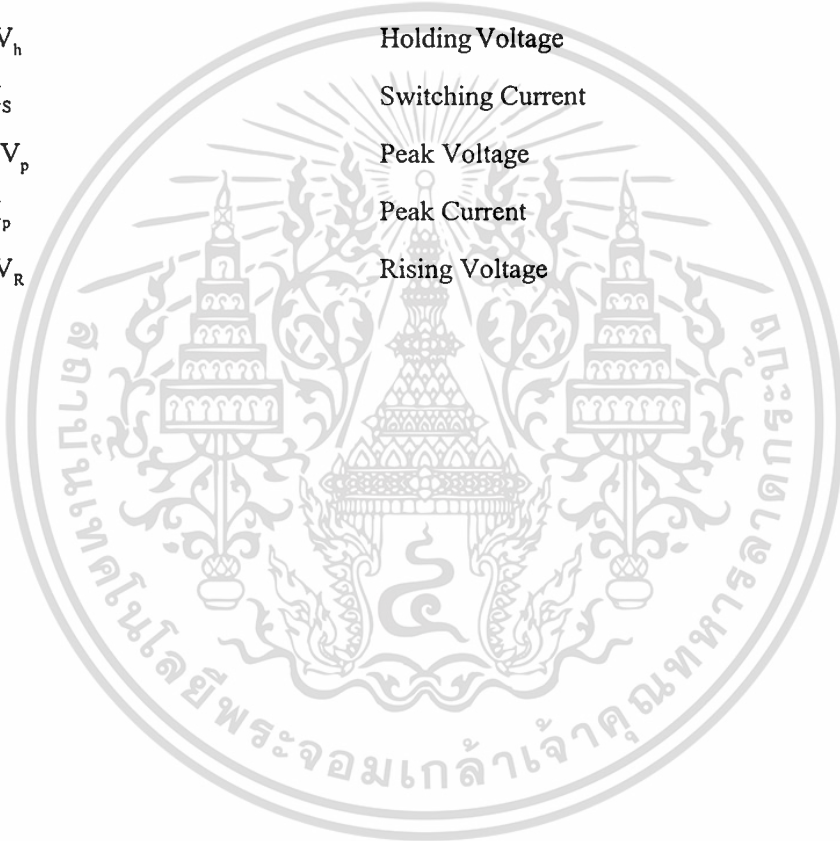
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์(ต่อ)

สัญลักษณ์

ความหมาย

I_{AC}	Anode-Cathode Current
I_G	Gate Current
V_{AC}	Anode-Cathode Voltage
V_{AG}	Anode-Gate Voltage
V_S	Switching Voltage
V_h	Holding Voltage
I_S	Switching Current
V_p	Peak Voltage
I_p	Peak Current
V_R	Rising Voltage



ศัพท์เทคนิค

สารเจือขัปลึก	Deep Impurity
สัมประสิทธิ์การแพร่	Diffusion Coefficient
ช่วงอายุ	Lifetime
อายุพาหะ	Carrier Lifetime
สิ่งประดิษฐ์ความเร็วสูง	High Speed Switching Devices
การแพร่แบบแทรกตัว	Interstitial Diffusion
การแพร่แบบแทนที่	Substitute Diffusion
สัมประสิทธิ์การแพร่สุทธิ	Effective Diffusion Coefficient
ระดับพลังงานขัปลึก	Deep-Lying Energy Level
พาหะอิสระ	Free Carrier
ศูนย์กลางการรวมตัว	Recombination Centers
กระบวนการจับ	Capture Process
ความต้านทานเชิงลบ	Negative Resistance
ความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยกระแส	Current Controlled Negative Resistance
กระแสสวิกฤติ	Threshold Current
ความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยแรงดัน	Voltage Controlled Negative Resistance
การฉีดประจุคู่ควบ	Double Injection
การรวมตัว	Recombination
การจับ	Trapping
ประจุพาหะอิสระ	Space-charge
อัตราการจับ	Capture Cross Section Ratios
ความต้านทานสูง	High Resistivity
จุดทำงาน	Operation Point
กระบวนการอิพิแทกเซียล	Epitaxial Growth
รอยต่อแบบอัลลอย	Alloyed Junction
เกิดรอยต่อชนิดชันบันได	Abrupt Junction
สารเจือผู้รับ	Acceptor
การ์ดริง	Guardring
น้ำบริสุทธิ์	De-ionized Water

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศัพท์เทคนิค (ต่อ)

เครื่องสั่นความถี่สูง	Ultrasonic Cleaner
ออกซิเดชันแบบแห้ง	Dry Oxidation
ออกซิเดชันแบบชื้น	Wet Oxidation
โฟโตลิโธกราฟี	Photolithography
สารไวแสงชนิดลบ	Negative Photo Resist
สารไวแสงชนิดบวก	Positive Photo Resist
กระบวนการแพร่อะตอมสารเจือโบรอน	Boron Deposition
กระบวนการแพร่อะตอมสารเจือฟอสฟอรัส	Phosphorus Deposition
การขับลึก	Drive-in
เครื่องเคลือบโลหะในสุญญากาศ	Vacuum Evaporator
การซินเตอร์ริง	Sintering
ไบอัสตรง	Forward Bias
ไบอัสย้อนกลับ	Reverse Bias
เครื่องวัดคุณสมบัติทรานซิสเตอร์	Transistor Curve Tracer
สวิตซิงค์	Switching
กระแสสวิตซิงค์	Switching Current
แรงดันสวิตซิงค์	Switching Voltage
กระแสรั่ว	Leakage Current
กระแสค่ายอด	Peak Current
แรงดันค่ายอด	Peak Voltage
แรงดันขึ้น	Rising Voltage

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

ได้มีการศึกษาและวิจัยอย่างกว้างขวางเกี่ยวกับปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยกระแส (CCNR: Current Controlled Negative Resistance) หรือแบบ S ในซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ เมื่อส่วนอินทรินซิก (intrinsic) หรือส่วน i มีระดับพลังงานแบบลึก (deep impurity level) [1-5] เช่นระดับพลังงานของทองคำ ซึ่งกลไกที่สำคัญคือการฉีดประจุคู่ควบ (Double Injection) ของโฮลจากส่วนพี (p^+) และอิเล็กตรอนจากส่วนเอ็น (n^+) ผ่านส่วน i ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมทองคำ ปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยกระแสสามารถอธิบายในรูปแบบของการฉีดประจุพาหะคู่ควบโดย Lampert ในปี 1962

นอกจากนั้นเมื่อส่วน i มีส่วนกึ่งตัวนำชนิดพี (p^+) อยู่ระหว่างแคโทด (n^+) และแอโนด (p^+) ในตำแหน่งและแรงดันไบอัสที่เหมาะสม ไดโอดจะสามารถแสดงคุณสมบัติความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยแรงดัน (VCNR: Voltage Controlled Negative Resistance) หรือแบบ N ได้

1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย

ซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ เมื่อให้แรงดันไบอัสตรงค่าหนึ่งจะทำให้เกิดการฉีดพาหะคู่ควบ (Double Injection) ของอิเล็กตรอนจากส่วนเอ็นและโฮลจากส่วนพีเข้าไปในส่วน i ทำให้ไดโอดสามารถแสดงคุณสมบัติสวิทชิงค์และความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยกระแส (CCNR) ออกมาได้ ส่วนเมื่อไดโอดได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับไดโอดจะปิดกั้นไม่ให้กระแสไหลผ่าน ซึ่งปรากฏการณ์สวิทชิงค์ดังกล่าวจะสังเกตเห็นได้ชัดเมื่อความยาวของส่วน i มีค่าสูงราว 140 ไมโครเมตร กรณีที่ส่วน i มีระยะสั้นกว่านี้ปรากฏการณ์สวิทชิงค์จะไม่ปรากฏหรือปรากฏได้ไม่ชัดเจนและมีคุณสมบัติคล้ายกับไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็นทั่วไป ซึ่งปัญหาดังกล่าวเป็นอุปสรรคสำคัญในการพัฒนาไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ ให้มีขนาดเล็กและทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์สวิทชิงค์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์

เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวและเพื่อสร้าง Short $i - region$ $p^+ - i - n^+$ diode ซึ่งสามารถแสดงคุณสมบัติสวิทชิงค์ เทคนิคการอัลลอยจึงถูกนำมาใช้ในการสร้างไดโอดโดยส่วนแอโนดเกิดจากการอัลลอยระหว่างอะลูมิเนียมและซิลิคอนชนิด i ขณะทำการซินเตอร์ (Sinter) เพื่อสร้างรอยสัมผัสให้กับขั้วแอโนดและแคโทดแทนการแพร่สารเจือ จากการทดลองพบว่าวิธีการนี้สามารถสร้างไดโอดให้มีขนาดเล็กได้ โดยเมื่อระยะส่วน i มีขนาดเพียง 60 ไมโครเมตร ไดโอดสามารถแสดงคุณสมบัติสวิทชิงค์และความต้านทานเชิงลบแบบ CCNR ได้เป็นอย่างดี ทำให้มีโอกาที่จะพัฒนา

เอกสารนี้เป็นเอกสารทบทวนวิสาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไดโอดชนิดนี้ให้เป็นอุปกรณ์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ได้ และเมื่อนำเทคนิคการอัลลอยไปสร้างซิลิคอนไดโอดชนิด IG $p^+ - i - n^+$ ซึ่งส่วน i มีเกทชนิดพีอยู่ พบว่าไดโอดสามารถแสดงคุณสมบัติความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยแรงดัน(VCNR) ออกมาได้อย่างชัดเจนแม้ส่วนเกทจะสร้างด้วยเทคนิคการอัลลอยหรือแพร่สารเจือ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติสวิตซิงค์และความต้านทานเชิงลบในซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอย โดยแสดงให้เห็นว่าแม้ส่วนแอนโอดจะสร้างจากเทคนิคการอัลลอยก็สามารถแสดงคุณสมบัติสวิตซิงค์และความต้านทานเชิงลบออกมาได้อย่างชัดเจนเช่นเดียวกับเมื่อส่วนแอนโอดสร้างจากวิธีการแพร่สารเจือและทำให้สามารถช่วยลดขนาดของอุปกรณ์ให้เล็กลงได้ โดยได้ทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบไดโอดซึ่งส่วนพีสร้างจากเทคนิคการอัลลอยและการแพร่สารเจือ, ทำการวิเคราะห์ผลของพารามิเตอร์ที่สำคัญของไดโอดต่อการเกิดคุณสมบัติความต้านทานเชิงลบ

การศึกษาผลของการครีตต่อการเกิดความต้านทานเชิงลบในซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอย ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าส่วนการครีตเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้ไดโอดสามารถแสดงคุณสมบัติความต้านทานเชิงลบออกมาได้อย่างชัดเจน เนื่องจากการครีตช่วยป้องกันกระแสที่ไหลที่ผิวทำให้กระแสส่วนใหญ่ไหลในเนื้อสารส่วน i หรือป้องกันกระแสรั่วที่ผิว(leakage current) และยังทำให้เส้นทางการไหลของกระแสระหว่างแคโทดและแอนโอดเพิ่มขึ้น เป็นผลให้แม้ส่วน i มีระยะสั้นๆ ก็สามารถแสดงคุณสมบัติสวิตซิงค์และความต้านทานเชิงลบได้เป็นอย่างดี

การศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงขนาดพื้นที่ของส่วนแอนโอดและแคโทดที่มีต่อการเกิดความต้านทานเชิงลบ จากผลการทดลองพบว่าการเปลี่ยนแปลงผลของพื้นที่นั้นจะมีผลต่อการเกิดความต้านทานเชิงลบเพียงเล็กน้อยเท่านั้นเมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของระยะ i

การศึกษาคุณสมบัติความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยแรงดันในซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอย(IG $p^+ - i - n^+$ หรือ $n^+ - i - Al$ injection gate) เมื่อมีส่วนเกทชนิดพีในส่วน i โดยทำการศึกษาและทดลองทั้งส่วนเกทสร้างจากการแพร่สารเจือและจากเทคนิคการอัลลอย จากผลการทดลองพบว่าซิลิคอนไดโอดชนิด $n^+ - i - Al$ injection gate สามารถแสดงคุณสมบัติความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยแรงดัน(VCNR) ออกมาได้อย่างชัดเจนเช่นเดียวกับซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการแพร่สารเจือซึ่งมีผู้วิจัยมาแล้ว[5] และพบว่าแม้ส่วนเกทชนิดพีจะเกิดจากการแพร่อะตอมสารเจือชนิดพีหรือการอัลลอยระหว่างอะลูมิเนียมและซิลิคอน ไดโอดก็สามารถแสดงคุณสมบัติความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยแรงดันได้ เนื่องมาจากผลของรอยต่อพี-เอ็นชนิดอัลลอย ทำให้ไดโอดต้องใช้แรงดันเกทค่าสูงกว่ามากจึงจะสามารถแสดงคุณสมบัติความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยแรงดันออกมาได้

และเสนอการทดลอง และผลการทดลองเกี่ยวกับการเกิดคุณสมบัติสวิตซิงค์และความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยกระแสได้ทั้งในขณะที่ไดโอดได้รับแรงดันไบอัสตรงและไบอัสย้อน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลับของไดโอดโครงสร้าง Bi-directional $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอย และ Bi-directional $n^+ - i - n^+$ ซึ่งพบว่าไม่ว่าส่วนแอโนดจะเป็นชนิดพีหรือชนิดเอ็นก็สามารถแสดงคุณสมบัติความต้านทานเชิงลบออกมาได้ และทำการศึกษาทดลองเกี่ยวกับคุณสมบัติความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยแรงดันในซิลิคอนไดโอดชนิด $n^+ - i - n^+$ injection gate เมื่อมีส่วนเกทชนิดพีในส่วน i โดยทำการศึกษาและทดลองทั้งส่วนเกทสร้างจากการแพร่สารเจือและจากเทคนิคการอัลลอย พบว่าไดโอดสามารถแสดงคุณสมบัติความต้านทานเชิงลบได้เช่นเดียวกับซิลิคอนไดโอดชนิด $n^+ - i - Al$ injection gate

โดยในบทที่ 2 ของวิทยานิพนธ์จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอย ในบทที่ 3 จะกล่าวถึงการออกแบบและกระบวนการสร้าง ส่วนรายละเอียดของการทดลองและผลการทดลองได้เสนอไว้ในบทที่ 4 และในบทที่ 5 จะทำการสรุปผลการทดลองและวิจารณ์ผลการศึกษาและการทดลองทั้งหมด

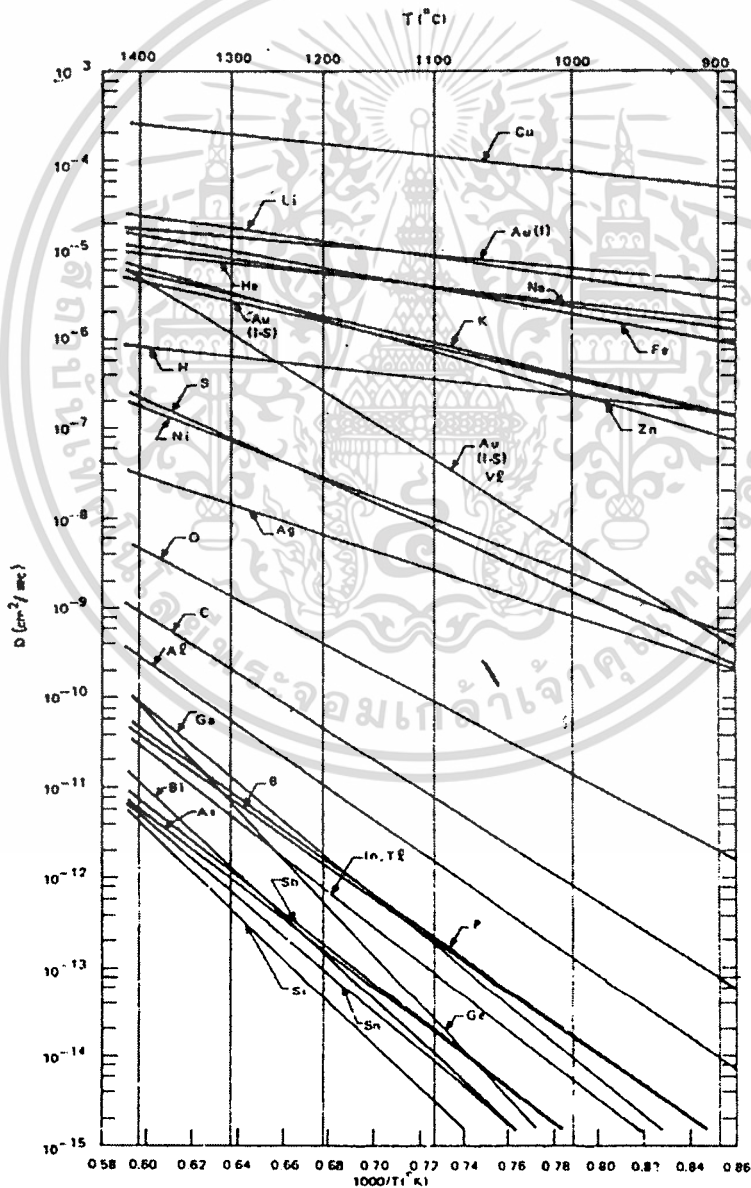


บทที่ 2 ทฤษฎี

2.1 คุณสมบัติของซิลิคอนที่ถูกแพร่ด้วยทองคำ

2.1.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของทองคำ

ทองคำนั้นเป็นสารเจือขัปลึก(Deep Impurity)ที่สำคัญในซิลิคอน เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion Coefficient) สูงคือมีค่าประมาณ 3×10^{-6} cm²/sec [6-7] ณ อุณหภูมิการแพร่ประมาณ 1300 องศาเซลเซียส แสดงดังรูป 2.1

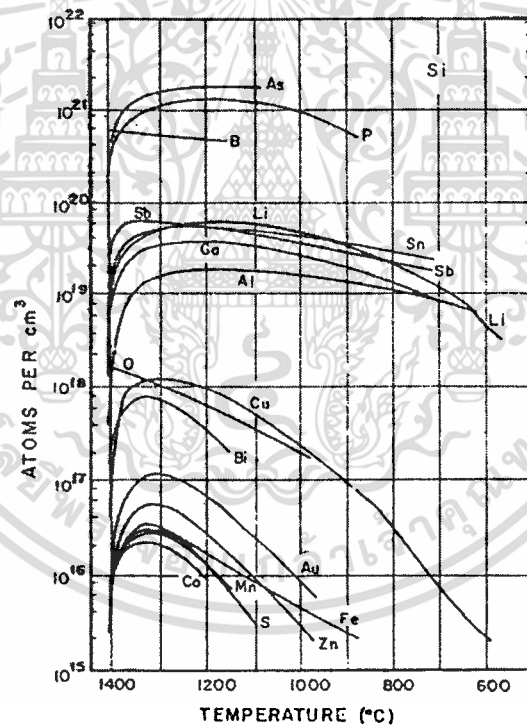


รูปที่ 2.1 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมสารเจือในซิลิคอนที่อุณหภูมิต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารทสวทสวไรสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เนาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจึงสามารถควบคุมความหนาแน่นของอะตอมของค่าได้โดยการควบคุมอุณหภูมิการแพร่ เมื่ออะตอมของค่าแพร่เข้าไปในซิลิคอน จะไปควบคุมช่วงอายุ (Lifetime) ของพาหะ เนื่องจากผลของศูนย์กลางการรวมตัวทำให้ช่วงอายุของพาหะ (Carrier Lifetime) ทั้งอิเล็กตรอนและโฮลในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและมีค่าลดลง จึงเรียกของค่าว่าเป็น Carrier Lifetime Killer

เมื่ออุณหภูมิการแพร่สูงขึ้นจะมีผลทำให้ค่าสูงสุดของความสามารถในการละลายได้ของของค่าในซิลิคอนเพิ่มขึ้น(Maximum Solid Solubility) โดยมีค่าสูงสุดประมาณ 10^{17} cm^{-3} ที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 2.2 มีผลทำให้ค่าสภาพต้านทานของซิลิคอนเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด โดยค่าสภาพต้านทานของซิลิคอนชนิดเอ็นจะสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงได้ชัดเจนกว่าในซิลิคอนชนิดพี ในทางปฏิบัตินั้นเมื่ออะตอมของค่าแพร่เข้าไปในซิลิคอนชนิดเอ็นหรือชนิดพีจะทำให้ซิลิคอนมีคุณสมบัติค่อนข้างไปทางชนิดเอ็นที่มีค่าความต้านทานสูง(V) หรือชนิดพีที่มีค่าความต้านทานสูง(π) หรือชนิดอินทรินซิก



รูปที่ 2.2 ค่าความสามารถในการละลายได้ในซิลิคอนของสารเจือเมื่ออุณหภูมิมียค่าต่างๆ

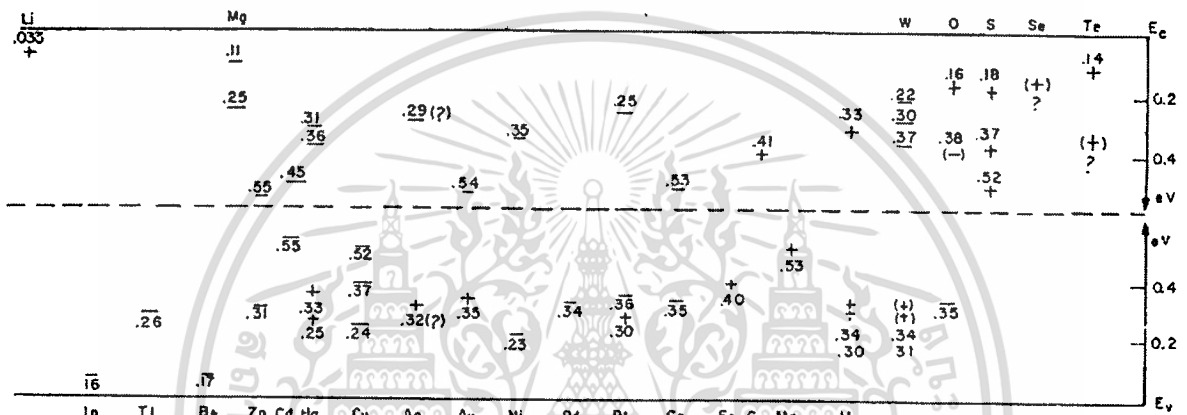
จากคุณสมบัติที่กล่าวมาทำให้สามารถนำมาใช้ในการสร้างสิ่งประดิษฐ์ความเร็วสูง(High Speed Switching Devices) เช่น สวิตชิงไดโอด และวงจรรวมดิจิทัลแบบต่างๆ ได้เป็นอย่างดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

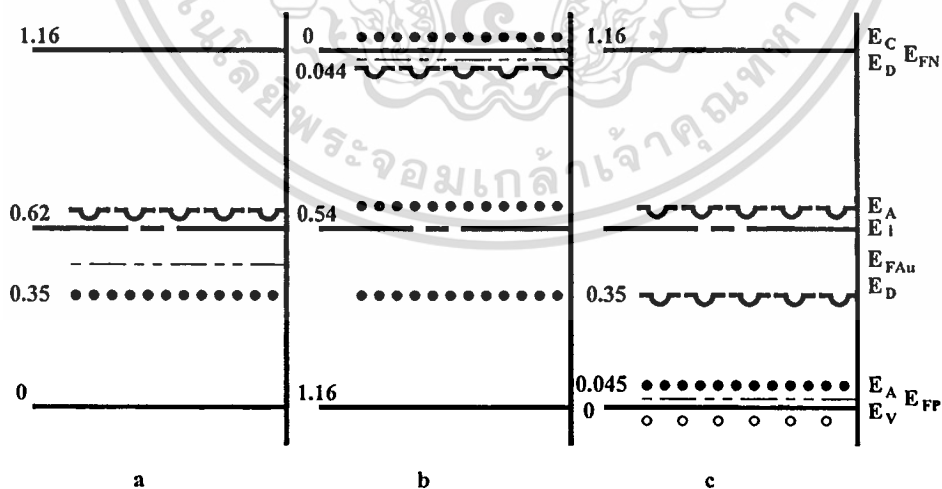
2.1.2 ลักษณะระดับพลังงานของทองคำในซิลิกอน

ทองคำถือว่าเป็นสารเจือขั้วลึกในซิลิกอน เมื่อเติมทองคำลงในซิลิกอนจะปรากฏระดับพลังงานสองระดับใกล้กับตรงกลางของแถบพลังงาน คือระดับพลังงาน Deep Donor Level ซึ่งอยู่เหนือแถบวาเลนซ์ 0.35 eV และ Deep Acceptor Level ใต้แถบความนำลงมา 0.54 eV ดังรูปที่ 2.3

โดยเมื่อเติมอะตอมทองคำในซิลิกอนชนิดเอ็น Deep Acceptor Level จะเป็นระดับที่มีบทบาทสำคัญต่อคุณสมบัติของซิลิกอน และในซิลิกอนชนิดพี Deep Donor Level จะเป็นระดับที่มีบทบาทสำคัญ จากรูปที่ 2.4 แสดงถึงระดับพลังงานของทองคำในซิลิกอน เมื่อไม่เติมระดับพลังงานแบบต้น(a) และเมื่อเติมระดับพลังงานของสารเจือแบบต้นชนิดเอ็นและชนิดพี(b)และ(c)ตามลำดับ



รูปที่ 2.3 ระดับพลังงานของอะตอมสารเจือต่างๆ ในซิลิกอน



รูปที่ 2.4 ระดับพลังงานของทองคำในซิลิกอน เมื่อไม่เติมระดับพลังงานแบบต้น(a) และเมื่อเติมระดับพลังงานของสารเจือแบบต้นชนิดเอ็นและชนิดพี(b)และ(c)ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในชิลิคอนชนิดเอ็นเมื่อ $N_D > N_A$ และ $N_{AU} > N_D - N_A$ สามารถหาความหนาแน่นของอิเล็กตรอนได้จาก

$$n \approx \frac{N_D - N_A}{N_{AU} - (N_D - N_A)} g_A N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_A}{kT}\right) \quad (2.1)$$

เมื่อ $n \gg p$, $n \ll N_D - N_A$ และ $n \ll N_{AU} - (N_D - N_A)$

จากสมการ 2.1 g_A คือ degeneracy factor ซึ่งเกี่ยวข้องกับ gold acceptor level

ในชิลิคอนชนิดพีเมื่อ $N_A > N_D$ และ $N_{AU} > N_A - N_D$ สามารถหาความหนาแน่นของโฮลได้จาก

$$p \approx \frac{N_A - N_D}{N_{AU} - (N_A - N_D)} g_D \frac{N_v}{g_D} \exp\left(-\frac{E_D - E_v}{kT}\right) \quad (2.2)$$

เมื่อ $p \gg n$, $p \ll N_A - N_D$ และ $p \ll N_{AU} - (N_A - N_D)$

จากสมการ 2.2 g_D คือ degeneracy factor ซึ่งเกี่ยวข้องกับ gold donor level

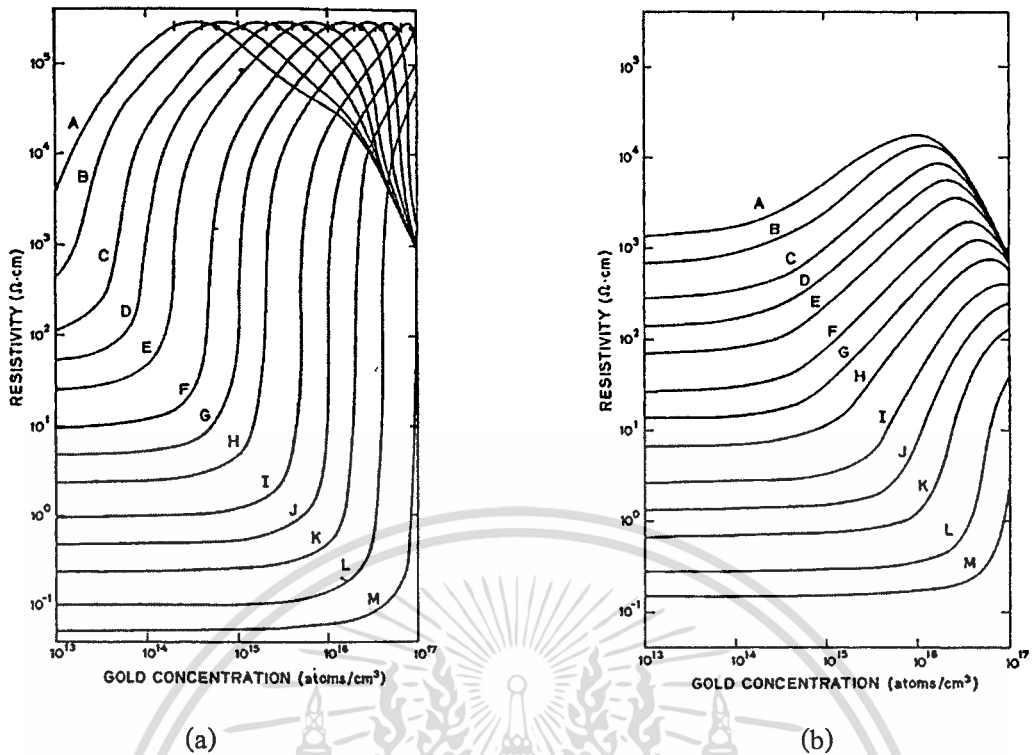
ค่าความต้านทานของชิลิคอนชนิดเอ็น(300K)เป็นฟังก์ชันของความหนาแน่นของอะตอมทองคำ(Gold Concentration) จากรูปที่ 2.5 ค่าความต้านทานจะสูงขึ้นเมื่อความหนาแน่นของทองคำมากกว่าความหนาแน่นของสารเจือผู้ให้แบบตั้งและเมื่อความหนาแน่นของทองคำเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความต้านทานสูงขึ้นจนกลายเป็นชนิดอินทรีนซิก และเมื่อเพิ่มความหนาแน่นของทองคำต่อไปค่าความต้านทานจะถึงจุดสูงสุดและกลายเป็นชิลิคอนชนิดพี เมื่อ $p \ll N_D - N_A$ และ $p \ll N_{AU} - (N_D - N_A)$ ความหนาแน่นของโฮลถูกกำหนดโดย

$$p \approx \frac{N_{AU} - (N_D - N_A)}{N_D - N_A} \frac{N_v}{g_A} \exp\left(-\frac{E_A - E_v}{kT}\right) \quad (2.3)$$

ในชิลิคอนชนิดเอ็นที่ถูกเติมอะตอมทองคำเข้าไปนั้นสามารถหาระดับเฟอร์มิได้จาก

$$E_F = E_{AU} - kT \ln\left[\frac{(N_{AU} - N_D)}{2N_D}\right] \quad (2.4)$$

เมื่อ $E_{AU} = 0.54 \text{ eV}$ และ $N_D =$ the net residual donor concentration (cm^{-3})



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพต้านทานและความหนาแน่นของอะตอมที่อุณหภูมิตั้งที่ 300 องศาเซลเซียส ในสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น (a) และชนิดพี (b) เมื่อความหนาแน่นของสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นและชนิดพี (cm^{-3}) มีค่าต่างๆ ดังนี้

A : 1×10^{13} ; B : 2×10^{13} ; C : 5×10^{13} ; D : 1×10^{14} ; E : 2×10^{14} ; F : 5×10^{14} ; G : 1×10^{15}
 H : 2×10^{15} ; I : 5×10^{15} ; J : 1×10^{16} ; K : 2×10^{16} ; L : 5×10^{16} ; M : 1×10^{17}

2.1.3 กลไกการแพร่ของทองคำในซิลิคอน (Gold Diffusion Mechanisms)

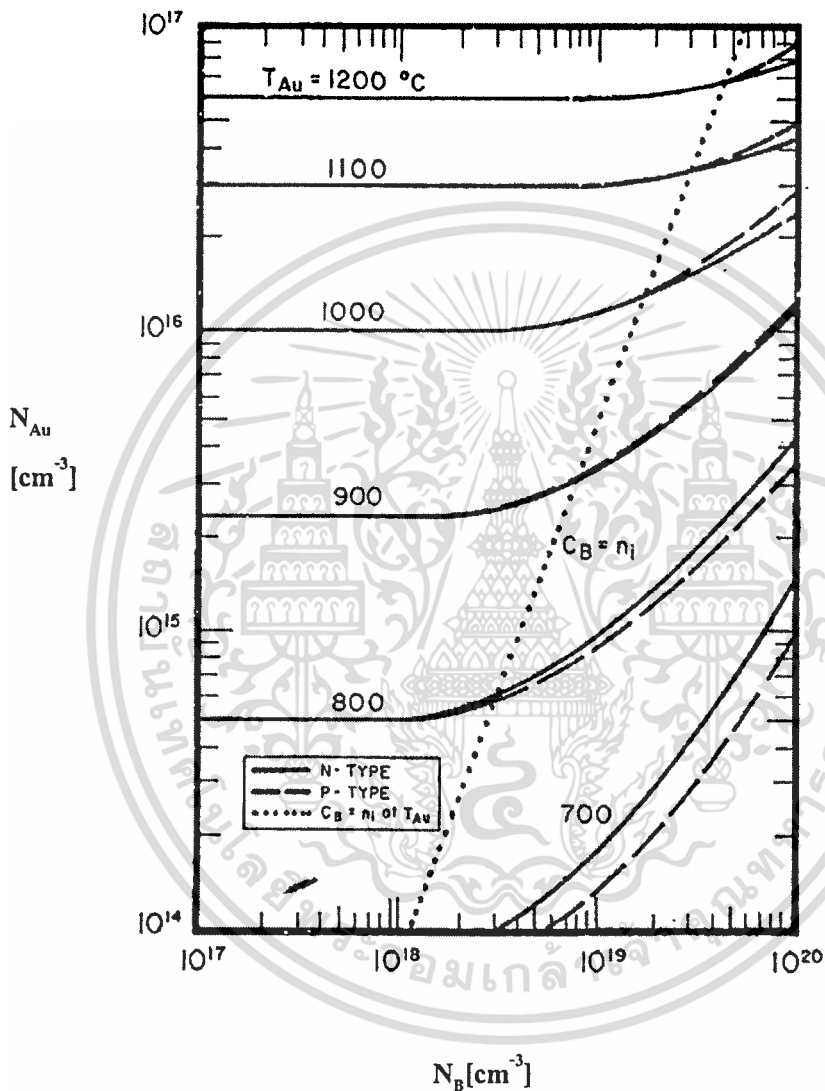
การแพร่ของทองคำในซิลิคอนเกิดจากกลไกสำคัญ 2 อย่างในเวลาเดียวกัน กลไกการแพร่ที่สำคัญคือการแพร่แบบแทรกตัว (Interstitial Diffusion) โดยจะมีสัมประสิทธิ์การแพร่ที่สูง ส่วนการแพร่อีกอย่าง (ประมาณ 10%) คือการแพร่แบบแทนที่ (Substitute Diffusion) จะมีสัมประสิทธิ์การแพร่ต่ำ โดยอัตราส่วนของสัมประสิทธิ์การแพร่แบบแทรกตัวกับแบบแทนที่จะเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ ซึ่งกลไกการแพร่ของทองคำในซิลิคอนนั้นมีความซับซ้อนมาก

ในความเป็นจริงสัมประสิทธิ์การแพร่ของทองคำในซิลิคอนขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายอย่างด้วยกันได้แก่ ความบกพร่อง, ความหนาแน่นสารเจือ, อุณหภูมิ และปริมาณออกซิเจน ถ้าให้ D_i และ D_s คือสัมประสิทธิ์การแพร่แบบแทรกตัวและแบบแทนที่ของทองคำในซิลิคอน สัมประสิทธิ์การแพร่สุทธิ (Effective Diffusion Coefficient) ของทั้งสองกลไกโดยประมาณคือ

$$D_{\text{eff}} \approx 0.9D_i + 0.1D_s \quad (2.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.6 นั้นความสามารถในการละลายได้ของทองคำในซิลิคอนจะเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาแน่นของสารเจือ N_B มีค่าเกินความหนาแน่นของพาหะในซิลิคอนชนิดอินทรินซิก (n_i : intrinsic carrier) ณ อุณหภูมิการแพร่(เส้นประในรูปที่ 2.6) โดยจากรูปจะแสดงค่าความสามารถในการละลายได้ของทองคำในซิลิคอนทั้งในซิลิคอนชนิดเอ็นและชนิดพี พบว่าที่อุณหภูมิ 900°C ความสามารถในการละลายในซิลิคอนชนิดเอ็นและชนิดพีนั้น ไม่มีความแตกต่างกัน



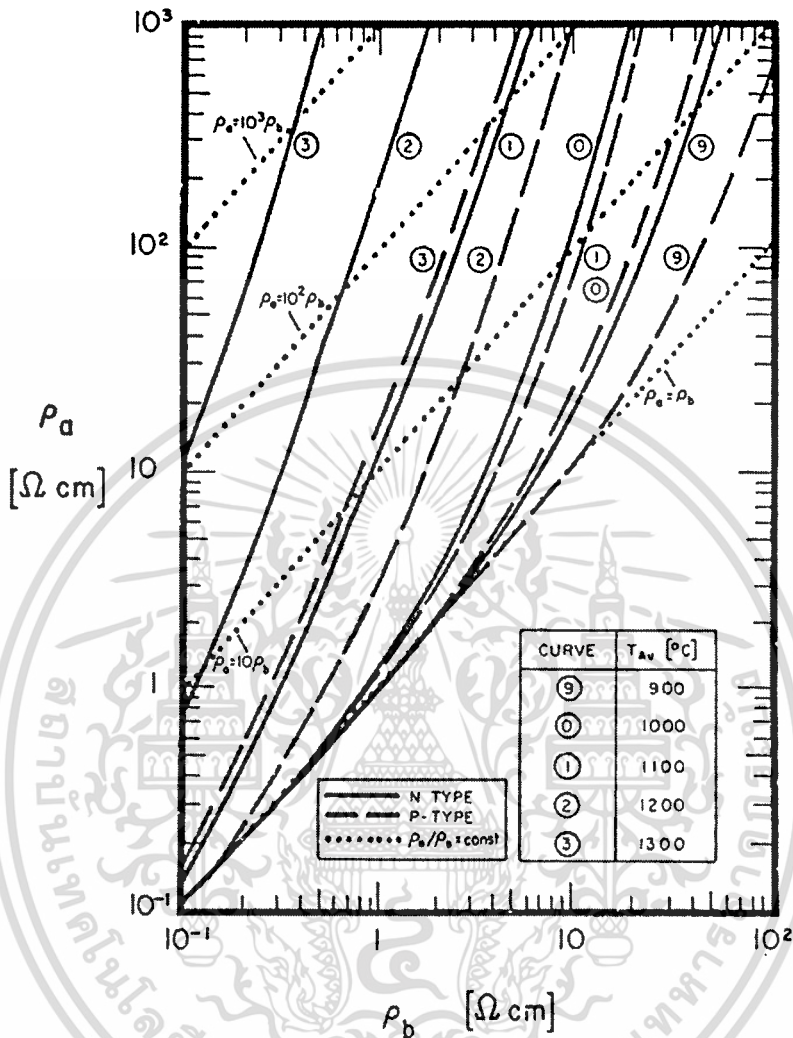
รูปที่ 2.6 ค่าความหนาแน่นสูงสุดของทองคำ (N_{Au}) ในซิลิคอนที่อุณหภูมิการแพร่ทองคำค่าต่างๆ

2.1.4 การเพิ่มขึ้นของสภาพต้านทานของสารที่มีสารเจือขั้วลึก (Resistivity Increase Owing to Deep-Lying Impurities)

สารเจือขั้วลึก (อะตอมทองคำ) ในซิลิคอนมีผลทำให้ความหนาแน่นของพาหะอิสระ (Free Carrier) ลดลง โดยในแต่ละอะตอมซึ่งมีระดับพลังงานขั้วลึก (Deep-Lying Energy Level) จะทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พาหะส่วนมากในแถบความนำของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นหรือพาหะส่วนมากในแถบวาเลนซ์ของสารกึ่งตัวนำชนิดพีลดลง[8] แสดงได้ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 สภาพต้านทานของซิลิคอนหลังจากแพร่ด้วยทองคำที่ภาวะอิมิตัว (ρ_a) และค่าสภาพต้านทานก่อนแพร่ทองคำ (ρ_b) ที่อุณหภูมิการแพร่ทองคำค่าต่างๆ (T_{AV})

โดยความหนาแน่นของพาหะในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นประมาณได้คือ

$$n \approx N_D - N_i \quad (2.6)$$

และในสารกึ่งตัวนำชนิดพีประมาณได้คือ

$$p \approx N_A - N_i \quad (2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ N_t เป็นความหนาแน่นของศูนย์กลางการรวมตัว(Recombination Centers) เช่นความหนาแน่นของสารเจือขัปลึก

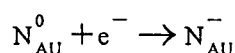
ใน Nondegenerate Semiconductor ซึ่งไม่มีศูนย์กลางการรวมตัว ความหนาแน่นพาหะจะเท่ากับความหนาแน่นของอะตอมสารเจือ ส่วนในสารกึ่งตัวนำที่มีอะตอมสารเจือขัปลึกจะทำให้ค่าสภาพต้านทานของสารกึ่งตัวนำเพิ่มขึ้น (ถ้า $N_t \ll N_B$ ค่าสภาพต้านทานจะไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก)

ในซิลิคอนชนิดเอ็นเมื่อแพร่ด้วยอะตอมทองคำ พิจารณาที่อิเล็กตรอนที่ระดับพลังงานผู้ให้ (N_D) ถูกอ็อกไนซ์หมด อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบความนำจะถูกจับ(trap) ด้วยระดับพลังงาน Deep Acceptor Level ที่อยู่ใต้แถบความนำประมาณ 0.54 eV ทำให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระลดลง ค่าสภาพต้านทานจึงเพิ่มขึ้น และเมื่อความหนาแน่นของอะตอมทองคำมากขึ้นจะทำให้ระดับพลังงาน Deep Acceptor Level มีจำนวนมากพอที่จะจับอิเล็กตรอนอิสระในแถบความนำได้หมดทำให้ซิลิคอนชนิดเอ็นกลายเป็นชนิดอินทรินซิก(intrinsic)

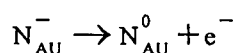
ซิลิคอนชนิดพีเมื่อแพร่ด้วยอะตอมทองคำ พิจารณาที่ระดับพลังงานผู้รับ(N_A) ถูกอ็อกไนซ์หมด ทำให้อิเล็กตรอนในระดับพลังงาน Deep Donor Level ที่อยู่เหนือแถบวาเลนซ์ประมาณ 0.35 eV รวมตัวกับโฮล(hole trapping)ในแถบวาเลนซ์ทำให้ความหนาแน่นของโฮลลดลง ค่าสภาพต้านทานจึงเพิ่มขึ้น และเมื่อความหนาแน่นของอะตอมทองคำมากขึ้น ระดับพลังงาน Deep Donor Level มีจำนวนมากพอที่จะจับโฮลในแถบวาเลนซ์จนซิลิคอนชนิดพีกลายเป็นชนิดอินทรินซิก(intrinsic)

2.1.5 ทองคำเป็นตัวควบคุมช่วงอายุพาหะ(Lifetime Controller)

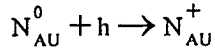
ทองคำแสดงคุณสมบัติเป็นศูนย์กลางการรวมตัว(Recombination Center) ของพาหะส่วนน้อยในซิลิคอนชนิดเอ็นและชนิดพี ในซิลิคอนชนิดเอ็นที่มี $N_D \gg N_{AU}$ จะทำให้ระดับพลังงานของทองคำมีอิเล็กตรอนอยู่เต็มกลายเป็น acceptor ชนิดที่มีประจุลบ (N_{AU}^-) ซึ่งทำหน้าที่เป็น hole trapping คือจับโฮลซึ่งเป็นพาหะส่วนน้อยทำให้ τ_p จะลดลง โดยสามารถแสดงกระบวนการจับ (Capture Process) ดังนี้



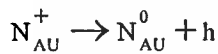
และ Generation Process คือ



สำหรับซิลิคอนชนิดพีที่มี $N_A \gg N_{AU}$ deep donor level จับโฮลกลายเป็น donor ที่มีประจุบวก (N_{AU}^+) และสามารถจับ(trap) กับอิเล็กตรอนซึ่งเป็นพาหะส่วนน้อย ทำให้ τ_n มีค่าลดลง โดยสามารถแสดงกระบวนการจับ(Capture Process)ดังนี้



และ Generation Processคือ



ค่า Lifetime ของพาหะส่วนน้อยในซิลิคอนชนิดเอ็นสามารถหาได้จาก

$$\tau_p = \frac{1}{V_p \sigma_p N_{AU}} \quad (2.8)$$

และในซิลิคอนชนิดพีหาได้จาก

$$\tau_n = \frac{1}{V_n \sigma_n^+ N_{AU}} \quad (2.9)$$

τ : lifetime (sec)

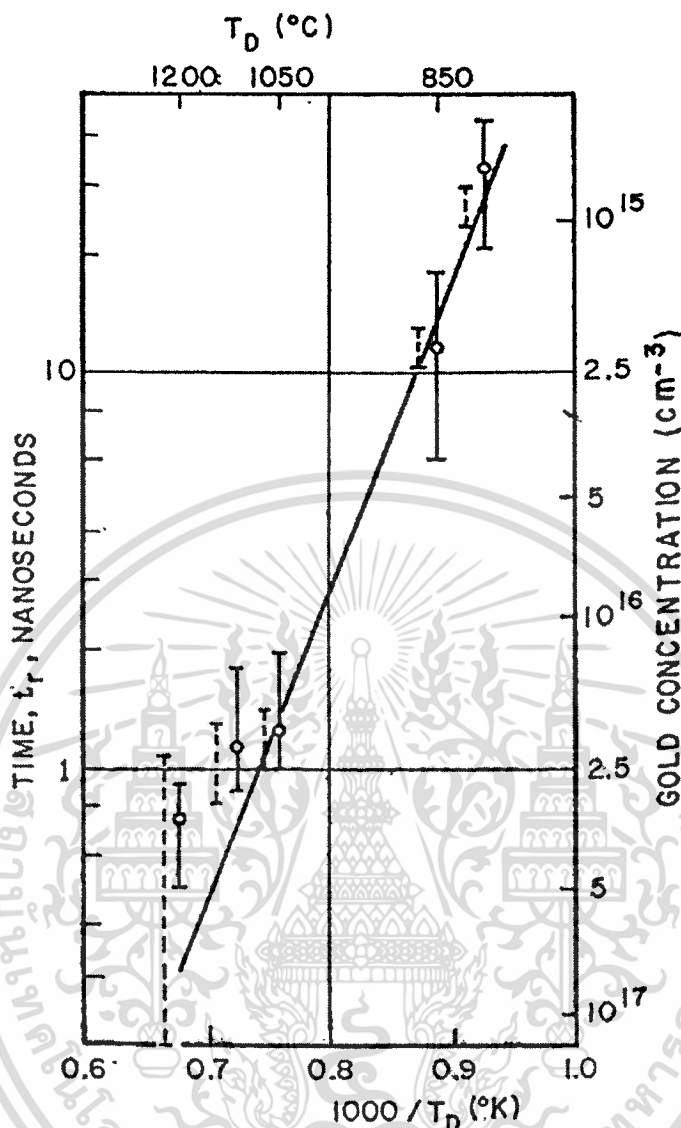
V : thermal velocity ของพาหะ (cm.sec⁻¹)

σ : capture cross-section (cm²)

N_{AU} : the deep impurity concentration (cm⁻³)

โดยค่า lifetime หลังจากแพร่ของค่าจะเป็นส่วนกลับของอุณหภูมิที่ใช้ในการแพร่ของค่า คือ lifetime จะลดลงเมื่อความหนาแน่นของทองคำเพิ่มขึ้นดังในรูปที่ 2.8

และ capture cross-section ของอิเล็กตรอนและโฮลในซิลิคอนที่เติมอะตอมทองคำ[9] สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.8 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของ lifetime เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการแพร่ทองเปลี่ยนไป

ตารางที่ 2.1 Capture Cross Sections of Gold in Silicon.

