การประยุกต์ใช้ฟิล์มบางเพชรเป็นโฟโตไดโอดโครงสร้าง เพชรชนิดพี/อินทรินซิค–ซิลิคอน/เอ็น–ซิลิคอน

APPLICATION OF DIAMOND THIN FILMS FOR p-DIAMOND /i-SI/n^{+}-Si PHOTODIODE

จักรพงศ์ ศุภเดช
JAKRAPONG SUPADECH

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2549

ISBN 974-15-2705-5

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การประยุกต์ใช้ฟิล์มบางเพชรเป็นโฟโตไดโอดโครงสร้าง เพชรชนิดพี/อินทรินซิค-ซิลิคอน/เอ็น-ซิลิคอน

APPLICATION OF DIAMOND THIN FILMS FOR p-DIAMOND /i-Si/n^+-Si PHOTODIODE

จักรพงศ์ ศุภเดช

JAKRAPONG SUPADECH

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 63623
วัน,เดือน,ปี..... 30 ส.ค. 2549

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2549

ISBN : 974-15-2705-5

APPLICATION OF DIAMOND THIN FILMS FOR p-DIAMOND /i-Si/n^+-Si PHOTODIODE

JAKRAPONG SUPADECH

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN MICROELECTRONICS ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2006

ISBN : 974-15-2705-5

COPYRIGHT 2006

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประยุกต์ใช้ฟิล์มบางเพชรเป็นโฟโตไดโอดโครงสร้างเพชรชนิดพี/อินทรินซิค-ซิลิคอน/เอ็น-ซิลิคอน
นักศึกษา	นาย จักรพงศ์ ศุภเดช
รหัสนักศึกษา	47061201
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
พ.ศ.	2549
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. วิสุทธิ์ จิตริ่งเรือง

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มเพชร การประยุกต์ใช้งานฟิล์มเพชรเป็นโฟโตไดโอดซึ่งมีโครงสร้างใหม่ p-diamond/i-Si/n^+-Si, คุณสมบัติพื้นฐานของโฟโตไดโอด และศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆที่มีผลต่อโฟโตไดโอดชนิดนี้ โดยฟิล์มเพชรชนิดพีที่มีความหนาตั้งแต่ 5-20 μm ถูกสังเคราะห์ขึ้นด้วยวิธีซีวีดีแบบขดลวดความร้อนที่ความดันบรรยากาศ บนแผ่นผลึกฐานรองซึ่งเป็นซิลิคอนชนิดพี(p^- : intrinsic) ระนาบ(111) ที่มีสภาพต้านทานสูง 2,000 Ω.cm หนาประมาณ 275 μm โดยใช้สารตั้งต้นเป็นเอทิลแอลกอฮอล์ที่มีโบรอนไตรออกไซด์ผสมอยู่ สำหรับชั้นซิลิคอนชนิดเอ็น (n^+) สร้างขึ้นด้วยการแพร่อะตอมฟอสฟอรัสเข้าไปทางด้านหลังของแผ่นผลึกฐานรองลึก 4 μm จากการทดลองพบว่าโครงสร้างดังกล่าวสามารถทำงานเป็นโฟโตไดโอดได้ดี โดยมีกระแสมืดประมาณ 2.3 μA/mm^2, ศักย์ภายในมีค่าอยู่ในช่วง 0.6-1.5 Volts, แรงดันพังทลายมีค่าสูงมากกว่า 100 Volts, ความจุไฟฟ้ามีค่าต่ำประมาณ 1.5-27.5 pF/mm^2 และให้กระแสแสงประมาณ 2-28 μA/mm^2 เมื่อถูกฉายด้วยแสงฮาโลเจนที่มีความเข้มแสง 650-9,500 lux ที่แรงดัน 0-10 Volts ความไวในการตอบสนองต่อสัญญาณแสงมีค่าความถี่คัทออฟ 320 kHz ที่ความต้านทานโหลด 1 kΩ (พื้นที่รับแสง 17.5 mm^2) นอกจากนี้การทดลองยังได้แสดงให้เห็นถึงผลของอุณหภูมิ ผลของความหนาแน่นอะตอมสารเจือในฟิล์มเพชร ผลของความหนาของฟิล์มเพชร ผลของความหนาของชั้นอินทรินซิค และผลของลวดลายขั้วโลหะด้านรับแสง

ผลการศึกษาและวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของการประยุกต์ใช้งานฟิล์มเพชรเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง และยังเป็นแนวทางของการพัฒนาประสิทธิภาพของโฟโตไดโอดชนิดนี้ต่อไป

Thesis Title	Application of diamond thin films for p-diamond / i-Si/n^+-Si photodiode
Student	Mr. Jakrapong Supadech
Student ID.	47061201
Degree	Master of Engineering
Programme	Microelectronics Engineering
Year	2006
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Wisut Titiroongruang

ABSTRACT

This thesis presents the study on diamond films properties, application and basic properties of diamond thin films for the new structure of p-diamond/i-Si/n^+-Si photodiode and study on parameters to effects on these photodiode. The 5-20 μm of p-diamond thin films thickness was synthesized on high resistivity of 2,000 Ω.cm p^--type silicon(intrinsic) orientation of substrate (111), 275 μm. thickness by hot filament CVD technique at atmosphere pressure. Borontrioxide mixed with ethyl-alcohol was used for carbon source. n^+-layer silicon was formed by thermal diffusion of phosphorous atoms from the back side of intrinsic silicon substrate. From the experimental results, it was found that this structure shows good basic properties of photodiode, which 2.3 μA/mm^2 of dark current, built-in voltage is about 0.6-1.5 Volts, more than 100 Volts breakdown voltage, capacitance is 1.5-27.5 pF/mm^2, photocurrent is 2-28 μA/mm^2 at 650-9,500 lux with reverse bias 0-10 volts and 320 kHz cut-off frequency with 1 kΩ load resistance (active area is 17.5 mm^2). Furthermore, this experiment results perform the effects of temperature, carrier density, patterns of electrode, diamond thin films and intrinsic silicon layer thickness.

This experiments shows high potential of application of diamond thin films for opto-electronic devices and useful for the development of this photodiode.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้อย่างดี ด้วยคำแนะนำ และคำปรึกษาจาก รศ.ดร. วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์และดร. อัมพร โพธิ์ใย ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม ขอขอบคุณ รศ.ดร. สมเกียรติ ศุภเดช, ผศ.ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, รศ.ดร.เติมพงษ์ เพ็ชรกูล และ รศ.สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล ที่ช่วยให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์

ขอขอบคุณทุนสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (TGIST) ที่ให้การสนับสนุนทุนการวิจัย

ขอขอบคุณคุณ วิน บรรจงปรุ และ คุณนิมิต สมหวัง จาก TMEC ที่ช่วยวัดความหนาของชั้นฟิล์มเพชรและความหนาของชั้นอินทรินซิค ขอขอบคุณ คุณอภินัย ฤกษ์รัตน์ ที่ช่วยวัดความลึกของชั้นซิลิคอนชนิดเอ็น

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ทุกคนที่ให้คำแนะนำต่างๆ และคอยให้กำลังใจเสมอมา

ขอขอบคุณบัณฑิตศึกษาและบัณฑิตวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องต่างๆ

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนในทุกเรื่องๆ ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

จักรพงศ์ ศุภเดช

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....II

กิตติกรรมประกาศ.....III

สารบัญ.....IV

สารบัญตาราง.....IX

สารบัญรูป.....X

คำอธิบายสัญลักษณ์.....XV

บทที่ 1 บทนำ.....1

1.1 ความเป็นมาของการวิจัย.....1

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....2

1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....2

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....3

1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน.....3

1.6 ขอบเขตการวิจัย.....4

1.7 ขั้นตอนของการศึกษา.....4

บทที่ 2 สารกึ่งตัวนำเพชร.....6

2.1 ความเป็นมาของสารกึ่งตัวนำเพชร.....6

2.2 ลักษณะโครงสร้างของผลึกคาร์บอน.....7

2.3 คุณสมบัติต่างๆของผลึกเพชร.....9

2.4 เทคนิคการสังเคราะห์ผลึกเพชร.....10

2.4.1 Hot Filament CVD (HFCVD).....10

2.4.2 Plasma -ASSISTED CVD (PACVD).....11

2.4.3 Combustion CVD 12

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5 การวิเคราะห์คุณสมบัติของผลึกเพชร.....13

2.5.1 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Raman spectroscopy 13

2.5.2 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray spectrometer (EDX).....14

2.5.3 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวและขนาดด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM).....15

2.6 การประยุกต์ใช้งานฟิล์มเพชร.....16

บทที่ 3 อุปกรณ์ตรวจวัดแสง.....17

3.1 ความหมายและประเภทของตัวตรวจวัดแสง.....17

3.1.1 โฟโตอิมิชชั่นดีเทคเตอร์(Photoemission detector).....17

3.1.2 โฟโตคอนดัคเตอร์ (Photoconductor).....18

3.1.3 โฟโตไดโอดชนิดโลหะ-สารกึ่งตัวนำ (Metal-semiconductor photodiode).....19

3.1.4 โฟโตไดโอดชนิดโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ(MSM photodiode).....20

3.1.5 โฟโตไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น(p-n photodiode).....21

3.1.6 โฟโตไดโอด ชนิดอะวาลานซ์ (Avalanche PhotoDiode : APD).....23

3.1.7 โฟโตไดโอดชนิด พี-ไอ-เอ็น (p-i-n photodiode).....23

3.2 ข้อมูลจำเพาะพื้นฐานต่างๆที่สำคัญของโฟโตไดโอดทั่วๆไป.....24

3.2.1 กระแสมืดของโฟโตไดโอด(Dark current : I_{Dark}).....24

3.2.2 กระแสแสงของโฟโตไดโอด(Photo current : I_{photo}).....25

3.2.3 แรงดันพังทลายของโฟโตไดโอด(Breakdown voltage : V_B).....26

3.2.4 ความไวต่อแสงของโฟโตไดโอด(Responsivity).....27

3.2.5 ความเป็นเชิงเส้นของโฟโตไดโอด(Linearity).....27

3.2.6 ค่าความจุไฟฟ้าของโฟโตไดโอด (Junction capacitance : C_j).....28

3.2.7 ผลการตอบสนองของโฟโตไดโอด(Photo response).....28

3.2.8 แบนด์วิดท์ของโฟโตไดโอด(Bandwidth).....29

3.3 โฟโตไดโอดโครงสร้าง ใหม่ แบบ p-diamond/i-Si/n^+-Si 30

3.3.1 โครงสร้างของโฟโตไดโอดชนิด p-diamond/i-Si/n^+-Si.....30

3.3.2 หลักการทำงานของโฟโตไดโอดโครงสร้างใหม่แบบ p-diamond/i-Si/n^+-Si....31

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 กระบวนการสร้างและการทดลอง.....35

4.1 กระบวนการสังเคราะห์และการวิเคราะห์คุณสมบัติฟิล์มเพชร.....35

4.1.1 ทำความสะอาดแผ่นผลึกซิลิคอน.....35

4.1.2 ขั้นตอนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร.....36

4.2 กระบวนการสร้างรอยสัมผัสระหว่างฟิล์มเพชรชนิดพีกับโลหะชนิดต่างๆ.....38

4.2.1 การสร้างรอยสัมผัสระหว่าง ฟิล์มเพชรชนิดพีกับกาวเงิน.....38

4.2.2 การสร้างรอยสัมผัสระหว่าง ฟิล์มเพชรชนิดพีกับอะลูมิเนียม.....39

4.2.3 การสร้างรอยสัมผัสระหว่าง ฟิล์มเพชรชนิดพีกับทองคำ.....40

4.3 กระบวนการสร้างโฟโตไดโอดโครงสร้าง p-diamond/i-Si/n^{+}-Si 41

4.3.1 ทำความสะอาดแผ่นผลึกซิลิคอน.....41

4.3.2 สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ 41

4.3.3 แพร่อะตอมสารเจือฟอสฟอรัส.....42

4.3.4 สังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี HFCVD.....43

4.3.5 สร้างรอยสัมผัสโอห์มิคระหว่างซิลิคอนชนิดเอ็นกับอะลูมิเนียม.....44

4.4 การทดลองเพื่อการศึกษาผลของความเข้มข้นอะตอมสารเจือในฟิล์มเพชร และผลของความหนาของชั้นฟิล์มเพชรที่มีต่อคุณสมบัติของโฟโตไดโอด.....45

4.5 การทดลองเพื่อการศึกษาผลของความหนาชั้นอินทรินซิคที่มีต่อคุณสมบัติ ของโฟโตไดโอด.....46

4.5.1 ทำความสะอาดแผ่นผลึกซิลิคอน.....46

4.5.2 สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ 46

4.2.3 สกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ด้านหลังออกบางส่วน.....46

4.2.4 สกัดชั้นซิลิคอนด้านหลังออกบางส่วน.....48

4.2.5 สกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ออกทั้งหมด.....49

4.5.6 สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์.....49

4.5.7 สกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ด้านหลังออก.....49

4.2.8 แพร่อะตอมสารเจือฟอสฟอรัส.....50

4.6 การทดลองเพื่อการศึกษาผลของลักษณะลวดลายของขั้วโลหะด้านรับแสง.....52

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 5 ผลการวิเคราะห์และผลการทดลอง.....54

5.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้.....54

5.1.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวและลักษณะตัดขวางด้วย ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดอิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope:SEM).....54

5.1.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Raman spectroscopy 55

5.1.3 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray spectrometer (EDX)....56

5.1.4 ผลการวัดการสะท้อน(Reflectance)ของชั้นฟิล์มเพชร.....57

5.1.5 ผลการศึกษาอัตราการเกิดของฟิล์มเพชร.....58

5.2 ผลการวัดลักษณะสมบัติของรอยสัมผัสระหว่างฟิล์มเพชรชนิดพีกับโลหะชนิดต่างๆ.....58

5.2.1 ลักษณะสมบัติของรอยสัมผัสระหว่างฟิล์มเพชรชนิดพีกับกาวเงิน.....58

5.2.2 ลักษณะสมบัติของรอยสัมผัสระหว่าง ฟิล์มเพชรชนิดพีกับอะลูมิเนียม.....59

5.2.3 ลักษณะสมบัติของรอยสัมผัสระหว่าง ฟิล์มเพชร ชนิดพีกับทองคำ.....60

5.3 ผลการวัดลักษณะสมบัติของโฟโตไดโอดโครงสร้าง p-diamond/i-Si/n^+-Si.....61

5.3.1 ผลการวัดลักษณะสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดในภาวะมืด (Dark condition).....61

5.3.2 ผลการวัดลักษณะสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดในขณะได้รับแสง (Illumination condition).....63

5.3.3 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อกระแสมืดของโฟโตไดโอด.....65

5.3.4 ผลการวัดความหนาแน่นความจุไฟฟ้าของโฟโตไดโอด.....67

5.3.5 ผลการวัดลักษณะสมบัติ photo response ของโฟโตไดโอด.....67

5.3.6 ผลการทดลองตรวจจับสัญญาณเสียงที่ถูกมอดดูเลทมากับแสงเลเซอร์ด้วยโฟโตไดโอด โครงสร้าง p-diamond/i-Si/n^+-Si.....70

5.4 ผลของความเข้มข้นอะตอมสารเจือในฟิล์มเพชรที่มีต่อคุณสมบัติของโฟโตไดโอด..71

5.4.1 ผลของความเข้มข้นอะตอมสารเจือในฟิล์มเพชรที่มีต่อกระแสแสงของโฟโตไดโอด.....71

5.4.2 ผลของความเข้มข้นอะตอมสารเจือในฟิล์มเพชรที่มีต่อค่าความหนาแน่นความจุไฟฟ้าของโฟโตไดโอด.....72

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.5 ผลของความหนาของชั้นฟิล์มเพชรที่มีต่อลักษณะสมบัติของโฟโตไดโอด.....73
5.5.1 ผลของความหนาชั้นฟิล์มเพชรที่มีต่อกระแสแสงของโฟโตไดโอด.....73
5.5.2 ผลของความหนาชั้นฟิล์มเพชรที่มีต่อค่าความหนาแน่นความจุไฟฟ้าของโฟโตไดโอด.....74
5.6 ผลของความหนาชั้นอินทรินซิก-ซิลิคอนที่มีต่อลักษณะสมบัติของโฟโตไดโอด.....74
5.6.1 ผลของความหนาชั้นอินทรินซิก-ซิลิคอน ที่มีต่อกระแสมืด.....75
5.6.2 ผลของความหนาชั้นอินทรินซิก-ซิลิคอนที่มีต่อความหนาแน่นความจุไฟฟ้า..76
5.7 ผลของลวดลายของขั้วโลหะด้านรับแสงที่มีต่อลักษณะสมบัติของโฟโตไดโอด.....77

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....78

เอกสารอ้างอิง.....81

ภาคผนวก.....83
ภาคผนวก ก. รายละเอียดของลวดลายของขั้วโลหะด้านรับแสงของโฟโตไดโอด.....84
ภาคผนวก ข. การคำนวณหาอัตราส่วนระหว่างจำนวนโบรอนต่อคาร์บอน.....88
ภาคผนวก ค. รายละเอียดข้อมูลทั่วไปของสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ.....91
ภาคผนวก ง. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....115

ประวัติผู้เขียน..... 135

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 คุณสมบัติที่สำคัญของผลึกเพชรเปรียบเทียบกับฟิล์มเพชรที่ได้จากกระบวนการ CVD และซิลิคอน....9

2.2 ค่า Raman Spectrum ของโครงสร้างแบบต่างๆของคาร์บอน 13

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 ลักษณะโครงสร้างอะตอมของผลึกกราไฟต์....8

2.2 ลักษณะการเรียงตัวของอะตอมในหนึ่งยูนิตเซลล์ของผลึกเพชร....8

2.3 ลักษณะของเครื่อง CVD แบบขดลวดความร้อน....11

2.4 ลักษณะของเครื่อง CVD แบบ DC plasma....12

2.5 ลักษณะของเครื่อง CVD แบบ Microwave plasma....12

2.6 ตัวอย่างลักษณะกราฟRaman spectrum ของฟิล์มเพชร....14

2.7 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX ของผิวหน้าฟิล์มเพชร....15

2.8 ลักษณะของภาพ SEM ของผิวหน้าชิ้นงาน....15

3.1 อุปกรณ์ตรวจจับแสงแบบโฟโตอิมิชชั่น....18

3.2 อุปกรณ์ตรวจจับแสงแบบโฟโตคอนดัคทีฟ....18

3.3 ลักษณะของแถบพลังงานของตรวจจับแสงแบบโฟโตคอนดัคเตอร์....19

3.4 ลักษณะโครงสร้างตัดขวางของโฟโตไดโอดชนิดโลหะ-สารกึ่งตัวนำ....19

3.5 ลักษณะของแถบพลังงานของโฟโตไดโอดชนิดโลหะ-ซิลิคอนชนิดเอ็น....20

3.6 ลักษณะตัดขวางของโฟโตไดโอดชนิดโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ....20

3.7 ลักษณะของแถบพลังงานของโฟโตไดโอดชนิดโลหะ-ซิลิคอนชนิดเอ็น-โลหะ....21

3.8 ลักษณะตัดขวางของโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น....21

3.9 ลักษณะของแถบพลังงานของโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น....22

3.10 วงจรสมมูลของตัวตรวจวัดแสงชนิดรอยต่อพี-เอ็น....22

3.11 ลักษณะโครงสร้างตัดขวางของโฟโตไดโอดชนิดพี-ไอ-เอ็น....24

3.12 ลักษณะของแถบพลังงานของโฟโตไดโอดชนิด พี-ไอ-เอ็น....24

3.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าล็อคฐานอีของกระแสอิ่มตัวไหลย้อนกลับ($\ln(I_{Diode})$) กับแรงดันไบอัส....25

3.14 กราฟความสัมพันธ์ กระแสแสง กับแรงดันไบอัสย้อนกลับขณะได้รับแสง ที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ....26

3.15 ค่าแรงดันพังทลายบนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส กับแรงดันไบอัส....26

3.16 กราฟแสดงค่า Responsivity ของโฟโตไดโอด ที่ความยาวคลื่นแสงค่าต่างๆ....27

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.17 ความเป็นเชิงเส้นของโฟโตไดโอดบนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสง กับความเข้มแสง....27

3.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้า กับแรงดันไบอัสย้อนกลับ....28

3.19 กราฟคุณสมบัติ Photo response ของโฟโตไดโอด....29

3.20 ขนาดแบนด์วิดท์ จากกราฟคุณสมบัติ Photo responseของโฟโตไดโอด....29

3.21 ลักษณะโครงสร้างของโฟโตไดโอดแบบ p-diamond/i-Si/n^{+}-Si....30

3.22 ลักษณะของแถบพลังงานของไดโอดในภาวะเริ่มสัมผัสก่อนเกิดสมดุลความร้อน....31

3.23 ลักษณะของแถบพลังงานในภาวะสมดุลความร้อนและไม่มีแรงดันไบอัส....32

3.24 ลักษณะของแถบพลังงานขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ....32

3.25 ลักษณะของแถบพลังงานขณะได้รับไบอัสย้อนกลับและได้รับแสง....33

4.1 แผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นที่ใช้เป็นฐานรอง....36

4.2 ภาพถ่ายแผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นที่ใช้เป็นฐานรองสำหรับการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร....36

4.3 แผ่นผลึกซิลิคอนหลังจากที่ผิวหน้าถูกขัดด้วยครีมเพชร....36

4.4 ภาพผิวผลึกซิลิคอนหลังจากที่ผิวหน้าถูกขัดด้วยครีมเพชรที่ถ่ายจาก SEM....36

4.5 แผนผังของเครื่อง Hot Filament Chemical Vapor Deposition....37

4.6 แผ่นผลึกซิลิคอนหลังจากที่สังเคราะห์ฟิล์มเพชร....38

4.7 ภาพถ่ายด้านบนของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้จาก SEMภายหลังการ anneal 38

4.8 การสร้างรอยสัมผัสระหว่าง ฟิล์มเพชรชนิดพี กับ กาวเงิน....39

4.9 ภาพถ่ายรอยสัมผัสระหว่าง ฟิล์มเพชรชนิดพี กับ กาวเงิน....39

4.10 แผ่นลักษณะลวดลายชั้นอะลูมิเนียม บนแผ่นกระจก Mask 39

4.11 โครงสร้างรอยสัมผัสระหว่าง ฟิล์มเพชรชนิดพี กับ อะลูมิเนียม....40

4.12 ภาพถ่ายด้านบนของรอยสัมผัสฟิล์มเพชรชนิดพี กับ อะลูมิเนียม....40

4.13 โครงสร้างของรอยสัมผัสระหว่าง ฟิล์มเพชรชนิดพี กับ ทองคำ....41

4.14 แผ่นผลึกซิลิคอนเริ่มต้นชนิดอินทรินซิค....41

4.15 แผ่นผลึกซิลิคอนหลังจากสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์....42

4.16 โครงสร้างหลังจากสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ด้านหลังออก....42

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.17 โครงสร้างของชิ้นงานภายหลังการแพร่อะตอมสารเจือชนิดเอ็น....43
4.18 โครงสร้างของชิ้นงานภายหลังการสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ด้านหน้า....43
4.19 โครงสร้างของชิ้นงานภายหลังการที่สังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดพี....44
4.20 โครงสร้างของชิ้นงานหลังจากสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ด้านหลังออก....44
4.21 โครงสร้างของชิ้นงานภายหลังการสร้างขั้วโลหะที่ด้านหลัง....44
4.22 โครงสร้างของโฟโตไดโอดที่สร้างเสร็จเรียบร้อย....45
4.23 ภาพถ่ายของชิ้นงาน ที่ถูกติดตั้งบน Print Circuit Board....45
4.24 แผ่นผลึกเริ่มต้น ซิลิคอนชนิดอินทรินซิค....46
4.25 แผ่นผลึกซิลิคอนหลังจากสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์....46
4.26 ลักษณะลวดลายของกระจก Mask....47
4.27 แผ่นผลึกซิลิคอนก่อนการสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ด้านหลังออก....47
4.28 โครงสร้างชิ้นงานหลังจากสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ด้านหลังออก....47
4.29 ภาพถ่ายด้านหลังขอลชิ้นงานจากกล้องจุลทรรศน์ หลังจากสกัดชั้น
ซิลิคอนไดออกไซด์ด้านหลังออก....48
4.30 โครงสร้างของชิ้นงานหลังจากสกัดซิลิคอนบางส่วนที่ด้านหลังออก....48
4.31 ภาพด้านบนของชิ้นงานหลังจากสกัดซิลิคอนด้านหลังบางส่วนออก....49
4.32 โครงสร้างของชิ้นงานหลังจากสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ใหม่....49
4.33 โครงสร้างของชิ้นงานหลังจากสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ด้านหลังออก....50
4.34 โครงสร้างของชิ้นงานหลังจากแพร่อะตอมสารเจือด้านหลัง....50
4.35 โครงสร้างของชิ้นงานหลังจากสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ด้านหน้าออก....51
4.36 โครงสร้างของชิ้นงานหลังจากที่ผิวหน้าถูกขัดด้วยครีมเพชร....51
4.37 โครงสร้างของชิ้นงานหลังจากที่สังเคราะห์ฟิล์มเพชร....51
4.38 การสร้างรอยสัมผัสโอห์มิคระหว่างซิลิคอนชนิดเอ็นกับอะลูมิเนียม....51
4.39 โครงสร้างของโฟโตไดโอดที่สร้างเสร็จสมบูรณ์....51
4.40ลักษณะลวดลายโลหะด้านรับแสง แบบต่างๆ ซึ่งมีพื้นที่ของชั้นโลหะต่างกัน....52
4.41 ตัวอย่างภาพถ่ายด้านบนของโฟโตไดโอดที่มีลวดลายของขั้วโลหะ....52
4.42 ภาพของโฟโตไดโอดภายหลังการติดตั้งลงบนตัวถังแบบ TO-3....53

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.1 ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวชิ้นงาน 55

5.2 ภาพถ่ายลักษณะภาคตัดขวางของชิ้นงานภายหลังการสังเคราะห์วัสดุ.....55

5.3 spectrum ของผิวหน้าชิ้นงาน 56

5.4 Raman spectrum ของวัสดุที่ได้สังเคราะห์ขึ้น.....56

5.5 ผลการสะท้อนแสงของฟิล์มเพชรซึ่งหนา 10 μm ที่ความยาวคลื่นแสงค่าต่างๆ ในช่วง 400-900 nm.....57

5.6 ความหนาของฟิล์มเพชรชนิดไม่มีอะตอมสารเจือปน ที่เวลาการสังเคราะห์ค่าต่างๆ.....58

5.7 ลักษณะกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสระหว่าง กาวเงิน/ฟิล์มเพชรชนิดพี/กาวเงิน.....59

5.8 ลักษณะกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันของสัมผัสระหว่าง อะลูมิเนียม/ฟิล์มเพชรชนิดพี/อะลูมิเนียม.....59

5.9 ลักษณะกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสระหว่าง ทองคำ/ฟิล์มเพชรชนิดพี/ทองคำ.....60

5.10 แผนผังวงจรและอุปกรณ์ที่ใช้วัดลักษณะสมบัติของโฟโตไดโอดในภาวะมืด.....61

5.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดโครงสร้าง p-diamond/i-Si/n^+-Si ในภาวะมืด.....62

5.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดัน จากเครื่อง Curve tracer ของโฟโตไดโอดโครงสร้าง p-diamond/i-Si/n^+-Si ในภาวะมืด.....62

5.13 แผนผังวงจรและอุปกรณ์ที่ใช้วัดลักษณะสมบัติของโฟโตไดโอดขณะได้รับแสง.....63

5.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสง-แรงดันของโฟโตไดโอดโครงสร้าง p-diamond/i-Si/n^+-Si ที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ (Halogen Lamp).....63

5.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสง-ความเข้มแสงของโฟโตไดโอดโครงสร้าง p-diamond/i-Si/n^+-Si ที่แรงดันไบอัสย้อนกลับ 12 โวลต์.....64

5.16 แผนผังวงจรและอุปกรณ์ที่ใช้วัดผลของอุณหภูมิที่มีต่อกระแสมืดของโฟโตไดโอด.....65

5.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสมืด-แรงดันของโฟโตไดโอดโครงสร้าง p-diamond/i-Si/n^+-Si ที่อุณหภูมิค่าต่างๆ.....66

5.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสมืด-อุณหภูมิ ของโฟโตไดโอด ที่แรงดันค่าต่างๆ.....66

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอดโครงสร้าง p-diamond/i-Si/n^+-Si.....67

5.20 แผนผังวงจรที่ใช้วัดคุณสมบัติ Photo responseของโฟโตไดโอด.....68

5.21 กราฟ photo response ของโฟโตไดโอดโครงสร้าง p-diamond/i-Si/n^+-Si ที่ค่าความต้านทานโหลดค่าต่างๆภายใต้แรงดันไบอัส 15 โวลต์.....69

5.22 กราฟ photo response ของโฟโตไดโอดโครงสร้าง p-diamond/i-Si/n^+-Si ที่แรงดันไบอัสค่าต่างๆ โดยใช้ความต้านทานโหลดเท่ากับ 10 kΩ.....69

5.23 แผนผังวงจรที่ใช้วัดคุณสมบัติ Photo responseของโฟโตไดโอด.....70

5.24 ลักษณะของการตอบสนองต่อสัญญาณเสียงของโฟโตไดโอดโครงสร้าง p-diamond/i-Si/n^+-Si.....71

5.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสง-แรงดันไบอัสย้อนกลับ ของโฟโตไดโอด ที่ประกอบด้วยฟิล์มเพชรที่มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่แตกต่างกัน.....72

5.26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นความจุไฟฟ้า-แรงดันไบอัส ที่มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือของฟิล์มเพชรชนิดพีที่แตกต่างกัน.....72

5.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสง-ความหนาฟิล์มเพชรของโฟโตไดโอด โครงสร้าง p-diamond/i-Si/n^+-Si ที่แรงดัน 7 โวลต์.....73

5.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้า-ความหนาฟิล์มเพชรของโฟโตไดโอด โครงสร้าง p-diamond/i-Si/n^+-Si.....74

5.29 ลักษณะตัดขวางของแผ่นผลึกซิลิคอนชนิดอินทรินซิก หลังจากถูกสกัดออก.....75

5.30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสมืด-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด ที่ความหนาในการสกัดชั้นอินทรินซิกซิลิคอนมีค่าต่างๆกัน.....76

5.31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด ที่ความหนาในการสกัดชั้นอินทรินซิกซิลิคอนมีค่าต่างๆ.....76

คำอธิบายสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย
μ	ความคล่องตัวของพาหะ (mobolity)
ϕ_B	กำแพงศักย์ช็อตต์กี้ (Schottky Barrier)
C_j	ความจุไฟฟ้าที่รอยต่อ (junction capacitance)
E_C	ระดับคอนดักชั่น (conduction level)
E_F	ระดับเฟอร์มิ (fermi level)
E_g	ช่องว่างแถบพลังงาน (energy band gap)
E_V	ระดับวาเลนซ์ (valence level)
$f_{Cut\text{-}off}$	ความถี่คัทออฟ
I_{photo}	กระแสแสง (photo current)
I_{dark}	กระแสมืด (dark current)
J_L	ความหนาแน่นกระแสแสง (photo current density)
L_n	ระยะการแพร่ของอิเล็กตรอน (electron diffusion length)
L_p	ระยะการแพร่ของโฮล (hole diffusion length)
R_L	ความต้านทานโหลด (load resistance)
R_{series}	ความต้านทานอนุกรม (series resistance)
R_{Sh}	ความต้านทานขนาน (shunt resistance)
V_{bi}	ศักย์ไฟฟ้าภายใน (built in voltage)
W	เขตปลอดพาหะ (Deplrtion region)

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาของการวิจัย

วัสดุสารกึ่งตัวนำเริ่มเป็นที่รู้จักและถูกนำมาใช้งานเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ตั้งแต่กลางศตวรรษที่ 20 จนกระทั่งถึงปัจจุบัน วัสดุสารกึ่งตัวนำที่มีบทบาทและถูกนำมาใช้งานมากที่สุดได้แก่ซิลิคอน ในขณะเดียวกันมีการศึกษาวิจัยเพื่อค้นหาวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดใหม่ๆอีกด้วย ธาตุคาร์บอนจัดเป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำประเภทธาตุเดี่ยว(element semiconductor)เช่นเดียวกับซิลิคอน แต่ยังไม่มีการนำมาใช้สร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทไวงาน(active device)เช่นซิลิคอน ทั้งนี้เนื่องจากปกติโดยทั่วไปคาร์บอนมักจะอยู่ในรูปของอผลึก หรืออาจอยู่ในรูปของกราไฟต์ซึ่งมีคุณสมบัตินำไฟฟ้าได้ดี นอกจากนี้ยังอาจอยู่ในรูปของผลึกที่เรียกว่าเพชร(dimond) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดช่องว่างพลังงานกว้าง(Large band gap semiconductor) และเหมาะที่จะนำมาสร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีคุณสมบัติพิเศษต่างจากซิลิคอนได้ ปกติเพชรมักเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติโดยอาศัยสิ่งแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูง ความดันสูง ดังนั้นเพชรธรรมชาติจึงเกิดขึ้นที่ชั้นใต้ดินซึ่งลึกมากและใช้เวลานาน ทำให้เป็นวัสดุที่หายากประกอบกับเพชรเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติหลายอย่างที่เด่นเป็นพิเศษเหนือกว่าวัสดุอื่นๆ เช่นแข็งแรงที่สุด ทนต่อการกัดกร่อนมากที่สุด ทนต่ออุณหภูมิสูง สามารถนำความร้อนได้ดีและมีคุณสมบัติเป็นวัสดุโปร่งแสง โดยเฉพาะเมื่อนำไปเจียรนัยจะเป็นเครื่องประดับที่มีความงดงามมากที่สุด ดังนั้นเพชรธรรมชาติจึงมีราคาแพงเหมาะที่จะเป็นเครื่องประดับมากกว่า อย่างไรก็ดีได้มีความพยายามของนักวิจัยจำนวนมาก ที่จะสังเคราะห์เพชรขึ้นมาเพื่อการนำไปใช้งานในด้านต่างๆ รวมทั้งการนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ในที่สุดประมาณกลางปี ค.ศ. 1950 ก็มีรายงานถึงความสำเร็จในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยกระบวนการต่างๆเช่น กระบวนการ High Pressure High Temperature หรือ HPHT และกระบวนการChemical Vapor Deposition หรือ CVD [1],[2],[3] แต่ในระยะแรกๆการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรมีข้อจำกัด และสามารถสังเคราะห์ขึ้นบนวัสดุฐานรองที่เป็นเพชรเท่านั้น กระทั่งต่อมาราวปี ค.ศ. 1970 จึงประสบความสำเร็จสามารถสังเคราะห์ฟิล์มเพชรขึ้นบนแผ่นฐานรองที่ไม่ใช่วัสดุเพชรได้ ซึ่งความสำเร็จนี้นับเป็นก้าวสำคัญเพราะเป็นการเปิดประตูกว้างสู่ตลาดเทคโนโลยีของเพชรอย่างแท้จริง ฟิล์มเพชรถูกนำไปประยุกต์ใช้ด้านต่างๆอย่างกว้างขวางและจริงจังมากยิ่งขึ้น สำหรับงานอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากฟิล์มเพชร มีคุณสมบัติทางแสงที่เด่นหลายประการ จึงเหมาะอย่างยิ่งที่จะนำไปประยุกต์ใช้สร้างเป็นอุปกรณ์ทางแสง(Photonic Devices or Opto-Devices) โดยทำหน้าที่เป็นตัวอุปกรณ์ตรวจวัดแสง(Photo detector)

อุปกรณ์ตรวจวัดแสงที่ใช้กันในปัจจุบันมีอยู่หลายชนิด แต่ที่สำคัญและน่าสนใจได้แก่โฟโตไดโอดชนิด พี-ไอ-เอ็น (p-i-n photodiode) เนื่องจากมีข้อดีเหนือตัวตรวจวัดแสงแบบอื่นๆ หลายประการเช่น มีกระแสมืดต่ำ, แรงดันพังทลายสูง, ค่าความจุไฟฟ้าต่ำ, การตอบสนองทางแสงที่ดี, ทำงานด้วยความเร็วสูง และมีสัญญาณรบกวนต่ำ [4] ซึ่งจากคุณสมบัติดังกล่าวนี้ทำให้ผู้วิจัยมีความสนใจที่จะทำการวิจัยศึกษาและทดลองการนำเอาฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ขึ้นได้ มาประยุกต์ใช้เป็นโฟโตไดโอดโครงสร้างใหม่คือ p-diamond/i-Si/n^+-Si โดยชั้นฟิล์มเพชรชนิดพี จะสามารถทำหน้าที่ได้หลายอย่างคือเป็นทั้งชั้นรับแสง(Optical window) ชั้นป้องกันผิวหน้าและลดการสะท้อนแสงที่ดีของโฟโตไดโอด ทั้งนี้เนื่องจากฟิล์มเพชรมีคุณสมบัติ โปร่งแสงและให้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนที่ต่ำ มีความแข็งแรง ทนทาน และสภาพผิวที่ขรุขระตามลำดับ [1],[2],[3] ดังนั้น โฟโตไดโอดโครงสร้างใหม่คือ p-diamond/i-Si/n^+-Si จึงเป็นตัวตรวจวัดแสงที่น่าสนใจและน่าศึกษา นอกจากนี้ยังเป็นอีกตัวอย่างหนึ่งของการนำฟิล์มเพชรมาประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อีกด้วย

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาวิจัยและทดลองสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยเทคนิคพื้นฐานที่ง่ายและไม่สิ้นเปลือง รวมทั้งการนำเอาฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้ไปประยุกต์ใช้ เป็นตัวตรวจวัดแสงหรือโฟโตไดโอดชนิด พี-ไอ-เอ็นโครงสร้างแบบใหม่คือ p-diamond/i-Si/n^+-Si [5] เพื่อแสดงให้เห็นถึงศักยภาพและความเป็นไปได้ในการนำฟิล์มเพชรสังเคราะห์มาใช้เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำทางแสง โดยข้อมูลและความรู้ที่ได้จากศึกษาวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาอุปกรณ์ทางแสงที่สร้างจากฟิล์มเพชรสังเคราะห์ หรือที่ใช้ฟิล์มเพชรสังเคราะห์เป็นส่วนประกอบ

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

การนำฟิล์มเพชรชนิดพีที่สังเคราะห์ได้ และมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำมาทำหน้าที่แทนชั้นสารกึ่งตัวนำซิลิคอนชนิดพี ในซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n จะทำให้ได้โฟโตไดโอดแบบ p-i-n โครงสร้างแบบใหม่คือ p-diamond/i-Si/n^+-Si ซึ่งจะสามารถทำงานได้เช่นเดียวกับซิลิคอนโฟโตไดโอด แต่ด้วยคุณสมบัติทางแสงที่เด่นของชั้นฟิล์มเพชรชนิดพี เช่นความโปร่งแสงและมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนที่ต่ำ รวมทั้งมีความแข็งแรง ทนทาน และสภาพผิวที่ขรุขระตามลำดับ จึงคาดว่าโฟโตไดโอดชนิดนี้ จะสามารถทำงานได้ดีและมีความไวต่อแสงสูง ทั้งยังช่วยแก้ปัญหาบางอย่างที่เกิดขึ้นในซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด พี-ไอ-เอ็นที่มีโครงสร้างแบบแนวดิ่ง คือโฟตอนจำเป็นต้องผ่านชั้นซิลิคอนชนิดพีลงมายังชั้นอินทรินซิค ซึ่งเป็นชั้นแอคทีฟ(ส่วนที่ทำให้เกิดกระแสแสง) โดยชั้นซิลิคอนชนิดพีซึ่งเป็นซิลิคอนจะมีการดูดกลืนโฟตอนบางส่วน ส่งผล

ให้ได้กระแสแสงน้อยกว่าที่ควรจะได้รับ ซึ่งปัญหาข้างต้นนี้สามารถแก้ไขได้โดยหาวัสดุสารกึ่งตัวนำบางชนิดที่มีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนต่ำ, โปร่งแสง และโฟตอนสามารถทะลุผ่านได้โดยมีการสูญเสียที่ต่ำ โดยในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้เลือกใช้ฟิล์มเพชรชนิดพี เป็นชั้นดังกล่าว

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

ฟิล์มเพชรซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำตัวใหม่ มีคุณสมบัติที่เด่นเป็นพิเศษ ทั้งทางกายภาพ ทางฟิสิกส์ ทางไฟฟ้า และทางแสงหลายประการเช่น ฟิล์มเพชรมีช่องว่างแถบพลังงานสูงถึง 5.45 eV มีความหนาแน่นสูงประมาณ 2.8-3.5 g/cm^3 มีความทนทานต่อสารเคมี, ทนต่อการกัดกร่อน เป็นตัวนำความร้อนที่ดี มีค่า Dielectric constant ต่ำประมาณ 5.6 มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนต่ำ และมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ จึงเหมาะที่จะนำมาใช้สร้างเป็นอุปกรณ์ทางแสง เช่นตัวตรวจวัดแสง(Photo detector)หรือตัวตรวจวัดรังสี(radiation detector)

ในการศึกษานี้ได้ออกแบบและสร้างโฟโตไดโอดชนิดใหม่ที่มีโครงสร้างเป็น ฟิล์มบางเพชรชนิดพี/อินทรินซิก-ซิลิคอน/เอ็น-ซิลิคอน โดยโครงสร้างนี้จะมีลักษณะที่คล้ายกับโครงสร้างของโฟโตไดโอดชนิด พี-ไอ-เอ็น ซึ่งเป็นโฟโตไดโอดที่มีความไวแสงสูงมากชนิดหนึ่ง แต่โฟโตไดโอดชนิดใหม่ที่สร้างขึ้นนี้แตกต่างจากโฟโตไดโอดชนิด พี-ไอ-เอ็นแบบปกติ คือการนำเอาฟิล์มบางเพชรชนิดพีซึ่งเป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำตัวใหม่อีกชนิดหนึ่งมาใช้แทนสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น เช่น ซิลิคอน เยอรมันเนียม หรือ สารประกอบในกลุ่ม III-V ซึ่งใช้กันอยู่ในปัจจุบัน ทำให้ได้โฟโตไดโอดชนิดใหม่ที่มีโครงสร้างเป็น p-diamond / i-Si / n^+-Si ในโครงสร้างดังกล่าวนี้ฟิล์มบางเพชรชนิดพีจะทำหน้าที่เป็นชั้นหน้าต่างรับแสงหรือ window layer ที่ดี เพราะมีคุณสมบัติพิเศษคือ very low absorption coefficient และรอยต่อแบบ heterojunction ระหว่างฟิล์มบางเพชรและซิลิคอนชนิดอินทรินซิกจะเป็นย่าน active region ที่ไวต่อแสง ยิ่งไปกว่านั้น ในขณะที่ไดโอดได้รับแรงดันไบอัส สนามไฟฟ้าในชั้นของซิลิคอนชนิดอินทรินซิกจะทำให้บริเวณนี้เป็นชั้น active region โดยเมื่อมีการดูดกลืนโฟตอนในย่านนี้ จะทำให้ได้กระแสแสงออกมา คล้ายกับโฟโตไดโอดชนิด p-i-n อีกด้วย ดังนั้นโครงสร้างเช่นนี้จะทำให้โฟโตไดโอดนี้มีคุณสมบัติที่ไวต่อแสงสูง

นอกจากนี้แล้ว ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้ยังเป็นการแสดงตัวอย่างของการนำฟิล์มเพชรวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดใหม่มาประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดใหม่ หรือโครงสร้างใหม่ๆได้อีกด้วย

1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน

1.ในการศึกษานี้ได้นำเสนอการการนำฟิล์มบางเพชร(Diamond thin films) ซึ่งสังเคราะห์ได้จากวิธี CVD แบบขดลวดความร้อน(Hot Filament Chemical Vapor Deposition: HFCVD) มา

ประยุกต์ใช้ในงานอิเล็กทรอนิกส์ทางแสง เป็นโฟโตไดโอดโครงสร้างแบบใหม่คือ p-diamond / i-Si / n^+-Si

2.ตัวตรวจวัดแสงทั่วๆไปในปัจจุบันนั้น จำเป็นต้องมีชั้นหน้าต่าง (window layer)และชั้นป้องกันผิวหน้า(Passivation layer) โดยคุณสมบัติของชั้นนี้จะต้องมีค่า absorbtion coefficient ที่ต่ำ, ทนทานแข็งแรง, โปร่งแสง ซึ่งต้องสร้างชั้นดังกล่าวขึ้นมาเพิ่มเติมนอกเหนือจากการสร้างตัวตรวจวัดแสงซึ่งยุ่งยากและสิ้นเปลือง แต่เนื่องจากฟิล์มเพชรมีคุณสมบัติพิเศษ เหมาะอย่างยิ่งที่จะเป็นชั้นหน้าต่างและชั้นป้องกันผิวหน้า ดังนั้นตัวตรวจวัดแสงที่มีโครงสร้าง ซึ่งมีชั้นฟิล์มเพชรอยู่ด้านรับแสง จึงไม่จำเป็นต้องสร้างชั้นป้องกันผิวหน้าขึ้นมาเพิ่มเติม ในงานวิจัยนี้ ชั้นของฟิล์มเพชรที่อยู่ในโฟโตไดโอดโครงสร้างแบบ p-diamond / i-Si / n^+-Si สามารถที่จะเป็นได้ทั้ง passive layer และ active layer กล่าวคือเป็นทั้งชั้นป้องกันผิวหน้า ชั้นหน้าต่าง และเป็นชั้นของสารที่ทำให้เกิดเป็นรอยสัมผัสแบบ Hetero junction กับชั้นซิลิคอนชนิดอินทรินซิก ตามลำดับ จึงเป็นการใช้ประโยชน์จากฟิล์มเพชรอย่างสมบูรณ์

1.6 ขอบเขตการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการศึกษาวิจัยและการทดลองสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธีการ HFCVD และการนำฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้ไปประยุกต์ใช้งานเป็นตัวตรวจวัดแสงหรือโฟโตไดโอดโครงสร้างแบบใหม่คือ ฟิล์มบางเพชรชนิดพี/อินทรินซิก-ซิลิคอน/เอ็น-ซิลิคอน (p-diamond/i-Si/n^+-Si) ซึ่งรวมถึงการทดลองและศึกษาเงื่อนไขการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร อัตราการเกิด ลักษณะโครงสร้าง และคุณสมบัติของฟิล์มเพชรโดยใช้การวิเคราะห์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด อุปกรณ์ Energy Dispersive X-ray spectrometer, Raman Spectroscope และ UV/VIS Spectrometer ตามลำดับ นอกจากนี้ยังได้ทดลองและศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่จะมีผลกระทบต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้า และทางแสงของโฟโตไดโอดชนิดนี้ เช่นความเข้มข้นของอะตอมโบรอนในฟิล์มเพชร ความหนาของฟิล์มเพชร, ความหนาของชั้นอินทรินซิค-ซิลิคอน และลักษณะของขั้วสัมผัสโลหะ เพื่อให้เป็นแนวทางในการพัฒนาโฟโตไดโอดชนิดนี้ต่อไป

1.7 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บทด้วยกันคือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย, ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์, สมมติฐานของการศึกษา, ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย, การเปรียบเทียบวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน, ขอบเขตการวิจัย และขั้นตอนการศึกษาวิจัย

บทที่ 2 กล่าวถึงประวัติความเป็นมาของฟิล์มเพชร, ลักษณะโครงสร้างของผลึกคาร์บอน, คุณสมบัติที่สำคัญของผลึกเพชร, เทคนิคการสังเคราะห์ผลึกเพชร, การวิเคราะห์คุณสมบัติของผลึกเพชร และการประยุกต์ใช้งานฟิล์มเพชร

บทที่ 3 กล่าวถึงความหมายและประเภทของตัวตรวจวัดแสง, ข้อมูลจำเพาะพื้นฐานต่างๆ ที่สำคัญของโฟโตไดโอดทั่วๆไป และโฟโตไดโอดชนิดใหม่โครงสร้าง p-diamond/i-Si./n^+-Si

บทที่ 4 กล่าวถึงกระบวนการสังเคราะห์และการวิเคราะห์คุณสมบัติฟิล์มเพชรด้วยวิธี HFCVD, กระบวนการสร้างรอยสัมผัสระหว่างฟิล์มเพชรชนิดพีกับโลหะชนิดต่างๆ, กระบวนการสร้างโฟโตไดโอดโครงสร้าง p-diamond/i-Si/n^+-Si, การทดลองเพื่อการศึกษาผลของความเข้มข้นอะตอมสารเจือในฟิล์มเพชรและผลการทดลองของความหนาของชั้นฟิล์มเพชรที่มีผลต่อคุณสมบัติของโฟโตไดโอด, การทดลองเพื่อการศึกษาผลของความหนาชั้นอินทรินซิคที่มีต่อคุณสมบัติของโฟโตไดโอด และการทดลองเพื่อการศึกษาผลของลักษณะลวดลายของขั้วโลหะด้านรับแสง

บทที่ 5 กล่าวถึงการวิเคราะห์คุณสมบัติฟิล์มที่สังเคราะห์ได้, ผลการวัดลักษณะสมบัติของรอยสัมผัสระหว่างฟิล์มเพชรชนิดพีกับโลหะชนิดต่างๆ, ผลการวัดลักษณะสมบัติของโฟโตไดโอดโครงสร้าง p-diamond/i-Si/n^+-Si, ผลของความเข้มข้นอะตอมสารเจือในฟิล์มเพชรที่มีต่อลักษณะสมบัติของโฟโตไดโอด, ผลของของความหนาของชั้นฟิล์มเพชรที่มีผลต่อลักษณะสมบัติของโฟโตไดโอด, ผลของความหนาชั้นอินทรินซิค และ ผลของลักษณะลวดลายของขั้วโลหะด้านรับแสงที่มีผลต่อลักษณะสมบัติของโฟโตไดโอด

บทที่ 6 เป็นบทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2
สารกึ่งตัวนำเพชร

วัสดุสารกึ่งตัวนำที่ถูกนำมาใช้งานในปัจจุบันมีอยู่ด้วยกันหลายชนิด ซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของผลึก โดยสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ ประเภทธาตุเดี่ยว(Element semiconductor) และประเภทสารประกอบ(Compound Semiconductor)

-สารกึ่งตัวนำประเภทธาตุเดี่ยวหมายถึง สารกึ่งตัวนำที่เกิดจากธาตุเดี่ยว และเป็นธาตุที่อยู่ในกลุ่มที่ 4 ของตารางธาตุ เช่น ซิลิคอน, และเยอรมันเนียม, เป็นต้น สารกึ่งตัวนำประเภทนี้ถูกนำมาใช้สร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์พื้นฐานทั่วไป

- สารกึ่งตัวนำประเภทสารประกอบหมายถึง สารกึ่งตัวนำที่มีสภาพเป็นสารประกอบ โดยเกิดจากธาตุ 2 ธาตุรวมกันเป็นสารประกอบ ได้แก่ สารประกอบของธาตุในกลุ่มที่ 3 และ กลุ่มที่ 5 หรือสารประกอบของธาตุในกลุ่มที่ 2 และ ธาตุในกลุ่มที่ 6 เช่น แกลเลียมอาร์เซไนด์, แกลเลียมฟอสฟายด์ เป็นต้นสารกึ่งตัวนำประเภทนี้มักถูกนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดพิเศษ เช่น อุปกรณ์ชนิดความถี่สูง หรือเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง

นอกจากนี้สารกึ่งตัวนำทั้งสองประเภทนี้แล้ว ยังมีสารกึ่งตัวนำแบบธาตุเดี่ยวอีกชนิดหนึ่งที่มีคุณสมบัติเด่น และน่าสนใจ คือ คาร์บอน ซึ่งเป็นธาตุอยู่ในหมู่ที่ 4 คาบที่ 2 ของตารางธาตุ และมีลักษณะโครงสร้างอะตอมได้หลายแบบ เช่น กราไฟต์ และเพชร เป็นต้น สำหรับเพชรถือเป็นผลึกที่สมบูรณ์ของคาร์บอนซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ และมีคุณสมบัติ ที่พิเศษหลายอย่าง เช่น มีช่องว่างแถบพลังงานกว้าง, มีความหนาแน่นสูง, มีความทนทานต่อสารเคมี, ทนต่อการกัดกร่อน,เป็นตัวนำความร้อนที่ดี, มีค่า Dielectric constant ต่ำ, มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนต่ำ และมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ และเมื่อไม่นานมานี้นักวิจัยสามารถสังเคราะห์ฟิล์มเพชรได้ด้วยเทคนิคต่างๆ ทำให้ฟิล์มเพชรถูกนำมาประยุกต์ใช้งานต่างๆอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะในการสร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง (Photonic devices)

2.1 ความเป็นมาของสารกึ่งตัวนำเพชร [1],[2],[3]

การสังเคราะห์เพชรนั้นเกิดขึ้นมาตั้งแต่ปี 1797 โดย Smith Tennant ได้ทดลองเผาเพชรในบรรยากาศของออกซิเจน ทำให้ได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับขี้เถ้า ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเพชรคืออัญรูปของคาร์บอน ซึ่งมีความหนาแน่น 3.52 g/cm^3 มากกว่าคาร์บอนในรูปแบบอื่นๆ เช่น กราไฟต์ที่มีความหนาแน่นเพียง 2.25 g/cm^3 ดังนั้นหากเพิ่มความดันให้แก่คาร์บอนอย่างรวดเร็ว และลดปริมาตรจะทำให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเปลี่ยนคาร์บอนซึ่งอยู่ในรูปอื่นที่ไม่ใช่เพชรให้เปลี่ยนมาเป็นเพชรได้ จากหลักการนี้จึงมีผู้ทดลองสังเคราะห์เพชรจากคาร์บอนรูปอื่นๆ เช่น

J.B.Hannay ได้ประสบความสำเร็จในการสังเคราะห์เพชรเมื่อปี 1880 ด้วยวิธีใส่สารอินทรีย์ที่มีลิเทียมผสมอยู่ลงในท่อเหล็กที่ปิดตาย และทำให้ความร้อนจนแดงกระทั่งเกิดการระเบิดขึ้น บางส่วนของท่อที่เหลืออยู่ พบว่ามีเป็นเพชรเกิดขึ้น

H.Moissan ใช้เหล็กที่มีคาร์บอนผสมอยู่มาทำการสังเคราะห์ให้เกิดเพชรด้วยวิธี การทำให้ร้อนจนหลอมละลาย จากนั้นเย็นลงอย่างรวดเร็ว(quenching)ทำให้เกิดแรงดันจากการหดตัวของส่วนที่อยู่ด้านนอกของแท่งเหล็กที่เย็นลง จะมีผลทำให้เกิดเป็นเพชรได้

C.Parsons ได้พยายามทำการทดลองสังเคราะห์เพชรตามวิธีเหล่านี้ แต่ก็พบว่าการทดลองในช่วงแรกๆไม่ประสบความสำเร็จเนื่องจากมีรายละเอียดไม่เพียงพอ เขาจึงสรุปว่าไม่มีใครที่ประสบความสำเร็จในการสังเคราะห์เพชรได้

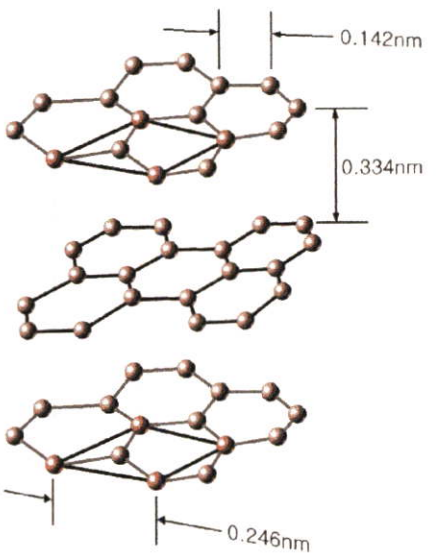
ต่อมากระทั่งประมาณกลางปี ค.ศ. 1950 ก็มีรายงานถึงความสำเร็จในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยกระบวนการต่างๆเช่น กระบวนการ High Pressure High Temperature หรือ HPHT และกระบวนการChemical Vapor Deposition หรือ CVD ซึ่งเป็นกระบวนการสังเคราะห์เพชรที่ความดันต่ำและอุณหภูมิต่ำ แต่ในระยะแรกๆการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรมีข้อจำกัด และสามารถสังเคราะห์ขึ้นบนวัสดุฐานรองที่เป็นเพชรเท่านั้น กระทั่งต่อมาราวปี ค.ศ. 1970 นักวิจัยจึงประสบความสำเร็จสามารถสังเคราะห์ฟิล์มเพชรขึ้นบนแผ่นฐานรองที่ไม่ใช่วัสดุเพชรได้ ซึ่งความสำเร็จนี้นับเป็นก้าวสำคัญเพราะเป็นการเปิดประตูกว้างสู่ตลาดเทคโนโลยีของเพชรอย่างแท้จริง ฟิล์มเพชรถูกนำไปประยุกต์ใช้ด้านต่างๆอย่างกว้างขวางและจริงจังมากยิ่งขึ้น สำหรับงานอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากฟิล์มเพชร มีคุณสมบัติทางแสงที่เด่นหลายประการ จึงเหมาะอย่างยิ่งที่จะนำไปประยุกต์ใช้สร้างเป็นอุปกรณ์ทางแสง(Photonic Devices or Opto-Devices) โดยทำหน้าที่เป็นตัวอุปกรณ์ตรวจวัดแสง(Photo detector)

2.2 ลักษณะโครงสร้างของผลึกคาร์บอน

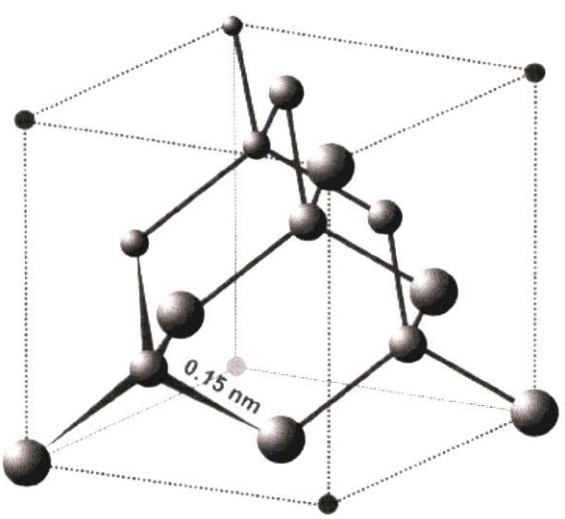
วัสดุสารกึ่งตัวนำประเภทธาตุเดี่ยว จะประกอบด้วยอะตอมของธาตุชนิดเดียวกันเช่น ซิลิคอนและเยอรมันเนียม ซิลิคอนเป็นสารกึ่งตัวนำที่ถูกนำมาใช้ในการสร้างวงจรรวมและมีความสำคัญมาก ส่วนสารกึ่งตัวนำที่เป็นประเภทสารประกอบ เช่น แกลเลียมอาร์เซไนด์ จะมีคุณสมบัติที่โดดเด่นทางด้านแสง ,และมีสภาพคล่องของพาหะที่สูง เป็นต้น

สำหรับคาร์บอนสามารถมีลักษณะของโครงสร้างผลึกได้ 2 รูปแบบคือ ผลึกกราไฟต์ และผลึกเพชร ซึ่งอะตอมในผลึกกราไฟต์ มีการเกาะเกี่ยวกันเป็นวงแหวนหกเหลี่ยมและไม่มีการเหลื่อมกันของอะตอมที่อยู่ใกล้เคียงกันเหมือนวงแหวนหกเหลี่ยมของเพชร อีกทั้งคาร์บอนแต่ละอะตอมจะจับตัวแบบ Trogonally กับอะตอมทั้งสามที่อยู่ใกล้เคียงกันด้วยพันธะแบบ sp^2 ซึ่งมีระยะห่างระหว่างอะตอมเท่ากับ 1.42 Å ระยะห่างระหว่างระนาบเท่ากับ 3.35 Å ค่าคงที่แลตทิสเท่ากับ 2.46 Å ดังรูปที่ 2.1

ส่วนผลึกเพชรมีโครงสร้างเป็นแบบโครงข่ายทรงเหลี่ยมสี่หน้า(Tetrahedral Network) ซึ่งมีระยะห่างระหว่างอะตอมเท่ากับ 1.54 Å โดยคาร์บอนแต่ละอะตอมจะเกาะกับอะตอมคาร์บอนอื่นอีก 4 อะตอมเป็นโครงสร้างผลึกแบบลูกบาศก์ เชื่อมต่อกันด้วยพันธะโควาเลนซ์ชนิดซิกม่าและมีวงโคจรอิเล็กตรอนเป็นแบบ sp^3 ที่แข็งแรงมาก ส่วนการจัดเรียงตัวของหนึ่งยูนิตเซลล์จะประกอบไปด้วยอะตอมคาร์บอนแปดอะตอม โดย 1/8 ของอะตอมจะอยู่ที่มุมทั้งแปด 1/2 ของอะตอมอยู่ที่แต่ละหน้าของยูนิตเซลล์และสุดท้ายมีสี่อะตอมฝังตัวอยู่ในยูนิตเซลล์ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 ลักษณะโครงสร้างอะตอมของผลึกกราไฟต์



รูปที่ 2.2 ลักษณะการเรียงตัวของอะตอมในหนึ่งยูนิตเซลล์ของผลึกเพชร

2.3 คุณสมบัติที่สำคัญของผลึกเพชร

จากโครงสร้างของเพชรที่ประกอบด้วยพันธะทางเคมีแบบ covalent bond ซึ่งเป็นพันธะที่มีความแข็งแรงมาก จึงมีผลทำให้เพชรเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติทางกลและทางไฟฟ้าหลายประการที่เด่นเป็นพิเศษ แตกต่างไปจากวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นๆ คุณสมบัติที่สำคัญบางประการของเพชรสามารถสรุปได้ดังนี้คือ

- มีความแข็งแรงสูง และทนทานต่อการกัดกร่อนทางเคมีสูง
- ทนทานต่ออุณหภูมิ ทนต่อรังสีได้ดี และนำความร้อนได้ดี
- มีการขยายตัวเนื่องมาจากความร้อนที่ต่ำ

นอกจากนั้นฟิล์มเพชรยังมีคุณสมบัติทางแสงโดยมีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงต่ำหรือ Low absorption coefficient (สำหรับโฟตอนที่มีพลังงานน้อยกว่า 5.5 eV.) และฟิล์มเพชรที่มีความบริสุทธิ์ จะมีความโปร่งแสงสูง คุณสมบัติข้อนี้ทำให้เพชรมีความเหมาะสมที่จะถูกใช้งานเป็นชั้นหน้าต่างรับแสง หรือ ชั้นวินโดว์(Window layer) ในอุปกรณ์ทางแสง(Photonic devices) คุณสมบัติอื่นๆที่สำคัญของผลึกเพชร และฟิล์มเพชรที่ได้จากกระบวนการ CVD สามารถเทียบกับคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำซิลิคอนซึ่งใช้สร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆในปัจจุบันได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติที่สำคัญของผลึกเพชรเปรียบเทียบกับฟิล์มเพชรที่ได้จากกระบวนการ CVD และซิลิคอน[1], [2], [3]

Properties	**Single-crystal Diamond**	**CVD Diamond**	**Silicon**
Nature of band-gap	Indirect	Indirect	Indirect
Electronic band-gap (300 K)	5.45 eV	5.45 eV	1.12
Electron Mobility(cm^2/V.s)	2200	1350-1500	1350
Hole Mobility(cm^2/V.s)	1600	480	480
Electron saturated velocity (cm/s)	2.7×10^7	2.7×10^7	1×10^7
Hole saturated velocity (cm/s)	1.05×10^7	1.05×10^7	0.9×10^7
Breakdown field (V/cm)	$1\text{-}20 \times 10^6$	-	0.3×10^6
Refractive index: (visible light)	2.40–2.46	2.34	3.4
Density (g/cm^3)	3.52	2.8-3.5	2.42
Dielectric constant: (300 K)	5.70	5.6	11.8
Thermal Conductivity(Watts/cm-^oC)	20	-	1.5

