

การประดิษฐ์โฟโตนิกไฮบริด
จากสารกึ่งตัวนำเพนทาซีนและแคดเมียมซัลไฟด์

FABRICATION OF PENTACENE AND CADMIUM SULPHIDE
SEMICONDUCTOR HYBRID PHOTODETECTOR

อรุณพ จันทน์หอม
ANNOP CHANHOM

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยที่สนับสนุนโดยศูนย์วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยี
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2551

KMITL-2008-SC-M-030-053

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริด
จากสารกึ่งตัวนำเพนทาซีนและแคดเมียมซัลไฟด์

FABRICATION OF PENTACENE AND CADMIUM SULPHIDE
SEMICONDUCTOR HYBRID PHOTODETECTOR



อรรณพ จันทรหอม

ANNOP CHANHOM

เลขหมู่..... 87892
เลขทะเบียน.....
วัน,เดือน,ปี 19 ส.ค. 2552



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2551

KMITL-2008-SC-M-030-053

COPYRIGHT 2008

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การประดิษฐ์โฟโตดีเทกเตอร์ไฮบริดจากสารกึ่งตัวนำเพนทาซีนและแคดเมียมซัลไฟด์
Fabrication of Pentacene and Cadmium Sulphide Semiconductor Hybrid Photodetector
นักศึกษา นายอรรณพ จันทร์หอม
รหัสประจำตัว 47064151
ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.จิติ หนูแก้ว
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ดร.สุวัฒน์ โสภิตพันธ์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.วิษณุ	เพชรภา	
รศ.ดร.จิติ	หนูแก้ว	
ดร.สุวัฒน์	โสภิตพันธ์	
ดร.สิริพัฒน์	ประโทนเทพ	

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ 15 ตุลาคม 2551 เวลา 15.00 น. เป็นต้นไป

สถานที่สอบ ณ อาคารจุฬารณวลัยลักษณ์ 1 ห้อง APL 602

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีรวัฒน์ มงคลอัครวัฒน์)

คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

วันที่ 30 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2551

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประดิษฐ์โพลีโอดีเทคเตอร์ไฮบริดจากสารกึ่งตัวนำ เพนทาซีนและแคดเมียมซัลไฟด์
นักศึกษา	นายอรรณพ จันทร์หอม
รหัสประจำตัว	47064151
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
พ.ศ.	2551
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. จิติ หนูแก้ว
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.สุวัฒน์ ไสภิตพันธ์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาและสร้างสิ่งประดิษฐ์โพลีโอดีเทคเตอร์ไฮบริดจากฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์เพนทาซีนและสารอนินทรีย์แคดเมียมซัลไฟด์ด้วยระบบระเหยสารอินทรีย์ด้วยความร้อน จากการศึกษาสมบัติทางโครงสร้างความเป็นผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์พบว่าฟิล์มบางเพนทาซีนมีมุมการเลี้ยวเบน (2θ) ที่ 5.72° และ 6.12° จัดเรียงตัวผลึกแบบเฟสฟิล์มบางผลึกเดี่ยว (single crystal thin film phase) และ เฟสแบบก้อนผลึกไตรคริติก (triclinic bulk phase) เมื่อความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้นทำให้การจัดเรียงตัวความเป็นผลึกเป็นแบบเฟสแบบก้อนผลึกไตรคริติกเพิ่มขึ้นและส่งผลทำให้เฟสฟิล์มบางผลึกเดี่ยวลดลง ส่วนฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์มีมุมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์อยู่ที่ 26.44° โดยจัดเรียงตัวผลึกแบบเฮกซะโกนอล เมื่อศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงของเพนทาซีนและแคดเมียมซัลไฟด์อยู่ในช่วง 400 – 700 นาโนเมตร และในช่วง 400-550 นาโนเมตร จากการศึกษาสมบัติของอุปกรณ์โพลีโอดีเทคเตอร์ไฮบริดจากโครงสร้าง ITO/PEDOT/CdS(100)/Pentacene(50,100,150nm)/Al และโครงสร้าง ITO/PEDOT/Pentacene(50nm)/CdS(50,100,150 nm)/Al พบว่ามีการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงในช่วงความยาวคลื่น 350-700 นาโนเมตรเช่นเดียวกัน โดยที่ค่า Fill Factor (FF) มากสุดคือ 0.69 ที่ความหนาฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ 50 นาโนเมตร

Thesis Title	Fabrication of Pentacene and Cadmiumsulphide Semiconductor Hybrid Photodetector
Student	Mr. Annop Chanhom
Student ID.	47064151
Degree	Master of Science
Program	Applied Physics
Year	2008
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr.Jiti Nukeaw
Thesis Co – Advisor	Dr. Suwat Sopitpan

ABSTRACT

This thesis studies and fabricates the hybrid photodetector from pentacene organic semiconductor and cadmiumsulphide (CdS) inorganic semiconductor using low temperature organic evaporator. The crystallinity characteristic of Pentacene is investigated with X-ray diffraction spectrometers which yield the diffraction angle (2θ) results at 5.72° and 6.12° . The obtained diffraction angle indicates that the Pentacene thin film has structure in the form of single crystal thin film phase and triclinic bulk phase. As the Pentacene thickness is increased, its triclinic bulk phase crystalline will be risen and its single crystal thin film phase will be decreased. For CdS structural study, which XRD, its diffraction angle of 26.44° refer to the crystal structural of hexagonal. The optical absorption characteristic of Pentacene and CdS is in the range of 400 -700 nm and 350-550 nm, respectively. In fabrication and optical response measurement of the hybrid photodetector device with the structural ITO/PEDOT/CdS(100)/Pentacene(50,100,150nm)/Al and ITO/PEDOT/Pentacene(50nm)/CdS(50,100,150 nm)/Al, Both structural exhibit the optical respond in the region of 350-700 nm. In case of 50 nm thick of CdS layer, the device has the highest efficiency with the number of Fill Factor (FF) of 0.69.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้อย่างดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาจาก รศ.ดร.จิตติ หนูแก้ว ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ และ ดร.สุวัฒน์ โสภิตพันธ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ข้าพเจ้ารู้สึกทราบบ้างในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ทั้งสองท่านในทุกด้านและขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุก ๆ ท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ อ.ปกรณ์ พีโม และพี่เบญ ที่ให้คำปรึกษาในทุกๆ ด้าน ในการทำวิจัย รวมทั้งช่วยตรวจสอบความถูกต้องของวิทยานิพนธ์ได้เป็นอย่างดี ขอขอบคุณพี่ๆ ทุกคนในห้องปฏิบัติการวิจัยควอนตัมและสารกึ่งตัวนำทางแสงที่คอยให้คำปรึกษา และให้กำลังใจในการทำงานเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณนวัตพันธ์และอนุศิษย์ที่คอยซึ่งเป็นเพื่อนที่ให้คำปรึกษาในการแก้ปัญหาและข้อเสนอแนะต่างๆและสอนการใช้เครื่องสปีน PEDOT

ขอขอบคุณสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (TGIST) ที่สนับสนุนทางด้านทุนการศึกษาจนสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท

ขอขอบคุณบุคคลที่ข้าพเจ้าไม่ได้เอ่ยนามทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือคำแนะนำต่างๆ และคอยให้กำลังใจเสมอมา

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกๆด้าน ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ ลุล่วงด้วยดี

คุณค่าและคุณประโยชน์ที่ได้จากการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

อรรณพ จันทรหอม

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 การดำเนินงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	5
2.1 ทฤษฎีพื้นฐานของสารอินทรีย์.....	5
2.1.1 พันธะของสารอินทรีย์.....	5
2.1.1.1 ออร์บิทัลอะตอม	5
2.1.1.2 ทฤษฎีพันธะเวเลนซ์ (Valence bond theory).....	7
2.1.1.3 ไฮบริดออร์บิทัล.....	10
2.2 สารกึ่งตัวนำอินทรีย์ (Organic Semiconductor)	12
2.2.1 โมเลกุลขนาดเล็ก (small molecule)	15
2.2.2 คอนจูเกตพอลิเมอร์ (conjugated polymer)	16
2.3 สิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์ (Photodetector).....	17
2.3.1 รอยต่อของโลหะและสารกึ่งตัวนำ (Metal-semiconductor junction).....	17
2.3.1.1 รอยต่อแบบชอตกี้แบเรีย (schottky barriers contact).....	17
2.3.1.2 รอยต่อโอห์มิก (Ohmic Contact).....	20
2.3.2 หลักการทำงานของตัวตรวจจับแสงชอตกี้แบเรีย	22
2.3.3 กระบวนการเกิดการไหลของกระแส (Current transport process)	23

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.4 โครงสร้างพื้นฐานของอุปกรณ์โฟโตดีเทคเตอร์.....	25
2.3.4.1 แผ่นฐานรองรับ (substrate)	25
2.3.4.2 ขั้วไฟฟ้าแอโนด (anode)	26
2.3.4.3 ชั้นฟิล์มสาร PEDOT	26
2.3.4.4 ชั้นรับแสง (Active layer)	27
2.3.4.5 ชั้นขั้วไฟฟ้าแคโทด (Cathode)	28
2.4 การดูดกลืนแสงของ เอ็กซิตรอน (Exciton).....	28
2.5 สภาพตอบสนอง (Responsivity).....	29
2.5.1 ผลการตอบสนองเชิงสเปกตรัม (Spectral Response).....	30
2.6 สมบัติพื้นฐานของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์เพนตาซีน (Pentacene).....	30
2.7 สมบัติพื้นฐานของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์แคดเมียมซัลไฟด์.....	31
2.8 หลักการเครื่องมือวิเคราะห์สมบัติเฉพาะของฟิล์มบาง.....	32
2.8.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....	32
2.8.2 การศึกษาสมบัติทางแสงด้วยวิธีวัดสเปกตรัมการทะลุผ่านของแสง.....	36
2.8.3 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าด้วยการตอบสนองความยาวคลื่นแสงของ สิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์	40
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	43
3.1 ระบบระเหยสารอินทรีย์.....	44
3.2 สปินเนอร์ (Spinner Coating).....	49
3.3 การทำความสะอาดแผ่นฐานรองรับ.....	50
3.3.1 การทำความสะอาดพื้นผิวหน้าแผ่นกระจก.....	50
3.3.2 การทำความสะอาดพื้นผิวหน้าแผ่นฐานรองรับอินเดียมทินออกไซด์.....	51
3.4 เงื่อนไขการปลูกฟิล์มบางเพนทาซีนและสารแคดเมียมซัลไฟด์.....	53
3.5 เงื่อนไขการสร้างสิ่งประดิษฐ์โอบริคโฟโตดีเทคเตอร์ระหว่าง ฟิล์มบางเพนทาซีนกับแคดเมียมซัลไฟด์.....	54
3.6 ขั้นตอนการตรวจสอบสมบัติของฟิล์มบาง.....	55
3.6.1 ระบบวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....	55
3.6.2 ระบบวัดUV-VIS Spectrophotometer	56

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.7 การตรวจสอบสมบัติของสิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์.....	57
3.7.1 การตรวจสอบสมบัติของการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงของ สิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์	57
3.7.2 การตรวจสอบสมบัติกระแส - แรงดันของสิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์.....	58
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล.....	59
4.1 ผลจากการวิเคราะห์สมบัติของสารเพนทาซีนที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาบน ฐานรองรับกระจก.....	60
4.1.1 ผลการตรวจวิเคราะห์โครงสร้างความเป็นผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของ รังสีเอ็กซ์(X-ray Diffractometer, XRD) ของฟิล์มบางเพนทาซีน.....	60
4.1.2 ผลจากการวัดค่าการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางเพนทาซีน.....	63
4.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่มีการเปลี่ยนแปลง ความหนาบนฐานรองรับที่เป็นกระจก.....	65
4.2.1 ผลการตรวจวิเคราะห์โครงสร้างความเป็นผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของ รังสีเอ็กซ์(X-ray Diffractometer, XRD) ของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์.....	65
4.2.2 ผลการวัดการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์.....	66
4.3 การตรวจสอบสมบัติของสิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์.....	68
4.3.1 ผลการทดลองสร้างโฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้าง ITO/PEDOT/Pentacene(100nm)/Al	69
4.3.1.1 ผลการวัดการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงโฟโตดีเทคเตอร์ โครงสร้าง ITO/PEDOT/Pentacene(100 nm)/Al.....	70
4.3.1.2 ผลการวัดกระแส - แรงดัน โฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้าง ITO/PEDOT/Pentacene(100 nm)/Al.....	71
4.3.2 ผลการทดลองสร้างโฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้าง ITO/PEDOT/CdS(100nm)/Al	72
4.3.2.1 ผลการวัดการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงโฟโตดีเทคเตอร์ โครงสร้าง ITO/PEDOT/CdS(100nm)/Al.....	73
4.3.2.2 ผลการวัดกระแส - แรงดัน โฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้าง ITO/PEDOT/CdS(100nm) /Al.....	74

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3.3 ผลการทดลองสร้างโฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริดโครงสร้าง	
ITO/PEDOT/CdS/Pentacene/Al.....	76
4.3.3.1 ผลจากการวัดการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสง	
โฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริดโครงสร้าง	
ITO/PEDOT/CdS(100nm)/Pentacene(50,100,150nm)/Al....	77
4.3.3.2 ผลการกระแส – แรงดันโฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริดโครงสร้าง	
ITO/PEDOT/CdS(100nm)/Pentacene(50,100,150 nm)/Al....	78
4.3.4 ผลจากการทดลองโฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริดโครงสร้าง	
ITO/PEDOT/Pentacene/CdS/Al.....	79
4.3.4.1 ผลจากการวัดการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสง	
โฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริดโครงสร้าง	
ITO/PEDOT/Pentacene(50nm)/CdS(50,100,150nm)/Al....	80
4.3.4.2 ผลการเปรียบเทียบการวัดการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงโฟโตดีเทคเตอร์จากโครงสร้าง	
ITO/PEDOT/Pentacene(50nm)/CdS(50nm)/Al กับ ค่าของการดูดกลืนแสงของเพนทาซีนที่ความหนา 50 นาโนเมตร...	81
4.3.4.3 ผลการวัดกระแส – แรงดันโฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริดโครงสร้าง	
ITO/PEDOT/Pentacene(50nm)/CdS(50,100,150nm)/Al....	83
4.3.4.4 ผลการวัดกระแส – แรงดันโฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริดโครงสร้าง	
ITO/PEDOT/Pentacene(50 nm)/CdS(50,100,150 nm)/Al	
กราฟแกน y เป็นเซมิลอกซ์.....	84
4.3.4.5 ผลการวัดการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสง	
โฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริดโครงสร้าง	
ITO/PEDOT/Pentacene(100nm)/CdS(50nm)/Al.....	88
4.3.4.6 ผลการวัดกระแส – แรงดันโฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริดโครงสร้าง	
ITO/PEDOT/Pentacene(100 nm)/CdS(50nm)/Al	
เปรียบเทียบกับ โครงสร้างITO/PEDOT/Pentacene	
(100 nm)/CdS(50nm)/Al.....	90

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3.4.7 ผลการวัดกระแส – แรงดัน โฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริด โครงสร้างITO/PEDOT/Pentacene(50 nm)/CdS(50 nm)/Al เปรียบเทียบกับโครงสร้าง ITO/PEDOT/Pentacene (100 nm)/CdS(50nm)/Al กราฟแกน y เป็นเซมิลอกซ์.....	89
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	92
บรรณานุกรม.....	94
ประวัติผู้เขียน.....	96

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ตารางการแสดงผลสมบัติของสารเพนทาซีน.....	31
ตารางที่ 2.2 ตารางการแสดงผลสมบัติของสารแคดเมียมซัลไฟด์.....	31
ตารางที่ 3.1 แสดงเงื่อนไขในการปลูกฟิล์มบางเพนทาซีนและสารแคดเมียมซัลไฟด์ โดยระบบระเหยสารอินทรีย์และอนินทรีย์ด้วยความร้อน.....	53
ตารางที่ 3.2 แสดงเงื่อนไขในการสร้างเป็นสิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์ จากสารอินทรีย์เพนทาซีนและแคดเมียมซัลไฟด์.....	55
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าของ fill factor ของอุปกรณ์โฟโตดีเทคเตอร์เมื่อเพิ่มความหนาของ แคดเมียมซัลไฟด์โครงสร้าง ITO/PEDOT/Pentacene(50nm)/ CdS(50,100,150 nm)/Al.....	85
ตารางที่ 4.2 แสดงค่า FF ของอุปกรณ์โฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริดเปรียบเทียบค่าที่ได้จากโครงสร้าง ITO/PEDOT/Pentacene(50nm)/CdS(50nm)/Al กับ ITO/PEDOT/Pentacene (100 nm)/CdS(50nm)/Al.....	90

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1	ลักษณะของออร์บิทัล 1s ที่มีลักษณะเป็นแบบทรงกลม.....	5
รูปที่ 2.2	ออร์บิทัล 2p ที่ถูกแบ่งโดยระนาบัพ คล้ายกับลูกตุ้ม โดย ทั้งสองด้านจะมีเฟสต่างกัน.....	6
รูปที่ 2.3	ออร์บิทัล d ตามลักษณะของการกระจาย.....	6
รูปที่ 2.4	พันธะ H-H เกิดจากการซ้อนกันของ 1s ออร์บิทัล แต่ละอะตอมไฮโดรเจนอะตอม.....	7
รูปที่ 2.5	การเกิดพันธะโดยการซ้อนกันของ p ออร์บิทัล 2 ออร์บิทัล (ก) พันธะ σ (ข) พันธะ π	8
รูปที่ 2.6	การสร้างออร์บิทัลโมเลกุลจาก 1s ออร์บิทัลอะตอมของไฮโดรเจนอะตอม.....	8
รูปที่ 2.7	แผนภาพระดับพลังงานของออร์บิทัลโมเลกุลของ H_2	9
รูปที่ 2.8	sp ออร์บิทัลแบบไฮบริด.....	10
รูปที่ 2.9	sp^2 ออร์บิทัลแบบไฮบริด.....	11
รูปที่ 2.10	sp^3 ออร์บิทัลแบบไฮบริด.....	11
รูปที่ 2.11	ตัวอย่างของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์.....	12
รูปที่ 2.12	การกระจายของอิเล็กตรอน และการเกิด sp^2 ออร์บิทัล ของคาร์บอนที่เป็นพันธะคู่.....	13
รูปที่ 2.13	พันธะซิกมาในวงของเบนซีน และพันธะพายในวงของเบนซีน.....	14
รูปที่ 2.14	ระดับพลังงานพันธะของอะตอมคาร์บอนกับอะตอมข้างเคียงภายในวงเบนซีน.....	15
รูปที่ 2.15	สารกึ่งตัวนำอินทรีย์แบบ โมเลกุลขนาดเล็ก (ก) Pentacene (ข) Alq_3 (ค) DPVBi (ง) CuPc.....	16
รูปที่ 2.16	สารกึ่งตัวนำอินทรีย์แบบคอนจูเกตพอลิเมอร์.....	16
รูปที่ 2.17	แสดงรอยต่อแบบขอดก็แบเรียซึ่งเกิดจากการที่สารกึ่งตัวนำแบบเอ็นสัมผัสกับ โลหะซึ่ง มีค่าฟังก์ชันงานสูงกว่า (ก) แผนภาพพลังงานของ โลหะและสารกึ่งตัวนำก่อนการต่อ กัน (ข) แผนภาพพลังงานของรอยต่อที่สภาวะสมดุล.....	18
รูปที่ 2.18	แสดงรอยต่อขอดก็แบเรียซึ่งเกิดจากการที่สารกึ่งตัวนำแบบพี สัมผัสกับ โลหะซึ่งมีค่า ฟังก์ชันงานต่ำกว่า (ก) แผนภาพพลังงานของ โลหะและสารกึ่งตัวนำก่อนการต่อกัน (ข) แผนภาพพลังงานของหัวต่อที่สภาวะสมดุล.....	19
รูปที่ 2.19	ผลของการไบอัสผิวสัมผัสตามรูปที่ 2.18 (ก) ไบอัสตาม (ข) ไบอัสย้อน.....	20
รูปที่ 2.20	แสดงรอยต่อ โลหะ-สารกึ่งตัวนำแบบ โอห์มมิก (ก) $\phi_m < \phi_s$ ในกรณีของสารกึ่งตัวนำ ชนิดเอ็น (ข) แผนภาพพลังงานของรอยต่อที่สภาวะสมดุล (ค) $\phi_m > \phi_s$ ในกรณีของ สารกึ่งตัวนำชนิดพี (ง) รอยต่อที่สภาวะสมดุล.....	21

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 2.21 แสดง energy band diagram ของรอยต่อชนิดกึ่งตัวนำแบบรีย (ก) โลหะ – สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (ข) โลหะ – สารกึ่งตัวนำชนิดพี.....	22
รูปที่ 2.22 เป็นรูปแสดงผลจากการวัดกระแส- แรงดันของอุปกรณ์ภายใต้การฉายแสง โดยแสดงผลเป็นเซมิลอคกับผลการวัดปกติ.....	24
รูปที่ 2.23 โฟโตดีเทคเตอร์ โครงสร้างแบบชั้นเดียว.....	25
รูปที่ 2.24 ระดับชั้นพลังงานของอุปกรณ์ โฟโตดีเทคเตอร์แบบชั้นเดียว Φ_c คือ พลังงานของช่องว่างของขั้วไฟฟ้าแคโทดและ Φ_a คือพลังงานของขั้วไฟฟ้าแอโนด E_g คือแถบช่องว่าง พลังงานระหว่างแถบคอนดักชันและแถบเวเลนซ์	26
รูปที่ 2.25 รูปแสดงโครงสร้างโมเลกุลของPEDOT	27
รูปที่ 2.26 รูปแสดงสารที่นิยมใช้เป็นชั้นรับแสงของโฟโตดีเทคเตอร์.....	27
รูปที่ 2.27 การเกิดเอ็กซิตอนและคูคกิ้นแสงด้วยเอ็กซิตอน (ก) โมเดลการกระตุ้นคู่อิเล็กตรอน – โฮล โดยใช้ตัวอย่างอะตอมไฮโดรเจน (ข) โมเดลแถบพลังงานแสงเอ็กซิตอน (ค) สัมประสิทธิ์การคูคกิ้นแสงแบบตรงและแบบมีเอ็กซิตอน.....	29
รูปที่ 2.28 โครงสร้างสารอินทรีย์เพนทาซีน.....	30
รูปที่ 2.29 แสดงการตกกระทบและการสะท้อนของรังสีเอ็กซ์ตามกฎของแบรกก์.....	32
รูปที่ 2.30 แสดงเครื่อง X-ray diffractometer.....	33
รูปที่ 2.31 แสดงตัวตรวจวัดของ X-ray diffractometer.....	33
รูปที่ 2.32 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....	34
รูปที่ 2.32 ลักษณะการเดินทางของแสงทะลุผ่านตัวกลาง.....	37
รูปที่ 2.24 ระบบวัดสเปกตรัมการทะลุผ่านของแสง.....	39
รูปที่ 2.25 แสดงไดอะแกรมของระบบการวัดการตอบสนองทางแสง.....	41
รูปที่ 3.1 ระบบระเหยสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์.....	44
รูปที่ 3.2 แผนภาพระบบสุญญากาศของระบบระเหยสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์.....	45
รูปที่ 3.3 หัวระเหยสารอินทรีย์.....	46
รูปที่ 3.4 ชุดควบคุมการระเหยสารของระบบระเหยสารอินทรีย์.....	46
รูปที่ 3.5 อุปกรณ์ภายในห้องสุญญากาศสูง1.....	47
รูปที่ 3.6 อุปกรณ์ภายในห้องสุญญากาศสูง2.....	47
รูปที่ 3.7 ผลึกควอทซ์.....	48
รูปที่ 3.8 เครื่องแสดงผลความหนาฟิล์มบาง.....	48

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.9 การเตรียมสารตัวอย่างบนฐานรองรับด้วยวิธีสปินเนอร์ (ก) การหยดสารที่ต้องการเตรียมบนฐานรองรับ (ข) การหมุนแผ่นกระจกบนแท่นหมุนเพื่อเตรียมฟิล์มบาง.....	49
รูปที่ 3.10 รูปแสดงเครื่องสปินเนอร์.....	49
รูปที่ 3.11 รูปแสดงเครื่องให้ความร้อนด้วยสุญญากาศ.....	50
รูปที่ 3.12 แสดงอุปกรณ์สารเคมีที่ใช้ในการทำผิวน้ำแผ่นกระจก และ Piranha Process Chart	51
รูปที่ 3.13 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้กับขบวนการในการทำผิวน้ำฐานรองรับ ITO.....	52
รูปที่ 3.14 แสดงโครงสร้างของการศึกษาสิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้างแบบ ชั้นเดียวและแบบหลายชั้นระหว่างเพนทาซีนกับแคดเมียมซัลไฟด์.....	54
รูปที่ 3.15 แสดงลักษณะของระบบวัดการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ของบริษัท Bruker รุ่น D8.....	55
รูปที่ 3.16 แสดงเครื่อง UV –Visible Spectrophotometer บริษัท PG Instruments Ltd. (T90,UV/Vis Spectrometer)	56
รูปที่ 3.17 แสดงระบบการวัดการตอบสนองความยาวคลื่นแสงของอุปกรณ์ของสิ่งประดิษฐ์ โฟโตดีเทคเตอร์	57
รูปที่ 3.18 แสดงระบบการวัดกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ของสิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์.....	58
รูปที่ 4.1 แสดงผลการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางเพนทาซีนที่ความหนา 10,50,100,150 และ 200 นาโนเมตร.....	60
รูปที่ 4.2 รูปแสดงกราฟการเปรียบเทียบระหว่างเฟสหนึ่งและเฟสสองของการวัดการเลี้ยวเบน ของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางเพนทาซีนที่ความหนา 50,100,150 และ 200 นาโนเมตร....	60
รูปที่ 4.3 รูปแสดงการเปรียบเทียบการจัดเรียงโมเลกุลของสารอินทรีย์เพนทาซีนระหว่าง thin film phase กับ bulk phase ที่ได้จากรายงานของ Hiroyoki และคณะ.....	61
รูปที่ 4.4 แสดงผลการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางเพนทาซีนที่มีการเพิ่มความหนา ต่างๆในขณะที่มีการให้อุณหภูมิที่ 87 องศาเซลเซียส จากรายงานของ D.M. Nanditha และคณะ.....	62
รูปที่ 4.5 แสดงเสปคตรัมของการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางเพนทาซีนที่ความหนา 50 นาโนเมตร, 100 นาโนเมตร, 150 นาโนเมตร และ 200 นาโนเมตร.....	63
รูปที่ 4.6 แสดงเสปคตรัมของการดูดกลืนแสงเทียบกับค่าของพลังงานโฟตอนของฟิล์มบาง เพนทาซีน	64

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.7 แสดงผลการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่มีการให้ความหนา 50, 100 และ 150 นาโนเมตรบนฐานรองรับที่เป็นกระจก.....	65
รูปที่ 4.8 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่ความหนาต่างๆกัน.....	66
รูปที่ 4.9 แสดงผลของการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางเพนทาซีนและฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์.....	67
รูปที่ 4.10 แสดงลักษณะโฟโตดีเทคเตอร์จากโครงสร้างแบบหลายชั้นระหว่างฟิล์มบางเพนทาซีนและฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์.....	68
รูปที่ 4.11 แสดงโครงสร้างโฟโตดีเทคเตอร์ ITO/PEDOT/Pentacene(100nm)/Al.....	69
รูปที่ 4.12 ไดอะแกรมระดับพลังงานของโฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้าง ITO/PEDOT/Pentacene/Al.....	69
รูปที่ 4.13 แสดงผลการวัดการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงโฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้าง ITO/PEDOT/Pentacene(100nm)/Al.....	70
รูปที่ 4.14 แสดงผลการวัดกระแส – แรงดัน โฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้าง ITO/PEDOT/Pentacene(100nm)/Al.....	71
รูปที่ 4.15 แสดงโครงสร้างโฟโตดีเทคเตอร์จาก ITO/PEDOT/CdS(100nm)/Al	72
รูปที่ 4.16 แสดงไดอะแกรมของระดับพลังงานของโฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้าง ITO/PEDOT/CdS/Al.....	72
รูปที่ 4.17 แสดงผลการวัดการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงโฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้าง ITO/PEDOT/CdS(100nm)/Al	73
รูปที่ 4.18 แสดงผลการวัดกระแส – แรงดัน โฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้าง ITO/PEDOT/CdS(100nm)/Al.....	74
รูปที่ 4.19 แสดงผลการเปรียบเทียบการวัดการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงโฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้าง ITO/PEDOT/Pentacene(100nm)/Al และ ITO/PEDOT/CdS(100nm)/Al.....	75
รูปที่ 4.20 แสดงโฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริดโครงสร้าง ITO/PEDOT/CdS/Pentacene/Al.....	76
รูปที่ 4.21 ไดอะแกรมระดับพลังงานของโฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริดโครงสร้าง ITO/PEDOT/CdS/Pentacene/Al.....	76

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.22 แสดงผลการวัดการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงโฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริด โครงสร้าง ITO/PEDOT/CdS(100nm)/Pentacene(50,100,150nm)/Al.....	77
รูปที่ 4.23 แสดงผลการวัดกระแส – แรงดัน โฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริด โครงสร้าง ITO/PEDOT/CdS(100nm)/Pentacene(100nm)/Al ในขณะที่มีการฉายแสงและไม่มีการฉายแสง.....	78
รูปที่ 4.24 แสดงไฮบริด โฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริด โครงสร้าง ITO/PEDOT/Pentacene/CdS/Al.....	79
รูปที่ 4.25 ไดอะแกรมระดับพลังงานของโฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริด โครงสร้าง ITO/PEDOT/Pentacene/CdS/Al.....	80
รูปที่ 4.26 แสดงผลการวัดการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงโฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริด โครงสร้างITO/PEDOT/Pentacene(50nm)/CdS(50,100,150nm)/Al.....	80
รูปที่ 4.27 แสดงผลการเปรียบเทียบการวัดการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสง โฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริด โครงสร้าง ITO/PEDOT/Pentacene(50nm)/CdS(50nm)/Al กับค่าของการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางเพนทาซีนที่ความหนา 50 นาโนเมตร.....	81
รูปที่ 4.28 แสดงไดอะแกรมของรอยต่อของโครงสร้าง Al/Pentacene และการเคลื่อน ที่ของพาหะที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงของอิเล็กตรอนและโฮล โดยมีชั้นของ HOMO-LUMO และชั้นของเอ็กซิตอน.....	82
รูปที่ 4.29 แสดงผลการวัดกระแส – แรงดัน โฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริด โครงสร้าง ITO/PEDOT/Pentacene(50nm)/CdS(50,100,150nm)/Al	83
รูปที่ 4.30 แสดงผลการวัดกระแส – แรงดัน โฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริด โครงสร้าง ITO/PEDOT/Pentacene(50nm)/CdS(50,100,150nm)/Al แกน y เป็นเซมิลอค.....	84
รูปที่ 4.31 แสดงการเปรียบเทียบค่า Isc และ ค่า Voc ที่ได้จากการเพิ่มความหนาของฟิล์ม แคดเมียมซัลไฟด์จากโครงสร้าง ITO/PEDOT/Pentacene(50nm)/ CdS(50,100,150 nm)/Al.....	85
รูปที่ 4.32 แสดงผลการวัดการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงโฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริดจาก โครงสร้าง ITO/PEDOT/Pentacene(100nm)/CdS(50nm)/Al.....	86
รูปที่ 4.33 แสดงผลการเปรียบเทียบการวัดการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสง โฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริด โครงสร้าง ITO/PEDOT/Pentacene(50nm)/CdS(50nm)/Al กับ ITO/PEDOT/Pentacene(100 nm)/CdS(50 nm)/Al	87

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.34 แสดงการเปรียบเทียบการวัดกระแส – แรงดันของทั้งสองโครงสร้าง ITO/PEDOT/Pentacene(50nm)/CdS(50nm)/Al กับ ITO/PEDOT/Pentacene(100nm)/CdS(50nm)/Al.....	88
รูปที่ 4.35 แสดงการเปรียบเทียบการวัดกระแส – แรงดันของทั้งสองโครงสร้าง ITO/PEDOT/Pentacene(50nm)/CdS(50nm)/Al กับ ITO/PEDOT/Pentacene(100nm)/CdS(50nm)/Al แกน y เป็นเซมิลอก	89
รูปที่ 4.44 รูปแสดงโฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริด โครงสร้าง ITO/PEDOT/Pentacene(50nm)/CdS(50nm)/Al.....	91

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันสารอินทรีย์ได้ถูกนำมาประยุกต์สร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อย่างแพร่หลายเนื่องจากมีสมบัติเด่นหลายประการ เช่น สามารถเตรียมด้วยกระบวนการที่ไม่ยุ่งยาก ส่งผลทำให้มีต้นทุนในการสร้างต่ำ และรวมถึงใช้อุณหภูมิต่ำทำให้สามารถปลูกบนฐานรองรับที่มีความยืดหยุ่นได้ที่ซึ่งเป็นการเปิดวิสัยทัศน์ในการพัฒนาการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์บนฐานรองรับที่มีความยืดหยุ่นและราคาถูกลง อย่างเช่น พลาสติก และกระดาษพอยล์ เป็นต้น

สารอินทรีย์ได้ถูกนำมาประยุกต์สร้างเป็น จอแสดงผลแบบบางสารอินทรีย์ (Organic light emitting diode; OLED) , ทรานซิสเตอร์สารอินทรีย์ (Organic thin film transistors; OTFTs), โฟโตไดโอดสารอินทรีย์ (Organic photo-diode) และ โซลาร์เซลล์สารอินทรีย์ (Organic solar cells) อุปกรณ์สารประกอบอินทรีย์สามารถผลิตได้หลายวิธีด้วยกัน เช่น Organic evaporation, Screen printing, Spin coating เป็นต้น

แต่เนื่องด้วยในการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำจากสารอินทรีย์มีข้อเสียก็คือ การขาดแคลนพาหะและความคล่องตัวของพาหะน้อยนอกจากนี้ความไม่เสถียรทางความร้อนและทางเคมีของสารอินทรีย์รวมถึงการเสื่อมสภาพของขั้วไฟฟ้าเนื่องจากความชื้นและออกซิเจนในอากาศซึ่งมีผลโดยตรงต่อการลดลงของประสิทธิภาพของอิเล็กทรอนิกส์ด้วยเหตุนี้วิธีการแก้ปัญหาหลายวิธีถูกเสนอขึ้น เช่น การห่อหุ้มโดยใช้สารพอลิเมอร์บางชนิดเพื่อป้องกันสารอินทรีย์จากความชื้นและออกซิเจน เป็นต้น หนึ่งในหลายวิธีที่ถูกเสนอขึ้นคือ การใช้โครงสร้างไฮบริดระหว่างสารอินทรีย์กับสารอนินทรีย์โดยเมื่อพิจารณาถึงสมบัติที่สำคัญของสารอนินทรีย์พบว่า สารอนินทรีย์มีจำนวนพาหะมากและมีสภาพคล่องของพาหะสูง ทั้งยังมีเสถียรภาพทางความร้อนและทางเคมีสูง จึงมีความเป็นไปได้ที่จะสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีโครงสร้างไฮบริดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ เพื่อรวมข้อได้เปรียบของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ด้วยกัน เพื่อให้ได้มาซึ่งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีประสิทธิภาพสูง

ในกลุ่มของสารอินทรีย์มีสารที่น่าสนใจชื่อว่า Polycyclic aromatic hydrocarbon pentacene ($C_{22}H_{14}$) หรือเรียกสั้นๆว่า เพนทาซีน (Pentacene) ที่น่าสนใจเนื่องมาจากคุณสมบัติมีสภาพคล่องของโฮลสูง (นำไฟฟ้าได้ดี) ซึ่งเทียบได้กับ คุณสมบัติของ Amorphous Si โดยสารอินทรีย์เพนทาซีนได้มีการเริ่มศึกษาโครงสร้างผลึกของเพนทาซีนตั้งแต่ช่วงต้นทศวรรษที่ 60 โดย Cambell และคณะได้ทำการปลูกผลึกเดี่ยวของเพนทาซีนจากสารละลาย จากผลที่ได้พบว่ามี

ระนาบของเพนทาซีนอยู่ที่ระนาบ (001) และระยะห่างระหว่างระนาบอยู่ที่ 14.4 \AA [1,2] ต่อมาในปี 1991 Minakata และคณะได้เสนอผลงานวิจัยเกี่ยวกับฟิล์มบางเพนทาซีน จากสมบัติดังกล่าวส่งผลให้ตั้งแต่ทศวรรษที่ 90 เพนทาซีนได้ถูกนำมาประยุกต์สร้างเป็นทรานซิสเตอร์กันอย่างแพร่หลายแล้วก็ได้มีการวิจัยต่อมาจนถึงปัจจุบัน

ได้มีรายงานถึงการศึกษาและพัฒนาอุปกรณ์เกี่ยวกับทรานซิสเตอร์สารอินทรีย์ Organic Thin Film Transistors (OTFTs) โดยมีสารเพนทาซีนเป็นส่วนประกอบ จากรายงานดังกล่าวมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงสมบัติทางไฟฟ้าของ OTFTs แต่อย่างไรก็ตามรายงานการศึกษามันตีทางแสงของเพนทาซีนน้อยมากทั้งๆที่สารเพนทาซีนมีสมบัติความไวแสงค่อนข้างสูง ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นในการศึกษาสมบัติทางแสงของสารอินทรีย์เพนทาซีน โดยการสร้างเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดแสงโฟโตดีเทคเตอร์

สำหรับสารอินทรีย์ที่น่าสนใจที่นำมาสร้างเป็นอุปกรณ์ตัวตรวจวัดแสงไฮบริด คือ แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างของแถบพลังงานอยู่ที่ 2.42 eV ที่อุณหภูมิห้อง [3] โดยแคดเมียมซัลไฟด์เป็นวัสดุที่สำคัญสำหรับสร้างเป็นอุปกรณ์ทางแสงหลายชนิด อย่างเช่น ตัวนำทางแสง (Photoconducting cell), ตัวตรวจวัดทางแสง (Photo sensor), วัสดุเลเซอร์ (laser materials) และ เครื่องมือเชิงแสง (Optical devices) เนื่องจากมีข้อดีทางด้านความเสถียรภาพทางด้านความร้อนที่โดยรวมทั้งมีสมบัติที่เป็น direct bandgap semiconductor และในงานวิจัยนี้ใช้สารแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) ในการเพิ่มช่วงของการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงของสิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริดนอกจากสารอินทรีย์เพนทาซีนอีกด้วย

โดยทั่วไปแล้วสารแคดเมียมซัลไฟด์สามารถที่จะทำการเตรียมฟิล์มโดยใช้เทคนิคต่างๆ อย่างเช่น Vacuum deposition, Thermal deposition, Sputtering, Spay pyrolysis, Chemical bath deposition, Photo chemical deposition, Electrode position เป็นต้น ในรายงานนี้ใช้วิธีการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธี Thermal deposition เนื่องจากเป็นวิธีที่มีการยอมรับโดยที่สามารถทำให้เกิดสมบัติของฟิล์มบางสารแคดเมียมซัลไฟด์ที่ดี

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำสารเพนทาซีนมาสร้างเป็นตัวตรวจวัดแสงโฟโตดีเทคเตอร์ โดยมีการเพิ่มชั้นของสารอินทรีย์สารแคดเมียมซัลไฟด์ โดยอันดับแรกจะมุ่งเน้นทำการศึกษาเกี่ยวกับสมบัติความเป็นผลึกและการดูดกลืนทางแสงของฟิล์มบางเพนทาซีนกับแคดเมียมซัลไฟด์ เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการนำมาสร้างเป็นอุปกรณ์ตัวตรวจวัดแสงต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 ทำการศึกษาวิธีการระเหยสารกึ่งตัวนำอินทรีย์โดยระบบระเหยสารอินทรีย์ที่อุณหภูมิต่ำ (Low Temperature Evaporation System; LTE)
- 1.2.2 ทำการศึกษาวิธีการระเหยสารกึ่งตัวนำอินทรีย์โดยระบบระเหยด้วยความร้อน (Thermal Evaporation System)
- 1.2.3 ทำการศึกษาทางกายภาพและสมบัติทางแสงของฟิล์มบางของสารอินทรีย์เพนทาซีนและสารอินทรีย์แคดเมียมซัลไฟด์ ด้วยการตรวจวิเคราะห์โครงสร้างความเป็นผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction; XRD) และ การตรวจวัดการดูดกลืนแสงด้วย UV-VIS Spectroscopy
- 1.2.4 ศึกษาหลักการของสิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริด
- 1.2.5 ศึกษาวิธีการสร้างสิ่งประดิษฐ์ที่มีโครงสร้างระดับนาโนเมตรรวมทั้งแนวทางการแก้ปัญหาในกระบวนการต่าง ๆ
- 1.2.6 ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า- แสงของอุปกรณ์โฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริด
- 1.2.7 เพื่อพัฒนาสิ่งประดิษฐ์ที่มีอยู่ในปัจจุบันให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นและเป็นแนวทางในการศึกษาค้นคว้าของนักวิจัยต่อไป

1.3 การดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยเริ่มต้นด้วยการศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับโฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริด รวมทั้งศึกษาวิธีการสร้างโฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริดของสารเพนทาซีนกับสารแคดเมียมซัลไฟด์ โดยในขั้นต้นจะทำการศึกษาสมบัติของสารเพนทาซีนกับสารแคดเมียมซัลไฟด์ ที่ปลูกในเงื่อนไขต่างๆกัน จากนั้นทำการออกแบบโครงสร้างโฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริด หลังจากนั้นศึกษาสมบัติกระแส- แรงดันของอุปกรณ์ที่ความเข้มแสงที่ต่างๆและสมบัติการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงเพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็น โฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริดในงานตรวจจับทางแสงและงานด้านการสื่อสารทางแสงต่อไป

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

- 1.4.1 มีความรู้ความเข้าใจในเทคนิคและวิธีการระเหยสารกึ่งตัวนำอินทรีย์โดยระบบระเหยสารอินทรีย์ที่อุณหภูมิต่ำ (Low Temperature Evaporation System; LTE)
- 1.4.2 มีความรู้ความเข้าใจในเทคนิคและวิธีการระเหยสารกึ่งตัวนำอินทรีย์โดยระบบระเหยด้วยความร้อน (Thermal Evaporation System)
- 1.4.3 มีความรู้ความชำนาญในการวัดและวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยเครื่องมือการตรวจวิเคราะห์โครงสร้างความเป็นผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction; XRD) และการตรวจวัดการดูดกลืนแสงด้วย UV-VIS Spectroscopy
- 1.4.4 เข้าใจหลักการของสิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริด
- 1.4.5 ได้เรียนรู้ถึงกระบวนการในการสร้างสิ่งประดิษฐ์ที่มีโครงสร้างขนาดเล็กและแนวทางในการแก้ปัญหาในกระบวนการต่าง ๆ
- 1.4.6 มีความรู้ความชำนาญในการวัดและวิเคราะห์ผลทางไฟฟ้าและทางแสงจากอุปกรณ์โฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริด
- 1.4.7 ได้มีการพัฒนาสิ่งประดิษฐ์ที่มีอยู่ในปัจจุบันให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นและเป็นแนวทางในการศึกษาค้นคว้าของนักวิจัยต่อไป

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 ทฤษฎีพื้นฐานของสารอินทรีย์

สารอินทรีย์ในธรรมชาติส่วนใหญ่จะประกอบด้วยอะตอมของธาตุพื้นฐานคือ H,C,O,N ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างหลายแบบและมีสมบัติที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งสารบางชนิดสามารถสังเคราะห์ได้ในห้องปฏิบัติการ

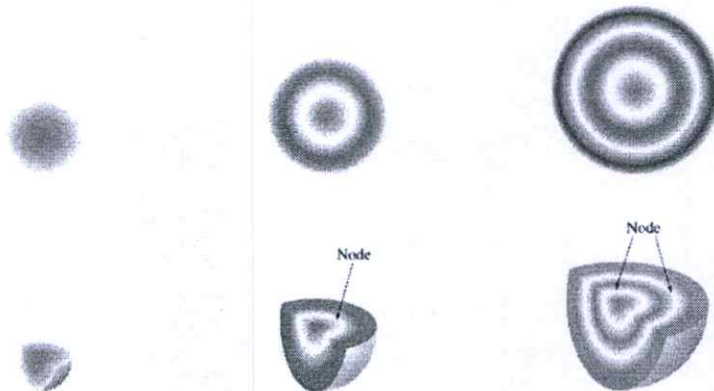
2.1.1 พันธะของสารอินทรีย์

2.1.1.1 ออร์บิทัลอะตอม (atomic orbital)

ออร์บิทัลอะตอม คือบริเวณที่มีโอกาสที่จะพบอิเล็กตรอนมากที่สุดรอบนิวเคลียส โดยมีลักษณะเป็นฟังก์ชันคลื่น

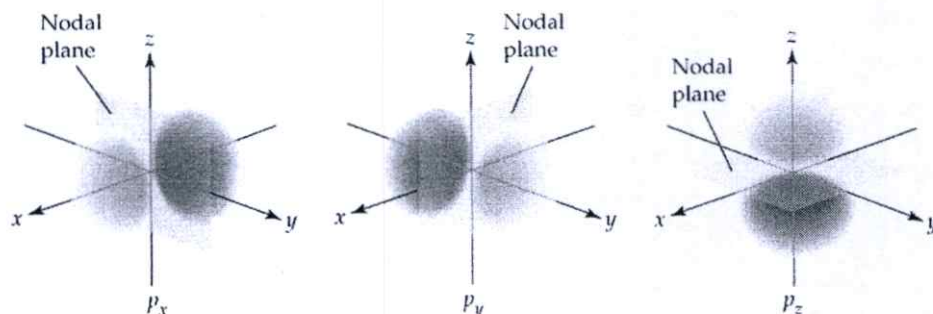
1. s-ออร์บิทัล เป็นออร์บิทัลที่แสดงถึงโอกาสที่จะพบอิเล็กตรอนรอบนิวเคลียส โดยมีลักษณะเป็นทรงกลม ซึ่งการกระจายของอิเล็กตรอนจะไม่ขึ้นกับทิศทางเนื่องจากมีเลขควอนตัมเชิงมุม (angular momentum quantum number) เท่ากับศูนย์

ในอะตอมที่มี s-ออร์บิทัล มากกว่าหนึ่งออร์บิทัล เช่นมีทั้ง 1s, 2s, 3s, ... ภายในทรงกลมบริเวณระหว่าง 1s กับ 2s หรือ 2s กับ 3s โอกาสที่จะพบอิเล็กตรอนบริเวณนี้จะมีค่าเท่ากับศูนย์เรียกบริเวณนี้ว่าโนด (node) แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ลักษณะของออร์บิทัล 1s ที่มีลักษณะเป็นแบบทรงกลม

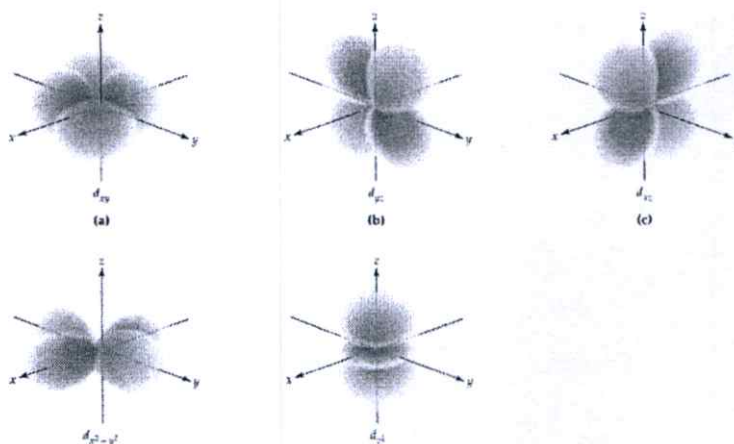
2. p-ออร์บิทัล มีเลขควอนตัมเชิงมุม $l = 1$ โอกาสที่จะพบอิเล็กตรอนใน p-ออร์บิทัล จะขึ้นกับระยะจากนิวเคลียสและทิศทาง มีค่าเลขควอนตัมแม่เหล็ก (magnetic quantum number) $m_l = +1, 0, -1$ โดย p-ออร์บิทัล มีลักษณะเป็นเหมือนห่วง (loop) 2 ห่วงต่อกันและมีการกระจาย 3 ลักษณะคือ p_x, p_y, p_z แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ออร์บิทัล 2p ที่ถูกแบ่งโดยระนาบัพ คล้ายกับลูกตุ้ม โดยทั้งสองด้านจะมีเฟสต่างกัน

3. d-ออร์บิทัล มีเลขควอนตัมเชิงมุม $l = 2$ โอกาสที่จะพบอิเล็กตรอนใน d-ออร์บิทัล จะขึ้นกับระยะจากนิวเคลียสและทิศทาง มีค่าเลขควอนตัมแม่เหล็ก (magnetic quantum number) $m_l = +2, +1, 0, -1, -2$ โดย d-ออร์บิทัล มีการกระจาย 5 ลักษณะคือ $p_{xy}, p_{xz}, p_{yz}, p_{x^2-y^2}, p_{z^2}$ แสดงดังรูปที่

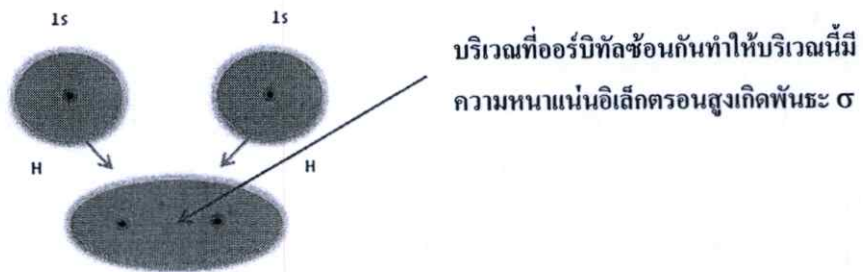
2.3



รูปที่ 2.3 ออร์บิทัล d ตามลักษณะของการกระจาย

2.1.1.2 ทฤษฎีพันธะเวเลนซ์ (Valence bond theory)

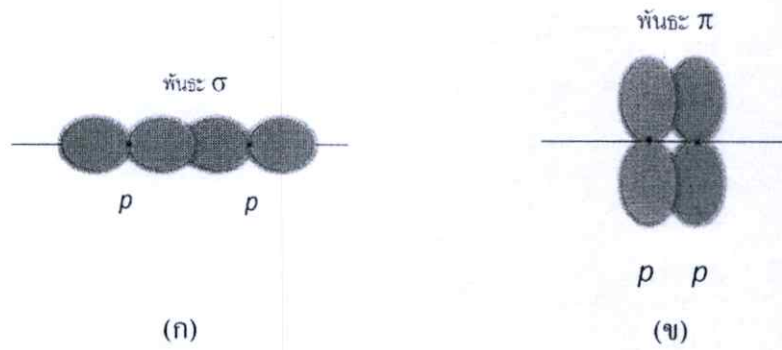
ใน ค.ศ. 1930 ไลนัส พอลิง (Linus Pauling) และ (J.C. Slater) ได้เสนอทฤษฎีที่ใช้อธิบายการเกิดพันธะโคเวเลนต์ซึ่งเรียกว่าพันธะเวเลนซ์ (Valence bond theory) ตามทฤษฎีนี้พันธะโคเวเลนต์เกิดขึ้นโดยออร์บิทัลอะตอมวงนอกสุดที่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่เพียงตัวเดียวซ้อนทับกับออร์บิทัลอะตอมวงนอกสุดที่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่เพียงตัวเดียวของอะตอมหนึ่ง และอิเล็กตรอนทั้งสองจะจัดตัวให้มีสปินตรงกันข้ามอยู่ในออร์บิทัลนี้ ตัวอย่างเช่น ใน H_2 พันธะ H-H เกิดจากการซ้อนทับกันของ 1s ออร์บิทัล ดังรูป 2.4



รูปที่ 2.4 พันธะ H-H เกิดจากการซ้อนทับกันของ 1s ออร์บิทัลแต่ละอะตอมไฮโดรเจนอะตอม

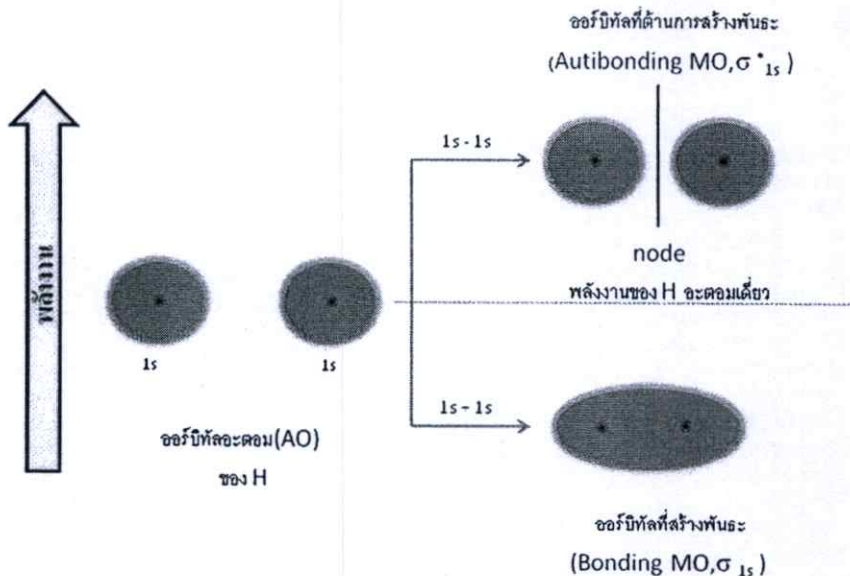
พันธะที่เกิดขึ้นจากการซ้อนทับกันของ s ออร์บิทัลกับ s ออร์บิทัล นี้เรียกว่า พันธะซิกมา (σ -bond) ซึ่งเป็นพันธะโคเวเลนต์ที่มีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสูงในแนวแกนระหว่างนิวเคลียส อิเล็กตรอนเหล่านี้จะทำหน้าที่เป็น “กาว” ยึดนิวเคลียสทั้งสองไว้ด้วยกัน

พันธะ p ออร์บิทัล 2 ออร์บิทัล อาจจะซ้อนทับกันได้ 2 แบบ เนื่องจาก p ออร์บิทัล ไม่เป็นทรงกลม ถ้า p ออร์บิทัลทั้งสองซ้อนทับกันตามแนวแกนระหว่างนิวเคลียส จะเกิดพันธะ σ ดังรูปที่ 2.5 (ก) แต่ถ้า p ออร์บิทัลทั้งสองชนิดซ้อนทับกันทางด้านข้าง ดังรูปที่ 2.5 (ข) จะเกิดพันธะที่เรียกว่า พันธะพาย (π -bond) พันธะ π นี้เป็นพันธะโคเวเลนต์ซึ่งบริเวณที่ซ้อนทับกันอยู่เหนือและใต้แกนระหว่างนิวเคลียส การซ้อนทับกันของ p ออร์บิทัลในพันธะ π เกิดขึ้นได้น้อยกว่าการซ้อนทับกันในพันธะ σ ดังนั้นพันธะ π จึงแข็งแรงน้อยกว่าพันธะ σ



รูปที่ 2.5 การเกิดพันธะโดยการซ้อนกันของ p ออร์บิทัล 2 ออร์บิทัล (ก) พันธะ σ (ข) พันธะ π

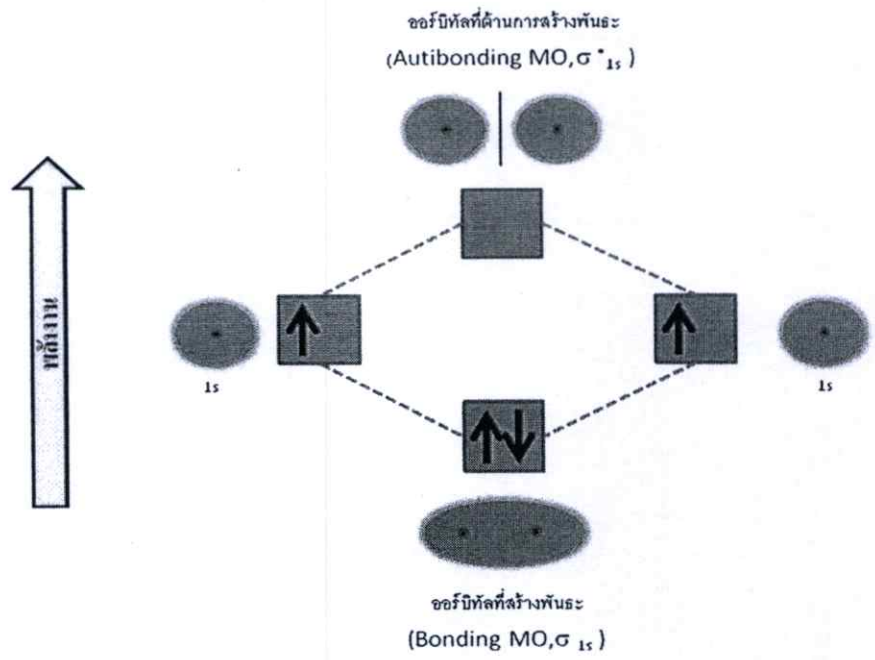
เมื่ออะตอมของออร์บิทัล 1s ของอะตอมรวมกันจะเกิดเป็นออร์บิทัลโมเลกุล 2 ออร์บิทัล แสดงดังรูปที่ 2.6 ออร์บิทัลโมเลกุลออร์บิทัลหนึ่งจะมีพลังงานต่ำกว่าออร์บิทัลอะตอม การบรรจุอิเล็กตรอนในออร์บิทัลนี้จะทำให้โมเลกุลเสถียรกว่าอะตอมที่แยกกันอยู่ ดังนั้นเราจึงเรียกออร์บิทัลโมเลกุลที่มีพลังงานต่ำกว่าว่า ออร์บิทัลโมเลกุลที่สร้างพันธะ (bonding molecular orbital) ส่วนออร์บิทัลโมเลกุลอีกออร์บิทัลหนึ่งจะมีพลังงานสูงกว่าออร์บิทัลอะตอม การบรรจุอิเล็กตรอนในออร์บิทัลนี้จึงทำให้โมเลกุลมีพลังงานเพิ่มขึ้นและไม่เสถียร จึงเรียกออร์บิทัลโมเลกุลนี้ว่า ออร์บิทัลโมเลกุลที่ต้านสร้างพันธะ (antibonding molecular orbital)



รูปที่ 2.6 การสร้างออร์บิทัลโมเลกุลจาก 1s ออร์บิทัลอะตอมของไฮโดรเจนอะตอม

ความหนาแน่นอิเล็กตรอนในออร์บิทัล โมเลกุลทั้งสองแสดงในรูปที่ 2.6 สังเกตว่าในออร์บิทัล โมเลกุลที่สร้างพันธะมีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสูงในบริเวณที่อยู่ระหว่างนิวเคลียสทั้งสอง จึงทำให้ระดับพลังงานต่ำกว่าออร์บิทัลอะตอม ส่วนในออร์บิทัล โมเลกุลที่ด้านการสร้างพันธะ โอกาสที่จะพบอิเล็กตรอนในบริเวณที่อยู่ระหว่างนิวเคลียสทั้งสองมีน้อย อิเล็กตรอนจะมีความหนาแน่นมากในบริเวณด้านนอกของโมเลกุล ออร์บิทัลที่ด้านการสร้างพันธะจึงมีพลังงานสูงกว่าออร์บิทัลอะตอม

ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในออร์บิทัล โมเลกุลที่สร้างพันธะและออร์บิทัล โมเลกุลที่ด้านการสร้างพันธะจะสมมาตรรอบแกนระหว่างนิวเคลียสทั้งสอง ซึ่งหมายความว่าออร์บิทัลทั้งสองเป็นออร์บิทัล โมเลกุลชนิดซิกมา (sigma molecular orbital) ซึ่งใช้สัญลักษณ์ σ เครื่องหมาย * ใช้แสดงว่าเป็นออร์บิทัลที่ด้านการสร้างพันธะ และตัวเลขและอักษรด้านล่างขวาแสดงออร์บิทัลอะตอมที่ทำให้เกิดออร์บิทัล โมเลกุลนั้นๆ เช่นออร์บิทัล โมเลกุลที่สร้างพันธะซึ่งเกิดจากการรวมกันของ $1s$ ออร์บิทัล จะมีสัญลักษณ์เป็น σ_{1s} ออร์บิทัล โมเลกุลที่ด้านการสร้างพันธะจะมีสัญลักษณ์เป็น σ_{1s}^* โดยใน H_2 โมเลกุลจะมีอิเล็กตรอน 2 ตัวซึ่งอิเล็กตรอนทั้งสองจะบรรจุใน σ_{1s} ออร์บิทัลซึ่งมีพลังงานต่ำกว่าก่อน



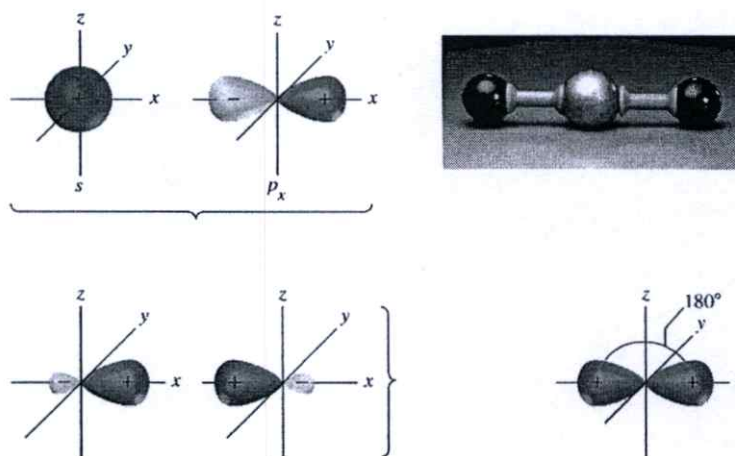
รูปที่ 2.7 แผนภาพระดับพลังงานของออร์บิทัล โมเลกุลของ H_2

รูปที่ 2.7 แสดงแผนภาพระดับพลังงานของออร์บิทัลโมเลกุลในไฮโดรเจน (H_2) โมเลกุล เนื่องจากแต่ละ H อะตอมมีอิเล็กตรอน 1 ตัวใน $1s$ ออร์บิทัล H_2 จึงมีอิเล็กตรอนสองตัว อิเล็กตรอนทั้งสองจะถูกบรรจุอยู่ใน σ_{1s} ออร์บิทัล ซึ่งมีระดับพลังงานต่ำกว่าออร์บิทัลอะตอมในอะตอมเดี่ยว H_2 โมเลกุลจึงเสถียรกว่า H สองอะตอมที่แยกจากกันอยู่

2.1.1.3 ไฮบริดออร์บิทัล (Hybrid orbital)

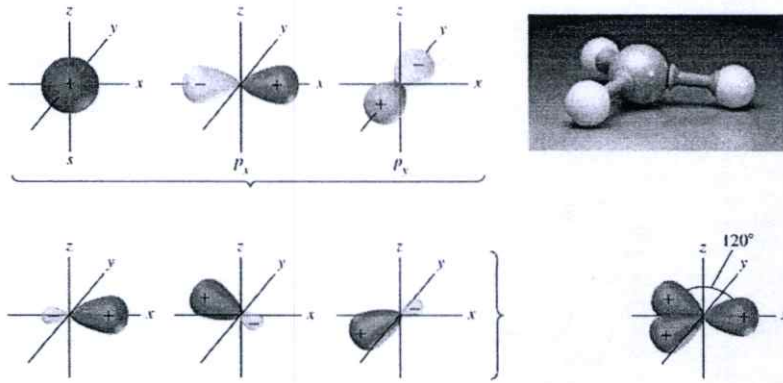
ไฮบริดออร์บิทัล เกิดจากการซ้อนทับกันระหว่างออร์บิทัลอะตอมต่างชนิดกันเช่น ออร์บิทัล s กับ ออร์บิทัล p

1. sp ไฮบริดออร์บิทัล เกิดจากการซ้อนทับระหว่างออร์บิทัล s 1 ออร์บิทัลกับออร์บิทัล p 1 ออร์บิทัล มีการจัดเรียงตัวเป็นแบบเชิงเส้น (linear bonding arrangement) แสดงดังรูปที่ 2.8



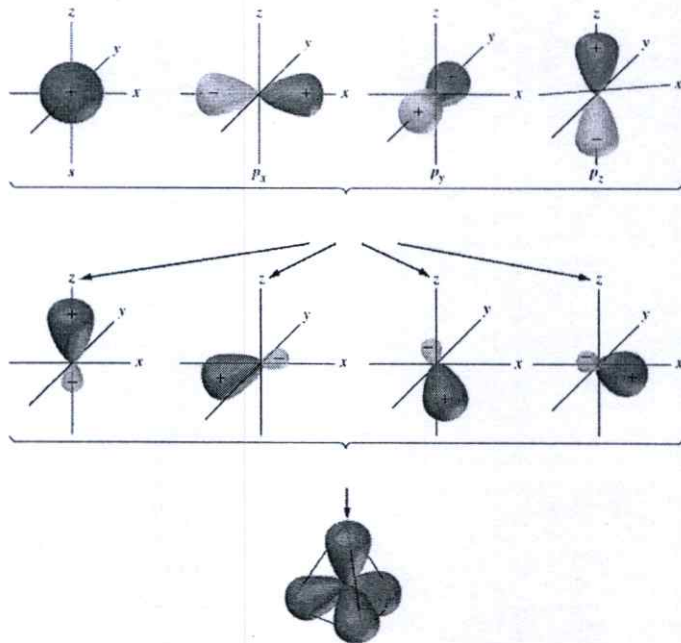
รูปที่ 2.8 sp ออร์บิทัลแบบไฮบริด

2. sp^2 ไฮบริดออร์บิทัล เกิดจากการซ้อนทับระหว่างออร์บิทัล s 1 ออร์บิทัลกับออร์บิทัล p 2 ออร์บิทัลมีการจัดเรียงตัวแบบไตรโกนอล (trigonal arrangement) แต่ละด้านจะทำมุมกัน 120° แสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 sp^2 ออร์บิทัลแบบไฮบริด

3. sp^3 ไฮบริดออร์บิทัลเกิดจากการซ้อนทับระหว่างออร์บิทัล s 1 ออร์บิทัลกับออร์บิทัล p 3 ออร์บิทัลมีการจัดเรียงตัวแบบเตตระฮีดรอล (tetrahedral arrangement) โดยแต่ละด้านทำมุมกัน 109.5° แสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 sp^3 ออร์บิทัลแบบไฮบริด

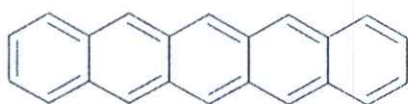
การเกิดไฮบริดเซชันในพันธะต่างๆจะประกอบด้วยพันธะซิกมาและพันธะพายดังนี้

1. พันธะเดี่ยว (single bond) เป็นพันธะที่เกิดจากอะตอม 2 อะตอมที่ใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน 1 คู่ โดยออร์บิทัลมีการซ้อนทับกันแบบซิกมา ดังนั้นพันธะเดี่ยวบางครั้งเรียกว่าพันธะซิกมา
2. พันธะคู่ (double bond) เป็นพันธะที่เกิดจากอะตอม 2 อะตอมที่ใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน 2 คู่ โดยออร์บิทัลมีการซ้อนทับกันแบบซิกมา 1 คู่ และแบบพาย 1 คู่
3. พันธะสาม (triple bond) เป็นพันธะที่เกิดจากอะตอม 2 อะตอมที่ใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน 3 คู่ โดยออร์บิทัลมีการซ้อนทับกันแบบซิกมา 1 คู่ และแบบพาย 2 คู่

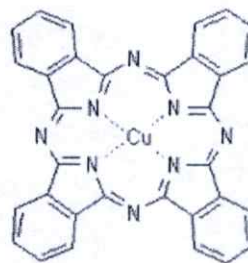
2.2 สารกึ่งตัวนำอินทรีย์ (Organic Semiconductor)

สารอินทรีย์ในธรรมชาติส่วนใหญ่จะประกอบด้วยอะตอมของธาตุพื้นฐานคือ H, C, O, N ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างหลายแบบและมีสมบัติที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งสารบางชนิดสามารถสังเคราะห์ได้ในห้องปฏิบัติการ

สารกึ่งตัวนำอินทรีย์เป็นสารอินทรีย์ที่มีลักษณะเฉพาะเมื่อนำมาทำการทดลองและวิเคราะห์ทางฟิสิกส์พบว่า สารอินทรีย์ดังกล่าวมีแถบพลังงานต้องห้าม (Forbidden Bandgap) จึงเรียกลักษณะดังกล่าวว่าเป็นสารกึ่งตัวนำอินทรีย์จะมีลักษณะพันธะเป็นพันธะคู่สลับพันธะเดี่ยว เรียกโครงสร้างลักษณะนี้ว่า โครงสร้างแบบคอนจูเกต (conjugate structure) ดังรูปที่ 2.11



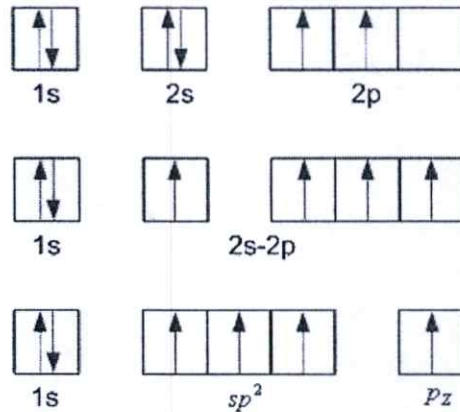
Pentacene



CuPc

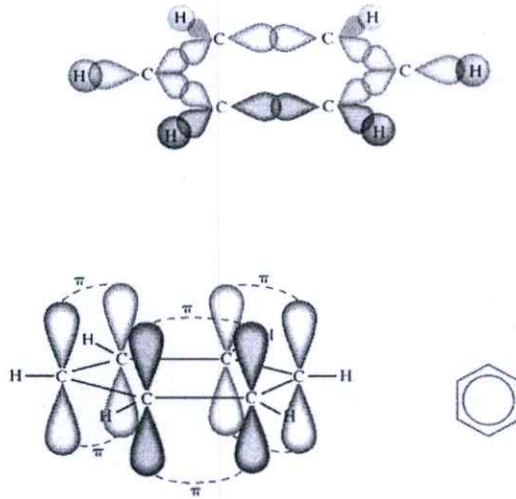
รูปที่ 2.11 ตัวอย่างของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์

สารกึ่งตัวนำอินทรีย์จะมีโครงสร้างพื้นฐานของอะตอมคาร์บอนซึ่งเป็นแบบ sp^2 ไฮบริดออร์บิทัล เมื่อพิจารณาคู่พันธะของอะตอมคาร์บอนที่เป็นพันธะคู่ ภายในพันธะคู่จะประกอบด้วยพันธะซิกมา 1 คู่ พันธะพาย 1 คู่ ส่วนพันธะที่เหลือจะเป็นพันธะซิกมาทั้งหมดเนื่องจากเป็นพันธะเดี่ยวดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 การกระจายของอิเล็กตรอนและการเกิด sp^2 ออร์บิทัลของคาร์บอนที่เป็นพันธะคู่

