บทที่ 2 ทฤษฏีและหลักการ

2.1 ทฤษฎีพื้นฐานของสารอินทรีย์

สารอินทรีย์ คือ สารประกอบซึ่งประกอบขึ้นจากอะตอมของธาตุการ์บอน (C) และ ใฮโดรเจน (H) เป็นองก์ประกอบสำคัญ มีลักษณะ โกรงสร้างได้หลายรูปแบบ โดยสมบัติของ สารอินทรีย์จะมีกวามแตกต่างกันออกไปขึ้นกับรูปแบบโกรงสร้างของสารอินทรีย์นั้น เนื่องจาก สารอินทรีย์สามารถสังเกราะห์ขึ้นได้ในห้องปฏิบัติการจึงทำให้สามารถปรับปรุงเปลี่ยนแปลง สมบัติของสารได้อย่างมากมายทำให้สามารถประยุกต์ใช้สารอินทรีย์ได้อย่างกว้างขวาง

2.1.1 พันธะของสารอินทรีย์

2.1.1.1 ออร์บิทัลอะตอม (atomic orbital)

ออร์บิทัลอะตอม คือบริเวณที่มีโอกาสที่จะพบอิเล็กตรอนมากที่สุดรอบนิวเคลียส โดยมี ลักษณะเป็นฟังก์ชันคลื่น [3]

s-ออร์บิทัล เป็นออร์บิทัลที่แสดงถึงโอกาสที่จะพบอิเล็กตรอนรอบนิวเคลียส
 โดยมีลักษณะเป็นทรงกลม ซึ่งการกระจายของอิเล็กตรอนจะไม่ขึ้นกับทิศทางเนื่องจากมีเลข
 ควอนตัมเชิงมุม (angular momentum quantum number) เท่ากับศูนย์

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



รูปที่ 2.1 ลักษณะของออร์บิทัล 1s ที่มีลักษณะเป็นแบบทรงกลม

p-ออร์บิทัล มีเลขควอนตัมเชิงมุม l = 1 โอกาสที่จะพบอิเล็กตรอนใน p-ออร์บิทัล จะ
 จึ้นกับระยะจากนิวเคลียสและทิศทาง 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 ที่ถูกแบ่งโดยระนาบบัพ คล้ายกับถูกตุ้มโดยทั้งสองด้านจะมีเฟสต่างกัน

3. d-ออร์บิทัล มีเลขควอนตัมเชิงมุม l = 2 โอกาสที่จะพบอิเล็กตรอนใน d-ออร์บิทัล จะ ขึ้นกับระยะจากนิวเคลียสและทิศทาง 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} แสดงดัง รูปที่ 2.3



ร**ูปที่ 2.3** ออร์บิทัล d ตามลักษณะของการกระจาย

2.1.1.2 ออร์บิทัลโมเลกุล (Molecular Orbital)

ตามทฤษฎีแล้วโมเลกุลเกิดจากการเกิดอันตรกิริยาของออร์บิทัลอะตอมทำให้เกิดการ ซ้อนทับ หรือการผลักกันระหว่างออร์บิทัลอะตอม ซึ่งลักษณะการเกิดอันตรกิริยาของออร์บิทัล อะตอมจะมี 2 ลักษณะ

 1. ออร์บิทัลโมเลกุลที่สร้างพันธะ (bonding molecular orbital) เนื่องจากออร์บิทัล อะตอมมีสถานะที่ตรงกัน ทำให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนมีมากบริเวณนิวเคลียสของอะตอม ทั้งสอง และทำให้เกิดเป็นพันธะระหว่างอะตอม 2. ออร์บิทัลโมเลกุลที่ต้านการสร้างพันธะ (antibonding molecular orbital) เนื่องจาก
 ออร์บิทัลอะตอมมีสถานะที่ตรงข้ามกัน ทำให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนจะกระจายอยู่นอก
 บริเวณนิวเคลียสของอะตอมทั้งสอง

พันธะที่เกิดการซ้อนทับของออร์บิทัลโมเลกุล จะมี 2 ลักษณะคือ

 พันธะซิกมา (σ-bond) เกิดจากการซ้อนทับลักษณะปลายชนปลาย หรือ หัวชนหัว (Head to head) โดยมีลักษณะการซ้อนทับและการผลักกัน ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ลักษณะการซ้อนทับของพันธะซิกมา

การรวมกันของออร์บิทัล s จะได้ออร์บิทัลโมเลกุลแบบซิกมาเท่านั้นและระดับพลังงาน ของออร์บิทัลที่สร้างพันธะจะต่ำกว่าระดับพลังงานของออร์บิทัลที่ต้านการสร้างพันธะและต่ำกว่า ระดับพลังงานของออร์บิทัลอะตอมด้วยแสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ระดับพลังงานของออร์บิทัลโมเลกุลเมื่อเกิดการซ้อนทับของพันธะซิกมา

2. พันธะพาย (π-bond) เกิดจากการซ้อนทับด้านข้าง (side to side) ซึ่งเป็นการซ้อนทับ และการผลักกัน 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 ออร์ บิทัล s กับ ออร์บิทัล p

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



ร**ูปที่ 2.**7 sp ออร์บิทัลแบบไฮบริด

2. sp² ไฮบริดออร์บิทัล เกิดจากการซ้อนทับระหว่างออร์บิทัล s 1 ออร์บิทัลกับออร์บิทัล p
 2 ออร์บิทัลมีการจัดเรียงตัวแบบไตรโกนอล (trigonal arrangement) แต่ละด้านจะทำมุมกัน
 120[°] แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 sp² ออร์บิทัลแบบไฮบริค

3. sp³ ไฮบริดออร์บิทัลเกิดจากการซ้อนทับระหว่างออร์บิทัล s 1 ออร์บิทัลกับออร์บิทัล p
 3 ออร์บิทัลมี การจัดเรียงตัวแบบเททระฮิดรอล (tetrahedral arrangement) โดยแต่ละด้านทำมุมกัน
 109.5[°]แสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 sp³ ออร์บิทัลแบบไฮบริค

การเกิดไฮบริไดเซชั่นในพันธะต่างๆจะประกอบด้วยพันธะซิกมาและพันธะพายดังนี้

พันธะเดี่ยว (single bond) เป็นพันธะที่เกิดจากอะตอม 2 อะตอมที่ใช้อิเล็กตรอน
 ร่วมกัน 1คู่ โดยออร์บิทัลมีการซ้อนทับกันแบบซิกมา ดังนั้น พันธะเดี่ยวบางครั้งเรียกว่าพันธะ
 ซิกมา

พันธะคู่ (double bond) เป็นพันธะที่เกิดจากอะตอม 2 อะตอมที่ใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน
 2 คู่ โดยออร์บิทัลมีการซ้อนทับกันแบบซิกมา1คู่ และแบบพาย 1 คู่

3. พันธะสาม (triple bond) เป็นพันธะที่เกิดจากอะตอม 2 อะตอมที่ใช้อิเล็กตรอนร่วมกัน
 3 คู่ โดยออร์บิทัลมีการซ้อนทับกันแบบซิกมา1คู่ และแบบพาย 2 คู่

2.2 สารกึ่งตัวนำอินทรีย์ (organic semiconductor)

สารกึ่งตัวนำอินทรีย์เป็นสารอินทรีย์ที่มีสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงที่แตกต่างจาก สารอินทรีย์ทั่วไป โดยเมื่อนำมาทำการทคลองและวิเคราะห์ทางฟิสิกส์จะพบว่า สารอินทรีย์ ดังกล่าวมีระดับพลังงานคล้ายคลึงกับสารกึ่งตัวนำ คือ มีแถบพลังงานต้องห้าม (forbidden band) จึงเรียกสารดังกล่าวว่าเป็นสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ (organic semiconductor) โดยลักษณะโครงสร้าง ส่วนใหญ่ของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์จะมีลักษณะพันธะเป็นพันธะคู่สลับกับพันธะเดี่ยว เรียก โครงสร้างลักษณะนี้ว่า โครงสร้างแบบคอนจูเกต (conjugate structure) ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์

สารกึ่งตัวนำอินทรีย์จะมีโครงสร้างพื้นฐานของอะตอมคาร์บอนซึ่งเป็นแบบ sp² ไฮบริด ออร์บิทัล เมื่อพิจารณาคู่พันธะของอะตอมคาร์บอนที่เป็นพันธะคู่ ภายในพันธะคู่จะประกอบด้วย พันธะซิกมา 1 คู่ พันธะพาย 1 คู่ ส่วนพันธะที่เหลือจะเป็นพันธะซิกมาทั้งหมดเนื่องจากเป็นพันธะ เดี๋ยวดังรูปที่ 2.11



ร**ูปที่ 2.11** การกระจายของอิเล็กตรอน และการเกิด sp² ออร์บิทัล ของคาร์บอนที่เป็นพันธะคู่

พิจารณาอะตอมของการ์บอนที่ภายในวงของเบนซีน (benzene,C₆H₆) อะตอมของ การ์บอนเป็นแบบ sp² ไฮบริดออร์บิทัล มีพันธะเป็นแบบคู่สลับเดี่ยว ในแนวระนาบของวงเบนซีน จะมีระนาบของพันธะซิกมาซึ่งเกิดจากการสร้างพันธะระหว่างอะตอมของ การ์บอนกับการ์บอน และ อะตอมของ การ์บอนกับไฮโดรเจน และภายในวงของเบนซีนส่วนที่เป็น p_z ออร์บิทัล จะเกิด เป็นพันธะพายที่เกิดจากพันธะคู่ระหว่างอะตอมของการ์บอน 3 คู่ ดังรูปที่ 2.12





