



รายงานผลการประดิษฐ์
ทุนอุดหนุนโครงการสิ่งประดิษฐ์

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์
ระยะที่ 2

เรื่อง

ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางชนิดวัสดุอะมอร์ฟิัสสารกึ่งตัวนำ
Amorphous Semiconductor Visible - Light
Thin Film Light Emitting Diode

โดย

ตุสิต เครื่องงาม
สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว
สมชัย รัตนธรรมพันธ์
บัณฑิตา รัฐวิเศษ

621.381
522
ค17647
ส.2

๗๗
๙-๐๓-๐๓

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ทุนอุดหนุนโครงการสิ่งประดิษฐ์



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์
ระยะที่ 2

เรื่อง

ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางชนิดวัสดุอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำ
Amorphous Semiconductor Visible-Light
Thin Film Emitting Diode

โดย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ดุสิต เครื่องงาม (หัวหน้าโครงการ)
ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว (ผู้ร่วมวิจัย)
อาจารย์ ดร. สมชัย รัตนธรรมพันธ์ (ผู้ร่วมวิจัย)
และ นางบัณฑิตา รัฐวิเศษ (ผู้ร่วมวิจัย)

ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
กรุงเทพมหานคร 10330

กันยายน 2538

I1729031A



กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgment)

งานวิจัยเรื่องนี้ได้รับเงินทุนสนับสนุนจำนวน 2,553,660 บาท จากโครงการสิ่งประดิษฐ์ ฝ่ายวิจัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ประจำปี 2535-2538 รวมเป็นเวลา 3 ปี คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณคณะกรรมการและเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้องทุกท่านในโครงการสิ่งประดิษฐ์ รวมทั้งขอขอบคุณคณะกรรมการติดตามผลการวิจัยคือ รศ.ดร. ภิชัย ปันยารชุน และ รศ. วิรุฬห์ มังคละวิรัช ที่ได้ให้คำแนะนำ คำวิจารณ์และข้อคิดเห็นต่างๆ มากมายที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อโครงการฯ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ได้ให้ความรับผิดชอบค่าใช้จ่ายต่างๆ ในการขอรับสิทธิบัตร เพื่อคุ้มครองทรัพย์สินทางปัญญาที่ได้จากโครงการวิจัยทั้งในประเทศไทย ในประเทศออสเตรเลียและในประเทศสหรัฐอเมริกา และขอขอบคุณ รศ.ดร. ศลักษณ์ ทรรพนันท์ อดีตรองอธิการบดีฝ่ายวิจัย จุฬาฯ และปัจจุบันประธานสถาบันทรัพย์สินทางปัญญาที่ได้ให้คำแนะนำและกำลังใจในการทำวิจัย และโดยเฉพาะอย่างยิ่งท่านได้ต่อสู้กับความยากลำบากในการยื่นขอจดสิทธิบัตร ขอขอบคุณ ศ.ดร.เผด็จ สิทธิสุนทร ที่ได้ให้คำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ในการเขียนสิทธิบัตร และขอขอบคุณสำนักบริการวิชาการ จุฬาฯ ที่รับหน้าที่ดูแลการยื่นขอจดสิทธิบัตรด้วยดีมาตลอด

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความร่วมมือในการวัดสเปกตรัมของ UV transmittance, IR absorption และ Electron Spin Resonance (ESR)

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีชีวภาพและวิศวกรรมพันธุศาสตร์ จุฬาฯ ที่ได้อนุเคราะห์ให้ใช้เครื่องวัด UV transmittance

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ร่วมงานทุกคนในห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง นายวิโรจน์ บุญโกสมภ ในฐานะผู้ช่วยวิจัยและนิสิตปริญญาเอกที่เป็นกำลังสำคัญในการปลูกฟิล์ม การผลิตสิ่งประดิษฐ์ และการวัดต่างๆ ขอขอบคุณคุณศุภโชค ไทยน้อย, คุณปริษา บุญอำไพ, คุณอนุศักดิ์ เกตุสำราญ และคุณศิริพงษ์ ปฏิพัทธ์รงค์ ที่ให้ความร่วมมือด้านเทคนิคต่างๆ และขอขอบคุณคุณขวัญเรือน ไทยน้อย เลขานุการห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่ได้พิมพ์รายงานเล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติที่ได้ให้การสนับสนุนการวิจัยด้วยโครงการพัฒนาวิชาชีพนักวิจัย

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณบริษัทพีเอ็มเออร์โกลเบิลเคอร์เปอเรชั่นจำกัด ที่ได้ให้เงินทุนสนับสนุนการวิจัยเพิ่มเติม จำนวน 200,000 บาท และขอขอบคุณผู้เชี่ยวชาญอาวุโสหลายท่านจากบริษัทนี้ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ดร. วิโรจน์ ตันตราภรณ์ กรรมการผู้จัดการ, ดร.จรรยา คำนวนตา ผู้จัดการแผนกบุคคล และ ดร.วิบูลย์เกียรติ โมฬีรตานนท์ ผู้อำนวยการสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีที่ได้ให้ข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ยิ่งเกี่ยวกับงานวิจัย และขอขอบคุณ ดร. บรรเจิด เดลอม จาก

บริษัทเดียวกันที่ได้มาร่วมทำวิจัยในโครงการนี้ที่ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำเป็นเวลา 1 ปี

ผลงานการวิจัยเรื่องนี้ได้รับรางวัลที่มีเกียรติหลายรางวัลทั้งระดับประเทศและระดับนานาชาติ ทำให้คณะผู้วิจัยมีกำลังใจในการทำวิจัยเพิ่มขึ้นมาก จึงขอขอบคุณดังนี้

1. หัวหน้าโครงการวิจัยได้รับการคัดเลือกจาก มูลนิธิส่งเสริมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทยและสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (NRCT) ให้เป็นตัวแทนประเทศไทยไปประเทศสิงคโปร์และได้รับการคัดเลือกจากคณะกรรมการวิทยาศาสตร์อาเซียนและรัฐบาลสิงคโปร์ให้ได้รับรางวัลชนะเลิศ “Young ASEAN Scientist & Technologist Award” ประจำปี 2535

2. รางวัล EDN Innovator Award จากวารสาร ASIA EDN Electronics ในฮ่องกง ปี 2537

3. รางวัลผลงานคิดค้นหรือสิ่งประดิษฐ์ที่เป็นประโยชน์ต่อประเทศประจำปี 2537 รางวัลที่ 1 จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

4. รางวัลพัฒนาวิชาชีพนักวิจัย จากสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ปี 2538-2542

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ Mr. H. Maehata, Hitachi Zosen Corporation ประเทศญี่ปุ่นที่ได้บริจาคแผ่นโลหะวัสดุสแตนเลสสตีลที่ผิวมีความเรียบดีมาก ซึ่งถูกนำมาใช้เป็นแผ่นฐานสำหรับการประดิษฐ์ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางในงานวิจัย และทำให้คณะผู้วิจัยสามารถค้นพบข้อดีเด่นของแผ่นฐานโลหะหลายประเด็น และผลงานเรื่องนี้ได้เผยแพร่ในที่ประชุม Materials Research Society 1994

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ Dr. H. Sakai และ Dr. S. Fujikake, Fuji Electric R&D Corporation ประเทศญี่ปุ่น ที่ได้ให้ความร่วมมือในส่วนของ การปรับปรุงความสว่างของไดโอดเปล่งแสง โดยการส่งชิ้นงานที่เป็น glass/ITO/ p-microcrystalline SiO:H จากญี่ปุ่นมาให้คณะผู้วิจัยปลูกฟิล์มชั้น i, n และ Al ทับ จนสามารถได้ไดโอดเปล่งที่มีประสิทธิภาพสูงชิ้นได้สำเร็จ และผลงานเรื่องนี้ได้เผยแพร่ในที่ประชุมนานาชาติ (16th International Conference on Amorphous Semiconductors, Kobe, Japan, 1995.)

ตลอดการทำวิจัยเรื่องนี้ ผลงานเรื่องนี้ได้รับความสนใจและเป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวางจากนักวิจัยผู้เชี่ยวชาญด้านอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำในหลายประเทศ ได้มีการแลกเปลี่ยนความคิดเห็นและได้รับคำแนะนำที่มีคุณค่าและกำลังใจจากหลายท่านในที่ประชุมนานาชาติ โดยเฉพาะอย่างยิ่งบุคคลต่อไปนี้ คณะผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณมากที่สุดคือ Prof. Dr. Y. Hamakawa (Japan), Prof. Dr. H. Okamoto (Japan), Prof. Dr. W.I. Milne (UK), Prof. Dr. J.M. Marshall (UK), Dr. J.C. Kanicky (USA), Dr. R.A. Street (USA), Dr. A. Madan (USA), Dr. R. Carius (Germany), Prof. Dr. J. Kocka (Czech), Prof. Dr. S.M. Pietruszko (Poland), Prof. Dr. S. Nonomura (Japan), Prof. Dr. E. Fortunato (Portugal), Prof. Dr. J. Shirafuji (Japan), ศ.ดร.วิรุฬห์ สายคณิต, ศ.ดร. สุทัศน์ ยกส้าน และรศ. ดร. กรกฎ วัฒนวิเชียร

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัย Tokyo Institute of Technology ที่ได้อนุเคราะห์การ
วัดความเรียบของผิวแผ่นโลหะสแตนเลสสตีลซึ่งใช้งานเป็นแผ่นฐานของไดโอดเปล่งแสงฟิล์มบาง
และขอขอบคุณ ผศ.ดร. ธารา ชลปราณี ที่ได้วัดความเรียบดังกล่าวให้ในระหว่างเดินทางไปญี่ปุ่น

ในระหว่างการทำวิจัย ผู้วิจัยได้รับการสนับสนุนค่าใช้จ่ายจากหลายหน่วยงานให้สามารถ
เดินทางไปเผยแพร่ผลงานวิจัยในที่ประชุมนานาชาติหลายครั้ง ซึ่งได้แก่ ฝ่ายวิชาการจุฬาลงกรณ์-
มหาวิทยาลัย บริษัทพรีเมียร์โกลเบลคคอร์โปเรชันจำกัด และสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และ
เทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)



สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชื่อโครงการ	ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางชนิดวัสดุอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำ	
ชื่อผู้ดำเนินงาน	ผศ. ดร. ดุลิต เครื่องงาม (หัวหน้าโครงการ)	
	ศ. ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว (ผู้ร่วมวิจัย)	
	อ. ดร. สมชัย รัตนธรรมพันธ์ (ผู้ร่วมวิจัย)	
	นางบัณฑิตา รั้ววิเศษ (ผู้ร่วมวิจัย)	
ระยะเวลาการทำวิจัย	ตุลาคม 2535-กันยายน 2538 (รวม 3 ปี)	
ปีที่ทำวิจัยเสร็จ	กันยายน 2538	

บทคัดย่อ

ได้มีการคิดค้นการออกแบบและประดิษฐ์ “ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางชนิดวัสดุอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำ” ได้สำเร็จ สิ่งประดิษฐ์มีโครงสร้างเป็นรอยต่อ p-i-n ของฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอนอัลลอยชนิดที่มีช่องว่างพลังงานกว้างซึ่งได้แก่ อะมอร์ฟัสซิลิคอนไนไตรด์ (a-SiN:H) อะมอร์ฟัสซิลิคอนคาร์ไบด์ (a-SiC:H) และอะมอร์ฟัสซิลิคอนออกไซด์ (a-SiO:H) ฟิล์มบางเหล่านี้เตรียมด้วยวิธี glow discharge plasma CVD ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางนี้สามารถเปล่งแสงสีต่างๆที่ตามองเห็นได้ตั้งแต่สีแดง สีส้ม สีเหลือง สีเขียว ไปจนถึงสีน้ำเงินขาว เป็นสิ่งประดิษฐ์ที่มีศักยภาพในการนำไปใช้งานเป็นดีสเพลย์ชนิดใหม่ของโลกที่มีลักษณะเด่นหลายด้านในอนาคต เช่น บาง เบา ใช้แรงดันไฟฟ้าต่ำ และมีราคาถูก

ในงานวิจัยนี้ได้ดำเนินการวิจัยตั้งแต่การติดตั้งเครื่องมือ glow discharge plasma CVD สำหรับปลูกฟิล์ม a-SiN:H, a-SiC:H และ a-SiO:H โดยการใช้การผสมของก๊าซชนิดต่างๆเป็นวัสดุเริ่มต้นซึ่งได้แก่ SiH₄, NH₃, CH₄, C₂H₄, CO₂ และใช้ก๊าซ B₂H₆ และ PH₃ เป็นก๊าซโด๊ปสำหรับทำให้ฟิล์มเหล่านี้มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด p และ n ตามลำดับ ฟิล์มที่เตรียมได้ถูกนำไปศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานต่างๆ อย่างละเอียดและอย่างเป็นระบบทั้งคุณสมบัติทางโครงสร้าง (IR, ESCA, ESR) คุณสมบัติทางแสง(การดูดกลืนแสง, ช่องว่างพลังงาน, การเปล่งแสงโฟโตลูมิเนสเซนซ์) และคุณสมบัติทางไฟฟ้า (สภาพนำไฟฟ้า) ผลการวิจัยพบว่าระดับพลังงานชนิด localized states ในช่องว่างพลังงานมีอิทธิพลมากต่อคุณสมบัติพื้นฐานของฟิล์ม ในงานวิจัยได้ประสบความสำเร็จในการเตรียมฟิล์มบาง a-SiN:H, a-SiC:H และ a-SiO:H ที่มีช่องว่างพลังงานกว้างเพียงพอ (2.0-3.5 eV) ต่อการเปล่งแสงที่ตามองเห็นได้ ข้อมูลที่ได้ในการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของฟิล์มเหล่านี้มีประโยชน์มากในการนำไปใช้ออกแบบ และประดิษฐ์ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบาง ตลอดจนใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติต่างๆ ของไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบาง

ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางที่พัฒนาขึ้นสำเร็จในงานวิจัยนี้มีโครงสร้างพื้นฐานประกอบด้วยฟิล์มบางชั้นต่างๆที่มีความหนารวมประมาณ 0.5 ไมครอนเคลือบอยู่บนแผ่นกระจก กล่าวคือ ประกอบด้วย “แผ่นกระจก/ฟิล์มโปร่งแสงที่นำไฟฟ้าได้ (ITO)/ ฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอนอัลลอยชั้น p-i-n/ฟิล์มขั้วไฟฟ้า Al” ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางนี้เปล่งแสงได้ด้วยหลักการของการฉีดกระแสไฟฟ้า กล่าวคือ ฉีดโฮลจากชั้น p และอิเล็กตรอนจากชั้น n ให้เข้าไปรวมตัว

กันในระดับ i ซึ่งเป็นชั้นเปล่งแสง แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ไบแอสเพื่อฉีดกระแสไฟฟ้ามีค่าประมาณ 5-15 โวลต์ ความสว่างของแสงที่เปล่งมีค่าอยู่ในช่วง $0.1 \sim 1 \text{ cd/m}^2$ โดยใช้กระแสไฟฟ้าประมาณ $100 \sim 1000 \text{ mA/cm}^2$ สีของการเปล่งแสงกำหนดจากขนาดของช่องว่างพลังงานของชั้น i

ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางที่ประดิษฐ์ได้นั้น ได้นำไปศึกษาวิเคราะห์กลไกการฉีดพาหะและกลไกการเปล่งแสงอย่างละเอียด ผลการวิเคราะห์พบว่า การฉีดพาหะได้อาศัยกลไกการทะลุนิวตริ่ง (tunneling) เป็นหลักและการเปล่งแสงเกิดจากการรวมตัวของอิเล็กตรอนและโฮลที่ระดับ localized states นอกจากนี้ได้มีการศึกษาหาความหนาที่เหมาะสมของชั้น i ทั้งทางทฤษฎีและการทดลอง พบว่าความหนาที่เหมาะสมของชั้น i มีค่าประมาณ 500 \AA

การวิจัยได้มีการเปรียบเทียบคุณสมบัติการเปล่งแสงของไดโอดเปล่งแสงฟิล์มบางที่ชั้น i ผลิตจากวัสดุอะมอร์ฟิสนิตแตกต่างกัน ผลการวิจัยพบว่า ไดโอดเปล่งแสงฟิล์มบางที่ชั้น i ผลิตจาก $a\text{-SiC:H}$ จะเปล่งแสงได้สว่างมากที่สุดที่ 2 cd/m^2 และรองลงไปได้แก่ $a\text{-SiN:H}$ และ $a\text{-SiO:H}$ ตามลำดับ

ได้มีความพยายามในการปรับปรุงความสว่างของไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางหลายวิธี ได้แก่ 1) การปรับปรุงประสิทธิภาพของการรวมตัวแบบเปล่งแสงของพาหะ โดยการใช้แผ่นโลหะซึ่งมีคุณสมบัตินำความร้อนได้ดีและสะท้อนแสงได้ดีเป็นแผ่นฐานแทนแผ่นกระจก ทำให้ความสว่างเพิ่มขึ้นเป็น 5 cd/m^2 และ 2) ได้มีการปรับปรุงประสิทธิภาพของการฉีดพาหะ (โฮล) โดยการใช้ฟิล์มไมโครคริสตัลไลน์ซิลิคอนออกไซด์ ($\mu\text{-SiO:H}$) ชนิด p ซึ่งมีคุณสมบัตินำไฟฟ้าได้ดีและมีช่องว่างพลังงานกว้างเป็นชั้นฉีดโฮลแทน $a\text{-SiC:H}$ ชนิด p ทำให้ความสว่างของไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางเพิ่มขึ้นถึงระดับ 10 cd/m^2

ในด้านการพัฒนาเป็นดิสเพลย์ ได้ประสบความสำเร็จในการประดิษฐ์ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางให้เปล่งแสงเป็นรูปร่างลักษณะต่างๆ อีกทั้งผลิตให้มีโครงสร้างเป็นเมตริกซ์และมีพื้นที่กว้างใหญ่ถึงระดับร้อยตารางเซนติเมตรได้สำเร็จ ผลงานข้อนี้เป็นการพิสูจน์ว่าไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางนี้สามารถผลิตเป็นดิสเพลย์แบบบางเรียบได้จริง ดิสเพลย์ชนิดนี้สามารถใช้งานด้วยกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่มีความถี่มอดูเลชันที่สูงถึงประมาณ 500 kHz ได้

นอกจากไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางจะมีประโยชน์ในด้านดิสเพลย์แล้ว ในงานวิจัยนี้ยังได้ประสบความสำเร็จในการประยุกต์ใช้งานไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางเป็นภาคเปล่งแสงในโฟโตคัปเปิลอร์ด้วย นั่นคือได้ประสบความสำเร็จในการพัฒนาโฟโตคัปเปิลอร์ชนิดอะมอร์ฟิสนิตสารกึ่งตัวนำเป็นครั้งแรก ในโฟโตคัปเปิลอร์ชนิดอะมอร์ฟิสนิต มีเซลล์แสงอาทิตย์ (โฟโตไดโอด) ชนิดอะมอร์ฟิสนิตเป็นภาครับแสง และสามารถทำงานที่ความถี่มอดูเลชันได้สูงหลายร้อย kHz

ในตอนท้ายของงานวิจัย ได้มีการวิเคราะห์และเสนอแนวทางในการออกแบบให้ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางที่มีโครงสร้างพิเศษอื่นๆ เพื่อการปรับปรุงความสว่างและการใช้งานที่หลากหลาย อีกทั้งได้เสนอโครงสร้างของวงจรรวมออปโตอิเล็กทรอนิกส์ชนิดอะมอร์ฟิสนิตสารกึ่งตัวนำเป็นครั้งแรก ซึ่งจะเป็นสิ่งประดิษฐ์พื้นฐานในระบบ optical computer และ neural network ต่อไปในอนาคต

ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางชนิดอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำนี้ จัดว่าเป็นสิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดใหม่ที่เกิดขึ้นในโลก ทั้งนี้เพราะว่าไดโอดเปล่งแสงที่มีการผลิตอยู่ในภาคอุตสาหกรรมในปัจจุบันนั้น ทำจากวัสดุผลึกเดี่ยวทั้งหมด ส่วนในงานวิจัยนี้ใช้วัสดุอะมอร์ฟัสทั้งหมด และเป็นการช่วยขยายการประยุกต์ใช้งานวัสดุอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำด้วย

ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางชนิดอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำนี้สามารถเปล่งแสงจากพื้นผิว (surface emission) ได้ จึงมีศักยภาพที่จะนำไปผลิตเป็นจอภาพดิสเพลย์แบบบางเรียบ (flat-panel display) หรือจอโทรทัศน์แบบบางเรียบ (flat-panel TV) ได้ ดังนั้นผลงานวิจัยการคิดค้นในงานวิจัยนี้จึงมีเนื้อหาทั้งทางวิชาการที่ลึกซึ้งและมีศักยภาพสูง ในการประยุกต์ผลิตในภาคอุตสาหกรรม

ข้อดีเด่นของไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางชนิดอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำนี้ ได้แก่

- 1) ต้นทุนการผลิตต่ำเพราะใช้วัสดุราคาถูกและผลิตด้วยวิธี CVD ที่อุณหภูมิเพียง 190°C
- 2) ผลิตเป็นฟิล์มบางพื้นที่ใหญ่ๆ ได้ง่าย ทำให้ได้ดิสเพลย์ขนาดใหญ่
- 3) ผลิตบนแผ่นฐานวัสดุชนิดต่างๆ ได้ เช่น แผ่นกระจก แผ่นโลหะ แผ่นพลาสติก แผ่นเซรามิก ทำให้ได้ดิสเพลย์รูปร่างและการใช้งานหลากหลาย เป็นต้น

ผลงานวิจัยเรื่องนี้ ได้มีหลายส่วนที่นับว่า เป็นความสำเร็จเป็นครั้งแรกในระดับนานาชาติ ซึ่งได้แก่

1. การพัฒนาไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางจากวัสดุอะมอร์ฟัสซิลิคอนอัลลอยหลายชนิด ซึ่งได้แก่ a-SiN:H, a-SiC:H, a-SiO:H ในลักษณะรอยต่อ p-i-n
2. การใช้วัสดุโลหะเป็นแผ่นฐานให้ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบาง ทำให้ความสว่างและความคงทนดีขึ้น
3. การพัฒนาไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางโดยมีไมโครคริสตัลไลน์ซิลิคอนออกไซด์ ($\mu\text{c-SiO:H}$) เป็นชั้น p ทำให้ความสว่างดีขึ้น
4. การพัฒนาดิสเพลย์ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางโครงสร้างเมตริกซ์ ซึ่งเป็นโครงสร้างพื้นฐานของดิสเพลย์ที่ใช้งานจริง
5. การพัฒนาไฟโอดคัปเปิลอร์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนอัลลอย ซึ่งเป็นประโยชน์ในงานออปโตอิเล็กทรอนิกส์
6. การเสนอแนวความคิดโครงสร้างวงจรรวมออปโตอิเล็กทรอนิกส์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนอัลลอย

**Project Title: Amorphous Semiconductor Visible-Light
Thin Film Light Emitting Diode**

Names of the Investigators:

Assistant Professor Dr. Dusit Kruangam	(Project Leader)
Professor Dr. Somsak Panyakeow	(Co-Researcher)
Dr. Somchai Ratamathamapan	(Co-Researcher)
Ms. Bandhita Ratviset	(Co-Researcher)

Period of Project: October 1992-September 1995

Year of Completion: September 1995

Abstract

An amorphous "Thin Film Light Emitting Diode" (TFLED) has been developed for the first time. The TFLED has a basic structure of glass/ITO/ p-i-n layers of amorphous silicon alloys/Al. The amorphous silicon alloys employed in the work are wide optical energy gaps materials, so-called, hydrogenated amorphous silicon nitride (a-SiN:H), hydrogenated amorphous silicon carbide (a-SiC:H) and hydrogenated amorphous silicon oxide (a-SiO:H). The total thickness of all of the thin films is only 0.5 micron. The TFLED can emit the visible light having the colors from red, orange, yellow to green and white-blue depending on the optical energy gap of the i-layer. The TFLED has several advantages as compared with conventional displays, such as flat panel display, light weight, low operation voltages and low cost.

The research started from the construction of the glow discharge plasma CVD system for growing a-SiN:H, a-SiC:H and a-SiO:H films. A detailed study was done on the basic properties of these films including structural (IR absorption, ESCA, ESR), optical (absorption coefficient, optical energy gap) and electrical properties (conductivity).

The TFLED is a carrier-injection type electroluminescent device. The light output comes from the radiative recombination of holes and electrons injected from the p- and n-layers, respectively into the i-layer. The typical voltage and the injection current density are about 5-15 volt and 100-1000 mA/cm², respectively. These give the typical brightness of about 0.1~1 cd/m². The theoretical and experimental results showed that the optimal thickness of the i-layer is about 500 Å.

The performances of the amorphous TFLED depend on the selection of materials used for the i-layer of the devices. The result showed that the TFLED with a-SiC:H as the i-layer gives the highest brightness of 2 cd/m², while a-SiN:H gives lower but higher than a-SiO:H.

A series of trials has also been conducted to improve the brightness of the TFLED. The first attempt was to improve the radiative recombination efficiency by using a metal substrate instead of a glass substrate. A metal substrate is a good thermal conductive material so that it can dissipate heat from the TFLED to the ambient with a better efficiency than a glass substrate. The other attempt was to improve the injection efficiency

of holes by using p-type highly-conductive and wide optical energy gap microcrystalline silicon oxide (p- μ c-SiO:H) instead of conventional p-a-SiC:H. The result showed that the brightness was improved to the level of 10 cd/m^2 .

A series of experiments has been done on the fabrication of TFLED displays that can emit light with desired emitting patterns. A new type of dot matrix TFLED display has also been proposed and fabricated for the first time. The screen size for the demonstration is $10 \times 10 \text{ cm}^2$. It is shown that the spacing distance of pixels which limits the resolution can be as small as μm .

In this research, a new type of amorphous photocoupler having the amorphous TFLED as a light source has been developed for the first time. The amorphous photocoupler can be used in various kinds of electronic and mechanical applications, such as interface between logic circuit, position detection and RPM detection, etc.

Moreover, various novel structures of amorphous TFLEDs were also proposed in order to improve the brightness.

The amorphous semiconductor TFLED developed in this research is a new type of electronic device, since it is the LED that is made out of thin film amorphous semiconductor, while the conventional LED is made of crystalline semiconductor. The TFLED is a surface light-emitting device. Therefore, it has a potential to be produced as a flat-panel display or flat-panel TV.

The advantages of the amorphous TFLED are as follows : 1) low-cost, because the TFLED is made from low-cost amorphous material and uses a low temperature CVD process (190°C), 2) it has the possibility to be produced as a large area display, 3) it can be deposited on various substrates, such as glass, metal, plastic, ceramic sheets, therefore various forms of displays can be realized., etc.

In conclusions, there were several explorations in the research that contributed to the science and technology of amorphous semiconductor community. The main topics are summarized as follows:

1) Amorphous TFLEDs with a structure of p-i-n junctions of a-SiN:H, a-SiC:H and a-SiO:H materials have been developed. The results showed that the highest brightness of $1-2 \text{ cd/m}^2$ was obtained in the TFLED with a-SiC:H as the i-layer.

2) The brightness of the amorphous TFLED has been improved to 5 cd/m^2 by using a sheet of metal material as a substrate for the TFLED.

3) The brightness of the amorphous TFLED has been also improved to 10 cd/m^2 by using p-type microcrystalline SiO:H as the hole injection p-layer in TFLED.

4) Novel dot matrix amorphous TFLED displays have been developed. The dot matrix design is the basic structure for a practical large area display.

5) Novel amorphous photocouplers have been developed. The amorphous photocouplers are also divided into a photo-isolator type and a photo-interrupter type.

6) Some new amorphous optoelectronic ICs (OEIC) were proposed.

สารบัญเรื่อง

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	II
บทคัดย่อภาษาไทย.....	V
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	VIII
สารบัญเรื่อง.....	X
สารบัญตาราง.....	XVI
สารบัญภาพ.....	XVIII
คำอธิบายสัญลักษณ์.....	XXXI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1. ความสำคัญและที่มาของหัวข้อการวิจัย.....	1
1.1.1 สิ่งประดิษฐ์แสดงผลชนิดต่าง ๆ.....	1
1.1.2 การพัฒนาสิ่งประดิษฐ์แสดงผลชนิดบางเรียบ.....	2
1.1.3 การพัฒนาไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางจากวัสดุอะมอร์ฟัส- สารกึ่งตัวนำ.....	4
1.2. วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	4
1.3. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
1.4. วิธีการดำเนินการวิจัย.....	9
1.5. ขอบเขตของการวิจัย.....	10
1.6. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย.....	10
1.7. โครงสร้างของรายงานการวิจัย.....	11
เอกสารอ้างอิง.....	13
บทที่ 2 คุณสมบัติดีเด่นของฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอนอัลลอยและการผลิตด้วย วิธี Glow Discharge Plasma CVD.....	14
2.1 วัสดุอะมอร์ฟัสคืออะไร.....	15
2.2 คุณสมบัติสำคัญของวัสดุอะมอร์ฟัส.....	15
2.3 คุณสมบัติดีเด่นของวัสดุฟิล์มบาง a-Si:H, a-SiN:H, a-SiC:H และ a-SiO:H.....	17
2.4 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานวัสดุ a-Si:H, a-SiN:H, a-SiC:H และ a-SiO:H.....	19
2.5 วิธีการปลูกฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอนอัลลอย.....	20
2.5.1 โครงสร้างของระบบ Glow Discharge Plasma CVD.....	20
2.5.2 ขั้นตอนการผลิตฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอนอัลลอย.....	24

สารบัญเรื่อง (ต่อ)

	หน้า
2.6 สรุป.....	27
เอกสารอ้างอิง.....	28
บทที่ 3 การพัฒนาไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางอะมอร์ฟิสสารกึ่งตัวนำ(TFLED) โดยมี a-SiN:H เป็นชั้นเปล่งแสง.....	30
3.1 การศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานทางโครงสร้างของ a-SiN:H.....	31
3.1.1 การวัดพันธะของอะตอมใน a-SiN:H ด้วยสเปกตรัมการดูดกลืนแสงอินฟราเรด.....	31
3.1.2 การวัดจำนวนแขนขาดใน a-SiN:H ด้วยวิธีอิเล็กตรอนสปิน-เรโซแนนซ์ (ESR).....	37
3.2 การศึกษาคุณสมบัติทางแสงของ a-SiN:H.....	43
3.2.1 สเปกตรัมสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและช่องว่างพลังงานของ a-SiN:H.....	43
3.2.2 การศึกษาโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของ a-SiN:H.....	48
3.2.2.1 การขึ้นกับช่องว่างพลังงานของ a-SiN:H ของ PL.....	50
3.2.2.2 การขึ้นกับความยาวคลื่นของแสงที่ใช้กระตุ้น PL.....	50
3.2.2.3 อิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่มีต่อประสิทธิภาพของโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของ a-SiN:H.....	55
3.3 การผลิตไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบาง (TFLED) โดยมี a-SiN:H เป็นชั้นเปล่งแสง (รอยต่อ p-a-SiC:H/i-a-SiN:H/n-a-SiC:H).....	57
3.3.1 การเตรียม a-SiC:H สำหรับใช้เป็นชั้นฉีดพาหะใน TFLED.....	57
3.3.2 การออกแบบและการผลิต a-SiN:H TFLED.....	60
3.3.2.1 โครงสร้างพื้นฐานของไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบาง (TFLED).....	60
3.3.2.2 ขั้นตอนการประดิษฐ์ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางของ a-SiN:H.....	63
3.4 ลักษณะสมบัติพื้นฐานของ a-SiN:H TFLED.....	65
3.4.1 ลักษณะสมบัติ J-V และกลไกการฉีดพาหะใน a-SiN:H TFLED.....	65
3.4.2 สเปกตรัมการเปล่งแสงของ a-SiN:H TFLED.....	68
3.4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความสว่างและกระแสไฟฟ้าที่ฉีดเข้าสู่ a-SiN:H TFLED.....	71

สารบัญเรื่อง (ต่อ)

หน้า

3.4.4 การวิเคราะห์กลไกการฉีดพาหะและกลไกการรวมตัวของพาหะ ใน a-SiN:H TFLED.....	74
3.4.5 การหาค่าความหนาที่เหมาะสมของชั้น i ใน a-SiN:H TFLED...	79
3.4.6 การขึ้นกับความถี่ของกระแสไฟฟ้าพัลส์ของความสว่างของ a-SiN:H TFLED.....	83
3.4.7 การผลิต a-SiN:H TFLED ให้เปล่งแสงเป็นรูปร่างต่าง ๆ.....	86
3.4.7.1 การประดิษฐ์ a-SiN:H TFLED ที่เปล่งแสงภาพนิ่ง.....	86
3.4.7.2 ตัวอย่างผลการประดิษฐ์ TFLED ซึ่งกำหนดรูปร่าง ด้วยขั้วโลหะ Al.....	87
3.4.7.3 ตัวอย่างผลการประดิษฐ์ TFLED ซึ่งกำหนดรูปร่าง ด้วยขั้วโปร่งแสง ITO.....	87
3.5 สรุป.....	93
เอกสารอ้างอิง.....	96
บทที่ 4 การพัฒนาไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางอะมอร์ฟิซสารกึ่งตัวนำ (TFLED) โดยมี a-SiC:H เป็นชั้นเปล่งแสง.....	99
4.1 การผลิตและผลการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบาง a-SiC:H.....	99
4.2 การผลิตและลักษณะสมบัติพื้นฐานของ TFLED โครงสร้าง p-a-SiC:H/ i-a-SiC:H/n-a-SiC:H.....	105
4.3 การผลิต a-SiC:H TFLED ให้เปล่งแสงรูปร่างต่าง ๆ.....	112
4.4 สรุป.....	118
เอกสารอ้างอิง.....	119
บทที่ 5 การพัฒนาไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางอะมอร์ฟิซสารกึ่งตัวนำ (TFLED) โดยมี a-SiO:H เป็นชั้นเปล่งแสง.....	121
5.1 การผลิตและคุณสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบาง a-SiO:H.....	121
5.2 ลักษณะสมบัติพื้นฐานของ a-SiO:H TFLED และผลการเปรียบเทียบกับ a-SiC:H TFLED และ a-SiN:H TFLED.....	125
5.3 สรุป.....	127
เอกสารอ้างอิง.....	127

สารบัญเรื่อง (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 6 การปรับปรุงความสว่างของ TFLED ด้วยวิธีต่าง ๆ.....	129
6.1 การปรับปรุงความสว่างโดยการใช้วัสดุโลหะเป็นแผ่นฐาน.....	130
6.1.1 คุณสมบัติดีเด่นของการใช้วัสดุโลหะเป็นแผ่นฐาน.....	130
6.1.2 การผลิต TFLED ซึ่งมีวัสดุโลหะเป็นแผ่นฐาน.....	133
6.1.3 ผลการประดิษฐ์ TFLED โดยมีวัสดุโลหะเป็นแผ่นฐาน.....	135
6.2 การปรับปรุงความสว่างโดยการเพิ่มประสิทธิภาพของการฉีดโฮลด้วยวัสดุ p-a-(μ c)-SiO:H ซึ่งมีค่าสภาพนำไฟฟ้าสูงและช่องว่างพลังงานกว้าง..	141
6.2.1 การผลิตฟิล์ม a-(μ c)-SiO:H ชนิด p และคุณสมบัติพื้นฐาน.....	144
6.2.2 ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางรอยต่อ p-a-(μ c)-SiO:H/ i-a-SiC:H/n-a-SiC:H.....	146
6.3 สรุป.....	151
เอกสารอ้างอิง.....	151
 บทที่ 7 การพัฒนา TFLED โครงสร้างเมตริกซ์สำหรับจอแสดงผลแบบบางชนิดใหม่	 153
7.1 การออกแบบและวิธีการประดิษฐ์ TFLED โครงสร้างเมตริกซ์.....	153
7.2 วงจรสมมูลและความละเอียดของจุดภาพใน TFLED โครงสร้างเมตริกซ์..	156
7.3 ผลการประดิษฐ์ TFLED โครงสร้างเมตริกซ์.....	161
7.4 TFLED แสดงผลชนิดโปร่งแสง.....	170
7.5 สรุป.....	170
เอกสารอ้างอิง.....	171
 บทที่ 8 การประยุกต์ใช้งานไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบาง (TFLED) ในงาน ออปโตอิเล็กทรอนิกส์.....	 173
8.1 ลักษณะเด่นของโฟโตคัปเปิลอร์ชนิดอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำ.....	174
8.2 การพัฒนาโฟโตคัปเปิลอร์ชนิดอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำ.....	176
8.2.1 โครงสร้างชนิดต่าง ๆ ของโฟโตคัปเปิลอร์ชนิดอะมอร์ฟัสสาร- กึ่งตัวนำ.....	176
8.2.2 การประดิษฐ์โฟโตคัปเปิลอร์ชนิดอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำ.....	179
8.2.3 ลักษณะสมบัติพื้นฐานของไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบาง.....	179
8.2.4 คุณสมบัติพื้นฐานของโฟโตคัปเปิลอร์ชนิดอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำ.....	182
8.3 การพัฒนางจรรวมออปโตอิเล็กทรอนิกส์ชนิดอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำ.....	191
8.4 สรุป.....	193

สารบัญเรื่อง (ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง.....	193
บทที่ 9 การออกแบบไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางที่มีโครงสร้างพิเศษอื่น ๆ.....	196
9.1 TFLED โครงสร้าง Tandem.....	196
9.2 TFLED โครงสร้าง 2 หน้า.....	196
9.3 TFLED โครงสร้างหลายสี.....	199
9.4 สรุป.....	199
บทที่ 10 สรุป.....	200
ภาคผนวก.....	204
1) การเผยแพร่ผลงานวิจัย.....	204
2) การจดสิทธิบัตร (Patents).....	207
3) รางวัลต่าง ๆ ที่ได้รับจากผลงานวิจัยเรื่องนี้.....	208
4) การได้รับเกียรติให้เผยแพร่ผลงานวิจัยในงานนิทรรศการต่าง ๆ.....	219
5) การได้รับเกียรติเผยแพร่ผลงานโดยสื่อมวลชนแขนงต่าง ๆ.....	223
6) ตัวอย่างข้อมูลที่แสดงว่าผลงานวิจัยเรื่องนี้ได้รับความสนใจจาก นักวิทยาศาสตร์ทั่วโลก.....	230
6.1) การเป็นแหล่งอ้างอิงทางวิชาการมาตรฐานนานาชาติ (Citation Search).....	230
6.2) รายชื่อนักวิทยาศาสตร์ที่ติดต่อขอ Reprints ของบทความเรื่อง ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางซึ่งเผยแพร่ในที่ประชุม 16th Conf. Amorphous Semiconductors วันที่ 4-8 กันยายน 2538 เมือง โกเบ ญี่ปุ่น.....	231
6.3) รายชื่อนักวิทยาศาสตร์ที่ติดต่อขอ Reprints ของบทความเรื่อง ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางซึ่งเผยแพร่ตีพิมพ์ใน Japanese Journal of Applied Physics 1993.....	233
6.4) รายชื่อนักวิทยาศาสตร์ที่ติดต่อขอ Reprints ของบทความเรื่อง ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางซึ่งเผยแพร่ในที่ประชุม Materials Research Society (MRS) เมษายน 2537 เมืองซานฟรานซิสโก สหรัฐอเมริกา.....	233

สารบัญเรื่อง (ต่อ)

	หน้า
6.5) รายชื่อนักวิทยาศาสตร์ที่ติดต่อขอ Reprints ของบทความเรื่อง ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางซึ่งเผยแพร่ในที่ประชุม Materials Research Society (MRS) เมษายน 2538 เมืองซานฟรานซิสโก สหรัฐอเมริกา.....	234
6.6) รายชื่อนักวิทยาศาสตร์ที่ติดต่อขอ Reprints ของบทความเรื่อง ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางซึ่งเผยแพร่ในวารสาร EDN ASIA Electronics, Hong Kong 1994.....	234
7) การพัฒนาโปรแกรมซอฟต์แวร์.....	235
8) วิธีการใช้เครื่องมือต่าง ๆ ในงานวิจัย.....	249
8.1) วิธีการใช้ระบบ Glow Discharge Plasma CVD.....	249
8.2) วิธีการใช้เครื่อง Electron Beam Evaporator (EB).....	257

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1	ตัวอย่างข้อเสียของสิ่งประดิษฐ์แสดงผลชนิด CRT..... 2
ตารางที่ 1.2	ข้อดีเด่นของไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบาง (TFLED) ชนิดอะมอร์ฟัส- สารกึ่งตัวนำ..... 4
ตารางที่ 1.3	เปรียบเทียบข้อมูลทางเทคนิคของสิ่งประดิษฐ์แสดงผลแบบบางต่าง ๆ (flat-panel) ชนิด Electroluminescence(EL), Liquid Crystal Display (LCD), crystalline LED และ amorphous TFLED..... 6
ตารางที่ 2.1	ตัวอย่างสิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ผลิตจากวัสดุอะมอร์ฟัสซิลิคอน อัลลอย..... 19
ตารางที่ 2.2	รายละเอียดของเครื่อง CVD..... 23
ตารางที่ 2.3	แผ่นฐานที่ใช้สำหรับปลูกฟิล์ม a-SiN:H, a-SiC:H, a-SiO:H ในงาน วิจัย..... 25
ตารางที่ 2.4	เงื่อนไขโดยสรุปของการปลูกฟิล์ม a-SiN:H, a-SiC:H และ a-SiO:H..... 27
ตารางที่ 3.1	ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งาน a-SiN:H ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ..... 31
ตารางที่ 3.2	เงื่อนไขสำหรับการปลูกฟิล์ม a-SiN:H ชนิดบริสุทธิ์..... 32
ตารางที่ 3.3	เงื่อนไขการปลูกฟิล์ม a-SiC:H ชนิด p และ n..... 60
ตารางที่ 3.4	เงื่อนไขการปลูกฟิล์มอะมอร์ฟัสชั้น p-i-n ใน a-SiN:H TFLED..... 65
ตารางที่ 4.1	เงื่อนไขการผลิต a-SiC:H ชนิดบริสุทธิ์สำหรับใช้เป็นชั้นเปล่งแสงใน TFLED..... 100
ตารางที่ 4.2	เงื่อนไขการประดิษฐ์ a-SiC:H TFLED รอยต่อ p-i-n ด้วยวิธี glow discharge plasma CVD..... 107
ตารางที่ 5.1	เงื่อนไขสำหรับการปลูกฟิล์ม a-SiO:H ชนิดบริสุทธิ์ด้วยวิธี glow discharge plasma CVD..... 122
ตารางที่ 5.2	คุณสมบัติพื้นฐานต่าง ๆ ของฟิล์ม a-SiO:H ที่ปลูกได้เช่น ความหนา อัตราการเติบโตของฟิล์มและช่องว่างพลังงาน..... 123
ตารางที่ 6.1	ตัวอย่างค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุต่าง ๆ ทั้งชนิด กระจกและโลหะ..... 130
ตารางที่ 6.2	เงื่อนไขสำหรับการผลิตฟิล์ม a-SiO:H และ μ c-SiO:H ชนิด p และ n ให้มีค่าสภาพนำไฟฟ้าสูง ด้วยวิธี glow discharge plasma CVD..... 144
ตารางที่ 6.3	ปริมาณของ Si, O, C และ H ในฟิล์ม a- หรือ μ c-SiO:H ชนิด p..... 146
ตารางที่ 6.4	พารามิเตอร์โครงสร้างของ TFLED แบบต่าง ๆ โดยที่หมายเลข #1, #2 และ #3 เป็น TFLED ที่มีโครงสร้างแบบเดิมตามที่ได้อ้างมาแล้ว ในบทที่ 3-5 และหมายเลข #4, #5, #6 และ #7 เป็นโครงสร้างใหม่ ในบทที่ 6 นี้..... 147

สารบัญตาราง (ต่อ)

		หน้า
ตารางที่ 7.1	รายละเอียดต่าง ๆ ของ TFLED โครงสร้างเมตริกซ์รุ่นต่าง ๆ.....	161
ตารางที่ 8.1	ตัวอย่างศักยภาพการใช้งานโพลีเมอร์ชนิดอะมอร์ฟิสสารกึ่งตัวนำที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้.....	174
ตารางที่ 8.2	เงื่อนไขในการผลิตไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางอะมอร์ฟิสและเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบางอะมอร์ฟิส.....	181



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 ตัวอย่างสิ่งประดิษฐ์แสดงผลชนิดต่าง ๆ ที่พัฒนามาถึงปัจจุบัน(ยังไม่รวม TFLED ที่พัฒนาเป็นครั้งแรกในงานวิจัยนี้).....	3
รูปที่ 1.2 ตัวอย่างผลงานการประดิษฐ์ดีสเพลย์ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำโครงสร้างเมตริกซ์ ซึ่งเป็นความสำเร็จเป็นครั้งแรกในโลก.....	5
รูปที่ 1.3 ลักษณะโครงสร้างของไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบาง (TFLED) ที่เสนอประดิษฐ์ในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วยรอยต่อชนิด p-i-n ของวัสดุอะมอร์ฟัสซิลิคอนอัลลอย นับเป็นสิ่งประดิษฐ์ชนิดใหม่ของโลก.....	8
รูปที่ 1.4 ขั้นตอนการประดิษฐ์ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำ.....	9
รูปที่ 1.5 โครงสร้างของรายงานวิจัยฉบับนี้.....	12
รูปที่ 2.1 เปรียบเทียบลักษณะของอะตอมที่สร้างพันธะแบบผลึกและแบบอะมอร์ฟัส....	16
รูปที่ 2.2 ขนาดช่องว่างพลังงานของวัสดุอะมอร์ฟัสซิลิคอนอัลลอยชนิดต่าง ๆ.....	16
รูปที่ 2.3 คุณสมบัติเด่นของสารกึ่งตัวนำอะมอร์ฟัสซิลิคอนอัลลอยชนิดต่าง ๆ เช่น a-Si:H, a-SiN:H, a-SiC:H, a-SiGe:H ฯลฯ.....	18
รูปที่ 2.4 โครงสร้างของระบบ Glow discharge plasma CVD ซึ่งติดตั้งในงานวิจัยสำหรับการปลูกฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอนอัลลอย ติดตั้งอยู่ที่ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ดิ็กไฟฟ้า ชั้นที่ 5 คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.....	21
รูปที่ 2.5 ภาพถ่ายระบบ Glow discharge plasma CVD.....	22
รูปที่ 2.6 ภาพถ่ายขณะกำลังทำการดิสชาร์จ ใช้งานระบบ Glow discharge plasma CVD.....	22
รูปที่ 2.7 ขั้นตอนการปลูกฟิล์ม a-Si:H, a-SiN:H, a-SiC:H, a-SiO:H.....	26
รูปที่ 2.8 ภาพถ่ายตัวอย่างฟิล์ม a-SiN:H ที่เคลือบบนแผ่นฐานชนิดกระจก ปริมาณอะตอม N เพิ่มจากซ้ายไปขวา เมื่อปริมาณอะตอม N ในฟิล์มมีมากขึ้นจะทำให้ช่องว่างพลังงานของ a-SiN:H กว้างขึ้น และสีของ a-SiN:H จะเปลี่ยนจากแดงเข้มไปเป็นโปร่งแสง.....	26
รูปที่ 3.1 ผลการวัดสเปกตรัมการทะลุผ่านแสงอินฟราเรด (T %) ของฟิล์ม a-SiN:H.....	33
รูปที่ 3.2 หลักการวัดค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (α) จากค่าการทะลุผ่านแสงอินฟราเรด.....	35
รูปที่ 3.3 สเปกตรัมสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงอินฟราเรดของ a-SiN:H พารามิเตอร์ในรูปคือ อัตราส่วนของก๊าซ $x = \text{NH}_3 / (\text{NH}_3 + \text{SiH}_4)$	35
รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (concentration) ของชุดอะตอม Si-H, Si-N, N-H ที่มีอยู่ในฟิล์ม a-SiN:H และอัตราส่วนก๊าซ $x = \text{NH}_3 / (\text{SiH}_4 + \text{NH}_3)$ ที่ใช้ในการปลูกฟิล์ม.....	36

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความสว่างของโฟโตลูมิเนสเซนซ์ และจำนวนของแขน ขาดในพันธะอะตอม (วัดจาก ESR spin density) ในกรณีฟิล์ม a-Si:H [22].....	38
รูปที่ 3.6 โมเดลสำหรับการรวมตัวของพาหะชนิดเปล่งแสง (radiative) และชนิด ไม่เปล่งแสง (non-radiative) ในแถบพลังงานต้องห้ามในวัสดุตระกูล อะมอร์ฟัสซิลิคอน.....	38
รูปที่ 3.7 ลักษณะของการเกิดอิเล็กตรอนไร้คู่ ซึ่งเป็นแขนขาด (lone pair electron หรือ dangling bond) ในอะมอร์ฟัสซิลิคอน.....	40
รูปที่ 3.8 นิยามของการตั้งชื่อแขนขาดชนิดต่าง ๆ [24].....	40
รูปที่ 3.9 สเปกตรัม ESR ของ a-SiN:H ที่ปลูกจากก๊าซอัตราส่วน $x = \text{NH}_3/(\text{SiH}_4 + \text{NH}_3) = 0.5$ สัญญาณตรงกลางเป็นของ a-SiN:H ส่วนสัญญาณด้าน ขอบซ้ายและขวาเป็นของ Marker Mn^{2+} ตัวที่ 3 และ 4 ตามลำดับ.....	41
รูปที่ 3.10 สรุปผลการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ESR spin density และอัตราส่วนก๊าซ $x = \text{NH}_3/(\text{SiH}_4 + \text{NH}_3)$ ที่ใช้ปลูกฟิล์ม a-SiN:H.....	42
รูปที่ 3.11 สรุปผลการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง g-value และอัตราส่วนก๊าซ $x = \text{NH}_3/(\text{SiH}_4 + \text{NH}_3)$ ที่ใช้ปลูกฟิล์ม a-SiN:H.....	42
รูปที่ 3.12 การเปลี่ยนสถานะ (transition) ของอิเล็กตรอนเมื่อมีการดูดกลืนแสง (A) กรณี extended states to extended states (ย่าน band edge) (B) กรณี tail states to extended states (ย่าน Urbach tail) และ (C) กรณี gap states to extended states (ย่าน deep gap states).....	44
รูปที่ 3.13 สเปกตรัมสัมพันธ์การดูดกลืนแสงในย่าน A (band edge) ของฟิล์มบาง a-SiN:H ชนิดบริสุทธิ์ (undoped) พารามิเตอร์ในรูปคือ อัตราส่วนก๊าซ $x = \text{NH}_3/(\text{NH}_3 + \text{SiH}_4)$	44
รูปที่ 3.14 Tauc's plot ($(\alpha h\nu)^{1/2}$ vs $h\nu$) ของ a-SiN:H ชนิดบริสุทธิ์เพื่อกำหนด ค่าช่องว่างพลังงาน (optical energy gap : E_{opt}) พารามิเตอร์ในรูปคือ อัตราส่วนก๊าซ $x = \text{NH}_3/(\text{NH}_3 + \text{SiH}_4)$	46
รูปที่ 3.15 การขึ้นกับอัตราส่วนก๊าซ $\text{NH}_3/(\text{NH}_3 + \text{SiH}_4)$ ของช่องว่างพลังงาน สำหรับฟิล์มบาง a-SiN:H ชนิดบริสุทธิ์.....	47
รูปที่ 3.16 การขึ้นกับอัตราส่วนก๊าซ $x = \text{NH}_3/(\text{NH}_3 + \text{SiH}_4)$ ของ B value สำหรับ ฟิล์ม a-SiN:H ชนิดบริสุทธิ์.....	47
รูปที่ 3.17 แผนภูมิวิธีการวัดสเปกตรัมของโฟโตลูมิเนสเซนซ์ เป็นระบบที่ออกแบบ ในงานวิจัย โดยมีคอมพิวเตอร์ควบคุมการวัดได้อย่างอัตโนมัติ.....	49

สารบัญภาพ (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 3.18	ผลการวัดสเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของ a-SiN:H ที่มีช่องว่างพลังงานระหว่าง 2.07-2.90 eV วัดที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้แสงเลเซอร์ HeCd ความยาวคลื่น 325 nm เป็นแสงกระตุ้น.....	51
รูปที่ 3.19	ความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างพลังงาน และค่ายอดพลังงาน (peak energy) ของสเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (PL) ของ a-SiN:H ที่วัดที่อุณหภูมิห้อง.....	51
รูปที่ 3.20	ความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างพลังงานและค่ายอดพลังงาน (peak energy) ของสเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (PL) และอัตราส่วนก๊าซ x ที่ใช้ปลูกฟิล์ม a-SiN:H.....	52
รูปที่ 3.21	การอธิบายการกระตุ้นโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (PL) ด้วยแสงที่มีพลังงานโฟตอนค่าต่าง ๆ และการรวมตัวแบบเปล่งแสงของพาหะที่ระดับพลังงานต่าง ๆ ใน localized states ในอะมอร์ฟิซิลิคอนอัลลอย.....	52
รูปที่ 3.22	สเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของ a-SiN:H ซึ่งถูกกระตุ้นด้วยแสงที่มีพลังงานโฟตอนค่าต่าง ๆ ($E_x = 1.96-3.39$ eV) โดยวัดที่อุณหภูมิห้อง ช่องว่างพลังงานของ a-SiN:H ในรูปคือ 2.50 eV.....	54
รูปที่ 3.23	ความสัมพันธ์ระหว่างค่ายอดพลังงานของสเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของ a-SiN:H และพลังงานโฟตอนของแสงที่ใช้กระตุ้น ในรูปนี้มีฟิล์ม a-SiN:H 4 ตัวอย่างที่มีช่องว่างพลังงาน (E_{opt}) เท่ากับ 2.14, 2.37, 2.50 และ 2.90 eV ตามลำดับ ตำแหน่งที่ชี้ด้วยลูกศรตรงกับค่าพลังงานช่องว่างของแต่ละตัวอย่าง.....	54
รูปที่ 3.24	การอธิบายการเปล่งแสงโฟโตลูมิเนสเซนซ์จาก a-SiN:H (a) กรณีไม่มีสนามไฟฟ้ามากระทำกับฟิล์ม a-SiN:H และ (b) กรณีมีสนามไฟฟ้าไบแอสฟิล์ม a-SiN:H.....	56
รูปที่ 3.25	ผลการวัดความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้าที่ไบแอสฟิล์ม a-SiN:H และความเข้มแสง (intensity) ของโฟโตลูมิเนสเซนซ์ ในรูปแสดงกรณี a-SiN:H ที่มีช่องว่างพลังงาน 2.13 eV และ 2.60 eV.....	56
รูปที่ 3.26	สเปกตรัมสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงในย่าน band edge ของ a-SiC:H ชนิด n พารามิเตอร์ในรูปคือ อัตราส่วนก๊าซ $x = CH_4/(CH_4+SiH_4)$ ที่ใช้ปลูกฟิล์ม.....	58
รูปที่ 3.27	Tauc's plot ($(\alpha hv)^{1/2}$ vs $h\nu$) ของ a-SiC:H ชนิด n จุดตัดแกนนอนได้แก่ค่าช่องว่างพลังงานของ a-SiC:H.....	58
รูปที่ 3.28	ความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างพลังงานของ a-SiC:H ชนิด n และอัตราส่วนก๊าซ $x = CH_4/(CH_4+ SiH_4)$ ที่ใช้ปลูกฟิล์ม.....	59

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.29 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้ามืด (dark conductivity) และช่องว่างพลังงานของ a-SiC:H ชนิด p เนื่องจากเมื่อช่องว่างพลังงานกว้างขึ้น จะทำให้สภาพนำไฟฟ้าลดลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงจำเป็นต้องใช้ฟิล์ม a-SiC:H ชนิด p, n ที่มีช่องว่างพลังงานคงที่ที่ 2.0 eV เป็นชั้น p, n ใน TFLED ตลอดการวิจัย.....	59
รูปที่ 3.30 โครงสร้างพื้นฐานของไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบาง (TFLED) รอยต่อ p-i-n ในรูปนี้ชั้นเปล่งแสงชนิด i ได้แก่ a-SiN:H ชนิดบริสุทธิ์ โดยที่ (a) ภาพตัดขวาง และ (b) ภาพแบบ 3 มิติ.....	61
รูปที่ 3.31 ลักษณะแถบพลังงานของ TFLED รอยต่อ p-i-n ซึ่งมี a-SiN:H ชนิด i เป็นชั้นเปล่งแสง โดยที่ (a) สภาพสมดุลเชิงความร้อน (b) สภาพขณะไบแอสตาม.....	62
รูปที่ 3.32 ขั้นตอนการผลิต a-SiN:H TFLED.....	63
รูปที่ 3.33 ภาพถ่าย a-SiN:H TFLED ที่ผลิตบนแผ่นกระจกขนาด 2x2 cm ² พื้นที่การเปล่งแสงมีขนาดตามหัว Al รูปวงกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 mm.....	64
รูปที่ 3.34 ตัวอย่างผลการวัดลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า (J-V) ของ a-SiN:H TFLED 2 ตัวซึ่งเปล่งแสงสีแดง (E _{opt} ของชั้น i = 2.50 eV) และเปล่งแสงสีเหลือง (E _{opt} ของชั้น i = 2.90 eV) ตามลำดับ.....	66
รูปที่ 3.35 ลักษณะสมบัติ J-V ของ a-SiN:H TFLED ซึ่งเปล่งแสงสีแดง และกราฟรูปเล็กในรูปเป็นการพล็อตของ log (J/V ²) vs 1/V ในกรณีไบแอสตามกราฟเส้นตรงในรูปเล็กนี้แสดงให้เห็นว่า กระแสไฟฟ้าไหลใน TFLED ด้วยวิธีการทันเนลลิง (tunneling).....	66
รูปที่ 3.36 แผนผังวิธีการวัดสเปกตรัมการเปล่งแสง (electroluminescence: EL) จาก TFLED โดยใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมการทำงานอย่างอัตโนมัติ.....	69
รูปที่ 3.37 สเปกตรัมการเปล่งแสง EL จาก a-SiN:H TFLED ที่เปล่งแสงสีแดง และสีเหลืองวัดที่อุณหภูมิห้อง.....	69
รูปที่ 3.38 ระบบเครื่องมือที่ใช้วัดความสัมพันธ์ระหว่างความสว่างของ TFLED และกระแสไฟฟ้ามืด ซึ่งมีคอมพิวเตอร์ควบคุมการวัดได้อย่างอัตโนมัติ.....	72
รูปที่ 3.39 ผลการวัดความสัมพันธ์ระหว่างความสว่างของ a-SiN:H TFLED และกระแสไฟฟ้ามืด ในรูปเป็นกรณี TFLED สีแดง (i E _{opt} = 2.50 eV) และสีเหลือง (i E _{opt} = 2.90 eV) ทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง.....	72

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.40 การอธิบายการเกิดปรากฏการณ์พูลเฟรนเคิล (Pool-Frenkel effect) ใน TFLED ที่พัฒนาขึ้น ซึ่งพาหะถูกกระทำให้แยกออกจากกันด้วยสนามไฟฟ้า เป็นผลทำให้อัตราการรวมตัวของพาหะ (recombination rate) ลดลง และเป็นอุปสรรคต่อความสว่างของ TFLED.....	73
รูปที่ 3.41 แผนภูมิแถบพลังงานของ a-SiN:H TFLED ในสภาพถูกไบแอสตาม ให้ตำแหน่งรอยต่อของ p/i อยู่ที่ $x = 0$ และตำแหน่งของรอยต่อ i/n อยู่ที่ $x = d$ E_{x1} ในรูปแสดงความแตกต่างของระดับพลังงานของ อิเล็กตรอนและโฮลที่ถูกกระตุ้นให้ TFLED เปล่งแสง.....	73
รูปที่ 3.42 ลักษณะของ localized states ใกล้แถบคอนดักชันและแถบวาเลนซ์ของ a-SiN:H ซึ่งมีรูปร่างเป็น exponential bandtails ในรูป α_c และ α_v เรียกว่า dispersive parameters และมีค่าระหว่าง 0-1.....	77
รูปที่ 3.43 โมเดลความสัมพันธ์ระหว่างความสว่างของ a-SiN:H TFLED และกระแส ไฟฟ้าที่ฉีดเข้า TFLED ความลาดของกราฟมีค่าประมาณ 1-1.1 ซึ่งให้ผล ใกล้เคียงผลการทดลองในรูปที่ 3.39.....	77
รูปที่ 3.44 โมเดลอธิบายความสว่างของ TFLED ที่ขึ้นอยู่กับความหนาของชั้น i ของ TFLED.....	80
รูปที่ 3.45 ผลการวัดความสัมพันธ์ระหว่างความสว่างของ TFLED และความหนาของ ชั้น i ใน a-SiN:H TFLED ที่เปล่งแสงสีแดง วัดที่กระแสไฟฟ้าเท่ากับ 1200 mA/cm^2	82
รูปที่ 3.46 ลักษณะสมบัติไดโอด (J-V) ของ a-SiN:H TFLED ซึ่งมีชั้น i ที่มีความ หนาระหว่าง $500 \text{ \AA} - 1000 \text{ \AA}$	82
รูปที่ 3.47 แผนภูมิแสดงวิธีการวัดลักษณะรูปคลื่น (wave form) ของความเข้มแสง เอาท์พุทของ a-SiN:H TFLED เมื่อนัดด้วยกระแสไฟฟ้าแบบพัลส์.....	84
รูปที่ 3.48 ลักษณะรูปคลื่น (wave form) ของแสงเอาท์พุทจาก a-SiN:H TFLED สีเหลือง เมื่อนัดด้วยกระแสไฟฟ้าแบบพัลส์สี่เหลี่ยม พัลส์ในรูป (a)-(d) มี duty cycle 50% และความถี่ 500 Hz, 2.5 kHz, 5 kHz และ 25 kHz ตามลำดับ.....	84
รูปที่ 3.49 (a) การวัดความสัมพันธ์ระหว่างความสว่างของอะมอร์ฟิส TFLED และความถี่ของกระแสไฟฟ้าพัลส์ (b) ผลการวัดความสัมพันธ์ระหว่างความสว่างและความถี่ของกระแสไฟฟ้า พัลส์ของ a-SiN:H TFLED สีเหลือง ทำการวัดที่อุณหภูมิห้องและ ควบคุมให้ออมพลิจูดของกระแสไฟฟ้าพัลส์คงที่ที่ 150 mA/cm^2	85

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.50 ภาพตัดขวางแสดงโครงสร้างของ TFLED ที่เปล่งแสงแบบภาพนิ่ง (a) กำหนดลวดลายของการเปล่งแสงด้วยขั้ว Al (b) กำหนดลวดลายของการเปล่งแสงด้วย ITO (c) กำหนดลวดลายของการเปล่งแสงด้วยชั้นฉนวน.....	88
รูปที่ 3.51 ภาพถ่ายของแผ่นโลหะมาสก์ (mask) สำหรับการเคลือบขั้ว Al.....	88
รูปที่ 3.52 ภาพถ่ายของ a-SiN:H TFLED ขณะที่ยังไม่เปล่งแสง โดยมี Al เป็นขั้ว รูปร่างกลมและรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า.....	89
รูปที่ 3.53 ภาพถ่ายของ a-SiN:H TFLED ขณะกำลังเปล่งแสงสีแดง รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 3x5 mm ²	89
รูปที่ 3.54 ภาพถ่ายของ a-SiN:H TFLED ขณะกำลังเปล่งแสงรูปร่างกลม เส้นผ่าศูนย์กลาง กลาง 2 mm และให้แสงสีต่างๆ (a) สีแดง (b) สีเหลือง (c) สีเขียว และ (d) สีขาว.....	90
รูปที่ 3.55 ขั้นตอนการประดิษฐ์ TFLED ที่เปล่งแสงมีรูปภาพตามลวดลายของขั้ว ITO ลวดลายของ ITO สร้างด้วยวิธีโฟโตลิโธกราฟีและกัดด้วยกรด.....	91
รูปที่ 3.56 ภาพตัวอย่างมาสก์ (mask) ที่ใช้ในกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีสำหรับสร้าง ลวดลายให้ ITO เป็นรูปร่างต่างๆ.....	91
รูปที่ 3.57 ภาพถ่ายของ a-SiN:H TFLED (a) ขณะยังไม่เปล่งแสง และ (b) ขณะกำลังเปล่งแสงสีขาวน้ำเงิน ตัวอักษรมีความสูง 6 mm กำหนดรูปภาพด้วยลวดลายของ ITO	92
รูปที่ 4.1 ผลการวัดความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนของแขนขาด (สปิน) และอัตราส่วน ก๊าซ $x = C_2H_4 / (SiH_4 + C_2H_4)$	101
รูปที่ 4.2 ผลการวัดความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างพลังงานของ a-SiC:H และ อัตราส่วนก๊าซ $x = C_2H_4 / (SiH_4 + C_2H_4)$ ช่องว่างพลังงานกำหนดจากวิธี ของ Tauc's Plot	101
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง B value และอัตราส่วนก๊าซ $x = C_2H_4 / (SiH_4 + C_2H_4)$ ที่ใช้ปลูกฟิล์ม a-SiC:H	102
รูปที่ 4.4 สเปกตรัมการเปล่งแสงโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (PL) ของ a-SiC:H ชนิดบริสุทธิ์ ซึ่งวัดที่อุณหภูมิห้อง พารามิเตอร์ในรูปนี้คือ ช่องว่างพลังงานซึ่งเปลี่ยนจาก 2.3 eV-3.0 eV แสงที่ใช้กระตุ้น PL คือ แสงเลเซอร์ชนิด HeCd 325 nm.	103
รูปที่ 4.5 ตัวอย่างภาพถ่ายการเปล่งแสง PL สีเหลืองของ a-SiC:H ที่มีช่องว่างพลังงาน ประมาณ 2.8 eV (การวัด PL ได้ใช้ฟิลเตอร์ตัดแสงเลเซอร์ HeCd).....	103

สารบัญญภาพ (ต่อ)

	หน้า	
รูปที่ 4.6	สรุปลักษณะสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างพลังงาน และตำแหน่งของค่ายอดพลังงานของสเปกตรัม PL และอัตราส่วนของก๊าซ $x = C_2H_4 / (C_2H_4 + SiH_4)$ สำหรับฟิล์ม a-SiC:H ชนิดบริสุทธิ์.....	104
รูปที่ 4.7	โครงสร้างพื้นฐานของ a-SiC:H TFLED รอยต่อ p-i-n	106
รูปที่ 4.8	แผนภูมิแถบพลังงานของ a-SiC:H TFLED รอยต่อ p-i-n (a) สภาพสมดุลเชิงความร้อน (b) สภาพไบแอสตาม.....	106
รูปที่ 4.9	ลักษณะสมบัติความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของ a-SiC:H TFLED ความหนาของชั้น p, i, n คือ 150 Å, 500 Å และ 500 Å ตามลำดับ พารามิเตอร์ในรูปนี้คือ ช่องว่างพลังงานของชั้น i (ช่องว่างพลังงานของชั้น p และ n คงที่ที่ 2.0 eV).....	108
รูปที่ 4.10	สเปกตรัมการเปล่งแสงของ a-SiC:H TFLED วัดที่อุณหภูมิห้อง กระแสไฟฟ้า ฉีดเข้า TFLED แต่ละตัวประมาณ 100 mA/cm ² พารามิเตอร์ในรูปนี้คือช่องว่างพลังงานของชั้น i ซึ่งได้แก่ 2.6 eV, 2.8 และ 3.0 eV ตามลำดับ TFLED ซึ่งช่องว่างพลังงานของชั้น i มีค่า 2.6 eV เปล่งแสงสีแดง และ TFLED ซึ่งช่องว่างพลังงานของชั้น i มีค่า 2.8-3.0 eV เปล่งแสงสีเหลืองส้ม.....	108
รูปที่ 4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างความสว่างและความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ฉีดเข้า a-SiC:H TFLED พารามิเตอร์ในรูปคือช่องว่างพลังงานของชั้น i	110
รูปที่ 4.12	ลักษณะรูปคลื่น (wave form) ของแสงเอทพุทของ a-SiC:H TFLED ซึ่งตอบสนองต่อกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่มีความถี่ระหว่าง 500 Hz-20 kHz.....	111
รูปที่ 4.13	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของแสงเอทพุทของ a-SiC:H TFLED และความถี่ของกระแสไฟฟ้าพัลส์ ในการวัดใช้กระแสไฟฟ้าพัลส์ด้วยค่าแอมพลิจูด 16 mA และ duty cycle 50 % แกนในแนวตั้งเป็นค่าเปรียบเทียบกับค่าความสว่างที่ความถี่กระแสไฟฟ้าพัลส์ต่ำประมาณ 500 Hz.....	111
รูปที่ 4.14	ตัวอย่างแผ่นมาสก์(mask) ซึ่งได้สร้างขึ้นสำหรับกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี.	113
รูปที่ 4.15	ตัวอย่างภาพถ่ายของ a-SiC:H TFLED ที่เปล่งแสงสีเหลืองรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 3 mm × 5 mm ลวดลายสี่เหลี่ยมนี้ถูกกำหนดด้วยฟิล์มชั้น Al ซึ่งเคลือบด้วยวิธี evaporation.....	113

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า	
รูปที่ 4.16	ภาพถ่ายของ a-SiC:H TFLED ขณะยังไม่เปล่งแสง ใน TFLED แต่ละตัว จะสังเกตเห็นมีสายไฟฟ้าบัดกรีไว้ 2 เส้น โดยเส้นหนึ่งเป็นสายแรงดันไฟฟ้าบวกต่อกับ ITO และอีกเส้นเป็นสายแรงดันไฟฟ้าลบต่อกับ Al ในรูปนี้ ฟิล์ม Al ถูกเคลือบให้เต็มแผ่นกระจก ส่วนลวดลายของภาพถูกกำหนดด้วยลวดลายของ ITO.....	114
รูปที่ 4.17	ภาพถ่ายของ a-SiC:H TFLED กำลังเปล่งแสงเป็นรูป “เฟือง” ซึ่งเป็นสัญลักษณ์ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาฯ เส้นผ่าศูนย์กลางของรูปประมาณ 16 mm เปล่งแสงสีส้มเหลือง.....	114
รูปที่ 4.18	ภาพถ่ายของ a-SiC:H TFLED กำลังเปล่งแสงเป็นรูป “แมว” ความสูง 16 mm สีส้มเหลือง.....	115
รูปที่ 4.19	ภาพถ่ายของ a-SiC:H TFLED กำลังเปล่งแสงรูป “MRS” สัญลักษณ์ของสมาคม Materials Research Society ซึ่งผู้วิจัยส่งผลงานวิจัยเสนอในที่ประชุมหลายครั้ง ความสูง 7 mm เปล่งแสงสีส้มเหลือง.....	115
รูปที่ 4.20	ภาพถ่ายของ a-SiC:H TFLED กำลังเปล่งแสงรูป “SSDM” สัญลักษณ์ของการประชุมนานาชาติ Solid State Device & Materials ซึ่งผู้วิจัยเคยส่งผลงานเข้าเสนอในที่ประชุม ความสูง 4 mm เปล่งแสงสีส้มเหลือง.....	116
รูปที่ 4.21	ภาพถ่ายของ a-SiC:H TFLED กำลังเปล่งแสงรูปสัญลักษณ์ของกลุ่มบริษัทพีเมียร์ ซึ่งให้การสนับสนุนการวิจัยเรื่องไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบาง ความสูงรวมกรอบรอบนอก 14 mm เปล่งแสงสีส้มเหลือง.....	116
รูปที่ 4.22	ภาพถ่ายของ a-SiC:H TFLED กำลังเปล่งแสงรูปสัญลักษณ์ขององค์การโทรศัพท์แห่งประเทศไทย.....	117
รูปที่ 4.23	ตัวอย่างการออกแบบประยุกต์ TFLED เป็นจอแสดงผลที่มีรูปร่างบางคล้ายกรอบรูปภาพที่แขวนที่ฝาผนังได้ จากกรอบรูปภาพนั้น จะมีสายไฟฟ้าเชื่อมไปสู่วงจรไฟฟ้าสำหรับป้อนกระแสไฟฟ้าและสแกนภาพได้.....	117
รูปที่ 5.1	ตัวอย่างสเปกตรัมการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของ a-SiO:H ที่ปลูกที่อัตราส่วนก๊าซ $x = \text{CO}_2 / (\text{SiH}_4 + \text{CO}_2) = 0.6$	123
รูปที่ 5.2	ผลการวัดความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างพลังงาน (กำหนดด้วยวิธี Tauc's plot) และอัตราส่วนก๊าซ $x = \text{CO}_2 / (\text{SiH}_4 + \text{CO}_2)$ สำหรับฟิล์ม a-SiO:H ชนิดบริสุทธิ์.....	124
รูปที่ 5.3	ผลการวัดสเปกตรัมการเปล่งแสงโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (PL) ของ a-SiO:H ชนิดบริสุทธิ์ซึ่งมีช่องว่างพลังงานระหว่าง 2.4 eV - 3.16 eV โดยใช้แสงเลเซอร์ HeCd ที่มีพลังงานโฟตอน 3.8 eV (325 nm) เป็นแสงกระตุ้น.....	124

สารบัญญภาพ (ต่อ)

	หน้า	
รูปที่ 5.4	โครงสร้างของ TFLED รอยต่อ p-i-n ซึ่งมี a-SiO:H ชนิด i เป็นชั้นเปล่งแสง และมี a-SiC:H ชนิด p และ n เป็นชั้นฉุดพาหะ ช่องว่างพลังงานของชั้น p-i-n เท่ากับ 2.0, 3.0 และ 2.0 eV ตามลำดับ.....	126
รูปที่ 5.5	ลักษณะสมบัติการเปล่งแสงของ a-SiO:H TFLED (#3) โดยแสดงเปรียบเทียบความสว่างกับ TFLED ชนิดอื่น ๆ ที่มีวัสดุชั้น i แตกต่างกัน ซึ่งได้แก่ # 1 p-a-SiC:H/i-a-SiC:H/n-a-SiC:H # 2 p-a-SiC:H/i-a-SiN:H/n-a-SiC:H # 3 p a-SiC:H/i-a-SiO:H/n-a-SiC:H โดยที่ช่องว่างพลังงานของ TFLED ทุกตัวมีค่าคงที่ดังนี้ $p/i/n = 2.0 \text{ eV}/3.1 \text{ eV}/2.0 \text{ eV}$ ตามลำดับ และความหนาของชั้น p-i-n เท่ากับ 150, 500 และ 300 Å ตามลำดับ.....	126
รูปที่ 6.1	ตัวอย่างแผ่นฐานกระจกที่แตกเพราะความเครียดจากความร้อนจาก TFLED ซึ่งเกิดจากการที่ปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่ไหลใน TFLED ในพื้นที่ส่วนต่าง ๆ มีค่าไม่เท่ากัน.....	132
รูปที่ 6.2	(a) โครงสร้างของ TFLED แบบเดิมซึ่งใช้กระจกเป็นแผ่นฐาน (b) โครงสร้างของ TFLED แบบใหม่ซึ่งมีโลหะเป็นแผ่นฐาน โดยมีโครงสร้างคือ แผ่นฐานโลหะ/n-i-p a-SiC:H/ITO.....	132
รูปที่ 6.3	เปรียบเทียบลักษณะสมบัติ I-V ของ a-SiC:H TFLED ซึ่งเคลือบลงบนแผ่นฐานโลหะสแตนเลสสตีลที่ความขรุขระของผิวแตกต่างกัน.....	134
รูปที่ 6.4	ลักษณะสมบัติความสว่างของ a-SiC:H TFLED ซึ่งเคลือบลงบนแผ่นโลหะสแตนเลสสตีล (SUS) (เส้นประ) โดยในรูปนี้ได้เปรียบเทียบกับกรณี TFLED ซึ่งเคลือบลงบนแผ่นกระจกด้วย (เส้นทึบ) พารามิเตอร์ในรูปนี้คือ ช่องว่างพลังงานของชั้น i	134
รูปที่ 6.5	ความสัมพันธ์ระหว่างความสว่างของ a-SiC:H TFLED และกำลังไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่ที่ป้อนให้ TFLED โดยเปรียบเทียบกรณีแผ่นฐานชนิดโลหะสแตนเลสสตีลและแผ่นฐานชนิดกระจก	136
รูปที่ 6.6	อิทธิพลของความหนาของชั้น p ที่มีต่อความสว่างของ a-SiC:H TFLED จากรูปนี้ พบว่า ถ้าชั้น p หนามากเกินไป จะทำให้แสงที่เปล่งจากชั้น i ถูกชั้น p ดูดกลืนมาก ความหนาที่เหมาะสมของชั้น p คือประมาณ 150 Å	136
รูปที่ 6.7	สเปกตรัมการเปล่งแสงของ a-SiC:H TFLED (ช่องว่างพลังงานชั้น i เท่ากับ 3.0 eV) ที่เคลือบบนแผ่นโลหะสแตนเลสสตีล.....	137

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 6.8 ตัวอย่างภาพแผ่นฐานชนิดต่าง ๆ และภาพ a-SiC:H TFLED รูปสี่เหลี่ยมสี่ เหลี่ยม (3 mm x 5 mm) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานชนิดต่าง ๆ.....	137
รูปที่ 6.9 ตัวอย่างภาพถ่ายการเปล่งแสงของ a-SiC:H TFLED ที่เคลือบลงบนโลหะ สแตนเลสสตีล เปล่งแสงสีแดง พื้นที่เปล่งแสง 3 mm x 5mm (เงาที่ปรากฏในรูปคือสายไฟฟ้าที่ต่อกับ ITO).....	138
รูปที่ 6.10 ตัวอย่างภาพถ่ายการเปล่งแสงของ a-SiC:H TFLED ที่เคลือบลงบนโลหะ สแตนเลสสตีล เปล่งแสงสีเหลือง พื้นที่เปล่งแสง 3 mm x 5 mm.....	138
รูปที่ 6.11 ตัวอย่าง a-SiC:H TFLED ที่เคลือบบนแผ่นโลหะสแตนเลสสตีล โดยออก แบบให้เปล่งแสงเป็นรูปร่างต่าง ๆ (ลวดลายภาพกำหนดด้วยชั้นฉนวนตาม ที่แสดงในรูปที่ 6.12).....	139
รูปที่ 6.12 โครงสร้างของ TFLED ซึ่งกำหนดลวดลายการเปล่งแสงด้วยชั้นฉนวนที่สอด อยู่ภายใน วัสดุฉนวนอาจเป็น SiO ₂ หรือ SiN.....	139
รูปที่ 6.13 โครงสร้างของ TFLED ซึ่งมีขั้วไฟฟ้า ITO แบบเมตริกซ์ โดยมีชั้นฉนวนกัน ระหว่างแผ่นฐานโลหะและ ITO.....	140
รูปที่ 6.14 โครงสร้างของ TFLED ซึ่งถ้าผิวของแผ่นโลหะขรุขระ อาจทำให้ผิวเรียบขึ้น โดยการเคลือบชั้นบัฟเฟอร์ (buffer) เช่น วัสดุ ITO, TiO ₂ หรือ Ag	140
รูปที่ 6.15 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนประสิทธิภาพสูงระดับ 10% ซึ่งมีการประยุกต์ใช้วัสดุ a-SiO:H เป็นชั้น p [5].....	142
รูปที่ 6.16 โครงสร้างของ TFLED แบบต่าง ๆ ที่ประดิษฐ์ในงานวิจัยนี้ โดยในบทนี้พัฒนารุ่นที่ใช้วัสดุ p-a-SiO:H และ p- μ c-SiO:H เป็นชั้น ฉนวนดังแสดงในรูป (d) และ (e) ตามลำดับ.....	143
รูปที่ 6.17 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้า ช่องว่างพลังงานของฟิล์ม SiO:H และ อัตราส่วนของก๊าซ CO ₂ /(CO ₂ +SiH ₄) เมื่ออัตราส่วนของก๊าซ CO ₂ เพิ่มขึ้น จาก 0.05 เป็น 0.55 ทำให้ช่องว่างพลังงานของฟิล์มกว้างขึ้นจาก 2.1 eV เป็น 2.3 และขณะเดียวกันสภาพนำไฟฟ้าลดลงจาก 10 ⁰ เป็น 10 ⁻⁶ (S/cm)[5].....	145
รูปที่ 6.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้าและช่องว่างพลังงาน ในรูปนี้พบว่า สภาพนำไฟฟ้าของฟิล์มที่ผลิตด้วยเงื่อนไขให้เป็น p- μ c-SiO:H จะมีค่าสูง กว่า p-a-SiO:H ถึง 2-4 หลัก และช่องว่างพลังงานของ p- μ c-SiO:H สามารถผลิตให้กว้างถึง 2.2~2.3 eV ได้โดยที่ยังสามารถรักษาค่าสภาพนำ ไฟฟ้าไว้ได้ถึงระดับ 10 ⁻⁶ (S/cm) [5]	145

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 6.19 สเปกตรัมการเปล่งแสงของ TFLED ที่มีวัสดุชั้น p แตกต่างกัน 3 ชนิดซึ่ง ได้แก่ p-a-SiC:H, $E_{opt} = 2.0$ eV p-a-SiO:H, $E_{opt} = 2.15$ eV p- μ c-SiO:H, $E_{opt} = 2.30$ eV	147
รูปที่ 6.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ายอดพลังงานของสเปกตรัม EL และช่องว่างพลังงาน ของวัสดุชั้น p ที่ใช้ใน TFLED.....	149
รูปที่ 6.21 โมเดลอธิบายการเคลื่อนที่ของสเปกตรัม EL ไปทางพลังงานโฟตอนที่สูงขึ้น เมื่อช่องว่างพลังงานของชั้น p กว้างขึ้น.....	149
รูปที่ 6.22 เปรียบเทียบความสว่างของ TFLED ที่มีวัสดุชั้น p แตกต่างกัน โดยมีชั้น i และ n เหมือนกัน (โครงสร้างดูในรูปที่ 6.16 (d) และ (e)) TFLED หมายเลข #1 มีชั้น p คือ p-a-SiC:H (2.0 eV) TFLED หมายเลข #4, #5 มีชั้น p คือ p-a-SiO:H (2.15 eV) TFLED หมายเลข #6, #7 มีชั้น p คือ p- μ c-SiO:H (2.30 eV)	150
รูปที่ 7.1 โครงสร้างของ TFLED ซึ่งมีขั้วไฟฟ้า ITO และ Al ไขว้กันแบบเมตริกซ์ สำหรับฟิล์มอะมอร์ฟัสชั้น p-i-n นั้นเคลือบเต็มพื้นที่แผ่นฐาน.....	154
รูปที่ 7.2 ขั้นตอนการประดิษฐ์ TFLED แบบเมตริกซ์.....	154
รูปที่ 7.3 วิธีการสร้างลายเส้น Al ด้วยกระบวนการ lift-off.....	155
รูปที่ 7.4 ตัวอย่างลวดลายขั้วไฟฟ้า ITO และ Al ซึ่งไขว้กันแบบเมตริกซ์ ความกว้างของเส้นขั้วไฟฟ้าแต่ละเส้นเท่ากับ 1 mm และห่างกัน 1 mm.....	158
รูปที่ 7.5 วงจรสมมูลของ TFLED โครงสร้างเมตริกซ์	158
รูปที่ 7.6 วงจรสมมูลของ TFLED โครงสร้างเมตริกซ์ กรณีพิจารณาว่ามีกระแสไฟฟ้า รั่วผ่านจาก ITO เส้นหนึ่งผ่านชั้น p ไปสู่ ITO อีกเส้นหนึ่งข้างเคียง.....	159
รูปที่ 7.7 ภาพตัดขวางของ TFLED โครงสร้างเมตริกซ์ซึ่งอธิบายการเกิดกระแสไฟฟ้า รั่วผ่านชั้น p.....	159
รูปที่ 7.8 ตัวอย่างผลการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของ ITO-ITO และ กระแสไฟฟ้าที่รั่วในชั้น p พารามิเตอร์ในรูปคือ สภาพนำไฟฟ้าของชั้น p-a-SiC:H ในการคำนวณกำหนดให้ $d = 150$ Å, $V = 15$ V และ $l = 6$ cm.....	160
รูปที่ 7.9 ภาพถ่าย TFLED เมตริกซ์รุ่นที่ 1 ขณะยังไม่ได้เปล่งแสง.....	162
รูปที่ 7.10 ภาพถ่าย TFLED เมตริกซ์รุ่นที่ 1 ขณะกำลังเปล่งแสง.....	162
รูปที่ 7.11 ภาพถ่าย TFLED เมตริกซ์รุ่นที่ 1 ขณะกำลังเปล่งแสง โดยป้อนกระแสไฟฟ้า ให้เปล่งแสงพร้อมกันทุกพิกเซล.....	163

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 7.12	ภาพถ่าย TFLED เมตริกซ์รุ่นที่ 1 ขณะกำลังเปล่งแสงเพียงบางพิกเซล..... 164
รูปที่ 7.13	ภาพถ่ายขั้นตอนการประดิษฐ์ TFLED เมตริกซ์รุ่นที่ 2 ซึ่งเริ่มจากการสร้าง ITO ให้เป็นลวดลายเส้น ตามด้วยการเคลือบฟิล์ม a-SiC:H p-i-n และเคลือบ Al เป็นสายเส้น..... 165
รูปที่ 7.14	ภาพถ่าย TFLED เมตริกซ์รุ่นที่ 2 และขณะกำลังเปล่งแสงสีส้มเหลือง..... 166
รูปที่ 7.15	ตัวอย่างการบรรจุ TFLED ลงในกรอบคล้ายกรอบรูปภาพ ซึ่งจะเห็นว่าได้อิสเพลย์ที่มีลักษณะบางและแบน มีศักยภาพในการใช้งานเป็นดิสเพลย์ เช่น สำหรับคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก เป็นต้น ในรูปจะเห็นว่า TFLED เป็นดิสเพลย์ที่มีความสวยงามและง่ายต่อการติดตั้ง ผลงานความสำเร็จในการประดิษฐ์ TFLED เมตริกซ์นี้ถือได้ว่าเป็นนวัตกรรมการประดิษฐ์ดิสเพลย์ชนิดใหม่ของโลก..... 167
รูปที่ 7.16	ตัวอย่างลวดลายของขั้ว ITO และ Al ที่ไขว้กันสำหรับ TFLED เมตริกซ์รุ่นที่ 4 ซึ่งออกแบบโดยการใช้คอมพิวเตอร์ ขั้วไฟฟ้าแต่ละเส้นมีความกว้าง 0.2 mm..... 168
รูปที่ 7.17	ภาพถ่าย TFLED ซึ่งมีลักษณะโปร่งแสง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ตั้งชื่อให้ว่า "See Through TFLED Display" จัดว่าเป็นนวัตกรรมชนิดใหม่ของโลกอีกเช่นกัน..... 169
รูปที่ 8.1	ตัวอย่างโฟโตคัปเปิลอร์ชนิดผลึกและการใช้งาน [10]..... 175
รูปที่ 8.2	โครงสร้างของโฟโตคัปเปิลอร์ชนิดอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำซึ่งพัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้เป็นครั้งแรกในโลก และมีด้วยกัน 4 ชนิด และได้มีการจดสิทธิบัตร..... 177
รูปที่ 8.3	ตัวอย่างการบรรจุ (package) โฟโตคัปเปิลอร์ชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำลงในภาชนะในลักษณะต่างๆ และได้มีการจดสิทธิบัตร..... 180
รูปที่ 8.4	สเปกตรัมการเปล่งแสงของไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบาง 3 ตัว (เส้นทึบ) ซึ่งมีช่องว่างพลังงานของชั้น i เท่ากับ 2.6, 2.8, 3.0 eV ตามลำดับ และเส้นประในรูปแสดงผลตอบสนองแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัส... 181
รูปที่ 8.5	ลักษณะสมบัติพื้นฐานของโฟโตคัปเปิลอร์ชนิดอะมอร์ฟัส ในรูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าอินพุท (injection current density: J_{inj}) ที่ป้อนให้ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบาง และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเอาต์พุท (short circuit current output: J_{sc}) ที่ออกจากเซลล์แสงอาทิตย์ (โฟโตไดโอด) แบบฟิล์มบาง และพารามิเตอร์ d ในรูปนี้คือ ระยะห่างระหว่างภาคเปล่งแสงและภาครับแสง..... 183

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 8.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตและระยะห่าง d ระหว่างภาคเปล่งแสงและภาครับแสงของโฟโตคัปเปิลอร์ชนิดอะมอร์ฟิส.....	183
รูปที่ 8.7 ลักษณะสมบัติพื้นฐานของโฟโตคัปเปิลอร์ชนิดโฟโตอินเทอร์เรปเตอร์ที่มีโฟโตรีซิสเตอร์ (photoresistor) เป็นภาครับแสง (สิ่งประดิษฐ์รูปที่ 8.2 (b)) ในรูปนี้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้โฟโตรีซิสเตอร์และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตในสภาวะที่ไม่ได้ฉายแสง (วงกลมสีดำ) และสภาวะที่ฉายแสงจากไดโอดเปล่งแสง (วงกลมขาว) โดยที่แสงจากไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางมีความสว่างคงที่.....	185
รูปที่ 8.8 ลักษณะสมบัติเอาต์พุตของโฟโตคัปเปิลอร์ชนิดโฟโตไอโซเลเตอร์ซึ่งมีโครงสร้าง (c) ในรูปที่ 8.2 กล่าวคือมีไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบาง และเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบางอยู่บนกระจกแผ่นเดียวกัน และอยู่คนละด้านของแผ่นกระจก (dual surfaces).....	187
รูปที่ 8.9 ภาพถ่ายสิ่งประดิษฐ์ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางและเซลล์แสงอาทิตย์-ฟิล์มบางก่อนการประกอบเป็นโฟโตคัปเปิลอร์.....	189
รูปที่ 8.10 ภาพถ่ายโฟโตคัปเปิลอร์ชนิดอะมอร์ฟิสสารกึ่งตัวนำซึ่งประกอบด้วย ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางอะมอร์ฟิสและเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบางอะมอร์ฟิส ขาสองขาด้านซ้ายคือขาอินพุต และขาสองขาด้านขวาคือขาเอาต์พุต.....	189
รูปที่ 8.11 ภาพถ่ายของโฟโตคัปเปิลอร์ชนิดโฟโตไอโซเลเตอร์ ซึ่งประกอบด้วยไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางและเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบางซึ่งเคลือบอยู่บนกระจกแผ่นเดียวกันและอยู่คนละด้าน (dual surfaces).....	190
รูปที่ 8.12 ภาพถ่ายตัวอย่างโฟโตคัปเปิลอร์ชนิดอะมอร์ฟิสสารกึ่งตัวนำซึ่งบรรจุลงในภาชนะเรียบร้อยแล้ว โดยที่รูปซ้ายมือเป็นกรณีโฟโตอินเทอร์เรปเตอร์ และรูปขวามือเป็นกรณีโฟโตไอโซเลเตอร์.....	190
รูปที่ 8.13 ตัวอย่าง combination ระหว่างสิ่งประดิษฐ์เปล่งแสงและรับแสงที่ผลิตจากวัสดุอะมอร์ฟิสเพื่อประกอบเป็น optical functional elements ต่าง ๆ (a) optical switch, (b) photocoupler และ (c) optical amplifier.....	192
รูปที่ 8.14 ตัวอย่างสิ่งประดิษฐ์ multi-layer ที่ใช้วัสดุอะมอร์ฟิสล้วน ๆ ซึ่งมีประโยชน์ในงาน optical computer และ neural network ชนิดต่าง ๆ	192
รูปที่ 9.1 โครงสร้างของ TFLED แบบ tandem.....	197
รูปที่ 9.2 โครงสร้างของ TFLED แบบสร้างบนแผ่นกระจก 2 หน้า.....	198
รูปที่ 9.3 โครงสร้างของ TFLED แบบมีหลายสีบนพื้นระนาบ.....	198

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อที่ใช้ในการวิจัย

CVD	: Chemical Vapor Deposition
a-SiGe:H	: อะมอร์ฟัสซิลิคอนเยอรมันเนียม (Hydrogenated amorphous silicon Germanium)
a-SiN:H	: อะมอร์ฟัสซิลิคอนไนไตรด์ (Hydrogenated amorphous silicon nitride)
a-SiC:H	: อะมอร์ฟัสซิลิคอนคาร์ไบด์ (Hydrogenated amorphous silicon carbide)
a-SiSn:H	: อะมอร์ฟัสซิลิคอนดีบุก (Hydrogenated amorphous silicon tin)
a-SiO:H	: อะมอร์ฟัสซิลิคอนออกไซด์ (Hydrogenated amorphous silicon oxide)
a-Se	: อะมอร์ฟัสซีลีเนียม (Amorphous selenium)
ITO	: อินเดียมดีบุกออกไซด์ (Indium Tin Oxide)
RF power	: ความถี่วิทยุ (Radio frequency power (13.56 MHz))
SiH ₄	: ก๊าซซิลเลน (Silane gas)
NH ₃	: ก๊าซแอมโมเนีย (Ammonia gas)
CH ₄	: ก๊าซมีเทน (Methane gas)
C ₂ H ₄	: ก๊าซเอทิลีน (Ethylene gas)
C ₂ H ₂	: ก๊าซอะเซทิลีน (Acetylene gas)
B ₂ H ₆	: ก๊าซไดโบรเจน (Diborane gas)
PH ₃	: ก๊าซฟอสฟีน (Phosphine gas)
CO ₂	: ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide gas)
N ₂	: ก๊าซไนโตรเจน (Nitrogen gas)
H ₂	: ก๊าซไฮโดรเจน (Hydrogen gas)
Ar	: ก๊าซอาร์กอน (Argon gas)
LED	: ไดโอดเปล่งแสง (Light Emitting Diode)
TFLED	: ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบาง (Thin Film Light Emitting Diode)
E _{opt}	: ช่องว่างพลังงานทางแสง (Optical energy gap)
E _c	: ขอบของแถบการนำ (Conduction band edge)
E _v	: ขอบของแถบวาเลนซ์ (Valence band edge)
E _F	: ระดับเฟอร์มี (Fermi level)
EB	: อิเล็กตรอนบีม (Electron Beam)
IC	: วงจรรวม (Integrated Circuit)
LSI	: วงจรรวมขนาดใหญ่ (Large Scale Integrated Circuit)
TFT	: ทรานซิสเตอร์ชนิดฟิล์มบาง (Thin Film Transistor)
LCD	: ดิสเพลย์ชนิดผลึกเหลว (Liquid Crystal Display)
IR	: อินฟราเรด (Infrared)

α	: สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (Optical absorption coefficient)	(1/cm)
ω	: ความถี่เชิงมุม (Angular frequency)	(1/s)
K	: จำนวนคลื่น (Wave number)	(1/cm)
σ	: สภาพนำไฟฟ้า (Electrical conductivity)	(s/cm)
n	: ดัชนีหักเหแสง (Refractive index)	
C	: ความเร็วแสง (Velocity of light)	
E	: พลังงานโฟตอน (Photon energy)	(eV)
E	: สนามไฟฟ้า (Electric field)	(V/cm)
h	: ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant)	(J.s)
ESR	: อิเล็กตรอนสปินรีโซแนนซ์ (Electron Spin Resonance)	
DPPH	: Diphenyl Picryl Hydrazyl	
Mn	: แมงกานีส (Manganese)	
H	: สนามแม่เหล็ก (Magnetic field)	(gauss)
n	: ความหนาแน่นพาหะ (Carrier density)	(1/cm)
e	: ประจุอิเล็กตรอน (Electronic charge)	(C)
K	: ค่าคงที่โบลซ์แมน (Boltzman's constant)	(J/K)
T	: อุณหภูมิสัมบูรณ์ (Absolute temperature)	(K)
σ_D	: สภาพนำไฟฟ้ามืด (Dark conductivity)	(S/cm)
T_s	: อุณหภูมิแผ่นฐาน (Substrate temperature)	(°C)
hV	: พลังงานโฟตอน (Photon energy)	(eV)
J	: ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Current density)	(A/cm ²)
τ	: เวลาอายุพาหะ (Life time of carrier)	(s)
λ	: ความยาวคลื่นแสง (Wave length)	
PL	: โฟโตลูมิเนสเซนซ์ (Photoluminescence)	
EL	: อิเล็กโตรลูมิเนสเซนซ์ (Electroluminescence)	
ΔE_c	: ความแตกต่างของแถบคอนดักชัน (Conduction band discontinuity)	(eV)
ΔE_v	: ความแตกต่างของแถบวาเลนซ์ (Valence band discontinuity)	(eV)
ϕ_B	: ความสูงของกำแพงทันเนลิง (Barrier height for tunneling)	(eV)
d	: ความหนาของชั้น i (i-layer thickness)	(Å)
V	: แรงดันไฟฟ้าไบแอส (Applied voltage)	(V)
n(x)	: ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่ตำแหน่ง x (Electron density at position x)	(1/cm ³)
p(x)	: ความหนาแน่นของโฮลที่ตำแหน่ง x (Hole density at position x)	(1/cm ³)
B	: ความสว่าง (Brightness)	(cd/m ²)

m_e^*	: มวลประสิทธิผลของอิเล็กตรอน (Effective mass of electron)	
m_h^*	: มวลประสิทธิผลของโฮล (Effective mass of hole)	
γ_p	: ระยะของโฮล (Hole range)	(μm)
μ_n	: ความคล่องตัวของอิเล็กตรอน (Electron mobility)	($\text{cm}^2/\text{V.s}$)
μ_p	: ความคล่องตัวของโฮล (Hole mobility)	($\text{cm}^2/\text{V.s}$)
τ_p	: เวลาอายุการรวมตัวแบบไม่เปล่งแสงของโฮล (Nonradiative recombination life time of holes)	(s)
α_c	: พารามิเตอร์ดิสเพอร์ซีฟของอิเล็กตรอน (Dispersive parameter of electron)	
α_v	: พารามิเตอร์ดิสเพอร์ซีฟของโฮล (Dispersive parameter of hole)	
E_x	: พลังงานกระตุ้น (Excitation energy)	(eV)
E_{EL}	: พลังงานค่ายอดของสเปกตรัมอิเล็กโตรลูมิเนสเซนซ์ (Peak energy of EL spectrum)	(eV)
E_{PL}	: พลังงานค่ายอดของสเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (Peak energy of PL spectra)	(eV)
HTI	: ชั้นฉีดพาหะร้อนด้วยวิธีทันเนลลิง (Hot carrier tunneling injector)	
m^*	: มวลประสิทธิผลของอิเล็กตรอนอิสระ (Effective mass of free electron)	(kg)
q	: ประจุอิเล็กตรอนอิสระ (Charge of free electron)	(C)
J_n	: ความหนาแน่นกระแสของอิเล็กตรอน (Current density based on electrons)	(A/cm^2)
J_p	: ความหนาแน่นกระแสของโฮล (Current density based on holes)	(A/cm^2)
x	: ตำแหน่งในชั้น i (Position in the i-layer)	(μm)
d_{max}	: ความหนาที่เหมาะสมของชั้น i (Optimal i-layer thickness)	(\AA)
f_c	: ความถี่ตัดออฟ (Cut-off frequency)	(Hz)
I_{leak}	: กระแสไฟฟ้าวรั่ว (Leakage current) ในชั้น p-a-SiC:H จาก ITO หนึ่งไปสู่ ITO ข้างเคียง	(mA)
σ	: สภาพนำไฟฟ้าของชั้น p (Conductivity of p-layer)	(S/cm)
d	: ความหนาของชั้น p (Thickness of p-layer)	(\AA)
V	: ความต่างศักย์ระหว่างขั้ว ITO ข้างเคียงกัน (Potential drop between adjacent ITO electrodes)	(V)
S	: ระยะห่างของขั้ว ITO (Distance of ITO electrodes)	(μm)
l	: ความยาวของขั้วไฟฟ้า Al (Length of Al electrode)	(cm)

บทที่ 1

บทนำ



1.1 ความสำคัญและที่มาของหัวข้อการวิจัย

1.1.1 สิ่งประดิษฐ์แสดงผลชนิดต่าง ๆ

ปัจจุบันสิ่งประดิษฐ์แสดงผล (display device) มีบทบาทสูงมากในการเป็นตัวเชื่อม (interface) สื่อข้อมูล (information) ระหว่างอุปกรณ์เครื่องมือ เครื่องจักรกับมนุษย์ให้มนุษย์ได้รับทราบข้อมูลได้ด้วยประสาทตา [1-2] ตัวอย่างสิ่งประดิษฐ์แสดงผลที่เรารู้จักและใช้กันมากได้แก่ จอโทรทัศน์ จอออสซิลโลสโคป จอคอมพิวเตอร์ หน้าปัทม์เครื่องใช้ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ที่แสดงข้อมูลด้วยแสง ซึ่งรวมทั้งหน้าปัทม์แสดงผลแบบอิเล็กทรอนิกส์ในรถยนต์ รถไฟฟ้า เครื่องบิน จรวด และตารางแสดงข้อมูลการเดินทางในสถานีรถไฟ รถไฟฟ้า สนามบิน และป้ายโฆษณาต่าง ๆ

สิ่งประดิษฐ์แสดงผลนับจนถึงปัจจุบันมีมากมายหลายชนิด ซึ่งหลักการทำงานของแต่ละชนิดจะแตกต่างกัน [1-2] และที่นิยมใช้กันในปัจจุบันได้แก่

1. CRT (Cathode Ray Tube)
2. LCD (Liquid Crystal Display)
3. LED (Light Emitting Diode)
4. EL (Electroluminescence)
5. VFD (Vacuum Fluorescent Display)
6. PDP (Plasma Display Panel)
7. ECD (Electro-Chromic Display)
8. EPID (Electro-Phoretic Image Display)

ฯลฯ

ปัจจุบันมูลค่าการผลิตสิ่งประดิษฐ์แสดงผลเหล่านี้ทั่วโลกรวมกันมีมูลค่ามหาศาลนับหลายแสนล้านบาทต่อปี [3]

แม้ว่าขณะนี้ CRT จะเป็นสิ่งประดิษฐ์แสดงผลและจอโทรทัศน์ที่นิยมใช้และมียอดมูลค่าการผลิตสูงที่สุดในปัจจุบัน แต่ CRT ก็มีข้อเสียหลายประการดังตัวอย่างในตารางที่ 1.1 แต่ในระยะหลังและในอนาคตอันใกล้นี้ ความต้องการสิ่งประดิษฐ์แสดงผลชนิดบางเรียบแบนและเบาจะมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ ทั้งนี้เพราะถ้าสิ่งประดิษฐ์แสดงผลหรือจอโทรทัศน์มีลักษณะแบนบางและเบา ก็จะสะดวกต่อการติดตั้งและขนย้ายไปในที่ต่าง ๆ ได้ และสามารถใช้แว่นดูภาพแบบกรอบรูปภาพที่ผาผนังได้ และติดตั้งได้สะดวกทั้งบนโต๊ะทำงานและในยานพาหนะต่าง ๆ เช่น รถยนต์ รถไฟฟ้า เครื่องบิน ฯลฯ

ตารางที่ 1.1 ตัวอย่างข้อเสียของสิ่งประดิษฐ์แสดงผลชนิด CRT

1. ใช้แรงดันไฟฟ้าสูงหลายหมื่นโวลต์ซึ่งเป็นอันตรายต่อชีวิต
2. ใช้หลอดสุญญากาศเป็นหลอดภาพซึ่งระเบิดแตกง่ายและอันตราย
3. มีความลึกและมีน้ำหนักมาก เปลืองพื้นที่การติดตั้ง
4. ผลิตให้มีขนาดใหญ่ได้ยาก และจะยังมีน้ำหนักมาก
5. ใช้ลำอิเล็กตรอนเป็นตัวกระตุ้นให้ภาพสว่าง จึงระคายเคืองต่อสายตา
6. โครงสร้างภายในยุ่งยาก และต้องใช้สนามแม่เหล็ก สนามไฟฟ้าในการควบคุมทิศทางของลำอิเล็กตรอน

1.1.2 การพัฒนาสิ่งประดิษฐ์แสดงผลชนิดบางเรียบ (Flat-Panel Display)

จากการที่ CRT ใช้งานไม่สะดวกในหลายกรณี เช่น CRT มีน้ำหนักมากและใช้พื้นที่ติดตั้งมาก จึงได้มีความพยายามที่จะพัฒนาสิ่งประดิษฐ์แสดงผลที่มีรูปร่างบาง และเรียบแบน และมีน้ำหนักเบาขึ้นทดแทน และในปัจจุบันก็มีหลายชนิดแล้ว อาทิเช่น LED, LCD, EL ฯลฯ รูปที่ 1.1 แสดงตัวอย่างภาพดิสเพลย์เหล่านี้ แต่ดิสเพลย์เหล่านี้ก็ยังมีข้อดีและข้อเสียอีกหลายด้าน อาทิเช่น

1. LED มีขนาดกระทัดรัด มีความสว่างสูง ใช้แรงดันไฟฟ้าต่ำ (ต่ำกว่า 10 V.) แต่มีข้อเสียที่ผลิตจากวัสดุผลึกสารกึ่งตัวนำ (เช่น GaAlAs, GaP, GaN ฯลฯ) จึงผลิตให้มีพื้นที่ที่กว้างใหญ่ได้ยาก และถ้ามีพื้นที่ใหญ่ก็จะทำให้มีราคาแพงมาก และผลิตให้เปล่งแสงเป็นรูปร่างต่างๆ ได้ยาก ปัจจุบันได้เพียงแต่นำ LED หลายๆ ตัวมาวางเรียงกันเท่านั้น และสีการเปล่งแสงถูกจำกัดด้วยชนิดของผลึก

2. LCD ใช้แรงดันไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าต่ำ แต่มีข้อเสียที่ผลิตเป็นจอใหญ่ๆ ได้ยาก เพราะใช้แผ่นกระจก 2 แผ่นวางประกบผลึกเหลวไว้ ให้แผ่นกระจกห่างกันเพียงไม่ถึง 50 ไมครอน จึงยากต่อการควบคุมระยะห่างในกรณีกระจกมีพื้นที่ใหญ่ๆ นอกจากนี้ LCD มี contrast ไม่ดี มุมการมองก็ถูกจำกัดในมุมแคบ อีกทั้ง LCD เปล่งแสงเองไม่ได้แต่ต้องมีต้นกำเนิดแสง (light source) อีก

3. EL เป็นสิ่งประดิษฐ์แสดงผลแบบบางที่มีลักษณะเป็นฟิล์มบางของ ZnS เคลือบบนแผ่นกระจก เปล่งแสงได้เมื่อมีแรงดันไฟฟ้าสูงกว่า 150 V. มากกระทำ จึงมีข้อเสียที่ใช้แรงดันไฟฟ้าสูง และใช้ IC เป็นวงจรสแกนหรือขับได้ยากและ EL จะเสื่อมสภาพเร็วเมื่อถูกความชื้น

Comparisons of various Flat Panel Displays



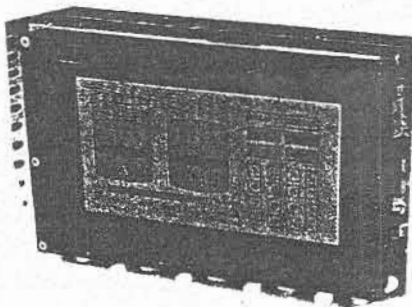
CRT

- Heavy
- High Voltage (>10 KV)
- Deep Dimension
- Vacuum Tube
- Difficulty of Large Area



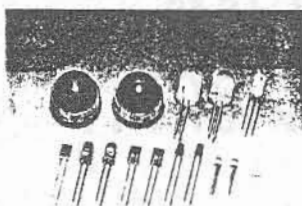
LCD

- Bad Contrast
- Bad Viewing Angle
- Need Light Source



EL

- High Voltage (>150 V)



LED

- Expensive Crystals
- Difficulty of Large Area

รูปที่ 1.1 ตัวอย่างสิ่งประดิษฐ์แสดงผลชนิดต่าง ๆ ที่พัฒนามาถึงปัจจุบัน (ยังไม่รวม TFLED ที่พัฒนาเป็นครั้งแรกในงานวิจัยนี้)

1.1.3 การพัฒนาไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางจากวัสดุอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำ

จากเหตุผลที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 1.1.1 และ 1.1.2 ทำให้มีความจำเป็นต้องพัฒนา คิดค้นสิ่งประดิษฐ์แสดงผลแบบบางชนิดใหม่ที่ไม่มีข้อเสียดังกล่าวข้างต้น คณะผู้วิจัยได้ประสบความสำเร็จในการประดิษฐ์ “ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบาง (Thin Film Light Emitting Diode : ใช้ชื่อย่อว่า TFLED)” โดยใช้วัสดุที่ไม่ใช่ผลึกเป็นวัสดุเริ่มต้น กล่าวคือใช้วัสดุ ทรานซิสเตอร์อะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำ ซึ่งได้แก่วัสดุสารประกอบทรานซิสเตอร์อะมอร์ฟัสซิลิคอนไนไตรด์ ทรานซิสเตอร์อะมอร์ฟัสซิลิคอนคาร์ไบด์และอะมอร์ฟัสซิลิคอนออกไซด์เป็นวัสดุหลักใน TFLED

ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบาง (TFLED) ที่ผลิตจากวัสดุอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำนี้มีข้อดีเด่นหลายประการ และมีศักยภาพที่จะนำไปผลิตเป็นสิ่งประดิษฐ์แสดงผลแบบแบนเรียบและบางชนิดใหม่ของโลกได้ ตารางที่ 1.2 แสดงสรุปข้อดีเด่นของไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางชนิดอะมอร์ฟัสที่พัฒนาขึ้นสำเร็จในงานวิจัยนี้

ตารางที่ 1.2 ข้อดีเด่นของไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบาง (TFLED) ชนิดอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำ

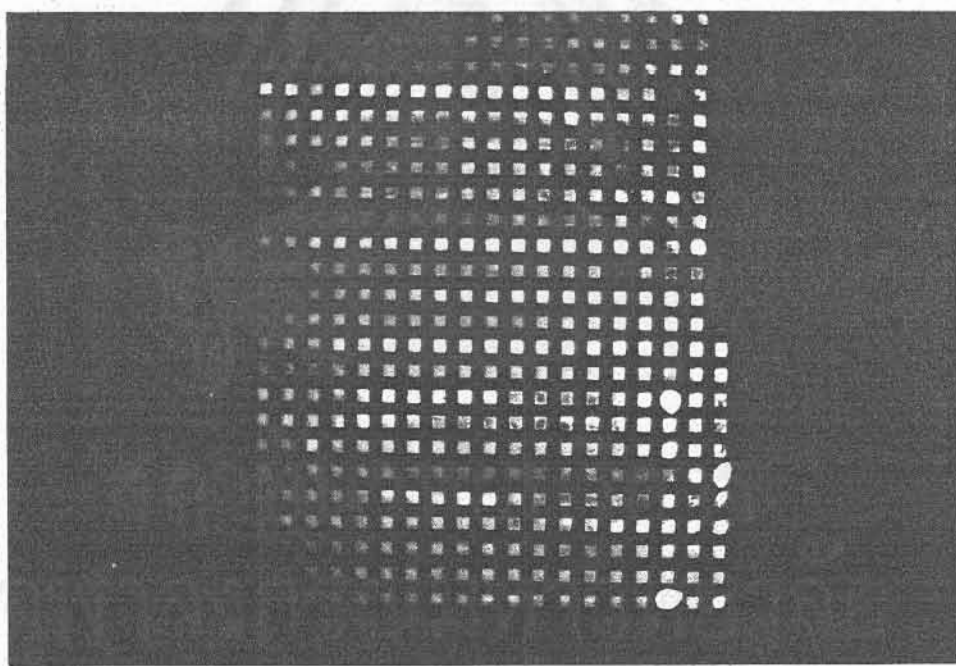
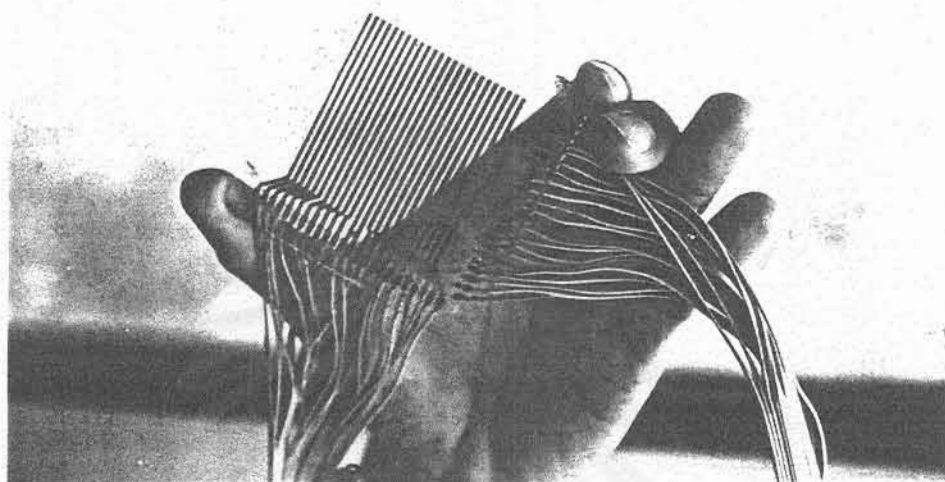
- วัสดุเริ่มต้นคืออะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำ จึงมีราคาถูกกว่าวัสดุผลึกที่เคยมีมาในอดีต
- ผลิตเป็นจอพื้นที่ใหญ่ได้ง่าย
- ผลิตจากวัสดุอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำเช่น a-SiN:H, a-SiC:H และ a-SiO:H และจากคุณสมบัติของอะมอร์ฟัสทำให้เปลี่ยนอัตราส่วนของวัสดุได้ง่าย ทำให้ได้สีของแสงตามต้องการได้ง่าย
- ใช้แรงดันไฟฟ้าต่ำ เพราะทำงานด้วยหลักการฉีดพาหะด้วยกระแสไฟฟ้า (carrier injection)
- ผลิตให้ไดโอดเปล่งแสงหลายๆตัวซ้อนทับกันในแนวตั้งได้ ทำให้สามารถเปล่งแสงได้สีหลายสี (multicolor) ในตัวเดียวกัน

ตารางที่ 1.3 แสดงเปรียบเทียบข้อมูลทางเทคนิคของสิ่งประดิษฐ์แสดงผลแบบ flat-panel ชนิด EL, LCD, crystalline LED และ amorphous TFLED

รูปที่ 1.2 แสดงตัวอย่างภาพของไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบาง ซึ่งมีโครงสร้างเมตริกซ์ที่ประดิษฐ์ได้ในงานวิจัยนี้

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อศึกษาหาแนวทางการเตรียมวัสดุอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำที่จะสามารถนำมาประดิษฐ์เป็นไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางได้ดี
2. เพื่อศึกษาหาแนวทางการออกแบบและวิธีประดิษฐ์ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางจากวัสดุอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำที่มีคุณภาพดี



รูปที่ 1.2 ตัวอย่างผลงานการประดิษฐ์ศิลปะไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำโครงสร้างเมตริกซ์ ซึ่งเป็นความสำเร็จเป็นครั้งแรกในโลก

ตารางที่ 1.3 เปรียบเทียบข้อมูลทางเทคนิคของสิ่งประดิษฐ์แสดงผลแบบบาง (flat-panel display) ชนิด Electroluminescence(EL), Liquid Crystal Display (LCD), crystalline LED และ amorphous TFLED

(⊙ : very good, O : good, Δ : available, × : bad)

	<i>EL</i>	<i>LCD</i>	<i>c-LED</i>	<i>amorphous TFLED</i>
Substrate	glass	glass	crystal	any substrate
Possibility of Large Area	O	O	Δ	⊙
Fabricating Temperature	< 500 °C	-	> 800 °C	< 300 °C
Driving Voltage	ac, dc 160-250 V	dc < 5 V	dc 2-10 V	dc 5-15 V
Current Consumption	mA/cm ²	μA/cm ²	A/cm ²	mA/cm ²
Brightness (cd/m ²)	60-1000	-	> 150	5-20
How to Change Color	rare earth	filter	Crystal, Impurity	Material Content
Possibility of Full Color	O	O	O	O
Possibility of Tunable Color	O	×	Δ	O
Cost	middle	cheap	expensive	very cheap

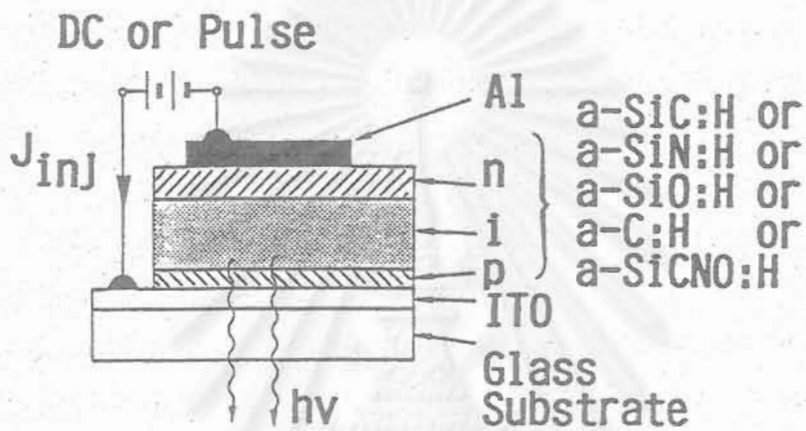
3. เพื่อศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานต่าง ๆ ของไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางที่ประดิษฐ์ได้ เพื่อประโยชน์ในการปรับปรุงคุณภาพและการประยุกต์ใช้งานต่อไปในอนาคต เช่น กลไกการฉีดพาหะ กลไกการเปล่งแสง ผลตอบสนองต่อกระแสไฟฟ้าแบบพัลส์ ฯลฯ
4. เพื่อศึกษาแนวทางการประยุกต์ใช้งานไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์ม ทั้งในงานดิสเพลย์ และงานออปโตอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ

1.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กุญแจหลักสำคัญของงานวิจัยเรื่อง การประดิษฐ์ “ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางชนิด วัสดุอะมอร์ฟิสสารกึ่งตัวนำ” นี้คือ เทคโนโลยีในการเตรียมวัสดุตระกูลอะมอร์ฟิสซิลิคอนอัลลอย ซึ่งมีช่องว่างพลังงานกว้าง ซึ่งได้แก่ อะมอร์ฟิสซิลิคอนไนไตรด์ ($a\text{-SiN:H}$) อะมอร์ฟิสซิลิคอนคาร์ไบด์ ($a\text{-SiC:H}$) และอะมอร์ฟิสซิลิคอนออกไซด์ ($a\text{-SiO:H}$) ว่ามีความพร้อมเพียงใด คณะผู้วิจัยได้มีประสบการณ์ในการผลิตฟิล์ม $a\text{-Si:H}$, $a\text{-SiC:H}$ ฯลฯ ด้วยวิธี glow discharge plasma CVD มาแล้วเป็นเวลาหลายปี กล่าวคือ เคยได้ทุนสนับสนุนให้ทำวิจัยเรื่อง “เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟิสซิลิคอน” จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติเป็นเวลา 2 ปี (2532-2534) [4-5] และจาก NECTEC อีก 2 ปี (2534-2536) [6-7] ดังนั้น ประสบการณ์ด้านการเตรียมฟิล์มอะมอร์ฟิสซิลิคอนอัลลอยผลิตด้วยวิธี glow discharge plasma CVD จึงมีความพร้อม (เทคโนโลยี glow discharge plasma CVD เป็นเทคโนโลยีที่สามารถผลิตฟิล์มอะมอร์ฟิสซิลิคอนอัลลอยที่มีคุณภาพสูงที่สุดชนิดหนึ่ง [8])

แนวความคิดในการพัฒนาไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางนี้ คณะผู้วิจัยได้มีความคิดว่า วัสดุอะมอร์ฟิสเมื่อนำมาผลิตเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นสิ่งประดิษฐ์ที่เปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้ฉับไฉน วัสดุอะมอร์ฟิสก็ควรที่จะแปลงพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานแสงได้เช่นกัน และจากการตรวจสอบงานวิจัยในต่างประเทศจากบทความต่าง ๆ ได้มีการรายงานวัสดุอะมอร์ฟิสซิลิคอนไนไตรด์ ($a\text{-SiN:H}$) [9-10] อะมอร์ฟิสซิลิคอนคาร์ไบด์ ($a\text{-SiC:H}$) [11] และอะมอร์ฟิสซิลิคอนออกไซด์ ($a\text{-SiO:H}$) [12-13] สามารถเปล่งแสงโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (photoluminescence) ที่ตา มองเห็นได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงได้หยิบยกวัสดุ $a\text{-SiN:H}$, $a\text{-SiC:H}$ และ $a\text{-SiO:H}$ ขึ้นมาเป็นวัสดุหลักในงานวิจัยนี้เพื่อประดิษฐ์เป็น TFLED ที่เปล่งแสงที่ตามองเห็นได้ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากคุณสมบัติพื้นฐานด้านต่างๆ ของวัสดุ $a\text{-SiN:H}$, $a\text{-SiC:H}$ และ $a\text{-SiO:H}$ นั้นขึ้นกับเงื่อนไขในการผลิตมากและยังมีหลายจุดที่คุณสมบัติพื้นฐานเป็นอย่างไร ยังไม่มีการรายงานอย่างละเอียด ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้มีการวิจัยทั้งที่เกี่ยวกับการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของฟิล์ม การศึกษาการออกแบบและประดิษฐ์ TFLED และการศึกษาหาแนวทางในการประยุกต์ใช้งาน TFLED





รูปที่ 1.3 ลักษณะโครงสร้างของไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบาง (TFLED) ที่เสนอประดิษฐ์ในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วยรอยต่อชนิด p-i-n ของวัสดุอะมอร์ฟัสซิลิคอนอัลลอย นับเป็นสิ่งประดิษฐ์ชนิดใหม่ของโลก

สถาบันวิทยบริการ

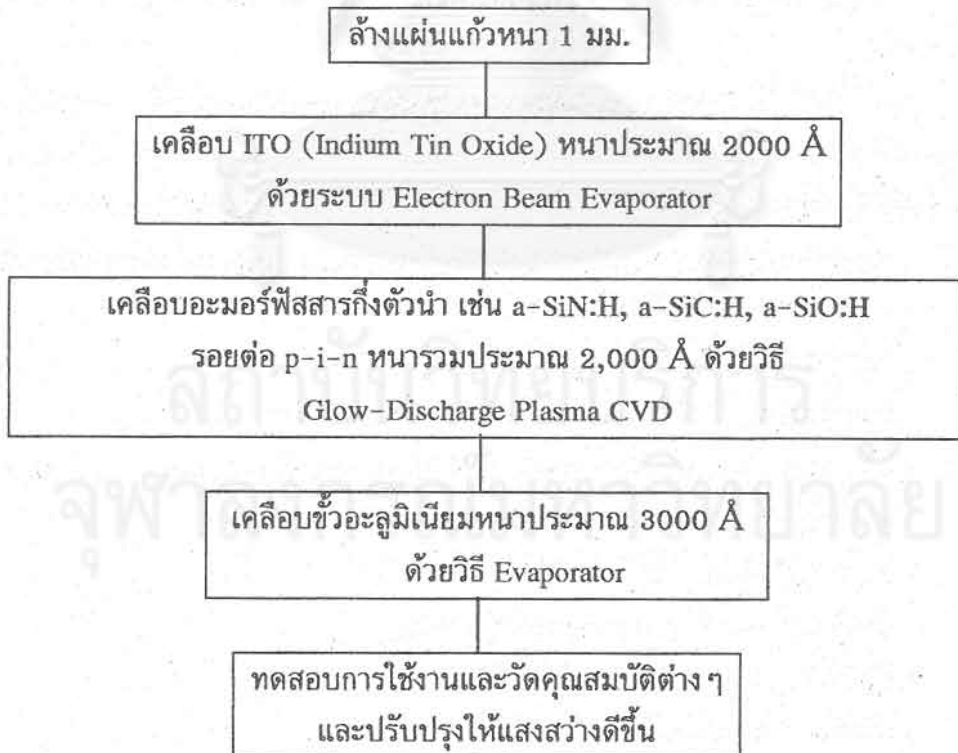
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

วิธีการดำเนินการวิจัย เริ่มจากการติดตั้งเครื่องมือ glow discharge plasma CVD สำหรับใช้ในการปลูกฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอนอัลลอย ต่อจากนั้น ทำการปลูกฟิล์มชนิดต่างๆ ซึ่งได้แก่ a-SiN:H, a-SiC:H และ a-SiO:H และทำการตรวจวัดคุณสมบัติพื้นฐานของฟิล์มเหล่านี้ เพื่อเป็นพื้นฐานและตรวจย้ำเรื่องความสามารถในการเปล่งแสงด้วยการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ ต่อจากนั้นทำการออกแบบและประดิษฐ์ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบาง สิ่งประดิษฐ์ที่ได้ถูกนำไปวัดลักษณะสมบัติพื้นฐานต่างๆ เช่น กลไกการฉีดพาหะ กลไกการเปล่งแสง ศึกษาหาแนวทางในการปรับปรุงคุณภาพ และการประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ

ลักษณะโครงสร้างของไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางที่เสนอประดิษฐ์ในงานวิจัยนี้แสดงในรูปที่ 1.3 มีลักษณะคือมีกระจกเป็นแผ่นฐาน บนแผ่นกระจกจะมีฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ เคลือบเป็นชั้นๆ ซ้อนทับกัน ได้แก่ ชั้นไฟฟ้าโปร่งแสง (ITO), a-SiC:H ชนิด P, a-SiN:H หรือ a-SiC:H หรือ a-SiO:H ชนิด i, a-SiC:H ชนิด n และชั้นโลหะ Al ความหนาของฟิล์มบางชั้นต่างๆ แสดงในรูปและมีความหนารวมกันน้อยกว่า 1 ไมครอน เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าแบบไบแอสตาม กล่าวคือ ป้อนแรงดันไฟฟ้าบวกเข้าทางชั้น ITO และป้อนแรงดันไฟฟ้าลบเข้าทางชั้น Al ก็จะทำให้ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางนี้เปล่งแสงออกมาจากชั้น i

ขั้นตอนโดยสรุปสำหรับการประดิษฐ์ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางแสดงในรูปที่ 1.4



รูปที่ 1.4 ขั้นตอนการประดิษฐ์ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำ

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

ประดิษฐ์ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางรอยต่อ p-i-n จากวัสดุอะมอร์ฟัสซิลิคอนอัลลอยของ a-SiN:H, a-SiC:H, a-SiO:H ศึกษากลไกการฉีดพาหะและการเปล่งแสง และศึกษาแนวทางการปรับปรุงความสว่าง และการใช้งานให้เป็นประโยชน์ทั้งในด้านдисเพลย์และในงานออปโตอิเล็กทรอนิกส์

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย

1) เป็นการพัฒนาสิ่งประดิษฐ์ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบาง จากวัสดุอะมอร์ฟัสซิลิคอนอัลลอยเป็นครั้งแรก จะนำชื่อเสียงมาสู่ประเทศไทย ถือว่าเป็นสิ่งประดิษฐ์ที่บุกเบิกและคิดค้น (Pioneering & Innovation) โดยฝีมือนักวิจัยไทย และชื่อจะถูกจารึกอยู่ในประวัติศาสตร์ของวงการสิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์และฟิลิกส์ประยุกต์ของโลก

2) เป็นการบุกเบิกและท้าทายกับอุตสาหกรรมสิ่งประดิษฐ์แสดงผล (display) เพราะถ้าสามารถประดิษฐ์ให้ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางนี้มีคุณภาพสูงและมีความสว่างเพียงพอจนใช้งานได้ จะมี impact ต่ออุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์เป็นอย่างมาก คาดว่าความต้องการ (needs) จะมีมูลค่านับพันล้านบาท หมื่นล้านบาทต่อปี !

3) เป็นการขยายการประยุกต์ใช้งานวัสดุตระกูลอะมอร์ฟัสซิลิคอนอัลลอยชนิดต่าง ๆ เช่น a-SiN:H, a-SiC:H และ a-SiO:H ให้กว้างขวางยิ่งขึ้น อีกทั้งวัสดุ Si, C, O และ N ก็มีมากมายบนโลก

4) ถ้าไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางนี้ มีคุณภาพสูงจนใช้งานได้ดี จะทำให้โฉมหน้าของจอภาพโทรทัศน์เปลี่ยนไปเป็นแบบแบนบาง และมีน้ำหนักเบา ซึ่งจะเป็นประโยชน์มากมายเป็นวงกว้างมิเพียงประเทศไทย แต่รวมไปทั่วโลก ตัวอย่าง impact ที่จะเกิดขึ้น อาทิเช่น

- ในเคหสถาน มี TV แบบกรอบรูปแขวนที่ฝาผนังแบบสมัยใหม่ ไม่เกะกะพื้นที่ติดตั้ง
- ในยานพาหนะ ใช้เป็นหน้าปัทม์ต่าง ๆ
- ในการจราจร ใช้เป็นสัญญาณจราจร
- ในการโฆษณา ใช้เป็นป้ายโฆษณา
- ในการแพทย์ ใช้เป็นจอภาพตรวจคนไข้ทั้งจอภาพ X-ray, ultrasound, MRI CT
- ในการเกษตร ใช้เป็นสัญญาณแสดงรถเกษตร
- การทหาร จอเรดาร์ จอสื่อสาร
- ใช้เป็นหน้าปัทม์จอภาพเครื่องใช้ไฟฟ้าต่าง ๆ
- ใช้เป็นจอ monitor ของคอมพิวเตอร์
- ใช้เป็นจอโทรทัศน์/วิดีโอ

5) เป็นการปูพื้นฐานการประยุกต์ใช้งานไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางในงานออปโต-อิเล็กทรอนิกส์ใหม่ๆ เช่น ดิสเพลย์แบบบางชนิดอะมอร์ฟิส โฟโตคัปเปิลอร์ชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟิส วงจรรวมออปโตอิเล็กทรอนิกส์ชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟิส

1.7 โครงสร้างของรายงานการวิจัย

รายงานการวิจัยเรื่องนี้ประกอบด้วยรายงาน 10 บทและภาคผนวก มีรายละเอียดดังนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำ

บทที่ 2 กล่าวถึงวิธีการเตรียมฟิล์มบางอะมอร์ฟิสซิลิคอนอัลลอย ด้วยวิธี Glow discharge plasma CVD

บทที่ 3 กล่าวถึงการพัฒนาไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบาง โดยในบทนี้จะเริ่มจากการทดลองใช้ a-SiN:H เป็นชั้นเปล่งแสงในสิ่งประดิษฐ์

บทที่ 4 กล่าวถึงการพัฒนาไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบาง โดยมี a-SiC:H เป็นชั้นเปล่งแสง

บทที่ 5 กล่าวถึงการพัฒนาไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบาง โดยมี a-SiO:H เป็นชั้นเปล่งแสง และเปรียบเทียบลักษณะสมบัติของไดโอดเปล่งแสงที่ได้จากบทที่ 3 ถึงบทที่ 5 ว่า ไดโอดเปล่งแสงที่ดีที่สุดควรใช้วัสดุอะไรในชั้นเปล่งแสง

บทที่ 6 กล่าวถึงผลการปรับปรุงความสว่างของไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบาง

บทที่ 7 กล่าวถึงการพัฒนาไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางโครงสร้างเมตริกซ์ ซึ่งเป็นโครงสร้างพื้นฐานของดิสเพลย์ขนาดใหญ่

บทที่ 8 กล่าวถึงผลการพัฒนาสิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดใหม่ ซึ่งได้แก่ อะมอร์ฟิสโฟโตคัปเปิลอร์ ซึ่งเป็นสิ่งประดิษฐ์ที่ใช้ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางเป็นภาคเปล่งแสงอยู่ภายใน

บทที่ 9 กล่าวถึงแนวความคิดในการเสนอโครงสร้างของไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางแบบใหม่ๆ เพื่ออาจจะใช้ปรับปรุงคุณภาพต่อไปในอนาคต

บทที่ 10 สรุป

ภาคผนวก เป็นการเสนอข้อมูลการเผยแพร่ผลงานวิจัย

รูปที่ 1.5 แสดงแผนภูมิสรุปโครงสร้างของรายงานการวิจัยเรื่องนี้



รูปที่ 1.5 โครงสร้างของรายงานวิจัยฉบับนี้

เอกสารอ้างอิง

1. J.I. Pankove editor, *Display Devices*, Springer-Verlag (Berlin New York, 1980).
2. A.H. Kitai editor, *Solid State Luminescence*, Chapman & Hall (London, 1993).
3. Asia-Pacific, *Laser Focus World*, Spring (1992) 8.
4. ดุสิต เครื่องาม และคณะ : รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์เรื่อง “การประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ราคาถูกแบบฟิล์มบางอะมอร์ฟิซิลิคอน”, ณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร , เสนอต่อสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (2533) 181 หน้า.
5. D. Kruangam and S. Panyakeow, “Study of Hydrogenated Amorphous Silicon for Optoelectronic Devices”, 2nd Regional Symposium on Optoelectronics, Jakarta, Indonesia, November 27-28 (1989) 11.
6. ดุสิต เครื่องาม และคณะ : “เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟิซิลิคอน”, การประชุมวิชาการครั้งที่ 4, ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC), ณ โรงแรมโนมาสวิสไฮเต็ล, 21-22 ตุลาคม (2535) หน้า 190-201.
7. D.Kruangam, P. Siamchai, W. Boonkosum and S. Panyakeow, “Integrated Type a-Si:H Solar Cells Having Simple Configuration”, The 7th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-7), Nagoya, Japan, November 22-26 (1993) 217.
8. D.A. Anderson and W.E. Spear, “Electrical and Optical Properties of Amorphous Silicon Carbide, Silicon Nitride and Germanium Carbide Prepared by the Glow Discharge Technique”, *Phil. Mag.*, 35 (1977) 1.
9. W.A. Jackson, T.M. Searl and I.G. Austin, “Photoluminescence Excitation Studies of a-SiN:H Alloys”, *J. Non-Crystalline Solids*, 77&78 (1985) 909.
10. F.R. Chuan, S.Y. Zhou, Y.Ming and J. Wen-di, “Photoluminescence of Hydrogenated a-SiN Films”, *J. Non-Crystalline Solids*, 77&78 (1985) 913.
11. D. Engeman, R. Fischer and J. Kecht, “Photoluminescence in the Amorphous System $\text{Si}_x\text{C}_{1-x}$ ”, *Appl. Phys. Lett.*, 32 (1978) 567.
12. R.A Street, J.C. Knight, “Luminescence in Plasma-Deposited Si-O Alloys”, *Phil. Mag.* B42 (1980) 551.
13. R. Carius, R. Fischer, E. Holzenkämpfer, J. Stuke, “Photoluminescence of Glow Discharge Prepared Amorphous SiO”, *J. Appl. Phys.* 52 (1981) 4241.

บทที่ 2

คุณสมบัติดีเด่นของฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอนอัลลอย และการผลิตด้วยวิธี Glow Discharge Plasma CVD

คำนำ

ในปัจจุบัน “วัสดุอะมอร์ฟัส” จัดเป็นวัสดุชนิดใหม่ (new material) ที่สำคัญและเป็นวัสดุจำพวก high tech ชนิดหนึ่ง ประวัติศาสตร์ของอะมอร์ฟัสได้เริ่มต้นในปีค.ศ. 1948 เมื่อมีการค้นพบว่าอะมอร์ฟัสซิลิเนียม (a-Se) สามารถนำไฟฟ้าได้ดีขึ้นเมื่อถูกฉายด้วยแสง จึงได้มีการนำ a-Se มาประดิษฐ์เป็นดรัมไวแสงในเครื่องถ่ายเอกสารจนถึงทุกวันนี้ ต่อมาในปี ค.ศ. 1975 อาจถือได้ว่าเป็นยุคปฏิวัติการพัฒนาวัสดุอะมอร์ฟัสชนิดที่เป็นสารกึ่งตัวนำกล่าวคือ ศาสตราจารย์ Spear แห่งมหาวิทยาลัย Dundee ประเทศอังกฤษได้ประสบความสำเร็จเป็นครั้งแรกในการเติมสารเจือปน (impurity doping) เข้าสู่วัสดุอะมอร์ฟัสซิลิคอน (a-Si:H) ทำให้มีคุณสมบัติเป็นชนิด p และชนิด n [1]

จากความสำเร็จในการได้ p a-Si:H ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นในการใช้งานของสารกึ่งตัวนำ ทำให้การใช้งานของอะมอร์ฟัสซิลิคอนแพร่หลายไปมาก [2-3] อาทิเช่น อะมอร์ฟัสซิลิคอนถูกนำมาประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบาง เช่น เซอร์ซีของแสง ดรัมไวแสงในเครื่องถ่ายเอกสาร โทรานซิสเตอร์แบบฟิล์มบางเพื่อใช้กับโทรทัศน์แบบผลึกเหลว (Liquid Crystal Display) หลอดถ่ายภาพในกล้องวิดีโอ และไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบาง [4-5] ฯลฯ เป็นต้น

สิ่งที่น่าชื่นชมยินดีเป็นอย่างยิ่งอีกประการหนึ่งคือ รางวัลโนเบล สาขาฟิสิกส์ ได้ถูกมอบให้แก่วงการวัสดุอะมอร์ฟัสในปี ค.ศ. 1977 ผู้ได้รับรางวัลคือ ศาสตราจารย์ Mott และ Anderson แห่งมหาวิทยาลัย Cambridge (Cavendish Laboratory) ประเทศอังกฤษในฐานะเป็นผู้ตั้งทฤษฎีอธิบายคุณสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์ของวัสดุอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำได้อย่างถูกต้อง [6]

ในบทนี้จะกล่าวโดยสังเขปเกี่ยวกับคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุอะมอร์ฟัสซิลิคอนอัลลอยว่าดีเด่นอย่างไรบ้าง โดยจะเน้นที่วัสดุตระกูลที่มีช่องว่างพลังงานกว้างซึ่งได้แก่ a-SiC:H, a-SiN:H และ a-SiO:H และกล่าวถึงการผลิตฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอนอัลลอยด้วยเครื่องมือ glow discharge plasma CVD ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ติดตั้งในงานวิจัยนี้

2.1 วัสดุอะมอร์ฟัสคืออะไร

คำว่า “อะมอร์ฟัส” (amorphous) มีรากศัพท์มาจากภาษากรีกว่า “a-morphe” แปลว่า สิ่งซึ่งมีรูปร่างไม่แน่นอน หรือวัสดุสัณฐาน วัสดุอะมอร์ฟัสมีโครงสร้างของอะตอมที่เรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบในช่วงระยะยาวของอะตอม (ไม่มี long range order) แต่จะมีการเรียงตัวของอะตอมอย่างเป็นระเบียบในช่วงระยะสั้นของอะตอม (มี short range order) คำว่าช่วงระยะยาวของอะตอมนั้นหมายถึงช่วงระยะอะตอมหลายๆ ลิบตัว ส่วนช่วงระยะสั้นของอะตอมนั้นหมายถึงช่วงระยะอะตอมสองสามตัว [4]

รูปที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่างโครงสร้างของอะตอมของวัสดุผลึกเดี่ยวและวัสดุอะมอร์ฟัส โดยยกตัวอย่างกรณีผลึกเดี่ยวซิลิคอน (single crystal silicon) (a) และอะมอร์ฟัสซิลิคอน (amorphous silicon) (b)

2.2 คุณสมบัติสำคัญของวัสดุอะมอร์ฟัส

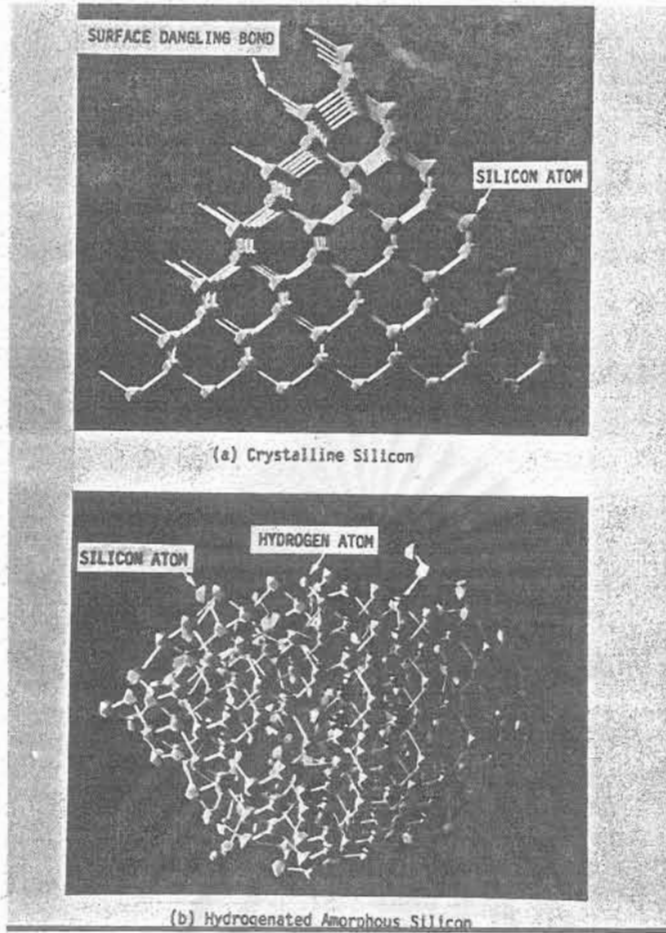
วัสดุอะมอร์ฟัสมีโครงสร้างอะตอมที่เรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบในช่วงระยะสั้นของอะตอม แต่ไม่เป็นระเบียบในช่วงระยะยาวของอะตอม การเรียงตัวของอะตอมอย่างเป็นระเบียบในระยะสั้นนี้มีผลสำคัญทำให้วัสดุนั้นมีคุณสมบัติคล้ายผลึกที่เกิดจากธาตุชนิดเดียวกัน แต่ในขณะเดียวกันเนื่องจากไม่มีระเบียบในระยะยาวของอะตอม วัสดุอะมอร์ฟัสจึงมีคุณสมบัติแปลกๆ ใหม่ๆ เพิ่มเติมไปจากผลึก อาทิเช่น

(1) ค่าคงที่ต่าง ๆ ทางฟิสิกส์สามารถเปลี่ยนแปลงได้

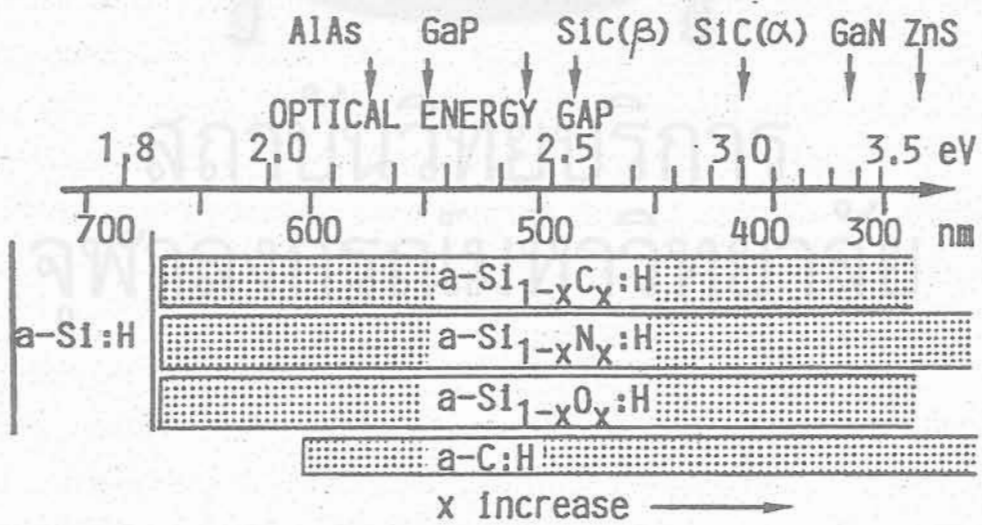
ถ้าเป็นผลึกเดี่ยวเช่นผลึกซิลิคอนหรือผลึกเยอรมันเนียม ค่าคงที่ต่าง ๆ ของผลึกจะถูกกำหนดแน่นอนและการจะเติมผสมธาตุอื่นใดลงไปเพื่อให้เป็นสารประกอบก็มีขอบเขตอัตราส่วนที่จำกัด แต่ถ้าเป็นอะมอร์ฟัสเราจะสร้างวัสดุผสมใด ๆ หรือสารประกอบใด ๆ ก็ได้ตามใจชอบ ทำให้สามารถผลิตวัสดุใหม่ๆ ที่ผลิตจากผลึกไม่ได้ อาทิเช่น ผลึกซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) มีอัตราส่วนของจำนวนของซิลิคอนต่อคาร์บอนเท่ากับ 1:1 เท่านั้น ในขณะที่อะมอร์ฟัสซิลิคอนคาร์ไบด์ ($a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$) สามารถเปลี่ยนค่า x ได้ตั้งแต่ 0 ถึง 1 จึงทำให้เราสามารถออกแบบและผลิตวัสดุที่มีค่าคงที่ทางฟิสิกส์ต่าง ๆ ตามต้องการได้

(2) การเป็นเนื้อเดียวกันตลอด

ในวัสดุพวกผลึกเดี่ยวหรือผลึกโพลี คุณสมบัติพื้นฐานต่าง ๆ ทางฟิสิกส์จะขึ้นกับทิศทางของแกนผลึกและลักษณะของเส้นพรมแดน (grain boundary) ของผลึก แต่สำหรับวัสดุอะมอร์ฟัส เนื่องจากอะตอมเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบ คุณสมบัติต่าง ๆ ทางฟิสิกส์จึงเหมือนกันตลอดทุกทิศทางของวัสดุ ในอะมอร์ฟัสไม่มีกลุ่มผลึก (grain) หรือเส้นพรมแดน และไม่มีหน้าแตกของผลึก (cleavage) ด้วยคุณสมบัติเหล่านี้ วัสดุอะมอร์ฟัสจึงมีข้อดีอีกหลายอย่าง



รูปที่ 2.1 เปรียบเทียบลักษณะของอะตอมที่สร้างพันธะแบบผลึกและแบบอะมอร์ฟัส

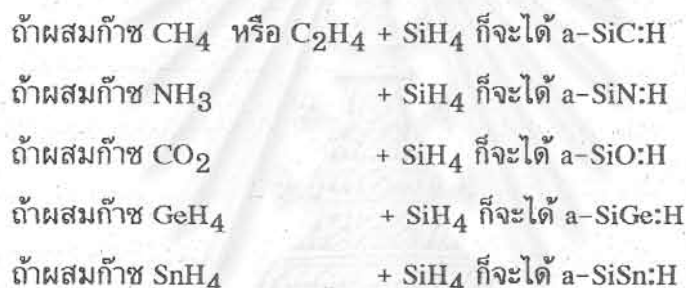


รูปที่ 2.2 ขนาดช่องว่างพลังงานของวัสดุอะมอร์ฟัสซิลิคอนอัลลอยชนิดต่าง ๆ

เช่น สามารถผลิตเป็นพื้นที่ใหญ่ๆ ได้ง่าย มีความสามารถในการดูดกลืนแสงได้สูง และมีความสามารถในการเปล่งแสงได้ดี

2.3 คุณสมบัติเด่นของวัสดุฟิล์มบาง a-Si:H, a-SiN:H, a-SiC:H และ a-SiO:H

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ธาตุซิลิคอน (Si) เป็นวัสดุเริ่มต้น เพราะค่านึงว่าซิลิคอนเป็นธาตุที่มีราคาถูกหาได้ง่ายและมีมากในโลก การนำซิลิคอนมาผลิตเป็นอะมอร์ฟัสซิลิคอน (a-Si:H) จึงเป็นการใช้วัสดุราคาถูกให้คุ้มค่า สิ่งที่น่าสนใจมากอีกอย่างหนึ่งคือ เราสามารถผลิต a-Si:H ให้เป็นสารประกอบต่างๆ ได้มากมาย โดยการผสมก๊าซอื่นเข้าไปในระบบ glow discharge plasma CVD เช่น

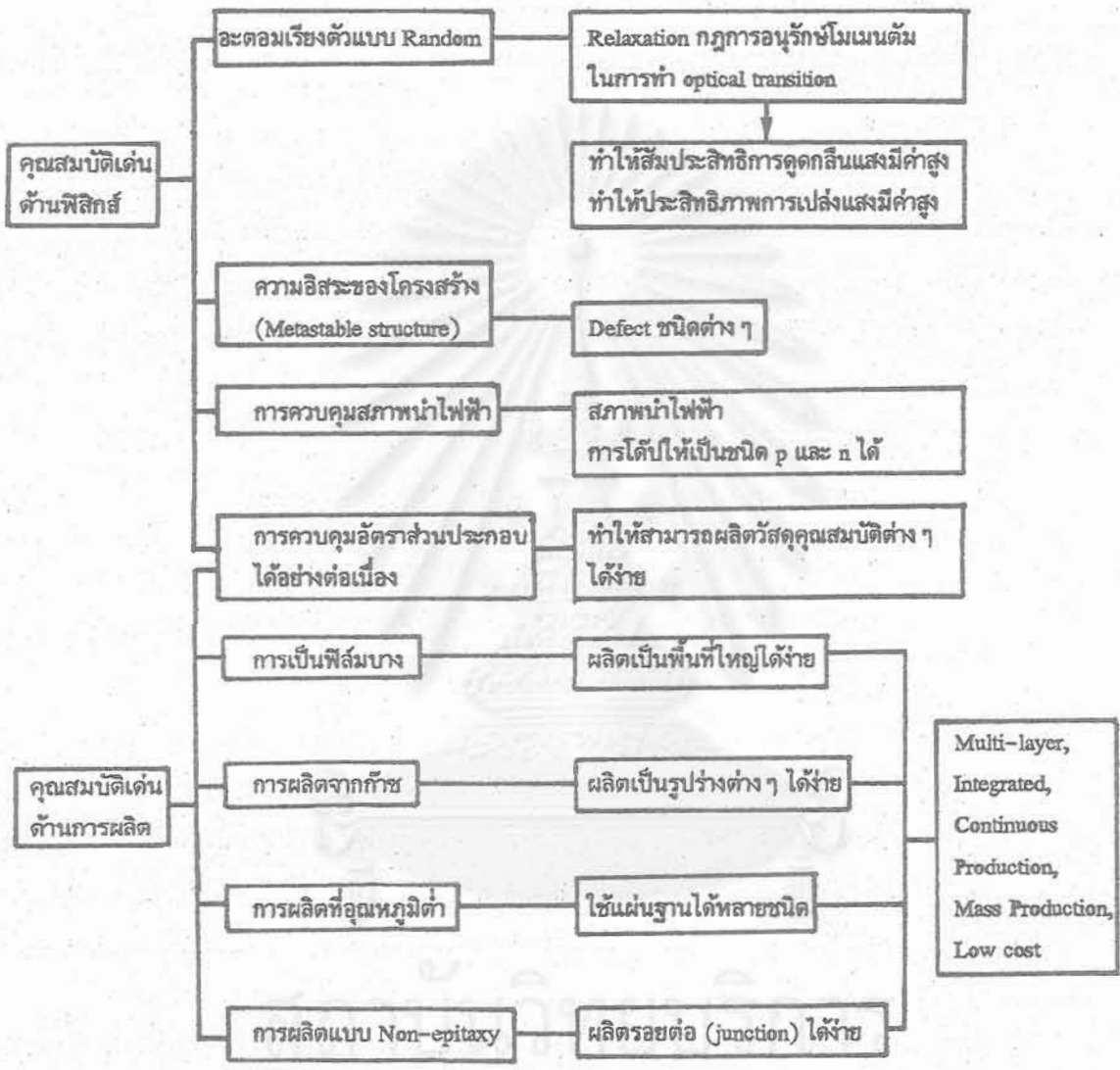


สารประกอบของฟิล์มบางเหล่านี้ จะมีค่าช่องว่างพลังงานกว้างหรือแคบขึ้นกับชนิดและปริมาณของธาตุที่ผสมเข้าไป เช่น ถ้าเพิ่มปริมาณ C หรือ N ให้มากขึ้นจะทำให้ช่องว่างพลังงานของวัสดุ a-SiC:H หรือ a-SiN:H กว้างขึ้น (เช่น 1.8-4.0 eV) แต่ถ้าเพิ่มปริมาณของ Ge หรือ Sn ให้มากขึ้น จะทำให้ช่องว่างพลังงานของวัสดุ a-SiGe:H หรือ a-SiSn:H แคบลง (เช่น 1.8-1.2 eV)

รูปที่ 2.2 แสดงการเปรียบเทียบขนาดช่องว่างพลังงานของวัสดุต่างๆ จากจุดนี้จึงทำให้เราสามารถออกแบบวัสดุอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำให้มีช่องว่างพลังงานต่างๆ ได้ง่ายตามต้องการ [7] จึงทำให้สามารถนำไปผลิตเป็นสิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดต่างๆ จากวัสดุเดียวกันได้ง่ายและหลากหลายชนิด

นอกจากนี้วัสดุตระกูลสารประกอบของ a-Si:H, a-SiN:H, a-SiC:H, a-SiO:H ฯลฯ มีคุณสมบัติเด่นน่าสนใจอีกหลายด้านดังแสดงในรูปที่ 2.3 เช่น

- (1) สามารถผลิตที่อุณหภูมิต่ำๆ ได้ เช่นที่ 150-200°C
- (2) สามารถปลูกบนแผ่นฐานได้หลายชนิดเช่น แผ่นแก้ว แผ่นสแตนเลส แผ่นเซรามิก และแผ่นโพลิเมอร์
- (3) ผลิตเป็นฟิล์มบางได้ง่าย ทำให้ประหยัดวัสดุ



รูปที่ 2.3 คุณสมบัติเด่นของสารกึ่งตัวนำอะมอร์ฟัสซิลิคอนอัลลอยชนิดต่าง ๆ เช่น a-Si:H, a-SiN:H, a-SiC:H, a-SiGe:H ฯลฯ

(4) จากคุณสมบัติของการเป็นอะมอร์ฟัส การเปลี่ยนสถานะ (transition) ของพาหะทางแสงจึงไม่จำเป็นต้องเป็นไปตามกฎการอนุรักษ์โมเมนตัม (K-selection rule) ดังนั้นสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของ a-Si:H จึงมีค่าสูง และในทำนองเดียวกันจึงคาดว่าประสิทธิภาพการเปล่งแสงของ a-Si:H, a-SiC:H, a-SiN:H และ a-SiO:H จะมีค่าสูงด้วย

(5) ผลิตแบบออตโนมัติต่อเนื่องและปริมาณมากได้ง่าย

(6) ผลิตเป็นฟิล์มบางหลายชั้นแบบ multi-layer ได้ง่าย

2.4 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานวัสดุ a-Si:H, a-SiN:H, a-SiC:H และ a-SiO:H

จากการที่อะมอร์ฟัสซิลิคอน มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำที่ไวต่อแสง และเติมสารเจือปนให้มีคุณสมบัติเป็นชนิดพีและเอ็นได้ จึงสามารถนำมาใช้งานเป็นสิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์ได้มากมายและถูกผลิตออกขายในเชิงพาณิชย์แล้วหลายอย่าง ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานวัสดุตระกูลอะมอร์ฟัสซิลิคอนอัลลอยแสดงในตารางที่ 2.1 นอกจากงานวิจัยเรื่องนี้แล้ว คณะผู้วิจัยห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำได้มีการวิจัยและพัฒนาสิ่งประดิษฐ์อื่น ๆ จากวัสดุอะมอร์ฟัสอีกหลายชนิด เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ [8-9] โฟโตไดโอด และเซนเซอร์สีของแสง [10]

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างสิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ผลิตจากวัสดุอะมอร์ฟัสซิลิคอนอัลลอย

สิ่งประดิษฐ์รับแสง	<ul style="list-style-type: none"> - เซลล์แสงอาทิตย์ (solar cell) - โฟโตไดโอด (photo-diode) - เซ็นเซอร์สีของแสง (color sensor) - โซลิตสเตทอิมเมจเซ็นเซอร์ (Solid State Image sensor) - ทรัม (Drum in electrophotography)
สิ่งประดิษฐ์เปล่งแสง	<ul style="list-style-type: none"> - ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบาง (Thin Film LED) (โดยงานวิจัยนี้)
สิ่งประดิษฐ์แอกทีฟ	<ul style="list-style-type: none"> - ทรานซิสเตอร์แบบฟิล์มบาง (Thin Film Transistor : TFT)
สิ่งประดิษฐ์อื่น ๆ	<ul style="list-style-type: none"> - เซ็นเซอร์ความดัน (Pressure sensor) - เซ็นเซอร์ความร้อน (Thermal sensor) - สวิตช์หน่วยความจำ (Switch memory) - เซ็นเซอร์ความเค้น (Strain sensor)

