

การประดิษฐ์ไดโอดเปล่งแสงสารกึ่งตัวนำอินทรีย์

tris(8-hydroxyquinoline)aluminum

FABRICATION OF TRIS(8-HYDROXYQUINOLINE)ALUMINUM
ORGANIC LIGHT-EMITTING DIODE

อนุศิษย์ แก้วประจักษ์
ANUSIT KEAWPRAJAK

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2549

ISBN 974-15-2564-8

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การประดิษฐ์ไดโอดเปล่งแสงสารกึ่งตัวนำอินทรีย์

tris(8-hydroxyquinoline)aluminum

FABRICATION OF TRIS(8-HYDROXYQUINOLINE)ALUMINUM
ORGANIC LIGHT-EMITTING DIODE

อนุศิษย์ แก้วประจักษ์

ANUSIT KEAWPRAJAK

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....**63385**
วัน,เดือน,ปี.....**28 ส.ค. 2549**

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2549

ISBN 974-15-2564-8

**FABRICATION OF TRIS(8-HYDROXYQUINOLINE)ALUMINUM
ORGANIC LIGHT-EMITTING DIODE**

ANUSIT KEAWPRAJAK

**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 974-15-2564-8

COPYRIGHT 2006

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประดิษฐ์ไดโอดเปล่งแสงสารกึ่งตัวนำอินทรีย์
	tris(8-hydroxyquinoline)aluminum
นักศึกษา	นายอนุศิษฐ์ แก้วประจักษ์
รหัสประจำตัว	46063502
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
พ.ศ.	2549
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. จิติ หนูแก้ว

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและสร้างสิ่งประดิษฐ์ไดโอดเปล่งแสงจากสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ tris(8-hydroxyquinoline)aluminum (Alq_3) ทำการสร้างไดโอดเปล่งแสงสารอินทรีย์สีเขียว โดยมีขั้วนำไฟฟ้าโปรงแสงเป็นฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ (ITO) สารกึ่งตัวนำอินทรีย์ N,N'-Di(naphthalen-1-yl)-N,N'-diphenyl-benzidine (NPB) เป็นชั้นส่งผ่านโฮล Alq_3 เป็นทั้งชั้นเปล่งแสงสีเขียว และชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน ลิเทียมฟลูออไรด์ (LiF) เป็นชั้นฉนวนอิเล็กตรอนและ อลูมิเนียม (Al) เป็นขั้วไฟฟ้าแคโทด ทำการสร้างไดโอดเปล่งแสงสารอินทรีย์สีแดงโดยทำการแทรกชั้นบางๆของ 4-(Dicyanomethylene)-2-*t*-butyl-6-(1,1,7,7-tetramethyljulolidyl-9-enyl)-4H-pyran (DCJTB) เป็นชั้นเปล่งแสงสีแดงเข้าไประหว่างชั้น NPB กับ Alq_3 โดยโครงสร้างของไดโอดเปล่งแสงสารอินทรีย์ทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ NPB กับ Alq_3 และชั้นฉนวนอิเล็กตรอน LiF ทำให้มีผลต่อสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของไดโอดเปล่งแสงสารอินทรีย์ที่สร้างขึ้น โดยที่ค่ากระแสและค่าความส่องสว่างของไดโอดเปล่งแสงสารอินทรีย์จะเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาของชั้นสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ NPB, Alq_3 และ LiF ลดลง จากผลการทดลองได้ไดโอดเปล่งแสงสารอินทรีย์สีเขียวโครงสร้างที่เหมาะสมคือ ITO(200 nm)/NPB(30 nm)/ Alq_3 (50 nm)/LiF(1 nm)/Al(200 nm) วัดค่าความส่องสว่างสูงสุดได้ 2,687 แคนเดลาต่อตารางเมตร (Cd/m^2) ที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 14 โวลต์ ไดโอดเปล่งแสงสารอินทรีย์สีแดงสร้างโดยทำการแทรกชั้น DCJTB 1 nm เข้าไประหว่างชั้น NPB กับ Alq_3 โครงสร้างที่เหมาะสมคือ ITO(200 nm)/NPB(30 nm)/DCJTB(1 nm)/ Alq_3 (50 nm)/LiF(1 nm)/Al(200 nm) วัดค่าความส่องสว่างสูงสุดได้ 129 แคนเดลาต่อตารางเมตร (Cd/m^2) ที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 โวลต์

Thesis Title	Fabrication of Tris(8-Hydroxyquinoline)Aluminum Organic Light Emitting Diode
Student	Mr. Anusit Keawprajak
Student ID.	46063502
Degree	Master of Science
Programme	Applied Physics
Year	2006
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Jiti Nukeaw

ABSTRACT

This research is a study of organic light-emitting diode (OLED) fabricated from tris(8-hydroxyquinoline)aluminum (Alq_3). The green OLED structure consists of indium tin oxide (ITO) as anode, N,N'-Di(naphthalen-1-yl)-N,N'-diphenyl-benzidine (NPB) as a hole transport layer (HTL), Alq_3 as an emitting layer (EML) also an electron transport layer (ETL), lithium fluoride (LiF) as an electron injection layer (EIL) and aluminum (Al) as a cathode. While a red OLED was fabricated by using 4-(Dicyanomethylene)-2-*t*-butyl-6-(1,1,7,7-tetramethyljulolidyl-9-enyl)-4Hpyran (DCJTB) inserted between NPB and Alq_3 . In OLED structure, we varied the thickness of NPB, Alq_3 and LiF. It was found that the electrical and optical characteristics of OLED depended on the thickness of NPB, Alq_3 and LiF. The current and luminance intensity of OLED increase when the thickness of NPB, Alq_3 and LiF was decreasing. The green OLED structure optimization is ITO(200 nm)/NPB(30 nm)/ Alq_3 (50 nm)/LiF(1 nm)/Al (200 nm), which showed the highest luminance intensity of $2,687 \text{ Cd/m}^2$ at a bias voltage of 14 V. The red OLED structure optimization is ITO(200 nm)/NPB(30 nm)/DCJTB(1 nm)/ Alq_3 (50 nm)/LiF (1 nm)/Al(200 nm), which showed the highest luminance intensity of 129 Cd/m^2 at a bias voltage of 15 V.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้อย่างดี ด้วยคำแนะนำ และคำปรึกษาจาก รศ.ดร.จิติ หนูแก้ว ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ และ ดร.อดิสร เตือนตรานนท์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ข้าพเจ้ารู้สึกทราบบ้างในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ทั้งสองท่านในทุกด้าน และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.รัชภาคย์ จิตต์อารี ที่ให้คำแนะนำและใช้เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุก ๆ ท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณพี่หน่อง และพี่คอนที่ให้คำปรึกษาในทุกๆ ด้าน ช่วยเตรียมอุปกรณ์ต่างๆ และขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง (ITO) ในการทำวิจัย รวมทั้งช่วยตรวจสอบความถูกต้องของวิทยานิพนธ์ได้เป็นอย่างดี ขอขอบคุณพี่ๆ ทุกคนในห้องปฏิบัติการวิจัยควอนตัมและสารกึ่งตัวนำทางแสงที่คอยให้คำปรึกษา และให้กำลังใจในการทำงานเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณคุณหมอมอทิพย์ พี่สาวที่ช่วยผ่าตัดไส้ติ่งจนหายทันก่อนสอบวิทยานิพนธ์ และเป็ก ซึ่งเป็นเพื่อนร่วมงานวิจัยที่คอยให้คำปรึกษาแก้ปัญหาและคอยช่วยเหลือกันในทุกด้าน และในการทำงานวิจัยจนประสบความสำเร็จ

ขอขอบคุณสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (TGIST) ที่สนับสนุนทางด้านทุนการศึกษาจนสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท

ขอขอบคุณบุคคลที่ข้าพเจ้าไม่ได้เอ่ยนามทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือคำแนะนำต่างๆ และคอยให้กำลังใจเสมอมา

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกๆด้าน ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

คุณค่าและคุณประโยชน์ที่ได้จากการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

อนุศิษย์ แก้วประจักษ์

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 ออร์บิทัล โมเลกุล.....	7
2.1.1.3 ไฮบริดออร์บิทัล.....	8
2.2 สารกึ่งตัวนำอินทรีย์.....	10
2.2.1 โมเลกุลขนาดเล็ก.....	13
2.2.2 คอนจูเกตพอลิเมอร์.....	14
2.3 ไดโอดเปล่งแสงสารอินทรีย์ (OLED).....	15
2.3.1 กระบวนการทำงานของ OLED.....	16
2.3.1.1 การฉีดพาหะและการขนส่งพาหะใน OLED.....	18
2.3.1.2 การรวมตัวของพาหะและการปลดปล่อยแสง.....	24
2.3.1.3 การประมาณค่าประสิทธิภาพควอนตัมภายในและภายนอก.....	25
2.3.2 การออกแบบโครงสร้าง OLED แบบหลายชั้น.....	28

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.3 หน้าทีและตัวอย่างสารอินทรีย์ที่ใช้ใน OLED.....	30
2.3.3.1 แผ่นฐานรองรับ	30
2.3.3.2 ขั้วไฟฟ้าแอโนด	30
2.3.3.3 ชั้นฉนวนโฮล	31
2.3.3.4 ชั้นขนส่งโฮล	32
2.3.3.5 ชั้นเปล่งแสง	33
2.3.3.6 ชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน	33
2.3.3.7 ชั้นฉนวนอิเล็กตรอน	34
2.3.3.8 ชั้นขั้วไฟฟ้าแคโทด.....	34
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	35
3.1 ระบบระเหยสารอินทรีย์.....	36
3.2 สารอินทรีย์ที่ใช้การสร้าง OLED.....	41
3.3 การเตรียมฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ (ITO) บนฐานรองรับกระจกสไลด์.....	44
3.4 การทำความสะอาดแผ่นฐานรองรับอินเดียมทินออกไซด์	45
3.5 การสร้าง OLED สีเขียวโครงสร้าง ITO/NPB/Alq ₃ /Al.....	46
3.5.1 การปลูกฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ ด้วยระบบระเหยสารอินทรีย์.....	46
3.5.2 การระเหยขั้วไฟฟ้าด้วยระบบระเหยสารด้วยความร้อน.....	47
3.6 การสร้าง OLED สีเขียวโครงสร้าง ITO/NPB/Alq ₃ /LiF/Al.....	48
3.6.1 การปลูกฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ ด้วยระบบระเหยสารอินทรีย์.....	48
3.6.2 การระเหยขั้วไฟฟ้าด้วยระบบระเหยสารด้วยความร้อน.....	49
3.7 การสร้าง OLED สีแดงโครงสร้าง ITO/NPB/DCJT/Alq ₃ /LiF/Al.....	50
3.7.1 การปลูกฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ ด้วยระบบระเหยสารอินทรีย์.....	50
3.7.2 การระเหยขั้วไฟฟ้าด้วยระบบระเหยสารด้วยความร้อน.....	51
3.8 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของ OLED.....	53
3.9 การตรวจสอบสมบัติทางแสงของ OLED.....	53

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.10 การตรวจสอบสเปกตรัมอิเล็กทรอนิกส์ของ OLED.....	54
3.10.1 ระบบวัดสเปกตรัมอิเล็กทรอนิกส์ที่จัดระบบขึ้นภายใน ห้องปฏิบัติการ.....	54
3.10.2 เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer.....	57
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล.....	58
4.1 OLED สีเขียวโครงสร้าง ITO/NPB/Alq ₃ /Al.....	58
4.1.1 ผลการวัดสเปกตรัมอิเล็กทรอนิกส์ของ OLED.....	59
4.1.2 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของ OLED.....	60
4.1.2.1 ผลของการเพิ่มความหนาของชั้น Alq ₃ โดยที่ความหนาของชั้น NPB คงที่	60
4.1.2.2 ผลของการเพิ่มความหนาของชั้น NPB โดยที่ความหนาของชั้น Alq ₃ คงที่.....	62
4.1.3 การตรวจสอบสมบัติทางแสงของ OLED.....	64
4.1.3.1 ผลของการเพิ่มความหนาของชั้น Alq ₃ โดยที่ความหนาของชั้น NPB คงที่.....	64
4.1.3.2 ผลของการเพิ่มความหนาของชั้น NPB โดยที่ความหนาของชั้น Alq ₃ คงที่.....	66
4.2 OLED สีเขียวโครงสร้าง ITO/NPB/Alq ₃ /LiF/Al.....	70
4.2.1 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของ OLED.....	71
4.2.2 การตรวจสอบสมบัติทางแสงของ OLED.....	71
4.3 OLED สีแดงโครงสร้าง ITO/NPB/DCJTBA/Alq ₃ /LiF/Al.....	73
4.3.1 ผลการวัดสเปกตรัมอิเล็กทรอนิกส์ของ OLED.....	74
4.3.2 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของ OLED.....	75
4.3.3 การตรวจสอบสมบัติทางแสงของ OLED.....	76

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	78
บรรณานุกรม.....	80
ประวัติผู้เขียน.....	81

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงค่า Glass Transition Temperature T_g , ค่าระดับพลังงานของ HOMO และ LUMO, ค่า Mobility ของโฮล และอิเล็กตรอน ของสารแต่ละตัวที่ใช้ใน OLED.....	34
3.1 สมบัติของสารอินทรีย์ NPB.....	41
3.2 สมบัติของสารอินทรีย์ Alq ₃	42
3.3 สมบัติของสารอินทรีย์ DCJTb.....	43

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ลักษณะของออร์บิทัล 1s ที่มีลักษณะเป็นแบบทรงกลม.....	5
2.2 ออร์บิทัล 2p ที่ถูกแบ่งโคจรระนาบตั้งฉากต่อกันโดยทั้งสองด้านจะมีเฟสต่างกัน.....	6
2.3 ออร์บิทัล d ตามลักษณะของการกระจาย.....	6
2.4 ลักษณะการซ้อนทับของพันธะซิกมา.....	7
2.5 ระดับพลังงานของออร์บิทัลโมเลกุลเมื่อเกิดการซ้อนทับของพันธะซิกมา.....	8
2.6 ลักษณะการซ้อนทับของพันธะพาย.....	8
2.7 sp ออร์บิทัลแบบไฮบริด.....	9
2.8 sp ² ออร์บิทัลแบบไฮบริด.....	9
2.9 sp ³ ออร์บิทัลแบบไฮบริด.....	10
2.10 ตัวอย่างของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์.....	11
2.11 การกระจายของอิเล็กตรอน และการเกิด sp ² ออร์บิทัล ของคาร์บอนที่เป็นพันธะคู่.....	11
2.12 พันธะซิกมาในวงของเบนซีน และพันธะพายในวงของเบนซีน.....	12
2.13 ระดับพลังงานพันธะของอะตอมคาร์บอนกับอะตอมข้างเคียงภายในวงเบนซีน.....	13
2.14 สารกึ่งตัวนำอินทรีย์แบบโมเลกุลขนาดเล็ก (ก) TPD (ข) Alq ₃ (ค) DPVBi (ง) CuPc.....	14
2.15 สารกึ่งตัวนำอินทรีย์แบบคอนจูเกตพอลิเมอร์.....	14
2.16 โครงสร้าง OLED แบบต่างๆ (ก) แบบชั้นเดียว (ข) แบบสองชั้น (ค) แบบหลายชั้น.....	15
2.17 กระบวนการเกิดอิเล็กโตรลูมิเนสเซนซ์ของ OLED.....	16
2.18 เปรียบเทียบกระบวนการทำงานของ OLED โครงสร้างแบบชั้นเดียวกับแบบสองชั้น (ก) แบบชั้นเดียว (ข) แบบสองชั้น.....	17
2.19 สมองกลไกที่เป็นไปได้ในการฉีดกระแสที่บริเวณรอยต่อของสารอินทรีย์/ขั้วโลหะ (ก) การฉีดกระแสแบบ Schottky โดยทางความไม่บริสุทธิ์หรือความไม่เป็นระเบียบของ โครงสร้าง (ข) การฉีดกระแสแบบทะลุผ่าน Fowler-Nordheim tunneling เกิดภายใต้ สนามไฟฟ้าสูงประมาณ 10 ⁶ -10 ⁷ V/cm.....	21

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.20 (ก) แผนภาพของ SCLC ที่เกิดจากสนามไฟฟ้าภายนอก (V/d) บวกกับสนามไฟฟ้าภายใน (E_{in}) เหนี่ยวนำให้เกิดการฉีดของประจุพาหะที่มากขึ้นเป็นสิ่งสำคัญที่จะทำให้ได้ค่าความหนาแน่นกระแสสูงสนามไฟฟ้าทั้งหมด $E_{total} = V/d + E_{in}$ มีความหมายอย่างมากต่อการไหลของกระแส เมื่อให้สัญลักษณ์วงกลมเปิด (O) แทนโฮล สัญลักษณ์วงกลมปิด (●) แทนอิเล็กตรอน (ข) กราฟของความหนาแน่นกระแสกับความต่างศักย์ (J-V).....	22
2.21 ความหนาแน่นกระแส (J) กับความต่างศักย์ (V) ที่ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของชั้นสารอินทรีย์ (L).....	23
2.22 สถานะซิงเกรตและทริปเปตของเอกซิตรอน.....	24
2.23 (ก) เอกซิตรอนแบบซิงเกรตที่รวมตัวกันแล้วเกิดการเปล่งแสง (ข) เอกซิตรอนแบบทริปเปตที่รวมตัวกันแล้วไม่เกิดการเปล่งแสง.....	24
2.24 แผนภาพกระบวนการพื้นฐานของ EL ใน OLED.....	25
2.25 การไหลของกระแสในการฉีดและการขนส่งโฮลและอิเล็กตรอนในชั้นสารอินทรีย์ J_h และ J_e เป็นความหนาแน่นกระแสสุทธิของโฮลและอิเล็กตรอนตามลำดับ J , คือ ส่วนประกอบของ recombination current density J_r และ J_c คือความหนาแน่นกระแสของโฮลและอิเล็กตรอนตามลำดับที่ไม่ได้เกิดการ recombination	26
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.....	28
2.27 OLED โครงสร้างแบบหลายชั้น.....	30
2.28 ระดับชั้นพลังงานของอุปกรณ์ OLED แบบชั้นเดียว Φ_c คือ พลังงานของขั้วไฟฟ้าแคโทดและ Φ_a คือพลังงานของขั้วไฟฟ้าแอโนด ΔE_h และ ΔE_e คือค่าพลังงานของการฉีดโฮลและอิเล็กตรอนตามลำดับ E_g คือแถบช่องว่างพลังงานระหว่างแถบคอนดักชันและแถบเวเลนซ์.....	31
2.29 สารในชั้นฉีดโฮลที่ใช้ใน OLED.....	32
2.30 โครงสร้างของ NPB และ TPD.....	32
2.31 โครงสร้างของ Alq ₃ , DPVBi, DCJTb, DCM2	33
2.32 โครงสร้างของ BA1q.....	33

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	35
3.2 ระบบระเหยสารอินทรีย์.....	36
3.3 แผนภาพระบบสุญญากาศของระบบระเหยสารอินทรีย์.....	33
3.4 หัวระเหยสารอินทรีย์.....	38
3.5 ชุดควบคุมการระเหยสารของระบบระเหยสารอินทรีย์.....	38
3.6 อุปกรณ์ภายในห้องสุญญากาศสูง	39
3.7 ผลึกควอทซ์.....	39
3.8 เครื่องแสดงผลความหนาฟิล์มบาง.....	39
3.9 อุปกรณ์ภายในห้องสุญญากาศสูง	40
3.10 (ก) รูปโครงสร้างสารอินทรีย์ NPB (ข) ภาพสาร NPB.....	41
3.11 (ก) รูปโครงสร้างสารอินทรีย์ Alq ₃ (ข) ภาพสาร Alq ₃	42
3.12 (ก) รูปโครงสร้างสารอินทรีย์ DCJTB (ข) ภาพสาร DCJTB.....	43
3.13 ระบบ อาร์ เอฟ แมกนิตรอนสปัตเตอร์ริง.....	44
3.14 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำความสะอาดฐานรองรับ ITO.....	45
3.15 ลวดลาย ITO บนฐานรองรับกระจก.....	46
3.16 หน้ากากสำหรับระเหยสารอินทรีย์.....	46
3.17 หน้ากากสำหรับระเหยขั้ว Al.....	47
3.18 OLED ที่สร้างเสร็จแล้วมีพื้นที่ 1 ตารางเซนติเมตร.....	47
3.19 โครงสร้าง OLED แบบสองชั้น.....	48
3.20 ลวดลาย ITO บนฐานรองรับกระจก.....	48
3.21 หน้ากากสำหรับระเหยสารอินทรีย์.....	48
3.22 หน้ากากสำหรับระเหย LiF กับ ขั้ว Al.....	49
3.23 OLED ที่สร้างเสร็จแล้วมีพื้นที่ 5 ตารางมิลลิเมตร.....	50
3.24 โครงสร้าง OLED สีเขียวแบบหลายชั้น.....	50
3.25 ลวดลาย ITO บนฐานรองรับกระจก.....	50
3.26 หน้ากากสำหรับระเหยสารอินทรีย์.....	51
3.27 หน้ากากสำหรับระเหย LiF กับ ขั้ว Al.....	51

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.28 OLED ที่สร้างเสร็จแล้วมีพื้นที่ 5 ตารางมิลลิเมตร.....	52
3.29 โครงสร้าง OLED สีแดงแบบหลายชั้น.....	52
3.30 ระบบวัดค่ากระแสและความต่างศักย์ (ก) KEITHLEY 228 voltage/current source (ข) KEITHLEY 195A digital multimeter	53
3.31 กล้องวัดความส่องสว่าง.....	54
3.32 ระบบวัดสเปกตรัมอิเล็กทรอนิกส์ โทรลูมินิสเซนซ์.....	55
3.33 ไดอะแกรมระบบวัดสเปกตรัมอิเล็กทรอนิกส์ โทรลูมินิสเซนซ์.....	55
3.34 ไดอะแกรมของโมโนโครเมเตอร์.....	56
3.35 (a) เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer (b) โปรแกรม SpectraWiz.....	57
4.1 OLED โครงสร้างแบบสองชั้น.....	58
4.2 แผนภาพระดับพลังงานของ OLED ที่ทำการศึกษา.....	68
4.3 สเปกตรัมอิเล็กทรอนิกส์ของ OLED สีเขียว	60
4.4 ค่ากระแสกับความต่างศักย์ของ OLED เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของ ชั้น Alq ₃ โดยให้ความหนาของชั้น NPB คงที่ (ก) ความหนาของชั้น NPB คงที่ 30 นาโนเมตร (ข) ความหนาของชั้น NPB คงที่ 50 นาโนเมตร (ค) ความหนาของชั้น NPB คงที่ 70 นาโนเมตร.....	62
4.5 ค่ากระแสกับความต่างศักย์ของ OLED เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของ ชั้น NPB โดยให้ความหนาของชั้น Alq ₃ คงที่ (ก) ความหนาของชั้น Alq ₃ คงที่ 50 นาโนเมตร (ข) ความหนาของชั้น Alq ₃ คงที่ 70 นาโนเมตร (ค) ความหนาของชั้น Alq ₃ คงที่ 90 นาโนเมตร.....	64
4.6 ค่าความส่องสว่างกับความต่างศักย์ของ OLED เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความ หนาของชั้น Alq ₃ โดยให้ความหนาของชั้น NPB คงที่ (ก) ความหนาของชั้น NPB คงที่ 30 นาโนเมตร (ข) ความหนาของชั้น NPB คงที่ 50 นาโนเมตร (ค) ความหนาของชั้น NPB คงที่ 70 นาโนเมตร.....	66

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 ค่าความส่องสว่างกับความต่างศักย์ของ OLED เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้น Alq ₃ โดยให้ความหนาของชั้น NPB คงที่ (ก) ความหนาของชั้น Alq ₃ คงที่ 50 นาโนเมตร (ข) ความหนาของชั้น Alq ₃ คงที่ 70 นาโนเมตร (ค) ความหนาของชั้น Alq ₃ คงที่ 90 นาโนเมตร.....	68
4.8 OLED ขณะจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 25 โวลต์.....	69
4.9 OLED แบบคอตเมทริกซ์บนพลาสติก.....	69
4.10 OLED แบบคอตเมทริกซ์ 18 x 18 จุด.....	70
4.11 แผนภาพระดับพลังงานของ OLED ที่ทำการศึกษา.....	70
4.12 ค่าความหนาแน่นกระแสกับความต่างศักย์ของ OLED เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้น LiF	71
4.13 ค่าความส่องสว่างกับความต่างศักย์ของ OLED เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้น LiF.....	72
4.14 OLED ขณะจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 9 โวลต์.....	72
4.15 (ก) โครงสร้างของ OLED สีแดงที่ทำการศึกษา (ข) แผนภาพระดับพลังงานของ OLED ที่ทำการศึกษา.....	73
4.16 (ก) โครงสร้างของ OLED สีแดงที่ทำการเพิ่มชั้น LiF (ข) แผนภาพระดับพลังงานของ OLED ที่ทำการเพิ่มชั้น LiF.....	74
4.17 สเปกตรัมอิเล็กโทโรลูมิเนสเซนส์ของ OLED สีแดงที่ทำการจ่ายค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 13, 15, 16, 17 โวลต์.....	75
4.18 ค่าความหนาแน่นกระแสกับความต่างศักย์ของ OLED เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้น LiF.....	76
4.19 ค่าความส่องสว่างกับความต่างศักย์ของ OLED เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้น LiF	76
4.20 OLED สีแดงขณะจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 15 โวลต์.....	77
4.21 OLED สีแดงแบบคอตเมทริกซ์ 18 x 18 จุด.....	77

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ไดโอดเปล่งแสงสารอินทรีย์ (Organic Light Emitting Diode ; OLED) เป็นอุปกรณ์เปล่งแสง (Light Emitting Device ; LEDs) ที่สร้างจากสารอินทรีย์ ทำงานโดยการให้ความต่างศักย์แก่ไดโอดจะเกิดการเปล่งแสงออกมาที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับชนิดของสารอินทรีย์ที่ใช้ และ โครงสร้างของไดโอดเปล่งแสง ซึ่งในปัจจุบันได้รับความสนใจอย่างมากจากนักวิจัยเนื่องจากมีศักยภาพสูงพอที่จะนำไปประยุกต์สร้างเป็นจอแสดงผลแบบแบนบาง (flat panel display) ด้วยเหตุนี้จึงมีการใช้เงินทุนจำนวนมากในการวิจัยและพัฒนา OLED ทำให้เทคโนโลยีของ OLED ถูกพัฒนาไปอย่างรวดเร็วเพื่อให้มีประสิทธิภาพเทียบเท่าอุปกรณ์เปล่งแสงสารอนินทรีย์ที่ใช้อยู่ทั่วไป ในอนาคตอันใกล้นี้นักวิจัยเชื่อว่าจอแสดงผลที่สร้างจาก OLED จะเข้ามามีบทบาทสำคัญแทนจอแสดงผลที่มีอยู่ในปัจจุบัน

การศึกษาวิจัยทางด้าน OLED เริ่มจากในปี 1963 Pope และคณะ [1] ได้มีการค้นพบปรากฏการณ์อิเล็กโตรลูมิเนสเซนส์ (Electroluminescence, EL) จากสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ ซึ่งในขณะนั้นความสว่างของการเปล่งแสงของอุปกรณ์มีค่าต่ำและสามารถสว่างอยู่ได้เพียงเวลาสั้นๆ หลังจากนั้นได้มีการศึกษาและพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านนี้เรื่อยมาจนกระทั่งในปี ค.ศ. 1987 C.W. Tang และ S. A. Van Slyke [2] ทำการสร้าง OLED ที่เปล่งแสงในช่วงความยาวคลื่นแสงสีเขียวจากสารอินทรีย์ Tris(8-Hydroxyquinoline)Aluminum (Alq₃) โดย OLED ที่สร้างขึ้นเป็นโครงสร้างแบบหลายชั้น (hetero-structure) ซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหยสารในสุญญากาศ และพบว่า OLED ที่ทำการประดิษฐ์ขึ้นมานี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นจอแสดงผลแบบแบนบางได้ การค้นพบครั้งนี้เป็นจุดเริ่มต้นที่สำคัญของการศึกษาวิจัยและพัฒนา OLED เพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงรวมทั้งสามารถนำมาใช้งานได้จริงในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่อไปในอนาคต

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับจอแสดงผลที่พบในปัจจุบัน เช่น จอแสดงผลแบบหลอดรังสีแคโทด (Cathode Ray Tubes ; CRT) และจอแสดงผลแบบ (Liquid Crystal Display ; LCD) พบว่าจอแสดงผลที่สร้างจาก OLED มีคุณสมบัติพิเศษและมีข้อได้เปรียบในหลายๆ ด้าน เช่น

1. ด้านวัสดุที่ใช้ OLED สร้างจากสารอินทรีย์ที่สามารถสังเคราะห์ขึ้นได้เองจากห้องทดลองทำให้ต้นทุนด้านวัสดุมีราคาต่ำ และยังสามารถปรับปรุงโครงสร้างทางเคมีของสารเพื่อเปลี่ยนแปลงสมบัติของสารอินทรีย์ได้ง่ายและหลากหลาย นอกจากนี้สารอินทรีย์ส่วนมากสามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติ จึงไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม

2. ด้านการสร้าง OLED สามารถสร้างได้โดยใช้กระบวนการเช่น วิธีระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ วิธีการเคลือบโดยการหมุน (spin coating) เป็นต้น ซึ่งเป็นกระบวนการที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อนราคาไม่แพง รวมทั้งสามารถเตรียมได้พร้อมกันเป็นจำนวนมาก ทำให้ต้นทุนของการสร้างจอแสดงผลที่สร้างจาก OLED มีราคาต่ำ

3. ด้านการใช้งาน จอแสดงผลที่สร้างจาก OLED มีจุดเด่นตรงที่ บาง น้ำหนักเบา มีความสว่างสูง มีความเร็วในการตอบสนองสูง สามารถเปล่งแสงได้ด้วยตัวเองไม่จำเป็นต้องใช้แสงจากด้านหลังทำให้ประหยัดพลังงาน และมีมุมมองที่กว้างกว่า จอแสดงผลแบบ LCD

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

ด้วยข้อได้เปรียบต่างๆ ที่ได้กล่าวมาทำให้ในปัจจุบัน OLED ยังคงได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยงานวิจัยจะเน้นไปทางด้าน การปรับปรุงประสิทธิภาพการเปล่งแสงของ OLED ให้มีค่าสูงขึ้น ทั้งทางด้านการปรับปรุงโครงสร้างทางเคมีของสารอินทรีย์ และการออกแบบโครงสร้างแต่ละชั้นของตัวอุปกรณ์ ซึ่ง OLED ที่ดีควรจะใช้ค่าความต่างศักย์ต่ำ และค่าประสิทธิภาพการส่องสว่างสูงปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของ OLED คือปริมาณประจุที่ฉีดเข้าไปในชั้นสารอินทรีย์และความสามารถในการส่งผ่านประจุในสารอินทรีย์ จึงได้มีความพยายามที่จะจำกัดการฉีดโฮลเนื่องจากสภาพคล่องทางไฟฟ้าของโฮลของสารอินทรีย์โดยทั่วไปมีค่าประมาณ $10^{-7} - 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ส่วนสภาพคล่องทางไฟฟ้าของอิเล็กตรอนมีค่าน้อยกว่า 10-100 เท่า เพื่อให้โฮลกับอิเล็กตรอนสามารถรวมตัวกันแล้วปลดปล่อยแสงได้มากที่สุดจึงทำการกั้นโฮลที่บริเวณรอยต่อของชั้นแอโนดกับสารอินทรีย์ หรือที่บริเวณระหว่างรอยต่อของสารอินทรีย์กับสารอินทรีย์ และเพิ่มการฉีดอิเล็กตรอน โดยทำการปรับปรุงขั้วแคโทดจากการเจือสารหรือเพิ่มชั้นต่างๆ เข้าไป

นอกจากนี้ยังมีการวิจัยเกี่ยวกับกระบวนการเสื่อมสภาพของ OLED รวมทั้งการทำให้ OLED มีอายุการใช้งานนานขึ้น โดยการป้องกันความชื้น และออกซิเจนในอากาศโดยการห่อหุ้มโดยใช้พอลิเมอร์ (polymer) บางชนิด เป็นต้น

จากที่ได้กล่าวมาจะเห็นได้ว่าการพัฒนาประสิทธิภาพของ OLED ให้สูงขึ้น เป็นความจำเป็นอย่างยิ่ง โดยหนึ่งในหลายวิธีที่จะเพิ่มประสิทธิภาพ OLED คือ วิธีการแทรกชั้นสารอินทรีย์ซึ่งทำหน้าที่เป็นชั้นส่งผ่านโฮล (Hole Transport Layer ; HTL) เข้าไปในโครงสร้างของ OLED นอกจากนี้การศึกษาเพื่อหาความหนาที่เหมาะสมของชั้น HTL ยังมีส่วนช่วยให้ประสิทธิภาพของ OLED มีค่าสูงขึ้นเช่นกัน

สำหรับในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาและสร้างสิ่งประดิษฐ์ไดโอดเปล่งแสงจากสารกึ่งตัวนำอินทรีย์โครงสร้างแบบสองชั้น (double layer OLED) และแบบหลายชั้น โดยมีสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ NPB เป็นชั้นส่งผ่านโฮล Alq₃ เป็นทั้งชั้นเปล่งแสง (Emitting Layer ; EML) และชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน (Electron Transport Layer ; ETL) และ 4-(Dicyanomethylene)-2-*t*-butyl-6-(1,1,7,7-tetramethyljulolidyl-9-enyl)-4Hpyran (DCJTB) เป็นชั้นเปล่งแสงสีแดง มีขั้วนำไฟฟ้าโปร่งแสงเป็นฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ (ITO) เป็นขั้วไฟฟ้าแอโนด และลิเทียมฟลูออไรด์ (LiF) กับอลูมิเนียม (Al) เป็นชั้นฉนวนอิเล็กตรอนและขั้วไฟฟ้าแคโทดตามลำดับ เงื่อนไขที่สำคัญคือ การเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้น NPB, Alq₃ และ LiF ที่มีผลต่อสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของ OLED โดยจะทำการหาเงื่อนไขความหนาที่เหมาะสมเพื่อพัฒนาเป็น OLED สีเขียวและสีแดงโครงสร้างแบบหลายชั้นที่มีประสิทธิภาพสูงต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาวิธีการปลูกฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์โดยระบบระเหยสารอินทรีย์ (Low Temperature Evaporation System ; LTE)
- 1.2.2 ศึกษาการสร้าง OLED สีเขียว โดยมีชั้นของสาร NPB เป็นชั้นส่งผ่านโฮล และ Alq₃ เป็นชั้นเปล่งแสงและชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน
- 1.2.3 ศึกษาการสร้าง OLED สีเขียว โดยทำการเพิ่มชั้น LiF เข้าไประหว่างชั้น Alq₃ กับ Al เพื่อเป็นชั้นฉนวนอิเล็กตรอน
- 1.2.4 ศึกษาการสร้าง OLED สีแดง โดยทำการแทรกชั้น DCJTB เข้าไประหว่างชั้น NPB กับ Alq₃ เพื่อเป็นชั้นเปล่งแสงสีแดง
- 1.2.5 ศึกษาการวัดสเปกตรัมอิเล็กโตรลูมิเนสเซนซ์ (Electroluminescence) ของ OLED ด้วยระบบวัดสเปกตรัมอิเล็กโตรลูมิเนสเซนซ์
- 1.2.6 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแส และค่าความต่างศักย์ ของ OLED ด้วยระบบวัดค่ากระแส และค่าความต่างศักย์ (current-voltage measurement system)
- 1.2.7 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความส่องสว่าง และค่าความต่างศักย์ของ OLED ด้วยกล้องวัดความส่องสว่าง (luminance meter)
- 1.2.8 ทำการวิเคราะห์ และเปรียบเทียบความหนาของชั้นต่างๆ ของ OLED ที่เหมาะสม เพื่อนำไปพัฒนาสร้างเป็น OLED สีเขียว และแดงที่มีประสิทธิภาพสูง