2.4 เทคนิคการสังเคราะห์ผลึกเพชร[1],[2],[3]

ในปัจจุบันนี้การสังเคราะห์ผลึกเพชรสามารถทำได้หลายวิธี แต่สามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธีหลักๆ คือ

1) การสังเคราะห์ผลึกเพชรด้วยวิธี High Pressure High Temperature หรือ HPHT วิธีนี้เป็นการสังเคราะห์ผลึกเพชรที่ความดันและอุณหภูมิสูง ซึ่งเป็นการเลียนแบบการเกิดของเพชรธรรมชาติ ดังนั้นวิธีนี้จะทำให้ได้ผลึกเพชรที่มีขนาดใหญ่, อัตราการเกิดสูง แต่เป็นวิธีที่สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายสูง

2) การสังเคราะห์ผลึกเพชรด้วยวิธี Chemical Vapor Deposition หรือ CVD วิธีนี้เป็นการสังเคราะห์ผลึกเพชรที่ความดันต่ำและอุณหภูมิต่ำ วิธีนี้จะทำให้ได้ผลึกเพชรที่มีขนาดเล็กและมีลักษณะเป็นฟิล์มบาง นอกจากนี้การสังเคราะห์ด้วยวิธีนี้ยังสามารถทำได้หลายแบบซึ่งแต่ละแบบต่างก็มีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งในการเลือกสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD แบบใดๆ จะขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการนำฟิล์มเพชรไปใช้งาน

การสังเคราะห์ฟิล์มบางเพชรด้วยวิธี CVD สามารถทำได้หลายแบบ ซึ่งสรุปได้ดังนี้

2.4.1 Hot Filament CVD (HFCVD)

ระบบ Hot Filament CVD(HFCVD) หรือระบบ CVD แบบขดลวดความร้อนได้ถูกพัฒนาขึ้นมาโดย นาย Matsumoto และคณะฯ จาก NIRIM(National Institute for Research in Inorganic Material) วิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายและประหยัดที่สุดสำหรับการสร้างฟิล์มเพชรที่ความดันต่ำและยังง่ายต่อการทำความเข้าใจในการเกิดฟิล์มเพชรอีกด้วย ระบบ HFCVD ใช้หลักของการแตกตัวของโมเลกุลด้วยความร้อนทำให้เกิดการแยกตัวของอะตอมคาร์บอนและอนุมูลอิสระอื่นๆ ซึ่งมีสภาพเป็นไอเคมี ในการเกิดเพชรสามารถใช้แหล่งจ่ายอะตอมคาร์บอนได้หลากหลายเช่น เอทิลแอลกอฮอล์(C_2H_5OH), อะซิโตน(Acetone) หรือ เมทิลแอลกอฮอล์(CH_3OH) เป็นต้น โดยความร้อนที่ได้จากไส้หลอดที่มีอุณหภูมิสูงประมาณ 1,900-2,200 ^{o}C จะช่วยทำให้เกิดการแตกตัวของโมเลกุลของก๊าซไฮโดรคาร์บอน ซึ่งสามารถแสดงปฏิกิริยาเคมีได้ดังสมการที่ (2.1), (2.2) และ (2.3) ตามลำดับ

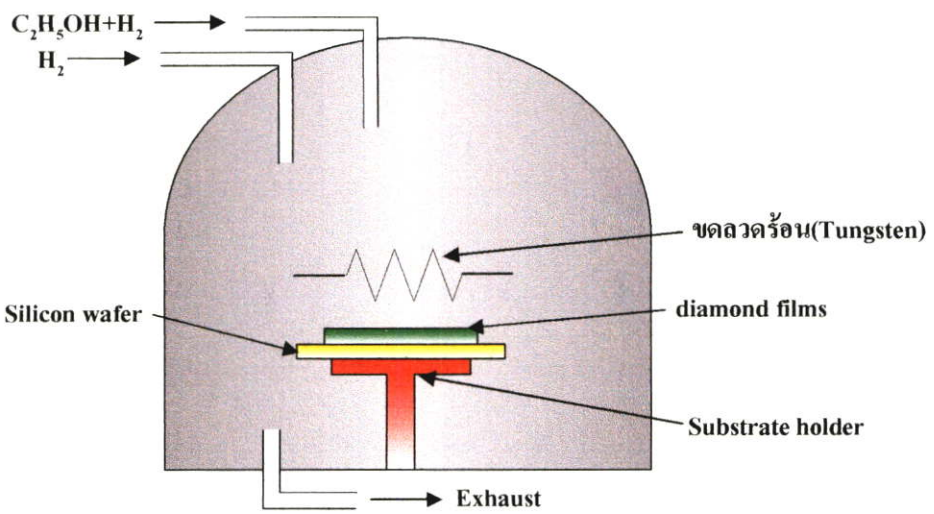
$$H_2(g) \xrightarrow{Heat} 2H^+(g) + 2e^- \qquad (2.1)$$

$$2C_2H_5OH + 2H_2(g) \longrightarrow 2CO + 2C_D - H + 7H_2(g) \qquad (2.2)$$

$$C_D - H + H^+(g) \longrightarrow C_D^{\bullet} + H_2(g) \qquad (2.3)$$

การแตกตัวของโมเลกุลเนื่องจากพลังงานความร้อนนับว่าเป็นวิธีการที่ง่ายต่อการจัดเตรียมอุปกรณ์ ดังนั้นการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVDแบบขดลวดร้อนจึงเป็นวิธีที่ง่าย

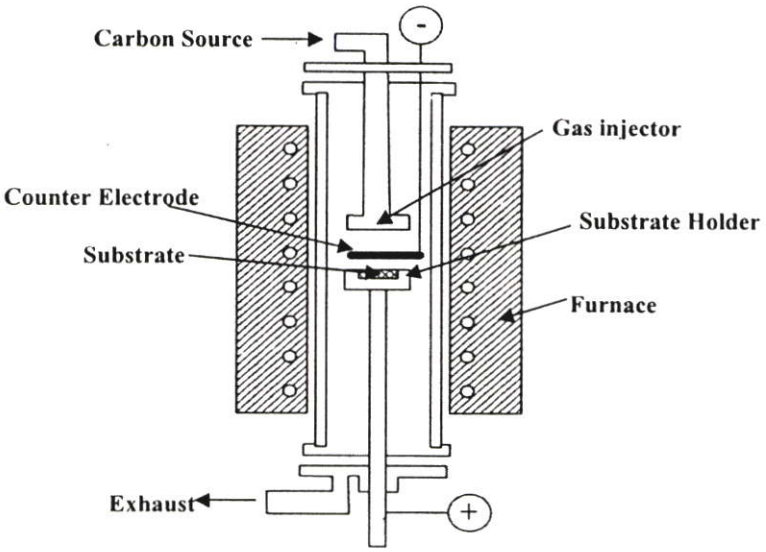
และสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายน้อยกว่าวิธีอื่นๆ อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ แสดงดังในรูปที่ 2.3 ซึ่งประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายก๊าซ ไฮโดรเจน และไอของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน โดยก๊าซนี้จะถูกปล่อยให้ไหลผ่านไส้หลอดทังสเตน ที่อยู่เหนือแผ่นฐานรองประมาณ 5-15 มิลลิเมตร ความร้อนที่ไส้หลอดทังสเตนจะทำให้ก๊าซเกิดปฏิกริยาและทำให้เกิดเป็นฟิล์มเพชรบนแผ่นฐานรองในที่สุด การสังเคราะห์เพื่อให้ได้ฟิล์มเพชรที่มีพื้นที่กว้างสามารถทำได้ หลายวิธี เช่นการเลื่อนตำแหน่งของไส้หลอดหรือแผ่นฐานรองไปยังบริเวณต่างที่ต้องการสังเคราะห์ฟิล์ม วิธีนี้สามารถสังเคราะห์ฟิล์มเพชรได้ในอัตรา 1-10 μm/h นอกจากนี้แล้ววิธี HFCVD ยังให้ฟิล์มเพชรที่มีความบริสุทธ์สูง แม้ว่าจะเกิดการปนเปื้อนของฟิล์มจากไส้หลอดบ้างแต่ก็ยังมีคุณภาพเพียงพอที่จะนำมาใช้งานทางอิเล็กทรอนิกส์ได้



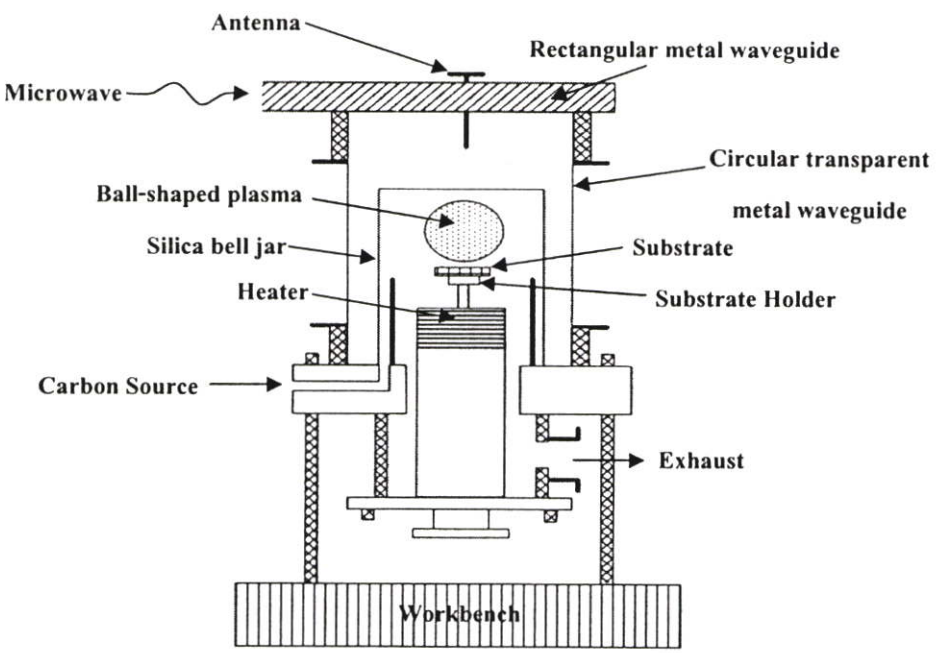
รูปที่ 2.3 ลักษณะของเครื่อง CVD แบบขดลวดความร้อน

2.4.2 Plasma -ASSISTED CVD (PACVD)

วิธี Plasma -ASSISTED CVD (PACVD)นี้ เป็นอีกวิธีหนึ่งซึ่งใช้เพื่อสังเคราะห์ฟิล์มเพชรบนฐานรองชนิดต่างๆ ซึ่งเริ่มโดยกลุ่มนักวิจัยชาวญี่ปุ่นจาก NIRIM(National Institute for Research in Inorganic Material) หลักการทำงานคือใช้สนามไฟฟ้าหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทำให้โมเลกุลของก๊าซแต่ละชนิดแตกตัวเป็นอะตอม เพื่อทำปฏิกิริยากัน ก่อนจะตกลงบนฐานรองที่ได้เตรียมไว้จนเกิดเป็นชั้นฟิล์ม ลักษณะของเครื่องมือแสดงดังรูปที่ 2.4 และ 2.5 ซึ่งการสร้างสนามไฟฟ้าหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทำได้หลายรูปแบบเช่น คลื่นไมโครเวฟ, คลื่นวิทยุ และสนามไฟฟ้า DC เป็นต้น สำหรับวิธีนี้จะสามารถสังเคราะห์ฟิล์มเพชรที่มีความบริสุทธิ์ได้สูงกว่าแบบการใช้ขดลวดความร้อน แต่มีอัตราการเกิดของฟิล์มเพชรที่ต่ำ, และอุปกรณ์ที่ใช้ค่อนข้างยุ่งยาก และสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายสูงกว่าการสังเคราะห์ด้วยวิธี CVD แบบขดลวดความร้อน



รูปที่ 2.4 ลักษณะของเครื่อง CVD แบบ DC plasma



รูปที่ 2.5 ลักษณะของเครื่อง CVD แบบ Microwave plasma

2.4.3 Combustion CVD

วิธีนี้เป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถสังเคราะห์ฟิล์มเพชรได้ที่ความดันบรรยากาศ โดยนาย Hirose ได้สังเคราะห์จากเปลวไฟของออกซิอะเซทิลีน(Oxyacetylene) เป็นผลสำเร็จในปี 1988 ซึ่งการสังเคราะห์นี้มีอุปกรณ์พื้นฐาน ที่ประกอบด้วยหัวเชื่อมก๊าซ แหล่งจ่ายก๊าซออกซิเจนและไฮโดรคาร์บอนเป็นอุปกรณ์หลัก หลักการสังเคราะห์คือทำการเผาก๊าซออกซิเจนและก๊าซไฮโดรคาร์บอนในอัตราส่วนที่เหมาะสม จะปรากฏเป็นเปลวไฟสามชั้น เปลวไฟชั้นกลางเมื่อ

สัมผัสกับฐานรองซิลิคอน อะตอมคาร์บอนที่เหลือจากการเผาไหม้จะตกลงบนฐานรองเกิดเป็นฟิล์มเพชรขึ้น ซึ่งจากการทดลองของนาย Hirose พบว่าฟิล์มเพชรที่ได้มีอัตราการเกิดสูง 100-200 μm/hr แต่วิธีนี้ก็มีข้อเสียคือ มีพื้นที่ในการเกิดฟิล์มเพชรน้อย ,คุณภาพของฟิล์มเพชรต่ำจนไม่เหมาะสมในการนำมาสร้างเป็นอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ได้ และมีความสม่ำเสมอของฟิล์มเพชรต่ำ

สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้การสังเคราะห์ผลึกเพชรด้วยวิธี HFCVD ซึ่งทำที่ความดันต่ำและอุณหภูมิต่ำ เพื่อให้ได้ฟิล์มบางเพชรที่จะนำไปประยุกต์ใช้เป็นโฟโตไดโอด

2.5 การวิเคราะห์คุณสมบัติของผลึกเพชร

การวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มเพชร สามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีนั้นเป็นการตรวจสอบฟิล์มเพชรในแง่มุมต่างๆ เช่น คุณภาพ(ความบริสุทธิ์), ความหนา, ลักษณะของผลึก และความสม่ำเสมอ เป็นต้น

2.5.1 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Raman spectroscopy [8]

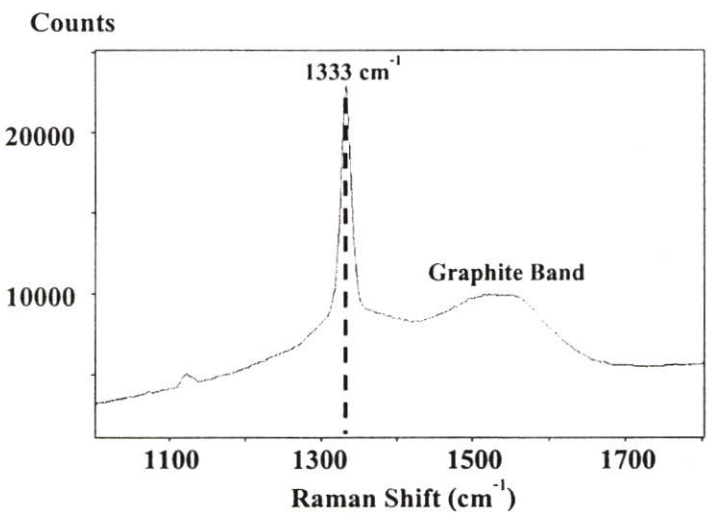
Raman spectroscopy คือเทคนิคการวัดและวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของวัสดุ โดยอยู่บนพื้นฐานของ "Raman effect" ซึ่งอาศัยหลักการกระเจิงของแสงจากก๊าซ,ของเหลว หรือของแข็ง ที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆ เทคนิค Raman spectroscopy เป็นวิธีที่นิยมนำมาตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มเพชร เนื่องจากพันธะของคาร์บอนมีความไวต่อการกระเจิงของ Raman สูง ดังนั้นจึงสามารถจำแนกประเภทต่างๆของโครงสร้างคาร์บอนได้เป็นอย่างดีเช่น เพชร, กราไฟต์ และคาร์บอนชนิดอะมอร์ฟัส เป็นต้น ซึ่งค่า Raman Spectrumของโครงสร้างแบบต่างๆของคาร์บอนสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.2 โดยผลของการวัดจะแสดงได้เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มแสงที่ถูกกระเจิง(scattered intensity or count) กับ Raman Shift (cm^{-1}) หรือก็คือ ปริมาณของอัญรูป (แกน y) กับ ลักษณะของอัญรูปนั้นๆ(แกน x) ดังแสดงในรูปที่ 2.6

ตารางที่ 2.2 ค่า Raman Spectrum ของโครงสร้างแบบต่างๆของคาร์บอน [3]

Peak position (cm^{-1})	Type of carbon	Description
1140	Small size cubic diamond (<0.1 μm)	Occasionally observe in diamond films with very small grain size(<0.1 μm)
1315-1326	Hexagonal diamond	Broad band, observe in shock wave produced diamond
1332	Cubic diamond	First order peak with FWHM of 1.9 cm^{-1} for natural diamond

ตารางที่ 2.2(ต่อ) ค่า Raman Spectrum ของโครงสร้างแบบต่างๆของคาร์บอน [3]

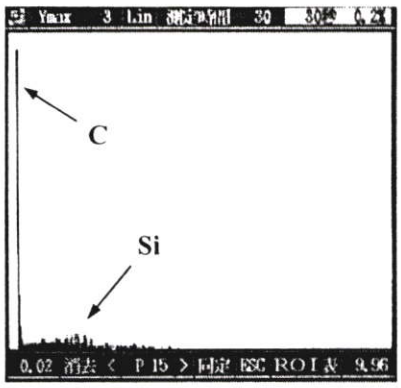
Peak position (cm^{-1})	Type of carbon	Description
1355	Microcrystalline graphite	observe in material with small grain size
1550	Amorphous or diamond-like carbon	Broad band
1580	graphite	First order peak
2458	Cubic diamond	Second order peak
2710	Microcrystalline graphite	Second order peak
3240	graphite	Second order peak



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างลักษณะกราฟRaman spectrum ของฟิล์มเพชร

2.5.2 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray spectrometer (EDX) [7]

Energy Dispersive X-ray spectrometer เป็นการวิเคราะห์ค่าพลังงานของการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนในอะตอม โดยใช้รังสีเอ็กซ์เรย์ ซึ่งค่าการเปลี่ยนระดับพลังงานเป็นค่าเฉพาะของแต่ละธาตุ ทำให้เราสามารถวิเคราะห์หาชนิดของธาตุที่เป็นองค์ประกอบได้ ยกเว้นธาตุ 11 ตัวแรกของตารางธาตุ โดยผลของ EDX จะแสดงได้เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณของธาตุ(แกน y) กับ ชนิดของธาตุนั้นๆ(แกน x) ดังในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX ของผิวหน้าฟิล์มเพชร

2.5.3 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวและขนาดด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

Scanning Electron Microscope(SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่นิยมใช้อย่างกว้างขวางในการดูลักษณะพื้นผิวของวัสดุที่มีขนาดระดับไมครอน โดยหลักการของอุปกรณ์ SEM แล้ว ภายในส่วนคอลัมน์ (column) ของเครื่องจะมีปืนอิเล็กตรอน (electron gun) ซึ่งทำหน้าที่ปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมา (primary electron) เราจะควบคุมความเร็วของอิเล็กตรอนนั้นด้วยศักย์ไฟฟ้าสูง (high voltage) และใช้เลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic lens) เป็นตัวโฟกัสให้ลำอิเล็กตรอนนั้นตกกระทบชิ้นงาน และเกิดการสะท้อน จากการใช้ตัวตรวจจับอิเล็กตรอน(Electron detector) จะทำให้ได้สัญญาณแบบต่าง ๆ ซึ่งสามารถแปลงผลเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า และแสดงออกมาเป็นภาพที่จอภาพในที่สุด ตัวอย่างลักษณะของภาพที่ถ่ายได้จาก SEM แสดงดังรูปที่ 2.8

รูปที่ 2.8 ลักษณะของภาพ SEM ของผิวหน้าชิ้นงาน

2.6 การประยุกต์ใช้งานฟิล์มเพชร

เนื่องจากฟิล์มเพชรมีคุณสมบัติที่โดดเด่นอยู่หลายประการ เช่น มีความแข็งแรง, ทนทานต่อการกัดกร่อน, ทนต่อรังสี, นำความร้อนได้ดี มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนต่ำ, มีช่องว่างแถบพลังงานสูง, มีความหนาแน่นสูง, มีความทนทานต่อสารเคมี, มีค่า Dielectric constant ต่ำ, มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ และทนทานต่ออุณหภูมิ เป็นต้น จึงสามารถนำมาใช้งานได้หลายรูปแบบ เช่น นำมาเคลือบเพื่อเพิ่มความแข็ง, นำมาทำเป็นแผ่นระบายความร้อน, นำมาสร้างเป็นอุปกรณ์ทนความร้อน, นำมาสร้างเป็นอุปกรณ์ทนรังสี, ใช้เป็นชั้นหน้าต่างรับแสง หรือ window layer เป็นต้น นอกจากนี้แล้วยังนิยมนำมาสร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น ไดโอด(Hetero junction และHomo junction)[8][9], หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ทางแสง เช่นโฟโตไดโอดโครงสร้างโลหะ-ฟิล์มเพชร-โลหะ[10][11], ตัวตรวจวัดรังสี[12][13][14]และวงจรรวม เป็นต้น

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

บทที่ 3
อุปกรณ์ตรวจวัดแสง

ปัจจุบันนี้งานอิเล็กทรอนิกส์ทางแสงได้มีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว เพื่อตอบรับกับการขยายตัวของระบบสื่อสาร โทรคมนาคม ส่งผลให้อุปกรณ์ตัวตรวจวัดแสง หรือ โฟโตดีเทคเตอร์ (Photo detector) มีการเปลี่ยนสัญญาณทางแสงให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าที่ดีกว่าเดิม และมีการพัฒนาให้สามารถจัดการข้อมูลทางแสงได้หลายรูปแบบ ดังนั้นอุปกรณ์เหล่านี้จึงถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายเช่น ในชุดควบคุมการเปิด-ปิดแบบไร้สาย ใช้ตรวจนับจำนวนและตรวจสอบคุณภาพของสินค้าในทางอุตสาหกรรม ใช้เป็นตัวรับสัญญาณทางไกลในระบบสื่อสารความเร็วสูง และใช้ในการตรวจวัดรังสีต่างๆ เป็นต้น

3.1 ความหมายและประเภทของตัวตรวจวัดแสง

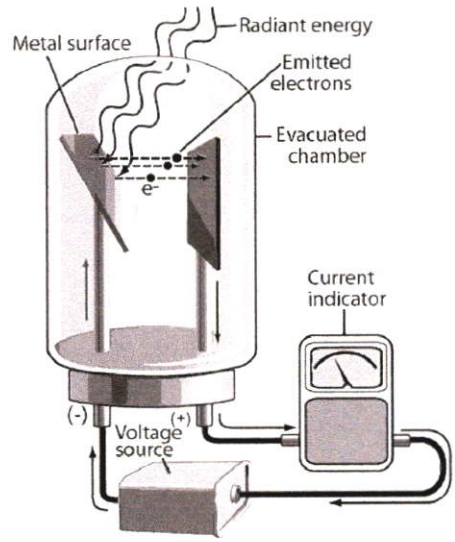
ตัวตรวจวัดแสง(Photodetector) คืออุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ส่วนมากมักสร้างมาจากวัสดุสารกึ่งตัวนำ ซึ่งในปัจจุบันนี้มีอยู่ด้วยกันหลายชนิด เช่น

1. โฟโตอิมิชชั่นดีเทคเตอร์(Photoemission detector)
2. โฟโตคอนดัคเตอร์ (photoconductor)
3. โฟโตไดโอดชนิดโลหะ-สารกึ่งตัวนำ (metal-semiconductor photodiode)
4. โฟโตไดโอดชนิดโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ(metal-semiconductor-metal photodiode)
5. โฟโตไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น(p-n photodiode)
6. โฟโตไดโอด ชนิดอะวาลานซ์ (Avalanche PhotoDiode : APD)
7. โฟโตไดโอดชนิด พี-ไอ-เอ็น (p-i-n photodiode)

ซึ่งในแต่ละชนิดนั้นต่างก็มีคุณสมบัติการทำงานและข้อดี-ข้อเสีย ที่แตกต่างกันออกไป โดยขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างและชนิดของตัวตรวจวัดแสง ซึ่งสรุปได้ดังนี้

3.1.1 โฟโตอิมิชชั่นดีเทคเตอร์(Photoemission detector)

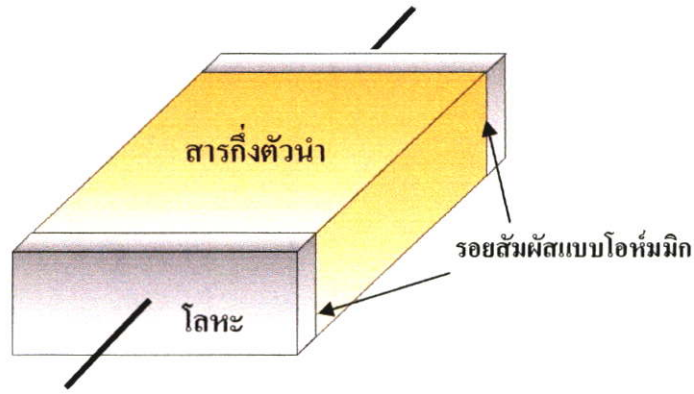
โฟโตอิมิชชั่นดีเทคเตอร์(Photoemission detector) เป็นโฟโตดีเทคเตอร์ที่ประกอบไปด้วยแผ่นโลหะขั้วบวก และลบ เมื่อมีแสงตกกระทบลงมายังโลหะที่ขั้วลบ โลหะจะดูดกลืนพลังงานจากโฟตอนและทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระหรือโฟโตอิเล็กตรอน(เมื่อโฟตอนมีพลังงานมากกว่าค่าเวิร์คฟังก์ชั่นของโลหะ) ซึ่งจะหลุดออกจากผิวของวัสดุสนามไฟฟ้าที่เกิดจากแรงดันไบอัสระหว่างแผ่นโลหะทั้งสองจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปที่ขั้วบวก ซึ่งโดยทั่วไปอุปกรณ์นี้มักจะอยู่ในรูปของหลอดสุญญากาศดังแสดงในรูปที่ 3.1



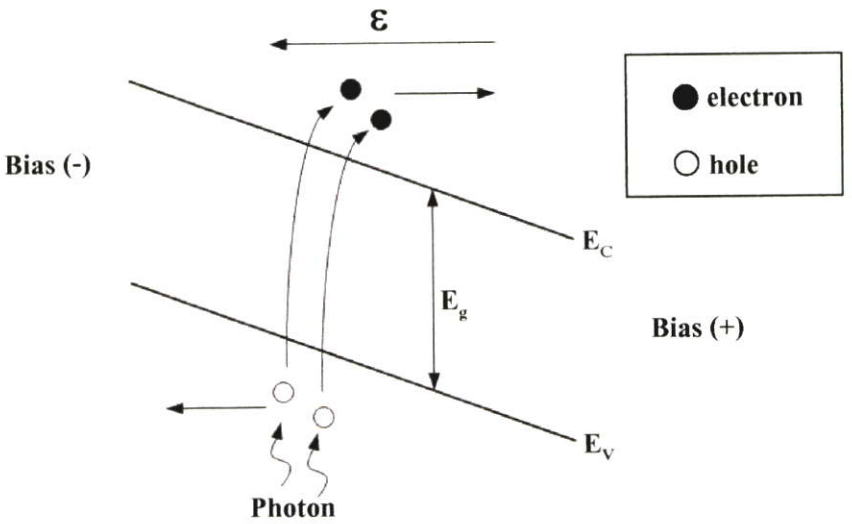
รูปที่ 3.1 อุปกรณ์ตรวจวัดแสงแบบโฟโตอิมิชชั่น

3.1.2 โฟโตคอนดัคเตอร์ (Photoconductor)

โฟโตคอนดัคเตอร์(Photoconductor) เป็นโฟโตดีเทคเตอร์ที่มีโครงสร้างซึ่งง่ายที่สุด โดยประกอบไปด้วยวัสดุที่เป็นชิ้นสารกึ่งตัวนำและที่ปลายของแท่งสารกึ่งตัวนำจะมีขั้วโลหะ 2 ขั้ว ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งในภาวะมืดชิ้นสารกึ่งตัวนำนี้จะมีค่าความต้านทานค่าหนึ่ง แต่เมื่อมีโฟตอนที่มีพลังงานมากกว่าหรือเท่ากับขนาดของช่องว่างพลังงาน(E_g) มาตกกระทบกับสารกึ่งตัวนำ สารกึ่งตัวนำจะดูดกลืนพลังงานแสง ทำให้มีคู่อิเล็กตรอน-โฮลเกิดขึ้น คู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้นนี้จะทำให้สภาพนำไฟฟ้า (Conductivity) มีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิมซึ่งคุณสมบัติเช่นนี้ถูกเรียกว่า “สภาพนำไฟฟ้าเนื่องจากแสง” (Photoconductivity) หรือก็คือมีค่าความต้านทานลดลง ความเข้มแสงที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ สภาพนำไฟฟ้าเนื่องจากแสง มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย การเกิดพาหะเนื่องจากแสงและลักษณะของแถบพลังงานของโฟโตคอนดัคเตอร์ แสดงได้ดังรูปที่ 3.3



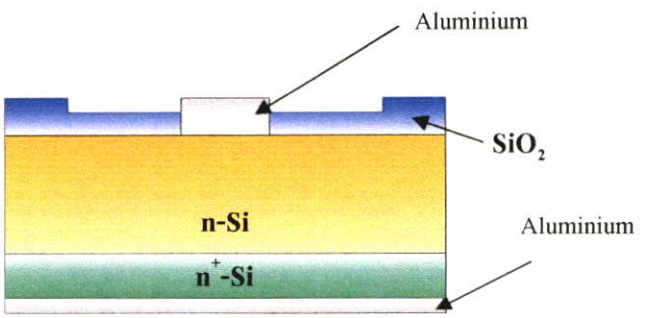
รูปที่ 3.2 อุปกรณ์ตรวจจับแสงแบบโฟโตคอนดัคทีฟ



รูปที่ 3.3 ลักษณะของแถบพลังงานของตรวจจับแสงแบบโฟโตคอนดัคเตอร์

3.1.3 โฟโตไดโอดชนิดโลหะ-สารกึ่งตัวนำ (Metal-semiconductor photodiode)

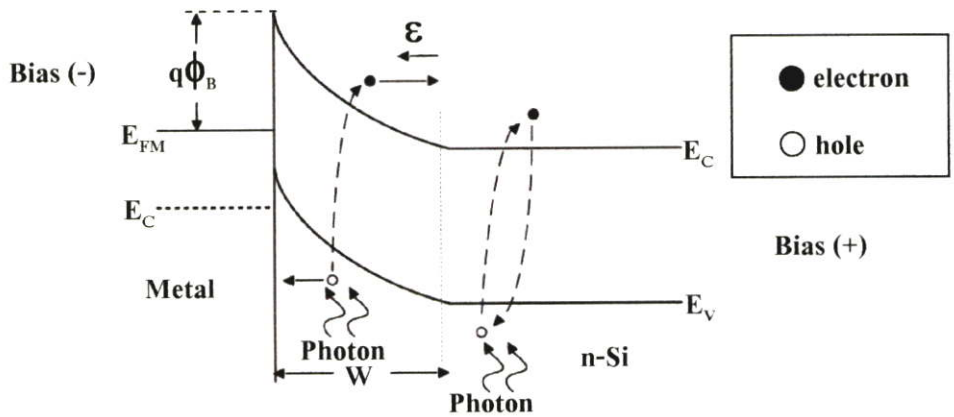
โฟโตไดโอดชนิดโลหะ-สารกึ่งตัวนำ คือโฟโตไดโอดที่เกิดจากการนำโลหะมาสัมผัสกับสารกึ่งตัวนำทำให้เกิดเป็นรอยต่อแบบช๊อตกี้(Schottky junction) ซึ่งลักษณะของโฟโตไดโอดชนิดโลหะ-สารกึ่งตัวนำนี้ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.4 โดยโฟโตไดโอดชนิดนี้มีข้อดีคือสร้างได้ง่าย, มีความเร็วในการทำงานสูง, สามารถเพิ่มพื้นที่รับแสงได้ง่ายและมีค่าความจุไฟฟ้าต่ำ แต่โฟโตไดโอดชนิดนี้ก็มีข้อเสียคือ มีกระแสมืดสูง, แรงดันพังทลายต่ำ และยากต่อการควบคุมพารามิเตอร์



รูปที่ 3.4 ลักษณะโครงสร้างตัดขวางของโฟโตไดโอดชนิดโลหะ-สารกึ่งตัวนำ

โฟโตไดโอดชนิดโลหะ-สารกึ่งตัวนำนี้มีหลักการทำงานคือ ในภาวะมืดจะมีกระแสค่าหนึ่ง ซึ่งเกิดแรงดันไบอัสย้อนกลับ ทำให้มีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำ เราเรียกกระแสนี้ว่า “กระแสมืด” แต่เมื่อเขตปลอดพาหะ(W) บริเวณรอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำได้รับแสง จะเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้น ซึ่งคู่อิเล็กตรอนและโฮล ที่เกิดขึ้นนี้

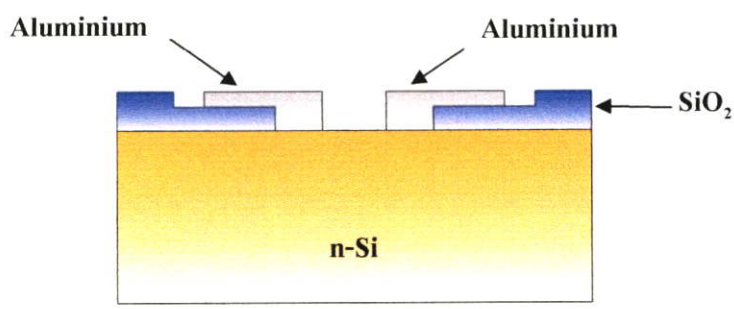
จะเคลื่อนที่ทวนและตาม สนามไฟฟ้า ตามลำดับ ส่งผลให้เกิดเป็นกระแสแสงขึ้นมา โดยมีทิศทางเดียวกันกับกระแสมืด ลักษณะแถบพลังงานของโฟโตไดโอดชนิดนี้แสดงได้ดังรูปที่ 3.5



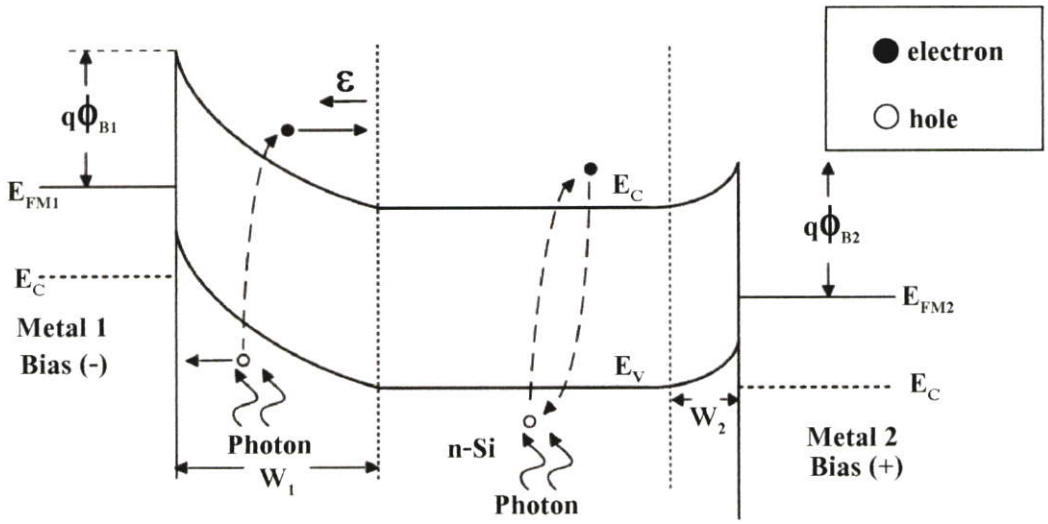
รูปที่ 3.5 ลักษณะของแถบพลังงานของโฟโตไดโอดชนิดโลหะ-ซิลิคอนชนิดเอ็น

3.1.4 โฟโตไดโอดชนิดโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ(MSM photodiode)[15]

โฟโตไดโอดชนิดนี้มีลักษณะและคุณสมบัติของรอยต่อแบบช๊อตต์กี้เหมือนโฟโตไดโอดชนิดโลหะ-สารกึ่งตัวนำ ที่ต่อกันแบบแบ็คทูแบ็ค(Back to back) ส่งผลให้มีความสะดวกในการใช้งาน เนื่องจากไม่มีขั้วในการไบอัสแรงดันซึ่งลักษณะโครงสร้างของโฟโตไดโอด ชนิดโลหะ-สารกึ่งตัวนำ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.6 ส่วนหลักการทำงานนั้นมีลักษณะที่เหมือนกับโฟโตไดโอดชนิดโลหะ-สารกึ่งตัวนำ ซึ่งลักษณะของแถบพลังงานแสดงได้ดังรูปที่ 3.7



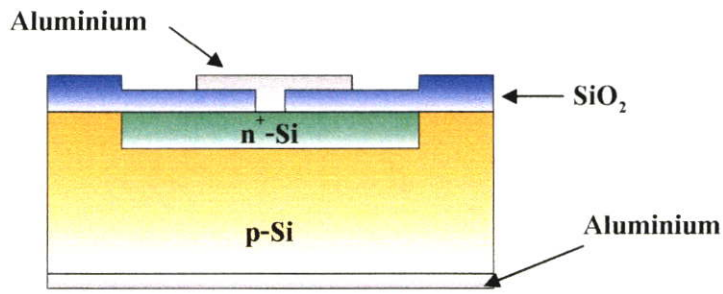
รูปที่ 3.6 ลักษณะตัดขวางของโฟโตไดโอดชนิดโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ



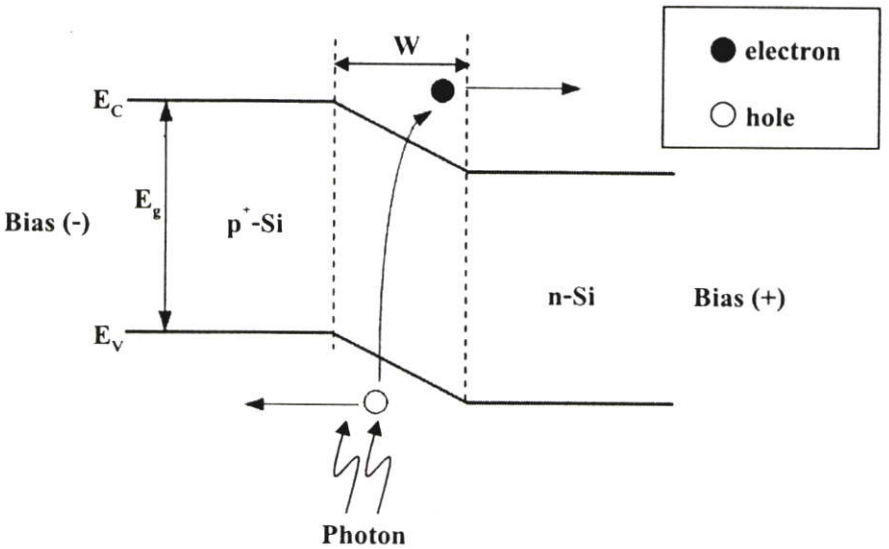
รูปที่ 3.7 ลักษณะของแถบพลังงานของโฟโตไดโอดชนิดโลหะ-ซิลิคอนชนิดเอ็น-โลหะ

3.1.5 โฟโตไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น (p-n photodiode)

โฟโตไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น คือ อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่รอยต่อของสารกึ่งตัวนำพีและเอ็นสามารถรับแสงได้ขณะใช้งาน ซึ่งลักษณะของโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.8 โดยประกอบไปด้วยชั้นของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและพี โดยชั้นเอ็นซึ่งอยู่ในด้านรับแสงจะมีขนาดบางมาก(<1 μm) เพื่อให้โฟตอนสามารถผ่านเข้ามายังเขตปลอดพาหะ(W) เพื่อเกิดเป็นกระแสแสงได้ โฟโตไดโอดชนิดนี้เป็นโฟโตไดโอดแบบพื้นฐานซึ่งมีขีดจำกัดทางด้านความไวในการตอบสนองต่อสัญญาณแสงความถี่สูง, กระแสมืด และแรงดันพังทลาย เมื่อเทียบกับโฟโตไดโอดชนิดอื่นๆ โดยสามารถแสดงลักษณะของแถบพลังงานได้ดังรูปที่ 3.9

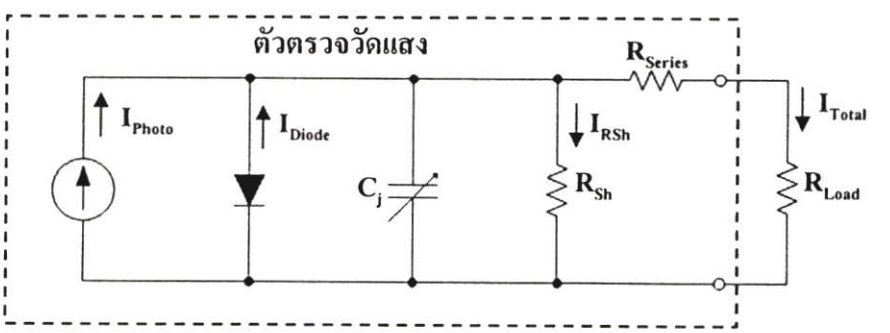


รูปที่ 3.8 ลักษณะตัดขวางของโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น



รูปที่ 3.9 ลักษณะของแถบพลังงานของโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น

สำหรับวงจรสมมูลของโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น[16] สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.10 ซึ่งประกอบด้วยแหล่งจ่ายกระแสแสง, กระแสที่ไหลผ่านตัวไดโอด, ตัวเก็บประจุ, ตัวต้านทานขนาน และตัวต้านทานอนุกรม ส่วนโฟโตไดโอดชนิดอื่นๆก็จะมีลักษณะของวงจรสมมูลที่ใกล้เคียงกันกับวงจรสมมูลของโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น



รูปที่ 3.10 วงจรสมมูลของตัวตรวจวัดแสงชนิดรอยต่อพี-เอ็น

โดยที่

I_{Photo}	=	กระแสแสง (A)	I_{Diode}	=	กระแสไดโอด (A)
I_{RSh}	=	กระแสที่ไหลผ่าน R_{Sh} (A)	I_{Total}	=	กระแสรวม (A)
C_j	=	ตัวเก็บประจุ (F)	R_{Series}	=	ตัวต้านทานอนุกรม (Ω)
R_{Sh}	=	ตัวต้านทานขนาน (Ω)	R_{Load}	=	ตัวต้านทานโหลด (Ω)

-กระแสแสง (Photo current)เป็นกระแสที่เกิดจากคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล อิสระ เนื่องมาจากได้รับพลังงาน จากโฟตอน ซึ่งสามารถแสดงสมการอย่างง่ายๆได้ดังสมการที่ (3.1)

$$I_{Photo} = -qA(L_n + W + L_p) \times G_L \qquad (3.1)$$

โดยที่

I_{Photo} = กระแสแสง (A)

A = พื้นที่หน้าตัดของไดโอด (cm^{-2})

W = ความกว้างของเขตปลอดพาหะ (cm)

G_L = อัตราการเกิดพาหะเนื่องจากแสง ($cm^{-3}.sec^{-1}$)

L_n และ L_p = ระยะการแพร่ของอิเล็กตรอนและ โฮล ตามลำดับ (cm)

- ส่วนกระแสอิ่มตัวไหลย้อนกลับนั้น เกิดมาจากพาหะส่วนน้อยที่ด้านทั้งสองของรอยต่อและแรงดันไบอัสย้อนกลับ ในขณะที่ไม่ได้รับแสง เราอาจเรียกกระแสนี้ว่า "กระแสมืด" ปกติในโฟโตไดโอดที่ดี กระแสมืดจะมี ค่าน้อยมาก
- ส่วนตัวเก็บประจุที่รอยต่อ เกิดจากความจุไฟฟ้าที่รอยสัมผัสของสารกึ่งตัวนำต่างชนิดทำให้มีบริเวณเขตปลอดพาหะ (Space Charge Region : SCR) และมีประจุไฟฟ้าในบริเวณนี้
- ตัวต้านทานอนุกรมเกิดจากผลรวมของค่าความต้านทานภายในเนื้อสารของสารกึ่งตัวนำ, เส้นลวดโลหะ และรอยสัมผัสโอห์มมิกระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ ปกติจะมีค่าต่ำมาก
- ตัวต้านทานขนานเกิดจากค่าความต้านทานไฟฟ้าที่รอยต่อ ปกติที่รอยต่ออุดมคติ ความไม่สมบูรณ์ของรอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำต่างชนิดกัน ปกติจะมีค่าสูงมาก

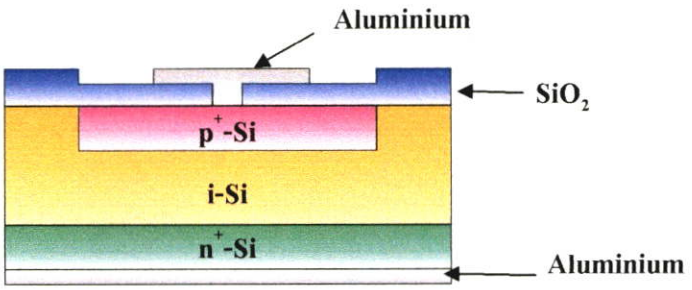
3.1.6 โฟโตไดโอด ชนิดอะวาลานซ์ (Avalanche PhotoDiode : APD)

โฟโตไดโอดชนิดอะวาลานซ์ ก็คือโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น หรือโฟโตไดโอดชนิด พี-ไอ-เอ็น ที่ถูกออกแบบมาให้ใช้งานโดยการให้แรงดันไบอัส ในช่วงที่เกิดภาวะพังทลายเพื่อให้ได้กระแสแสงสูง เนื่องมาจากภาวะพังทลาย แต่โฟโตไดโอดชนิดนี้มีข้อเสียคือ จำเป็นต้องให้แรงดันไฟฟ้าสูงๆ เพื่อให้เกิดการพังทลายแบบ อะวาลานซ์ จัดเป็นโฟโตไดโอดที่มีความไวต่อแสงสูงเป็นพิเศษ

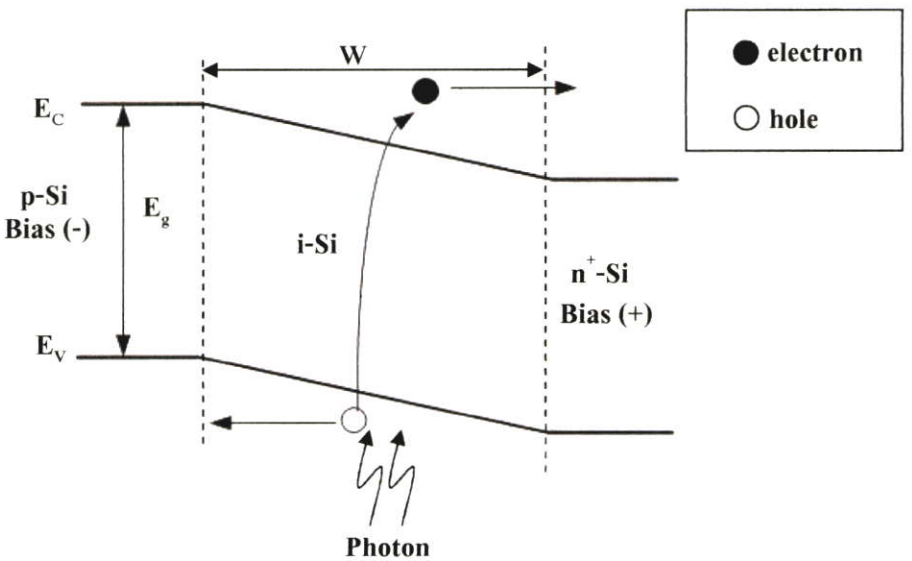
3.1.7 โฟโตไดโอดชนิด พี-ไอ-เอ็น (p-i-n photodiode)

โฟโตไดโอดชนิด พี-ไอ-เอ็น คือ โฟโตไดโอดที่มีโครงสร้างประกอบไปด้วยชั้นของสารกึ่งตัวนำชนิดพี, สารกึ่งตัวนำชนิดอินทรินซิค และสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ดังแสดงรูปที่ 3.11 จัดเป็นโฟโตไดโอดที่มีความไวต่อแสงสูงอีกชนิดหนึ่ง เนื่องจากรอยต่อ p-i , รอยต่อ n-i และในย่านชั้นi ของไดโอดเป็นบริเวณที่ไวแสง(Active area) ทำให้สามารถดูดกลืนโฟตอนได้ดี และมีกระแสแสงสูง และเนื่องจากโครงสร้างของไดโอดชนิดนี้ทำให้มีค่าความจุไฟฟ้าต่ำ จึงส่งผลให้

มีคุณสมบัติความเร็วในการทำงานสูงอีกด้วย นอกจากนี้แล้ว ยังมีกระแสมืดต่ำ มีแรงดันพังทลายสูงซึ่งเป็นคุณสมบัติของโฟโตไดโอดที่ดี ลักษณะของแถบพลังงานสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.11 ลักษณะโครงสร้างตัดขวางของโฟโตไดโอดชนิดพี-ไอ-เอ็น



รูปที่ 3.12 ลักษณะของแถบพลังงานของโฟโตไดโอดชนิด พี-ไอ-เอ็น

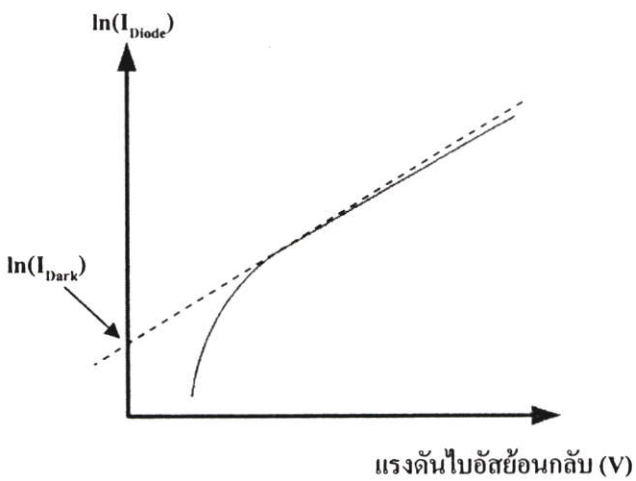
3.2 ข้อมูลจำเพาะพื้นฐานต่างๆที่สำคัญของโฟโตไดโอดทั่วๆไป[17],[18],[19],[20]

3.2.1 กระแสมืดของโฟโตไดโอด(Dark current : I_{Dark})

กระแสมืด คือ กระแสที่เกิดจากพาหะส่วนน้อย เนื่องจากการไบอัสย้อนกลับในขณะที่โฟโตไดโอดไม่ได้รับแสงโดยปกติจะมีค่าน้อย กระแสมืดหรือกระแสรั่วจัดเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญตัวซึ่งต้องถูกควบคุมให้มีค่าต่ำสุด เพราะ ถือว่าเป็นสัญญาณรบกวนแบบหนึ่งในโฟโตไดโอด นอกจากนี้แล้วกระแสมืดยังสามารถเกิดจากการไอออไนซ์ของอะตอมเนื่องจากความร้อน (Thermal ionization) ทำให้มีพาหะคู่อิเล็กตรอน-โฮล เกิดขึ้นและเป็นกระแสมืดได้และบางครั้ง

อาจเรียกกระแสนี้ว่า Thermal noise ดังนั้นการควบคุมอุณหภูมิของโฟโตไดโอดขณะใช้งานจึงมีความจำเป็น เพื่อการควบคุมค่ากระแสมืดนี้

กระแสมืดเป็นพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงขีดความสามารถในการตรวจวัดสัญญาณ ซึ่งสัญญาณที่รับได้นั้นควรมีค่ามากพอที่จะแสดงนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับกระแสมืด เพราะหากสัญญาณที่โฟโตไดโอดตรวจจับได้มีค่าน้อยกว่ากระแสมืดมากๆ จะส่งผลให้ไม่สามารถตรวจจับสัญญาณแสงได้อย่างชัดเจน การหาค่าของกระแสมืดสามารถหาได้จาก กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส(ค่าล็อคฐานอี)และแรงดันของโฟโตไดโอดหรือ $\ln(I_{Diode})$ – V ในขณะได้รับไบอัสตรง ดังแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าล็อคฐานอีของกระแสอิ่มตัวไหลย้อนกลับ($\ln(I_{Dode})$) กับแรงดันไบอัส

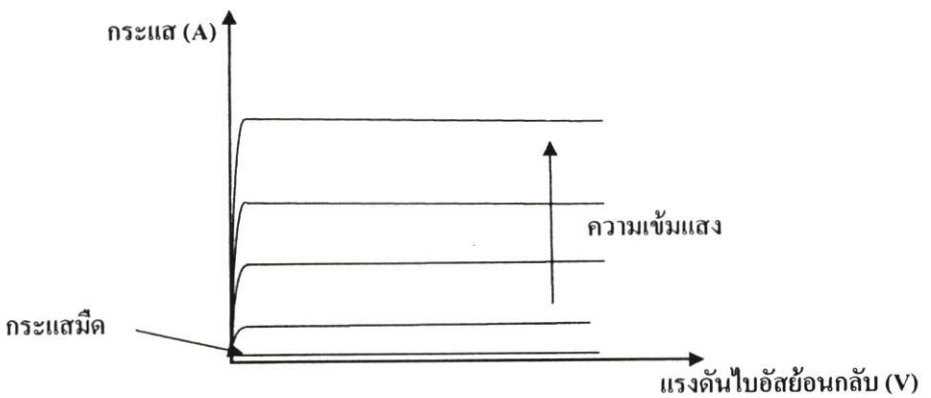
3.2.2 กระแสแสงของโฟโตไดโอด(Photo current : I_{photo})

กระแสแสงคือกระแสที่เกิดขึ้นในโฟโตไดโอดขณะที่ได้รับแสง กระแสชนิดนี้เกิดจากการดูดกลืนโฟตอน ในโฟโตไดโอดทำให้เกิดคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล อิสระ สนามไฟฟ้าในไดโอดจะทำให้พาหะเหล่านี้ เคลื่อนที่ขั้วโลหะและกลายเป็นกระแสแสงไหลในวงจร

กระแสแสงเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญและบ่งบอกถึงขีดความสามารถในการตรวจวัดแสง ปกติค่าของกระแสแสงที่ได้ควรมีค่ามากพอที่จะแสดงนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับกระแสมืด โดยทั่วไปขนาดของกระแสแสงจะขึ้นกับความเข้มแสง พื้นที่รับแสงและประสิทธิภาพในการดูดกลืนแสงของโฟโตไดโอด และค่าของกระแสแสงของโฟโตไดโอดสามารถคำนวณหาค่าได้จากสมการที่ (3.1) โฟโตไดโอดที่ดีจะต้องสามารถให้กระแสแสงได้สูง กระแสรวมที่ไหลในวงจรขณะที่โฟโตไดโอดได้รับแสง เป็นผลรวมของกระแสแสงและกระแสมืด ดังนั้นค่าของกระแสแสง อาจหาได้จากผลต่างของกระแสรวมและกระแสมืด ดังสมการที่ 3.2

$$I_{Photo} = I_{Total} - I_{Dark} \tag{3.2}$$

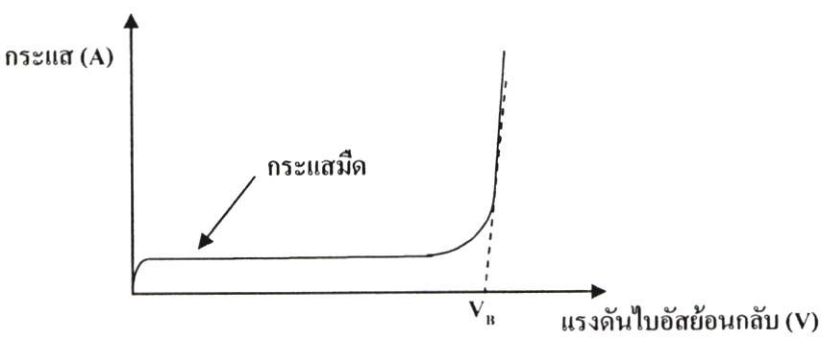
และลักษณะของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสแสง(I_{photo}) กับแรงดันไบอัสย้อนกลับของโฟโตไดโอดในขณะได้รับแสงที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ แสดงได้ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 กราฟความสัมพันธ์ กระแสแสง กับแรงดันไบอัสย้อนกลับขณะได้รับแสงที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ

3.2.3 แรงดันพังทลายของโฟโตไดโอด(Breakdown voltage : V_B)

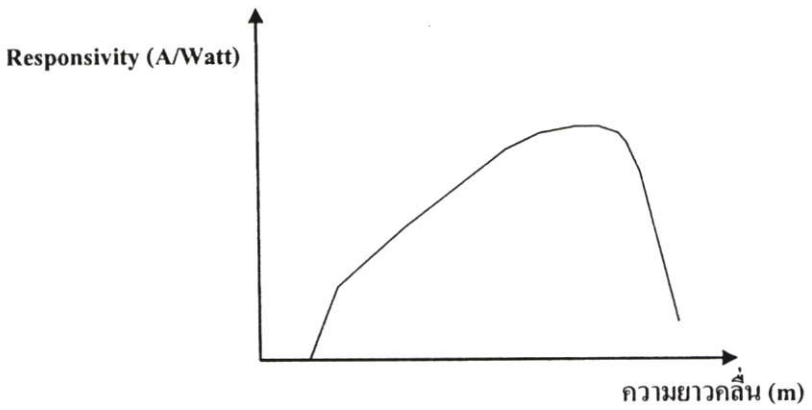
แรงดันพังทลายของโฟโตไดโอดเป็นพารามิเตอร์ตัวหนึ่งซึ่งมีความสำคัญต่อการกำหนดค่าแรงดันไบอัสให้แก่โฟโตไดโอดขณะใช้งาน ซึ่งค่าของแรงดันพังทลายนั้นขึ้นอยู่กับการออกแบบเพื่อวัตถุประสงค์ในการใช้งานเช่น อาวาลานซ์โฟโตไดโอด(APD) ต้องออกแบบให้โฟโตไดโอดเกิดการพังทลายแบบอาวาลานซ์ เพื่อให้เกิดการชนของอิเล็กตรอนกันแบบทวีคูณ ซึ่งทำให้มีอัตราการขยายของกระแสแสง จึงจำเป็นต้องมีค่าแรงดันพังทลายสูง เป็นต้น โดยสามารถหาค่าแรงดันพังทลายของโฟโตไดโอดได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส กับแรงดันไบอัส ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 ค่าแรงดันพังทลายบนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส กับแรงดันไบอัส

3.2.4 ความไวต่อแสงของโฟโตไดโอด(responsivity)

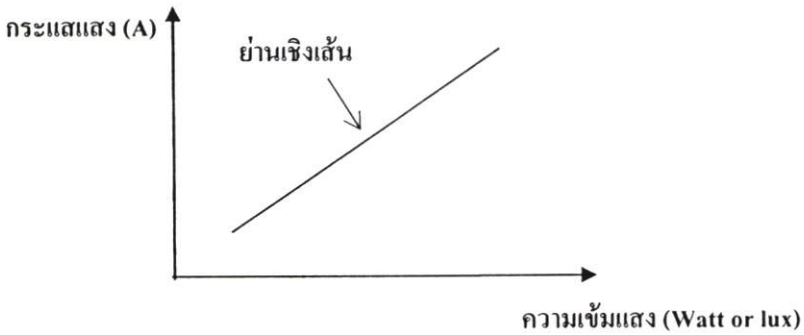
ความไวต่อแสงของโฟโตไดโอดหรือ Responsivity :$\Re$ นิยามว่าคือ อัตราส่วนระหว่างกระแสแสง(I_{photo}) กับกำลังงานของแสงที่ตกกระทบ(P_{inc}) หรือก็คือความสามารถในการจ่ายกระแสแสงต่อกำลังงานของแสงหนึ่งวัตต์(A/Watt หรือ V/Watt) ที่ความยาวคลื่นของแสงค่าต่างๆการดูดกลืนโฟตอนของโฟโตไดโอดจะแตกต่างกัน ทำให้ได้กระแสแสงที่ต่างกัน ดังนั้นที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆ ความไวต่อแสงที่มีความยาวคลื่นค่าต่างๆจะแตกต่างกัน ซึ่งสามารถแสดงได้เป็นลักษณะของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงต่อความเข้มแสงหนึ่งวัตต์(A/Watt) กับความยาวคลื่นค่าต่างๆ ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 กราฟแสดงค่า Responsivity ของโฟโตไดโอด ที่ความยาวคลื่นแสงค่าต่างๆ

3.2.5 ความเป็นเชิงเส้นของโฟโตไดโอด(Linearity)

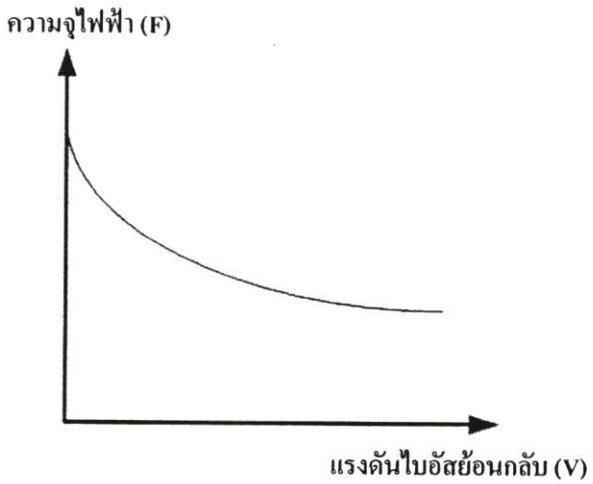
ความเป็นเชิงเส้นของโฟโตไดโอด หมายถึงลักษณะของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสง กับความเข้มแสง ที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงที่คงที่ ดังรูปที่ 3.17ซึ่งถ้าโฟโตไดโอดมีความเป็นเชิงเส้นที่ดี จะสามารถนำไปใช้งานได้อย่างง่าย



รูปที่ 3.17 ความเป็นเชิงเส้นของโฟโตไดโอดบนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสง กับความเข้มแสง

3.2.6 ค่าความจุไฟฟ้าของโฟโตไดโอด (Junction capacitance : C_j)

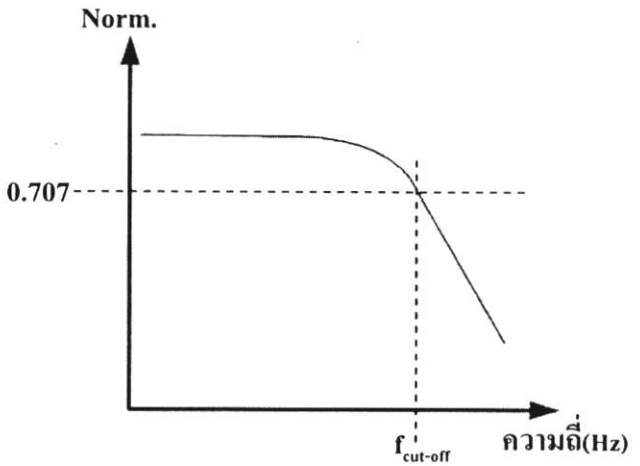
ค่าความจุไฟฟ้าของโฟโตไดโอดเป็นพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงความเร็วในการทำงานหรือความเร็วในการตอบสนองต่อสัญญาณแสงของโฟโตไดโอด ปกติค่าความจุไฟฟ้าของไดโอดจะแปรโดยตรงกับพื้นที่ของรอยต่อในโฟโตไดโอด หรือก็คือขนาดของไดโอด สำหรับโฟโตไดโอดที่มีขนาดใหญ่ จะมีค่าความจุไฟฟ้าสูง นอกจากนี้แล้วค่าความจุไฟฟ้ายังขึ้นกับพารามิเตอร์อื่นๆและเงื่อนไขของการสร้างอีกด้วย ค่าความหนาแน่นความจุไฟฟ้าของโฟโตไดโอดสามารถวัดและแสดงได้ด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้า กับแรงดันไบอัสย้อนกลับ ดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้า กับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

3.2.7 ผลการตอบสนองของโฟโตไดโอด(photo response)

ผลการตอบสนองต่อสัญญาณแสงที่ความถี่ค่าต่างๆ หรือ Photoresponse หมายถึงความสามารถของโฟโตไดโอดที่ตรวจจับสัญญาณแสงซึ่งมีความถี่ค่าต่างๆ โดยปกติเมื่อความถี่ของสัญญาณแสงมีค่าเพิ่มขึ้น โฟโตไดโอดจะให้กระแสแสงลดลง และที่ความถี่ของสัญญาณแสงค่าหนึ่ง กำลังงานที่เอาท์พุทของโฟโตไดโอดจะลดลงครึ่งหนึ่งหรือขนาดของแรงดันไฟฟ้าจะลดลงเหลือ 0.707 เท่าของแรงดันไฟฟ้าสูงสุดซึ่งเราเรียกจุดนี้ว่า "ฮาฟเพาเวอร์พ้อยท์(Half power point)" หรือ "ความถี่คัทออฟ(Cut-off Frequency)" เราสามารถหาผลการตอบสนองต่อสัญญาณแสงที่ความถี่ค่าต่างๆได้จากอัตราส่วนระหว่างขนาดแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหลดที่ความถี่ค่าต่างๆ (V_{out}) ต่อขนาดแรงดันของไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหลดที่มีค่าสูงสุด($V_{out\text{-}max}$) หรือ $V_{out}/ V_{out\text{-}Max}$ ซึ่งค่านี้ถูกเรียกว่า "ค่านอร์มอไลซ์ของแรงดันเอาท์พุท"(Normalized Output voltage: Norm.) จะถูกนำมาแสดงเป็นคุณสมบัติ photo response ของโฟโตไดโอด ดังรูปที่ 3.19

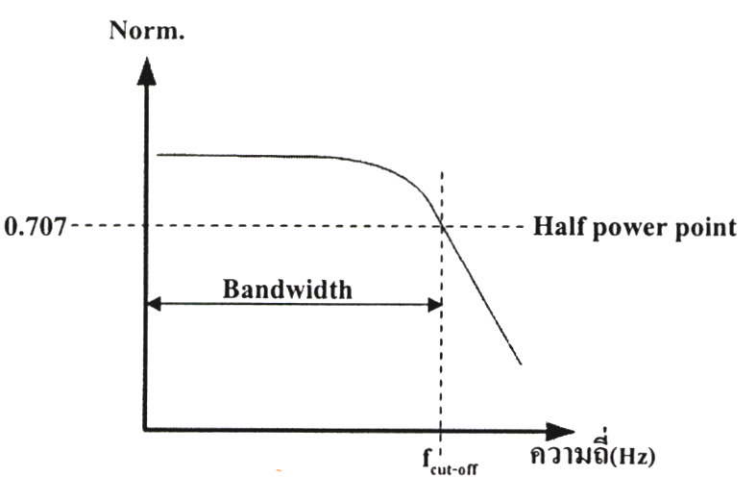


รูปที่ 3.19 กราฟคุณสมบัติ Photo response ของโฟโตไดโอด

ค่าความถี่คัทออฟ ของโฟโตไดโอดจะเกี่ยวข้องโดยตรงกับความเร็วในการทำงาน และขึ้นอยู่กับค่าความจุไฟฟ้า และค่าความต้านทานอนุกรมของโฟโตไดโอด นอกจากนี้ยังขึ้นกับพารามิเตอร์อื่นๆอีก เช่นชนิดของโฟโตไดโอด ลักษณะโครงสร้าง และเงื่อนไขการสร้างเป็นต้น

3.2.8 แบนด์วิดท์ของโฟโตไดโอด(Bandwidth)

แบนด์วิดท์ของโฟโตไดโอด คือ ความกว้างของแถบความถี่ที่ โฟโตไดโอด สามารถทำงานได้ โดยที่กำลังงานด้านเอาท์พุทมีค่ามากกว่าครึ่งหนึ่งของกำลังงานสูงสุด ขนาดความกว้างของแบนด์วิดท์ของโฟโตไดโอด สามารถหาได้จากกราฟคุณสมบัติ Photo response ดังในรูปที่ 3.20 ขนาดความกว้างของแบนด์วิดท์ของโฟโตไดโอดจะเกี่ยวข้องโดยตรงกับค่าความถี่คัทออฟ โดยที่ กรณีความถี่คัทออฟมีค่าสูง จะส่งผลให้แบนด์วิดท์ของโฟโตไดโอด มีขนาดกว้าง

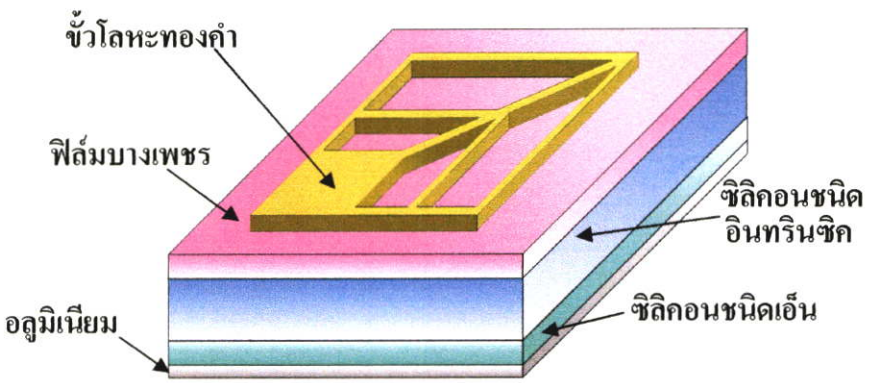


รูปที่ 3.20 ขนาดแบนด์วิดท์ จากกราฟคุณสมบัติ Photo responseของโฟโตไดโอด

3.3 โฟโตไดโอดโครงสร้าง ใหม่ แบบ p-diamond/i-Si/n^+-Si

3.3.1 โครงสร้างของโฟโตไดโอดชนิด p-diamond/i-Si/n^+-Si

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั้นจะสังเกตเห็นว่าในแง่ของคุณสมบัตินั้น โฟโตไดโอดชนิด พี-ไอ-เอ็น มีจุดเด่นมากที่สุด ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้นำมาปรับปรุงโครงสร้างให้เป็นโครงสร้างใหม่ เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำฟิลม์เพชรที่สังเคราะห์มาประยุกต์ใช้งาน เป็นโฟโตไดโอด โดยนำฟิลม์เพชรมาประยุกต์ใช้เป็นชั้นวินโดว์ให้กับโฟโตไดโอดชนิด พี-ไอ-เอ็น ซึ่งโครงสร้างของโฟโตไดโอดนี้ ประกอบไปด้วยชั้นของฟิลม์เพชรชนิดพี, ซิลิคอนชนิดอินทรินซิค และชั้นของซิลิคอนชนิดเอ็น โดยรอยต่อระหว่างฟิลม์เพชรชนิดพีกับซิลิคอนชนิดอินทรินซิคถูกสร้างให้เป็นรอยต่อแบบ Hetero junction และรอยต่อระหว่างซิลิคอนชนิดอินทรินซิคกับซิลิคอนชนิดเอ็นเป็นรอยต่อแบบ Homo junction ส่วนชั้นรอยสัมผัสโลหะทั้งด้านหน้าและด้านหลังเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิก ดังในรูปที่ 3.21



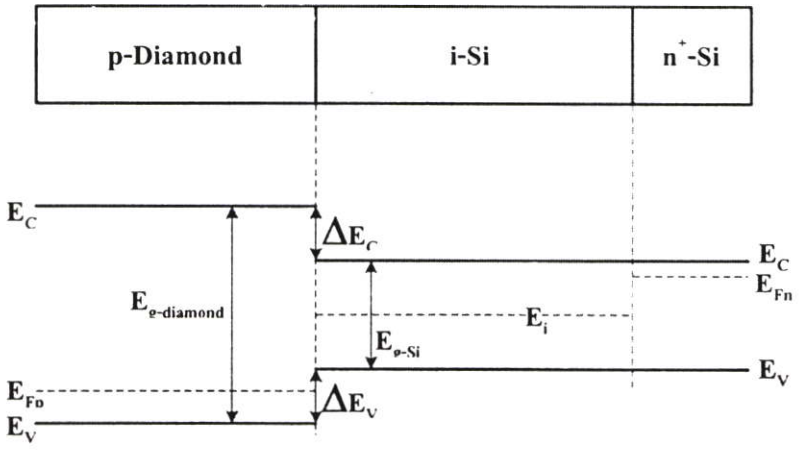
รูปที่ 3.21 ลักษณะโครงสร้างของโฟโตไดโอดแบบ p-diamond/i-Si/n^+-Si

ในการใช้ฟิลม์เพชรชนิดพีแทนซิลิคอนชนิดพีนั้นมีข้อดีอยู่หลายประการ ดังนี้

- ฟิลม์เพชรมีค่าสัมประสิทธ์การดูดกลืนที่ต่ำ[1] ส่งผลให้โฟตอนเกือบทั้งหมดสามารถผ่านไปยังส่วนของ Active region ในโฟโตไดโอดได้ ทำให้ได้กระแสแสงเพิ่มมากขึ้น
- ฟิลม์เพชรที่สังเคราะห์ขึ้น มีลักษณะเป็นโพลีคริสตอลไลน์ ส่งผลให้ชั้นฟิลม์เพชรสามารถใช้เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงได้ดี ซึ่งทำให้ได้กระแสแสงเพิ่มมากขึ้น
- ฟิลม์เพชรซึ่งมีความเด่นในด้านคุณสมบัติทางกายภาพนั้น สามารถใช้เป็นชั้นป้องกันโครงสร้างของตัวตรวจจับแสงได้อีกด้วย[1] นอกจากนั้นฟิลม์เพชรยังทำหน้าที่เป็นสารกึ่งตัวนำ โดยทำให้เกิดรอยต่อแบบ Hetero junction กับชั้นของซิลิคอนชนิดอิทรินซิกอีกด้วย
- สามารถกำหนดความไวต่อแสง(responsivity) ได้ง่าย โดยการกำหนดความหนาของชั้นฟิลม์เพชร

3.3.2 หลักการทำงานของโฟโตไดโอดโครงสร้างใหม่แบบ p-diamond/i-Si/n^+-Si

ลักษณะของแถบพลังงานของโฟโตไดโอดชนิดp-i-n โครงสร้างใหม่แบบ p-diamond/i-Si/n^+-Si ซึ่งประกอบไปด้วยชั้นของฟิล์มเพชรชนิดพี, สารกึ่งตัวนำซิลิคอนชนิดอินทรินซิค และสารกึ่งตัวนำซิลิคอนชนิดเอ็น ในภาวะเริ่มสัมผัส ก่อนเกิดสมดุลความร้อนแสดงได้ดังรูปที่ 3.22 โดยฟิล์มเพชรจะมีช่องว่างแถบพลังงานประมาณ 5.5 eV. ส่วนซิลิคอนจะมีช่องว่างแถบพลังงานประมาณ 1.12 eV.

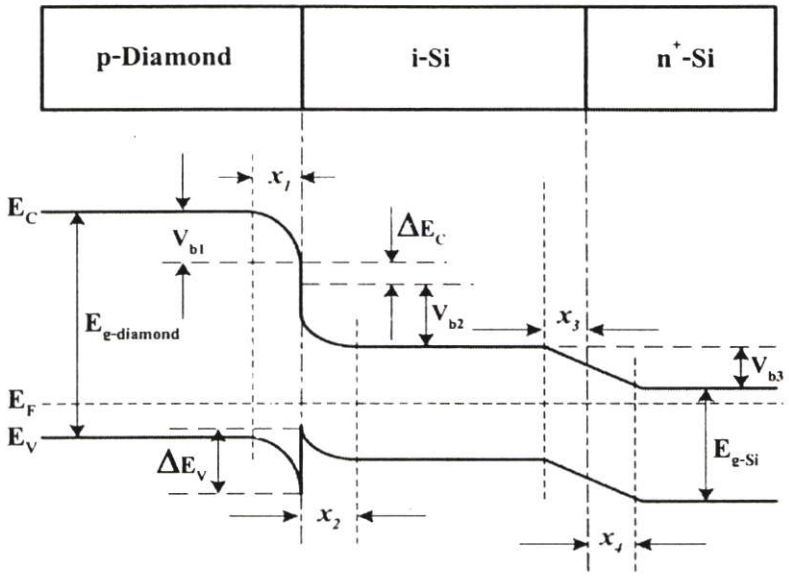


รูปที่ 3.22 ลักษณะของแถบพลังงานของไดโอดในภาวะเริ่มสัมผัสก่อนเกิดสมดุลความร้อน

เนื่องจากความแตกต่างของระดับเฟอร์มิ(Fermi level) ขณะที่อยู่ในภาวะสมดุลความร้อน แถบพลังงานบริเวณรอยสัมผัสระหว่างฟิล์มเพชรชนิดพีกับซิลิคอนชนิดอินทรินซิค และรอยสัมผัสระหว่างซิลิคอนชนิดอินทรินซิคกับซิลิคอนชนิดเอ็นจะเกิดการโค้งงอ เนื่องจากมีสนามไฟฟ้าภายในบริเวณเขตปลอดพาหะของรอยต่อระหว่างฟิล์มเพชรชนิดพีกับซิลิคอนชนิดอินทรินซิค(x_1 และ x_2) และซิลิคอนชนิดอินทรินซิคกับซิลิคอนชนิดเอ็น(x_3 และ x_4) เกิดขึ้น ส่วนในชั้นอินทรินซิคซึ่งไม่มีสนามไฟฟ้าจะไม่เกิดการโค้งงอของแถบพลังงาน ดังรูปที่ 3.23

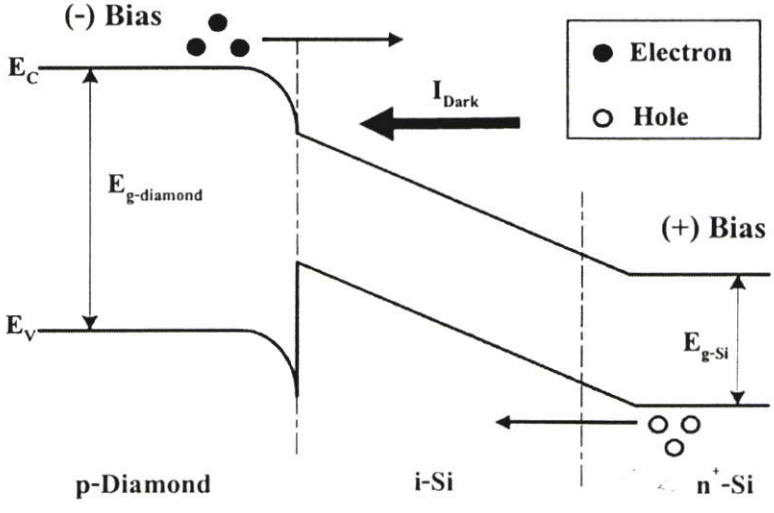
ส่วนแรงดันภายใน(Build-in voltage) ซึ่งตกคร่อมที่บริเวณรอยต่อต่างๆในโฟโตไดโอด โดยมีผลรวมดังแสดงได้ในสมการที่ (3.3)

$$V_{bi(Total)} = V_{b1} + V_{b2} + V_{b3} \tag{3.3}$$



รูปที่ 3.23 ลักษณะของแถบพลังงานในภาวะสมดุลความร้อนและไม่มีแรงดันไบอัส

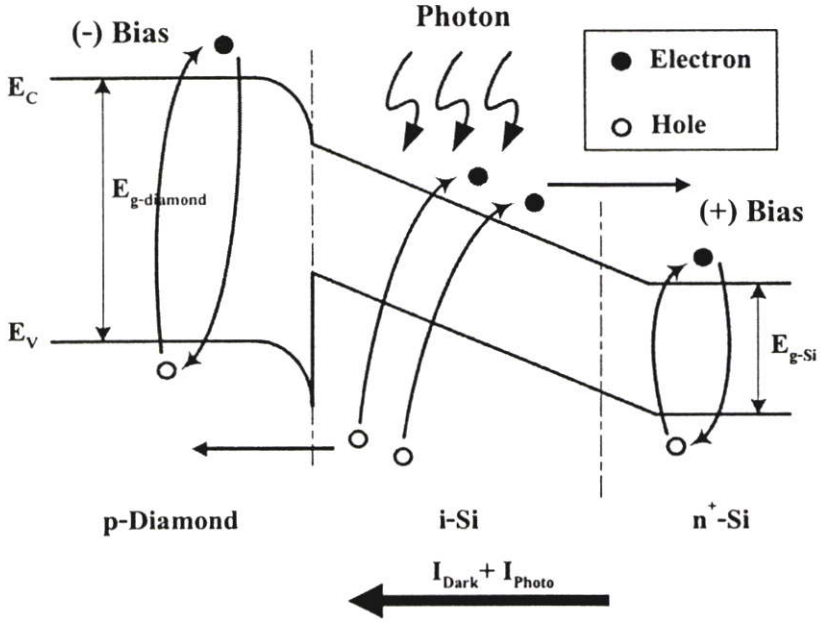
ขณะที่มีการไบอัสแรงดันไฟฟ้าให้กับโฟโตไดโอด โดยด้านฟิล์มเพชรชนิดพีมีศักย์ไฟฟ้าเป็นลบ ส่วนด้านซิลิคอนชนิดเอ็นมีศักย์ไฟฟ้าเป็นบวก และไม่มีการฉายแสง เมื่อพิจารณาว่าไม่มีสนามไฟฟ้าปรากฏอยู่ในฟิล์มเพชรชนิดพี และซิลิคอนชนิดเอ็น ลักษณะของแถบพลังงานสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.24 ผลจากแรงดันไบอัสจะทำให้มีสนามไฟฟ้าปรากฏอยู่ในบริเวณซิลิคอนชนิดอินทรินซิคและเขตปลอดพาหะ ส่งผลให้เกิดการลาดเอียงของแถบพลังงานในส่วนของซิลิคอนชนิดอินทรินซิค ในภาวะนี้จะเกิดกระแสขึ้นชนิดหนึ่งเรียกว่า "กระแสมืด"(I_{Dark}) ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของประจุพาหะส่วนน้อยจากฟิล์มเพชรชนิดพี ไปยังซิลิคอนชนิดเอ็น และจากซิลิคอนชนิดเอ็นไปยังฟิล์มเพชรชนิดพี



รูปที่ 3.24 ลักษณะของแถบพลังงานขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ

เมื่อมีแสงหรือโฟตอนมาตกกระทบกับโฟโตไดโอด โฟตอนจะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ทั้งในฟิล์มเพชรชนิดพี, ซิลิคอนชนิดอินทรินซิค และชนิดเอ็น ดังในรูปที่ 3.25 ซึ่งถ้าพิจารณาว่าไม่มีสนามไฟฟ้าในฟิล์มเพชรชนิดพี และซิลิคอนชนิดเอ็นแล้ว คู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้นในบริเวณทั้งสองจะไม่มีการเคลื่อนที่แต่จะกลับมารวมตัวกัน จึงส่งผลให้ไม่เกิดเป็นกระแส แต่สำหรับในชั้นอินทรินซิคที่มีสนามไฟฟ้าปรากฏอยู่นั้น เมื่อเกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮล ประจุพาหะนี้จะเคลื่อนที่เข้าไปทางด้านซิลิคอนชนิดเอ็นและด้านฟิล์มเพชรตามลำดับ ส่งผลให้เกิดเป็นกระแสอิเล็กตรอนและกระแสโฮลขึ้นและเรียกว่า "กระแสแสง" กระแสที่เกิดจากพาหะทั้งสองชนิดนี้จะมีทิศทางเดียวกัน ดังนั้นกระแสแสงรวมจึงเป็นผลรวมของกระแสทั้งสอง นอกจากนี้แล้ว กระแสรวมในวงจรที่วัดได้ขณะไดโอดได้รับแสง เกิดจากผลรวมของกระแสมืดและกระแสแสง ดังสมการที่ (3.4)

$$I_{(Total)} = I_{Dark} + I_{Photo} \tag{3.4}$$



รูปที่ 3.25 ลักษณะของแถบพลังงานขณะได้รับไบอัสย้อนกลับและได้รับแสง

และเมื่อเพิ่มแรงดันไบอัสย้อนกลับให้แก่โฟโตไดโอด จะทำให้สนามไฟฟ้าในบริเวณเขตปลอดพาหะมีค่าเพิ่มขึ้น ที่แรงดันไบอัสค่าหนึ่งจะ ทำให้เกิดการพังทลายที่รอยต่อ การพังทลายนี้เกิดจากการการพังทลายแบบอาวาลานซ์ (Avalanche Breakdown) ซึ่งโฟโตไดโอดชนิดพี-ไอ-เอ็น ทั่วไปนั้นจะมีค่าแรงดันพังทลายสูงมากกว่าร้อยโวลต์ ทั้งนี้เนื่องจากเป็นไดโอดที่มีโครงสร้างสองรอยต่อ ส่งผลให้สนามไฟฟ้าทั้งหมดถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนทำให้มีแรงดันพังทลายสูงกว่าโฟโตไดโอดทั่วๆไป อีกประการหนึ่งคือในชั้นอินทรินซิคมีจำนวนอะตอม

สารเจืออยู่เพียงเล็กน้อย ทำให้เขตปลอดพาหะสามารถขยายได้กว้างมากกว่ารอยต่อพี-เอ็น ทั่วๆไป นั่นก็คือความเข้มสนามไฟฟ้าในเขตปลอดพาหะจะมีค่าน้อยกว่ารอยต่อพี-เอ็น ทั่วๆไป จึงมีค่าแรงดันพังลายที่สูงกว่ารอยต่อพี-เอ็น ทั่วๆไป

บทที่ 4
กระบวนการสร้างและการทดลอง

ในบทนี้เป็นการแสดงถึงกระบวนการสร้างตัวตรวจจับแสงโครงสร้าง p-diamond / i-Si / n^+-Si เพื่อศึกษาคุณสมบัติ, การทำงาน และพารามิเตอร์ต่างๆที่เป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของตัวตรวจจับแสง โดยแบ่งกระบวนการสร้างการทดลองออกเป็น 6 ส่วนด้วยกันดังนี้

- กระบวนการสังเคราะห์และการวิเคราะห์คุณสมบัติฟิล์มเพชร
- กระบวนการสร้างรอยสัมผัสระหว่างฟิล์มเพชรกับโลหะชนิดต่างๆ
- กระบวนการสร้างโฟโตไดโอดโครงสร้าง p-diamond/i-Si/n^+-Si
- การทดลองเพื่อการศึกษาผลของความเข้มข้นอะตอมสารเจือในฟิล์มเพชรชนิดพีและการทดลองผลของความหนาของชั้นฟิล์มเพชรที่มีต่อคุณสมบัติของโฟโตไดโอด
- การทดลองเพื่อการศึกษาผลของความหนาชั้นอินทรินซิคที่มีต่อคุณสมบัติของโฟโตไดโอด
- การทดลองเพื่อการศึกษาผลของลักษณะลวดลายของขั้วโลหะด้านรับแสง

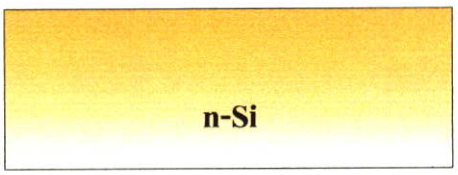
4.1 กระบวนการสังเคราะห์และการวิเคราะห์คุณสมบัติฟิล์มเพชร

หัวข้อนี้เป็นการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรเพื่อนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ เช่น Scanning Electron Microscopy, Raman Spectroscopy, Energy Dispersive X-ray เป็นต้น ซึ่งกระบวนการสร้างสามารถแสดงได้ดังนี้

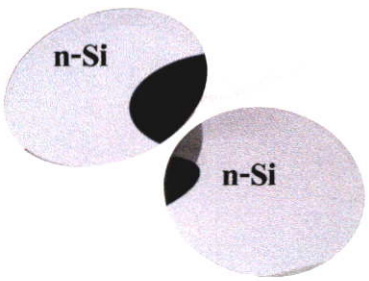
4.1.1 ทำความสะอาดแผ่นผลึกซิลิคอน

ทำความสะอาดแผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นระนาบ (111), สภาพต้านทาน 5-6 Ω.cm, หนา 400μm ที่ถูกนำมาใช้เป็นแผ่นฐานรองสำหรับการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร ดังนี้

- ต้มใน Nitric Acid(HNO_3) เป็นเวลา 5 นาที
- ล้างด้วยน้ำ DI ให้สะอาด แล้วเป่าด้วยก๊าซไนโตรเจนให้แห้ง
- ต้มในTricholoethelene(C_2HCl_3) เป็นเวลา 5 นาที
- อัลตร้าโซนิคใน Acetone(C_3H_6O) เป็นเวลา 5 นาที
- ล้างน้ำ DI 2 แก้ว แล้วเป่าด้วยก๊าซไนโตรเจนให้แห้ง จะได้แผ่นผลึกซิลิคอนที่สะอาด ดังรูปที่ 4.1 และ 4.2



รูปที่ 4.1 แผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นที่ใช้เป็นฐานรอง

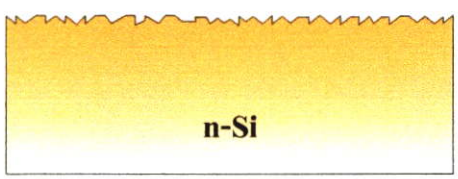


รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายแผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นที่ใช้เป็นฐานรองสำหรับการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร

4.1.2 ขั้นตอนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร

ขั้นตอนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD แบบขดลวดความร้อน(HFCVD) สามารถสรุปได้ดังนี้

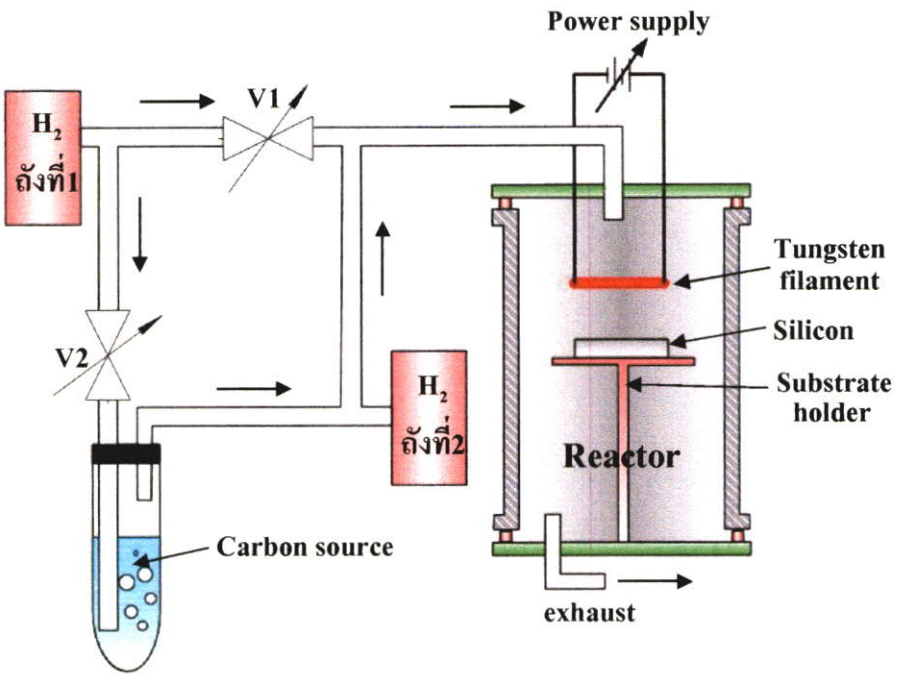
- เตรียมผิวแผ่นผลึกฐานรองซิลิคอน โดยการขัดด้วยครีมเพชร(Diamond paste) ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของผงเพชรประมาณ 1 μm เพื่อให้ผิวหน้าของฐานรองเกิดเป็นริ้วรอย ดังรูปที่ 4.3 และ 4.4ซึ่งจะช่วยเพิ่มอัตราการเกิดของฟิล์มเพชร



รูปที่ 4.3 แผ่นผลึกซิลิคอนหลังจากที่ผิวหน้าถูกขัดด้วยครีมเพชร

รูปที่ 4.4 ภาพผิวผลึกซิลิคอนหลังจากที่ผิวหน้าถูกขัดด้วยครีมเพชรที่ถ่ายจาก SEM

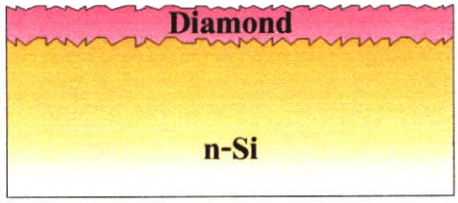
ทำการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรบนแผ่นฐานรอง โดยใช้อุปกรณ์เครื่อง CVD แบบขดลวดความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 4.5



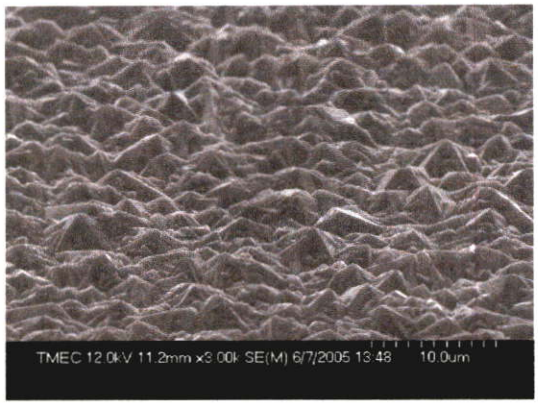
รูปที่ 4.5 แผนผังของเครื่อง Hot Filament Chemical Vapor Deposition

โดยมีขั้นตอนการทำงานดังนี้

- เปิดวาล์วตัวที่ 1(V1) แล้วจึงปล่อยก๊าซไฮโดรเจน(H_2) 30 cc/min จากถังที่ 1 และ 2 เข้าไปยัง reactor ประมาณ 10 นาที เพื่อให้ภายใน reactor เป็นบรรยากาศของไฮโดรเจน
- เปิดวาล์วตัวที่ 2 (V2) และปิดวาล์วตัวที่ 1(V1) อีก 10 นาที เพื่อให้ก๊าซไฮโดรเจนพาเอาโมเลกุลของเอทิลแอลกอฮอล์(C_2H_5OH) ซึ่งเป็นแหล่งจ่ายอะตอมคาร์บอน เข้าไปยัง reactor
- จ่ายไฟฟ้าให้กับขดลวดทังสเตนประมาณ 160 Watts เพื่อให้เกิดความร้อน ส่วนฐานรองอยู่ใต้ขดลวดทังสเตนโดยห่างประมาณ 2-3 mm. ทำให้มีอุณหภูมิประมาณ 700 $^{\circ}$C (วัดด้วย temperature control ยี่ห้อ WEST รุ่น 6100+, thermocouple type K)
- ทำการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรโดยใช้เวลา 1, 2, 3 และ 4 ชั่วโมง ได้ฟิล์มเพชรหนา 5, 10, 15 และ20 μm. ตามลำดับ และ มีพื้นที่ประมาณ 15-20 mm^2
- นำชิ้นงานมา Anneal ในบรรยากาศของไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิ 700 $^{\circ}$C เป็นเวลา 10 นาที รูปตัดขวางของชิ้นงาน และภาพถ่ายลักษณะฟิล์มเพชรภายหลังการ anneal แสดงดังในรูปที่ 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ



รูปที่ 4.6 แผ่นผลึกซิลิคอนหลังจากที่สังเคราะห์ฟิล์มเพชร



รูปที่ 4.7 ภาพถ่ายด้านบนของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้จาก SEMภายหลังการ anneal

- ทำความสะอาดชิ้นงาน เพื่อกำจัดสิ่งสกปรก โดยต้มในสารละลาย NaOH เดือด (NaOH 0.05 mol : H_2O 5.56 mol) เป็นเวลา 3 นาที แล้วล้างด้วยน้ำ DI

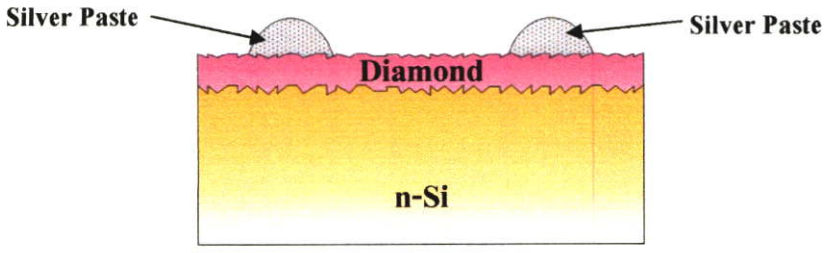
ในกรณีที่ต้องการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดพี จำเป็นต้องมีการผสมสารประกอบ B_2O_3 เข้าไปในเอทิลแอลกอฮอล์(C_2H_5OH) ในอัตราส่วนต่างๆ ตามที่ต้องการ

4.2 กระบวนการสร้างรอยสัมผัสระหว่างฟิล์มเพชรชนิดพีกับโลหะชนิดต่างๆ

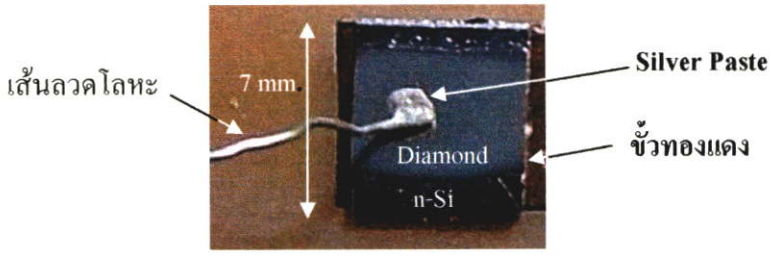
หลังจากที่ได้สังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดพี ดังในการทดลองหัวข้อที่ 4.1 แล้ว ในหัวข้อนี้เป็นการนำฟิล์มเพชรชนิดพี หนา 10μm ที่สร้างจากแหล่งจ่ายอะตอมคาร์บอนซึ่งมีอะตอมสารเจือโบรอนเจือปนอยู่ ด้วยอัตราส่วนระหว่างจำนวนอะตอมโบรอนต่อคาร์บอนเท่ากับ 75 ppm. มาสร้างรอยสัมผัสกับโลหะชนิดต่างๆ ได้แก่ กาวเงิน, อะลูมิเนียม และทองคำ เพื่อศึกษาคุณสมบัติของรอยสัมผัสที่เกิดขึ้น กระบวนการสร้างรอยสัมผัสทำได้ดังนี้

4.2.1 การสร้างรอยสัมผัสระหว่าง ฟิล์มเพชรชนิดพีกับกาวเงิน

สำหรับชั้นของกาวเงินนั้น เราสามารถทำได้โดยใช้กาวเงินหยดลงบนฟิล์มเพชรชนิดพี ดังในรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 แสดงภาพถ่ายของชั้นกาวเงินที่อยู่บนฟิล์มเพชร จากนั้นปล่อยทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 8 ชั่วโมง เพื่อให้ชั้นของกาวเงินแห้งสนิท



รูปที่ 4.8 การสร้างรอยสัมผัสระหว่าง ฟิล์มเพชรชนิดพี กับ กาวเงิน

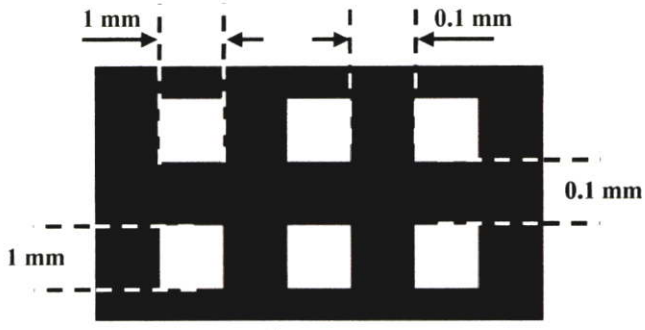


รูปที่ 4.9 ภาพถ่ายรอยสัมผัสระหว่าง ฟิล์มเพชรชนิดพี กับ กาวเงิน

4.2.2 การสร้างรอยสัมผัสระหว่าง ฟิล์มเพชรชนิดพีกับอะลูมิเนียม

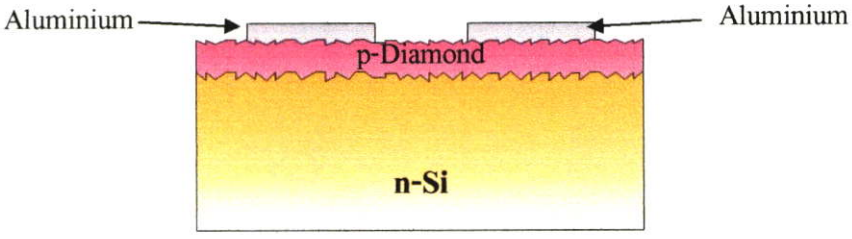
นำแผ่นผลึกซิลิคอนที่มีการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรอยู่ด้านบน มาใช้เป็นฐานรองสำหรับการสร้างชั้นอลูมิเนียม เพื่อให้เกิดเป็นรอยสัมผัส ระหว่าง ฟิล์มเพชรชนิดพีกับอะลูมิเนียม ซึ่งสามารถทำได้ ดังนี้

- เคลือบอะลูมิเนียมโดยใช้เทคนิค Vacuum Thermal Evaporation ที่ความดัน 3×10^{-6} Torr. ได้ชั้นอะลูมิเนียมหนาประมาณ 1 ไมครอน
- นำชิ้นงานไปอบที่อุณหภูมิ 90 $^{\circ}$C เป็นเวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวกเบอร์AZ 1350 ด้วยเครื่องสปินเนอร์ ที่ 3,000 rpm.20 วินาที แล้วอบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 90 $^{\circ}$C เป็นเวลา 20 นาที เพื่อให้น้ำยาไวแสงแห้ง
- ฉายแสงอัลตร้าไวโอเล็ตผ่านกระจกลวดลายดังรูปที่ 4.10 ด้วยเครื่อง Mask Aligner

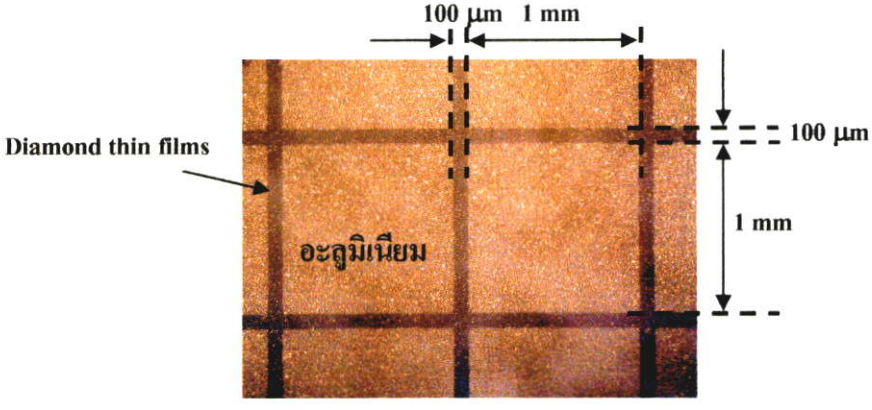


รูปที่ 4.10 ลักษณะลวดลายชั้นอะลูมิเนียม บนแผ่นกระจก Mask

- จุ่มชิ้นงานลงในสารละลาย AZ developer ประมาณ 30 วินาที
- ล้างด้วยน้ำ DI ให้สะอาด แล้วเป่าด้วยก๊าซไนโตรเจนให้แห้ง
- อบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 90 $^{\circ}$C เป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้ ชิ้นงานแห้งสนิท
- สกัด(etching)อะลูมิเนียมออกบางส่วนด้วยสารละลาย Al-etching (H_3PO_4 : HNO_3 : CH_3COOH : H_2O = 80 : 5 : 5 : 10 vol./vol.) ที่อุณหภูมิ 40 $^{\circ}$C เป็นเวลา 10 วินาที
- ล้างด้วยน้ำ DI ให้สะอาด แล้วเป่าด้วยก๊าซไนโตรเจนให้แห้ง
- ล้างใน Acetone(C_3H_6O) เป็นเวลา 10 วินาที เพื่อกำจัดน้ำยาไวแสงออกให้หมด จะทำให้ได้ลวดลายชั้นของอะลูมิเนียมบนฟิล์มเพชรดังในรูปที่ 4.11 และรูปที่ 4.12เป็นภาพถ่าย ด้านบนของชิ้นงาน ภายหลังการสร้างชั้นอะลูมิเนียม
- ขั้นตอนสุดท้าย ทำการSintering ที่อุณหภูมิ 500 $^{\circ}$C ในบรรยากาศไนโตรเจนเป็นเวลา 12 นาที เพื่อให้ได้โครงสร้างที่เสถียร



รูปที่ 4.11 โครงสร้างรอยสัมผัสระหว่าง ฟิล์มเพชรชนิดพี กับ อะลูมิเนียม

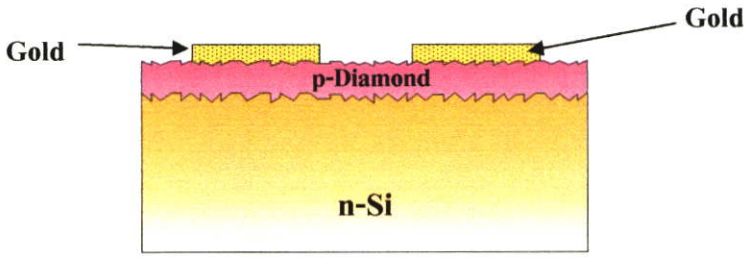


รูปที่ 4.12 ภาพถ่ายด้านบนของรอยสัมผัสฟิล์มเพชรชนิดพี กับ อะลูมิเนียม

4.2.3 การสร้างรอยสัมผัสระหว่าง ฟิล์มเพชรชนิดพีกับทองคำ

การสร้างรอยสัมผัสระหว่าง ฟิล์มเพชรชนิดพีกับทองคำ สามารถทำได้ เช่นเดียวกับรอยสัมผัสอะลูมิเนียม โดยการสร้างชั้นทองคำบนผิวฟิล์มเพชรด้วยเทคนิค Vacuum Thermal Evaporation และสร้างลวดลาย ด้วยเทคนิค Photolithography สารละลายที่ใช้สกัดทองคำได้แก่

Au-etching (HCl : HNO_3 = 3 : 1 vol./vol.) ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10 วินาที ทำให้ได้โครงสร้างของรอยสัมผัส ดังในรูปที่ 4.13 และมีลวดลายของทองคำลักษณะเช่นเดียวกับลวดลายของอะลูมิเนียม ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.13 โครงสร้างของรอยสัมผัสระหว่าง ฟิล์มเพชรชนิดพี กับ ทองคำ

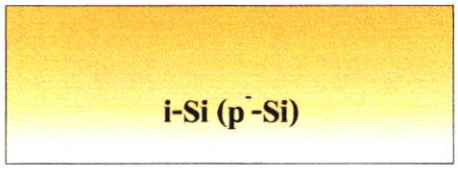
4.3 กระบวนการสร้างโฟโตไดโอดโครงสร้าง p-diamond/i-Si/n^+-Si

ในหัวข้อนี้เป็นการแสดงถึงกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง p-diamond/i-Si/n^+-Si ซึ่งมีลำดับขั้นตอนสรุปได้ดังนี้

4.3.1 ทำความสะอาดแผ่นผลึกซิลิคอน

ทำความสะอาดแผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นระนาบ (111), สภาพต้านทาน 2000 Ω.cm, หนา 275 μm ซึ่งนำมาใช้เป็นแผ่นผลึกเริ่มต้น ดังนี้

- ต้มใน Nitric Acid(HNO_3) เป็นเวลา 5 นาที
- ล้างด้วยน้ำ DI ให้สะอาด แล้วเป่าด้วยก๊าซไนโตรเจนให้แห้ง
- ต้มชิ้นงานในTrichloroethylene(C_2HCl_3) เป็นเวลา 5 นาที
- ทำความสะอาดใน Acetone(C_3H_6O) ด้วยเครื่องอัลตร้าโซนิค เป็นเวลา 5 นาที
- ล้างด้วยน้ำ DI ให้สะอาด แล้วเป่าด้วยก๊าซไนโตรเจนให้แห้ง จะได้แผ่นผลึกซิลิคอนที่สะอาด ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 แผ่นผลึกซิลิคอนเริ่มต้นชนิดอินทรินซิค

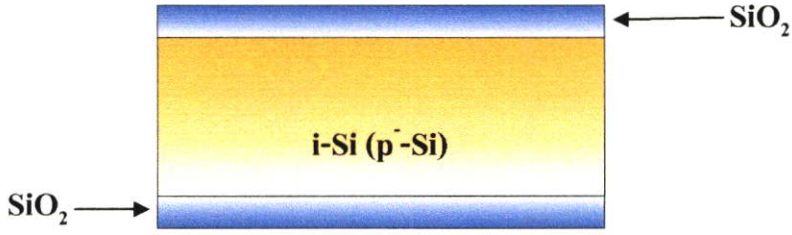
4.3.2 สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์(SiO_2) บนแผ่นผลึกเริ่มต้น ด้วยวิธี Thremal Oxidation ที่อุณหภูมิ 1,000 $^{\circ}C$ ตามลำดับดังนี้

- Dry oxidation ที่อัตราการไหลของ O_2 1,000 cc/min เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

- Wet oxidation ที่อัตราการไหลของ O_2 1,200 cc/min เป็นเวลา 4 ชั่วโมง
- Dry oxidation ที่อัตราการไหลของ O_2 1,000 cc/min เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

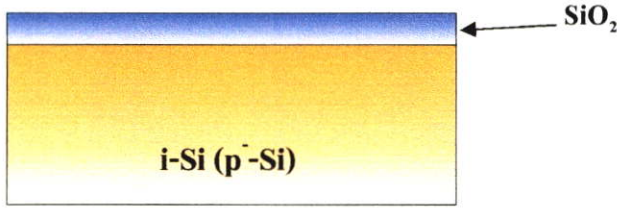
ได้ความหนาของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ประมาณ 10,600 Å ดังแสดงในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 แผ่นผลึกซิลิคอนหลังจากสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

4.3.3 แพร่อะตอมสารเจือฟอสฟอรัส

- โดยอบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 90 $^{\circ}$C เป็นเวลา 30 นาที เพื่อไล่ความชื้น
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวกเบอร์ AZ 1350 ไว้ที่ด้านหน้าของแผ่นผลึกซิลิคอน
- อบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 90 $^{\circ}$C เป็นเวลา 20 นาที เพื่อให้น้ำยาไวแสงแห้ง
- นำไปสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ด้านหลังของแผ่นผลึกซิลิคอนออกด้วยสารละลาย Buffer For Oxidation($HF : NH_4F$ = 1 : 6 vol./vol.) เป็นเวลา 11 นาที
- ล้างด้วยน้ำ DI ให้สะอาด แล้วเป่าด้วยก๊าซไนโตรเจนให้แห้ง
- ล้างใน Acetone(C_3H_6O) เป็นเวลา 10 วินาที เพื่อกำจัดน้ำยาไวแสงออกให้หมด
- ล้างด้วยน้ำ DI ให้สะอาด แล้วเป่าด้วยก๊าซไนโตรเจนให้แห้ง จะทำให้ได้โครงสร้าง ดังแสดงในรูปที่ 4.16

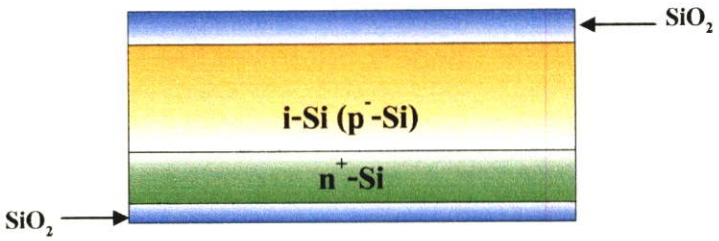


รูปที่ 4.16 โครงสร้างหลังจากสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ด้านหลังออก

- อบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 150 $^{\circ}$C เป็นเวลา 10 นาที เพื่อไล่ความชื้น
- ทำการแพร่อะตอมสารเจือฟอสฟอรัส(สารเจือแบบของเหลว) โดยเคลือบสารเจือที่ผิวด้านหลังของชิ้นงาน ด้วยการสปินที่ความเร็ว 3,000 รอบ/นาที เป็นเวลา 20 วินาที
- อบที่อุณหภูมิ 150 $^{\circ}$C เป็นเวลา 10 นาที
- ทำการแพร่อะตอมสารเจือฟอสฟอรัส เข้าที่ด้านหลังของแผ่นผลึกชนิดอินทรินซิกเพื่อสร้างชั้น n^+ โดยการ Pre deposite ที่อุณหภูมิ 1,000 $^{\circ}$C เป็นเวลา 30 นาที ใน

บรรยากาศ N_2 1,000 cc/min

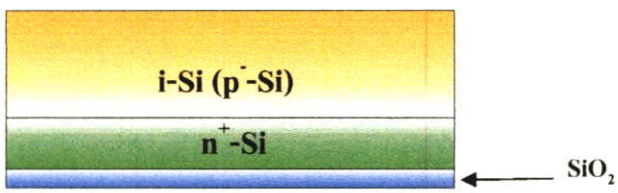
- ทำการ Drive-in ที่อุณหภูมิ 1,000 $^{\circ}$C เป็นเวลา 9 ชั่วโมงในบรรยากาศ O_2 (Dry) เพื่อสร้างชั้นออกไซด์ใหม่ และ ขับอะตอมสารเจือให้ลึกเข้าไปในแผ่นผลึกซิลิคอน จะทำให้ได้ความหนาของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นใหม่ ประมาณ 2,200 Å ส่วนอะตอมสารเจือฟอสฟอรัสถูกแพร่เข้าไปได้ลึกประมาณ 4 μm. และชั้น n^{+}-Si มีความหนาแน่นอะตอมสารเจือประมาณ 10^{17} cm^{-3} โครงสร้างตัดขวางของชิ้นงานแสดงดังในรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 โครงสร้างของชิ้นงานภายหลังการแพร่อะตอมสารเจือชนิดเอ็น

4.3.4 สังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี HFCVD

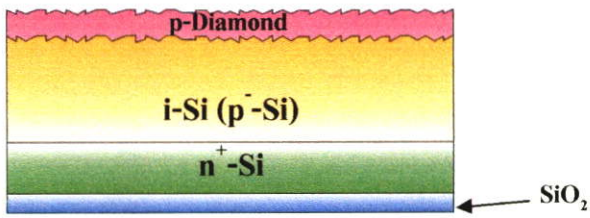
- โดยอบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 90 $^{\circ}$C เป็นเวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวกเบอร์ AZ 1350 ไว้ที่ด้านหลังของแผ่นผลึกซิลิคอน
- อบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 90 $^{\circ}$C เป็นเวลา 20 นาที เพื่อให้น้ำยาไวแสงแห้ง
- นำไปสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ด้านหน้าของแผ่นผลึกซิลิคอนออก ด้วยสารละลาย Buffer For Oxidation($HF : NH_4F$ = 1 : 6 vol./vol.) เป็นเวลา 11 นาที
- ล้าง ด้วยน้ำ DI ให้สะอาด แล้วเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ล้างใน Acetone(C_3H_6O) เป็นเวลา 10 วินาที เพื่อกำจัดน้ำยาไวแสงออกให้หมด
- ล้างด้วยน้ำ DI ให้สะอาด แล้วเป่าด้วยก๊าซไนโตรเจนให้แห้ง โครงสร้างของชิ้นงานแสดงดังในรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 โครงสร้างของชิ้นงานภายหลังการสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ด้านหน้า

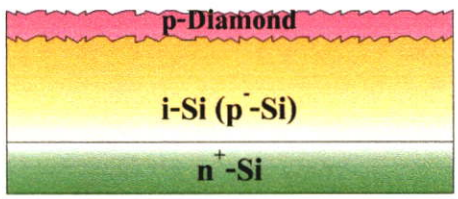
- สังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดพี โดยมีขั้นตอนเช่นเดียวกับที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 4.1.2 ใช้เวลาในการสังเคราะห์ 2 ชั่วโมง เพื่อให้ได้ความหนาของฟิล์มเพชร 10 μm. และ

แหล่งจ่ายอะตอมคาร์บอนที่ใช้มีอัตราส่วนระหว่างจำนวนอะตอมโบรอนต่อคาร์บอนเท่ากับ 250 ppm. โครงสร้างของชิ้นงานแสดงได้ดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 โครงสร้างของชิ้นงานภายหลังการที่สังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดพี

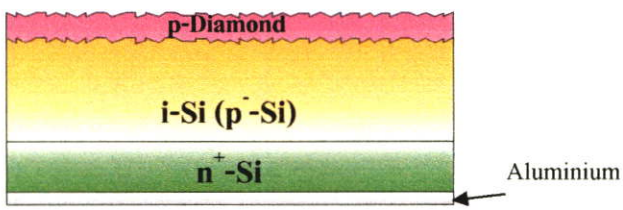
- นำชิ้นงานมา Anneal ในบรรยากาศของไฮโดรเจน ที่อุณหภูมิ 700 $^{\circ}C$ เป็นเวลา 10 นาที
- ทำความสะอาดชิ้นงานด้วยการต้มในในสารละลาย NaOH (NaOH : H_2O = 0.05 mol : 5.56 mol) เดือด เป็นเวลา 3 นาที
- จุ่มชิ้นงานในสารละลาย Buffer For Oxidation เป็นเวลา 3 นาที เพื่อสกัดชั้นออกไซด์ที่ด้านหลังของชิ้นงาน
- ล้างด้วยน้ำ DI ให้สะอาด แล้วเป่าด้วยก๊าซไนโตรเจนให้แห้ง จะได้โครงสร้างของชิ้นงานดังในรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 โครงสร้างของชิ้นงานหลังจากสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ด้านหลังออก

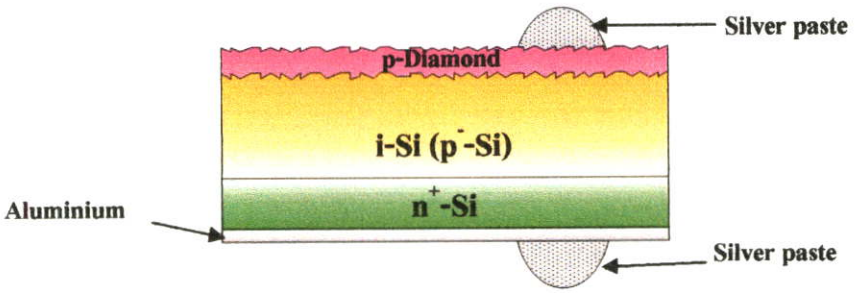
4.3.5 สร้างรอยสัมผัสโอห์มิกระหว่างซิลิคอนชนิดเอ็นกับอะลูมิเนียม

- สร้างรอยสัมผัสด้านหลังระหว่างซิลิคอนชนิดเอ็นกับอะลูมิเนียม ดังแสดงได้ในรูปที่ 4.19 ด้วยเทคนิค Vacuum Thermal Evaporation

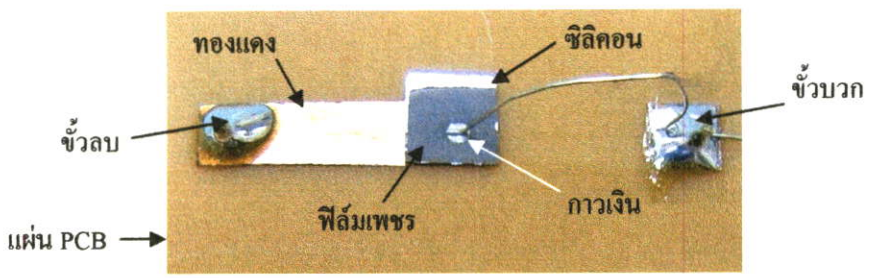


รูปที่ 4.21 โครงสร้างของชิ้นงานภายหลังการสร้างขั้วโลหะที่ด้านหลัง

- Sintering ที่อุณหภูมิ 500 °C ในบรรยากาศของไนโตรเจน 1000 cc/min เป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้ได้รอยสัมผัสโอห์มมิคที่ดี
- สร้างขั้วไฟฟ้าให้แก่โฟโตไดโอด โดยใช้กาวเงิน หยดบนฟิล์มเพชรชนิดพี และบนชั้นอะลูมิเนียมด้านหลัง ดังในรูปที่ 4.22 และ รูปที่ 4.23 เป็นภาพถ่ายของชิ้นงาน ที่ถูกติดตั้งบน Print Circuit Board(PCB)



รูปที่ 4.22 โครงสร้างของโฟโตไดโอดที่สร้างเสร็จเรียบร้อย



รูปที่ 4.23 ภาพถ่ายของชิ้นงาน ที่ถูกติดตั้งบน Print Circuit Board

4.4 การทดลองเพื่อการศึกษาผลของความเข้มข้นอะตอมสารเจือในฟิล์มเพชร และผลของความหนาของชั้นฟิล์มเพชรที่มีต่อคุณสมบัติของโฟโตไดโอด

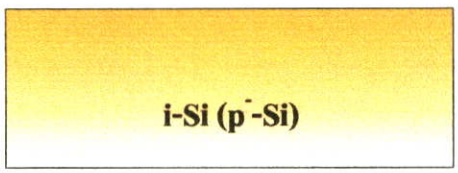
ในหัวข้อนี้เป็นการแสดงถึงกระบวนการสร้างตัวตรวจจับแสงโครงสร้าง p-diamond/i-Si/n^+-Si เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นอะตอมสารเจือในฟิล์มเพชร และผลของความหนาของชั้นฟิล์มเพชรที่มีต่อคุณสมบัติของโฟโตไดโอด ซึ่งวิธีการสร้างโฟโตไดโอดสามารถทำได้เช่นเดียวกับการสร้างในหัวข้อที่ 4.3 แต่ในการทดลองนี้ชั้นของฟิล์มเพชรชนิดพี ถูกสร้างด้วยแหล่งจ่ายอะตอมคาร์บอนที่มีความเข้มข้นของสารเจือค่าต่างๆ โดยมีอัตราส่วนของ B:C เท่ากับ 75, 125, 250, 500 และ1000 ppm.ตามลำดับ(สำหรับการศึกษาผลของความเข้มข้นอะตอมสารเจือในฟิล์มเพชร) นอกจากนี้ยังสร้างโฟโตไดโอด ที่มีความหนาของชั้นฟิล์มเพชรค่าต่างๆกัน โดยใช้เวลาในการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรตั้งแต่ 1, 2, 3 และ 4 ชั่วโมง ตามลำดับ(สำหรับการศึกษาผลของความหนาของชั้นฟิล์มเพชร)

4.5 การทดลองเพื่อการศึกษาผลของความหนาชั้นอินทรินซิคที่มีต่อคุณสมบัติของโฟโตไดโอด

ในหัวข้อการทดลองนี้ ได้สร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง p-diamond/i-Si/n^+-Si ที่มีความหนาของชั้นอินทรินซิคที่ต่างกัน เพื่อศึกษาผลของความหนาชั้นอินทรินซิคที่มีต่อคุณสมบัติของโฟโตไดโอด ขั้นตอนการสร้างสรุปได้ดังนี้

4.5.1 ทำความสะอาดแผ่นผลึกซิลิคอน

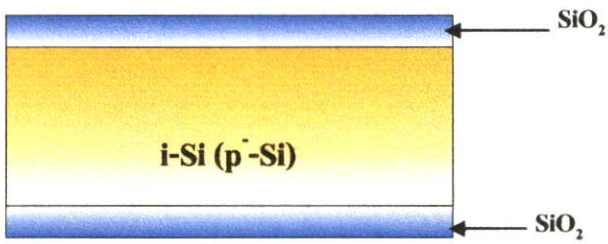
ทำความสะอาดแผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นระนาบ (111), สภาพต้านทาน 2000 Ω.cm, หนา 275 μm ด้วยขั้นตอนดังในหัวข้อที่ 4.1.1 จะได้แผ่นผลึกซิลิคอนที่สะอาด ดังรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 แผ่นผลึกเริ่มต้น ซิลิคอนชนิดอินทรินซิค

4.5.2 สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

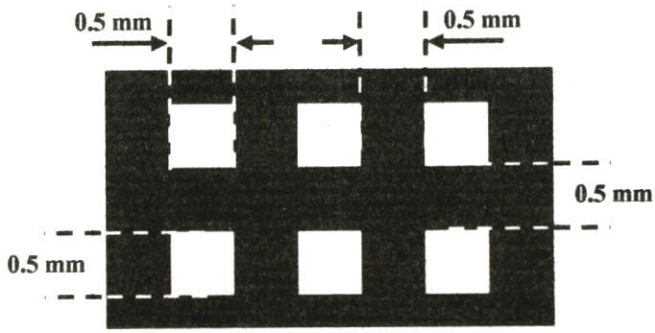
สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์(SiO_2) บนแผ่นผลึกเริ่มต้น ด้วยวิธี Thremal Oxidation ที่อุณหภูมิ 1,000 °C ด้วยขั้นตอนดังในหัวข้อที่ 4.3.2 ได้ความหนาของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ประมาณ 10,600 Å ดังแสดงในรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.25 แผ่นผลึกซิลิคอนหลังจากสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

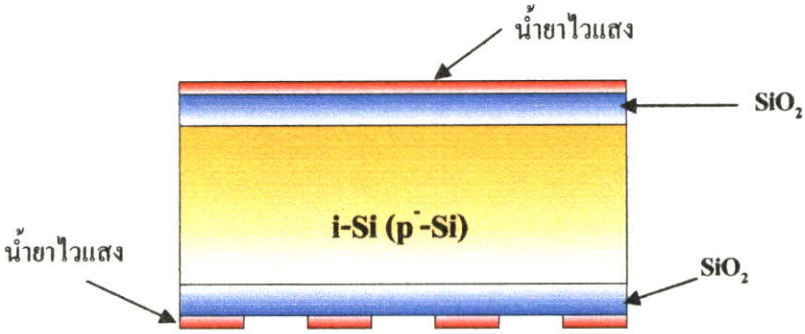
4.5.3 สกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ด้านหลังออกบางส่วน

- อบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวกเบอร์ AZ 1350 ไว้ที่ด้านหลังแผ่นผลึกซิลิคอน ด้วยเครื่องสปินเนอร์ ที่ 3,000 rpm. เป็นเวลา 20 วินาที
- อบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้น้ำยาไวแสงแห้ง
- ฉายแสงอัลตร้าไวโอเล็ตผ่านกระจกลวดลายดังรูปที่ 4.26 ด้วยเครื่อง Mask Aligner



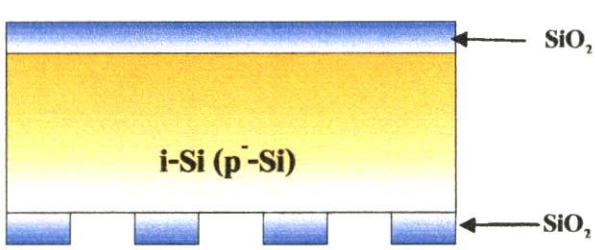
รูปที่ 4.26 ลักษณะลวดลายของกระจก Mask

- ล้างชิ้นงานในสารละลาย AZ developer 30 วินาที ล้างด้วยน้ำ DI ให้สะอาด
- อบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 90 ^{o}C เป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้น้ำยาไวแสงแห้ง
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวกเบอร์ AZ 1350 ไว้ที่ด้านหน้าแผ่นผลึกซิลิคอน
- อบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 90 ^{o}C เป็นเวลา 20 นาที เพื่อให้น้ำยาไวแสงแห้ง โครงสร้างของชิ้นงานแสดงได้ดังรูปที่ 4.27



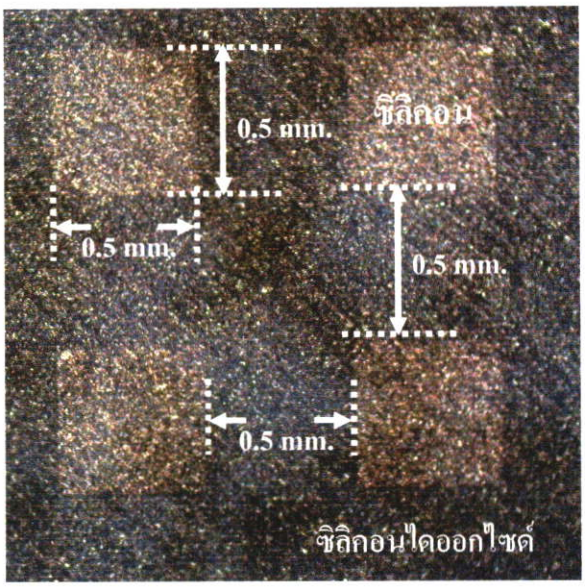
รูปที่ 4.27 แผ่นผลึกซิลิคอนก่อนการสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ด้านหลังออก

- นำไปสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ด้านหลังของแผ่นผลึกซิลิคอนออกบางส่วน ด้วยสารละลาย Buffer For Oxidation เป็นเวลา 11 นาที
- ล้างด้วยน้ำ DI ให้สะอาด แล้วเป่าด้วยก๊าซไนโตรเจนให้แห้ง
- ล้างใน Acetone(C_3H_6O) เป็นเวลา 10 วินาที เพื่อกำจัดน้ำยาไวแสงออกให้หมด โครงสร้างของชิ้นงานแสดงได้ดังรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.28 โครงสร้างชิ้นงานหลังจากสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ด้านหลังออก

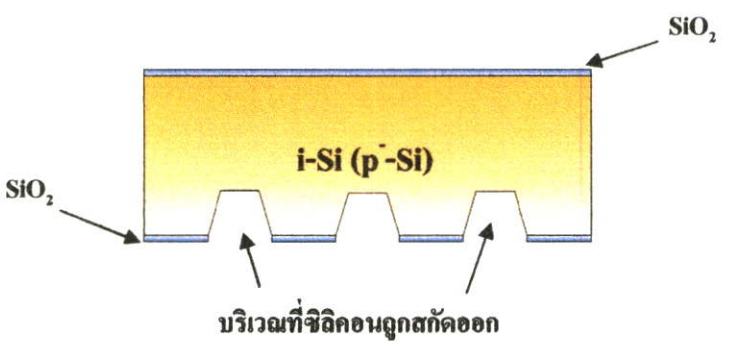
และจากรูปที่ 4.29 แสดงภาพถ่ายด้านหลังของชิ้นงาน ภายหลังการสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์



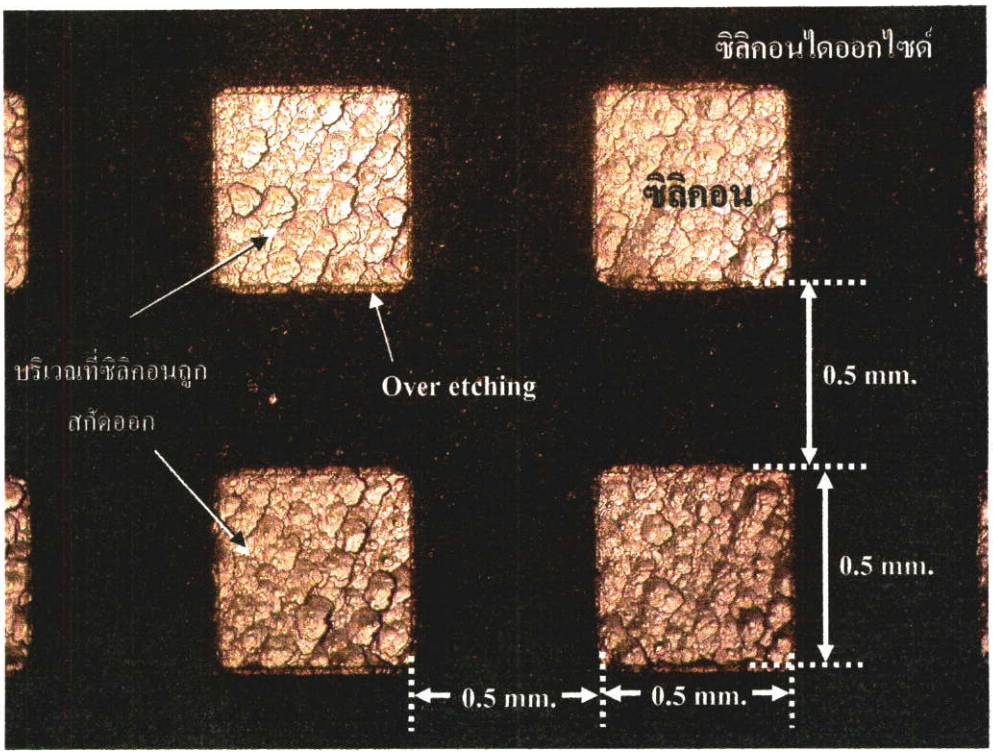
รูปที่ 4.29 ภาพถ่ายด้านหลังของชิ้นงานจากกล้องจุลทรรศน์ หลังจากสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ด้านหลังออก

4.5.4 สกัดชั้นซิลิคอนด้านหลังออกบางส่วน

- นำมาสกัดชั้นซิลิคอนด้านหลังออกบางส่วน โดยต้มในสารละลาย NaOH เดือด (NaOH 0.05 mol : H_2O 5.56 mol) เป็นเวลา 8, 16, 24, 32 และ 40 นาที ตามลำดับ โครงสร้างของชิ้นงานและภาพถ่ายด้านหลัง แสดงดังในรูปที่ 4.30 และ 4.31ตามลำดับ



รูปที่ 4.30 โครงสร้างของชิ้นงานหลังจากสกัดซิลิคอนบางส่วนที่ด้านหลังออก



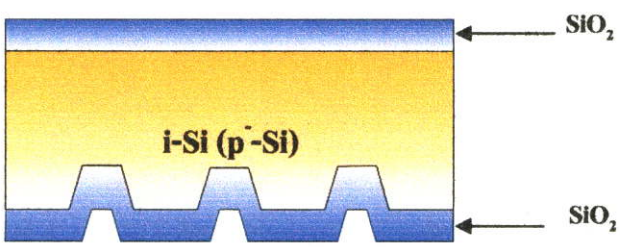
รูปที่ 4.31 ภาพด้านบนของชิ้นงานหลังจากสกัดซิลิคอนด้านหลังบางส่วนออก

4.5.5 สกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ออกทั้งหมด

สกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ออกทั้งหมดทั้งด้านหน้าและด้านหลังของแผ่นผลึก ด้วยแช่สารละลาย Buffer For Oxidation เป็นเวลา 5 นาที

4.5.6 สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์(SiO_2) ด้วยวิธี Thremal Oxidation ที่อุณหภูมิ 1,000 ^{o}C ด้วยขั้นตอนดังในหัวข้อที่ 4.3.2 ได้ความหนาของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ประมาณ 10,600 Å ดังแสดงในรูปที่ 4.32



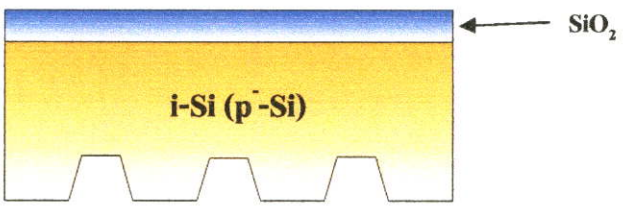
รูปที่ 4.32 โครงสร้างของชิ้นงานหลังจากสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ใหม่

4.5.7 สกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ด้านหลังออก

สกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ด้านหลังออก โดยมีขั้นตอนดังนี้

-โดยอบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 90 ^{o}C เป็นเวลา 30 นาที

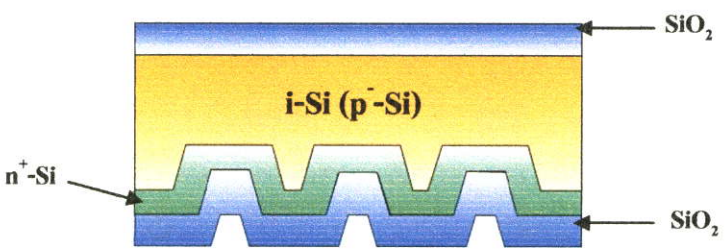
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวกเบอร์ AZ 1350 ไว้ที่ด้านหน้าของแผ่นผลึกซิลิคอน
- อบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 90 $^{\circ}$C เป็นเวลา 20 นาที เพื่อให้น้ำยาไวแสงแห้ง
- นำไปสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ด้านหน้าของแผ่นผลึกซิลิคอนออกด้วยสารละลาย Buffer For Oxidation($HF : NH_4F = 1 : 6$ vol./vol.) เป็นเวลา 11 นาที
- ล้างด้วยน้ำ DI ให้สะอาด แล้วเป่าด้วยก๊าซไนโตรเจนให้แห้ง
- ล้างใน Acetone(C_3H_6O) เป็นเวลา 10 วินาที เพื่อกำจัดน้ำยาไวแสงออก
- ล้างด้วยน้ำ DI ให้สะอาด แล้วเป่าด้วยก๊าซไนโตรเจนให้แห้งจึงได้ลวดลายของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ดังรูปที่ 4.33



รูปที่ 4.33 โครงสร้างของชิ้นงานหลังจากสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ด้านหลังออก

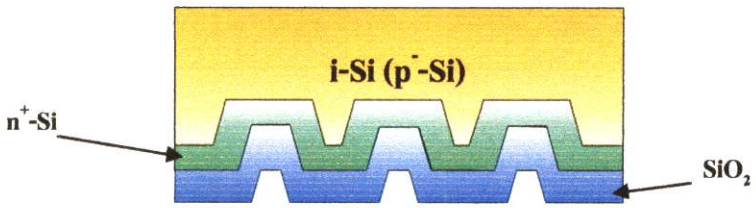
4.5.8 แพร่อะตอมสารเจือฟอสฟอรัส

แพร่อะตอมสารเจือฟอสฟอรัสเข้าทางด้านหลังแผ่นผลึกซิลิคอน โดยมีขั้นตอนเช่นเดียวกับการสร้างในหัวข้อที่ 4.3.3 โครงสร้างของชิ้นงานแสดงดังในรูปที่ 4.34

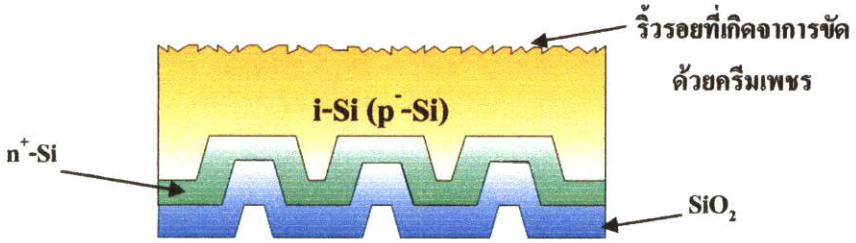


รูปที่ 4.34 โครงสร้างของชิ้นงานหลังจากแพร่อะตอมสารเจือด้านหลัง

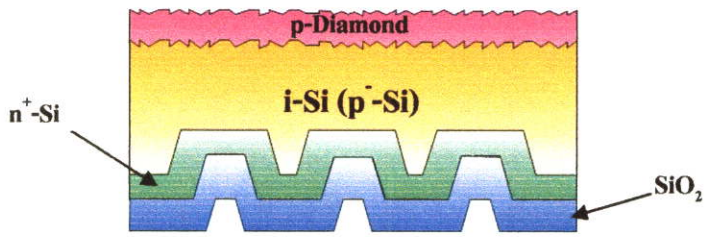
สกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ด้านหน้าออก แล้วสังเคราะห์ฟิล์มเพชรโดยใช้วิธี CVD แบบขดลวดความร้อน(HFCVD) ได้ฟิล์มเพชรชนิดพี หนา 10 ไมโครอน จากนั้นเคลือบชั้นอะลูมิเนียมที่ด้านหลังของชิ้นงาน และขั้นตอนสุดท้ายใช้กาวเงินทำเป็นขั้วไฟฟ้าของโฟโตไดโอด ซึ่งรายละเอียดของการสร้าง สามารถทำได้เช่นเดียวกับหัวข้อที่ 4.3.4 – 4.3.5 โครงสร้างของชิ้นงานตามลำดับขั้นตอนของการสร้างแสดงได้ดังในรูปที่ 4.35 – 4.39



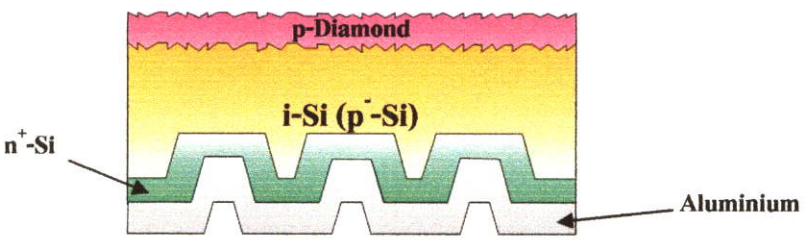
รูปที่ 4.35 โครงสร้างของชิ้นงานหลังจากสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ด้านหน้าออก



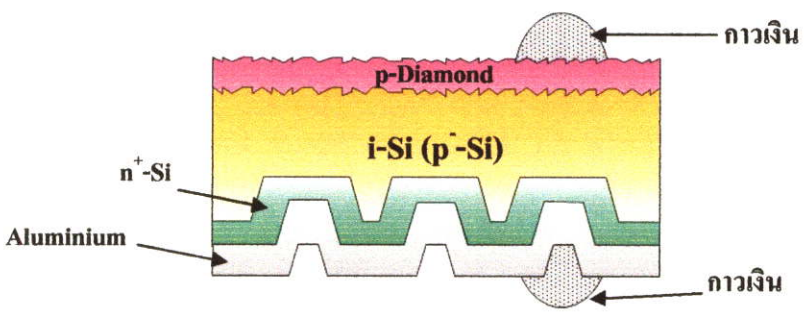
รูปที่ 4.36 โครงสร้างของชิ้นงานหลังจากที่ผิวหน้าถูกขัดด้วยครีมเพชร



รูปที่ 4.37 โครงสร้างของชิ้นงานหลังจากที่สังเคราะห์ฟิล์มเพชร



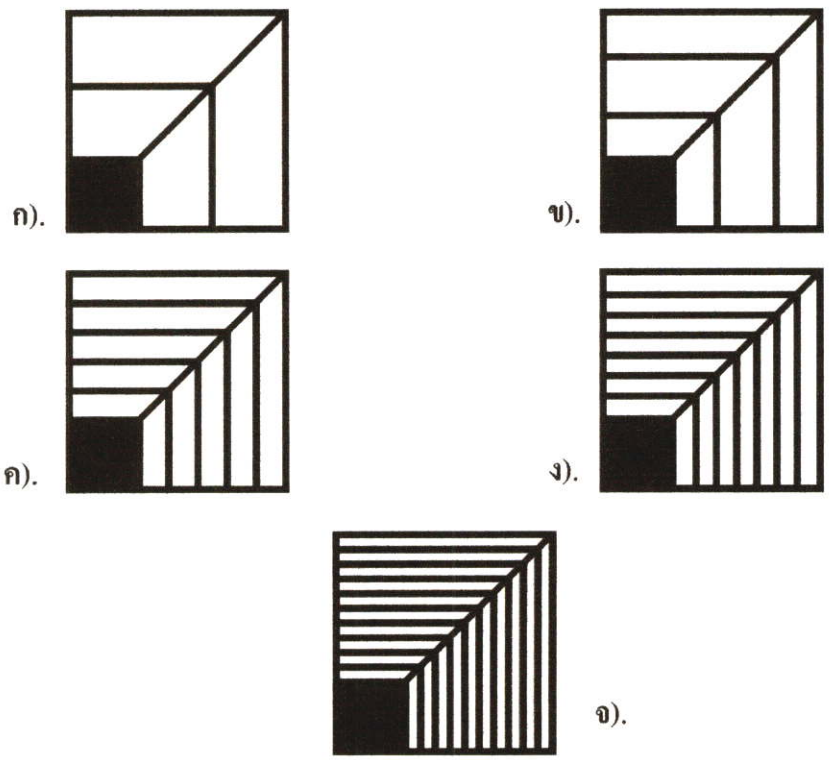
รูปที่ 4.38 การสร้างรอยสัมผัสโอห์มิคระหว่างซิลิคอนชนิดเอ็นกับอะลูมิเนียม



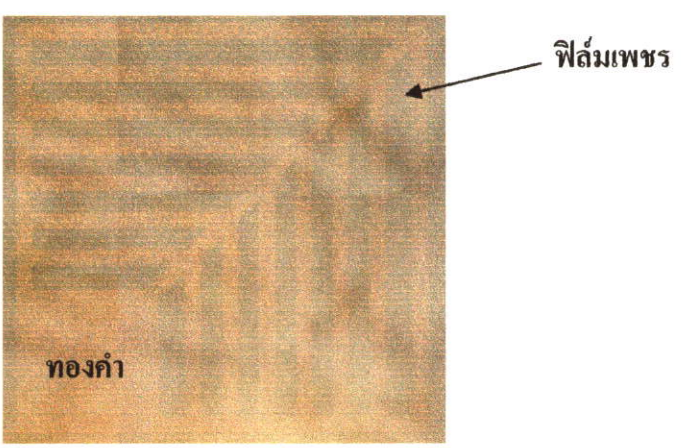
รูปที่ 4.39 โครงสร้างของโฟโตไดโอดที่สร้างเสร็จสมบูรณ์

4.6 การทดลองเพื่อการศึกษาผลของลักษณะลวดลายของขั้วโลหะด้านรับแสง

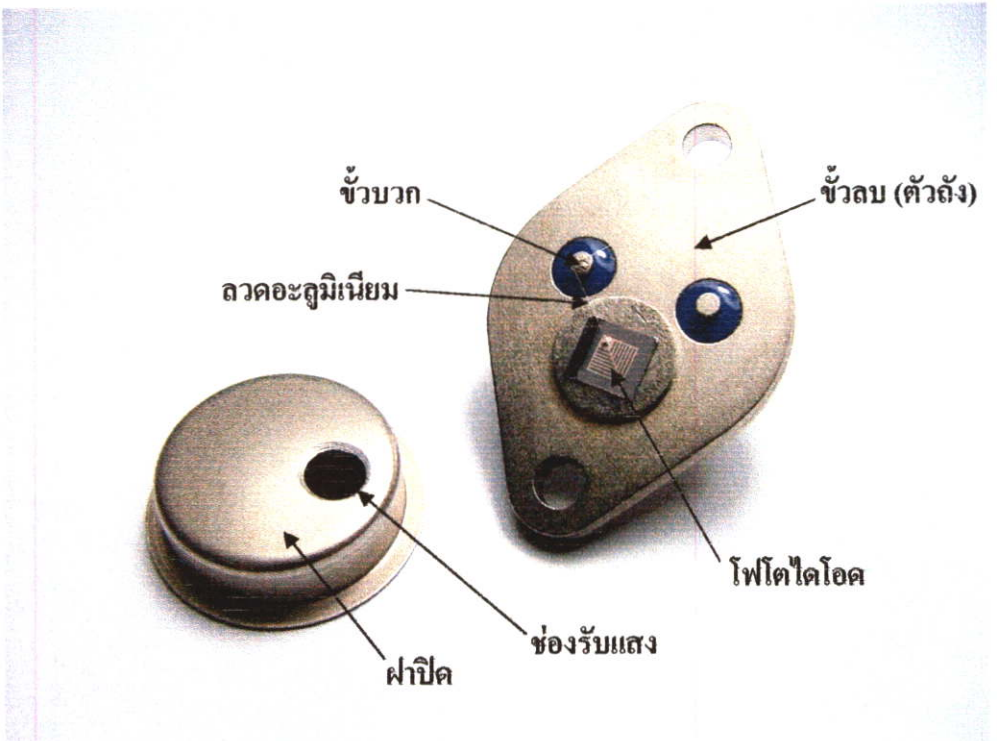
การทดลองนี้ได้สร้างโฟโตไดโอดโครงสร้าง p-diamond/i-Si/n^+-Si ซึ่งมีลวดลายและพื้นที่ของขั้วโลหะที่ด้านรับแสงแตกต่างกันดังรูปที่ 4.40 เพื่อศึกษาผลของขั้วโลหะที่มีต่อคุณสมบัติของไดโอด รูปที่ 4.41 เป็นตัวอย่างภาพถ่ายด้านบนของโฟโตไดโอดที่มีลวดลายของขั้วโลหะ และ รูปที่4.42 แสดงการติดตั้งโฟโตไดโอดที่สร้างได้ลงบนตัวถังแบบ TO-3



รูปที่ 4.40 ลักษณะลวดลายโลหะด้านรับแสง แบบต่างๆ ซึ่งมีพื้นที่ของชั้นโลหะต่างกันตามลำดับ (รายละเอียดสามารถตรวจสอบได้ในภาคผนวก ก.)



รูปที่ 4.41 ตัวอย่างภาพถ่ายด้านบนของโฟโตไดโอดที่มีลวดลายของขั้วโลหะ



รูปที่ 4.42 ภาพของโฟโตไดโอดภายหลังการติดตั้งลงบนตัวถังแบบ TO-3

บทที่ 5
ผลการวิเคราะห์และผลการทดลอง

ในบทนี้เป็นการนำเสนอผลการวิเคราะห์คุณสมบัติ(properties) ของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้ และผล ที่ได้จากการวัดลักษณะสมบัติ(characteristics) ของรอยสัมผัสระหว่างฟิล์มเพชรกับกาวเงิน ฟิล์มเพชรกับอลูมิเนียม และฟิล์มเพชรกับทองคำ รวมทั้งผลที่ได้จากการวัดลักษณะสมบัติพื้นฐานทั้งทางไฟฟ้าและทางแสงของโฟโตไดโอดโครงสร้าง p-diamond/i-Si/n^+-Si ที่สร้างขึ้น นอกจากนี้ยังเสนอผลของความเข้มข้นอะตอมสารเจือชนิดพีในฟิล์มเพชร ผลของความหนาของชั้นฟิล์มเพชร ผลของความหนาชั้นอินทรินซิค และผลของลักษณะลวดลายของขั้วโลหะด้านรับแสงที่มีต่อลักษณะสมบัติของโฟโตไดโอดชนิดนี้ ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้ แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการนำฟิล์มเพชรซึ่งสังเคราะห์ได้โดยง่ายจากวิธี CVD แบบขดลวดความร้อน ไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง (Opto-electronic devices) ยิ่งไปกว่านั้นยังสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาลักษณะสมบัติของโฟโตไดโอดโครงสร้าง p-diamond/i-Si/n^+-Si นี้ให้มีประสิทธิภาพสูงยิ่งขึ้นต่อไป

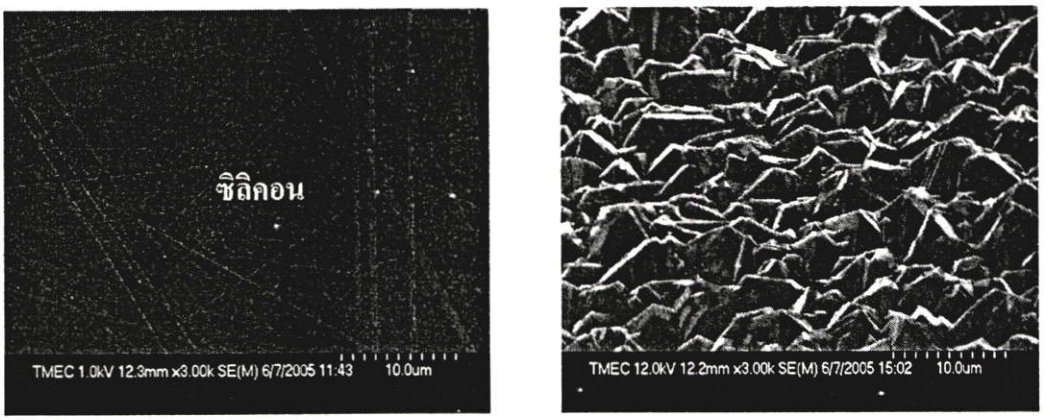
5.1 การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้

เพื่อให้เข้าใจลักษณะสมบัติของฟิล์มเพชรในแง่มุมต่างๆได้ดียิ่งขึ้น การศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้ทำการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติพื้นฐานของฟิล์มเพชรโดยใช้เทคนิคและอุปกรณ์การวิเคราะห์แบบต่างๆดังนี้คือ จากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดอิเล็กตรอน(Scanning Electron Microscope:SEM), จากอุปกรณ์ Energy Dispersive Spectroscope(EDX) และจากอุปกรณ์Raman Spectroscope รวมทั้งการวัดค่าการสะท้อน(Reflectance)ของฟิล์มเพชรอีกด้วย

5.1.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวและลักษณะภาคตัดขวางด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดอิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope:SEM)

หลังจากการสังเคราะห์วัสดุที่ได้จากกระบวนการ Hot Filament Chemical Vapor Deposition (HFCVD) ดังหัวข้อที่ 4.1 เสร็จสิ้น จึงได้นำตัวอย่างชิ้นงานมาถ่ายภาพด้วยเครื่อง SEM เพื่อศึกษาลักษณะพื้นผิวของชิ้นงาน ก่อนการสังเคราะห์และหลังการสังเคราะห์ ซึ่งสามารถแสดงภาพถ่ายผิวหน้าของชิ้นงานได้ดังในรูปที่ 5.1(ก) และ 5.1(ข) ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าวัสดุที่สังเคราะห์ได้ มีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบผลึกหลายรูป(polycrystalline) โดยชั้นของวัสดุประกอบไปด้วยผลึกจำนวนมากที่มีระนาบ(Orientation)ต่างๆปะปนกันอยู่ และแต่ละผลึกมีขนาดอยู่ในระดับไมครอน ส่วนภาพตัดขวางของชั้นฟิล์มเพชร แสดงได้ดังในรูปที่ 5.2 ใน

ภาพนี้แสดงให้เห็นลักษณะโครงสร้างภาคตัดขวางของวัสดุที่เป็นแบบโพลีคริสตอลไลน์ ซึ่งประกอบไปด้วยผลึกหลายๆผลึกเรียงต่อกันอย่างชัดเจน



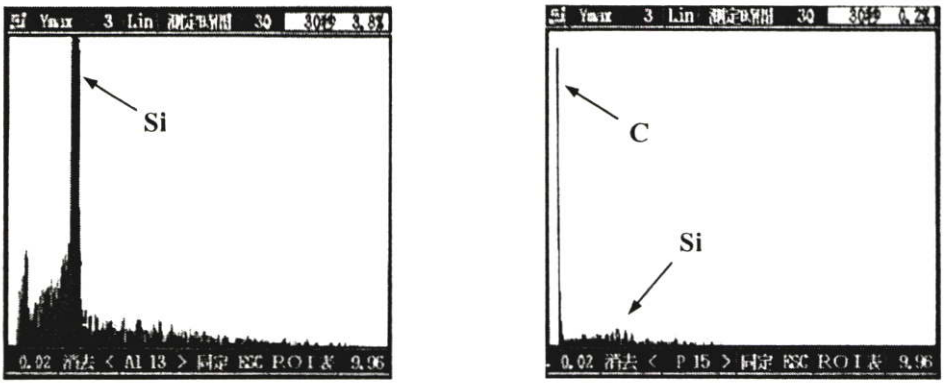
(ก) (ข)

รูปที่ 5.1 ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวชิ้นงาน (ก) ก่อนการสังเคราะห์ (ข) หลังการสังเคราะห์

รูปที่ 5.2 ภาพถ่ายลักษณะภาคตัดขวางของชิ้นงานภายหลังการสังเคราะห์วัสดุ

5.1.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray spectrometer (EDX)

วัสดุที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการ HFCVD ถูกนำมาวิเคราะห์ Spectrum ด้วยเครื่อง EDX เพื่อตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุที่มีอยู่ในชั้นฟิล์ม ซึ่งสังเคราะห์ขึ้นมาบนแผ่นฐานรองที่เป็นผลึกซิลิคอน ผลการวัด Spectrum บริเวณผิวหน้าของชิ้นงาน ก่อนและภายหลังการสังเคราะห์วัสดุสามารถแสดงได้ดังในรูปที่ 5.3(ก) และ5.3(ข) ตามลำดับ จากกราฟ Spectrum ทั้งสองแสดงให้เห็นว่าผิวหน้าของชิ้นงานก่อนการสังเคราะห์ชั้นของวัสดุนั้นประกอบไปด้วยธาตุซิลิคอนเป็นส่วนใหญ่ และเมื่อทำการสังเคราะห์ชั้นของวัสดุแล้ว ที่ผิวหน้าของฐานรองจะประกอบไปด้วยธาตุคาร์บอนเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งจะถูกนำไปวิเคราะห์ต่อไป

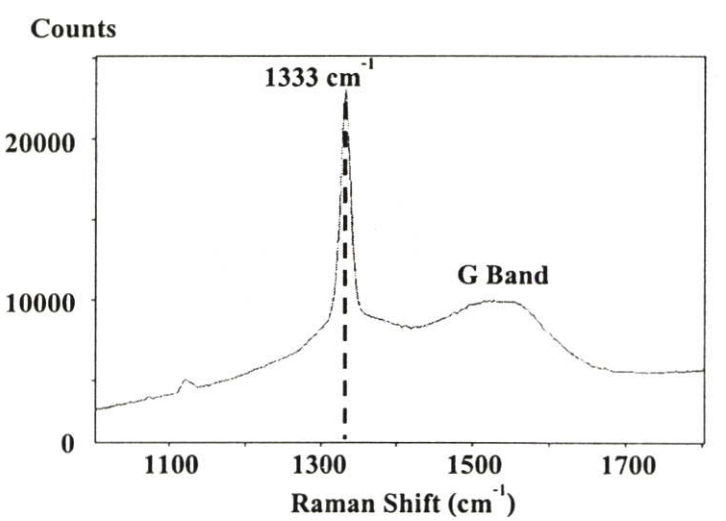


(ก) (ข)

รูปที่ 5.3 spectrum ของผิวหน้าชิ้นงาน (ก) ก่อนการสังเคราะห์ชั้นของวัสดุ (ข) หลังการสังเคราะห์ชั้นของวัสดุ

5.1.3 ผลการวิเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยเทคนิค Raman spectroscopy

ชั้นของวัสดุที่สังเคราะห์ได้จากกระบวนการ HFCVD ถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Raman Spectroscope เพื่อพิสูจน์ว่าชั้นวัสดุที่ได้สังเคราะห์ขึ้นมานั้นมีลักษณะสมบัติเป็นเพชรหรือไม่ ซึ่งการวัดด้วยอุปกรณ์ Raman Spectrum สามารถจะบ่งบอกและแยกลักษณะของชั้นฟิล์มคาร์บอนที่แตกต่างกันเช่น เพชร, กราไฟต์ และอะมอร์ฟัสได้ ปกติในกรณีของเพชรที่เกิดตามธรรมชาติกราฟที่ได้จากการวัดด้วยอุปกรณ์ Raman Spectrum จะปรากฏยอดกราฟของ spectrum เกิดขึ้นที่ตำแหน่งของ Raman Shift =1332 cm^{-1} และผลที่ได้จากการวัด แสดงได้ดังในรูปที่5.4



รูปที่ 5.4 Raman spectrum ของวัสดุที่ได้สังเคราะห์ขึ้น

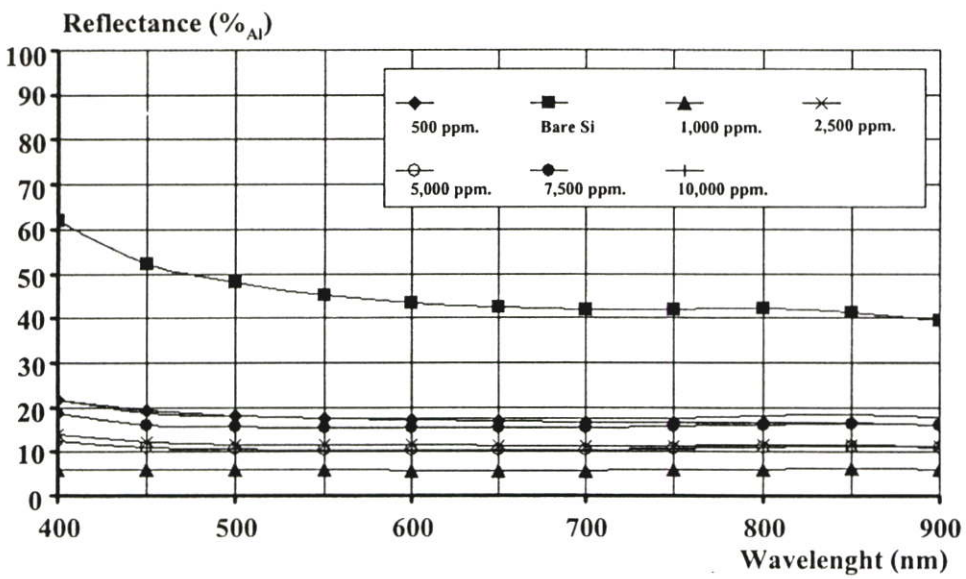
โดยพบว่า spectrum ของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ขึ้นมีจุดยอดสูงสุดของกราฟเกิดขึ้นที่ Raman Shift =1333 cm^{-1} ซึ่งใกล้เคียงกับลักษณะของเพชรที่เกิดตามธรรมชาติ ดังนั้น จึงเป็น

ข้อมูลที่สามารถยืนยันได้ว่าชั้นของวัสดุที่สังเคราะห์ขึ้นได้เป็นชั้นฟิล์มของเพชร และนอกจาก Raman Shift ที่ตำแหน่ง 1333 cm^{-1} ยังมี Raman Shift อีกโดยมีค่าอยู่ในช่วง 1500-1600 cm^{-1} ซึ่งเป็นการบ่งบอกว่าในชั้นฟิล์มเพชรยังประกอบไปด้วยกราไฟต์เล็กน้อย ซึ่งเราเรียกช่วงนี้ว่า "G Band" (Graphite Band)

5.1.4 ผลการวัดการสะท้อน(Reflectance)ของชั้นฟิล์มเพชร

การวัดค่าการสะท้อน(Reflectance)ของฟิล์มเพชร เป็นการหาค่าการสะท้อนของแสงที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆ ที่สะท้อนออกมาจากชิ้นงาน ซึ่งรูปที่ 5.5 เป็นผลการทดลองที่ได้จากการวัดด้วยเครื่อง UV/VIS Spectrometer ซึ่งพบว่าฟิล์มเพชรที่ถูกสังเคราะห์บนแผ่นฐานรองของผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น(111), 5-6 Ω.cm, ที่อุณหภูมิของฐานรอง 700 ^{o}C มีความหนา 10 ไมครอน และถูกเติมด้วยอะตอมสารเจือชนิดพีซึ่งความเข้มข้นค่าต่างๆกัน ต่างก็มีค่าการสะท้อนของแสงที่มีความยาวคลื่นในช่วง 400nm. ถึง 900nm.ที่ใกล้เคียงกัน คือมีค่าการสะท้อนระหว่าง 5-20 %(เมื่อเทียบกับอลูมิเนียม) ซึ่งต่ำกว่าค่าการสะท้อนของชั้นซิลิคอนผิวเรียบ-มัน โดยมีค่าระหว่าง 40-60 %(เมื่อเทียบกับอลูมิเนียม) จากผลการทดลองที่ได้นี้ชี้ให้เห็นว่าฟิล์มเพชรที่มีลักษณะเป็นโพลีคริสตอลไลน์ สามารถใช้เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง(Anti –Reflection layer)ได้ดีกว่าผิวของชั้นซิลิคอนที่เรียบ มัน

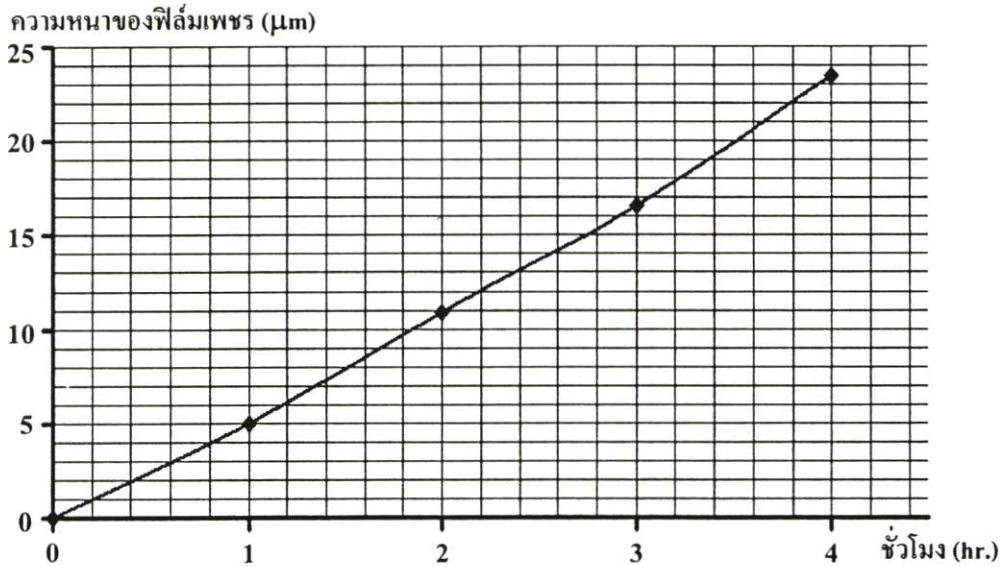
และเนื่องจากปกติเพชรมีลักษณะสมบัติเป็นวัสดุโปร่งแสงที่ดี หรือก็คือสามารถให้ลำแสงทะลุผ่านไปได้ดี ดังนั้นจึงอาจพิจารณาได้ว่าโฟตอนในลำแสงที่ตกลงมากระทบยังผิวของฟิล์มเพชรสามารถผ่านเข้าไปในชั้นของฟิล์มเพชรได้เป็นอย่างดี จึงมีผลทำให้ชั้นของฟิล์มเพชรมีค่าการสะท้อนที่ต่ำ



รูปที่ 5.5 ผลการสะท้อนแสงของฟิล์มเพชรซึ่งหนา 10 μm ที่ความยาวคลื่นแสงค่าต่างๆในช่วง 400-900 nm.

5.1.5 ผลการศึกษาอัตราการเกิดของฟิล์มเพชร

จากการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยกระบวนการ CVD แบบขดลวดความร้อน โดยใช้เวลาในการสังเคราะห์ต่างๆกันคือ 1-4 ชั่วโมง ทำให้ได้ฟิล์มเพชรที่มีความหนาค่าต่างๆ ชั้นของฟิล์มเพชรที่ได้ถูกนำมาถ่ายภาพตัดขวางด้วย SEM เพื่อวัดหาค่าความหนา โดยสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 ความหนาของฟิล์มเพชรชนิดไม่มีอะตอมสารเจือปน ที่เวลาการสังเคราะห์ค่าต่างๆ

จากรูปที่ 5.6 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์มเพชรกับเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ โดยในการทดลองนี้ฟิล์มเพชรเป็นชนิดที่ไม่มีการเติมอะตอมสารเจือ และถูกสร้างบนแผ่นผลึกฐานรองซิลิคอนชนิดเอ็น ซึ่งมีสภาพต้านทาน 5-6 Ω.cm หนาประมาณ 400 μm อุณหภูมิบริเวณที่ผิวแผ่นซิลิคอนในขณะสังเคราะห์มีค่าประมาณ 700 ^{0}C ดังหัวข้อที่ 4.1 จากรูปที่ 5.6 จะเห็นได้ว่าอัตราการเกิดของฟิล์มเพชรมีค่าเกือบคงที่ โดยมีค่าประมาณ 5 μmต่อชั่วโมง

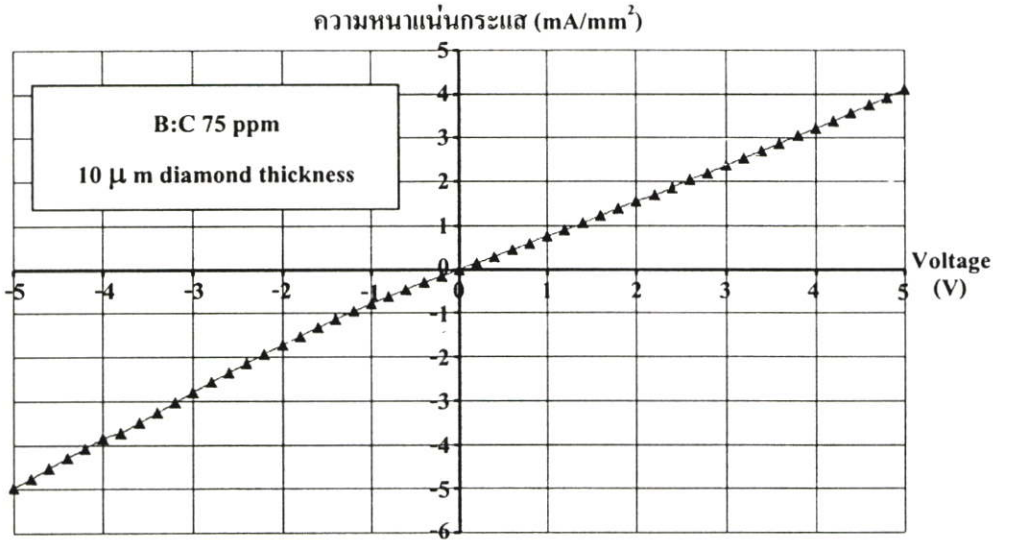
5.2 ผลการวัดลักษณะสมบัติของรอยสัมผัสระหว่างฟิล์มเพชรชนิดพีกับโลหะชนิดต่างๆ

ในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาลักษณะสมบัติของรอยสัมผัส(Contact)ระหว่างฟิล์มเพชรกับโลหะชนิดต่างๆ เพื่อให้ทราบถึงความเหมาะสมในการใช้งานโลหะชนิดต่างๆกับฟิล์มเพชรชนิดพี โดยในการทดลองนี้ได้ใช้กาวเงิน, อะลูมิเนียม และทองคำ

5.2.1 ผลการวัดลักษณะสมบัติของรอยสัมผัสระหว่าง ฟิล์มเพชรชนิดพีกับกาวเงิน

ฟิล์มเพชรชนิดพีที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นบนแผ่นผลึกฐานรองซิลิคอน ถูกนำมาสร้างเป็นรอยสัมผัสระหว่าง ฟิล์มเพชรชนิดพี กับ กาวเงิน เพื่อการศึกษาลักษณะสมบัติของรอยสัมผัสนี้ โดยในการทดลองนี้ได้สร้างชิ้นงานที่มีโครงสร้างเป็นรอยสัมผัสระหว่าง กาวเงิน/ฟิล์มเพชรชนิดพี/

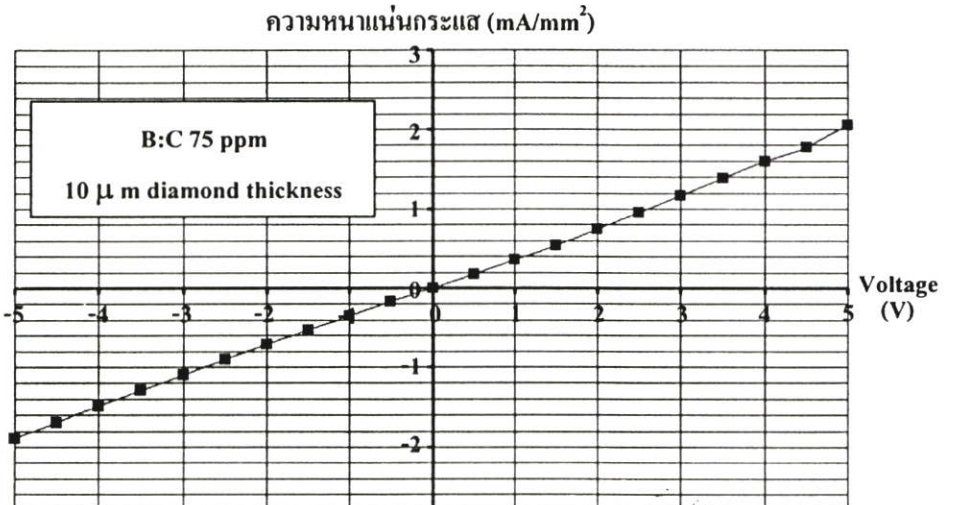
กาวเงิน ผลการทดลองพบว่ารอยสัมผัสระหว่างฟิล์มเพชรชนิดพี (B:C 75 ppm.) กับ ชั้นกาวเงิน มีลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิก ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 5.7 โดยมีค่าความต้านทานประมาณ 1.08 kΩ



รูปที่ 5.7 ลักษณะกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสระหว่าง กาวเงิน/ฟิล์มเพชรชนิดพี/กาวเงิน

5.2.2 ลักษณะสมบัติของรอยสัมผัสระหว่าง ฟิล์มเพชรชนิดพีกับอะลูมิเนียม

ฟิล์มเพชรชนิดพีที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นบนแผ่นผลึกฐานรองซิลิคอน ถูกนำมาสร้างเป็นรอยสัมผัสกับ ชั้นอะลูมิเนียม เพื่อการศึกษาลักษณะสมบัติของรอยสัมผัสนี้ โดยชิ้นงานที่สร้างขึ้นเพื่อการทดลองนี้มีโครงสร้างเป็นรอยสัมผัสระหว่าง อะลูมิเนียม/ฟิล์มเพชรชนิดพี/อะลูมิเนียม ผลการทดลองวัดลักษณะสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน ดังแสดงรูปที่ 5.8

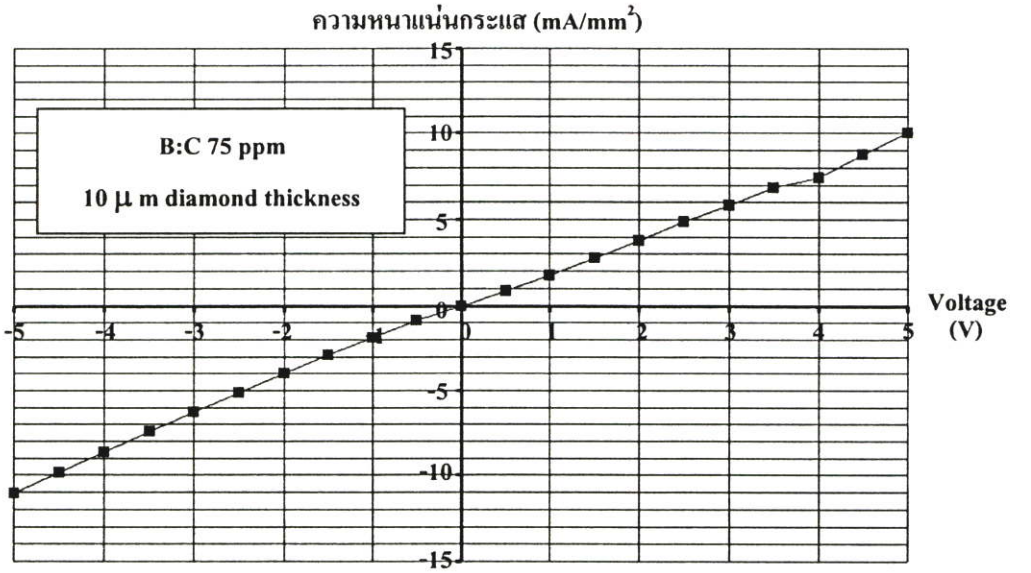


รูปที่ 5.8 ลักษณะกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแส-แรงดันของสัมผัสระหว่าง อะลูมิเนียม/ฟิล์มเพชรชนิดพี/อะลูมิเนียม

พบว่ารอยสัมผัสระหว่างฟิล์มเพชรชนิดพี (B:C 75 ppm.) กับ อะลูมิเนียมมีลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิก โดยมีค่าความต้านทานประมาณ 2.33 kΩ

5.2.3 ลักษณะสมบัติของรอยสัมผัสระหว่าง ฟิล์มเพชร ชนิดพีกับทองคำ

ฟิล์มเพชรชนิดพีที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นบนแผ่นผลึกฐานรองซิลิคอน ถูกนำมาสร้างเป็นรอยสัมผัสระหว่าง ฟิล์มเพชร กับ ทองคำ เพื่อการศึกษาลักษณะสมบัติของรอยสัมผัสนี้ โดยในการทดลองนี้ได้สร้างชิ้นงานที่มีโครงสร้างเป็นรอยสัมผัสระหว่าง ทองคำ/ฟิล์มเพชร/ทองคำ ผลการทดลองพบว่ารอยสัมผัสระหว่างฟิล์มเพชรชนิดพี (B:C 75 ppm.) กับ ชั้นทองคำมีลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิก ซึ่งมีลักษณะดังแสดงรูปที่ 5.9 โดยมีค่าความต้านทานประมาณ 552.48 Ω



รูปที่ 5.9 ลักษณะกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสระหว่าง ทองคำ/ฟิล์มเพชรชนิดพี/ทองคำ

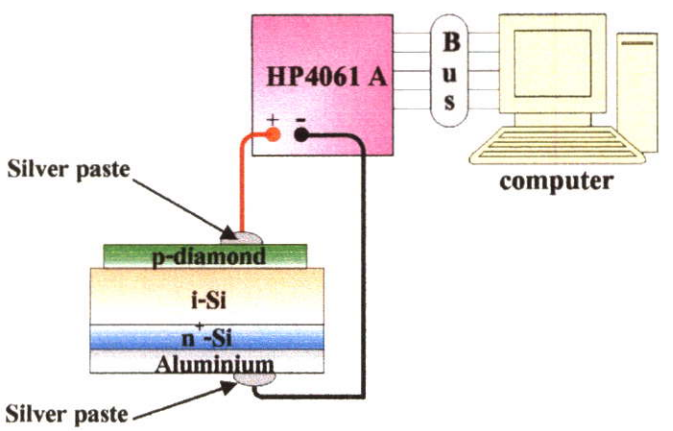
จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 5.2.1, 5.2.2 และ5.2.3 จึงสามารถสรุปได้ว่า โลหะที่ควรนำมาใช้ในการสร้างรอยสัมผัสกับฟิล์มเพชรชนิดพี คือ ทองคำ เพราะจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า รอยสัมผัสระหว่าง ทองคำ/ฟิล์มเพชร/ทองคำ มีค่าความต้านทานที่ต่ำที่สุด แต่สำหรับกาวเงินนั้นก็สามารถนำมาใช้ได้เช่นกันเพราะมีรอยสัมผัสกับฟิล์มเพชรชนิดพีแบบโอห์มมิกเช่นเดียวกับทองคำ และที่สำคัญคือ ใช้งานได้ง่าย และสะดวก

5.3 ผลการวัดลักษณะสมบัติของโฟโตไดโอดโครงสร้าง p-diamond/i-Si/n^+-Si

การวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานของโฟโตไดโอดโครงสร้าง p-diamond/i-Si/n^+-Si สามารถทำได้ด้วยการวัดคุณสมบัติต่างๆที่สำคัญของโฟโตไดโอด ซึ่งในการทดลองนี้ได้ทำการวัดและวิเคราะห์ลักษณะสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดัน, ลักษณะสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสง-แรงดัน, ค่ากระแสมืด(Dark current : I_{Dark}), ค่าศักย์ภายใน (build-in voltage : V_{bi}), ค่าความต้านทานอนุกรม(Series Resistance : R_s), ค่าความต้านทานขนาน (Shunt Resistance : R_{sh}), ค่าความจุไฟฟ้า(Capacitance : C) และค่าความถี่คัทออฟ(Cut-off frequency : $f_{Cut\text{-}off}$) และแบนด์วิด(Bandwidth: B) ซึ่งรายละเอียดผลวัดและทดลองมีดังนี้

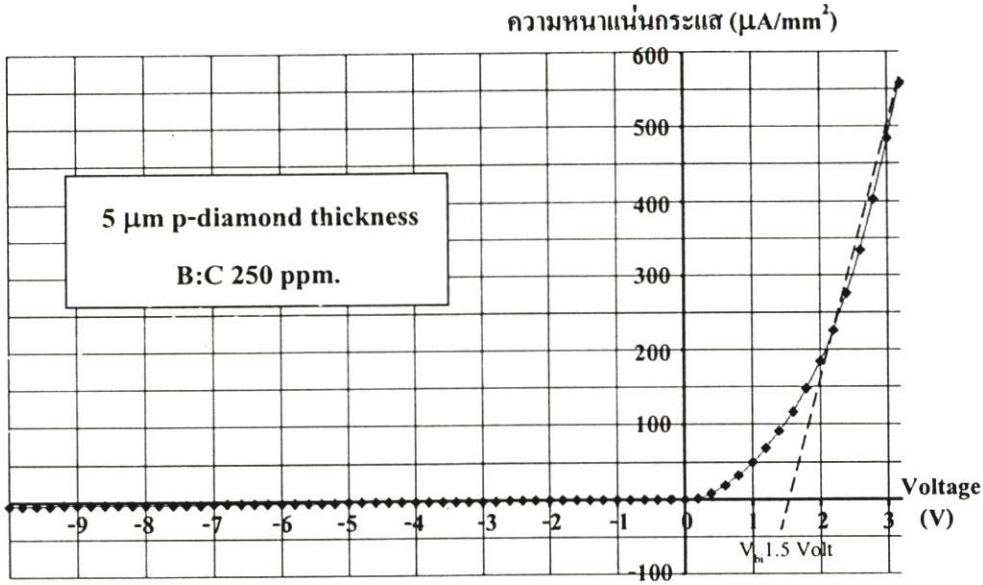
5.3.1 ผลการวัดลักษณะสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดในภาวะมืด (Dark condition)

นำโฟโตไดโอดโครงสร้าง p-diamond/i-Si/n^+-Si จากการทดลองที่ 4.3 มาวัดลักษณะสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันในภาวะมืด ทำได้โดยต่อวงจรและอุปกรณ์ดังรูปที่ 5.10 ซึ่งประกอบไปด้วยโฟโตไดโอดที่ต่ออยู่กับเครื่อง Semiconductor Analyzer HP4061 A โดยมีคอมพิวเตอร์เป็นตัวควบคุมและบันทึกผล

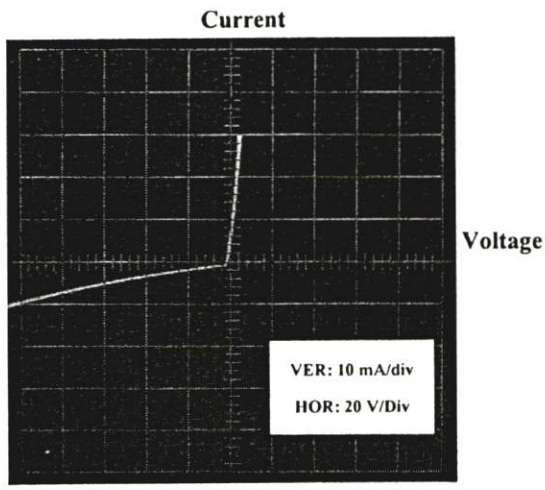


รูปที่ 5.10 แผนผังวงจรและอุปกรณ์ที่ใช้วัดลักษณะสมบัติของโฟโตไดโอดในภาวะมืด

ผลการวัดพบว่าไดโอดที่สร้างขึ้น มีคุณสมบัติเป็น Rectifier เช่น Rectifier diode ทั่วๆไป โดยกราฟลักษณะสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดในขณะไม่ได้รับแสงหรือในภาวะมืดสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.11 และภาพถ่ายที่ได้จากอุปกรณ์ Curve Tracer แสดงดังในรูปที่ 5.12



รูปที่ 5.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดโครงสร้าง p-diamond/i-Si/n^+-Siในภาวะมืด

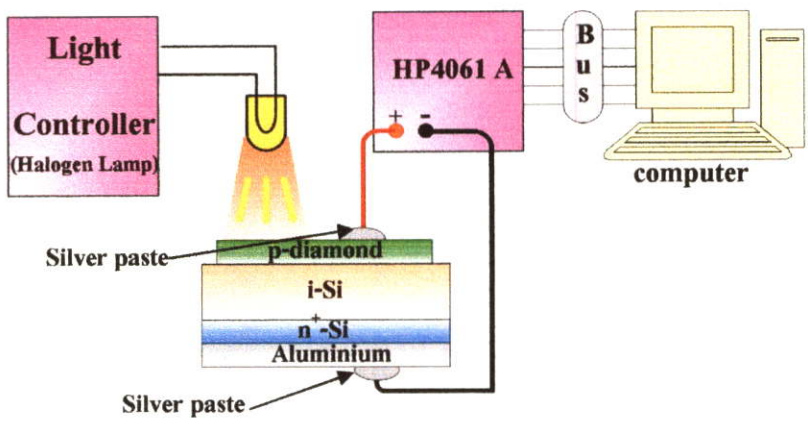


รูปที่ 5.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดัน จากเครื่อง Curve tracerของโฟโตไดโอดโครงสร้าง p-diamond/i-Si/n^+-Siในภาวะมืด

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดดังรูปที่ 5.11 และ 5.12 นั้น พบว่าโฟโตไดโอดโครงสร้าง p-diamond/i-Si/n^+-Si ที่สร้างขึ้นมีค่าศักย์ภายในประมาณ 1.5 โวลต์ แรงดันพังทลายมีค่ามากกว่า 100 โวลต์ ค่าความต้านทานอนุกรมประมาณ 3.1 kΩ , ความต้านทานขนานประมาณ 1.83 MΩ และกระแสมืดมีค่าประมาณ 2.3 μA/mm^2

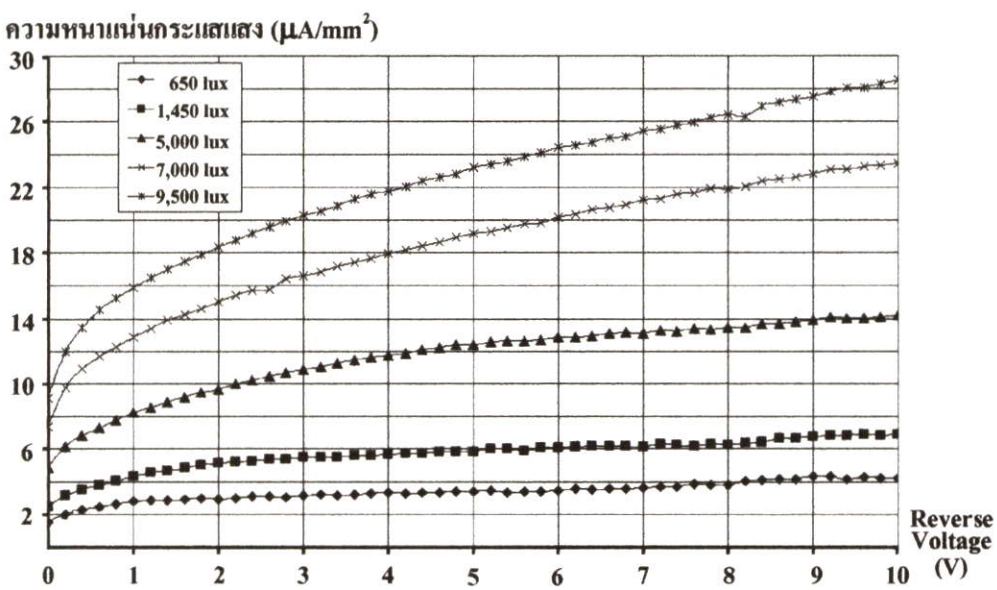
5.3.2 ผลการวัดลักษณะสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด ในขณะได้รับแสง (Illumination condition)

การวัดลักษณะสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันในขณะได้รับแสง ของโฟโตไดโอดโครงสร้าง p-diamond/i-Si/n^+-Si สามารถทำได้โดยต่อวงจรและอุปกรณ์ดังรูปที่ 5.13 ซึ่งทางด้านอินพุทนั้นประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสงจากหลอดฮาโลเจนที่สามารถปรับความเข้มแสงได้ และทางด้านเอาท์พุทประกอบด้วยโฟโตไดโอดที่ต่ออยู่กับเครื่อง Semiconductor Analyzer HP4061 A โดยมีคอมพิวเตอร์เป็นตัวควบคุมและบันทึกผล



รูปที่ 5.13 แผนผังวงจรและอุปกรณ์ที่ใช้วัดลักษณะสมบัติของโฟโตไดโอดขณะได้รับแสง

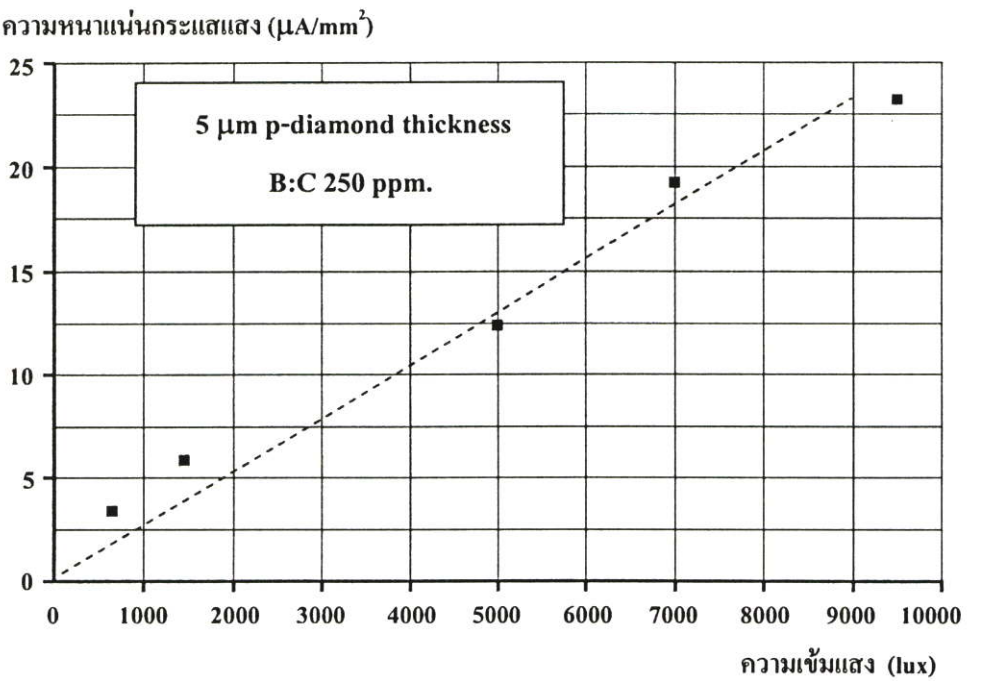
สำหรับกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสง-แรงดันของโฟโตไดโอดในขณะได้รับแสงที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.14 ซึ่งจากกราฟผลการทดลองนี้ พบว่า



รูปที่ 5.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสแสง-แรงดันของโฟโตไดโอดที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ (Halogen Lamp)

กระแสแสงของไดโอดจะมีค่าเพิ่มขึ้นกับความเข้มแสง เช่นที่แรงดัน 10 โวลต์ กระแสแสงจะเพิ่มขึ้นจาก 8μA/mm^2 เป็น 28μA/mm^2 เมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้นจาก 650 lux เป็น 9,500 lux เนื่องจากการเพิ่มความเข้มแสงก็คือการเพิ่มจำนวนโฟตอน จึงทำให้เกิดคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ได้กระแสแสงที่มีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้กระแสแสงยังเพิ่มขึ้นกับค่าแรงดันไบอัส เช่น ที่ความเข้มแสง 9,500 lux กระแสแสงจะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 9μA/mm^2 เป็น 28μA/mm^2 เมื่อแรงดันไบอัสเพิ่มขึ้นจาก 0 โวลต์ เป็น 10 โวลต์ เนื่องจากการเพิ่มแรงดันไบอัสก็คือการเพิ่มบริเวณเขตปลอดพาหะ หรืออีกนัยหนึ่งก็คือการเพิ่มพื้นที่ในการเกิดกระแสแสงนั่นเอง ส่งผลให้ได้กระแสแสงเพิ่มขึ้น ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า โฟโตไดโอดที่สร้างขึ้นจากการประยุกต์ใช้ฟิล์มเพชร สามารถทำงานได้ เช่นเดียวกับโฟโตไดโอดชนิดอื่นๆ

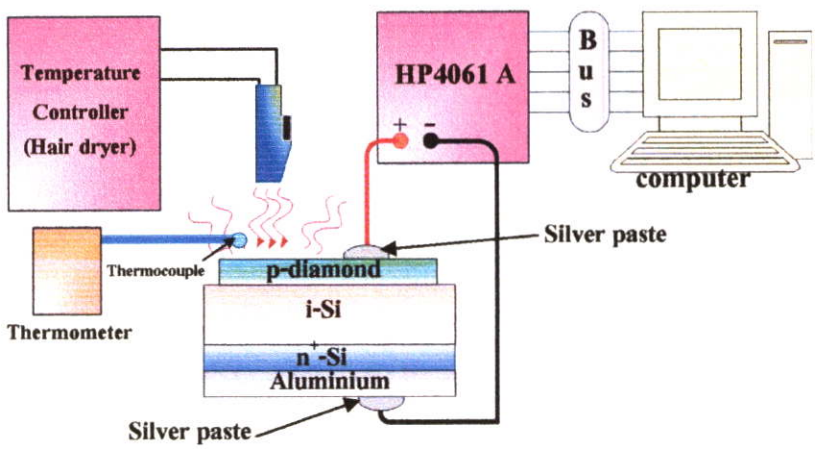
นอกจากนั้น ข้อมูลที่ได้กราฟในรูปที่ 5.14 เรายังสามารถเขียนเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสง-ความเข้มแสงของโฟโตไดโอดที่แรงดันค่าต่างๆ ได้ดังรูปที่ 5.15 ผลการทดลองที่ความเข้มแสงในช่วง 800 lux. ถึง 10,000 Lux. จะสังเกตเห็นได้ว่ากระแสแสงของไดโอดมีการเพิ่มขึ้นในลักษณะเป็นเชิงเส้น(Linear) กับความเข้มแสง ซึ่งเป็นคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้นที่ดีของโฟโตไดโอดทั่วไป ซึ่งเหมาะกับการนำไปประยุกต์ใช้เป็นตัวตรวจวัดแสงในงานต่างๆได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 5.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสแสง-ความเข้มแสงของโฟโตไดโอดที่แรงดันไบอัสย้อนกลับ 5 โวลต์

5.3.3 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อกระแสมืดของโฟโตไดโอด

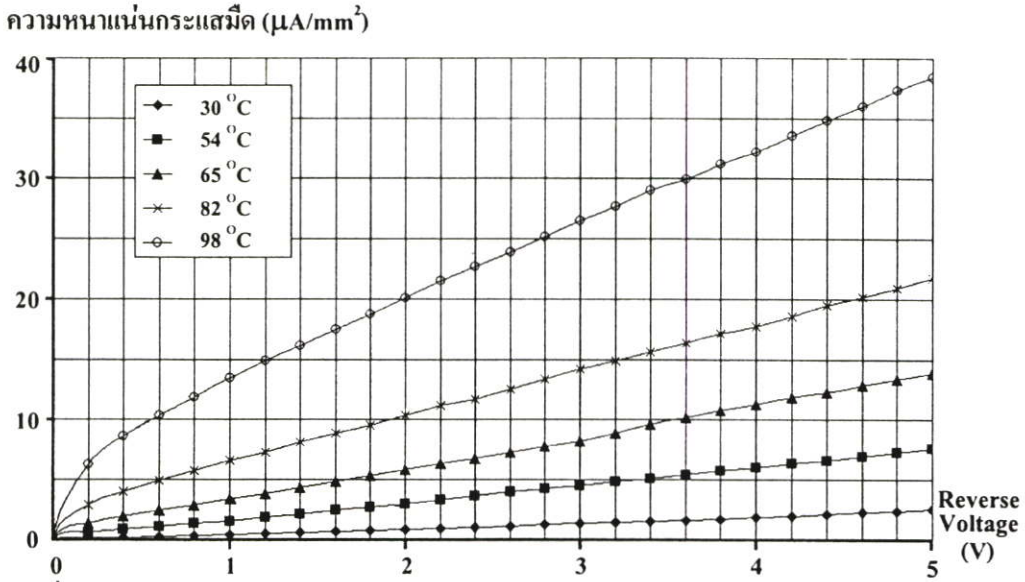
ในการใช้งานจริงของโฟโตไดโอดนั้น บางครั้งอาจมีการรบกวนจากสิ่งแวดล้อมภายนอก ได้เช่น มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ เป็นต้น ซึ่งอาจเป็นสาเหตุทำให้ลักษณะสมบัติ และประสิทธิภาพการทำงานของโฟโตไดโอดเปลี่ยนแปลงได้ โดยเฉพาะกระแสมืดหรือกระแสรั่วของโฟโตไดโอดซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอย่างหนึ่ง ดังนั้นในการศึกษาวิจัยนี้จึงได้ทำการทดลองผลของอุณหภูมิที่ใช้งานในช่วง 30 ^{o}C ถึง 98 ^{o}C ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของ กระแสมืดของโฟโตไดโอดโครงสร้าง p-diamond/i-Si/n^{+}-Si โดยต่อวงจรและอุปกรณ์ดังรูปที่ 5.16 ซึ่งทางด้านอินพุทนั้นประกอบด้วยแหล่งกำเนิดความร้อนที่สามารถปรับระดับความร้อนได้ และทางด้านเอาท์พุทประกอบด้วยโฟโตไดโอดที่ต่ออยู่กับเครื่อง Semiconductor Analyzer HP4061 A โดยมีคอมพิวเตอร์เป็นตัวควบคุมและบันทึกผล



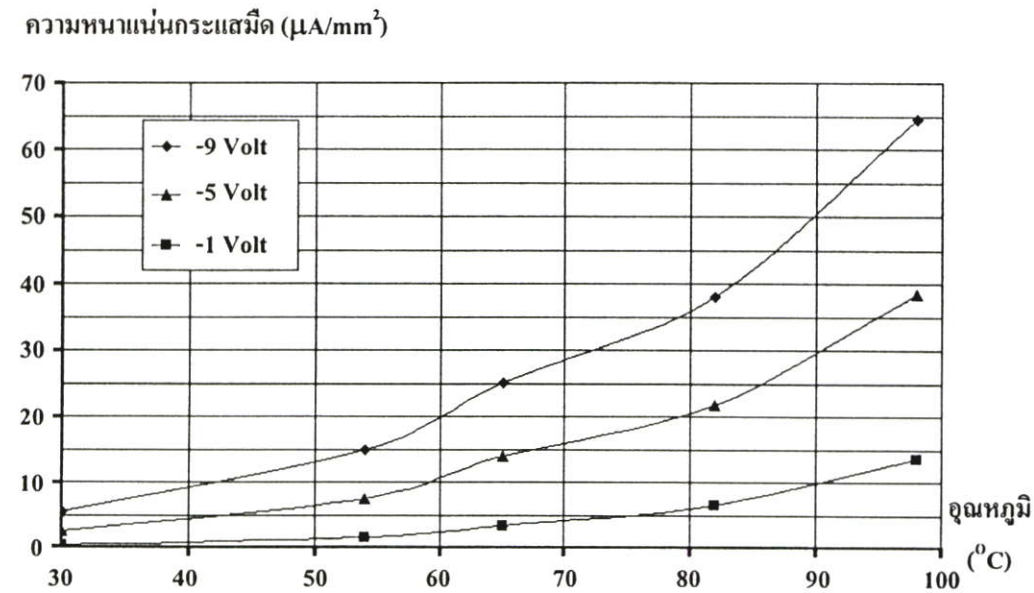
รูปที่ 5.16 แผนผังวงจรและอุปกรณ์ที่ใช้วัดผลของอุณหภูมิที่มีต่อกระแสมืดของโฟโตไดโอด

จากผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.17 พบว่านอกจากกระแสมืดหรือกระแสรั่วของโฟโตไดโอด จะมีค่าเพิ่มขึ้นกับแรงดันไบอัสแล้ว กระแสมืดยังมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่ใช้งานอีกด้วย เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้เกิดคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล ขึ้นในบริเวณเขตปลอดพาหะ ซึ่งมีสนามไฟฟ้าตกคร่อมอยู่ ทำให้คู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล มีการเคลื่อนที่ทวน-ตาม สนามไฟฟ้าส่งผลให้เกิดเป็นกระแส และกระแสที่เกิดขึ้นนี้จะมีทิศทางเดียวกับกระแสอิ่มตัวไหลย้อนกลับ ดังนั้นกระแสรวม(กระแสมืดหรือกระแสรั่ว) จึงมีค่าสูงขึ้น เช่นเมื่ออุณหภูมิมีค่าสูงขึ้นจาก 30^{o}C เป็น 97^{o}C กระแสมืดจะมีค่าสูงขึ้นจาก 5 $\mu A/mm^{2}$ เป็น 65 $\mu A/mm^{2}$ ที่แรงดันไบอัสย้อนกลับ 9 โวลต์ และจากกราฟในรูปที่ 5.17 สามารถนำมาแสดงอัตราการเพิ่มขึ้นของกระแสมืดกับอุณหภูมิที่ใช้งานได้ดังในรูปที่ 5.18 ซึ่งจะเห็นว่าที่แรงดันไบอัสคงที่ค่าหนึ่งๆ อัตราการเพิ่มขึ้นของกระแสมืดในช่วงอุณหภูมิค่าต่ำๆ จะมีค่าต่ำกว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของกระแสมืดในช่วงอุณหภูมิค่าสูงๆ นอกจากนี้อัตราการเพิ่มขึ้นของกระแสมืดที่แรงดันไบอัสค่าสูง จะมีค่า

มากกว่ากรณีแรงดันไบอัสค่าต่ำ หรือก็คือ ที่แรงดันไบอัสค่าสูง กระแสมืดจะมีการเปลี่ยนแปลงหรือมีความไวต่ออุณหภูมิสูง กว่ากรณีแรงดันไบอัสต่าต่ำ ดังนั้นการตั้งแรงดันไบอัส และการควบคุมอุณหภูมิของโฟโตไดโอดให้เหมาะสมกับใช้งานจึงเป็นเรื่องที่สำคัญและจะทำให้โฟโตไดโอดมีประสิทธิภาพในการทำงานสูงสุด



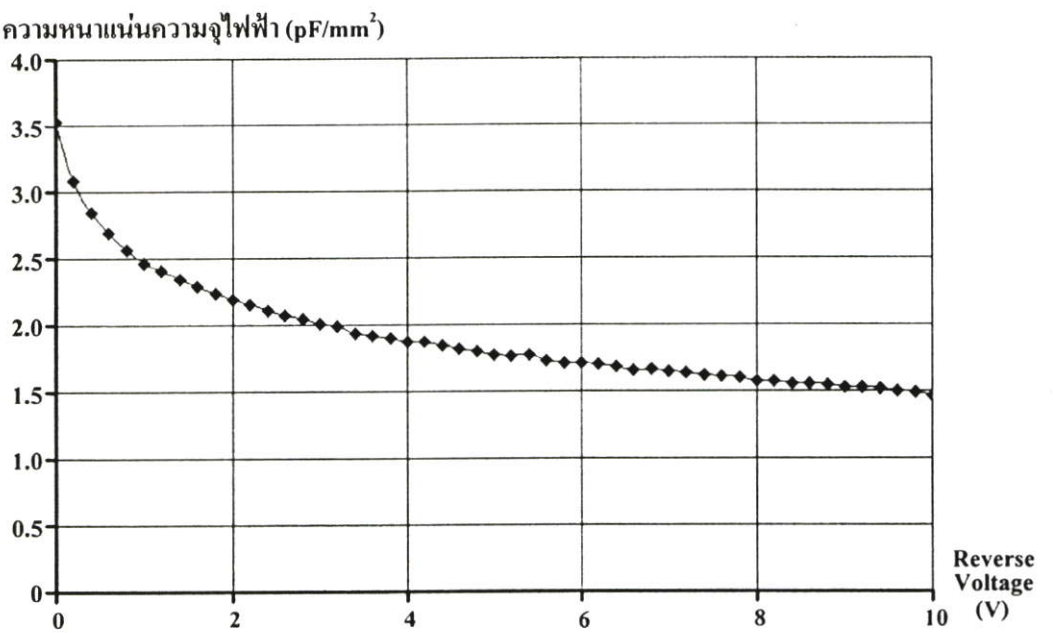
รูปที่ 5.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสมืด-แรงดันของโฟโตไดโอด ที่อุณหภูมิค่าต่างๆ



รูปที่ 5.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสมืด-อุณหภูมิ ของโฟโตไดโอด ที่แรงดันค่าต่างๆ

5.3.4 ผลการวัดความหนาแน่นความจุไฟฟ้าของโฟโตไดโอด

เนื่องจากความจุไฟฟ้าของไดโอดมีผลโดยตรงต่อความเร็วในการทำงาน ดังนั้นในการศึกษาความเร็วในการทำงานของโฟโตไดโอด โฟโตไดโอดที่สร้างขึ้นจึงถูกนำมาวัดหาลักษณะสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นความจุไฟฟ้า-แรงดันไบอัส ซึ่งผลการวัดแสดงดังในรูปที่ 5.19 ค่าความจุไฟฟ้าของไดโอดจะลดลงกับการเพิ่มขึ้นของแรงดันไบอัสอย่างๆไม่เป็นเชิงเส้น (Non-liear)โดยมีการลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรงดันไบอัสค่าต่ำๆและจะช้าลงในช่วงแรงดันไบอัสค่าสูงขึ้น จากการวัดในช่วงแรงดันไบอัสระหว่าง 0-10 โวลต์ โฟโตไดโอดมีค่าความหนาแน่นความจุไฟฟ้าระหว่าง 1.5-3.5 pF/mm^2 การลดลงของค่าความจุไฟฟ้าของไดโอดกับแรงดันไบอัส อาจพิจารณาได้ว่าเนื่องมาจากการขยายตัวของย่านปลอดพาหะที่บริเวณรอยต่อ โดยเมื่อโฟโตไดโอดได้รับแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับจะส่งผลให้เขตปลอดพาหะขยายกว้างขึ้น และเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความกว้างย่านปลอดพาหะมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นดังนั้นจึงมีผลทำให้ค่าความจุไฟฟ้าของไดโอดลดลงอย่างไม่เป็นเชิงเส้นด้วย

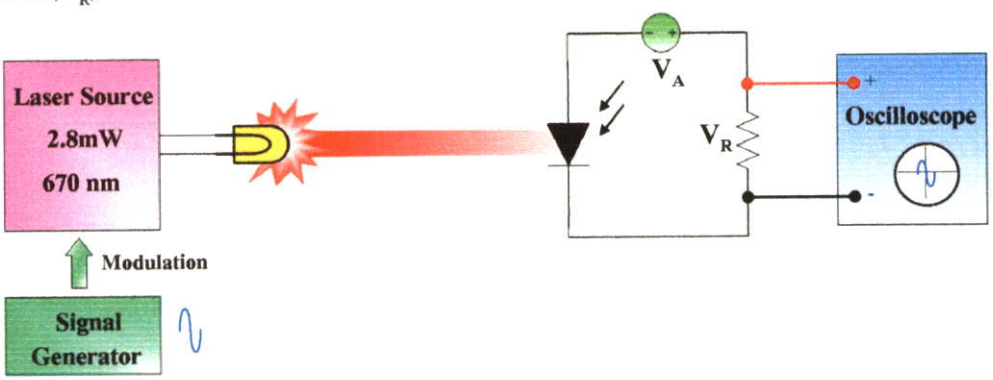


รูปที่ 5.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอดโครงสร้าง p-diamond/i-Si/n^+-Si

5.3.5 ผลการวัดคุณสมบัติ photo response ของโฟโตไดโอด

ในการใช้งานโฟโตไดโอดเพื่อการสื่อสารนั้น มีจำเป็นต้องรู้ค่าความถี่คัทออฟ(Cut-off frequency : $f_{Cut\text{-}off}$) และ แบนด์วิดท์(Bandwidth : B) เพื่อการเลือกใช้ให้มีความเหมาะสม ซึ่งการวัดคุณสมบัติดังกล่าวสามารถทำได้โดยต่อวงจรและอุปกรณ์ดังในรูปที่ 5.20 โดยทางด้านอินพุทหรือด้านส่ง ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดคลื่นสัญญาณรูปไซน์ (Sine wave) ที่สามารถปรับค่าความถี่ได้ และแหล่งกำเนิดคลื่นแสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 670 nm กำลังงาน 2.8 mW ที่สามารถ

มอดดูเลทคลื่นสัญญาณต่างๆเข้ากับคลื่นแสงเลเซอร์ได้ ส่วนทางด้านเอาท์พุทนั้นประกอบไปด้วยโฟโตไดโอดโครงสร้าง p-diamond/i-Si/n^{+}-Si ที่สร้างขึ้น ทำหน้าที่เป็นตัวรับสัญญาณแสงเลเซอร์และถูกต่ออนุกรมอยู่กับโหลดซึ่งเป็นตัวต้านทานและแหล่งจ่ายแรงดันไบอัส V_A โดยมีอุปกรณ์ออสซิลโลสโคปเป็นเครื่องมือวัดขนาดและรูปร่างของคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทาน(V_R)

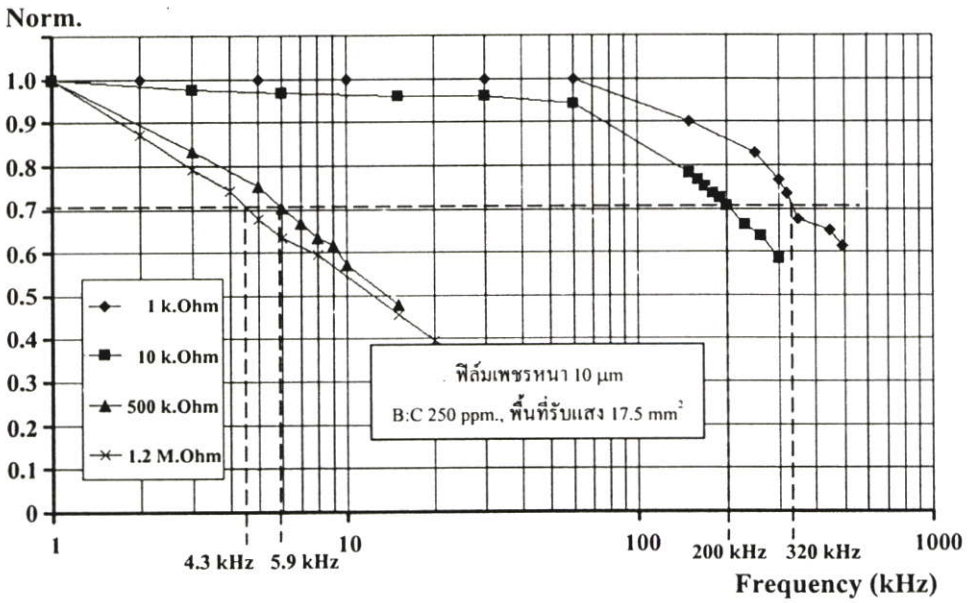


รูปที่ 5.20 แผนผังวงจรที่ใช้วัดคุณสมบัติ Photo responseของโฟโตไดโอด

ทำการทดลองโดยการป้อนคลื่นสัญญาณรูปไซน์ (Sine wave) ที่ความถี่ค่าต่างๆ เข้าไปมอดดูเลท(modulate)กับคลื่นแสงเลเซอร์ แล้วแสงเลเซอร์ที่ถูกมอดดูเลทด้วยสัญญาณรูปไซน์จะถูกส่งออกไปยังด้านรับโดยใช้โฟโตไดโอดเป็นตัวรับแสงเลเซอร์ ทำให้มีกระแสแสงเกิดขึ้นในวงจรด้านรับ และมีขนาดเปลี่ยนแปลงตามสัญญาณรูปไซน์ แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหลดตัวต้านทานจะถูกวัดขนาดและรูปร่างด้วยออสซิลโลสโคป ในขณะที่ปรับให้คลื่นสัญญาณรูปไซน์ด้านส่งมีความถี่สูงขึ้น ขนาดของสัญญาณรูปไซน์ที่ตกคร่อมโหลดตัวต้านทานที่ด้านรับจะมีขนาดลดลง อัตราส่วนของขนาดคลื่นรูปไซน์ค่าสูงสุด($V_{R\text{-}Max}$) ต่อขนาดคลื่นรูปไซน์ที่ความถี่ค่าต่างๆ (V_R) หรือ V_R/ $V_{R\text{-}Max}$ ถูกเรียกว่า "ค่านอร์มอไลซ์ของแรงดันเอาท์พุท"(Normalized Output voltage: Norm.) จะถูกนำมาแสดงเป็นคุณสมบัติ photo response ของโฟโตไดโอด

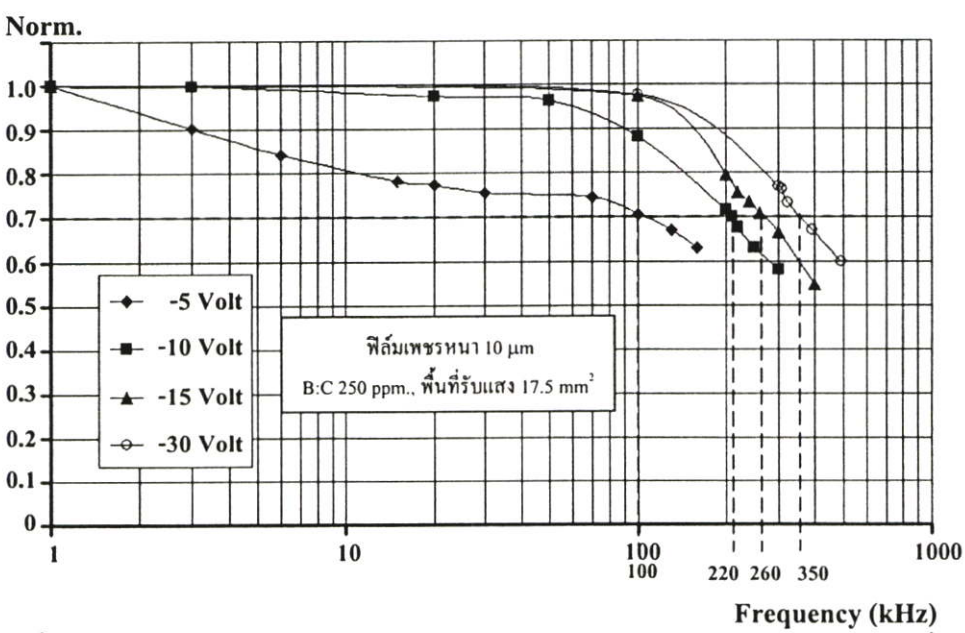
จากผลการทดลองพบว่าโฟโตไดโอดมีลักษณะการทำงานเป็นแบบ Low pass filter คือ เมื่อความถี่ของคลื่นรูปไซน์มีค่าต่ำๆค่านอร์มอไลซ์ของแรงดันเอาท์พุท (Norm.) จะมีค่าประมาณ 1 แต่เมื่อความถี่มีค่าสูงขึ้นค่านอร์มอไลซ์ของแรงดันเอาท์พุท จะมีค่าลดลงต่ำกว่า 1 และที่ความถี่ค่าหนึ่ง ค่านอร์มอไลซ์ของแรงดันเอาท์พุทจะมีค่าเท่ากับ 0.707 ความถี่ค่านี้ถูกเรียกว่า "ความถี่คัทออฟ" (cutoff frequency) ในการทดลองนี้ได้ใช้โหลดตัวต้านทานค่าต่างๆคือ 1kOhm , 10 kOhm , 500kOhm และ 1.2 MOhm ผลการทดลองแสดงดังในรูปที่ 5.20 โดยเมื่อค่าความต้านทานมีค่าสูงขึ้นจาก 1 kΩ เป็น 1.2 MΩ ค่าความถี่คัทออฟและแบนด์วิดท์ จะมีค่าลดลงจาก 320 kHz เป็น 43 kHz เนื่องจากเวลาในการตอบสนองของโฟโตไดโอดนั้น แปรผันตามกับผลคูณของค่าความต้านทานกับค่าความจุไฟฟ้า(RC Time Constant) ดังนั้นเมื่อค่าความต้านทานโหลด

สูงขึ้น เวลาในการตอบสนองของโฟโตไดโอดก็จะมีค่าเพิ่มมากขึ้น หรือก็คือค่าความถี่คัทออฟและแบนด์วิดท์จะมีค่าลดลง



รูปที่ 5.21 กราฟ photo response ของโฟโตไดโอดโครงสร้าง p-diamond/i-Si/n^+-Si ที่ค่าความต้านทานโหลดค่าต่างๆภายใต้แรงดันไบอัส 15 โวลต์

และเมื่อทำการวัดหากราฟ photo response ที่แรงดันไบอัสค่าต่างๆ โดยใช้ความต้านทานโหลดเท่ากับ 10 kΩ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.22

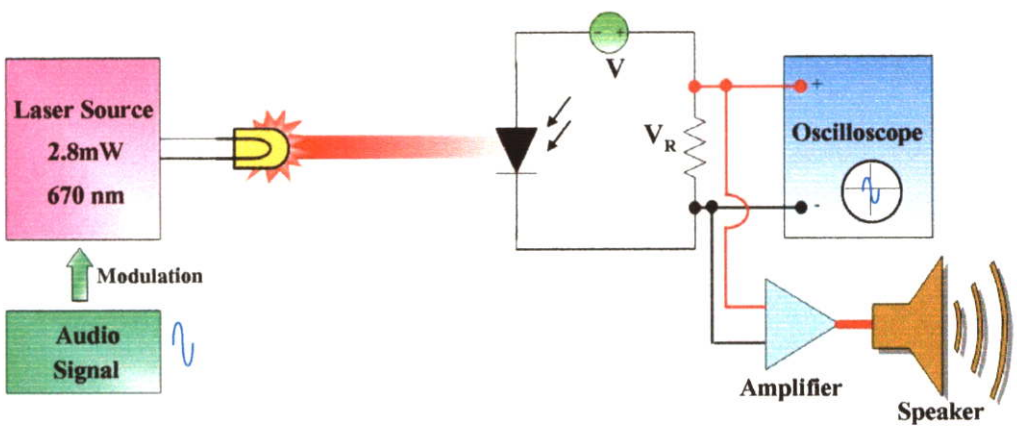


รูปที่ 5.22 กราฟ photo response ของโฟโตไดโอดโครงสร้าง p-diamond/i-Si/n^+-Si ที่แรงดันไบอัสค่าต่างๆโดยใช้ความต้านทานโหลดเท่ากับ 10 kΩ

พบว่านอกจากความถี่คัทออฟของโฟโตไดโอดจะขึ้นกับค่าความต้านทานของโหลดแล้ว ความถี่คัทออฟยังมีค่าขึ้นกับแรงดันไบอัสอีกด้วย โดยความถี่คัทออฟและแบนด์วิดท์จะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 100 kHz เป็น 350 kHz เมื่อเพิ่มแรงดันไบอัสย้อนกลับให้มีค่าสูงขึ้นจาก -5 โวลต์ เป็น -30 โวลต์ โดยใช้ความต้านทานโหลดเท่ากับ 10 kΩ เนื่องจากเพิ่มแรงดันไบอัสย้อนกลับให้มีค่าสูงขึ้นจะทำให้เขตปลอดพาหะขยายขึ้น ส่งผลให้ค่าความจุไฟฟ้ามีค่าลดลง ดังผลการทดลองที่ 5.3.4 และเวลาในการตอบสนองของโฟโตไดโอดนั้นขึ้นแปรตามกับผลคูณของค่าความต้านทานกับค่าความจุไฟฟ้า(RC Time Constant) ดังนั้นเมื่อเพิ่มแรงดันไบอัสย้อนกลับ จึงทำให้ความถี่คัทออฟจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น

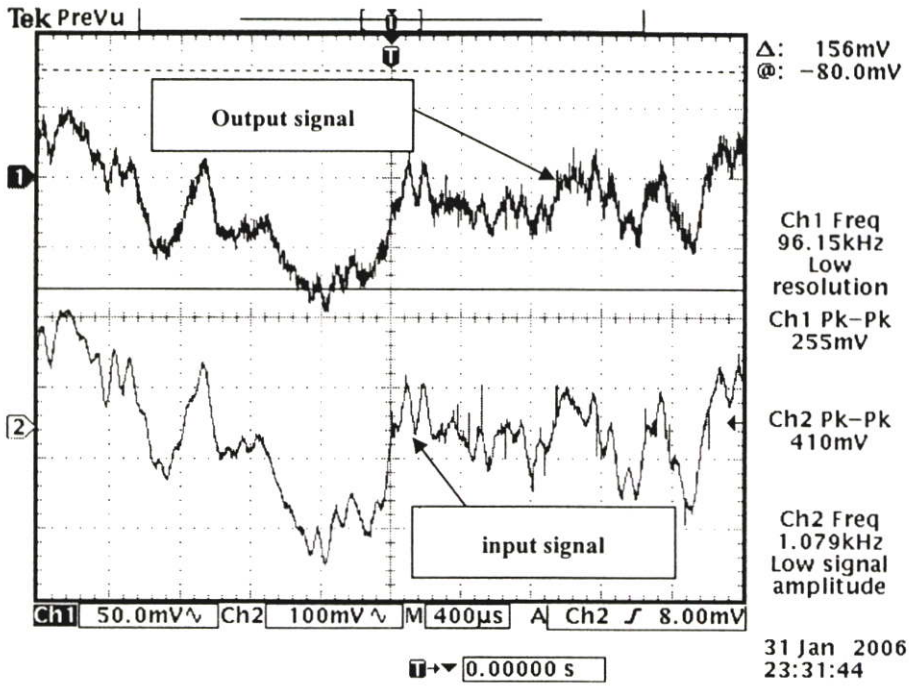
5.3.6 ผลการทดลองตรวจจับสัญญาณเสียงที่ถูกมอดดูเลทมากับแสงเลเซอร์ด้วยโฟโตไดโอด โครงสร้าง p-diamond/i-Si/n^+-Si

ในงานวิจัยนี้ได้ทดลองตรวจจับสัญญาณเสียงที่ถูกมอดดูเลทมากับแสงเลเซอร์ด้วยโฟโตไดโอด โครงสร้าง p-diamond/i-Si/n^+-Si โดยการมอดดูเลทสัญญาณเสียง(Audio signal)เข้าคลื่นแสงเลเซอร์และส่งผ่านอากาศไปยังวงจรด้านรับซึ่งมีโฟโตไดโอดที่สร้างขึ้นเป็นตัวรับสัญญาณ ดังแผนผังในรูปที่ 5.23



รูปที่ 5.23 แผนผังวงจรที่ใช้วัดคุณสมบัติ Photo responseของโฟโตไดโอด

จากการทดลองฟังเสียงพบว่าโฟโตไดโอดสามารถรับและแยกสัญญาณเสียงออกจากแสงเลเซอร์ซึ่งเป็นคลื่นพาหะได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังสังเกตและเปรียบเทียบลักษณะรูปร่างของคลื่นสัญญาณเสียงที่ด้านส่งและด้านรับด้วยเครื่องออสซิลโลสโคป ดังในรูปที่ 5.24 โดยพบว่ามีความผิดเพี้ยนน้อยมากและไม่มีการเลื่อนของเฟส การทดลองนี้แสดงให้เห็นถึงตัวอย่างของการนำเอาโฟโตไดโอดโครงสร้างใหม่นี้ไปประยุกต์ใช้งาน โดยสามารถทำหน้าที่เป็นตัวตรวจจับสัญญาณแสง(Photo-Detector) ในอุปกรณ์ภาครับ(Receiver)ของระบบการสื่อสารด้วยคลื่นแสง (Opto – communication system)ได้เป็นอย่างดี



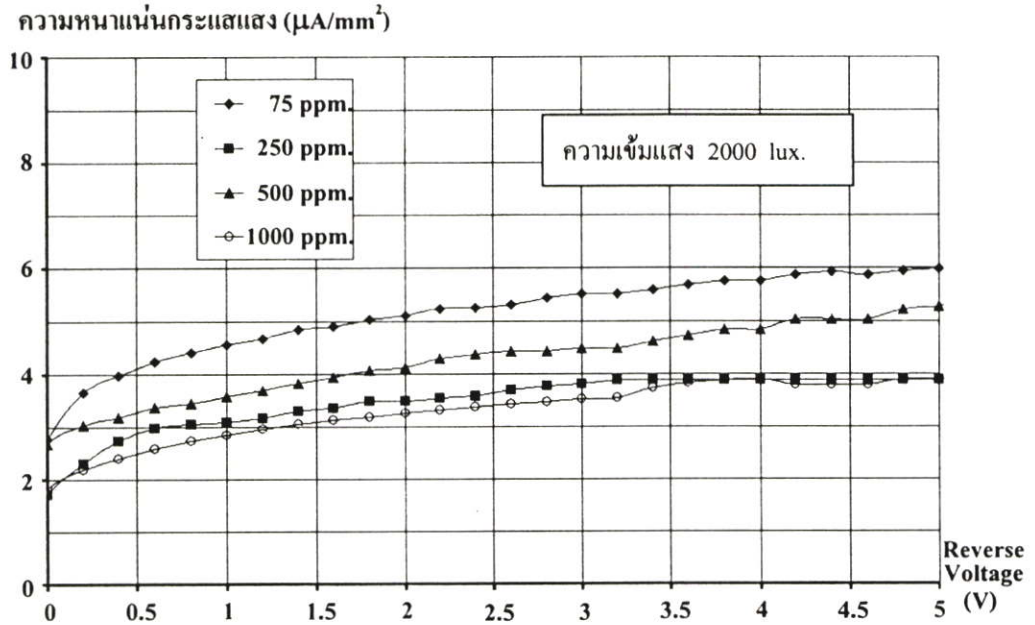
รูปที่ 5.24 ลักษณะของการตอบสนองต่อสัญญาณเสียงของโฟโตไดโอดโครงสร้าง p-diamond/i-Si/n^+-Si

5.4 ผลของความเข้มข้นอะตอมสารเจือในฟิล์มเพชรที่มีต่อคุณสมบัติของโฟโตไดโอด

ในการทดลองที่ 5.4 เป็นการศึกษาผลของความเข้มข้นอะตอมสารเจือโบรอนในฟิล์มเพชรชนิดพี ที่มีต่อลักษณะสมบัติของโฟโตไดโอดโครงสร้าง p-diamond/i-Si/n^+-Si โดยทดลองดังหัวข้อที่ 4.4 คือ สร้างโฟโตไดโอดโครงสร้าง p-diamond/i-Si/n^+-Si ที่มีฟิล์มเพชรหนา 5 µm. และใช้โบรอนไตรออกไซด์ผสมกับเอทิลแอลกอฮอลล์ ซึ่งมีอัตราส่วนระหว่างจำนวนอะตอมโบรอนต่ออะตอมคาร์บอน(B:C) เท่ากับ 75, 250, 500 และ 1000 ppm. ตามลำดับ และศึกษาลักษณะสมบัติของโฟโตไดโอด ดังนี้

5.4.1 ผลของความเข้มข้นอะตอมสารเจือในฟิล์มเพชรที่มีต่อกระแสแสงของโฟโตไดโอด

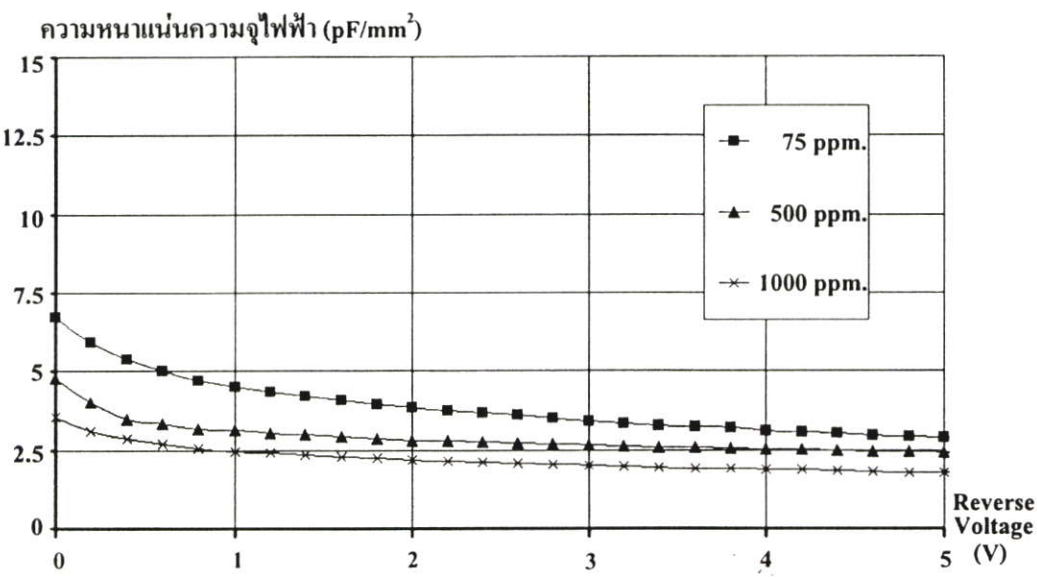
ในหัวข้อการทดลองนี้ เป็นการศึกษาผลของความเข้มข้นอะตอมสารเจือในฟิล์มเพชรที่มีต่อกระแสแสงของโฟโตไดโอด ซึ่งจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสง-แรงดันไบอัสย้อนกลับ ที่มีอัตราส่วน B:C ค่าต่างๆ แสดงดังรูปที่ 5.25 พบว่าที่ความเข้มแสง 2000 lux. โฟโตไดโอดที่ประกอบด้วยฟิล์มเพชรชนิดพีที่มีความเข้มข้นของอะตอมสารเจือที่แตกต่างกัน สามารถให้กระแสแสงที่ใกล้เคียงกันหรือมีความแตกต่างกันน้อยมาก โดยมีความแตกต่างของกระแสแสงเพียง 1-2 µA/mm^2 เนื่องจากการเติมอะตอมสารเจือเกือบจะไม่ทำให้คุณสมบัติทางกายภาพของฟิล์มเพชรเกิดการเปลี่ยนแปลง รวมไปถึงคุณสมบัติในการสะท้อน(Reflectance)ของฟิล์มเพชรดังการทดลองที่ 5.1.4



รูปที่ 5.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสแสง-แรงดันไบอัสย้อนกลับ ของโฟโตไดโอดที่ประกอบด้วยฟิล์มเพชรที่มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือที่แตกต่างกัน

5.4.2 ผลของความเข้มข้นอะตอมสารเจือในฟิล์มเพชรที่มีต่อค่าความหนาแน่นความจุไฟฟ้าของโฟโตไดโอด

ในหัวข้อการทดลองนี้ เป็นการศึกษาผลของความเข้มข้นอะตอมสารเจือในฟิล์มเพชร ซึ่งจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นความจุไฟฟ้า-แรงดันไบอัสย้อนกลับ ที่มีอัตราส่วนจำนวนอะตอม B:C ค่าต่างๆ ดังรูปที่ 5.26



รูปที่ 5.26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นความจุไฟฟ้า-แรงดันไบอัสที่มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือของฟิล์มเพชรชนิดพีที่แตกต่างกัน

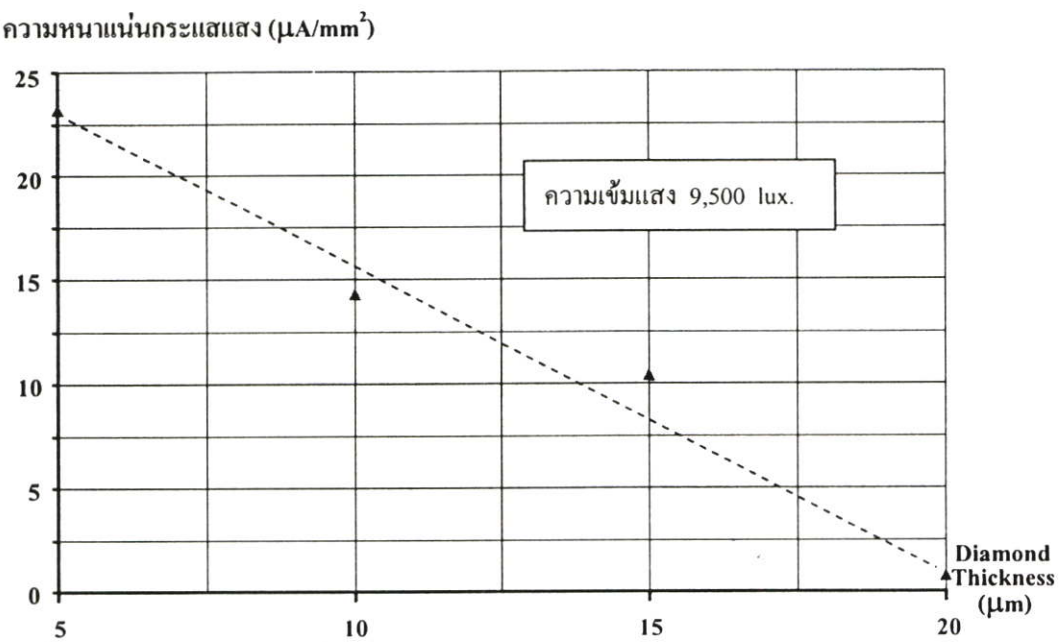
พบว่าความเข้มข้นของสารเจือเกือบจะไม่มีผลต่อความหนาแน่นความจุไฟฟ้า เช่นที่แรงดันไบอัสย้อนกลับ 6 โวลต์ ความหนาแน่นความจุไฟฟ้าจะมีค่าต่างกันเพียงประมาณ 0.67-0.98 pF/mm^2 เมื่ออัตราส่วนจำนวนอะตอม B:C อยู่ในช่วง75-1,000 ppm. และสำหรับ ศักย์ภายใน, แรงดันพังทลาย และกระแสมืด ก็จะมีค่าที่แตกต่างๆกันเพียงเล็กน้อยเช่นเดียวกันจึงไม่สามารถสังเกตเห็นความแตกต่างกันได้

5.5 ผลของความหนาของชั้นฟิล์มเพชรที่มีต่อคุณสมบัติของโฟโตไดโอด

ในการทดลองที่ 5.5 เป็นการศึกษาผลของความหนาชั้นฟิล์มเพชรที่มีต่อลักษณะสมบัติของโฟโตไดโอดโครงสร้าง p-diamond/i-Si/n^+-Si โดยทำการสร้างโฟโตไดโอดดังหัวข้อที่ 4.4 คือ สร้างโฟโตไดโอดโครงสร้าง p-diamond/i-Si/n^+-Si ที่ฟิล์มเพชรมีอัตราส่วนระหว่างจำนวนอะตอมโบรอนต่ออะตอมคาร์บอน(B:C) เท่ากับ 250 ppm ซึ่งมีความหนา 5, 10, 15 และ 20 μm. และศึกษาลักษณะสมบัติของโฟโตไดโอด ดังนี้

5.5.1 ผลของความหนาชั้นฟิล์มเพชรที่มีต่อกระแสแสงของโฟโตไดโอด

ในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาผลของความหนาชั้นฟิล์มเพชรที่มีต่อกระแสแสงของโฟโตไดโอด เพื่อหาความหนาของชั้นฟิล์มเพชรที่มีความเหมาะสม จากการทดลองพบว่าโฟโตไดโอดชั้นของฟิลม์เพชรที่หนากว่าจะให้กระแสแสงได้น้อยกว่า เช่นโฟโตไดโอดที่มีความหนาของฟิล์มเพชรชนิดพีขนาด 5 μm ขณะที่แรงดันไบอัสมีค่า -5 โวลต์ และได้รับแสงความเข้ม 9500 lux. จะให้กระแสแสงได้สูงสุดซึ่งมีค่า 25.4 $\mu A/mm^2$ และสำหรับโฟโตไดโอดที่มีชั้นฟิล์มเพชรที่หนาขึ้นจะให้กระแสแสงได้น้อยลงตามลำดับ ดังรูปที่ 5.27

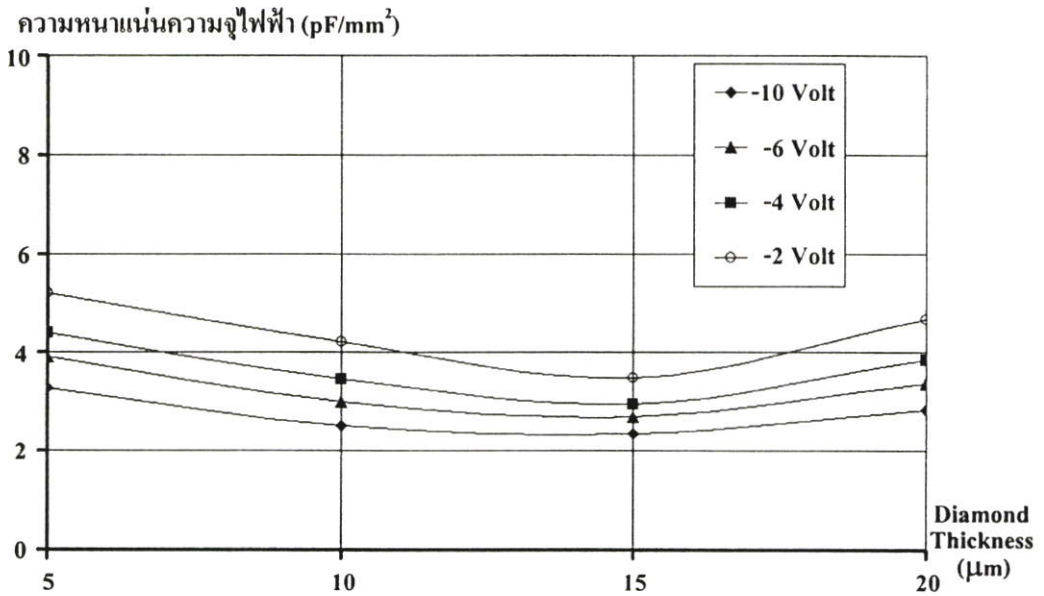


รูปที่ 5.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสแสง-ความหนาฟิล์มเพชรของโฟโตไดโอด ที่แรงดัน -5 โวลต์

เนื่องจากโฟตอนที่สามารถผ่านเข้าไปยังสารกึ่งตัวนำซิลิคอนชนิดอินทรินซิกซึ่งเป็นบริเวณหลักของการเกิดกระแสแสง มีจำนวนลดลงเมื่อฟิล์มเพชรหนาขึ้น ส่งผลให้ปริมาณกระแสแสงที่ได้มีค่าที่ลดลงจากเดิม

5.5.2 ผลของความหนาชั้นฟิล์มเพชรที่มีต่อค่าความหนาแน่นความจุไฟฟ้าของโฟโตไดโอด

การทดลองนี้เป็นการศึกษาผลของความหนาชั้นฟิล์มเพชรที่มีต่อค่าความหนาแน่นความจุไฟฟ้าของโฟโตไดโอด ซึ่งจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นความจุไฟฟ้า-ความหนาชั้นฟิล์มเพชร ที่แรงดันค่าต่างๆ ดังรูปที่ 5.28 พบว่าค่าความหนาแน่นความจุไฟฟ้านั้นมีการเปลี่ยนแปลงที่น้อยมาก ซึ่งมีค่าประมาณ 1 pF/mm^2 เนื่องจากความหนาแน่นความจุไฟฟ้าขึ้นอยู่กับความกว้างของเขตปลอดพาหะ ดังนั้นการเพิ่มความหนาของชั้นฟิล์มเพชรจึงมาสามารถทำให้ความหนาแน่นความจุไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ สำหรับศักย์ภายใน, แรงดันพังทลาย และกระแสมืด ของโฟโตไดโอดก็จะมีค่าที่แตกต่างๆกันเพียงเล็กน้อยเช่นเดียวกัน

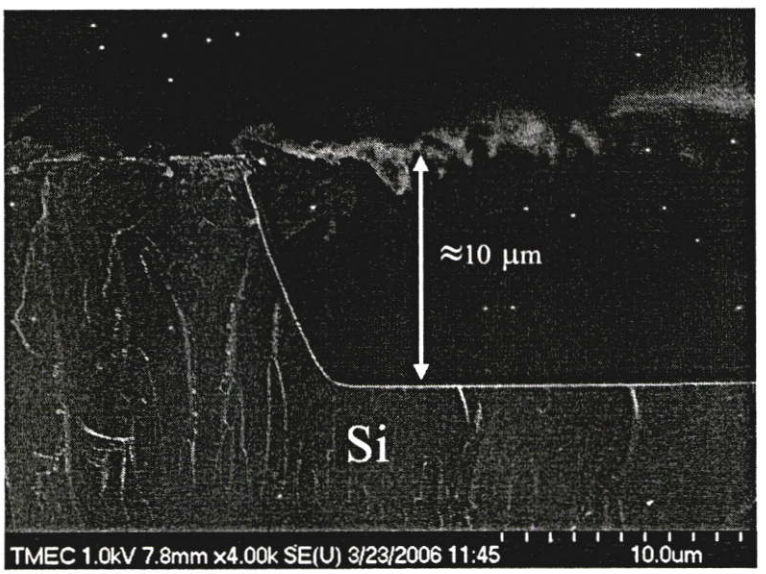


รูปที่ 5.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นความจุไฟฟ้า-ความหนาฟิล์มเพชรของโฟโตไดโอดที่แรงดันไฟฟ้าค่าต่างๆ

5.6 ผลของความหนาชั้นอินทรินซิก-ซิลิคอน

ในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาผลของความหนาชั้นอินทรินซิก-ซิลิคอน ที่มีต่อคุณสมบัติของโฟโตไดโอดโครงสร้าง p-diamond/i-Si/n^+-Si ในการทดลองนี้ได้ทำการสร้างโฟโตไดโอดดังรายละเอียดของขั้นตอนการสร้างได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 4.5 ซึ่งชั้นอินทรินซิกซิลิคอนถูกสกัดให้บางลงด้วยการใช้สารละลาย NaOH เป็นตัวสกัดและใช้เวลาในการสกัดต่างๆกันทำให้ชั้น

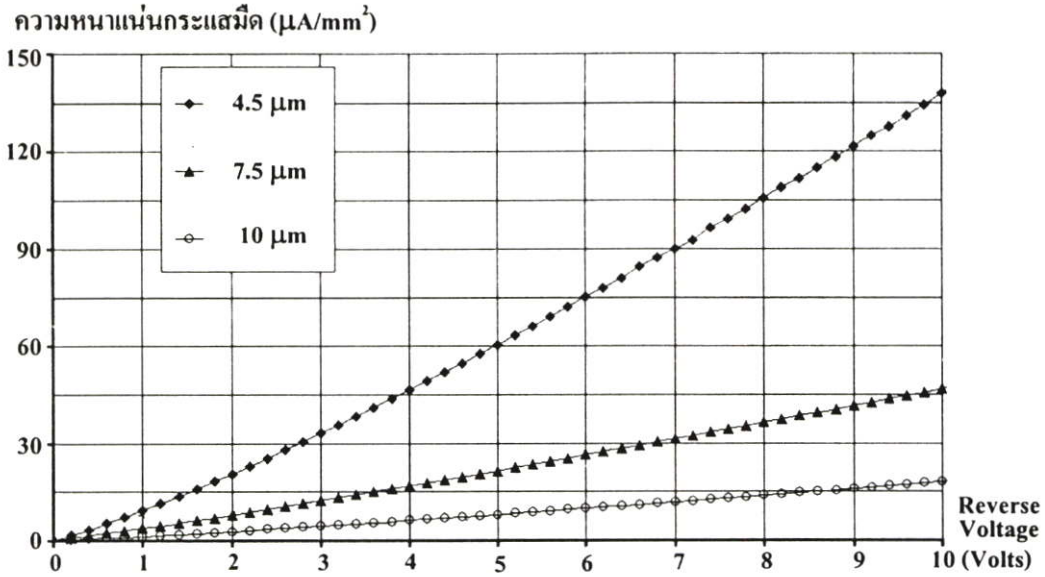
อินทรินซิค เข้าไปได้ลึก 4.5, 7.5 และ 10 μm ตามลำดับ ซึ่งลักษณะหลุมที่เกิดขึ้นสามารถแสดงด้วยภาพถ่ายด้านตัดขวางด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดอิเล็กตรอน(SEM)ได้ดังรูปที่ 5.29 จากนั้นทำการสร้างโฟโตไดโอดขึ้นบริเวณหลุมดังกล่าวจะทำให้ได้โฟโตไดโอดโครงสร้าง p-diamond/i-Si/n^{+}-Si ที่มีความหนาของชั้นอินทรินซิกซิลิคอนค่าต่างๆกัน และศึกษาลักษณะสมบัติของโฟโตไดโอด ดังนี้



รูปที่ 5.29 ลักษณะตัดขวางของแผ่นผลึกซิลิคอนชนิดอินทรินซิก หลังจากถูกสกัดออก

5.6.1 ผลของความหนาชั้นอินทรินซิก-ซิลิคอน ที่มีต่อกระแสมืด

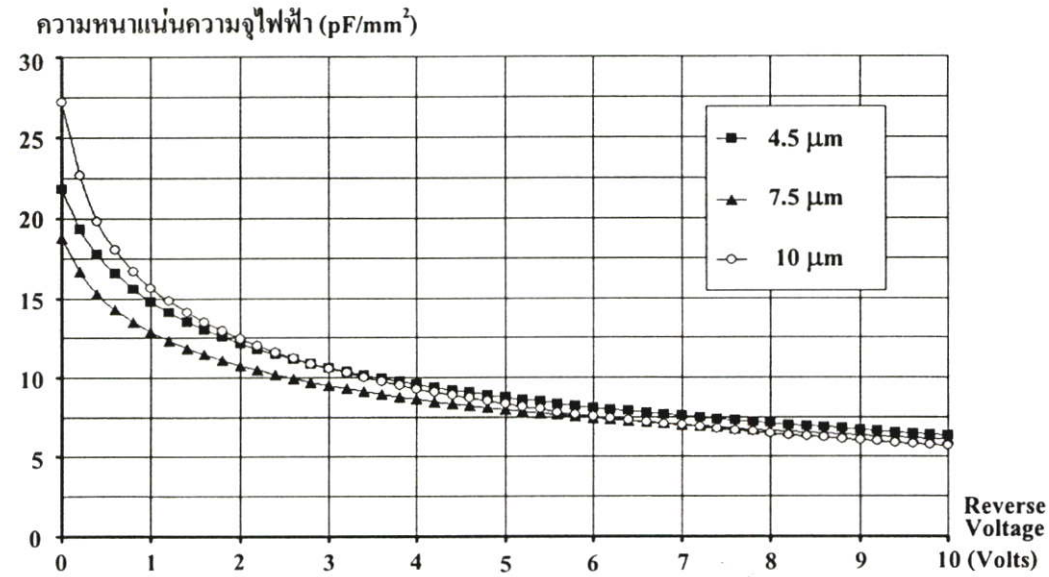
จากผลการทดลองพบว่า พบว่ากระแสมืดจะมีค่าลดลงเมื่อความหนาของซิลิคอนอินทรินซิกมีค่าลดลง ดังแสดงในรูปที่ 5.30 ทั้งนี้เพราะกระแสมืดเกิดจากพาหะส่วนน้อยในสารกึ่งตัวนำซึ่งถูกฉีดข้ามบริเวณรอยต่อ และจากการเกิดคู่พาหะอิเล็กตรอน – โฮล ที่บริเวณที่มีสนามไฟฟ้าปรากฏอยู่ ซึ่งในที่นี้ได้แก่บริเวณของชั้นอินทรินซิคซิลิคอน เมื่อความหนาหรือความกว้างของชั้นอินทรินซิคลดลง จึงทำให้กระแสมืดมีค่าลดลงด้วย



รูปที่ 5.30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสมืด-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด ที่ความลึกในการสกัดชั้นอินทรินซิกซิลิคอนค่าต่างๆ

5.6.2 ผลของความหนาชั้นอินทรินซิก-ซิลิคอน ที่มีต่อความหนาแน่นความจุไฟฟ้า

เมื่อศึกษาความหนาแน่นความจุไฟฟ้าของโฟโตไดโอด ที่มีความหนาชั้นซิลิคอนชนิดอินทรินซิกค่าต่างๆ พบว่าค่าความจุไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อชั้นอินทรินซิกถูกสกัดให้บางลง ดังรูปที่ 5.31 เนื่องจากความจุไฟฟ้าส่วนใหญ่เกิดมาจากความจุไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อ ดังนั้นความกว้างของชั้นอินทรินซิกจึงมีผลน้อยมาก สำหรับศักย์ภายใน, แรงดันพังทลาย และกระแสแสง ของโฟโตไดโอดก็จะมีค่าที่แตกต่างๆกันเพียงเล็กน้อยเช่นเดียวกัน



รูปที่ 5.31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด ที่ความลึกในการสกัดชั้นอินทรินซิกซิลิคอนค่าต่างๆ

5.7 ผลของลวดลายของขั้วโลหะด้านรับแสงที่มีต่อคุณสมบัติของโฟโตไดโอด

ในหัวข้อการทดลองสุดท้ายนี้เป็นการศึกษาผลของรูปร่างลักษณะลวดลายของขั้วโลหะด้านรับแสง(ด้านฟิล์มเพชรชนิดพี) ที่มีต่อกระแสแสงของโฟโตไดโอดชนิดนี้ ซึ่งในการทดลองได้ออกแบบให้ขั้วโลหะกระจายอยู่บนด้านรับแสงของโฟโตไดโอดและมีรูปร่างต่างๆกัน 5 แบบ (ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.6) ซึ่งปกติการสร้างขั้วโลหะให้กระจายอยู่โดยทั่วไปบนด้านรับแสงของโฟโตไดโอดจะทำให้สามารถลดการสูญเสียคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮลที่บริเวณผิวได้ และจะมีผลทำให้ได้กระแสแสงเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ดี การที่โฟโตไดโอดที่มีพื้นที่ของขั้วโลหะด้านรับแสงเพิ่มขึ้น จะทำให้มีพื้นที่รับแสงลดลงจากเดิม ในกรณีนี้จะมีผลทำให้ได้กระแสแสงลดลง เพราะขนาดของกระแสแสงจะแปรโดยตรงกับพื้นที่รับแสงของโฟโตไดโอด จากการทดลองพบว่าโฟโตไดโอดที่มีพื้นที่ของลวดลายโลหะมากขึ้น จะให้ได้กระแสแสงน้อยลงกว่าเดิม ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวนี้ แสดงให้เห็นว่าขนาดของพื้นที่รับแสงมีผลต่อกระแสแสงมากกว่าผลของการรวมตัวของพาหะที่บริเวณผิว นอกจากนี้ยังพบว่าการลดลงของกระแสแสงไม่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับการลดลงของพื้นที่รับแสง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความหนาและลักษณะพื้นผิวของชั้นฟิล์มเพชรมีความไม่สม่ำเสมอกันโดยสมบูรณ์ ซึ่งทำให้ยากต่อการควบคุมขนาดของกระแสแสงด้วยพื้นที่รับแสงเช่นโฟโตไดโอดโดยทั่วๆไป

บทที่ 6
สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

เพชร ที่เกิดตามธรรมชาติ เป็นอัญมณีที่มีราคาสูงและนิยมนำมาทำเป็นเครื่องประดับ มีเพียงส่วนน้อยที่นำมาใช้ประโยชน์ด้านอื่นๆ แต่โดยที่จริงแล้วพบว่าเพชรเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติที่เด่นสุดมากมายหลายประการเหนือกว่าวัสดุใดๆ ซึ่งสามารถนำไปใช้งานได้อย่างกว้างขวาง ในช่วงเวลาที่ผ่านมามีนักวิทยาศาสตร์จำนวนมากสนใจและพยายามสังเคราะห์เพชรขึ้นมา กระทั่งปัจจุบันการสังเคราะห์ฟิล์มบางเพชรสามารถทำได้หลายวิธี ฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้มีคุณสมบัติเป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำ ถูกนำไปใช้ในงานต่างๆ รวมทั้งงานด้านอิเล็กทรอนิกส์

วิทยานิพนธ์นี้แสดงให้เห็นถึงการทดลองสังเคราะห์ฟิล์มเพชร ด้วยวิธีการที่ง่ายและประหยัด ทั้งยังได้ทดลองนำฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้มาประยุกต์ใช้งานในด้านอิเล็กทรอนิกส์ทางแสง ด้วยการนำมาสร้างเป็นโฟโตไดโอดโครงสร้างใหม่แบบ p-diamond/i-Si/n^+-Si โดยใช้เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์พื้นฐาน โฟโตไดโอดที่สร้างได้มีลักษณะคล้ายกับโฟโตไดโอดชนิด p-i-n ดังนั้นจึงสามารถเป็นตัวตรวจวัดแสงที่มีความไวต่อแสงสูง, มีแรงดันพังทลายสูง, ทนทานและมีค่าความจุไฟฟ้าต่ำ นอกจากนี้ในวิทยานิพนธ์ยังได้แสดงผลการวัดและทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของไดโอด และผลการศึกษาอื่นๆที่เกี่ยวข้องกับโฟโตไดโอดชนิดนี้ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้คือ

ฟิล์มเพชรพื้นที่ขนาด 15-20 mm^2ถูกสังเคราะห์ขึ้นด้วยวิธี ซีวีดีแบบขดลวดร้อน (HFCVD) ในความดัน บรรยากาศ ที่อุณหภูมิ 700 ^oC โดยใช้เอทิลแอลกอฮอลล์เป็นแหล่งกำเนิดอะตอมคาร์บอน ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีที่ง่ายและประหยัด สำหรับการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดพีก็สามารถทำได้เช่นเดียวกัน แต่มีการเติม B_2O_3 ลงไปในเอทิลแอลกอฮอลล์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ อัตราการเกิดของฟิล์มเพชรประมาณ 5 μm/hr. ผลการวิเคราะห์พบว่าฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะเป็นแบบโพลีคริสตอลไลน์ โดยมีขนาดอยู่ในระดับไมโครเมตร และมีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก นอกจากนี้ยังมีอัญรูปของกราไฟต์ปะปนอยู่ในอัญรูปของเพชรเล็กน้อย ฟิล์มเพชรมีคุณสมบัติการสะท้อนแสงที่ต่ำโดยมีค่า Reflectanceอยู่ในช่วง 5-20% เมื่อเทียบกับฟิล์มอะลูมิเนียมที่มีผิวมันเป็นเงา

ผลการทดลองและศึกษาคุณสมบัติของรอยสัมผัสระหว่างฟิล์มเพชรชนิดพีกับโลหะชนิดต่างๆเช่นกาวเงิน, อะลูมิเนียม และทองคำ พบว่ารอยสัมผัสระหว่างโลหะทั้งสามชนิดกับฟิล์มเพชรชนิดพี(B:C = 75, 250, 500 และ 1,000 pmm.) มีคุณสมบัติเป็นรอยสัมผัสโอห์มมิก แต่ทองคำสามารถเป็นรอยสัมผัสโอห์มมิคที่ดีกว่า

ในส่วนที่สามเป็นการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของโฟโตไดโอดโครงสร้าง p-diamond/i-Si/n^+-Si พบว่า โฟโตไดโอดโครงสร้างดังกล่าวที่มีอัตราส่วนระหว่าง B:C อยู่ในช่วง 75-1,000

ppm. จะมีค่าศักย์ภายในประมาณ 0.6-1.5 โวลต์ กระแสมืดประมาณ 2.3 $\mu A/mm^2$ และจะมีค่าแปรผันตามกับอุณหภูมิขณะใช้งาน ค่าความต้านทานอนุกรมและขนานประมาณ 3.1 $k\Omega$,1.83 $M\Omega$ ตามลำดับ ค่าความจุไฟฟ้ามีค่าอยู่ในช่วง 1.5-27.5 pF/mm^2 และเมื่อทดลองโดยใช้แสงฮาโลเจนที่มีความเข้มแสง 650-9,500 lux ที่แรงดัน 0-10 โวลต์ โฟโตไดโอดจะให้กระแสแสงประมาณ 2-28 $\mu A/mm^2$ และมีความเป็นเชิงเส้นที่ดี

การตอบสนองทางแสงของโฟโตไดโอด(Photo response)ชนิดนี้ พบว่าการตอบสนองมีลักษณะเป็นแบบ Low pass โฟโตไดโอดที่มีขนาด 17.5 mm^2 สามารถให้ค่าความถี่คัทออฟได้ถึง 350 kHz ค่าความถี่คัทออฟนี้จะมีค่าแปรผกผันกับค่าความต้านทานโหลดและแปรผันตามกับแรงดันไบอัส นอกจากนั้นยังพบว่าโฟโตไดโอดชนิดนี้สามารถใช้ในการสื่อสารด้วยแสงได้อีกด้วย

ในการทดลองเพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นอะตอมสารเจือในฟิล์มเพชร พบว่าไดโอดต่างก็ให้กระแสแสงที่ใกล้เคียงกัน โดยมีความแตกต่างน้อยมากเพียง 1-2 $\mu A/mm^2$ นอกจากนี้ยังพบว่าโฟโตไดโอดที่มีความหนาของชั้นฟิล์มเพชรซึ่งบางกว่า จะสามารถให้กระแสแสงได้สูงกว่า เช่นความหนาของฟิล์มเพชร 5 μm ให้กระแสแสงสูงสุด 25.4 $\mu A/mm^2$(9,500 lux) ที่แรงดัน -7 โวลต์ และเมื่อฟิล์มเพชรมีความหนา 20 μm จะให้กระแสแสงต่ำสุดประมาณ 2 $\mu A/mm^2$(9,500 lux) อย่างไรก็ดี ความหนาของฟิล์มเพชรไม่ส่งผลต่อค่าความจุไฟฟ้าแต่อย่างใด

กรณีของความหนาชั้นอินทรินซิคซิลิคอน พบว่ากระแสมืดจะมีค่าลดลง เมื่อชั้นซิลิคอนชนิดอินทรินซิคมีความหนาลดลง แต่ความหนาของชั้นอินทรินซิคจะไม่ทำให้ค่าความจุมีเปลี่ยนแปลง

และในส่วนสุดท้ายเป็นพบว่าการสร้างลวดลายโลหะที่มีพื้นที่มากบนด้านรับแสงของโฟโตไดโอด จะทำให้พื้นที่รับแสงของไดโอดลดลง ส่งผลให้กระแสแสงมีค่าลดลง แสดงว่าลวดลายโลหะที่มีพื้นที่มาก ที่สร้างบนด้านรับแสงของไดโอด มีผลต่อการลดการสูญเสียพาหะเนื่องจากการรวมตัวของพาหะ(carrier recombination)ที่ผิวได้น้อยมาก ทั้งนี้อาจเนื่องจากเพชรมีคุณสมบัติเป็นวัสดุที่มีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนต่ำ ดังนั้นการเกิดคู่พาหะ อิเล็กตรอน-โฮล ที่ผิวจึงมีน้อยมาก ปัญหาการสูญเสียเนื่องจากการรวมตัวของพาหะที่บริเวณผิวจึงมีน้อยมาก ดังนั้นการเพิ่มลวดลายโลหะจึงไม่ได้มีส่วนช่วยเพิ่มกระแสแต่อย่างใด ซึ่งตรงข้ามกับโฟโตไดโอดชนิดอื่นๆ ที่ชั้นรับแสงเป็นสารกึ่งตัวนำซิลิคอน

ในการทดลองนี้ เนื่องจากมีข้อจำกัดหลายประการ เช่นความละเอียดของอุปกรณ์และความแม่นยำของเครื่องมือที่ใช้ เป็นต้น จนมีผลทำให้บางการทดลองได้ข้อมูลไม่เพียงพอเท่าที่ควร อย่างไรก็ดี ข้อมูลต่างๆที่ได้เหล่านี้ จะเป็นประโยชน์ และสามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาโฟโตไดโอดโครงสร้าง p-diamond / i- Si / n^+ Si นี้ต่อไปได้ รวมทั้งการพัฒนาตัวตรวจวัดแสงที่สร้างจากฟิล์มเพชร หรือแม้กระทั่ง การประยุกต์ใช้ฟิล์มเพชรในงานอิเล็กทรอนิกส์ทั่วๆไป

ยิ่งไปกว่านั้น การทดลองนี้ยังเป็นตัวอย่างที่สำคัญของการประยุกต์ใช้งานฟิล์มเพชรร่วมกับสารกึ่งตัวนำซิลิคอนเพื่อสร้างให้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยเฉพาะอุปกรณ์ทางแสง เช่น ตัวตรวจวัดแสง เป็นต้น ซึ่งจะทำให้สามารถใช้เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ของซิลิคอน(Silicon base microelectronic technology)ที่เป็นเทคโนโลยีมาตรฐานสำหรับการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำทั่วไปได้เป็นอย่างดี และยังอาจพัฒนาต่อไปให้อยู่ในรูปของวงจรรวมแสง (Photonic Integrated Circuits :Photonic IC)ได้อีกด้วย

เอกสารอ้างอิง

[1] R. F. Davis, **Diamond films and coatings Development, properties, and application,** Noyes publication., 1993

[2] Huimin Lui David S. Dandy, **Diamond chemical vapor deposition,** Noyes publication. , 1995

[3] Lawrence S.Pan Don R. Kania, **Diamond electronic properties and applications,** Kluwer Academic publishers., 1995

[4] สมเกียรติ ศุภเดช คงศักดิ์ อิ่มอุไร จิรวัฒน์ ปราบเขต สุรศักดิ์ เนียมเจริญ , "กระบวนการสร้างและคุณสมบัติของโฟโตไดโอดชนิด p-i-n", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28, หน้า 1097-1100., 2548

[5] จักรพงศ์ ศุภเดช วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง อัมพร โพธิ์ใย, "ผลของความหนาชั้นฟิล์มเพชรและอินทรินซิคที่มีผลต่อโฟโตไดโอดโครงสร้าง p-Diamond / i-Si / n^{+}-Si", วิศวสาร-ลาดกระบัง, ปีที่ 23, ฉบับที่ 2, มิถุนายน 2549

[6] http://www.gfz-potsdam.de/pb4/pg2/equipment/raman/raman.html

[7] http://www.google.co.th/search?hl=th&lr=&defl=en&q=define:EDX&sa=X&oi=glossary_definition&ct=title

[8] S. Salvatori, R. Vincenzoni, M.C. Rossi, F. Galluzzi, F.Pinzari, G. Mattei, E. Cappelli, P.Ascarelli, "Electrical and photoelectrical characterization of diamond-on-silicon structure", applied surface science, Vol.102, 1996, pp. 125-129

[9] Ken Okano, Hideo Kiyota, Tatsuya Iwasaki, Tateki Kurosu, Masamori Iida and Terutaro Nakamura, "p-n junction diode made of semiconducting diamond films", Appl. Phys. Lett., Vol.58, No.8, 1991, pp. 840-841

[10] S. Salvatori, R. Vincenzoni, M.C. Rossi, F. Galluzzi, F.Pinzari, G. Mattei, E. Cappelli, P.Ascarelli, "Metal-semiconductor-metal photodiodes based on CVD diamond films", Diamond and Related Materials, Vol.5, 1996, pp. 775-778

[11] จักรพงศ์ ศุภเดช วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง อัมพร โพธิ์ใย, "การประยุกต์ใช้ฟิล์มเพชรเป็นตัวตรวจจับแสง MSM โครงสร้าง Al / n-Diamond / Al", ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 28, เล่ม 2, หน้า 1093-1096

[12] S. Salvatori, A. Della Scala, M.C. Rossi, G. conte, "Optimised contact-structures for Metal-semiconductor-metal UV-detectors", Diamond and Related Materials, Vol.11, 2002, pp. 458-462

[13] L. Thaiyothin, E. Ratanaudompisut, T. Phetchakul, S. Cheirsirikul, S.Supadech "UV-photodetector from Schottky diode diamond film", Diamond and Related Materials, Vol.11, 2002, pp. 442-445

[14] E. Pace, F. Galluzzi, M.C. Rossi, S. Salvatori, M. Marinelli, P. Paroli, "Electro-optical properties of diamond thin films as UV photodiode", Nuclear Instruments and Methods in physics Research, Vol.387, 1997, pp. 255-258

[15] จักรพงศ์ ศุภเดช วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง สุรศักดิ์ เนียมเจริญ อัมพร โพธิ์ใย, "ตัวตรวจจับแสงแบบ Planar MSM โครงสร้าง Al/V-Si (Au Doped)/Al ", ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 27, เล่ม 2, หน้า 221-224

[16] http://sales.hamamatsu.com/assets/html/ssd/si-photodiode/

[17] http://www.iupac.org/goldbook/R05347.pdf

[18] http://www.atis.org/tg2k/_responsivity.html

[19] http://en.wikipedia.org/wiki/Responsivity

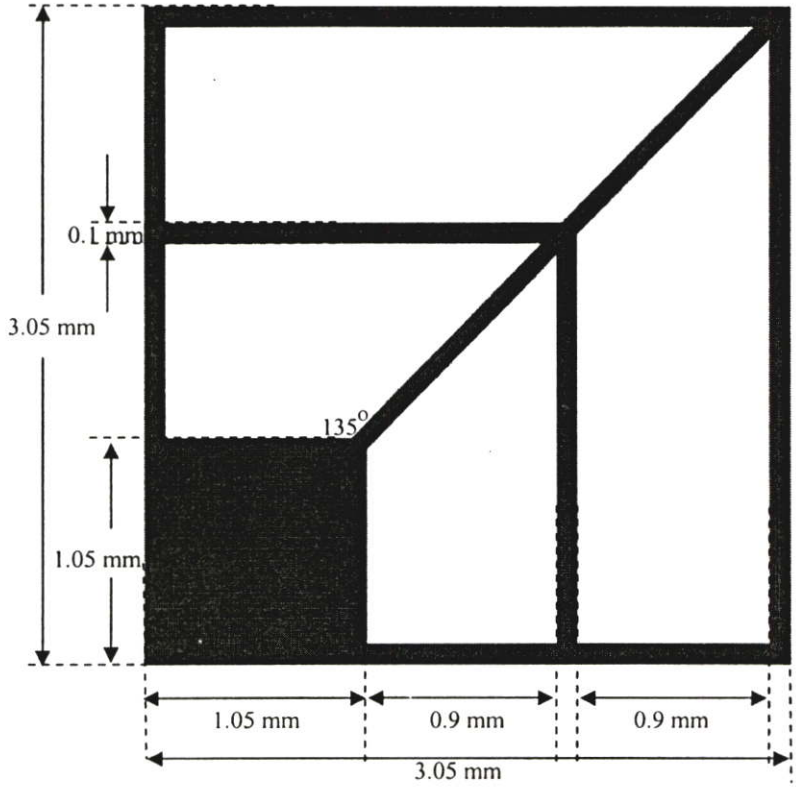
[20] http://en.wikipedia.org/wiki/Bandwidth

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

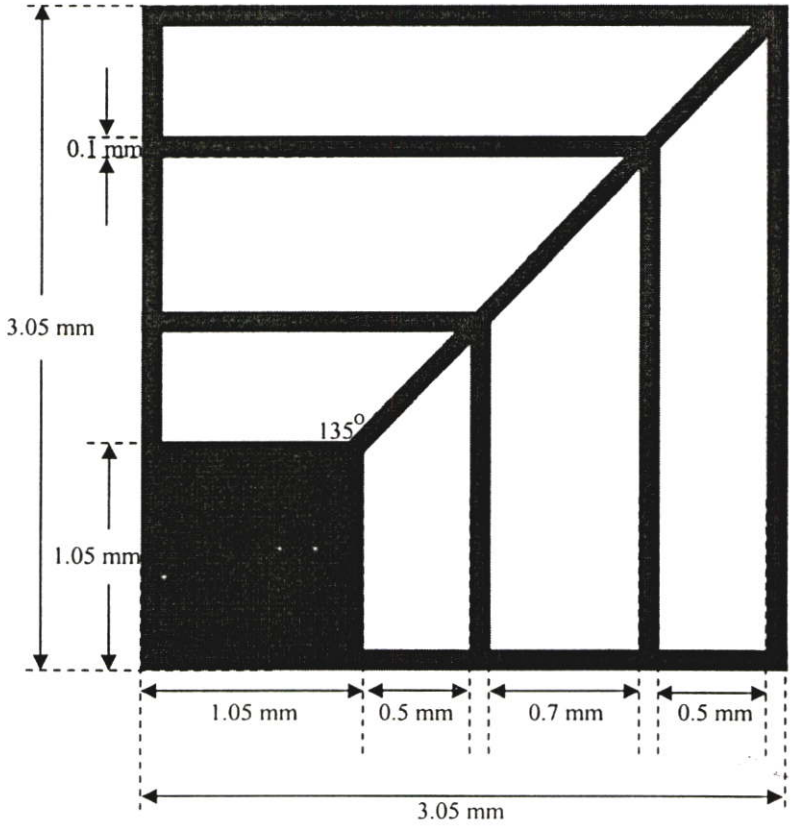
รายละเอียดของลวดลายของขั้วโลหะด้านรับแสง

ลวดลายของขั้วโลหะด้านรับแสง แบบที่ 1



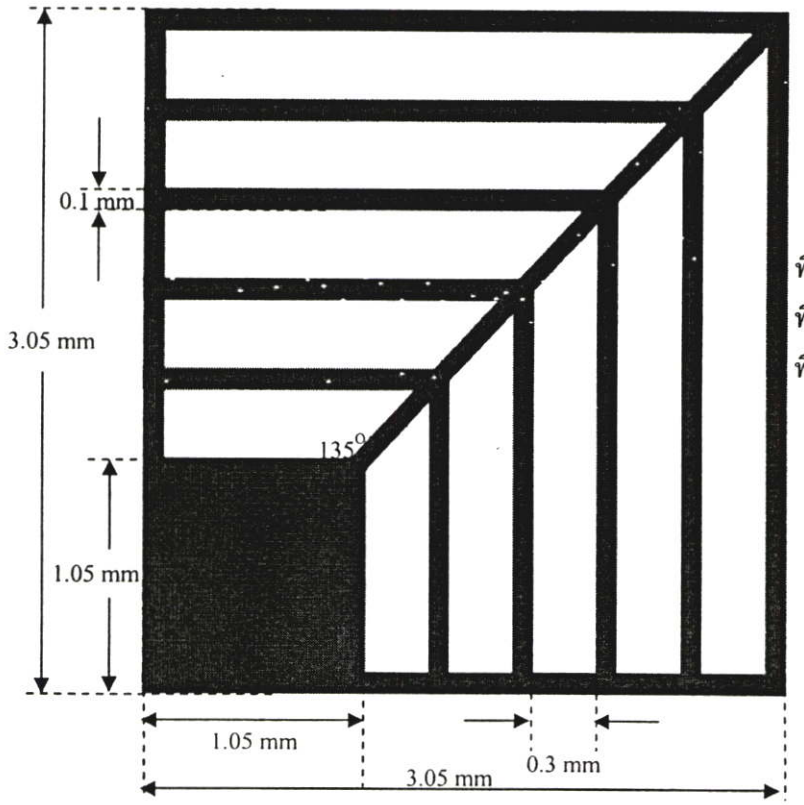
พื้นที่ทั้งหมด= 9.30mm^2
พื้นที่ขั้วโลหะ= 2.65mm^2
พื้นที่รับแสง= 6.65mm^2

ลวดลายของขั้วโลหะด้านรับแสง แบบที่ 2



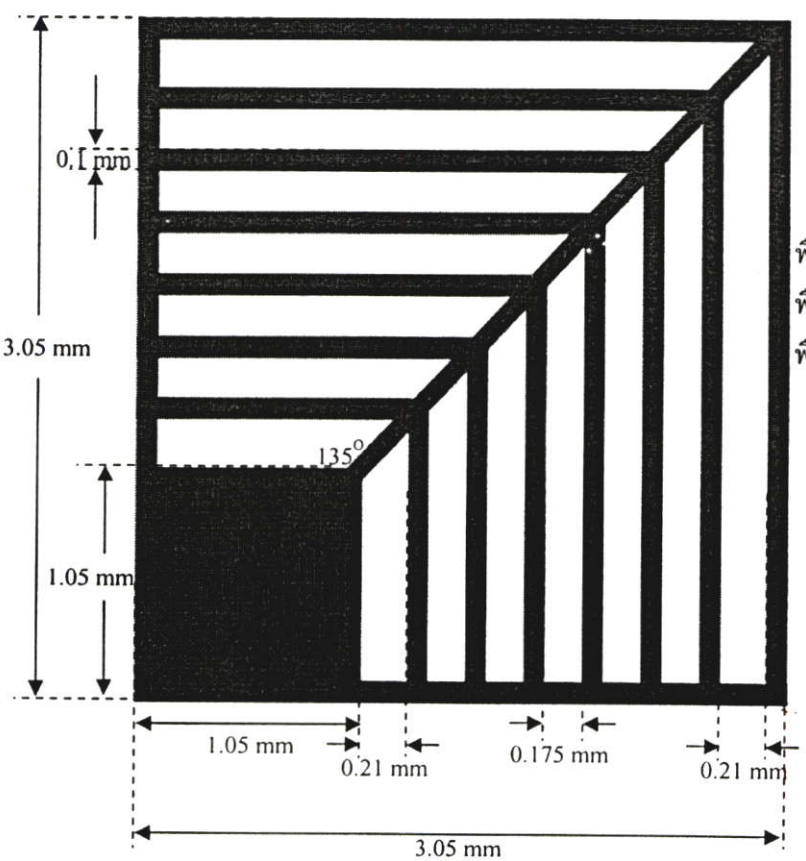
พื้นที่ทั้งหมด= 9.30mm^2
พื้นที่ขั้วโลหะ= 3.08mm^2
พื้นที่รับแสง= 6.22 mm^2

ลวดลายของขั้วโลหะด้านรับแสง แบบที่ 3



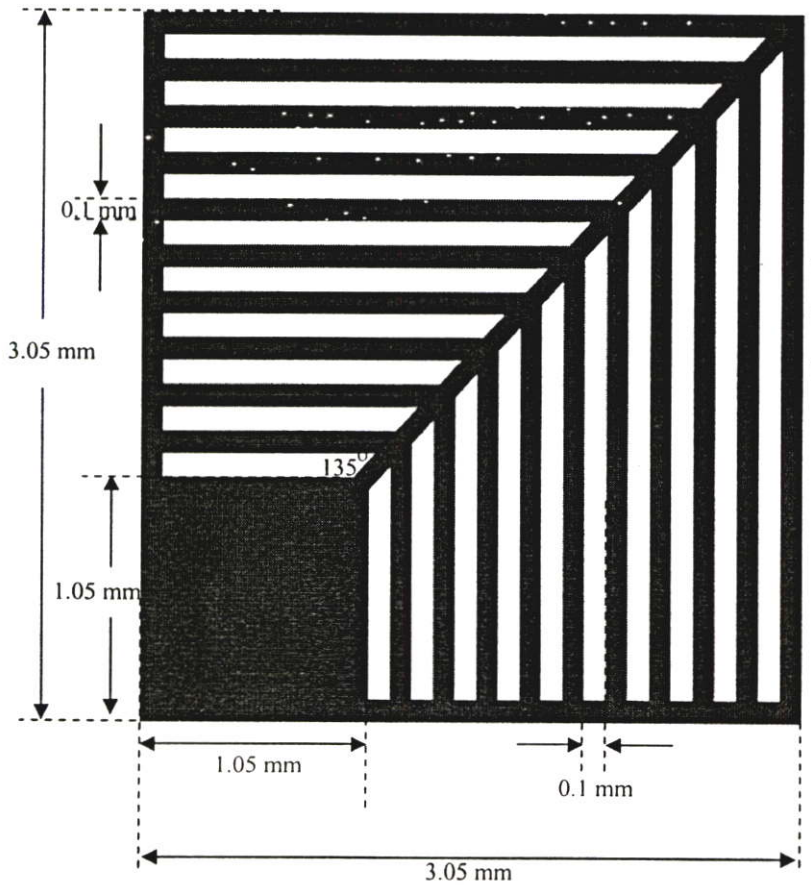
พื้นที่ทั้งหมด= 9.30mm^2
พื้นที่ขั้วโลหะ= 3.81mm^2
พื้นที่รับแสง= 5.49 mm^2

ลวดลายของขั้วโลหะด้านรับแสง แบบที่ 4



พื้นที่ทั้งหมด= 9.30mm^2
พื้นที่ขั้วโลหะ= 4.52mm^2
พื้นที่รับแสง= 4.78 mm^2

ลวดลายของขั้วโลหะด้านรับแสง แบบที่ 5



พื้นที่ทั้งหมด= 9.30mm^2

พื้นที่ขั้วโลหะ= 5.64 mm^2

พื้นที่รับแสง= 3.66 mm^2

ภาคผนวก ข.

การคำนวณหาอัตราส่วนระหว่างจำนวนอะตอมโบรอนต่อคาร์บอน

วิธีการคำนวณหาส่วนระหว่างจำนวนอะตอมโบรอนต่อคาร์บอน(B:C) ที่ใช้ในการทดลอง

ตัวอย่าง ในกรณีที่ต้องการเตรียมสารละลายซึ่งประกอบด้วย เอททิลแอลกอฮอลล์ (C_2H_5OH) ปริมาตร 50 cm^{-3}และโบรอนไตร์ออกไซด์ เพื่อจะนำไปใช้เป็นแหล่งกำเนิดอะตอมคาร์บอนสำหรับการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดพี โดยมีอัตราส่วนระหว่างจำนวนอะตอมโบรอนต่อคาร์บอน B:C 1 ppm. จะต้องใช้โบรอนไตร์ออกไซด์ หนักเท่าใด?

ขั้นที่ 1 หาน้ำหนักของ C_2H_5OH โดย

C_2H_5OH 1 cm^{-3} หนัก 0.796 g

$\therefore$ C_2H_5OH 50 cm^{-3} หนัก $0.796\times50 = 39.8$ g

ขั้นที่ 2 หาน้ำหนักของคาร์บอนใน C_2H_5OH 50 cm^{-3}

C_2H_5OH 1 โมเลกุลมี $2(12.01115)+6(1.00797)+1(15.9994) = 46.0695$ g/mol

และ C_2H_5OH 1 mol มีคาร์บอน $= 2(12.01115)$

$= 24.023$ g

และ C_2H_5OH 50 cm^{-3} $= \dfrac{39.8}{46.0695}$

$= 0.8639$ g

$\therefore$ C_2H_5OH 0.8639 mol จะมีคาร์บอน $= 0.8639\times24.023$

$= 20.7535$ g

ขั้นที่ 3 หาน้ำหนักของโบรอนใน B_2O_3 1 mol

B_2O_3 1 โมเลกุลมี $2(10.8115)+3(15.9994) = 69.6202$ g/mol

และ B_2O_3 1 mol มีโบรอน $= 2(10.8115)$

$= 21.622$ g

ขั้นที่ 4 หาน้ำหนักของโบรอนในที่ต้องใช้ใน C_2H_5OH 50 cm^{-3} เพื่อให้ได้ B:C 1 ppm.

โดย B:C 1 ppm. $= \dfrac{1}{10^6}$

หมายถึง คาร์บอน 10^6 g จะต้องมีโบรอน 1 g

ดังนั้นถ้าคาร์บอน 20.7535 g จะมีโบรอน 2.07535×10^{-5} g

จากขั้นที่1 โบรอน 21.622 g จะอยู่ใน B_2O_3 1 mol

$\therefore$ โบรอน 2.07535×10^{-5} g จะอยู่ใน B_2O_3 9.5983×10^{-7} mol

ดังนั้น จะต้องใช้ B_2O_3 น้ำหนัก $9.5983\times10^{-7}\times69.6202 = 6.6824\times10^{-5}$ g

จากตัวอย่างการคำนวณเพื่อกำหนดอัตราส่วนระหว่างจำนวนอะตอมของโบรอนต่อคาร์บอนที่กล่าวมาสามารถ นำไปใช้ในการทดลอง เพื่อสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดพี ซึ่งมีความเข้มข้นของอะตอมสารเจือค่าต่างๆได้ และสรุปได้ดังนี้

ในกรณี ที่ใช้เอททิลแอลกอฮอลล์ (C_2H_5OH)ปริมาตร 50 cm^{-3}

B:C 1,000 ppm. ต้องใช้ B_2O_3 น้ำหนัก 6.6824×10^{-2} g

B:C 500 ppm. ต้องใช้ B_2O_3 น้ำหนัก 3.3412×10^{-2} g

B:C 250 ppm. ต้องใช้ B_2O_3 น้ำหนัก 1.6706×10^{-2} g

B:C 125 ppm. ต้องใช้ B_2O_3 น้ำหนัก 0.8353×10^{-2} g

B:C 75 ppm. ต้องใช้ B_2O_3 น้ำหนัก 0.4176×10^{-2} g

ภาคผนวก ค.

รายละเอียดของสารเคมี

Acetone

ชื่อเคมี IUPAC : 2-Propanone

ชื่อเคมีทั่วไป : Acetone ; Dimethyl ketone

ชื่ออื่นๆ : Methyl ketone; Ketone propane; Dimethyl formaldehyde; Beta-ketopropane; Pyroacetic ether; Propanone;Dimethylketal; Pyroacetic acid; Chevron acetone

สูตรโมเลกุล :C_3H_6O **สถานะ** : ของเหลว **สี** : ใสไม่มีสี **กลิ่น** : คล้ายมินท์ **นน.โมเลกุล** : 58.08

จุดเดือด(°ซ.) : 56.5 **จุดหลอมเหลว/จุดเยือกแข็ง(°ซ.)** : -95 **ความถ่วงจำเพาะ(น้ำ=1)** : 0.79

ความหนืด(mPa.sec) : 0.32 **ความดันไอ(มม.ปรอท)** : 400 ที่ 39.5 °ซ.

ความสามารถในการละลายน้ำที่(กรัม/100 มล.) : ละลายน้ำได้ ที่ 20 °ซ

การใช้ประโยชน์ (Uses)

- ใช้ในการทำเครื่องสำอางค์ เป็นตัวทำละลาย ใช้ในการชะล้าง เป็นสารไล่น้ำ

อันตรายต่อสุขภาพอนามัย (Health Effect)

สัมผัสทางหายใจ : การหายใจเอาไอระเหยของสารเข้าไปจะก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจ ทำให้เกิดอาการไอ เวียนศีรษะ หดหู่ และปวดศีรษะ ถ้าได้รับปริมาณมาก ๆ มีผลกระทบต่อระบบประสาทส่วนกลาง

สัมผัสทางผิวหนัง : การสัมผัสถูกผิวหนัง : จะก่อให้เกิดการทำลายชั้นไขมันของผิวหนัง ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดผื่นแดง ผิวหนังแห้งและแตก ก่อให้เกิดอาการปวดแสบปวดร้อนได้

กินหรือกลืนเข้าไป : การกลืนหรือกินเข้าไปในปริมาณน้อยจะไม่ก่อให้เกิดอันตราย แต่หากกินหรือกลืนเข้าไปในปริมาณมากจะทำให้เกิดอาการปวดท้อง คลื่นไส้ และอาเจียน

สัมผัสถูกตา : การสัมผัสถูกตา ไอระเหยของสารจะก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อตา ทำให้ ปวดตา น้ำตาไหล ตาแดงและปวดตาได้

สัมผัสเรื้อรัง : ก่อให้เกิดการระคายเคืองอย่างรุนแรงหรืออาจทำให้เกิดการอักเสบของผิวหนังได้ สารนี้มีผลทำลายปอด ทรวงอก ไต ท่อไต กระเพาะปัสสาวะ

ความคงตัวและการเกิดปฏิกิริยา (Stability and Reaction)

- ความคงตัวทางเคมี สารนี้เสถียรภายใต้สภาวะปกติของการใช้และการเก็บ
- สารที่เข้ากันไม่ได้ : ส่วนผสมระหว่างกรดไนตริกเข้มข้นและกรดซัลฟูริก, สารออกซิไดซ์, คลอโรฟอร์ม, แอลคาไล, สารประกอบคลอรีน, กรด, โพแทสเซียมทีบิวทอกไซด์ (potassium t-butoxide)
- สภาวะที่ควรหลีกเลี่ยง ความร้อน เปลวไฟ แหล่งจุดติดไฟและสารที่เข้ากันไม่ได้
- สารเคมีอันตรายที่เกิดจากการสลายตัว คาร์บอนไดออกไซด์ และคาร์บอนมอนนอกไซด์ จะเกิดขึ้นเมื่อถูกความร้อนทำให้สลายตัว
- อันตรายจากการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ : จะไม่เกิดขึ้น

การเกิดอัคคีภัยและการระเบิด (Fire and Explosion)

จุดวาบไฟ(0ซ.) : -20 จุดลุกติดไฟได้เอง(0ซ.) : 465

- การระเบิด จะเกิดขึ้นได้เมื่อสัมผัสกับความร้อนที่อุณหภูมิมากกว่าจุดวาบไฟ
- ส่วนผสมไอระเหยกับอากาศจะระเบิดได้ภายในขีดจำกัดความไวไฟ
- ไอระเหยสามารถแพร่กระจายไปสู่แหล่งจุดติดไฟและเกิดไฟย้อนกลับมาได้
- การสัมผัส กับสารออกซิไดซ์อาจเป็นสาเหตุทำให้เกิดเพลิงไหม้
- ภาชนะบรรจุที่ปิดผนึกสนิทอาจเกิดระเบิดได้เมื่อได้รับความร้อน
- สารเคมีอันตรายที่เกิดจากการสลายตัวคาร์บอนไดออกไซด์ และคาร์บอนมอนนอกไซด์ จะเกิดขึ้นเมื่อถูกความร้อนทำให้สลายตัว
- สารนี้ว่องไวต่อประจุไฟฟ้าสถิตย์
- สารดับเพลิงในกรณีเกิดเพลิงไหม้ ให้ใช้ผงเคมีแห้ง แอลกอฮอล์โฟม หรือคาร์บอนไดออกไซด์
- น้ำจะใช้ไม่ได้ผลในการดับเพลิง
- ให้ใช้การฉีดน้ำเป็นฝอยเพื่อหล่อเย็นภาชนะบรรจุที่ถูกเพลิงไหม้ , เจือจางส่วนที่หกรั่วไหลให้เป็นส่วนผสมที่ไม่ไวไฟ และเพื่อ

ป้องกันการสัมผัสกับสารและพยายามป้องกันบุคคลที่จะเข้าไปหยุดการรั่วไหลและการแพร่กระจายของไอระเหย

- ในเหตุการณ์เกิดเพลิงไหม้ ให้สวมใส่ชุดป้องกันสารเคมีและอุปกรณ์ช่วยหายใจชนิดมีถังอากาศในตัว(SCBA) พร้อมกับหน้ากากแบบเต็มหน้า

การเก็บรักษา/สถานที่เก็บ/เคลื่อนย้าย/ขนส่ง (Storage and Handling)

- เก็บในภาชนะบรรจุที่ปิดมิดชิด ในบริเวณที่เย็น แห้ง และบริเวณที่มีการระบายอากาศเพียงพอ
- เก็บให้ห่างจาก : ความร้อน เปลวไฟ แหล่งจุดติดไฟ และสารที่เข้ากันไม่ได้
- ห้ามสูบบุหรี่ในบริเวณที่มีการใช้และเก็บสาร - ทำการเคลื่อนย้ายในที่โล่ง
- หลีกเลี่ยงการหายใจ การกลืนกิน การสัมผัสกับผิวหนัง และเสื้อผ้า
- ให้ล้างทำความสะอาดร่างกาย ให้ทั่วถึงภายหลังทำการเคลื่อนย้าย

การกำจัดกรณีรั่วไหล (Leak and Spill)

- วิธีการปฏิบัติเมื่อเกิดอุบัติเหตุรั่วไหล : ให้ระบายอากาศพื้นที่ที่หกรั่วไหล
- ให้เคลื่อนย้ายแหล่งจุดติดไฟทั้งหมดออกไป -ให้สวมใส่อุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคลที่เหมาะสม - กั้นแยกบริเวณที่หกรั่วไหลเป็นพื้นที่อันตราย - ป้องกันบุคคลที่ไม่เกี่ยวข้องออกไป – เก็บและเอาของเหลวคืนกลับมาใช้ใหม่เมื่อเป็นไปได้ – ใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ไม่ก่อให้เกิดประกายไฟ
- เก็บรวบรวมของเหลวในภาชนะบรรจุที่เหมาะสมหรือดูดซับด้วยวัตถุเฉื่อย เช่น แร่หินทราย (vermiculite) ทรายแห้ง ดิน (earth) และเก็บใส่ในภาชนะบรรจุกากของเสียจากเคมี

- อย่าใช้วัสดุติดไฟได้ เช่น ขี้เลื่อย ในการดูดซับสารที่หกรั่วไหล
- อย่าฉีดล้างลงท่อระบายน้ำ ถ้าสารที่หกรั่วไหลยังไม่ลุกติดไฟ
- ใช้น้ำฉีดเป็นฝอยเพื่อสลายกลุ่มไอระเหย เพื่อป้องกันบุคคลที่พยายามจะเข้าไปหยุดการรั่วไหล และฉีดล้างส่วนที่หกรั่วไหลออกจากการสัมผัส
- แนะนำให้ใช้วัสดุดูดซับตัวทำละลายกับการหกรั่วไหลของสารนี้
- การกำจัด ไม่ควรนำสารกลับมาใช้ใหม่ ควรนำไปกำจัดเช่นเดียวกับของเสียอันตราย
- กระบวนการใช้หรือการปนเปื้อนของสารนี้จะต้องเปลี่ยนแนวทางในการจัดการของเสียใหม่
- การจัดการกับภาชนะบรรจุและมิได้ใช้แล้วจะต้องดำเนินการให้สอดคล้องกับกฎหมาย ความต้องการของส่วนกลางและท้องถิ่น
- การพิจารณาการกำจัด : ปฏิบัติให้เป็นไปตามกฎระเบียบที่ทางราชการกำหนด

การปฐมพยาบาล (First Aid)

หายใจเข้าไป : ถ้าหายใจเข้าไป ให้เคลื่อนย้ายออกไปที่อากาศบริสุทธิ์ ถ้าผู้ป่วยหยุดหายใจ ให้ช่วยผายปอด ถ้าหายใจลำบาก ให้ออกซิเจน นำส่งไปพบแพทย์

กินหรือกลืนเข้าไป : การกลืนหรือกินเข้าไป อาจจะทำให้เกิดการอาเจียนขึ้น แต่อย่ากระตุ้นให้เกิดการอาเจียน หากมีอาการอาเจียนให้ผู้ป่วยเอียงศีรษะลงต่ำ เพื่อป้องกันการหายใจเอาสารที่เกิดจากการอาเจียนเข้าสู่ปอด ห้ามมิให้นำสิ่งใดเข้าปากผู้ป่วยที่หมดสติ นำส่งไปพบแพทย์

สัมผัสถูกผิวหนัง : ถ้าสัมผัสถูกผิวหนัง ให้ฉีดล้างผิวหนังทันทีด้วยน้ำปริมาณมากๆ อย่างน้อย 15 นาที พร้อมถอดเสื้อผ้าและรองเท้าที่เปรอะเปื้อนสารเคมีออก นำส่งไปพบแพทย์ ให้ทำความสะอาดเสื้อผ้าและรองเท่าก่อนนำมาใช้อีกครั้ง

สัมผัสถูกตา : ถ้าสัมผัสถูกตา ให้ฉีดล้างตาทันทีด้วยน้ำปริมาณมาก ๆ อย่างน้อย 15 นาที พร้อมกระพริบตาถี่ๆขณะทำการล้าง นำส่งไปพบแพทย์

Chromium trioxide

ชื่อเคมีทั่วไป : Chromium trioxide

ชื่อพ้องอื่นๆ :Chromium anhydride; Chromium (VI) Oxide; Chromic Anhydride; Chromic Trioxide; Monochromium Oxide;Chromium (VI) Oxide (1:3); Chromerge; Chromium (VI) trioxide; Chromium oxide; Monochromium trioxide;Chromium trioxide (CrO3); Chromium Oxide (Chromic Anhydride);

สูตรโมเลกุล :CrO_3 **สถานะ** : ของแข็ง **สี** : แดงเข้ม **กลิ่น** : ไม่มี **นน.โมเลกุล** : 99.99

จุดเดือด(°ซ.) : 250 **จุดหลอมเหลว/จุดเยือกแข็ง(°ซ.)** : 197 **ความถ่วงจำเพาะ(น้ำ=1)** : 2.7

ความดันไอ(มม.ปรอท) : ต่ำมาก **ความหนาแน่นไอ(อากาศ=1)** : 3.4

อุณหภูมิสลายตัว : > 230 องศาเซลเซียส **ความเป็นกรด-ด่าง(pH)** : <-1 ที่ 20 ^{0}ซ.

อันตรายต่อสุขภาพอนามัย (Health Effect)

สัมผัสทางหายใจ : การหายใจเข้าไปเนื่องจากสารนี้กัดกร่อนจะทำเกิดการทำลายเนื้อเยื่อของเยื่อเมือก และทางเดินหายใจส่วนบน ทำให้เกิดเป็นแผลพุพอง และเกิดรูพรุน ต่อผนังกั้นโพรงจมูก และทำให้เกิดอาการอักเสบต่อลำคอเกิดอาการไอ หายใจถี่รัว และหายใจลำบาก อาจทำให้เกิดอาการที่เกี่ยวกับปอด หรืออาการภูมิแพ้จากโรคหืด การสัมผัสกับสารในปริมาณมาก อาจทำให้เกิดอาการน้ำท่วมปอดได้

สัมผัสทางผิวหนัง : การสัมผัสถูกผิวหนัง เนื่องจากสารนี้มีฤทธิ์กัดกร่อนจะเกิดอาการผื่นแดง เจ็บปวด และแผลไหม้อย่างรุนแรง ฝุ่นและสารละลายเข้มข้นจะเป็นเหตุให้เกิดการระคายเคืองอย่างรุนแรง เมื่อสัมผัสกับผิวหนังที่แตกหรือเป็นแผลจะทำให้เกิดแผลพุพอง (Chrome sores) และการดูดซึมถ้าเข้าสู่ร่างกายเป็นสาเหตุทำให้เกิดความเป็นพิษ มีผลกระทบต่อการทำงานของไต และตับ จะเป็นเหตุให้ผิวหนังไวต่อสิ่งกระตุ้น

กินหรือกลืนเข้าไป : การกลืนหรือกินเข้าไปจะก่อให้เกิดเพลิงไหม้ บริเวณปาก, คอ, และกระเพาะอาหาร อาจทำให้เสียชีวิตได้ทำให้เกิดอาการเจ็บคอ, อาเจียน, ท้องร่วง, การอักเสบของลำไส้, เส้นเลือดหดตัว, วิงเวียนศรีษะ, กระหายน้ำ, เกิดตะคริว, หมดสติ, มีอาการโคม่า, การไหลเวียนเลือดผิดปกติ, ไข้, เกิดการทำลายตับ และไตวายเฉียบพลัน

สัมผัสถูกตา : การสัมผัสถูกตาเนื่องจากสารนี้มีฤทธิ์กัดกร่อน ทำให้ตาพล่ามัวมองไม่ชัด ตาแดง ปวดตา และเกิดแผลไหม้อย่างรุนแรง อาจก่อให้เกิดบาดเจ็บต่อกระจกตาหรือตาบอดได้

ความผิดปกติ,อื่น ๆ : การสัมผัสเรื้อรังการสัมผัสซ้ำ ๆ กันหรือเป็นเวลายาวนานจะทำให้เป็นแผลพุพอง และเกิดรูของผนังแบ่งกั้นโพรงจมูก ทำให้ระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจ ตับและไตถูกทำลาย เป็นแผลพุพองของผิวหนัง การเป็นแผลพุพองเริ่มแรกจะไม่มีอาการเจ็บปวด แต่จะทะลุเข้าไปถึงกระดูกทำให้เกิดรูพรุน (Chrome holes) *สารนี้เป็นสารมะเร็งต่อมนุษย์*

ความคงตัวและการเกิดปฏิกิริยา (Stability and Reaction)

- ความคงตัวของสารเคมี : สารนี้มีความเสถียรเมื่ออยู่สภาวะ การใช้งานและการเก็บปกติ
- สารที่เข้ากันไม่ได้ : สารที่สามารถติดไฟได้ สารอินทรีย์ หรือสารที่สามารถเกิดออกซิไดซ์ได้อย่างรวดเร็ว เช่น กระดาษ ไม้ ซัลเฟอร์อลูมิเนียม หรือพลาสติก, สารหนู แก๊ซแอมโมเนีย ไฮโรเจนซัลไฟล์ ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม โซเดียม และเซเลเนียม ทำให้เกิดความร้อน และเกิดการกัดกร่อนแก่โลหะ
- สภาวะที่ควรหลีกเลี่ยง : ควรหลีกเลี่ยงจากความร้อนที่สูงเกินและการเกิดการเผาไหม้หรือสารอินทรีย์
- สารเคมีอันตรายจากการสลายตัว : การเผาไหม้ อาจก่อให้เกิดโครเมียมออกไซด์
- อันตรายจากปฏิกิริยาโพลิเมอร์เซชั่น : ไม่มีอันตราย

การเกิดอัคคีภัยและการระเบิด (Fire and Explosion)

- การเกิดระเบิดเมื่อสัมผัสกับสารออกซิไดซ์จะก่อให้เกิดการเผาไหม้อย่างรุนแรง
- ภาชนะบรรจุสามารถเกิดการระเบิดขึ้นได้เมื่อเกิดการเผาไหม้
- สารนี้ไม่ติดไฟ แต่เป็นสารออกซิไดซ์อย่างแรงและสามารถเกิดปฏิบัติความร้อนกับสารรีดิวซ์หรือสารที่สามารถลุกติดไฟได้ทำให้เกิดการจุดติดไฟขึ้น
- จะจุดติดไฟเมื่อสัมผัสกับกรดอะเซติก และแอลกอฮอล์
- การเผาไหม้ทำให้เกิดก๊าซออกซิเจนขึ้นจากการสลายตัว
- สารดับเพลิงให้ใช้น้ำ อย่างไรก็ตามสารจากการสลายตัวจะทำให้เกิดฟองที่เหนียวและต้องระมัดระวังอันตรายที่อาจเกิดขึ้นได้จากการระเบิดของลำน้ำ
- ข้อมูลพิเศษในเหตุการณ์เกิดเพลิงไหม้ ควรสวมใส่ชุดป้องกันสารเคมีและอุปกรณ์ช่วยหายใจชนิดมีถังออกซิเจน (SCBA) ในตัวพร้อมกับหน้ากากแบบเต็มหน้า

การเก็บรักษา/สถานที่เก็บ/เคลื่อนย้าย/ขนส่ง (Storage and Handling)

- เก็บไว้ในภาชนะบรรจุปิดมิดชิด - ป้องกันความเสียหายทางกายภาพ
- เก็บในที่เย็น แห้ง และระบายอากาศได้ดี - ไม่ควรเก็บไว้บนพื้นที่ทำให้ด้วยไม้
- เก็บให้ห่างจากแหล่งที่มีความร้อน แหล่งที่มีประกายไฟ ความชื้น และสารที่เข้ากันไม่ได้
- ควรสวมใส่อุปกรณ์ที่ป้องกันอันตรายสำหรับงานบำรุงรักษาซึ่งจะต้องสัมผัสกับสารนี้ในปริมาณมากเกิน - ล้างมือ หน้า แขน และคอเมื่อออกจากสถานที่ควบคุมปฏิบัติงาน อาบน้ำ ควรเปลี่ยนเสื้อผ้า ชั้นนอกและทำความสะอาดเสื้อผ้าหลังเลิกงานทุกวัน
- หลีกเลี่ยงเสื้อผ้าที่มีการปนเปื้อนสารเคมี และล้างมือก่อนที่จะมีการรับประทานอาหาร
- ไม่ควรรับประทานอาหาร ดื่ม หรือสูบบุหรี่ในที่ที่มีการปฏิบัติงาน
- ภาชนะที่บรรจุสารเคมี ที่เป็นถังเปล่า แต่มีกากสารเคมีตกค้างอยู่ เช่น ฝุ่น ของแข็ง อาจก่อให้เกิดอันตรายได้ และให้ดูป้ายเตือน และอ่านข้อความระมัดระวังก่อนการใช้งาน

การกำจัดกรณีรั่วไหล (Leak and Spill)

- วิธีการปฏิบัติกรณีเกิดอุบัติเหตุรั่วไหล : ให้ระบายอากาศพื้นที่ที่หกรั่วไหล - ให้สวมอุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคลที่เหมาะสม - เก็บกวาดและบรรจุใส่ภาชนะสำหรับเก็บคืนหรือนำไปกำจัด - การดูดหรือการกวาดขณะชื้นสามารถใช้ได้เพื่อหลีกเลี่ยงการแพร่กระจายของฝุ่น
- การพิจารณาการกำจัด : ปฏิบัติให้เป็นไปตามกฎระเบียบที่ทางราชการกำหนด

ข้อแนะนำการเลือกใช้อุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคล(PPD/PPE)

- ควรเลือกใช้ถุงมือประเภท Polyvinyl chloride Vinyl แต่ควรหลีกเลี่ยงถุงมือประเภท Unsupported Neopnene Supperted Polyvinyl alcohol Natural Rubber และ Neoprene Natural Rubber

การปฐมพยาบาล (First Aid)

หายใจเข้าไป : - ถ้าหายใจเข้าไปให้เคลื่อนย้ายผู้ป่วยออกไปอยู่ในที่ที่มีอากาศบริสุทธิ์ ถ้าผู้ป่วยหยุดการหายใจ ให้ช่วยผายปอด ถ้าผู้ป่วยหายใจลำบาก ให้ออกซิเจนช่วย นำส่งไปพบแพทย์

กินหรือกลืนเข้าไป : ถ้ากินหรือการกลืนเข้าไป : อย่าทำให้ผู้ป่วยเกิดการอาเจียน ควรให้ดื่มน้ำปริมาณมาก ถ้าผู้ป่วยหมดสติห้ามไม่ให้นำสิ่งใดเข้าปากและให้อยู่ในความดูแลของแพทย์โดยทันที

สัมผัสถูกผิวหนัง : - ถ้าสัมผัสถูกผิวหนัง : ให้ฉีดล้างผิวหนังทันทีด้วยน้ำปริมาณมาก ๆ อย่างน้อย 15 นาที พร้อมถอดเสื้อผ้าและรองเท้าที่เปรอะเปื้อนสารเคมีออก และทำความสะอาดเสื้อผ้ารองเท้าก่อนนำมาใช้อีกครั้ง นำส่งไปพบแพทย์

สัมผัสถูกตา : - ถ้าสัมผัสถูกตาให้ล้างตาทันทีด้วยน้ำปริมาณมาก ๆ อย่างน้อย 15 นาที พร้อมกระพริบตาถี่ ๆ ขณะทำการล้าง นำส่งไปพบแพทย์

ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Environmental Impacts)

- สิ่งแวดล้อมถูกทำลายเสียหาย เมื่อสารเคมีรั่วไหลสู่ดิน - สารนี้จะถูกชะล้างลงสู่น้ำใต้ดิน เมื่อสารเคมีรั่วไหลสู่น้ำ - สารนี้ไม่สามารถคาดได้ว่าจะระเหยได้ เมื่อสารเคมีรั่วไหลสู่อากาศ
- สารเคมีจะเคลื่อนย้ายไปสู่ชั้นบรรยากาศ

Sulfuric acid

ชื่อเคมี IUPAC : Sulfuric acid

ชื่อเคมีทั่วไป : Sulfuric acid

ชื่อพ้องอื่นๆ :Oil of vitriol; BOU; Dipping Acid; Vitriol Brown Oil; Sulfuric; Acid Mist; Hydrogen sulfate; Sulfur acid; Sulfuricacid, spent;

สูตรโมเลกุล :H_2SO_4 **สถานะ** : ของเหลว **สี** : ไม่มีสี **กลิ่น** : ไม่มีกลิ่น **นน.โมเลกุล** : 98

จุดเดือด(°ซ.) : 276 **จุดหลอมเหลว/จุดเยือกแข็ง(°ซ.)** : -1 - (-30) **ความหนืด(mPa.sec)** : 26.9

ความถ่วงจำเพาะ(น้ำ=1) : 1.84 **ความดันไอ(มม.ปรอท)** : 0.001 ที่ 20 °ซ.

ความหนาแน่นไอ(อากาศ=1) : 3.4

ความสามารถในการละลายน้ำที่(กรัม/100 มล.) :ละลายน้ำได้ ที่ 20 °ซ.

การใช้ประโยชน์ (Uses)

ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เป็นสารละลายอิเล็กโตรไลต์ เป็นตัวชะล้างถ่านหิน เป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออน

อันตรายต่อสุขภาพอนามัย (Health Effect)

สัมผัสทางหายใจ : การหายใจเข้าไป สารนี้มีฤทธิ์กัดกร่อนและก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจ ทำให้มีอาการน้ำท่วมปอด เจ็บคอ ไอ หายใจติดขัด และหายใจถี่รัว การหายใจเอาสารที่ความเข้มข้นสูงอาจทำให้เสียชีวิตได้

สัมผัสทางผิวหนัง : การสัมผัสถูกผิวหนัง สารนี้มีฤทธิ์กัดกร่อน ทำให้เป็นแผลไหม้ และปวดแสบปวดร้อน

กินหรือกลืนเข้าไป : การกลืนหรือการกินเข้าไป ทำให้คลื่นไส้ อาเจียน แต่ไม่มีผลต่อเนื้อเยื่อ

สัมผัสถูกตา : การสัมผัสถูกตา สารนี้มีฤทธิ์กัดกร่อน ทำให้ตาแดง ปวดตา และสายตาพร่ามัว

ความผิดปกติ,อื่น ๆ : สารนี้มีผลทำลายฟัน ระบบหลอดเลือดเลี้ยงหัวใจ

ความคงตัวและการเกิดปฏิกิริยา (Stability and Reaction)

- สารที่เข้ากันไม่ได้ : เบสแก่ น้ำ สารอินทรีย์ โลหะอัลคาไลน์
- สารเคมีอันตรายที่เกิดจากการสลายตัว : เมื่อทำปฏิกิริยากับโลหะจะเกิดออกไซด์ของกำมะถันและไฮโดรเจน
- สารนี้ทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ทำให้เกิดเพลิงไหม้และการระเบิด

การเกิดอัคคีภัยและการระเบิด (Fire and Explosion)

- สารนี้ไม่ไวไฟ - สารดับเพลิง ในกรณีเกิดเพลิงไหม้ให้ใช้คาร์บอนไดออกไซด์ ผงเคมีแห้ง น้ำ
- สารเคมีอันตรายจากการเผาไหม้ : ออกไซด์ของกำมะถัน
- สารนี้เมื่อทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ อาจทำให้เกิดเพลิงไหม้และการระเบิดได้

การเก็บรักษา/สถานที่เก็บ/เคลื่อนย้าย/ขนส่ง (Storage and Handling)

- เก็บในภาชนะบรรจุที่ปิดมิดชิด – เก็บในบริเวณที่เย็นและแห้ง – เก็บในบริเวณที่มีการระบายอากาศเพียงพอ - เก็บห่างจากแสง ไอน้ำ เบสแก่ สารประกอบอินทรีย์
- เก็บภาชนะบรรจุสารไว้ในบริเวณเก็บสารเคมีที่เหมาะสม
- หลีกเลี่ยงการหายใจและการสัมผัสถูกผิวหนังและตา

การกำจัดกรณีรั่วไหล (Leak and Spill)

- วิธีการปฏิบัติในกรณีเกิดการหกรั่วไหลให้กั้นบริเวณสารหกแยกจากบริเวณอื่น
- ให้ดูดซับสารที่หกรั่วไหลด้วยสารอัลคาไลด์ เช่น โซดาแอ๊ซ สารอนินทรีย์ หรือดิน
- เก็บส่วนที่หกรั่วไหลในภาชนะบรรจุที่ปิดมิดชิดเพื่อนำไปกำจัด
- ล้างบริเวณสารหกรั่วไหล หลังจากสารเคมีถูกเก็บกวาดเรียบร้อยแล้ว
- ป้องกันไม่ให้สารเคมีที่หกรั่วไหล ไหลลงสู่ท่อระบายน้ำ แม่น้ำ และแหล่งน้ำอื่นๆ
- ให้สวมใส่อุปกรณ์ป้องกันอันตรายที่เหมาะสม
- การพิจารณาการกำจัด : ปฏิบัติให้เป็นไปตามกฎระเบียบที่ทางราชการกำหนด

การปฐมพยาบาล (First Aid)

หายใจเข้าไป : ถ้าหายใจเข้าไป ให้เคลื่อนย้ายผู้ป่วยออกสู่บริเวณที่มีอากาศบริสุทธิ์ ถ้าผู้ป่วยหยุดหายใจให้ช่วยผายปอด ถ้าหายใจติดขัดให้ออกซิเจนช่วย รักษาร่างกายผู้ป่วยให้อบอุ่นและอยู่นิ่ง นำส่งไปพบแพทย์

กินหรือกลืนเข้าไป : ถ้ากลืนหรือกินเข้าไป อย่ากระตุ้นให้เกิดการอาเจียน ให้ผู้ป่วยบ้วนล้างปากด้วยน้ำ ให้ผู้ป่วยดื่มน้ำ 200-300มิลลิลิตร นำส่งไปพบแพทย์

สัมผัสถูกผิวหนัง : ถ้าสัมผัสถูกผิวหนัง ให้ฉีดล้างผิวหนังทันทีด้วยน้ำปริมาณมากอย่างน้อย 15 นาที นำส่งไปพบแพทย์

สัมผัสถูกตา : ถ้าสัมผัสถูกตา ให้ฉีดล้างตาทันทีด้วยน้ำปริมาณมากอย่างน้อย 15 นาที นำส่งไปพบแพทย์

อื่น ๆ: การรักษาอื่น ๆ อยู่ในการวินิจฉัยของแพทย์ภายใน 24 ชั่วโมง อาการเกี่ยวกับปอดบวม อักเสบ บางทีอาจจะมีขึ้น

ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Environmental Impacts)

- ห้ามทิ้งลงสู่แหล่งน้ำ น้ำเสีย หรือดิน

Hydrochloric acid

ชื่อเคมี IUPAC : Hydrochloric acid

ชื่อเคมีทั่วไป : Hydrochloride

ชื่อพ้องอื่นๆ :Muriatic acid; Chlorohydric acid; Spirits of salts; Hydrogen chloride (acid); Hydrogen chloride; Hydrogen Chloride Gas only

สูตรโมเลกุล :HCl

สถานะ : ของเหลว ,ก๊าซ **สี** : ไม่มีสี **กลิ่น** : ฉุน **นน.โมเลกุล** : 36.46 **จุดเดือด(°ซ.)** : 53 **จุดหลอมเหลว/จุดเยือกแข็ง(°ซ.)** : -74 **ความถ่วงจำเพาะ(น้ำ=1)** : 1.18

ความหนืด(mPa.sec) : 0.0148 **ความดันไอ(มม.ปรอท)** : 190 ที่ 25 ^{0}ซ.

ความหนาแน่นไอ(อากาศ=1) : 1.3 **ความสามารถในการละลายน้ำที่(กรัม/100 มล.)** : ละลายได้

อันตรายต่อสุขภาพอนามัย (Health Effect)

สัมผัสทางหายใจ : การหายใจเอาไอระเหยของสารนี้เข้าไปจะก่อให้เกิดอาการไอ หายใจติดขัด เกิดการอักเสบของจมูก ลำคอ และทางเดินหายใจส่วนบน และในกรณีที่รุนแรง จะก่อให้เกิดอาการน้ำท่วมปอด ระบบหายใจล้มเหลวและอาจเสียชีวิตได้

สัมผัสทางผิวหนัง : การสัมผัสถูกผิวหนังจะก่อให้เกิดการระคายเคืองเกิดผื่นแดง ปวดและเกิดแผลไหม้ การสัมผัสกับสารที่ความเข้มข้นสูงจะก่อให้เกิดแผลพุพองและผิวหนังเปลี่ยน

กินหรือกลืนเข้าไป : การกลืนหรือกินเข้าไปจะก่อให้เกิดการระคายเคือง จะก่อให้เกิดอาการปวด และเกิดแผลไหม้ในปาก คอหลอดอาหาร และทางเดินอาหาร อาจก่อให้เกิดอาการ คลื่นไส้ และท้องร่วง และอาจทำให้เสียชีวิตได้

สัมผัสถูกตา : การสัมผัสถูกตาจะก่อให้เกิดการระคายเคืองและอาจก่อให้เกิดการทำลายได้ อาจทำให้เกิดแผลไหม้อย่างรุนแรง และก่อให้เกิดทำลายตาอย่างถาวรได้

ความผิดปกติ,อื่น ๆ : การสัมผัสกับไอระเหยของสารเป็นระยะนานจะก่อให้เกิดการกัดกร่อนต่อกัน และทำให้เกิดฤทธิ์กัดกร่อน เช่นเดียวกับฤทธิ์ของการสัมผัสกรด

- ในบุคคลที่มีอาการผิดปกติทางผิวหนัง หรือเป็นโรคทางตา จะมีความไวต่อการเกิดผลกระทบสารนี้
- ไม่เป็นสารก่อมะเร็งตาม NTP <u>*จัดเป็นสารก่อมะเร็ง*</u>ประเภท 3 ตามบัญชีรายชื่อของ IARC

ความคงตัวและการเกิดปฏิกิริยา (Stability and Reaction)

ความคงตัวทางเคมี : สารนี้มีความเสถียรภายใต้สภาวะปกติของการใช้และการเก็บ ภาชนะบรรจุของสารอาจเกิดการแตกออกและระเบิดได้เมื่อสัมผัสกับความร้อน

สารที่เข้ากันไม่ได้ : โลหะ โลหะออกไซด์ ไฮดรอกไซด์ เอมีน คาร์บอเนต สารที่เป็นเบส และสารอื่น ๆ เช่น ไซยาไนด์ ซัลไฟด์ และฟอมัลดีไฮด์

สภาวะที่ควรหลีกเลี่ยง : ความร้อน และการสัมผัสโดยตรงกับแสง

สารเคมีอันตรายที่เกิดจากการสลายตัว : เมื่อสารนี้สัมผัสกับความร้อน จะเกิดการสลายตัวและปล่อยฟูม/ควันของไฮโดรเจนคลอไรด์ที่เป็นพิษและจะเกิดปฏิกิริยากับน้ำหรือไอน้ำ ทำให้เกิดความร้อน และเกิดฟูมหรือควันของสารที่เป็นพิษและมีฤทธิ์การสลายตัวของสารจากปฏิกิริยาออกซิเดชั่น เนื่องจากความร้อนจะทำให้เกิดฟูม/ควันของก๊าซไฮโดรเจนซึ่งสามารถระเบิดได้

อันตรายจากการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ : จะไม่เกิดขึ้น

การเกิดอัคคีภัยและการระเบิด (Fire and Explosion)

- การสัมผัสกับความร้อนสูงหรือการสัมผัสกับโลหะจะก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซไฮโดรเจนซึ่งไวไฟออกมา
- สารดับเพลิงในกรณีเกิดเพลิงไหม้ให้ใช้ น้ำฉีดเป็นฝอย และทำให้สารเป็นกลางโดยใช้โซดาไฟหรือปูนขาว
- กรณีเกิดเพลิงไหม้ให้สวมใส่อุปกรณ์ช่วยหายใจชนิดมีถังอากาศในตัว (SCBA) พร้อมหน้ากากแบบเต็มหน้า
- ใช้น้ำฉีดเพื่อหล่อเย็นภาชนะบรรจุที่สัมผัสเพลิงไหม้ และให้อยู่ห่างจากภาชนะบรรจุสาร

การเก็บรักษา/สถานที่เก็บ/เคลื่อนย้าย/ขนส่ง (Storage and Handling)

- เก็บในภาชนะบรรจุที่ปิดมิดชิด และป้องกันการเสียหายทางกายภาพ

- เก็บในบริเวณที่เย็นและแห้ง - เก็บในบริเวณที่มีการระบายอากาศเพียงพอ
- เก็บในบริเวณที่มีพื้นป้องกันกรด และมีระบบระบายออกที่ดี
- เก็บห่างจาก การสัมผัสโดยตรงกับแสง ความร้อน น้ำ และสารที่เข้ากันไม่ได้
- อย่าทำการฉีดล้างภายนอกภาชนะบรรจุหรือนำเอาภาชนะไปใช้เพื่อวัตถุประสงค์อื่น
- เมื่อต้องการเจือจางให้ทำการค่อย ๆ เติมกรดปริมาณน้อย ๆ ลงในน้ำ อย่าใช้น้ำร้อนหรืออย่าทำการเติมน้ำลงในกรดเพราะจะทำให้ไม่สามารถควบคุมจุดเดือดของสารได้
- เมื่อทำการเปิดภาชนะบรรจุสารที่ทำจากโลหะให้ใช้อุปกรณ์ที่ป้องกันการเกิดประกายไฟ เพราะในการเปิดอาจเกิดก๊าซไฮโดรเจนขึ้นได้
- ภาชนะบรรจุของสารที่เป็นถังเปล่า แต่มีกากสารเคมีตกค้างอยู่ เช่น ไอระเหย ของเหลว อาจเป็นอันตรายได้

การกำจัดกรณีรั่วไหล (Leak and Spill)

- วิธีการปฏิบัติในกรณีเกิดการหกรั่วไหล ให้จัดให้มีการระบายอากาศในบริเวณที่มีการหกรั่วไหล
- ให้สวมใส่อุปกรณ์ป้องกันอันตรายที่เหมาะสม ให้กั้นแยกเป็นพื้นที่อันตราย และกันบุคคลที่ไม่มีหน้าที่เกี่ยวข้องและไม่สวมใส่อุปกรณ์ป้องกันออกจากบริเวณหกรั่วไหล
- ให้เก็บของเหลวที่หกรั่วไหลและนำกลับมาใช้ใหม่ถ้าสามารถทำได้
- ทำให้สารเป็นกลางโดยใช้สารที่เป็นเบส เช่น โซดาไฟ ปูนขาว และทำการดูดซับส่วนที่หกรั่วไหลด้วยวัสดุที่เฉื่อย เช่น แร่หินทราย(Vermiculite) ทรายแห้ง ดิน และเก็บใส่ในภาชนะบรรจุสำหรับกากของเสียเคมี

การปฐมพยาบาล (First Aid)

หายใจเข้าไป : ถ้าหายใจเข้าไปให้เคลื่อนย้ายผู้ป่วยออกสู่บริเวณที่มีอากาศบริสุทธิ์ ถ้าผู้ป่วยหยุดหายใจให้ช่วยผายปอด ถ้าหายใจติดขัดให้ออกซิเจนช่วย นำส่งไปพบแพทย์

กินหรือกลืนเข้าไป : ถ้ากลืนหรือกินเข้าไป อย่ากระตุ้นให้เกิดการอาเจียนให้ผู้ป่วยดื่มน้ำ หรือนมปริมาณมาก ๆ ถ้าสามารถหาได้ห้ามไม่ให้สิ่งใดเข้าปากผู้ป่วยที่หมดสติ นำส่งไปพบแพทย์ทันที

สัมผัสถูกผิวหนัง : ถ้าสัมผัสถูกผิวหนัง ให้ฉีดล้างผิวหนังทันทีด้วยน้ำปริมาณมากอย่างน้อย 15 นาที พร้อมถอดเสื้อผ้าและรองเท้าที่ปนเปื้อนสารเคมีออก ซักทำความสะอาดเสื้อผ้า และรองเท้าก่อนนำกลับมาใช้ใหม่ นำส่งไปพบแพทย์

สัมผัสถูกตา : ถ้าสัมผัสถูกตาให้ฉีดล้างตาทันทีด้วยน้ำปริมาณมากอย่างน้อย 15 นาที กระพริบตาถี่ ๆ นำส่งไปพบแพทย์ทันที

ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Environmental Impacts)

- เมื่อรั่วไหลลงสู่ดินคาดว่าสารนี้จะไม่เกิดการสลายตัวทางชีวภาพ และสารนี้อาจถูดดูดซึมเข้าสู่แหล่งน้ำใต้ดินได้

- สารนี้จะก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยในน้ำ จะเกิดอันตรายจากการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช
- ห้ามทิ้งลงสู่ระบบน้ำ น้ำเสีย หรือดิน

Hydrofluoric Acid

ชื่อเคมี IUPAC : Hydrofluoric Acid

ชื่อเคมีทั่วไป : Fluorhydric acid or Fluoric acid

ชื่อพ้องอื่นๆ : Hydrogen fluoride; Etching acid; HF A; Fluorohydric acid; Fluoric acid; Antisal 2B; Deuteriumfluoride;

สูตรโมเลกุล :HF **สถานะ :** ก๊าซ **สี :** ไม่มีสี **กลิ่น :** ฉุน **นน.โมเลกุล :** 20.01

จุดเดือด(°ซ.) : 20 **จุดหลอมเหลว/จุดเยือกแข็ง(°ซ.) :** -83

ความถ่วงจำเพาะ(น้ำ=1) : 1.0 **ความดันไอ(มม.ปรอท) :** 760 ที่ 20 °ซ.

ความหนาแน่นไอ(อากาศ=1) : 0.7

ความสามารถในการละลายน้ำที่(กรัม/100 มล.) : ได้ดีมาก

- สารนี้ละลายได้ในแอลกฮอล์ ตัวทำละลายอินทรีย์ ละลายได้เล็กน้อยในอีเธอร์ เบนซีน โทลูอีน ไวลีน เตตระไฮโดรเนปราลีน

การใช้ประโยชน์ (Uses)

- สารคลอโรฟูลออโรคาร์บอน ใช้เป็นสารทำความเย็น สารขับดัน สารเป่าโฟม
-ใช้ทำความสะอาดผิวโลหะ ชุบโลหะด้วยไฟฟ้า กัดผิวตกแต่ง ขัดเครื่องแก้ว

อันตรายต่อสุขภาพอนามัย (Health Effect)

สัมผัสทางหายใจ : การหายใจเข้าไปจะทำให้เกิดการระคายเคืองต่อเยื่อบุเมือก ทางเดินหายใจส่วนบน แผลไหม้ เจ็บหน้าอกหายใจติดขัด ผิวหนังเขียวคล้ำเนื่องจากขาดออกซิเจน ปอดอุดตัน ไตถูกทำลาย

สัมผัสทางผิวหนัง : การสัมผัสถูกผิวหนัง จะทำให้เกิดการระคายเคือง ผื่นแดง ปวดแสบปวดร้อน และแผลไหม้ สารนี้สามารถซึมผ่านผิวหนังได้

กินหรือกลืนเข้าไป : การกลืนหรือกินเข้าไปทำให้เกิดแผลไหม้ อาเจียน ปวดศีรษะ ระบบย่อยอาหารผิดปกติ ท้องร่วง สายตาพล่ามัว ไตถูกทำลาย

สัมผัสถูกตา : การสัมผัสถูกตา จะทำให้เกิดการระคายเคือง น้ำตาไหล ตาแดง เจ็บตา แผลไหม้ ตาบอด

ความผิดปกติ,อื่น ๆ :

- สารนี้ไม่ถูกจัดเป็นสารก่อมะเร็งของ OSHA, NTP, IARC
- อวัยวะเป้าหมาย : ตับ ไต

ความคงตัวและการเกิดปฏิกิริยา (Stability and Reaction)

- การเกิดปฏิกริยา : สารนี้เป็นกรดอย่างแรงจะเกิดปฏิกริยาขึ้นเมื่อสัมผัสถูกน้ำ ทำให้เกิดก๊าซพิษกัดกร่อน ไวไฟ และระเบิดได้
- สภาวะที่ต้องหลีกเลี่ยง : ความร้อน เปลวไฟ ประกายไฟ
- สารที่เข้ากันไม่ได้ : ออกไซด์ของโลหะ ไซยาไนด์ วัสดุติดไฟได้ ฮาโลเจน โลหะ สารออกซิไดซ์ เกลือของโลหะ สารรีดิวซ์
- อันตรายจากการสลายตัว : การสลายตัวเมื่อสัมผัสถูกน้ำหรือความชื้นจะทำให้เกิดไฮโดรเจนฟลูออไรด์ การสลายตัวเนื่องจากความร้อนจะทำให้เกิดสารประกอบฮาโลเจน ไฮโดรเจน
- อันตรายจากการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ : อาจจะเกิดขึ้นได้

การเกิดอัคคีภัยและการระเบิด (Fire and Explosion)

- สารนี้ไม่ติดไฟ - สารดับเพลิงให้ใช้ผงเคมีแห้ง คาร์บอนไดออกไซด์ ใช้น้ำฉีดเป็นฝอย หรือใช้โฟมชนิดที่เหมาะสม - เพลิงไหม้รุนแรง ให้ใช้โฟมหรือใช้น้ำฉีดเป็นฝอย
- ภาชนะบรรจุอาจเกิดการระเบิดได้เมื่อสัมผัสถูกความร้อน
- เคลื่อนย้ายภาชนะบรรจุออกจากบริเวณไฟไหม้ถ้าทำได้โดยไม่เสี่ยงอันตราย
- ฉีดหล่อเย็นภาชนะบรรจุด้วยน้ำจนกว่าไฟจะดับสนิท - อยู่ห่างจากด้านท้ายของภาชนะบรรจุ
- ให้อยู่ด้านเหนือลมและออกจากบริเวณที่ต่ำกว่า

การเก็บรักษา/สถานที่เก็บ/เคลื่อนย้าย/ขนส่ง (Storage and Handling)

- เก็บในภาชนะบรรจุที่ปิดมิดชิด - ป้องกันความเสียหายทางกายภาพ
- เก็บในบริเวณที่แห้ง เย็น และมีการระบายอากาศเป็นอย่างดี
- เก็บให้ห่างจากสารที่เข้ากันไม่ได้ - ใช้เฉพาะในบริเวณที่มีตู้ดูดสารเคมีเท่านั้น
- ติดตั้งที่อาบน้ำและฉีดล้างตาฉุกเฉิน

การกำจัดกรณีรั่วไหล (Leak and Spill)

- ควบคุมบุคคลที่ไม่มีหน้าที่เกี่ยวข้องให้ออกห่างจากบริเวณที่ที่หกรั่วไหล
- กันแยกเป็นพื้นที่อันตราย
- ให้ดูดซับด้วยทราย หรือหินแร่เวอร์ไมคิวไลท์ (Vermiculite) และเก็บใส่ในภาชนะบรรจุที่มีฝาปิดมิดชิดสำหรับนำไปกำจัดต่อไป
- ฉีดน้ำให้เป็นฝอยเพื่อลดการเกิดไอระเหย - อย่าสัมผัสถูกสารที่หกรั่วไหล
- สวมใส่อุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคล (PPD/PPE) ที่เหมาะสม รองเท้าบูท และถุงมือยาง
- หยุดการรั่วไหลถ้าทำได้โดยปราศจากความเสี่ยงอันตราย
- ถ้าหกรั่วไหลมากให้ทำเขื่อนหรือทำนบกั้นเพื่อสูบนำไปกำจัดต่อไป

การปฐมพยาบาล (First Aid)

หายใจเข้าไป : ถ้าหายใจเข้าไป ให้เคลื่อนย้ายผู้ป่วยออกไปสู่ที่ที่มีอากาศบริสุทธิ์ ถ้าผู้ป่วยหยุดหายให้ช่วยผายปอด ถ้าหายใจติดขัดให้ออกซิเจนช่วยรักษาร่างกายให้อบอุ่น นำส่งไปพบแพทย์ทันที

กินหรือกลืนเข้าไป : ถ้ากลืนหรือกินเข้าไป ให้ดื่มน้ำหรือนม ถ้าผู้ป่วยหมดสติอย่ากระตุ้นทำให้อาเจียนหรือดื่มน้ำหรือนม ถ้าผู้ป่วยอาเจียนให้ก้มศรีษะลง นำส่งไปพบแพทย์

สัมผัสถูกผิวหนัง : ถ้าสัมผัสถูกผิวหนัง ให้ถอดเสื้อผ้า เครื่องประดับ รองเท้าที่เปรอะเปื้อนสารเคมีออกทันทีล้างด้วยสบู่และน้ำปริมาณมาก ๆ อย่างน้อย 15-20 นาที

สัมผัสถูกตา : ถ้าสัมผัสถูกตา ให้ล้างตาด้วยน้ำปริมาณมาก ๆ กระพริบตาขึ้น-ลง บ่อย ๆ เพื่อให้มั่นใจว่าล้างออกหมด นำส่งไปพบแพทย์

อื่น ๆ: ใช้ทาผิวหนังด้วยเจลแคลเซียมกลูโคเนต 2.5 % หรือเอทธิลีนไกลคอล 40

ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Environmental Impacts)

- ห้ามทิ้งลงสู่ระบบน้ำ น้ำเสีย หรือดิน
- ไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อระบบนิเวศน์ หากมีการใช้และจัดการกับผลิตภัณฑ์อย่างเหมาะสม

Nitric acid

ชื่อเคมี IUPAC : Nitric acid

ชื่อพ้องอื่นๆ : Hydrogen nitrate; Azotic acid; Rfna; Aqua fortis; Fuming nitric acid; Red fuming nitric acid; Nital; Nitryl Hydroxide;Nitric acid red fuming; Nitric acid, other than red fuming;

สูตรโมเลกุล : HNO_3

สถานะ : สารละลาย **สี :** ไม่มีสี **กลิ่น :** ฉุน **นน.โมเลกุล :** 63.01 **จุดเดือด(°ซ.) :** 83

จุดหลอมเหลว/จุดเยือกแข็ง(°ซ.) : -42 **ความถ่วงจำเพาะ(น้ำ=1) :** 1.5

ความดันไอ(มม.ปรอท) : 4.3 ที่ 20 °ซ. **ความหนาแน่นไอ(อากาศ=1) :** 2.2

ความสามารถในการละลายน้ำที่(กรัม/100 มล.) :ละลายน้ำ

อันตรายต่อสุขภาพอนามัย (Health Effect)

สัมผัสทางหายใจ : การหายใจเข้าไปจะทำให้เกิดการระคายเคืองต่อทางเดินหายใจ ทำให้เกิดอาการเจ็บคอ ไอ หายใจติดขัดอย่างรุนแรง ในบางกรณีอาจเสียชีวิตได้

สัมผัสทางผิวหนัง : การสัมผัสถูกผิวหนัง จะก่อให้เกิดผื่นแดง ปวด และเกิดแผลไหม้ ทำให้เกิดการระคายเคือง

กินหรือกลืนเข้าไป : การกลืนหรือการกินเข้าไป จะก่อให้เกิดอาการเจ็บคอ และปวดท้อง

สัมผัสถูกตา : การสัมผัสถูกตา จะก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อตา ทำให้ตาแดง ปวดตา และทำให้มองเห็นไม่ชัดเจน

ความคงตัวและการเกิดปฏิกิริยา (Stability and Reaction)

- ความคงตัวทางเคมี : สารนี้ไม่เสถียร - การสลายตัวจะเกิดขึ้นเมื่อสัมผัสความร้อน หรือแสง
- สารที่เข้ากันไม่ได้ : สารนี้เกิดปฏิกิริยารุนแรงกับสารไวไฟ และสารรีดิวซ์ เบส สารกัดกร่อน ผงโลหะ ตัวทำละลายอินทรีย์ - สารเคมีอันตรายที่เกิดจากการสลายตัว : ไอระเหยของไนตริส
- อันตรายจากการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ : จะไม่เกิดขึ้น

การเกิดอัคคีภัยและการระเบิด (Fire and Explosion)

- สารนี้ไม่ใช่สารไวไฟ แต่สามารถทำให้เกิดสารที่ไวไฟได้
- ปฏิกิริยาทางเคมีของสารนี้ สามารถทำให้เกิดไฟ และการระเบิดได้
- ให้ใช้การฉีดน้ำเป็นฝอย เพื่อหล่อเย็นภาชนะบรรจุที่ถูกเพลิงไหม้
- ให้เลือกใช้สารดับเพลิงที่เหมาะกับสภาพการเกิดเพลิง

การเก็บรักษา/สถานที่เก็บ/เคลื่อนย้าย/ขนส่ง (Storage and Handling)

- เก็บในที่เย็น และมืด - เก็บแยกออกจากสารรีดิวซ์ สารที่ไวไฟ และเบส
- เก็บในบริเวณที่มีการระบายอากาศที่ดี -หลีกเลี่ยงการสัมผัสกับสารไวไฟตัวทำลายและสารอื่น
- การบรรจุในภาชนะที่ทำจากขวดแก้วสีชา อลูมิเนียม เหล็กกล้าไร้สนิม พลาสติก
- ห้ามสัมผัสถูกน้ำ

การกำจัดกรณีรั่วไหล (Leak and Spill)

- เก็บส่วนที่หกรั่วไหลใส่ในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท
- ให้ดูดซับการหกรั่วไหลด้วยทราย หรือ วัสดุดูดซับที่เฉื่อย และเคลื่อนย้ายออกสู่บริเวณที่ปลอดภัย
- ให้ฉีดน้ำล้างบริเวณที่หกรั่วไหลด้วยน้ำ
- อย่าใช้ขี้เลื่อย หรือ สารไวไฟในการดูดซับสาร
- ให้สวมใส่ชุดป้องกันสารเคมี
- ให้หยุดการรั่วไหล ถ้าสามารถทำได้โดยปราศจากความเสี่ยงอันตราย
- การพิจารณาการกำจัด : ปฏิบัติให้เป็นไปตามกฎระเบียบที่ทางราชการกำหนด

การปฐมพยาบาล (First Aid)

หายใจเข้าไป : ถ้าหายใจเข้าไปให้เคลื่อนย้ายผู้ป่วยออกไปสู่ที่ที่มีอากาศบริสุทธิ์ จัดให้ผู้ป่วยอยู่ในท่าสบาย นำส่งไปพบแพทย์

กินหรือกลืนเข้าไป : ถ้ากลืนหรือกินเข้าไป ให้ผู้ป่วยบ้วนล้างปากด้วยน้ำ นำส่งไปพบแพทย์

สัมผัสถูกผิวหนัง : ถ้าสัมผัสถูกผิวหนัง ให้ฉีดล้างผิวหนังด้วยน้ำ นำส่งไปพบแพทย์

สัมผัสถูกตา : ถ้าสัมผัสถูกตาให้ฉีดล้างออกด้วยน้ำ นำส่งไปพบแพทย์

Isopropanol(IPA)

ชื่อเคมี IUPAC : 2 - Propanol ; Isopropanol

ชื่อเคมีทั่วไป : Isopropyl alcohol ; 2 - Propyl alcohol ; Sec - propyl alcohol

ชื่อพ้องอื่นๆ :IPA; Sec-propanol; Rubbing Alcohol; Dimethylcarbinol; Sec-Propyl alcohol; Alcohol; Propan-2-ol; I-Propanol; 2-Hydroxypropane; Alcojel; Alcosolve; Avantin; Chromar; Combi-schutz; Hartosol; Imsol a; Isohol; Lutosol; Petrohol;N-propan-2-ol; Propol; Spectrar; Sterisol hand disinfectant; Takineocol; Alcosolve 2; DuPont Zonyl FSP Fluorinated Surfactants; DuPont Zonyl FSJ Fluorinated Surfactants; DuPont Zonyl FSA Fluorinated Surfactants; DuPont ZonylFSN Fluorinated Surfactants; ISOPROPYL ALCOHOL (MANUFACTURING, TRONG-ACID PROCESS);

สูตรโมเลกุล : C_3H_8O

สถานะ : ของเหลว **สี :** ไม่มีสี **กลิ่น :** เหมือนยางแอลกอฮอล์ , ฉุน **นน.โมเลกุล :** 60.09**จุดเดือด(°ซ.) :** 82.3 **จุดหลอมเหลว/จุดเยือกแข็ง(°ซ.) :** -88.5 **ความถ่วงจำเพาะ(น้ำ=1) :** 0.8044

ความหนืด(mPa.sec) : 2.4 **ความดันไอ(มม.ปรอท) :** 33 ที่ 20 ^{0}ซ.

ความหนาแน่นไอ(อากาศ=1) : 2.1

ความสามารถในการละลายน้ำที่(กรัม/100 มล.) :ละลายน้ำได้ ที่ 20 ^{0}ซ

การใช้ประโยชน์ (Uses)

ใช้ในการผลิตเครื่องสำอางค์ และอุตสาหกรรมปิโตรเคมี

อันตรายต่อสุขภาพอนามัย (Health Effect)

สัมผัสทางหายใจ : การหายใจเข้าไปไม่เป็นอันตรายมาก แต่เกิดการระคายเคืองจมูกและลำคอ และระบบทางเดินหายใจอาการที่แสดงต่อมาเมื่อได้รับสารเพิ่มขึ้น คือ ปวดหัว , คลื่นไส้ , วิงเวียน , อาเจียน ถ้าได้รับปริมาณสูงขึ้นอาจทำให้หมดสติหรือตายได้

สัมผัสทางผิวหนัง : การสัมผัสถูกผิวหนังไม่ทำให้เกิดการระคายเคืองบริเวณผิวหนังในกรณีที่สัมผัสในเวลาอื่นๆ แต่ถ้าสัมผัสนาน จะทำให้ผิวหนังแห้งและผิวหนังแตก

กินหรือกลืนเข้าไป : การกลืนเข้าไปปริมาณมากทำให้อาการทรุดหนักลงไป อาการคล้ายการสัมผัสทางหายใจ ซึ่งควรนำไปพบแพทย์ อาการคือจะอาเจียน และมีอันตรายเกี่ยวกับปอด

สัมผัสถูกตา : การสัมผัสถูกตาทำให้เกิดการระคายบริเวณตา ถ้าสัมผัสถูกสารที่ 400 ppm ประมาณ 3 - 5 นาที ถ้าสัมผัสที่ 800 ppm จะทำให้เกิดแผลอาจจะไม่เป็นอันตรายต่อคน แต่จากการทดลองเป็นอันตรายต่อสัตว์ เมื่อได้รับในอัตราที่สูง

ความผิดปกติ,อื่น ๆ :

- อาจจะไม่เป็นอันตรายต่อคน แต่จากการทดลองเป็นอันตรายต่อสัตว์ เมื่อได้รับในอัตราที่สูง
- สารทำลายระบบประสาท ไต ระบบหลอดเลือดเลี้ยงหัวใจ ระบบทางเดินอาหาร

ความคงตัวและการเกิดปฏิกิริยา (Stability and Reaction)

- ความลงตัวทางเคมี : สารนี้เสถียร เกิดรูปเปอร์ออกไซด์ในความมืด และไวต่อแสงแดด ทำให้อยู่ในรูปของคีโตนเมื่อเกิดปฏิกิริยาเปอร์ออกซิเดรน
- สารที่เข้ากันไม่ได้ : สารออกซิไดส์อย่างแรง (โครเมียมไตรออกไซด์ , เปอร์คลอเรต , เปอร์ออกไซด์) ซึ่งเสี่ยงต่อการติดไฟ , ระเบิดกรดเข้มข้น (กรดไนตริก , กรดซัลฟูริก , โอลีน) ปฏิกริยาที่รุนแรงและอันตราย โลหะอัลคาไลน์ และอัลคาไลน์เอริท์ (ไม่เกิดการติดไฟได้ก๊าซไฮโดรเจน) อลูมิเนียม เกิดปฏิกริยารุนแรง และไม่ให้ความร้อนโครโตนานดีไฮน์หรือฟอสจีน , โพแทลเซี่ยล บิวทิวออกไซด์ ,ไตรไนโตรมีเทป
- สภาพที่ควรหลีกเลี่ยง : เปลวไฟ , ประกายไฟ , ประจุไฟฟ้า , ความร้อน และสารติดไฟ , แสง
- อันตรายของการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ : ไม่เกิดขึ้น
- การกัดกร่อนของโลหะ : แอนไฮดริส โพรพานอลไม่กัดกร่อนเหล็ก , สเตนเลท , เหล็กกล้า , ทองแดงและบรอนซ์ และอัลลอยด์ที่อุณหภูมิปกติ

การเกิดอัคคีภัยและการระเบิด (Fire and Explosion)

- สารนี้ทนต่อแรงกระแทก , ไวต่อประจุไฟฟ้า
- สารดับเพลิง : คาร์บอนไดออกไซด์ , ผลเคมีแห้ง , แอลกอฮอล์โฟม , พอลิเมอร์โฟม แต่น้ำจะไม่มีประสิทธิภาพในการดับเพลิง เพราะไม่ทำให้อุณหภูมิของสารต่ำกว่าจุดวาบไฟได้ นิยมที่สุดคือโฟม
- กรณีเกิดเพลิงไหม้ให้สวมใส่อุปกรณ์ช่วยหายใจชนิดมีถังอากาศในตัว (SCBA)
- สารที่ได้จากการเผาไหม้ : คาร์บอนมอนอกไซด์ , คาร์บอนไดออกไซด์ และสารพิษอื่นๆ
- ควรหยุดสารที่รั่วไหลก่อนจะดับไฟ ถ้าหยุดสารไม่ได้ให้ใช้น้ำในการดับเพลิง
- ในการดับเพลิงควรอยู่ในที่ที่ปลอดภัย อยู่เหนือลม เพื่อป้องกันสารพิษปลิวเข้าตา
- ถ้าเป็นไปได้ควรนำภาชนะบรรจุสารออกไปจากบริเวณนั้น
- ในกรณีสารรั่วไหลแต่ยังไม่ไหม้ ควรใช้น้ำฉีดเป็นฝอยกว้างๆ หรือใช้น้ำช่วยในการเจือจางฉีดให้ห่างจากเปลวไฟ หรือสารติดไฟ
- ผู้ดับเพลิงควรมีความชำนาญ

การเก็บรักษา/สถานที่เก็บ/เคลื่อนย้าย/ขนส่ง (Storage and Handling)

- เก็บในภาชนะบรรจุที่ปิดมิดชิด - เก็บในบริเวณที่เย็นและแห้ง
- เก็บห่างจากสารออกซิไดส์ , การกัดกร่อนและสารไม่เข้ากัน หรือกรดเข้มข้น , กรดแอนไฮไดรส์ , ธาตุอัลคาไลฟ์ , ธาตุอัลคาไลน์เอริท (โลหะ ควรจะปิดฉลากไว้ด้วยและเขียนคุณสมบัติของสารไว้ด้วย) - เก็บให้ห่างจากสารที่เข้ากันไม่ได้ ความร้อน เปลวไฟ แสงแดด
- สถานที่เก็บไม่ควรมีสื่อที่สามารถติดไฟได้ เช่น บุหรี่ ไม้ขีดไฟ ไฟ - ควรปิดฝาภาชนะเมื่อไม่ใช้
- ไม่ควรนำสารที่เหลือจากการใช้กลับมาใส่ภาชนะบรรจุอีก และควรปิดฉลากไว้ด้วย
- สารนี้ไวไฟ เป็นสารพิษ และสารระคายเคืองตา
- ก่อนเก็บสิ่งสำคัญคือควรมีอุปกรณ์ป้องกันและทำความสะอาดให้ดี
- บุคคลที่ทำงานเกี่ยวกับสารเคมีควรทราบถึงคุณสมบัติของสาร
- การจัดเก็บควรมีคู่มือการปฐมพยาบาล
- วิธีการดับเพลิง หรือวิธีการกำจัดกรณีรั่วไหล หลีกเลี่ยงการเกิดไอ และไม่ให้ไอรั่วไหลออกไปอย่าให้สารกระเด็น

การกำจัดกรณีรั่วไหล (Leak and Spill)

- วิธีการปฏิบัติในกรณีเกิดการหกรั่วไหล
- ให้หยุดการรั่วไหล ถ้าสามารถทำได้โดยปราศจากความเสี่ยงอันตราย
- ให้ดูดซับส่วนที่หกรั่วไหลด้วยดิน , ทราย , ฝุ่น หรือสารที่มีคุณสมบัติการดูดซับได้
- จัดหาอุปกรณ์ป้องกันและจัดเก็บสารที่รั่วไหลใส่ภาชนะบรรจุสำหรับนำไปกำจัด
- จัดเก็บสารที่รั่วไหล นำเอาสารที่เป็นของเหลวกลับมาใช้ใหม่ หรือจัดเก็บไว้ถ้าสามารถทำได้
- หยุดการรั่วไหลของสารถ้าสามารถทำได้โดยปราศจากความเสี่ยงจากอันตราย
- เคลื่อนย้ายสารที่ทำให้เกิดความร้อน
- ให้หยุดการรั่วไหล ถ้าสามารถทำได้โดยปราศจากความเสี่ยงอันตราย

การปฐมพยาบาล (First Aid)

หายใจเข้าไป : ถ้าหายใจเข้าไปให้เคลื่อนย้ายผู้ป่วยออกสู่บริเวณที่มีอากาศบริสุทธิ์ เคลื่อนย้ายผู้ป่วยออกไปจากบริเวณเปลวไฟของสาร เคลื่อนย้ายสารและผู้ป่วยไปยังที่มีอากาศบริสุทธิ์ รีบนำไปพบแพทย์

กินหรือกลืนเข้าไป : ถ้ากลืนหรือกินเข้าไป ไม่ควรให้สิ่งใดเข้าปากในกรณีผู้ป่วยหมดสติ ควรล้างปากด้วยน้ำ อย่ากระตุ้นให้เกิดการอาเจียน ควรให้ผู้ป่วยดื่มน้ำ 8-10 แก้วหรือ 240-300 มิลลิลิตร เพื่อนำไปเจือจางสารในช่องท้อง ถ้าผู้ป่วยเกิดอาเจียนขึ้นมาให้ผู้ป่วยนอนลาดกับพื้น และให้ดื่มน้ำอีกแล้วรีบนำส่งไปพบแพทย์

สัมผัสถูกผิวหนัง : ถ้าสัมผัสถูกผิวหนัง ให้ฉีดล้างผิวหนังทันทีด้วยน้ำปริมาณมากอย่างน้อย 15 นาที พร้อมถอดเสื้อผ้าและรองเท้าที่ปนเปื้อนสารเคมีออก นำไปส่งพบแพทย์ ถ้ายังมีอาการระคายเคือง ซักทำความสะอาดเสื้อผ้า และรองเท้าก่อนนำกลับมาใช้ใหม่

สัมผัสถูกตา : ถ้าสัมผัสถูกตา ควรล้างตาด้วยน้ำอุ่นทันที โดยในน้ำไหลผ่านประมาณ 20 นาที หรือจนกระทั่งสารเคมีออกหมดแล้ว ควรเปิดเปลือกตา ดูแลอย่าให้มีสิ่งเจือปนในน้ำเข้าตาอีก แล้วรีบนำไปพบแพทย์

ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Environmental Impacts)

- ห้ามทิ้งลงสู่แหล่งน้ำ น้ำเสีย หรือดิน
- สารนี้สามารถเกิดการย่อยสลายทางชีวภาพได้
- ไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อระบบนิเวศน์ หากมีการใช้และจัดการกับผลิตภัณฑ์อย่างเหมาะสม

Sodium hydroxide

ชื่อเคมี IUPAC : Sodium hydroxide

ชื่อพ้องอื่นๆ : Caustic soda ; Lye; Sodium hydrate; Soda lye; White Caustic; Lye, caustic; Augus Hot Rod;

สูตรโมเลกุล : NaOH

สถานะ : ของแข็ง **สี :** ขาว **กลิ่น :** ไม่มีกลิ่น **นน.โมเลกุล :** 40.00 **จุดเดือด(°ซ.) :** 1390

จุดหลอมเหลว/จุดเยือกแข็ง(°ซ.) : 318 **ความถ่วงจำเพาะ(น้ำ=1) :** 2.13

ความดันไอ(มม.ปรอท) : เล็กน้อย **ความหนาแน่นไอ(อากาศ=1) :** >1.4

ความสามารถในการละลายน้ำที่(กรัม/100 มล.) : 111 ที่ 20 ^{0}ซ.

อันตรายต่อสุขภาพอนามัย (Health Effect)

สัมผัสทางหายใจ : การหายใจเข้าไปจะก่อให้เกิดการระคายเคือง และทำให้เกิดการทำลายต่อทางเดินหายใจส่วนบน ทำให้เกิดอาการจาม ปวดคอ หรือน้ำมูกไหล ปอดอักเสบอย่างรุนแรง หายใจติดขัด หายใจถี่รั่ว

สัมผัสทางผิวหนัง : การสัมผัสถูกผิวหนัง จะก่อให้เกิดการระคายเคืองรุนแรง เป็นแผลไหม้ และเกิดเป็นแผลพุพองได้

กินหรือกลืนเข้าไป : การกลืนหรือกินเข้าไป ทำให้แสบไหม้บริเวณปาก คอ กระเพาะอาหาร ทำให้เป็นแผลเป็น เลือดออกในกระเพาะอาหาร อาเจียน ท้องร่วง ความดันเลือดลดต่ำลง อาจทำให้เสียชีวิต

สัมผัสถูกตา : การสัมผัสถูกตา จะมีฤทธิ์กัดกร่อน ทำให้เกิดการระคายเคืองรุนแรง เป็นแผลแสบไหม้ อาจทำให้มองไม่เห็นถึงขั้นตาบอดได้

ความผิดปกติ,อื่น ๆ :

- การสัมผัสสารติดต่อกันเป็นเวลานาน จะทำให้เกิดการทำลายเนื้อเยื่อ
- สารนี้มีฤทธิ์กัดกร่อนเนื้อเยื่อ

ความคงตัวและการเกิดปฏิกิริยา (Stability and Reaction)

- ความคงตัวทางเคมี : สารนี้มีความเสถียรภายใต้สภาวะปกติของการใช้และการเก็บ
- สารที่เข้ากันไม่ได้ : น้ำ, กรด, ของเหลวไวไฟ, สารประกอบอินทรีย์ของฮาโลเจน โดยเฉพาะไตรคลอโรเอทิลีน ซึ่งอาจก่อให้เกิดไฟหรือการระเบิด การสัมผัสไนโตรมีเทนและสารประกอบไนโตรทำให้เกิดเกลือที่ไวต่อการกระแทก
- สภาวะที่ควรหลีกเลี่ยง : ความชื้น, ฝุ่น และสารที่เข้ากันไม่ได้
- สารเคมีอันตรายที่เกิดจากการสลายตัว : โซเดียมออกไซด์ การทำปฏิกิริยากับโลหะเกิดก๊าซไฮโดรเจนที่ไวไฟ
- สารนี้ผสมความชื้นในอากาศและทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศเป็นสารโซเดียมคาร์บอเนต
- สารนี้มีฤทธิ์เป็นเบสเข้มข้น
- อันตรายจากการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ : จะไม่เกิดขึ้น

การเกิดอัคคีภัยและการระเบิด (Fire and Explosion)

- สารนี้ไม่ทำให้เกิดอันตรายจากเพลิงไหม้ สารที่ร้อนหรือหลอมอยู่จะทำปฏิกิริยารุนแรงกับน้ำ
- สารนี้ทำปฏิกิริยากับโลหะ เช่น อะลูมิเนียม เกิดก๊าซไฮโดรเจนที่ไวไฟ
- สารดับเพลิงกรณีเกิดเพลิงไหม้ให้เลือกใช้สารดับเพลิง/วิธีการดับเพลิง ที่เหมาะสมสำหรับสภาพการเกิดเพลิงโดยรอบ ห้ามใช้น้ำในการดับเพลิง
- กรณีเกิดเพลิงไหม้ให้สวมใส่อุปกรณ์ช่วยหายใจชนิดมีถังอากาศในตัว (SCBA)

การเก็บรักษา/สถานที่เก็บ/เคลื่อนย้าย/ขนส่ง (Storage and Handling)

- เก็บในภาชนะบรรจุที่ปิดมิดชิด ป้องกันการเสียหายทางกายภาพ - เก็บในบริเวณที่เย็นและแห้ง
- เก็บในบริเวณที่มีการระบายอากาศเพียงพอ - เก็บห่างจากความร้อน, ความชื้น, สารที่เข้ากันไม่ได้ - เก็บห่างจากอะลูมิเนียม, แมกนีเซียม
- ภาชนะบรรจุของสารที่เป็นถังเปล่า แต่มีกากสารเคมีตกค้างอยู่ เช่น ฝุ่น ของแข็ง อาจเป็นอันตรายได้
- อย่าผสมสารนี้กับกรดหรือสารอินทรีย์
- ให้สังเกตคำเตือนและข้อควรระวังทั้งหมดที่ให้ไว้สำหรับสารนี้

การกำจัดกรณีรั่วไหล (Leak and Spill)

- วิธีการปฏิบัติในกรณีเกิดการหกรั่วไหล ระบายอากาศบริเวณสารหกรั่วไหล
- ป้องกันบุคคลเข้าไปในบริเวณสารรั่วไหล
- ให้สวมใส่อุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคลที่เหมาะสม
- ให้ดูดซับส่วนที่หกรั่วไหลด้วยทราย, แร่เวอร์มิคิวไลต์ หรือวัสดุดูดซับอื่น

- เก็บส่วนที่หกรั่วไหลในภาชนะบรรจุที่ปิดมิดชิดเพื่อนำไปกำจัด โดยวิธีไม่ทำให้เกิดฝุ่น
- ป้องกันไม่ให้สารเคมีที่หกรั่วไหล ไหลลงสู่ท่อระบายน้ำ แม่น้ำ และแหล่งน้ำอื่น ๆ
- สารที่หลงเหลืออยู่ สามารถทำให้เจือจางด้วยน้ำหรือทำให้เป็นกลางด้วยกรด เช่น อะซีติก, ไฮโดรคลอริก, ซัลฟูริก
- การพิจารณาการกำจัด : ปฏิบัติให้เป็นไปตามกฎระเบียบที่ทางราชการกำหนด

การปฐมพยาบาล (First Aid)

หายใจเข้าไป : ถ้าหายใจเข้าไป ให้เคลื่อนย้ายผู้ป่วยออกสู่บริเวณที่มีอากาศบริสุทธิ์ ถ้าผู้ป่วยหยุดหายใจให้ช่วยผายปอด ถ้าหายใจลำบากให้ออกซิเจนช่วย นำส่งไปพบแพทย์

กินหรือกลืนเข้าไป : ถ้ากลืนหรือกินเข้าไป อย่ากระตุ้นให้เกิดการอาเจียน ให้ดื่มน้ำหรือนมปริมาณมากๆ ห้ามไม่ให้สิ่งใดเข้าปากผู้ป่วยที่หมดสติ นำส่งไปพบแพทย์

สัมผัสถูกผิวหนัง : ถ้าสัมผัสถูกผิวหนัง ให้ฉีดล้างผิวหนังทันทีด้วยน้ำปริมาณมากอย่างน้อย 15 นาที พร้อมถอดเสื้อผ้าและรองเท้าที่ปนเปื้อนสารเคมีออก นำส่งไปพบแพทย์ทันที ซักทำความสะอาดเสื้อผ้าและรองเท้าก่อนนำกลับมาใช้ใหม่

สัมผัสถูกตา : ถ้าสัมผัสถูกตา ให้ฉีดล้างตาโดยทันทีด้วยน้ำปริมาณมากๆอย่างน้อย 15 นาที พร้อมกระพริบตาถี่ๆ นำส่งไปพบแพทย์ทันที

ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Environmental Impacts)

- ห้ามทิ้งลงสู่แหล่งน้ำ น้ำเสีย หรือดิน - สารนี้ไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ
- สารนี้เป็นพิษต่อปลา และแพลงค์ตอน ซึ่งส่งผลเป็นอันตรายเนื่องจากเปลี่ยนแปลงพีเอช อาจทำให้ปลาตายได้

Trichloroethene

ชื่อเคมี IUPAC : Trichloroethene

ชื่อเคมีทั่วไป : Trichloroethylene

ชื่อพ้องอื่นๆ : Ethinyl trichloride; Acetylene trichloride; Ethylene trichloride; Triciene; 1,1,2-Trichloroethylene; Tri; TCE; Tri-Clene; Trielene; Trilene; Trichloran; Trichloren; Algylen; Trimar; Triline; Trethylene; Westrosol; Chlorylen;Gemalgene; Germalgene; 1,1,2-Trichloroethene; 1-Chloro-2,2-dichloroethylene; 1,1-Dichloro-2-chloroethylene; 1,2,2-Trichloroethylene; Anamenth; Benzinol; Blacosolv; Blancosolv; Cecolene; Chlorilen; Chlorylea; Chorylen;Circosolv; Crawhaspol; Densinfluat; Dow-tri; Dukeron; Fleck-flip; Flock flip; Fluate; Lanadin; Lethurin; Narcogen;Narkogen; Narkosoid; Nialk; Perm-a-chlor; Perm-a-

clor; Petzinol; Philex; Threthylene; Triad; Trial; Triasol; Triklone;Triol; Tri-plus; Tri-plus m; Vestrol; Vitran; Trieline

สูตรโมเลกุล : C_2HCl_3 **สถานะ :** ของเหลว **สี :** ใส ไม่มีสี **กลิ่น :** คล้ายอีเธอร์

นน.โมเลกุล : 131.39 **จุดเดือด(°ซ.) :** 87.2 **จุดหลอมเหลว/จุดเยือกแข็ง(°ซ.) :** 86.4

ความถ่วงจำเพาะ(น้ำ=1) : 1.476 **ความหนืด(mPa.sec) :** 0.55

ความดันไอ(มม.ปรอท) : 60 ที่ 20 °ซ. **ความหนาแน่นไอ(อากาศ=1) :** 4.54

ความสามารถในการละลายน้ำที่(กรัม/100 มล.) : 0.1 ที่ 25 °ซ

อันตรายต่อสุขภาพอนามัย (Health Effect)

สัมผัสทางหายใจ : การหายใจเข้าไปจะก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อทางเดินหายใจ ทำให้เกิดอาการปวดศีรษะ , เวียนศีรษะ ,คลื่นไส้ , ไอ หายใจติดขัด หมดสติ , เป็นลม และอาจเสียชีวิตได้เมื่อสัมผัสกับไอระเหยที่ความเข้มข้นสูงๆ

สัมผัสทางผิวหนัง : การสัมผัสถูกผิวหนังซ้ำหรือเป็นระยะเวลานาน จะก่อให้เกิดการระคายเคืองและทำให้ผิวหนังอักเสบเนื่องจากการสูญเสียไขมันของชั้นผิวหนังได้ และอาจทำให้เกิดภาวะภูมิแพ้ต่อการสัมผัสผิวหนังได้

กินหรือกลืนเข้าไป : การกลืนหรือกินเข้าไป จะทำให้เกิดการระคายเคืองต่อทางเดินอาหาร และทำให้เกิดอาการคลื่นไส้ ไอ ปวดท้อง ท้องร่วง และอาจหมดสติได้

สัมผัสถูกตา : การสัมผัสกับของเหลวหรือไอระเหยที่ความเข้นข้นสูง จะก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อตา และทำให้น้ำตาไหลได้

ความผิดปกติ,อื่น ๆ :

ไม่เป็นสารก่อมะเร็ง ตาม NTP , OSHA , ACGIH แต่เป็นสารก่อมะเร็งตามบัญชีรายชื่อของ NIOSH และสงสัยว่าจะเป็นสารก่อมะเร็งในสัตว์ ตามบัญชีรายชื่อของ IARC และมีรายงานความผิดปกติของทารกในครรภ์ตามรายงานของ RTEC การสัมผัสในปริมาณมาก จะก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อตาและเยื่อเมือก ผิวหนัง และทำให้เกิดการกดระบบประสาทส่วนกลาง อาจทำให้เกิดการทำลายทางเดินอาหาร ตับ และไตได้การหายใจหรือการดูดซับของสารเข้าสู่ร่างกายเป็นระยะเวลานาน จะก่อให้เกิดผลต่อระบบประสาทส่วนกลาง , ทำลายตับและไต รวมทั้งทำให้เกิดภาวะที่ไวต่ออีพริเนฟพริน

ความคงตัวและการเกิดปฏิกิริยา (Stability and Reaction)

- ความคงตัวทางเคมี : สารนี้มีความเสถียร
- สารที่เข้ากันไม่ได้ : โลหะ เบสเข้มข้น, สารออกซิไดซ์
- สภาวะที่ควรหลีกเลี่ยง : ความร้อน , ประกายไฟ , เปลวไฟ , ภาชนะบรรจุที่เปิด และสภาพที่มีการระบายอากาศไม่ดี

- สารเคมีอันตรายที่เกิดจากการสลายตัว : การเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ จะทำให้เกิดฟอสจีน , ไฮโดรเจนคลอไรด์ , คลอรีน และไอระเหยที่เป็นพิษ

การเกิดอัคคีภัยและการระเบิด (Fire and Explosion)

- สารนี้ไม่เป็นสารไวไฟ
- ไอระเหยของสารที่เข้มข้นสูงสามารถลุกติดไฟได้ เมื่อสัมผัสความร้อนสูง หรือสัมผัสกับเปลวไฟ และจะทำให้เกิดก๊าซที่เป็นพิษ และมีฤทธิ์กัดกร่อนขึ้น
- สารดับเพลิงในกรณีเกิดเพลิงไหม้ให้ใช้ : ผงเคมีแห้ง , คาร์บอนไดออกไซด์ , น้ำฉีดเป็นฝอย , โฟม หรือสารดับเพลิงที่เหมาะสมกับสภาพการเกิดเพลิงโดยรอบ
- กรณีเกิดเพลิงไหม้ให้สวมใส่อุปกรณ์ช่วยหายใจชนิดมีถังอากาศในตัว (SCBA)
- ความร้อนจะทำให้เกิดความดันและทำให้ภาชนะบรรจุแตกออกได้ ใช้น้ำฉีดหล่อเย็นเพื่อหล่อเย็นภาชนะบรรจุที่สัมผัสเพลิงไหม้

การเก็บรักษา/สถานที่เก็บ/เคลื่อนย้าย/ขนส่ง (Storage and Handling)

- เก็บในห้องสำหรับเก็บสารเคมีอันตราย
- ให้ล้างทำความสะอาดร่างกาย ให้ทั่วถึงภายหลังทำการเคลื่อนย้าย
- เก็บในภาชนะบรรจุที่ปิดมิดชิด
- เก็บในบริเวณที่เย็นและแห้ง
- เก็บในบริเวณที่มีการระบายอากาศเพียงพอ
- เก็บที่อุณหภูมิ 15 ถึง 20 องศาเซลเซียส

การกำจัดกรณีรั่วไหล (Leak and Spill)

- วิธีการปฏิบัติในกรณีเกิดการหกรั่วไหล ให้สวมใส่อุปกรณ์ป้องกันอันตรายที่เหมาะสม
- ให้ดูดซับส่วนที่หกรั่วไหลด้วยวัสดุดูดซับที่เหมาะสม เช่น ทราย หรือวัสดุดูดซับที่เฉื่อย และเคลื่อนย้ายออกสู่บริเวณที่หลอดปลอดภัยเพื่อนำไปกำจัด
- การพิจารณาการกำจัด : ปฏิบัติให้เป็นไปตามกฎระเบียบที่ทางราชการกำหนด

การปฐมพยาบาล (First Aid)

หายใจเข้าไป : ถ้าหายใจเข้าไปให้เคลื่อนย้ายผู้ป่วยออกสู่บริเวณที่มีอากาศบริสุทธิ์ ถ้าผู้ป่วยหยุดหายใจให้ช่วยผายปอด ถ้าหายใจติดขัดให้ออกซิเจนช่วย นำส่งไปพบแพทย์ทันที

กินหรือกลืนเข้าไป : ถ้ากลืนหรือกินเข้าไป อย่ากระตุ้นให้เกิดการอาเจียน ห้ามไม่ให้สิ่งใดเข้าปากผู้ป่วยที่หมดสติ

สัมผัสถูกผิวหนัง : ถ้าสัมผัสถูกผิวหนัง ให้ฉีดล้างผิวหนังทันทีด้วยน้ำปริมาณมากอย่างน้อย 15 นาที พร้อมถอดเสื้อผ้าและรองเท้าที่ปนเปื้อนสารเคมีออก นำส่งไปพบแพทย์ทันที ซักทำความสะอาดเสื้อผ้า และรองเท้าก่อนนำกลับมาใช้ใหม่

สัมผัสถูกตา : ถ้าสัมผัสถูกตา ให้ฉีดล้างตาทันทีด้วยน้ำปริมาณมากอย่างน้อย 15 นาที นำส่งไปพบแพทย์ทันที

ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Environmental Impacts)

- เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ
- อาจก่อให้เกิดผลเสียต่อระบบนิเวศน์ทางน้ำ

ภาคผนวก ง.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

ISSN 0125-1724

วิศวสาร ลาดกระบัง

LADKRABANG ENGINEERING JOURNAL

ปีที่ 23 ฉบับที่ 2 มิถุนายน 2549

1. The Automatic Flight Control System of Flying Robot by FUZZY PI 1
ชาติ ฤทธิ์หิรัญ ปิติเขต สู้รักษา

2. การควบคุมการสั่นสะเทือนบนชั้นเก็บวัสดุด้วยวิธีไร้แรงบังคับ 7
สกนธ์ คล่องบุญจิต

3. การออกแบบระบบต่อลงดินของสถานีไฟฟ้าย่อยที่มีระยะห่างระหว่างตัวนำของตะแกรงตาข่ายห่างกันไม่สม่ำเสมอ 13
ฉัตรชัย เทียบศรไชย ศุลี บรรจงจิตร นิทัศน์ กฤษณจินดา

4. การหาค่ากระแสแอคทีฟของการสังเคราะห์กระแสอ้างอิงสำหรับวงจรกรองกำลังแอคทีฟหนึ่งเฟสโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมเพอร์เซ็บตรอนหลายชั้น 19
เอกวิทย์ หายักวงษ์ วิจิตร กิณเรศ สมชาติ จิรวิภากร

5. การออกแบบและวิเคราะห์บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์สำหรับหลอดฟลูออเรสเซนต์ 36 วัตต์ 2 หลอดที่สามารถหรี่แสงได้โดยใช้การออสซิลเลตด้วยตัวเอง 25
ณรงค์กรณ์ ผกาแก้ว วิจิตร กิณเรศ

6. ผลกระทบที่เกิดจากการแทรกสอดในระบบเซลลูลาร์ ซีดีเอ็มเอ แถบกว้าง เมื่อมีการใช้งานบริการลักษณะต่าง ๆ 31
คมสัน กอชัชวาล สมยศ จุณณะปิยะ พิเชฐ ม่วงนวล

7. การประยุกต์ใช้เวฟเลทแยกเสียงพยัญชนะ เสียงสระ ภาษาไทย 37
นริศ บุญศักดิ์เฉลิม ไกรสีห์ สงวัฒนา

8. การสังเคราะห์วัสดุประกอบจากขวดพอลิเอทิลีนที่ใช้แล้วกับเศษผงหนังสัตว์ เพื่อใช้ทดแทนไม้หมอนรางรถไฟ 42
จันทนา เทศเจริญ ไพศาล นาคพิพัฒน์

9. ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์แบบต่อเนื่องจากละอองไอแอลกอฮอล์ และ Ferrocene 48
ปฏิคม ศรีชมพล สุธิชัย ชัยสิทธิศักดิ์

10. การสร้างซาโดว์มาส์คโดยวิธีการชุบนิกเกิลด้วยไฟฟ้า 54
สุรศักดิ์ มนัสชง พิษณุนาถ จิวสิทธิประไพ ถนอม โลมาศ อนุรัตน์ วิศิษฏ์สรอรรถ
อดิสร เดือนตรานนท์ สุธิชัย ชัยสิทธิศักดิ์

11. การหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนทิวบ์จากแอลกอฮอล์ด้วยวิธี CVD 60
พิษณุนาถ จิวสิทธิประไพ จิติ หนูแก้ว อดิสร เดือนตรานนท์ สุธิชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์

12. ผลของความหนาชั้นฟิล์มเพชรและอินทรินซิคที่มีผลต่อโฟโตไดโอดโครงสร้าง p-Diamond / i-Si / n$^+$-Si 66
จำรัพงศ์ ศุภเดช วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง อัมพร โพธิ์ไทย

ผลของความหนาชั้นฟิล์มเพชรและอินทรินซิคที่มีผลต่อโฟโตไดโอดโครงสร้าง p-Diamond / i-Si / n^+-Si

Effect and Application of Diamond Films and Intrinsic Thickness for p-Diamond / i-Si / n^+-Si Structure Photodiode

จักรพงศ์ ศุภเดช วิฐทธิ์ จิตรุ่งเรือง *อัมพร ไพรีไข
ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
*TMEC, สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ
โทร 0-9128-8116 E-mail: gam73@thaimail.com

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้ได้นำเสนอคุณสมบัติพื้นฐานของโฟโตไดโอดโครงสร้างแบบใหม่คือ ฟิล์มบางเพชรชนิดพี/อินทรินซิก-ซิลิคอน/เอ็น-ซิลิคอน รวมถึงผลของคุณหภูมิ, ผลของความหนาชั้นฟิล์มเพชร และอินทรินซิคที่มีผลต่อโฟโตไดโอดชนิดนี้ โดยชั้นของฟิล์มเพชรชนิดพีที่มีความหนาตั้งแต่ 5-20 μm. ถูกสังเคราะห์ขึ้นบนแผ่นผลึกซิลิคอนชนิดอินทรินซิก, ระนาบ (111) ซึ่งมีสภาพต้านทานสูง 2000โอห์ม-ซม. ด้วยวิธี CVD แบบหลอดความร้อนที่ความดันบรรยากาศและใช้เอทิลแอลกอฮอล์ที่มีโบรอนไตรออกไซด์ (B_2O_3) ผสมอยู่ประมาณ 250 และ 500 ppm. เป็นสารตั้งต้น สำหรับชั้นซิลิคอนชนิดเอ็นสร้างขึ้นด้วยการแพร่อะตอมฟอสฟอรัสเข้มข้นเข้าไปทางด้านหลังของแผ่นผลึกซิลิคอนชนิดอินทรินซิก จากการทดลองพบว่าโครงสร้างดังกล่าวสามารถทำงานได้เช่นเดียวกับโฟโตไดโอดทั่วไป โดยกระแสมืดมีค่าประมาณ 2.3 μA/mm^2,แรงดันพังทลายมีค่าสูงมากกว่า 100 โวลต์ ค่าความหนาแน่นความจุไฟฟ้ามีค่าต่ำประมาณ 2-7 pF/mm^2 ที่แรงดันไบอัส -10โวลต์ นอกจากนี้การทดลองยังแสดงให้เห็นผลของคุณหภูมิที่มีต่อกระแสมืด, ผลของความหนาของฟิล์มเพชรที่มีต่อกระแสแสง และความหนาของชั้นอินทรินซิคที่มีต่อกระแสมืดอีกด้วย ซึ่งจากผลการทดลองนั้นยังต้องมีการปรับปรุงประสิทธิภาพของโฟโตไดโอดอยู่ แต่การทดลองนี้ก็ได้แสดงให้เห็นถึงการพัฒนาและการควบคุมประสิทธิภาพของโฟโตไดโอดชนิดนี้

คำสำคัญ : ฟิล์มบางเพชร ,โฟโตไดโอด

Abstract

This paper presents the characteristic of new structure of p-diamond/i-Si/n^+-Si photodiode, effects of temperature, diamond films thickness and intrinsic thickness for these photodiode.The thickness of p-diamond thin films, 5-20 μm was synthesized on high resistivity of 2,000 ohm.cm intrinsic silicon wafer (111), 265-275 μm thickness by hot filament CVD technique at atmosphere pressure and borontrioxide (B_2O_3) mix with ethyl-alcohol about 250-500 ppm. was used as carbon source. n^+-layer silicon was

formed by thermal diffusion of phosphorous atoms from the back side of intrinsic silicon wafer. From the experimental results, it was found that this structure of photodiode shows good basic properties of photodiode, which 2.3 $\mu A/mm^2$ of dark current, more over 100 Volts breakdown voltage and 2-7 pF/mm^2 of capacitance at -10 Volts. Moreover the experimental results perform the effects of temperature to dark current, diamond films thickness to photocurrent and intrinsic thickness to dark current. Although, the performance developments of this photodiode are needed but these experiments show the method to improvement and control efficiency of this photodiode.

Keyword : diamond thin films , photodiode

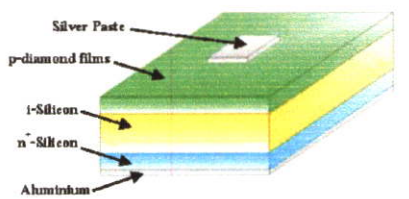
1. บทนำ

โฟโตไดโอดรนิด p-i-n เป็นตัวตรวจวัดแสงรนิดหนึ่ง ซึ่งมีข้อดีหลายประการเช่น ,กระแสมืดต่ำ ,แรงดันพังทลายสูง ,ค่าความจุไฟฟ้าต่ำ และมีความเร็วในการตอบสนองต่อสัญญาณแสงที่ดี[1],[2] ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงได้นำโฟโตไดโอดโครงสร้าง p-i-n มาพัฒนาเป็นโฟโตไดโอดโครงสร้าง p-diamond/i-Si/n^+-Si ซึ่งเป็นโครงสร้างใหม่ที่มีข้อดีอยู่หลายประการ โดยประกอบด้วย ฟิล์มเพชรที่มีหน้าที่เป็น window layer[3] และเป็นชั้นลดการสะท้อน, ชั้นอินทรินซิคซิลิคอนที่มีหน้าที่เป็น active layer และเซ็นซิลิคอนที่มีส่วนช่วยเพิ่มเขตปลอดพาหะในชั้นอินทรินซิคซิลิคอน ดังโครงสร้างในรูปที่ 1

บทความนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐาน, ผลของอุณหภูมิ, ผลของความหนาของชั้นฟิล์มเพชรและชั้นอินทรินซิคซิลิคอน ที่มีผลต่อโฟโตไดโอดโครงสร้าง p-diamond/i-Si/n^+-Si เพื่อการพัฒนาและควบคุมประสิทธิภาพของโฟโตไดโอดโครงสร้าง p-diamond/i-Si/n^+-Si รวมถึงเป็นการแสดงการประยุกต์ใช้งานของฟิล์มเพชรในด้านอิเล็กทรอนิกส์

2. โครงสร้างและหลักการทำงาน

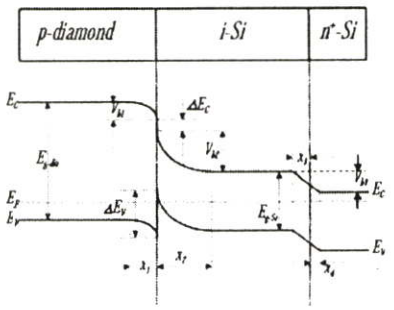
โฟโตไดโอดรนิด ที่มีโครงสร้าง p-diamond/i-Si/n^+-Si แสดงได้ดังรูปที่ 1 โดยรอยต่อระหว่างฟิล์มเพชรรนิดกับอินทรินซิกซิลิคอนเป็นรอยต่อแบบ Hetero junction และรอยต่อระหว่างอินทรินซิกซิลิคอนกับเซ็นซิลิคอนเป็นรอยต่อแบบ Homo junction ซึ่งบริเวณรอยต่อทั้งสองเป็นย่านที่ไวต่อแสง (active region) และในขณะที่โฟโตไดโอดถูกนำไปใช้งานโดยได้รับแรงดันไบอัส จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าในชั้นของซิลิคอนรนิดอินทรินซิกและบริเวณนี้จะเป็นชั้นที่ไวต่อแสงอีกด้วย (active layer) โครงสร้างนี้คล้ายกับโฟโตไดโอดรนิด p-i-n แบบ Homo junction ซึ่งมีคุณสมบัติที่ไวต่อแสงสูง ลักษณะแถบพลังงานของโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ที่ใช้ฟิล์มเพชรรนิดพี ในภาวะสมดุลความร้อนแสดงได้ดังรูปที่ 2



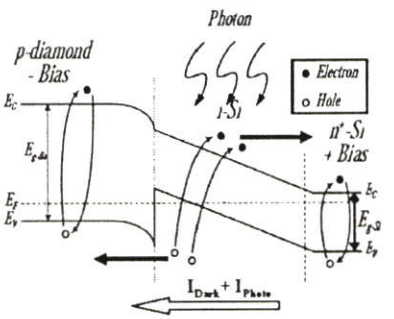
รูปที่ 1 โฟโตไดโอดโครงสร้าง p-diamond / i-Si / n^+-Si

ในการใช้งานก็เหมือนกับโฟโตไดโอดทั่วๆไป คือต้องให้แรงดันไบอัสแบบ reverse bias[4] ทำให้บริเวณปลอดพาหะที่รอยต่อจะขยายกว้างมากขึ้นตามแรงดันไบอัส นอกจากนี้เนื่องจากสภาพต้านทานที่สูงของชั้นอินทรินซิกจะทำให้เกิดมีสนามไฟฟ้าคลอดชั้นอินทรินซิกอีกด้วย ดังนั้นเมื่อมีแสงตกกระทบที่บริเวณรอยต่อและชั้นอินทรินซิก โฟตอนในแสงจะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล และสนามไฟฟ้าจะพัดพาให้คู่อิเล็กตรอน-โฮล เคลื่อนที่ไป

ยังขั้วไฟฟ้าบวกและลบตามลำดับ เกิดเป็นกระแสไฟฟ้าไหลในวงจร กระแสไฟฟ้าที่ได้นี้จึงเรียกว่า "กระแสแสง" ดังแสดงได้ในรูปที่ 3



รูปที่ 2 แถบพลังงานของโฟโตไดโอดโครงสร้าง p-Diamond / i-Si / n^+-Si ในภาวะสมดุลความร้อน



รูปที่ 3 แถบพลังงานของโฟโตไดโอดโครงสร้าง p-Diamond / i-Si / n^+-Si ขณะถูกไบอัสย้อนกลับ

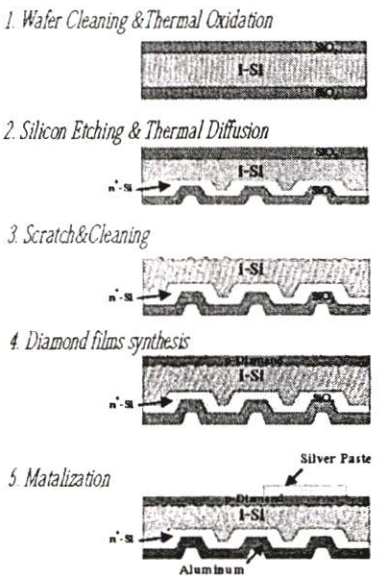
3. การสร้าง

3.1 การควบคุมความหนาของฟิล์มเพชร

เริ่มจากการนำแผ่นผลึกซิลิคอนชนิดอินทรินซิค ระนาบ(111) ที่มีสภาพต้านทาน 2,000 Ω.cm, หนา 275 μm มาสร้างชั้น SiO_2 หนา 10,600 Å ต่อไปจึงสร้างชั้น n^+-Si ที่ด้านหลังแผ่นผลึกซิลิคอนด้วยวิธี Thermal Diffusion ที่อุณหภูมิ 1,000 °C ได้ความหนาแน่นอะตอมสารเจือ 10^{17} cm^{-3} ลึก 3 μm. พร้อมกับได้ชั้น SiO_2 ใหม่ ด้านหลังซึ่งมีความหนาประมาณ 7,200 Å จากนั้นสลักชั้น SiO_2 ด้านหน้าออกเพื่อขัดแผ่นผลึกซิลิคอนด้วยครีมเพชร (Diamond Paste) ขนาด 1 μm ก่อนที่จะนำไปสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD แบบขดลวดร้อน (HFCVD) ที่ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิฐานรองประมาณ 700 °C ได้ความหนาของฟิล์มเพชรตั้งแต่ 5-20 μm. ขั้นตอนสุดท้ายเป็นการสร้างขั้วโลหะด้านหลังโดยใช้การระเหยอะลูมิเนียมในสุญญากาศ ส่วนด้านหน้านั้นใช้กาวเงินในการต่อขั้วออกไปใช้งาน

3.2 การควบคุมความหนาของชั้นอินทรินซิค

ลำดับขั้นตอนของกระบวนการสร้างและภาพตัดขวางของตัวตรวจจับแสงแสดงได้ดังในรูปที่ 4



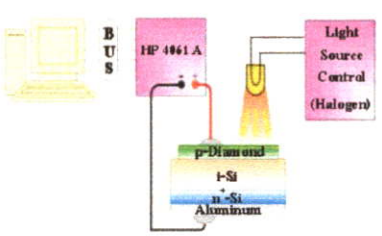
รูปที่ 4 ลำดับขั้นตอนการสร้างโฟโตไดโอดที่ควบคุมความหนาของชั้นอินทรินซิค

โดยเริ่มจากการนำแผ่นผลึกซิลิคอนชนิดอินทรินซิค ระนาบ(111) ที่มีสภาพต้านทาน 2,000 Ω.cm, หนา 275 μm มาสร้างชั้น SiO_2 หนา 10,600 Å แล้วสลักชั้น SiO_2 ออกบางส่วน เพื่อสลักชั้นอินทรินซิคให้บางลง

4.5-10 μm. ด้วยสารละลาย NaOH ต่อไปจึงสร้างชั้น n^+-Si ด้วยวิธี Thermal Diffusion ได้ความหนาแน่นอะตอมสารเจือ 10^{17} cm^{-3} ลึก 3 μm. จากนั้นสกัดชั้น SiO_2 ด้านหน้าออกเพื่อขัดแผ่นผลึกซิลิคอนด้วยผงริมเพชรที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของผลึกเพชรเท่ากับ 1 μm ก่อนที่จะนำไปสังเคราะห์ฟิล์มเพชรด้วยวิธี CVD แบบผลวดร้อนที่ความดันบรรยากาศ อุณหภูมิฐานรองประมาณ 700 °C ได้ความหนาของฟิล์มเพชรประมาณ 10 μm. ขั้นตอนสุดท้ายเป็นการสร้างขั้วโลหะด้านหลังโดยใช้การระเหยอะลูมิเนียมในสุญญากาศ ส่วนด้านหน้านั้นใช้กาวเงินในการต่อขั้วออกไปใช้งาน

4. การทดลองและผลการทดลอง

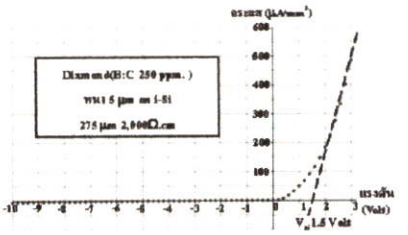
การทดลองเพื่อศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของโฟโตไดโอดโครงสร้าง p-diamond/i-Si/n^+-Si สามารถทำได้ โดยต่อวงจรวัดคุณสมบัติพื้นฐานดังรูปที่ 5 ซึ่งทางด้านอินพุทประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสงซาโอเจนที่สามารถปรับค่าความเข้มแสงค่าต่างๆ ได้ หรือเครื่องกำเนิดความร้อน(ในกรณีที่ศึกษาผลของอุณหภูมิ) ส่วนทางด้านเอาท์พุทประกอบด้วย pin photodiode ที่ต่ออยู่กับเครื่องวิเคราะห์คุณลักษณะของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ(Semiconductor analyzer)ของ HP รุ่น 4061 A โดยมีคอมพิวเตอร์เป็นตัวควบคุมและบันทึกผล นอกจากนั้นยังได้มีการวัดค่าความจุไฟฟ้า เพื่อศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงเมื่อความหนาของชั้นฟิล์มเพชร และชั้นอินทรินซิค มีการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 5 อุปกรณ์และการวัดลักษณะสมบัติระหว่างกระแส – แรงดันไฟฟ้า กระแสตรงของตัวตรวจจับแสง

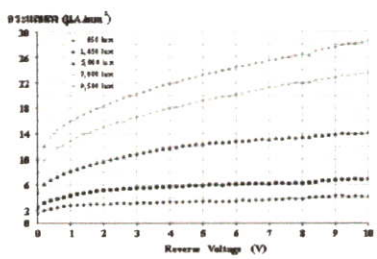
4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของโฟโตไดโอด

โฟโตไดโอดโครงสร้าง p-diamond/i-Si/n^+-Si ที่สร้างขึ้นมีคุณสมบัติระหว่างกระแส-แรงดัน ดังรูปที่ 6



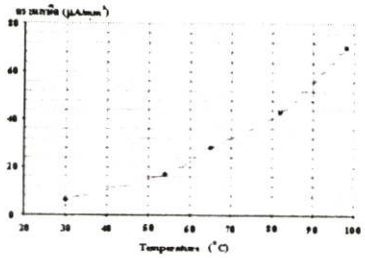
รูปที่ 6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันในภาวะมืด

โดยมีค่ากระแสมืดประมาณ 2.3μA/mm^2 ที่แรงดันไบอัส -5 โวลต์ และสามารถตอบสนองกับแสงได้เช่นเดียวกับโฟโตไดโอดชนิดอื่นๆ นอกจากนั้นยังพบว่ากระแสแสงจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อแรงดันไบอัสมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการขยายตัวของบริเวณเขตปลอดพาหะ ส่งผลให้มีพื้นที่ในการเกิดกระแสแสงเพิ่มขึ้น ดังนั้นกระแสแสงจึงมีค่าเพิ่มขึ้นตาม ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสง-แรงดันไฟฟ้า ที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ (Halogen Lamp)

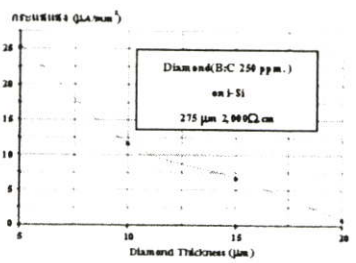
และเมื่อนำโฟโตไดโอดมาวัดหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสมืด-อุณหภูมิ ดังรูปที่ 8 พบว่าเมื่ออุณหภูมิมีค่าสูงขึ้นกระแสมืดก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากความร้อนทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ซึ่งในบริเวณที่มีสนามไฟฟ้านั้น คู่อิเล็กตรอน-โฮลจะเกิดการเคลื่อนที่ส่งผลให้เกิดเป็นกระแสมืด โดยมีค่าประมาณ 6.3-70 μA /mm^2 ในช่วงอุณหภูมิ 30-100 °C



รูปที่ 8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสมืด-อุณหภูมิ ที่แรงดันไบอัสย้อนกลับ 10 โวลต์

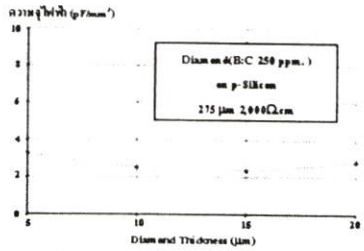
4.2 ผลของความหนาชั้นฟิล์มเพชรชนิดพี

เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นฟิล์มเพชรในโฟโตไดโอด พบว่ากระแสแสงที่ได้จากโฟโตไดโอดมีค่าลดลงเมื่อความหนาของฟิล์มเพชรมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากโฟตอนที่สามารถผ่านลงมาถึงชั้นอินทรินซิคได้น้อยลง ส่งผลให้กระแสแสงที่ได้มีค่าลดลง โดยที่ความหนาของชั้นฟิล์มเพชรมีค่า 5 μm จะให้กระแสแสงสูงสุด ซึ่งมีค่า 25.4 μA/mm^2 (9,500 lux) และกระแสแสงจะลดลงตามลำดับเมื่อฟิล์มเพชรมีความหนาเพิ่มขึ้น ดังความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสง-แรงดันในรูปที่ 9



รูปที่ 9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสง-ความหนาฟิล์มเพชร ที่แรงดัน 7 โวลต์

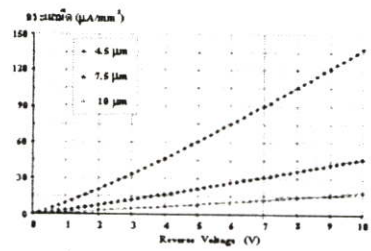
และเมื่อหากราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้า-ความหนาฟิล์มเพชร ดังรูปที่ 10 พบว่าค่าความจุไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากซึ่งมีค่าประมาณ 1 pF/mm^2 จึงสามารถสรุปได้ว่าความหนาของชั้นฟิล์มเพชรไม่มีผลต่อค่าความจุไฟฟ้า



รูปที่ 10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความจุไฟฟ้า-ความหนาฟิล์มเพชร ที่แรงดันไบอัสย้อนกลับ 10 โวลต์

4.3 ผลของความหนาชั้นอินทรินซิลิคอน

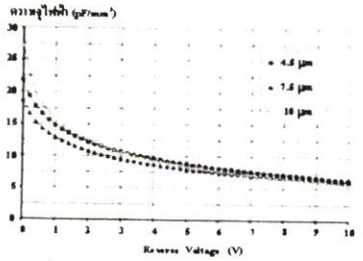
เมื่อความหนาของชั้นอินทรินซิคซิลิคอนมีการเปลี่ยนแปลงโดยอินทรินซิคมีความบางลงจะทำให้กระแสมืดจะมีค่าลดลง ดังกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสมืด-แรงดันไฟฟ้า ที่ความหนาในการสกัดชั้นซิลิคอนค่าต่างๆ ในรูปที่ 11 เนื่องจากในการเกิดกระแสมืดนั้นเกิดมาจากการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ในบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าซึ่งมีอยู่สองบริเวณคือ ส่วนของบริเวณเขตปลอดพาหะ และส่วนของชั้นอินทรินซิค ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ดังนั้นการลดความหนาของชั้นอินทรินซิคจึงสามารถลดการเกิดกระแสมืดได้



รูปที่ 11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสมืด-แรงดันไฟฟ้า ที่ความหนาในการสกัดชั้นซิลิคอนค่าต่างๆ

และเมื่อหากราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า ดังรูปที่ 12 พบว่าค่าความจุไฟฟ้ามีการ

เปลี่ยนแปลงน้อยมาก จึงสามารถสรุปได้ว่าความหนาของชั้นอินทรินซิค ไม่มีผลต่อค่าความจุไฟฟ้า



รูปที่ 12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า ที่ความหนาในการสกัดชั้นซิลิคอนต่างๆ

5. สรุป

ฟิล์มเพชรชนิดพีถูกสังเคราะห์ขึ้นด้วยวิธี CVD แบบขดลวดร้อน และถูกนำมาประยุกต์ใช้สร้างเป็นตัวตรวจจับแสงโครงสร้างแบบใหม่คือ ฟิล์มบางเพชรชนิดพี/อินทรินซิก-ซิลิคอน/เอ็น-ซิลิคอน ซึ่งจากการวัดและทดลองพบว่าตัวตรวจจับแสงที่สร้างขึ้นแสดงคุณสมบัติเป็นเรคติไฟร์ที่ดี และสามารถทำงานได้เช่นเดียวกับตัวตรวจจับแสงอื่นๆ โดยกระแสมืดมีค่าประมาณ 2.3 $\mu A/mm^2$ ที่แรงดันไบอัส -5 โวลต์, แรงดันพังทลายมีค่าสูงมากกว่า 100 โวลต์ นอกจากนั้นยังพบว่าสามารถควบคุมกระแสมืด และกระแสแสงได้ โดยผลการควบคุมความหนาของชั้นซิลิคอนชนิดอินทรินซิค และความหนาของชั้นฟิล์มเพชรชนิดพีตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า "กระแสแสงจะแปรผกผันกับความหนาของชั้นฟิล์มเพชรชนิดพี" และ"กระแสมืดจะแปรผันตามกับความหนาของชั้นซิลิคอนชนิดอินทรินซิค" ส่วนค่าความจุไฟฟ้าจะมีค่าค่อนข้างคงที่ เมื่อความหนาของชั้นฟิล์มเพชรและชั้นอินทรินซิค-ซิลิคอนมีการเปลี่ยนแปลง"

อย่างไรก็ดีการปรับปรุงคุณภาพโฟโตไดโอดยังมีอีกหลายวิธีด้วยกัน เพื่อให้ได้โฟโตไดโอดที่มีกระแสมืดค่าต่ำมากๆ และมีความไวต่อแสง ซึ่งจำเป็นต้องได้รับการพัฒนาต่อไป ซึ่งรายละเอียดกำลังอยู่ระหว่างการวิจัย

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ รศ.ดร. สมเกียรติ ศุภเดช ที่ช่วยให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ และตรวจแก้ต้นฉบับจนสมบูรณ์ ขอขอบคุณคุณ วิน บรรจงปรุ และ คุณนิมิต สมหวัง จาก TMEC ที่ช่วยวัดความหนาของชั้นฟิล์มเพชร และความหนาของชั้นอินทรินซิค ขอขอบคุณ คุณอภินัย ฉกษ์รัตน์ ที่ช่วยวัดความลึกของชั้นซิลิคอนชนิดเอ็น สุดท้ายขอบคุณสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย(TGIST) ที่ให้การสนับสนุนทุนการวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

[1] สมเกียรติ ศุภเดช ดรศักดิ์ อิ่มอุไร จิรวัฒน์ ปราบเขต อุรศักดิ์ ณิยมเจริญ, "กระบวนการสร้างและคุณสมบัติของโฟโตไดโอดชนิด p-i-n", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28, หน้า 1097-1100., 2548

[2] S.M. Sze, "Semiconductor Devices", 2nd edition John Wiley & Sons, Inc., 2002

[3] R. F. Davis, "Diamond films and coatings Development, properties, and application" Noyes publication., 1993

[4] สมเกียรติ ศุภเดช, "เซมิคอนดัคเตอร์ดีไวซ์" พิมพ์ครั้งที่ 1, แผนกตำราคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, หน้า 399, 2545

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 27

27th Electrical Engineering Conference

Volume II

สาขาบทความ

- ระบบควบคุมและการวัดคุม (CT)
- คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)
- การประมวลผลสัญญาณดิจิตอล (DS)
- อิเล็กทรอนิกส์ (EL)
- ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)

11-12 พฤศจิกายน 2547

โรงแรมโซฟิเทล ราชา ออคิด ขอนแก่น

ดำเนินการจัดประชุมโดย

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ตัวตรวจจับแสงแบบ Planar MSMโครงสร้าง Al/V-Si (Au Doped)/Al

The Al/V-Si (Au Doped)/Al Structure Planar MSM Photodetector

จักรพงศ์ ศุดผล วิฑูรย์ ฐิติรุ่งเรือง สุวศักดิ์ เนียมเจริญ และ *อัมพร โพธิโย
ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
3 หมู่ 2 ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520., *TMEC, สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ
โทร 0-2587-3246 โทรสาร 0-2587-3246 E-mail: gain13@thaimail.com

บทคัดย่อ

รายงานฉบับนี้ได้เสนอการทดลองและผลการทดลองสร้างตัวตรวจจับแสงแบบ Planar MSM (Metal-Semiconductor-Metal) โครงสร้างอะลูมิเนียม/ซิลิคอนชนิดV/อะลูมิเนียม(Al/V-Si/Al) ซึ่งชั้นซิลิคอนชนิดV เตรียมได้จากการแพร่อะตอมทองคำเข้าไปในผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น ตัวตรวจจับแสงที่สร้างได้ถูกนำไปวัดคุณสมบัติทั้งทางไฟฟ้าและทางแสง จากการทดลองและเปรียบเทียบกับตัวตรวจจับแสงแบบเดียวกันแต่โครงสร้างเป็นอะลูมิเนียม/ซิลิคอนชนิดเอ็น/อะลูมิเนียม (Al/n-Si/Al) ซึ่งไม่มีการแพร่อะตอมทองคำ พบว่าตัวตรวจจับแสงทั้งสองโครงสร้าง ต่างก็แสดงคุณสมบัติ Voltage control photo current ได้ ที่ความเข้มแสงและแรงดันไบอัสค่าเดียวกัน ตัวตรวจจับแสง Al/V-Si/Al ให้กระแสแสงที่มีค่าต่ำกว่าแต่มีผลการตอบสนองทางแสง (Photoresponse)ที่ดีกว่า ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวนี้เป็นผลของอะตอมทองคำในผลึกซิลิคอนที่ทำให้เกิดระดับพลังงานชนิดลึก และทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางการแทรป(Trapping) จึงทำให้อัตราการรวมตัวใหม่ของพาหะเพิ่มขึ้นและอายุของพาหะส่วนน้อย(minority carrier lifetime)ในผลึกซิลิคอนลดลง ข้อมูลเบื้องต้นที่ได้จากการทดลองนี้ แสดงให้เห็นแนวทางในการพัฒนาประสิทธิภาพการตอบสนองทางแสงของตัวตรวจจับแสงแบบ MSM ที่ใช้สารกึ่งตัวนำซิลิคอน และยังสามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้เพื่อให้ได้วงจรรวมประเภทแสงที่ใช้สารกึ่งตัวนำซิลิคอนได้อีกด้วย

คำสำคัญ : ตัวตรวจจับแสง , อะลูมิเนียม/ซิลิคอนชนิดV/อะลูมิเนียม , MSM

Abstract

This paper presents experiments and results from the fabrication of a planar Al/V-Si/Al structure MSM photodetector. A V-type silicon layer is prepared by gold diffusion technique. Both of the electrical and optical characteristics of the fabricated photodetector are measured and compared with the planar Al/n-Si/Al structure without gold atoms MSM photodetector. From the experimental results , it was found that both photodetectors showed the voltage control photocurrent characteristics, at the same light intensity and biased voltage. The photocurrent value of Al/V-Si/Al photodetector was smaller but the photoresponse was better. This is the effects of gold atoms in silicon ,because it creates the deep energy levels and acts as trapping center in the energy gap of silicon , then the recombination rate of excess carrier is increased, on the contrary the minority carrier lifetime in silicon is decreased. These basically experimental data are useful for the development of silicon based MSM photodetector and also can be applied to the silicon optoelectronic Integrated Circuits.

Keywords : Photodetector, Al/V-Si (Au Doped)/Al, MSM

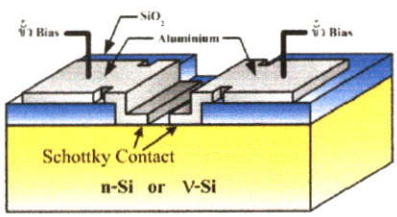
1. บทนำ

ตัวตรวจจับแสงแบบ โลหะ/สารกึ่งตัวนำ/โลหะหรือ MSM เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง (Opto-Devices) ที่มีบทบาทและถูกนำไปใช้งานอย่างกว้างขวาง เนื่องจากสามารถสร้างได้โดยง่ายไม่ยุ่งยากซับซ้อน เหมือนอุปกรณ์แสงอื่นๆ ทั้งยังให้คุณสมบัติที่ดีเช่น มีการตอบสนองทางแสงที่ดี ทำงานด้วยความเร็วสูง สัญญาณรบกวนต่ำ มีเสถียรภาพที่ดี[1-3] และสามารถนำไปใช้งานได้ง่ายไม่ต้องกังวลเรื่องการต่อแรงดันไบอัสผิดขั้วเพราะเป็นอุปกรณ์ที่ไม่มีขั้วบวก-ลบ

ปกติตัวตรวจจับแสงแบบ MSM จะประกอบด้วยรอยสัมผัสแบบ ช็อตคีย์ (Schottky contact) ที่เกิดขึ้นระหว่าง โลหะกับสารกึ่งตัวนำ 2 รอยสัมผัส วัสดุสารกึ่งตัวนำและโลหะที่ใช้ในตัวตรวจจับแสงแบบนี้สามารถใช้ได้หลายชนิด แต่ที่สร้างได้ง่ายราคาถูกและไม่ยุ่งยากได้แก่ โครงสร้างของ อะลูมิเนียม / ซิลิคอน / อะลูมิเนียม หรือ Al/Si/Al ซึ่งปกตินิยมใช้แผ่นผลึกฐานรองที่เป็นซิลิคอนชนิดเอ็น (n-type) อย่างไรก็ดีแม้ว่าตัวตรวจจับแสงแบบ MSM ที่สร้างจากซิลิกอนจะมีคุณสมบัติการตอบสนองทางแสงที่ดีกว่าและมีความเร็วในการทำงานที่สูงกว่าตัวตรวจจับแสงแบบอื่นๆที่ใช้ซิลิคอน เช่น ตัวตรวจจับแสงแบบ p-i-n diode , และแบบ APD แต่หากเมื่อเทียบกับตัวตรวจจับแสงแบบอื่นๆที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำประเภทสารประกอบเช่น GaAs และ GaP แล้ว ตัวตรวจจับ

แสงแบบ MSM ของซิลิคอนยังมีคุณสมบัติการตอบสนองทางแสงที่ด้อยกว่ามาก

เนื่องจากอะตอมทองคำเป็นอะตอมสารเจือระดับลึก(Deep level) ในผลึกซิลิคอน มีคุณสมบัติในการดักจับพาหะ (carrier trapped) และเป็นศูนย์กลางการรวมตัวของพาหะ จึงนิยมนำมาใช้เป็นสารเจือที่ช่วยเพิ่มความเร็วในการทำงานของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ เช่น ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ และ วงจรรวมแบบไบโพลาร์ประเภทสวิทช์ (switching bipolar ICs) เป็นต้น ดังนั้นเพื่อการพัฒนาคุณสมบัติการตอบสนองทางแสงของตัวตรวจจับแสงแบบ MSM ที่ใช้ผลึกซิลิคอน ให้มีความเร็วสูงยิ่งขึ้น คณะผู้วิจัยจึงได้เลือกอะตอมทองคำมาประยุกต์ใช้ในการทดลองนี้ โดยการแพร่ทองคำเข้าไปในผลึกฐานรองซิลิคอนชนิดเอ็น จะทำให้ผลึกสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นมีสภาพเปลี่ยนไปเป็น ซิลิคอนชนิด ν และทำให้ได้ตัวตรวจจับแสงแบบ MSM ที่มีโครงสร้างใหม่คือ Al/V-Si (Au Doped Si)/Al ดังแสดงในรูปที่ 1

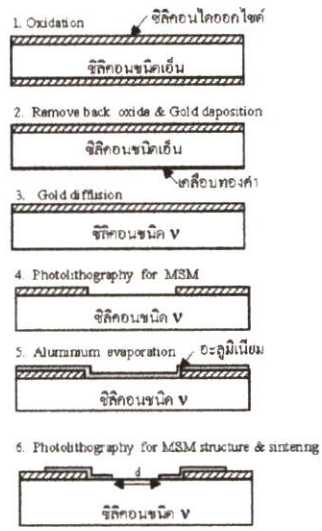


รูปที่ 1 ตัวตรวจจับแสงโครงสร้าง Al/V-Si(Au Doped) /Al

2. การสร้าง การทดลอง และผลการทดลอง

2.1 การสร้าง

กระบวนการสร้างตัวตรวจจับแสงแบบ Planar MSM โครงสร้าง Al/V-Si (Au Doped) /Al เริ่มต้นจากการนำแผ่นผลึกฐานรองซิลิคอนชนิดเอ็น ระนาบ (100) , สภาพต้านทาน 1.57 Ω.cm หนา 400 μm มาสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์โดยวิธี Thermal oxidation ที่อุณหภูมิ 1000 °C นาน 3 ชั่วโมง ได้ชั้น SiO_2 หนาประมาณ 5300 Å จากนั้นลอกชั้น SiO_2 ด้านหลังของแผ่นผลึกออกทั้งหมด ก่อนที่จะนำไปเคลือบด้วยทองคำโดยวิธี Vacuum Evaporation แล้วนำไปแพร่ (Thermal diffusion)ที่อุณหภูมิ 1000 °C เป็นเวลา 10 นาที เพื่อทำให้ผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นเปลี่ยนเป็น ชนิดν มีค่าความต้านทานแผ่นเป็น 1.28 kΩ/□ จากนั้นลอกชั้นทองคำด้านหลังทิ้งด้วยการใช้กรดกัดทอง แล้วเปิดลวดลายของชั้น SiO_2 ด้านหน้าแผ่นผลึกบริเวณที่จะสร้างตัวตรวจจับแสงด้วยเทคนิค Photolithography จากนั้นสร้างชั้นอะลูมิเนียมหนาประมาณ 1μm ที่ด้านหน้า ของแผ่นผลึกซิลิคอน ด้วยเทคนิค Vacuum Evaporation ที่ความดันประมาณ 10^{-6} Torr แล้วทำลวดลายของชั้นอะลูมิเนียม เพื่อเป็นขั้วไลหะโดยใช้เทคนิค Photolithographyอีกครั้งหนึ่ง สำหรับขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการสร้างคือการทำ Sintering เพื่อให้เกิดรอยสัมผัสโอห์มิคระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ โดยใช้อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 15 นาที ในบรรยากาศ ของก๊าซ N_2 ลำดับขั้นตอนของกระบวนการสร้างและภาพตัดขวางของตัวตรวจจับแสงแสดงได้ดังในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ลำดับขั้นตอนของการสร้างและภาพตัดขวางของตัวตรวจจับแสงแบบ Planar MSM โครงสร้าง Al/V-Si (Au Doped) /Al

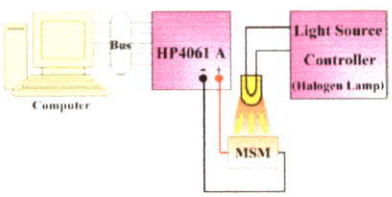
ส่วนตัวตรวจจับแสงในกรณีที่ไม่มีขั้นตอนของการเติมอะตอมทองคำ จะมีโครงสร้างเป็น Al/n-Si/Al ซึ่งนำมาใช้สำหรับการศึกษา และเปรียบเทียบ ผลของอะตอมทองคำในตัวตรวจจับแสงแบบ MSM ภาพถ่ายตัวตรวจจับแสงที่ผ่านกระบวนการสร้างและเสร็จสมบูรณ์อยู่บนแผ่นผลึกซิลิคอน และที่ถูกตัดแยกออกไปติดตั้งบนแผ่นปรินท์ เพื่อสะดวกในการนำไปทดสอบคุณสมบัติแสดงดังในรูปที่ 3 (ก) และ (ข)ตามลำดับ

(ก) (ข)

รูปที่ 3 (ก) ภาพถ่ายตัวตรวจจับแสงที่สร้างเสร็จบนแผ่นผลึกซิลิคอน และ (ข) ที่ตัดแยกไปติดตั้งบนแผ่นปรินท์

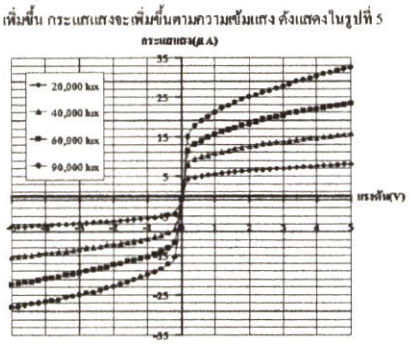
2.2 คุณลักษณะกระแส-แรงดัน

การวัดคุณลักษณะกระแสและแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ของตัวตรวจจับแสง ในขณะที่ไม่ได้รับแสง และเมื่อได้รับแสงที่ความเข้มค่าต่างๆ สามารถทำได้ด้วยเครื่องวิเคราะห์คุณลักษณะของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor analyzer)ของ HP รุ่น 4061 A ดังในรูปที่ 4 และแสงที่ใช้ ได้จากหลอดฮาโลเจนที่สามารถปรับความเข้มได้



รูปที่ 4 อุปกรณ์และการวัดคุณลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแส - แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของตัวตรวจจับแสง

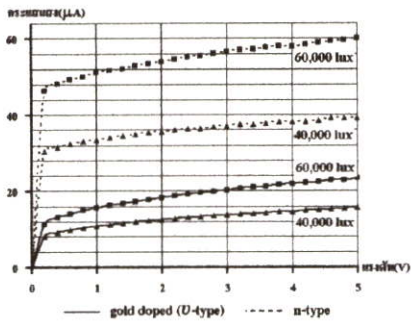
ผลการทดลองที่ได้จากตัวตรวจจับแสง ที่มีพื้นที่รับแสง 500 × 2000 μm^2 มีกระแสมืดราว 1-2 μA และเมื่อได้รับแสงที่มีความเข้มแสงเพิ่มขึ้น กระแสแสงจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มแสง ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 คุณลักษณะกระแสแสง-แรงดัน ไฟฟ้ากระแสตรงของตัวตรวจจับแสง Al/n-Si /Al (d = 500μm)

นอกจากนี้จะเห็นว่ากระแสแสงยังเพิ่มขึ้นกับแรงดันไบอัสอีกด้วย โดยเฉพาะที่ความเข้มแสงค่าสูงๆจะสังเกตเห็นได้ชัดเจน ปรากฏการณ์นี้เป็นคุณสมบัติพิเศษอย่างหนึ่งของตัวตรวจจับแสงแบบ MSM ที่ตัวตรวจจับแสงแบบอื่นๆไม่มี และถูกเรียกว่า " voltage control photo current " ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ทำให้ตัวตรวจจับแบบนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานเป็น "รูม่านตาอิเล็กทรอนิกส์" หรือ Electronic Iris[4] ของหุ่นยนต์ได้เป็นอย่างดี

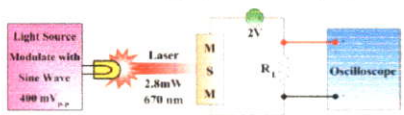
และจากการวัดคุณลักษณะ I-V เปรียบเทียบกับตัวตรวจจับแสงที่ไม่มีการเติมอะตอมทองคำหรือโครงสร้าง Al/n-Si/Al ดังแสดงในรูปที่ 6 พบว่าตัวตรวจจับแสงที่มีขนาดเดียวกัน ที่ความเข้มแสง และแรงดันไบอัสค่าเดียวกัน ตัวตรวจจับแสงที่มีการเติมอะตอมทองคำหรือ Al / V-Si / Al ให้ค่ากระแสแสงต่ำกว่าตัวตรวจจับแสงที่ไม่มีอะตอมทองคำ



รูปที่ 6 กราฟเปรียบเทียบ กระแสแสง-แรงดันของตัวตรวจจับแสงที่มีการเติมทอง และไม่เติมทอง (d = 500 μm)

2.3 คุณลักษณะการตอบสนองทางแสง

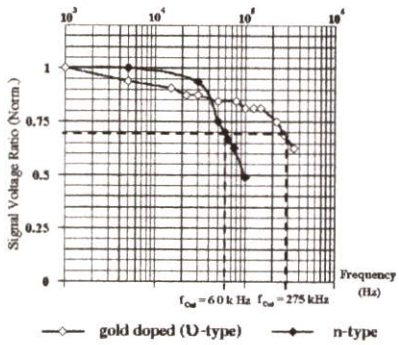
คุณลักษณะการตอบสนองทางแสงหรือ Photo Response วัดได้ด้วยอุปกรณ์ ดังในรูปที่ 7 โดยการ Modulate สัญญาณรูปไซน์ที่มีความถี่ค่าต่างๆ เข้ากับแสงเลเซอร์ ความยาวคลื่น 670 nm, กำลังงาน 2.8 mW แล้วฉายให้แก่ตัวตรวจจับแสง ซึ่งถูกให้แรงดันไบอัส 2โวลต์ จะทำให้มีกระแสแสงไหลในวงจรด้านเอาท์พุท ที่ความถี่ของสัญญาณรูปไซน์ค่าต่ำๆ จะทำให้ได้ขนาดของสัญญาณรูปไซน์ที่ด้านเอาท์พุทค่าสูง แต่เมื่อ



รูปที่ 7 การวัดคุณสมบัติ Photo Response ของ MSM

ความถี่ของสัญญาณรูปไซน์เพิ่มขึ้น ขนาดของสัญญาณที่ด้านเอาท์พุทจะลดลง อัตราส่วนของขนาดสัญญาณค่าสูงสุด กับขนาดสัญญาณที่ความถี่ค่าต่างๆซึ่งเรียกว่า "ค่านอร์มอไลซ์ผลตอบสนองทางแสง" (Normalized Photoresponse) ของตัวตรวจจับแสง โดยใช้ตัวต้านทาน R_L ค่า 10 kΩ และแรงดันไบอัส 2 โวลต์ ผลการทดลองแสดงดังในรูปที่ 8

ผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่าตัวตรวจจับแสง MSM โครงสร้าง Al / V-Si / Al ที่มีการเติมทองคำให้คุณสมบัติการตอบสนองทางแสง กับสัญญาณความถี่สูงได้ดีกว่าตัวตรวจจับแสงที่ไม่มีอะตอมทองคำ



รูปที่ 8 คุณสมบัติการตอบสนองทางแสงของ MSM
ที่ถูกเติมทอง และ ไม่ถูกเติมทอง (d = 500 μm)

3. สรุป วิจารณ์

ตัวตรวจจับแสงแบบ Planar MSM โครงสร้าง Al / V-Si / Al ถูกสร้างขึ้น และศึกษาเปรียบเทียบกับโครงสร้างAl/n-Si/Al โดยชั้นของซิลิคอนชนิดV เตรียมได้จากการแพร่อะตอมทองคำเข้าไปในซิลิคอนชนิดเอ็น จากการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของตัวตรวจจับแสงที่สร้างขึ้น พบว่าตัวตรวจจับแสงทั้งสองโครงสร้างสามารถแสดงคุณสมบัติ Voltage Control Photo Current ได้ เนื่องจากมีระยะห่างระหว่างขั้วไอหะ(d) กว้าง จึงมีลักษณะเป็น wide MSM photodetector เมื่อแรงดันไบอัสเพิ่มขึ้นความกว้างของบริเวณปลอดพาหะที่รอยต่อช็อตคีย์ด้านที่ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ(reverse biased)จะขยายกว้างขึ้น ทำให้พื้นที่ไวแสง(active area) มีค่าเพิ่มขึ้น จึงทำให้ได้กระแสแสงสูงขึ้น

ที่ความเข้มแสงและแรงดันไบอัสที่เท่ากัน ตัวตรวจจับแสงโครงสร้าง Al/V-Si/ Al จะให้กระแสแสงต่ำกว่า ซึ่งเป็นผลของอะตอมทองคำที่อยู่ในผลึกซิลิคอน ทำให้เกิดระดับพลังงานชนิดลึก(Deep level energy) ส่งผลให้อัตราการรวมตัวของโฟโตอิเล็กตรอน-โฮลมีค่าสูงขึ้น การสูญเสียกระแสแสงเนื่องจากการรวมตัว(recombination loss)จึงมีมาก ดังนั้นกระแสแสงจึงมีค่าต่ำ และเหมาะที่จะเป็นตัวตรวจจับแสงที่มีความเข้มสูง นอกจากนี้อะตอมทองคำยังทำให้อายุของพาหะมีค่าลดลงซึ่งส่งผลโดยตรงต่อความเร็วในการทำงานซึ่งจะสังเกตุเห็นได้จากคุณสมบัติการตอบสนองทางแสงต่อสัญญาณความถี่สูงที่ดีกว่าตัวตรวจจับแสงโครงสร้าง Al /n-Si / Al นึง 4.5 เท่า ซึ่งโครงสร้างของ Al /n-Si / Al ไม่มีผลของอะตอมทองคำดังกล่าว

ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็น ถึงแนวทางในการพัฒนาประสิทธิภาพการตอบสนองทางแสงของตัวตรวจจับแสงแบบ MSM ที่ใช้สารกึ่งตัวนำซิลิคอน และยังสามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้เพื่อให้ได้วงจรรวมประเภทแสงที่ใช้สารกึ่งตัวนำซิลิคอนได้อีกด้วย

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ ศุภเลข ที่ช่วยให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ และตรวจแก้ต้นฉบับจนสมบูรณ์ และขอขอบคุณทุนสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย(TGIST) ที่ให้การสนับสนุนทุนการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

[1] Yuang R.H., Chyi J. L., Lin W. and Tu Y.K.,Photonics Technology Letter, Vol..7, No.11,November, 1955,pp. 1333-1335.

[2] Harder Ch. S. , Van Zeghbroeck B. J., Kesler M.P., Meier H.P., Vettiger P., Webb D.J. and Wolf P., IBM Journal Develop, Vol. 34, No. 4, July 1990, pp. 568-584

[3] Mullin B.W., Soares S.F., McArdle K.A., Wilson C. M. and Brueck S.R.J., IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 3, No. 4, April 1991, pp. 360-362.

[4] S. Niemcharoen , K. Kobayashi , M. Kimura , K. Sato , Solid-State Electronics , Vol 45 , Issue 10 , October 2001 , pp1815-1819

นาย จักรพงศ์ ศุภเลข ปริญญาตรี วศ.บ. สาขาอิเล็กทรอนิกส์ สจล.

นาย วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง ปริญญาตรี วศ.บ. สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สจล. M.Eng สาขา Solid state electronics Tokai Univ.,Japan D.Eng สาขา Solid state electronics Tokai Univ.,Japan ปัจจุบันเป็นรองศาสตราจารย์ ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะ วิศวกรรมศาสตร์ สจล

นาย สุรศักดิ์ เนียมเจริญ ปริญญาตรี วท.บ.สาขาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ปริญญาโท วศ.ม. สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สจล. ปัจจุบันเป็นผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.

นาย อัมพร ไพรีใย ปริญญาตรี วท.บ.สาขาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ปริญญาโท วศ.ม. สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สจล. M.Eng จาก Katholieke Universiteit Leuven Ph.D. สาขา Electrical engineering จาก Katholieke Universiteit Leuven ปัจจุบันเป็นนักวิจัยศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC)

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28

28th Electrical Engineering Conference

EECON XXVIII

Volume II

ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)
คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)
การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DS)
อิเล็กทรอนิกส์ (EL)
งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรม... (GN)

dabos
WD Western Digital
NECTEC

การประยุกต์ใช้ฟิล์มเพชรเป็นตัวตรวจจับแสง MSM โครงสร้าง Al / n-Diamond / Al

Application of Diamond Films For Al / n-Diamond / Al Structure MSM Photo-detector

จักรพงศ์ ศุภเดช วิสุทธิ์ ลิขิรุ่งเรือง และ *อัมพร โพธิไชย

ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3 หมู่ 2 ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 ., *TMEC, สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

โทร 0-2587-3246 โทรสาร 0-2587-3246 E-mail: gain7N@thaimail.com

บทคัดย่อ

รายงานฉบับนี้ได้นำเสนอการสังเคราะห์และการประยุกต์ใช้ฟิล์มบางของเพชรเป็นตัวตรวจจับแสง แบบ Planar MSM โครงสร้าง อะลูมิเนียม/เพชรชนิดเอ็น/อะลูมิเนียม โดยชั้นของฟิล์มเพชรชนิดเอ็นซึ่งหนา 3-5 μm. ถูกสังเคราะห์ขึ้นด้วยวิธี CVD แบบขดลวดร้อน ที่ความดันบรรยากาศ บนแผ่นผลึกฐานรองซิลิคอนชนิดพีระนาบ(111) ซึ่งผิวหน้าถูกขัดด้วยครีมเพชร สารตั้งต้น(source)ที่ใช้คือเอทิลแอลกอฮอล์ที่มีฟอสฟอรัสเพนตอกไซด์(P_2O_5)ผสมอยู่ประมาณ 10,000 ppm. ชั้นของโลหะอลูมิเนียมถูกสร้างขึ้นบนฟิล์มเพชรและสกัดเป็นลวดลายด้วยกระบวนการโฟโต้ลิโธกราฟีเกิดเป็นโครงสร้างMSMมีระยะห่างระหว่างขั้วโลหะอลูมิเนียม 1,000 μm. รอยสัมผัสระหว่างโลหะอลูมิเนียมกับเพชรที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นมีคุณสมบัติเป็นรอยต่อแบบชอตคีย์ จากการวัดและทดลองพบว่าโครงสร้างดังกล่าวสามารถแสดงคุณสมบัติของตัวตรวจจับแสงได้เช่นเดียวกับตัวตรวจจับแสงทั่วไป โดยเมื่อได้รับแสงกระแสแสงจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มแสง และในภาวะมืดจะที่ได้รับแรงดันไบอัส 2 volt กระแสมืดมีค่าประมาณ 300 μA แรงดันพังทลายมีค่าในช่วง 4 - 6 volt แม้ว่าคุณสมบัติดังกล่าวข้างต้นเป็นต้องได้รับการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น เพื่อให้เหมาะกับการใช้งานจริง แต่การทดลองนี้ก็แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการนำฟิล์มเพชรซึ่งสังเคราะห์ด้วยวิธีการที่ง่ายและประหยัดมาประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์ทางแสง สำหรับการพัฒนาคุณสมบัติความไวแสง และอัตราเร็วในการทำงานอยู่ในระหว่างการวิจัย

คำสำคัญ : CVD แบบขดลวดความร้อน, ฟิล์มบางเพชร, ตัวตรวจจับแสง, MSM โครงสร้าง อะลูมิเนียม/เพชรชนิดเอ็น/ อะลูมิเนียม

Abstract

This paper presents the synthesis and application of diamond thin films for planar MSM Aluminum/ n-Diamond /Aluminum (MSM) structure photo detector . The n - diamond thin film of 3-5 μm thickness was synthesized by Hot Filament Chemical Vapor Deposition(HFCVD) technique at 1 atm. on p-type silicon(111) substrate, that was scratched by diamond paste. The mixed solution of P_2O_5(10,000 ppm) and ethyl alcohol was used as carbon source. Aluminum layer was entirely deposited on diamond film and patterned by photolithography process to form MSM structure. Spacing between aluminum pad is 1,000 μm. From the measurements and experiments , it was found that this diamond photo-detector shows the basic properties similar as the other photo-detector. Namely, the photocurrent increases with the intensity of light , at 2 volts of dark condition the dark current is 300 μA and breakdown voltage is in the range of 4-6 Volts. Although, the performance developments of this photo-detector are needed but these experiments show the possibility application of diamond films from the easiest and cheapest technique. The development of sensitivity and speed of this diamond photo detector are being investigated.

Keywords : Hot Filament CVD, diamond thin films, Photo detector, Aluminum / n-diamond / Aluminum MSM

1.คำนำ

ฟิล์มเพชรเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติพิเศษเหนือกว่าวัสดุอื่นๆ หลายประการทั้งทางกล ทางเคมี ทางไฟฟ้า และทางแสง เช่นความแข็ง ความทนทานต่อสารเคมีอื่นๆ เป็นตัวนำความร้อนที่ดี มีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนต่ำ เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี ทนต่อสนามไฟฟ้าสูง มีช่องว่างแถบพลังงานที่กว้าง(5.47eV) มีสภาพคล่องของพาหะนำประจุที่สูงและยอมให้คลื่นแสงที่มีความถี่ในย่านกว้างผ่านได้ดี ตั้งแต่ deep UV จนถึง far IR จากคุณสมบัติดังกล่าวนี้ทำให้ฟิล์มเพชรเป็นวัสดุทางวิศวกรรมที่ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างกว้างขวางโดยเป็นวัสดุเคลือบ อุปกรณ์หัวตัด วัสดุขัดผิว และที่สำคัญคือใช้สร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทนต่ออุณหภูมิสูง และรังสีที่มีพลังงานสูง เช่น เป็นตัวตรวจจับแสง และตรวจจับรังสี UV เป็นต้น [1]

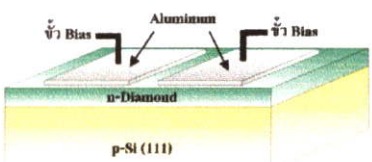
การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรสามารถทำได้หลายวิธีแต่ฟิล์มเพชรที่มีคุณภาพดีนิยมสังเคราะห์ด้วยกระบวนการ Chemical Vapor

Deposition (CVD) โดยการกระตุ้นปฏิกิริยาเคมีของก๊าซที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ(Hydrocarbon gas) ในบรรยากาศของก๊าซไฮโดรเจน เพื่อทำให้ได้ฟิล์มเพชรที่มีโครงสร้างเป็น Polycrystalline ซึ่งการกระตุ้นปฏิกิริยาดังกล่าวอาจทำได้ด้วยความร้อน (Hot filament CVD: HFCVD) หรือพลาสมา (Plasma CVD: PCVD) แต่วิธี Hot filament CVDหรือ CVD แบบขดลวดร้อน ทำได้ง่ายและประหยัดกว่า โดยมีอัตราการเกิดฟิล์มประมาณ 5 μm./hr., ฟิล์มเพชรที่ได้มีคุณภาพดีเหมาะที่จะนำไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ

MSM Photo detector[2] เป็นตัวตรวจจับแสงที่อาศัยหลักการทำงานของรอยต่อ Schottky ที่เกิดระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ จำนวน 2 รอยต่อ สร้างได้โดยง่ายไม่ยุ่งยากซับซ้อน เหมือนอุปกรณ์แสงอื่นๆ ทั้งยังให้คุณสมบัติที่ดีเช่น มีการตอบสนองทางแสงที่ดี ทำงานด้วยความเร็วสูง สัญญาณรบกวนต่ำ มีเสถียรภาพที่ดี[3-5] และสามารถนำไปใช้งานได้ง่ายไม่ต้องกังวลเรื่องการจ่ายแรงดันไบอัสผิดขั้วเพราะเป็นอุปกรณ์ที่ไม่มีขั้วแอก-อน และเนื่องจากฟิล์มเพชรมีข้อดีอยู่หลายประการดังที่ได้กล่าวไว้แล้ว ในงานวิจัยนี้จึงได้ทดลองสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดเอ็นโดยวิธี CVD แบบขดลวดร้อน และนำไปประยุกต์สร้างเป็นตัวตรวจจับแสงแบบ MSM โครงสร้างอะลูมิเนียม/เพชรชนิดเอ็น/อะลูมิเนียม เพื่อศึกษาคุณสมบัติและความเป็นไปได้ ในการใช้ฟิล์มเพชรเป็นอุปกรณ์ทางแสง

2. การสร้าง

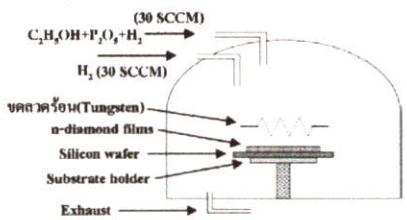
ในการทดลองนี้ได้ทำการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดเอ็น ด้วยกระบวนการCVD แบบขดลวดร้อนและนำฟิล์มเพชรที่ได้ไปสร้างเป็นตัวตรวจจับแสงแบบ Metal/Semiconductor/Metal หรือ MSM ที่มีโครงสร้างเป็น อะลูมิเนียม / ฟิล์มเพชรชนิดเอ็น / อะลูมิเนียม (Al/ n-Diamond /Al) ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ตัวตรวจจับแสงโครงสร้าง Al / n-Diamond / Al

2.1 การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดเอ็น

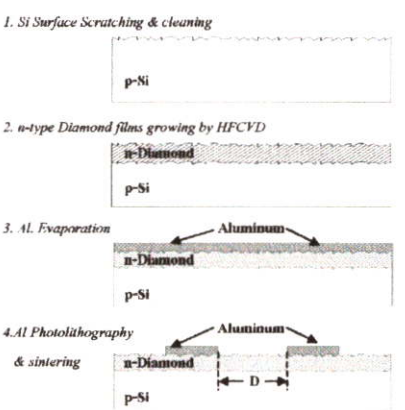
ทำการสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดเอ็นด้วยวิธี CVDแบบขดลวดร้อน (HFCVD)ที่ความดันบรรยากาศ[6] บนแผ่นผลึกฐานรองที่เป็นซิลิคอนชนิดพี่ระนาบ(111), สภาพต้านทาน 5-6 Ω.cm หนา 400 μm ซึ่งผิวของแผ่นผลึกฐานรองถูกขัดด้วยครีมเพชร เพื่อให้เกิดรอยขีดข่วน ซึ่งจะทำให้ฟิล์มเพชรเกิดขึ้นได้ดีและมีอัตราการเกิดสูง โดยการผ่านก๊าซไฮโดรเจนเข้าไปในสารละลายของเอทิลแอลกอฮอล์(C_2H_5OH) ที่มีฟอสฟอรัสเพนตอกไซด์(P_2O_5)ละลายอยู่ ซึ่งมีอัตราส่วนระหว่างฟอสฟอรัสต่อคาร์บอนประมาณ 10,000 ppm. ทำให้ได้ไอระเหยเกิดขึ้นและผ่านเข้าไปผสมกับก๊าซไฮโดรเจนบริสุทธิ์ใน Chamber ที่มีขดลวดทังสเตนและแผ่นซิลิคอนฐานรองวางอยู่ ดังในรูปที่ 2 อุณหภูมิของขดลวดทังสเตนและผิวแผ่นซิลิคอนมีค่าประมาณ 2,000 °C และ 700 °C ตามลำดับ ทำการสร้างเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ได้ฟิล์มเพชรชนิดเอ็นหนาประมาณ 5 μm



รูปที่ 2 อุปกรณ์การสังเคราะห์ฟิล์มเพชรชนิดเอ็นโดยวิธี HFCVD

2.2 การสร้างตัวตรวจจับแสง MSM โครงสร้าง อะลูมิเนียม/เพชรชนิดเอ็น/ อะลูมิเนียม

ชั้นอะลูมิเนียมที่หนาประมาณ 1 μm.ถูกสร้างขึ้นด้วยเทคนิค Vacuum Evaporation บนผิวหน้าทั้งหมดของฟิล์มเพชรที่สังเคราะห์ได้จากนั้นชั้นของอะลูมิเนียมถูกสลักทำเป็นลวดลายขั้วโลหะ ด้วยเทคนิค Photo-lithography เพื่อให้เป็นตัวตรวจจับแสงโครงสร้าง MSM มีระยะห่างระหว่างขั้วโลหะ 1,000 μm. ลำดับขั้นตอนของกระบวนการสร้างและภาพตัดขวางของตัวตรวจจับแสงแสดงได้ดังในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ลำดับขั้นตอนของการสร้างและภาพตัดขวางของตัวตรวจจับแสงแบบ Planar MSM โครงสร้าง Al/ n-diamond /Al

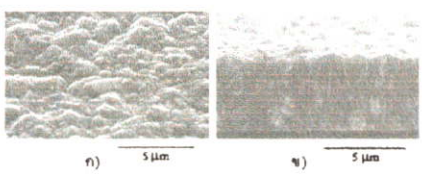
และตัวตรวจจับแสงโครงสร้าง Al/n-diamond/Al ที่สร้างเสร็จสมบูรณ์แสดงดังในรูปที่ 4

รูปที่ 4 ภาพถ่ายด้านบนของตัวตรวจจับแสงโครงสร้าง Al/n-diamond/Al ที่สร้างเสร็จสมบูรณ์

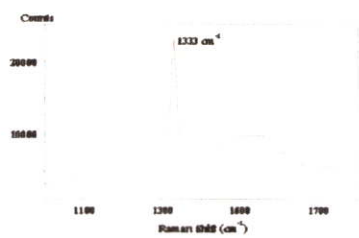
3.การทดลอง และผลการทดลอง

3.1 คุณสมบัติของฟิล์มเพชร

ผิวหน้าของฟิล์มเพชรชนิดเอ็นที่สังเคราะห์ได้มีลักษณะขรุขระและระนาบของผลึกเพชรมีลักษณะเป็นแบบ random มีความหนาประมาณ 5 μm. ดังแสดงในรูปที่ 5 และผลจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Raman spectroscope เพื่อตรวจสอบพันธะต่างๆของคาร์บอน พบว่า ยอดสูงสุดของ Raman spectrum อยู่ที่ 1333 cm^{-1} ดังในรูปที่ 6 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพันธะของฟิล์มส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นเพชร และมีกราไฟต์ปนอยู่บ้างเพียงเล็กน้อย



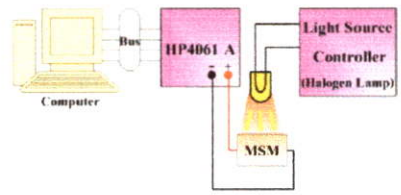
รูปที่ 5 ภาพถ่าย ก)ผิวหน้าด้านบน และ ข)ภาพตัดขวางของฟิล์มเพชร



รูปที่ 6 Raman spectra ของฟิล์มเพชรชนิดเอ็นที่สร้างขึ้น

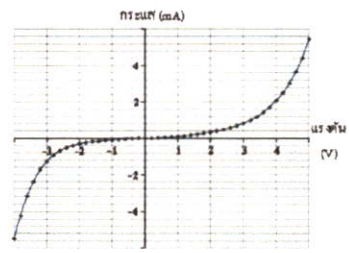
3.2 ลักษณะสมบัติ กระแส-แรงดัน

การวัดลักษณะสมบัติกระแสและแรงดันไบอัสไฟฟ้ากระแสตรง ของตัวตรวจจับแสงในขณะที่ไม่ได้รับแสง และเมื่อได้รับแสงที่ความเข้มค่าต่างๆ สามารถทำได้ด้วยเครื่องวิเคราะห์คุณลักษณะของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor analyzer)ของ HP รุ่น 4061 A ดังในรูปที่ 7

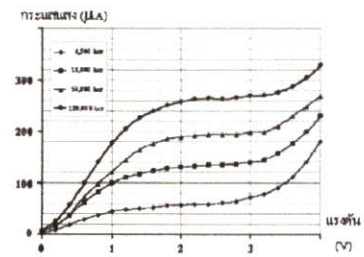


รูปที่ 7 อุปกรณ์และการวัดลักษณะสมบัติระหว่างกระแส - แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงของตัวตรวจจับแสง

ผลการทดลองที่ได้จากการวัดตัวตรวจจับแสงในขณะที่ไม่ได้รับแสงเมื่อได้รับแรงดันไบอัส แสดงดังในรูปที่ 8 โดยตัว MSM ที่มีพื้นที่รับแสง 0.2 mm^2 จะมีกระแสมืดประมาณ 300 μA ที่แรงดัน 2 volts. ในขณะที่ได้รับแสงจะมีกระแสแสงเกิดขึ้นและเมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้นกระแสแสงจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มแสงเช่นเดียวกับ ไฟได้โอดทั่วไป ดังแสดงในรูปที่ 9

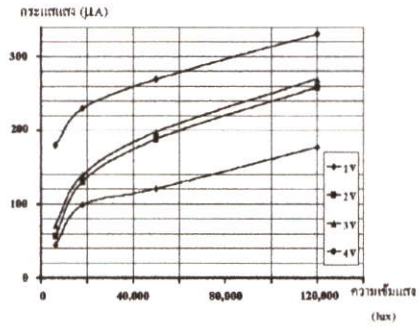


รูปที่ 8 กราฟลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไบอัสในภาวะมืด



รูปที่ 9 กราฟลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดันไบอัสที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ

นอกจากนี้จะเห็นว่าที่แรงดันไบอัสต่ำในช่วง 0-2 V. กระแสแสงจะเพิ่มขึ้นกับแรงดันไบอัสอย่างชัดเจน ซึ่งปรากฏการณ์นี้เป็นคุณสมบัติพิเศษอย่างหนึ่งของตัวตรวจจับแสงแบบ MSM ที่ตัวตรวจจับแสงแบบอื่นๆไม่มี และถูกเรียกว่า " voltage control photo current " โดยเกิดจากการขยายตัวของเขตปลอดพาหะ ในขณะที่แรงดันไบอัสเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นคุณสมบัติดังกล่าวนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานเป็น "รูม่านตาอิเล็กทรอนิกส์" หรือ Electronic Iris[7] ของหุ่นยนต์ได้เป็นอย่างดี และจากรูปที่ 9 ซึ่งเป็นกราฟลักษณะสมบัติกระแสแสง-ความเข้มแสงที่แรงดันต่างๆ แสดงให้เห็นถึงความเป็นเชิงเส้นที่ดีของ MSM โดยจะมีความเป็นเชิงเส้นอยู่ในช่วงความเข้มแสง 18,000 – 120,000 lux



รูปที่ 9 กราฟลักษณะสมบัติกระแสแสง-ความเข้มแสง
ที่แรงดันไบอัสต่างๆ

4.สรุปวิจารณ์

ฟิล์มเพชรชนิดเอ็นซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำถูกสังเคราะห์ขึ้นด้วยวิธี CVD แบบขดลวดร้อนซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและประหยัด และถูกนำมาประยุกต์ใช้สร้างเป็นตัวตรวจจับแสงแบบ MSM โครงสร้าง Al/n-Diamond/Al ซึ่งเกิดเป็นรอยต่อแบบชอตต์กี้ระหว่างอลูมิเนียมและฟิล์มเพชร 2 รอยต่อ ผลการวัดและทดลองพบว่าตัวตรวจจับแสงที่สร้างขึ้นสามารถทำงานได้เช่นเดียวกับตัวตรวจจับแสงอื่นๆ โดยกระแสมืดมีค่าประมาณ 300 μA ที่แรงดัน 2 Volt และแรงดันพังทลายมีค่าประมาณ 4 volts ในขณะได้รับแสง กระแสแสงจะเพิ่มขึ้นอย่างเชิงเส้นกับความเข้มแสงในช่วง 18,000 – 120,000 lux นอกจากนี้ที่ความเข้มแสงค่าคงที่กระแสแสงถูกควบคุมได้ด้วยแรงดันไบอัส โดยกระแสแสงจะเพิ่มขึ้นกับแรงดันไบอัส ผลการทดลองที่ได้แสดงถึงความเป็นไปได้ที่จะนำ Al/n-Diamond/Al ไปใช้งานเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสงที่ดี อย่างไรก็ดีการปรับปรุงคุณภาพของฟิล์มเพชร โครงสร้างและกระบวนการสร้างของตัวตรวจจับแสงเพื่อให้ได้ตัวตรวจจับแสงที่มีกระแสมืดค่าต่ำ มีความไวต่อแสง และมีค่าแรงดันพังทลายสูงขึ้นจำเป็นต้องได้รับการพัฒนาต่อไป ซึ่งรายละเอียดกำลังอยู่ระหว่างการวิจัย

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ รศ.ดร. สมเกียรติ ศุภเดช รศ.สมศักดิ์ เชียร์ศิริกุล ผศ.ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ และ รศ.ดร. เดิมพงศ์ เพ็ชรถูก ที่ช่วยให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ และตรวจแก้ต้นฉบับจนสมบูรณ์ ขอขอบคุณที่วิน บรรจงปลูก จาก TMEC ที่ช่วยถ่ายภาพ SEM และ บริษัท แก้วเจริญ ที่ช่วยวิเคราะห์ Raman ให้ และขอบคุณสถาบันบัณฑิตวิทยาลัยศาสตร์และเทคโนโลยีไทย(IGIST) ที่ให้การสนับสนุนทุนการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

[1] L Thaiyotin, et.al. "UV photodetector from schottky diode diamond film", Elsevier Science Diamond and Relate Matherials, March 2002, vol. 11, no. 3, pp. 442-445(4)

[2] จักรพงศ์ ศุภเดช, วิฑูรย์ รู้ดีรุ่งเรือง, สุรศักดิ์ เนียมเจริญ และอัมพร ไพรี่ไธ," ตัวตรวจจับแสงแบบ Planar MSM โครงสร้าง Al/V-Si (Au Doped)/Al", ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 27, เล่ม 2, หน้า 221-224

[3] Yuang R.H., Chyi J. L., Lin W. and Tu Y.K.,Photonics Technology Letter, Vol..7, No.11,November, 1955,pp. 1333-1335.

[4] Harder Ch. S. , Van Zeghbroeck B. J., Kesler M.P., Meier H.P., Vettiger P., Webb D.J. and Wolf P., IBM Journal Develop, Vol. 34, No. 4, July 1990, pp. 568-584

[5] Mullin B.W., Soares S.F., McArdle K.A., Wilson C. M. and Brueck S.R.J., IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 3, No. 4, April 1991, pp. 360-362.

[6] Ken Okano, et.al., Applied physics A 51, 1990, pp. 344-346.

[7] S. Niemcharoen , K. Kobayashi , M. Kimura , K. Sato , Solid-State Electronics , Vol 45 , Issue 10 , October 2001 , pp1815-1819

นาย จักรพงศ์ ศุภเดช : ปริญญาเอก วศ.บ. สาขาอิเล็กทรอนิกส์ สจล. ปัจจุบันเป็นนักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ สจล.

นาย วิฑูรย์ รู้ดีรุ่งเรือง: รองศาสตราจารย์ระดับ 9 ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะ วิศวกรรมศาสตร์ สจล วศ.บ. สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สจล. M.Eng สาขา Solid state electronics Tokai Univ.,Japan D.Eng สาขา Solid state electronics Tokai Univ.,Japan

นาย อัมพร ไพรี่ไธ: วศ.บ.สาขาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศิลปากร, วศ.ม. สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สจล. , M.Eng และ Ph.D. สาขา Electrical engineering จาก Katholieke Universiteit Leuven ,ปัจจุบันเป็นนักวิจัย ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC)

NAC2005
NSTDA Annual Conference
S&T in Thailand : Towards the Molecular Economy

เอกสารประกอบการนำเสนอบทความวิชาการ

วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทยสู่เศรษฐกิจยุคโมเลกุล

S&T in Thailand: Towards the Molecular Economy

การประชุมประจำปี สวทช. 2548

NSTDA Annual Conference 2005

28-30 มีนาคม 2548
ศูนย์ประชุมอุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย
สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

NSTDA NECTEC MTEC NANOTEC TMC

การศึกษาการสร้างตัวตรวจจับแสงแบบ Al/n-Diamond/Al

Study on the fabrication of Al/n-Diamond/Al Photodetector

จักรพงศ์ ศุภผล วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง และ *อัมพร ไทยไพ
ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
3 หมู่ 2 ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 ., *ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์,
ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ, สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ,
กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 51/4 หมู่ 1 ต. บึงคะเทียน อ.เมือง จ.ฉะเชิงเทรา 24000
โทร 0-9128-8116 โทรสาร 0-2587-3246 E-mail: gain73@thaimail.com

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้นำเสนอการศึกษาการสร้างตัวตรวจจับแสงแบบ อะลูมิเนียม/เพชรชนิดเอ็น/อะลูมิเนียม หรือ MSM โดยสารกึ่งตัวนำที่ใช้เป็นฟิล์มเพชรชนิดเอ็นซึ่งเตรียมได้ด้วยวิธีการ Hot Filament Chemical Vapor Deposition(HFCVD) ที่ความดันบรรยากาศ โดยใช้ฐานรองเป็นแผ่นผลึกซิลิคอนชนิดพี ระนาบ(111) ซึ่งผิวหน้าถูกขัดด้วยครีมเพชร ฟิล์มเพชรที่สร้างได้ถูกนำไปเคลือบอะลูมิเนียมด้วยวิธีการระเหยในสุญญากาศ ลวดลายอะลูมิเนียมสร้างได้ด้วยกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี เพื่อทำให้เกิดโครงสร้าง อะลูมิเนียม/เพชรชนิดเอ็น/อะลูมิเนียม ซึ่งระยะห่างระหว่างขั้วโลหะมีค่าเท่ากับ 1,000 µm ตัวตรวจจับแสงที่สร้างได้ถูกนำมาศึกษาและวัดคุณสมบัติทั้งทางไฟฟ้าและทางแสง ผลการทดลองพบว่าตัวตรวจจับแสงแบบ อะลูมิเนียม/เพชรชนิดเอ็น/อะลูมิเนียม สามารถแสดงคุณสมบัติ "Voltage control photocurrent" ได้เช่นเดียวกับ MSM ที่มีโครงสร้างแบบ อะลูมิเนียม/ซิลิคอนชนิดเอ็น/อะลูมิเนียม [1] ซึ่งข้อมูลเบื้องต้นที่ได้จากการทดลองนี้ แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการนำฟิล์มเพชรไปประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์ทางแสง

คำสำคัญ : ตัวตรวจจับแสง, อะลูมิเนียม/เพชรชนิดเอ็น/อะลูมิเนียม, MSM

Abstract

This paper presents the fabrication of Al/n-Diamond/Al or MSM. In this case semiconductor is n-type diamond films, that was prepared by Hot Filament Chemical Vapor Deposition(HFCVD) method at 1 atm on p-type silicon(111) substrate, which scratched by diamond paste. Diamond films was coated with aluminium by evaporation method and patterning by photolithography technique for making Al/n-Diamond/Al structure. Metal pad spacing is 1,000 µm. Finally, the electrical and optical characteristics of photodetector are measured. The experimental results show that Al/n-Diamond/Al photodetector exhibit the "Voltage control photocurrent" characteristic similar to the Al/n-Silicon/Al structure MSM photodetector[1]. These basically experimental data show the possibility application of diamond films on opto-devices.

Keyword : Photodetector, Al/n-Diamond/Al, MSM

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นาย จักรพงศ์ ศุภเดช
วัน เดือน ปีเกิด	วันที่ 16 พฤศจิกายน 2525 ที่กรุงเทพมหานคร
ที่อยู่	67/63 ซ.ประชาชื่น 33 ถ.ประชาชื่น บางซื่อ กรุงเทพฯ 10800
ประวัติการศึกษา	2546 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1.) กระบวนการสร้างวงจรรวม
	2.) เทคนิคการวัดอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ
	3.) กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มเพชร

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

[1] จักรพงศ์ ศุภเดช วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง สุรศักดิ์ เนียมเจริญ อัมพร โพธิ์ใย, "ตัวตรวจจับแสงแบบ Planar MSM โครงสร้าง Al/V-Si (Au Doped)/Al ", ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 27, เล่ม 2, หน้า 221-224

[2] จักรพงศ์ ศุภเดช วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง อัมพร โพธิ์ใย, "การประยุกต์ใช้ฟิล์มเพชรเป็นตัวตรวจจับแสง MSM โครงสร้าง Al / n-Diamond / Al", ประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 28, เล่ม 2, หน้า 1093-1096

[3] จักรพงศ์ ศุภเดช วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง อัมพร โพธิ์ใย, "ผลของความหนาชั้นฟิล์มเพชรและอินทรินซิคที่มีผลต่อโฟโตไดโอดโครงสร้าง p-Diamond / i-Si / n^{+}-Si", วิศวสาร-ลาดกระบัง, ปีที่ 23, ฉบับที่ 2, มิถุนายน 2549