บทที่ 5
การพัฒนาไดโอดเปล่งแสงชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอนคาร์ไบด์ที่มีโครงสร้างแบบเมตริกซ์

5.1 บทนำ

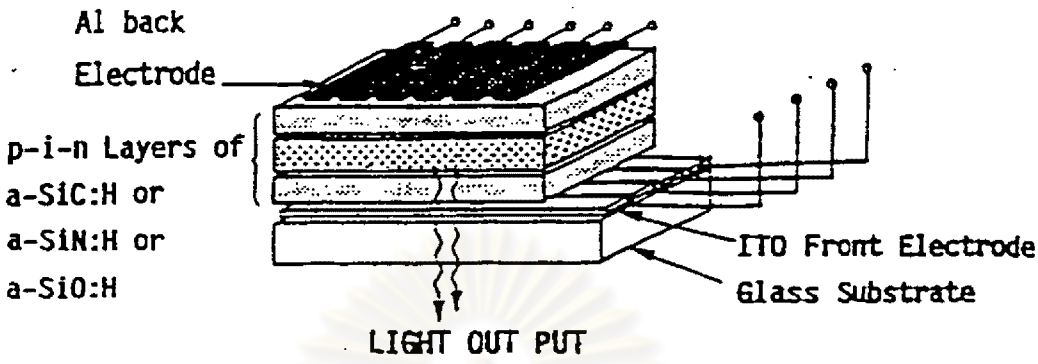
ในบทนี้ได้มีการพัฒนาออกแบบและประดิษฐ์ a-SiC:H TFLED ที่มีโครงสร้างแบบเมตริกซ์ (matrix) กล่าวคือ ขั้วไฟฟ้า ITO และ Al มีรูปร่างเป็นเส้นเล็ก ๆ จำนวนมากมาย และไขว้กันแบบเมตริกซ์เพื่อให้เปล่งแสงเป็นจุด ๆ การออกแบบวงจรไฟฟ้าเพื่อสแกนสัญญาณภาพให้ TFLED แต่ละจุดเปล่งแสงแบบกระพริบอย่างรวดเร็วก็จะทำให้เห็นภาพเคลื่อนไหวแบบต่อเนื่องได้ ในบทนี้จะรายงานวิธีการออกแบบการประดิษฐ์ และผลการประดิษฐ์ TFLED ที่มีโครงสร้างแบบเมตริกซ์และมีขนาดพิกเซลหลายขนาด และจะวิจารณ์วิธีการใช้งานเป็นดิสเพลย์แบบบางชนิดใหม่

5.2 การออกแบบและวิธีการประดิษฐ์ TFLED ที่มีโครงสร้างแบบเมตริกซ์

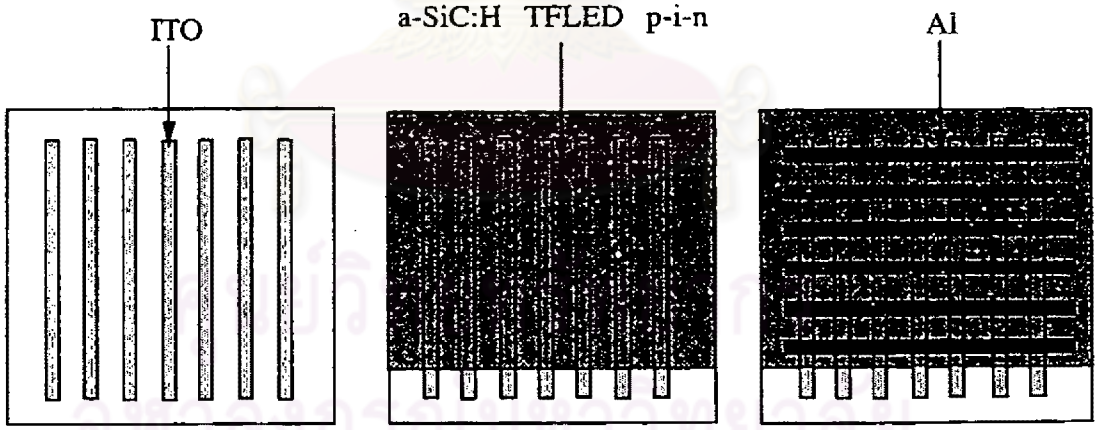
หลักการพื้นฐานในการออกแบบ TFLED ที่สามารถเปล่งแสงภาพเคลื่อนไหวได้นั้นคล้ายคลึงกับกรณีของดิสเพลย์ชนิดผลึกเหลว (LCD) และดิสเพลย์ชนิดบางอื่น ๆ ทั่วไป [22-29] กล่าวคือจะต้องออกแบบให้ขั้วไฟฟ้า ITO และ Al จะต้องไขว้กันแบบตั้งฉากในลักษณะเมตริกซ์ (matrix) ดังแสดงในรูปที่ 5.1 สำหรับฟิล์มบางอะมอร์ฟัสชั้น p-i-n นั้นให้เคลือบแบบเต็มพื้นที่แผ่นฐาน เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าผ่านขั้วไฟฟ้า ITO และ Al บริเวณใดที่มีกระแสไฟฟ้าไหลทั้ง ITO และ Al พร้อม ๆ กันบริเวณนั้นก็จะเปล่งแสงเป็นจุดตรงบริเวณที่มี ITO และ Al ไขว้กัน ถ้ามีวงจรอิเล็กทรอนิกส์สแกนสัญญาณให้จุดเหล่านั้นกระพริบสว่างอย่างรวดเร็วก็จะได้ภาพรูปร่างที่ต้องการและเคลื่อนไหวได้ ความถี่ของการสแกนอาจเป็นระดับ kHz [30-31]

