

อุณหภูมิซินเตอร์ริงที่มีผลกระทบบนโครงสร้าง Al/n-Si/Al โฟโตไดโอด
EFFECT OF SINTERING TEMPERATURE FOR Al/n-Si/Al PHOTODIODE



โดย

นายฉัฐพงษ์ ถิ่นมัน รหัส 44015236

นายปรีชา เทียนงาม รหัส 44015243



อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ. สุรศักดิ์ เนียมเจริญ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

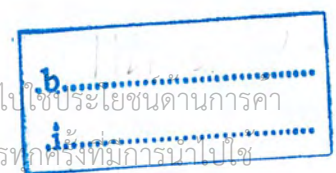
ปีการศึกษา 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน.....55780

วัน,เดือน,ปี.....25 พ.ค. 2548



ปีการศึกษา 2546

สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อวิทยานิพนธ์ อุณหภูมิซินเตอร์ริงที่มีผลกระทบทับ โครงสร้าง Al/n-Si/Al
โฟโตไดโอด

EFFECT OF SINTERING TEMPERATURE FOR
Al/n-Si/Al PHOTODIODE

นักศึกษาผู้จัดทำ

นายณัฐพงษ์ ถิ่นมั้น รหัส 44015236

นายปรีชา เทียนงาม รหัส 44015243



วิทยานิพนธ์นี้ได้ผ่านการตรวจสอบโดยอาจารย์ที่ปรึกษาแล้ว

(ผศ. สุรศักดิ์ เนียมเจริญ)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ

อุณหภูมิซินเตอร์ริงที่มีผลกระทบทับโครงสร้าง Al/n-Si/Al
โฟโตไดโอด

EFFECT OF SINTERING TEMPERATURE FOR
Al/n-Si/Al PHOTODIODE

ชื่อนักศึกษา

1. นาย ณัฐพงษ์ ถิ่นมั่น รหัส 44015236
2. นาย ปรีชา เทียนงาม รหัส 44015243

โครงการได้รับการตรวจสอบแล้ว พร้อมทั้งจะทำการสอบได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์

คุณสมบัติซินเตอร์ริงที่มีผลกระทบบกับโครงสร้าง Al/n-Si/Al โฟโตไดโอด

นักศึกษาผู้จัดทำ

นายณัฐพงษ์ ถิ่นมัน รหัส 44015236

นายปรีชา เทียนงาม รหัส 44015243

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ. สุรศักดิ์ เนียมเจริญ

ปีการศึกษา

2546

บทคัดย่อ

จากการศึกษาการสร้างโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ซึ่งมันสามารถตอบสนองความถี่สูงและสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในวงจรรวมได้ เนื่องจากเป็นโครงสร้างที่มีความจุไฟฟ้าต่ำ จึงเป็นอุปกรณ์ที่น่าสนใจทำการศึกษาดังนั้นในปริญญานิพนธ์นี้จึงเป็นการศึกษากระบวนการสร้างตัวตรวจจับแสงแบบ MSM โดยออลูมิเนียมจะถูกสร้างบนซิลิคอนชนิดเอ็นที่อุณหภูมิการซินเตอร์ริงที่ต่าง ๆ กันคือ 100°C , 200°C , 300°C , 400°C , 450°C และ 500°C ตามลำดับ ซึ่งในโครงงานนี้ ได้ศึกษาคุณสมบัติของกระแสและแรงดันของโครงสร้างนี้เมื่อได้รับแสงและไม่ได้รับแสง ซึ่งพิจารณากระแสรั่วไหลและแรงดันพังทลายทั้งที่ขณะได้รับ โป้สตรงและโป้สกลับ นอกจากนี้ได้ศึกษาความเข้มแสงที่มีผลต่อกระแสของโฟโตไดโอดต่อพื้นที่รับแสงของโฟโตไดโอดที่มีขนาดต่างกันที่ขั้วโลหะเท่ากับพื้นที่รับแสงที่ขั้วโลหะต่างกัน ซึ่งผลที่ได้จะนำมาใช้ในการพิจารณาคุณสมบัติทางไฟฟ้าและคุณสมบัติทางแสงของโฟโตไดโอดและศึกษาผลของพื้นที่รับแสงต่อกระแสโฟโตไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title EFFECT OF SINTERING TEMPERATURE FOR
Al/n-Si/Al PHOTODIODE

Authors Mr. Nathaphong Thueman 44015236
Mr. Preecha Thienngam 44015243

Thesis Advisor Asst. Prof. Surasak Niemcharoen

Year 2003

ABSTRACT

From studied on fabrication of Al/n-Si/Al it can be response at high frequency and apply for integrated circuit. Because of low capacitance in structure then device is interesting for studied. So that in the thesis was studied on fabrication of MSM photodiode. Aluminium was fabrication on n-type silicon varied at 100°C , 200°C , 300°C , 400°C , 450°C and 500°C of sintering temperature. In this project would be study about property of current and voltage of photodiode when it receive light and dark for consider in quantity of leakage current and breakdown voltage when forward bias and reverse bias. Further more we studied light intensity effect of photodiode current per receive area light in different size of photodiode but same size of metal electrode. The result will be consider in electrical property and light property of photodiode and study on effective of light receive area per photodiode current.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ประสบความสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ. สุรศักดิ์ เนียมเจริญ ที่ได้กรุณาให้คำชี้แนะแนวทางในการแก้ปัญหา รวมทั้งรายละเอียดต่างๆที่เกี่ยวข้องกับปริญญาานิพนธ์นี้

ขอขอบพระคุณรุ่นพี่นักศึกษาปริญญาโท สำหรับความช่วยเหลือและดูแลการทำงานในทุกๆเรื่อง ทั้งคำปรึกษา ตลอดจนคำชี้แนะ รวมทั้งรายละเอียดต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับปริญญาานิพนธ์ รวมถึงเพื่อนๆทุกคน และทุกกำลังใจที่ให้ตลอดมา

ขอบคุณศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำให้ปริญญาานิพนธ์สำเร็จได้ด้วยดี
สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดาและมารดา ที่สนับสนุนและให้กำลังใจตลอดมา



(นายณัฐพงษ์ ถิ่นมัน)

(นายปรีชา เทียนงาม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ	VII
สารบัญตาราง	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย	2
บทที่ 2 ทฤษฎี	3
2.1 คุณสมบัติของคลื่นแสง	3
2.2 คุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำที่ใช้การสร้างโฟโตไดโอด	5
2.3 รอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ	7
2.3.1 รอยต่อโลหะระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น	7
2.3.2 ลักษณะคุณสมบัติเกี่ยวกับรอยต่อแบบขอตัดก็	9
2.4 โฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM	11
2.4.1 หลักการทำงานของโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM	12
2.4.2 สถานะสมดุลความร้อนของโฟโตไดโอด โครงสร้าง MSM	12
2.4.3 การให้ไบอัสและการกระจายพลังงานศักย์	13
2.4.4 กระบวนการดูดกลืนแสงของโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM	14
2.4.4.1 กระบวนการดูดกลืนแสงของบริเวณปลอดประจุพาหะ	15
2.4.4.2 กระบวนการดูดกลืนแสงของพื้นที่เป็นกลาง	15
2.5 การรวมตัวใหม่และการเกิดพาหะ	16
2.5.1 กระบวนการ R-G	16
2.5.1.1 กระบวนการ R-G โดยตรง	16
2.5.1.2 กระบวนการ R-G โดยอ้อม	17
บทที่ 3 การออกแบบกระบวนการสร้างและการทดลอง	19
3.1 การออกแบบและกระบวนการสร้างโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al	19
3.1.1 การออกแบบโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.1.2 กระบวนการสร้างรอยสัมผัส	21
3.1.3 ลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้างโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al	22
3.2 การศึกษากระบวนการสร้างและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยสัมผัส	26
3.2.1 การวัดค่าความสูงกำแพงศักย์จากการวัดกระแส-แรงดัน	26
3.2.2 การวัดค่าความสูงกำแพงศักย์จากการวัดค่าความจุไฟฟ้าที่รอยสัมผัส	27
3.3 การศึกษาคุณสมบัติทางแสงของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al	29
3.3.1 การศึกษาคุณสมบัติกระแส-แรงดัน และค่าความจุไฟฟ้า	29
3.3.2 การศึกษากระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al	29
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	30
4.1 ผลการทดลองการศึกษากระบวนการสร้างรอยสัมผัสระหว่างอูมิเนียมและซิลิคอนชนิดเอ็นในการซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิต่างๆ	30
4.1.1 ผลการทดลองเวลาสำหรับการซินเตอร์ริงรอยสัมผัส	30
4.2 ผลการทดลองการศึกษาคุณสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่ผ่านการซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิต่างๆ	34
4.3 ผลการทดลองการศึกษาคุณสมบัติทางแสงของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al	38
4.3.1 การวัดความเข้มของแสงที่มีผลต่อคุณลักษณะของกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al	38
4.3.2 ผลการวัดกระแส-แรงดันของคุณสมบัติทางแสงของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al	40
4.3.3 การวัดคุณสมบัติทางแสงของโฟโตไดโอดที่ระยะ D ต่างๆ	42
4.3.4 การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของผิวอะลูมิเนียมของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al	42
4.3.5 การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของผิซิลิคอนของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al	46
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	49
เอกสารอ้างอิง	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปลูกภาพ

รูปที่	หน้า
1.1 โฟโตไดโอดแบบ โครงสร้าง MSM (Al/n-Si/Al)	1
2.1 การดูดกลืนพลังงานโฟตอนของแสงในสารกึ่งตัวนำ	4
2.2 การทดลองการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก	4
2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและความถี่แสงในปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกกระแสไฟฟ้าจะเริ่มไหลเมื่อความถี่ของแสงสูงกว่าค่าหนึ่งๆ	5
2.4 แสดงลักษณะกราฟความสัมพันธ์ E-k ของสารกึ่งตัวนำ	6
2.5 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นในกรณี $\phi_m > \phi_s$ เกิดเป็นรอยสัมผัสเรกติไฟรี	8
2.6 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นในกรณีที่ $\phi_m < \phi_s$ เกิดเป็นรอยสัมผัสแบบ โอห์มิก	9
2.7 ลักษณะแถบพลังงานแสงต่างๆของรอยต่อแบบขอดต์กั	9
2.8 โครงสร้างของโฟโตไดโอด โครงสร้าง MSM	11
2.9 (ก) โครงสร้างของโฟโตไดโอด โครงสร้าง MSM (ข) แถบพลังงานของโฟโตไดโอด โครงสร้าง MSM ในสภาวะสมดุลความร้อน	13
2.10 การกระจายประจุ สนามไฟฟ้า และการกระจายพลังงานศักย์ไฟฟ้าของโครงสร้าง MSM ภายใต้อิทธิพลของแสง	14
2.11 ลักษณะของแถบพลังงานขอดต์กัไดโอด ขณะที่พลังงานแสงถูกดูดกลืน ภายในพื้นที่ปลอดประจุ	15
2.12 ลักษณะแถบพลังงานของพื้นที่เป็นกลางขณะได้รับแรงดันไบอัสพร้อมกับมีแสงตกกระทบ	15
2.13 (ก) การเกิดพาหะโดยตรงหรือ Band to Band Generation และ (ข) การรวมตัวใหม่โดยตรงของพาหะ Band to Band recombination	17
2.14 (ก) แสดงการเกิดพาหะโดยอ้อม หรือ R-G Center Generation และ (ข) การรวมตัวใหม่โดยอ้อมของพาหะ หรือ R-G Center Recombination	18
3.1 โครงสร้างของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-si/Al	19
3.2 การออกแบบโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al	19
3.3 แผนผังกระบวนการสร้างโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปร่างภาพ(ต่อ)

	รูปที่	หน้า
3.4	ลำดับขั้นตอนการสร้างโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al	26
3.5	การหาค่า J_s จากกราฟความสัมพันธ์ความหนาแน่นกระแส-แรงดันของรอยสัมผัส	26
3.6	การหาค่า V_{bi} จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C^2$ กับแรงดันของรอยสัมผัส	27
3.7	ความสัมพันธ์ $\phi_{bn} = V_{bi} + V_n$	28
3.8	การวัดกระแส-แรงดันและค่าความจุไฟฟ้าของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al	29
3.9	การวัดกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al เมื่อได้รับแสง	29
4.1	การวัดกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสระหว่างอะลูมิเนียมและซิลิคอนชนิดเอ็น	30
4.2	ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al	31
4.3	คุณลักษณะระหว่างความหนาแน่นกระแส-แรงดันของจากชิ้นงานที่ซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิต่าง ๆ	32
4.4	คุณลักษณะ ϕ_{bn} ของจากชิ้นงานที่ซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ ต่าง ๆ	34
4.5	การวัดคุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al	35
4.6	คุณลักษณะของกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบสมมาตร	35
4.7	ลักษณะพารามิเตอร์ของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al	36
4.8	คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al หมายเลข A1 ที่ซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิต่างๆ (ขณะไม่ได้รับแสง)	37
4.9	คุณลักษณะกระแสมืด (Dark Current) ของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่ซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิต่างๆ (V bias = 1 V)	38
4.10	การวัดกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al เมื่อได้รับแสง	39
4.11	โฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al ขณะได้รับแรงดันไบอัส	39
4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของพื้นที่ปลอดประจุพาหะกับแรงดันไบอัสกลับ	40
4.13	คุณลักษณะของกระแส-แรงดันของคุณสมบัติทางแสงของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al (กราฟ กระแส-แรงดัน โฟโต ที่ซินเตอร์ริง 500°C)	41
4.14	คุณลักษณะของกระแส-แรงดันต่อการเปลี่ยนแปลงระยะ d ของคุณสมบัติทางแสงของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al (กราฟ กระแส-แรงดัน โฟโต ที่ซินเตอร์ริง 500°C)	42
4.15	การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของผิวอะลูมิเนียมของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่อุณหภูมิการซินเตอร์ริง 25°C	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.16 การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของผิวอะลูมิเนียมของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่อุณหภูมิการขึ้นเตอร้ริง 100°C	43
4.17 การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของผิวอะลูมิเนียมของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่อุณหภูมิการขึ้นเตอร้ริง 200°C	44
4.18 การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของผิวอะลูมิเนียมของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่อุณหภูมิการขึ้นเตอร้ริง 300°C	44
4.19 การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของผิวอะลูมิเนียมของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่อุณหภูมิการขึ้นเตอร้ริง 400°C	45
4.20 การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของผิวอะลูมิเนียมของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่อุณหภูมิการขึ้นเตอร้ริง 450°C	45
4.21 การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของผิวอะลูมิเนียมของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่อุณหภูมิการขึ้นเตอร้ริง 500°C	46
4.22 การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของผิวซิลิคอนของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่อุณหภูมิการขึ้นเตอร้ริง 25°C	47
4.23 การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของผิวซิลิคอนของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่อุณหภูมิการขึ้นเตอร้ริง 500°C	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
3.1	ขนาดของพื้นที่รับแสงและขนาดพื้นที่ขั้วสัมผัส	20
4.1	ปริมาณของกระแสของรอยสัมผัสที่ซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิต่าง ๆ	31
4.2	ค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่ได้จากการวัดกระแส-แรงดัน	33
4.3	ขนาดของพื้นที่รับแสงและขนาดพื้นที่ขั้วสัมผัส	36



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

ปัจจุบันสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำทางแสงได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในงานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ทางแสง ซึ่งมีการนำมาประยุกต์ใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เพราะเป็นอุปกรณ์ที่มีความรวดเร็ว ความเที่ยงตรง และความแม่นยำ จึงได้มีการศึกษาสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำทางแสง และได้มีการพัฒนาอย่างรวดเร็วมาโดยตลอด สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำทางแสงที่สำคัญได้แก่ โฟโตดีเทคเตอร์ (Photodetector) หรือตัวตรวจวัดแสง โฟโตไดโอดซึ่งเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำทางแสงมีหน้าที่ในการเปลี่ยนสัญญาณทางแสงให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าซึ่งจะนำไปใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่อไป [1] สารกึ่งตัวนำที่ได้นำมาใช้ในงานสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสงก็เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีคุณลักษณะมีความไวต่อแสงได้ดี และสามารถเปลี่ยนสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้าที่สามารถนำไปใช้ในวงจรได้ดี เช่น เจอร์มาเนียม (Ge), ซิลิคอน (Si) และ แกลเลียมอาเซไนด์ (GaAs) ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่นิยมนำมาสร้างเป็นอุปกรณ์ทางแสงมากที่สุดเพราะ คุณสมบัติที่สูงๆ ได้ดีกว่า ซิลิคอน โฟโตไดโอดมีโครงสร้างหลายลักษณะแตกต่างกันไปเช่น พีเอ็นโฟโตไดโอด, พีอินโฟโตไดโอด, โฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM, อะวาลานซ์โฟโตไดโอด ในงานนี้เราจะมาทำการศึกษากระบวนการสร้างโฟโตไดโอดที่มีโครงสร้างแบบ MSM ซึ่งเป็นการใช้สารกึ่งตัวนำในการสร้างเป็น ซิลิคอน (Si) ซึ่งมีกระบวนการสร้างที่ง่ายกว่า แกลเลียมอาเซไนด์ (GaAs) และมีคุณสมบัติที่น่าสนใจหลายอย่าง [2]

โฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al เป็นโครงสร้างที่ประกอบด้วยรอยสัมผัสระหว่างสารกึ่งตัวนำและโลหะ สองรอยสัมผัส [2] ดังรูปที่ 1.1 โดยจะมีการเปิดช่องระหว่างรอยสัมผัสทั้งสอง (Gap) ซึ่งเป็นบริเวณซิลิคอนทำหน้าที่เป็นตัวรับสัญญาณแสงแล้วเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้า ข้อดีของโฟโตไดโอดชนิดนี้คือ มีโครงสร้างเป็นแบบพลาแนร์ (Planar Structure) ซึ่งสามารถนำไปพัฒนาในกระบวนการสร้างเป็นอุปกรณ์ร่วมในวงจรรวมได้

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 คุณสมบัติของคลื่นแสง

แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง ที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกันไป แสงที่ตามนุษย์เรามองเห็นเรียกว่า แสงมองเห็น (visible light) ซึ่งมีคลื่นความยาวอยู่ในช่วงประมาณ 400 – 700 nm โดยที่แสงมีทั้งคุณสมบัติที่เป็นทั้ง “คลื่น” และ “อนุภาค” [2] ปรากฏการณ์ที่แสงแสดงคุณสมบัติเป็นคลื่นก็คือ การสะท้อน การหักเห การแทรกสอด โดยความเร็วของแสงที่เดินทางมีความสัมพันธ์กับความยาวของคลื่นแสงและความถี่ของคลื่นแสงคือ

$$\lambda = c_0 / \nu \quad (2.1)$$

λ คือ ความยาวคลื่นแสง (m)

c_0 คือ ความเร็วของแสงที่เดินทางในสุญญากาศ ($c_0 = 2.99792458 \times 10^8$ m/s)

ν คือ ความถี่ของคลื่นแสง (Hz)

ในทางฟิสิกส์แบบควอนตัม คลื่นแสงถูกพิจารณาว่ามีคุณสมบัติเป็นอนุภาคอีกด้วยโดยที่อนุภาคของแสงถูกเรียกว่า โฟตอน (photon) [2] อนุภาคของแสงนี้จะมีพลังงานอยู่ภายใน โดยที่พลังงานของโฟตอนนี้จะแปรกับความถี่ของคลื่นแสงคือ

$$E_{\text{photon}} = h\nu = hc / \lambda = 1.24 / \lambda_{(\text{nm})} \quad (2.2)$$

E_{photon} คือ พลังงานของโฟตอน (eV)

h คือ ค่าคงตัวของพลังค์ = 6.626×10^{-34} J-sec

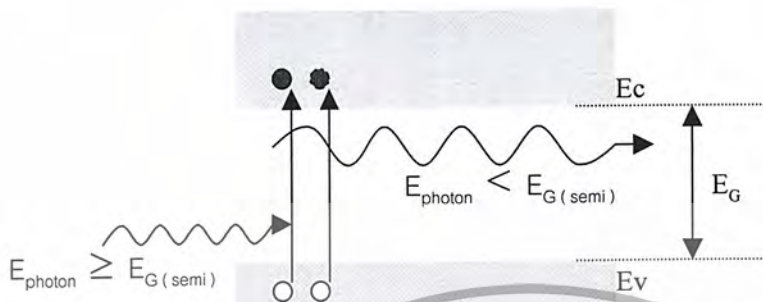
c คือ ความเร็วแสง = 3×10^8 m/s

ν และ λ คือ ความถี่และความยาวคลื่นของแสงตามลำดับ

เมื่อพลังงานโฟตอนของแสงมีค่ามากกว่าขนาดของช่องว่างพลังงาน (Energy gap : E_G) ของสารกึ่งตัวนำ หรือ $E_{\text{photon}} \geq E_{G(\text{semi})}$ สารกึ่งตัวนำจะดูดกลืนพลังงานแสงทำให้มีคู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

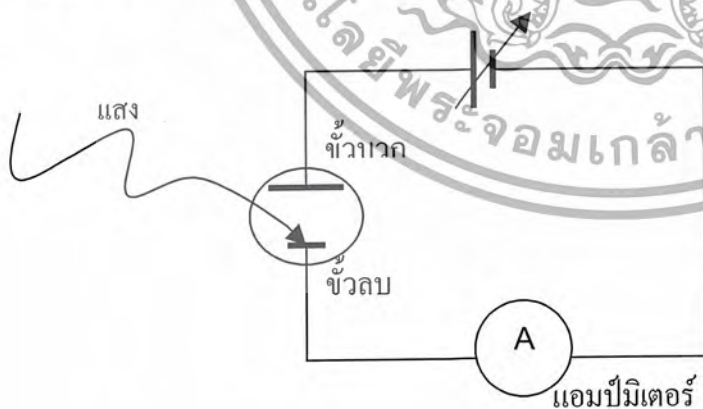
อิเล็กตรอน - โสตร เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำ ความนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำจึงเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับแสง แต่ในกรณีที่ $E_{\text{photon}} < E_{\text{G (semi)}}$ การดูดกลืนจะไม่เกิดขึ้น [2], [4] ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การดูดกลืนพลังงานโฟตอนของแสงในสารกึ่งตัวนำ

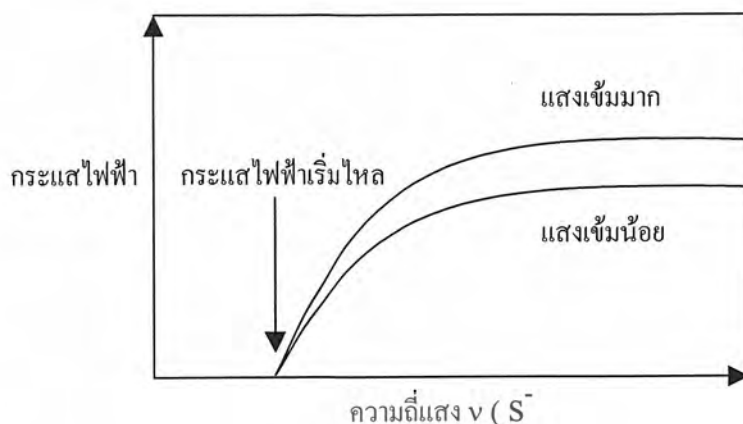
ปรากฏการณ์หนึ่งที่แสดงว่าแสงเป็นอนุภาคคือ ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (photoelectric effect) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์การส่องแสงลงบนผิวโลหะที่วางอยู่ในสุญญากาศแล้ว ทำให้อิเล็กตรอนที่ผิวโลหะกระเด็นออกจากผิวโลหะ [7] ดังแสดงในรูปที่ 2.2

ในรูปที่ 2.2 ในหลอดสุญญากาศมีแผ่นขั้วไฟฟ้าบวกและลบบรรจุอยู่ ขั้วไฟฟ้าเหล่านี้ถูกต่อออกไปสู่วงจรภายนอกซึ่งมีแอมมิเตอร์ไบอัสอยู่เมื่อแสงส่องลงบนขั้วไฟฟ้าลบจะพบว่า ถ้าแสงมีความถี่สูงกว่าค่าๆ หนึ่ง จะทำให้มีกระแสไหลในวงจรแต่ถ้าแสงมีความถี่ต่ำเกินไป จะไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลในวงจร[4] ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.2 การทดลองการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและความถี่แสงในปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก
กระแสไฟฟ้าจะเริ่มไหลเมื่อความถี่ของแสงสูงกว่าค่าหนึ่ง

ปรากฏการณ์นี้ได้แสดงให้เห็นว่าแสงมีคุณสมบัติเป็นอนุภาค และพลังงานสูงสุดของอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากโลหะ E มีค่าเท่ากับพลังงานของแสงที่ฉายลงบนผิวของโลหะ $h\nu$ ลบด้วยพลังงานที่จำเป็นในการดึงอิเล็กตรอนในโลหะให้หลุดออกมาข้างนอก $q\phi$ และเขียนเป็นสมการได้ว่า

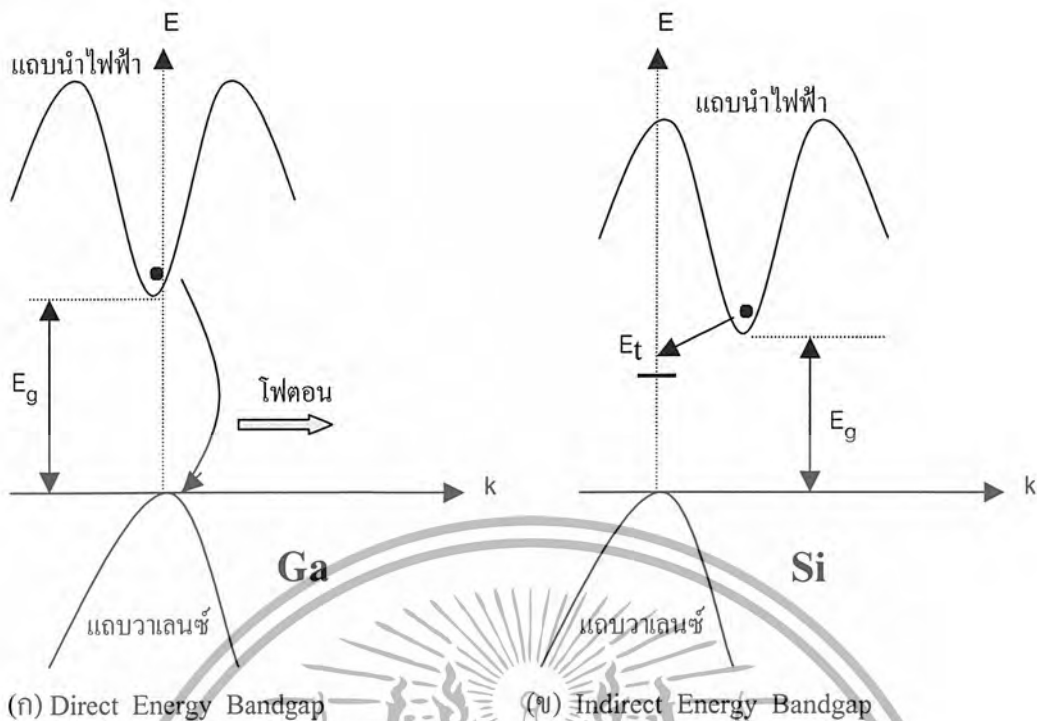
$$E = h\nu - q\phi \quad (2.3)$$

โดยที่ ϕ เรียกว่า เวิร์กฟังก์ชัน (work function) และ $q\phi$ มีหน่วยเป็น eV [5], [6]

2.2 คุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำที่ใช้การสร้างโฟโตไดโอด

โดยความเป็นจริงนั้น ลักษณะโครงสร้างของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ จะมีความยุ่งยากและซับซ้อนมากกว่าในรูปที่ 2.1 มากสิ่งสำคัญที่เราสนใจในกราฟ $E - k$ ก็คือ ตำแหน่งของค่าพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า กับตำแหน่งของค่าพลังงานสูงสุดในแถบวาเลนซ์ หรือจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ เราจะพบว่าสารกึ่งตัวนำบางชนิด ตำแหน่งทั้งสองจะอยู่ตรงกัน เช่น แกลเลียมอาเซไนด์ หรือสารกึ่งตัวนำประเภทสารประกอบอื่นๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (ก) เราเรียกลักษณะเช่นนี้ว่า “แถบพลังงานช่องตรง” หรือ “แถบช่องตรง” (Direct band gap) และยังมีสารกึ่งตัวนำอีกกลุ่มหนึ่งซึ่งตำแหน่งของจุดสำคัญทั้งสองนี้ จะอยู่ไม่ตรงกัน ดังรูปที่ 2.4 (ข) เช่น ซิลิคอน ลักษณะเช่นนี้ถูกเรียกว่า “แถบพลังงานช่องไม่ตรง” หรือ “แถบช่องไม่ตรง” (Indirect band gap) [1],[8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) Direct Energy Bandgap

(ข) Indirect Energy Bandgap

รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะกราฟความสัมพันธ์ $E-k$ ของสารกึ่งตัวนำ (ก) แบบช่องตรง (ข) แบบช่องไม่ตรง

โดยปกติ จุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ จะปรากฏอยู่ที่ตำแหน่งที่ $k=0$ แต่จากรูปที่ 2.4 (ข) จะเห็นว่าจุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า จะไม่อยู่ตรงตำแหน่งนี้ หรือก็คือไม่อยู่ตรงกัน อีกนัยหนึ่งก็คือ จุดสองจุดนี้มีค่า k ที่ต่างกัน หรือก็คือมีค่าโมเมนตัมที่ต่างกันนั่นเอง ดังนั้นคุณสมบัติบางประการของสารกึ่งตัวนำสองกลุ่มนี้ จะแตกต่างกันมาก เช่นคุณสมบัติทางด้านแสง (Optical property) ในกรณีของสารกึ่งตัวนำแบบช่องตรง (GaAs) พลังงานโฟตอนของแสงซึ่งมีค่าเท่ากับ $h\nu > E_g$ สามารถที่จะกระตุ้นให้อิเล็กตรอน จากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ ขึ้นไปอยู่ที่จุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าได้โดยตรง (Direct) และอิเล็กตรอนที่จุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าก็สามารถที่จะตกลงมาที่จุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ได้โดยตรง โดยไม่ต้องมีการเปลี่ยนแปลงค่าโมเมนตัม [2] เนื่องจากการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในรูปแบบโดยตรงเช่นนี้จะเกิดขึ้นได้โดยง่าย ทำให้สารกึ่งตัวนำในกลุ่มนี้ สามารถดูดกลืนหรือปลดปล่อยพลังงานแสงได้เป็นอย่างดี จึงมักถูกนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์ด้านแสง (Optical devices) ในกรณีของสารกึ่งตัวนำแบบช่องไม่ตรง (Si) อิเล็กตรอนในแถบนำไฟฟ้าไม่สามารถตกลงมายังแถบวาเลนซ์ได้โดยตรง เพราะจะต้องมีการเปลี่ยนระดับพลังงานก่อนซึ่งก็คือ การเปลี่ยนแปลงโมเมนตัม เพื่อให้อยู่ที่จุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าก่อน แล้วจึงลดมาสู่แถบวาเลนซ์ได้ในที่สุด และพลังงานที่เปลี่ยนแปลงดังกล่าวมักแสดงออกมาในรูปของความร้อนจึงไม่มีโฟตอนเกิดขึ้นในทำนองเดียวกัน พลังงานโฟตอนจากแสงก็ไม่สามารถที่จะกระตุ้นให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กตรอนจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ขึ้นไปอยู่จุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าได้โดยง่าย ถึงแม้พลังงานจากโฟตอนจะมีค่ามากเพียงพอก็ตามแต่อิเล็กตรอนก็ยังต้องมีค่าโมเมนตัมที่เหมาะสมสำหรับการเปลี่ยนสถานะ ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่า การดูดกลืนหรือคายพลังงานของแสง ของสารกึ่งตัวนำกลุ่มนี้ เกิดขึ้นได้ไม่ดันทันเนื่องจากมีคุณสมบัติทางแสงที่ด้อยกว่าสารกึ่งตัวนำแบบช่องตรง[7] ,[8]

อย่างไรก็ดีการเลือกใช้ซิลิคอนในการสร้างโฟโตโวลตาอิกก็ยังมีข้อดีอีกหลายประการในการเลือกใช้สร้างโฟโตโวลตาอิกแทน แกลเลียมอาเซไนด์ เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีมาก ราคาถูก และสามารถสร้างชั้นออกไซด์ SiO_2 ที่ผิวได้ง่ายกว่า โดยวิธีการออกซิเดชันและเป็นชั้นออกไซด์ที่เสถียรภาพกว่า แกลเลียมอาเซไนด์ อีกทั้งยังเป็นสารกึ่งตัวนำที่ใช้ในการสร้างวงจรรวม [1]

2.3 รอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ

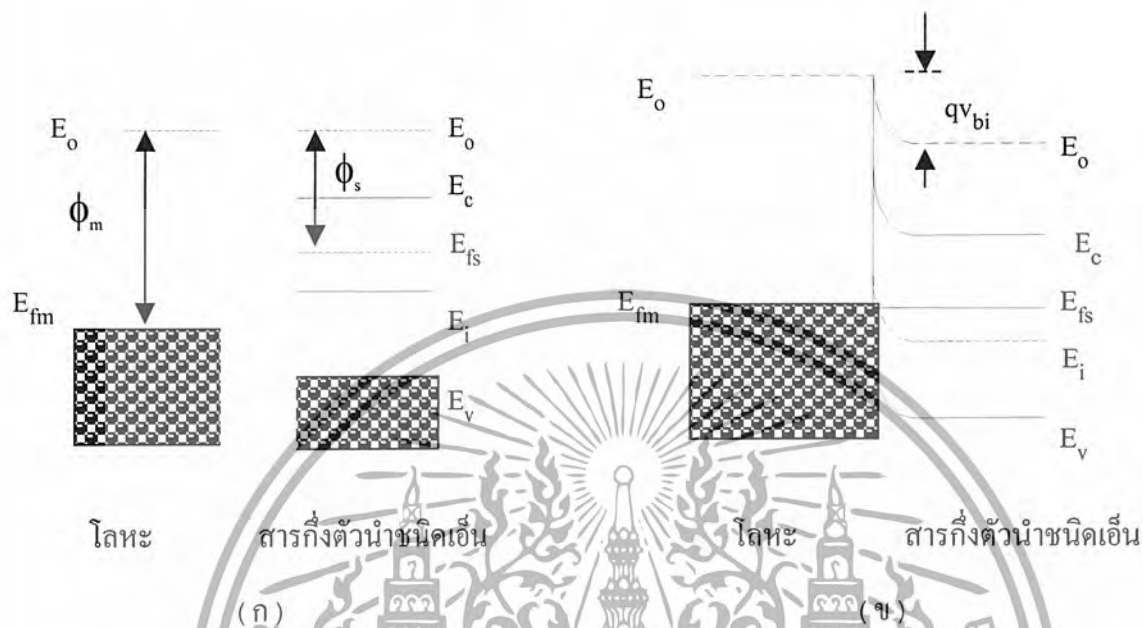
การสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำที่เป็นไปได้อาจมีทั้งหมด 4 กรณีด้วยกันทั้งนี้เนื่องจากสารกึ่งตัวนำอาจเป็นไปได้ทั้งชนิดเอ็นและชนิดพี และยังขึ้นกับค่าฟังก์ชันงานของโลหะ (Work Function, ϕ_m) ซึ่งอาจจะมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า ค่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ (ϕ_s) ได้ ในบรรดารอยต่อทั้ง 4 กรณีนี้ ถ้าเราพิจารณาแถบพลังงานศักย์ (Energy Band Diagram) ที่เกิดขึ้นจากรอยต่อดังกล่าวแล้ว เราจะได้ว่ามีอยู่ 2 กรณีที่ทำให้รอยต่อดังกล่าวกลายเป็นรอยต่อแบบโอห์มมิก (Ohmic Contact) ซึ่งสามารถนำกระแสได้ทั้งสองด้านและอีก 2 กรณีจะทำให้รอยต่อดังกล่าวเป็นรอยต่อทางเดียว (Rectifying Contact) เนื่องจากสารกึ่งตัวนำที่ใช้ในการสร้างโฟโตโวลตาอิกในงานนี้เป็น ซิลิคอน ชนิดเอ็น ดังนั้นเราจะกล่าวถึงรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำซิลิคอนชนิดเอ็นเพียงชนิดเดียว [5],[10]

2.3.1 รอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

ถ้าเราสมมติให้ค่าฟังก์ชันงาน (Work Function) ของ โลหะคือ (ϕ_m) และมีค่ามากกว่า ฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (ϕ_n) ดังนั้นลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงาน โลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น สามารถแยกกันได้ดังแสดงในรูปที่ 2.5 (ก) และเมื่อนำโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นดังกล่าวนี้มาสัมผัสกัน เนื่องจากค่าฟังก์ชันงานของสารทั้ง 2 ชนิดไม่เท่ากันจึงทำให้เกิดการถ่ายเทของประจุระหว่างสารกึ่งตัวนำกับ โลหะจนกระทั่งในที่สุดจะอยู่ในสภาวะสมดุลโดยในสภาวะนี้ระดับเฟอร์มิของสารทั้ง 2 ชนิดจะอยู่ที่ระดับเดียวกันตลอดรอยสัมผัสดังแสดงในรูปที่ 2.5 (ข) ปรากฏการณ์ที่กล่าวมานี้อธิบายได้ว่าเนื่องจากอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อเข้าไปทางด้าน โลหะจึงทำให้เกิดอ็อนบวคของอะตอมสารเจือผู้ให้ขึ้นที่สารกึ่งตัวนำและเกิดประจุลบทางด้าน โลหะ ทำให้เกิดมีสนามไฟฟ้าขึ้นที่บริเวณรอยต่อสนามไฟฟ้างกล่าวนี้จะมีทิศทางช่วยด้านการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งในที่สุดก็สามารถหยุดยั้งการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนได้ ซึ่งสามารถเขียนให้เห็น ได้ชัดโดยการโค้งงอขึ้นของแถบพลังงานของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

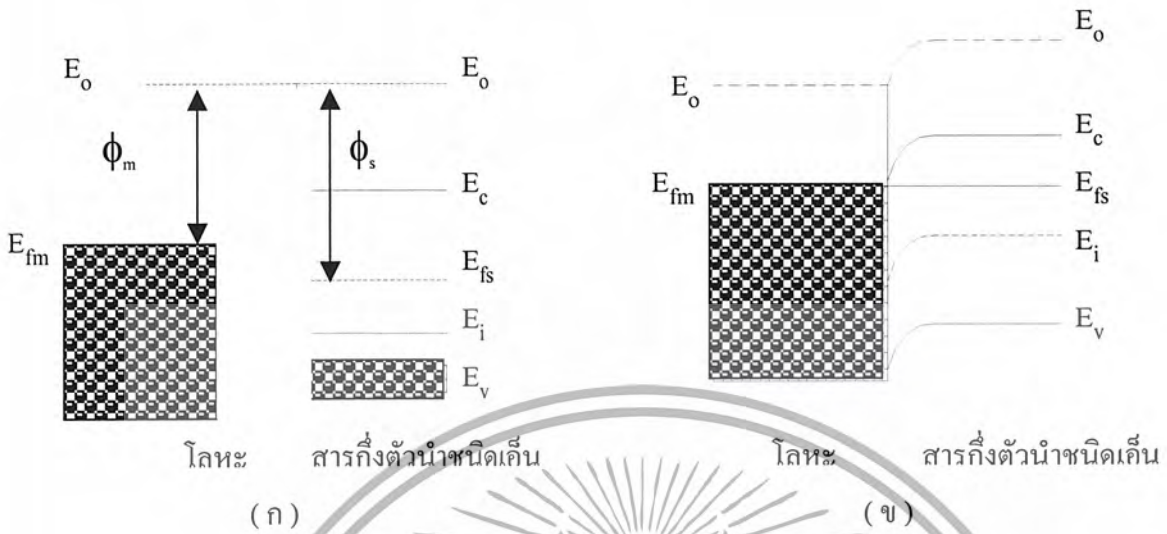
สารกึ่งตัวนำบริเวณรอยต่อสัมผัสกับโลหะ ซึ่งหมายความว่าเกิดกำแพงศักย์ป้องกันการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน โดยกำแพงศักย์นี้มีความสูงเท่ากับ $q(\phi_m - \phi_s)$ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 (ข) ดังนั้นในสภาวะสมดุลจึงไม่มีกระแสผ่านรอยต่อนี้[10]



รูปที่ 2.5 ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นในกรณีที่ $\phi_m > \phi_s$ เกิดเป็นรอยสัมผัสแบบเรกติไฟร์ (ก) ก่อนสัมผัส (ข) หลังสัมผัส

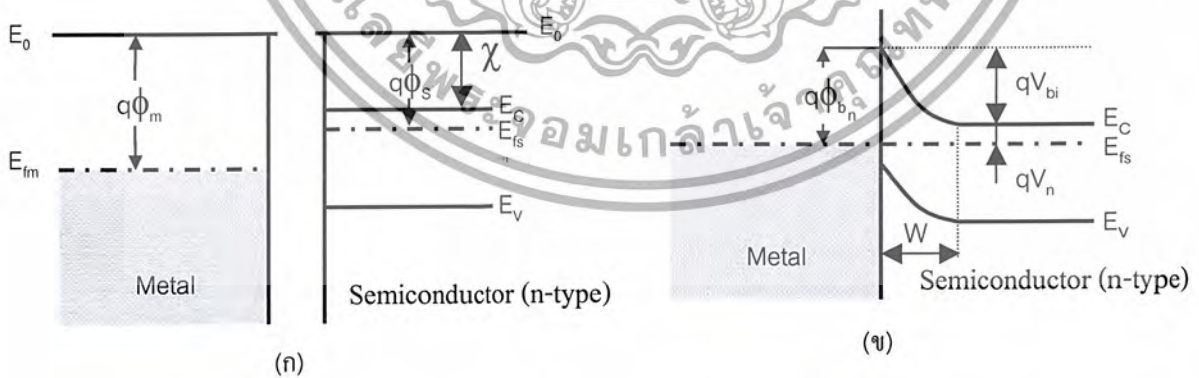
ในทำนองกลับกันถ้าเราสมมติให้ค่าฟังก์ชันงาน (Work Function) ของโลหะ (ϕ_m) มีค่าน้อยกว่าค่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ (ϕ_s) ดังนั้นลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำก่อนและหลังที่จะนำมาสัมผัสกันแสดงดังในรูปที่ 2.6 (ก) และ (ข) ตามลำดับกล่าวคือ เมื่อก่อนสัมผัสกันแล้วจะทำให้เกิดการถ่ายเทประจุพาหะผ่านรอยสัมผัสโดยที่อิเล็กตรอนจากโลหะจะไหลเข้าไปในสารกึ่งตัวนำทำให้เกิดอ็อนบวกขึ้นทางด้านโลหะ และเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าภายในชั้นที่รอยสัมผัสดังนั้นการไหลของอิเล็กตรอนจะหยุดลงเมื่อสนามไฟฟ้าภายในมีค่าสูงพอที่จะสามารถต้านการแพร่ของอิเล็กตรอนในสภาวะสมดุล[1],[2] ซึ่งระดับเฟอร์มิของสารทั้งสองจะอยู่ในระดับเดียวกันตลอดรอยสัมผัส ดังนั้นจึงทำให้เกิดการสะสมอิเล็กตรอนทางด้านสารกึ่งตัวนำบริเวณรอยสัมผัสดังรูปที่ 2.6 (ข) ซึ่งแสดงโดยการ โค้งงอของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำบริเวณผิวสัมผัสกับโลหะดังนั้นในภาวะสมดุลจะเห็นได้ว่าที่รอยสัมผัสจะไม่มีกำแพงศักย์ที่จะป้องกันการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำไปทางด้านโลหะกล่าวคือ อิเล็กตรอนจะสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสนี้ได้สองทิศทางซึ่งรอยสัมผัสนี้ไม่มีคุณสมบัติในการเรกติไฟร์ รอยสัมผัสเช่นนี้เราเรียกว่า รอยสัมผัสแบบโอห์มมิก หรือรอยสัมผัสโอห์มมิก (ohmic contact)[1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นในกรณีที่ $\phi_m < \phi_s$ เกิดเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มิก (ก) ก่อนสัมผัส (ข) หลังสัมผัส

2.3.2 ลักษณะคุณสมบัติเกี่ยวกับรอยต่อแบบขอตัก



รูปที่ 2.7 ลักษณะแถบพลังงานแสงค่าต่างๆของรอยต่อแบบขอตัก

จากรูปค่า ϕ_{bn} คือค่าความสูงของรอยสัมผัสสารกึ่งตัวนำ เป็นค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่ป้องกันการไหลของอิเล็กตรอนจากโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำโดยเราสามารถหาได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\phi_{bn} = (\phi_m - \chi) \tag{2.4}$$

ในส่วนของสารกึ่งตัวนำ V_{bi} คือค่าแรงดันภายใน (Built-in voltage) ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกันกับรอยต่อพีเอ็น[8] ซึ่งหาได้จาก

$$V_{bi} = \phi_{bn} - \phi_n \tag{2.5}$$

โดยที่ V_{bi} เป็นฟังก์ชันที่ขึ้นอยู่กับ การได้ไป

- เมื่อ $q\phi_{bn}$ = ความสูงของกำแพงศักย์ (Barrier height) ; eV
- V_{bi} = แรงดันภายใน (Built-in voltage) ; V
- ϕ_n = ความต่างศักย์ระหว่าง แถบนำกับชั้น เฟอร์มิ ; V
- $q\phi_m$ = ฟังก์ชันงานของโลหะ ; eV
- $q\phi_s$ = ฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ ; eV
- χ = Electron affinity ; V

และเมื่อให้แรงดันไบอัส จะมีปริมาณความหนาแน่นกระแสไหลผ่านรอยสัมผัสดังสมการที่ (2.6)

$$J = J_s \left(e^{qV/kT} - 1 \right) \tag{2.6}$$

และ

$$J_s = A_n^{-1} T^2 e^{\left(\frac{-q\phi_{bn}}{kT} \right)} \tag{2.7}$$

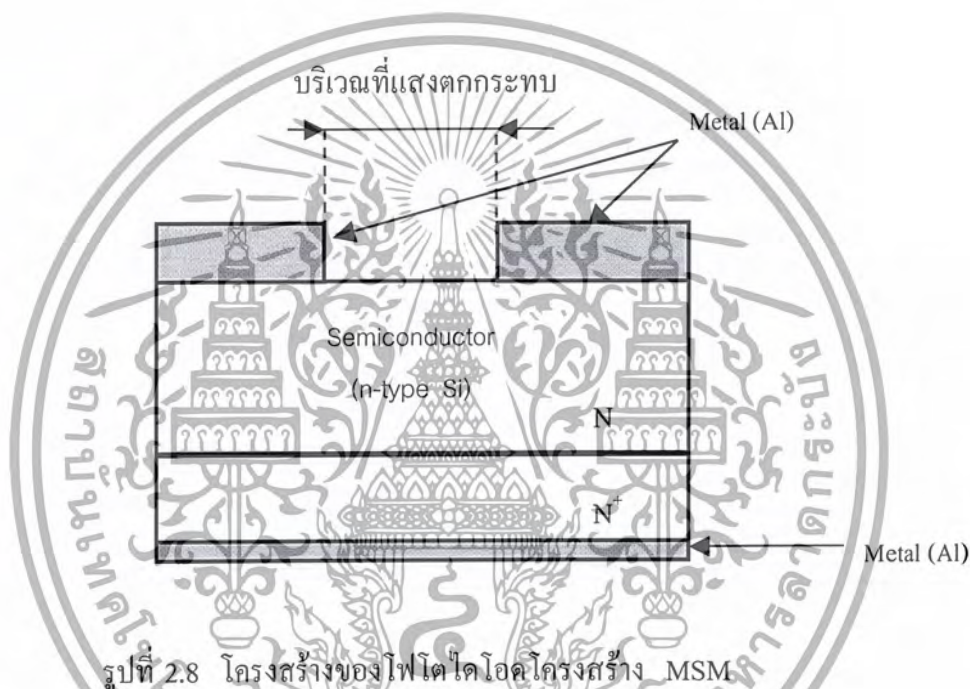
- โดย J คือ ความหนาแน่นกระแสที่ไหลผ่านรอยสัมผัส
- J_s คือ ความหนาแน่นกระแสอิ่มตัวของรอยสัมผัส
- V คือ แรงดันไบอัสภายนอก
- k คือ ค่าคงที่ของ โบสล์มันน์
- T คือ อุณหภูมิสมบูรณ์
- A_n^* คือ ค่าคงที่ริชาร์ดสันของอิลีเกตรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 โฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM

โฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM ประกอบด้วยรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ จำนวนสองรอยสัมผัสสองขั้วที่สร้างบนสารกึ่งตัวนำ และแสงที่จะทำการตรวจจับจะถูกกำหนดให้กระทบบริเวณพื้นที่ที่เป็นสารกึ่งตัวนำ ซึ่งอยู่ระหว่างขั้วโลหะทั้งสอง ส่วนที่ด้านล่างของโฟโตไดโอดได้ทำการสร้างชั้น N^+ เพื่อให้รอยสัมผัสระหว่างสารกึ่งตัวนำด้านล่างกับโลหะมีคุณสมบัติเป็นโอห์มิก ไว้สำหรับหาค่า ϕ_{bn} โครงสร้างของโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM[3] แสดงดังรูปที่

2.8



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM

จากรูปที่ 2.8 รอยสัมผัสด้านบนระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำทั้งสองรอยสัมผัสของโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM จะต้องมีคุณสมบัติเป็นรอยสัมผัสแบบขอตักไดโอด ซึ่งการทำงานของโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM นี้จะสามารถทำการไบอัสให้กระแสไหลไปด้านใดด้านหนึ่งก็ได้ หรืออีกนัยหนึ่งก็คือสามารถที่จะเลือกไบอัสบวกหรือลบสลับกันได้ทั้งสองด้าน[1],[6] ส่วนโครงสร้างด้านล่างได้ทำการแพร่สารฟอสฟอรัสเพื่อสร้างชั้น N^+ เพื่อทำการสร้างรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำที่มีคุณสมบัติเป็นโอห์มิกสำหรับหาค่า ϕ_{bn} ในการ Sintering ที่อุณหภูมิต่างๆ

2.4.1 หลักการทำงานของโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM

หลักการทำงานของโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM ส่วนพื้นที่รับแสงจะเป็นพื้นที่บริเวณสารกึ่งตัวนำโดยจะทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าด้วยกระบวนการ โฟโตโวลตาอิก (photovoltaic effect) การสร้างรอยสัมผัสระหว่างสารกึ่งตัวนำและโลหะแบบขอตติ์ทั้งสองรอยสัมผัสบนสารกึ่งตัวนำจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นเนื่องจากการปรับระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำและโลหะ ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าที่แพร่เข้ามาทางด้านสารกึ่งตัวนำบริเวณที่รับแสง เนื่องจากโลหะมีประจุพาหะเป็นจำนวนมากสามารถพิจารณาได้ว่าไม่มีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นด้านโลหะ กระบวนการโฟโตโวลตาอิกเกิดจากการที่พลังงานโฟตอนของแสงที่ตกกระทบบริเวณพื้นที่ทางด้านสารกึ่งตัวนำ บริเวณสนามไฟฟ้าและบริเวณใกล้สนามไฟฟ้า พลังงานโฟตอนของแสงนี้มีค่ามากพอที่จะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนอิสระ – โฮลอิสระ กล่าวคือ $h\nu \geq E_g$ ที่บริเวณพื้นที่ปลอดพาหะและบริเวณพื้นที่ใกล้เคียงกับบริเวณปลอดพาหะนี้ และสนามไฟฟ้านี้จะเป็นตัวพัดพา อิเล็กตรอนอิสระ และ โฮลอิสระ ที่เกิดจากแสงให้ออกไปสู่วงจรภายนอกเกิดเป็นกระแสไหลผ่านตัวโฟโตไดโอดในที่สุด [1]

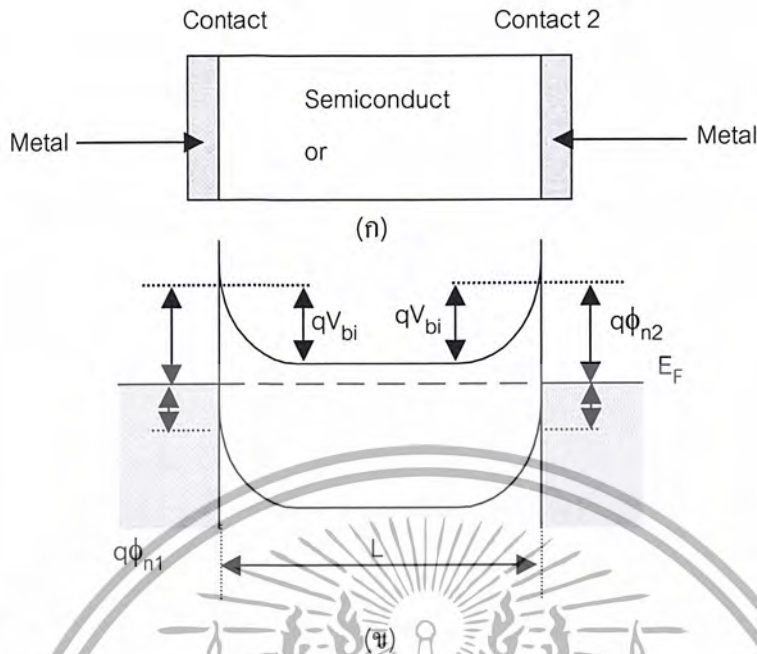
จากโครงสร้างโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM เราสามารถทำการไบอัสบวกและลบได้ทั้งสองทิศทาง เนื่องจากทั้งสองรอยสัมผัสมีคุณสมบัติที่เหมือนกัน เมื่อเราทำการไบอัสโฟโตไดโอดจะทำให้รอยต่อขอตติ์ด้านหนึ่งเป็น Forward Bias และอีกด้านจะเป็น Reverse Bias ซึ่งส่วนที่มีผลต่อกระแสเอาต์พุตมากที่สุดคือบริเวณที่เป็น Reverse Bias ซึ่งมีความเข้มสนามไฟฟ้าสูงและมีบริเวณกว้าง เมื่อแสงที่บริเวณสารกึ่งตัวนำมีค่ามากพอคือ $h\nu \geq E_g$ จะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนอิสระและโฮลอิสระ ซึ่งคู่อิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดขึ้นบริเวณ สนามไฟฟ้าด้าน Reverse และบริเวณใกล้สนามไฟฟ้า จะถูกสนามไฟฟ้าพัดพาและจะมีผลต่อกระแสเอาต์พุตมากที่สุด[9]

2.4.2 สถานะสมดุลความร้อนของโฟโตไดโอด โครงสร้าง MSM

โครงสร้างของโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM แสดงในรูปที่ 2.9 (ก) ประกอบไปด้วยสารกึ่งตัวนำที่มีการแพร่สารเจือ ชนิดเอ็น อย่างสม่ำเสมอและขั้วโลหะสองขั้ว โดยลักษณะของแถบพลังงานของโฟโตไดโอดในสถานะสมดุลความร้อนแสดงในรูปที่ 2.9 (ข) ซึ่งค่า

- ϕ_{n1} คือ ความสูงของกำแพงศักย์ของอิเล็กตรอนของรอยสัมผัสที่ 1
- ϕ_{n2} คือ ความสูงของกำแพงศักย์ของอิเล็กตรอนของรอยสัมผัสที่ 2
- ϕ_{p1} คือ ความสูงของกำแพงศักย์ของโฮลของรอยสัมผัสที่ 1
- ϕ_{p2} คือ ความสูงของกำแพงศักย์ของโฮลของรอยสัมผัสที่ 2
- V_{bi1} คือ ศักย์ไฟฟ้าภายในของรอยสัมผัสที่ 1
- V_{bi2} คือ ศักย์ไฟฟ้าภายในของรอยสัมผัสที่ 2
- L คือ ระยะห่างระหว่างขั้วสัมผัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 (ก) โครงสร้างของโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM

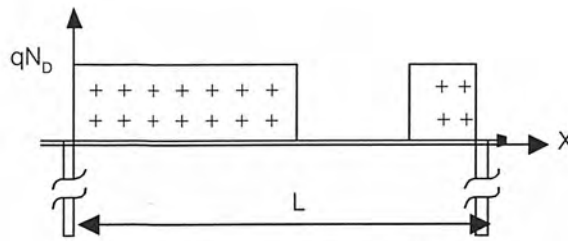
(ข) แถบพลังงานของโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM ในสถานะสมดุลย์ความ

ร้อน

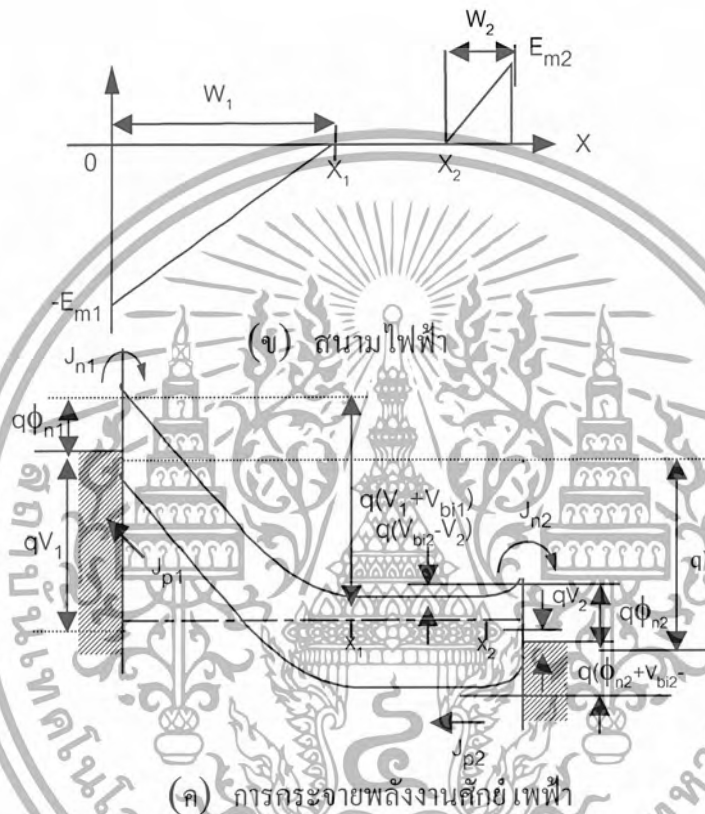
ถ้าพื้นที่ของทั้งสองรอยสัมผัสมีค่าเท่ากันและค่าความสูงกำแพงศักย์ $\phi_{n1} = \phi_{n2}$ เท่ากัน กล่าวได้ว่าโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM แบบสมมาตร (Symmetrical MSM Structure)

2.4.3 การให้ไบอัสและการกระจายพลังงานศักย์

เมื่อมีการไบอัสให้กับโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM โดยไฟลบจะต่อเข้ากับขั้วโลหะที่ 1 และขั้วบวกต่อเข้ากับรอยสัมผัสที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 2.10 รอยสัมผัสที่ 1 เป็นแบบไบอัสกลับและรอยสัมผัสที่ 2 เป็นแบบไบอัสตรง [7] จากทฤษฎีเทอร์มิออนิก อิมิซัน (Thermionic Emission) ดังนั้นกระแสอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นมาจากรอยสัมผัสที่ 1 กระแสไหลจะเกิดจากการแพร่จากรอยสัมผัสที่ 2 ไปยังรอยสัมผัสที่ 1 ดังนั้นความต่อเนื่องของกระแส (Current Continuity) จะเป็นเงื่อนไขที่ทำให้กระแสอิเล็กตรอนที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ของรอยสัมผัสทั้งสองต้องมีขนาดเท่ากัน



(ก) การกระจายของประจุ



(จ) สนามไฟฟ้า

(ค) การกระจายพลังงานศักย์ไฟฟ้า

รูปที่ 2.10 การกระจายประจุ สนามไฟฟ้า และการกระจายพลังงานศักย์ไฟฟ้าของโครงสร้าง MSM ภายใต้การให้แรงดันไบอัส (ด้วยการไบอัสค่าบวกที่รอยสัมผัสที่ 2)

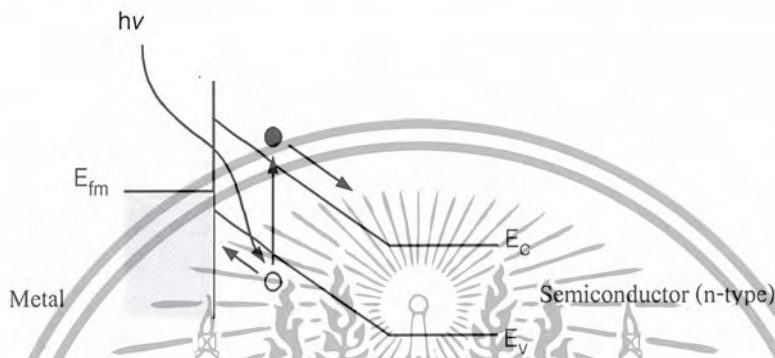
2.4.4 กระบวนการดูดกลืนแสงของโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM

เมื่อให้แรงดันไบอัสจากรูปที่ 2.10 (ค) พื้นที่รับแสงของโฟโตไดโอด โครงสร้าง MSM สามารถแบ่งพื้นที่รับแสงเป็น 2 ส่วน คือ พื้นที่ปลอดประจุพาหะและพื้นที่เป็นกลาง ซึ่งพื้นที่ปลอดประจุพาหะจะมีกระบวนการดูดกลืนแสงเหมือนกับการดูดกลืนแสงของชอตต์กีโฟโตไดโอด และส่วนพื้นที่เป็นกลางจะมีกระบวนการดูดกลืนแสงเหมือนกับโฟโตคอนดักเตอร์[5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.4.1 กระบวนการดูดกลืนแสงของบริเวณปลอดประจุพาหะ

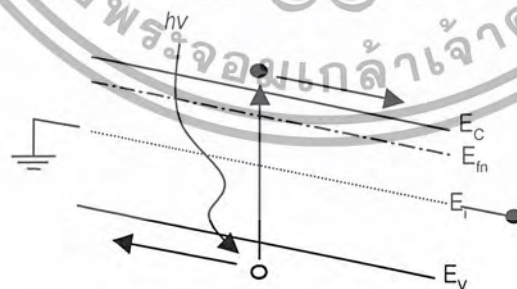
กระบวนการดูดกลืนแสงของพื้นที่ปลอดประจุพาหะของรอยสัมผัสมีกระบวนการดูดกลืนแสงเหมือนกับกระบวนการดูดกลืนแสงของชอตต์กีโฟโตไดโอด พลังงานแสงจะถูกดูดกลืนในพื้นที่ปลอดประจุพาหะของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น โดยพลังงานแสงที่ถูกดูดกลืนจะต้องมีค่าพลังงานมากกว่าแถบพลังงานต้องห้ามของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและสร้างคู่อิเล็กตรอน-โฮล (Electron-hole Pair) คู่อิเล็กตรอน-โฮลที่ถูกเกิดภายในพื้นที่ปลอดประจุพาหะจะถูกแยกออกโดยสนามไฟฟ้า



รูปที่ 2.11 ลักษณะของแถบพลังงานชอตต์กีไดโอด ขณะที่พลังงานแสงถูกดูดกลืนภายในพื้นที่ปลอดประจุ

2.4.4.2 กระบวนการดูดกลืนแสงของพื้นที่เป็นกลาง

กระบวนการดูดกลืนแสงของพื้นที่เป็นกลาง เมื่อแสงตกกระทบบริเวณสารกึ่งตัวนำที่เป็นกลาง จะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล โดยที่ระดับพลังงานของแสงที่ถูกดูดกลืนจะต้องมีมากกว่าหรือเท่ากับแถบพลังงานต้องห้ามของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น[2]



รูปที่ 2.12 ลักษณะแถบพลังงานของพื้นที่เป็นกลางขณะได้รับแรงดันไบอัสพร้อมกันมีแสงตกกระทบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 การรวมตัวใหม่และการเกิดพาหะ(Recombination and Generation)

การเกิดของพาหะ หรือ Carrier Generation หมายถึง กระบวนการซึ่งทำให้มีพาหะเกิดขึ้นใหม่โดยจะเป็นการเกิด ของคู่อิเล็กตรอน-โฮล [1]

การรวมตัวใหม่ หรือ Recombination หมายถึง กระบวนการตรงข้ามหรือย้อนกลับกับการเกิด กล่าวคือ เป็นการรวมตัวระหว่างอิเล็กตรอนอิสระกับโฮล ทำให้พาหะคือโฮลและอิเล็กตรอนหายไป กระบวนการทั้งสองนี้จะเกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำในเวลาเดียวกัน และถูกเรียกว่า กระบวนการรวมตัวใหม่และการเกิดของพาหะ (Recombination-Generation Process) บางครั้งเรียกสั้นๆว่า กระบวนการ R-G สำหรับสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ ในภาวะสมดุลความร้อน ที่อุณหภูมิใดๆ พลังงานจากความร้อนจะทำให้มี คู่อิเล็กตรอน-โฮลเกิดขึ้น และมีการรวมตัวอย่างต่อเนื่องตลอดเวลาโดยมีอัตราการเกิดและอัตราการรวมตัวใหม่ของพาหะเท่ากัน ดังนั้นจึงทำให้ความหนาแน่นของพาหะมีค่าคงที่ได้

ในสารกึ่งตัวนำอีกทรินซิค ความหนาแน่นของพาหะถูกกำหนดด้วยปริมาณของอะตอมสารเจือ และความหนาแน่นของพาหะอินทรินซิค อย่างไรก็ตามในภาวะสมดุลความร้อน อัตราการเกิดและการรวมตัวใหม่ของพาหะต้องมีค่าเท่ากัน และสมการตามกฎของแมสแอคชั่น(mass action law) $n.p = n_i^2$ ยังคงใช้ได้ แต่สารกึ่งตัวนำนั้นต้องเป็นสาร นอนดีเจนเนอเรต (nondegenerate)

ในขณะที่สารกึ่งตัวนำถูกรบกวน เช่น มีการกระตุ้นด้วยพลังงานจากภายนอก ได้แก่ ความร้อน หรือแสง หรือสนามไฟฟ้า และไม่อยู่ในสภาวะสมดุล สมการแมสแอคชั่น ไม่สามารถใช้ได้เพราะความหนาแน่นของพาหะมีการเปลี่ยนแปลง แต่ในที่สุด ระบบก็พยายามจะเข้าสู่ภาวะสมดุลความร้อนเช่นเดิม ตัวอย่างเช่น เมื่อมีการทำให้เกิดพาหะส่วนน้อยเพิ่มขึ้นจากเดิม ที่ปลายด้านหนึ่งของแท่งสารกึ่งตัวนำ ขณะนี้ภาวะสมดุลถูกรบกวน แต่ระบบจะพยายาม กลับคืนสู่ภาวะสมดุล โดยอัตราการรวมตัวใหม่ จะมีค่าสูงกว่าอัตราการเกิดของพาหะ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ในภาวะไม่สมดุลอัตราการเกิดและอัตราการรวมตัวจะไม่เท่ากัน ทั้งนี้เนื่องจากระบบพยายามจะกลับคืนสู่ภาวะสมดุลนั่นเอง เมื่อระบบเข้าสู่ภาวะสมดุลแล้ว ในที่สุดอัตราการเกิด และอัตราการรวมตัวก็จะมีค่าเท่ากันอีกครั้งหนึ่ง[1],[7]

2.5.1 กระบวนการ R-G (Recombination- Generation Process)

โดยทั่วไป กระบวนการ R-G ที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำ อาจพิจารณาจัดแบ่งเป็นแบบใหญ่ๆได้ทั้ง 2 แบบ ดังนี้คือ

2.5.1.1 กระบวนการ R-G โดยตรง (Direct R-G Process)

กระบวนการ R-G โดยตรง เป็นกระบวนการเกิดและรวมตัวใหม่ของพาหะ ที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำแบบช่องแถบตรง (Direct Band Gap Semiconductor) เช่น สารกึ่งตัวนำเอ็กสัทรินเป็นเอ็กสัทรินที่สังเคราะห์สำหรับใช้ในงานโฟโตนิกส์ เช่น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะเกิดการคายไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประเภทสารประกอบกลุ่ม III-V ได้แก่ แกลเลียมอาเซไนด์ แกลเลียมฟอสไฟด์ และอินเดียมแอนติโมนายด์ ซึ่งลักษณะของกราฟ E-k Diagram จะเป็นแบบช่องตรง การรวมตัวใหม่โดยตรงนี้จะทำให้มีการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของแสงหรือโฟตอน(Photon)ได้ง่าย กระบวนการเกิดและการรวมตัวใหม่โดยตรง แสดงได้ดังในรูปที่ 2.13 กล่าวคือ เมื่ออิเล็กตรอนวาเลนซ์ ในแถบวาเลนซ์ได้รับพลังงาน มากพอจากความร้อน หรือแสงคือต้องมากกว่าขนาด E_g eV อิเล็กตรอนจะสามารถย้ายขึ้นไปยังแถบนำไฟฟ้า ได้โดยตรง ด้วยการข้ามช่องว่างพลังงาน (E_g) ลักษณะเช่นนี้ถูกเรียกว่า การเกิดพาหะโดยตรง (Direct Generation) ซึ่งเป็นลักษณะการย้ายที่อยู่จากแถบพลังงานแถบหนึ่งไปยังอีกแถบหนึ่ง ซึ่งบางครั้งเรียกว่า การเกิดพาหะจากแถบหนึ่งไปยังอีกแถบหนึ่ง

(Band to Band Generation) ซึ่งจะทำให้ได้คู่อิเล็กตรอน-โฮล เกิดขึ้น ในทางกลับกัน เมื่ออิเล็กตรอนนำไฟฟ้าจากแถบนำไฟฟ้า ลดระดับกลับลงไปรวมตัวกลับโฮลในแถบวาเลนซ์โดยตรง ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า การรวมตัวใหม่โดยตรง (Direct recombination) ซึ่งจะทำให้อิเล็กตรอนอิสระและโฮลหายไป คล้ายเป็นกระบวนการย้อนกลับของการเกิดพาหะ กระบวนการเกิดและรวมตัวของพาหะเช่นนี้ถูกเรียกว่า กระบวนการ R-G โดยตรง [1]



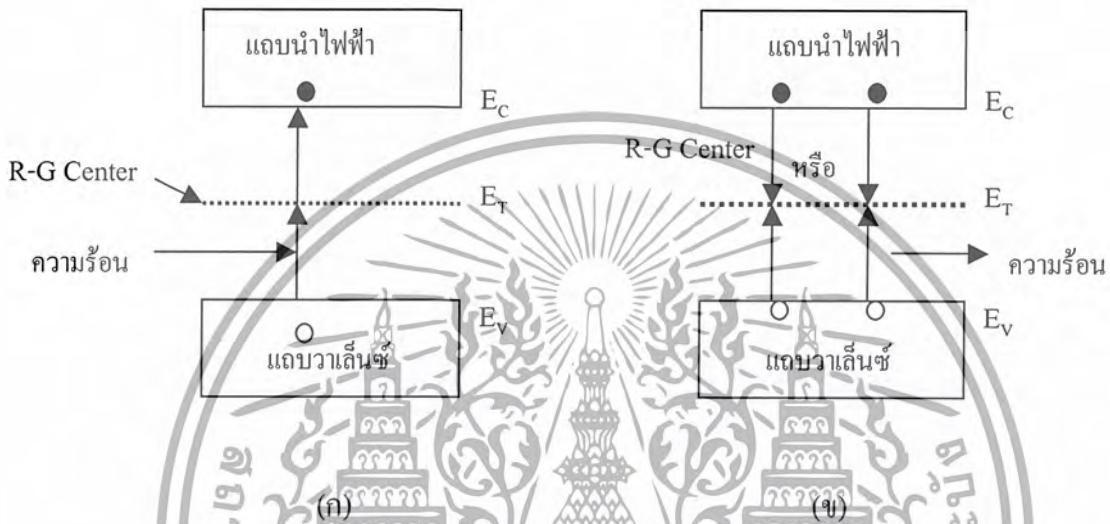
รูปที่ 2.13 (ก) การเกิดพาหะ โดยตรงหรือ Band to Band Generation และ (ข) การรวมตัวใหม่โดยตรงของพาหะ Band to Band recombination

2.5.1.2 กระบวนการ R-G โดยอ้อม(Indirect band gap)

กระบวนการ R-G โดยอ้อมนี้ จะเกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำแบบช่องแถบไม่ตรง (Indirect band gap) เช่นซิลิคอน เยอรมันเนียม โดยเมื่ออิเล็กตรอนวาเลนซ์ได้รับพลังงาน จะมีการย้ายระดับพลังงานแต่ไม่สามารถที่จะข้ามช่องว่างแถบพลังงาน E_g ไปยังแถบนำไฟฟ้าได้โดยตรง แต่จะเกิดขึ้นเป็นสองขั้นตอน โดยในขั้นแรก อิเล็กตรอนจะอาศัยระดับพลังงาน หรือสถานะพลังงานที่ปรากฏอยู่ในช่องว่างแถบพลังงานเป็นที่พัก ก่อนที่จะข้ามต่อไปยังแถบนำไฟฟ้าในขั้นที่สอง ซึ่งปรากฏการณ์นี้ถูกเรียกว่า การเกิดพาหะโดยอ้อม และในทางกลับกันการรวมตัวใหม่โดยอ้อมก็คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คือกระบวนการย้อนกลับของการเกิดพาหะโดยอ้อมนั่นเอง โดยอิเล็กตรอนจากแถบนำไฟฟ้าจะลดลงไปยังระดับพลังงานระดับหนึ่ง ที่อยู่ในช่องว่างพลังงาน ก่อนที่จะตกลงไปยังแถบวาเลนซ์ในที่สุดปรากฏการณ์ทั้งสองนี้ถูกเรียกว่า การเกิดและการรวมตัวโดยอ้อมของพาหะ หรือกระบวนการ R-G โดยอ้อม ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ระดับพลังงาน หรือสถานะพลังงานที่ปรากฏอยู่ในช่องว่างแถบพลังงาน เป็นสถานะพลังงานที่อะตอมซิลิคอนและอะตอมเยอรมันเนียมไม่สามารถมีได้ ดังนั้นสถานะพลังงานเหล่านี้จึงเกิดขึ้นจากอะตอมสารเจือหรืออะตอมแปลกปลอมอื่นๆ[1]



รูปที่ 2.14 (ก) แสดงการเกิดพาหะโดยอ้อม หรือ R-G Center Generation และ
(ข) การรวมตัวใหม่โดยอ้อมของพาหะ หรือ R-G Center Recombination

หรืออาจเกิดเนื่องจากโครงสร้างของผลึกเสียหาย ระดับพลังงานซึ่งช่วยให้เกิดกระบวนการ R-G แบบนี้ถูกเรียกว่า ศูนย์กลางการเกิด-และการรวมตัวใหม่ของพาหะ หรือ R-G Center หรือบางครั้งเรียกว่า (R-G Traps)

ในกระบวนการรวมตัวใหม่โดยอ้อมนี้ปกติจะมีการปลดปล่อยพลังงานออกมาและอาจมีผล ทำให้มีการสั่นของแลตทิซได้ (Lattice vibration) และการสั่นของแลตทิซจะทำให้มีการปลดปล่อยพลังงานซึ่งเรียกว่า โฟนอน (Phonon) ออกมาในที่สุด[1]

บทที่ 3

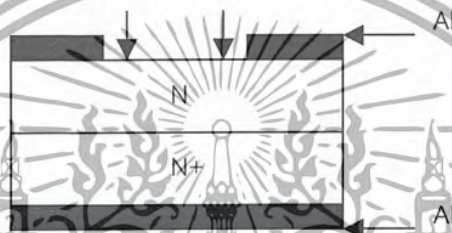
การออกแบบกระบวนการสร้างและการทดลอง

3.1 การออกแบบและกระบวนการสร้างโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al

3.1.1 การออกแบบโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-si/Al

โครงสร้างของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al ประกอบไปด้วยรอยสัมผัสระหว่างอะลูมิเนียมและซิลิคอน ชนิดเอ็น จำนวน 2 รอยสัมผัส และมีพื้นที่รับแสงอยู่ระหว่างขั้วสัมผัส โดยมีซิลิคอนไดออกไซด์เป็นตัวกำหนดพื้นที่รับแสง บริเวณด้านหลังแผ่นเคลือบอะลูมิเนียมเพื่อสร้างเป็นเป็นรอยสัมผัสแบบ โอห์มมิก[3]

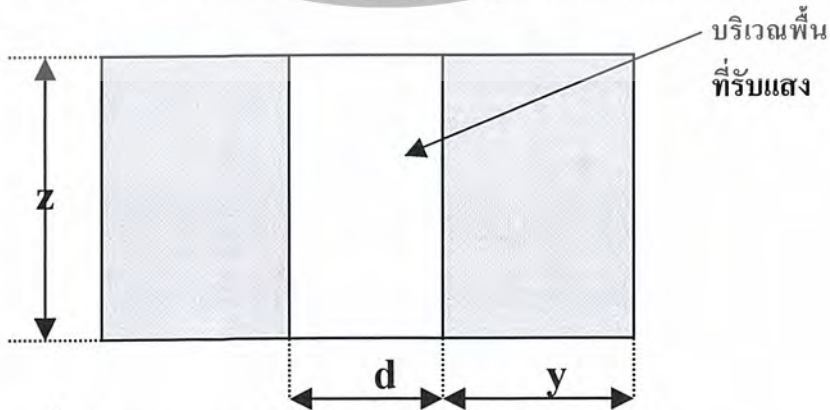
บริเวณที่แสงตกกระทบ



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-si/Al

ในการออกแบบนี้สามารถแบ่งพื้นที่เป็น 2 ส่วน คือ พื้นที่ขั้วสัมผัสโลหะที่เป็นอะลูมิเนียมและพื้นที่รับแสงที่เป็นซิลิคอน ชนิดเอ็น

การออกแบบบริเวณที่เป็นพื้นที่ของขั้วสัมผัสแต่ละด้านจะถูกกำหนดให้มีพื้นที่ของรอยสัมผัสหนึ่งด้านเท่ากับพื้นที่รอยสัมผัสระหว่างอะลูมิเนียมและซิลิคอน ชนิดเอ็น ในหัวข้อที่ 3.1 ดังนั้นรายละเอียดในการคำนวณพื้นที่จะเหมือนกับการออกแบบและการศึกษาการสร้างรอยสัมผัส ในหัวข้อที่ 3.1.1 ซึ่งพื้นที่ที่เป็นขั้วสัมผัสของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al จะมีขนาดเท่ากับพื้นที่ที่ใช้ในการศึกษากระบวนการสร้างรอยสัมผัส 1 รอยสัมผัสซึ่งมีพื้นที่เท่ากับ $1 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$



รูปที่ 3.2 การออกแบบโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้ d คือ ความยาวของพื้นที่รับแสงหรือระยะห่างระหว่างขั้วสัมผัส

y คือ ความยาวของขั้วสัมผัส

z คือ ความกว้างของพื้นที่รับแสงหรือความกว้างของขั้วสัมผัส

ส่วนพื้นที่รับแสงมีความกว้างเท่ากับ $1000 \mu\text{m}$ จากรูปที่ 3.2 ก็คือระยะ z ระยะห่างระหว่างขั้วสัมผัส โดยที่ความกว้างของพื้นที่รับแสง $1000 \mu\text{m}$ จะมีระยะ x หรือระยะห่างระหว่างขั้วสัมผัสเท่ากับ $20 \mu\text{m}$, $40 \mu\text{m}$, $100 \mu\text{m}$, และ $500 \mu\text{m}$ ตามลำดับ

การกำหนดให้พื้นที่ของรอยสัมผัสทั้งสองด้านเท่ากัน โดยแต่ละด้านมีพื้นที่เท่ากับ $1 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$ กำหนดให้ขั้วสัมผัสทั้งสองมีความกว้างยาวเท่ากันทั้งสองด้าน คือ $Z = 1000 \mu\text{m}$ และ $y = 1000 \mu\text{m}$ โดยมีระยะห่างระหว่างขั้วสัมผัส จากรูปที่ 3.2 คือ x มีค่าแตกต่างกันดังตารางโดยให้โฟโตไดโอด A1, A2, A3 และ A4 มีระยะห่างระหว่างขั้วสัมผัสเรียงกันตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ขนาดของพื้นที่รับแสงและขนาดพื้นที่ขั้วสัมผัส

หมายเลข	ขนาด d (μm)	ขนาด y (μm)	ขนาด z (μm)
A1	20	1000	1000
A2	40	1000	1000
A3	100	1000	1000
A4	500	1000	1000

3.1.2 กระบวนการสร้างรอยสัมผัส

กระบวนการสร้างรอยสัมผัส เป็นการศึกษากระบวนการสร้างรอยสัมผัสเพื่อให้ได้เงื่อนไขที่จะใช้ในกระบวนการสร้างรอยสัมผัสแบบขอตต์กีและอัลลอยสำหรับโฟโตไดโอด [3] โครงสร้าง Al/n-Si/Al ในกระบวนการสร้างนี้จะใช้มาส์คต้นแบบมาส์คเดียวเท่านั้นคือมาส์คใช้สำหรับสร้างลวดลายอะลูมิเนียม กระบวนการโฟโตไดโอดสามารถสร้างแสดงตามแผนผังได้ดังรูป



รูปที่ 3.3 แผนผังกระบวนการสร้างโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 ลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้างโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al โดยมีลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้างดังต่อไปนี้

1. การเตรียมแผ่นผลึกซิลิคอน

- แผ่นผลึกผลึกรูปเดี่ยวแบบ Single ชนิดเอ็นมีระนาบ <100>
- ความต้านทานจำเพาะ 25 โอห์ม - เซนติเมตร
- ความหนาของแผ่นผลึก 380 ไมครอน

2. การทำความสะอาดผิวซิลิคอนเบื้องต้น

- ความสะอาดผิวด้วยน้ำบริสุทธิ์ (De-ionized Water) ในเครื่องสั่นความถี่สูง (Supersonic Cleaning)
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- กัดผิวหน้าแผ่นผลึกด้วยกรดกัดแก้ว HF 5% เป็นเวลา 2 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- ต้มในกรดไนตริก (HNO₃) เป็นเวลา 10 นาที
- ต้มในน้ำบริสุทธิ์ เป็นเวลา 5 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ต้มในไตรโคลโรเอทิลีน (Trichloethylene) เป็นเวลา 5 นาที เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกประเภทไขมัน
- ล้างด้วยอะซิโตน (Acetone) ในเครื่องสั่นความถี่สูง เป็นเวลา 3 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- จุ่มในกรดกัดแก้ว (HF) 5% เป็นเวลา 20 วินาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

3. กระบวนการออกซิเดชันเริ่มต้น

เพื่อทำการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ให้มีความหนาประมาณ 5000 Å ในการทำออกซิเดชันนำแผ่นซิลิคอนที่ทำความสะอาดแล้ว ทั้งไว้ในบรรยากาศของก๊าซออกซิเจนที่อุณหภูมิ 1100 °C

เงื่อนไขและขั้นตอนกระบวนการสร้าง

- ทำการออกซิเดชันแบบแห้งเป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1.2 ลิตร/นาที
- ทำการออกซิเดชันแบบชื้นเป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1.1 ลิตร/นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ทำการออกซิเดชันแบบแห้งเป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1.2 ลิตร/นาที

4. สารเคมีกักชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ด้านหลัง

เพื่อทำการกักชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ด้านหลัง ใช้สารละลายเคมีซึ่งมีส่วนผสมของกรดกัดแก้วเป็นหลัก ทำการละลายชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เป็นหลัก ตรงบริเวณที่ต้องการเปิดออก สารละลายที่ใช้ในการกักชั้นซิลิคอนไดออกไซด์นี้ เรียกว่า สารละลายบัฟเฟอร์ (Buffer) มีอัตราการกักชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ประมาณ 1000 Å / นาที

ขั้นตอนการกักชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

- จุ่มในสารละลาย Buffer เป็นเวลาประมาณ 5 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ 2 แก้ว
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

5. กระบวนการแพร่ฟอสฟอรัส

- Predeposition 1000 C เวลา 25 นาที
- Drive in 1000 C เวลา 60 นาที

6. สารเคมีกักชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ด้านบน

เพื่อทำการกักชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ด้านบน ใช้สารละลายเคมีซึ่งมีส่วนผสมของกรดกัดแก้วเป็นหลัก ทำการละลายชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เป็นหลัก ตรงบริเวณที่ต้องการเปิดออก สารละลายที่ใช้ในการกักชั้นซิลิคอนไดออกไซด์นี้ เรียกว่า สารละลายบัฟเฟอร์ (Buffer) มีอัตราการกักชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ประมาณ 1000 Å / นาที

ขั้นตอนการกักชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

- จุ่มในสารละลาย Buffer เป็นเวลาประมาณ 5 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ 2 แก้ว
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

7. กระบวนการเคลือบชั้นอะลูมิเนียมด้านหน้าของแผ่นซิลิคอนในสุญญากาศ

ในการเคลือบชั้นอะลูมิเนียมโดยใช้เครื่องเคลือบโลหะในสุญญากาศ (Vacuum Evaporation) ทำการเคลือบแผ่นซิลิคอนด้วยอะลูมิเนียมที่ความดัน 2.2×10^{-6} Torr

8. กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี (Mask Photolithography)

ใช้กระจกมาสก์ต้นแบบสำหรับการกักส่วนของอะลูมิเนียมที่ไม่ต้องการออก
ขั้นตอนนี้ใช้น้ำยาไวแสงชนิดบวก AZ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีลำดับขั้นตอนดังนี้

- อบแห้งเพื่อไล่ความชื้น ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 15-20 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสง ชนิดบวก AZ โดยใช้เครื่องสปินเนอร์ ขนาด 5000 รอบ/นาทีเป็นเวลา 20 วินาที
- อบครั้งแรกให้น้ำยาไวแสงแห้งที่อุณหภูมิ 85-90 °C เป็นเวลา 20 นาที
- ฉายแสงผ่านกระจกต้นแบบมาสก์ ด้วยอุปกรณ์ Mask Aligner เป็นเวลา 12 วินาที
- การล้างภาพ จุ่มในน้ำยา AZ – Developer 2 ครั้ง ครั้งละ 30 วินาที ล้างในน้ำบริสุทธิ์ แล้วเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- อบครั้งที่สอง ให้แผ่นฟิล์มที่เหลืออยู่แห้งที่อุณหภูมิ 85-90 °C เป็นเวลา 20-30 นาที

9. การกัดชั้นอนุกรมเนียม

สารละลายที่ใช้ละลายชั้นอนุกรมเนียม ได้แก่ สารละลายผสมซึ่งมีกรดฟอสฟอริกเป็นหลักมีลำดับขั้นตอนดังนี้

- จุ่มแผ่นซิลิกอนที่สร้างจากขั้นตอนที่แล้วลงในสารละลายซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 50 °C เป็นเวลาประมาณ 10-20 วินาที
- ล้างในน้ำบริสุทธิ์ 2 ครั้ง
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

10. การลอกชั้นสารไวแสงชนิดบวก AZ

มีลำดับขั้นตอนดังนี้

- จุ่มแผ่นซิลิกอนลงในอะซิโตน เป็นเวลาประมาณ 1 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

11. สารเคมีกัดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ด้านหลัง

เพื่อทำการกัดชั้นของซิลิกอนไดออกไซด์ด้านหลัง ใช้สารละลายเคมีซึ่งมีส่วนผสมของกรดกัดแก้วเป็นหลัก ทำการละลายชั้นซิลิกอนไดออกไซด์เป็นหลัก ตรงบริเวณที่ต้องการเปิดออก สารละลายที่ใช้ในการกัดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์นี้ เรียกว่า สารละลายบัฟเฟอร์ (Buffer) มีอัตราการกัดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ ประมาณ 1000 Å / นาที

ขั้นตอนการกัดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์

- จุ่มในสารละลาย Buffer เป็นเวลาประมาณ 1 นาที
- ล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ 2 แก้ว
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

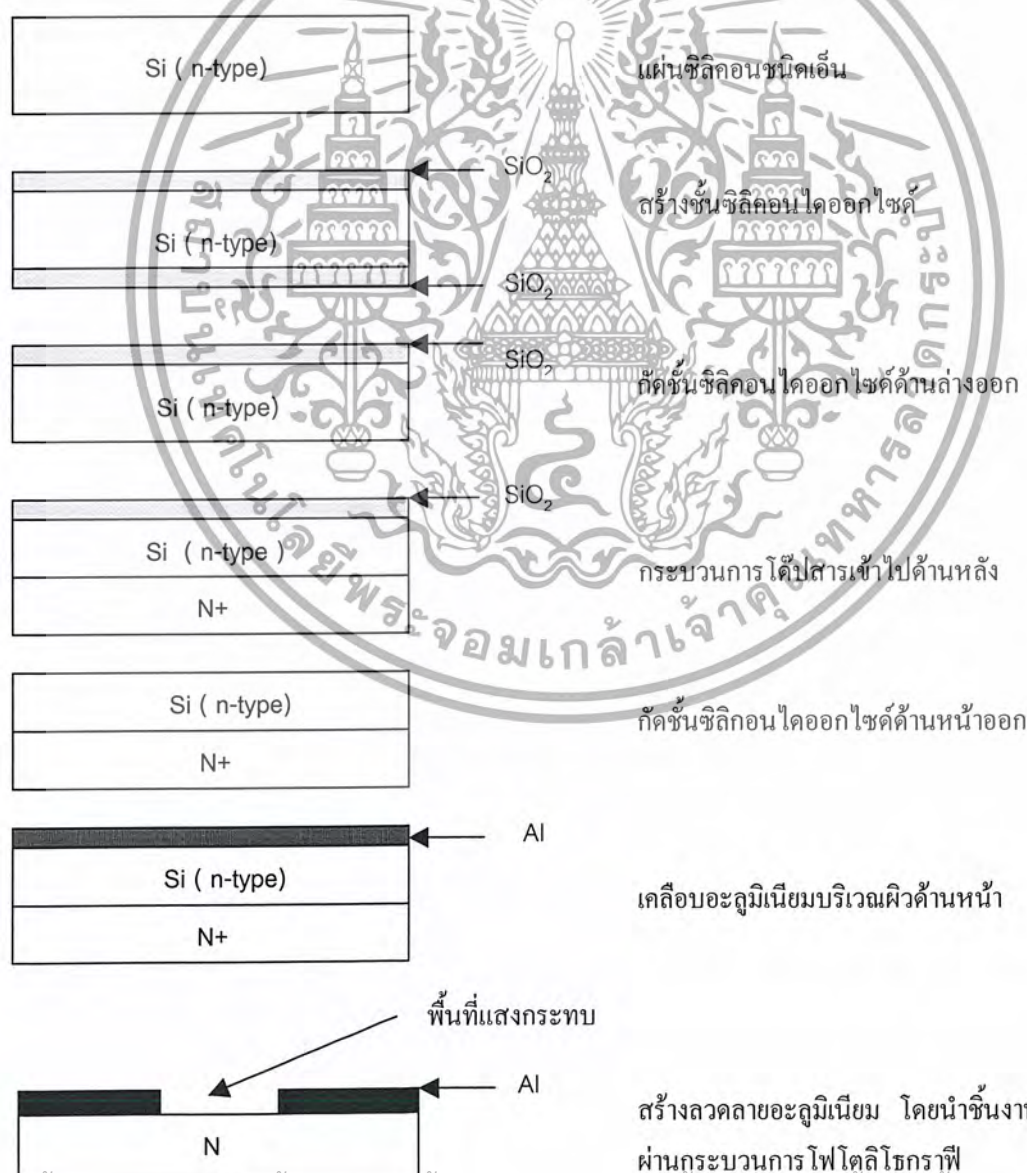
12. กระบวนการเคลือบชั้นอะลูมิเนียมด้านหลังของแผ่นซิลิคอนในสุญญากาศ

การเคลือบชั้นอะลูมิเนียมด้านหลังแผ่น จะมีรายละเอียดเหมือนกับขั้นตอนที่ 7

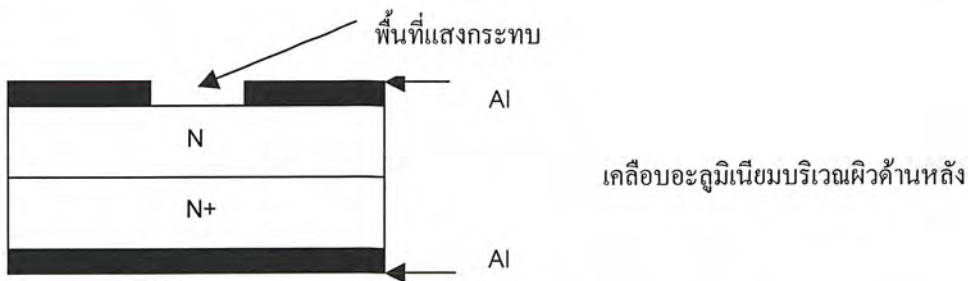
13. กระบวนการซินเตอร์ริง

กระบวนการซินเตอร์ริง (Sintering) เป็นกระบวนการที่ทำให้การสัมผัสของ อะลูมิเนียมและซิลิคอนเป็นรอยสัมผัสที่สมบูรณ์ แต่สำหรับการศึกษากระบวนการสร้างรอยสัมผัส จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการซินเตอร์ริง จะเป็นเงื่อนไขที่สำคัญที่เป็นตัวกำหนดว่ารอย สัมผัสที่ได้จะเป็นรอยสัมผัสแบบขดตักหรืออัลลอย ดังนั้นในการทดลองขั้นตอนนี้จึงทำการซิน เตอร์ริงที่อุณหภูมิต่าง ๆ คือ 100°C, 200°C, 300°C, 400 °C, 450 °C ,และ 500 °C ตามลำดับ จาก นั้นจึงนำชิ้นงานที่ได้ไปวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่อไป[3]

ลำดับขั้นตอนการสร้างโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al ดังรูปที่แสดงต่อไปนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



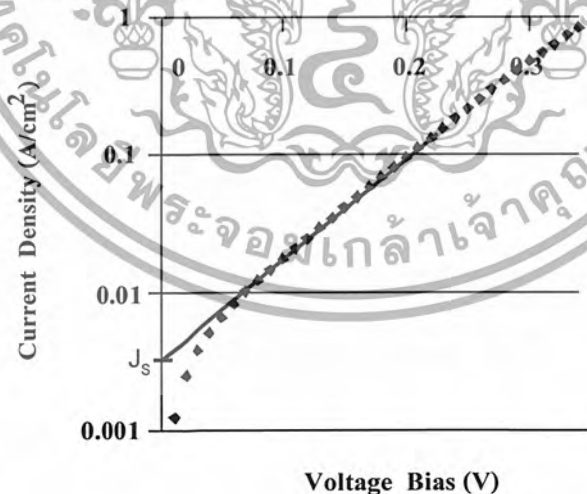
รูปที่ 3.4 ลำดับขั้นตอนการสร้างโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al

3.2 การศึกษากระบวนการสร้างและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยสัมผัส

เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการซินเตอร์ริงมีผลกับค่าความสูงของกำแพงศักย์ ดังนั้นในการทดลองจึงทำการซินเตอร์ริงชิ้นงานที่อุณหภูมิต่าง ๆ แล้ววัดค่าความสูงกำแพงศักย์ การวัดค่าความสูงของกำแพงศักย์ได้จากการวัดกระแส-แรงดันและค่าความจุไฟฟ้าของรอยสัมผัส [2]

3.2.1 การวัดค่าความสูงกำแพงศักย์จากการวัดกระแส-แรงดัน

ในการวัดค่าความสูงของกำแพงศักย์จากการวัดกระแส-แรงดัน โดยการนำค่ากระแส-แรงดันที่ของรอยสัมผัสที่วัดได้ นำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของกระแส-แรงดัน เพื่อหาความหนาแน่นกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ J_s โดยอาศัยความสัมพันธ์ของสมการที่ (3.2) ซึ่งจากสมการที่ (3.2) สามารถหาค่า J_s ขณะที่แรงดันไบอัสภายนอกเท่ากับศูนย์ โวลท์[3]



รูปที่ 3.5 การหาค่า J_s จากกราฟความสัมพันธ์ความหนาแน่นกระแส-แรงดันของรอยสัมผัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

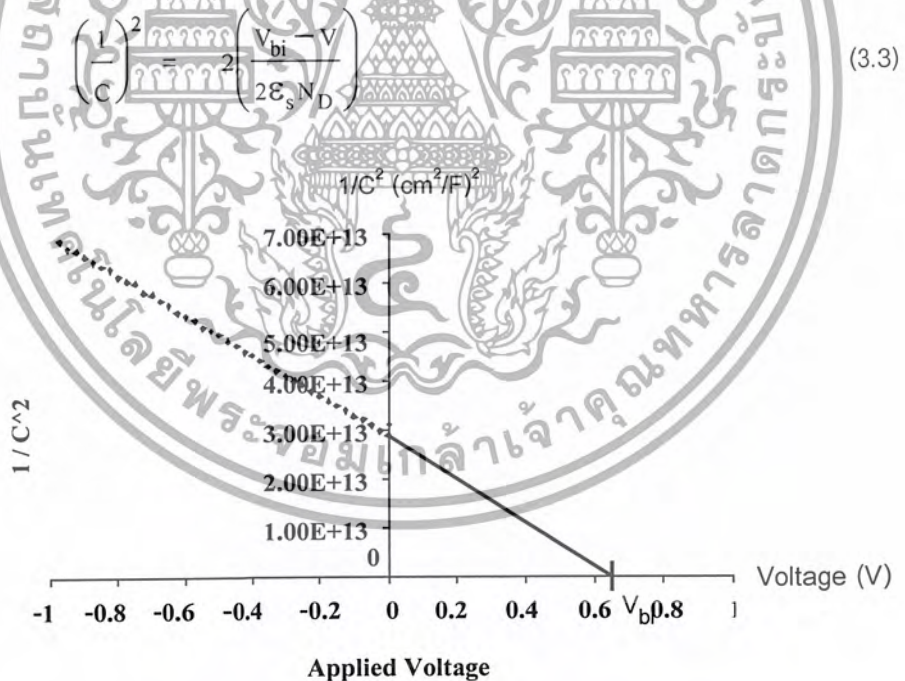
$$J = J_s \left(\frac{qV}{e kT} - 1 \right) \tag{3.1}$$

จากนั้นจึงนำค่า J_s ไปแทนค่าในสมการที่ (3.3) เพื่อหาค่าความสูงของกำแพงศักย์

$$\phi_{b_n} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{A_n * T^2}{J_s} \right) \tag{3.2}$$

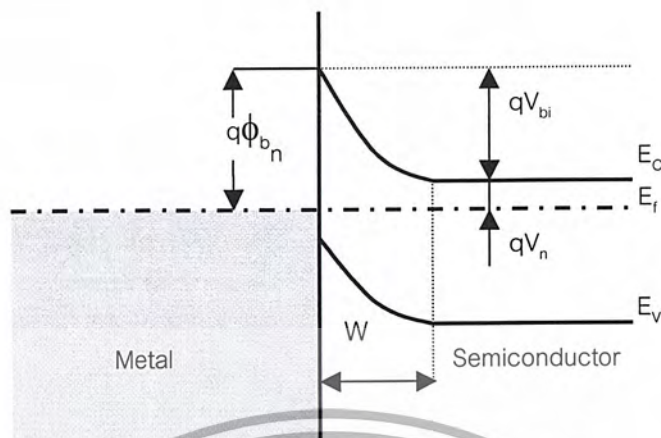
3.2.2 การวัดค่าความสูงกำแพงศักย์จากการวัดค่าความจุไฟฟ้าที่รอยสัมผัส

การวัดค่าความสูงของกำแพงศักย์จากการวัดค่าความจุไฟฟ้าที่รอยสัมผัส โดยนำค่าความจุไฟฟ้าที่ได้มาหาความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C^2$ กับแรงดัน โดยอาศัยความสัมพันธ์ของสมการที่ (3.4) โดยจะพบว่าความสัมพันธ์ที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นตรงดังรูปที่ 3.6 และจากความสัมพันธ์ของ สมการที่ (3.4) สามารถหาศักย์ไฟฟ้าภายใน V_{bi} ขณะที่ค่าความจุไฟฟ้าที่รอยสัมผัสเท่ากับศูนย์ ดังรูปที่ 3.6[4]



รูปที่ 3.6 การหาค่า V_{bi} จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C^2$ กับแรงดันของรอยสัมผัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ $\phi_{bn} = V_{bi} + V_n$

นำค่า V_{bi} ไปแทนค่าในสมการที่ (3.4) และ V_n จะได้จากสมการที่ (3.5) และ (3.6) ค่า $d(1/C^2)/dV$ ในสมการที่ (3.7) ได้จากความชันของกราฟของความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C^2$ กับแรงดันไบอัสในรูปที่ 3.7

จากรูปที่ 3.7 จะได้

$$\phi_{bn} = V_{bi} + V_n \quad (3.4)$$

$$V_n = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_c}{N_D} \quad (3.5)$$

$$N_D = \frac{2}{q\epsilon_s} \left[\frac{-1}{d(1/C^2)/dy} \right] \quad (3.6)$$

โดย V_{bi} คือ ศักย์ไฟฟ้าภายใน

V_n คือ ศักย์ไฟฟ้าภายในเนื้อสาร

N_c คือ ความหนาแน่นสถานะพลังงานที่แถบความนำ

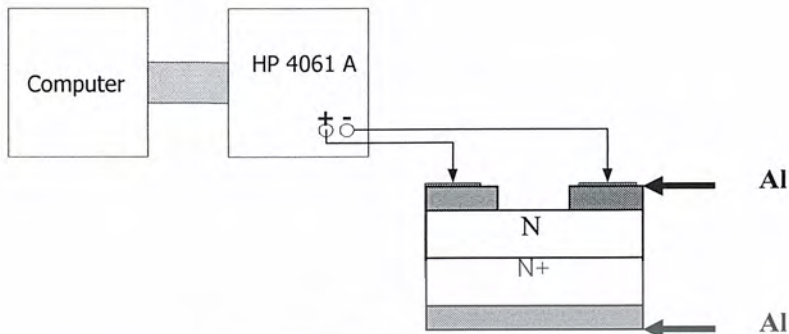
N_D คือ ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือผู้ให้

ϵ_s คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของซิลิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การศึกษาคุณสมบัติทางแสงของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al

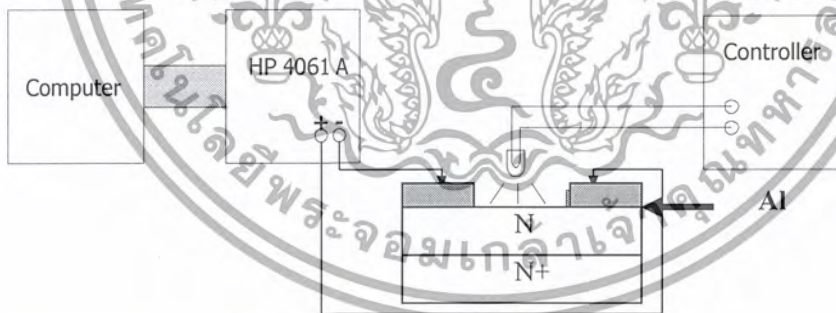
3.3.1 การศึกษาคุณสมบัติกระแส-แรงดัน และ ค่าความจุไฟฟ้า



รูปที่ 3.8 การวัดกระแส-แรงดันและค่าความจุไฟฟ้าของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al

จากรูปที่ 3.8 ในการศึกษาหัวข้อนี้ จะใช้การวัดจากเครื่อง HP4061A ซึ่งต่ออยู่กับคอมพิวเตอร์ซึ่งใช้ในการควบคุมเครื่อง HP4061A และเก็บข้อมูล โดยเครื่อง HP4061A จะให้แรงดันไบอัสกับชิ้นงานและวัดการเปลี่ยนแปลงของกระแสหรือค่าความจุไฟฟ้า

3.3.2 การศึกษากระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al เมื่อได้รับแสง



รูปที่ 3.9 การวัดกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al เมื่อได้รับแสง

การศึกษาในหัวข้อนี้ จากรูปที่ 3.9 ใช้แหล่งกำเนิดแสงเป็นหลอดฮาโลเจน (Halogen Lamp) ขนาด 150 W และมีชุดควบคุมสำหรับปรับความเข้มแสง ฉายแสงลงบนชิ้นงานที่ต่ออยู่กับเครื่อง HP4061A โดยจะฉายแสงที่ความเข้มต่าง ๆ กัน แล้ววัดการเปลี่ยนแปลงของกระแสที่เกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

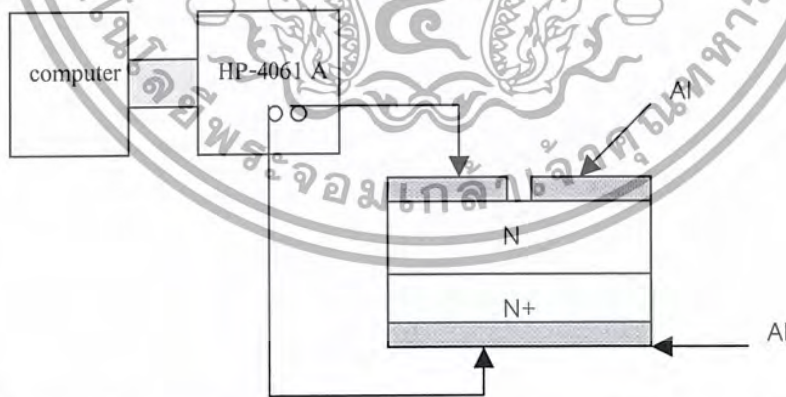
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลองการศึกษากระบวนการสร้างรอยสัมผัสระหว่างอะลูมิเนียมและซิลิคอนชนิดเอ็นในการซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 100°C , 200°C , 300°C , 400°C , 450°C , 500°C

โฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al โดยขั้นตอนกระบวนการสร้างแล้ว เงื่อนไขที่สำคัญในการสร้างโฟโตไดโอดชนิดนี้ คือ ขั้นตอนของการให้อุณหภูมิในการซินเตอร์ริงกับรอยสัมผัสของโฟโตไดโอด แล้วทำการวัดหาคุณลักษณะที่เปลี่ยนแปลงจากการซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิต่างๆของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al เนื่องรอยสัมผัสอะลูมิเนียมและซิลิคอนชนิดเอ็นสามารถที่จะสร้างให้เป็นรอยสัมผัสแบบขดศีกิหรืออัลลอยคั้งนั้นจึงศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการซินเตอร์ริง การวัดคุณสมบัติของรอยสัมผัสแสดงดังรูปที่ 4.1

4.1.1 ผลการทดลองเวลาสำหรับการซินเตอร์ริงรอยสัมผัส

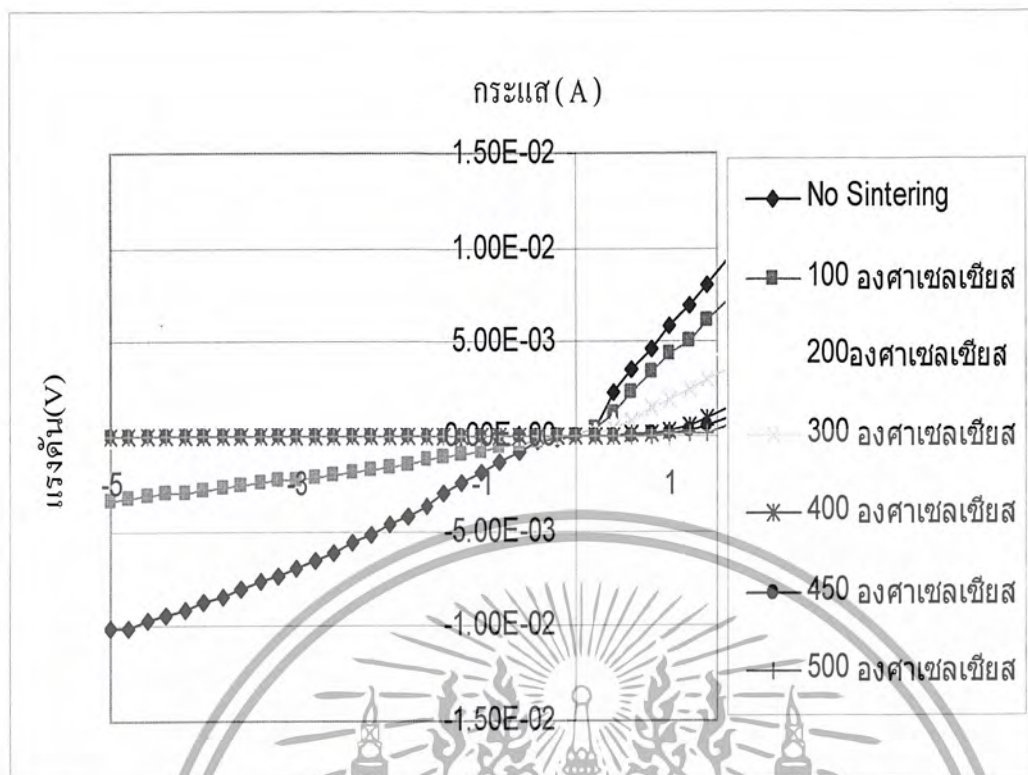
หลังจากได้สร้างชิ้นงานตามหัวข้อที่ 3.1 จากนั้นจึงนำชิ้นงานไปซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 100°C , 200°C , 300°C , 400°C , 450°C , 500°C เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นจึงนำชิ้นงานมาวัดหาความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดัน ซึ่งจะดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 การวัดกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสระหว่างอะลูมิเนียมและซิลิคอนชนิดเอ็น

จากรูปที่ 4.2 จะเห็นว่ากระแสรั่วไหลในการที่ยังไม่ซินเตอร์ริง มีค่ากระแสรั่วไหลมากที่สุด และเมื่ออุณหภูมิการซินเตอร์ริงเพิ่มขึ้นกระแสรั่วไหลที่ได้จะลดลงซึ่งเป็นผลมาจากการแพร่อะตอมของอะลูมิเนียมเข้าไปที่ผิวของซิลิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al

ตารางที่ 4.1 ปริมาณของกระแสของรอยสัมผัสที่ซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิของการซินเตอร์ริง	กระแสขณะไบอัสตรง (0.4 V)	กระแสรั่วไหลขณะไบอัสกลับ (-1V)
25 °C	2.26 mA	-1.9 mA
100 °C	1.2 mA	-760 μ A
200 °C	0.628 mA	-44 μ A
300 °C	0.46 mA	-19.4 μ A
400 °C	0.03 mA	-2.35 μ A
450 °C	5 μ A	-1.81 μ A
500 °C	1.8 μ A	-1.67 nA

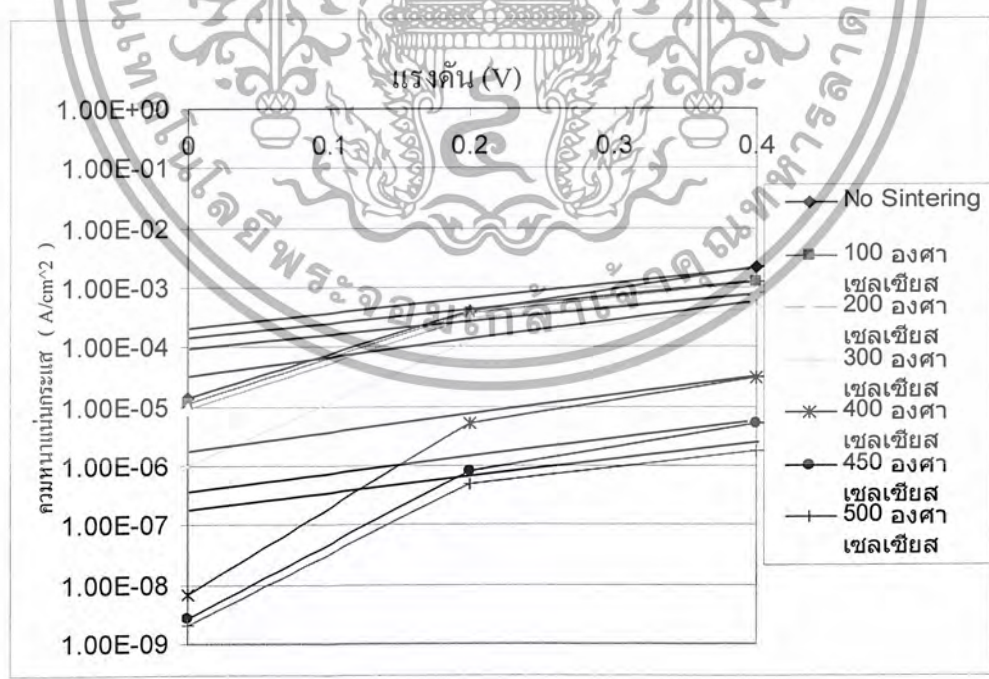
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยสัมผัสเปลี่ยนแปลงไปเมื่อผ่านการซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิต่างๆ จากรูปที่ 4.2 รอยสัมผัสระหว่างอะลูมิเนียมและซิลิคอนชนิดเอ็นที่ยังไม่ได้ซินเตอร์ริงจะให้กระแสไหลในขณะได้รับแรงดันไบอัสตรงมากที่สุดและกระแสที่ไหลจะน้อยลงเมื่อเริ่มทำการที่ซินเตอร์ริง 100 °C และมีค่าสูงขึ้นตามลำดับคือ 200°C, 300°C, 400°C, 450°C และที่อุณหภูมิ 500°C จะมีกระแสไหลน้อยที่สุด ในขณะที่เดียวกันเมื่อรอยสัมผัสได้รับแรงดันไบอัสกลับที่อุณหภูมิ 500°C ก็จะมีกระแสรั่วไหลน้อยที่สุดและกระแสรั่วไหลจะมีค่ามากขึ้นตามลำดับเมื่ออุณหภูมิของการซินเตอร์ริงมีค่าลดลง คือ 450°C, 400°C, 300°C, 200°C, 100°C และที่ยังไม่ได้ทำการซินเตอร์ริงจะมีกระแสรั่วไหลมากที่สุด ดังรูปที่ 4.2 การหาค่า J_s จากกราฟความสัมพันธ์ความหนาแน่นกระแส-แรงดันของรอยสัมผัส

$$J = J_s \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \tag{4.1}$$

จากนั้นจึงนำค่า J_s ไปแทนค่าในสมการที่ (4.2) เพื่อหาค่าความสูงของกำแพงศักย์

$$\Phi_{b_n} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{A_n * T^2}{J_s} \right) \tag{4.2}$$



รูปที่ 4.3 คุณลักษณะระหว่างความหนาแน่นกระแส-แรงดันของจากชิ้นงานที่ซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิต่างๆ

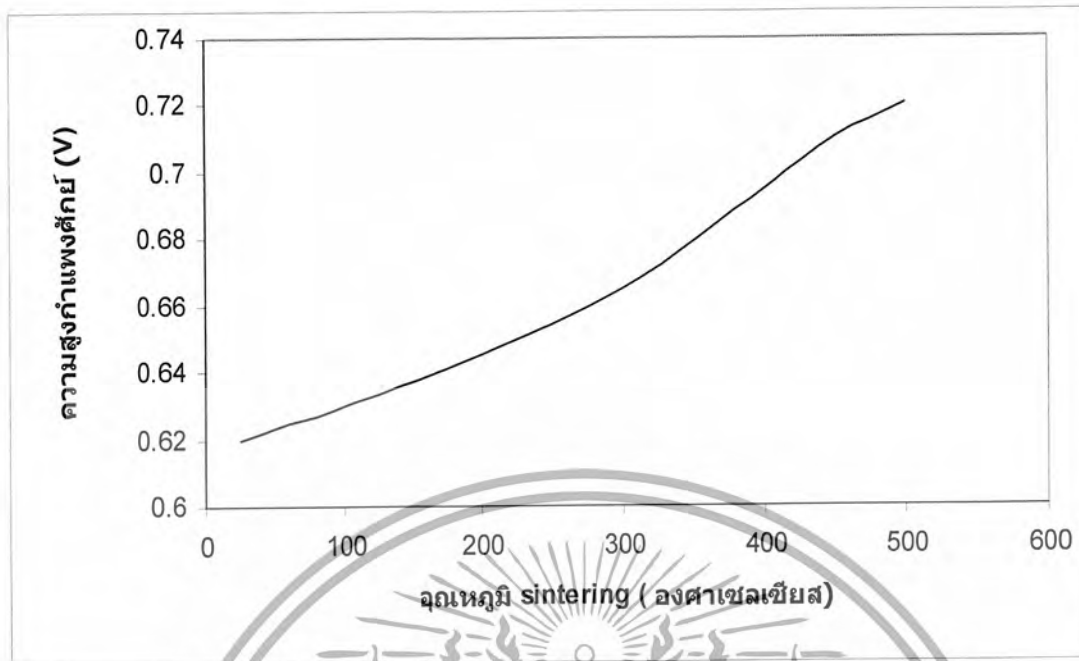
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.3 จะได้ค่า J_s ไปแทนในสมการ 4.2 แล้วคำนวณหาค่าความสูงกำแพงศักย์ของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่เริ่มซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 100°C , 200°C , 300°C , 400°C , 450°C และ 500°C ตามลำดับ ได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่ได้จากการวัดกระแส-แรงดัน

อุณหภูมิของการซินเตอร์ริง	ค่าความสูงของกำแพงศักย์จากการวัดกระแส-แรงดัน(V)
No Sintering	0.62 V
100°C	0.63 V
200°C	0.64 V
300°C	0.66 V
400°C	0.69 V
450°C	0.71 V
500°C	0.72 V

จากตารางที่ 4.2 ค่าความสูงของกำแพงศักย์จะมีค่าสูงขึ้นตามอุณหภูมิของการซินเตอร์ริง แต่จะมีค่าใกล้เคียงกันในช่วง 100°C , 200°C และช่วง 450°C กับ 500°C โดยที่ค่าของการที่ยังไม่ได้ทำการซินเตอร์ริง จะมีค่าความสูงของกำแพงศักย์ต่ำที่สุดคือ 0.62 V เป็นผลทำให้เกิดกระแสรั่วไหลมากกว่าการซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 500°C ซึ่งมีค่าความสูงของกำแพงศักย์มากที่สุดคือ 0.72 V เมื่อนำค่าความสูงของกำแพงศักย์จากตารางที่ 4.2 และความสัมพัทธ์กระแสและแรงดันขณะที่รอยสัมผัสได้รับแรงดันไบอัสตรงจากรูปที่ 4.2 มาเปรียบเทียบกันก็จะพบว่า เมื่ออุณหภูมิของการซินเตอร์ริงที่เพิ่มสูงขึ้น ก็จะทำให้ค่าความสูงของกำแพงศักย์เพิ่มขึ้น ซึ่งมีผลทำให้กระแสที่ไหลผ่านรอยสัมผัสมีค่าลดลง



รูปที่ 4.4 คุณลักษณะ ϕ_{oc} ของจากชิ้นงานที่ซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ ต่าง ๆ

สำหรับในช่วงอุณหภูมิ 100°C , 200°C และ 300°C จะได้ความสูงของค่าแรงศักย์ที่มีค่าคงที่ ซึ่งเนื่องจากอุณหภูมิในช่วงนี้จะอะลูมิเนียมจะยังไม่สามารถแพร่ลงไปยังซิลิคอน ชนิดอื่น ทำให้รอยสัมผัสที่ได้จากการซินเตอร์ริงในช่วงอุณหภูมินี้จะเป็นรอยสัมผัสแบบขอดตัก จากรูปที่ 4.2 ที่อุณหภูมิ 450°C และ 500°C จะทำให้ไบอัสกลับจะมีกระแสรั่วไหลน้อยที่สุดอยู่ในค่าที่น้อยมาก เมื่อเทียบกับรอยสัมผัสซึ่งซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิที่ 100°C และ 200°C ดังนั้น อุณหภูมิที่ใช้ในการซินเตอร์ริงสำหรับการสร้างรอยสัมผัสแบบขอดตักคือ 300°C เป็นต้นไป ส่วนอุณหภูมิที่ทำให้อะตอมของอะลูมิเนียมแพร่ลงไปในเนื้อซิลิคอนจนเป็นรอยสัมผัสแบบอัลลอยคือ 450°C , 500°C

4.2 ผลการทดลองการศึกษาคุณสมบัติกระแสแรงดันของโพโตไดโอดโครงสร้าง

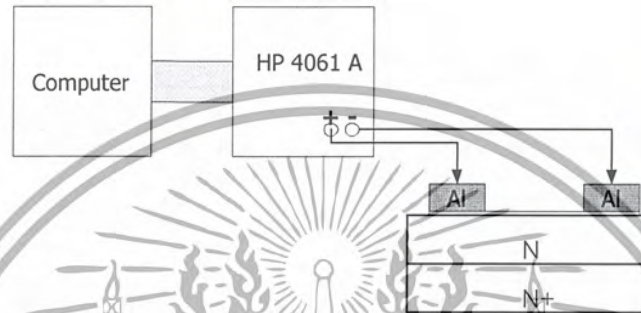
Al/n-Si/Al ที่ผ่านการซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 100°C , 200°C , 300°C , 400°C , 450°C , 500°C

ในกระบวนการสร้างโพโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al จะมีขั้นตอนการซินเตอร์ริงเพื่อให้ได้คุณสมบัติของรอยสัมผัสระหว่างอะลูมิเนียมและสารกึ่งตัวนำที่ดี เราจะทำการซินเตอร์ริงที่

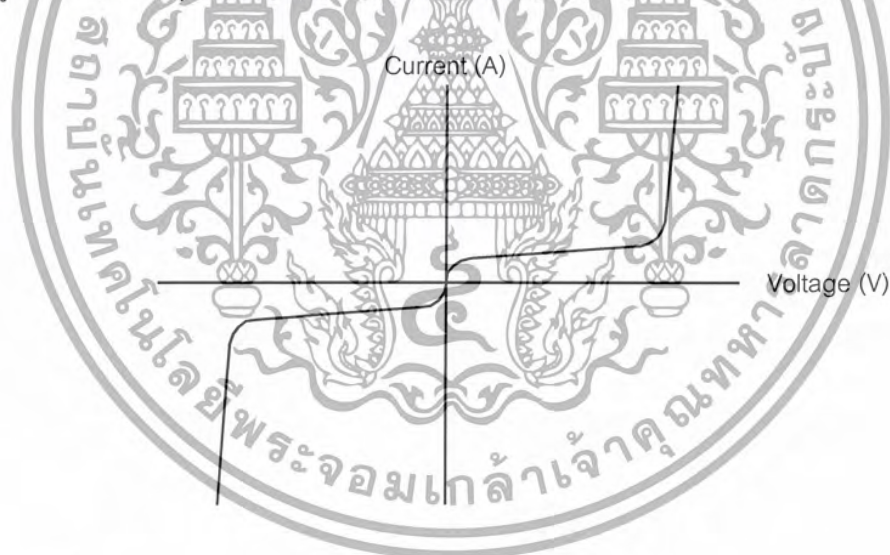
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิต่างๆเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นจะนำโฟโตไดโอดไปวัดหาคณสมบัติกระแส-แรงดัน ดังแสดงในรูปที่ 4.5

โฟโตไดโอดที่ผ่านกระบวนการสร้างเป็นโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบสมมาตร คือมีพื้นที่ของอะลูมิเนียมที่สัมผัสกับซิลิคอนเท่ากันทั้งสองรอยสัมผัส ดังนั้น $\phi_{n1} = \phi_{n2}$ กระแสของโฟโตไดโอดขณะได้รับไบอัสตรงและไบอัสกลับมีลักษณะดังรูปที่ 4.6



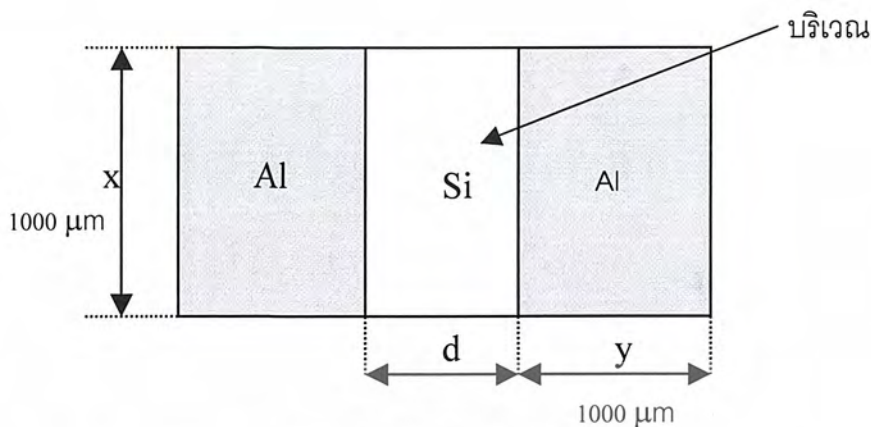
รูปที่ 4.5 การวัดคุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al



รูปที่ 4.6 คุณลักษณะของกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบสมมาตร

การออกแบบโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al ในการแสดงค่าพารามิเตอร์จะใช้เป็นหมายเลขดังแสดงในตารางที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 ลักษณะพารามิเตอร์ของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al

กำหนดให้ d คือ ความยาวของพื้นที่รับแสงหรือระยะห่างระหว่างขั้วสัมผัส (μm)

y คือ ความยาวของขั้วสัมผัส (μm)

x คือ ความกว้างของพื้นที่รับแสงหรือความกว้างของขั้วสัมผัส (μm)

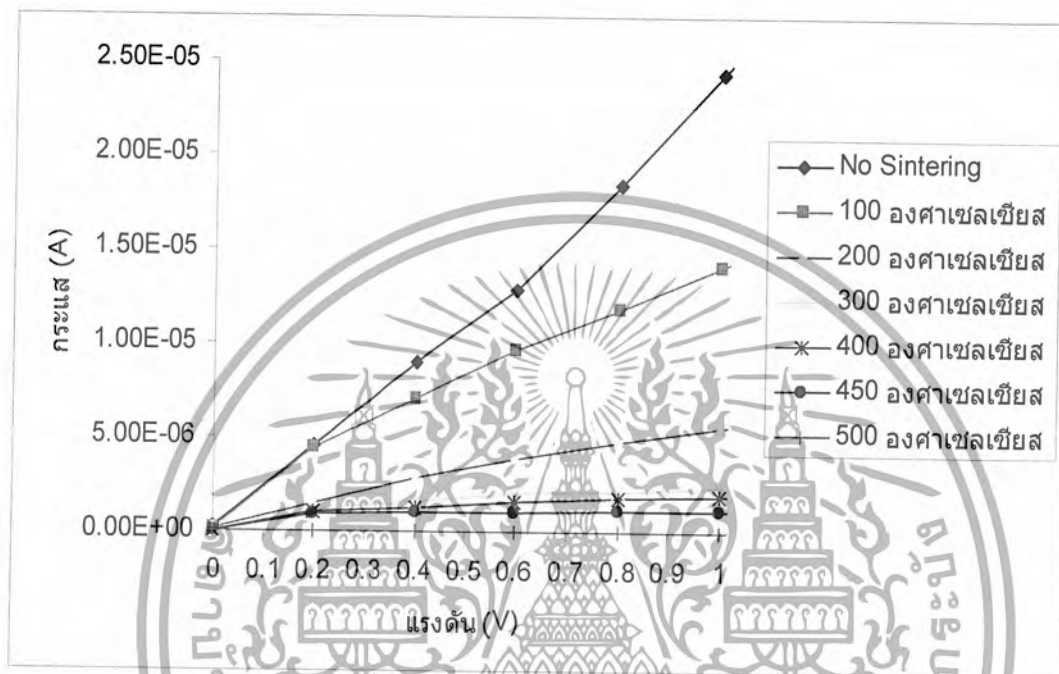
โดยกำหนดพารามิเตอร์ของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al จะมีระยะ x และระยะ y มีขนาดเท่ากันคือ $1000 \mu\text{m}$ โดยมีการเปลี่ยนระยะ d ดังตาราง

ตารางที่ 4.3 ขนาดของพื้นที่รับแสงและขนาดพื้นที่ขั้วสัมผัส

หมายเลข	ขนาด d (μm)
A1	20
A2	40
A3	100
A4	500

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

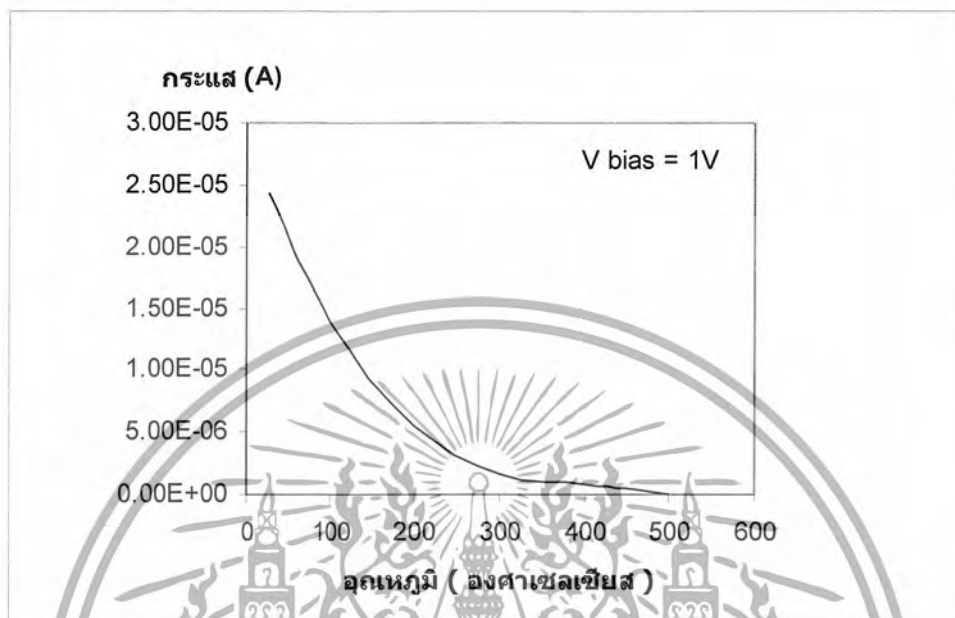
การวัดหาคุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al ในการซินเทอริงที่อุณหภูมิ 100°C , 200°C , 300°C , 400°C , 450°C และ 500°C ขณะไม่ได้รับแสง (Dark Current) แสดงดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 คุณลักษณะกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al หมายเลข A1 ที่ซินเทอริงที่อุณหภูมิต่างๆ (ขณะไม่ได้รับแสง)

จากกราฟรูปที่ 4.6 เนื่องจากกระแสมืด (Dark Current) ของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al มีความสมมาตรกันทั้งการไบอัสไฟบวกและไบอัสไฟลบ กราฟรูปที่ 4.8 จึงทำการพิจารณาการไบอัสเพียงด้านเดียวคือไบอัสไฟบวกจะพบว่ากระแสมืด (Dark Current) ของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al มีลักษณะคล้ายๆกับกระแสรั่วไหลของรอยสัมผัสขอตติ์ระหว่างอะลูมิเนียมกับซิลิคอนดังรูปที่ 4.2 คือ เมื่อยังไม่ทำการซินเทอริ์ กระแสมืด (Dark Current) จะมีค่าสูงที่สุด และจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิการซินเทอริ์มีค่าสูงมากขึ้น โดยที่อุณหภูมิการซินเทอริ์ที่ 500°C จะมีกระแสมืด (Dark Current) ต่ำที่สุด

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสมืด (Dark Current) กับอุณหภูมิการซินเตอร์ริง แสดงดังรูปที่ 4.9 โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการซินเตอร์ริง 100°C , 200°C , 300°C , 400°C , 450°C และ 500°C



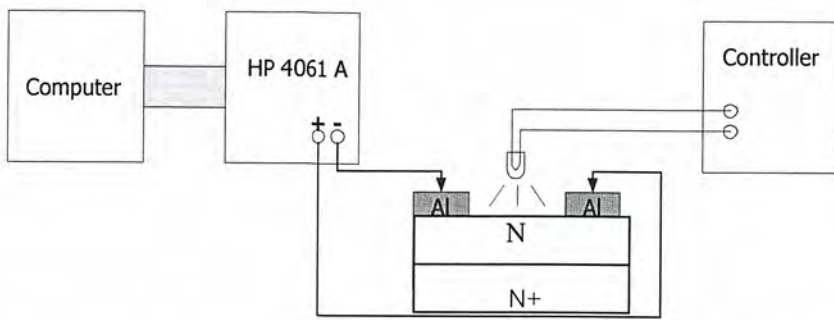
รูปที่ 4.9 คุณลักษณะกระแสมืด (Dark Current) ของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่ซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิต่างๆ ที่แรงดันไบอัส 1 V

จากกราฟรูปที่ 4.9 ค่ากระแสมืด (Dark Current) มีค่าลดลงตามกราฟ เมื่ออุณหภูมิการซินเตอร์ริงสูงขึ้น โดยที่อุณหภูมิที่ใช้ในการซินเตอร์ริงที่ 300°C เป็นต้นไปกระแสมืดเริ่มมีค่าที่คงที่ (Flat) ซึ่งเป็นผลมาจากกำแพงศักย์ระหว่างรอยสัมผัสอะลูมิเนียมกับขดดักเพิ่มสูงขึ้นและที่รอยสัมผัสมีคุณลักษณะที่ดีคือ อะตอมของอะลูมิเนียมเริ่มแพร่เข้าไปในซิลิคอนเป็นรอยสัมผัสลักษณะอัลลอย

4.3 ผลการทดลองการศึกษาคุณสมบัติทางแสงของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al

4.3.1 การวัดความเข้มของแสงที่มีผลต่อคุณลักษณะของกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al

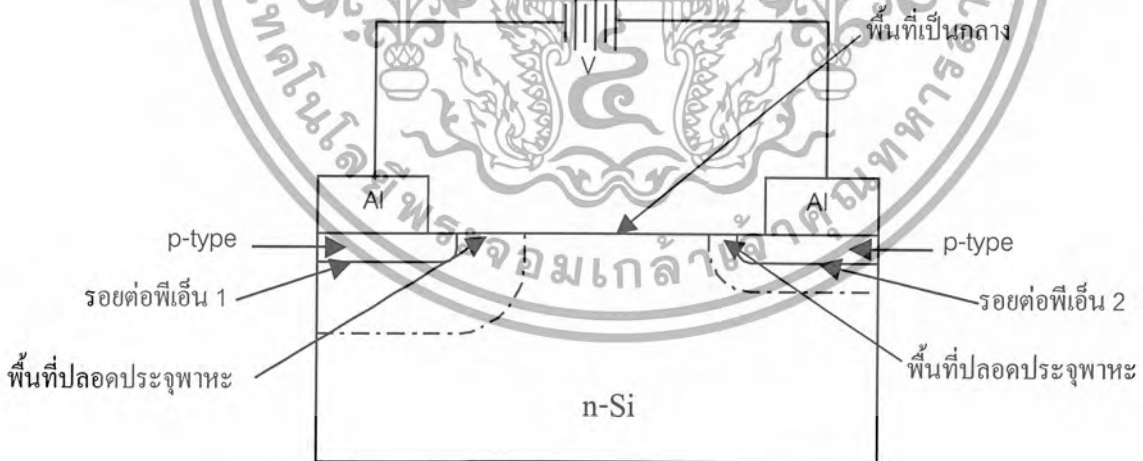
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 การวัดกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al เมื่อได้รับแสง

การศึกษาในหัวข้อนี้ เพื่อศึกษาความเข้มของแสงที่มีผลกระทบต่อกระแสไฟฟ้าของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al โดยการฉายแสงที่มีความเข้มต่างๆ โดยใช้อุปกรณ์ Photocell Illuminometer (TOPCON SPI-71) ในการวัดระดับความเข้มของแสงมีลักษณะการวัดแสดงดังรูปที่ 4.10

เมื่อให้แรงดันไบอัสกับโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al ดังรูปที่ 4.11 ซึ่งจะทำให้รอยต่อพีเอ็น 1 ได้รับแรงดันไบอัสกลับทำให้บริเวณปลอดประจุพาหะขยายตัวออก และรอยต่อพีเอ็น 2 ได้รับแรงดันไบอัสตรงทำให้บริเวณปลอดประจุพาหะขยายตัวได้น้อยเมื่อเปรียบเทียบกับความกว้างปลอดประจุพาหะของรอยต่อพีเอ็น 1



รูปที่ 4.11 โฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al ขณะได้รับแรงดันไบอัส

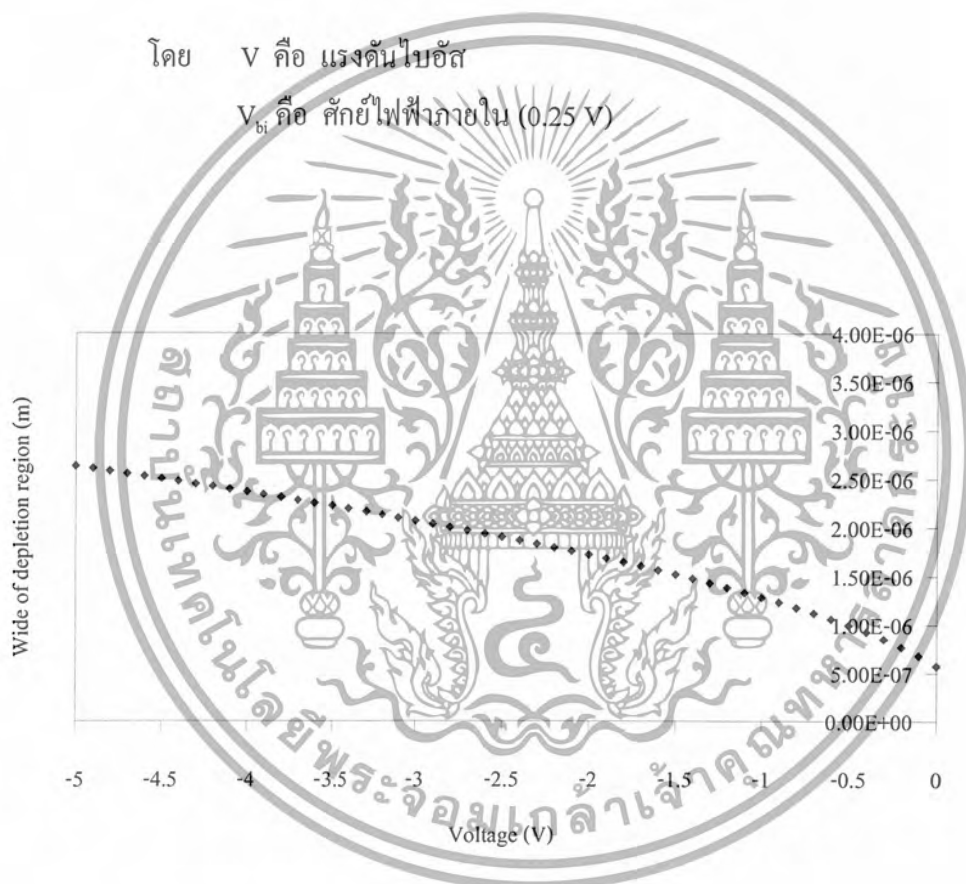
สำหรับพื้นที่รับแสงของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al ซึ่งจากโครงสร้างที่ได้ออกแบบไว้จะอยู่ระหว่างขั้วสัมผัสโลหะ ซึ่งเมื่อนำมาคำนวณหาความกว้างบริเวณปลอดประจุพาหะของรอยสัมผัสที่ 1 โดยเปรียบเทียบกับความกว้างของบริเวณปลอดประจุพาหะ 1 รอยสัมผัส ซึ่งความกว้างเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของพื้นที่ปลอดประจุพาหะ [2] นี้ได้จากคำนวณในสมการที่ (4.3) ซึ่งพบว่าขณะแรงดันไบอัสเท่ากับ 2 V ความกว้างของบริเวณปลอดประจุพาหะจะเท่ากับ $1.75 \mu\text{m}$ ซึ่งจากการออกแบบระยะห่างระหว่างขั้วโลหะได้ออกแบบเล็กสุดคือ $20 \mu\text{m}$ ซึ่งความกว้างของบริเวณปลอดประจุพาหะจากรอยสัมผัสที่ 1 ที่เกิดขึ้นจะยังไม่ถึงรอยสัมผัสที่ 2 ทำให้พื้นที่รับแสงของโฟโตไดโอดสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนคือ พื้นที่ปลอดประจุพาหะและพื้นที่ที่เป็นกลาง

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon}{qN_D} (V_{bi} + V)} \quad (4.3)$$

โดย V คือ แรงดันไบอัส

V_{bi} คือ ศักย์ไฟฟ้าภายใน (0.25 V)



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของพื้นที่ปลอดประจุพาหะกับแรงดันไบอัสกลับ

4.3.2 ผลการวัดกระแส-แรงดันของคุณสมบัติทางแสงของโฟโตไดโอด โครงสร้าง

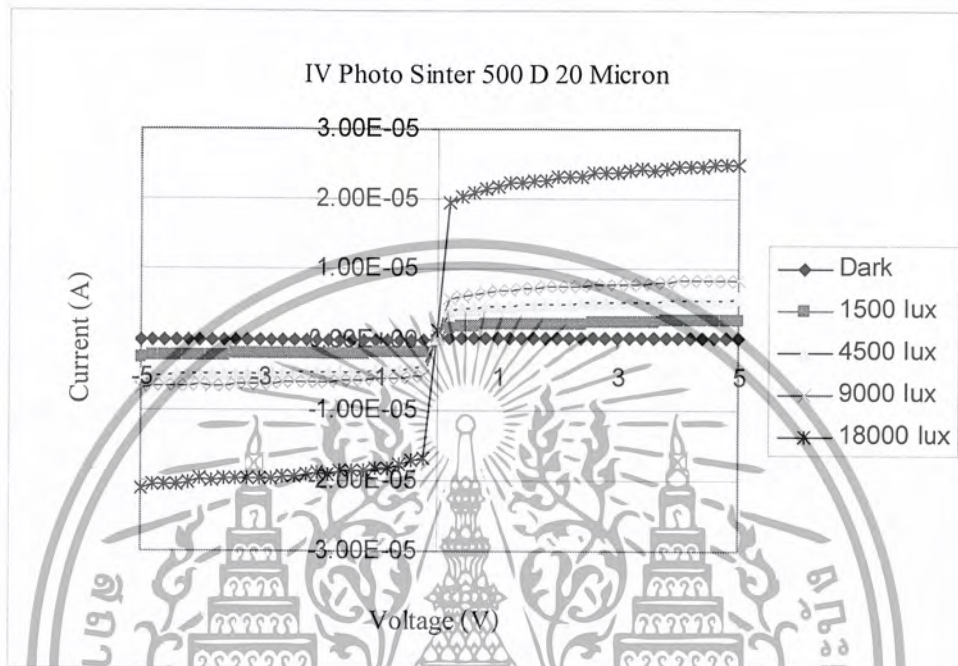
Al/n-Si/Al

โดยทำการวัดแสดงดังรูปที่ 4.10 โดยพิจารณาคุณสมบัติทางแสงของโฟโตไดโอดที่ซินเตอร์

ริงที่อุณหภูมิ 100°C , 200°C , 300°C , 400°C , 450°C และ 500°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองคุณสมบัติทางแสงของโฟโตไดโอดสามารถวัดค่ากระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดที่ขึ้นเตอรริงที่อุณหภูมิ 100°C , 200°C , 300°C , 400°C , 450°C และ 500°C จะได้ผลของกระแส-แรงดันที่คล้ายกับกราฟตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 คุณลักษณะของกระแส-แรงดันของคุณสมบัติทางแสงของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al (กราฟ กระแส-แรงดัน โฟโต ที่ขึ้นเตอรริง 500°C)

จากกราฟที่ 4.13 เป็นผลการทดลองทางแสงของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al โดยกระแสและแรงดันของคุณลักษณะทางแสง ที่ ขึ้นเตอรริงที่อุณหภูมิต่างกันจะมีลักษณะคล้ายกันดังรูปคือเมื่อเราทำการเพิ่มความเข้มแสงที่ฉายบริเวณรับแสงของโฟโตไดโอด จะทำให้กระแสแสง มีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยกระแสแสงมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4.4

$$I_p = I_{\text{Mea}} - I_d \quad (4.4)$$

I_p คือ กระแสแสงของโฟโตไดโอด (A)

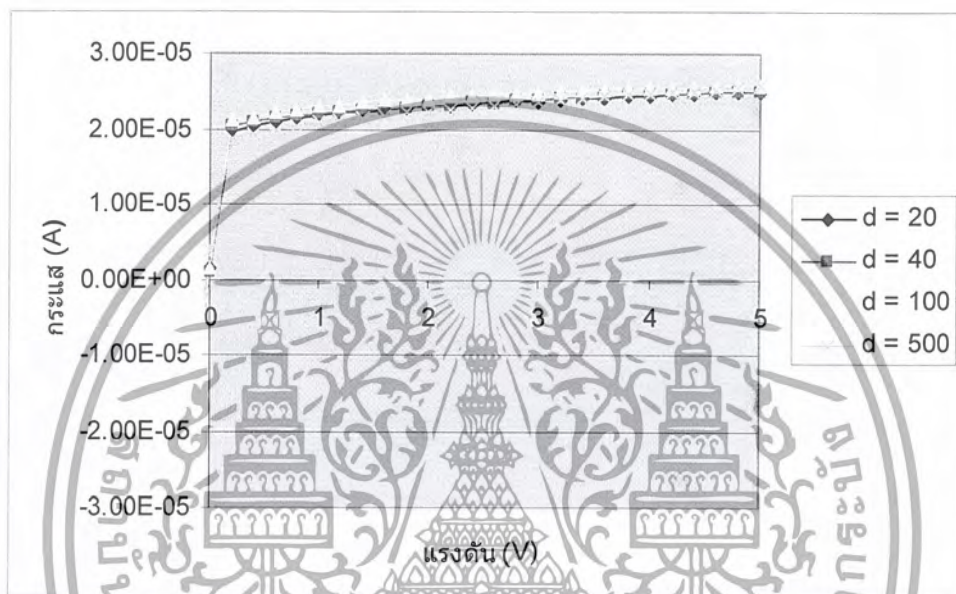
I_{Mea} คือ กระแสที่วัดได้จากเครื่องวัด (A)

I_d คือ กระแสมืดของโฟโตไดโอด (A)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 การวัดคุณสมบัติทางแสงของโฟโตไดโอดกับระยะ d ต่างๆ ตามตารางที่ 4.3

จากการศึกษาหัวข้อนี้ เป็นการหาความสัมพันธ์ของโฟโตไดโอดที่มีการเปลี่ยนแปลงระยะ d ตามตารางที่ 4.3 แล้วหาคุณสมบัติทางแสง คือกระแสแสงต่อระยะ d จากผลการทดลองที่ทำการเปลี่ยนระยะ d ของโฟโตไดโอดที่อุณหภูมิการซินเตอร์ริงที่ 500°C ได้ผลการทดลองดังกราฟรูปที่ 4.14

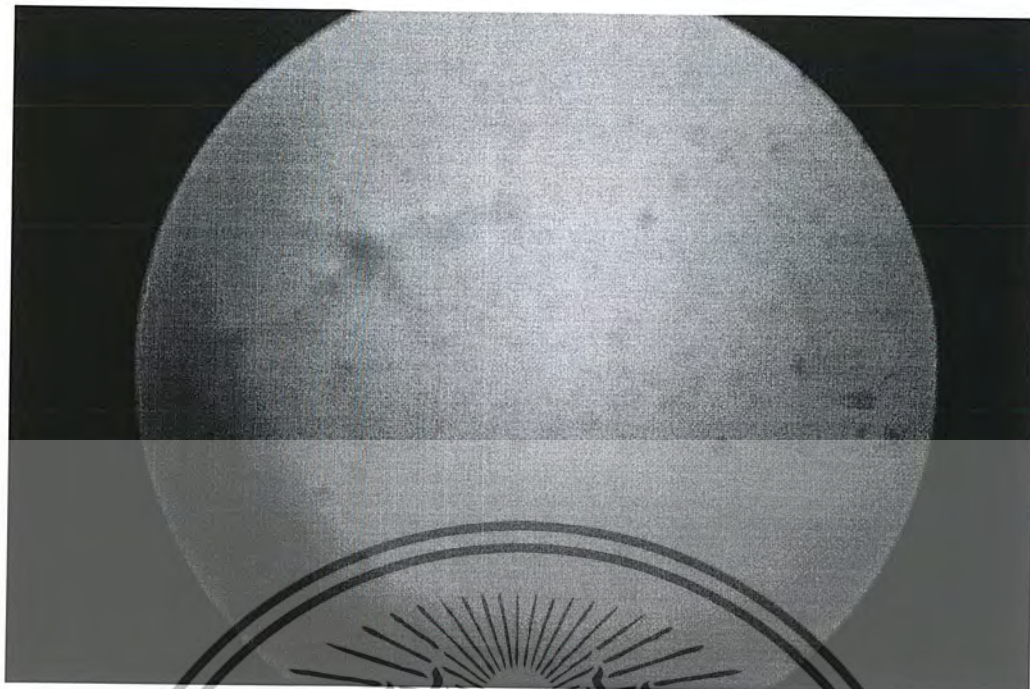


รูปที่ 4.14 คุณลักษณะของกระแส-แรงดันต่อการเปลี่ยนแปลงระยะ d ของคุณสมบัติทางแสงของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al (กราฟกระแส-แรงดัน โฟโต ที่ซินเตอร์ริง 500°C)

จากกราฟเราแทบจะ ไม่เห็นความเปลี่ยนแปลงของกระแสแสงเลยเมื่อเราทำการเปลี่ยนแปลงระยะ d ของโฟโตไดโอดหรือมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้นเราสามารถพิจารณาได้ว่าระยะ d นั้น ไม่มีผลต่อกระแสแสงที่เกิดขึ้นซึ่งถ้ามีผลก็น้อยมาก

4.3.4 การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของผิวอะลูมิเนียมของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่อุณหภูมิการซินเตอร์ริง 100°C , 200°C , 300°C , 400°C , 450°C และ 500°C แสดงดังรูปที่ 4.15 ถึงรูปที่ 4.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