2.5 วิธีการปลูกฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอนอัลลอย

วัสดุฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอนอัลลอย โดยเฉพาะอย่างยิ่งชนิดที่มีช่องว่างพลังงานกว้าง เช่น a-SiN:H, a-SiC:H และ a-SiO:H สามารถผลิตได้หลายวิธี เช่น วิธี sputtering, thermal CVD แต่ปัจจุบันวิธี glow discharge plasma CVD (การแยกสลายก๊าซด้วยประจุเรืองแสง) เป็นวิธีที่จะให้ได้ฟิล์มที่มีคุณภาพทางสารกึ่งตัวนำที่ดีที่สุดวิธีหนึ่งและใช้กันแพร่หลายมากที่สุด และมีการนำไปใช้ผลิตสิ่งประดิษฐ์ฟิล์มบางอะมอร์ฟัสต่าง ๆ มากมาย เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ ทรานซิสเตอร์ฟิล์มบาง ฟิล์มถ่ายภาพ ฯลฯ (CVD ย่อมาจากคำว่า Chemical Vapor Deposition) [11]

ปัจจุบันที่ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มีเครื่อง glow discharge plasma CVD 2 ชุด (เพื่อความสะดวกต่อไปขอเรียกสั้น ๆ ว่า CVD) โดยชุดแรกสร้างระหว่างพ.ศ. 2531-2533 เพื่อใช้สำหรับผลิต a-Si:H ในงานเซลล์แสงอาทิตย์ เป็น CVD ที่มีขั้วไฟฟ้าทรงกระบอกอยู่ภายนอก chamber [12]

สำหรับการผลิตฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอนอัลลอยในวิจัยนี้ เพื่อป้องกันมิให้เกิดการ contamination กับเซลล์แสงอาทิตย์ จึงได้ติดตั้ง CVD ชุดที่ 2 ขึ้น และใช้ในการผลิตฟิล์มสารประกอบ a-SiN:H, a-SiC:H และ a-SiO:H ขึ้นโดยเฉพาะ เครื่อง CVD ชุดที่ 2 นี้มีขั้วไฟฟ้าเป็นจานแบน 2 แผ่น วางขนานกันและอยู่ใน chamber [13] ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงวิธีการผลิตฟิล์มบาง a-SiN:H, a-SiC:H และ a-SiO:H ด้วยเครื่อง CVD ชุดที่ 2 ดังกล่าว

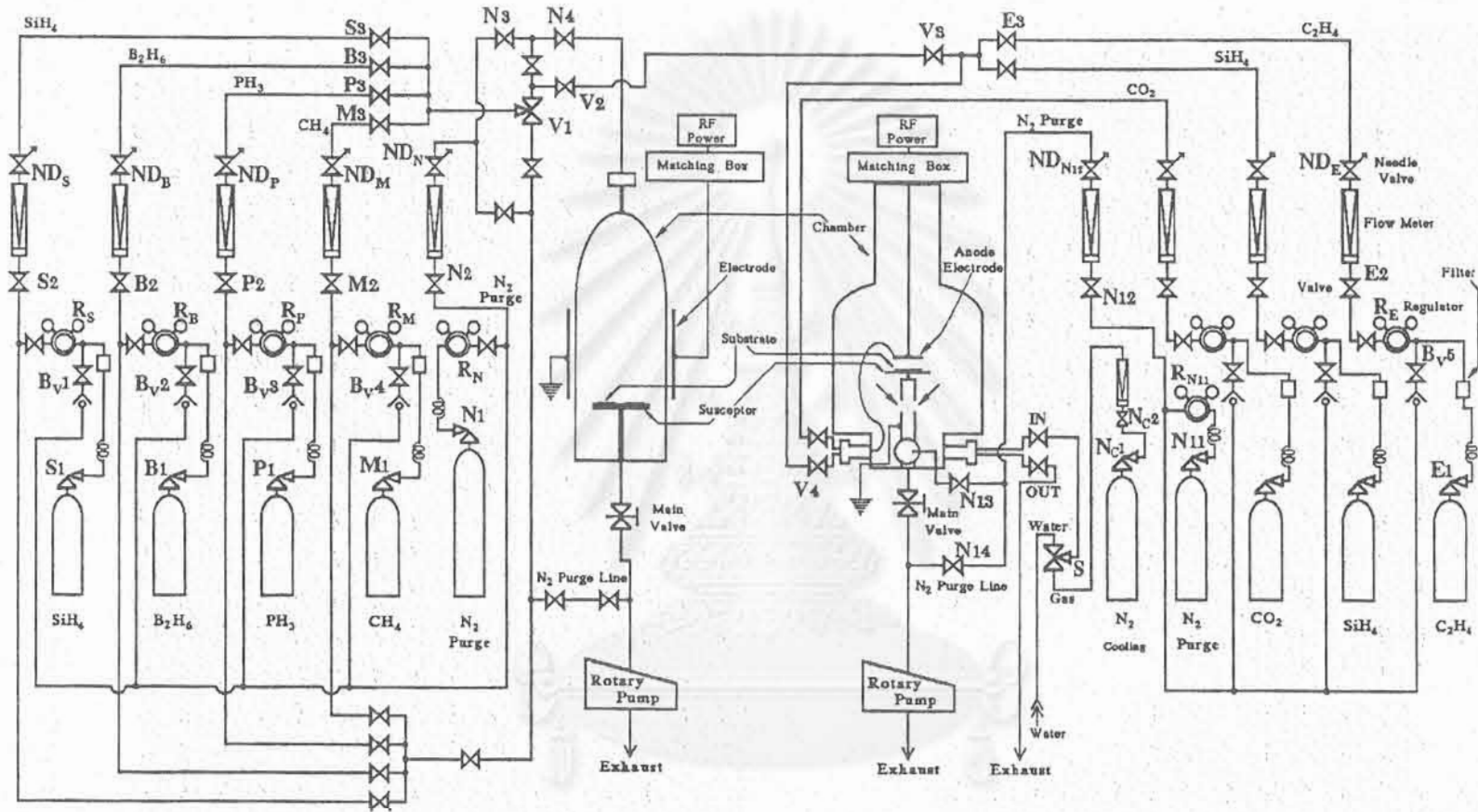
2.5.1 โครงสร้างของระบบ Glow Discharge Plasma CVD

ระบบ CVD ที่ติดตั้งในงานวิจัยนี้เป็นชนิด vertical direction กล่าวคือสนามไฟฟ้าความถี่วิทยุ RF นั้นอยู่ในทิศทางตั้งฉากกับแผ่นฐาน (บริษัทผู้ผลิตได้แก่ SAMCO Intemation ประเทศญี่ปุ่น เป็นรุ่น BP-1) โดยคณะผู้วิจัยเป็นผู้ดำเนินการประกอบและติดตั้งเองทั้งหมด รวมทั้งระบบก๊าซก็ได้ออกแบบ ติดตั้งเดินท่อก๊าซและตรวจเช็คระบบทั้งหมด

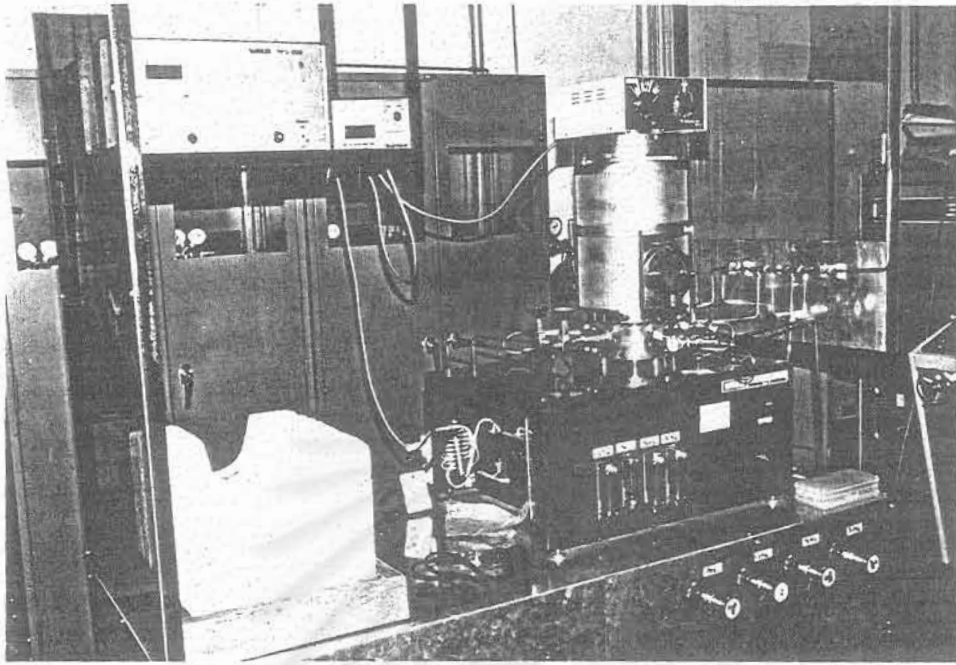
หมายเหตุ รายละเอียดเกี่ยวกับระบบ CVD ที่ไม่ได้กล่าวถึงในรายงานวิจัยเล่มนี้ สามารถดูเพิ่มเติมได้จากรายงานวิจัยระยะที่หนึ่ง [14] ที่ได้เคยเสนอไปแล้วในพ.ศ. 2536

รูปที่ 2.4 และ 2.5 แสดงแผนผังและภาพถ่ายของระบบ CVD ซึ่งประกอบด้วย ส่วนสำคัญ 2 ส่วนคือ 1) เครื่อง CVD และ 2) ระบบการจ่ายก๊าซ

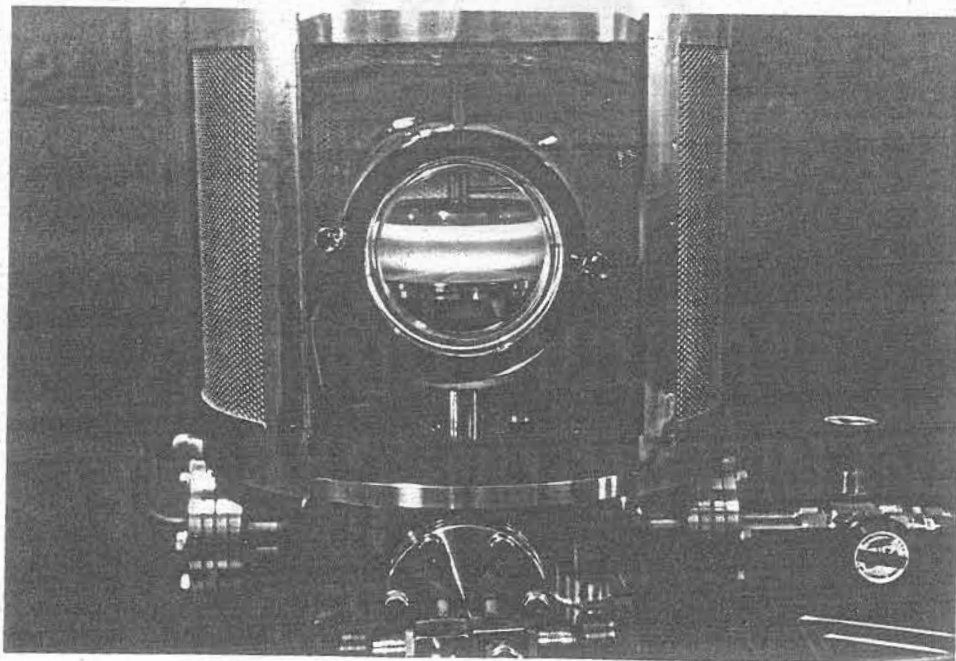
หลักการการทำงานโดยย่อของการผลิตฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอนอัลลอยด้วยวิธี CVD นี้คือ ก๊าซดิบเช่น SiH₄, CH₄, NH₃, CO₂ จะถูกส่งเข้า chamber ที่มีความดันประมาณ 1 Torr และก๊าซดิบเหล่านี้จะถูกสนามไฟฟ้ากระตุ้นให้แตกตัวเป็นพลาสมา และอะตอมของธาตุต่าง ๆ จะถูกแยกให้ไปเกาะติดเป็นฟิล์มบางบนแผ่นฐานเช่น แผ่นแก้วที่วางอยู่บน heater เจือปนชนิดต่าง ๆ ที่จะต้องควบคุมได้แก่ ปริมาณการไหลของก๊าซ, ความดันใน chamber, กำลังไฟฟ้า RF และอุณหภูมิของแผ่นฐาน



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของระบบ Glow discharge plasma CVD ซึ่งติดตั้งในงานวิจัยสำหรับการปลูกฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอนอัลลอย ติดตั้งอยู่ที่ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ตึกไฟฟ้า ชั้นที่ 5 คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.5 ภาพถ่ายระบบ Glow discharge plasma CVD



รูปที่ 2.6 ภาพถ่ายขณะกำลังทำการดิสชาร์จ ใช้งานระบบ Glow discharge plasma CVD

รายละเอียดของระบบ CVD มีดังนี้

เครื่อง CVD ประกอบด้วยส่วนสำคัญดังนี้

(1) Pyrex Chamber (Pyrex Bell jar) มีลักษณะเป็นครอบแก้ว ของวัสดุ Pyrex สูงประมาณ 40 cm เส้นผ่าศูนย์กลางส่วนด้านล่าง 22 cm และเส้นผ่าศูนย์กลางส่วนด้านบน 12 ซม. ทำหน้าที่เป็นหลอดสุญญากาศ โดยวางคว่ำประกบอยู่บน stainless steel flange โดยมียาง L type packing rubber เป็นตัวเก็บสุญญากาศ ภายใน chamber มี heater ลักษณะจานกลม (susceptor) เส้นผ่าศูนย์กลาง 10 cm และปรับอุณหภูมิได้จาก RT-400 °C ที่ด้านล่างของ flange มีท่อสแตนเลสต่อไปสู่ปั๊มสุญญากาศ (rotary vacuum pump) ที่ด้านข้างของ flange มีวาล์วเปิด/ปิดควบคุมการปล่อยก๊าซเข้า chamber

(2) เครื่องกำเนิดสนามไฟฟ้าความถี่วิทยุ ที่ด้านข้างของ CVD จะมีเครื่องกำเนิดสนามไฟฟ้าความถี่วิทยุ (Radio Frequency 13.56 MHz) วางอยู่และต่อไปสู่ chamber ด้วยสาย coaxial โดยที่ก่อนเข้า chamber จะมีกล่อง matching box เป็นตัวปรับให้อิมพีแดนซ์ของ RF power source มีค่าเท่ากับ อิมพีแดนซ์ของโหลด (คือ พลาสมา) matching box ทำจากวงจร L และ C การปรับ matching box นั้นเป็นการเปลี่ยนค่า C นั้นเอง

ต่อจาก matching box ลงมาจะมีขั้วไฟฟ้าอะโนดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 cm ขั้วอะโนดทำจากโลหะสแตนเลสมีลักษณะเป็นจานกลมๆ และมีรูพรุนที่จานโดยทั่ว เพื่อให้ก๊าซที่ไหลมาจากภายนอกสามารถแพร่กระจายและไหลลงสู่ susceptor ได้ทั่วและสม่ำเสมอคล้ายฝักบัว

รูปที่ 2.6 แสดงภาพถ่ายขณะกำลังดิสชาร์จก๊าซซิลเลน (SiH_4)

รายละเอียดของเครื่อง CVD นี้ สรุปได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 รายละเอียดของเครื่อง CVD

Chamber	เส้นผ่าศูนย์กลาง 22 cm, วัสดุ Pyrex
Susceptor	เส้นผ่าศูนย์กลาง 10 cm, ปรับอุณหภูมิช่วง RT-400 °C
Electrode	Capacitive coupling กับ matching circuit
RF power	13.56 MHz, สูงสุด 150 Watts
Pressure	0.01~10 torr

ระบบการจ่ายและควบคุมก๊าซ ก๊าซดิบที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นก๊าซที่มีความบริสุทธิ์สูงมากระดับ 99.9999 % ขึ้นไป (สั่งซื้อมาใช้จากบริษัท NIHON SAN SO ประเทศญี่ปุ่น) ได้แก่

- ก๊าซซิลเลน (SiH_4) ผสมในไฮโดรเจน (H_2) ด้วยอัตราส่วน $\text{SiH}_4/\text{H}_2 = 10\%$ ขนาด 10 ลิตร
- ก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) ผสมในไฮโดรเจน (H_2) ด้วยอัตราส่วน $\text{NH}_3/\text{H}_2 = 10\%$ ขนาด 10 ลิตร
- ก๊าซมีเทน (CH_4) ผสมในไฮโดรเจน (H_2) ด้วยอัตราส่วน $\text{CH}_4/\text{H}_2 = 10\%$ ขนาด 40 ลิตร
- ก๊าซไดโบเรน (B_2H_6) ผสมในไฮโดรเจนด้วยอัตราส่วน 500 ppm ใช้สำหรับการได้ปให้สารกึ่งตัวนำเป็นชนิดพี ขนาด 10 ลิตร
- ก๊าซฟอสฟีน (PH_3) ผสมในไฮโดรเจนด้วยอัตราส่วน 500 ppm ใช้สำหรับการได้ปให้สารกึ่งตัวนำเป็นชนิดเอ็น

ก๊าซเหล่านี้ถูกอัดอยู่ในถังก๊าซด้วยความดันประมาณ 120 kg/cm^2 (ยกเว้นแอมโมเนีย 30 Kg/cm^2) จากถังก๊าซจะต่อท่อสแตนเลสผ่านฟิลเตอร์กรองฝุ่นขนาด 50 ไมครอน แล้วต่อเข้ากับ gas regulator (Matheson สหรัฐอเมริกา) ซึ่งเป็นตัวลดความดันก๊าซจาก 120 kg/cm^2 ให้เหลือ $1-2 \text{ kg/cm}^2$ จากนั้นจะมีวาล์วเปิดปิด (Nupro สหรัฐอเมริกา) และ gas flow meter วัดอัตราการไหลของก๊าซ (0-100 cc/min) โดยอัตราการไหลของก๊าซนี้จะถูกควบคุมด้วย needle controller valve ก๊าซต่างๆ จะไหลไปรวมกันที่วาล์วสามทาง และไปสู่หลอดสุญญากาศหรือลงไปสู่ปั๊มสุญญากาศ เนื่องจากก๊าซดิบเหล่านี้เป็นก๊าซติดไฟและอันตราย การใช้งานจึงต้องระมัดระวังเป็นพิเศษว่าต้องไม่มีการรั่วออกสู่ภายนอก

อนึ่ง เนื่องจากก๊าซที่ใช้เป็นก๊าซไวไฟและอันตราย ดังนั้นการติดตั้งและการใช้งานจึงต้องระมัดระวังมิให้มีการรั่วเด็ดขาด อุปกรณ์การจ่ายก๊าซจึงต้องใช้ชนิดที่มีความไว้วางใจสูง

2.5.2 ขั้นตอนการผลิตฟิล์มบางอะมอร์ฟิซิลิคอนอัลลอย

ขั้นตอนการผลิต a-SiN:H , a-SiC:H , a-SiO:H ด้วยวิธี glow discharge plasma CVD แบ่งได้เป็นส่วนใหญ่ๆ ได้ 3 ขั้นตอน ตามที่แสดงในรูปที่ 2.7 ดังนี้ (รายละเอียดเกี่ยวกับการเดินเครื่อง glow discharge plasma CVD ดูได้ในภาคผนวก)

(1) การเตรียมตัว ได้แก่การเริ่มเตรียมแผ่นฐานที่จะใช้ปลูกฟิล์ม แผ่นฐานที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีหลายชนิดดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แผ่นฐานที่ใช้สำหรับปลูกฟิล์ม a-SiN:H, a-SiC:H, a-SiO:H ในงานวิจัย

แผ่นฐาน	วัตถุประสงค์เพื่อวัดคุณสมบัติต่าง ๆ
Corning glass # 7059 (2 cm x 2 cm x 1 mm)	. สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (α) . สภาพนำไฟฟ้า (σ) . ESCA
Single Crystalline Silicon Wafer with High Resistivity (ผิว mirror) (1 cm x 1 cm x 0.5 mm)	. การดูดกลืนแสงอินฟราเรด (IR) เพื่อดูโครงสร้างของฟิล์ม
Micro Glass (2 cm x 2 cm x 0.1 mm)	. Spin Density (Dangling Bond Density) ด้วยวิธี Electron Spin Resonance (ESR)
glass/ITO (2 cm x 2 cm x 1 mm)	. ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบาง

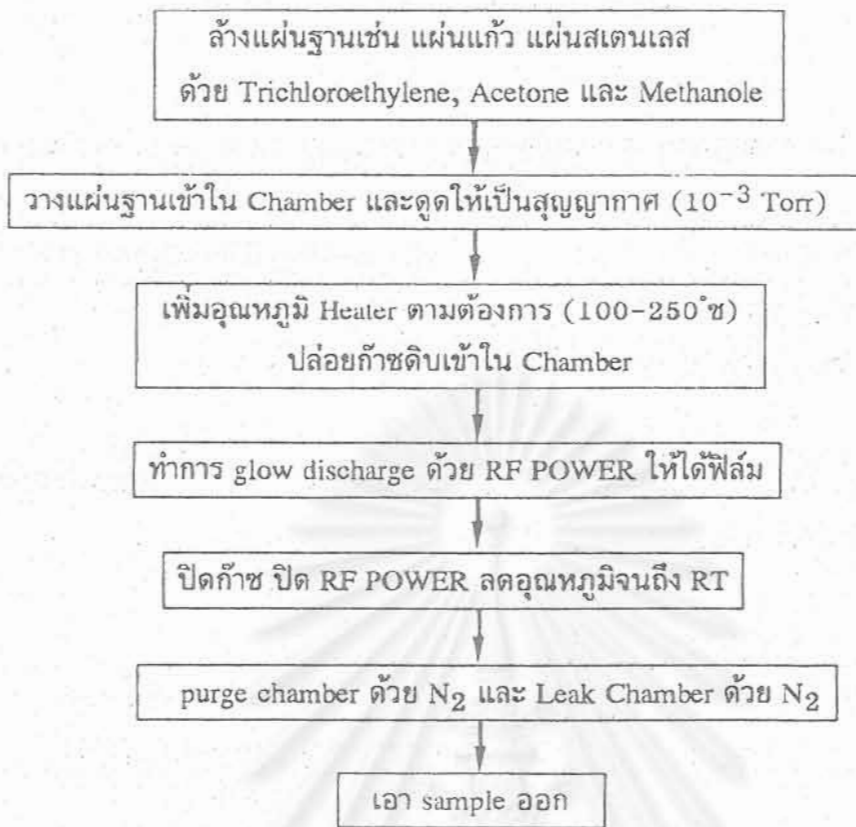
ก่อนการปลูกฟิล์ม จะต้องล้างแผ่นฐานเหล่านี้ให้สะอาดด้วยกระบวนการดังนี้

- Trichloroethylene Ultrasound 20 นาที
- Acetone Ultrasound 20 นาที
- Methylalcohol Ultrasound 20 นาที

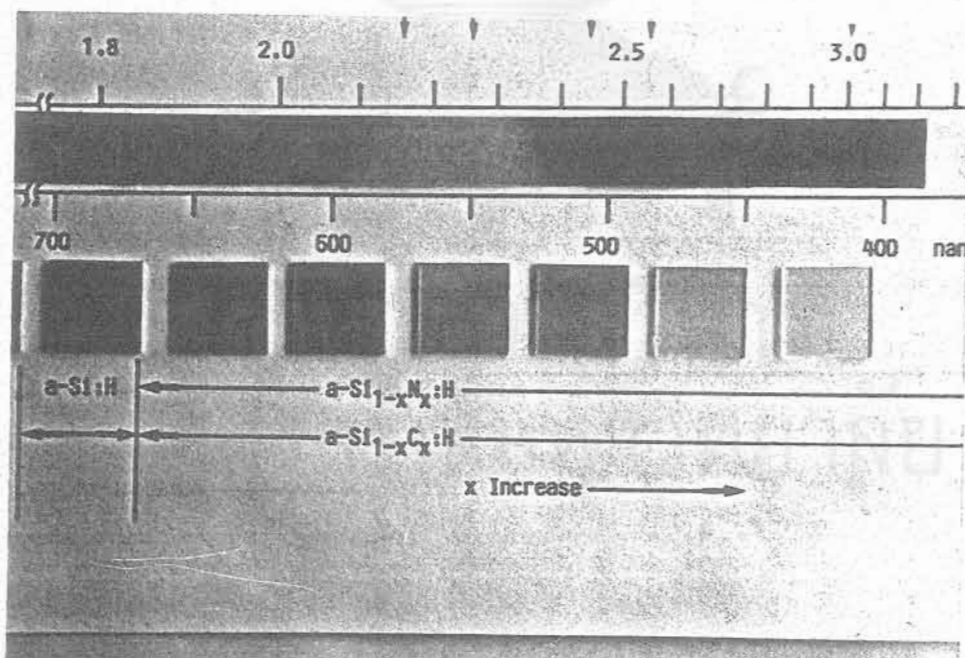
ส่วนผลึกเดี่ยวซิลิคอนนั้น หลังจากการล้างข้างต้นแล้ว จะถูกกัดผิวออกไซด์ด้วยกรด HF:H₂O = 1:10 เป็นเวลาประมาณ 20 นาที และล้างด้วยน้ำ DI (de-ionized water) ให้สะอาด

เมื่อได้แผ่นฐานที่สะอาดแล้ว ก็นำไปวางบนแท่นรองใน chamber แล้วทำให้เป็นสุญญากาศด้วย rotary pump เมื่อความดันลดเหลือน้อยกว่า 0.01 torr จึงปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้า heater เพื่อให้ได้อุณหภูมิที่ต้องการ จะใช้เวลาในการ heating นี้ประมาณครึ่งชั่วโมง

(2) การปลูกฟิล์ม เมื่ออุณหภูมิแผ่นฐานสูงตามต้องการแล้ว จึงเริ่มปล่อยก๊าซติดต่าง ๆ ให้ไหลตามปริมาณที่กำหนด (cc/min) เข้าสู่ chamber และควบคุมความดันภายใน chamber ให้คงที่ตามค่าที่กำหนด (ปกติ 1 torr) ด้วย main valve ที่อยู่ก่อนถึง rotary pump ต่อจากนั้นก็เริ่มเพิ่ม RF power จนก๊าซเกิดการดิสชาร์จซึ่งประมาณ 2-4 watt เริ่มจับเวลาการปลูกฟิล์ม และพยายามควบคุมเงื่อนไขต่าง ๆ ให้คงที่ตามที่กำหนด ตารางที่ 2.4 แสดงตัวอย่างเงื่อนไขโดยสรุปในการปลูก a-SiN:H, a-SiC:H และ a-SiO:H



รูปที่ 2.7 ขั้นตอนการปลูกฟิล์ม a-Si:H, a-SiN:H, a-SiC:H, a-SiO:H



รูปที่ 2.8 ภาพถ่ายตัวอย่างฟิล์ม a-SiN:H ที่เคลือบบนแผ่นฐานชนิดกระจก ปริมาณอะตอม N เพิ่มจากซ้ายไปขวา เมื่อปริมาณอะตอม N ในฟิล์มมีมากขึ้นจะทำให้ช่องว่างพลังงานของ a-SiN:H กว้างขึ้น และสีของ a-SiN:H จะเปลี่ยนจากแดงเข้มไปเป็นโปร่งแสง

ตารางที่ 2.4 เงื่อนไขโดยสรุปของการปลูกฟิล์ม a-SiN:H, a-SiC:H และ a-SiO:H

การทำดิสชาร์จ	แบบ capacitive ที่ความถี่ RF 13.56 MHz
อุณหภูมิแผ่นฐาน	100-300°C
กำลังไฟฟ้า RF	2-4 watt
ความดันขณะปลูกฟิล์ม	1 torr
ปริมาณการไหลรวมของก๊าซ	40-100 cc/min
ชนิดของก๊าซ	
a-SiN:H	SiH ₄ + NH ₃
a-SiC:H	SiH ₄ + CH ₄ (หรือ C ₂ H ₄)
a-SiO:H	SiH ₄ + CO ₂

(3) การหยุดเครื่อง เมื่อปลูกฟิล์มได้ความหนาตามต้องการแล้ว ก็ปิด RF POWER แล้วจึงลดอุณหภูมิให้ถึงอุณหภูมิห้อง (ใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง) ปิดถังก๊าซ ส่วนก๊าซดิบที่เหลือในท่อสแตนเลสต้องระบายทิ้งให้หมด เมื่อก๊าซดิบหมดแล้วให้ทำการ purge ท่อสแตนเลสด้วยก๊าซไนโตรเจน 5 นาที เมื่ออุณหภูมิลดถึงอุณหภูมิห้องแล้ว ให้เพิ่มความดันใน chamber ด้วยก๊าซไนโตรเจนจนถึงความดันบรรยากาศ แล้วจึงนำ sample ออก ทำความสะอาดภายใน chamber ด้วยกระดาษทิชชูสะอาด (ไม่มีขุย) ชุบอัลกอฮอล์จนสะอาด แล้วจึง set ระบบใหม่ การหยุด rotary pump ให้ leak pump ด้วยก๊าซไนโตรเจน

รูปที่ 2.8 แสดงภาพตัวอย่างฟิล์ม a-SiN:H ที่ผลิตได้ในงานวิจัยที่เคลือบบนแผ่นฐานชนิดกระจก

2.6 สรุป

ได้มีการติดตั้งระบบ glow discharge plasma CVD สำหรับปลูกฟิล์ม a-Si:H, a-SiC:H, a-SiN:H, a-SiO:H ขั้วไฟฟ้า RF มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 cm ดังนั้นพื้นที่ใหญ่สุดของฟิล์มที่จะปลูกได้จึงมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 cm ความสม่ำเสมอของความหนาของฟิล์มอยู่ในระดับที่พอใช้ได้ อัตราการเติบโต (growth rate) ของฟิล์มขึ้นกับเงื่อนไขต่าง ๆ โดยมีค่าอยู่ในช่วง 1-3 Å/sec การกำหนดความหนาของฟิล์มในสิ่งประดิษฐ์จะใช้วิธีการใช้อัตราการเติบโตของฟิล์มในการปลูกฟิล์มที่หนาๆไว้ก่อนแล้ว

เนื่องจากก๊าซที่ใช้ในระบบ CVD นี้เป็นก๊าซอันตรายที่ติดไฟและเป็นก๊าซพิษ ดังนั้นการติดตั้งและการใช้เครื่อง CVD จึงต้องอาศัยความชำนาญเป็นพิเศษและต้องใช้งานด้วยความระมัดระวังเป็นพิเศษ

เอกสารอ้างอิง

1. W.E. Spear and P.G. Le Comber, "Substitutional Doping of Amorphous Si", *Solid State Commun.*, **17**, (1975) 1193.
2. Y. Hamakawa editor, *Japan Annual Reveivs in Electronics, Computers & Telecommunications(JARECT) Amorphous Semiconductor Technologies & Devices*, (Ohm-Sha & North-Holland), vol **6**, (1983).
3. ดุสิต เครื่องงาม, "อะมอร์ฟัสซิลิคอน วัสดุอิเล็กทรอนิกส์ไฮเทคชนิดใหม่", *วิศวกรรมสาร* ที่ 42 เล่มที่ 2, (2532) 65.
4. N.F. Mott and E.A. Davis, *Electronic Processes in Non-Crystalline materials*, (Oxford University Press, 2nd edition 1979).
5. D. Kruangam, W. Boonkosum, P. Siamchai and S. Panyakeow, "Amorphous Visible-Light Thin Film LED Having a-SiN:H As a Luminescent Layer", 1992 International Conference on Solid State and Materials, Tsukuba, Japan, August 26-28 (1992) 563.
6. W. Boonkosum, D. Kruangam and S. Panyakeow, "Amorphous Visible-Light Thin Film Light-Emitting Diode Having a-SiN:H as a Luminescent Layer", *Japanese Journal of Applied Physics, Part I*, **4**, (1993) 1534.
7. D. Kruangam and W. Boonkosum, "Novel Thin Film Light Emitting Diode Display Made of Amorphous Silicon Based Semiconductors", *Symposium Proceedings of 1994 Spring Meeting of Materials Research Society (MRS)*, vol.345-Flat Panel Display Materials, San Francisco, U.S.A., April 4-8 (1994) 305.
8. D. Kruangam and S. Panyakeow, "Study of Hydrogenated Amorphous Silicon for Optoelectronic Devices", 2nd Regional Symp. Optoelectronics, Jakarta, Indonesia, November 27-18 (1989) 11.
9. D. Kruangam, P. Siamchai, W. Boonkosum and S. Panyakeow, "Integrated Type a-Si:H Solar Cells Having Simple Configuration", *The 7th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-7)*, Nagoya, Japan, November 22-26 (1993) 217.
10. D. Kruangam, "Development of Low Cost Amorphous Silicon Thin Film Solar Cell", *Proceeding of ASIA Energy'91*, World Trade Center, Bangkok, October (1991) 266.
11. W. Luft and Y.S. Tsuo, *Hydrogenated Amorphous Silicon Alloy Deposition Processes*, (Marcel Dekker, New York, Basel, Hong Kong, 1993).

12. ดุลิต เครื่องงาม และคณะ, รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์เรื่อง “เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟิซิลิกอน”, ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬา เสนอสภาวิจัยแห่งชาติ (2533) 181 หน้า.
13. วิโรจน์ บุญโกสุมภ์, ดุลิต เครื่องงาม และสมศักดิ์ ปัญญาแก้ว, “การประยุกต์ใช้อะมอร์ฟิซิลิกอนในไตรด์เป็นชั้นเปล่งแสงในไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบาง”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 15, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 3-4 ธันวาคม (2535) 3-1.
14. ดุลิต เครื่องงาม และคณะ, รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ระยะที่ 1 เรื่อง “ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางชนิดวัสดุอะมอร์ฟิซิลิกอน”, ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, จุฬาฯ, เสนอฝ่ายวิจัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (2536) 223 หน้า.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

การพัฒนาไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางอะมอร์ฟัส สารกึ่งตัวนำ (TFLED) โดยมี a-SiN:H เป็นชั้นเปล่งแสง

บทนำ

ในอดีตที่ผ่านมา ฟิล์มบางชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนไนไตรด์ มีประโยชน์สำหรับใช้งานในด้านอิเล็กทรอนิกส์มากมายหลายอย่าง เช่น ใช้เป็นชั้นฉนวน และชั้นป้องกันผิว (passivation layer) ให้กับสิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดต่าง ๆ และมีการใช้งานเป็นชั้นป้องกันการสะท้อนแสง (anti-reflection layer) ให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นต้น ฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอนไนไตรด์ที่ถูกผลิตขึ้นเพื่อใช้งานตามวัตถุประสงค์ดังกล่าวข้างต้นนี้ จะถูกผลิตให้มีอัตราส่วนของ Si และ N เท่ากับ 3/4 ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่ตรงกับคุณสมบัติของ stoichiometry ฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอนไนไตรด์เช่นนี้ ($a\text{-Si}_3\text{N}_4$) มีคุณสมบัติด้านความแข็ง ความโปร่งแสง (ช่องว่างพลังงานประมาณ 5.4 eV) และมีสภาพความต้านทานไฟฟ้าที่สูง ตารางที่ 3.1 แสดงตัวอย่างการประยุกต์ใช้งาน a-SiN:H ในงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ

สำหรับในงานวิจัยนี้ ได้เน้นการผลิตฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอนไนไตรด์ให้มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ (a-SiN:H) โดยลดปริมาณของอะตอม N ให้น้อยลง และควบคุมช่องว่างพลังงานให้อยู่ในช่วงประมาณ 1.8-3.5 eV ซึ่งจะทำให้ฟิล์มสามารถเปล่งแสงได้ดี และได้ทดลองการประยุกต์ใช้งาน a-SiN:H เป็นชั้นเปล่งแสงในไดโอดเปล่งแสงฟิล์มบางเป็นครั้งแรก [1-2] และความสำเร็จในการประยุกต์ใช้งาน a-SiN:H เป็นชั้น active ในสิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์เช่นนี้ก็นับเป็นครั้งแรกด้วยเช่นกัน

ในหัวข้อที่ 3.1 จะกล่าวถึงวิธีการผลิต a-SiN:H และผลการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานทางโครงสร้างของ a-SiN:H โดยการวิเคราะห์การสั่นพ้องของอะตอมใน a-SiN:H ด้วยการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงอินฟราเรด (infrared absorption spectrum) และการวัดจำนวนของแกนขาด (spin density หรือ จำนวนของ defects) ใน a-SiN:H ด้วยวิธี ESR (electron spin resonance)

ในหัวข้อที่ 3.2 จะกล่าวถึงผลการศึกษาคุณสมบัติทางแสงของ a-SiN:H โดยเน้นเรื่องการดูดกลืนแสงและการเปล่งแสงโฟโตลูมิเนสเซนซ์ การศึกษาโฟโตลูมิเนสเซนซ์ทำให้ทราบว่าฟิล์ม a-SiN:H เปล่งแสงได้อย่างไรและดีเพียงไร ความรู้ที่ได้จากหัวข้อที่ 3.1-3.2 นี้ จะมีประโยชน์ต่อการออกแบบสิ่งประดิษฐ์ไดโอดเปล่งแสง และเป็นข้อมูลพื้นฐานในการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติ (เช่นกลไกการรวมตัวของพาหะและการเปล่งแสง) และสามารถคาดการณ์ได้ว่า



จะมีแพคเกจอะไรบ้าง ที่จะเป็นตัวจำกัดประสิทธิภาพของการเปล่งแสงจากสิ่งประดิษฐ์ไดโอด-เปล่งแสง

ในหัวข้อที่ 3.3-3.5 จะกล่าวถึงการผลิตและผลการศึกษาลักษณะสมบัติพื้นฐานของ ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางรอยต่อ p-i-n ซึ่งมีฟิล์ม a-SiN:H เป็นชั้นเปล่งแสง และจะกล่าวถึงผลการพัฒนาให้ไดโอดเปล่งแสงสามารถเปล่งแสงที่มีรูปร่างต่าง ๆ ตามที่ต้องการ

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งาน a-SiN:H ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ

การใช้งาน	เอกสารอ้างอิง
1. Encapsulation coating for Gallium Arsenide to prevent evaporation of Arsenic during heat treatments	[3-7]
2. Gate dielectric for amorphous silicon or indium phosphide transistor	[8-10]
3. Insulators between metal layers	[11-12]
4. Masks to prevent oxidation and diffusion	[13-14]
5. Etch masks in multilayer resist structures	[15]
6. Supporting membranes for X-ray lithography masks	[16]
7. Dielectric and antireflection coating for solar cells and photodetectors	[17-18]
8. Luminescent layer in amorphous thin film LED	[1-2]

3.1 การศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานทางโครงสร้างของ a-SiN:H

3.1.1 การวัดพันธะของอะตอมใน a-SiN:H ด้วยสเปกตรัมการดูดกลืนแสง

อินฟราเรด

ฟิล์ม a-SiN:H ที่ปลูกในงานวิจัยนี้มีคุณสมบัติเป็นอะมอร์ฟัสกล่าวคือ การเรียงตัวของอะตอม Si และ N เป็นไปแบบไม่เป็นระเบียบ การวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงย่านแสงอินฟราเรดจะได้ข้อมูลเกี่ยวกับชนิดของพันธะของอะตอมต่าง ๆ ว่ามีอะไรบ้างและมีปริมาณเท่าไร

ฟิล์ม a-SiN:H ปลูกด้วยวิธี glow discharge plasma CVD ตามรายละเอียดที่กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 โดยมีเงื่อนไขที่สำคัญดังที่แสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขสำหรับการปลูกฟิล์ม a-SiN:H ชนิดบริสุทธิ์

RF power	4 watt (13.56 MHz)
Substrate temperature	190 °C
Pressure	1 Torr
SiH ₄ gas flow	30-70 cc/min
NH ₃ gas flow	30-70 cc/min
Film thickness	1-1.5 micron

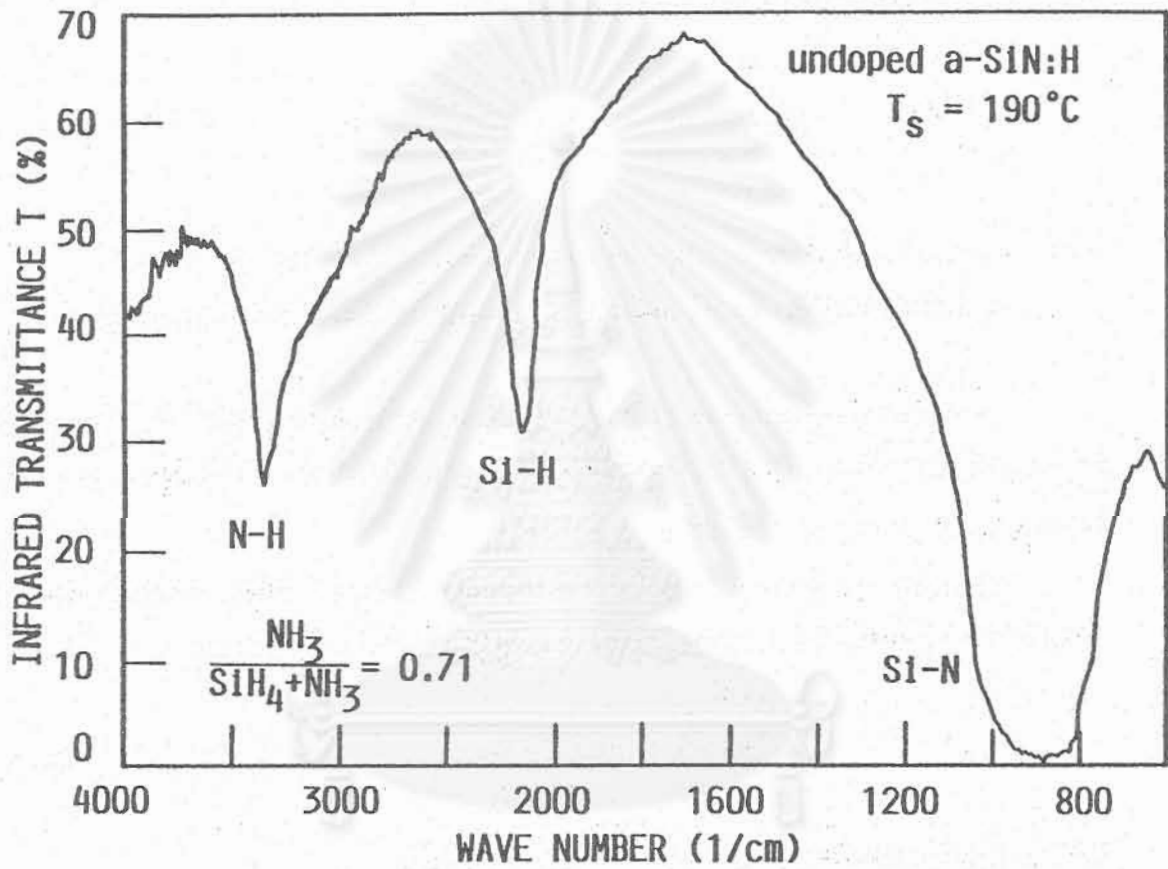
แผ่นฐานที่ใช้สำหรับวัดการดูดกลืนแสงอินฟราเรดคือ แผ่นผลึกเดี่ยวซิลิคอน (c-Si) ที่มีสภาพความต้านทานไฟฟ้าสูง (ประมาณ 1000 Ohm.cm) มีความหนาประมาณ 400 micron และถูกตัดให้มีขนาดประมาณ 1.5x1.5 cm²

ในการวัดนั้นได้ใช้วิธีการวัดสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของแสงอินฟราเรด (infrared transmittance T %) ในย่านจำนวนคลื่น (wave number) 800-4000 (1/cm) โดยใช้แสงชนิดลำแสงคู่ (double beams)

รูปที่ 3.1 แสดงตัวอย่างผลการวัดสเปกตรัม T % ของแสงอินฟราเรดของฟิล์ม a-SiN:H ในกรณีที่อัตราส่วนของการไหลของก๊าซ NH₃/(SiH₄ + NH₃) เท่ากับ 0.71 ในรูปนี้พบว่าการดูดกลืนแสงอินฟราเรดมากในบริเวณ 3 ช่วงซึ่งได้แก่ บริเวณจำนวนคลื่นที่ 850, 2000 และ 3350 cm⁻¹ การดูดกลืนเหล่านี้เกิดจากการดูดกลืนแสงอินเนื่องจากการสั่นแบบ stretching ของโมเลกุลชุด Si-N, Si-H และ N-H ตามลำดับ [19] สิ่งที่น่าสังเกตในรูปนี้คือการหนึ่งคือการปลูกฟิล์มจากก๊าซ NH₃ ผสม SiH₄ นั้นจะได้สารประกอบของอะมอร์ฟัส SiN และจะมีอะตอมของ H ผสมอยู่ด้วยเสมอ

ในกรณีของ a-Si:H ได้เป็นที่ยอมรับกันอย่างกว้างขวางว่าอะตอม H มีบทบาทเป็นตัวต่อแขนขาด (terminator) ให้กับ Si ซึ่งทำให้ช่วยลดจำนวนของแขนขาด (dangling bond) ได้มาก ทำให้จำนวนของจุดบกพร่องลดลงมาก จึงทำให้ฟิล์ม a-Si:H มีคุณภาพดีกว่ากรณีที่ไม่มี H ดังนั้น a-Si:H จึงมีค่าสภาพนำไฟฟ้าด้วยแสงที่ดี และประสิทธิภาพของโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่ดีด้วย

ในทำนองเดียวกัน จากการที่ a-SiN:H ก็มีอะตอม H รวมอยู่ด้วย ดังนั้นจึงคาดว่า H ก็ทำหน้าที่เป็นตัวอุดแขนขาดให้กับ Si และ N ด้วย ดังนั้นประสิทธิภาพของโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของ a-SiN:H ซึ่งผลิตด้วยวิธี glow discharge plasma CVD ที่ใช้ในงานวิจัยนี้จึงดีกว่า a-SiN ที่ผลิตด้วยวิธีอื่นที่ไม่มี H ผสมอยู่ด้วย



รูปที่ 3.1 ผลการวัดสเปกตรัมการทะลุผ่านแสงอินฟราเรด (T %) ของฟิล์ม a-SiN:H

ในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากสเปกตรัมการดูดกลืนแสงอินฟราเรด แบบเชิงปริมาณ นั้น สามารถคำนวณหาค่าจำนวนโมเลกุลของการสั่นขูดต่างๆได้ (จำนวน/cm³)

ถ้า a-SiN:H มีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเท่ากับ $\alpha(\text{cm}^{-1})$ มีความหนา d (cm) และมีสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงด้านรับแสงเท่ากับ R % ถ้าพิจารณาให้แสงส่วนใหญ่สะท้อน เฉพาะด้านผิวหน้าที่ได้รับแสงเท่านั้น จากรูปที่ 3.2 จะได้ว่า

$$\alpha(\lambda) = \frac{1}{d} \ln \left(\frac{T_0(\lambda)}{T_1(\lambda)} \right) \quad (3.1)$$

โดยที่ T_0 และ T_1 คือค่า back ground และค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านแสงตามลำดับ α คือสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงอินฟราเรดและเป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่นแสง

ผลการวัดสเปกตรัมสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงอินฟราเรดแสดงในรูปที่ 3.3 จากรูปนี้ พบว่าถ้าเพิ่มปริมาณก๊าซ NH₃ จะทำให้สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของการสั่นโหมดต่างๆ ซึ่ง ได้แก่ N-H, Si-H และ Si-N เพิ่มขึ้น

นอกจากนี้ จากสเปกตรัม α เรายังสามารถคำนวณหาค่าปริมาณของขูดอะตอมในการ สั่นโหมดต่างๆ ในหนึ่งหน่วยปริมาตร (concentration) ได้อีกด้วย จากสูตร [19]

$$C(\text{cm}^{-3}) = A \int \frac{\alpha(\omega)}{\omega} d\omega \quad (3.2)$$

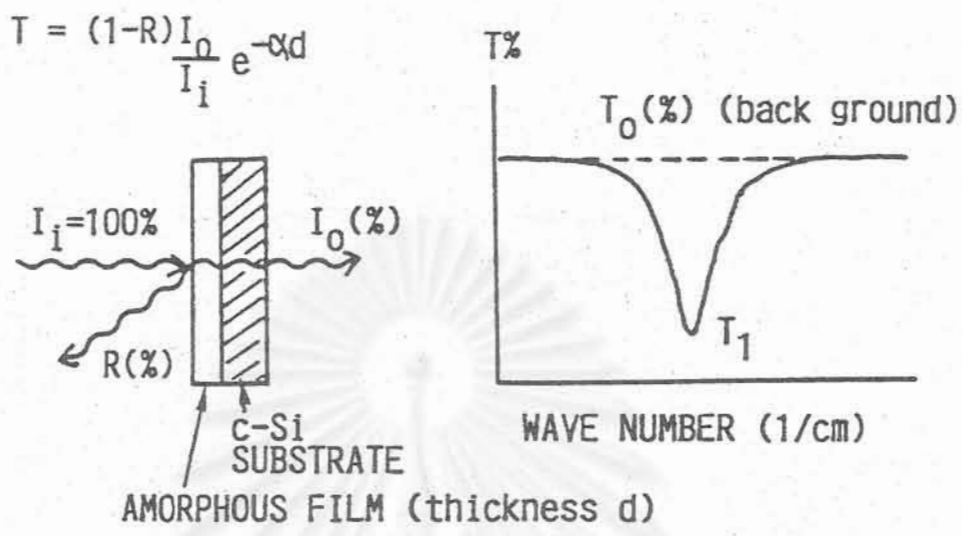
โดยที่ A คือค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับการสั่นโหมดต่างๆเช่น กรณี [19]

Si-N (stretching ที่ 880 cm⁻¹), $A = 2.9 \times 10^{18}$ (cm⁻³)

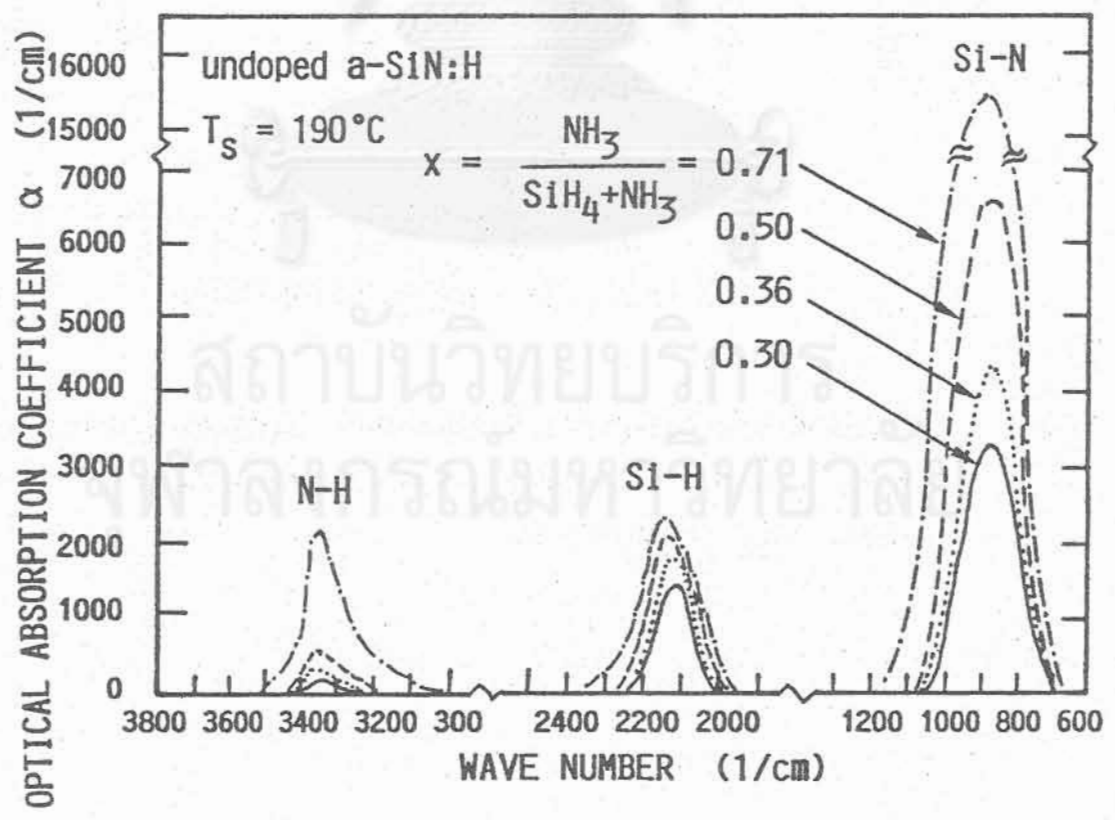
Si-H (stretching ที่ 2000 cm⁻¹), $A = 1.4 \times 10^{20}$ (cm⁻³)

N-H (stretching ที่ 3300 cm⁻¹), $A = 2.3 \times 10^{19}$ (cm⁻³)

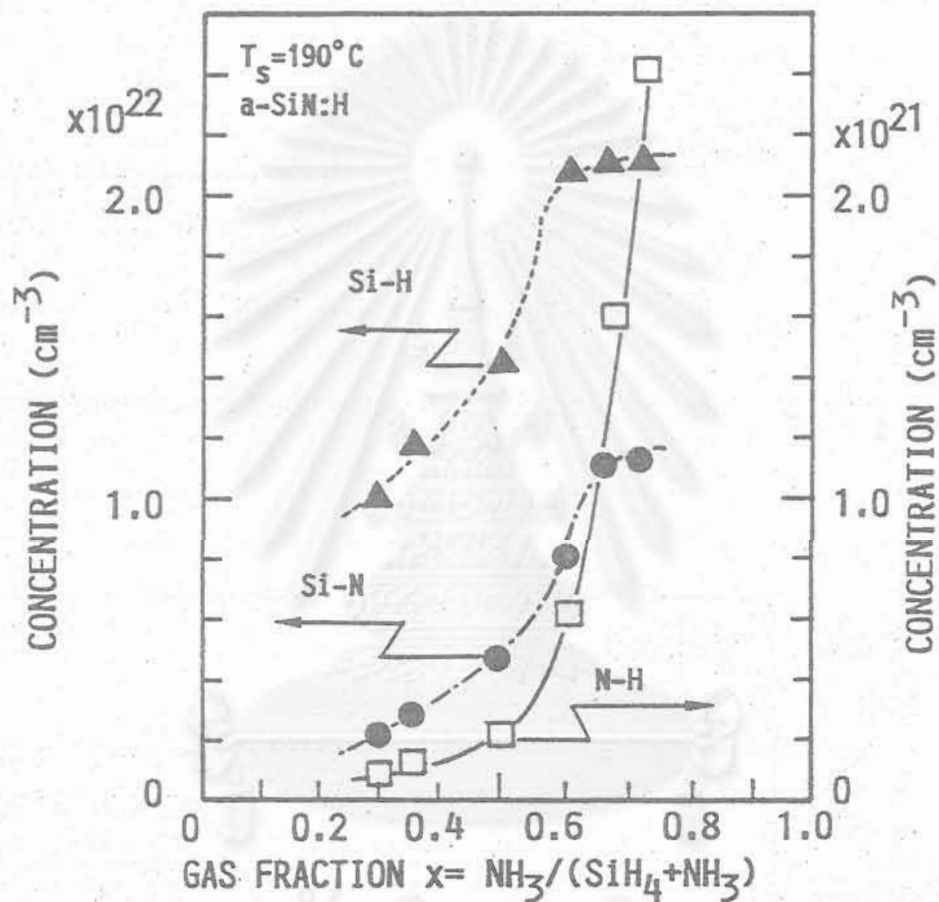
รูปที่ 3.4 แสดงผลการคำนวณปริมาณของโมเลกุลที่สั่นด้วยโหมดต่างๆ จากรูปนี้พบว่าการเพิ่มปริมาณของก๊าซแอมโมเนีย x จาก 0.3 ถึง 0.71 ทำให้ปริมาณของ Si-N เพิ่มจาก 2×10^{21} (cm⁻³) เป็นประมาณ 1×10^{22} (cm⁻³) และปริมาณของ Si-N นี้เริ่มจะอิ่มตัวเมื่อ x มีค่าใกล้ 0.71 สำหรับกรณี N-H ค่อยๆ เพิ่มจาก 8×10^{20} (cm⁻³) ไปถึง 2×10^{21} (cm⁻³) และยังไม่อิ่มตัว



รูปที่ 3.2 หลักการวัดค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (α) จากค่าการทะลุผ่านแสงอินฟราเรด



รูปที่ 3.3 สเปกตรัมสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงอินฟราเรดของ a-SiN:H พารามิเตอร์ในรูปคือ อัตราส่วนของก๊าซ $x = \text{NH}_3 / (\text{NH}_3 + \text{SiH}_4)$



รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (concentration) ของชุดอะตอม Si-H, Si-N, N-H ที่มีอยู่ในฟิล์ม $a\text{-SiN:H}$ และอัตราส่วนก๊าซ $x = \text{NH}_3 / (\text{SiH}_4 + \text{NH}_3)$ ที่ใช้ในการปลูกฟิล์ม

ข้อมูลเหล่านี้ทำให้เราทราบว่าการเพิ่มอัตราส่วนก๊าซ $x = \text{NH}_3/(\text{SiH}_4+\text{NH}_3)$ ทำให้ในฟิล์ม a-SiN:H มีอะตอม N และ H เพิ่มขึ้น โดยที่ปริมาณ N มีแนวโน้มว่าจะอิ่มตัวได้ ส่วนจำนวนของ H ที่สร้างพันธะกับ Si แม้จะอิ่มตัว แต่ H ที่สร้างพันธะกับ N จะยังคงเพิ่มขึ้นได้เรื่อย ๆ

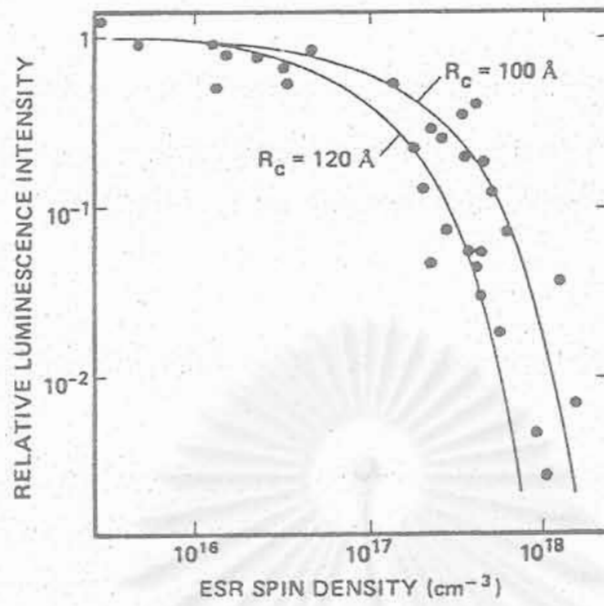
3.1.2 การวัดจำนวนแขนขาดใน a-SiN:H ด้วยวิธีอิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์ (ESR)

การศึกษาคุณสมบัติทางโครงสร้างที่สำคัญที่สุดอีกด้านหนึ่งในวัสดุตระกูลอะมอร์ฟัสซิลิคอนอัลลอยต่าง ๆ คือการวัดจำนวนของแขนขาด (dangling bond) ว่ามีจำนวนมากน้อยเท่าไร และแขนขาดเหล่านั้นเกิดขึ้นจากอะตอมใด ทั้งนี้เพราะว่าแขนขาดนั้นมีบทบาทสูงในการกำหนดคุณสมบัติทั้งทางแสงและทางไฟฟ้าของวัสดุอะมอร์ฟัส อาทิเช่น

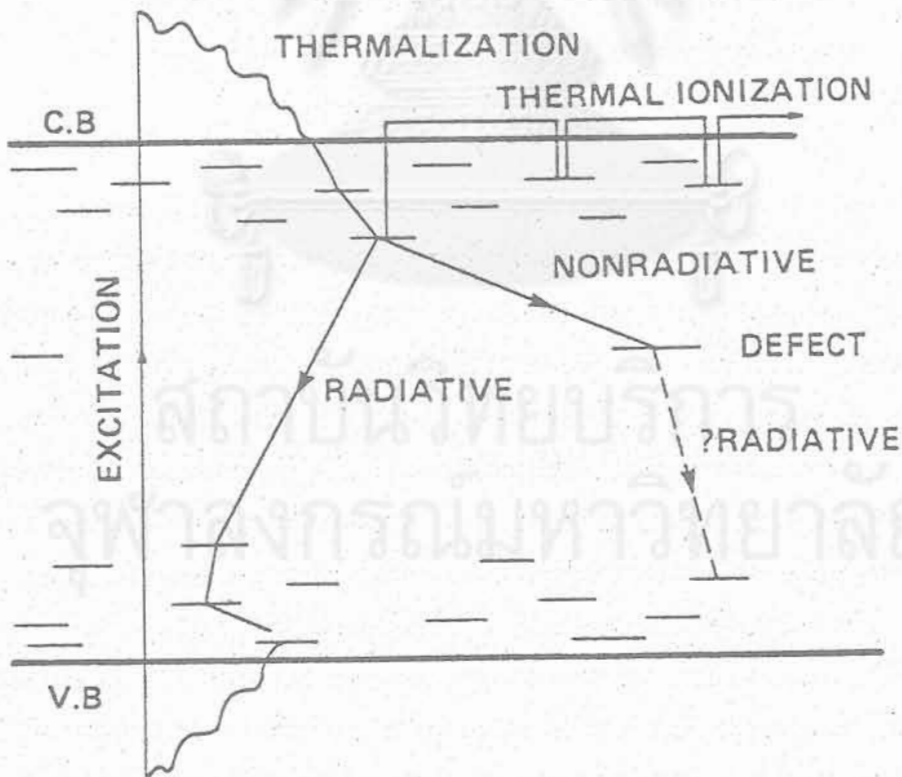
1. แขนขาด ทำให้เกิด defect states ขึ้นภายในช่องว่างพลังงานของวัสดุอะมอร์ฟัส
2. แขนขาดเป็นตัวคอยจับพาหะ (เช่นอิเล็กตรอน) ที่วิ่งเข้ามาใกล้ จึงทำให้ประสิทธิภาพของการได้เปลวลง
3. ทำให้ค่าสภาพนำไฟฟ้าด้วยแสง (photoconductivity) เลวลง
4. ทำให้ประสิทธิภาพของลูมิเนสเซนซ์ (luminescence) เลวลง
- และ 5. ทำให้เสถียรภาพ (stability) ของสิ่งประดิษฐ์เลวลง

ดังนั้นในทางปฏิบัติ ฟิล์มที่ดีควรมีแขนขาดจำนวนน้อย ในอดีตฟิล์ม a-Si ที่ปลูกด้วยวิธี evaporation นั้นมีจำนวนแขนขาดมากจนไม่สามารถได้ปให้เป็นสารกึ่งตัวนำชนิด p หรือ n ได้ จนในที่สุด ในต้นทศวรรษที่ 1970 Prof. Spear จากมหาวิทยาลัย Dundee [20] ประเทศอังกฤษ ได้ประสบความสำเร็จในการผลิตฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอน (a-Si:H) ด้วยวิธี glow discharge plasma CVD และเป็นฟิล์มที่มีคุณสมบัติทางออปโตอิเล็กทรอนิกส์ที่ดีมาก กล่าวคือมีค่าสภาพนำไฟฟ้าด้วยแสงที่ดี และสามารถได้ปให้เป็นชนิด p และ n ได้ ทั้งนี้เพราะว่าจำนวนของจุดบกพร่องหรือแขนขาดใน a-Si:H มีจำนวนน้อยกว่า a-Si และต่อมาก็มีการค้นพบว่า อะตอมไฮโดรเจนที่สร้างพันธะกับอะตอมซิลิคอนนั้น มีประโยชน์ในการทำให้แขนขาดมีจำนวนลดน้อยลง [21]

ทางด้านคุณสมบัติการเปล่งแสง ได้มีการศึกษาพบว่า a-Si:H เปล่งแสงโฟโตลูมิเนสเซนซ์ได้ดีในย่านอินฟราเรด โดยมียอดของสเปกตรัมอยู่ที่ 1.1~1.2 eV อย่างไรก็ตาม Street [22] ได้ค้นพบว่าประสิทธิภาพของโฟโตลูมิเนสเซนซ์จะลดลงถ้า a-Si:H มีจำนวนแขนขาดมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.5 จำนวนของแขนขาดนี้สามารถวัดได้ด้วยวิธี ESR โดยได้มีโมเดลที่เป็นที่ยอมรับกันทั่วไปว่า แขนขาดนั้นจะเป็นศูนย์กลางการรวมตัวแบบไม่เปล่งแสง (non-radiative recombination centers) โดยมีระดับพลังงานอยู่ใน gap states ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความสว่างของโฟโตลูมิเนสเซนซ์ และจำนวนของแขนขาดในพันธะอะตอม (วัดจาก ESR spin density) ในกรณีฟิล์ม a-Si:H [22]



รูปที่ 3.6 โมเดลสำหรับการรวมตัวของพาหะชนิดเปล่งแสง (radiative) และชนิดไม่เปล่งแสง (non-radiative) ในแถบพลังงานต้องห้ามในวัสดุตระกูลอะมอร์ฟัสซิลิคอน

ในทำนองเดียวกัน เนื่องจากในบทนี้จะใช้ฟิล์ม a-SiN:H เป็นชั้นเปล่งแสงในไดโอด-เปล่งแสงแบบฟิล์มบาง ดังนั้นเราจึงควรทราบว่าฟิล์ม a-SiN:H ที่ปลูกในงานวิธีนี้จะมีแขนขาดจำนวนมากน้อยเท่าไร และขึ้นกับเงื่อนไขการผลิตอย่างไรบ้าง

ในหัวข้อนี้จะรายงานผลการวิจัยการวัดจำนวนของแขนขาดใน a-SiN:H ด้วยวิธี Electron Spin Resonance (ESR) (สำหรับรายละเอียดเกี่ยวกับหลักการของ ESR และวิธีการวัดดูได้ในรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ระยะที่ 1 พ.ศ. 2536 [23])

จากกฎของ Pauli ในวงโคจรของอิเล็กตรอน 1 วง จะมีอิเล็กตรอนได้สูงสุด 2 ตัว โดยอิเล็กตรอน 2 ตัวนั้นต้องมีสปินที่มีทิศตรงข้ามกัน เราเรียกอิเล็กตรอน 2 ตัวที่มีทิศทางของสปินตรงข้ามกันและจับคู่กันเช่นนี้ว่า “อิเล็กตรอนคู่” (pair electron) แต่ถ้ามีอิเล็กตรอนเพียงตัวเดียวก็จะเรียกว่า “อิเล็กตรอนไร้คู่” (lone pair electron) ดังแสดงในรูปที่ 3.7

อิเล็กตรอนไร้คู่ที่กล่าวมานี้มีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า “แขนขาด” (dangling band) นิยมใช้อักษรย่อว่า “D” และมีวิธีการเรียกชื่อต่าง ๆ ในรายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 3.8 ดังนี้ [24]

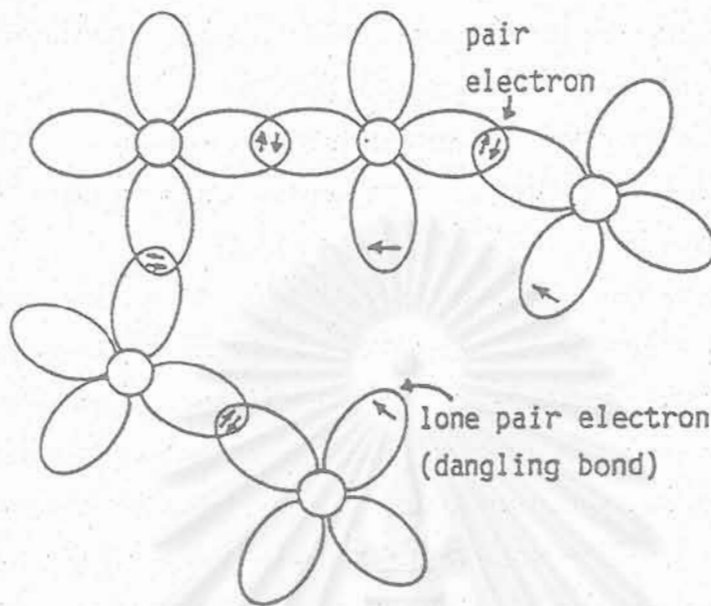
1. ที่ตำแหน่งแขนขาดนี้ ถ้ามีอิเล็กตรอนเพียงตัวเดียวจะใช้สัญลักษณ์ว่า “D⁰”
2. ถ้ามีอิเล็กตรอนอิสระจากที่อื่นวิ่งมาจับคู่ด้วย แขนขาดนั้นจะมีอิเล็กตรอนรวม 2 ตัว จะใช้สัญลักษณ์ว่า “D⁻”
3. ถ้าที่ตำแหน่งแขนขาดนั้น ไม่มีอิเล็กตรอนเลยจะใช้สัญลักษณ์ว่า “D⁺”

เนื่องจาก “D⁻” มีอิเล็กตรอน 2 ตัว จึงไม่มีโมเมนต์แม่เหล็กและไม่เกิดปรากฏการณ์ ESR

ฟิล์ม a-SiN:H ที่ใช้วัด ESR ในงานวิจัยนี้ถูกปลูกบนแผ่นฐานกระจก (micro glass) ขนาด 2x2x0.1 mm³ ฟิล์ม a-SiN:H หนาประมาณ 1~2 ไมครอน เงื่อนไขการปลูกฟิล์มมีดังนี้ (การคำนวณต่าง ๆ จะหักค่าสัญญาณจากแผ่นฐานออกไป)

RF power	3 watt
Substrate Temperature	190° C
Gas Pressure	1 Torr
Gas Fraction $x = \text{NH}_3 / (\text{SiH}_4 + \text{NH}_3) = 0 \sim 0.71$	

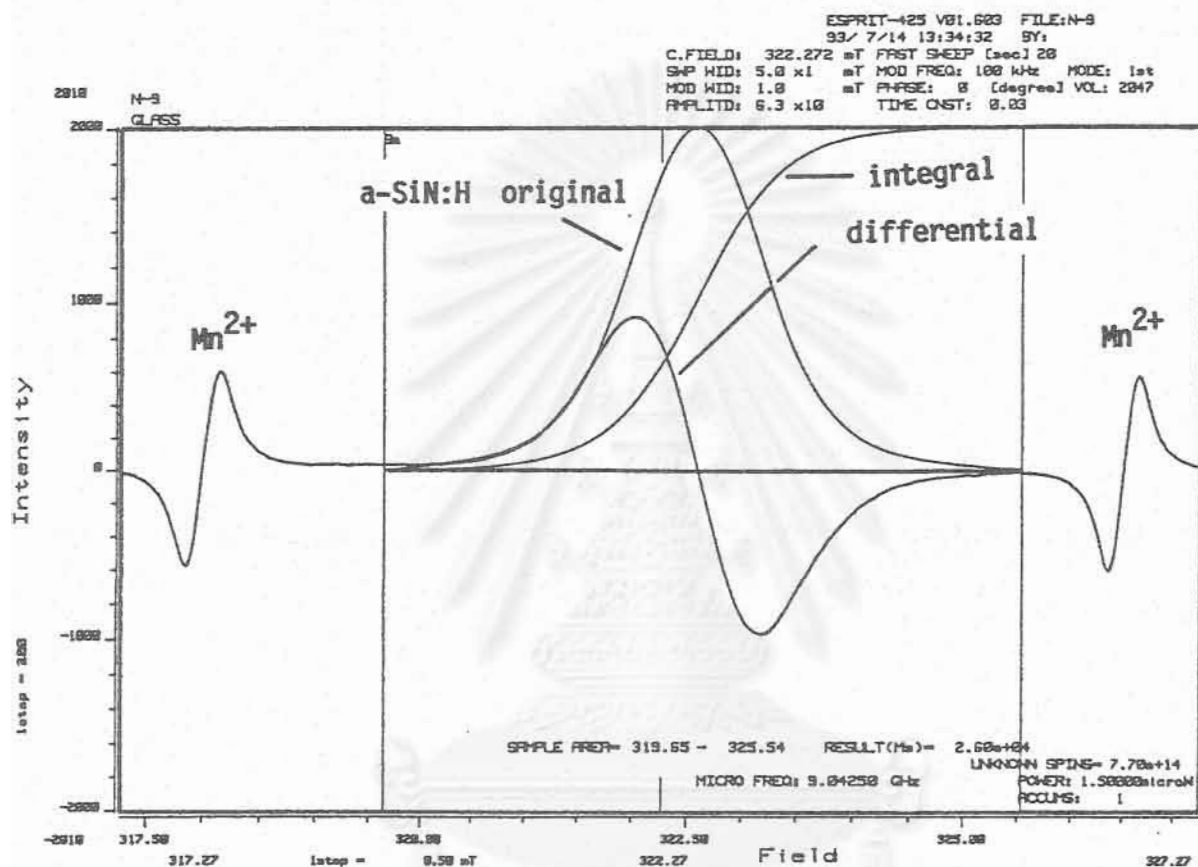
รูปที่ 3.9 แสดงตัวอย่างสเปกตรัม ESR ของ a-SiN:H ที่ปลูกที่อัตราส่วนก๊าซ $x = \text{NH}_3 / (\text{SiH}_4 + \text{NH}_3) = 0.5$ ปกติสัญญาณเอทท์พุทจะเป็นสัญญาณดิฟเฟอเรนเชียล 1 ครั้ง สัญญาณเล็ก ๆ ด้านซ้ายและขวาเป็นของชิ้นงานมาตรฐาน (marker) ซึ่งใช้วัดชนิด Mn^{2+}



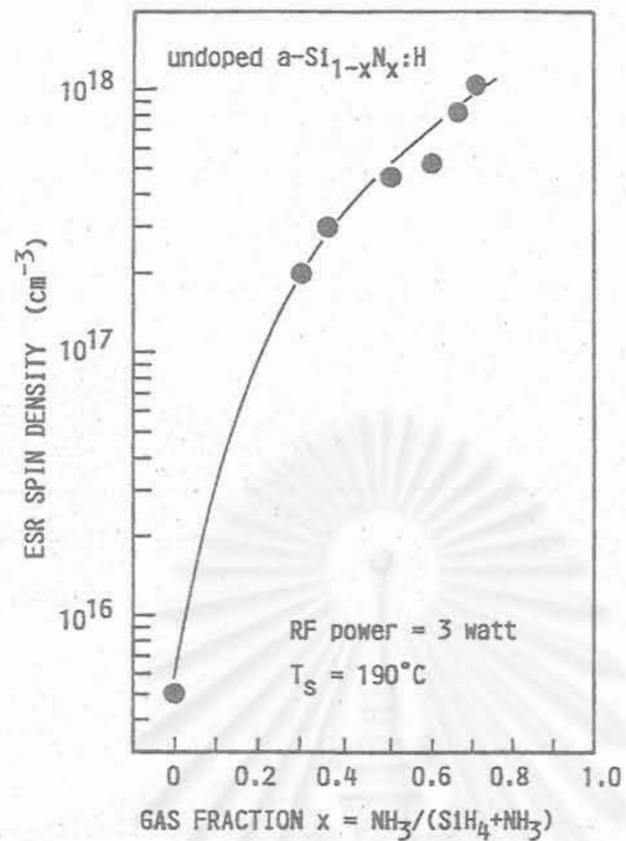
รูปที่ 3.7 ลักษณะของการเกิดอิเล็กตรอนไร้คู่ ซึ่งเป็นแขนขาด (lone pair electron หรือ dangling bond) ในอะมอร์ฟัสซิลิคอน

Dangling bond state	Spin	ESR signal detectability
D^0	↑	yes
D^-	↓ ↑	no
D^+		no

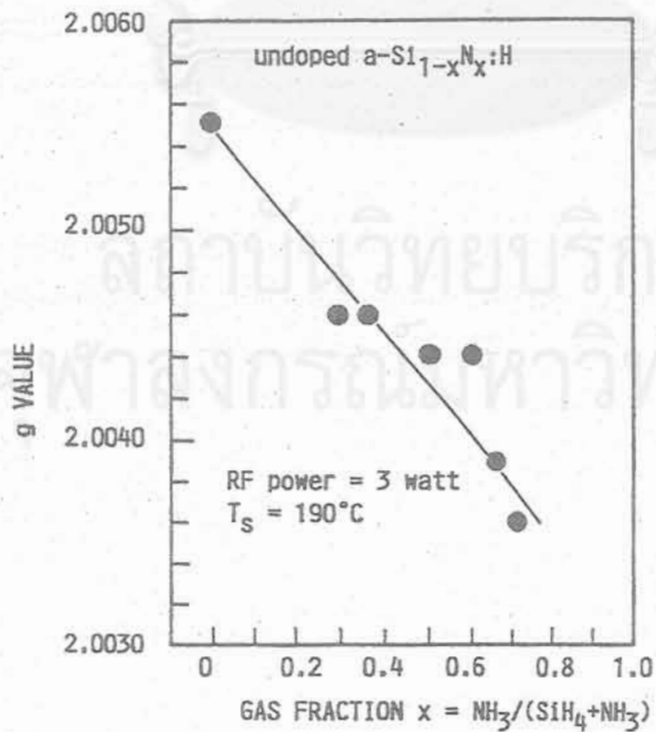
รูปที่ 3.8 นิยามของการตั้งชื่อแขนขาดชนิดต่าง ๆ [24]



รูปที่ 3.9 สเปกตรัม ESR ของ a-SiN:H ที่ปลูกจากก๊าซอัตราส่วน $x = \text{NH}_3 / (\text{SiH}_4 + \text{NH}_3) = 0.5$ สัญญาณตรงกลางเป็นของ a-SiN:H ส่วนสัญญาณด้านขอบซ้ายและขวาเป็นของ Marker Mn²⁺ ตัวที่ 3 และ 4 ตามลำดับ



รูปที่ 3.10 สรุปผลการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ESR spin density และอัตราส่วนก๊าซ $x = \text{NH}_3/(\text{SiH}_4 + \text{NH}_3)$ ที่ใช้ปลูกฟิล์ม $a\text{-SiN:H}$



รูปที่ 3.11 สรุปผลการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง g-value และอัตราส่วนก๊าซ $x = \text{NH}_3/(\text{SiH}_4 + \text{NH}_3)$ ที่ใช้ปลูกฟิล์ม $a\text{-SiN:H}$

ข้อมูลสำคัญที่เราได้จากการวัด ESR ได้แก่ จำนวนสปิน (แขนขาด) ของ a-SiN:H ในการวัดเพื่อให้ทราบค่าจำนวนสปินที่แท้จริงนั้น ทำได้โดยการใช้วัสดุมาตรฐานคือ DPPH (Diphenyl Picryl Hydrazyl) เป็นตัวเทียบ (รายละเอียดการเตรียมและการคำนวณดูในรายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์เรื่อง เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิกอน เสนอต่อสภาวิจัยฯ 2533 [25])

รูปที่ 3.10 แสดงผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนของสปินและอัตราส่วนของก๊าซ x ($= \text{NH}_3/(\text{SiH}_4 + \text{NH}_3)$) ที่ใช้ปลูกฟิล์ม a-SiN:H จากรูปพบว่า เมื่อค่า x เพิ่มจาก 0 ถึง 0.71 จะทำให้จำนวนสปินเพิ่มขึ้นจากค่า $5 \times 10^{15} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$ เป็น $1 \times 10^{18} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$ ข้อมูลนี้ชี้ให้เห็นว่า การเพิ่มปริมาณก๊าซ NH_3 (นั่นคือ ปริมาณ N) จะทำให้ฟิล์ม a-SiN:H มีแขนขาดเพิ่มมากขึ้น

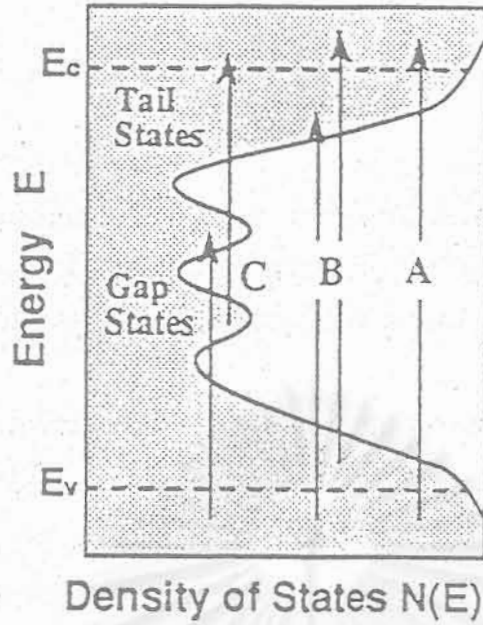
รูปที่ 3.11 แสดงผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่าง g-value และอัตราส่วนของก๊าซ x จากรูปนี้พบว่า ถ้า $x = 0$ จะได้ g-value เท่ากับ 2.0055 ซึ่งเป็นค่าของ a-Si:H นั้นเอง และเมื่อเพิ่มค่า x จาก 0 ถึง 0.71 กล่าวคือ เมื่อเพิ่มจำนวน N จะทำให้ g-value มีค่าลดลงจาก 2.0055 เป็นประมาณ 2.0036 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า อะตอมที่เป็นแขนขาดใน a-SiN:H นั้น ไม่เพียงแต่เกิดขึ้นที่อะตอม Si เท่านั้น แต่ยังเกิดขึ้นที่อะตอม N ด้วย

3.2 การศึกษาคุณสมบัติทางแสงของ a-SiN:H

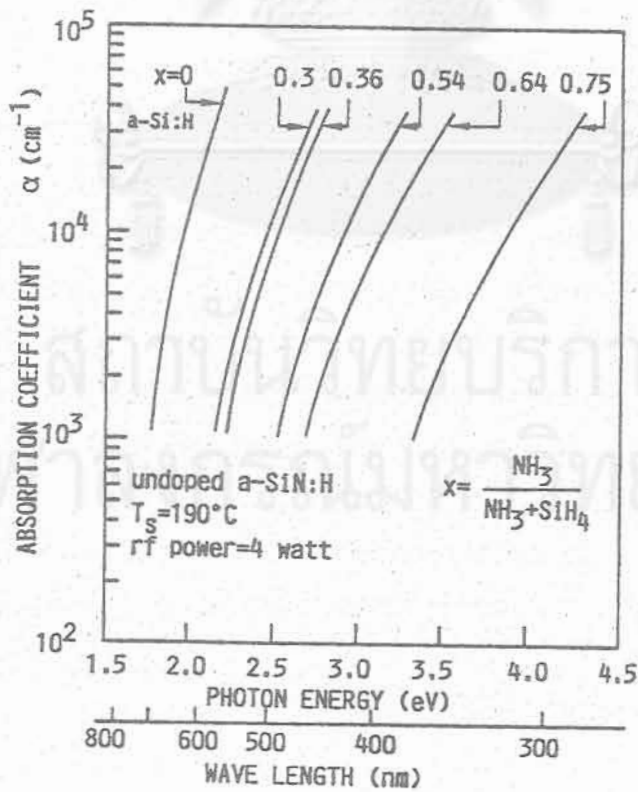
3.2.1 สเปกตรัมสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและช่องว่างพลังงานของ a-SiN:H

เมื่อมีแสงเดินทางเข้าสู่วัสดุอะมอร์ฟัสซิลิกอนอัลลอย แสงนั้นจะถูกดูดกลืนด้วยกระบวนการต่าง ๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับพลังงานโฟตอนของแสงว่ามีค่ามากน้อยเท่าไรดังแสดงในรูปที่ 3.12 การเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนอันเนื่องจากการดูดกลืนแสงนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น กรณี A, B และ C ดังที่แสดงในรูปที่ 3.12 ดังนั้นการวัดสเปกตรัมของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงจะมีประโยชน์มาก เพราะจากสเปกตรัมสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงจะทำให้เราได้ข้อมูลต่าง ๆ มากมายหลายอย่าง เช่น ลักษณะของแถบพลังงาน, ลักษณะของระดับ localized states, ขนาดช่องว่างพลังงาน ตลอดจนข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับการเปล่งแสงด้วย

ในหัวข้อนี้ จะรายงานผลการศึกษาการวัดสเปกตรัมสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของ a-SiN:H ชนิดบริสุทธิ์ โดยเน้นการเปลี่ยนสถานะในย่าน A ซึ่งเปลี่ยนสถานะระหว่างแถบวาเลนซ์และแถบคอนดักชัน โดยมีการเปลี่ยนพารามิเตอร์อัตราส่วนของก๊าซที่ใช้ผลิตฟิล์ม และนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่าช่องว่างพลังงานของ a-SiN:H



รูปที่ 3.12 การเปลี่ยนสถานะ (transition) ของอิเล็กตรอนเมื่อมีการดูดกลืนแสง
 (A) กรณี extended states to extended states (ย่าน band edge)
 (B) กรณี tail states to extended states (ย่าน Urbach tail) และ
 (C) กรณี gap states to extended states (ย่าน deep gap states)



รูปที่ 3.13 สเปกตรัมสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงในย่าน A (band edge) ของฟิล์มบาง a-SiN:H ชนิดบริสุทธิ์ (undoped) พารามิเตอร์ในรูปคือ อัตราส่วนก๊าซ $x = \text{NH}_3 / (\text{NH}_3 + \text{SiH}_4)$

หมายเหตุ รายละเอียดเกี่ยวกับทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับโมเดลแถบพลังงานของอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำและการดูดกลืนแสงย่าน A, B, C ดูได้ในรายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ระยะที่ 1 พ.ศ. 2536 [23]

สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของ $a\text{-SiN:H}$ วัดได้จากค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านแสง (transmittance T %) โดยใช้เครื่อง UV spectrophotometer แบบลำแสงคู่ ฟิล์ม $a\text{-SiN:H}$ ปลูกบนแผ่นฐานชนิดกระจก (Coming No. 7059) แผ่นกระจกมีขนาด $20 \times 20 \times 1 \text{ mm}^3$ ฟิล์ม $a\text{-SiN:H}$ มีความหนาประมาณ 0.5-1 ไมครอน

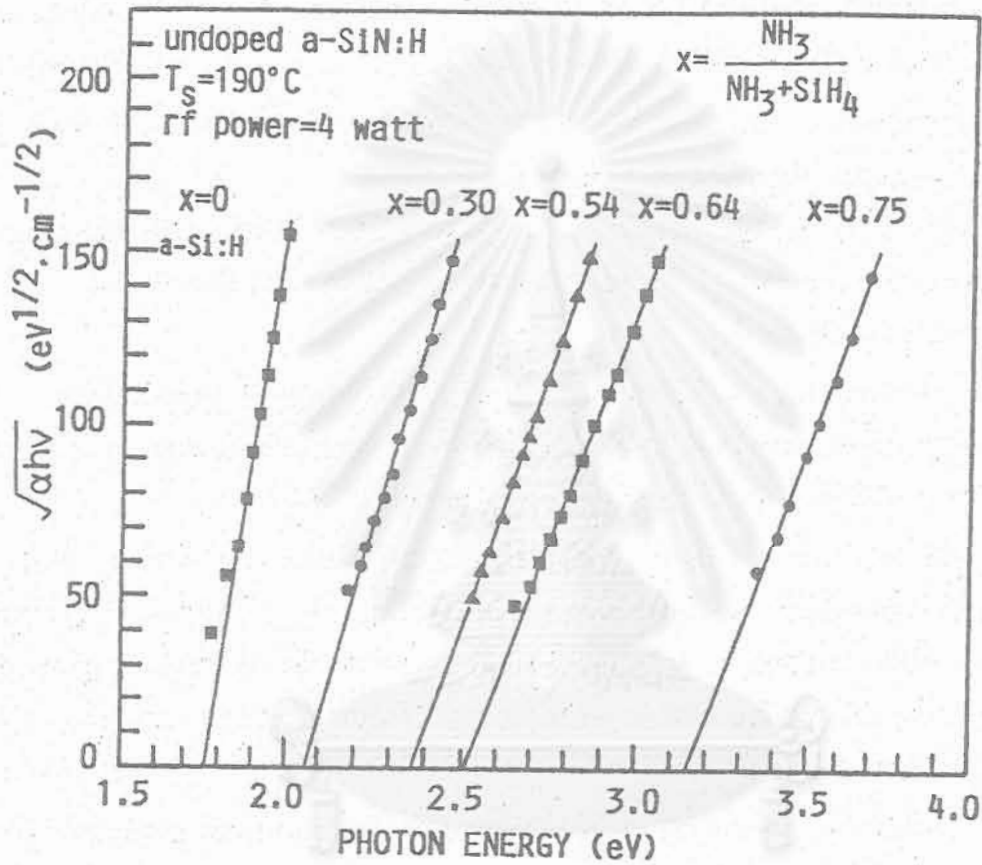
เงื่อนไขการปลูกฟิล์ม $a\text{-SiN:H}$ ได้แก่ อุณหภูมิแผ่นฐาน 190°C , RF power 4 watt, gas pressure ใน chamber 1 Torr พารามิเตอร์ที่เปลี่ยนได้แก่ อัตราส่วนของก๊าซ $x = \text{NH}_3 / (\text{SiH}_4 + \text{NH}_3)$ โดยที่ $x = 0-0.8$

สเปกตรัมของ T % ที่วัดได้ถูกนำไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง โดยคำนึงถึงการสะท้อนแสงทั้งที่ผิวฟิล์มด้านรับแสงและที่รอยต่อระหว่างฟิล์มและแผ่นฐาน (ในกรณีที่มีค่ามากจะใช้แผ่นควอทซ์เป็นแผ่นฐานแทนแผ่นกระจก Coming)

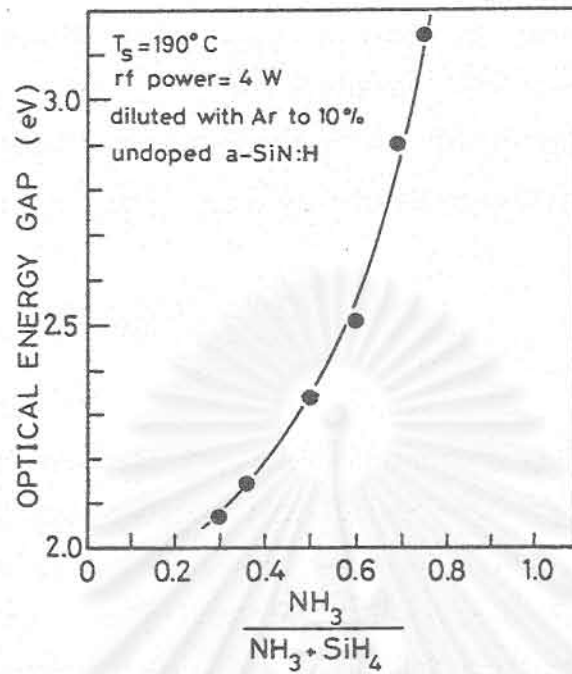
รูปที่ 3.13 แสดงสเปกตรัมของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (α) ของ $a\text{-SiN:H}$ ในย่านพลังงานโฟตอนใกล้ช่องว่างพลังงาน (ย่าน A) โดยที่พารามิเตอร์ในรูปนี้คือ อัตราส่วนของก๊าซ (x) ที่ใช้ในการปลูกฟิล์ม จากรูปนี้พบว่า เมื่อ x มีค่ามากขึ้น สเปกตรัมจะเคลื่อนไปทางพลังงานโฟตอนที่มีค่ามากขึ้น จากข้อมูลการวัดการดูดกลืนแสงอินฟราเรด เราเคยทราบว่าการเพิ่มปริมาณก๊าซ NH_3 (x) จะทำให้ฟิล์ม $a\text{-SiN:H}$ มีปริมาณอะตอมของ N มากขึ้น ดังนั้นจากรูปที่ 3.13 นี้ทำให้เราทราบว่าเมื่ออะตอม N มีจำนวนมากขึ้น จะทำให้สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงลดลง และสเปกตรัมจะเคลื่อนไปทางพลังงานโฟตอนสูงขึ้น

รูปที่ 3.14 แสดงวิธีการหาค่าขนาดช่องว่างพลังงาน (optical energy gap : E_{opt}) ด้วยวิธี Tauc's plot โดยที่แกนในแนวตั้งคือ $(\alpha h\nu)^{1/2}$ และแกนในแนวนอนคือ $h\nu$ (eV) การนำค่า α ในย่านนี้มาพล็อตเช่นนี้จะทำให้ข้อมูลอยู่บนเส้นตรง และเมื่อลากต่อเส้นตรงให้มาตัดแกนนอน จุดตัดบนแกนนอนนั้นจะเป็นค่าช่องว่างพลังงานที่ต้องการ ในรูปที่ 3.14 ได้ผลว่าการเพิ่มปริมาณก๊าซ NH_3 (x) ทำให้ช่องว่างพลังงานกว้างขึ้น และขณะเดียวกันความลาดของเส้นตรงก็มีแนวโน้มว่าลดลงด้วย

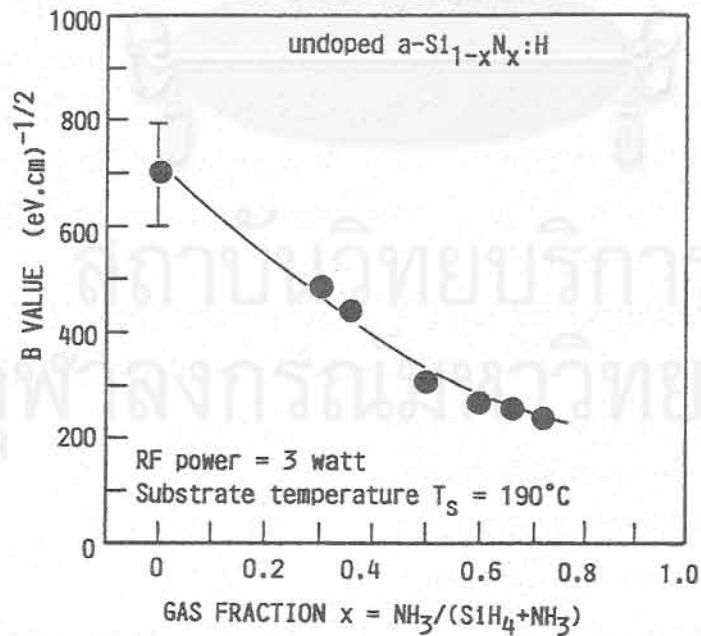
รูปที่ 3.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างพลังงานของ $a\text{-SiN:H}$ ชนิดบริสุทธิ์และอัตราส่วนของก๊าซ x ($=\text{NH}_3 / (\text{SiH}_4 + \text{NH}_3)$) จากรูปนี้พบว่าเมื่อ x มีค่าเพิ่มจาก 0.3 ไปถึง 0.75 ทำให้ช่องว่างพลังงานเพิ่มจาก 2.05 eV ไปถึง 3.1 eV และสีของฟิล์มเปลี่ยนจากสีน้ำตาลม่วงไปเป็นสีส้ม สีเหลืองและค่อยๆ ใสขึ้น เนื่องจากค่าช่องว่างพลังงานในช่วงนี้ อยู่ในช่วงแสงที่มองเห็น ดังนั้นเราจึงคาดได้ว่า การนำฟิล์มเหล่านี้ไปใช้งานด้านการเปล่งแสง ก็คงจะ



รูปที่ 3.14 Tauc's plot ($(\alpha h\nu)^{1/2}$ vs $h\nu$) ของ a-SiN:H ชนิดบริสุทธิ์เพื่อกำหนดค่าช่องว่างพลังงาน (optical energy gap : E_{opt}) พารามิเตอร์ในรูปคือ อัตราส่วนก๊าซ $x = \text{NH}_3 / (\text{NH}_3 + \text{SiH}_4)$



รูปที่ 3.15 การขึ้นกับอัตราส่วนก๊าซ $\text{NH}_3/(\text{NH}_3 + \text{SiH}_4)$ ของช่องว่างพลังงานสำหรับฟิล์มบาง a-SiN:H ชนิดบริสุทธิ์



รูปที่ 3.16 การขึ้นกับอัตราส่วนก๊าซ $x = \text{NH}_3/(\text{NH}_3 + \text{SiH}_4)$ ของ B value สำหรับฟิล์ม a-SiN:H ชนิดบริสุทธิ์

เปล่งแสงที่สามารถมองเห็นได้ ซึ่งจากผลการตรวจสอบ ได้พบว่าฟิล์มเหล่านี้เปล่งแสงโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่ตามองเห็นได้จริงดังที่ได้กล่าวในหัวข้อต่อไป

รูปที่ 3.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า B และค่าอัตราส่วนของก๊าซ NH_3 (X) ค่า B นี้เปรียบเสมือนเป็นค่าความลาดของเส้นตรงในรูปที่ 3.15 เพราะจากสูตร [26]

$$\alpha(\omega) = \frac{B(\hbar\omega - E_{\text{opt}})^2}{\hbar\omega} \quad (3.3)$$

ค่า B นี้ให้ข้อมูลเกี่ยวกับความยุ่งเหยิงของเน็ตเวิร์ค (net work) ของอะตอม กล่าวคือ ถ้า B มีค่าน้อยลง จะแสดงว่าเน็ตเวิร์คของอะตอมมีความยุ่งเหยิงมากขึ้น และจะทำให้ความหนาแน่นของสเตทใกล้เคียงของช่องว่างพลังงานเบลอมากขึ้น ดังนั้นข้อมูลในรูปที่ 3.16 จึงชี้ให้เห็นว่าเมื่ออะตอม N ในฟิล์ม a-SiN:H มีจำนวนมากขึ้น นอกจากจะทำให้ช่องว่างพลังงานกว้างขึ้นแล้ว ยังทำให้เน็ตเวิร์คของอะตอมมีความยุ่งเหยิงมากขึ้นด้วย

3.2.2 การศึกษาโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของ a-SiN:H

ปรากฏการณ์โฟโตลูมิเนสเซนซ์ (photoluminescence : PL) คือ ปรากฏการณ์ซึ่งสารกึ่งตัวนำ (หรือวัสดุทั่วไป) เปล่งแสงออกมาเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสง การสังเกต PL จะเป็นประโยชน์มากต่อการศึกษาคคุณสมบัติทางแสงของวัสดุ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับวัสดุที่จะนำไปผลิตเป็นสิ่งประดิษฐ์เปล่งแสง วัสดุจะเปล่งแสง PL ได้ดี ถ้าวัสดุนั้นมีจุดบกพร่องน้อย ดังนั้นการวัด PL ก็จะเป็นการศึกษาและได้ข้อมูลเกี่ยวกับคุณสมบัติทางโครงสร้างไปในตัวด้วย

ในหัวข้อนี้จะรายงานผลการวัด PL ใน a-SiN:H ชนิดบริสุทธิ์ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงอะตอม N หลายๆค่า และจะรายงานผลการวัดอิทธิพลของความยาวคลื่นแสงที่ใช้กระตุ้น และสนามไฟฟ้าที่มีต่อสเปกตรัมของ PL ด้วย

รูปที่ 3.17 แสดงแผนภูมิการวัด PL ในงานวิจัยนี้ ต้นกำเนิดแสงที่ใช้กระตุ้นโฟโตลูมิเนสเซนซ์มีหลายความยาวคลื่นแสงแล้วแต่วัตถุประสงค์และขนาดช่องว่างพลังงาน อาทิเช่น

He-Ne เลเซอร์ ความยาวคลื่น 6320 Å

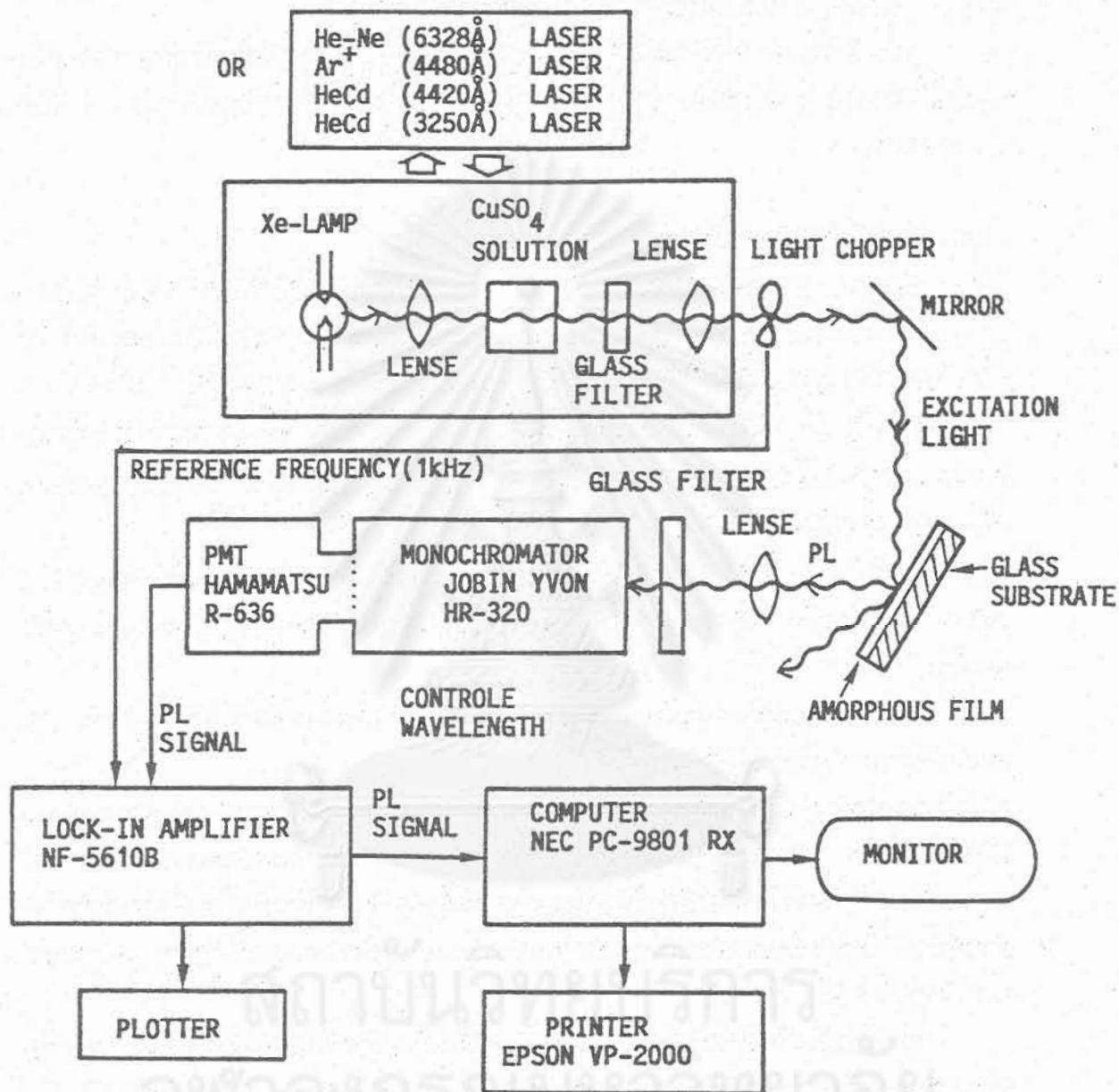
Ar⁺ เลเซอร์ ความยาวคลื่น 4480 Å

HeCd เลเซอร์ ความยาวคลื่น 4420 Å

HeCd เลเซอร์ ความยาวคลื่น 3250 Å

หลอดไฟ Xe ความยาวคลื่น 3650 Å (ใช้ฟิลเตอร์ชนิดสารละลายของ CuSO_4 และฟิลเตอร์แบนด์พาส 3650 Å)

แสง PL ที่เปล่งออกมาจาก a-SiN:H จะถูกเลนส์โฟกัสเข้าสู่โมโนโครเมเตอร์ และที่ด้านเอาท์พุทของโมโนโครเมเตอร์ใช้โฟโตมัลติพลายเออร์ (photomultiplier: PMT) เป็นอุปกรณ์รับ



รูปที่ 3.17 แผนภูมิวิธีการวัดสเปกตรัมของโฟโตลูมิเนสเซนซ์ เป็นระบบที่ออกแบบในงานวิจัย โดยมีคอมพิวเตอร์ควบคุมการวัดได้อย่างอัตโนมัติ

แสง (R-636 GaAs ของ Hamamatsu) เอาที่พุทจาก PMT ถูกส่งต่อไปยัง lock-in Amplifier และ x-t recorder ความถี่ของซอเปอร์แสงใช้ประมาณ 1 kHz

อนึ่งเพื่อป้องกันมิให้แสงกระตุ้นเล็ดลอดเข้าสู่โมโนโครเมเตอร์ จึงได้มีการวางกระจกฟิลเตอร์ที่เหมาะสมไว้ระหว่างฟิล์ม a-SiN:H และโมโนโครเมเตอร์ การวัดสเปกตรัม PL ทำที่อุณหภูมิห้อง

3.2.2.1 การขึ้นกับช่องว่างพลังงานของ a-SiN:H ของ PL

รูปที่ 3.18 แสดงสเปกตรัม PL ของ a-SiN:H ชนิดบริสุทธิ์ที่มีค่าช่องว่างพลังงานระหว่าง 2.07 eV ถึง 2.90 eV ผลการวัดพบว่าสเปกตรัม PL ของ a-SiN:H มีลักษณะค่อนข้างกว้าง โดยมีค่า FWHM (Full Width at Half Maximum) ประมาณ 0.2-0.4 eV เมื่อค่าช่องว่างพลังงาน (E_{opt}) เพิ่มขึ้นสเปกตรัมจะเคลื่อนไปทางความยาวคลื่นที่สั้นลง และสีการเปล่งแสงจะเปลี่ยนจากสีแดง-ส้ม-เหลือง ไปสู่สีเขียว ความเข้มของ PL มีความสว่างมากพอที่จะสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่าในห้องที่มีแสงสลัว

รูปที่ 3.19 และ 3.20 แสดงสรุปความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างพลังงานและค่ายอดพลังงานของสเปกตรัม PL และอัตราส่วนก๊าซ x ที่ใช้ปลูกฟิล์ม a-SiN:H สิ่งที่น่าสังเกตในรูปทั้งสองนี้คือ

1) เมื่อช่องว่างพลังงานของ a-SiN:H กว้างขึ้น ค่ายอดพลังงานของสเปกตรัม PL เคลื่อนไปทางพลังงานโฟตอนที่ค่ามากขึ้น

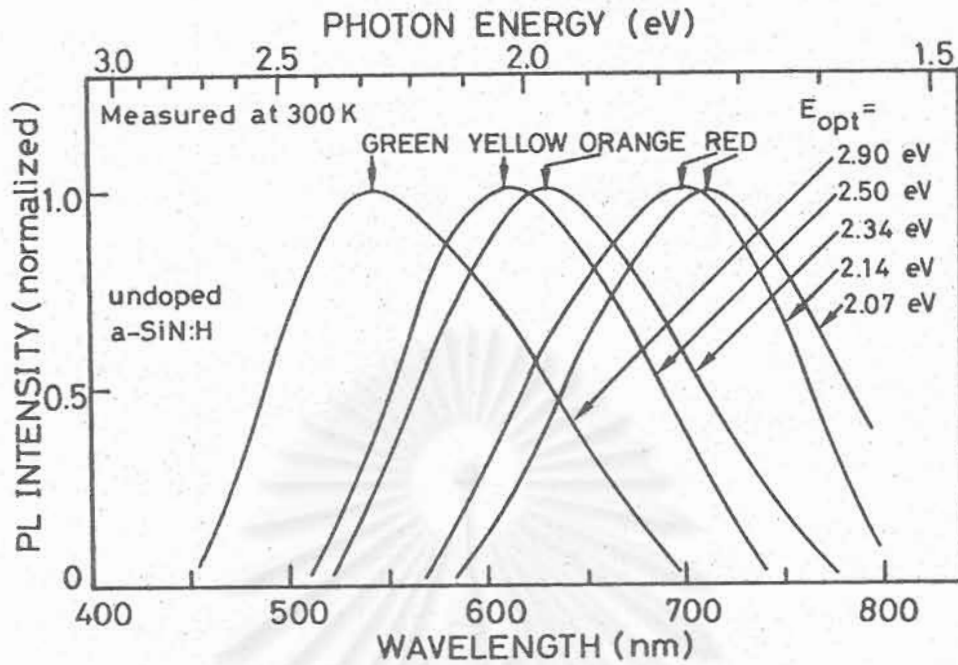
2) ค่ายอดพลังงานของสเปกตรัม PL ของ a-SiN:H นี้จะมีค่าน้อยกว่าค่าของช่องว่างพลังงานเสมอ ปรากฏการณ์นี้ชี้ให้เราทราบว่า การรวมตัวแบบเปล่งแสง (radiative recombination) ของ a-SiN:H เกิดขึ้นจากการรวมตัวของอิเล็กตรอนและโฮลที่ผ่อนคลายจากแถบคอนดักชันและแถบวาเลนซ์ลงสู่ระดับ localized state ในช่องว่างพลังงานเสมอ ดังโมเดลที่แสดงในรูปที่ 3.21

3) เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของก๊าซแอมโมเนียซึ่งทำให้ช่องว่างพลังงานของ a-SiN:H กว้างขึ้นนั้น ความกว้างของสเปกตรัม PL (FWHM) จะกว้างขึ้น ปรากฏการณ์นี้ชี้ให้เราทราบว่า เมื่อช่องว่างพลังงานของ a-SiN:H กว้างขึ้นนั้น ขณะเดียวกันระดับ localized states ในส่วนที่เป็นศูนย์กลางการรวมตัวแบบเปล่งแสงจะแผ่กว้างกระจายในหลายระดับพลังงานมากขึ้น

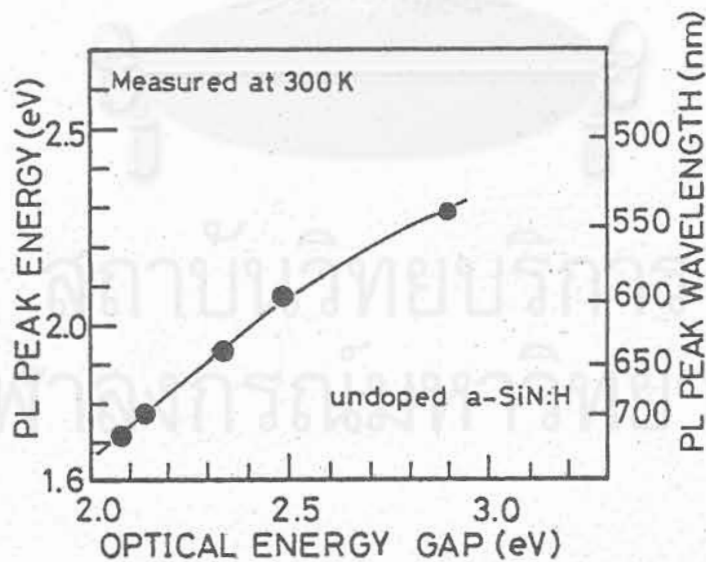
ข้อมูลเกี่ยวกับ PL ที่ได้เหล่านี้มีความสำคัญมาก เพราะจะเป็นประโยชน์ในการนำไปใช้เป็นเงื่อนไขในการประดิษฐ์ TFLED และการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของสิ่งประดิษฐ์ในด้านต่าง ๆ

3.2.2.2 การขึ้นกับความยาวคลื่นของแสงที่ใช้กระตุ้น PL

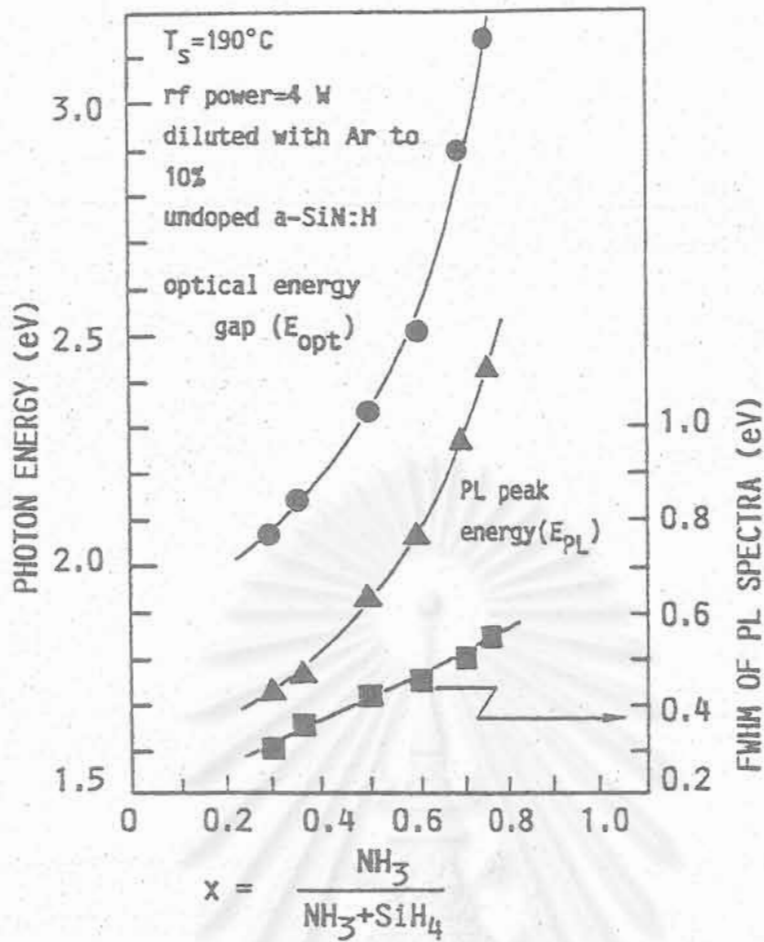
เนื่องจากภายในช่องว่างพลังงานของ a-SiN:H มี localized states อยู่มากมายและกระจายอยู่หลายระดับพลังงาน ดังนั้นการรวมตัวของพาหะจึงสามารถเกิดขึ้นที่ระดับ localized



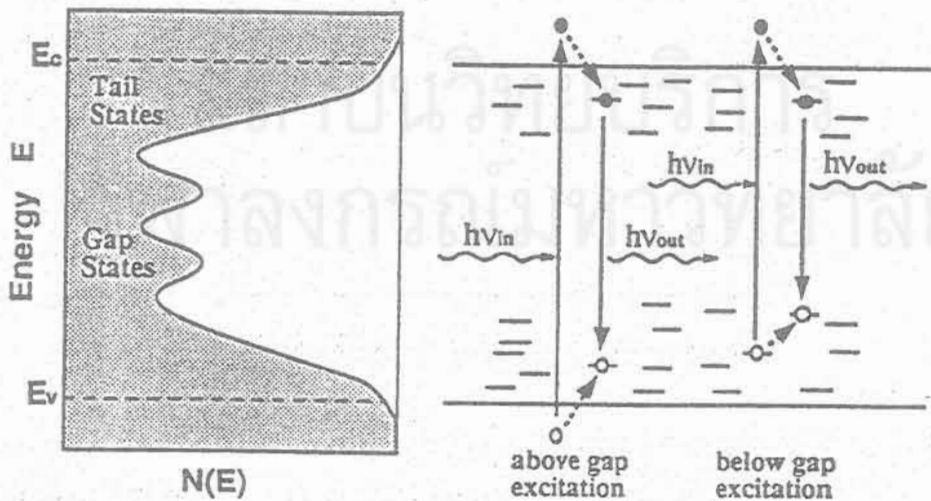
รูปที่ 3.18 ผลการวัดสเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของ a-SiN:H ที่มีช่องว่างพลังงานระหว่าง 2.07 - 2.90 eV วัดที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้แสงเลเซอร์ HeCd ความยาวคลื่น 325 nm เป็นแสงกระตุ้น



รูปที่ 3.19 ความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างพลังงาน และค่ายอดพลังงาน (peak energy) ของสเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (PL) ของ a-SiN:H ที่วัดที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 3.20 ความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างพลังงานและค่ายอดพลังงาน (peak energy) ของสเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (PL) และอัตราส่วนก๊าซ x ที่ใช้ปลูกฟิล์ม a-SiN:H



รูปที่ 3.21 การอธิบายการกระตุ้นโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (PL) ด้วยแสงที่มีพลังงานโฟตอนค่าต่างๆ และการรวมตัวแบบเปล่งแสงของพาหะที่ระดับพลังงานต่างๆใน localized states ในอะมอร์ฟัสซิลิคอนอัลลอย

states ได้หลายระดับ การกระตุ้นด้วยแสงที่มีพลังงานโฟตอนค่าแตกต่างกันหลายๆ ค่า จะทำให้เราได้ข้อมูลเกี่ยวกับระดับพลังงานที่เป็นศูนย์กลางในการรวมตัวแบบเปล่งแสงได้ ในหัวข้อนี้จะรายงานผลการศึกษาค้นคว้าความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานโฟตอนของแสงที่ใช้กระตุ้นโฟโตลูมิเนสเซนซ์และสเปกตรัม PL

ต้นกำเนิดแสงในงานวิจัยนี้มีหลายชนิด เช่น แสงความยาวคลื่น 3650 Å จากหลอดซีนอน (Xe lamp) เลเซอร์ชนิดฮีเลียม-แคดเมียม (He-Cd laser 4420 Å) เลเซอร์ชนิดอาร์กอน (Ar laser 4880 Å) และเลเซอร์ชนิดฮีเลียม-นีออน (He-Ne laser 6328 Å)

รูปที่ 3.22 แสดงตัวอย่างสเปกตรัม PL ของ a-SiN:H ที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงที่มีพลังงานโฟตอนค่าต่างๆ ช่องว่างพลังงานของ a-SiN:H ในรูปนี้คือ 2.50 eV จากรูปนี้พบว่า สเปกตรัม PL ของ a-SiN:H มีการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับค่าพลังงานโฟตอนที่กระตุ้น กล่าวคือเมื่อเพิ่มพลังงานโฟตอนของแสงกระตุ้นจะทำให้สเปกตรัม PL เคลื่อนไปทางความยาวคลื่นที่สั้นลง

เพื่อให้เห็นการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน ได้พล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ายอดพลังงานของสเปกตรัม PL และพลังงานโฟตอนของแสงกระตุ้นดังแสดงในรูปที่ 3.23 พารามิเตอร์ในรูปนี้คือ ช่องว่างพลังงานของ a-SiN:H ค่าช่องว่างพลังงานของ a-SiN:H แต่ละตัวชี้ด้วยลูกศร ข้อมูลที่ได้ที่น่าสนใจในรูปนี้คือ

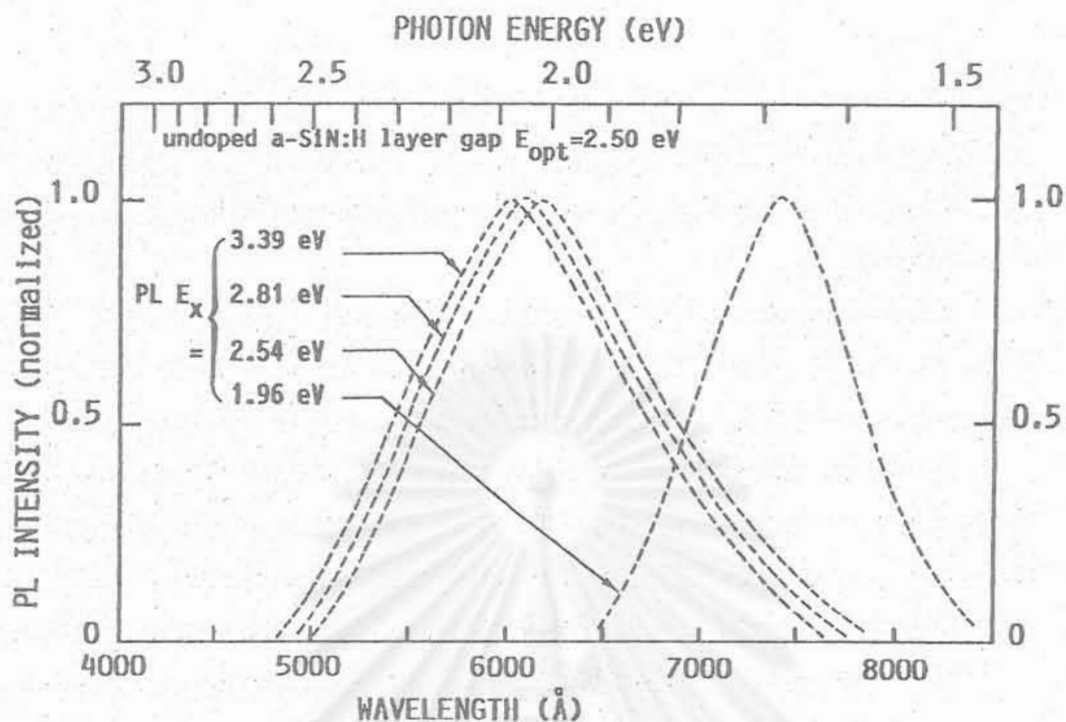
- 1) เมื่อพลังงานโฟตอนของแสงกระตุ้นเพิ่มขึ้น ค่ายอดพลังงาน PL จะเพิ่มขึ้น
- 2) แต่ค่ายอดพลังงานของ PL (E_{PL}) จะอิ่มตัว เมื่อค่าพลังงานโฟตอนที่กระตุ้นมีค่ามากกว่าช่องว่างพลังงาน (E_{opt})

ปรากฏการณ์เหล่านี้สามารถอธิบายโดยใช้รูปที่ 3.21 ได้ดังต่อไปนี้

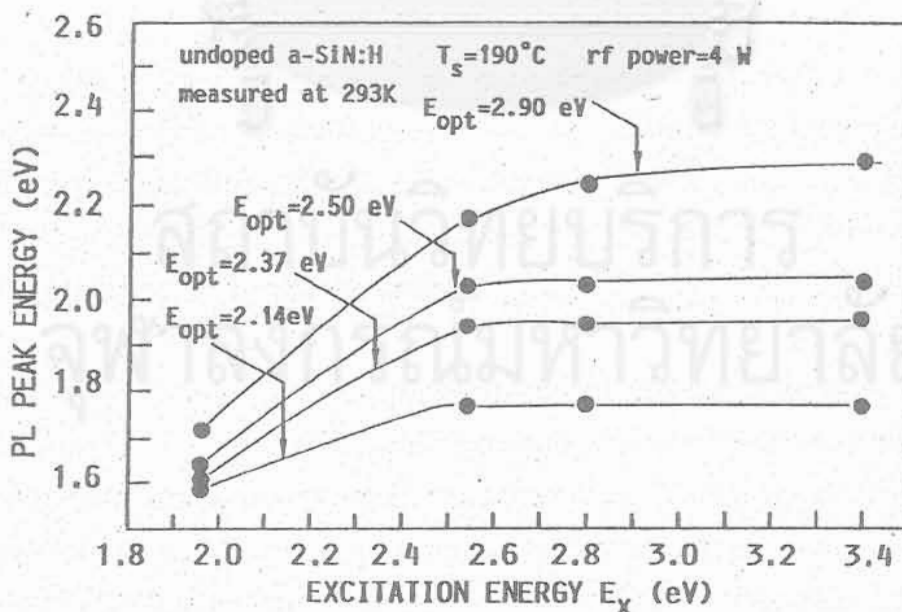
- 1) ในกรณีที่พลังงานโฟตอนแสงที่ใช้กระตุ้นมีค่าน้อยกว่าช่องว่างพลังงาน คู่อิเล็กตรอน-โฮลจะถูกกระตุ้นไปสู่ระดับพลังงานลึก (deep localized states) ที่อยู่ในช่องว่างพลังงาน และคู่อิเล็กตรอน-โฮลจะผ่อนคลายลงสู่ localized states ที่อยู่ลึกลงไปอีกแล้วจึงรวมตัวกัน ในการกระตุ้นให้คู่อิเล็กตรอน-โฮลอยู่ใน deep localized states เช่นนี้จะทำให้พลังงานโฟตอนของแสงที่เปล่งออกมาขึ้นกับระดับพลังงานที่ถูกกระตุ้นซึ่งเรียกว่าเกิดปรากฏการณ์ความจำ (memory effect) [27-28]

2. เมื่อพลังงานโฟตอนของแสงที่มากกระตุ้นมีค่ามากกว่าช่องว่างพลังงาน คู่อิเล็กตรอน-โฮล จะถูกกระตุ้นให้กระโดดขึ้นไปสู่แถบคอนดักชันและแถบวาเลนซ์ ต่อจากนั้นพาหะจะคายพลังงานให้โฟนอน(phonon) และตัวเองจะลดระดับลงมาสู่ขอบของแถบคอนดักชันและขอบของแถบวาเลนซ์เสมอ ก่อนที่จะตกลงสู่ระดับ localized states และเกิดการรวมตัวในระดับพลังงานนี้ จึงทำให้ค่ายอดพลังงานของ PL ไม่เปลี่ยนแปลงตามพลังงานโฟตอนของแสงที่ใช้กระตุ้น

ข้อมูลที่สำคัญที่เราทราบในหัวข้อนี้ที่จะเป็นประโยชน์ในการช่วยวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของไดโอดเปล่งแสงฟิล์มบางคือ สเปกตรัมการเปล่งแสงของ a-SiN:H นั้นจะขึ้นกับระดับพลังงานที่ใช้กระตุ้นพาหะ ดังนั้นในการฉีดพาหะเข้าสู่ไดโอดเปล่งแสงด้วยกระแสไฟฟ้านั้น ระดับ



รูปที่ 3.22 สเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของ a-SiN:H ซึ่งถูกกระตุ้นด้วยแสงที่มีพลังงานโฟตอนค่าต่าง ๆ ($E_x = 1.96-3.39$ eV) โดยวัดที่อุณหภูมิห้อง ช่องว่างพลังงานของ a-SiN:H ในรูปคือ 2.50 eV



รูปที่ 3.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ายอดพลังงานของสเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของ a-SiN:H และพลังงานโฟตอนของแสงที่ใช้กระตุ้น ในรูปนี้มีฟิล์ม a-SiN:H 4 ตัวอย่างซึ่งมีช่องว่างพลังงาน (E_{opt}) เท่ากับ 2.14, 2.37, 2.50 และ 2.90 eV ตามลำดับ ตำแหน่งที่ชี้ด้วยลูกศรตรงกับค่าพลังงานช่องว่างของแต่ละตัวอย่าง

พลังงานของพาหะที่ถูกฉีดก็จะเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการกำหนดลักษณะของสเปกตรัมของการเปล่งแสงของไดโอดเปล่งแสงด้วย

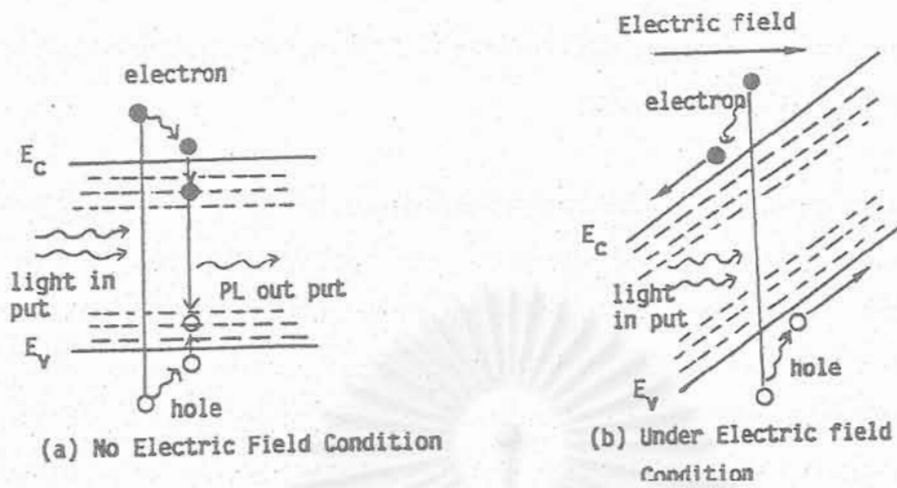
3.2.2.3 อิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่มีต่อประสิทธิภาพของโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของ a-SiN:H

ในขณะที่กำลังสังเกตโฟโตลูมิเนสเซนซ์ กล่าวคือขณะกำลังกระตุ้นพาหะอยู่นั้น ถ้ามีสนามไฟฟ้ามากระทำกับวัสดุ สนามไฟฟ้าจะทำให้พาหะแยกตัวออกจากกัน จึงทำให้ความน่าจะเป็นของการรวมตัวของพาหะลดลง ดังโมเดลที่แสดงในรูปที่ 3.24 (b) ทั้งนี้เพราะว่าสนามไฟฟ้าจะทำให้พาหะอิเล็กตรอนและโฮลที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงนั้นแยกห่างออกจากกัน จึงทำให้โอกาสที่จะรวมตัวกันมีค่าน้อยลง ผลของการศึกษาปรากฏการณ์นี้ทำให้เราทราบว่า ไดโอดเปล่งแสงฟิล์มบางที่จะเปล่งแสงได้สว่างดีนั้น จะต้องป้อนสนามไฟฟ้าให้มีค่าต่ำที่สุด

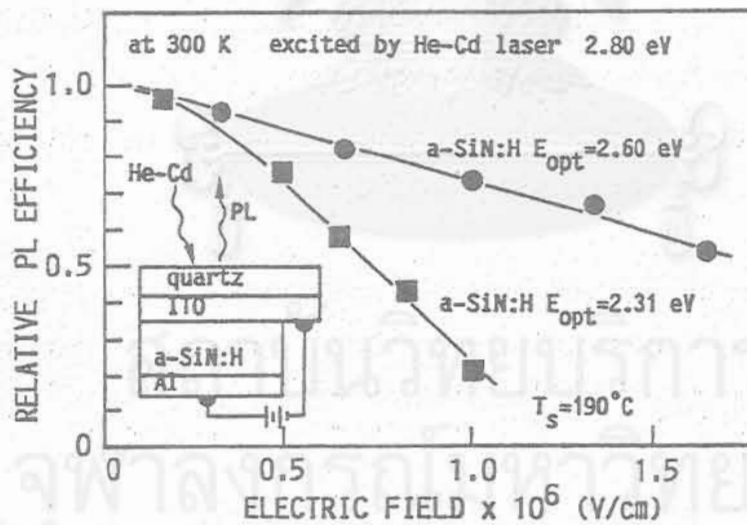
รูป 3.25 แสดงผลการวัดความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้าและประสิทธิภาพของ PL โครงสร้างของชิ้นงานในรูปคือ แผ่นฐานชนิด quartz/ITO/a-SiN:H/Al การป้อนสนามไฟฟ้าทำผ่านขั้ว ITO และ Al โดยระวางมีให้มีการฉีดกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ a-SiN:H ในรูปนี้ฟิล์ม a-SiN:H มีสองชั้นและมีช่องว่างพลังงานเท่ากับ 2.13 eV และ 2.60 eV ตามลำดับ จากรูปนี้ เราได้ข้อมูลที่น่าสนใจดังนี้

- 1) เมื่อสนามไฟฟ้ามีค่ามากขึ้น ประสิทธิภาพของ PL จะลดลง
- 2) ประสิทธิภาพของ PL ของ a-SiN:H ที่มีช่องว่างพลังงานแคบจะได้รับผลกระทบจากสนามไฟฟ้ามากกว่า a-SiN:H ที่มีช่องว่างพลังงานกว้าง
- และ 3) การป้อนสนามไฟฟ้าที่มีค่ามากกว่าระดับ 1.0×10^6 (V/cm) จะทำให้ประสิทธิภาพการเปล่งแสงของ a-SiN:H ลดลงอย่างมาก

ผลของข้อมูลที่เราได้เรียนรู้เช่นนี้ ทำให้เราทราบว่าเมื่อนำ a-SiN:H ไปใช้งานเป็นชั้นเปล่งแสงในไดโอดเปล่งแสงและทำงานภายใต้การไบแอสตามนั้น ควรออกแบบให้ประสิทธิภาพการฉีดพาหะมีค่าสูงที่สุด เพื่อจะได้ป้อนแรงดันไฟฟ้าได้ต่ำ ๆ ทั้งนี้เพื่อป้องกันมิให้เกิดสนามไฟฟ้าคร่อม a-SiN:H มากนั่นเอง



รูปที่ 3.24 การอธิบายการเปล่งแสงโฟโตลูมิเนสเซนซ์จาก a-SiN:H
 (a) กรณีไม่มีสนามไฟฟ้ามากระทำกับฟิล์ม a-SiN:H และ
 (b) กรณีมีสนามไฟฟ้าไบแอสฟิล์ม a-SiN:H



รูปที่ 3.25 ผลการวัดความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้าที่ไบแอสฟิล์ม a-SiN:H และความเข้มแสง (intensity) ของโฟโตลูมิเนสเซนซ์ ในรูปแสดงกรณี a-SiN:H ที่มีช่องว่างพลังงาน 2.13 eV และ 2.60 eV

3.3 การผลิตไดโอดเปล่งแสงฟิล์มบางโดยมี a-SiN:H เป็นชั้นเปล่งแสง (รอยต่อ p-a-SiC:H/i-a-SiN:H/n-a-SiC:H)

ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบให้ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางมีโครงสร้างเป็นรอยต่อ p-i-n ของวัสดุอะมอร์ฟิซิลิคอนอัลลอย ในบทนี้จะรายงานผลการทดลองใช้ a-SiN:H ชนิดบริสุทธิ์เป็นชั้น i ส่วนชั้นฉีดยาหะชนิด p และ n นั้นได้ใช้วัสดุ a-SiC:H ทั้งนี้เพราะว่าสามารถได้ปให้ a-SiC:H เป็นชนิด p และ n ได้ดีกว่า a-SiN:H ดังนั้นโครงสร้างของไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบาง (TFLED) ที่จะศึกษาในบทนี้คือ p a-SiC:H/i a-SiN:H/n a-SiC:H

ในหัวข้อที่ 3.3.1 จะรายงานผลการศึกษาการได้ป a-SiC:H ให้เป็นชนิด p และ n

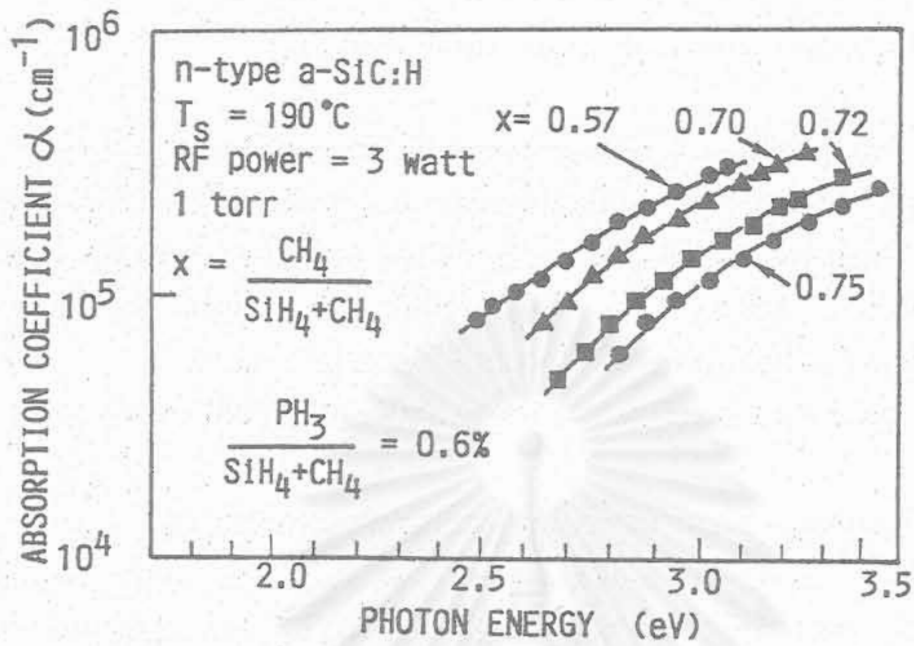
3.3.1 การเตรียม a-SiC:H สำหรับใช้เป็นชั้นฉีดยาหะใน TFLED

ฟิล์มบาง a-SiC:H เตรียมด้วยวิธี glow discharge plasma CVD ก๊าซดิบสำหรับ a-SiC:H คือ SiH₄ และ CH₄ เงื่อนไขในการปลูกฟิล์มได้แก่ อุณหภูมิแผ่นฐาน 190 °C ความดันรวม 1.0 Torr และ RF power 3-4 watt

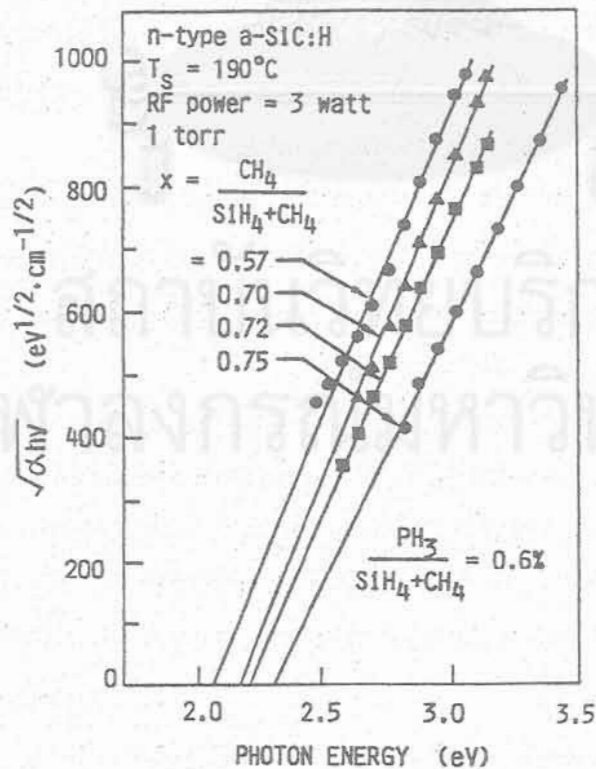
รูปที่ 3.26 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ a-SiC:H ย่านพลังงานโฟตอนใกล้ช่องว่างพลังงาน และรูปที่ 3.27 แสดง Tauc's plot เพื่อกำหนดช่องว่างพลังงาน รูปที่ 3.28 แสดงสรุปผลการวัดความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างพลังงานและอัตราส่วนของก๊าซ $x = \text{CH}_4 / (\text{CH}_4 + \text{SiH}_4)$ สำหรับ a-SiC:H ชนิด n จากรูปเหล่านี้พบว่าในขณะที่ปลูกฟิล์มนั้น ถ้าเพิ่มปริมาณของก๊าซ CH₄ ให้มากขึ้น จะทำให้ได้ a-SiC:H ที่มีช่องว่างพลังงานกว้างขึ้น ซึ่งการขยายขนาดช่องว่างพลังงานนี้ มีสาเหตุมาจากปริมาณของอะตอม C ในฟิล์มมีค่ามากขึ้นนั่นเอง ช่องว่างพลังงานที่ได้จากการทดลองอยู่ในช่วงประมาณ 1.85-2.3 eV

การได้ป a-SiC:H ให้เป็นชนิด p และ n ทำได้โดยการผสมก๊าซ B₂H₆ และ PH₃ (ก๊าซเหล่านี้ถูกผสมใน H₂ ให้ภายในถังก๊าซมีความเข้มข้น 500 ppm) ตามลำดับขณะปลูกฟิล์ม โดยที่ B จะทำหน้าที่เป็นอะเซปเตอร์ (acceptor) และ P จะทำหน้าที่เป็นโดเนอร์ (donor) ตารางที่ 3.3 แสดงเงื่อนไขการปลูกฟิล์ม a-SiC:H ชนิด p และ n

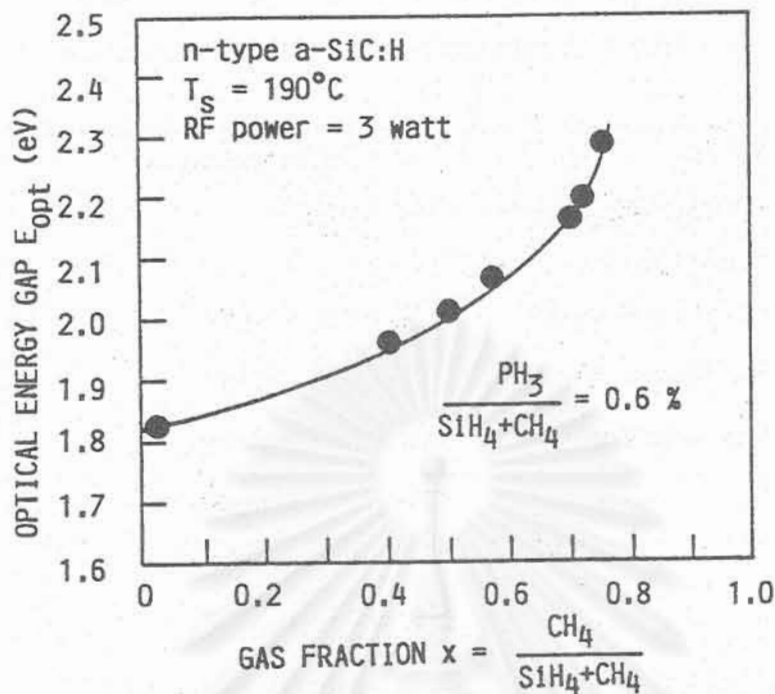
อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพของการได้ป (doping efficiency) ของ a-SiC:H จะลดลงอย่างรวดเร็วถ้าในฟิล์มมี C จำนวนมากขึ้น ทั้งนี้เพราะว่าการเพิ่มจำนวนอะตอมของ C จะทำให้มีจุดบกพร่องจำนวนมากขึ้น ดังจะเห็นผลได้ชัดเจนในรูปที่ 3.29 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้ามืด (dark conductivity) และช่องว่างพลังงานของ a-SiC:H ชนิด p ในที่นี้ ปริมาณการได้ปด้วย B₂H₆/(SiH₄+CH₄) = 6x10⁻³ จากรูปนี้พบว่าเมื่อช่องว่างพลังงานของ p-a-SiC:H มีค่ามากขึ้นจาก 1.8 eV ถึง 2.05 eV จะทำให้สภาพนำไฟฟ้าลดลงอย่างรวดเร็วจากระดับ 10⁻⁷ (S/cm) ลดถึง 10⁻⁹ (S/cm) ในกรณีของ n-a-SiC:H ก็ได้ผลลักษณะเช่นเดียวกัน



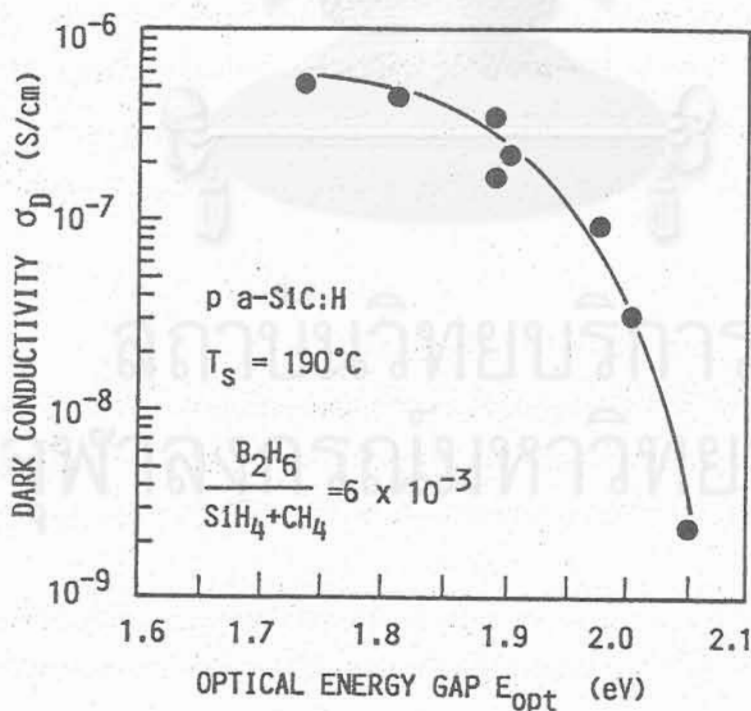
รูปที่ 3.26 สเปกตรัมสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงในย่าน band edge ของ a-SiC:H ชนิด n พารามิเตอร์ในรูปคือ อัตราส่วนก๊าซ $x = \text{CH}_4/(\text{CH}_4 + \text{SiH}_4)$ ที่ใช้ปลูกฟิล์ม



รูปที่ 3.27 Tauc's plot ($(\alpha h\nu)^{1/2}$ vs $h\nu$) ของ a-SiC:H ชนิด n จุดตัดแกนนอนได้แก่ ค่าช่องว่างพลังงานของ a-SiC:H



รูปที่ 3.28 ความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างพลังงานของ a-SiC:H ชนิด n และอัตราส่วนก๊าซ $x = \text{CH}_4 / (\text{CH}_4 + \text{SiH}_4)$ ที่ใช้ปลูกฟิล์ม



รูปที่ 3.29 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้ามืด (dark conductivity) และช่องว่างพลังงานของ a-SiC:H ชนิด p เนื่องจากเมื่อช่องว่างพลังงานกว้างขึ้น จะทำให้สภาพนำไฟฟ้าลดลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงจำเป็นต้องใช้ฟิล์ม a-SiC:H ชนิด p, n ที่มีช่องว่างพลังงานคงที่ที่ 2.0 eV เป็นชั้น p, n ใน TFLED ตลอดการวิจัย

ตารางที่ 3.3 เงื่อนไขการปลูกฟิล์ม a-SiC:H ชนิด p และ n

RF Power	3-4 Watt, at 13.56 MHz
Substrate Temperature	190-200°C
Total Gas Pressure	1 Torr
Gas For p a-SiC:H	SiH ₄ + CH ₄ + B ₂ H ₆
Gas For n a-SiC:H	SiH ₄ + CH ₄ + PH ₃
Gas Bottle Dilution	SiH ₄ 10 % + H ₂ 90 % CH ₄ 10 % + H ₂ 90 % B ₂ H ₆ 500 ppm in H ₂ PH ₃ 500 ppm in H ₂
Doping Ratio	B ₂ H ₆ /(SiH ₄ + CH ₄) = 6x10 ⁻³ PH ₃ /(SiH ₄ + CH ₄) = 6x10 ⁻³

ในการนำฟิล์ม p-a-SiC:H และ n-a-SiC:H ไปใช้เป็นชั้นฉีดพาหะใน TFLED นั้นฟิล์มทั้งสองชนิดนี้ควรมีค่าสภาพนำไฟฟ้าที่สูงพอสมควร และช่องว่างพลังงาน (E_{opt}) ก็ควรจะกว้างด้วย ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้เลือกใช้ p-a-SiC:H และ n-a-SiC:H ที่มีช่องว่างพลังงานประมาณ 2.0 eV และสภาพนำไฟฟ้าอยู่ในระดับ 10^{-8} (S/cm) เป็นชั้นฉีดพาหะในอะมอร์ฟิส TFLED

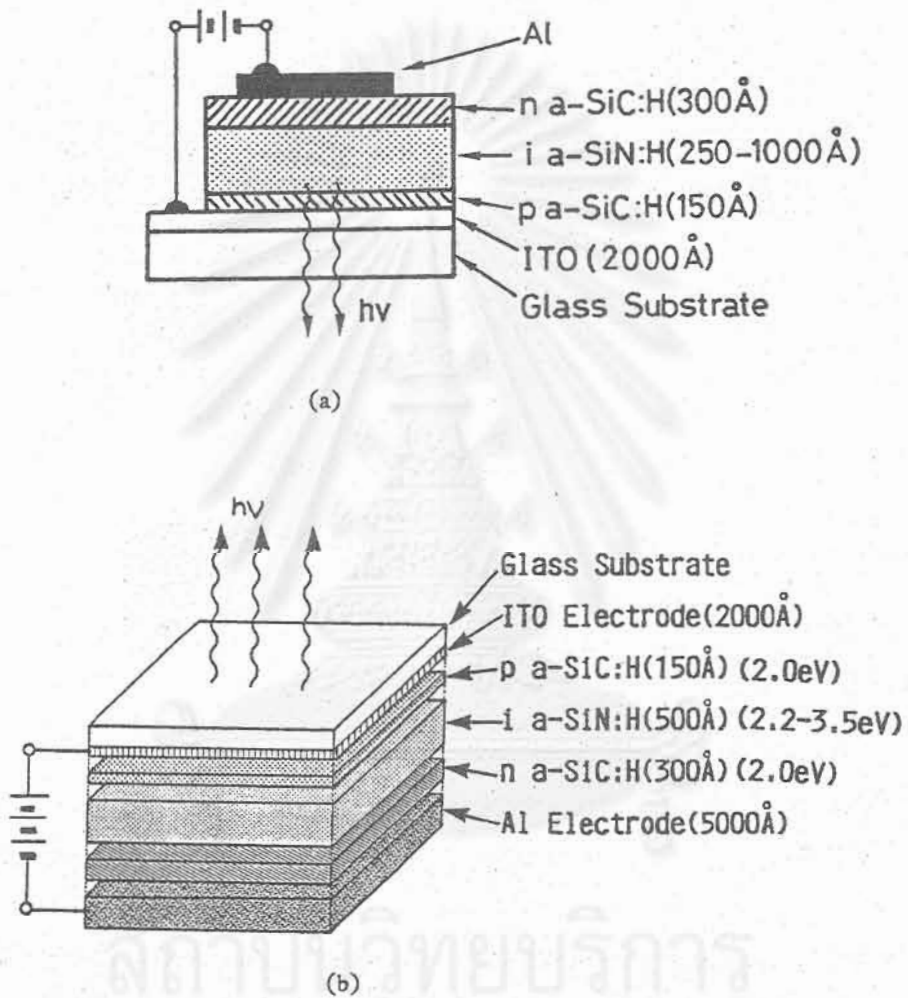
3.3.2 การออกแบบและการผลิต a-SiN:H TFLED

3.3.2.1 โครงสร้างพื้นฐานของไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบาง (TFLED)

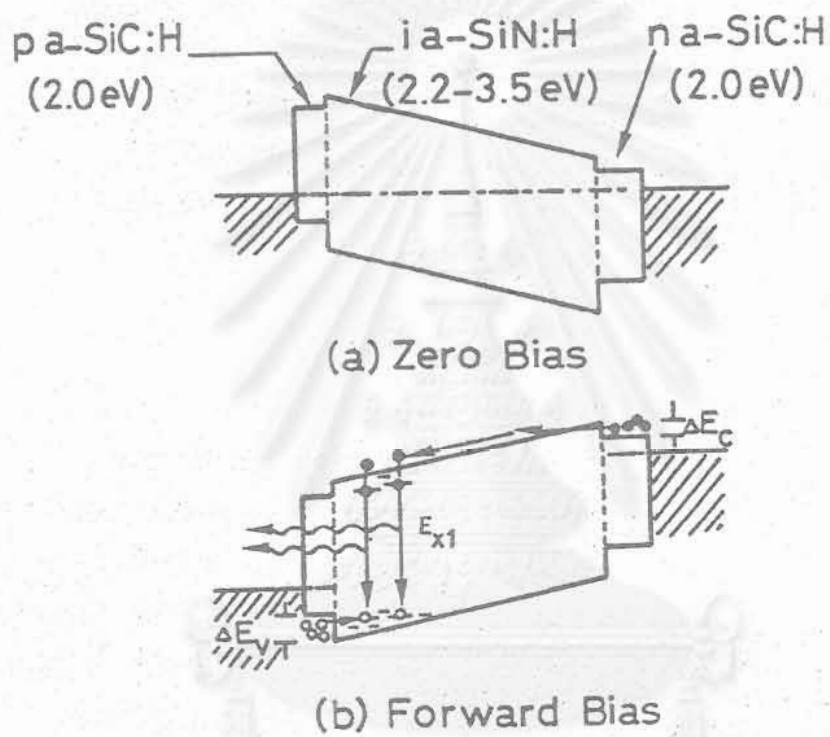
โครงสร้างพื้นฐานของไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบาง (TFLED) ที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้แสดงในรูปที่ 3.30 (a) ภาพตัดขวาง และ (b) ภาพ 3 มิติ ซึ่งเป็นรอยต่อ p-i-n ของอะมอร์ฟิสสารกึ่งตัวนำ

ในโครงสร้าง p-i-n นี้ ชั้น p และ n ทำหน้าที่เป็นชั้นฉีดพาหะโฮลและอิเล็กตรอนตามลำดับเข้าสู่ชั้น i และชั้น i นี้ ทำหน้าที่เป็นชั้นเปล่งแสงซึ่งแสงนั้นเกิดจากการรวมตัวของโฮลและอิเล็กตรอน

ในงานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายที่จะประดิษฐ์ให้ TFLED เปล่งแสงที่ตามนุษย์มองเห็น (Visible light) ดังนั้นช่องว่างพลังงานของชั้น i จึงควรกว้างกว่า 1.8 eV ในบทนี้จะกล่าวถึงกรณีการใช้ a-SiN:H ซึ่งช่องว่างพลังงานมีค่าระหว่าง 2.5-3.5 eV เป็นชั้นเปล่งแสง (ชั้น i) ส่วนชั้น



รูปที่ 3.30 โครงสร้างพื้นฐานของไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบาง (TFLED) รอยต่อ p-i-n ในรูปนี้ชั้นเปล่งแสงชนิด i ได้แก่ a-SiN:H ชนิดบริสุทธิ์ โดยที่ (a) ภาพตัดขวาง และ (b) ภาพแบบ 3 มิติ



รูปที่ 3.31 ลักษณะแถบพลังงานของ TFLED รอยต่อ p-i-n ซึ่งมี a-SiN:H ชนิด i เป็นชั้นเปล่งแสง โดยที่ (a) สภาพสมดุลเชิงความร้อน (b) สภาพขณะไบแอสตาม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

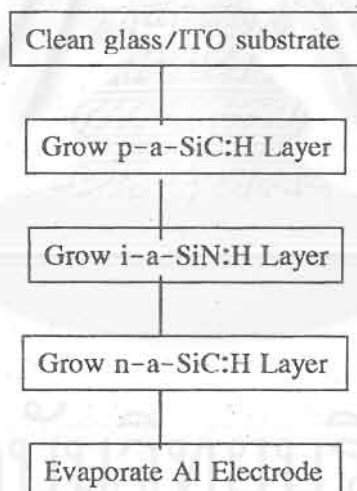
p และ n ใช้วัสดุ a-SiC:H ชนิด p และ n ตามลำดับโดยกำหนดให้ช่องว่างพลังงานของ a-SiC:H คงที่ที่ 2.0 eV

รูปที่ 3.31 แสดงลักษณะแถบพลังงานของ TFLED (a) ในสภาพสมดุลที่ยังไม่มีการไบแอส และ (b) ในสภาพกำลังถูกไบแอสตาม เนื่องจากช่องว่างพลังงานของชั้น i a-SiN:H กว้างกว่าของชั้น p- และ n-a-SiC:H ดังนั้นการฉีดพาหะโฮลและอิเล็กตรอนเข้าสู่ชั้น i จึงต้องอาศัยวิธีการทันเนลิง (tunneling) ทะลุผ่านกำแพงศักย์ที่รอยต่อของ p/i และ i/n ตามลำดับเป็นหลัก

กระบวนการรวมตัวแบบเปล่งแสงของพาหะที่ถูกฉีดเข้าสู่ชั้น i คือ อิเล็กตรอนและโฮล จะผ่อนคลายจากแถบคอนดักชันและวาเลนซ์ตกลงสู่ระดับ localized states แล้วจึงรวมตัวกันที่ระดับ localized states ดังนั้นค่าพลังงานโฟตอนของแสงที่เปล่งออกมาจาก TFLED จึงมีค่าน้อยกว่าช่องว่างพลังงานเสมอ

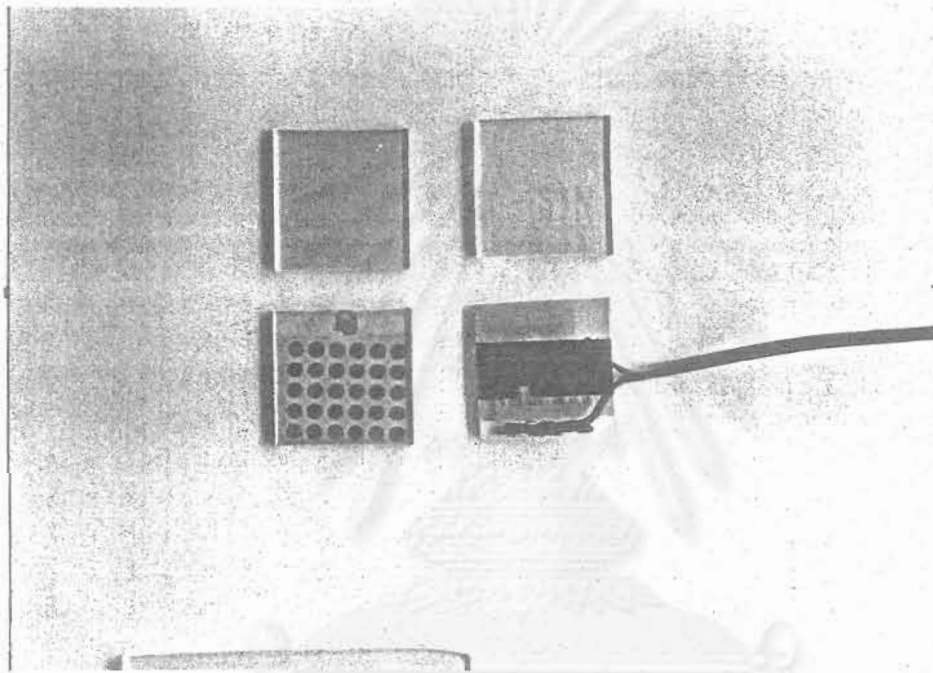
3.3.2.2 ขั้นตอนการผลิตรูไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางของ a-SiN:H

ขั้นตอนการผลิต a-SiN:H TFLED แสดงในรูปที่ 3.32



รูปที่ 3.32 ขั้นตอนการผลิต a-SiN:H TFLED

เงื่อนไขการปลูกฟิล์มอะมอร์ฟัสชั้นต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 3.4



รูปที่ 3.33 ภาพถ่าย a-SiN:H TFLED ที่ผลิตบนแผ่นกระจกขนาด $2 \times 2 \text{ cm}^2$ พื้นที่การเปล่งแสงมีขนาดตามข้อ AI รูปวงกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 mm

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.4 เงื่อนไขการปลูกฟิล์มอะมอร์ฟัสชั้น p-i-n ใน a-SiN:H TFLED

Power Source	C-coupling, 13.56 MHz
rf Power	4 Watt
Substrate Temperature	190°C
Total Gas Pressure	1.0 Torr.
p-type a-SiC:H	SiH ₄ /CH ₄ /B ₂ H ₆ = 1.5/3.5/0.03
i-type a-SiN:H	NH ₃ /SiH ₄ = 6~10/3~4
n-type a-SiC:H	SiN ₄ /CH ₄ /PH ₃ = 1.5/3.5/0.03
Cell Area	0.033 - 5 cm ²

เมื่อปลูกชั้น p-i-n เสร็จแล้วจะนำชิ้นงานไปเคลือบขั้วอะลูมิเนียมด้านบนสุด ขนาดพื้นที่การเปล่งแสงของ TFLED จะถูกกำหนดด้วยขนาดของขั้ว Al นี้

รูปที่ 3.33 แสดงภาพถ่าย a-SiN:H TFLED ที่ผลิตได้บนแผ่นกระจกขนาด 2x2 cm² พื้นที่การเปล่งแสงจะมีขนาดเท่ากับขั้วอะลูมิเนียม

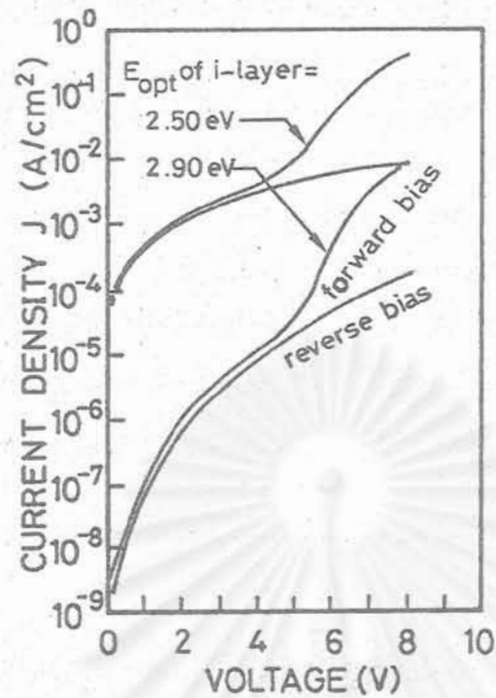
3.4 ลักษณะสมบัติพื้นฐานของ a-SiN:H TFLED

a-SiN:H TFLED เปล่งแสงออกมาได้โดยการป้อนแรงดันไฟฟ้าไบแอสแบบตามเข้าสู่ไดโอด ซึ่งเป็นการฉีดกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ไดโอดนั่นเอง การศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานอาทิเช่น กลไกการฉีดพาหะ กลไกการเปล่งแสงจะเป็นสิ่งสำคัญที่จะทำให้เราทราบว่ามีประสิทธิภาพของ TFLED ที่เราสร้างขึ้นมานั้นมีคุณสมบัติเช่นไร และจะเป็นประโยชน์ในการปรับปรุงคุณภาพของ TFLED ให้ดีขึ้นในโอกาสต่อไปได้อีก

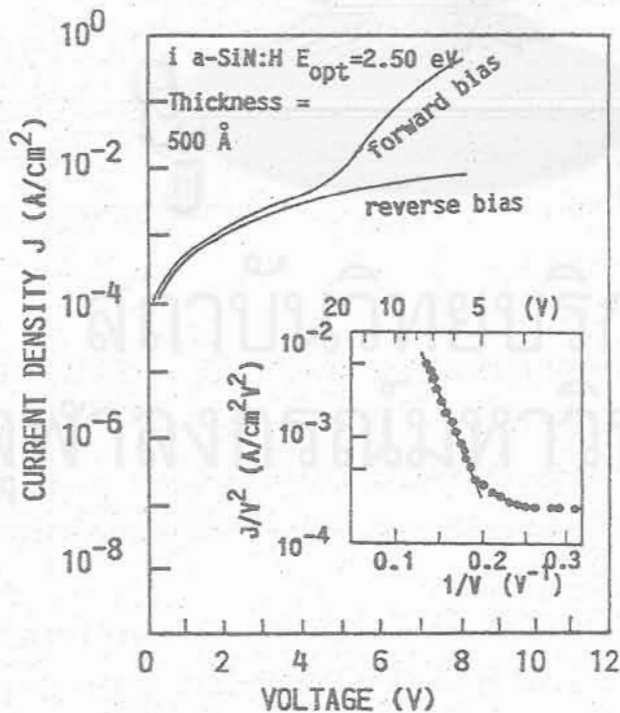
3.4.1 ลักษณะสมบัติ J-V และกลไกการฉีดพาหะใน a-SiN:H TFLED

เนื่องจากช่องว่างพลังงานของ i-a-SiN:H มีขนาดกว้างกว่าของ p- และ n-a-SiC:H ดังนั้นรอยต่อ p-i-n จึงมีลักษณะเป็นรอยต่อแบบเฮตเตโร (hetero-junction) ที่มีลักษณะเป็น "up hill" ดังนั้นจึงคาดว่าลักษณะสมบัติ J-V ตลอดจนกลไกของการฉีดพาหะใน TFLED ที่ผลิตนี้จึงแตกต่างไปจากไดโอดทั่วไป

รูปที่ 3.34 แสดงตัวอย่างผลการวัดลักษณะสมบัติ J-V ของ TFLED สองตัวที่มีรอยต่อ p-a-SiC:H/i-a-SiN:H/n-a-SiC:H โดยที่ช่องว่างพลังงาน (E_{opt}) ของชั้น i เท่ากับ 2.50 eV (เปล่งแสงสีแดง) และ 2.90 eV (เปล่งแสงสีเหลือง) ตามลำดับ ส่วนช่องว่างพลังงานของชั้น p และ n คงที่ที่ 2.0 eV ความหนาของชั้น p-i-n เท่ากับ 150 Å, 500 Å และ 300 Å ตามลำดับ



รูปที่ 3.34 ตัวอย่างผลการวัดลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า (J-V) ของ a-SiN:H TFLED 2 ตัวซึ่งเปล่งแสงสีแดง (E_{opt} ของชั้น i = 2.50 eV) และเปล่งแสงสีเหลือง (E_{opt} ของชั้น i = 2.90 eV) ตามลำดับ



รูปที่ 3.35 ลักษณะสมบัติ J-V ของ a-SiN:H TFLED ซึ่งเปล่งแสงสีแดง และกราฟรูปเล็กในรูปเป็นการพล็อตของ $\log(J/V^2)$ vs $1/V$ ในกรณีไบแอสตามกราฟเส้นตรงในรูปเล็กนี้แสดงให้เห็นว่า กระแสไฟฟ้าไหลใน TFLED ด้วยวิธีการทันเนลลิง (tunneling)

จากรูปที่ 3.34 นี้พบว่า TFLED แต่ละตัวมีคุณสมบัติของการเป็นไดโอดกล่าวคือ กระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการไบแอสตามมีค่ามากกว่าที่เกิดจากการไบแอสย้อน ตัวอย่างอัตราส่วนของกระแสไบแอสตามต่อกระแสไบแอสย้อนของ TFLED ซึ่งชั้น i มีช่องว่างพลังงาน 2.50 eV มีค่าสูงถึง 10^2 ที่แรงดันไฟฟ้าประมาณ 8 V

นอกจากนี้ ในรูปที่ 3.34 เมื่อเปรียบเทียบ TFLED 2 ตัวนี้ ได้พบว่า TFLED ตัวที่ชั้น i มีช่องว่างพลังงานกว้าง จะมีกระแสไฟฟ้าไหลได้น้อยกว่า TFLED ที่ชั้น i มีช่องว่างพลังงานแคบ ทั้งนี้อาจจะเป็นเนื่องจากสาเหตุสำคัญ 2 ประการคือ

1) เนื่องจากช่องว่างพลังงานของชั้น i มีค่ากว้างกว่าของชั้น p และ n ดังนั้นการฉีดกระแสไฟฟ้าขณะไบแอสตาม จึงจำเป็นต้องอาศัยวิธีการของทันเนลลิง (tunneling) ผ่านกำแพงศักย์ (barriers) ที่รอยต่อ p/i และ i/n และถ้าช่องว่างพลังงานของชั้น i กว้างขึ้นจะทำให้กำแพงศักย์สูงขึ้น จึงทำให้ประสิทธิภาพของการทันเนลลิงลดลง ดังนั้นในโครงสร้างที่กำแพงศักย์สูงจึงทำให้กระแสไฟฟ้าไหลได้น้อย

2) เนื่องจาก TFLED ซึ่งชั้น i มีช่องว่างพลังงานกว้างจะมีค่าความต้านทานของชั้น i สูงกว่าค่าความต้านทานของ TFLED ซึ่งชั้น i มีช่องว่างพลังงานแคบ

เพื่อเป็นการพิสูจน์ว่า การฉีดกระแสไฟฟ้าขณะไบแอสตามนั้นเป็นการทำให้พาหะถูกฉีดจากชั้น p และ n เข้าสู่ชั้น i ด้วยวิธีการทันเนลลิง จึงได้มีการพล็อตกราฟในลักษณะของ Fowler-Nordheim ตามสมการ [29]

$$J \propto E^2 \exp \left[-4 \sqrt{2m^*} (\phi_B)^{3/2} / 3q\hbar E \right] \quad (3.4)$$

โดยที่ J : ความหนาแน่นของกระแสต่อพื้นที่

E : สนามไฟฟ้าคร่อมชั้น i ขณะไบแอสตาม

m^* : มวลประสิทธิผลของพาหะ

q : ประจุของอิเล็กตรอน

h : ค่าคงที่ของพลังค์, $\hbar = h/2\pi$

ϕ_B : กำแพงศักย์ในการทันเนลลิง

รูปเล็กในรูปที่ 3.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log (J/V^2)$ และ $1/V$ ของ TFLED สีแดง โดยที่ V คือแรงดันไฟฟ้าไบแอสตาม เป็นที่น่าสังเกตว่า กราฟนี้มีลักษณะเป็นเส้นตรงในย่านที่ V มีค่าสูงกว่า 5 V ซึ่งเป็นแรงดันไฟฟ้าที่จำเป็นในการฉีดกระแส การที่กราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรงเป็นการสอดคล้องกับสมการที่ (3.4) ซึ่งแสดงว่า กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน TFLED เป็นกระแสไฟฟ้าชนิดทันเนลลิง (tunneling current)

ต่อไปถ้าเราสมมติให้ว่า กระแสไฟฟ้าที่ไหลส่วนใหญ่เป็นกระแสของพาหะอิเล็กตรอน จะทำให้เราได้ข้อมูลว่าความสูงของกำแพงศักย์ (barrier) ϕ_B นั้น จะเป็นความแตกต่างของระดับพลังงานของแถบคอนดักชันที่รอยต่อระหว่างชั้น i และ n

จะกำหนดให้ ΔE_C แสดงค่าความแตกต่างของระดับของขอบแถบคอนดักชัน (conduction band discontinuity) ของชั้น i และ n จากสมการที่ (3.4) ความลาดของกราฟเส้นตรงในรูปที่ 3.35 จะให้ข้อมูลค่า ϕ_B (นั่นคือ ΔE_C) จากรูปที่ 3.35 ได้ผลการวัดดังนี้

$$\Delta E_C \text{ ที่ } i/n \text{ interface} = 0.20 \text{ eV}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } \Delta E_V \text{ ที่ } i/n \text{ interface} &= 2.50 - 2.0 - 0.2 \\ &= 0.30 \text{ eV} \end{aligned}$$

นั่นคือ อิเล็กตรอนจากชั้น n จะต้องทันเนลผ่านกำแพงศักย์ที่มีความสูงถึง 0.20 eV จึงจะสามารถวิ่งเข้าสู่ชั้น i ได้

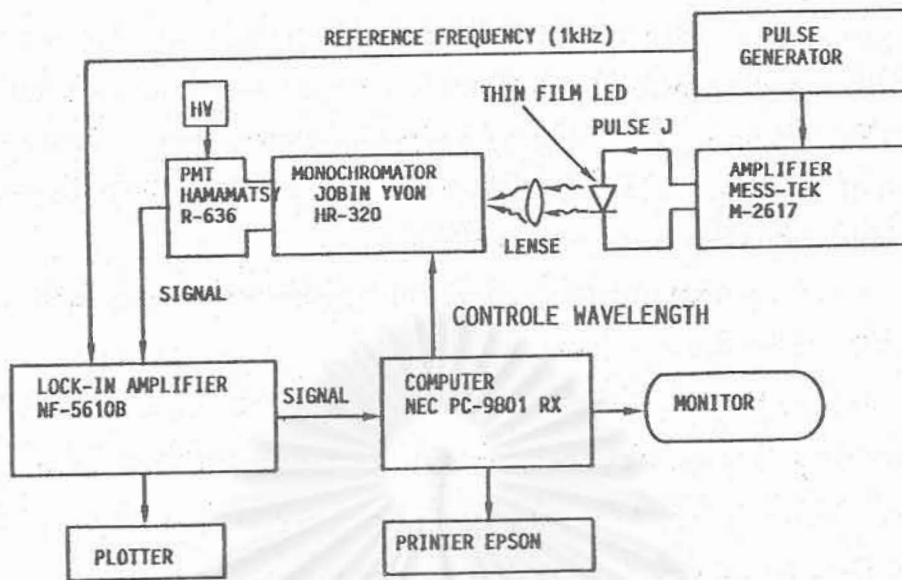
ขณะเดียวกัน ถ้าเราสมมติว่าอิเล็กตรอนอффินิตี (electron affinity) ของชั้น p มีค่าเท่ากับชั้น n เราจะได้ค่าความแตกต่างของระดับของขอบแถบวาเลนซ์ (valence band discontinuity) ที่รอยต่อ p/i ว่ามีค่าเท่ากับ $2.50 - 2.0 - 0.2 = 0.30 \text{ eV}$

ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบความสูงของกำแพงศักย์ของอิเล็กตรอน (ΔE_C) และของโฮล (E_V) พบว่า $\Delta E_V > \Delta E_C$ ดังนั้นอิเล็กตรอนจึงทันเนลเข้าสู่ชั้น i ได้ง่ายกว่าโฮล เพราะฉะนั้นกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน TFLED ส่วนใหญ่จึงได้แก่กระแสของอิเล็กตรอน ส่วนกระแสของโฮลนั้นไหลได้น้อยกว่ามาก

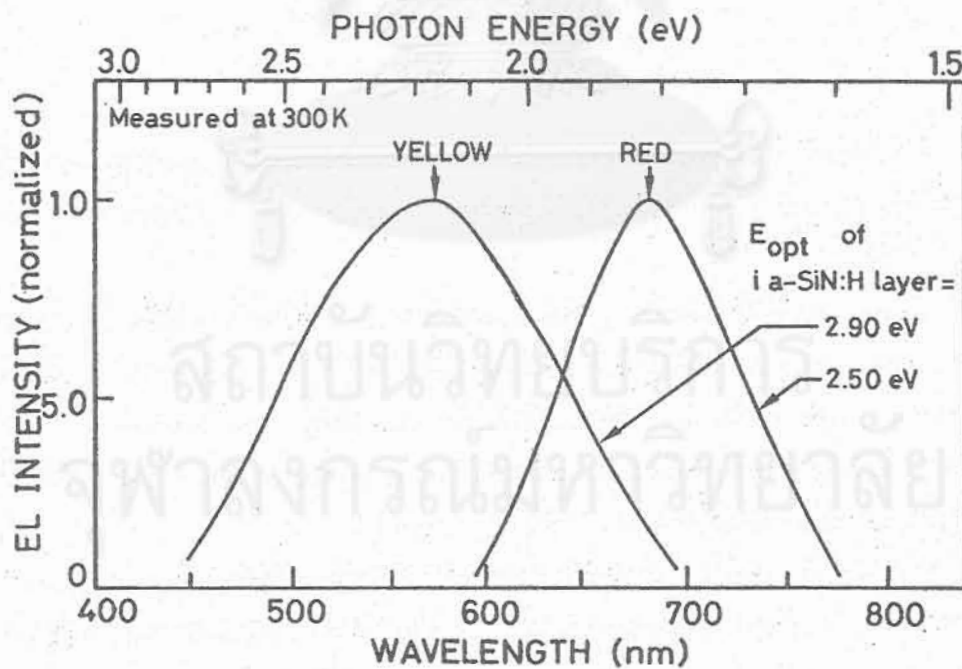
ด้วยเหตุผลนี้จึงกล่าวได้ว่า คุณสมบัติการเปล่งแสงนั้นจะถูกกำหนดด้วยพฤติกรรมของโฮลเป็นส่วนใหญ่ ข้อมูลนี้มีความสำคัญยิ่งต่อคุณสมบัติด้านการเปล่งแสงของ TFLED ดังจะได้อธิบายต่อไป

3.4.2 สเปกตรัมการเปล่งแสงของ a-SiN:H TFLED

ในงานวิจัยนี้ได้ประสบความสำเร็จในการประดิษฐ์ TFLED ที่เปล่งแสงสีแดง และสีเหลือง โดยมีชั้น i a-SiN:H ซึ่งเป็นชั้นเปล่งแสงซึ่งมีค่าช่องว่างพลังงาน 2.5 eV และ 2.9 eV ตามลำดับ สเปกตรัมการเปล่งแสงของ TFLED วัดด้วยระบบเครื่องมือซึ่งแสดงในรูปที่ 3.36 และผลการวัดสเปกตรัมการเปล่งแสงของ TFLED แสดงในรูปที่ 3.37 การวัดสเปกตรัมการเปล่งแสงวัดเมื่อความหนาแน่นของกระแสจมีค่าประมาณ 800 mA/cm^2 สเปกตรัมการเปล่งแสงสีแดงมีค่ายอดอยู่ที่พลังงานโฟตอนประมาณ 1.8 eV และมีค่า FWHM (Full Width at Half Maximum) ประมาณ 0.26 eV ส่วนสเปกตรัมการเปล่งแสงสีเหลืองมีลักษณะกว้างซึ่งมีค่ายอดอยู่ที่พลังงานโฟตอนประมาณ 2.2 eV และมีค่า FWHM ประมาณ 0.58 eV ความสว่างของ TFLED เหล่านี้สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า



รูปที่ 3.36 แผนผังวิธีการวัดสเปกตรัมการเปล่งแสง (electroluminescence: EL) จาก TFLED โดยใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมการทำงานอย่างอัตโนมัติ



รูปที่ 3.37 สเปกตรัมการเปล่งแสง EL จาก a-SiN:H TFLED ที่เปล่งแสงสีแดงและสีเหลืองวัดที่อุณหภูมิห้อง

เมื่อเปรียบเทียบค่าพลังงานโฟตอนของยอดของสเปกตรัมกับช่องว่างพลังงาน พบว่าค่าพลังงานโฟตอนของยอดของสเปกตรัมนี้มีค่าน้อยกว่าช่องว่างพลังงาน เหตุผลเพราะว่า การเปล่งแสงในวัสดุอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำนั้นเกิดจากการเปลี่ยนสถานะของพาหะอิเล็กตรอนและโฮลระหว่าง localized states ซึ่งกระจายอยู่ภายในช่องว่างพลังงาน นอกจากนี้จากการที่สเปกตรัมในรูปที่ 3.37 ค่อนข้างกว้าง จึงทำให้ทราบว่าศูนย์กลางการรวมตัวแบบเปล่งแสงนั้นค่อนข้างจะกระจายกว้างอยู่ในช่องว่างพลังงาน

ถ้าจะวิเคราะห์รายละเอียดเกี่ยวกับตำแหน่งยอดพลังงานของสเปกตรัมของการเปล่งแสงของ TFLED จะได้ผลที่น่าสนใจดังต่อไปนี้

ตัวอย่างกรณี TFLED ที่เปล่งแสงสีแดงซึ่งมี E_{opt} ของชั้น i -a-SiN:H = 2.50 eV ถ้าเปรียบเทียบกับสเปกตรัมของโฟโตลูมิเนสเซนซ์ในรูปที่ 7.6 ซึ่งในกรณีที่ E_{opt} ของ i -a-SiN:H = 2.50 eV ถ้าใช้แสงที่มีพลังงานโฟตอน = 2.20 eV กระตุ้น PL จะได้สเปกตรัม PL ที่มียอดอยู่ที่ 1.8 eV ซึ่งค่า 1.8 eV นี้ตรงกับยอดสเปกตรัม EL ของ TFLED พอดี

จากหัวข้อที่ผ่านมา ได้พบแล้วว่าในการฉีดกระแสไฟฟ้าเข้า TFLED นั้น อิเล็กตรอนสามารถวิ่งทะลุกำแพงศักย์ของชั้น i เข้าไปสู่แถบคอนดักชันของชั้น i ได้ แต่โฮลจะถูกฉีดเข้าสู่ระดับ localized states ซึ่งอยู่ลึก (deep) ในชั้น i เป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นความแตกต่างของระดับพลังงานของอิเล็กตรอนและโฮลที่ถูกฉีดจึงมีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} E_{x1} &= E_{opt}(i) - \Delta E_v(\text{at } p/i) \\ &= 2.50 \text{ eV} - 0.30 \text{ eV} = 2.2 \text{ eV} \end{aligned} \quad (3.5)$$

ค่าระดับพลังงานกระตุ้น 2.2 eV นี้ ทำให้ยอดพลังงานของสเปกตรัมการเปล่งแสงของ TFLED อยู่ที่ 1.8 eV ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลจาก PL ดังนั้น เราจึงสรุปกลไกของการฉีดพาหะได้ว่า

“ในสถานะการไบแอสตาม อิเล็กตรอนถูกฉีดจากแถบคอนดักชันในชั้น n -a-SiC:H ให้วิ่งทันเนลผ่านกำแพงพลังงานศักย์เข้าไปสู่แถบคอนดักชันในชั้น i -a-SiN:H ได้ ส่วนโฮลนั้นถูกฉีดจากแถบวาเลนซ์ในชั้น p -a-SiC:H ให้วิ่งทันเนลเข้าไปสู่ deep localized states ในชั้น i -a-SiN:H และโฮลรวมตัวกับอิเล็กตรอนที่ระดับ deep localized states นั้น ก่อนที่โฮลจะสามารถถูกกระตุ้นขึ้นไปสู่แถบวาเลนซ์ ในชั้น i -a-SiN:H”

ดังนั้นจากข้อสรุปนี้ ระดับพลังงานของการฉีดโฮลจะเป็นตัวกำหนดลักษณะสเปกตรัมของ TFLED และประสิทธิภาพของการฉีดโฮลจะเป็นตัวกำหนดความสว่างของ TFLED ด้วย ดังนั้นในอนาคตการปรับปรุงคุณภาพของชั้น p -a-SiC:H (เพิ่มขนาด E_{opt} และเพิ่มสภาพนำไฟฟ้ามืด) จึงเป็นหัวข้อการวิจัยที่สำคัญมากต่อการเพิ่มความสว่างของ TFLED การปรับปรุงความสว่างของ TFLED จะกล่าวถึงในบทที่ 6

3.4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความสว่างและกระแสไฟฟ้าที่ฉีดเข้าสู่

a-SiN:H TFLED

การเปล่งแสงของ TFLED เกิดจากการรวมตัวของโฮลและอิเล็กตรอนที่ถูกฉีดเข้าสู่ TFLED ถ้าเพิ่มกระแสไฟฟ้าก็จะทำให้ความสว่างของ TFLED เพิ่มขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า (J) และความสว่าง (B) โดยทั่วไปสามารถแสดงได้ด้วยสมการดังนี้

$$B \propto J^n \quad \text{โดยที่ } 0 < n < 2 \quad (3.6)$$

ค่าดัชนี n ที่ได้จากการทดลองจะมีความสำคัญที่ช่วยทำให้เราทราบกลไกการรวมตัวของพาหะ

ในกรณีของผลึก LED กระแสไฟฟ้าที่ไหลส่วนใหญ่เป็นกระแสแพร่ซึม (diffusion current) ดัชนี n มีค่าเท่ากับ 2 กรณีกระแสไฟฟ้ายังมีค่าน้อย (low current) และ n มีค่าเท่ากับ 1 กรณีกระแสไฟฟ้ามีค่ามาก (high current) [30]

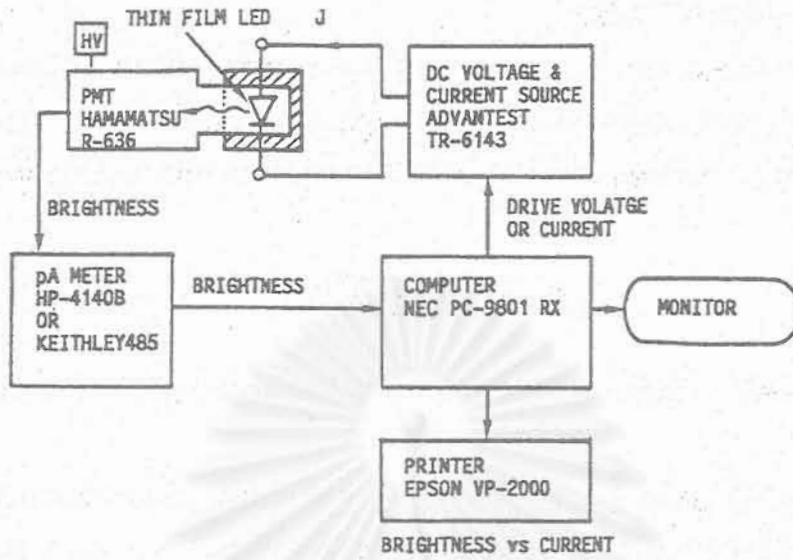
แต่ในกรณีอะมอร์ฟัส TFLED นี้จะแตกต่างกับกรณีผลึก เพราะว่าการฉีดกระแสไฟฟ้าเป็นกระแสขยับ (drift current) และยังต้องอาศัยปรากฏการณ์ทันเนลลิงด้วย ดังนั้นในการวิเคราะห์จึงต้องอาศัยวิธีพิเศษซึ่งแตกต่างกับกรณีผลึก

ในการทดลอง ได้ใช้คอมพิวเตอร์สั่งให้เครื่องกำเนิดแรงดันไฟฟ้าป้อนแรงดันไฟฟ้าไบแอสตามเข้าสู่ TFLED จากแรงดันไฟฟ้าต่ำเช่น 0 V ไปถึงค่าที่เหมาะสมเช่น 10 V โดยเพิ่มแรงดันไฟฟ้าที่ละสเต็ปแบบ DC เช่น 0.1 V และอ่านค่ากระแสไฟฟ้า (J_{inj}) ที่ไหล และความสว่าง (B) ของ TFLED และพล็อตเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสว่างและกระแสไฟฟ้า พื้นที่ของการเปล่งแสงมีค่าประมาณ 0.15 cm^2 หน่วยของ J_{inj} จะใช้เป็น mA/cm^2

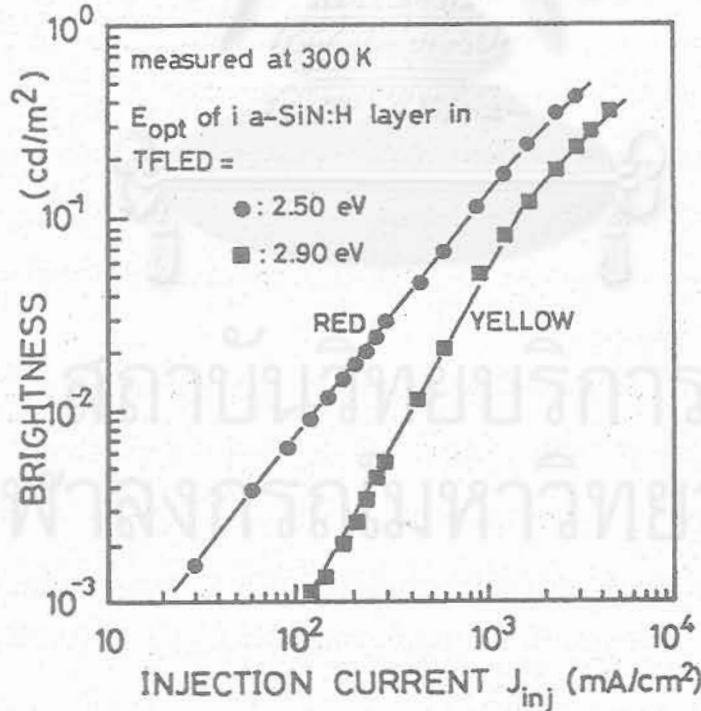
รูปที่ 3.38 แสดงแผนภูมิตระกูลของเครื่องมือที่ใช้วัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า J_{inj} และความสว่าง B ของ TFLED

รูปที่ 3.39 แสดงผลการวัดความสัมพันธ์ $B-J_{inj}$ ที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้สเกล log-log ของ a-SiN:H TFLED สีแดงและสีเหลืองซึ่งมี E_{opt} ของ i-layer เท่ากับ 2.50 eV และ 2.90 eV ตามลำดับ เมื่อ J_{inj} เพิ่มจากประมาณ 20 mA/cm^2 ไปสู่ระดับ 3000 mA/cm^2 ทำให้ความสว่างเพิ่มขึ้น จากระดับ 10^{-3} cd/m^2 ไปสู่ระดับ 0.5 cd/m^2 ความสัมพันธ์ระหว่าง B และ J_{inj} ก่อนข้างเป็นแบบเชิงเส้น โดยมีความลาดประมาณ 1 และในบริเวณที่กระแสมีค่าสูงมาก ๆ สังเกตพบว่าความสว่างจะเริ่มอิ่มตัว

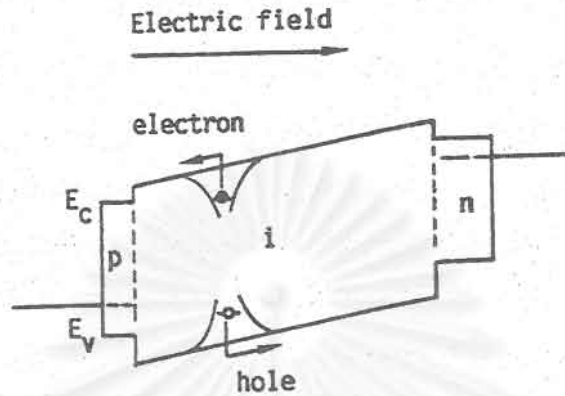
ความสว่างหรือการเปล่งแสงของ TFLED ทั้ง 2 ตัวนี้สามารถมองเห็นได้ด้วยตาในท้องที่มีแสงสลัว จะเริ่มเห็นเมื่อความสว่างมีค่าสูงกว่าประมาณ 0.01 cd/m^2 ความสว่างสูงสุดที่ได้อยู่ในระดับ $0.1 \sim 0.5 \text{ cd/m}^2$



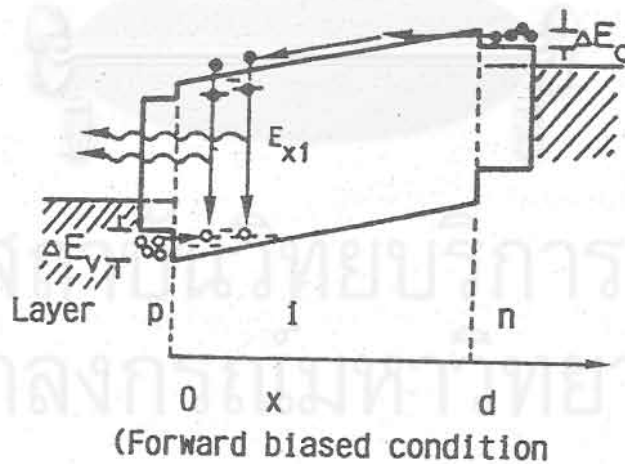
รูปที่ 3.38 ระบบเครื่องมือที่ใช้วัดความสัมพันธ์ระหว่างความสว่างของ TFLED และกระแสไฟฟ้าฉีด ซึ่งมีคอมพิวเตอร์ควบคุมการวัดได้อย่างอัตโนมัติ



รูปที่ 3.39 ผลการวัดความสัมพันธ์ระหว่างความสว่างของ a-SiN:H TFLED และกระแสไฟฟ้าฉีด ในรูปเป็นกรณี TFLED สีแดง ($i E_{opt} = 2.50$ eV) และสีเหลือง ($i E_{opt} = 2.90$ eV) ทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 3.40 การอธิบายการเกิดปรากฏการณ์พูลเฟรเนคเคิล (Pool-Frenkel effect) ใน TFLED ที่พัฒนาขึ้น ซึ่งพาหะถูกกระทำให้แยกออกจากกันด้วยสนามไฟฟ้า เป็นผลทำให้อัตราการรวมตัวของพาหะ (recombination rate) ลดลงและเป็นอุปสรรคต่อความสว่างของ TFLED



รูปที่ 3.41 แผนภูมิแถบพลังงานของ a-SiN:H TFLED ในสภาพถูกไบแอสตาม ให้ตำแหน่งรอยต่อของ p/i อยู่ที่ $x = 0$ และตำแหน่งของรอยต่อ i/n อยู่ที่ $x = d$ E_{x1} ในรูปแสดงความแตกต่างของระดับพลังงานของอิเล็กตรอนและโฮลที่ถูกกระตุ้นให้ TFLED เปล่งแสง

เป็นที่น่าสังเกตว่า TFLED สีเหลืองมีความสว่างน้อยกว่า TFLED สีแดง ทั้งนี้จากการวิเคราะห์ พบว่าอาจมีสาเหตุจาก

1. TFLED สีเหลืองต้องใช้ชั้น i-a-SiN:H ที่มี E_{opt} กว้างกว่าของ TFLED สีแดง และ i-a-SiN:H ที่มี E_{opt} กว้างจะมีจุดบกพร่อง (ESR spin density) มากกว่า i-a-SiN:H ที่มี E_{opt} แคบ (ข้อมูลเกี่ยวกับ ESR ได้เคยกล่าวไว้แล้วในรูปที่ 3.10)
2. TFLED สีเหลือง ต้องใช้สนามไฟฟ้าไบแอสสูงกว่า TFLED สีแดง การใช้สนามไฟฟ้าสูงนั้น มีผลเสียโดยที่สนามไฟฟ้าจะกระตุ้นพาหะให้กระโดดจาก localized states กลับขึ้นไปสู่แถบคอนดักชันหรือแถบวาเลนซ์ได้ง่ายด้วยปรากฏการณ์ Poole-Frenkel ดังแสดงโมเดลในรูปที่ 3.40 ด้วยเหตุนี้ภายใต้สนามไฟฟ้าสูง จึงทำให้อัตราการรวมตัวแบบเปล่งแสง (radiative recombination rate) ของพาหะลดลง หนึ่งผลการวัดขึ้นกับสนามไฟฟ้าของแสงของโฟโตลูมิเนสเซนซ์ในรูปที่ 3.25 เป็นการยืนยันการวิเคราะห์นี้ได้

3.4.4 การวิเคราะห์กลไกการฉีดพาหะและกลไกการรวมตัวของพาหะใน

a-SiN:H TFLED

ในงานวิจัยนี้ได้มีการศึกษากลไกการฉีดพาหะและกลไกการรวมตัวของพาหะใน a-SiN:H อย่างละเอียด ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

กำหนดให้ p-i-n TFLED มีความหนาในแกน x โดยให้ชั้น i เริ่มจาก $x = 0$ (p/i interface) และระนาบ y-z มีขนาดใหญ่ไม่สิ้นสุดดังแสดงในรูปที่ 3.41 ชั้น i มีความหนา $x = d$ เนื่องจากได้เคยพิสูจน์มาแล้วว่า กระบวนการฉีดพาหะในอะมอร์ฟัส p-i-n TFLED นี้ใช้วิธีการทันเนลลิง (field-tunneling) ดังนั้นกระแสไฟฟ้าของอิเล็กตรอนและของโฮลที่บริเวณใกล้รอยต่อของ i/n และ p/i ตามลำดับ จึงแสดงได้ดังนี้

$$J_n = E^2 \exp \left[\frac{-4 \sqrt{2m_e^*} (\Delta E_c)^{3/2}}{3q\hbar E} \right], \text{ at } x \approx d \quad (3.7)$$

$$J_p = E^2 \exp \left[\frac{-4 \sqrt{2m_h^*} (\Delta E_v)^{3/2}}{3q\hbar E} \right], \text{ at } x \approx 0$$

โดยที่ m_e^* และ m_h^* คือมวลประสิทธิผลของอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ

ΔE_c : ความแตกต่างของขอบแถบคอนดักชันที่รอยต่อ i/n

ΔE_v : ความแตกต่างของขอบแถบวาเลนซ์ที่รอยต่อ p/i

ถ้าเราสมมติว่า ชั้นเปล่งแสงชนิด i นี้มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด n และกระบวนการไหลของพาหะในชั้น i เป็นชนิดขับ (drift-type) อันเนื่องจากสนามไฟฟ้าที่ค่อนข้างสูง เราจะสามารถคำนวณค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลได้โดยการแก้สมการความต่อเนื่องของพาหะ (carrier continuity equation) โดยใช้เงื่อนไขพรมแดนในสมการที่ (3.7) ดังนั้นในกรณีที่สนามไฟฟ้า E ในชั้น i มีความสม่ำเสมอ (uniform electric field) ตลอดความหนาจะได้ว่า

$$n(x) = \frac{J_n}{q\mu_p E} - \frac{J_p \mu_p}{q\mu_n E} \left(e^{-x/r_p} - e^{-d/r_p} \right) \quad (3.8)$$

และ

$$p(x) = \frac{J_p}{q\mu_p E} e^{-x/r_p} \quad (3.9)$$

โดยที่ r_p : ระยะของโฮล (hole range) = $\mu_p \tau_p E$

μ_n, μ_p : ความคล่องตัวของอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ

τ_p : เวลาอายุการรวมตัวของชนิดไม่เปล่งแสง (nonradiative recombination lifetime) ของโฮล

ต่อจากนั้นกระแสไฟฟ้ารวมที่ไหลผ่านไดโอดสามารถหาได้จากการใช้สมการที่ (3.8) และ (3.9) และได้ผลดังนี้

$$J = J_n + J_p e^{-d/r_p} \quad (3.10)$$

เนื่องจาก ΔE_v มีค่ามากกว่า ΔE_c ดังนั้นกระแสทันเนลลิงของโฮล (J_p) จึงควรมีค่าน้อยกว่ากระแสทันเนลลิงของอิเล็กตรอน (J_n) ยิ่งกว่านั้นเทอม $\exp(-d/r_p)$ ยังช่วยทำให้กระแสโฮลลดลงด้วย ดังนั้นเราจึงสามารถให้รูปโดยประมาณของ J ได้ว่า

$$J \cong J_n \quad (3.11)$$

สมการนี้มีความหมายว่า กระแสไฟฟ้าของไดโอดมีค่าโดยประมาณเป็นกระแสไฟฟ้าของ อิเล็กตรอนนั่นเอง ต่อไปจะวิเคราะห์ความสว่างของ TFLED

ความสว่าง (EL intensity) ของ TFLED โดยหลักการแล้วจะแปรผันตรงกับอัตราการรวมตัวแบบเปล่งแสงของอิเล็กตรอนและโฮล และในขณะเดียวกันอัตราการรวมตัวแบบเปล่งแสง ก็ถูกกำหนดด้วย ผลคูณของความหนาแน่นของอิเล็กตรอนส่วนเกินและโฮลส่วนเกินในสถานะ เริ่มต้น (initial states) และ ในสถานะสุดท้าย (final states) เพื่อความสะดวก เราจะกำหนดให้ ว่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนส่วนเกินและโฮลส่วนเกินมีค่าแปรผันตรงกับ

$$n(x)^{\alpha_c} \quad \text{และ} \quad p(x)^{\alpha_v} \quad (3.12)$$

โดยที่ α_c, α_v : เป็นพารามิเตอร์ที่กำหนดกระบวนการรวมตัวของพาหะแบบเปล่งแสงในชั้น i อาทิเช่น

1) ถ้าเป็นการรวมตัวแบบไบโมเลกูลาร์ (bimolecular recombination) ของ อิเล็กตรอนอิสระและโฮลอิสระ จะได้ว่า

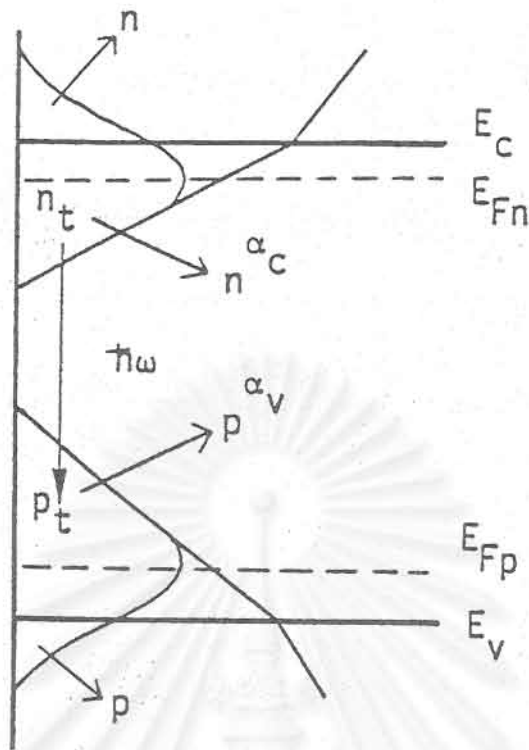
$$\alpha_c = \alpha_v = 1 \quad (3.13)$$

2) ถ้าเป็นการรวมตัวแบบโมนโมเลกูลาร์ (monomolecular recombination) โดยที่ โฮลเป็นพาหะข้างน้อยจะได้ว่า

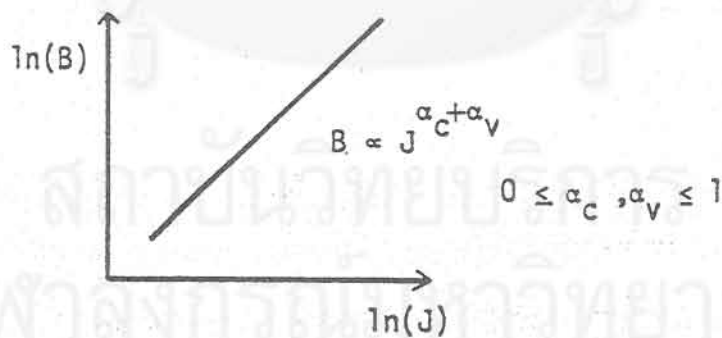
$$\alpha_c = 0, \quad \alpha_v = 1 \quad (3.14)$$

อย่างไรก็ตาม ในกรณีของวัสดุอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำ การรวมตัวแบบเปล่งแสงของ พาหะนั้นส่วนใหญ่จะเกิดที่ระดับ localized states และถ้าเราพิจารณาให้ localized state ที่เป็น ที่ทำให้เกิดการรวมตัวแบบเปล่งแสงมีรูปร่าง (การขึ้นกับระดับพลังงาน) เป็นเอกซโพเนนเชียล (exponential band tail) ดังแสดงในรูปที่ 3.42 จะทำให้ความหมายของพารามิเตอร์ α_c และ α_v กลายเป็น “ดิสเพอร์ซีพารามิเตอร์” (dispersive parameters) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่กำหนดค่า ความลาดของหาง (band tails) ของแถบคอนดักชันและแถบวาเลนซ์ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 3.42 และไม่ว่าจะเป็นกรณีใดก็ตาม ทั้ง α_c และ α_v จะมีค่าระหว่าง 0 และ 1

ต่อไปถ้าพิจารณาให้ γ_p มีค่าน้อยกว่าความหนา (d) ของชั้น i ดังนั้นความสว่าง (B) ของ TFLED จะแปรผันตรงกับความหนาแน่นของพาหะ $n(x)$ และ $p(x)$ ดังนี้



รูปที่ 3.42 ลักษณะของ localized states ไกล่แถบคอนดักชันและแถบวาเลนซ์ของ a-SiN:H ซึ่งมีรูปร่างเป็น exponential bandtails ในรูป α_C และ α_V เรียกว่า dispersive parameters และมีค่าระหว่าง 0-1



Experiments $\alpha_C = 0.8$ (TOF)
 $\alpha_V = 0.3$

slope = 1.1

รูปที่ 3.43 โมเดลความสัมพันธ์ระหว่างความสว่างของ a-SiN:H TFLED และกระแสไฟฟ้าที่ฉีดเข้า TFLED ความลาดของกราฟมีค่าประมาณ 1-1.1 ซึ่งให้ผลใกล้เคียงผลการทดลองในรูปที่ 3.39

$$B \propto \int_0^d n(x)^{\alpha_c} \cdot p(x)^{\alpha_v} dx \quad (3.15)$$

เมื่อแทนค่าสมการที่ (3.7)-(3.14) ลงในสมการที่ (3.15) ก็จะได้คำตอบที่มีความสำคัญมากดังนี้

$$B \propto \frac{d^{1 + \alpha_c + \alpha_v}}{V^{\alpha_c + \alpha_v}} \exp \left[\frac{-d\alpha_v}{d_c} \right] \cdot J^{\alpha_c + \alpha_v} \quad (3.16)$$

โดยที่ในที่นี่

$$d_c \equiv \frac{3q\hbar V}{4\sqrt{2m^*} \left(\Delta E_v^{3/2} - \Delta E_c^{3/2} \right)} \quad (3.17)$$

และ V : แรงดันไฟฟ้าที่คร่อมชั้น i

สมการที่ (3.16) ชี้ให้ว่า ความสว่าง B ของ TFLED มีค่าแปรผันตรงกับกระแสไฟฟ้าไดโอดตามรูปที่ 3.43 และ

$$B \propto J^n \approx J^{1.2} \quad (3.18)$$

โดยที่ดัชนี $n = \alpha_c + \alpha_v$

เนื่องจากผลการวัดในรูปที่ 3.39 ทำให้เราทราบว่าดัชนี n มีค่าใกล้เคียง 1 ดังนั้น $\alpha_c + \alpha_v \cong 1$ ซึ่งทำให้เราสามารถตั้งข้อสังเกตต่อไปได้ว่า การรวมตัวแบบเปล่งแสงใน TFLED ที่ผลิตได้นั้น อาจจะเป็นการรวมตัวชนิดโมโนโมเลกูลาร์ (monomolecular) หรือไม่ก็อาจเป็นการรวมตัวชนิดระหว่างหางของโลคอลไลซ์สเตท (tail-to-tail recombination) อนึ่งในวัสดุ a-SiC:H, a-SiN:H และ a-SiO:H นั้น โดยทั่วไป α_c และ α_v มีค่าประมาณ 0.8 และ 0.3 ตามลำดับ

3.4.5 การหาค่าความหนาที่เหมาะสมของชั้น i ใน $a\text{-SiN:H TFLED}$

ในหัวข้อที่ 3.4.4 ได้กล่าวถึงผลการทดลองและวิเคราะห์กลไกการฉีดพาหะและการรวมตัวแบบเปล่งแสงแล้ว และได้ข้อสรุปว่าการฉีดพาหะได้อาศัยกระบวนการทันเนลลิง (tunneling) ผ่านกำแพงศักย์ที่รอยต่อของ p/i และ i/n เป็นหลัก จากกระบวนการทันเนลลิงนี้ ทำให้ลักษณะสมบัติของอะมอร์ฟัส TFLED แตกต่างไปจากผลึก LED และเพื่อที่จะผลิตให้ TFLED มีความสว่างสูงสุดจำเป็นต้องหาค่าความหนาที่เหมาะสมของชั้น i ในรอยต่อ $p-i-n$ ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการคำนวณทางทฤษฎีเพื่อหาค่าความหนาที่เหมาะสมของชั้น i และเปรียบเทียบกับผลการทดลอง

ความหนาของชั้น $p-i-n$ แต่ละชั้นใน TFLED มีความสำคัญต่อความสว่างของ TFLED ดังนี้

1. ชั้น p เป็นชั้นฉีดโฮลให้เข้าสู่ชั้น i และสร้างรอยสัมผัสโอห์มมิกกับ ITO ถ้าชั้น p บางเกินไปแสงจากชั้น i จะทะลุผ่านได้ดี แต่ขณะเดียวกันความสามารถในการฉีดโฮลจะเลวลงและการสร้างรอยสัมผัสกับ ITO จะเลวลง ในทางตรงข้ามถ้าชั้น p หนาเกินไป ก็จะทำให้แสงจากชั้น i รั่วทะลุผ่านออกสู่ภายนอกได้น้อยลง ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดความหนาของชั้น p ไว้ที่ประมาณ 150 \AA ซึ่งเป็นค่าเท่ากับความหนาของชั้น p ในกรณีเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด $a\text{-Si:H}$.

2. ชั้น n เป็นชั้นฉีดอิเล็กตรอนให้เข้าสู่ชั้น i และสร้างรอยสัมผัสโอห์มมิกกับ Al ถ้าชั้น n บางเกินไปจะฉีดอิเล็กตรอนเลวลง และถ้าหนาเกินไปจะตัดแสงสะท้อนจะ Al ให้กลับไปออกทางชั้น p เลวลง ในงานนี้ได้เลือกชั้น n หนาประมาณ $300\text{-}500 \text{ \AA}$ ซึ่งเท่ากับกรณีเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด $a\text{-Si:H}$ เช่นกัน

3. ชั้น i เป็นชั้นเปล่งแสง โดยทั่วไปถ้าชั้น i ยิ่งหนา ก็จะทำให้มีจำนวนของ ศูนย์กลางการรวมตัวแบบเปล่งแสง (recombination centers) เพิ่มขึ้น แต่ขณะเดียวกันใน TFLED จะทำให้ความสามารถของการทันเนลลิงของพาหะเพื่อเข้าสู่ชั้น i ลดลง ดังนั้นความหนาที่เหมาะสมของชั้น i จะถูกกำหนดด้วยแฟกเตอร์ต่างๆ มากมาย ดังจะได้อธิบายต่อไป

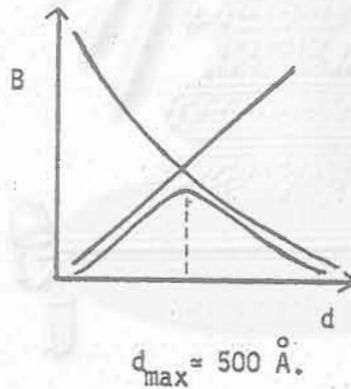
เราเคยทราบแล้วว่าความสัมพันธ์ระหว่างความสว่าง (B) และกระแสไฟฟ้า (J) ของ TFLED มีรูปตามสมการที่ (3.16) แล้ว สมการนี้ให้ข้อมูลมากมายและเป็นประโยชน์ยิ่งต่อการออกแบบและผลิต TFLED เพื่อให้ได้ความสว่างสูงสุดดังนี้

1) ณ ที่แรงดันไฟฟ้า V และกระแส J คงที่ ความสัมพันธ์ระหว่าง B และความหนา d ของชั้น i คือ

$$B \propto d^{2.1} \exp[-d] \quad (3.19)$$

สมการนี้สามารถวาดเป็นภาพได้ดังรูปที่ 3.44 ซึ่งหมายความว่า B จะมีค่าสูงสุดที่ d ไม่บางเกินไปและไม่หนาเกินไป ค่าความหนา d_{\max} ของชั้น i ที่จะทำให้ B มีค่าสูงสุดหาได้โดยการหาค่าอนุพันธ์ของสมการที่ (3.16) ด้วย d และให้ผลลัพธ์มีค่าเท่ากับ 0 นั่นคือ

$$\begin{aligned}
 B &\propto d \cdot n_t \cdot P_t \\
 &\propto d \cdot J_n^{\alpha_c} \cdot J_p^{\alpha_v} \\
 &\quad \text{here, } J_p/J_n \propto \exp(-d/d_c) \\
 &\quad J_{\text{total}} = J_n \\
 &\propto d \cdot \exp(-d \cdot \alpha_v/d_c) \cdot J_n^{\alpha_c + \alpha_v}
 \end{aligned}$$



รูปที่ 3.44 โมเดลอธิบายความสว่างของ TFLED ที่ขึ้นอยู่กับความหนาของชั้น i ของ TFLED

$$\frac{\partial B}{\partial d} = 0 \quad (3.20)$$

นั่นคือ ค่าความหนาที่เหมาะสมที่สุดของชั้น i จะได้ว่า

$$d_{\max} = \frac{(1 + \alpha_c + \alpha_v)}{\alpha_v} \alpha_c \quad (3.21)$$

ถ้าแทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆลงในสมการที่ (3.21) ก็จะได้ค่า d_{\max} ตัวอย่างกรณี TFLED สีแดง ซึ่ง $\alpha_c = 0.8$, $\alpha_v = 0.3$, $\Delta E_c = 0.2$ eV, $\Delta E_v = 0.3$ eV, $V = 10$ V จะได้ว่า

$$d_{\max} \approx 500 \text{ \AA}$$

2) ณ ที่ J คงที่ ความสัมพันธ์ระหว่าง B และ V คือ

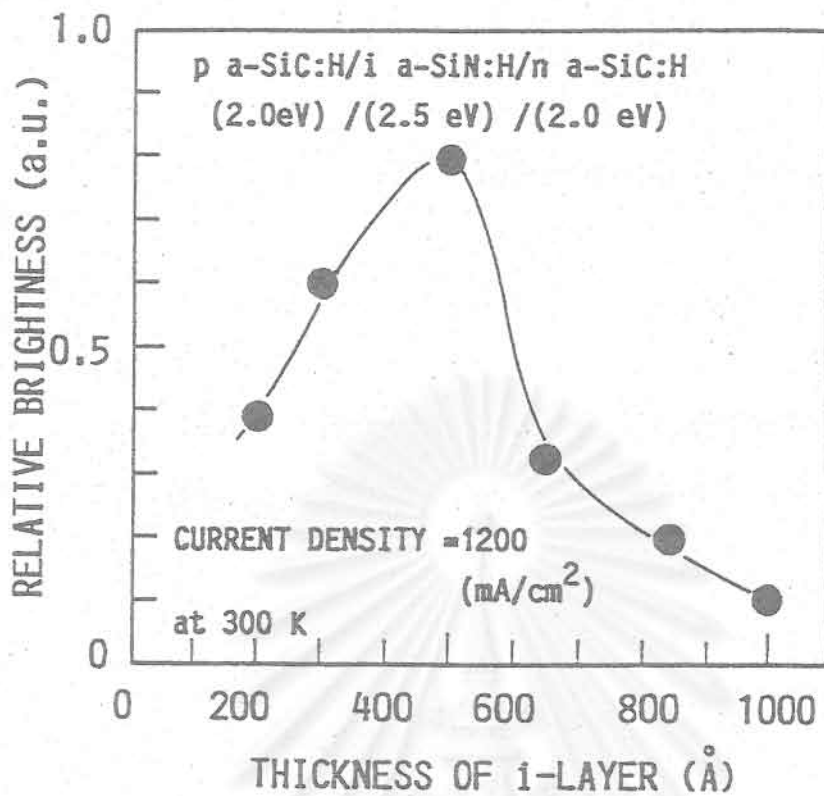
$$B \propto \frac{1}{V^{1.1}} \quad (3.22)$$

สมการนี้บอกให้ทราบว่าความสว่างแปรผกผันกับแรงดันไฟฟ้า นั่นคือ ถ้าต้องการ B สูง จะต้องใช้แรงดันไฟฟ้าไบแอส TFLED ให้ต่ำที่สุด

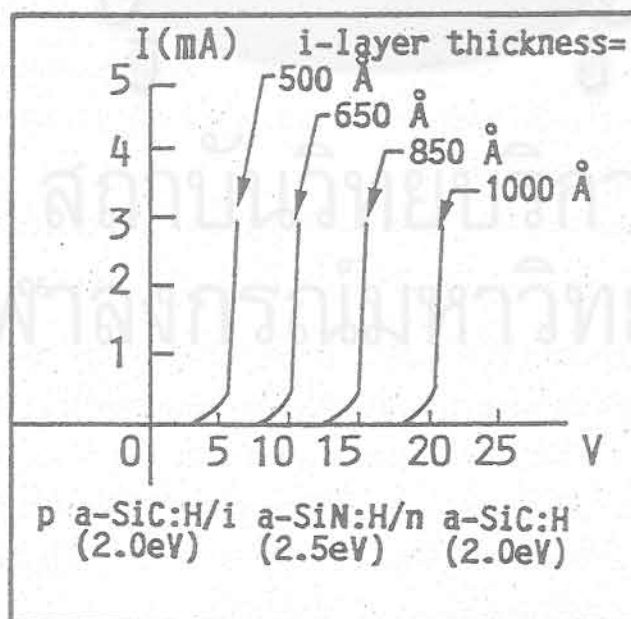
ในงานวิจัย ได้มีการผลิต p-a-SiC:H/i-a-SiN:H/n-a-SiC:H TFLED ที่ชั้น i มีความหนาระหว่าง 200 Å ถึง 1000 Å โดยกำหนดให้ชั้น p และ n มีความหนาคงที่ที่ 150 Å และ 500 Å ตามลำดับ ช่องว่างพลังงานของชั้น p , i และ n คือ 2.0, 2.5 และ 2.0 eV ตามลำดับ ทั้งหมดนี้เป็น TFLED ที่เปล่งแสงสีแดง

รูปที่ 3.45 แสดงผลการวัดความสว่างที่ขึ้นอยู่กับความหนาของชั้น i โดยทำการวัดที่อุณหภูมิห้องและให้กระแสฉีด J_{inj} เท่ากับ 1200 mA/cm^2 (เท่ากับ 40 mA ในพื้นที่จริง 0.033 cm^2) ผลการทดลองในรูปที่ 3.45 นี้ให้ผลความหนาที่เหมาะสมของชั้น i ว่ามีค่าเท่ากับ 500 Å ซึ่งตรงกับการคำนวณทางทฤษฎี ในรูปนี้เมื่อความหนาของชั้น i เพิ่มจาก 200 Å จะทำให้ความสว่างมีค่าเพิ่ม ทั้งนี้เพราะว่าจำนวนของศูนย์กลางการรวมตัวชนิดเปล่งแสง (radiative recombination centers) เพิ่มนั่นเอง แต่เมื่อความหนาเพิ่มค่ามากกว่า 500 Å จะทำให้ความสว่างมีค่าลดลง ทั้งนี้เพราะว่าการเพิ่มความหนาหลายๆ จะทำให้ต้องเพิ่มสนามไฟฟ้ามากขึ้น เพื่อฉีดพาหะแบบทันเนลลิง (field tunneling) เข้าสู่ชั้น i

รูปที่ 3.46 แสดงลักษณะสมบัติ J - V ของ TFLED ซึ่งชั้น i มีความหนาแตกต่างกัน จากผลการวัดในรูปนี้พบว่า แรงดันไฟฟ้าเทอร์โวลต์ V_{th} ซึ่งกระแสไฟฟ้าเริ่มไหลของ TFLED ที่ชั้น i



รูปที่ 3.45 ผลการวัดความสัมพันธ์ระหว่างความสว่างของ TFLED และความหนาของชั้น i ใน a-SiN:H TFLED ที่เปล่งแสงสีแดง วัดที่กระแสไฟฟ้าเท่ากับ 1200 mA/cm²



รูปที่ 3.46 ลักษณะสมบัติไดโอด (J-V) ของ a-SiN:H TFLED ซึ่งมีชั้น i ที่มีความหนา ระหว่าง 500 Å - 1000 Å

หนา 500 Å คือประมาณ 6 V แต่เมื่อเพิ่มความหนาเป็น 1000 Å แทนที่ V_{th} จะเป็น 2 เท่า ซึ่งเท่ากับ 12 V แต่ V_{th} จากการวัดเพิ่มขึ้นเกือบ 4 เท่าตัวเป็น 22 V.

ดังนั้นข้อมูลในรูปที่ 3.46 นี้ยืนยันได้ว่าการลดลงของความสว่างเมื่อชั้น i หนามากๆ เกิดจากอิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่ทำให้ความน่าจะเป็นของการรวมตัวชนิดเปล่งแสงของพาหะลดลง (electric-field quenching effect) ตามที่ได้เคยกล่าวแล้วในเรื่องโฟโตลูมิเนสเซนซ์

โดยสรุปแล้ว จากการทดลองผลิต TFLED สีแดง ที่ชั้น i มีความหนาต่างๆ พบว่าความหนาที่เหมาะสมที่สุดมีค่าประมาณ 500 Å ซึ่งเป็นค่าที่สอดคล้องกับการคำนวณทางทฤษฎี

3.4.6 การขึ้นกับความถี่ของกระแสไฟฟ้าพัลส์ของความสว่างของ

a-SiN:H TFLED

ในการป้อนกระแสไฟฟ้าแบบไบแอสตามเข้าสู่ TFLED ให้สว่างนั้น สามารถทำได้ 2 วิธี คือ

1. การฉีดกระแสไฟฟ้าแบบกระแสตรงค่าคงที่

และ 2. การฉีดกระแสไฟฟ้าแบบพัลส์

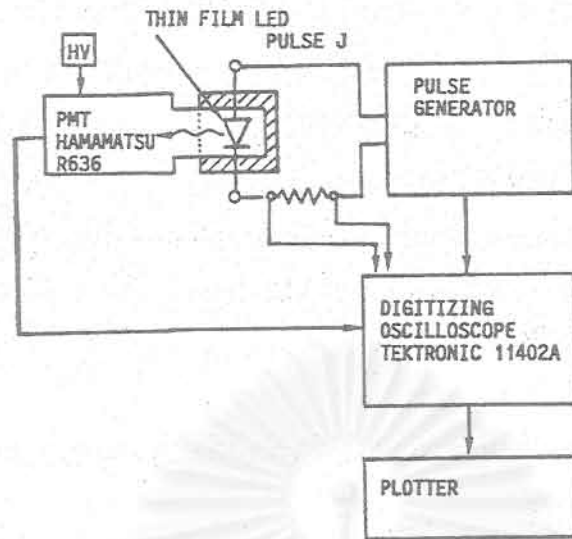
ในกรณีแรกเหมาะกับการใช้งาน TFLED เป็น pilot lamp หรือหน้าปัทม์แบบง่าย มีข้อดีที่วงจรไฟฟ้าไม่ยุ่งยากแต่มีข้อเสียที่การเกิดความร้อนที่ค่อนข้างสูง ส่วนกรณีหลังซึ่งเป็นวิธีพัลส์ต้องใช่วงจรยุ่งยาก แต่มีผลไม่ให้เกิดความร้อนสูงมากและเหมาะกับการใช้งานเป็นดีสเพลย์ที่ต้องการสแกนภาพ หรือการมอดูเลต (modulation) ความสว่างเพื่อให้แสงเป็นสัญญาณ on/off แบบพัลส์สำหรับการส่งข้อมูลในอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์เช่น photocoupler, optical computer, optical switching และ optical communication

ในหัวข้อนี้จะรายงานผลของการใช้งานอะมอร์ฟัส TFLED ด้วยการฉีดกระแสไฟฟ้าแบบพัลส์ที่ความถี่ต่างๆ ว่า ความสว่างของ TFLED จะขึ้นกับความถี่เช่นไร และผลตอบสนองพัลส์เป็นอย่างไร

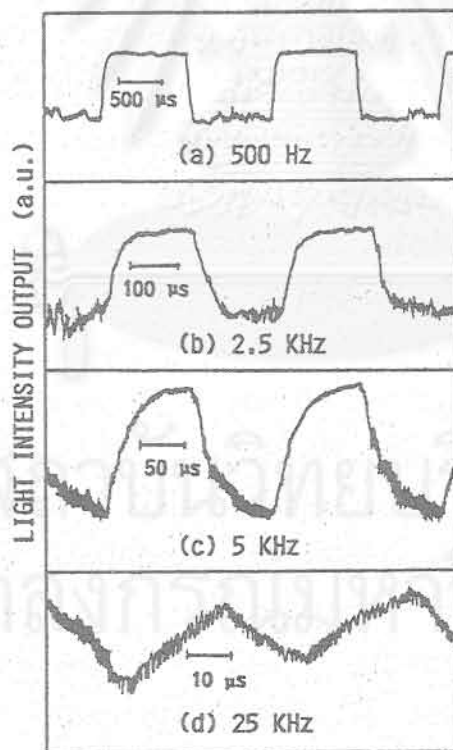
รูปที่ 3.47 แสดงแผนภูมิวิธีการวัดลักษณะรูปคลื่น (wave form) ของแสงเอาท์พุทของ TFLED เมื่อฉีดกระแสไฟฟ้าแบบพัลส์สี่เหลี่ยมเข้าสู่ TFLED การทดลองใช้ฟังก์ชันเจเนเรเตอร์ (function generator) กำเนิดสัญญาณคลื่นพัลส์สี่เหลี่ยมที่มี duty cycle เท่ากับ 50 %

รูปที่ 3.48 แสดงผลการวัดลักษณะรูปคลื่นของแสงเอาท์พุทจาก TFLED สีเหลืองซึ่งช่องว่างพลังงานของชั้น i -a-SiN:H เท่ากับ 3.0 eV จากรูปพบว่าเมื่อเพิ่มความถี่ของกระแสพัลส์จาก 500 Hz ไปถึง 25 kHz รูปคลื่นของแสงเอาท์พุทจะค่อยๆ เปลี่ยน (distort) จากรูปสี่เหลี่ยมเป็นสามเหลี่ยม จากรูป (d) คำนวณค่าช่วงเวลาขาขึ้น (rise time) (t_r) วัดได้ประมาณ 10 μ s.

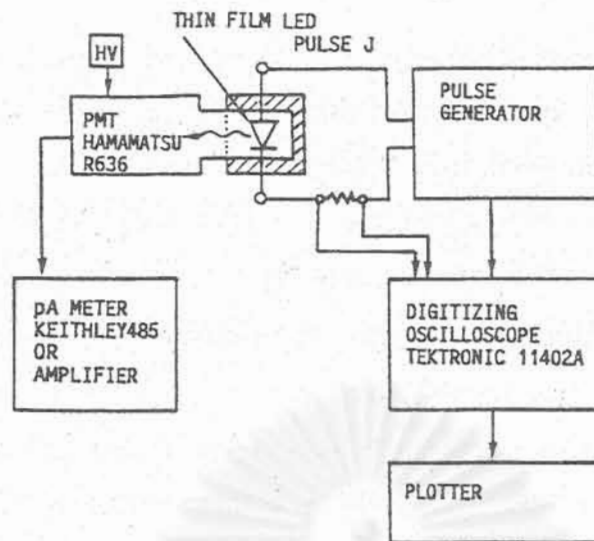
รูปที่ 3.49 แสดงผลการวัดความสัมพันธ์ระหว่างความสว่างของ TFLED สีเหลืองและความถี่ของกระแสพัลส์ที่อุณหภูมิห้อง จากรูปพบว่า ความสว่างคงที่ตลอดย่านความถี่ต่ำไปจนถึงระดับ 1 MHz ในรูปไม่มีข้อมูลความถี่สูงกว่า 1 MHz เพราะถูกจำกัดด้วยฟังก์ชันเจเนเรเตอร์ที่ใช้งานกำเนิดพัลส์



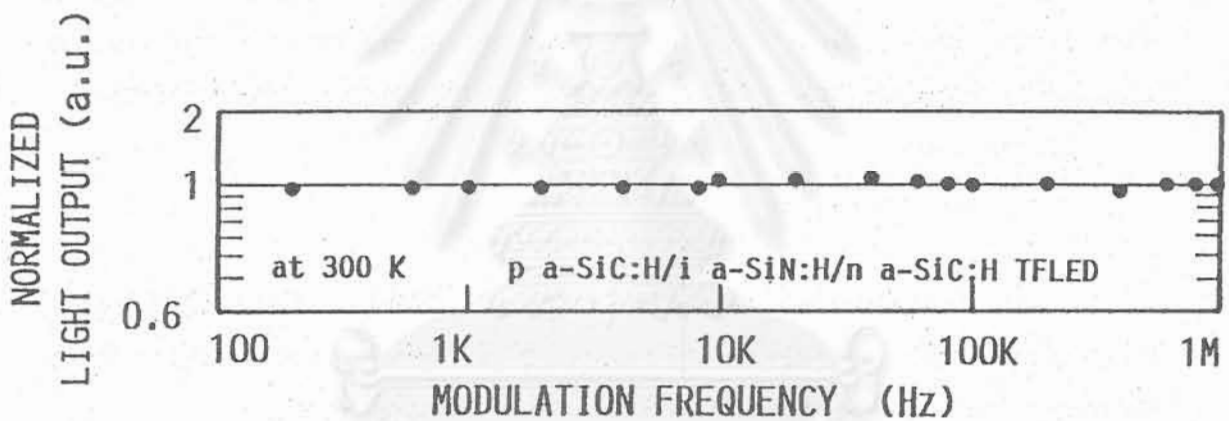
รูปที่ 3.47 แผนภูมิแสดงวิธีการวัดลักษณะรูปคลื่น (wave form) ของความเข้มแสงเออร์ท์พุทของ a-SiN:H TFLED เมื่อฉีดด้วยกระแสไฟฟ้าแบบพัลส์



รูปที่ 3.48 ลักษณะรูปคลื่น (wave form) ของแสงเออร์ท์พุทจาก a-SiN:H TFLED สีเหลืองเมื่อฉีดด้วยกระแสไฟฟ้าแบบพัลส์สี่เหลี่ยมพัลส์ในรูป (a)-(d) มี duty cycle 50% และความถี่ 500 Hz, 2.5 kHz, 5 kHz และ 25 kHz ตามลำดับ



(a)



(b)

- รูปที่ 3.49 (a) การวัดความสัมพันธ์ระหว่างความสว่างของอะมอร์ฟัส TFLED และความถี่ของกระแสไฟฟ้าพัลส์
- (b) ผลการวัดความสัมพันธ์ระหว่างความสว่างและความถี่ของกระแสไฟฟ้าพัลส์ของ a-SiN:H TFLED สีเหลือง ทำการวัดที่อุณหภูมิห้องและควบคุมให้แอมพลิจูดของกระแสไฟฟ้าพัลส์คงที่ที่ 150 mA/cm^2

อย่างไรก็ตาม ถ้าเราสมมติให้ว่าความสว่างจะลดลงเมื่อความถี่สูงกว่า 1 MHz ตามที่พบกันในการมีผลึก LED ทั่วๆ ไป เราจะสามารถคำนวณหาค่าเวลาอายุการรวมตัวแบบเปล่งแสง (radiative recombination life time) ของพาหะที่ถูกฉีดเข้า TFLED ได้ดังนี้

ถ้าเราให้นิยามของความถี่ตัดออฟ (cut-off frequency) (f_c) ว่าเป็นความถี่ที่ความสว่างลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของความสว่างที่ความถี่ต่ำ [31-32] ดังนั้นถ้าเราสมมติว่า f_c ในการมี a-SiN:H TFLED มีค่าอยู่ในช่วง 5-100 Mhz เราจะได้ค่าเวลาอายุการรวมตัวแบบเปล่งแสง (τ) ของพาหะว่าอยู่ในช่วง 10^{-8} - 10^{-9} sec

ผลการทดลองในรูปที่ 3.49 มีความสำคัญต่อการใช้งาน a-SiN:H TFLED เพราะทำให้เราทราบว่าความสว่างของ TFLED จะยังคงที่ แม้ความถี่ของกระแสไฟฟ้าพัลส์จะสูงถึงระดับ 1 MHz

3.4.7 การผลิต a-SiN:H TFLED ที่เปล่งแสงเป็นรูปร่างต่าง ๆ

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงวิธีการประดิษฐ์ a-SiN:H TFLED ที่สามารถเปล่งแสงให้เป็นรูปร่างต่าง ๆ ซึ่งจะใกล้เคียงกับสภาพการใช้งานจริงเป็นดิสเพลย์แบบแบนเรียบ สำหรับรูปร่างภาพ (pattern) ของแสงที่เปล่งออกมานั้น จำแนกตามวัตถุประสงค์ของการใช้งานได้เป็น 2 ชนิดคือ

1. รูปร่างนิ่ง
2. รูปร่างเคลื่อนไหวได้

ในงานวิจัยนี้ได้ประสบความสำเร็จในการประดิษฐ์ TFLED ที่สามารถเปล่งแสงที่มีรูปร่างได้ทั้งสองชนิด ในบทนี้จะขอรายงานผลการทดลองประดิษฐ์ a-SiN:H TFLED ชนิดที่เปล่งแสงรูปร่างนิ่ง ส่วนกรณีรูปร่างเคลื่อนไหวได้นั้น จะกล่าวถึงในบทที่ 7

3.4.7.1 การประดิษฐ์ a-SiN:H TFLED ที่เปล่งแสงภาพนิ่ง

การผลิตให้ TFLED เปล่งแสงเป็นรูปร่างอะไรนั้นได้แก่ การออกแบบให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน TFLED เฉพาะในบริเวณที่ต้องการให้เกิดแสง และไม่ทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลในบริเวณที่ไม่ต้องการแสง หลักการเช่นนี้สามารถออกแบบได้ดังแสดงในรูปที่ 3.50 (a)-(c) ดังนี้

1) ในรูป (a) เป็นการเคลือบชั้นขั้วโปรงแสง ITO และชั้นอะมอร์ฟัส p-i-n ให้เต็มแผ่นกระจก และเคลือบฟิล์มขั้ว Al ให้มีรูปร่างและขนาดเหมือนภาพที่ต้องการให้เปล่งแสง ดังนั้นกระแสไฟฟ้าจึงไหลเฉพาะบริเวณ (cross section) ใต้ Al เท่านั้น วิธีนี้ต้องมีการสร้างแผ่น-มาสค์ (mask) สำหรับขั้ว Al เหมาะสำหรับการสร้างภาพแบบง่าย ๆ เช่น วงกลม สามเหลี่ยม สี่เหลี่ยม ฯลฯ

2) ในรูป (b) เป็นการเคลือบขั้ว ITO ให้มีรูปร่างขนาดเหมือนภาพที่ต้องการให้เปล่งแสง และเคลือบชั้นอะมอร์ฟัส p-i-n และ Al ให้เต็มแผ่นกระจก ดังนั้นกระแสไฟฟ้าจึงไหลเฉพาะบริเวณที่อยู่เหนือ ITO เท่านั้น การสร้างลวดลายของ ITO อาจทำได้โดยการใช่มาสค์ ใน

ขณะเคลือบ ITO หรือเคลือบ ITO ให้เต็มแผ่นกระจกแล้วใช้วิธีโฟโตลิโทกราฟี (photolithography) และตามด้วยการกัด ITO ส่วนที่ไม่ต้องการออกด้วยกรด วิธีนี้เหมาะสำหรับการสร้างภาพแบบยากได้ดี แต่รูปภาพต้องเป็นรูปที่ต่อเนื่องทั้งแผ่น โดยไม่มีการขาดตอน

3) ในรูป (c) เป็นการเคลือบ ITO เต็มแผ่น ตามด้วยเคลือบชั้นฉนวน (เช่น SiO_2 , Y_2O_3 , PbTiO_3 ฯลฯ) ให้มีช่องเปิดเป็นรูปภาพตามต้องการ แล้วเคลือบชั้นอะมอร์ฟัส p-i-n และ Al ให้เต็มแผ่นกระจก วิธีนี้ กระแสไฟฟ้าจะไหลได้เฉพาะบริเวณที่ไม่มีชั้นฉนวนเท่านั้น วิธีนี้เหมาะกับการสร้างภาพที่มีลวดลายยากและเป็นภาพที่ขาดตอนหรือซับซ้อนได้ดี

3.4.7.2 ตัวอย่างผลการประดิษฐ์ TFLED ซึ่งกำหนดรูปภาพด้วยขั้วโลหะ Al

รูปที่ 3.51 แสดงตัวอย่างภาพถ่ายของมาสค์ชนิดโลหะที่มีรูปต่างๆสำหรับการเคลือบขั้ว Al ในกรณีนี้ฟิล์ม ITO และอะมอร์ฟัสจะเคลือบเต็มแผ่นกระจก ดังนั้นภาพของการเปล่งแสงจึงถูกกำหนดด้วยลวดลายของมาสค์นี้

รูปที่ 3.52 แสดงภาพถ่ายของสิ่งประดิษฐ์ TFLED ขณะที่ยังไม่เปล่งแสง

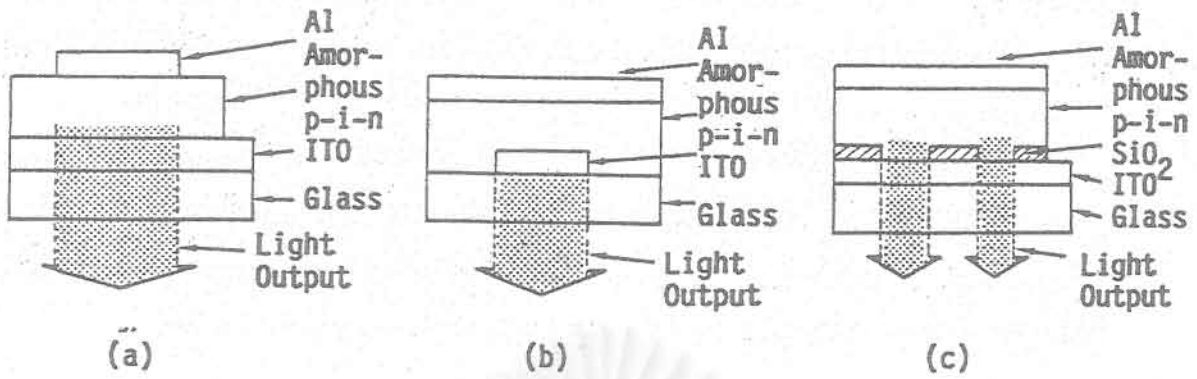
รูปที่ 3.53 แสดงภาพถ่ายของ a-SiN:H TFLED ที่กำลังเปล่งแสงสีแดงรูปสี่เหลี่ยม-ผืนผ้าขนาด $3 \times 5 \text{ mm}^2$

รูปที่ 3.54 (a)-(d) แสดงภาพถ่ายของ a-SiN:H TFLED ที่กำลังเปล่งแสงสีต่างๆ รูปวงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 mm ช่องว่างพลังงานของชั้น i-a-SiN:H ใน TFLED ที่เปล่งแสงสีแดง เหลือง เขียว และขาว เหล่านี้คือ 2.50, 2.80, 3.2 และ 3.6 eV ตามลำดับ ภาพเหล่านี้ถ่ายที่กระแสไฟฟ้าจัดประมาณ 150 mA/cm^2

3.4.7.3 ตัวอย่างผลการประดิษฐ์ TFLED ซึ่งกำหนดรูปภาพด้วยขั้วโปร่งแสง ITO

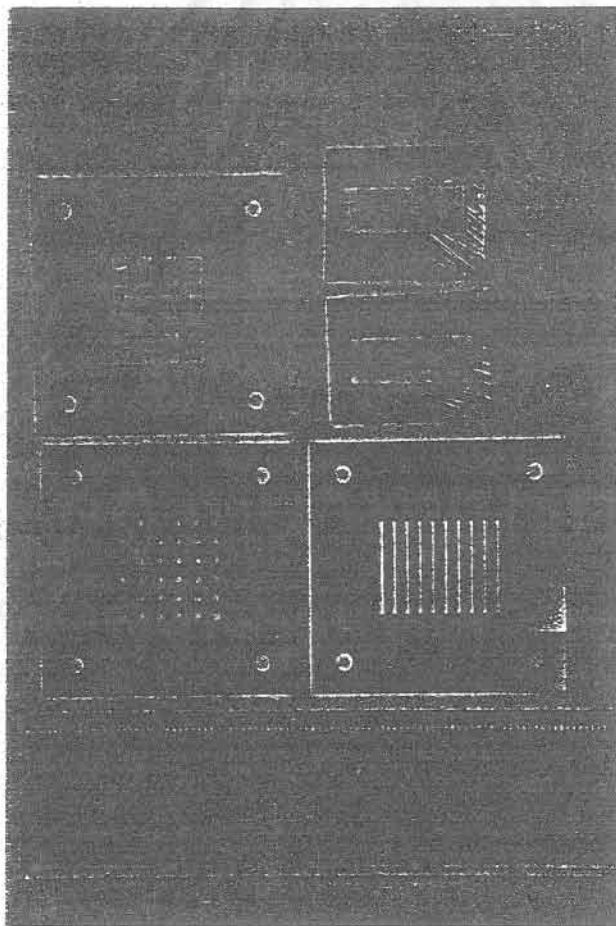
ขั้นตอนการประดิษฐ์ TFLED ที่เปล่งแสงตามรูปร่างของฟิล์ม ITO แสดงในรูปที่ 3.55 เริ่มแรกฟิล์ม ITO ที่เคลือบอยู่บนแผ่นกระจกเต็มแผ่นจะต้องถูกกัดให้เป็นลวดลายด้วยกรดด้วยกระบวนการวิธีโฟโตลิโทกราฟี (photolithography) ดังนี้

- ทาหน้ายา photoresist ลงบนแผ่นกระจก/ITO (photoresist ยี่ห้อ AZ 1350)
- สปินหมุนแผ่นกระจกด้วยความเร็ว 3500 rpm เป็นเวลา 10 วินาที และ 5000 rpm เป็นเวลา 5 วินาที
- เอาเข้าเตาอบ 90°C เป็นเวลา 10 นาที
- ฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตผ่านแผ่นมาสค์ที่ออกแบบไว้แล้วเป็น เวลา 30-45 วินาที
- ล้าง photoresist บริเวณที่ถูกฉายแสงออกด้วยน้ำยา developer
- นำแผ่นกระจกนี้ไปแช่ลงในน้ำยาเคมี $\text{HCL} + \text{FeCl}_3 + \text{H}_2\text{O}$ ประมาณ 15-20 นาที เพื่อกัดฟิล์ม ITO บริเวณที่ไม่มี photoresist
- ตรวจสอบให้แน่ใจว่า สามารถกัดฟิล์ม ITO ได้สวยงามแล้ว
- ล้างน้ำ

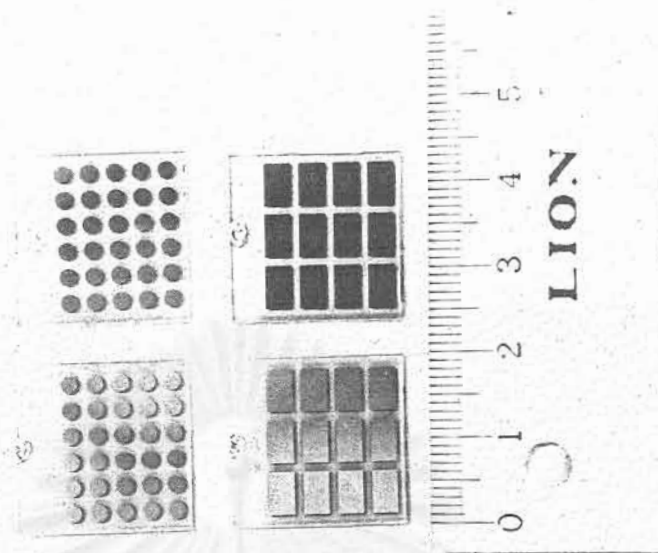


รูปที่ 3.50 ภาพตัดขวางแสดงโครงสร้างของ TFLED ที่เปล่งแสงแบบภาพนิ่ง

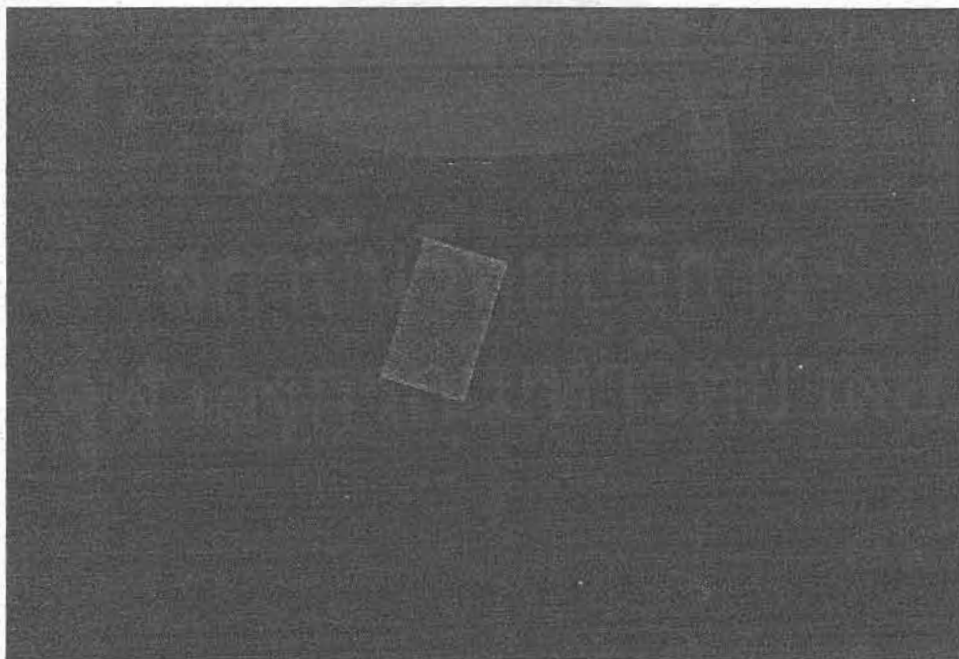
- (a) กำหนดลวดลายของการเปล่งแสงด้วยขั้ว Al
- (b) กำหนดลวดลายของการเปล่งแสงด้วย ITO
- (c) กำหนดลวดลายของการเปล่งแสงด้วยชั้นฉนวน



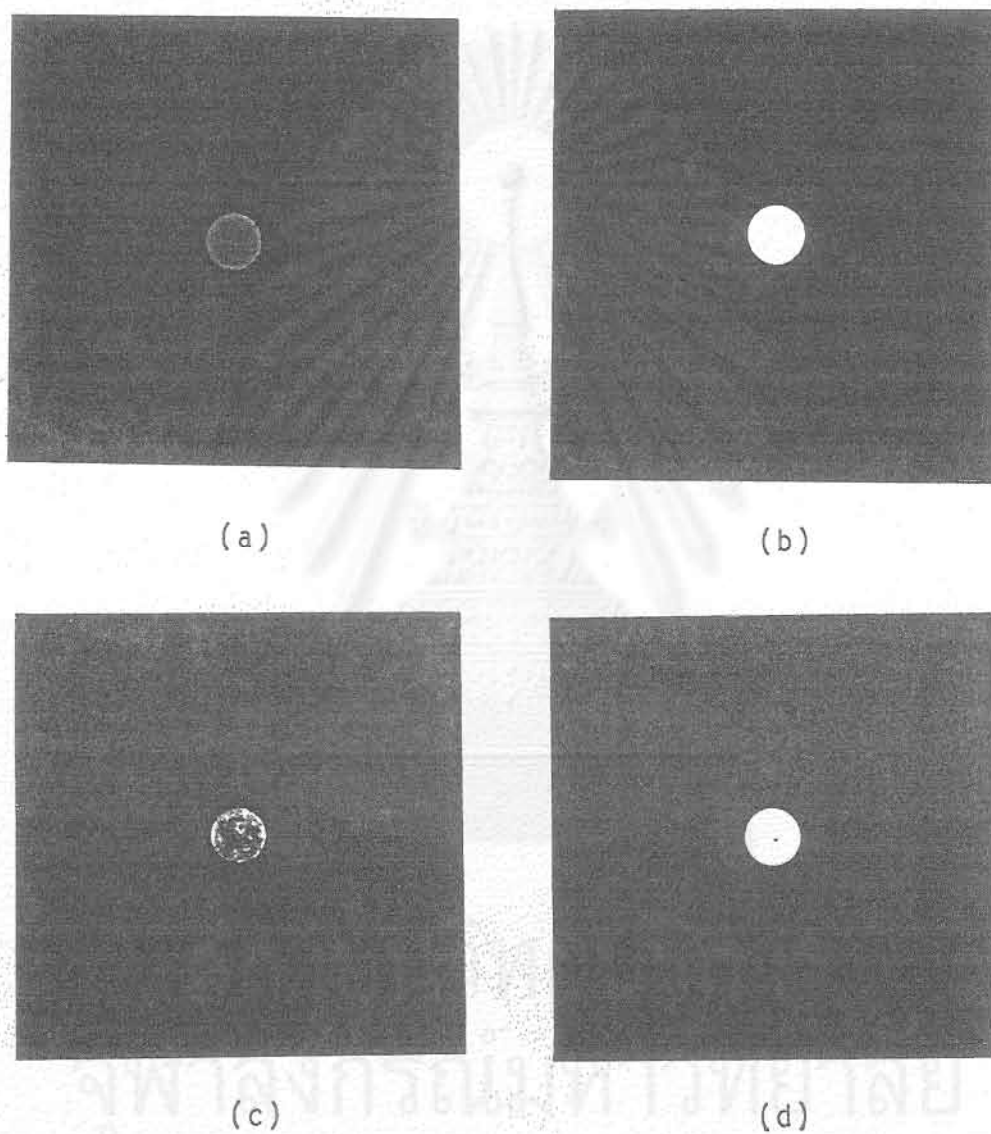
รูปที่ 3.51 ภาพถ่ายของแผ่นโลหะมาสค์ (mask) สำหรับการเคลือบขั้ว Al



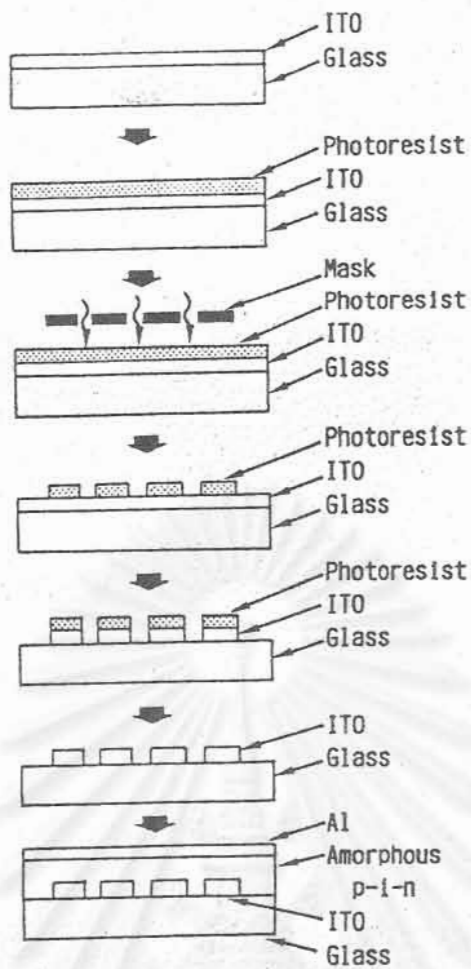
รูปที่ 3.52 ภาพถ่ายของ a-SiN:H TFLED ขณะที่ยังไม่เปล่งแสง โดยมี Al เป็นขั้วรูปวงกลมและรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า



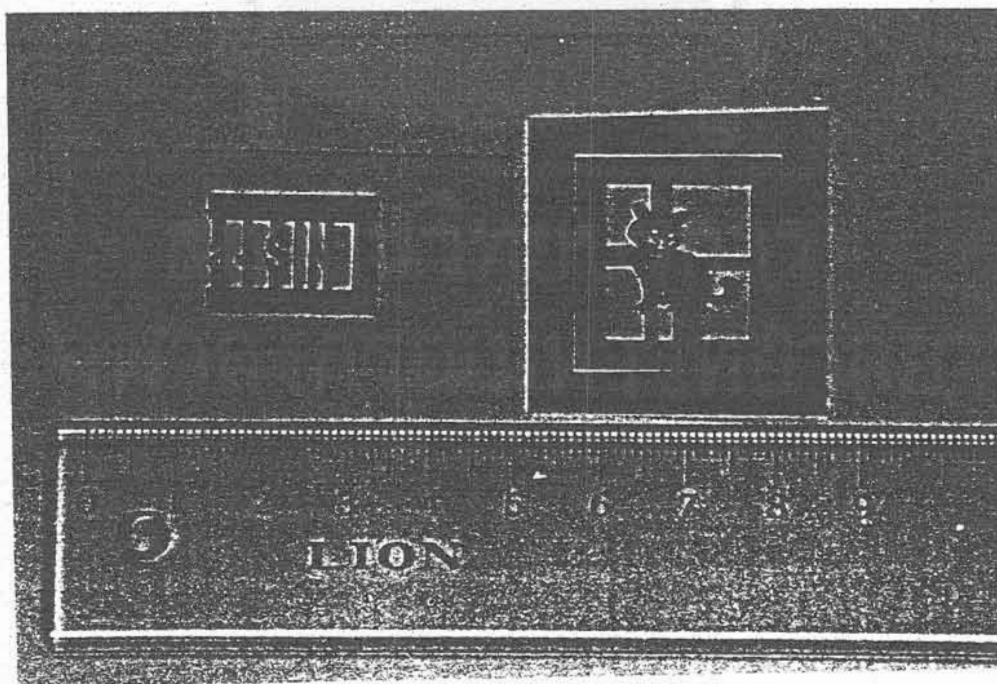
รูปที่ 3.53 ภาพถ่ายของ a-SiN:H TFLED ขณะกำลังเปล่งแสงสีแดง รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด $3 \times 5 \text{ mm}^2$



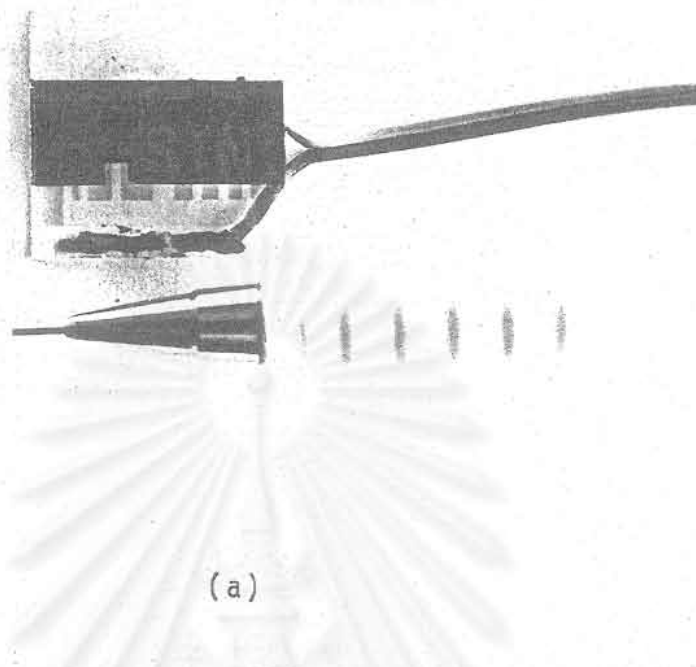
รูปที่ 3.54 ภาพถ่ายของ a-SiN:H TFLED ขณะกำลังเปล่งแสงรูปวงกลม เส้นผ่าศูนย์กลาง 2 mm. และให้แสงสีต่างๆ (a) สีแดง (b) สีเหลือง (c) สีเขียว และ (d) สีขาว



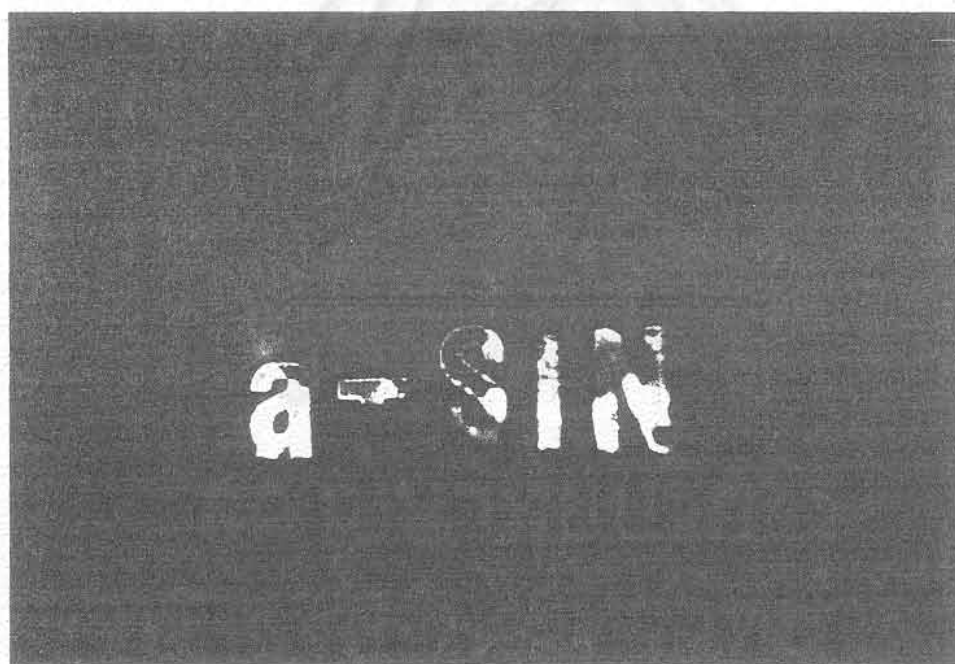
รูปที่ 3.55 ขั้นตอนการประดิษฐ์ TFLED ที่เปล่งแสงมีรูปภาพตามลวดลายของชั้น ITO ลวดลายของ ITO สร้างด้วยวิธีโฟโตลิโธกราฟีและกัดด้วยกรด



รูปที่ 3.56 ภาพตัวอย่างมาสค์ (mask) ที่ใช้ในกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีสำหรับสร้างลวดลายให้ ITO เป็นรูปร่างต่าง ๆ



(a)



(b)

รูปที่ 3.57 ภาพถ่ายของ a-SiN:H TFLED (a) ขณะยังไม่เปล่งแสง และ (b) ขณะกำลังเปล่งแสงสีขาบน้ำเงิน ตัวอักษรมีความสูง 6 mm กำหนดรูปภาพด้วยลวดลายของ ITO

- แช่แผ่นกระจกลงใน acetone เพื่อล้าง photoresist ออกให้หมด
- ตรวจสอบดูว่าได้ลวดลายของฟิล์ม ITO ตามต้องการ
- นำแผ่นกระจกไปล้างด้วย Trichloroethylene, acetone และ methylalcohole

รูปที่ 3.56 แสดงตัวอย่างลักษณะของแผ่น 마스크ที่ใช้ในกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี สำหรับกัด ITO ให้มีลวดลายต่างๆ เมื่อเตรียมแผ่นกระจกที่มีฟิล์ม ITO ลวดลายตามต้องการแล้ว จึงนำไปเคลือบชั้นอะมอร์ฟัสให้เต็มแผ่นกระจก (เว้นพื้นที่ต่อไฟฟ้าไปซ์ ITO เล็กน้อย) และเคลือบฟิล์ม Al ให้เต็มแผ่นโดยมิให้ชิดกับขั้ว ITO

รูปที่ 3.57 แสดงภาพถ่าย a-SiN:H TFLED ขณะยังไม่เปล่งแสง (a) และขณะกำลังเปล่งแสงสีเขาวน้ำเงินลวดลายตัวอักษร "a-SiN" (b) ตัวอักษรสูงประมาณ 6 mm

3.5 สรุป

ได้ประสบความสำเร็จในการคิดค้นออกแบบและประดิษฐ์ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบาง จากวัสดุอะมอร์ฟัสซิลิคอนไนไตรด์ (a-SiN:H) และอะมอร์ฟัสซิลิคอนคาร์ไบด์ (a-SiC:H) เป็นครั้งแรกในโลก ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางนี้มีความบางมากไม่ถึง 1 ไมครอน สามารถเปล่งแสงที่ตามองเห็นได้ตั้งแต่สีแดง สีส้ม สีเหลือง สีเขียว ไปจนถึงสีน้ำเงินขาว นับว่าเป็นไดโอดเปล่งแสงชนิดเดียวในโลกที่สามารถเปล่งแสงสีหลักต่างๆ ได้ครบจากวัสดุเพียงตระกูลเดียวกัน [33-37]

ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางชนิดอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำนี้จัดว่าเป็นสิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดใหม่ที่เกิดขึ้นในโลก ทั้งนี้เพราะว่าไดโอดเปล่งแสงที่มีการผลิตอยู่ในปัจจุบันนั้นทำจากวัสดุผลึกเดี่ยวทั้งหมด ส่วนในงานวิจัยนี้ใช้วัสดุอะมอร์ฟัสทั้งหมด และเป็นการช่วยขยายการประยุกต์ใช้งานวัสดุอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำด้วย

ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางชนิดอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำนี้สามารถเปล่งแสงจากพื้นราบ (surface emission) ได้ จึงมีศักยภาพที่จะนำไปผลิตเป็นจอภาพดิสเพลย์แบบบางเรียบ (flat-panel display) หรือจอโทรทัศน์แบบบางเรียบ (flat-panel TV) ได้ ดังนั้นผลงานวิจัยการคิดค้นในงานวิจัยนี้จึงมีเนื้อหาทั้งทางวิชาการที่ลึกซึ้งและมีศักยภาพสูงในการประยุกต์ผลิตเป็นภาคอุตสาหกรรม

ข้อดีเด่นของไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางชนิดอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำนี้ ได้แก่

- 1) ต้นทุนการผลิตต่ำเพราะใช้วัสดุราคาถูกและผลิตด้วยวิธี CVD ที่อุณหภูมิเพียง 200 °C
- 2) ผลิตเป็นฟิล์มบางพื้นใหญ่ ๆ ได้ง่าย ทำให้ได้ดิสเพลย์ขนาดใหญ่
- 3) ผลิตบนแผ่นฐานวัสดุชนิดต่างๆ ได้ เช่น แผ่นกระจก แผ่นโลหะ แผ่นพลาสติก แผ่นเซรามิก ทำให้ได้ดิสเพลย์รูปร่างและการใช้งานหลากหลาย เป็นต้น

รายละเอียดอื่นๆ ในบทนี้มีดังนี้

1. สามารถปลูกฟิล์ม a-SiN:H และ a-SiC:H ได้สำเร็จตามเป้าหมาย ก๊าซดิบสำหรับ a-SiN:H คือ $\text{SiH}_4 + \text{NH}_3$ ก๊าซดิบสำหรับ a-SiC:H คือ $\text{SiH}_4 + \text{CH}_4$ ฟิล์ม a-SiN:H ชนิด i จะใช้เป็นชั้นเปล่งแสง และฟิล์ม a-SiC:H ชนิด p และ n จะใช้เป็นชั้นฉีดยาในไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางรอยต่อ p-i-n

2. จากผลการศึกษาโครงสร้างของ a-SiN:H ด้วยสเปกตรัมการดูดกลืนแสงอินฟราเรด พบว่าฟิล์มที่ปลูกนั้นมีอะตอมของ Si, N และ H ผสมอยู่ โดยที่การเพิ่มอัตราส่วนของก๊าซ $\text{NH}_3 / (\text{NH}_3 + \text{SiH}_4)$ จะทำให้ปริมาณ N ในฟิล์มมีค่ามากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าอะตอม H นั้นมีการสร้างพันธะทั้งในรูปของพันธะ Si-H และ N-H และ H ได้มีหน้าที่สำคัญในการเป็นตัวช่วยลดขนาดให้เล็กลงด้วย

3. จากผลการศึกษาโครงสร้างของ a-SiN:H ด้วยวิธี ESR (Electron Spin Resonance) พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของก๊าซ $x = \text{NH}_3 / (\text{SiH}_4 + \text{NH}_3)$ จาก 0 ถึง 0.71 จะทำให้ขนาด (dangling bond) มีปริมาณเพิ่มขึ้นจาก $5 \times 10^{15} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$ ไปเป็น $1 \times 10^{18} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$ อย่างไรก็ตามปริมาณของขนาดระดับนี้ยังไม่มากจนเกินไปที่จะทำให้ฟิล์ม a-SiN:H ไม่เปล่งแสง จึงยังอยู่ในวิสัยที่จะใช้ a-SiN:H เป็นชั้นเปล่งแสงในสิ่งประดิษฐ์ได้

4. เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของก๊าซ $x = \text{NH}_3 / (\text{SiH}_4 + \text{NH}_3)$ จาก 0.3 ไปถึง 0.75 ทำให้ช่องว่างพลังงานของ a-SiN:H เพิ่มจาก 2.05 eV ไปเป็น 3.1 eV ข้อมูลนี้สำคัญมากในการนำไปใช้ออกแบบผลิตไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบาง

5. เนื่องจาก a-SiN:H จะใช้เป็นชั้นเปล่งแสงในไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางจึงได้มีการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (PL) ของ a-SiN:H อย่างละเอียด โดยศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขก๊าซและสเปกตรัม PL ศึกษา excitation spectrum ของ PL และศึกษาอิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่มีต่อประสิทธิภาพของ PL

6. ผลการวัดสเปกตรัม PL ที่อุณหภูมิห้องของ a-SiN:H ชนิดบริสุทธิ์ที่มีค่าช่องว่างพลังงานระหว่าง 2.07 eV-2.90 eV พบว่าสเปกตรัม PL ของ a-SiN:H เป็นรูปภูเขาที่มียอดเดียวที่ค่อนข้างกว้าง (มี FWHM ประมาณ 0.2-0.4 eV) เมื่อช่องว่างพลังงานเพิ่มขึ้น สเปกตรัมจะเคลื่อนไปทางความยาวคลื่นที่สั้นลง และสีของการเปล่งแสงของ PL จะเปลี่ยนจากสีแดง-ส้ม-สีเหลืองและไปสู่สีเขียว ความสว่างของ PL ที่อุณหภูมิห้องของ a-SiN:H มีค่าสูงเพียงพอที่จะสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่า ข้อมูลเช่นนี้เป็นประโยชน์มากต่อการประดิษฐ์ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางในขั้นต่อไป

7. ผลการวิเคราะห์การเปล่งแสง PL ของ a-SiN:H พบว่าเกิดจากการรวมตัวของอิเล็กตรอนและโฮลแบบเปล่งแสงผ่านระดับ localized states ที่อยู่ในช่องว่างพลังงาน จากการวิเคราะห์การขึ้นกับความยาวคลื่นของแสงที่ใช้กระตุ้น PL พบว่าศูนย์กลางการรวมตัวแบบเปล่งแสงใน a-SiN:H มีกระจายอยู่เป็นหลายระดับใน localized states

8. ผลการวัดอิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่ป้อนเข้าสู่ a-SiN:H ที่มีต่อ PL พบว่า ถ้าสนามไฟฟ้ามีค่าสูงจะทำให้ประสิทธิภาพการเปล่งแสง PL ลดลง ดังนั้นจึงทำให้ได้แนวทางการออกแบบไดโอดเปล่งแสงว่า ควรออกแบบให้มีสนามไฟฟ้าตกคร่อมชั้นเปล่งแสงให้น้อยที่สุด

9. ได้มีการออกแบบและผลิตไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางให้มีโครงสร้าง glass/ITO/p-a-SiC:H/i-a-SiN:H/n-a-SiC:H/Al สิ่งประดิษฐ์นี้เปล่งแสงให้เห็นเมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าแบบกระแสตรงประมาณ 5-10 V หรือพัลส์ในลักษณะไบแอสตาม

10. การประดิษฐ์ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางซึ่งมี a-SiN:H เป็นชั้นเปล่งแสงนั้นนับเป็นครั้งแรกในโลก

11. ได้มีการศึกษาลักษณะสมบัติพื้นฐานของไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางอย่างละเอียด ได้แก่ลักษณะสมบัติไดโอด (J-V) กลไกการฉีดพาหะและกลไกการรวมตัวของพาหะ

12. จากขีดจำกัดในการโด๊ป a-SiC:H ทำให้ช่องว่างพลังงานของชั้น p- และ n-a-SiC:H ได้คงที่ไว้ที่ 2.0 eV ในขณะที่ช่องว่างพลังงานของชั้นเปล่งแสง i-a-SiN:H ที่ให้แสงมองเห็นมีค่าสูงกว่า 2.2 eV จึงทำให้ช่องว่างพลังงานของชั้นเปล่งแสงมีค่ามากกว่าของชั้นฉีดพาหะ และจากผลการวิเคราะห์การฉีดพาหะพบว่า อิเล็กตรอนและโฮลถูกฉีดจากชั้น n และ p ให้วิ่งทันเนลผ่านกำแพงศักย์ที่รอยต่อของ i/n และ p/i ตามลำดับ

13. ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางชนิดนี้เปล่งแสงด้วยหลักการการฉีดพาหะ (carrier injection EL) กล่าวคือ โฮลและอิเล็กตรอนจะถูกฉีดจากชั้น p และ n ด้วยการไบแอสตาม (ใช้แรงดัน ไฟฟ้าประมาณ 5-10 V) ให้ไหลเข้าสู่ชั้น i a-SiN:H และรวมตัวกันในชั้น i และเปล่งเป็นแสงออกมาจากชั้น i การเปล่งแสงจากไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางชนิดอะมอร์ฟิสนี้ เกิดจากการรวมตัวแบบเปล่งแสงของโฮลและอิเล็กตรอนผ่านระดับ localized states (tail states) ในชั้น i a-SiN:H

14. จากการวัด J-V พบว่า สิ่งประดิษฐ์ที่ผลิตแสดงคุณสมบัติของการเป็นไดโอดเป็นที่น่าพอใจ

15. การเปล่งแสงจากไดโอดเปล่งแสงสว่างเพียงพอที่จะเห็นได้ด้วยตาในห้องที่มีแสงไฟอ่อนๆ ความสว่างที่ได้อยู่ในช่วง 0.1-1 cd/m² (ใช้ DC current 100-1000 mA/cm²)

16. สีของการเปล่งแสงสามารถกำหนดได้จากขนาดของช่องว่างพลังงานของชั้น i-a-SiN:H ในงานวิจัยนี้สามารถผลิตไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางชนิดอะมอร์ฟิสนี้ให้เปล่งแสงสีแดง สีส้ม สีเขียว และสีขาวน้ำเงินได้สำเร็จ

17. จากการหาค่าความหนาที่เหมาะสมของชั้น p, i และ n ทั้งทางทฤษฎีและการทดลอง ได้ผลดังนี้ 150 Å, 500 Å และ 300 Å ตามลำดับ

18. จากผลการวัดความสัมพันธ์ระหว่างความสว่างและความถี่ของกระแสไฟฟ้าพัลส์พบว่า ความสว่างคงที่เมื่อความถี่ต่ำกว่า 1 MHz และความสว่างเริ่มลดลงเมื่อความถี่สูงกว่า 1 MHz ข้อมูลนี้เป็นการยืนยันได้ว่าไดโอดเปล่งแสงชนิดนี้สามารถทำงานเป็นดิสเพลย์ซึ่งใช้ความถี่สแกนทั่วไประดับ kHz ได้

19. ประสบความสำเร็จในการผลิตให้ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางสามารถเปล่งแสงเป็นรูปร่างต่าง ๆ ได้ด้วยพื้นที่การเปล่งแสงตั้งแต่ตารางมิลลิเมตรไปจนถึงระดับตารางเซนติเมตร

เอกสารอ้างอิง

1. D. Kruangam, W. Boonkosum, P. Siamchai and S. Panyakeow, "Amorphous Visible-Light Thin Film LED Having a-SiN:H As a Luminescent Layer", 1992 International Conference on Solid State and Materials, Tsukuba, Japan, August 26-28 (1992) 563.
2. W. Boonkosum, D. Kruangam and S. Panyakeow, "Amorphous Visible-Light Thin Film Light-Emitting Diode Having a-SiN:H as a Luminescent Layer", Japanese Journal of Applied Physics, Part I, 4 (1993) 1534.
3. D.C. Bartle, D.C. Andrew, J.D. Grange, P.G. Harris, A.D. Trigg and D.K. Wickenden, "Plasma Enhanced Deposition of Silicon Nitride for Use As an Encapsulant for Silicon Ion-Implanted Gallium Arsenide", Vacuum, 34 (1984) 315.
4. Y. Ishii, T. Aoki and S. Miyazaki, "Silicon Nitride Film Deposition by Hot-Wall Plasma-Enhanced CVD for GaAs LSI", J. Vacuum Science & Technology, B2 (1984) 49.
5. M.J. Helix, K.V. Vaidyanathan, B.G. Streetman, H.B. Dietrich and P.K. Chatterjee, "R.F. Plasma Deposition of Silicon Nitride Layers", Thin Solid Films, 55 (1978) 143.
6. P.M. Cambell and B.J. Baliga, in Silicon Nitride Insulating Films, V.J. Kapoor and H.J. Stein editors, Electrochemical Society (Pennington, N.J. 1983) 150.
7. G.J. Valco and V.J. Kapoor, in Silicon Nitride Thin Insulating Films, V.J. Kapoor and H.J. Stein editors, Electrochemical Society (Pennington, N.J. 1983) 128.
8. K. Katch, M. Yasui and H. Watanabe, Jpn. J. Appl. Phys., 22 (1983) L321.
9. J. Woodward, D.C. Cameron, L.D. Irving and G.R. Jones, "The Deposition of Insulators onto InP Using Plasma-Enhanced Chemical Vapour Deposition", Thin Solid Films, 85 (1981) 61.
10. R. Hezel, K. Blumenstock and R.J. Schorner, "Interface States and Fixed Charges in MNOS Structures with APCVD and Plasma Silicon Nitride", J. Electrochem. Soc., 131 (1984) 1979.
11. M. Maeda and H. Nakamura, "Insulation Degradation and Anomalous Etching Phenomena in Silicon Nitride Films Prepared by Plasma-Enhanced Deposition", Thin Solid Films, 112 (1984) 279.

12. D. Summers, "Process for Two-Layer Gold IC Metallization", *Solid State Technol.*, **26** (1983) 137.
13. G.W. Turner and M.K. Conners, "Use of Plasma-Deposited SiN As an Oxidation Mask in the Fabrication of GaAs Shallow-Homojunction Solar Cells", *J. Electrochem. Soc.*, **131** (1984) 1211.
14. C. Blaauw and B.J. Emmerstrofer, "CVD SiO₂ and Plasma SiN_x Films As Zn Diffusion Masks for GaAs", *J. Electron. Materials*, **13** (1984) 251.
15. B.R. Soller, C.R. Snider and R.F. Shuman, *J. Electrochem. Soc.*, **131** (1984) 868.
16. K. Suzuki, J. Matsui and T. Torikai, "SiN Membrane Masks for X-Ray Lithography", *J. Vac. Sci. & Technol.*, **20** (1982) 191.
17. R. Hezel and R. Schorner, "Plasma Si Nitride - A Promising Dielectric to Achieve High-Quality Silicon MIS/IL Solar Cells", *J. Appl. Phys.*, **52** (1981) 3076.
18. H. Watanabe, K. Katoh and M. Yasui, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **23** (1984) 1.
19. Japan Electronic Industry Promotion Society editor, *Databook on Amorphous Silicon Semiconductors*, (1986) p.181.
20. W.E. Spear and P.G.LeComber, *Solid State Comm.*, **17** (1975) 1193.
21. J.D. Joannopoulos and G. Lucovsky editors, *The Physics of Hydrogenated Amorphous Silicon* volumes I, II, (Springer-Verlag, 1984).
22. R.A. Street, *Hydrogenated Amorphous Silicon*, (Cambridge University Press, 1991) p. 308.
23. ดุสิต เครื่องาม และคณะ, รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ระยะที่ 1 เรื่อง "ไดโอดเปล่งแสง-แบบฟิล์มบางชนิดวัสดุอะมอร์ฟิซสารกึ่งตัวนำ", ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, จุฬาฯ, เสนอฝ่ายวิจัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (2536) 223 หน้า.
24. R.A. Street, *Hydrogenated Amorphous Silicon*, (Cambridge University Press, 1991) p. 95.
25. ดุสิต เครื่องาม และคณะ, รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์เรื่อง "เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟิซซิลิกอน", ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาฯ เสนอสภาวิจัยแห่งชาติ (2533) 181 หน้า.
26. J. Tauc, *Amorphous and Liquid Semiconductors*, (Plenum Press, London and New York, 1974) p. 159.
27. P.K. Bhat, T.M. Searl, I.G. Austin and R.A. Gibson, "Low Energy Excitation of Photoluminescence in a-Si:H: Temperature and Intensity Effects", *Solid State Comm.*, **45-6** (1983) 481.

28. W.C. Chen, B.J. Feldman, J. Bajaj, F.M. Tong and G.K. Wong, "Thermalization Gap Excitation Photoluminescence and Optical Absorption in Amorphous Silicon-Hydrogen Alloys", *Solid State Comm.*, **38** (1981) 357.
29. S.M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices*, 2nd Ed. (John Wiley and Sons, 1981) p. 402.
30. Cyril Hilsum editor, *Handbook on Semiconductors*, vol.4 (North-Holland, 1981) p. 565.
31. Cyril Hilsum editor, *Handbook on Semiconductors*, vol.4 (North-Holland, 1981) p. 607.
32. Henry Kressel, J.K. Butler, *Semiconductor Lasers and Heterojunction LEDs*, (Academic Press, 1977) p. 491.
33. D. Kruangam, W. Boonkosum, P. Siamchai and S. Panyakeow, "Amorphous Visible-Light Thin Film LED Having a-SiN:H As a Luminescent Layer", Proc. 1992 International Conference on Solid State and Materials, Tsukuba, Japan, August 26-28 (1992) 563.
34. W. Boonkosum, D. Kruangam and S. Panyakeow, "Amorphous Visible-Light Thin Film Light-Emitting Diode Having a-SiN:H as a Luminescent Layer", *Japanese Journal of Applied Physics, Part I*, **32** (1993) 1534.
35. W. Boonkosum, D. Kruangam and S. Panyakeow, "Visible-Light Amorphous Silicon-Nitride Thin Film Light Emitting Diode", Symposium Proceedings of Spring Meeting of Materials Research Society (MRS), vol. 297-Amorphous Silicon Technology 1993-, San Francisco, U.S.A, April 12-16 (1993) 1005.
36. W. Boonkosum, D. Kruangam and S. Panyakeow, "Novel Flat-Panel Display Made of Amorphous SiN:H/SiC:H Thin Film LED", International Symposium on Physical Concepts and Materials for Novel Optoelectronic Device Application, EUROPTO Series, SPIE vol. 1985, Trieste, Italy, May 24-27 (1993) 40.
37. D. Kruangam, W. Boonkosum and S. Panyakeow, "Visible Thin Film Light Emitting Diode Using a-SiN:H/a-SiC:H Heterojunctions", *Journal of Non-Crystalline Solids*, **164-166** (1993) 809.

บทที่ 4

การพัฒนาไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำ (TFLED) โดยมี a-SiC:H เป็นชั้นเปล่งแสง

บทนำ

ในบทที่ 3 ได้กล่าวถึงการพัฒนาไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบาง (TFLED) โดยมี a-SiN:H เป็นชั้นเปล่งแสงแล้ว นับเป็นการพัฒนาสิ่งประดิษฐ์ที่น่าสนใจและเป็นการบุกเบิกการใช้งาน a-SiN:H ให้เป็นประโยชน์ด้านการเปล่งแสงเป็นครั้งแรก แต่อย่างไรก็ตามความสว่างที่ได้จาก a-SiN:H TFLED ยังต่ำมากเพียงระดับ $0.1 \sim 1 \text{ cd/m}^2$ จึงยังมีความจำเป็นต้องปรับปรุงความสว่างให้สูงขึ้น (ความสว่างสำหรับดิสเพลย์ที่ใช้งานได้จริงควรมีค่าระดับ 50 cd/m^2 ขึ้นไป)

วัสดุอะมอร์ฟัสซิลิคอนอัลลอยที่มีขนาดช่องว่างพลังงานกว้างกว่า 1.8 eV ซึ่งเหมาะสมในการเปล่งแสงที่มองเห็นอีกชนิดหนึ่งได้แก่ อะมอร์ฟัสซิลิคอนคาร์ไบด์ (a-SiC:H) ในอดีตที่ผ่านมาได้มีการนำ a-SiC:H ไปใช้เป็นชั้นหน้าต่าง (window layer) ให้เซลล์แสงอาทิตย์ [1] และใช้เป็นชั้นอิมิตเตอร์ให้ทรานซิสเตอร์ และใช้เป็นชั้นกั้นพาหะ (blocking layer) ให้กับดรัมสำหรับเครื่องถ่ายภาพเอกสาร [2-3] และล่าสุดนี้ D. Kruangam ได้รายงานผลความสำเร็จในการพัฒนาไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางอะมอร์ฟัสจากรอยต่อ p-i-n ของวัสดุ a-SiC:H [4-5] สิ่งประดิษฐ์ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางอะมอร์ฟัสนี้ได้รับความสนใจจากนักวิทยาศาสตร์ในหลายประเทศ ได้มีการทดลองหาแนวทางในการปรับปรุงความสว่างตลอดจนคุณสมบัติพื้นฐานของไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบาง [6-8]

ในบทนี้ ได้ทดลองหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเตรียมฟิล์ม a-SiC:H และสามารถประยุกต์ใช้งาน a-SiC:H ชนิดบริสุทธิ์เป็นชั้นเปล่งแสงในไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางได้สำเร็จ ความสว่างสูงสุดของ a-SiC:H TFLED ที่ได้คือ $1-2 \text{ cd/m}^2$ และดีกว่าความสว่างของ a-SiN:H TFLED ซึ่งมีค่า $0.7-0.8 \text{ cd/m}^2$ ซึ่งกล่าวมาแล้วในบทที่ 3 ในตอนท้ายของบทนี้จะรายงานตัวอย่างการประดิษฐ์ดิสเพลย์ a-SiC:H TFLED ซึ่งเปล่งแสงเป็นรูปร่างต่างๆขนาดพื้นที่หลายตารางเซนติเมตร ผลการวัดความสัมพันธ์ระหว่างความสว่างและความถี่ของกระแสไฟฟ้าพัลส์พบว่า ความถี่คัตออฟของ a-SiC:H TFLED มีค่าประมาณ 500 kHz ซึ่งเป็นค่าที่สูงเพียงพอต่อการใช้งานแบบสแกนด้วยวงจรรออิเล็กทรอนิกส์

4.1 การผลิตและผลการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบาง a-SiC:H

ฟิล์มบาง a-SiC:H ชนิดบริสุทธิ์ซึ่งจะใช้เป็นชั้นเปล่งแสงใน TFLED นั้น ผลิตด้วยวิธี glow discharge plasma CVD ตามรายละเอียดที่ได้กล่าวแล้วในบทที่ 2 แต่สิ่งสำคัญคือ เนื่องจากต้องการ a-SiC:H ที่มีช่องว่างพลังงานกว้าง ดังนั้นจึงได้ใช้ก๊าซ C_2H_4 เป็นก๊าซสำหรับคาร์บอน ตารางที่ 4.1 แสดงเงื่อนไขการผลิต a-SiC:H ชนิดบริสุทธิ์

จากการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงอินฟราเรดพบว่าในฟิล์ม a-SiC:H มีอะตอมสร้างพันธะกันทั้งในรูปแบบของ Si-C, C-H และ Si-H จำนวนของอะตอม H มีประมาณ 10-20 % ของอะตอมทั้งหมดในฟิล์ม และจำนวนของอะตอม C มีประมาณ 5-30 % เมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนก๊าซ $x = C_2H_4 / (SiH_4 + C_2H_4) = 0.4 \sim 0.9$

ตารางที่ 4.1 เงื่อนไขการผลิต a-SiC:H ชนิดบริสุทธิ์สำหรับใช้เป็นชั้นเปล่งแสงใน TFLED

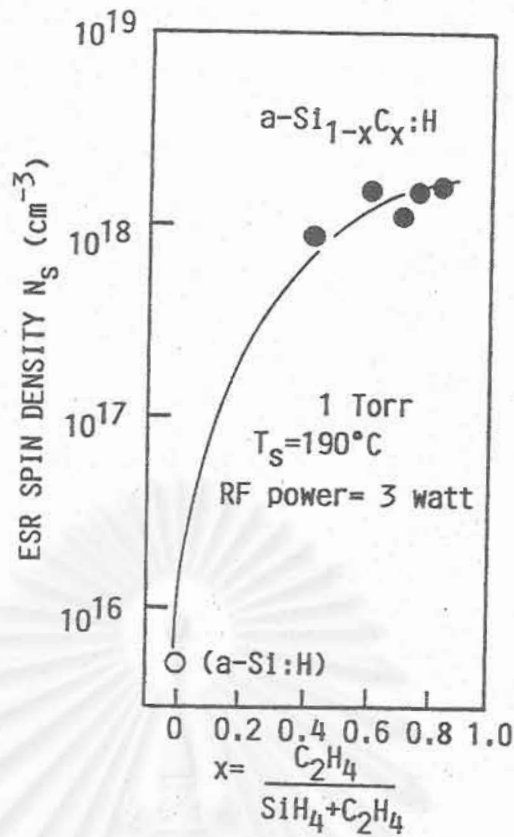
RF power	3 watt
Substrate Temperature	190 °C
Gas Pressure	1 Torr
Gas Fraction	$x = C_2H_4 / (SiH_4 + C_2H_4) = 0 \sim 0.9$

รูปที่ 4.1 แสดงผลการวัดความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนของแขนขาด (สปิน) และอัตราส่วนก๊าซ x ผลการทดลองพบว่า การเพิ่มอัตราส่วนก๊าซ x ทำให้จำนวนแขนขาดใน a-SiC:H เพิ่มขึ้น จากรูปนี้จำนวนแขนขาดของ a-SiC:H มีค่าประมาณ 10^{18} ตัว/cm³ ซึ่งมีค่ามากกว่ากรณี a-Si:H (x = 0) ถึงระดับร้อยเท่า แต่อย่างไรก็ตามจากผลการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ได้ข้อมูลว่า a-SiC:H สามารถเปล่งแสงได้ดีพอสมควร

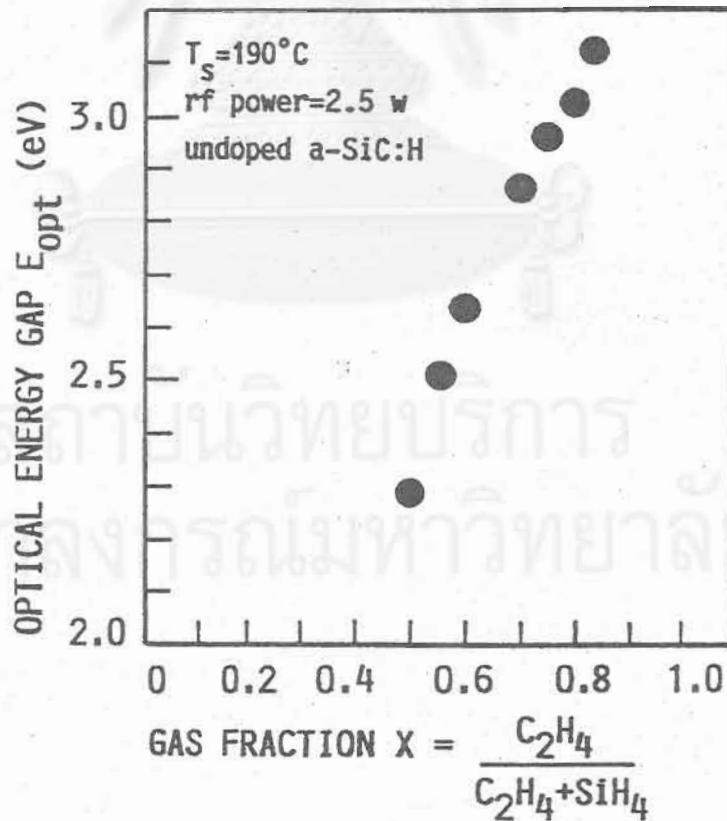
รูปที่ 4.2 แสดงผลการวัดความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างพลังงานของ a-SiC:H และอัตราส่วนก๊าซ x ช่องว่างพลังงานเหล่านี้กำหนดจากวิธีของ Tauc's Plot [9] จากรูปนี้พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนก๊าซ x จาก 0.4-0.9 จะทำให้ช่องว่างพลังงานของ a-SiC:H เพิ่มจาก 2.3 เป็น 3.1 eV ข้อมูลนี้ชี้ให้เห็นว่าเงื่อนไขการผลิตในตารางที่ 4.1 สามารถให้ฟิล์มที่มีช่องว่างอยู่ในช่วงแสงมองเห็นได้ตามต้องการ

สำหรับข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะของ tail states หรือความยุ่งเหยิง (randomness) ของเน็ตเวิร์คของอะตอมใน a-SiC:H สามารถดูได้จากค่า B value ของ Tauc's Plot ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.3 จากรูปที่ 4.3 พบว่าเมื่อเพิ่มค่า x กล่าวคือเพิ่มปริมาณของอะตอม C จะทำให้ B มีค่าลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เมื่อมีอะตอม C จำนวนมากขึ้น จะทำให้เน็ตเวิร์คของอะตอมมีความยุ่งเหยิงมากขึ้น

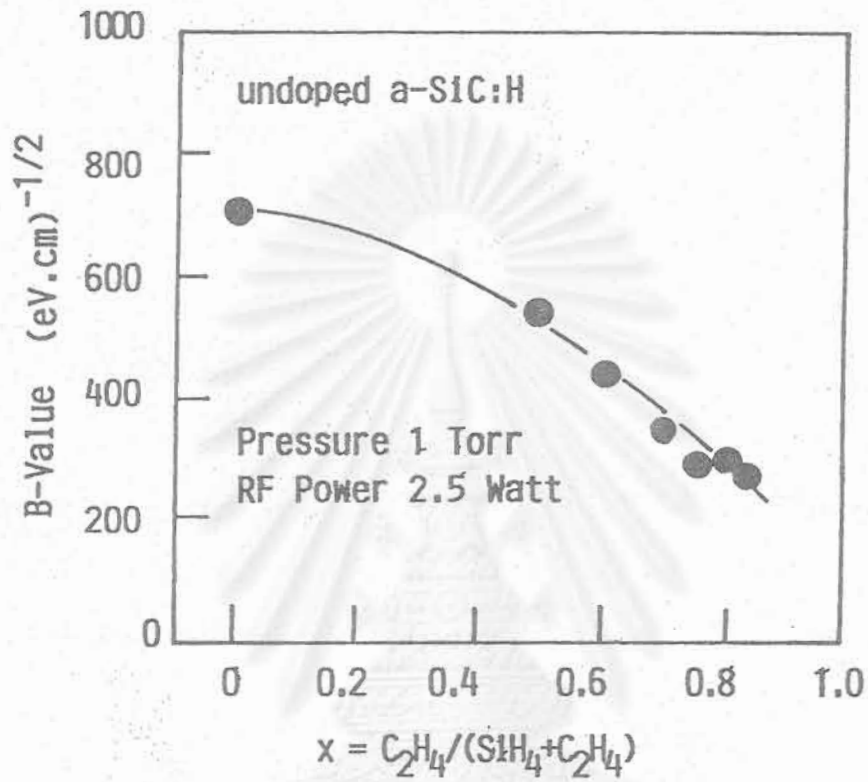
รูปที่ 4.4 แสดงสเปกตรัมการเปล่งแสงโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (PL) ของ a-SiC:H ชนิดบริสุทธิ์ซึ่งวัดที่อุณหภูมิห้อง พารามิเตอร์ในรูปนี้คือ ช่องว่างพลังงานซึ่งเปลี่ยนจาก 2.3 eV-3.0 eV แสงที่ใช้กระตุ้น PL คือ แสงเลเซอร์ชนิด HeCd ความยาวคลื่น 325 nm ผลการวัดพบว่าสเปกตรัม PL มีลักษณะกว้างโดยมี FWHM ประมาณ 0.2~0.4 eV เมื่อช่องว่างพลังงานกว้างขึ้น สเปกตรัมจะเคลื่อนไปทางพลังงานโฟตอนที่มีค่ามากขึ้น ขณะเดียวกันสีของ PL ก็เปลี่ยน



รูปที่ 4.1 ผลการวัดความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนของแขนขาด (สปิน) และอัตราส่วนก๊าซ $x = \text{C}_2\text{H}_4 / (\text{SiH}_4 + \text{C}_2\text{H}_4)$

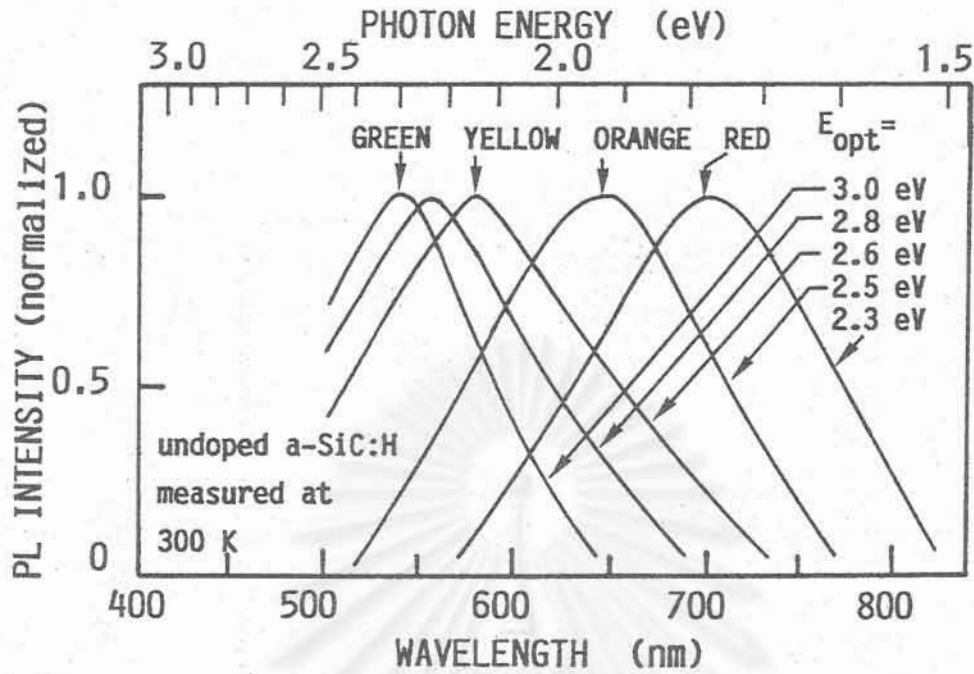


รูปที่ 4.2 ผลการวัดความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างพลังงานของ $a\text{-SiC:H}$ และอัตราส่วนก๊าซ $x = \text{C}_2\text{H}_4 / (\text{SiH}_4 + \text{C}_2\text{H}_4)$ ช่องว่างพลังงานกำหนดจากวิธีของ Tauc's Plot

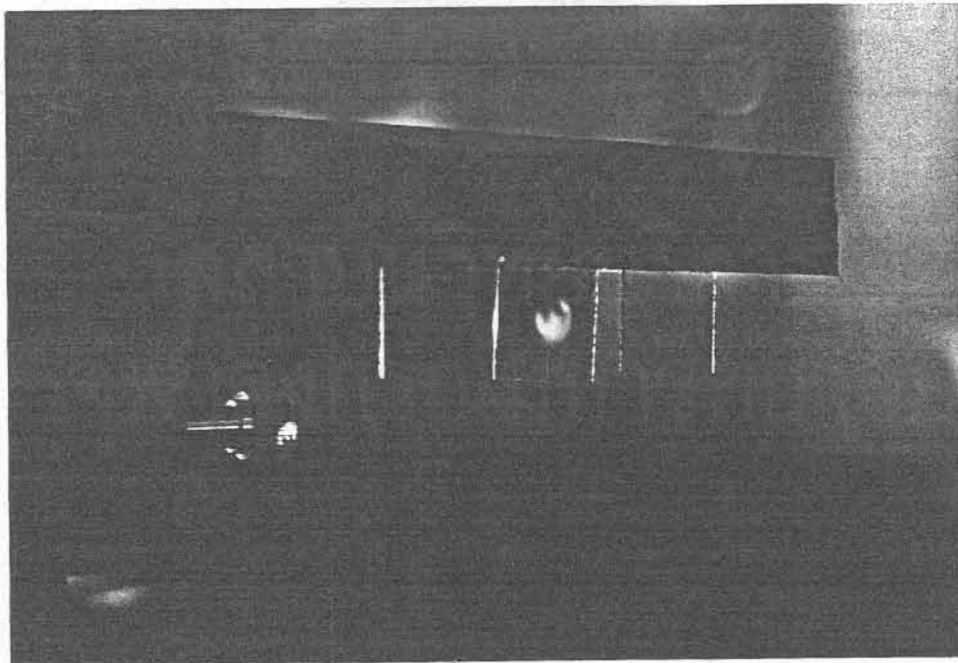


รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง B value และอัตราส่วนก๊าซ $x = \text{C}_2\text{H}_4 / (\text{SiH}_4 + \text{C}_2\text{H}_4)$ ที่ใช้ปลูกฟิล์ม a-SiC:H

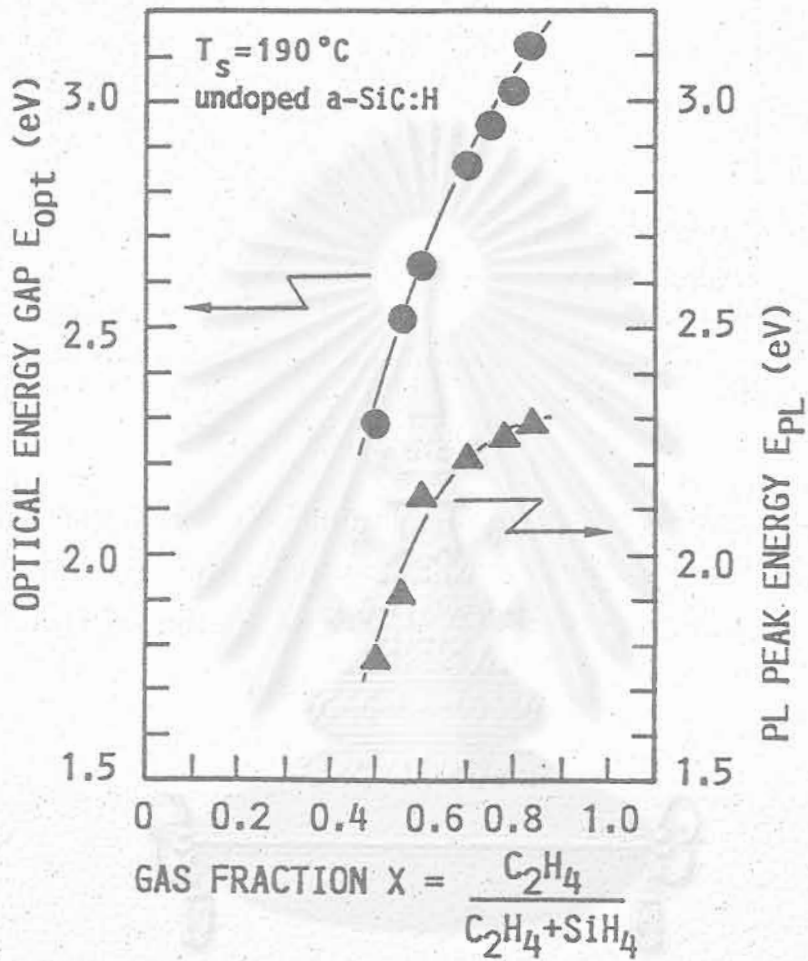
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.4 สเปกตรัมการเปล่งแสงโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (PL) ของ a-SiC:H ชนิดบริสุทธิ์ ซึ่งวัดที่อุณหภูมิห้อง พารามิเตอร์ในรูปนี้คือ ช่องว่างพลังงานซึ่งเปลี่ยนจาก 2.3 eV-3.0 eV แสงที่ใช้กระตุ้น PL คือ แสงเลเซอร์ชนิด HeCd 325 nm



รูปที่ 4.5 ตัวอย่างภาพถ่ายการเปล่งแสง PL สีเหลืองของ a-SiC:H ที่มีช่องว่างพลังงาน ประมาณ 2.8 eV (การวัด PL ได้ใช้ฟิลเตอร์ตัดแสงเลเซอร์ HeCd)



รูปที่ 4.6 สรุปลความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างพลังงาน และตำแหน่งของค่ายอดพลังงานของสเปกตรัม PL และอัตราส่วนของก๊าซ $x = C_2H_4 / (C_2H_4 + SiH_4)$ สำหรับฟิล์ม a-SiC:H ชนิดบริสุทธิ์

จากสีแดง สีส้ม สีเหลืองไปเป็นสีเขียว การเปล่งแสง PL เหล่านี้สว่างมากพอที่สามารถสังเกตเห็นได้ในห้องที่มีแสงสว่าง

รูปที่ 4.5 แสดงตัวอย่างภาพถ่ายการเปล่งแสง PL สีเหลืองของ a-SiC:H ที่มีช่องว่างพลังงานประมาณ 2.8 eV (การวัด PL ได้ใช้ฟิลเตอร์ตัดแสงเลเซอร์ HeCd)

รูปที่ 4.6 แสดงสรุปความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างพลังงาน และตำแหน่งของค่ายอดพลังงานของสเปกตรัม PL และอัตราส่วนของก๊าซ $x = C_2H_4/(C_2H_4+SiH_4)$ ที่ใช้ในการปลูกฟิล์ม a-SiC:H ชนิดบริสุทธิ์ สิ่งที่น่าสนใจประการหนึ่งคือ ค่ายอดพลังงานของสเปกตรัม PL นั้นจะมีค่าน้อยกว่าช่องว่างพลังงานเสมอ ข้อมูลนี้แสดงให้เห็นว่าการรวมตัวแบบเปล่งแสงของพาหะนั้นเกิดขึ้นที่ระดับ localized states ซึ่งกระจายอยู่ในช่องว่างพลังงานของ a-SiC:H คุณสมบัติเช่นนี้คล้ายกับกรณีของ a-SiN:H ซึ่งได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3

4.2 การผลิตและลักษณะสมบัติพื้นฐานของ TFLED โครงสร้าง

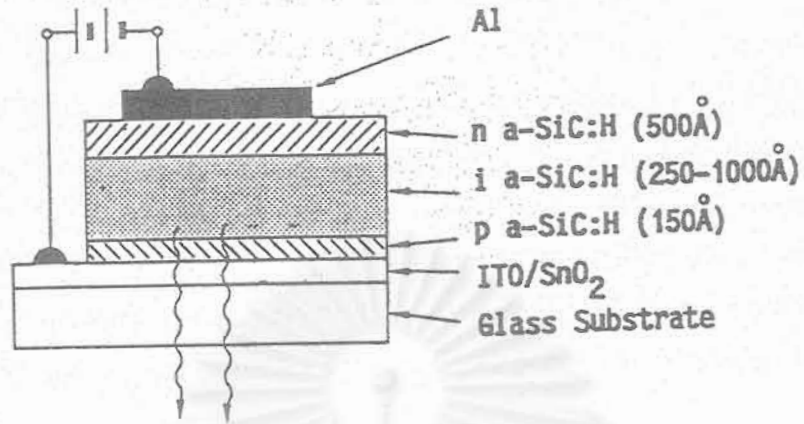
p-a-SiC:H/ i-a-SiC:H/n-a-SiC:H

รูปที่ 4.7 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของ a-SiC:H TFLED ซึ่งพัฒนาในบทนี้ โดยมีโครงสร้างคือ แผ่นกระจก/p-a-SiC:H/i-a-SiC:H/n-a-SiC:H/Al การไบแอสตามเพื่อฉีดพาหะทำโดยป้อนแรงดันไฟฟ้าบวกเข้าด้าน ITO และป้อนแรงดันไฟฟ้าลบเข้าด้าน Al ภายใต้การไบแอสตามเช่นนี้ โฮลและอิเล็กตรอนจะถูกฉีดจากชั้น p และ n เข้าสู่ชั้น i และโฮลและอิเล็กตรอนจะรวมตัวกันในชั้น i การเปล่งแสงจะเกิดขึ้นที่ชั้น i ความหนาของชั้นต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 4.7

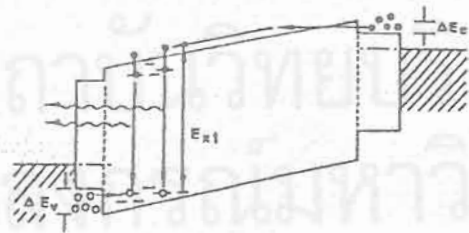
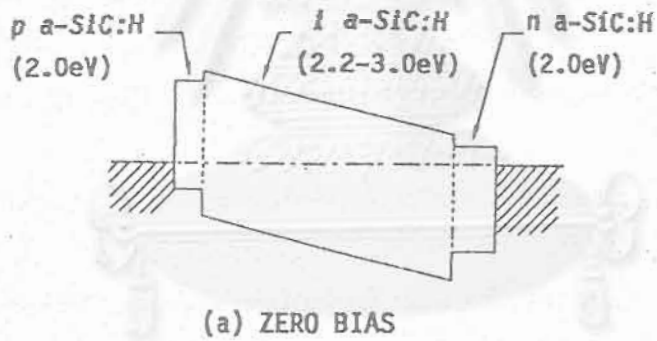
จากข้อมูลในหัวข้อที่ 4.1 เคยพบว่า a-SiC:H จะเปล่งแสง PL ที่ตามองเห็นเมื่อช่องว่างพลังงานกว้างกว่าประมาณ 2.2 eV ดังนั้นช่องว่างพลังงานของชั้น i-a-SiC:H จึงต้องมีค่ามากกว่า 2.2 eV แต่ขณะเดียวกันจากบทที่ 3 เราเคยทราบว่าจากข้อจำกัดในการได้ป a-SiC:H นั้นทำให้เราต้องใช้วัสดุ a-SiC:H ชนิด p และ n ที่มีช่องว่างพลังงานคงที่ที่ 2.0 eV ดังนั้นช่องว่างพลังงานของชั้น i จึงกว้างกว่าของชั้น p และ n

รูปที่ 4.8 แสดงลักษณะแถบพลังงานของ a-SiC:H TFLED ในสภาพสมดุลเชิงความร้อน (a) และสภาพไบแอสตาม (b) ในรูปนี้เนื่องจากช่องว่างพลังงานของชั้น i กว้างกว่าของชั้น p และ n ดังนั้นจึงมีกำแพงศักย์กั้นการไหลของอิเล็กตรอนและโฮล พาหะจากชั้น p และ n ต้องใช้วิธีทันเนลลิ่งทะลุผ่านกำแพงศักย์เข้าสู่ชั้น i

ตารางที่ 4.2 แสดงเงื่อนไขการผลิต a-SiC:H TFLED โดยชั้น p-i-n a-SiC:H ผลิตด้วยวิธี glow discharge plasma CVD



รูปที่ 4.7 โครงสร้างพื้นฐานของ a-SiC:H TFLED รอยต่อ p-i-n



รูปที่ 4.8 แผนภูมิแถบพลังงานของ a-SiC:H TFLED รอยต่อ p-i-n
(a) สภาพสมดุลเชิงความร้อน (b) สภาพไบแอสตาม

ตารางที่ 4.2 เงื่อนไขการประดิษฐ์ a-SiC:H TFLED รอยต่อ p-i-n ด้วยวิธี glow discharge plasma CVD

RF power	3 watt
Substrate Temperature	190 °C
Gas Pressure	1 Torr
Gas สำหรับชั้น	p : $\text{SiH}_4 + \text{CH}_4 + \text{B}_2\text{H}_6$ i : $\text{SiH}_4 + \text{C}_2\text{H}_4$ n : $\text{SiH}_4 + \text{CH}_4 + \text{PH}_3$

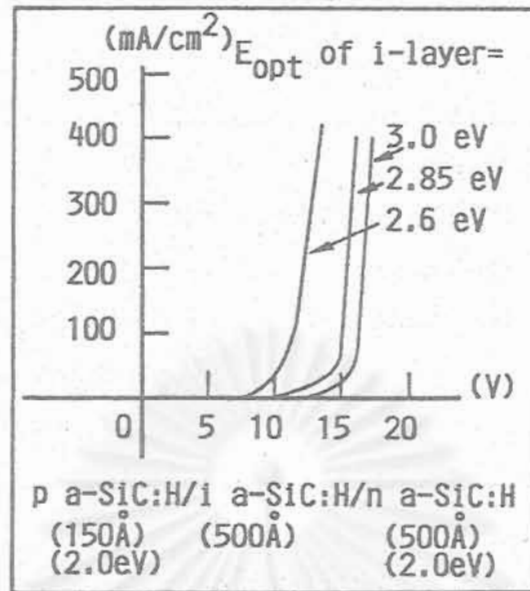
รูปที่ 4.9 แสดงลักษณะสมบัติความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของ a-SiC:H TFLED ความหนาของชั้น p, i, n คือ 150 Å, 500 Å และ 500 Å ตามลำดับ พารามิเตอร์ในรูปที่ 4.9 นี้คือ ช่องว่างพลังงานของชั้น i (ช่องว่างพลังงานของชั้น p และ n คงที่ 2.0 eV) ผลการวิจัยทำให้ทราบว่าเมื่อช่องว่างพลังงานของชั้น i เพิ่มขึ้น จะทำให้แรงดันไฟฟ้าเทอร์โวลต์ (V_{th}) ซึ่งกระแสเริ่มไหล จะเพิ่มขึ้น ในรูปนี้แรงดันไฟฟ้าเทอร์โวลต์มีค่าอยู่ในช่วง 10-15 V ความหนาของชั้น i นี้จะกำหนดให้คงที่ที่ 500 Å ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการวิเคราะห์ในบทที่ 3

สาเหตุที่แรงดันไฟฟ้าเทอร์โวลต์ในรูปที่ 4.9 เพิ่มขึ้นเมื่อช่องว่างพลังงานของชั้น i กว้างขึ้น อาจมีสาเหตุมาจาก

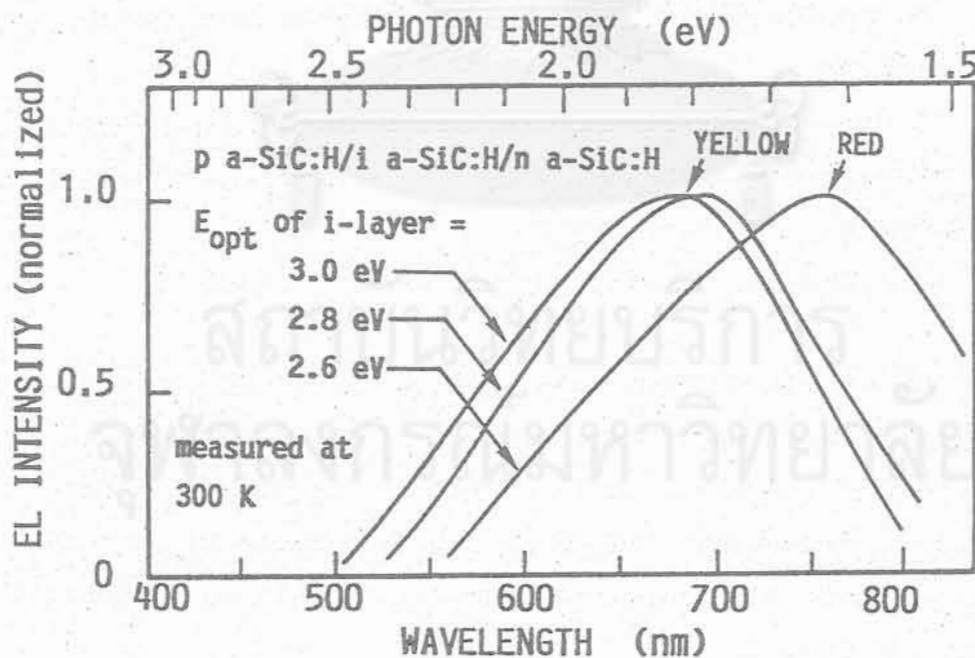
- 1) เมื่อช่องว่างพลังงานของชั้น i กว้างขึ้น ทำให้กำแพงศักย์ (ซึ่งพาหะต้องทะลุผ่าน) สูงขึ้น ดังนั้นประสิทธิภาพของการทันเนลลิงจึงลดลง ดังนั้นจึงต้องอาศัยแรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้น เพื่อขับให้พาหะทะลุผ่านกำแพงศักย์เข้าสู่ชั้น i
- 2) ความต้านทานของชั้น i สูงขึ้น (เนื่องจากมีคาร์บอนมากขึ้น)

รูปที่ 4.10 แสดงสเปกตรัมการเปล่งแสงของ a-SiC:H TFLED ที่อุณหภูมิห้อง กระแสไฟฟ้าฉีดของ TFLED แต่ละตัวประมาณ 100 mA/cm^2 พารามิเตอร์ในรูปนี้คือช่องว่างพลังงานของชั้น i ซึ่งได้แก่ 2.6 eV, 2.8 และ 3.0 eV ตามลำดับ TFLED ซึ่งช่องว่างพลังงานของชั้น i มีค่า 2.6 eV เปล่งแสงสีแดง และ TFLED ซึ่งช่องว่างพลังงานของชั้น i มีค่า 2.8-3.0 eV เปล่งแสงสีเหลืองส้ม สเปกตรัมเปล่งแสงของ TFLED ทุกตัวมีลักษณะกว้างโดยมีค่า FWHM ประมาณ 0.3~0.4 eV

การเปรียบเทียบค่ายอดพลังงานของสเปกตรัมการเปล่งแสงของ TELED ในรูปที่ 4.10 และของสเปกตรัม PL ของฟิล์ม a-SiC:H ในรูปที่ 4.4 พบว่าค่ายอดพลังงานของสเปกตรัมของ TFLED จะมีค่าน้อยกว่าของสเปกตรัม PL ของฟิล์ม a-SiC:H เสมอ สามารถอธิบายสาเหตุได้เช่นเดียวกับกรณี a-SiN:H TFLED โดยการพิจารณาความแตกต่างของการกระตุ้นพาหะดังนี้



รูปที่ 4.9 ลักษณะสมบัติความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของ a-SiC:H TFLED ความหนาของชั้น p, i, n คือ 150 Å, 500 Å และ 500 Å ตามลำดับ พารามิเตอร์ในรูปนี้คือ ช่องว่างพลังงานของชั้น i (ช่องว่างพลังงานของชั้น p และ n คงที่ที่ 2.0 eV)



รูปที่ 4.10 สเปกตรัมการเปล่งแสงของ a-SiC:H TFLED วัดที่อุณหภูมิห้อง กระแสไฟฟ้านัดเข้า TFLED แต่ละตัวประมาณ 100 mA/cm^2 พารามิเตอร์ในรูปนี้คือช่องว่างพลังงานของชั้น i ซึ่งได้แก่ 2.6 eV, 2.8 และ 3.0 eV ตามลำดับ TFLED ซึ่งช่องว่างพลังงานของชั้น i มีค่า 2.6 eV เปล่งแสงสีแดง และ TFLED ซึ่งช่องว่างพลังงานของชั้น i มีค่า 2.8-3.0 eV เปล่งแสงสีเหลืองส้ม

ในกรณีการวัดสเปกตรัม PL ของฟิล์ม a-SiC:H นั้น ใช้แสงเลเซอร์ HeCd ที่มีพลังงานโฟตอนเท่ากับ 3.8 eV ซึ่งมีความมากกว่าช่องว่างพลังงานในการกระตุ้นพาหะ แต่ในกรณี TFLED นั้น พาหะโฮลถูกฉีดจากแถบวาเลนซ์ในชั้น p เข้าสู่ระดับ deep localized states ในชั้น i และโฮลรวมตัวกับอิเล็กตรอนในระดับ deep localized states (ก่อนที่โฮลจะกระโดดขึ้นไปสู่แถบวาเลนซ์ในชั้น i) กล่าวคือ ในการทำงานของ TFLED นั้น เป็นการกระตุ้นพาหะภายในช่องว่างพลังงานเท่านั้น

รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสว่างและความหนาแน่นของกระแสที่ฉีดเข้า a-SiC:H TFLED พารามิเตอร์ในรูปที่ 4.11 คือช่องว่างพลังงานของชั้น i ผลการวิจัยพบว่า ในขณะที่กระแสมีค่าน้อยๆ ความสว่างจะเพิ่มแบบเชิงเส้นกับกระแส แต่เมื่อกระแสมีค่ามากขึ้น ความสว่างจะเริ่มอิ่มตัว ความสว่างสูงสุดที่ได้จาก a-SiC:H TFLED คือระดับ 1-2 cd/m^2 (สูงกว่า a-SiN:H TFLED ซึ่งมีความสว่างระดับ 0.1-0.5 cd/m^2)

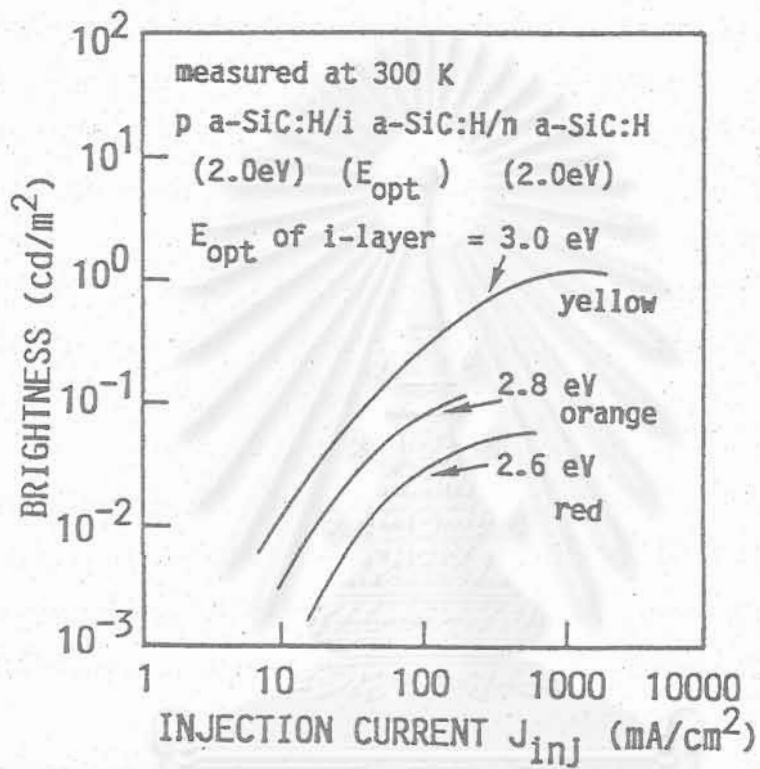
สิ่งที่น่าสังเกตข้อหนึ่งในรูปที่ 4.11 คือ ความสว่างมีค่ามากขึ้นเมื่อช่องว่างพลังงานของชั้น i-a-SiC:H กว้างขึ้น ปรากฏการณ์นี้คงอธิบายได้ว่า เมื่อช่องว่างพลังงานกว้างขึ้น ระดับ localized states ของ i-a-SiC:H ซึ่งทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางการรวมตัวแบบเปล่งแสงจะมีจำนวนมากขึ้น ในแง่การใช้งานนับว่าเป็นคุณสมบัติที่เอื้ออำนวยเป็นอย่างยิ่ง

แสงที่เปล่งจาก a-SiC:H TFLED สามารถสังเกตเห็นได้ในห้องที่มีแสงสลัวๆ (อย่างไรก็ตาม ในการใช้งานเป็นดิสเพลย์นั้น ความสว่างของ a-SiC:H TFLED จะต้องมีความถึงระดับ 50 $\text{cd/m}^2 \sim 100 \text{cd/m}^2$ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องปรับปรุงความสว่างของ a-SiC:H TFLED ให้ดีขึ้นอีก ในรายงานนี้ จะกล่าวถึงเทคโนโลยีและผลการปรับปรุงความสว่างของ a-SiC:H TFLED ในบทที่ 6)

ในการใช้งาน a-SiC:H TFLED เป็นดิสเพลย์ ลักษณะสมบัติที่สำคัญอีกข้อหนึ่งคือความเร็วในการตอบสนองต่อกระแสไฟฟ้าพัลส์ รูปที่ 4.12 แสดงตัวอย่างลักษณะรูปคลื่น (wave form) ของแสงเอาร์ทพุทของ a-SiC:H TFLED ซึ่งตอบสนองต่อกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่มีความถี่ 500 Hz-20kHz จากรูปพบว่ารูปคลื่นของแสงเอาร์ทพุทสามารถตอบสนองได้ดีต่อกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่มีความถี่ระดับร้อย~หลายสิบลิบ kHz ช่วงเวลาขาขึ้นและช่วงเวลาลงของ รูปคลื่นมีค่าอยู่ในระดับ 10-20 μsec ลักษณะสมบัติเช่นนี้เพียงพอต่อการใช้งานเป็นดิสเพลย์ทั่ว ๆ ไป หนึ่งช่องว่างพลังงานของชั้น i ในรูปนี้เท่ากับ 3.0 eV และ TFLED เปล่งแสงสีส้มเหลือง

รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสว่างของแสงเอาร์ทพุทของ a-SiC:H TFLED และความถี่ของกระแสไฟฟ้าพัลส์ ในการวัดใช้กระแสไฟฟ้าพัลส์ด้วยค่าแอมพลิจูด 16 mA และ duty cycle 50 % แกนในแนวตั้งเป็นค่าเปรียบเทียบกับค่าความสว่างที่ความถี่กระแสไฟฟ้าพัลส์ต่ำประมาณ 500 Hz จากรูปที่ 4.13 พบว่าความสว่างของ a-SiC:H TFLED คงที่ตลอดช่วงความถี่ 500 Hz-50 kHz และความสว่างจะลดลงเมื่อความถี่กระแสไฟฟ้าพัลส์สูงเกิน 1200 kHz

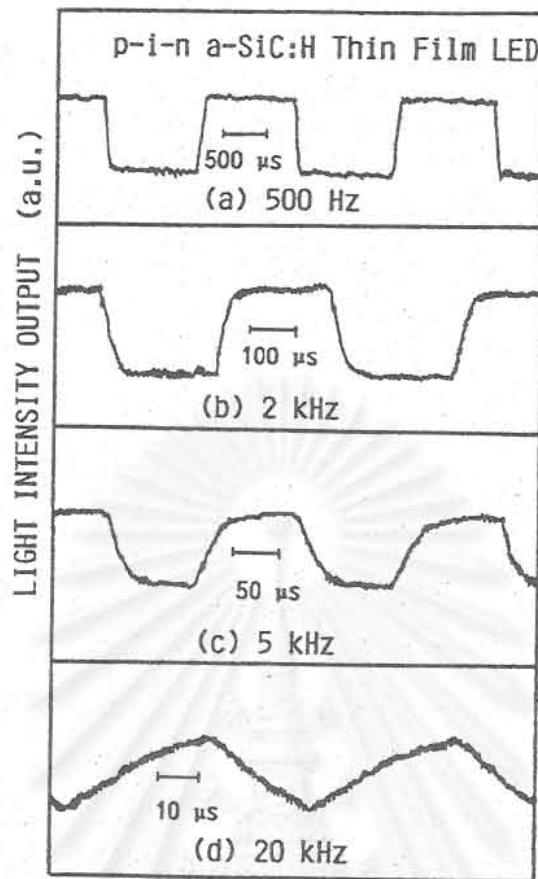
โดยทั่วไป นิยามของความถี่คัตออฟ f_c (cut-off frequency) คือค่าความถี่ที่ความสว่างลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของความสว่างที่ความถี่ต่ำ [10] นั่นคือ



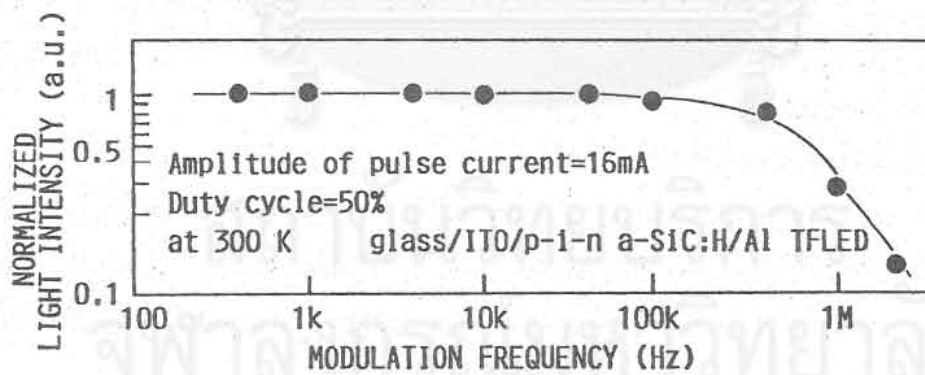
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความสว่างและความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ฉีดเข้า a-SiC:H TFLED พารามิเตอร์ในรูปคือช่องว่างพลังงานของชั้น i

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.12 ลักษณะรูปคลื่น (wave form) ของแสงเอาร์ทพุทของ a-SiC:H TFLED ซึ่งตอบสนองต่อกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่มีความถี่ระหว่าง 500 Hz-20 kHz



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของแสงเอาร์ทพุทของ a-SiC:H TFLED และความถี่ของกระแสไฟฟ้าพัลส์ ในการวัดใช้กระแสไฟฟ้าพัลส์ด้วยค่าแอมพลิจูด 16 mA และ duty cycle 50% แกนในแนวดิ่งเป็นค่าเปรียบเทียบกับค่าความสว่างที่ความถี่กระแสไฟฟ้าพัลส์ต่ำประมาณ 500 Hz

$$P^2(f_c) = \frac{1}{2} P^2(f = 0) \quad (4.1)$$

$$P(f_c) = 0.7P(f = 0) \quad (4.2)$$

เราจะได้

$$f_c = 1 / (2\pi\tau) \quad (4.3)$$

โดยที่ τ คือเวลาอายุของพาหะที่รวมตัวแบบเปล่งแสง

จากรูปที่ 4.13 นี้ ความถี่คัตออฟมีค่าประมาณ 500 kHz ดังนั้นจากสมการที่ (4.3) เวลาอายุของพาหะที่รวมตัวแบบเปล่งแสงมีค่าประมาณ 0.3 μ sec

เนื่องจากในการใช้งานดิสเพลย์เช่นกรณีโทรทัศน์และมอนิเตอร์ของคอมพิวเตอร์ ความถี่ของการสแกนจุดภาพแต่ละจุดใช้ประมาณ 20-30 kHz เนื่องจากความสว่างของ a-SiC:H TFLED ยังคงที่ในช่วงนี้ ดังนั้นจากข้อมูลในรูปที่ 4.13 นี้จึงสามารถกล่าวได้ว่า a-SiC:H TFLED สามารถใช้งานเป็นดิสเพลย์ได้โดยไม่มีปัญหาเรื่องความถี่ของการสแกนจุดภาพแต่อย่างใด

4.3 การผลิต a-SiC:H TFLED ให้เปล่งแสงรูปร่างต่าง ๆ

a-SiC:H TFLED สามารถผลิตให้เปล่งแสงที่มีรูปร่างต่าง ๆ ได้โดยใช้เทคนิคเช่นเดียวกับกรณี a-SiN:H TFLED ตามที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 ลวดลายของภาพสามารถกำหนดได้จาก

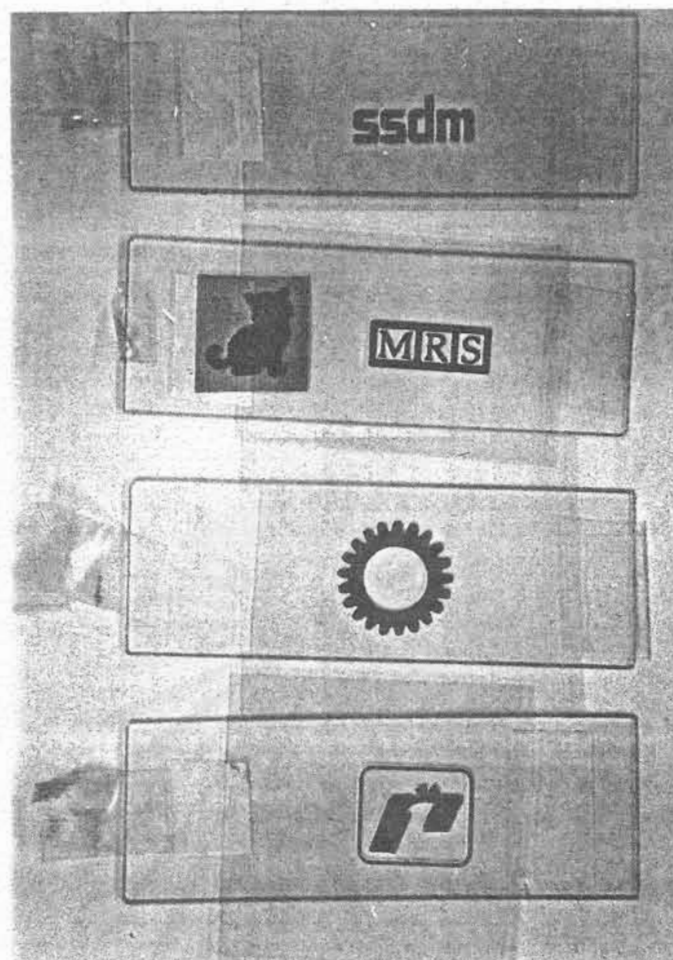
1. ลักษณะของฟิล์มชั้น Al ด้านหลัง หรือ
2. ลักษณะของฟิล์มชั้น ITO ด้านหน้า

ฟิล์ม ITO สามารถสร้างให้มีลวดลายต่าง ๆ ได้โดยการเคลือบ ITO ให้เต็มแผ่นกระจก ต่อจากนั้นจึงใช้เทคนิคโฟโตลิโทกราฟี (photolithography) และการเอชซิง (etching) เพื่อกัด ITO ส่วนที่ไม่ต้องการออก บริเวณที่มี ITO จะเป็นบริเวณที่มีกระแสไฟฟ้าไหลและเปล่งแสง [11-13]

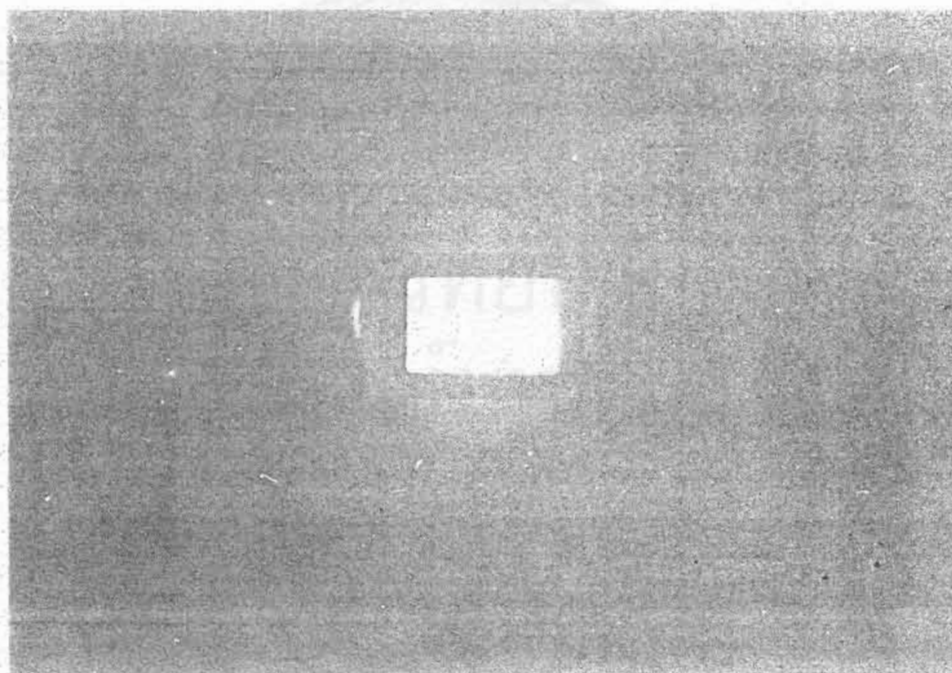
รูปที่ 4.14 แสดงตัวอย่างแผ่นมาสค์ (mask) ซึ่งได้สร้างขึ้นในงานวิจัยสำหรับกระบวนการโฟโตลิโทกราฟี

รูปที่ 4.15 แสดงตัวอย่างภาพถ่าย a-SiC:H TFLED สีเหลืองรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 3 mm \times 5 mm ลวดลายสี่เหลี่ยมนี้ถูกกำหนดด้วยฟิล์มชั้น Al ซึ่งเคลือบด้วยวิธี evaporation ใช้มาสค์ทั้งสแตนเจาะเป็นร่องรูปสี่เหลี่ยม

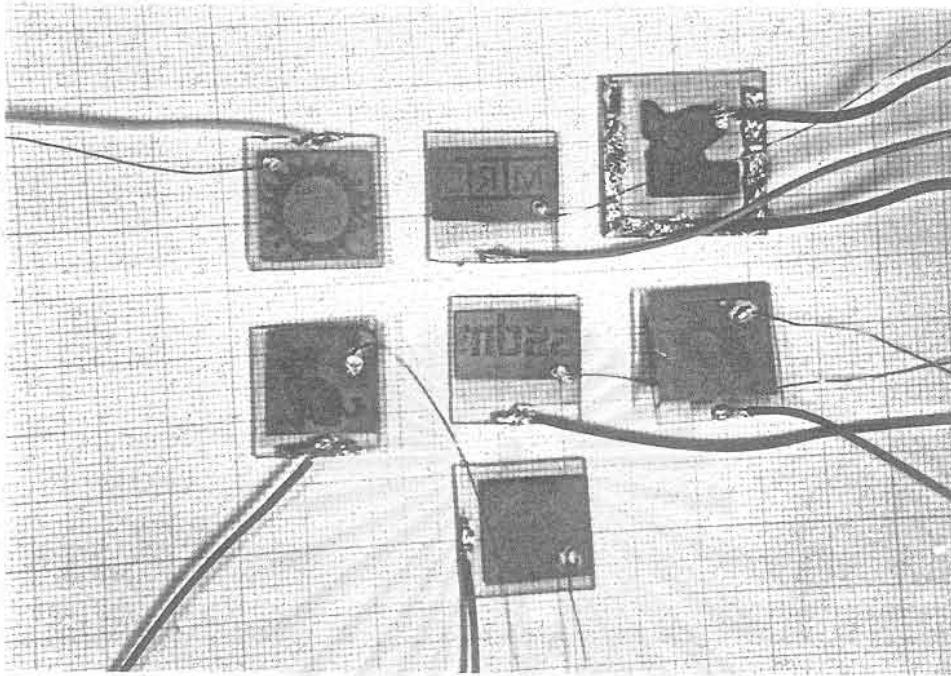
รูปที่ 4.16 แสดงภาพถ่าย TFLED ขณะยังไม่เปล่งแสง ใน TFLED แต่ละตัว จะสังเกตเห็นมีสายไฟฟ้าบัดกรีไว้ 2 เส้น โดยเส้นหนึ่งเป็นสายแรงดันไฟฟ้าบวกต่อกับ ITO และอีกเส้น



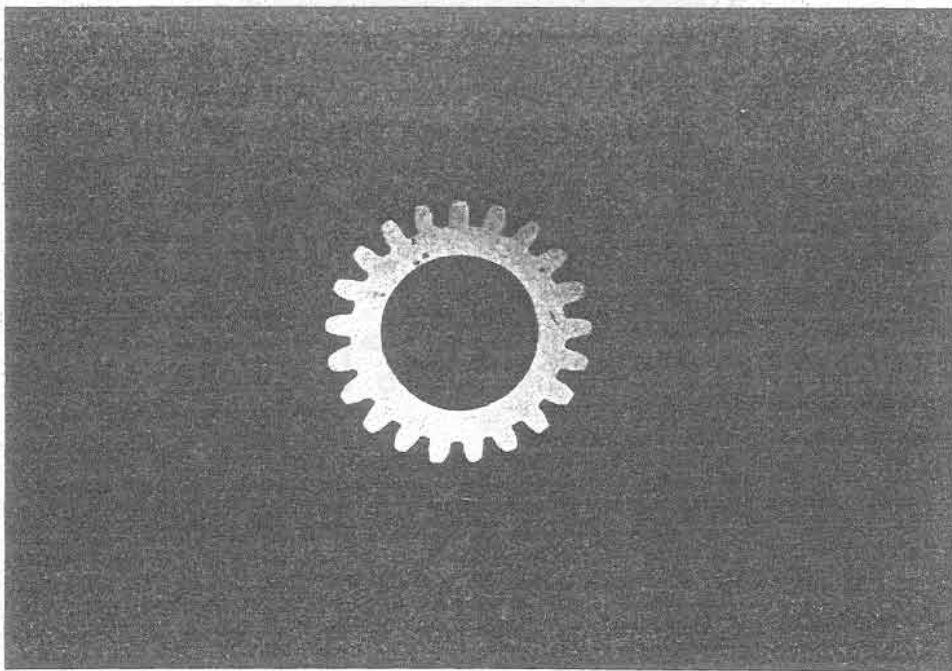
รูปที่ 4.14 ตัวอย่างแผ่นมาสค์ (mask) ซึ่งได้สร้างขึ้นสำหรับกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี



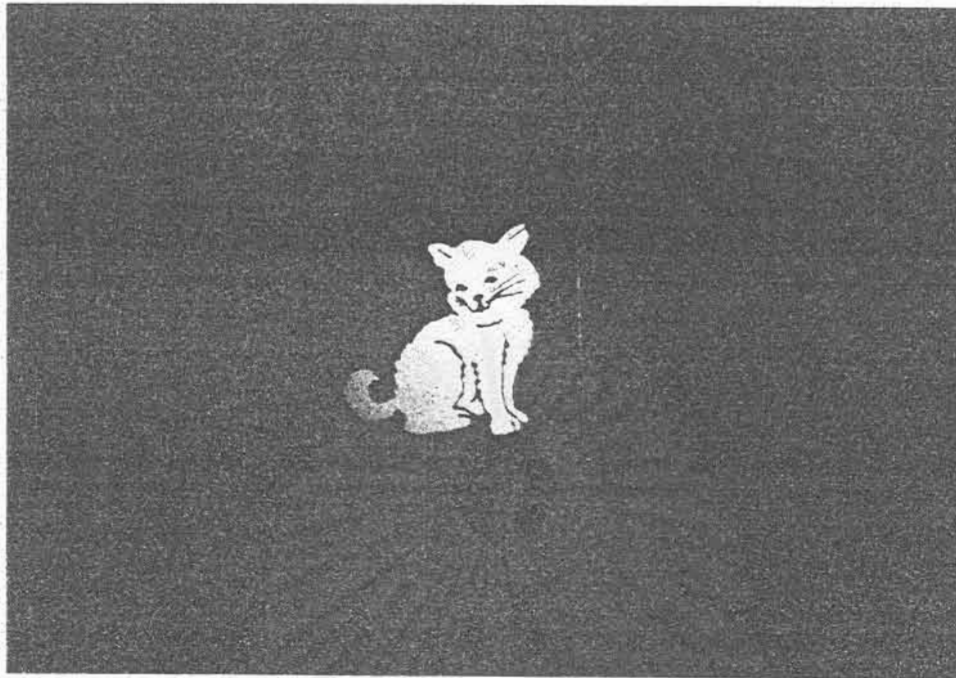
รูปที่ 4.15 ตัวอย่างภาพถ่ายของ a-SiC:H TFLED ที่เปล่งแสงสีเหลืองรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 3 mm X 5 mm ลวดลายสีเหลืองนี้ถูกกำหนดด้วยฟิล์มชั้น Al ซึ่งเคลือบด้วยวิธี evaporation



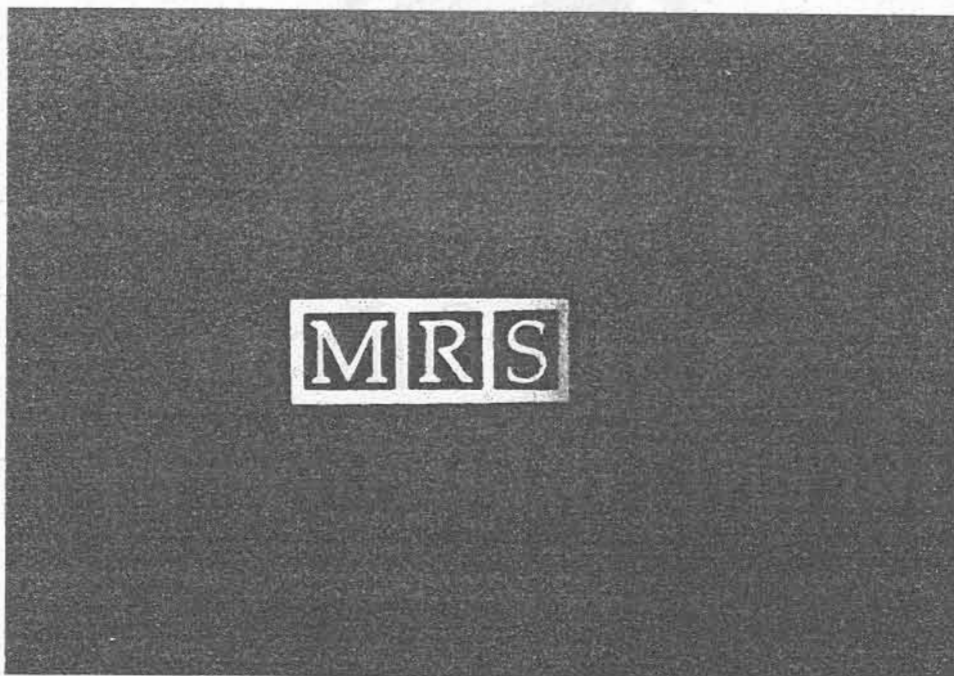
รูปที่ 4.16 ภาพถ่ายของ a-SiC:H TFLED ขณะยังไม่เปล่งแสง ใน TFLED แต่ละตัว จะสังเกตเห็นมีสายไฟฟ้าบัดกรีไว้ 2 เส้น โดยเส้นหนึ่งเป็นสายแรงดันไฟฟ้าบวกต่อกับ ITO และอีกเส้นเป็นสายแรงดันไฟฟ้าลบต่อกับ Al ในรูปนี้ ฟิล์ม Al ถูกเคลือบให้เต็มแผ่นกระจก ส่วนลวดลายของภาพถูกกำหนดด้วยลวดลายของ ITO



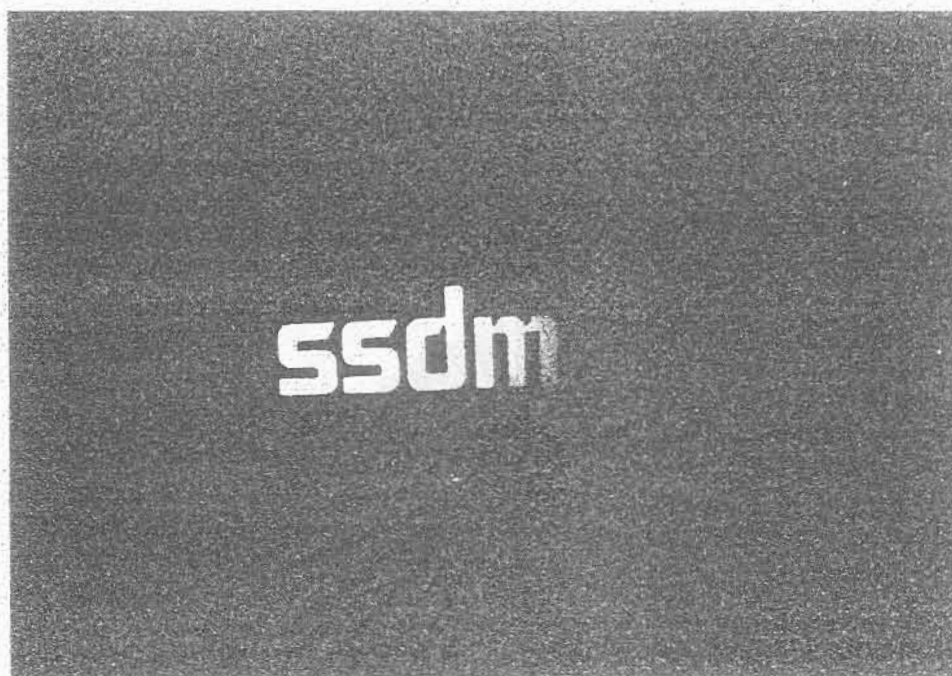
รูปที่ 4.17 ภาพถ่ายของ a-SiC:H TFLED กำลังเปล่งแสงเป็นรูป “เฟือง” ซึ่งเป็นสัญลักษณ์ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาฯ เส้นผ่าศูนย์กลางของรูปประมาณ 16 mm เปล่งแสงสีส้มเหลือง



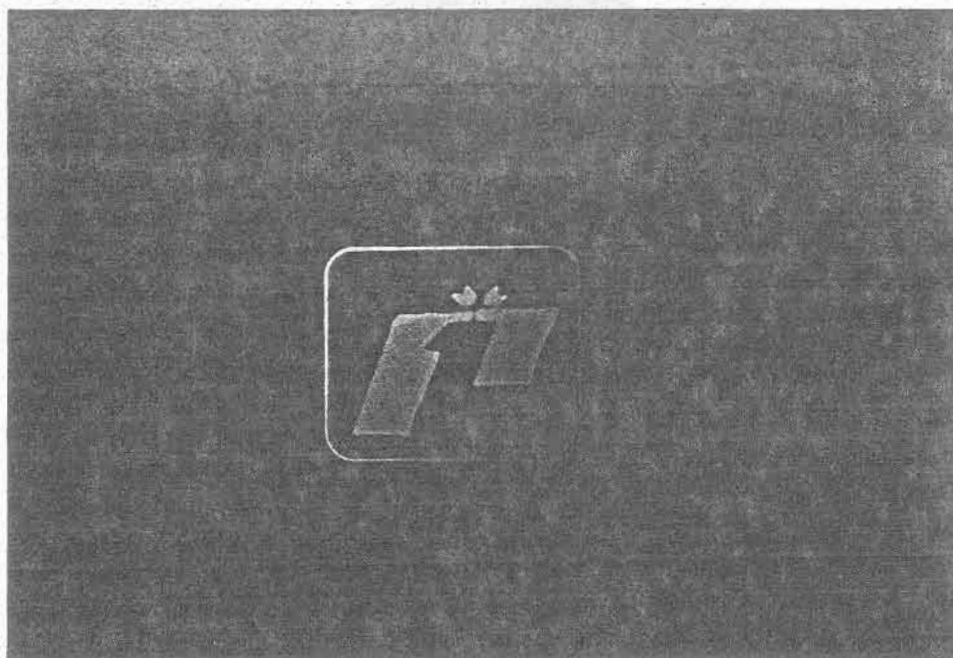
รูปที่ 4.18 ภาพถ่ายของ a-SiC:H TFLED กำลังเปล่งแสงเป็นรูป “แมว” ความสูง 16 mm สีส้มเหลือง



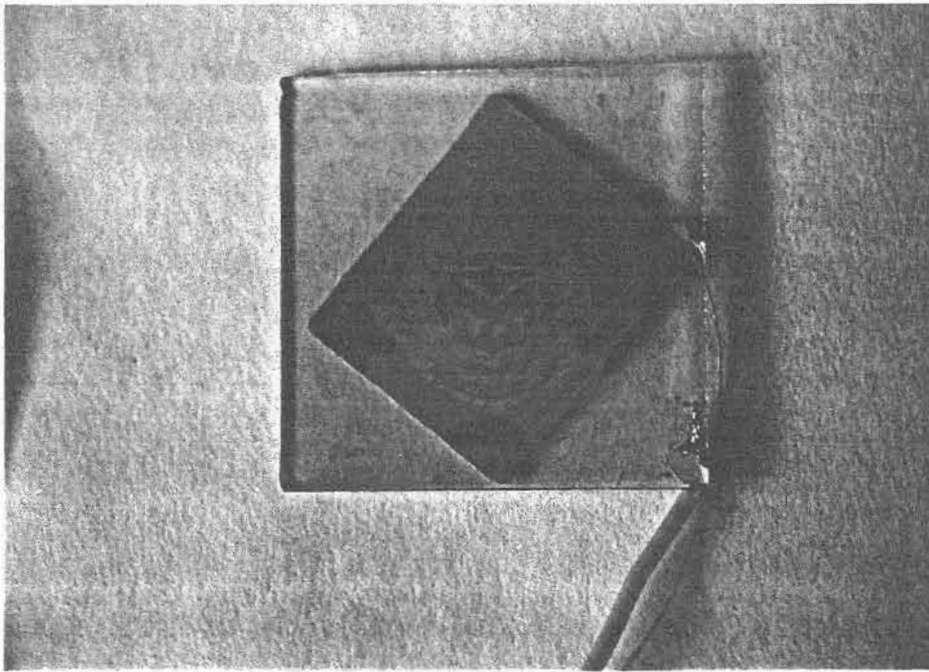
รูปที่ 4.19 ภาพถ่ายของ a-SiC:H TFLED กำลังเปล่งแสงรูป “MRS” สัญลักษณ์ของสมาคม Materials Research Society ซึ่งผู้วิจัยส่งผลงานวิจัยเสนอในที่ประชุมหลายครั้ง ความสูง 7 mm เปล่งแสงสีส้มเหลือง



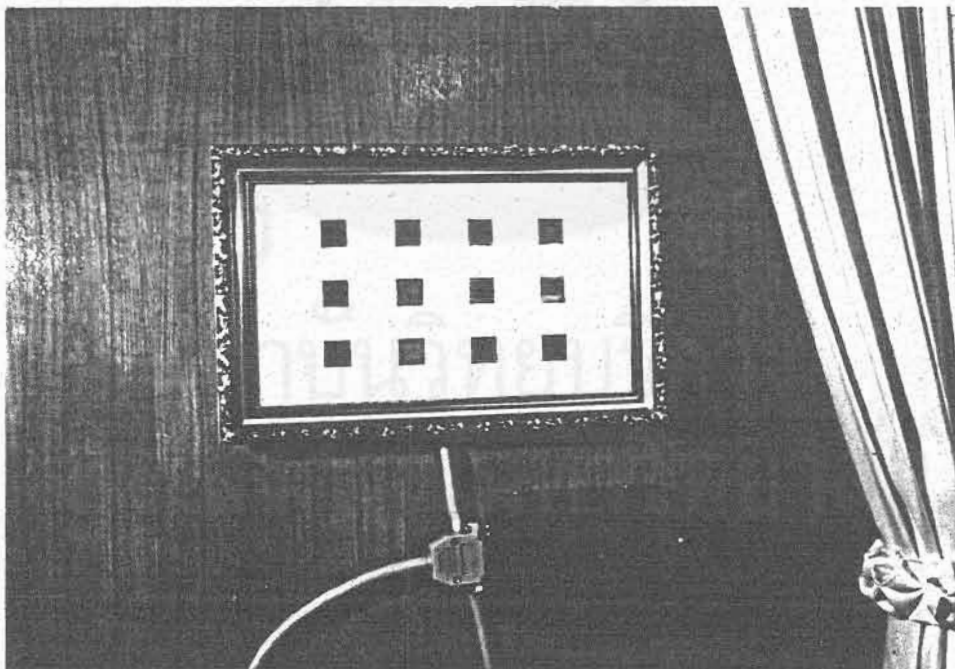
รูปที่ 4.20 ภาพถ่ายของ a-SiC:H TFLED กำลังเปล่งแสงรูป “SSDM” สัญลักษณ์ของการประชุมนานาชาติ Solid State Device & Materials ซึ่งผู้วิจัยเคยส่งผลงานเข้าเสนอในที่ประชุม ความสูง 4 mm เปล่งแสงสีส้มเหลือง



รูปที่ 4.21 ภาพถ่ายของ a-SiC:H TFLED กำลังเปล่งแสงรูปสัญลักษณ์ของกลุ่มบริษัทพีเอ็มเอ ซึ่งให้การสนับสนุนการวิจัยเรื่องไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบาง ความสูงรวมกรอบรอบนอก 14 mm เปล่งแสงสีส้มเหลือง



รูปที่ 4.22 ภาพถ่ายของ a-SiC:H TFLED กำลังเปล่งแสงรูปสัญลักษณ์ขององค์การโทรศัพท์แห่งประเทศไทย



รูปที่ 4.23 ตัวอย่างการออกแบบประยุกต์ TFLED เป็นจอแสดงผลที่มีรูปร่างบางคล้ายกรอบรูปภาพที่แขวนที่ฝาผนังได้ จากกรอบรูปภาพนั้น จะมีสายไฟฟ้าเชื่อมไปสู่วงจรไฟฟ้าสำหรับป้อนกระแสไฟฟ้าและสแกนภาพได้

เป็นสายแรงดันไฟฟ้าลบบต่อกับ AI ในรูปนี้ ฟิล์ม AI ถูกเคลือบให้เต็มแผ่นกระจก ส่วนลวดลายของภาพถูกกำหนดด้วยลวดลายของ ITO

รูปที่ 4.17~4.22 แสดงภาพถ่ายของ TFLED ที่กำลังเปล่งแสงเป็นรูปภาพต่าง ๆ โดยมีรายละเอียดดังนี้

รูปที่ 4.17 แสดงภาพ TFLED กำลังเปล่งแสงเป็นรูป “เฟือง” ซึ่งเป็นสัญลักษณ์ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาฯ เส้นผ่าศูนย์กลางของรูปประมาณ 16 มม. เปล่งแสงสีส้มเหลือง

รูปที่ 4.18 แสดงภาพ TFLED กำลังเปล่งแสงเป็นรูป “แมว” ความสูง 16 mm สีส้มเหลือง

รูปที่ 4.19 แสดงภาพ TFLED กำลังเปล่งแสงรูป “MRS” สัญลักษณ์ของสมาคม Materials Research Society ซึ่งผู้วิจัยส่งผลงานวิจัยเสนอในที่ประชุมประจำ ความสูง 7 mm เปล่งแสงสีส้มเหลือง

รูปที่ 4.20 แสดงภาพ TFLED กำลังเปล่งแสงรูป “SSDM” สัญลักษณ์ของการประชุม-นานาชาติ Solid State Device & Materials ซึ่งผู้วิจัยเคยส่งผลงานเข้าเสนอในที่ประชุม ความสูง 4 mm เปล่งแสงสีส้มเหลือง

รูปที่ 4.21 แสดงภาพ TFLED กำลังเปล่งแสงรูปสัญลักษณ์ของกลุ่มบริษัทพรีเมียร์ ซึ่งให้การสนับสนุนการวิจัยเรื่องไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบาง ความสูงรวมกรอบรอบนอก 14 mm เปล่งแสงสีส้มเหลือง

รูปที่ 4.22 แสดงภาพ TFLED กำลังเปล่งแสงรูปสัญลักษณ์ขององค์การโทรศัพท์แห่งประเทศไทย

จากตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 4.15-4.22 จะเห็นว่าอะมอร์ฟิส TFLED สามารถผลิตให้เปล่งแสงเป็นรูปภาพต่าง ๆ ได้ตามต้องการ และผลิตให้มีพื้นที่ใหญ่ได้ด้วย (ในขณะที่กรณี LED ชนิดผลึกที่เคยมีมานั้นเปล่งแสงได้เฉพาะเป็นรูปจุดเท่านั้น)

TFLED ที่รายงานในบทนี้ เป็น TFLED ที่เปล่งแสงภาพนิ่ง สำหรับ TFLED ที่เปล่งแสงภาพเคลื่อนไหวได้นั้นจะกล่าวถึงในบทที่ 7 โดยการออกแบบให้ขั้ว AI และ ITO มีรูปร่างเป็นเส้นแบบเมตริกซ์

ดังได้กล่าวในบทที่ 1 แล้วว่าอะมอร์ฟิส TFLED มีคุณสมบัติเด่นด้านการเป็นฟิล์มบาง จึงมีศักยภาพในการใช้งานเป็นจอแสดงผลที่บางและเบาได้ รูปที่ 4.23 แสดงตัวอย่างการออกแบบประยุกต์ TFLED เป็นจอแสดงผลที่มีรูปร่างบางคล้ายกรอบรูปภาพที่แขวนที่ฝาผนังได้ จากกรอบรูปภาพนั้น จะมีสายไฟฟ้าเชื่อมไปสู่วงจรไฟฟ้าสำหรับป้อนกระแสไฟฟ้าและสแกนภาพได้

4.4 สรุป

ได้ประสบความสำเร็จในการประดิษฐ์ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบาง TFLED อีกชนิดหนึ่ง ซึ่งมีรอยต่อ p-i-n โดยมี a-SiC:H เป็นชั้นเปล่งแสง ความสว่างที่ได้มีค่าประมาณ 1-2 cd/m² TFLED ชนิด a-SiC:H นี้สามารถตอบสนองต่อกระแสไฟฟ้าพัลส์ได้ถึงความถี่ประมาณ

500 kHz (ความถี่คัตออฟ) นอกจากนี้ยังประสบความสำเร็จในการประดิษฐ์ให้ TFLED เปล่งแสงเป็นรูปร่างต่างๆ

เอกสารอ้างอิง

1. Y. Hamakawa and Y. Tawada, "Valency Control of Glow Discharge Produced a-SiC:H and Its Application to Heterojunction Solar Cell", *Int. J. Solar.*, **1** (1982) 125.
2. For example see, *Japan Annual Reviews in Electronics, Computers and Telecommunications, Amorphous Semiconductor Technologies and Devices (JARECT)*, Y. Hamakawa editor (Ohm-Sha and North-Holland, Tokyo, Amsterdam, 1984) vol. 16.
3. For example see, J.I. Pankove editor, *Semiconductors and Semimetals*, vol. 21, *Hydrogenated Amorphous Silicon, part D, Device Applications* (Academic Press, Orlando, 1984).
4. D. Kruangam, chapter 6, "Amorphous and microcrystalline silicon-carbide alloy light emitting diodes", in *amorphous and microcrystalline semiconductor devices: optoelectronic devices*, J. Kanicki editor, (Artech House, Boston, London, 1991) p. 165.
5. D. Kruangam, D. Deguchi, T. Toyama, H. Okamoto and Y. Hamakawa, "Carrier injection mechanism in an a-SiC:H p-i-n junction thin film LED", *IEEE Trans. Electron Devices.*, **ED-35** (1988) 957 .
6. R. Rizzoli, C. Summonte, R. Galloni, M. Ruth, A. Desalvo, F. Zignani, P. Rava, F. Demichelis, C.F. Pirri, E. Tresso, G. Crovini, F. Giorgis and A. Madan, "Brightness Degradation Controlled by Current Induced Metastable Defect Creation in a-SiC:H Based Light Emitting Diodes", *Materials Research Society Symp. San Francisco* (1995).
7. S.P. Lau, J.M. Marshall, T.E. Dyer, A.R. Hepburn and J.F. Davies, "a-SiC:H Thin Film Visible Light-Emitting Diodes with Highly Conductive Wide Band Gap a-SiC:H as the Carrier Injection Layers", *15th ICAS, Cambridge* (1993).
8. F. Wang and R. Schwartz, "Characterization of Optoelectronic Properties of a-SiC:H Films", *15th ICAS, Cambridge* (1993).
9. J. Tauc, *Amorphous and Liquid Semiconductors* (Plenum Press, London and New York, 1974) p.159.
10. Cyril Hilsum editor, *Handbook on Semiconductors*, (north-Holland) vol. 4 (1981) p.607.

11. W. Boonkosum, D. Kruangam, S. Panyakeow and S. Panyakeow, "Novel Visible Amorphous Silicon Carbide Thin Film LED", The 1st International Symposium on Laser and Optoelectronics Technology and Application (ISLOE), Singapore, November 11-14 (1993) 300.
12. D. Kruangam and W. Boonkosum, "Novel Thin Film Light Emitting Diode Display Made of Amorphous Silicon Based Semiconductors", Symposium Proceedings of 1994 Spring Meeting of Materials Research Society (MRS), vol.345-Flat Panel Display Materials, San Francisco, U.S.A., April 4-8 (1994) 305.
13. D. Kruangam, W. Boonkosum, B. Ratwises, S. Panyakeow and B. DeLong, "Visible-Light Amorphous Silicon Alloys Thin Film Light Emitting Diodes and Its Applications to Optoelectronic Functional Devices", Invited paper, Proceedings of the 8th International School on Condensed Matter Physics (ISCMP)-Electronic, Optoelectronic and Magnetic Thin Films-, Varna, Bulgaria, September 18-23 (1994) 87.



สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

การพัฒนาไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำ (TFLED) โดยมี a-SiO:H เป็นชั้นเปล่งแสง

บทนำ

ในบทที่ 3 และบทที่ 4 ได้กล่าวถึงความสำเร็จในการพัฒนาไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางจากวัสดุอะมอร์ฟัสที่มีช่องว่างพลังงานกว้าง 2 ชนิดซึ่งได้แก่ a-SiN:H และ a-SiC:H วัสดุตระกูลอะมอร์ฟัสซิลิคอนอัลลอยที่มีช่องว่างพลังงานกว้างที่น่าสนใจอีกชนิดหนึ่งได้แก่อะมอร์ฟัสซิลิคอนออกไซด์ (a-SiO:H)

วัสดุตระกูลซิลิคอนออกไซด์ (SiO) โดยทั่วไปมีคุณสมบัติเป็นฉนวน มีการใช้งานอย่างกว้างขวางเป็นชั้นฉนวนในสิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์ [1] เช่น ใช้ SiO เป็นชั้นเกต (gate) ใน FET (Field Effect Transistor) และใช้เป็นชั้นป้องกันผิว (passivation layer) และชั้นป้องกันการสะท้อนแสง (anti-reflection layer) ให้กับเซลล์แสงอาทิตย์

ต่อมาในระยะหลังมีการรายงานว่า ถ้าควบคุมอัตราส่วนของ Si, O ให้เหมาะสม จะสามารถผลิตให้ SiO มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ และสามารถเปล่งแสงโฟโตลูมิเนสเซนซ์ได้ด้วยวิธี glow discharge plasma CVD [2-9] อย่างไรก็ตามยังไม่เคยมีรายงานเกี่ยวกับการทดลองใช้ a-SiO:H เป็นชั้นเปล่งแสงในสิ่งประดิษฐ์เปล่งแสงเลย

ในบทนี้ มีความสนใจว่าฟิล์ม a-SiO:H จะสามารถใช้งานเป็นชั้นเปล่งแสงได้หรือไม่และความสว่างจะเป็นเช่นไร งานวิจัยนี้นับเป็นครั้งแรกที่ประสบความสำเร็จในการประยุกต์ใช้ a-SiO:H เป็นชั้นเปล่งแสงในไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบาง [10] โดย TFLED ที่ประดิษฐ์ในงานวิจัยนี้ มีโครงสร้างรอยต่อ p-a-SiC:H/i-a-SiO:H/n a-SiO:H (เรียกว่า a-SiO:H TFLED) ความสว่างสูงสุดที่ได้ประมาณ 0.3 cd/m^2 จากผลการวัดความหนาแน่นของสปิน (spin density) พบว่า a-SiO:H มีความหนาแน่นของสปินมากกว่า a-SiC:H และ a-SiN:H ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบความสว่างแล้วจึงพบว่า a-SiO:H TFLED เปล่งแสงสว่างน้อยกว่า a-SiC:H TFLED และ a-SiN:H TFLED

ในบทนี้จะรายงานผลการเตรียมฟิล์ม a-SiO:H ชนิดบริสุทธิ์และผลการประดิษฐ์ a-SiO:H TFLED โดยจะเปรียบเทียบความสว่างของ a-SiO:H TFLED และ a-SiN:H TFLED และ a-SiC:H TFLED ว่า TFLED ชนิดใดจะเปล่งแสงได้ดีที่สุด

5.1 การผลิตและคุณสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบาง a-SiO:H

ฟิล์มบาง a-SiO:H ในงานวิจัยนี้เตรียมด้วยวิธี glow discharge plasma CVD ในรายงานอื่นๆ มีการรายงานว่า a-SiO:H สามารถผลิตได้จากก๊าซผสมของ SiH_4 และ N_2O [6]

หรือ O_2 [3] หรือ CO_2 [8-9] เนื่องจากที่ความเข้มข้นสูง N_2O และ O_2 ทำปฏิกิริยากับ SiH_4 และระเบิดเป็นอันตรายได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ใช้ก๊าซ CO_2 เป็นก๊าซดิบสำหรับออกซิเจน เจื่อนไซพื้นฐานสำหรับการปลูกฟิล์ม a-SiO:H แสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 เจื่อนไซสำหรับการปลูกฟิล์ม a-SiO:H ชนิดบริสุทธิ์ด้วยวิธี glow discharge plasma CVD

RF power	4 watt, 13.56 MHz
Substrate Temperature	190°C
Gas Pressure	1 Torr
Gas Fraction	$x = CO_2 / (SiH_4 + CO_2) = 0 \sim 0.70$

ตารางที่ 5.2 แสดงสรุปคุณสมบัติพื้นฐานต่างๆ ของฟิล์ม a-SiO:H ที่ปลูกได้เช่น ความหนา อัตราการเติบโตของฟิล์มและช่องว่างพลังงาน

รูปที่ 5.1 แสดงตัวอย่างสเปกตรัมการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของ a-SiO:H ที่ปลูกที่อัตราส่วนก๊าซ $x = CO_2 / (SiH_4 + CO_2) = 0.6$ ในสเปกตรัมนี้ พบว่ามีการดูดกลืนแสงหลายตำแหน่ง เช่น

- ที่ wave number $\sim 2100 \text{ cm}^{-1}$ เกิดจากการดูดกลืนแสงของ Si-H (stretching mode)
- ที่ wave number $\sim 920 \text{ cm}^{-1}$ เกิดจากการดูดกลืนแสงของ Si-O-Si (stretching mode)
- ที่ wave number $\sim 800 \text{ cm}^{-1}$ เกิดจากการดูดกลืนแสงของ Si-O-Si (bending mode)
- ที่ wave number $\sim 640 \text{ cm}^{-1}$ เกิดจากการดูดกลืนแสงของ Si-H (bending mode)

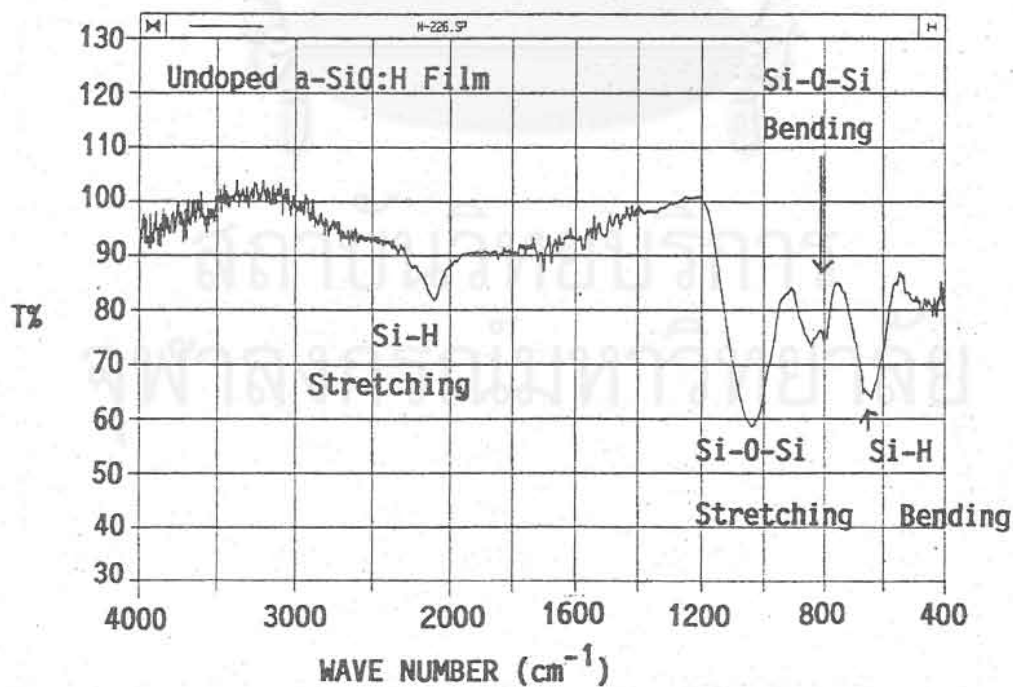
จากขีดจำกัดความละเอียด (resolution) ของเครื่องมือ ไม่พบว่าการดูดกลืนแสงด้วยชุดอะตอมที่มีคาร์บอน (C) ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าฟิล์ม a-SiO:H ที่ปลูกได้จากก๊าซผสมของ SiH_4 และ CO_2 นี้ไม่มีอะตอม C ผสมอยู่ (หรือมีน้อยมาก)

รูปที่ 5.2 แสดงผลการวัดความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างพลังงาน (กำหนดด้วยวิธี Tauc's plot) และอัตราส่วนก๊าซ $x = CO_2 / (SiH_4 + CO_2)$ เมื่ออัตราส่วนของก๊าซ CO_2 เพิ่มจาก 0.35-0.70 ทำให้ช่องว่างพลังงานกว้างขึ้นจาก 2.0-3.1 eV จากข้อมูลการดูดกลืนแสงอินฟราเรด ทำให้อธิบายได้ว่า การเพิ่มขึ้นของปริมาณอะตอมของออกซิเจน ทำให้ช่องว่างพลังงานกว้างขึ้น

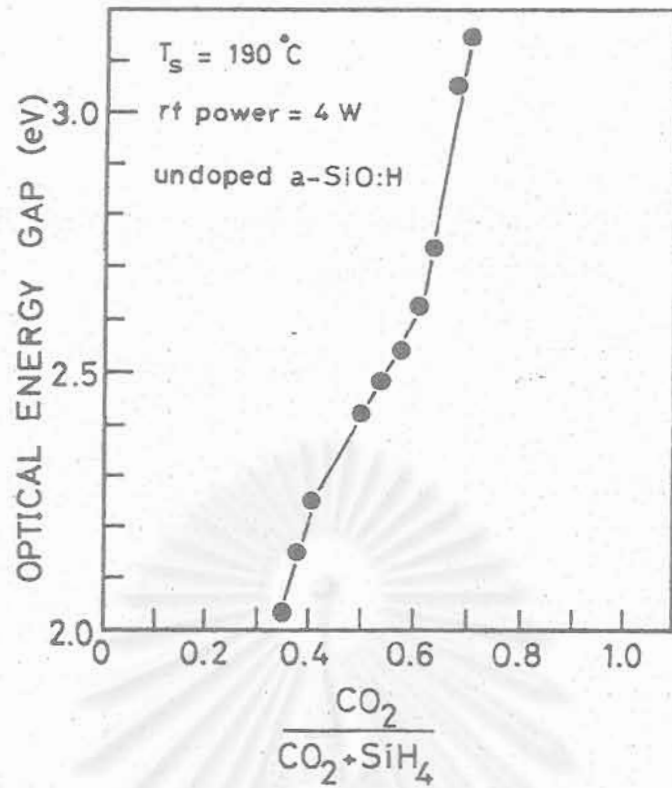
รูปที่ 5.3 แสดงผลการวัดสเปกตรัมการเปล่งแสงโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (PL) ของ a-SiO:H ชนิดบริสุทธิ์ซึ่งมีช่องว่างพลังงานระหว่าง 2.4 eV-3.16 eV โดยใช้แสงเลเซอร์ HeCd ที่มีพลังงานโฟตอน 3.8 eV (325 nm) เป็นแสงกระตุ้น จากรูปนี้พบว่า

ตารางที่ 5.2 คุณสมบัติพื้นฐานต่างๆ ของฟิล์ม a-SiO:H ที่ปลูกได้เช่น ความหนา อัตราการเติบโตของฟิล์มและช่องว่างพลังงาน

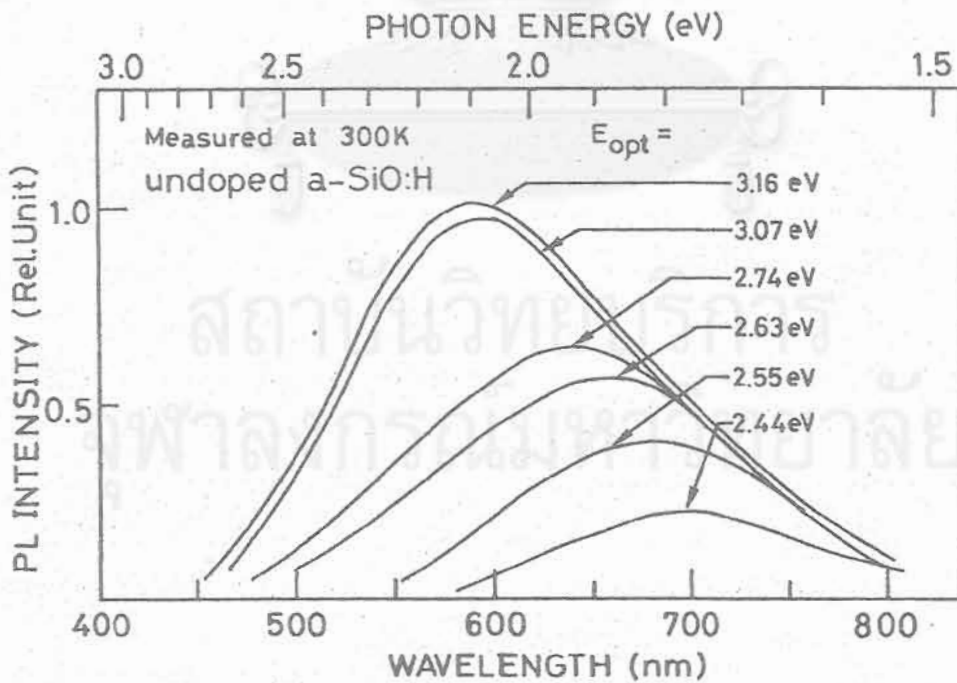
Sample No.	SiH ₄	CO ₂	X = CO ₂ /SiH ₄ +CO ₂	Energy Gap (eV)	Thickness (Å)	Time (Hours)	Deposition rate (Å/sec)
N-225	40	25	0.38	2.14	7417	4	0.51
N-226	45	25	0.35	2.02	9198	4	0.63
N-227	35	25	0.41	2.25	6517	4	0.45
N-228	30	25	0.45	2.44	6616	5	0.36
N-229	25	25	0.5	2.43	6382	5	0.35
N-230	25	30	0.54	2.49	6333	5	0.35
N-231	25	35	0.58	2.55	5993	5	0.33
N-232	25	45	0.64	2.63	5706	5	0.31
N-233	25	40	0.61	2.74	6078	5	0.33
N-234	25	55	0.68	3.07	5237	5	0.29
N-235	25	60	0.70	3.16	4974	5	0.27



รูปที่ 5.1 ตัวอย่างสเปกตรัมการดูดกลืนแสงอินฟราเรดของ a-SiO:H ที่ปลูกที่อัตราส่วนก๊าซ $x = \text{CO}_2 / (\text{SiH}_4 + \text{CO}_2) = 0.6$



รูปที่ 5.2 ผลการวัดความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างพลังงาน (กำหนดด้วยวิธี Tauc's plot) และอัตราส่วนก๊าซ $x = \text{CO}_2 / (\text{SiH}_4 + \text{CO}_2)$ สำหรับฟิล์ม a-SiO:H ชนิดบริสุทธิ์



รูปที่ 5.3 ผลการวัดสเปกตรัมการเปล่งแสงโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (PL) ของ a-SiO:H ชนิดบริสุทธิ์ซึ่งมีช่องว่างพลังงานระหว่าง 2.4 eV-3.16 eV โดยใช้แสงเลเซอร์ HeCd ที่มีพลังงานโฟตอน 3.8 eV (325 nm) เป็นแสงกระตุ้น

a-SiO:H ซึ่งมีช่องว่างพลังงานเท่ากับ 2.44 eV เปล่งแสงสีแดง

a-SiO:H ซึ่งมีช่องว่างพลังงานเท่ากับ 2.74 eV เปล่งแสงสีส้ม และ

a-SiO:H ซึ่งมีช่องว่างพลังงานเท่ากับ 3.16 eV เปล่งแสงสีเหลือง

ข้อมูลที่ได้ในรูปที่ 5.3 เป็นการยืนยันให้ทราบว่าฟิล์ม a-SiO:H ที่เตรียมจากก๊าซผสมของ SiH₄ และ CO₂ นั้นสามารถเปล่งแสง (PL) ที่ตามองเห็นได้

5.2 ลักษณะสมบัติพื้นฐานของ a-SiO:H TFLED และผลการเปรียบเทียบกับ a-SiC:H และ a-SiN:H TFLEDs

รูปที่ 5.4 แสดงโครงสร้างของ TFLED ซึ่งมี a-SiO:H ชนิด i เป็นชั้นเปล่งแสง และมี a-SiC:H ชนิด p และ n เป็นชั้นฉีดยานพาหะ ช่องว่างพลังงานของชั้น p-i-n เท่ากับ 2.0, 3.0 และ 2.0 eV ตามลำดับ

รูปที่ 5.5 แสดงลักษณะสมบัติการเปล่งแสงของ a-SiO:H TFLED (#3) โดยแสดงเปรียบเทียบความสว่างกับ TFLED ชนิดอื่น ๆ ที่มีวัสดุชั้น i แตกต่างกัน ซึ่งได้แก่

1 p-a-SiC:H/i-a-SiC:H/n-a-SiC:H

2 p-a-SiC:H/i-a-SiN:H/n-a-SiC:H

3 p a-SiC:H/i-a-SiO:H/n-a-SiC:H

โดยที่ช่องว่างพลังงานของ TFLED ทุกตัวมีค่าคงที่ดังนี้

p-i-n = 2.0 eV/3.1 eV/2.0 eV ตามลำดับ

และความหนาของชั้น p-i-n เท่ากับ 150, 500 และ 300 Å ตามลำดับ

ความสว่างสูงสุดของ a-SiO:H TFLED ที่ผลิตมีค่าต่ำกว่าระดับ 0.3 cd/m² แต่ก็สามารถมองเห็นการเปล่งแสงในสีส้มเหลืองในห้องที่มีแสงสลัว

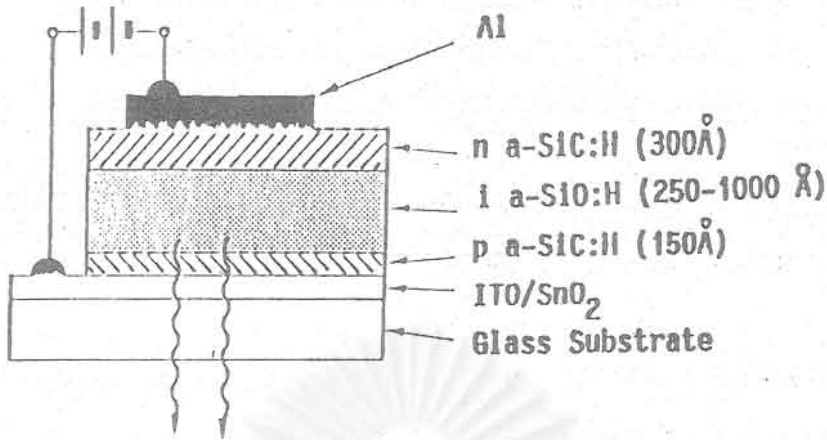
จากการเปรียบเทียบความสว่างของ TFLED แต่ละชนิดในรูปที่ 5.5 พบว่า a-SiC:H TFLED ให้แสงสว่างที่สุด รองลงมาคือ a-SiN:H TFLED และ a-SiO:H TFLED โดยความสว่างสูงสุดมีค่าดังต่อไปนี้

a-SiC:H TFLED 2 cd/m²

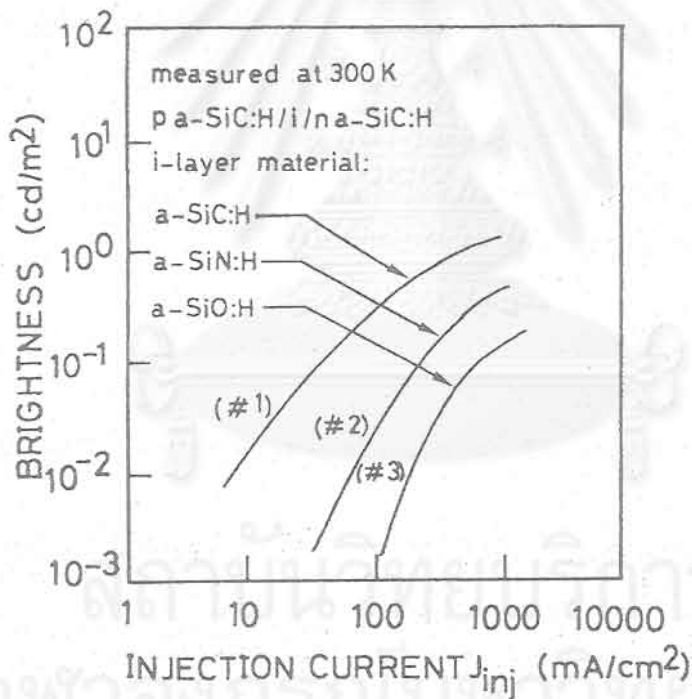
a-SiN:H TFLED 0.5 cd/m²

a-SiO:H TFLED 0.3 cd/m²

แรงดันไฟฟ้าเทอร์โวลต์ของ TFLED ทุกชนิดมีค่าใกล้เคียงกันประมาณ 15 V



รูปที่ 5.4 โครงสร้างของ TFLED รอยต่อ p-i-n ซึ่งมี a-SiO:H ชนิด i เป็นชั้นเปล่งแสง และมี a-SiC:H ชนิด p และ n เป็นชั้นฉีดพาหะ ช่องว่างพลังงานของชั้น p-i-n เท่ากับ 2.0, 3.0 และ 2.0 eV ตามลำดับ



รูปที่ 5.5 ลักษณะสมบัติการเปล่งแสงของ a-SiO:H TFLED (#3) โดยแสดงเปรียบเทียบความสว่างกับ TFLED ชนิดอื่น ๆ ที่มีวัสดุชั้น i แตกต่างกัน ซึ่งได้แก่
 # 1 p-a-SiC:H/i-a-SiC:H/n-a-SiC:H
 # 2 p-a-SiC:H/i-a-SiN:H/n-a-SiC:H
 # 3 p-a-SiC:H/i-a-SiO:H/n-a-SiC:H
 โดยที่ช่องว่างพลังงานของ TFLED ทุกตัวมีค่าคงที่ดังนี้
 $p/i/n = 2.0 \text{ eV}/3.1 \text{ eV}/2.0 \text{ eV}$ ตามลำดับ
 และความหนาของชั้น p-i-n เท่ากับ 150, 500 และ 300 Å ตามลำดับ

จากการวัดจำนวนของสปินด้วยวิธี ESR พบว่าในฟิล์ม a-SiO:H มีสปินอยู่มากกว่า $10^{18}(\text{cm}^{-3})$ ซึ่งจำนวนของสปินนี้มีค่ามากกว่า a-SiC:H และ a-SiN:H ดังนั้น a-SiO:H TFLED จึงสว่างน้อยที่สุด

5.3 สรุป

ได้ประสบความสำเร็จในการประดิษฐ์ TFLED โดยมี a-SiO:H เป็นชั้นเปล่งแสงเป็นครั้งแรก ฟิล์ม a-SiO:H เตรียมได้จากก๊าซผสมของ SiH_4 และ CO_2 ด้วยวิธี glow discharge plasma CVD ความสว่างสูงสุดของ a-SiO:H TFLED คือ 0.3 cd/m^2 แม้ว่า a-SiO:H TFLED จะมีความสว่างน้อยกว่า a-SiC:H TFLED และ a-SiN:H TFLED แต่อย่างไรก็ดี ความสำเร็จในบทรนี้ มีคุณค่าในการบุกเบิกการใช้งาน a-SiO:H ในด้านสารกึ่งตัวนำให้เปล่งแสง

เอกสารอ้างอิง

1. R.A.B. Devine editor, *The Physics and Technology of Amorphous SiO₂* (Plenum Press, New York and London, 1987).
2. E. Holzenkammer, Proc. 4th PVSEC, (1982) 778.
3. M. Zacharias, H. Freisted, F. Stolze, T.P. Drusedau, M. Rosenbauer and M. Stutzmann, "Properties of Sputtered a-SiO:H Alloys with a Visible Luminescence", *J. Non-Crystalline Solids*, **164-166** (1993) 1089.
4. R.A. Street, J.C. Knights, "Luminescence in Plasma-Deposited Si-O Alloys", *Phil. Mag.*, **B42** (1980) 551.
5. R. Carius, R. Fischer, E. Holzenkammer and J. Stuke, "Photoluminescence in the Amorphous System SiO_x", *J. Appl. Phys.* **52** (1981) 4241.
6. I. Umezu, K. Miyamoto, N. Sakamoto and K. Maeda, "Optical Band Gap and Tauc Gap in a-SiO_x:H and a-SiN_x:H Films", *Jpn. J. Appl. Phys.*, **34** (1995) 1753.
7. K. Haga, K. Yamamoto, M. Kumano and H. Watanabe, "Wide Optical-Gap a-SiO:H Films Prepared From SiH₄-CO₂ Gas Mixture", *Jpn. J. Appl. Phys.* **25** (1986) L39.
8. S. Fujikake, H. Ohta, P. Sihanugrist, M. Ohsawa, Y. Ichikawa and H. Sakai, "a-SiO:H Films and Their Application to Solar Cells", *Optoelectronics-Devices and Technologies-*, **9** (1994) 379.
9. H. Watanabe, K. Haga and T. Lohner, "Structure of High-Photosensitivity Silicon-Oxygen Alloy Films", *J. Non-Crystalline Solids*, **164-166** (1993) 1085.

10. W. Boonkosum, D. kruangam, T. Sujaridchai, B. Ratwises, S. Panyakeow, S. Fujikake and H.Sakai, "Visible Amorphous SiO:H Thin Film Light Emitting Diode", The 16th International Conference on Amorphous Semiconductors-Science and Technology-(ICAS 16) Kobe, Japan, September 4-8 (1995).