ขั้นตอนการประดิษฐ์ TFLED ที่มีโครงสร้างแบบเมตริกซ์ แสดงในรูปที่ 5.2 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. เคลือบ ITO ให้เต็มแผ่นกระจก และใช้สารละลายเคมี ($FeCl_3$+HCl+H_2O_2) กัด ITO ให้เหลือเป็นลายเส้น โดยใช้กระบวนการโฟโตลิโทรกราฟี (photolithography)



รูปที่ 5.1 โครงสร้างของ TFLED รอยต่อ p-i-n เคลือบเต็มพื้นที่แผ่นฐาน ซึ่งมีขั้วไฟฟ้า ITO และ Al ไขว้กันแบบเมตริกซ์



รูปที่ 5.2 ขั้นตอนการประดิษฐ์ a-SiC:H TFLED ที่มีโครงสร้างแบบเมตริกซ์

2. เคลือบฟิล์มอะมอร์ฟัสรอยต่อ p-i-n ให้เต็มพื้นที่แผ่นกระจก โดยเว้นให้บางส่วนของ ITO ไว้ไม่ให้มีฟิล์มอะมอร์ฟัสเคลือบเพื่อเป็นพื้นที่สำหรับการต่อสายไฟฟ้ากับ ITO
3. เคลือบขั้ว Al ให้เป็นลายเส้นในลักษณะตั้งฉากกับ ITO โดยการใช้มาสค์ (mask) ที่เปิดช่องไว้ หรือวิธีการ lift-off ก็ได้

รูปที่ 5.3 แสดงวิธีการสร้างลายเส้น Al ด้วยวิธีการ lift-off โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. เคลือบโฟโตรีซิสต์ลงบนฟิล์ม a-SiC:H เต็มพื้นที่แผ่นกระจก
2. ส่องแสง UV ผ่านมาสค์ที่มีรูปร่างตามที่ออกแบบไว้
3. ล้างโฟโตรีซิส์ด้วยน้ำยา developer จนเห็นลายตามที่ต้องการ อบให้แห้ง
4. เคลือบ Al เต็มพื้นที่แผ่นกระจก
5. นำชิ้นงานที่ได้ไปแช่สารละลาย Acetone บริเวณที่มีโฟโฟรีซิสต์จะหลุดออก พร้อมกับ Al ส่วนที่ไม่มีโฟโตรีซิสต์จะมี Al เคลือบเหลืออยู่

5.3 วงจรสมมูลและความละเอียดของจุดภายใน TFLED ที่มีโครงสร้างแบบเมตริกซ์

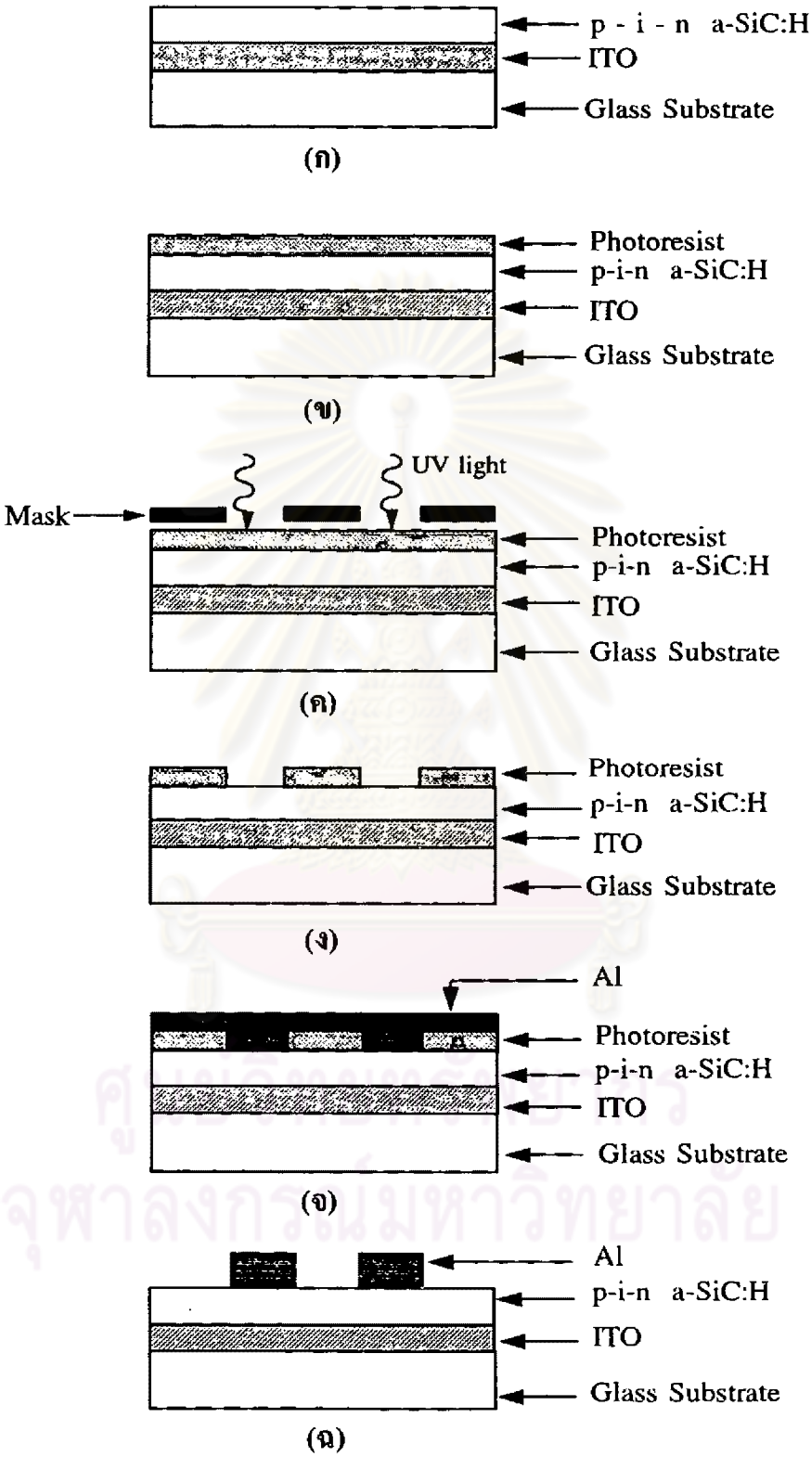
สิ่งประดิษฐ์เปล่งแสงชนิดฟิล์มบาง a-SiC:H ที่พัฒนานี้สามารถเปล่งแสงออกมาเป็นจุดพิกเซล (pixel) คุณภาพของภาพที่ปรากฏให้เห็นนั้นจะมีแฟกเตอร์ที่ต้องคำนึงถึงหลายข้อเช่น

