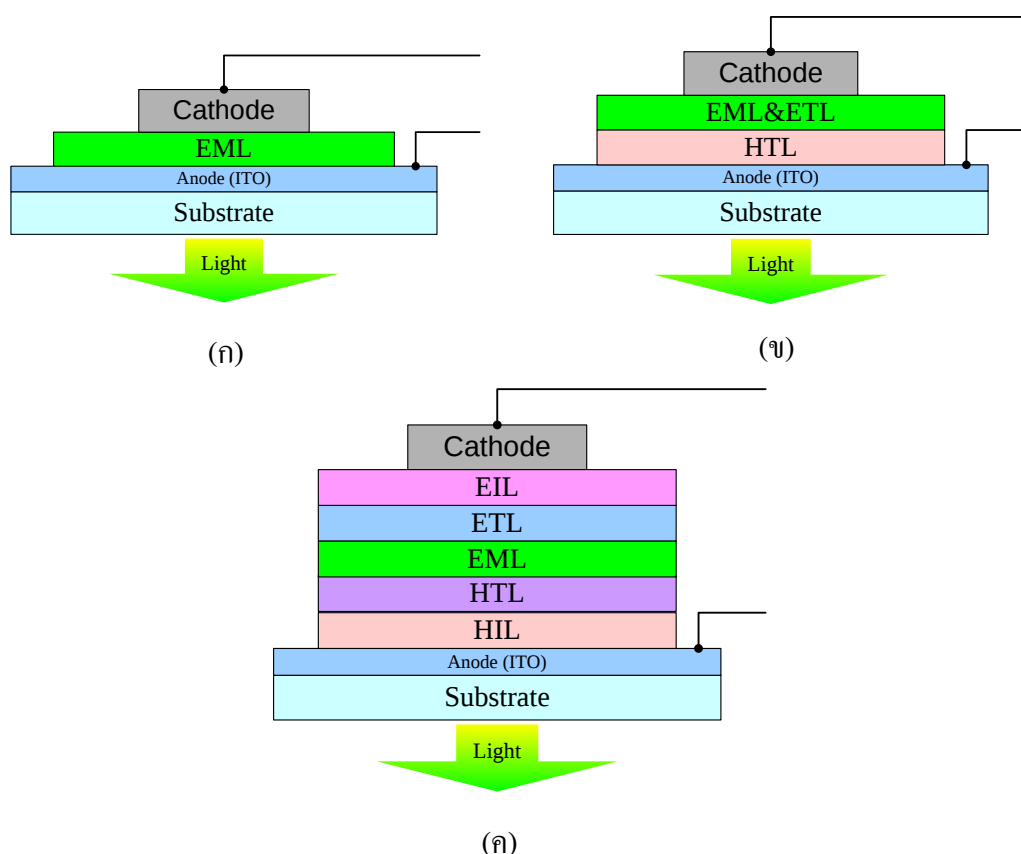


2.3 ไดโอดเปล่งแสงสารอินทรีย์ (Organic Light-Emitting Diode; OLED)

OLED เป็นอุปกรณ์เปล่งแสง (Light Emitting Device ; LEDs) ที่สร้างจากสารอินทรีย์ ทำงานโดยการให้ความต่างศักย์แก่ไดโอดจะเกิดการเปล่งแสงออกมาที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับชนิดของสารอินทรีย์ที่ใช้ และโครงสร้างของไดโอดเปล่งแสง โครงสร้างของ OLED แบบชั้นเดียวแสดงดังรูปที่ 2.16 (ก) ประกอบไปด้วยชั้นเปล่งแสง (Emitting Layer; EML) เพียงชั้นเดียว เพื่อทำการเพิ่มประสิทธิภาพของ OLED ให้สูงขึ้นจึงได้มีการพัฒนาโครงสร้างเป็นแบบสองชั้น และแบบหลายชั้นแสดงรูปที่ 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

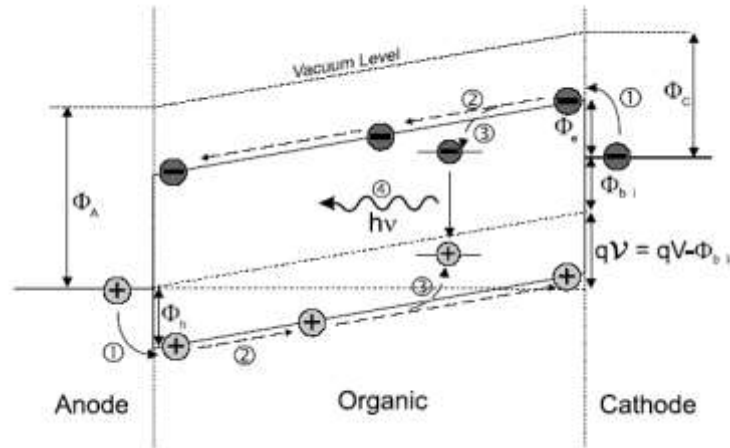
สารอินทรีย์ที่นำมาสร้างเป็น OLED มีด้วยกันสองชนิดคือ พอลิเมอร์ กับโมเลกุลขนาดเล็ก (small molecule) โดยในที่นี้จะขอลำถึงเฉพาะ OLED ที่สร้างจากสารอินทรีย์แบบโมเลกุลขนาดเล็กเท่านั้น



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

2.3.1 กระบวนการทำงานของ OLED

เมื่อทำการพิจารณาแผนภาพระดับพลังงานของ OLED โครงสร้างแบบชั้นเดียว กระบวนการเกิดอิเล็กโตรลูมิเนสเซนซ์ ของ OLED มีขั้นตอนหลักอยู่ 4 ขั้นตอนดังรูปที่ 2.17 [6]



รูปที่ 2.17 กระบวนการเกิดอิเล็กโตรลูมิเนสเซนซ์ของ OLED

เมื่อให้ Φ_A คือ ฟังก์ชันงาน(work function) ของขั้วแอโนด

Φ_C คือ ฟังก์ชันงาน ของขั้วแคโทด

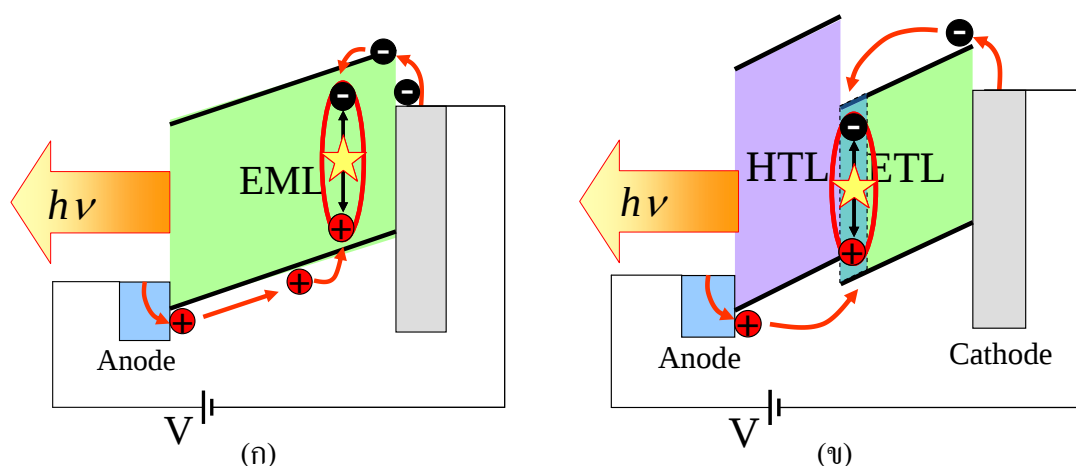
Φ_h คือ กำแพงการฉีดโฮล

Φ_e คือ กำแพงการฉีดอิเล็กตรอน

Φ_{bi} คือ built-in potential

1. การฉีดพาหะโฮลและอิเล็กตรอนจากขั้วไฟฟ้า
2. การส่งผ่านโฮลและอิเล็กตรอนในชั้นสารอินทรีย์
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 ขั้นตอนตามที่ได้อธิบายไว้ข้างต้นแต่เนื่องจากในสารอินทรีย์โฮลมีสภาพคล่องทางไฟฟ้าสูงกว่าอิเล็กตรอนประมาณ 10-100 เท่าทำให้โอกาสที่โฮลจะวิ่งเข้าไปยังขั้วแคโทดของ OLED ก็มีความเป็นไปได้สูงทำให้โอกาสที่อิเล็กตรอนกับโฮลจะเกิดการรวมตัวกันแบบเปล่งแสงก็เป็นไปได้สูงทำให้ OLED โครงสร้างแบบชั้นเดียวยังมีประสิทธิภาพต่ำอยู่ เมื่อพัฒนาเป็นโครงสร้างแบบสองชั้น ในชั้นแรกเป็นชั้นส่งผ่านโฮลและชั้นเป็นชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน ผิวนสัมผัสระหว่างชั้นทั้งสองนี้จะเป็นตำแหน่งของการรวมตัวกันของคู่อิเล็กตรอนโฮล (electron-hole pair) และเป็นผลทำให้เกิดอิเล็กโตรลูมินิเซนซ์

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

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

ความหนาของชั้นสารอินทรีย์เปล่งแสงสุดท้ายควรจะให้ความหนาต้านทานน้อยๆ ซึ่งจะทำให้ได้ความหนาแน่นของกระแสสูงเมื่อทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้า เนื่องจากแสงที่ปลดปล่อยออกมา มีความสัมพันธ์โดยตรงกับความหนาแน่นกระแส ที่จะทะลุผ่านเข้าไปในชั้นสารอินทรีย์เปล่งแสง ขึ้นอยู่กับการเพิ่มการฉีดประจุเข้าไปและประสิทธิภาพการส่งผ่านซึ่งเป็นผลทำให้เกิดการปลดปล่อยแสงออกมาที่แรงดันไฟฟ้าต่ำ

แม้ว่ามันง่ายมากที่จะทำให้เข้าใจผิดว่า OLED ทำมาจากสารอินทรีย์ที่มีกลไกการเปล่งแสงเหมือนกันกับสารอินทรีย์ P-N junction LED แต่ในรายละเอียดแล้ว LED จากสารอินทรีย์กับ OLED แตกต่างกันอย่างมาก ความแตกต่างทั้งคุณสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์และคุณสมบัติทางแสงระหว่างสารกึ่งตัวนำอินทรีย์และอนินทรีย์ และรูปแบบของการฉีดพาหะ space-charge-limited current (SCLC) และ molecular exciton เป็นกุญแจสำคัญที่จะทำให้เข้าใจกลไกของ OLED

2.3.1.1 การฉีดพาหะและการส่งผ่านพาหะใน OLED

การฉีดและการเคลื่อนที่ของประจุพาหะใน OLED ได้มีการศึกษาอย่างละเอียดโดย Kalinowski [9] สารอินทรีย์ที่สามารถเปล่งแสงด้วยไฟฟ้าส่วนมากทั้งแบบโมเลกุลขนาดเล็กและพอลิเมอร์ชนิดคอนจูเกตเป็นสารที่มีความนำไฟฟ้าต่ำ 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 ได้สามารถเคลื่อนที่ไปได้ระยะห่างตำแหน่งนั้นคือ

localization length ระดับพลังงานของการเคลื่อนที่แบบ hop ของโฮลและอิเล็กตรอนอยู่รอบๆ แถบพลังงาน HOMO และ LUMO โดยความกว้างของแถบพลังงานนี้สามารถพิจารณาได้จาก อัตราการกระหว่างโมเลกุลและระดับพลังงานของความไม่เป็นระเบียบ

สารอินทรีย์ทั้งหมดที่ใช้ใน OLED มีคุณสมบัติเป็นฉนวนอยู่ภายใต้เงื่อนไขสนามไฟฟ้าต่ำ ($< 10^4$ 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 นี่เป็นผลลัพธ์ที่ชี้ให้เห็นว่าควรระวังเรื่องความบริสุทธิ์ของสารอินทรีย์จะไม่มีประจุสุทธิถ้าไม่มีการเชื่อมทางเคมีของ doner และ acceptor molecule ใน OLED เราจะทำให้ได้ความหนาแน่นกระแสสูงมากๆ มากกว่า 1 A/cm² จะเป็นไปได้ยากมากถ้าไม่มีการเชื่อมสาร นี่เป็นความจริงในความเข้าใจในพื้นฐานของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ มันเป็นเรื่องจำเป็นที่จะทำให้เราเข้าใจการควบคุมทฤษฎีของการเคลื่อนที่ของพาหะในสารกึ่งตัวนำอินทรีย์

ความเข้มของการแสงที่มีค่ามากสามารถพิจารณาได้จากการนิคพาหะที่บริเวณรอยต่อระหว่างสารอินทรีย์กับขั้วไฟฟ้า และ SCLC โครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ของฟิล์มบางสารอินทรีย์อยู่บนพื้นฐานของ HOMO และ LUMO ของแต่ละโมเลกุลจะทำปฏิกิริยากันด้วยแรง van der 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 เมื่อเราสังเกตดูจะเห็น สิ่งที่ไม่คาดคิดว่าจะมีค่าสนามไฟฟ้าสูงถึง 10^6 V/cm² ทำให้มีทางเป็นไปได้ที่จะเหนี่ยวนำให้เกิด การฉีดพาหะและ SCLC ในตอนแรกเราสนใจพฤติกรรมของการฉีดพาหะจากขั้วไฟฟ้าเรามีสอง กลไกที่เป็นไปได้ของการฉีดประจุพาหะคือ 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

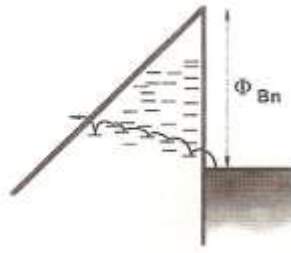
q คือ elementary charge

Φ_{Bn} คือ barrier height

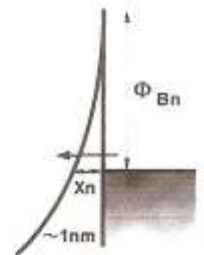
V คือ applied voltage

ตัวอย่างเช่นที่รอยต่อของ Alq₃/Mg กำแพงศักย์มีค่า 1.0 eV เมื่อคิดจาก Schottky emission เราไม่สามารถทำให้มีความหนาแน่นกระแสมากกว่านี้ได้อีกถ้ามีกำแพงศักย์สูงกว่า 1 eV พลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นของ OLED โดยทั่วไปที่พบมีค่าประมาณ 0.03 eV ความเป็นไปได้ของ injection mechanisms คือการทะลุผ่านระดับ localized เหนี่ยวนำโดยโครงสร้างที่บกพร่องและ สิ่งเจือปนต่างๆแสดงในรูปที่ 2.19 (ก) เป็นอีกสิ่งหนึ่งที่มีความเป็นไปได้ในการอธิบายการฉีด กระแสโดย Fowler-Nordheim tunneling injection แสดงในรูปที่ 2.19 (ข) การไหลของกระแส สามารถอธิบายได้โดย

(ก)



(ข)



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

รูปที่ 2.19 สองกลไกที่เป็นไปได้ในการฉีดกระแสที่บริเวณรอยต่อของสารอินทรีย์/ขั้วโลหะ

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

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

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 ระหว่างชั้นของสารอินทรีย์กับขั้วไฟฟ้า อีกอย่างหนึ่งในทางปฏิบัติกำแพงศักย์ควรจะต่ำกว่าค่าประมาณถ้าเราต้องการใช้กลไกการทะลุผ่าน

เราควรจะใช้การ inject charge carriers โดยทั้งสองกลไกที่มีความเป็นไปได้ต่อไปเราจะอธิบาย 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 อย่างไรก็ดีตาม

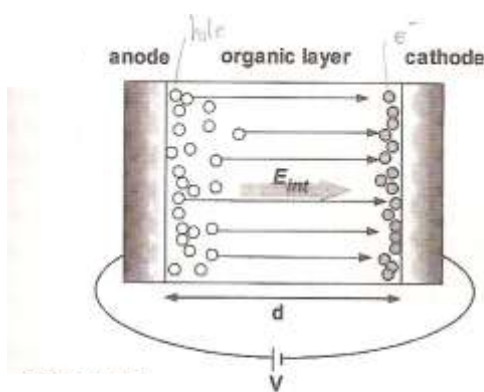
การ injected charge carriers จาก space charges ใกล้เคียง กับรอยต่อระหว่างสารอินทรีย์กับขั้วไฟฟ้า เนื่องจาก carrier mobility มีค่าต่ำแสดงในรูปที่ 2.20 ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากสนามไฟฟ้าภายนอกสามารถเปลี่ยนแปลงได้โดย space charge ความหนาแน่นของกระแส (J) ควบคุมได้โดย SCLC สามารถอธิบายได้โดย

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

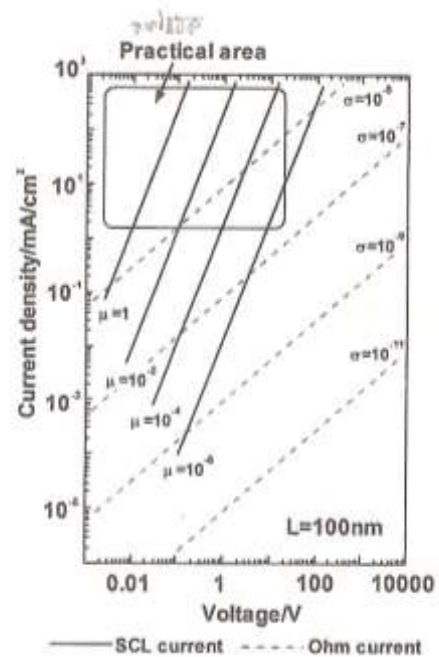
เมื่อ ϵ คือ relative dielectric constant

ϵ_0 คือ dielectric constant

L คือ sample thickness



(ก)

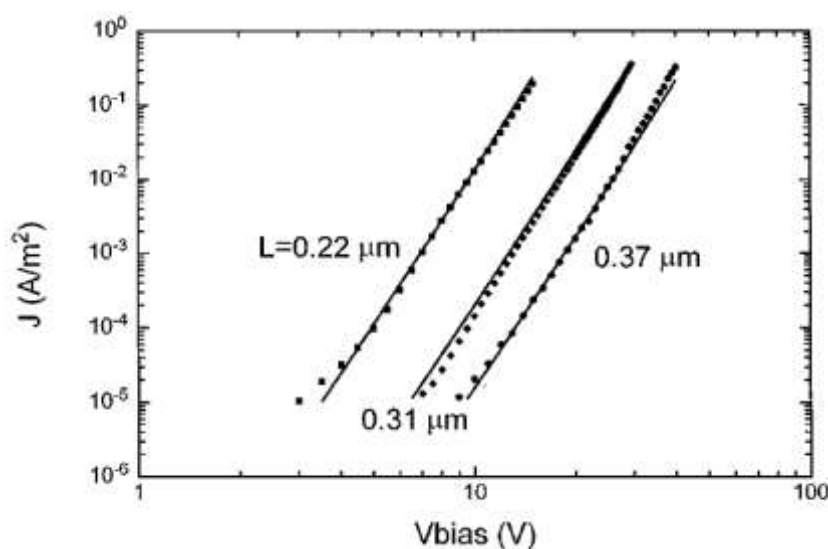


(ข)

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

ปรากฏการณ์นี้ไม่ได้อยู่ภายใต้ electrostatic equilibrium แต่อยู่ภายใต้ dynamic charge equilibrium เมื่ออุปกรณ์อยู่ภายใต้ขบวนการประจุทั้งหมดสมมติให้มี 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)

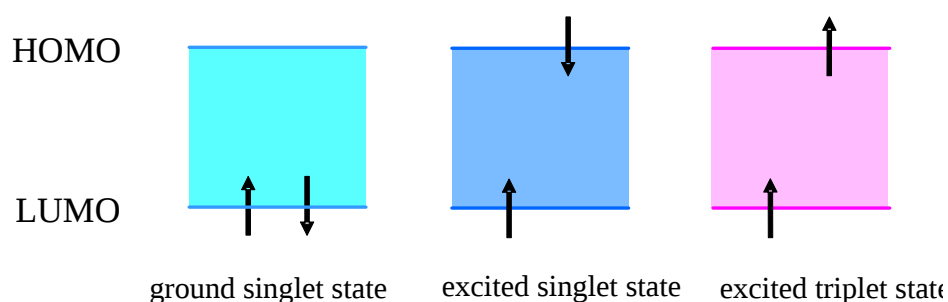


รูปที่ 2.21 ความหนาแน่นกระแส (J) กับความต่างศักย์ (V) ที่ขึ้นอยู่กับความหนาของชั้นสารอินทรีย์ (L)

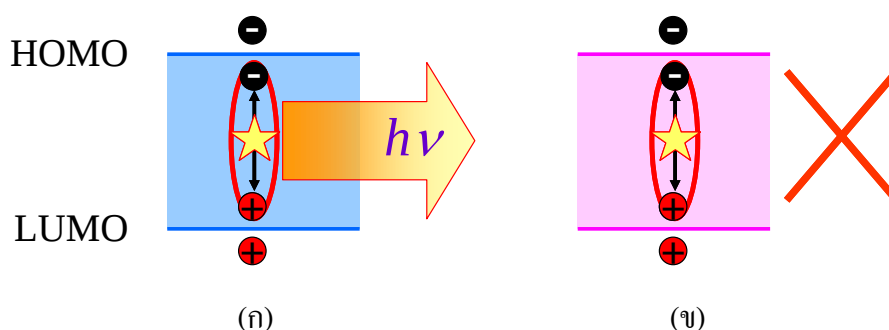
ถึงแม้ว่าฟิล์มบางสารอินทรีย์จะมีคุณสมบัติเป็นฉนวนแต่เมื่อทำการจ่ายค่าความต่างศักย์ 10 โวลต์ ให้กับความหนา 100 nm (ประมาณ 10^6 V/cm) จาก SCLC จะยอมให้เกิดการฉีดกระแสอย่างต่อเนื่องกันได้ ในทางปฏิบัติทำให้ได้ความหนาแน่นกระแสตั้งแต่ 1 mA/cm^2 ถึง 1 A/cm^2 ทำให้สามารถนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์จากฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำอินทรีย์ได้

2.3.1.2 การรวมตัวของพาหะและการปลดปล่อยแสง

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



รูปที่ 2.22 สถานะซิงเกรตและทริปเปตของเอกซิตอน



รูปที่ 2.23 (ก) เอกซิตอนแบบซิงเกรตที่รวมตัวกันแล้วเกิดการเปล่งแสง

(ข) เอกซิตอนแบบทริปเปตที่รวมตัวกันแล้วไม่เกิดการเปล่งแสง

โดยเอกซิตอนที่จะเกิดการเปล่งแสงแบบฟลูออเรสเซนส์ได้จะต้องเป็นเอกซิตอนแบบซิงเกรตเท่านั้น ในขณะที่เอกซิตอนแบบทริปเปตจะเกิดการรวมตัวแบบไม่ปลดปล่อยแสงดังรูปที่ 2.23 ซึ่งอาจเกิดในรูปของความร้อนและการสั่น หรืออาจเกิดการรวมตัวเป็นซิงเกรตแล้วปลดปล่อยแสงแบบฟอสโฟเรสเซนส์ โดยค่าของความยาวคลื่นแสงที่สามารถปลดปล่อยออกมาจากปรากฏการณ์อิเล็กโตรลูมิเนสเซนซ์จะมีความสัมพันธ์กับความกว้างของช่องว่างพลังงานของตัวสารที่เกิดการเปล่งแสงด้วยความสัมพันธ์ตามสมการดังนี้

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

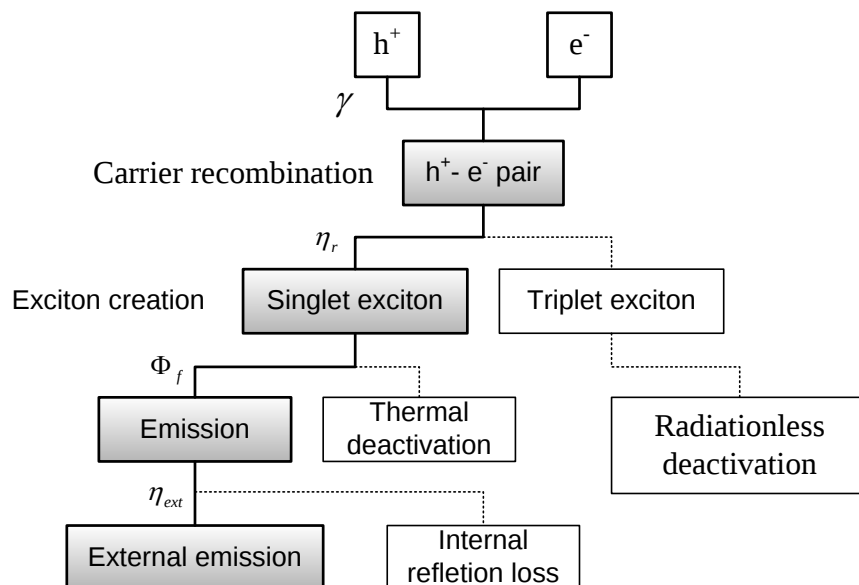
เมื่อ λ คือ ความยาวคลื่นแสงที่ปลดปล่อยมาจากสารกึ่งตัวนำอินทรีย์
 E_g คือ ความกว้างช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำอินทรีย์

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 ที่ถูกฉีดเข้าไป ดังนั้น $\eta_\phi(ext)$ คือ

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

และ

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

โดยให้ η_ϕ คือ internal quantum efficiency

γ คือ charge-balance factory

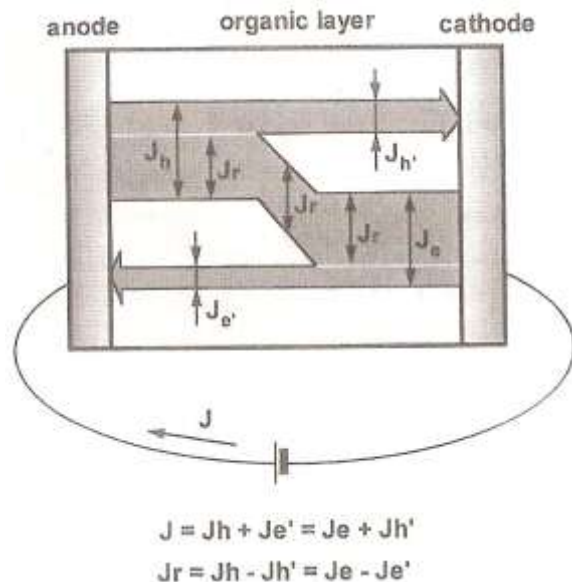
η_r คือ efficiency ของ production for singlet excitons

ϕ_f คือ quantum efficiency ของ fluorescence

โดยให้คำจำกัดความของ charge-balance factory γ คือ

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

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



รูปที่ 2.25 การไหลของกระแสในการฉีดและการขนส่งโฮลและอิเล็กตรอนในชั้นสารอินทรีย์ J_h

และ J_e เป็นความหนาแน่นกระแสสุทธิของโฮลและอิเล็กตรอนตามลำดับ J_r 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

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

เมื่อ ε_p คือ average photon energy of emitter light

V คือ applied voltage

ดังนั้น applied voltage เพียงอย่างเดียวที่จะแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่แสดงออกมาของ energy conversion efficiency

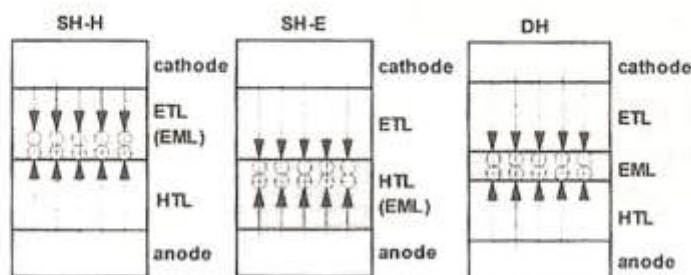
จากที่ได้ทำการพิจารณาถึงความสัมพันธ์ต่างๆจะได้กุญแจสำคัญที่ทำให้ได้ OLED ที่มีประสิทธิภาพสูงสุดดังนี้

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

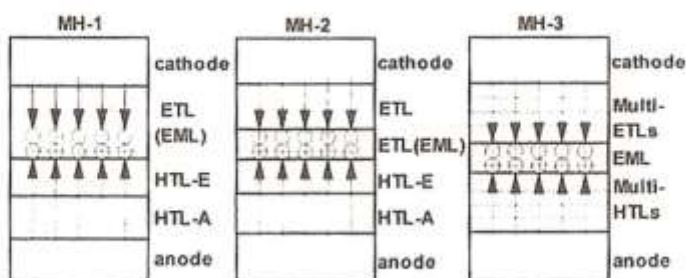
2.3.2 การออกแบบโครงสร้าง OLED แบบหลายชั้น

ที่ผ่านมามีการศึกษาสารอินทรีย์โครงสร้างแบบหลายชั้นแสดงให้เห็นว่าสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพของอุปกรณ์ 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) 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

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

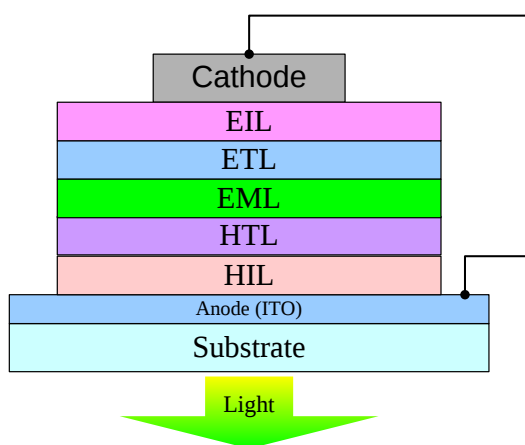
บนพื้นฐานของ 3 โครงสร้าง OLED พื้นฐานจะสามารถพัฒนามาเป็นโครงสร้างแบบหลายชั้นได้ใหม่เป็น MH 1-3 ซึ่งโครงสร้างที่ได้มีการเสนอกันมาสรุปในรูปที่ 2.26 (ข) โครงสร้าง MH-1 และ MH-2 ได้มีการปรับเป็น double HTLs และ ETLs ซึ่งจุดประสงค์ของ double layers คือการแบ่งแยกการฉีดพาหะจากขั้วไฟฟ้าและการขนส่งพาหะ ซึ่งสรุปเป็นความต้องการหลักๆ 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^{-3} cm²/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

บนพื้นฐานของความต้องการทั้งหมดมันยอมรับได้อย่างง่ายว่ามันยากมากที่จะทำให้ได้ทุกความต้องการใน HTL ชั้นเดียว โดยเฉพาะความต้องการในข้อ 1 มันไปด้วยกันไม่ได้กับความ ต้องการในข้อที่ 4 เป็นผลลัพธ์ในการสร้าง double HTLs ในลักษณะที่คล้ายกันทำให้ต้องใช้ double ETL เป็นสิ่งที่จำเป็นในการปรับปรุงประสิทธิภาพของ OLED

2.3.3 หน้าทีและตัวอย่างสารอินทรีย์ที่ใช้ใน OLED

โดยจะอธิบายและยกตัวอย่างสารอินทรีย์ที่ใช้ในแต่ละชั้นของ OLED โครงสร้างแบบหลายชั้นดังรูปที่ 2.27



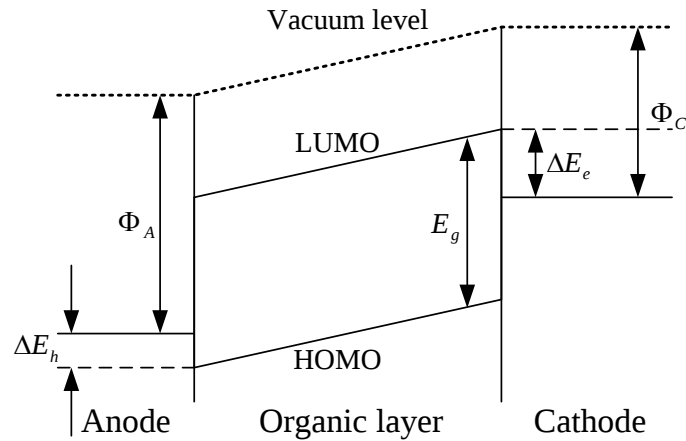
รูปที่ 2.27 OLED โครงสร้างแบบหลายชั้น

2.3.3.1 แผ่นฐานรองรับ (substrate)

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

2.3.3.2 ขั้วไฟฟ้าแอโนด (anode)

ทำหน้าที่จ่ายโฮลเข้าไปยังชั้นสารอินทรีย์ ซึ่งโลหะที่จะนำมาใช้ทำขั้วไฟฟ้าแอโนดจะต้องมีสมบัติที่สำคัญคือ มีฟังก์ชันงาน Φ_A สูงดังแสดงในรูปที่ 2.28



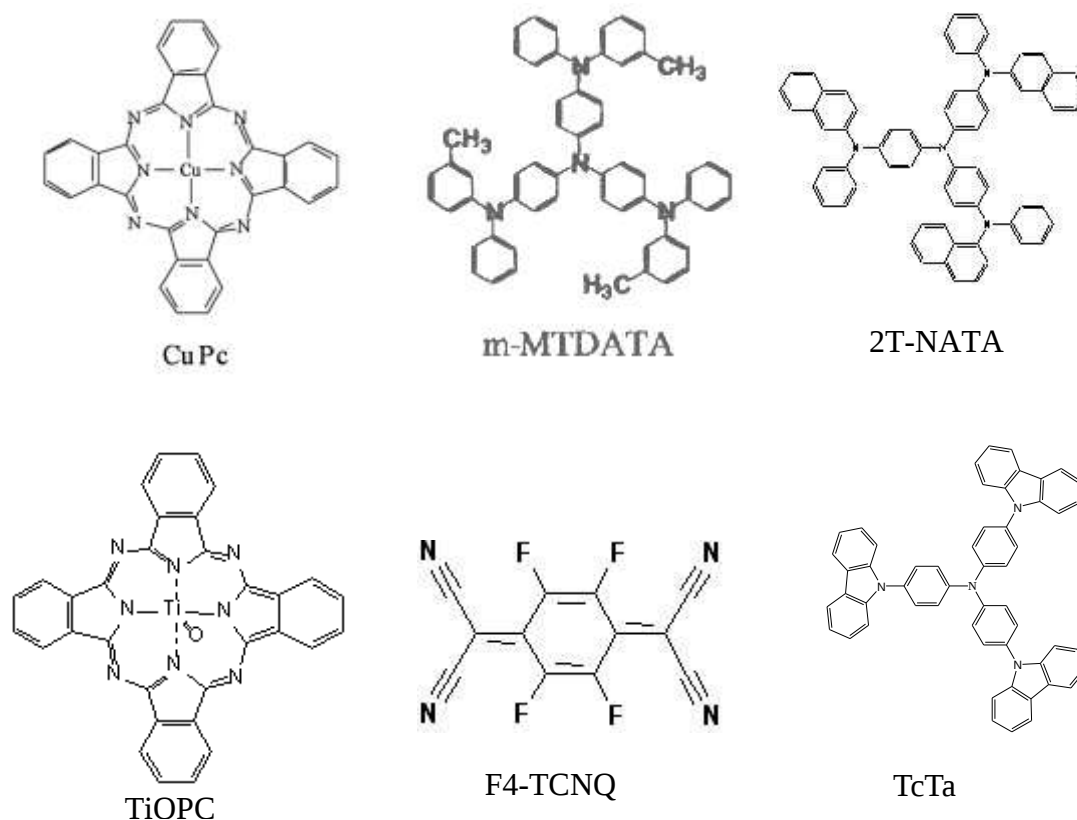
รูปที่ 2.28 ระดับชั้นพลังงานของอุปกรณ์ OLED แบบชั้นเดียว Φ_C คือ

ฟังก์ชันงานของขั้วไฟฟ้าแคโทดและ Φ_A คือฟังก์ชันงานของขั้วไฟฟ้าแอโนด ΔE_h และ ΔE_e คือค่าแพงของการฉีดโฮลและอิเล็กตรอนตามลำดับ E_g คือแถบช่องว่างพลังงานระหว่างแถบคอนดักชันและแถบเวเลนซ์

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

2.3.3.3 ชั้นฉีดโฮล (Hole Injection Layer ; HIL)

ทำหน้าที่ควบคุมการฉีดโฮล ที่บริเวณรอยต่อของขั้วไฟฟ้าแอโนดและขั้วไฟฟ้าแคโทด โดยที่สารอินทรีย์ในชั้นนี้จะเป็นชนิด p-type ในชั้นนี้โฮลจะมีสภาพคล่องสูงโดยสารที่ใช้ในชั้นนี้ที่พบแสดงดังรูปที่ 2.29

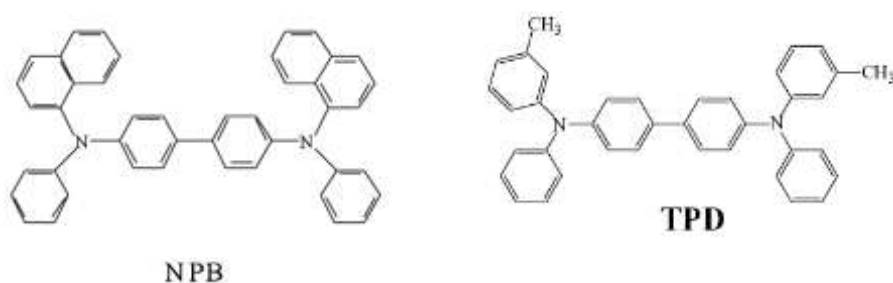


รูปที่ 2.29 สารในชั้นฉีดโฮลที่ใช้ใน OLED

2.3.3.4 ชั้นขนส่งโฮล (Hole Transport Layer ; HTL)

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

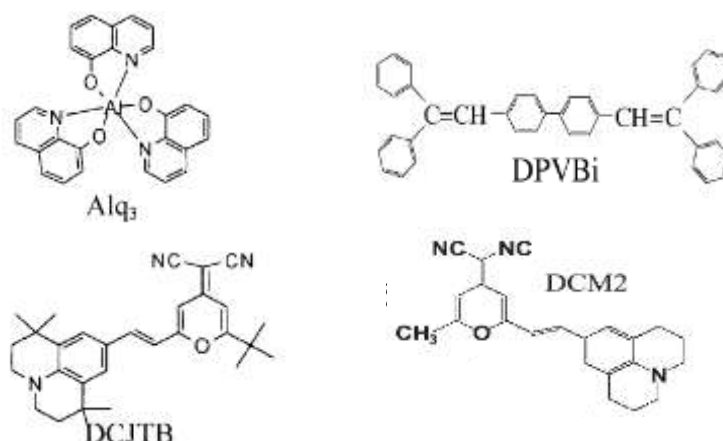
2.30



รูปที่ 2.30 โครงสร้างของ NPB และ TPD

2.3.3.5 ชั้นเปล่งแสง (Emitting Layer ; EML)

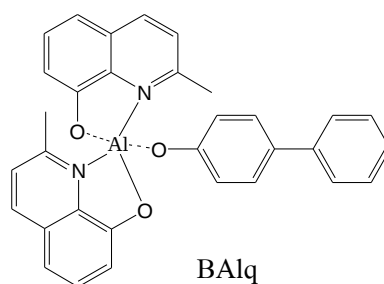
ทำหน้าที่เป็นชั้นเปล่งแสงเป็นชั้นที่เกิดการรวมตัวกันของอิเล็กตรอนกับโฮล เกิดการปลดปล่อยพลังงานแสงออกมาในชั้นนี้ และยังทำหน้าที่เป็นชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอนและชั้นกักโฮลอีกด้วยทำให้ประสิทธิภาพในการเปล่งแสงดีขึ้น โดยสารที่ใช้ในชั้นเปล่งแสงนี้จะเป็นตัวเปล่งแสงสีต่างๆ เช่น สีเขียวนิยมใช้ Alq_3 สีแดงเป็นสารเจือสีของ DCM2, DCJTb สีน้ำเงิน DPVBi แสดงโครงสร้างดังรูปที่ 2.31



รูปที่ 2.31 โครงสร้างของ Alq_3 , DPVBi, DCJTb, DCM2

2.3.3.6 ชั้นส่งผ่านอิเล็กตรอน (Electron Transport Layer ; ETL)

ทำหน้าที่ส่งผ่านอิเล็กตรอนและยังช่วยกักโฮลที่มาจากขั้วไฟฟ้าแอโนดให้อยู่ในบริเวณเปล่งแสงด้วย โดยสารที่ใช้ในชั้น ETL จะเป็นสารอินทรีย์ชนิด n-type มีสภาพคล่องตัวของอิเล็กตรอนสูง สารที่ใช้ส่วนใหญ่จะเป็น Alq_3 , BAlq แสดงโครงสร้างดังรูปที่ 2.32



รูปที่ 2.32 โครงสร้างของ BAlq

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