รูปที่ 2.12 พันธะซิกมาในวงของเบนซีน และพันธะพายในวงของเบนซีน

เมื่อพิจารณาถึงระดับพลังงานของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ ในลักษณะของโมเลกุลออร์บิทัล แล้วจะพบว่าลักษณะของการเกิดพันธะระหว่างพันธะคู่ของอะตอมคาร์บอน ส่วนที่เป็น sp² จะ เป็นพันธะซิกมาที่มีความเสถียร ระดับพลังงานของออร์บิทัลโมเลกุลแบบสร้าง มีค่าลคลงเมื่อ เทียบกับ ไฮบริดออร์บิทัล และระดับพลังงานของออร์บิทัลโมเลกุลแบบต้านจะมีค่าสูงมาก เนื่องจากต้องใช้พลังงานที่มีค่ามากเพื่อที่จะทำลายพันธะซิกมา

ส่วนที่เป็น p_z ออร์บิทัล จะเกิดเป็นพันธะพายระดับพลังงานของออร์บิทัลโมเลกุลที่สร้าง มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับ ออร์บิทัลอะตอม ระดับพลังงานของออร์บิทัลโมเลกุลที่ต้านการสร้าง พันธะจะมีค่าไม่มากนักเนื่องจากพันธะพาย เป็นพันธะที่เกิดจากการซ้อนทับด้านข้างของออร์ บิทัล p ดังนั้นอิเล็กตรอนที่กระจายอยู่บริเวณนี้จะเป็นอิเล็กตรอนแบบไม่ประจำที่ (delocalized electron) เนื่องจากความหนาแน่นของอิเล็กตรอนกระจายตัวอยู่นอกนิวเคลียส เมื่อมีพลังงานมา กระตุ้นทำให้อิเล็กตรอนที่กระจายตัวอยู่สามารถเคลื่อนที่ไปตามพันธะพายได้ เสมือนเป็นการ เคลื่อนประจุ



รูปที่ 2.13 ระดับพลังงานพันธะของอะตอมการ์บอนกับอะตอมข้างเกียงภายในวงเบนซีน

เมื่อพิจารณาจากทฤษฎีออร์บิทัลโมเลกุล (molecular orbital theory) ระดับพลังงาน ของ อิเล็กตรอนใน p_z ออร์บิทัล ระดับพลังงานของออร์บิทัลโมเลกุลที่สร้าง (π bonding molecular orbital) จะเป็นระดับที่สูงที่สุดที่อิเล็กตรอนสามารถอาศัยอยู่ได้ จึงเรียกระดับพลังงานนี้ว่า highest occupied molecular orbital (HOMO) และ ที่ระดับพลังงานของออร์บิทัลโมเลกุลที่ต้านการสร้าง พันธะ (π * antibonding molecular orbital) จะเป็นระดับที่ต่ำที่สุดที่ไม่มีอิเล็กตรอนอาศัยอยู่ได้ จึง เรียกระดับพลังงานนี้ว่า lowest unoccupied molecular orbital (LUMO) ระหว่างระดับ HOMO และ LUMO เสมือนเป็นช่องว่างแถบพลังงานที่มีค่าใกล้เคียงกับสารกึ่งตัวนำ ระดับพลังงานชั้น HOMO เปรียบเสมือนแถบวาเลนซ์ (valence band) ส่วนระดับพลังงานชั้น LUMO เปรียบเสมือน แถบนำ (conduction band) จึงเรียกสารที่มีสมบัติดังกล่าวว่า สารกึ่งตัวนำอินทรีย์ (organic semiconductor) [4] ดังรูปที่ 2.13

2.2.1 สารอินทรีย์โมเลกุลขนาดเล็ก (small organic molecule)

เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีโครงสร้างเป็นแบบพันธะคู่สลับเคี่ยวต่อเนื่องกันเป็น โมเลกุล สารอินทรีย์โมเลกุลขนาดเล็กบางชนิดจะมีอะตอมของโลหะเจืออยู่ด้วย ดังรูปที่ 2.14 โดยสารแต่ละชนิดจะมีสมบัติที่แตกต่างกันออกไปตามหน้าที่ดังนี้

วัสคุน้ำพาอิเล็กตรอน (electron transport material) มีความสามารถในการขนส่ง
 อิเล็กตรอนได้ดีและประพฤติตนคล้ายกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

2.วัสคุนำพาโฮล (hole transport material) มีความสามารถในการขนส่งโฮลได้คีและ ประพฤติตนคล้ายกับสารกึ่งตัวนำชนิดพี

3.วัสคุเปล่งแสง (emission material) เป็นวัสคุที่เปล่งแสงในช่วงของแสงสีที่ตาสามารถ มองเห็นได้

4.วัสคุเจือ (dopant material) เมื่อทำการเจือสารเหล่านี้ลงไปในวัสคุเปล่งแสง ทำให้แสง สีที่ออกมาสามารถเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม สารบางชนิดสามารถทำหน้าที่ได้หลายแบบ เช่น สารกึ่งตัวนำอินทรีย์ Alq, มีสมบัติที่ เป็น วัสคุนำพาอิเล็กตรอน และ วัสคุเปล่งแสง



รูปที่ 2.14 สารกึ่งตัวนำอินทรีย์แบบโมเลกุลขนาดเล็ก

- (fl) TPD
- (\mathfrak{V}) Alq₃
- (ค) DPVBi
- () CuPc

2.2.2 สารคอนจูเกทพอลิเมอร์ (conjugated polymer)

สารคอนจูเกทพอลิเมอร์คือ สารอินทรีย์ซึ่งประกอบขึ้นจากหน่วยของมอนอเมอร์ (monomer) มาเรียงต่อซ้ำกัน เป็นสายยาว โดยมีโครงสร้างเป็นแบบพันธะคู่สลับเคี่ยวเรียงต่อกัน หรืออาจจับกันเป็นวง ซึ่งการมีพันธะคู่สลับเคี่ยวจะทำให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ไปตามสาย ของพอลิเมอร์ได้ ตัวอย่างสารคอนจูเกทพอลิเมอร์แสดงดังรูปที่ 2.15





PPV ให้แสงสีเหลือและเขียว

PPP ให้แสงสีน้ำเงิน

MEHPPV ให้แสงสีแดง

รูปที่ 2.15 สารกึ่งตัวนำอินทรีย์แบบคอนจูเกทพอลิเมอร์

2.3 ใดโอดเปล่งแสงสารอินทรีย์(Organic Light-Emitting Diode; OLED)

ใดโอดเปล่งแสงสารอินทรีย์ (OLED) เป็นอุปกรณ์เปล่งแสงที่สร้างจากฟิล์มบาง สารอินทรีย์ที่ถูกประกบด้วยขั้วไฟฟ้า ทำงานโดยการให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าแก่ไดโอดจะเกิดการ เปล่งแสงออกมา ซึ่งความยาวคลื่นแสงที่เปล่งออกมาจะมีความสัมพันธ์กับชนิดของสารอินทรีย์ที่ ใช้ และโครงสร้างของไดโอดเปล่งแสง โดยโครงสร้างพื้นฐานของ OLED คือ โครงสร้างแบบชั้น เดียวประกอบด้วยชั้นเปล่งแสง (Emitting Layer; EML) ดังแสดงในรูปที่ 2.16 (ก)

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



รูปที่ 2.16 โครงสร้างไคโอคเปล่งแสงสารอินทรีย์แบบต่างๆ

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

2.3.1 กระบวนการทำงานของไดโอดเปล่งแสงสารอินทรีย์

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

1. การฉีดพาหะ โฮลและอิเล็กตรอนจากขั้วไฟฟ้าเข้าสู่ชั้นสารอินทรีย์

- 2. การส่งผ่านโฮลและอิเล็กตรอนในชั้นสารอินทรีย์
- 3. การรวมตัวของพาหะ โฮลและอิเล็กตรอนเกิดเป็นเอกซิตอน

4. การรวมตัวแบบปลดปล่อยแสงของเอกซิตอน

โดยขั้นตอนทั้ง 4 จะแสดงคังรูปที่ 2.17 [6]



รูปที่ 2.17 กระบวนการเกิดปรากฏการณ์การเปล่งแสงด้วยไฟฟ้าของ OLED

เมื่อให้ $\Phi_{\scriptscriptstyle A}$ คือ ฟังก์ชันงาน (work function) ของขั้วแอโนค

- Φ_c คือ ฟังก์ชันงานของขั้วแคโทด
- Φ_h คือ กำแพงศักย์การฉีดโฮล
- $\Phi_{_{e}}$ คือ กำแพงศักย์การฉีดอิเล็กตรอน
- Φ_{bi} คือ built-in potential

เมื่อทำการจ่ายแรงคันไฟฟ้าให้กับ OLED จะทำให้โฮลและอิเล็กตรอนถูกฉีดจากขั้วไฟฟ้า เข้าสู่ชั้นสารอินทรีย์และเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในชั้นของสารอินทรีย์ เกิดการรวมตัวกันจากสถานะ กระตุ้นและเกิดการปลดปล่อยแสงออกมา จากการศึกษา OLED โครงสร้างแบบชั้นเดียวพบว่า ประสิทธิภาพ รวมทั้งอายุการใช้งานมีค่าต่ำ จึงไม่สามารถนำมาใช้งานจริงได้ จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1987 C. W. Tang และ S. A. Van Slyke ได้ทำการทำการสร้าง OLED ที่มีโครงสร้างแบบหลายชั้น จากสารอินทรีย์ tris (8-hydroxyquinoline) aluminum (Alq₃) ที่สามารถเปล่งแสงในช่วงความยาว คลื่นแสงสีเขียว โดย OLED ที่สร้างขึ้นมีประสิทธิภาพรวมทั้งอายุการใช้งานสูงกว่า OLED โครงสร้างแบบชั้นเดียว ซึ่งประสิทธิภาพที่สูงขึ้นสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 2.18



ร**ูปที่ 2.18** กระบวนการทำงานของไคโอคเปล่งแสงสารอินทรีย์ (ก) โครงสร้างแบบชั้นเดียว (ข) โครงสร้างแบบสองชั้น

เมื่อทำการจ่ายแรงคันไฟฟ้าให้กับ OLED โครงสร้างแบบชั้นเคียวโฮลกับอิเล็กตรอนจะ ถูกฉีดจากขั้วไฟฟ้าเข้าไปยังชั้นของสารอินทรีย์และเกิดกระบวนการ 4 ขั้นตอนตามที่ได้กล่าวไว้ ข้างต้นแต่เนื่องจากสารอินทรีย์เกือบทั้งหมดจะมีสภาพคล่องทางไฟฟ้า (mobility) ของโฮลสูงกว่า อิเล็กตรอนประมาณ 10-100 เท่า ทำให้บริเวณที่เกิดการรวมตัวของโฮลและอิเล็กตรอนจะอยู่ บริเวณใกล้ขั้วไฟฟ้าแคโทดดังแสดงในรูป 2.18(ก) ซึ่งทำให้โฮลมีโอกาสที่จะผ่านเข้าสู่ขั้วไฟฟ้า แคโทดโดยไม่เกิดการรวมตัวกับอิเล็กตรอนซึ่งทำให้จำนวนเอกซิตรอนที่จะเกิดการเปล่งแสง ลดลง ด้วยเหตุนี้ทำให้ OLED โครงสร้างแบบชั้นเดียวมีประสิทธิภาพด่ำ แต่เมื่อทำการพัฒนาเป็น OLEDโครงสร้างแบบสองชั้น ดังแสดงในรูป 2.18(ข) ซึ่งประกอบด้วยชั้นส่งผ่านโฮลและชั้น ส่งผ่านอิเล็กตรอนซึ่งในรูป 2.18(ข) จะทำหน้าที่เป็นชั้นเปล่งแสงด้วย ที่บริเวณรอยต่อระหว่างชั้น ทั้งสองจะเป็นตำแหน่งของการรวมตัวกันของกู่อิเล็กตรอน-โฮล (electron-hole pair) เกิดเป็นเอก ซิตรอนและเกิดการปลดปล่อยแสงออกมา

เมื่อทำการจ่ายแรงคันไฟฟ้าให้กับ OLED โครงสร้างแบบสองชั้น จะเกิดกระบวนการทั้ง 4 ที่ได้กล่าวมาแล้วเช่นกัน การออกแบบโครงสร้างแบบสองชั้นทำให้เกิดรอยต่อแบบเฮเทโร (hetero junction) ซึ่งจะพบกำแพงศักย์บริเวณรอยต่อของชั้นส่งผ่านโฮล และชั้นส่งผ่าน อิเล็กตรอนทำให้เกิดการกักพาหะขึ้นที่บริเวณรอยต่อทำให้มีโอกาสที่พาหะจะรวมตัวเกิดเป็นเอก ซิตอนที่บริเวณใกล้เคียงกับรอยต่อแทนที่จะไปรวมตัวที่บริเวณใกล้ขั้วไฟฟ้าเช่นเดียวกับที่เกิดใน OLED ที่มีโครงสร้างแบบชั้นเดียว เมื่อพิจารณาระดับพลังงานจากรูปที่ 2.18(ข) พบว่าระดับ HOMO ของ HTL อยู่สูงกว่าระดับ HOMO ของชั้น ETL เล็กน้อย ทำให้โฮลสามารถเข้าไปในชั้น ETL ได้อย่างรวดเร็ว ในขณะเดียวกันระดับ LUMO ของชั้น ELT อยู่ต่ำกว่าระดับ LUMO ของชั้น HTL อย่างมากทำให้อิเล็กตรอนถูกจำกัดให้อยู่ในชั้น ETL เนื่องจากสภาพคล่องทางไฟฟ้าของ โฮลมีค่าต่ำในชั้น ETL จึงต้องสร้างให้ความหนาแน่นของโฮลมากขึ้นเพื่อทำให้ขบวนการจับกัน ของอิเล็กตรอนกับโฮลเกิดมากขึ้น นอกจากนั้นช่องว่างจากรอยต่อออกมาต้องมีระยะทางเพียงพอ เพื่อที่จะไม่เกิดการรวมตัวขึ้นที่บริเวณใกล้ผิวรอยต่อของขั้วโลหะทำให้ OLED โครงสร้างแบบ สองชั้นมีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบชั้นเดียว [7]

โครงสร้าง OLED สามารถปรับปรุงให้เป็น 3 ชั้นใด้ โดยจะเพิ่มชั้น EML เข้าไปเพื่อให้ เป็นบริเวณที่จะเกิดการรวมตัวและเกิดการเปล่งแสงด้วยไฟฟ้า ซึ่งชั้น EML จะถูกแทรกอยู่ ระหว่างชั้น HTL กับ ETL โดยสารอินทรีย์ที่เหมาะสมจะนำมาใช้เป็นชั้น EML จะต้องมีความ กว้างช่องว่างแถบพลังงานที่สามารถปลดปล่อยแสงความยาวคลื่นที่ต้องการได้อย่างมี ประสิทธิภาพ นอกจากนี้ชั้น ETL และ HTL ควรจะมีระดับพลังงานที่เหมาะสมและมีคุณสมบัติ ในการถ่ายเทประจุได้ดี [8] โดยความหนาที่เหมาะสมของชั้น EML กวรจะเป็นความหนาที่จะทำ ให้ได้ความหนาแน่นของกระแสสูงที่สุดเมื่อทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้า เนื่องจากปริมาณแสงที่ ปลดปล่อยออกมาจาก OLED จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความหนาแน่นกระแสที่ไหลผ่านเข้า ไปในชั้น EML

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

2.3.1.1 การฉีดพาหะและการขนส่งพาหะใน OLED

การฉีดพาหะและการเคลื่อนที่ของพาหะใน OLED ใด้มีการศึกษาอย่างละเอียดโดย Kalinowski [9] ซึ่งพบว่าสารอินทรีย์ส่วนมากที่สามารถเกิดการเปล่งแสงด้วยไฟฟ้าได้ทั้งชนิดที่ เป็นสารอินทรีย์โมเลกุลขนาดเล็กและคอนจูเกทพอลิเมอร์จะมีความนำไฟฟ้าต่ำ โดยสภาพคล่อง ทางไฟฟ้าของโฮล (hole mobility) ในสารเหล่าเหล่านี้โดยทั่วไปมีค่าประมาณ 10⁻⁷ – 10⁻³ cm²/Vs ในขณะที่สภาพคล่องทางไฟฟ้าของอิเล็กตรอน (electron mobility) จะมีค่ามีค่าน้อยกว่าประมาณ 10-100 เท่า

การเคลื่อนที่ของพาหะในสารอินทรีย์มีความแตกต่างจากการเคลื่อนที่ของพาหะในสาร กึ่งตัวนำอนินทรีย์ โดยการเคลื่อนที่ของพาหะใน OLED จะพิจารณาเป็นการกระโดดของพาหะ ระหว่างสถานะโลคอล (local state) ภายในสารอินทรีย์ ในขณะที่การฉีดพาหะจะมีลักษณะ เหมือนกับการกระโดดจากสถานะดีโลคอล (delocal state) ในโลหะไปสู่สถานะโลคอลใน สารอินทรีย์ ซึ่งอัตราการเคลื่อนที่จากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่งจะมีความสัมพันธ์กับ ความแตกต่างของพลังงานทั้งสองตำแหน่งและระยะห่างระหว่างตแหน่งทั้งสอง โดยพาหะ สามารถกระ โดดไปสู่ตำแหน่งที่มีพลังงานสูงกว่าได้โดยการดูดกลืนโฟนอนที่มีพลังงาน เหมาะสมซึ่งจะลดโอกาสของการเคลื่อนที่ของพาหะไปสู่สถานะโลคอลที่มีพลังงานสูงกว่า เมื่อ พาหะได้รับพลังงานเพียงพอที่จะสามารถกระโดดได้ พาหะจะสามารถเคลื่อนที่ไปได้ระยะห่างค่า หนึ่งซึ่งเรียกว่า localization length โดยระดับพลังงานของการเคลื่อนที่แบบกระโดด ของโฮลและ อิเล็กตรอนจะอยู่บริเวณรอบแถบพลังงาน HOMO และ LUMO โดยความกว้างของแถบพลังงาน นี้สามารถพิจารณาได้จาก อันตรกริยาระหว่างโมเลกุลและระดับพลังงานของความไม่เป็นระเบียบ ของโมเลกุล

สารอินทรีย์ทั้งหมดที่ใช้ใน OLED มีคุณสมบัติเป็นฉนวนอยู่ภายใต้เงื่อนไขสนามไฟฟ้า ต่ำ (< 10⁴ V/cm) ตัวอย่างที่ได้มีการศึกษา เช่น ผลึกเดี่ยวของ anthracene มีความต้านทานอยู่ใน ระดับ 10²⁰Ω cm และเมื่อทำให้บริสุทธิ์ในสุญญากาศ (vacuum-sublimed) ฟิล์มบาง anthracene จะ มีความต้านทานอยู่ในระดับ 10¹⁵Ω cm นอกจากนี้ตัวอย่างของ π-conjugared polymer, poly(pphenylene vinylene) (PPV) มีความต้านทานอยู่ในระดับ 10¹⁶Ω cm ข้อมูลเหล่านี้เป็นผลลัพธ์ที่ แสดงให้เห็นว่าความบริสุทธิ์ของสารอินทรีย์มีผลต่อสมบัติทางไฟฟ้า

อย่างไรก็ตามการจะทำให้ความหนาแน่นของกระแสที่ไหลผ่าน OLED มีค่าสูงมากกว่า 1 A/cm² ไม่ใช่เรื่องยาก ซึ่งเป็นความจริงที่ขัดแย้งกับความเข้าใจในพื้นฐานของสารกึ่งตัวนำ อินทรีย์ ดังนั้นจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องเข้าใจว่าอะไรเป็นตัวกวบคุมทฤษฎีของการเกลื่อนที่ของ พาหะในสารกึ่งตัวนำอินทรีย์

ความเข้มของกระแสที่มีค่ามากสามารถพิจารณาได้จากการฉีดพาหะที่บริเวณรอยต่อ ระหว่างสารอินทรีย์กับขั้วไฟฟ้า และ SCLC โดยโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ของฟิล์มบาง สารอินทรีย์จะอยู่บนพื้นฐานของ HOMO และ LUMO ของแต่ละโมเลกุลซึ่งจะเกิดอันตรกริยาต่อ กันด้วยแรง vander waals และเกิดการรวมตัวเป็น valence bands และ conduction bands นอกจากนี้ยังสามารถอธิบายโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ของฟิล์มบางสารอินทรีย์ได้อย่างชัดเจน โดยใช้ ionization potential (I_P), electron affinity (Ea), charge carrier density (n_h, n_e) และ mobilities (μ_h, μ_e) ของโฮลและอิเล็กตรอน โดยค่า I_P และ Ea จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการ ฉีดพาหะ และค่าของ charge carrier densities (n_h, n_e) และ mobilities (μ_h, μ_e) ของโฮลแล ะอิเล็กตรอนจะมีความสัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ของพาหะ

เมื่อทำการพิจารณาถึง carrier density ภายในสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ซึ่งอยู่บนพื้นฐานของ การเจือปนและความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างของฟิล์มบางซึ่งมีค่าต่ำมากโดยทั่วไปจะอยู่ ประมาณ 10⁵-10¹⁰ cm⁻³ นอกจากนั้น mobility ของพาหะในสารกึ่งตัวนำอินทรีย์มีค่าต่ำประมาณ 10⁻³-10⁻⁷ cm²/Vs ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับ mobility ของพาหะในสารอนินทรีย์ซึ่งมีค่าประมาณ 1-10³ cm²/Vs พบว่าตัวเลขที่ได้จะดูเหมือนจะเป็นอุปสรรค์ต่อการประยุกต์สร้างเป็นอุปกรณ์แต่ เมื่อพิจารณาถึงความหนาของฟิล์มที่ใช้มีค่าน้อยมากจะพบว่าเมื่อทำการจ่ายความต่างศักย์ 10 V ให้กับชั้นสารอินทรีย์หนา 100 nm ค่าสนามไฟฟ้าที่ได้จะมีค่าสูงถึง 10° V/cm² ทำให้มีทางเป็นไป ได้ที่จะเหนี่ยวนำให้เกิดการฉีดพาหะและ SCLC ซึ่งจะนำไปสู่การประยุกต์สร้างอุปกรณ์จากสาร กึ่งตัวนำอินทรีย์ได้

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

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

เมื่อ m คือ effective mass ของ electron(hole)

- k คือ Boltzmann's constant
- h คือ Planck's constant
- T คือ temperature
- q กี่อ elementary charge
- $\Phi_{\scriptscriptstyle Bn}$ คือ barrier height
- V คือ applied voltage

ตัวอย่างเช่นที่รอยต่อของ Alq₃/Mg ความสูงของกำแพงศักย์มีค่าประมาณ 1.0 eV เมื่อคิด จาก Schottky emission จะไม่สามารถเกิดความหนาแน่นกระแสที่มีค่าสูงได้เมื่อมีกำแพงศักย์สูง ถึง 1 eV แต่เนื่องจากพลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นของ OLED ทั่วไปที่พบมีค่าประมาณ 0.03 eV ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่กระบวนการฉีดพาหะจะเกิดจากการทะฉุผ่านเข้าสู่สถานะ localize ซึ่ง อาจเกิดจากโครงสร้างที่บกพร่องและสิ่งเจือปนในชั้นสารอินทรีย์ดังแสดงในรูปที่ 2.19(ก)

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

$$J = \left(\frac{q^{3}V^{2}m_{0}}{8\pi\hbar\Phi_{Bn}m^{*}}\right) \exp\left(-\frac{4\left(2m^{*}\right)^{0.5}\Phi_{Bn}^{1.5}}{3\hbar qV}\right)$$
(2.2)

เมื่อ m_0 คือ free electron mass

 m^* คือ effective mass

พื้นฐานของสมการนี้จะเกิดขึ้นเมื่อทำการจ่ายสนามไฟฟ้าจนมีค่าอยู่ในระดับ 10° V/cm โดยระยะทางการทะลุผ่านประมาณมากกว่า 10 nm ซึ่งค่าที่คำนวณได้นี้ไม่ได้เป็นค่าที่แท้จริง โดย คาดว่าจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ในกรณีที่สนามไฟฟ้าระหว่างชั้นของสารอินทรีย์กับ ขั้วไฟฟ้ามีค่าสูงประมาณ 10⁷ V/cm นอกจากนั้นในทางปฏิบัติกำแพงศักย์ควรจะมีค่าต่ำกว่า ค่าประมาณถ้าต้องการใช้กลไก tunneling injection



รูปที่ 2.19 กลไกที่เป็นไปได้ในการฉีดกระแสที่บริเวณรอยต่อของสารอินทรีย์/ขั้วโลหะ (ก) การฉีดกระแสแบบ Schottky โดยทางความไม่บริสุทธิ์หรือความไม่เป็นระเบียบ ของโครงสร้าง (ข) การฉีดกระแสแบบ Fowler-Nordheim tunneling เกิดภายใต้ สนามไฟฟ้าสูงประมาณ 10°-10⁷ V/cm

ต่อไปจะอธิบายเกี่ยวกับการส่งผ่านพาหะในฟิล์มบางสารอินทรีย์ เมื่อทำการจ่าย สนามไฟฟ้าที่มีค่าน้อยกว่า 10⁴ V/cm ค่าความหนาแน่นกระแสที่ฉีค (injected current density ; n_c) จะมีค่าน้อยกว่า ความหนาแน่นประจุภายใน (intrinsic charge density ; n_c) การไหลของ กระแสสามารถอธิบายได้โดย Ohm's law เมื่อนำไปประยุกต์ใช้กับสนามไฟฟ้าที่มากกว่า 10⁵ V/cm ค่าของ n_{ci} จะมีค่ามากกว่า n_i และเกิดการ injected charge carriers จาก space charges ใกล้ๆ กับรอยต่อระหว่างสารอินทรีย์กับขั้วไฟฟ้าเนื่องจาก carrier mobility มีค่าต่ำแสดงในรูปที่ 2.20 ที่ เป็นเช่นนี้เนื่องจากสนามไฟฟ้าภายนอกสามารถเปลี่ยนแปลงได้โดย space charge โดยความ หนาแน่นของกระแส (J) ควบคุมได้โดย SCLC สามารถอธิบายได้โดย

$$J = \frac{9\varepsilon_0 \mu V^2}{8L^3} \tag{2.3}$$

เมื่อ є คือ ค่าคงที่ใดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (relative dielectric constant)

 ε_0 คือ ค่าคงที่ใดอิเล็กตริก (dielectric constant)

L คือ ความหนาของชั้นสาร



รูปที่ 2.20 (ก) แผนภาพของ SCLC ที่เกิดจากสนามไฟฟ้าภายนอก (V/d) บวกกับสนามไฟฟ้า ภายใน (E_{int}) เหนี่ยวนำให้เกิดการฉีดของประจุพาหะที่มากขึ้นเป็นสิ่งสำคัญที่จะทำให้ ได้ค่าความหนาแน่นกระแสสูง โดยสนามไฟฟ้าทั้งหมด E_{total} = V/d + E_{int} มีอิทธิพล อย่างมากต่อการไหลของกระแส เมื่อให้สัญลักษณ์วงกลมเปิด (O) แทน exceed holes และวงกลมปิด (•) แทน exceed electrons (ข) กราฟเปรียบเทียบของความหนาแน่น กระแสกับความต่างศักย์ (J-V) ของ ohmic current ที่แสดงด้วยเส้นประ (----) และ SCLC ที่แสดงโดยเส้นทึบ (------) โดยกรอบสี่เหลี่ยมจะแสดงก่าของความหนาแน่น กระแสที่สามารถนำใช้งานได้

ปรากฏการณ์นี้ไม่อยู่ภายใต้ electrostatic equilibrium แต่อยู่ภายใต้ dynamic charge equilibrium เมื่ออุปกรณ์อยู่ภายใต้งบวนการทำงาน ประจุทั้งหมดจะถูกสมมุติให้มี space charges และประจุไม่มีความเป็นกลางในฟิล์มสารอินทรีย์ ดังนั้นสามารถประมาณความเป็นไปได้ของ current density ในฟิล์มบางสารอินทรีย์ โดยการแทนค่า mobility $\mu = 1 - 10^{-6} cm^2 / Vs$, sample thickness L=100 nm และ applied voltage V=0.01-20V พบว่าทำให้ได้ความหนาแน่นกระแสที่มี ค่าสูงมาก จากรูปที่ 2.20(ข) เปรียบเทียบระหว่าง ohmics current และ SCLC พบว่าสามารถทำให้ ความหนาแน่นกระแสมีค่าตั้งแต่ 1 mA/cm² ถึง 1 A/cm² โดยใช้ความต่างศักย์เพียงแค่ 10 V ถ้า สภาพคล่องของพาหะมีค่ามากกว่า 10⁻⁴ cm²/Vs

อีกตัวอย่างหนึ่งที่ได้มีศึกษาการไหลของกระแสของโฮลและอิเล็กตรอนที่ขึ้นอยู่กับ SCLC คือ P. W. M. Blom และคณะ [10] ได้ทำการศึกษา OLED โครงสร้าง ITO/PPV/Au แสดงผลของความหนาแน่นกระแส (J) กับความต่างศักย์ (V) ที่ขึ้นอยู่กับความหนาของชั้น สารอินทรีย์ (L) ดังรูปที่ 2.21 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าความหนาแน่นกระแส (J) เปลี่ยนแปลงตาม ก่าความหนาของชั้นสารอินทรีย์ (L) ตามสมการที่ (2.3)



ร**ูปที่ 2.21** ความหนาแน่นกระแส (J) กับความต่างศักย์ (V) ที่ขึ้นอยู่กับความหนาของชั้น สารอินทรีย์ (L)

ถึงแม้ว่าฟิล์มบางสารอินทรีย์จะมีคุณสมบัติเป็นฉนวนแต่โดยการจ่ายความต่างศักย์ 10 V ให้กับฟิล์มบางสารอินทรีย์ที่มีความหนา 100 nm จะสามารถทำให้เกิดสนามไฟฟ้าประมาณ 10° V/cm ซึ่งมีค่าสูงพอที่ SCLC จะยอมให้เกิดการฉีดกระแสอย่างต่อเนื่องเข้าสู่ชั้นสารอินทรีย์ได้ ในทางปฏิบัติ มีผลทำให้ได้ความหนาแน่นกระแสตั่งแต่ 1 mA/cm² ถึง 1 A/cm² ทำให้สามารถนำ ฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ไปสร้างเป็นอุปกรณ์ได้

2.3.1.2 การรวมตัวของพาหะและการปลดปล่อยแสง

เมื่อโฮลและอิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากขั้วไฟฟ้ามายังบริเวณชั้นสารอินทรีย์เปล่งแสง จะเกิด การรวมตัวของคู่อิเล็กตรอนโฮลเกิดเป็นเอกซิตอนซึ่งสถานะของเอกซิตอนจะแบ่งได้ออกเป็น 2 แบบ คือ สถานะซิงเกรต (singlet state) และ สถานะทริปเปรต (tripet state) แสดงดังรูป 2.22 ซึ่ง โอกาสของการเกิดเอกซิตอนแบบซิงเกรตต่อแบบทริปเปรตจะเป็น 1:3 สามารถเขียนดังสมการ

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



รูปที่ 2.23 (ก) เอกซิตอนแบบซิงเกรตที่รวมตัวกันแล้วเกิดการเปล่งแสง (ข) เอกซิตอนแบบทริปเปรตที่รวมตัวกันแล้วไม่เกิดการเปล่งแสง

โดยเอกซิตอนที่จะเกิดการเปล่งแสงแบบฟลูออเรสเซนซ์ได้จะต้องเป็นเอกซิตอนแบบซิง เกรตเท่านั้น ในขณะที่เอกซิตอนแบบทริปเปรตจะเกิดการรวมตัวแบบไม่ปลดปล่อยแสงซึ่งอาจ เกิดในรูปของความร้อน หรือการสั่นของโมเลกุลแทน หรืออาจเกิดการรวมตัวเป็นซิงเกรตแล้ว ปลดปล่อยแสงแบบฟอสโพเรสเซนซ์ (Phosphorescent) แสดงในรูป 2.23 โดยค่าของความยาว กลื่นแสงที่สามารถปลดปล่อยออกมาจากปรากฏการณ์การเปล่งแสงด้วยไฟฟ้าจะมีความสัมพันธ์ กับความกว้างของช่องว่างแถบพลังงานของตัวสารที่เกิดการเปล่งแสงด้วยความสัมพันธ์

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

เมื่อ λ คือ ความยาวคลื่นแสงที่ปลดปล่อยมาจากสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ (นาโนเมตร) E_g คือ ความกว้างช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ (อิเล็กตรอนโวลต์)

2.3.1.3 การประมาณค่าประสิทธิภาพควอนตัมภายในและภายนอก

รูปที่ 2.24 แสดงกระบวนการพื้นฐานของการรวมตัวของพาหะเริ่มจากการรวมตัวกันของ โฮลและอิเล็กตรอน และจบลงด้วยการที่มีแสงเปล่งออกมา โดยประสิทธิภาพภายในและ ประสิทธิภาพภายนอกนั้นเกี่ยวข้องกันด้วย factor *ๆ_{ext}* ซึ่งสามารถประมาณได้โดยพิจารณาดัชนี หักเห (refractive index ; n) ของชั้นสารอินทรีย์เปล่งแสง ดังสมการ

$$\eta_{ext} = \frac{1}{2n^2} \tag{2.5}$$

เมื่อ n คือ ค่าดัชนีหักเหของชั้นสารอินทรีย์



รูปที่ 2.24 แผนภาพกระบวนการพื้นฐานของการเปล่งแสงด้วยไฟฟ้าใน OLED

เมื่อให้คำจำกัดความของ external EL quantum efficiency $\eta_{\phi}(ext)$ คือ เป็นอัตราส่วน ของจำนวนของ emitter photons ที่ออกมาภายนอกอุปกรณ์ กับจำนวนของ charge carrier ที่ถูกฉีด เข้าไปในอุปกรณ์ สำหรับ internal EL quantum efficiency η_{ϕ} ให้คำจำกัดความเป็นอัตราส่วนของ photons ที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์กับจำนวนของ charge carrier ที่ถูกฉีดเข้าไปดังนั้น $\eta_{\phi}(ext)$ คือ

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

ແລະ

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

โดยให้ η_{\star}

γ

คือ charge-balance factory

คือ internal quantum efficiency

- η_r คือ efficiency ของ production for singlet excitons
- ϕ_f คือ quantum efficiency ของ fluorescence

โดยให้กำจำกัดความของ charge-balance factory γ คือ

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



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

ร**ูปที่ 2.25** การไหลของกระแสในการฉีคและการขนส่งโฮลและอิเล็กตรอนในชั้นสารอินทรีย์ J_hและ J_e เป็นความหนาแน่นกระแสสุทธิของโฮลและอิเล็กตรอนตามลำคับ J_e คือ ส่วนประกอบของ recombination current density J_b' และ J_e' คือความหนาแน่นกระแส ของโฮลและอิเล็กตรอนที่ไม่ได้เกิดการ recombination ตามลำคับ [9]

จำนวนของโฮลและอิเล็กตรอนที่ถูกฉีดเข้ามาจากแอโนดและแคโทดให้เป็น J_h และ J_e ตามลำดับ จำนวนของโฮลที่ข้ามทะลุชั้นสารอินทรีย์โดยไม่มีการ recombination กับอิเล็กตรอน และจำนวนของอิเล็กตรอนที่ข้ามทะลุผ่านชั้นสารอินทรีย์โดยไม่มีการ recombination กับโฮลให้ เป็น J_h' และ J_e' ตามลำดับ ดังนั้นกระแสในชั้นสารอินทรีย์จะสามารถเขียนได้ดังสมการ

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

ແລະ

$$J_{r} = J_{h} - J_{h'} = J_{e} - J_{e'}$$
(2.10)

แม้ว่าจะไม่มีวิธีการวัดโดยตรงที่จะประมาณค่า J_r แต่สามารถอธิบายค่า J_r โดยอาศัย พื้นฐานการตรวจสอบบริเวณของ charge carrier recombination

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

$$\eta_E = \frac{\eta_{\phi} \varepsilon_P}{eV} \tag{2.11}$$

เมื่อ \mathcal{E}_{p} คือ average photon energy of emitter light

V คือ applied voltage

ดังนั้น applied voltage จะเป็นเพียงตัวแสดงการเปลี่ยนแปลงของ energy conversion efficiency เท่านั้น

จากที่ได้ทำการพิจารณาถึงความสัมพันธ์ที่ได้กล่าวมาแล้วขั้นต้น ทำให้ได้กุญแจที่สำคัญ 5 ประการ ซึ่งทำให้ OLED มีประสิทธิภาพสูงสุดดังนี้

1. ทำให้ค่าของ charge-balance factor $\gamma = 1.0$

- 2. การทำโครงสร้างแบบ multilayer ทำให้ได้ค่า γ เข้าใกล้ 1.0 มากขึ้น
- ล่าสูงสุดในการเกิดเอกซิตอนแบบซิงเกรตมีก่าประมาณ 25% หรือ 40% เมื่อทำการ รวมการเกิดการสลายตัวของเอกซิตอนแบบทริปเปรตสองตัวเกิดเป็นซิงเกรต ดังนั้น จึงกวรใช้ประโยชน์จากทริปเปรตเอกซิตอนด้วย
- 4. การใช้สาร fluorescent molecule ร่วมกันหรือทำการเจือกันจะทำให้ค่าของ quantum efficiency มีค่าสูง เนื่องจากโดยคุณสมบัติของโมเลกุลจะมี concentration น้อย การเจือ เพียงเล็กน้อยของจำนวนสารที่มี highly fluorescent molecule เข้าไปใน host organic layer จะทำให้ได้ประสิทธิภาพสูงขึ้น
- 5. ควรจะเลือกให้ barrier ในการฉีดพาหะระหว่างขั้วไฟฟ้ากับชั้นสารอินทรีย์มีค่าน้อย

2.3.2 การออกแบบโครงสร้าง OLED แบบหลายชั้น

ที่ผ่านมาการศึกษาสารอินทรีย์โครงสร้างแบบหลายชั้นแสดงให้เห็นว่าสามารถปรับปรุง ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ OLED ได้เป็นอย่างดี ความสำคัญส่วนใหญ่ของโครงสร้างแบบหลาย ชั้นที่ได้รับการยอมรับเนื่องจากสามารถกัก charge carriers ให้อยู่ภายในชั้นเปล่งแสงได้และทำให้ เกิดความสมดุลของ carrier injection และ transport รูปที่ 2.26(ก) แสดงโครงสร้างพื้นฐานของ OLED ทั้ง 3 แบบ คือ Single Hetero-H structure (SH-H), Single Hetero-E structure (SH-E) และ Double Hetero structure (DH)

ในตอนแรกจะให้ความสำคัญกับการศึกษาโครงสร้างแบบพื้นฐานที่เป็นสารอินทรีย์สอง ชั้นก่อน ซึ่งประกอบไปด้วยชั้น HTL และ ETL โดยการเปล่งแสงจะสามารถเกิดได้จากทั้งสองชั้น ขึ้นกับระดับพลังงานที่รอยต่อของชั้น HTL และ ETL หลังจากนั้นก็ได้มีการปรับปรุงโครงสร้าง ของ OLED เพื่อให้ได้ก่าความสว่างและความทนทานของ OLED มีก่าสูงขึ้น โดยการปรับปรุงชั้น ของสารอินทรีย์เป็นแบบ 4 หรือ 5 ชั้น สำหรับโครงสร้าง SH-H ถูกเสนอโดย Tang และ Vanslyke โดยจะมี carrier recombination เกิดขึ้นภายในชั้น ETL ซึ่ง ETL สามารถรับโฮลที่ฉีดเข้า มาจากชั้น HTL ได้ ดังนั้นชั้น ETL จะทำหน้าที่สองอย่างคือ เป็นชั้นเปล่งแสงและชั้นขนส่ง อิเล็กตรอน ซึ่งในโครงสร้างแบบ SH-E ก็ทำหน้าที่กล้ายกันเพียงทำหน้าที่กลับกันเท่านั้น ซึ่ง HTL จะทำหน้าที่ได้สองอย่างคือเป็นทั้งชั้นเปล่งแสงและชั้นขนส่งโฮล และเมื่อทำการแยกชั้น เปล่งแสงออกจากชั้นอื่นก็จะกลายเป็นโครงสร้างแบบ DH



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

ซึ่งกุญแจสำคัญที่จำเป็นต้องให้ความสำคัญในการศึกษาโครงสร้างแบบหลายชั้น นอกจากจะให้เป็นชั้น HTL หรือ ETL แล้วยังใช้ทำหน้าที่ในการ block โฮลหรืออิเล็กตรอน เพื่อให้เกิดการรวมตัวกันของพาหะที่มีประสิทธิภาพสูงยิ่งขึ้นใกล้บริเวณรอยต่อของ HTL/ETL โดยที่ recombination region ของโครงสร้างแบบหลายชั้นเป็นบริเวณที่มีค่าจำกัดเป็นบริเวณที่ แคบมากๆโดยทั่วไปน้อยกว่า 10 nm ใกล้บริเวณรอยต่อของ HTL/ETL จากการคาคคะเนการ สะสมของโฮลหรืออิเล็กตรอนที่บริเวณรอยต่อจะช่วยให้เกิดความเป็นไปได้ที่จะเกิดการรวมตัว กันสูงขึ้นซึ่งตรงกันข้ามกับอุปกรณ์แบบชั้นเดียว recombination region จะกว้างกว่ามากมากกว่า 50-100 nm ทำให้การรวมตัวกันของพาหะเป็นไปได้น้อยกว่า

จากความสำคัญของโครงสร้างสารอินทรีย์แบบหลายชั้นที่ได้กล่าวไปแล้ว ทำให้สามารถ รักษา molecular excitons จากการสลายเข้าไปในชั้นขั้วไฟฟ้าได้ ซึ่งถ้าบริเวณที่เกิด excited molecules ใกล้กับขั้วโลหะน้อยกว่า 20 nm จะไม่เกิดการเปล่งแสงขึ้นเนื่องจากพลังงานจะถูก ถ่ายเทไปยังขั้วโลหะเกิดขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ดังนั้นความหนา 50-70 nm ของ HTL และ ETL จะ สามารถป้องกันการสูญเสียพลังงานของ molecular excitons อย่างมีประสิทธิภาพ บนพื้นฐานของ 3 โครงสร้าง OLED พื้นฐานจะสามารถพัฒนามาเป็นโครงสร้างแบบ หลายชั้นได้ใหม่เป็น MH 1-3 ซึ่งโครงสร้างที่ได้มีการเสนอมาจะสามารถสรุปในรูปที่ 2.26(ข) โครงสร้าง MH-1 และ MH-2 ได้มีการปรับเป็น double HTLs และ ETLs ซึ่งจุดประสงค์ของ double layers คือการแบ่งแยกการฉีดพาหะจากขั้วไฟฟ้าและการขนส่งพาหะ ซึ่งสรุปเป็นความ ต้องการหลักๆของ HTL ควรจะเป็นดังนี้

- HTL ควรจะมี barrier น้อยๆ เพื่อที่การฉีดโฮลจากขั้วแอโนดจะเป็นไปโดยง่ายเพื่อทำ ให้เกิด low injection barrier ระหว่างชั้นทั้งสอง I_p ของ HTL ควรจะเหมาะสมกับ ขั้วแอโนดโดยทั้วไปจะใช้ ITO ซึ่งมี I_p = 5.0 eV HTL ควรจะมีก่าเหมือนกัน
- HTL สามารถขนส่งโฮลด้วย low driving voltage มีค่า mobility ของโฮลสูงมากกว่า 10⁻³ cm²/Vs จะดีมาก
- HTL ที่สามารถ block การทะลุผ่านเข้ามาของอิเล็กตรอนจาก ETL ได้ซึ่ง HTL ที่มี Ea น้อยๆเป็นที่ต้องการมาก
- HTL ควรจะมี exciton energy มากกว่า ETL เพื่อที่จะป้องกันและต่อต้านการเคลื่อนที่ ของ exiton ทำให้มีประสิทธิภาพในการเปล่งแสงมากขึ้น

บนพื้นฐานของความต้องการทั้งหมดทำให้ยอมรับได้อย่างง่ายว่าเป็นสิ่งที่ยากมากที่จะทำ ให้ได้ทุกความต้องการใน HTL ชั้นเดียว โดยเฉพาะความต้องการในข้อ 1 มันไปด้วยกันไม่ได้กับ ความต้องการในข้อที่ 4 ซึ่งเป็นผลลัพธ์ในการสร้าง double HTLs ในลักษณะที่คล้ายกันทำให้ต้อง ใช้ double ETL เป็นสิ่งที่จำเป็นในการปรับปรุงประสิทธิภาพของ OLED [9]

2.3.3 หน้าที่และตัวอย่างสารอินทรีย์ที่ใช้ใน OLED

โคยจะอธิบายและยกตัวอย่างสารแต่ละชั้นของใคโอคเปล่งแสงสารอินทรีย์โครงสร้าง แบบหลายชั้นคังรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 ใดโอดเปล่งแสงสารอินทรีย์โครงสร้างแบบหลายชั้น

2.3.3.1 แผ่นฐานรองรับ (Substrate)

ทำหน้าที่เป็นชั้นสำหรับสร้างสารอินทรีย์ในชั้นต่างๆ ของ OLED และทำหน้าที่ป้องกัน ชั้นของสารอินทรีย์จากความชื้นและอากาศ ซึ่งเป็นผลทำให้ OLED เสื่อมสภาพลงได้วัสดุที่ใช้ทำ จากกระจกหรือพลาสติก (ในกรณีที่จะทำจอแบบโด้งงอได้) ซึ่งจะต้องมีค่าความทะลุผ่านของแสง สูง ในกรณีที่จะทำให้ชั้นเปล่งแสงสารอินทรีย์เปล่งแสงทะลุผ่านแผ่นฐานรองรับออกมา แต่ใน กรณีที่มีการเปล่งแสงออกมาจากด้านบนของแผ่นฐานรองรับอาจใช้ซิลิกอนสำหรับอุปกรณ์ เปล่งแสงขนาดเล็ก

2.3.3.2 ขั้วไฟฟ้าแอโนด (Anode)

ทำหน้าที่จ่ายประจุบวกโฮลเข้าไปยังชั้นสารอินทรีย์ ซึ่งวัสดุที่จะนำมาใช้ทำขั้วไฟฟ้า แอโนดจะต้องมีคุณสมบัติที่สำคัญคือ มีฟังก์ชันงาน Φ_A สูงดังแสดงในรูปที่ 2.28 รวมทั้งจะต้อง เป็นฟิล์มบางที่มีความโปร่งแสงสูงในย่านความยาวคลื่นแสงที่ตามองเห็น มีความด้านทานไฟฟ้า ต่ำ นำไฟฟ้าได้ดี สารส่วนใหญ่ที่นิยมนำมาใช้ทำเป็นขั้วไฟฟ้าแอโนดของ OLED คือ ITO เพราะมี คุณสมบัติต่างๆ ดังกล่าวข้างต้น ซึ่งมีฟังก์ชันงาน $\Phi_A \sim 4.5 \text{ eV}$ และสามารถเพิ่มขึ้นไปได้อีกถึง ~ 5.1 eV ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขที่ใช้ในการทำ

2.3.3.3 ชั้นฉิดโฮล (Hole Injection Layer ; HIL)

ทำหน้าที่ควบคุมการฉีดประจุบวกโฮล ที่บริเวณรอยต่อของขั้วไฟฟ้าแอโนดและยกระดับการฉีด ประจุบวกโฮลจากขั้วไฟฟ้าแอโนด โดยที่สารอินทรีย์ในชั้นนี้จะเป็นชนิด p-type ในชั้นนี้ประจุ บวกโฮลจะมีสภาพกล่องสูงโดยสารที่ใช้ในชั้นนี้ที่พบแสดงดังรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.28 ระดับชั้นพลังงานของอุปกรณ์ใดโอคเปล่งแสงสารอินทรีย์แบบชั้นเดียว Φ_c คือ พึงก์ชันงานของขั้วไฟฟ้าแคโทคและ Φ_A คือพึงก์ชันงานของขั้วไฟฟ้าแอโนค ΔE_h และ ΔE_e คือกำแพงของการฉีคโฮลและอิเล็กตรอนตามลำคับ E_g คือแถบ ช่องว่าง (Band gap) ระหว่าง HOMO และ LUMO





รูปที่ 2.29 สารที่นิยมใช้เป็น Hole Injection Layer ใน OLED

2.3.3.4 ชั้นขนส่งโฮล (Hole Transport Layer ; HTL)

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



รูปที่ 2.30 โครงสร้างของ NPB และ TPD

2.3.3.5 ชั้นเปล่งแสง (Emitting Layer ; EML)

ทำหน้าที่เป็นชั้นเปล่งแสงเป็นชั้นที่เกิดการรวมตัวกันของอิเล็กตรอนกับโฮล เกิดการ ปลดปล่อยพลังงานแสงออกมาในชั้นนี้ และยังทำหน้าที่เป็นชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน ชั้นกักโฮลอีก ด้วยทำให้ประสิทธิภาพในการเปล่งแสงดีขึ้น โดยสารที่ใช้ในชั้นเปล่งแสงนี้จะเป็นตัวเปล่งแสงสี ต่างๆ เช่น สีเขียวนิยมใช้ Alq₃ สีแดงเป็นสารเจือสีของ DCM2, DCJTB สีน้ำเงิน DPVBi โดยสูตร โมเลกุลของสารแสดงในรูปที่ 2.31



รูปที่ 2.31 โครงสร้างของ Alq₃, DPVBi, DCJTB, DCM2

2.3.3.6 ชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน (Electron Transport Layer ; ETL)

ทำหน้าที่ส่งผ่านประจุลบอิเล็กตรอนและยังช่วยกักประจุบวกโฮลที่มาจากขั้วไฟฟ้า แอโนคให้อยู่ในบริเวณเปล่งแสงค้วย โดยสารที่ใช้ในชั้น ETL จะเป็นสารอินทรีย์ชนิด n-type มี สภาพกล่องตัวของอิเล็กตรอนสูง สารที่ใช้ส่วนใหญ่จะเป็น Alq., BAlq ดังแสดงในรูปที่ 2.32



ร**ูปที่ 2.32** โครงสร้างของ BAlq

2.3.3.7 ชั้นฉิดอิเล็กตรอน (Electron Injection Layer ; EIL)

ทำหน้าที่เป็นตัวช่วยฉีดอิเล็กตรอนจากขั้วแคโทดเข้าไปยังชั้น ETL โดยสารที่ใช้ในชั้น EIL จะเป็นสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ชนิด n-type มีก่าสภาพกล่องตัวของอิเล็กตรอนสูง มีก่า ฟังก์ชันงานต่ำมาก สารส่วนใหญ่ที่ใช้เป็น LiF, Li, Sr,Sm

2.3.3.8 ชั้นขั้วไฟฟ้าแคโทด (Cathode)

ทำหน้าที่ง่ายประจุลบอิเล็กตรอนเข้าไปยังชั้นสารอินทรีย์ ซึ่งวัสดุที่จะนำมาใช้ทำขั้ว แคโทดจะต้องมีค่าฟังก์ชันงาน Φ_c ต่ำ ดังรูปที่ 2.28 ส่วนใหญ่จะใช้ Aluminium (Al), Calcium (Ca) และ Magnesium (Mg): Silver (Ag) โดยจะใช้เป็นขั้วไฟฟ้าเพื่อป้องกันสารอินทรีย์จากการ เกิดออกซิเดชัน และยังทำหน้าที่เป็นกระจกช่วยในการสะท้อนแสงในชั้นของสารอินทรีย์ออกมา อีกด้วย

โดยที่คุณสมบัติเฉพาะตัวของแต่ละสารที่ใช้ใน OLED เช่น ค่า Glass Transition Temperature T_g, ค่าระดับพลังงานของ HOMO และ LUMO, ค่า Mobility ของโฮลและ อิเล็กตรอน 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)	$\mu_h(\mathrm{cm}^2/V s)$	$\mu_e(\mathrm{cm}^2/V s)$
CuPc		4.8^{a}	3.1ª	$\sim 10^{-3 b}$	
m-MTDATA				$1.5 \times 10^{-5} - 1.5 \times 10^{-4} c$	$1.5 \times 10^{-7} - 1.5 \times 10^{-6}$ c
TPD	65 ^d	5.6, ^{ef} 5.1 ^g	2.5 ^{ef}	$1-2 \times 10^{-3h}$	
NPB, NPD	95 ^d	5.6 ⁸		$3 \times 10^{-4 i}$	
AIq ₃	$> 170^{d}$	$5.9^{e,f}, 5.7 - 5.9^8$	$3.2^{e,f}$	2×10^{-8} ^j	1.4×10^{-6} j
Rubrene		5.4^{f}	3.2^{f}		
DPVBi	64^{k}	5.9 ¹	2.8^{1}		
PVK		5.4, ^{<i>m</i>} 6.1 ^{<i>a</i>}	$1.9^m, 1.2^a$		
PPV		5.1 ⁿ	2.5 ⁿ		
2,5-Dialkoxy-PPV		4.9 – 5.1°	2.5 - 2.8°	$5 \times 10^{-7} p,$ $10^{-10} - 10^{-9} q$	
MEH-PPV		4.9 ^r	2.8 ^r	$5 \times 10^{-7} - 5 \times 10^{-6 s}$ 2.3 × 10 ⁻⁷ - 6 × 10 ^{-6 t}	6×10^{-8} 1.2 × 10^{-5}t
m-LPPP		5.5"	2.3 ^{<i>u</i>}	$10^{-3} v$	
Polythiophenes		$5.5 - 6^{W}$	$2 - 3.5^{W}$		
PFO		5.8 ^x	2.1 ^{<i>x</i>}	$4 \times 10^{-4 y} - 8 \times 10^{-3 z}$	

2.4 ใดโอดเปล่งแสงไฮบริดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์

ในปัจจุบันไดโอคเปล่งแสงสารอินทรีย์จะได้รับความสนใจอย่างมากจากทั้งนักวิจัย และ ทางอุตสาหกรรม แต่อย่างไรก็ตามก็ยังมีปัญหาที่พบบ่อยใน OLED เช่น

- การขาดแคลนของพาหะ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอิเล็กตรอน
- สภาพคล่องของอิเล็กตรอนมีค่าต่ำในสารอินทรีย์
- การขาดเสถียรภาพทางความร้อนและทางเคมีของสารอินทรีย์
- การเสื่อมสภาพของขั้วไฟฟ้าต่อความชื้นและออกซิเจนในอากาศ

ซึ่งสาเหตุเหล่านี้มีผลกระทบโดยตรงต่อการลดลงของประสิทธิภาพ และ อายุการใช้งาน ของไดโอดเปล่งแสง งานวิจัยเกี่ยวกับป้องกันการเสื่อมสภาพของไดโอดเปล่งแสง เช่น การ เจือสารเพื่อเพิ่มพาหะในสารอินทรีย์ การใช้ฟิล์มบางหรือพอลิเมอร์บางชนิดเพื่อมาป้องกันการ เสื่อมสภาพของขั้วไฟฟ้า การจ่ายความต่างศักย์แบบกระแสสลับเพื่อยืดอายุการใช้งาน เป็นต้น หนึ่งในทางเลือกหนึ่งในการแก้ปัญหาที่พบในไดโอดเปล่งแสง คือ การใช้โครงสร้างแบบไฮบริด สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ซึ่งจะได้เสนอในหัวข้อถัดไป

2.4.1 ใดโอดเปล่งแสงโครงสร้างไฮบริดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์

หนึ่งในทางเลือกในการแก้ปัญหา การเสื่อมสภาพในไคโอคเปล่งแสงสารอินทรีย์ คือ การ นำเอาสารอนินทรีย์มาใช้ร่วมกับสารอินทรีย์ ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงจุคเค่นของสารกึ่งตัวนำอนินทรีย์ เช่น

- การมีจำนวนอิเล็กตรอนมาก และ สภาพคล่องของอิเล็กตรอนสูง
- การมีเสถียรภาพทางเคมีและความร้อนที่ดี
- การมีเสถียรภาพต่อความชื้นและออกซิเจนในอากาศ

จะเห็นได้ว่าสารอนินทรีย์มีคุณสมบัติที่จะสามารถทดแทนข้อด้อยของสารอินทรีย์ที่พบ ในไดโอดเปล่งแสงดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะเพิ่มประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของ ไดโอดเปล่งแสงสารอินทรีย์โดยการนำชั้นสารอนินทรีย์มารวมในโครงสร้างร่วมกับชั้น สารอินทรีย์โดยให้สารอินทรีย์ทำหน้าที่เป็นตัวส่งผ่านโฮลเนื่องจากมีคุณสมบัติที่เกี่ยวกับโฮลที่ดี และสารอนินทรีย์เป็นตัวส่งผ่านด้านอิเล็กตรอนเนื่องจากมีสมบัติเกี่ยวกับอิเล็กตรอนที่ดี โดย ไดโอดเปล่งแสงที่รวมเอาจุดเด่นของทั้งสารอินทรีย์ละสารอนินทรีย์เข้าด้วยกันเรียกว่า ไดโอด เปล่งแสงไฮบริดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์

นอกจากนี้การใช้สารอนินทรีย์ในโครงสร้างจะมีส่วนช่วยทำให้การเสื่อมสภาพเนื่องจาก ความชื้นและออกซิเจนในอากาศที่มีผลต่อสารอินทรีย์น้อยลงเนื่องจากเสถียรภาพของสารอนินทรีย์ ซึ่งมีผลทำให้อายุการใช้งานของไคโอคเปล่งแสงมีค่าเพิ่มขึ้นอีกด้วย

2.4.2 สนามไฟฟ้าในสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์

้สนามไฟฟ้าในสารไดอิเล็กตริกจะมีความสัมพันธ์ขึ้นกับ ความหนาของชั้นสารและ ้ ค่าคงที่ไคอิเล็กตริกของสาร เมื่อพิจารณาถึงระบบที่ประกอบด้วยสารไคอิเล็กตริกที่แตกต่างกัน สองชนิดซึ่งมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่ต่างกันเป็น ${\cal E}_i$ และ ${\cal E}_p$ รวมทั้งมีความหนาที่ต่างกันเป็น d_i และ d_p โดยระบบถูกจ่ายความต่างศักย์มีค่าเท่ากับ $_{
m bias}$ จะพบว่าค่าสนามไฟฟ้าในแต่ละชั้น ้จะมีค่าไม่เท่ากันซึ่งสนามไฟฟ้าในเนื้อสารแต่ละชั้นจะสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$E_{p} = \frac{\varepsilon_{i}}{\varepsilon_{i}d_{p} + \varepsilon_{p}d_{i}}V_{bias}$$
(2.12)

เมื่อ E_p คือ สนามไฟฟ้าในชั้น P ${\cal E}_i$ และ ${\cal E}_p$ คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสารในชั้น I และชั้น P ตามถำดับ d_i และ d_p คือ ความหนาของชั้น I และ P ตามลำคับ

คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมชั้นสาร V_{hias}

2.5 สมบัติสารกึ่งตัวนำอนินทรีย์ซิงค์ซีลี่ในด์

สารกึ่งตัวนำซิงค์ซีลีไนด์ (Zinc Selenide) เป็นสารกึ่งตัวนำกลุ่ม II-VI โครงสร้างผลึกของ สารกึ่งตัวนำซิงค์ซีลีไนด์ จะประกอบไปด้วยอะตอมของสังกะสี (Zinc) และอะตอมของซีลีเนียม (Selenium) จับตัวเป็นโครงผลึกแบบซิงค์เบลน (Zinc Blende structure) อะตอมของสังกะสีมีเลข อะตอมเท่ากับ 30 ดังนั้นการกระจายของอิเล็กตรอนในสถานะควอนตัมต่างๆคือ $1S^2 2S^2 2P^6 3S^2$ $3P^{6} 3D^{10} 4S^{2}$ และอะตอมของซิลีเนียมมีเลขอะตอมเท่ากับ 36 การกระจายของอิเล็กตรอนคือ $1S^{2}$ $2S^{2} 2P^{6} 3S^{2} 3P^{6} 3D^{10} 4S^{2} 4P^{4}$ โครงสร้างผลึกของซิงค์ซีลีไนด์ แสดงดังรูปที่ 2.33



รูปที่ 2.33 โครงสร้างการจัดเรียงตัวของสารกึ่งตัวนำซิงก์ซีลีในด์

โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนจะประกอบด้วยผลึกแบบลูกบาศก์ชนิดเฟสเซนเตอร์ (face centered cubic; fcc) 2 ผลึกที่แตกต่างกันเกิดการรวมตัวกัน ดังนั้นในหนึ่งหน่วยเซลล์ของ โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนจะมีอะตอมอยู่สองชนิด แต่ละชนิดมี 4 อะตอม ซึ่งมีตำแหน่งของ อะตอมดังนี้

> อะตอมของ Zn อยู่ที่ 000,01/21/2,1/201/2,1/21/20 อะตอมของ Se อยู่ที่ 1/41/4,1/43/43/4,3/41/43/4,3/43/41/4

บริลลันโซน (brillouin zone) ของโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนและโครงสร้าง แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำซิงค์ซีลีในค์แสคงคังรูปที่ 2.34 และ 2.35 ตามลำคับ



รูปที่ 2.34 บริลลัน โซนของ โครงผลึกแบบซิงค์เบลน



รูปที่ 2.35 โครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำซิงค์ซีลีไนค์

โครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำซิงค์ซีลีในค์คังแสคงในรูปที่ 2.35 สามารถบอก ใด้ถึงชนิคของแถบพลังงานต้องห้ามของสารกึ่งตัวนำ โคยพิจารณาจากตำแหน่งล่างสุคของแถบ ความนำและตำแหน่งบนสุคของแถบวาเลนซ์ โคยถ้าตำแหน่งล่างสุคของแถบความนำอยู่แกน เคียวกับตำแหน่งบนสุคของแถบวาเลนซ์จะเป็นชนิคแถบพลังงานต้องห้ามแบบตรง (direct band gap) แต่ถ้าตำแหน่งถ่างสุคของแถบความนำอยู่คนละแกนกับตำแหน่งบนสุคของแถบวาเลนซ์จะ เป็นชนิคแถบพลังงานต้องห้ามแบบอ้อม (indirect band gap) ซึ่งจากรูปแสคงว่าสารกึ่งตัวนำซิงค์ ซีลีในค์นั้นมีชนิคของแถบพลังงานต้องห้ามแบบตรง

สารกึ่งตัวนำซิงค์ซีลีไนค์มีช่วงการทะลุผ่านของแสงในช่วงกว้าง คือช่วงความยาวคลื่น ระหว่าง 0.6-20 ไมโครเมตร ช่วงการทะลุผ่านของแสงและการดูดกลืนแสงของซิงค์ซีลีไนด์ แสดงดังรูปที่ 2.36 และ 2.37



รูปที่ 2.36 ช่วงการทะลุผ่านของแสงของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำซิงก์ซีลีในด์