1. พิกเซลทุก ๆ จุดควรให้ความสว่างมากที่สุด
2. พิกเซลทุก ๆ จุดควรให้ความสว่างเท่ากันอย่างสม่ำเสมอ
3. พื้นที่ของพิกเซลแต่ละจุดควรเล็กที่สุด
4. ระยะห่างของพิกเซลแต่ละจุดควรชิดกันมากที่สุด

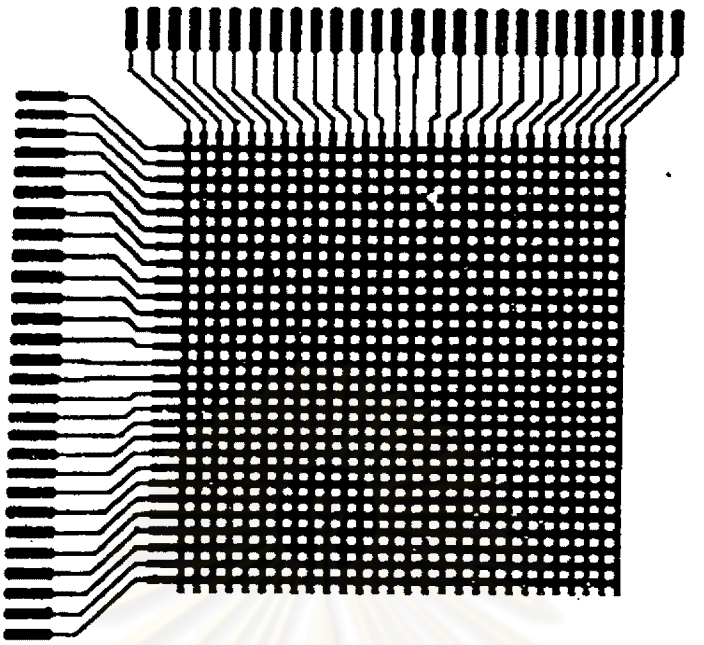
ในที่นี้จะขอพิจารณากรณีของข้อ 3. และข้อ 4.

ในกรณีข้อ 3. กรณีพื้นที่ของพิกเซลแต่ละจุดถ้ายิ่งเล็กก็จะทำให้สามารถแสดงภาพได้ละเอียดมากขึ้น ในทางปฏิบัตินั้นสามารถผลิตให้ขั้ว ITO และขั้ว Al มีขนาดความกว้างได้ถึงระดับหลายสิบ μm ซึ่งเล็กมาก และเพียงพอต่อความต้องการของดิสเพลย์ที่ต้องการความละเอียดสูง

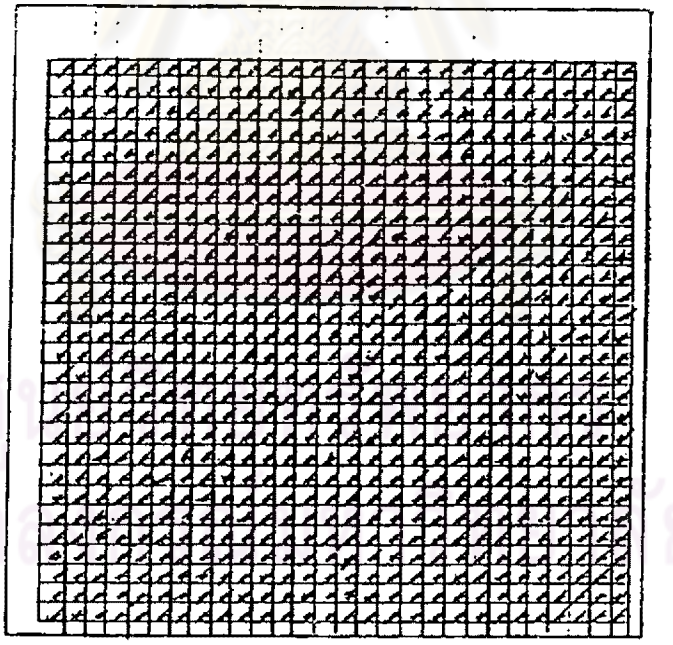
ในกรณีข้อ 4. กรณีระยะห่างของพิกเซลแต่ละจุด (spacing distance หรือ pitch) จะเป็น



รูปที่ 5.3 วิธีการสร้างลายเส้น Al ด้วยกระบวนการ lift-off



รูปที่ 5.4 ตัวอย่างลวดลายขั้วไฟฟ้า ITO และ Al ซึ่งไขว้กันแบบเมตริกซ์ ความกว้างของเส้นขั้วไฟฟ้าแต่ละเส้นเท่ากับ 1 mm และห่างกัน 1 mm



รูปที่ 5.5 วงจรสมมูลของ TFLED ที่มีโครงสร้างแบบเมตริกซ์

แฟกเตอร์ที่ต้องพิจารณาอย่างละเอียดดังต่อไปนี้

ในแง่ของเทคโนโลยีนั้นสามารถผลิตให้ขั้ว ITO แต่ละเส้น และขั้ว Al แต่ละเส้นให้มีระยะห่างกันหลายสิบ μm และลงไปถึงระดับ μm ได้ แต่ในการใช้งาน TFLED ดิสเพลย์นั้น สิ่งที่ต้องคำนึงคือ

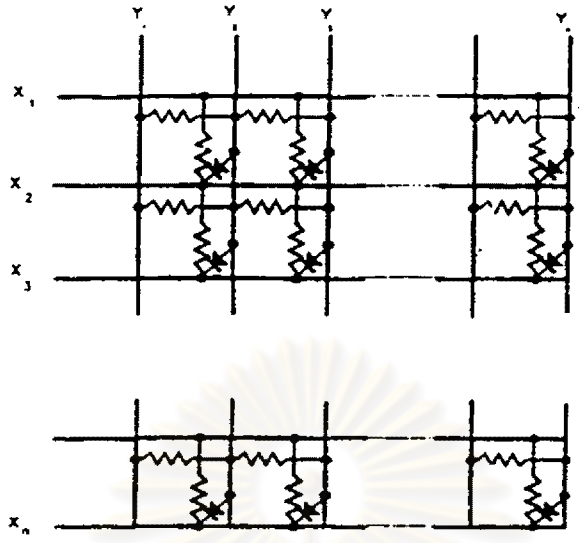
1) จะมีการเกิดครอสทอร์ค (cross talk) หรือไม่ [22]
2) จะมีกระแสไฟฟ้ารั่วไหลในบริเวณที่ไม่ต้องการให้ไหลหรือไม่

ทั้งข้อ 1) และข้อ 2) จะเป็นแฟกเตอร์กำหนดระยะห่างที่ต่ำสุดของแต่ละพิกเซล ในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้มีการคำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้ารั่วในดิสเพลย์ และหาความสัมพันธ์กับระยะห่างของพิกเซลโดยมีรายละเอียดดังนี้

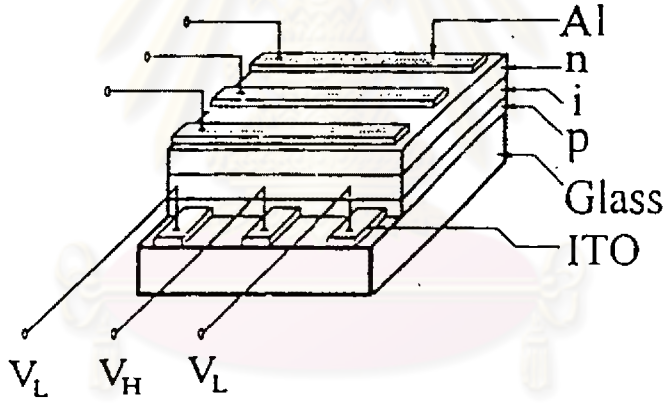
เมื่อ TFLED ที่มีโครงสร้างแบบเมตริกส์ดังแสดงดังรูปที่ 5.4 จะได้วงจรสมมูลของ TFLED ที่มีโครงสร้างแบบเมตริกซ์ แสดงดังรูปที่ 5.5 แสดงให้เห็นว่ามีไดโอดต่อเข้าด้วยกันเป็นร่างแหเป็นจำนวนมาก อย่างไรก็ตามในสภาพเป็นจริงจะมีความต้านทานเกิดขึ้นระหว่าง Al ที่อยู่ใกล้เคียงกันและมีความต้านทานเกิดขึ้นระหว่างขั้ว ITO ที่อยู่ใกล้เคียงกันดังแสดงในรูปที่ 5.6 สาเหตุของการมีความต้านทานอธิบายได้ด้วยรูปที่ 5.7

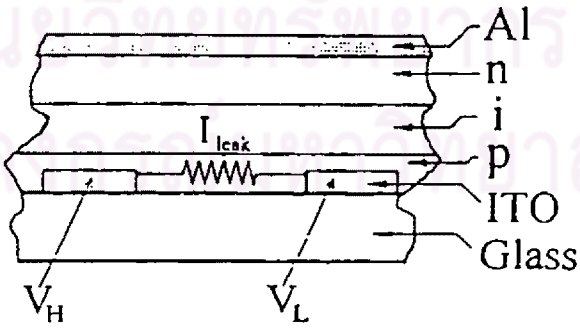
รูปที่ 5.7 แสดงภาพตัดขวางของ TFLED ที่มีโครงสร้างแบบเมตริกซ์ในการใช้งาน TFLED นั้นปกติต้องฉีดให้กระแสไฟฟ้าไหลในแนวดิ่ง กล่าวคือจาก ITO ไปสู่ Al โดยการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้ศักย์ไฟฟ้าของ ITO สูง (high level) เช่น +15 V และให้ศักย์ไฟฟ้าของ Al ต่ำ (low level) เช่น 0 V แต่ในขณะเดียวกัน ถ้าศักย์ไฟฟ้าของ ITO ข้างเคียงอยู่ในสภาพต่ำ ก็จะทำให้มีกระแสไฟฟ้ารั่วไหลในแนวราบจาก ITO เส้นหนึ่งผ่านชั้น p - a-SiC:H ไปสู่ ITO ข้างเคียงได้ จึงทำให้ในวงจรสมมูลของ TFLED ที่มีโครงสร้างแบบเมตริกซ์เปรียบเสมือนมีความต้านทาน (มีค่าไม่เป็นอนันต์) ต่ออนุกรมระหว่าง ITO กับ ITO ด้วยกันดังแสดงในรูปที่ 5.7

เนื่องจากสภาพนำไฟฟ้าของชั้น p มีค่ามากกว่าชั้น i มาก ดังนั้นจึงพิจารณาได้ว่ากระแสไฟฟ้าที่รั่วนี้ส่วนใหญ่ไหลในชั้น p เท่ากัน เพราะฉะนั้นกระแสไฟฟ้ารั่วในแนวระนาบ I_{leak} จึงสามารถคำนวณได้ง่าย ๆ ดังนี้



รูปที่ 5.6 วงจรสมมูลของ TFLED ที่มีโครงสร้างแบบเมตริกซ์ กรณีพิจารณาว่ามีกระแสไฟฟ้ารั่วผ่านจาก ITO เส้นหนึ่งผ่านชั้น p ไปสู่ ITO อีกเส้นหนึ่งที่อยู่ข้างเคียง





รูปที่ 5.7 ภาพตัดขวางของ TFLED ที่มีโครงสร้างแบบเมตริกซ์ซึ่งใช้อธิบายการเกิดกระแสไฟฟ้ารั่วผ่านชั้น p

$$I_{leak} = \frac{\sigma \times l \times d \times V}{S} \qquad (5.1)$$

โดยที่ I_{leak} : กระแสไฟฟ้ารั่วในชั้น p - a-SiC:H จาก ITO หนึ่งไปสู่ ITO ข้างเคียง

σ : สภาพนำไฟฟ้าของชั้น p

d : ความหนาของชั้น p

V : ความต่างศักย์ระหว่าง ITO ข้างเคียงกัน

S : ระยะห่างของ ITO

l : ความยาวของขั้วไฟฟ้า Al

ตัวอย่างถ้าให้ $\sigma = 10^{-7}$ S/cm, d = 150 Å, V = 15 V, S = 0.3 μm และ l = 6 cm จะมีกระแสไฟฟ้ารั่วที่น้อยมากเพียงระดับ 1 μA เท่านั้น

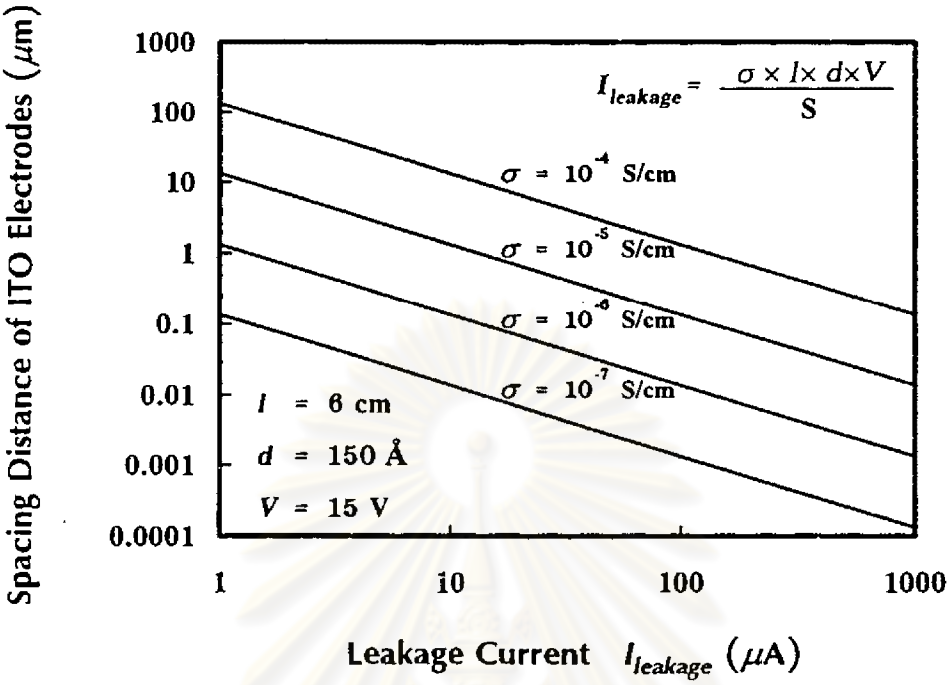
รูปที่ 5.8 แสดงตัวอย่างผลการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของ ITO - ITO และกระแสไฟฟ้าที่รั่วในชั้น p พารามิเตอร์ในรูปคือ สภาพนำไฟฟ้าของชั้น p - a-SiC:H ในการคำนวณกำหนดให้ d = 150 Å, V = 15 V, และ l = 6 cm

เนื่องจากโดยทั่วไปค่าสภาพนำไฟฟ้าของชั้น p มีค่าอยู่ในระดับ $\sigma = 10^{-7} \sim 10^{-6}$ S/cm ดังนั้นจากผลการคำนวณในรูปที่ 5.8 ทำให้ทราบว่าแม้ว่าระยะห่างของ ITO-ITO จะแคบเพียง 0.1~1 μm ก็จะมีกระแสไฟฟ้ารั่วน้อยมากเพียงระดับไมโครแอมป์ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าไม่มีปัญหาเรื่องกระแสไฟฟ้ารั่วในแนวพื้นผิว

5.4 ผลการประดิษฐ์ a-SiC:H TFLED ที่มีโครงสร้างแบบเมตริกซ์

ในงานวิทยานิพนธ์บทนี้ได้ทดลองออกแบบ a-SiC:H TFLED ที่มีโครงสร้างแบบเมตริกซ์จำนวน 2 รุ่นโดยมีรายละเอียดของแต่ละรุ่นแสดงในตารางที่ 5.1 และผลการประดิษฐ์รุ่นต่าง ๆ แสดงดังรูป 5.9 - 5.12 อนึ่ง TFLED ที่ประดิษฐ์ในบทนี้เป็นวัสดุ a-SiC:H รอยต่อ p-i-n และช่องว่างพลังงานของชั้น i เท่ากับ 3.0 eV เปล่งแสงสีส้มเหลือง

รูปที่ 5.9 - 5.10 แสดงภาพถ่าย TFLED ที่มีโครงสร้างแบบเมตริกซ์ ขณะยังไม่ทำการ



รูปที่ 5.8 ตัวอย่างผลการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของ ITO-ITO และกระแสไฟฟ้าที่รั่วในชั้น p พารามิเตอร์ในรูปคือ สภาพนำไฟฟ้าของชั้น p- a-SiC:H ในการคำนวณกำหนดให้ d = 150 Å, V = 15 V, และ l = 6 cm

ตารางที่ 5.1 รายละเอียดต่าง ๆ ของ a-SiC:H TFLED ที่มีโครงสร้างแบบเมตริกซ์รุ่นต่าง ๆ

รุ่น	พื้นที่การเปล่งแสง	ขนาดของพิกเซล	ระยะห่างของพิกเซล	จำนวนพิกเซล
1	3.5 cm × 3 cm	0.5 mm × 0.5 mm	0.5 mm	35×30
2	3 cm × 2 cm	0.2 mm × 0.2 mm	0.2 mm	75×50

ไบอัสแรงดันไฟฟ้าที่มีขนาดพิกเซล 0.5 mm × 0.5 mm และ 0.2 mm × 0.2 mm ตามลำดับ

รูปที่ 5.11 - 5.12 แสดงภาพถ่าย TFLED ที่มีโครงสร้างแบบเมตริกซ์ขณะเปล่งแสงมีขนาดพิกเซล 0.5 mm × 0.5 mm และ 0.2 mm × 0.2 mm ตามลำดับ

รูปที่ 5.13 แสดงตัวอย่างการบรรจุ TFLED ลงในกรอบรูปภาพ ซึ่งจะเห็นว่าได้ดิสเพลย์ที่มีลักษณะบางและแบนมีศักยภาพในการใช้งานเป็นดิสเพลย์ เช่น สำหรับคอมพิวเตอร์โน๊ตบุ๊ค เป็นต้น ในรูปจะเห็นว่า TFLED เป็นดิสเพลย์ที่มีความสวยงามและง่ายต่อการติดตั้ง ผลงานความสำเร็จในการประดิษฐ์ TFLED เมตริกซ์นี้ [32] ถือได้ว่าเป็นนวัตกรรมการประดิษฐ์ดิสเพลย์ชนิดใหม่ของโลก

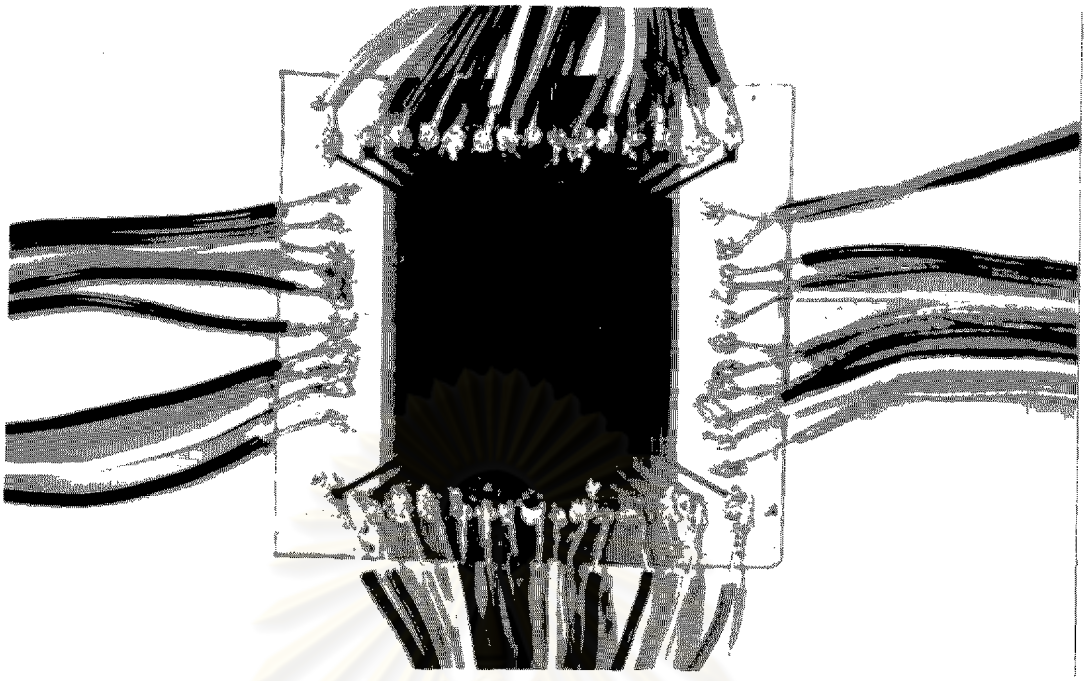
รูปที่ 5.14 แสดงภาพถ่าย TFLED ที่มีลักษณะโปร่งแสง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ตั้งชื่อ TFLED ให้ว่า "See Through Display" จัดว่าเป็นนวัตกรรมชนิดใหม่ของโลกอีกชนิดหนึ่ง

ผลการประดิษฐ์ TFLED ที่มีโครงสร้างแบบเมตริกซ์ได้ผลเป็นที่น่าพอใจมาก ได้ความสว่างสูงสุดหลาย cd/m^2 และความสม่ำเสมอของความสว่างของแต่ละพิกเซลอยู่ในเกณฑ์ที่น่าพอใจ แต่จะพบว่ามีบางแถบที่ไม่เปล่งแสง เพราะสิ่งประดิษฐ์ TFLED เมตริกซ์ได้ทำการต่อขั้วโลหะด้วยแบบอุลตราโซนิคเองซึ่งอาจจะเกิดรอยต่อของโลหะไม่ดี เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าให้แก่ TFLED ที่มีโครงสร้างแบบเมตริกซ์เกิดการเปล่งแสงที่ระดับค่ากระแสสูงประมาณ 100 - 300 mA/cm^2 อาจทำให้ความร้อนที่เกิดขึ้นมีผลต่อรอยต่อขั้วโลหะไม่เป็นรอยต่อแบบโอห์มมิค

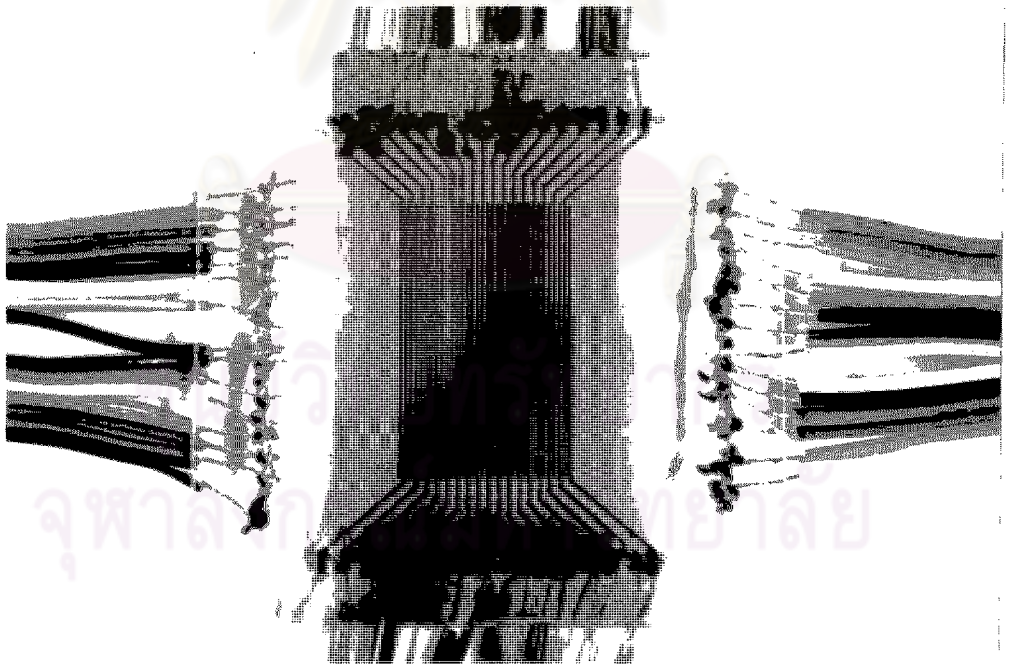
5.5 TFLED ดิสเพลย์ชนิดโปร่งแสง

สิ่งที่ค้นพบที่น่าสนใจอีกเรื่องหนึ่งในสิ่งประดิษฐ์ TFLED คือเป็นสิ่งประดิษฐ์ที่มีลักษณะโปร่งแสงซึ่งสามารถมองทะลุไปสู่ด้านหลังของดิสเพลย์ได้ดังที่แสดงตัวอย่างในรูปที่ 5.14 ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำให้เกิดแนวความคิดใหม่ในการใช้งาน TFLED ที่แปลกไปกว่าดิสเพลย์ชนิดอื่นๆ อีกด้วยกล่าวคือ สามารถใช้งาน TFLED ดิสเพลย์เป็นกระจกใสไปในตัว ซึ่งจะมีสีเหลืองส้มบ้างตามสีของฟิล์ม a-SiC:H (ค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านแสงของ TFLED มีค่าประมาณ 70 %)

ตัวอย่างถ้าเราติดตั้ง TFLED ดิสเพลย์นี้ที่หน้าต่างหรือประตูทางผ่าน หรือหน้าตู้โชว์ใน



รูปที่ 5.9 ภาพถ่าย TFLED ที่มีโครงสร้างแบบเมตริกซ์และมีพิกเซลขนาด 0.5 mm × 0.5 mm ขณะยังไม่เปล่งแสง

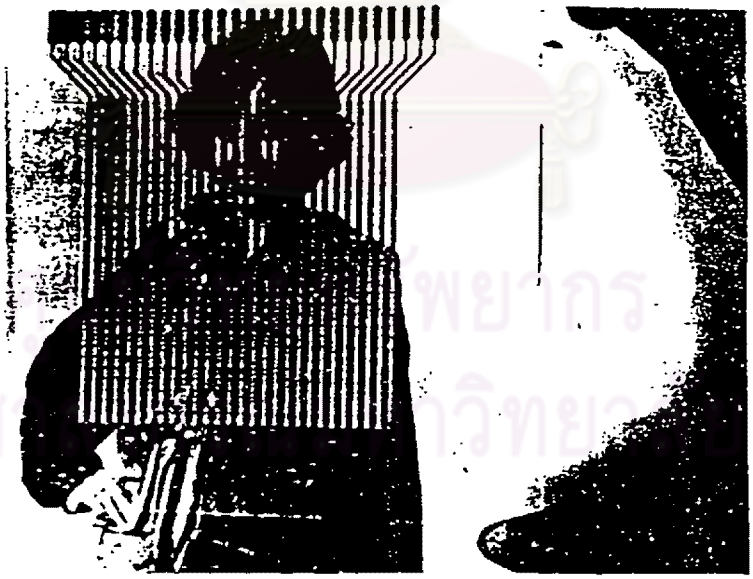


รูปที่ 5.10 ภาพถ่าย TFLED ที่มีโครงสร้างแบบเมตริกซ์และมีขนาดพิเซล 0.2 mm × 0.2 mm ขณะยังไม่เปล่งแสง

รูปที่ 5.11 ภาพถ่าย TFLED ที่มีขนาดพิกเซล 0.5 mm× 0.5 mm ขณะกำลังเปล่งแสง

รูปที่ 5.12 ภาพถ่าย TFLED ที่มีขนาดพิกเซล 0.2 mm × 0.2 mm ขณะกำลังเปล่งแสง

รูปที่ 5.13 ตัวอย่างการบรรจุ TFLED ลงในกรอบรูปภาพซึ่งจะเห็นว่าได้ดิสเพลย์ที่มีลักษณะบางและแบนมีศักยภาพในการใช้งานเป็นดิสเพลย์ เช่น สำหรับคอมพิวเตอร์โน๊ตบุ๊คเป็นต้น



รูปที่ 5.14 ภาพถ่าย TFLED ซึ่งมีลักษณะโปร่งแสง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ตั้งชื่อ TFLED ให้ว่า "See Through Display" จัดว่าเป็นนวัตกรรมชนิดใหม่ของโลกอีกชนิดหนึ่ง

เวลาที่ไม่ได้ใช้งาน TFLED ดิสเพลย์จะทำหน้าที่เป็นกระจกกรองแสงและเมื่อใช้งาน (ป้อนกระแสไฟฟ้า) ให้ดิสเพลย์เปล่งแสงก็จะแสดงข้อมูลเป็นตัวอักษรหรือตัวเลขหรือรูปภาพต่าง ๆ ได้ตามต้องการ หรืออาจใช้เป็น dash board (หน้าปัทม์) ในยานพาหนะได้ เช่น เวลาไม่ใช้งานผู้ขับรถก็จะเห็นข้อมูลด้านหลังดิสเพลย์ และเมื่อใช้งานก็จะเห็นข้อมูลบนดิสเพลย์ในลักษณะ "ภาพลอย"

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ตั้งชื่อดิสเพลย์ชนิด TFLED นี้อีกลักษณะหนึ่งว่า "See Through Display" (ดิสเพลย์โปร่งแสง)

5.6 สรุป

ได้ประสบความสำเร็จในการประดิษฐ์ดิสเพลย์ไดโอดเปล่งแสงฟิล์มบาง (TFLED) ให้มีโครงสร้างแบบเมตริกซ์สามารถเปล่งแสงได้ที่มีขนาดพิกเซล 0.2 mm × 0.2 mm ที่เล็กที่สุดในโลกสำเร็จเป็นครั้งแรก ผลการทดลองประดิษฐ์ได้ผลเป็นที่น่าพอใจไม่พบว่ามีปัญหาเรื่องคลอสทอล์คและกระแสไฟฟ้ารั่วซึ่งไม่เกี่ยวข้องกับการเปล่งแสงนั้นมีค่าน้อยมาก ความละเอียดของพิกเซลสามารถออกแบบให้มีความละเอียดระดับสิบไมครอนได้โดยไม่มีปัญหาด้านเทคโนโลยี นอกจากนี้ยังพบว่าดิสเพลย์ชนิดนี้มีลักษณะโปร่งแสงด้วย จึงสามารถใช้งานดิสเพลย์ TFLED ในลักษณะ "See Through Display" ได้อีกด้วย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย