สำนักหอสมุดกลาง_พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การพัฒนาซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด p-i-n โครงสร้างแบบพลานาร์

THE DEVELOPMENT OF SILICON P-I-N PHOTO DIODE WITH PLANAR STRUCTURE

โดย

นางสาววันวิสาข์ พีระไพศาลทรัพย์

นายอำนาจ เหมหงษา

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 62369
วัน,เดือน,ปี 16 ส.ค. 2549

b 11621746
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต

สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพัฒนาซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด p-i-n โครงสร้างแบบพลานาร์

THE DEVELOPMENT OF SILICON P-I-N PHOTO DIODE WITH PLANAR STRUCTURE

โดย

นางสาววันวิสาข์ พีระไพศาลทรัพย์ เลขประจำตัว 46015279

นายอำนาจ เหมหงษา เลขประจำตัว 46015292

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร. สมเกียรติ ศุภเดช

ปริญญานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต

สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2548

ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การพัฒนาซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด p-i-n โครงสร้างแบบพลานาร์

THE DEVELOPMENT OF SILICON P-I-N PHOTO DIODE WITH PLANAR STRUCTURE

ผู้จัดทำ

1.นางสาววันวิสาข์ พีระไพศาลทรัพย์ เลขประจำตัว 46015279

2.นายอำนาจ เหมหงษา เลขประจำตัว 46015292

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร. สมเกียรติ ศุภเดช)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพัฒนาซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด p-i-n โครงสร้างแบบพลานาร์

THE DEVELOPMENT OF SILICON P-I-N PHOTO DIODE WITH PLANAR STRUCTURE

ผู้จัดทำ

1.นางสาววันวิสาข์ พีระไพศาลทรัพย์ เลขประจำตัว 46015279

2.นายอำนาจ เหมหงษา เลขประจำตัว 46015292

โครงงานนี้ได้รับการตรวจสอบจากอาจารย์ที่ปรึกษาแล้ว

ลงชื่อ.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร. สมเกียรติ ศุภเดช)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพัฒนาซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด p-i-n โครงสร้างแบบพลานาร์

นางสาววันวิสาข์ พีระไพศาลทรัพย์ รหัส 46015279
นายอำนาจ เหมหงษา รหัส 46015292
รศ.ดร. สมเกียรติ ศุภเดช อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2548

บทคัดย่อ

การพัฒนาซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด p-i-n โครงสร้างแบบพลานาร์ เป็นการศึกษาและพัฒนาเกี่ยวข้องกับกระบวนการสร้าง , ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า และการตอบสนองทางด้านแสงเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพดีที่สุด โดยการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์สำคัญต่างๆ ได้แก่ ขนาดของพื้นที่รับแสง (Active Area) , ความลึกของส่วนพื้นที่รับแสง (Depth) , ความเข้มของแสง และการตอบสนองต่อสัญญาณแสง และค่าของกระแสแสง กับกระแสมืด ที่มีผลต่อการทำงานของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด p-i-n เป็นอย่างมาก ดังนั้นจากข้อมูลการทดลองจะเป็นการเพิ่มศักยภาพของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด p-i-n และลดข้อเสียหรือปัญหาให้น้อยลง ซึ่งจะทำให้การพัฒนาดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEVELOPMENT OF SILICON P-I-N PHOTO DIODE WITH PLANAR STRUCTURE

Miss. Wanwisa Peerapaisansap ID. 46015279
Mr. Aumnart Hemhongsa ID. 46015292
Assoc. Prof. Dr. Somkiat Supadech Advisor
Educational Year 2005

ABSTRACT

The development of silicon p-i-n photodiode with planar structure is the study and development dealing with the process of construction, the electrical quality and the response of light for the most efficient. By changing the main parameters, such as active area, the depth of active area , intensity of light and response to the light signal and value of photo current and dark current are the most effective to the function of silicon p-i-n photodiode. The information from experiment can be increase the potentiality of silicon p-i-n photo diode and reduce the disadvantages or problems. The development will be pursued continually.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี สืบเนื่องมาจากความช่วยเหลือและคำแนะนำที่กรุณายิ่งของ รศ.ดร.สมเกียรติ ศุภเดช อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ท่านได้กรุณาตรวจแก้ไขข้อบกพร่องและให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ในส่วนของการทดลองและรายงาน และนอกจากนี้ขอขอบคุณอาจารย์ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ทุกท่านที่ช่วยอบรมสั่งสอนและมอบความรู้ให้มีแนวทางในการคิดวิเคราะห์โครงงานนี้ อีกทั้งเจ้าหน้าที่และนักวิจัยในศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ที่ให้ความช่วยเหลือในทุกด้านอย่างเต็มที่เพื่อความสะดวกในการดำเนินงาน และขอขอบคุณพี่ ๆ ปริญญาโท ทุกท่านที่ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในการทำโครงงานนี้

คณะผู้จัดทำสำนึกในพระคุณของทุกท่าน และถือโอกาสนี้กราบขอบพระคุณทุก ๆ ท่านที่ให้ความกรุณาให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา คำแนะนำที่ดี ๆ และความอดทนกับโครงงานนี้มาโดยตลอด ขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย

(นางสาววันวิสาข์ พีระไพศาลทรัพย์)

(นายอำนาจ เหมหงษา)

ผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
ความเป็นมาของการทำโครงงาน	2
วัตถุประสงค์ของโครงงาน	2
แผนการดำเนินงาน	2
บทที่ 2 แสงและอุปกรณ์รับแสง	3
2.1 คุณสมบัติพื้นฐานของแสง	3
2.1.1 การเป็นคลื่นของแสง	3
2.1.2 การสะท้อนของแสง	4
2.1.3 การหักเหของแสง	5
2.2 โฟโตไดโอด	5
2.2.1 การทำงานของโฟโตไดโอด	8
2.2.2 โครงสร้างของโฟโตไดโอดชนิดต่างๆ	12
2.2.3 คุณสมบัติที่โดดเด่นของโฟโตไดโอดชนิดต่างๆ	14
2.2.4 คุณสมบัติในการเลือกอุปกรณ์รับแสงมาใช้งาน	15
2.3 สารและโครงสร้างของอุปกรณ์รับแสง	16
2.4 โฟโตไดโอดชนิดโครงสร้าง p-i-n	17
2.4.1 โครงสร้างและหลักการทำงานของโฟโตไดโอดชนิด p-i-n	17
2.5 พินโฟโตไดโอดชนิดสารวัสดุต่างๆ	19
2.5.1 พินโฟโตไดโอดชนิดธาตุเดี่ยว และชนิดสารประกอบไบนารี	19
บทที่ 3 กระบวนการออกแบบและการสร้างโฟโตไดโอดชนิด p-i-n	24
3.1 การสร้างโฟโตไดโอดชนิด p-i-n	24
3.2 การเตรียมแผ่นผลึก	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.2.1 กระบวนการ Lapping ผิวหน้าแผ่นผลึกซิลิคอน	25
3.2.2 คุณสมบัติของแผ่นผลึกที่ใช้สร้างโฟโตไดโอดชนิด p-i-n	26
3.3 การออกซิเดชั่น	28
3.3.1 กระบวนการออกซิเดชั่นแบบแห้ง	28
3.3.2 กระบวนการออกซิเดชั่นแบบไอน้ำอิ่มตัว	30
3.3.3 การวัดความหนาของชั้นออกไซด์	31
3.3.4 การพิจารณาความหนาของชั้นออกไซด์ที่น้อยที่สุดสำหรับป้องกันการแพร่สารเจือ	34
3.4 การเปิดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่ผิวหน้า (Photolithography)	35
3.5 การแพร่สารเจือ	36
3.5.1 กลไกของการแพร่	37
3.5.2 เทคนิคการแพร่สารเจือ	37
3.6 ขบวนการเมตัลไลเซชั่น	38
3.6.1เงื่อนไขการเลือกใช้สารโลหะในกระบวนการเมตัลไลเซชั่น	38
3.6.2โครงสร้างทางฟิสิกส์ของระบบสุญญากาศ	38
3.6.3 เทคนิคการเคลือบโลหะในระบบสุญญากาศ	39
3.7 กระบวนการสร้างโฟโตไดโอดชนิด p-i-n โครงสร้างแบบพลานาร์	40
3.7.1 การออกแบบมาส์ค	40
3.7.2 กระบวนการทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นผลึก	42
3.7.3 กระบวนการสร้างชั้นออกไซด์	42
3.7.4 ขบวนการ Photo-etching	44
3.7.5 การแพร่สารเจือฟอสฟอรัสเพื่อสร้างส่วน n^+	44
3.7.6 การแพร่สารเจือโบรอนเพื่อสร้างส่วน p^+	46
3.7.7 ขบวนการสร้างขั้วโลหะ (Metallization)	48
บทที่ 4 การวัดและการทดลอง	54
4.1 การทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน (I-V Characteristics)	54
4.2 การทดลองเพื่อศึกษากระแสมืด(I_{dark})	55
4.3 การทดลองเพื่อศึกษากระแสแสง(I_{photo})	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.3.1 ศึกษาผลของพื้นที่รับแสงขนาดต่างๆกัน ที่ความเข้มแสง 8,000 lx 55

4.3.2 ศึกษาผลของความเข้มแสงค่าต่างๆ ที่พื้นที่ 1000*2000 μm^2 56

4.4 การวัดการตอบสนองสัญญาณ 58

4.4.1 ผลกระทบของการตอบสนองสัญญาณกับแรงดันไบแอส 58

4.4.2 ผลกระทบของการตอบสนองสัญญาณกับค่าความต้านทานโหลด 59

4.4.3 การตอบสนองสัญญาณทางแสงที่ขนาดพื้นที่ต่างกัน 59

4.5 การทดลองเพื่อหาค่าความจุไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อ 60

4.6 การทดลองเพื่อศึกษาผลของพื้นที่ของชั้น i (Intrinsic) 60

4.6.1 เปรียบเทียบระหว่าง p+_region และ n+_region ที่พื้นที่รับแสง และระยะ i เท่ากัน 61

4.7 การทดลองเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน กับ UV-light 62

บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ 63

ประมวลภาพการดำเนินงานทั้งหมดในโครงงานนี้ 65

ภาคผนวก 68

ภาคผนวก ก ค่าคงที่ทางฟิสิกส์ 68

ภาคผนวก ข คุณสมบัติทั่วไปของ Ge Si และ GaAs ที่อุณหภูมิห้อง (300 K) 69

ภาคผนวก ค ตารางธาตุ 70

ภาคผนวก ง สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า 71

ภาคผนวก จ วัสดุและเคมีภัณฑ์ที่ใช้ในการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ 72

หนังสืออ้างอิง 74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 2.1	ความยาวคลื่นที่ตามนุษย์มองเห็น (Visible Light)	4
ตารางที่ 3.1	แสดงสีของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีความหนาต่างๆ	32
ตารางที่ 4.1	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและแรงดันที่ความเข้มแสง 8,000 lx	54
ตารางที่ 4.2	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสง I_Dและแรงดันที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

		หน้า
รูปที่ 2.1	การสะท้อนของคลื่น	4
รูปที่ 2.2	การหักเหของคลื่น	5
รูปที่ 2.3	วงจรโฟโตไดโอดเบื้องต้น	6
รูปที่ 2.4	ภาพแสดงการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน–โฮลเมื่อทำการจ่าย Forward bias	6
รูปที่ 2.5	ภาพแสดงการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน–โฮลเมื่อทำการจ่าย Reversed bias	6
รูปที่ 2.6	ภาพการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากชั้นวาเลนส์ไปยังชั้นคอนดักชั่น	7
รูปที่ 2.7	กราฟแสดงค่ากระแส และแรงดันของโฟโตไดโอด	7
รูปที่ 2.8	แสดงการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน-โฮลช่วงต้นของการชนกันของสารP-N	8
รูปที่ 2.9	แสดงการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากด้านเอ็นข้ามไปด้านพี แล้วทิ้งให้เกิดโฮล เอาไว้ที่จุดเดิมที่อิเล็กตรอนเคยอยู่ก่อนการชนกันของสาร P-N	8
รูปที่ 2.10	แสดงการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากด้านเอ็นข้ามไปด้านพี ที่มากขึ้นแล้วทิ้ง ให้เกิดโฮลเอาไว้ที่จุดเดิมที่อิเล็กตรอนเคยอยู่ก่อนการชนกันของสาร P-N	9
รูปที่ 2.11	แสดงการเคลื่อนที่ของโฮลจากด้านพีข้ามไปยังด้านเอ็น แล้วทิ้งให้เกิดอิเล็กตรอน เอาไว้ที่จุดเดิมที่โฮลเคยอยู่ก่อนการชนกันของสาร P-N	9
รูปที่ 2.12	แสดงการเคลื่อนที่ของโฮลและอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ ข้ามฝั่งไปมาจนเกิดบริเวณปลอดพาหะที่สมบูรณ์	9
รูปที่ 2.13	แสดงการเกิดสนามไฟฟ้าบริเวณพื้นที่รับแสง เป็นบริเวณเดียวกับบริเวณปลอดพาหะ	10
รูปที่ 2.14	แสดงบริเวณพื้นที่รับแสงเป็นบริเวณเดียวกับบริเวณปลอดพาหะ	10
รูปที่ 2.15	ดีพลีชั่นโซน	11
รูปที่ 2.16	โฟโตไดโอดแบบพลานาร์ที่สร้างจากซิลิกอน	12
รูปที่ 2.17	อะวะลานช์โฟโตไดโอด โครงสร้างพลานาร์ ทำจากซิลิกอน	13
รูปที่ 2.18	ภาพกระบวนการทวีคูณของจำนวนอิเล็กตรอน	13
รูปที่ 2.19	ภาพกระแสและแรงดันขณะจ่าย Reversed และ Forward bias	14
รูปที่ 2.20	ความยาวคลื่นในการรับแสงของอุปกรณ์รับแสงแต่ละชนิด	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 2.21	โครงสร้างพื้นฐานของโฟโตไดโอดชนิด p-i-n	17
รูปที่ 2.22	โครงสร้าง แถบพลังงาน และการลดของกำลังแสงอินพุตตามความลึกของโฟโตไดโอดชนิด p-i-n	18
รูปที่ 2.23	หลักการทำงานการรับแสง และระดับพลังงานของพินโฟโตไดโอด	19
รูปที่ 2.24	หลักการทำงานของโฟโตไดโอดชนิด p-i-n	20
รูปที่ 2.25	ตัวอย่างการใช้งานโฟโตไดโอดชนิด p-i-n	21
รูปที่ 2.26	วงจรสมมูลของการใช้งานโฟโตไดโอดชนิด p-i-n	22
รูปที่ 2.27	ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด p-i-n	23
รูปที่ 2.28	Photoconductive Detectors	23
รูปที่ 3.1	แผนภาพกระบวนการออกซิเดชั่นแบบแห้ง	29
รูปที่ 3.2	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและเวลาการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่างๆ	29
รูปที่ 3.3	แผนภาพกระบวนการออกซิเดชั่นแบบไอน้ำอิ่มตัว	30
รูปที่ 3.4	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและเวลาการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่างๆ	31
รูปที่ 3.5	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นออกไซด์ที่น้อยที่สุด	35
รูปที่ 3.6	แสดงลำดับขั้นตอน และภาพด้านข้างของผลึกซิลิคอนในกระบวนการโฟโต้ลิโธกราฟี	36
รูปที่ 3.7	โครงสร้างของเครื่อง Filament Evaporator	39
รูปที่ 3.8	ภาพการออกแบบโฟโตมาร์ค โดยเปลี่ยนแปลงค่าพื้นที่ p^+	40
รูปที่ 3.9	แผ่นผลึกซิลิคอนฐานรอง	41
รูปที่ 3.10	ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่สร้างขึ้นบนฐานรอง	43
รูปที่ 3.11	กระบวนการแพร่สารเจือชนิดเอ็น	45
รูปที่ 3.12	กระบวนการแพร่สารเจือชนิดพี	47
รูปที่ 3.13	กระบวนการเปิดช่อง contact window เพื่อสร้างขั้วอลูมิเนียม	48
รูปที่ 3.14	กระบวนการสร้างขั้วอลูมิเนียม	49
รูปที่ 3.15	ภาพการออกแบบโฟโตมาร์ค โดยเปลี่ยนแปลงค่าพื้นที่ i โดยให้พื้นที่รับแสงเป็นส่วน P^+	50
รูปที่ 3.16	ภาพการออกแบบโฟโตมาร์ค โดยเปลี่ยนแปลงค่าพื้นที่ i โดยให้พื้นที่รับแสงเป็นส่วน N^+	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน ขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง และไบอัสย้อนกลับ ที่ความลึก 0.387 μm และพื้นที่รอยต่อ p^+ - i 1.76 μm^2 54

รูปที่ 4.2 กราฟแสดงค่ากระแสมืดที่มีผลต่อพื้นที่รอยต่อ p^+ - i 1.32 μm^2(A) , 1.76 μm^2(B) , 2.20 μm^2(C) , 2.64 μm^2(D) ที่ความลึก 0.387 μm(Xj1) 55

รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสง และแรงดันที่ความเข้มแสง 8,000 lx ที่ขนาดพื้นที่รับแสงค่าต่างๆ 56

รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและแรงดันที่ขนาดพื้นที่รับแสง 1000*2000 μm^2 ที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ 57

รูปที่ 4.5 กราฟแสดงค่ากระแสแสงที่มีผลต่อแรงดันไบอัสย้อนกลับค่าต่างๆที่ความลึก 0.387 μm(Xj1) และพื้นที่รับแสง 0.80 μm^2(A) 57

รูปที่ 4.6 วงจรที่ใช้ทดลองวัดการตอบสนองสัญญาณ 58

รูปที่ 4.7 การตอบสนองทางแสงที่ขึ้นกับแรงดันไบแอส และใช้โหลดความต้านทาน 100 Ω ต่ออนุกรมเข้ากับชิ้นงาน 58

รูปที่ 4.8 การตอบสนองทางแสงที่ขึ้นกับโหลดความต้านทาน 100 Ω และ 10kΩ ที่แรงดันไบแอส 10V 59

รูปที่ 4.9 การตอบสนองทางแสงที่ขนาดพื้นที่ต่างกัน ที่โหลดความต้านทาน 100 Ω และ ที่แรงดันไบแอส 10V 59

รูปที่ 4.10 กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่มีผลต่อแรงดันไบอัสย้อนกลับ ที่ความลึก 0.387 μm และพื้นที่รับแสงขนาดต่างๆ 60

รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและแรงดัน ที่พื้นที่ i ค่าต่างๆ 60

รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและแรงดัน เปิด n+_region ที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ 61

รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและแรงดัน เปิด p+_region ที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ 61

รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน กับ UV-light ที่พื้นที่ i ค่าต่างๆ เปิด n+_region 62

รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความกว้างชั้น i กับ UV-light ที่แรงดันค่าต่างๆ 62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อ (junction photo diode) เป็นอุปกรณ์ตรวจจับแสงที่ใช้เทคโนโลยีซิลิคอน (Silicon Technology) ในการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่มีประสิทธิภาพสูง และมีกระบวนการสร้างที่ไม่ยุ่งยากจึงทำให้ตัวตรวจจับแสงได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีราคาถูก และมีประสิทธิภาพในการทำงานสูง

การพัฒนาตัวตรวจจับแสงให้สามารถทำงานได้เร็วขึ้น โดยใช้ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด p-i-n ซึ่งมีโครงสร้างแตกต่างจากซิลิคอนโฟโตไดโอดธรรมดาคือ มีส่วนของชั้นสารกึ่งตัวนำชนิดอินทรินซิค (inirinsic) ที่เป็นสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ นำมาใช้เป็นแผ่นผลึกฐานรองเริ่มต้น ที่ด้านบนของแผ่นผลึกฐานรองนี้จะมีส่วนของชั้นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n^+- type) และชนิดพี (p^+- type) โดยการแพร่อะตอมสารเจือของฟอสฟอรัส (Phosphorous) และโบรอน (Boron) ที่มีความเข้มข้นของสารเจือสูง ตามลำดับ ลักษณะโครงสร้างเช่นนี้เรียกว่า โครงสร้างแบบพลาน่าร์ (Planar) ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด p-i-n โครงสร้างแบบพลาน่าร์ สามารถควบคุมความหนาของชั้นอินทรินซิคได้ง่ายกว่าซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด p-i-n โครงสร้างแบบแนวตั้ง (Vertical) เนื่องจากโครงสร้างแบบแนวตั้งนี้ต้องแพร่สารเจือทั้งสองด้าน ต้องใช้เวลาในการแพร่สารเจือนานจนกระทั่งได้ขนาดของชั้นอินทรินซิคตามความเหมาะสม จากการที่มีชั้นอินทรินซิคทำให้ค่าความจุไฟฟ้าที่รอยต่อมีค่าน้อย จึงสามารถทำงานได้รวดเร็วขึ้นหรือมีผลตอบสนองทางด้านเวลาที่รวดเร็วถึงระดับพิโกวินาที ในปัจจุบันโฟโตไดโอดชนิด p-i-n สามารถใช้งานได้ที่ความถี่สูงถึง 1 กิกะเฮิรตซ์ (1 GHz) ด้วยเหตุนี้จึงมีการนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์รับแสงเพื่อตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของแสง , ใช้ในการสื่อสารด้วยเส้นใยแสง , ใช้ในระบบการสื่อสารด้วยแสงเลเซอร์ และใช้เป็นตัวรับแสงของรีโมทคอนโทรล เป็นต้น

ในรายงานนี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับค่าพารามิเตอร์ต่างๆได้แก่ ขนาดของพื้นที่รับแสง (Active Area) ความลึกของส่วนพื้นที่รับแสง (Depth) และค่าความเข้มแสง โดยการนำไปใช้ในการออกแบบและการสร้าง เพื่อที่จะนำผลการทดลองมาศึกษาเกี่ยวกับผลตอบสนองต่อสัญญาณแสง , ค่ากระแสแสง และค่ากระแสมืด เพื่อให้เกิดการพัฒนาซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด p-i-n โครงสร้างแบบพลาน่าร์ ให้มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงที่มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น และยังใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาอุปกรณ์ทางแสงชนิดต่างๆต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเป็นมาของการทำโครงงาน

เมื่อพิจารณาเกี่ยวกับการพัฒนาทางเทคโนโลยี จะพบว่าเหตุผลที่สำคัญได้แก่ ความต้องการของมนุษย์ที่มีอย่างไม่หยุดยั้ง ไม่ว่าจะเป็นเหตุผลทางด้านการแข่งขันทางการตลาด หรือเหตุผลในการพัฒนาเพื่อการศึกษาและวิจัย จึงได้พัฒนาโฟโตไดโอดชนิด p-i-n ขึ้นเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการทำงานที่สูงขึ้น และมีต้นทุนในการผลิตที่ต่ำลง ข้อได้เปรียบของอุปกรณ์ชนิดนี้คือ มีความเร็วในการทำงานสูง จากการศึกษาทฤษฎีสารกึ่งตัวนำที่ผ่านมาได้นำมาใช้เป็นแนวทางในกระบวนการสร้างโฟโตไดโอดชนิด p-i-n ที่มีโครงสร้างแบบพลานาร์ (Planar) นี้ขึ้น

วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1. เพื่อศึกษาและเรียนรู้ลักษณะโครงสร้าง และคุณสมบัติต่างๆของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด p-i-n
2. เพื่อศึกษาและเรียนรู้ถึงหน้าที่การทำงานของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด p-i-n
3. เพื่อศึกษาและเรียนรู้การออกแบบโฟโตมาส์ค และกระบวนการสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด p-i-n ที่มีโครงสร้างแบบพลานาร์ (Planar)
4. เพื่อศึกษาและฝึกทักษะ ในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ สำหรับกระบวนการสร้างและการวัดคุณสมบัติต่างๆของตัวอุปกรณ์
5. สามารถที่จะนำความรู้ไปใช้ในการพัฒนาอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำได้

แผนการดำเนินงาน

1. ทำการสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด p-i-n โครงสร้างแบบพลานาร์

ทำการสร้างโฟโตไดโอดชนิด p-i-n โดยใช้ซิลิคอน และออกแบบให้มีโครงสร้างเป็นแบบพลานาร์ (planar) โดยการเปลี่ยนขนาดของส่วน P^+ และระยะเวลาในการแพร่ส่วน P^+ เพื่อศึกษาลักษณะสมบัติในการทำงาน แล้วนำชิ้นงานไปวัดทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า เพื่อที่จะศึกษาผลของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

2. ทำการสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด p-i-n โครงสร้างแบบพลานาร์ (ต่อ)

โดยการออกแบบมาส์คที่เปลี่ยนขนาดพื้นที่ของส่วน Intrinsic และเปิดส่วนพื้นที่รับแสงทั้งส่วน P^+ และ N^+ ตามลำดับ เพื่อศึกษาค่าของกระแสแสง ,กระแสมืด และคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงที่มีการเปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
แสงและอุปกรณ์รับแสง

2.1 คุณสมบัติพื้นฐานของแสง

แสงเดินทางเป็นเส้นตรงจากแหล่งกำเนิดโดยไม่ต้องอาศัยตัวกลาง เมื่อเดินทางผ่านตัวกลางที่มีความหนาแน่นต่างกันก็จะเกิดการหักเห ถ้าแสงเดินทางกระทบวัตถุผิวเรียบเป็นมัน จะเกิดการสะท้อน ซึ่งเป็นคุณสมบัติเฉพาะของแสง และแสงมีคุณสมบัติเป็นทั้ง "คลื่น" (wave) และ "อนุภาค" (particle) ปรากฏการณ์ที่เราพบเห็นในชีวิตประจำวัน เช่น การสะท้อนแสง (reflection) การแทรกสอดแสง (interference) แสดงว่าแสงมีคุณสมบัติเป็นคลื่น ส่วนปรากฏที่แสดงให้เห็นหรืออธิบายได้ว่าแสงเป็นอนุภาคได้แก่การส่องของแสงเข้าสู่ผิวโลหะแล้วทำให้อิเล็กตรอนกระเด็นหลุดออกสู่สุญญากาศ ซึ่งเรียกว่า ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (external photoelectric effect) หรือการเพิ่มขึ้นของค่าสภาพนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำเมื่อถูกแสงหรือการเปล่งแสงของไดโอดเปล่งแสง เป็นต้น

2.1.1 การเป็นคลื่นของแสง

แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง ถ้าให้ λ คือความยาวคลื่นแสง ν คือความถี่ และ C_o คือ ความเร็วของแสงที่เดินทางในสุญญากาศ ($C_o = 2.99792458 \times 10^8$ m/s) จะมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.1)

$$\lambda = C_o/\nu \qquad (2.1)$$

แสงที่ตามนุษย์เรามองเห็นเรียกว่า (visible light) ซึ่งมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงประมาณ 400 – 700 nm แสงมองเห็นนี้ในสเปกตรัมแสงมีการแบ่งเป็นสีต่างๆ ได้แก่สีม่วง คราม น้ำเงิน เขียว เหลือง ส้ม และ แดง ในจำนวนสีต่างๆ เหล่านี้สีที่ตามนุษย์มีความไว (sensitivity) มากที่สุดคือแสงสีเขียว สเปกตรัมแสงมีการแบ่งเป็นสีต่างๆดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ความยาวคลื่นที่ตามนุษย์มองเห็น (Visible Light)

สี	ความยาวคลื่น (nm)
ม่วง	380-450
น้ำเงิน	450-500
เขียว	500-570
เหลือง	570-590
แสด	590-610
แดง	610-760

2.1.2 การสะท้อนของแสง

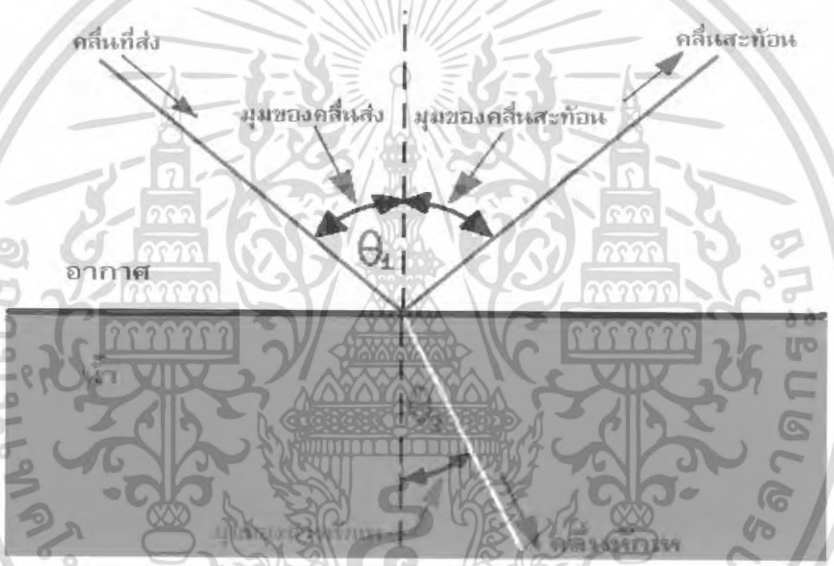
แสงเมื่อเดินทางกระทบวัตถุผิวเรียบเป็นมัน จะเกิดการสะท้อน โดยมีมุมตกกระทบ (มุมที่แสงตกกระทบทำมุมกับเส้นที่ลากตั้งฉากกับแนวระนาบ) เท่ากับมุมสะท้อน ถ้าแหล่งกำเนิดแสงอยู่ตรงกับจุดศูนย์กลางความโค้งของวัตถุผิวเรียบเป็นมัน จะเกิดการสะท้อนที่ผิววัตถุนั้น และกลับไปยังจุดศูนย์กลางความโค้ง แต่ถ้าแสงขนานจากภายนอก มากระทบกับผิววัตถุโค้งผิวเรียบเป็นมัน จะสะท้อน ไปรวมที่จุดจุดหนึ่ง ที่อยู่กึ่งกลางระหว่างผิววัตถุ กับจุดศูนย์กลางความโค้งจุดจุดนี้เรียกว่า จุดโฟกัส ในทางกลับกัน ถ้าให้แหล่งกำเนิดแสงอยู่ที่จุดโฟกัสของวัตถุโค้งผิวเรียบเป็นมัน ก็จะเกิดการสะท้อนเป็นลำแสงขนานออกไป ซึ่งหลักการนี้ นำมาใช้ทำตัวสะท้อนคลื่น(reflector)

รูปที่ 2.1 การสะท้อนของคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 การหักเหของแสง

เมื่อแสงเดินทางกระทบตัวกลางโปร่งแสง บางส่วนจะสะท้อน และบางส่วนจะเดินทางผ่านตัวกลางนั้น ถ้าตัวกลางใหม่นั้นมีความหนาแน่นต่างไปจากตัวกลางเดิมจะเกิดปรากฏการณ์ ที่เรียกว่า การหักเหของแสง (refraction) ตัวอย่าง เช่น เมื่อแสงเดินทางจากอากาศ ซึ่งมีความหนาแน่นน้อยกว่าไปยังน้ำ ซึ่งมีความหนาแน่นมากกว่า ความเร็วของแสงในตัวกลางอากาศ ซึ่งโปร่งกว่าจะมีความเร็วสูงกว่าในน้ำ ซึ่งทึบกว่า หรือหนาแน่นกว่า และทิศทางจะเบนเข้าหาเส้นปกติ ในทางกลับกัน ถ้าแสงเดินทาง จากตัวกลางที่ทึบกว่าไปยังตัวกลางที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า จะเกิดการหักเหออกจากเส้น

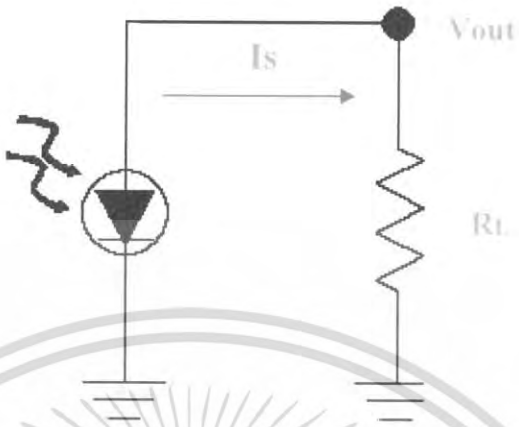


รูปที่ 2.2 การหักเหของคลื่น

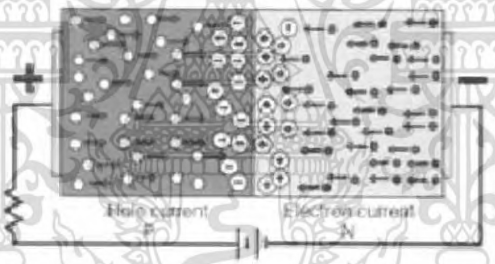
2.2 โฟโตไดโอด (Photo Diode)

โฟโตไดโอด เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่ง ที่มีความไวต่อแสงมาก โฟตอนจากแสงอินฟาเรดที่ส่งมามีผลทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระหลุดออกมาจากบอนด์ สารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่ง (สาร P) แล้ววิ่งทะลุผ่านรอยเชื่อม (Junction) ไปยังสารกึ่งตัวนำอีกชนิดหนึ่ง (สาร N) ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระและโฮล โดยปกติแล้วรอยเชื่อมหรือรอยต่อของโฟโตไดโอด นี้ จะมีขนาดใหญ่กว่ารอยต่อของสาร P-N ทั่วไปและเมื่อให้แรงดันไฟฟ้าจะเกิดสนามไฟฟ้าในแห่งสารนั้นเป็นผลทำให้ประจุอิเล็กตรอนและโฮล เคลื่อนที่ โฟโตไดโอดจึงมีหลักการทำงานโดยอาศัยแสงในการเพิ่มพลังงานให้กับอิเล็กตรอนในเนื้อสารกึ่งตัวนำ

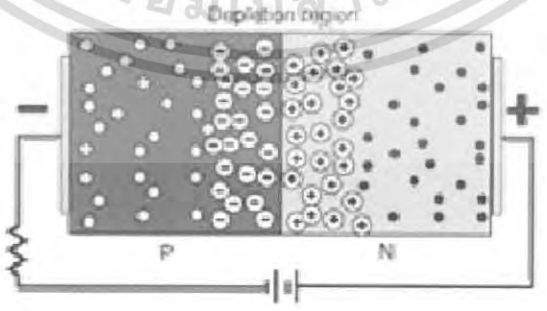
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 วงจรโฟโตไดโอดเบื้องต้น



รูปที่ 2.4 ภาพแสดงการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน–โฮลเมื่อทำการจ่าย Forward bias



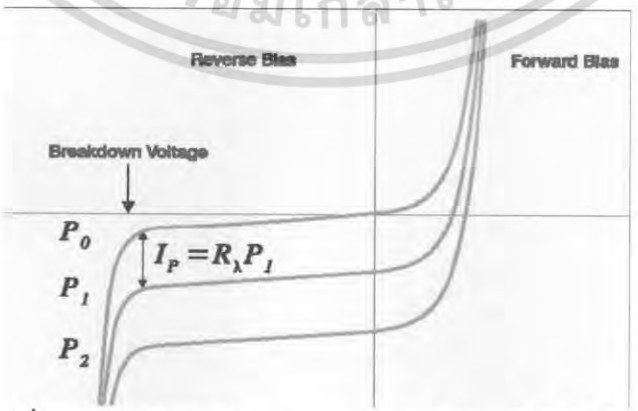
รูปที่ 2.5 ภาพแสดงการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน–โฮลเมื่อทำการจ่าย Reversed bias

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรโฟโตไดโอดเบื้องต้นต่อเป็นวงจรความต้านทานโหลดและแหล่งจ่ายไฟดังรูป2.3 โดยปกติไดโอดจะถูกไบแอสตรงแต่ในขณะที่ไบแอสตรงนี้ จำนวนอิเล็กตรอนและโฮลที่ในเนื้อสารมีจำนวนไม่มากนัก ดังนั้นกระแสที่ไหลในวงจรจึงเป็นส่วนน้อย ครั้นเมื่อส่วนของสารกึ่งตัวนำมีแสงส่องถูก จะทำให้เนื้อสารเกิดอิเล็กตรอนอิสระและโฮลเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก จำนวนอิเล็กตรอนอิสระที่เกิดขึ้นจะแปรตรงกับความเข้มของแสงแต่เมื่อเพิ่มความเข้มของแสงจนถึงค่าหนึ่งจะไม่มีการเพิ่มของอิเล็กตรอนอิสระอีกแล้วในช่วงนี้เราจะเรียกว่า ช่วงอิ่มตัว (saturation region) ในขณะที่ไม่มีแสงตกกระทบจำนวนกระแสที่ไหลผ่านตัวไดโอดนี้เรียกว่า กระแสมืด (dark current)

รูปที่ 2.6 ภาพการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากชั้นวาเลนส์ไปยังชั้นคอนดักชั่น

โฟโตไดโอด เป็นไดโอดที่อาศัยแสงจากภายนอกผ่านเลนซ์ ซึ่งฝังตัวอยู่ระหว่างรอยต่อ p-n เพื่อกระตุ้นให้ไดโอดทำงาน การต่อโฟโตไดโอดเพื่อใช้งานจะเป็นแบบไบอัสกลับ ทั้งนี้เพราะไม่ต้องการให้โฟโตไดโอดทำงานในทันทีทันใด แต่ต้องการให้ไดโอดทำงานเฉพาะเมื่อมีปริมาณแสงสว่างมากพอตามที่กำหนดเสียก่อน กล่าวคือ เมื่อเลนซ์ของโฟโตไดโอดได้รับแสงสว่างจะเกิดกระแสรั่วไหล ปริมาณกระแสรั่วไหลนี้เพิ่มขึ้นตามความเข้มของแสง

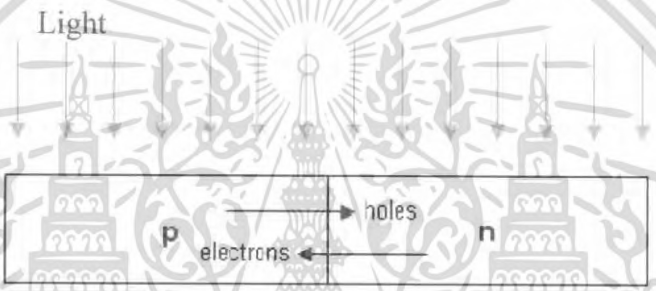


รูปที่ 2.7 กราฟแสดงค่ากระแส และแรงดันของโฟโตไดโอด

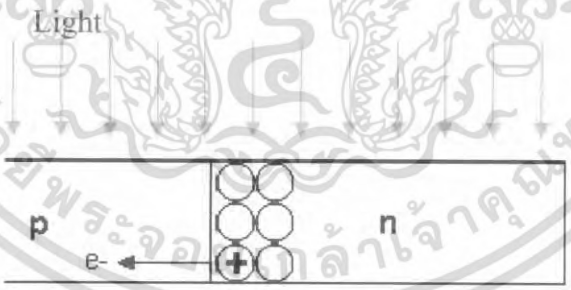
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 การทำงานของโฟโตไดโอด

โฟโตไดโอดเป็นอุปกรณ์ทางด้านเซมิคอนดัคเตอร์ ที่มีหน้าที่หลักๆ ในการเปลี่ยนสัญญานแสง เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า จากโครงสร้างพื้นฐานจะเห็นได้ว่า ตรงบริเวณรอยต่อ P-N จะเป็นบริเวณที่มีการเคลื่อนที่ของประจุอิเล็กตรอน และโฮลตามปกติ เหมือนไดโอดธรรมดาตัวหนึ่ง จึงเป็นบริเวณปลอดพาหะ แต่ตรงบริเวณนี้จะเป็นจุดที่ใช้สำหรับรับแสง เพื่อที่จะแปลงแสงอาทิตย์ มาเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยสารกึ่งตัวนำชนิด P จะเป็นตัวรับแสงเข้ามาทำให้เกิดกระบวนการที่เรียกว่าโฟโตโวลทาอิก (Photovoltaaic effect) คือกระบวนการที่มีหน้าที่ในการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้านั่นเอง

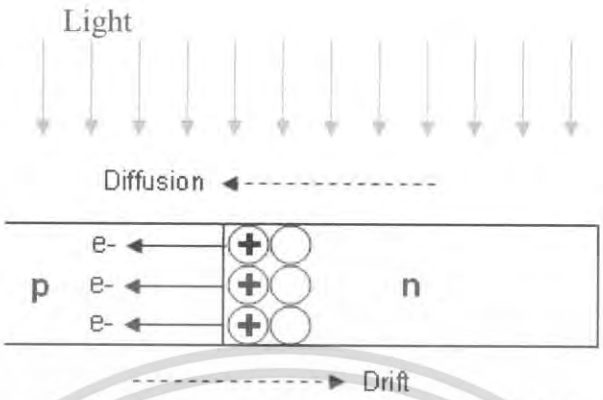


รูปที่ 2.8 แสดงการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน-โฮลช่วงต้นของการชนกันของสารP-N

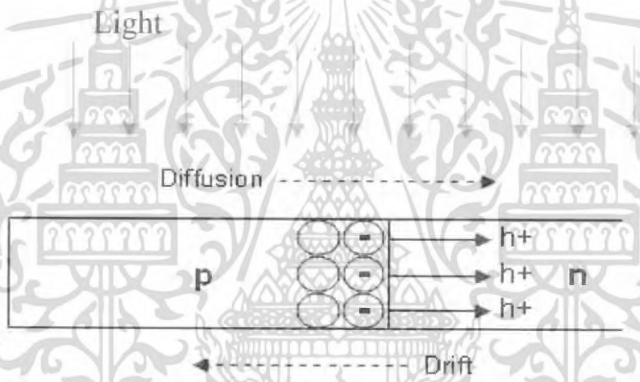


รูปที่ 2.9 แสดงการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากด้านเอ็นข้ามไปด้านพี แล้วทิ้งให้เกิดโฮลเอาไว้ที่จุดเดิมที่อิเล็กตรอนเคยอยู่ก่อนการชนกันของสาร P-N

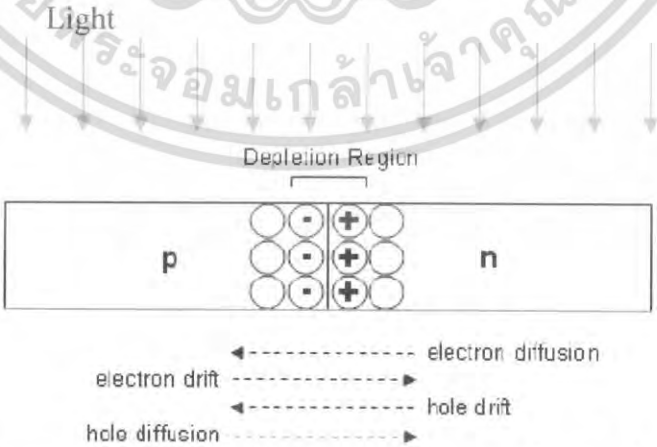
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 แสดงการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากด้านเอ็นข้ามไปด้านพี ที่มากขึ้น แล้วทิ้งให้เกิดโฮลเอาไว้ที่จุดเดิมที่อิเล็กตรอนเคยอยู่ก่อนการชนกันของสาร P-N

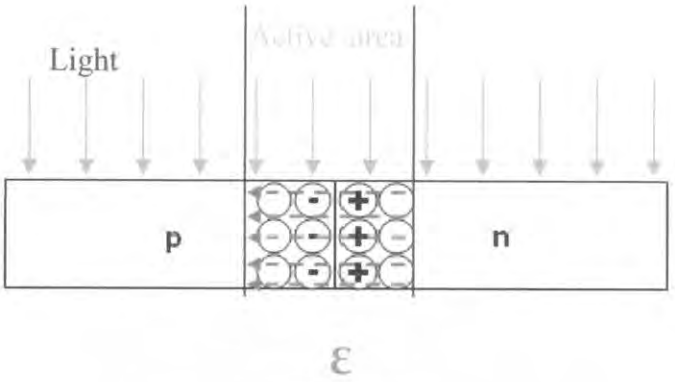


รูปที่ 2.11 แสดงการเคลื่อนที่ของโฮลจากด้านพีข้ามไปยังด้านเอ็น แล้วทิ้งให้เกิดอิเล็กตรอน เอาไว้ที่จุดเดิมที่โฮลเคยอยู่ก่อนการชนกันของสาร P-N

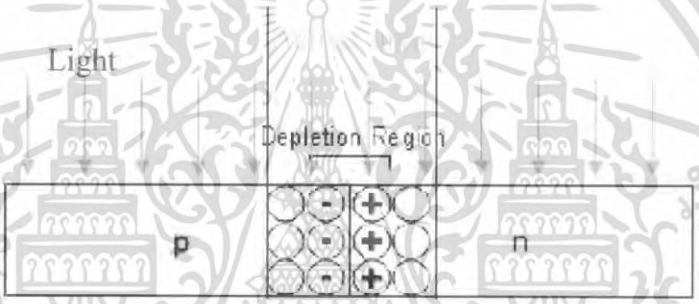


รูปที่ 2.12 แสดงการเคลื่อนที่ของโฮลและอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ ข้ามฝั่งไปมาจนเกิดบริเวณปลอดพาหะที่สมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



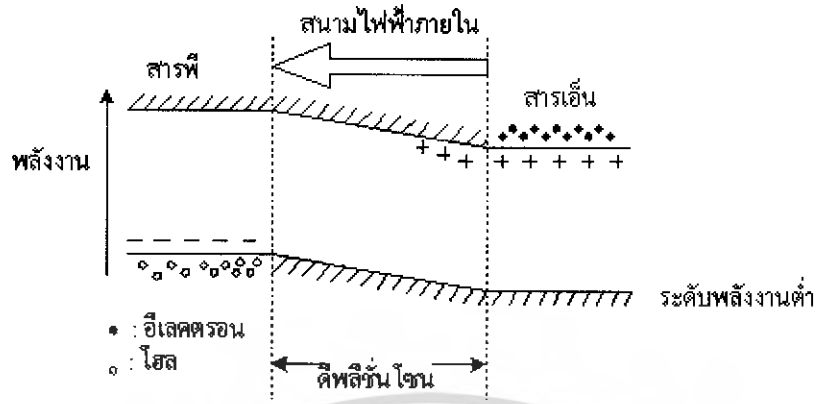
รูปที่ 2.13 แสดงการเกิดสนามไฟฟ้าบริเวณพื้นที่รับแสงเป็นบริเวณเดียวกับบริเวณปลอดพาหะ



รูปที่ 2.14 แสดงบริเวณพื้นที่รับแสงเป็นบริเวณเดียวกับบริเวณปลอดพาหะ

การรับแสงหมายถึงการเปลี่ยนแสงให้เป็นไฟฟ้า ในการทำงานนี้แบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ วิธีที่หนึ่งเป็นการเปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นไฟฟ้าโดยตรง วิธีที่สองทำได้โดยการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานความร้อนแล้วจึงเปลี่ยนเป็นไฟฟ้า วิธีที่หนึ่งนั้นเรียกว่า "โฟโตอิเลคทริคเอฟเฟค (Photo Electric Effect)" ส่วนวิธีที่สองเรียกว่า "เซนซิทีฟฮีทเอฟเฟค (Sensitive Heat Effect)" หลักการของโฟโตอิเลคทริคเอฟเฟคใช้ขบวนการดูดพลังงาน นั่นคือ เมื่อมีแสงมาตกกระทบสารกึ่งตัวนำอิเลคตรอนที่อยู่ในระดับพลังงานต่ำจะเลื่อนขึ้นไปอยู่ที่ระดับพลังงานสูงแต่การเลื่อนขึ้นไปนี้เป็นแต่เพียงอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปเท่านั้น และในที่สุดมันจะไปรวมกันใหม่กับโฮลในระดับพลังงานต่ำอีกทำให้ไม่ได้รับโฟโตอิเลคทริคเอฟเฟคเพื่อที่จะเปลี่ยนแสงให้เป็นไฟฟ้าจะต้องใช้สภาพการแยกกันของอิเล็กตรอนกับโฮลก่อนที่มันจะรวมกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 ดีพลีชั่นโซน

สำหรับอุปกรณ์รับแสงสารกึ่งตัวนำก็เช่นเดียวกันกับอุปกรณ์กำเนิดแสง นั่นคือเพื่อที่จะแยกอิเล็กตรอนกับโฮลนั้นโดยทั่วไปใช้รอยต่อพีเอ็น ที่รอยต่อของพีกับเอ็นนั้นจะเกิดสนามไฟฟ้าในที่ว่างขึ้น แต่มันจะถูกดึงด้วยอิเล็กตรอนของสารเอ็นและโฮลของสารพี ซึ่งมีประจุไฟฟ้าเป็นลบและบวกเป็นผลให้เกิดบริเวณที่ไม่มีอิเล็กตรอนและโฮลขึ้นตรงรอยต่อบริเวณนี้เรียกว่าดีพลีชั่นโซน (Depletion Zone) ดังแสดงในรูปที่ 2.15 ในสภาพอย่างนี้เมื่อมีแสงมากระทบจากทางด้านบริเวณสารพีแสงนั้นจะถูกดูด พร้อมทั้งเคลื่อนที่ไปทางบริเวณสารเอ็นแต่ที่ดีพลีชันโซนอิเล็กตรอน และโฮลที่เกิดจากการดูดพลังงานจากแสงจะถูกสเปคอีเลคทริคฟิลส์ (Space Electric Field) แยกไปในทิศทางตรงกันข้าม กล่าวคือ อิเล็กตรอนไปทางด้านเอ็นและโฮลไปทางด้านพี ที่บริเวณซึ่งอยู่ห่างจากดีพลีชั่นโซนนั้น เนื่องจากไม่มีสนามไฟฟ้าอิเล็กตรอน และโฮลที่เกิดจากโฟโตอิเล็กทริคเอฟเฟคจะรวมตัวกันใหม่ ในระหว่างเคลื่อนที่ แต่สำหรับอิเล็กตรอน และโฮลที่เคลื่อนที่เข้าไปในสเปคอิเล็กทริคฟิลส์แล้วนั้นจะสามารถเข้าไปยังบริเวณตรงกันข้ามได้ ผลที่ได้ก็คือ จะเกิดแรงดันไฟฟ้าที่เป็นสัดส่วนกับบริเวณของอิเล็กตรอนและโฮลที่ถูกแยกขึ้นระหว่างปลายทั้งสองของสารพีและ สารเอ็นถ้าหากนำวงโคจรภายนอกมาต่อกับปลายทั้งสองนี้จะทำให้อิเล็กตรอน และโฮลสามารถรวมตัวกันได้โดยผ่าน วงจรภายนอก นั่นคือมีกระแสไหลนั่นเองกระแสที่เกิดที่ดีพลีชั่นโซนเรียกว่า "Drift Current" ส่วนกระแสที่เกิดตรงบริเวณที่อยู่ห่างจากดีพลีชั่นโซนเรียกว่า "DiffusionCurrent"และกระแสนี้เป็นหลักของการเปลี่ยนแสงเป็นไฟฟ้า

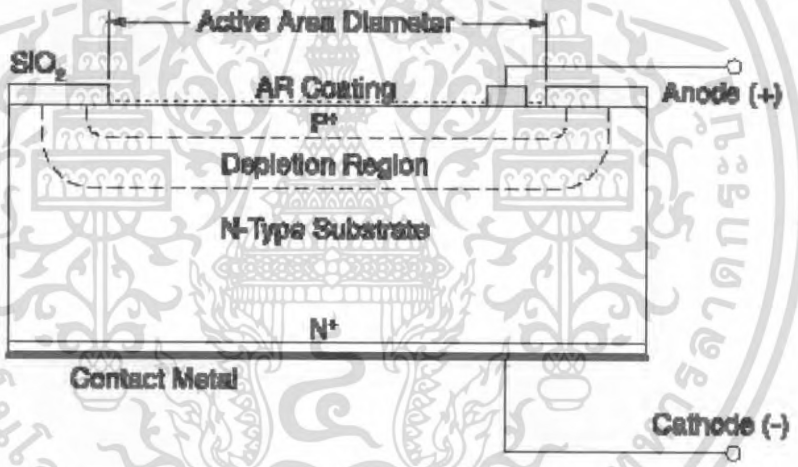
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 โครงสร้างของโฟโตไดโอดชนิดต่างๆ

โฟโตไดโอดเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่สามารถทำการเปลี่ยนสัญญาณแสง เป็นสัญญาณไฟฟ้าเมื่อมีแสงมาตกกระทบ ซึ่งในเทคโนโลยีในปัจจุบันได้มีการผลิตโฟโตไดโอดมาหลายชนิด เราสามารถจำแนกโฟโตไดโอดได้หลายรูปแบบตามโครงสร้างดังต่อไปนี้

1. โฟโตไดโอดชนิดพลานาร์ดิฟฟิวชั่น (Planar Diffusion type)

เป็นโฟโตไดโอดที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นรอยต่อ P-N และมีฉนวน SiO_2 เคลือบทับมีข้อดีตรงที่มีกระแสรั่วน้อย มีค่าของความจุบริเวณรอยต่อมีค่าน้อย จึงเป็นผลทำให้สามารถทำงานได้อย่างรวดเร็ว และตอบสนองต่อแสงความยาวคลื่นสั้นได้ดี



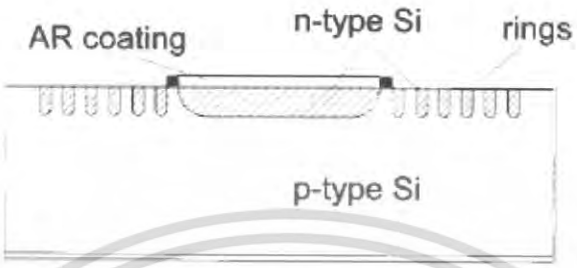
รูปที่ 2.16 โฟโตไดโอดแบบพลานาร์ที่สร้างจากซิลิกอน

2. อะวะลานช์โฟโตไดโอด (Avalanche photodiode)

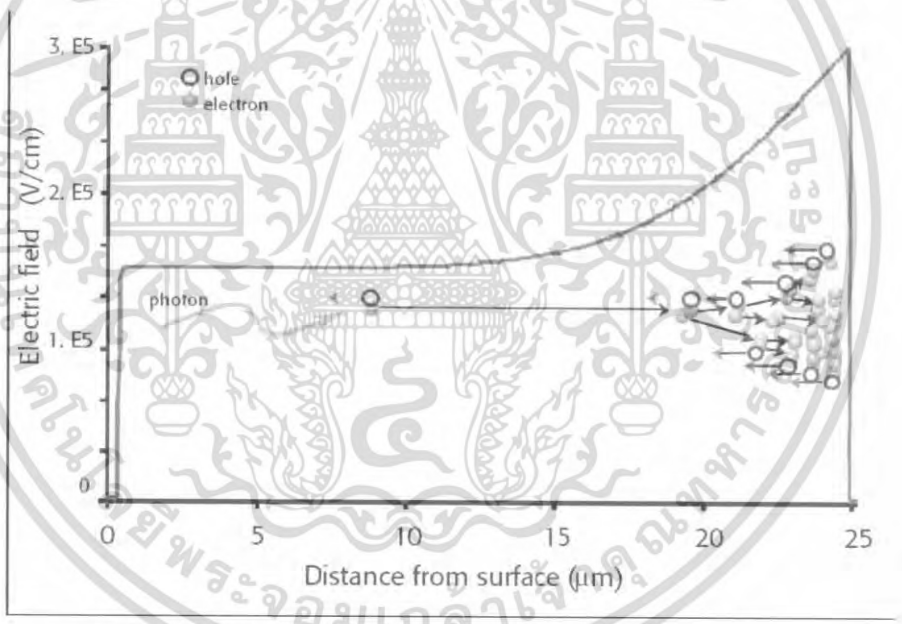
อะวะลานช์โฟโตไดโอด เป็นอุปกรณ์สำหรับตรวจจับแสงที่มีความเข้มต่ำ จึงสามารถนำมาใช้ตรวจจับโฟตอนเดี่ยวได้ โดยจะทำการต่อความต่างศักย์ไบแอสกลับให้สูงกว่าความต่างศักย์พังทลาย หรือเรียกว่าการนับโฟตอนในไกเกอร์โหมด (Geiger mode) ตอนมาตกกระทบ APD จะทำให้เกิดคู่ของอิเล็กตรอนและโฮล จากนั้นอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปชนอิเล็กตรอนตัวอื่น ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล แบบทวีคูณ (ดังรูป) จึงทำให้ APD สามารถนำกระแสได้ หลังจาก APD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำกระแสแล้วจะคายประจุจนทำให้ APD กลับมาเปิดวงจรเช่นเดิมซึ่งเวลาในการคายประจุจะมีค่าประมาณ 1 ไมโครวินาที



รูปที่ 2.17 อะวะลานช์โฟโตไดโอด โครงสร้างพลานาร์ ทำจากซิลิกอน



รูปที่ 2.18 ภาพกระบวนการทวีคูณของจำนวนอิเล็กตรอน

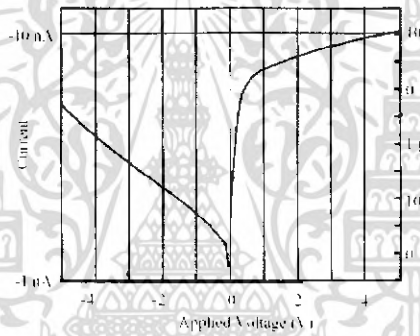
การใช้งาน APD ในการนับโฟตอนนั้นนอกจากสัญญาณที่ได้จากโฟตอนที่ต้องการแล้วยังมี สัญญาณจากสัญญาณรบกวนขณะมืด (Dark count) ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าผ่านรอยต่อ PN ขณะที่ยังไม่มีการตรวจจับโฟตอน มีสาเหตุมาจากการถูกกระตุ้นด้วยความร้อน และการปล่อยพาหะไฟฟ้าที่ถูกจับไว้ในหลุมดักพาหะซึ่งในกรณีหลังเป็นสาเหตุให้เกิดพัลส์ค้าง (After pulse) นอกจากสาเหตุการเกิดสัญญาณรบกวนขณะมืดด้วยลักษณะสมบัติของตัว APD เองแล้ว ยังมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณรบกวนอันเนื่องมาจากสิ่งแวดล้อมอีกด้วย ทั้งสองกรณีเป็นสาเหตุทำให้สัญญาณที่ได้มากกว่าค่าจริงเมื่อใช้ในการนับโฟตอน วิธีแก้ไขให้สัญญาณรบกวนน้อยลงเช่น ออกแบบให้ APD อยู่ในกล่องมืด, เลือกค่าความต่างศักย์ไบแอสกลับให้เหมาะสม และลดอุณหภูมิของ APD

3. โฟโตไดโอดชนิดรอยต่อแบบชอตต์กี (Schottky Photodiode)

เป็นโฟโตไดโอดรอยต่อชอตต์กีแบเรียร์ ใช้วิธีเคลือบโลหะที่บางมาก ๆ ลงบนผิวของสารกึ่งตัวนำจบเป็นผลทำให้มีรอยต่อชอตต์กีแบเรียร์ เช่น การผลิตที่ทำการเคลือบทองคำ ลงบน GaAsP ชนิดเอ็น เนื่องจากโลหะที่เคลือบนั้นบางมาก ดังนั้นจึงเป็นผลทำให้โฟโตไดโอดชนิดนี้ มีการตอบสนองต่อแสงตั้งแต่ย่านที่มองไม่เห็น จนถึงย่านอัลตราไวโอเลทได้ดี



รูปที่ 2.19 ภาพกระแสและแรงดันขณะจ่าย Reversed และ Forward bias

4. โฟโตไดโอดชนิดรอยต่อ p-i-n หรือเรียกว่าพินโฟโตไดโอด

เป็นโฟโตไดโอดอีกชนิดหนึ่งที่ใช้รอยต่อพี และเอ็น แต่จะพิเศษตรงที่ บริเวณรอยต่อระหว่างพีกับเอ็นมีการใส่สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (intrinsic) ทำให้โฟโตไดโอดชนิดนี้มีการทำงานที่รวดเร็วเป็นพิเศษ เพราะชั้น intrinsic เป็นชั้นที่มีความจุของเนื้อสารน้อยมาก เวลาใช้งานจะทำการจ่ายไบอัสย้อนกลับ เป็นผลทำให้กระแสรั่วมีค่าน้อย เราจะกล่าวเพิ่มเติมอย่างละเอียดในหัวข้อต่อไป

2.2.3 คุณสมบัติที่โดดเด่นของโฟโตไดโอดชนิดต่างๆ

จากการที่เทคโนโลยีปัจจุบันได้มีการพัฒนาอย่างยิ่งยวด เป็นผลทำให้โฟโตไดโอดมีโครงสร้างที่แต่กต่างกันไป เราพอที่จะสรุปคุณสมบัติของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำเหล่านี้ได้ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. มีสัญญาณรบกวนต่ำ (Low noise)
2. สัญญาณทางเอาท์พุตเปลี่ยนแปลงตามความเข้มของแสงที่เข้ามาทางอินพุตแบบเป็นเชิงเส้นได้ดี (excellent linearity)
3. ตอบสนองต่อแสงในช่วงความยาวคลื่นกว้าง (wide spectral response)
4. ขนาดกระทัดรัด เล็กลงกว่าการผลิตยุคเก่ามาก รวมทั้งมีน้ำหนักของตัวอุปกรณ์ที่เบา (Compact and light weight)
5. มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน

2.2.4 คุณสมบัติในการเลือกอุปกรณ์รับแสงมาใช้งาน

ในการที่เราจะทำการเลือกอุปกรณ์รับแสงมาใช้งานในกรณีต่างๆจะต้องพิจารณาคุณสมบัติต่างๆเพื่อให้ได้คุณประโยชน์ที่สมบูรณ์และมีความคุ้มค่ากับสิ่งที่เราทำการลงทุนไปควรจะมีหลักการพิจารณาดังต่อไปนี้

1. มีความไวสูงในช่วงความยาวคลื่นที่ใช้งาน อุปกรณ์รับแสงในยุคแรกจะตอบสนองการใช้งานกับความยาวคลื่นแสงช่วงวินโดว์ที่ 1 แต่ในปัจจุบันระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสงนิยมใช้งานในช่วงวินโดว์ที่ 2 และช่วงวินโดว์ที่ 3 ดังนั้นอุปกรณ์รับแสงจะต้องสร้างให้สามารถตอบสนองต่อความยาวคลื่นดังกล่าวได้ดีโดยการเลือกใช้สารที่เหมาะสม

2. ความสามารถสร้างสัญญาณไฟฟ้าจากสัญญาณแสงได้มาก ความสามารถในการสร้างสัญญาณไฟฟ้าจากสัญญาณแสงจะขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพทาง ควอนตัมของสารที่ใช้สร้าง โดยทั่วไปประสิทธิภาพทางควอนตัมจะถูกกำหนดโดยสัมประสิทธิ์ การดูดกลืน (Absorption Coefficient ; a0) ของสารนั้น ค่า a0 นี้จะขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นคือสารแต่ละชนิดจะมีค่าa0ที่ความยาวคลื่นต่างๆไม่เท่ากัน

3. มีความไวสูงในการตอบสนองต่อสัญญาณอินพุต เพื่อให้เหมาะสมกับแบนด์วิดท์ เนื่องจากในปัจจุบันแบนด์วิดท์ในการส่งสัญญาณโดยใช้เส้นใยนำแสงจะมีค่าตั้งแต่ หลายร้อยเมกะเฮิรตซ์ ดังนั้นอุปกรณ์รับแสงจะต้องมีความไวในการตอบสนองต่อสัญญาณอินพุตสูงเพื่อให้สามารถทำงานได้ทันกับสัญญาณอินพุตที่ได้รับ

4. สัญญาณรบกวนต่ออุปกรณ์แสงจะต้องมีค่าต่ำ สัญญาณรบกวนที่สำคัญ ได้แก่ สัญญาณรบกวนควอนตัม (Quantum Noise หรือ Shot Noise) เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงกระแสโฟโต โดยการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเกิดจากแสงที่มาตกกระทบในบางช่วงเป็นแสงที่ไม่มีเฟสเดียวกัน หรือมีหลายความยาวคลื่น ทำให้อีเลคตรอนได้รับพลังงานไม่เท่ากันจึงทำให้จำนวนอีเลคตรอนที่เกิดขึ้นแตกต่างกัน ดังนั้นปริมาณกระแสโฟโต จึงเกิดการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย สัญญาณรบกวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ควอนตัมนี้จะแปรผันโดยตรงกับแรงดันไฟฟ้า ที่ไบอัสกลับ

5.มีขนาดเล็ก เพื่อให้สามารถนำอุปกรณ์ดังกล่าวมาใช้งานได้สะดวก และเชื่อมต่อกับเส้นใยนำแสงซึ่งมีขนาดเล็กได้ง่าย

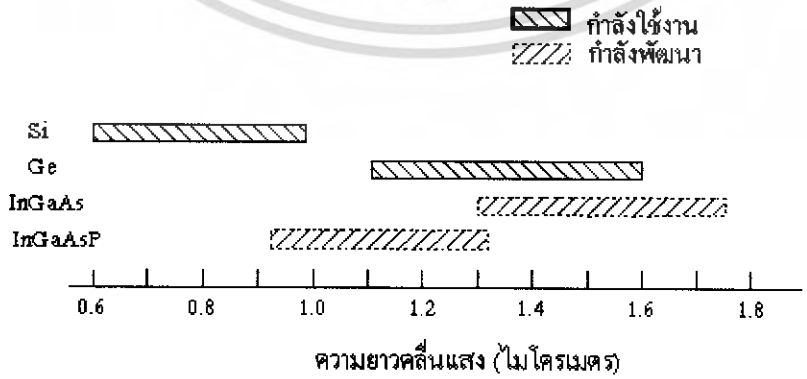
6.ใช้แรงดันไบอัสต่ำ เพื่อประหยัดพลังงานไฟฟ้า

7.มีความเชื่อถือได้สูง อุปกรณ์รับแสงจะต้องสามารถทำงานได้อย่างถูกต้อง และต่อเนื่องเป็นเวลาหลายปี

8.มีราคาต่ำ เนื่องจากในการออกแบบระบบ ปัจจัยทางด้านการเงินมักจะเป็นสิ่งสำคัญที่ใช้ในการออกแบบด้วย

2.3 สารและโครงสร้างของอุปกรณ์รับแสง

สารที่ใช้สร้างอุปกรณ์รับแสง สำหรับอุปกรณ์รับแสงก็เช่นเดียวกับอุปกรณ์กำเนิดแสงนั้นมีสารหลายชนิด นอกจากนั้นผลต่างของพลังงานของระดับพลังงานสูง และระดับพลังงานต่ำของอุปกรณ์รับแสงมีค่าแตกต่างกันทำให้มีย่านความยาวคลื่นต่างกันที่ดูดสัญญาณที่เข้ามาได้ง่าย (ความไวในการรับแสง) คุณสมบัติความไวในการรับแสงของสารแต่ละชนิดดังรูป ในการออกแบบระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสงนั้นจะต้องเลือกอุปกรณ์รับแสงที่เหมาะสมกับความยาวคลื่นที่ใช้เช่นเดียวกันกับอุปกรณ์กำเนิดแสง สำหรับย่านความยาวคลื่นที่ต่ำกว่า 1 ไมโครเมตร จะใช้สารซิลิกอน สำหรับย่านความยาวคลื่น 1 @ 1.7 ไมโครเมตร ใช้เจอรมันเนียมเป็นส่วนใหญ่ นอกจากนั้นในปัจจุบันสำหรับความยาวคลื่นในช่วง 1.55 ไมโครเมตร เป็นความยาวคลื่นมีการสูญเสียในเส้นใยนำแสงน้อยมาก และเป็นความยาวคลื่นที่อยู่ในวินโดว์ที่สาม (Third Window) การใช้งานอุปกรณ์รับแสงชนิดใหม่ที่ทำจากสารที่เป็นสารประกอบของ สารกึ่งตัวนำอินเดียมแกลเลียมอาเซไนส์และอื่นๆ ซึ่งมีความไวในการรับแสงดีมากนั้น กำลังได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ



รูปที่ 2.20 ความยาวคลื่นในการรับแสงของอุปกรณ์รับแสงแต่ละชนิด

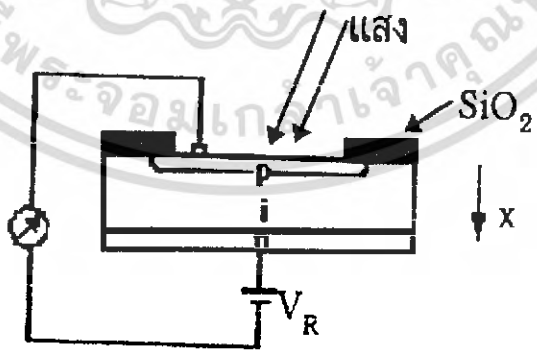
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง โพระจอมเกล้าลาดกระบัง

2.4 โฟโตไดโอดชนิดโครงสร้าง p-i-n

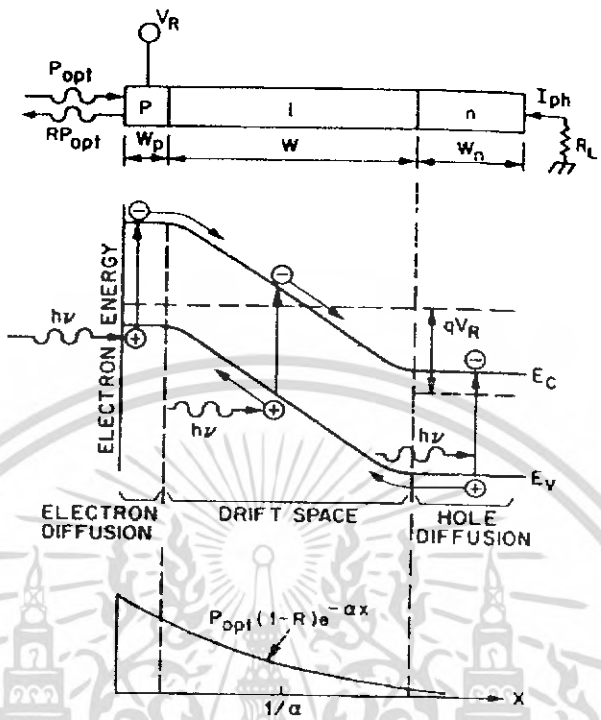
โฟโตไดโอดชนิดโครงสร้าง p-i-n พินโฟโตไดโอด (PIN-Photo Diode) หมายถึงว่าในระหว่างสารกึ่งตัวนำชนิดพี (P - Type) และชนิดเอ็น (N - Type) มีสารกึ่งตัวนำที่เรียกว่าอินทรินซิค (Intrinsic : I) สารกึ่งตัวนำชนิดบริสุทธิ์คั่นอยู่ ตามที่ได้กล่าวมาแล้วว่าดริฟเดอร์เรนส์ (Drift Current) นั้นเกิดขึ้นในดีพลีชั่นโซน และผลของสนามไฟฟ้าทำให้มีการดอบสนองเร็ว แต่ในทางตรงกันข้าม ดริฟเดอร์เรนส์ที่เกิดขึ้นภายนอกดีพลีชั่นโซนนั้นมีการตอบสนองช้า ดังนั้นถ้าความกว้างของ ดีพลีชั่นโซนยิ่งกว้างมากเท่าใดประสิทธิภาพทางควอนตัม (Quantum Efficiency) และความเร็วในการตอบสนองความถี่ยิ่งดีขึ้น ความกว้างของดีพลีชั่นโซนนี้มีความหนาแน่นของอิเล็กตรอน และ โฮลของสารพีและสารเอ็นยิ่งต่ำจะยิ่งกว้าง ดังนั้นสารกึ่งตัวนำชนิดอินทรินซิค i ที่คั่นกลางระหว่างสารกึ่งตัวนำชนิดพี กับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น จึงมีหน้าที่เพื่อทำให้ความกว้างของดีพลีชั่นโซนกว้างขึ้นนั่นเอง เนื่องจากโฟโตไดโอดที่ใช้ในระบบการสื่อสารนั้นโดยทั่วไปต้องการความเร็วในการตอบสนองสูง ดังนั้นส่วนใหญ่จะใช้พินโฟโตไดโอด และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ดิสก์ ในอุปกรณ์รีโมทคอนโทรลด้วยแสง เป็นต้น การทำความเข้าใจเกี่ยวกับโฟโตไดโอดชนิด p-i-n นี้จะเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาและทำความเข้าใจหลักการทำงานของระบบการสื่อสารด้วยแสง

2.4.1 โครงสร้างและหลักการทำงานของโฟโตไดโอดชนิด p-i-n



รูปที่ 2.21 โครงสร้างพื้นฐานของโฟโตไดโอดชนิด p-i-n

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
62369



รูปที่ 2.22 โครงสร้าง แถบพลังงาน และการลดของกำลังแสงอินพุตตามความลึก ของโฟโตไดโอดชนิด p-i-n

หลักการทำงานพื้นฐานของโฟโตไดโอดชนิด p-i-n คล้ายกับกรณีของโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อ pn แตกต่างกันที่โฟโตไดโอดชนิด p-i-n จะมีชั้น i อยู่ซึ่งเป็นชั้นปลอดพาหะ (depletion layer) โดยสามารถสร้างชั้น i จากวัสดุต่างๆ และให้มีความหนาต่างๆได้ตามต้องการ ซึ่งในกรณีของโฟโตไดโอดนั้น ความหนาของชั้นปลอดพาหะจะถูกกำหนดด้วยปริมาณและวิธีการโดปสารเจือปนของรอยต่อ พี-เอ็น สมการต่างๆที่ใช้สำหรับอธิบายการทำงานของโฟโตไดโอดชนิด p-i-n สามารถเลียนแบบได้จากกรณีของโฟโตไดโอดชนิด pn

เมื่อฉายแสงเข้าสู่พินโฟโตไดโอดทางด้านชั้นพี จะทำให้เกิดคู่พาหะอิเล็กตรอนและโฮลอิสระขึ้นในชั้นต่างๆ ทั้งในชั้นพี ชั้นอินทรินซิค และชั้นเอ็น พาหะที่เกิดขึ้นจากแสงจะเปลี่ยนเป็นกระแสไฟฟ้าที่เอาต์พุตได้ด้วยกลไก 2 ชนิดได้แก่

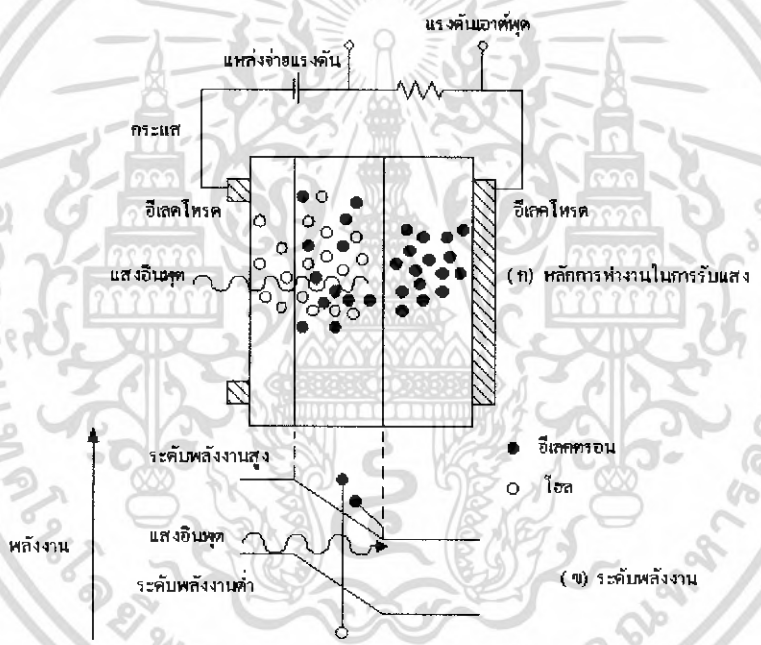
1) ถ้าพาหะอิสระเหล่านี้สามารถไหลออกสู่วงจรภายนอกได้ ก็จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหล พาหะอิสระที่เกิดในชั้นอินทรินซิค จะมีบทบาทในการกลายเป็นกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตได้มากที่สุด โดยพาหะจากชั้นอินทรินซิค จะถูกพัดพาให้ไหลออกสู่วงจรภายนอกด้วยปรากฏการณ์พัดพา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยศักย์ไฟฟ้าภายใน (built-in potential) โดยอิเล็กตรอนจะไหลออกทางชั้นเอ็น และโฮลจะไหลออกทางชั้นพี กระแสไฟฟ้าที่ได้ในลักษณะนี้เรียกว่า "กระแสไฟฟ้าพัดพา" J_{dr} (drift current)

2) โฮลที่เกิดในชั้นเอ็นนั้น ถ้ามีระยะทางการแพร่ซึม (diffusion length) ที่ไกลเพียงพอ ก็จะแพร่ซึมจากชั้นเอ็น ผ่านเข้าสู่ชั้นอินทรินซิค และไหลไปสู่ชั้นพีได้ และกลายเป็น "กระแสไฟฟ้าแพร่ซึม" J_{diff} (diffusion current) ในทำนองเดียวกันอิเล็กตรอนที่เกิดในชั้นพี ถ้ามีระยะทางการแพร่ซึมที่ไกลเพียงพอ ก็จะแพร่ซึมจากชั้นพี เข้าสู่ชั้นอินทรินซิค และชั้นเอ็นได้ และจะกลายเป็นกระแสไฟฟ้าแพร่ซึมด้วย

ดังนั้นกระแสไฟฟ้ารวม J_{total} ที่เกิดขึ้นในพินโฟโตไดโอดจึงเป็นผลรวมของกระแสไฟฟ้าพัดพา และกระแสไฟฟ้าแพร่ซึม



รูปที่ 2.23 หลักการทำงานการรับแสง และระดับพลังงานของพินโฟโตไดโอด

2.5 พินโฟโตไดโอดชนิดสารวัสดุต่าง ๆ

2.5.1 พินโฟโตไดโอดชนิดธาตุเดี่ยว และชนิดสารประกอบไบนารี

สารกึ่งตัวนำชนิดธาตุเดี่ยว และชนิดสารประกอบไบนารีที่นิยมใช้ผลิตเป็นโฟโตไดโอด ได้แก่สารจำพวก Si GaSb Ge และ InAs ซึ่งในแต่ละธาตุจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไป ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

GaAs เป็นวัสดุที่มีราคาแพง และสเปคตรัมผลตอบสนองก็สามารถครอบคลุมได้ด้วยวัสดุเหล่านี้ จึงไม่ค่อยนำมาผลิตเป็น p-i-n โฟโตไดโอด

Si เป็นวัสดุที่มีราคาที่ถูกที่สุด และเหมาะกับแสงที่มีความยาวคลื่นสั้น ตัวอย่างที่มีการใช้ทำเป็นตัววัดแสงในระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยแก้วนำแสงที่มีความยาวคลื่นย่าน 0.85 ไมโครเมตร

Ge สามารถใช้วัดแสงที่มีความยาวคลื่นถึงย่านประมาณ 1.5 ไมโครเมตร

GaSb สามารถใช้วัดแสงที่มีความยาวคลื่นที่มากกว่าสาร Ge เล็กน้อย

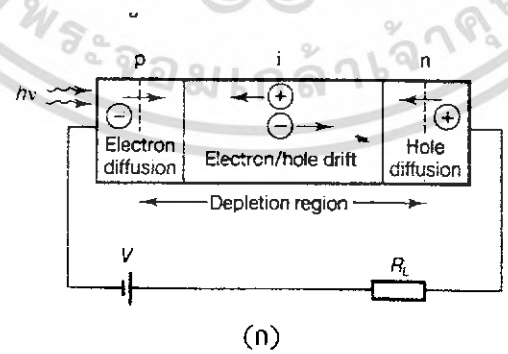
InAs เป็นสารอีกหนึ่งชนิดที่สามารถวัดความยาวคลื่นได้หลายไมครอน

การที่วัสดุเหล่านี้สามารถทำการวัดความยาวคลื่นได้ แต่มีข้อเสียอยู่ตรงที่ว่า สารจำพวก Si ,GaSb, Ge และInAs เป็นสารที่มีช่องว่างของแถบพลังงานที่ค่อนข้างแคบจึงเป็นผลทำให้มีปัญหาที่ว่ามีกระแสไฟฟ้ามืดเกิดขึ้นมา (Dark - Current) ค่อนข้างมากในวงจร กระแสมืดเหล่านี้เกิดจากการที่มีกระแสไฟฟ้าชนิด Generation and Recombination ชนิดทัลเนลลิง

ในกรณีที่เราทำการออกแบบเพื่อที่จะให้แสงเข้าทางด้านข้าง มีแนวคิดเพื่อที่จะไม่ให้เกิดการดูดแสงที่ชั้นพี ก่อนที่แสงจะเข้าถึงชั้นอินทรินซิค และที่ทางด้านหลังจะมีการเคลือบวัสดุที่สามารถสะท้อนแสง แต่โครงสร้างที่ได้กล่าวมานี้เราต้องใช้แรงดันไบอัสค่อนข้างสูงมาก เพราะเราทำการปลูกชั้นอินทรินซิคให้มีความหนาค่อนข้างมาก

2.6 ลักษณะสมบัติต่างๆของโฟโตไดโอดชนิด p-i-n

2.6.1 วงจรสมมูลของโฟโตไดโอดชนิด p-i-n และความเร็วในการตอบสนอง

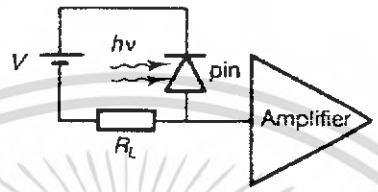


(n)

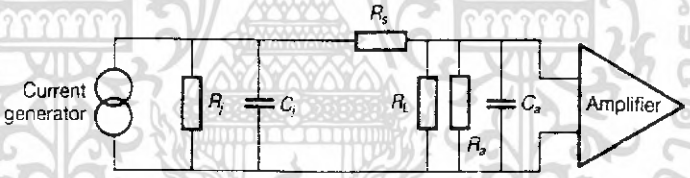
รูปที่ 2.24 หลักการทำงานของโฟโตไดโอดชนิด p-i-n

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.24 แสดงปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในโฟโตไดโอดชนิด p-i-n แสงเดินทางเข้าทางด้านชั้นพี ซึ่งมีความบางมาก ดังนั้นโฟโตอิเล็กตรอนและโฟโตโฮลส่วนใหญ่จึงถูกผลิตในชั้นปลอดพาหะ (ชั้น i) และพาหะโฟโตบางส่วนถูกผลิตในชั้นพี และชั้นเอ็น ในขอบเขตระยะทางแพร่ซึม พาหะโฟโตเหล่านี้จะถูกแยกออกจากกันด้วยสนามไฟฟ้าที่ไบแอสแบบย้อนกลับและกลายเป็นกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต



รูปที่ 2.25 ตัวอย่างการใช้งานโฟโตไดโอดชนิด p-i-n



รูปที่ 2.26 วงจรสมมูลของการใช้งานโฟโตไดโอดชนิด p-i-n

จากรูปที่ 2.25 แสดงตัวอย่างวงจรภายนอกสำหรับใช้งานโฟโตไดโอดชนิด p-i-n อย่างง่าย และรูปที่ 2.26 เป็นวงจรสมมูลของวงจรในรูปที่ 2.25 โฟโตไดโอดชนิด p-i-n เปรียบเสมือนแหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้า โดยมีความต้านทานของรอยต่อแบบชันต์ R_j (มีค่ามาก) และความจุไฟฟ้าแบบชันต์ C_j และความต้านทานของรอยต่อแบบอนุกรม R_s (มีค่าน้อย) ต่ออยู่ ในการพิจารณาแบบง่ายๆ เราสามารถไม่คำนึงถึงค่า R_j และ R_s

ความเร็วในการตอบสนองของโฟโตไดโอดชนิด p-i-n ได้แก่ เวลาที่นับจากตอนได้รับแสงจนเกิดกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตออกมา โดยหลักการของปรากฏการณ์ทางแสงแล้ว การดูดกลืนแสงและการเกิดคู่พาหะจะใช้เวลาสั้นมาก ดังนั้นการล่าช้าของเวลากว่าจะได้กระแสไฟฟ้าเอาต์พุตออกมาจึงขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ตัวอื่นๆมากกว่า โดยที่ตัวแปรสำคัญที่มีอิทธิพลต่อความเร็วในการตอบสนองของโฟโตไดโอดชนิด p-i-n

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้แก่ค่า (1) เวลาพัดพา T_{dr} (drift time) ที่พาหะใช้ในการวิ่งผ่านชั้นปลอดพาหะ

(2) เวลาแพร่ซึม T_{diff} (diffusion time) ที่พาหะใช้ในการแพร่ซึมเข้าสู่ชั้นปลอดพาหะ

(3) ค่าคงที่เวลา T_{CR} (CR time constant) ของวงจรภายนอก

(1) เวลาพัดพา

พาหะในชั้นปลอดพาหะ (ชั้น i) วิ่งได้ด้วยแรงจากสนามไฟฟ้า E และเรียกความเร็วในการวิ่งเช่นนี้ว่า ความเร็วพัดพา v_d (drift velocity) โดยที่ $v_d = \mu E$ และ μ คือความคล่องตัวของพาหะ ถ้าชั้น i หนาเท่ากับ w และแรงดันไฟฟ้าไบแอสย้อนกลับเท่ากับ V_R จะได้ว่า $E = V_R/w$ ดังนั้นเวลาพัดพาที่พาหะใช้ในการวิ่งผ่านชั้น i คือ

$$T_{dr} = w / v_d = w^2 / \mu V_R \qquad (2.2)$$

เนื่องจากความคล่องตัวของพาหะในสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างพลังงานแบบตรง มีค่ามากกว่าในสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างพลังงานแบบไม่ตรง ดังนั้นเวลาพัดพาของพาหะในสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างพลังงานแบบตรงจึงมีค่าน้อยกว่าของสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างพลังงานแบบไม่ตรง

(2) เวลาแพร่ซึม

ในบริเวณที่ไม่ได้เป็นชั้นปลอดพาหะเช่นชั้น p หรือ n จะไม่มีสนามไฟฟ้า ดังนั้น T_{diff} จึงถูกกำหนดด้วยเวลาอายุของพาหะนั่นเอง ในทางปฏิบัติจะออกแบบให้ชั้น p และ n บางมาก จึงทำให้การดูดกลืนแสงในชั้น p และ n มีน้อยมาก ดังนั้น J_{diff} จึงมีค่าน้อยกว่า J_{dr} มาก นั่นคือการออกแบบให้ J_{diff} มีค่าน้อยจะช่วยทำให้โฟโตไดโอดทำงานได้เร็วขึ้น

(3) ค่าคงที่เวลาของ CR

ค่าคงที่เวลาของ CR เกิดจากเวลาที่ต้องใช้ในการดิสชาร์จประจุไฟฟ้าผ่านความจุไฟฟ้าของรอยต่อ และมีค่าเท่ากับผลคูณของ $R_L \times C_T$ โดยที่ R_L คือความต้านทานของโหลดและ C_T คือความจุไฟฟ้าของรอยต่อ p-i-n (และรวมของขาต่อต่างๆด้วย) โดยรวมความต้านทานอนุกรมด้วย แต่ถ้าออกแบบดีๆ และทำการไบแอสย้อนกลับ จะทำให้ $R_S << R_L$

มีนิยามคือ เวลาที่ใช้ในการดิสชาร์จประจุจากค่า 90% ของค่าสูงสุดลงเหลือ 10% ดังนั้นค่าคงที่เวลา จึงเขียนได้ดังนี้

$$T_{CR} = 2.2 R_L C_T \qquad (2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 วงจรการใช้งานพื้นฐานสำหรับโฟโตไดโอดชนิด p-i-n

วิธีการใช้งานโฟโตไดโอดชนิด p-i-n โดยพื้นฐานได้แก่ การป้อนแรงดันไบแอสย้อนกลับ ซึ่งจะทำให้ค่าความจุไฟฟ้าของชั้น i ลดลงและจะได้ผลตอบสนองต่อเวลาที่รวดเร็ว จากรูปที่ 2.27 และ 2.28 แสดงตัวอย่างโฟโตไดโอดชนิดp-i-n โดยใช้ซิลิคอน

การต่อพินโฟโตไดโอดกับโหลดความต้านทาน จะได้เอาต์พุตในรูปของแรงดัน และการต่อพินโฟโตไดโอดเข้ากับออปแอมป์นั้น ความเร็วของผลตอบสนองจะถูกควบคุมด้วยคุณสมบัติของออปแอมป์ซึ่งใช้งานในย่านตั้งแต่ความถี่ต่ำๆ จนถึงระดับ MHz

ถ้าต้องการความเร็วสูงควรต่อกับโหลดความต้านทาน อาจใช้สายไฟฟ้าแบบโคแอกเชียล ซึ่งมีค่าความต้านทานเท่ากับ 75 โอห์ม หรือ 50 โอห์ม เป็นโหลดไปในตัวก็ได้ และต่อเอาต์พุตเข้ากับออสซิลโลสโคปความเร็วสูง ถ้าต้องมีแอมป์ขยายแรงดันต่อถัดจาก R_L ควรออกแบบให้ R_L มีค่าสูงๆ และใช้แอมป์พลิฟายเออร์ ที่มีอัตราการขยายต่ำๆ

รูปที่ 2.27 ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด p-i-n

รูปที่ 2.28 Photoconductive Detectors

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
กระบวนการออกแบบและการสร้างโฟโตไดโอดชนิด P-I-N

3.1 การสร้างโฟโตไดโอดชนิด p-i-n

ปัจจุบันโฟโตไดโอดชนิด p-i-n ได้รับการพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเป็นผลมาจากความก้าวหน้าทางเทคโนโลยี ที่ต้องการความรวดเร็วในการทำงานสูง ประสิทธิภาพในการใช้งานที่ดีและมีราคาถูก เราจึงนำซิลิคอนมาเป็นวัตถุดิบในการสร้างโฟโตไดโอดชนิด p-i-n

โฟโตไดโอดเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ที่ใช้สำหรับเป็นอุปกรณ์รับแสง เมื่อถูกแสงจะทำให้เกิดกระแสไหล หรือเปลี่ยนแปลงขนาดของกระแสที่ไหล ซึ่งจะใช้เป็นตัวตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของแสง หรือโฟโตเซนเซอร์ (Photo Sensor)

สำหรับการทดลองครั้งนี้เริ่มต้นจากการเตรียมแผ่นซิลิคอนที่มีระนาบ (111) และมีสภาพต้านทาน 2,000 โอห์ม-เซนติเมตร

3.2 การเตรียมแผ่นผลึก

เมื่อได้แท่งผลึกรูปเดี่ยวเรียกว่า อินกอต (ingot) แล้วนำแท่งผลึกรูปเดี่ยวไปตัดเป็นแผ่นผลึกบางๆ (crystal wafer) โดยใช้ใบเลื่อยชนิดพิเศษ (inside diameter) ซึ่งมีลักษณะเป็นวงแหวน และมีคมอยู่ในวงชั้นในโดยที่ใบเลื่อยจะถูกฉาบไว้ด้วยผงเพชร (diamond powder) ในการตัดผลึกจะต้องให้ถูกระนาบหรือแนวผลึกซึ่งจะกล่าวต่อไป เพื่อให้มีความคมพอที่จะตัดเนื้อซิลิคอนซึ่งแข็งมากได้ เมื่อตัดเสร็จแล้วจะปรากฏรอยคมของเลื่อยขึ้นที่ผิวทั้งสองด้านของแผ่นผลึก ซึ่งรอยนี้จะถูกกำจัดให้หมดไปโดยใช้ปฏิกิริยาทางเคมี (HNO_3 + HF + CH_3COOH) แล้วจึงนำแผ่นผลึกที่ได้นี้ไปทำความสะอาดและขัด (Lapping) ด้วยผงขัด

ในการขัด (Lapping) ผิวหน้าของแผ่นผลึก ผงขัดที่ใช้ได้แก่ ผงเพชร ผงโบรอนไนไตรด์ ผงซิลิคอนคาร์ไบด์ และผงอะลูมินา เป็นต้น สำหรับผงขัดที่ใช้ในห้องปฏิบัติการของศูนย์วิจัยมี 2 ชนิด คือ

1. **ผงซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) เป็นผงที่ใช้ขัดเพื่อให้ผิวหน้าของแผ่นผลึกเรียบ** ซึ่งพบโดย Edward G. Acheson ในปี 1897 ผงขัดชนิดนี้เกิดจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างทราย (SiO_2) กับคาร์บอน (C) ที่อุณหภูมิสูงกว่า 2000 °C ถ้าอุณหภูมิต่ำกว่านี้อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะช้า และได้ผงขัดที่มีคุณภาพไม่ดีไม่สามารถนำมาใช้ในการขัดได้ ปฏิกิริยาดังกล่าวมีสมการเคมีดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$SiO_2 + 3C \xrightarrow{T > 2000^{O}C} SiC + 2CO$$

ในระหว่างที่ทรายและถ่าน (C) ซึ่งเป็นตัวนำไฟฟ้าเกิดปฏิกิริยากันในเตาไฟฟ้า ที่มีอุณหภูมิจะใส่ขี้เลื่อยเข้าไปเพื่อให้ส่วนผสมเกิดรูขึ้น และก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) ที่เกิดขึ้นสามารถผ่านออกไปได้

ต่อจากนั้นนำผงขัด SiC ที่ได้ซึ่งยังคงมีขนาดใหญ่ไปบดด้วยเครื่องบด และนำไปร่อนด้วยตะแกรงตาข่ายที่มีขนาดช่องว่างแตกต่างกัน จะได้ผงขัด SiC ที่มีขนาดแตกต่างกันคือ หยาบปานกลาง

สำหรับผงขัด SiC (ผงซิลิคอนคาร์ไบด์) ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการจะมี 4 เกรดด้วยกันคือ

1. เกรด 0000 ผงขัดเกรดนี้จะหยาบ คือมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 28 μ
2. เกรด 1000 เม็ดผงขัดจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 16 μ
3. เกรด 2000 เป็นผงขัดที่ค่อนข้างละเอียด คือมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 7 μ
4. เกรด 4000 เป็นผงขัด SiC ที่มีความละเอียดมากที่สุด คือมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเพียง 3 μ

2. **ผงอะลูมินา (Alumina)** ซึ่งก็คือ Aluminium Oxide (Al_2O_3) เป็นผงขัดที่ใช้ขัดผิวผลึกที่เรียบ แล้วให้เป็นมันวาวคล้ายกระจกเงา พบในปี ค.ศ. 1899 โดย Charles B. Jacobs โดยการนำเอาแร่ Bauxite ซึ่งเป็นแร่อะลูมิเนียมส่วนใหญ่ประกอบด้วย Aluminium Oxide (Al_2O_3) มาหลอมละลายในเตาไฟฟ้า ซึ่งมีคาร์บอนเป็นขั้วอิเลคโทรด 2 ขั้ว อยู่ในทิศตรงกันข้าม กระแสจากอิเลคโทรดขั้วหนึ่งจะไปยังอีกขั้วหนึ่งและมีอุณหภูมิ 3700 องศาฟาเรนไฮต์ แร่ Bauxite นี้จะละลายและจะได้ Alumina ซึ่งมีขนาดใหญ่และประกอบด้วย Al_2O_3 ถึง 93-94%

ต่อจากนั้นดำเนินขั้นตอนเพื่อให้ได้ผงขัดที่มีขนาดเล็กเช่นเดียวกับ SiC จะได้ผงขัด Alumina ที่มีขนาดต่าง ๆ กัน ผง Alumina ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการมีอยู่ด้วยกัน 2 ชนิดคือ ผงขัดที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.3 และ 0.05 μ

3.2.1 กระบวนการ Lapping ผิวหน้าแผ่นผลึกซิลิคอน

นำแผ่นผลึกซิลิคอนที่มาติดกับแท่น (die) ด้วยขี้ผึ้ง (Electronic-grade Wax) ซึ่งมีความบริสุทธิ์สูงจนแผ่นผลึกติดแน่นดีแล้ว ผสมผง SiC กับน้ำบริสุทธิ์บนแผ่นกระจกให้เข้ากัน แล้วนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผ่นซิลิคอนดังกล่าวมาขัดในทิศทางตามเข็มนาฬิกา ขัดจนได้ผิวหน้าแผ่นผลึกที่เรียบแล้วจึงนำแผ่นผลึกออกจาก die แล้วนำแผ่นผลึกไปทำความสะอาด ซึ่งจะกล่าวต่อไป

ในบางครั้งแผ่นผลึกซิลิคอนที่มีอยู่มีความหนามากเกินกว่าที่จะวางบน boat ได้ เราสามารถขัดแผ่นผลึกให้บางลงได้ โดยขัดที่ด้านบนของแผ่นผลึกด้วยผงขัด SiC

ถ้าใช้ผงขัดอะลูมินา วิธีการก็จะคล้ายกับการขัดด้วย SiC เพียงแต่นำแผ่นผลึกซิลิคอนไปขัดบนกระจกที่คลุมด้วยผ้าสักหลาด ส่วนขั้นตอนอื่นๆเหมือนกับการขัดด้วยผง SiC

3.2.2 คุณสมบัติของแผ่นผลึกที่ใช้สร้างโฟโตไดโอดชนิด p-i-n

การสร้างโฟโตไดโอด และอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำประเภทต่างๆ ต้องคำนึงถึงคุณสมบัติของแผ่นผลึก โดยพิจารณาจากพารามิเตอร์ดังนี้ จะต้องเป็นแผ่นผลึกรูปเดี่ยว ชนิดของสารเจือในแผ่นผลึก ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือ ความหนาของแผ่นผลึก และระนาบของแผ่นผลึก ในการวัดคุณสมบัติดังกล่าวมีรายละเอียดดังนี้

ระนาบของผลึก (Orientation)

ผลึกซิลิคอนที่มีระนาบ (100) และ (111) ถูกนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำมากที่สุด เนื่องจากมีความเหมาะสมหลายประการ ในการสร้างโฟโตไดโอด จะใช้แผ่นผลึกที่มีระนาบ (111) เป็นหลัก เพราะมีความหนาแน่นอะตอมที่ผิวสูงที่สุด ดังนั้นในการปลูกผลึกระนาบ (111) จะทำได้ง่ายกว่าระนาบอื่น และระนาบ (111) นี้จะมีปฏิกิริยาต่อสารเคมีที่ใช้ในการ etching น้อยที่สุด นอกจากนี้ระนาบ (111) ยังมีคุณสมบัติแมคคานิคส์ที่ดีคือ มีความทนแรงดึง (Tensile Strength) ของ SiO_2 ได้สูงถึง 0.35×10^{10} dyne/cm^2

ในขบวนการสร้างแบบพลานาร์ (Planar) แผ่นผลึกระนาบ (111) จะเกิดชั้น SiO_2 ได้เร็วกว่าระนาบ (100) เนื่องจากมีจำนวนอะตอมที่ผิวสูงกว่า คุณสมบัติทางไฟฟ้าคือ ค่าความคล่องตัวของพาหะ (mobility carrier) ของระนาบ (111) จะสูงกว่าระนาบ (100) และระนาบ(111) จะมีราคาที่ถูกกว่าอีกด้วย

การวัดค่าพิกัดความต้านทาน

เป็นการหาปริมาณอะตอมสารเจือที่เติมลงไปในซิลิคอน ประกอบด้วยจำนวนอะตอมสารเจือผู้ให้ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (N_D) หรือจำนวนอะตอมสารเจือผู้รับต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (N_A) กล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ เป็นจำนวนของพาหะอิสระ (Free Carrier) ได้แก่ อิเล็กตรอน (n) และโฮล (p) อิสระที่เกิดขึ้นหลังจากการเติมสารเจือแล้ว เราสามารถคำนวณหาค่าต่างๆได้ โดยการวัดค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความนำไฟฟ้า (conductivity) หรือค่าพิกัดความต้านทานไฟฟ้า (resistivity) ของสารกึ่งตัวนำนั้นๆ ได้ กล่าวคือ ค่าความนำไฟฟ้า (σ) และค่าพิกัดความต้านทานไฟฟ้า (ρ) มีสมการที่ (3.1)

$$\sigma = 1/\rho \tag{3.1}$$

ค่าความนำไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับจำนวนของอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ ประจุไฟฟ้าของพาหะแต่ละตัว และความสามารถในการเคลื่อนที่ของพาหะ เรียกว่า ความคล่องตัว (mobility) ดังสมการที่ (3.2)

$$\sigma = q\mu_n n + q\mu_p p \tag{3.2}$$

โดยที่ μ_n และ μ_p เป็นความคล่องตัวของอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ

n และ p คือจำนวนอิเล็กตรอนและโฮลในสารกึ่งตัวนำ

q คือประจุไฟฟ้าของพาหะ มีค่าเท่ากับ 1.6×10^{-19} คูลอมน์

สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n) และพี (p) จะคิดเฉพาะพาหะส่วนมากได้แก่ อิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ ส่วนพาหะส่วนน้อยนั้นถือว่ามีค่าน้อยมากจึงไม่นำมาคำนวณ

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าเราสามารถคำนวณหาค่าความนำไฟฟ้าได้ โดยวัดค่าพิกัดความต้านทานการไหลของกระแสไฟฟ้า และทำให้เกิดมีแรงดันตกคร่อมวัสดุนั้นๆ

ค่าพิกัดความต้านทานไฟฟ้า ρ ซึ่งมีหน่วยเป็น Ω-cm สามารถวัดได้โดยใช้เครื่องมือโฟร์พอยท์โพรบ (Four point probe) วัดค่าแผ่นความต้านทาน (Sheet resistance) ใช้สัญลักษณ์ R_S มีหน่วยเป็น $\Omega/\square$ (โอห์ม/สแควร์) ทำให้เราทราบค่าพิกัดความต้านทาน ρ ได้จากสมการที่ (3.3)

$$\rho = R_S \times \text{ความหนา} \tag{3.3}$$

เครื่องมือโฟร์พอยท์โพรบ (Four point probe) ประกอบด้วยเข็มโลหะ ซึ่งใช้เป็นขั้วไฟฟ้าทั้งสี่วางห่างจากกันเป็นระยะ S เท่าๆกัน เข็มทั้งสี่นี้จะถูกกดลงบนแผ่นผลึกซิลิคอน แล้วป้อนไบอัสทำให้เกิดกระแส I ไหลผ่านเข็มโลหะที่อยู่ริมนอกสุด คือเข็มที่ 1 และ 4 กระแสนี้จะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อม V ขึ้นที่ระหว่างขั้วของเข็มโลหะด้านใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาค่าพิกัดความต้านทานไฟฟ้า ด้วยวิธีการนี้จะต้องมีขนาดของแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำที่มีความกว้างและความยาวมากกว่าระยะระหว่างเข็ม (S) นั่นเอง

จากนั้นนำแผ่นซิลิคอนที่ได้ไปทำความสะอาดผิวหน้า เพื่อชำระล้างไขมันและกำจัดสิ่งแปลกปลอมที่ติดอยู่บนผิวผลึกออกให้หมด กระบวนการจะได้กล่าวในภายหลังอย่างละเอียด

3.3 การออกซิเดชั่น

ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นสารที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนลักษณะโปร่งแสง ใช้เป็น Field Oxide , ใช้เป็น MASK ในกระบวนการ Lithography , ใช้เป็น MASK ในกระบวนการ แพร่สารเจือโดยควบคุมการแพร่ของสารเจือให้เข้าไปในบริเวณที่ต้องการเท่านั้น และใช้เป็นสารเคลือบผิวหน้า เพื่อปกป้องผิวหน้าของ Si

Thermal Oxidation คือ การก่อตัวของ SiO_2 บนพื้นผิว Si โดยที่ Si อยู่ในบรรยากาศของ O_2 หรือ H_2O ที่อุณหภูมิสูงประกอบด้วย

1. การออกซิเดชั่นแบบแห้ง (Dry Oxidation)
2. การออกซิเดชั่นแบบไอน้ำอิ่มตัว (Wet Oxidation)

ระบบของการออกซิเดชั่นด้วยความร้อนมีอุปกรณ์ในระบบส่วนใหญ่โดยหลักคือ

1. Oxidation Furnace
2. Boat
3. Quartz Tube ซึ่งส่วนปลายจะต่อกับระบบก๊าซ
4. ตัววัดอุณหภูมิ Pt / Pt-Rh
5. ระบบควบคุมอุณหภูมิ ความดัน

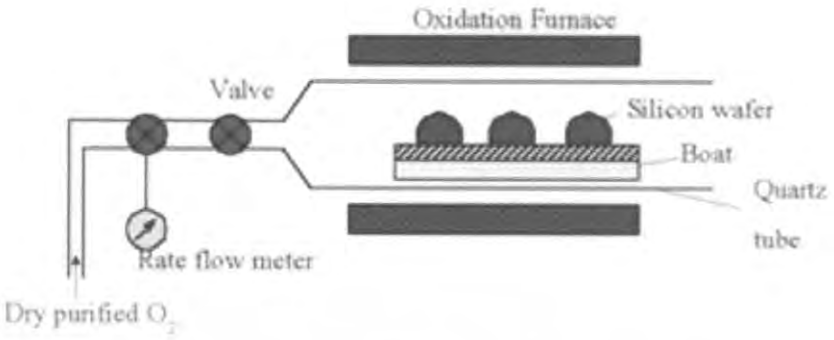
เตาสำหรับ Oxidation สามารถควบคุมอุณหภูมิได้อย่างแน่นอน (ผิดพลาด±0.5°C) เตาดังกล่าวนี้จะแบ่งออกเป็น 3 หรือ 4 ตอน แต่ละตอนสามารถควบคุมอุณหภูมิได้โดยไม่เกี่ยวข้องกัน

3.3.1 กระบวนการออกซิเดชั่นแบบแห้ง (Dry Oxidation Process)

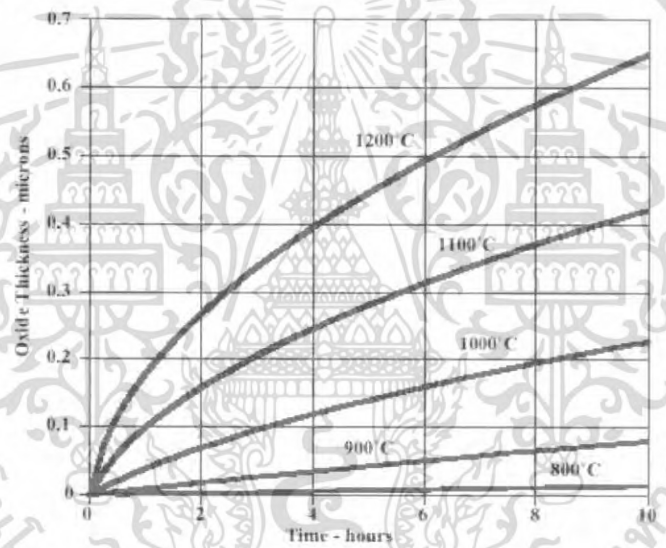
เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างอะตอมของผลึกซิลิคอน และอะตอมของก๊าซออกซิเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1100°C ทำให้อะตอมของซิลิคอนรวมตัวกับออกซิเจนเกิดเป็นสารประกอบชนิดใหม่คือ ซิลิคอนไดออกไซด์ ซึ่งมีสมการเคมีดังนี้

$$Si\ (\text{ของแข็ง}) + O_2\ (\text{บริสุทธิ์}) \longrightarrow SiO_2\ (\text{ของแข็ง})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 แผนภาพกระบวนการออกซิเดชั่นแบบแห้ง



รูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและเวลาการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่างๆ

จากกราฟดังกล่าวนี้ ทำให้เราสามารถควบคุมความหนาของชั้น SiO_2 ได้โดยการควบคุมอุณหภูมิภายในเตา และเวลาที่ใช้ในการออกซิเดชั่น นอกจากนี้แล้วปริมาณของก๊าซออกซิเจนจะต้องมีมากพอที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยากับซิลิคอน ลักษณะพื้นผิวของออกไซด์ที่ได้ค่อนข้างเรียบกว่าแบบ Wet Oxidation แต่ปฏิกิริยาการเกิดช้า และอัตราการเกิดต่ำกว่า

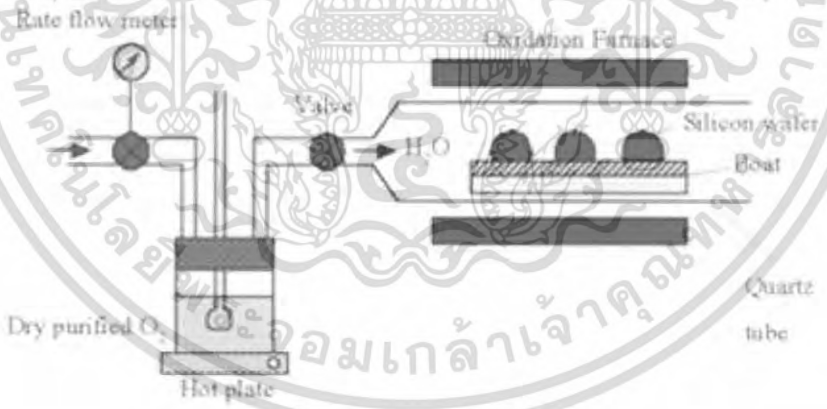
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 กระบวนการออกซิเดชั่นแบบไอน้ำอิ่มตัว (Wet Oxidation Process)

เป็นปฏิกิริยาระหว่างอะตอมของซิลิคอนกับอะตอมของออกซิเจนในไอน้ำ ซึ่งมีปฏิกิริยาทางเคมีแสดงได้โดยสมการ

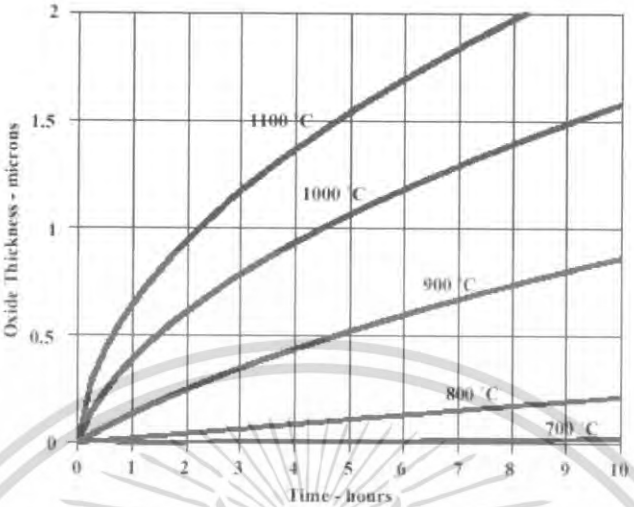
$$Si\ (\text{ของแข็ง}) + 2H_2O\ (\text{ไอน้ำ}) \longrightarrow SiO_2\ (\text{ของแข็ง}) + 2H_2$$

การออกซิเดชั่นแบบไอน้ำอิ่มตัวนี้ จะกล่าวเฉพาะเทคนิคที่ใช้ระบบไอน้ำคือ ระบบไอน้ำ (Steam System) เป็นวิธีการปล่อยก๊าซออกซิเจนที่บริสุทธิ์เข้าไปในขวดแก้ว (bubbler) ซึ่งบรรจุน้ำบริสุทธิ์ไว้ น้ำในขวดแก้วจะถูกทำให้ร้อนแต่มีค่าต่ำกว่าจุดเดือดราว 90-95°C ท่อก๊าซออกซิเจนจะถูกจุ่มลงในน้ำบริสุทธิ์ซึ่งร้อน ทำให้เกิดฟองอากาศผุดขึ้น ซึ่งฟองอากาศที่ผุดขึ้นมานี้ก็คือ ก๊าซออกซิเจนซึ่งอิ่มตัว (มีไอน้ำด้วย) และจะถูกทำให้ไหลผ่านเข้าไปในช่องควอทซ์ ระยะห่างระหว่างทางออกของก๊าซในขวดแก้วและท่อควอทซ์ของเตาออกซิเดชั่นที่ไม่ควรอยู่ไกลนัก เพราะอาจจะเกิดการกลั่นตัวของไอน้ำเป็นหยดน้ำได้ ซึ่งควรหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดกรณีเช่นนี้ได้



รูปที่ 3.3 แผนภาพกระบวนการออกซิเดชั่นแบบไอน้ำอิ่มตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและเวลาการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่างๆ

การเกิดปฏิกิริยาเช่นนี้เร็วกว่าแบบ **Dry Oxidation** ทั้งนี้เนื่องจากโมเลกุลของน้ำเล็กกว่าโมเลกุลของออกซิเจน จึงทำให้อะตอมของซิลิคอนเกิดปฏิกิริยากับไอน้ำได้เร็วกว่า แต่ข้อเสียของปฏิกิริยาแบบ Wet Oxidation คือคุณสมบัติในการเป็นฉนวนที่ไม่ดี จึงมีประสิทธิภาพในการต้านทานการแพร่ตัวของอะตอมสารเจือน้อยกว่า สภาพผิวผลึกที่ได้ไม่สมบูรณ์คือ เกิดการบิดเบือนของผลึก (Crystal dislocation) เกิดมีรูพรุนขึ้น ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากตัวไฮโดรเจนที่เหลือจากโมเลกุลของไอน้ำ

3.3.3 การวัดความหนาของชั้นออกไซด์

- **Optical Interference**

ใช้หลักการแทรกสอดที่เกิดระหว่างแสงที่สะท้อนจากผิวสัมผัสระหว่างอากาศกับซิลิคอนไดออกไซด์ กับผิวสัมผัสระหว่างซิลิคอนไดออกไซด์กับซิลิคอน สามารถวัดได้ที่ความหนาตั้งแต่ 100 อังสตรอม ขึ้นไป

- **Ellipsometry**

ใช้หลักการโพลาไรเซชั่นของแสงเมื่อแสงเกิดการสะท้อนกับตัวกลางและเกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะการโพลาไรซ์ ซึ่งจะสามารถวัดได้ที่ค่าความหนาน้อยกว่า 100 อังสตรอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- **Capacitance**

โดยการพิจารณาค่าพื้นที่ของเกท และ Permittivity เมื่อคำนวณแล้วจะได้ค่าความหนาของชั้นออกไซด์ ตามสมการที่ (3.4)

$$X_o = C_{ox}Ag / \varepsilon_{ox}\varepsilon_0 \qquad (3.4)$$

- **เทียบสี**

การเทียบสีจะกระทำโดยการสะท้อนฟิล์มกับแสงฟลูออเรสเซนต์โดยตรง สีสะท้อนที่สังเกตได้จะนำมาเทียบสีกับ Chart

ตารางที่ 3.1 แสดงสีของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีความหนาต่างๆ

ความหนา (°A)	สี
500	สีเขียวเหลือง
700	สีน้ำตาล
1000	สีม่วงเข้มถึงสีแดงม่วง
1200	สีฟ้า
1500	สีน้ำเงินอ่อนถึงสีเทาน้ำเงิน
1700	สีน้ำเงินถึงสีเหลือง
2000	สีทองถึงสีเหลือง
2200	สีทองค่อนข้างเหลืองแกมส้ม
2500	สีส้มถึงสีเขียวอ่อน
2700	สีแดงม่วง
3000	สีน้ำเงินถึงสีม่วงน้ำเงิน
3100	สีน้ำเงิน
3200	สีน้ำเงินถึงสีน้ำเงินเขียว
3400	สีเขียวอ่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนา (°A)	สี
3500	สีเขียวถึงสีเขียวเหลือง
3600	สีเหลืองเขียว
3700	สีเขียวเหลือง
3900	สีเหลือง
4100	สีส้มอ่อน
4200	สีชมพูอ่อน
4400	สีม่วงแดง
4600	สีแดงม่วง
4700	สีม่วง
4800	สีน้ำเงินม่วง
4900	สีน้ำเงิน
5000	สีน้ำเงินเขียว
5200	สีเขียว
5400	สีเหลืองเขียว
5600	สีเขียวเหลือง
5700	สีเหลืองถึงสีเทาอ่อน
5800	สีส้มหรือสีเหลืองถึงสีชมพู
6000	สีชมพู
6300	สีม่วงแดง
6800	สีเขียวถึงสีเขียวเหลือง
7200	สีเหลืองเขียว
7700	สีเขียวเหลือง
8000	สีเหลือง
8200	สีส้มอ่อน
8500	สีชมพูอ่อน

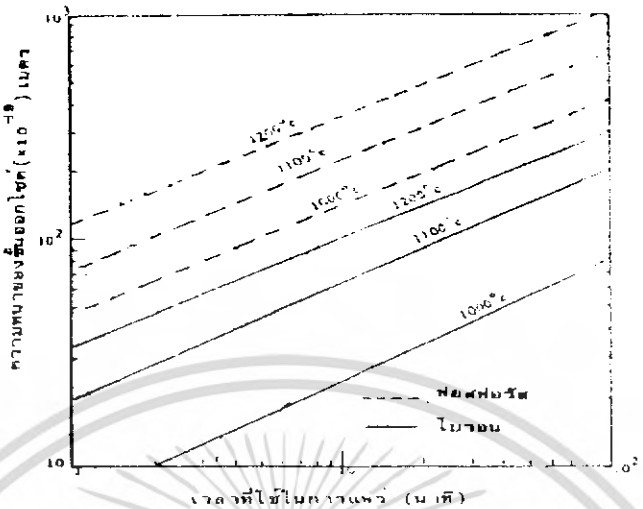
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนา (°A)	สี
8600	สีม่วงแดง
8700	สีแดงม่วง
8900	สีม่วง
9200	สีน้ำเงินม่วง
9500	สีน้ำเงิน
9700	สีน้ำเงินเขียว
9900	สีเขียว
1.00 µm	สีเหลืองเขียว
1.02 µm	สีเขียวเหลือง
1.05 µm	สีเหลืองถึงสีเทาอ่อน
1.06 µm	สีส้มหรือสีเหลืองถึงสีชมพู
1.07 µm	สีชมพู
1.10 µm	สีม่วงแดง

3.3.4 การพิจารณาความหนาของชั้นออกไซด์ที่น้อยที่สุดสำหรับป้องกันการแพร่สารเจือ

ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์มีความสำคัญมากต่อการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ คือ จะมีสภาพเป็นฉนวนไม่นำไฟฟ้า มีความทนทานต่อสนามไฟฟ้าได้ราว 600 v/µm นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติเป็นชั้นที่ต้านทานการแพร่ของอะตอมสารเจือ ในระหว่างการแพร่อะตอมสารเจือ ไม่ว่าจะเป็นฟอสฟอรัส (ชนิดเอ็น) หรือโบรอน (ชนิดพี) ก็ตาม แต่อะตอมสารเจือเหล่านี้ไม่ได้แพร่เข้าไปในเนื้อซิลิคอนเพียงอย่างเดียว ยังจะแพร่เข้าไปในชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ด้วย แต่ก็ช้ามาก ทั้งนี้เนื่องจากสัมประสิทธิ์ของการแพร่ตัวของอะตอมสารเจือใน SiO_2 มีค่าน้อยกว่าการแพร่ตัวในเนื้อซิลิคอน ดังนั้นชั้นของ SiO_2 จึงทำหน้าที่ช่วยต้านทานการแพร่ของอะตอมสารเจือ ความสามารถในการต้านทานจะขึ้นอยู่กับชนิดของสารเจือ และเวลาที่ใช้ในการแพร่ ค่าความหนาของชั้น SiO_2 ที่น้อยที่สุดที่สามารถทำหน้าที่ป้องกันการแพร่ของอะตอมสารเจือได้ แสดงดังรูปที่ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้นออกไซด์ที่น้อยที่สุด

3.4 การเปิดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่ผิวหน้า (Photolithography)

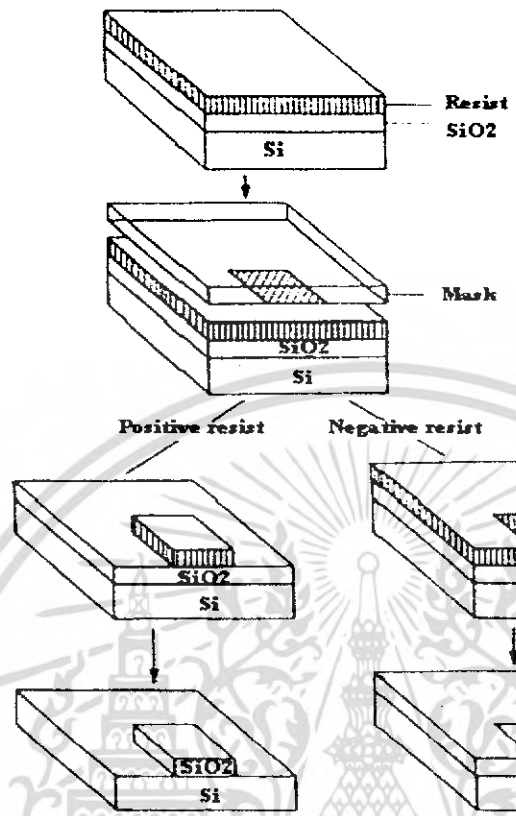
ภายหลังจากผ่านขบวนการออกซิเดชั่นจะเกิดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ เคลือบผิวซิลิคอนทั้งหมดเพื่อป้องกันไม่ให้อะตอมสารใดเข้าไปถึงซิลิคอนได้ ดังนั้นจึงต้องทำการเปิดช่องออกไซด์นี้ออก เพื่อแพร่สารเจือเรียกขบวนการนี้ว่า Photolithography หรือ Photo–etching

ขบวนการ Photolithography เป็นขั้นตอนการถ่ายแบบจากมาส์คไปยังผิวหน้าของแผ่นซิลิคอน โดยจะต้องเคลือบผิวของแผ่นผลึกซิลิคอนด้วยน้ำยาที่ไวต่อแสง (Photo – resist) โดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่า สปินเนอร์ (Spinner) โดยสารที่ไวต่อแสงนี้ แบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ

1. สารไวแสงแบบลบ (Negative Photo Resist) จะใช้ Waycoat สารไวต่อแสงชนิดนี้ เมื่อถูกแสงจะเกาะติดกับผิวของแผ่นผลึกแน่น ไม่ยอมละลายในน้ำยาล้าง (Developer)

2. สารไวแสงแบบบวก (Positive Photo Resist) จะใช้ AZ-1350 และมีคุณสมบัติตรงข้ามกับแบบที่ 1 กล่าวคือ เมื่อถูกแสงจะมีคุณสมบัติคลายความเหนียว และหลุดออกจากผิวแผ่นผลึกได้โดยง่าย เมื่อล้างด้วยน้ำยา Developer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 แสดงลำดับขั้นตอน และภาพด้านข้างของผลึกซิลิคอนในกระบวนการโฟโต้ลิโธกราฟี

3. 5 การแพร่สารเจือ (Diffusion)

การเติมสารเจือลงในแผ่นผลึกซิลิกอน สามารถกระทำได้โดยการแพร่ (Diffusion) ปกติการแพร่หมายถึงการเคลื่อนที่ของอนุภาคจากบริเวณที่มีความเข้มสูงไปสู่บริเวณที่มีความเข้มต่ำ ซึ่งเป็นการแพร่ภายในของเข็ง (Solid state diffusion) จะเกิดขึ้นในสภาวะอุณหภูมิสูงๆ (900 - 1200° C) จะถูกกำหนดได้ด้วยค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่ (Diffusivity ;D) ตามสมการที่ 3.5

$$D = \mu kT/q \qquad cm^2/sec \qquad (3.5)$$

โดยที่ q คือขนาดของประจุของอิเล็กตรอน

k คือค่างคงตัวของโบส์ตมันน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

T คืออุณหภูมิสัมบูรณ์

μ คือค่าความคล่องตัวของอนุภาค

3.5.1 กลไกของการแพร่ (Diffusion mechanism)

1. การแพร่เข้าไปแทนที่ (Substitutional diffusion)

การแพร่แบบนี้เป็นการแทนที่อะตอมของซิลิกอนและเมื่อการแพร่ยังดำเนินต่อไป นั้นอะตอมสารเจือจะเคลื่อนที่เข้าไปแทนที่อะตอมของซิลิกอนซึ่งอยู่ใกล้และว่างอยู่ดังรูป การแพร่ดังกล่าวนี้จะเกิดในกรณีของการแพร่อะตอมสารเจือ เช่น โบรอน ฟอสฟอรัส และสารหนู

2. การแพร่เข้าไปอยู่ระหว่างอะตอม (Interstitial diffusion)

การแพร่แบบนี้มักเกิดขึ้นในกรณีที่เป็นการแพร่ของอิออนโลหะของธาตุที่หนัก เช่น ทองคำ นิเกล เป็นต้น ทั้งนี้เนื่องจากขนาดอะตอมของสารเจือมีขนาดใหญ่กว่าอะตอมของสารกึ่งตัวนำ อะตอมสารเจือนี้สามารถที่จะเคลื่อนที่ต่อไปได้เมื่อได้รับพลังงานมากกว่ากำแพงศักย์ของแลททีส

3.5.2 เทคนิคการแพร่สารเจือ

สำหรับเทคนิคการแพร่สารเจือกระทำสองขั้นตอน ทั้งนี้ก็เพื่อง่ายต่อการควบคุม และแก้ไขให้การกระจายของสารเจือเป็นไปตามต้องการอย่างมีประสิทธิภาพโดยที่

ขั้นที่ 1 เรียกว่า กระบวนการ depostion กระทำโดยการแพร่สารเจือในเงื่อนไขที่ว่าปริมาณจำนวนอะตอมของสารเจือที่ผิวมีค่าคงที่ตลอดไปไม่จำกัด การแพร่ขั้นนี้ทำให้ช่วงเวลาสั้น ๆ และอุณหภูมิไม่สูงนัก (ราว 1000° C)

ขั้นที่ 2 เรียกว่า กระบวนการ drive in ในขั้นนี้จำนวนอะตอมสารเจือที่ผิวจะถูกควบคุมให้มีค่าจำกัด (คือปริมาณที่แพร่เข้าไปในซิลิคอน เนื่องจากการแพร่ในขั้นที่ 1) การแพร่ขั้นนี้ทำที่อุณหภูมิสูงกว่าขั้นแรก คือ (1200° C) และสามารถควบคุมการกระจาย และความลึกในการแพร่ของสารโดยควบคุมเวลาในการแพร่ นอกจากนี้ขณะที่ทำการแพร่ก็จะทำการออกซิเดชั่นไปพร้อม ๆ กัน ทั้งนี้เพื่อให้เกิดชั้นของออกไซด์เคลือบที่ผิวนอกสุดของแผ่นผลึก ซึ่งเป็นการช่วยป้องกันไม่ให้อะตอมสารเจือแพร่ออกมาจากแผ่นผลึก (out diffusion)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 กระบวนการเมตัลไลเซชั่น

เมื่อสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ จนได้ชิ้นส่วนต่างๆครบแล้ว แต่ส่วนต่างๆเหล่านี้ยังแยกกันอยู่ทางไฟฟ้า จึงจำเป็นต้องต่อส่วนต่างๆเหล่านี้เข้าด้วยกันตามโครงสร้างที่ออกแบบไว้ จึงจะได้อุปกรณ์ที่สมบูรณ์ โดยการสร้างรอยต่อสัมผัสโอห์มมิค (Ohmic Contact)

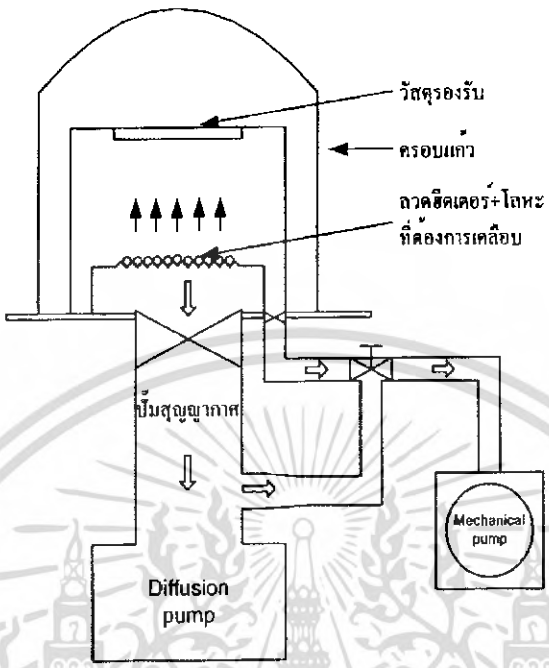
3.6.1 เงื่อนไขการเลือกใช้สารโลหะในกระบวนการเมตัลไลเซชั่น

- รอยต่อสัมผัสกับผิวซิลิคอนมีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำ
- มีค่าความนำไฟฟ้าสูง
- ทำให้ติดแน่นกับผิวของซิลิคอนไดออกไซด์
- ภาพแบบแผนจะต้องทำให้มีความคมชัด
- สามารถต่อเข้ากับลวดลายความนำภายนอกได้ดี
- มีค่าใช้จ่ายต่ำ

3.6.2 โครงสร้างทางฟิสิกส์ของระบบสุญญากาศ

จากรูปที่ 3.7 Chamber เป็นครอบแก้วรูปทรงระฆังคว่ำ (Bell Jar) เริ่มต้นภายใน Chamber มีความดันบรรยากาศปกติ จะถูกดูดอากาศออกโดยใช้ Mechanical Pump จนความดันใน Chamber มีค่าประมาณ 10^{-3} Torr จะวัดความดันที่จุดนี้โดย Geissler's Tube จาก Chanber ก็จะเปิดให้ระบบ Diffusion Pump ช่วยลดความดันต่อไปจนถึงค่าความดันประมาณ 10^{-6} Torr กระบวนการเคลือบโลหะก็สามารถดำเนินการได้ที่ความดันต่ำจะวัดความดันได้โดยใช้ Ionization Gauge สำหรับการเคลือบฟิล์มบางที่มีปฏิกิริยากับน้ำมันในระบบสุญญากาศ จะมีการออกแบบให้ระบบ High Vacuum Pump ใช้ Turbomolecular และ cryo Pump แทนระบบ Diffusion Pump

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 โครงสร้างของเครื่อง Filament Evaporator

3.6.3 เทคนิคการเคลือบโลหะในระบบสุญญากาศ

การเคลือบโลหะทำได้โดยทำให้สารนั้นได้รับความร้อนจากไส้ (Filament หรือ Boat) ที่ทำจากทังสเตน (Tungstan) หรือ (Molynum) เมื่อไส้ถูกทำให้ร้อนโดยการผ่านกระแสไฟฟ้าจำนวนมากไหลผ่าน โดยขณะทำการเคลือบโลหะจะควบคุมให้กระแสไหลผ่านไส้ เพิ่มขึ้นทีละน้อยๆ จนกระทั่งโลหะที่วางอยู่ที่ไส้หลอมตัวเป็นของเหลวติดอยู่กับไส้ก็จะระเหยเป็นไอฟุ้งกระจายเคลือบแผ่นผลึกซิลิคอนที่วางใน Chamber

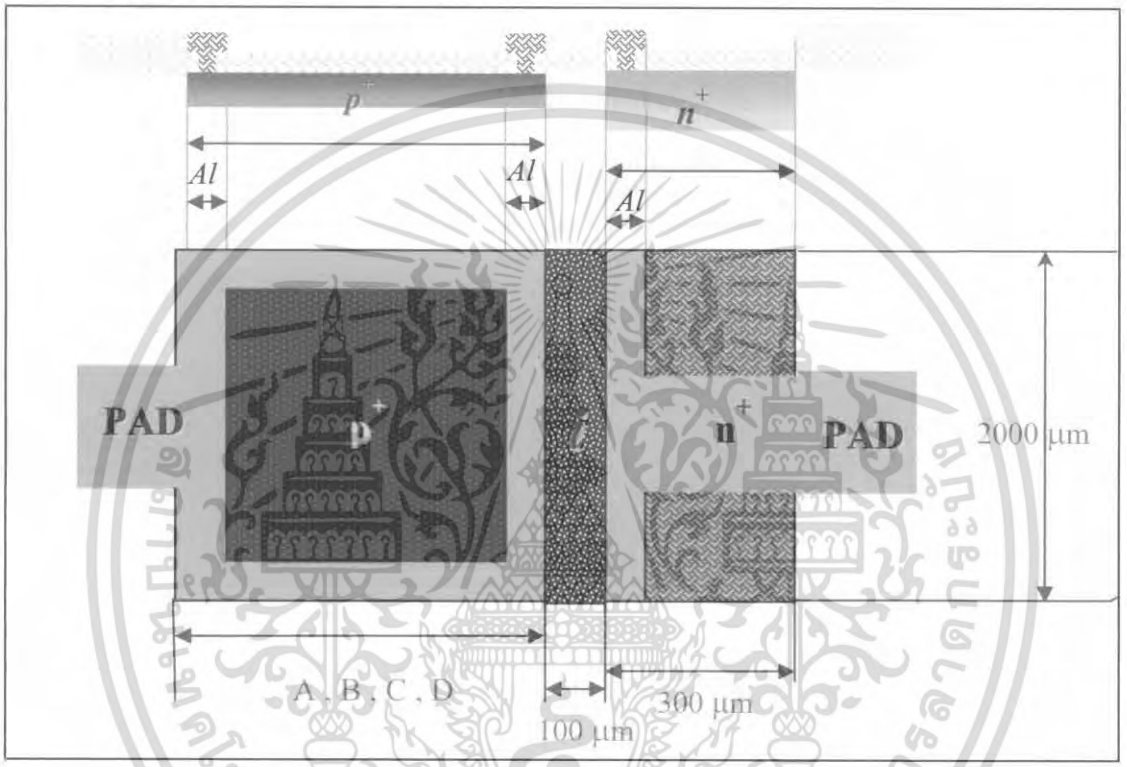
สำหรับเทคนิคนี้จะใช้กับสารที่มีธาตุรวมกันอยู่ไม่ได้ เนื่องจากธาตุที่มีจุดหลอมเหลวต่ำกว่า ระเหยเป็นไอก่อนธาตุที่มีจุดหลอมเหลวสูงกว่า การเลือกใช้ไส้ต้องพิจารณาให้มีขนาดพอเหมาะกับสารที่จะใช้ระเหย ไม่เช่นนั้นจะเป็นการสิ้นเปลืองโลหะที่ใช้ระเหยเป็นจำนวนมากเพื่อจะให้ได้ความหนาของโลหะเคลือบตามต้องการ และพื้นที่ของโลหะที่เคลือบมีขนาดเล็ก เทคนิคการระเหยสารวิธีนี้จะใช้ได้สะดวกกับ Al , Au , Ag , Pd เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7 กระบวนการสร้างโฟโตไดโอดชนิด p-i-n โครงสร้างแบบพลานาร์

3.7.1 การออกแบบมาส์ค

ในการออกแบบการสร้างโฟโตไดโอดชนิด p-i-n โดยเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ขนาดพื้นที่รับแสง $\mathbf{P^+}$ (Active Area) และเวลาในการแพร่เพื่อสร้างส่วน $\mathbf{P^+}$ ให้มีขนาดความลึกของส่วนพื้นที่รับแสงแตกต่างกันดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.8 ภาพการออกแบบโฟโตมาร์ค โดยเปลี่ยนแปลงค่าพื้นที่ p^+

Pad มีพื้นที่ 500 × 500 μm^2

A พื้นที่ p^+ = 400 × 2,000 μm^2

B พื้นที่ p^+ = 600 × 2,000 μm^2

C พื้นที่ p^+ = 800 × 2,000 μm^2

D พื้นที่ p^+ = 1,000 × 2,000 μm^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>ชุดที่ 1</u> : เวลาในการแพร่ $\mathbf{p^+}$ 15 นาที (ความลึก = **0.387μm**)

<u>ชุดที่ 2</u> : เวลาในการแพร่ $\mathbf{p^+}$ 25 นาที (ความลึก = **0.490μm**)

<u>ชุดที่ 3</u> : เวลาในการแพร่ $\mathbf{p^+}$ 35 นาที (ความลึก = **0.580μm**)

<u>ชุดที่ 4</u> : เวลาในการแพร่ $\mathbf{P^+}$ 45 นาที (ความลึก = **0.660μm**)

ซึ่งในกระบวนการสร้างนี้ จะออกแบบมาส์คทั้งหมด 4 มาส์คได้แก่

Mask # 1 คือ Phosphorous Diffusion

Mask # 2 คือ Boron Diffusion

Mask # 3 คือ Contact Window

Mask # 4 คือ Metal Contact

ในขบวนการสร้างโฟโตไดโอดชนิด p-i-n จะใช้แผ่นผลึกรูปเดี่ยว ชนิดอินทรินซิค (intrinsic) ที่มีระนาบ (111) มีค่าพิกัดความต้านทาน 2000 Ω-cm และมีความหนา 500 μm เทคโนโลยีที่ใช้ในกระบวนการสร้างเป็นแบบพลานาร์ (Planar) ซึ่งรายละเอียดของขั้นตอนในการสร้างโฟโตไดโอดชนิด p-i-n มีดังต่อไปนี้

รูปที่ 3.9 แผ่นผลึกซิลิคอนฐานรอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.2 กระบวนการทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นผลึก

กำจัดฝุ่น

- Ultrasonic ในน้ำบริสุทธิ์ (Deionization water) 5 นาที
- จุ่มในน้ำ DI 1 แก้ว จนสะอาด
- เป่าแห้งด้วยก๊าซ N_2

กำจัดเศษโลหะ

- ต้มในกรด Nitric (HNO_3) 2 แก้วๆละ 5 นาที
- จุ่มในน้ำ DI 1 แก้ว
- ต้มในน้ำ DI แก้วที่หนึ่ง 5 นาที (กรด Nitric ละลายในน้ำร้อนได้ดี)
- ต้มในน้ำ DI แก้วที่สอง 5 นาที
- จุ่มในน้ำ DI 2 แก้ว จนสะอาด
- เป่าแห้งด้วยก๊าซ N_2

กำจัดไขมัน

- ต้มใน Trichloroethylene 5 นาที (Trichloroethylene จะไม่ละลายในน้ำ)
- Ultrasonic ใน Acetone 3 นาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่สอง
- เป่าแห้งด้วยก๊าซ N_2

การ Slice etching

- จุ่มในกรดกัดแก้ว (Hydrofluoric acid : HF 5 %) 10 วินาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่สอง
- เป่าแห้งด้วยก๊าซ N_2

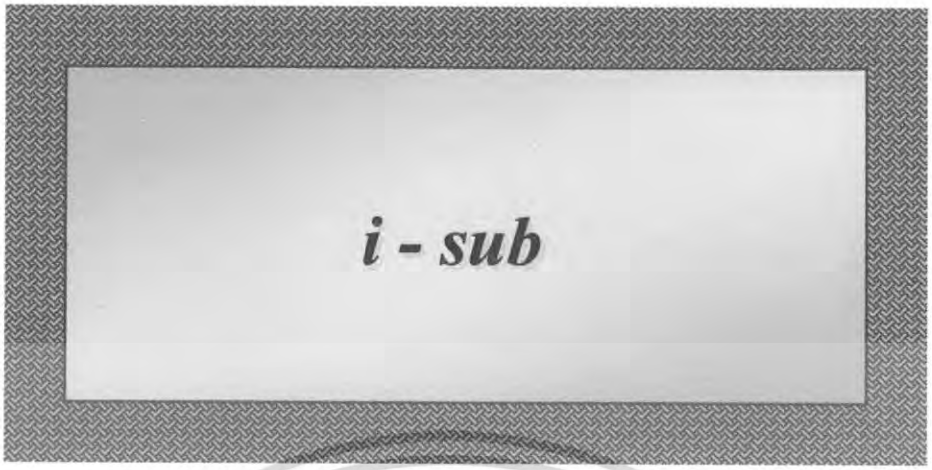
3.7.3 กระบวนการสร้างชั้นออกไซด์

โดยในการทดลองครั้งนี้จะทำการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์โดยใช้ทั้ง 2 วิธี เพื่อให้ได้ความหนาของออกไซด์ที่เหมาะสมคือ

Dry : Wet : Dry = 1 : 2 : 1 ชั่วโมง (ได้ความหนาชั้นออกไซด์ 6500 ˚A)

- Dry Oxidation ด้วย O_2 1,200 cc/min ที่อุณหภูมิ 1,000 °C
- Wet Oxidation ด้วย O_2 1,000 cc/min ที่อุณหภูมิ 1,000 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่สร้างขึ้นบนฐานรอง

ลำดับขั้นตอนในการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ด้วยวิธี Thermal Oxidation

1. กัดผิวหน้าของแผ่นผลึกซิลิคอนด้วยกรด HF 5% นาน 10 วินาที
2. ล้างด้วยน้ำ DI แล้วเป่าให้แห้งด้วยก๊าซ N_2
3. ปรับอุณหภูมิในเตาแพร่สารให้คงที่ (อุณหภูมิตามความต้องการ)
4. นำแผ่นผลึกวางลงบน Boat แล้วนำไปวางไว้ที่ปากท่อควอทซ์ 5 นาที
5. ค่อยๆดัน Boat ให้เข้าไปในท่อควอทซ์อย่างช้าๆ 5 นาที
6. ทำการออกซิเดชั่นตามวิธีที่ต้องการ กล่าวคือ ถ้าเป็นแบบแห้งปล่อยก๊าซออกซิเจนแห้งในอัตรา 1000 cc/min ถ้าเป็นแบบไอน้ำอิ่มตัวปล่อยก๊าซออกซิเจนที่อิ่มตัวด้วยไอน้ำในอัตรา 600 cc/min
7. ทิ้งแผ่นผลึกไว้ในท่อควอทซ์ตามเวลาที่ต้องการ
8. ค่อยๆดึง Boat ให้ออกที่ปากท่อควอทซ์อย่างช้าๆ 5 นาที
9. ทิ้งแผ่นผลึกไว้ที่ปากเตาราว 5 นาที แล้วเก็บขึ้น

หลังจากขบวนการออกซิเดชั่นแล้ว จะได้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ปกคลุมทั้งด้านหน้าและด้านหลังของแผ่นผลึกซิลิคอน ต่อจากนั้นทำการเปิดช่องออกไซด์เพื่อแพร่สารเจือในบริเวณที่กำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.4 ขบวนการ Photo-etching

1. อบแผ่นไล่ความชื้นที่ 120°C (30 นาที)

2. เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ 1350) แล้ว Spin ที่ 500 rpm (5 วินาที) และที่ 3000 rpm (20 วินาที)

3. อบฟิล์มที่ 95°C (30 นาที) เรียกว่า Prebake

4. ทำการ Mask Alignment และฉายแสง U.V. (Expose) 8 วินาที

5. Develop ฟิล์ม โดย

- จุ่มลงใน AZ Developer I (10 วินาที)
- จุ่มลงใน AZ Developer II (10 วินาที)
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่สอง

6. เป่าให้แห้งด้วยก๊าซ N_2

7. อบฟิล์มที่ 95°C (10 นาที) เรียกว่า Postbake

8. เคลือบน้ำยาไวแสงด้านหลัง เพื่อป้องกันการกัดออกไซด์ด้านหลังด้วย AZ 1350 จากนั้นอบต่ออีก 10 นาที

9. Etching ออกไซด์ด้วย Buffer ($HF : NH_4F = 1 : 6$) ซึ่งมีอัตราการกัดประมาณ 1000 อังสตรอมต่อนาที จนกระทั่งชั้นออกไซด์ถูกกัดออกจนหมด

10. จุ่มในน้ำ DI แล้วเป่าให้แห้งด้วยก๊าซ N_2

11. ลอกฟิล์มน้ำยาไวแสงบวก AZ 1350 ออกโดย Ultrasonic ใน Acetone 5-10 นาที

12. จุ่มในน้ำ DI 2 แก้ว จนสะอาด

13. เป่าให้แห้งด้วยก๊าซ N_2

3.7.5 การแพร่สารเจือฟอสฟอรัสเพื่อสร้างส่วน n^+

โดยมีแหล่งจ่ายอะตอมสารเจือคือ ของเหลว p-59250

- **Predeposition** ที่ 1,000°C

N_2 1,000 cc/min, 15 min

- **Drive in** ที่ 1,100°C , O_2 , 20 min

Dry 1,200 cc/min , 10 min

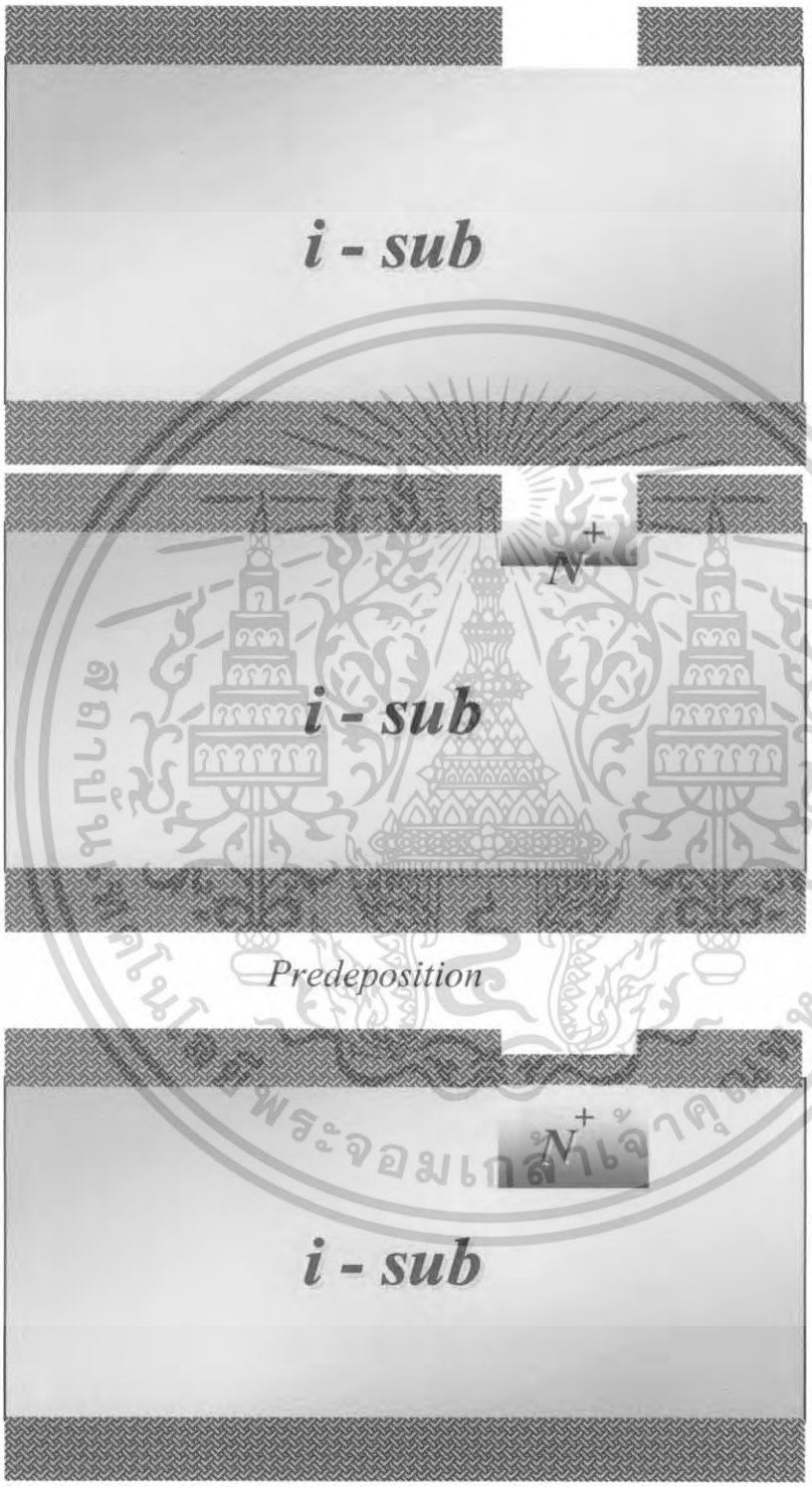
Wet 1,000 cc/min , 10 min

Dry 1,200 cc/min , 10 min

มีค่าความลึกของส่วน n^+ 1.92 μm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Mask # 1 คือ Phosphorous Diffusion



รูปที่ 3.11 กระบวนการแพร่สารเจือชนิดเอ็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.6 การแพร่สารเจือโบรอนเพื่อสร้างส่วน p^+

โดยมีแหล่งจ่ายอะตอมสารเจือคือ ของเหลว B_2O_3

- **Predeposition** ที่ 1,000°C

  N_2 1,000 cc/min, 15 min

- **Drive in** ที่ 1,000°C , O_2 , ที่เวลาต่างๆคือ 15 min ,25 min ,35 min และ 45 min

  Dry 1,200 cc/min , 10 min

  Wet 1,000 cc/min , 10 min

  Dry 1,200 cc/min , 10 min

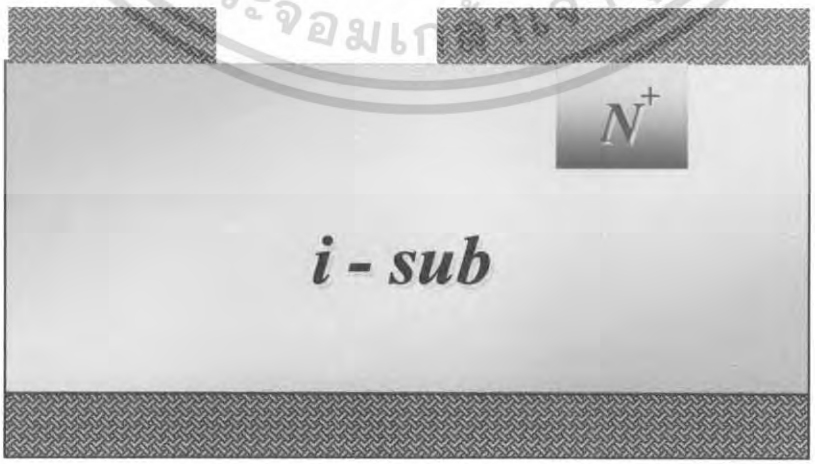
ที่เวลา 15 นาที ได้ความลึกของส่วน p^+ = 0.387 μm

ที่เวลา 25 นาที ได้ความลึกของส่วน p^+ = 0.490 μm

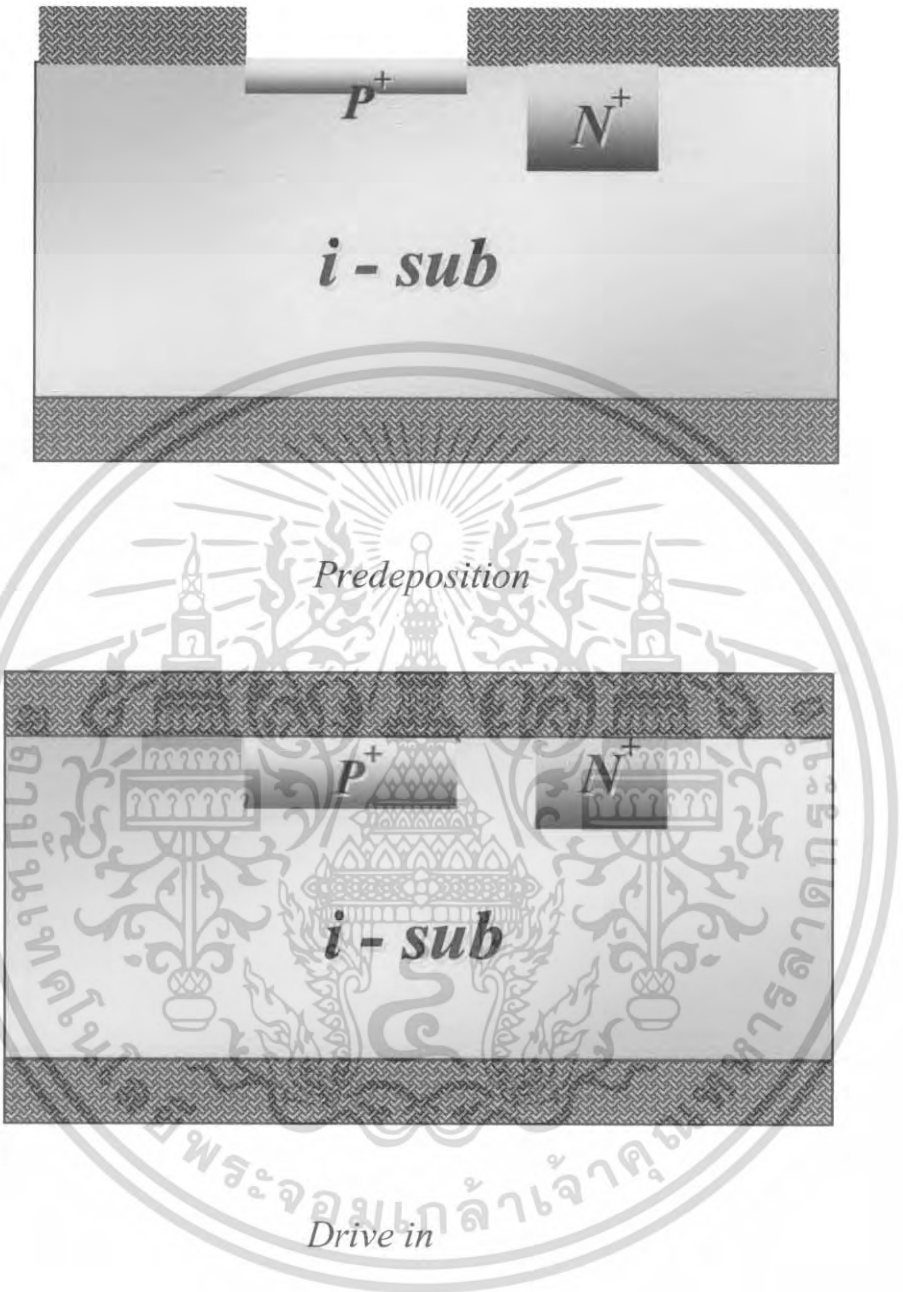
ที่เวลา 35 นาที ได้ความลึกของส่วน p^+ = 0.580 μm

ที่เวลา 45 นาที ได้ความลึกของส่วน p^+ = 0.660 μm

Mask # 2 คือ Boron Diffusion



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 กระบวนการแพร่สารเจือชนิดพี

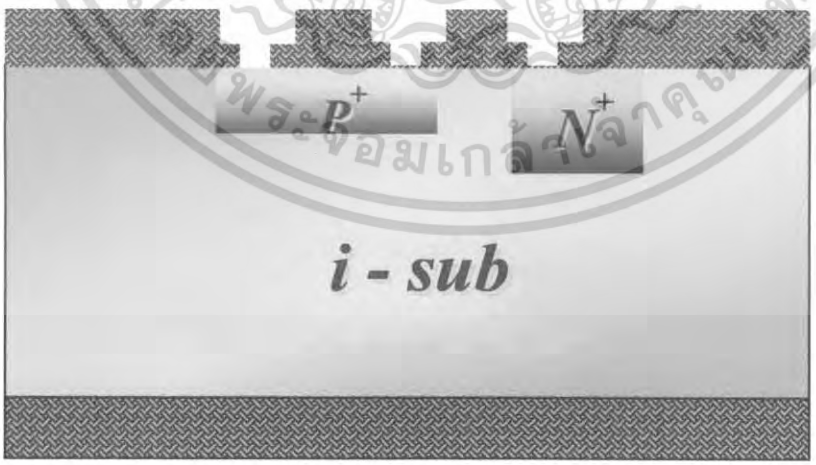
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.7 ขบวนการสร้างขั้วโลหะ (Metallization)

1. เปิดช่องออกไซด์เพื่อสร้างขั้วสัมผัส
2. เคลือบแผ่นผลึกด้วยชั้นอลูมิเนียมโดยใช้อุปกรณ์ vacuum evaporate ที่ความดัน 2×10^{-6}
3. เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ)
4. อบฟิล์มที่ 85°C 20 นาที (Prebake)
5. ทำการ Mask Alignment และฉายแสง U.V. (Expose) 8 วินาที
6. Develop ฟิล์ม โดย

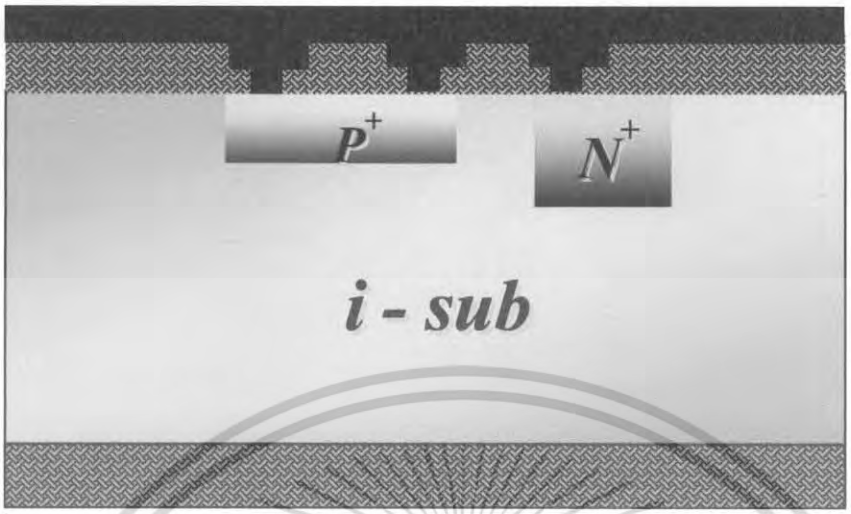
- จุ่มลงใน AZ Developer I (30 นาที)
- จุ่มลงใน AZ Developer II (30 นาที)
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่หนึ่ง
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่สอง

7. เป่าให้แห้งด้วยก๊าซ N_2

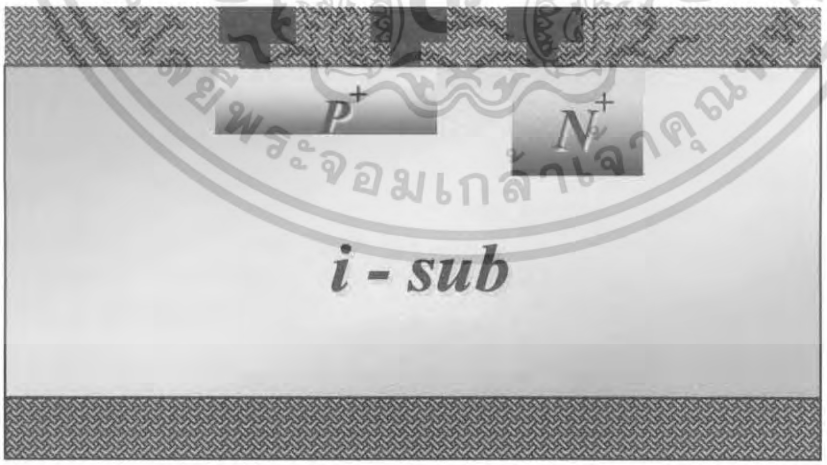


รูปที่ 3.13 กระบวนการเปิดช่อง contact window เพื่อสร้างขั้วอลูมิเนียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

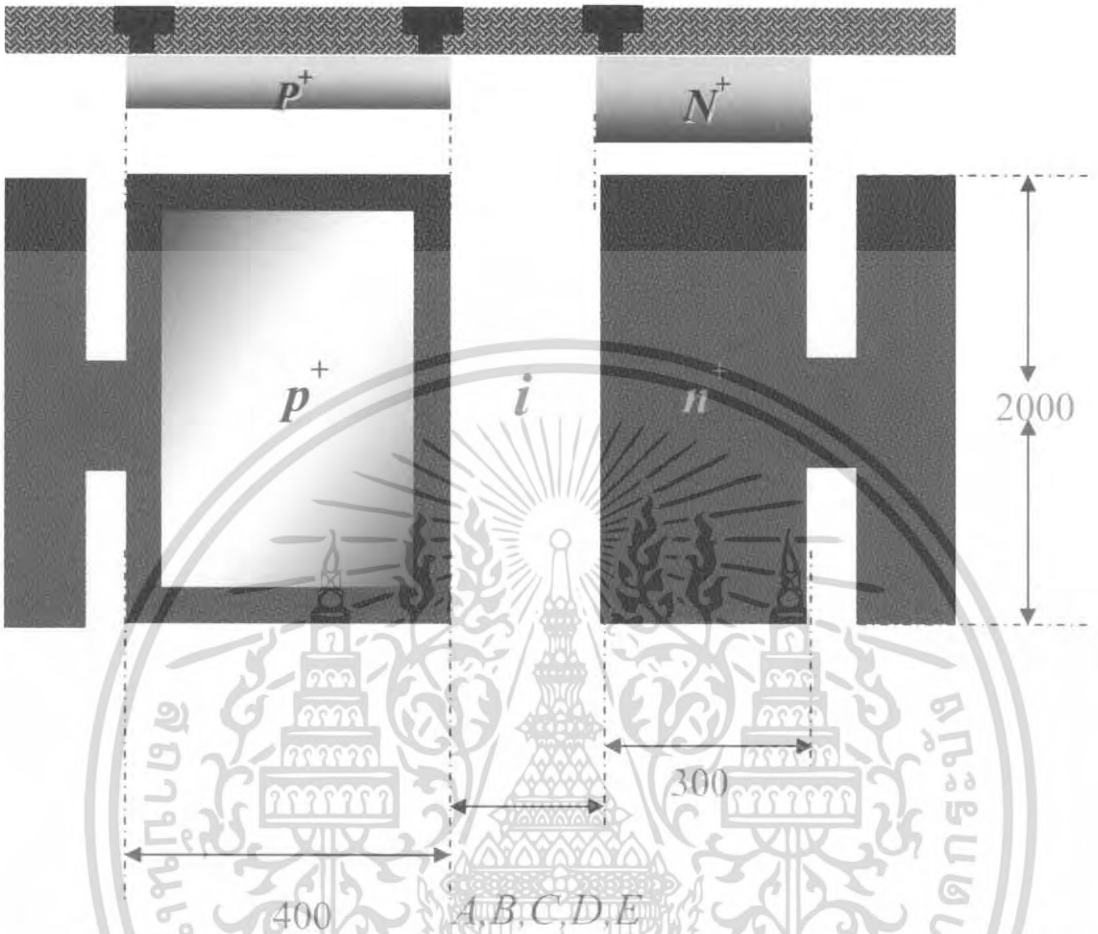


Mask # 4 คือ Metal Contact



รูปที่ 3.14 กระบวนการสร้างขั้วอลูมิเนียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 ภาพการออกแบบโฟโตมาร์ค โดยเปลี่ยนแปลงค่าพื้นที่ i โดยให้พื้นที่รับแสงเป็นส่วน P^+

ในการออกแบบการสร้างโฟโตไดโอดชนิด p-i-n โดยเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ขนาดพื้นที่รับแสง **i** (Active Area) และเวลาในการแพร่เพื่อสร้างส่วน **i** ให้มีขนาดความกว้างของส่วนพื้นที่รับแสงแตกต่างกันแต่ในส่วนของ P^+ และN^+ คงที่และทำการแพร่ Phosphorous ก่อน จึงค่อยแพร่ Boron เพื่อจะทำการให้พื้นที่รับแสงเป็นส่วน P^+

A พื้นที่ i = 50 × 2,000 μm^2

B พื้นที่ i = 100 × 2,000 μm^2

C พื้นที่ i = 200 × 2,000 μm^2

D พื้นที่ i = 400 × 2,000 μm^2

E พื้นที่ i = 600 × 2,000 μm^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>ชุดที่ 1</u> : เวลาในการแพร่ p^+ 15 นาที (ความลึก = **0.387μm**)

<u>ชุดที่ 2</u> : เวลาในการแพร่ P^+ 45 นาที (ความลึก = **0.660μm**)

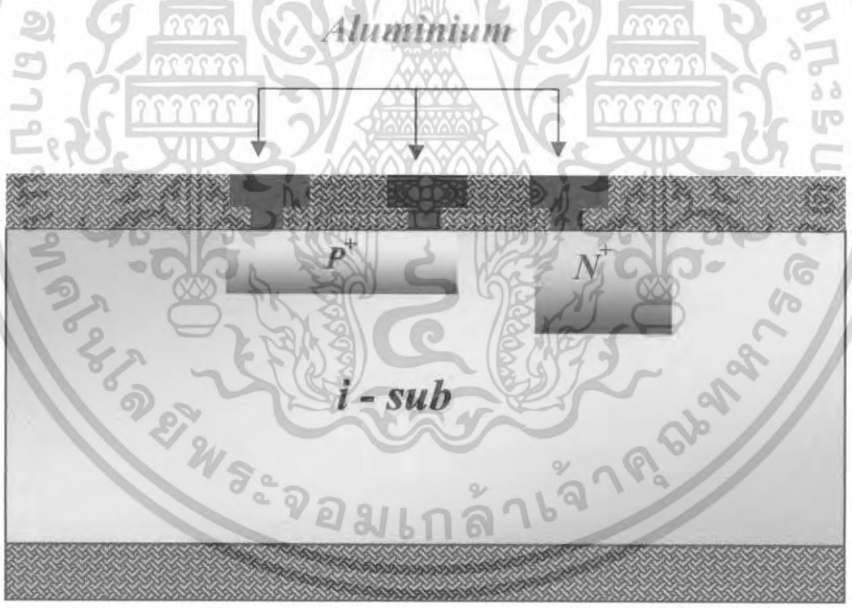
ซึ่งในกระบวนการสร้างนี้ จะออกแบบมาส์คทั้งหมด 4 มาส์คเหมือนการออกแบบ p-i-n ข้างต้นที่ทำการเปลี่ยนแปลงค่าของชั้น P^+ แต่ครั้งนี้จะทำการเปลี่ยนแปลงค่าของชั้น i ได้แก่

Mask # 1 คือ Phosphorous Diffusion

Mask # 2 คือ Boron Diffusion

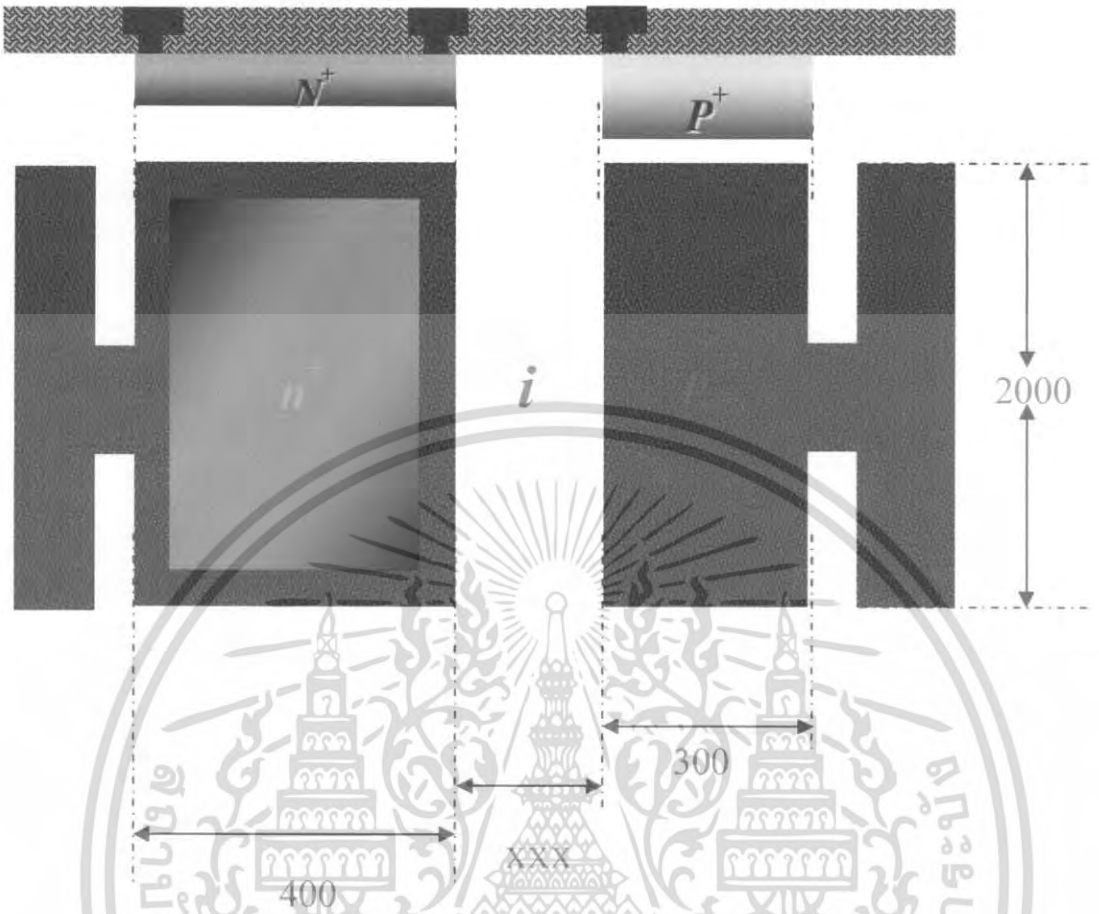
Mask # 3 คือ Contact Window

Mask # 4 คือ Metal Contact



ให้พื้นที่รับแสงเป็นส่วน P^+

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 ภาพการออกแบบโฟโตมาร์ค โดยเปลี่ยนแปลงค่าพื้นที่ i โดยให้พื้นที่รับแสงเป็นส่วน N^+

ในการออกแบบการสร้างโฟโตไดโอดชนิด p-i-n โดยเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆได้แก่ขนาดพื้นที่รับแสง i (Active Area) และเวลาในการแพร่เพื่อสร้างส่วน i ให้มีขนาดความกว้างของส่วนพื้นที่รับแสงแตกต่างกันแต่ในส่วนของ P^+ และN^+ คงที่และทำการแพร่ Boron ก่อน จึงค่อยแพร่ Phosphorous เพื่อจะทำการให้พื้นที่รับแสงเป็นส่วน N^+

A พื้นที่ i = 50 × 2,000 μm^2

B พื้นที่ i = 100 × 2,000 μm^2

C พื้นที่ i = 200 × 2,000 μm^2

D พื้นที่ i = 400 × 2,000 μm^2

E พื้นที่ i = 600 × 2,000 μm^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>ชุดที่ 1</u> : เวลาในการแพร่ N^+ 15 นาที (ความลึก = **0.387μm**)

<u>ชุดที่ 2</u> : เวลาในการแพร่ N^+ 45 นาที (ความลึก = **0.660μm**)

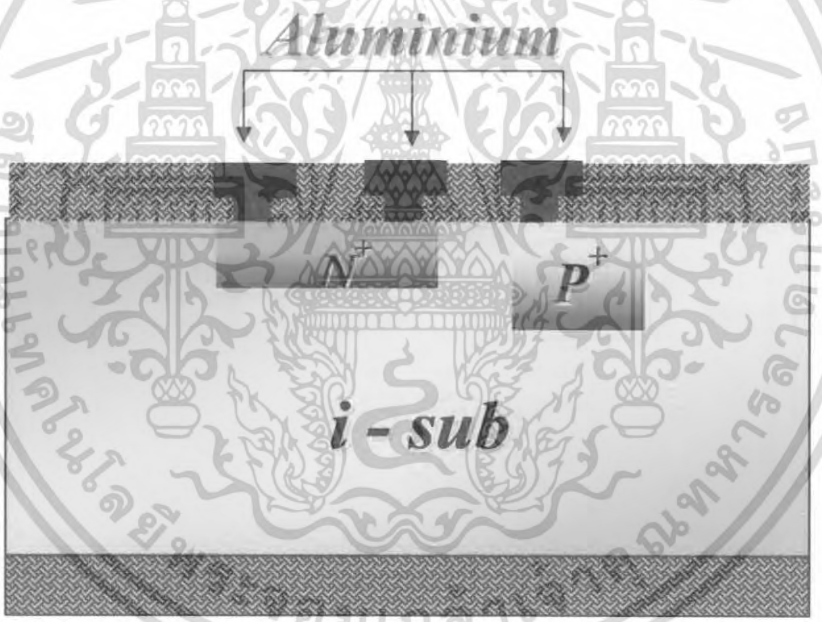
ซึ่งในกระบวนการสร้างนี้ จะออกแบบมาส์คทั้งหมด 4 มาส์ค ได้แก่

Mask # 1 คือ Boron Diffusion

Mask # 2 คือ Phosphorous Diffusion

Mask # 3 คือ Contact Window

Mask # 4 คือ Metal Contact



ให้พื้นที่รับแสงเป็นส่วน N^+

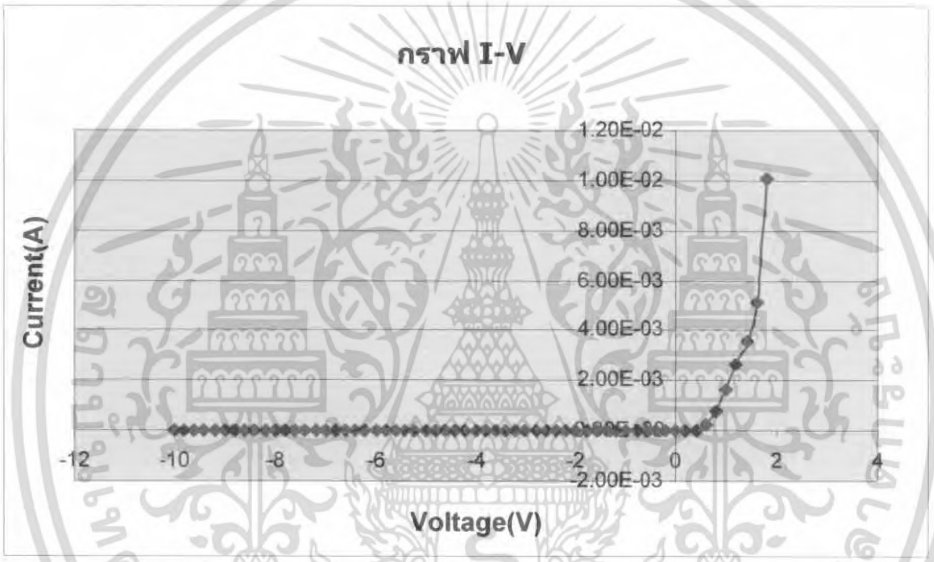
กระบวนการสร้างของอุปกรณ์ที่ทำการเปลี่ยนแปลงค่าของชั้นอินเทนซิคในค่าต่าง ๆ เหมือนที่กล่าวมาแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
การวัดและการทดลอง

4.1 การทดลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน (I-V Characteristics)

จะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน (I-V Characteristics) ในขณะไบอัสตรงและไบอัสย้อนกลับดังรูปที่4.1

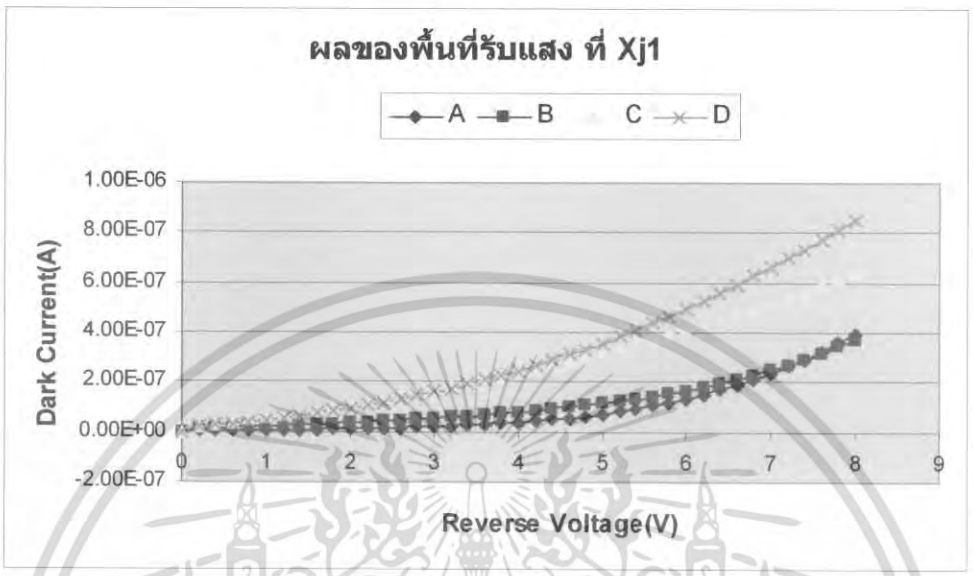


รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน ขณะได้รับแรงดันไบอัสตรงและไบอัสย้อนกลับ ที่ความลึก 0.387 μm และพื้นที่รอยต่อ p^+ - i 1.76 μm^2

จากกราฟสามารถหาค่าแรงดันขีดเริ่มได้จากขณะแรงดันไบอัสตรง ลากเส้นกราฟในช่วงที่เป็นเชิงเส้นลงมาตัดแกนนอน(แกนของแรงดัน) แล้วอ่านค่าที่กราฟตัดแกนนอน จะได้แรงดันขีดเริ่ม (V_T) = 0.6 Volt จากนั้นสามารถหาค่าทรานคอนดัคแตนซ์(g_m)ได้จาก Slope ของกราฟ I-V โดย $g_m = \frac{\Delta I}{\Delta V} = 5 \times 10^{-3}$ A/V และยังสามารถหาค่า R_{series} ได้จากส่วนกลับของค่าทรานคอนดัคแตนซ์ โดย $R_{series} = \frac{1}{g_m} = 200\ \Omega$ เมื่อโฟโตไดโอดได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับจะมีกระแสมืดประมาณ 15.4 nA – 509 nA ที่แรงดันไบอัสย้อนกลับ 1-10V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การทดลองเพื่อศึกษากระแสมืด(I_{dark})



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงค่ากระแสมืดที่มีผลต่อพื้นที่รอยต่อ p^+ - i 1.32 μm^2(A) , 1.76 μm^2(B) , 2.20 μm^2(C) , 2.64 μm^2(D) ที่ความลึก 0.387 μm(Xj1)

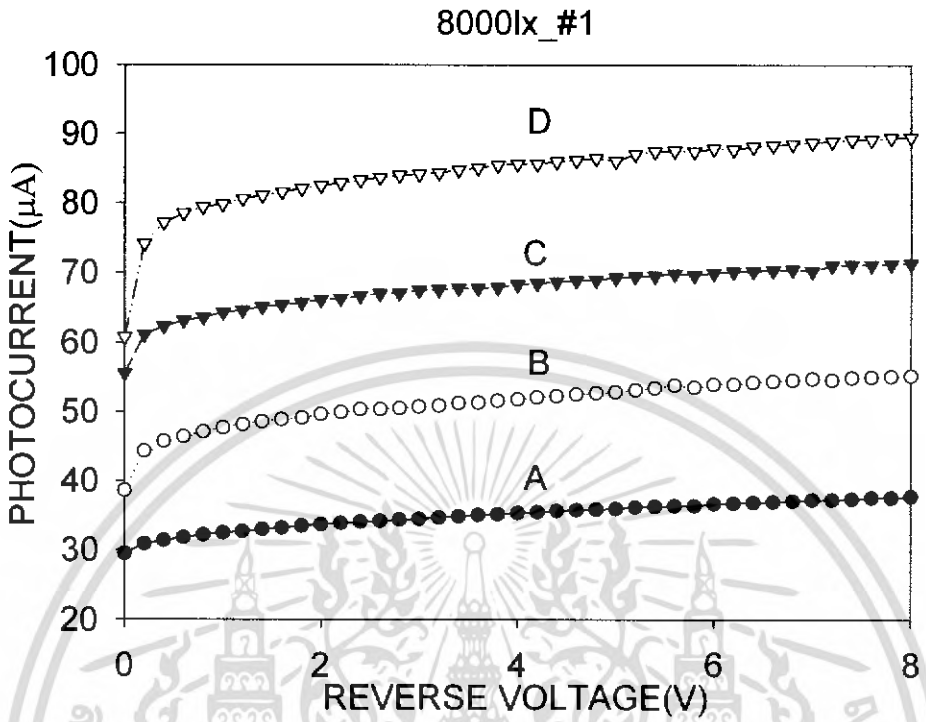
4.3 การทดลองเพื่อศึกษากระแสแสง(I_{photo})

4.3.1 ศึกษาผลของพื้นที่รับแสงขนาดต่างๆกัน ที่ความเข้มแสง 8,000 lx

ตารางที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและแรงดัน ที่ความเข้มแสง 8,000 lx ที่ขนาดพื้นที่รับแสงค่าต่างๆ

IA (μA)	IB(μA)	IC(μA)	ID(μA)	Voltage(v)
29.5	38.6	55.49968	60.6997	0
32.5	47.7	64.2877	79.88567	1
33.7	49.6	66.0845	82.4824	2
34.5	50.7	67.4808	84.1792	3
35.4	51.8	68.276	85.6755	4
36.0	52.8	69.27	86.0705	5
36.7	53.9	69.9627	87.8639	6
37.3	54.7	70.2547	88.7555	7
37.8	55.2	71.3456	89.5452	8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



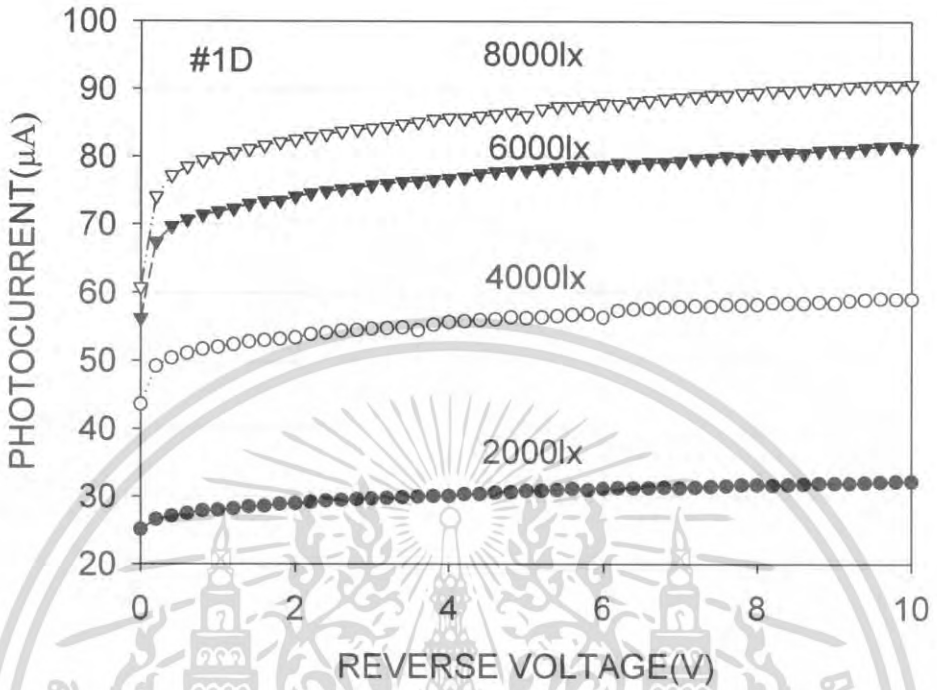
รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสง และแรงดันที่ความเข้มแสง 8,000 lx ที่ขนาดพื้นที่รับแสงค่าต่างๆ

4.3.2 ศึกษาผลของความเข้มแสงค่าต่างๆ ที่พื้นที่ 1000*2000 μm^2

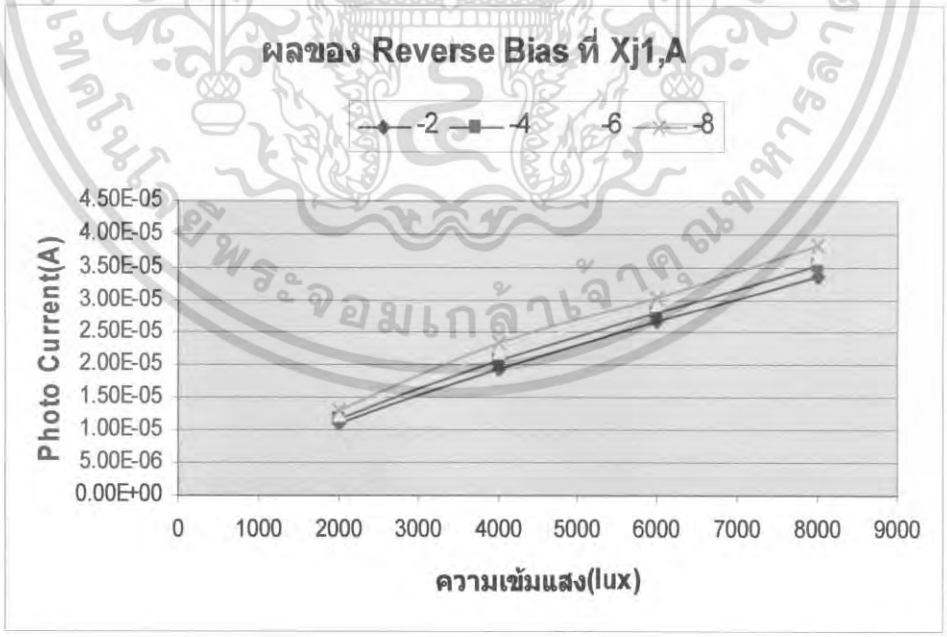
ตารางที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและแรงดัน ที่ขนาดพื้นที่รับแสง 1000*2000 μm^2 ที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ

ID-2000LX (μA)	ID-4000LX (μA)	ID-6000LX (μA)	ID-8000LX (μA)	Voltage(v)
25.0997	43.5997	56.1997	60.6997	0
27.98567	51.98567	71.88567	79.88567	1
28.9824	53.3824	74.0824	82.4824	2
29.6792	54.6792	75.7792	84.1792	3
30.0755	55.6755	76.7755	85.6755	4
30.8705	56.2705	77.9705	86.0705	5
31.1639	56.3639	78.7639	87.8639	6
31.2555	57.9555	79.3555	88.7555	7
31.7452	58.2452	80.4452	89.5452	8
31.9329	58.4329	81.0329	90.2329	9
32.2187	59.0187	81.3187	90.7187	10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



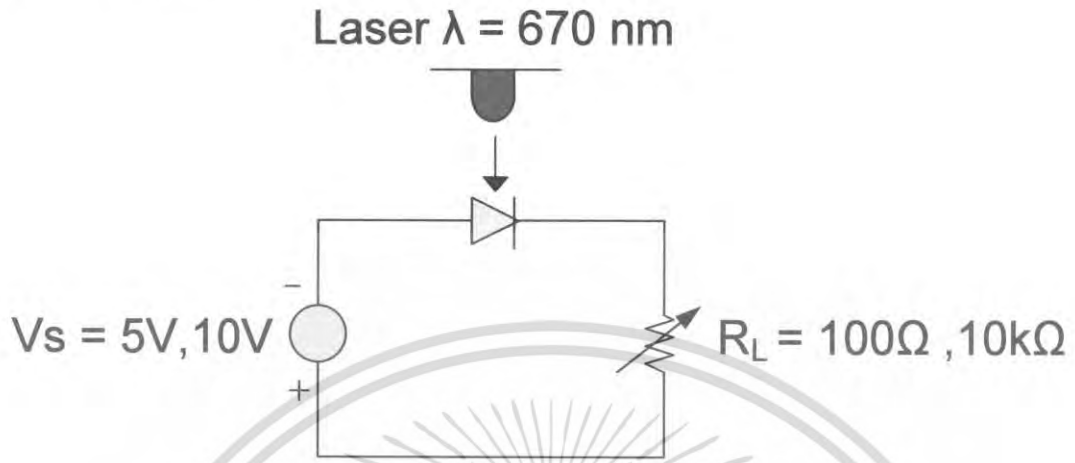
รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและแรงดันที่ขนาดพื้นที่รับแสง 1000*2000 μm^2 ที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงค่ากระแสแสงที่มีผลต่อแรงดันไบอัสย้อนกลับค่าต่างๆที่ความลึก 0.387 μm(Xj1) และพื้นที่รับแสง 0.80 μm^2(A)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

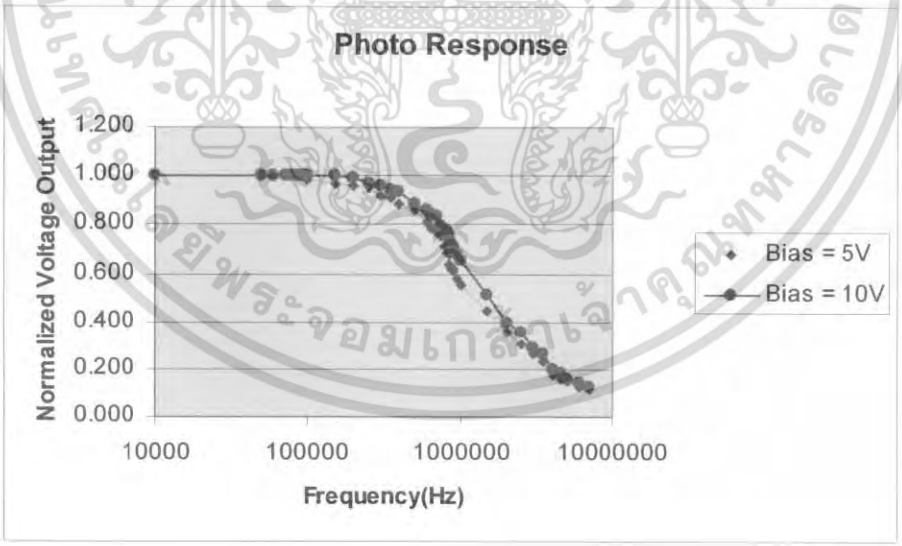
4.4 การวัดการตอบสนองสัญญาณ



รูปที่ 4.6 วงจรที่ใช้ทดลองวัดการตอบสนองสัญญาณ

4.4.1 ผลกระทบของการตอบสนองสัญญาณกับแรงดันไบแอส

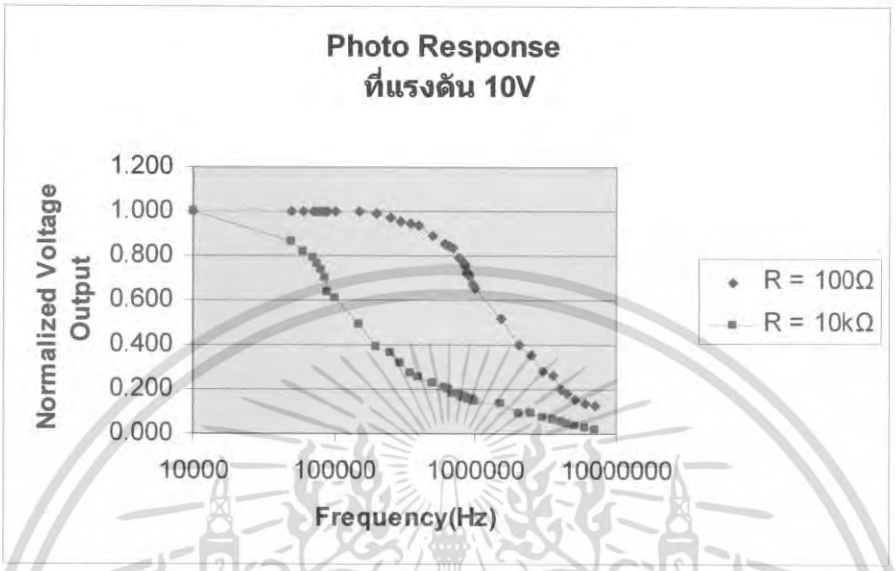
ในหัวข้อนี้จะพิจารณาผลกระทบของการตอบสนองสัญญาณแสงที่ขึ้นกับแรงดันไบแอส โดยการเปลี่ยนค่าแรงดันไบแอสเป็น 5V และ10V ตามลำดับ



รูปที่ 4.7 การตอบสนองทางแสงที่ขึ้นกับแรงดันไบแอส และใช้โหลดความต้านทาน 100 Ω ต่ออนุกรมเข้ากับชิ้นงาน

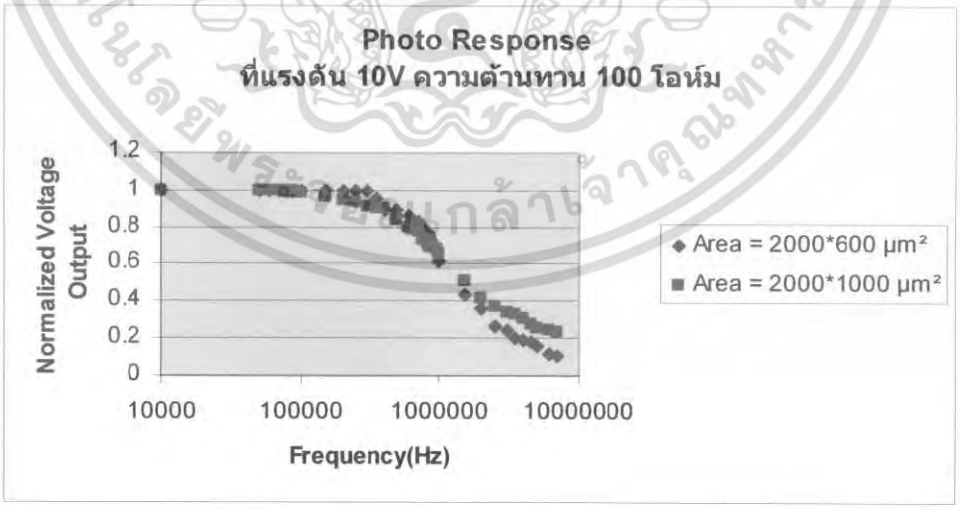
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 ผลกระทบของการตอบสนองสัญญาณกับค่าความต้านทานโหลด



รูปที่ 4.8 การตอบสนองทางแสงที่ขึ้นกับโหลดความต้านทาน 100 Ω และ 10kΩ ที่แรงดันไบแอส 10V

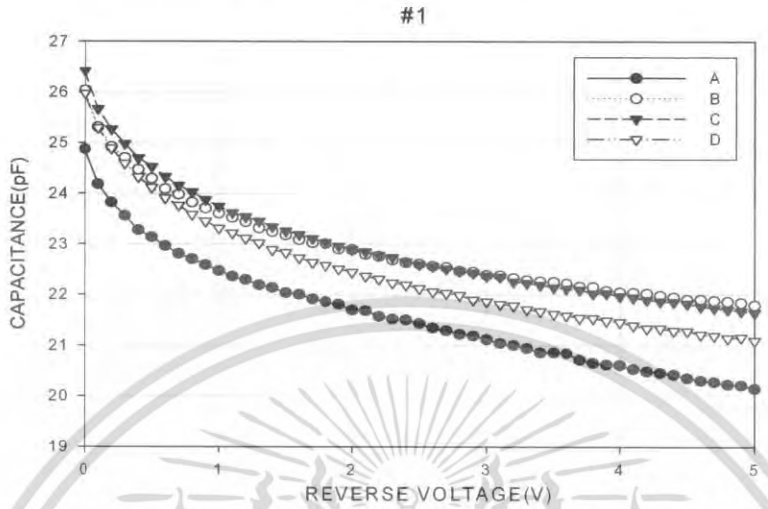
4.4.3 การตอบสนองสัญญาณทางแสงที่ขนาดพื้นที่ต่างกัน



รูปที่ 4.9 การตอบสนองทางแสงที่ขนาดพื้นที่ต่างกัน ที่โหลดความต้านทาน 100 Ω และ ที่แรงดันไบแอส 10V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

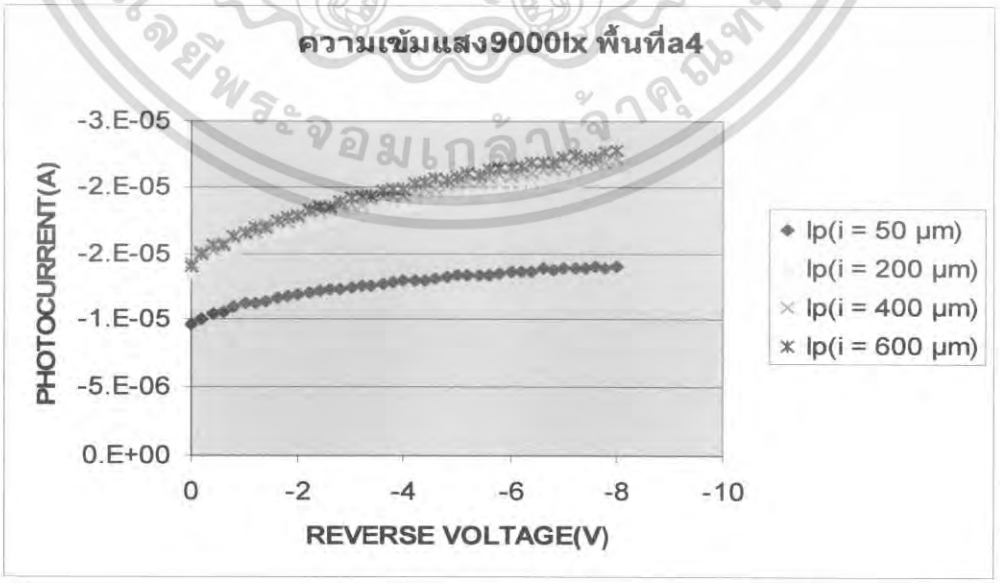
4.5 การทดลองเพื่อหาค่าความจุไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อ



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงค่าความจุไฟฟ้าที่มีผลต่อแรงดันไบอัสย้อนกลับ ที่ความลึก 0.387 μm และพื้นที่รับแสงขนาดต่างๆ

4.6 การทดลองเพื่อศึกษาผลของพื้นที่ของชั้น i (Intrinsic)

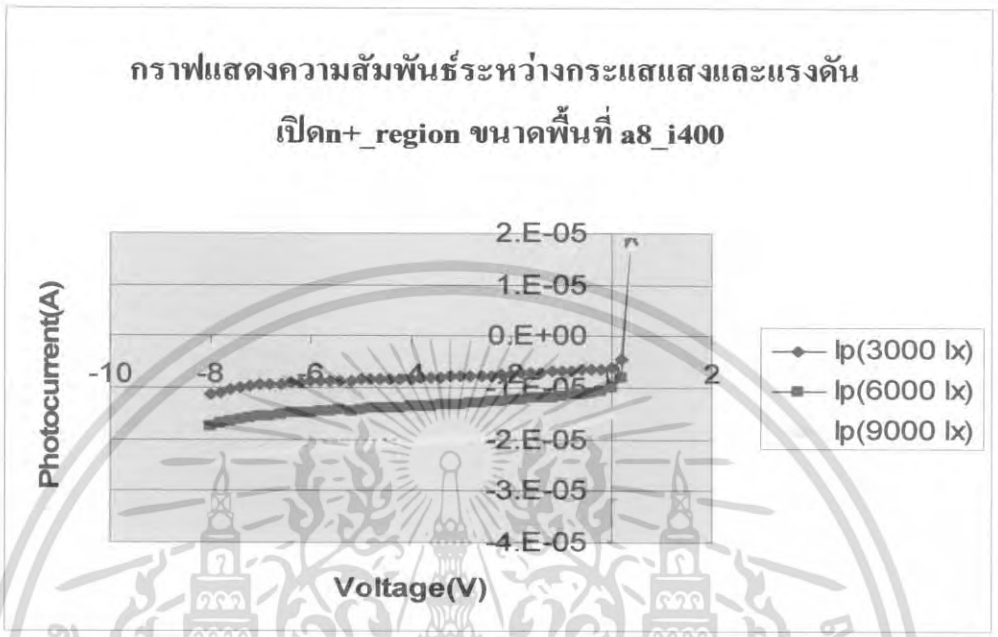
จากการทดลองที่ผ่านมาได้ทำการศึกษาผลของกระแสมืดและกระแสแสงที่เปลี่ยนแปลงตามพื้นที่รอยต่อ p^+ - i ,พื้นที่รับแสง p^+(Active area) และระยะเวลาในการแพร่สารเจือ p^+ (ความลึกXj) แต่ในหัวข้อนี้จะศึกษาผลของพื้นที่ของชั้น i ที่มีผลต่อกระแสแสง และพื้นที่รับแสงที่ต่างชนิดกัน



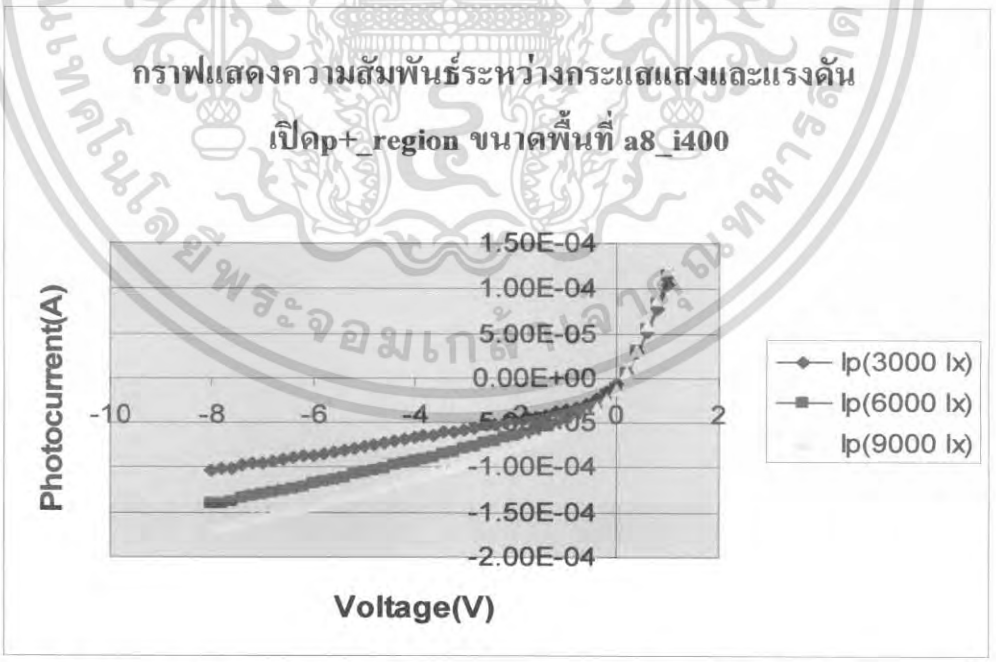
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและแรงดัน ที่พื้นที่ i ค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.1 เปรียบเทียบระหว่าง p+_region และ n+_region ที่พื้นที่รับแสงและระยะ i เท่ากัน



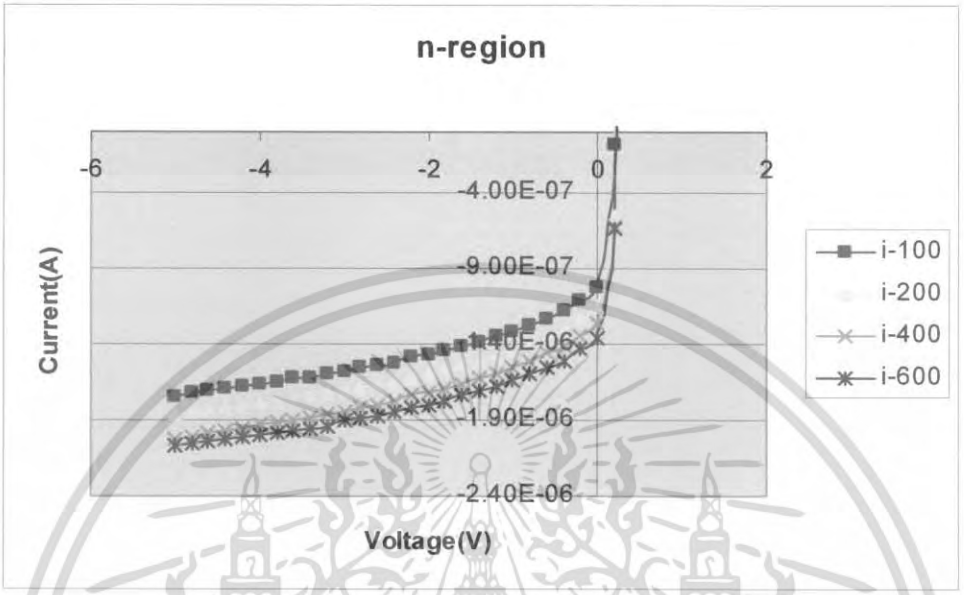
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและแรงดัน เปิด n+_region ที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ



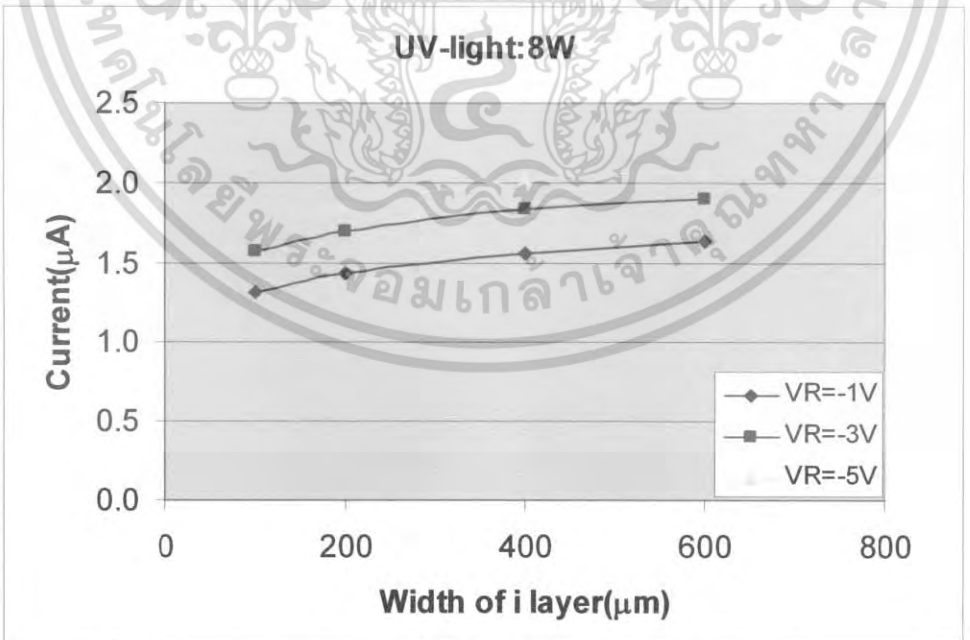
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและแรงดัน เปิด p+_region ที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7 การทดลองเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน กับ UV-light



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน กับ UV-light ที่พื้นที่ i ค่าต่างๆ เปิด n+_region



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความกว้างชั้น i กับ UV-light ที่แรงดันค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปและวิจารณ์

• ผลของการวัดการตอบสนองสัญญาณ (Photo Response)

จากการทดลองโดยการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆดังนี้

- **ผลกระทบของการตอบสนองสัญญาณกับแรงดันไบแอส**

เมื่อเพิ่มค่าแรงดันไบแอส จะทำให้ค่าความถี่คัทออฟสูงขึ้น

- **ผลกระทบของการตอบสนองสัญญาณกับค่าความต้านทานโหลด**

เมื่อเพิ่มค่าความต้านทานโหลด จะทำให้ค่าความถี่คัทออฟลดลง

- **การตอบสนองสัญญาณทางแสงที่ขนาดพื้นที่ต่างกัน**

เมื่อเพิ่มขนาดพื้นที่ จะทำให้ค่าความถี่คัทออฟลดลง

• ผลของค่าความจุไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อ

จากกราฟรูปที่ 4.10 พบว่าเมื่อเพิ่มค่าแรงดันไบแอสย้อนกลับ จะทำให้ค่าความจุไฟฟ้าบริเวณรอยต่อลดน้อยลง เนื่องจากค่าความจุไฟฟ้าบริเวณรอยต่อ แปรผกผันกับค่าแรงดันไบแอสย้อนกลับ ดังสมการต่อไปนี้

$$C_j = \sqrt{\frac{\varepsilon \cdot q \cdot N_A \cdot N_D}{2(N_A + N_D) \cdot V_0}}$$

$$C_j \propto \frac{1}{\sqrt{V_0}}$$

เนื่องจากค่าความจุไฟฟ้าบริเวณรอยต่อที่วัดได้มีค่าน้อย จะส่งผลทำให้โฟโตไดโอดชนิดนี้ทำงานได้รวดเร็วยิ่งขึ้น เนื่องจากผลของค่า Rise Time และ Fall Time จะแปรผันตรงกับค่าความจุไฟฟ้าดังสมการต่อไปนี้

$$\tau = 0.7 \cdot R \cdot C$$

โดยที่ τ คือ เวลาในการตอบสนองต่อสัญญาณ

R คือ ค่าความต้านทานภายในเนื้อสาร

C คือ ค่าความจุไฟฟ้าที่รอยต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

• ผลของการวัดค่ากระแสแสงเปรียบเทียบระหว่าง p+_region และ n+_region

จากผลการทดลองที่ให้ส่วน p+_region เป็นพื้นที่รับแสง จะมีค่ากระแสแสงสูงกว่า n+_region เนื่องจากความลึกรอยต่อของส่วน p+_region มีค่าน้อยกว่า n+_region เมื่อใช้เวลาในการแพร่สารเจือเท่ากัน

• ผลของพื้นที่ของชั้น i (Intrinsic)

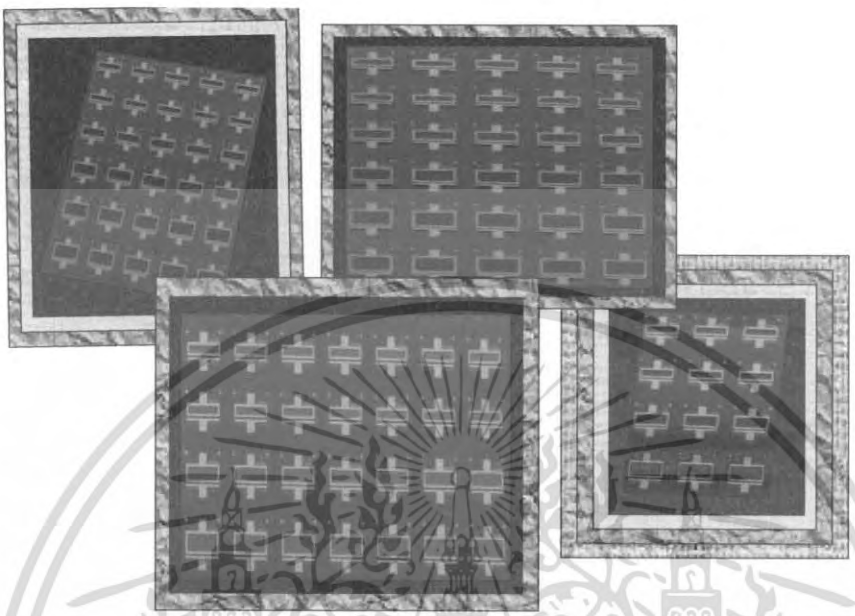
จากการทดลองวัดค่ากระแสแสงที่ความเข้มแสง 9000 lx ที่พื้นที่ i ค่าต่างๆดังต่อไปนี้ (50, 200, 400, 600 μm) ตามลำดับ พบว่าเมื่อพื้นที่ i มีค่าเพิ่มมากขึ้น จะทำให้ค่ากระแสแสงที่วัดได้มีค่าสูงขึ้น

• สามารถตรวจจับแสง อัลตร้าไวโอเลต (Ultraviolet) ได้

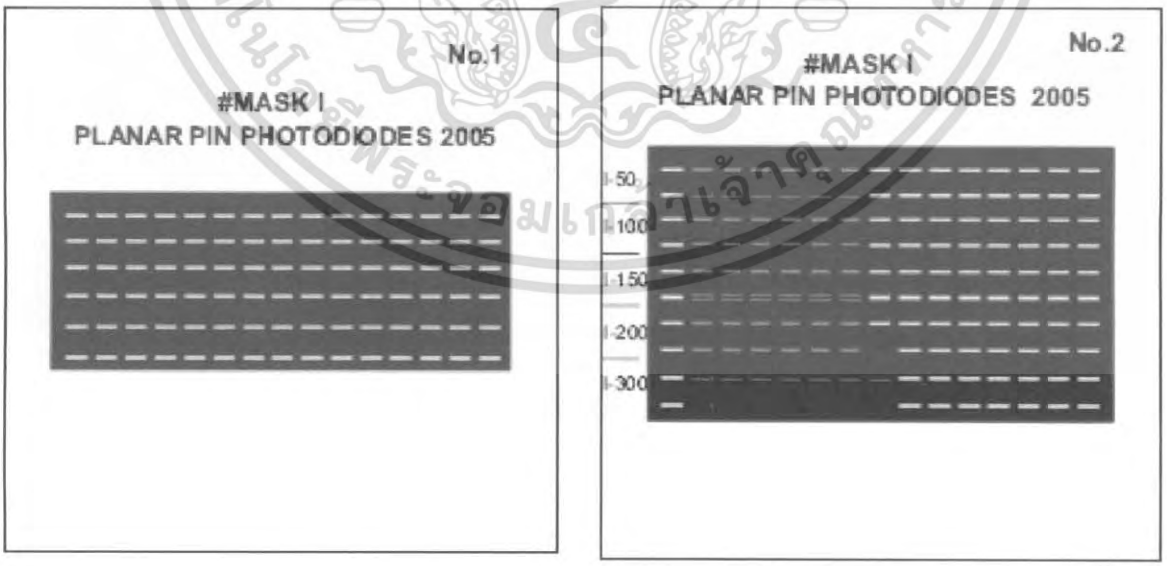
เนื่องจากอุปกรณ์มีขนาดที่ค่อนข้างใหญ่ ประมาณ (1000*2000 μm^2) จึงนิยมใช้สำหรับเป็นตัวตรวจจับแสง มากกว่าใช้เป็นตัวเซ็นเซอร์ที่มีความไวสูง และการที่เลือกตรวจจับแสง UV เป็นเพราะว่าแสง UV มีความสำคัญ เช่น ใช้ฆ่าเชื้อโรคได้ แต่ก็เป็นอันตรายต่อมนุษย์ ดังนั้นการพัฒนา p-i-n photodiode จึงมีประโยชน์อย่างยิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประมวลภาพการดำเนินงานทั้งหมดในโครงงานนี้

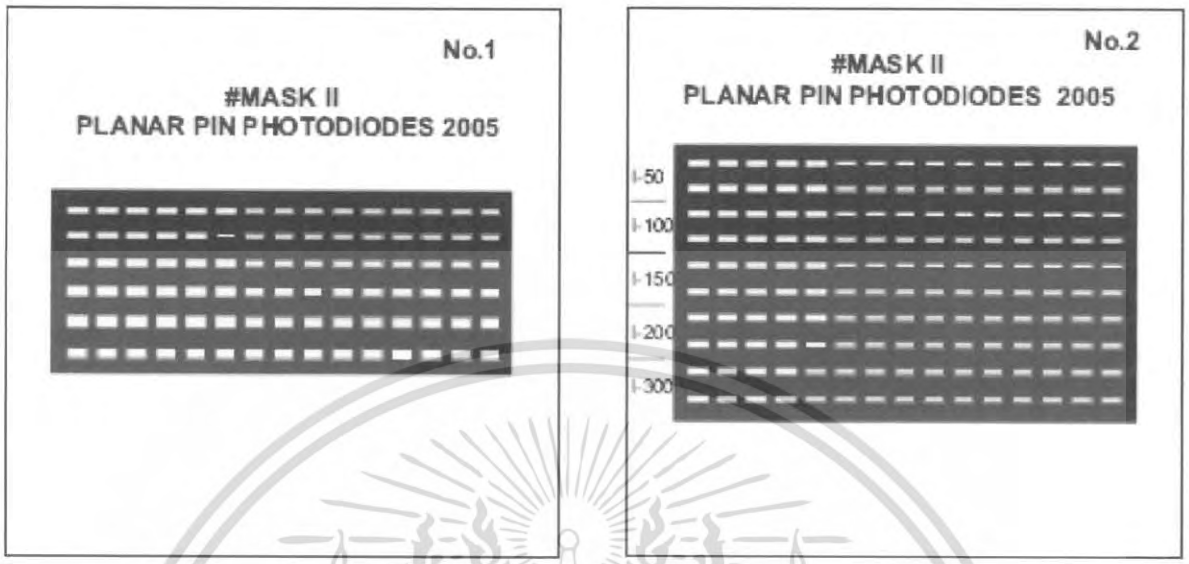


อุปกรณ์ที่สร้างเสร็จสมบูรณ์

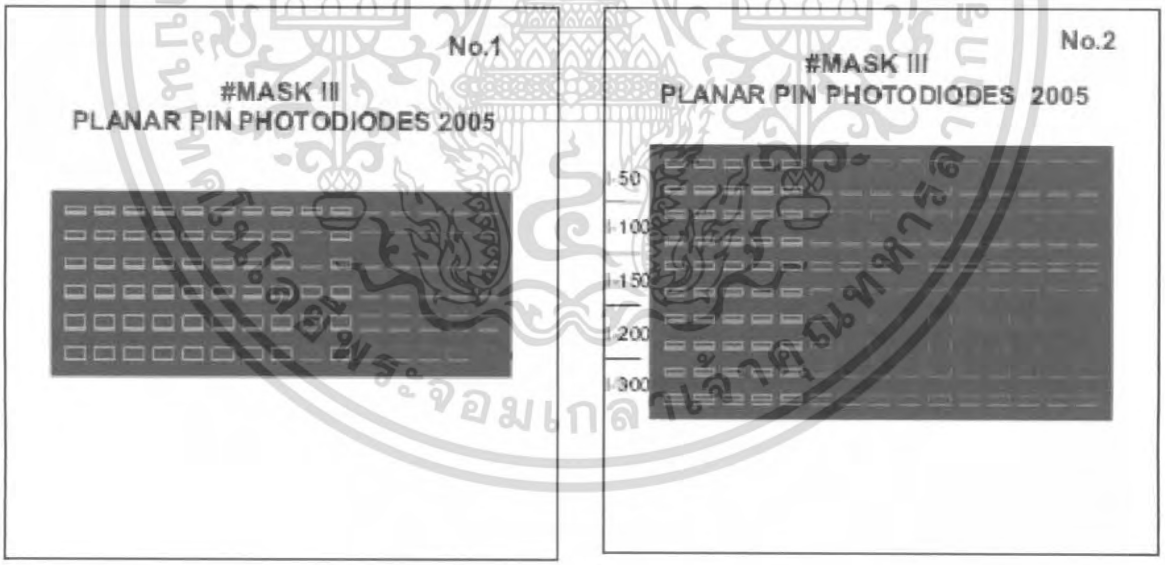


ลักษณะของกระจก Mask#1 (Phosphorus Diffusion)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

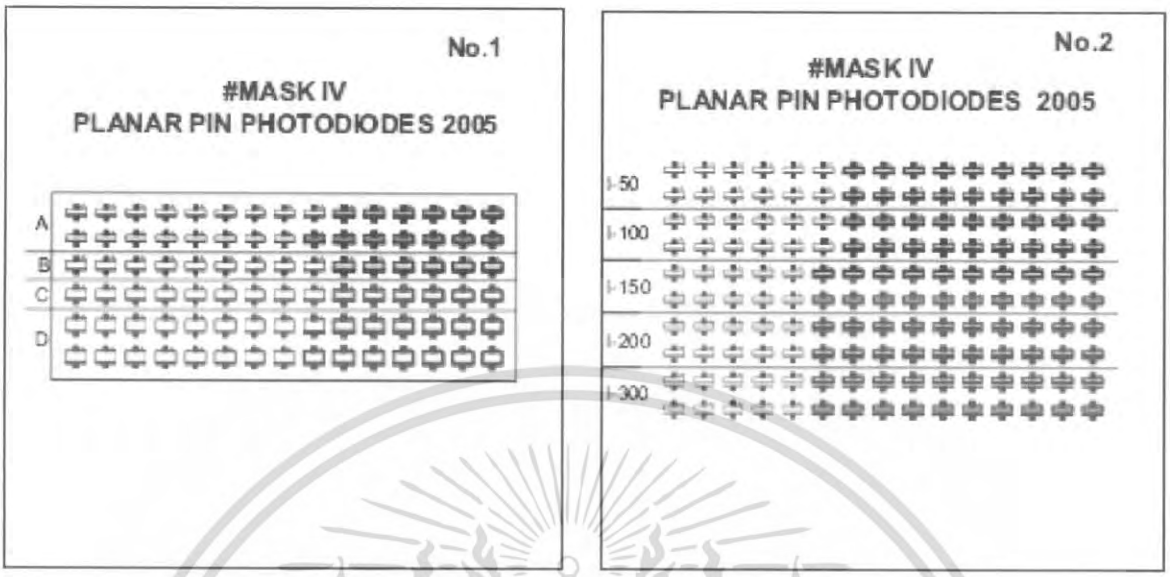


ลักษณะของกระจก Mask#2 (Boron Diffusion)



ลักษณะของกระจก Mask#3 (Contact window)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ลักษณะของกระจก Mask#4 (Metal Contact)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนังสืออ้างอิง

1. รศ.ดร.สมเกียรติ ศุภเดช , " *เซมิคอนดัคเตอร์ดีไวซ์* " , คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 469 หน้า, 2547
2. รศ.ดร.สมเกียรติ ศุภเดช , " เทคโนโลยีวงจรรวม " , คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
3. เอกสารประกอบการอบรมความรู้ด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์เบื้องต้น , ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์(Electronics Research Center)
4. ศ.ดร. ดุสิต เครืองาม , " สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ " , ฟิสิกส์เทคโนโลยีและการใช้งาน
5. Infineon Technologies , " Semiconductors Technical Information, Technologies and Characteristic Data "

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ตารางค่าคงที่ทางฟิสิกส์

มวลนิ่งของอิเล็กตรอน(rest mass of an electron)	m_e	9.109×10^{-31} kg.
มวลนิ่งของโปรตอน(rest mass of proton)	m_p	1.672×10^{-27} kg.
มวลนิ่งของนิวตรอน(rest mass of nuetron)	m_n	1.675×10^{-27} kg.
ประจุอิเล็กตรอน(electron charge)	q	1.602×10^{-19} C.
ระหว่างประจุ กับมวลนิ่งของอิเล็กตรอน	q/m_e	1.76×10^{11} C/kg.
ค่าคงที่ของแพลงค์ (Planck's constant)	h $\hbar = h/2\pi$	6.626×10^{-34} J-sec 4.136×10^{-15} eV-sec 1.055×10^{-34} j-sec
ค่าคงที่ของโบลทซ์มันน์(Boltzmann 's constant)	k	1.381×10^{-23} j/K 8.617×10^{-5} eV/K
เลขอะโวกาโด(Avogadro's number)	N_0	6.023×10^{26} $(\text{k mol})^{-1}$
ความเร็วแสงในสุญญากาศ(speed of light in space)	c	2.998×10^{8} m/sec
ค่าคงที่ของแรงคูลอมบ์(Coulomb force constant)	$1/4\pi\epsilon_0$	8.988×10^{9} $N.m^2/c^2$
อัตราส่วนมวลโปรตอนและอิเล็กตรอน	m_p/m_e	1836
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริคของสุญญากาศ(Permittivity of free space)	ϵ_0	8.854×10^{-12} $c^2/N.m^2$ (F/m)
ค่าเปอร์มิอะบิลิตี้ในสุญญากาศ(permeability of free space)	μ_0	1.257×10^{-6} T.m/A(H/m)
ค่ารัศมีของบอห์ร(Bohr radius)	a_0	5.292×10^{-11} m.
ค่าคงที่ของริดเบอร์ก(Rydberg constant)	R	1.097×10^{7} m^{-1}
ค่าคงที่ของสเตฟาน(Stafan's constant)	σ	5.67×10^{-8} W/m^2
ค่าบอห์รแมกนีตรอน(Bohr magnetron)	μ_B	9.273×10^{-24} J/T
ค่าอิเล็กตรอนโวลต์(1 electron -volts)	eV.	1.602×10^{-19} J
ค่าพลังงานจูล (1 Joule)	J	6.242×10^{18} eV.
ค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ (Absolute temperature)	K	$^{\circ}C + 273.15$ K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ตารางคุณสมบัติทั่วไปของ Ge Si และ GaAs ที่อุณหภูมิห้อง (300 K)

Properties of Germannium , Silicon and GaliumAsenide at 300 K

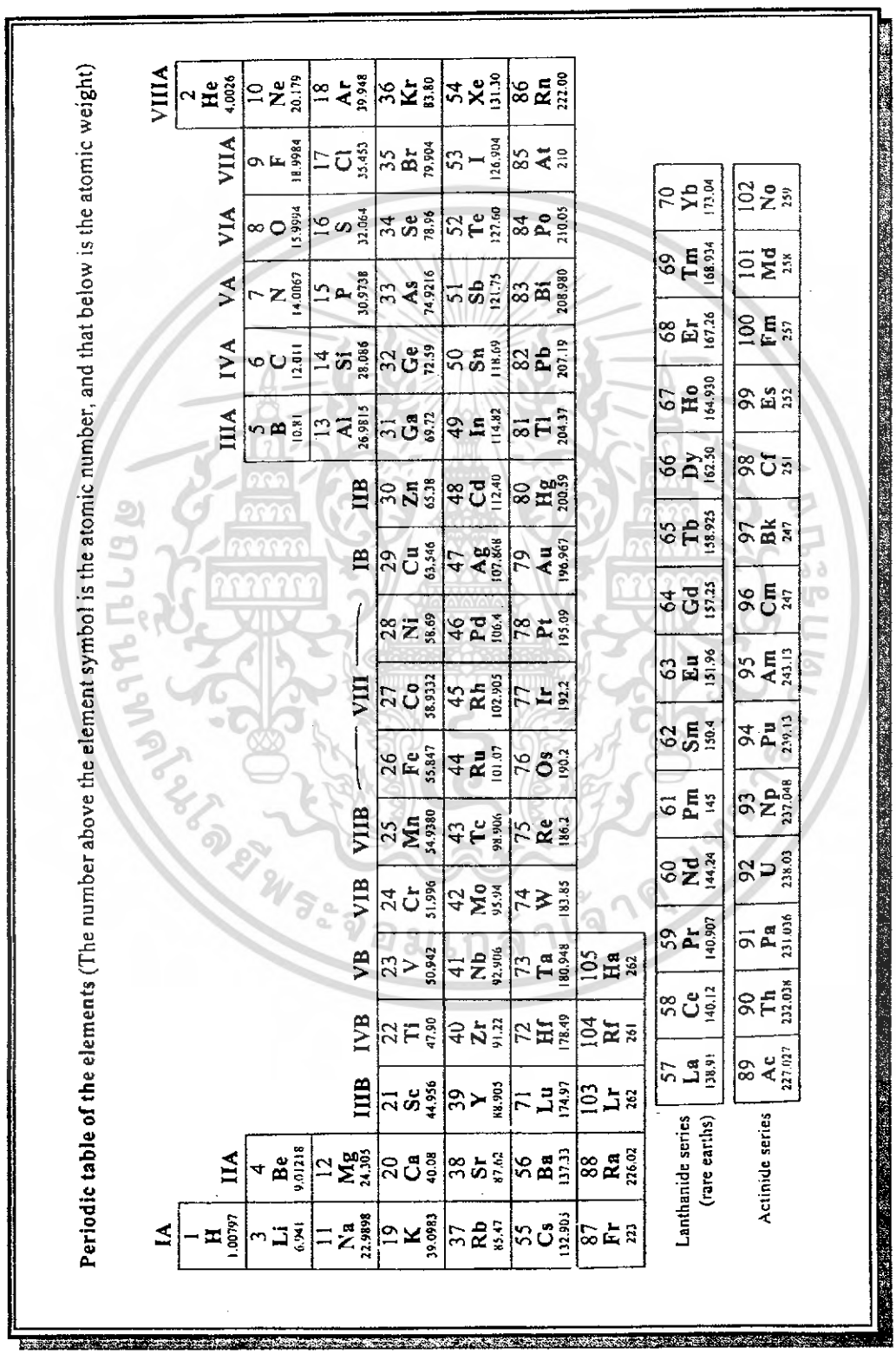
Property	Ge	Si	GaAs
Atom/molecule density (/cm^3)	4.42×10^{22}	5.0×10^{22}	4.42×10^{22}
Atomic/molecular weight	72.60	28.09	144.63
Breakdown field (V/cm)	$\approx 10^5$	$\approx 3\times10^5$	$\approx 4\times10^5$
Crystal structure	Diamond	Diamond	Zinc-blende
Density (g/cm^3)	5.3267	2.328	5.32
Dielectric constant	16.0	11.8	13.1
Diffusion constant, intrinsic (cm^2/s)			
electron, D_n	100	39	220
hole, D_p	49	13	10
Effective density of states (/cm^3)			
in conduction band, N_C	1.04×10^{19}	2.8×10^{19}	4.7×10^{17}
in valence band, N_V	6.0×10^{18}	1.04×10^{19}	7.0×10^{18}
Effective mass (m_o), mobility			
electron, m^*_e	1.64 (m^*_l) 0.082 (m^*_t)	0.98 (m^*_l) 0.19 (m^*_t)	0.067
hole, m^*_h	0.044 (m^*_{lh}) 0.28 (m^*_{hh})	0.16 (m^*_{lh}) 0.49 (m^*_{hh})	0.074 (m^*_{lh}) 0.50 (m^*_{hh})
Effective mass (m_o), density-of-state			
electron, m^*_{de}	0.22	1.18	0.067
hole, m^*_{dh}	0.18	0.81	0.52
Electron affinity, χ (V)	4.0	4.05	4.07
Energy gap, E_g (eV)	0.67	1.12	1.42
Index of refraction	4.0	3.4	3.3
Intrinsic carrier concentration, n_i (/cm^3)	2.4×10^{13}	1.08×10^{10} #	2.1×10^6
Intrinsic Debye length (μm)	0.68	24	2,250
Lattice constant, a (Å)	5.64613	5.43095	5.6533
Linear coef. of thermal expansion (/°C)	5.8×10^{-6}	2.6×10^{-6}	6.86×10^{-6}
Melting point (°C)	937	1,415	1,238
Mobility (cm^2/V-s)			
electron, μ_n	3,900	1,500	8,500
hole, μ_p	1,900	500	400
Optical-phonon energy (eV)	0.037	0.063	0.035
Specific heat (J/g-°C)	0.31	0.7	0.35
Thermal conductivity (W/cm-°C)	0.6	1.5	0.46
Thermal diffusivity (cm^2/s)	0.36	0.9	0.44

Note: All properties at room temperature. Source: Most data from S. M. Sze, *Physics of semiconductor devices*, 2nd Ed., Wiley, New York, 1981. # M. A. Green, "Intrinsic concentration, effective densities of states, and effective mass in silicon," *J. Appl. Phys.*, 67. 2944 (1990).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

ตารางธาตุ



Periodic table of the elements (The number above the element symbol is the atomic number, and that below is the atomic weight)

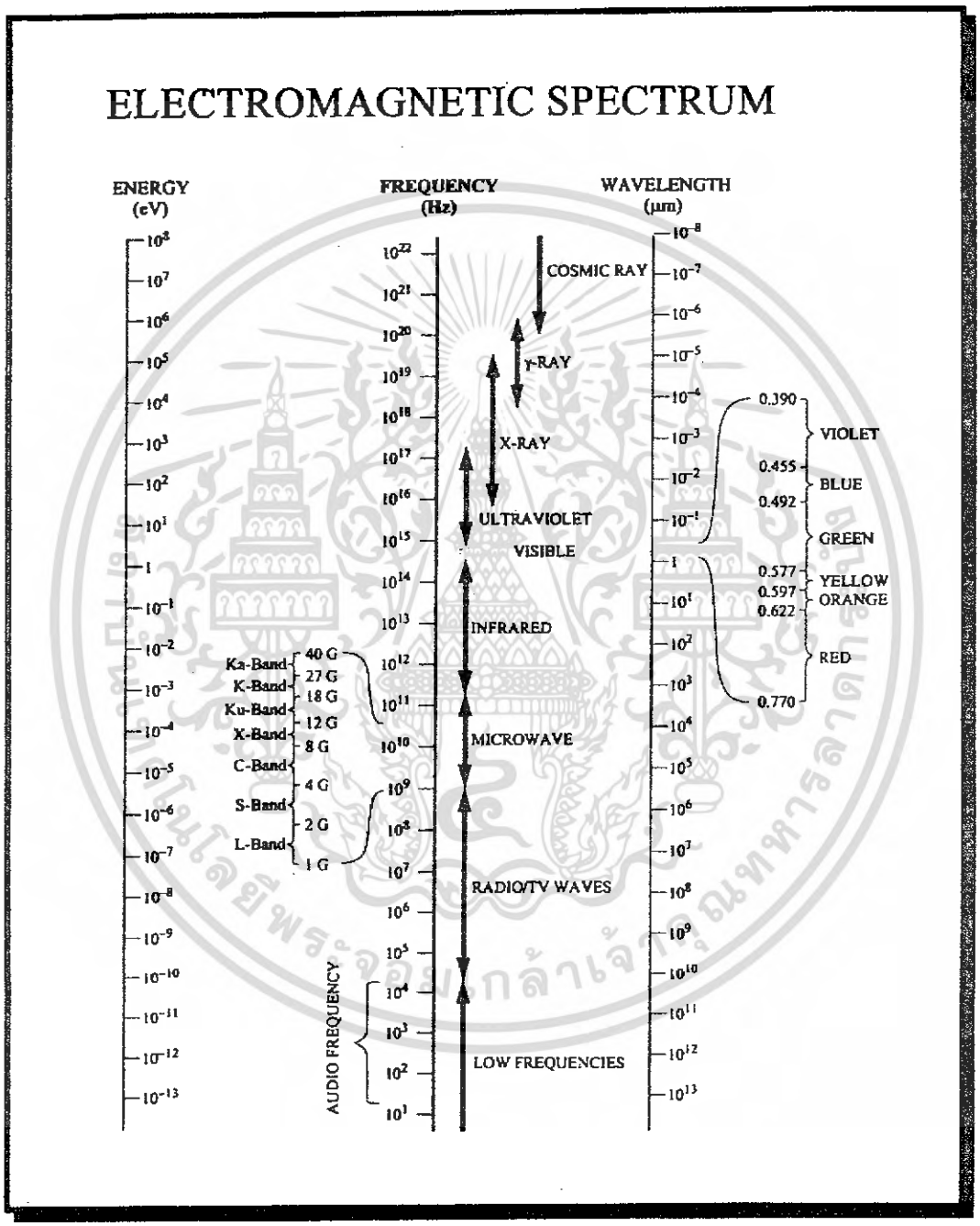
IA	IIA	IIIB	IVB	VB	VIB	VIIB	—— VIII ——		IB	IIB	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	VIIIA
1 H 1.00797																2 He 4.0026
3 Li 6.941	4 Be 9.01218										5 B 10.81	6 C 12.011	7 N 14.0067	8 O 15.9994	9 F 18.9984	10 Ne 20.179
11 Na 22.9898	12 Mg 24.305										13 Al 26.9815	14 Si 28.086	15 P 30.9738	16 S 32.064	17 Cl 35.453	18 Ar 39.948
19 K 39.0983	20 Ca 40.08	21 Sc 44.956	22 Ti 47.90	23 V 50.942	24 Cr 51.996	25 Mn 54.9380	26 Fe 55.847	27 Co 58.9332	28 Ni 58.69	29 Cu 63.546	30 Zn 65.38	31 Ga 69.72	32 Ge 72.59	33 As 74.9216	34 Se 78.96	35 Br 79.904	36 Kr 83.80
37 Rb 85.47	38 Sr 87.62	39 Y 88.905	40 Zr 91.22	41 Nb 92.906	42 Mo 95.94	43 Tc 98.906	44 Ru 101.07	45 Rh 102.905	46 Pd 106.4	47 Ag 107.868	48 Cd 112.40	49 In 114.82	50 Sn 118.69	51 Sb 121.75	52 Te 127.60	53 I 126.904	54 Xe 131.30
55 Cs 132.905	56 Ba 137.33	71 Lu 174.97	72 Hf 178.49	73 Ta 180.948	74 W 183.85	75 Re 186.2	76 Os 190.2	77 Ir 192.2	78 Pt 195.09	79 Au 196.967	80 Hg 200.59	81 Tl 204.37	82 Pb 207.19	83 Bi 208.980	84 Po 210.05	85 At 210	86 Rn 222.00
87 Fr 223	88 Ra 226.02	103 Lr 262	104 Rf 261	105 Ha 262													

Lanthanide series (rare earths)	57 La 138.91	58 Ce 140.12	59 Pr 140.907	60 Nd 144.24	61 Pm 145	62 Sm 150.4	63 Eu 151.96	64 Gd 157.25	65 Tb 158.925	66 Dy 162.50	67 Ho 164.930	68 Er 167.26	69 Tm 168.934	70 Yb 173.04
Actinide series	89 Ac 227.1027	90 Th 232.0381	91 Pa 231.036	92 U 238.03	93 Np 237.048	94 Pu 239.13	95 Am 243.13	96 Cm 247	97 Bk 247	98 Cf 251	99 Es 252	100 Fm 257	101 Md 258	102 No 259

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

วัสดุและเคมีภัณฑ์ที่ใช้ในการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ

Boron (B) : โบรอน

จัดอยู่ในตารางธาตุกลุ่มที่ 3 ของตารางพีริออดิค ใช้สำหรับเป็นอะตอมสารเจือในการแพร่เพื่อสร้างส่วน P^+ ใน (p-i-n photodiode) หรือการแพร่เพื่อสร้างส่วนเดรนและซอสในเอ็นฮานซ์เมนท์มอสทรานซิสเตอร์ชนิดพีแชนแนล

Isopropyl alcohol : ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์

เป็นสารละลายชนิดหนึ่ง ซึ่งใช้สำหรับล้างทำความสะอาดแผ่นผลึกครั้งสุดท้ายก่อนทำให้แห้ง

Methylalcohol : เมทิลแอลกอฮอล์

เป็นสารละลาย ซึ่งใช้สำหรับล้างแผ่นผลึกในครั้งสุดท้าย เพื่อขจัดสารอื่นๆก่อนทำให้แห้ง

Nitric acid (NHO_3) : กรดดินประสิว

เป็นกรดแก่ ซึ่งใช้สำหรับทำความสะอาดผิวหน้าของแผ่นผลึก เพื่อกำจัดเศษโลหะต่างๆที่อาจเกิดขึ้นได้

Nitrogen (N_2) : ไนโตรเจน

เป็นก๊าซเฉื่อยที่ใช้สำหรับทำหน้าที่ในการแพร่สารเจือลงไปในซิลิกอน หรือใช้สำหรับเป่าแผ่นผลึกให้แห้งภายหลังการล้างทำความสะอาด

Oxygen (O_2) : ออกซิเจน

เป็นก๊าซที่ใช้สำหรับกระบวนการออกซิเดชั่นเพื่อสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ขึ้น

Phosphorus (P) : ฟอสฟอรัส

จัดอยู่ในตารางธาตุกลุ่มที่ 5 ใช้สำหรับเป็นอะตอมสารเจือในการแพร่เพื่อสร้างส่วน N^+ ใน (p-i-n photodiode) หรือการแพร่เพื่อสร้างส่วนเดรนและซอสในพีมอสทรานซิสเตอร์ทั่วๆไป

Silicon dioxide (SiO_2) : ซิลิกอนไดออกไซด์

ใช้สำหรับทำหน้าที่เป็นชั้นป้องกันการแพร่สารเจือ และเป็นชั้นป้องกันผิวหน้าของแผ่นผลึกที่สมบูรณ์แล้ว สร้างขึ้นด้วยกระบวนการออกซิเดชั่น

Sulfulric acid (H_2SO_4) : กรดกำมะถัน

เป็นกรดแก่ ซึ่งใช้สำหรับทำความสะอาดแผ่นซิลิกอนและน้ำยาไวแสงในแผ่นผลึกภายหลังกระบวนการโฟโตลิโทกราฟฟี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Trichloroethylene : ไตรคลอโรเอทีลีน

เป็นสารละลายซึ่งใช้สำหรับล้างไขมันและสิ่งสกปรกที่อยู่บนผิวแผ่นซิลิกอน หรือภาชนะอื่นๆที่เกี่ยวข้องกับงานสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ

Xylean : ไซลีน

เป็นสารละลายที่ใช้ในกระบวนการโฟโตลิโทกราฟฟี เพื่อละลายน้ำยาไวแสงที่ไม่ถูกฉายแสงออกจากแผ่นผลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้