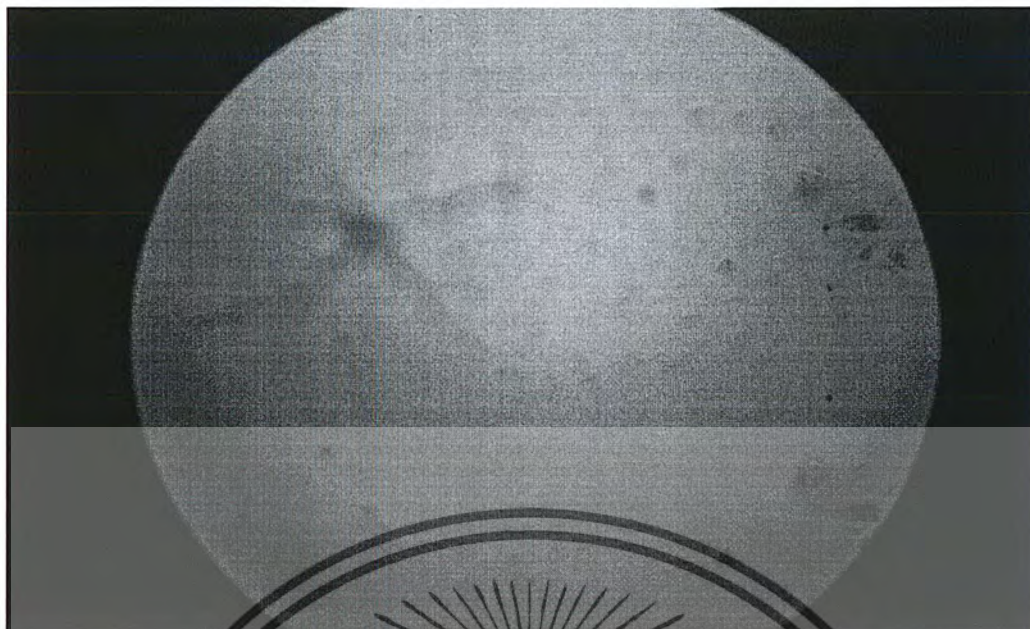


รูปที่ 4.15 การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของผิวอะลูมิเนียมของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่ยังไม่ได้ทำการขึ้นเตอรจริง



รูปที่ 4.16 การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของผิวอะลูมิเนียมของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่อุณหภูมิการขึ้นเตอรจริง 100°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

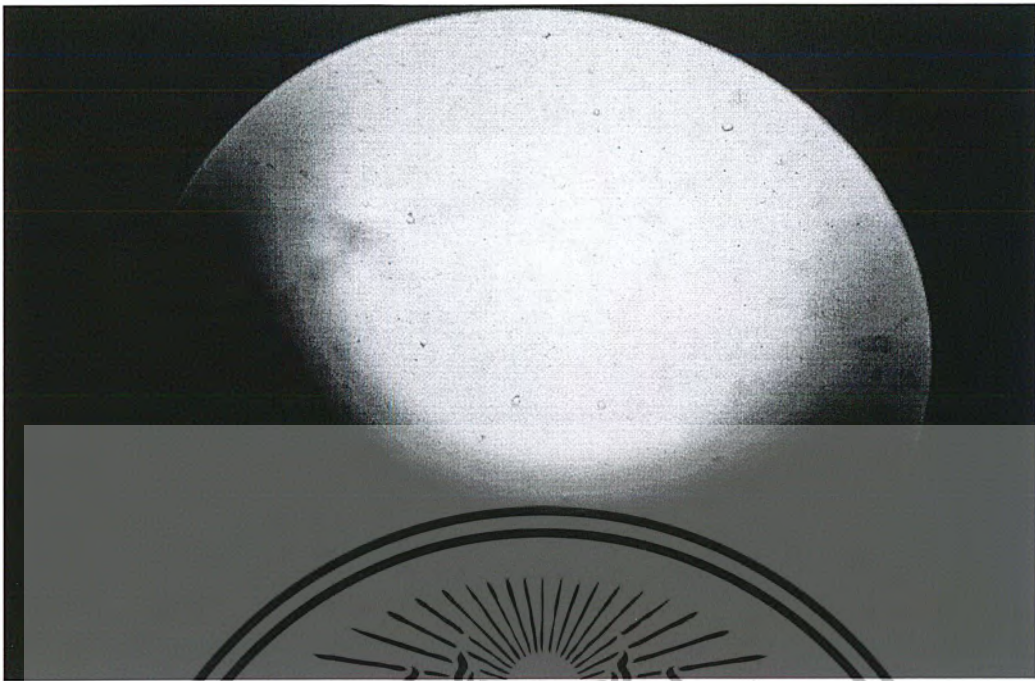


รูปที่ 4.17 การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของผิวอะลูมิเนียมของโพลีไดออกไซด์ โครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่อุณหภูมิการขึ้นเตอรริง 200°C



รูปที่ 4.18 การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของผิวอะลูมิเนียมของโพลีไดออกไซด์ โครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่อุณหภูมิการขึ้นเตอรริง 300°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของผิวอะลูมิเนียมของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่อุณหภูมิการขึ้นเตอรริง 400°C



รูปที่ 4.20 การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของผิวอะลูมิเนียมของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่อุณหภูมิการขึ้นเตอรริง 450°C
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



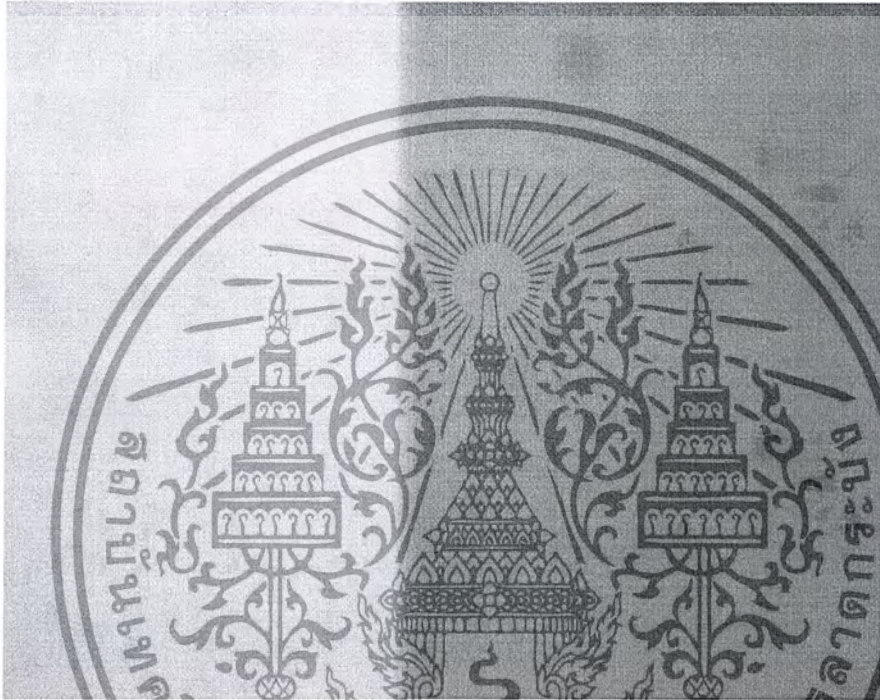
รูปที่ 4.21 การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของผิวอะลูมิเนียมของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่อุณหภูมิการขึ้นเตอรืง 500°C

จากผลการทดลองรูปที่ 4.15 ถึงรูปที่ 4.21 จะพบว่าคุณสมบัติทางกายภาพของผิวอะลูมิเนียมที่ขึ้นเตอรืงด้วยอุณหภูมิ 100°C , 200°C , 300°C จะมีลักษณะที่คล้ายกันยังไม่ปรากฏผลของการเปลี่ยนแปลงที่ผิวของอะลูมิเนียม แต่เมื่อเราทำการขึ้นเตอรืงอุณหภูมิเพิ่มขึ้นไปถึง 400°C ดังรูปที่ 4.19 จะเริ่มสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงของผิวอะลูมิเนียม แต่จะมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยและเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการขึ้นเตอรืงมากขึ้น ไปอีกก็จะมี การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของผิวอะลูมิเนียมมากขึ้นตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 4.19 ถึง 4.21 ซึ่งการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนี้เป็นผลมาจากการแพร่ของอะตอมของอะลูมิเนียมเข้าไปยังซิลิคอนทำให้รอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำมีคุณสมบัติที่ดีหรือเป็นรอยต่อชอตต์กีที่ดี และคุณสมบัตินี้ก็เป็นผลทำให้ค่ากำแพงศักย์ของรอยต่อชอตต์กีลดลงนั่นเอง

4.3.5 การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของผิวซิลิคอนของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่อุณหภูมิการขึ้นเตอรืง 100°C , 200°C , 300°C , 400°C , 450°C และ 500°C

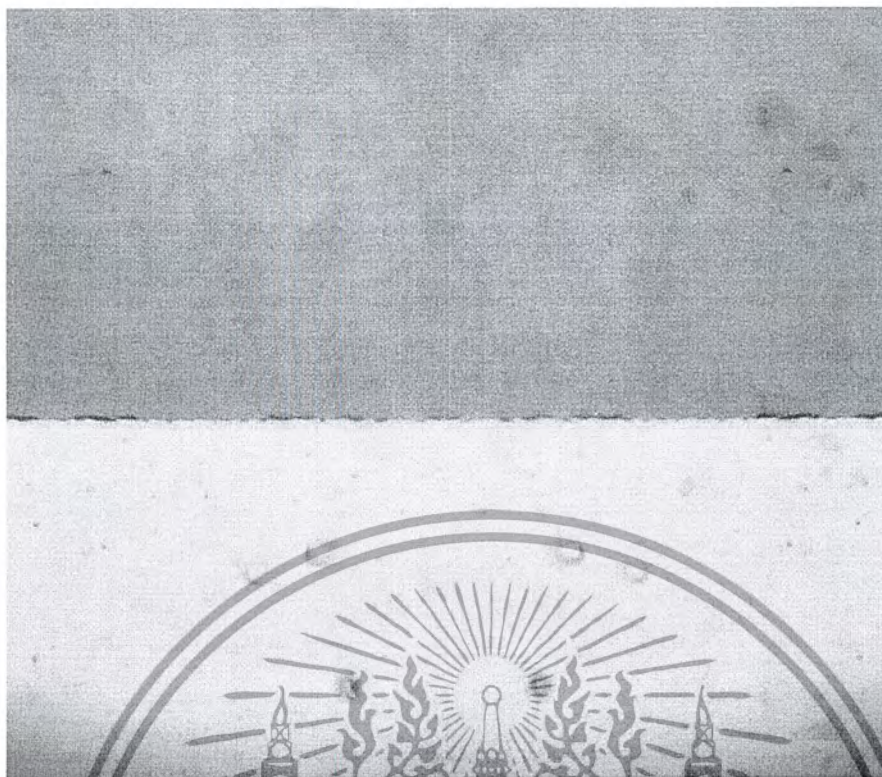
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองเมื่อเราทำการซินเตอร์ริงโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al ด้วย อุณหภูมิตั้งแต่ ยังไม่ได้ทำการซินเตอร์ริง ถึง 500°C ผลของการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของผิว ซิลิคอนไม่ปรากฏการเปลี่ยนแปลง เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการที่ยังไม่ได้ทำการซินเตอร์ริง กับ อุณหภูมิการซินเตอร์ริงที่สูงที่สุดคือ 500°C แสดงดังรูปที่ 4.21 ถึงรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของผิวซิลิคอนของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่ยังไม่ได้ทำการซินเตอร์ริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของผิวซิลิคอนของโฟโตโวลตาอิก โครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่อุณหภูมิการขึ้นเตอรืง 500 °C



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการงานวิจัยเรื่องกระบวนการสร้างโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al โดยในส่วนแรกนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยสัมผัสระหว่างอะลูมิเนียมและซิลิคอนชนิดเอ็น โดยอะลูมิเนียมสร้างจากการเคลือบโลหะในสุญญากาศแล้วทำการซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิต่างๆโดยอุณหภูมิที่ใช้ในการซินเตอร์ริงคือ 100°C , 200°C , 300°C , 400°C , 450°C , 500°C จากนั้นหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ด้วยเทคนิคการวัดกระแส-แรงดัน ซึ่งจากการวัดค่าความสูงของกำแพงศักย์จากผลที่ได้ ค่าความสูงของกำแพงศักย์จะมีค่าคงที่ในช่วงอุณหภูมิต้นคือ, 100°C , 200°C และ 300°C ซึ่งรอยสัมผัสที่ได้จะเป็นรอยสัมผัสแบบขอตัก และเมื่ออุณหภูมิของการซินเตอร์ริงเป็น 400°C , 450°C และ 500°C ในช่วงอุณหภูมินี้จะทำให้อะตอมของอะลูมิเนียมจะแพร่ไปยังซิลิคอน ชนิดเอ็น ซึ่งทำให้รอยสัมผัสที่ได้เป็นรอยสัมผัสแบบอัลลอย จากการพิจารณาค่าความสูงของกำแพงศักย์และคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยสัมผัสที่ซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิต่าง ๆ สามารถสร้างรอยสัมผัสระหว่างอะลูมิเนียมและซิลิคอน ชนิดเอ็น ให้เป็นรอยสัมผัสแบบขอตักและอัลลอยได้ โดยซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 300°C และ 500°C ตามลำดับ เป็นเวลา 15 นาที และจากผลการทดลองที่ได้เราจะพบว่าเมื่อเราไม่ได้ทำการซินเตอร์ริง กระแสรั่วไหลจะมีค่าสูงมากที่สุดและจะมีค่าลดลงตามลำดับเมื่อเราเพิ่มอุณหภูมิการซินเตอร์ริงไปจนถึง 500°C

ในส่วนที่สองเป็นการศึกษากระบวนการสร้างโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al โดยใช้เงื่อนไขของการซินเตอร์ริงซึ่งได้จากการศึกษากระบวนการสร้างและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยสัมผัสระหว่างอะลูมิเนียมและซิลิคอน ชนิดเอ็น โดยซินเตอร์ริงโฟโตไดโอดที่อุณหภูมิ 100°C , 200°C , 300°C , 400°C , 450°C , 500°C ซึ่งทำให้ได้โฟโตไดโอด ที่มีรอยสัมผัสแบบขอตักและแบบอัลลอย ตามลำดับ และในการออกแบบโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al นี้ได้ออกแบบให้โฟโตไดโอดมีโครงสร้างแบบสมมาตร ซึ่งจะมีผลกับกระแสของโฟโตไดโอดขณะได้รับแรงดันไบอัสตรงและไบอัสกลับ จะมีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งเมื่อนำโฟโตไดโอดที่สร้างทั้งสองชนิด ไปศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้า พบว่าโฟโตไดโอดที่มีรอยสัมผัสแบบขอตักจะมีกระแสรั่วและแรงดันพังทลายที่ไม่แน่นอน และกระแสที่ไหลขณะได้รับแรงดันไบอัสตรงและไบอัสกลับจะมีลักษณะที่ไม่ใกล้เคียงกัน ส่วนโฟโตไดโอด ที่มีรอยสัมผัสแบบอัลลอยจะมีกระแสรั่วที่ต่ำและแรงดันพังทลายที่แน่นอน และมีกระแสไหลขณะที่ได้รับแรงดันไบอัสตรงและไบอัสกลับที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งจากการทดลองวัดกระแสรั่วไหล (Dark Current) แผ่นที่ไม่ได้ทำการซินเตอร์ริง จะมีกระแสรั่วไหล (Dark Current) สูงและจะมีค่าลดต่ำลงเมื่ออุณหภูมิการซินเตอร์ริงเพิ่มสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น กระบวนการสร้างโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al ซึ่งสร้างชั้นอะลูมิเนียมจากเทคนิคเคลือบโลหะในสุญญากาศ จึงเหมาะสมที่จะสร้างโฟโตไดโอด ให้มีรอยสัมผัสแบบอัลลอย

ในส่วนต่อมาเป็นการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al จากผลการทดลองของกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al ค่าของกระแสรั่วของโฟโตไดโอดจะมีค่าน้อยกว่า $0.5 \mu\text{A}$ ที่อุณหภูมิการชินเตอร์ริง 500°C และผลของกระแสรั่วไหล (Dark Current) ของโฟโตไดโอดต่ออุณหภูมิจะพบว่ามีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในชิ้นงานที่ยังไม่ได้ชินเตอร์ริง จนถึง 300°C และที่อุณหภูมิการชินเตอร์ริงตั้งแต่ 300°C จนถึง 500°C ค่าของกระแสรั่วไหล (Dark Current) จะมีค่าลดลงต่ำมีลักษณะที่เริ่มเรียบ(Flat)และมีแรงดันพังทลายที่แน่นอน

ในส่วนถัดมาเป็นการศึกษาคุณสมบัติทางแสงของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al คือผลของพื้นที่รับแสง โดยพื้นที่รับแสงของโฟโตไดโอดสามารถถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ พื้นที่ปลอดประจุพาหะและพื้นที่เป็นกลาง ถ้าเพิ่มแรงดันไบอัสจะทำให้พื้นที่ปลอดประจุพาหะเพิ่มมากขึ้นและพื้นที่เป็นกลางจะลดลง ในขณะที่พื้นที่ปลอดประจุพาหะเท่าเดิม กระแสโฟโตที่ได้จะมีค่าเท่าเดิม ถึงแม้ว่าพื้นที่เป็นกลางจะเพิ่มขึ้น กระแสโฟโตจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มพื้นที่ปลอดประจุพาหะถึงแม้ว่าพื้นที่เป็นกลางจะลดลง ซึ่งจากผลการทดลองโดยการเปลี่ยนระยะห่างระหว่างขั้ว d จากกราฟกระแสแสงที่วัดเปรียบเทียบที่ระยะ d ต่างๆเราแทบจะไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสแสงของของโฟโตไดโอดเลย แสดงให้เห็นว่ากระแสโฟโตของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al เกิดจากพื้นที่ปลอดประจุพาหะมากกว่าพื้นที่เป็นกลาง

การศึกษาคูณสมบัติของกระแสและแรงดันทางแสงของโฟโตไดโอดที่มีการเพิ่มความเข้มของแสง พบว่าเมื่อเราทำการไบอัสโฟโตไดโอดแล้วทำการฉายแสงลงบนบริเวณพื้นที่รับแสง กระแสที่ได้จะมีค่าสูงขึ้นตามลำดับเมื่อเราทำการเพิ่มความเข้มของแสงให้มีค่าสูงขึ้น

สุดท้ายเป็นการศึกษาคูณสมบัติทางกายภาพผิวของอะลูมิเนียมและซิลิคอนของโฟโตไดโอด จากการทดลองจะพบว่าคุณสมบัติทางกายภาพของผิวอะลูมิเนียมที่ชินเตอร์ริงด้วยอุณหภูมิ 100°C , 200°C , 300°C จะมีลักษณะที่คล้ายกันยังไม่ปรากฏผลของการเปลี่ยนแปลงที่ผิวของอะลูมิเนียม แต่เมื่อเราทำการชินเตอร์ริงอุณหภูมิเพิ่มขึ้นไปถึง 400°C จะเริ่มสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงของผิวอะลูมิเนียม แต่จะมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยและเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการชินเตอร์ริงมากขึ้นไปอีกก็จะมีเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของผิวอะลูมิเนียมมากขึ้นตามลำดับ การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนี้เป็นผลมาจากการแพร่ของอะตอมของอะลูมิเนียมเข้าไปยังซิลิคอนทำให้รอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำมีคุณสมบัติที่ดีหรือเป็นรอยต่อชอตต์กีที่ดี และคุณสมบัตินี้ก็ส่งผลทำให้ค่ากำแพงศักย์ของรอยต่อชอตต์กีลดลงนั่นเอง ส่วนคุณสมบัติทางกายภาพของผิวซิลิคอนตั้งแต่ยังไม่ได้ทำการชินเตอร์ริงจนถึง 500°C จากการทดลองไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า โฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al สามารถที่จะใช้เป็นถึงประดิษฐ์ตรวจจับแสงในย่านความยาวคลื่นแสงมองเห็นและแสงอินฟราเรดได้ สำหรับในการพัฒนานั้นผลการทดลองทั้งหมดนี้ สามารถที่จะใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการศึกษาและพัฒนาโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al ตามเงื่อนไขที่เหมาะสมต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] รศ.ดร. สมเกียรติ ศุภเดช . **เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์**. คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.พ.ศ.2542
- [2] ดุสิต เครื่องงาม. **สิ่งประดิษฐ์ ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ : ฟิสิกส์เทคโนโลยีและการใช้งาน**. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2542
- [3] สราวุธ วิศวแสวงสุข และคณะ. “ การศึกษาค่าความสูงของกำแพงศักย์ของรอยสัมผัสแบบขอตติ์กี . การประชุมวิชาการทางไฟฟ้า ครั้งที่ 23 พ.ศ. 2543.
- [4] Desmarais Louis. **Applied Electro- optics**. Upper Saddle River,NJ: Prentice Hall PTR.1998.
- [5] Sze S.M.**Physics of Semiconductor Device**2nd Edition.1981.
- [6] Rhoderick E.H. William R. H. **Metal- Semiconductor Contacts** 2nd Edition Oxford University Press. New York. 1998.
- [7] Sze S M. Coleman D,JJR, and Loya A “ Current Transport in Metal- Semiconductor Metal(MSM) Structures.” *Solid-State Electronics*. 1971. Vol.14 ,pp. 1209-1248
- [8] Takano H, Kimura M,Ando T, Niemcharoen S. Yasamura Y, and Sato K. “Optical Response of Planar Mo/n-Si/Mo Structure With Long Neutral Region and Schottky Barriers at Both Ends.” *Solid-State Electronics* 44(2000), pp.2161-2164.
- [9] Solymar L, Walsh D, **Lecture on the electrical properties of material**. 5th ed, Oxford: Oxford University Press, 1993.
- [10] Gerikd W, Neudeck. **The PN Junction diode**. 2nd ed. Reading MA: Addison- Wesle. 1989.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้