บทที่ 2

ทฤษฎีพื้นฐานของ Electroluminescence

<u>บทนำ</u>

ในบทนี้จะขอกล่าวถึง ประวัติความเป็นมาของดิสเพลย์ EL และกลไกหลักการทำงาน เพื่อเป็นพื้นฐานให้เข้าใจก่อนที่จะศึกษาวิธีการผลิตในบทต่อ ๆ ไป

<u>Electroluminescence คืออะไร</u>

Electroluminescence (EL) คือ ปรากฏการณ์ของสารกึ่งตัวนำหรือสารเรืองแสง ที่เปล่งแสงออกมาเมื่อมีสนามไฟฟ้ามาป้อน (5) การเปล่งแสงของ EL มีอยู่ 2 ชนิด คือ การเปล่งแสงด้วยสนามไฟฟ้าสูง ๆ โดยไม่ใช้รอยต่อ p-n เรียกว่า intrinsic electroluminescence ส่วนอีกชนิดหนึ่ง เป็นการเปล่งแสงที่เกิดขึ้นในรอยต่อ p-n เรียกว่า carrier injection type EL หรือ (LED) ด้วยการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงไบแอสตาม (forward bias) เข้าในรอยต่อ p-n ในโครงงานวิจัยนี้จะขอให้นิยามของ EL ที่ประดิษฐ์ขึ้นนี้ว่าเป็นชนิด intrinsic electroluminescence และขอใช้ชื่อย่อว่า EL

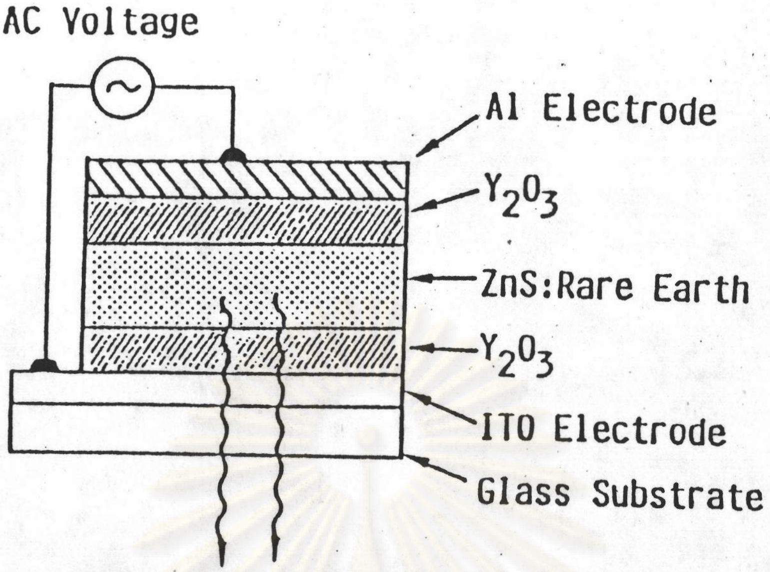
Electroluminescence (EL) ถูกค้นพบครั้งแรกโดย Destriau (6) ชาวฝรั่งเศส ในปี ค.ศ. 1936 โดยเขาพบว่า ถ้าแช่ผง ZnS:Cu ไว้ในน้ำมันและป้อนแรงดันไฟฟ้าเข้าสู่น้ำมันจะทำให้ ZnS เปล่งแสงออกมา หลังจากการสังเกตในครั้งนี้ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับสิ่งประดิษฐ์ EL ที่มีลักษณะเป็นแบบฟิล์มบาง (thin film) ขึ้นเป็นครั้งแรกโดย Halstead (6) ใน ปี ค.ศ. 1954 ด้วยการพัฒนา ZnS ให้เป็นฟิล์มบางได้สำเร็จ ตั้งแต่นั้นเป็นต้นมามีนักประดิษฐ์อีกหลายคนที่พยายามปรับปรุงประสิทธิภาพของ EL เพราะว่า EL มีลักษณะที่เหมาะสมอยู่หลายอย่าง ในการนำมาทำเป็นดิสเพลย์แบบแบน (flat panel display) เช่น กินกำลังงานต่ำ แสดงภาพได้หลายสี และมีความเข้มของภาพสูง ถึงแม้ว่า EL จะมีข้อดีดังกล่าว แต่ EL ก็ยังไม่เป็นที่นิยมแพร่หลาย เพราะว่า EL มีประสิทธิภาพต่ำและมีอายุการใช้งานสั้น

ในปี ค.ศ. 1968 Kahng (6) ได้ศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพของโมเลกุลของธาตุ rare earth fluoride (REF_3 หรือ LnF_3) ที่โด๊ปอยู่ในฟิล์มบาง ZnS ถูกประกบด้วยชั้นฉนวนของออกไซด์ (oxide insulating layer) เมื่อถูกกระตุ้นโดยตรงด้วยสนามไฟฟ้า การใช้โมเลกุลของธาตุ rare earth fluoride (REF_3) เป็น color center หรือ luminescence center นั้นมีข้อดีอยู่ 2 ประการ คือประการแรก การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแปลงไฟฟ้าให้เป็นแสงได้ดี เนื่องจากมีปริมาณอิออนไนซ์ (ionization) ออกจากโมเลกุลของ color center ต่อพื้นที่หน้าตัดสูง จึงทำให้ ZnS เปล่งแสงได้ดี ประการที่สอง คือ สามารถเลือกสีการเปล่งแสงได้ โดยการเลือกโมเลกุลของ color center ที่เหมาะสม นอกจากนี้ชั้นฉนวนของออกไซด์ที่ต่ออนุกรมกับชั้น ZnS จะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าตกคร่อมชั้น ZnS มีค่าสูง ซึ่งเป็นเหตุผลหนึ่งที่ทำให้ ZnS เปล่งแสงได้ดีและมีเสถียรภาพ เนื่องจากข้อดีดังกล่าวจึงได้มีการวิจัยและลงทุนเกี่ยวกับสิ่งประดิษฐ์ EL กันอย่างกว้างขวาง ไม่เฉพาะพื้นฐานทางด้านฟิสิกส์ และยังรวมไปถึงการนำไปประยุกต์ใช้งานด้วย

ผู้ที่ประสบความสำเร็จในการผลิต thin film EL อยู่ในขั้นที่ใช้งานได้จริงคือ บริษัท SHARP ประเทศญี่ปุ่น ในปี ค.ศ. 1974 ได้มีการออกแบบให้มีโครงสร้างเป็นแบบ double insulating layer กล่าวคือ มีชั้นฉนวน Y_2O_3 ขนาบแบบ sandwitch ทั้งด้านบนและด้านล่างของชั้น ZnS ส่วนชั้น ZnS ถูกโด๊ปด้วย Mn จากลักษณะโครงสร้างนี้จะช่วยป้องกันไม่ให้ความชื้นเข้าสู่ชั้น ZnS จะทำให้ EL มีความสว่างสูง ซึ่งจะมีความสว่างถึง 1000 fl (foot-lamberts) และมีอายุการใช้งานได้ยาวนานกว่า 20,000 ชั่วโมง (7) หลังจากการค้นพบในครั้งนี้จึงได้มีบริษัทผลิตโทรทัศน์ที่มีจอภาพเป็น EL ออกขายให้แสงสีส้ม (สีของ Mn) ซึ่งบางรุ่นมี high resolution สูงถึง 500 เส้น/นิ้ว

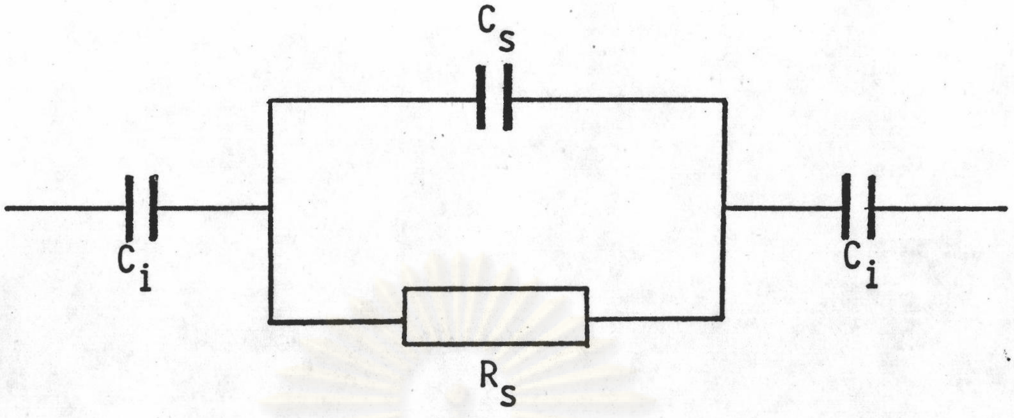
<u>ปรากฏการณ์ของ Electroluminescence (8)</u>

สิ่งประดิษฐ์ ac EL มีโครงสร้างประกอบด้วยแผ่นกระจก/ขั้วนำไฟฟ้าโปร่งแสง/ชั้นฉนวน/ชั้นเปล่งแสง/ชั้นฉนวน/ขั้วอะลูมิเนียม ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ชั้นเปล่งแสงถูกขนาบด้วยชั้นฉนวน ตัวอย่างของชั้นฉนวนได้แก่ Y_2O_3 SiO_2 $PbTiO_3$ และ SiN_3 เป็นต้น ส่วนสีของการเปล่งแสงจะเกิดมาจากการเติม luminescence center ด้วยปริมาณที่เหมาะสมภายในชั้นเปล่งแสงที่เป็นชั้นของสารกึ่งตัวนำ ชั้นของสารกึ่งตัวนำที่เป็น host material ได้แก่ ZnS ZnSe ZnF_2 CdF_2 CaS และ SrS เป็นต้น แต่ชั้นสารกึ่งตัวนำที่เป็น host material ที่นิยมมากที่สุดคือ ZnS เพราะมีความสว่างสูง และราคาถูก ส่วน



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของ Electroluminescence

luminescence centers ที่เหมาะสมที่สุด คือ Mn การทำงานเราจะป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับผ่านขั้วทั้งสอง ซึ่งขั้วด้านหนึ่งเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง (ITO) มีชั้นฉนวน 2 ชั้นขนาบชั้นเปล่งแสง ทำให้สิ่งประดิษฐ์มีลักษณะเหมือนตัวเก็บประจุ ถ้าเราป้อนแรงดันต่ำกว่าค่า threshold voltage ก็จะไม่มีเปล่งแสงออกมาให้เห็น แสงจะเปล่งออกมาก็ต่อเมื่อมีค่าแรงดันสูงกว่าค่า threshold voltage จะอยู่ในรูปของพัลซ์ ในแต่ละคาบเวลาของแรงดันไฟฟ้า ac (หรือ polarpulse) พัลซ์ที่เกิดซ้ำกันและมีขั้วเหมือนกันจะทำให้เกิด polarized และแสงที่เปล่งออกมาก็จะลดลงอย่างรวดเร็ว ที่แรงดันสูงกว่าค่า threshold voltage ความชันของความสว่าง (brightness : B) ที่เกิดขึ้นจะตามด้วยส่วนที่อิ่มตัวของลักษณะสมบัติ B-V ความสว่างที่ค่าอิ่มตัวนี้จะมีค่าสูงถึง 10,000 cd/m^2 เมื่อความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนมีค่า 5 KHz ค่าเฉลี่ยของความสว่างจะเป็นสัดส่วนกับครึ่งคาบเวลาของการกระตุ้น (excite) จุดเริ่มต้นตัวสิ่งประดิษฐ์ EL ที่ค่าต่ำกว่า threshold voltage นี้จะไม่ก่อให้เกิดการเก็บประจุเพียงอย่างเดียว แต่ค่า phase angle ระหว่างแรงดันและกระแสเริ่มมีค่าลดลง กล่าวอีกนัยหนึ่ง คือ เกิดการกระจายของกระแสในตัวอุปกรณ์เพิ่มขึ้น เมื่อ threshold voltage เปลี่ยน



รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลย์ของ Electroluminescence

วงจรสมมูลย์ของสิ่งประดิษฐ์ EL ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ตัวเก็บประจุ C_i คือค่าความจุของชั้นฉนวน C_s คือค่าความจุของชั้นสารกึ่งตัวนำ และ R_s คือตัวต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้นแทนการกระจายของกระแสโหลด

กลไกการเปล่งแสงในสิ่งประดิษฐ์ ac EL

สิ่งประดิษฐ์ ac EL โดยทั่วไปแล้วมีโครงสร้างที่สมมาตร มีชั้นฉนวน 2 ชั้น ขนาบชั้นเปล่งแสงที่เป็นของชั้นสารกึ่งตัวนำ ZnS มีขั้วต่อเป็นโลหะ เพื่อให้ป้อนแรงดันไฟฟ้า จุดต่อจะอยู่ที่ผิวด้านนอกของชั้นฉนวนทั้งสอง

ชั้นสารกึ่งตัวนำที่โด๊ปด้วย luminescence center จะถูก excite ด้วยไฟฟ้ากระแสสลับ การ excite หรือ การกระตุ้นนี้จะเป็นการกระตุ้นโดยการชนโดยตรงของตัวพาหะ (electron) ซึ่งพาหะจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าค่าสูง กระบวนการดังกล่าวได้มีการพูดถึงกันตั้งแต่ปี ค.ศ.1962 โดย Cusano (9) เป็นการทดลองที่พิสูจน์ให้เห็นถึงการใช้ ZnSe:Mn ZnS:Tb และ ZnS:Er เป็นตัวอย่าง ดังนั้นหน้าที่ของชั้นสารกึ่งตัวนำจึงมีอยู่ 2 ประการคือ

ประการแรก การบรรจุ color center แล้วจะปลดปล่อยอิเล็กตรอน ประการที่สองจะทำให้อิเล็กตรอนมีค่าพลังงานสูงมาก (hot-electron) เป็นต้น สำหรับการสูญเสียทางความร้อนของอิเล็กตรอนอิสระจะเกิดจากสนามไฟฟ้าที่มีค่าสูง ๆ หน้าที่ของชั้นฉนวนก็คือ จะต้องมีเสถียรภาพ หรือป้องกันการเกิด breakdown ของชั้นฉนวน ส่วนชั้นฉนวนจะประกอบด้วย impedance ค่าสูง ๆ ต่ออนุกรมกันและจะกินพลังงานอยู่ในรูปของแรงดัน

การพิจารณาถึงในการทำงานจะเริ่มต้นด้วยการมองภาพที่เป็นไฟฟ้าสถิตย์อย่างง่าย ๆ เมื่อป้อนสนามไฟฟ้ากระแสสลับให้ผ่านขั้วโปร่งแสง (ITO) และขั้ว Al ด้านหลัง ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นภายในชั้นต่าง ๆ (หรือเกิดแรงดันตกคร่อมชั้นนั้น ๆ) ซึ่งจะเป็นสัดส่วนกับส่วนกลับของค่าคงที่ dielectric เนื่องจากค่าคงที่ dielectric ของชั้นฉนวนถูกออกแบบให้มีค่ามากกว่าชั้น ZnS ไว้มาก ๆ ดังนั้นสนามไฟฟ้าจากภายนอกส่วนใหญ่จะไปตกคร่อมชั้น ZnS ซึ่งจะใช้เป็นพื้นฐานในการออกแบบ

เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น การเป็นความจุไฟฟ้าที่บริสุทธิ์ของ EL ก็จะหมดไป และเมื่อสนามไฟฟ้ามีความเข้มสูงพอที่จะ ionize แล้ว state หรือ trap พลังงานของอิเล็กตรอนที่ตื้นที่สุด ซึ่งเราอาจคิดเป็นชั้น Interface state ระหว่างชั้นฉนวนกับชั้นสารกึ่งตัวนำ พาหะ (อิเล็กตรอน) ที่อยู่ใกล้ที่สุดก็จะถูกฉีดทะลุ (tunneling) เข้ามาจาก interface state ไปยัง conduction band ของชั้นสารกึ่งตัวนำ พาหะพวกนี้จะวิ่งด้วยสนามไฟฟ้าจากบริเวณขั้วลบไปยังขั้วบวก เมื่อมีพลังงานสูงพอที่จะทำให้พาหะวิ่งไปชน luminescence center ด้วยกระบวนการ impact ionization ทำให้อิเล็กตรอนที่เคยอยู่ใน luminescence center หลุดออกมาเคลื่อนที่ไปรวมตัวกับ luminescence center ที่ว่าง เกิดการเปล่งแสงออกมา

การป้อนไฟฟ้ากระแสสลับจะทำให้เกิดขั้วสลับไปมาตลอดเวลา ทำให้พาหะวิ่งกลับไปกลับมาเวลาเกิด impact ionization และแสงที่เปล่งออกมาจึงมีความสม่ำเสมอ ทำให้มีประสิทธิภาพสูงกว่า การป้อนด้วยไฟฟ้ากระแสตรง จึงทำให้ ac EL เปล่งแสงได้ดีกว่าแบบ dc EL

สรุป

ดิสเพลย์ชนิด EL เปล่งแสงได้โดยการอาศัยสนามไฟฟ้ากระแสสลับที่ป้อนจากภายนอกให้ไปกระตุ้น color center ให้เปล่งแสง โครงสร้างพื้นฐานของ EL ที่ให้ความสว่างสูงและมีอายุการใช้งานยาวนานคือ แผ่นกระจก / ITO / ชั้นฉนวน / ชั้นเปล่งแสง / ชั้นฉนวน / Al ถึงแม้ว่าชั้นเปล่งแสงนั้นจะมีวัสดุ candidate หลายชนิด เช่น ZnS ZnSe CdF_2 ฯลฯ แต่เมื่อพิจารณาจาก cost performance และปริมาณการผลิตวัสดุดิบแล้ว ZnS น่าจะเป็นวัสดุที่มีราคาถูกที่สุดในงานวิจัยนี้ ในบทต่อ ๆ ไปจึงขอเลือกใช้ ZnS เป็นวัสดุหลักในชั้นเปล่งแสง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย