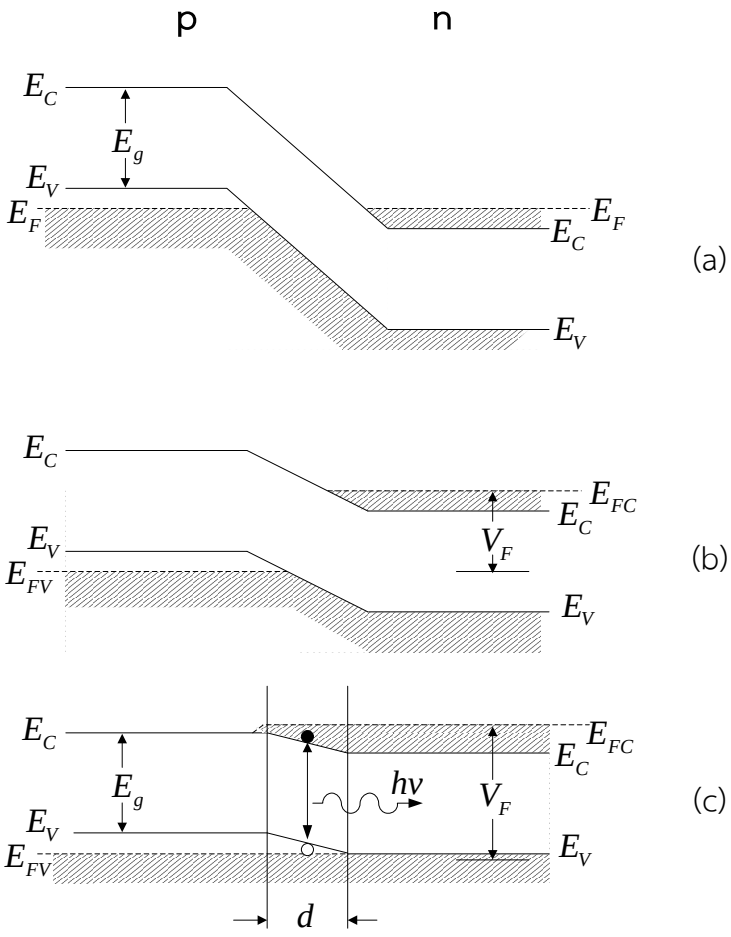
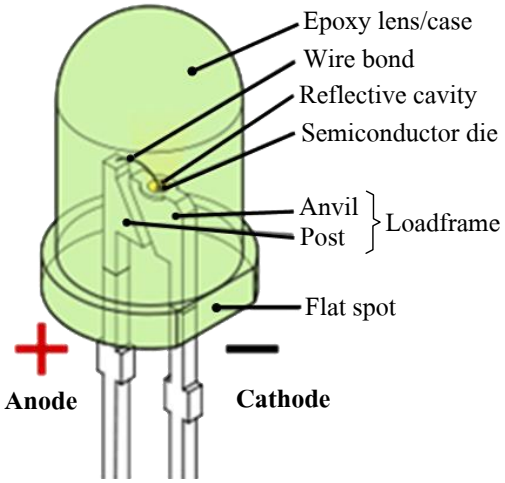
บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลอดแอลอีดี

หลอดแอลอีดีจัดเป็นสิ่งประดิษฐ์ทางออปโตอิเล็กทรอนิกส์ที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานแสงด้วยปรากฏการณ์ลูมิเนสเซนซ์ โครงสร้างของสิ่งประดิษฐ์โดยทั่วไปจะ ประกอบไปด้วยสารกึ่งตัวนำสองชนิด คือ สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและสารกึ่งตัวนำชนิดพีประกบเข้าด้วยกัน และมีผิวข้างด้านหนึ่งเรียบคล้ายกระจก เมื่อทำการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงผ่านตัว หลอดแอลอีดี โดยจ่ายไฟบวกให้ขา แอโนด (Anode: A) จ่ายไฟลบให้ขาแคโทด (Cathode: K) ทำให้อิเล็กตรอนที่สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น มีพลังงานสูงขึ้น จนสามารถวิ่งข้ามรอยต่อจากสาร กึ่งตัวนำ ชนิดเอ็น ไปรวมกับโฮลในสาร กึ่งตัวนำ ชนิดพี เกิดการเคลื่อนที่ ของอิเล็กตรอนผ่านรอยต่อพีเอ็น (PN junction) ทำให้เกิดกระแสไหล เป็นผลให้ระดับพลังงานของอิเล็กตรอนเปลี่ยนไปและคายพลังงานออกมาในรูปคลื่นแสง แสดงดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนผ่านรอยต่อพีเอ็น

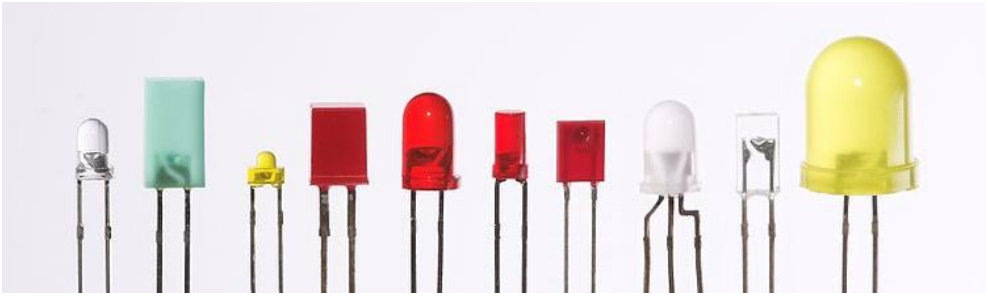


ภาพที่ 2.2 โครงสร้างหลอดแอลอีดี

สีของแสงที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่นำมาใช้ในการสร้างสิ่งประดิษฐ์ เช่น ใช้แกลเลียมฟอสไฟด์ (Gallium Phosphide: GaP) ทำให้เกิดแสงสีแดง ใช้แกลเลียมอาซีไนด์ ฟอสไฟด์ (Gallium Arswnide Phosphide: GaAsP) เกิดแสงสีเหลืองและเขียว ซึ่งโครงสร้างของหลอดแอลอีดีจะแสดงดังภาพที่ 2.2 และตารางที่ 2.1 จะสรุปสมบัติของหลอดแต่ละสี สำหรับการควบคุมปริมาณแสงสว่างจะสามารถทำได้โดยการควบคุมกระแสที่ไหลผ่านหลอด โดยกระแสที่จ่ายให้กับหลอดสูงจะทำให้หลอดมีความสว่างสูงด้วย อย่างไรก็ตามหากป้อนกระแสสูงมากไปจะทำให้บริเวณรอยต่อของสารกึ่งตัวนำเกิดความร้อนปริมาณมากจนทำให้โครงสร้างหลอดเสียหายไม่สามารถใช้งานได้อีก

ปัจจุบันหลอดแอลอีดีมีอยู่หลายรูปแบบ ซึ่งหากแบ่งชนิดของหลอดตามลักษณะของบรรจุภัณฑ์ (package) จะแบ่งได้ 2 แบบ คือ

1) แบบแลมป์ (Lamp type) เป็นหลอดแอลอีดีที่พบกันอยู่ทั่วไปมีขายื่นออกมาจากตัว อีพ็อกซี (Epoxy) 2 ขาหรือมากกว่า โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 3 มิลลิเมตรขึ้นไป บริษัทผู้ผลิตจะออกแบบให้ขับกระแสได้ไม่เกิน 50 mA แสดงให้เห็นดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 หลอดแอลอีดีแบบแลมป์

2) แบบเซอร์เฟสเมาท์ (Surface Mount Type: SMT) มีลักษณะเป็นตัวบาง ๆ เวลาประกอบต้องใช้เครื่องมือชนิดพิเศษ มีขนาดการขับกระแสตั้งแต่ 20 mA มากกว่า 1 A สำหรับหลอดแอลอีดีแบบ SMT ถ้าขับกระแสได้ตั้งแต่ 300 mA ขึ้นไป จะเรียกว่า หลอดแอลอีดีกำลังสูง (Power LED) การนำไปใช้

งาน ส่วนใหญ่จะใช้ภายในเนื่องจากสารเคลือบหน้า หลอดแสงส่วนใหญ่จะเป็น วัสดุซิลิโคน ซึ่งละอองน้ำหรือความชื้นสามารถซึมผ่านได้ ภาพที่ 2.4 แสดงตัวอย่างหลอดแบบเซอร์เฟสเมาท์

ตารางที่ 2.1 สมบัติของหลอดแอลอีดี

สี	ความยาวคลื่น (nm)	แรงดันตกคร่อม (ΔV)	วัสดุสารกึ่งตัวนำ
แดง	$610 < \lambda < 760$	$1.63 < \Delta V < 2.03$	อลูมิเนียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ (AlGaAs) แกลเลียมอาร์เซไนด์ฟอสไฟด์ (GaAsP) อลูมิเนียมแกลเลียมอินเดียมฟอสไฟด์ (AlGaInP) แกลเลียมฟอสไฟด์ (GaP)
เขียว	$500 < \lambda < 570$	$1.9 < \Delta V < 4.0$	แกลเลียมฟอสไฟด์ (GaP) อลูมิเนียมแกลเลียมอินเดียมฟอสไฟด์ (AlGaInP) อลูมิเนียมแกลเลียมฟอสไฟด์ (AlGaP)
เขียวบริสุทธิ์			อินเดียมแกลเลียมไนไตรด์ (InGaN) แกลเลียมไนไตรด์ (GaN)
น้ำเงิน	$450 < \lambda < 500$	$2.48 < \Delta V < 3.7$	ซิงค์เซเลไนด์ (ZnSe) อินเดียมแกลเลียมไนไตรด์ (InGaN) ซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) เป็นฐานรอง ซิลิกอน (Si) เป็นฐานรองภายใต้การพัฒนา
ม่วง	$400 < \lambda < 450$	$2.76 < \Delta V < 4.0$	อินเดียมแกลเลียมไนไตรด์ (InGaN)
ชมพู	Multiple types	$\Delta V \sim 3.3$	Blue with one or two phosphor layers: yellow with red, orange or pink phosphor added afterwards, or white phosphors with pink pigment or dye over top.
ขาว	Broad spectrum	$\Delta V = 3.5$	Blue/UV diode with yellow phosphor

ภาพที่ 2.4 หลอดแอลดีดีแบบเซอร์เฟสเมาท์

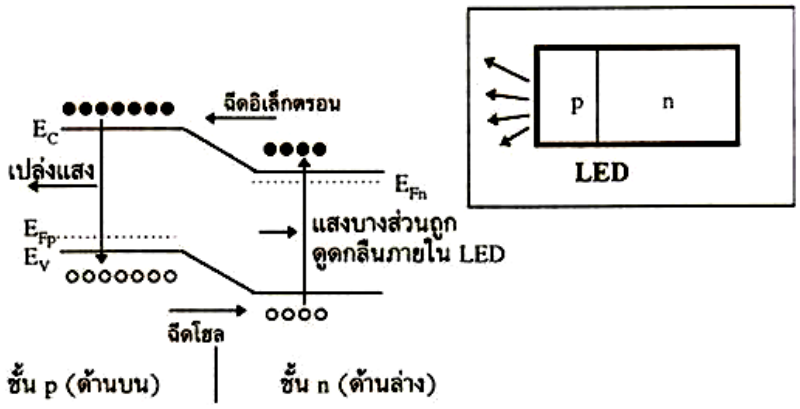
ข้อดีของหลอดแอลอีดีมีหลายประการ ได้แก่

- มีอายุการใช้ที่งานยาวนาน หลอดแอลอีดีมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน ถึง 100,000 ชั่วโมง หรือประมาณ 11 ปี เมื่อเทียบกับหลอดไส้ทั่ว ๆ ไป ซึ่งมีอายุการใช้งานที่ประมาณ 1,000 ชั่วโมงเท่านั้น
- มีสีสันจัดจ้าน ไดโอดเปล่งแสงให้สีสันที่จัดจ้านมากกว่าหลอดไส้
- มีความทนทานสูงเพราะ หลอดแอลอีดี เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ สถานะของแข็ง ซึ่งไม่มีชิ้นส่วนใดที่เคลื่อนไหว ไม่มีส่วนใดที่เป็นกระจก ไม่มีไส้หลอดซึ่งอาจจะขาดได้ง่าย
- ประหยัดพลังงาน หลอดแอลอีดีใช้พลังงานน้อยกว่าหลอดไส้ทั่วไปถึง 80-90%
- หลอดแอลอีดีไม่มีส่วนประกอบด้วยสารปรอท ทำให้เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม
- หลอดแอลอีดีสามารถเปิดใช้งานได้อย่างรวดเร็ว เปิดแล้วหลอดติดทันที ไม่ต้องรอกระพริบ

แต่หลอดประเภทนี้ก็มีข้อจำกัดบางประการคือ ราคาที่สูงกว่าหลอดไส้และหลอดฟลูออเรสเซนต์

2.2 หลักการทำงานพื้นฐานของหลอดแอลอีดี

ในการใช้งาน หลอดแอลอีดี จะต้องป้อนแรงดันไฟฟ้าแบบไบแอสต รง (Forward bias) ให้กับสิ่งประดิษฐ์ โดยป้อนแรงดันบวกเข้าด้านขาชนิดพี (ขาอาโนด) และป้อนแรงดันลบเข้าด้านขาชนิดเอ็น (ขาคาโทด) วิธีนี้เป็นการฉีดพาหะ (อิเล็กตรอนและโฮล) เข้าสู่หลอดแอลอีดี ซึ่งจะทำให้อิเล็กตรอนถูกฉีดจากชั้นเอ็นเข้าสู่ชั้นพี และโฮลจะถูกฉีดจากชั้นพีเข้าสู่ชั้นเอ็น พาหะข้างน้อยที่ถูกฉีดเหล่านี้จะไปรวมตัวกับพาหะข้างมากที่มีอยู่ก่อนแล้ว ทำให้เกิดการเปล่งแสงขึ้นดังแสดงในภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 การเคลื่อนที่ของพาหะในรอยต่อพีเอ็นที่ได้รับการไบแอสตรง

การเปล่งแสงที่บริเวณใกล้ผิวด้านบนจะออกสู่ภายนอกได้ง่ายกว่าการเปล่งแสงที่บริเวณลึก บริเวณที่รวมตัวกันแบบเปล่งแสงได้นั้นมีความกว้างเท่ากับระยะทางที่พาหะจะแพร่ซึมได้ ระยะทางแพร่ซึม (Diffusion length: L_e, L_h) นี้ขึ้นอยู่กับอัตราการรวมตัวของพาหะ (Recombination rate) และค่าคงตัวของการแพร่ซึม (Diffusion constant) ของพาหะ โดยทั่วไประยะทางแพร่ซึมมีค่าประมาณ 1-2 μm

ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของ LED ชนิดรอยต่อพี-เอ็น จะสามารถอธิบายด้วยสมการของ Schockley ดังนี้

$$I = I_s\left(exp\left(\frac{qV_a}{k_BT}\right) - 1\right) \quad (2.1)$$

เมื่อ q คือค่าประจุของอิเล็กตรอน

k_B คือค่าคงที่ของโบล์สมานต์ (Boltzmann's constant)

T คืออุณหภูมิและ I_s คือค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับแสดงดังสมการ

$$I_s = eA\left(\sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}}\frac{n_i^2}{N_D} + \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}}\frac{n_i^2}{N_A}\right) \quad (2.2)$$

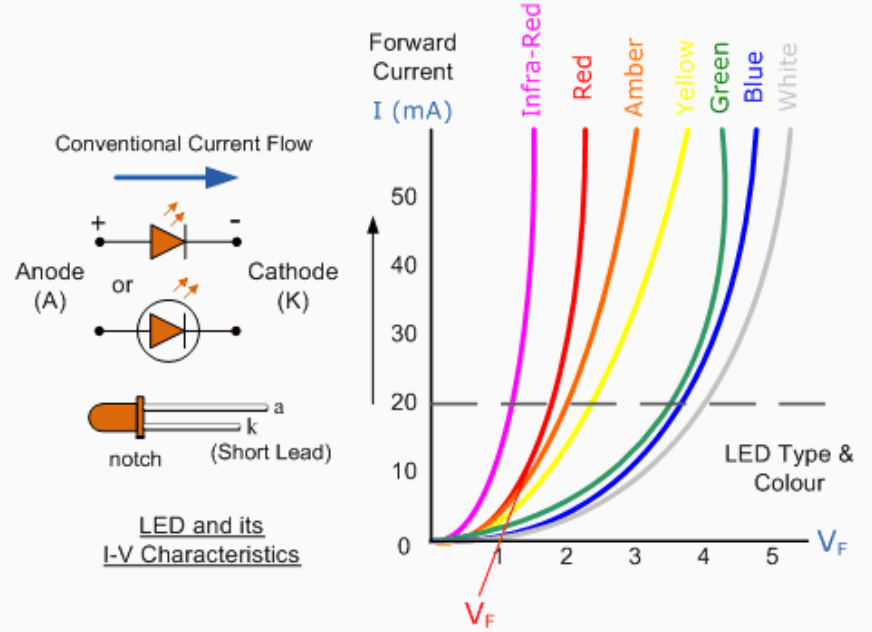
A คือพื้นที่ตัดขวางของรอยต่อ D_p และ D_n คือค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ซึมของพาหะ $\boldsymbol{\tau}_n$ และ $\boldsymbol{\tau}_p$ คือช่วงอายุของพาหะ ในกรณีที่ LED ได้รับการไบอัสตรงด้วยแรงดัน V >> k_BT ดังนั้นเทอม $\left(exp\left(\frac{qV}{k_BT}\right) - 1\right)$ ในสมการที่ (2.1) จะมีค่าเข้าใกล้ $exp\left(\frac{qV}{k_BT}\right)$ ดังนั้นจึงสามารถสมการเขียนได้ในอีกรูปแบบดังนี้

$$I = eA\left(\sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}}N_A + \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}}N_D\right)\left(exp\left(\frac{qV_a - V_D}{k_BT}\right) - 1\right) \quad (2.3)$$

เมื่อ V_D หรือ *built-in potential* V_{bi} คือแรงดันไฟฟ้าที่เกิดบริเวณรอยต่อของวัสดุ แสดงดังสมการ

$$V_{bi} = V_D = \frac{k_BT}{q}ln\left(\frac{N_AN_D}{n_i^2}\right) \quad (2.4)$$

จากสมการที่ (2.4) จะเห็นว่าเมื่อแรงดันไฟฟ้าที่ไบอัสให้กับ LED (V_a) มีค่าสูงกว่าแรงดัน V_D จะทำให้ปริมาณ กระแส ที่ไหลใน LED มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทั นใด แรงดันค่านี้จะถูกเรียกว่าแรงดันขีดเริ่ม (threshold voltage: V_{th}) ด้วยเหตุผลนี้จึงทำให้ในการใช้งาน LED จะนิยมจ่ายกระแสคงที่ให้กับหลอดมากกว่าการจ่ายแรงดันไฟฟ้า เพราะถ้าในการจ่ายแรงดันไฟฟ้ามีความคลาดเคลื่ อนเพียงเล็กน้อยอาจส่งผลให้กระแสในหลอดอย่างมาก ส่งผลให้เกิดความเสียหายได้ ภาพที่ 2.6 แสดงตัวอย่างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของ LED ที่สร้างจากวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ



ภาพที่ 2.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันไฟฟ้าของ LED ที่สร้างจากวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ [4]

2.3 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อหลอดแอลอีดี

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าอุณหภูมิจะมีผลต่อ สมบัติทางไฟฟ้าและทางแสง หลอดแอลอีดี ซึ่งอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปจะส่งผลต่อคุณสมบัติภายในของหลอด เช่น

- ค่าพาหะที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ
- ค่าช่องว่างแถบพลังงานที่มีการเปลี่ยนแปลง
- ค่าการรวมตัวแบบไม่เปล่งแสงที่ลดลงกับอุณหภูมิรอยต่อ

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ของรอยต่อ จะส่งผลต่อค่าความส่องสว่างและสเปกตรัมแสงที่เปล่งออกมาทั้งนี้ เป็นผลเนื่องมาจากการระดับพลังงานในสารกึ่งตัวนำ มีการเปลี่ยนแปลง ตามอุณหภูมิ ซึ่งสามารถอธิบายได้ตามสมการของวาร์ชนี่ (Varshni) [5-6] ดังนี้

$$E_g(T) = E_g(0K) - \frac{\alpha T^2}{T+\beta} \qquad (2.5)$$

α และ β คือค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับสมบัติของวัสดุ จากสมการที่ (2.1) และ (2.5) จะสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและอุณหภูมิได้ดังนี้

$$V_a(T) = \frac{k_B T}{q} ln \frac{I}{I_s} + \frac{E_g(T)}{q} \qquad (2.6)$$

จากสมการที่ (2.3) จะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นค่า E_g จะมีค่าลดลง แต่ถ้าสังเกตเทอมแรกในสมการที่ (2.4) จะเห็นว่าเทอมนี้จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อ T เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเนื่องจากการลดลง E_g มีค่ามากกว่าผลของเทอมแรก ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะส่งผลให้ค่าแรงดันไฟฟ้าขีดเริ่มมีค่าลดลง