พิจารณาอะตอมของคาร์บอนที่อยู่ในวงของเบนซีน (benzene, C_6H_6) อะตอมของคาร์บอนเป็นแบบ sp^2 ไฮบริดออร์บิทัล มีพันธะเป็นแบบคู่สลับเดียว ในแนวระนาบของวงเบนซีนจะมีระนาบของพันธะซิกมาซึ่งเกิดจากการสร้างพันธะระหว่างอะตอมของ คาร์บอนกับคาร์บอน และ อะตอมของคาร์บอนกับไฮโดรเจน และภายในวงของเบนซีนส่วนที่เป็น p_z ออร์บิทัล จะเกิดเป็นพันธะพายที่เกิดจากพันธะคู่ระหว่างอะตอมของคาร์บอน 3 คู่ ดังรูปที่ 2.13



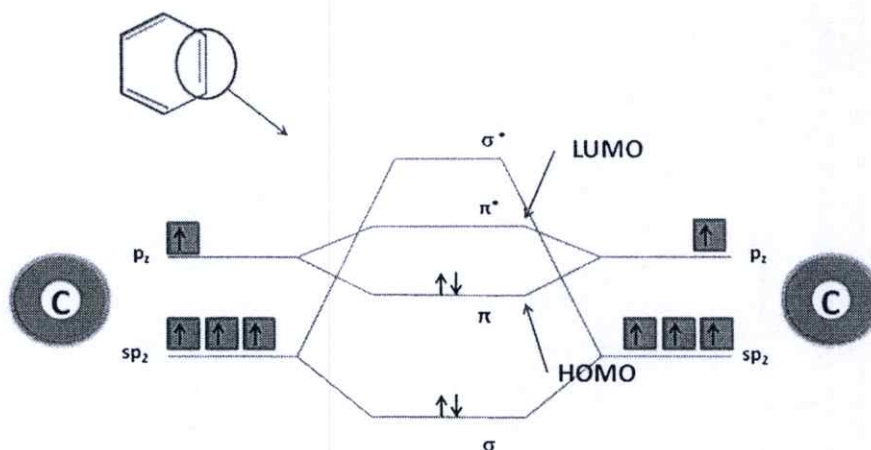
รูปที่ 2.13 พันธะซิกมาในวงของเบนซีน และพันธะพายในวงของเบนซีน

เมื่อพิจารณาถึงระดับพลังงานของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ ในลักษณะของโมเลกุลออร์บิทัลแล้ว จะพบว่าลักษณะของการเกิดพันธะระหว่างพันธะคู่ของอะตอมคาร์บอน ส่วนที่เป็น sp^2 จะเป็นพันธะซิกมาที่มีความเสถียรระดับพลังงานของออร์บิทัล โมเลกุลแบบสร้างมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับไฮบริดออร์บิทัล และระดับพลังงานของออร์บิทัล โมเลกุลแบบต้านจะมีค่าสูงมากเนื่องจากต้องใช้พลังงานที่มีค่ามากเพื่อที่จะทำลายพันธะซิกมา

ส่วนที่เป็น p_z ออร์บิทัล จะเกิดเป็นพันธะพายระดับพลังงานของออร์บิทัล โมเลกุลที่สร้าง มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับ ออร์บิทัลอะตอม ระดับพลังงานของออร์บิทัล โมเลกุลที่ต้านการสร้างพันธะจะมีค่าไม่มากนักเนื่องจากพันธะพาย เป็นพันธะที่เกิดจากการซ้อนทับด้านข้างของออร์บิทัล p ดังนั้นอิเล็กตรอนที่กระจายอยู่บริเวณนี้จะเป็นอิเล็กตรอนแบบไม่ประจำที่ (delocalized electron) เนื่องจากความหนาแน่นของอิเล็กตรอนกระจายตัวอยู่นอกนิวเคลียส เมื่อมีพลังงานมากกระตุ้นทำให้อิเล็กตรอนที่กระจายตัวอยู่สามารถเคลื่อนที่ไปตามพันธะพายได้ เสมือนเป็นการเคลื่อนประจุ

เมื่อพิจารณาจากทฤษฎีออร์บิทัล โมเลกุล (molecular orbital theory) ระดับพลังงาน ของอิเล็กตรอนใน p_z ออร์บิทัล ระดับพลังงานของออร์บิทัล โมเลกุลที่สร้าง (π bonding molecular orbital) จะเป็นระดับที่สูงที่สุดที่อิเล็กตรอนสามารถอาศัยอยู่ได้ จึงเรียกระดับพลังงานนี้ว่า highest occupied molecular orbital (HOMO) และ ที่ระดับพลังงานของออร์บิทัล โมเลกุลที่ต้านการสร้างพันธะ (π^* antibonding molecular orbital) จะเป็นระดับที่ต่ำที่สุดที่ไม่มีอิเล็กตรอนอาศัยอยู่ได้ จึงเรียกระดับพลังงานนี้ว่า lowest unoccupied molecular orbital (LUMO) ระหว่างระดับ HOMO และ LUMO เสมือนเป็นช่องว่างแถบพลังงานที่มีค่าใกล้เคียงกับสารกึ่งตัวนำ ระดับพลังงานชั้น HOMO

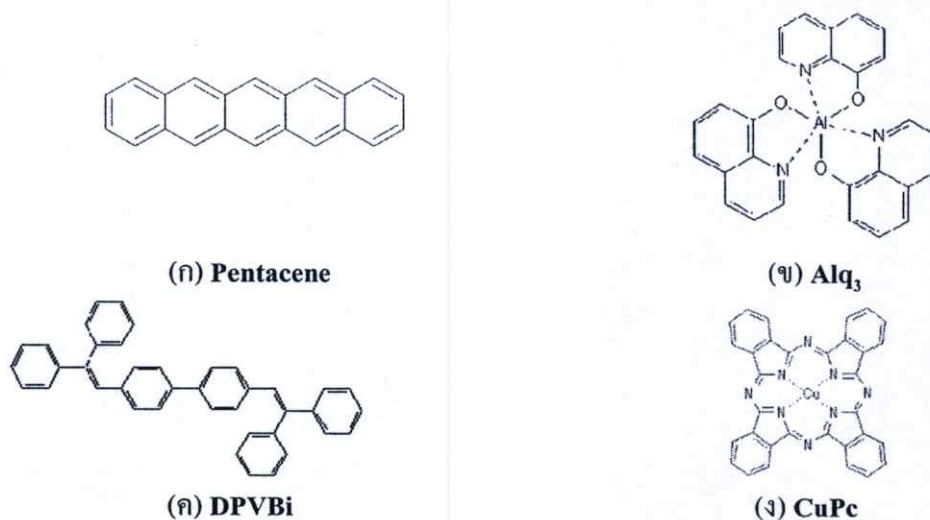
เปรียบเสมือนแถบวาเลนซ์ (valence band) ส่วนระดับพลังงานชั้น LUMO เปรียบเสมือนแถบนำ (conduction band) จึงเรียกสารที่มีสมบัติดังกล่าวว่า สารกึ่งตัวนำอินทรีย์ [4] ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ระดับพลังงานพันธะของอะตอมคาร์บอนกับอะตอมข้างเคียงภายในวงเบนซีน

2.2.1 โมเลกุลขนาดเล็ก (small molecule)

เป็นสารประกอบออร์แกนิกที่มีโครงสร้างพันธะเป็นแบบคู่สลับเดี่ยวเป็น โครงข่ายจับตัวกัน เป็นโมเลกุลสารบางชนิดจะมีอะตอมของโลหะเจืออยู่ด้วย จับกันเป็นโครงข่ายที่จำกัด ดังรูปที่ 2.15

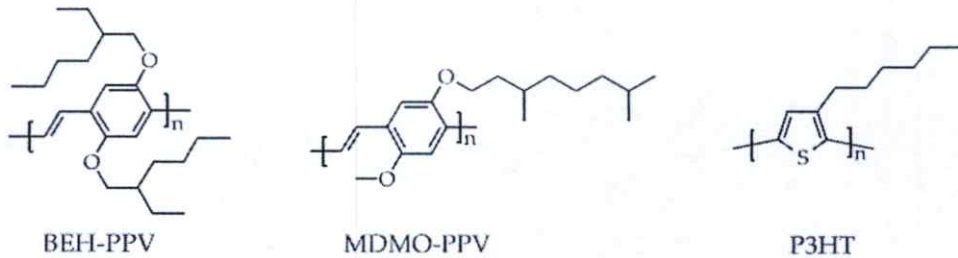


รูปที่ 2.15 สารกึ่งตัวนำอินทรีย์แบบ โมเลกุลขนาดเล็ก (ก) Pentacene (ข) Alq₃ (ค) DPVBi

(ง) CuPc

2.2.2 คอนจูเกตพอลิเมอร์ (conjugated polymer)

คอนจูเกตพอลิเมอร์คือ สารที่มีหน่วยของมอนอเมอร์ (monomer) ซ้ำๆกัน เรียงต่อกัน ไปโดยมีโครงสร้างพันธะเป็นแบบคู่สลับเดี่ยวเรียงต่อกันออกไปตามสายโซ่ของพอลิเมอร์ (polymer) เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนไปตามสายโซ่ของพอลิเมอร์ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 สารกึ่งตัวนำอินทรีย์แบบคอนจูเกตพอลิเมอร์

2.3 สิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์ (Photodetector)

สิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์หรือสิ่งประดิษฐ์ตรวจจับแสง หมายถึง สิ่งประดิษฐ์ที่มีความไวต่อแสงและสามารถเปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าได้

ตาของมนุษย์มีความไวต่อแสงและเป็นตรวจตัวรับแสงชนิดหนึ่ง(แต่ไม่ได้เปลี่ยนสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้า) สามารถส่งสัญญาณไปให้ประสาทรับแสงได้รับรู้ภาพ แต่ตามนุษย์มีข้อเสียที่มองภาพในที่มืดๆ ไม่ดีหรือไม่เห็นเลย และช่วงความยาวคลื่นของแสงที่มองเห็นค่อนข้างจำกัด ตาของมนุษย์สามารถมองเห็นได้เฉพาะในย่าน 400-700 นาโนเมตร โดยประมาณ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องมีการพัฒนาสิ่งประดิษฐ์ที่ไวต่อแสงในย่านต่างๆตั้งแต่อัลตราไวโอเล็ตไปจนถึงแสงอินฟราเรด

ในปัจจุบันสิ่งประดิษฐ์ตรวจจับแสงที่มีการพัฒนาให้สามารถใช้จัดการข้อมูลแสงได้ในหลายรูปแบบซึ่งแต่ละชนิดไวต่อแสงในย่านความยาวคลื่นที่ต่างกัน โดยการศึกษาจะเริ่มการศึกษาเกี่ยวกับรอยต่อที่เกิดขึ้นจากอุปกรณ์โฟโตดีเทคเตอร์พี-เอ็น (PN junction)

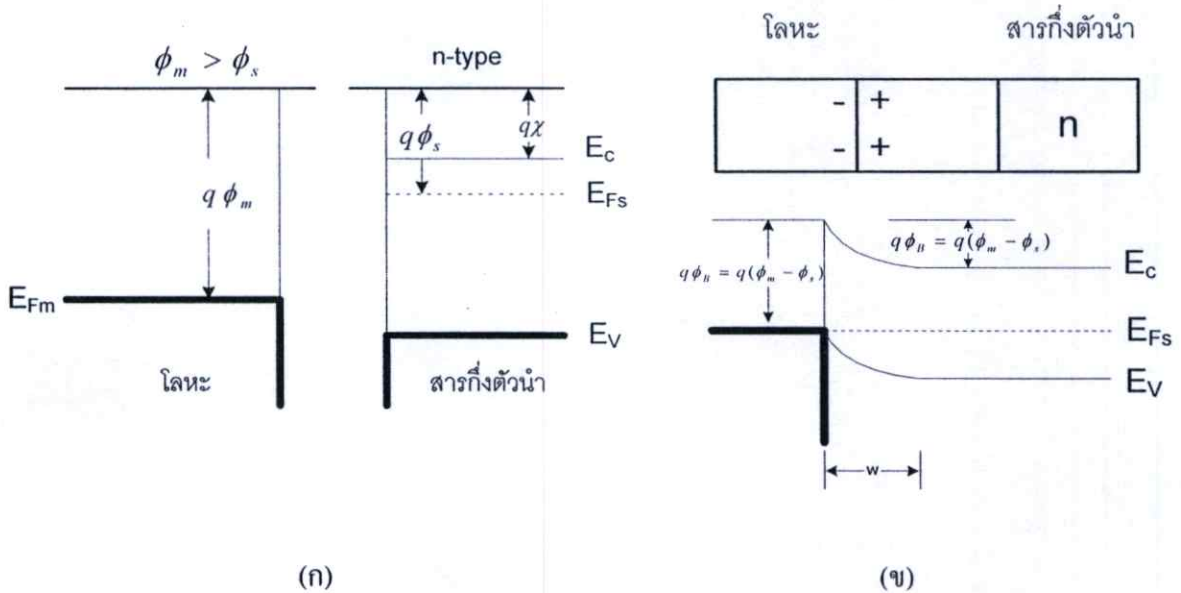
2.3.1 รอยต่อของโลหะและสารกึ่งตัวนำ (Metal-semiconductor junction)

ปรากฏการณ์การไหลทางเดียว (rectify) ของกระแสไฟฟ้าผ่านรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ เริ่มมีการศึกษาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1904 โดยเฉพาะตัวกรองกระแสชนิดรอยต่อแบบจุด (point contact rectifier) เป็นไดโอดที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในสมัยก่อนซึ่งในขณะนั้นทฤษฎีการนำไฟฟ้ายังไม่เป็นที่รู้จักแพร่หลาย ต่อมาในปี พ.ศ. 1938 Schottky ได้เสนอแนวคิดว่าการไหลทางเดียวของกระแสเกิดจากกำแพงศักย์ที่รอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำซึ่งเรียกว่า รอยต่อชอตต์กีแบเรีย (schottky barrier contact) ส่วนในกรณีของรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำที่ไม่มีปรากฏการณ์การไหลทางเดียวและมีค่าความต้านทานของรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับความต้านทานของเนื้อสารเรียกว่า รอยต่อโอห์มมิก (ohmic contact) ซึ่งในการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำจะมีการใช้ทั้งรอยต่อแบบชอตต์กีแบเรียและรอยต่อแบบโอห์มมิก

2.3.1.1 รอยต่อแบบชอตต์กีแบเรีย (schottky barriers contact)

ถ้าหากว่าประจุลบถูกนำมาใกล้ผิวของโลหะ ซึ่งในโลหะจะเกิดประจุบวกซึ่งถูกเหนี่ยวนำขึ้นเมื่อแรงนี้รวมเข้ากับสนามไฟฟ้าซึ่งถูกใส่เข้ามาจะทำให้ค่าประสิทธิผลของฟังก์ชันงาน (work function) ลดต่ำลง การที่กำแพงลดต่ำลงเช่นนี้เราเรียกว่า ปรากฏการณ์ชอตต์กี (schottky effect) แต่ผิวสัมผัสแบบเรียงกระแส มักถูกเรียกว่า ไดโอดชอตต์กีแบเรีย (Schottky barrier diode)

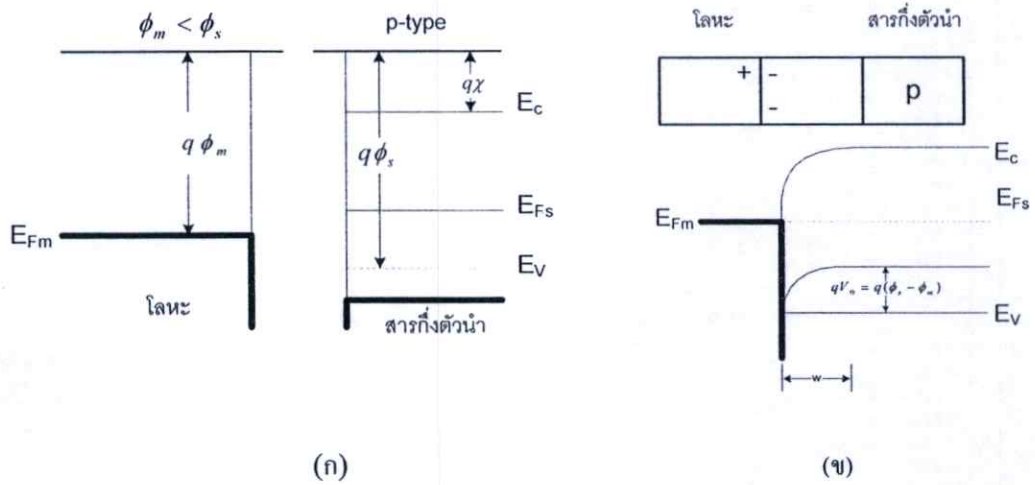
เมื่อโลหะซึ่งมีฟังก์ชันงานเท่ากับ ϕ_m ถูกนำมาสัมผัสกับสารกึ่งตัวนำซึ่งมีฟังก์ชันงาน ϕ_s การเคลื่อนย้ายประจุจะเกิดขึ้น จนกระทั่งระดับเฟอร์มิในสารทั้งสองเรียงตัวกันเป็นเส้นตรงที่สภาวะสมดุล ตามรูปที่ 2.17 ตัวอย่างเช่น เมื่อ $\phi_m > \phi_s$ ในขณะเริ่มแรกระดับเฟอร์มิในสารกึ่งตัวนำจะอยู่สูงกว่าในโลหะ(ก่อนการสัมผัส)เพื่อให้ระดับเฟอร์มิทั้งสองอยู่ในแนวเดียวกันศักย์ไฟฟ้าสถิตย์ในสารกึ่งตัวนำต้องถูกยกขึ้นทำให้พลังงานอิเล็กตรอนลดลงเมื่อเทียบกับของโลหะ ในสารกึ่งตัวนำแบบเอ็นรูปที่ 2.17 จะเกิดย่านปลอดพาหะ w ขึ้นใกล้ๆ กับรอยต่อ ประจุบวกซึ่งเกิดจาก อีออนแบบผู้ให้ภายใน w จะเท่ากับประจุลบภายในโลหะสนามไฟฟ้าและการโค้งงอของแถบพลังงานภายใน w จะคล้ายๆ กับในรอยต่อพี-เอ็น (PN junction)



รูปที่ 2.17 แสดงรอยต่อแบบขดกึ่งที่แบบเรียบซึ่งเกิดจากการที่สารกึ่งตัวนำแบบเอ็นสัมผัสกับโลหะซึ่งมีค่าฟังก์ชันงานสูงกว่า (ก) แผนภาพพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำก่อนการต่อกัน (ข) แผนภาพพลังงานของรอยต่อที่สภาวะสมดุล

ศักย์ไฟฟ้า V_0 บริเวณผิวสัมผัสที่สภาวะสมดุล จะมีค่าเท่ากับผลต่างของฟังก์ชันงานของโลหะกับสารกึ่งตัวนำ ซึ่งจะทำหน้าที่หยุดการแพร่ของอิเล็กตรอนจากแถบการนำ (Conduction band) ในสารกึ่งตัวนำ ไปยังโลหะ ความสูงของกำแพงศักย์ ϕ_b ซึ่งกั้นการหนีอิเล็กตรอนจากโลหะไปยังแถบการนำในสารกึ่งตัวนำ มีค่าเท่ากับ $\phi_m - \chi$ เมื่อ χ เรียกว่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี (electron affinity) คือระดับพลังงานที่อิเล็กตรอนใช้ในการย้ายอิเล็กตรอนจากบริเวณขอบล่างของแถบการนำไปยังระดับสุญญากาศ ค่า V_0 อาจถูกเพิ่มหรือลดได้โดยการไบอัสย้อนหรือไบอัสตาม

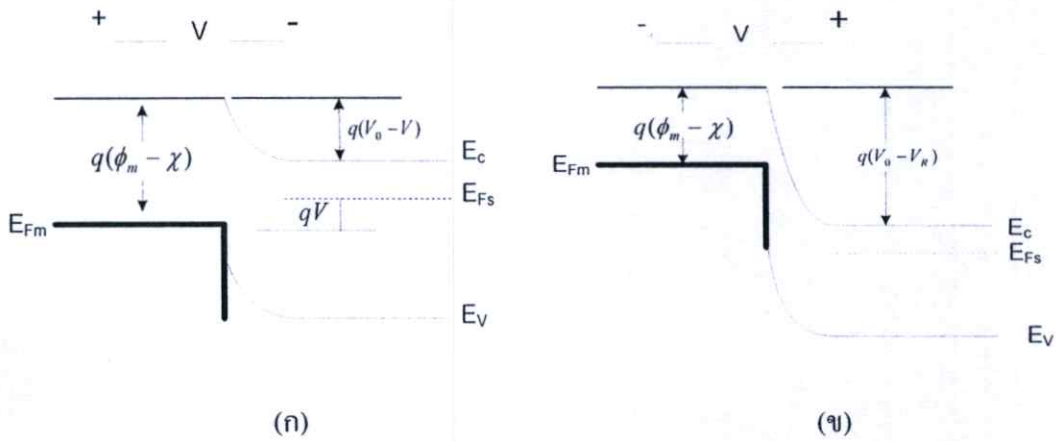
รูปที่ 2.18 แสดงรอยต่อขดกึ่งที่แบบเรียบบนสารกึ่งตัวนำชนิดพี ซึ่งมี $\phi_m < \phi_s$ ในกรณีนี้เพื่อให้เกิดการเรียงตัวของระดับเฟอร์มิจะต้องมีประจุบวกในด้านโลหะและประจุลบในด้านสารกึ่งตัวนำที่บริเวณรอยต่อ ประจุลบจะเกิดจากอ็อนแบบผู้รับในสารกึ่งตัวนำชนิดพี กำแพงศักย์ไฟฟ้า V_0 ที่ด้านทานการแพร่ซึมของโฮลจากสารกึ่งตัวนำไปสู่โลหะมีค่าเท่ากับ $\phi_s - \phi_m$ ค่า V_0 นี้จะลดลงหรือเพิ่มขึ้นก็ได้เนื่องจากการไบอัส



รูปที่ 2.18 แสดงรอยต่อขอตึกแบบเรียบซึ่งเกิดจากการที่สารกึ่งตัวนำแบบพี สัมผัสกับ โลหะซึ่งมีค่าฟังก์ชันงานต่ำกว่า

- (ก) แผนภาพพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำก่อนการต่อกัน
- (ข) แผนภาพพลังงานของหัวต่อที่สภาวะสมดุล

เมื่อไบอัสตามถูกใช้กับผิวสัมผัสแบบขอตึกแบบเรียบตามรูปที่ 2.19 (ข) ศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณผิวสัมผัสจะมีค่าลดลงจาก V_0 เป็น $V_0 - V$ ดังรูปที่ 2.19 ผลลัพธ์ก็คือ อิเล็กตรอนในแถบการนำของสารกึ่งตัวนำสามารถแพร่ซึมข้ามย่านปลอดพาหะเข้าไปในโลหะได้ ซึ่งทำให้เกิดกระแสไบอัสตาม (จากโลหะสู่สารกึ่งตัวนำ) ข้ามรอยต่อ ในทางตรงกันข้าม ไบอัสย้อนจะเพิ่มขนาดของกำแพงเป็น $V_0 + V_R$ และอิเล็กตรอนที่ข้ามจากสารกึ่งตัวนำไปสู่โลหะจะมีปริมาณน้อยจนตัดทิ้งไปได้ในทั้งสองกรณี การไหลของอิเล็กตรอนข้ามโลหะไปสู่สารกึ่งตัวนำจะถูกต้านด้วยกำแพง $\phi_m - \chi$



รูปที่ 2.19 ผลของการไบอัสตัวสัมผัสตามรูปที่ 2.18 (ก) ไบอัสตาม (ข) ไบอัสย้อน

ในกรณีรอยต่อขอตึกแบเรีย ตามรูปที่ 2.19 การไบอัสตามก็คือ การให้สารกึ่งตัวนำเป็นบวก เมื่อเทียบกับ โลหะ กระแสไบอัสตามเพิ่มขึ้นเมื่อแรงดันที่ใส่เข้ามาลดค่ากำแพงศักย์ไฟฟ้าลงเป็น $V_0 - V$ และโฮลจะไหลจากสารกึ่งตัวนำเข้าสู่โลหะ ส่วนแรงดันไบอัสย้อนจะเพิ่มค่ากำแพงศักย์สำหรับกั้น การไหลของโฮลทำให้กระแสมีค่าน้อยมาก

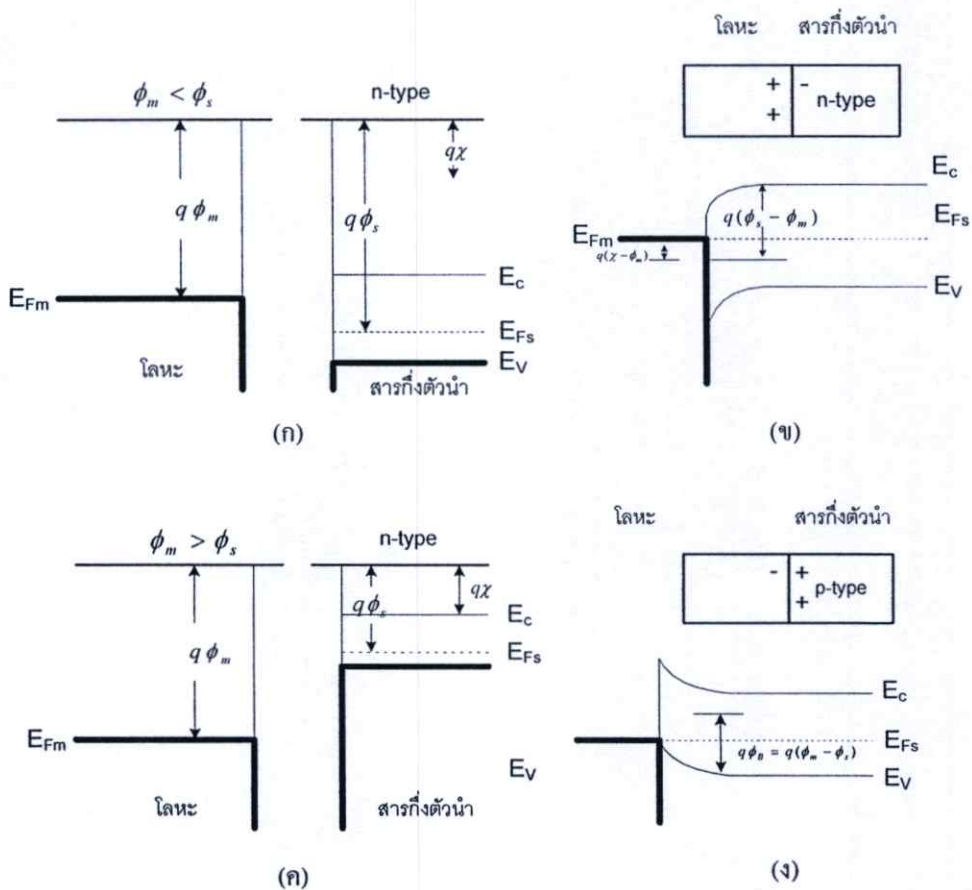
ในทั้งสองกรณีรอยต่อขอตึกแบเรียไดโอดจะเรียงกระแสได้เราจะสังเกตได้ว่าในแต่ละกรณี กระแสไบอัสตามจะเกิดเนื่องจากการฉีดพาหะข้างมากข้ามจากสารกึ่งตัวนำไปสู่โลหะ การที่ไม่มีการฉีดพาหะข้างน้อยและการที่มี ค่าเวลากักเก็บหน่วง(storage delay time) ต่ำ ซึ่งเป็นลักษณะที่สำคัญของขอตึกแบเรียไดโอด ดังนั้นจึงมีคุณสมบัติที่ความถี่สูงและความเร็วในการสวิตช์ที่ดี

2.3.1.2 รอยต่อโอห์มมิก (Ohmic Contact)

ในงานหลายประเภทต้องการผิวสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำที่เป็นแบบโอห์มมิก นั่นคือ มีลักษณะสมบัติของกระแสและแรงดันเป็นแบบเส้นตรงทั้งสองทิศทางของการไบอัส ตัวอย่างเช่น ใน วงจรไอซีซึ่งมีทั้งย่านพีและเอ็น ต้องการเชื่อมวงจรเหล่านี้เข้าด้วยกัน ดังนั้นผิวสัมผัสเพื่อการเชื่อมต่อ นี้ จึงต้องเป็น โอห์มมิกซึ่งมีความต้านทานน้อยที่สุด และไม่มีแนวโน้มที่จะเรียงกระแส

ผิวสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำในอุดมคตินั้นจะเป็นโอห์มมิกได้ ก็ต่อเมื่อประจุที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้น เพื่อให้ระดับเฟอร์มิอยู่ในแนวเดียวกัน เป็นผลมาจากพาหะข้างมาก ตามรูปที่ 2.20 ในกรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ที่มี $\phi_m < \phi_s$ ดังแสดงในรูปที่ 2.20(ก) การเรียงเป็นเส้นตรงของระดับเฟอร์มิ ที่สภาวะสมดุล จะเกิดจากการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนจากโลหะเข้าสู่สารกึ่งตัวนำ ซึ่งจะเป็นการทำให้พลังงานของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำมีค่าสูงขึ้น (ศักย์ไฟฟ้าสถิตมีค่าลดลง) เมื่อเทียบกับโลหะที่

สภาวะสมดุล (รูปที่ 2.20(ข)) ในกรณีนี้กำแพงที่กั้นการไหลของอิเล็กตรอนจะต่ำ ทำให้เกิดการไหลข้ามกำแพงได้ง่าย แม้ว่าแรงดันไฟฟ้าที่ใส่เข้ามาจะมีค่าต่ำ ในทำนองเดียวกับสารกึ่งตัวนำชนิดพี $\phi_m > \phi_s$ รูปที่ 2.20(ง) จะทำให้โวลต์ไหลข้ามรอยต่อได้ง่าย รอยต่อโอห์มมิกจะต่างกับรอยต่อแบบชอตกีแบเรียรี่คือจะไม่มีย่านปลอดพาหะเกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำเนื่องจากการจัดระดับเฟอร์มิให้เป็นเส้นตรงที่สภาวะสมดุลเกิดจากพาหะข้างมากในสารกึ่งตัวนำ

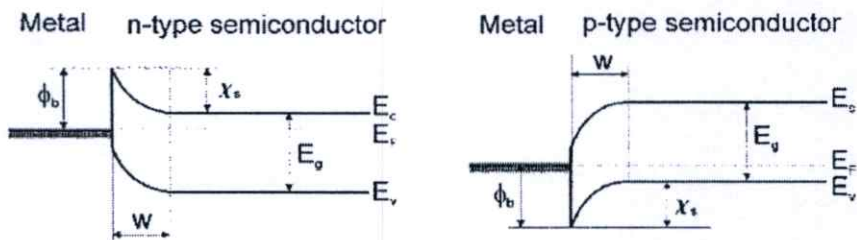


รูปที่ 2.20 แสดงรอยต่อโลหะ-สารกึ่งตัวนำแบบโอห์มมิก (ก) $\phi_m < \phi_s$ ในกรณีของสารกึ่งตัวนำชนิด เอ็น (ข) แผนภาพพลังงานของรอยต่อที่สภาวะสมดุล (ค) $\phi_m > \phi_s$ ในกรณีของสารกึ่งตัวนำชนิดพี (ง) รอยต่อที่สภาวะสมดุล

ในทางปฏิบัติการสร้างรอยต่อแบบโอห์มมิกทำได้โดยการเติมสารเจือปนจำนวนมากลงไปในบริเวณผิวสัมผัส ดังนั้นแม้ว่าจะเกิดกำแพงขึ้นที่บริเวณระหว่างผิว (Interface) ความกว้างของชั้นปลอดพาหะก็จะแคบพอที่จะทำให้พาหะเกิดการลอดทะลุ (Tunneling) ผ่านกำแพงไปได้

2.3.2 หลักการทำงานของตัวตรวจจับแสงชนิด Schottky barrier

ตัวตรวจจับแสงชนิด Schottky barrier photodiode (Schottky barrier photodiode) ได้รับการศึกษาอย่างมาก เนื่องจากมีข้อได้เปรียบหลายประการที่ดีกว่า p - n photodiode คือ ทำการสร้างได้ง่าย ไม่เกิดการแพร่ซึมในขณะที่มีการปลูกที่อุณหภูมิสูง และ มีการตอบสนองที่เร็ว



รูปที่ 2.21 แสดง energy band diagram ของรอยต่อ Schottky barrier (ก) โลหะ - สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (ข) โลหะ - สารกึ่งตัวนำชนิดพี

ตามโมเดลของ Schottky - Mott คุณสมบัติการเรียงกระแส (rectifying property) ของรอยต่อโลหะ - สารกึ่งตัวนำ เกิดจากกำแพงศักย์ทางไฟฟ้าระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำที่มีค่า work function ที่ต่างกันคือ ϕ_m และ ϕ_s สำหรับ work function ของโลหะและของสารกึ่งตัวนำตามลำดับ ตัวอย่างเช่นถ้าเป็นรอยต่อระหว่างโลหะ - สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น จะได้ว่า ϕ_m จะต้องมีค่าที่มากกว่าค่า ϕ_s ในขณะที่ถ้าเป็นรอยต่อระหว่างโลหะ - สารกึ่งตัวนำชนิดพี จะได้ว่า ϕ_m จะต้องมีค่าที่น้อยกว่าสำหรับความสูงของกำแพงศักย์แสดงดังรูปที่ 2.21 ซึ่งจะได้ว่า

$$\phi_{bn} = \phi_m - \chi_s \quad (2.1)$$

และ

$$\phi_{bp} = \chi_s + E_g - \phi_m \quad (2.2)$$

เมื่อ χ_s คือ electron affinity ของสารกึ่งตัวนำ ค่ากำแพงศักย์ระหว่างรอยต่อของสารกึ่งตัวนำและภายในเรียกว่า band bending ซึ่งจะได้ว่า

$$\psi_s = \phi_m - \phi_s \quad (2.3)$$

2.3.3 กระบวนการเกิดการไหลของกระแส (Current transport process)

การที่กระแสไหลผ่านในรอยต่อระหว่างโลหะ – สารกึ่งตัวนำ ในขณะที่ไบอัสตรง สามารถเกิดได้หลายกระบวนการตามรูปที่ 13 ซึ่งอาจเกิดเป็น 4 กระบวนการหลักคือ

ก) เกิดการส่งผ่านอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำที่บนสุดของกำแพงศักย์ไปยังโลหะ

ข) เกิดการทะลุผ่านกำแพงศักย์

ค) เกิดการรวมตัวในบริเวณ space charge

ง) เกิดการรวมตัวในบริเวณ neutral region ซึ่งในกรณีนี้จะเท่ากับ เกิดการฉีดโฮลจากโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำ

ในกรณีที่ถ้าเราทำการไบอัสกลับก็จะเกิดกระบวนการที่กลับกัน ซึ่งอาจจะเกิดกระแสรั่วไหลได้เมื่อเกิดสนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อด้านนอก สำหรับการที่กระแสไหลผ่านกำแพงศักย์สามารถอธิบายได้ในหลายๆทฤษฎีเช่น diffusion, thermionic emission เป็นต้น

สำหรับทฤษฎี thermionic emission โดย Bethe จะพิจารณาว่าความสูงของกำแพงศักย์มีค่ามากกว่า kT ที่สมดุลทางความร้อน (thermal equilibrium) ซึ่งจะได้ว่าผลที่ทำให้กระแสไหลมีผลมาจากความสูงของกำแพงศักย์แต่ไม่มีผลมาจากความกว้างของกำแพงศักย์ และกระแสอิ่มตัวจะเพิ่มขึ้นกับการไบอัส จะได้ว่าความหนาแน่นกระแสของพาหะข้างมากจากสารกึ่งตัวนำที่ข้ามกำแพงศักย์ไปยังโลหะคือ