1.3 การดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและสร้างสิ่งประดิษฐ์ไดโอดเปล่งแสงจากสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ Alq₃ เริ่มจากทำการศึกษา OLED สีเขียว โดยมีสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ NPB เป็นชั้นส่งผ่านโฮลและ Alq₃ เป็นชั้นเปล่งแสงสีเขียวและชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน ฟิล์มบางทุกชั้นเตรียมด้วยระบบระเหยสารอินทรีย์ในสุญญากาศสูง ด้วยเงื่อนไขที่สำคัญคือการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้น NPB และ Alq₃ ซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพของ OLED จากนั้นนำเงื่อนไขความหนาของชั้น NPB กับ Alq₃ ที่เหมาะสมนำไปทำการเพิ่มประสิทธิภาพ โดยทำการเพิ่มชั้นฉนวนอิเล็กตรอน LiF เข้าไประหว่างชั้น Alq₃ กับ Al ด้วยเงื่อนไขที่สำคัญคือการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้น LiF ซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพของ OLED จากนั้นนำเงื่อนไขความหนาของชั้น NPB กับ Alq₃ ที่เหมาะสมไปสร้างเป็น OLED สีแดง โดยทำการแทรกชั้นบางๆ ของ DCJTb เข้าไประหว่างชั้น NPB กับ Alq₃ จากนั้นทำการเพิ่มประสิทธิภาพของ OLED สีแดงโดยการเพิ่มชั้นฉนวนอิเล็กตรอน LiF เข้าไปทำการวัด และวิเคราะห์สเปกตรัมอิเล็กโตรลูมิเนสเซนซ์ของ OLED จากนั้นนำ OLED ที่ได้มาวัดสมบัติทางไฟฟ้า และทางแสง ตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดค่ากระแส และค่าความต่างศักย์ ด้วยระบบวัดค่ากระแส และความต่างศักย์ (current-voltage measurement system) ตรวจสอบสมบัติทางแสงโดยทำการวัดค่าความส่องสว่าง เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ ด้วยกล้องวัดความส่องสว่าง (luminance meter LS-110) ของบริษัท KONICA MINOLTA จากนั้นนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองไปทำการวิเคราะห์ เพื่อนำไปพัฒนาสร้างเป็น OLED สีเขียว และสีแดง แบบคอตเมทริกซ์ต่อไป

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

- 1.4.1 มีความรู้ความเข้าใจในเทคนิค และวิธีการในการระเหยสารกึ่งตัวนำอินทรีย์โดยระบบระเหยสารอินทรีย์
- 1.4.2 สามารถสร้าง OLED สีเขียว โดยมีชั้นสารอินทรีย์ Alq₃ เป็นเปล่งแสงได้
- 1.4.3 สามารถสร้าง OLED สีแดง โดยมีชั้นของสาร DCJTb เป็นชั้นเปล่งแสงได้
- 1.4.4 สามารถวัด และวิเคราะห์สเปกตรัมอิเล็กโตรลูมิเนสเซนซ์ของ OLED ด้วยระบบวัดสเปกตรัมอิเล็กโตรลูมิเนสเซนซ์ได้
- 1.4.5 สามารถวัด และวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแส และค่าความต่างศักย์ของ OLED ด้วยระบบวัดค่ากระแส และความต่างศักย์ได้
- 1.4.6 สามารถวัด และวิเคราะห์สมบัติทางแสงเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความส่องสว่าง และค่าความต่างศักย์ของ OLED ด้วยกล้องวัดความส่องสว่างได้
- 1.4.7 สามารถนำข้อมูล และเงื่อนไขที่ได้ไปสร้างเป็น OLED สีเขียว และสีแดง แบบคอตเมทริกซ์ได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 ทฤษฎีพื้นฐานของสารอินทรีย์

สารอินทรีย์ในธรรมชาติส่วนใหญ่จะประกอบด้วยอะตอมของธาตุพื้นฐานคือ H, C ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างหลายแบบและมีสมบัติที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งสารบางชนิดสามารถสังเคราะห์ได้ในห้องปฏิบัติการ

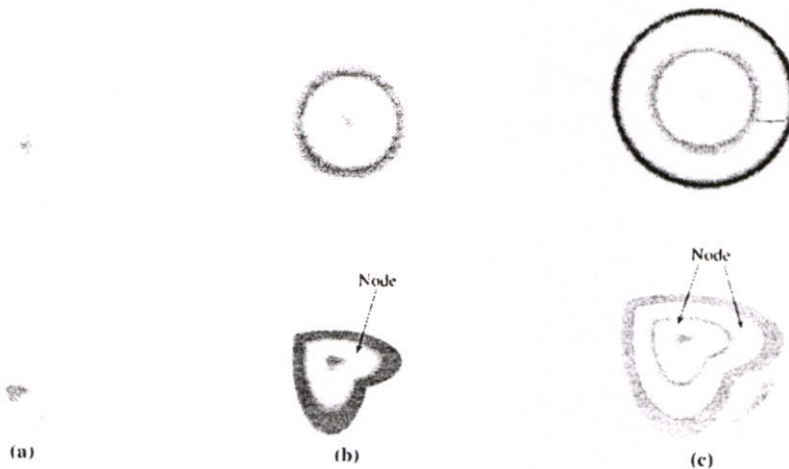
2.1.1 พันธะของสารอินทรีย์

2.1.1.1 ออร์บิทัลอะตอม (atomic orbital)

ออร์บิทัลอะตอม คือบริเวณที่มีโอกาสที่จะพบอิเล็กตรอนมากที่สุดรอบนิวเคลียส โดยมีลักษณะเป็นฟังก์ชันคลื่น [3]

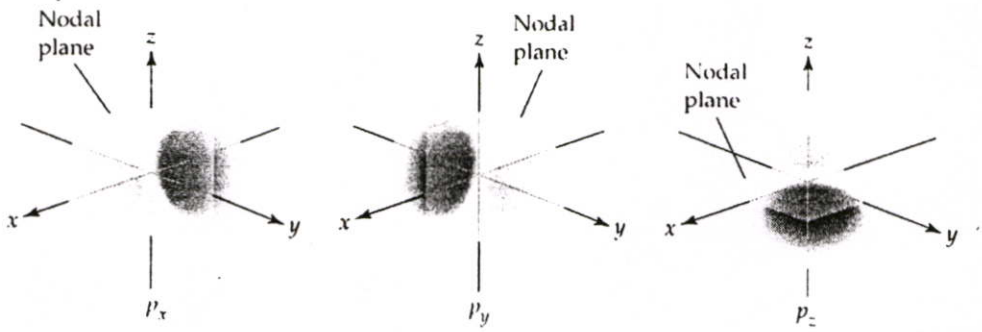
1. s-ออร์บิทัล เป็นออร์บิทัลที่แสดงถึงโอกาสที่จะพบอิเล็กตรอนรอบนิวเคลียส โดยมีลักษณะเป็นทรงกลม ซึ่งการกระจายของอิเล็กตรอนจะไม่ขึ้นกับทิศทางเนื่องจากมีเลขควอนตัมเชิงมุม (angular momentum quantum number) เท่ากับศูนย์

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



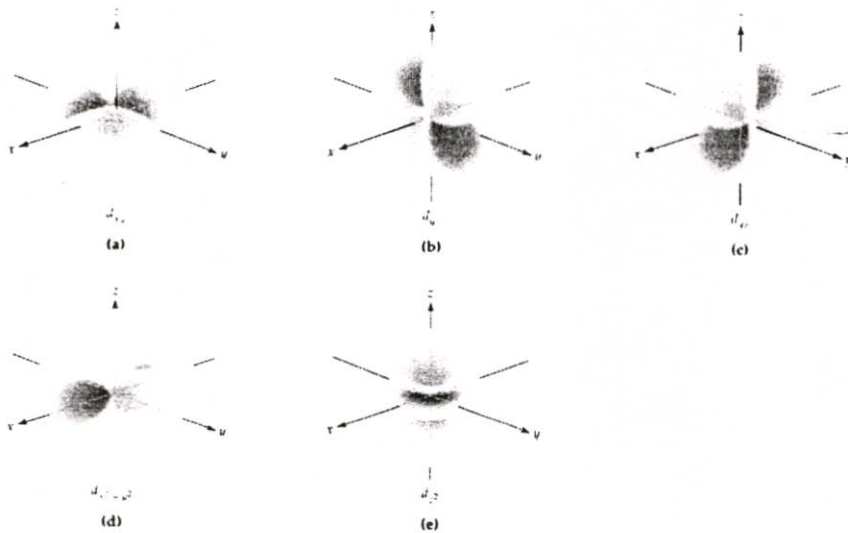
รูปที่ 2.1 ลักษณะของออร์บิทัล 1s ที่มีลักษณะเป็นแบบทรงกลม

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



รูปที่ 2.2 ออร์บิทัล 2p ที่ถูกแบ่งโดยระนาบัพ คล้ายกับลูกตุ้ม โดยทั้งสองด้านจะมีเฟสต่างกัน

3. d-ออร์บิทัล มีเลขควอนตัมเชิงมุม $l = 2$ โอกาสที่จะพบอิเล็กตรอนใน d-ออร์บิทัล จะขึ้นกับระยะจากนิวเคลียสและทิศทาง มีค่าเลขควอนตัมแม่เหล็ก (magnetic quantum number) $m_l = +2, +1, 0, -1, -2$ โดย d-ออร์บิทัล มีการกระจาย 5 ลักษณะคือ $p_{xy}, p_{xz}, p_{yz}, p_{x^2-y^2}, p_{z^2}$ แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ออร์บิทัล d ตามลักษณะของการกระจาย

2.1.1.2 ออร์บิทัลโมเลกุล (Molecular Orbital)

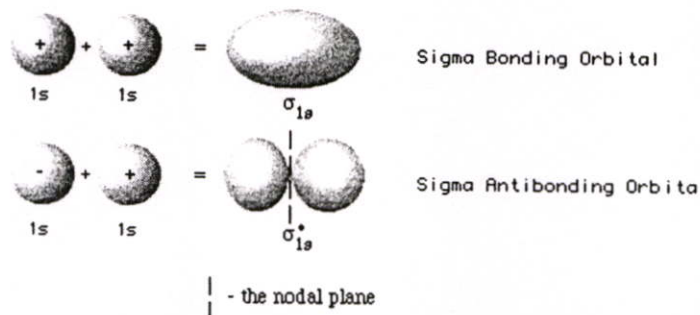
ตามทฤษฎีแล้ว โมเลกุลเกิดจากการเกิดอันตรกิริยาของออร์บิทัลอะตอมทำให้เกิดการซ้อนทับ หรือการผลักรันระหว่างออร์บิทัลอะตอม ซึ่งลักษณะการเกิดอันตรกิริยาของออร์บิทัลอะตอมจะมี 2 ลักษณะ

1. ออร์บิทัลโมเลกุลที่สร้างพันธะ (bonding molecular orbital) เนื่องจากออร์บิทัลอะตอมมีสถานะที่ตรงกัน ทำให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนมีมากบริเวณนิวเคลียสของอะตอมทั้งสอง และทำให้เกิดเป็นพันธะระหว่างอะตอม

2. ออร์บิทัลโมเลกุลที่ต้านการสร้างพันธะ (antibonding molecular orbital) เนื่องจากออร์บิทัลอะตอมมีสถานะที่ตรงข้ามกัน ทำให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนจะกระจายอยู่นอกบริเวณนิวเคลียสของอะตอมทั้งสอง

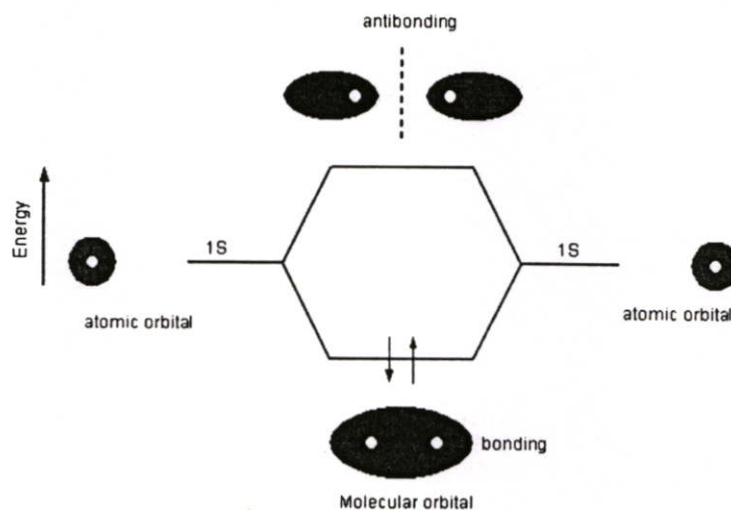
พันธะที่เกิดการซ้อนทับของออร์บิทัลโมเลกุล จะมี 2 ลักษณะคือ

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



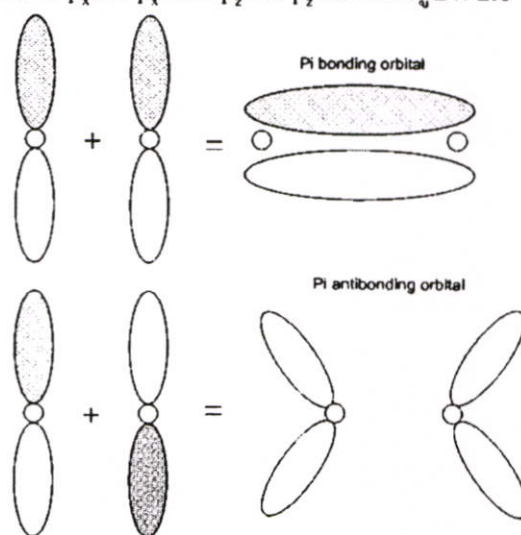
รูปที่ 2.4 ลักษณะการซ้อนทับของพันธะซิกมา

การรวมกันของออร์บิทัล s จะได้ออร์บิทัลโมเลกุลแบบซิกมาเท่านั้นและระดับพลังงานของออร์บิทัลที่สร้างพันธะจะต่ำกว่าระดับพลังงานของออร์บิทัลที่ต้านการสร้างพันธะและต่ำกว่าระดับพลังงานของออร์บิทัลอะตอมด้วยแสดงดังรูปที่ 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

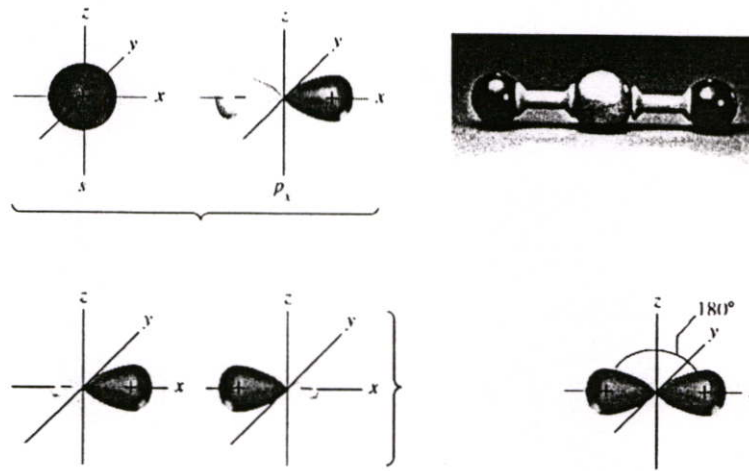


รูปที่ 2.6 ลักษณะการซ้อนทับของพันธะพาย

2.1.1.3 ไฮบริดออร์บิทัล (hybrid orbital)

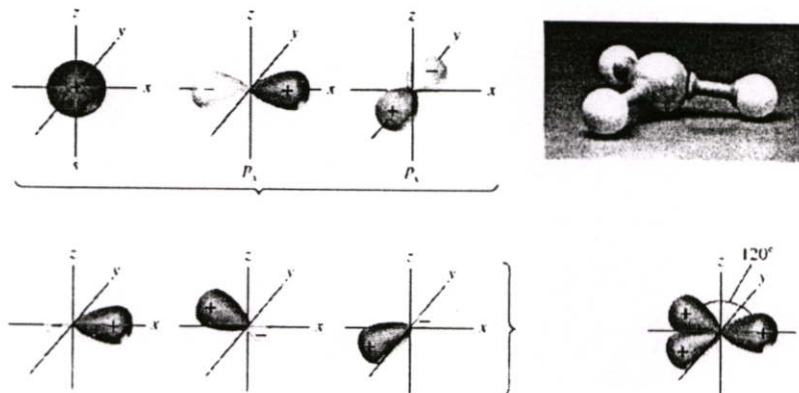
ไฮบริดออร์บิทัล เกิดจากการซ้อนทับกันระหว่างออร์บิทัลอะตอมต่างชนิดกันเช่น ออร์บิทัล s กับ ออร์บิทัล p

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

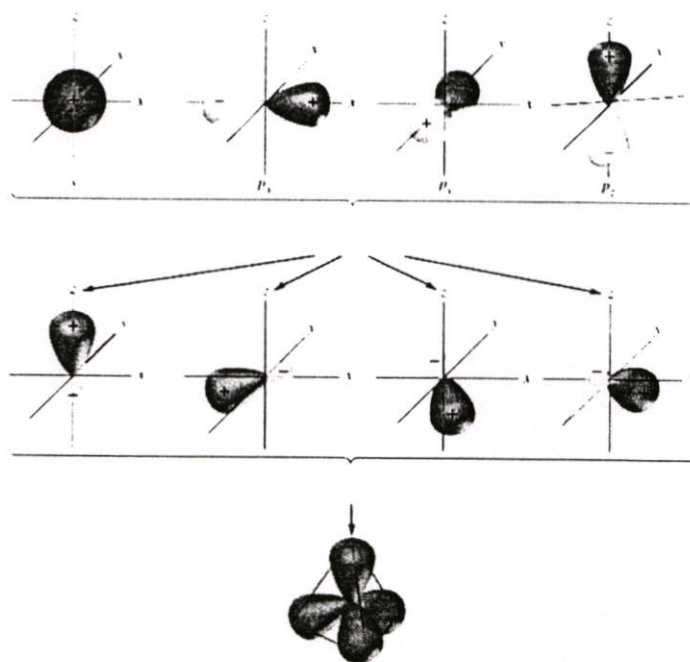


รูปที่ 2.7 sp ออร์บิทัลแบบไฮบริด

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 ออร์บิทัลมีการจัดเรียงตัวแบบเตตระฮีดรอล (tetrahedral arrangement) โดยแต่ละด้านทำมุมกัน 109.5° แสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 sp^3 ออร์บิทัลแบบไฮบริด

การเกิดไฮบริดไอเซชันในพันธะต่างๆจะประกอบด้วยพันธะซิกมาและพันธะพายดังนี้

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

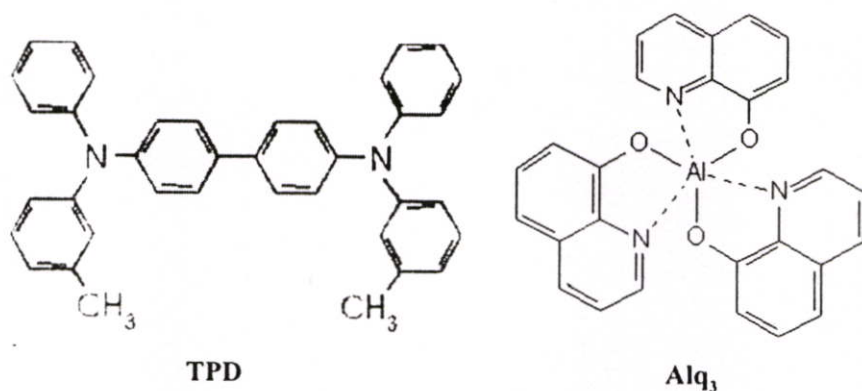
2. พันธะคู่ (double bond) เป็นพันธะที่เกิดจากอะตอม 2 อะตอมที่ใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน 2 คู่ โดยออร์บิทัลมีการซ้อนทับกันแบบซิกมา 1 คู่ และแบบพาย 1 คู่

3. พันธะสาม (triple bond) เป็นพันธะที่เกิดจากอะตอม 2 อะตอมที่ใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน 3 คู่ โดยออร์บิทัลมีการซ้อนทับกันแบบซิกมา 1 คู่ และแบบพาย 2 คู่

2.2 สารกึ่งตัวนำอินทรีย์ (organic semiconductor)

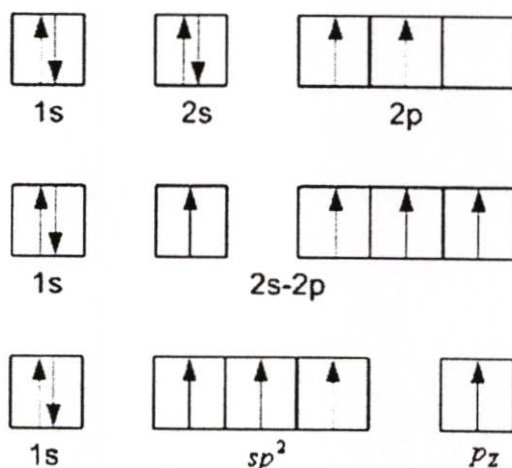
สารอินทรีย์ในธรรมชาติส่วนใหญ่จะประกอบด้วยอะตอมของธาตุพื้นฐานคือ H, C, O, N ซึ่งมีลักษณะ โครงสร้างหลายแบบและมีสมบัติที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งสารบางชนิดสามารถสังเคราะห์ได้ในห้องปฏิบัติการ

สารกึ่งตัวนำอินทรีย์เป็นสารอินทรีย์ที่มีลักษณะเฉพาะเมื่อนำมาทำการทดลองและวิเคราะห์ทางฟิสิกส์พบว่า สารอินทรีย์ดังกล่าวมีแถบพลังงานต้องห้าม (forbidden bandgap) จึงเรียกสารดังกล่าวว่าเป็นสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ โดยลักษณะโครงสร้างส่วนใหญ่ของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์จะมีลักษณะพันธะเป็นพันธะคู่สลับพันธะเดี่ยว เรียกโครงสร้างลักษณะนี้ว่า โครงสร้างแบบคอนจูเกต (conjugate system) ดังรูปที่ 2.10

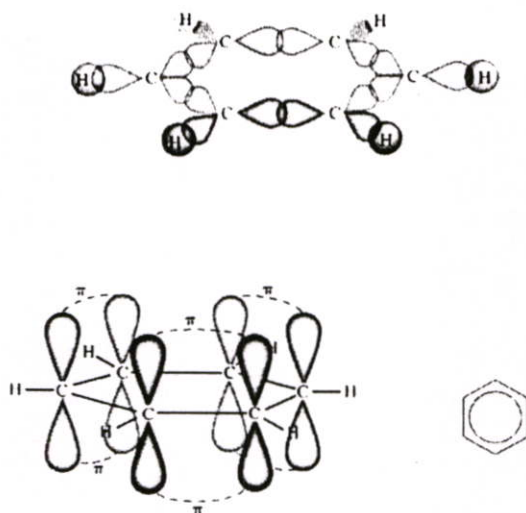


รูปที่ 2.10 ตัวอย่างของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์

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

รูปที่ 2.11 การกระจายของอิเล็กตรอน และการเกิด sp^2 ออร์บิทัล ของคาร์บอนที่เป็นพันธะคู่

พิจารณาอะตอมของคาร์บอนที่อยู่ในวงของเบนซีน (benzene, C_6H_6) อะตอมของคาร์บอนเป็นแบบ sp^2 ไฮบริดออร์บิทัล มีพันธะเป็นแบบคู่สลับเดี่ยว ในแนวระนาบของวงเบนซีนจะมีระนาบของพันธะซิกมาซึ่งเกิดจากการสร้างพันธะระหว่างอะตอมของคาร์บอนกับคาร์บอนและอะตอมของคาร์บอนกับไฮโดรเจน และภายในวงของเบนซีนส่วนที่เป็น p_z ออร์บิทัล จะเกิดเป็นพันธะพายที่เกิดจากพันธะคู่ระหว่างอะตอมของคาร์บอน 3 คู่ ดังรูปที่ 2.12

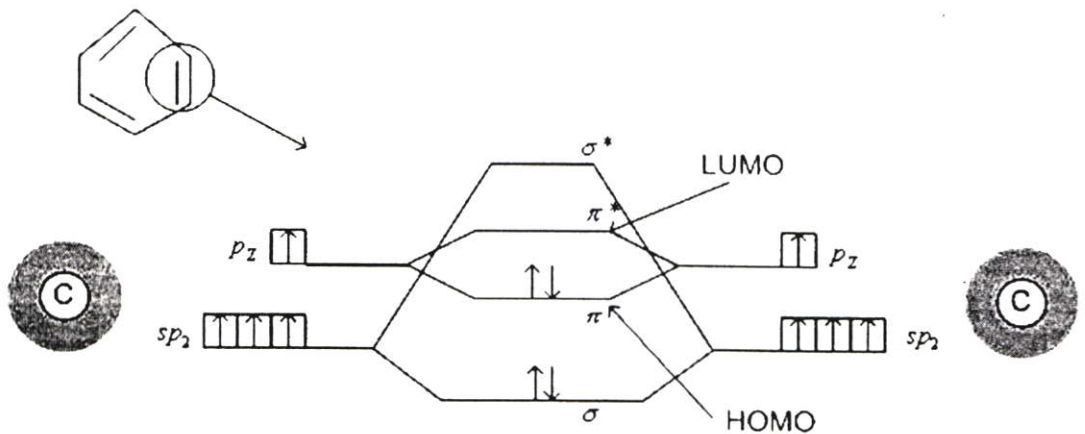


รูปที่ 2.12 พันธะซิกมาในวงของเบนซีน และพันธะพายในวงของเบนซีน

เมื่อพิจารณาถึงระดับพลังงานของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ ในลักษณะของ โมเลกุลออร์บิทัล 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 เมื่อมีพลังงานมากกระตุ้นทำให้อิเล็กตรอนที่กระจายตัวอยู่สามารถเคลื่อนที่ไปตามพันธะพายได้ เสมือนเป็นการเคลื่อนประจุ

เมื่อพิจารณาจากทฤษฎีออร์บิทัลโมเลกุล (molecular orbital theory) ระดับพลังงาน ของอิเล็กตรอนใน p_z ออร์บิทัล ระดับพลังงานของออร์บิทัลโมเลกุลที่สร้าง (π bonding molecular orbital) จะเป็นระดับที่สูงที่สุดที่อิเล็กตรอนสามารถอาศัยอยู่ได้ จึงเรียกระดับพลังงานนี้ว่า highest occupied molecular orbital (HOMO) และ ที่ระดับพลังงานของออร์บิทัลโมเลกุลที่ผ่านการสร้างพันธะ (π^* antibonding molecular orbital) จะเป็นระดับที่ต่ำที่สุดที่ไม่มีอิเล็กตรอนอาศัยอยู่ได้ จึงเรียกระดับพลังงานนี้ว่า lowest unoccupied molecular orbital (LUMO) ระหว่างระดับ HOMO และ LUMO เสมือนเป็นช่องว่างแถบพลังงานที่มีค่าใกล้เคียงกับสารกึ่งตัวนำ ระดับพลังงานชั้น HOMO เปรียบเสมือนแถบวาเลนซ์ (valence band) ส่วนระดับพลังงานชั้น LUMO เปรียบเสมือนแถบนำ (conduction band) จึงเรียกสารที่มีสมบัติดังกล่าวว่า สารกึ่งตัวนำอินทรีย์ [4] ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ระดับพลังงานพันธะของอะตอมคาร์บอนกับอะตอมข้างเคียงภายในวงเบนซีน

2.2.1 โมเลกุลขนาดเล็ก (small molecule)

เป็นสารประกอบออร์แกนิกส์ที่มีโครงสร้างพันธะเป็นแบบคู่สลับเดี่ยวเป็น โครงข่ายจับตัวกันเป็น โมเลกุล สารบางชนิดจะมีอะตอมของโลหะเจืออยู่ด้วย จับกันเป็น โครงข่ายที่จำกัด ดังรูปที่ 2.14 สารแต่ละชนิดจะมีสมบัติที่แตกต่างกันออกไปตามหน้าที่ดังนี้

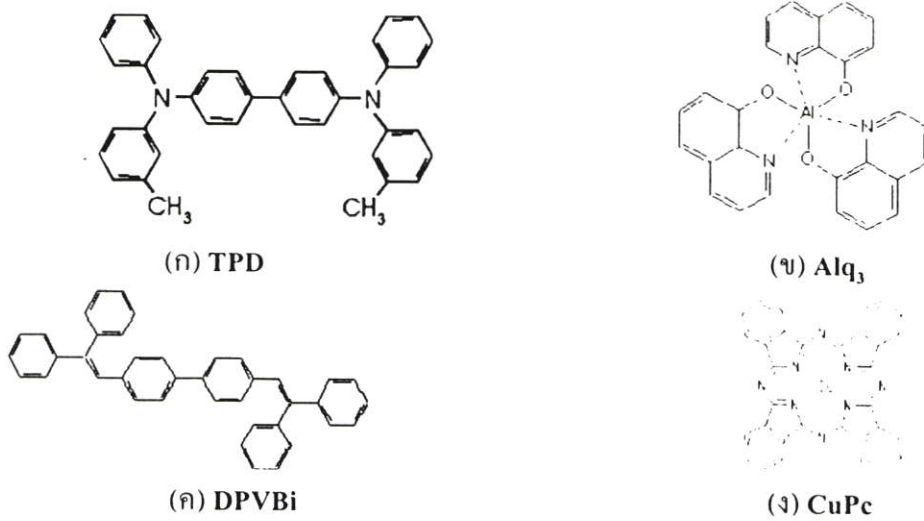
1. วัสดุนำพาอิเล็กตรอน (electron transport material) มีความสามารถในการขนส่งอิเล็กตรอนได้ดีและประพุดิตนคล้ายกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

2. วัสดุนำพาโฮล (hole transport material) มีความสามารถในการขนส่งโฮลได้ดีและประพุดิตนคล้ายกับสารกึ่งตัวนำชนิดพี

3. วัสดุเปล่งแสง (emission material) เป็นวัสดุที่เปล่งแสงในช่วงของแสงสีที่ตาสามารถมองเห็นได้

4. วัสดุเจือ (dopant material) เมื่อทำการเจือสารเหล่านี้ลงไปในวัสดุเปล่งแสง ทำให้แสงสีที่ออกมาสามารถเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม

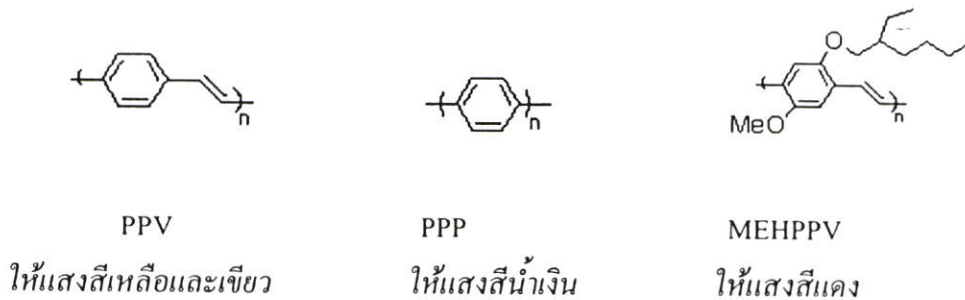
สารบางชนิดสามารถทำหน้าที่ได้หลายแบบ เช่น สารกึ่งตัวนำอินทรีย์ Alq₃ มีสมบัติที่เป็น วัสดุนำพาอิเล็กตรอน และ วัสดุเปล่งแสง



รูปที่ 2.14 สารกึ่งตัวนำอินทรีย์แบบโมเลกุลขนาดเล็ก (ก) TPD (ข) Alq₃ (ค) DPVBi (ง) CuPc

2.2.2 คอนจูเกตพอลิเมอร์ (conjugated polymer)

คอนจูเกตพอลิเมอร์คือ สารที่มีหน่วยของมอนอเมอร์ (monomer) ซ้ำๆกัน เรียงต่อกันไป โดยมีโครงสร้างพันธะเป็นแบบคู่สลับเดี่ยวเรียงต่อกันออกไปตามสายโซ่ของพอลิเมอร์ (polymer) เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนไปตามสายโซ่ของพอลิเมอร์ดังรูปที่ 2.15

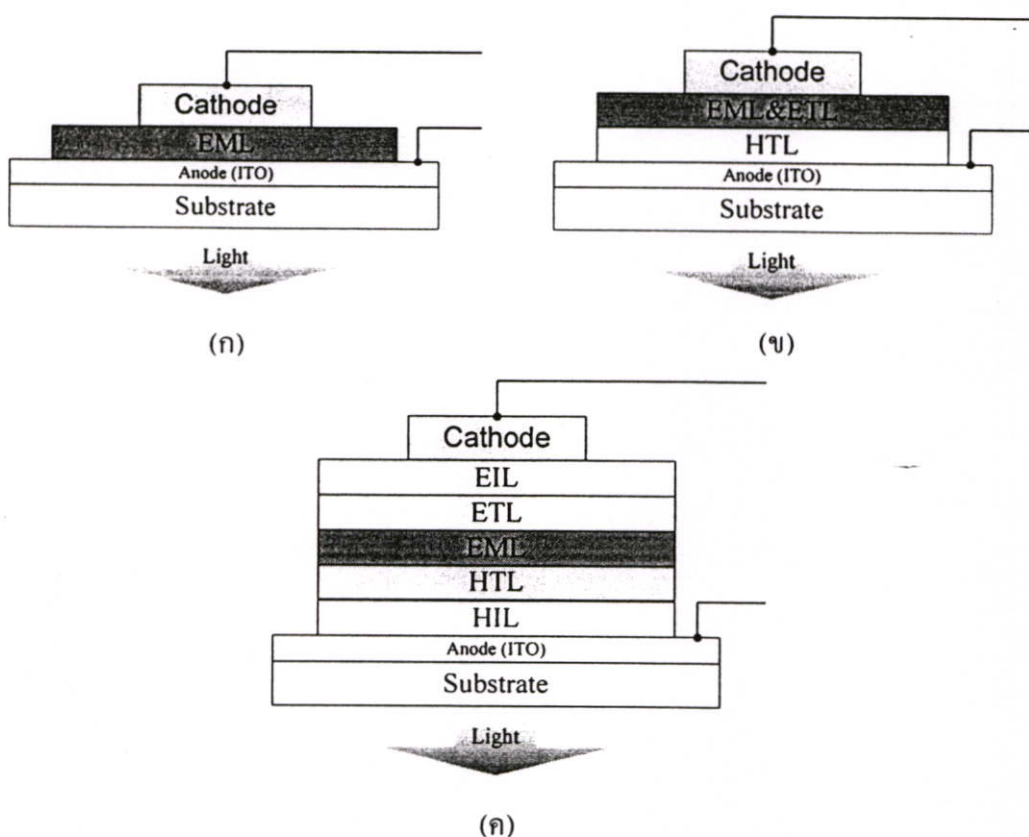


รูปที่ 2.15 สารกึ่งตัวนำอินทรีย์แบบคอนจูเกตพอลิเมอร์

2.3 ไดโอดเปล่งแสงสารอินทรีย์ (Organic Light-Emitting Diode; OLED)

OLED เป็นอุปกรณ์เปล่งแสง (Light Emitting Device ; LEDs) ที่สร้างจากสารอินทรีย์ทำงานโดยการให้ความต่างศักย์แก่ไดโอดจะเกิดการเปล่งแสงออกมาที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับชนิดของสารอินทรีย์ที่ใช้ และโครงสร้างของไดโอดเปล่งแสง โครงสร้างของ OLED แบบชั้นเดียวแสดงดังรูปที่ 2.16 (ก) ประกอบไปด้วยชั้นเปล่งแสง (Emitting Layer; EML) เพียงชั้นเดียวเพื่อทำการเพิ่มประสิทธิภาพของ OLED ให้สูงขึ้นจึงได้มีการพัฒนาโครงสร้างเป็นแบบสองชั้นและแบบหลายชั้นแสดงรูปที่ 2.16 (ข)-(ค) ตามลำดับ โดยทำการเพิ่มชั้นต่างๆเข้าไปคือ ชั้นฉีดโฮล (Hole Injection Layer ; HIL) ชั้นส่งผ่านโฮล (Hole Transport Layer ; HTL) ชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน (Electron Transport Layer ; ETL) และชั้นฉีดอิเล็กตรอน (Electron Injection Layer ; EIL) [5] ส่วนรายละเอียดได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2.3.3

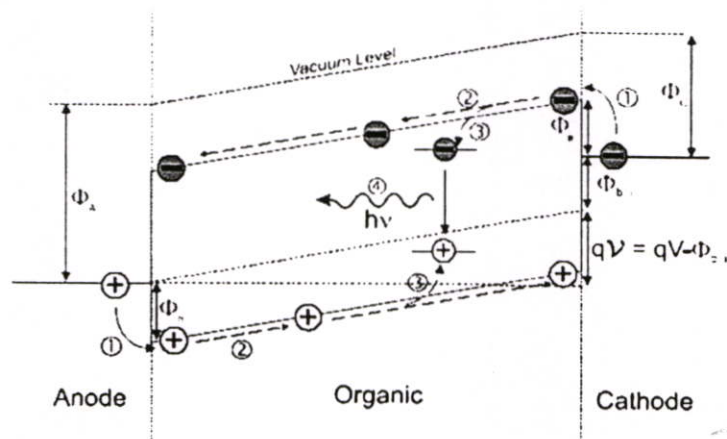
สารอินทรีย์ที่นำมาสร้างเป็น OLED มีด้วยกันสองชนิดคือ พอลิเมอร์ กับ โมเลกุลขนาดเล็ก (small molecule) โดยในที่นี้จะขอกกล่าวถึงเฉพาะ OLED ที่สร้างจากสารอินทรีย์แบบโมเลกุลขนาดเล็กเท่านั้น



รูปที่ 2.16 โครงสร้าง OLED แบบต่างๆ (ก) แบบชั้นเดียว (ข) แบบสองชั้น (ค) แบบหลายชั้น

2.3.1 กระบวนการทำงานของ OLED

เมื่อทำการพิจารณาแผนภาพระดับพลังงานของ OLED โครงสร้างแบบชั้นเดียว กระบวนการเกิดอิเล็กโทรมินิเซนซ์ของ OLED มีขั้นตอนหลักอยู่ 4 ขั้นตอนดังรูปที่ 2.17 [6]



รูปที่ 2.17 กระบวนการเกิดอิเล็กโทรมินิเซนซ์ของ OLED

เมื่อให้ Φ_A คือ ฟังก์ชันงาน(work function) ของขั้วแอโนด

Φ_C คือ ฟังก์ชันงาน ของขั้วแคโทด

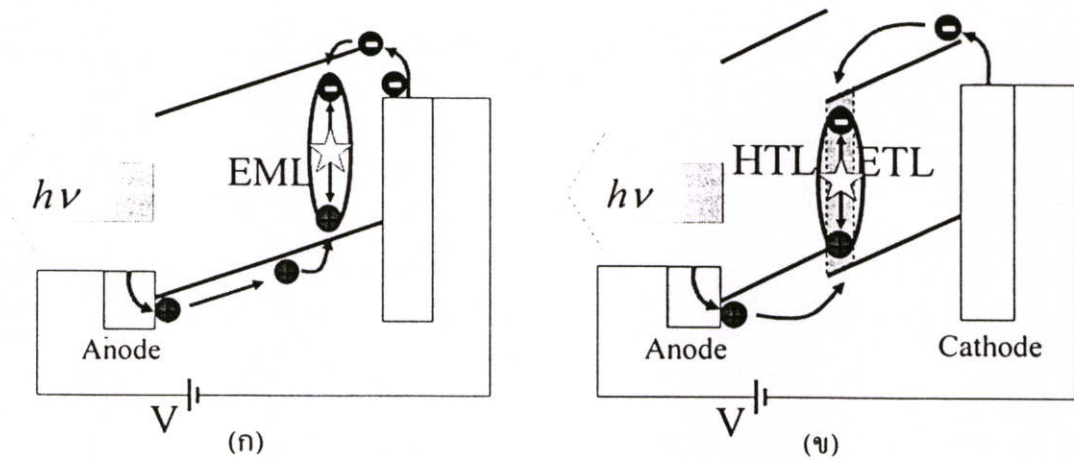
Φ_h คือ กำแพงการฉีดโฮล

Φ_e คือ กำแพงการฉีดอิเล็กตรอน

Φ_{bi} คือ built-in potential

1. การฉีดพาหะโฮลและอิเล็กตรอนจากขั้วไฟฟ้า
2. การล่งผ่านโฮลและอิเล็กตรอนในชั้นสารอินทรีย์
3. การรวมตัวของเอกซิตอน (exciton)
4. การปลดปล่อยแสงของเอกซิตอน

เมื่อทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าทำให้ประจุโฮลและอิเล็กตรอนถูกฉีดออกมาจากขั้วไฟฟ้า และเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในชั้นของสารอินทรีย์ และเกิดการรวมตัวกันจากสถานะกระตุ้นผลลัพธ์สุดท้ายจะเกิดการปลดปล่อยแสงออกมา เริ่มแรกที่มีการศึกษา OLED โครงสร้างแบบชั้นเดียว พบว่ายังมีประสิทธิภาพที่ต่ำอยู่จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1987 C. W. Tang และ S. A. Van Slyke ได้ทำการสร้าง OLED ที่เปล่งแสงในช่วงความยาวคลื่นแสงสีเขียวจากสารอินทรีย์ Alq₃ โดย OLED ที่สร้างขึ้นเป็นโครงสร้างแบบหลายชั้น ทำให้มีประสิทธิภาพการเปล่งแสงสูงขึ้นสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 เปรียบเทียบกระบวนการทำงานของ OLED โครงสร้างแบบชั้นเดียวกับแบบสองชั้น (ก) แบบชั้นเดียว (ข) แบบสองชั้น

เมื่อทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับขั้วไฟฟ้าของ OLED ชั้นเดียวโฮลกับอิเล็กตรอนจะถูกฉีดจากขั้วไฟฟ้าเข้าไปยังชั้นของสารอินทรีย์และเกิดกระบวนการต่างๆ 4 ขั้นตอนตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นแต่เนื่องจากว่าในสารอินทรีย์โฮลมีสภาพช่องทางไฟฟ้าสูงกว่าอิเล็กตรอนประมาณ 10-100 เท่าทำให้โอกาสที่โฮลจะวิ่งเข้าไปยังขั้วแคโทดของ OLED ก็มีความเป็นไปได้สูงทำให้โอกาสที่อิเล็กตรอนกับโฮลจะเกิดการรวมตัวกันแบบเปล่งแสงก็เป็นไปได้ต่ำทำให้ OLED โครงสร้างแบบชั้นเดียวยังมีประสิทธิภาพต่ำอยู่ เมื่อพัฒนาเป็นโครงสร้างแบบสองชั้น ในชั้นแรกเป็นชั้นส่งผ่านโฮลและชั้นเป็นชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน ผิวสัมผัสระหว่างชั้นทั้งสองนี้จะเป็นตำแหน่งของการรวมตัวกันของคู่อิเล็กตรอนโฮล (electron-hole pair) และเป็นผลทำให้เกิดอิเล็กโตรลูมิเนสเซนซ์

เมื่อทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับขั้วไฟฟ้าของ OLED แบบสองชั้น ก็จะเกิดกระบวนการทั้ง 4 ตามที่ได้กล่าวมาแล้วเช่นกัน การออกแบบโครงสร้างแบบรอยต่อเฮเทโร (hetero-junction) ทำให้สามารถฉีดโฮล จากชั้น HTL ไปยังชั้น ETL ได้ง่ายขึ้น และทำให้สามารถกักอิเล็กตรอน ที่ฉีดเข้ามาในทิศทางตรงกันข้ามทำให้มีความเป็นไปได้ในการเกิดเอกซิตอนมากขึ้น และทำให้เกิดการรวมตัวกันบริเวณใกล้ๆกับรอยต่อของชั้นทั้งสองดังรูปที่ 2.18 HOMO ของ HTL อยู่เหนือกว่าของชั้น ETL เล็กน้อย ทำให้โฮลสามารถเข้าไปในชั้น ETL ได้อย่างรวดเร็ว ในขณะที่โฮล LUMO ของชั้น ETL ต้องอยู่ต่ำกว่าของชั้น HTL อย่างมากอิเล็กตรอน จึงถูกจำกัดให้อยู่ในชั้น ETL เนื่องจากสภาพช่องของโฮลต่ำ ในชั้น ETL จึงต้องสร้างให้เพิ่มความหนาแน่นของโฮลมากขึ้น จะทำให้ขบวนการจับกันของอิเล็กตรอนกับโฮล เกิดมากขึ้น นอกจากนั้นช่องว่างจากรอยต่อออกมาต้องมีระยะทางเพียงพอ เพื่อที่จะได้ไม่เกิดขึ้นที่บริเวณใกล้ๆผิวรอยต่อของขั้วโลหะทำให้ OLED โครงสร้างแบบสองชั้นมีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบชั้นเดียว [7]

โครงสร้างตัวอย่างสามารถปรับปรุงให้เป็น 3 ชั้นได้ โดยชั้นที่จะเพิ่มเข้าไปคือชั้น EML ซึ่งอยู่ระหว่างชั้น HTL กับ ETL เป็นตัวแปรที่สำคัญเพราะเป็นตำแหน่งที่อิเล็กตรอนกับโฮลเกิดการรวมตัวกันและเกิดการอิเล็กโทรมูมิเนสเซนซ์ จึงต้องพิจารณาหาความเหมาะสมของสารอินทรีย์ในชั้นนี้ ซึ่งชั้นที่เกิดการเปล่งแสงหรือรวมตัวกันนี้ควรจะเลือกเอาสารอินทรีย์ที่ให้สีในชั้นเปล่งแสงที่มีค่าประสิทธิภาพในการเปล่งแสงสูง นอกจากนี้ชั้น ETL และ HTL ควรจะมีความเหมาะสมและมีคุณสมบัติในการถ่ายเทประจุได้ดี [8]

ความหนาของชั้นสารอินทรีย์เปล่งแสงสุดท้ายควรจะทำให้มีความต้านทานน้อยๆ ซึ่งจะทำได้ความหนาแน่นของกระแสสูงเมื่อทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้า เนื่องจากแสงที่ปลดปล่อยออกมา มีความสัมพันธ์โดยตรงกับความหนาแน่นกระแส ที่จะทะลุผ่านเข้าไปในชั้นสารอินทรีย์เปล่งแสง ขึ้นอยู่กับการเพิ่มการฉีดประจุเข้าไปและประสิทธิภาพการส่งผ่านซึ่งเป็นผลทำให้เกิดการปลดปล่อยแสงออกมาที่แรงดันไฟฟ้าต่ำ

แม้ว่ามันง่ายมากที่จะทำให้เข้าใจผิดว่า OLED ทำมาจากสารอินทรีย์ที่มีกลไกการเปล่งแสงเหมือนกันกับสารอนินทรีย์ P-N junction LED แต่ในรายละเอียดแล้ว LED จากสารอนินทรีย์กับ OLED แตกต่างกันอย่างมา ความแตกต่างทั้งคุณสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์และคุณสมบัติทางแสงระหว่างสารกึ่งตัวนำอินทรีย์และอนินทรีย์ และรูปแบบของการฉีดพาหะ space-charge-limited current (SCLC) และ molecular exciton เป็นกุญแจสำคัญที่จะทำให้เข้าใจกลไกของ OLED

2.3.1.1 การฉีดพาหะและการส่งผ่านพาหะใน OLED

การฉีดและการเคลื่อนที่ของประจุพาหะใน OLED ได้มีการศึกษาอย่างละเอียดโดย Kalinowski [9] สารอินทรีย์ที่สามารถเปล่งแสงด้วยไฟฟ้าส่วนมากทั้งแบบ โมเลกุลขนาดเล็กและพอลิเมอร์ชนิดคอนจูเกตเป็นสารที่มีความนำไฟฟ้าต่ำ สภาพคล่องทางไฟฟ้าของโฮลของสารเหล่านี้โดยทั่วไปมีค่าประมาณ $10^{-7} - 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{Vs}$ ส่วนสภาพคล่องทางไฟฟ้าของอิเล็กตรอนมีค่าน้อยกว่า 10-100 เท่า

สารอินทรีย์แตกต่างจากสารกึ่งตัวนำอนินทรีย์ โดยที่สมบัติการเคลื่อนที่และการฉีดประจุพาหะในไดโอดเปล่งสารอินทรีย์จะพิจารณาว่าเกิดจากการ hop ของประจุพาหะระหว่างสถานะโลคอลภายในสารอินทรีย์มีลักษณะเหมือนกับการ hop จากสถานะดีโลคอลในโลหะไปสู่สถานะโลคอลในสารอินทรีย์ ซึ่งอัตราการเคลื่อนที่จากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่งขึ้นอยู่กับความแตกต่างของพลังงานทั้งสองตำแหน่งและระยะห่างระหว่างกัน ประจุพาหะสามารถ hop ไปสู่ตำแหน่งที่มีพลังงานสูงกว่าได้โดยการดูดกลืนโฟนอนที่มีพลังงานเหมาะสมซึ่งจะลดโอกาสของการเคลื่อนที่ของประจุพาหะจากสถานะโลคอลที่มีพลังงานมากกว่าไปยังสถานะที่มีน้อยกว่า เมื่อประจุพาหะได้รับพลังงานที่สามารถ hop ได้สามารถเคลื่อนที่ไปได้ระยะห่างค่าหนึ่งนั่นคือ

localization length ระดับพลังงานของการเคลื่อนที่แบบ hop ของโฮลและอิเล็กตรอนอยู่รอบๆ แถบพลังงาน HOMO และ LUMO โดยความกว้างของแถบพลังงานนี้สามารถพิจารณาได้จาก อัตราการระหว่าง โมเลกุลและระดับพลังงานของความไม่เป็นระเบียบ

สารอินทรีย์ทั้งหมดที่ใช้ใน OLED มีคุณสมบัติเป็นฉนวนอยู่ภายใต้เงื่อนไขสนามไฟฟ้า ต่ำ ($< 10^4$ V/cm) ตัวอย่างที่ได้มีการศึกษากันเช่น anthracene single crystals มีความต้านทานอยู่ในระดับ 10^{20} Ω cm และเมื่อทำให้บริสุทธิ์ในสุญญากาศ (vacuum-sublimed) ฟิล์มบาง anthracene จะมีความต้านทานอยู่ในระดับ 10^{15} Ω cm นอกจากนี้ตัวอย่างของ π -conjugated polymer, poly(p-phenylene vinylene) มีความต้านทานอยู่ในระดับ 10^{16} Ω cm นี้เป็นผลลัพธ์ที่ชี้ให้เห็นว่าควรระมัดระวังเรื่องความบริสุทธิ์ของสารอินทรีย์จะไม่มีประจุสุทธิถ้าไม่มีการเจือทางเคมีของ doner และ acceptor molecule ใน OLED เราจะทำให้ได้ความหนาแน่นกระแสสูงมากๆ มากกว่า 1 A/cm² จะเป็นไปได้ยากมากถ้าไม่มีการเจือสาร นี้เป็นความจริงในความเข้าใจในพื้นฐานของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ มันเป็นสิ่งจำเป็นที่จะทำให้เราเข้าใจการควบคุมทฤษฎีของการเคลื่อนที่ของพาหะในสารกึ่งตัวนำอินทรีย์

ความเข้มของการแสงที่มีค่ามากสามารถพิจารณาได้จากการฉีดพาหะที่บริเวณรอยต่อระหว่างสารอินทรีย์กับขั้วไฟฟ้า และ SCLC โครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ของฟิล์มบางสารอินทรีย์อยู่บนพื้นฐานของ HOMO และ LUMO ของแต่ละ โมเลกุลจะทำปฏิกิริยากันด้วยแรง vander waals และ valence bonds นอกจากนี้เรายังสามารถอธิบายโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ได้อย่างชัดเจนเช่น Ionization Potential (IP), Electron Affinity (Ea) และ charge carrier density (n_h, n_e) และ mobilities (μ_h, μ_e) ของโฮลและอิเล็กตรอน ค่า IP และ EA สัมพันธ์กับ carrier injection phenomena และ charge carrier densities (n_h, n_e) และ mobilities (μ_h, μ_e) สัมพันธ์กับ carrier injection phenomena เราสามารถอธิบาย carrier density ภายในของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ โดยการคาดคะเนบนพื้นฐานของการมีสิ่งเจือปนและความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างของฟิล์มบางซึ่งต่ำมากๆ โดยทั่วไป 10^5 - 10^{10} /cm³ ค่า mobility ของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์มีค่าต่ำประมาณ 10^{-3} - 10^{-7} cm²/Vs เมื่อเปรียบเทียบกับสารอนินทรีย์มีค่า 1 - 10^3 cm²/Vs แม้ว่าตัวเลขต่างๆ ที่ได้จะดูเหมือนว่าเป็นอุปสรรคต่อการสร้างเป็นอุปกรณ์แต่เนื่องจากเป็นองค์ประกอบของฟิล์มที่บางมาก ทำให้มีความเป็นไปได้ที่จะนำไปสู่การสร้างอุปกรณ์จากสารกึ่งตัวนำอินทรีย์

เมื่อเราจ่ายความต่างศักย์ 10 V ให้กับชั้นสารอินทรีย์หนา 100 nm เมื่อเราสังเกตดูจะเห็นสิ่งที่ไม่คาดคิดว่าจะมีค่าสนามไฟฟ้าสูงถึง 10^6 V/cm² ทำให้มีทางเป็นไปได้ที่จะเหนี่ยวนำให้เกิดการฉีดพาหะและ SCLC ในตอนแรกเราสนใจพฤติกรรมของการฉีดพาหะจากขั้วไฟฟ้าเรามีสองกลไกที่เป็นไปได้ของการฉีดประจุพาหะคือ Schottky thermal emission และ tunneling injection process ทั้งสองเป็นพื้นฐานในทฤษฎีของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์

Schottky emission process อธิบายได้โดย

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

เมื่อ m คือ effective mass ของ electron (hole)

k คือ Boltzmann's constant

h คือ Planck's constant

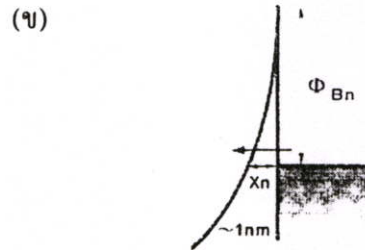
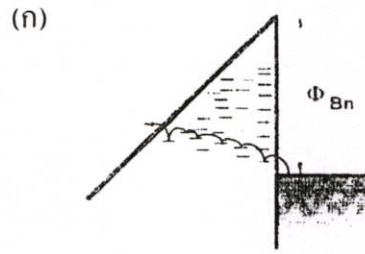
T คือ temperature

q คือ elementary charge

Φ_{Bn} คือ barrier height

V คือ applied voltage

ตัวอย่างเช่นที่รอยต่อของ Alq₃/Mg กำแพงศักย์มีค่า 1.0 eV เมื่อคิดจาก Schottky emission เราไม่สามารถทำให้มีความหนาแน่นกระแสมากกว่านี้ได้ถ้ามีกำแพงศักย์สูงกว่า 1 eV พลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นของ OLED โดยทั่วไปที่พบมีค่าประมาณ 0.03 eV ความเป็นไปได้ของ injection mechanisms คือการทะลุผ่านระดับ localized เหนี่ยวนำโดยโครงสร้างที่บกพร่องและสิ่งเจือปนต่างๆแสดงในรูปที่ 2.19 (ก) เป็นอีกสิ่งหนึ่งที่มีความเป็นไปได้ในการอธิบายการฉีดกระแสโดย Fowler-Nordheim tunneling injection แสดงในรูปที่ 2.19 (ข) การไหลของกระแสสามารถอธิบายได้โดย



local electric field
E: $10^6 \sim 10^7$ V/cm

รูปที่ 2.19 สองกลไกที่เป็นไปได้ในการฉีดกระแสที่บริเวณรอยต่อของสารอินทรีย์/ซิลิกอน

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

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

เมื่อ m_0 คือ มวลของ free electron

m^* คือ effective mass

จากพื้นฐานของสมการนี้จะเกิดขึ้นเมื่อจ่ายสนามไฟฟ้าจนมีค่าอยู่ในระดับ 10^6 V/cm ระยะทางการทะลุผ่านประมาณมากกว่า 10 nm โดยค่านี้ไม่ได้เป็นค่าที่แท้จริง เราสามารถทำนายเมื่อนำไปประยุกต์ใช้ที่สนามไฟฟ้าสูงมีค่าประมาณ 10^7 V/cm ระหว่างชั้นของสารอินทรีย์กับซิลิกอน อีกอย่างหนึ่งในทางปฏิบัติกำแพงศักย์ควรจะต่ำกว่าค่าประมาณถ้าเราต้องการใช้กลไกการทะลุผ่าน

เราควรจะใช้การ inject charge carriers โดยทั้งสองกลไกที่มีความเป็นไปได้ ต่อไปเราจะอธิบาย carrier transport ในฟิล์มบางสารอินทรีย์เมื่อ applied electric field น้อยกว่า 10^4 V/cm และ injected current density (n_{ci}) น้อยกว่า intrinsic charge density (n_i) การไหลของกระแสอธิบายได้โดย Ohm's law เมื่อ n_{ci} มากกว่า n_i โดยการนำไปประยุกต์ใช้ที่มากกว่า 10^5 V/cm ใดๆก็ตาม

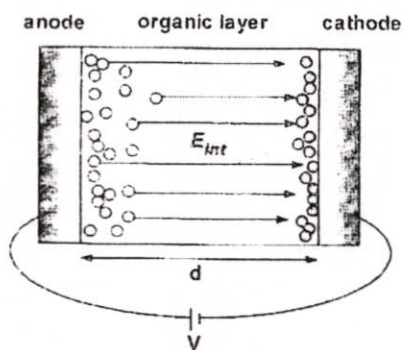
การ injected charge carriers จาก space charges ใกล้เคียง กับรอยต่อระหว่างสารอินทรีย์กับขั้วไฟฟ้า เนื่องจาก carrier mobility มีค่าต่ำแสดงในรูปที่ 2.20 ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากสนามไฟฟ้าภายนอกสามารถเปลี่ยนแปลงได้โดย space charge ความหนาแน่นของกระแส (J) ควบคุมได้โดย SCLC สามารถอธิบายได้โดย

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

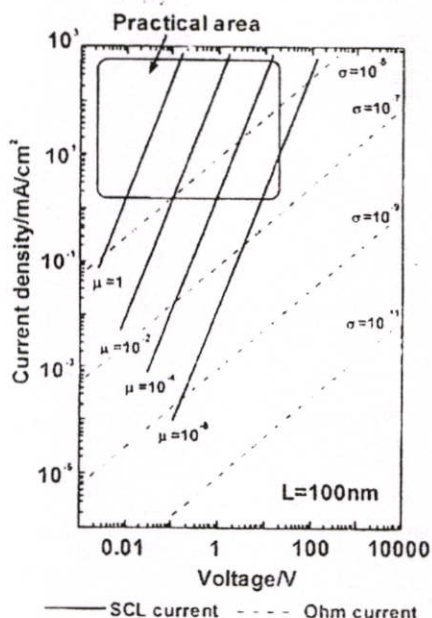
เมื่อ ϵ คือ relative dielectric constant

ϵ_0 คือ dielectric constant

L คือ sample thickness



(ก)

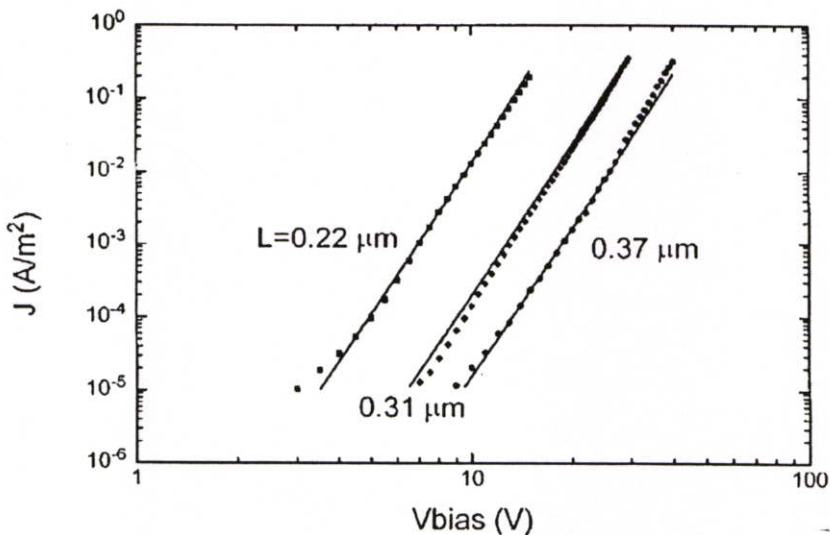


(ข)

รูปที่ 2.20 (ก) แผนภาพของ SCLC ที่เกิดจากสนามไฟฟ้าภายนอก (V/d) บวกกับสนามไฟฟ้าภายใน (E_{int}) เหนี่ยวนำให้เกิดการฉีดของประจุพาหะที่มากขึ้นเป็นสิ่งสำคัญที่จะทำให้ได้ค่าความหนาแน่นกระแสสูงสนามไฟฟ้าทั้งหมด $E_{total} = V/d + E_{int}$ มีความหมายอย่างมากต่อการไหลของกระแส เมื่อให้สัญลักษณ์วงกลมเปิด (○) แทนโฮล สัญลักษณ์วงกลมปิด (●) แทนอิเล็กตรอน (ข) กราฟของความหนาแน่นกระแสกับความต่างศักย์ (J-V)

ปรากฏการณ์นี้ไม่ได้อยู่ภายใต้ electrostatic equilibrium แต่อยู่ภายใต้ dynamic charge equilibrium เมื่ออุปกรณ์อยู่ภายใต้ขบวนการประจุทั้งหมดสมดุลให้มี space charges และประจุไม่มีความเป็นกลางในฟิล์มสารอินทรีย์ดังนั้นเราสามารถประมาณความเป็นไปได้ของ current density โดยทั่วทั้งฟิล์มสารอินทรีย์ โดยการแทนค่า $\mu = 1-10^{-6} \text{ cm}^2 / \text{Vs}$ $L=100 \text{ nm}$ และ $V=0.01-20\text{V}$ จะสามารถทำให้ได้ความหนาแน่นกระแสที่มาก อย่างไม่คาดคิด รูปที่ 2.20 (ข) เปรียบเทียบกับ ohmic current และ SCLC จะทำให้สามารถได้ความหนาแน่นกระแส 1 mA/cm^2 ถึง 1 A/cm^2 โดยใช้ความต่างศักย์เพียงแค่ 10 V ถ้า carrier mobility มากกว่า $10^{-4} \text{ cm}^2/\text{Vs}$

อีกตัวอย่างหนึ่งที่ได้มีศึกษาการไหลของกระแสของโฮลและอิเล็กตรอนที่ขึ้นอยู่กับ SCLC คือ P. W. M. Blom [10] และคณะที่ได้ทำการศึกษา OLED โครงสร้าง ITO/PPV/Au แสดงผลของความหนาแน่นกระแส (J) กับความต่างศักย์ (V) ที่ขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นสารอินทรีย์ (L) ดังรูปที่ 2.21 จะเห็นได้ว่าความหนาแน่นกระแสเปลี่ยนแปลงตามค่าความหนาของชั้นสารอินทรีย์ตามสมการที่ (2.3)



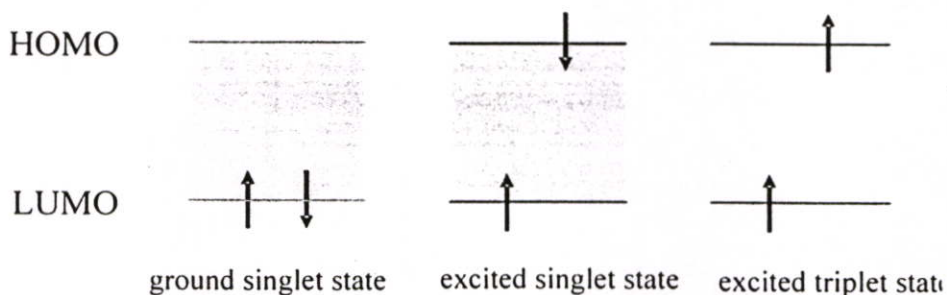
รูปที่ 2.21 ความหนาแน่นกระแส (J) กับความต่างศักย์ (V) ที่ขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นสารอินทรีย์ (L)

ถึงแม้ว่าฟิล์มบางสารอินทรีย์จะมีคุณสมบัติเป็นฉนวนแต่เมื่อทำการจ่ายค่าความต่างศักย์ 10 โวลต์ ให้กับความหนา 100 nm (ประมาณ 10^6 V/cm) จาก SCLC จะยอมให้เกิดการฉีดกระแสอย่างต่อเนื่องกันได้ ในทางปฏิบัติทำให้ได้ความหนาแน่นกระแสตั้งแต่ 1 mA/cm^2 ถึง 1 A/cm^2 ทำให้สามารถนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์จากฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ได้

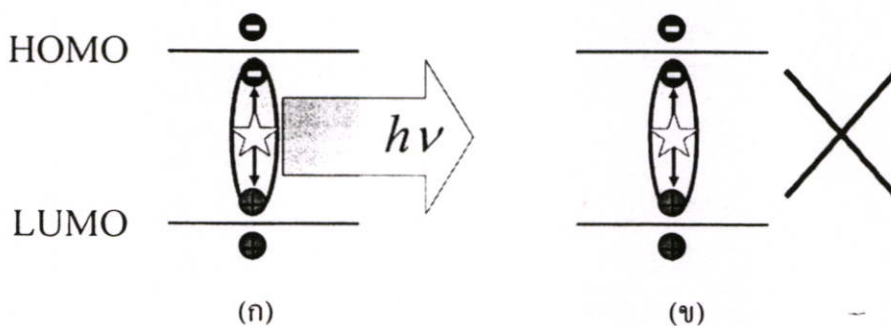
2.3.1.2 การรวมตัวของพาหะและการปลดปล่อยแสง

เมื่อประจุโฮลและอิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากขั้วไฟฟ้ามายังบริเวณชั้นสารอินทรีย์เปล่งแสง จะเกิดการรวมตัวของคู่อิเล็กตรอน โฮล เกิดเป็นเอกซิตอนซึ่งสถานะของเอกซิตอนจะแบ่งได้ออกเป็นสองแบบ คือ singlet state และ triplet state ดังรูปที่ 2.22 ซึ่งโอกาสของการเกิดเอกซิตอนแบบซิงเกรตต่อแบบทริปเปตจะเป็น 1:3 แสดงในสมการดังนี้

$$4(h + e) \rightarrow S + 3T \tag{2.4}$$



รูปที่ 2.22 สถานะซิงเกรตและทริปเปตของเอกซิตอน



รูปที่ 2.23 (ก) เอกซิตอนแบบซิงเกรตที่รวมตัวกันแล้วเกิดการเปล่งแสง

(ข) เอกซิตอนแบบทริปเปตที่รวมตัวกันแล้วไม่เกิดการเปล่งแสง

โดยเอกซิตอนที่จะเกิดการเปล่งแสงแบบฟลูออเรสเซนส์ได้จะต้องเป็นเอกซิตอนแบบซิงเกรตเท่านั้น ในขณะที่เอกซิตอนแบบทริปเปตจะเกิดการรวมตัวแบบไม่ปลดปล่อยแสงดังรูปที่ 2.23 ซึ่งอาจเกิดในรูปของความร้อนและการสั่น หรืออาจเกิดการรวมตัวเป็นซิงเกรตแล้วปลดปล่อยแสงแบบฟอสโฟเรสเซนส์ โดยค่าของความยาวคลื่นแสงที่สามารถปลดปล่อยออกมาจากปรากฏการณ์อิเล็กโทโรลูมิเนสเซนซ์จะมีความสัมพันธ์กับความกว้างของช่องว่างพลังงานของตัวสารที่เกิดการเปล่งแสงด้วยความสัมพันธ์ตามสมการดังนี้

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

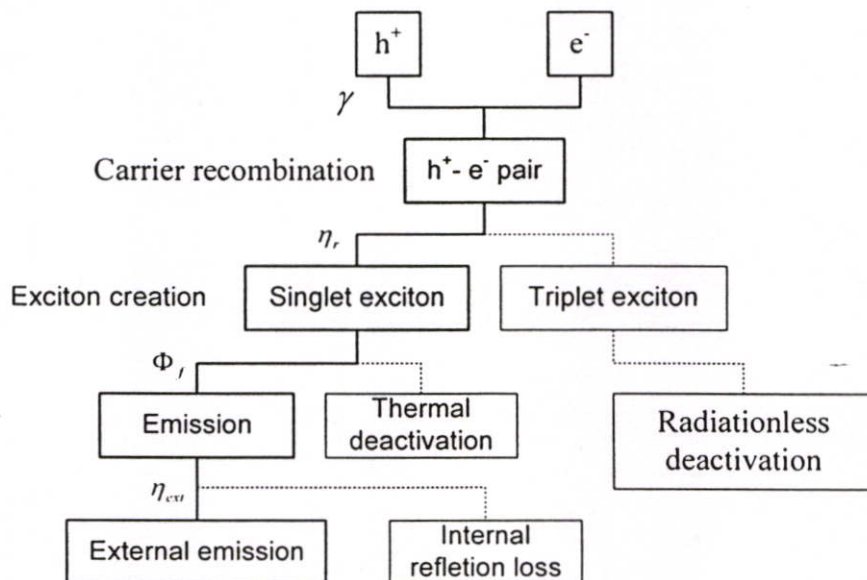
เมื่อ λ คือ ความยาวคลื่นแสงที่ปลดปล่อยมาจากสารกึ่งตัวนำอินทรีย์
 E_g คือ ความกว้างช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์

2.3.1.3 การประมาณค่าประสิทธิภาพควอนตัมภายในและภายนอก

รูปที่ 2.24 แสดงกระบวนการพื้นฐานของ charge recombination เริ่มจากการรวมตัวกันของโฮลและอิเล็กตรอน และจบลงด้วยการที่มีแสงเปล่งออกมา external และ internal efficiency นั้นเกี่ยวข้องกับ factor η_{ext} คือแสงที่สามารถทะลุผ่านออกมาภายนอก ซึ่งจะได้ค่าโดยประมาณโดยพิจารณา refractive index (n) ของชั้นสารอินทรีย์ใน OLED ที่แสงจะสามารถทะลุผ่านออกมาภายนอกจะสามารถเขียนเป็นค่าโดยประมาณได้เป็น

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

เมื่อ n คือ refractive index ของชั้นสารอินทรีย์



รูปที่ 2.24 แผนภาพกระบวนการพื้นฐานของ EL ใน OLED

เมื่อให้คำจำกัดความของ external EL quantum efficiency คือ $\eta_{\phi}(ext)$ เป็นอัตราส่วนของจำนวนของ emitter photons ที่ออกมาภายนอกอุปกรณ์หารด้วยจำนวนของ charge carrier ที่ฉีดเข้าไปในอุปกรณ์ สำหรับ internal EL quantum efficiency η_{ϕ} ให้คำจำกัดความเป็นจำนวนของ photons ที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์หารด้วยจำนวนของ charge carrier ที่ถูกฉีดเข้าไปดังนั้น $\eta_{\phi}(ext)$ คือ

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

และ

$$\eta_{\phi} = \gamma \eta_r \phi_f \tag{2.7}$$

โดยให้ η_{ϕ} คือ internal quantum efficiency

γ คือ charge-balance factor

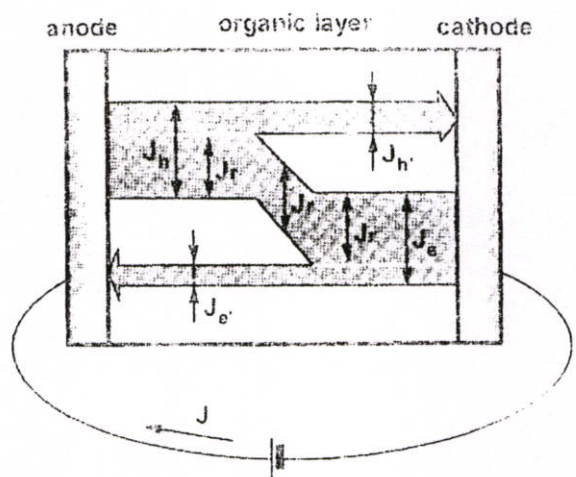
η_r คือ efficiency ของ production for singlet excitons

ϕ_f คือ quantum efficiency ของ fluorescence

โดยให้คำจำกัดความของ charge-balance factor γ คือ

$$\gamma = \frac{J_r}{J} \tag{2.8}$$

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



$$J = J_h + J_{e'} = J_e + J_{h'}$$

$$J_r = J_h - J_{h'} = J_e - J_{e'}$$

รูปที่ 2.25 การไหลของกระแสในการฉีดและการขนส่งโฮลและอิเล็กตรอนในชั้นสารอินทรีย์ J_h และ J_e เป็นความหนาแน่นกระแสสุทธิของโฮลและอิเล็กตรอนตามลำดับ J_r คือ ส่วนประกอบของ recombination current density $J_{h'}$ และ $J_{e'}$ คือความหนาแน่นกระแสของโฮลและอิเล็กตรอนตามลำดับที่ไม่ได้เกิดการ recombination

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

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

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 ให้คำจำกัดความโดยเป็นอัตราส่วนของ emitter light power และ input electric power (JV) และ internal quantum efficiency ให้เป็น

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

เมื่อ ϵ_p คือ average photon energy of emitter light

V คือ applied voltage

ดังนั้น applied voltage เพียงอย่างเดียวที่จะแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่แสดงออกมาของ energy conversion efficiency

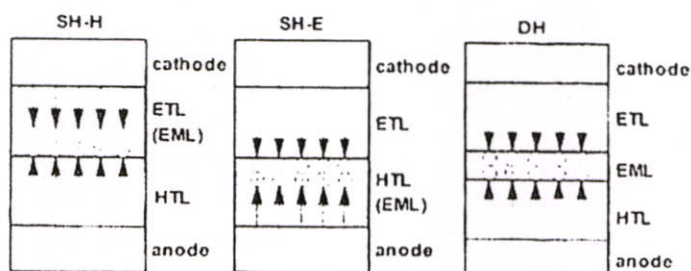
จากที่ได้ทำการพิจารณาถึงความสัมพันธ์ต่างๆจะได้กุญแจสำคัญที่ทำให้ได้ OLED ที่มีประสิทธิภาพสูงสุดดังนี้

1. เมื่อได้ charge-balance factor $\gamma = 1.0$ สำเร็จ
2. การทำโครงสร้างแบบ multilayer ทำให้ได้ค่า γ เข้าใกล้ 1.0 มากขึ้น
3. การใช้สาร fluorescent molecule ร่วมกันหรือทำการเจือกันจะทำให้ได้ high quantum efficiency เนื่องจากโดยคุณสมบัติของโมเลกุลจะมี concentration น้อย การเจือเพียงเล็กน้อยของจำนวนสารที่มี highly fluorescent molecule เข้าไปใน host organic layer จะทำให้ได้ประสิทธิภาพสูงขึ้น
4. ควรจะเลือกให้ barrier ในการประจุพาหะระหว่างขั้วกับชั้นสารอินทรีย์มีค่าน้อยๆ ยิ่งดี

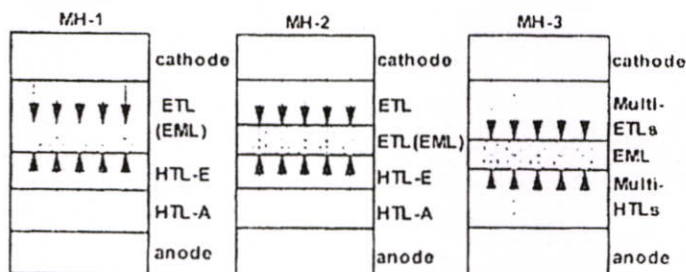
2.3.2 การออกแบบโครงสร้าง OLED แบบหลายชั้น

ที่ผ่านมามีการศึกษารวบรวมโครงสร้างแบบหลายชั้นแสดงให้เห็นว่าสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพของอุปกรณ์ OLED ได้เป็นอย่างดี ความสำคัญส่วนใหญ่ของโครงสร้างแบบหลายชั้นที่ได้รับการยอมรับเนื่องจากสามารถกัก charge carriers ให้อยู่ภายในชั้นเปล่งแสงได้และทำให้เกิดความสมดุลของ carrier injection และ transport รูปที่ 2.26 (ก) สรุป 3 โครงสร้างพื้นฐานของ OLED เป็น SH-H (single hetero-H structure), SH-E (single hetero-E structure) และ DH (double hetero structure)

(ก) Basic cell structures



(ข) Advanced cell structures



รูปที่ 2.26 (ก) สาม โครงสร้างพื้นฐานของ OLED โครงสร้าง SH-H, SH-E และ DH เมื่อชั้น hole-transport layer (HTL), electron-transport layer (ETL) และ emitter layer (EML) (ข) โครงสร้างชั้นสูงของ OLED สาม โครงสร้าง MH-1, MH-2 และ MH-3 โดยที่โครงสร้างสองชั้นของ HTL และ ETL มีผลต่อการปรับปรุงประสิทธิภาพของ OLED

ในตอนแรกจะให้ความสำคัญกับการศึกษาโครงสร้างแบบพื้นฐานที่เป็นสารอินทรีย์สองชั้นก่อน ซึ่งประกอบไปด้วยชั้น HTL และ ETL หลังจากนั้นก็ได้มีการปรับปรุงโครงสร้างของ OLED เพื่อให้ได้ค่าความสว่างสูงและความทนทานของ OLED โดยการปรับปรุงชั้นของสารอินทรีย์เป็นแบบ 4 หรือ 5 ชั้น สำหรับโครงสร้าง SH-H เสนอโดย Tang และ Vanslyke โดยที่ carrier recombination เกิดขึ้นภายในชั้น ETL ซึ่ง ETL สามารถรับโฮลที่ฉีดเข้ามาจากชั้น HTL ได้ ดังนั้น ETL จะทำหน้าที่สองอย่างคือเป็นทั้งชั้นเปล่งแสงและชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนซึ่งในโครงสร้างแบบ SH-E ก็ทำหน้าที่คล้ายกันเพียงทำหน้าที่กลับกันเท่านั้น ซึ่ง HTL จะทำหน้าที่ได้

สองอย่างคือเป็นทั้งชั้นเปล่งแสงและชั้นส่งผ่านโฮล และเมื่อทำการแยกชั้นเปล่งแสงออกจากชั้นอื่นก็จะกลายเป็นโครงสร้างแบบ DH

ซึ่งคุณสมบัติที่สำคัญที่จำเป็นต้องให้ความสำคัญในการศึกษาโครงสร้างแบบหลายชั้นนอกจากจะเป็นชั้น HTL หรือ ETL แล้วยังใช้ทำหน้าที่ในการ block โฮลหรืออิเล็กตรอน เพื่อให้เกิดการรวมตัวกันของพาหะที่มีประสิทธิภาพสูงยิ่งขึ้นใกล้บริเวณรอยต่อของ HTL/ETL โดยที่ recombination region ของโครงสร้างแบบหลายชั้นเป็นบริเวณที่มีค่าจำกัดเป็นบริเวณที่แคบมากๆ 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 พื้นฐานจะสามารถพัฒนามาเป็นโครงสร้างแบบหลายชั้นได้ใหม่เป็น MH 1-3 ซึ่งโครงสร้างที่ได้มีการเสนอกันมาสรุปในรูปที่ 2.26 (ข) โครงสร้าง MH-1 และ MH-2 ได้มีการปรับเป็น double HTLs และ ETLs ซึ่งจุดประสงค์ของ double layers คือการแบ่งแยกการฉีดพาหะจากขั้วไฟฟ้าและการขนส่งพาหะ ซึ่งสรุปเป็นความต้องการหลักๆ ของ HTL ควรจะเป็นดังนี้

1. HTL ควรจะมี barrier น้อยๆ เพื่อที่การฉีดโฮลจากขั้วแอโนดจะเป็นไปโดยง่ายเพื่อทำให้เกิด low injection barrier ระหว่างชั้นทั้งสอง I_p ของ HTL ควรจะเหมาะสมกับขั้วแอโนด โดยทั่วไปจะใช้ ITO ซึ่งมี $I_p = 5.0$ eV HTL ควรจะมีค่าเหมือนกัน

2. HTL สามารถขนส่งโฮลด้วย low driving voltage มีค่า mobility ของโฮลสูงมากกว่า $10^{-1} \text{ cm}^2/\text{Vs}$ จะดีมาก

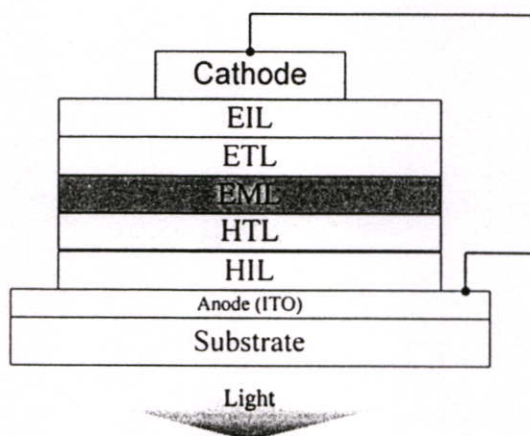
3. HTL ที่สามารถ block การทะลุผ่านเข้ามาของอิเล็กตรอนจาก ETL ได้ซึ่ง HTL ที่มี electron affinity (Ea) น้อยๆ เป็นที่ต้องการมาก

4. HTL ควรจะมี exciton energy มากกว่า ETL เพื่อที่จะป้องกันและต่อต้านการเคลื่อนที่ของ exciton ทำให้มีประสิทธิภาพในการเปล่งแสงมากขึ้น

บนพื้นฐานของความต้องการทั้งหมดมัธยมรับได้อย่างง่ายว่ามันยากมากที่จะทำให้ได้ทุกความต้องการใน HTL ชั้นเดียว โดยเฉพาะความต้องการในข้อ 1 มันไปด้วยกันไม่ได้กับความต้องการในข้อที่ 4 เป็นผลลัพธ์ในการสร้าง double HTLs ในลักษณะที่คล้ายกันทำให้ต้องใช้ double ETL เป็นสิ่งที่จำเป็นในการปรับปรุงประสิทธิภาพของ OLED

2.3.3 หน้าทีและตัวอย่างสารอินทรีย์ที่ใช้ใน OLED

โดยจะอธิบายและยกตัวอย่างสารอินทรีย์ที่ใช้ในแต่ละชั้นของ OLED โครงสร้างแบบหลายชั้นดังรูปที่ 2.27



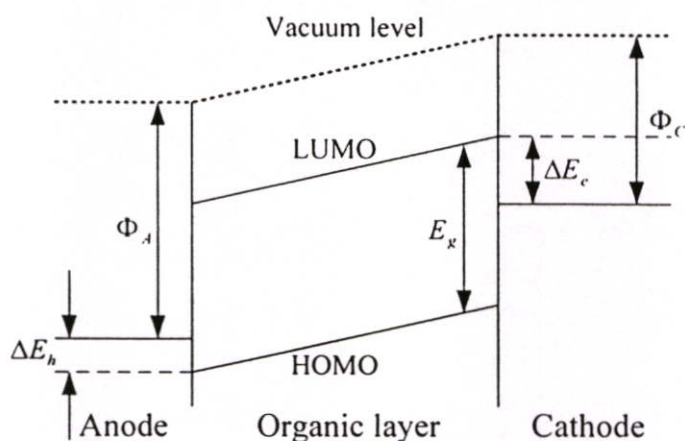
รูปที่ 2.27 OLED โครงสร้างแบบหลายชั้น

2.3.3.1 แผ่นฐานรองรับ (substrate)

ทำหน้าที่เป็นชั้นสำหรับสร้างสารอินทรีย์ในชั้นต่างๆ ของ OLED และทำหน้าที่ป้องกันชั้นของสารอินทรีย์จากความชื้นและอากาศ ซึ่งเป็นผลทำให้ OLED เสื่อมสภาพลงได้วัสดุที่ใช้ทำจากกระจกหรือพลาสติก (ในกรณีที่จะทำจอแบบ โค้งงอได้) ซึ่งจะต้องมีค่าความทะลุผ่านของแสงสูง ในกรณีที่จะทำให้ชั้นเปล่งแสงสารอินทรีย์เปล่งแสงทะลุผ่านแผ่นฐานรองรับออกมา แต่ในกรณีที่มีการเปล่งแสงออกมาจากด้านบนของแผ่นฐานรองรับอาจใช้ซิลิกอนสำหรับอุปกรณ์เปล่งแสงขนาดเล็ก (microdisplays)

2.3.3.2 ขั้วไฟฟ้าแอโนด (anode)

ทำหน้าที่จ่าย โหลเข้าไปยังชั้นสารอินทรีย์ ซึ่งโลหะที่จะนำมาใช้ทำขั้วไฟฟ้าแอโนดจะต้องมีสมบัติที่สำคัญคือ มีฟังก์ชันงาน Φ , สูงดังแสดงในรูปที่ 2.28



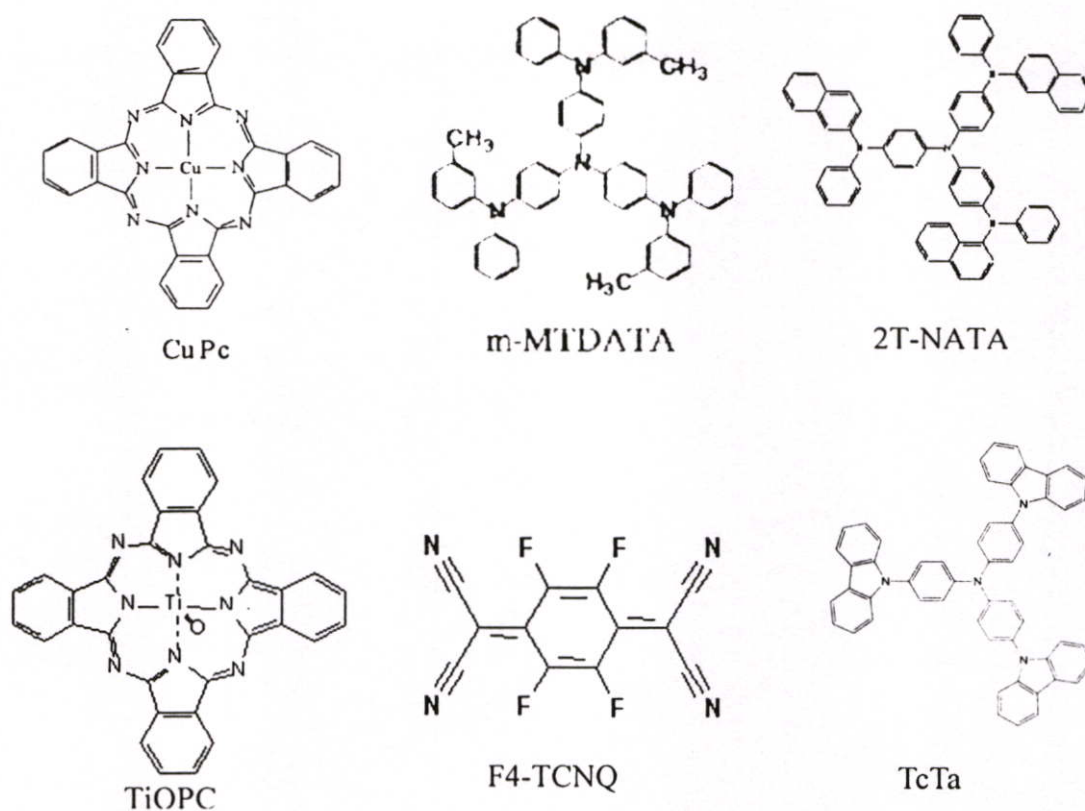
รูปที่ 2.28 ระดับชั้นพลังงานของอุปกรณ์ OLED แบบชั้นเดียว Φ_c คือ

ฟังก์ชันงานของขั้วไฟฟ้าแคโทดและ Φ_A คือฟังก์ชันงานของขั้วไฟฟ้าแอโนด ΔE_h และ ΔE_c คือกำแพงของการฉีดโฮลและอิเล็กตรอนตามลำดับ E_g คือแถบช่องว่างพลังงานระหว่างแถบคอนดักชันและแถบเวเลนซ์

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

2.3.3.3 ชั้นฉีดโฮล (Hole Injection Layer ; HIL)

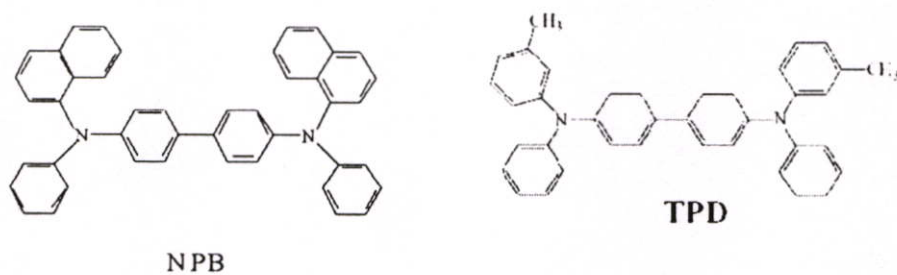
ทำหน้าที่ควบคุมการฉีดโฮล ที่บริเวณรอยต่อของขั้วไฟฟ้าแอโนดและขั้วการฉีดโฮลจากขั้วไฟฟ้าแอโนด โดยที่สารอินทรีย์ในชั้นนี้จะเป็นชนิด p-type ในชั้นนี้โฮลจะมีสภาพคล่องสูงโดยสารที่ใช้ในชั้นนี้ที่พบแสดงดังรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.29 สารในชั้นฉีดโฮลที่ใช้ใน OLED

2.3.3.4 ชั้นขนส่งโฮล (Hole Transport Layer ; HTL)

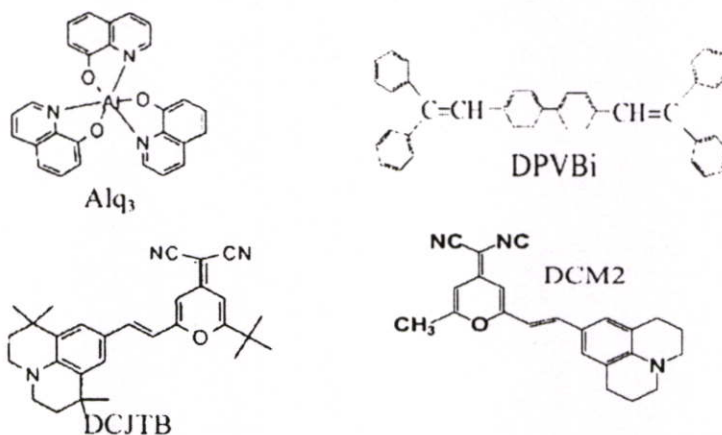
ทำหน้าที่ขนส่งโฮล เข้าไปยังบริเวณชั้นเปล่งแสง และยังช่วยกักอิเล็กตรอนที่มาจากขั้วไฟฟ้าแคโทดไว้ให้อยู่ในบริเวณเปล่งแสงเป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเปล่งแสงของ OLED สารที่ใช้ในชั้น HTL จะมีสภาพคล่องตัวของโฮลสูง โดยสารอินทรีย์ที่ใช้ในขั้ว HIL จะเป็นชนิด p-type โดยส่วนใหญ่จะใช้ diphenyl diamines (TPD) และ NPB แสดงโครงสร้างดังรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.30 โครงสร้างของ NPB และ TPD

2.3.3.5 ชั้นเปล่งแสง (Emitting Layer ; EML)

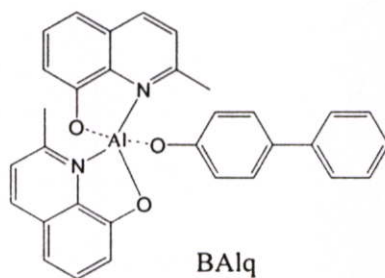
ทำหน้าที่เป็นชั้นเปล่งแสงเป็นชั้นที่เกิดการรวมตัวกันของอิเล็กตรอนกับโฮล เกิดการปลดปล่อยพลังงานแสงออกมาในชั้นนี้ และยังทำหน้าที่เป็นชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนและชั้นกักโฮลอีกด้วยทำให้ประสิทธิภาพในการเปล่งแสงดีขึ้น โดยสารที่ใช้ในชั้นเปล่งแสงนี้จะเป็นตัวเปล่งแสงสีต่างๆ เช่น สีเขียวนิยมใช้ Alq₃ สีแดงเป็นสารเจือสีของ DCM2, DCJTb สีน้ำเงิน DPVBi แสดงโครงสร้างดังรูปที่ 2.31



รูปที่ 2.31 โครงสร้างของ Alq₃, DPVBi, DCJTb, DCM2

2.3.3.6 ชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน (Electron Transport Layer ; ETL)

ทำหน้าที่ส่งผ่านอิเล็กตรอนและยังช่วยกักโฮลที่มาจากขั้วไฟฟ้าแอโนดให้อยู่ในบริเวณเปล่งแสงด้วย โดยสารที่ใช้ในชั้น ETL จะเป็นสารอินทรีย์ชนิด n-type มีสภาพคล่องตัวของอิเล็กตรอนสูง สารที่ใช้ส่วนใหญ่จะเป็น Alq₃, BAq แสดงโครงสร้างดังรูปที่ 2.32



รูปที่ 2.32 โครงสร้างของ BAq

2.3.3.7 ชั้นฉีดอิเล็กตรอน (Electron Injection Layer ; EIL)

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

2.3.3.8 ชั้นขั้วไฟฟ้าแคโทด (Cathode)

ทำหน้าที่จ่ายประจุลบอิเล็กตรอนเข้าไปยังชั้นสารอินทรีย์ ซึ่งโลหะที่จะนำมาใช้ทำขั้วแคโทดจะต้องมีค่าฟังก์ชันงาน Φ_c ต่ำดังรูปที่ 2.28 ส่วนใหญ่จะใช้ อลูมิเนียม (Al), แคลเซียม (Ca) และ แมกนีเซียม (Mg): เงิน (Ag) โดยจะใช้เป็นขั้วไฟฟ้าเพื่อป้องกันสารอินทรีย์จากการเกิดออกซิเดชัน (oxidation) และความชื้นในอากาศ อีกทั้งยังทำหน้าที่เป็นกระจกช่วยในการสะท้อนแสงในชั้นของสารอินทรีย์ออกมาอีกด้วย

โดยที่คุณสมบัติเฉพาะตัวของแต่ละสารที่ใช้ใน OLED เช่น ค่า glass Transition temperature T_g , ค่าระดับพลังงานของ HOMO และ LUMO ค่า mobility ของโฮลและอิเล็กตรอน แสดงดังตารางที่ 2.1

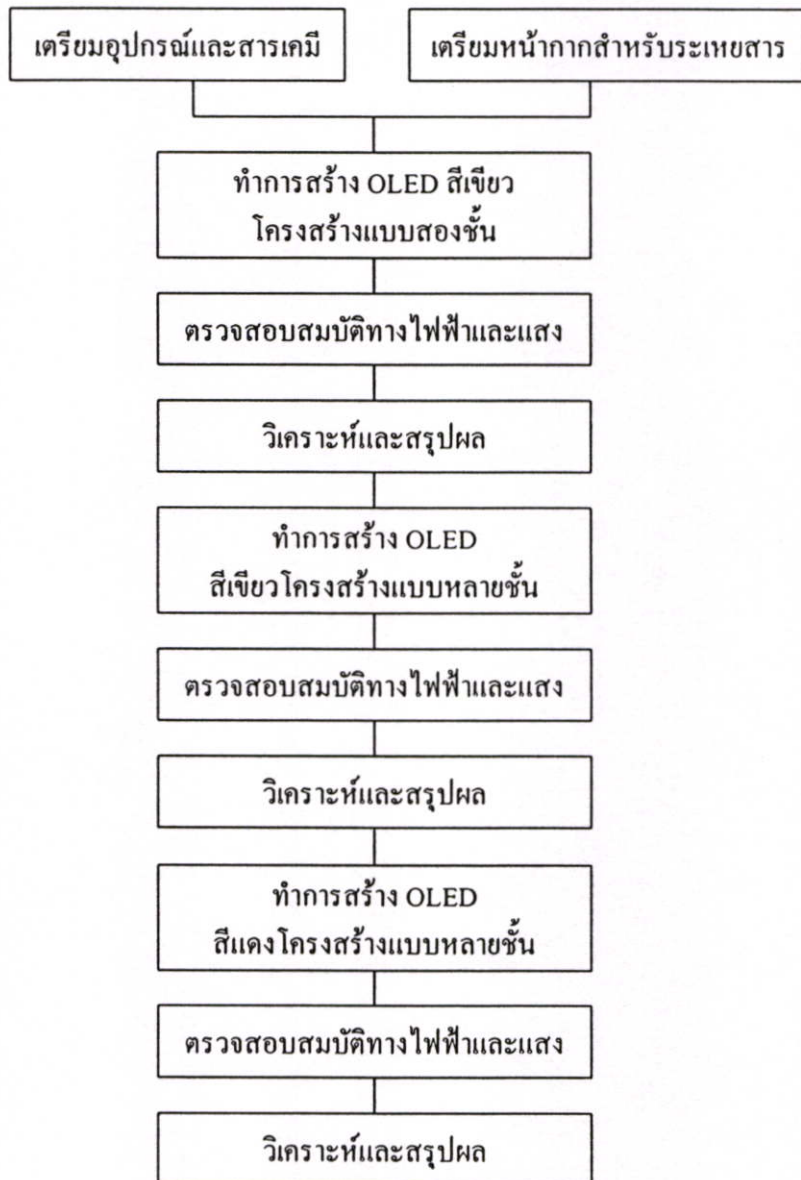
ตารางที่ 2.1 แสดงค่า glass transition temperature T_g , ค่าระดับพลังงานของ HOMO และ LUMO, ค่า mobility ของโฮลและอิเล็กตรอน ของสารแต่ละตัวที่ใช้ใน OLED [9]

Material	$T_g(^{\circ}C)$	HOMO (eV)	LUMO (eV)	$\mu_h(\text{cm}^2/Vs)$	$\mu_e(\text{cm}^2/Vs)$
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 ^e	2.5 ^f	$1-2 \times 10^{-10h}$	
NPB, NPD	95 ^d	5.6 ^h		3×10^{-4i}	
Alq ₃	> 170 ^d	5.9, ^{e,f} 5.7 - 5.9 ^h	3.2, ^{e,j}	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 ⁿ		
PPV		5.1 ⁿ	2.5 ⁿ		
2,5-Dialkoxy-PPV		4.9 - 5.1 ^o	2.5 - 2.8 ^o	$5 \times 10^{-7p},$ $10^{-10} - 10^{-9q}$	
MEH-PPV		4.9 ^r	2.8 ^r	$5 \times 10^{-7} - 5 \times 10^{-6s},$ $2.3 \times 10^{-7} - 6 \times 10^{-6t}$	6×10^{-8} 1.2×10^{-5t}
m-LPPP		5.5 ^u	2.3 ^u	10^{-3v}	
Polythiophenes		5.5 - 6 ^w	2 - 3.5 ^w		
PFO		5.8 ⁱ	2.1 ⁱ	$4 \times 10^{-4y} - 8 \times 10^{-3z}$	

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยการสร้าง OLED สามารถสรุปขั้นตอนทั้งหมดเป็นไดอะแกรม
ได้ดังรูปที่ 3.1



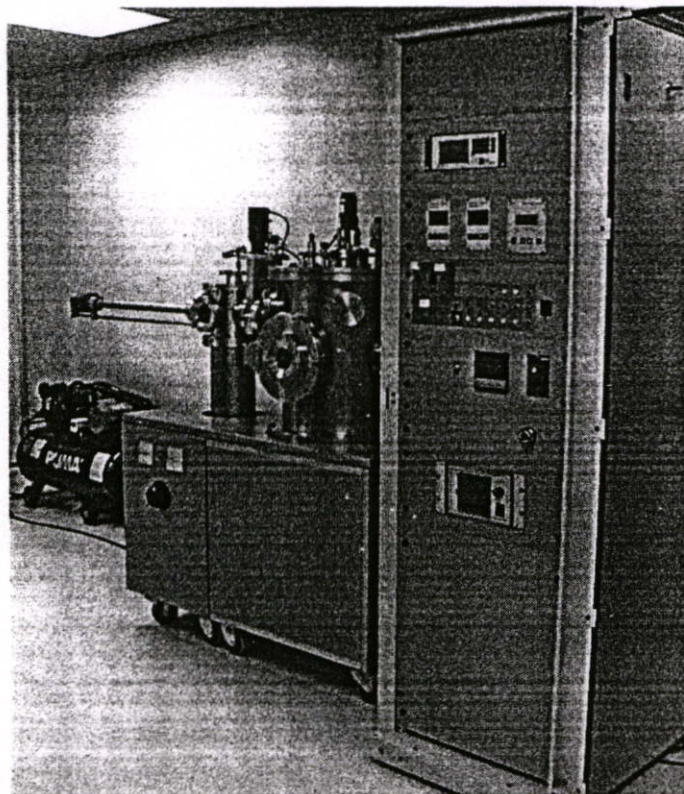
รูปที่ 3.1 ไดอะแกรมขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยเริ่มจากการเตรียมอุปกรณ์ สารเคมี และเครื่องมือเพื่อใช้วัดสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของ OLED ที่สร้างขึ้น เตรียมหน้ากากสำหรับระเหยสารอินทรีย์

และจั่วไฟฟ้า จากนั้นทำการสร้าง OLED สีเขียวโครงสร้างแบบสองชั้น ตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของ OLED ที่สร้างขึ้นเพื่อทำการหาความหนาของชั้นสาร NPB กับ Alq₃ ที่เหมาะสม จากนั้นทำการเพิ่มประสิทธิภาพของ OLED โดยทำการเพิ่มชั้นฉนวนอิเล็กตรอน LiF เข้าไประหว่างชั้นสาร Alq₃ กับ AI ตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้า และทางแสงของ OLED ที่สร้างขึ้นเพื่อทำการหาความหนาของชั้น LiF ที่เหมาะสม ทำการสร้าง OLED สีแดงโดยทำการแทรกชั้นบางๆ ของสารอินทรีย์ DCJTb เข้าไประหว่างชั้นสาร NPB กับ Alq₃ ตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของ OLED ที่สร้างขึ้น

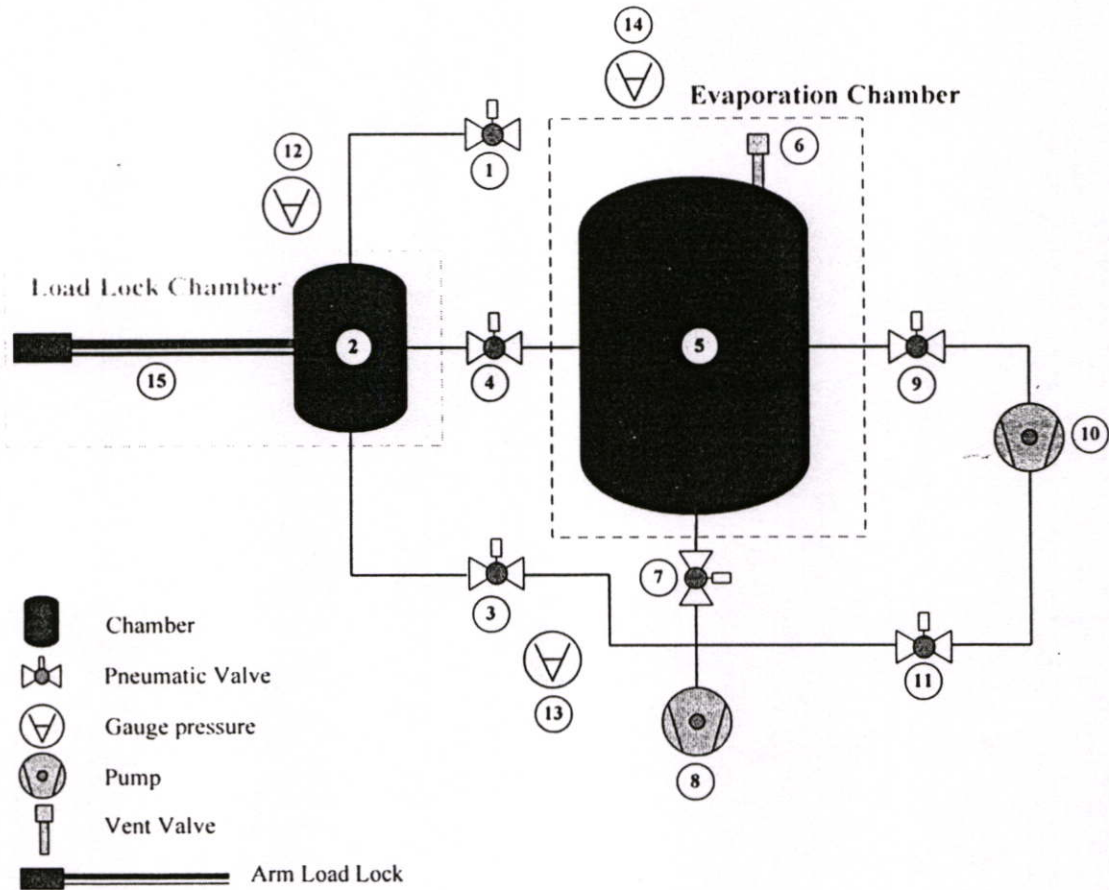
3.1 ระบบระเหยสารอินทรีย์ (Low Temperature Evaporation System ; LTE)

ระบบระเหยสารอินทรีย์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ทำการออกแบบระบบโดยห้องปฏิบัติการวิจัยควอนตัมและสารกึ่งตัวนำทางแสง (QOSLab) ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ระบบถูกออกแบบมาเพื่อให้สามารถระเหยสารอินทรีย์ได้เป็นอย่างดีมีประสิทธิภาพ เนื่องจากสารอินทรีย์มีอุณหภูมิในการระเหิดต่ำเมื่อเทียบกับสารอนินทรีย์โดยทั่วไป ดังนั้นระบบจึงออกแบบให้สามารถควบคุมการให้อุณหภูมิกับสารอินทรีย์ได้อย่างละเอียดและแม่นยำ เพื่อให้สามารถควบคุมอัตราการระเหยของสารอินทรีย์ได้อย่างถูกต้องแม่นยำและมีความสม่ำเสมอ



รูปที่ 3.2 ระบบระเหยสารอินทรีย์

ซึ่งระบบระเหยสารอินทรีย์มีส่วนประกอบที่สำคัญดังรูปที่ 3.3

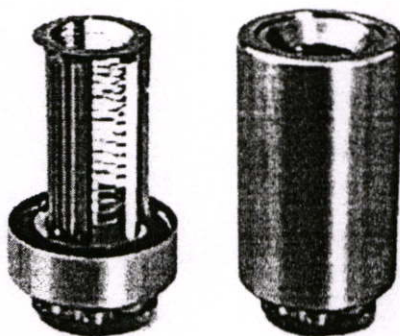


- | | |
|--|--------------------------------|
| 1. load lock vent valve (VENT VALVE) | 9. high vacuum valve (HV) |
| 2. load lock chamber | 10. turbo molecular pump (TMP) |
| 3. roughing load lock valve (LL SYATEM) | 11. backing valve (BV) |
| 4. load lock valve (LLV) | 12. pirani gauge |
| 5. evaporation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

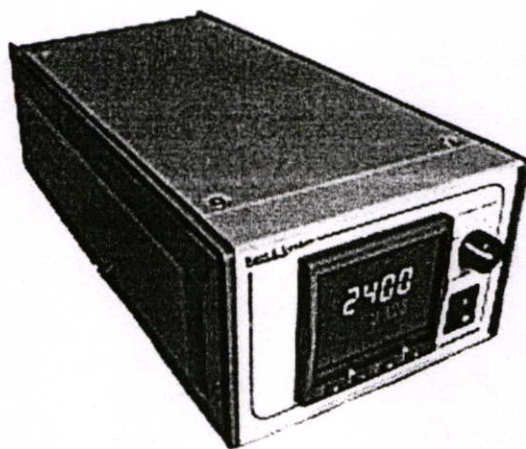
รูปที่ 3.3 แผนภาพระบบสุญญากาศของระบบระเหยสารอินทรีย์

ภายในห้องสุญญากาศ (vacuum chamber) ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ต่างๆ ดังนี้

1. ระบบระเหยสารอินทรีย์ (Low Temperature Evaporator System ; LTE) เป็นระบบที่ใช้สำหรับระเหยสารอินทรีย์โดยระบบประกอบด้วย 2 ส่วน คือ หัวระเหยสารอินทรีย์ และ ชุดควบคุมการระเหยสารอินทรีย์ของบริษัท Kurt J. Lesker ดังแสดงในรูปที่ 3.5 และ 3.6 ซึ่งสามารถให้ความร้อนแก่สารอินทรีย์ได้อย่างทั่วถึงสม่ำเสมอ มีเทอร์โมคัปเปิล type K ในการตรวจวัดค่าอุณหภูมิที่สารอินทรีย์ได้รับเพื่อนำมาใช้ควบคุมอุณหภูมิที่ให้แก่สารอินทรีย์ ซึ่งระบบที่ใช้สามารถควบคุมอุณหภูมิที่ให้ได้อย่างแม่นยำ ± 0.1 องศาเซลเซียส

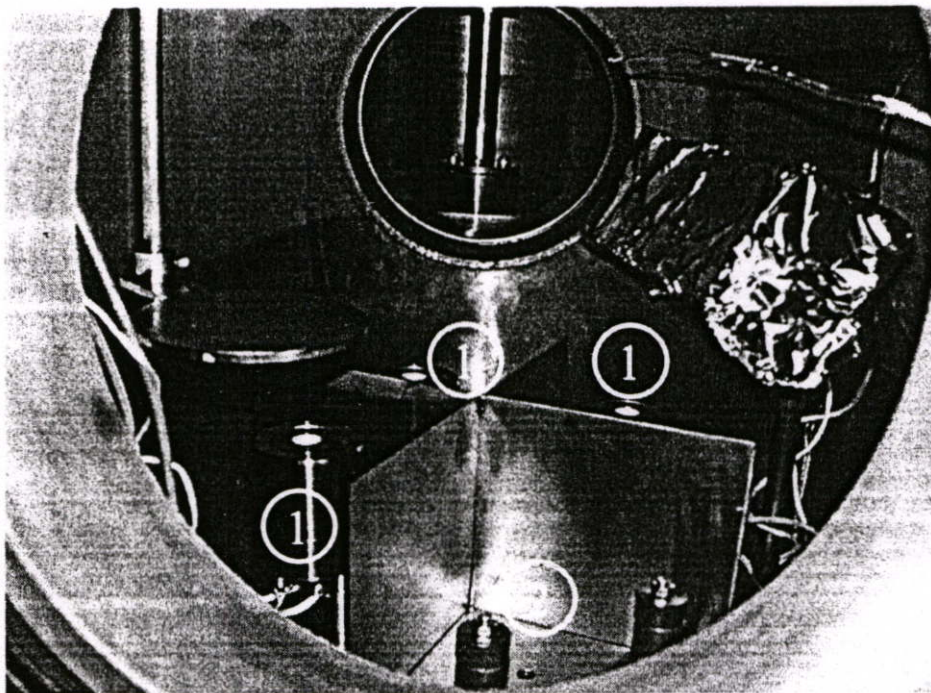


รูปที่ 3.4 หัวระเหยสารอินทรีย์



รูปที่ 3.5 ชุดควบคุมการระเหยสารของระบบระเหยสารอินทรีย์

โดยภายในห้องสุญญากาศทำการติดตั้งระบบระเหยสารอินทรีย์อยู่ทั้งหมด 3 ชุดดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.6 อุปกรณ์ภายในห้องสุญญากาศสูง

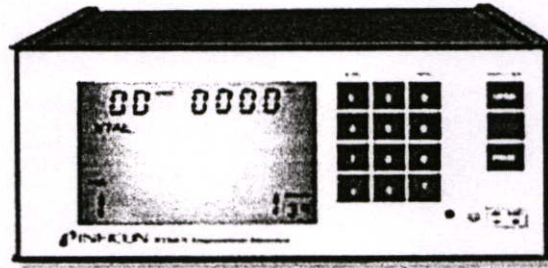
2. ระบบระเหยสารด้วยความร้อนเป็นระบบที่ออกแบบมาเพื่อทำการระเหยขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการสร้าง OLED ดังรูปที่ 3.4

3. ระบบตรวจวัดความหนาของฟิล์มบาง ความหนาของฟิล์มบางถูกตรวจสอบความหนาโดยใช้ผลึกควอตซ์ของ INFICON ดังแสดงในรูปที่ 3.7

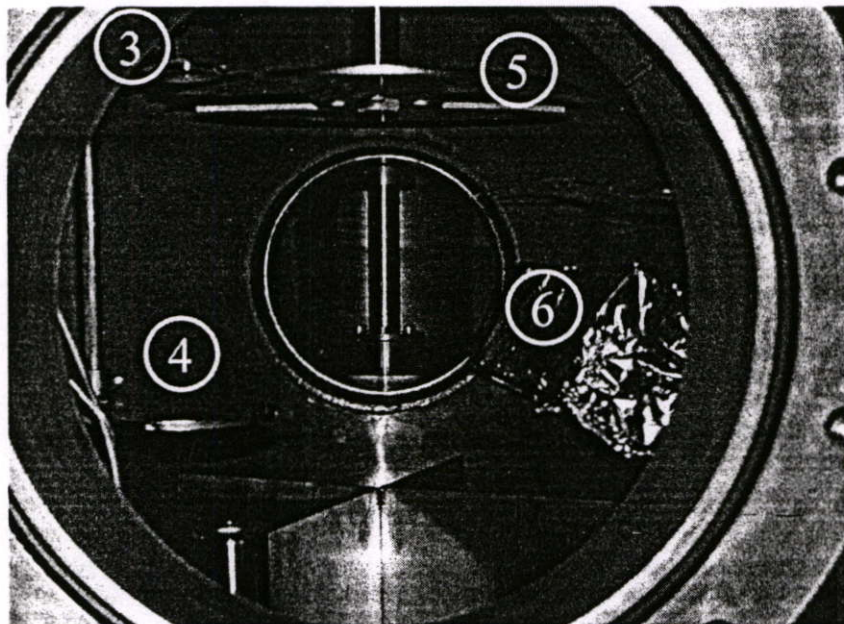


รูปที่ 3.7 ผลึกควอตซ์

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

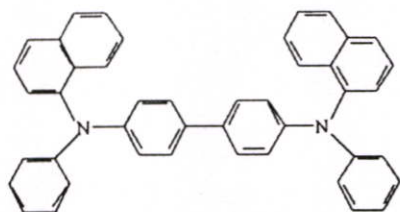


รูปที่ 3.9 อุปกรณ์ภายในห้องสุญญากาศสูง

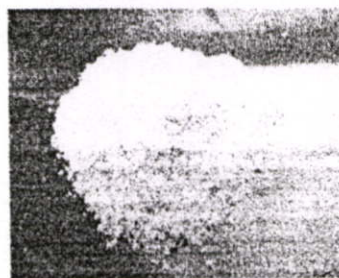
4. ชุดเตอร์มีหน้าที่ในการเปิด-ปิดไอรระเหยของสารที่จะขึ้นไปเกาะฐานรองรับ
5. ตัวยึดจับฐานรองรับมีหน้าที่ใช้ยึดจับฐานรองรับที่ใช้และสามารถทำการหมุนได้ ขณะที่ทำการระเหยสาร
6. ชุดให้ความร้อนแก่ฐานรองรับเป็นระบบที่ให้ความร้อนแก่ฐานรองรับโดยหลอดไฟควอทซ์ และมีเทอร์โมคัปเปิลที่สามารถวัดอุณหภูมิของฐานรองรับได้

3.2 สารอินทรีย์ที่ใช้การสร้าง OLED

ในงานวิจัยนี้ในชั้นส่งผ่านโฮลใช้สารอินทรีย์ NPB ของบริษัท Luminescence Technology โครงสร้างและภาพของสาร NPB แสดงดังรูปที่ 3.10 (ก) และ(ข) มีสมบัติแสดงดังตารางที่ 3.1



(ก)



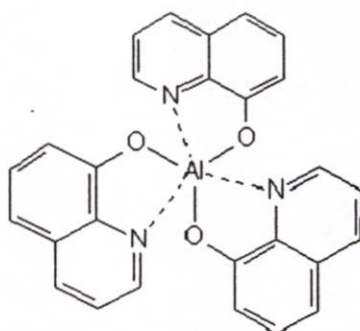
(ข)

รูปที่ 3.10 (ก) รูปโครงสร้างสารอินทรีย์ NPB (ข) ภาพสาร NPB

ตารางที่ 3.1 สมบัติของสารอินทรีย์ 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	-

ชั้นเปล่งแสงสีเขียวและชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนใช้สารอินทรีย์ Alq₃ ของบริษัท Sigma-Aldrich โครงสร้างและภาพของสาร NPB แสดงดังรูปที่ 3.11 (ก) และ(ข) มีสมบัติแสดงดังตารางที่ 3.2



(ก)



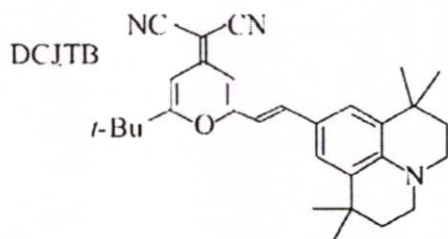
(ข)

รูปที่ 3.11 (ก) รูปโครงสร้างสารอินทรีย์ Alq₃ (ข) ภาพสาร Alq₃

ตารางที่ 3.2 สมบัติของสารอินทรีย์ Alq₃

ชื่อสารอินทรีย์	Alq ₃
ชื่อทางเคมี	Tris-(8-hydroxy-quinolinato)-aluminium
สูตรเคมี	C ₂₇ H ₁₈ AlN ₃ O ₃
Molecular Weight	459.42 g/mole
จุดหลอมเหลว	416~418 °C
Thermal Gravimetric Analysis	Weight loss<0.5% at 300 °C
ลักษณะทางกายภาพ	สีเขียว-เหลือง
Glass Transition Temperature (T _g)	>170 °C
HOMO	5.7 eV
LUMO	3.1 eV
Hole Mobility	2 x 10 ⁻⁴ cm ² /Vs
Electron Mobility	1.4 x 10 ⁻⁴ cm ² /Vs

ชั้นเปล่งแสงสีแดงใช้สารอินทรีย์ DCJTB ของบริษัท Luminescence Technology มีสมบัติดังนี้ โครงสร้างและภาพของสาร NPB แสดงดังรูปที่ 3.12 (ก) และ(ข) มีสมบัติแสดงดังตารางที่ 3.3



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.12 (ก) รูปโครงสร้างสารอินทรีย์ DCJTB (ข) ภาพสาร DCJTB

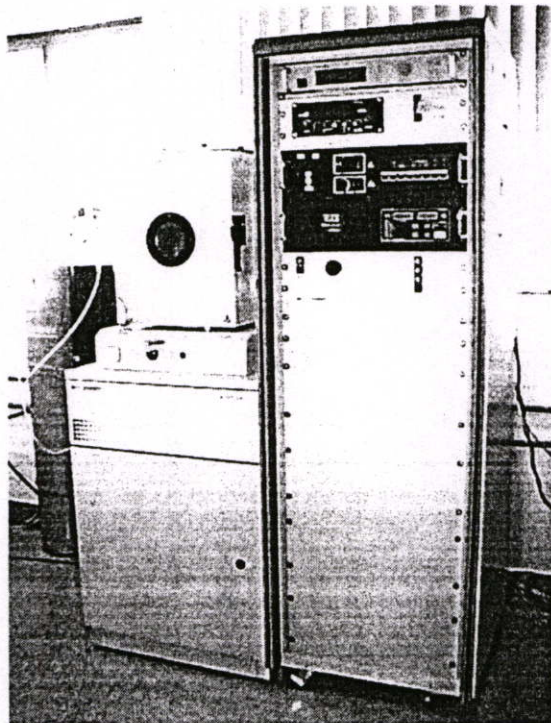
ตารางที่ 3.3 สมบัติของสารอินทรีย์ DCJTB

ชื่อสารอินทรีย์	DCJTB
ชื่อทางเคมี	4-(Dicyanomethylene)-2- <i>t</i> -butyl-6-(1,1,7,7-tetramethyljulolidyl-9-enyl)-4Hpyran
สูตรเคมี	$C_{30}H_{35}N_3O$
Molecular Weight	-
จุดหลอมเหลว	299 °C
Thermal Gravimetric Analysis	Weight loss=0.11% at 224 °C
ลักษณะทางกายภาพ	สีแดง
Glass Transition Temperature (T_g)	110 °C
HOMO	5.26 eV
LUMO	3.11 eV
Hole Mobility	-
Electron Mobility	-

3.3 การเตรียมฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ (ITO) บนฐานรองรับกระจกใสได้

ฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ปลูกโดยระบบอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงแบบควบคุมเวลาก๊าซดังรูปที่ 3.13 โดยมีเงื่อนไขในการปลูกดังนี้

- RF Power 30 Watt
- อัตราการ Flow gas Ar 9 Standard Cubic Centimeters per Minute (SCCM)
- Timing ปล่องแก๊ส Ar 50 วินาที หุคปล่อง 2 วินาที
- ระยะระหว่างเป้าเคลื่อนกับแผ่นฐานรองรับ 5 เซนติเมตร
- Based Pressure 1.0×10^{-6} มิลลิบาร์
- Sputtering Pressure 3×10^{-3} มิลลิบาร์
- ไม่มีการให้อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับ



รูปที่ 3.13 ระบบ อาร์ เอฟ แมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง

โดยสมบัติของ ITO ที่ได้จะมี

- ความหนา 200 นาโนเมตร
- ความต้านทานเชิงแผ่นประมาณ 10 โอห์ม/□
- ค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านของแสงประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์

3.4 การทำความสะอาดแผ่นฐานรองรับอินเดียมทินออกไซด์

ก่อนที่จะทำการระเหยสารลงบนฐานรองรับอินเดียมทินออกไซด์จะมีขั้นตอนการทำความสะอาดเพื่อล้างสิ่งสกปรก ผุ่น และคราบไขมันที่ปนเปื้อนบนพื้นผิว รูปลูกกรณ์ที่ใช้แสดงดังรูปที่ 3.14 โดยขั้นตอนการทำความสะอาดเริ่มจาก

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

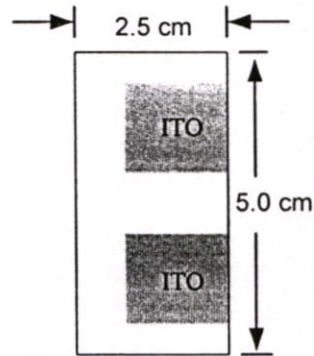


รูปที่ 3.14 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำความสะอาดฐานรองรับ ITO

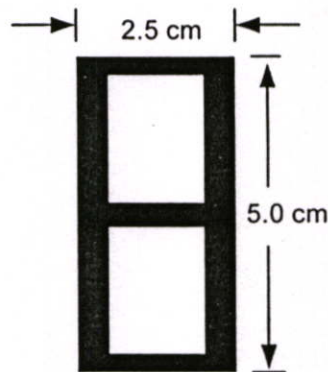
3.5 การสร้าง OLED สีเขียวโครงสร้าง ITO/NPB/Alq₃/Al

3.5.1 การปลูกฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ ด้วยระบบระเหยสารอินทรีย์

นำฐานรองรับ ITO บนกระจกใสที่ผ่านการทำความสะอาดแล้วดังรูปที่ 3.15 มาติด หน้ากาก (mask) สำหรับระเหยสารอินทรีย์ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.15 ลวดลาย ITO บนฐานรองรับกระจก



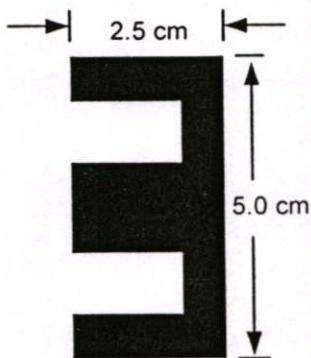
รูปที่ 3.16 หน้ากากสำหรับระเหยสารอินทรีย์

ทำการระเหยสารอินทรีย์ NPB ก่อนตามด้วยสารอินทรีย์ Alq₃ โดยเปลี่ยนแปลงความหนาของ NPB เป็น 30, 50 และ 70 นาโนเมตร ความหนาของ Alq₃ เป็น 50, 70 และ 90 นาโนเมตร โดยใช้เงื่อนไขที่ใช้ในการระเหยสารอินทรีย์ทั้งสองชนิดเหมือนกันดังนี้

- Base Pressure ประมาณ 3×10^{-6} mbar
- Evaporation Rate ประมาณ $1-2 \text{ \AA/s}$
- ความหนามีการเปลี่ยนแปลงทั้งสองชั้น
- ไม่มีการให้อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับ

3.5.2 การระเหยขั้วไฟฟ้าด้วยระบบระเหยสารด้วยความร้อน

นำฐานรองรับที่ทำการระเหยสารกึ่งตัวนำอินทรีย์เสร็จแล้วมาทำการระเหยขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม โดยนำหน้ากากสำหรับระเหยสารอินทรีย์ออกหน้ากากสำหรับระเหยขั้วอลูมิเนียมดังรูปที่ 3.17 มาติดแทน

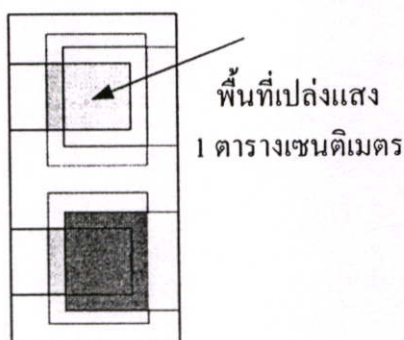


รูปที่ 3.17 หน้าการสำหรับระเหยขั้ว AI

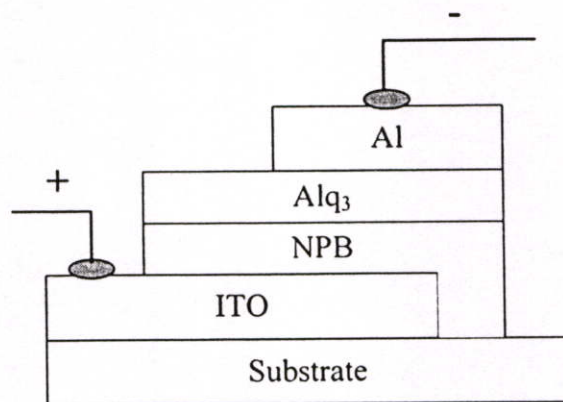
ทำการระเหยขั้วไฟฟ้า AI ด้วยระบบระเหยสารด้วยความร้อน โดยมีเงื่อนไขในการระเหยสารดังนี้

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

OLED ที่ได้ที่จะมีพื้นที่เปล่งแสง 1 ตารางเซนติเมตรดังรูปที่ 3.18 โครงสร้างของ OLED โครงสร้างแบบสองชั้นที่สร้างเสร็จแล้วแสดงดังรูปที่ 3.19 จากนั้นนำ OLED ที่สร้างขึ้นไปทำการตรวจวัดสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงต่อไป



รูปที่ 3.18 OLED ที่สร้างเสร็จแล้วมีพื้นที่ 1 ตารางเซนติเมตร

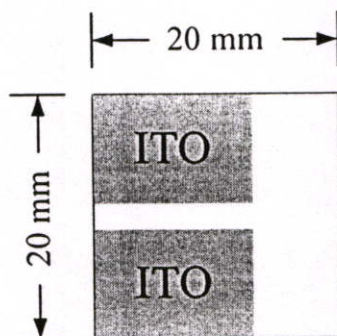


รูปที่ 3.19 โครงสร้าง OLED แบบสองชั้น

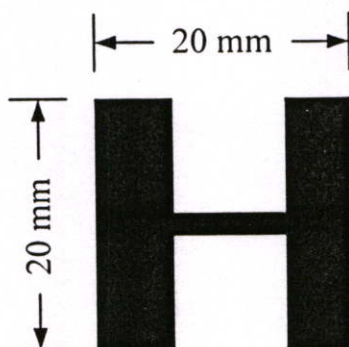
3.6 การสร้าง OLED สีเขียวโครงสร้าง ITO/NPB/Alq₃/LiF/Al

3.6.1 การปลูกฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ ด้วยระบบระเหยสารอินทรีย์

นำฐานรองรับ ITO บนกระจกใสที่ผ่านการทำความสะอาดแล้วดังรูปที่ 3.20 มาติดหน้ากากสำหรับระเหยสารอินทรีย์ดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.20 ลวดลาย ITO บนฐานรองรับกระจก



รูปที่ 3.21 หน้ากากสำหรับระเหยสารอินทรีย์

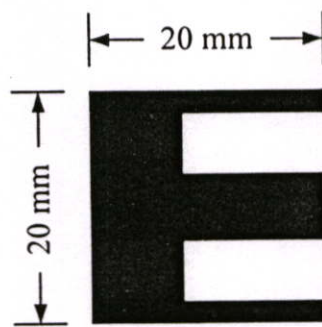
ทำการระเหยสารอินทรีย์ NPB ก่อนตามด้วยสารอินทรีย์ Alq₃ โดยใช้ความหนาของ NPB และ Alq₃ ที่เหมาะสมที่หาได้จากผลการทดลองข้างต้นเป็น 30 และ 50 นาโนเมตรตามลำดับโดยเงื่อนไขที่ใช้ในการระเหยสารอินทรีย์ทั้งสองชนิดเหมือนกันดังนี้

- Base Pressure ประมาณ 3×10^{-6} mbar
- Evaporation Rate ประมาณ 1-2 Å/s
- ไม่มีการให้อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับ

3.6.2 การระเหยขั้วไฟฟ้าด้วยระบบระเหยสารด้วยความร้อน

นำฐานรองรับที่ทำการระเหยสารกึ่งตัวนำอินทรีย์เสร็จแล้วมาทำการระเหยชั้นฉนวนอิเล็กทรอนิกส์อินทรีย์ลิเทียมฟลูออไรด์ (LiF) และขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม (Al) โดยนำหน้ากากสำหรับระเหยสารอินทรีย์ออกนำหน้ากากสำหรับระเหยลิเทียมฟลูออไรด์ และอลูมิเนียมมาติดแทนดังรูปที่

3.22



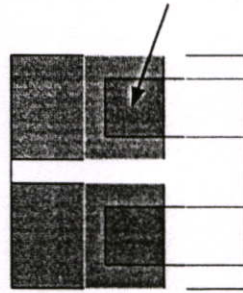
รูปที่ 3.22 หน้ากากสำหรับระเหย LiF และขั้ว Al

ทำการระเหย LiF และขั้วไฟฟ้า Al โดยทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของ LiF เป็น 1, 3 และ 5 นาโนเมตร ด้วยระบบระเหยสารด้วยความร้อน โดยมีเงื่อนไขในการระเหยสารดังนี้

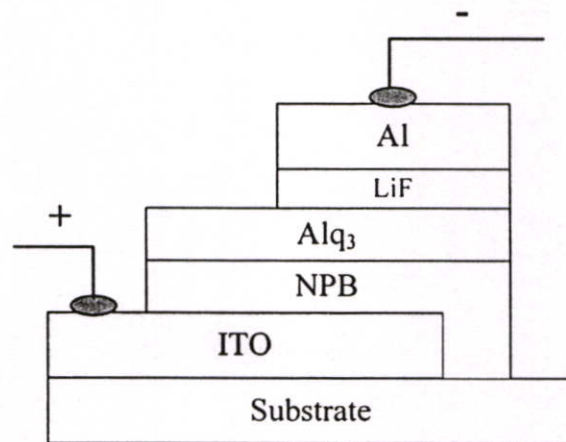
- Base Pressure ประมาณ 4×10^{-6} mbar
- LiF Evaporation Rate ประมาณ >0.3 Å/s
- ทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้น LiF
- Al Evaporation Rate ประมาณ >20 Å/s
- Al ความหนา 200 นาโนเมตร
- ไม่มีการให้อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับ

OLED ที่ได้ที่จะมีพื้นที่เปล่งแสง 5 ตารางมิลลิเมตรดังรูปที่ 3.23 โครงสร้างของ OLED สีเขียวโครงสร้างแบบหลายชั้นที่สร้างเสร็จแล้วแสดงดังรูปที่ 3.24 จากนั้นนำ OLED ที่สร้างขึ้นไปทำการตรวจวัดสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงต่อไป

พื้นที่เปล่งแสง 5 ตารางมิลลิเมตร



รูปที่ 3.23 OLED ที่สร้างเสร็จแล้วมีพื้นที่ 5 ตารางมิลลิเมตร

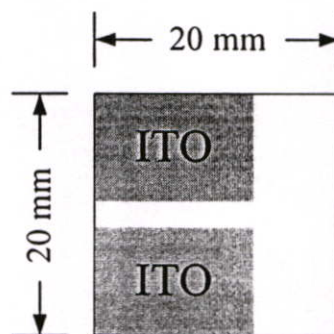


รูปที่ 3.24 โครงสร้าง OLED สีเขียวแบบหลายชั้น

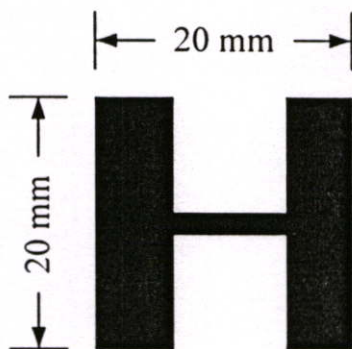
3.7 การสร้าง OLED สีแดงโครงสร้าง ITO/NPB/DCJTb/Alq₃/LiF/Al

3.7.1 การปลูกฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ ด้วยระบบระเหยสารอินทรีย์

นำฐานรองรับ ITO บนกระจกใสที่ผ่านการทำความสะอาดแล้วดังรูปที่ 3.25 มาติดหน้ากากสำหรับระเหยสารอินทรีย์ดังรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.25 ลวดลาย ITO บนฐานรองรับกระจก



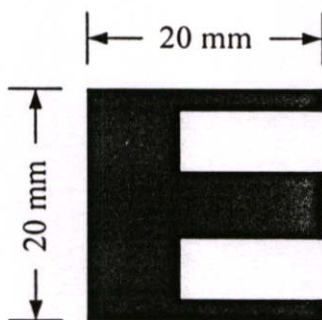
รูปที่ 3.26 หน้ากากสำหรับระเหยสารอินทรีย์

ทำการระเหยสารอินทรีย์ NPB ก่อนตามด้วยสารอินทรีย์ DCJTB 1 นาโนเมตร และ Alq₃ โดยใช้ความหนาของ NPB และ Alq₃ ที่เหมาะสมที่ได้จากผลการทดลองข้างต้นเป็น 30 และ 50 นาโนเมตรตามลำดับ โดยเงื่อนไขที่ใช้ในการระเหยสารอินทรีย์ทั้งสามชนิดเหมือนกันดังนี้

- Base Pressure ประมาณ 3×10^{-6} mbar
- DCJTB Evaporation Rate ประมาณ 0.1 \AA/s
- NPB, Alq₃ Evaporation Rate ประมาณ $1-2 \text{ \AA/s}$
- ไม่มีการให้อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับ

3.7.2 การระเหยขั้วไฟฟ้าด้วยระบบระเหยสารด้วยความร้อน

นำฐานรองรับที่ทำการระเหยสารกึ่งตัวนำอินทรีย์เสร็จแล้วมาทำการระเหยชั้นฉนวนอิเล็กทรอนิกส์ลิเทียมฟลูออไรด์ (LiF) และขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม (Al) โดยนำหน้ากากสำหรับระเหยสารอินทรีย์ออกนำหน้ากากสำหรับระเหยลิเทียมฟลูออไรด์ และอลูมิเนียมมาติดตั้งดังรูปที่ 3.27 โดยจะทำการศึกษา OLED ทั้งแบบไม่มี LiF และแบบมี LiF



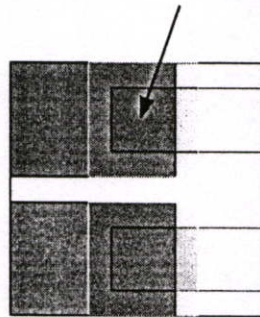
รูปที่ 3.27 หน้ากากสำหรับระเหย LiF และขั้ว Al

ทำการระเหย LiF และขั้วไฟฟ้า Al ด้วยระบบระเหยสารด้วยความร้อน โดยมีเงื่อนไขในการระเหยสารดังนี้

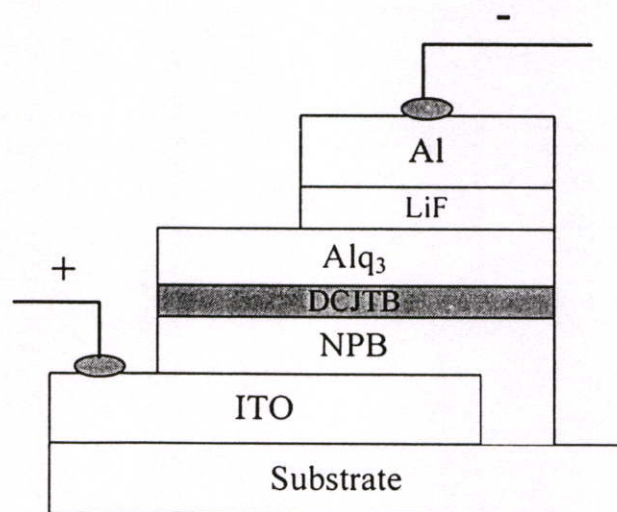
- Base Pressure ประมาณ 4×10^{-6} mbar
- LiF Evaporation Rate ประมาณ $>0.3 \text{ \AA}/\text{s}$
- LiF ความหนา 1 นาโนเมตร
- Al Evaporation Rate ประมาณ $>20 \text{ \AA}/\text{s}$
- Al ความหนา 200 นาโนเมตร
- ไม่มีการให้อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับ

OLED ที่ได้ที่จะมีพื้นที่เปล่งแสง 5 ตารางมิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.28 โครงสร้างของ OLED โครงสร้างแบบสองชั้นที่สร้างเสร็จแล้วแสดงดังรูปที่ 3.29 จากนั้นนำ OLED ที่สร้างขึ้นไปทำการตรวจวัดสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงต่อไป

พื้นที่เปล่งแสง 5 ตารางมิลลิเมตร



รูปที่ 3.28 OLED ที่สร้างเสร็จแล้วมีพื้นที่ 5 ตารางมิลลิเมตร



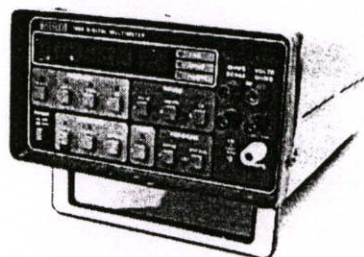
รูปที่ 3.29 โครงสร้าง OLED สีแดงแบบหลายชั้น

3.8 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของ OLED

ทำการตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของ OLED ด้วยระบบวัดค่ากระแส และความต่างศักย์ (Current-Voltage Measurement System) ที่จัดขึ้นในห้องปฏิบัติการโดยใช้ KEITHLEY 228 voltage/current source และ KEITHLEY 195A digital multimeter ดังรูปที่ 3.30 (ก) และ (ข)



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.30 ระบบวัดค่ากระแสและความต่างศักย์

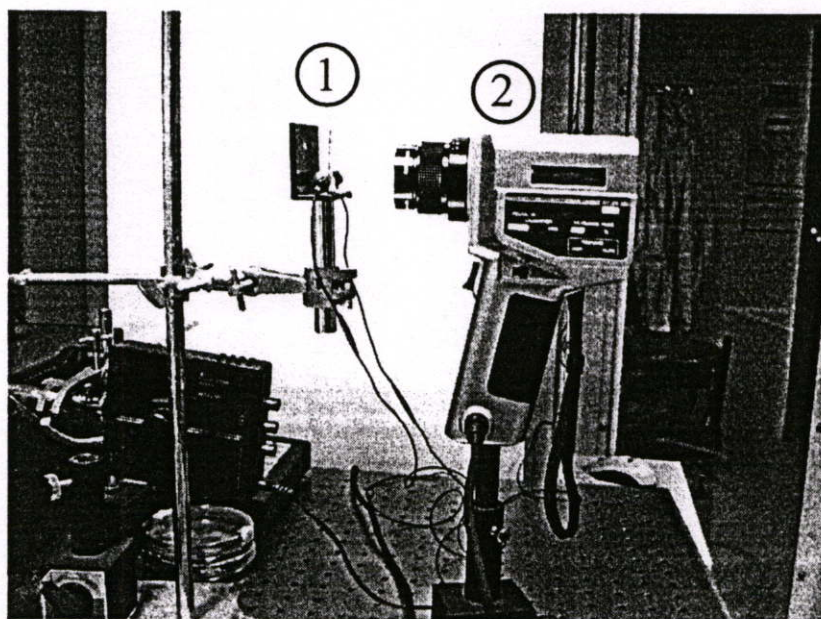
(ก) KEITHLEY 228 voltage/current source

(ข) KEITHLEY 195A digital multimeter

3.9 การตรวจสอบสมบัติทางแสงของ OLED

ทำการตรวจสอบสมบัติทางแสงของ OLED ด้วยกล้องวัดความส่องสว่าง (Luminance Meter) รุ่น LS-110 ของบริษัท KONICA MINOLTA โดยทำการวัดในที่มืด แสดงภาพอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.31 มีส่วนประกอบ 2 ส่วนคือ

1. OLED ที่ต้องการวัดความส่องสว่าง
2. กล้องวัดความส่องสว่าง

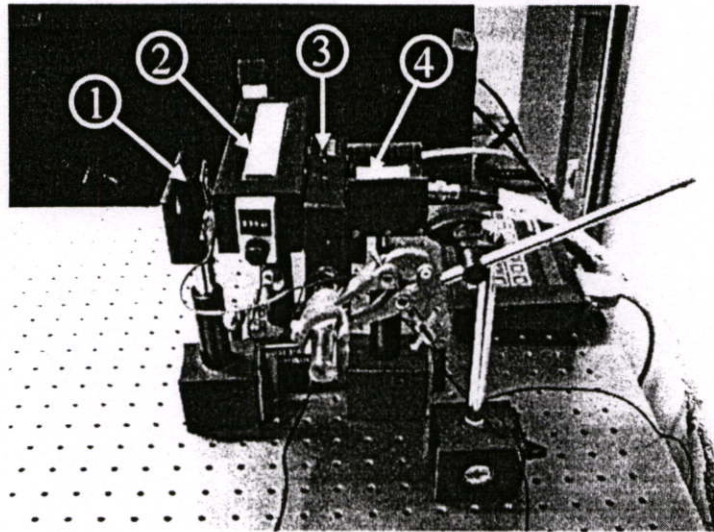


รูปที่ 3.31 กล้องวัดความส่องสว่าง

3.10 การตรวจสอบสเปกตรัมอิเล็กทรอนิกส์โทรมินิสเซนซ์ (EL) ของไดโอดเปล่งแสงสารอินทรีย์

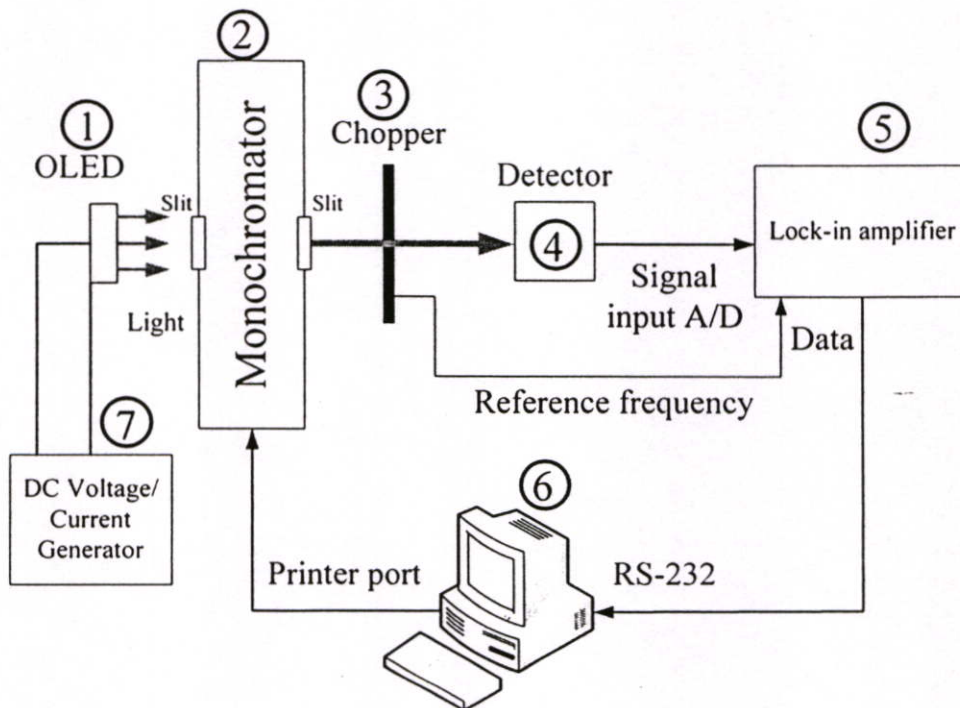
3.10.1 ระบบวัดสเปกตรัมอิเล็กทรอนิกส์โทรมินิสเซนซ์ที่จัดระบบขึ้นภายในห้องปฏิบัติการ

ทำการตรวจสอบสเปกตรัมอิเล็กทรอนิกส์โทรมินิสเซนซ์ของ OLED โดยใช้ระบบวัดสเปกตรัมอิเล็กทรอนิกส์โทรมินิสเซนซ์ที่จัดระบบขึ้นภายในห้องปฏิบัติการแสดงดังรูปที่ 3.32 โดยจะทำการจ่ายค่าความต่างศักย์ให้กับ OLED โดยใช้เครื่องจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแส จากนั้นแสงจะผ่านเข้าสู่โมโนโครเมเตอร์ (monochromator) ที่ควบคุมการทำงานโดยไมโครคอมพิวเตอร์ (microcomputer) ผ่านทางพอร์ทขนาน แสงจะผ่านตัวตัดแสง (chopper) ที่ทำการส่งความถี่อ้างอิงเข้าสู่เครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอิน (lock in amplifier) จากนั้นแสงจะเข้าสู่ตัวตรวจจับแสง (detector) สัญญาณที่ได้จะเข้าสู่เครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอิน ข้อมูลที่ได้จะเข้าสู่ไมโครคอมพิวเตอร์ผ่านทางพอร์ท RS-232



รูปที่ 3.32 ระบบวัดสเปกตรัมอเล็กโทรมินเนสเซนซ์

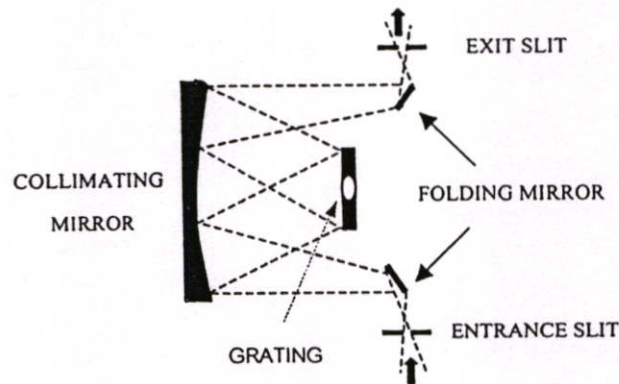
โดยที่องค์ประกอบของระบบวัดสเปกตรัมอเล็กโทรมินเนสเซนซ์แสดงดังรูปที่ 3.33 สำหรับรายละเอียดของอุปกรณ์แต่ละชิ้นอธิบายตามหมายเลขด้านล่าง



รูปที่ 3.33 โค้ดโปรแกรมระบบวัดสเปกตรัมอเล็กโทรมินเนสเซนซ์

1.OLED ที่ต้องการวัด EL

2. โมโนโครเมเตอร์ ทำหน้าที่แยกแสงที่มีความยาวคลื่นต่างๆ โดยไดอะแกรมของ โมโนโครมาเตอร์แสดงดังรูปที่ 3.34 หลักการคือเมื่อแสงเข้ามาทางสลิต (Slit) จะสะท้อนผ่าน กระจก (Folding mirrors) ไปตกกระทบบนที่คอลลิเมตติ้ง (Collimating mirror) และสะท้อนไปยังเกรตติง (Grating) เกรตติงจะให้แสงที่มีความยาวคลื่นต่างๆตามการตกกระทบบนเกรตติงและแสงจาก เกรตติงจะสะท้อนกลับไปยังคอลลิเมตติ้งสะท้อนกระจกออกไปยังสลิตต่อไป



รูปที่ 3.34 ไดอะแกรมของโมโนโครเมเตอร์

3. ตัวตัดแสง ทำหน้าที่ตัดแสงของแสงจากแหล่งกำเนิดแสงในลักษณะของ สัญญาณพัลส์

4. ตัวตรวจจับแสง ทำหน้าที่เปลี่ยนความเข้มแสงให้อยู่ในรูปของกระแสและ แรงดันไฟฟ้า

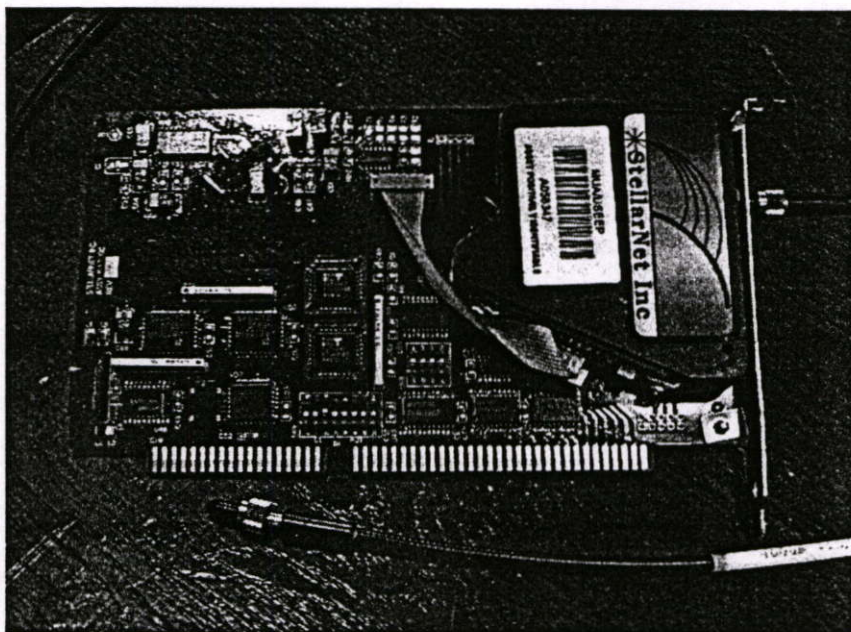
5. เครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอิน ทำหน้าที่ขยายสัญญาณที่ออกมาจากตัวตรวจจับ สัญญาณ ซึ่งเป็นสัญญาณ A/D เครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอินมี 4 ช่องสัญญาณ

6. ไมโครคอมพิวเตอร์ ทำหน้าที่ควบคุมสเตปปีงมอเตอร์ โดยควบคุมการหมุนเกรตติง ภายในโมโนโครเมเตอร์ทำให้ได้แสงความยาวคลื่นต่างๆ และรับข้อมูลจากเครื่องขยายสัญญาณ แบบล็อกอินผ่านทาง Rs-232 เพื่อทำการเก็บข้อมูล

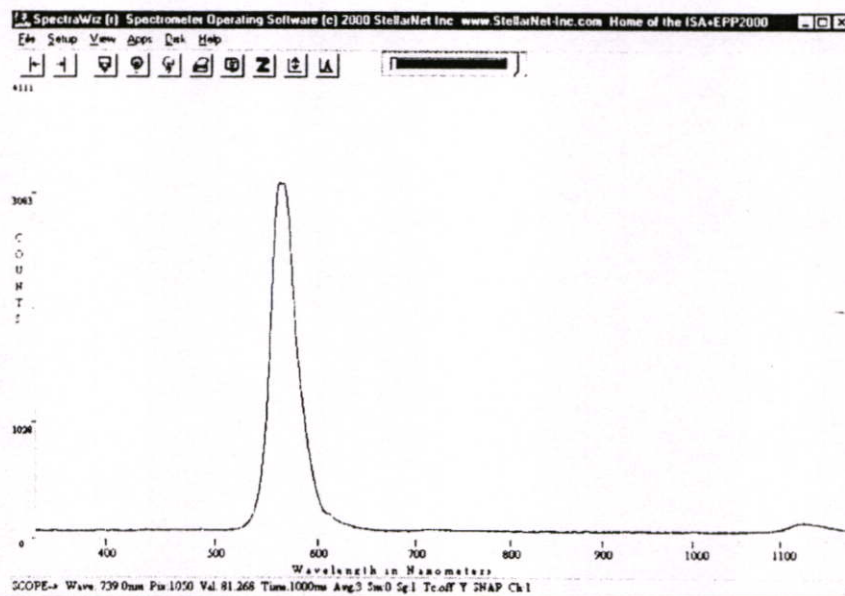
7. เครื่องจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแส ทำหน้าที่จ่ายค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าให้กับ OLED ที่ทำการวัด

3.10.2 เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer

ทำการวัดสเปกตรัมอิเล็กโทรลูมิเนสเซนซ์โดยใช้เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer ของ StellarNet Inc โดยใช้โปรแกรม SpectraWiz แสดงดังรูปที่ 3.35 (ก) และ (ข)



(ก)



(ข)

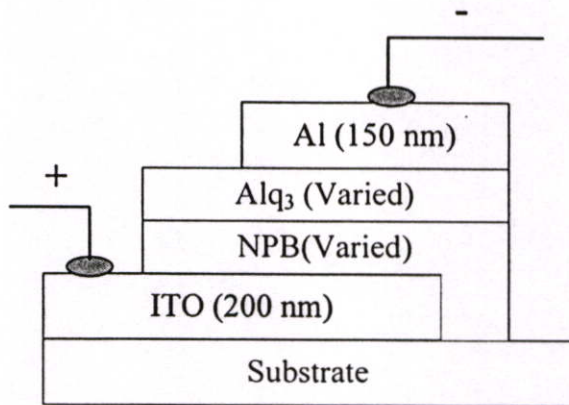
รูปที่ 3.35 (ก) เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer (ข) โปรแกรม SpectraWiz

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

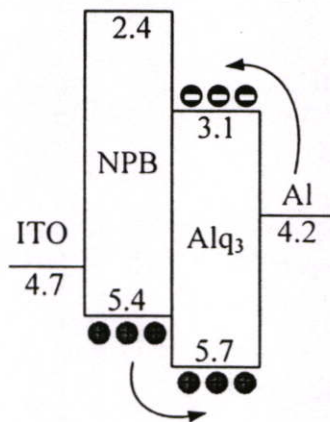
4.1 OLED ทีเจียวโครงสร้าง ITO/NPB/Alq₃/Al

จากการศึกษาการสร้าง OLED โดยทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นส่งผ่านโฮล NPB เป็น 30, 50 และ 70 นาโนเมตร กับชั้นเปล่งแสง Alq₃ เป็น 50, 70 และ 90 นาโนเมตร โดยโครงสร้างของ OLED แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 OLED โครงสร้างแบบสองชั้น

OLED โครงสร้างแบบสองชั้นที่ทำการศึกษานี้สามารถเขียนไดอะแกรมระดับพลังงานได้ ดังรูปที่ 4.2 [9,11] ซึ่งช่องว่างแถบพลังงาน (ระดับ HOMO-LUMO) เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่สุดอย่างหนึ่งในการออกแบบและการประดิษฐ์ OLED



รูปที่ 4.2 ไดอะแกรมระดับพลังงานของ OLED ที่ทำการศึกษา

จากที่ได้กล่าวแล้วในบทที่ 2 ว่าขบวนการทำงานของ OLED เกิดจากการฉีดพาหะอิเล็กตรอนและโฮลจากขั้วไฟฟ้าผ่านกำแพงศักย์ที่รอบต่อของ แคลโทด/Alq₃ และ NPB/แอนโนดตามลำดับเข้าไปในชั้นสารอินทรีย์แล้วเกิดการรวมตัวกันในชั้นเปล่งแสง ดังนั้นเงื่อนไขอีกอย่างหนึ่งที่สำคัญก็คือความหนาของชั้นสารอินทรีย์ เพื่อที่จะทำให้ OLED มีความสว่างสูงสุด กระแสไฟฟ้าใน OLED จะเริ่มไหลผ่านชั้นสารอินทรีย์ได้ ค่อยเมื่อมีสนามไฟฟ้าแรงพอโดยทั่วไปสำหรับสารอินทรีย์ต้องการสนามไฟฟ้าในช่วง 10⁶ โวลต์ต่อเซนติเมตร ขึ้นไป ดังนั้นจะพบได้ว่าความหนาของชั้นสารอินทรีย์มีผลต่อกระแสไฟฟ้าที่จะเข้าไปในชั้นสารอินทรีย์ และจากที่ได้กล่าวไปแล้วว่าในสารอินทรีย์โดยทั่วไปค่าสภาพคล่องทางไฟฟ้าของโฮลมีค่าประมาณ 10⁻⁷ - 10⁻³ โวลต์ต่อเซนติเมตร ส่วนสภาพคล่องทางไฟฟ้าของอิเล็กตรอนมีค่าน้อยกว่า 10-100 เท่า ซึ่ง OLED จะเกิดการเปล่งแสงได้เนื่องจากการรวมตัวกันระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮล แต่โฮลเร็วกว่าอิเล็กตรอนอาจจะเกิดการรวมตัวกันไม่หมดทำให้โฮลบางส่วนไหลไปยังขั้วไฟฟ้าก่อนทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพของ OLED เงื่อนไขความหนาแต่ละชั้นที่เหมาะสมพิจารณาได้ดังนี้

ความหนาของชั้น NPB

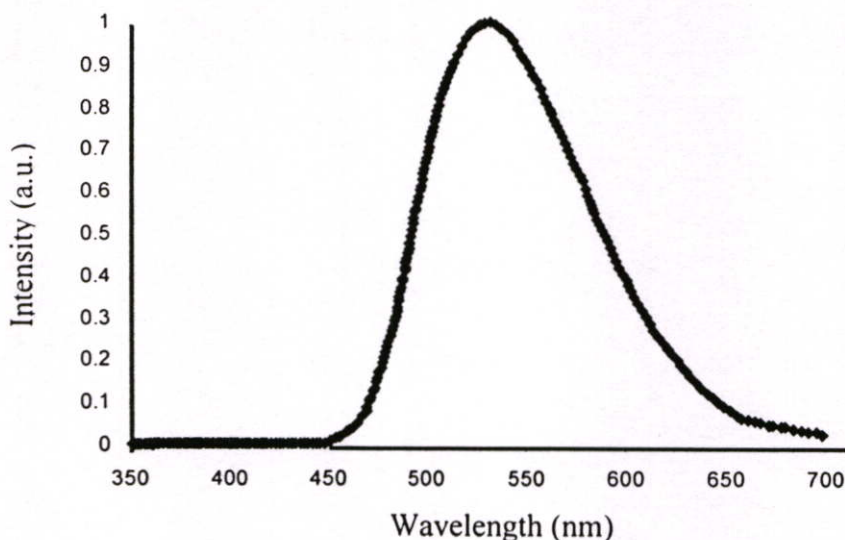
ชั้น NPB ทำหน้าที่เป็นชั้นฉีดโฮลให้ไหลเข้าสู่ชั้นเปล่งแสง ถ้าความหนาของชั้น NPB มีค่าน้อยแม้ว่าจะทำให้โฮลฉีดเข้าไปได้ง่ายแต่ถ้าความหนาน้อยเกินไปอาจทำให้ความสามารถในการฉีดโฮลแอ่งและอาจทำให้เกิดการลัดวงจรได้ง่าย ในทางตรงกันข้ามถ้าความหนาของชั้น NPB มากเกินไปอาจทำให้โฮลฉีดเข้าไปยังชั้นเปล่งแสงได้ยากขึ้นเนื่องจากสารอินทรีย์มีความต้านทานสูง

ความหนาของชั้น Alq₃

ชั้น Alq₃ ทำหน้าที่เป็นชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนและชั้นเปล่งแสง ถ้าความหนาของชั้น Alq₃ มีค่าน้อยแม้ว่าจะทำให้อิเล็กตรอนฉีดเข้าไปได้ง่ายแต่ถ้าหนาน้อยเกินไปก็จะทำให้ระยะเวลาที่อิเล็กตรอนกับโฮลจะเกิดการรวมตัวกันได้ลดลงทำให้สูญเสียประสิทธิภาพและอาจทำให้เกิดการลัดวงจรได้ง่าย ในทางตรงกันข้ามถ้าความหนาของชั้น Alq₃ มากเกินไปอาจทำให้อิเล็กตรอนฉีดเข้าไปในชั้นเปล่งแสงได้ยากขึ้นเนื่องจากสารอินทรีย์มีความต้านทานสูง

4.1.1 ผลการวัดสเปกตรัมอิเล็กโตรลูมิเนสเซนซ์ของ OLED

สเปกตรัมอิเล็กโตรลูมิเนสเซนซ์ของ OLED โครงสร้าง ITO (200 nm)/NPB (30 nm)/Alq₃ (50 nm)/Al (150 nm) ที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 25 โวลต์ แสดงดังรูปที่ 4.3 จากรูป OLED มีค่าของตำแหน่งสูงสุดของสเปกตรัมที่ประมาณค่าความยาวคลื่นแสง 533 นาโนเมตร เป็นแสงที่มีความยาวคลื่นอยู่ในย่านสีเขียวซึ่งเกิดจากการรวมตัวกันแบบเปล่งแสงที่บริเวณชั้นของสาร Alq₃ โดยผลที่วัดได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ V. Bulovic [12] ที่มีค่าของตำแหน่งสูงสุดของสเปกตรัมที่ประมาณค่าความยาวคลื่นแสง 530 นาโนเมตรของสาร Alq₃



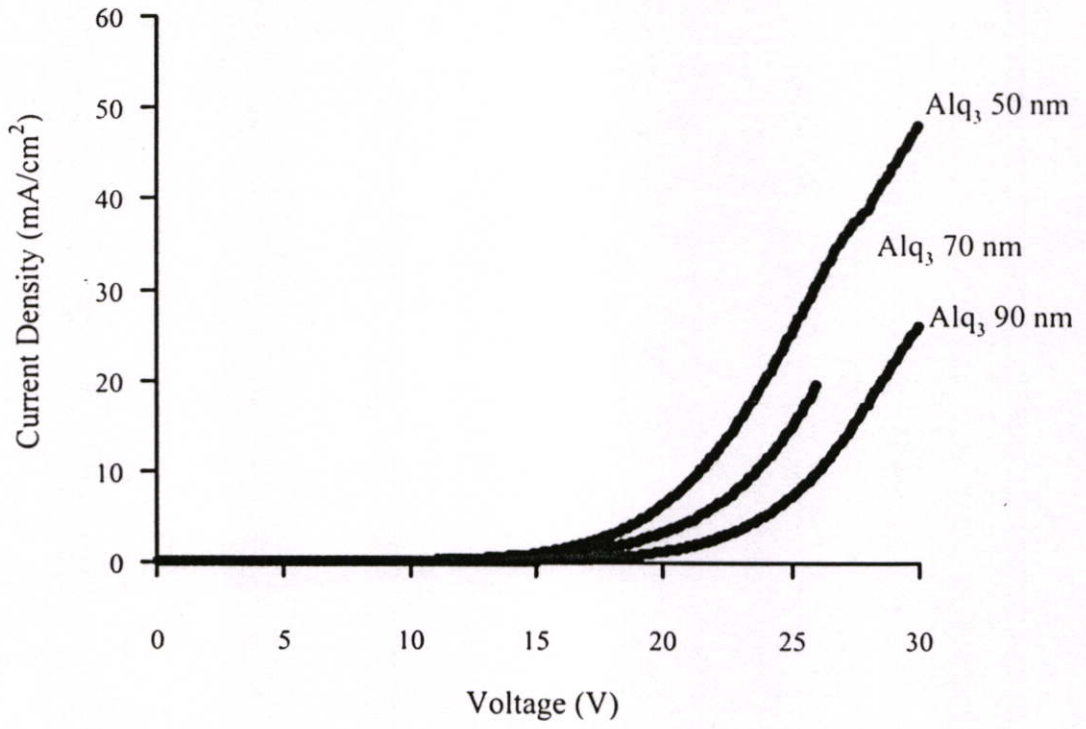
รูปที่ 4.3 สเปกตรัมอิเล็กทรอนิกส์ของ OLED สีเขียว

4.1.2 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของ OLED

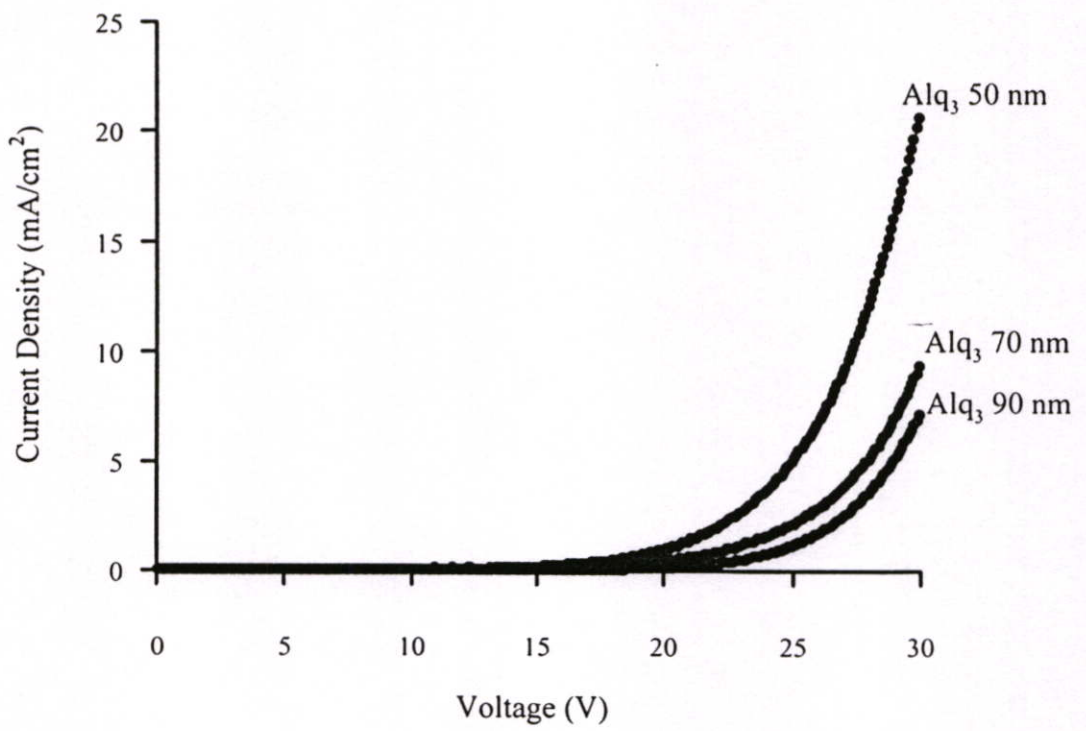
ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของ OLED แสดงดังรูปที่ 4.4-4.5 พบว่าเมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้ามีย่าน้อยกระแสยังไม่สามารถไหลได้ เมื่อมีการให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าค่าหนึ่งกับ OLED กระแสจึงเริ่มไหลเข้าสู่ OLED ได้ ความต่างศักย์ไฟฟ้าค่านี้เรียกว่าความต่างศักย์ขีดเริ่ม (threshold voltage) ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามค่าความหนาของชั้นสารอินทรีย์ดังจะ ได้แสดงในผลการทดลองดังนี้

4.1.2.1 ผลของการเพิ่มความหนาของชั้น Alq₃ โดยที่ความหนาของชั้น NPB คงที่

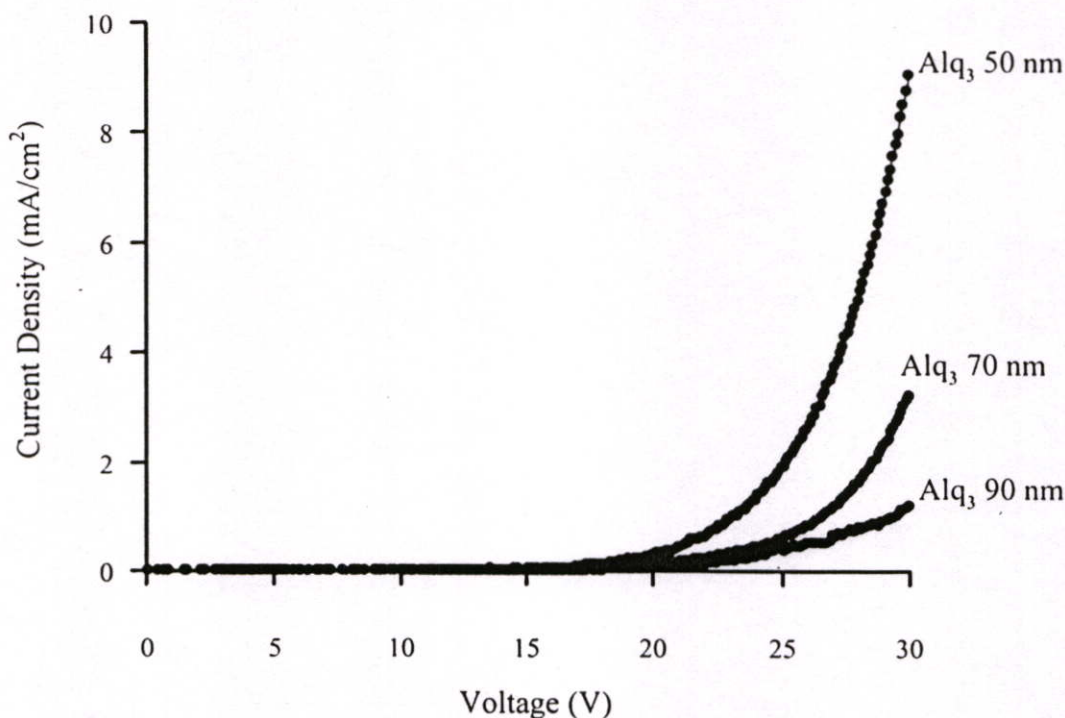
จากรูปที่ 4.4 (ก) จะเห็นได้ว่าเมื่อความหนาของชั้น Alq₃ เพิ่มขึ้นโดยที่ความหนาของชั้น NPB มีค่า 30 นาโนเมตรจะมีผลทำให้ค่า threshold voltage ของ OLED มีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่เมื่อทำการเพิ่มความหนาของ NPB ขึ้นไปอีกและทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของ Alq₃ ก็ให้ผลเหมือนกันดังรูปที่ 4.4 (ข) และ 4.4 (ค) แม้ว่าความหนาที่น้อยที่สุดจะทำให้ได้ค่าความต่างศักย์ขีดเริ่มต่ำสุดแต่ถ้าน้อยกว่านี้จะทำให้เกิดการลัดวงจรได้ง่ายซึ่งข้อมูลที่เกิดการลัดวงจรจะไม่นำมาแสดงไว้ในรายงานนี้



(n)



(v)

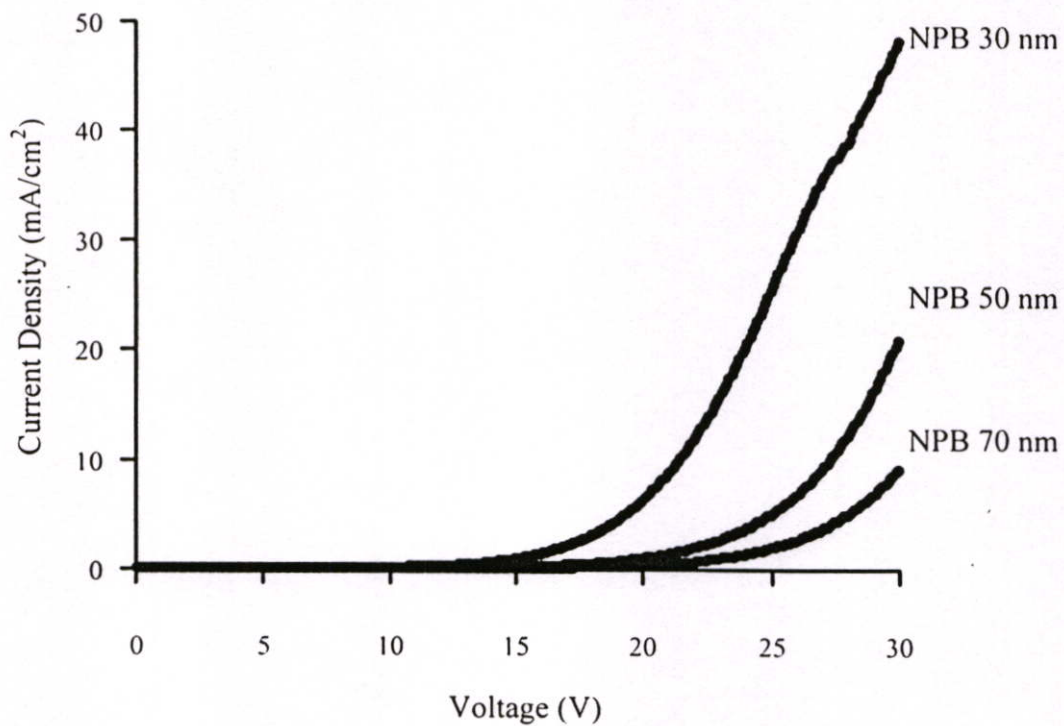


(ก)

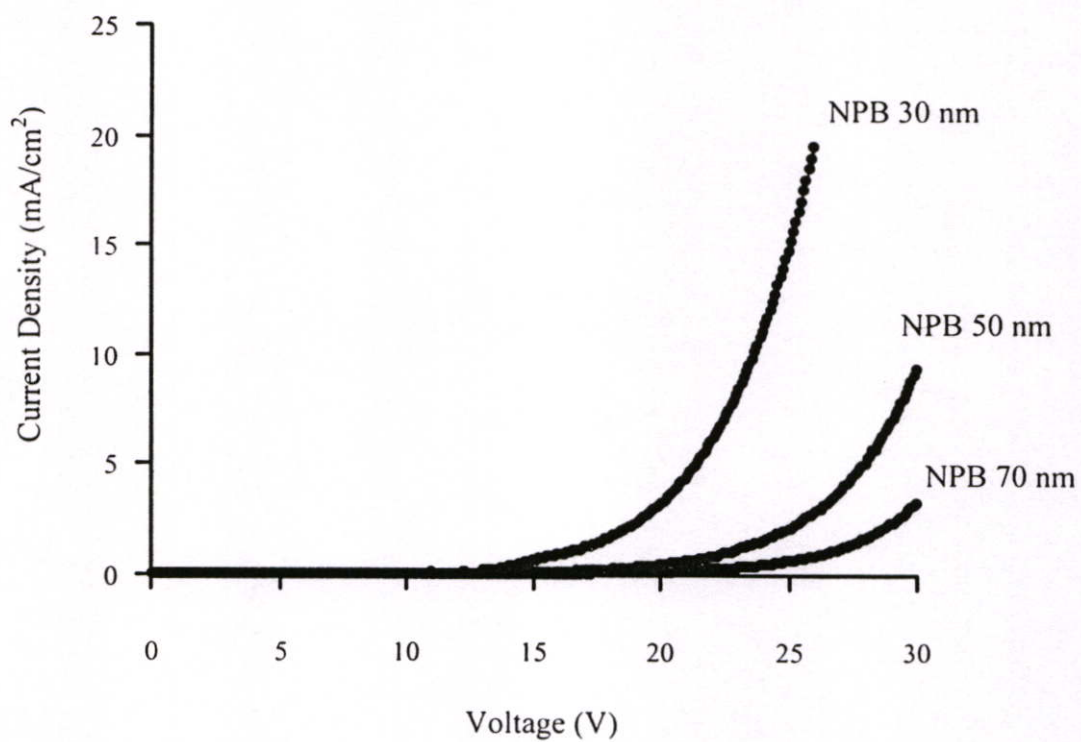
รูปที่ 4.4 ค่ากระแสกับความต่างศักย์ของ OLED เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้น Alq₃ โดยให้ความหนาของชั้น NPB คงที่ (ก) ความหนาของชั้น NPB คงที่ 30 นาโนเมตร (ข) ความหนาของชั้น NPB คงที่ 50 นาโนเมตร (ค) ความหนาของชั้น NPB คงที่ 70 นาโนเมตร

4.1.2.2 ผลของการเพิ่มความหนาของชั้น NPB โดยที่ความหนาของชั้น Alq₃ คงที่

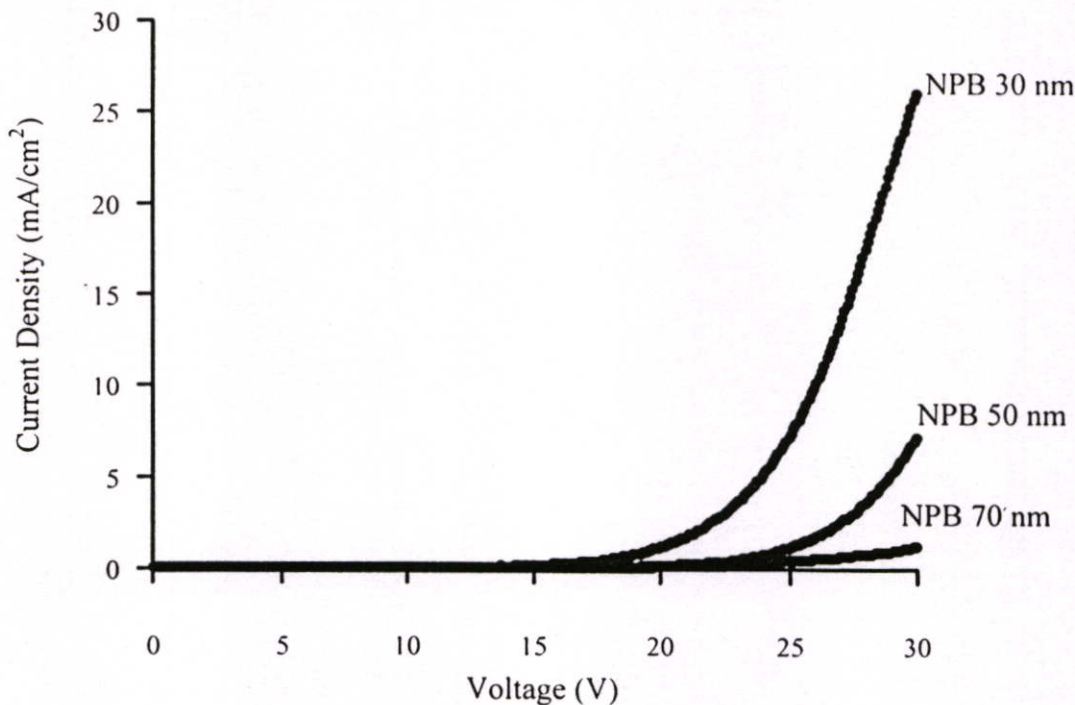
จากรูปที่ 4.5 (ก) จะเห็นได้ว่าเมื่อความหนาของชั้น NPB เพิ่มขึ้น โดยที่ความหนาของชั้น Alq₃ มีค่า 50 นาโนเมตรจะมีผลทำให้ค่าความต่างศักย์ขีดเริ่มของ OLED มีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่เมื่อทำการเพิ่มความหนาของ Alq₃ ขึ้นไปอีกและทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของ NPB ก็ให้ผลเหมือนกันดังรูปที่ 4.5 (ข) และ 4.5 (ค) แม้ว่าความหนาที่น้อยที่สุดจะทำให้ได้ค่าความต่างศักย์ขีดเริ่มต่ำสุดแต่ถ้าน้อยกว่านี้จะทำให้เกิดการลัดวงจรได้ง่ายซึ่งข้อมูลที่เกิดการลัดวงจรจะไม่นำมาแสดงไว้ในรายงานนี้



(n)



(v)



(ก)

รูปที่ 4.5 ค่ากระแสกับความต่างศักย์ของ OLED เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้น NPB โดยให้ความหนาของชั้น Alq₃ คงที่ (ก) ความหนาของชั้น Alq₃ คงที่ 50 นาโนเมตร (ข) ความหนาของชั้น Alq₃ คงที่ 70 นาโนเมตร (ค) ความหนาของชั้น Alq₃ คงที่ 90 นาโนเมตร

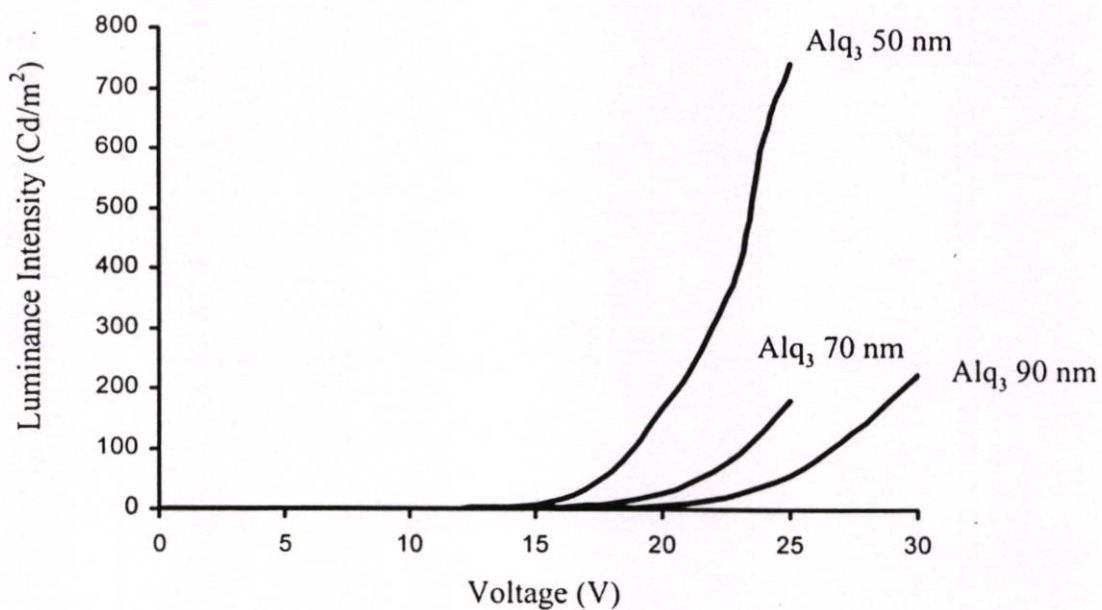
4.1.3 การตรวจสอบสมบัติทางแสงของ OLED

ความสัมพันธ์ระหว่างความส่องสว่างกับความต่างศักย์ของ OLED แสดงดังรูปที่ 4.6-4.8 พบว่าจากที่ได้กล่าวไปแล้วว่าในสารอินทรีย์โดยทั่วไปค่าสภาพคล่องทางไฟฟ้าของโฮลมีค่าสูงกว่าสภาพคล่องทางไฟฟ้าของอิเล็กตรอนประมาณ 10-100 เท่า ซึ่ง OLED จะเกิดการเปล่งแสงได้เนื่องจากการรวมตัวกันระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮล แต่โฮลเร็วกว่าอิเล็กตรอนอาจจะมีการรวมตัวกันไม่หมดทำให้โฮลบางส่วนจะไหลไปยังขั้วไฟฟ้าก่อนทำให้สูญเสียพลังงานไฟฟ้าซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพการเปล่งแสงของ OLED ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามค่าความหนาของชั้นสารอินทรีย์ดังจะได้แสดงในผลการทดลองดังนี้

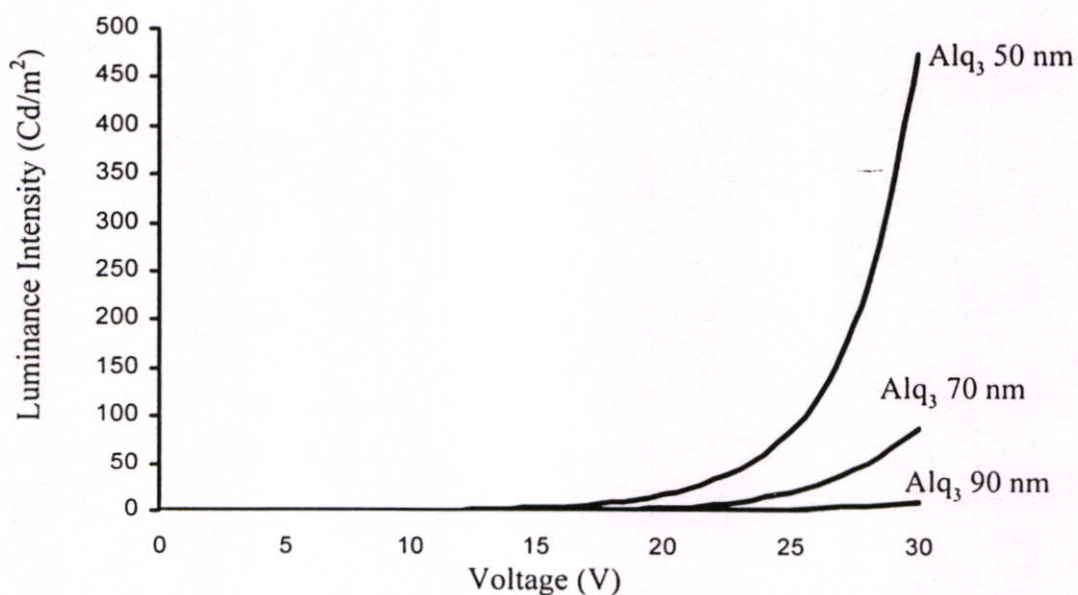
4.1.3.1 ผลของการเพิ่มความหนาของชั้น Alq₃ โดยที่ความหนาของชั้น NPB คงที่

จากรูปที่ 4.6 (ก) จะเห็นได้ว่าเมื่อความหนาของชั้น Alq₃ เพิ่มขึ้น โดยที่ความหนาของชั้น NPB มีค่า 30 นาโนเมตรจะมีผลทำให้ค่าความส่องสว่าง ของ OLED มีค่าเพิ่มขึ้นที่ค่าความต่าง

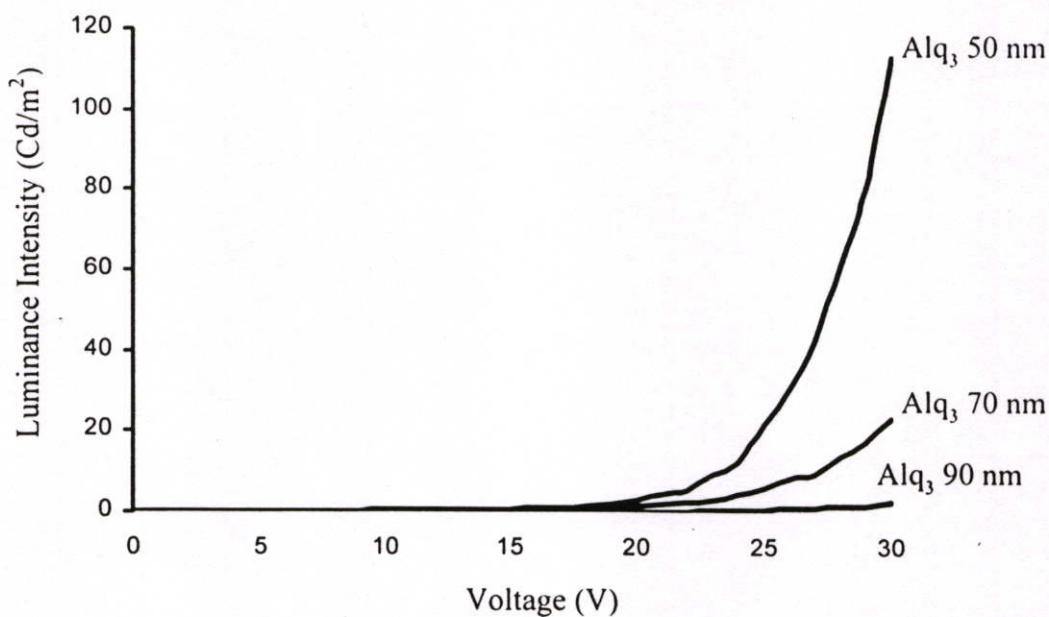
สัปดาห์เท่ากัน โดยที่เมื่อทำการเพิ่มความหนาของ NPB ขึ้นไปอีกและทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของ Alq₃ ก็ให้ผลเหมือนกันดังรูปที่ 4.6 (ข) และ 4.6 (ค) แม้ว่าความหนาที่น้อยที่สุดจะทำให้ได้ค่าความส่องสว่าง มากที่สุดแต่ถ้าน้อยกว่านี้จะทำให้เกิดการลัดวงจรได้ง่ายซึ่งข้อมูลที่เกิดการลัดวงจรจะไม่นำมาแสดงไว้ในรายงานนี้



(ก)



(ข)

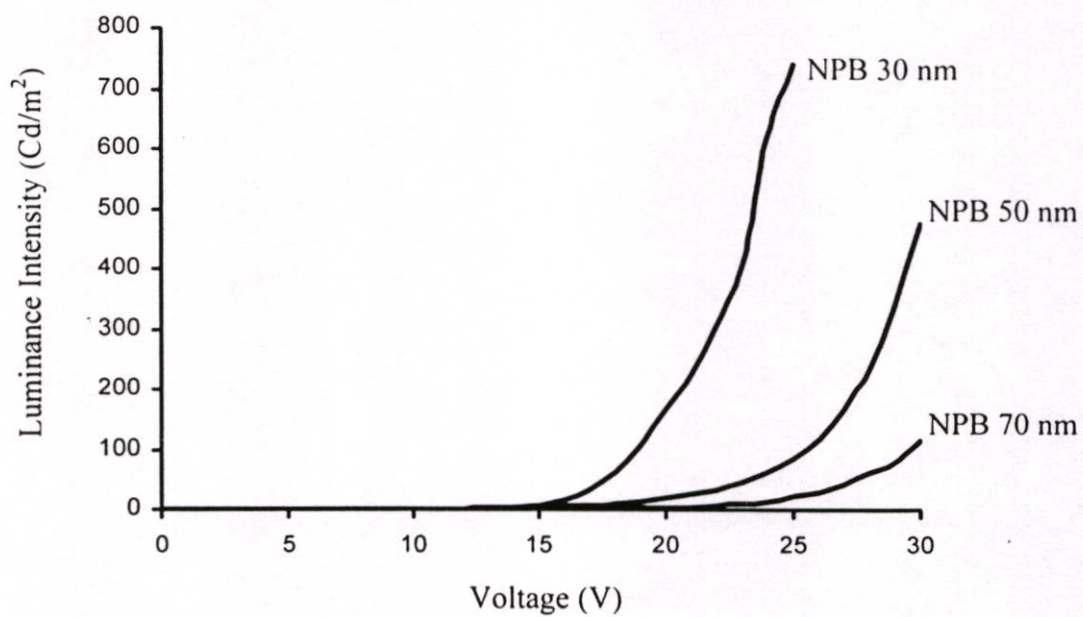


(ค)

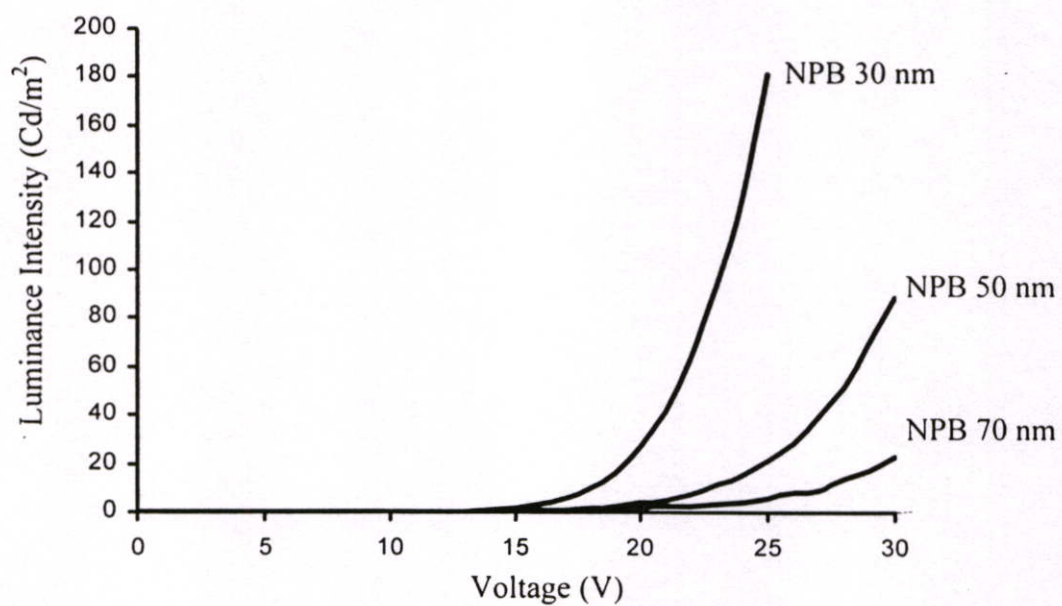
รูปที่ 4.6 ค่าความส่องสว่างกับความต่างศักย์ของ OLED เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้น Alq₃ โดยให้ความหนาของชั้น NPB คงที่ (ก) ความหนาของชั้น NPB คงที่ 30 นาโนเมตร (ข) ความหนาของชั้น NPB คงที่ 50 นาโนเมตร (ค) ความหนาของชั้น NPB คงที่ 70 นาโนเมตร

4.1.3.2 ผลของการเพิ่มความหนาของชั้น NPB โดยที่ความหนาของชั้น Alq₃ คงที่

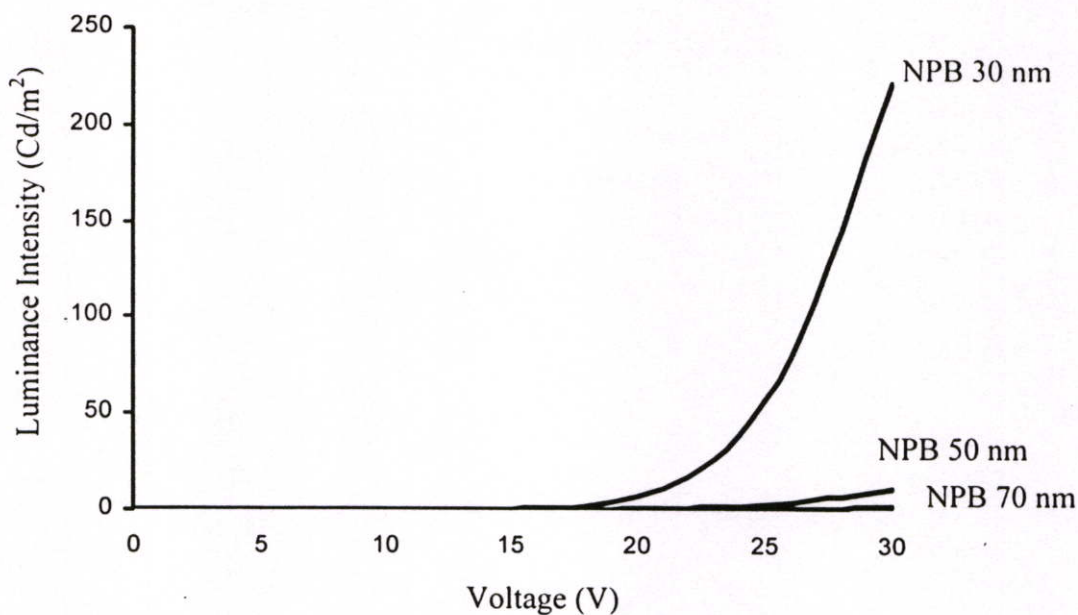
จากรูปที่ 4.7 (ก) จะเห็นได้ว่าเมื่อความหนาของชั้น NPB เพิ่มขึ้น โดยที่ความหนาของชั้น Alq₃ มีค่า 50 นาโนเมตรจะมีผลทำให้ค่าความส่องสว่าง ของ OLED มีค่าเพิ่มขึ้นที่ค่าความต่างศักย์เท่ากัน โดยที่เมื่อทำการเพิ่มความหนาของ NPB ขึ้นไปอีกและทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของ Alq₃ ก็ให้ผลเหมือนกันดังรูปที่ 4.7 (ข) และ 4.7 (ค) แม้ว่าความหนาน้อยที่สุดจะทำให้ได้ค่าความส่องสว่างมากที่สุดแต่ถ้าน้อยกว่านี้จะทำให้เกิดการลัดวงจรได้ง่ายซึ่งข้อมูลที่เกิดการลัดวงจรจะไม่นำมาแสดงไว้ในรายงานนี้



(n)



(v)

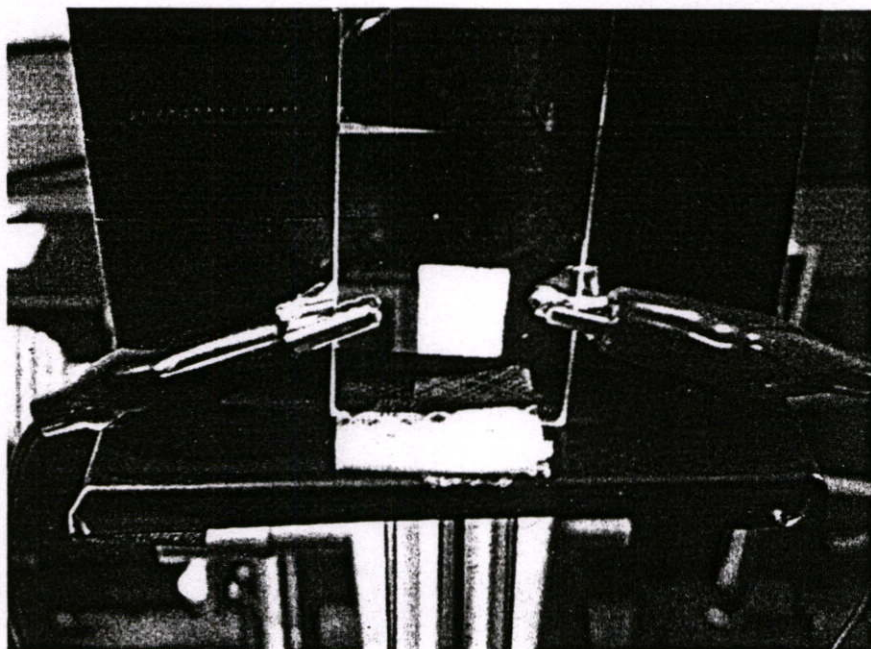


(ค)

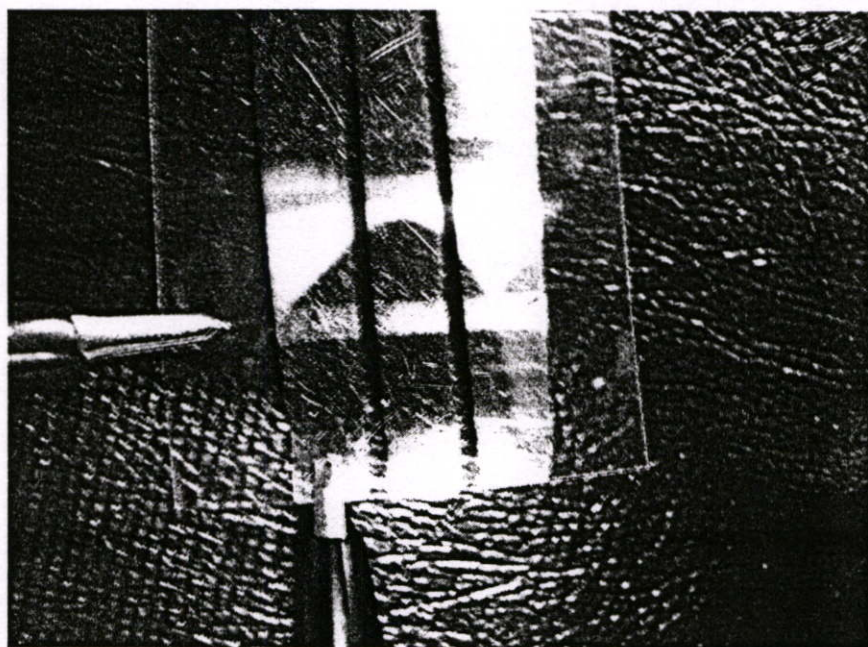
รูปที่ 4.7 ค่าความส่องสว่างกับความต่างศักย์ของ OLED เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้น Alq₃ โดยให้ความหนาของชั้น NPB คงที่ (ก) ความหนาของชั้น Alq₃ คงที่ 50 นาโนเมตร (ข) ความหนาของชั้น Alq₃ คงที่ 70 นาโนเมตร (ค) ความหนาของชั้น Alq₃ คงที่ 90 นาโนเมตร

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองทั้งหมดสรุปได้ว่าค่าความหนาแน่นกระแสของ OLED จะมีค่าลดลงเมื่อความหนาของชั้นสารอินทรีย์ใน OLED มากขึ้นสอดคล้องกับผลการทดลองของ I.D.Parker [13] ส่วนค่าความส่องสว่างของ OLED จะมีค่าลดลงเมื่อความหนาของชั้นสารอินทรีย์เพิ่มมากขึ้นเช่นกันสอดคล้องกันกับผลการทดลองของ D.Troadec [14]

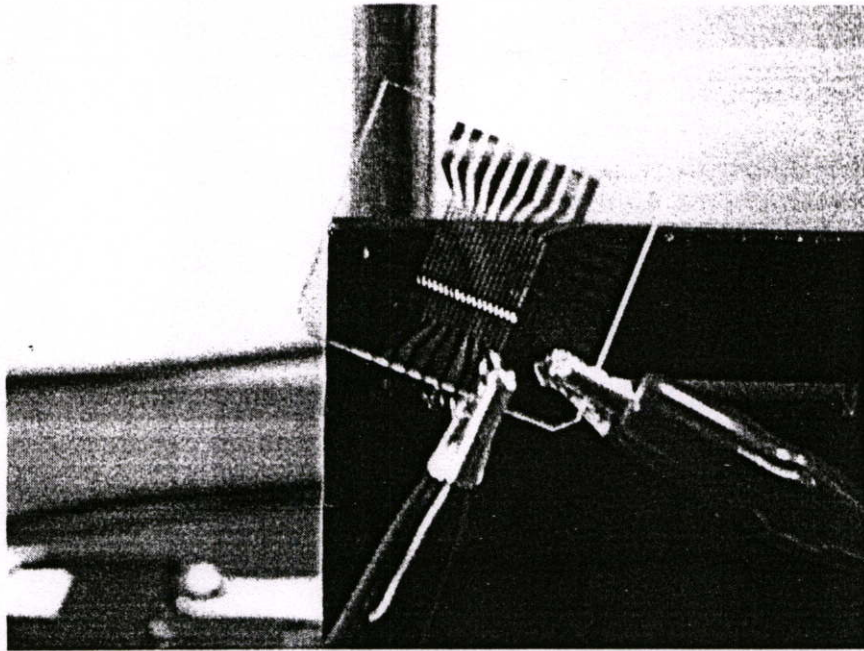
ความหนาของชั้น NPB กับ Alq₃ ที่ใช้ในโครงสร้าง OLED แบบสองชั้นที่เหมาะสมที่สุดในงานวิจัยนี้คือโครงสร้าง ITO (200 nm)/NPB (30 nm)/Alq₃ (50 nm)/Al (150 nm) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ใช้ความส่องสว่าง (luminance intensity) ถึง 740 แคนเดลาต่อตารางเมตร (Cd/m²) และมีประสิทธิภาพถึง 3.0 แคนเดลาต่อแอมแปร์ (Cd/A) ที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 25 โวลต์ แสดงดังรูปที่ 4.8 และจากเงื่อนไขดังกล่าวนำไปสร้าง OLED แบบคอตเมทริกซ์บนพลาสติกดังรูปที่ 4.9 และ OLED แบบคอตเมทริกซ์ (dot matrix) 18 x 18 จุด (dot) 1 จุดมีพื้นที่ 500 ตารางไมโครเมตร แสดงภาพขณะจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 20 โวลต์ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.8 OLED ขณะจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 25 โวลต์



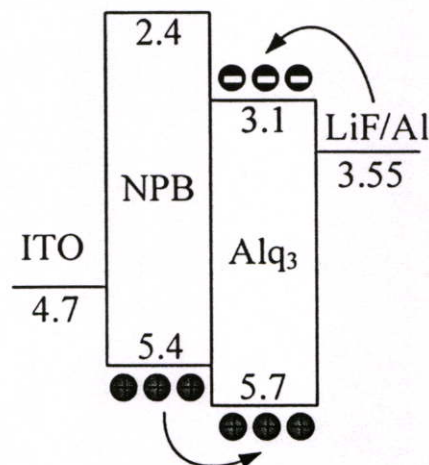
รูปที่ 4.9 OLED แบบคอตเมทริกซ์บนพลาสติก



รูปที่ 4.10 OLED แบบคอตเมทริกซ์ 18 x 18 จุด

4.2 OLED สีเขียวโครงสร้าง ITO/NPB/Alq₃/LiF/Al

เมื่อได้เงื่อนไขความหนาของ OLED โครงสร้าง ITO/NPB/Alq₃/Al โดยใช้ความหนาที่เหมาะสมของ NPB กับ Alq₃ ที่ได้จากผลการทดลองเป็น 30 และ 50 นาโนเมตร ตามลำดับจึงทำการเพิ่มประสิทธิภาพของ OLED โดยการเพิ่มชั้นฉนวนอิเล็กตรอน LiF เข้าไประหว่างชั้น Alq₃ กับ Al โดยเงื่อนไขที่สำคัญคือทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นฉนวนอิเล็กตรอน LiF ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของ OLED เนื่องจากฟังก์ชันงานของ LiF มีระดับที่ต่ำกว่า Al ทำให้อิเล็กตรอนสามารถฉีดเข้ามายังชั้นเปล่งแสงได้มากขึ้น แผนภาพระดับพลังงานของอุปกรณ์แสดงดังรูปที่ 4.11

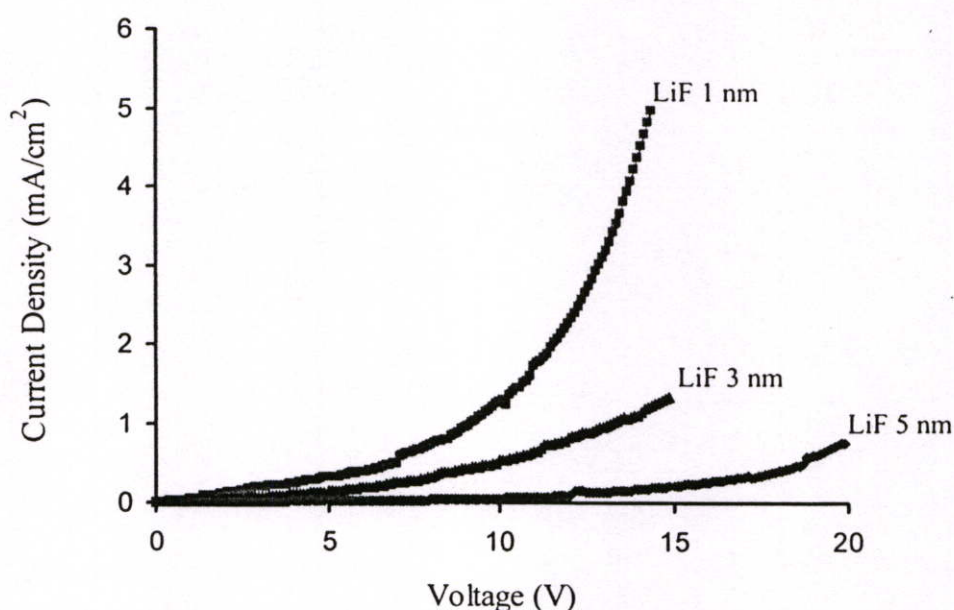


รูปที่ 4.11 แผนภาพระดับพลังงานของ OLED ที่ทำการศึกษา

จากรูปที่ 4.2 และ 4.11 จะเห็นว่าชั้นของสาร LiF มีค่าฟังก์ชันงานที่ต่ำกว่า Al ทำให้ อิเล็กตรอนสามารถกระโดดข้ามกำแพงศักย์ของชั้นสาร Alq₃ เข้าไปในชั้นสารอินทรีย์ได้ง่ายกว่า เมื่อเทียบกับ Al

4.2.1 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของ OLED

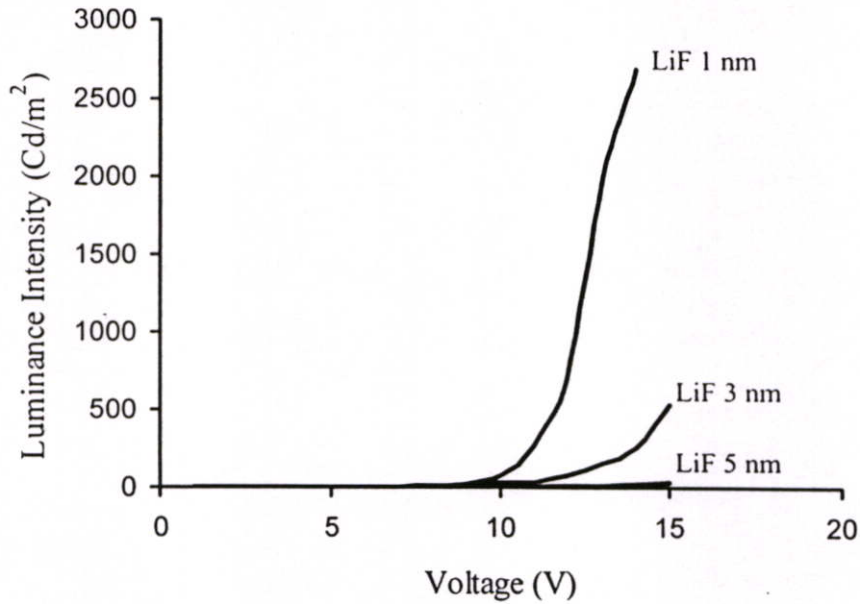
ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสกับความต่างศักย์ของ OLED แสดงดังรูปที่ 4.12 เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้น LiF เป็น 1, 3 และ 5 นาโนเมตร จะเห็นได้ว่าค่าความหนาแน่นกระแสของอุปกรณ์จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อความหนาของชั้น LiF มีค่าลดลง เนื่องจากว่า LiF มีความต้านทานสูง [15] จากรูปที่ 4.12 จะพบว่าค่าความหนาของชั้น LiF ที่เหมาะสมคือ 1 นาโนเมตร



รูปที่ 4.12 ค่าความหนาแน่นกระแสกับความต่างศักย์ของ OLED เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้น LiF

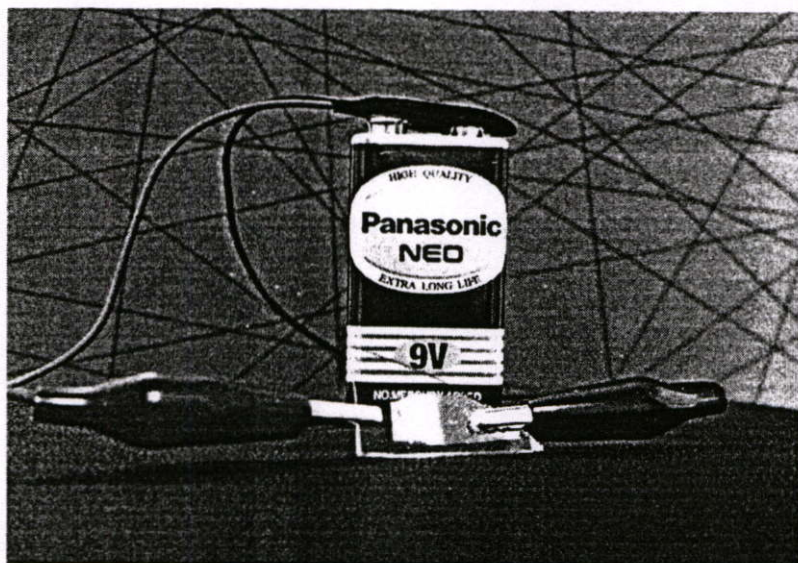
4.2.2 การตรวจสอบสมบัติทางแสงของ OLED

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความส่องสว่างกับความต่างศักย์ของ OLED แสดงดังรูปที่ 4.13 จะพบว่าเมื่อความหนาของชั้น LiF มีค่าลดลงจะมีผลทำให้ค่าความส่องสว่างของ OLED มีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งให้ผลสอดคล้องกันกับการวัดค่าความหนาแน่นกระแสและความต่างศักย์ เนื่องจากว่าการที่ความหนาของชั้น LiF ลดลงจะทำให้มีค่าความหนาแน่นกระแสเพิ่มขึ้น ทำให้โอกาสที่อิเล็กตรอนกับโฮลจะเกิดการรวมตัวกันแบบเปล่งแสงมีค่ามากขึ้นจึงทำให้ค่าความส่องสว่างของ OLED มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย



รูปที่ 4.13 ค่าความส่องสว่างกับความต่างศักย์ของ OLED เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้น LiF

จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.12 และ 4.13 จะเห็นได้ว่าความหนาของชั้น LiF ที่เหมาะสมที่สุดในงานวิจัยนี้คือ 1 นาโนเมตร ใน OLED โครงสร้าง ITO (200 nm)/NPB (30 nm)/Alq₃ (50 nm)/LiF (1 nm)/Al (200 nm) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ใช้ความส่องสว่างสูงสุดถึง 2,687 แคนเดลาต่อตารางเมตร และมีประสิทธิภาพสูงถึง 61 แคนเดลาต่อแอมแปร์ ที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 14 โวลต์ แสดงภาพขณะจ่ายความต่างศักย์โดยใช้แบตเตอรี่ 9 โวลต์ดังรูปที่ 4.14



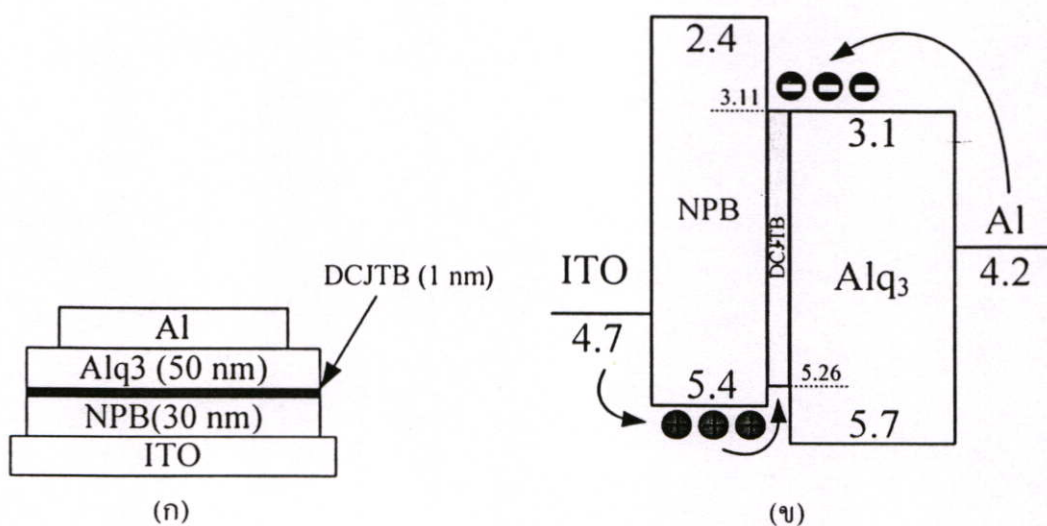
รูปที่ 4.14 OLED ขณะจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 9 โวลต์

4.3 OLED สีแดงโครงสร้าง ITO/NPB/DCJTB/Alq₃/LiF/Al

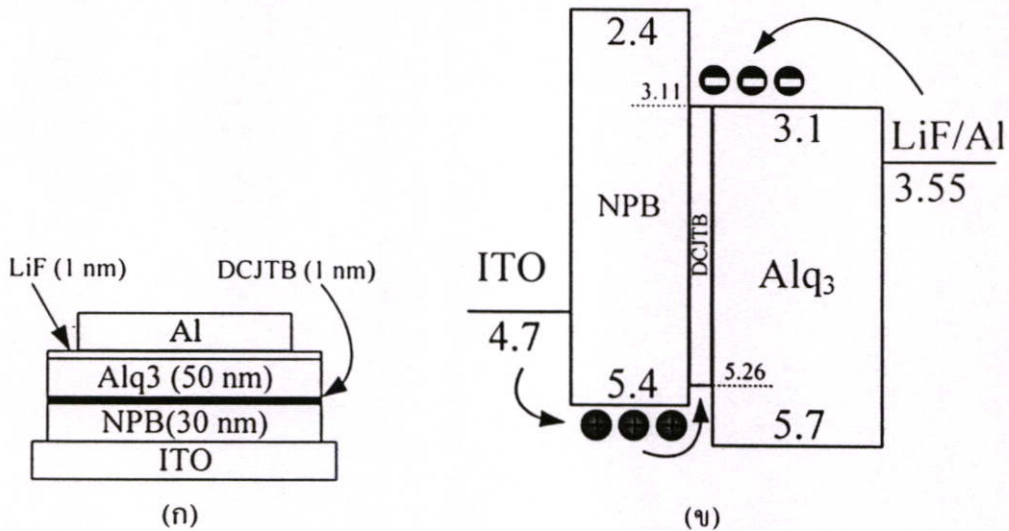
ทำการศึกษาการสร้างไดโอดเปล่งแสงสีแดงโดยใช้ชั้นเปล่งแสงสีแดง DCJTB ซึ่งโดยทั่วไปจะสร้างชั้นเปล่งแสงสีแดงโดยการเจือสารอินทรีย์ DCJTB กับสารอินทรีย์ Alq₃ โดยวิธีการ coevaporate แม้จะเป็นที่นิยมทำกันเนื่องจากสามารถปรับความเข้มสีได้จากการเพิ่มความเข้มข้นของสารเจือ แต่ก็เป็วิธีที่ยุ่งยากเนื่องจากจะต้องทำการระเหยสารอินทรีย์ทั้งสองพร้อมกันและจะต้องควบคุมอัตราการระเหยของสารทั้งสองให้คงที่จึงจะได้อัตราส่วนที่แน่นอน

สำหรับงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาการสร้าง OLED สีแดงจากสารอินทรีย์ DCJTB โดยทำการศึกษาถึงผลของการแทรกชั้นบางๆ ของ DCJTB 1 นาโนเมตรซึ่งเป็นค่าความหนาที่น้อยที่สุดที่ทำได้ในงานวิจัยนี้ เข้าไประหว่างชั้น NPB กับ Alq₃ ซึ่งเป็นการสร้าง OLED สีแดงอย่างง่าย โดยไม่ต้องทำการเจือสาร โดยในขั้นต้นจะทำการศึกษา OLED โครงสร้าง ITO/NPB/DCJTB/Alq₃/Al แสดงโครงสร้างดังรูปที่ 4.15 จากนั้นจะทำการเพิ่มประสิทธิภาพโดยการเพิ่มชั้น LiF เข้าไปแสดงโครงสร้างดังรูปที่ 4.16 โดยใช้เงื่อนไขความหนาที่เหมาะสม 1 นาโนเมตร ดังที่ได้แสดงจากผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.2

สำหรับไดอะแกรมระดับพลังงานของ OLED สีแดงแสดงดังรูปที่ 4.15 และเมื่อเพิ่มชั้น LiF เข้าไปแสดงดังรูปที่ 4.16 จะเห็นได้ว่าระดับ HOMO และ LUMO ของสารอินทรีย์ DCJTB ต่ำกว่าทั้งระดับของ NPB และ Alq₃ โดยเฉพาะระดับ HOMO ทำให้เกิดการกักโฮลให้อยู่บริเวณชั้น DCJTB ทำให้มีโอกาสที่โฮลกับอิเล็กตรอนจะเกิดการรวมตัวกันแบบเปล่งแสงก็เป็นไปได้สูงทำให้เกิดการเปล่งแสงสีแดงจากสารอินทรีย์ DCJTB มากกว่าสีเขียวจากสารอินทรีย์ Alq₃ [16]



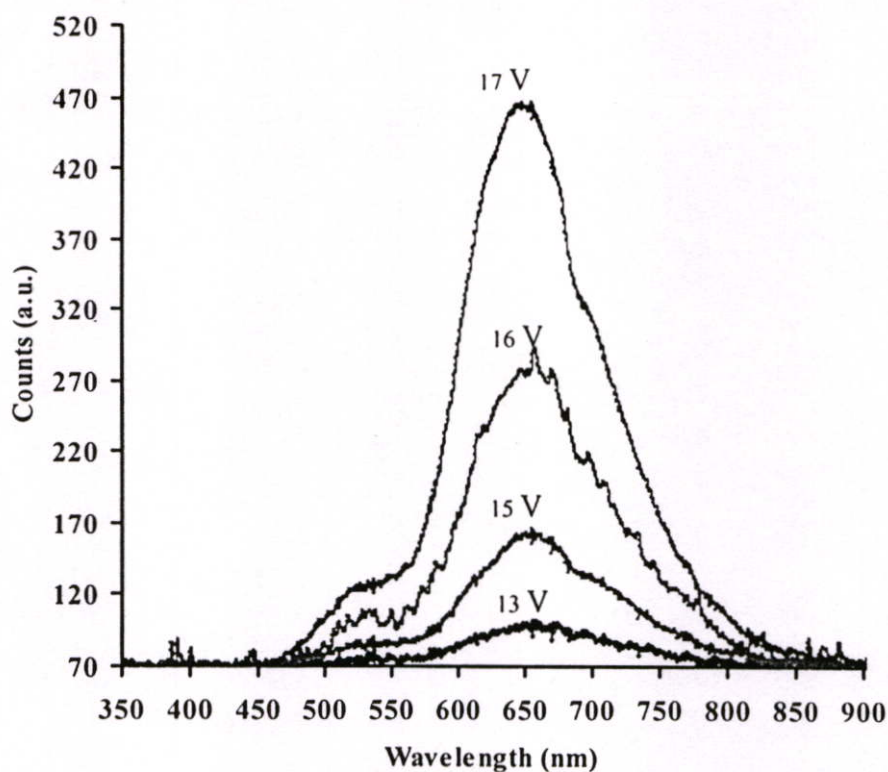
รูปที่ 4.15 (ก) โครงสร้างของ OLED สีแดงที่ทำการศึกษา (ข) ไดอะแกรมระดับพลังงานของ OLED ที่ทำการศึกษา



รูปที่ 4.16 (ก) โครงสร้างของ OLED สีแดงที่ทำการเพิ่มชั้น LiF (ข) ไดอะแกรมระดับพลังงานของ OLED ที่ทำการเพิ่มชั้น LiF

4.3.1 ผลการวัดสเปกตรัมอิเล็กทรอนิกส์ของ OLED

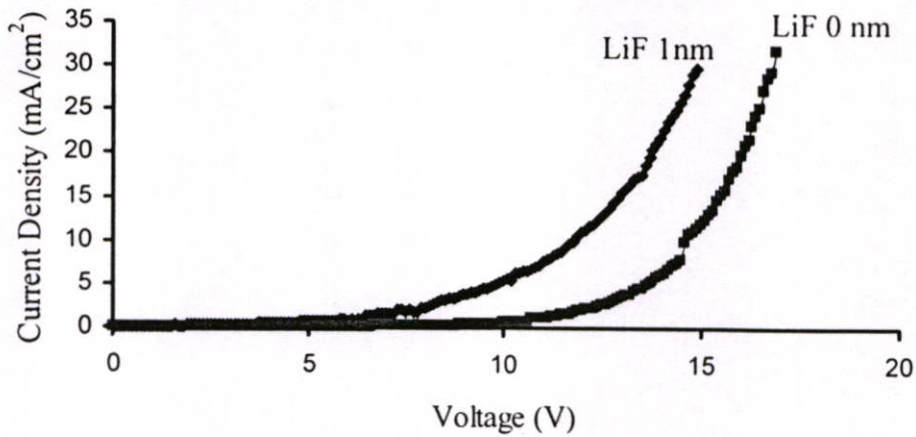
สเปกตรัมอิเล็กทรอนิกส์ของ OLED โครงสร้าง ITO (200 nm)/NPB (30 nm)/DCJT (1 nm)/Alq₃ (50 nm)/Al (200 nm) ที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าต่างกัน แสดงดังรูปที่ 4.17 จากรูป OLED มีค่าของตำแหน่งสูงสุดของสเปกตรัมที่ประมาณความยาวคลื่นแสง 655 นาโนเมตร ซึ่งเกิดจากการรวมตัวกันแบบปลดปล่อยแสงของอิเล็กตรอนกับโฮลที่ บริเวณชั้นของสารอินทรีย์ DCJT และจะเห็นได้ว่าเมื่อทำการจ่ายค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้นจะทำให้ค่าของตำแหน่งสูงสุดของสเปกตรัมที่ประมาณความยาวคลื่นแสง 530 นาโนเมตร มีค่าสูงขึ้น ซึ่งเป็นค่าจุดสูงสุดของสเปกตรัมจากสารอินทรีย์ Alq₃ เกิดจากการที่เมื่อทำการจ่ายค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าให้สูงขึ้นทำให้มีโอกาสที่โฮลจะสามารถกระโดดข้ามกำแพงศักย์เข้าไปยังชั้นสารอินทรีย์ Alq₃ มากขึ้นด้วย ทำให้จุดสูงสุดของสเปกตรัมที่ประมาณความยาวคลื่นแสง 530 นาโนเมตรของสารอินทรีย์ Alq₃ มีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 4.17 สเปกตรัมอิเล็กโตรลูมิเนสเซนซ์ของ OLED สีแดงที่ทำการจ่ายค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 13,15,16,17 โวลต์

4.3.2 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของ OLED

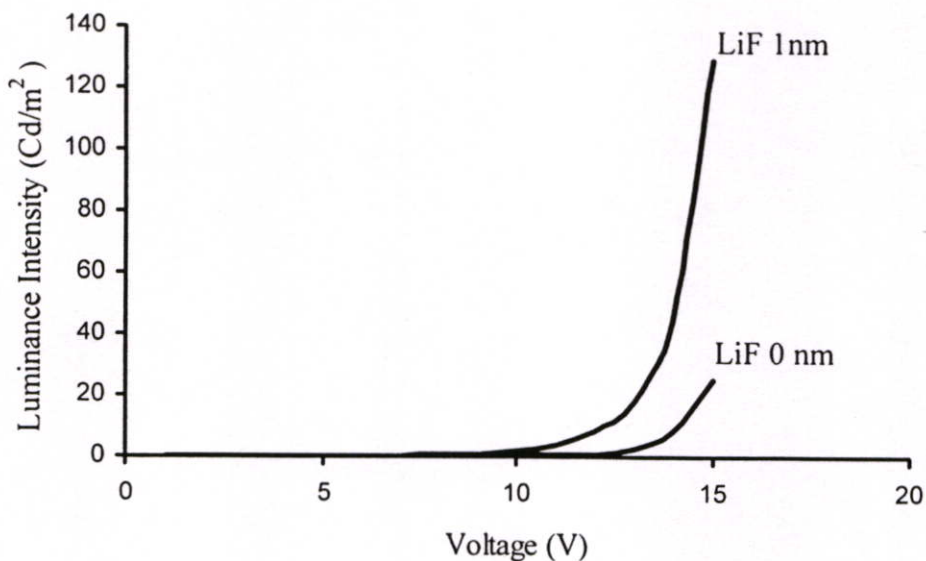
ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสกับความต่างศักย์ของ OLED แสดงดังรูปที่ 4.18 โดยทำการเปรียบเทียบ OLED โครงสร้าง ITO (200 nm)/NPB (30 nm)/DCJTb (1 nm)/Alq₃ (50 nm)/Al (200 nm) กับ OLED โครงสร้าง ITO (200 nm)/NPB (30 nm)/DCJTb (1 nm)/Alq₃ (50 nm)/LiF(1 nm)/Al (200 nm) ที่ทำการเพิ่มประสิทธิภาพโดยการเพิ่มชั้นฉนวนอิเล็กตรอน LiF เข้าไป จะเห็นได้ว่า OLED สีแดงที่มีชั้น LiF จะมีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าขีดเริ่มที่ต่ำกว่า เกิดจากการที่ชั้นสาร LiF มีค่าฟังก์ชันงานที่ต่ำกว่า Al ทำให้สามารถฉีดอิเล็กตรอนเข้าไปได้ง่ายกว่า Al ดังที่ได้อธิบายในหัวข้อที่ 4.2



รูปที่ 4.18 ค่าความหนาแน่นกระแสกับความต่างศักย์ของ OLED เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้น LiF

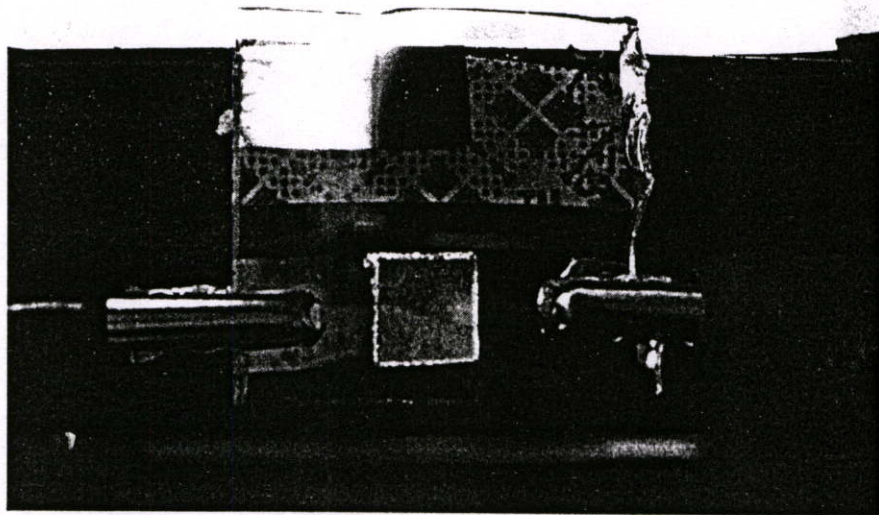
4.3.3 การตรวจสอบสมบัติทางแสงของ OLED

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความส่องสว่างกับความต่างศักย์ของ OLED แสดงดังรูปที่ 4.19 จะพบว่าเมื่อทำการเพิ่มชั้นฉนวนอิเล็กตรอน LiF เข้าไปมีผลทำให้ค่าความส่องสว่างของ OLED มีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งให้ผลสอดคล้องกันกับการวัดค่าความหนาแน่นกระแสและความต่างศักย์ เนื่องจากว่าการที่เพิ่มชั้น LiF เข้าไปทำให้ได้ค่าความหนาแน่นกระแสมากขึ้น ทำให้มีโอกาที่อิเล็กตรอนกับโฮลจะเกิดการรวมตัวกันแบบเปล่งแสงมีมากขึ้นจึงทำให้ค่าความส่องสว่างมีค่ามากขึ้นด้วย

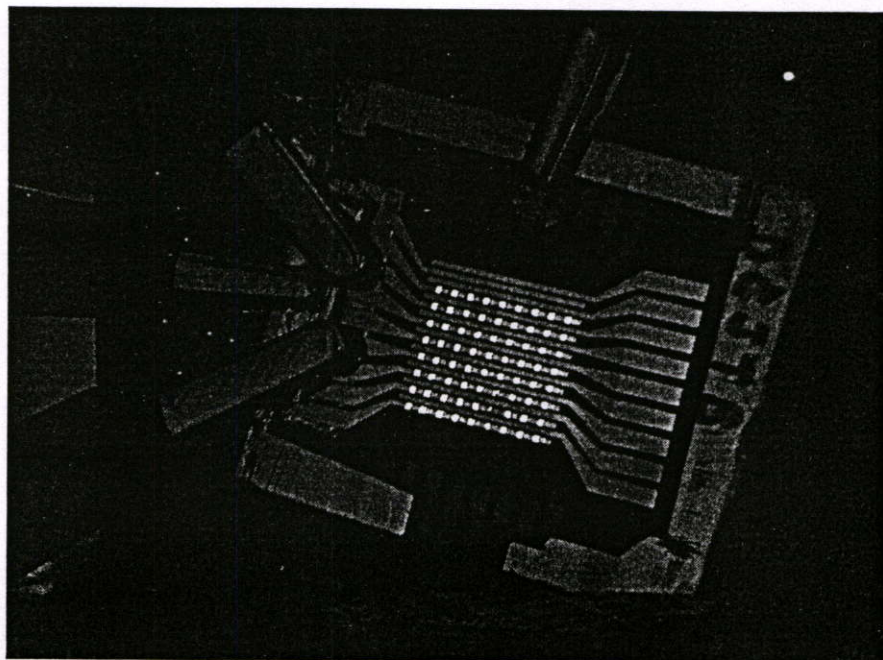


รูปที่ 4.19 ค่าความส่องสว่างกับความต่างศักย์ของ OLED เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้น LiF

จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.18 และ 4.19 จะเห็นได้ว่า OLED สีแดงโครงสร้างแบบหลายชั้นที่เหมาะสมที่สุดในงานวิจัยนี้คือโครงสร้าง ITO (200 nm)/NPB (30 nm)/DCJTB (1 nm)/Alq₃ (50 nm)/LiF (1 nm)/Al (200 nm) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ให้แสงสว่างสูงสุดถึง 129 แคนเดลาต่อตารางเมตร และมีประสิทธิภาพ 0.43 แคนเดลาต่อแอมแปร์ ที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 โวลต์ แสดงภาพขณะจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 15 โวลต์ดังรูปที่ 4.20 OLED สีแดงแบบคอตเมทริกซ์ 18 x 18 จุด 1 จุดมีพื้นที่ 500 ตารางไมโครเมตร แสดงภาพขณะจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 13 โวลต์ ดังรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.20 OLED สีแดงขณะจ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 15 โวลต์



รูปที่ 4.21 OLED สีแดงแบบคอตเมทริกซ์ 18 x 18 จุด

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาการสร้าง OLED ด้วยระบบระเหยสารอินทรีย์ โดยเงื่อนไขที่สำคัญในการศึกษาการสร้าง OLED คือ การเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นสารอินทรีย์ในแต่ละชั้นเพื่อที่จะหาความหนาของชั้นต่างๆของ OLED ที่เหมาะสม เพื่อให้สามารถนำเงื่อนไขความหนาที่เหมาะสมที่ได้นำไปสร้างเป็น OLED โครงสร้างแบบหลายชั้น

จากการศึกษา OLED โครงสร้างแบบสองชั้น ทำการสร้าง OLED โครงสร้าง ITO/NPB/Alq₃/AI โดยเงื่อนไขที่สำคัญที่ทำการศึกษาคือทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของ NPB และ Alq₃ พบว่า OLED โครงสร้างแบบสองชั้นที่มีความหนาของ NPB และ Alq₃ ที่เหมาะสมคือ NPB 30 นาโนเมตร และ Alq₃ 50 นาโนเมตร จากผลการวัดสเปกตรัมอิเล็กโทรลูมิเนสเซนซ์ของ OLED สีเขียวมีค่าของตำแหน่งสูงสุดของสเปกตรัมที่ความยาวคลื่นแสง 533 นาโนเมตรซึ่งให้ความส่องสว่างสูงสุด 740 แคนเดลาต่อตารางเมตร และมีประสิทธิภาพ 3.0 แคนเดลาต่อแอมแปร์ ที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 25 โวลต์

ทำการสร้าง OLED สีเขียวโครงสร้างแบบหลายชั้นโดยทำการเพิ่มชั้นฉนวนอิเล็กตรอน LiF เข้าไประหว่างชั้น Alq₃ กับชั้น AI โดยใช้ความหนาของ NPB และ Alq₃ ที่เหมาะสมที่ได้จากผลการทดลองข้างต้นนำมาสร้างเป็น OLED โครงสร้าง ITO/NPB/Alq₃/LiF/AI โดยเงื่อนไขที่สำคัญคือทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้น LiF จากผลการทดลองทำการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้น LiF เป็น 1, 3 และ 5 นาโนเมตร พบว่าเมื่อทำการลดความหนาของชั้น LiF จะทำให้ได้ค่าความหนาแน่นกระแสเพิ่มขึ้นเนื่องจากว่าชั้นของสาร LiF มีความต้านทานสูง[15] ความหนาของ LiF ที่เหมาะสมคือ 1 นาโนเมตร เป็นความหนาที่ทำให้วัดค่าความส่องสว่างของ OLED สีเขียวได้สูงสุดถึง 2,687 แคนเดลาต่อตารางเมตร และมีประสิทธิภาพสูงถึง 61 แคนเดลาต่อแอมแปร์ ที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 14 โวลต์

ทำการสร้าง OLED สีแดงโครงสร้างแบบหลายชั้น โดยทำการแทรกชั้นบางๆของ DCJTb 1 นาโนเมตร เข้าไประหว่างชั้น NPB กับ Alq₃ เป็น OLED สีแดงโครงสร้าง ITO/NPB/DCJTb/Alq₃/AI ซึ่งใช้ค่าความหนาของ NPB และ Alq₃ ที่เหมาะสมคือ 30 และ 50 นาโนเมตรตามลำดับ จากผลการวัดสเปกตรัมอิเล็กโทรลูมิเนสเซนซ์ของ OLED สีแดงพบว่ามีค่าของตำแหน่งสูงสุดของสเปกตรัมที่ความยาวคลื่นแสง 655 นาโนเมตร และได้ค่าความส่องสว่าง 25 แคนเดลาต่อตารางเมตร และมีประสิทธิภาพ 0.22 แคนเดลาต่อแอมแปร์ ที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 15 โวลต์

จากนั้นทำการเพิ่มประสิทธิภาพของ OLED สีแดงให้สูงขึ้นโดยทำการเพิ่มชั้นฉนวนอิเล็กตรอน LiF 1 นาโนเมตร ซึ่งเป็นความหนาที่เหมาะสมที่ได้จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.2 ทำให้ได้ OLED สีแดงที่มีประสิทธิภาพสูง โครงสร้าง ITO/NPB/DCJTB/Alq₃/LiF/Al ซึ่งให้ความส่องสว่างสูงสุด 129 แคนเดลาต่อตารางเมตร และมีประสิทธิภาพ 0.43 แคนเดลาต่อแอมแปร์ ที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 14 โวลต์

ข้อเสนอแนะ

- แม้ว่า OLED จะมีประสิทธิภาพสูงแต่ก็มีอุปสรรคคือชั้นของสารอินทรีย์และขั้วไฟฟ้าจะสามารถทำปฏิกิริยากับความชื้นและออกซิเจนในอากาศได้ทำให้ OLED เสื่อมสภาพลง แต่ก็สามารถป้องกันได้โดยทำการห่อหุ้ม (Encapsulation) เพื่อป้องกันไม่ให้ชั้นของสารอินทรีย์และขั้วไฟฟ้าทำปฏิกิริยากับความชื้นและออกซิเจนในอากาศก็จะทำให้ OLED มีอายุการใช้งานนานขึ้น

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] Xiao Jing, Deng Zhenbo, **“Effect of LiF buffer layer on the performance of organic electroluminescent devices.”**, Physica E, Vol 28, 2005, 323–327
- [12] V. Bulovic, P. Tian, **“A surface-emitting vacuum-deposited organic light emitting device.”**, Applied Physics Letters, Vol 70, 2954-2956
- [13] I.D. Parker, **“Carrier tunneling and device characteristics in polymer light-emitting diodes.”**, Journal of Applied Physics, Vol 75, 1656-1666
- [14] D.Troadec, **“Organic light-emitting diodes base on multilayer structure.”**, Synthetic Metals, Vol 124, 2001, 49-51
- [15] M.Matsumura, **“Effect of Al/LiF Cathodes on emission efficiency of organic EL devices.”**, Thin Solid Films, Vol 331, 1998, 96-100
- [16] Yuan-Min Wang, **“Trap effect of an ultrathin DCJTB layer in organic light-emitting diodes.”**, Materials Chemistry and Physics, Vol 92, 2005, 291–294

ประวัติผู้เขียน

นายอนุศิษย์ แก้วประจักษ์ เกิดเมื่อวันที่ 16 พฤศจิกายน 2523 ที่จังหวัดอุทัยธานี สำเร็จ การศึกษาวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ จากมหาวิทยาลัยทักษิณ ปีการศึกษา 2545 และเข้า ศึกษาต่อในระดับปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2546