Temperature(K)	Acceptor Level		Donor Level	
	$\sigma_n^0(\text{cm}^2)$	$\sigma_p^-(\text{cm}^2)$	$\sigma_n^+(\text{cm}^2)$	$\sigma_p^0(\text{cm}^2)$
300	5×10^{-16}	1×10^{-15}	3.5×10^{-15}	$\geq 10^{-16}$
300	1.7×10^{-16}	1.1×10^{-15}	6.3×10^{-15}	2.4×10^{-16}
77	3×10^{-16}	1×10^{-15}	6×10^{-15}	3×10^{-16}
77	5×10^{-16}	2.3×10^{-15}	1×10^{-15}	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ความต้านทานเชิงลบ(Negative Resistance)

คือปรากฏการณ์ที่แรงดันตกคร่อมมีค่าลดลงในขณะที่กระแสที่ไหลผ่านมีค่าเพิ่มขึ้นแสดงดังในรูปที่ 2.9

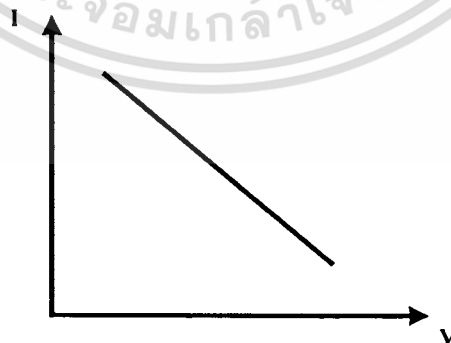
2.2.1 ประเภทของความต้านทานเชิงลบ

2.2.1.1 ความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยกระแส(Current Controlled Negative Resistance: CCNR)

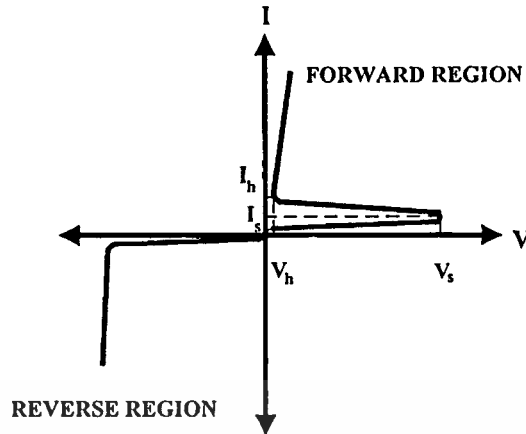
ความต้านทานเชิงลบแบบนี้เกิดขึ้นโดยการควบคุมกระแส กล่าวคือเมื่อกระแสมีค่าเท่ากับกระแสวิกฤติ I_{th} (Threshold Current) จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยกระแสขึ้นจึงเรียกว่า Current Controlled Negative Resistance (CCNR) และเนื่องจากความต้านทานเชิงลบชนิดนี้จะมีลักษณะคล้ายตัวอักษร S ดังรูปที่ 2.10 บางครั้งจึงเรียกความต้านทานชนิดนี้ว่าความต้านทานเชิงลบแบบ S ซึ่งจะพบเช่นในอุปกรณ์ SCR (Silicon Controlled Rectifier), UJT (Uni Junction Transistor) และ $p^+ - i - n^+$ Diode

2.2.1.2 ความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยแรงดัน(Voltage Controlled Negative Resistance: VCNR)

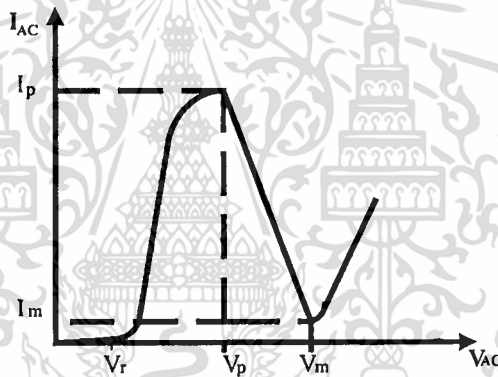
ความต้านทานเชิงลบแบบนี้เกิดขึ้นโดยการควบคุมแรงดัน กล่าวคือเมื่อแรงดันมีค่าเท่ากับแรงดันค่าหนึ่ง V_p (Peak Voltage) จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยแรงดันขึ้นเรียกว่า Voltage Controlled Negative Resistance (VCNR) และเนื่องจากความต้านทานเชิงลบชนิดนี้จะมีลักษณะคล้ายตัวอักษร N ดังรูปที่ 2.11 บางครั้งจึงเรียกความต้านทานชนิดนี้ว่าความต้านทานเชิงลบแบบ N ซึ่งพบได้ในอุปกรณ์ Tunnel Diode และ IG $p^+ - i - n^+$ Diode



รูปที่ 2.9 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของคุณสมบัติความต้านทานเชิงลบ



รูปที่ 2.10 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของคุณสมบัติความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยกระแส



รูปที่ 2.11 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของคุณสมบัติความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยแรงดัน

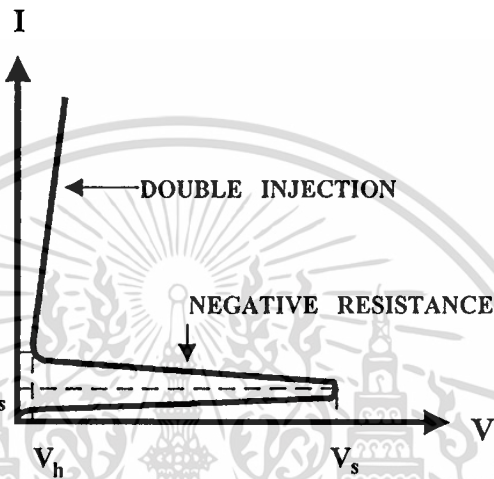
2.3 การฉีดประจุคู่ควบ(Double Injection)

เป็นการฉีดประจุพาหะของอิเล็กตรอนจากขั้วหนึ่งและโฮลจากอีกขั้วหนึ่งเข้าไปในส่วนเนื้อสารซึ่งเป็นอินทรินซิกหรือส่วน i [3-5] โดยสามารถสร้างได้โดยการแพร่อะตอมของค่าเข้าไปในผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นหรือพีทำให้เกิดส่วน i ชนิด n (V-type) หรือ p (π -type) นอกจากนี้สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีค่าสภาพต้านทานสูงๆ (high resistivity) ตั้งแต่ 500 โอห์ม-เซนติเมตร[5]ขึ้นไปก็ถือว่าเป็นอินทรินซิกด้วย ซึ่งอุปกรณ์พื้นฐานที่ทำการศึกษาก็คือ โครงสร้างของ $p^+ - i - n^+$ โดยเมื่ออิเล็กตรอนและโฮลถูกฉีดเข้าไปในส่วน i จะถูกจับ (trap) หรือรวมตัว(recombination) ที่ Trapping Center หรือ Deep Level ในส่วน i และเมื่ออิเล็กตรอนและโฮลถูกแทรกจนเต็ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Trapping Center ทั้งอิเล็กตรอนและโฮลสามารถผ่านส่วน i ได้ เรียกว่า การฉีดพาหะคู่ควบ (Double Injection) ดังแสดงในรูปที่ 2.12

โดยกระแสสามารถพิจารณาจากการรวมตัว(recombination) และการจับ(trapping) ของประจุพาหะอิสระ(space-charge)ทั้งอิเล็กตรอนและโฮล นอกจากนั้นยังขึ้นอยู่กับสภาวะต่างๆ เช่น อุณหภูมิ, ความยาวของอุปกรณ์ และอัตราการจับ(capture cross section ratios) เป็นต้น



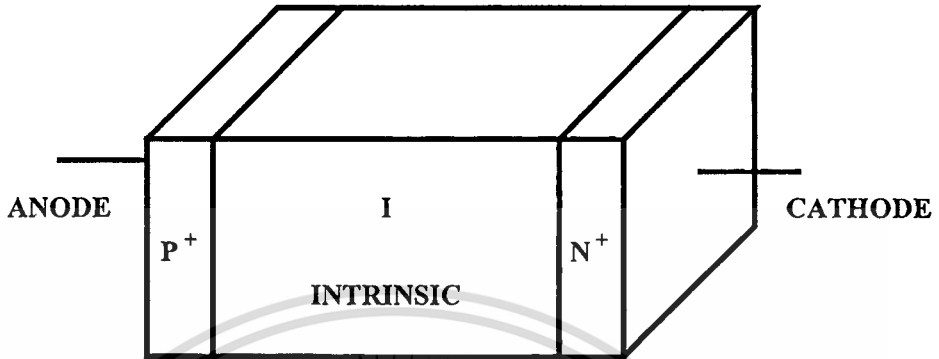
รูปที่ 2.12 การฉีดประจุคู่ควบ (Double Injection) และการเกิดความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยกระแส

2.4 ปรัชญาการความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยกระแสในซิลิคอนไดโอดชนิด

$p^+ - i - n^+$

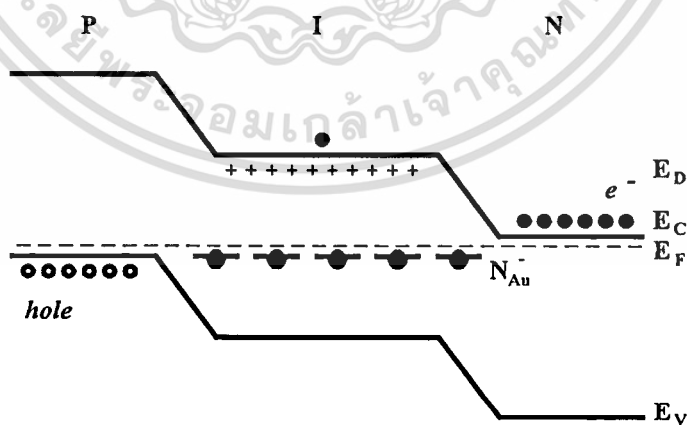
โครงสร้างทั่วไปของซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ แสดงดังรูปที่ 2.13 โดยไดโอดประกอบด้วยส่วนแอนโนด(p^+), ส่วนอินทรินซิกหรือส่วน i และส่วนแคโทด(n^+) เมื่อเติมอะตอมของทองคำในซิลิคอนชนิดเอ็นจะทำให้เกิดระดับพลังงาน deep acceptor level (N_{AU}) ขึ้นที่ 0.54 อิเล็กตรอนโวลต์ที่ได้แถบความนำ โดยมีความหนาแน่นเท่ากับ N_{AU} ซึ่งระดับ deep acceptor level นี้จะรวมตัวกับระดับ shallow donor (N_D) ทำให้ deep acceptor level กลายเป็น N_{AU}^- เนื่องจากระดับ deep acceptor level เป็นระดับพลังงานแบบลึก(deep level) ทำให้เมื่อถูกกระตุ้นจากพลังงานความร้อนเพียงเล็กน้อยจึงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง คือไม่สามารถกระตุ้นให้อิเล็กตรอนกลับไปยังแถบความนำได้ ทำให้ซิลิคอนชนิดเอ็นมีความต้านทานสูงขึ้นจนกลายเป็นชนิดอินทรินซิก และ N_{AU}^- จะแสดงตัวเป็นตัวจับ(trap) โฮล หรือแสดงตัวเป็น trapping cross section σ_p^- ของโฮลที่ถูกฉีดเข้ามาใน

ขณะเดียวกัน ส่วน N_{Au}^0 ซึ่งเป็นกลาง และมีเพียงส่วนน้อยจะจับ(trap) อิเล็กตรอน หรือแสดงตัวเป็น trapping cross section σ_n^0 ของอิเล็กตรอน[10]



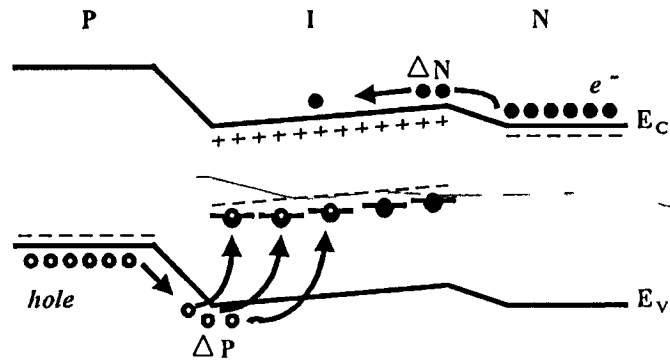
รูปที่ 2.13 โครงสร้างทั่วไปของซิลิคอนไดโอดชนิด p⁺-i-n⁺

ในความเป็นจริงแล้ว $\sigma_p^0 \gg \sigma_n^0$ ซึ่งเป็นคุณสมบัติของ Au acceptor ที่สามารถทำให้เกิดปรากฏการณ์ CCNR หรือ S-type switching ขึ้นมาได้ โดยระดับพลังงานของซิลิคอนไดโอดชนิด p⁺-i-n⁺ ที่สภาวะสมดุลความร้อนและภายใต้การให้แรงดันไบอัสตรงแสดงดังรูปที่ 2.14 และ 2.15 ตามลำดับ



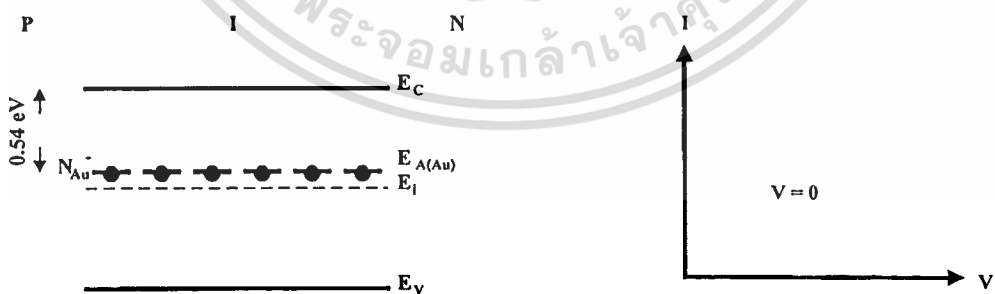
รูปที่ 2.14 ระดับพลังงานของซิลิคอนไดโอดชนิด p⁺-i-n⁺ ที่สภาวะสมดุลความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

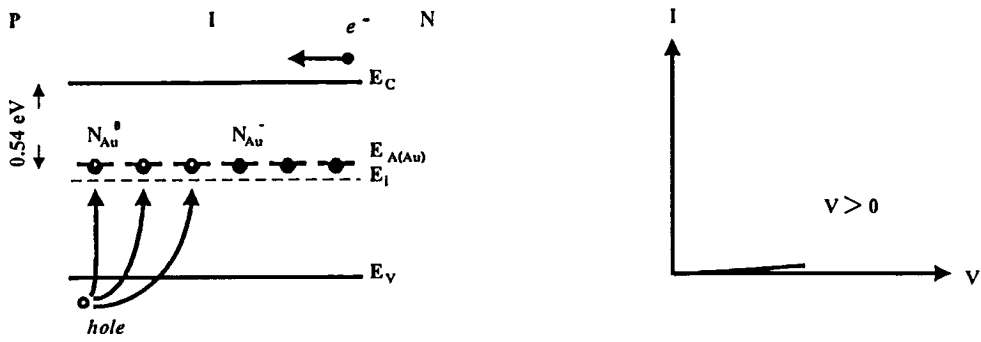


รูปที่ 2.15 ระดับพลังงานของซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ ภายใต้การให้แรงดันไบอัสตรง

กลไกการทำงานที่สำคัญใน $p^+ - i - n^+$ ไดโอดนี้คือการฉีดประจุพาหะคู่ควบ (Double Injection) ผ่านเนื้อสาร(bulk) ส่วน i ซึ่งเป็นอินทรีนซิคและมีความต้านทานสูงที่สร้างจากการแพร่ อะตอมทองคำเข้าไปในซิลิคอนชนิดเอ็นทำให้ซิลิคอนชนิดเอ็นกลายเป็นชนิด i ที่มีความต้านทานสูงทำให้ความนำไฟฟ้าลดลง โดยในภาวะเริ่มต้นเมื่อให้แรงดันไบอัสเท่ากับศูนย์โวลต์ สมมติให้มีอิเล็กตรอนอยู่ที่ Trapping Center เนื่องจากจับ(trap) อิเล็กตรอนจนเต็มแล้ว[trapping cross section ของ N_{Au}^0 ซึ่งเป็นกลางนั้นมีเพียงเล็กน้อยหรือไม่มี] ดังรูปที่ 2.16 ซึ่งในภาวะนี้จะไม่มีการแสไหลผ่านส่วน i และเมื่อให้แรงดันไบอัสตรงค่าน้อยๆ จะทำให้เกิดประจุพาหะคืออิเล็กตรอนจากแถบความนำในส่วนเอ็น(cathode)และโฮลจากแถบวาเลนซ์ในส่วนพี ถูกฉีดเข้ามาในส่วน i โดยโฮลจะถูกจับ(trap) ที่ trapping center หรือ trapping cross section N_{Au}^0 ซึ่งมีจำนวนมากและทำหน้าที่จับ(trap)โฮล ทำให้กระแสที่ไหลผ่านไดโอดเป็นเพียง Single Injection ของอิเล็กตรอนเท่านั้นซึ่งมีปริมาณน้อย ดังรูปที่ 2.17 ซึ่งในภาวะนี้ส่วน i จะแสดงตัวนำไฟฟ้าน้อย



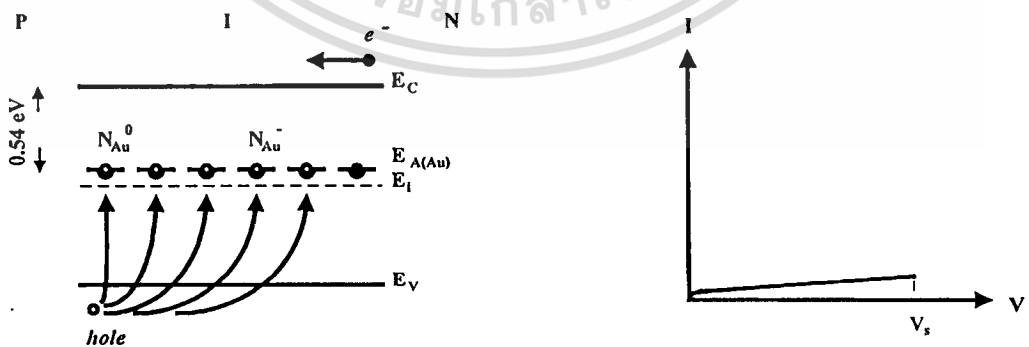
รูปที่ 2.16 ภาวะเมื่อแรงดันไบอัสเท่ากับศูนย์โดยอิเล็กตรอนถูกจับจนเต็ม trapping center ซึ่งยังไม่มีการแสไหลผ่านส่วน i



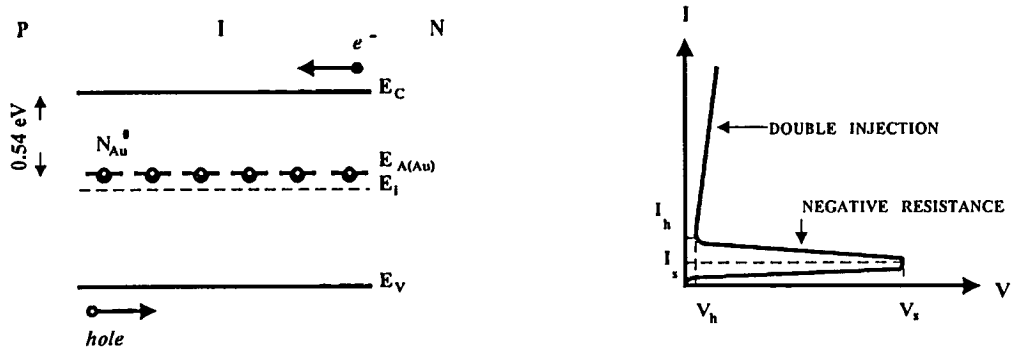
รูปที่ 2.17 ภาวะเมื่อให้แรงดันไบอัสค่าต่ำๆ ทำให้เกิด single injection ของอิเล็กตรอน

หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มแรงดันไบอัสให้สูงขึ้นจนใกล้เคียงกับค่าแรงดันวิกฤติ(Threshold Voltage V_{th}) ทั้งอิเล็กตรอนและโฮลจะถูกฉีดเข้ามาในส่วน i เป็นปริมาณมาก จนกระทั่ง trapping center หรือ N_{Au}^- เกือบทั้งหมดมีโฮลอยู่ ดังแสดงในรูปที่ 2.18 และเมื่อเพิ่มแรงดันไบอัสต่อไปอีก จนถึงแรงดันวิกฤติ V_{th} หรือ V_s (switching voltage) ซึ่งตรงกับภาวะที่โฮลถูกจับ(trap)จนเต็ม trapping center ทั้งหมด จะเกิดการฉีดประจุพาหะคู่ควบ(Double Injection) ผ่านส่วน i ในภาวะนี้ทั้งอิเล็กตรอนและโฮลที่ถูกฉีดเข้ามา จะสามารถเคลื่อนที่ผ่านส่วน i ไปได้สะดวก และเป็นปริมาณมาก ทำให้กระแสไหลผ่านไดโอดได้มากขึ้น หรือคล้ายกับว่าส่วน i เปลี่ยนสภาพจากที่มีความนำต่ำ มาเป็นความนำสูง ช่วงของการเปลี่ยนภาวะดังกล่าวนี้จะเกิดปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยกระแส(Current Controlled Negative Resistance) ขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.19

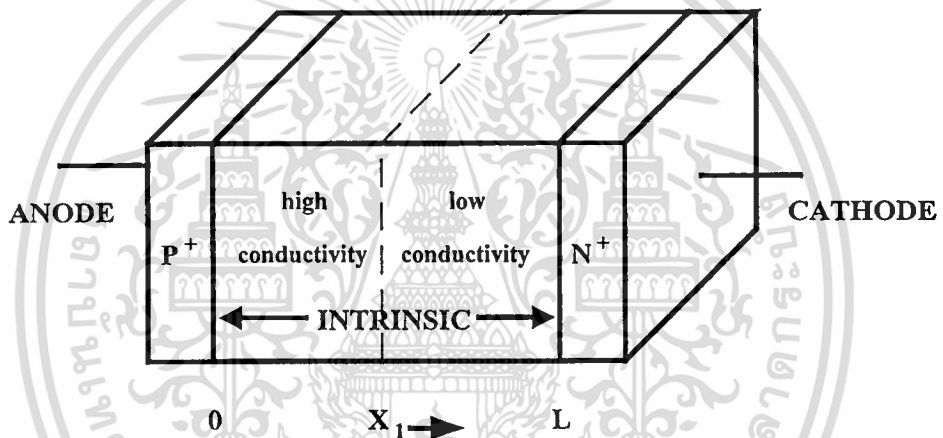
จากกลไกการทำงานดังกล่าวข้างต้นนั้นทำให้เราสามารถแบ่งช่วงการทำงานของไดโอดได้ เป็นสองช่วงคือช่วง Low Conductivity และ High Conductivity เนื่องจากผลของระดับ Au acceptor ที่ทำให้เกิด recombination barrier บริเวณใกล้ส่วนแคโทดในขณะที่ trapping cross section N_{Au}^- จับ (trap) โฮลดังแสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.18 ภาวะเมื่อแรงดันไบอัสมีค่าใกล้เคียงแรงดันวิกฤติและ trapping center จับ โฮลเกือบเต็ม



รูปที่ 2.19 ภาวะ trapping center จับอิเล็กตรอนและ โฮลจนเต็มทำให้เกิดการฉีดพาหะคู่ควบ (double injection) และเกิดความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยกระแส



รูปที่ 2.20 ช่วงการทำงานของไดโอดซึ่งแบ่งได้เป็นสองช่วงคือช่วง Low Conductivity และ High Conductivity

ในส่วน $x_1 < x < L$ ในช่วงนี้จะเป็น one carrier space charge limited current หรือ Single Injection โดยจะมีเพียงกระแสของอิเล็กตรอนจากส่วนแคโทด และในส่วน $0 < x < x_1$ จะเป็นกระแสของทั้งอิเล็กตรอนและโฮลทำให้เกิด two carrier space charge limited current หรือ Double Injection ขึ้นดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น โดยขอบเขตของ x_1 จะเคลื่อนที่ไปยังแคโทดเมื่อมีการฉีดอิเล็กตรอนและโฮลจากแคโทดและแอนโนดเพิ่มขึ้น ซึ่ง CCNR เกิดขึ้นเนื่องมาจากการขยายตัวของ High Conductivity Layer จากขอบของส่วน i region บริเวณใกล้ $p^+ - i$ junction ไปยังบริเวณ $n^+ - i$ junction หรือก็คือเมื่อช่วงอายุ(lifetime) ของอิเล็กตรอนและโฮลมีค่าเท่ากันทำให้ไดโอดเกิดการสวิตช์จาก off-state ไปเป็น on-state

จากการวิเคราะห์ของ Lampert จะได้ค่าแรงดันวิกฤติ V_{th}

$$V_{th} = \left[\frac{e \langle v \sigma_p \rangle L^4}{4 \pi \epsilon \mu_p} \right]^{1/2} \left[N_{AU} \frac{1}{1 + 2 \exp \frac{(E_{AU} - E_F)}{kT}} \right] \left[\frac{1}{1 + 2 \exp \frac{(E_{AU} - E_F)}{kT}} \right]^{1/2} \quad (2.10)$$

โดยที่ e คือขนาดของประจุ

V คือ thermal velocity ของพาหะซึ่งมีค่าเท่ากับ $\sqrt{\frac{2kT}{m}}$

σ_p คือ capture cross section ของโฮล

L คือความกว้างของส่วน i

E คือค่าไดโอดิกอิเล็กทริกของซิลิคอน

μ_p คือความคล่องตัวของโฮล

E_F คือระดับเฟอร์มีของส่วน i

E_{AU} คือระดับ trapping center ที่เกิดเนื่องจากทอง

ดังนั้นจึงสามารถกำหนดค่าแรงดันวิกฤติ V_{th} ได้โดยการกำหนดระยะความกว้างของส่วนอินทรีนซิกและความหนาแน่นของอะตอมของทองคำที่เจือลงไป

2.5 ปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยแรงดันในซิลิคอนไดโอดชนิด

IG $p^+ - i - n^+$

กลไกการทำงานของซิลิคอนไดโอดชนิด IG $p^+ - i - n^+$ สามารถแยกพิจารณาคุณสมบัติกระแสและแรงดันของไดโอดเป็นส่วนๆ [11] ดังรูปที่ 2.21 คือ

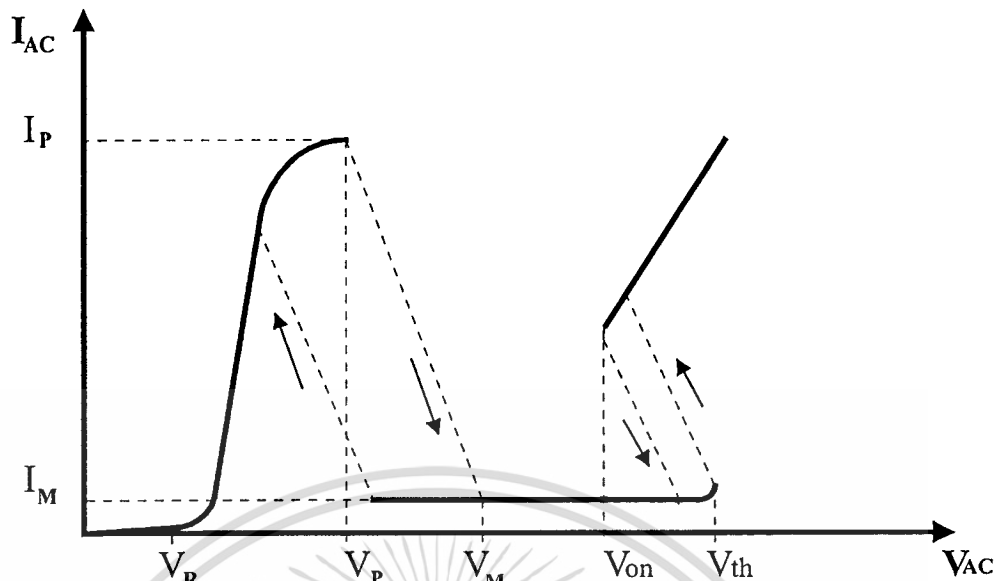
: High Resistivity ในช่วง $0 < V_{AC} < V_R$

: Current Rising ในช่วง $V_R < V_{AC} < V_P$

: Peak Point ขณะที่ $V_{AC} = V_P$

: VCNR ในช่วง $V_P < V_{AC} < V_M$

: Switch Off $V_M < V_{AC} < V_{th}$

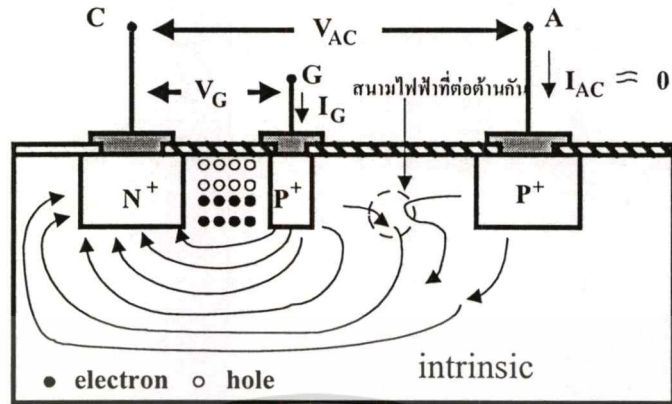


รูปที่ 2.21 คุณสมบัติกระแสและแรงดันของความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยแรงดัน

พิจารณาให้ $p^+ - i - n^+$ ไดโอดระหว่างแคโทดและเกตได้รับแรงไบอัสตรงค่าหนึ่ง ซึ่งอยู่เหนือกว่าจุดที่ทำให้เกิดภาวะ double injection กล่าวคือจะพิจารณาถึงความสัมพันธ์ของ $I_{AC} - V_{AC}$ ในขณะที่แคโทดและเกตอยู่ในภาวะ on และมีกระแสเกต (DC. Gate current) ไหลอยู่เป็นจำนวนมาก

2.5.1 High Resistivity ในช่วง $0 < V_{AC} < V_R$

คุณสมบัติของซิลิคอนไดโอดชนิด IG $p^+ - i - n^+$ ช่วง high resistivity ในช่วง $0 < V_{AC} < V_R$ ในช่วงที่แรงดัน V_{AC} มีค่าน้อยๆ และต่ำกว่า V_R $p^+ - i - n^+$ ไดโอดที่เกิดขึ้นระหว่างแคโทดและแอโนดจะอยู่ในภาวะ off กระแส I_{AC} จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ แม้ว่าจะเกิด double injection ในส่วน $p^+ - i - n^+$ ระหว่างแคโทดกับเกตก็ตาม ซึ่งกระแสเกต I_G มีค่าสูงสุดและอยู่ในช่วง on อิเล็กตรอนที่ออกจากขั้วแคโทดทั้งหมดจะเคลื่อนที่ไปยังเกตดังแสดงในรูปที่ 2.22 และไม่สามารถเคลื่อนที่ไปถึงส่วนแอโนดได้เนื่องจากแรงดัน V_{AC} มีค่าน้อยจนทำให้ transition time (T_n) ของอิเล็กตรอนเพื่อใช้ในการเคลื่อนที่จากเกตไปยังขั้วแอโนดมีค่ามากกว่าอายุของอิเล็กตรอน (lifetime) τ_n นั่นคือ $T_n > \tau_n$ นอกจากนี้แล้วสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดัน V_G จะมีทิศทางตรงกันข้ามกับสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดัน V_{AC} ในบริเวณระหว่างเกตและแอโนด และยังมีผลช่วยยับยั้งไม่ให้อิเล็กตรอนจากบริเวณเกตเคลื่อนที่ไปยังส่วนของแอโนดอีกด้วย ดังนั้นในช่วงนี้กระแสแอโนดจะไม่ไหลหรือมีค่าน้อยมากเกือบเป็นศูนย์ ซึ่งไดโอดในขณะนี้จะมีความต้านทานสูง



รูปที่ 2.22 การกระจายของสนามไฟฟ้าขณะที่ยังแรงดัน V_{AC} มีค่า $0 < V_{AC} < V_R$

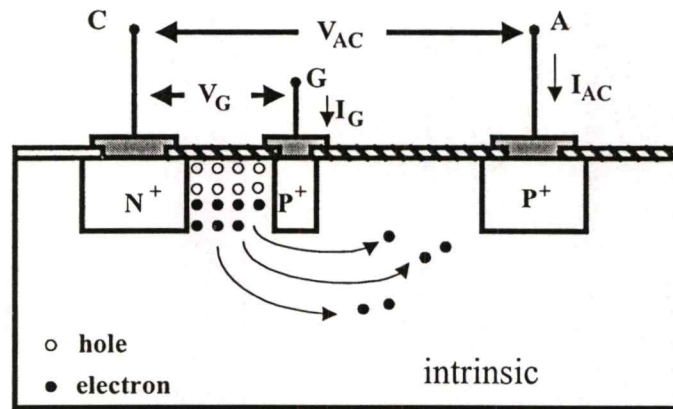
2.5.2 Current Rising ในช่วง $V_R < V_{AC} < V_P$

เมื่อไดโอดได้รับแรงดัน V_{AC} ซึ่งมีค่าสูงกว่า V_R แต่ต่ำกว่า V_P อิเล็กตรอนจะมีทิศทางเคลื่อนที่ดังแสดงในรูปที่ 2.23 เมื่อแรงดัน V_{AC} มีค่าเท่ากับ V_R แรงดันนี้จะมีผลทำให้อิเล็กตรอนจากเกตเคลื่อนที่ไปยังแอโนดเพิ่มขึ้น และเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่จากเกตไปยังแอโนด (T_n) จะเป็นไปตามสมการที่ 2.11

$$T_n = \frac{L_{AG}L}{\mu_n V_R} \leq \tau_n \tag{2.11}$$

เมื่อ μ_n และ L_{AG} คือค่าความคล่องตัว(mobility)ของอิเล็กตรอนและระยะห่างระหว่างแอโนดและเกตตามลำดับ

เนื่องจากขณะนี้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ไปถึงแอโนดได้ ดังนั้นกระแสแอโนด I_{AC} จะมีค่าเพิ่มขึ้น โดยเพิ่มตามแรงดัน V_{AC} ในขณะที่เดียวกันจะเห็นว่ากระแสเกต I_G จะมีค่าเปลี่ยนแปลงโดยจะมีค่าลดลงขณะที่กระแสแอโนด I_{AC} เพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามกระแสเกต I_G ยังมีค่ามากพอและยังคงอยู่ในภาวะ on คือในช่วงนี้ไดโอดจะนำไฟฟ้าได้ดี



รูปที่ 2.23 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนขณะที่ $V_R < V_{AC} < V_P$

2.5.3 Peak Point ขณะที่ $V_{AC} = V_P$

เมื่อแรงดันแอโนด V_{AC} มีค่าเพิ่มขึ้น ค่าความต่างศักย์ระหว่างเกต และเนื้อสารส่วน i จะลดลง ซึ่งคล้ายกับว่าแรงดันที่เกตลดลง ปริมาณโฮลที่ถูกฉีดจากรอยต่อ $p^+ - i$ ของเกตก็จะลดลงดังนั้นบริเวณส่วน i ระหว่างแคโทด และแอโนดจะเริ่มเปลี่ยนจากสภาพที่นำไฟฟ้าได้ มาเป็นภาวะที่มีความต้านทานสูงขึ้น กระแสแอโนด I_{AC} จึงเริ่มลดลงเช่นเดียวกับกระแสเกต I_G ที่แรงดัน $V_{AC} = V_P$ ดังในรูปที่ 2.21

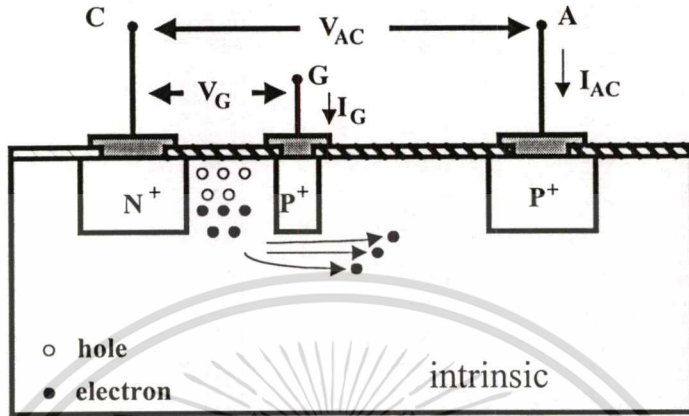
2.5.4 VCNR ในช่วง $V_P < V_{AC} < V_M$

ลักษณะการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในช่วงนี้แสดงดังรูปที่ 2.24 คือการลดลงของความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลใน $p^+ - i - n^+$ ระหว่างแคโทดและเกตยังคงดำเนินต่อไป ในขณะที่แรงดันแอโนด V_{AC} เพิ่มขึ้น และเมื่อภาวะของ double injection หยุกลงกระแสแอโนด I_{AC} จะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากเกิดการรวมตัว (recombination) ของพาหะ กระแส I_{AC} จะลดลงมายังค่า I_M และอยู่ในภาวะ off นั่นคือจุดทำงาน (operation point) ของกราฟ $I_G - V_G$ จะลดลงและอยู่ในช่วงสภาวะ off อย่างสมบูรณ์

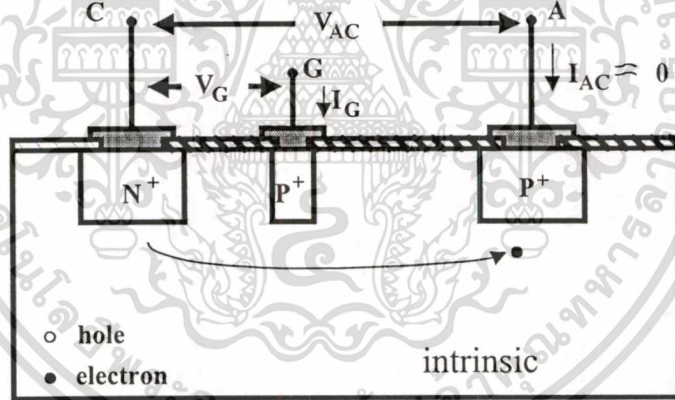
2.5.5 Switch Off $V_M < V_{AC} < V_{th}$

ในช่วงนี้ $p^+ - i - n^+$ ไดโอดทั้งสองตัวคือระหว่างแคโทดและเกต และระหว่างแคโทดและแอโนดจะอยู่ในภาวะ off ค่าของกระแสแอโนด I_{AC} จะมีค่าโดยประมาณเท่ากับ I_M ดังแสดงในรูปที่ 2.25 ซึ่งกระแส I_{AC} มีค่าน้อยมาก และเมื่อแรงดัน V_{AC} มีค่าสูงพอจะทำให้เกิดการ turn on ของ $p^+ - i - n^+$ ไดโอดระหว่างแคโทดและแอโนดขึ้น

โดยสามารถหาสมการโดยพิจารณาจากรูปแบบจำลองของซิลิคอนพลาแนรีไคโอดชนิด IG p⁺-i-n⁺ เมื่อส่วนแอโนด-แคโทดได้รับแรงดัน V_{AC} ซึ่งเปลี่ยนแปลงค่าได้ จะทำให้เกิดกระแสแอโนด I_{AC} ค่าต่างๆ โดยขึ้นกับแรงดัน V_{AC} ที่ให้



รูปที่ 2.24 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนขณะที่ $V_p < V_{AC} < V_M$



รูปที่ 2.25 ภาวะช่วง switch off เมื่อ $V_M < V_{AC}$

เมื่อให้แรงดันไบอัสแอโนด-แคโทด V_{AC} ซึ่งมีค่าคงที่ค่าหนึ่ง จะทำให้เกิดความต่างศักย์ขึ้นดังในรูปที่ 2.26(a) และสมมติให้มีการกระจายแบบเชิงเส้นจะได้ค่าแรงดันแอโนด-เกต(V_{AG}) ดังสมการที่ 2.12 แสดงดังรูปที่ 2.26(b)

$$V_{AG} = \frac{L_{AG} V_{AC}}{L} \tag{2.12}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และค่าสนามไฟฟ้า \mathcal{E} พิจารณาได้จากสมการที่ 2.13

$$\mathcal{E} = \frac{V_{AG}}{L_{AG}} = \frac{V_{AC}}{L} \quad (2.13)$$

และเมื่อแรงดันแอโนด-แคโทด V_{AC} มีค่าเท่ากับ V_R แล้ว เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากเกตไปยังแอโนด (T_n) จะมีค่าเท่ากับช่วงอายุ (lifetime) ของอิเล็กตรอนหรือก็คือ $T_n = \tau_n$ จากสมการ 2.14 จะได้อ่า V_R คือ

$$V_R = \frac{L_{AG}L}{\tau_n \mu_n} \quad (2.14)$$

ขณะที่แรงดัน $V_{AC} = V_R$ $p^+ - i - n^+$ ไดโอดระหว่างแคโทดและเกตยังคงมีการฉีดประจุพาหะคู่ควบ (Double Injection) และจากสภาวะเป็นกลางทางไฟฟ้า จะได้ว่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่ถูกฉีดเข้าไปในส่วน i มีค่าเท่ากับความหนาแน่นของโฮลนั่นคือ

$$\Delta n = \Delta p \quad (2.15)$$

โดยที่ $\Delta n, \Delta p$ คือความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลที่ถูกฉีดเข้าไปในส่วน i ตามลำดับ

จากการกระจายของความต่างศักย์ในรูปที่ 2.26(b) จะได้อ่าแรงดันที่ตกคร่อมรอยต่อ $p^+ - i - n^+$ ที่ส่วนเกตคือ

$$\text{แรงดันที่ตกคร่อมระหว่างเกตกับส่วน } i = V_G - \frac{L_G}{L} V_{AC} \quad (2.16)$$

เมื่อรอยต่อได้รับแรงดันไบอัสตรง โฮลจะถูกฉีดเข้าไปในส่วน i ในภาวะนี้แรงดันเกต $V_G > \frac{L_G}{L} V_{AC}$ และเมื่อแรงดันแอโนด V_{AC} มีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่ง $V_G < \frac{L_G}{L} V_{AC}$ แล้ว จะทำให้รอยต่อ $p^+ - i$ เกิดการไบอัสย้อนกลับ ซึ่งทำให้เกิดการฉีดโฮลและการฉีดประจุพาหะคู่ควบหยุดลง จากสมการที่ 2.16 จะได้อ่าความหนาแน่นของโฮลที่ถูกฉีดคือ

$$\Delta p = n_i \exp \left[\frac{q \left(V_G - \frac{L_G}{L} V_{AC} \right)}{nkT} \right] \quad (2.17)$$

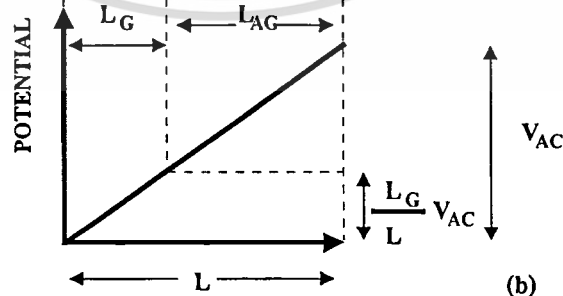
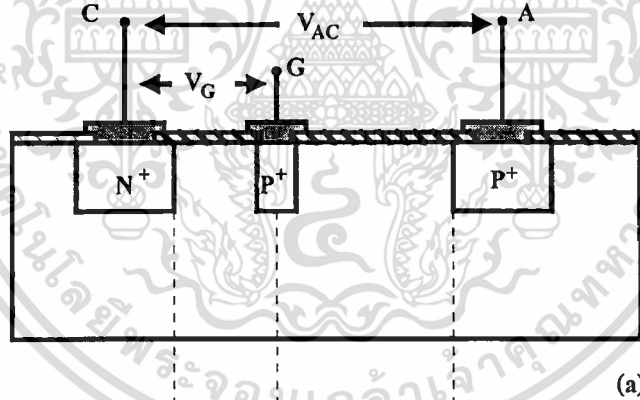
เมื่อ n_i และ q คือความหนาแน่นของพาหะของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์เมื่ออยู่ในภาวะสมดุลของอุณหภูมิและประจุของอิเล็กตรอน ตามลำดับ ส่วน n เป็นค่าคงที่ซึ่งถูกกำหนดโดยภาวะของรอยต่อในที่มีค่าเท่ากับ 4

จากกฎของโอห์มและการประมาณของอันดับแรก(first-order) จะได้ค่ากระแสแวนได-แควท I_{AC} เมื่อ $V_{AC} > V_R$ ดังนี้คือ

$$I_{AC} = Aq\mu_n \Delta n \frac{(V_{AC} - V_R)}{L} \quad (2.18)$$

โดย A เป็นพื้นที่ที่กระแสไหลผ่านอย่างแท้จริงและจากสมการที่ 2.15, 2.17, 2.18 จะได้ว่า

$$I_{AC} = Aq\mu_n \frac{(V_{AC} - V_R)}{L} n_i \exp \left[\frac{q \left(V_G - \frac{L_G}{L} V_{AC} \right)}{nkT} \right] \quad (2.19)$$



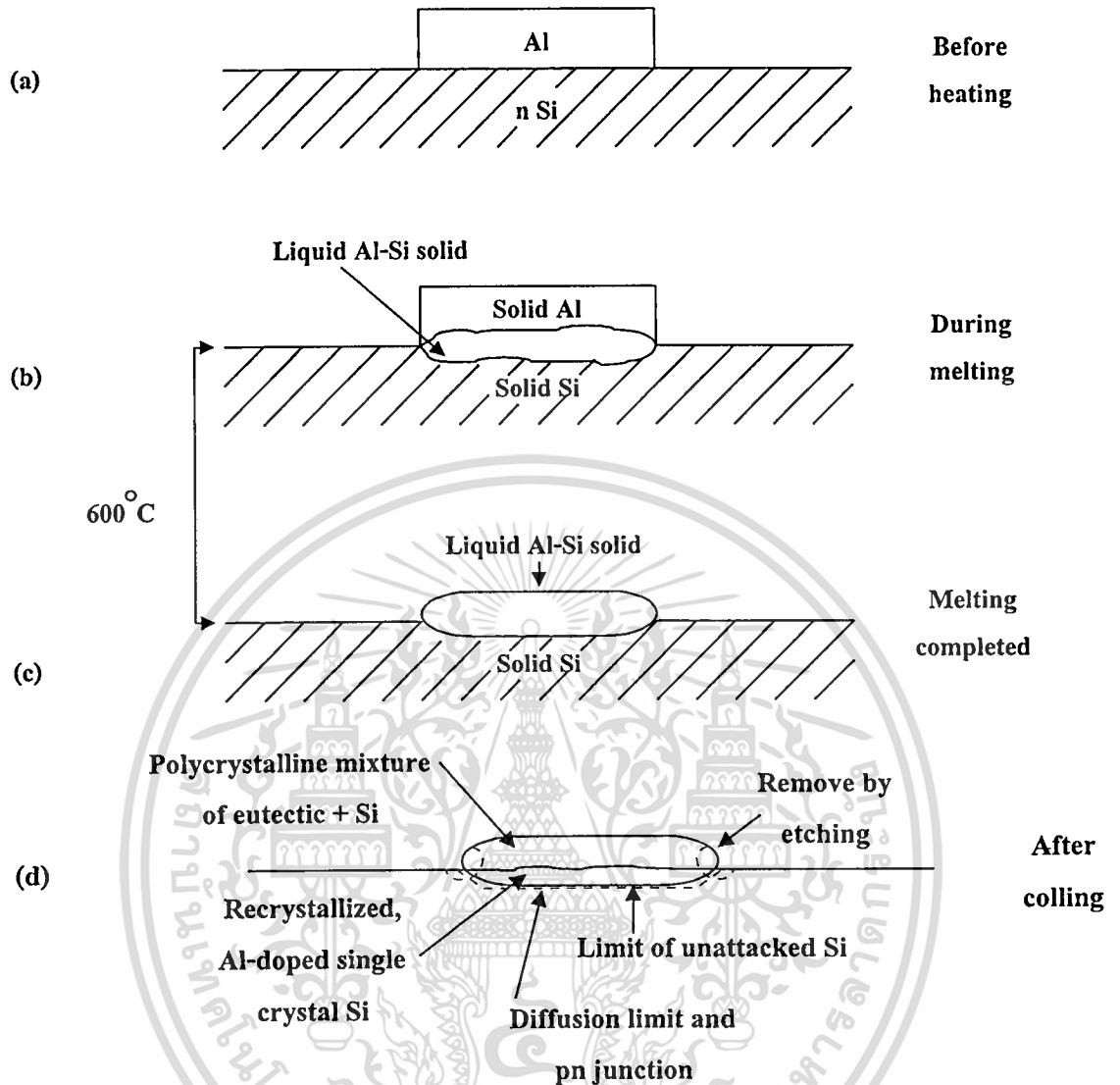
รูปที่ 2.26 ลักษณะแรงดันไบอัสแวนได-แควท (V_{AC}) และแรงดันเกต (V_G) (a) และลักษณะการกระจายแบบเชิงเส้นของแรงดันระหว่างแวนได-แควทและ แกต-เกต (b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 รอยต่อแบบอัลลอย(Alloyed Junction)

ในการสร้างรอยต่อพี-เอ็นนั้นสามารถสร้างได้จากหลายวิธี เช่นจากกระบวนการแพร่สารเจือ(thermal diffusion), กระบวนการอิพิแทกเชียล(epitaxial growth), กระบวนการไอออนอิมพลานต(ion implantation) และเทคนิคการอัลลอย(alloyed junction) ก็เป็นอีกวิธีหนึ่งซึ่งสามารถสร้างรอยต่อพี-เอ็นได้ง่ายและไม่สิ้นเปลืองแต่ก็เป็นกรยากที่จะควบคุมความหนาแน่นของสารเจือที่ทำการอัลลอย[12-13]

การอัลลอยนั้นเป็นกระบวนการสร้างรอยต่อพี-เอ็นซึ่งทำให้เกิดรอยต่อชนิดชันบันได(abrupt junction) หลักในการสร้างรอยต่อคือนำสารกึ่งตัวนำชนิดใดชนิดหนึ่งและโลหะที่เป็นสารเจือชนิดตรงข้ามกับสารกึ่งตัวนำวางบนผิวของชิ้นสารแล้วนำไปให้ความร้อนจนเกิดเป็นของผสมระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำที่บริเวณใต้พื้นผิวแล้วทำให้เย็นลง จากรูปที่ 2.27 แสดงการสร้างรอยต่อพี-เอ็นจากการอัลลอย โดยทำการเคลือบอะลูมิเนียมบางบนฐานรองซิลิคอนชนิดเอ็น โดยอะลูมิเนียมจะแสดงตัวเป็นสารเจือผู้รับ(acceptor)ในซิลิคอนชนิดเอ็น เมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 580-600 องศาเซลเซียส อะลูมิเนียมจะเริ่มหลอมละลายที่บริเวณรอยต่อและแพร่ซึมเข้าไปในซิลิคอนเกิดเป็นชั้นอัลลอยของเหลว(liquid alloy)ระหว่างอะลูมิเนียมและซิลิคอนและเมื่อทำให้อุณหภูมิเย็นลงชั้นอัลลอยซึ่งเป็นของเหลวจะเปลี่ยนสภาพเป็นชั้นของส่วนพีหรือ recrystallized Al-doped single crystal Si layer โดยความสามารถในการละลายสูงสุด(solid solubility)จะมีค่าประมาณ $3 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ ของอะลูมิเนียมในซิลิคอนที่อุณหภูมิ 580 องศาเซลเซียส จึงเกิดเป็นรอยต่อพี-เอ็นขึ้น



รูปที่ 2.27 การสร้างรอยต่อพี-เอ็นจากการอัลลอย

บทที่ 3

การออกแบบและกระบวนการสร้าง

ในการสร้างซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอย เพื่อศึกษาการคุณสมบัติความต้านทานเชิงลบ การออกแบบโครงสร้างของอุปกรณ์เป็นส่วนที่สำคัญอีกส่วนหนึ่ง ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการออกแบบโครงสร้างและกระบวนการสร้าง โดยในการออกแบบจะกล่าวถึงการออกแบบกระจกต้นแบบเพื่อใช้ในการสร้างซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ และรายละเอียดเกี่ยวกับกระบวนการสร้างไดโอด

3.1 การสร้างกระจกต้นแบบ

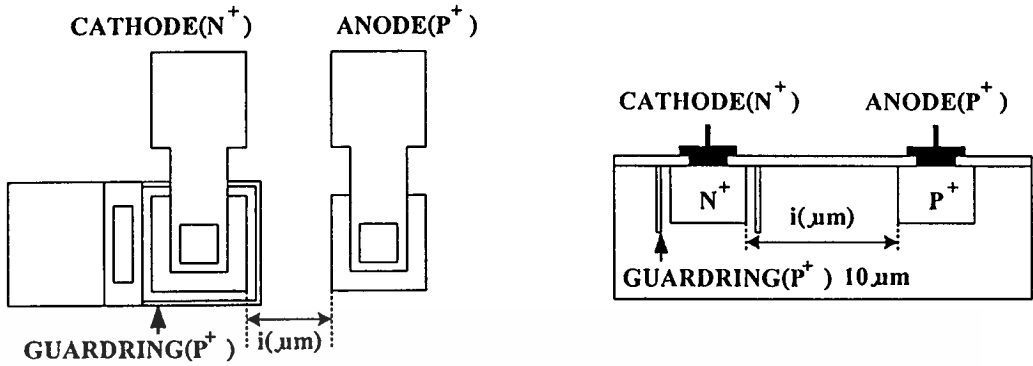
ออกแบบโครงสร้างของไดโอดและทำการถ่ายย่อลงบนกระจกโฟโตมาส์ด้วยเครื่อง Reduction camera กระจกต้นแบบทั้งหมดมี 4 มาส์กคือ

- มาส์กที่ 1 สร้างส่วนแอโนด
- มาส์กที่ 2 สร้างส่วนแคโทด
- มาส์กที่ 3 เปิดช่องเพื่อสร้างขั้วสัมผัสอะลูมิเนียม
- มาส์กที่ 4 สร้างลวดลายอะลูมิเนียม

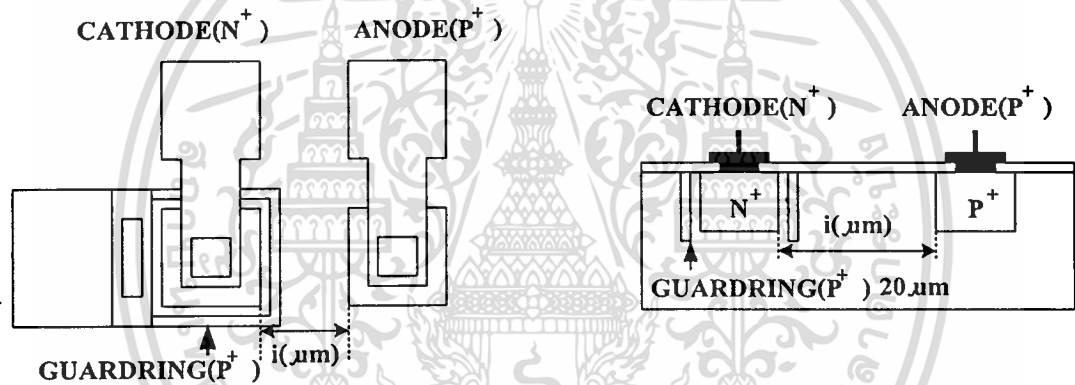
โดยทำการออกแบบให้ในแต่ละมาส์กข้างต้นให้มีโครงสร้างที่แตกต่างกันเพื่อศึกษาถึงคุณสมบัติของซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยแบ่งโครงสร้างหลักได้เป็น 6 ชุดดังนี้คือ

- ชุดที่ 1** ทำการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอยและซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการแพร่สารเจือ และทำการศึกษาผลของการดริฟท์ที่มีผลต่อการเกิดความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยกระแส (CCNR) รวมถึงทั้งทำการเปรียบเทียบกับโครงสร้างของซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - p$ โดยวิธีการอัลลอยดังแสดงในรูปที่ 3.1-3.6
- ชุดที่ 2** ทำการศึกษาศึกษาการเปลี่ยนแปลงของขนาดพื้นที่ส่วนแอโนดและแคโทดต่อการเกิดความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยกระแส (CCNR) ดังแสดงในรูปที่ 3.7-3.9
- ชุดที่ 3** ทำการศึกษารากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยแรงดันในซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ injection gate โดยวิธีการอัลลอย ดังแสดงในรูปที่ 3.10-3.11
- ชุดที่ 4** ทำการศึกษารากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยแรงดันในซิลิคอนไดโอดชนิด $n^+ - i - n^+$ injection gate ดังแสดงในรูปที่ 3.12-3.13
- ชุดที่ 5** ทำการศึกษารากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยกระแสในซิลิคอนไดโอดชนิด Bi-directional $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอย ดังแสดงในรูปที่ 3.14

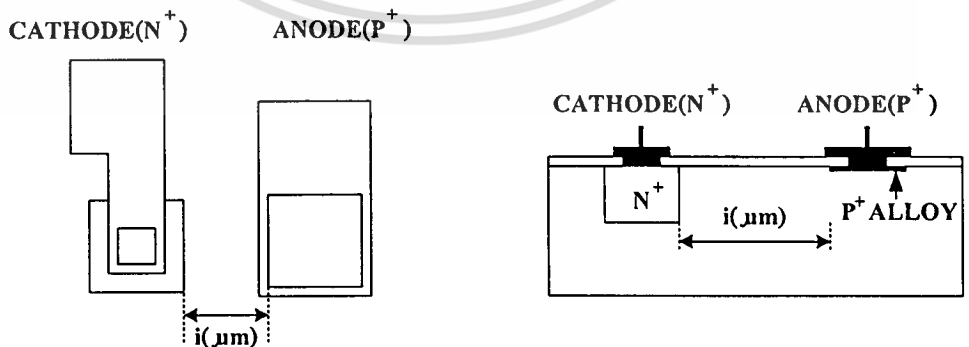
ชุดที่ 6 ทำการศึกษาปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยกระแสในซิลิคอนไดโอดชนิด Bi-directional $n^+ - i - n^+$ ดังแสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.1 ลักษณะโครงสร้างของซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีแพร่สารเจือโดยมีการ์ดริงชนิดพีล้อมรอบส่วนแคโทดขนาด 10 ไมโครเมตร และเปลี่ยนแปลงระยะ i ตั้งแต่ 50-180 ไมโครเมตร

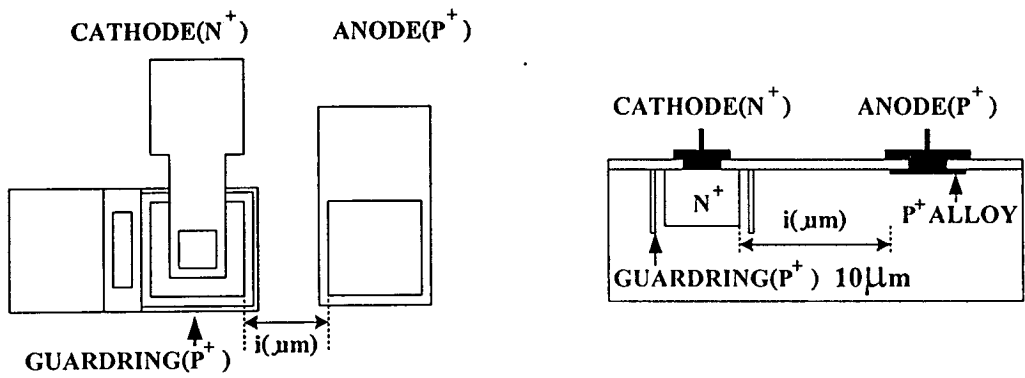


รูปที่ 3.2 ลักษณะโครงสร้างของซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีแพร่สารเจือโดยมีการ์ดริงชนิดพีล้อมรอบส่วนแคโทดขนาด 20 ไมโครเมตรและเปลี่ยนแปลงระยะระหว่าง i ตั้งแต่ 60-180 ไมโครเมตร

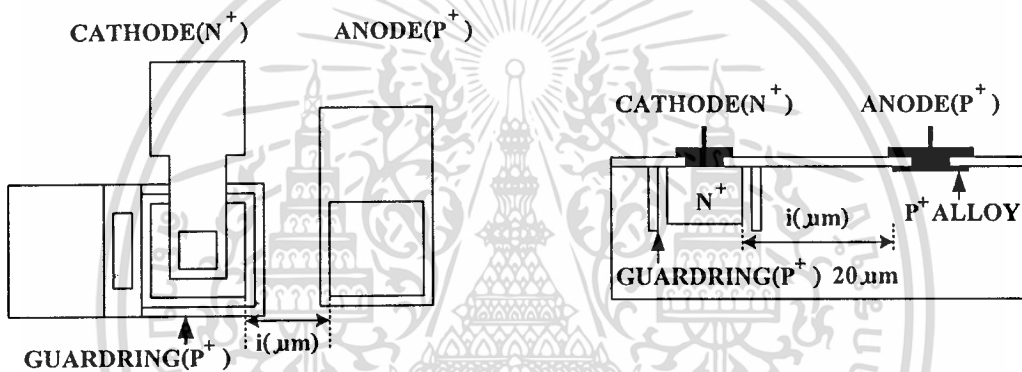


รูปที่ 3.3 ลักษณะโครงสร้างของซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอยโดยส่วนแคโทดไม่มีการ์ดริงล้อมรอบ และเปลี่ยนแปลงระยะ i ตั้งแต่ 20-180 ไมโครเมตร

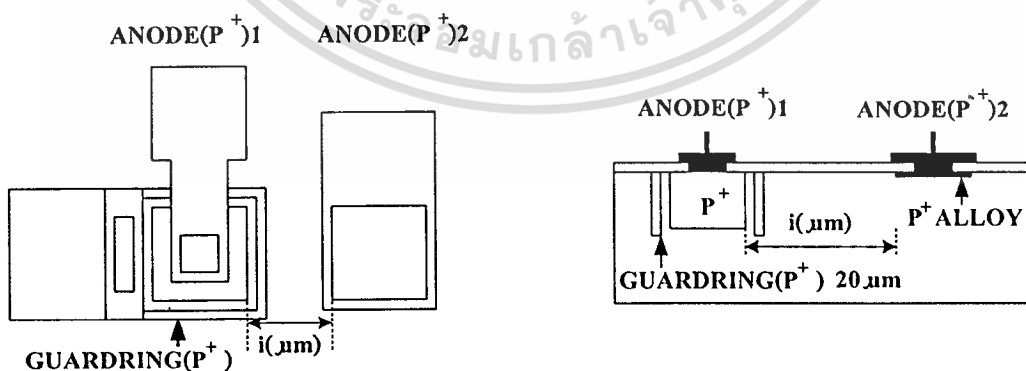
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 ลักษณะโครงสร้างของซีลิกอนไดโอดชนิด p^+i-n^+ โดยวิธีการอัลลอยโดยมีกัรด์ริงชนิดพี ล้อมรอบส่วนแคโทดขนาด 10 ไมโครเมตร และเปลี่ยนแปลงระยะ i ตั้งแต่ 50-150 ไมโครเมตร

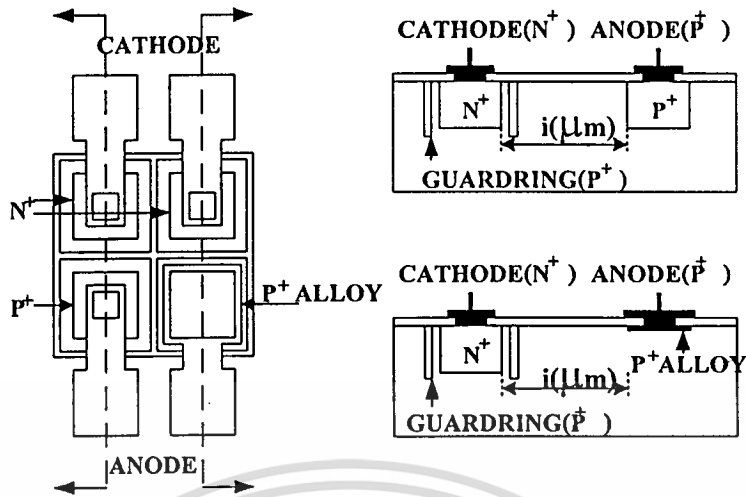


รูปที่ 3.5 ลักษณะโครงสร้างของซีลิกอนไดโอดชนิด p^+i-n^+ โดยวิธีการอัลลอยโดยมีกัรด์ริงชนิดพี ล้อมรอบส่วนแคโทดขนาด 20 ไมโครเมตร และทำการเปลี่ยนแปลงระยะระหว่างส่วน แคโทดและแอโนด(ส่วน i) ตั้งแต่ 60-160 ไมโครเมตร



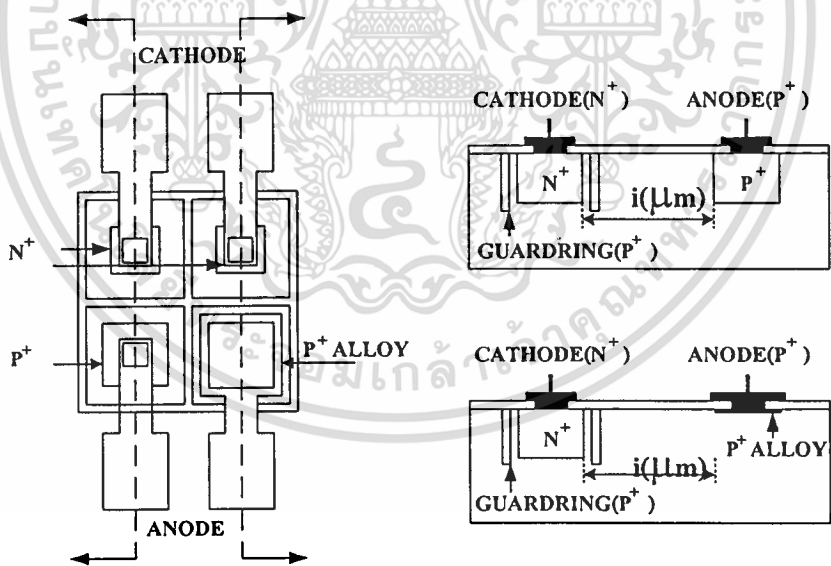
รูปที่ 3.6 ลักษณะโครงสร้างซึ่งส่วนแอโนด1สร้างจากการแพร่สารเจือชนิดพีและส่วนแอโนด2 สร้างจากการอัลลอยโดยมีกัรด์ริงชนิดพีล้อมรอบส่วนแคโทดขนาด 20 ไมโครเมตร และเปลี่ยนแปลงระยะ i ตั้งแต่ 60-120 ไมโครเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



VARY CATHODE = ANODE ($200\mu\text{m}^2, 160\mu\text{m}^2$ and $120\mu\text{m}^2$)

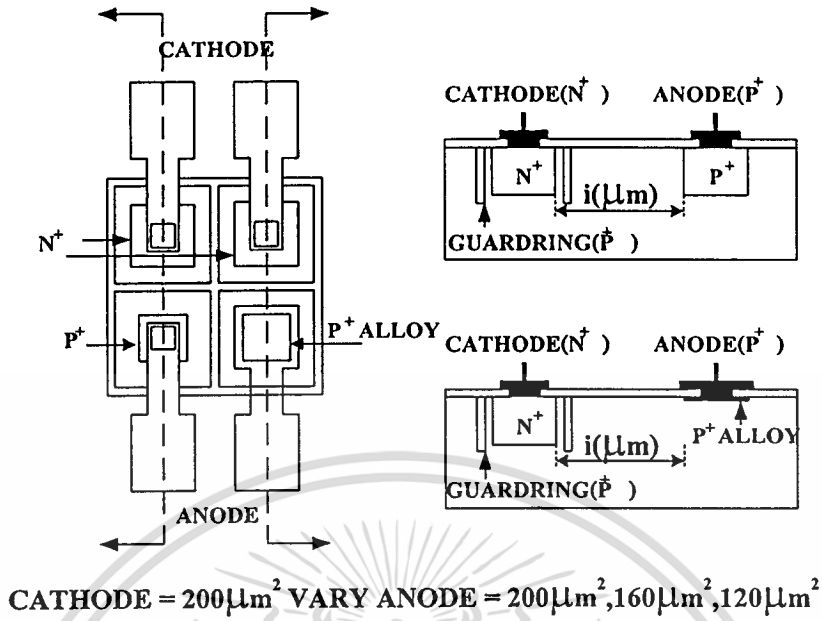
รูปที่ 3.7 ลักษณะ โครงสร้างของซิลิคอนไดโอดชนิด p^+-i-n^+ โดยวิธีการแพร่สารเจือและอัลลอยโดยมีการ์ดริงชนิดพีล้อมรอบส่วนแคโทดและแอโนดขนาด 20 ไมโครเมตรโดยเปลี่ยนแปลงขนาดพื้นที่ส่วนแอโนดและแคโทดพร้อมกันคือ 120, 160 และ 200 ตารางไมโครเมตร และเปลี่ยนแปลงระยะ i ตั้งแต่ 60-160 ไมโครเมตร



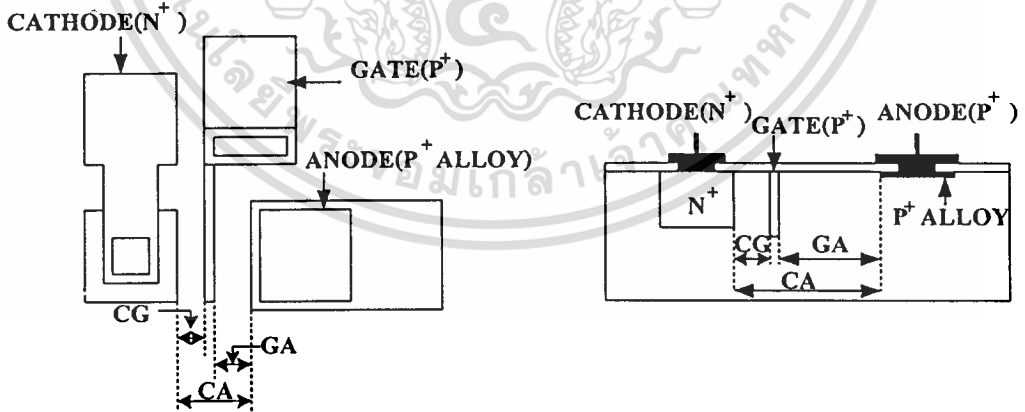
ANODE = $200\mu\text{m}^2$ VARY CATHODE = $200\mu\text{m}^2, 160\mu\text{m}^2, 120\mu\text{m}^2$

รูปที่ 3.8 ลักษณะ โครงสร้างของซิลิคอนไดโอดชนิด p^+-i-n^+ โดยวิธีการแพร่สารเจือและอัลลอยโดยมีการ์ดริงชนิดพีล้อมรอบส่วนแคโทดและแอโนดขนาด 20 ไมโครเมตรโดยพื้นที่ส่วนแอโนดมีขนาดคงที่คือ 200 ตารางไมโครเมตร แต่เปลี่ยนแปลงขนาดพื้นที่ส่วนแคโทดคือ 120, 160 และ 200 ตารางไมโครเมตร และเปลี่ยนแปลงระยะ i ตั้งแต่ 60-160 ไมโครเมตร

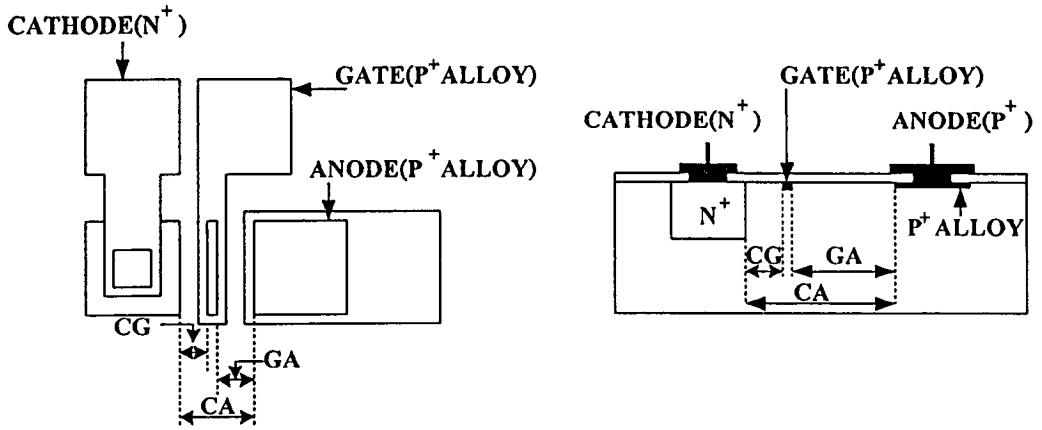
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



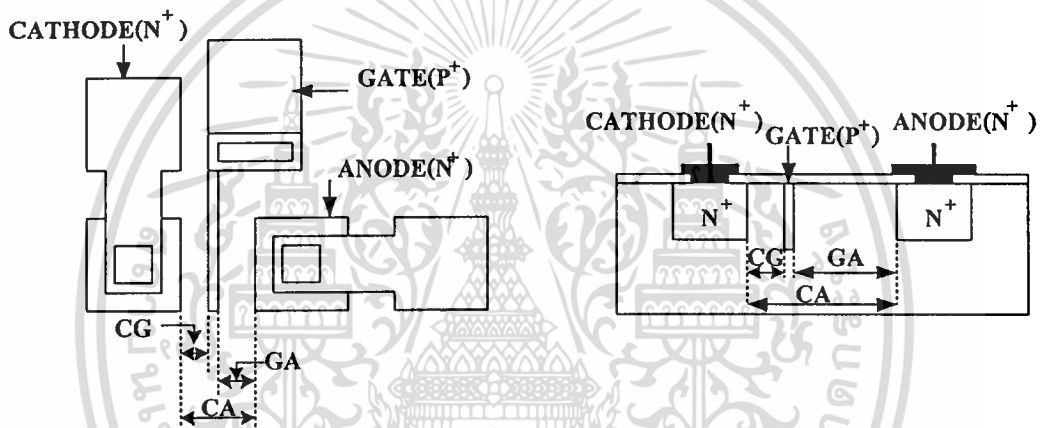
รูปที่ 3.9 ลักษณะ โครงสร้างของซิติคอนไดโอดชนิด p^+-i-n^+ โดยวิธีการอัลลอยโดยมีกัรด์ริงชนิดพี ล้อมรอบส่วนแคโทดและแอโนดขนาด 20 ไมโครเมตร โดยพื้นที่ส่วนแคโทดมีขนาดคงที่ คือ 200 ตารางไมโครเมตร แต่เปลี่ยนแปลงขนาดพื้นที่ส่วนแอโนดคือ 120, 160 และ 200 ตารางไมโครเมตร และเปลี่ยนแปลงระยะ i ตั้งแต่ 60-160 ไมโครเมตร



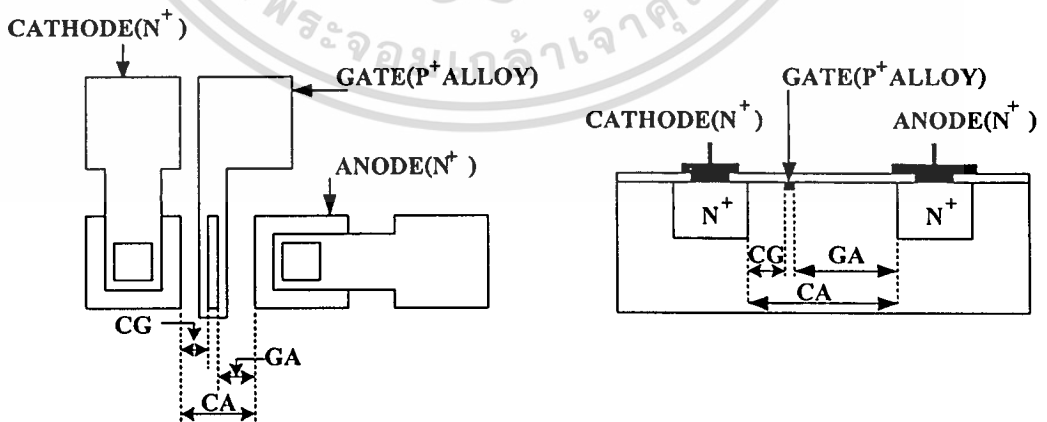
รูปที่ 3.10 ลักษณะ โครงสร้างของซิติคอนไดโอดชนิด n^+-i-Al injection gate โดยส่วนเกทสร้างจาก การแพร่สารเจือชนิดพี เปลี่ยนแปลงระยะระหว่างส่วนแคโทดและเกทคือ 60 และ 80 ไมโครเมตร และเปลี่ยนแปลงระยะ i ตั้งแต่ 120-220 ไมโครเมตร



รูปที่ 3.11 ลักษณะโครงสร้างของซิลิคอนไดโอดชนิด n^+ -i-Al injection gate โดยส่วนเกตสร้างจากการอัลลอย เปลี่ยนแปลงระยะระหว่างส่วนแคโทดและเกตคือ 60 และ 80 ไมโครเมตร และเปลี่ยนแปลงระยะ i ตั้งแต่ 140-240 ไมโครเมตร

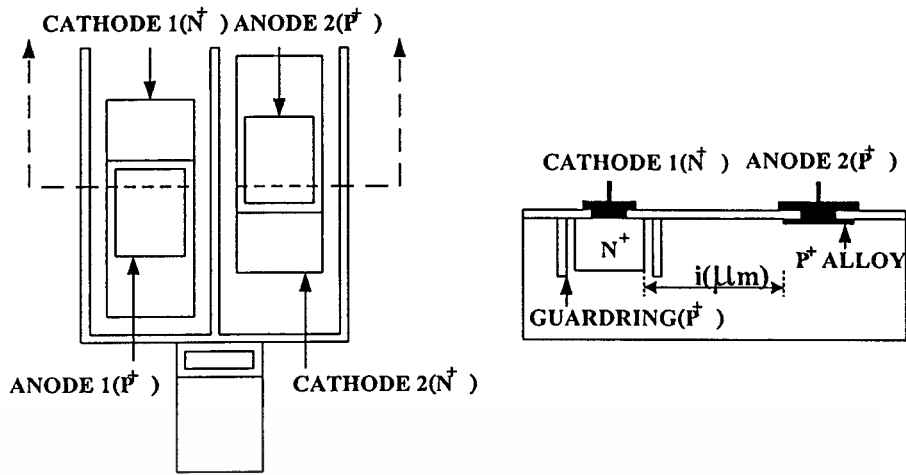


รูปที่ 3.12 ลักษณะโครงสร้างของซิลิคอนไดโอดชนิด n^+ -i- n^+ injection gate โดยส่วนเกตสร้างจากการแพร่สารเจือชนิดพี ทำการเปลี่ยนแปลงระยะระหว่างส่วนแคโทดและเกตคือ 60 และ 80 ไมโครเมตร และเปลี่ยนแปลงระยะ i ตั้งแต่ 120-220 ไมโครเมตร

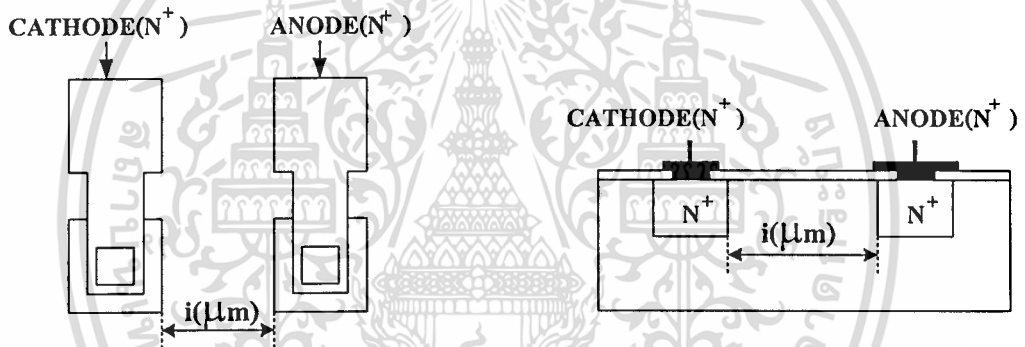


รูปที่ 3.13 ลักษณะโครงสร้างของซิลิคอนไดโอดชนิด n^+ -i- n^+ injection gate โดยส่วนเกตสร้างจากการอัลลอย ทำการเปลี่ยนแปลงระยะระหว่างส่วนแคโทดและเกตคือ 60 และ 80 ไมโครเมตร และเปลี่ยนแปลงระยะ i ตั้งแต่ 120-220 ไมโครเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 ลักษณะ โครงสร้างของซิลิคอนไดโอดชนิด Bi-directional $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอย และ เปลี่ยนแปลงระยะ i ตั้งแต่ 50-120 ไมโครเมตร



รูปที่ 3.15 ลักษณะ โครงสร้างของซิลิคอนไดโอดชนิด Bi-directional $n^+ - i - n^+$ ซึ่งส่วนแคโทดและ แอโนดสร้างจากการแพร่สารเจือชนิดเอ็นโดยส่วนแคโทดไม่มีกรังด์ริงล้อมรอบ และ เปลี่ยนแปลงระยะ i ตั้งแต่ 20-220 ไมโครเมตร

3.2 กระบวนการสร้างซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอย

3.2.1. ขั้นตอนการเตรียมฐานรอง

โดยเริ่มต้นเตรียมแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็นระนาบ $\langle 111 \rangle$ ค่าพิทักความต้านทาน 80-120 โอห์ม-เซนติเมตร หนาประมาณ 400 ไมโครเมตร

3.2.2 การทำความสะอาดผิวซิลิคอนครั้งแรก

เป็นการเตรียมผิวและทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนครั้งแรกเพื่อล้างสิ่งแปลกปลอมที่ติดค้างอยู่บนผิวซิลิคอน ดังนี้

1. ทำความสะอาดผิวด้วยน้ำบริสุทธิ์ (Deionized Water) ในเครื่องสั่นความถี่สูง (Ultrasonic Cleaner) 2 นาที(กำจัดฝุ่นละออง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติ ไม่นิยญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ล้างด้วยน้ำ DI และเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N₂)
3. ต้มในกรดไนตริก(HNO₃) เป็นเวลา 10 นาที (กำจัดโลหะหนัก เช่น เศษซิลิคอน)
4. ต้มในน้ำบริสุทธิ์ 2 ครั้ง ครั้งละ 5 นาที
5. ล้างด้วยน้ำ DI และเป่าแห้ง

3.2.3 การทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นมาตรฐาน

เพื่อทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นซิลิคอนและกำจัดไขมันและสิ่งแปลกปลอมโดย

1. ต้มในไตรโคลโรเอททีลีน(Trichloroethylene) เป็นเวลา 5 นาที (เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกประเภทไขมัน)
2. ล้างด้วยอะซิโตน (Acetone) ในเครื่องสั่นความถี่สูง 3 นาที
3. ล้างด้วยน้ำ DI 2 ครั้ง และเป่าแห้ง

3.2.4 Slice Etching (ก่อนการออกซิเดชัน)

เพื่อกำจัด SiO₂ ที่อยู่บนผิวซิลิคอนก่อนการออกซิเดชัน

1. ลอกชั้น SiO₂ ด้วยสารละลาย HF 5% ประมาณ 10 วินาที(สังเกตว่า SiO₂ หหมดแล้วโดยจะไม่มีน้ำเกาะบนผิวซิลิคอน)
2. ล้างด้วยน้ำ DI 2 ครั้ง และเป่าแห้ง

3.2.5 กระบวนการออกซิเดชัน(Oxidation)

สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์(SiO₂)ให้มีความหนาประมาณ 5000 Å ซึ่งซิลิคอนไดออกไซด์(SiO₂) นั้นเป็นสารที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนลักษณะโปร่งแสงเพื่อเคลือบผิวหน้า และใช้ควบคุมการแพร่ของสารเจือให้เข้าไปในบริเวณที่ต้องการเท่านั้น และความหนาของชั้น SiO₂ นั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ, เวลา และวิธีการสร้าง ซึ่งการสร้างโดยวิธีออกซิเดชันแบบแห้งนั้นจะใช้เวลามากกว่าวิธีออกซิเดชันแบบชื้นแต่ลักษณะการเกิดชั้น SiO₂ จะดีและมีผลกระทบต่อผิวหน้าของซิลิคอนน้อยกว่า

การสร้างชั้น SiO₂ ทำได้ 2 ลักษณะ คือ

1. ออกซิเดชันแบบแห้ง(Dry Oxidation)



2. ออกซิเดชันแบบชื้น(Wet Oxidation)



ขั้นตอนการสร้างคือ

1. นำแผ่นซิลิคอนเข้าเตาออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส แล้วใช้วิธีออกซิเดชันแบบแห้งโดยผ่านก๊าซออกซิเจนเข้าไปด้วยอัตรา 1200 ซีซีต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

2. ออกซิเดชันแบบชื้นด้วยอัตรา 1000 ซีซีต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

3. ออกซิเดชันแบบแห้งด้วยอัตรา 1200 ซีซีต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

3.2.6 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี(Photolithography)

เป็นกระบวนการที่ใช้ถ่ายภาพจากกระจกมาสก์ลงบนผิวแผ่นซิลิคอนเพื่อเตรียมเปิดช่องออกไซด์เฉพาะบริเวณที่ต้องการแพร่สารเจือ โดยเคลือบผิวของแผ่นซิลิคอนด้วยน้ำยาไวแสง(Photo-resist)ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือ

1. สารไวแสงชนิดลบ(Negative photo resist) โดยเมื่อถูกฉายแสงแล้วจะแข็งตัวไม่ยอมละลายในน้ำยาล้าง(Developer)

2. สารไวแสงชนิดบวก(Positive photo resist) โดยเมื่อถูกฉายแสงแล้วจะอ่อนตัวและสามารถละลายในน้ำยาล้าง(Developer)

ขั้นตอนในกระบวนการนี้คือ

[เมื่อใช้สารไวแสงแบบลบ (และขั้นตอนการใช้สารไวแสงชนิดบวกคู่ขั้นตอนหลังจากเคลือบอะลูมิเนียม(3.2.8))]

1. อบแห้งเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 20 - 30 นาที

2. เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดลบ (Waycoat) โดยใช้เครื่องสปินเนอร์ความเร็ว 5000 รอบ/นาที เป็นเวลา 20 วินาที

3. อบให้น้ำยาแห้งที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 30 นาที (Prebake)

4. ฉายแสงผ่านกระจกมาสก์ด้วยอุปกรณ์ Mask Aligner ซึ่งจะให้แสงอัตราไวโอเลตออกมา แหล่งกำเนิดแสงคือ หลอดเมอร์คิวรี $\lambda = 5000 \text{ \AA}$ เป็นเวลา 12 วินาที

5. ล้างด้วยน้ำยาล้าง(Developer) ใน Xylene 2 ครั้ง ครั้งละ 90 วินาที แล้วล้างใน Isopropyl 3 ครั้ง ครั้งละ 30 วินาที แล้วล้างใน DI 2 ครั้งและเป่าแห้ง

6. อบแห้งที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 20 นาที (Postbake)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ทาด้านหลังด้วย Way coat
8. อบแห้งที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 30 นาที
9. กัดซึลิกอนไดออกไซด์ (Oxide Etching) ออกโดยใช้สารละลายบัฟเฟอร์(Buffer) (มีอัตราการกัดชั้นซึลิกอนไดออกไซด์ประมาณ 1000 Å/นาที)
10. ล้างด้วยDI 2 ครั้งและ เป่าแห้ง
11. การลอกชั้นสารไวแสงชนิดลบ Waycoat โดยต้มในกรดซัลฟูริก (H₂SO₄) 2 ครั้ง ครั้งละ 5 นาที
12. ล้างด้วย DI
13. ต้มในน้ำบริสุทธิ์ 2 ครั้ง ครั้งละ 5 นาที
14. ล้างด้วย DI และเป่าแห้ง
15. ทำความสะอาดผิวหน้ามาตรฐาน (3.2.3)
16. Slice Etching โดยใช้ HF 5% เป็นเวลาประมาณ 10 วินาที
17. ล้างด้วยDI 2 ครั้งและเป่าแห้ง

3.2.7 กระบวนการแพร่อะตอมสารเจือ (Diffusion)

3.2.7.1 กระบวนการแพร่อะตอมสารเจือโบรอน (Boron Deposition)

เป็นกระบวนการแพร่สารเจือโบรอนด้วยแหล่งสารเจือ BN ลงไปในบริเวณที่เปิดช่องออกไซด์ไว้เพื่อสร้างส่วนแอโนด

โดยมีขั้นตอนการแพร่ดังนี้คือ

1. นำแผ่นซึลิกอนวางสลับกับแผ่น BN ในเตาแพร่สารที่อุณหภูมิ 980°C เป็นเวลา 30 นาที ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 700 ซีซี/นาที วิธีการนี้เรียกว่า Boron deposition
2. การลอกชั้น Boron Glass โดยใช้สารละลาย HF 5% แล้วล้างด้วยน้ำ DI และเป่าแห้ง
3. ทำความสะอาดผิวหน้ามาตรฐาน (3.2.3)
4. กระบวนการขับลึกโบรอน (Boron Drive-in) ที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา 3 $\frac{1}{2}$ ชั่วโมง ในบรรยากาศของก๊าซออกซิเจนที่มีอัตราการไหล 1200 ซีซี/นาที วิธีการนี้เรียกว่า Boron drive-in (ซึ่งในกระบวนการนี้นอกจากจะทำให้เกิดส่วนแอโนดขึ้นแล้วจะทำให้เกิดชั้นของ SiO₂ เคลือบที่บริเวณผิวของซึลิกอนด้วย)
5. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี(3.2.6) อีกครั้งเพื่อเปิดช่องออกไซด์เตรียมแพร่สารเจือฟอสฟอรัสเข้าไปในบริเวณที่ต้องการเพื่อสร้างส่วนแคโทด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.7.2 กระบวนการแพร่อะตอมสารเจือฟอสฟอรัส (Phosphorus Deposition)

เป็นกระบวนการแพร่สารเจือฟอสฟอรัสด้วยแหล่งสารเจือ SiP_2O_5 (PH1000) ลงไปในบริเวณที่เปิดช่องออกไซด์ไว้

โดยมีขั้นตอนการแพร่ดังนี้คือ

1. นำแผ่นซิลิคอนวางสลับกับแผ่น PH 1000 ในเตาแพร่สารที่อุณหภูมิ 1000°C เป็นเวลา 30 นาที ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 700 ซีซี/นาที วิธีการนี้เรียกว่า Phosphorus deposition

2. การลอกชั้น Phosphorus Glass โดยใช้สารละลาย HF 5% แล้วล้างด้วยน้ำ DI และเป่าแห้ง

3. ทำความสะอาดผิวหน้ามาตรฐาน (3.2.3)

4. กระบวนการขับลึกฟอสฟอรัส (Phosphorus Drive-in) ที่อุณหภูมิ 1100°C เป็นเวลา $3\frac{1}{2}$ ชั่วโมง ในบรรยากาศของก๊าซออกซิเจนที่มีอัตราการไหล 1200 ซีซี/นาที วิธีการนี้เรียกว่า Phosphorus drive-in (ซึ่งในกระบวนการนี้นอกจากจะทำให้เกิดส่วนแคโทดขึ้นแล้วจะทำให้เกิดชั้นของ SiO_2 เคลือบที่บริเวณผิวของซิลิคอนด้วย) และเข้าสู่กระบวนการแพร่อะตอมทองคำต่อไป

3.2.7.3 กระบวนการแพร่อะตอมทองคำ

เพื่อสร้างส่วนอินทรีนซิกหรือส่วน i ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้ไดโอดสามารถแสดงคุณสมบัติความต้านทานเชิงลบออกมาได้ โดยทำการแพร่อะตอมทองคำที่ด้านหลังของแผ่นซิลิคอน และเนื่องจากอะตอมของทองคำนั้นส่วนใหญ่จะแทรกตัวอยู่ระหว่างอะตอม ดังนั้นภายหลังจากการแพร่อะตอมทองคำต้องทำการ quenching คือการดึงแผ่นซิลิคอนที่เคลือบทองคำออกมาอย่างรวดเร็วเพื่อให้อะตอมของทองคำแทรกตัวกับอะตอมของซิลิคอน ได้มากคือ จะยังคงอยู่ที่ด้านหลังของแผ่นผลึก

ขั้นตอนการแพร่อะตอมทองคำทำได้ดังนี้คือ

1. วัดค่าพิคัดความต้านทานของแผ่น
2. เคลือบด้านหน้าแผ่นซิลิคอนด้วยน้ำยาไวแสงชนิดบวก AZ
3. อบแห้งที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 10 นาที
4. นำไปกัดออกไซด์ด้านหลังของแผ่นซิลิคอนโดยใช้สารละลาย Buffer
5. ใช้ Acetone เพื่อลอกน้ำยาไวแสงชนิดบวก AZ
6. ล้างในน้ำ DI และเป่าแห้ง
7. เคลือบทองคำบริสุทธิ์ที่ด้านหลังของแผ่นซิลิคอนด้วยเครื่องเคลือบโลหะในสุญญากาศ (Vacuum Evaporator) ที่บรรยากาศ 3×10^{-6} มม.ของปรอท(torr)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. นำแผ่นซิลิคอนเข้าเตาแพร่สารเจือที่อุณหภูมิ 900 °C เป็นเวลา $1\frac{1}{2}$ ชั่วโมง โดยมี

อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน 500 ซีซี/นาที

9. วัดค่าพิคัดความต้านทาน(ประมาณ 2.4-4.0 kΩ.cm)

10. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี(3.2.6) อีกครั้งเพื่อเปิดช่องออกไซด์เพื่อสร้างส่วนขั้วสัมผัส(contact) ในการเตรียมเคลือบอะลูมิเนียมเพื่อสร้างขั้วโลหะให้กับไดโอด

3.2.8 กระบวนการเคลือบอะลูมิเนียมเพื่อสร้างขั้วโลหะ(Metallization)

เป็นกระบวนการสร้างรอยสัมผัสโอห์มมิกให้แกขั้วสัมผัสต่างๆ โดยโลหะที่ใช้คืออะลูมิเนียมเนื่องจากมีราคาถูกและใช้งานได้ดี โดยในการศึกษาครั้งนี้นอกจากจะใช้เป็นขั้วสัมผัสแบบโอห์มมิกแล้วยังใช้สร้างส่วนพี(แอนโนด) ในขณะที่ทำการซินเตอร์ริง(sintering) ทำให้เกิดส่วนพีจากการอัดลยระหว่างอะลูมิเนียมและซิลิคอนขึ้น

ขั้นตอนการเคลือบอะลูมิเนียมทำได้ดังนี้คือ

1. การเคลือบชั้นอะลูมิเนียมในสุญญากาศด้วยเครื่องเคลือบโลหะในสุญญากาศ (Vacuum Evaporator) ที่บรรยากาศ 2×10^{-6} มม.ของปรอท(torr)

2. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี(สารไวแสงชนิดบวก) เพื่อสร้างลวดลายอะลูมิเนียม มีขั้นตอนดังนี้คือ

- อบแห้งเพื่อไล่ความชื้น ที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 15-20 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสง AZ โดยใช้เครื่องสปินเนอร์ความเร็ว 5000 รอบ/นาทีเป็นเวลา 20 วินาที
- อบแห้ง (prebake)ให้น้ำยาไวแสงแห้งที่อุณหภูมิ 85 °C เป็นเวลา 20 นาที
- ฉายแสงผ่านกระจกต้นแบบมาส์ก ด้วยอุปกรณ์ Mask Aligner เป็นเวลา12 วินาที
- ล้างด้วยน้ำยาล้างใน AZ-Developer 2 ครั้ง ครั้งละ 30 วินาที แล้วล้างในน้ำ DI 2 ครั้งและเป่าแห้ง
- อบแห้งที่อุณหภูมิ 85°C เป็นเวลา 30 นาที

3. การกัดชั้นอะลูมิเนียม (Aluminium Etching)

โดยกัดอะลูมิเนียมส่วนที่ไม่ต้องการออกในสารละลาย Al-Etching ที่อุณหภูมิประมาณ 40 ° C (ประมาณ 10-20 วินาที)

4. ล้างในน้ำ DI 2 ครั้งและเป่าแห้ง

5. การลอกชั้นสารไวแสงชนิดบวก AZ

ล้าง AZ ออกโดยใช้ Acetone 2 ครั้ง ครั้งละ 1 นาที

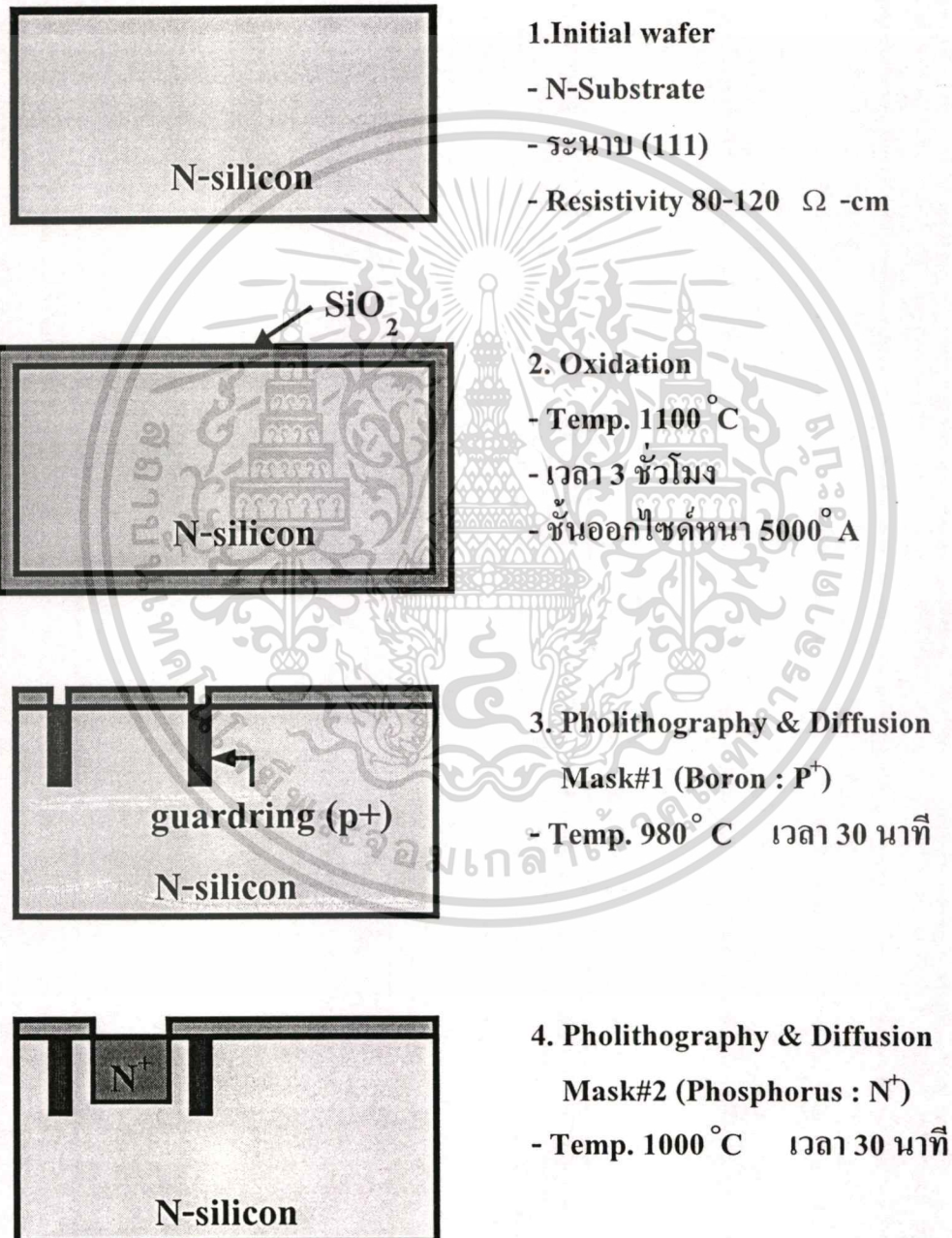
6. ล้างในน้ำ DI 2 ครั้งและเป่าแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

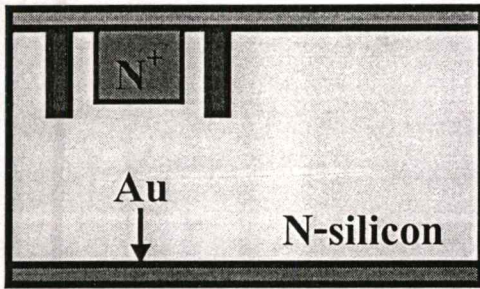
3.2.9 กระบวนการซินเตอร์ริง (Sintering)

เพื่อสร้างรอยสัมผัสโอห์มมิระหว่างอะลูมิเนียมและซิลิคอน และทำให้เกิดส่วนที่อัลลอยระหว่างอะลูมิเนียมและซิลิคอนขึ้นในขณะเดียวกันโดยนำแผ่นซิลิคอนไปไว้ในเตาแพร่สารในบรรยากาศของไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 500 ซีซี/นาที เป็นเวลา 12 นาที ที่อุณหภูมิ 510 °C

โดยลำดับขั้นตอนการสร้างซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอย แสดงดังรูปที่ 3.16

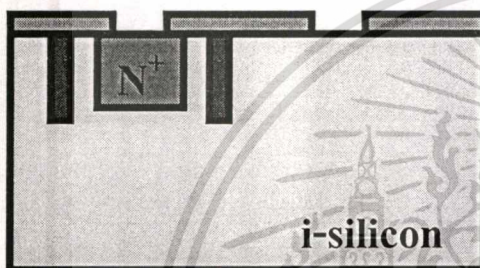


รูปที่ 3.16 กระบวนการสร้างซิลิคอนชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอย
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

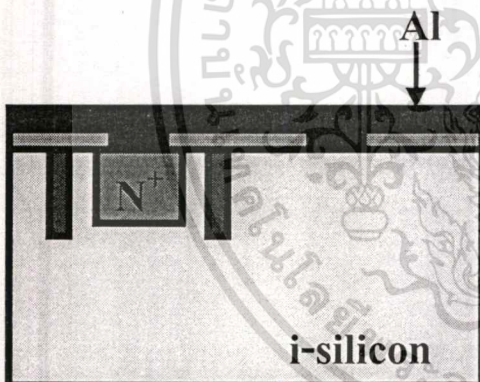


5. Gold Diffusion

- Temp. 900 °C เวลา 1.5 ชม.
- ไนโตรเจนบรรยากาศ N₂ 500 cc/min



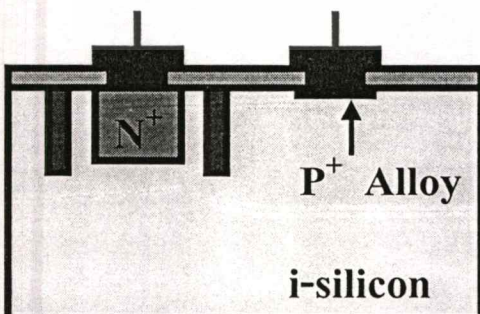
6. Photolithography Mask #3 (contact)



7. Metallization

- แบบ Vacuum Evaporation
ที่ความดัน 10⁻⁶ Torr

Cathode Anode



8. Photolithography Mask #4 (ลวดลายอลูมิเนียม)

9. Sintering (Alloying)

- Temp. 510 °C เวลา 12 นาที

รูปที่ 3.16(ต่อ) กระบวนการสร้างขั้วคอนชิต p⁺-i-n⁺ โดยวิธีการอัลลอย

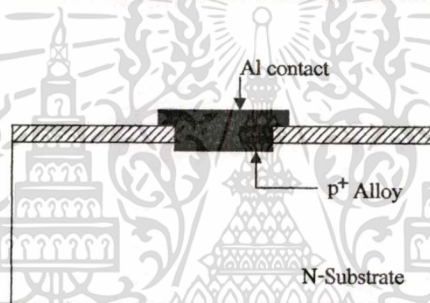
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

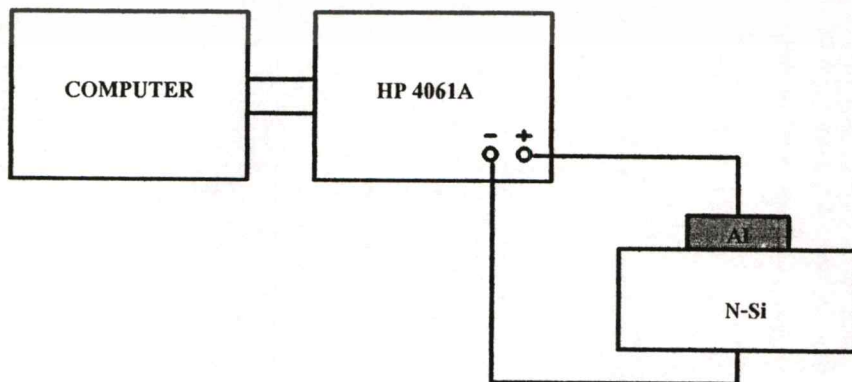
4.1 การศึกษารอยต่อพี-เอ็นโดยเทคนิคการอัลลอย

เพื่อศึกษาการเกิดรอยต่อพี-เอ็นที่สร้างจากเทคนิคการอัลลอยจึงได้ทำการสร้างรอยต่อพี-เอ็นจากฐานรองซิลิคอนชนิดเอ็นที่กักความต้านทาน 80-120 โอห์ม-เซนติเมตร และสร้างส่วนพีจากการอัลลอยระหว่างอะลูมิเนียมและซิลิคอนขณะทำการซินเตอร์ริง โดยทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ใช้ในการซินเตอร์ริงดังนี้คือ 300, 400, 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 นาที เพื่อแสดงให้เห็นว่าเกิดส่วนพีจากการอัลลอยระหว่างอะลูมิเนียมและซิลิคอนขึ้นจริง โดยไดโอดซึ่งเกิดจากรอยต่อพี-เอ็น โดยวิธีการอัลลอยนี้สามารถนำกระแสไฟฟ้าได้เช่นเดียวกับ ไดโอดที่เกิดจากการแพร่สารเจือตามปกติ โดยโครงสร้างของไดโอดที่เกิดจากการอัลลอยสามารถแสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ลักษณะ โครงสร้างของไดโอดที่เกิดจากการอัลลอย

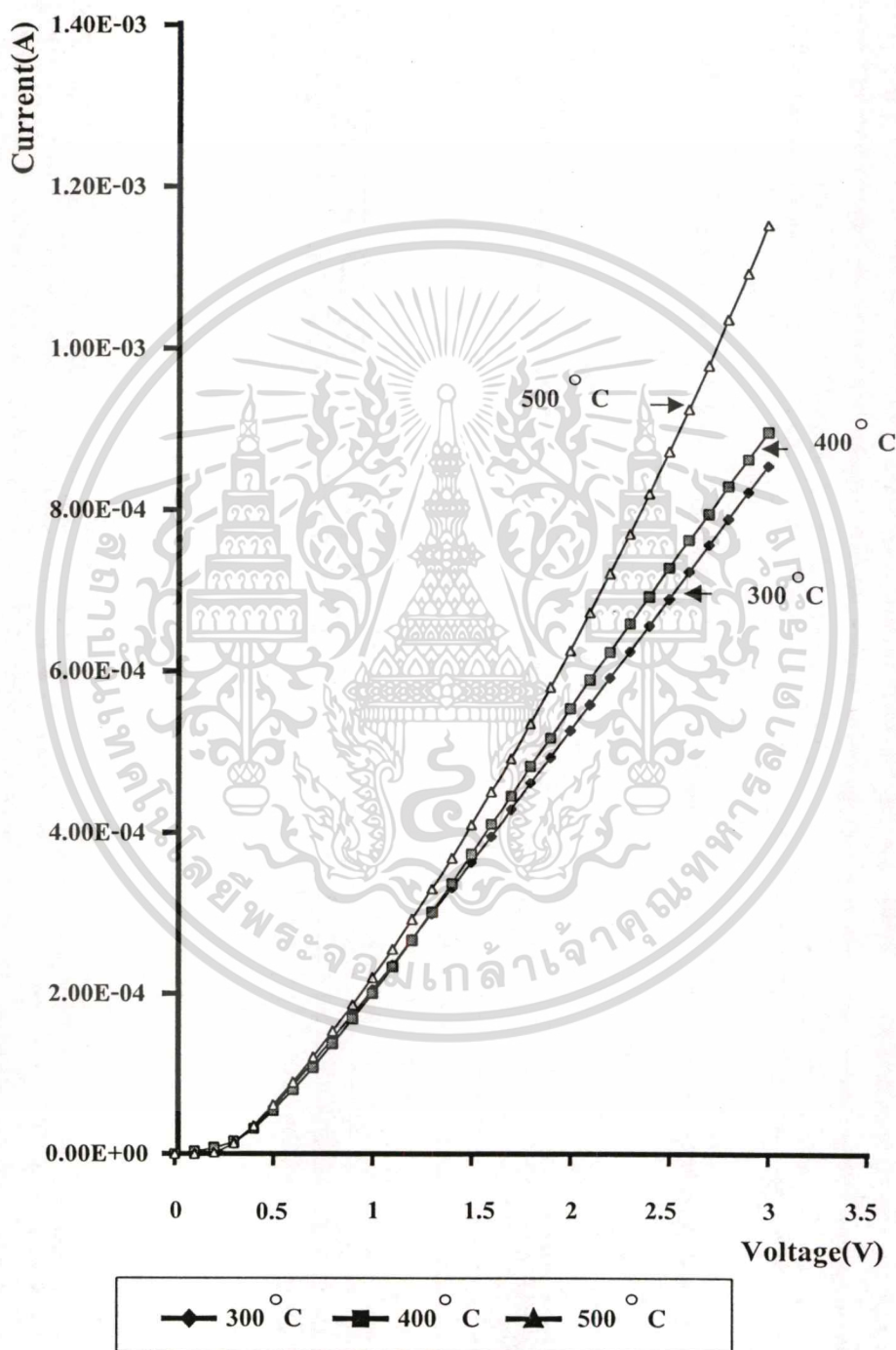
เพื่อศึกษาคุณสมบัติของไดโอดที่สร้างโดยใช้เทคนิคการอัลลอย จึงนำไดโอดที่สร้างไปทำการทดลองหาคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันจากเครื่อง HP 4061 A ซึ่งต่ออยู่กับคอมพิวเตอร์ในการควบคุมและเก็บข้อมูล ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งเครื่อง HP4061A จะให้แรงดันไบอัสกับชิ้นงานและวัดการเปลี่ยนแปลงของกระแส



รูปที่ 4.2 เครื่อง HP 4061 A ซึ่งต่ออยู่กับคอมพิวเตอร์ในการควบคุมและเก็บข้อมูล

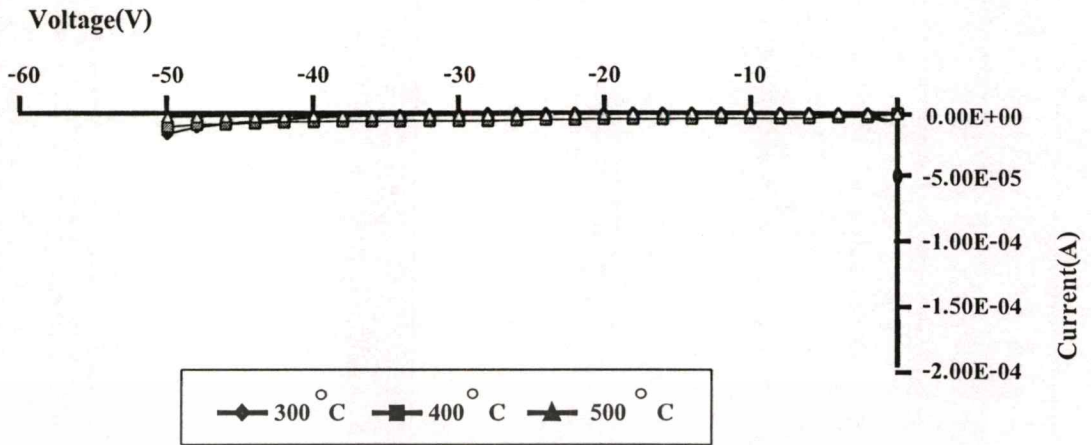
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่าขณะที่ไดโอดได้รับแรงดันไบอัสตรง ไดโอดที่ทำการซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิต่างกัน สามารถนำกระแสได้เช่นเดียวกัน โดยเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการซินเตอร์มีค่ามากขึ้นก็จะสามารถนำกระแสได้ดีขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.3 และขณะที่ไดโอดได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับแสดงดังรูปที่ 4.4 ซึ่งจากรูปจะเห็นว่ากระแสทางด้านไบอัสย้อนกลับมีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันขณะไดโอดได้รับแรงดันไบอัสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันขณะไดโอดได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าไดโอดซึ่งสร้างจากเทคนิคการอัลลอยนั้นสามารถแสดงคุณสมบัติเรกติไฟร์ได้เช่นเดียวกับไดโอดซึ่งสร้างจากวิธีการแพร่สารเจือ

4.2 ปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยกระแส (CCNR) ในซิลิคอน

ไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอย ($n^+ - i - Al$)

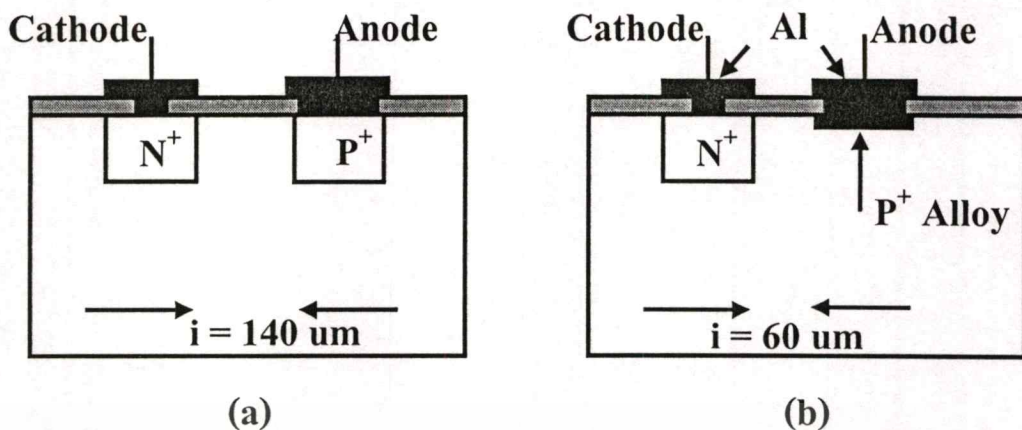
เพื่อศึกษาการเกิดปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยกระแส (CCNR) ในซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอย โดยส่วนที่เกิดจากการอัลลอยระหว่างอะลูมิเนียมและซิลิคอนชนิด i ขณะที่ทำการซินเตอร์ (sinter) เพื่อสร้างรอยสัมผัสให้กับขั้วแอโนดและแคโทด, ส่วนแคโทด n^+ เกิดจากการแพร่อะตอมสารเจือฟอสฟอรัสตามปกติ และส่วน i เกิดจากการแพร่อะตอมทองคำ ทำให้มีชั้นตอนที่ย่อยลงและประหัย โดยไดโอดที่สร้างโดยวิธีนี้สามารถแสดงคุณสมบัติสวิทชิงค์และความต้านทานเชิงลบได้เป็นอย่างดีในขณะที่ได้รับแรงดันไบอัสตรงค่าหนึ่งแม้ส่วน i ของไดโอดจะมีระยะสั้นเพียง 60 ไมโครเมตร ขณะที่ไดโอดที่สร้างด้วยวิธีการแพร่สารแบบเดิมจะสามารถแสดงปรากฏการณ์สวิทชิงค์ได้ชัดเจนเมื่อความยาวของส่วน i มีค่าสูงกว่า 140 ไมโครเมตร [14] โดยลักษณะโครงสร้างของไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ ที่สร้างด้วยวิธีการอัลลอย และการแพร่สารแบบเดิมแสดงได้ดังในรูปที่ 4.5

เมื่อไดโอดได้รับแรงดันไบอัสตรงค่าหนึ่งจะทำให้มีการฉีดพาหะคู่ควบ (double injection) ของอิเล็กตรอน และโฮลจากส่วน n^+ และ p^+ เข้าไปในส่วน i ทำให้ไดโอดชนิดนี้สามารถแสดงคุณสมบัติสวิทชิงค์ และความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยกระแส (CCNR : Current Controlled Negative Resistance) ได้ แต่สำหรับช่วงแรงดันไบอัสย้อนกลับ ไดโอดจะปิดกั้นไม่ให้กระแสไหล

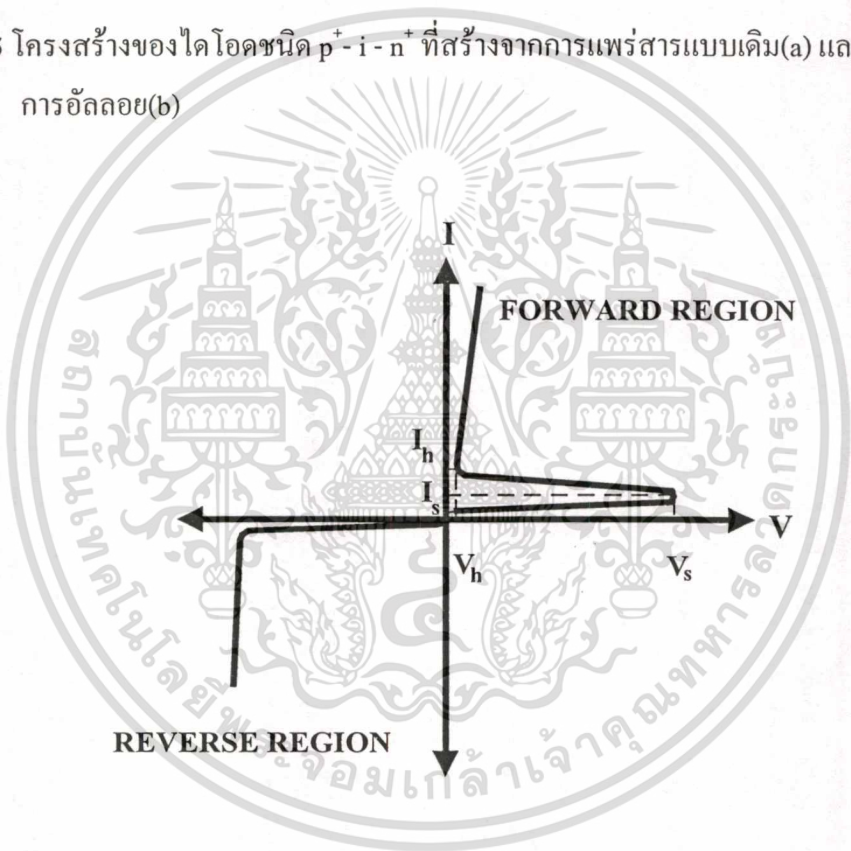
ผ่าน คุณสมบัติกระแสและแรงดันของไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ แสดงได้ดังในรูปที่ 4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการสงวนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออยู่ให้เห็นไปจะประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 โครงสร้างของไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ ที่สร้างจากการแพร่สารแบบเดิม(a) และจากเทคนิคการอัลลอย(b)



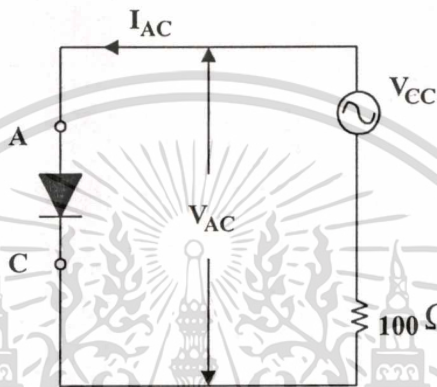
รูปที่ 4.6 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$

จากการเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างไดโอดแบบเก่าและแบบใหม่ จะเห็นได้ชัดว่า ไดโอดจากวิธีอัลลอย สามารถสร้างให้มีขนาดเล็กได้ดีกว่าจึงเหมาะที่จะพัฒนาและนำไปสร้างเป็น อุปกรณ์สวิตซิงค์ที่มีขนาดเล็กๆ ได้เป็นอย่างดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของแอนโอดและแคโทดเมื่อระยะ i มีค่าต่างๆ

ในการทดลองได้ออกแบบและสร้างไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ ซึ่งส่วน i มีระยะความยาวค่าต่างๆ กันตั้งแต่ 60 , 80 , 100 , 120 และ 140 ไมโครเมตรตามลำดับ เพื่อศึกษาคุณสมบัติของไดโอดที่มีโครงสร้างแตกต่างกัน เมื่อนำไดโอดที่สร้างได้ไปทำการทดลองหาคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันโดยใช้เครื่องวัดคุณสมบัติทรานซิสเตอร์ (transistor curve tracer) วงจรวัดแสดงดังรูปที่ 4.7

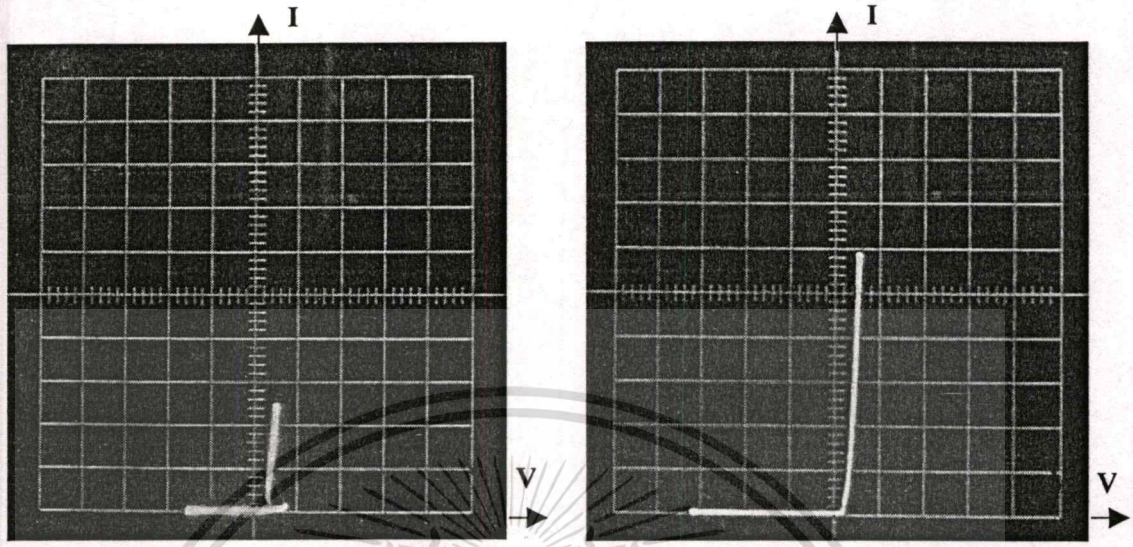


รูปที่ 4.7 วงจรวัดความสัมพันธ์ของกระแสแอนโอด (I_{AC}) และ แรงดันแอนโอด-แคโทด (V_{AC})

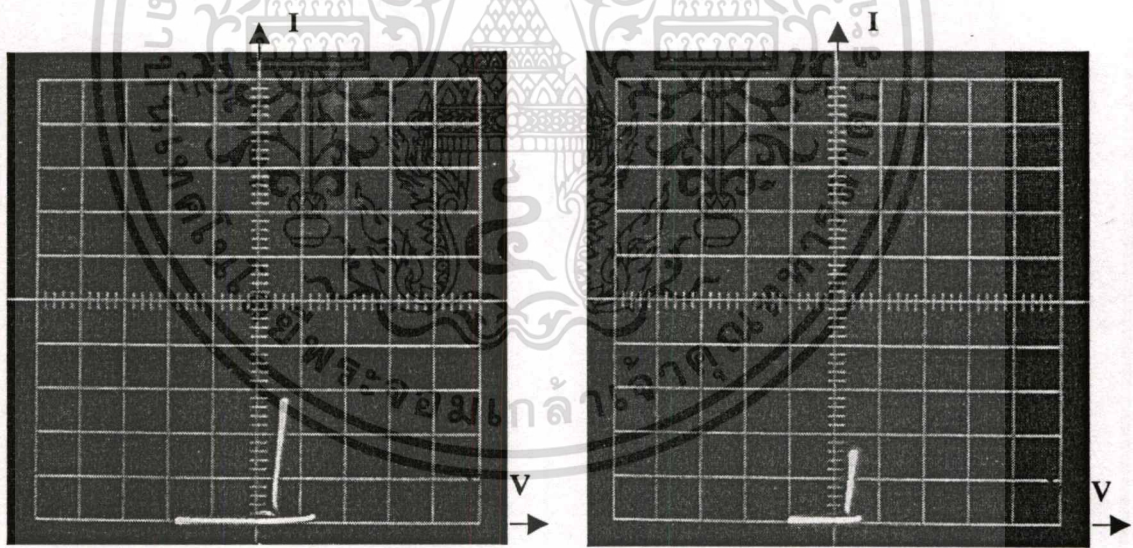
พบว่าขณะที่ไดโอดได้รับแรงดันไบอัสตรงค่าน้อย ($V < V_S$) อิเล็กตรอนจากส่วน n^+ และโฮลจากส่วน p^+ จะถูกฉีดเข้าไปในส่วน i ของไดโอด ซึ่งในส่วน i มีระดับแทรก (trapped level) ของอะตอมทองคำปรากฏอยู่ โฮลจะถูกจับโดยระดับแทรกทำให้มีเพียงอิเล็กตรอนจำนวนน้อยที่สามารถเคลื่อนที่ข้ามส่วน i ได้ กระแสที่ไหลผ่านไดโอดจึงมีค่าน้อยมาก แรงดันที่ตกคร่อมไดโอดจะเพิ่มขึ้นตามแรงดันไบอัสและเมื่อแรงดันไบอัสมีค่าใกล้เคียงกับแรงดันสวิทชิงค์ (V_S) กระแสจะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย จนเมื่อแรงดันไบอัสมีค่าเท่ากับแรงดันสวิทชิงค์ ($V = V_S$) ระดับแทรกในส่วน i ทุกระดับจะอิ่มตัวเนื่องจากจับโฮลไว้เต็มทุกระดับและกระแสขณะนี้มีค่า I_S (switching current) ดังนั้นเมื่อแรงดันไบอัสสูงกว่าแรงดันสวิทชิงค์ ($V > V_S$) จะทำให้เกิดปรากฏการณ์การฉีดพาหะคู่ควบในส่วน i (double injection in intrinsic region) กล่าวคืออิเล็กตรอนและโฮลสามารถเคลื่อนที่ข้ามส่วน i ได้ ทำให้มีการเพิ่มขึ้นของกระแสอย่างรวดเร็วในขณะที่ส่วน i ก็มีค่าความต้านทานลดลงทันที ดังนั้นแรงดันตกคร่อมไดโอดจะมีค่าลดลงขณะที่กระแสมีค่าเพิ่มขึ้น ไดโอดจึงแสดงควมต้านทานเชิงลบออกมา แรงดันที่ตกคร่อมไดโอดจะลดลงต่ำสุด เป็น V_h (holding voltage) เมื่อเพิ่มแรงดันไบอัสต่อไป แรงดันตกคร่อมไดโอดจะเพิ่มขึ้นพร้อมๆกับการเพิ่มขึ้นของกระแส ลักษณะดัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กล่าวเป็นคุณสมบัติสวิตซ์ของไดโอดชนิดนี้ ในกรณีย่านแรงดันไบอัสย้อนกลับไดโอดจะไม่ยอมให้กระแสไหลผ่านหรือไหลได้น้อยมาก ซึ่งแสดงดังในรูปที่ 4.8



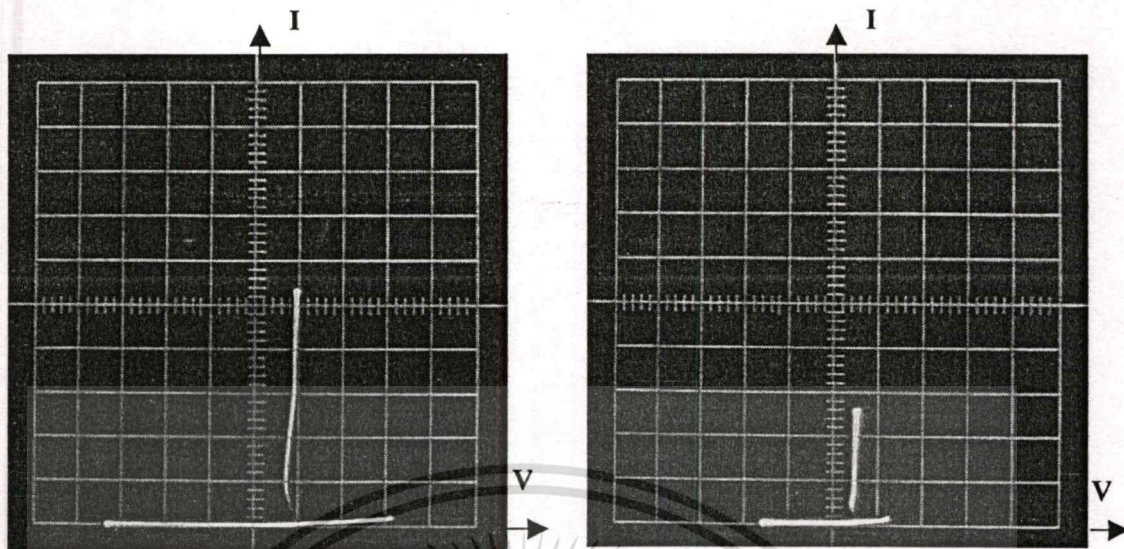
(a) $n^+ - i - Al : i = 60$ ไมโครเมตร $I = 0.5 \text{ mA / Division}, V = 20 \text{ V / Division}$
 (b) $p^+ - i - n^+ : i = 60$ ไมโครเมตร $I = 0.5 \text{ mA / Division}, V = 20 \text{ V / Division}$



(c) $n^+ - i - Al : i = 80$ ไมโครเมตร $I = 0.5 \text{ mA / Division}, V = 20 \text{ V / Division}$
 (d) $p^+ - i - n^+ : i = 80$ ไมโครเมตร $I = 0.5 \text{ mA / Division}, V = 20 \text{ V / Division}$

รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ แบบอัลลอยและแบบแพร่สารเจือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

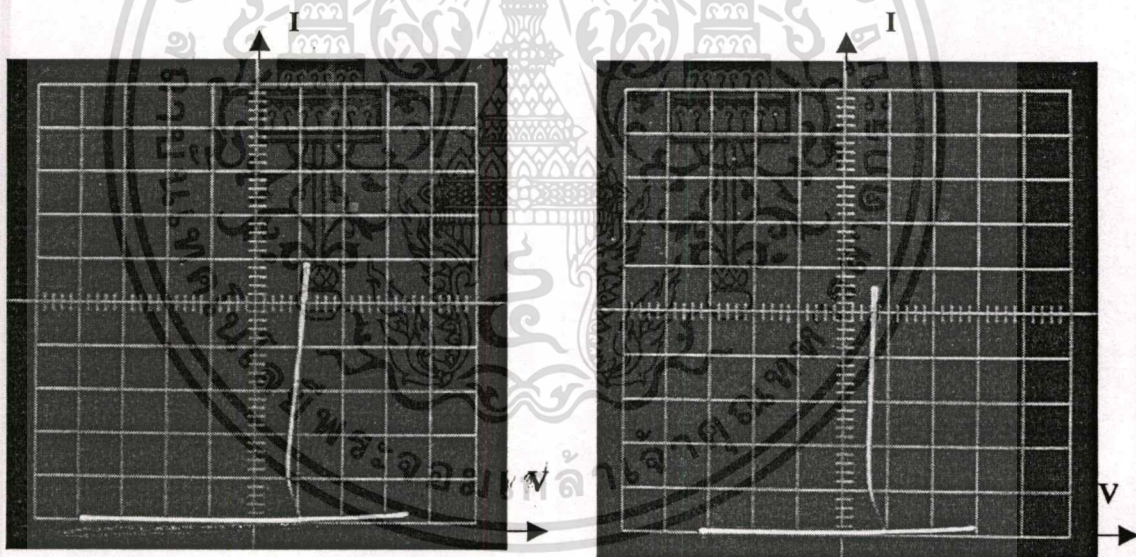


(e) $n^+ - i - Al$: $i = 100$ ไมโครเมตร

$I = 0.5 \text{ mA / Division}$, $V = 20 \text{ V / Division}$

(f) $p^+ - i - n^+$: $i = 100$ ไมโครเมตร

$I = 0.5 \text{ mA / Division}$, $V = 20 \text{ V / Division}$



(g) $n^+ - i - Al$: $i = 120$ ไมโครเมตร

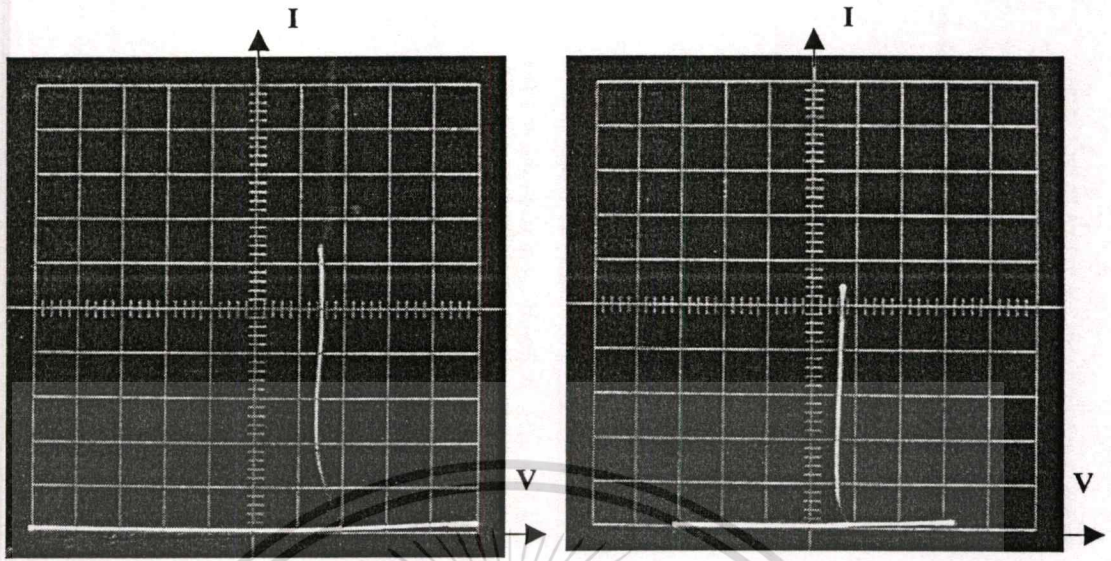
$I = 0.5 \text{ mA / Division}$, $V = 20 \text{ V / Division}$

(h) $p^+ - i - n^+$: $i = 120$ ไมโครเมตร

$I = 0.5 \text{ mA / Division}$, $V = 20 \text{ V / Division}$

รูปที่ 4.8(ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(i) $n^+ - i - Al : i = 140$ ไมโครเมตร

$I = 0.5 \text{ mA / Division}$, $V = 20 \text{ V / Division}$

(j) $p^+ - i - n^+ : i = 140$ ไมโครเมตร

$I = 0.5 \text{ mA / Division}$, $V = 20 \text{ V / Division}$

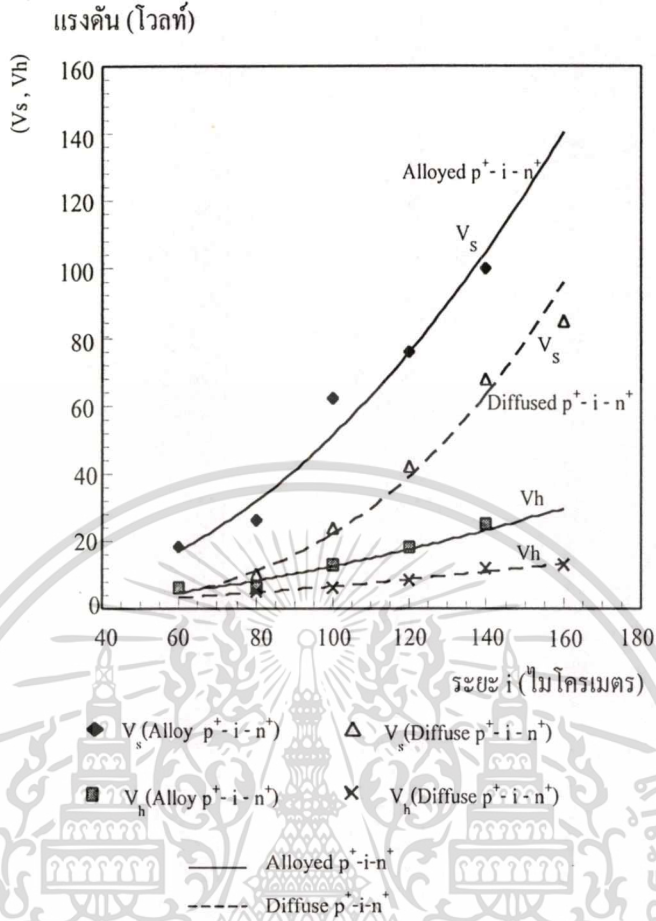
รูปที่ 4.8(ต่อ)

จากผลการทดลองพบว่าไดโอดที่มีขนาดของระยะ i ต่างๆ กัน จะให้ค่าแรงดัน V_s และ V_h ที่แตกต่างกัน โดยเมื่อระยะ i เพิ่มขึ้นแรงดัน V_s และ V_h จะมีค่าสูงขึ้น สำหรับกระแสสวิทชิงค์ (I_s) ของไดโอดซึ่งมีระยะ i ที่ต่างกันต่างก็มีค่าใกล้เคียงกันคือ ประมาณ 0.04 มิลลิแอมป์แปร์ ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติของ CCNR นอกจากนี้สิ่งสำคัญที่ได้จากผลการทดลองก็คือ ไดโอดที่มีระยะ i สั้นเพียง 60 ไมโครเมตรสามารถแสดงคุณสมบัติสวิทชิงค์และความต้านทานเชิงลบออกมาได้อย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 4.8 (a) ซึ่งปกติไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ ที่สร้างด้วยวิธีการแพร่สารแบบเดิมซึ่งมีระยะ i 60 ไมโครเมตร จะไม่แสดงคุณสมบัติสวิทชิงค์แต่จะแสดงคุณสมบัติคล้ายกับไดโอดชนิดรอยต่อพี - เอ็นทั่วไป ดังแสดงในรูปที่ 4.8 (b)

4.2.2 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่าง V_s , V_h กับระยะ i ของซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$

โดยวิธีการอัลลอยและแพร่สารเจือ

ความสัมพันธ์ระหว่างระยะความยาวของส่วน i กับแรงดัน V_s และ V_h ของไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ แบบอัลลอยและแบบที่สร้างด้วยวิธีการแพร่สารแบบเดิมถูกนำมาเขียนแสดงและเปรียบเทียบได้ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง V_s , V_h กับระยะ i ของไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ แบบอัลลอย และแบบแพร่สารเจือ

จากกราฟในรูปที่ 4.9 จะเห็นว่า การเปลี่ยนแปลงของแรงดัน V_s , V_h กับระยะ i ของไดโอดทั้งสองแบบมีแนวโน้มที่เหมือนกันโดยจะเพิ่มขึ้นกับระยะ i โดยไดโอดจะสวิทช์ที่กระแสสวิทช์คงที่ค่าๆเดียวกันซึ่งเป็นคุณสมบัติของปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยกระแส และที่ความยาวของ i ซึ่งเท่าๆ กัน แรงดัน V_s และ V_h ของไดโอดชนิดอัลลอยจะมีค่าสูงกว่าของไดโอดชนิดแพร่สารเจือ เนื่องจากผลของรอยต่อพี-เอ็นชนิดอัลลอย ซึ่งส่วน p^+ ของไดโอดเป็นอัลลอยของ Al - Si ทำให้ต้องใช้ค่าแรงดันไบอัสที่สูงกว่าไดโอดซึ่งส่วน p^+ เกิดจากการแพร่สารเจือ ดังนั้นเมื่อพิจารณาขนาดของส่วน i ที่เท่ากันไดโอดแบบอัลลอยจึงให้แรงดันสวิทช์ที่สูงกว่าของไดโอดแบบแพร่สารเจือ และมีผลทำให้ไดโอดแบบอัลลอยแสดงคุณสมบัติสวิทช์ได้แม้ระยะ i มีขนาดสั้นเพียง 60 ไมโครเมตร และในการทดลองนี้ส่วน p^+ เป็นอัลลอยระหว่าง Al - Si โดยทำการสร้างที่อุณหภูมิ 510 °C ความหนาแน่นของอะลูมิเนียมในซิลิคอนมีค่าราว 10^{18} อะตอม/ลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งสูงมากพอที่จะทำให้ซิลิคอนเป็นชนิด p^+ ดังนั้นโครงสร้างของไดโอดจึง

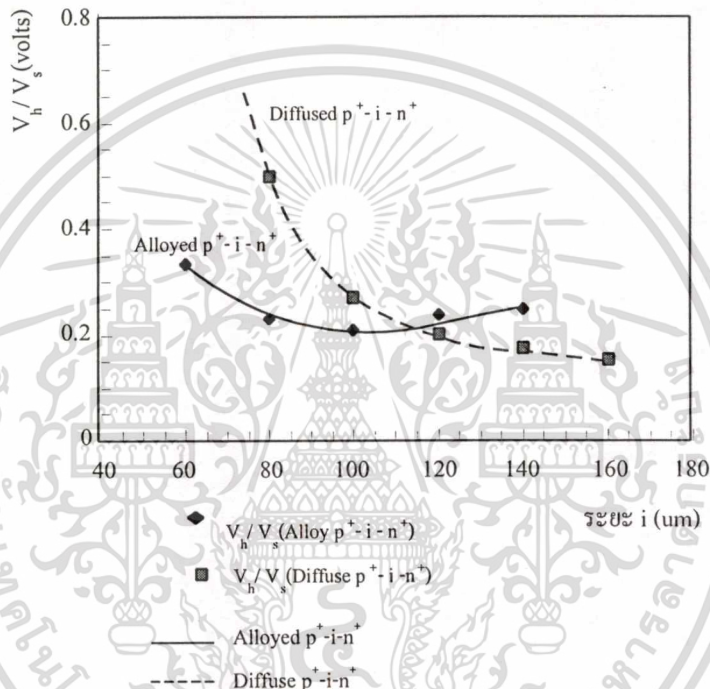
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็น $p^+ - i - n^+$ เหมือนกับโครงสร้างของไดโอดที่สร้างด้วยการแพร่สารทั้งส่วน n^+ และ p^+ ไดโอดชนิดนี้จึงสามารถแสดงคุณสมบัติสวิตซิงค์และความต้านทานเชิงลบได้

4.2.3 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่าง V_h/V_s กับระยะ i ของซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$

โดยวิธีการอัลลอยและแพร่สารเจือ

เมื่อทำการหาอัตราส่วนของ V_h กับ V_s ของไดโอดทั้งสองแบบมาเขียนเปรียบเทียบจะได้ดังตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง V_h/V_s กับระยะ i ของไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ แบบอัลลอยและแบบแพร่สารเจือ

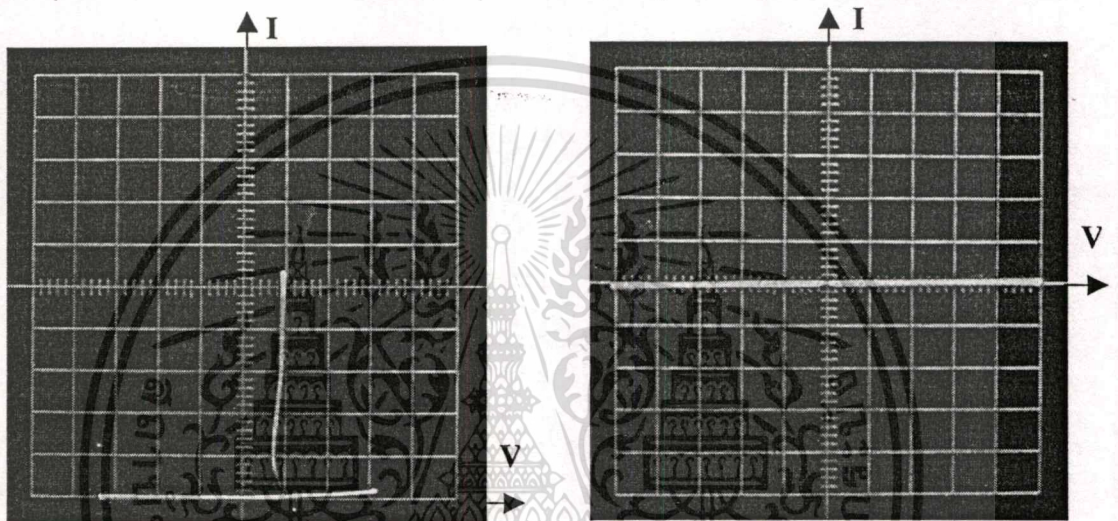
ซึ่งจะเห็นได้ชัดว่าไดโอดทั้งสองแบบจะแสดงคุณสมบัติสวิตซิงค์ได้ดีเมื่อระยะ i มีขนาดเพิ่มขึ้น แต่ในกรณีที่ระยะ i มีค่าต่ำกว่า 120 ไมโครเมตร ไดโอดแบบอัลลอยจะแสดงคุณสมบัติสวิตซิงค์ได้ดีกว่า และสำหรับกรณีที่ระยะ i มีค่าสูงกว่า 120 ไมโครเมตร ไดโอดแบบแพร่สารเจือจะให้คุณสมบัติที่ดีกว่าทำให้มีโอกาสที่พัฒนาไดโอดชนิดนี้ให้มีขนาดเล็กและเป็นอุปกรณ์สวิตซิงค์ขนาดเล็กแบบต่างๆได้ เช่น ซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ ที่มีเกทควบคุมการทำงาน (IG $p^+ - i - n^+$ diode) สำหรับใช้ในงานไมโครอิเล็กทรอนิกส์ได้

4.2.4 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$

โดยวิธีการอัลลอย ($n^+ - i - Al$) และ $p^+ - i - p^+$ โดยวิธีการอัลลอย ($p^+ - i - al$)

ในการทดลองได้ออกแบบและสร้างซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - p^+$ โดยวิธีการอัลลอย ซึ่งส่วนแอโนด 1 สร้างจากการแพร่สารเจือชนิดพีและส่วนแอโนด 2 สร้างจากการอัลลอยโดยมีกัณฑ์ริงชนิดพีล้อมรอบขนาด 20 ไมโครเมตร และทำการเปลี่ยนแปลงระยะระหว่างส่วนแอโนด 1 และแอโนด 2 (ส่วน i) ตั้งแต่ 60-120 ไมโครเมตร

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อส่วนแอโนดเป็นชนิดพีหรือพีอัลลอยไดโอดจะไม่สามารถแสดงคุณสมบัติสวิทชิงค์และความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยกระแสออกมาได้ดังรูปที่ 4.11



(a) $n^+ - i - Al$; $i = 100$ ไมโครเมตร

(b) $p^+ - i - al$; $i = 100$ ไมโครเมตร

$I = 0.5 \text{ mA / Division}$, $V = 20 \text{ V / Division}$

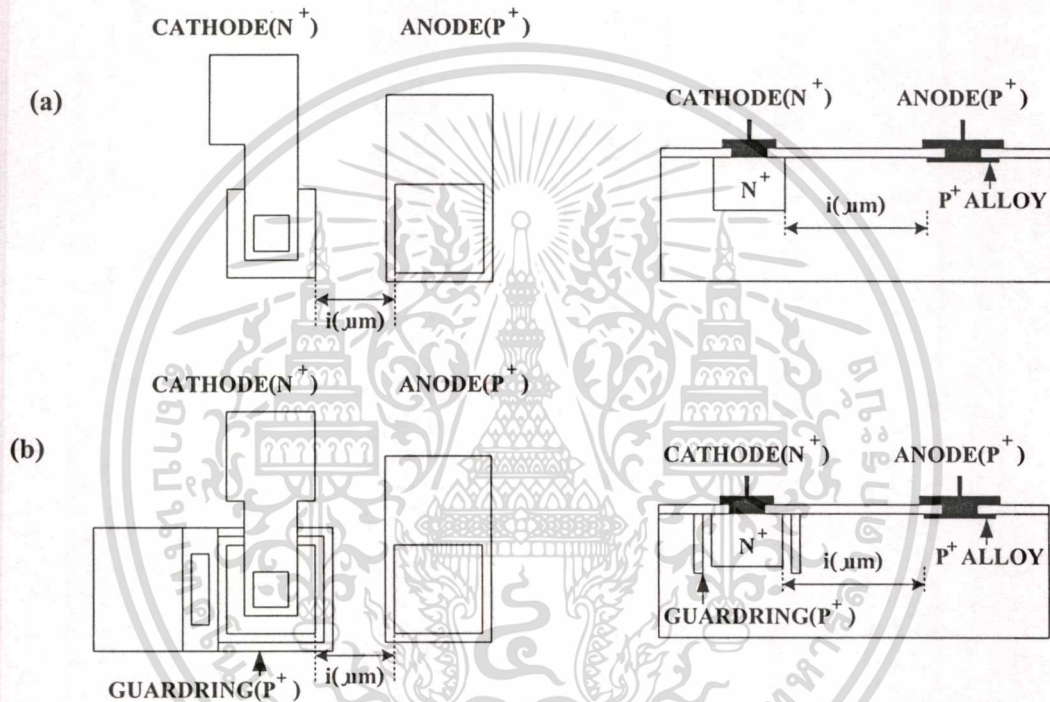
$I = 0.5 \text{ mA / Division}$, $V = 20 \text{ V / Division}$

รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ แบบอัลลอย (a) และ $p^+ - i - p^+$ โดยวิธีการอัลลอย (b)

4.3 การศึกษาผลของกัณฑ์ริงที่มีผลต่อการเกิดความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยกระแส (CCNR)

เพื่อศึกษาถึงผลของการสร้างกัณฑ์ริงต่อการเกิดปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบและคุณสมบัติสวิทชิงค์ในไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอย เมื่อส่วนแคโทดไม่มีกัณฑ์ริงล้อมรอบ, แคโทดมีกัณฑ์ริงขนาด 10 ไมโครเมตร และ 20 ไมโครเมตรล้อมรอบตามลำดับ จากการทดลองจะเห็นได้ชัดว่าไดโอดซึ่งส่วนแคโทดมีกัณฑ์ริงล้อมรอบนั้นสามารถแสดงคุณสมบัติสวิทชิงค์และความต้านทานเชิงลบได้เป็นอย่างดีและสอดคล้องกับคุณสมบัติ CCNR คือไดโอดจะสวิทชิงค์ที่ค่ากระแส สวิทชิงค์ (I_S) ต่ำกว่ากัณฑ์ที่ประมาณ 0.017 มิลลิแอมแปร์ ในขณะที่ไดโอดซึ่งส่วนแคโทดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่มีกัณฑ์ริงล้อมรอบนั้นแสดงคุณสมบัติสวิตซิ่งและความต้านทานเชิงลบได้ไม่ชัดเจนและไม่สอดคล้องกับคุณสมบัติ CCNR คือไดโอดสวิตซิ่งที่ค่ากระแสสวิตซิ่งที่ไม่แน่นอน ดังนั้น กัณฑ์ริงจึงเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้ไดโอดสามารถแสดงคุณสมบัติสวิตซิ่งและความต้านทานเชิงลบได้แม้ส่วน i ของไดโอดจะมีระยะสั้นๆ โดยไดโอดซึ่งส่วนแคโทดมีกัณฑ์ริงขนาด 10 ไมโครเมตรล้อมรอบนั้นสามารถแสดงคุณสมบัติสวิตซิ่งและความต้านทานเชิงลบได้แม้ส่วน i จะมีระยะเพียง 50 ไมโครเมตร[15-16] จึงน่าจะเป็นข้อดีในการพัฒนาไดโอดให้เป็นอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็กได้ต่อไป โดยลักษณะโครงสร้างของไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอย ทั้งสามแบบแสดงได้รูปที่ 4.12



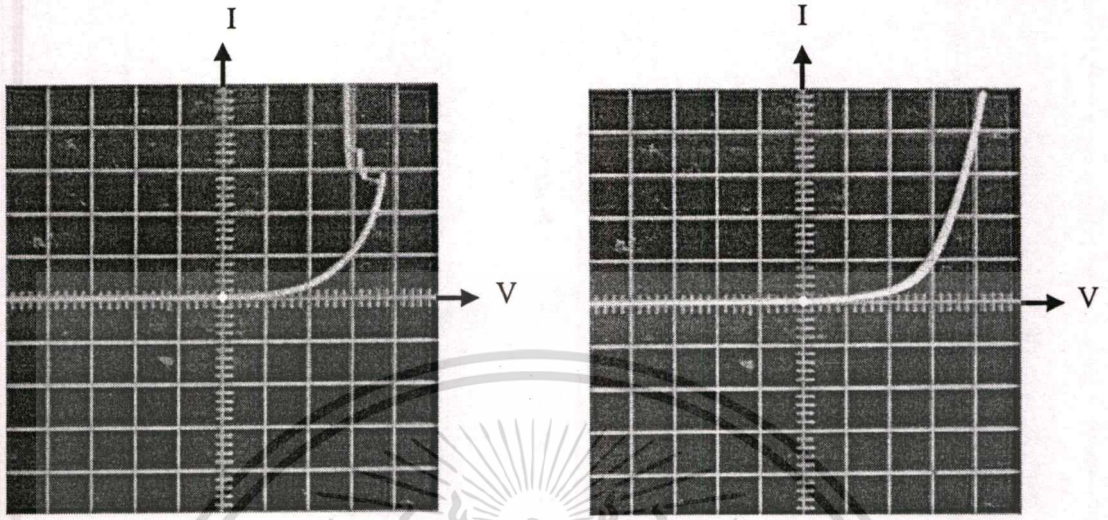
รูปที่ 4.12 โครงสร้างของซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอยเมื่อส่วนแคโทดไม่มีกัณฑ์ริง (a) และมีกัณฑ์ริงล้อมรอบ(b)

4.3.1 คุณสมบัติของซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอยเมื่อส่วนแคโทดไม่มีกัณฑ์ริงล้อมรอบ, มีกัณฑ์ริงขนาด 10 และ 20 ไมโครเมตรล้อมรอบที่ระยะมีค่าต่างๆ

ในการทดลองได้ออกแบบ และสร้างซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอย โดยได้ออกแบบให้ส่วนแคโทดไม่มีกัณฑ์ริงล้อมรอบ โดยส่วน i มีความยาวค่าต่างๆ กันตั้งแต่ 20 , 40 , 60 , 80 , 100 , 120 , 160 , 180 ไมโครเมตร , ส่วนแคโทดมีกัณฑ์ริงขนาด 10 ไมโครเมตรล้อมรอบ โดยส่วน i มีความยาวค่าต่างๆ กันตั้งแต่ 50 , 60 , 80 , 100 , 120 , 140 , 150 ไมโครเมตร และ ส่วนแคโทดมีกัณฑ์ริงขนาด 20 ไมโครเมตร โดยส่วน i มีความยาวค่าต่างๆ กัน ตั้งแต่ 60 , 80 , 100 , 120 , 140 , 160 ไมโครเมตร ตามลำดับ เพื่อศึกษาถึงคุณสมบัติของซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการอัลลอยทั้งสามแบบข้างต้นได้ใช้เครื่องวัดคุณสมบัติทรานซิสเตอร์ (transistor curve tracer) ในการตรวจสอบคุณสมบัติไฟฟ้า ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันแสดงได้ดังรูปที่ 4.13

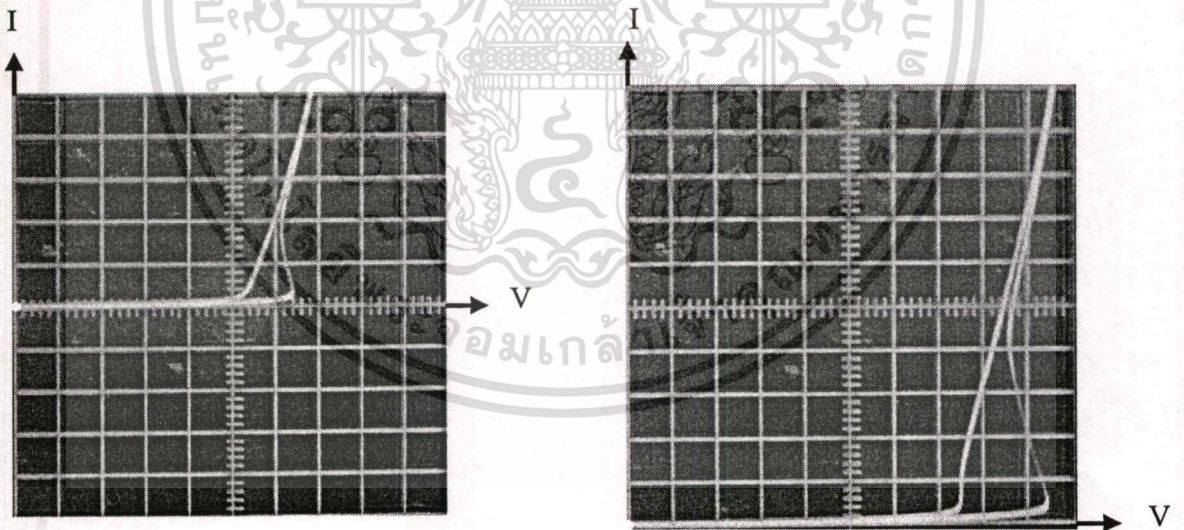


$I = 0.5 \text{ mA / Division}, V = 1 \text{ V / Division}$

(a) ไม่มีการรั่วตรงล้อมรอบ, $i = 20 \mu\text{m}$

$I = 0.05 \text{ mA / Division}, V = 2 \text{ V / Division}$

(b) ไม่มีการรั่วตรงล้อมรอบ, $i = 60 \mu\text{m}$



$I = 0.02 \text{ mA / Division}, V = 1 \text{ V / Division}$

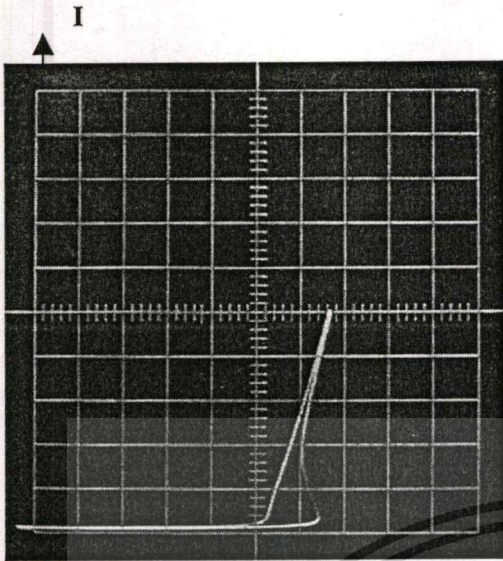
(c) มีการรั่วขนาด $10 \mu\text{m}$, $i = 50 \mu\text{m}$

$I = 0.02 \text{ mA / Division}, V = 1 \text{ V / Division}$

(d) มีการรั่วขนาด $20 \mu\text{m}$, $i = 60 \mu\text{m}$

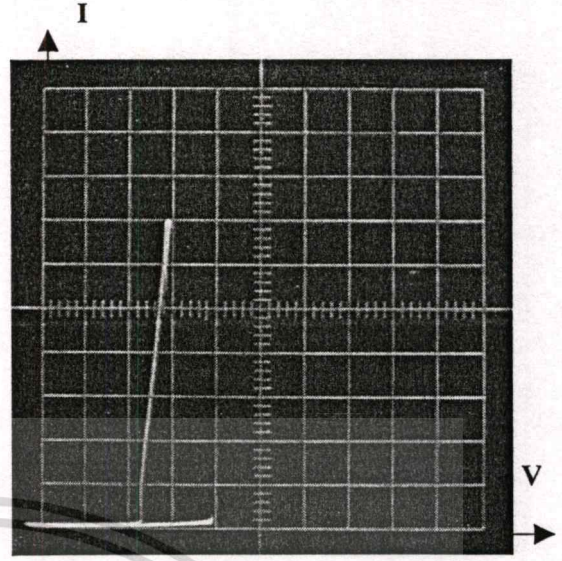
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอยเมื่อส่วนแคโทดไม่มีการรั่วและมีการรั่วขนาด 10 และ 20 ไมโครเมตรล้อมรอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



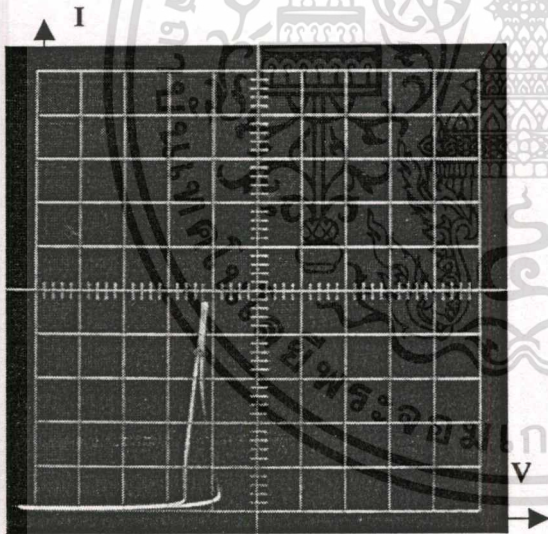
$I = 0.05 \text{ mA / Division}$, $V = 2 \text{ V / Division}$

(e) มีกั้วครึ่งขนาด $10 \mu\text{m}$, $i = 80 \mu\text{m}$



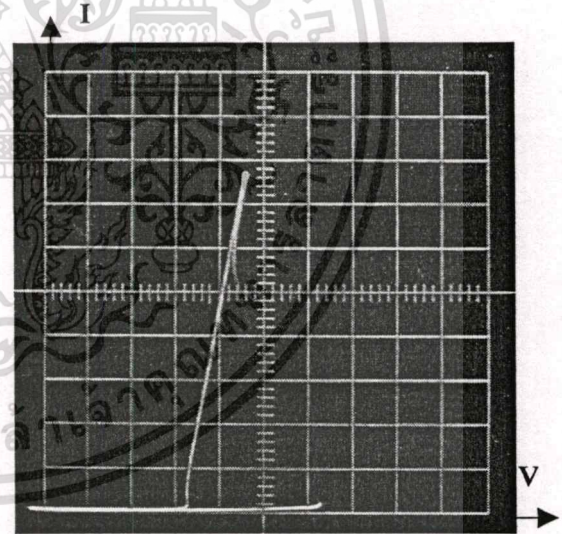
$I = 0.05 \text{ mA / Division}$, $V = 5 \text{ V / Division}$

(f) มีกั้วครึ่งขนาด $20 \mu\text{m}$, $i = 80 \mu\text{m}$



$I = 0.05 \text{ mA / Division}$, $V = 5 \text{ V / Division}$

(g) มีกั้วครึ่งขนาด $10 \mu\text{m}$, $i = 100 \mu\text{m}$

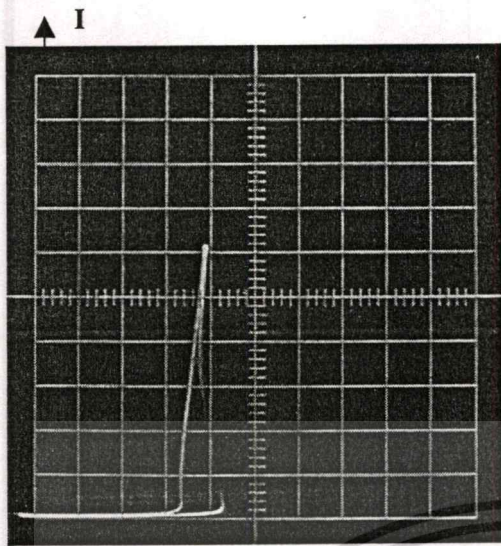


$I = 0.1 \text{ mA / Division}$, $V = 5 \text{ V / Division}$

(h) มีกั้วครึ่งขนาด $20 \mu\text{m}$, $i = 100 \mu\text{m}$

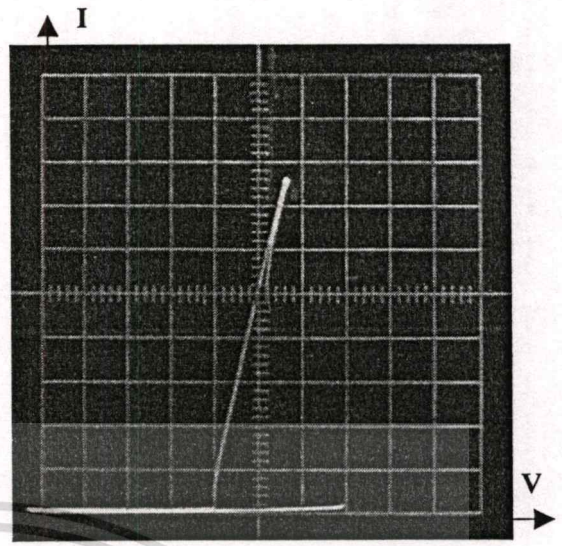
รูปที่ 4.13(ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



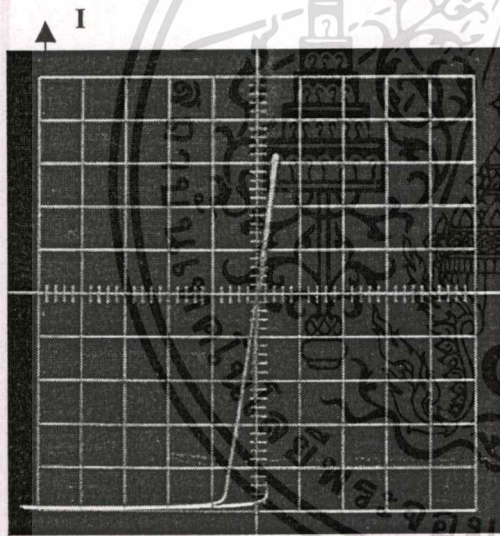
$I = 0.05 \text{ mA / Division}$, $V = 5 \text{ V / Division}$

(i) มีกัร่ดริงขนาด $10 \mu\text{m}$, $i = 120 \mu\text{m}$



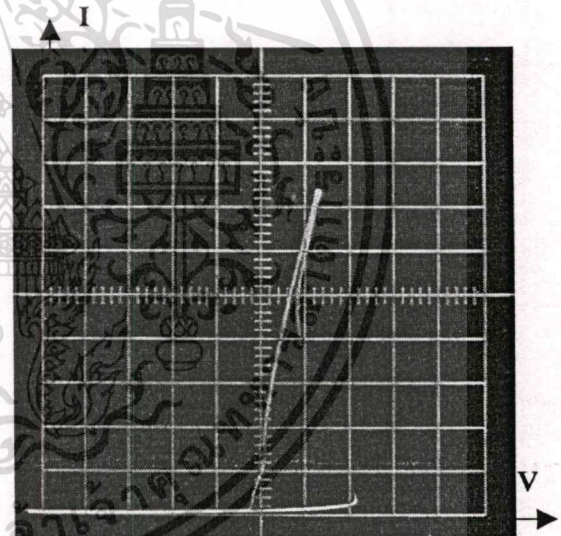
$I = 0.1 \text{ mA / Division}$, $V = 5 \text{ V / Division}$

(j) มีกัร่ดริงขนาด $20 \mu\text{m}$, $i = 120 \mu\text{m}$



$I = 0.05 \text{ mA / Division}$, $V = 5 \text{ V / Division}$

(k) มีกัร่ดริงขนาด $10 \mu\text{m}$, $i = 140 \mu\text{m}$

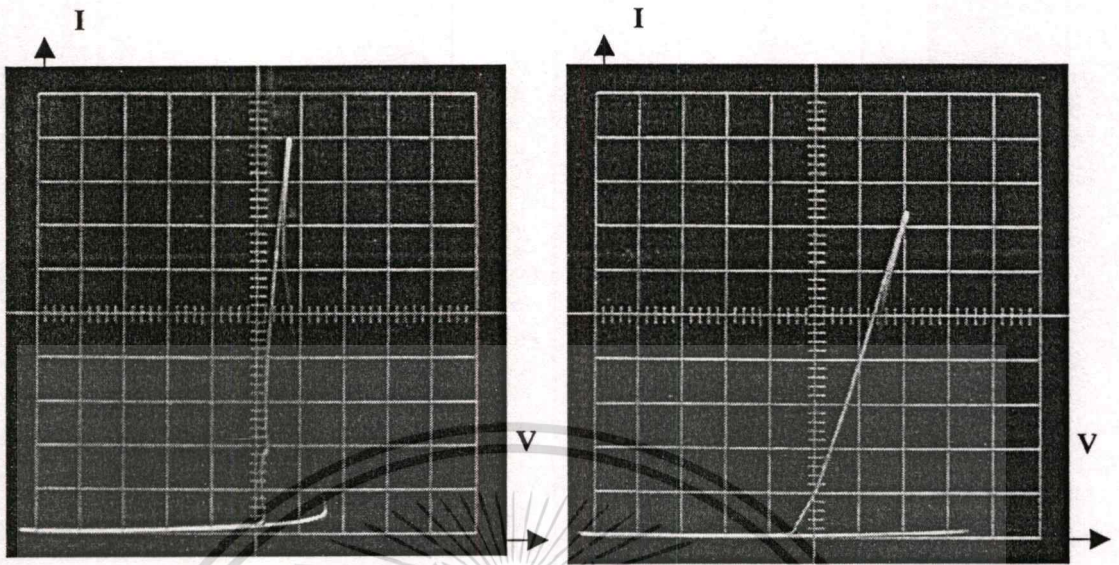


$I = 0.1 \text{ mA / Division}$, $V = 5 \text{ V / Division}$

(l) มีกัร่ดริงขนาด $20 \mu\text{m}$, $i = 140 \mu\text{m}$

รูปที่ 4.13(ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



$I = 0.05 \text{ mA / Division}$, $V = 5 \text{ V / Division}$

(m) มีกัร่ดรงขนาด $10 \text{ }\mu\text{m}$, $i = 150 \text{ }\mu\text{m}$

$I = 0.1 \text{ mA / Division}$, $V = 5 \text{ V / Division}$

(n) มีกัร่ดรงขนาด $20 \text{ }\mu\text{m}$, $i = 160 \text{ }\mu\text{m}$

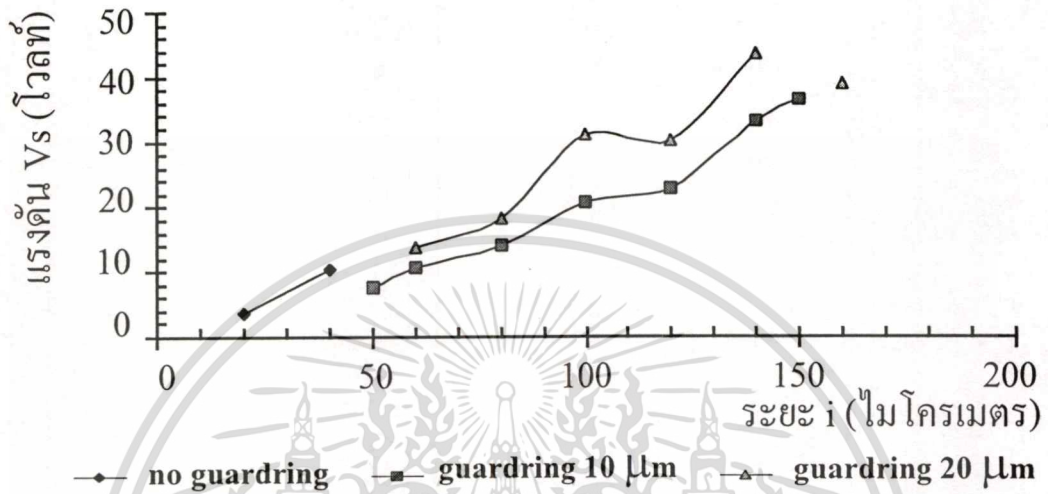
รูปที่ 4.13(ต่อ)

จากผลการทดลองสามารถแสดงความสัมพันธ์ของค่า V_s , I_s ของซีลิกอนไดโอดชนิด p^+i-n^+ โดยวิธีการอัลลอยทั้งสามโครงสร้างเทียบกับระยะความยาวของส่วน i แสดงได้ดังรูปที่ 4.14, 4.15 และ 4.16 จากรูปที่ 4.14 จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน V_s (switching voltage) กับระยะความยาวส่วน i ของไดโอดทั้งสามโครงสร้างนั้นมีแนวโน้มที่เหมือนกันโดยจะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะความยาวส่วน i เพิ่มขึ้น และพบว่าที่ระยะความยาวส่วน i ค่าเดียวกัน ค่าของแรงดันสวิทชิงค์ (V_s) ของซีลิกอนไดโอดซึ่งส่วนแคโทดมีกัร่ดรงขนาด 20 ไมโครเมตรล้อมรอบนั้นจะมีค่าสูงกว่าไดโอดโครงสร้างอื่น ส่วนค่าแรงดัน V_h (holding voltage) ของไดโอดจะมีแนวโน้มเช่นเดียวกัน

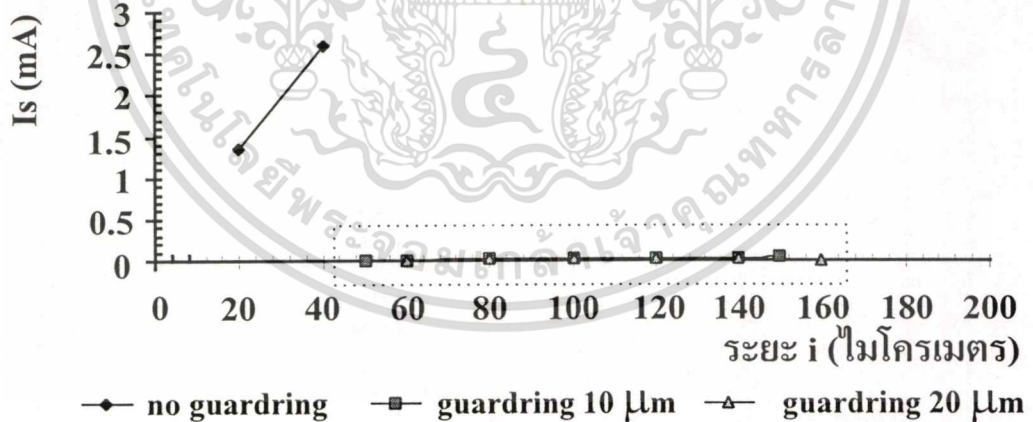
จากรูปที่ 4.15 และ 4.16 จะเห็นว่าค่ากระแสสวิทชิงค์ (I_s : switching current) ของไดโอดเมื่อส่วนแคโทดมีกัร่ดรงขนาด 10 และ 20 ไมโครเมตรล้อมรอบนั้น ที่ระยะความยาวส่วน i ค่าต่างๆ กันนั้นต่างก็มีค่าใกล้เคียงกันคือประมาณ 0.017 มิลลิแอมแปร์ ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติของ CCNR ในขณะที่ไดโอดซึ่งส่วนแคโทดไม่มีกัร่ดรงล้อมรอบนั้นที่ระยะความยาวส่วน i 20 และ 40 ไมโครเมตร นั้นค่า I_s มีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งไม่สอดคล้องกับคุณสมบัติของ CCNR และที่ระยะความยาวส่วน i ค่าอื่นๆ ก็ไม่สามารถเห็นการเกิดความต้านทานเชิงลบได้ เมื่อทำการพิจารณาค่ากระแสของไดโอดเมื่อได้รับแรงดันไบอัสที่ค่าต่างๆ โดยพิจารณาก่อนไดโอดจะสวิทชิงค์ที่ระยะความยาวส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

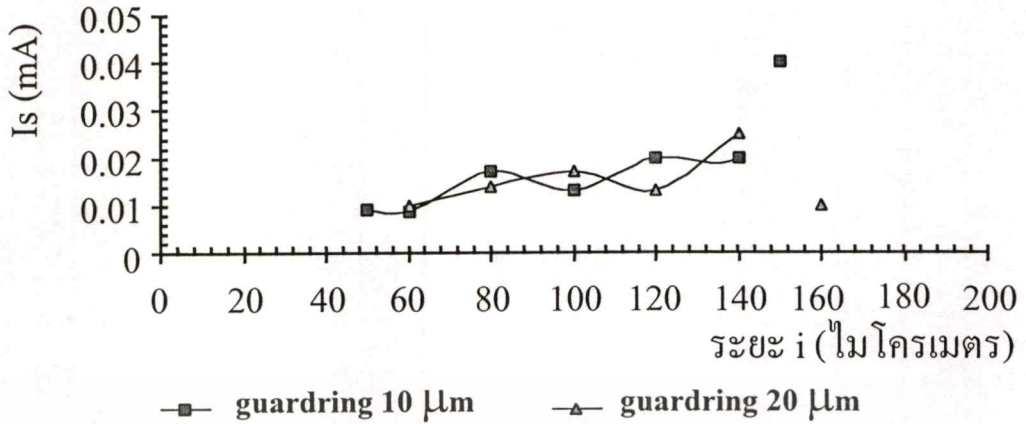
i เท่ากับ 60 ไมโครเมตร จากรูปที่ 4.17 พบว่าเมื่อแรงดันไบอัสเพิ่มขึ้นค่ากระแสของไดโอดซึ่งส่วนแคโทดไม่มีการคริงจะเพิ่มขึ้นอย่างมากในขณะที่ไดโอดซึ่งส่วนแคโทดมีการคริงล้อมรอบค่ากระแสจะค่อนข้างคงที่หรือเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย และที่ระยะ i ค่าอื่นๆ ก็มีแนวโน้มเช่นเดียวกัน



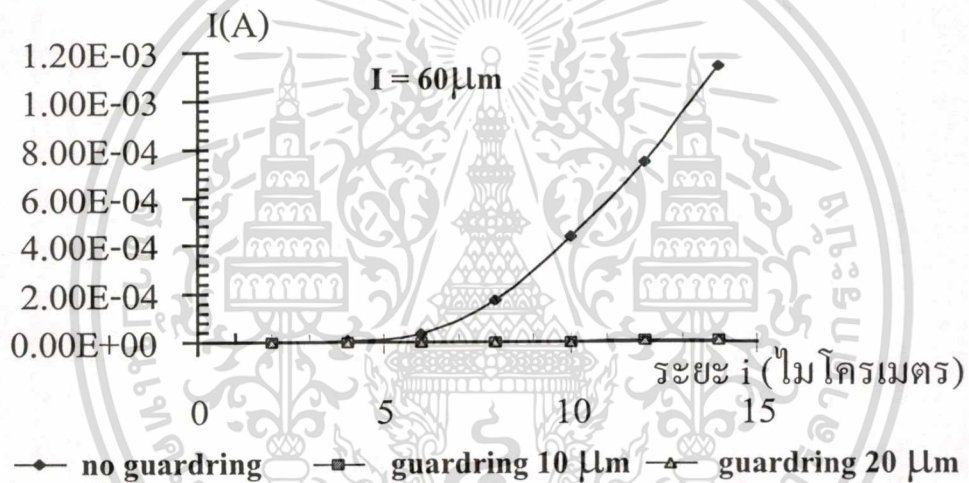
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง V_s กับระยะ i ของไดโอดทั้งสามโครงสร้าง



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง I_s กับระยะ i ของไดโอดทั้งสามโครงสร้าง



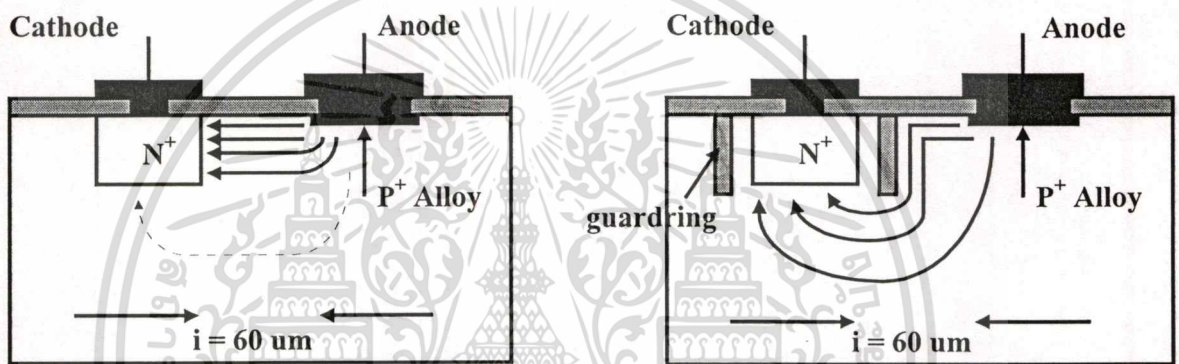
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง I_s กับระยะ i ของไดโอดทั้งสามโครงสร้าง



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดเมื่อระยะ i มีค่า 60 ไมโครเมตร

จากผลการทดลองพบว่าคุณสมบัติสวิทชิงค์และความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยกระแส (CCNR) ของซิลิคอนไดโอดชนิด p^+i-n^+ โดยวิธีการอัลลอย เมื่อส่วน i มีระยะสั้นๆ นั้น เนื่องจากเป็นผลของรอยต่อพี-เอ็นชนิดอัลลอยซึ่งเป็นอัลลอยของ Al-Si ที่เกิดขึ้นบริเวณข้อสัมผัส ทำให้ต้องใช้แรงดันไบอัสที่สูงกว่าไดโอดที่สร้างจากการแพร่สารเจือ นอกจากนี้ส่วนของกัรริงที่ล้อมรอบแคโทดก็เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้ไดโอดแสดงคุณสมบัติสวิทชิงค์และความต้านทานเชิงลบได้ แม้ส่วน i จะมีระยะสั้นๆ เนื่องจากฐานรองของไดโอดเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีนซิกที่ได้จากการแพร่อะตอมทองคำเข้าไปทำให้มีค่าความต้านทานสูงมาก กระแสส่วนใหญ่จึงพยายามไหลที่พื้นผิวทำให้ไดโอดซึ่งส่วนแคโทดไม่มีกัรริงล้อมรอบไม่สามารถแสดงคุณสมบัติสวิทชิงค์และความต้านทานเชิงลบออกมาได้ชัดเจนและไม่สอดคล้องกับคุณสมบัติ CCNR เนื่องจากไม่สามารถควบคุมปริมาณกระแสได้ที่ไหลที่ผิว (leakage current) ได้ทำให้ค่ากระแสเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อการใดๆ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

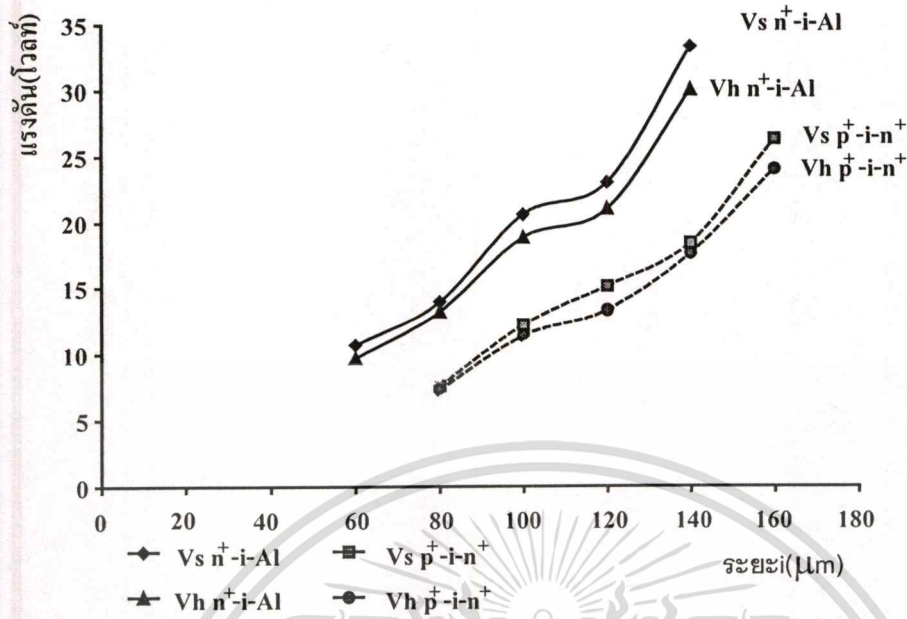
สวิตซิงค์ไม่คงที่ ในขณะที่ไดโอดซึ่งส่วนแคโทดมีการ์ดริงล้อมรอบสามารถแสดงคุณสมบัติดังกล่าวได้เป็นอย่างดี เนื่องจากการ์ดริงช่วยป้องกันกระแสที่ไหลที่ผิวทำให้กระแสส่วนใหญ่ไหลในเนื้อสารส่วน i หรือป้องกันกระแสรั่วที่ผิว (leakage current) นอกจากนี้การ์ดริงยังทำให้เส้นทางการไหลของกระแสระหว่างแคโทดและแอโนดเพิ่มขึ้น เป็นผลให้แม้ส่วน i มีระยะสั้นๆ ก็สามารถแสดงคุณสมบัติสวิตซิงค์และความต้านทานเชิงลบได้เป็นอย่างดี ดังสังเกตได้เมื่อการ์ดริงมีขนาดเพิ่มขึ้นก็เป็นการเพิ่มเส้นทางการไหลของกระแสทำให้ค่าแรงดัน V_s, V_h ของไดโอดซึ่งการ์ดริงมีขนาด 20 ไมโครเมตรมีค่าสูงกว่าไดโอดซึ่งการ์ดริงมีขนาด 10 ไมโครเมตร ซึ่งจากการทดลองพบว่า การ์ดริงที่มีขนาด 10 ไมโครเมตรสามารถแสดงคุณสมบัติสวิตซิงค์ได้แม้ส่วน i มีระยะเพียง 50 ไมโครเมตรโดยลักษณะทางเดินของกระแสสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.18



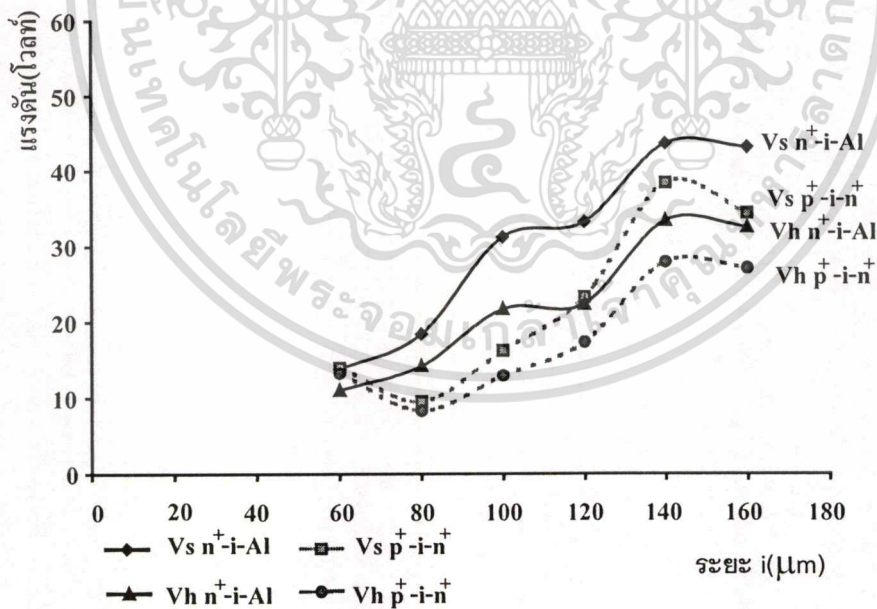
รูปที่ 4.18 ลักษณะทางเดินของกระแสเมื่อมีและไม่มีการ์ดริงล้อมรอบส่วนแคโทด

4.3.2 คุณสมบัติของซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอยและแพร่สารเจือเมื่อส่วนแคโทดมีการ์ดริงขนาด 10 และ 20 ไมโครเมตรล้อมรอบที่ระยะ i ต่างๆ

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน V_s, V_h, I_s และ V_h / V_s ที่ระยะ i ค่าต่างๆ ของซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอยและแพร่สารเจือถูกนำมาเขียนแสดงและเปรียบเทียบดังรูปที่ 4.19, 4.20, 4.21 และ 4.22 โดยส่วน i มีความยาวค่าต่างๆ กันตั้งแต่ 60-160 ไมโครเมตร

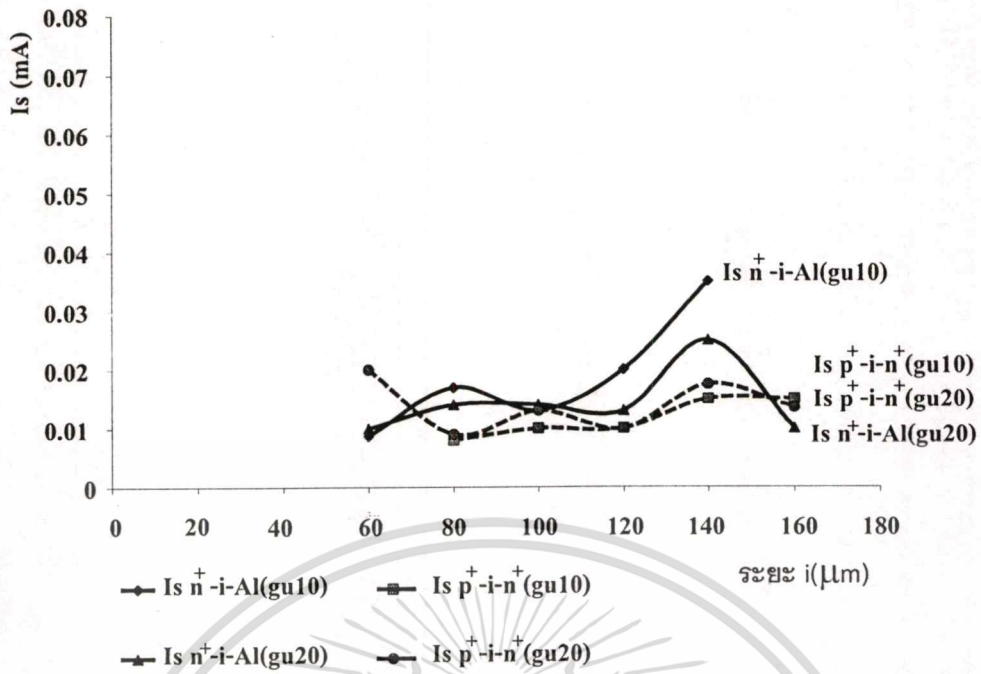


รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่าง V_s, V_h กับระยะ i ของไดโอดชนิด p^+-i-n^+ แบบอัลลอย ($n^+-i\text{-Al}$) และแบบแพร่สารเจือ (p^+-i-n^+) เมื่อการรักรังมีขนาด 10 ไมโครเมตร

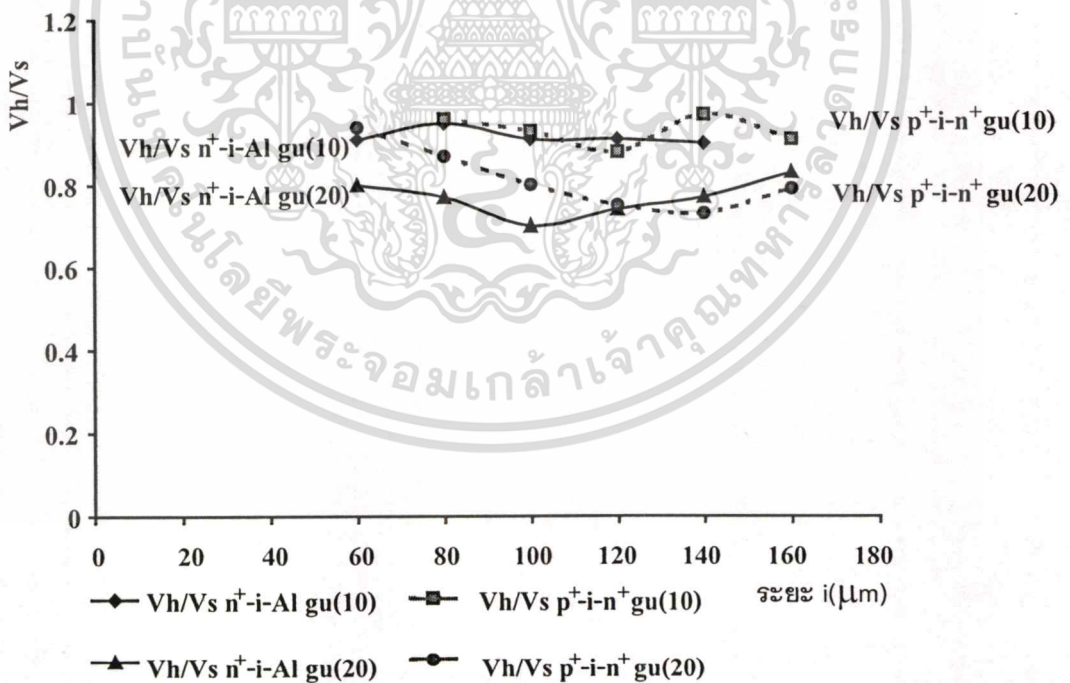


รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่าง V_s, V_h กับระยะ i ของไดโอดชนิด p^+-i-n^+ แบบอัลลอย ($n^+-i\text{-Al}$) และแบบแพร่สารเจือ (p^+-i-n^+) เมื่อการรักรังมีขนาด 20 ไมโครเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่าง I_s กับระยะ i ของไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ แบบอัลลอย ($n^+ - i - Al$) และแบบแพร่สารเจือ ($p^+ - i - n^+$) เมื่อการรัศมีขนาด 10 และ 20 ไมโครเมตร



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง I_s กับระยะ i ของไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ แบบอัลลอย ($n^+ - i - Al$) และแบบแพร่สารเจือ ($p^+ - i - n^+$) เมื่อการรัศมีขนาด 10 และ 20 ไมโครเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการเปรียบเทียบพบว่าไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอย ($n^+ - i - Al$) และแพร์สารเจือ ($p^+ - i - n^+$) เมื่อการครึงมีขนาด 10 และ 20 ไมโครเมตร นั้นมีแนวโน้มเหมือนกันคือเมื่อระยะ i เพิ่มขึ้นแรงดัน V_s และ V_h มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยค่าแรงดัน V_s และ V_h ของไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอยจะมีค่ามากกว่าแบบแพร์สารเจือดังกล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.2 ดังรูป 4.19 และ 4.20 ส่วนค่ากระแสสวิทชิงค์ (I_s) นั้นมีค่าค่อนข้างคงที่ที่ประมาณ 0.017 มิลลิแอมป์ทั้งไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอย ($n^+ - i - Al$) และแพร์สารเจือ ($p^+ - i - n^+$) เมื่อการครึงมีขนาด 10 และ 20 ไมโครเมตร ดังรูป 4.21 และจากรูป 4.22 จะเห็นว่าไดโอดทั้งสองแบบเมื่อมีการครึงขนาด 10 ไมโครเมตรนั้นคุณสมบัติสวิทชิงค์จะมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อการครึงมีขนาด 20 ไมโครเมตรนั้นไดโอดทั้งสองแบบจะแสดงคุณสมบัติสวิทชิงค์ได้ดีเมื่อระยะ i มีขนาดเพิ่มขึ้น แต่ในกรณีที่ระยะ i มีค่าต่ำกว่า 120 ไมโครเมตร ไดโอดแบบอัลลอยจะแสดงคุณสมบัติสวิทชิงค์ได้ดีกว่า และสำหรับกรณีที่ระยะ i มีค่าสูงกว่า 120 ไมโครเมตร ไดโอดแบบแพร์สารเจือจะให้คุณสมบัติที่ดีกว่าเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 4.2

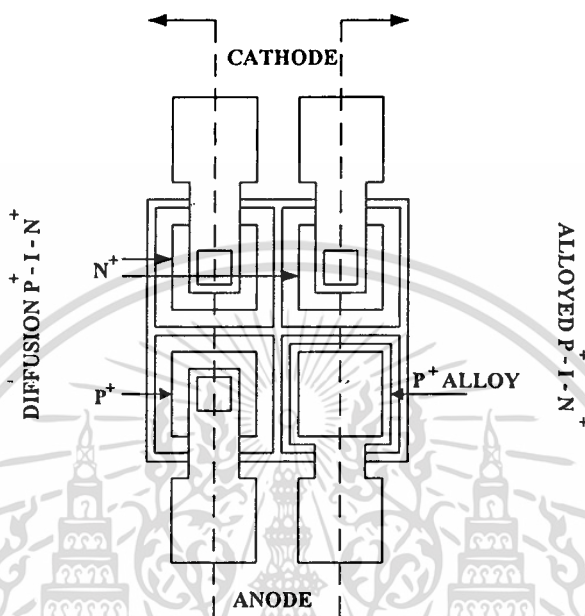
4.4 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของขนาดพื้นที่ส่วนแอโนดและแคโทดต่อการเกิดควม

ด้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยกระแส (CCNR)

เพื่อศึกษาถึงผลของการเปลี่ยนแปลงของขนาดพื้นที่ส่วนแอโนดและแคโทดต่อการเกิดควมด้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยกระแส (CCNR) และคุณสมบัติสวิทชิงค์ในซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอย ในการทดลองได้ออกแบบและสร้างซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอยโดยแบ่งเป็นเมื่อพื้นที่ส่วนแอโนดและแคโทดมีขนาดเท่ากันคือ 200, 160 และ 120 ตารางไมครอน, เมื่อพื้นที่ส่วนแอโนดมีขนาดคงที่คือ 200 ตารางไมครอน และส่วนแคโทดมีการเปลี่ยนแปลงขนาดคือ 200, 160 และ 120 ตารางไมครอน และเมื่อพื้นที่ส่วนแคโทดมีขนาดคงที่คือ 200 ตารางไมครอน และส่วนแอโนดมีการเปลี่ยนแปลงขนาดคือ 200, 160 และ 120 ตารางไมครอน ซึ่งส่วน i มีระยะความยาวค่าต่างๆ กันตั้งแต่ 60, 100, 120, 140 และ 160 ไมโครเมตรตามลำดับ เพื่อศึกษาคุณสมบัติของไดโอดที่มีขนาดพื้นที่ที่แตกต่างกันทั้งสามแบบ และทำการเปรียบเทียบกับในซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ แบบแพร์สารเจือ เมื่อนำไดโอดที่สร้างได้ไปทำการทดลองหาคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน โดยใช้เครื่องวัดคุณสมบัติทรานซิสเตอร์ (transistor curve tracer) พบว่าขนาดของพื้นที่แอโนดและแคโทดมีผลต่อการเกิดควมด้านทานเชิงลบและคุณสมบัติสวิทชิงไม่ชัดเจนเท่าผลของระยะ i หรือระยะระหว่างแคโทดและแอโนด

4.4.1 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันเมื่อพื้นที่ส่วนแอโนดและแคโทดมีขนาดเท่ากัน

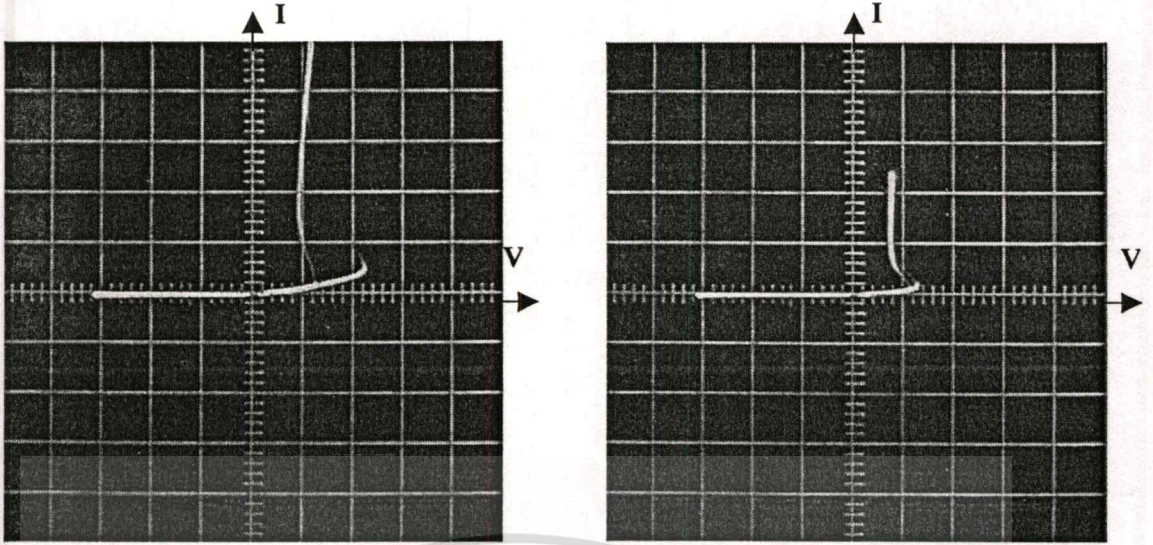
เพื่อศึกษาถึงคุณสมบัติของซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอยและแพร่สารเจือ เมื่อพื้นที่ส่วนแอโนดและแคโทดมีขนาดเท่ากัน ($120, 160$ และ $200 \mu\text{m}^2$) โดยลักษณะโครงสร้างของไดโอดแสดงได้รูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 โครงสร้างของไดโอดเมื่อพื้นที่ส่วนแอโนดและแคโทดมีขนาดเท่ากัน

โดยความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดเมื่อพื้นที่ส่วนแอโนดและแคโทดมีขนาดเท่ากันสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.24

และจากผลการทดลองสามารถถูกนำมาเขียนแสดงและเปรียบเทียบดังรูปที่ 4.25 และ 4.26 พบว่าเมื่อขนาดพื้นที่ที่มีการเปลี่ยนแปลง V_s และ V_h ของทั้งซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีแพร่สารเจือและโดยวิธีการอัลลอยมีแนวโน้มลดลงเมื่อขนาดพื้นที่ของส่วนแอโนดและแคโทดเพิ่มขึ้น แต่เป็นการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้นเมื่อเทียบกับผลการเปลี่ยนแปลงของระยะ i ซึ่งจะเห็นการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน แสดงให้เห็นว่าผลพื้นที่ของส่วนแอโนดและแคโทดจะมีผลน้อยกว่าผลของการเปลี่ยนแปลงระยะ i และจากรูปที่ 4.27 พบว่า I_s มีการเปลี่ยนแปลงน้อยหรือใกล้เคียงกัน แม้จะมีการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่และระยะ i ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยกระแส



(a) n-i-Al: $i = 100 \mu\text{m}$

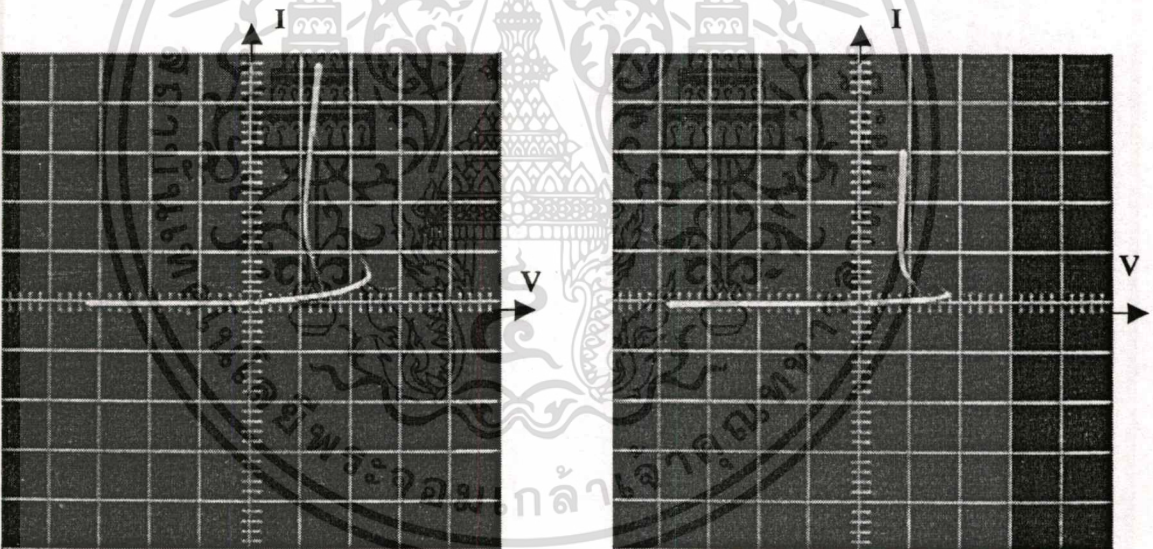
Cathode = Anode = $200 \mu\text{m}^2$

$I = 0.1 \text{ mA / Division}$, $V = 5 \text{ V / Division}$

(b) $p^+ - i - n^+$: $i = 100 \mu\text{m}$

Cathode = Anode = $200 \mu\text{m}^2$

$I = 0.1 \text{ mA / Division}$, $V = 2 \text{ V / Division}$



(c) n-i-Al: $i = 100 \mu\text{m}$

Cathode = Anode = $160 \mu\text{m}^2$

$I = 0.1 \text{ mA / Division}$, $V = 5 \text{ V / Division}$

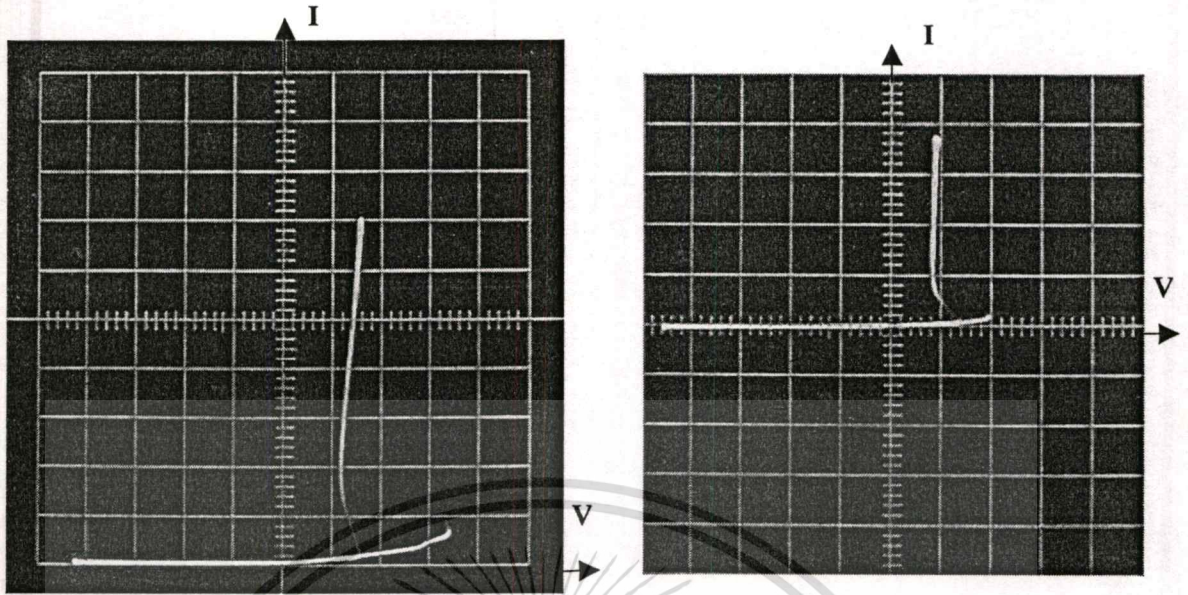
(d) $p^+ - i - n^+$: $i = 100 \mu\text{m}$

Cathode = Anode = $160 \mu\text{m}^2$

$I = 0.1 \text{ mA / Division}$, $V = 2 \text{ V / Division}$

รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดเมื่อพื้นที่ส่วนแอโนดและแคโทดมีขนาดเท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(e) $n^+ - i - Al$: $i = 100 \mu m$

Cathode = Anode = $120 \mu m^2$

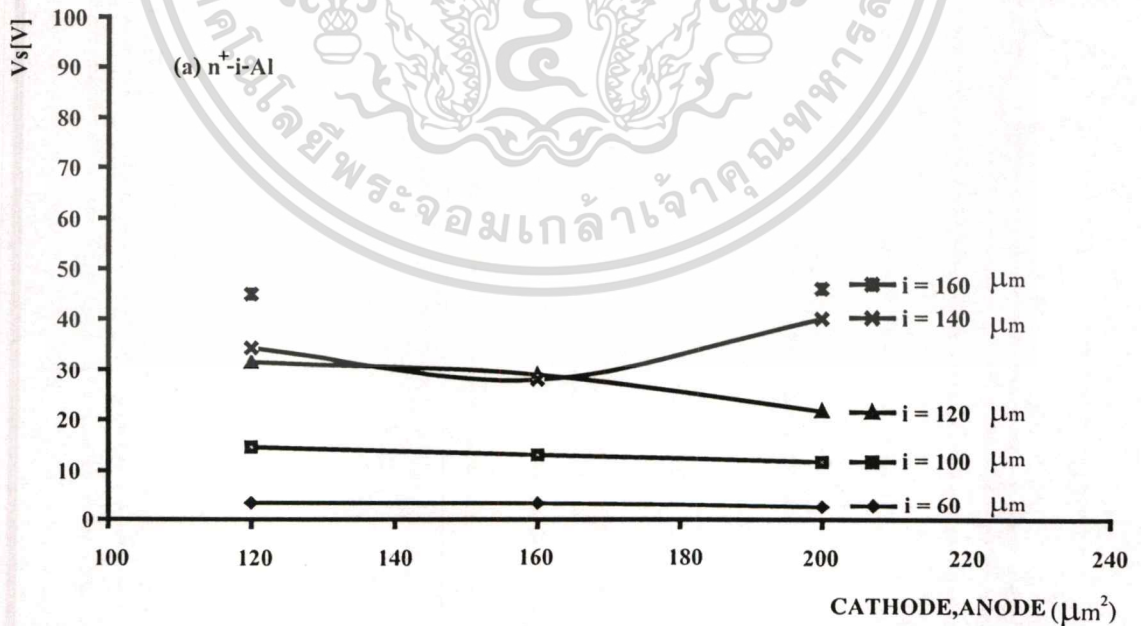
$I = 0.1 \text{ mA / Division}$, $V = 5 \text{ V / Division}$

(f) $p^+ - i - n^+$: $i = 100 \mu m$

Cathode = Anode = $120 \mu m^2$

$I = 0.1 \text{ mA / Division}$, $V = 2 \text{ V / Division}$

รูปที่ 4.24(ต่อ)

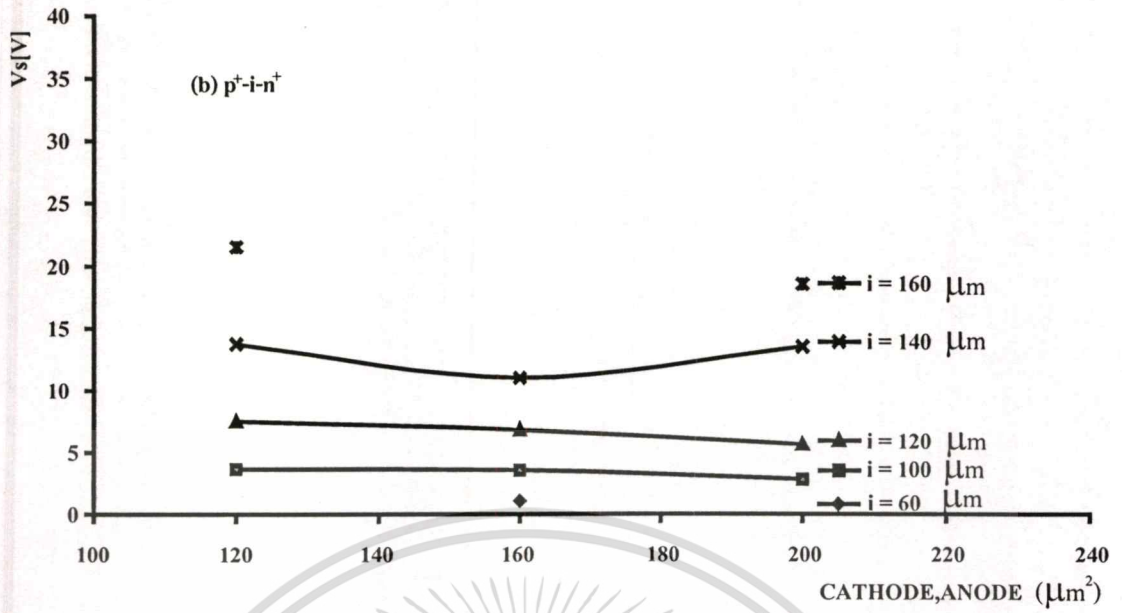


รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่าง V_s และขนาดของแอโนดและแคโทดของซิลิคอนไดโอดชนิด

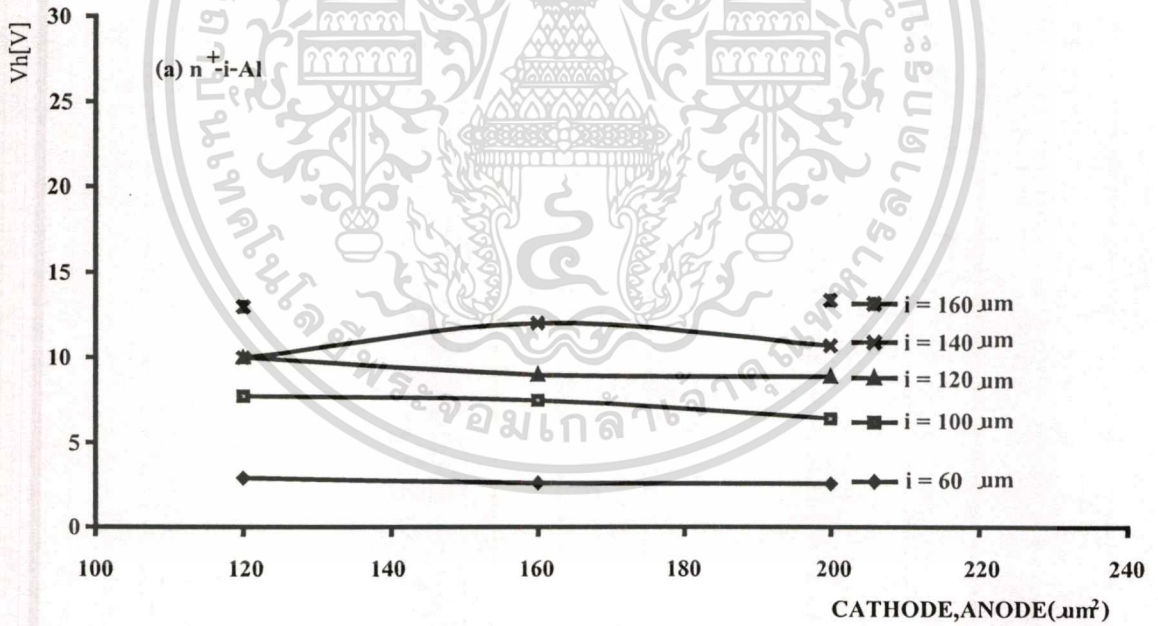
$p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอย(a)และวิธีแพร่สารเจือ(b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

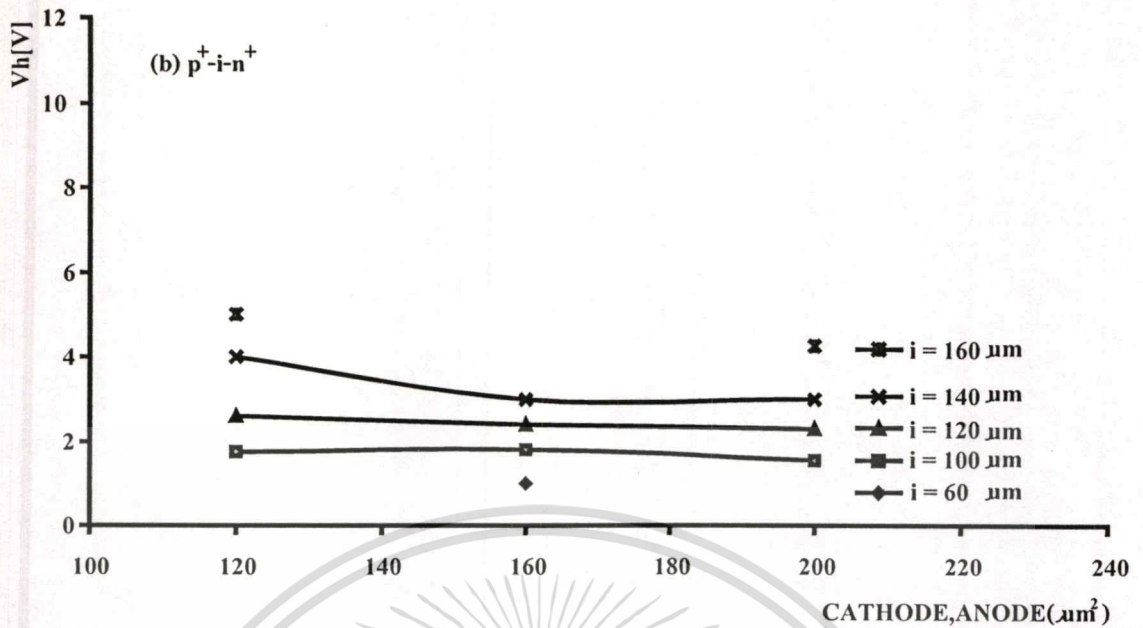


รูปที่ 4.25(ต่อ)



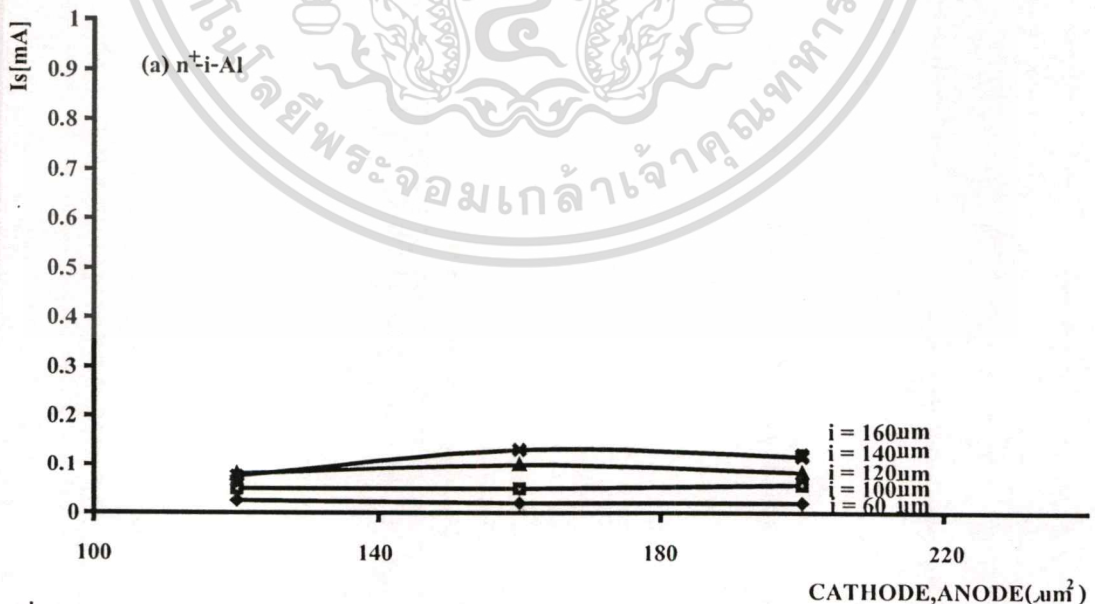
รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่าง V_h และขนาดของแอโนดและแคโทดของซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอย (a) และวิธีแพร่สารเจือ (b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



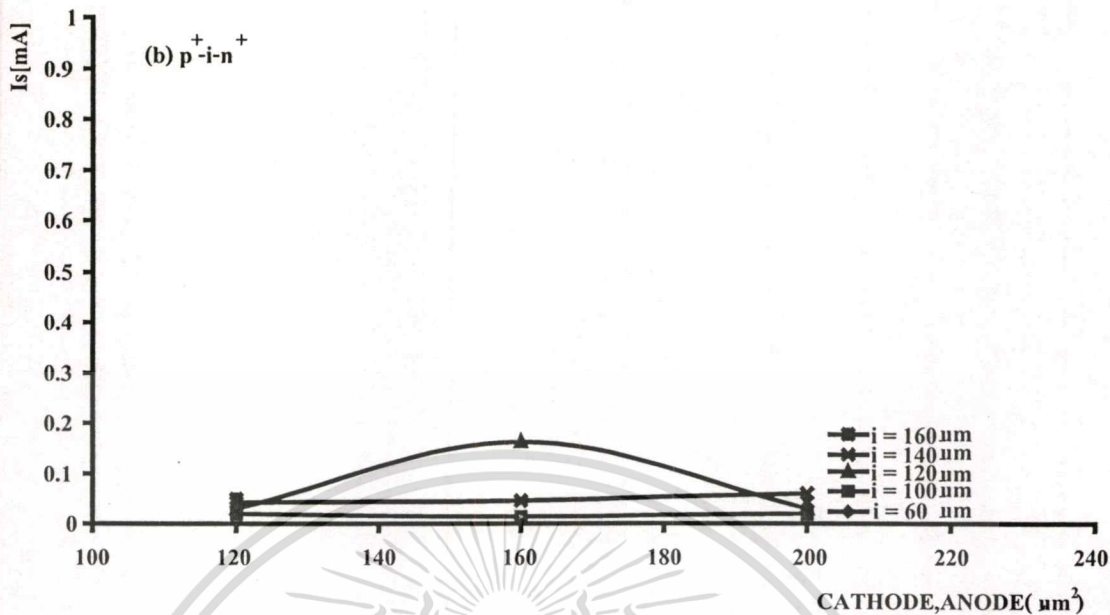
รูปที่ 4.26(ต่อ)

และพบว่าที่ระยะ i เท่ากับ 60 ไมโครเมตร ซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีแพร่สาร จะไม่สามารถแสดงคุณสมบัติสวิตชิงและความต้านทานเชิงลบได้ชัดเจน ในขณะที่ซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอตัลลอยสามารถแสดงคุณสมบัติสวิตชิงและความต้านทานเชิงลบได้จึงเป็นข้อดีของไดโอดโดยวิธีอตัลลอย



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่าง I_s และขนาดของแอโนดและแคโทดของซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอตัลลอย(a)และวิธีแพร่สาร(b)

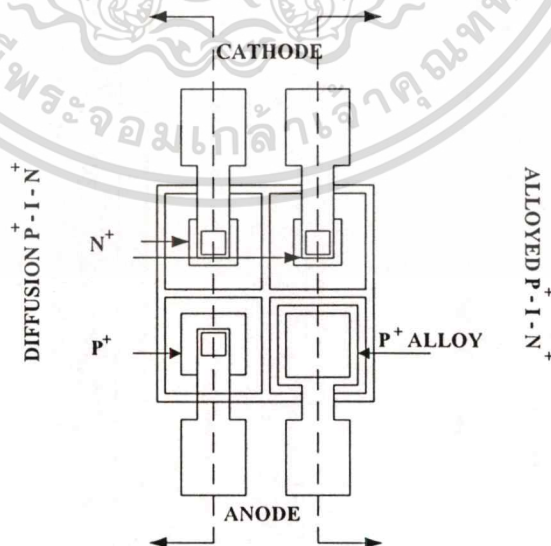
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.27(ต่อ)

4.4.2 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันเมื่อพื้นที่ส่วนแอโนดคงที่และแคโทดมีการเปลี่ยนแปลงขนาด

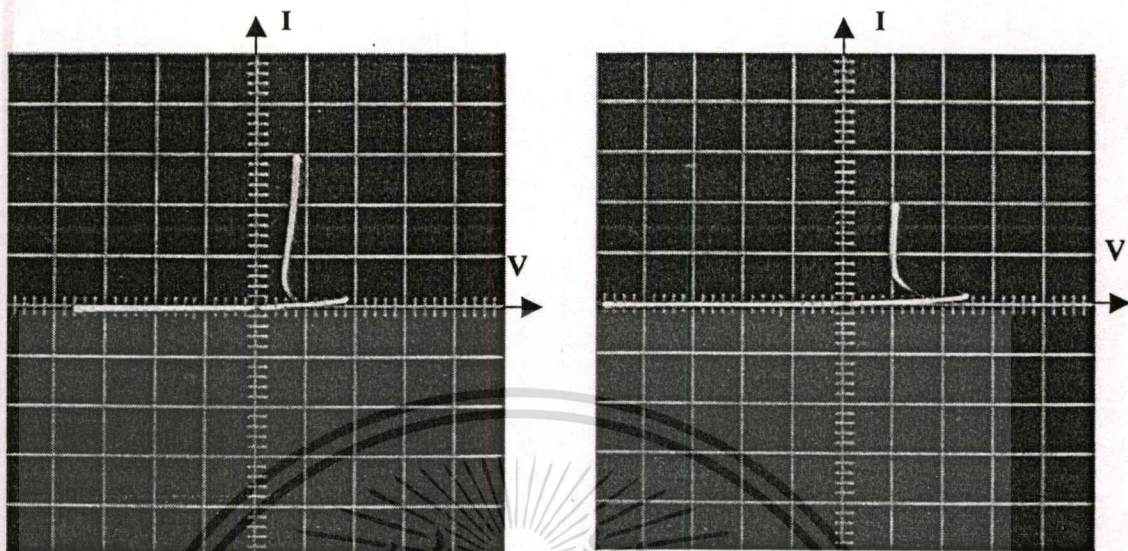
เพื่อศึกษาถึงคุณสมบัติของซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอยและแพร่สารเจือ เมื่อพื้นที่ส่วนแอโนดคงที่ ($200 \mu m^2$) และแคโทดมีการเปลี่ยนแปลงขนาด ($200, 160, 120 \mu m^2$) โดยลักษณะโครงสร้างของไดโอดแสดงได้รูปที่ 4.28



รูปที่ 4.28 โครงสร้างของไดโอดเมื่อพื้นที่ส่วนแอโนดคงที่และแคโทดมีการเปลี่ยนแปลงขนาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดเมื่อพื้นที่ส่วนแอโนดคงที่และแคโทดมีการเปลี่ยนแปลงขนาดแสดงได้ดังรูปที่ 4.29



(a) $n^+ - i - Al$: $i = 120 \mu\text{m}$

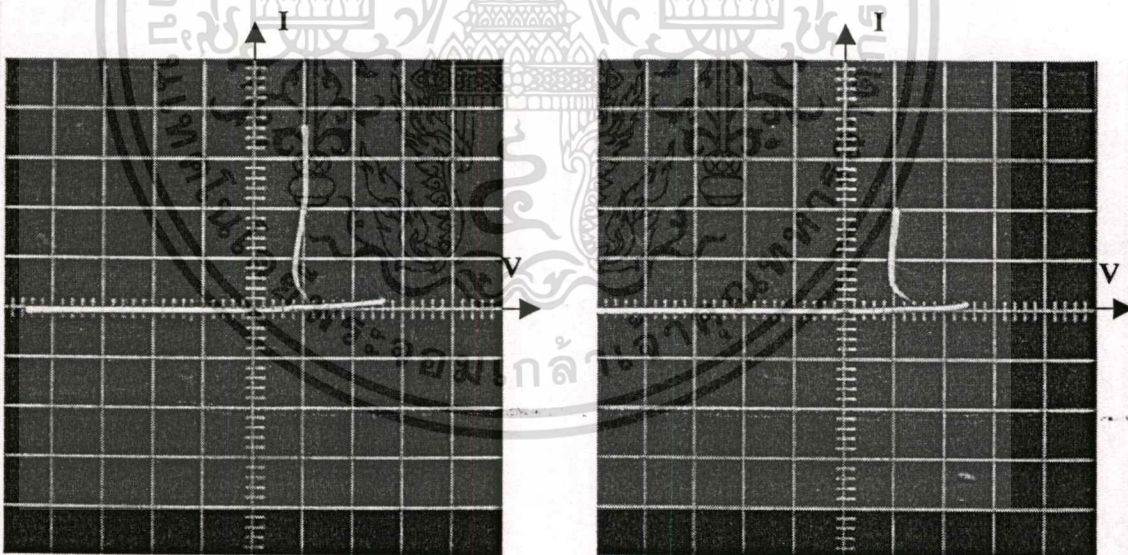
Anode = $200 \mu\text{m}^2$, Cathode = $200 \mu\text{m}^2$

$I = 0.5 \text{ mA / Division}$, $V = 10 \text{ V / Division}$

(b) $p^+ - i - n^+$: $i = 120 \mu\text{m}$

Anode = $200 \mu\text{m}^2$, Cathode = $200 \mu\text{m}^2$

$I = 0.2 \text{ mA / Division}$, $V = 2 \text{ V / Division}$



(c) $n^+ - i - Al$: $i = 120 \mu\text{m}$

Anode = $200 \mu\text{m}^2$, Cathode = $160 \mu\text{m}^2$

$I = 0.5 \text{ mA / Division}$, $V = 10 \text{ V / Division}$

(d) $p^+ - i - n^+$: $i = 120 \mu\text{m}$

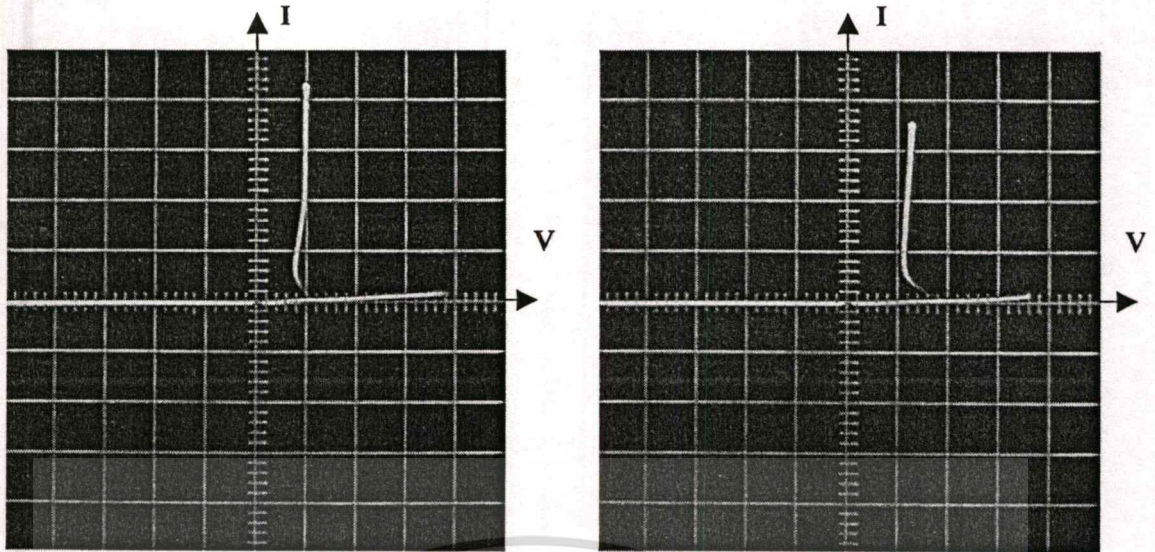
Anode = $200 \mu\text{m}^2$, Cathode = $160 \mu\text{m}^2$

$I = 0.2 \text{ mA / Division}$, $V = 2 \text{ V / Division}$

รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดเมื่อพื้นที่ส่วนแอโนดคงที่และ

แคโทดมีการเปลี่ยนแปลงขนาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(e) $n^+ - i - Al$: $i = 120 \mu m$

Anode = $200 \mu m^2$, Cathode = $120 \mu m^2$

$I = 0.5 \text{ mA / Division}$, $V = 10 \text{ V / Division}$

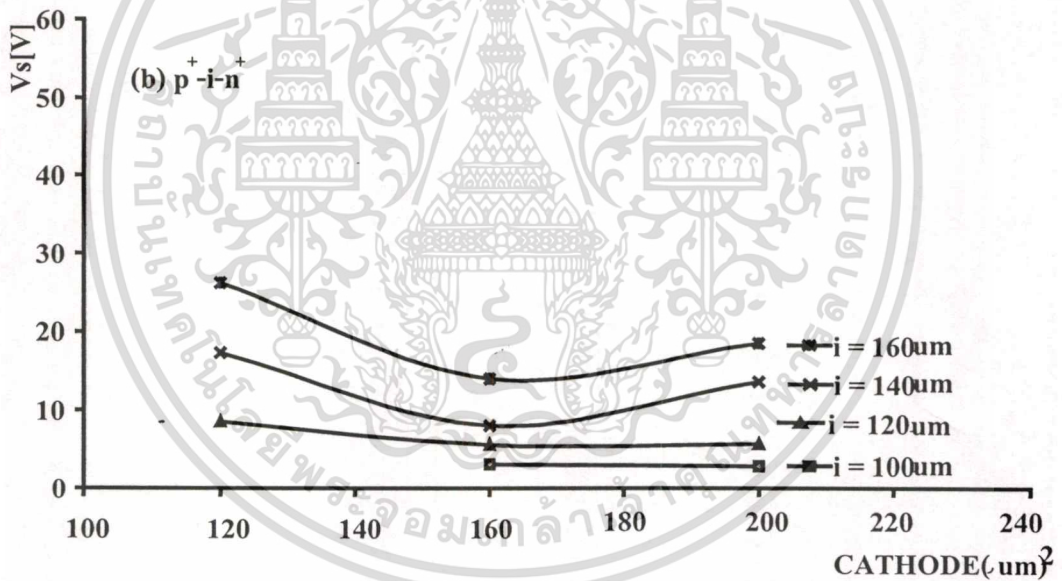
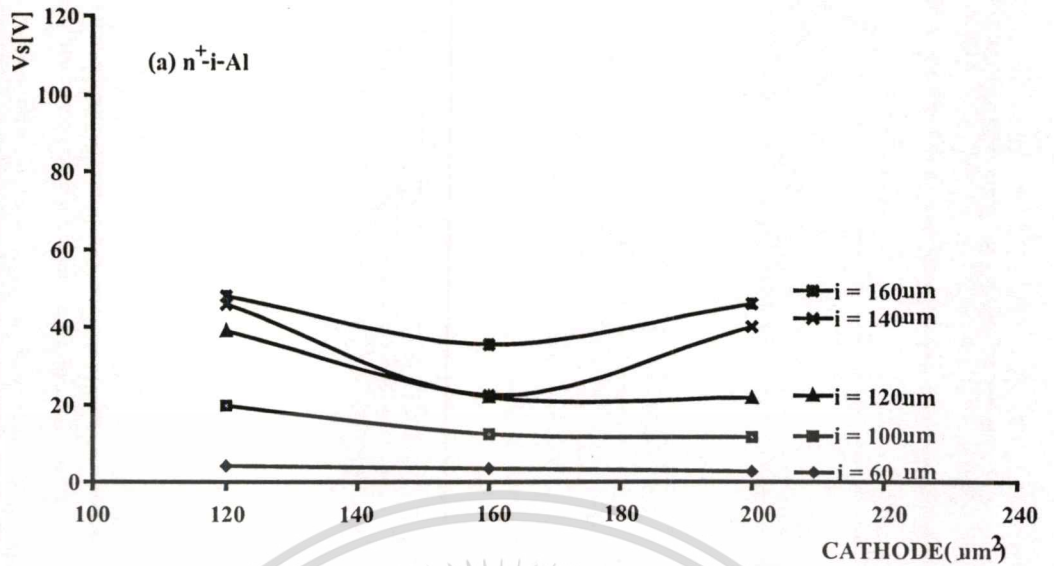
(f) $p^+ - i - n^+$: $i = 120 \mu m$

Anode = $200 \mu m^2$, Cathode = $120 \mu m^2$

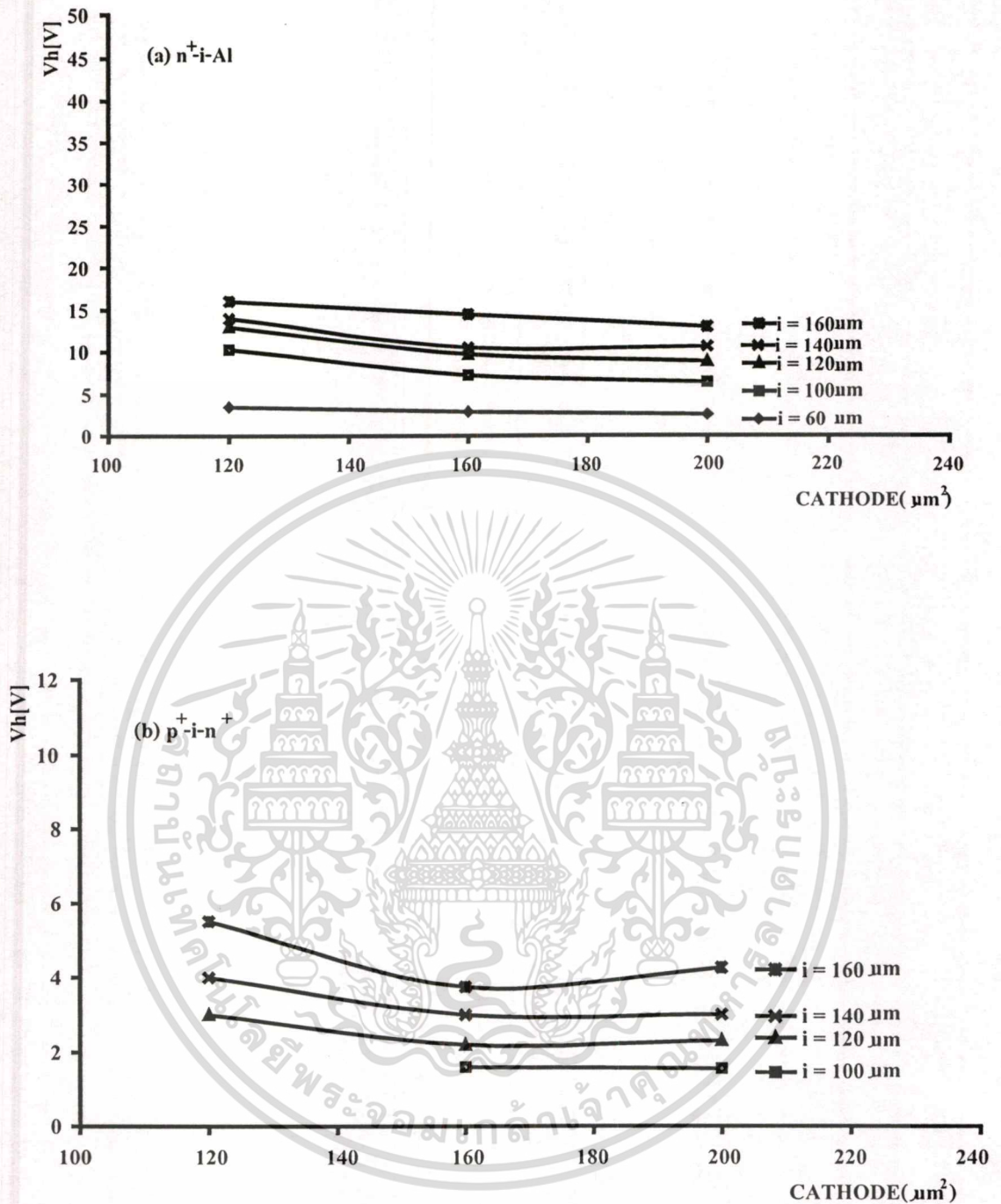
$I = 0.2 \text{ mA / Division}$, $V = 2 \text{ V / Division}$

รูปที่ 4.29(ต่อ)

จากผลการทดลองสามารถแสดงดังรูปที่ 4.30 และ 4.31 พบว่าเมื่อขนาดพื้นที่ที่มีการเปลี่ยนแปลง V_s และ V_h ของทั้งซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีแพร่สารเจือและโดยวิธีการอัลลอย มีแนวโน้มลดลงเมื่อขนาดพื้นที่ของส่วนแคโทดเพิ่มขึ้น แต่เป็นการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้นเมื่อเทียบกับผลการเปลี่ยนแปลงของระยะ i ซึ่งจะเห็นการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน แสดงให้เห็นว่าผลพื้นที่ของส่วนแคโทดจะมีผลน้อยกว่าผลของการเปลี่ยนแปลงระยะ i และจากรูปที่ 4.32 พบว่า I_s มีการเปลี่ยนแปลงน้อยหรือใกล้เคียงกันแม้จะมีการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่และระยะ i ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยกระแส และพบว่าที่ระยะ i เท่ากับ 60 ไมโครเมตร ซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีแพร่สารเจือจะไม่สามารถแสดงคุณสมบัติสวิทชิงค์และความต้านทานเชิงลบได้ ในขณะที่ซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอยสามารถแสดงคุณสมบัติสวิทชิงค์และความต้านทานเชิงลบได้จึงเป็นข้อดีของไดโอดโดยวิธีอัลลอย

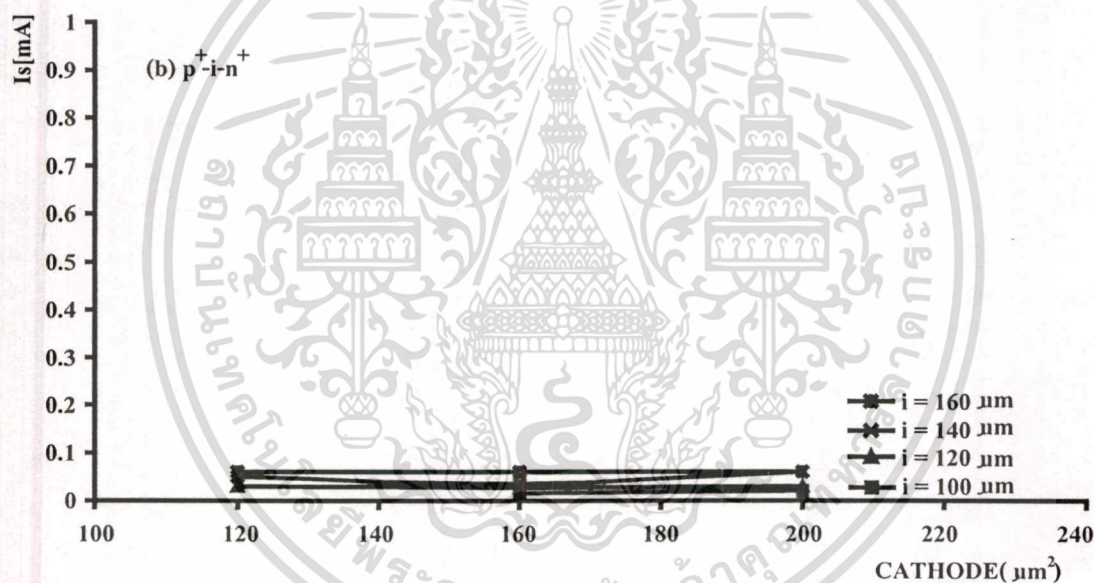
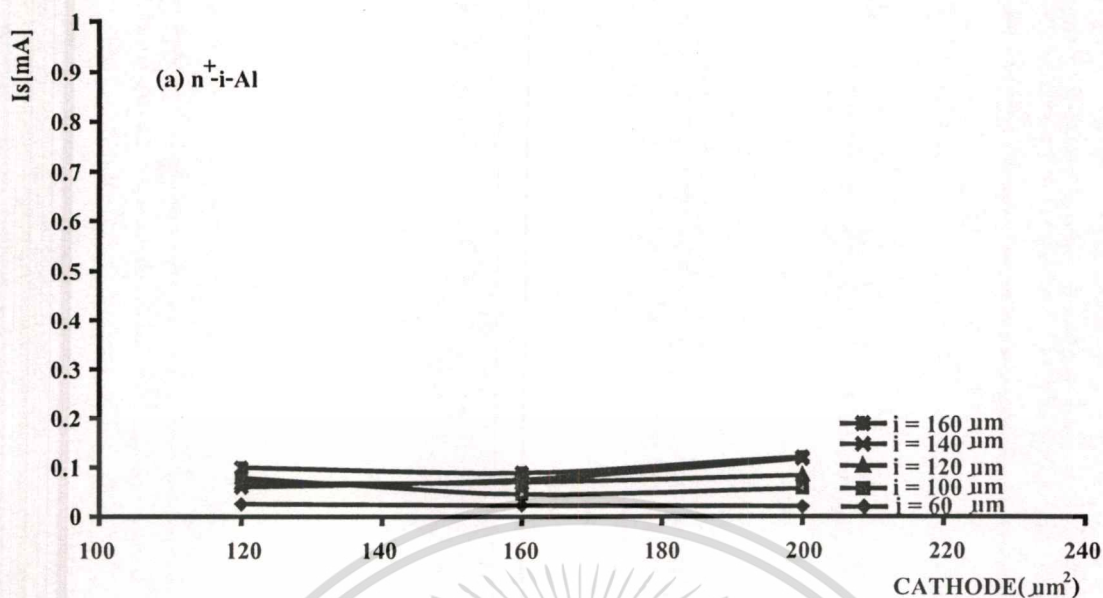


รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่าง V_s และขนาดของแคโทดของซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัดลอย(a)และวิธีแพร่สารเจือ(b)



รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่าง V_h และขนาดของแคโทดของซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอย(a)และวิธีแพร่สารเจือ(b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

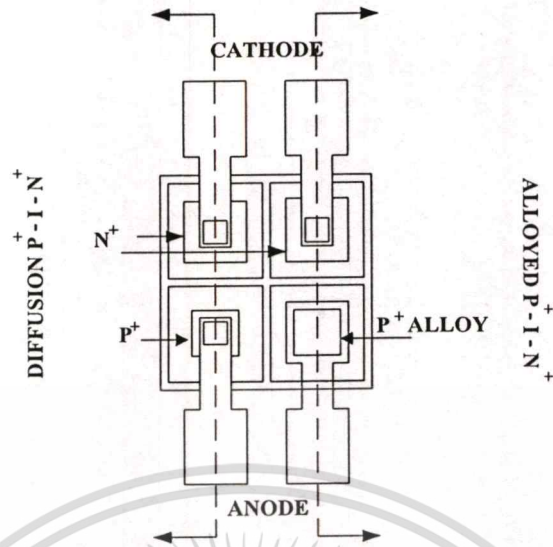


รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่าง I_s และขนาดของแคโทดของซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอย (a) และวิธีแพร่สารเจือ (b)

4.4.3 คุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันเมื่อพื้นที่ส่วนส่วนแคโทดคงที่ และแอโนดมีการเปลี่ยนแปลงขนาด

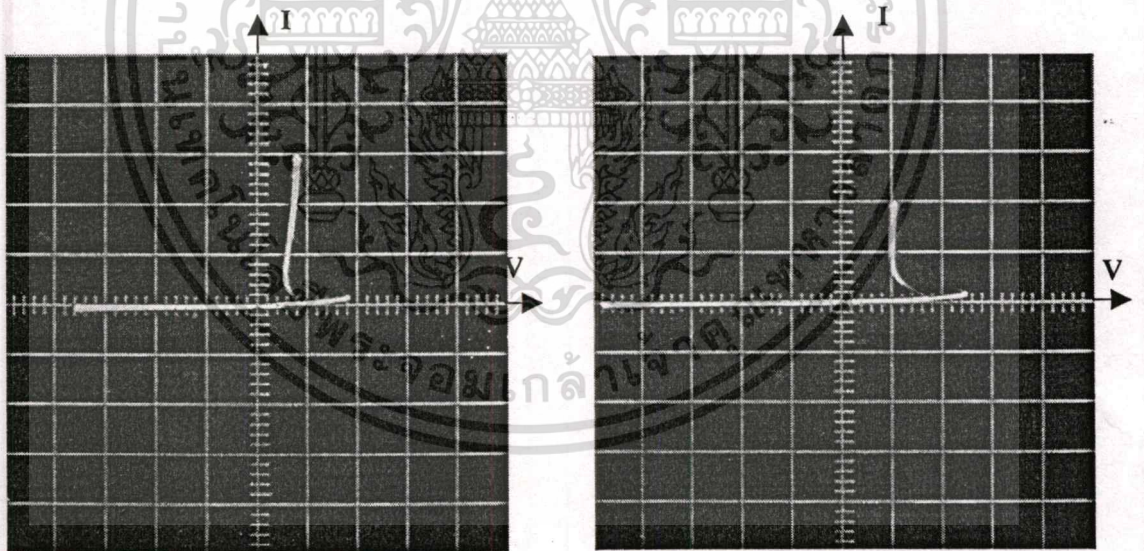
เพื่อศึกษาถึงคุณสมบัติของซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอยและแพร่สารเจือ เมื่อพื้นที่ส่วนแคโทดคงที่ (200 μm²) และแอโนดมีการเปลี่ยนแปลงขนาด (200, 160, 120 μm²) โดยลักษณะโครงสร้างของไดโอดแสดงได้รูปที่ 4.33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.33 โครงสร้างของไดโอดเมื่อพื้นที่ส่วนแคโทดคงที่และแอโนดมีการเปลี่ยนแปลงขนาด

โดยความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดเมื่อพื้นที่ส่วนแคโทดคงที่และแอโนดมีการเปลี่ยนแปลงขนาดแสดงดังรูปที่ 4.34



(a) $n^+ - i - Al: i = 120 \mu m$

Cathode = $200 \mu m^2$, Anode = $200 \mu m^2$

$I = 0.5 \text{ mA / Division}$, $V = 10 \text{ V / Division}$

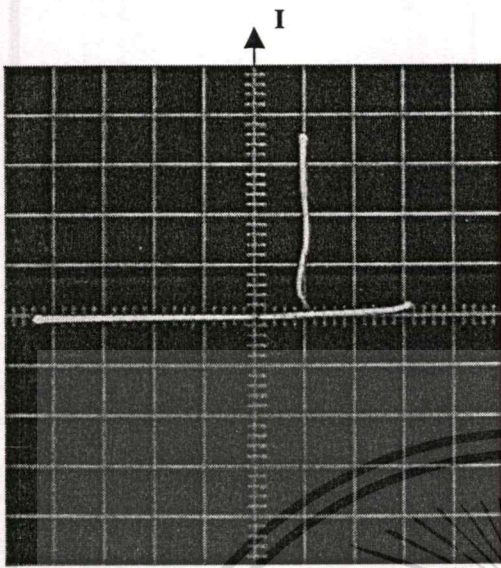
(b) $p^+ - i - n^+: i = 120 \mu m$

Cathode = $200 \mu m^2$, Anode = $200 \mu m^2$

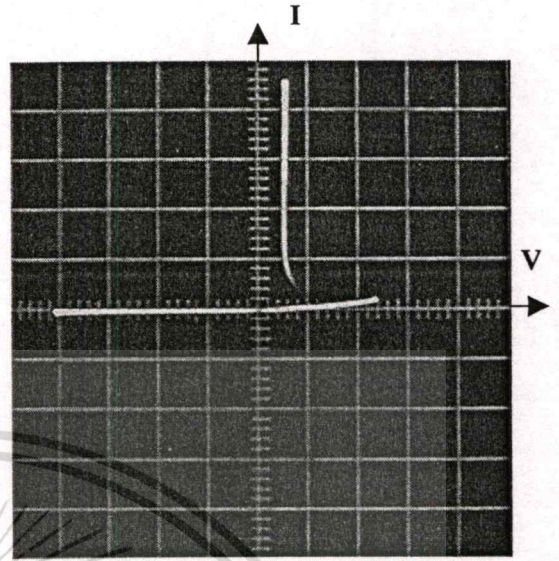
$I = 0.2 \text{ mA / Division}$, $V = 2 \text{ V / Division}$

รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอดเมื่อพื้นที่ส่วนแคโทดคงที่และแอโนดมีการเปลี่ยนแปลงขนาด

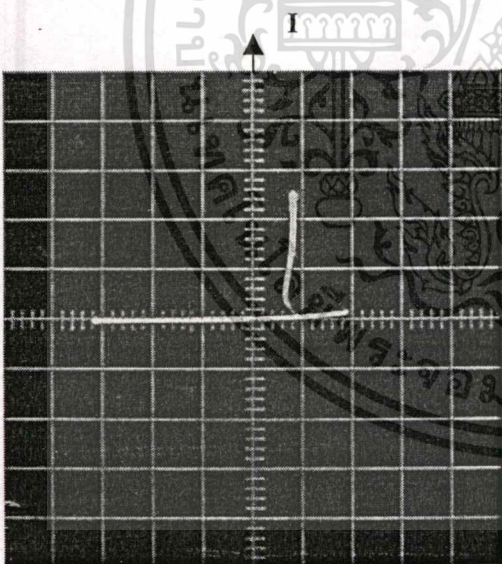
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



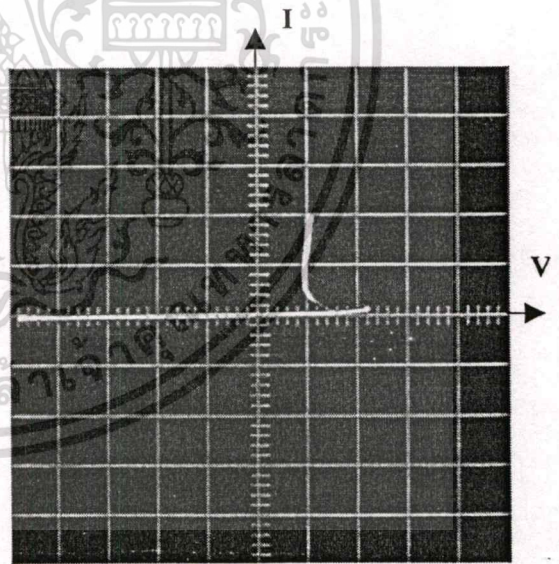
(c) $n^+ - i - Al : i = 120 \mu m$
 Cathode = $200 \mu m^2$, Anode = $160 \mu m^2$
 $I = 0.5 \text{ mA / Division}$, $V = 10 \text{ V / Division}$



(d) $p^+ - i - n^+ : i = 120 \mu m$
 Cathode = $200 \mu m^2$, Anode = $160 \mu m^2$
 $I = 0.2 \text{ mA / Division}$, $V = 5 \text{ V / Division}$



(e) $n^+ - i - Al : i = 120 \mu m$
 Cathode = $200 \mu m^2$, Anode = $120 \mu m^2$
 $I = 0.5 \text{ mA / Division}$, $V = 10 \text{ V / Division}$

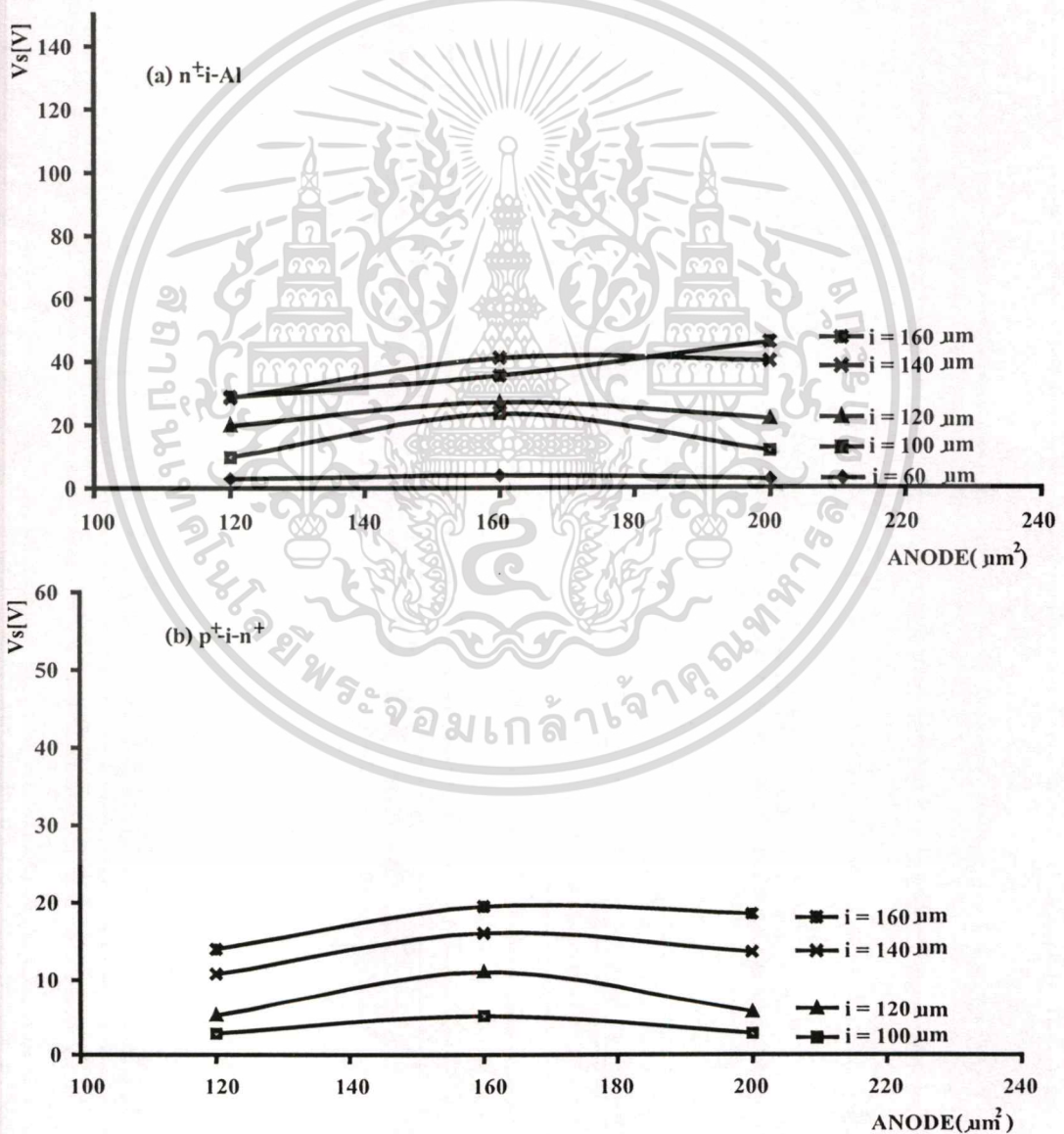


(f) $p^+ - i - n^+ : i = 120 \mu m$
 Cathode = $200 \mu m^2$, Anode = $120 \mu m^2$
 $I = 0.2 \text{ mA / Division}$, $V = 2 \text{ V / Division}$

รูปที่ 4.34(ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

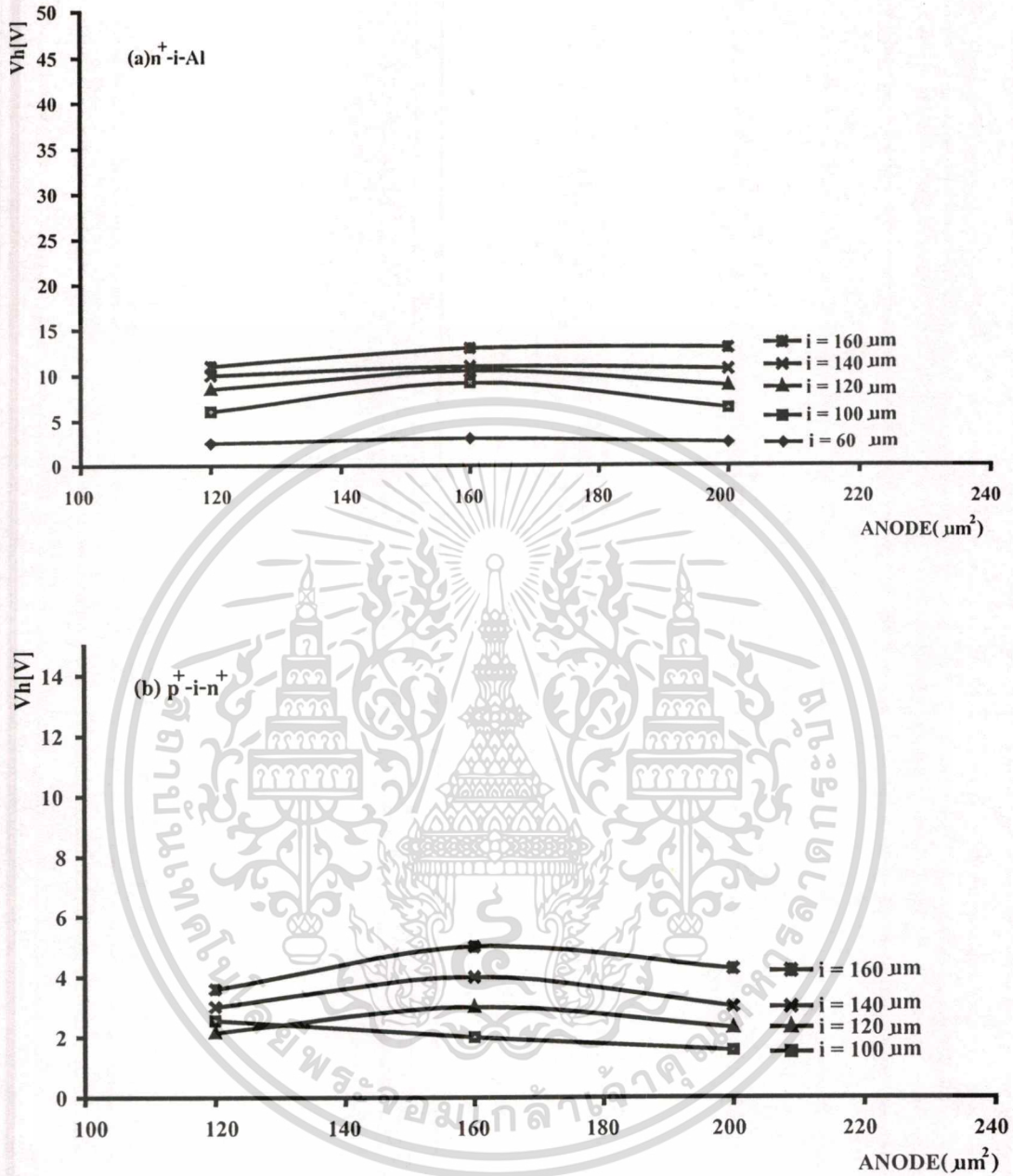
จากผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.35 และ 4.36 พบว่าเมื่อขนาดพื้นที่ที่มีการเปลี่ยนแปลง V_s และ V_h ของทั้งซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีแพร่สารเจือและโดยวิธีการอัลลอยมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเมื่อขนาดพื้นที่ของส่วนแอโนดเพิ่มขึ้น แต่เป็นการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้นเมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของระยะ i ซึ่งจะเห็นการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน แสดงให้เห็นว่าผลพื้นที่ของส่วนแอโนดจะมีผลน้อยกว่าผลของการเปลี่ยนแปลงระยะ i และการเปลี่ยนแปลงของส่วนแอโนดนั้นจะมีผลน้อยกว่าการเปลี่ยนแปลงของส่วนแคโทดที่เห็นการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนกว่า จากรูปที่ 4.37 พบว่า I_s มีการเปลี่ยนแปลงน้อยหรือใกล้เคียงกันแม้จะมีการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่และระยะ i ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยกระแส



รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่าง V_s และขนาดของแอโนดของซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$

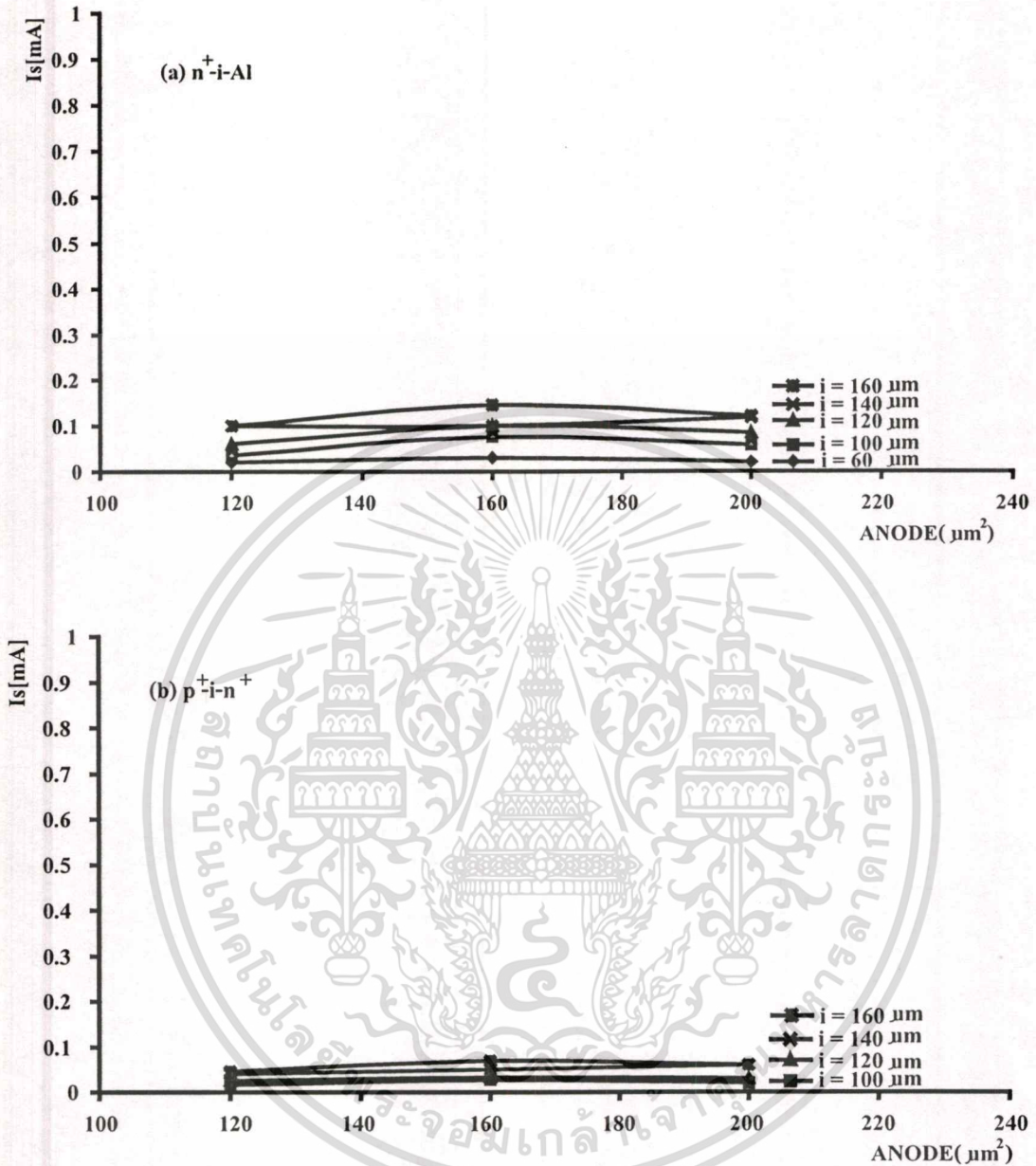
โดยวิธีการอัลลอย(a)และวิธีแพร่สารเจือ(b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารทงสวนไวสําหรับการใชงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่าง V_h และขนาดของแอโนดของซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอย (a) และวิธีแพร่สารเจือ (b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่าง I_s และขนาดของแอโนดของซีลิกอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอย (a) และวิธีแพร่สารเจือ (b)

4.5 ปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยแรงดันในซีลิกอนไดโอดชนิด $n^+ - i - Al$ injection gate

เพื่อศึกษาถึงการเกิดปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยแรงดันหรือ Voltage Controlled Negative Resistance (VCNR) ในซีลิกอนไดโอดชนิด $n^+ - i - Al$ injection gate เมื่อส่วน i

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

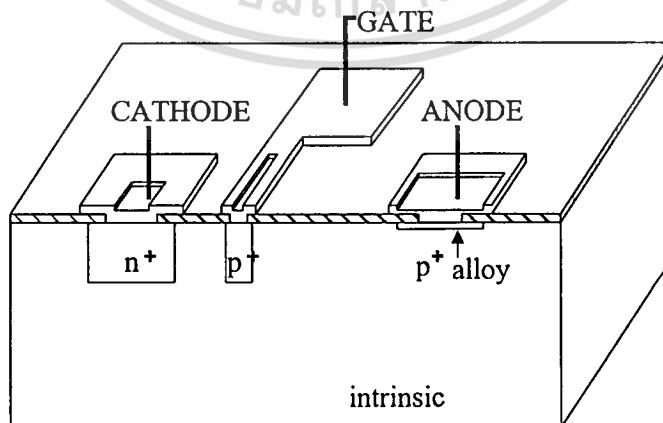
(intrinsic) มีเกทชนิดที่อยู่ที่ โดยทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลของโครงสร้างต่อพารามิเตอร์ที่สำคัญของไดโอดเมื่อส่วนเกทสร้างจากการแพร่อะตอมสารเจือโบรอนและการอัลลอยระหว่างอะลูมิเนียมและซิลิคอน เช่น กระแสค่ายอด (I_p : peak current), แรงดันค่ายอด (V_p : peak voltage) และ แรงดันขึ้น (V_R : rising voltage) [17-18]

จากการทดลองพบว่าซิลิคอนไดโอดชนิด n^+i -Al injection gate สามารถแสดงคุณสมบัติความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยแรงดันหรือ VCNR ได้ โดยมีลักษณะโครงสร้างโดยทั่วไปแสดงในรูปที่ 4.38 และ 4.39 โดยส่วน i (intrinsic)เกิดจากการแพร่อะตอมทองคำ คุณสมบัติความต้านทานระหว่างกระแสและแรงดันแสดงในรูปที่ 4.40 โดยกระแสค่ายอด(I_p) สามารถควบคุมได้ด้วยแรงดันที่เกท(V_g) จากที่ได้มีการเสนอผลการวิเคราะห์ ซึ่งเป็นทฤษฎีพื้นฐาน[4] ของซิลิคอนไดโอดชนิดนี้ โดยแสดงสมการพื้นฐานของพารามิเตอร์ต่างๆ ไว้ ดังนี้คือ

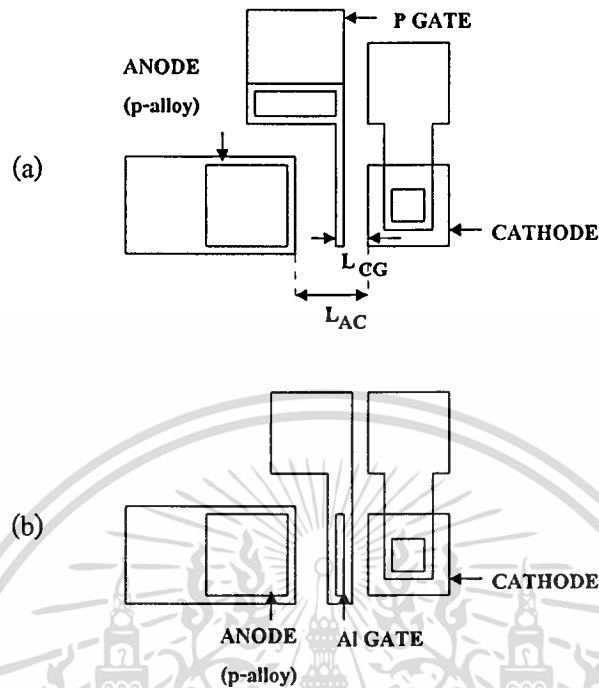
$$V_R = \frac{L_{AC}(L_{AC} - L_{CG})}{2\mu_n \tau_n} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{4\alpha\mu_n \tau_n V_g}{(L_{AC} - L_{CG})^2}} \right] \quad (4.1)$$

$$V_P = \frac{nL_{AC}kT}{qL_{CG}} + \frac{L_{AC}(L_{AC} - L_{CG})}{2\mu_n \tau_n} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{4\alpha\mu_n \tau_n V_g}{(L_{AC} - L_{CG})^2}} \right] \quad (4.2)$$

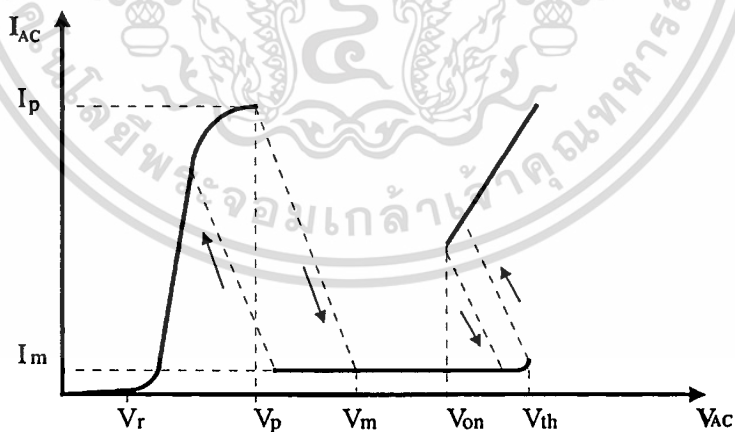
$$I_P = \frac{A\mu_n n_i nkT}{eL_{CG}} \exp \left(\frac{qV_g - nkT - \frac{qL_{CG}(L_{AC} - L_{CG})}{2\mu_n \tau_n} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{4\alpha\mu_n \tau_n V_g}{(L_{AC} - L_{CG})^2}} \right]}{nkT} \right) \quad (4.3)$$



รูปที่ 4.38 ลักษณะ โครงสร้างทั่วไปของซิลิคอนไดโอดชนิด n^+i -Al injection gate



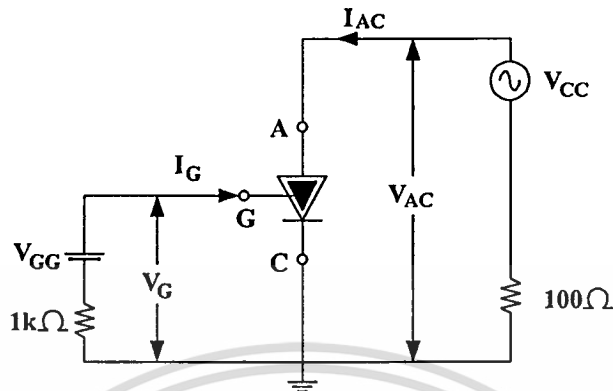
รูปที่ 4.39 ลักษณะ โครงสร้างด้านบนซิลิคอนไดโอดชนิด n^+ -i-Al injection gate เมื่อส่วนเกตสร้างจากการแพร่อะตอมสารเจือโบรอน 3(a) และ จากการออลอยระหว่างอะลูมิเนียมและซิลิคอน (b)



รูปที่ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของซิลิคอนไดโอดชนิด n^+ -i-Al injection gate

นำไดโอดที่สร้างไปทำการทดลองหาคุณสมบัติและความสัมพันธ์ของกระแสแอโนด (I_{AC}) และ แรงดันแอโนด-แคโทด (V_{AC}) โดยใช้เครื่องวัดคุณสมบัติทรานซิสเตอร์ (transistor curve tracer) วงจรวัดแสดงดังรูปที่ 4.41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

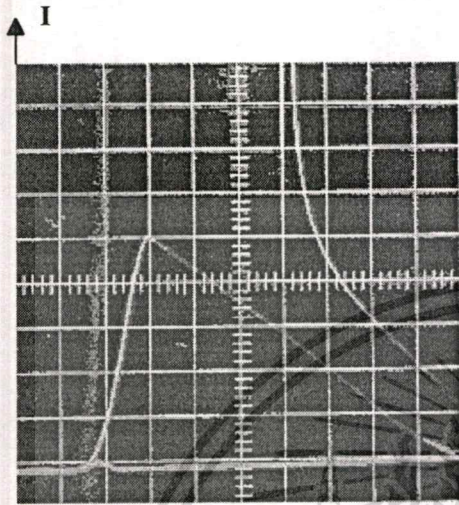


รูปที่ 4.41 วงจรวัดความสัมพันธ์ของกระแสแอนโอด (I_{AC}) และ แรงดันแอนโอด-แคโทด (V_{AC})

ผลการทดลองปรากฏว่า ขณะที่เกทถูกเปิดวงจร (open circuit) เมื่อแรงดัน V_{AC} มีค่าต่ำๆ กระแส I_{AC} จะมีค่าน้อยมากเกือบเป็นศูนย์ และเมื่อแรงดัน V_{AC} เพิ่มขึ้นจนถึงจุดแรงดันสวิทชิงค์ (V_{th}) ไดโอดจะนำไฟฟ้า กระแส I_{AC} จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นและเกิดปรากฏการณ์ CCNR อันเนื่องมาจาก Double injection เท่านั้น และขณะที่แรงดันเกท V_g มีค่าบวกค่าหนึ่งซึ่งมากกว่า 0 โวลต์ ปรากฏว่าเมื่อแรงดัน V_{AC} เพิ่มขึ้นจาก 0 โวลต์ และมีค่าเหนือค่าแรงดันค่าหนึ่งซึ่งเรียกว่า แรงดันขึ้น (V_R : rising voltage) กระแส I_{AC} จะมีค่าเพิ่มขึ้น และขณะที่แรงดัน V_{AC} เพิ่มขึ้น I_{AC} ก็จะเพิ่มขึ้นตาม จนกระทั่งแรงดัน V_{AC} มีค่าเท่ากับแรงดันค่ายอด (V_p : peak voltage) กระแส I_{AC} จะมีค่าสูงสุดและเท่ากับกระแสค่ายอด (I_p : peak current) เมื่อแรงดัน V_{AC} มีค่าเพิ่มสูงกว่า V_p , I_p จะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว เกิดปรากฏการณ์ VCNR และกระแส I_{AC} จะลดลง จนกระทั่งมีค่าต่ำสุดเป็นกระแสต่ำสุด (I_m : minimum current) กระแสนี้จะมีค่าน้อยมาก แต่ในบางกรณีอาจมีค่าเกือบเท่า $I_p/2$ และเมื่อแรงดัน V_{AC} ยังคงมีค่าสูงขึ้นไปอีกกระทั่งถึงจุด V_{th} ไดโอดจะนำกระแสอีกครั้งหนึ่งและเกิดปรากฏการณ์ CCNR ขึ้นมา

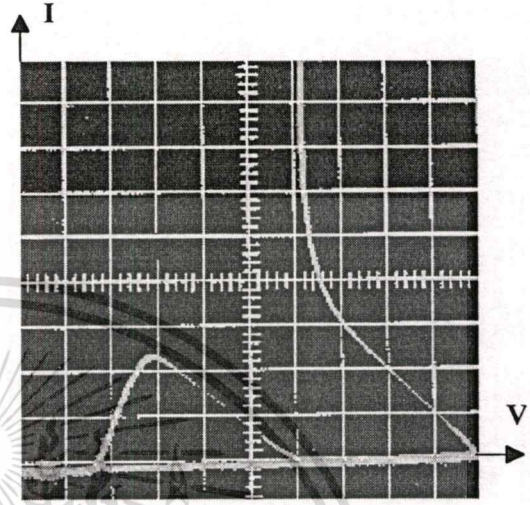
4.5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแอนโอด (I_{AC}) และ แรงดันแอนโอด-แคโทด (V_{AC}) ของ ซิลิคอนไดโอดชนิด $n^+ - i - Al$ injection gate

จากคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแอนโอด (I_{AC}) และ แรงดันแอนโอด-แคโทด (V_{AC}) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.42 พบว่าแม้ส่วนแอนโอดและเกทจะเกิดจากการอัลลอยระหว่าง อะลูมิเนียมและซิลิคอนก็สามารถแสดงคุณสมบัติความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยแรงดัน (VCNR) ออกมาได้



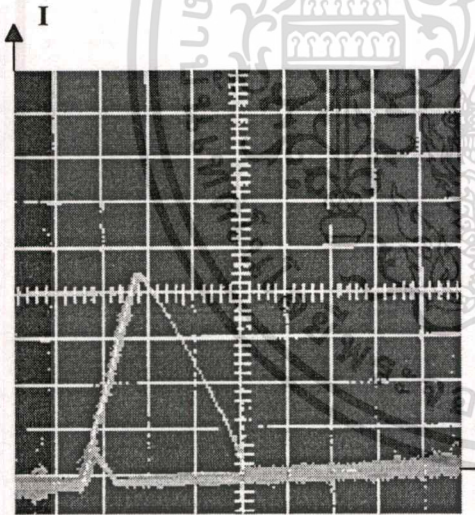
(a) $n^+ - i - Al$ p gate $L_{CG} = 60 \mu m$ $L_{AC} = 140 \mu m$

$V = 1V/Division$, $I = 0.1mA/Division$, $V_g = 2.5V$



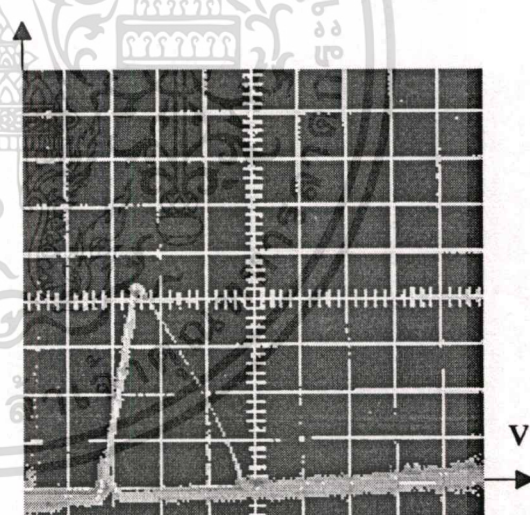
(b) $n^+ - i - Al$ p gate $L_{CG} = 80 \mu m$ $L_{AC} = 140 \mu m$

$V = 1V/Division$, $I = 0.1mA/Division$, $V_g = 2.5V$



(c) $n^+ - i - Al$ Al gate $L_{CG} = 60 \mu m$ $L_{AC} = 160 \mu m$

$V = 5V/Division$, $I = 0.2mA/Division$, $V_g = 12V$



(d) $n^+ - i - Al$ Al gate $L_{CG} = 80 \mu m$ $L_{AC} = 160 \mu m$

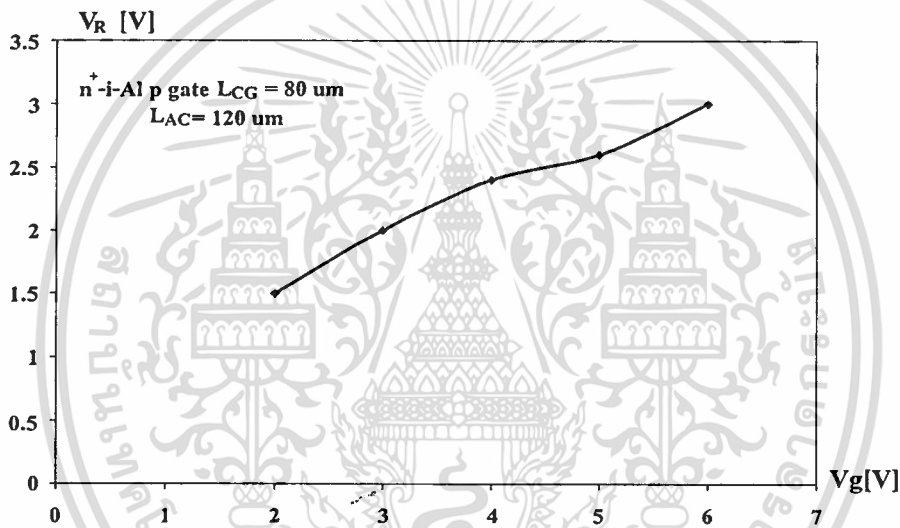
$V = 5V/Division$, $I = 0.2mA/Division$, $V_g = 12V$

รูปที่ 4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแอโนด (I_{AC}) และ แรงดันแอโนด-แคโทด (V_{AC}) ของซิลิคอน ไดโอดชนิด $n^+ - i - Al$ injection gate

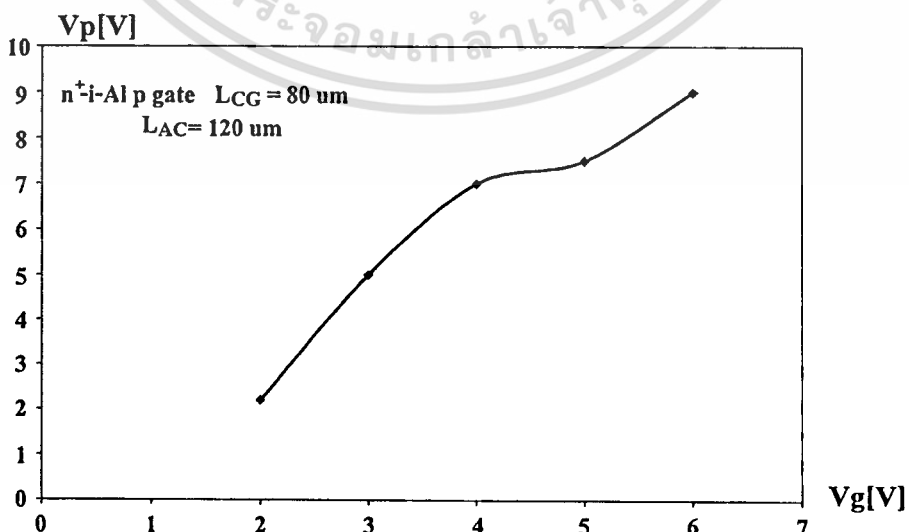
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคายอด (I_p), แรงดันคายอด (V_p) และ แรงดันขึ้น (V_R)
เมื่อแรงดันที่เกตมีค่าต่างๆ

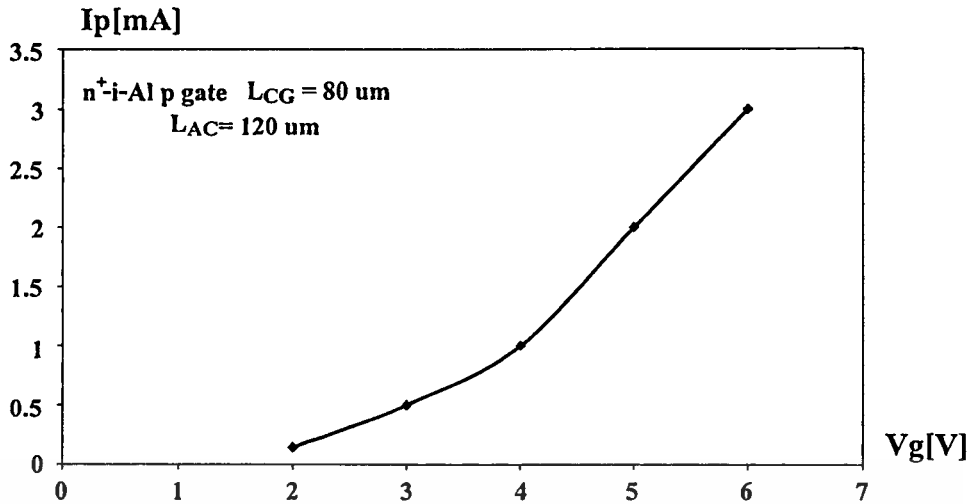
จากผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.43, 4.44 และ 4.45 จะเห็นว่าไดโอดทั้ง 2 โครงสร้างมีแนวโน้มที่เหมือนกัน โดยจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง V_R - V_g พบว่าเมื่อแรงดันเกตมีค่าเพิ่มขึ้นค่าของ V_R จะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนความสัมพันธ์ระหว่าง V_p - V_g เมื่อแรงดันเกตมีค่าเพิ่มขึ้นค่าของ V_p มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนและความสัมพันธ์ระหว่าง I_p - V_g เมื่อแรงดันเกตมีค่าเพิ่มขึ้นค่าของ I_p มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยโครงสร้าง n^+ -i-Al Al gate จะมีค่าแรงดันเกตที่สูงกว่าเนื่องจากปริมาณโฮลที่ถูกฉีดออกจากส่วนพีของไดโอดที่ส่วนเกตเป็นแบบอัลลอยจะน้อยกว่าของไดโอดแบบแพร่สารเจือ เป็นผลทำให้ค่าของ V_R และ V_p ของ n^+ -i-Al Al gate มีค่ามากกว่าแบบ n -i-Al p gate ส่วน I_p นั้นเมื่อแรงดันเกตมีค่าสูงๆค่าของ I_p จะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน



รูปที่ 4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันขึ้น (V_R) เมื่อแรงดันที่เกตมีค่าต่างๆ



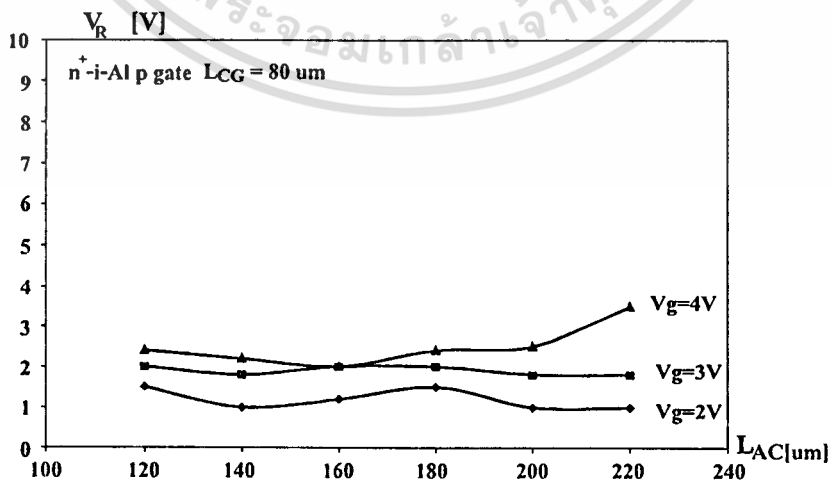
รูปที่ 4.44 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันคายอด (V_p) เมื่อแรงดันที่เกตมีค่าต่างๆ



รูปที่ 4.45 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคายอด (I_p)เมื่อแรงดันที่เกตมีค่าต่างๆ

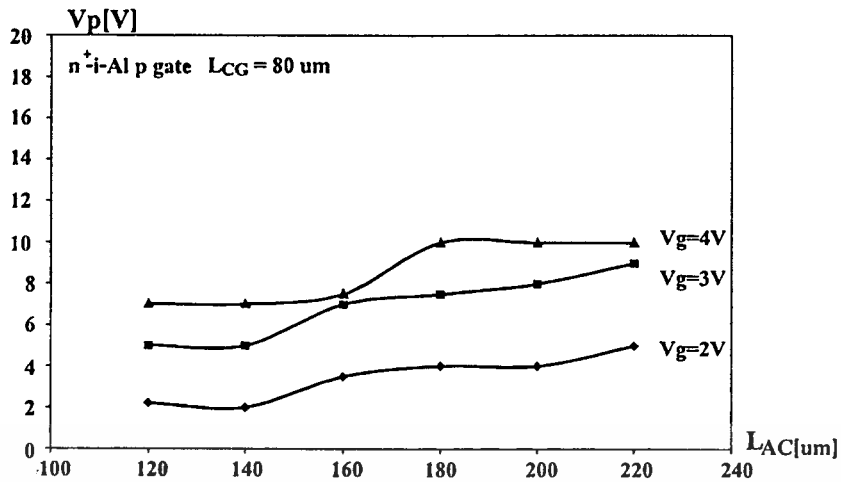
4.5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคายอด (I_p), แรงดันคายอด (V_p) และ แรงดันขึ้น (V_R) เมื่อระยะระหว่างแคโทดและแอโนด (L_{AC}) มีค่าต่างๆ

จากผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.46, 4.47, 4.48 โดยความสัมพันธ์ระหว่าง V_R - L_{AC} พบว่าเมื่อระยะ L_{AC} เพิ่มขึ้นค่าของ V_R ของไดโอดทั้งสองจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากหรือค่อนข้างคงที่ ความสัมพันธ์ระหว่าง V_p - L_{AC} โครงสร้าง n^+ -i-Al p gate เมื่อ L_{AC} เพิ่มขึ้น V_p มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วน n^+ -i-Al Al gate มีการเปลี่ยนแปลงน้อยเห็นไม่ชัดเจน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะผลของรอยต่อพี-เอ็นชนิดอัลลอยทำให้เมื่อระยะ L_{AC} เปลี่ยนไปจึงเห็นการเปลี่ยนแปลงได้ไม่ชัดเจน และความสัมพันธ I_p - L_{AC} ของ n^+ -i-Al p gate เมื่อระยะ L_{AC} เพิ่มขึ้น I_p มีค่าค่อนข้างคงที่ หรือมีการเปลี่ยนแปลงน้อย ส่วน n^+ -i-Al Al gate I_p มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย

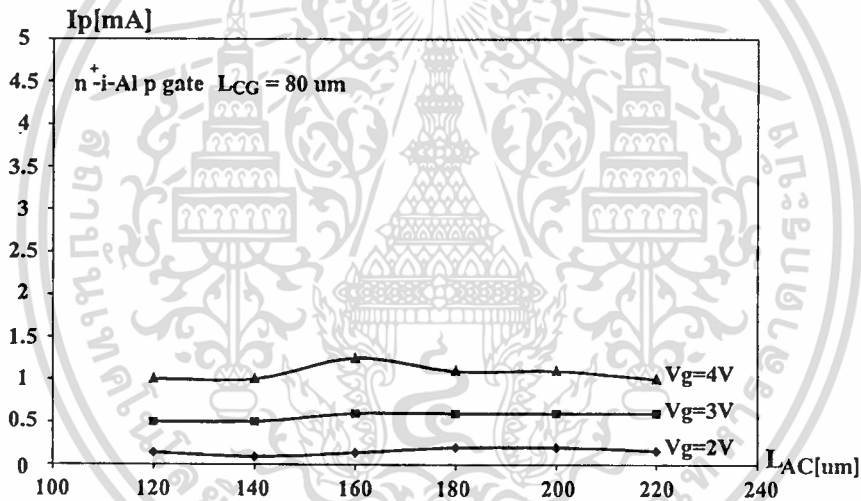


รูปที่ 4.46 ความสัมพันธ์ระหว่าง V_R - L_{AC}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.47 ความสัมพันธ์ระหว่าง V_p - L_{AC}



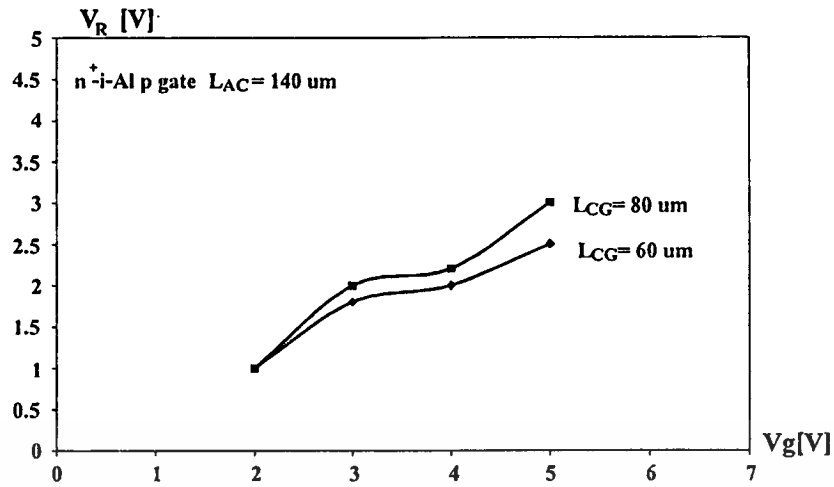
รูปที่ 4.48 ความสัมพันธ์ระหว่าง I_p - L_{AC}

4.5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสคายอด (I_p), แรงดันคายอด (V_p) และ แรงดันขึ้น (V_R)

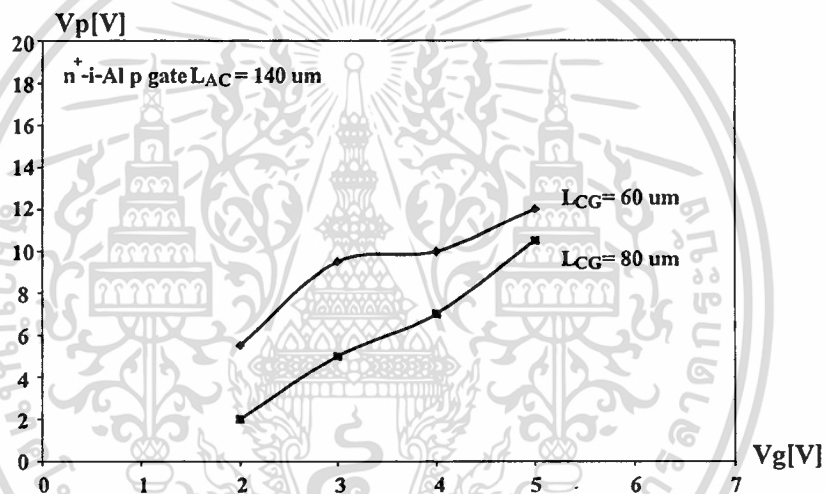
เมื่อระยะระหว่างแคโทดและเกต (L_{CG}) มีค่าต่างๆ

จากผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.49, 4.50 และ 4.51 โครงสร้างของไดโอดทั้งสองโครงสร้างมีแนวโน้มที่เหมือนกันคือ ความสัมพันธ์ระหว่าง V_R - V_g เห็นว่าเมื่อระยะ L_{CG} มีค่า $80 \mu m$ V_R จะมีค่ามากกว่า ระยะ L_{CG} มีค่า $60 \mu m$ เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ความสัมพันธ์ระหว่าง V_p - V_g เมื่อระยะ L_{CG} มีค่า $60 \mu m$ ค่าของ V_p จะมีค่าสูงกว่าเมื่อระยะ L_{CG} มีค่า $80 \mu m$ และ ความสัมพันธ์ระหว่าง I_p - V_g เมื่อระยะ L_{CG} มีค่า $60 \mu m$ ค่าของ V_p จะมีค่าสูงกว่าเมื่อระยะ L_{CG} มีค่า $80 \mu m$

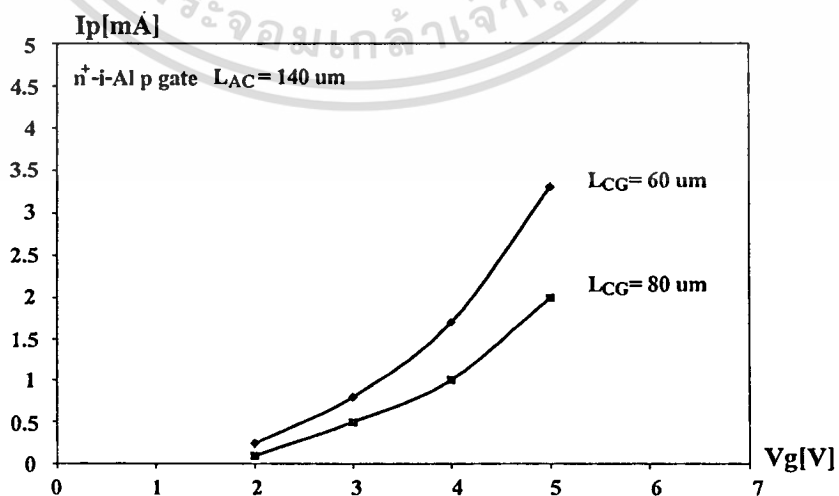
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.49 ความสัมพันธ์ระหว่าง V_R - L_{CG}



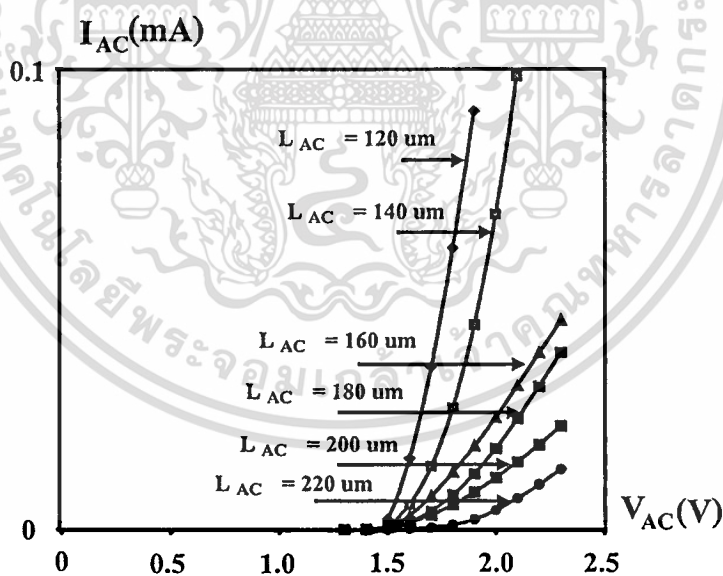
รูปที่ 4.50 ความสัมพันธ์ระหว่าง V_p - L_{CG}



รูปที่ 4.51 ความสัมพันธ์ระหว่าง I_p - L_{CG}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองพบว่าซิลิคอนไดโอดชนิด n^+i -Al injection gate สามารถแสดงคุณสมบัติความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยแรงดัน(VCNR) ได้แม้ส่วนเกตชนิดพีจะเกิดจากการแพร่อะตอมสารเจือชนิดพีหรือการอัลลอยระหว่างอะลูมิเนียมและซิลิคอน โดยในส่วนพีของไดโอดที่ส่วนเกตเกิดจากการอัลลอยเนื่องจากเป็นอัลลอยของอะลูมิเนียมและซิลิคอนและผลของรอยต่อพี-เอ็นชนิดอัลลอยทำให้ต้องใช้แรงดันเกตค่าสูงกว่ามากจึงจะสามารถแสดงคุณสมบัติความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยแรงดันออกมาได้ โดยจากผลการทดลองพบว่าเมื่อแรงดันเกตเพิ่มขึ้นค่าของ I_p จะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเนื่องมาจากตามสมการที่ 4.3 $I_p \propto \exp(qV_g/nkT)$ ส่วน V_R , $V_p \propto \sqrt{V_g}$ ดังสมการที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ เมื่อทำการพิจารณาที่ระยะระหว่างแคโทดและเกต(L_{CG}) คงที่พบว่าเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงระยะระหว่างแอโนดและแคโทด(L_{AC}) นั้นค่าของ I_p , V_R และ V_p มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากแต่ระยะ L_{AC} จะมีผลต่อความชันในช่วง $V_R < V_{AC} < V_p$ เนื่องจากเมื่อระยะ L_{AC} เพิ่มขึ้นค่าความต้านทานของไดโอดก็จะเพิ่มขึ้นแสดงดังรูปที่ 4.52 และเมื่อให้ระยะระหว่างแอโนดและแคโทด(L_{AC}) มีค่าคงที่และทำการเปลี่ยนแปลงระยะระหว่างแคโทดและเกต(L_{CG}) พบว่าค่าของ I_p และ V_p จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามสมการที่ 4.2 และ 4.3 ตามลำดับส่วน V_R นั้นจะเกี่ยวข้องกับสนามไฟฟ้าบริเวณระหว่างเกตและแอโนดดังนั้นพบว่าเมื่อระยะระหว่างเกตและแอโนดลดลงค่าของ V_R จึงลดลงเล็กน้อยดัง สมการที่ 4.1



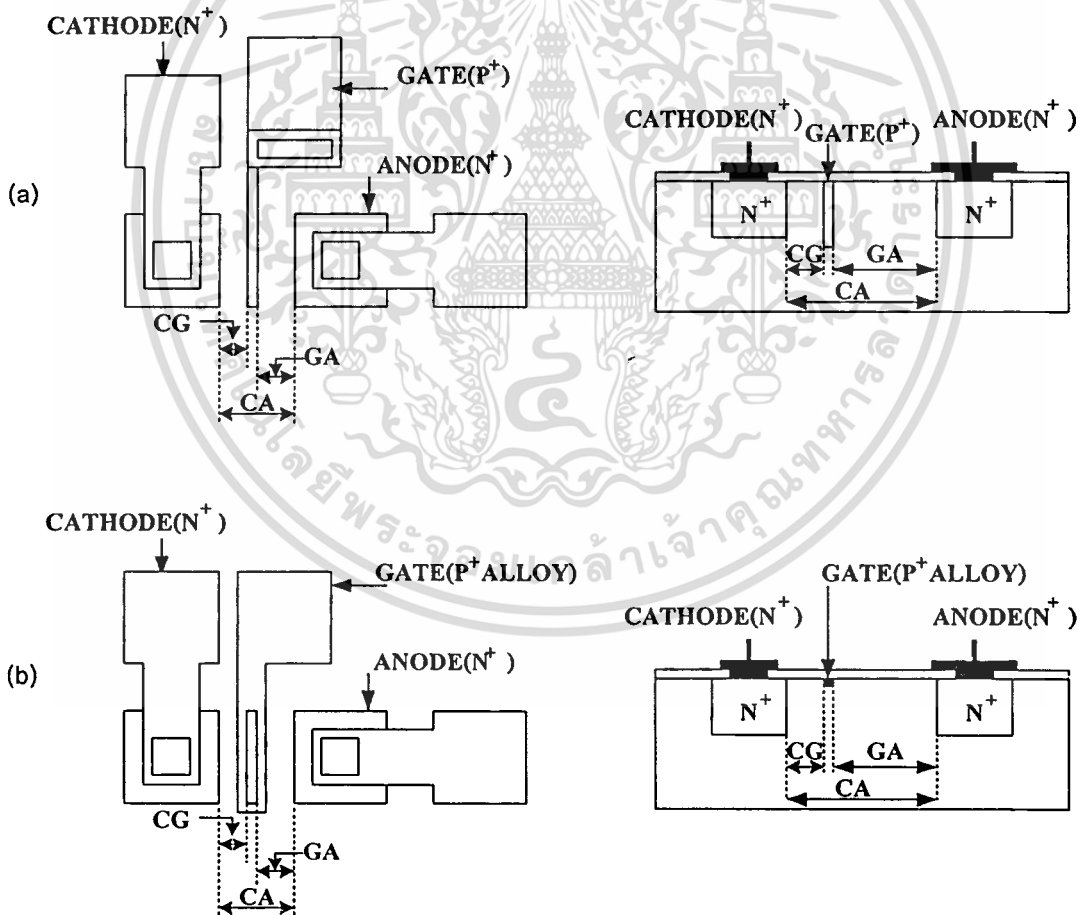
รูปที่ 4.52 ความสัมพันธ์ระหว่าง I_{AC} - V_{AC} เมื่อ $V_R < V_{AC} < V_p$ ที่ระยะ L_{AC} มีค่าต่างๆ

4.6 ปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยแรงดันในซิลิคอนไดโอดชนิด

n^+i-n^+ injection gate

เพื่อศึกษาถึงการเกิดปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยแรงดันหรือ Voltage Controlled Negative Resistance (VCNR) ในซิลิคอนไดโอดชนิด n^+i-n^+ injection gate เมื่อส่วน i (intrinsic) มีเกณฑ์นิกฟืออยู่ โดยสร้างส่วนเกทจากการแพร่สารเจือชนิดพี (โบรอน) และการอัลลอยระหว่างอะลูมิเนียมและซิลิคอน จากผลการทดลองพบว่าถึงแม้ทั้งส่วนแคโทดและแอโนดของซิลิคอนไดโอดชนิด n^+i-n^+ injection gate จะเกิดจากการแพร่สารเจือชนิดเอ็น (ฟอสฟอรัส) ก็ยังสามารถแสดงคุณสมบัติ VCNR ได้เช่นเดียวกับซิลิคอนไดโอดชนิด n^+i-Al injection gate ซึ่งเป็นข้อดีทำให้สามารถลดขั้นตอนการสร้างได้จึงเหมาะที่จะนำไปศึกษาและพัฒนาต่อไป

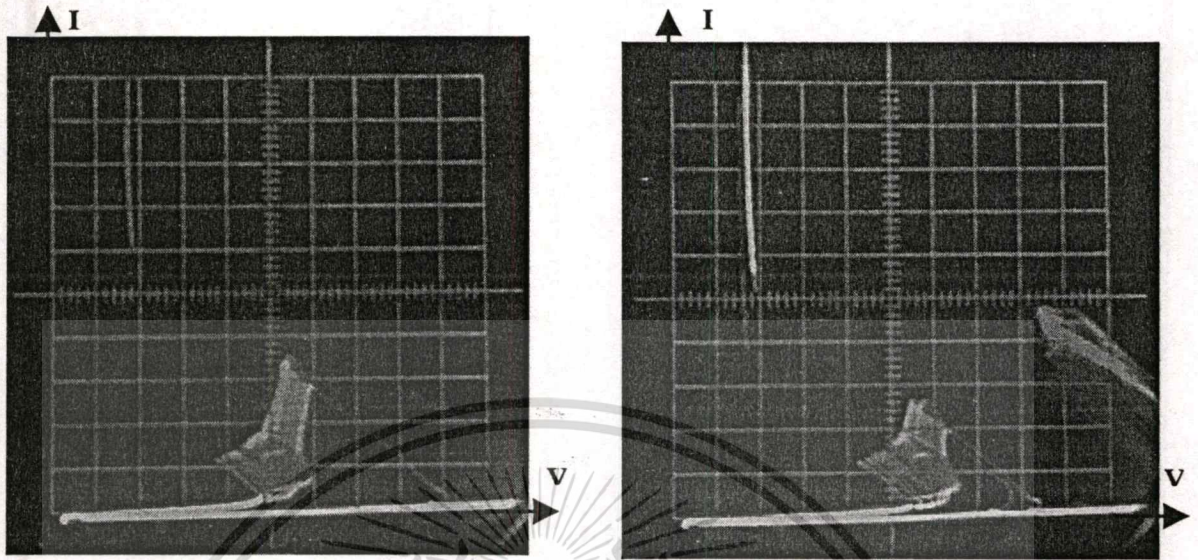
ในการทดลองได้ออกแบบและสร้างซิลิคอนไดโอดชนิด n^+i-n^+ injection gate ให้ส่วน i มีระยะความยาวต่าง ๆ กันตั้งแต่ 120, 140, 160, 180, 200 และ 220 ไมโครเมตรตามลำดับ โดยมีลักษณะโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 4.53



รูปที่ 4.53 โครงสร้างของซิลิคอนไดโอดชนิด n^+i-n^+ injection gate เมื่อส่วนเกทสร้างจากการแพร่อะตอมสารเจือโบรอน(a) และจากการอัลลอยระหว่างอะลูมิเนียมและซิลิคอน(b)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อศึกษาถึงการทำงานของไดโอดจึงได้ทำการทดลองหาคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันดังแสดงในรูปที่ 4.54



(a) $n^+ - i - n^+ p^+$ gate

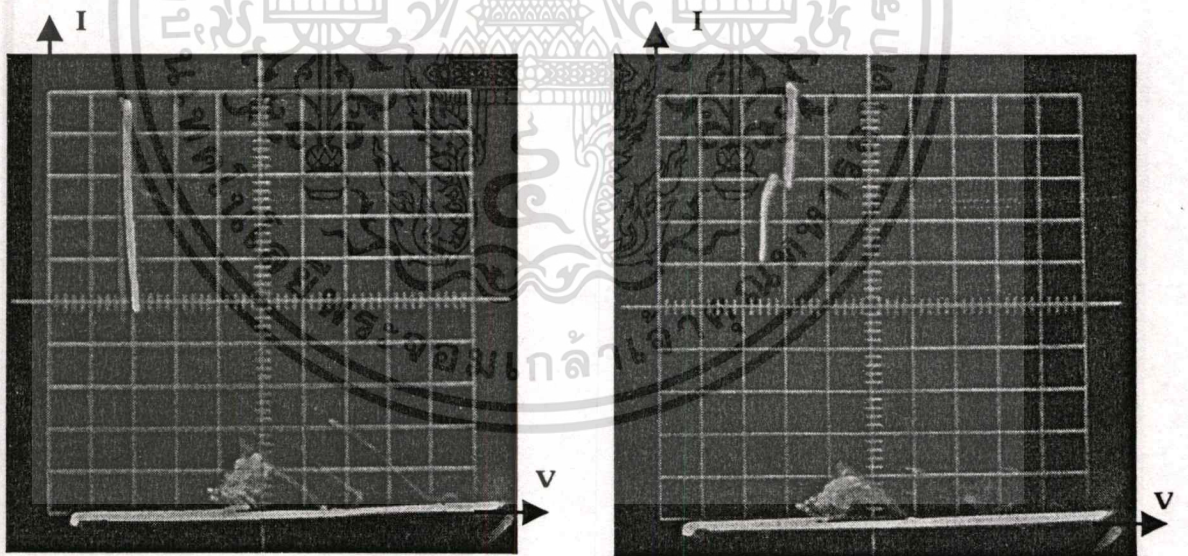
$$L_{AC} = 180 \mu\text{m}, L_{CG} = 60 \mu\text{m} : V_g = 4 \text{ V}$$

$$I = 2 \text{ mA / Division}, V = 20 \text{ V / Division}$$

(b) $n^+ - i - n^+ p^+$ gate

$$L_{AC} = 200 \mu\text{m}, L_{CG} = 80 \mu\text{m} : V_g = 4 \text{ V}$$

$$I = 2 \text{ mA / Division}, V = 20 \text{ V / Division}$$



(c) $n^+ - i - n^+ \text{ Al gate}$

$$L_{AC} = 180 \mu\text{m}, L_{CG} = 60 \mu\text{m} : V_g = 12 \text{ V}$$

$$I = 2 \text{ mA / Division}, V = 20 \text{ V / Division}$$

(d) $n^+ - i - n^+ \text{ Al gate}$

$$L_{AC} = 180 \mu\text{m}, L_{CG} = 80 \mu\text{m} : V_g = 12 \text{ V}$$

$$I = 2 \text{ mA / Division}, V = 20 \text{ V / Division}$$

รูปที่ 4.54 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของซิลิคอนไดโอดชนิด $n^+ - i - n^+$ injection gate

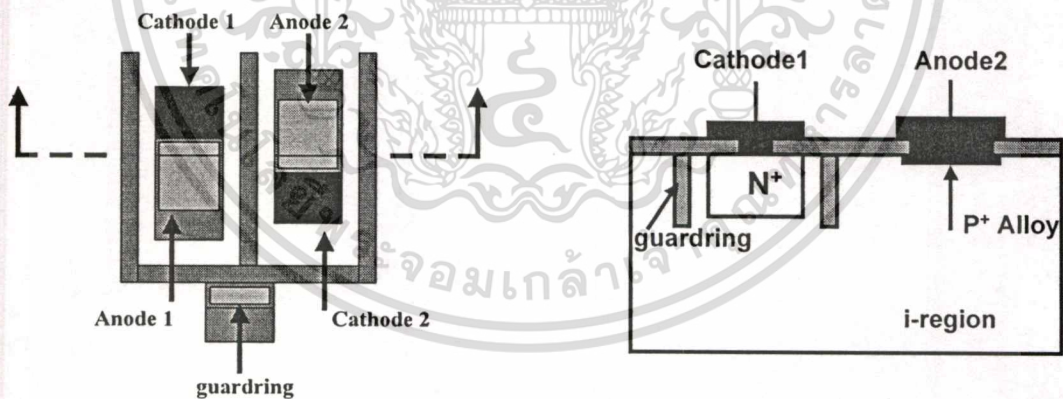
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองพบว่าสามารถเกิด VCNR ได้ทั้งในกรณีที่ส่วนเกทเกิดจากการแพร่สารเจือและเกิดจากการอัลลอย โดยแรงดันเกทที่ใช้ในการเกิด VCNR ของ $n^+ - i - n^+$ Al gate จะมีค่าสูงกว่า $n^+ - i - n^+ p^+$ gate เนื่องจากผลของรอยต่อพี-เอ็นที่เกิดจากการอัลลอยทำให้ต้องใช้แรงดันเกทค่าสูงกว่า และพบว่าเมื่อแรงดันเกทเพิ่มขึ้นค่า V_R และ V_p จะมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วน I_p จะมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนทั้งส่วนเกทที่สร้างจากการแพร่สารเจือและจากการอัลลอย นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นการเกิดออสซิลเลต (oscillate)

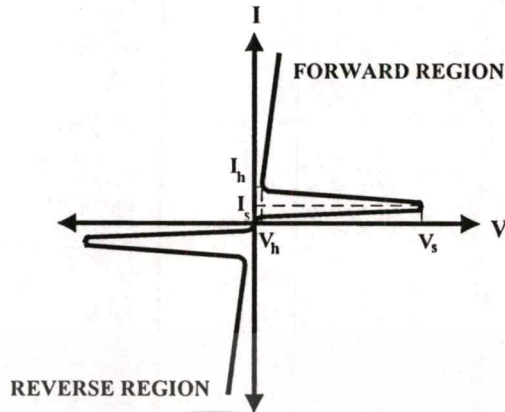
4.7 ปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยกระแสในซิลิคอนไดโอดชนิด

Bi-directional $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอย

เพื่อศึกษาคุณสมบัติสวิตชิงค์และความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยกระแส (CCNR) ได้ทั้งในขณะที่ไดโอดได้รับแรงดันไบอัสตรงและแรงดันไบอัสย้อนกลับของซิลิคอนไดโอดชนิด Bi-directional $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอยที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมทองคำ ซึ่งตามปกติซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอยนั้นจะแสดงคุณสมบัติสวิตชิงค์และความต้านทานเชิงลบเฉพาะในขณะที่ได้รับแรงดันไบอัสตรงเท่านั้น จึงเป็นข้อดีของไดโอดโครงสร้างใหม่นี้ในการนำไปใช้ในวงจรกระแสกลับได้ โดยมีลักษณะโครงสร้างพื้นฐานดังแสดงในรูปที่ 4.55 และคุณสมบัติกระแสและแรงดันของซิลิคอนไดโอดชนิด Bi-directional $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอยแสดงดังในรูปที่ 4.56

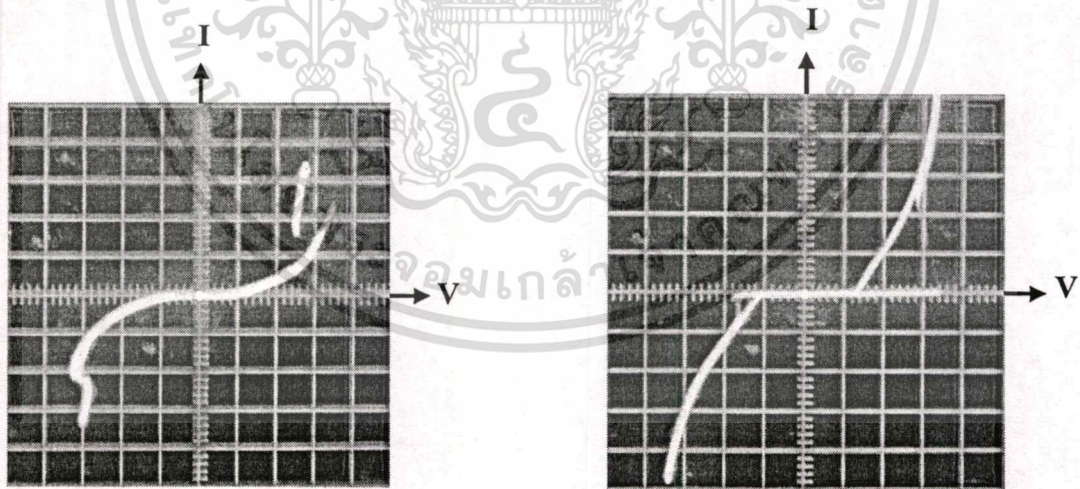


รูปที่ 4.55 ลักษณะซิลิคอนไดโอดชนิด Bi-directional $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอย



รูปที่ 4.56 คุณสมบัติกระแสและแรงดันของซิลิคอนไดโอดชนิด Bi-directional p⁺-i-n⁺ โดยวิธีการอัลลอย

ในการทดลองได้ออกแบบและสร้างซิลิคอนไดโอดชนิด Bi-directional p⁺-i-n⁺ โดยวิธีการอัลลอยโดยให้ส่วน i มีระยะความยาวต่างๆกันตั้งแต่ 50, 60, 80, 100, 120 ไมโครเมตรตามลำดับ เพื่อศึกษาถึงการทำงานของไดโอดจึงได้ทำการทดลองหาคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันดังแสดงในรูปที่ 4.57



(a) เมื่อระยะ i = 50 ไมโครเมตร
I = 0.5 mA/Division, V = 5 V/Division

(b) เมื่อระยะ i = 120 ไมโครเมตร
I = 1 mA/Division, V = 20 V/Division

รูปที่ 4.57 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของซิลิคอนไดโอดชนิด Bi-directional p⁺-i-n⁺ โดยวิธีการอัลลอย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยในขณะที่ไดโอดได้รับแรงดันไบอัสตรงจะทำให้แคโทด1 และแอโนด2 ทำงานสามารถอธิบายการทำงานของไดโอดได้คือขณะที่ไดโอดได้รับแรงดันไบอัสตรงค่าน้อย ($V < V_0$) อิเล็กตรอนจากส่วน n^+ และโฮลจากส่วน p^+ จะถูกฉีดเข้าไปในส่วน i ของไดโอด ซึ่งในส่วน i มีระดับแตรป(trapped level) ของอะตอมทองคำปรากฏอยู่ โฮลจะถูกจับโดยระดับแตรปทำให้มีเพียงอิเล็กตรอนจำนวนน้อยที่สามารถเคลื่อนที่ข้ามส่วน i ได้ กระแสที่ไหลผ่านไดโอดจึงมีค่าน้อยมาก แรงดันที่ตกคร่อมไดโอดจะเพิ่มขึ้นตามแรงดันไบอัสและเมื่อแรงดันไบอัสมีค่าใกล้เคียงกับแรงดันสวิทชิงค์(V_0) กระแสจะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจนเมื่อแรงดันไบอัสมีค่าเท่ากับแรงดันสวิทชิงค์ ($V=V_0$) ระดับแตรปในส่วน i ทุกระดับจะอึดตัวเนื่องจากจับโฮลไว้เต็มทุกระดับและกระแสขณะนี้มีค่า I_0 (switching current) ดังนั้นเมื่อแรงดันไบอัสสูงกว่าแรงดันสวิทชิงค์ ($V > V_0$) จะทำให้เกิดปรากฏการณ์การฉีดพาหะคู่ควบในส่วน i (double injection in intrinsic region) กล่าวคืออิเล็กตรอนและโฮลสามารถเคลื่อนที่ข้ามส่วน i ได้ ทำให้มีการเพิ่มขึ้นของกระแสอย่างรวดเร็วในขณะที่ส่วน i ก็มีค่าความต้านทานลดลงทันที ดังนั้นแรงดันตกคร่อมไดโอดจะมีค่าลดลงขณะที่กระแสมีค่าเพิ่มขึ้น ไดโอดจึงแสดงความต้านทานเชิงลบออกมา แรงดันที่ตกคร่อมไดโอดจะลดลงต่ำสุด เป็น V_h (holding voltage) เมื่อเพิ่มแรงดันไบอัสต่อไปแรงดันตกคร่อมไดโอดจะเพิ่มขึ้นพร้อมๆกับการเพิ่มขึ้นของกระแส และเมื่อไดโอดได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับจะทำให้แคโทด2 และแอโนด1 ทำงานซึ่งสามารถอธิบายการทำงานของไดโอดได้เช่นเดียวกับในขณะที่ไดโอดได้รับแรงดันไบอัสตรง

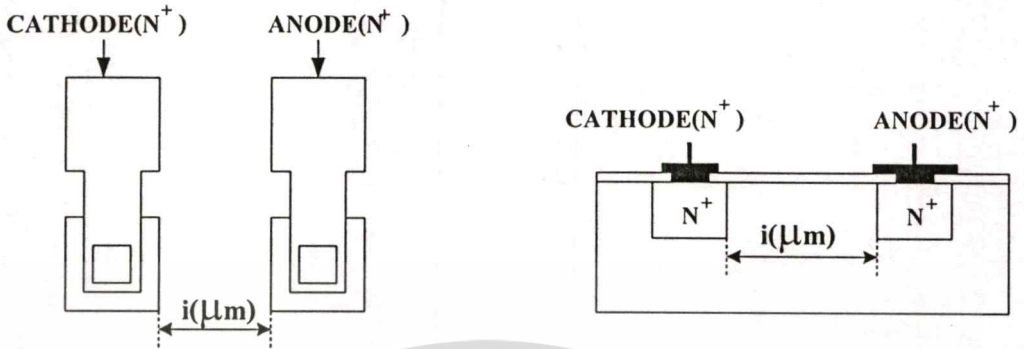
เนื่องจากโครงสร้างของซิลิคอนไดโอดชนิด Bi-directional $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอยนั้นส่วนแอโนดสามารถสร้างโดยไม่ต้องแพร่อะตอมโบรอนแต่ใช้เทคนิคการอัลลอย ทำให้สามารถสร้างส่วนแคโทดและแอโนดได้ในขั้วไฟฟ้าเดียวกัน ซึ่งทำให้ไดโอดสามารถแสดงคุณสมบัติสวิทชิงค์และความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยกระแส(CCNR)ได้ ทั้งในขณะที่ไดโอดได้รับแรงดันไบอัสตรงและแรงดันไบอัสย้อนกลับและจากการทดลองพบว่าแม้ระยะมีค่าเพียง 50 ไมโครเมตรไดโอดก็สามารถทำงานได้ จึงเป็นข้อดีในการจะพัฒนาให้เป็นอุปกรณ์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ได้ต่อไป

4.8 ปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยกระแสในซิลิคอนไดโอดชนิด

Bi-directional $n^+ - i - n^+$

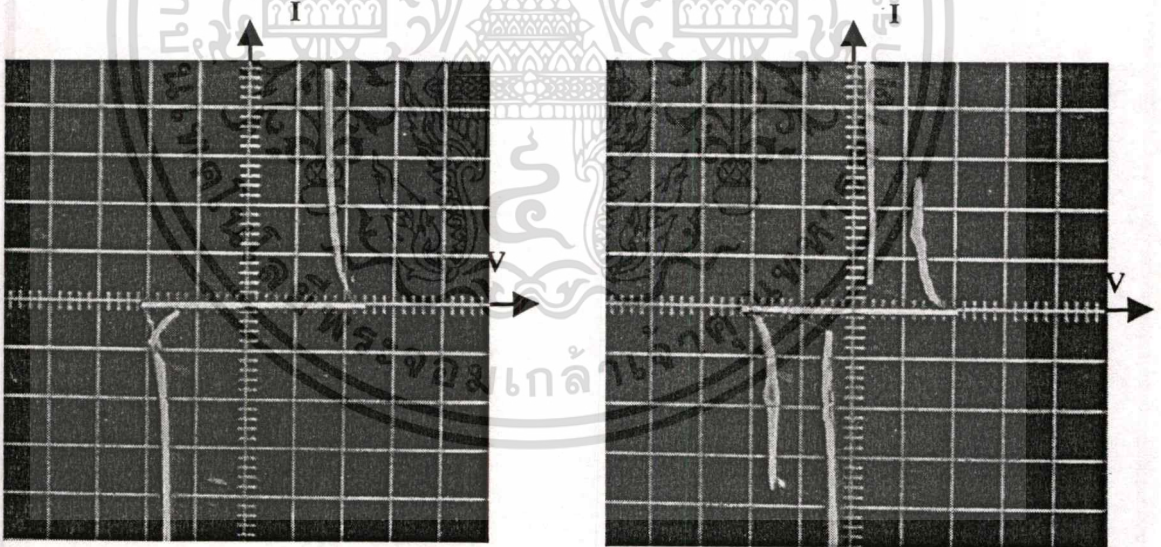
เพื่อศึกษาคุณสมบัติสวิทชิงค์และความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยกระแส(CCNR) ทั้งในขณะที่ไดโอดได้รับแรงดันไบอัสตรงและแรงดันไบอัสย้อนกลับของซิลิคอนไดโอดชนิด Bi-directional $n^+ - i - n^+$ ที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมทองคำ ซึ่งตามปกติซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอยนั้นจะแสดงคุณสมบัติสวิทชิงค์และความต้านทานเชิงลบเฉพาะในขณะที่ได้รับแรงดัน

ไบอัสตรงเท่านั้น จึงเป็นข้อดีของไดโอดในการนำไปใช้ในวงจรกระแสกลับได้และทำให้ลดขั้นตอนในการสร้างได้ โดยมีลักษณะโครงสร้างพื้นฐานดังแสดงในรูปที่ 4.58



รูปที่ 4.58 ลักษณะโครงสร้างของซิลิคอนไดโอดชนิด Bi-directional $n^+ - i - n^+$

ในการทดลองได้ออกแบบและสร้างซิลิคอนไดโอดชนิด Bi-directional $n^+ - i - n^+$ โดยให้ส่วน i มีระยะความยาวค่าต่างๆกันตั้งแต่ 20-220 ไมโครเมตรตามลำดับ เพื่อศึกษาถึงการทำงานของไดโอดจึงได้ทำการทดลองหาคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันดังแสดงในรูปที่ 4.59



(a) $i = 20 \mu\text{m}$,

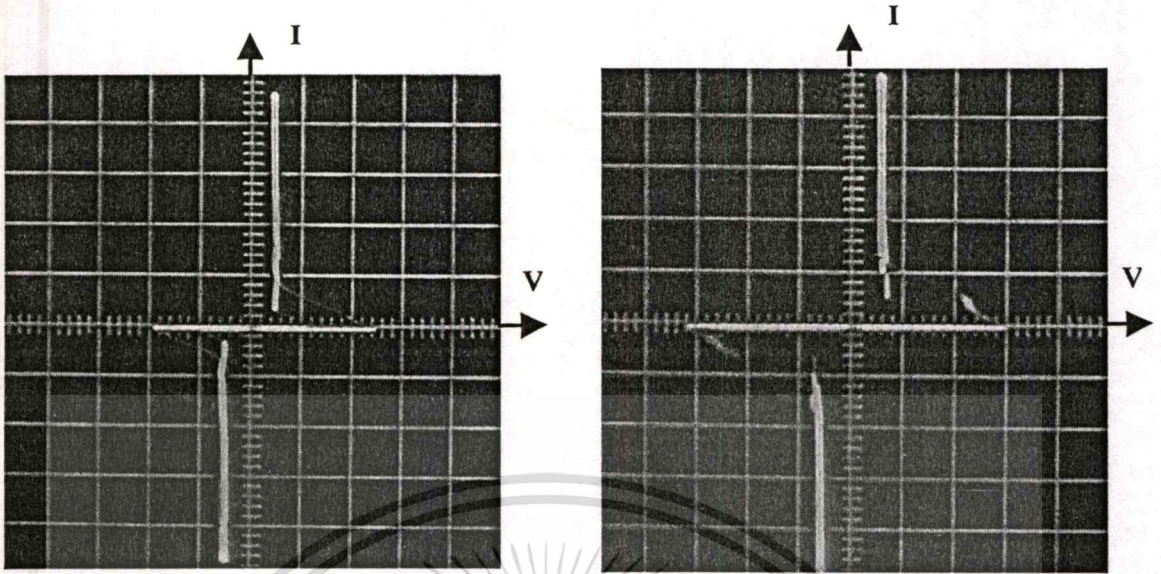
$I = 1 \text{ mA / Division}$, $V = 20 \text{ V / Division}$

(b) $i = 40 \mu\text{m}$

$I = 10 \text{ mA / Division}$, $V = 50 \text{ V / Division}$

รูปที่ 4.59 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของซิลิคอนไดโอดชนิด Bi-directional $n^+ - i - n^+$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

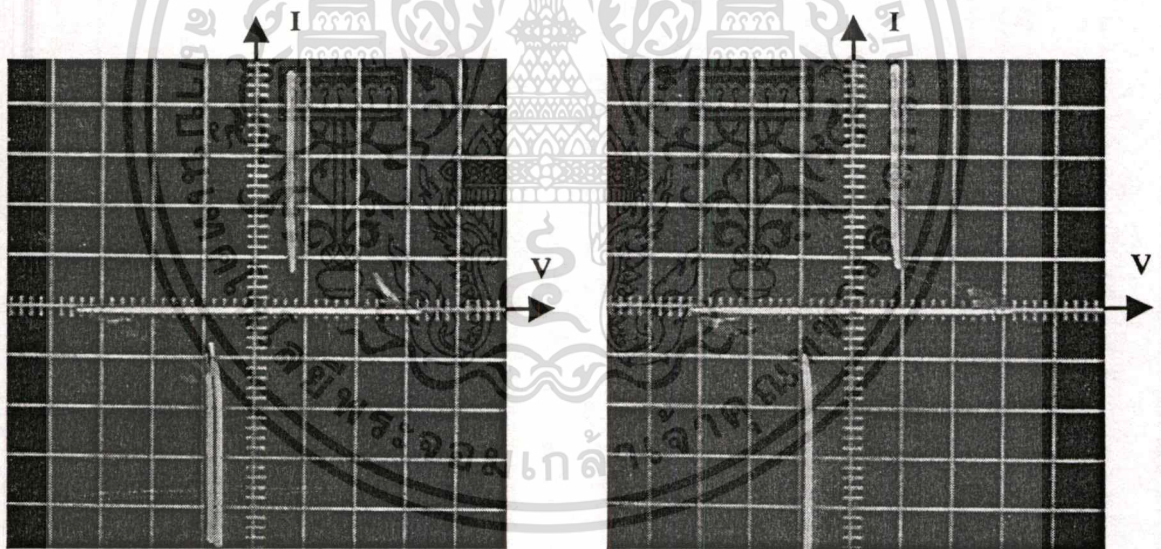


(c) $i = 60 \mu\text{m}$,

$I = 10 \text{ mA / Division}$, $V = 50 \text{ V / Division}$

(d) $i = 80 \mu\text{m}$

$I = 10 \text{ mA / Division}$, $V = 50 \text{ V / Division}$



(e) $i = 100 \mu\text{m}$,

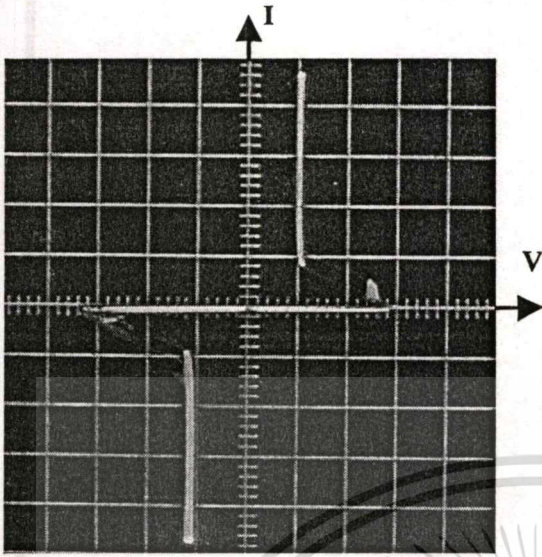
$I = 10 \text{ mA / Division}$, $V = 50 \text{ V / Division}$

(f) $i = 120 \mu\text{m}$

$I = 10 \text{ mA / Division}$, $V = 50 \text{ V / Division}$

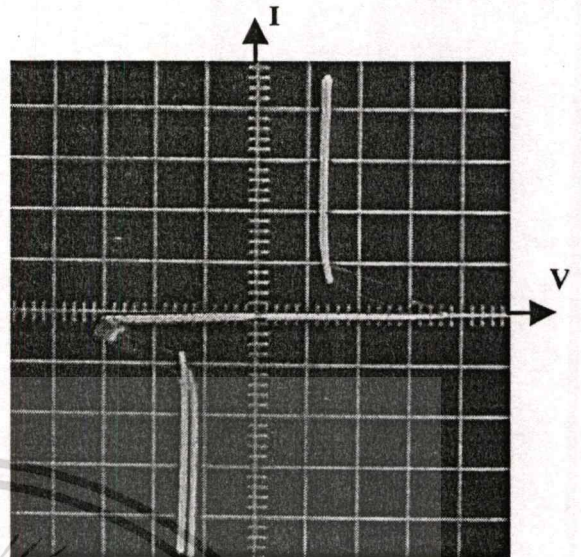
รูปที่ 4.59(ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



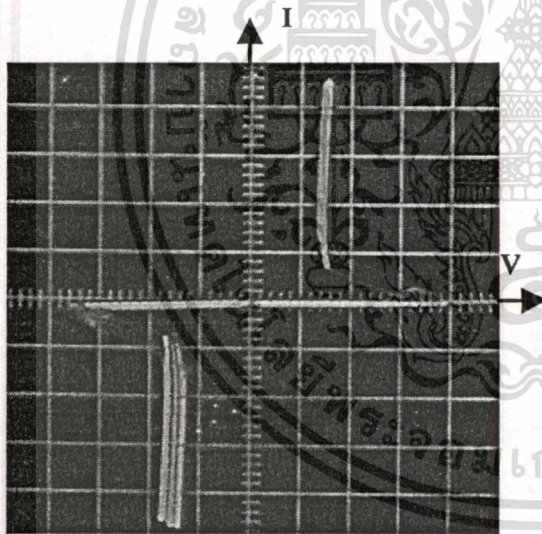
(g) $i = 140 \mu\text{m}$,

$I = 10 \text{ mA / Division}$, $V = 50 \text{ V / Division}$



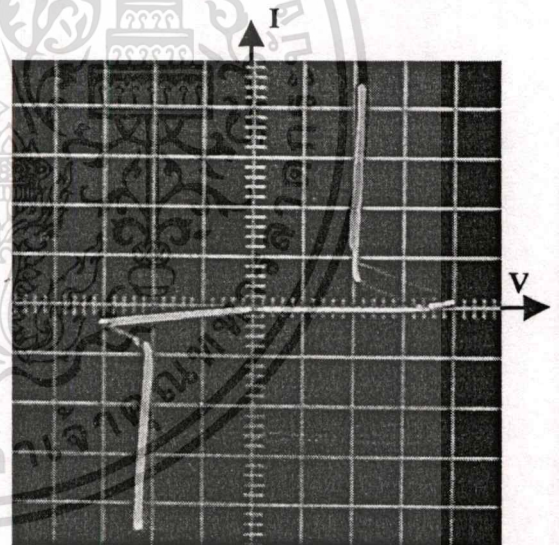
(h) $i = 160 \mu\text{m}$

$I = 10 \text{ mA / Division}$, $V = 50 \text{ V / Division}$



(i) $i = 180 \mu\text{m}$,

$I = 10 \text{ mA / Division}$, $V = 50 \text{ V / Division}$



(j) $i = 220 \mu\text{m}$

$I = 10 \text{ mA / Division}$, $V = 50 \text{ V / Division}$

รูปที่ 4.59(ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองพบว่าการเกิด CCNR ทั้งในขณะได้รับแรงดันไบอัสตรงและย้อนกลับ ค่อนข้างสมมาตรกันหรือมีแนวโน้มค่าของพารามิเตอร์ต่างๆ มีค่าใกล้เคียงกันซึ่งเป็นข้อดีในการนำไปใช้งานกระแสสลับ และพบว่าเมื่อระยะ i เพิ่มขึ้น V_p , V_{pk} มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่วนเมื่อระยะ i เพิ่มขึ้น I_p มีแนวโน้มใกล้เคียงกันแต่ไม่คงที่นักเนื่องจากมีผลของกระแสรั่วที่บริเวณพื้นผิวเนื่องจากไม่มีส่วนการ์ดริง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นงานวิจัยเพื่อทำการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอย ซึ่งพบว่าการนำเทคนิคอัลลอยมาใช้แทนการแพร่สารเจือโบรอนในการสร้างส่วนแอนโอดนั้น ทำให้ไดโอดสามารถแสดงคุณสมบัติสวิตชิงค์และความต้านทานเชิงลบได้แม้ส่วน i มีระยะสั้นๆ ทำให้สามารถที่จะพัฒนาให้เป็นอุปกรณ์สวิตชิงค์ขนาดเล็กต่อไปได้ ในส่วนแรกของงานวิจัยได้ทำการศึกษาคุณสมบัติรอยต่อของพี-เอ็นโดยเทคนิคการอัลลอย โดยใช้ฐานรองชนิดเอ็นซึ่งมีพิภักความต้านทานเช่นเดียวกับที่จะใช้สร้างไดโอดต่อไป คือ 80-120 โอห์ม-เซนติเมตร สร้างส่วนพีจากการอัลลอยระหว่างอะลูมิเนียมและซิลิคอนขณะทำการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ตามลำดับเป็นเวลา 12 นาที พบว่ารอยต่อพี-เอ็นที่สร้างขึ้นมีคุณสมบัติเช่นเดียวกับไดโอดรอยต่อพี-เอ็นที่สร้างจากการแพร่สารเจือทั่วไป พบว่าที่อุณหภูมิซินเตอร์ 500 องศาเซลเซียส ไดโอดจะนำกระแสได้ดีที่สุด ซึ่งในการสร้างซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอยนั้นก็สร้างส่วนนี้จากการอัลลอยระหว่างอะลูมิเนียมและซิลิคอน ขณะซินเตอร์ที่ อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 นาทีเช่นกัน ในส่วนที่ 2 ได้ทำการสร้างซิลิคอนไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอยเพื่อศึกษาคุณสมบัติสวิตชิงค์และความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยกระแส (CCNR) โดยส่วนแคโทด (n^+) สร้างจากการแพร่สารเจือฟอสฟอรัส (ส่วนแคโทดต้องเป็นชนิดเอ็นเท่านั้น ไดโอดจึงสามารถแสดงคุณสมบัติสวิตชิงค์และความต้านทานเชิงลบได้) ส่วน i เกิดจากการแพร่อะตอมทองคำ และส่วนแอนโอด (p^+) เกิดจากการอัลลอยระหว่างอะลูมิเนียมและซิลิคอนขณะทำการซินเตอร์ ในขณะที่แรงดันไบอัสตรงค่าหนึ่ง ไดโอดที่สร้างจากวิธีการอัลลอยสามารถแสดงคุณสมบัติสวิตชิงค์และความต้านทานเชิงลบได้ แม้ระยะ i มีขนาดเพียง 60 ไมโครเมตร ในขณะที่ไดโอดที่ส่วนแอนโอดสร้างจากการแพร่สารเจือไม่สามารถแสดงคุณสมบัติสวิตชิงค์และความต้านทานเชิงลบได้ เนื่องจากผลของรอยต่อพี-เอ็นที่ส่วนแอนโอด p^+ เป็นอัลลอยของอะลูมิเนียมและซิลิคอนที่บริเวณขั้วสัมผัสทำให้ไดโอดต้องใช้แรงดันไบอัสค่าสูงกว่าไดโอดซึ่งส่วนแอนโอด p^+ เกิดจากการแพร่สารเจือ ทำให้แรงดันสวิตชิงค์มีค่าสูง และพบว่าที่ระยะ $i < 120$ ไมโครเมตร ไดโอดที่สร้างจากเทคนิคการอัลลอยจะแสดงคุณสมบัติสวิตชิงค์ได้ดีกว่า ซึ่งแสดงให้เห็นว่าไดโอดที่สร้างจากเทคนิคการอัลลอยสามารถทำงานได้ดีแม้ขนาดของอุปกรณ์จะเล็กลง จึงเหมาะสมที่จะพัฒนาเป็นอุปกรณ์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ต่อไป

การศึกษาถึงผลของอาร์คริงต่อการเกิดความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยกระแส พบว่าอาร์คริงเป็นส่วนสำคัญอีกส่วนหนึ่งที่ทำให้ไดโอดแสดงคุณสมบัติสวิตชิงค์และความต้านทานเชิงลบได้ แม้ส่วน i จะมีระยะสั้นๆ เนื่องจากการอาร์คริงช่วยป้องกันกระแสรั่วบริเวณพื้นผิวทำให้กระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนใหญ่ไหลในเนื้อสารซึ่งมีระดับพลังงานของอะตอมทองคำอยู่ ไโคโอดจึงสามารถแสดงคุณสมบัติสวิตซิงค์และความต้านทานเชิงลบออกมาได้อย่างชัดเจนและสอดคล้องกับคุณสมบัติความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยกระแส โดยจากการทดลองพบว่าไโคโอดซึ่งไม่มีกระแสสวิตซิงค์จะมีค่าไม่คงที่ ในขณะที่ไโคโอดซึ่งมีส่วนกระแสสวิตซิงค์นั้นให้กระแสสวิตซิงค์ค่อนข้างคงที่ประมาณ 0.017 มิลลิแอมแปร์ นอกจากนี้กระแสสวิตซิงค์ยังช่วยเพิ่มเส้นทางการไหลทำให้แม้ส่วน i มีระยะสั้นๆ ไโคโอดก็สามารถแสดงคุณสมบัติดังกล่าวออกมาได้ และไโคโอดซึ่งส่วนกระแสสวิตซิงค์มีขนาดเพียง 10 ไมโครเมตรก็สามารถแสดงคุณสมบัติดังกล่าวได้อย่างชัดเจน

ศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงขนาดพื้นที่ส่วนแอโนดและแคโทดต่อการเกิดความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยกระแส โดยทำการศึกษาเมื่อพื้นที่แอโนด แคโทดมีขนาดเท่ากัน โดยทำการเปลี่ยนแปลงขนาดที่ 120 160 200 ตารางไมโครเมตร, พื้นที่แอโนดคงที่(200 ตารางไมโครเมตร) ทำการเปลี่ยนแปลงพื้นที่แคโทด (120 160 200 ตารางไมโครเมตร) และพื้นที่แคโทดคงที่(200 ตารางไมโครเมตร) ทำการเปลี่ยนแปลงพื้นที่แอโนด(120 160 200 ตารางไมโครเมตร) จากผลการทดลองพบว่า การเปลี่ยนแปลงขนาดพื้นที่ส่วนแอโนดและแคโทดต่อคุณสมบัติสวิตซิงค์และความต้านทานเชิงลบมีผลน้อยเมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของระยะ i ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนโดยสามารถอธิบายได้ตามสมการที่ 2.10

การศึกษาปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมในซิลิคอนไโคโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอย ($n^+ - i - al$ injection gate) ซึ่งในส่วน i มีเกทชนิดพีอยู่ จากการทดลองพบว่า (1) ส่วนเกทสามารถสร้างได้ทั้งจากการแพร่สารเจือชนิดพีและการอัลลอยระหว่างอะลูมิเนียมและซิลิคอน โดยส่วนเกทที่สร้างจากการอัลลอยต้องใช้แรงดันเกทค่าสูงกว่า (2) ค่าแรงดันเกทจะมีผลต่อ I_p ตามสมการที่ 4.3 คือ $I_p \propto \exp(qV_g/nkT)$ และ $V_R, V_p \propto \sqrt{V_g}$ ดังสมการที่ 4.1 และ 4.2 (3) L_{AC} จะมีผลต่อความชันในช่วง $V_R < V_{AC} < V_p$ เนื่องจากเมื่อระยะ L_{AC} เพิ่มขึ้นค่าความต้านทานของไโคโอดก็จะเพิ่มขึ้น เมื่อระยะ L_{AC} มีขนาดยาวมากจะเป็นผลให้สนามไฟฟ้าในส่วน i ไม่เพียงพอที่จะดึงอิเล็กตรอนจากส่วนเกทไปยังส่วนแอโนดได้ (4) เมื่อ L_{CG} มีค่าเพิ่มขึ้น ค่าของ V_R จะเพิ่มขึ้น และ I_p, V_p จะลดลง เนื่องจากผลของการฉีดพาหะคู่ควบในส่วน i ระหว่างส่วนเกทและแคโทด โดย L_{CG} จะมีผลต่อ I_p เป็นอย่างมาก

และได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมพบว่าซิลิคอนไโคโอดชนิด $n^+ - i - n^+$ injection gate ซึ่งส่วนแอโนดและแคโทดสร้างจากการแพร่สารเจือชนิดเอ็นสามารถแสดงคุณสมบัติความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยแรงดันได้ทั้งเมื่อส่วนเกทสร้างจากการแพร่สารเจือชนิดพีและการอัลลอยระหว่างอะลูมิเนียมและซิลิคอน เป็นข้อดีในการพัฒนาไโคโอดทำให้สามารถลดขั้นตอนในการสร้างลงได้ จากการทดลองสรุปได้ว่าส่วนแอโนดของไโคโอดจะสร้างจากการแพร่สารเจือชนิดเอ็นหรือพีก็ได้

ศึกษาผลของโครงสร้าง Bi-directional ชนิด p^+i-n^+ โดยวิธีการอัลลอย และ Bi-directional n^+i-n^+ จากผลการทดลองพบว่าไดโอดทั้งสองโครงสร้างสามารถแสดงคุณสมบัติสวิตซิงค์และความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยกระแสได้ทั้งในขณะให้แรงดันไบอัสตรงและไบอัสย้อนกลับ ซึ่งเป็นข้อดีของไดโอดในการนำไปใช้กับวงจรกระแสลับได้ นอกจากนี้สังเกตเห็นได้ว่าไดโอด Bi-directional n^+i-n^+ จะให้คุณสมบัติที่ดีกว่าโดยจะมีความสมมาตรทั้งด้านไบอัสตรงและไบอัสย้อนกลับ แม้ระยะ i จะมีค่าเพียง 20 ไมโครเมตร ก็สามารถแสดงคุณสมบัติสวิตซิงค์และความต้านทานเชิงลบได้ จึงเหมาะที่จะพัฒนาเป็นอุปกรณ์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Lampert , M.A. , “Double injection in insulator” , Phys. Rev., 1962 , 125, pp. 126 – 141
- [2] Iida , M. and Nojima . S., “A criterion for negative resistance in long diode” , Jpn.J.Appl.Phys.,1969, 8, pp. 1149 – 1153
- [3] P. Antognetti , A.Chiabrera and S. Ridella. “Negative resistance in silicon doped with gold”, Solid-State Electronics. 1971., Vol. 14, pp. 1119 – 1122
- [4] Supadech S. “The studies on interaction between closely located negative resistance Si $p^+ - i - n^+$ diodes”.
- [5] จินดารัตน์ สุพัตเวช. 2528 . “การศึกษากลไกการเกิดคุณสมบัติความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยแรงดันในซิลิคอนพลานาร์ไดโอดแบบ IG $p^+ - i - n^+$ และเงื่อนไขที่ดีที่สุด” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [6] A.G. Milnes. “Deep impurity in semiconductors”, John Wiley and Sons, Inc., 1971.
- [7] C.B. Collins, R.O. Carlson, and C.J. Gallagher. “Properties of gold-doped silicon”, Physical review, 1957., pp. 1168-1173.
- [8] Helmut F.Wolf. “Semiconductors”, John Wiley and Sons, Inc., 1971.
- [9] A.G. Milnes. “Semiconductor Devices and Integrated Electronics”, Van Nostrand Reinhold Company, Inc., 1980., pp. 49-53.
- [10] M.A. Lampert and P. Mark. “Current injection in solids”, Academic Press, Inc., 1970.
- [11] S. Supadech, S.Okazaki, Y.Akiba, T.Kurosu and M.Iida, “Voltage Controlled Negative Resistance in $p^+ - i - n^+$ planar diodes with injection gate”, IEE Proceedings, Vol.133, Pt. I, No. 1 February 1986, pp. 1-5.
- [12] Edward S.Yang. “Microelectronic Devices”, Mcgraw-Hill International Edition 1988, pp. 62.
- [13] Robert F.Pierret and Gerold W.Neudeck. “Volume II The PN Junction Diode”, Addison Wesley Publishing Company, Inc., 1989.
- [14] เนาวรัตน์ สังข์จีน, อลิสร่า จรรยาหาญ, สมเกียรติ สุภเดช, สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, วีระ เพ็งจันทร์ และ โยอิชิ ยาซุมูระ. “กระบวนการสร้างและคุณสมบัติของไดโอดชนิด $p^+ - i - n^+$ โดยวิธีการอัลลอย”, การประชุมวิชาการทางไฟฟ้าครั้งที่ 22 พ.ศ. 2542, หน้า 303-306.

- [15] อลิสร่า จรรยาหาญ, เนาวรัตน์ สังข์จีน, สมเกียรติ สุภเดช, สุรศักดิ์ เนียมเจริญ. “ผลของการสร้างกรรไกรในไดโอดชนิด p^+i-n^+ โดยวิธีการอัลลอย”, การประชุมวิชาการทางไฟฟ้าครั้งที่ 23 พ.ศ. 2543, หน้า 697-700.
- [16] ฉัตรพงศ์ สุริยาอมรานนท์, รศ.ดร. สมเกียรติ สุภเดช, ผศ.ดร. วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง. “ซิลิคอนไดโอดแบบ IG p^+i-n^+ ชนิดวงแหวน”, การประชุมวิชาการทางไฟฟ้าครั้งที่ 16 พ.ศ. 2536.
- [17] ชลิตา จรรยาหาญ, สมเกียรติ สุภเดช. “ปรากฏการณ์ความต้านทานเชิงลบแบบควบคุมด้วยแรงดันในซิลิคอนไดโอดชนิด $n-i$ -al injection gate”, วิศวกรรมลาดกระบัง ปีที่ 19 ฉบับที่ 1 มีนาคม 2545.
- [18] สมเกียรติ สุภเดช, สมชัย วงษ์เมตตา และ วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง. “การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์กับขนาดทางเรขาคณิตของส่วนเกทในซิลิคอนไดโอดแบบ IG p^+i-n^+ ”, การประชุมวิชาการทางไฟฟ้าครั้งที่ 10 พ.ศ. 2530.



ภาคผนวก ก

กระจัดต้นแบบของซิลิคอนไดออกไซด์ p^+-i-n^+

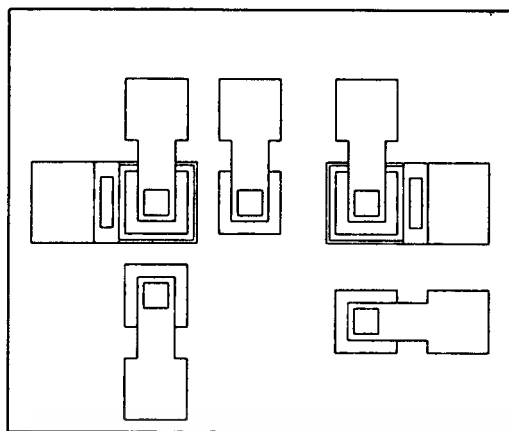
โดยทำการออกแบบให้ในแต่ละมาส์กข้างต้นให้มีโครงสร้างที่แตกต่างกันเพื่อศึกษาถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของซิลิคอนไดออกไซด์ p^+-i-n^+ โดยแบ่งออกเป็น 15 ชุดดังนี้คือ

- ชุดที่ 1 ลักษณะโครงสร้างของซิลิคอนไดออกไซด์ p^+-i-n^+ โดยวิธีแพร่สารเจือโดยมีการ์ดริงชนิดฟิล์้อมรอบส่วนแคโทดขนาด 10 ไมโครเมตร และทำการเปลี่ยนแปลงระยะระหว่างส่วนแคโทดและแอโนด(ส่วน i) ตั้งแต่ 50-180 ไมโครเมตร
- ชุดที่ 2 ลักษณะโครงสร้างของซิลิคอนไดออกไซด์ p^+-i-n^+ โดยวิธีแพร่สารเจือโดยมีการ์ดริงชนิดฟิล์้อมรอบส่วนแคโทดขนาด 20 ไมโครเมตรและทำการเปลี่ยนแปลงระยะระหว่างส่วนแคโทดและแอโนด(ส่วน i) ตั้งแต่ 60-180 ไมโครเมตร
- ชุดที่ 3 ลักษณะโครงสร้างของซิลิคอนไดออกไซด์ p^+-i-n^+ โดยวิธีการอัลลอยโดยส่วนแคโทดไม่มีการ์ดริงล้อมรอบ และทำการเปลี่ยนแปลงระยะระหว่างส่วนแคโทดและแอโนด(ส่วน i) ตั้งแต่ 20-180 ไมโครเมตร
- ชุดที่ 4 ลักษณะโครงสร้างของซิลิคอนไดออกไซด์ p^+-i-n^+ โดยวิธีการอัลลอยโดยมีการ์ดริงชนิดฟิล์้อมรอบส่วนแคโทดขนาด 10 ไมโครเมตร และทำการเปลี่ยนแปลงระยะระหว่างส่วนแคโทดและแอโนด(ส่วน i) ตั้งแต่ 50-150 ไมโครเมตร
- ชุดที่ 5 ลักษณะโครงสร้างของซิลิคอนไดออกไซด์ p^+-i-n^+ โดยวิธีการอัลลอยโดยมีการ์ดริงชนิดฟิล์้อมรอบส่วนแคโทดขนาด 20 ไมโครเมตร และทำการเปลี่ยนแปลงระยะระหว่างส่วนแคโทดและแอโนด(ส่วน i) ตั้งแต่ 60-160 ไมโครเมตร
- ชุดที่ 6 ลักษณะโครงสร้างของซิลิคอนไดออกไซด์ p^+-i-n^+ โดยวิธีการอัลลอยโดยมีการ์ดริงชนิดฟิล์้อมรอบส่วนแคโทดและแอโนดขนาด 20 ไมโครเมตร โดยทำการเปลี่ยนแปลงขนาดพื้นที่ส่วนแอโนดและแคโทดพร้อมกันคือ 120, 160 และ 200 ตารางไมโครเมตร และทำการเปลี่ยนแปลงระยะระหว่างส่วนแคโทดและแอโนด(ส่วน i) ตั้งแต่ 60-160 ไมโครเมตร
- ชุดที่ 7 ลักษณะโครงสร้างของซิลิคอนไดออกไซด์ p^+-i-n^+ โดยวิธีการอัลลอยโดยมีการ์ดริงชนิดฟิล์้อมรอบส่วนแคโทดและแอโนดขนาด 20 ไมโครเมตร โดยพื้นที่ส่วนแอโนดมีขนาดคงที่คือ 200 ตารางไมโครเมตร แต่ทำการเปลี่ยนแปลงขนาดพื้นที่ส่วนแคโทดคือ 120, 160 และ 200 ตารางไมโครเมตร และทำการเปลี่ยนแปลงระยะระหว่างส่วนแคโทดและแอโนด(ส่วน i) ตั้งแต่ 60-160 ไมโครเมตร

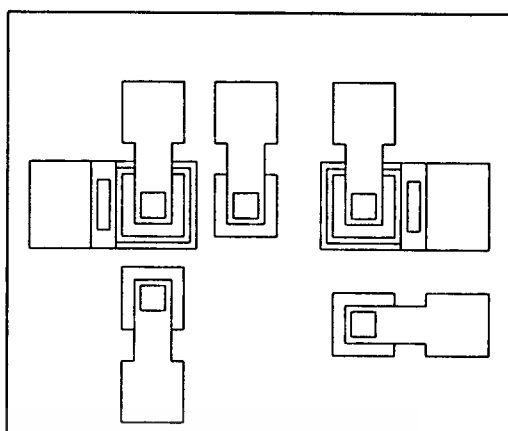
- ชุดที่ 8 ลักษณะโครงสร้างของซิลิคอนไดโอดชนิด p^+i-n^+ โดยวิธีการอัลลอยโดยมีการ์ดริงชนิดพีล้อมรอบส่วนแคโทดและแอนโนดขนาด 20 ไมโครเมตร โดยพื้นที่ส่วนแคโทดมีขนาดคงที่คือ 200 ตารางไมโครเมตร แต่ทำการเปลี่ยนแปลงขนาดพื้นที่ส่วนแอนโนดคือ 120, 160 และ 200 ตารางไมโครเมตร และทำการเปลี่ยนแปลงระยะระหว่างส่วนแคโทดและแอนโนด(ส่วน i) ตั้งแต่ 60-160 ไมโครเมตร
- ชุดที่ 9 ลักษณะโครงสร้างซึ่งส่วนแอนโนด 1 สร้างจากการแพร่สารเจือชนิดพีและส่วนแอนโนด 2 สร้างจากการอัลลอยโดยมีการ์ดริงชนิดพีล้อมรอบส่วนแคโทดขนาด 20 ไมโครเมตร และทำการเปลี่ยนแปลงระยะระหว่างส่วนแคโทดและแอนโนด(ส่วน i) ตั้งแต่ 60-120 ไมโครเมตร
- ชุดที่ 10 ลักษณะโครงสร้างของซิลิคอนไดโอดชนิด n^+i -al injection gate โดยส่วนเกตสร้างจากการแพร่สารเจือชนิดพี ทำการเปลี่ยนแปลงระยะระหว่างส่วนแคโทดและเกตคือ 60 และ 80 ไมโครเมตร และทำการเปลี่ยนแปลงระยะระหว่างส่วนแคโทดและแอนโนด(ส่วน i) ตั้งแต่ 120-220 ไมโครเมตร
- ชุดที่ 11 ลักษณะโครงสร้างของซิลิคอนไดโอดชนิด n^+i -al injection gate โดยส่วนเกตสร้างจากการอัลลอย ทำการเปลี่ยนแปลงระยะระหว่างส่วนแคโทดและเกตคือ 60 และ 80 ไมโครเมตร และทำการเปลี่ยนแปลงระยะระหว่างส่วนแคโทดและแอนโนด(ส่วน i) ตั้งแต่ 140-240 ไมโครเมตร
- ชุดที่ 12 ลักษณะโครงสร้างของซิลิคอนไดโอดชนิด n^+i-n^+ injection gate โดยส่วนเกตสร้างจากการแพร่สารเจือชนิดพี ทำการเปลี่ยนแปลงระยะระหว่างส่วนแคโทดและเกตคือ 60 และ 80 ไมโครเมตร และทำการเปลี่ยนแปลงระยะระหว่างส่วนแคโทดและแอนโนด(ส่วน i) ตั้งแต่ 120-220 ไมโครเมตร
- ชุดที่ 13 ลักษณะโครงสร้างของซิลิคอนไดโอดชนิด n^+i-n^+ injection gate โดยส่วนเกตสร้างจากการอัลลอย ทำการเปลี่ยนแปลงระยะระหว่างส่วนแคโทดและเกตคือ 60 และ 80 ไมโครเมตร และทำการเปลี่ยนแปลงระยะระหว่างส่วนแคโทดและแอนโนด(ส่วน i) ตั้งแต่ 120-220 ไมโครเมตร
- ชุดที่ 14 ลักษณะโครงสร้างซึ่งส่วนแคโทดและแอนโนดสร้างจากการแพร่สารเจือชนิดเอ็นโดยส่วนแคโทดไม่มีการ์ดริงล้อมรอบ และทำการเปลี่ยนแปลงระยะระหว่างส่วนแคโทดและแอนโนด(ส่วน i) ตั้งแต่ 20-220 ไมโครเมตร
- ชุดที่ 15 ลักษณะโครงสร้างของซิลิคอนไดโอดชนิด bidirectional p^+i-n^+ โดยวิธีการอัลลอย และทำการเปลี่ยนแปลงระยะระหว่างส่วนแคโทดและแอนโนด(ส่วน i) ตั้งแต่ 50-120 ไมโครเมตร

โดยลักษณะโครงสร้างดังกล่าวข้างต้นแสดงดังรูปที่ ก-1 - ก-15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



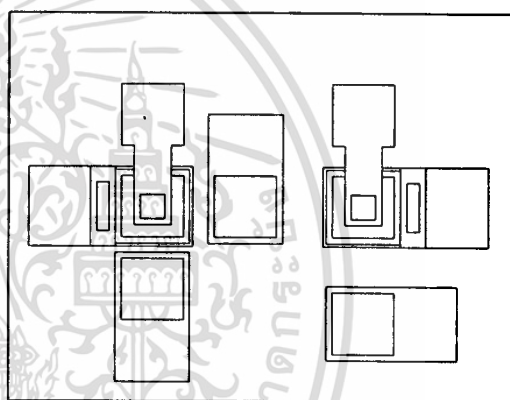
รูปที่ ก-1 โครงสร้างชุดที่ 1



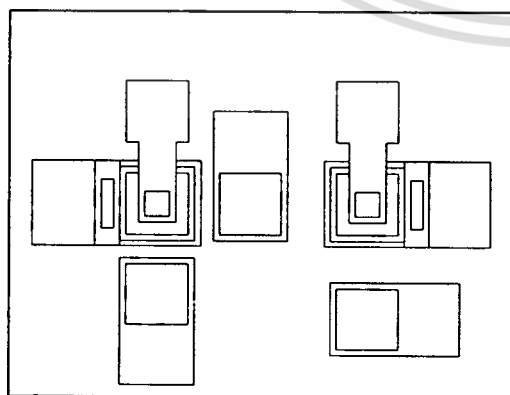
รูปที่ ก-2 โครงสร้างชุดที่ 2



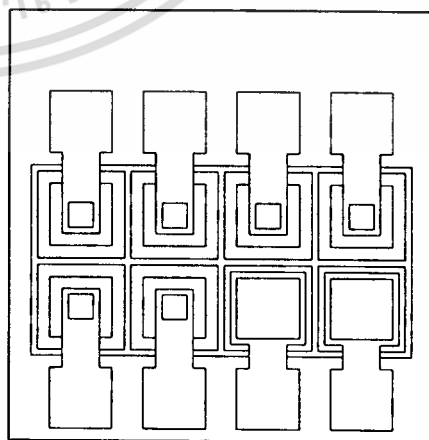
รูปที่ ก-3 โครงสร้างชุดที่ 3



รูปที่ ก-4 โครงสร้างชุดที่ 4

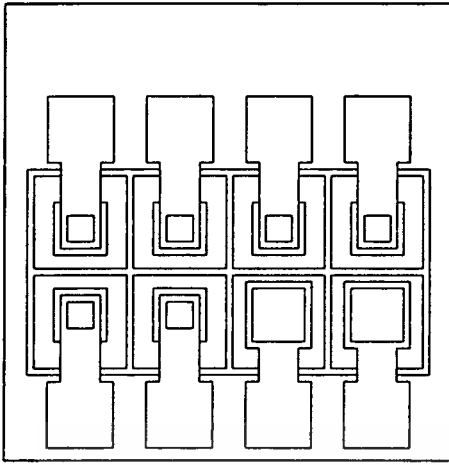


รูปที่ ก-5 โครงสร้างชุดที่ 5

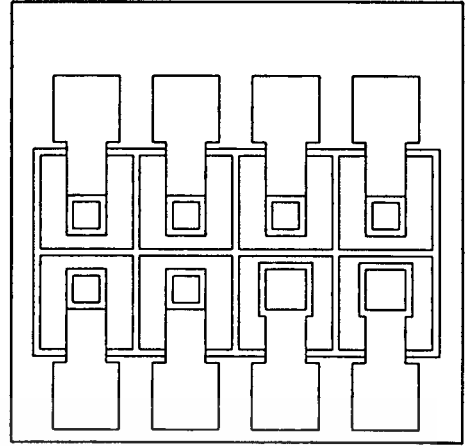


รูปที่ ก-6(a) โครงสร้างชุดที่ 6(a)

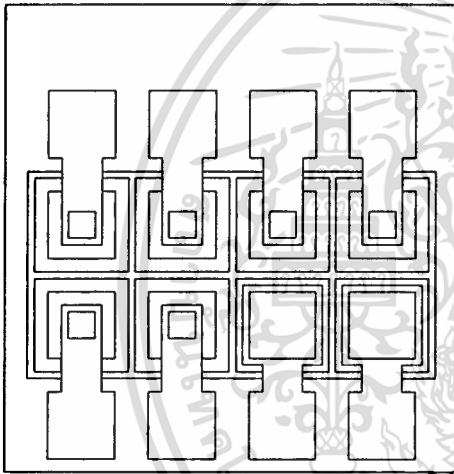
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



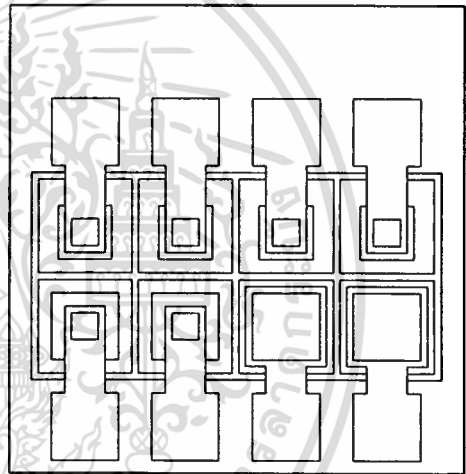
รูปที่ ก-6(b) โครงสร้างชุดที่ 6(b)



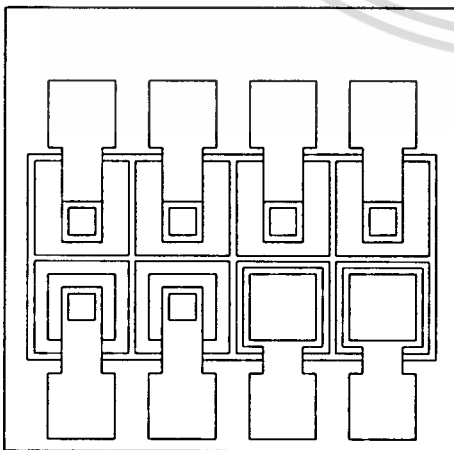
รูปที่ ก-6(c) โครงสร้างชุดที่ 6(c)



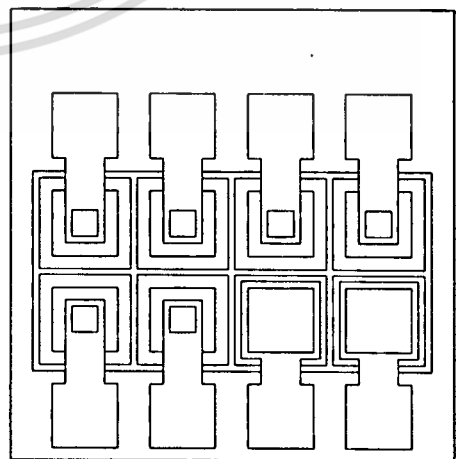
รูปที่ ก-7(a) โครงสร้างชุดที่ 7(a)



รูปที่ ก-7(b) โครงสร้างชุดที่ 7(b)

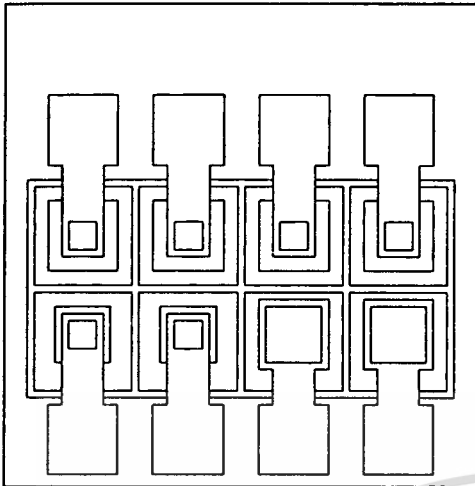


รูปที่ ก-7(c) โครงสร้างชุดที่ 7(c)

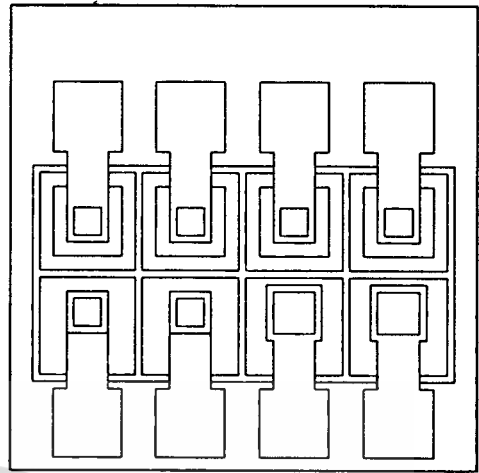


รูปที่ ก-8(a) โครงสร้างชุดที่ 8(a)

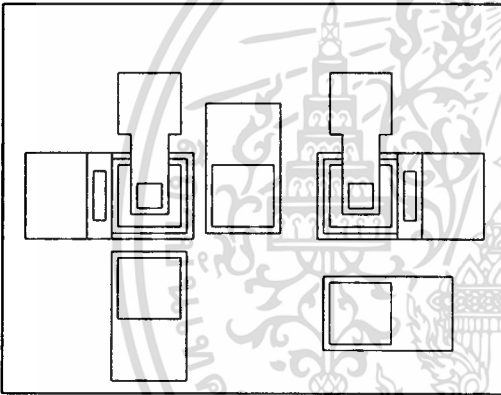
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



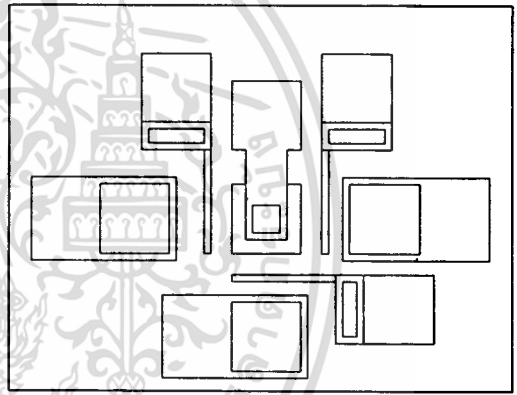
รูปที่ ก-8(b) โครงสร้างชุดที่ 8(b)



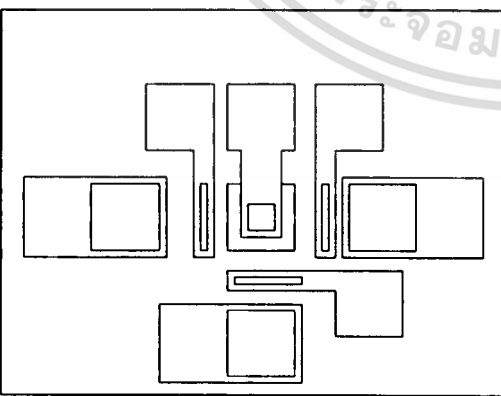
รูปที่ ก-8(c) โครงสร้างชุดที่ 8(c)



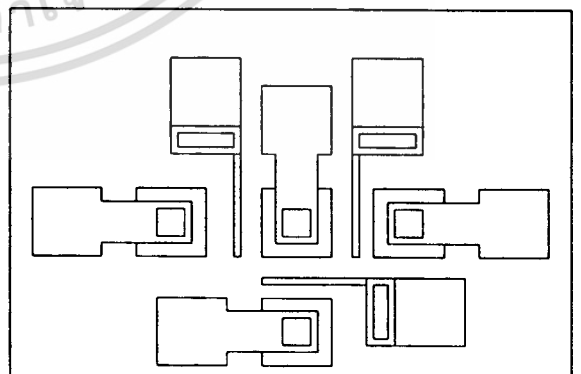
รูปที่ ก-9 โครงสร้างชุดที่ 9



รูปที่ ก-10 โครงสร้างชุดที่ 10

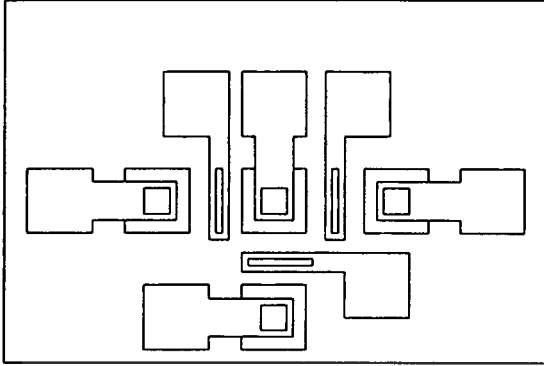


รูปที่ ก-11 โครงสร้างชุดที่ 11

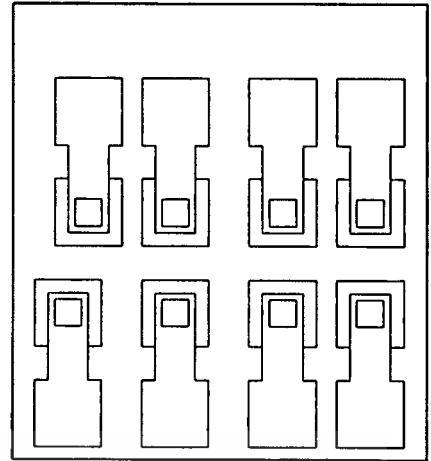


รูปที่ ก-12 โครงสร้างชุดที่ 12

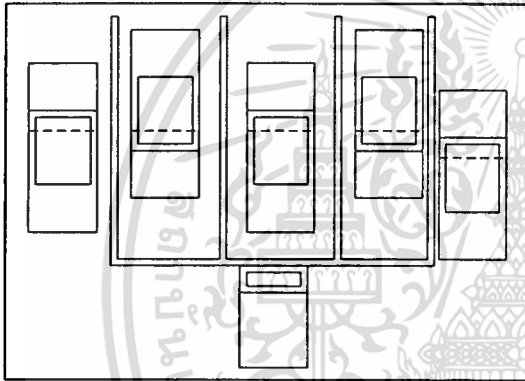
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-13 โครงสร้างชุดที่ 13



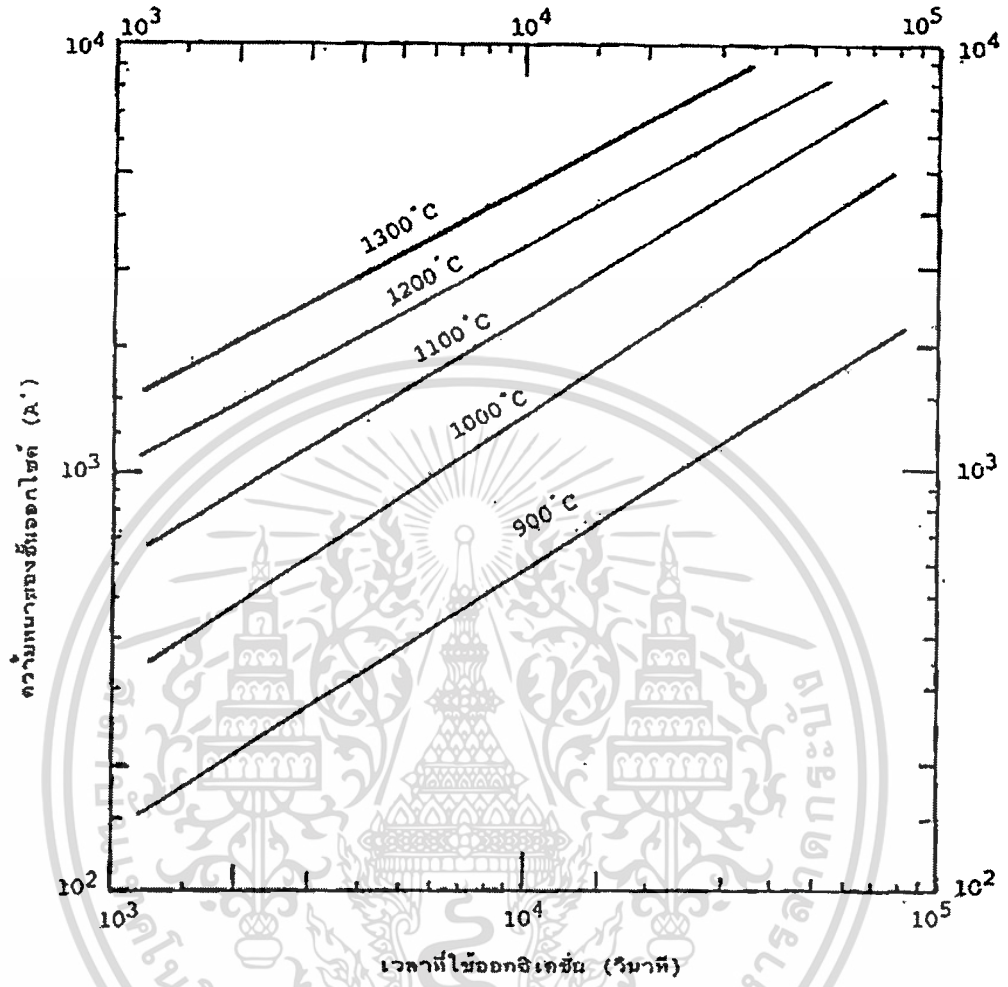
รูปที่ ก-14 โครงสร้างชุดที่ 14



รูปที่ ก-15 โครงสร้างชุดที่ 15

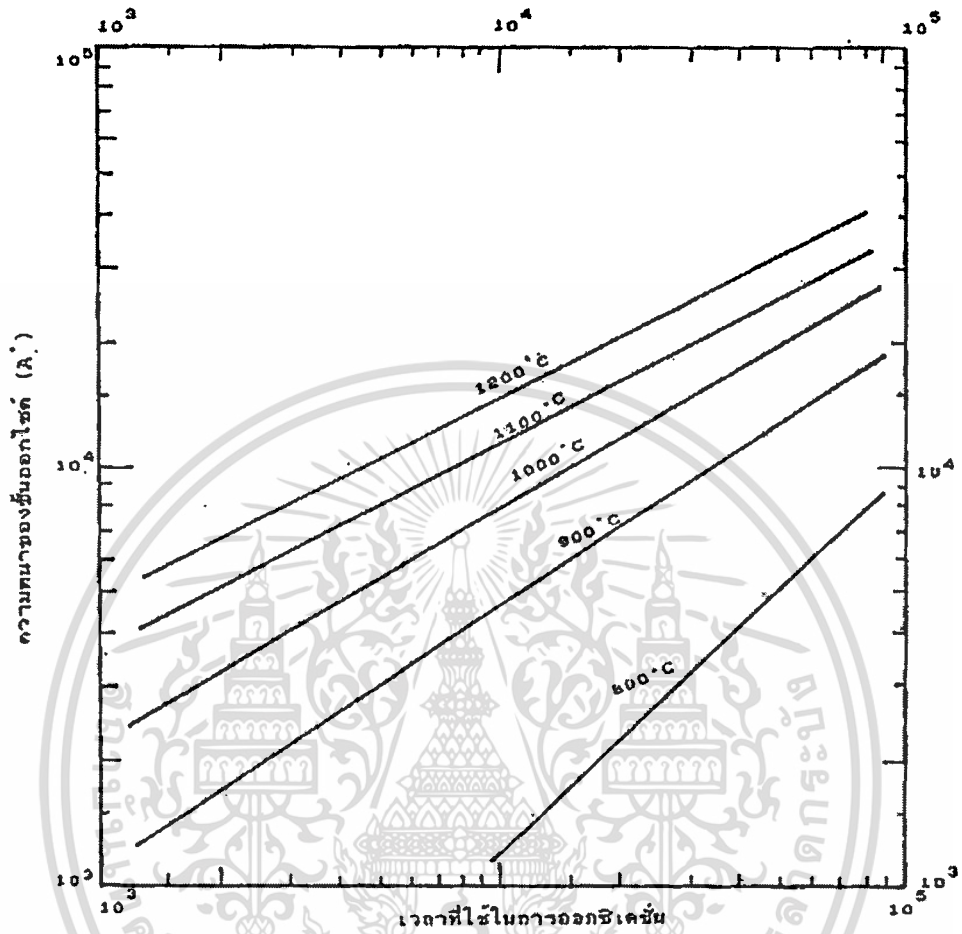
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข



รูปที่ ข-1 ความสัมพันธ์ของความหนาของชั้นออกไซด์กับเวลาและอุณหภูมิสำหรับการออกซิเดชันแบบแห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-2 ความสัมพันธ์ของความหนาของชั้นฟิล์มออกไซด์บนชั้นฟิล์มคอนกรีตกับเวลาและอุณหภูมิสำหรับการออกซิเดชันแบบชื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-1 สีของซิลิกอนไดออกไซด์ที่ความหนาต่าง ๆ

ความหนา(A)	สี
500	Tan
700	Brawn
1000	Dark Violet to Red Violet
1200	Royal Blue
1500	Light Blue
1700	Metallic to very light Yellow – Green
2000	Light Gold or Yellow – slightly Metallic
2200	Gold with slight Yellow – Orange
2500	Orange to Melon
2700	Red – Violet
2800	Violet
3000	Blue to Violet – Blue
3100	Blue
3200	Blue to Blue – Green
3400	Light Green
3500	Green to Yellow – Yellow
3600	Yellow – Green
3700	Green – Yellow
3900	Yellow
4100	Light Orange
4200	Carnation Pink
4400	Violet – Red
4600	Red – Violet
4700	Violet
4800	Blue – Violet
4900	Blue
5000	Blue – Green

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-1(ต่อ) สีของซิลิกอนไดออกไซด์ที่ความหนาต่าง ๆ

ความหนา(A)	สี
5200	Green
5400	Yellow - Green
5600	Green – Yellow
5700	Yellow
5800	Light Orange or Yellow to Pink
6000	Carnation Pink
6300	Violet – Red
6800	Violet – Red to Blue – Green
7200	Blue – Green to Green
7700	Yellow
8000	Orange
8200	Saimon
8500	Light Red – Violet
8600	Violet
8700	Blue – Violet
8900	Blue
9200	Blue – Green
9500	Yellow – Green
9700	Yellow
9900	Orange
10000	Carnation Pink
10200	Violet – Red
10500	Red – Violet
10600	Violet
10700	Blue – Violet
11000	Green
11200	Yellow – Green
11800	Violet
11900	Red – Violet

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ๗-2 Capture and Generation Processes for a Single-Process Trap and Field-Dependent Effects

Process	Carrier	Intrinsic Charge of The Trap (Empty)	Initial Trap State before the Process Considered	Capture Process		Generation Process		Trap State at End of Process	Comments, and Physical Examples of Such Traps
				Equation	Field Dependence	Equation	Field Dependence		
A(e,c) A(e,g)	Electron	N_t^+	N_t^+ N_t^0	$N_t^+ + e \rightarrow N_t^0$	Small, or $\epsilon^{3/2}$	$N_t^0 \rightarrow N_t^+ + e$	$e, \epsilon \uparrow$	N_t^0 N_t^+	Deep donors (S, Se, Te) in Ge or Si with partial compensation. Increase of the generation rate with field in this coulombically attractive process is known as the Poole-Frenkel effect for electrons
N(e,c) N(e,g)	Electron	N_t^0 N_t^-	N_t^0	$N_t^0 + e \rightarrow N_t^-$	$\sigma_n \downarrow \epsilon \uparrow$	$N_t^0 \rightarrow N_t^+ + e$	Small ^b	N_t^- N_t^0	Au^0, Au^+ in V-type silicon. Coulombically neutral processes
R(e,c) R(e,g)	Electron	N_t^- N_t^{2-}	N_t^-	$N_t^- + e \rightarrow N_t^{2-}$	$\sigma_n \uparrow \epsilon$	$N_t^{2-} \rightarrow N_t^- + e$		N_t^{2-} N_t^-	Ge (Cu, Ag, Au, Pt, Fe, Co, Ni). Also seen for double acceptors in Si and GaAs. ^c
R(h,c) R(h,g)	Hole	N_t^+	N_t^+ N_t^{2+}	$N_t^+ + h \rightarrow N_t^{2+}$	$\sigma_p \uparrow \epsilon$	$N_t^{2+} \rightarrow N_t^+ + h$		N_t^{2+} N_t^+	Double donors (with first level compensated) should give these coulombically repulsive trapping actions in Ge and Si.
N(h,c) N(h,g)	Hole	N_t^0	N_t^0 N_t^+	$N_t^0 + h \rightarrow N_t^+$	$\sigma_p \downarrow \epsilon \uparrow$	$N_t^+ \rightarrow N_t^0 + h$	Small	N_t^+ N_t^0	Au^0, Au^+ in π -type silicon coulombically neutral processes
A(h,c) A(h,g)	Hole	N_t^-	N_t^- N_t^0	$N_t^- + h \rightarrow N_t^0$	Small, or $\epsilon^{3/2}$	$N_t^0 \rightarrow N_t^- + h$	$e, \epsilon \uparrow$	N_t^0 N_t^-	Deep acceptors, such as In ⁺ , In ⁰ in π -type silicon. The dependence of the generation rate on field if the Poole-Frenkel effect for holes.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน	นางสาวชลิดา จรรยาหาญ
วันเดือนปีเกิด	วันที่ 12 มีนาคม พ.ศ. 2520
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษาระดับปริญญาตรี	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สถานที่สำเร็จการศึกษา	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีที่สำเร็จการศึกษา	ปีการศึกษา 2540



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้