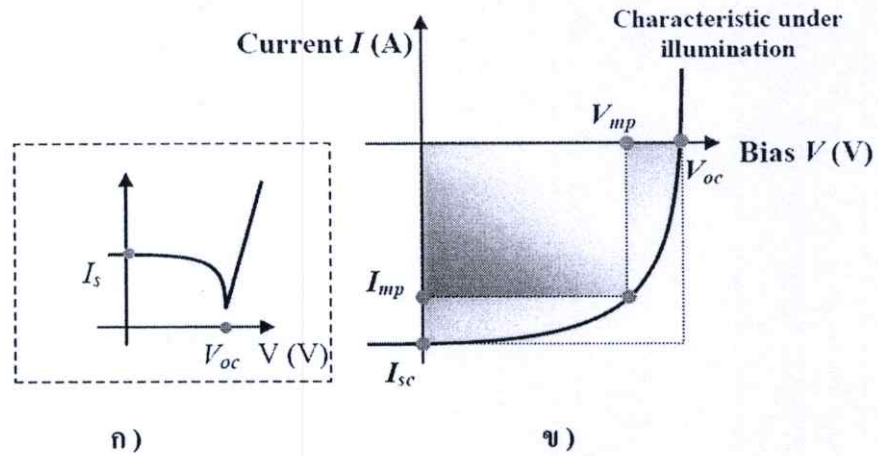
$$J_{MSI} = J_{st} \left[\exp\left(\frac{qV}{\beta kT}\right) - 1 \right] \quad (2.4)$$

และกระแสอิ่มตัวคือ

$$J_{st} = A^* T^2 \exp\left(-\frac{\phi_b}{kT}\right) \quad (2.5)$$

และ $A^* = 4\pi q k^2 m^* / h^3 = 120(m^* / m) \text{Acm}^{-2} \text{K}^{-2}$ ซึ่งก็คือ Richardson constant, m^* คือ effective electron mass และ β คือ empirical constant ซึ่งปกติแล้วจะมีค่าเป็น 1

ในการศึกษาคุณสมบัติของโฟโตดีเทคเตอร์ทำการตรวจวัดด้วยการวัดกระแส-แรงดัน (Current - Voltage) โดยมีพารามิเตอร์ดังนี้



รูปที่ 2.22 เป็นรูปแสดงผลจากการวัดกระแส- แรงดันของอุปกรณ์ภายใต้การฉายแสงโดยแสดงผลเป็นเซมิคอนดักเตอร์ผลการวัดปกติ

จากรูปที่ 2.22 (ข) โดยจากตำแหน่งของ (V_{mp}, I_{mp}) ที่ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการคำนวณค่าของพลังงานสูงสุดที่ได้จากกราฟ (Maximum Power Point, P_{mp}) โดยมีสมการดังนี้

$$P_{mp} = V_{mp} \cdot I_{mp} \quad (2.6)$$

โดยค่าของพลังงานสูงสุดจะอยู่ในพื้นที่ภายใน

และจากพื้นที่ว่างนอกก็จะมีค่าที่เกี่ยวข้องอีกสองค่า คือค่าของ กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (Short circuit Current, I_{sc}) และค่าของแรงดันเปิดวงจร (Open circuit Voltage, V_{oc}) สามารถที่นำมาคำนวณหาค่าของ Fill Factor (FF) ที่ซึ่งเป็นสมรรถนะการทำงานของอุปกรณ์โฟโตดีเทคเตอร์ โดยมีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่สองพื้นที่ ดังรูปที่ 2.22 โดยมีสมการดังนี้

$$FF = \frac{V_{mp} * I_{mp}}{V_{oc} * I_{sc}} \quad (2.7)$$

และค่าประสิทธิภาพของการแปรผันพลังงาน (Power Conversion Efficiency) ซึ่งบางครั้งจะเรียกว่า ประสิทธิภาพของเซลล์ (Cell Efficiency) ที่นิยามว่าเป็นอัตราส่วนของกำลังงานของเซลล์สามารถจ่าย

ได้กับกำลังงานที่ได้จากแหล่งกำเนิดแสง ดังนั้นถ้าพิจารณาว่าเซลล์สามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าให้แก่โหลดได้ค่าสูงสุด โดยคำนวณหาได้จากสมการ

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{I_{sc} * V_{oc} * FF}{P_{in}} \quad (2.8)$$

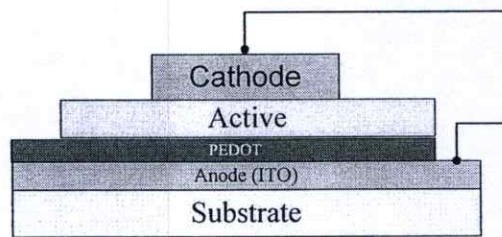
โดยที่ η คือประสิทธิภาพการแปลงพลังงานเซลล์

P_{in} คือพลังงานที่ตกกระทบผิวหน้าเซลล์ในหนึ่งวินาทีหรือก็คือกำลังไฟฟ้าของอินพุต

P_{out} คือพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์

2.3.4 โครงสร้างพื้นฐานของอุปกรณ์โฟโตดีเทคเตอร์

โครงสร้างพื้นฐานที่ใช้สร้างโฟโตดีเทคเตอร์โดยอธิบายและยกตัวอย่างสารอินทรีย์ที่ใช้ในแต่ละชั้นของโฟโตดีเทคเตอร์ที่ได้จากงานวิจัยโดยมีโครงสร้างแบบชั้นเดียวดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 โฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้างแบบชั้นเดียว

2.3.4.1 แผ่นฐานรองรับ (substrate)

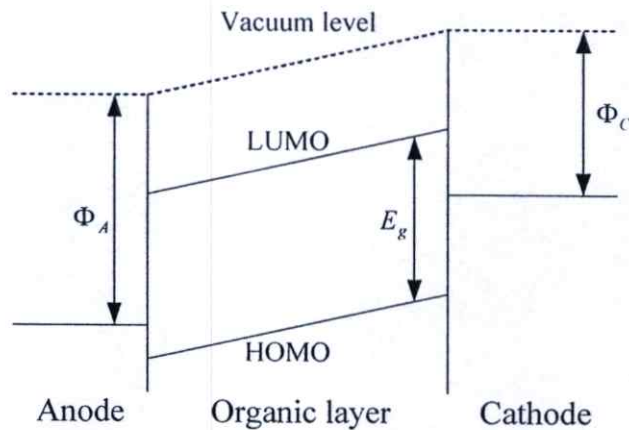
ทำหน้าที่เป็นชั้นสำหรับสร้างสารอินทรีย์ในชั้นต่างๆ ของ โฟโตดีเทคเตอร์ และทำหน้าที่ป้องกันชั้นของสารอินทรีย์จากความชื้นและอากาศ ซึ่งเป็นผลทำให้โฟโตดีเทคเตอร์เสื่อมสภาพลงได้ วัสดุที่ใช้ทำจากกระจกหรือพลาสติก (ในกรณีที่จะทำจอแบบโค้งงอได้) ซึ่งจะต้องมีค่าความทะลุผ่านของแสงสูง

2.3.4.2 ขั้วไฟฟ้าแอโนด (anode)

ทำหน้าที่ส่งผ่าน โฮลที่เคลื่อนที่จากของชั้นสารอินทรีย์และอนินทรีย์ ซึ่งโลหะที่จะนำมาใช้ทำขั้วไฟฟ้าแอโนดจะต้องมีสมบัติที่สำคัญคือ มีฟังก์ชันงาน Φ_A สูงดังแสดงในรูปที่ 2.24

2.3.4.2 ขั้วไฟฟ้าแอโนด (anode)

ทำหน้าที่ส่งผ่านโฮลที่เคลื่อนที่จากของชั้นสารอินทรีย์และอนินทรีย์ ซึ่งโลหะที่จะนำมาใช้ทำขั้วไฟฟ้าแอโนดจะต้องมีสมบัติที่สำคัญคือ มีฟังก์ชันงาน Φ_A สูงดังแสดงในรูปที่ 2.24

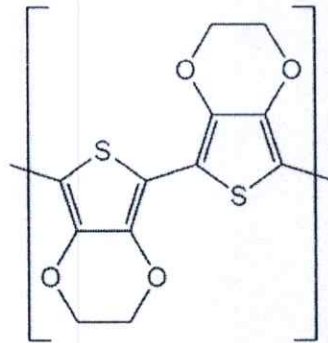


รูปที่ 2.24 ระดับชั้นพลังงานของอุปกรณ์ โฟโตดีเทคเตอร์แบบชั้นเดียว Φ_C คือฟังก์ชันงานของขั้วไฟฟ้าแคโทดและ Φ_A คือฟังก์ชันงานของขั้วไฟฟ้าแอโนด E_g คือแถบช่องว่าง พลังงานระหว่างแถบคอนดักชันและแถบเวเลนซ์

เป็นฟิล์มบางที่มีความโปร่งแสงสูงในย่านความยาวคลื่นแสงที่ตามองเห็น มีความต้านทานไฟฟ้าต่ำ นำไฟฟ้าได้ดี สารส่วนใหญ่ที่นิยมนำมาใช้ทำเป็นขั้วไฟฟ้าแอโนดของ โฟโตดีเทคเตอร์ คือ ITO เพราะมีคุณสมบัติต่างๆ ดังกล่าวข้างต้น ซึ่งมีฟังก์ชันงาน $\Phi_A \sim 4.5$ eV และสามารถเพิ่มขึ้นไปได้ถึง ~ 5.1 eV ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขที่ใช้ในการทำ

2.3.4.3 ชั้นฟิล์มสาร PEDOT

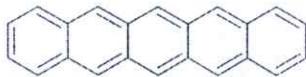
ทำหน้าที่ฉีดโฮลที่บริเวณรอยต่อของขั้วไฟฟ้าแอโนด โดยจากงานวิจัยสารที่ใช้ในชั้นนี้เป็น Poly(3,4-ethylenedioxythiophene) หรือเรียกสั้นๆว่า PEDOT เนื่องจากสมบัติเป็นตัวนำที่ตีอิกทั้งยังเป็นตัวส่งผ่านทางแสงในย่านที่ตามองเห็น (Visible light) ที่ดี และสามารถที่จะเป็นตัวปรับสภาพพื้นผิวของตัวอุปกรณ์โฟโตดีเทคเตอร์ปัญหาที่เกิดขึ้นเนื่องจากการช้อตของอุปกรณ์เนื่องจากขั้วไฟฟ้า



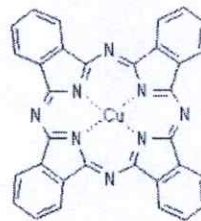
รูปที่ 2.25 รูปแสดงโครงสร้างโมเลกุลของPEDOT

2.3.4.4 ชั้นรับแสง (Active layer)

ทำหน้าที่เป็นชั้นรับแสงโดยจากสมบัติของสารกึ่งตัวนำเมื่อมีการฉายแสงผ่านมายังชั้นสารทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลส่งผลทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของพาหะเกิดขึ้นของอุปกรณ์โฟโตดีเทคเตอร์ โดยสารที่ใช้ในชั้นนี้จะเป็นสารอินทรีย์และอนินทรีย์ชนิด p-type และ n-type โดยแสดงสารดังตัวอย่างดังรูป 2.26



Pentacene



CuPc



C60

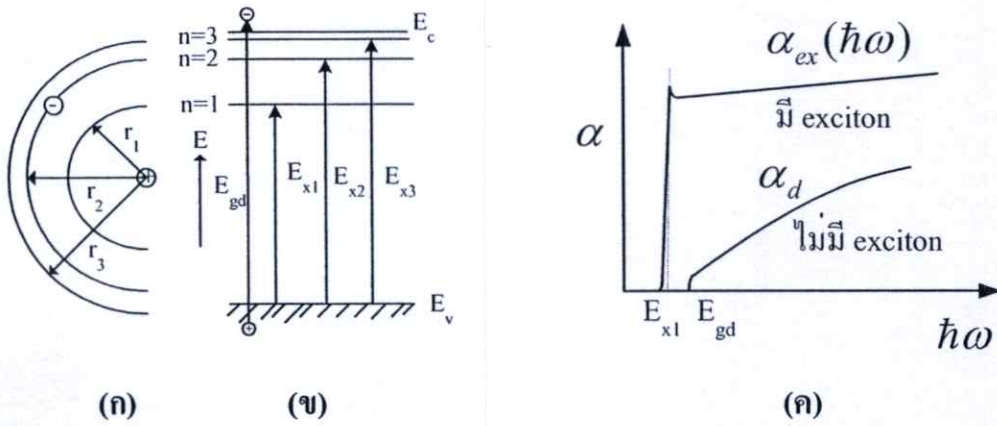
รูปที่ 2.26 รูปแสดงสารที่นิยมใช้เป็นชั้นรับแสงของโฟโตดีเทคเตอร์

2.3.4.5 ชั้นขั้วไฟฟ้าแคโทด (Cathode)

ทำหน้าที่ส่งผ่านอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่จากชั้นสารอินทรีย์และอนินทรีย์ ซึ่งโลหะที่จะนำมาใช้ทำขั้วแคโทดจะต้องมีค่าฟังก์ชันงาน Φ_c ดังรูปที่ 2.24 ส่วนใหญ่จะใช้ อลูมิเนียม (Al), แคลเซียม (Ca) และ แมกนีเซียม (Mg): เงิน (Ag) โดยจะใช้เป็นขั้วไฟฟ้าเพื่อป้องกันสารอินทรีย์จากการเกิดออกซิเดชัน (oxidation) และความชื้นในอากาศ อีกทั้งยังทำหน้าที่เป็นกระจกช่วยในการสะท้อนแสงในชั้นของสารอินทรีย์และอนินทรีย์ออกมาอีกด้วย

2.4 การดูดกลืนแสงของเอ็กซิตอน (Exciton)

ในการเปลี่ยนสถานะระหว่างแถบพลังงาน (interband transition) อิเล็กตรอนจะกระโดดขึ้นไปสู่แถบพลังงานนำไฟฟ้าและกลายพาหะอิสระ ส่วนโฮลที่เหลืออยู่ในชั้นแถบพลังงานวาเลนซ์ก็จะกลายเป็นพาหะอิสระเช่นกัน พาหะอิสระเหล่านี้จะช่วยให้สภาพนำไฟฟ้าของวัสดุมีค่าสูงขึ้น ซึ่งเรียกว่าเป็นปรากฏการณ์นำไฟฟ้าด้วยแสง (photo-conductive effect) นอกจากนี้ปรากฏการณ์เช่นนี้แล้ว บางครั้งอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงไม่สามารถกระโดดขึ้นไปถึงแถบพลังงานนำไฟฟ้าเพราะ ถูกแรงกูดอมบ์จากโฮลดึงดูดตัวไว้ ทำให้อิเล็กตรอนกระโดดขึ้นไปได้แค่ระดับพลังงานใกล้เคียงกับแถบพลังงานนำไฟฟ้า กล่าวคือถูกตรึงอยู่ในแถบพลังงานต้องห้ามนั่นเอง คู่อิเล็กตรอน และโฮลที่ดึงดูดกันด้วยแรงกูดอมบ์นี้ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้อิสระ ทำให้ไม่มีผลต่อการนำไฟฟ้า เราเรียกสภาพคู่อิเล็กตรอนและโฮลลักษณะนี้ว่า “เอ็กซิตอน” การดึงดูดซึ่งกันและกันระหว่างอิเล็กตรอนและโฮลด้วยแรงกูดอมบ์นี้เปรียบเสมือนเป็นอะตอมของไฮโดรเจนซึ่งพลังงานดึงดูดระหว่างอิเล็กตรอนและนิวเคลียสถูกการ QUANTIZATION เป็นระดับพลังงานต่างๆ ตามรูปที่ 2.27 รูป(ข) แสดงตัวอย่างระดับพลังงานของเอ็กซิตอน จากรูปที่ 2.27 (ค) แสดงตัวอย่างสเปกตรัมการดูดกลืนแสงอันเนื่องมาจากเอ็กซิตอน ที่ซึ่งถูกแบ่งเป็น 2 ชนิด ตามระยะห่างระหว่างอิเล็กตรอนและ โฮล ถ้าระยะห่างระหว่างอิเล็กตรอนมีค่าใกล้เคียง ค่าคงที่โครงผลึก (lattice constant) เรียกว่าเป็นแบบ Frenkel ถ้าระยะห่างระหว่างอิเล็กตรอนและโฮลมีค่ามากกว่าค่าคงที่โครงผลึกหลายเท่าถึงกลายสิบเท่า เรียกว่าเป็นแบบ Wannier



รูปที่ 2.27 การเกิดเอ็กซิตอนและดูดกลืนแสงด้วยเอ็กซิตอน

- (ก) โมเดลการกระตุ้นคู่อิเล็กตรอน - โฮล โดยใช้ตัวอย่างอะตอมไฮโดรเจน
- (ข) โมเดลแถบพลังงานแสงเอ็กซิตอน
- (ค) สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงแบบตรงและแบบมีเอ็กซิตอน

2.5 สภาพตอบสนอง (Responsivity)

ถ้าให้ P_{in} คือความเข้มแสง (หน่วย radiant flux) ที่เข้าสู่สิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสง และ V_s คือแรงดันเอาต์พุตของสิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสง นิยามของ “สภาพตอบสนอง” หรือ “เรสปอนซิวิตี” (responsivity, R) คือ การวัดแสงแบบต่อเนื่องตามความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$R = \frac{V_s}{P_{in}} \tag{2.9}$$

ถ้ามีการตัดแสงอินพุตด้วยขอบเปอร์ด้วยความถี่เชิงมุม ω และค่าคงที่เวลา (time constant) ของสิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสง τ จะได้ค่า $R(\omega)$ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความถี่ของการขอบเปอร์แสงว่า

$$R = \frac{R}{(1 + \omega^2 \tau^2)^{1/2}} \tag{2.10}$$

โดยที่ R หรือ $R(\omega)$ มีหน่วยเป็น V/W

ถ้าเอาที่พูดที่วัดคือกระแสไฟฟ้า หน่วยของสภาพตอบสนองคือ A/W ค่าสภาพสนองนี้เป็น การบ่งชี้ว่าถ้าแสงอินพุตมีกำลัง 1 W สิ่งประดิษฐ์จะมีเอาที่พูดเท่าไรนั่นเอง

2.5.1 ผลการตอบสนองเชิงสเปกตรัม (Spectral Response)

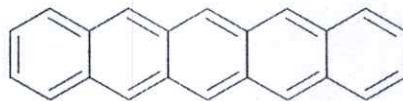
โดยปกติสิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสงจะมีผลตอบสนองไม่เท่ากันถ้าความยาวคลื่นแสง เปลี่ยนแปลง ซึ่งเรียกว่า ผลตอบสนองเชิงสเปกตรัม (Spectral response) ใช้สัญลักษณ์ว่า $R(\lambda)$ ซึ่ง สามารถแสดงได้ด้วยอัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตต่อความเข้มแสง $I_{sc}(\lambda)$ ต่อกำลังของแสงอินพุต $P(\lambda)$ กล่าวคือ

$$R(\lambda) = \frac{I_{sc}(\lambda)}{P(\lambda)} \quad (A/W) \quad (2.11)$$

จากสมการ 2.11 แสดงค่าผลตอบสนองสเปกตรัมที่มีค่าแบบสัมบูรณ์ตามความเป็นจริง (absolute spectral response) และถ้าเราทำการนอร์มอลไลซ์สูตรนี้ด้วยค่าผลตอบสนองของแสงที่ ความยาวคลื่นใดๆ เราจะได้ค่าผลตอบสนองเชิงสเปกตรัมสัมพัทธ์ (relative spectral response)

2.6 สมบัติพื้นฐานของโมเลกุลสารกึ่งตัวนำอินทรีย์เพนทาซีน

ในงานวิจัยนี้ใช้สารเพนทาซีนของบริษัท Aldrich Chem. Co ที่มีความบริสุทธิ์ที่ 99.8% โดยที่ คุณสมบัติของสารเพนทาซีนมีดังตารางที่ 2.28



รูปที่ 2.28 โครงสร้างสารอินทรีย์เพนทาซีน

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงสมบัติของสารเพนทาซีน

ชื่อสารอินทรีย์	Pentacene
ชื่อทางเคมี	Polycyclic aromatic hydrocarbon pentacene
สูตรทางเคมี	$C_{22}H_{14}$
Molecular Weight	278.35 g/mol
จุดหลอมเหลว	300 °C
ลักษณะทางกายภาพ	ผงสีดำ-น้ำตาล
HOMO	4.95 eV
LUMO	2.75 eV

2.7 สมบัติพื้นฐานของโมเลกุลสารกึ่งตัวนำอินทรีย์แคดเมียมซัลไฟด์

สำหรับสารกึ่งตัวนำอินทรีย์แคดเมียมซัลไฟด์ ใช้สารจากบริษัท Aldrich Chem. Co. ที่มีความบริสุทธิ์ที่ 99.8% โดยที่คุณสมบัติของสารแคดเมียมซัลไฟด์ มีดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงสมบัติของสารแคดเมียมซัลไฟด์

ชื่อสารอินทรีย์	Cadmium(II) sulphide
สูตรทางเคมี	CdS
จุดหลอมเหลว	1750°C at 100 bar
ลักษณะทางกายภาพ	ผงเหลือง-ส้ม
โครงสร้างผลึก	Hexagonal
Bandgap	2.42 eV

2.8 หลักการเครื่องมือวิเคราะห์สมบัติเฉพาะของฟิล์มบาง

2.8.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

รังสีเอ็กซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานสูง รังสีเอ็กซ์เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่ถูกเร่งในสนามไฟฟ้าให้มีพลังงานสูงแล้ววิ่งชนเป้าซึ่งทำด้วยโลหะหนัก ผลของการชนก่อให้เกิดรังสีเอ็กซ์ 2 ชนิดคือ รังสีเอ็กซ์ต่อเนื่อง (Continuous X-Ray) กับรังสีเอ็กซ์เฉพาะตัว (Characteristic X-Ray) รังสีเอ็กซ์จะเกิดการเลี้ยวเบน (Diffraction) เมื่อผ่านช่องว่างระหว่างอะตอมในผลึก เมื่อคลื่นผ่านโครงสร้างผลึกออกมาจะเกิดการแทรกสอด (Interference) ทั้งแบบเสริมและหักล้างกัน วิลเลียม เชนรี แบริก (William Henry Bragg) นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษได้ตั้งกฎการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในโครงสร้างผลึกไว้ว่า รังสีเอ็กซ์จะแทรกสอดกันแบบเสริมมากที่สุดเมื่อมีการกระเจิงออกจากแต่ละระนาบด้วยความแตกต่างของทางเดินคลื่น (Path different) เป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ เรียกกฎนี้ว่า กฎของแบรกก์ (Bragg's law) [4] ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 2.12

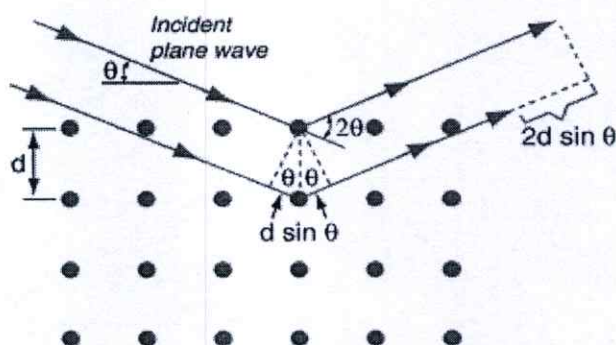
$$N\lambda = 2d_{hkl} \sin \theta \quad (2.12)$$

เมื่อ N คือ ลำดับของการเลี้ยวเบน มีค่าตั้งแต่ 1,2,3,...

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์

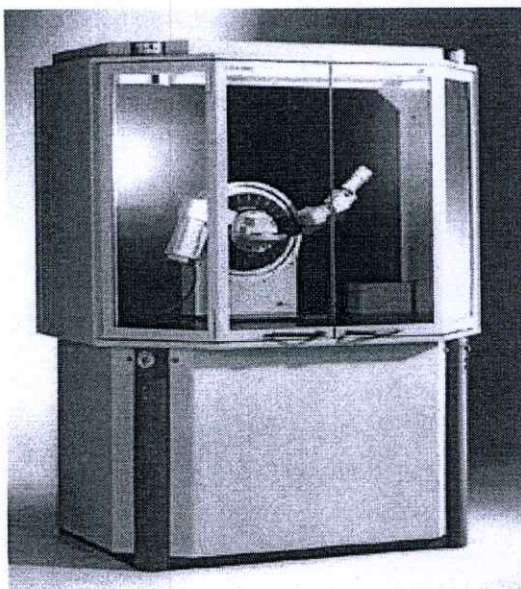
d_{hkl} คือ ระยะห่างระหว่างระนาบ

θ คือ มุมสะท้อนจากระนาบแบรกก์ของรังสีเอ็กซ์ซึ่งจะเท่ากับมุมตกกระทบ

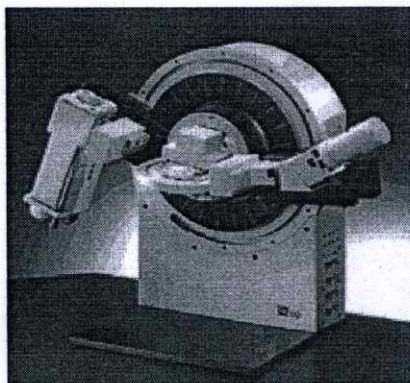


รูปที่ 2.29 แสดงการตกกระทบและการสะท้อนของรังสีเอ็กซ์ตามกฎของแบรกก์

ระนาบต่างๆของผลึกไม่ได้ก่อให้เกิดการเลี้ยวเบนเสมอไป ระนาบใดที่รังสีเอ็กซ์ตกกระทบแล้วกระเจิงออกมาอย่างสอดคล้องกับกฎของแบรกก์เรียกว่า ระนาบแบรกก์ (Bragg plane) แสดงดังรูปที่ 2.29 และมุมที่รังสีสะท้อนทำกับระนาบที่ขนานกับรังสีตกกระทบเรียกว่า มุมเลี้ยวเบน (Diffraction angle) ซึ่งมีค่าเป็นสองเท่าของมุมสะท้อน ความเข้ม (Intensity) ของรังสีเอ็กซ์ที่เลี้ยวเบนและมุมเลี้ยวเบนต่างๆ จะถูกตรวจหาด้วย X-Ray diffractometer ดังแสดงดังรูปที่ 2.30 และรูปที่ 2.31 นำค่าทั้งสองที่บันทึกไว้ไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

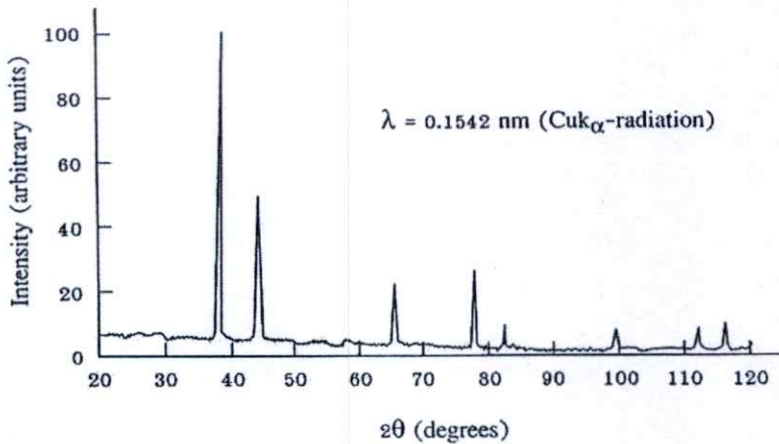


รูปที่ 2.30 แสดงเครื่อง X-ray diffractometer



รูปที่ 2.31 แสดงตัวตรวจวัดของ X-ray diffractometer

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มและมุมเลี้ยวเบนที่ได้เรียกว่า รูปแบบการเลี้ยวเบน (Diffraction pattern) ซึ่งจะมีลักษณะเฉพาะตัวสำหรับธาตุหรือสารประกอบต่างชนิดกัน จากการเลี้ยวเบนแล้วแทรกสอดกันแบบเสริมความเข้มของรังสีเอ็กซ์ก็จะมีค่ามากซึ่งจะสังเกตได้จากยอด (Peak) ในรูปแบบการเลี้ยวเบน และยอดเหล่านี้จะปรากฏที่มุมเลี้ยวเบนเดิมเสมอสำหรับธาตุหรือสารประกอบชนิดเดียวกัน



รูปที่ 2.32 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จะสามารถหาค่าตัวแปรซึ่งแสดงถึงสมบัติความเป็นผลึกของฟิล์มบางได้ดังนี้

ค่าคงที่แลตทิซ (Lattice constant) จากกฎการเลี้ยวเบนของแบรกก์แอมพลิจูดของการเลี้ยวเบนของคลื่นคือ F เวกเตอร์คลื่นของระนาบคลื่นที่ตกกระทบคือ k เวกเตอร์คลื่นของคลื่นสะท้อนคือ k' ดังนั้น

$$F = \int n_G e^{[i(\vec{G} + \vec{k} - \vec{k}').\vec{r}]} \quad (2.13)$$

เมื่อ n_G คือ แอมพลิจูดของการเลี้ยวเบน
 G คือ แลตทิซส่วนกลับ (Reciprocal lattice)

สามารถหาค่าแลตทิซส่วนกลับได้จากสมการ

$$\vec{G} = \vec{k}' - \vec{k} \quad (2.14)$$

เมื่อ

$$|\vec{k}'| = |\vec{k}| = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.15)$$

จะได้

$$|G|^2 = \vec{G} \cdot \vec{G} = (\vec{k}' - \vec{k}) \cdot (\vec{k}' - \vec{k}) \quad (2.16)$$

$$|G|^2 = 2|k|^2 - 2\vec{k}' \cdot \vec{k} \quad (2.17)$$

$$|G|^2 = 4\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 (1 - \cos 2\theta) \quad (2.18)$$

เมื่อ 2θ คือมุมระหว่าง \vec{k} และ \vec{k}' แก้สมการหาค่า λ จะได้ว่า

$$\lambda = \frac{4\pi}{|\vec{G}|} \sin \theta \quad (2.19)$$

และจากสมการการหาค่าของ $|G|^2$

$$|G|^2 = \left(\frac{2\pi}{a}\right)^2 (h^2 + k^2 + l^2) \quad (2.20)$$

จะได้สมการของค่าคงที่แลตทิซเป็น

$$a = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} \sqrt{h^2 + k^2 + l^2} \quad (2.21)$$

เมื่อ a คือ ค่าคงที่แลตทิซ

λ_x คือ ค่าความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

θ คือ มุมของการเลี้ยวเบน

2.8.2 การศึกษาสมบัติทางแสงด้วยวิธีวัดสเปกตรัมการทะลุผ่านของแสง

ในการศึกษาสมบัติทางแสงของสารอินทรีย์นั้น โดยระดับพลังงานในช่วงต่างจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงภายในโมเลกุลที่มีสภาวะการเร้าต่างกันของการวัด โดยที่ช่วงของรังสีแกมมา(γ -ray) และรังสี (X-ray) มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของอิเล็กตรอนและทำให้เกิดการแตกของพันธะซึ่งนำไปสู่รายละเอียดของการวิเคราะห์โครงสร้างของสารได้ช่วงของรังสีใกล้อินฟราเรด (far infrared) คาบเกี่ยวกับไมโครเวฟ (microwave) มีผลต่อการเร้าให้เกิดการหมุนหรือการเคลื่อนที่ของโมเลกุล

ระดับพลังงานในช่วงของอัลตราไวโอเล็ต (UV) จะทำให้อิเล็กตรอนที่เกิดพันธะ (bond) เกิดสภาวะเร้าสู่ระดับออร์บิทัลที่มีพลังงานสูงขึ้น ซึ่งจะสามารถบอกลักษณะของโมเลกุลของสารประกอบอินทรีย์บางอย่างได้เช่น มีพันธะคู่ที่คอนจูเกต (conjugated double bond) เนื่องจากผลจากการเคลื่อนที่ย้ายของอิเล็กตรอน (electron delocalization) เป็นผลให้ช่องว่างของระดับพลังงานระหว่าง HOMO (Highest Occupied Molecular Orbital) และ LUMO (Highest Occupied Molecular Orbital) ลดลง ซึ่งหมายถึงพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นการเร้าของอิเล็กตรอนก็จะน้อยลงด้วย การดูดซับพลังงานของโมเลกุลประเภทนี้จึงอยู่ที่ความถี่ต่ำลง

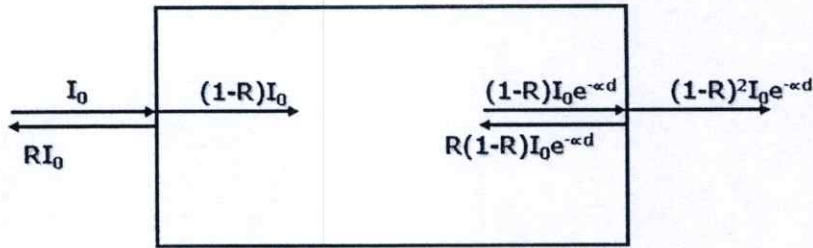
ในการดูดกลืนแสงช่วงอัลตราไวโอเล็ตปริมาณแสงที่พอเหมาะทำให้เกิดการกระตุ้นอิเล็กตรอน (electronic excitation) จากสภาวะพื้น (ground state) ไปสู่สภาวะกระตุ้น (excited state) กล่าวคืออิเล็กตรอนจากระดับที่มีพลังงานต่ำจะถูกกระตุ้นให้ขึ้นไปอยู่ที่ระดับพลังงานที่สูงกว่า พลังงานที่ดูดกลืนโดยโมเลกุลหรืออะตอมนั้นจะมีค่าเท่ากับผลต่างของพลังงานที่สูงกว่า พลังงานที่ถูกดูดกลืนโดยโมเลกุลหรืออะตอมนั้นจะมีค่าเท่ากับผลต่างของพลังงาน (ΔE) ระหว่างสภาวะเร้ากับสภาวะพื้น

ในการกระตุ้นอิเล็กตรอนของพันธะซิกมา (σ -bond) จะใช้พลังงานสูงกว่า (ความยาวคลื่นสั้นกว่า) ในพันธะไพ (π -Bond) เนื่องจากช่วงพลังงานระหว่างออร์บิทัลที่ไม่ก่อพันธะ (nonbonding) กับออร์บิทัลก่อพันธะ (bonding) ของพันธะซิกมากว่าในพันธะไพ

โมเลกุลที่ดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเล็ต ช่วงความยาวคลื่นต่ำประมาณ 150 นาโนเมตร ลงมา มักจะประกอบด้วยพันธะซิกมาเนื่องจากเป็นพลังงานที่สามารถเร้าอิเล็กตรอนของพันธะซิกมาได้ แต่เนื่องจากช่วงของความยาวคลื่นที่ใช้มักอยู่ที่ประมาณ 200 -400 นาโนเมตร สำหรับอัลตราไวโอเล็ต และช่วง 200 -800 นาโนเมตร สำหรับ UV-Vis ดังนั้นโมเลกุลส่วนใหญ่ที่เกี่ยวข้องกับอัลตราไวโอเล็ตสเปกโทรโฟโตมิเตอร์มักจะเป็นสารประกอบที่มีพันธะไพ

การนำอัลตราไวโอเล็ตสเปกโทรสโกปีมาใช้ในการวิเคราะห์สารเริ่มเมื่อประมาณปี ค.ศ. 1930 ซึ่งนับเป็นสเปกโทรสโกปีแบบดูดซับชนิดแรก ช่วงความยาวคลื่นของอัลตราไวโอเล็ตอยู่ระหว่าง 190 -400 นาโนเมตร และขยายไปถึงช่วงของที่ตามองเห็น (VIS) อยู่ระหว่าง 380-800 นาโน

เมตร โดยหลักการการทะลุผ่านของแสงก็คือเมื่อแสงเดินทางไปตกกระทบวัสดุ แสงบางส่วนจะสะท้อนกลับที่ผิววัสดุและจะมีแสงบางส่วนเดินทางเข้าไปข้างในวัสดุ แสงบางส่วนดังกล่าวจะถูกดูดกลืนและจะมีบางส่วนที่ทะลุออกมา ดังรูปที่ 2.33



รูปที่ 2.33 ลักษณะการเดินทางของแสงทะลุผ่านตัวกลาง

เมื่อ

I_0 คือ ความเข้มแสงที่ตกกระทบผิววัสดุ

I_r คือ ความเข้มแสงที่สะท้อนจากผิววัสดุ

I_t คือ ความเข้มแสงที่ทะลุผ่านผิววัสดุ

สามารถให้นิยามของสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง R (Optical Reflectivity Coefficient) สัมประสิทธิ์การดูดกลืน α (Optical Absorption Coefficient) และสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านแสง (Optical Transmittance Coefficient) ได้ดังนี้

$$\text{สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง} \quad R = \frac{I_r}{I_0} \quad (2.22)$$

ดังนั้นความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่ตัวกลางมีค่า

$$I_0 - I_r = I_0 - RI_0 = (1-R)I_0 \quad (2.23)$$

จากนั้นเมื่อแสงเดินทางเข้าไปในวัสดุแสงจะถูกดูดกลืน จากรูปจะเห็นว่าแสงจะมีค่าความเข้มแสงลดลงแบบเอกซ์โปเนนเชียลตามระยะทาง d

ในกรณีที่มีการสะท้อนที่ผิวด้านหลัง ความเข้มข้นของแสงที่ทะลุผ่านออกด้านหลังของวัสดุคือ

$$I_t = (1 - R)^2 I_0 e^{-\alpha d} \quad (2.24)$$

สัมประสิทธิ์การทะลุผ่านแสง

$$T_1 = \frac{I_t}{I_0} = (1 - R)^2 e^{-\alpha d} \quad (2.25)$$

สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

$$\alpha = -\frac{1}{d} \ln \left[\frac{T}{(1 - R)^2} \right] \quad (2.26)$$

ในกรณีที่สมมติให้แสงส่วนใหญ่สะท้อนเฉพาะผิวหน้าที่รับแสงเท่านั้น ความเข้มข้นแสงที่ทะลุออกด้านหลังของวัสดุคือ

$$I_t = (1 - R) I_0 e^{-\alpha d} \quad (2.27)$$

สัมประสิทธิ์การทะลุผ่านแสง

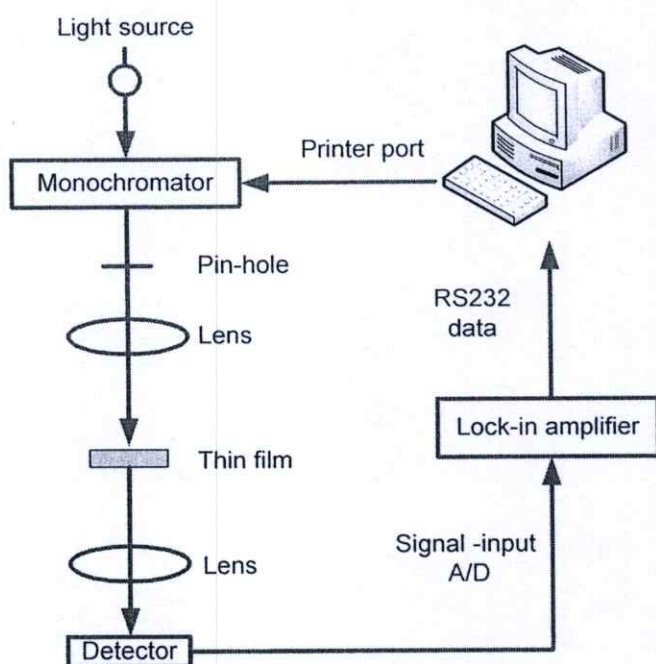
$$T_1 = \frac{I_t}{I_0} = (1 - R) e^{-\alpha d} \quad (2.28)$$

สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

$$\alpha = -\frac{1}{d} \ln \left[\frac{T}{1 - R} \right] \quad (2.29)$$

ในการวัดสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านแสงที่ตกกระทบและทะลุผ่านฟิล์มบางนั้น เราจะใช้ระบบวัด Transmittance Spectroscopy ในการวัด

องค์ประกอบของระบบวัดสเปกตรัมการทะลุผ่านของแสงประกอบด้วย แหล่งกำเนิดแสง โมโนโครเมเตอร์ ตัวตัดแสง ตัวตรวจจับแสง แท่นยึดสาร เครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอินและ ไมโครคอมพิวเตอร์ ซึ่งจัดเรียงไดอะแกรมดังรูปที่ 2.34



รูปที่ 2.34 ระบบวัดสเปกตรัมการทะลุผ่านของแสง

-แหล่งกำเนิดแสง (Light source)

ใช้หลอดทำจากทังสเตน (Tungsten) ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดแสงกำลัง 100 วัตต์ ให้แสงที่มีช่วงความยาวคลื่น 200-2,200 นาโนเมตร เพื่อให้เป็นแสงที่ตกกระทบสารตัวอย่างในรูปของสัญญาณ d.c.

-โมโนโครเมเตอร์ (Monochromator)

ทำหน้าที่แยกแสงที่มีความยาวคลื่นต่างๆ โดยไดอะแกรมของโมโนโครเมเตอร์ หลักการคือเมื่อแสงเข้ามาทางสลิต (Slit) จะสะท้อนผ่านกระจก (Folding mirrors) ไปตกกระทบที่คอลลิเมติง (Collimating mirror) และสะท้อนไปยังเกรตติง (Grating) เกรตติงจะให้แสงที่มีความยาวคลื่นต่างๆ ตามการตกกระทบบนเกรตติงและแสงจากเกรตติงจะสะท้อนกลับไปยังคอลลิเมติงสะท้อนกระจกออกไปยังสลิตต่อไป

-ตัวตรวจจับแสง (Detector)

ทำหน้าที่เปลี่ยนความเข้มแสงให้อยู่ในรูปของกระแสและแรงดันไฟฟ้า

-เลนส์ (Lens)

ทำหน้าที่ให้ความเข้มแสงที่จุดยาวโฟกัสของเลนส์ โดยความยาวโฟกัสพิจารณาจากระยะทางความเหมาะสมของระบบวัด

-แท่นยึดสาร

ทำหน้าที่ยึดสารกึ่งตัวนำและปรับปรุงมุมสะท้อนไปยังตัวตรวจจับสัญญาณ

-เครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอิน (Lock in amplifier)

ทำหน้าที่ขยายสัญญาณที่ออกมาจากตัวตรวจจับสัญญาณ ซึ่งเป็นสัญญาณ A/D เครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอินมี 4 ช่องสัญญาณ

-สเตปป์มอเตอร์ (Stepping motor)

ทำหน้าที่ควบคุมการหมุนของเกรตติงภายในโมโนโครเมเตอร์โดยสั่งงานควบคุมสเตปป์มอเตอร์แบบฟูลสเตปนั้นเป็นการสั่งงานโดยจ่ายกระแสไฟฟ้าพร้อมกันที่เดียวสองเฟส (Two excitation) คือคู่เฟสระหว่าง 1-2, 2-3, 3-4 และ 4-1 หมุนเวียนกันไป

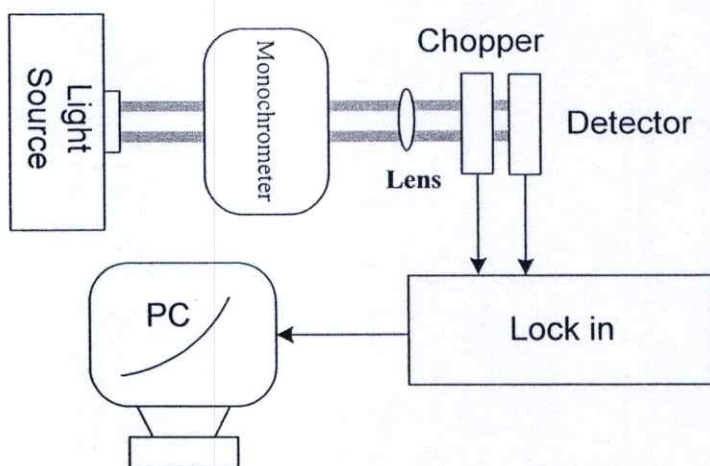
-ไมโครคอมพิวเตอร์ (Microcomputer)

ทำหน้าที่ควบคุมสเตปป์มอเตอร์ โดยควบคุมการหมุนเกรตติงภายในโมโนโครเมเตอร์ ทำให้ได้แสงความยาวคลื่นต่างๆ และรับข้อมูลจากเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอินผ่านทาง Rs-232 เพื่อทำการเก็บข้อมูล

2.8.3 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าด้วยการวัดการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงของสิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์

เป็นระบบวัดการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงนั้น โดยทั่วไปประกอบไปด้วยอุปกรณ์ดังนี้

1. Light Source
2. Lens
3. Chopper
4. Monochromator
5. Lock- in-Amplifier
6. Detector
7. Computer



รูปที่ 2.35 แสดงไดอะแกรมของระบบการวัดการตอบสนองทางแสง

1. แหล่งกำเนิดแสง (Light Source)

ใช้หลอดทำจากทังสเตน (Tungsten) ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดแสงกำลัง 100 วัตต์ ให้แสงที่มีช่วงความยาวคลื่น 200 - 2,200 นาโนเมตร เพื่อให้เป็นแสงที่ตกกระทบสารตัวอย่างในรูปของสัญญาณ d.c.

2. เลนส์ (Lens)

ทำหน้าที่ให้ความเข้มแสงที่จุดยาวโฟกัสของเลนส์โดยความยาวโฟกัสพิจารณาจากระยะทางความเหมาะสมของระบบวัด

3. Chopper

ทำหน้าที่เป็นความถี่อ้างอิงของเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอิน

4. โมโนโครเมเตอร์ (Monochromator)

ทำหน้าที่แยกแสงที่มีความยาวคลื่นต่างๆ โดยไดอะแกรมของโมโนโครเมเตอร์ หลักการคือเมื่อแสงเข้ามาทางสลิต (Slit) จะสะท้อนผ่านกระจก (Folding mirrors) ไปตกกระทบที่คอลลิเมตติง (Collimating mirror) และสะท้อนไปยังเกรตติง (Grating) เกรตติงจะให้แสงที่มีความยาวคลื่นต่างๆ ตามการตกกระทบบนเกรตติงและแสงจากเกรตติงจะสะท้อนกลับไปยังคอลลิเมตติงสะท้อนกระจกออกไปยังสลิตต่อไป

5. เครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอิน (Lock in amplifier)

ทำหน้าที่ขยายสัญญาณที่ออกมาจากตัวตรวจจับสัญญาณ ซึ่งเป็นสัญญาณ A/D เครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอินมี 4 ช่องสัญญาณ

6. ตัวตรวจจับแสง (Detector)

ทำหน้าที่เปลี่ยนความเข้มแสงให้อยู่ในรูปของกระแสและแรงดันไฟฟ้า

7. คอมพิวเตอร์ (Microcomputer)

ทำหน้าที่ควบคุมสเปคโตรมิเตอร์ โดยควบคุมการหมุนเกรตติงภายใน โมโนโครเมเตอร์ทำให้ได้แสงความยาวคลื่นต่างๆ และรับข้อมูลจากเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอินผ่านทาง RS-232 เพื่อทำการเก็บข้อมูล

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

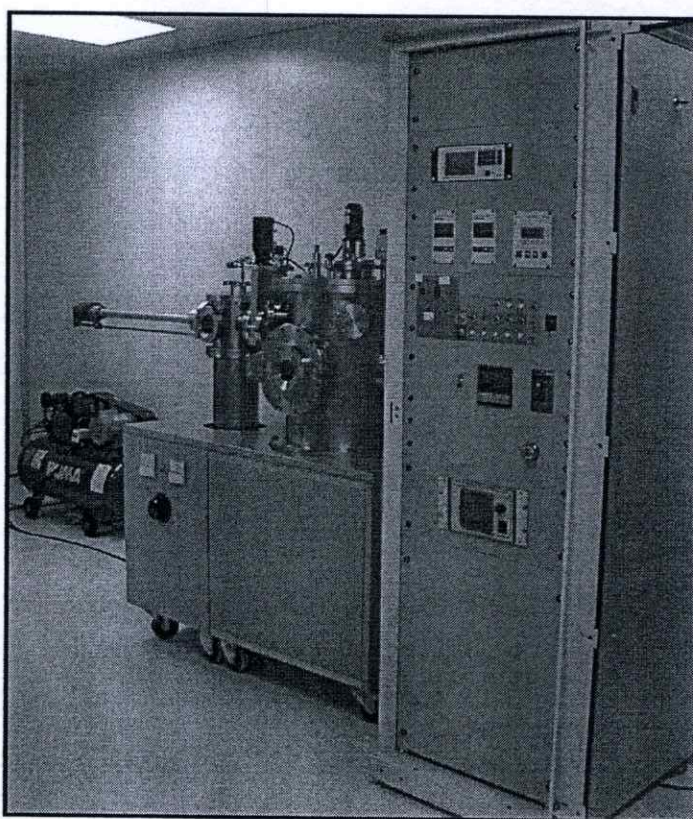
ในการศึกษาและการวิจัยการปลูกฟิล์มบางและการสร้างสิ่งประดิษฐ์โฟโตคัลเทคเตอร์ไฮบริดจากสารกึ่งตัวนำอินทรีย์เพนทาซีนกับสารกึ่งตัวนำอินทรีย์แคดเมียมซัลไฟด์ที่ถูกเตรียมด้วยระบบระเหยสารกึ่งตัวนำอินทรีย์และสารอนินทรีย์ด้วยความร้อน

โดยมีขั้นตอนในการดำเนินวิจัยดังนี้

- 3.1. ทำการศึกษาการใช้งานและการควบคุมอุปกรณ์ต่างๆในระบบระเหยสารอินทรีย์ (Organic Source Evaporation System) และสารอนินทรีย์ (Thermal Evaporations System)
- 3.2. เตรียมสารเคมีและทำความสะอาดแผ่นฐานรองรับ
- 3.3. ทำการปลูกฟิล์มบางเพนทาซีนและฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์โดยระบบระเหยสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ซึ่งมีเงื่อนไขความหนาของฟิล์มบางที่ต่างกัน
- 3.4. ทำการตรวจสอบสมบัติของฟิล์มบางด้วย
 - เครื่องมือวิเคราะห์โครงสร้างความเป็นผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction, XRD)
 - เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV-VIS Spectroscopy)
- 3.5. ทำการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางเพนทาซีนและแคดเมียมซัลไฟด์ โดยการสร้างเป็นสิ่งประดิษฐ์โฟโตคัลเทคเตอร์ไฮบริดที่มีการปลูกแบบโครงสร้างชั้นเดียวและแบบหลายชั้น
- 3.6. วิเคราะห์สมบัติของสารอนินทรีย์แคดเมียมซัลไฟด์และสารอินทรีย์เพนทาซีนและสรุปผลเพื่อเปรียบเทียบเงื่อนไขและคุณสมบัติของสิ่งประดิษฐ์โฟโตคัลเทคเตอร์ไฮบริดด้วย
 - เครื่องมือวัดกระแส-แรงดัน
 - เครื่องมือวัดการตอบสนองทางแสง

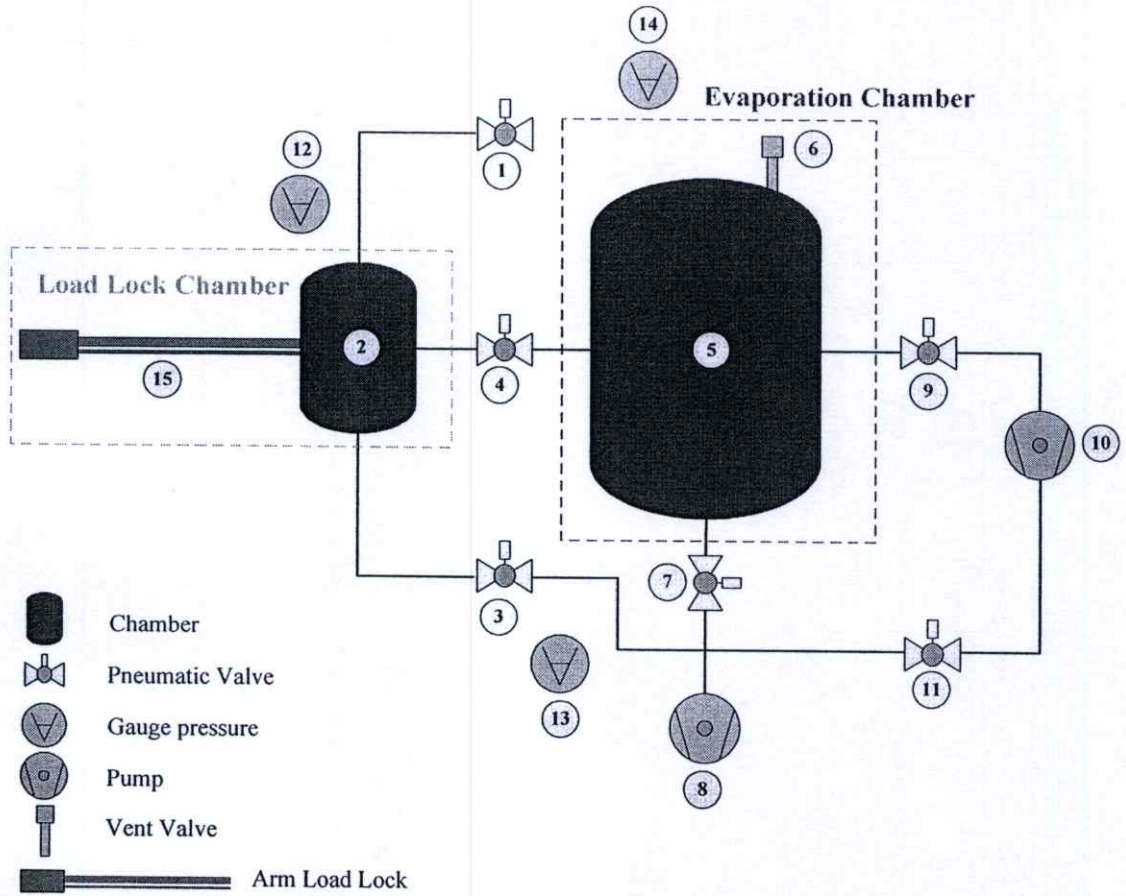
3.1 ระบบระเหยสารอินทรีย์ (Low Temperature Evaporation System ; LTE)

ระบบระเหยสารอินทรีย์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ทำการออกแบบระบบโดยห้องปฏิบัติการวิจัยควอนตัมและสารกึ่งตัวนำทางแสง (QOSLab) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ระบบถูกออกแบบมาเพื่อให้สามารถระเหยสารอินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากสารอินทรีย์มีอุณหภูมิในการระเหยต่ำเมื่อเทียบกับสารอนินทรีย์โดยทั่วไป ดังนั้นระบบจึงออกแบบให้สามารถควบคุมการให้อุณหภูมิกับสารอินทรีย์ได้อย่างละเอียดและแม่นยำ เพื่อให้สามารถควบคุมอัตราการระเหยของสารอินทรีย์ได้อย่างถูกต้องแม่นยำและมีความสม่ำเสมอ



รูปที่ 3.1 ระบบระเหยสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์

ซึ่งระบบระเหยสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์มีส่วนประกอบที่สำคัญดังรูปที่ 3.2

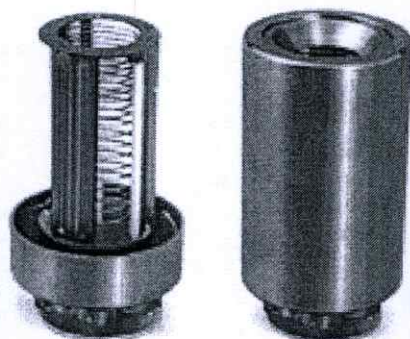


- | | |
|--|--------------------------------|
| 1. load lock vent valve (VENT VALVE) | 9. high vacuum valve (HV) |
| 2. load lock chamber | 10. turbo molecular pump (TMP) |
| 3. roughing load lock valve (LL SYATEM) | 11. backing valve (BV) |
| 4. load lock valve (LLV) | 12. pirani gauge |
| 5. evaporation chamber | 13. pirani gauge |
| 6. evaporation chamber vent valve | 14. full range gauge |
| 7. roughing evaporation chamber valve (RV) | 15. arm load lock |
| 8. rotary pump (RP) | |

รูปที่ 3.2 แผนภาพระบบสุญญากาศของระบบระเหยสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์

ภายในห้องสุญญากาศ (Vacuum chamber) ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ต่างๆ ดังนี้

1. ระบบระเหยสารอินทรีย์ (Low Temperature Evaporator System ; LTE) เป็นระบบที่ใช้สำหรับระเหยสารอินทรีย์โดยระบบประกอบด้วย 2 ส่วน คือ หัวระเหยสารอินทรีย์ และ ชุดควบคุมการระเหยสารอินทรีย์ของบริษัท Kurt J. Lesker ดังแสดงในรูปที่ 3.3 และ 3.4 ซึ่งสามารถให้ความร้อนแก่สารอินทรีย์ได้อย่างทั่วถึงสม่ำเสมอ มีเทอร์โมคัปเปิล type K ในการตรวจวัดค่าอุณหภูมิที่สารอินทรีย์ได้รับเพื่อนำมาใช้ควบคุมอุณหภูมิที่ให้แก่สารอินทรีย์ ซึ่งระบบที่ใช้สามารถควบคุมอุณหภูมิที่ให้ได้อย่างแม่นยำ ± 0.1 องศาเซลเซียส

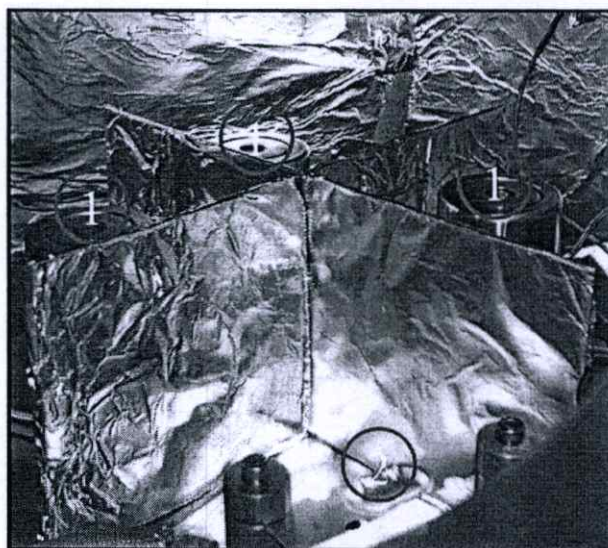


รูปที่ 3.3 หัวระเหยสารอินทรีย์



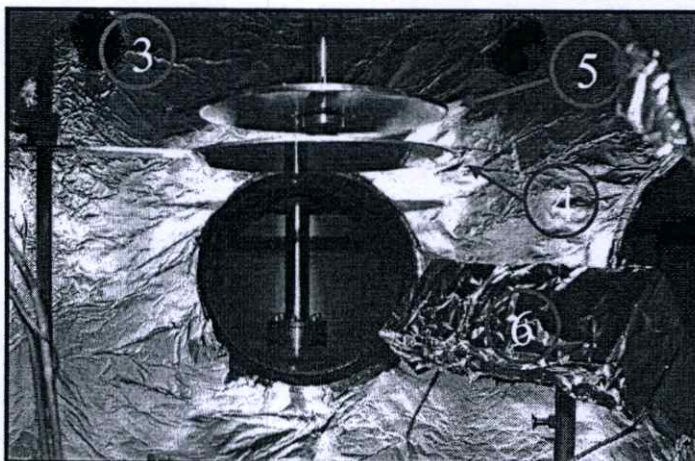
รูปที่ 3.4 ชุดควบคุมการระเหยสารของระบบระเหยสารอินทรีย์

โดยภายในห้องสุญญากาศทำการติดตั้งระบบระเหยสารอินทรีย์อยู่ทั้งหมด 3 ชุดดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 อุปกรณ์ภายในห้องสุญญากาศสูง 1

2. ระบบระเหยสารด้วยความร้อนเป็นระบบที่ออกแบบมาเพื่อทำการระเหยสารอินทรีย์



รูปที่ 3.6 อุปกรณ์ภายในห้องสุญญากาศสูง 2

3. ระบบตรวจวัดความหนาของฟิล์มบาง ความหนาของฟิล์มบางถูกตรวจสอบความหนาโดยใช้ผลึกควอทซ์ของ INFICON ดังแสดงในรูปที่ 3.7 และ 3.8



รูปที่ 3.7 ผลึกควอทซ์

ความหนาของสารที่กำลังระเหยจะวัดจากค่าความถี่การสั่นของคริสตอลที่มีค่าลดลงเมื่อมีสารมาเคลือบเกาะที่ผิวของคริสตอลมากขึ้น โดยความถี่ที่ได้จะคำนวณอัตราการระเหยสารและความหนาโดย XTM/2 Thin Film Deposition Monitor ของ INFICON แสดงดังรูปที่ 3.8

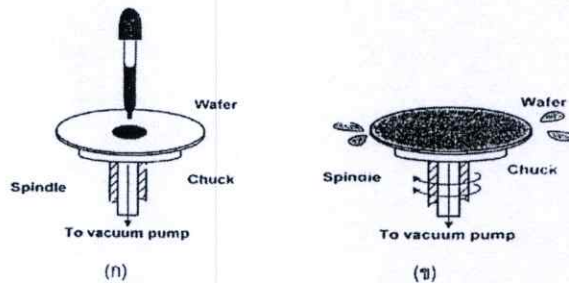


รูปที่ 3.8 เครื่องแสดงผลความหนาฟิล์มบาง

4. เซ็นเซอร์มีหน้าที่ในการเปิด-ปิด ไร่ระเหยของสารที่จะขึ้นไปเกาะฐานรองรับ
5. ตัวยึดจับฐานรองรับมีหน้าที่ใช้ยึดจับฐานรองรับที่ใช้และสามารถทำการหมุนได้ ขณะที่ทำการระเหยสาร
6. ชุดให้ความร้อนแก่ฐานรองรับเป็นระบบที่ให้ความร้อนแก่ฐานรองรับโดยหลอดไฟควอทซ์ และมีเทอร์โมคัปเปิลที่สามารถวัดอุณหภูมิของฐานรองรับได้

3.2 สปินเนอร์ (Spinner Coating)

เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากในการเคลือบสารที่มีสถานะเป็นของเหลว โดยอุปกรณ์มีลักษณะที่เป็นแท่นหมุนสามารถปรับความเร็วได้ด้วยมอเตอร์ความเร็วสูง และบนแท่นหมุนจะมีการยึดฐานรองรับด้วยระบบสุญญากาศ ในขณะที่หมุนฐานรองรับด้วยความเร็วสูง โดยที่แรงเหวี่ยงจากศูนย์กลางที่เกิดขึ้นจากการหมุนจะทำให้สารละลาย ซึ่งมีสถานะเป็นของเหลวกระจายออกจนทั่วผิวหน้า ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 การเตรียมสารตัวอย่างบนฐานรองรับด้วยวิธีสปินเนอร์

(ก) การหยดสารที่ต้องการเตรียมบนฐานรองรับ

(ข) การหมุนแผ่นกระจกบนแท่นหมุนเพื่อเตรียมฟิล์มบาง

โดยความหนาของชั้นฟิล์มจะขึ้นอยู่กับความเร็วรอบในการหมุน ถ้าหากใช้ความเร็วรอบต่ำ จะได้ฟิล์มของสารที่หนาถ้าเพิ่มความเร็วรอบก็จะได้ชั้นฟิล์มของสารที่บางลง ชั้นฟิล์มของสารที่ดีจะต้องมีความหนาสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น ในขั้นตอนนี้จะต้องระมัดระวังฝุ่นละอองมากเป็นพิเศษ โดยลักษณะเครื่องมือที่ใช้ในการปลูกฟิล์มบางด้วยวิธีสปินเนอร์ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 รูปแสดงเครื่องสปินเนอร์

ภายหลังจากการสปินเนอร์นำฟิล์มที่ได้มาทำการให้ความร้อนด้วยอุณหภูมิที่ต้องการ โดยเครื่องอบความร้อนในสุญญากาศแสดงดังรูป 3.11



รูปที่ 3.11 รูปแสดงเครื่องให้ความร้อนด้วยสุญญากาศ

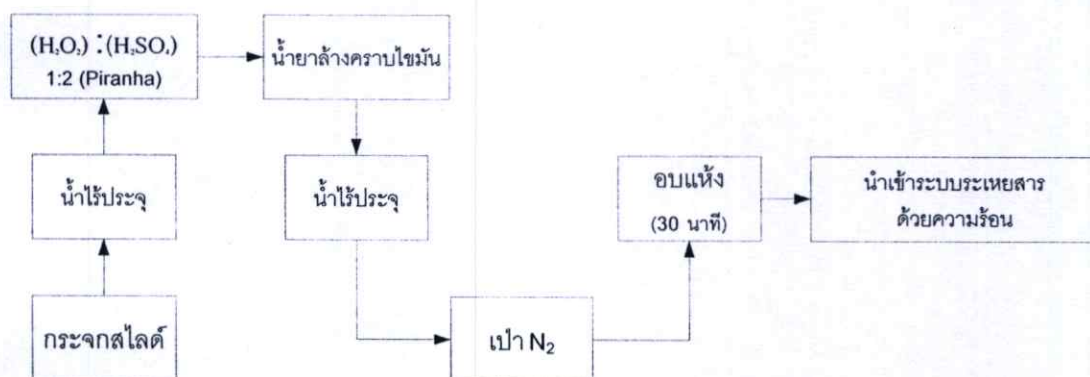
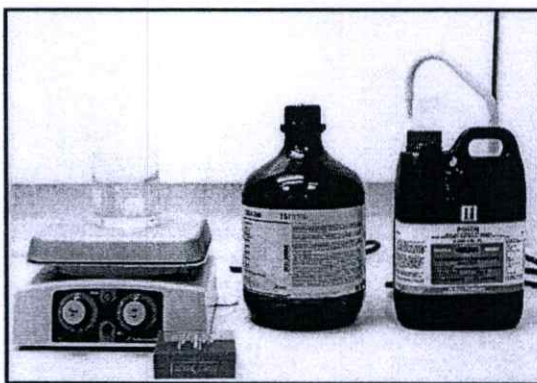
3.3 การทำความสะอาดแผ่นฐานรองรับ

ฐานรองรับที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นกระจกสไลด์ของบริษัท W.Germay รุ่น SUPEORIOR ขนาด 76×26 มิลลิเมตร

3.3.1 การทำความสะอาดพื้นผิวหน้าแผ่นกระจก (glass)

การทำความสะอาดแผ่นฐานรองรับกระจกสไลด์จะใช้ขบวนการที่เรียกว่า Piranha process ซึ่งมีอุปกรณ์และสารเคมีในการทำความสะอาดดังรูปที่ 3.12 โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. นำกระจกไปล้างด้วยน้ำยาล้างคราบไขมัน
2. นำกระจกไปล้างด้วยน้ำไร้ประจุ (de-ionized water)
3. นำกระจกไปต้มในสารละลายระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) กับกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ด้วยอัตราส่วนของ (H_2O_2) ต่อ (H_2SO_4) คือ 1:2 เป็นเวลา 15 นาที
4. นำกระจกไปล้างซ้ำด้วยน้ำยาล้างคราบไขมัน
5. ล้างด้วยน้ำไร้ประจุ และเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน
6. นำไปอบให้แห้งในเตาอบเป็นเวลา 30 นาที

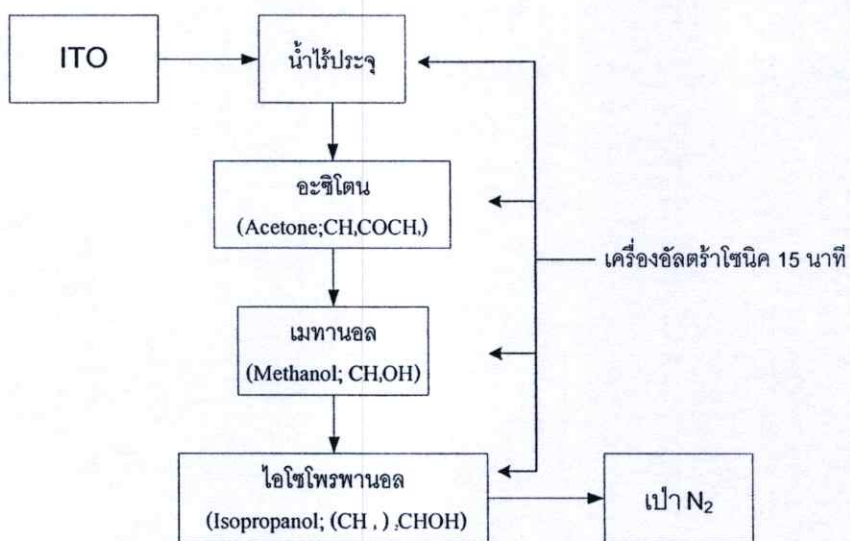


รูปที่ 3.12 แสดงอุปกรณ์สารเคมีที่ใช้ในการทำความสะอาดพื้นผิวหน้าแผ่นกระจก และ
Piranha Process Chart

3.3.2 การทำความสะอาดแผ่นฐานรองรับอินเดียมทินออกไซด์

ก่อนที่จะทำการระเหยสารลงบนฐานรองรับอินเดียมทินออกไซด์จะมีขั้นตอนการทำ
ความสะอาดเพื่อล้างสิ่งสกปรก ผุ่น และคราบไขมันที่ปนเปื้อนบนพื้นผิว อุปกรณ์ที่ใช้แสดงดังรูป
ที่ 3.13 โดยขั้นตอนการทำความสะอาดมีดังนี้

1. ล้างฐานรองด้วยน้ำไร้ประจุในเครื่องอัลตราโซนิค (ultrasonic cleaner)
เป็นเวลา 15 นาที
2. ล้างฐานรองด้วยอะซิโตน (Acetone; CH_3COCH_3) ในเครื่องอัลตราโซนิค
เป็นเวลา 15 นาที
3. ล้างฐานรองด้วยเมทานอล (Methanol; CH_3OH) ในเครื่องอัลตราโซนิค
เป็นเวลา 15 นาที
4. ล้างฐานรองด้วยไอโซโพรพานอล (Isopropanol; $(\text{CH}_3)_2\text{CHOH}$)
ในเครื่องอัลตราโซนิคเป็นเวลา 15 นาที
5. เป่าให้แห้งโดยใช้ก๊าซไนโตรเจน (N_2)



รูปที่ 3.13 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้กับขบวนการในการทำความสะอาดฐานรองรับ ITO

3.4 เงื่อนไขการปลูกฟิล์มบางเพนทาซีนและแคดเมียมซัลไฟด์

เงื่อนไขที่ใช้ในการระเหยระบบระเหยสารอินทรีย์และอนินทรีย์ด้วยความร้อนของสารเพนทาซีนและแคดเมียมซัลไฟด์ แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงเงื่อนไขในการปลูกฟิล์มบางเพนทาซีนและฟิล์มบางสารแคดเมียมซัลไฟด์โดยระบบระเหยสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ด้วยความร้อน

Material	Base Pressure (mbar)	Evaporation Rate A°/s	Thickness (nm)
Pentacene	5×10^{-6}	0.1	50
			100
			150
			200
CdS	5×10^{-6}	1.0	50
			100
			150

ตารางที่ 3.2 แสดงเงื่อนไขในการสร้างสิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์จากสารอินทรีย์เพนทาซีน และแคดเมียมซัลไฟด์

Structure	Base Pressure (mbar)	Evaporation Rate ($\text{\AA}/\text{s}$)		Thickness (nm)	
		Pen	CdS	Pen	CdS
1.ITO/PEDOT/Pentacene,CdS/Al	1.5×10^{-6}	0.1	1.0	100	100
2.ITO/PEDOT/CdS/ Pentacene/Al	1.5×10^{-6}	0.1	1.0	50,100,150	100
3.ITO/PEDOT/Pentacene/CdS/Al	1.5×10^{-6}	0.1	1.0	50	50,100,150

3.6 ขั้นตอนการตรวจสอบสมบัติของฟิล์มบาง

3.6.1 ระบบวัดการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์

การตรวจสอบ โครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์อาศัยหลักการของการเลี้ยวเบนที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์ กราฟที่ได้จากการตรวจสอบจะเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอ็กซ์และมุมเลี้ยวเบนที่ได้เรียกว่า รูปแบบการเลี้ยวเบน ซึ่งจะมีลักษณะเฉพาะตัวสำหรับธาตุหรือสารประกอบต่างชนิดกัน ในการตรวจสอบสมบัติทางโครงสร้างโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จะใช้เครื่อง X-ray diffractometer รุ่น D8 advance ของบริษัท Bruker แสดงดังรูปที่ 3.15 ซึ่งค่าความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดรังสีเอ็กซ์เท่ากับ 1.5046 อังสตรอม



รูปที่ 3.15 แสดงลักษณะของระบบวัดการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ ของบริษัท Bruker รุ่น D8

3.6.2 UV-VIS Spectrophotometer

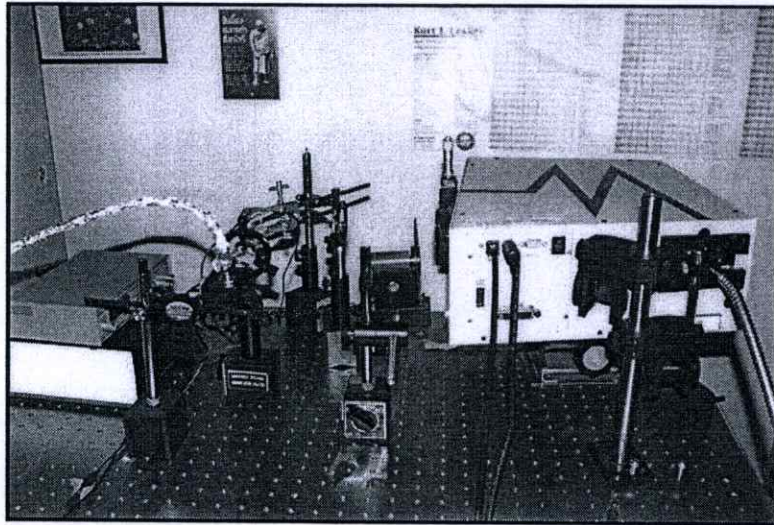
UV-Visible Spectroscopy เป็นเทคนิคการวิเคราะห์สมบัติทางแสงของสารโดยใช้หลักการดูดกลืนแสงที่อยู่ในช่วงอัลตราไวโอเล็ตและช่วงที่ตามองเห็นก็คือช่วงความยาวคลื่น 427-820 นาโนเมตร ของสารเคมีต่างๆ ได้แก่ สารอินทรีย์ (organic compound) สารประกอบเชิงซ้อน (complex compound) หรือสารอนินทรีย์ (inorganic compound) เครื่องวัดแสงจะทำการวัดปริมาณแสงที่ออกมา โดยการหักล้างกับปริมาณของแสงก่อนดูดกลืน จากนั้นจะทำการประมวลผลเป็นเส้นสเปกตรัม ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) และค่าความยาวคลื่นสำหรับเครื่อง UV – Visible Spectrophotometer ที่ใช้ในงานวิจัย เป็นของบริษัท PG Instruments Ltd. (T90 ,UV/Vis Spectrometer) ดังแสดงในรูป 3.16



รูปที่ 3.16 แสดงเครื่อง UV –Visible Spectrophotometer บริษัท PG Instruments Ltd.
(T90,UV/Vis Spectrometer)

3.7 การตรวจสอบสมบัติของสิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์

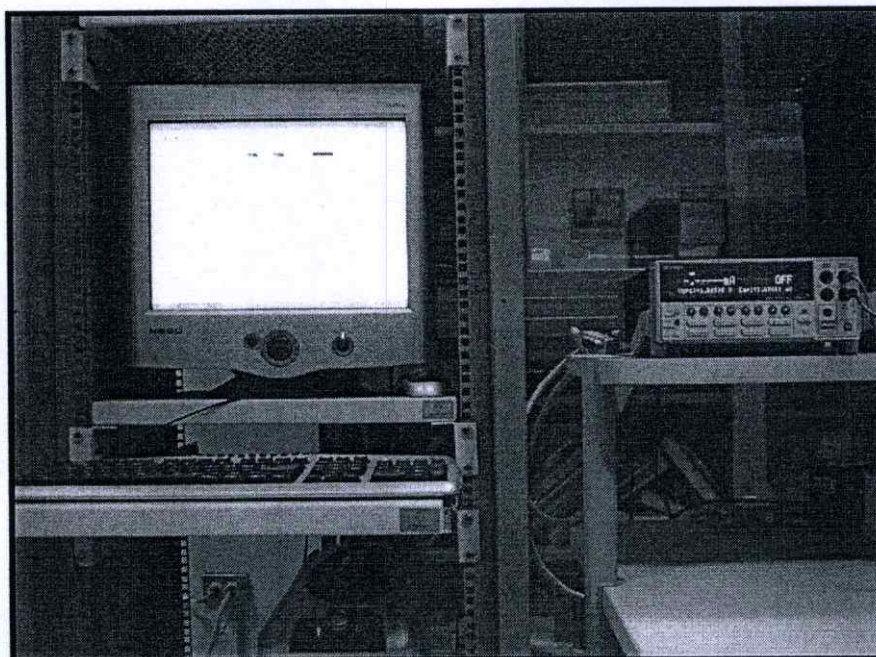
3.7.1 การตรวจสอบสมบัติของการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงของสิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์



รูปที่ 3.17 แสดงระบบการวัดการตอบสนองความยาวคลื่นแสงของสิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์

จากรูปที่ 3.17 เป็นระบบที่ถูกเตรียมขึ้นจากห้องปฏิบัติการวิจัยควอนตัมและสารกึ่งตัวนำทางแสง (Quantum and Optical Semiconductor Laboratory, QOS) ในการวัดการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงของสิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์ที่ซึ่งใช้แสงจากทั้งสแตนด์บายเข้าไปในโมโนโครมิเตอร์เพื่อแยกแสงความยาวคลื่นต่างๆ โดยควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์และค่ากระแสและโวลต์ที่ได้จากการตอบสนองความต่อความยาวคลื่นแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆจะถูกขยายสัญญาณด้วยเครื่อง Lock – in Amplifier โดยเครื่องจะส่งข้อมูลที่ได้อไปประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์และจัดเก็บเป็นข้อมูลในคอมพิวเตอร์ต่อไป

3.7.2 การตรวจสอบสมบัติของไฟฟ้าของกระแส – แรงแดันของสิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์



รูปที่ 3.18 แสดงระบบการวัดกระแส-แรงแดันของสิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์

จากรูปที่ 3.18 เป็นระบบการวัดกระแส-แรงแดันของสิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์ที่ถูกเตรียมขึ้นจากห้องปฏิบัติการวิจัยควอนตัมและสารกึ่งตัวนำทางแสง (Quantum and Optical Semiconductor Laboratory, QOS) โดยหลักการการทำงานทำการจ่ายความต่างศักย์ให้กับอุปกรณ์และทำการวัดกระแสที่ได้จากเครื่องมือตรวจสอบของ KEITHLEY (2410 1100V Source Meter) ที่ซึ่งถูกควบคุมและจัดเก็บข้อมูลที่ได้จากการวัดด้วยคอมพิวเตอร์

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางและการสร้างเป็นอุปกรณ์วัดแสงโฟโตดีเทคเตอร์จากฟิล์มบางสารอินทรีย์ของแคดเมียมซัลไฟด์และสารอินทรีย์เพนทาซีน โดยแบ่งการรายงานผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลเป็น 2 ส่วนดังนี้

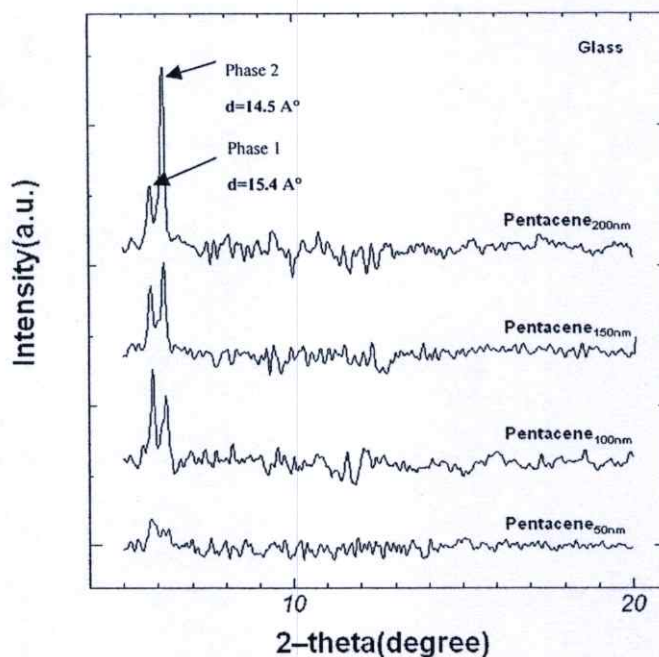
- ทำการวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มบางจากเครื่องมือวิเคราะห์โครงสร้างความเป็นผลึกสมบัติของการดูดกลืนทางแสงของฟิล์มบางสารอินทรีย์เพนทาซีนและสารอินทรีย์แคดเมียมซัลไฟด์ที่มีการให้เงื่อนไขความหนาที่ต่างกัน

- ทำการสร้างอุปกรณ์โฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริดจากฟิล์มบางสารอินทรีย์เพนทาซีนและสารอินทรีย์แคดเมียมซัลไฟด์ที่มีโครงสร้างต่างกัน โดยสังเคราะห์โฟโตดีเทคเตอร์มาวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติทางแสง

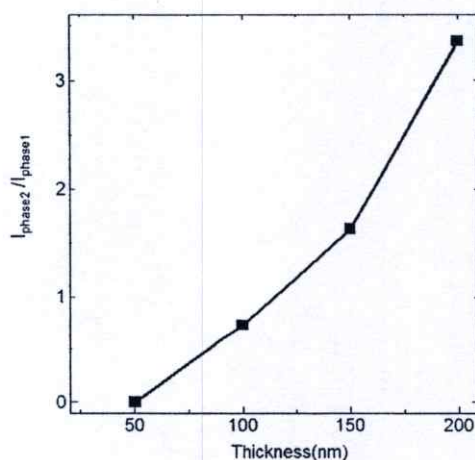
จากการรายงานผลและการวิเคราะห์ผลทั้ง 2 ส่วน มีหัวข้อดังต่อไปนี้

4.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มบางเพนทาซีนที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาบนฐานรองรับกระจก

4.1.1 ผลการตรวจวิเคราะห์โครงสร้างความเป็นผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer, XRD) ของฟิล์มบางเพนทาซีน

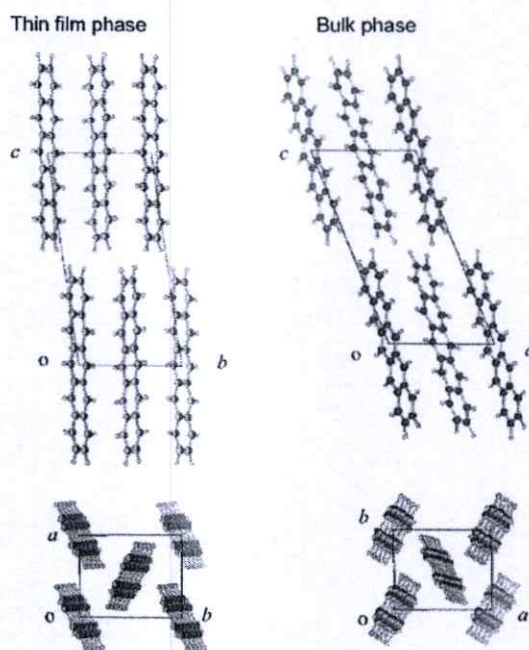


รูปที่ 4.1 แสดงผลการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางเพนทาซีนที่มีความหนา 50,100,150 และ 200 นาโนเมตร



รูปที่ 4.2 รูปแสดงกราฟการเปรียบเทียบระหว่างเฟสหนึ่งและเฟสสองของการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางเพนทาซีนที่มีความหนา 50,100,150 และ 200 นาโนเมตร

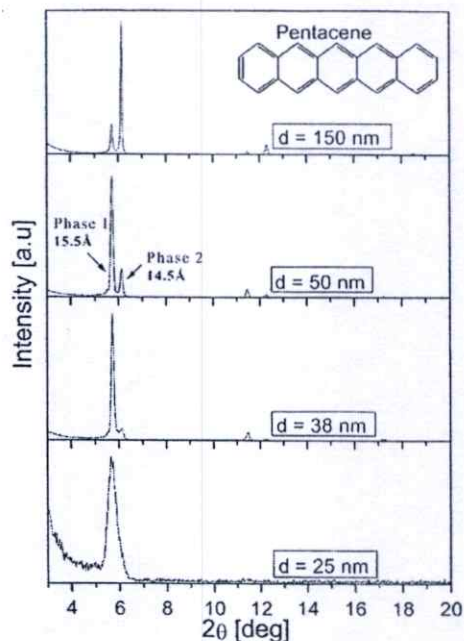
จากรูปที่ 4.1 แสดงผลการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์เพนทาซีนความหนา 50 ,100, 150 และ 200 นาโนเมตรบนฐานรองรับที่เป็นกระจกโดยไม่มีกรให้ความร้อนกับฐานรองรับ พบว่าทุกเงื่อนไขมียอดของการเลี้ยวเบนเกิดขึ้นสองตำแหน่งอยู่ที่มุม $2\theta = 5.72^\circ$ กับ 6.12° ที่ซึ่งมีระยะห่างระหว่างระนาบอยู่ที่ 15.5 \AA (phase 1) และ 14.5 \AA (phase 2) โดยมีระนาบของผลึกอยู่ที่ [110] และระยะห่างระหว่างระนาบทั้งสองมีชื่อเรียกที่ต่างกัน เฟสที่หนึ่ง จะเรียกว่า single crystal thin film phase และเฟสที่สองเรียกว่า triclinic bulk phase [1,5,6] ได้มีงานวิจัยของ Hiroyoki และคณะ[1] โดยทำการหาค่าของระยะห่างระหว่างระนาบและมุมของระนาบผลึกของ single crystal thin film phase มีค่าอยู่ที่ $a = 0.0593 \text{ nm}$, $b=0.756 \text{ nm}$ และ $c=1.565 \text{ nm}$ และมุมอยู่ที่ $\alpha=96.6^\circ$, $\beta=93.7^\circ$ และ $\gamma=89.8^\circ$ และจากงานวิจัยของของ Bert Nickel และคณะ [7] มีค่าเป็น $a=0.598 \text{ nm}$, $b=0.759 \text{ nm}$ และ $c=1.561 \text{ nm}$ และมีมุมอยู่ที่ $\alpha=81.2^\circ$, $\beta=86.56^\circ$ และ $\gamma=89.80^\circ$ จากงานวิจัยทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีการจัดเรียงของโมเลกุลตามรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 รูปแสดงการเปรียบเทียบการจัดเรียงโมเลกุลของสารอินทรีย์เพนทาซีนระหว่าง thin film phase กับ bulk phase ที่ได้จากรายงานของ Hiroyoki และคณะ

เมื่อเพิ่มความหนาของฟิล์มบางเพนทาซีนส่งผลทำให้พิคของความเข้มผลึกทางด้าน thin film phase ลดลงและในทางกลับกันเป็นการเพิ่มพิคของความเข้มผลึกทางด้าน triclinic bulk phase เพิ่มขึ้นซึ่งแสดงจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสองเฟสดังรูปที่ 4.2

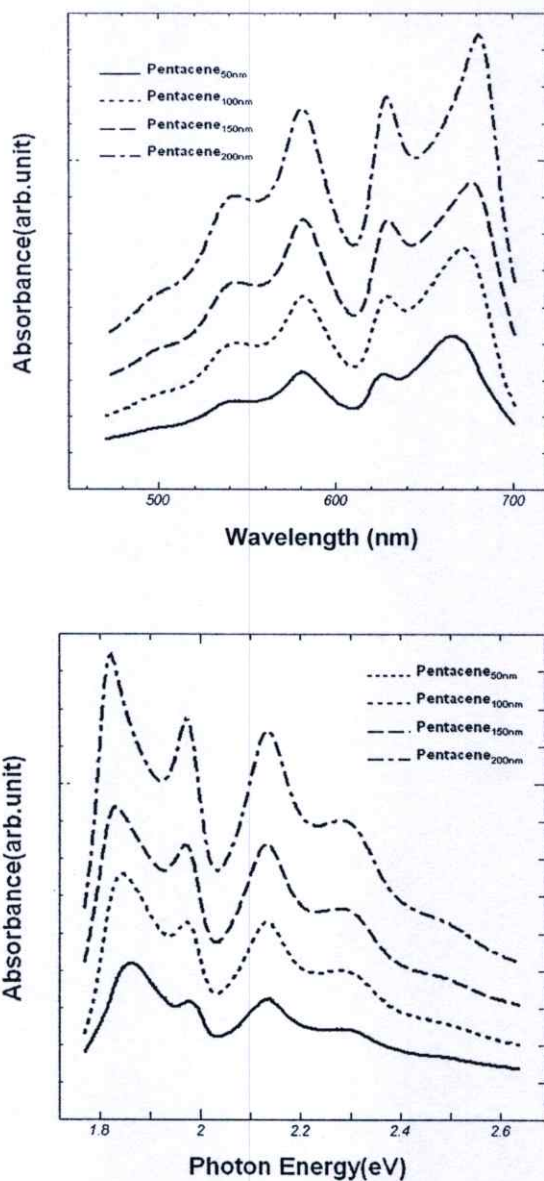
ได้มีรายงานอธิบายการเพิ่มขึ้นของเฟส triclinic bulk phase เป็นรายงานของ D.M. Nanditha และคณะ ได้ทำการปลูกฟิล์มบางที่ความหนาต่างๆกันผลที่ได้เป็นดังรูป



รูปที่ 4.4 แสดงผลการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางเพนทาซีนที่มีการเพิ่มความหนาต่างๆในขณะที่มีการให้อุณหภูมิที่ 87 องศาเซลเซียส จากรายงานของ D.M. Nanditha และคณะ

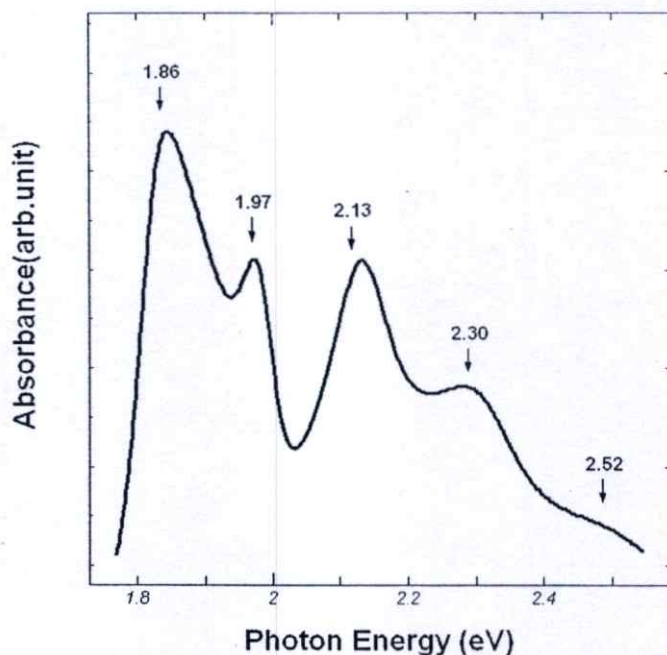
ผลการศึกษาการเกิดพีคของ triclinic bulk phase ของฟิล์มบางเพนทาซีนเนื่องจากความหนาของเพนทาซีนที่เพิ่มขึ้น โดย จากรายงานได้อธิบายถึงการจัดเรียงตัวโมเลกุลเกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากความหนาและอุณหภูมิที่ทำให้เกิดเฟสของการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบ triclinic bulk phase เพิ่มขึ้น จากโครงสร้างผลึกที่เป็นของ single crystal thin film phase ที่ซึ่งสอดคล้องกับรายงานที่ได้ข้างต้น

4.1.3 ผลจากการวัดค่าการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางเพนทาซีน



รูปที่ 4.5 แสดงสเปกตรัมของการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางเพนทาซีนที่มีความหนา 50 นาโนเมตร, 100 นาโนเมตร, 150 นาโนเมตร และ 200 นาโนเมตร

จากรูปที่ 4.5 แสดงสเปกตรัมของการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางเพนทาซีนที่มีความหนา 50,100,150 และ 200 นาโนเมตรบนฐานรองรับกระจกโดยไม่มีการให้ความร้อนกับฐานรองรับผลที่ได้พบว่ามีค่าช่วงของการดูดกลืนแสงอยู่ที่ 400 นาโนเมตร ถึง 700 นาโนเมตรและมีค่าพลังงานของโฟตอนอยู่ในช่วง 1.8 eV ถึง 2.6 eV เมื่อทำการเพิ่มความหนาของชั้นของฟิล์มบางเพนทาซีนบนฐานรองรับที่เป็นกระจกพบว่ามีค่าการดูดกลืนแสงเพิ่มมากขึ้นซึ่งเป็นไปตามกฎของ Beer

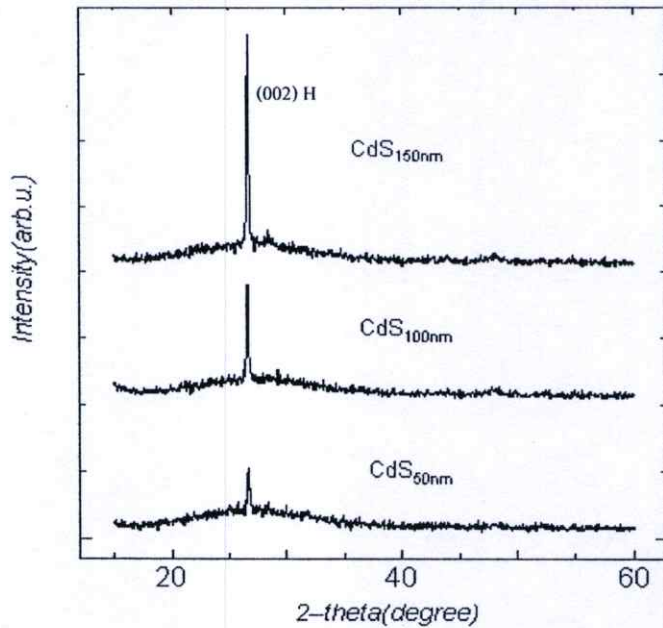


รูปที่ 4.6 แสดงสเปกตรัมของการดูดกลืนแสงเทียบกับค่าของพลังงาน โฟตอนของฟิล์มบาง เพนทาซีน

ผลจากการตรวจสอบสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางสารอินทรีย์เพนทาซีน จากรูปที่ 4.6 พบยอดของการดูดกลืนแสงหลายช่วงคือ 1.86 eV, 1.97 eV, 2.13 eV, 2.30 eV และ 2.52 eV ตามลำดับ จากยอดพีคที่เกิดขึ้นสามารถบอกได้ถึงค่าแถบพลังงานต้องห้าม (the fundamental gap) ของระดับพลังงาน LUMO (lowest unoccupied molecular orbital) และ HOMO (highest occupied molecular orbital) และชั้นพลังงานของ Frenkel exciton [5,8,9] จากกราฟค่าของแถบพลังงานต้องห้ามมีค่าพลังงานโฟตอนที่ 1.97 eV และยอดของการดูดกลืนพลังงานโฟตอนที่สูงขึ้นไปที่ 2.3 eV, 2.5 eV เป็นการดูดกลืนแสงเนื่องจากระดับชั้นพลังงานที่สูงกว่า LUMO-HOMO และการดูดกลืนแสงระดับพลังงานที่ 1.86 eV กับ 2.13 eV เป็นการดูดกลืนแสงเนื่องจากการเกิด Frenkel exciton จากผลที่กล่าวมาได้มาจากการทดลองวัดการตอบสนองทางแสงของอุปกรณ์ที่สร้างเป็นสารอินทรีย์โซลาเซลล์ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของรายงานของ Jiyoul Lee และคณะ [5] ได้อธิบายไว้

4.2. ผลการวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่มีการเปลี่ยนแปลง ความหนาบนฐานรองรับที่เป็นกระจก

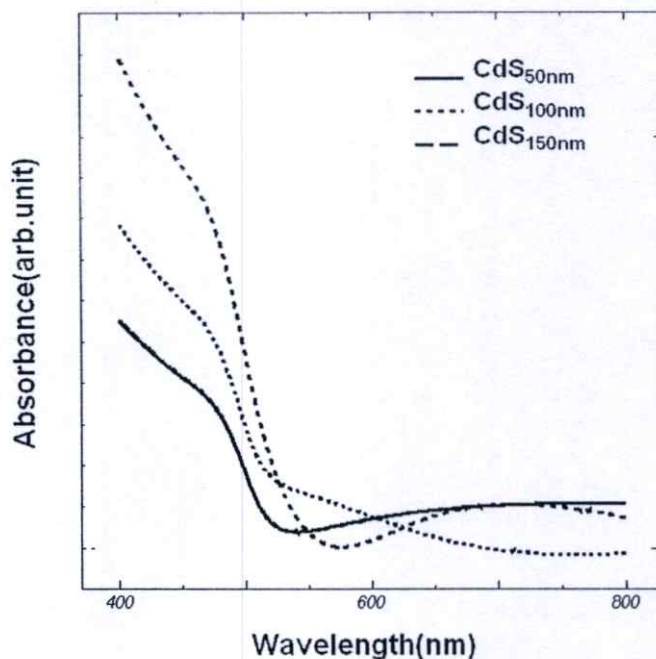
4.2.1 ผลการตรวจวิเคราะห์โครงสร้างความเป็นผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffractometer, XRD) ของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์



รูปที่ 4.7 แสดงผลการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่มีการให้ความหนา 50, 100 และ 150 นาโนเมตรบนฐานรองรับที่เป็นกระจก

จากรูปที่ 4.7 แสดงผลการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่ความหนา 50, 100 และ 150 นาโนเมตร โดยไม่มีการให้ความร้อนกับฐานรองรับ พบว่าทุกความหนาของฟิล์มบางมียอดของการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่มุม $2\theta = 26.44^\circ$ มีระนาบที่ (002) ซึ่งเป็นระนาบของการจัดเรียงตัวทางโครงสร้างของผลึกเป็นแบบเฮกซะโกนอล [10] เมื่อความหนาของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์เพิ่มขึ้นส่งผลต่อการจัดเรียงตัวทางโครงสร้างความเป็นผลึกของฟิล์มบางดีขึ้นซึ่งเป็นสมบัติพื้นฐานของสารอนินทรีย์ทั่วไป

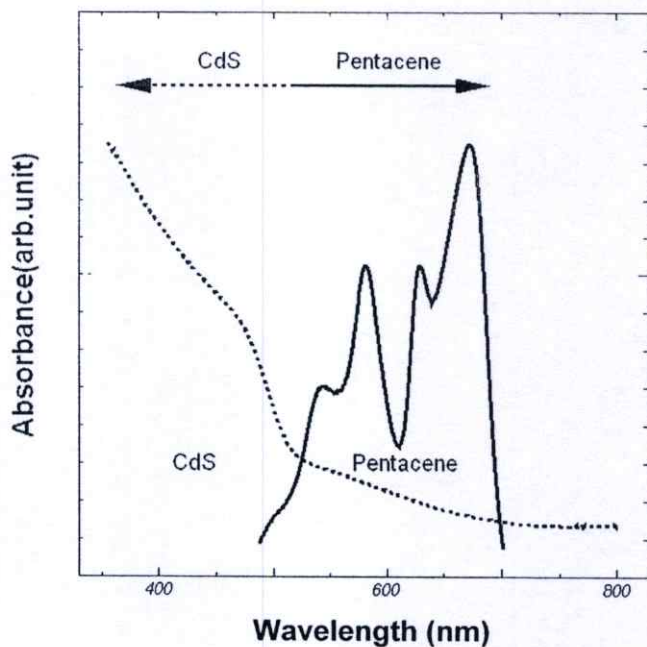
4.2.2 ผลจากการวัดการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์



รูปที่ 4.8 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่ความหนา ต่างๆกัน

จากรูปที่ 4.8 แสดงการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่ความหนา 50,100 และ 150 นาโนเมตรบนฐานรองรับที่เป็นกระจกโดยไม่มีการให้ความร้อนกับฐานรองรับ ผลที่ได้ พบว่ามีขอบของการดูดกลืนทางแสงที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร

การศึกษาสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบางสารอินทรีย์เพนทาซีน และ สารอนินทรีย์แคดเมียมซัลไฟด์ ผลจากการวัดการดูดกลืนทางแสงของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์พบว่าขอบการดูดกลืนแสงมีค่าตั้งแต่ประมาณ 550 นาโนเมตรลงไปถึง 400 นาโนเมตรและจากการวัดการดูดกลืนทางแสงของฟิล์มบางเพนทาซีนมีค่าอยู่ในที่ช่วงความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร ถึง 700 นาโนเมตร



รูปที่ 4.9 แสดงผลของการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางเพนทาซีนและฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์

จากคุณสมบัติการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางเพนทาซีนและแคดเมียมซัลไฟด์พบว่ามีความเป็นไปได้ในการนำไปสร้างเป็นสิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์ที่สามารถจะเพิ่มย่านในการตอบสนองทางแสงในช่วงที่กว้างขึ้น ซึ่งอาศัยสมบัติการดูดกลืนแสงเนื่องจากชั้นของฟิล์มบางของเพนทาซีนและแคดเมียมซัลไฟด์ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.9 และจากข้อดีของสมบัติสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ยังส่งผลทำให้สามารถยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ให้ยาวนานขึ้น ซึ่งได้รายงานในบทที่ 1 โดยเงื่อนไขที่นำมาสร้างเป็นอุปกรณ์จะเลือกเงื่อนไขที่ความหนาของฟิล์มบางเพนทาซีนและแคดเมียมซัลไฟด์ที่ 100 นาโนเมตรเป็นเงื่อนไขแรก ซึ่งเป็นความหนาที่ได้มีการวิจัยจะอยู่ในช่วงความหนาไม่เกิน 100 นาโนเมตร ในขั้นตอนต่อไปจะเป็นขบวนการสร้างสิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริดโครงสร้างแบบหลายชั้นที่ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

4.3 การตรวจสอบสมบัติของสิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์

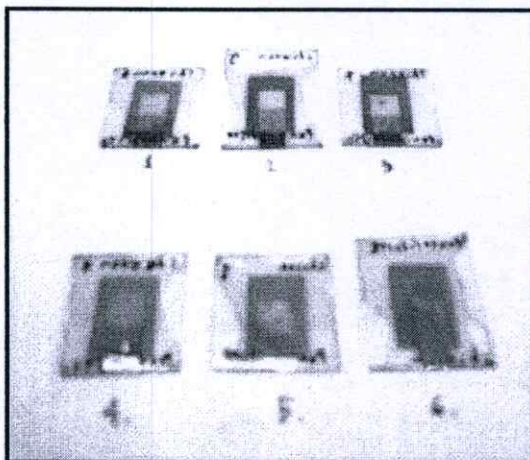
ในการสร้างอุปกรณ์ของสิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์จากโครงสร้างแบบหนึ่งชั้นและหลายชั้น โดยมีโครงสร้างของสิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์ดังต่อไปนี้

4.3.1 ผลการทดลองสร้างโฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้างของ ITO/PEDOT/Pentacene/Al และ ITO/PEDOT/CdS/Al

4.3.2 ผลการทดลองสร้างโฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริดโครงสร้าง ITO/PEDOT/CdS/Pentacene/Al

4.3.3 ผลการทดลองสร้างโฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริดโครงสร้าง ITO/PEDOT/Pentacene/CdS/Al

โดยมีลักษณะอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นดังรูปที่ 4.10

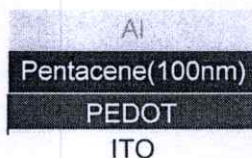


รูปที่ 4.10 แสดงลักษณะสิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้างแบบหลายชั้นระหว่างฟิล์มบางเพนทาซีนและฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์

4.3.1 ผลการทดลองสร้างโฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้าง

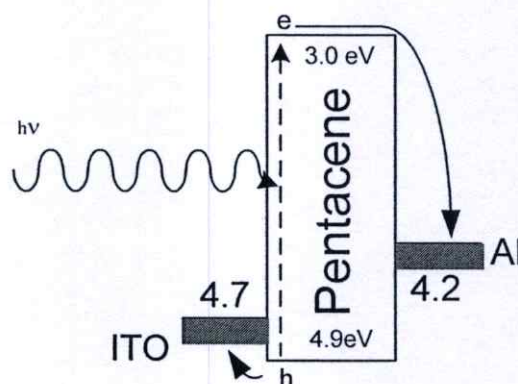
ITO/PEDOT/Pentacene(100nm)/Al

ในขั้นตอนแรกทำการศึกษาโครงสร้างแบบชั้นเดียวของสารเพนทาซีนที่ความหนา 100 นาโนเมตร โดยมีโครงสร้างของสิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์แสดงดังรูป 4.11



รูปที่ 4.11 แสดงโครงสร้างโฟโตดีเทคเตอร์ ITO/PEDOT/Pentacene(100nm)/Al

จากการสร้างโฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้างแบบหนึ่งชั้น ITO/PEDOT/Pentacene (100nm)/Al สามารถนำมาเขียนเป็นไดอะแกรมระดับพลังงานได้ดังรูปที่ 4.12



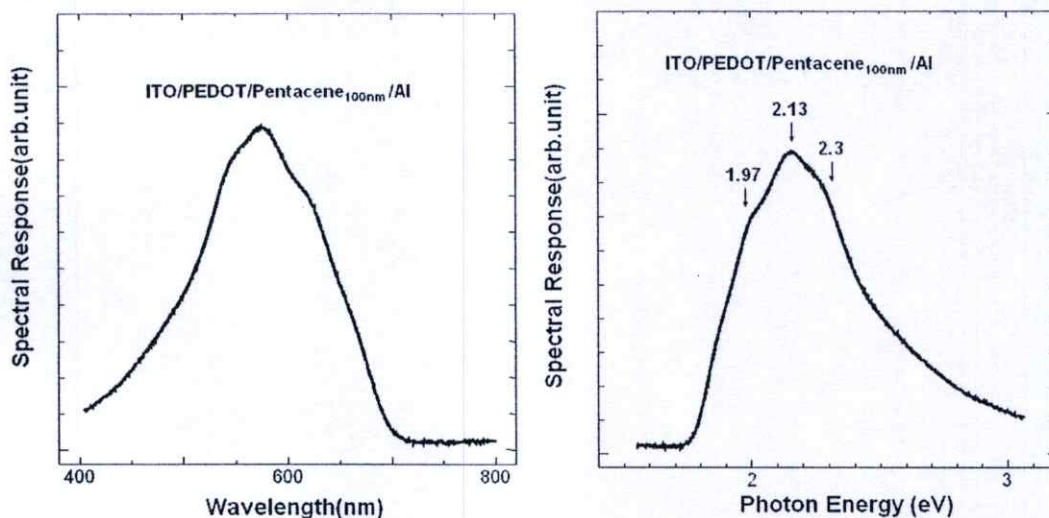
รูปที่ 4.12 ไดอะแกรมระดับพลังงานของโฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้าง

ITO/PEDOT/Pentacene/Al

จากไดอะแกรมระดับพลังงานของอุปกรณ์โฟโตดีเทคเตอร์พบว่าเมื่อมีการฉายแสงทำให้เกิดคู่ของอิเล็กตรอน-โฮลในชั้นของฟิล์มบางเพนทาซีน โดยอิเล็กตรอนจากชั้นฟิล์มเคลื่อนที่ไปทางขั้วอะลูมิเนียม (Anode) และโฮลเคลื่อนที่ไปทางขั้ว ITO (Cathode) [11] ดังรูปที่ 4.12

4.3.1.1 ผลการวัดการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงโฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้าง

ITO/PEDOT/Pentacene(100nm)/Al



รูปที่ 4.13 แสดงผลการวัดการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงโฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้าง

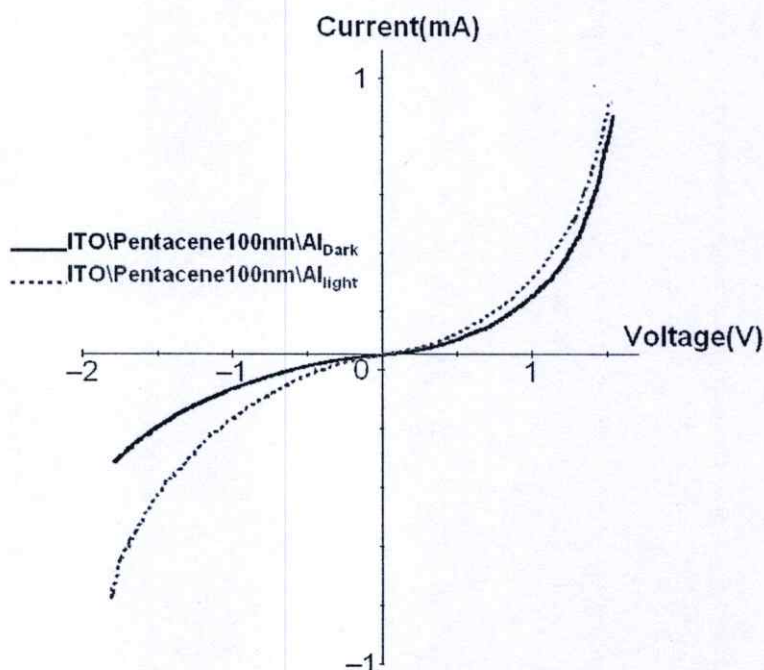
ITO/PEDOT/Pentacene(100nm)/Al

จากรูปที่ 4.13 แสดงค่าการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงของอุปกรณ์โฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้าง ITO/PEDOT/Pentacene(100nm)/Al พบว่ามีการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงช่วง 400 -700 นาโนเมตร (1.8 eV- 2.7 eV) และมียอดของการตอบสนองทางแสงที่ค่าพลังงานโฟตอนที่ตำแหน่ง 1.97 eV, 2.13 eV และ 2.30 eV โดยมีค่าการตอบสนองทางแสงสูงสุดที่ 2.13 eV ซึ่งเป็นช่วงของการดูดกลืนแสงในชั้นเพนทาซีนที่แสดงดังรูปที่ 4.6

4.3.1.2 ผลการวัดกระแส- แรงดันโฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้าง

ITO/PEDOT/Pentacene(100nm)/Al

ผลการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสที่ไหลผ่านกับความต่างศักย์ที่จ่ายให้โฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้าง ITO/PEDOT/Pentacene(100nm)/Al โดยมีความหนาของชั้นสารอินทรีย์เพนทาซีน 100 นาโนเมตรในกรณีที่ไม่มีการฉายแสงกับการฉายแสงแสดงดังรูปที่ 4.14



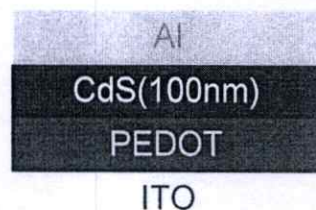
รูปที่ 4.14 แสดงผลการวัดกระแส - แรงดัน โฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้าง

ITO/PEDOT/Pentacene(100nm)/Al

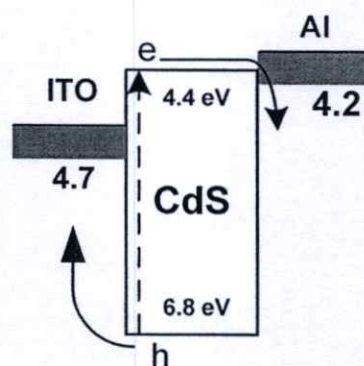
จากรูปที่ 4.14 เมื่อทำการเพิ่มความต่างศักย์ให้อุปกรณ์โฟโตดีเทคเตอร์ค่ากระแสที่ไหลผ่านอุปกรณ์โฟโตดีเทคเตอร์มีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและเมื่อทำการฉายแสงพบว่าการเลื่อนของค่าแรงดันเปิดวงจร (Open circuit Voltage, V_{oc}) ไปยังค่าน้อยกว่าที่ซึ่งเป็นสมบัติพื้นฐานของไดโอดทั่วไป [12] และเมื่อคำนวณค่าของ FF (Fill Factor) พบว่าค่า $FF = 0$

4.3.2 ผลการทดลองสร้างโฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้าง ITO/PEDOT/CdS(100nm)/Al

การศึกษาโครงสร้างแบบชั้นเดียวของแคดเมียมซัลไฟด์ที่ความหนา 100 นาโนเมตร โดยมีโครงสร้างสิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์แคดเมียมซัลไฟด์แสดงดังรูป 4.15



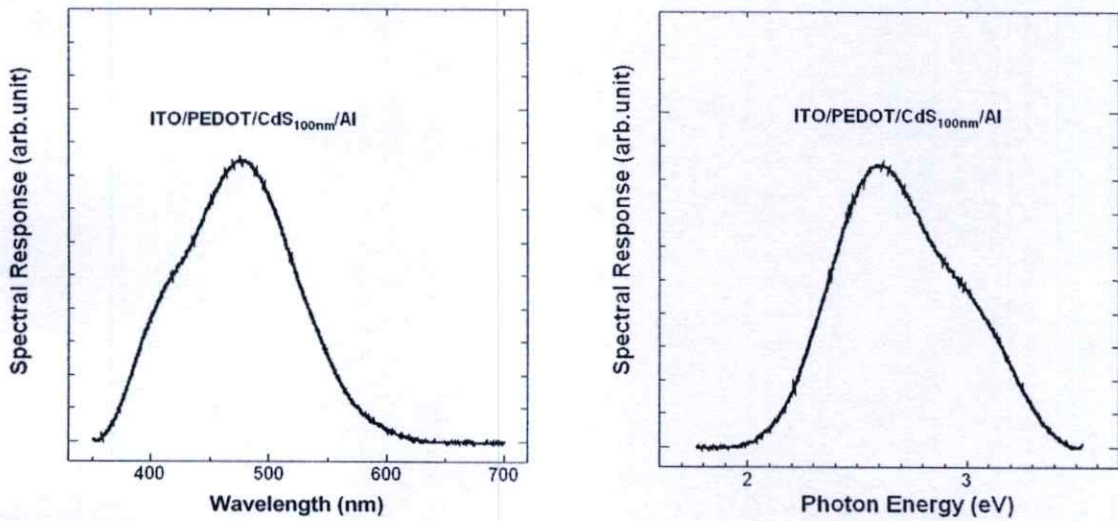
รูปที่ 4.15 แสดงโครงสร้างโฟโตดีเทคเตอร์จาก ITO/PEDOT/CdS(100nm)/Al



รูปที่ 4.16 แสดงไดอะแกรมของระดับพลังงานของโฟโตดีเทคเตอร์
โครงสร้าง ITO/PEDOT/CdS/Al

4.3.2.1 ผลการวัดการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงโฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้าง

ITO/PEDOT/CdS(100nm)/Al



รูปที่ 4.17 แสดงผลการวัดการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงโฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้าง

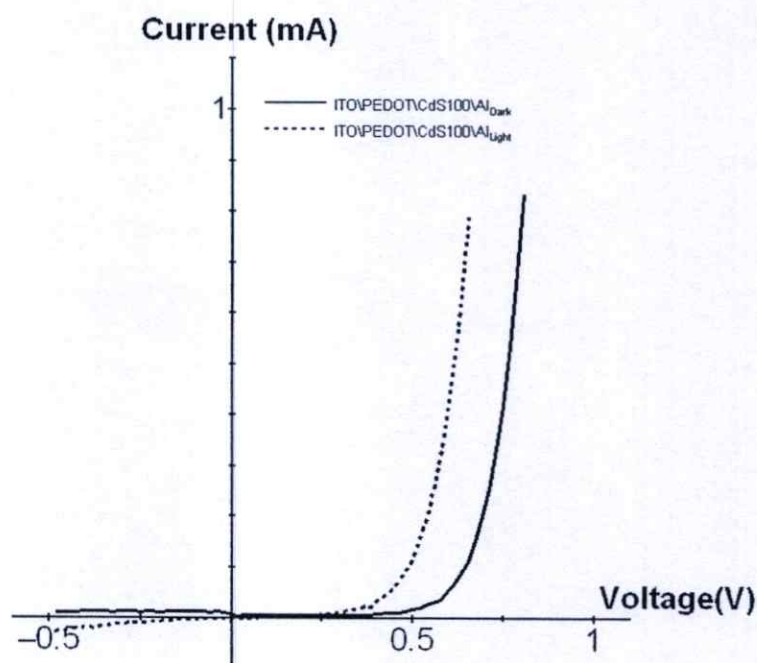
ITO/PEDOT/CdS(100nm)/Al

จากรูป 4.17 แสดงค่าการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงของอุปกรณ์ของโฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้าง ITO/PEDOT/CdS(100nm)/Al พบว่ามีการตอบสนองในช่วงความยาวคลื่น 350 - 600 นาโนเมตร และมีค่าพลังงานของโฟตอนในช่วง 2.0 eV- 3.54 eV โดยมีค่าของการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 476 นาโนเมตร หรือ 2.60 eV

4.3.2.2 ผลการวัดกระแส – แรงดันโฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้าง

ITO/PEDOT/CdS(100nm)/Al

ผลการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสที่ไหลผ่านกับความต่างศักย์ที่จ่ายให้โฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้าง ITO/PEDOT/CdS(100nm)/Al ที่ความหนาของชั้นสารอินทรีย์แคดเมียมซัลไฟด์เท่ากับ 100 นาโนเมตร ในกรณีไม่มีการฉายแสงกับการฉายแสง ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.18

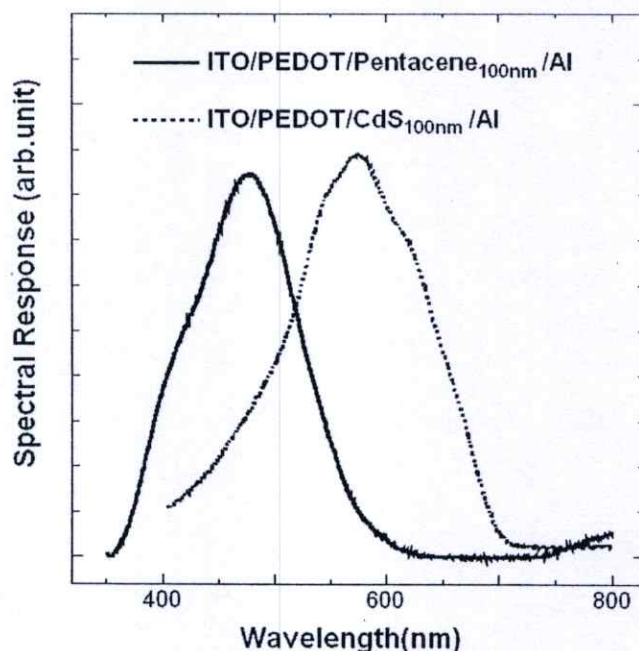


รูปที่ 4.18 แสดงผลการวัดกระแส – แรงดันโฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้าง

ITO/PEDOT/CdS(100nm)/Al

จากรูปที่ 4.18 จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มค่าความต่างศักย์ให้กับโฟโตดีเทคเตอร์ค่ากระแสที่ไหลผ่านโฟโตดีเทคเตอร์ที่ช่วงของความต่างศักย์น้อยๆ พบว่ากระแสไหลในอุปกรณ์โฟโตดีเทคเตอร์มีการเพิ่มขึ้นเป็นแบบเชิงเส้นแต่เมื่อทำการเพิ่มความต่างศักย์เพิ่มขึ้นกระแสที่ไหลผ่านโฟโตดีเทคเตอร์มีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วดังแสดงดังรูปที่ 4.18 สาเหตุที่เกิดพฤติกรรมของกระแสที่ไหลภายในอุปกรณ์โฟโตดีเทคเตอร์ในกรณีที่ให้ค่าความต่างศักย์น้อยๆ เนื่องจากอิล็กตรอนไม่สามารถที่จะฉีดเข้าสู่บริเวณชั้นแถบความนำของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ได้ จึงส่งผลทำให้เกิดกระแสที่รอยต่อแบบโอห์มมิก (ohmic contact) แต่เมื่อทำการจ่ายความต่างศักย์เพิ่มมากขึ้นทำให้กระแสสามารถฉีดเข้าไปยังแถบความนำของชั้นฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ได้จึงเกิดเป็นรอยต่อแบบชอตกี (schottky contact) ทำให้ค่ากระแสเพิ่มขึ้นอย่าง

รวดเร็วซึ่งเป็นสมบัติของไดโอดทั่วไป เมื่อทำการฉายแสงพบว่าแรงดันเปิดวงจร (Open circuit Voltage, V_{oc}) ลดลง และเมื่อนำมาคำนวณหาค่าของ fill factor = 0

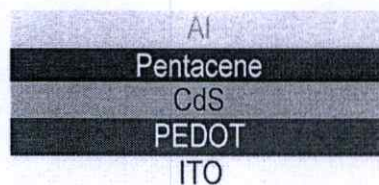


รูปที่ 4.19 แสดงผลการเปรียบเทียบการวัดการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงโฟโตดีเทคเตอร์ โครงสร้าง ITO/PEDOT/Pentacene(100nm)/Al และ ITO/PEDOT/CdS(100nm)/Al

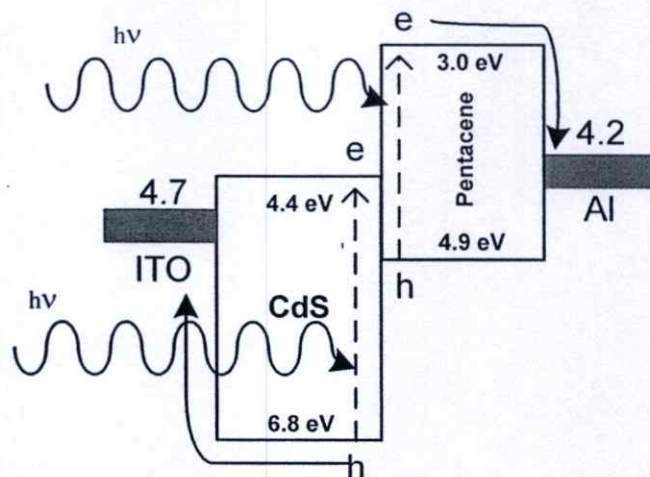
จากรูปที่ 4.19 เป็นผลการเปรียบเทียบการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงระหว่าง โครงสร้างแรก ITO/PEDOT/Pentacene(100nm)/Al และ โครงสร้างที่สอง ITO/PEDOT/CdS (100nm)/Al พบว่ามีช่วงการตอบสนองทางแสงในช่วงความยาวคลื่นที่ต่างกัน จากโครงสร้างแรก พบว่ามีช่วงการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงที่ความยาวคลื่น 400 - 700 นาโนเมตร และ โครงสร้างที่สองมีช่วงของการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงที่ความยาวคลื่น 350 - 600 นาโนเมตร โดยผลดังกล่าวเป็นไปได้ว่าถ้านำฟิล์มบางจากทั้งสอง โครงสร้างมารวมกันเป็น โครงสร้างไฮบริดแบบหลายชั้นจะสามารถเพิ่มช่วงของการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงเพิ่มขึ้นจากเดิม เป็น 350 - 700 นาโนเมตร โดยจะทำการทดลองในหัวข้อต่อไป

4.3.3 ผลการทดลองสร้างโฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริดโครงสร้าง ITO/PEDOT/CdS/Pentacene/Al

ในขั้นตอนต่อไปเป็นการสร้างสิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริดของฟิล์มบางเพนทาซีนและแคดเมียมซัลไฟด์ โดยให้ความหนาของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์เท่ากับ 100 นาโนเมตร โดยที่มีการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขฟิล์มบางเพนทาซีนที่ความหนาของต่างๆกันคือ 50,100 และ 150 นาโนเมตรเพื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างแบบชั้นเดียวที่ได้จากหัวข้อ 4.3.1, 4.3.2 โดยที่โครงสร้างของโฟโตดีเทคเตอร์แบบไฮบริดโครงสร้าง ITO/PEDOT/Pentacene/CdS/Al แสดงดังรูปที่ 4.20



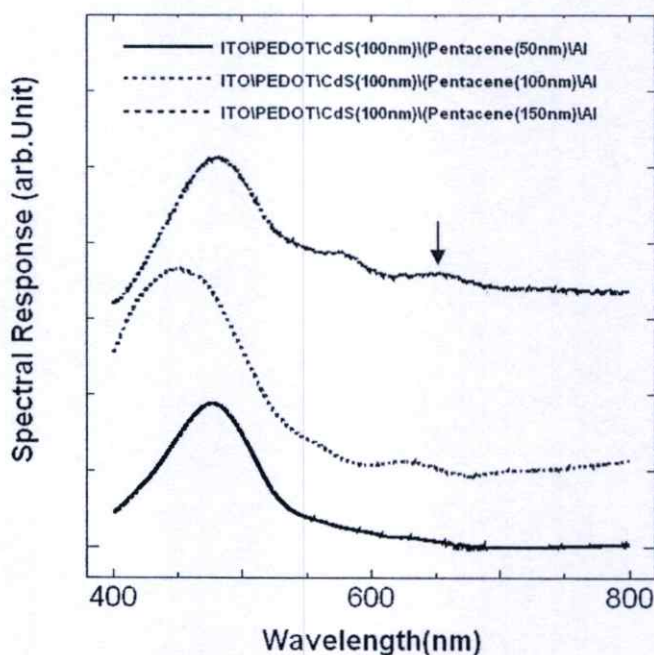
รูปที่ 4.20 แสดงโฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริดแบบหลายชั้น โครงสร้าง ITO/PEDOT/CdS/Pentacene/Al



รูปที่ 4.21 ไดอะแกรมระดับพลังงานของโฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริด โครงสร้าง ITO/PEDOT/CdS/Pentacene/Al

4.3.3.1 ผลการวัดการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงโฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริดโครงสร้าง

ITO/PEDOT/CdS(100 nm)/Pentacene(50,100,150 nm)/Al



รูปที่ 4.22 แสดงผลการวัดการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงโฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริดโครงสร้าง

ITO/PEDOT/CdS(100nm)/Pentacene(50,100,150nm)/Al

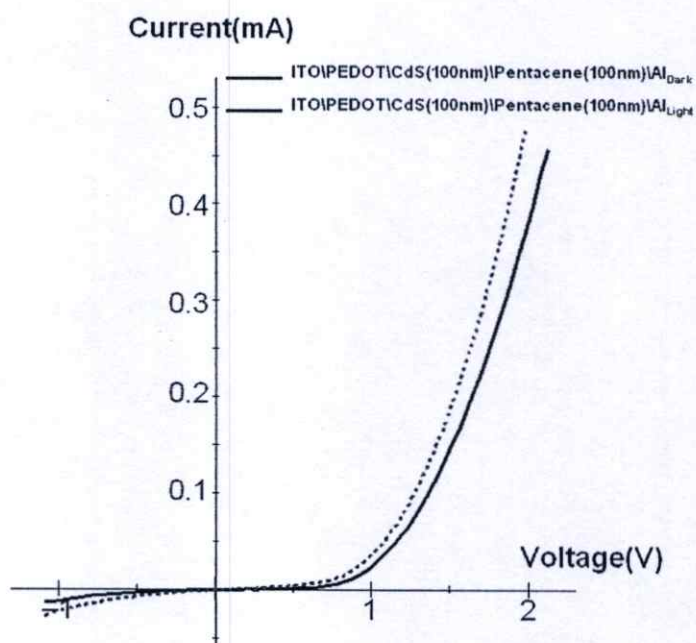
จากรูปที่ 4.22 แสดงผลจากการวัดการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงของโฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริดโครงสร้าง ITO/PEDOT/CdS(100nm)/Pentacene(50,100,150nm)/Al พบว่ามีช่วงการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงอยู่ที่ 400 – 700 นาโนเมตรซึ่งเป็นการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงในย่านของแคดเมียมซัลไฟด์และการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงในย่านของฟิล์มบางเพนทาซีนอยู่ที่ความยาวคลื่นในช่วง 550 – 700 นาโนเมตรที่ซึ่งมีการตอบสนองทางแสงที่มีค่าน้อยมากแต่เมื่อความหนาเพิ่มขึ้นก็จะเห็นค่าการตอบสนองของเพนทาซีนเด่นชัดขึ้นดังลูกศรเมื่อพิจารณาไออะแกรมระดับพลังงานจากรูป 4.21 พบว่าเมื่อฉายแสงให้กับอุปกรณ์โฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริดส่งผลทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลทั้งสองด้านฟิล์มชั้นแคดเมียมซัลไฟด์และเพนทาซีน แต่เนื่องมาจากบริเวณรอยต่อมีกำแพงศักย์ที่เกิดจากความแตกต่างของระดับพลังงาน HOMO และ LUMO กับแถบวาเลนซ์ และ แถบนำกระแส โดยกำแพงศักย์ของโฮลมีค่าประมาณ 1.9 อิเล็กตรอนโวลต์และของอิเล็กตรอนมีค่าประมาณ 1.4 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งความสูงของกำแพงศักย์บริเวณรอยต่อทำให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโฮลข้ามฝั่งไปได้ยากเป็นสาเหตุให้เกิด

การกักของพาหะอิเล็กตรอนและโฮลที่บริเวณรอยต่อจึงเป็นสาเหตุทำให้ผลตอบสนองทางแสงมีค่าน้อย

4.3.3.2 ผลการวัดกระแส – แรงดัน โฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริดโครงสร้าง

ITO/PEDOT/CdS(100nm)/Pentacene(100nm)/Al

ผลการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสที่ไหลผ่านกับความต่างศักย์ที่จ่ายให้โฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้าง ITO/PEDOT/CdS(100nm)/Pentacene(100nm)/Al ของฟิล์มบางเพนทาซีนและแคดเมียมซัลไฟด์ ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.23



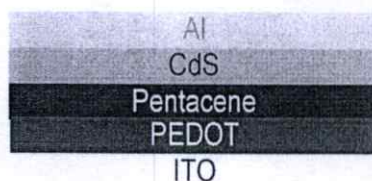
รูปที่ 4.23 แสดงผลการวัดกระแส – แรงดัน โฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริด โครงสร้าง ITO/PEDOT/CdS(100nm)/Pentacene(100nm)/Al กรณีที่มีการฉายแสงและไม่มีการฉายแสง

จากกราฟรูปที่ 4.23 แสดงให้เห็นว่าเมื่อให้ค่าความต่างศักย์น้อยๆกับสิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริดพบว่ามีการไหลในอุปกรณ์โฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริดเป็นแบบเชิงเส้น แต่เมื่อให้ค่าความต่างศักย์เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้กระแสไหลเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วซึ่งได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 4.3.2.2 และกรณีที่มีการฉายแสงให้กับสิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริดซึ่งค่าของแรงดันเปิดวงจร (Open circuit Voltage, Voc) มีค่าลดลงและจากการคำนวณหาค่า FF มีค่าเป็นศูนย์

4.3.4 ผลการทดลองสร้างไฮบริดโฟโตดีเทกเตอร์ไฮบริดโครงสร้าง

ITO/PEDOT/Pentacene/CdS/Al

จากการสร้างสิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทกเตอร์ไฮบริดโครงสร้าง ITO/PEDOT/Pentacene/CdS/Al ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.24

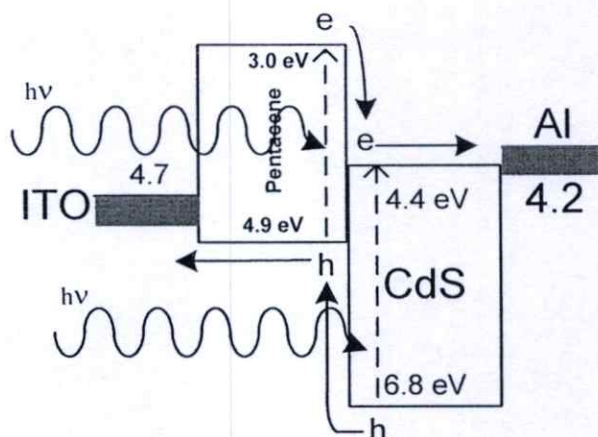


รูปที่ 4.24 แสดงไฮบริดโฟโตดีเทกเตอร์ไฮบริดโครงสร้าง ITO/PEDOT/Pentacene/CdS/Al

จากการวิเคราะห์โครงสร้างของ ITO/PEDOT/CdS(100 nm)/Pentacene(50 nm)/Al ในหัวข้อ 4.3.3 พบการตอบสนองทางด้านฟิล์มบางเพนทาซีนน้อยมาก ดังนั้นในงานวิจัยได้ทำการกลับโครงสร้างมาเป็น ITO/PEDOT/Pentacene/CdS/Al โดยเลือกความหนาฟิล์มบางเพนทาซีนที่ 50 นาโนเมตรเพื่อทำการตรวจสอบการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงของชั้นฟิล์มบางเพนทาซีนที่ซึ่งมีการเพิ่มความหนาของชั้นแคดเมียมซัลไฟด์ โดยมีโครงสร้างดังต่อไปนี้

1. ITO/PEDOT/Pentacene(50nm)/CdS(50nm)/Al
2. ITO/PEDOT/Pentacene(50nm)/CdS(100nm)/Al
3. ITO/PEDOT/Pentacene(50nm)/CdS(150nm)/Al

ซึ่งไดอะแกรมระดับพลังงานของสิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทกเตอร์ไฮบริดแสดงดังรูปที่ 4.25

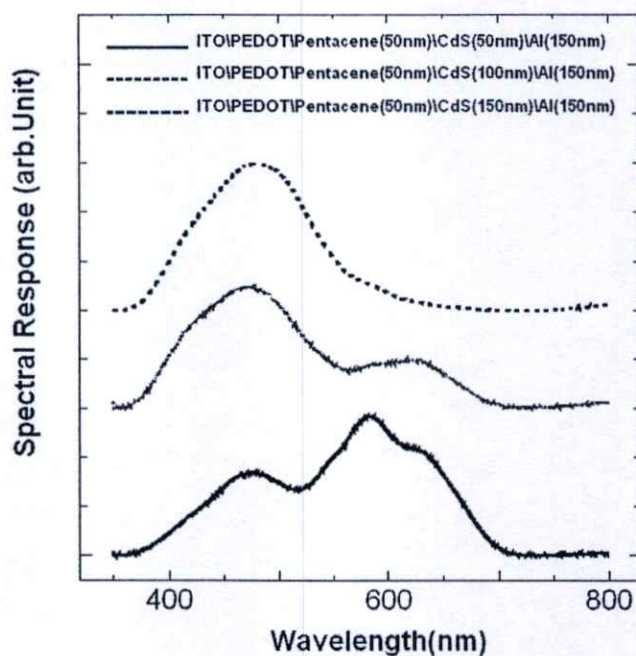


รูปที่ 4.25 ไดอะแกรมระดับพลังงานของโฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริด โครงสร้าง

ITO/PEDOT/Pentacene/CdS/Al

4.3.4.1 ผลการวัดการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงโฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริดโครงสร้าง

ITO/PEDOT/Pentacene(50 nm)/CdS(50,100,150 nm)/Al

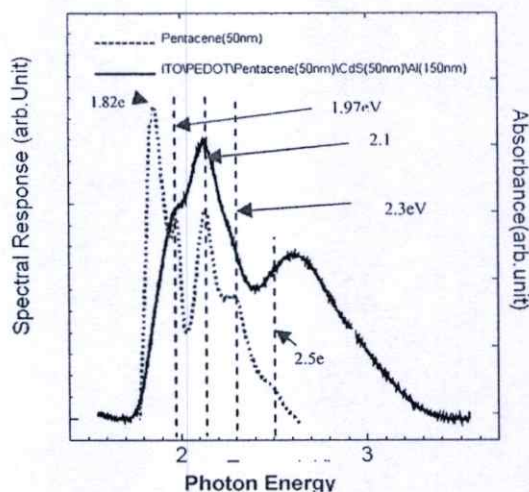


รูปที่ 4.26 แสดงผลการวัดการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงโฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริด โครงสร้าง

ITO/PEDOT/Pentacene(50 nm)/CdS(50,100,150 nm)/Al

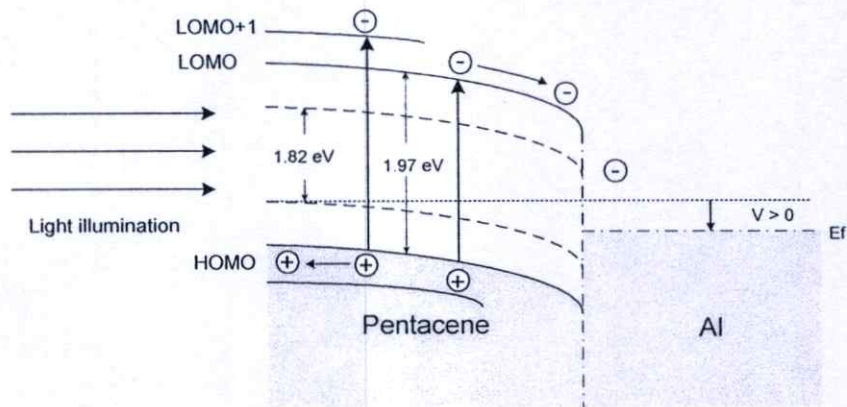
จากรูป 4.26 แสดงผลการวัดการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสง โฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริด โครงสร้าง ITO/PEDOT/Pentacene(50nm)/CdS(50,100,150 nm)/Al พบว่ามีการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงอยู่ที่ช่วง 350 -700 นาโนเมตร ซึ่งเป็นการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางเพนทาซีนและแคดเมียมซัลไฟด์ โดยที่ยอดคพิการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงอยู่ที่ 474 นาโนเมตร (2.61eV) และ 590 นาโนเมตร(2.1eV) ซึ่งมีการตอบสนองทางแสงดีกว่าโครงสร้างจากหัวข้อ 4.3.3.1 เมื่อมาพิจารณาไดอะแกรมระดับพลังงานจากรูป 4.25 พบว่าในขณะที่ทำการฉายแสงให้กับอุปกรณ์โฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริดทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน - โฮลจากชั้นฟิล์มบางเพนทาซีนและแคดเมียมซัลไฟด์ โดยการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโฮลสามารถเคลื่อนที่ได้สะดวกขึ้นเนื่องจากไม่มีกำแพงศักย์เกิดขึ้นที่บริเวณรอยต่อ ส่งผลให้มีการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงดีขึ้น และเมื่อความหนาของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ค่าของการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงของชั้นแคดเมียมซัลไฟด์มากขึ้น เนื่องจากเกิดคู่อิเล็กตรอน - โฮลเพิ่มขึ้นส่งผลทำให้การตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงทางด้านชั้นฟิล์มบางเพนทาซีนมีการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงลดลง และชั้นของฟิล์มบางเพนทาซีนที่ความหนา 50 นาโนเมตรมีค่าการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงสูงกว่าเนื่องจากการเกิดคู่อิเล็กตรอน - โฮลได้มากกว่าชั้นของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์นั่นเอง

4.3.4.2 ผลการเปรียบเทียบการวัดการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงโฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริด
โครงสร้าง ITO/PEDOT/Pentacene(50nm)/CdS(50nm)/Al กับ ค่าของการดูดกลืนแสง
ของเพนทาซีนที่ความหนา 50 นาโนเมตร



รูปที่ 4.27 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงโฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริดโครงสร้าง ITO/PEDOT/Pentacene(50nm)/CdS(50nm)/Al กับ ค่าของการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางเพนทาซีนที่ความหนา 50 นาโนเมตร

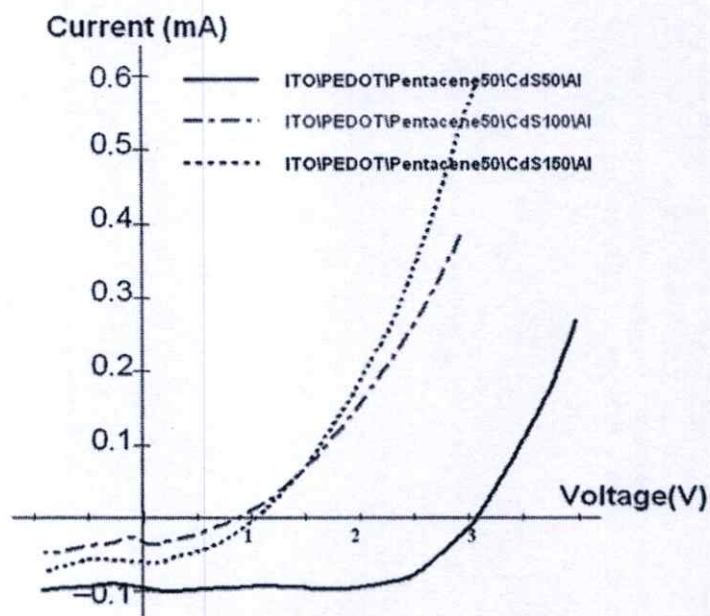
จากรูปที่ 4.27 เป็นการวัดการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงโฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริดโครงสร้าง ITO/PEDOT/Pentacene(50nm)/CdS(50nm)/Al เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าของการดูดกลืนทางแสงของฟิล์มบางเพนทาซีนที่ความหนา 50 นาโนเมตร พบยอดฟิคที่ตรงกับค่าของการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงอยู่ที่พลังงานโฟตอน 1.97 eV, 2.1 eV และ 2.3 eV ตามลำดับ โดยมีการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงสูงสุดเป็น 2.1 eV และเมื่อมาพิจารณาค่าของการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงที่พลังงานโฟตอน 1.97 และ 2.3 eV ซึ่งเป็นการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงในระดับพลังงาน HOMO - LUMO กับระดับพลังงานชั้นถัดไป HOMO - LUMO +1 และค่าของการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงในระดับพลังงานโฟตอนที่ 1.82 eV และ 2.1 eV เป็นการตอบสนองในชั้นของ Frankel exciton [8,11] โดยแสดงดังรูปที่ 4.28 ที่ซึ่งเป็นระดับพลังงานของบริเวณรอยต่อระหว่าง Al/pentacene ที่ได้จากรายงานของ Jiyoul และคณะ [8]



รูปที่ 4.28 แสดงไคอะแกรมของรอยต่อของโครงสร้าง Al/Pentacene และการเคลื่อนที่ของพาหะที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงของอิเล็กตรอนและโฮล โดยมีชั้นของ HOMO-LUMO และชั้นของเอ็กซิตอน

4.3.4.3 ผลการวัดกระแส – แรงดัน โฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริดโครงสร้าง

ITO/PEDOT/Pentacene(50nm)/CdS (50,100,150 nm)/Al



รูปที่ 4.29 แสดงผลการวัดกระแส – แรงดัน โฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริด โครงสร้าง

ITO/PEDOT/Pentacene(50nm)/CdS(50,100,150nm)/Al

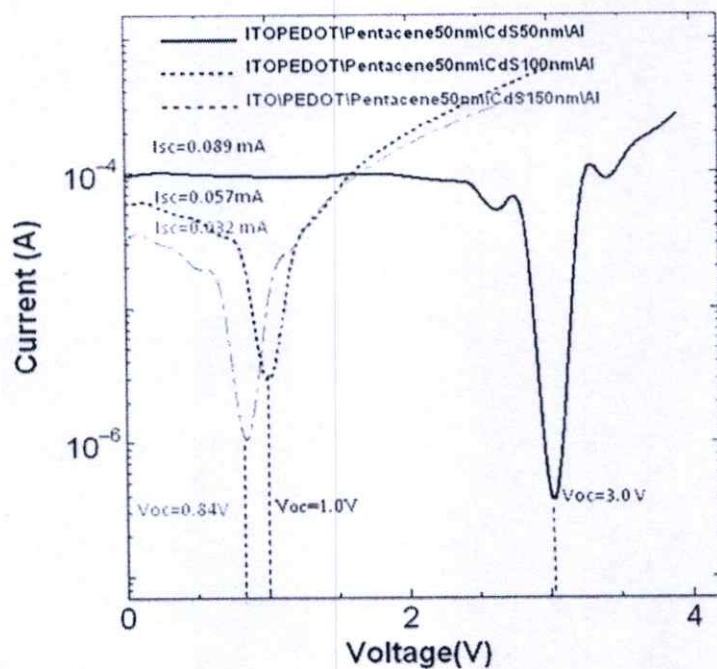
จากรูปที่ 4.29 แสดงผลการทดลองสร้างสิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริดจากโครงสร้าง ITO/PEDOT/Pentacene(50nm)/CdS (50,100,150 nm)/Al พบว่าเมื่อเพิ่มความต่างศักย์ให้กับสิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริดในช่วงของความต่างศักย์น้อยๆ จะมีกระแสไหลในอุปกรณ์โฟโตดีเทคเตอร์เพิ่มขึ้นเป็นแบบเชิงเส้นแต่เมื่อทำการให้ความต่างศักย์มีค่ามากขึ้นผลที่ได้จะทำให้กระแสที่ไหลผ่านโฟโตดีเทคเตอร์มีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ซึ่งอธิบายไปแล้วในหัวข้อ 4.3.2.2 และจากโครงสร้าง ITO/PEDOT/Pentacene(50nm)/CdS (50,100,150 nm)/Al มีกระแสแสงเกิดขึ้นเนื่องจากการฉายแสง (-Isc) ในทุกเงื่อนไข แต่เมื่อความหนาของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์มากขึ้นทำให้ค่าของกระแสแสงที่ได้มีค่าลดลงเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของพาหะภายในฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์มีค่าน้อยลงซึ่งเป็นค่าของ Diffusion length [13,14] โดยที่เป็นค่าที่บอกถึงสมบัติการเคลื่อนที่ของพาหะภายในฟิล์มบางสารอินทรีย์และอนินทรีย์ โดยสารแต่ละตัวจะมีค่าเหมาะสมอยู่ที่ความหนาหนึ่งๆที่ซึ่งสามารถทำให้สภาพคล่องของพาหะมีค่ามากที่สุด

4.3.4.4 ผลการวัดกระแส - แรงดันโฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริดโครงสร้าง ITO/PEDOT/Pentacene(50 nm)/CdS (50,100,150 nm)/Al แกน y เป็นเซมิลอค

จากสมการ Shockley ในสมการที่ใน 2.4 บทที่ 2 สามารถนำมาเขียนสมการในรูปแบบของลอคกาลิทึมเพื่อหาค่าของ J_{st} โดยเขียนสมการได้เป็น

$$\log J_{MSt} = \left(\frac{q}{\beta k T} \right) V + \log J_{st} \quad (4.1)$$

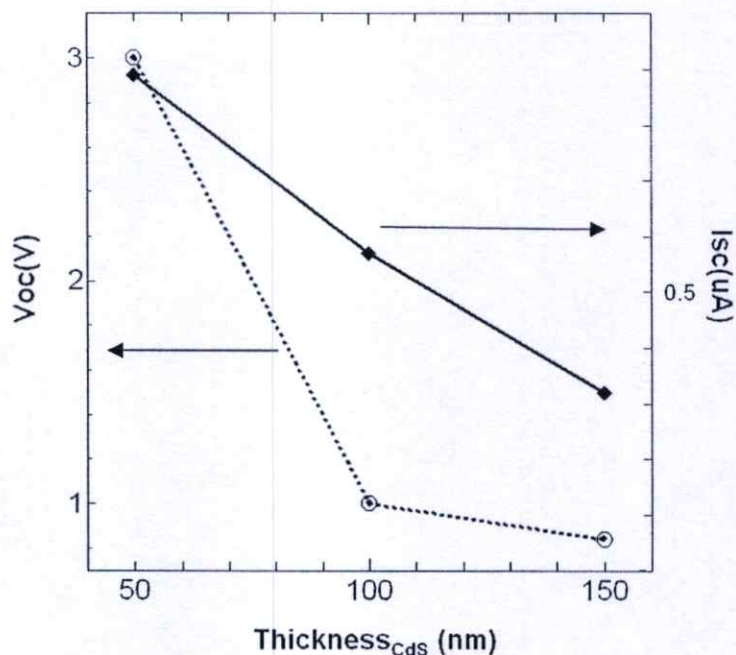
ในการหาค่าของ J_{st} ของ ไดโอดในอุดมคติหรือค่าของ I_{sc} ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.22 ในบทที่ 2 และจากสมการที่ 4.1 สามารถเขียนกราฟรูปแบบของเซมิลอค [15, 16] ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.30



รูปที่ 4.30 แสดงผลการวัดกระแส - แรงดันโฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริด โครงสร้าง

ITO/PEDOT/Pentacene(50nm)/CdS(50,100,150nm)/Al แกน y เป็นเซมิล็อก

จากรูปที่ 4.30 แสดงผลการวัดกระแส- แรงดันโฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริด โดยแสดงค่าของ V_{oc} มีค่าเท่ากับ 3.0, 1.0 และ 0.84 V ตามลำดับ และค่าของ I_{sc} เท่ากับ 0.089, 0.057 และ 0.032 mA ตามลำดับ โดยเงื่อนไขดังกล่าวสามารถนำมาคำนวณหาค่าของ FF ซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.31 แสดงการเปรียบเทียบค่า Isc และ ค่า Voc ที่ได้จากการเพิ่มความหนาของฟิล์ม แคดเมียมซัลไฟด์จากโครงสร้าง ITO/PEDOT/Pentacene(50nm)/ CdS(50,100,150 nm)/Al

จากรูปที่ 4.31 แสดงการเปรียบเทียบค่า Isc และค่า Voc ที่ได้จากการเพิ่มความหนาของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์โครงสร้าง ITO/PEDOT/Pentacene (50nm)/ CdS (50,100,150 nm)/Al พบว่ามีการลดลงของค่า Voc และค่าของ Isc ที่ซึ่งเป็นผลมาจากค่า Diffusion length ของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ [13, 14]

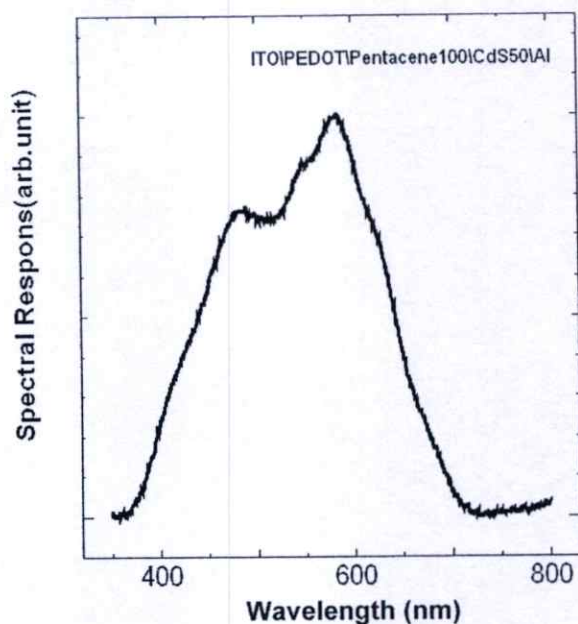
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าของ fill factor ของอุปกรณ์โฟโตดีเทคเตอร์เมื่อเพิ่มความหนาของ
 แคดเมียมซัลไฟด์โครงสร้าง ITO/PEDOT/Pentacene(50nm)/
 CdS(50,100,150 nm)/Al

เงื่อนไข	V_{mp} (v)	I_{mp} (mA)	V_{oc} (v)	I_{sc} (mA)	FF
1.ITO/PEDOT/Pentacene(50nm)/CdS(50nm)/Al	2.07	0.089	3.00	0.089	0.69
2.ITO/PEDOT/Pentacene(50nm)/CdS(100nm)/Al	0.54	0.039	1.00	0.057	0.38
3.ITO/PEDOT/Pentacene(50nm)/CdS(150nm)/Al	0.30	0.027	0.84	0.032	0.30

จากตารางที่ 4.1 เป็นตารางการคำนวณหาค่าของ fill factor (FF) ที่ได้จากการสร้างโฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริดโครงสร้าง ITO/PEDOT/Pentacene(50nm)/CdS(50,100,150 nm)/Al พบว่าเมื่อความหนาของชั้นฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ FF มีค่าลดลง และจากเงื่อนไขทั้งหมดจะพบว่าโครงสร้างของ ITO/PEDOT/Pentacene(50nm)/CdS(50nm)/Al มีค่า FF สูงสุดที่ 0.69 โดยจากเงื่อนไขของโครงสร้าง ITO/PEDOT/Pentacene(50nm)/CdS(50nm)/Al สามารถนำมาหาเงื่อนไขเพิ่มเติมโดยการเพิ่มความหนาของฟิล์มบางเพนทาซีนเป็น 100 นาโนเมตรเป็นโครงสร้าง ITO/PEDOT/Pentacene(100nm)/CdS(50nm)/Al ซึ่งผลที่ได้แสดงดังหัวข้อที่ 4.3.4.5

4.3.4.5 ผลการวัดการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงโฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริดโครงสร้าง

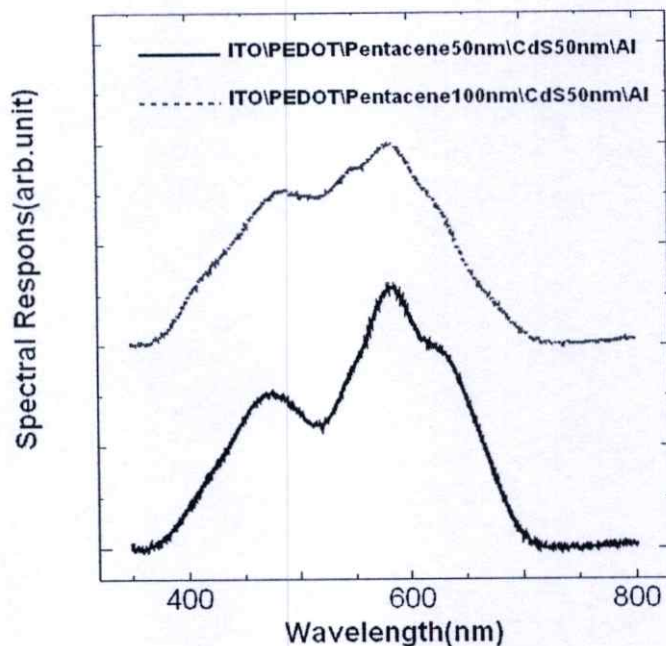
ITO/PEDOT/Pentacene(100nm)/CdS(50nm)/Al



รูปที่ 4.32 แสดงผลการวัดการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงโฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริดโครงสร้าง

ITO/PEDOT/Pentacene(100nm)/CdS(50nm)/Al

จากรูป 4.32 แสดงผลจากการวัดการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงของโฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริดเมื่อมีความหนาของชั้นของฟิล์มบางเพนทาซีนเพิ่มขึ้นเป็น 100 นาโนเมตร พบว่ามีช่วงของการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงที่ 350 -700 นาโนเมตรและมียอดพีคการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงสูงสุดอยู่ที่ 474 นาโนเมตร และ 590 นาโนเมตร ซึ่งโครงสร้างของ ITO/PEDOT/Pentacene(100nm)/CdS(50nm)/Al กับโครงสร้าง ITO/PEDOT/Pentacene(50nm)/CdS(50nm)/Al นำมาเปรียบเทียบค่าของการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงจะแสดงดังรูปที่ 4.33



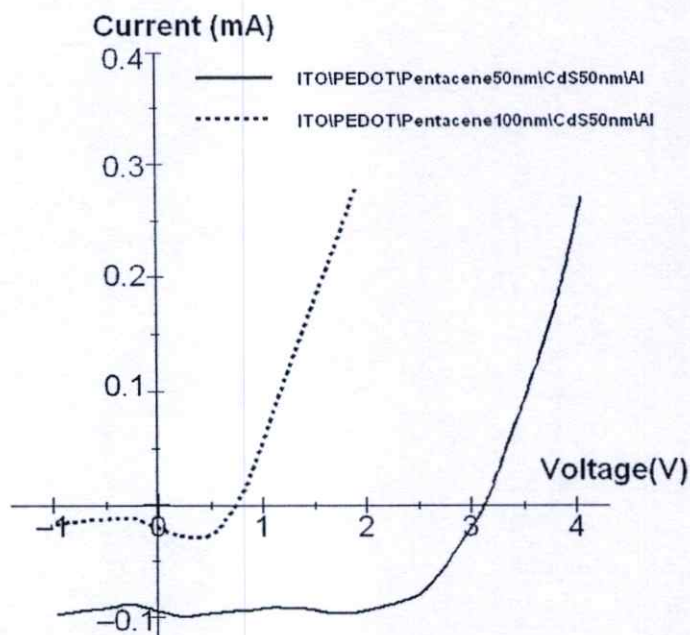
รูปที่ 4.33 แสดงผลการเปรียบเทียบการวัดการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงโฟโตดีเทคเตอร์

ไฮบริด โครงสร้าง ITO/PEDOT/Pentacene(50nm)/CdS(50nm)/Al

กับ ITO/PEDOT/Pentacene(100 nm)/CdS(50 nm)/Al

จากรูป 4.33 เป็นผลจากการเปรียบเทียบการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงโฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริดโครงสร้าง ITO/PEDOT/Pentacene(50nm)/CdS(50nm)/Al กับ ITO/PEDOT/Pentacene(100 nm)/CdS(50 nm)/Al จากทั้งสองโครงสร้างพบว่ามีช่วงของการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงและมียอดพิคของการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงสูงสุดอยู่ที่ 474 นาโนเมตร และ 590 นาโนเมตรเช่นเดียวกัน

4.3.4.6 ผลการวัด กระแส – แรงดัน โฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริดโครงสร้าง ITO/PEDOT/Pentacene (50 nm)/CdS(50nm)/Al เปรียบเทียบกับโครงสร้าง ITO/PEDOT/Pentacene (100 nm)/CdS(50nm)/Al

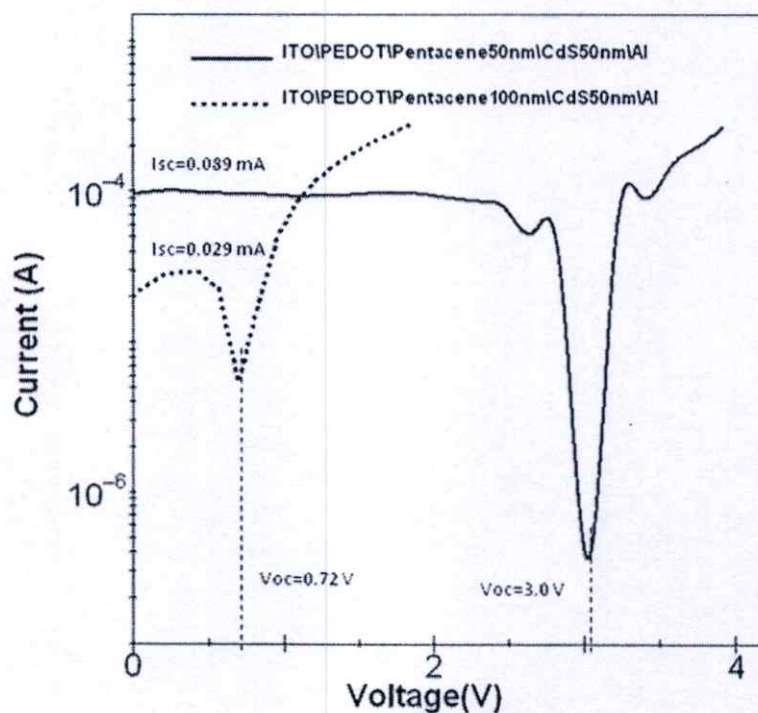


รูปที่ 4.34 แสดงการเปรียบเทียบการวัดกระแส – แรงดันของทั้งสองโครงสร้าง ITO/PEDOT/Pentacene(50nm)/CdS(50nm)/Al กับ ITO/PEDOT/Pentacene(100nm)/CdS(50nm)/Al

จากรูปที่ 4.34 แสดงผลจากการเปรียบเทียบการวัดกระแส – แรงดันที่ได้จากโครงสร้างโฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริด ITO/PEDOT/Pentacene(50nm)/CdS(50nm)/Al กับ ITO/PEDOT/Pentacene(100nm)/CdS(50nm)/Al จากทั้งสองโครงสร้างพบว่ามีกระแสเนื่องจากการฉายแสง ($-I_{sc}$) เกิดขึ้น แต่เมื่อความหนาของฟิล์มบางเพนทาซีนเพิ่มขึ้นจาก 50 นาโนเมตรเป็น 100 นาโนเมตรจะส่งผลทำให้ค่าของกระแสแสงมีค่าลดลงที่ซึ่งเป็นผลมาจากค่า Diffusion length ซึ่งได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 4.3.4.3 เมื่อนำมาคำนวณหาค่า FF จะแสดงค่าดังตารางที่ 4.2

4.3.4.7 ผลการวัดกระแส – แรงดันโฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริดโครงสร้าง ITO/PEDOT/Pentacene (50 nm)/CdS(50 nm)/Al เปรียบเทียบกับโครงสร้าง ITO/PEDOT/Pentacene (100 nm)/CdS(50nm)/Al แกน y เป็นเซมิล็อกซ์

จากสมการ Shockley ที่อธิบายในหัวข้อ 4.3.4.4 สมการที่ 4.1 นำมาเขียนกราฟในรูปแบบเซมิล็อกได้ดังรูปที่ 4.35



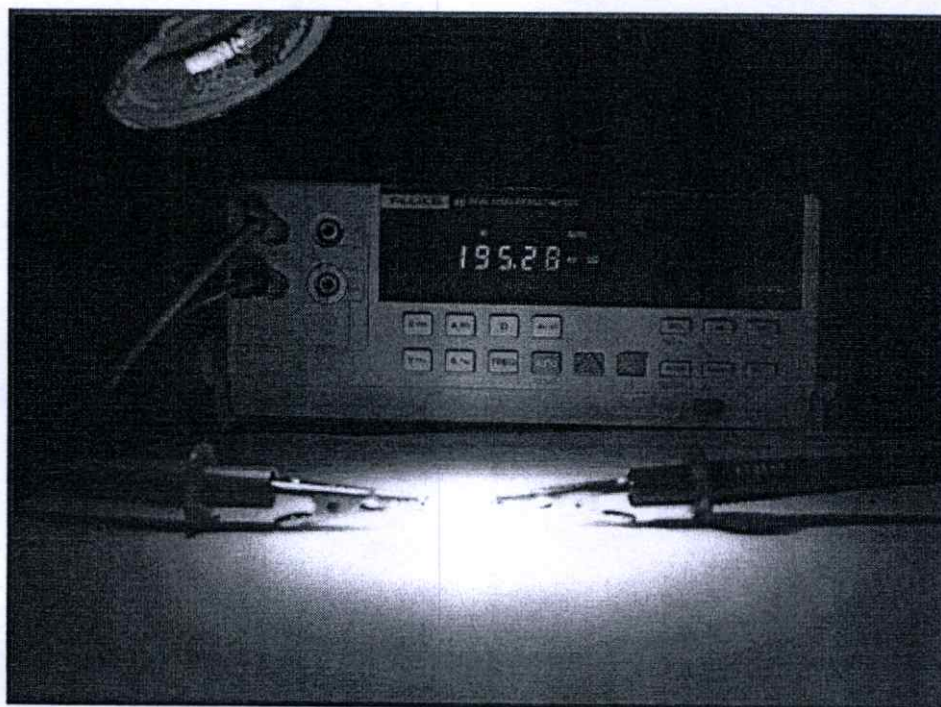
รูปที่ 4.35 แสดงการเปรียบเทียบการวัดกระแส – แรงดันของทั้งสองโครงสร้าง ITO/PEDOT/Pentacene(50nm)/CdS(50nm)/Al กับ ITO/PEDOT/Pentacene(100nm)/CdS(50nm)/Al

จากรูปที่ 4.35 เป็นค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแส – แรงดัน โดยแสดงค่าของ Voc และ Isc จากโครงสร้าง ITO/PEDOT/ Pentacene(50nm)/CdS(50nm)/Al กับ ITO/PEDOT/Pentacene (100nm)/CdS(50nm)/Al โดยที่ค่าของ Isc เท่ากับ 0.089 และ 0.029 mA และค่า Voc เท่ากับ 3.0 และ 0.72 ตามลำดับ ซึ่งจากเงื่อนไขดังกล่าวสามารถนำมาคำนวณหาค่า FF ที่ซึ่งแสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงค่า FF ของอุปกรณ์โฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริดเปรียบเทียบค่าที่ได้จากโครงสร้าง ITO/PEDOT/Pentacene(50nm)/CdS(50nm)/Al กับ ITO/PEDOT/Pentacene (100 nm)/CdS(50nm)/Al

เงื่อนไข	V_{mp} (v)	I_{mp} (mA)	V_{oc} (v)	I_{sc} (mA)	FF
1.ITO/PEDOT/Pentacene(50nm)/CdS(50nm)/Al	2.07	0.089	3.00	0.089	0.69
2.ITO/PEDOT/Pentacene(100nm)/CdS(50 nm)/Al	0.49	0.022	0.72	0.029	0.51

จากตารางที่ 4.2 เป็นตารางเปรียบเทียบค่า fill factor (FF) ของสิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริด โครงสร้าง ITO/PEDOT/Pentacene(50nm)/CdS(50nm)/Al กับ โครงสร้าง ITO/PEDOT/Pentacene(100nm)/CdS(50nm)/Al จากการเปรียบเทียบพบว่าค่าของ FF มีค่าสูงสุดอยู่ที่โครงสร้าง ITO/PEDOT/Pentacene(50nm)/CdS(50nm)/Al แต่เมื่อเพิ่มความหนาของเพนทาซีนเป็นเงื่อนไข ITO/PEDOT/Pentacene(100nm)/CdS(50nm)/Al พบว่ามีค่าของ FF ลดลงมีค่าเป็น 0.51 ซึ่งการลดลงของค่า FF เป็นผลเนื่องจากค่าของ Diffusion length[13,14] ของฟิล์มบางเพนทาซีน ที่ซึ่งได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 4.3.4.3 จากผลที่ได้ อุปกรณ์ที่เหมาะสมสำหรับสร้างเป็นสิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริดคือ โครงสร้าง ITO/PEDOT/Pentacene(50nm)/CdS (50 nm)/Al ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.36 และในส่วนของ การสร้างเป็นสิ่งประดิษฐ์โซลลาเซลล์ยังต้องมีการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพเทียบเท่าต่อไป



รูปที่ 4.36 รูปแสดงโฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริดโครงสร้าง

ITO/PEDOT/Pentacene(50nm)/CdS(50nm)/Al

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาและสร้างสิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริดจากฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์เพนทาซีนและสารกึ่งตัวนำอินทรีย์แคดเมียมซัลไฟด์ด้วยระบบระเหยสารอินทรีย์อุณหภูมิต่ำ ในขั้นต้นจะทำการศึกษาคูสมบัติของฟิล์มบางโดยที่จากการศึกษาสมบัติทางโครงสร้างความเป็นผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางเพนทาซีนพบว่ามีการเลี้ยวเบน (2 θ) ที่ 5.72° และ 6.12° โดยมีการจัดเรียงตัวผลึกแบบ เฟสฟิล์มบางผลึกเดี่ยว (single crystal thin film phase) และ เฟสแบบก้อนผลึกไตรคริติก (triclinic bulk phase) เมื่อเพิ่มความหนาของฟิล์มบางเพนทาซีนจะทำให้การจัดเรียงตัวความเป็นผลึกเป็นแบบ เฟสแบบก้อนผลึกไตรคริติกเพิ่มขึ้น โดยที่เฟสฟิล์มบางผลึกเดี่ยวลดลง และในส่วนของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์จะมีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์อยู่ที่ 26.44° มีการจัดเรียงตัวผลึกแบบเฮกซะโกนอล และเมื่อศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงของเพนทาซีนและแคดเมียมซัลไฟด์จะอยู่ในช่วง 400 – 700 นาโนเมตร และในช่วง 400-550 นาโนเมตร

ในส่วนของการสร้างสิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้างแบบชั้นเดี่ยว ITO/PEDOT/Pentacene(100nm)/Al พบว่ามีค่าการตอบสนองทางแสงอยู่ที่ช่วงความยาวคลื่น 400 - 700 นาโนเมตร โดยมีค่าของการตอบสนองทางแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่นแสง 580 นาโนเมตรและจากการวัดกระแสแรงดันในขณะที่ทำการฉายแสงจะมีค่าของแรงดันเปิดวงจรลดลงที่ซึ่งเป็นสมบัติพื้นฐานของอุปกรณ์ของโฟโตดีเทคเตอร์ทั่วไป และจากโครงสร้าง ITO/PEDOT/CdS(100nm)/Al มีค่าการตอบสนองทางความยาวคลื่นแสงในช่วง 350 - 600 นาโนเมตร เมื่อทำการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแส - แรงดัน พบว่าอุปกรณ์โฟโตดีเทคเตอร์มีสมบัติการเรียงกระแสและมีค่าแรงดันเปิดวงจรลดลงในกรณีทำการฉายแสงเช่นกัน และจากโครงสร้างทั้งสองนำมาคำนวณหาค่าของ FF ผลที่ได้มีค่าเป็นศูนย์ โดยที่โครงสร้างที่ได้กล่าวมาเป็นการศึกษาสมบัติของการตอบสนองต่อความยาวต่อความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางเพนทาซีนและฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์จากโครงสร้างชั้นเดียว โดยผลจากการวัดค่าการตอบสนองต่อความยาวคลื่นที่ได้มีความเป็นไปได้ว่าถ้ารวมฟิล์มบางทั้งสองไว้ด้วยกันก็จะส่งผลทำให้ช่วงของการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงเพิ่มขึ้นและมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นจากสิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริด ดังนั้นจากโครงสร้างแบบชั้นเดียวจึงมาเป็นโครงสร้างแบบหลายชั้นคือ โครงสร้าง ITO/PEDOT/CdS(100nm)/Pentacene(50,100,150nm)/Al และผลจากการวัดค่าของการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงพบว่ามีค่าการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงทั้งสองช่วงของฟิล์มบางเพนทาซีนและ

แคดเมียมซัลไฟด์ที่ความยาวคลื่นแสง 350 - 700 นาโนเมตร เมื่อเราพิจารณาไดโอดเปล่งแสงระดับพลังงานพบว่าลักษณะของโครงสร้างดังกล่าวมีผลทำให้การเคลื่อนที่อิเล็กตรอนและโฮลไม่สามารถเคลื่อนที่ได้สะดวกเนื่องจากกำแพงศักย์ส่งผลทำให้การตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงมีค่าน้อย จากปัญหาที่พบจากโครงสร้างเดิมมาทำการกลับโครงสร้างระหว่างฟิล์มบางเพนทาซีนและแคดเมียมซัลไฟด์มาเป็น ITO/PEDOT/Pentacene(50nm)/CdS(50,100,150nm)/Al ปรากฏว่ามีการตอบสนองทางแสงดีขึ้น โดยมีการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงช่วงความยาวคลื่น 350 - 700 นาโนเมตร แต่เมื่อเพิ่มความหนาแคดเมียมซัลไฟด์จะทำให้การตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงของชั้นฟิล์มบางเพนทาซีนลดลงเนื่องจากการเกิดจำนวนของพาหะของการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์มีค่ามากส่งผลทำให้พาหะของทางด้านเพนทาซีนน้อยลง และจากเงื่อนไขที่กล่าวมาจะมีโครงสร้างที่เหมาะสมอยู่ที่โครงสร้างITO/PEDOT/Pentacene(50nm)/CdS(50 nm)/Al ซึ่งมีค่า FF อยู่ที่ 0.69 แต่เมื่อเพิ่มความหนาของเพนทาซีนเป็น 100 นาโนเมตรเป็นโครงสร้าง ITO/PEDOT/Pentacene(100nm)/CdS(50 nm)/Al พบว่าลักษณะที่คของการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงมีช่วงความยาวคลื่นอยู่ในช่วงเดียวกัน โดยที่ FF มีค่าลดลงเป็น 0.51 โดยสรุปโครงสร้างที่เหมาะสมของอุปกรณ์โฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริดคือ ITO/PEDOT/Pentacene(50nm)/CdS(50nm)/Al ส่วนการสร้างเป็นอุปกรณ์โซลาร์เซลล์ยังต้องมีการพัฒนาต่อไป

ข้อเสนอแนะ

ปัญหาที่เกิดจากการศึกษาการสร้างโฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริดจากสารอินทรีย์เพนทาซีนและสารอินทรีย์แคดเมียมซัลไฟด์ซึ่งเป็นงานวิจัยที่ยังใหม่โดยที่ไม่มีรายงานวิจัยอ้างอิงถึง ทำให้ไม่มีข้อมูลมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพที่ได้จากสิ่งประดิษฐ์โฟโตดีเทคเตอร์ไฮบริดของสารอินทรีย์เพนทาซีนและสารอินทรีย์แคดเมียมซัลไฟด์ดังกล่าว โดยจากงานวิจัยจึงเป็นการศึกษาของสิ่งประดิษฐ์ไฮบริดเบื้องต้นเพื่อต่อยอดในการสร้างสิ่งประดิษฐ์ให้มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้นต่อไป โดยสามารถตรวจสอบประสิทธิภาพของสิ่งประดิษฐ์ที่ได้จากการใช้งานจริง

บรรณานุกรม

- [1] I.P.M. Bouchoms, W.A. Schoonveld), J. Vrijmoeth 1, T.M. Klapwijk, Morphology identification of the thin film phases of vacuum evaporated pentacene on SiO substrates, *Synthetic Metals* 104 ,1999,175–178
- [2] Hiroyuki Yoshida, Katsuhiko Inaba, Naoki Sato ,X-ray diffraction reciprocal space mapping study of the thin film phase of pentacene, *Applied Physics Letter* **90**, 2007,181930
- [3] P. P. Sahay, R. K. Nath, and S. Tewari, Optical properties of thermally evaporated CdS thin films, *Cryst. Res. Technol.* 42, No. 3, 2007,275 – 280
- [4] Q. Yang, L.R. Zhao, Characterization of nano-layered multilayer coatings using modified Bragg law, *Materials Characterization* 59, 2008, 1285-1291
- [5] Chaeho Kim , Kyoungyoon Bang , Ilsin An , C.J. Kang , Y.S. Kim , D. Jeon , Morphology and ellipsometry study of pentacene films grown on native SiO₂ and glass substrates *Current Applied Physics* ,2005
- [6] Christine C. Mattheus, Anne B. Dros, Jacob Baas, Gert T. Oostergetel, Auke Meetsma, Jan L. de Boer, Thomas T.M. Palstra, Identification of polymorphs of pentacene, *Synthetic Metals* 138 ,2003,475–481
- [7] Bert Nickel , Matthias Fiebig, Stefan Schiefer, Martin Göllner, Martin Huth, Christoph Erlen, Paolo Lugli, Pentacene devices: Molecular structure, charge transport and photo response, *phys. stat. sol. (a)* **205**, No. 3, 2008, 526–533
- [8] Jiyoul Lee, S. S. Kim, Kibum Kim, Jae Hoon Kim, and Seongil Im, Correlation between photoelectric and optical absorption spectra of thermally evaporated pentacene films, *Applied Physics Letter* 84, 2004, 10
- [9] Jiyoul Lee, D.K. Hwang, C.H. Park, S.S. Kim, Seongil Im, Pentacene-based photodiode with Schottky junction, *Thin Solid Films* 451 –452 ,2004,12–15
- [10] K. Senthil, D. Mangalaraj*, Sa.K. Narayandass, Structural and optical properties of CdS thin film , *Applied Surface Science* 169-170 ,2001, 476-479

- [11] Y.S. Lee *, J.H. Park, J.S. Choi, Electrical characteristics of pentacene-based Schottky diodes, *Optical Materials* 21 ,2002,433–437
- [12] Ajay K. Pandey, K.N.N. Unni, Jean-Michel Nunzi, Pentacene/Perylene co-deposited solar cells, *Thin Solid Films* 511 – 512 ,2006, 529 – 532
- [13] Leif A. A. Pettersson, Lucimara S. Roman, and Olle Inganäs , Modeling photocurrent action spectra of photovoltaic devices based on organic thin films , *Applied Physics Letter* ,86,1999, 1
- [14] Peter Peumans, Aharon Yakimov, and Stephen R. Forrest, Small molecular weight organic thin-film photodetectors and solar cells, *Applied Physics Letter*,93,2003,7
- [15] M.M. El-Nahass, K.F. Abd-El-Rahman, A.A.A. Darwish, Fabrication and electrical characterization of p-NiPc/n-Si heterojunction , *Microelectronics Journal* 38 ,2007, 91–95
- [16] S. Aydog an, M. Saglam, A. Turut, On the some electrical properties of the non-ideal PPy/p-Si/Al structure , *Polymer* 46 ,2005, 10982–10988
- [17] Iwao Yagia, Kazuhito Tsukagoshi, Yoshinobu Aoyagi, Growth control of pentacene films on SiO₂/Si substrates towards formation of flat conduction layers, *Thin Solid Films* 467 ,2004,168– 171
- [18] J. M. Shaw ,P. F. Seidler, *Organic electronics: Introduction*, IBM J. RES. & DEV, VOL.45 ,2001
- [19] C. D. Dimitrakopoulos, D. J. Mascaro, *Organic thin-film transistors: A review of recent advances* , IBM J. RES. & DEV, VOL. 45, NO. 1 , 2001
- [20] P.S. Smertenko , V.P. Kostylev , V.V. Kislyuk , A.F. Syngaevsky , S.A. Zynio , O.P. Dimitriev, Photovoltaic cells based on cadmium sulphide– phthalocyanine heterojunction, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 92 (2008) 976– 97
- [21] Holger Spanggaard, Frederik C. Krebs. A brief history of the development of organic and polymeric photovoltaics , *Solar Energy Materials & Solar Cells*,2004,125–146
- [22] Jae Kwang Lee , Jung Mo Koo , Sang Yun Lee , Studies of pentacene-based thin film devices produced by cluster beam deposition methods, *Optical Materials* 21 ,2002, 451–454
- [23] C. Voz, J. Puigdollers_, I. Martín, D. Muñoz, A. Orpella, M. Vetter, R. Alcubilla, Optoelectronic devices based on evaporated pentacene films, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 84, 2005, 567–573

ประวัติผู้เขียน

นายอรณพ จันทร์หอม เกิดวันที่ 9 ธันวาคม 2523 เกิดที่จังหวัดตราด สำเร็จการศึกษา
ระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนตราดตระการคุณ จังหวัดตราด ในปีการศึกษา 2541 สำเร็จการศึกษา
ระดับปริญญาตรีสาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยทักษิณ ในปีการศึกษา 2545 เข้า
ศึกษาต่อระดับปริญญาโทสาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอม
เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2547