

การศึกษาไดโอดเปล่งแสงไฮบริดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์

STUDY OF ORGANIC AND INORGANIC HYBRID
LIGHT EMITTING DIODE

นาวินทร์ ชัยนิก
NAVAPHUN KAYUNKID

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของดุษฎีนิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

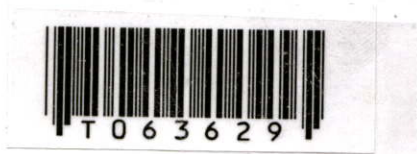
พ.ศ. 2549

ISBN 974-15-2709-8

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาไดโอดเปล่งแสงไฮบริดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์

STUDY OF ORGANIC AND INORGANIC HYBRID
LIGHT EMITTING DIODE



นวพันธ์ ขยันกิจ

NAVAPHUN KAYUNKID

อพ.
๒๒๙๗๓
๒๕๔๙

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 63629
วัน,เดือน,ปี 30 ส.ค. 2549

b. 11638898
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2549

ISBN 974-15-2709-8

**STUDY OF ORGANIC AND INORGANIC HYBRID
LIGHT EMITTING DIODE**

NAVAPHUN KAYUNKID

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

2006

ISBN 974-15-2709-8

COPYRIGHT 2006

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาไดโอดเปล่งแสงไฮบริดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์
นักศึกษา	นายนวพันธ์ ขยันกิจ
รหัสประจำตัว	46063510
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
พ.ศ.	2549
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. จิติ หนูแก้ว

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาไดโอดเปล่งแสงไฮบริดซึ่งเป็นสิ่งประดิษฐ์แบบใหม่ ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ N,N'-di(naphthalen-1-yl)-N,N'-diphenyl-benzidine (NPB) และสารกึ่งตัวนำอนินทรีย์ซิงค์ซีลีไนด์ (ZnSe) โดยสารอินทรีย์ NPB ทำหน้าที่เป็นชั้นส่งผ่านโฮลเตรียมโดยระบบระเหยสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ ZnSe เป็นชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนเตรียมโดยระบบระเหยสารด้วยความร้อน มีขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงอินเดียมทินออกไซด์ความหนา 200 นาโนเมตร เป็นขั้วไฟฟ้าบวกเตรียมโดยระบบอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง และอลูมิเนียมความหนา 150 นาโนเมตร เป็นขั้วไฟฟ้าลบเตรียมโดยระบบระเหยสารด้วยความร้อน จากการศึกษาพบว่าสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติทางแสงของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดจะมีความสัมพันธ์กับอัตราการระเหย และ ความหนาของชั้นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้น NPB และ ZnSe พบว่าไดโอดเปล่งแสงไฮบริดที่มีความหนาของชั้น NPB 50 นาโนเมตร และ ZnSe 30 นาโนเมตร มีการเปล่งแสงสีน้ำเงินที่ความยาวคลื่น 457 นาโนเมตร และ 500 นาโนเมตร เมื่อทำการจ่ายความต่างศักย์ประมาณ 16 โวลต์ จากการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติทางแสงของไดโอดเปล่งแสงไฮบริด โครงสร้าง ITO/NPB/ZnSe/Al ทำให้สามารถอธิบายกลไกการเปล่งแสงของไดโอดเปล่งแสงรวมทั้งสามารถพัฒนาไดโอดเปล่งแสงไฮบริดให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นต่อไป

Thesis Title	Study of organic and inorganic hybrid light emitting diode
Student	Mr. Navaphun Kayunkid
Student ID.	46063510
Degree	Master of Science
Program	Applied Physics
Year	2006
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Jiti Nukeaw

ABSTRACT

This research is a study of hybrid light emitting diode (HLED) as a new function device, based on organic material N,N'-di(naphthalen-1-yl)-N,N'-diphenyl-benzidine (NPB) and inorganic material zinc selenide (ZnSe). The NPB layer was prepared by organic source low temperature control evaporation system as a hole transport layer, while ZnSe layer was prepared by thermal evaporation system as an electron transport layer. Indium Tin Oxide (ITO) anode was prepared by rf magnetron sputtering system, and Aluminium (Al) cathode was prepared by thermal evaporation system. The study results were found that the electrical and optical characteristics of hybrid devices depended on evaporation rate and thickness of organic and inorganic layers, the thickness of NPB and ZnSe layers were varied. The hybrid device structure consists of NPB (50 nm) and ZnSe (30 nm) emitted blue light at bias voltage of 16 Volts. The HLED show electroluminescence peaks at 457 and 500 nm. From these results, the mechanism of blue emitting from hybrid light emitting diode HLED will be described and the performance of hybrid device will be improved.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เรื่อง การศึกษาไดโอดเปล่งแสงไฮบริดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์นี้ สามารถสำเร็จลุล่วงด้วยดีจากการให้คำแนะนำ คำปรึกษา ตลอดจนการสนับสนุนการวิจัยจาก รองศาสตราจารย์ ดร. จิติ หนูแก้ว ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ข้าพเจ้ารู้สึกทราบบ้างในความ อนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ในทุกด้านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุก ๆ ท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. รัชภักย์ จิตต์อารี ผศ.ดร. เดิมศักดิ์ ศรีศิริรินทร์ ที่ให้คำแนะนำใน การทำวิทยานิพนธ์และสนับสนุนเครื่องมือวัดการส่องสว่างและการเปล่งแสง

ขอขอบพระคุณ ดร.สมบุญ สหสิทธิวัฒน์ ที่ช่วยให้คำแนะนำในการทำการทดลองรวมทั้ง ตรวจสอบความถูกต้องของวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณพี่หน่อง พี่คอน พี่โม พี่เบญจ พี่กาจ พี่เป็ และพี่ๆ น้องๆ ทุกคนในห้องปฏิบัติการ วิจัยควอนตัมและสารกึ่งตัวนำทางแสงสำหรับคำปรึกษารวมทั้งเตรียมอุปกรณ์ต่างๆ และขั้วไฟฟ้า โปรงแสง (ITO) ที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งช่วยตรวจสอบความถูกต้องของวิทยานิพนธ์ นอกเหนือสิ่งอื่นใด ขอขอบคุณสำหรับกำลังใจที่มีให้แก่กัน

ขอขอบคุณ ไฉ่ซึ่งเป็นเพื่อนร่วมงานวิจัยที่คอยให้คำปรึกษา แก้ปัญหา และคอยช่วยเหลือ กันในทุกด้านจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ โครงการพัฒนาส่งเสริมผู้มีความรู้ความสามารถทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (พสวท.) สำหรับการสนับสนุนทางด้านทุนการศึกษาจนสำเร็จการศึกษาระดับปริญญา โท

ขอขอบคุณบุคคลที่ข้าพเจ้าไม่ได้เอ่ยนามทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือคำแนะนำต่างๆ และ คอยให้กำลังใจเสมอมา

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา พี่ติพย์ และครอบครัวขยันกิจ สำหรับ โอกาส กำลังใจ ข้อคิดในการดำเนินชีวิต รวมทั้งการสนับสนุนในทุกๆด้าน ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

คุณค่าและคุณประโยชน์ที่ได้จากการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบแต่ผู้มีพระคุณ ทุกท่าน

นวพันธ์ ขยันกิจ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 การดำเนินงานวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	5
2.1 ทฤษฎีพื้นฐานของสารอินทรีย์.....	5
2.1.1 พันธะของสารอินทรีย์.....	5
2.1.1.1 ออร์บิทัลอะตอม.....	5
2.1.1.2 ออร์บิทัลโมเลกุล.....	6
2.1.1.3 ไฮบริดออร์บิทัล.....	8
2.2 สารกึ่งตัวนำอินทรีย์.....	10
2.2.1 สารอินทรีย์โมเลกุลขนาดเล็ก.....	12
2.2.2 สารคอนจูเกตพอลิเมอร์.....	13
2.3 ไดโอดเปล่งแสงสารอินทรีย์.....	14
2.3.1 กระบวนการทำงานของไดโอดเปล่งแสงสารอินทรีย์.....	15
2.3.1.1 การฉีดพาหะและการขนส่งพาหะใน OLED.....	17
2.3.1.2 การรวมตัวของพาหะและการปลดปล่อยแสง.....	22
2.3.1.3 การประมาณค่าประสิทธิภาพควอนตัมภายในและภายนอก.....	23
2.3.2 การออกแบบโครงสร้าง OLED แบบหลายชั้น.....	26

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.3 หน้าทีและตัวอย่างสารอินทรีย์ที่ใช้ใน OLED	28
2.3.3.1 แผ่นฐานรองรับ.....	29
2.3.3.2 ขั้วไฟฟ้าแอโนด	29
2.3.3.3 ชั้นฉนวนโฮล	29
2.3.3.4 ชั้นขนส่งโฮล	30
2.3.3.5 ชั้นเปล่งแสง	31
2.3.3.6 ชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน.....	31
2.3.3.7 ชั้นฉนวนโฮล.....	32
2.3.3.8 ขั้วไฟฟ้าแคโทด.....	32
2.4 ไดโอดเปล่งแสงไฮบริดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์.....	33
2.4.1 ไดโอดเปล่งแสงโครงสร้างไฮบริดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์.....	33
2.4.2 สนามไฟฟ้าในสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์.....	34
2.5 สมบัติสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ซิงค์ซีลีไนด์ (ZnSe).....	34
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	37
3.1 ระบบระเหยสารอินทรีย์.....	38
3.2 สมบัติสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่ใช้ในการสร้างไดโอดเปล่งแสงไฮบริด.....	43
3.2.1 สมบัติทางกายภาพของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ซิงค์ซีลีไนด์.....	43
3.2.2 สมบัติทางกายภาพของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ NPB	44
3.3 การเตรียมฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์บนฐานรองรับกระจกสไลด์	45
3.4 การทำความสะอาดฐานรองรับอินเดียมทินออกไซด์.....	46
3.5 การสร้างไดโอดเปล่งแสงไฮบริด โครงสร้าง ITO/NPB/ZnSe/Al.....	47
3.5.1 เงื่อนไขการเตรียมสารอินทรีย์และอนินทรีย์ด้วยอัตราการระเหยสาร ไม่คงที่.....	48
3.5.2 เงื่อนไขการเตรียมสารอินทรีย์และอนินทรีย์ด้วยอัตราการระเหยสาร คงที่.....	48
3.6 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดเปล่งแสงไฮบริด โครงสร้างITO/NPB/ZnSe/Al.....	51

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.7 การตรวจสอบสมบัติทางแสงของไดโอดเปล่งแสงไฮบริด โครงสร้าง ITO/NPB/ZnSe/Al.....	52
3.8 การตรวจสอบสเปกตรัมการเปล่งแสงด้วยไฟฟ้าของไดโอดเปล่งแสงไฮบริด โครงสร้าง ITO/NPB/ZnSe/Al.....	53
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล.....	54
4.1 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของไดโอดเปล่งแสงไฮบริด โครงสร้าง ITO/NPB/ZnSe/Al ที่สร้างโดยอัตราการระเหยสารไม่คงที่.....	54
4.1.1 ผลการวัดสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดที่ทำการ เปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นสารอินทรีย์ ZnSe โดยความหนา ชั้น NPB คงที่.....	54
4.1.2 ผลการวัดสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดที่ทำการ เปลี่ยนแปลงความหนาของชั้น สารอินทรีย์ NPB โดยความหนา ชั้น ZnSe คงที่.....	57
4.1.3 การเปล่งแสงย่านความยาวคลื่นสีน้ำเงินในไดโอดเปล่งแสงไฮบริด โครงสร้าง ITO/NPB/ZnSe/Al.....	59
4.2 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของไดโอดเปล่งแสงไฮบริด โครงสร้าง ITO/NPB/ZnSe/Al ที่สร้างโดยอัตราการระเหยสารคงที่.....	61
4.2.1 ผลการวัดสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดสารอินทรีย์ และสารอินทรีย์โครงสร้าง ITO/NPB/ZnSe/Al เมื่อทำการเปลี่ยน แปลงความหนาชั้น NPB และ ZnSe.....	62
4.2.2 ผลการวัดสมบัติทางแสงของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดสารอินทรีย์ และสารอินทรีย์โครงสร้าง ITO/NPB/ZnSe/Al เมื่อทำการเปลี่ยน แปลงความหนาของชั้น NPB และ ZnSe.....	64
4.2.3 ผลการวัดสเปกตรัมการเปล่งแสงด้วยไฟฟ้าของไดโอดเปล่งแสง ไฮบริดสารอินทรีย์และสารอินทรีย์โครงสร้าง ITO/NPB/ZnSe/Al.....	66
4.2.4 การเปล่งแสงย่านความยาวคลื่นสีน้ำเงินในไดโอดเปล่งแสงไฮบริด สารอินทรีย์และสารอินทรีย์โครงสร้าง ITO/NPB/ZnSe/Al.....	67
4.3 การประยุกต์สร้างไดโอดเปล่งแสงไฮบริดแบบคอตเทมทริกซ์.....	71

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	73
บรรณานุกรม.....	77
ประวัติเขียน	78

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงค่า Glass Transition Temperature T_g , ค่าระดับพลังงานของ HOMO และ LUMO, ค่า Mobility ของโฮลและอิเล็กตรอน ของสารแต่ละตัวที่ใช้ใน OLED.....	32
3.1 สมบัติของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ซิงค์ซีลีไนด์.....	43
3.2 สมบัติของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ NPB.....	44

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ลักษณะของออร์บิทัล 1s ที่มีลักษณะเป็นแบบทรงกลม.....	5
2.2 ออร์บิทัล 2p ที่ถูกแบ่งโดยระนาบแนบัพ คล้ายกับลูกตุ้มโดยทั้งสองด้านจะมีเฟสต่างกัน.....	6
2.3 ออร์บิทัล d ตามลักษณะของการกระจาย.....	6
2.4 ลักษณะการซ้อนทับของพันธะซิกมา.....	7
2.5 ระดับพลังงานของออร์บิทัล โมเลกุลเมื่อเกิดการซ้อนทับของพันธะซิกมา.....	7
2.6 ลักษณะการซ้อนทับของพันธะพาย.....	8
2.7 sp ออร์บิทัลแบบไฮบริด.....	8
2.8 sp ² ออร์บิทัลแบบไฮบริด.....	9
2.9 sp ³ ออร์บิทัลแบบไฮบริด.....	9
2.10 ตัวอย่างของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์.....	10
2.11 การกระจายของอิเล็กตรอน และการเกิด sp ² ออร์บิทัล ของคาร์บอนที่เป็นพันธะคู่.....	10
2.12 พันธะซิกมาในวงของเบนซีน และพันธะพายในวงของเบนซีน.....	11
2.13 ระดับพลังงานพันธะของอะตอมคาร์บอนกับอะตอมข้างเคียงภายในวงเบนซีน.....	12
2.14 สารกึ่งตัวนำอินทรีย์แบบโมเลกุลขนาดเล็ก (ก) TPD (ข) Alq ₃ (ค) DPVBi (ง) CuPc.....	13
2.15 สารกึ่งตัวนำอินทรีย์แบบคอนจูเกตพอลิเมอร์.....	13
2.16 โครงสร้างไดโอดเปล่งแสงสารอินทรีย์แบบต่างๆ (ก) แบบชั้นเดียว (ข) แบบสองชั้น (ค) แบบหลายชั้น.....	14
2.17 กระบวนการเกิดปรากฏการณ์การเปล่งแสงด้วยไฟฟ้าของ OLED.....	15
2.18 กระบวนการทำงานของ OLED (ก) แบบชั้นเดียว (ข) แบบสองชั้น.....	16
2.19 กลไกที่เป็นไปได้ในการฉีดกระแสที่บริเวณรอยต่อของสารอินทรีย์/ขั้วโลหะ (ก) การฉีดกระแสแบบ Schottky โดยทางความไม่บริสุทธิ์หรือความไม่เป็นระเบียบของ โครงสร้าง (ข) การฉีดกระแสแบบทะลุผ่าน Fowler-Nordheim tunneling เกิดภายใต้ สนามไฟฟ้าสูงประมาณ 10 ⁶ -10 ⁷ V/cm.....	20

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.20 (ก) แผนภาพของ SCLC ที่เกิดจากสนามไฟฟ้าภายนอก (V/d) บวกกับสนามไฟฟ้าภายใน (E_{int}) เหนี่ยวนำให้เกิดการฉีดของประจุพาหะที่มากขึ้นเป็นสิ่งสำคัญที่จะทำให้ได้ค่าความหนาแน่นกระแสสูง โดยสนามไฟฟ้าทั้งหมด $E_{total} = V/d + E_{int}$ มีอิทธิพลอย่างมากต่อการไหลของกระแส เมื่อให้สัญลักษณ์วงกลมเปิด (O) แทน exceed holes และวงกลมปิด (●) แทน exceed electrons (ข) กราฟเปรียบเทียบของความหนาแน่นกระแสกับความต่างศักย์ (J - V) ของ ohmic current ที่แสดงด้วยเส้นประ (---) และ SCLC ที่แสดงโดยเส้นทึบ (—) โดยกรอบสี่เหลี่ยมจะแสดงค่าของความหนาแน่นกระแสที่สามารถนำใช้งานได้.....	21
2.21 ความหนาแน่นกระแส (J) กับความต่างศักย์ (V) ที่ขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นสารอินทรีย์ (L).....	22
2.22 สถานะชิงเกรตและทริปเปตของเอกซิตอน.....	23
2.23 (ก) เอกซิตอนแบบชิงเกรตที่รวมตัวกันแล้วเกิดการเปล่งแสง (ข) เอกซิตอนแบบทริปเปตที่รวมตัวกันแล้วไม่เกิดการเปล่งแสง	23
2.24 แผนภาพกระบวนการพื้นฐานของการเปล่งแสงด้วยไฟฟ้าใน OLED	24
2.25 การไหลของกระแสในการฉีดและการขนส่งโฮลและอิเล็กตรอนในชั้นสารอินทรีย์ J_h และ J_e เป็นความหนาแน่นกระแสสุทธิของโฮลและอิเล็กตรอนตามลำดับ J_r คือส่วนประกอบของ recombination current density J_h' และ J_e' คือความหนาแน่นกระแสของโฮลและอิเล็กตรอนที่ไม่ได้เกิดการ recombination ตามลำดับ.....	25
2.26 (ก) สามโครงสร้างพื้นฐานของ OLED โครงสร้าง SH-H, SH-E และ DH เมื่อชั้น hole-transport layer (HTL), electron-transport layer (ETL) และ emitter layer (EML) (ข) โครงสร้างชั้นสูงของ OLED สามโครงสร้าง MH-1, MH-2 และ MH-3 โดยที่โครงสร้างสองชั้นของ HTL และ ETL มีผลต่อการปรับปรุงประสิทธิภาพของ OLED.....	27
2.27 ไดโอดเปล่งแสงสารอินทรีย์โครงสร้างแบบหลายชั้น.....	28
2.28 ระดับชั้นพลังงานของอุปกรณ์ไดโอดเปล่งแสงสารอินทรีย์แบบชั้นเดียว Φ_c คือฟังก์ชันงานของขั้วไฟฟ้าแคโทดและ Φ_a คือฟังก์ชันงานของขั้วไฟฟ้าแอโนด ΔE_h และ ΔE_e คือกำแพงของการฉีดโฮลและอิเล็กตรอนตามลำดับ E_g คือแถบช่องว่าง (Band gap) ระหว่าง HOMO และ LUMO	29
2.29 สารที่นิยมใช้เป็น Hole Injection Layer ใน OLED.....	30
2.30 โครงสร้างของ NPB และ TPD	30

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.31 โครงสร้างของ Alq ₃ , DPVBi, DCJTb, DCM2	31
2.32 โครงสร้างของ BAq.....	31
2.33 โครงสร้างการจัดเรียงตัวของสารกึ่งตัวนำซิงค์ซีลีไนด์.....	34
2.34 บริลลัน โชนของ โครงผลึกแบบซิงค์เบลน.....	35
2.35 โครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำซิงค์ซีลีไนด์.....	35
2.36 ช่วงการทะลุผ่านของแสงของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำซิงค์ซีลีไนด์.....	36
2.37 ช่วงการดูดกลืนของแสงของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำซิงค์ซีลีไนด์	36
3.1 ระบบระเหยสารอินทรีย์.....	38
3.2 ห้องสะอาดคลาส 10000.....	38
3.3 แผนภาพระบบสุญญากาศของระบบระเหยสารอินทรีย์.....	39
3.4 หัวระเหยสารอินทรีย์.....	40
3.5 ชุดควบคุมการระเหยสารของระบบระเหยสารอินทรีย์.....	40
3.6 อุปกรณ์ภายในห้องสุญญากาศสูง 1.....	41
3.7 ผลึกควอทซ์.....	41
3.8 เครื่องแสดงผลความหนาฟิล์มบาง.....	42
3.9 อุปกรณ์ภายในห้องสุญญากาศสูง 2.....	42
3.10 ผลึกสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ซิงค์ซีลีไนด์ (ZnSe).....	43
3.11 โครงสร้างสารอินทรีย์ NPB.....	44
3.12 ระบบ อาร์ เอฟ แมกนีตรอนสปัตเตอร์.....	45
3.13 (ก) สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำความสะอาดฐานรองรับ ITO (ข) ขั้นตอนการทำความสะอาดฐานรองรับ ITO.....	46
3.14 โครงสร้างไดโอดเปล่งแสงไฮบริด ITO/NPB/ZnSe/Al.....	47
3.15 สลวดลาย ITO บนฐานรองรับกระจก.....	47
3.16 หน้ากากสำหรับระเหยสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์.....	48
3.17 หน้ากากสำหรับระเหยขั้วโลหะอลูมิเนียม	49
3.18 ไดโอดเปล่งแสงไฮบริดที่สร้างเสร็จแล้วมีพื้นที่ 1 ตารางเซนติเมตร.....	50

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.19 ระบบตรวจวัดสมบัติทางไฟฟ้าที่ใช้ในการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ไหลผ่านไดโอดเปล่งแสงและความต่างศักย์ที่จ่ายให้กับตัวไดโอดเปล่งแสง (ก) KEITHLEY 228 voltage/current source (ข) KEITHLEY 195A digital multimeter (ค) โปรแกรมควบคุมการวัดสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดเปล่งแสง.....	51
3.20 ระบบตรวจวัดสมบัติทางแสงที่ใช้ในการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความสว่างของไดโอดเปล่งแสงและความต่างศักย์ที่จ่ายให้กับตัวไดโอดเปล่งแสง.....	52
3.21 โปรแกรมควบคุมการวัดสมบัติทางแสงของไดโอดเปล่งแสง.....	52
3.22 ระบบตรวจวัดสเปกตรัมการเปล่งแสงด้วยไฟฟ้าของไดโอดเปล่งแสงไฮบริด (ก) USB2000 Spectrofluorometer (ข) Software 00IBase32.....	53
4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดที่เปลี่ยนแปลงความหนาชั้น ZnSe เป็น 30 และ 50 nm โดยความหนาของชั้น NPB คงที่ 50 nm.....	55
4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดที่เปลี่ยนแปลงความหนาชั้น ZnSe เป็น 30, 50 และ 100 nm โดยความหนาของชั้น NPB คงที่ 100 nm.....	55
4.3 แผนภาพระดับพลังงานของไดโอดเปล่งแสงไฮบริด (ก) เมื่อเกิดจุดบกพร่องของผลึก ZnSe (ข) เมื่อทำการจ่ายความต่างศักย์ที่มีค่าน้อย (ค) เมื่อทำการจ่ายความต่างศักย์ที่มีค่ามาก.....	56
4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดที่เปลี่ยนแปลงความหนาชั้น NPB เป็น 50 และ 100 nm โดยความหนาของชั้น ZnSe คงที่ 30 nm.....	57
4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดที่เปลี่ยนแปลงความหนาชั้น NPB เป็น 50, 80 และ 100 nm โดยความหนาของชั้น ZnSe คงที่ 50 nm.....	58
4.6 การเปล่งแสงความยาวคลื่นช่วงสีน้ำเงินในไดโอดเปล่งแสงไฮบริดโครงสร้าง ITO/NPB(50nm)/ZnSe(30nm)/Al เมื่อทำการจ่ายความต่างศักย์ประมาณ 20 โวลต์.....	59
4.7 โครงสร้างแถบพลังงานของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดโครงสร้าง ITO/NPB/ZnSe/Al.....	60
4.8 อัตราการระเหยสารตลอดช่วงการเตรียมฟิล์มบาง ZnSe.....	62

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดที่เปลี่ยนแปลงความหนาชั้น ZnSe เป็น 15, 30 และ 50 nm โดยความหนาของชั้น NPB คงที่ 30 nm.....	63
4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดที่เปลี่ยนแปลงความหนาชั้น ZnSe เป็น 15, 30 และ 50 nm โดยความหนาของชั้น NPB คงที่ 50 nm.....	63
4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความส่องสว่างและความต่างศักย์ของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดที่เปลี่ยนแปลงความหนาชั้น ZnSe เป็น 15, 30 และ 50 nm โดยความหนาของชั้น NPB คงที่ 30 nm.....	65
4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความส่องสว่างและความต่างศักย์ของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดที่เปลี่ยนแปลงความหนาชั้น ZnSe เป็น 15, 30 และ 50 nm โดยความหนาของชั้น NPB คงที่ 50 nm.....	65
4.13 สเปกตรัมการเปล่งแสงด้วยไฟฟ้าของไดโอดเปล่งแสงไฮบริด โครงสร้าง ITO/NPB (50 nm)/ZnSe(30 nm)/Al ที่ทำการจ่ายความต่างศักย์ 16 โวลต์.....	67
4.14 แสงช่วงความยาวคลื่นสีน้ำเงินจากไดโอดเปล่งแสงไฮบริด โครงสร้าง ITO/NPB/ZnSe/Al ที่มีความหนาของชั้น NPB 50 nm และ ZnSe 30 nm (ก) เมื่อจ่ายความต่างศักย์ 12 โวลต์ (ข) เมื่อจ่ายความต่างศักย์ 16 โวลต์.....	68
4.15 (ก) แผนภาพแถบพลังงานของไดโอดเปล่งแสงไฮบริด โครงสร้าง ITO/NPB/ZnSe/Al (ข) การเปล่งแสงที่เกิดจากจุดบกพร่องของผลึก ZnSe (ค) การเปล่งแสงที่เกิดจากช่องว่างแถบพลังงานของผลึก ZnSe.....	68
4.16 สเปกตรัมการเรืองแสงของฟิล์มบาง ZnSe ที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงความยาวคลื่น 330 และ 350 นาโนเมตร	70
4.17 สเปกตรัมการเรืองแสงของฟิล์มบาง ZnSe ที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงความยาวคลื่น 330 และ 350 นาโนเมตร	71
4.18 ไดโอดเปล่งแสงไฮบริดแบบคอตเททริกซ์ขนาด 18x18 จุด โดยแต่ละจุดมีขนาด 500 ตารางไมโครเมตร (ก) ก่อนทำการจ่ายความต่างศักย์ (ข) ทำการจ่ายความต่างศักย์แล้วเดียว (ค) ทำการจ่ายความต่างศักย์ทุกจุด.....	72

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ไดโอดเปล่งแสงสารอินทรีย์ (Organic Light Emitting Diode ; OLED) เป็นอุปกรณ์เปล่งแสง (Light Emitting Device ; LEDs) ที่สร้างจากสารอินทรีย์ ทำงานโดยการให้ความต่างศักย์แก่ไดโอดจะเกิดการเปล่งแสงออกมาที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับชนิดของสารอินทรีย์ที่ใช้รวมทั้งโครงสร้างของไดโอดเปล่งแสง การตระหนักถึงความเป็นไปได้ที่จะนำสารอินทรีย์มาประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์เปล่งแสงเริ่มขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1963 เมื่อ Pope และคณะวิจัย[1] ได้ค้นพบการเปล่งแสงด้วยไฟฟ้า (Electroluminescence ; EL) จากผลึกสารอินทรีย์แอนทราซีน (Anthracene) ซึ่งในขณะนั้นความสว่างของการเปล่งแสงจากสารอินทรีย์ดังกล่าวมีค่าต่ำและสว่างอยู่เป็นเวลานาน หลังจากนั้นได้มีการศึกษาและพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านนี้อย่างต่อเนื่องจนกระทั่งในปี ค.ศ. 1987 สารอินทรีย์ได้ถูกนำมาใช้เป็นอุปกรณ์เปล่งแสงเป็นครั้งแรก เมื่อ C. W. Tang และ S. A. Van Slyke [2] สามารถสร้าง OLED ที่เปล่งแสงในช่วงความยาวคลื่นแสงสีเขียวจากสารอินทรีย์ tris(8-hydroxyquinoline)aluminum (Alq₃) โดย OLED ที่สร้างขึ้นเป็นโครงสร้างแบบหลายชั้น (hetero-structure) ซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหยสารในสุญญากาศ และพบว่า OLED ที่สร้างขึ้นมานี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นจอแสดงผลแบบบางได้ การค้นพบครั้งนี้เป็นจุดเริ่มต้นที่สำคัญของการวิจัยและพัฒนา OLED เพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงรวมทั้งสามารถนำมาใช้งานได้จริงในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่อไปในอนาคต

OLED ได้รับความสนใจอย่างมากจากนักวิจัย เนื่องจากมีศักยภาพสูงพอที่จะนำไปประยุกต์สร้างเป็นจอแสดงผลแบบแบนบาง (flat panel display) ด้วยเหตุนี้ทำให้มีทุนวิจัยจำนวนมากถูกนำไปใช้ในการวิจัยและพัฒนา OLED ทำให้เทคโนโลยีของ OLED พัฒนาไปอย่างรวดเร็วจนทำให้มีประสิทธิภาพเทียบเท่าอุปกรณ์เปล่งแสงสารอนินทรีย์ที่ใช้อยู่ทั่วไปในปัจจุบัน ซึ่งเมื่อพิจารณาเทียบกับจอแสดงผลที่พบในปัจจุบัน เช่น จอแสดงผลแบบหลอดรังสีแคโทด (Cathode Ray Tubes ; CRT) และจอแสดงผลแบบผลึกเหลว (Liquid Crystal Display ; LCD) พบว่าจอแสดงผลที่สร้างจาก OLED มีสมบัติพิเศษและมีข้อได้เปรียบในหลายๆ ด้าน เช่น

1. ด้านวัสดุที่ใช้ OLED สร้างจากสารอินทรีย์ที่สามารถสังเคราะห์ขึ้นได้จากห้องทดลอง ทำให้ต้นทุนด้านวัสดุมีราคาต่ำ รวมทั้งสามารถปรับปรุงโครงสร้างทางเคมีของสารเพื่อเปลี่ยนแปลงสมบัติของสารอินทรีย์ได้ง่ายและหลากหลาย นอกจากนี้สารอินทรีย์ส่วนมากสามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติ จึงไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม

2. ด้านการสร้างอุปกรณ์ OLED สามารถสร้างได้โดยใช้กระบวนการเช่น วิธีการระเหยสารด้วยความร้อน (thermal evaporation) วิธีการเคลือบด้วยการหมุน (spin coating) เป็นต้น ซึ่ง

เป็นกระบวนการที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อนราคาไม่แพง รวมทั้งสามารถเตรียมได้พร้อมกันเป็นจำนวนมาก ทำให้ต้นทุนของจอแสดงผลที่สร้างจาก OLED มีราคาต่ำ

3. ด้านการใช้งาน จอแสดงผลที่สร้างจาก OLED มีขนาดบาง น้ำหนักเบา มีความสว่างสูง มีความเร็วในการตอบสนองสูงเมื่อเทียบกับจอแสดงผลแบบ LCD สามารถแปลงแสงได้ด้วยตัวเองไม่จำเป็นต้องใช้แสงจากด้านหลังทำให้ประหยัดพลังงานรวมทั้งทำให้มีมุมมองที่กว้างกว่าจอแสดงผลแบบ LCD

4. ด้านการพัฒนา ข้อได้เปรียบประการสำคัญที่ทำให้ OLED ได้รับความสนใจอย่างมากคือ สามารถที่จะสร้างบนฐานรองรับที่สามารถโค้งงอได้ เช่น พลาสติก ทำให้นักวิจัยจำนวนมากเชื่อว่า OLED จะเป็นเทคโนโลยีที่สำคัญที่จะนำไปสู่ความสำเร็จในการสร้างจอแสดงผลแบบโค้งงอ (flexible panel display)

เนื่องจากข้อได้เปรียบต่างๆ ที่ได้กล่าวมาทำให้นักวิจัยและนักลงทุนคาดการณ์ว่า ในอนาคตอันใกล้จอแสดงผลที่สร้างจาก OLED จะเข้ามามีบทบาทสำคัญแทนจอแสดงผลที่มีอยู่ในปัจจุบัน

ในปัจจุบัน OLED ยังคงได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยงานวิจัยจะเน้นไปทางด้าน การปรับปรุงประสิทธิภาพการเปล่งแสงของ OLED ให้มีค่าสูงขึ้น จากการปรับปรุงโครงสร้างทางเคมีของสารอินทรีย์ และการออกแบบโครงสร้างแต่ละชั้นของตัวอุปกรณ์ ซึ่ง OLED ที่ดีควรจะทำงานได้ที่ความต่างศักย์ต่ำ และมีค่าประสิทธิภาพการส่องสว่างสูง ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของ OLED คือปริมาณพาหะที่ฉีดเข้าไปในชั้นสารอินทรีย์และความสามารถในการส่งผ่านพาหะในสารอินทรีย์ จึงมีความพยายามที่จะจำกัดการฉีดพาหะบวก โดยทำการกั้นพาหะบวกที่บริเวณรอยต่อของขั้วแอโนดกับสารอินทรีย์ หรือ ที่บริเวณระหว่างรอยต่อของสารอินทรีย์กับสารอินทรีย์ และ เพิ่มการฉีดพาหะลบ โดยทำการปรับปรุงขั้วแคโทดจากการเจือสารหรือเพิ่มชั้นต่างๆ

แม้ว่า OLED จะมีข้อดีอย่างมากดังที่กล่าวมา แต่ปัญหาหลักที่พบใน OLED ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ประสิทธิภาพของ OLED ลดลง ได้แก่ การขาดแคลนพาหะและความคล่องตัวของพาหะ เนื่องจากในสารอินทรีย์ส่วนใหญ่จำนวนและสภาพคล่องของโฮลมีมากกว่าอิเล็กตรอนทำให้เกิดความไม่สมดุลของพาหะและเป็นผลให้ประสิทธิภาพของ OLED มีค่าลดลง นอกจากนั้นความไม่เสถียรทางความร้อนและทางเคมีของสารอินทรีย์รวมถึงการเสื่อมสภาพของขั้วไฟฟ้าเนื่องจากความชื้น และออกซิเจนในอากาศก็มีผลโดยตรงต่อการลดลงของประสิทธิภาพของ OLED เช่นกัน ด้วยเหตุนี้วิธีการแก้ปัญหาหลายวิธีถูกเสนอขึ้น เช่น การห่อหุ้มโดยใช้สารพอลิเมอร์บางชนิดเพื่อป้องกันสารอินทรีย์จากความชื้นและออกซิเจน เป็นต้น หนึ่งในหลายวิธีที่ถูกเสนอขึ้นคือ การใช้โครงสร้างไฮบริดระหว่างสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ โดยเมื่อทำการพิจารณาถึงสมบัติที่สำคัญของสารอนินทรีย์ พบว่า สารอนินทรีย์มีจำนวนพาหะมากและมีสภาพคล่องของพาหะสูง ทั้งยังมีเสถียรภาพทางความร้อนและทางเคมีสูง จึงมีความเป็นไปได้ที่จะสร้าง

ไดโอดเปล่งแสงที่มีโครงสร้างไฮบริดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ เพื่อรวมข้อได้เปรียบของทั้งสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์เข้าด้วยกัน เพื่อให้ได้มาซึ่งอุปกรณ์เปล่งแสงที่มีประสิทธิภาพสูงต่อไปในอนาคต

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติทางแสงของไดโอดเปล่งแสงที่มีโครงสร้างแบบไฮบริดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นสารอินทรีย์ N,N'-Di(naphthalene-1-yl)-N,N'-diphenyl-benzidine (NPB) และสารอนินทรีย์ซิงค์ซีลีไนด์ (ZnSe) โดยทำการศึกษาที่อัตรากระแสเหยสารไม่คงที่ และ อัตรากระแสเหยสารคงที่ เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการสร้างไดโอดเปล่งแสงไฮบริดที่มีประสิทธิภาพสูง รวมทั้งนำข้อมูลที่ได้มาอธิบายเกี่ยวกับกลไกการเปล่งแสงของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาวิธีการปลูกฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำสารอินทรีย์โดยระบบระเหยสารอินทรีย์
- 1.2.2 ศึกษาวิธีการปลูกฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำสารอนินทรีย์โดยระบบระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ
- 1.2.3 ศึกษาการสร้างไดโอดเปล่งแสงไฮบริดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์โดยมีชั้นของสารอินทรีย์ NPB เป็นชั้นส่งผ่านโฮล และชั้นของสารอนินทรีย์ ZnSe เป็นชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน โดยทำการระเหยสารที่อัตรากระแสเหยคงที่ และ ไม่คงที่
- 1.2.4 ศึกษาการวัดและวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสที่ไหลผ่านไดโอดเปล่งแสงไฮบริดและค่าความต่างศักย์ที่ให้แกไดโอดเปล่งแสงไฮบริดเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้น NPB และ ZnSe ที่อัตรากระแสเหยสารคงที่ และ ไม่คงที่
- 1.2.5 ศึกษาการวัดและวิเคราะห์สมบัติทางแสงเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่องสว่างจากไดโอดเปล่งแสงและค่าความต่างศักย์ที่ให้แกไดโอดเปล่งแสงไฮบริดเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้น NPB และ ZnSe ที่อัตรากระแสเหยสารคงที่ และ ไม่คงที่
- 1.2.6 ศึกษาการวัดและวิเคราะห์สเปกตรัมอิเล็กโทโรลูมิเนสเซนซ์ของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่เตรียมโดยใช้อัตรากระแสเหยสารคงที่ และ ไม่คงที่เพื่ออธิบายกลไกการเปล่งแสงจากไดโอดเปล่งแสงจากโครงสร้าง

ITO/NPB/ZnSe/Al

1.3 การดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาไดโอดเปล่งแสงโครงสร้างไฮบริดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ โดยโครงสร้างที่ใช้ศึกษาเป็นโครงสร้างแบบสองชั้น ประกอบด้วยชั้นสารอินทรีย์ NPB ทำหน้าที่เป็นชั้นส่งผ่านโฮล เตรียมโดยระบบระเหยสารอินทรีย์ และชั้นสารอนินทรีย์ ZnSe เป็นชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนเตรียมโดยระบบระเหยสารด้วยความร้อน มีขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงอินเดียมทินออกไซด์ ความหนา 200 นาโนเมตร เตรียมโดยระบบอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอร์เป็นขั้วไฟฟ้าแอโนด และโลหะอลูมิเนียมความหนา 150 นาโนเมตร เตรียมโดยระบบระเหยสารด้วยความร้อนเป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด ทำการเตรียมสารชั้น NPB และ ZnSe ที่ความหนาต่างๆ ด้วยอัตราการระเหยคงที่และไม่คงที่ ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติทางแสงของไดโอดเปล่งแสงไฮบริด รวมทั้งศึกษากลไกการเปล่งแสงจากปรากฏการณ์การเปล่งแสงด้วยไฟฟ้า ผลลัพธ์จากการศึกษาสมบัติต่างๆของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดดังกล่าวมา จะนำมาวิเคราะห์เพื่ออธิบายถึงกลไกการทำงานรวมทั้งสามารถนำไปพัฒนาไดโอดเปล่งแสงไฮบริดให้มีประสิทธิภาพสูงยิ่งขึ้นต่อไปได้

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

- 1.4.1 ได้รับความรู้ เทคนิค และวิธีการในการระเหยสารกึ่งตัวนำอินทรีย์โดยระบบระเหยสารอินทรีย์
- 1.4.2 ได้รับความรู้ เทคนิค และวิธีการในการระเหยสารกึ่งตัวนำอนินทรีย์โดยระบบระเหยสารด้วยความร้อน
- 1.4.3 สามารถสร้างไดโอดเปล่งแสงไฮบริดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์โดยมีชั้นของสาร NPB เป็นชั้นส่งผ่านโฮล และ ชั้นของสาร ZnSe เป็นชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน โดยอัตราการระเหยสารมีค่าคงที่และไม่คงที่
- 1.4.4 สามารถวัดและวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสและค่าความต่างศักย์ของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ได้
- 1.4.5 สามารถวัดและวิเคราะห์สมบัติทางแสงเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่องสว่างและค่าความต่างศักย์ของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ได้
- 1.4.6 สามารถวิเคราะห์ผลจากสเปกตรัมอิเล็กโตรลูมิเนสเซนซ์เพื่ออธิบายกลไกการเปล่งแสงของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่ทำการศึกษาได้
- 1.4.7 สามารถวิเคราะห์ผลของการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดเมื่ออัตราการระเหยสารมีค่าคงที่และไม่คงที่
- 1.4.8 สามารถนำข้อมูลและเงื่อนไขที่ได้จากการศึกษาไปพัฒนาไดโอดเปล่งแสงไฮบริดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ให้มีประสิทธิภาพสูงยิ่งขึ้นต่อไป

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 ทฤษฎีพื้นฐานของสารอินทรีย์

สารอินทรีย์ คือ สารประกอบซึ่งประกอบขึ้นจากอะตอมของธาตุคาร์บอน (C) และ ไฮโดรเจน (H) เป็นองค์ประกอบสำคัญ มีลักษณะโครงสร้างได้หลายรูปแบบ โดยสมบัติของ สารอินทรีย์จะมีความแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับรูปแบบ โครงสร้างของสารอินทรีย์นั้น เนื่องจาก สารอินทรีย์สามารถสังเคราะห์ขึ้นได้ในห้องปฏิบัติการจึงทำให้สามารถปรับปรุงเปลี่ยนแปลง สมบัติของสาร ได้อย่างมากมายทำให้สามารถประยุกต์ใช้สารอินทรีย์ได้อย่างกว้างขวาง

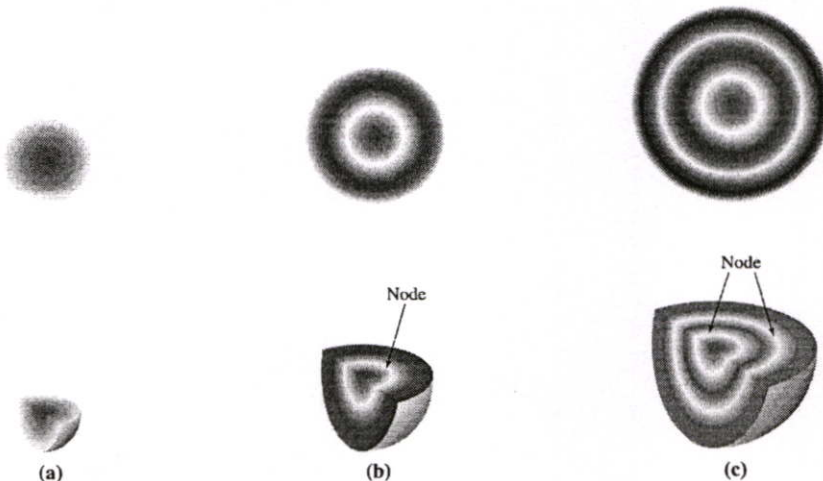
2.1.1 พันธะของสารอินทรีย์

2.1.1.1 ออร์บิทัลอะตอม (atomic orbital)

ออร์บิทัลอะตอม คือบริเวณที่มีโอกาสที่จะพบอิเล็กตรอนมากที่สุดรอบนิวเคลียส โดยมี ลักษณะเป็นฟังก์ชันคลื่น [3]

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

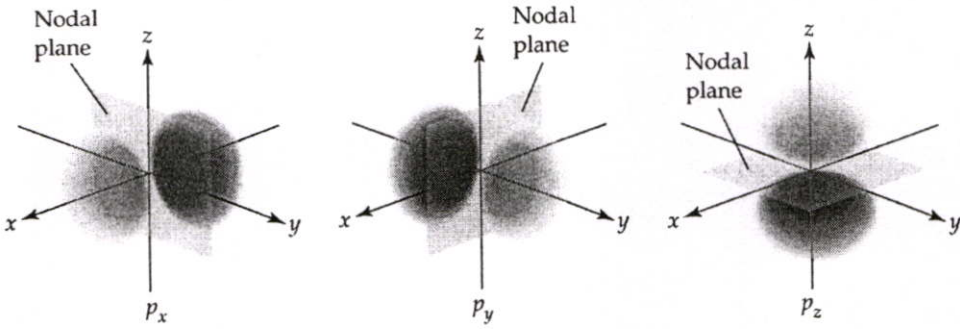
ในอะตอมที่มี s-ออร์บิทัล มากกว่าหนึ่งออร์บิทัล เช่นมีทั้ง 1s, 2s, 3s, ... ภายใน ทรงกลมบริเวณระหว่าง 1s กับ 2s หรือ 2s กับ 3s โอกาสที่จะพบอิเล็กตรอนบริเวณนี้จะมีค่า เท่ากับศูนย์เรียกบริเวณนี้ว่า โหนด (node) แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ลักษณะของออร์บิทัล 1s ที่มีลักษณะเป็นแบบทรงกลม

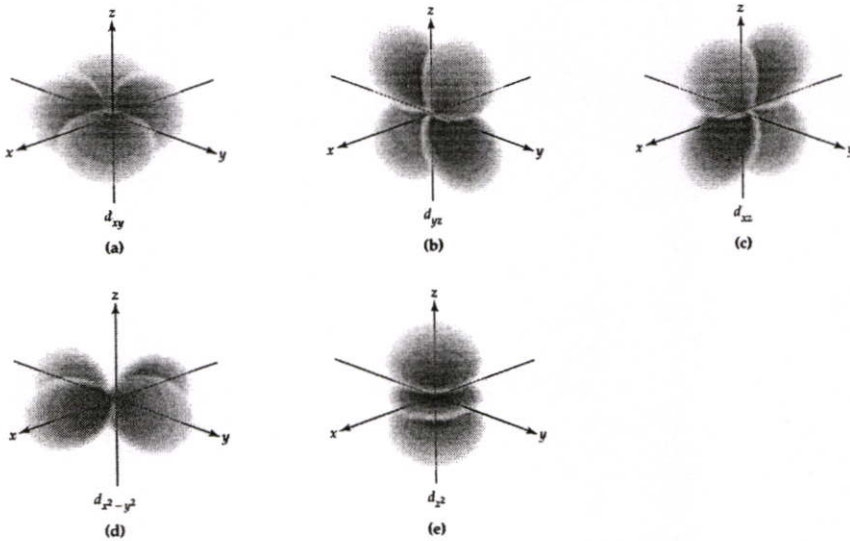
2. p-ออร์บิทัล มีเลขควอนตัมเชิงมุม $l = 1$ โอกาสที่จะพบอิเล็กตรอนใน p-ออร์บิทัล จะ ขึ้นกับระยะจากนิวเคลียสและทิศทาง มีค่าเลขควอนตัมแม่เหล็ก (magnetic quantum number) m_l

= +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 ออร์บิทัลโมเลกุล (Molecular Orbital)

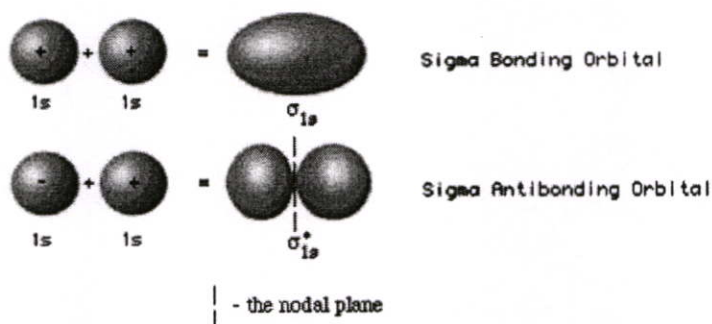
ตามทฤษฎีแล้ว โมเลกุลเกิดจากการเกิดอันตรกิริยาของออร์บิทัลอะตอมทำให้เกิดการซ้อนทับ หรือการผลัดกันระหว่างออร์บิทัลอะตอม ซึ่งลักษณะการเกิดอันตรกิริยาของออร์บิทัลอะตอมจะมี 2 ลักษณะ

1. ออร์บิทัลโมเลกุลที่สร้างพันธะ (bonding molecular orbital) เนื่องจากออร์บิทัลอะตอมมีสถานะที่ตรงกัน ทำให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนมีมากบริเวณนิวเคลียสของอะตอมทั้งสอง และทำให้เกิดเป็นพันธะระหว่างอะตอม

2. ออร์บิทัลโมเลกุลที่ด้านการสร้างพันธะ (antibonding molecular orbital) เนื่องจากออร์บิทัลอะตอมมีสถานะที่ตรงข้ามกัน ทำให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนจะกระจายอยู่นอกบริเวณนิวเคลียสของอะตอมทั้งสอง

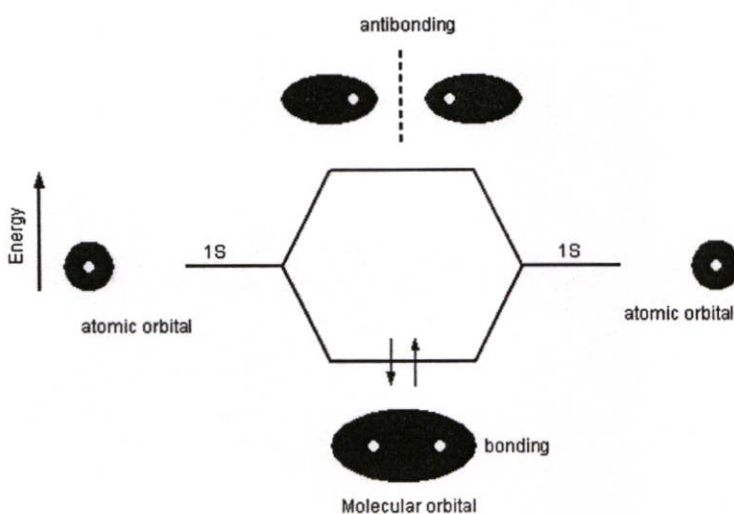
พันธะที่เกิดการซ้อนทับของออร์บิทัลโมเลกุล จะมี 2 ลักษณะคือ

1. พันธะซิกมา (σ -bond) เกิดจากการซ้อนทับลักษณะปลายชนปลาย หรือ หัวชนหัว (Head to head) โดยมีลักษณะการซ้อนทับและการผลัดกัน ดังรูปที่ 2.4



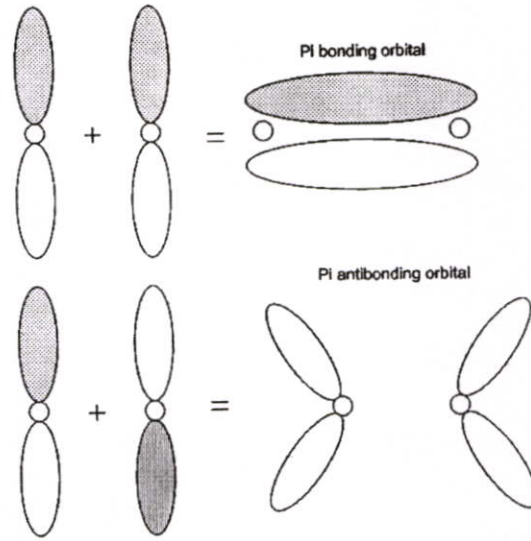
รูปที่ 2.4 ลักษณะการซ้อนทับของพันธะซิกมา

การรวมกันของออร์บิทัล s จะได้ออร์บิทัลโมเลกุลแบบซิกมาเท่านั้นและระดับพลังงานของออร์บิทัลที่สร้างพันธะจะต่ำกว่าระดับพลังงานของออร์บิทัลที่ด้านการสร้างพันธะและต่ำกว่าระดับพลังงานของออร์บิทัลอะตอมด้วยแสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ระดับพลังงานของออร์บิทัลโมเลกุลเมื่อเกิดการซ้อนทับของพันธะซิกมา

2. พันธะพาย (π -bond) เกิดจากการซ้อนทับด้านข้าง (side to side) ซึ่งเป็นการซ้อนทับและการผลัดกัน ระหว่างออร์บิทัล p_x กับ p_x หรือ p_z กับ p_z แสดงดังรูปที่ 2.6

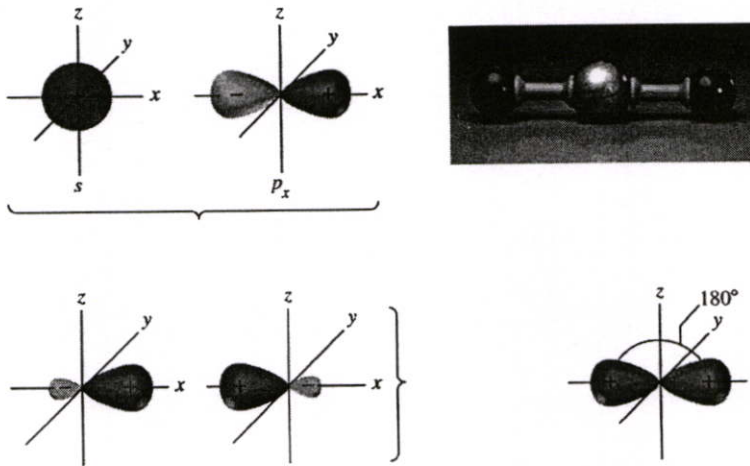


รูปที่ 2.6 ลักษณะการซ้อนทับของพันธะพาย

2.1.1.3 ไฮบริดออร์บิทัล (hybrid orbital)

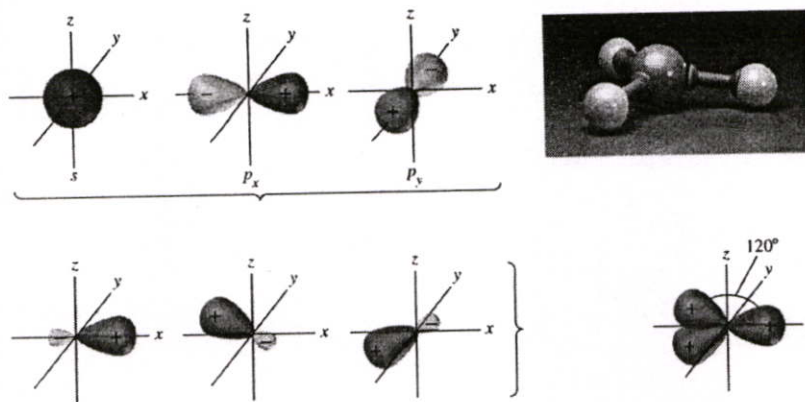
ไฮบริดออร์บิทัล เกิดจากการซ้อนทับกันระหว่างออร์บิทัลอะตอมต่างชนิดกันเช่น ออร์บิทัล s กับ ออร์บิทัล p

1. sp ไฮบริดออร์บิทัล เกิดจากการซ้อนทับระหว่างออร์บิทัล s 1 ออร์บิทัลกับออร์บิทัล p 1 ออร์บิทัล มีการจัดเรียงตัวเป็นแบบเชิงเส้น (linear bonding arrangement) แสดงดังรูปที่ 2.7

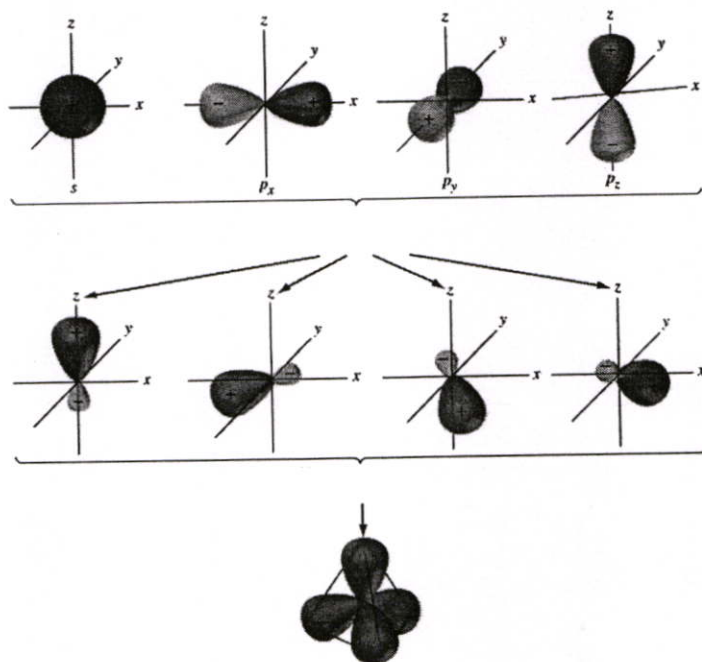


รูปที่ 2.7 sp ออร์บิทัลแบบไฮบริด

2. sp^2 ไฮบริดออร์บิทัล เกิดจากการซ้อนทับระหว่างออร์บิทัล s 1 ออร์บิทัลกับออร์บิทัล p 2 ออร์บิทัลมีการจัดเรียงตัวแบบไตรโกนอล (trigonal arrangement) แต่ละด้านจะทำมุมกัน 120° แสดงดังรูปที่ 2.8

รูปที่ 2.8 sp^2 ออร์บิทัลแบบไฮบริด

3. sp^3 ไฮบริดออร์บิทัลเกิดจากการซ้อนทับระหว่างออร์บิทัล s 1 ออร์บิทัลกับออร์บิทัล p 3 ออร์บิทัลมี การจัดเรียงตัวแบบเตตระฮีดรอล (tetrahedral arrangement) โดยแต่ละด้านทำมุมกัน 109.5° แสดงดังรูปที่ 2.9

รูปที่ 2.9 sp^3 ออร์บิทัลแบบไฮบริด

การเกิดไฮบริดไคเซชันในพันธะต่างๆจะประกอบด้วยพันธะซิกมาและพันธะพายดังนี้

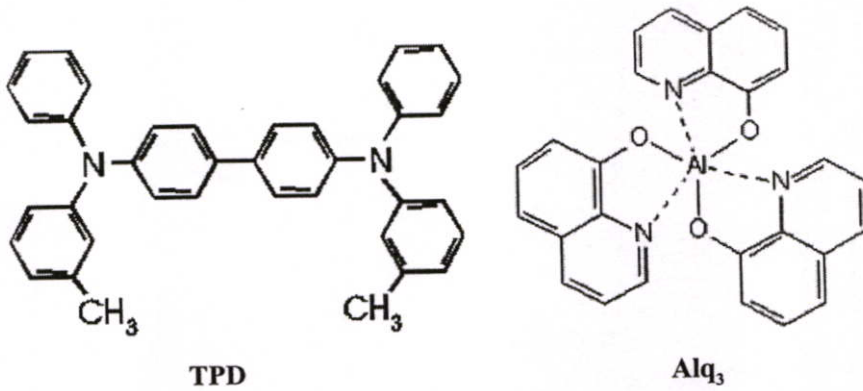
1. พันธะเดี่ยว (single bond) เป็นพันธะที่เกิดจากอะตอม 2 อะตอมที่ใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน 1 คู่ โดยออร์บิทัลมีการซ้อนทับกันแบบซิกมา ดังนั้น พันธะเดี่ยวบางครั้งเรียกว่าพันธะซิกมา

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

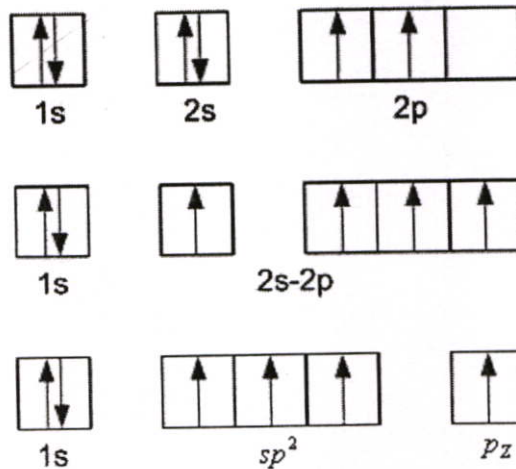
2.2 สารกึ่งตัวนำอินทรีย์ (organic semiconductor)

สารกึ่งตัวนำอินทรีย์เป็นสารอินทรีย์ที่มีสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงที่แตกต่างจากสารอินทรีย์ทั่วไป โดยเมื่อนำมาทำการทดลองและวิเคราะห์ทางฟิสิกส์จะพบว่า สารอินทรีย์ดังกล่าวมีระดับพลังงานคล้ายคลึงกับสารกึ่งตัวนำ คือ มีแถบพลังงานต้องห้าม (forbidden band) จึงเรียกดังกล่าวว่าเป็นสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ (organic semiconductor) โดยลักษณะโครงสร้างส่วนใหญ่ของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์จะมีลักษณะพันธะเป็นพันธะคู่สลับกับพันธะเดี่ยว เรียกโครงสร้างลักษณะนี้ว่า โครงสร้างแบบคอนจูเกต (conjugate structure) ดังรูปที่ 2.10



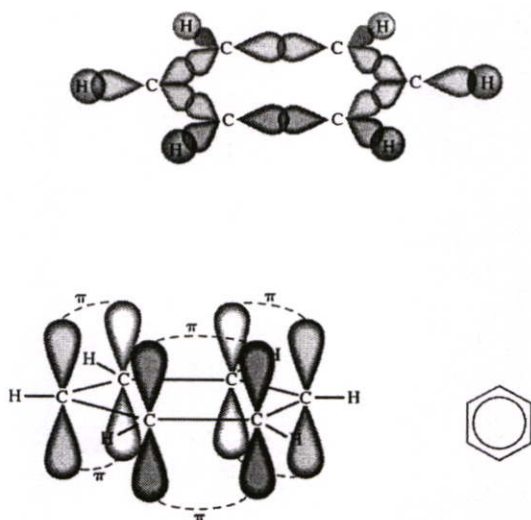
รูปที่ 2.10 ตัวอย่างของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์

สารกึ่งตัวนำอินทรีย์จะมีโครงสร้างพื้นฐานของอะตอมคาร์บอนซึ่งเป็นแบบ sp^2 ไฮบริดออร์บิทัล เมื่อพิจารณาพันธะของอะตอมคาร์บอนที่เป็นพันธะคู่ ภายในพันธะคู่จะประกอบด้วยพันธะซิกมา 1 คู่ พันธะพาย 1 คู่ ส่วนพันธะที่เหลือจะเป็นพันธะซิกมาทั้งหมดเนื่องจากเป็นพันธะเดี่ยวดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การกระจายของอิเล็กตรอน และการเกิด sp^2 ออร์บิทัล ของคาร์บอนที่เป็นพันธะคู่

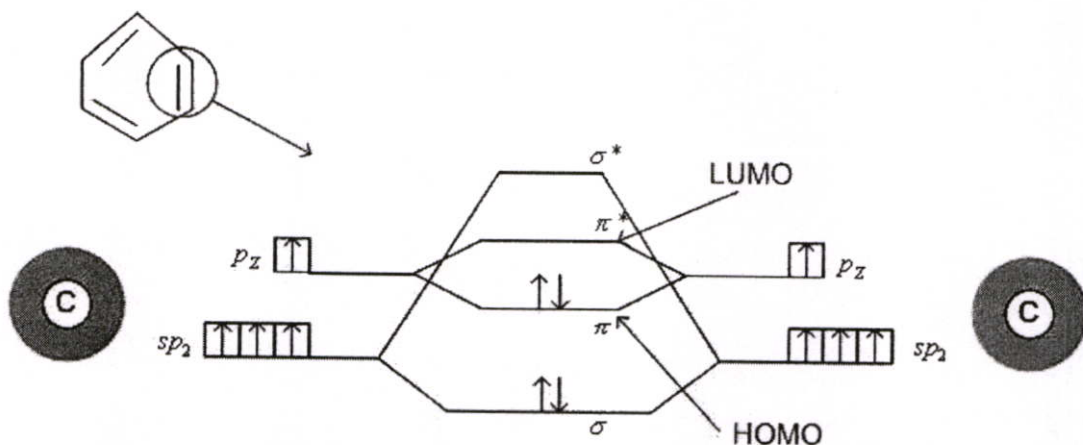
พิจารณาอะตอมของคาร์บอนที่ภายในวงของเบนซีน (benzene, C_6H_6) อะตอมของคาร์บอนเป็นแบบ sp^2 ไฮบริดออร์บิทัล มีพันธะเป็นแบบคู่สลับเดี่ยว ในแนวระนาบของวงเบนซีน จะมีระนาบของพันธะซิกมาซึ่งเกิดจากการสร้างพันธะระหว่างอะตอมของ คาร์บอนกับคาร์บอน และ อะตอมของ คาร์บอนกับ ไฮโดรเจน และภายในวงของเบนซีนส่วนที่เป็น p_z ออร์บิทัล จะเกิดเป็นพันธะพายที่เกิดจากพันธะคู่ระหว่างอะตอมของคาร์บอน 3 คู่ ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 พันธะซิกมาในวงของเบนซีน และพันธะพายในวงของเบนซีน

เมื่อพิจารณาถึงระดับพลังงานของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ ในลักษณะของโมเลกุลออร์บิทัล แล้วจะพบว่าลักษณะของการเกิดพันธะระหว่างพันธะคู่ของอะตอมคาร์บอน ส่วนที่เป็น sp^2 จะเป็นพันธะซิกมาที่มีความเสถียร ระดับพลังงานของออร์บิทัล โมเลกุลแบบสร้าง มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับ ไฮบริดออร์บิทัล และระดับพลังงานของออร์บิทัล โมเลกุลแบบด้านจะมีค่าสูงมาก เนื่องจากต้องใช้พลังงานที่มีค่ามากเพื่อที่จะทำลายพันธะซิกมา

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



รูปที่ 2.13 ระดับพลังงานพันธะของอะตอมคาร์บอนกับอะตอมข้างเคียงภายในวงเบนซีน

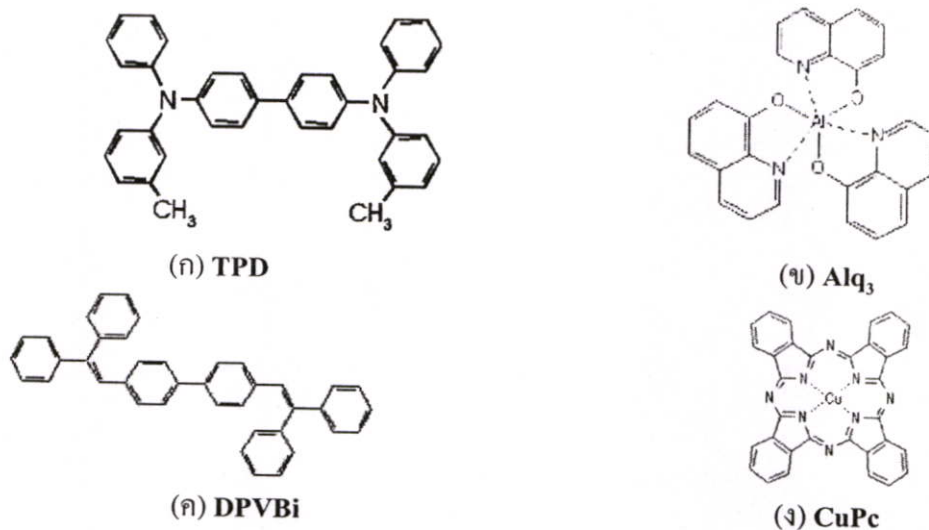
เมื่อพิจารณาจากทฤษฎีออร์บิทัลโมเลกุล (molecular orbital theory) ระดับพลังงาน ของอิเล็กตรอนใน p_z ออร์บิทัล ระดับพลังงานของออร์บิทัลโมเลกุลที่สร้าง (π bonding molecular orbital) จะเป็นระดับที่สูงที่สุดที่อิเล็กตรอนสามารถอาศัยอยู่ได้ จึงเรียกระดับพลังงานนี้ว่า highest occupied molecular orbital (HOMO) และ ที่ระดับพลังงานของออร์บิทัลโมเลกุลที่ด้านการสร้างพันธะ (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 (organic semiconductor) [4] ดังรูปที่ 2.13

2.2.1 สารอินทรีย์โมเลกุลขนาดเล็ก (small organic molecule)

เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีโครงสร้างเป็นแบบพันธะคู่สลับเดี่ยวต่อเนื่องกันเป็นโมเลกุล สารอินทรีย์โมเลกุลขนาดเล็กบางชนิดจะมีอะตอมของโลหะเจืออยู่ด้วย ดังรูปที่ 2.14 โดยสารแต่ละชนิดจะมีสมบัติที่แตกต่างกันออกไปตามหน้าที่ดังนี้

1. วัสดุนำพาอิเล็กตรอน (electron transport material) มีความสามารถในการขนส่งอิเล็กตรอนได้ดีและประพุดิตนคล้ายกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น
2. วัสดุนำพาโฮล (hole transport material) มีความสามารถในการขนส่งโฮลได้ดีและประพุดิตนคล้ายกับสารกึ่งตัวนำชนิดพี
3. วัสดุเปล่งแสง (emission material) เป็นวัสดุที่เปล่งแสงในช่วงของแสงสีที่ตาสามารถมองเห็นได้
4. วัสดุเจือ (dopant material) เมื่อทำการเจือสารเหล่านี้ลงไปวัสดุเปล่งแสง ทำให้แสงสีที่ออกมาสามารถเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม

สารบางชนิดสามารถทำหน้าที่ได้หลายแบบ เช่น สารกึ่งตัวนำอินทรีย์ Alq₃ มีสมบัติที่เป็น วัสดุนำพาอิเล็กตรอน และ วัสดุเปล่งแสง



รูปที่ 2.14 สารกึ่งตัวนำอินทรีย์แบบโมเลกุลขนาดเล็ก

(ก) TPD

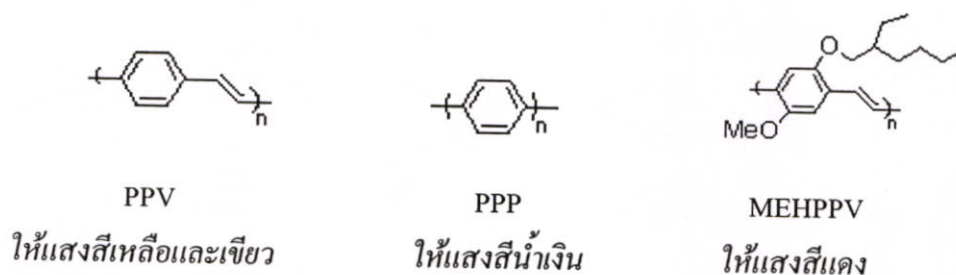
(ข) Alq₃

(ค) DPVBi

(ง) CuPc

2.2.2 สารคอนจูเกตพอลิเมอร์ (conjugated polymer)

สารคอนจูเกตพอลิเมอร์คือ สารอินทรีย์ซึ่งประกอบขึ้นจากหน่วยของมอนอเมอร์ (monomer) มาเรียงต่อเข้ากัน เป็นสายยาว โดยมีโครงสร้างเป็นแบบพันธะคู่สลับเดี่ยวเรียงต่อกัน หรืออาจจับกันเป็นวง ซึ่งการมีพันธะคู่สลับเดี่ยวจะทำให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ไปตามสายของพอลิเมอร์ได้ ตัวอย่างสารคอนจูเกตพอลิเมอร์แสดงดังรูปที่ 2.15

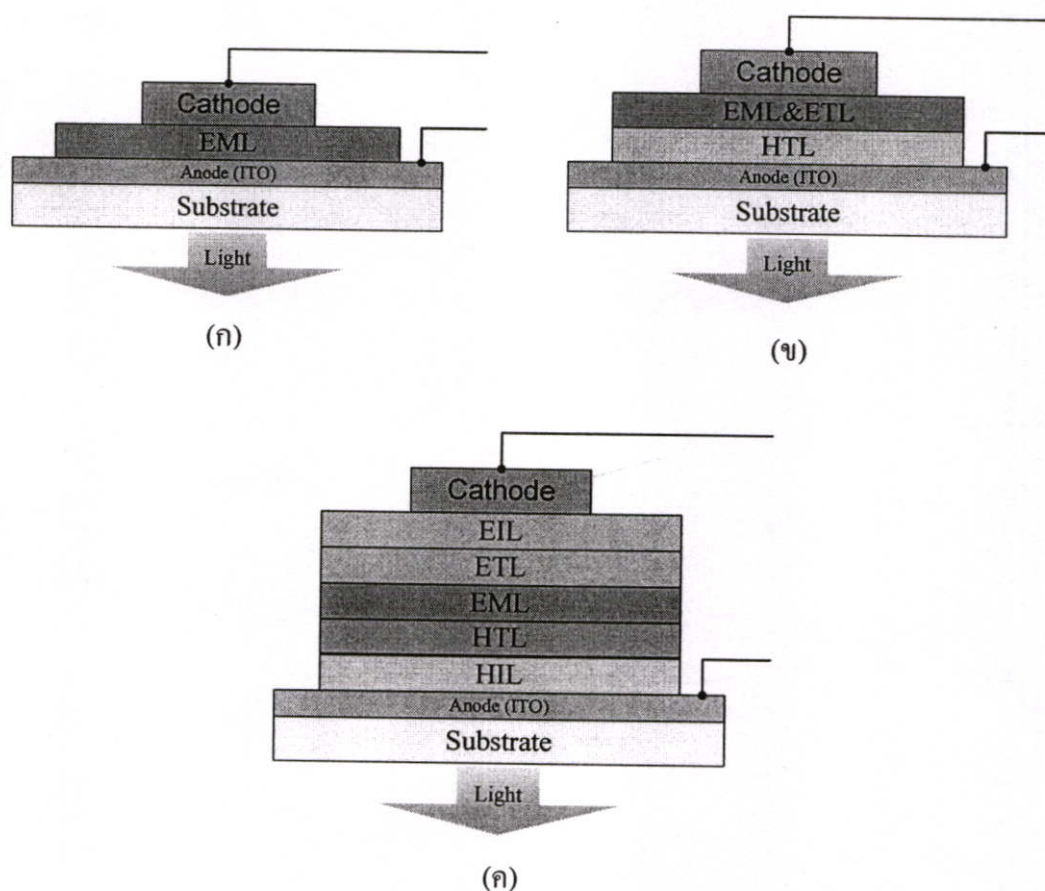


รูปที่ 2.15 สารกึ่งตัวนำอินทรีย์แบบคอนจูเกตพอลิเมอร์

2.3 ไดโอดเปล่งแสงสารอินทรีย์(Organic Light-Emitting Diode; OLED)

ไดโอดเปล่งแสงสารอินทรีย์ (OLED) เป็นอุปกรณ์เปล่งแสงที่สร้างจากฟิล์มบางสารอินทรีย์ที่ถูกประกบด้วยขั้วไฟฟ้า ทำงานโดยให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าแก่ไดโอดจะเกิดการเปล่งแสงออกมา ซึ่งความยาวคลื่นแสงที่เปล่งออกมาจะมีความสัมพันธ์กับชนิดของสารอินทรีย์ที่ใช้ และโครงสร้างของไดโอดเปล่งแสง โดยโครงสร้างพื้นฐานของ OLED คือ โครงสร้างแบบชั้นเดียวประกอบด้วยชั้นเปล่งแสง (Emitting Layer; EML) ดังแสดงในรูปที่ 2.16 (ก)

เพื่อทำการเพิ่มประสิทธิภาพของ OLED ให้มีค่าสูงขึ้นจึงได้มีการพัฒนาโครงสร้างเป็นแบบสองชั้นและแบบหลายชั้นดังแสดงในรูปที่ 2.16 (ข)-(ค) ตามลำดับ โดยชั้นที่ทำการเพิ่มเข้าไปได้แก่ ชั้นฉีดโฮล (Hole Injection Layer ; HIL), ชั้นส่งผ่านโฮล (Hole Transport Layer ; HTL), ชั้นฉีดอิเล็กตรอน (Electron Injection Layer ; EIL) และ ชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน (Electron Transport Layer ; ETL) [5] โดยรายละเอียดของแต่ละชั้นจะได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2.3.3



รูปที่ 2.16 โครงสร้างไดโอดเปล่งแสงสารอินทรีย์แบบต่างๆ

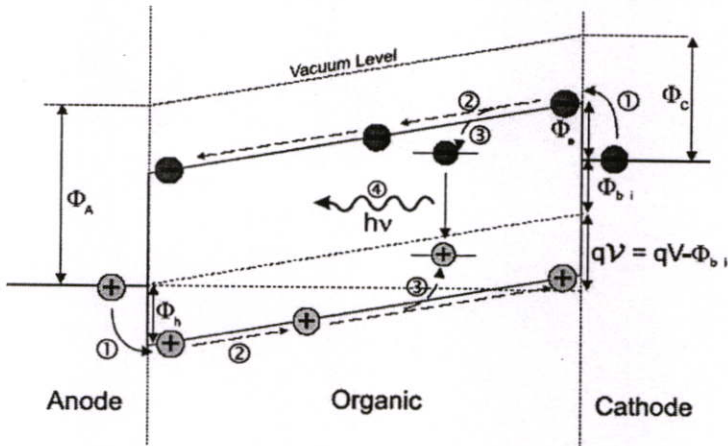
- (ก) แบบชั้นเดียว
- (ข) แบบสองชั้น
- (ค) แบบหลายชั้น

2.3.1 กระบวนการทำงานของไดโอดเปล่งแสงสารอินทรีย์

กระบวนการเปล่งแสงของ OLED เกิดจากปรากฏการณ์ที่เรียกว่า การเปล่งแสงด้วยไฟฟ้า (electroluminescence) ซึ่งเกิดเนื่องจากการทำการกระตุ้น OLED ด้วยไฟฟ้า เมื่อทำการพิจารณาแผนภาพระดับพลังงานของ OLED ที่มีโครงสร้างแบบชั้นเดียว กระบวนการทำงานของ OLED จะมีขั้นตอนหลักอยู่ 4 ขั้นตอน ได้แก่

1. การฉีดพาหะโฮลและอิเล็กตรอนจากขั้วไฟฟ้าเข้าสู่ชั้นสารอินทรีย์
2. การส่งผ่านโฮลและอิเล็กตรอนในชั้นสารอินทรีย์
3. การรวมตัวของพาหะโฮลและอิเล็กตรอนเกิดเป็นเอกซิตอน
4. การรวมตัวแบบปลดปล่อยแสงของเอกซิตอน

โดยขั้นตอนทั้ง 4 จะแสดงดังรูปที่ 2.17 [6]



รูปที่ 2.17 กระบวนการเกิดปรากฏการณ์การเปล่งแสงด้วยไฟฟ้าของ OLED

เมื่อให้ Φ_A คือ ฟังก์ชันงาน (work function) ของขั้วแอโนด

Φ_C คือ ฟังก์ชันงานของขั้วแคโทด

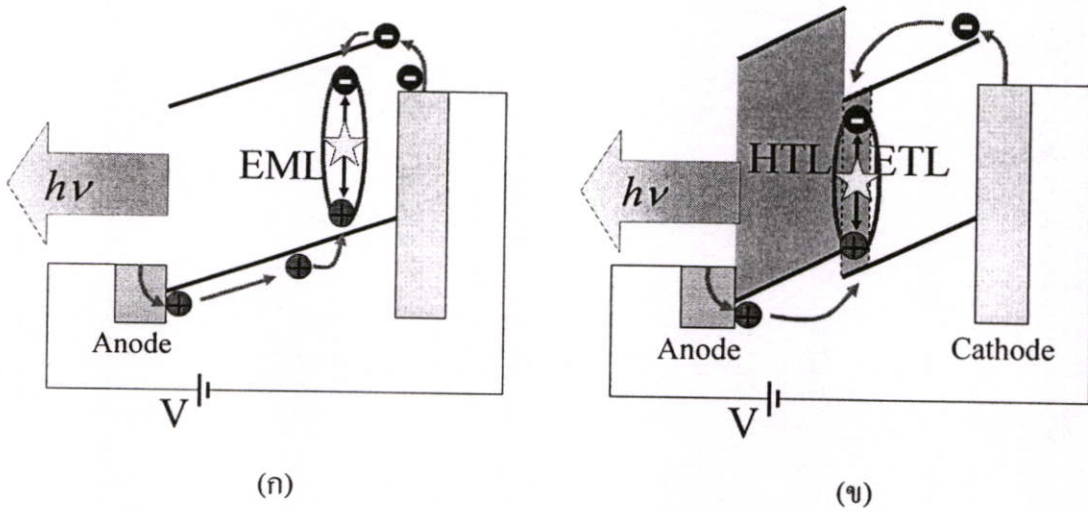
Φ_h คือ กำแพงศักย์การฉีดโฮล

Φ_e คือ กำแพงศักย์การฉีดอิเล็กตรอน

Φ_{bi} คือ built-in potential

เมื่อทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับ OLED จะทำให้โฮลและอิเล็กตรอนถูกฉีดจากขั้วไฟฟ้าเข้าสู่ชั้นสารอินทรีย์และเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในชั้นของสารอินทรีย์ เกิดการรวมตัวกันจากสถานะกระตุ้นและเกิดการปลดปล่อยแสงออกมา จากการศึกษา OLED โครงสร้างแบบชั้นเดียวพบว่า ประสิทธิภาพ รวมทั้งอายุการใช้งานมีค่าต่ำ จึงไม่สามารถนำมาใช้งานจริงได้ จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1987 C. W. Tang และ S. A. Van Slyke ได้ทำการทำการสร้าง OLED ที่มีโครงสร้างแบบหลายชั้นจากสารอินทรีย์ tris (8-hydroxyquinoline) aluminum (Alq_3) ที่สามารถเปล่งแสงในช่วงความยาว

คลื่นแสงสีเขียว โดย OLED ที่สร้างขึ้นมีประสิทธิภาพรวมทั้งอายุการใช้งานสูงกว่า OLED โครงสร้างแบบชั้นเดียว ซึ่งประสิทธิภาพที่สูงขึ้นสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 กระบวนการทำงานของไดโอดเปล่งแสงสารอินทรีย์

(ก) โครงสร้างแบบชั้นเดียว

(ข) โครงสร้างแบบสองชั้น

เมื่อทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับ OLED โครงสร้างแบบชั้นเดียวโฮลกับอิเล็กตรอนจะถูกฉีดจากขั้วไฟฟ้าเข้าไปยังชั้นของสารอินทรีย์และเกิดกระบวนการ 4 ขั้นตอนตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นแต่เนื่องจากสารอินทรีย์เกือบทั้งหมดจะมีสภาพคล่องทางไฟฟ้า (mobility) ของโฮลสูงกว่าอิเล็กตรอนประมาณ 10-100 เท่า ทำให้บริเวณที่เกิดการรวมตัวของโฮลและอิเล็กตรอนจะอยู่บริเวณใกล้ขั้วไฟฟ้าแคโทดดังแสดงในรูป 2.18(ก) ซึ่งทำให้โฮลมีโอกาสที่จะผ่านเข้าสู่ขั้วไฟฟ้าแคโทดโดยไม่เกิดการรวมตัวกับอิเล็กตรอนซึ่งทำให้จำนวนเอกซิตรอนที่จะเกิดการเปล่งแสงลดลง ด้วยเหตุนี้ทำให้ OLED โครงสร้างแบบชั้นเดียวมีประสิทธิภาพต่ำ แต่เมื่อทำการพัฒนาเป็น OLED โครงสร้างแบบสองชั้น ดังแสดงในรูป 2.18(ข) ซึ่งประกอบด้วยชั้นส่งผ่านโฮลและชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนซึ่งในรูป 2.18(ข) จะทำหน้าที่เป็นชั้นเปล่งแสงด้วย ที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้นทั้งสองจะเป็นตำแหน่งของการรวมตัวกันของคู่อิเล็กตรอน-โฮล (electron-hole pair) เกิดเป็นเอกซิตรอนและเกิดการปลดปล่อยแสงออกมา

เมื่อทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับ OLED โครงสร้างแบบสองชั้น จะเกิดกระบวนการทั้ง 4 ที่ได้กล่าวมาแล้วเช่นกัน การออกแบบโครงสร้างแบบสองชั้นทำให้เกิดรอยต่อแบบเฮเทโร (hetero junction) ซึ่งจะพบกำแพงศักย์บริเวณรอยต่อของชั้นส่งผ่านโฮล และชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนทำให้เกิดการกักพาหะขึ้นที่บริเวณรอยต่อทำให้มีโอกาสที่พาหะจะรวมตัวเกิดเป็นเอกซิตรอนที่บริเวณใกล้เคียงกับรอยต่อแทนที่จะไปรวมตัวที่บริเวณใกล้ขั้วไฟฟ้าเช่นเดียวกับที่เกิดใน OLED ที่มีโครงสร้างแบบชั้นเดียว เมื่อพิจารณาระดับพลังงานจากรูปที่ 2.18(ข) พบว่าระดับ

HOMO ของ HTL อยู่สูงกว่าระดับ HOMO ของชั้น ETL เล็กน้อย ทำให้โฮลสามารถเข้าไปในชั้น ETL ได้อย่างรวดเร็ว ในขณะที่เดียวกันระดับ LUMO ของชั้น ELT อยู่ต่ำกว่าระดับ LUMO ของชั้น HTL อย่างมากทำให้อิเล็กตรอนถูกจำกัดให้อยู่ในชั้น ETL เนื่องจากสภาพคล่องทางไฟฟ้าของ โฮลมีค่าต่ำในชั้น ETL จึงต้องสร้างให้ความหนาแน่นของโฮลมากขึ้นเพื่อทำให้ขบวนการจับกัน ของอิเล็กตรอนกับโฮลเกิดมากขึ้น นอกจากนั้นช่องว่างจากรอยต่อออกมาต้องมีระยะทางเพียงพอ เพื่อที่จะไม่เกิดการรวมตัวขึ้นที่บริเวณใกล้ผิวรอยต่อของขั้วโลหะทำให้ OLED โครงสร้างแบบ สองชั้นมีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบชั้นเดียว [7]

โครงสร้าง OLED สามารถปรับปรุงให้เป็น 3 ชั้นได้ โดยจะเพิ่มชั้น EML เข้าไปเพื่อให้ เป็นบริเวณที่จะเกิดการรวมตัวและเกิดการเปล่งแสงด้วยไฟฟ้า ซึ่งชั้น EML จะถูกแทรกอยู่ ระหว่างชั้น HTL กับ ETL โดยสารอินทรีย์ที่เหมาะสมจะนำมาใช้เป็นชั้น EML จะต้องมีความ กว้างช่องว่างแถบพลังงานที่สามารถปลดปล่อยแสงความยาวคลื่นที่ต้องการ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ชั้น ETL และ HTL ควรจะมีระดับพลังงานที่เหมาะสมและมีคุณสมบัติ ในการถ่ายเทประจุได้ดี [8] โดยความหนาที่เหมาะสมของชั้น EML ควรจะเป็นความหนาที่จะทำให้ ได้ความหนาแน่นของกระแสสูงที่สุดเมื่อทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้า เนื่องจากปริมาณแสงที่ ปลดปล่อยออกมาจาก OLED จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความหนาแน่นกระแสที่ไหลผ่านเข้าไป ในชั้น EML

ถึงแม้ว่า OLED ที่สร้างจากสารอินทรีย์จะมีกลไกการเปล่งแสงคล้ายกับ ไดโอดเปล่งแสง แบบรอยต่อพี-เอ็น (p-n junction LED) ที่สร้างจากสารอนินทรีย์ แต่ในรายละเอียดแล้ว LED กับ OLED มีความแตกต่างกันอย่างมากทั้งคุณสมบัติทางไฟฟ้าและคุณสมบัติทางแสง ดังนั้นการ เข้าใจถึงรูปแบบของการฉีดพาหะ, Space Charge Limited Current (SCLC) และ molecular exciton จึงเป็นกุญแจสำคัญที่จะทำให้เข้าใจกลไกของ OLED

2.3.1.1 การฉีดพาหะและการขนส่งพาหะใน OLED

การฉีดพาหะและการเคลื่อนที่ของพาหะใน OLED ได้มีการศึกษาอย่างละเอียดโดย Kalinowski [9] ซึ่งพบว่าสารอินทรีย์ส่วนมากที่สามารถเกิดการเปล่งแสงด้วยไฟฟ้าได้ทั้งหมดที่เป็น สารอินทรีย์โมเลกุลขนาดเล็กและคอนจูเกตพอลิเมอร์จะมีความนำไฟฟ้าต่ำ โดยสภาพคล่อง ทางไฟฟ้าของโฮล (hole mobility) ในสารเหล่านี้โดยทั่วไปมีค่าประมาณ $10^{-7} - 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ในขณะที่สภาพคล่องทางไฟฟ้าของอิเล็กตรอน (electron mobility) จะมีค่ามีค่าน้อยกว่าประมาณ 10-100 เท่า

การเคลื่อนที่ของพาหะในสารอินทรีย์มีความแตกต่างจากการเคลื่อนที่ของพาหะในสาร กึ่งตัวนำอนินทรีย์ โดยการเคลื่อนที่ของพาหะใน OLED จะพิจารณาเป็นการกระโดดของพาหะ ระหว่างสถานะ โลคัล (local state) ภายในสารอินทรีย์ ในขณะที่การฉีดพาหะจะมีลักษณะ เหมือนกับการกระโดดจากสถานะดีโลคัล (delocal state) ในโลหะ ไปสู่สถานะ โลคัลใน

สารอินทรีย์ ซึ่งอัตราการเคลื่อนที่จากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่งจะมีความสัมพันธ์กับความแตกต่างของพลังงานทั้งสองตำแหน่งและระยะห่างระหว่างตำแหน่งทั้งสอง โดยพาหะสามารถกระโดดไปสู่ตำแหน่งที่มีพลังงานสูงกว่าได้โดยการดูดกลืนโฟนอนที่มีพลังงานเหมาะสมซึ่งจะลดโอกาสของการเคลื่อนที่ของพาหะไปสู่สถานะโลคอลที่มีพลังงานสูงกว่า เมื่อพาหะได้รับพลังงานเพียงพอที่จะสามารถกระโดดได้ พาหะจะสามารถเคลื่อนที่ไปได้ระยะห่างค่าหนึ่งซึ่งเรียกว่า localization length โดยระดับพลังงานของการเคลื่อนที่แบบกระโดด ของโฮลและอิเล็กตรอนจะอยู่บริเวณรอบแถบพลังงาน HOMO และ LUMO โดยความกว้างของแถบพลังงานนี้สามารถพิจารณาได้จาก อันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลและระดับพลังงานของความไม่เป็นระเบียบของโมเลกุล

สารอินทรีย์ทั้งหมดที่ใช้ใน OLED มีคุณสมบัติเป็นฉนวนอยู่ภายใต้เงื่อนไขสนามไฟฟ้าต่ำ ($< 10^4$ V/cm) ตัวอย่างที่ได้มีการศึกษา เช่น ผลึกเดี่ยวของ anthracene มีความต้านทานอยู่ในระดับ 10^{20} Ω cm และเมื่อทำให้บริสุทธิ์ในสุญญากาศ (vacuum-sublimed) ฟิล์มบาง anthracene จะมีความต้านทานอยู่ในระดับ 10^{15} Ω cm นอกจากนี้ตัวอย่างของ π -conjugated polymer, poly(p-phenylene vinylene) (PPV) มีความต้านทานอยู่ในระดับ 10^{16} Ω cm ข้อมูลเหล่านี้เป็นผลลัพธ์ที่แสดงให้เห็นว่าความบริสุทธิ์ของสารอินทรีย์มีผลต่อสมบัติทางไฟฟ้า

อย่างไรก็ตามการจะทำให้ความหนาแน่นของกระแสที่ไหลผ่าน OLED มีค่าสูงมากกว่า 1 A/cm² ไม่ใช่เรื่องยาก ซึ่งเป็นความจริงที่ขัดแย้งกับความเข้าใจในพื้นฐานของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ ดังนั้นจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องเข้าใจว่าอะไรเป็นตัวควบคุมทฤษฎีของการเคลื่อนที่ของพาหะในสารกึ่งตัวนำอินทรีย์

ความเข้มของกระแสที่มีค่ามากสามารถพิจารณาได้จากการฉีดพาหะที่บริเวณรอยต่อระหว่างสารอินทรีย์กับขั้วไฟฟ้า และ SCLC โดยโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ของฟิล์มบางสารอินทรีย์จะอยู่บนพื้นฐานของ HOMO และ LUMO ของแต่ละโมเลกุลซึ่งจะเกิดอันตรกิริยาต่อกันด้วยแรง vander waals และเกิดการรวมตัวเป็น valence bands และ conduction bands นอกจากนี้ยังสามารถอธิบายโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ของฟิล์มบางสารอินทรีย์ได้อย่างชัดเจนโดยใช้ ionization potential (I_p), electron affinity (E_a), charge carrier density (n_h, n_e) และ mobilities (μ_h, μ_e) ของโฮลและอิเล็กตรอน โดยค่า I_p และ E_a จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการฉีดพาหะ และค่าของ charge carrier densities (n_h, n_e) และ mobilities (μ_h, μ_e) ของโฮลและอิเล็กตรอนจะมีความสัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ของพาหะ

เมื่อทำการพิจารณาถึง carrier density ภายในสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ซึ่งอยู่บนพื้นฐานของการเจือปนและความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างของฟิล์มบางซึ่งมีค่าต่ำมาก โดยทั่วไปจะอยู่ประมาณ 10^5 - 10^{10} cm⁻³ นอกจากนั้น mobility ของพาหะในสารกึ่งตัวนำอินทรีย์มีค่าต่ำประมาณ 10^{-3} - 10^{-7} cm²/Vs ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับ mobility ของพาหะในสารอนินทรีย์ซึ่งมีค่าประมาณ 1 - 10^3 cm²/Vs พบว่าตัวเลขที่ได้จะดูเหมือนจะเป็นอุปสรรคต่อการประยุกต์สร้างเป็นอุปกรณ์แต่

เมื่อพิจารณาถึงความหนาของฟิล์มที่ใช้มีค่าน้อยมากจะพบว่าเมื่อทำการจ่ายความต่างศักย์ 10 V ให้กับชั้นสารอินทรีย์หนา 100 nm ค่าสนามไฟฟ้าที่ได้จะมีค่าสูงถึง 10^6 V/cm² ทำให้มีทางเป็นไปได้ที่จะเหนี่ยวนำให้เกิดการฉีดพาหะและ SCLC ซึ่งจะนำไปสู่การประยุกต์สร้างอุปกรณ์จากสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ได้

กลไกการฉีดพาหะจากขั้วไฟฟ้าเข้าสู่ชั้นสารอินทรีย์มีความเป็นไปได้ สองกลไก ได้แก่ schottky thermal emission และ tunneling injection process โดยทั้งสองเป็นทฤษฎีพื้นฐานของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ โดย Schottky emission process สามารถอธิบายได้โดย

$$J = \frac{4\pi qmk}{h^3} T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_{Bn}}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1\right] \quad (2.1)$$

เมื่อ m คือ effective mass ของ electron(hole)

k คือ Boltzmann's constant

h คือ Planck's constant

T คือ temperature

q คือ elementary charge

Φ_{Bn} คือ barrier height

V คือ applied voltage

ตัวอย่างเช่นที่รอยต่อของ Alq₃/Mg ความสูงของกำแพงศักย์มีค่าประมาณ 1.0 eV เมื่อคิดจาก Schottky emission จะไม่สามารถเกิดความหนาแน่นกระแสที่มีค่าสูงได้เมื่อมีกำแพงศักย์สูงถึง 1 eV แต่เนื่องจากพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นของ OLED ทั่วไปที่พบมีค่าประมาณ 0.03 eV ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่กระบวนการฉีดพาหะจะเกิดจากการทะลุผ่านเข้าสู่สถานะ localize ซึ่งอาจเกิดจากโครงสร้างที่บกพร่องและสิ่งเจือปนในชั้นสารอินทรีย์ดังแสดงในรูปที่ 2.19(ก)

อีกกลไกหนึ่งที่มีความเป็นไปได้ในการอธิบายการฉีดพาหะ คือ Fowler-Nordheim tunneling injection ดังแสดงในรูปที่ 2.19(ข) สามารถอธิบายได้โดย

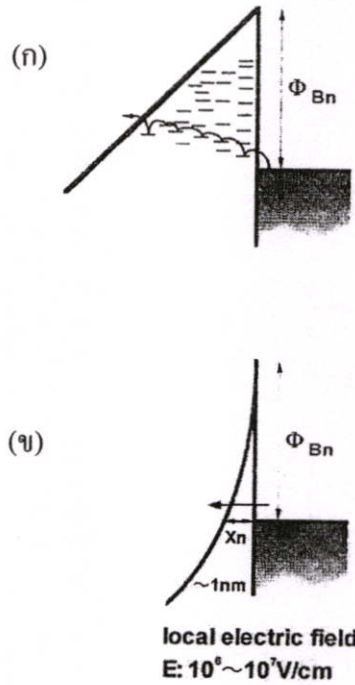
$$J = \left(\frac{q^3 V^2 m_0}{8\pi h \Phi_{Bn} m^*}\right) \exp\left(-\frac{4(2m^*)^{0.5} \Phi_{Bn}^{1.5}}{3\hbar q V}\right) \quad (2.2)$$

เมื่อ m_0 คือ free electron mass

m^* คือ effective mass

พื้นฐานของสมการนี้จะเกิดขึ้นเมื่อทำการจ่ายสนามไฟฟ้าจนมีค่าอยู่ในระดับ 10^6 V/cm โดยระยะทางการทะลุผ่านประมาณมากกว่า 10 nm ซึ่งค่าที่คำนวณได้นี้ไม่ได้เป็นค่าที่แท้จริง โดยคาดว่าจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ในกรณีที่สนามไฟฟ้าระหว่างชั้นของสารอินทรีย์กับ

ขั้วไฟฟ้ามีค่าสูงประมาณ 10^7 V/cm นอกจากนั้นในทางปฏิบัติกำแพงศักย์ควรจะมีค่าต่ำกว่าค่าประมาณถ้าต้องการใช้กลไก tunneling injection



รูปที่ 2.19 กลไกที่เป็นไปได้ในการฉีดกระแสที่บริเวณรอยต่อของสารอินทรีย์/ขั้วโลหะ

(ก) การฉีดกระแสแบบ Schottky โดยทางความไม่บริสุทธิ์หรือความไม่เป็นระเบียบของโครงสร้าง (ข) การฉีดกระแสแบบ Fowler-Nordheim tunneling เกิดภายใต้สนามไฟฟ้าสูงประมาณ 10^6 - 10^7 V/cm

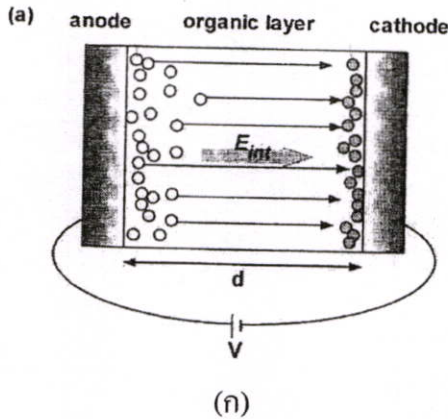
ต่อไปจะอธิบายเกี่ยวกับการส่งผ่านพาหะในฟิล์มบางสารอินทรีย์ เมื่อทำการจ่ายสนามไฟฟ้าที่มีค่าน้อยกว่า 10^4 V/cm ค่าความหนาแน่นกระแสที่ฉีด (injected current density ; n_{inj}) จะมีค่าน้อยกว่า ความหนาแน่นประจุภายใน (intrinsic charge density ; n_i) การไหลของกระแสสามารถอธิบายได้โดย Ohm's law เมื่อนำไปประยุกต์ใช้กับสนามไฟฟ้าที่มากกว่า 10^5 V/cm ค่าของ n_{inj} จะมีค่ามากกว่า n_i และเกิดการ injected charge carriers จาก space charges ใกล้เคียงกับรอยต่อระหว่างสารอินทรีย์กับขั้วไฟฟ้าเนื่องจาก carrier mobility มีค่าต่ำแสดงในรูปที่ 2.20 ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากสนามไฟฟ้าภายนอกสามารถเปลี่ยนแปลงได้โดย space charge โดยความหนาแน่นของกระแส (J) ควบคุมได้โดย SCLC สามารถอธิบายได้โดย

$$J = \frac{9\epsilon\epsilon_0\mu V^2}{8L^3} \quad (2.3)$$

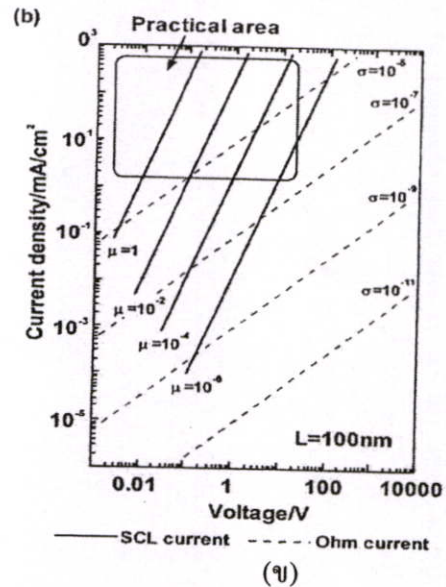
เมื่อ ϵ คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (relative dielectric constant)

ϵ_0 คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (dielectric constant)

L คือ ความหนาของชั้นสาร



(ก)



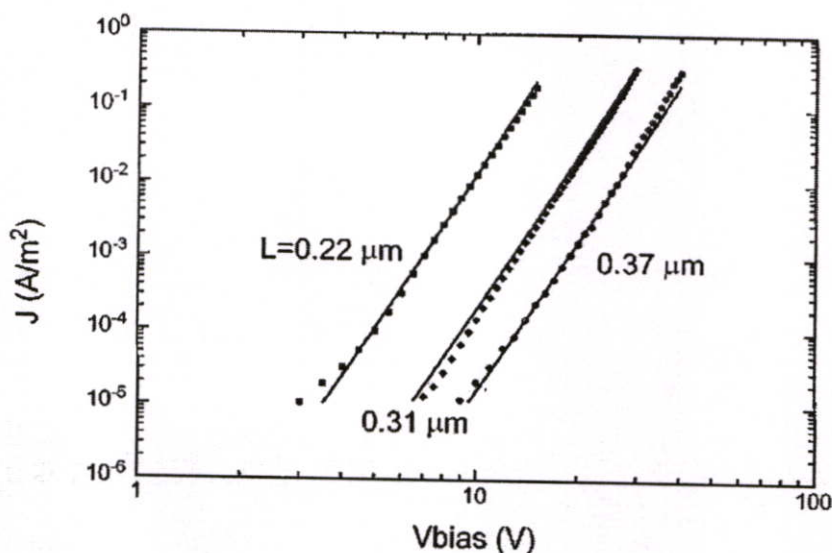
(ข)

รูปที่ 2.20 (ก) แผนภาพของ SCLC ที่เกิดจากสนามไฟฟ้าภายนอก (V/d) บวกกับสนามไฟฟ้าภายใน (E_{int}) เหนี่ยวนำให้เกิดการฉีดของประจุพาหะที่มากขึ้นเป็นสิ่งสำคัญที่จะทำให้ได้ค่าความหนาแน่นกระแสสูง โดยสนามไฟฟ้าทั้งหมด $E_{total} = V/d + E_{int}$ มีอิทธิพลอย่างมากต่อการไหลของกระแส เมื่อให้สัญลักษณ์วงกลมเปิด (O) แทน exceed holes และวงกลมปิด (●) แทน exceed electrons (ข) กราฟเปรียบเทียบของความหนาแน่นกระแสกับความต่างศักย์ (J-V) ของ ohmic current ที่แสดงด้วยเส้นประ (---) และ SCLC ที่แสดงโดยเส้นทึบ (—) โดยกรอบสี่เหลี่ยมจะแสดงค่าของความหนาแน่นกระแสที่สามารถนำใช้งานได้

ปรากฏการณ์นี้ไม่ได้อยู่ภายใต้ electrostatic equilibrium แต่อยู่ภายใต้ dynamic charge equilibrium เมื่ออุปกรณ์อยู่ภายใต้ขบวนการทำงาน ประจุทั้งหมดจะถูกสมมุติให้มี space charges และประจุไม่มีความเป็นกลางในฟิล์มสารอินทรีย์ ดังนั้นสามารถประมาณความเป็นไปได้ของ current density ในฟิล์มบางสารอินทรีย์ โดยการแทนค่า mobility $\mu = 1 - 10^{-6} \text{ cm}^2 / \text{Vs}$, sample thickness $L = 100 \text{ nm}$ และ applied voltage $V = 0.01 - 20 \text{ V}$ พบว่าทำให้ได้ความหนาแน่นกระแสที่มีค่าสูงมาก จากรูปที่ 2.20(ข) เปรียบเทียบระหว่าง ohmic current และ SCLC พบว่าสามารถทำให้ความหนาแน่นกระแสมีค่าตั้งแต่ 1 mA/cm^2 ถึง 1 A/cm^2 โดยใช้ความต่างศักย์เพียงแค่ 10 V ถ้าสภาพคล่องของพาหะมีค่ามากกว่า $10^{-4} \text{ cm}^2 / \text{Vs}$

อีกตัวอย่างหนึ่งที่ได้มีศึกษาการไหลของกระแสของโฮลและอิเล็กตรอนที่ขึ้นอยู่กับ SCLC คือ P. W. M. Blom และคณะ [10] ได้ทำการศึกษา OLED โครงสร้าง ITO/PPV/Au

แสดงผลของความหนาแน่นกระแส (J) กับความต่างศักย์ (V) ที่ขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นสารอินทรีย์ (L) ดังรูปที่ 2.21 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าความหนาแน่นกระแส (J) เปลี่ยนแปลงตามค่าความหนาของชั้นสารอินทรีย์ (L) ตามสมการที่ (2.3)



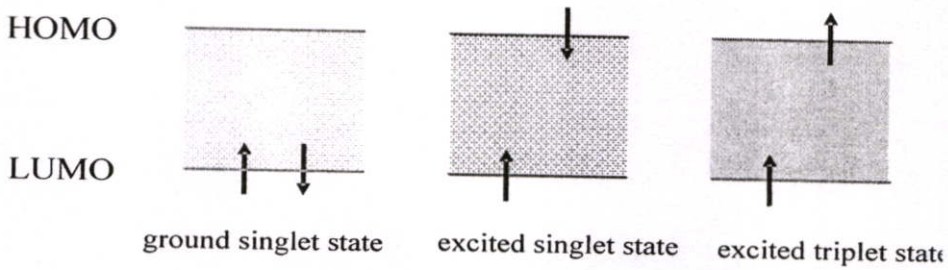
รูปที่ 2.21 ความหนาแน่นกระแส (J) กับความต่างศักย์ (V) ที่ขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นสารอินทรีย์ (L)

ถึงแม้ว่าฟิล์มบางสารอินทรีย์จะมีคุณสมบัติเป็นฉนวนแต่โดยการจ่ายความต่างศักย์ 10 V ให้กับฟิล์มบางสารอินทรีย์ที่มีความหนา 100 nm จะสามารถทำให้เกิดสนามไฟฟ้าประมาณ 10^6 V/cm ซึ่งมีค่าสูงพอที่ SCLC จะยอมให้เกิดการฉีดกระแสอย่างต่อเนื่องเข้าสู่ชั้นสารอินทรีย์ได้ ในทางปฏิบัติ มีผลทำให้ได้ความหนาแน่นกระแสตั้งแต่ 1 mA/cm^2 ถึง 1 A/cm^2 ทำให้สามารถนำฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ไปสร้างเป็นอุปกรณ์ได้

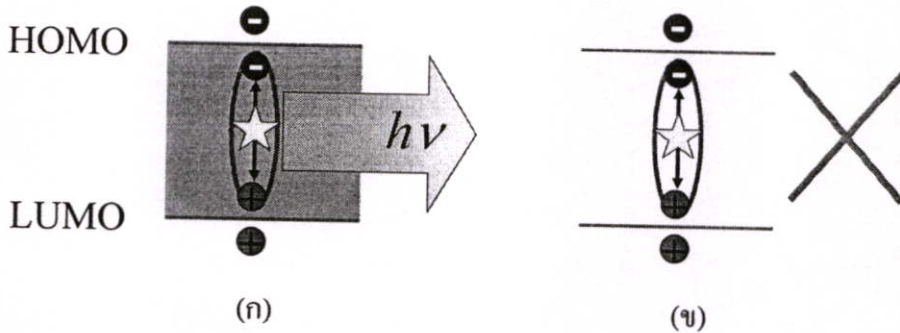
2.3.1.2 การรวมตัวของพาหะและการปลดปล่อยแสง

เมื่อโฮลและอิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากขั้วไฟฟ้ามายังบริเวณชั้นสารอินทรีย์เปล่งแสง จะเกิดการรวมตัวของคู่อิเล็กตรอนโฮลเกิดเป็นเอกซิตอนซึ่งสถานะของเอกซิตอนจะแบ่งได้ออกเป็น 2 แบบ คือ สถานะซิงเกรต (singlet state) และ สถานะทริปเปิร์ต (triplet state) แสดงดังรูป 2.22 ซึ่งโอกาสของการเกิดเอกซิตอนแบบซิงเกรตต่อแบบทริปเปิร์ตจะเป็น 1:3 สามารถเขียนดังสมการ

$$4(h + e) \rightarrow S + 3T \quad (2.4)$$



รูปที่ 2.22 สถานะซิงเกรตและทริปเปตของเอกซิตอน



รูปที่ 2.23 (ก) เอกซิตอนแบบซิงเกรตที่รวมตัวกันแล้วเกิดการเปล่งแสง

(ข) เอกซิตอนแบบทริปเปตที่รวมตัวกันแล้วไม่เกิดการเปล่งแสง

โดยเอกซิตอนที่เกิดการเปล่งแสงแบบฟลูออเรสเซนซ์ได้จะต้องเป็นเอกซิตอนแบบซิงเกรตเท่านั้น ในขณะที่เอกซิตอนแบบทริปเปตจะเกิดการรวมตัวแบบไม่ปลดปล่อยแสงซึ่งอาจเกิดในรูปของความร้อน หรือการสั่นของโมเลกุลแทน หรืออาจเกิดการรวมตัวเป็นซิงเกรตแล้วปลดปล่อยแสงแบบฟอสโฟเรสเซนซ์ (Phosphorescent) แสดงในรูป 2.23 โดยค่าของความยาวคลื่นแสงที่สามารถปลดปล่อยออกมาจากปรากฏการณ์การเปล่งแสงด้วยไฟฟ้าจะมีความสัมพันธ์กับความกว้างของช่องว่างแถบพลังงานของตัวสารที่เกิดการเปล่งแสงด้วยความสัมพันธ์

$$\lambda(nm) \approx \frac{1240}{E_g} \quad (2.5)$$

เมื่อ λ คือ ความยาวคลื่นแสงที่ปลดปล่อยมาจากสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ (นาโนเมตร)

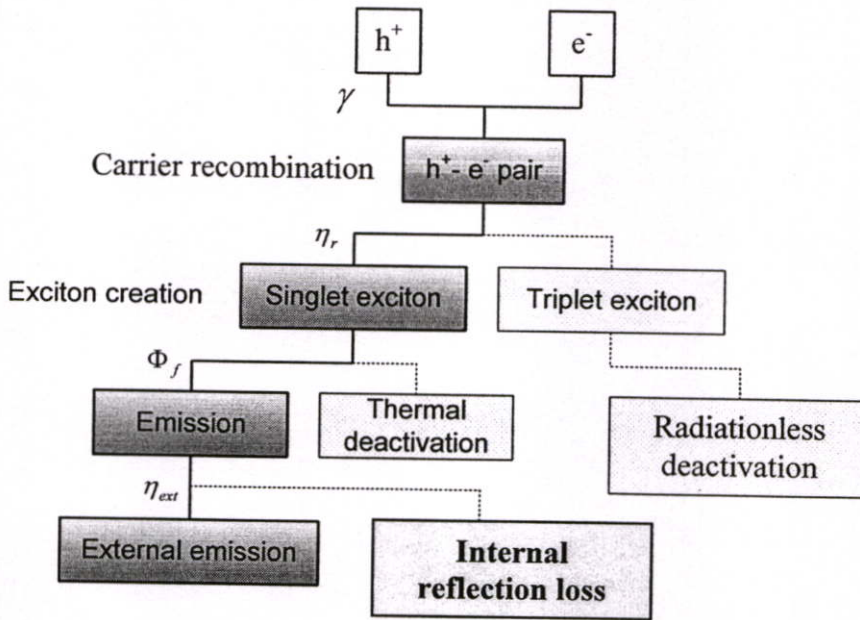
E_g คือ ความกว้างช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ (อิเล็กตรอน โวลต์)

2.3.1.3 การประมาณค่าประสิทธิภาพควอนตัมภายในและภายนอก

รูปที่ 2.24 แสดงกระบวนการพื้นฐานของการรวมตัวของพาหะเริ่มจากการรวมตัวกันของโฮลและอิเล็กตรอน และจบลงด้วยการที่มีแสงเปล่งออกมา โดยประสิทธิภาพภายในและประสิทธิภาพภายนอกนั้นเกี่ยวข้องกันด้วย factor η_{ext} ซึ่งสามารถประมาณได้โดยพิจารณาดัชนีหักเห (refractive index ; n) ของชั้นสารอินทรีย์เปล่งแสง ดังสมการ

$$\eta_{ext} = \frac{1}{2n^2} \quad (2.5)$$

เมื่อ n คือ ค่าดัชนีหักเหของชั้นสารอินทรีย์



รูปที่ 2.24 แผนภาพกระบวนการพื้นฐานของการเปล่งแสงด้วยไฟฟ้าใน OLED

เมื่อให้คำจำกัดความของ external EL quantum efficiency $\eta_\phi(ext)$ คือ เป็นอัตราส่วนของจำนวนของ emitter photons ที่ออกมาภายนอกอุปกรณ์ กับจำนวนของ charge carrier ที่ถูกฉีดเข้าไปในอุปกรณ์ สำหรับ internal EL quantum efficiency η_ϕ ให้คำจำกัดความเป็นอัตราส่วนของ photons ที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์กับจำนวนของ charge carrier ที่ถูกฉีดเข้าไปดังนั้น $\eta_\phi(ext)$ คือ

$$\eta_\phi(ext) = \eta_\phi \eta_{ext} \quad (2.6)$$

และ

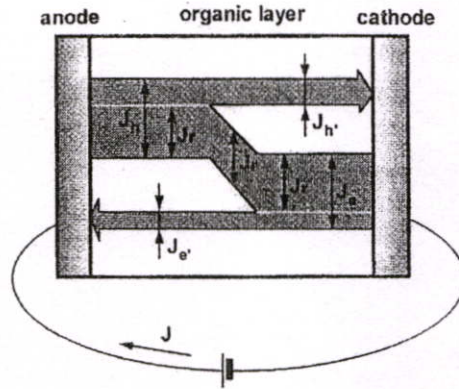
$$\eta_\phi = \gamma \eta_r \phi_f \quad (2.7)$$

- โดยให้
- η_ϕ คือ internal quantum efficiency
 - γ คือ charge-balance factory
 - η_r คือ efficiency ของ production for singlet excitons
 - ϕ_f คือ quantum efficiency ของ fluorescence

โดยให้คำจำกัดความของ charge-balance factory γ คือ

$$\gamma = \frac{J_r}{J} \quad (2.8)$$

โดยให้ J คือ circuit current และ J_r คือ recombination current แสดงในรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 การไหลของกระแสในการฉีดและการขนส่งโฮลและอิเล็กตรอนในชั้นสารอินทรีย์

J_h และ J_e เป็นความหนาแน่นกระแสสุทธิของโฮลและอิเล็กตรอนตามลำดับ J_r คือส่วนประกอบของ recombination current density $J_{h'}$ และ $J_{e'}$ คือความหนาแน่นกระแสของโฮลและอิเล็กตรอนที่ไม่ได้เกิดการ recombination ตามลำดับ [9]

จำนวนของโฮลและอิเล็กตรอนที่ถูกฉีดเข้ามาจากแอโนดและแคโทดให้เป็น J_h และ J_e ตามลำดับ จำนวนของโฮลที่ข้ามทะลุชั้นสารอินทรีย์โดยไม่มีการ recombination กับอิเล็กตรอน และจำนวนของอิเล็กตรอนที่ข้ามทะลุผ่านชั้นสารอินทรีย์โดยไม่มีการ recombination กับโฮลให้เป็น $J_{h'}$ และ $J_{e'}$ ตามลำดับ ดังนั้นกระแสในชั้นสารอินทรีย์จะสามารถเขียนได้ดังสมการ

$$J = J_h + J_{e'} = J_e + J_{h'} \quad (2.9)$$

และ

$$J_r = J_h - J_{h'} = J_e - J_{e'} \quad (2.10)$$

แม้ว่าจะไม่มีวิธีการวัดโดยตรงที่จะประมาณค่า J_r แต่สามารถอธิบายค่า J_r โดยอาศัยพื้นฐานการตรวจสอบบริเวณของ charge carrier recombination

ความสัมพันธ์ระหว่าง internal energy conversion efficiency (η_E) ซึ่งกำหนดโดยอัตราส่วนของ emitter light power และ input electric power (JV) กับ internal quantum efficiency มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\eta_E = \frac{\eta_\phi \epsilon_p}{eV} \quad (2.11)$$

เมื่อ ϵ_p คือ average photon energy of emitter light

V คือ applied voltage

ดังนั้น applied voltage จะเป็นเพียงตัวแสดงการเปลี่ยนแปลงของ energy conversion efficiency เท่านั้น

จากที่ได้ทำการพิจารณาถึงความสัมพันธ์ที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ทำให้ได้กุญแจที่สำคัญ 5 ประการ ซึ่งทำให้ OLED มีประสิทธิภาพสูงสุดดังนี้

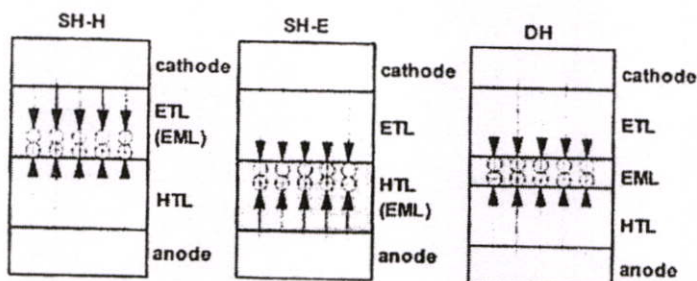
1. ทำให้ค่าของ charge-balance factor $\gamma = 1.0$
2. การทำโครงสร้างแบบ multilayer ทำให้ได้ค่า γ เข้าใกล้ 1.0 มากขึ้น
3. ค่าสูงสุดในการเกิดเอกซิตอนแบบซิงเกรตมีค่าประมาณ 25% หรือ 40% เมื่อทำการรวมการเกิดการสลายตัวของเอกซิตอนแบบทริปเปเรตสองตัวเกิดเป็นซิงเกรต ดังนั้นจึงควรใช้ประโยชน์จากทริปเปเรตเอกซิตอนด้วย
4. การใช้สาร fluorescent molecule ร่วมกันหรือทำการเจือกันจะทำให้ค่าของ quantum efficiency มีค่าสูง เนื่องจากโดยคุณสมบัติของ โมเลกุลจะมี concentration น้อย การเจือเพียงเล็กน้อยของจำนวนสารที่มี highly fluorescent molecule เข้าไปใน host organic layer จะทำให้ได้ประสิทธิภาพสูงขึ้น
5. ควรจะเลือกให้ barrier ในการฉีดพาหะระหว่างขั้วไฟฟ้ากับชั้นสารอินทรีย์มีค่าน้อย

2.3.2 การออกแบบโครงสร้าง OLED แบบหลายชั้น

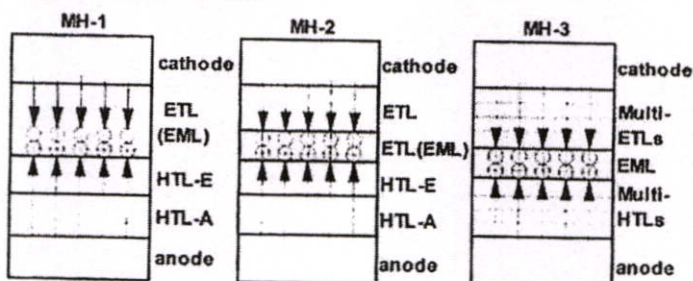
ที่ผ่านมามีการศึกษาด้านสารอินทรีย์โครงสร้างแบบหลายชั้นแสดงให้เห็นว่าสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพของอุปกรณ์ OLED ได้เป็นอย่างดี ความสำคัญส่วนใหญ่ของโครงสร้างแบบหลายชั้นที่ได้รับการยอมรับเนื่องจากสามารถกัก charge carriers ให้อยู่ภายในชั้นเปล่งแสงได้และทำให้เกิดความสมดุลของ carrier injection และ transport รูปที่ 2.26(ก) แสดงโครงสร้างพื้นฐานของ OLED ทั้ง 3 แบบ คือ Single Hetero-H structure (SH-H), Single Hetero-E structure (SH-E) และ Double Hetero structure (DH)

ในตอนแรกจะให้ความสำคัญกับการศึกษาโครงสร้างแบบพื้นฐานที่เป็นสารอินทรีย์สองชั้นก่อน ซึ่งประกอบไปด้วยชั้น HTL และ ETL โดยการเปล่งแสงจะสามารถเกิดได้จากทั้งสองชั้น ขึ้นกับระดับพลังงานที่รอยต่อของชั้น HTL และ ETL หลังจากนั้นก็ได้มีการปรับปรุงโครงสร้างของ OLED เพื่อให้ได้ค่าความสว่างและความทนทานของ OLED มีค่าสูงขึ้น โดยการปรับปรุงชั้นของสารอินทรีย์เป็นแบบ 4 หรือ 5 ชั้น สำหรับโครงสร้าง SH-H ถูกเสนอโดย Tang และ Vanslyke โดยจะมี carrier recombination เกิดขึ้นภายในชั้น ETL ซึ่ง ETL สามารถรับโฮลที่ฉีดเข้ามาจากชั้น HTL ได้ ดังนั้นชั้น ETL จะทำหน้าที่สองอย่างคือ เป็นชั้นเปล่งแสงและชั้นขนส่งอิเล็กตรอน ซึ่งในโครงสร้างแบบ SH-E ก็ทำหน้าที่คล้ายกันเพียงทำหน้าที่กลับกันเท่านั้น ซึ่ง HTL จะทำหน้าที่ได้สองอย่างคือเป็นทั้งชั้นเปล่งแสงและชั้นขนส่งโฮล และเมื่อทำการแยกชั้นเปล่งแสงออกจากชั้นอื่นก็จะกลายเป็นโครงสร้างแบบ DH

(ก) Basic cell structures



(ข) Advanced cell structures



รูปที่ 2.26 (ก) สามโครงสร้างพื้นฐานของ OLED โครงสร้าง SH-H, SH-E และ DH เมื่อชั้น HTL, ETL และ EML (ข) โครงสร้างชั้นสูงของ OLED สามโครงสร้าง MH-1, MH-2 และ MH-3 โดยที่โครงสร้างสองชั้นของ HTL และ ETL มีผลต่อการปรับปรุงประสิทธิภาพของ OLED [9]

ซึ่งคุณสมบัติที่สำคัญที่จำเป็นต้องให้ความสำคัญในการศึกษาโครงสร้างแบบหลายชั้น นอกจากจะให้เป็นชั้น HTL หรือ ETL แล้วยังใช้ทำหน้าที่ในการ block โสลหรืออิเล็กตรอน เพื่อให้เกิดการรวมตัวกันของพาหะที่มีประสิทธิภาพสูงยิ่งขึ้นใกล้บริเวณรอยต่อของ HTL/ETL โดยที่ recombination region ของโครงสร้างแบบหลายชั้นเป็นบริเวณที่มีค่าจำกัดเป็นบริเวณที่แคบมาก ๆ โดยทั่วไปน้อยกว่า 10 nm ใกล้บริเวณรอยต่อของ HTL/ETL จากการคาดคะเนการสะสมของโฮลหรืออิเล็กตรอนที่บริเวณรอยต่อจะช่วยให้เกิดความเป็นไปได้ที่จะเกิดการรวมตัวกันสูงขึ้นซึ่งตรงกันข้ามกับอุปกรณ์แบบชั้นเดียว recombination region จะกว้างกว่ามากกว่า 50-100 nm ทำให้การรวมตัวกันของพาหะเป็นไปได้น้อยกว่า

จากความสำคัญของโครงสร้างสารอินทรีย์แบบหลายชั้นที่ได้กล่าวไปแล้ว ทำให้สามารถรักษา molecular excitons จากการสลายเข้าไปในชั้นขั้วไฟฟ้าได้ ซึ่งถ้าบริเวณที่เกิด excited molecules ใกล้กับขั้วโลหะน้อยกว่า 20 nm จะไม่เกิดการเปล่งแสงขึ้นเนื่องจากพลังงานจะถูกถ่ายเทไปยังขั้วโลหะเกิดขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ดังนั้นความหนา 50-70 nm ของ HTL และ ETL จะสามารถป้องกันการสูญเสียพลังงานของ molecular excitons อย่างมีประสิทธิภาพ

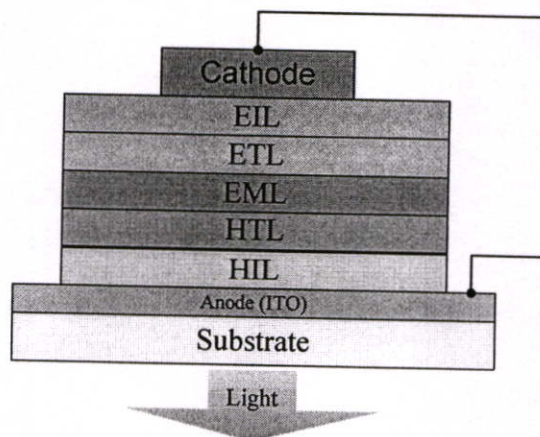
บนพื้นฐานของ 3 โครงสร้าง OLED พื้นฐานจะสามารถพัฒนาเป็นโครงสร้างแบบหลายชั้นได้ใหม่เป็น MH 1-3 ซึ่งโครงสร้างที่ได้มีการเสนอมาจะสามารถสรุปในรูปแบบที่ 2.26(ข) โครงสร้าง MH-1 และ MH-2 ได้มีการปรับเป็น double HTLs และ ETLs ซึ่งจุดประสงค์ของ double layers คือการแบ่งแยกการฉีดพาหะจากขั้วไฟฟ้าและการขนส่งพาหะ ซึ่งสรุปเป็นความต้องการหลักๆของ HTL ควรจะเป็นดังนี้

1. HTL ควรจะมี barrier น้อยๆ เพื่อที่การฉีดโฮลจากขั้วแอนโนดจะเป็นไปโดยง่ายเพื่อทำให้เกิด low injection barrier ระหว่างชั้นทั้งสอง I_p ของ HTL ควรจะเหมาะสมกับขั้วแอนโนดโดยทั่วไปจะใช้ ITO ซึ่งมี $I_p = 5.0 \text{ eV}$ HTL ควรจะมีค่าเหมือนกัน
2. HTL สามารถขนส่งโฮลด้วย low driving voltage มีค่า mobility ของโฮลสูงมากกว่า $10^{-3} \text{ cm}^2/\text{Vs}$ จะดีมาก
3. HTL ที่สามารถ block การทะลุผ่านเข้ามาของอิเล็กตรอนจาก ETL ได้ซึ่ง HTL ที่มี E_a น้อยๆเป็นที่ต้องการมาก
4. HTL ควรจะมี exciton energy มากกว่า ETL เพื่อที่จะป้องกันและต่อต้านการเคลื่อนที่ของ exciton ทำให้มีประสิทธิภาพในการเปล่งแสงมากขึ้น

บนพื้นฐานของความต้องการทั้งหมดทำให้ยอมรับได้อย่างง่ายว่าเป็นสิ่งที่ยากมากที่จะทำได้ทุกความต้องการใน HTL ชั้นเดียว โดยเฉพาะความต้องการในข้อ 1 มันไปด้วยกันไม่ได้กับความต้องการในข้อที่ 4 ซึ่งเป็นผลลัพธ์ในการสร้าง double HTLs ในลักษณะที่คล้ายกันทำให้ต้องใช้ double ETL เป็นสิ่งที่จำเป็นในการปรับปรุงประสิทธิภาพของ OLED [9]

2.3.3 หน้าทีและตัวอย่างสารอินทรีย์ที่ใช้ใน OLED

โดยจะอธิบายและยกตัวอย่างสารแต่ละชั้นของไดโอดเปล่งแสงสารอินทรีย์โครงสร้างแบบหลายชั้นดังรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 ไดโอดเปล่งแสงสารอินทรีย์โครงสร้างแบบหลายชั้น

2.3.3.1 แผ่นฐานรองรับ (Substrate)

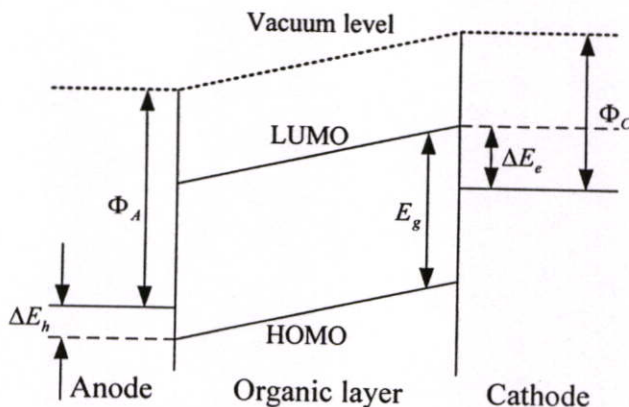
ทำหน้าที่เป็นชั้นสำหรับสร้างสารอินทรีย์ในชั้นต่างๆ ของ OLED และทำหน้าที่ป้องกันชั้นของสารอินทรีย์จากความชื้นและอากาศ ซึ่งเป็นผลทำให้ OLED เสื่อมสภาพลงได้วัสดุที่ใช้ทำจากกระจกหรือพลาสติก (ในกรณีที่จะทำจอแบบโค้งงอได้) ซึ่งจะต้องมีค่าความทะลุผ่านของแสงสูง ในกรณีที่จะทำให้ชั้นเปล่งแสงสารอินทรีย์เปล่งแสงทะลุผ่านแผ่นฐานรองรับออกมา แต่ในกรณีที่มีการเปล่งแสงออกมาจากด้านบนของแผ่นฐานรองรับอาจใช้ซิลิกอนสำหรับอุปกรณ์เปล่งแสงขนาดเล็ก

2.3.3.2 ขั้วไฟฟ้าแอโนด (Anode)

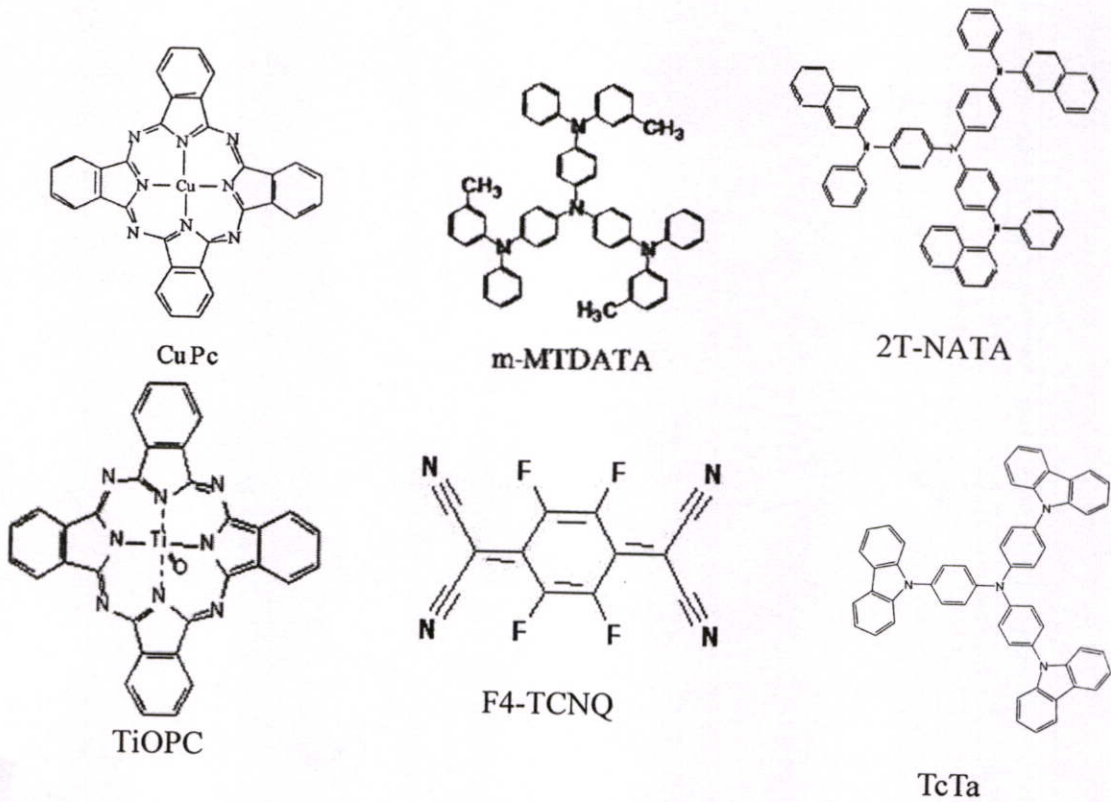
ทำหน้าที่จ่ายประจุบวกโฮลเข้าไปยังชั้นสารอินทรีย์ ซึ่งวัสดุที่จะนำมาใช้ทำขั้วไฟฟ้าแอโนดจะต้องมีคุณสมบัติที่สำคัญคือ มีฟังก์ชันงาน Φ_A สูงดังแสดงในรูปที่ 2.28 รวมทั้งจะต้องเป็นฟิล์มบางที่มีความโปร่งแสงสูงในย่านความยาวคลื่นแสงที่ตามองเห็น มีความต้านทานไฟฟ้าต่ำ นำไฟฟ้าได้ดี สารส่วนใหญ่ที่นิยมนำมาใช้ทำเป็นขั้วไฟฟ้าแอโนดของ OLED คือ ITO เพราะมีคุณสมบัติต่างๆ ดังกล่าวข้างต้น ซึ่งมีฟังก์ชันงาน $\Phi_A \sim 4.5$ eV และสามารถเพิ่มขึ้นไปได้มากถึง ~ 5.1 eV ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขที่ใช้ในการทำ

2.3.3.3 ชั้นฉีดโฮล (Hole Injection Layer ; HIL)

ทำหน้าที่ควบคุมการฉีดประจุบวกโฮล ที่บริเวณรอยต่อของขั้วไฟฟ้าแอโนดและขั้วการฉีดประจุบวกโฮลจากขั้วไฟฟ้าแอโนด โดยที่สารอินทรีย์ในชั้นนี้จะเป็นชนิด p-type ในชั้นนี้ประจุบวกโฮลจะมีสภาพคล่องสูงโดยสารที่ใช้ในชั้นนี้ที่พบแสดงดังรูปที่ 2.29



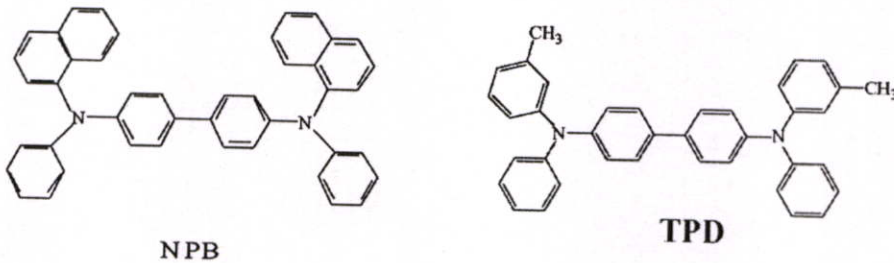
รูปที่ 2.28 ระดับชั้นพลังงานของอุปกรณ์โอดเปล่งแสงสารอินทรีย์แบบชั้นเดียว Φ_C คือฟังก์ชันงานของขั้วไฟฟ้าแคโทดและ Φ_A คือฟังก์ชันงานของขั้วไฟฟ้าแอโนด ΔE_h และ ΔE_e คือกำแพงของการฉีดโฮลและอิเล็กตรอนตามลำดับ E_g คือแถบช่องว่าง (Band gap) ระหว่าง HOMO และ LUMO



รูปที่ 2.29 สารที่นิยมใช้เป็น Hole Injection Layer ใน OLED

2.3.3.4 ชั้นขนส่งโฮล (Hole Transport Layer ; HTL)

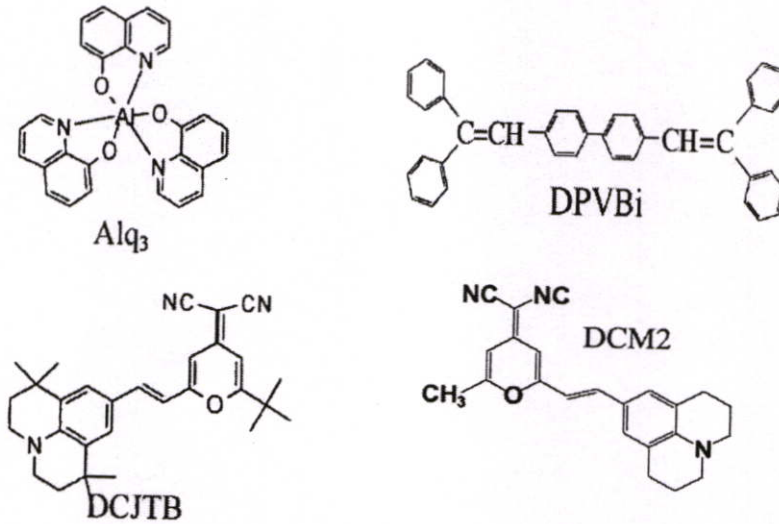
ทำหน้าที่ขนส่งประจุบวกโฮล เข้าไปยังบริเวณชั้นเปล่งแสง และยังช่วยกักประจุลบที่มาจากขั้วไฟฟ้าแคโทดไว้ให้อยู่ในบริเวณเปล่งแสงเป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเปล่งแสงของ OLED สารที่ใช้ในชั้น HTL จะมีสภาพคล่องตัวของประจุบวกโฮลสูง โดยสารอินทรีย์ที่ใช้ในชั้น HIL จะเป็นชนิด p-type โดยส่วนใหญ่จะใช้ N,N'-diphenyl-N,N'-bis(3-methylphenyl)-1,1'-biphenyl-4,4'-diamines (TPD) และ N,N'-di(naphthalen-1-yl)-N,N'-diphenyl-benzidine (NPB) ดังแสดงในรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.30 โครงสร้างของ NPB และ TPD

2.3.3.5 ชั้นเปล่งแสง (Emitting Layer ; EML)

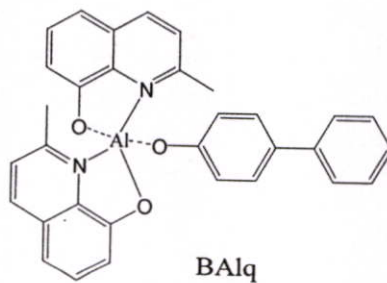
ทำหน้าที่เป็นชั้นเปล่งแสงเป็นชั้นที่เกิดการรวมตัวกันของอิเล็กตรอนกับโฮล เกิดการปลดปล่อยพลังงานแสงออกมาในชั้นนี้ และยังทำหน้าที่เป็นชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน ชั้นกักโฮลอีกด้วย ทำให้ประสิทธิภาพในการเปล่งแสงดีขึ้น โดยสารที่ใช้ในชั้นเปล่งแสงนี้จะเป็นตัวเปล่งแสงสีต่างๆ เช่น สีเขียวนิยมใช้ Alq₃ สีแดงเป็นสารเจือสีของ DCM2, DCJTb สีน้ำเงิน DPVBi โดยสูตรโมเลกุลของสารแสดงในรูปที่ 2.31



รูปที่ 2.31 โครงสร้างของ Alq₃, DPVBi, DCJTb, DCM2

2.3.3.6 ชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน (Electron Transport Layer ; ETL)

ทำหน้าที่ส่งผ่านประจุลบอิเล็กตรอนและยังช่วยกักประจุบวกโฮลที่มาจากขั้วไฟฟ้าแอโนดให้อยู่ในบริเวณเปล่งแสงด้วย โดยสารที่ใช้ในชั้น ETL จะเป็นสารอินทรีย์ชนิด n-type มีสภาพคล่องตัวของอิเล็กตรอนสูง สารที่ใช้ส่วนใหญ่จะเป็น Alq₃, BALq ดังแสดงในรูปที่ 2.32



รูปที่ 2.32 โครงสร้างของ BALq

2.3.3.7 ชั้นฉีดอิเล็กตรอน (Electron Injection Layer ; EIL)

ทำหน้าที่เป็นตัวช่วยฉีดอิเล็กตรอนจากขั้วแคโทดเข้าไปยังชั้น ETL โดยสารที่ใช้ในชั้น EIL จะเป็นสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ชนิด n-type มีค่าสภาพคล่องตัวของอิเล็กตรอนสูง มีค่าฟังก์ชันงานต่ำมาก สารส่วนใหญ่ที่ใช้เป็น LiF, Li, Sr,Sm

2.3.3.8 ชั้นขั้วไฟฟ้าแคโทด (Cathode)

ทำหน้าที่จ่ายประจุลบอิเล็กตรอนเข้าไปยังชั้นสารอินทรีย์ ซึ่งวัสดุที่จะนำมาใช้ทำขั้วแคโทดจะต้องมีค่าฟังก์ชันงาน Φ_C ต่ำ ดังรูปที่ 2.28 ส่วนใหญ่จะใช้ Aluminium (Al), Calcium (Ca) และ Magnesium (Mg): Silver (Ag) โดยจะใช้เป็นขั้วไฟฟ้าเพื่อป้องกันสารอินทรีย์จากการเกิดออกซิเดชัน และยังทำหน้าที่เป็นกระจกช่วยในการสะท้อนแสงในชั้นของสารอินทรีย์ออกมาอีกด้วย

โดยที่คุณสมบัติเฉพาะตัวของแต่ละสารที่ใช้ใน OLED เช่น ค่า Glass Transition Temperature T_g , ค่าระดับพลังงานของ HOMO และ LUMO, ค่า Mobility ของโฮลและอิเล็กตรอน แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงค่า Glass Transition Temperature T_g , ค่าระดับพลังงานของ HOMO และ LUMO, ค่า Mobility ของโฮลและอิเล็กตรอน ของสารแต่ละตัวที่ใช้ใน OLED [9]

Material	$T_g(^{\circ}C)$	HOMO (eV)	LUMO (eV)	$\mu_h(\text{cm}^2/V s)$	$\mu_e(\text{cm}^2/V s)$
CuPc		4.8 ^a	3.1 ^a	$\sim 10^{-3b}$	
m-MTDATA				$1.5 \times 10^{-5} - 1.5 \times 10^{-4c}$	$1.5 \times 10^{-7} - 1.5 \times 10^{-6c}$
TPD	65 ^d	5.6, ^{e,f} 5.1 ^g	2.5 ^{e,f}	$1-2 \times 10^{-3h}$	
NPB, NPD	95 ^d	5.6 ^g		3×10^{-4i}	
Alq ₃	> 170 ^d	5.9 ^{e,f} , 5.7 - 5.9 ^g	3.2 ^{e,f}	2×10^{-8j}	1.4×10^{-6j}
Rubrene		5.4 ^f	3.2 ^f		
DPVBi	64 ^k	5.9 ^l	2.8 ^l		
PVK		5.4, ^m 6.1 ^a	1.9 ^m , 1.2 ^a		
PPV		5.1 ⁿ	2.5 ⁿ		
2,5-Dialkoxy-PPV		4.9 - 5.1 ^o	2.5 - 2.8 ^o	5×10^{-7p} , $10^{-10} - 10^{-9q}$	
MEH-PPV		4.9 ^r	2.8 ^r	$5 \times 10^{-7} - 5 \times 10^{-6s}$	6×10^{-8}
m-LPPP		5.5 ^u	2.3 ^u	$2.3 \times 10^{-7} - 6 \times 10^{-6t}$	1.2×10^{-5t}
Polythiophenes		5.5 - 6 ^w	2 - 3.5 ^w	10^{-3v}	
PFO		5.8 ^t	2.1 ^t	$4 \times 10^{-4y} - 8 \times 10^{-3z}$	

2.4 ไดโอดเปล่งแสงไฮบริดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์

ในปัจจุบันไดโอดเปล่งแสงสารอินทรีย์จะได้รับความสนใจอย่างมากจากทั้งนักวิจัย และทางอุตสาหกรรม แต่อย่างไรก็ตามก็ยังมีปัญหาที่พบบ่อยใน OLED เช่น

- การขาดแคลนของพาหะ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอิเล็กตรอน
- สภาพคล่องของอิเล็กตรอนมีค่าต่ำในสารอินทรีย์
- การขาดเสถียรภาพทางความร้อนและทางเคมีของสารอินทรีย์
- การเสื่อมสภาพของขั้วไฟฟ้าต่อความชื้นและออกซิเจนในอากาศ

ซึ่งสาเหตุเหล่านี้มีผลกระทบโดยตรงต่อการลดลงของประสิทธิภาพ และ อายุการใช้งานของไดโอดเปล่งแสง งานวิจัยเกี่ยวกับป้องกันการเสื่อมสภาพของไดโอดเปล่งแสง เช่น การเจือสารเพื่อเพิ่มพาหะในสารอินทรีย์ การใช้ฟิล์มบางหรือพอลิเมอร์บางชนิดเพื่อมาป้องกันการเสื่อมสภาพของขั้วไฟฟ้า การจ่ายความต่างศักย์แบบกระแสสลับเพื่อยืดอายุการใช้งาน เป็นต้น หนึ่งในทางเลือกหนึ่งในการแก้ปัญหาที่พบในไดโอดเปล่งแสง คือ การใช้โครงสร้างแบบไฮบริดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ซึ่งจะได้เสนอในหัวข้อถัดไป

2.4.1 ไดโอดเปล่งแสงโครงสร้างไฮบริดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์

หนึ่งในทางเลือกในการแก้ปัญหา การเสื่อมสภาพในไดโอดเปล่งแสงสารอินทรีย์ คือ การนำเอาสารอนินทรีย์มาใช้ร่วมกับสารอินทรีย์ ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงจุดเด่นของสารกึ่งตัวนำอนินทรีย์ เช่น

- การมีจำนวนอิเล็กตรอนมาก และ สภาพคล่องของอิเล็กตรอนสูง
- การมีเสถียรภาพทางเคมีและความร้อนที่ดี
- การมีเสถียรภาพต่อความชื้นและออกซิเจนในอากาศ

จะเห็นได้ว่าสารอนินทรีย์มีคุณสมบัติที่จะสามารถทดแทนข้อด้อยของสารอินทรีย์ที่พบในไดโอดเปล่งแสงดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะเพิ่มประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของไดโอดเปล่งแสงสารอินทรีย์โดยการนำชั้นสารอนินทรีย์มารวมใน โครงสร้างร่วมกับชั้นสารอินทรีย์โดยให้สารอินทรีย์ทำหน้าที่เป็นตัวส่งผ่านโฮลเนื่องจากมีคุณสมบัติที่เกี่ยวกับโฮลที่ดี และสารอนินทรีย์เป็นตัวส่งผ่านด้านอิเล็กตรอนเนื่องจากมีสมบัติเกี่ยวกับอิเล็กตรอนที่ดี โดยไดโอดเปล่งแสงที่รวมเอาจุดเด่นของทั้งสารอินทรีย์ละสารอนินทรีย์เข้าด้วยกันเรียกว่า ไดโอดเปล่งแสงไฮบริดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์

นอกจากนี้การใช้สารอนินทรีย์ใน โครงสร้างจะมีส่วนช่วยทำให้การเสื่อมสภาพเนื่องจากความชื้นและออกซิเจนในอากาศที่มีผลต่อสารอินทรีย์น้อยลงเนื่องจากเสถียรภาพของสารอนินทรีย์ ซึ่งมีผลทำให้อายุการใช้งานของไดโอดเปล่งแสงมีค่าเพิ่มขึ้นอีกด้วย

2.4.2 สนามไฟฟ้าในสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์

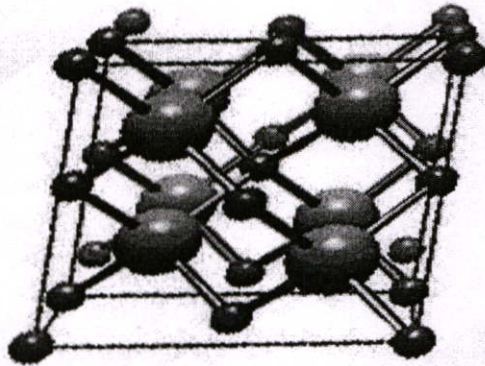
สนามไฟฟ้าในสารไดอิเล็กตริกจะมีความสัมพันธ์ขึ้นกับ ความหนาของชั้นสารและค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสาร เมื่อพิจารณาถึงระบบที่ประกอบด้วยสารไดอิเล็กตริกที่แตกต่างกันสองชนิดซึ่งมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่ต่างกันเป็น ϵ_i และ ϵ_p รวมทั้งมีความหนาที่ต่างกันเป็น d_i และ d_p โดยระบบถูกจ่ายความต่างศักย์มีค่าเท่ากับ V_{bias} จะพบว่าค่าสนามไฟฟ้าในแต่ละชั้นจะมีค่าไม่เท่ากันซึ่งสนามไฟฟ้าในเนื้อสารแต่ละชั้นจะสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$E_p = \frac{\epsilon_i}{\epsilon_i d_p + \epsilon_p d_i} V_{bias} \quad (2.12)$$

เมื่อ	E_p	คือ สนามไฟฟ้าในชั้น P
	ϵ_i และ ϵ_p	คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสารในชั้น I และชั้น P ตามลำดับ
	d_i และ d_p	คือ ความหนาของชั้น I และ P ตามลำดับ
	V_{bias}	คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมชั้นสาร

2.5 สมบัติสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ซิงค์ซีลีไนด์

สารกึ่งตัวนำซิงค์ซีลีไนด์ (Zinc Selenide) เป็นสารกึ่งตัวนำกลุ่ม II-VI โครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำซิงค์ซีลีไนด์ จะประกอบไปด้วยอะตอมของสังกะสี (Zinc) และอะตอมของซีลีเนียม (Selenium) จับตัวเป็นโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ (Zinc Blende structure) อะตอมของสังกะสีมีเลขอะตอมเท่ากับ 30 ดังนั้นการกระจายของอิเล็กตรอนในสถานะควอนตัมต่างๆคือ $1S^2 2S^2 2P^6 3S^2 3P^6 3D^{10} 4S^2$ และอะตอมของซีลีเนียมมีเลขอะตอมเท่ากับ 36 การกระจายของอิเล็กตรอนคือ $1S^2 2S^2 2P^6 3S^2 3P^6 3D^{10} 4S^2 4P^4$ โครงสร้างผลึกของซิงค์ซีลีไนด์ แสดงดังรูปที่ 2.33



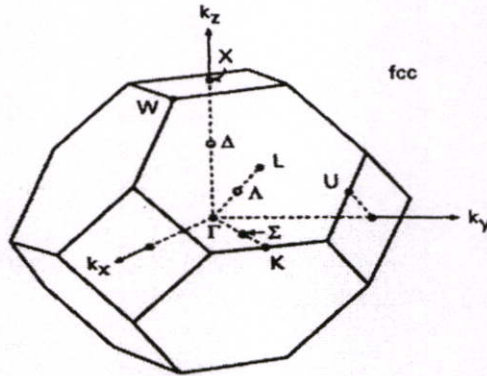
รูปที่ 2.33 โครงสร้างการจัดเรียงตัวของสารกึ่งตัวนำซิงค์ซีลีไนด์

โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนจะประกอบด้วยผลึกแบบลูกบาศก์ชนิดเฟสเซนเตอร์ (face centered cubic; fcc) 2 ผลึกที่แตกต่างกันเกิดการรวมตัวกัน ดังนั้นในหนึ่งหน่วยเซลล์ของโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนจะมีอะตอมอยู่สองชนิด แต่ละชนิดมี 4 อะตอม ซึ่งมีตำแหน่งของอะตอมดังนี้

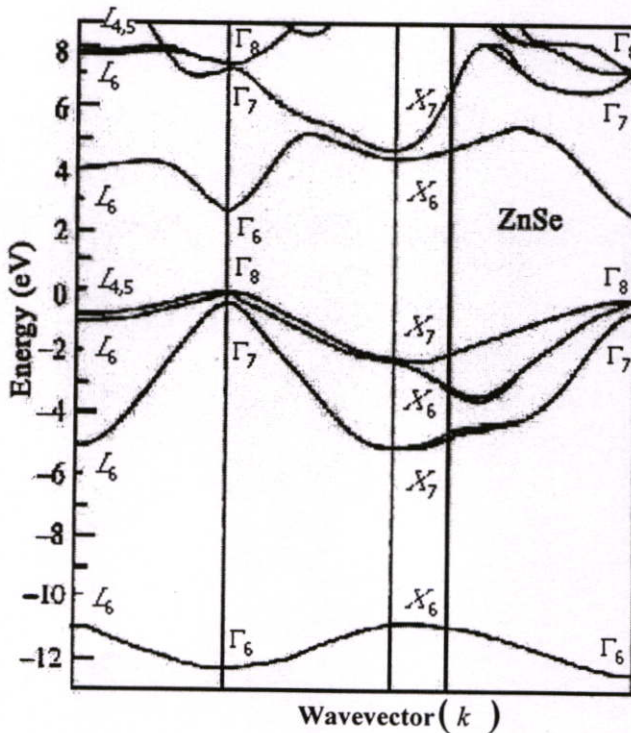
อะตอมของ Zn อยู่ที่ $0\ 0\ 0, 0\ \frac{1}{2}\ \frac{1}{2}, \frac{1}{2}\ 0\ \frac{1}{2}, \frac{1}{2}\ \frac{1}{2}\ 0$

อะตอมของ Se อยู่ที่ $\frac{1}{4}\ \frac{1}{4}\ \frac{1}{4}, \frac{1}{4}\ \frac{3}{4}\ \frac{3}{4}, \frac{3}{4}\ \frac{1}{4}\ \frac{3}{4}, \frac{3}{4}\ \frac{3}{4}\ \frac{1}{4}$

บริลลันโซน (brillouin zone) ของโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนและโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำซิงค์ซีลีไนด์แสดงดังรูปที่ 2.34 และ 2.35 ตามลำดับ



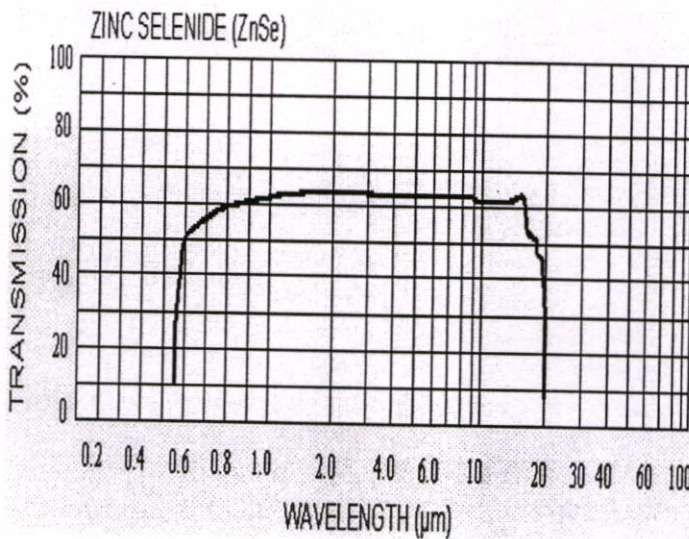
รูปที่ 2.34 บริลลันโซนของ โครงผลึกแบบซิงค์เบลน



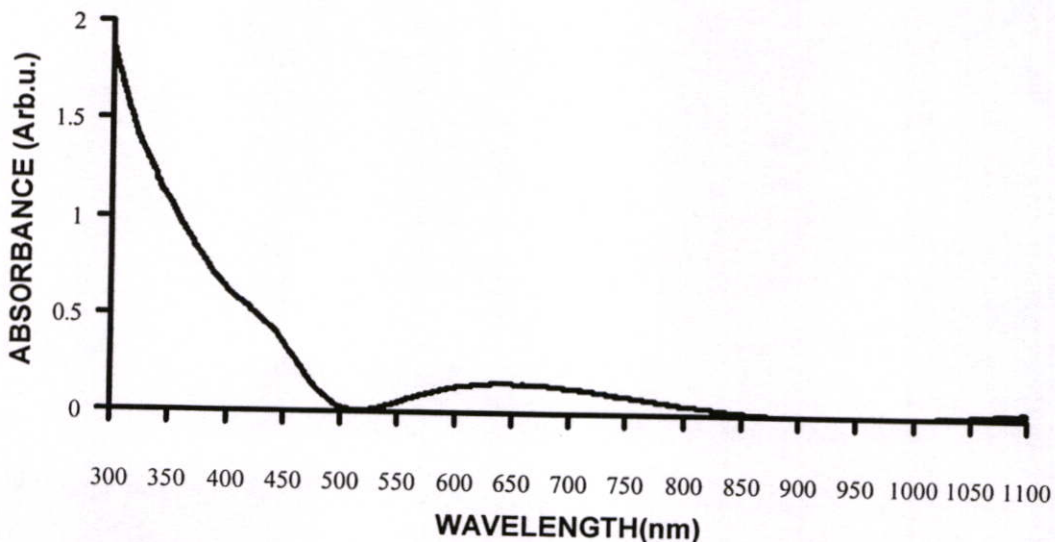
รูปที่ 2.35 โครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำซิงค์ซีลีไนด์

โครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำซิงค์ซีลีไนด์แสดงในรูปที่ 2.35 สามารถบอกได้ถึงชนิดของแถบพลังงานต้องห้ามของสารกึ่งตัวนำ โดยพิจารณาจากตำแหน่งล่างสุดของแถบความนำและตำแหน่งบนสุดของแถบวาเลนซ์ โดยถ้าตำแหน่งล่างสุดของแถบความนำอยู่แกนเดียวกับตำแหน่งบนสุดของแถบวาเลนซ์จะเป็นชนิดแถบพลังงานต้องห้ามแบบตรง (direct band gap) แต่ถ้าตำแหน่งล่างสุดของแถบความนำอยู่คนละแกนกับตำแหน่งบนสุดของแถบวาเลนซ์จะเป็นชนิดแถบพลังงานต้องห้ามแบบอ้อม (indirect band gap) ซึ่งจากรูปแสดงว่าสารกึ่งตัวนำซิงค์ซีลีไนด์นั้นมีชนิดของแถบพลังงานต้องห้ามแบบตรง

สารกึ่งตัวนำซิงค์ซีลีไนด์มีช่วงการทะลุผ่านของแสงในช่วงกว้าง คือช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 0.6-20 ไมโครเมตร ช่วงการทะลุผ่านของแสง และการดูดกลืนแสงของซิงค์ซีลีไนด์แสดงดังรูปที่ 2.36 และ 2.37



รูปที่ 2.36 ช่วงการทะลุผ่านของแสงของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำซิงค์ซีลีไนด์



รูปที่ 2.37 ช่วงการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำซิงค์ซีลีไนด์

บทที่ 3

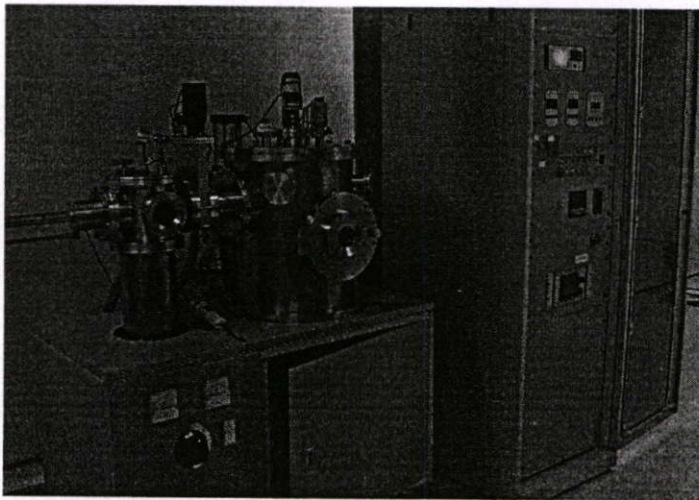
ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย สามารถแบ่งเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

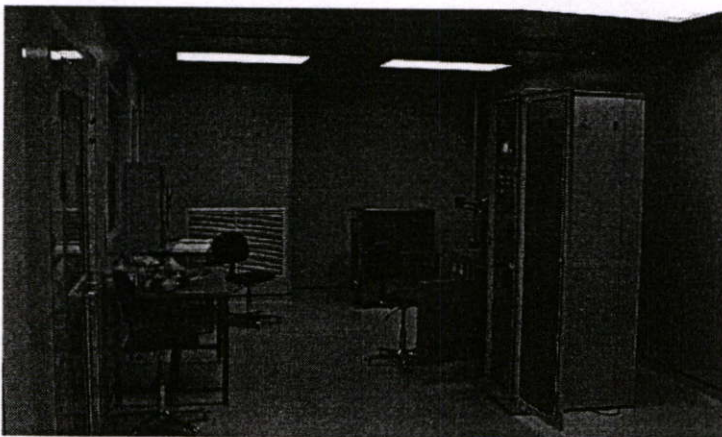
1. ทำการศึกษาค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ออกแบบการทดลองเตรียมอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง
3. เตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับวัดสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติทางแสงของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่สร้างขึ้น
4. เตรียมหน้ากากสำหรับระเหยสารให้ได้สเกลที่ต้องการด้วยวิธีการเคลือบด้วยไฟฟ้า (Electroplating)
5. ทำการสร้างไดโอดเปล่งแสงไฮบริด โดยการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นสารอินทรีย์ NPB กับชั้นสารอนินทรีย์ ZnSe โดยใช้อัตราการระเหยคงที่และไม่คงที่
6. ตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติทางแสงของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดที่สร้างขึ้น
7. วิเคราะห์และสรุปผล เพื่อเปรียบเทียบเงื่อนไขความหนาของชั้น NPB และ ZnSe ที่เหมาะสมเพื่อนำไปพัฒนาสร้างเป็นไดโอดเปล่งแสงไฮบริดที่มีประสิทธิภาพสูงต่อไป

3.1 ระบบระเหยสารอินทรีย์ (Organic Source Evaporation System)

ระบบระเหยสารอินทรีย์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ทำการออกแบบระบบโดยห้องปฏิบัติการวิจัยควอนตัมและสารกึ่งตัวนำทางแสง (QOSLab) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ระบบถูกออกแบบมาเพื่อให้สามารถระเหยสารอินทรีย์ได้เป็นอย่างดีมีประสิทธิภาพ เนื่องจากสารอินทรีย์มีอุณหภูมิในการระเหยต่ำเมื่อเทียบกับสารอนินทรีย์โดยทั่วไป ดังนั้นระบบจึงออกแบบให้สามารถควบคุมการให้อุณหภูมิกับสารอินทรีย์ได้อย่างละเอียดและแม่นยำ เพื่อให้สามารถควบคุมอัตราการระเหยของสารอินทรีย์ได้อย่างถูกต้องแม่นยำและมีความสม่ำเสมอ โดยระบบทั้งหมดจะอยู่ทำงานภายใน Clean Room Class 10K และเพื่อความบริสุทธิ์ของการระเหยสารอินทรีย์ ระบบจะทำการระเหยสารในสุญญากาศสูงโดยใช้เทอร์โบโมเลกุลาร์ปั๊ม และ โรตารีปั๊มในการสร้างสุญญากาศ รวมทั้งการสร้างอุปกรณ์ทั้งหมดจะทำภายในห้องสะอาดคลาส 10000 (clean room class 10K) ดังแสดงในรูป 3.2



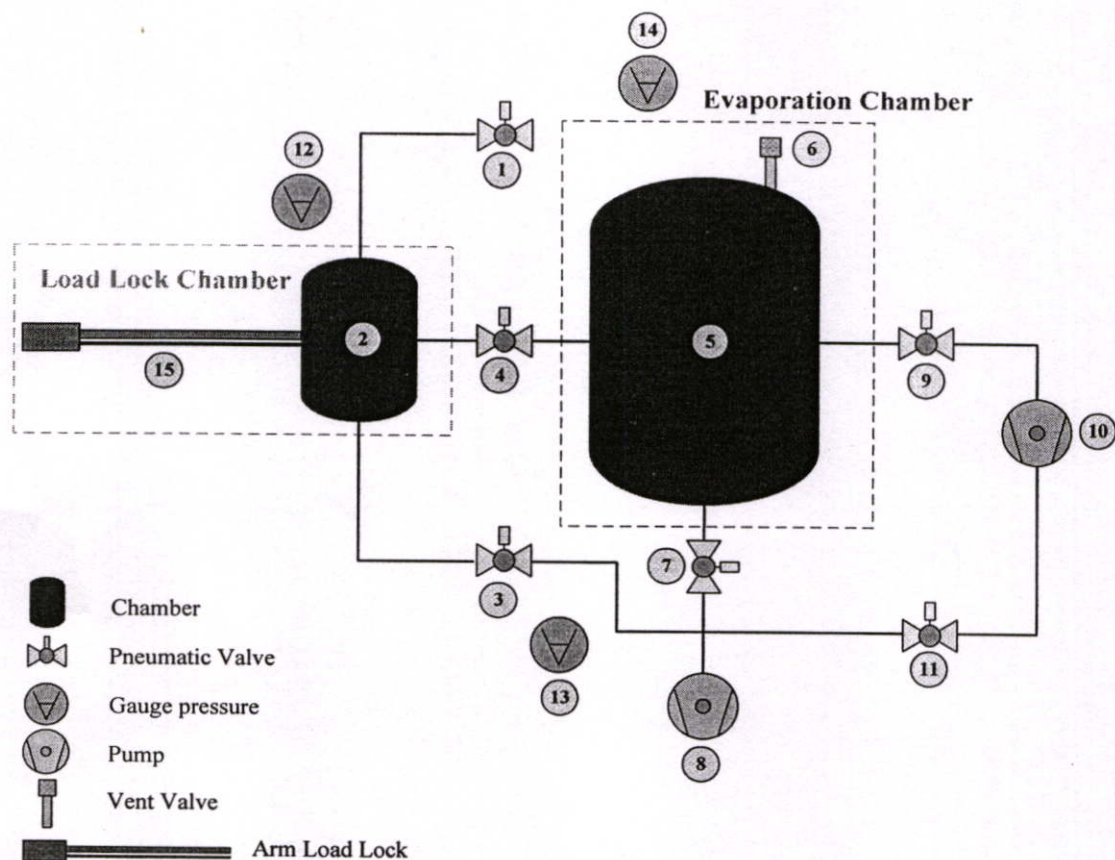
รูปที่ 3.1 ระบบระเหยสารอินทรีย์



รูปที่ 3.2 ห้องสะอาดคลาส 10000

ระบบระเหยสารอินทรีย์มีส่วนประกอบที่สำคัญดังรูปที่ 3.3

Organic Evaporation System

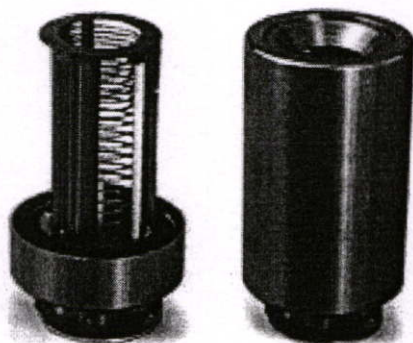


- | | |
|--|--------------------------------|
| 1. load lock vent valve (VENT VALVE) | 9. high vacuum valve (HV) |
| 2. load lock chamber | 10. turbo molecular pump (TMP) |
| 3. roughing load lock valve (LL SYSTEM) | 11. backing valve (BV) |
| 4. load lock valve (LLV) | 12. pirani gauge |
| 5. evaporation 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) | |

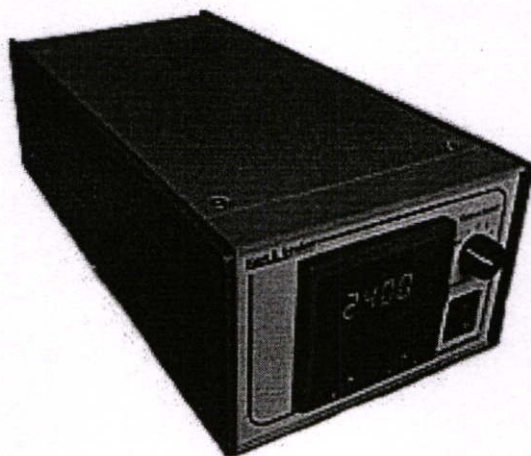
รูปที่ 3.3 แผนภาพระบบสุญญากาศของระบบระเหยสารอินทรีย์

ภายในห้องสุญญากาศ (vacuum chamber) ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ต่างๆ ดังนี้

1. ระบบระเหยสารอินทรีย์ (Low Temperature Evaporator System ; LTE) เป็นระบบที่ใช้สำหรับระเหยสารอินทรีย์โดยประกอบด้วย 2 ส่วน คือ หัวระเหยสารอินทรีย์ และ ชุดควบคุมการระเหยสารอินทรีย์ของบริษัท Kurt J. Lesker ดังแสดงในรูปที่ 3.4 และ 3.5 ซึ่งสามารถให้ความร้อนแก่สารอินทรีย์ได้อย่างทั่วถึงสม่ำเสมอ มีเทอร์โมคัปเปิล type K ในการตรวจวัดค่าอุณหภูมิที่สารอินทรีย์ได้รับเพื่อนำมาใช้ควบคุมอุณหภูมิที่ให้แก่สารอินทรีย์ ซึ่งระบบที่ใช้สามารถควบคุมอุณหภูมิที่ให้ได้อย่างแม่นยำ ± 0.1 องศาเซลเซียส

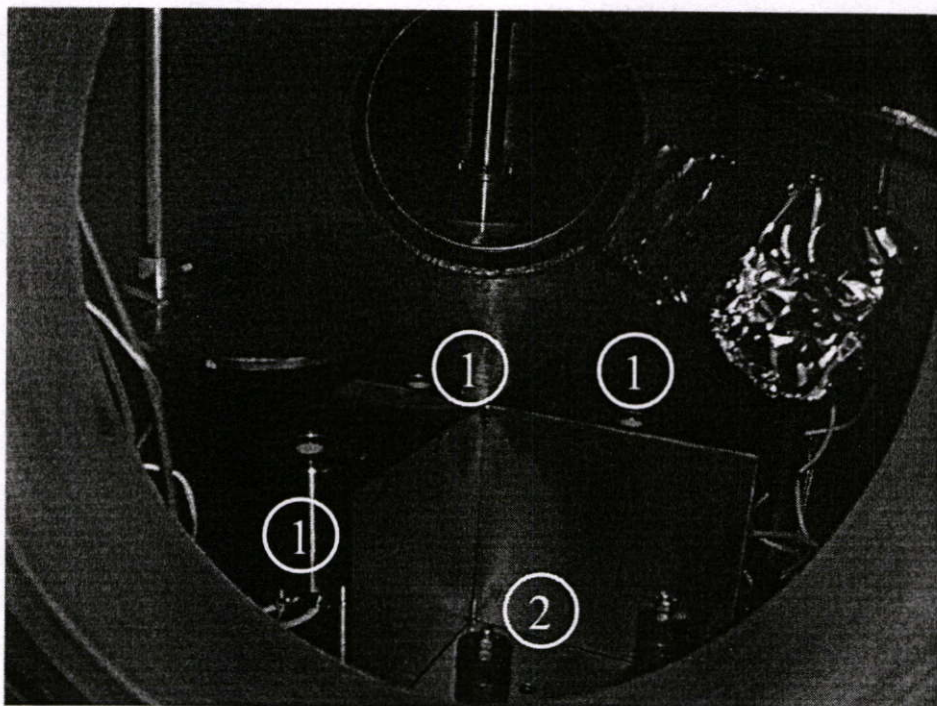


รูปที่ 3.4 หัวระเหยสารอินทรีย์



รูปที่ 3.5 ชุดควบคุมการระเหยสารของระบบระเหยสารอินทรีย์

โดยภายในห้องสุญญากาศทำการติดตั้งระบบระเหยสารอินทรีย์อยู่ทั้งหมด 3 ชุดดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 อุปกรณ์ภายในห้องสุญญากาศสูง 1

2. ระบบระเหยสารด้วยความร้อนเป็นระบบที่ออกแบบมาเพื่อทำการระเหยขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการสร้างไดโอดเปล่งแสงสารอินทรีย์ดังรูปที่ 3.4

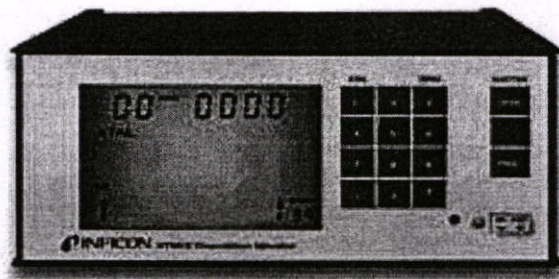
3. ระบบตรวจวัดความหนาของฟิล์มบาง ความหนาของฟิล์มบางถูกตรวจสอบความหนาโดยใช้ผลึกควอทซ์ของ INFICON ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ผลึกควอทซ์

ทำหน้าที่ตรวจวัดวัดความหนาของสารที่กำลังระเหยโดยจะทำการวัดจากค่าความถี่การสั่นของคริสตอลที่มีค่าลดลงเมื่อมีสารมาเคลือบเกาะที่ผิวของคริสตอลมากขึ้น โดยความถี่ที่ได้จะคำนวณอัตราการระเหยสารและความหนาโดย XTM/2 Thin Film Deposition Monitor ของ

INFICON แสดงดังรูปที่ 3.8 โดยที่อุปกรณ์ 3, 4, 5 และ 6 ภายในห้องสุญญากาศแสดงดังรูปที่ 3.9

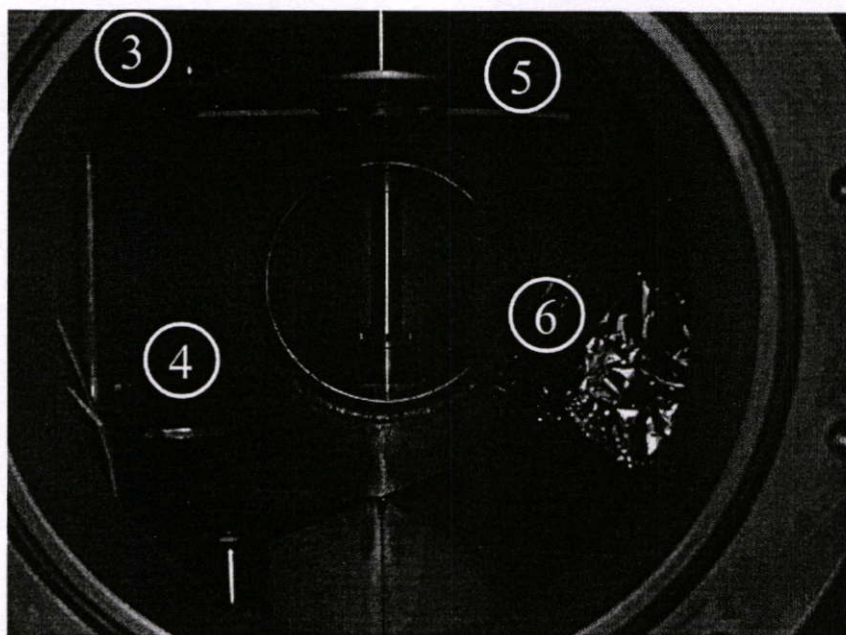


รูปที่ 3.8 เครื่องแสดงผลความหนาฟิล์มบาง

4. ชัตเตอร์มีหน้าที่ในการเปิด-ปิดไอระเหยของสารที่จะขึ้นไปเกาะฐานรองรับ

5. ตัวยึดจับฐานรองรับมีหน้าที่ใช้ยึดจับฐานรองรับที่ใช้และสามารถทำการหมุนได้

ขณะที่ทำการระเหยสาร



รูปที่ 3.9 อุปกรณ์ภายในห้องสุญญากาศสูง 2

6. ชุดให้ความร้อนแก่ฐานรองรับเป็นระบบที่ให้ความร้อนแก่ฐานรองรับโดยหลอดไฟควอทซ์ และมีเทอร์โมคัปเปิลที่สามารถวัดอุณหภูมิของฐานรองรับได้

3.2 สมบัติสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่ใช้ในการสร้างไดโอดเปล่งแสงไฮบริด

3.2.1 สมบัติทางกายภาพของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ซิงค์ซีลีไนด์

ในงานวิจัยนี้ใช้สารกึ่งตัวนำอินทรีย์ ZnSe ความบริสุทธิ์ 99.995 จากบริษัท Alfa Aesar มีสมบัติแสดงในตาราง 3.1 และรูปที่ 3.10

ตารางที่ 3.1 แสดงสมบัติของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ซิงค์ซีลีไนด์

ชื่อสารอนินทรีย์	ZnSe
ชื่อทางเคมี	Zinc Selenide
สูตรเคมี	ZnSe
Molecular Weight	144.34 g/mole
จุดหลอมเหลว	> 1100 °C
ความหนาแน่น	5.65 g/cm ³
ลักษณะทางกายภาพ	ผลึกสีเหลือง
conduction band	4.0. eV
valence band	6.8 eV
Hole Mobility	-
Electron Mobility	< 600 cm ² /Vs
Dielectric constant	8.5



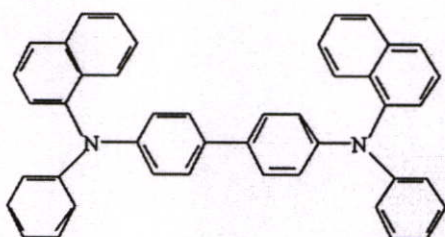
รูปที่ 3.10 ผลึกสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ซิงค์ซีลีไนด์ (ZnSe)

3.2.2 สมบัติทางกายภาพของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ NPB

ในงานวิจัยนี้ใช้สารอินทรีย์ NPB จากบริษัท Luminescence Technology มีสมบัติแสดงในตาราง 3.2 และในรูป 3.11

ตารางที่ 3.2 แสดงสมบัติของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ NPB

ชื่อสารอินทรีย์	NPB
ชื่อทางเคมี	N,N'-di(naphthalen-1-yl)-N,N'-diphenyl-benzidine
สูตรเคมี	$C_{44}H_{32}N_2$
Molecular Weight	588.72 g/mole
จุดหลอมเหลว	280~282 °C
Thermal Gravimetric Analysis	Weight loss < 0.5% at 340 °C
ลักษณะทางกายภาพ	ผงสีขาว-เหลืองอ่อน
Glass Transition Temperature (T_g)	95 °C
HOMO	5.2 eV
LUMO	2.1 eV
Hole Mobility	$3 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{Vs}$
Electron Mobility	-

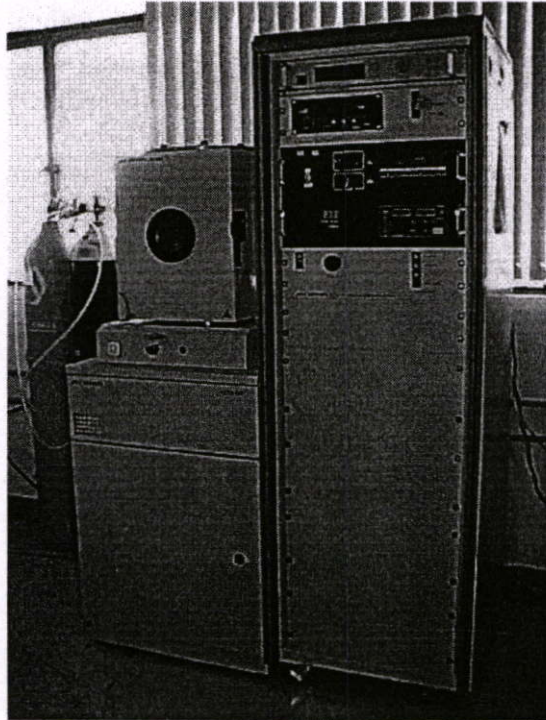


รูปที่ 3.11 โครงสร้างสารอินทรีย์ NPB

3.3 การเตรียมฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ (ITO) บนฐานรองรับกระจกใส

ฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ที่ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าบวกในงานวิจัยนี้จะถูกเตรียมบนฐานรองรับกระจกสไลด์ Super Frost ด้วยระบบอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงแบบเทคนิคควบคุมเวลาก๊าซ แสดงดังรูปที่ 3.12 โดยมีเงื่อนไขในการปลูกดังนี้

- RF Power 30 Watt
- อัตราการ Flow gas Ar 9 Standard Cubic Centimeters per Minute (SCCM)
- Timing ปลดปล่อยแก๊ส Ar 50 วินาที หยุดปล่อย 2 วินาที
- ระยะระหว่างเป้าเคลื่อนกับแผ่นฐานรองรับ 5 ซม.
- Based Pressure 1×10^{-6} มิลลิบาร์
- Sputtering Pressure 3.0×10^{-3} มิลลิบาร์
- ไม่มีการให้อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับ



รูปที่ 3.12 ระบบ อาร์ เอฟ แมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง

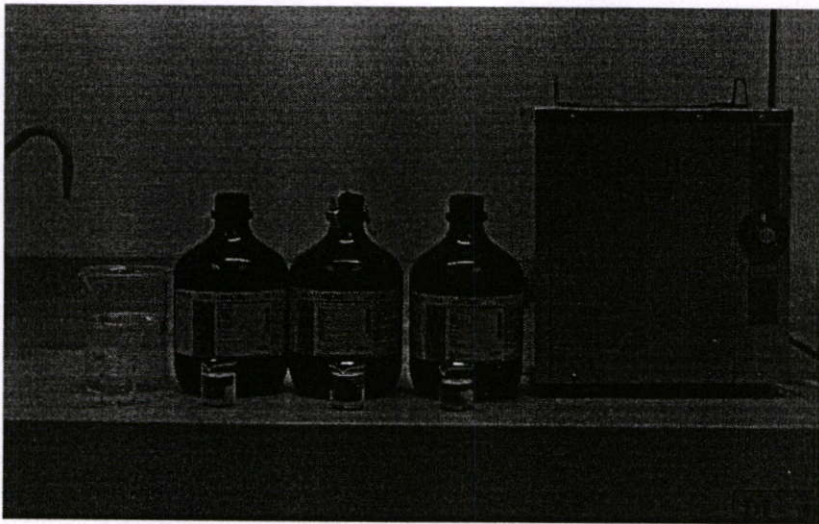
โดยสมบัติของ ITO ที่ได้จะมี

- ความหนา 200 นาโนเมตร
- ความต้านทานเชิงแผ่นประมาณ 10 โอห์ม/□
- Timing ปลดปล่อยแก๊ส Ar 50 วินาที หยุดปล่อย 2 วินาที

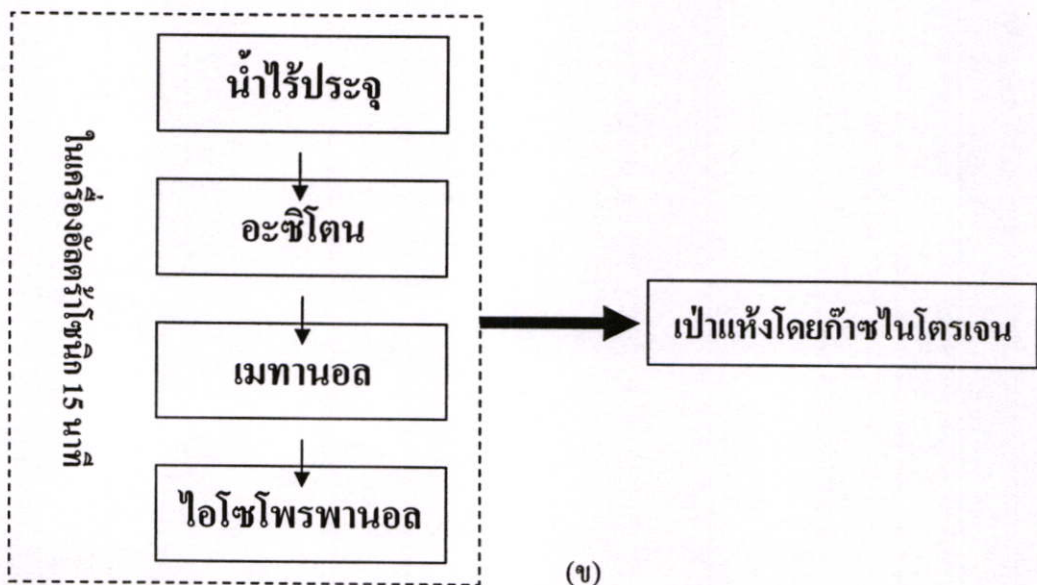
3.4 การทำความสะอาดฐานรองรับอินเดียมทินออกไซด์

ก่อนที่จะทำการระเหยสารอินทรีย์ลงบนฐานรองรับอินเดียมทินออกไซด์จะมีขั้นตอนการทำทำความสะอาดเพื่อล้างสิ่งสกปรก ผุ่นละออง และคราบไขมันที่ปนเปื้อนบนพื้นผิวซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดการหลุดลอกของฟิล์ม โดยขั้นตอนการทำความสะอาดแสดงดังรูป 3.13 เริ่มจาก

1. ล้างฐานรองรับด้วยน้ำไร้ประจุ (DI water) ในเครื่องอัลตราโซนิก เป็นเวลา 15 นาที
2. ล้างฐานรองรับด้วยอะซิโตน (Acetone; CH_3COCH_3) ในเครื่องอัลตราโซนิก เป็นเวลา 15 นาที
3. ล้างฐานรองรับด้วยเมทานอล (Methanol; CH_3OH) ในเครื่องอัลตราโซนิก เป็นเวลา 15 นาที
4. ล้างฐานรองรับด้วยไอโซโพรพานอล (Isopropanol; $(\text{CH}_3)_2\text{CHOH}$) ในเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 15 นาที
5. หลังจากนั้นทำการเป่าให้แห้งโดยใช้ก๊าซไนโตรเจน (N_2)



(ก)



(ข)

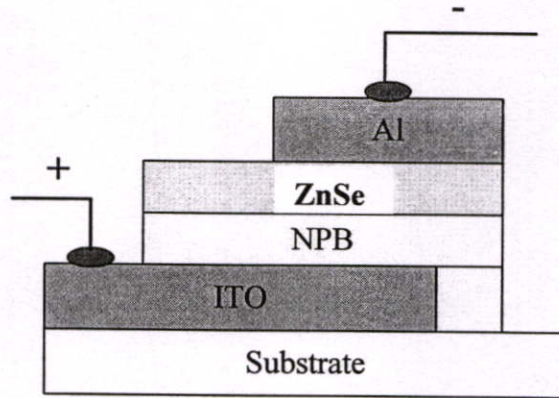
รูปที่ 3.13 (ก) แสดงสารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำความสะอาดฐานรองรับ ITO

(ข) ขั้นตอนการทำความสะอาดฐานรองรับ ITO

3.5 การสร้างไดโอดเปล่งแสงไฮบริดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์โครงสร้าง

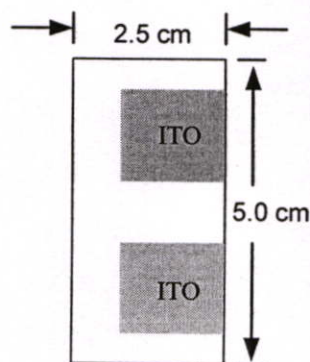
ITO/NPB/ZnSe/Al

โครงสร้างของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่ใช้ในการวิจัยเป็นโครงสร้างแบบสองชั้น ซึ่งประกอบด้วยชั้นส่งผ่านโฮลซึ่งเป็นสารอินทรีย์ NPB และชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนเป็นสารอนินทรีย์ ZnSe โดยมีขั้วไฟฟ้าโปรงแสง ITO และโลหะอลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทดตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.14

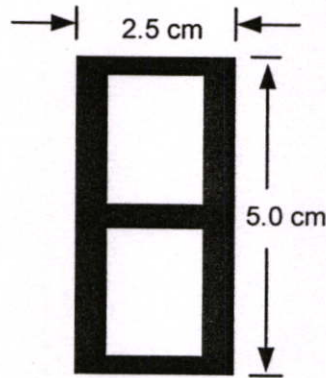


รูปที่ 3.14 โครงสร้างไดโอดเปล่งแสงไฮบริด ITO/NPB/ZnSe/Al

ขั้นตอนการสร้างไดโอดเปล่งแสงไฮบริดเริ่มจากนำฐานรองรับ ITO บนกระจกสไลด์ที่ผ่านการทำความสะอาดแล้วดังรูปที่ 3.15 มาติดหน้ากากสำหรับระเหยสารอินทรีย์และอนินทรีย์ดังรูปที่ 3.16 หลังจากนั้นนำ ITO ซึ่งติดหน้ากากระเหยสารแล้วเข้าห้องสุญญากาศเพื่อทำการระเหยชั้นสารอินทรีย์และอนินทรีย์ตามลำดับ



รูปที่ 3.15 สลวดลาย ITO บนฐานรองรับกระจก



รูปที่ 3.16 หน้ากากสำหรับระเหยสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์

ในการศึกษาจะได้ทำการระเหยสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์โดยแบ่งเป็น 2 เงื่อนไข
ได้แก่

3.5.1 เงื่อนไขการเตรียมสารอินทรีย์และอนินทรีย์ด้วยอัตราการระเหยสารไม่คงที่

เป็นการระเหยสารให้ได้ความหนาที่ต้องการ โดยไม่คำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงของอัตรา
การระเหยขณะทำการระเหยสาร โดยทำการระเหยสารอินทรีย์ NPB ด้วยระบบระเหยสารอินทรีย์
โดยเปลี่ยนแปลงความหนาของ NPB เป็น 30 และ 50 นาโนเมตร โดยเงื่อนไขการระเหยสารเป็น
ดังนี้

- Base Pressure ประมาณ 3×10^{-6} mbar
- Evaporation Rate ประมาณ $1-3 \text{ \AA}^{\circ}/\text{s}$
- ไม่มีการให้อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับ

หลังจากนั้นทำการระเหยสารอนินทรีย์ ZnSe ด้วยระบบระเหยสารด้วยความร้อน โดย
เปลี่ยนแปลงความหนาของ ZnSe เป็น 15, 30 และ 50 นาโนเมตร

- Base Pressure ประมาณ 3×10^{-6} mbar
- Evaporation Rate ประมาณ $1-3 \text{ \AA}^{\circ}/\text{s}$
- ไม่มีการให้อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับ

3.5.2 เงื่อนไขการเตรียมสารอินทรีย์และอนินทรีย์ด้วยอัตราการระเหยสารที่คงที่

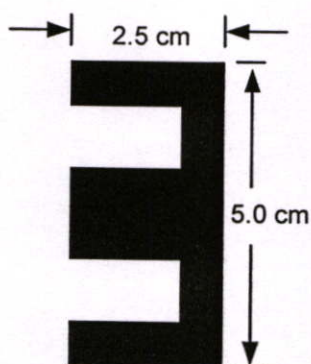
เป็นการระเหยสารให้ได้ความหนาที่ต้องการ โดยพยายามควบคุมอัตราการระเหยของสาร
ให้คงที่ตลอดการระเหยสาร โดยทำการระเหยสารอินทรีย์ NPB ด้วยระบบระเหยสารอินทรีย์โดย
เปลี่ยนแปลงความหนาของ NPB เป็น 30 และ 50 นาโนเมตร โดยเงื่อนไขการระเหยสารเป็นดังนี้

- Base Pressure ประมาณ 3×10^{-6} mbar
- Evaporation Rate ประมาณ $0.5 \text{ \AA}^{\circ}/\text{s}$
- ไม่มีการให้อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับ

หลังจากนั้นทำการระเหยสารอินทรีรี่ ZnSe ด้วยระบบระเหยสารด้วยความร้อน โดยเปลี่ยนแปลงความหนาของ ZnSe เป็น 15, 30 และ 50 นาโนเมตร

- Base Pressure ประมาณ 3×10^{-6} mbar
- Evaporation Rate ประมาณ $0.5 \text{ \AA}^{\circ}/\text{s}$
- ไม่มีการให้อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับ

หลังจากทำการระเหยชั้นสารอินทรีรี่และสารอินทรีรี่ทั้งสองเงื่อนไขเรียบร้อยแล้ว จะได้นำมาทำการระเหยขั้วไฟฟ้าแคโทดโลหะอลูมิเนียม โดยนำหน้ากากสำหรับระเหยสารอินทรีรี่ และสารอินทรีรี่ออก จากนั้นนำหน้ากากสำหรับระเหยขั้วโลหะอลูมิเนียม ดังรูปที่ 3.17 มาติดตั้งแทน

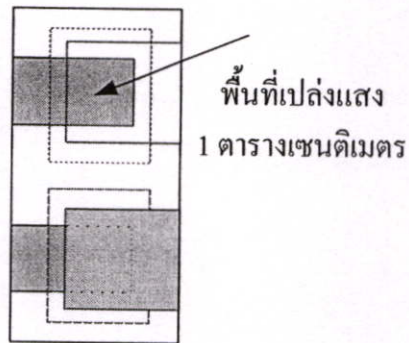


รูปที่ 3.17 หน้ากากสำหรับระเหยขั้วโลหะอลูมิเนียม

ทำการระเหยขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม ด้วยระบบระเหยสารด้วยความร้อน โดยมีเงื่อนไขในการระเหยสารดังนี้

- Base Pressure ประมาณ 4×10^{-6} mbar
- Evaporation Rate ประมาณ $>20 \text{ \AA}^{\circ}/\text{s}$
- ความหนา 150 นาโนเมตร
- ไม่มีการให้อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับ

ไดโอดเปล่งแสงไฮบริดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่สร้างเสร็จจะมีพื้นที่เปล่งแสง 1 ตารางเซนติเมตรดังรูปที่ 3.18 จากนั้นนำไดโอดเปล่งแสงไฮบริดที่สร้างขึ้นไปทำการตรวจวัดสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติทางแสงต่อไป



รูปที่ 3.18 ไดโอดเปล่งแสงไฮบริดที่สร้างเสร็จแล้วมีพื้นที่เปล่งแสง 1 ตารางเซนติเมตร

3.6 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดโครงสร้าง

ITO/NPB/ZnSe/AI

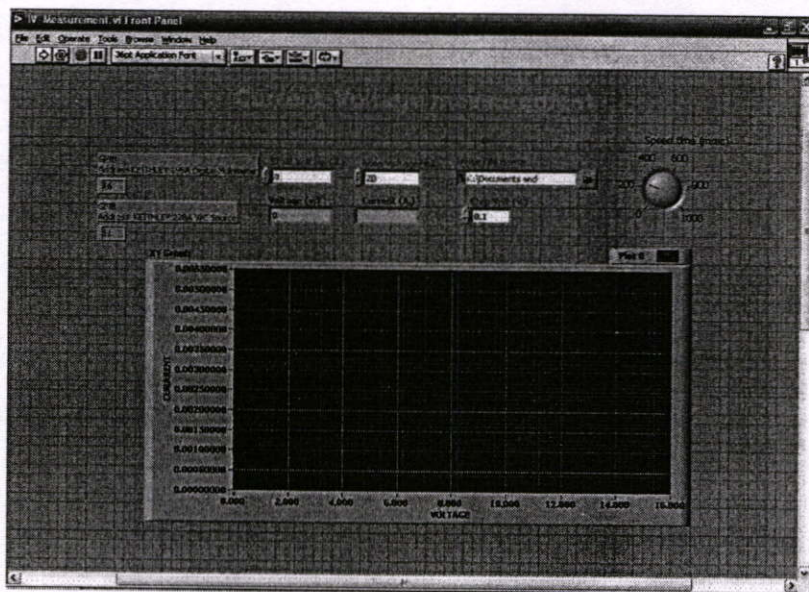
การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดจะทำโดยระบบวัดค่ากระแสและความต่างศักย์ (current-voltage measurement system) ที่จัดขึ้นในห้องปฏิบัติการโดยใช้ KEITHLEY 228 voltage/current source เป็นเครื่องจ่ายความต่างศักย์ให้แก่ไดโอดเปล่งแสง และ KEITHLEY 195A digital multimeter เป็นเครื่องวัดค่ากระแสที่ผ่านไดโอดเปล่งแสง โดยระบบวัดจะถูกควบคุมโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เขียนโดยใช้โปรแกรม Labview ผ่านทาง port G-PIB ดังแสดงในรูป 3.19



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 3.19 ระบบตรวจวัดสมบัติทางไฟฟ้าที่ใช้ในการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ไหล

ผ่านไดโอดเปล่งแสงและความต่างศักย์ที่จ่ายให้กับตัวไดโอดเปล่งแสง

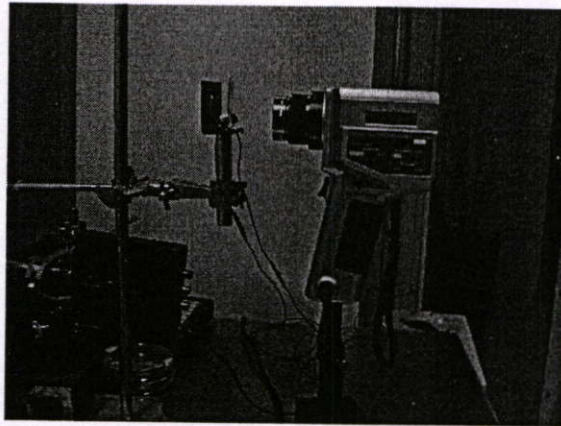
(ก) KEITHLEY 228 voltage/current source (ข) KEITHLEY 195A digital

multimeter (ค) โปรแกรมควบคุมการวัดสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดเปล่งแสง

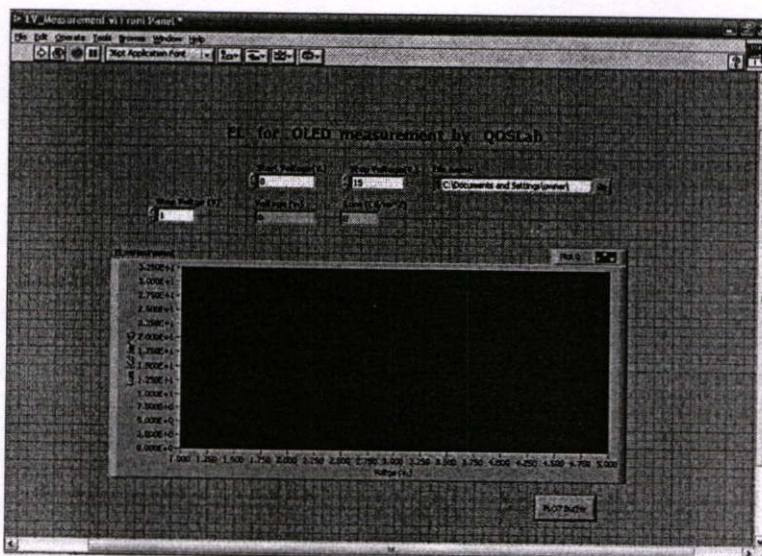
3.7 การตรวจสอบสมบัติทางแสงของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดโครงสร้าง

ITO/NPB/ZnSe/AI

การตรวจสอบสมบัติทางแสงของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดจะทำโดยระบบวัดค่าความส่องสว่างและความต่างศักย์ของไดโอดเปล่งแสง (luminance-voltage measurement system) ที่จัดขึ้นในห้องปฏิบัติการโดยใช้ KEITHLEY 228 voltage/current source เป็นเครื่องจ่ายความต่างศักย์ให้แก่ไดโอดเปล่งแสง และ กล้องวัดความส่องสว่าง (luminance meter) รุ่น LS-110 ของบริษัท KONICA - MINOLTA เป็นเครื่องวัดค่าความสว่างของไดโอดเปล่งแสง โดยการวัดจะถูกควบคุมโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เขียนโดยใช้โปรแกรม Labview ผ่านทาง port GPIB และ RS-232 ดังแสดงในรูป 3.20 และ 3.21



รูปที่ 3.20 ระบบตรวจวัดสมบัติทางแสงที่ใช้ในการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความสว่างของไดโอดเปล่งแสงและความต่างศักย์ที่จ่ายให้กับตัวไดโอดเปล่งแสง

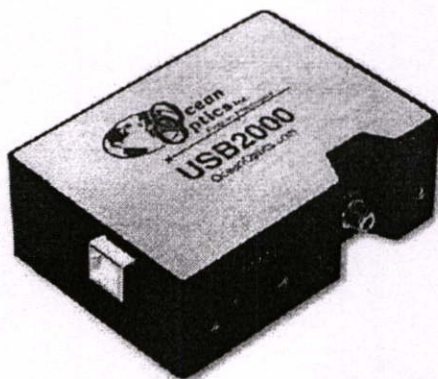


รูปที่ 3.21 โปรแกรมควบคุมการวัดสมบัติทางแสงของไดโอดเปล่งแสง

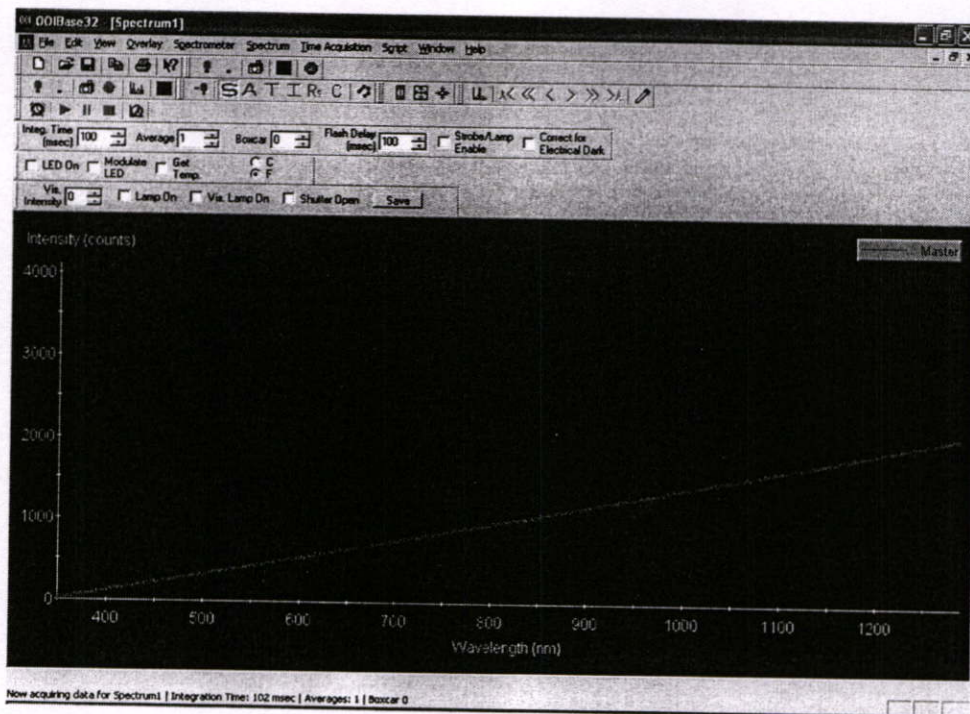
3.8 การตรวจสอบสเปกตรัมการเปล่งแสงด้วยไฟฟ้าของไดโอดเปล่งแสงไฮบริด

โครงสร้าง ITO/NPB/ZnSe/Al

สเปกตรัมการเปล่งแสงด้วยไฟฟ้าของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดจะถูกตรวจสอบโดยใช้เครื่อง Spectrofluorometer ของ Ocean Optics รุ่น USB2000 โดยใช้สาย fiber optic เป็นตัวนำแสงจากไดโอดเปล่งแสงมายังตัวตรวจวัด ดังแสดงในรูป 3.22



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.22 ระบบตรวจวัดสเปกตรัมการเปล่งแสงด้วยไฟฟ้าของไดโอดเปล่งแสงไฮบริด

(ก) USB2000 Spectrofluorometer

(ข) Software 00IBase32

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติทางแสงของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์โครงสร้าง ITO/NPB/ZnSe/Al เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นส่งผ่านโฮล NPB และ ชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน ZnSe จะแบ่งการรายงานผลการทดลองและวิเคราะห์ผลออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

- การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดที่สร้างโดยอัตราการระเหยสารไม่คงที่
- การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดที่สร้างโดยอัตราการระเหยสารคงที่

โดยข้อมูลที่ได้จากการศึกษาสมบัติทางแสงและไฟฟ้าจะถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อใช้ในการอธิบายกลไกการทำงานของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดต่อไป

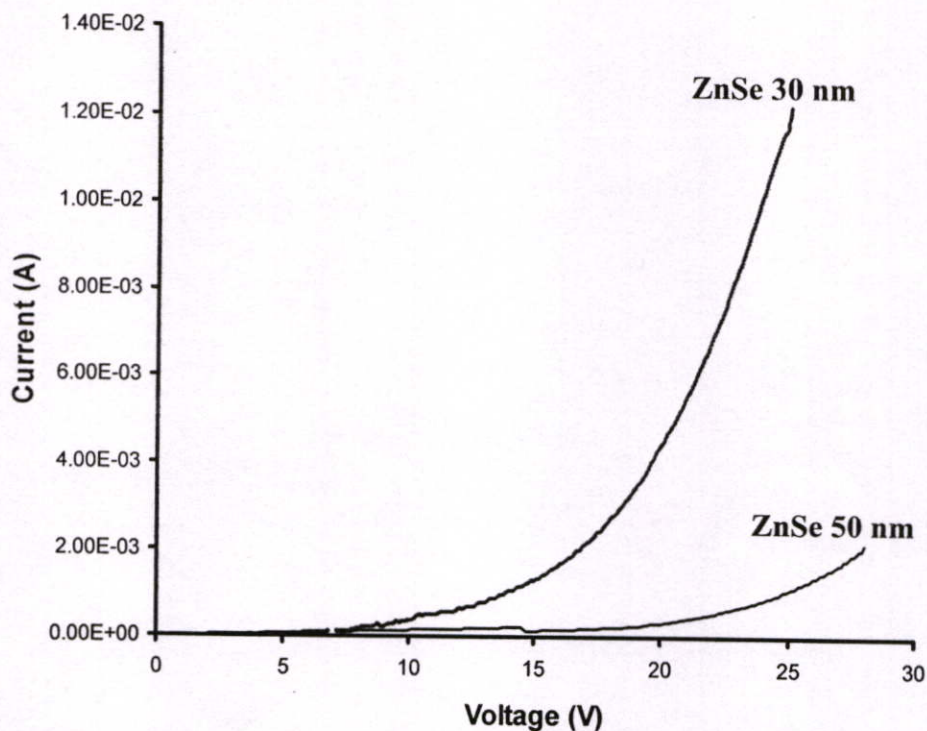
4.1 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดโครงสร้าง

ITO/NPB/ZnSe/Al ที่สร้างโดยอัตราการระเหยสารไม่คงที่

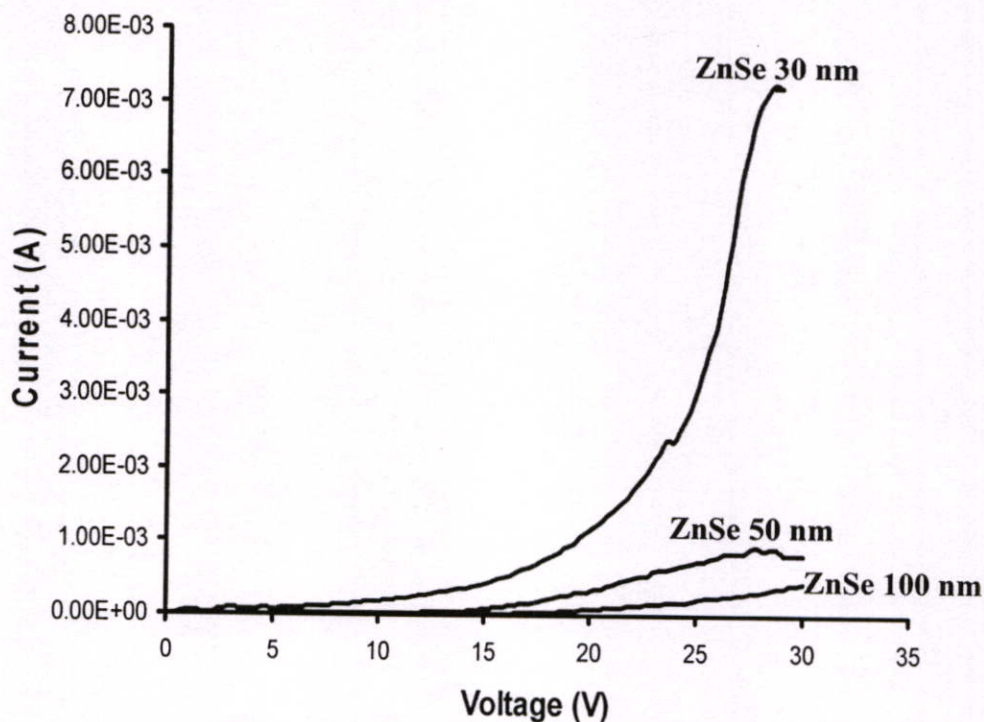
ในส่วนแรกนี้จะได้ทำการศึกษถึงผลกระทบของสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติทางแสงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้น NPB และ ZnSe ของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดที่สร้างโดยอัตราการระเหยของสารไม่คงที่ ทำให้อัตราการระเหยของสารมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นและลดลงอย่างไม่คงที่ตลอดการเตรียมสาร โดยผลการวัดค่าสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติทางแสงของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดที่สร้างขึ้นประกอบด้วย

4.1.1 ผลการวัดสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดที่ทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นสารอนินทรีย์ ZnSe โดยความหนาชั้น NPB คงที่

ผลการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสที่ไหลผ่านกับความต่างศักย์ที่จ่ายให้แก่ไดโอดเปล่งแสงไฮบริดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์โครงสร้าง ITO/NPB/ZnSe/Al ที่ทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นสารอนินทรีย์ ZnSe โดยให้ความหนาของชั้นสารอินทรีย์ NPB มีค่าคงที่ 50 และ 100 นาโนเมตร และความหนาชั้นสารอนินทรีย์ ZnSe มีค่า 15, 30 และ 50 นาโนเมตร แสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2



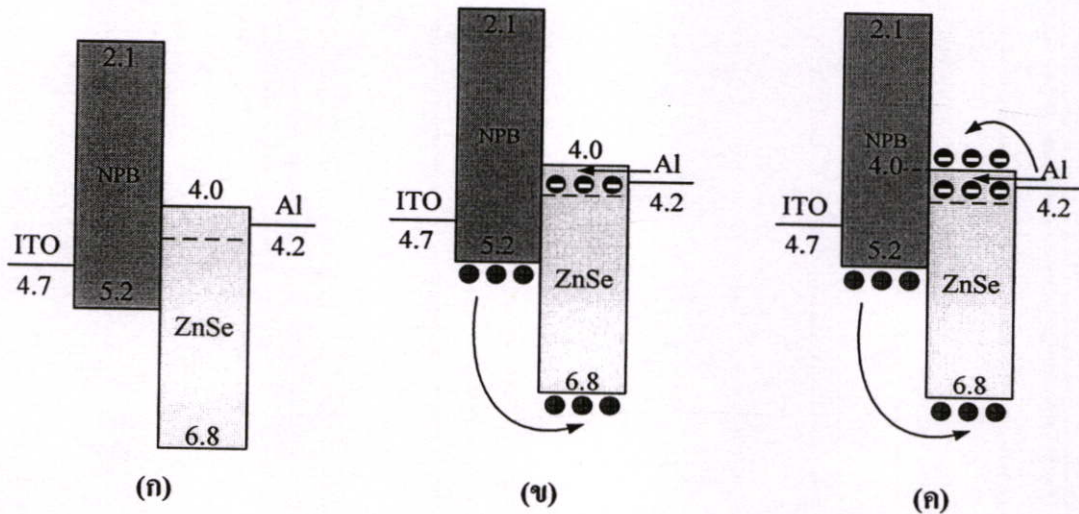
รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ของไดโอดเปล่งแสงไฮบริด ที่เปลี่ยนแปลงความหนาชั้น ZnSe เป็น 30 และ 50 nm โดยความหนาของชั้น NPB คงที่ 50 nm



รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ของไดโอดเปล่งแสงไฮบริด ที่เปลี่ยนแปลงความหนาชั้น ZnSe เป็น 30, 50 และ 100 nm โดยความหนาของชั้น NPB คงที่ 100 nm

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อทำการเพิ่มความต่างศักย์ให้แก่ไดโอดเปล่งแสงไฮบริด ค่ากระแสที่ไหลผ่านไดโอดเปล่งแสงไฮบริดจะสามารถแบ่งพฤติกรรมออกได้เป็น 2 ส่วนขึ้นกับค่าความต่างศักย์ กล่าวคือ เมื่อทำการจ่ายความต่างศักย์ที่มีค่าน้อยให้แก่ไดโอดเปล่งแสง กระแสที่ไหลในไดโอดเปล่งแสงจะมีการเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น แต่เมื่อทำการเพิ่มความต่างศักย์ให้มีค่าสูงขึ้นจนถึงจุดหนึ่งจะทำให้ค่าของกระแสที่ไหลผ่านไดโอดมีการเพิ่มขึ้นแบบเส้นโค้งอย่างรวดเร็ว ดังแสดงในรูป 4.1 และ 4.2

สาเหตุที่ทำให้พฤติกรรมของกระแสในไดโอดเปล่งแสงไฮบริดถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนสามารถอธิบายได้จาก การเกิดความไม่สมบูรณ์ของผลึกในชั้นสารอนินทรีย์ ZnSe ทำให้เกิดสถานะบกพร่อง (defect state) ภายในช่องว่างแถบพลังงานของชั้น ZnSe ดังแสดงในรูป 4.3(ก) ซึ่งมีผลทำให้ที่ความต่างศักย์มีค่าน้อยกระแสสามารถฉีดเข้าสู่สถานะบกพร่องได้ทำให้เกิดเป็นรอยต่อแบบโอห์มมิก (ohmic contact) ซึ่งส่งผลให้พฤติกรรมของกระแสในช่วงความต่างศักย์น้อยเป็นแบบเชิงเส้น แต่เมื่อทำการจ่ายความต่างศักย์มากขึ้นจะทำให้กระแสสามารถฉีดเข้าไปยังแถบนำของชั้น ZnSe ได้ เกิดเป็น รอยต่อแบบชอกกี (schottky contact) ทำให้ค่าของกระแสมีการเพิ่มขึ้นแบบเส้นโค้งอย่างรวดเร็ว ดังแสดงในรูป 4.3(ข) และ 4.3(ค) ตามลำดับ ซึ่งพบพฤติกรรมของกระแสเช่นเดียวกันนี้ในทุกตัวอย่างของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดที่ทำการศึกษา



รูปที่ 4.3 แผนภาพระดับพลังงานของไดโอดเปล่งแสงไฮบริด (ก) เมื่อเกิดจุดบกพร่องของผลึก ZnSe (ข) เมื่อทำการจ่ายความต่างศักย์ที่มีค่าน้อย (ค) เมื่อทำการจ่ายความต่างศักย์ที่มีค่ามาก

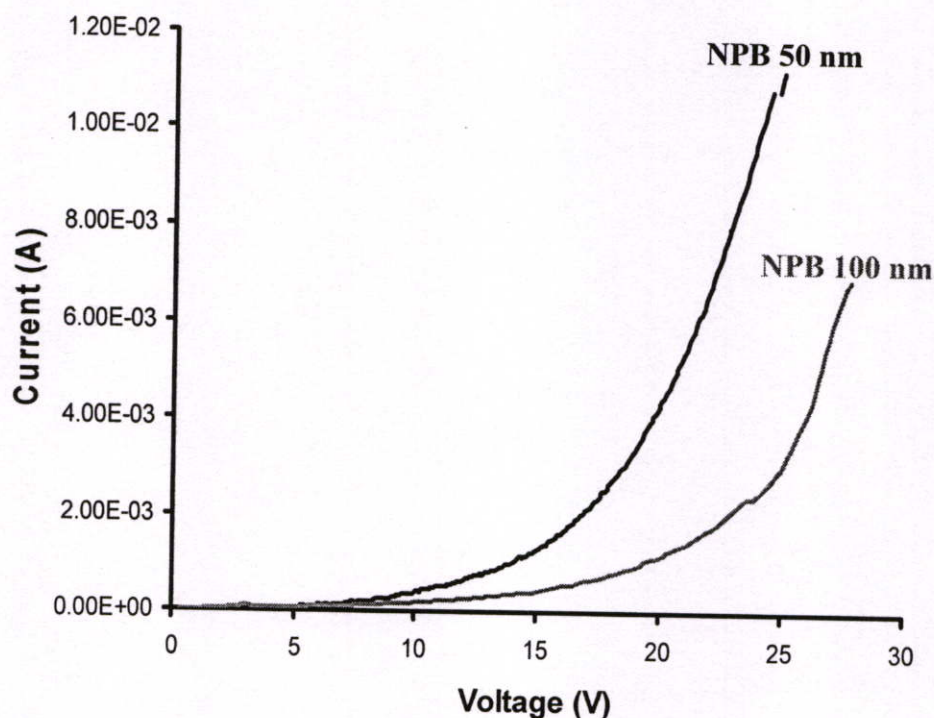
เมื่อทำการทดลองเพิ่มความหนาของชั้น ZnSe จาก 30 นาโนเมตร เป็น 50 นาโนเมตร และ 100 นาโนเมตร ตามลำดับพบว่าค่ากระแสที่วัดได้จากไดโอดเปล่งแสงไฮบริดมีแนวโน้มที่จะลดลง ในขณะที่ค่าความต่างศักย์ขีดเริ่ม (threshold voltage) มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นจาก 6 โวลต์ เป็น 13 โวลต์ เมื่อความหนาของชั้น ZnSe เพิ่มขึ้นและความหนาของชั้น NPB คงที่ 50 นาโนเมตร

โดยผลการทดลองที่ความหนาของชั้น NPB คงที่ 100 นาโนเมตร ก็พบการเพิ่มขึ้นของความต่างศักย์ขั้วเริ่มจาก 8, 15 และ 20 โวลต์ ตามลำดับ เช่นเดียวกัน

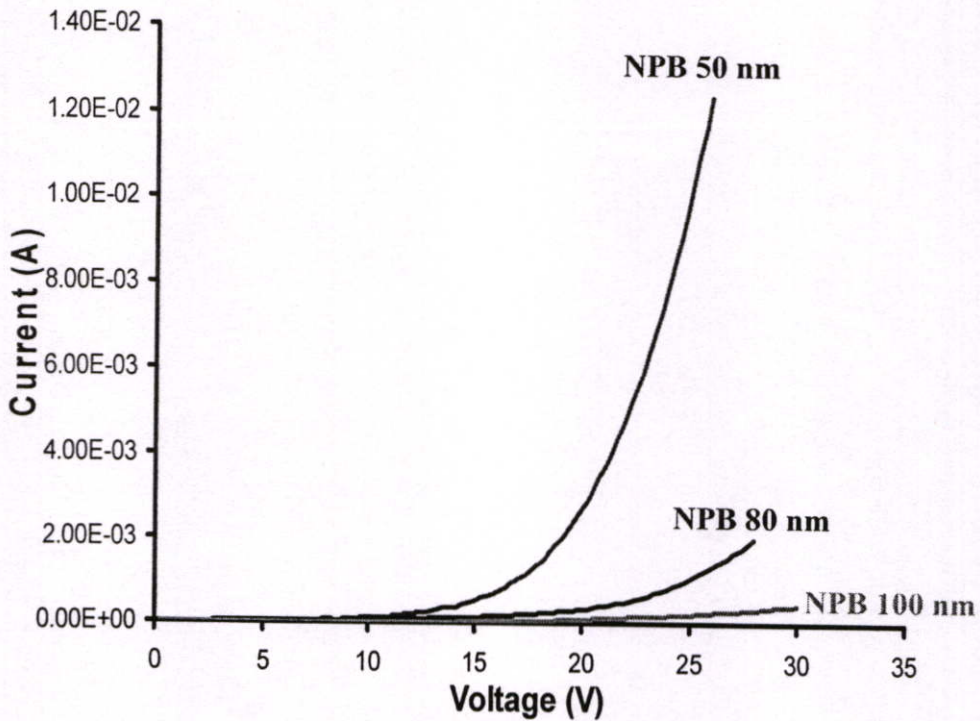
สาเหตุของการลดลงของกระแสที่ไหลผ่านไดโอดเปล่งแสงเมื่อทำการเพิ่มความหนาของชั้น ZnSe สามารถอธิบายได้ด้วย ทฤษฎี Space Charge Limit Current ที่ได้อธิบายในบทที่ 2 กล่าวคือ ค่าของความหนาแน่นของกระแสในไดโอดเปล่งแสงจะมีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันกับค่าความหนาของชั้นสาร ดังนั้นเมื่อความหนาของชั้น ZnSe มีค่าเพิ่มมากขึ้นจึงทำให้ค่ากระแสที่ไหลผ่านไดโอดเปล่งแสงมีค่าลดลง

4.1.2 ผลการวัดสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดที่ทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้น สารอินทรีย์ NPB โดยความหนาชั้น ZnSe คงที่

ผลการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสที่ไหลผ่านกับความต่างศักย์ที่จ่ายให้แก่ไดโอดเปล่งแสงไฮบริดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์โครงสร้าง ITO/NPB/ZnSe/Al ที่ทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นสารอินทรีย์ NPB โดยให้ความหนาของชั้นสารอนินทรีย์ ZnSe มีค่าคงที่ 30 และ 50 นาโนเมตร และความหนาชั้นสารอินทรีย์ NPB มีค่า 50, 80 และ 100 นาโนเมตร แสดงในรูปที่ 4.4 และ 4.5



รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดที่เปลี่ยนแปลงความหนาชั้น NPB เป็น 50 และ 100 nm โดยความหนาของชั้น ZnSe คงที่ 30 nm



รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดที่เปลี่ยนแปลงความหนาชั้น NPB เป็น 50, 80 และ 100 nm โดยความหนาของชั้น ZnSe คงที่ 50 nm

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อทำการเพิ่มความต่างศักย์ให้แก่ไดโอดเปล่งแสงไฮบริด ค่ากระแสที่ไหลผ่านไดโอดเปล่งแสงไฮบริดจะสามารถแบ่งพฤติกรรมออกได้เป็น 2 ส่วนขึ้นกับค่าความต่างศักย์เช่นเดียวกับที่พบในผลการวัดสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดที่ทำการเปลี่ยนความหนาชั้น ZnSe ดังแสดงในรูป 4.1 และ 4.2 ซึ่งสาเหตุของการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของกระแสที่ขึ้นความต่างศักย์ได้อธิบายแล้วในหัวข้อ 4.1.1 โดยพบพฤติกรรมของกระแสเช่นเดียวกันนี้ในทุกตัวอย่างของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดที่ทำการศึกษา

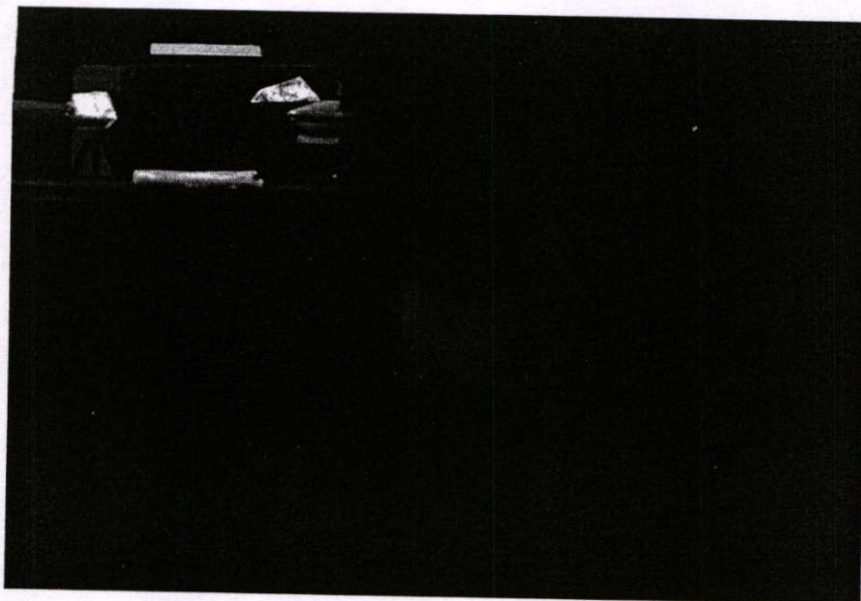
เมื่อทำการเพิ่มความหนาของชั้น NPB จาก 50 นาโนเมตร เป็น 80 และ 100 นาโนเมตร พบว่าค่ากระแสที่วัดได้จากไดโอดเปล่งแสงมีแนวโน้มที่จะลดลงในขณะที่ค่าความต่างศักย์ขีดเริ่มมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นจาก 6 โวลต์ เป็น 8 โวลต์ เมื่อความหนาของชั้น NPB เพิ่มขึ้นและความหนาของชั้น ZnSe คงที่ 30 นาโนเมตร โดยผลการทดลองมีแนวโน้มเช่นเดียวกันทั้งที่ความหนาของชั้น ZnSe คงที่ 50 นาโนเมตร คือเพิ่มจาก 13, 15 และ 18 โวลต์ ตามลำดับ โดยสาเหตุของกระแสที่ลดลงอาจอธิบายได้เช่นเดียวกับการอธิบายการลดลงของกระแสเนื่องจากการเพิ่มความหนา NPB คือ อธิบายโดยใช้ทฤษฎี Space Charge Limit Current ที่ได้กล่าวแล้วในบทที่ 2 กล่าวคือ ค่าของความหนาแน่นของกระแสในไดโอดเปล่งแสงจะมีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันกับค่าความหนาของชั้น NPB ดังนั้นเมื่อชั้นของ NPB มีความหนาเพิ่มมากขึ้นจึงทำให้ค่ากระแสมีค่าลดลง

โดยผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลองของ I.D.Parker [11] ซึ่งพบว่าเมื่อเพิ่มความหนาของชั้นสารอินทรีย์ในไดโอดเปล่งแสงสารอินทรีย์ให้มากขึ้นจะพบการลดลงของความหนาแน่นกระแสที่วัดได้จากไดโอดเปล่งแสงนั้น

4.1.3 การเปล่งแสงย่านความยาวคลื่นสีน้ำเงินในไดโอดเปล่งแสงไฮบริดโครงสร้าง

ITO/NPB/ZnSe/Al

จากการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์โครงสร้าง ITO/NPB/ZnSe/Al พบว่าที่ความหนาของชั้น NPB 50 nm และ ZnSe 30 nm พบการเปล่งแสงย่านความยาวคลื่นสีน้ำเงินที่สามารถมองเห็นได้ในที่มืด เมื่อทำการจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าให้แก่ไดโอดเปล่งแสงไฮบริดประมาณ 20 โวลต์ ดังแสดงในรูป 4.6

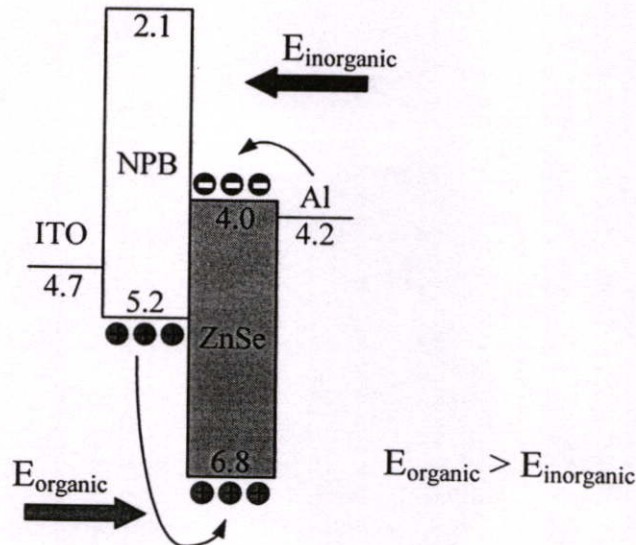


รูปที่ 4.6 การเปล่งแสงความยาวคลื่นช่วงสีน้ำเงินในไดโอดเปล่งแสงไฮบริดโครงสร้าง

ITO/NPB(50nm)/ZnSe(30nm)/Al เมื่อทำการจ่ายความต่างศักย์ประมาณ 20 โวลต์

แต่เนื่องจากความสว่างของแสงที่เปล่งออกมาจากไดโอดเปล่งแสงไฮบริดยังมีค่าต่ำจึงยังไม่สามารถที่จะศึกษาสมบัติทางแสงของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดได้ จึงทำให้ยังไม่สามารถบอกถึงที่มาของการเปล่งแสงสีน้ำเงินและอธิบายกลไกการเปล่งแสงได้อย่างชัดเจน

เมื่อทำการพิจารณาจากโครงสร้างแถบพลังงานของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดที่สร้างขึ้นรวมทั้งพิจารณาถึงสนามไฟฟ้าภายในชั้นสารแต่ละชั้น พบว่าการเปล่งแสงเปล่งแสงช่วงความยาวคลื่นสีน้ำเงินควรจะมาจากชั้นสารอินทรีย์ ZnSe มากกว่าที่จะมาจากชั้นสารอินทรีย์ NPB โดยสามารถอธิบายกลไกการเปล่งแสงเบื้องต้นของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดได้จากโครงสร้างแถบพลังงานดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 โครงสร้างแถบพลังงานของไดโอดเปล่งแสงไฮบริด โครงสร้าง ITO/NPB/ZnSe/Al

จากโครงสร้างแถบพลังงานเมื่อทำการจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าให้แก่ไดโอดเปล่งแสงไฮบริด จะทำให้โฮลจากขั้วไฟฟ้าแอโนด ITO ถูกฉีดจากขั้วไฟฟ้าเข้าสู่ระดับ HOMO ของชั้นส่งผ่านโฮล NPB และเคลื่อนที่ไปยังรอยต่อของ NPB และ ZnSe โดยอิทธิพลของสนามไฟฟ้าในชั้น NPB ในขณะที่เดียวกันอิเล็กตรอนจากขั้วไฟฟ้าคาโทดจะถูกฉีดเข้าสู่แถบนำกระแสของชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน ZnSe และเคลื่อนที่ไปยังบริเวณรอยต่อของ ZnSe และ NPB โดยอิทธิพลของสนามไฟฟ้าในชั้น ZnSe เมื่อทำการพิจารณาระดับพลังงานที่บริเวณรอยต่อของ NPB และ ZnSe พบว่าที่บริเวณรอยต่อจะมีกำแพงศักย์ที่เกิดจากความแตกต่างของ ระดับ HOMO และ ระดับ LUMO กับ แถบวาเลนซ์ และ แถบนำกระแส โดยกำแพงศักย์ของโฮลจะมีค่าประมาณ 1.6 อิเล็กตรอนโวลต์ ในขณะที่ของอิเล็กตรอนมีค่าประมาณ 1.9 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งความสูงของกำแพงศักย์ที่พบบริเวณรอยต่อจะทำให้อิเล็กตรอนและโฮลข้ามไปยังฝั่งตรงข้ามได้ยากเป็นสาเหตุให้เกิดการกักของพาหะทั้ง โฮลและอิเล็กตรอนที่บริเวณรอยต่อ

เมื่อพิจารณาถึงสนามไฟฟ้าที่กระทำต่อชั้นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่ได้กล่าวแล้วในบทที่ 2 พบว่า ค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าในชั้นสารจะขึ้นกับค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของตัวสารและความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ให้กับชั้นสาร ซึ่ง NPB มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประมาณ 4 ในขณะที่ ZnSe มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประมาณ 8.5 จากค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่ต่างกันส่งผลทำให้สนามไฟฟ้าในชั้นสารอินทรีย์มีค่าสูงกว่าสนามไฟฟ้าในชั้นสารอนินทรีย์ประมาณ 2 เท่า ประกอบกับความสูงของกำแพงศักย์ของโฮลมีค่าต่ำกว่าความสูงของกำแพงศักย์ของอิเล็กตรอน ดังนั้น โฮลบางส่วนที่ถูกกักอยู่บริเวณรอยต่อในชั้นสารอินทรีย์จะได้รับพลังงานมากพอที่จะสามารถข้ามกำแพงศักย์บริเวณรอยต่อเข้าไปสู่แถบวาเลนซ์ของชั้น ZnSe และเกิดการรวมตัวกับอิเล็กตรอนที่ถูกกักอยู่บริเวณรอยต่อในชั้นสารอนินทรีย์ เกิดการปลดปล่อยแสงในช่วงความยาวคลื่นสีน้ำเงินเนื่องจาก ZnSe มีค่าช่องว่างแถบพลังงานประมาณ 2.8 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งจากการคำนวณพบว่าช่องว่าง

แถบพลังงานของ ZnSe สามารถที่จะปลดปล่อยแสงในช่วงความยาวคลื่นแสงประมาณ 450 นาโนเมตรซึ่งอยู่ในช่วงสีน้ำเงินออกมาได้

กระบวนการการเกิดแสงสีน้ำเงินจากไดโอดเปล่งแสงไฮบริดที่นำเสนอมีความสอดคล้องกับรายงานของ Wenge Yu ในวารสาร physics letters A ปี 2005 [12] ซึ่งรายงานเกี่ยวกับการเปล่งแสงโดยใช้โครงสร้างของไฮบริดสารอนินทรีย์ ZnSe และ พอลิเมอร์ PPV พบว่าไดโอดเปล่งแสงสามารถเปล่งแสงช่วงความยาวคลื่นสีน้ำเงินออกมาจากชั้น ZnSe ได้

จากการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของทั้งชั้น NPB และ ZnSe โดยอัตราการระเหยสารไม่คงที่ทำให้ทราบว่าปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดได้แก่ ความหนาของชั้นสารอนินทรีย์ และสารอนินทรีย์ โครงสร้างแถบพลังงานของไดโอดเปล่งแสงไฮบริด และสนามไฟฟ้าภายในชั้นสาร สำหรับกลไกการเปล่งแสงจากไดโอดเปล่งแสงไฮบริดพบที่เกิดจากการรวมตัวภายในชั้นสารอนินทรีย์ ZnSe ซึ่งความยาวคลื่นแสงที่ปลดปล่อยออกมานั้นจะมีความสัมพันธ์กับความกว้างของช่องว่างแถบพลังงาน ดังนั้นปัจจัยสำคัญประการหนึ่งซึ่งมีผลต่อกลไกการเปล่งแสงของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดคือ ความเป็นผลึกของ ZnSe ซึ่งจะขึ้นกับอัตราการระเหยโดยตรง

เมื่อทำการพิจารณาถึงการสร้างไดโอดเปล่งแสงไฮบริดที่มีอัตราการระเหยสารไม่คงที่พบว่า การระเหยขึ้นไปจับตัวกันของ ZnSe แต่ละช่วงเวลามีความเร็วไม่เท่ากัน มากบ้าง น้อยบ้าง จึงเป็นสาเหตุให้ฟิล์มบาง ZnSe มีความเป็นผลึกที่ไม่ดี เกิดเป็นสถานะบกพร่องอยู่ภายในช่องว่างแถบพลังงานของ ZnSe โดยสถานะบกพร่องที่เกิดขึ้นนี้จะมีผลต่อการฉีดกระแส ดังแสดงให้เห็นจากรูปที่ 4.1 และ 4.2 ซึ่งได้อธิบายแล้วในหัวข้อ 4.1.1 รวมทั้งยังมีผลต่อกลไกการปลดปล่อยแสงของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดทำให้ไดโอดเปล่งแสงที่สร้างโดยมีอัตราการระเหยสารไม่คงที่มีประสิทธิภาพที่ไม่ดีดังจะเห็นได้จากความสว่างนี้น้อยจนไม่สามารถวัดค่าความส่องสว่างได้

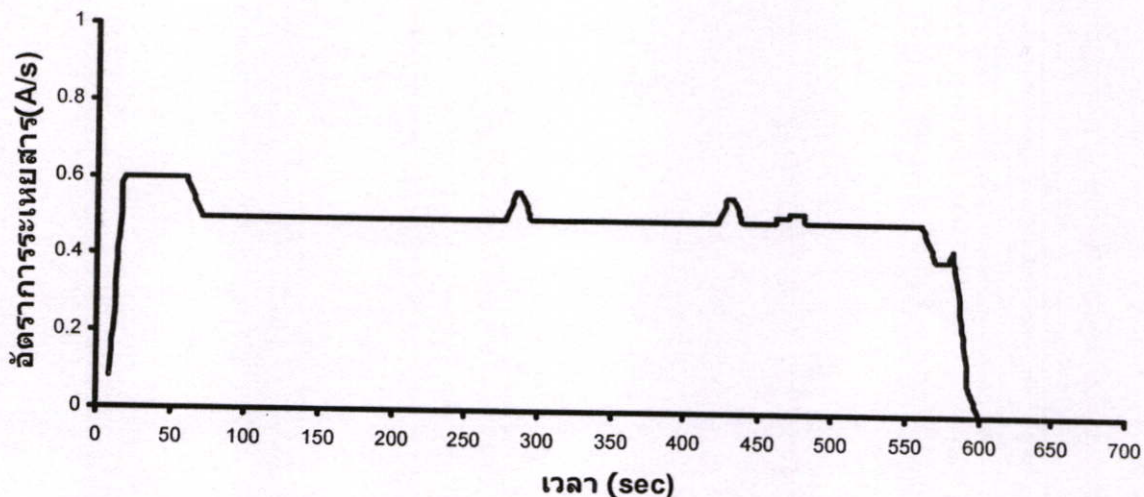
ในหัวข้อต่อไปจะได้ทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดโครงสร้าง ITO/NPB/ZnSe/Al ที่สร้างโดยมีอัตราการระเหยสารคงที่และลดอัตราการระเหยสารให้ช้าลงเพื่อให้ความเป็นผลึกของชั้น ZnSe ดีขึ้น โดยจะทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของชั้น ZnSe เนื่องจากเป็น ชั้นที่เกิดการรวมตัวและปลดปล่อยแสงออกมาเป็นหลัก ในขณะที่ชั้น NPB ทำหน้าที่เป็นเพียงชั้นส่งผ่านโฮลเท่านั้นซึ่งไม่มีผลต่อกลไกการเปล่งแสง

4.2 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดโครงสร้าง

ITO/NPB/ZnSe/Al ที่สร้างโดยอัตราการระเหยสารคงที่

ในส่วนที่สองนี้จะได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบของสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติทางแสงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้น ZnSe และ NPB ของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดที่มีอัตราการระเหยของสารคงที่ ซึ่งจะทำการให้อัตราการระเหยของสารมีค่าคงที่ตลอดการเตรียมสาร รวมทั้ง

ลดอัตราการระเหยสารให้ลดลง ซึ่งจะทำให้ความเป็นผลึกของชั้น ZnSe มีค่าเพิ่มขึ้น โดยอัตราการระเหยสารจะแสดงดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 อัตราการระเหยสารตลอดช่วงการเตรียมฟิล์มบาง ZnSe

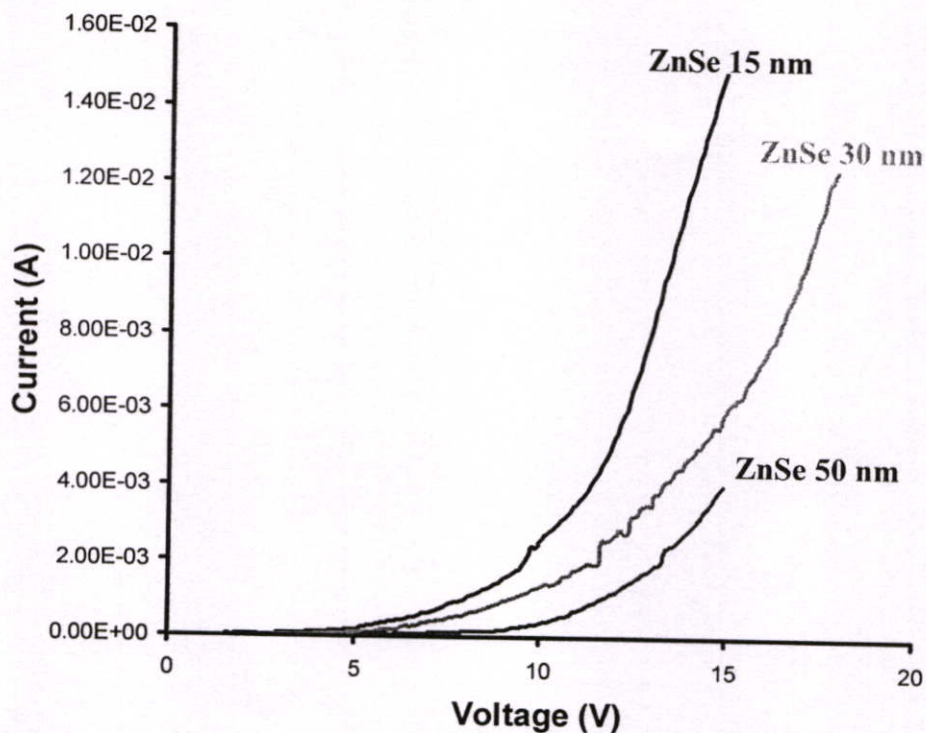
จากการศึกษาในหัวข้อ 4.1 พบว่า ชั้น NPB เป็นชั้นที่ทำหน้าที่ส่งผ่านโฮลเท่านั้น ไม่ได้มีผลต่อกลไกการเปล่งแสงนอกจากนั้นความหนาที่เพิ่มขึ้นของ NPB ยังมีผลต่อความหนาแน่นของกระแสรวมทั้งค่าความต่างศักย์ขีดเริ่มของไดโอดเปล่งแสงซึ่งอธิบายแล้วในหัวข้อ 4.1.2 ดังนั้นในการทดลองตอนนี้จะทำการศึกษาการลดความหนาของชั้น NPB จาก 50 นาโนเมตร เป็น 30 นาโนเมตร จากเดิมที่หนา 100 นาโนเมตร เป็น 50 นาโนเมตร โดยผลการวัดค่าสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติทางแสงของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดที่สร้างขึ้นประกอบด้วย

4.2.1 ผลการวัดสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดสารอินทรีย์และสาร

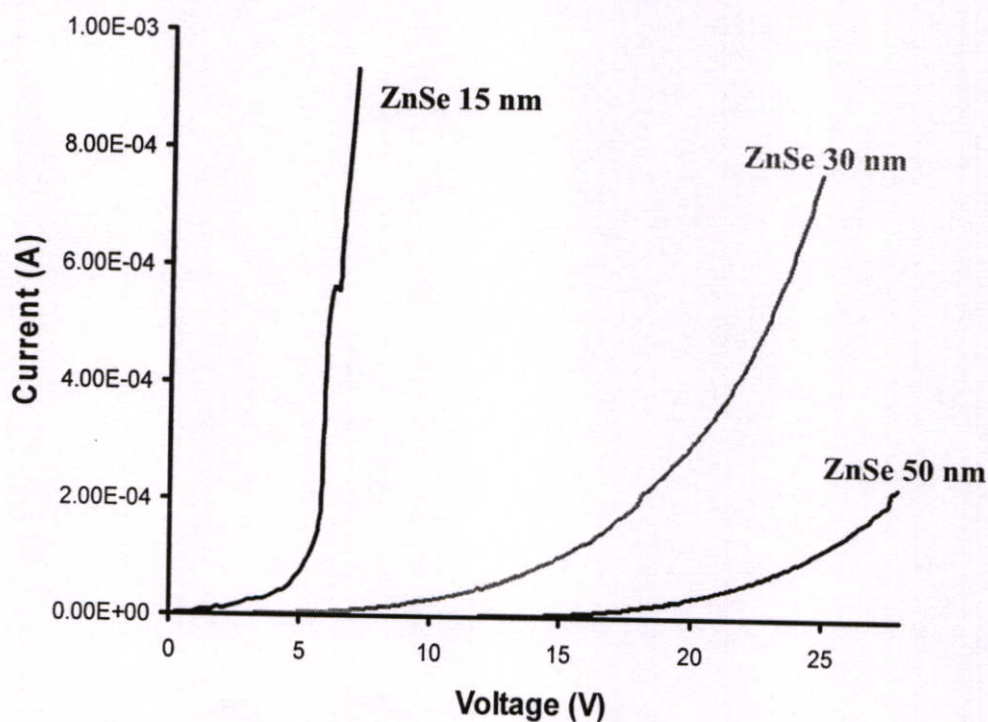
อนินทรีย์โครงสร้าง ITO/NPB/ZnSe/Al เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความหนาชั้น

NPB และ ZnSe

ผลการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสที่ไหลผ่านกับความต่างศักย์ที่จ่ายให้แก่ไดโอดเปล่งแสงไฮบริดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์โครงสร้าง ITO/NPB/ZnSe/Al ที่ทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นสารอินทรีย์ NPB และ สารอนินทรีย์ ZnSe โดยให้ความหนาของชั้นสารอินทรีย์ NPB มีค่า 30 และ 50 นาโนเมตร และความหนาชั้นสารอนินทรีย์ ZnSe มีค่า 15, 30 และ 50 นาโนเมตร แสดงในรูปที่ 4.9 และ 4.10



รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดที่เปลี่ยนแปลงความหนาชั้น ZnSe เป็น 15, 30 และ 50 nm โดยความหนาของชั้น NPB คงที่ 30 nm



รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดที่เปลี่ยนแปลงความหนาชั้น ZnSe เป็น 15, 30 และ 50 nm โดยความหนาของชั้น NPB คงที่ 50 nm

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อทำการเพิ่มความต่างศักย์ให้แก่ไดโอดเปล่งแสงไฮบริด ค่ากระแสที่ไหลผ่านไดโอดเปล่งแสงไฮบริดจะสามารถแบ่งพฤติกรรมออกได้เป็น 2 ส่วนขึ้นกับค่าความต่างศักย์เช่นเดียวกับที่พบในผลการวัดสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดที่ทำการเปลี่ยนความหนาชั้น ZnSe ดังแสดงในรูป 4.1 และ 4.2 ซึ่งสาเหตุของการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของกระแสที่ขึ้นความต่างศักย์ได้อธิบายแล้วในหัวข้อ 4.1.1 โดยพบพฤติกรรมของกระแสเช่นเดียวกันนี้ในทุกตัวอย่างของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดที่ทำการศึกษา

โดยการพบพฤติกรรมของกระแสเช่นนี้แสดงให้เห็นถึงการเกิดสถานะบกพร่องของผลึก ZnSe อยู่ ทั้งนี้สาเหตุอาจเกิดเนื่องจากข้อจำกัดของระบบระเหยสารด้วยความร้อนซึ่งพบว่าไม่สามารถเตรียมฟิล์มบาง ZnSe ที่มีคุณภาพผลึกที่ดีได้ที่มีความหนาน้อยๆ และไม่มีทำให้อุณหภูมิกับฐานรองรับ ดังนั้นฟิล์มบาง ZnSe ที่เตรียมได้จึงยังคงพบสถานะบกพร่องเกิดขึ้นอยู่

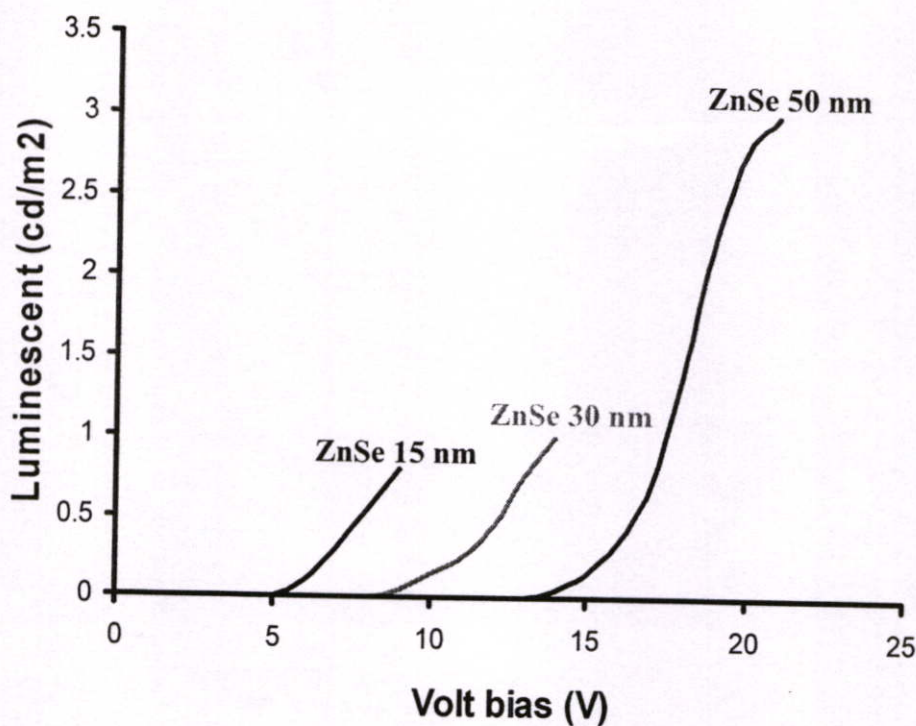
เมื่อทำการทดลองเพิ่มความหนาของชั้น ZnSe จาก 15 นาโนเมตร เป็น 30 นาโนเมตร และ 50 นาโนเมตร ตามลำดับพบว่าค่ากระแสที่วัดได้จากไดโอดเปล่งแสงไฮบริดมีแนวโน้มที่จะลดลง ในขณะที่ค่าความต่างศักย์ขีดเริ่มมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นจาก 4 เป็น 6 และเพิ่มเป็น 8 โวลต์ เมื่อความหนาของชั้น ZnSe เพิ่มขึ้น ที่ความหนาของชั้น NPB 30 นาโนเมตร โดยผลการทดลองมีแนวโน้มเช่นเดียวกันทั้งที่ความหนาของชั้น NPB 50 นาโนเมตร คือเพิ่มจาก 4 เป็น 7 และเพิ่มเป็น 15 โวลต์ ซึ่งสาเหตุของการลดลงของกระแสที่ไหลผ่านไดโอดเปล่งแสงสามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎี Space Charge Limit Current ที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 2 และในหัวข้อ 4.1.1

4.2.2 ผลการวัดสมบัติทางแสงของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์

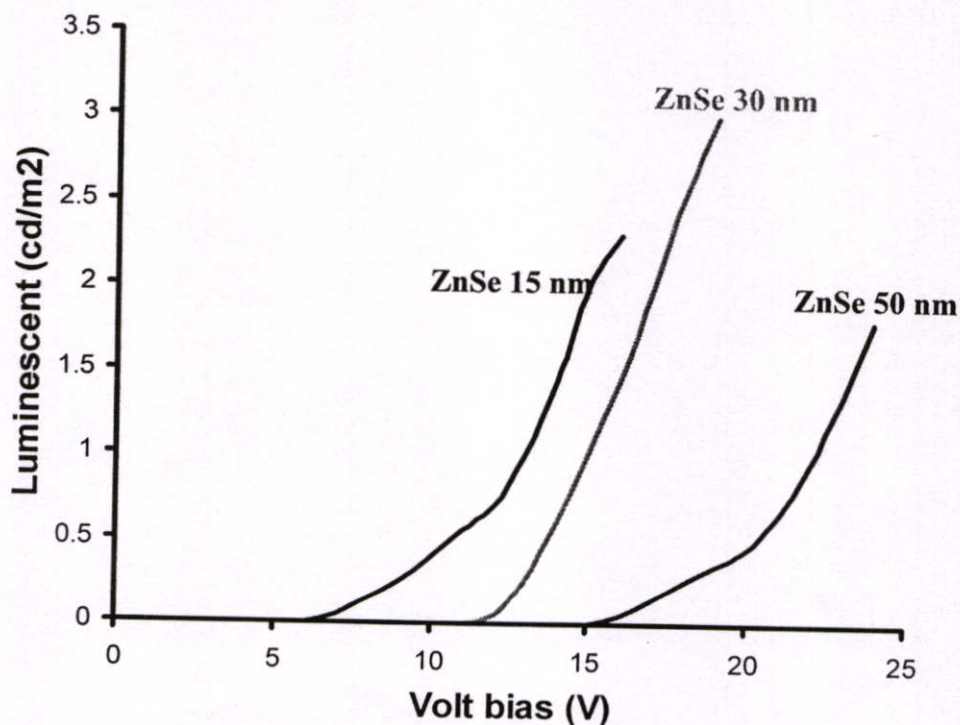
โครงสร้าง ITO/NPB/ZnSe/Al เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้น NPB และ ZnSe

ผลการวัดค่าความสัมพันธ์ระหว่างความส่องสว่างของไดโอดเปล่งแสงกับค่าความต่างศักย์ที่จ่ายให้แก่ไดโอดเปล่งแสงไฮบริดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์โครงสร้าง ITO/NPB/ZnSe/Al ที่ทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นสารอินทรีย์ NPB และ สารอนินทรีย์ ZnSe โดยให้ความหนาของชั้นสารอินทรีย์ NPB มีค่า 30 และ 50 นาโนเมตร และความหนาชั้นสารอนินทรีย์ ZnSe มีค่า 15, 30 และ 50 นาโนเมตร แสดงในรูปที่ 4.11 และ 4.12

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อทำการเพิ่มความต่างศักย์ให้แก่ไดโอดเปล่งแสงไฮบริดค่าความส่องสว่างที่วัดได้จะมีพฤติกรรมเช่นเดียวกันกับค่าของกระแสที่ไหลผ่านไดโอดเปล่งแสงไฮบริด กล่าวคือ เมื่อทำการจ่ายความต่างศักย์ค่าต่ำๆ ให้แก่ไดโอดเปล่งแสงไฮบริดจะไม่พบการเปล่งแสงออกมา แต่เมื่อทำการเพิ่มค่าความต่างศักย์ให้สูงขึ้นจนถึงค่าหนึ่งจะพบการเปล่งแสงออกมา หลังจากนั้นเมื่อทำการเพิ่มความต่างศักย์ให้แก่ไดโอดเปล่งแสงต่อไปจะพบว่า ค่าความส่องสว่างของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะพบพฤติกรรมของการส่องสว่างเช่นเดียวกันในทุกตัวอย่างของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดที่ทำการศึกษา



รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความส่องสว่างและความต่างศักย์ของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดที่เปลี่ยนแปลงความหนาชั้น ZnSe เป็น 15, 30 และ 50 nm โดยความหนาของชั้น NPB คงที่ 30 nm



รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความส่องสว่างและความต่างศักย์ของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดที่เปลี่ยนแปลงความหนาชั้น ZnSe เป็น 15, 30 และ 50 nm โดยความหนาของชั้น NPB คงที่ 50 nm

โดยพฤติกรรมของการส่องสว่างที่คล้ายกับพฤติกรรมของกระแสที่ไหลผ่านไดโอดเปล่งแสงไฮบริดเมื่อทำการเพิ่มความต่างศักย์ที่ให้แก่ไดโอดเปล่งแสงไฮบริดสามารถอธิบายได้จากกระบวนการเปล่งแสงของไดโอดเปล่งแสงที่ได้กล่าวแล้วในบทที่ 2 กล่าวคือ ค่าของการส่องสว่างของไดโอดเปล่งแสงจะแปรผันตรงกับจำนวนเอกซิตอนที่เกิดขึ้น ซึ่งจำนวนเอกซิตอนนี้จะขึ้นกับจำนวนพาหะหรือความหนาแน่นของกระแสที่ผ่านไดโอดเปล่งแสง ดังนั้นที่ความต่างศักย์มีค่าต่ำๆ ค่าของกระแสที่ไหลผ่านไดโอดเปล่งแสงมีค่าน้อยดังนั้นจำนวนเอกซิตอนที่เกิดขึ้นจะมีค่าน้อยส่งผลให้ความส่องสว่างมีค่าน้อย แต่เมื่อทำการเพิ่มความต่างศักย์จนผ่านค่าความต่างศักย์ขีดเริ่ม ค่าของกระแสที่ไหลผ่านไดโอดเปล่งแสงจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้จำนวนเอกซิตอนที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความส่องสว่างมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน

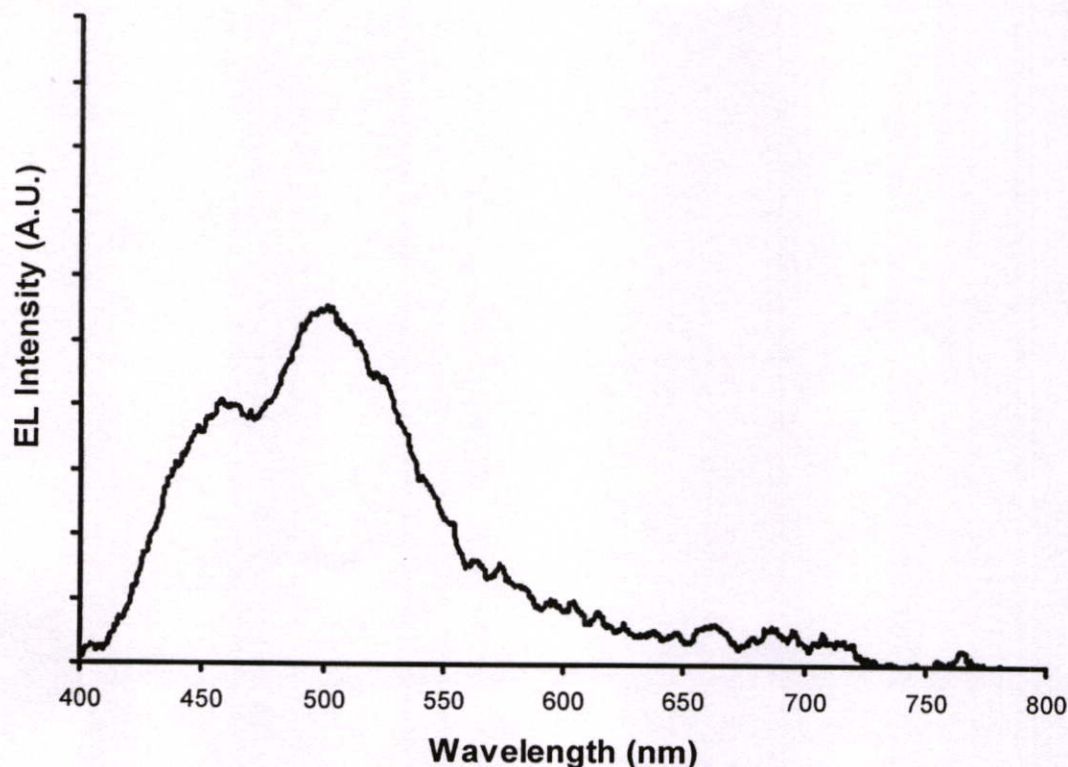
เมื่อทำการทดลองเพิ่มความหนาของชั้น ZnSe จาก 15 นาโนเมตร เป็น 30 นาโนเมตร และ 50 นาโนเมตร ตามลำดับ พบว่าค่าความส่องสว่างของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดมีแนวโน้มที่จะลดลงในขณะที่ความต่างศักย์ขีดเริ่มการส่องสว่างมีแนวโน้มที่จะมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 5 เป็น 9 และเพิ่มเป็น 14 โวลต์ เมื่อความหนาของชั้น ZnSe มีค่าเพิ่มขึ้น และความหนาของชั้น NPB คงที่ 30 นาโนเมตร โดยผลการทดลองมีแนวโน้มเช่นเดียวกันที่ความหนาของชั้น NPB 50 นาโนเมตร โดยเพิ่มจาก 7 เป็น 12 และเพิ่มขึ้นเป็น 16 โวลต์ ซึ่งการลดลงของค่าความส่องสว่างของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดเมื่อทำการเพิ่มความหนาชั้น ZnSe สามารถอธิบายได้ด้วย ทฤษฎี Space Charge Limit Current ที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 2 กล่าวคือ ค่าของความหนาแน่นของกระแสในไดโอดเปล่งแสงจะมีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันกับค่าความหนาของชั้นสาร ดังนั้นเมื่อความหนาของชั้น ZnSe มีค่าเพิ่มมากขึ้นจึงทำให้ค่ากระแสมีค่าลดลงซึ่งส่งผลให้เกิดการลดลงของจำนวนเอกซิตอนที่ขึ้นสาเหตุให้ค่าความส่องสว่างของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดมีค่าลดลงเมื่อความหนาของชั้น ZnSe มีค่าเพิ่มขึ้น โดยผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลองของ D. Troadec [13] ซึ่งพบว่าเมื่อทำการเพิ่มความหนาของไดโอดเปล่งแสงสารอินทรีย์ให้มากขึ้นจะพบการลดลงของค่าความส่องสว่างจากไดโอดเปล่งแสง รวมทั้งพบว่าค่าความต่างศักย์ขีดเริ่มการส่องสว่างของไดโอดเปล่งแสงมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเพิ่มความหนาของชั้นสารอินทรีย์

4.2.3 ผลการวัดสเปกตรัมการเปล่งแสงด้วยไฟฟ้าของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์โครงสร้าง ITO/NPB/ZnSe/Al

ผลการวัดสเปกตรัมการเปล่งแสงด้วยไฟฟ้าของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์โครงสร้าง ITO/NPB/ZnSe/Al ที่มีความหนาของชั้น NPB 50 นาโนเมตร และความหนาชั้น ZnSe 30 นาโนเมตร เมื่อทำการจ่ายความต่างศักย์คงที่ 16 โวลต์ แสดงในรูปที่ 4.13

สเปกตรัมของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดจะถูกพบที่ความยาวคลื่น 2 ค่าคือ 457 นาโนเมตร และ 500 นาโนเมตร ซึ่งที่ความยาวคลื่น 500 นาโนเมตรมีความเข้มของสเปกตรัมสูงกว่าที่ความยาวคลื่น 457 นาโนเมตร โดยสาเหตุและที่มาของความยาวคลื่นทั้งสองตำแหน่งรวมทั้งกลไกการ

เปล่งแสงของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดสารอินทรีย์และอนินทรีย์โครงสร้าง ITO/NPB/ZnSe/Al จะ
ได้วิเคราะห์และอธิบายในหัวข้อ 4.2.4



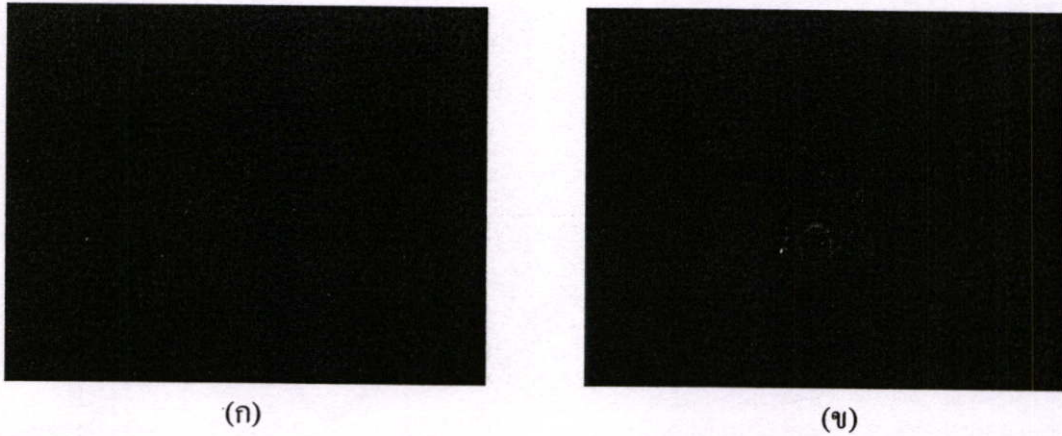
รูปที่ 4.13 สเปกตรัมการเปล่งแสงด้วยไฟฟ้าของไดโอดเปล่งแสงไฮบริด โครงสร้าง
ITO/NPB (50 nm)/ZnSe(30 nm)/Al ที่ทำการจ่ายความต่างศักย์ 16 โวลต์

4.2.4 การเปล่งแสงย่านความยาวคลื่นสีน้ำเงินในไดโอดเปล่งแสงไฮบริดสารอินทรีย์และ สารอนินทรีย์โครงสร้าง ITO/NPB/ZnSe/Al

จากการศึกษาสเปกตรัมการเปล่งแสงด้วยไฟฟ้าของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดสารอินทรีย์
และสารอนินทรีย์โครงสร้าง ITO/NPB/ZnSe/Al พบว่าที่ความหนาของชั้น NPB 50 nm และ ZnSe
30 nm มีการเปล่งแสงย่านความยาวคลื่นสีน้ำเงิน 2 ความยาวคลื่น ได้แก่ 457 นาโนเมตร และ 500
นาโนเมตร ซึ่งแสงที่เปล่งออกมาสามารถมองเห็นได้ชัดเจนในที่มืด เมื่อทำการจ่ายความต่าง
ศักย์ไฟฟ้าให้แก่ไดโอดเปล่งแสงไฮบริดประมาณ 16 โวลต์ ดังแสดงในรูป 4.14

โดยสาเหตุของการเปล่งแสงทั้งสองความยาวคลื่นที่พบนี้สามารถอธิบายได้จากการ
พิจารณาโครงสร้างแถบพลังงานของไดโอดเปล่งแสงไฮบริด แสดงในรูป 4.15(ก) พบว่าแสงที่มี
ความยาวคลื่น 457 นาโนเมตรสอดคล้องกับช่องว่างแถบพลังงานของ ZnSe ซึ่งมีค่าประมาณ 2.8
อิเล็กตรอนโวลต์ ในขณะที่ความยาวคลื่นประมาณ 500 นาโนเมตรเกิดจากการรวมตัวที่บริเวณ
จุดบกพร่องของผลึก ZnSe เนื่องจากฟิล์มที่ปลูกมีความหนาน้อยรวมทั้งวิธีการปลูกมีผลทำให้มี
โอกาสเกิดจุดบกพร่องได้มาก โดยจุดบกพร่องนี้จะเกิดอยู่ระหว่างช่องว่างแถบพลังงานจึงส่งผลให้
ความยาวคลื่นที่เปล่งออกมาจากจุดบกพร่องมีแนวโน้มที่จะมีความยาวคลื่นมากขึ้น ดังนั้นจึง

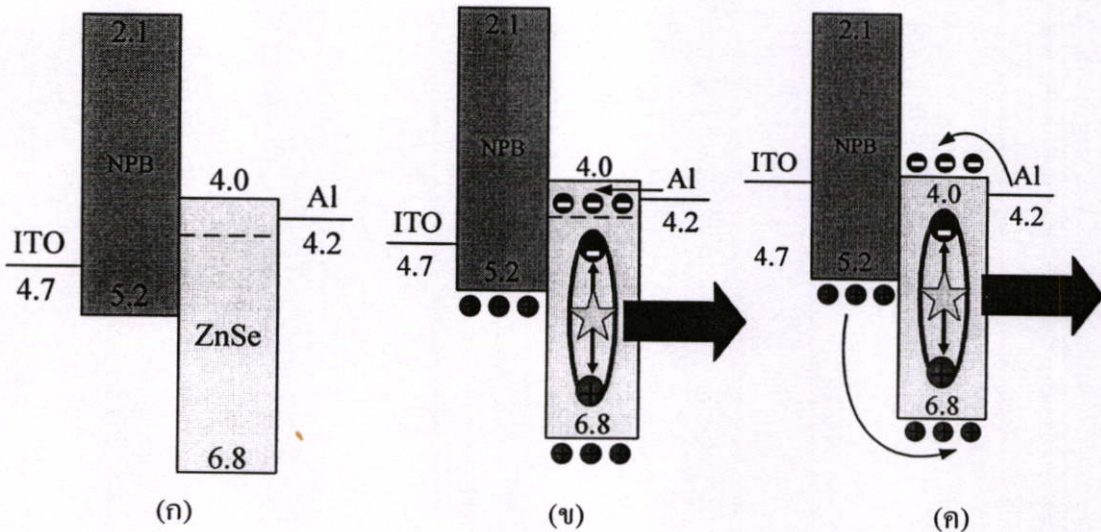
สามารถสรุปได้ว่าแสงทั้งสองความยาวคลื่นที่เปล่งออกมาจากไดโอดเปล่งแสงไฮบริดเกิดจากการรวมตัวของพาหะภายในชั้นของ ZnSe โดยที่แสงที่มีความยาวคลื่น 457 นาโนเมตรเกิดจากช่องว่างแถบพลังงานของผลึก ZnSe ในขณะที่ความยาวคลื่น 500 นาโนเมตรเกิดจากความบกพร่องของผลึก ZnSe ดังแสดงในรูป 4.15(ข) และ 4.15(ค) ตามลำดับ



รูปที่ 4.14 แสงช่วงความยาวคลื่นสีน้ำเงินจากไดโอดเปล่งแสงไฮบริด โครงสร้าง ITO/NPB/ZnSe/Al ที่มีความหนาของชั้น NPB 50 nm และ ZnSe 30 nm

(ก) เมื่อจ่ายความต่างศักย์ 12 โวลต์

(ข) เมื่อจ่ายความต่างศักย์ 16 โวลต์



รูปที่ 4.15 (ก) แผนภาพแถบพลังงานของไดโอดเปล่งแสงไฮบริด โครงสร้าง ITO/NPB/ZnSe/Al

(ข) การเปล่งแสงที่เกิดจากจุดบกพร่องของผลึก ZnSe

(ค) การเปล่งแสงที่เกิดจากช่องว่างแถบพลังงานของผลึก ZnSe

จากการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติทางแสงของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดที่เตรียมโดยมีการควบคุมอัตราสารระเหยสารทำให้สามารถเข้าใจและอธิบายถึงกลไกการเปล่งแสงของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดได้ดังนี้

เมื่อทำการจ่ายความต่างศักย์ให้แก่ไดโอดเปล่งแสงไฮบริดจะเกิดการฉีดโฮลจากขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง ITO เข้าสู่สถานะ HOMO ของชั้นส่งผ่านโฮล NPB และเคลื่อนที่ไปยังรอยต่อของ NPB/ZnSe โดยสนามไฟฟ้าภายในชั้น NPB ในขณะที่เดียวกันอิเล็กตรอนจากขั้วไฟฟ้าออลูมิเนียมจะถูกฉีดเข้าสู่ชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน ZnSe โดยที่ความต่างศักย์มีค่าน้อย อิเล็กตรอนจะถูกฉีดเข้าสู่สถานะบกร่องของผลึกซึ่งอยู่ต่ำกว่าค่าฟังก์ชันงานของออลูมิเนียมเกิดเป็นรอยต่อแบบโอห์มิกและเคลื่อนที่ไปยังรอยต่อของ ZnSe/NPB โดยสนามไฟฟ้าภายในชั้น ZnSe ดังจะเห็นได้จากพฤติกรรมของกระแสที่มีการเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นที่ความต่างศักย์ต่ำในหัวข้อ 4.1.1 และ 4.2.1

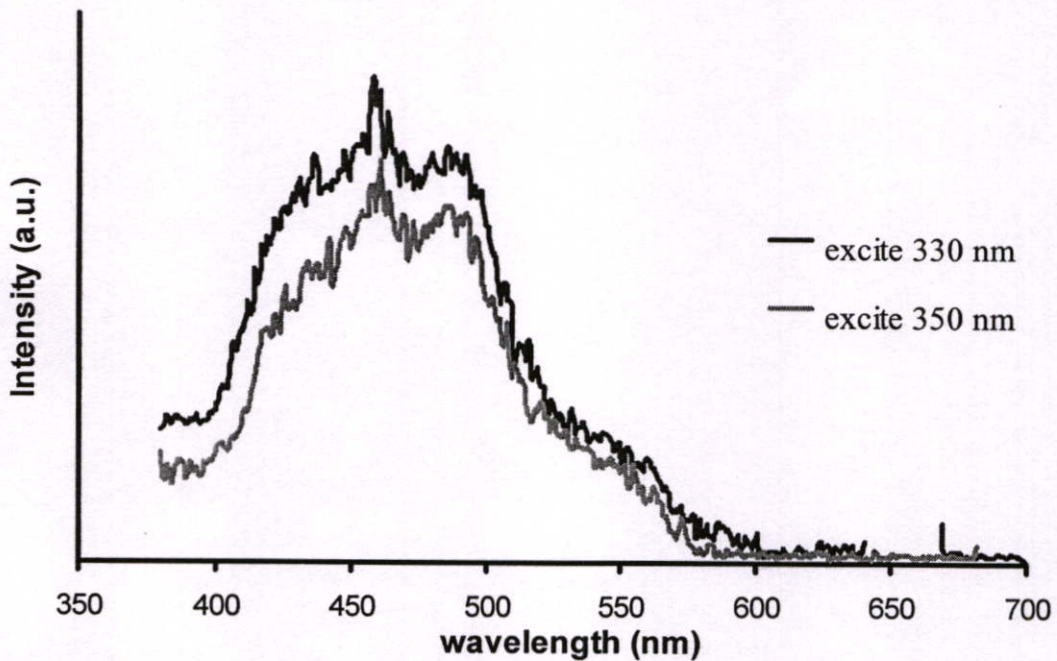
พิจารณาที่บริเวณรอยต่อของ NPB/ZnSe พบว่ามีกำแพงศักย์เกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของ ระดับพลังงาน HOMO และ ระดับพลังงาน LUMO ของ NPB กับ แถบวาเลนซ์และแถบนำกระแส ของ ZnSe โดยกำแพงศักย์ของโฮลจะมีค่าประมาณ 1.6 eV ในขณะที่กำแพงศักย์ของอิเล็กตรอนมีค่ามากกว่า 1.9 eV (สถานะบกร่องของผลึก ZnSe อยู่ต่ำกว่าแถบนำกระแสทำให้ค่าของกำแพงศักย์ของอิเล็กตรอนที่อยู่ในสถานะนี้มีค่ามากกว่า 1.9 อิเล็กตรอน โวลต์) ซึ่งความสูงของกำแพงศักย์จะเป็นสาเหตุให้เกิดการกักของพาหะทั้งโฮลและอิเล็กตรอนที่บริเวณรอยต่อ NPB/ZnSe ทำให้พาหะไม่สามารถเกิดการรวมตัวและปลดปล่อยแสงออกมาได้ ดังจะเห็นได้จากการไม่พบการเปล่งแสงที่ความต่างศักย์ต่ำจากกราฟแสดงแสงสว่างในหัวข้อ 4.2.2

เมื่อทำการเพิ่มความต่างศักย์ให้แก่ไดโอดเปล่งแสงไฮบริดจะทำให้มีการฉีดโฮลเข้าสู่ชั้น NPB มีค่ามากขึ้น ในขณะที่อิเล็กตรอนที่เข้าสู่สถานะบกร่องมีค่าสูงขึ้นนอกจากนี้จะพบว่าอิเล็กตรอนบางตัวสามารถฉีดเข้าไปยังแถบนำกระแสได้เกิดเป็นรอยต่อแบบชอกกี ดังจะเห็นได้จากการเพิ่มขึ้นของกระแสแบบเส้นโค้งที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.1.1 และ 4.2.1 เมื่อพิจารณาถึงสนามไฟฟ้าที่กระทำต่อชั้นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 พบว่า ค่าความเข้มของสนามไฟฟ้าจะขึ้นกับค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของตัวสารและความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ให้กับตัวไดโอดเปล่งแสง ซึ่ง NPB มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประมาณ 4 ในขณะที่ ZnSe มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประมาณ 8.5 จากการคำนวณพบว่าสนามไฟฟ้าในสารอินทรีย์มีค่าสูงกว่าสนามไฟฟ้าในสารอนินทรีย์ ประกอบกับความสูงของกำแพงศักย์ของโฮลมีค่าต่ำกว่าของอิเล็กตรอน ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่โฮลในชั้น NPB จะได้รับพลังงานสูงพอที่จะสามารถข้ามกำแพงศักย์บริเวณรอยต่อเข้าไปสู่แถบวาเลนซ์ของชั้น ZnSe และเกิดการรวมตัวกับอิเล็กตรอนที่ถูกกักอยู่บริเวณรอยต่อของ NPB/ZnSe เกิดการปลดปล่อยแสงในช่วงความยาวคลื่นสีน้ำเงินออกมา

โดยความยาวคลื่นแสง 500 นาโนเมตรจะเกิดจากการรวมตัวจากสถานะบกร่องของผลึก ZnSe ดังแสดงในรูป 4.15 (ข) ในขณะที่ความยาวคลื่นแสง 457 นาโนเมตรจะเกิดจากการรวมตัวจากช่องว่างแถบพลังงานของ ZnSe ดังแสดงในรูป 4.15 (ค) โดยการรวมตัวที่เกิดจาก

สถานะบกพร่องของผลึกจะเกิดได้มากกว่าการรวมตัวที่เกิดจากช่องว่างแถบพลังงานของ ZnSe ดังจะเห็นได้จากความสูงของสเปกตรัมการเปล่งแสงด้วยไฟฟ้าที่ตำแหน่ง 500 นาโนเมตร จะมีค่าสูงกว่าที่ตำแหน่ง 457 นาโนเมตร

เมื่อพิจารณาถึงสเปกตรัมการเรืองแสงของฟิล์มบาง ZnSe ที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงความยาวคลื่น 330 และ 350 นาโนเมตร ดังแสดงในรูป 4.16 พบว่าความยาวคลื่นที่ฟิล์มบาง ZnSe สามารถเปล่งออกมาได้ 2 ความยาวคลื่น ได้แก่ ประมาณ 460 นาโนเมตร และ 500 นาโนเมตร ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับสเปกตรัมการเปล่งแสงด้วยไฟฟ้าจากไดโอดเปล่งแสงไฮบริดดังแสดงในรูป 4.13

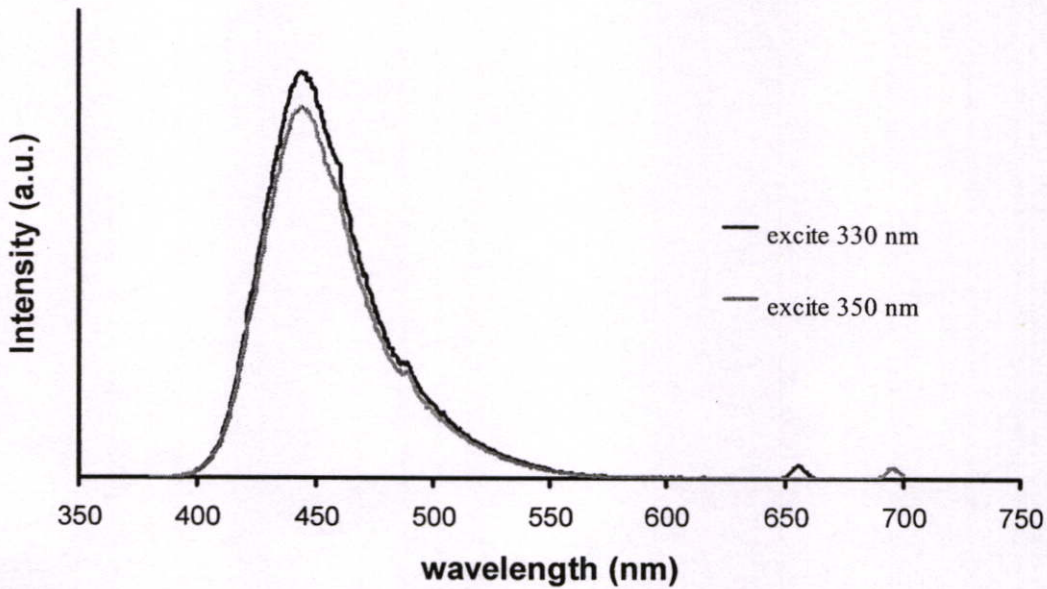


รูปที่ 4.16 สเปกตรัมการเรืองแสงของฟิล์มบาง ZnSe ที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงความยาวคลื่น 330 และ 350 นาโนเมตร

ผลของสเปกตรัมการเรืองแสงจากฟิล์มบาง ZnSe ที่ถูกกระตุ้นด้วยแสง เป็นสิ่งที่ช่วยยืนยันอีกประการหนึ่งที่จะทำให้สามารถสรุปได้ว่าแสงความยาวคลื่นสีน้ำเงินทั้งสองความยาวคลื่นที่เปล่งออกมาจากไดโอดเปล่งแสงไฮบริดมาจากชั้นของฟิล์มบาง ZnSe

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาถึงสเปกตรัมการเรืองแสงของฟิล์มบาง NPB ที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงความยาวคลื่น 330 และ 350 นาโนเมตร ดังแสดงในรูป 4.17 พบว่าความยาวคลื่นที่เปล่งออกมาอยู่บริเวณ 450 นาโนเมตร จึงมีความเป็นไปได้เช่นกันที่แสงความยาวคลื่นในช่วง 450 นาโนเมตรที่เปล่งมาจากชั้นฟิล์มบาง NPB แต่อย่างไรก็ตามจากการพิจารณาแบบจำลองกลไกการทำงานของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดที่ได้เสนอไปนั้นพบว่าการเปล่งแสงที่เกิดจากชั้น NPB เกิดขึ้นได้ยาก เนื่องจากผลของสนามไฟฟ้า รวมทั้งความสูงของกำแพงศักย์ของอิเล็กตรอนบริเวณรอยต่อของ NPB และ ZnSe ดังนั้น โอกาสที่แสงสีน้ำเงินที่เปล่งออกมาจากไดโอดเปล่งแสงไฮบริดจะมา

จากชั้นฟิล์มบาง NPB จึงมีโอกาสได้น้อยมาก โดยอาจจะสามารถเกิดได้ในกรณีที่ทำให้การจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มีค่าสูงมากให้แก่ไดโอดเปล่งแสงไฮบริด



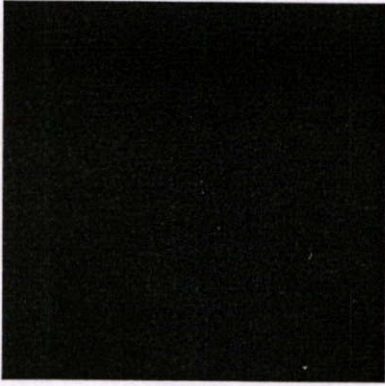
รูปที่ 4.17 สเปกตรัมการเปล่งแสงของฟิล์มบาง NPB ที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงความยาวคลื่น 330 และ 350 นาโนเมตร

4.3 การประยุกต์สร้างไดโอดเปล่งแสงไฮบริดแบบคอตเมทริกซ์

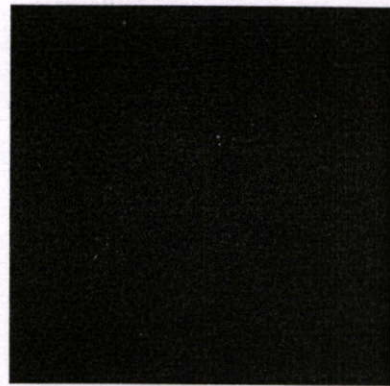
จากการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์โครงสร้าง ITO/NPB/ZnSe/Al พบว่าเงื่อนไขที่เหมาะสมที่ทำให้ไดโอดเปล่งแสงมีประสิทธิภาพสูงสุดคือ ความหนา NPB 50 นาโนเมตร และ ความหนา ZnSe 30 นาโนเมตร โดยทำการระเหยสารที่อัตราการระเหยที่ต่ำและคงที่ โดยจะได้นำเงื่อนไขนี้ไปทดลองประยุกต์สร้างเป็นโครงสร้างแบบคอตเมทริกซ์ขนาด 18x18 จุด โดยแต่ละจุดมีพื้นที่ 500x500 ตารางไมโครเมตร ดังแสดงในรูป 4.18



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.18 ไคโอดแปลงแสงไฮบริดแบบคอตเมทริกซ์ขนาด 18×18 จุด โดยแต่ละจุดมีขนาด 500×500 ตารางไมโครเมตร

(ก) ก่อนทำการจ่ายความต่างศักย์

(ข) ทำการจ่ายความต่างศักย์แถวเดียว

(ค) ทำการจ่ายความต่างศักย์ทุกจุด

จากรูป 4.18 พบว่าไคโอดแปลงแสงไฮบริดที่สร้างแบบคอตเมทริกซ์สามารถแปลงแสงเห็นได้ชัดเจนในที่มืด แต่พบว่ายังคงมีบางจุดที่มีความสว่างไม่เท่ากันและบางจุดไม่มีการแปลงแสง ทั้งนี้เกิดจากความไม่เป็นระเบียบของการระเหยสารแต่ละตำแหน่ง แต่อย่างไรก็ตามผลที่ได้นี้จะแสดงถึงความเป็นไปได้ที่จะนำไคโอดแปลงแสงไฮบริดไปประยุกต์สร้างเป็นจอแสดงผลได้ในอนาคต

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติทางแสงของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ซึ่งเป็นสิ่งประดิษฐ์ชนิดใหม่ โดยไดโอดเปล่งแสงไฮบริดที่ทำการศึกษาเป็น โครงสร้างแบบสองชั้นประกอบด้วย ชั้นสารอินทรีย์ N,N'-di(naphthalen-1-yl)-N,N'-diphenyl-benzidine (NPB) เป็นชั้นส่งผ่านโฮล และชั้นสารอนินทรีย์ซิงค์ซีลีไนด์ (ZnSe) เป็นชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน โดยมีขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงอินเดียมทินออกไซด์ (ITO) และโลหะอลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้าบวกและลบตามลำดับ เงื่อนไขที่ใช้ในการศึกษาคือ การเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นสารอินทรีย์ และ สารอนินทรีย์ ที่เตรียมโดยใช้อัตราการระเหยสารที่คงที่และ ไม่คงที่ มีผลอย่างไรต่อสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติทางแสงของไดโอดเปล่งแสงไฮบริด

จากการศึกษาเงื่อนไขของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดที่เตรียมโดยใช้อัตราการระเหยสารไม่คงที่พบว่า เมื่อทำการเพิ่มความต่างศักย์ให้กับไดโอดเปล่งแสงจะพบพฤติกรรมของกระแสสามารถแบ่งออกเป็นสองส่วนขึ้นกับความต่างศักย์ซึ่งสาเหตุสามารถอธิบายได้จากการเกิดสถานะบกพร่องในผลึก ZnSe ดังได้อธิบายแล้วในหัวข้อ 4.1.1 โดยเมื่อทำการเพิ่มความหนาของชั้นสารอินทรีย์ NPB และ สารอนินทรีย์ ZnSe พบว่าค่ากระแสที่ไหลผ่านไดโอดเปล่งแสงไฮบริดมีแนวโน้มที่จะลดลง ในขณะที่ค่าความต่างศักย์ขีดเริ่มมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น ดังได้อธิบายในหัวข้อ 4.1.1 และ 4.1.2

เมื่อทำการเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าให้แก่ไดโอดเปล่งแสงไฮบริด โครงสร้าง ITO/NPB/ZnSe/Al ที่มีความหนาของ NPB 50 นาโนเมตร และ ZnSe 30 นาโนเมตร พบว่าที่ความต่างศักย์ 20 โวลต์ จะพบการเปล่งแสงช่วงความยาวคลื่นสีน้ำเงิน แต่เนื่องจากความสว่างที่เปล่งออกมานั้นมีค่าน้อยจนไม่สามารถวัดค่าได้จึงทำให้ไม่สามารถอธิบายถึงที่มาของการเปล่งแสงช่วงความยาวคลื่นสีน้ำเงินนี้ได้อย่างชัดเจน จากจุดนี้เองแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการเตรียมไดโอดเปล่งแสงไฮบริดโดยอัตราการระเหยไม่คงที่ทำให้ได้ไดโอดเปล่งแสงที่มีประสิทธิภาพต่ำ

อย่างไรก็ตามจากการศึกษาถึงสมบัติทางไฟฟ้าและการพิจารณาระดับโครงสร้างพลังงานของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดทำให้สามารถอธิบายถึงกลไกการเปล่งแสงเบื้องต้นได้ โดยที่มาของการเปล่งแสงช่วงความยาวคลื่นสีน้ำเงินมาจากการรวมตัวภายในชั้นสารอนินทรีย์ ZnSe ดังอธิบายในหัวข้อ 4.1.3 ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงกลไกการเปล่งแสงเช่นนี้แล้วพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อกลไกการเปล่งแสงได้แก่ ความหนาของชั้นสาร ค่าสนามไฟฟ้าในชั้นสาร โครงสร้างของระดับพลังงานของไดโอดเปล่งแสง และ ความเป็นผลึกของชั้น ZnSe ซึ่งการเตรียมชั้น ZnSe ให้มีความเป็นผลึกที่ดีจะเป็นปัจจัยสำคัญที่จะทำให้ไดโอดเปล่งแสงไฮบริดมีประสิทธิภาพสูงขึ้น

หนึ่งในวิธีการเตรียมสารอนินทรีย์ ZnSe ให้มีความเป็นผลึกสูงขึ้นคือการเตรียมสารโดยใช้อัตราการระเหยคงที่และระเหยที่อัตราการระเหยที่ต่ำเพื่อให้เกิดการจับตัวที่ดีขึ้นด้วยเหตุนี้จึงทำการเตรียมโคโอดเปล่งแสงโดยใช้อัตราการระเหยที่คงที่ แล้วจึงทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงซึ่งพบว่าเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้น ZnSe เป็น 15, 30 และ 50 นาโนเมตร และความหนาชั้น NPB เป็น 30 และ 50 นาโนเมตร พบว่าทุกความหนาของ NPB และ ZnSe พฤติกรรมของกระแสที่ไหลผ่านโคโอดเปล่งแสงไฮบริดเมื่อทำการเพิ่มความต่างศักย์ยังคงสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วงซึ่งเกิดจากการเกิดจุดบกพร่องของผลึก คือช่วงที่เป็นเชิงเส้นตามรายต่อแบบโอห์มมิก และช่วงที่เป็นเส้นโค้งแบบชอกกี ZnSe โดยพบว่าค่ากระแสที่ไหลผ่านโคโอดเปล่งแสงไฮบริดมีแนวโน้มที่จะลดลงในขณะที่ค่าความต่างศักย์ขีดเริ่มของโคโอดเปล่งแสงไฮบริดมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาของทั้งชั้น ZnSe และ NPB เพิ่มขึ้น ตามที่ได้อธิบายในหัวข้อ 4.1.1 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแม้ว่าจะทำการลดอัตราการระเหยและระเหยด้วยอัตราคงที่แล้วก็ตามแต่ก็ยังพบการเกิดสถานะบกพร่องภายในชั้น ZnSe อยู่ โดยสาเหตุที่ทำให้พบสถานะบกพร่องเกิดจากข้อจำกัดของระบบระเหยสารด้วยความร้อนซึ่งทำการเตรียม ZnSe ให้มีความเป็นผลึกที่ดีได้ยากจึงทำให้ยังพบการเกิดสถานะบกพร่องในชั้น ZnSe อยู่ แต่อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของโคโอดเปล่งแสงไฮบริดที่เตรียมโดยใช้อัตราการระเหยคงที่ที่มีค่าสูงกว่าการเตรียมโดยอัตราการระเหยไม่คงที่ดังจะเห็นได้จากค่าความต่างศักย์ขีดเริ่มของโคโอดเปล่งแสงที่ลดลงรวมทั้งความส่องสว่างที่สามารถที่จะศึกษาถึงสมบัติของแสงที่เปล่งออกมาได้

เมื่อทำการตรวจสอบสมบัติทางแสงของโคโอดเปล่งแสงไฮบริดพบว่า ทุกความหนาของ NPB และ ZnSe พฤติกรรมการส่องสว่างของโคโอดเปล่งแสงไฮบริดเมื่อทำการเพิ่มความต่างศักย์จะเป็นเช่นเดียวกับกระแสที่ไหลผ่านโคโอดเปล่งแสงไฮบริด โดยค่าความส่องสว่างของโคโอดเปล่งแสงมีแนวโน้มที่จะลดลง ในขณะที่ ความต่างศักย์ขีดเริ่มส่องสว่างมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาของทั้งชั้น ZnSe และ NPB เพิ่มขึ้น ตามที่ได้อธิบายในหัวข้อ 4.2.2 โดยโคโอดเปล่งแสงไฮบริดที่มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุดที่ได้จากเงื่อนไขความหนาที่ทำการศึกษา คือความหนาของ NPB 50 นาโนเมตร ความหนาของ ZnSe 30 นาโนเมตร และทำการเตรียมที่อัตราการระเหยที่ต่ำและคงที่ ซึ่งค่าประสิทธิภาพที่ได้คือ 0.86 แคนเดลาต่อแอมป์ (cd/A)

จากการศึกษาสเปกตรัมอิเล็กทรอนิกส์โทรมิเนสเซนซ์พบว่าที่ความต่างศักย์ 16 โวลต์โคโอดเปล่งแสงไฮบริดที่มีความหนาของชั้น NPB 50 นาโนเมตร และ ZnSe 30 นาโนเมตร พบว่ามีการเปล่งแสงที่สองความยาวคลื่นได้แก่ ความยาวคลื่น 457 นาโนเมตรซึ่งเกิดจากการรวมตัวของพาหะจากช่องว่างแถบพลังงานของ ZnSe ในขณะที่ ความยาวคลื่น 500 นาโนเมตรเกิดจากการรวมตัวของพาหะจากสถานะบกพร่องของผลึก ZnSe ดังได้อธิบายในหัวข้อ 4.2.4

จากการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของโคโอดเปล่งแสงไฮบริดทำให้ทราบถึงตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพของโคโอดเปล่งแสงไฮบริดรวมทั้งสามารถอธิบายกลไกการทำงานและที่มาของการเปล่งแสงได้ แม้ว่าโคโอดเปล่งแสงไฮบริดที่สร้างขึ้นจะยังมีประสิทธิภาพต่ำเมื่อ

เทียบกับประสิทธิภาพของไดโอดเปล่งแสงที่สร้างจากสารอินทรีที่ใช้อยู่ทั่วไป แต่อย่างไรก็ตามแนวคิดการสร้างอุปกรณ์เปล่งแสงโดยใช้โครงสร้างไฮบริดสารอินทรีและสารอินทรีก็เป็นวิธีใหม่ที่ยังสามารถพัฒนาต่อไปเพื่อใช้ทดแทนไดโอดเปล่งแสงสารอินทรีซึ่งวิธีการเตรียมใช้เครื่องมือที่มีราคาสูงได้ โดยข้อมูลที่ได้จากการศึกษาเหล่านี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้สร้างไดโอดเปล่งแสงไฮบริดสารอินทรีและสารอินทรีที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้นได้ต่อไปในอนาคต

ข้อเสนอแนะ

- จากที่ได้กล่าวไปแล้วว่าค่าความส่องสว่างของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดมีค่าขึ้นกับจำนวนพาหะที่เกิดการรวมตัวเป็นเอกซิตรอน ซึ่งพบว่าที่รอยต่อของ NPB/ZnSe มีค่าความสูงของกำแพงศักย์สูงถึง 1.6-1.9 อิเล็กตรอนโวลต์จากทางโฮลและอิเล็กตรอน ดังนั้นถ้าสามารถทำการเปลี่ยนหรือแทรกชั้นซึ่งมีผลทำให้ค่าของกำแพงศักย์บริเวณรอยต่อมีค่าลดลง จะทำให้พาหะสามารถที่จะฉีดข้ามกำแพงศักย์ที่บริเวณรอยต่อได้มากขึ้น ทำให้เอกซิตรอนมีค่ามากขึ้นอันจะส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดมีค่าสูงขึ้น
- จากการศึกษาพบว่าความเป็นผลึกของสารอินทรีมีผลต่อกลไกการเปล่งแสงซึ่งสัมพันธ์กับประสิทธิภาพของไดโอดเปล่งแสงไฮบริด ดังนั้นถ้าสามารถเตรียมชั้นสารอินทรีให้มีความเป็นผลึกที่ดีได้ ก็จะสามารถพัฒนาไดโอดเปล่งแสงให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นได้
- เมื่อพิจารณาถึงความยาวคลื่นแสงที่เปล่งออกมาจากไดโอดเปล่งแสงไฮบริดเทียบกับความยาวคลื่นแสงที่ตัวสารแต่ละชั้นสามารถเปล่งออกมาได้ พบว่าความยาวคลื่นแสงที่เปล่งออกมาสามารถเกิดได้จากทั้งชั้น NPB และ ZnSe ซึ่งการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับที่มาของแสงที่เปล่งจากไดโอดเปล่งแสงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งเพื่อที่จะเข้าใจถึงกลไกการทำงานของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดมากขึ้น
- แม้ว่าสารอินทรีที่อยู่บนสารอินทรีสามารถป้องกันการเสื่อมสภาพของสารอินทรีได้ก็ตามแต่ด้วยความหนาของสารอินทรีในระดับนาโนเมตรทำให้ยังป้องกันได้ไม่ดีนัก นอกจากนั้นข้อไฟฟ้าของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดก็สามารถเกิดการเสื่อมสภาพได้จากการเกิดปฏิกิริยากับความชื้น และ ออกซิเจนในอากาศ ซึ่งทั้งสองสาเหตุนี้จะมีผลทำให้ประสิทธิภาพรวมทั้งอายุการใช้งานของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดมีค่าลดลง ดังนั้นถ้าทำการห่อหุ้ม (Encapsulation) ไดโอดเปล่งแสงโดยใช้พอลิเมอร์บางชนิด ซึ่งจะสามารถป้องกันความชื้น และ ออกซิเจนในอากาศที่จะมาทำปฏิกิริยากับสารอินทรีและข้อไฟฟ้าโลหะ ซึ่งจะทำให้ไดโอดเปล่งแสงไฮบริดมีอายุการใช้งานที่ยาวขึ้น

- แบบจำลองกลไกการทำงานของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้ยังเป็นเพียงแบบจำลองขั้นต้นซึ่งสร้างขึ้นจากหลักการทางฟิสิกส์รวมทั้งข้อมูลที่ได้จากการทดลองที่มี ทั้งนี้ความถูกต้องของกระบวนการอาจมีข้อผิดพลาดบางประการ ซึ่งสามารถทำการศึกษาเพิ่มเติมด้วยเงื่อนไขที่แตกต่างรวมถึงเครื่องมือวัดและกระบวนการวัดชนิดอื่น เพื่อนำมาซึ่งความเข้าใจถึงของกลไกการทำงานของไดโอดเปล่งแสงไฮบริดได้ดียิ่งขึ้น

บรรณานุกรม

- [1] M.Pope, H. Kallman, P. Magnante, "**Electroluminescence in Organic Crystals.**", The Journal of Chemical Physics, Vol.38, 1963, 2042-2043
- [2] C. W. Tang, S. A. Van Slyke, "**Organic Electroluminescent diodes.**", Applied Physics Letters, Vol.51, 1987, 913-915
- [3] L.G. Wade Jr. **Organic chemistry**, 2nd ED Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1991
- [4] Stefan Riechel. "**Organic semiconductor lasers with two-dimensional distributed feedback.**", Doktorarbeiten of Ludwig Maximilians Universtat Munchen, Germany 2001
- [5] Hari Singh Nalwa, **Handbook of Advanced Electronic and Photonic Materials and Devices**, Vol 10, USA:Academic Press, 2001
- [6] Wolfgang Brutting, Stefan Berleb, "**Organic Electronics.**", 2 (2001) 1-36
- [7] Rainer Waser, **Nanoelectronics and information technology : advanced electronic materials and novel devices**, Weinheim : John Wiley, 2003
- [8] L.S. Hung, C.H. Chen, "**Recent progress of molecular organic electroluminescent materials and devices.**", Materials Science and Engineering, R 36, 2002, 143-222
- [9] Joseph Shinar, **Organic light-emitting devices**, New York : Springer-Verlag, 2004
- [10] Georges Hadziioannou, Paul F. Van Hutten, **Semiconducting polymers**, Weinheim : Wiley-VCH, 2000
- [11] I.D. Parker, "**Carrier tunneling and device characteristics in polymer light-emitting diodes.**", Journal of Applied Physics, Vol 75, 1656-1666
- [12] Wenge Yu, "**Blue electroluminescence of ZnSe thin film in an organic-inorganic heterostructure device**", Physics Letters A, 338, 2005, 402-406
- [13] D.Troadec, "**Organic light-emitting diodes base on multilayer structure.**", Synthetic Metals, Vol 124, 2001, 49-51

ประวัติผู้เขียน

นายนวนพันธ์ ขันนิกิจ เกิดเมื่อวันที่ 27 พฤษภาคม พ.ศ. 2524 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานครฯ สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนฤทธิยะวรรณาลัย จากนั้นเข้าศึกษาต่อในระดับอุดมศึกษา ณ มหาวิทยาลัยมหิดล ในปีการศึกษา 2542 และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ จากมหาวิทยาลัยมหิดล ปีการศึกษา 2545 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2546