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

การปรับปรุงความสว่างของ TFLED ด้วยวิธีต่าง ๆ

บทนำ

ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3-5 ว่า ในงานวิจัยนี้ได้ประสบความสำเร็จในการประดิษฐ์-ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบาง (TFLED) ชนิดวัสดุอะมอร์ฟัสซิลิคอนอัลลอยจากวัสดุ 3 ชนิด ได้แก่ a-SiC:H, a-SiN:H และ a-SiO:H เป็นผลงานที่ได้รับความสนใจจากนักวิจัยทั่วโลกเป็นอย่างมาก อย่างไรก็ตามความสว่างที่ได้จาก TFLED เหล่านี้ยังไม่มากพอที่จะใช้งานเป็นดิสเพลย์

ต่อมาในหลายประเทศได้มีนักวิจัยหลายกลุ่มพยายามประดิษฐ์ TFLED โครงสร้าง p-i-n ตามแบบที่ได้เสนอในงานวิจัยนี้ และมีความพยายามหาเส้นทางในการปรับปรุงความสว่างให้ดีขึ้นตัวอย่างเช่น นักวิจัยในไต้หวันได้ทดลองใช้โครงสร้าง quantum-well เป็นชั้นฉีดพาหะ [1-2] นักวิจัยในอังกฤษได้ทดลองเตรียมวัสดุ p-a-SiC:H และใช้แสงเลเซอร์ส่องให้กลายเป็นวัสดุไมโครคริสตัลไลน์เพื่อใช้เป็นชั้น p [3] อย่างไรก็ตามความสว่างของ TFLED ก็ยังไม่ได้เพิ่มมากนัก ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องหาแนวทางแบบใหม่เพื่อปรับปรุงความสว่างให้ดีขึ้นอีก จากผลการวิเคราะห์ในบทที่ 3 เกี่ยวกับกลไกการฉีดพาหะและกลไกการเปล่งแสง เราได้แนวทางที่สำคัญในการปรับปรุงความสว่างคือ

- 1) ควรปรับปรุงประสิทธิภาพของการรวมตัวของพาหะแบบเปล่งแสงให้สูงขึ้น
- 2) ควรปรับปรุงประสิทธิภาพของการฉีดพาหะให้สูงขึ้น

ในงานบทนี้ ได้มีความพยายามในการปรับปรุงความสว่างให้กับ TFLED ด้วยวิธีใหม่ที่แตกต่างไปจากคณะผู้วิจัยที่อื่น โดยใช้วิธีการดังต่อไปนี้

- 1) ปรับปรุงประสิทธิภาพของการรวมตัวของพาหะแบบเปล่งแสง โดยใช้วัสดุโลหะที่สามารถระบายความร้อนได้ดีเป็นแผ่นฐานแทนแผ่นกระจก ผลการใช้สแตนเลสสตีลเป็นแผ่นฐานทำให้ความสว่างดีขึ้นจาก 1.5 cd/m^2 (กรณีแผ่นฐานชนิดกระจก) เป็น 5 cd/m^2
- 2) ปรับปรุงประสิทธิภาพของการฉีดพาหะ โดยการใช้วัสดุไมโครคริสตัลไลน์ซิลิคอน-ออกไซด์ชนิด p (p- $\mu\text{c-SiO:H}$) เป็นชั้นฉีดโฮล วัสดุ p- $\mu\text{c-SiO:H}$ มีคุณสมบัตินำไฟฟ้าได้ดีกว่า p-a-SiC:H และมีช่องว่างพลังงานกว้างกว่า p-a-SiC:H ผลการทดลองพบว่า ความสว่างเพิ่มขึ้นจากเดิม (ใช้ p-a-SiC:H) ประมาณ 2 cd/m^2 เป็น 10 cd/m^2 การวิเคราะห์อธิบายว่าการที่ลักษณะสมบัติของ TFLED ดีขึ้นนี้ เนื่องจากประสิทธิภาพของการฉีดโฮลดีขึ้น

ในบทนี้จะรายงานรายละเอียดเกี่ยวกับเทคโนโลยีและผลการปรับปรุงความสว่างทั้ง 2 วิธีดังกล่าว

6.1 การปรับปรุงความสว่างโดยใช้วัสดุโลหะเป็นแผ่นฐาน

6.1.1 คุณสมบัติดีเด่นของการใช้วัสดุโลหะเป็นแผ่นฐาน

การใช้วัสดุกระจกเป็นแผ่นฐานให้กับ TFLED ที่ผ่านมานั้นมีความสะดวกหลายด้านเช่น ผู้ผลิต TFLED สามารถสั่งซื้อแผ่นฐานกระจกที่มี ITO เคลือบไว้แล้วจากบริษัทผู้ผลิต ITO โดยตรง จึงลดขั้นตอนการผลิต ITO ได้ และวัสดุกระจกก็สามารถทำหน้าที่เป็นชั้นป้องกันผิวหน้าของ TFLED ได้ในตัว แต่ขณะเดียวกันวัสดุกระจกก็มีข้อเสียด้วยเช่นกัน เช่น

1. วัสดุกระจกนำความร้อนได้ไม่ดี จึงระบายความร้อนออกจาก TFLED ได้ไม่ดี ตารางที่ 6.1 แสดงตัวอย่างค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุต่างๆ ทั้งชนิดกระจกและโลหะ
2. วัสดุกระจกแตกหักได้ เมื่อถูกแรงกระแทก หรือเมื่อตกหล่น
3. วัสดุกระจกแตกหักได้ เมื่อมีความเครียดซึ่งเกิดจากความร้อนจาก TFLED ที่เคลือบติดอยู่ (thermal stress) ตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 6.1 เป็นตัวอย่างแผ่นฐานกระจกที่แตกเพราะความเครียดจากความร้อนจาก TFLED ซึ่งเกิดจากการที่ปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่ไหลใน TFLED ในพื้นที่ส่วนต่างๆมีค่าไม่เท่ากัน (กล่าวคือ ในการผลิตให้เปล่งแสงรูปร่างต่างๆนั้น ทำให้บางพื้นที่มีกระแสไฟฟ้าไหล และบางพื้นที่ไม่มีกระแสไฟฟ้าไหล)
4. วัสดุกระจกมีความเปราะ ไม่สามารถดัดให้โค้งงอได้

ตารางที่ 6.1 ตัวอย่างสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของวัสดุต่างๆ

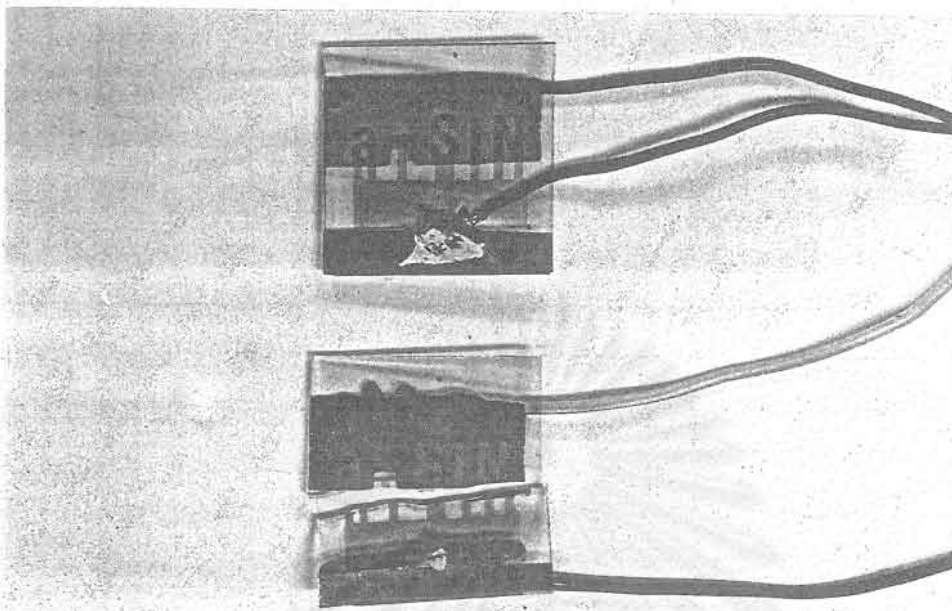
วัสดุ	สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (W/m.k) ที่อุณหภูมิห้อง
SiO ₂	0.69
Ag	23.0
Cu	22.2
Al	12.4
W	9.4
Zn	6.45
Fe	4.06
Ti	1.0
Si	2.0
SUS (Stainless steel)	0.96

ในบทนี้ ได้มีการทดลองใช้วัสดุโลหะเป็นแผ่นฐานให้กับ TFLED จากผลการทดลองพบว่า ความสว่างของ TFLED ได้เพิ่มขึ้นจากกรณีใช้กระจกเป็นแผ่นฐาน 1.5 cd/m^2 ขึ้นมาเป็น $3-5 \text{ cd/m}^2$ เมื่อใช้โลหะสแตนเลสสตีลเป็นแผ่นฐาน [4] นอกจากนี้ยังพบอีกด้วยว่าแผ่นฐานวัสดุโลหะยังมีคุณสมบัติที่เอื้ออำนวยต่อการผลิตและใช้งาน TFLED ที่น่าสนใจและดีกว่าการใช้กระจกเป็นแผ่นฐานหลายด้านด้วยกัน อาทิเช่น

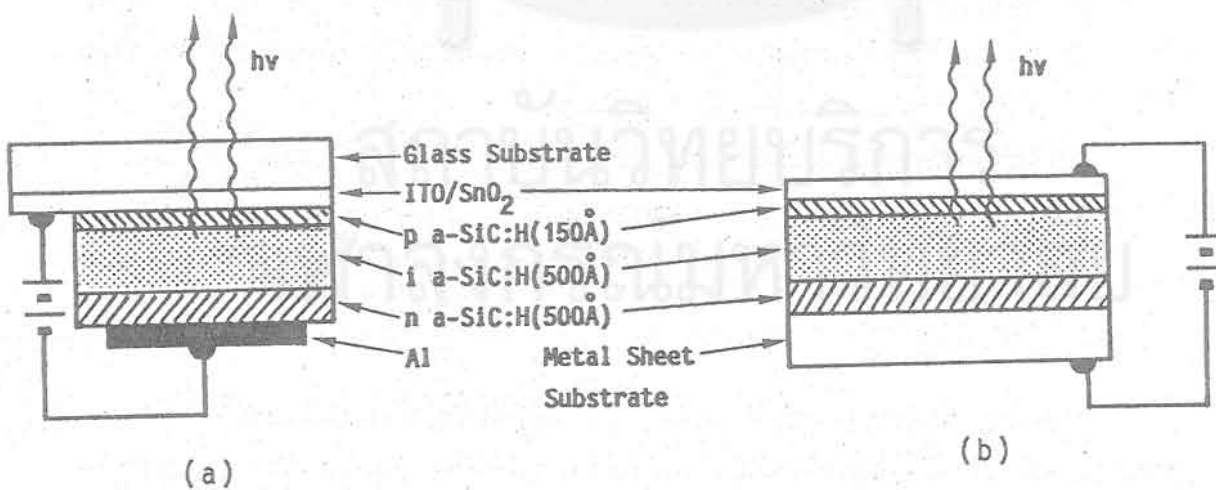
1. แผ่นโลหะมีราคาถูก มีความแข็งแรง คงทน ไม่แตกหักเพราะแรงสะท้อนหรือแรงกระทบ
2. แผ่นโลหะเป็นวัสดุที่ไม่แตกหัก อันเนื่องจากความร้อนจากไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบาง (ในกรณีที่ฉีดกระแสไฟฟ้ามาก ๆ เข้าสู่ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางที่มีกระจกเป็นแผ่นฐานนั้น อาจจะทำให้แผ่นกระจกแตกหักได้)
3. แผ่นโลหะมีคุณสมบัติการนำความร้อนได้ดีกว่าแผ่นกระจก ดังนั้นแผ่นโลหะสามารถระบายความร้อนที่เกิดขึ้นที่ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางไปสู่บริเวณรอบ ๆ ได้ดีและรวดเร็วกว่าแผ่นกระจก จึงทำให้ตัวไดโอดเปล่งแสงไม่ร้อนมาก ทำให้ไดโอดเปล่งแสงสามารถเปล่งแสงได้สว่างได้ดีและเสถียรภาพดีขึ้น
4. สามารถต่อแผ่นโลหะเข้ากับระบบควบคุมอุณหภูมิ หรือเครื่องทำความเย็นได้ง่าย เป็นการควบคุมอุณหภูมิของไดโอดเปล่งแสงให้ได้คงที่ตามต้องการ เป็นผลให้ไดโอดเปล่งแสงสามารถเปล่งแสงได้ดีและเสถียรภาพดี
5. การเลือกใช้แผ่นโลหะที่มีผิวเรียบ เช่นมีความขรุขระที่ผิวน้อยกว่า $0.1 \mu\text{m}$ และมีความแวววาวมาก ๆ จะช่วยให้แสงจากไดโอดเปล่งแสงสะท้อนกลับจากผิวโลหะให้ออกสู่ภายนอกได้ดีขึ้น ทำให้แสงจากไดโอดเปล่งแสงมีความสว่างมากขึ้นอีกด้วย
6. แผ่นโลหะสามารถตัดให้โค้งงอได้ ทำให้สามารถใช้งานสิ่งประดิษฐ์นี้เป็นจอภาพแสดงผลที่มีรูปร่างแปลก ๆ ต่าง ๆ ได้สะดวก โดยทั่วไปความหนาของแผ่นโลหะที่ใช้มีค่าประมาณ 0.5 มิลลิเมตร ถึง 1 มิลลิเมตร
7. แผ่นโลหะจะทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าขั้วหนึ่งไปในตัว ทำให้สามารถลดขั้นตอนของการผลิตเคลือบขั้วไฟฟ้าไปได้ 1 ขั้นตอน ทำให้มีส่วนช่วยลดเวลาและต้นทุนการผลิตได้ชั้นหนึ่ง (ควรเลือกแผ่นโลหะ ที่มีคุณสมบัติเป็นรอยต่อชนิดโอห์มมิกกับชั้นอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำที่ดี)

จากเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้นนี้ จะทำให้สามารถประดิษฐ์ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางที่มีโลหะเป็นแผ่นฐานที่มีคุณสมบัติการใช้งานดีกว่ากรณีการใช้กระจกเป็นแผ่นฐาน โดยสรุปได้ดังนี้

มีความสว่างสูงขึ้น มีเสถียรภาพใช้งานได้ยาวนานขึ้น ไม่แตกหัก มีความสวยงามและผลิตเป็นรูปทรงได้หลากหลาย ผลิตไดโอดเปล่งแสงเป็นพื้นฐานใหญ่ได้และราคาถูก



รูปที่ 6.1 ตัวอย่างแผ่นฐานกระจกที่แตกเพราะความเครียดจากความร้อนจาก TFLED ซึ่งเกิดจากการที่ปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่ไหลใน TFLED ในพื้นที่ส่วนต่างๆมีค่าไม่เท่ากัน



รูปที่ 6.2 (a) โครงสร้างของ TFLED แบบเดิมซึ่งใช้กระจกเป็นแผ่นฐาน
 (b) โครงสร้างของ TFLED แบบใหม่ซึ่งมีโลหะเป็นแผ่นฐาน โดยมีโครงสร้างคือ แผ่นฐานโลหะ/n-i-p a-SiC:H/ITO

6.1.2 การผลิต TFLED ซึ่งมีวัสดุโลหะเป็นแผ่นฐาน

รูปที่ 6.2 (b) แสดงโครงสร้างพื้นฐานของ TFLED ซึ่งมีแผ่นโลหะเป็นแผ่นฐาน โดยมีโครงสร้างคือ แผ่นฐานโลหะ/n-i-p a-SiC:H/ITO แผ่นโลหะที่ใช้ได้มีหลายชนิด อาทิเช่น แผ่นสแตนเลสสตีล แผ่นทองแดง แผ่นอะลูมิเนียม แผ่นทองเหลือง แผ่นสังกะสี แผ่นนิกเกิล และแผ่นโลหะชนิดอื่น ๆ

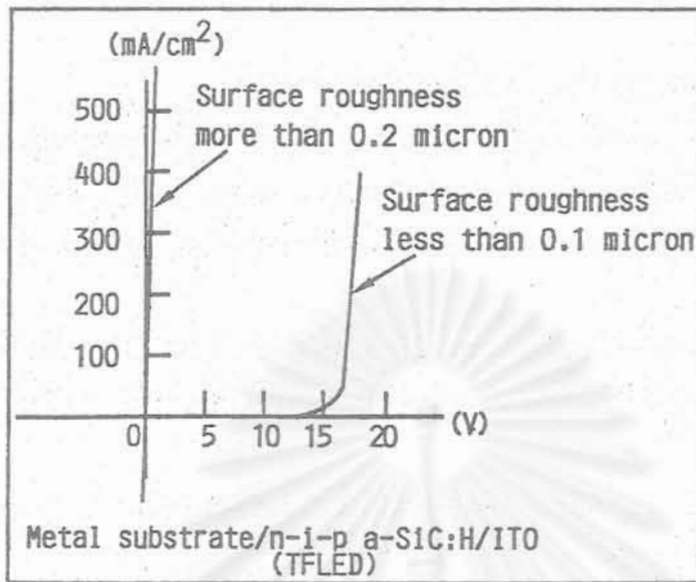
โปรดสังเกตว่าได้ใช้ชั้น p เป็นชั้นบน ทั้งนี้เพราะว่า การเปล่งแสงนั้นเกิดขึ้นในชั้น i ที่ใกล้กับรอยต่อ p-i ดังนั้นเพื่อลดการสูญเสียซึ่งเกิดจากดูดกลืนภายใน TFLED จึงได้ออกแบบให้ชั้น p อยู่ด้านบน

อย่างไรก็ตาม การคัดเลือกวัสดุโลหะมาใช้เป็นแผ่นฐานให้กับ TFLED ควรคำนึงถึงคุณสมบัติดังต่อไปนี้ด้วย เช่น

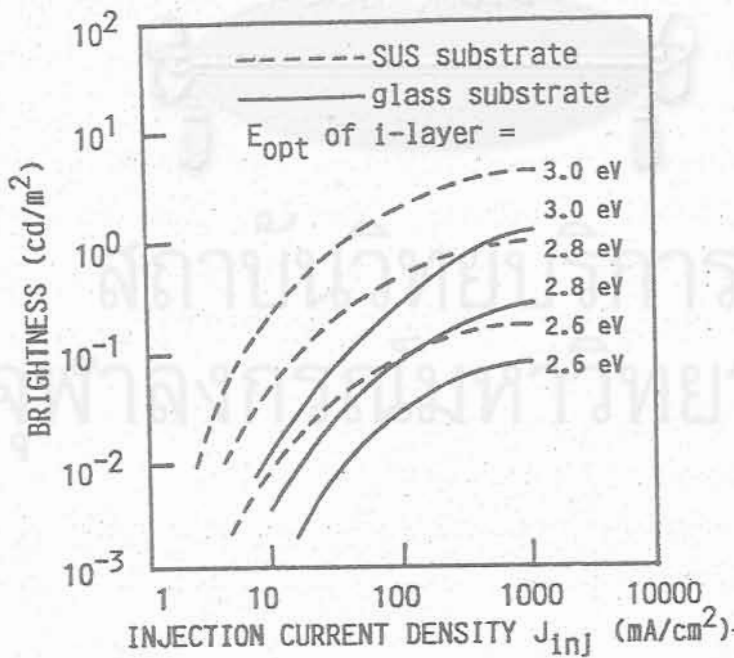
1. แผ่นโลหะที่ใช้ควรมีจุดหลอมเหลวไม่ต่ำกว่า 300°C และคงทนต่อพลาสมาในระบบ glow discharge plasma CVD ซึ่งใช้ในการผลิตฟิล์มอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำ
2. ควรใช้แผ่นโลหะซึ่งอะตอมหรือโมเลกุลของโลหะไม่แพร่ซึม (diffuse) เข้าสู่ชั้นอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำ
3. วัสดุแผ่นฐานโลหะควรมีความหนาที่เหมาะสม เช่น 0.5-1.0 มิลลิเมตร เพราะถ้าบางเกินไปอาจฉีกขาดได้ง่าย หรือถ้าหนาเกินไปก็จะทำให้มีน้ำหนักมากเกินไป
4. ควรสามารถนำไฟฟ้าได้ดี และนำความร้อนได้ดี และสะท้อนแสงได้ดี
5. ควรมีผิวเรียบมากที่สุด ถ้าผิวขรุขระจะทำให้เกิดการช็อตวงจรในรอยต่อ p-i-n ตัวอย่างในรูปที่ 6.3 แสดงเปรียบเทียบลักษณะสมบัติ I-V ของ a-SiC:H TFLED ซึ่งเคลือบลงบนแผ่นฐานโลหะสแตนเลสสตีลที่ความขรุขระของผิวแตกต่างกัน จากรูปพบว่า TFLED ซึ่งผลิตบนแผ่นโลหะที่ผิวขรุขระเกิน $0.2\ \mu\text{m}$ จะเกิดการช็อตภายในรอยต่อ p-i-n ดังนั้นเราจึงทราบว่า แผ่นโลหะที่จะนำมาใช้งานเป็นแผ่นฐานให้กับ TFLED จึงควรมีความขรุขระที่ผิวน้อยกว่า $0.2\ \mu\text{m}$

ขั้นตอนการผลิต TFLED ซึ่งมีโลหะเป็นแผ่นฐานอธิบายได้ดังนี้

- ล้างทำความสะอาดผิวของแผ่นโลหะ
- เคลือบฟิล์มบางของวัสดุอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำ a-SiC:H รอยต่อชนิด n-i-p
- เคลือบฟิล์มขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง ITO ด้านบนสุด หนาประมาณ $0.2\ \mu\text{m}$ ด้วยวิธี Electrom Beam Evaporation
- ต่อสายไฟฟ้าเข้ากับขั้ว ITO และแผ่นฐานโลหะ



รูปที่ 6.3 เปรียบเทียบลักษณะสมบัติ I-V ของ a-SiC:H TFLED ซึ่งเคลือบลงบนแผ่นฐานโลหะสแตนเลสสตีลที่มีความขรุขระของผิวแตกต่างกัน



รูปที่ 6.4 ลักษณะสมบัติความสว่างของ a-SiC:H TFLED ซึ่งเคลือบลงบนแผ่นโลหะสแตนเลสสตีล (SUS) (เส้นประ) โดยในรูปนี้ได้เปรียบเทียบกับกรณี TFLED ซึ่งเคลือบลงบนแผ่นกระจกด้วย (เส้นทึบ) พารามิเตอร์ในรูปนี้คือ ช่องว่างพลังงานของชั้น i

6.1.3 ผลการประดิษฐ์ TFLED โดยมีวัสดุโลหะเป็นแผ่นฐาน

รูปที่ 6.4 แสดงลักษณะสมบัติความสว่างของ a-SiC:H TFLED ซึ่งเคลือบลงบนแผ่นโลหะสแตนเลสสตีล (SUS) (เส้นประ) โดยในรูปนี้ได้เปรียบเทียบกับกรณี TFLED ซึ่งเคลือบลงบนแผ่นกระจกด้วย (เส้นทึบ) พารามิเตอร์ในรูปนี้คือ ช่องว่างพลังงานของชั้น i จากรูปที่ 6.4 นี้พบว่า ความสว่างของ TFLED ซึ่งใช้โลหะเป็นฐานมีค่าสูงกว่ากรณีที่ใช้กระจกเป็นฐานถึงเกือบ 2-3 เท่า

ตัวอย่างเช่น กรณี TFLED ซึ่งช่องว่างพลังงานของชั้น i เท่ากับ 3.0 eV นั้น (สีส้มเหลือง) ความสว่างได้เพิ่มจากประมาณ 1.5 cd/m^2 เป็นประมาณ $3-5 \text{ cd/m}^2$

ข้อมูลที่น่าสนใจอีกอย่างหนึ่งในรูปที่ 6.4 คือ จากตารางที่ 6.1 เราทราบว่า สัมประสิทธิ์ของการนำความร้อนของโลหะสแตนเลสสตีลมีค่ามากกว่าแก้วประมาณ 1.4 เท่า ดังนั้นถ้าสมมติว่าประสิทธิภาพการรวมตัวแบบเปล่งแสงของ a-SiC:H แปรผันโดยตรงกับสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (การระบายความร้อน) ดังนั้นความสว่างของ TFLED ซึ่งมีโลหะสแตนเลสสตีลเป็นแผ่นฐานควรมีค่ามากกว่ากรณีกระจกประมาณ 1.4 เท่าด้วย แต่ข้อมูลในรูปที่ 6.4 ให้ผลประมาณ 2-3 เท่า ทั้งนี้อาจมีสาเหตุมาจากแผ่นสแตนเลสสตีลได้ทำหน้าที่เป็นวัสดุสะท้อนแสงด้านหลังของ TFLED อย่างดีด้วยนั่นเอง

รูปที่ 6.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสว่างของ TFLED และกำลังไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่ที่ป้อนให้ TFLED โดยเปรียบเทียบกรณีแผ่นฐานชนิดโลหะสแตนเลสสตีลและแผ่นฐานชนิดกระจก จากรูปนี้พบว่า TFLED ที่ใช้โลหะสแตนเลสสตีลเป็นแผ่นฐานสามารถยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านรอยต่อแผ่นโลหะ/ชั้น p ได้ดีกว่า ดังนั้นจึงใช้กำลังไฟฟ้าต่อพื้นที่ต่ำกว่า จึงทำให้การสูญเสียพลังงานไฟฟ้าเป็นความร้อนน้อยลง จึงทำให้ความสว่างของ TFLED ซึ่งมีโลหะเป็นฐานดีกว่ากรณีกระจก

รูปที่ 6.6 แสดงข้อมูลอิทธิพลของความหนาของชั้น p ที่มีต่อความสว่างของ TFLED จากรูปนี้พบว่า ถ้าชั้น p หนามากเกินไป จะทำให้แสงที่เปล่งจากชั้น i ถูกชั้น p ดูดกลืนมาก ความหนาที่เหมาะสมของชั้น p คือประมาณ 150 \AA

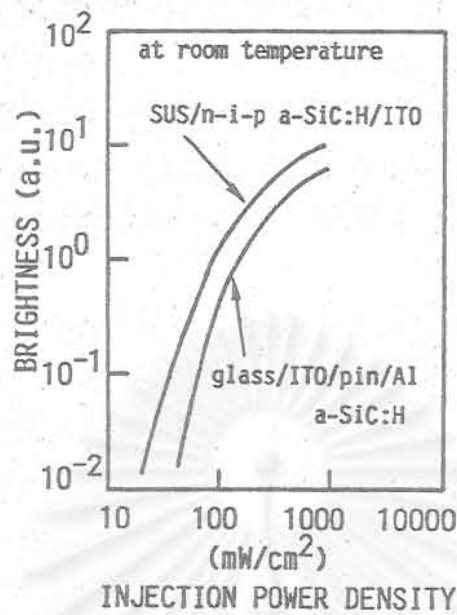
รูปที่ 6.7 แสดงสเปกตรัมการเปล่งแสงของ a-SiC:H TFLED (ช่องว่างพลังงานชั้น i เท่ากับ 3.0 eV) ที่เคลือบลงบนแผ่นโลหะสแตนเลสสตีล ลักษณะสเปกตรัมไม่แตกต่างจากกรณีการใช้กระจกเป็นแผ่นฐาน

รูปที่ 6.8 แสดงตัวอย่างภาพแผ่นฐานชนิดต่าง ๆ และภาพ TFLED รูปสี่เหลี่ยมสีส้มเหลือง ($3 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานชนิดต่าง ๆ

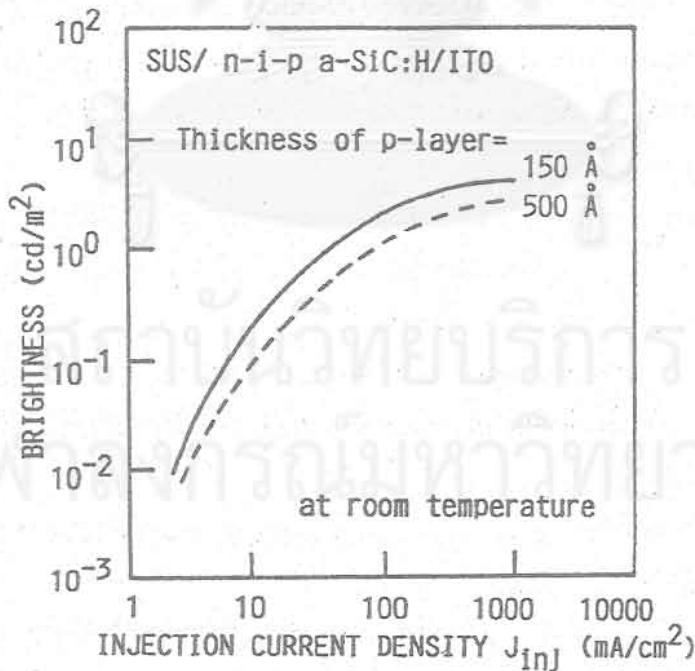
รูปที่ 6.9 แสดงตัวอย่างภาพการเปล่งแสงของ TFLED ที่เคลือบลงบนโลหะสแตนเลสสตีล เปล่งแสงสีแดง พื้นที่เปล่งแสง $3 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ (เงาที่ปรากฏในรูปคือสายไฟฟ้าที่ต่อกับ ITO)

รูปที่ 6.10 แสดงตัวอย่างภาพการเปล่งแสงของ TFLED ที่เคลือบลงบนโลหะสแตนเลสสตีล เปล่งแสงสีเหลือง พื้นที่เปล่งแสง $3 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$

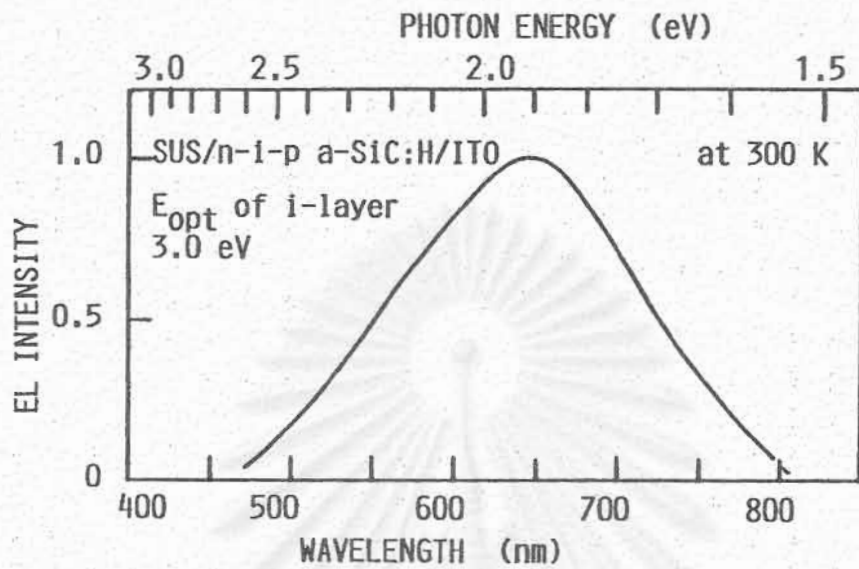
รูปที่ 6.11 แสดงตัวอย่าง TFLED ที่เคลือบลงบนแผ่นโลหะสแตนเลสสตีล โดยเปล่งแสงเป็นรูปร่างต่าง ๆ



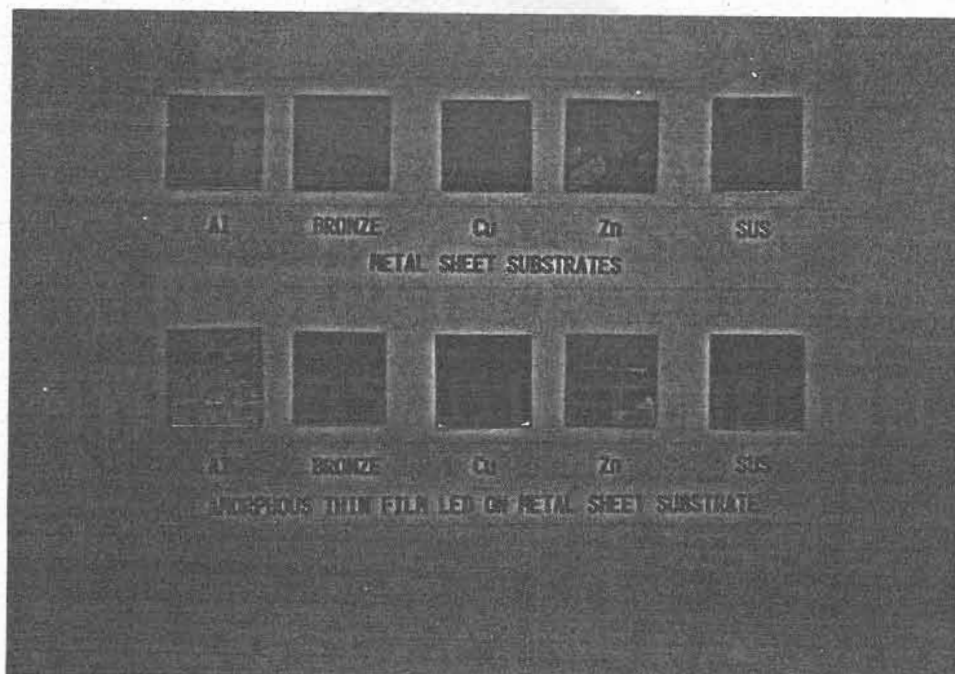
รูปที่ 6.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความสว่างของ a-SiC:H TFLED และกำลังไฟฟ้าต่อหน่วยพื้นที่ที่ป้อนให้ TFLED โดยเปรียบเทียบกรณีแผ่นฐานชนิดโลหะสแตนเลสสตีล และแผ่นฐานชนิดกระจก



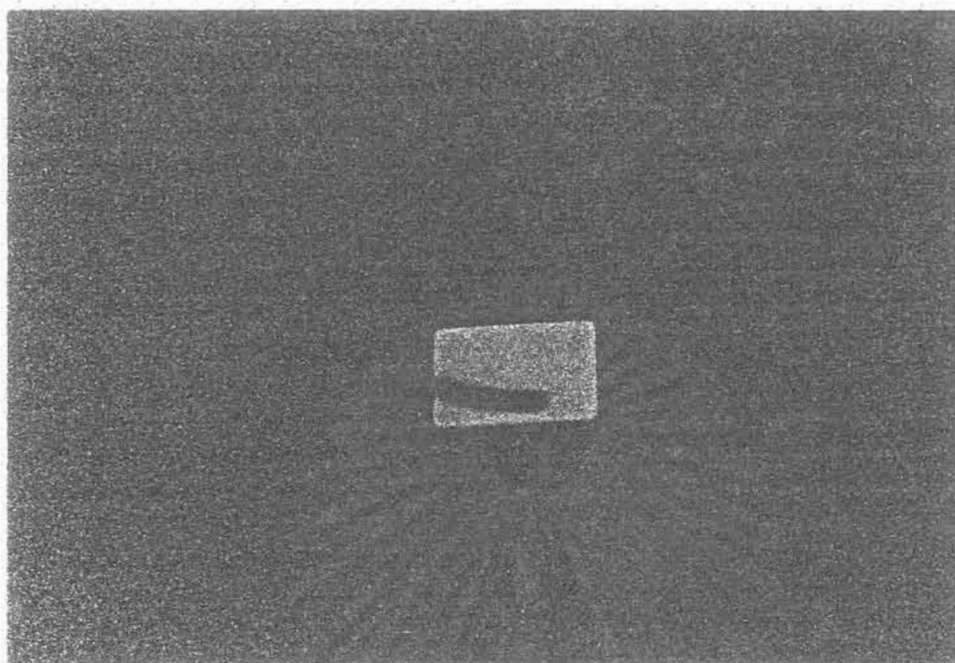
รูปที่ 6.6 อิทธิพลของความหนาของชั้น p ที่มีต่อความสว่างของ a-SiC:H TFLED จากรูปนี้พบว่า ถ้าชั้น p หนามากเกินไป จะทำให้แสงที่เปล่งจากชั้น i ถูกชั้น p ดูดกลืนมาก ความหนาที่เหมาะสมของชั้น p คือประมาณ 150 Å



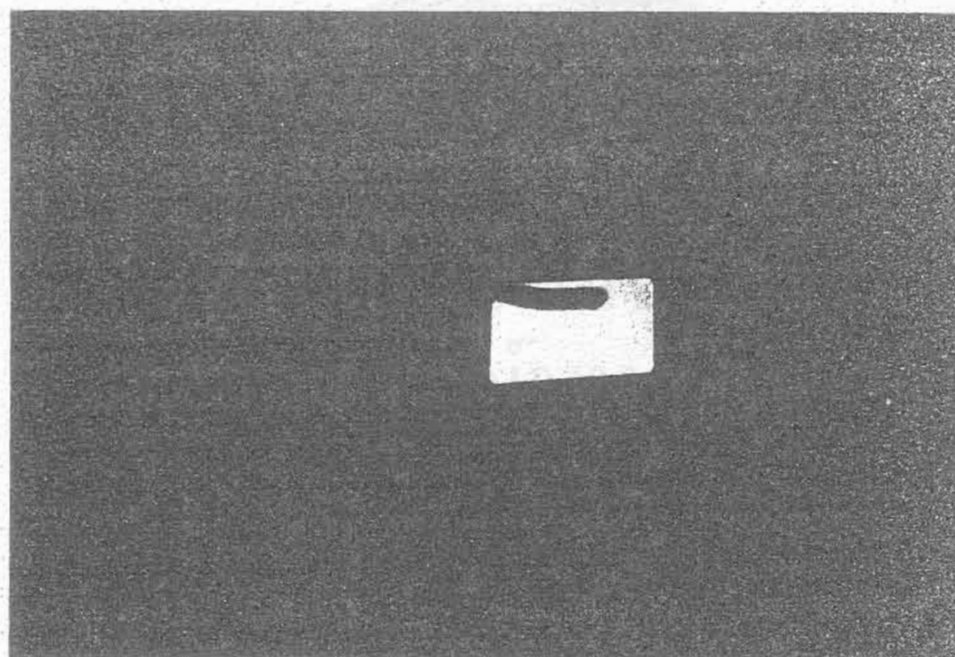
รูปที่ 6.7 สเปกตรัมการเปล่งแสงของ a-SiC:H TFLED (ช่องว่างพลังงานชั้น i เท่ากับ 3.0 eV) ที่เคลือบบนแผ่นโลหะสแตนเลสสตีล



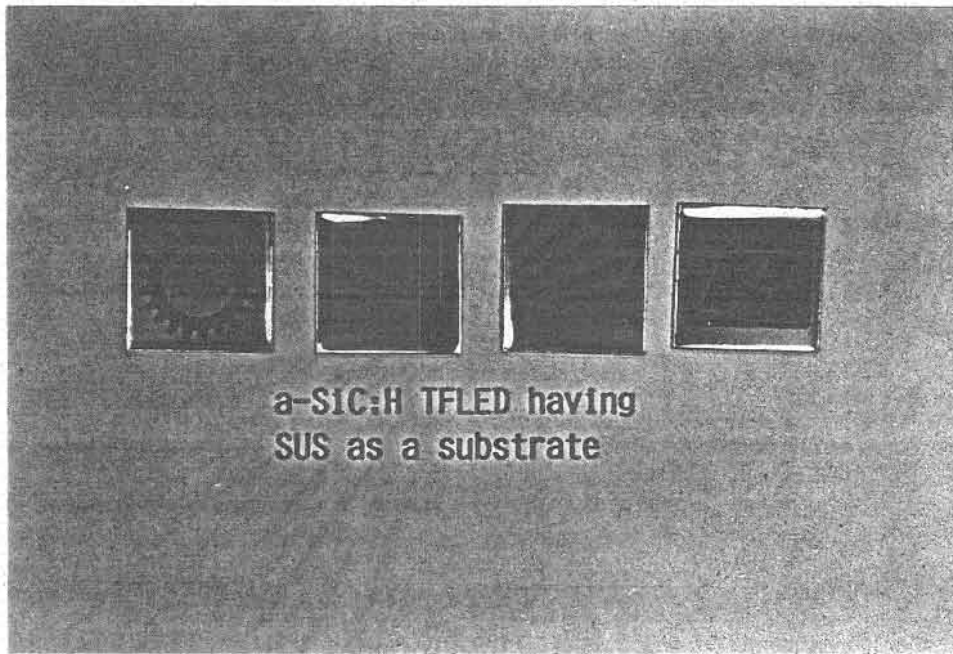
รูปที่ 6.8 ตัวอย่างภาพแผ่นฐานชนิดต่าง ๆ และภาพ a-SiC:H TFLED รูปสี่เหลี่ยมสี่มุมเหลี่ยม (3 mm x 5 mm) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานชนิดต่าง ๆ



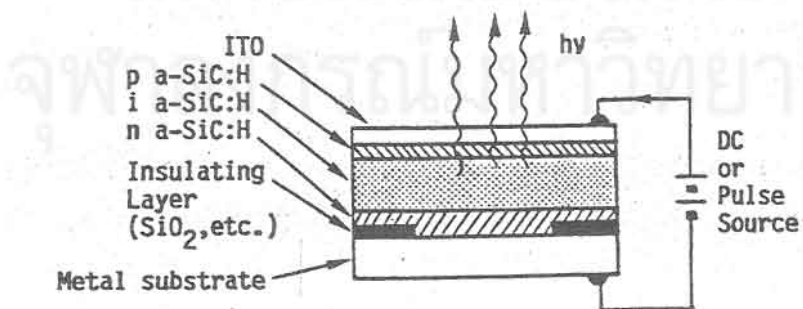
รูปที่ 6.9 ตัวอย่างภาพถ่ายการเปล่งแสงของ a-SiC:H TFLED ที่เคลือบลงบนโลหะ-สแตนเลสสตีล เปล่งแสงสีแดง พื้นที่เปล่งแสง 3 mm x 5 mm (เงาที่ปรากฏในรูปคือสายไฟฟ้าที่ต่อกับ ITO)



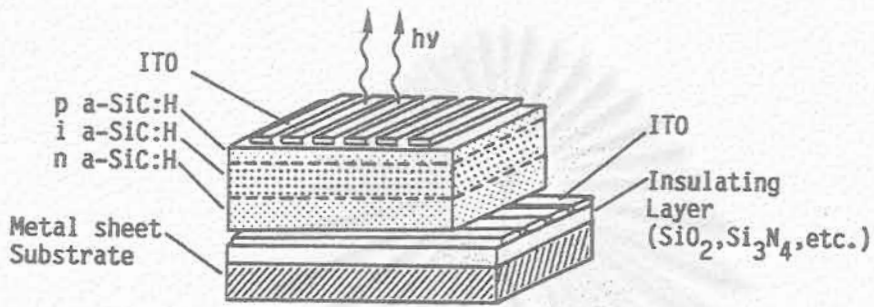
รูปที่ 6.10 ตัวอย่างภาพถ่ายการเปล่งแสงของ a-SiC:H TFLED ที่เคลือบลงบนโลหะ-สแตนเลสสตีล เปล่งแสงสีเหลือง พื้นที่เปล่งแสง 3 mm x 5 mm



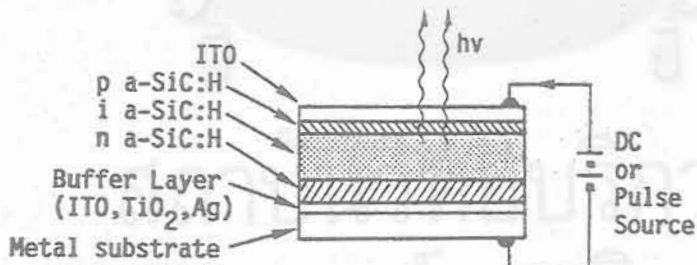
รูปที่ 6.11 ตัวอย่าง a-SiC:H TFLED ที่เคลือบบนแผ่นโลหะสแตนเลสสตีล โดยออกแบบให้เปล่งแสงเป็นรูปร่างต่าง ๆ (ลวดลายภาพกำหนดด้วยชั้นฉนวนตามที่แสดงในรูปที่ 6.12)



รูปที่ 6.12 โครงสร้างของ TFLED ซึ่งกำหนดลวดลายการเปล่งแสงด้วยชั้นฉนวนที่สอดอยู่ภายใน วัสดุฉนวนอาจเป็น SiO_2 หรือ SiN



รูปที่ 6.13 โครงสร้างของ TFLED ซึ่งมีขั้วไฟฟ้า ITO แบบเมตริกซ์ โดยมีชั้นฉนวนกันระหว่างแผ่นฐานโลหะและ ITO



รูปที่ 6.14 โครงสร้างของ TFLED ซึ่งถ้าผิวของแผ่นโลหะขรุขระ อาจทำให้ผิวเรียบขึ้น โดยการเคลือบชั้นบัฟเฟอร์ (buffer) เช่น ใช้วัสดุ ITO, TiO₂ หรือ Ag

ในกรณีที่ต้องการผลิต TFLED ให้เปล่งแสงเป็นรูปร่างต่างๆ สามารถทำได้หลายวิธีเช่น

1. กำหนดจากรูปร่างของฟิล์ม ITO ด้านบน ดังแสดงในรูปที่ 6.79-6.10
 2. โดยการสอดแทรกชั้นฉนวนเข้าไปภายใน TFLED ดังแสดงในรูปที่ 6.12 วิธีนี้จะไม่มีแสงออกจากบริเวณที่มีชั้นฉนวน วัสดุฉนวนอาจเป็น ซิลิคอนออกไซด์หรือซิลิคอนไนไตรด์ซึ่งสามารถเตรียมได้ด้วยวิธี glow discharge plasma CVD
 3. การผลิตให้เปล่งแสงแบบเมตริกซ์ สามารถใช้โครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 6.13
- อนึ่ง ถ้าผิวของแผ่นโลหะขรุขระ อาจทำให้ผิวเรียบขึ้นโดยการเคลือบชั้นบัฟเฟอร์ (buffer) เช่น ใช้วัสดุ ITO, TiO_2 หรือ Ag เป็นต้น ดังแสดงในรูป 6.14

6.2 การเพิ่มประสิทธิภาพของการฉีดโฮลด้วยวัสดุ p-a-(μc)-SiO:H ซึ่งมีค่าสภาพนำไฟฟ้าสูงและช่องว่างพลังงานกว้าง

ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 แล้วว่าเมื่อช่องว่างพลังงานของ p-a-SiC:H และ n-a-SiC:H กว้างขึ้นกว่า 2.0 eV จะทำให้ค่าสภาพนำไฟฟ้าลดลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้นเพื่อการคงสภาพสารกึ่งตัวนำไว้ ที่ผ่านมาในบทที่ 3 ถึงบทที่ 6 จึงใช้วัสดุ p-a-SiC:H และ n-a-SiC:H ที่มีช่องว่างพลังงาน 2.0 eV (สภาพนำไฟฟ้ามีค่าประมาณ 10^{-7} S/cm) เป็นชั้นฉีดกระแสโฮลและอิเล็กตรอนมาโดยตลอด

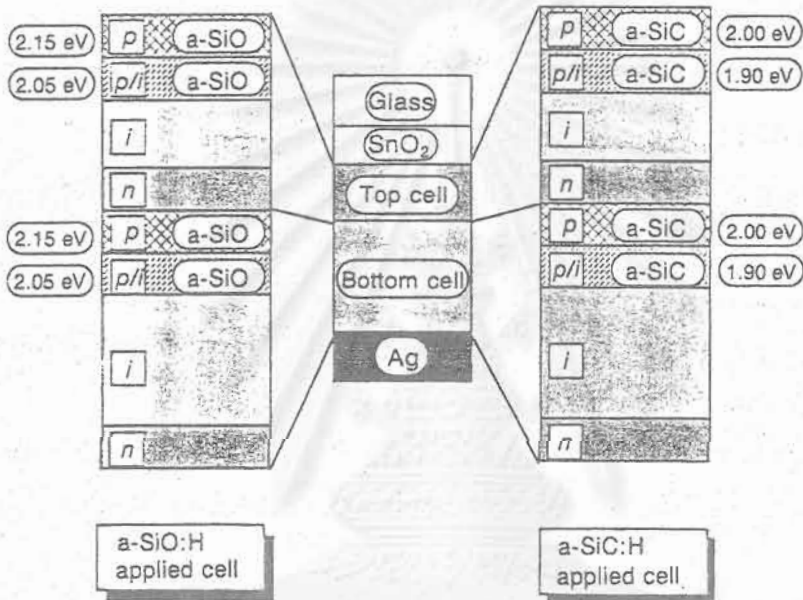
ในขณะที่เดียวกันช่องว่างพลังงานของชั้น i-a-SiC:H ต้องกว้างกว่า 2.4 eV จึงจะเปล่งแสงที่ตามองเห็น ดังนั้นใน TFLED นั้น ช่องว่างพลังงานของชั้น i จึงกว้างกว่าของชั้น p และชั้น n

จากผลการวิเคราะห์กลไกการฉีดพาหะในบทที่ 3 ได้พบว่าการฉีดพาหะทั้งโฮลและอิเล็กตรอนต้องใช้วิธีทันเนลลิงผ่านกำแพงศักย์ที่รอยต่อ p/i และ i/n ตามลำดับและต้องใช้สนามไฟฟ้าที่สูง การใช้สนามไฟฟ้านั้นมีผลเสีย กล่าวคือทำให้ความน่าจะเป็นของการรวมตัวของพาหะในชั้น i ลดลง ดังนั้นถ้าเราสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการฉีดพาหะได้ จะทำให้สามารถลดสนามไฟฟ้าและทำให้ความสว่างของ TFLED ดีขึ้นได้

การเพิ่มประสิทธิภาพของการฉีดพาหะที่คาดว่าจะได้ผลวิธีหนึ่งคือ การใช้วัสดุชั้น p, n ที่มีช่องว่างพลังงานกว้างขึ้นและมีค่าสภาพนำไฟฟ้าสูงด้วย

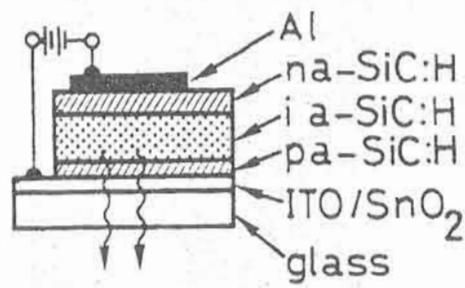
เป็นที่น่ายินดีว่าเมื่อไม่นานมานี้ ได้มีรายงานจากคณะผู้วิจัยของบริษัท Fuji Electric Corp ประเทศญี่ปุ่นว่าสามารถผลิตวัสดุอะมอร์ฟัสซิลิคอนออกไซด์ (a-SiO:H) และไมโครคริสตัลไลน์ (μc -SiO:H) ชนิด p ซึ่งมีช่องว่างพลังงานกว้างกว่า 2.0 eV และมีสภาพนำไฟฟ้าสูงได้สำเร็จ [5] และได้รายงานว่าฟิล์มเหล่านี้มีประโยชน์ในการใช้เป็นชั้นหน้าต่างกว้างรับแสงให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงดังแสดงในรูปที่ 6.15 [5]

ในงานวิจัยนี้ ได้มีการติดต่อเพื่อทำวิจัยร่วมกับบริษัท Fuji Electric โดยให้บริษัท Fuji Electric เตรียมฟิล์ม a-SiO:H และ μc -SiO:H ชนิด p ที่ญี่ปุ่น และส่งชิ้นงานเหล่านั้นมา

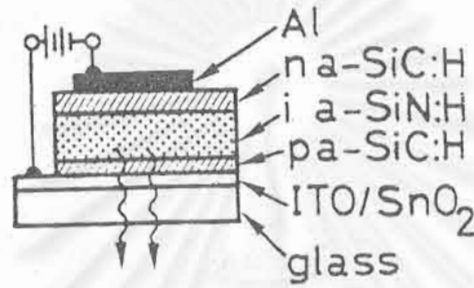


รูปที่ 6.15 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟิซิลิคอนประสิทธิภาพสูงระดับ 10% ซึ่งมีการประยุกต์ใช้วัสดุ a-SiO:H เป็นชั้น p [5]

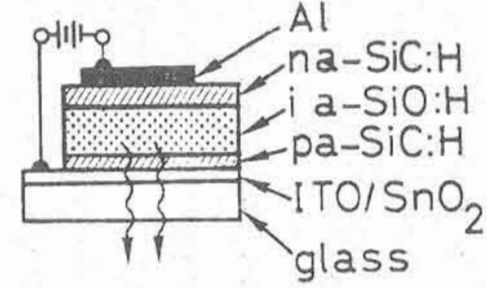
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



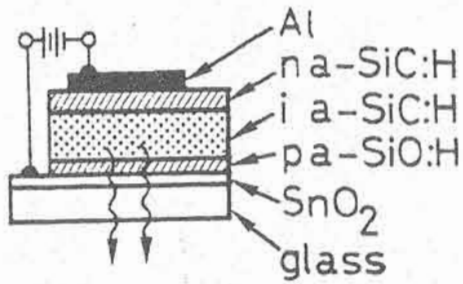
(a)



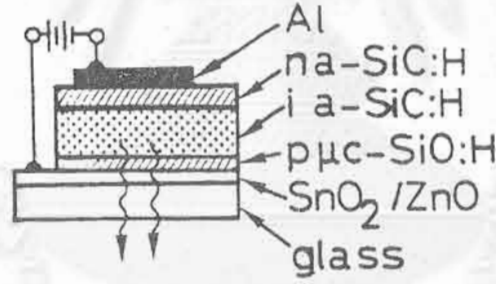
(b)



(c)



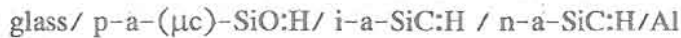
(d)



(e)

รูปที่ 6.16 โครงสร้างของ TFLED แบบต่างๆที่ประดิษฐ์ในงานวิจัยนี้ โดยในบทนี้พัฒนาารุ่นที่ใช้วัสดุ p-a-SiO:H และ p- μ c-SiO:H เป็นชั้นฉนวนแสดงในรูป (d) และ (e) ตามลำดับ

ประเทศไทย ต่อจากนั้นคณะผู้วิจัยจึงได้เคลือบ a-SiC:H ชนิด i และ n และชั้น Al ตามลำดับในประเทศไทย กล่าวคือ TFLED ที่ปรับปรุงใหม่นี้มีโครงสร้างดังนี้ (รูปที่ 6.16 (d), (e))



TFLED ที่มีโครงสร้างใหม่นี้ ให้ความสว่างสูงกว่า TFLED ในบทก่อน ๆ ได้ถึง 5 เท่า และสเปกตรัมก็เคลื่อนไปทางความยาวคลื่นสั้นลงด้วย ผลงานความสำเร็จในส่วนนี้ได้ตีพิมพ์เผยแพร่ในที่ประชุมนานาชาติ 16th Int. Conf. Amorphous Semiconductor 1995 [6]

6.2.1 การผลิตฟิล์ม a-(μc)-SiO:H ชนิด p และคุณสมบัติพื้นฐาน

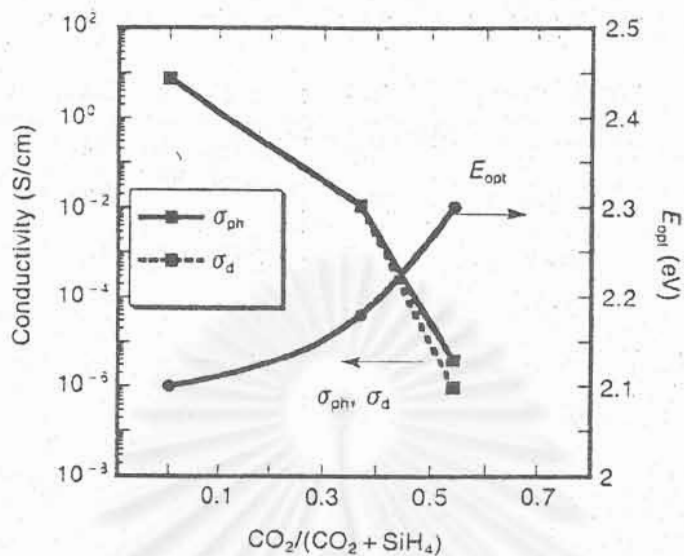
ตารางที่ 6.2 แสดงเงื่อนไขการผลิตฟิล์ม a-SiO:H และ $\mu\text{c-SiO:H}$ ชนิด p และ n ด้วยวิธี glow discharge plasma CVD [5] ก๊าซที่ใช้ได้แก่ SiH_4 และ CO_2 เงื่อนไขสำคัญที่ทำให้สามารถผลิตฟิล์มให้มีคุณสมบัติเป็นไมโครคริสตัลไลน์และมีค่าสภาพนำไฟฟ้าสูงคือ การผสมก๊าซ H_2 ปริมาณมาก ๆ เข้าสู่ chamber โดยให้อัตราส่วนของ $\text{H}_2/\text{SiH}_4 = 160-320$ และการใช้กำลัง RF สูง ๆ ประมาณ 50 mW/cm^2 ถ้าใช้กำลัง RF ต่ำจะได้ฟิล์มเป็นอะมอร์ฟัส

ตารางที่ 6.2 เงื่อนไขสำหรับการผลิตฟิล์ม a-SiO:H และ $\mu\text{c-SiO:H}$ ชนิด p และ n ให้มีค่าสภาพนำไฟฟ้าสูง ด้วยวิธี glow discharge plasma CVD

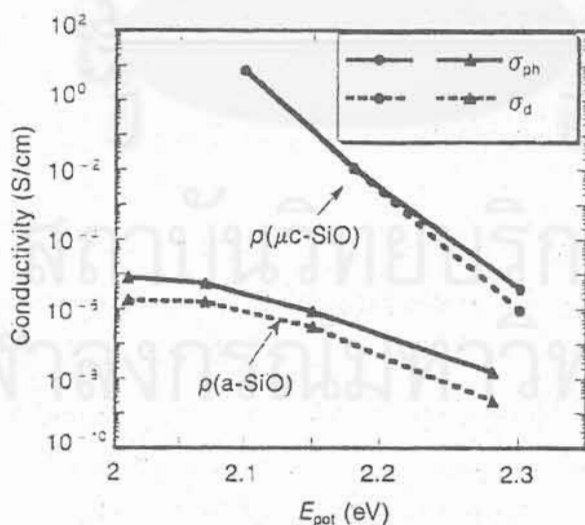
$\text{CO}_2/(\text{SiH}_4+\text{CO}_2)$	0-0.6
H_2/SiH_4	160-320
$\text{B}_2\text{H}_6 (\text{PH}_3)/\text{SiH}_4$	0.6-1.0 %
Substrate temperature	100-250°C
Pressure	1.0 Torr
RF power density	20-50 mW/cm^2

ในการเตรียมฟิล์มนั้น ถ้าใช้กำลังไฟฟ้า RF สูงประมาณ 50 mW/cm^2 จะได้ฟิล์มมีคุณสมบัติเป็นไมโครคริสตัลไลน์ ($\mu\text{c-SiO:H}$) การตรวจสอบว่าฟิล์ม $\mu\text{c-SiO:H}$ มีเฟสของผลึกผสมอยู่ สามารถดูได้ด้วยสเปกตรัมการกระเจิงของรามาน (Raman Scattering spectra) พบว่าสเปกตรัมรามานมียอดแหลมใกล้บริเวณ 520 cm^{-1} ซึ่งเกิดจากสัญญาณของ TO โฟนอนของเม็ดผลึกย่อยซิลิคอน

ตารางที่ 6.3 แสดงข้อมูลผลการวัดปริมาณของธาตุต่างๆในฟิล์มด้วยวิธี ESCA และวิธีสเปกตรัมของ FT-IR ในตารางนี้พบว่าฟิล์ม p- $\mu\text{c-SiO:H}$ มีปริมาณของ O มากกว่าในฟิล์ม a-SiO:H ดังนั้นฟิล์มชนิด $\mu\text{c-SiO:H}$ จึงมีช่องว่างพลังงานกว้างกว่า a-SiO:H



รูปที่ 6.17 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้า ช่องว่างพลังงานของฟิล์ม SiO:H และอัตราส่วนของก๊าซ $CO_2/(CO_2+SiH_4)$ เมื่ออัตราส่วนของก๊าซ CO_2 เพิ่มขึ้นจาก 0.05 เป็น 0.55 ทำให้ช่องว่างพลังงานของฟิล์มกว้างขึ้นจาก 2.1 eV เป็น 2.3 และขณะเดียวกันสภาพนำไฟฟ้าลดลงจาก 10^0 เป็น 10^{-6} (S/cm) [5]



รูปที่ 6.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้าและช่องว่างพลังงาน ในรูปนี้พบว่าสภาพนำไฟฟ้าของฟิล์มที่ผลิตด้วยเจือไนให้เป็น p- μ c-SiO:H จะมีค่าสูงกว่า p-a-SiO:H ถึง 2-4 หลัก และช่องว่างพลังงานของ p- μ c-SiO:H สามารถผลิตให้กว้างถึง 2.2~2.3 eV ได้โดยที่ยังสามารถรักษาค่าสภาพนำไฟฟ้าไว้ได้ถึงระดับ 10^{-6} (S/cm) [5]

ตารางที่ 6.3 ปริมาณของ Si, O, C และ H ในฟิล์ม a- หรือ $\mu\text{c-SiO:H}$ ชนิด p

ฟิล์มชนิด	$\text{CO}_2/$ (CO_2+SiH_4)	Si (%)	O (%)	C (%)	H (atom/cm ³)
p (a-SiO:H)	0.67	78.4	21.6	N.D.	1.37×10^{22}
p ($\mu\text{c-SiO:H}$)	0	100	N.D.	N.D.	1.68×10^{21}
	0.37	73.9	26.0	N.D.	8.71×10^{21}
	0.54	65.0	35.0	N.D.	7.30×10^{21}

(N.D.: ตรวจสอบไม่พบ)

รูปที่ 6.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้า ช่องว่างพลังงานของฟิล์ม SiO:H และอัตราส่วนของก๊าซ $\text{CO}_2/(\text{CO}_2+\text{SiH}_4)$ เมื่ออัตราส่วนของก๊าซ CO_2 เพิ่มขึ้นจาก 0.05 เป็น 0.55 ทำให้ช่องว่างพลังงานของฟิล์มกว้างขึ้นจาก 2.1 eV เป็น 2.3 eV และขณะเดียวกันสภาพนำไฟฟ้าลดลงจาก 10^0 เป็น 10^{-6} (S/cm)

รูปที่ 6.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้าและช่องว่างพลังงาน ในรูปที่ 6.18 นี้พบว่า ค่าสภาพนำไฟฟ้าของฟิล์มที่ผลิตด้วยเงื่อนไขให้เป็น $\mu\text{c-SiO:H}$ จะมีค่าสูงกว่า a-SiO:H ถึง 2-4 หลัก และช่องว่างพลังงานของ p- $\mu\text{c-SiO:H}$ สามารถผลิตให้กว้างถึง 2.2~2.3 eV ได้โดยที่ยังสามารถรักษาค่าสภาพนำไฟฟ้าไว้ได้ถึงระดับ 10^{-6} (S/cm)

ข้อมูลในรูปที่ 6.17-6.18 แสดงให้เห็นว่า ฟิล์ม p- $\mu\text{c-SiO:H}$ มีคุณสมบัติเหมาะสมในการนำไปใช้เป็นวัสดุชั้น p ที่มีช่องว่างพลังงานกว้างสำหรับ TFLED

6.2.2 ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางรอยต่อ p-a(μc)-SiO:H/i-a-SiC:H/n-a-SiC:H

ได้กล่าวในหัวข้อที่ 6.2.1 แล้วว่าสามารถประดิษฐ์ฟิล์ม p- $\mu\text{c-SiO:H}$ ชนิด p ได้ด้วยวิธี glow discharge plasma CVD และเป็นฟิล์มที่มีค่าสภาพนำไฟฟ้าสูงถึงระดับ 10^{-6} s/cm และช่องว่างพลังงานกว้างถึง 2.3 eV ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทดลองใช้วัสดุ p- $\mu\text{c-SiO:H}$ นี้เป็นชั้น p ใน TFLED และเปรียบเทียบกับ TFLED ซึ่งมี p-a-SiC:H เป็นชั้น p

โครงสร้างของ TFLED แบบใหม่ที่พัฒนาขึ้นในหัวข้อนี้ได้แก่

Glass/ITO/p-a-SiO:H/i-a-SiC:H/n-a-SiC:H

(รูปที่ 6.16 (d))

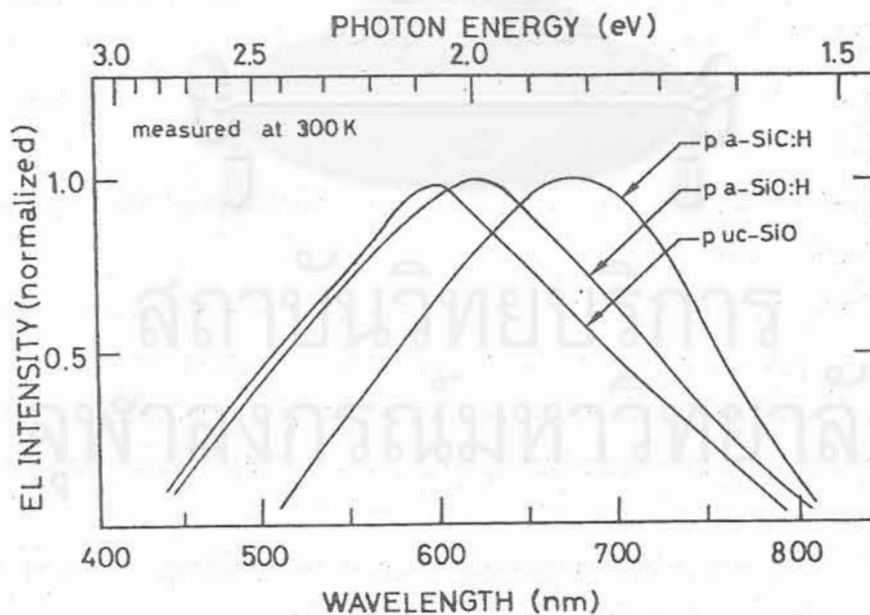
และ Glass/ITO/p- $\mu\text{c-SiO:H}$ /i-a-SiC:H/n-a-SiC:H

(รูปที่ 6.16 (e))

ตารางที่ 6.4 แสดงข้อมูลพารามิเตอร์โครงสร้างของ TFLED แบบต่างๆ โดยที่หมายเลข #1, #2 และ #3 เป็น TFLED ที่มีโครงสร้างแบบเดิมตามที่ได้อ้างมาแล้วในบทที่ 3-5

ตารางที่ 6.4 พารามิเตอร์โครงสร้างของ TFLED แบบต่างๆ โดยที่หมายเลข #1, #2 และ #3 เป็น TFLED ที่มีโครงสร้างแบบเดิมตามที่ได้อธิบายมาแล้วในบทที่ 3-5 และ หมายเลข #4, #5, #6 และ #7 เป็นโครงสร้างใหม่ในบทที่ 6 นี้

Type	Sample No.	TCO Materials	p-layer	i-layer	n-layer
(a)	#1	ITO/SnO ₂ (1800Å/200Å)	a-SiC:H (2.0eV, 150Å)	a-SiC:H (3.0eV, 500Å)	a-SiC:H (2.0eV, 500Å)
(b)	#2	ITO/SnO ₂ (1800Å/200Å)	a-SiC:H (2.0eV, 150Å)	a-SiN:H (3.0eV, 500Å)	a-SiC:H (2.0eV, 500Å)
(c)	#3	ITO/SnO ₂ (1800Å/200Å)	a-SiC:H (2.0eV, 150Å)	a-SiO:H (3.0eV, 500Å)	a-SiC:H (2.0eV, 500Å)
(d)	#4	SnO ₂ (9000Å)	a-SiO:H (2.15eV, 120Å)	a-SiC:H (3.0eV, 500Å)	a-SiC:H (2.0eV, 500Å)
(d)	#5	SnO ₂ (9000Å)	a-SiO:H (2.30eV, 120Å)	a-SiC:H (3.0eV, 500Å)	a-SiC:H (2.0eV, 500Å)
(e)	#6	SnO ₂ /ZnO (9000Å/300Å)	μc-SiO:H (2.30eV, 200Å)	a-SiC:H (3.0eV, 500Å)	a-SiC:H (2.0eV, 500Å)
(e)	#7	SnO ₂ /ZnO (9000Å/300Å)	μc-SiO:H (2.30eV, 200Å)	a-SiC:H (3.0eV, 500Å)	a-SiC:H (2.0eV, 500Å)



รูปที่ 6.19 สเปกตรัมการเปล่งแสงของ TFLED ซึ่งมีวัสดุชั้น p แตกต่างกัน 3 ชนิดซึ่งได้แก่

$$p\text{-a-SiC:H, } E_{\text{opt}} = 2.0 \text{ eV}$$

$$p\text{-a-SiO:H, } E_{\text{opt}} = 2.15 \text{ eV}$$

$$p\text{-}\mu\text{c-SiO:H, } E_{\text{opt}} = 2.30 \text{ eV}$$

และหมายเลข #4, #5, #6 และ #7 เป็น TFLED ที่พัฒนาใหม่ในบทนี้
ใน TFLED ทั้งหมดนี้ ช่องว่างพลังงานของชั้น i-a-SiC:H และ n-a-SiC:H เท่ากับ 3.0
และ 2.0 eV ตามลำดับ

ความแตกต่างของ TFLED หมายเลข #4~#7 ได้แก่
#4 และ #5 มีอะมอร์ฟัส p-a-SiO:H เป็นชั้น p
#6 และ #7 มีไมโครคริสตัลไลน์ p- μ c-SiO:H เป็นชั้น p

ผลการทดลองประดิษฐ์ TFLED ที่มีวัสดุชั้น p ชนิดใหม่ได้ผลดังต่อไปนี้

รูปที่ 6.19 แสดงช่องว่างพลังงานของชั้น p ที่ขึ้นกับชนิดของวัสดุชั้น p ของสเปกตรัม
การเปล่งแสงของ TFLED ในรูปที่ 6.19 มีค่าดังนี้

$$\begin{aligned} \text{p-a-SiC:H, } E_{\text{opt}} &= 2.0 \text{ eV} \\ \text{p-a-SiO:H, } E_{\text{opt}} &= 2.15 \text{ eV} \\ \text{p-}\mu\text{c-SiO:H, } E_{\text{opt}} &= 2.30 \text{ eV} \end{aligned}$$

ในรูปที่ 6.19 นี้พบว่า การใช้ p-a-SiO:H และ p- μ c-SiO:H เป็นชั้น p จะทำให้
สเปกตรัมการเปล่งแสง (EL) ของ TFLED เคลื่อนไปทางพลังงานโฟตอนที่สูงขึ้น

รูปที่ 6.20 แสดงสรุปความสัมพันธ์ระหว่างค่ายอดพลังงานของสเปกตรัม EL และช่อง-
ว่างพลังงาน

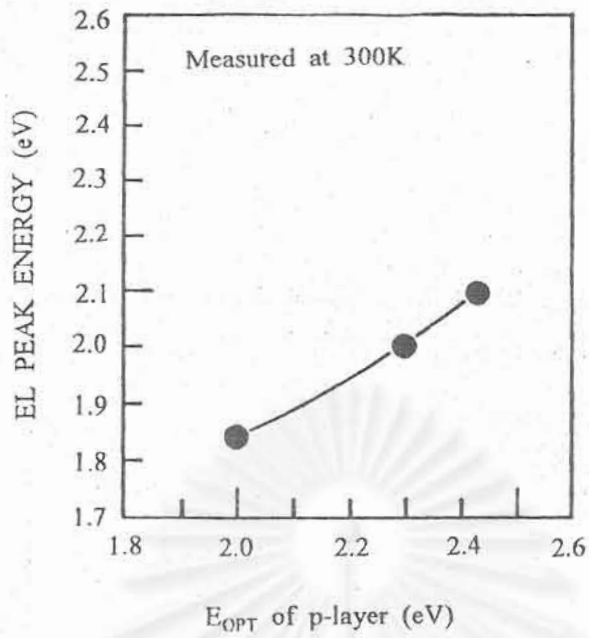
การเคลื่อนที่ของสเปกตรัมไปทางพลังงานโฟตอนที่สูงขึ้น เมื่อช่องว่างพลังงานของชั้น p
กว้างขึ้นนั้น สามารถอธิบายได้ดังนี้ (ดูรูปที่ 6.21)

1. เมื่อช่องว่างพลังงานชั้น p กว้างขึ้น ($E_{p2} > E_{p1}$) ทำให้ระดับพลังงานในการกระตุ้นโฮล
ค่ามากขึ้น ($E_{x2} > E_{x1}$)
2. เนื่องจาก $E_{x2} > E_{x1}$ ดังนั้นค่ายอดพลังงานของสเปกตรัมจึงมีค่า $E_{EL2} > E_{EL1}$

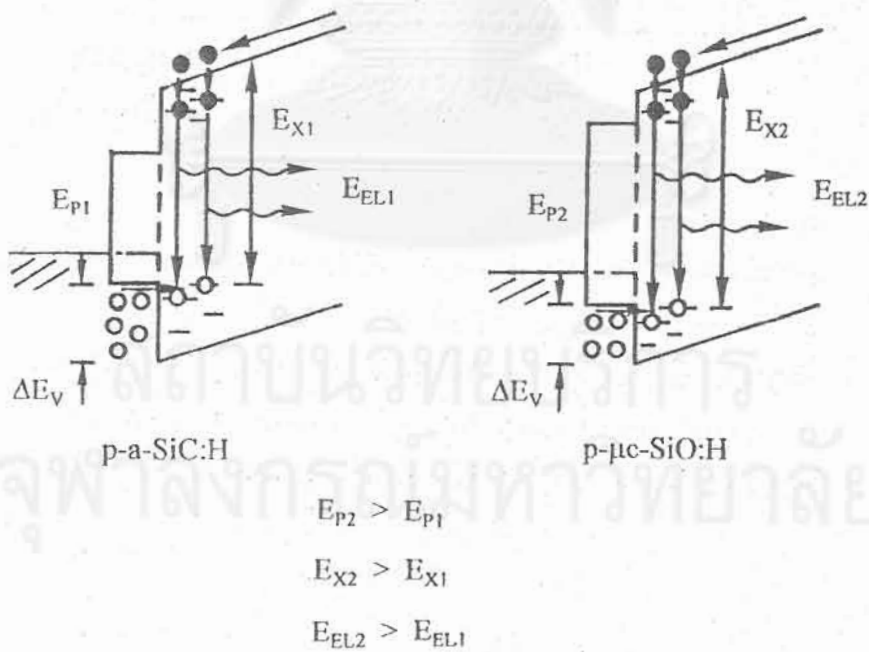
การเคลื่อนที่ของสเปกตรัม EL เช่นนี้ในแง่ของสิ่งประดิษฐ์เป็นผลดีเพราะนอกจากจะได้
สเปกตรัมที่พลังงานโฟตอนสูงขึ้นแล้วยังทำให้ความสว่างของ TFLED ดีขึ้นอีกด้วยดังแสดงในรูป
ที่ 6.22

รูปที่ 6.22 แสดงการเปรียบเทียบความสว่างของ TFLED ที่มีวัสดุชั้น p แตกต่างกัน โดย
มีชั้น i และ n เหมือนกัน (โครงสร้างดูในรูปที่ 6.16 (d) และ (e))

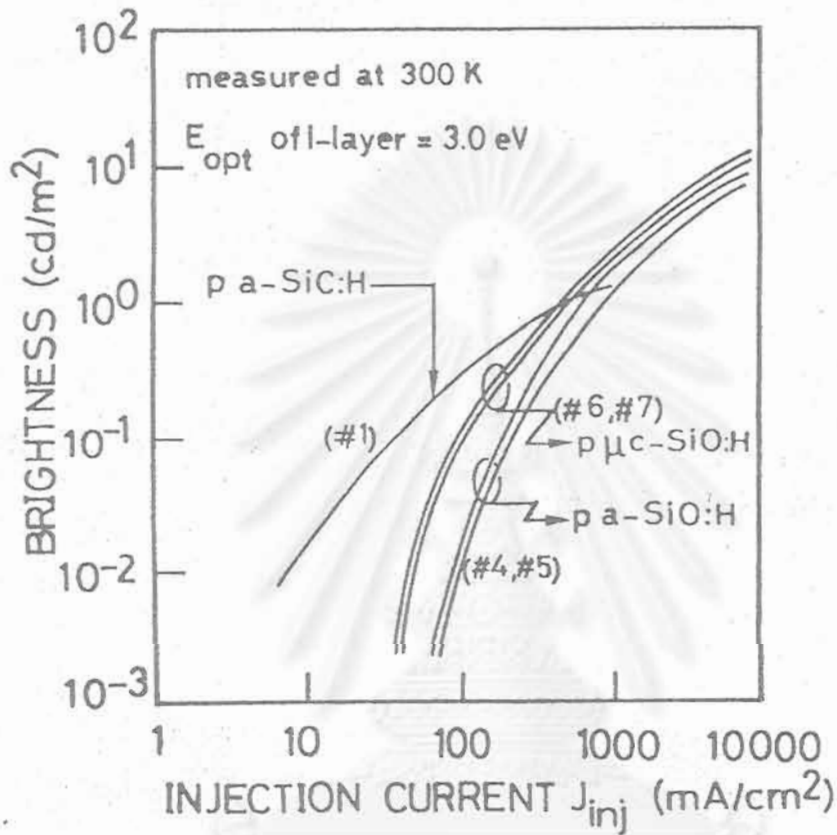
$$\begin{aligned} \text{TFLED หมายเลข #1} & \quad \text{มีชั้น p คือ p-a-SiC:H (2.0 eV)} \\ \text{TFLED หมายเลข #4, #5} & \quad \text{มีชั้น p คือ p-a-SiO:H (2.15 eV)} \\ \text{TFLED หมายเลข #6, #7} & \quad \text{มีชั้น p คือ p-}\mu\text{c-SiO:H (2.30 eV)} \end{aligned}$$



รูปที่ 6.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ายอดพลังงานของสเปกตรัม EL และช่องว่างพลังงานของวัสดุชั้น p ที่ใช้ใน TFLED



รูปที่ 6.21 โมเดลอธิบายการเคลื่อนที่ของสเปกตรัม EL ไปทางพลังงานโฟตอนที่สูงขึ้น เมื่อช่องว่างพลังงานของชั้น p กว้างขึ้น



รูปที่ 6.22 เปรียบเทียบความสว่างของ TFLED ที่มีวัสดุชั้น p ต่างกัน โดยมีชั้น i และ n เหมือนกัน (โครงสร้างดูในรูปที่ 6.16 (d) และ (e))

TFLED หมายเลข #1 มีชั้น p คือ p-a-SiC:H (2.0 eV)

TFLED หมายเลข #4, #5 มีชั้น p คือ p-a-SiO:H (2.15 eV)

TFLED หมายเลข #6, #7 มีชั้น p คือ p- $\mu\text{c-SiO:H}$ (2.30 eV)

ในรูปที่ 6.22 พบว่า TFLED ที่มีชั้น p เป็น p-a-SiO:H และ p- μ c-SiO:H สามารถให้กระแสไฟฟ้าไหลได้มากขึ้นและความสว่างก็ดีขึ้นจากระดับ 2 cd/m^2 ไปเป็นระดับ 10 cd/m^2

การเพิ่มขึ้นของความสว่างนี้อธิบายได้ว่า เมื่อช่องว่างพลังงานของชั้น p กว้างขึ้น ทำให้ระดับพลังงานสำหรับการฉีดโฮลเข้าสู่ชั้น i ได้รับการปรับปรุงให้ใกล้เคียงขอบของแถบวาเลนซ์ในชั้น i มากขึ้น และเนื่องจากความหนาแน่นของสเตท (localized states) ที่บริเวณใกล้เคียงของแถบวาเลนซ์ในชั้น i มีมากขึ้น ดังนั้นความน่าจะเป็นของการรวมตัวของโฮลและอิเล็กตรอนจึงมีค่ามากขึ้น

6.3 สรุป

ได้ประสบความสำเร็จในการปรับปรุงความสว่างให้กับไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบาง โดยใช้เทคนิค 2 วิธี วิธีแรกได้แก่การใช้วัสดุโลหะเป็นแผ่นฐาน การใช้วัสดุโลหะที่มีผิวเรียบเป็นแผ่นฐานทำให้สามารถสะท้อนแสงได้ดีและนำความร้อนได้ดีกว่ากระจก ผลการใช้สแตนเลสสตีลเป็นแผ่นฐานได้ผลว่า ความสว่างของ TFLED เพิ่มขึ้นจากกรณีการใช้กระจกเป็นฐาน $1-2 \text{ cd/m}^2$ เป็น $3-5 \text{ cd/m}^2$ นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้โลหะเป็นแผ่นฐานนั้น มีข้อดีเด่นกว่ากระจกอีกหลายด้าน เช่น คงทน ไม่แตกหัก ตัดให้โค้งงอได้ แผ่นโลหะทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าได้โดยตรง เป็นต้น ผลงานความสำเร็จในการคิดค้นเรื่องนี้ได้มีการยื่นจดสิทธิบัตรทั้งในประเทศและในออสเตรเลียและในสหรัฐอเมริกา [7]

ส่วนการปรับปรุงความสว่างวิธีที่สอง ได้แก่การใช้วัสดุไมโครคริสตัลไลน์ซิลิคอนออกไซด์ (μ c-SiO:H) ชั้น p ซึ่งมีช่องว่างพลังงานกว้างและมีค่าสภาพนำไฟฟ้าสูงเป็นชั้น p ผลการทดลองพบว่า ความสว่างเพิ่มขึ้นจากกรณีใช้ p-a-SiC:H เป็นชั้น p ระดับ 2 cd/m^2 เป็น 10 cd/m^2 และยังพบอีกด้วยว่า สเปกตรัมการเปล่งแสงของ TFLED ได้เคลื่อนไปทางความยาวคลื่นที่สั้นลง การดีขึ้นต่างๆของคุณสมบัติเหล่านี้ อธิบายได้ด้วยกลไกการฉีดโฮลที่ดีขึ้นของโฮล

เอกสารอ้างอิง

1. J.W.Hong, T.S. Jen, N.F. Shin, J.Y. Chen, S.L. Ning and C.Y. Chang, "Amorphous SiC Thin Film Light Emitting Diode Using Quantum Well Injection Structures", 1992 Int. Conf. Solid State Device and Materials, Tsukuba, Japan, August 26-28 (1992) 382.
2. T.S. Jen, J.Y. Chen, N.F. Shin, J.W. Hong and C.Y. Chang, "Hydrogenated Amorphous Silicon Carbide Thin Film Light Emitting Diode with Quantum Well Injection Structure", Electronics Letters, 29 (1993) 707.
3. S.P. Lau, J.M. marshall. T.E. Dyer, A.R. Hepburn and J.F. Davies, "a-SiC:H Thin Film Visible Light Emitting Diodes with Highly Conductive Wide Band Gap a-SiC:H

as The Carrier Injection Layers”, 15th Int. Conf. Amorphous Semiconductors (ICAS), Cambridge (1993).

4. W. Boonkosum, D. Kruangam, B. DeLong and S. Panyakeow, “Improvement of Brightness & Threshold Current in Visible Light a-SiC:H Thin Film LED by Using Metal Sheet Substrate”, Symp. Proc. of 1994 Spring Meeting of Materials Research Society (MRS), vol.336-Amorphous Silicon Technology 1994-, San Francisco, U.S.A., April 4-8 (1994) 849.
5. S. Fujikake, H. Ohta, P. Sichanugrist, M. Ohsawa, Y. Ichikawa and H. Sakai, “a-SiO:H Films and Their Application to Solar Cells”, Optoelectronics-Devices and Technologies-, 9 (1994) 379.
6. W. Boonkosum, D. kruangam, T. Sujaridchai, B. Ratwises, S. Panyakeow, S. Fujikake and H.Sakai, “Visible Amorphous SiO:H Thin Film Light Emitting Diode”, The 16th International Conference on Amorphous Semiconductors-Science and Technology-(ICAS 16) Kobe, Japan, September 4-8 (1995).
7. D. Krauangam, S. Panyakeow, M. Sawadsaringkam, B. Toprasetpong, C. Antarasena, T. Cholaprenee, M. Sriyudthsak, S. Ratanathamphan, B. Ratwiset, S. Thainoi and B. DeLong, “Amorphous Semiconductor Thin Film Light Emitting Diode”, United States, Patent, Application No. 08/414738 (1995).

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 7

การพัฒนา TFLED โครงสร้างเมตริกซ์ สำหรับจอแสดงผลชนิดใหม่

บทนำ

ในบทที่ 1-6 ได้รายงานผลการวิจัยการประดิษฐ์ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบาง (TFLED) และการปรับปรุงความสว่างมาแล้ว [1-2] ในการใช้งานจริง TFLED เป็นจอแสดงผลนั้น จำเป็นจะต้องผลิตให้ TFLED สามารถเปล่งแสงเป็นรูปร่างต่าง ๆ ตามความต้องการของผู้ใช้ ตัวอย่างการผลิตให้ TFLED เปล่งแสงและเปลี่ยนรูปร่างอย่างง่าย ๆ ได้แก่ การออกแบบให้ขั้ว ITO มีรูปร่างเป็น 7 เซ็กเมนต์ (segments) ซึ่งสามารถใช้แสดงตัวเลขและอักษรภาษาอังกฤษได้ [3]

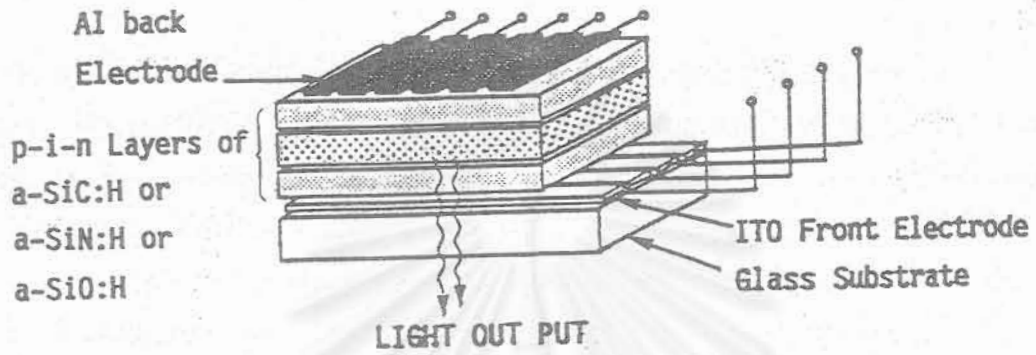
ในงานวิจัยนี้ได้มีการพัฒนาออกแบบและประดิษฐ์ TFLED มีโครงสร้างชนิดเมตริกซ์ (matrix) กล่าวคือ ขั้วไฟฟ้า ITO และ AI มีรูปร่างเป็นเส้นเล็กๆจำนวนมากและไขว้กันแบบเมตริกซ์ (ร่างแห) เพื่อให้เปล่งแสงเป็นจุดๆ การออกแบบวงจรไฟฟ้าเพื่อสแกนสัญญาณภาพให้ TFLED แต่ละจุดเปล่งแสงแบบกระพริบอย่างรวดเร็ว ก็จะทำให้เห็นภาพเคลื่อนไหวแบบต่อเนื่องได้ ตัวอย่างการประดิษฐ์ TFLED โครงสร้างเมตริกซ์ในชั้นแรกมี 2 รุ่นซึ่งมีขนาดของพิกเซลเท่ากับ $2 \times 2 \text{ mm}^2$ และ $1 \times 1 \text{ mm}^2$ ผลการวิเคราะห์ได้ระบุว่าขนาดของพิกเซลของจอแสดงผลชนิด TFLED นั้นสามารถออกแบบให้เล็กถึงระดับตารางไมครอนได้โดยที่ไม่มีปัญหาเรื่อง cross talk และกระแสไฟฟ้ารั่วไหล

ในบทนี้จะรายงานวิธีการออกแบบ การประดิษฐ์ และผลการประดิษฐ์ TFLED โครงสร้างเมตริกซ์ และจะวิเคราะห์วิธีการใช้งานเป็นจอแสดงผลแบบบางชนิดใหม่

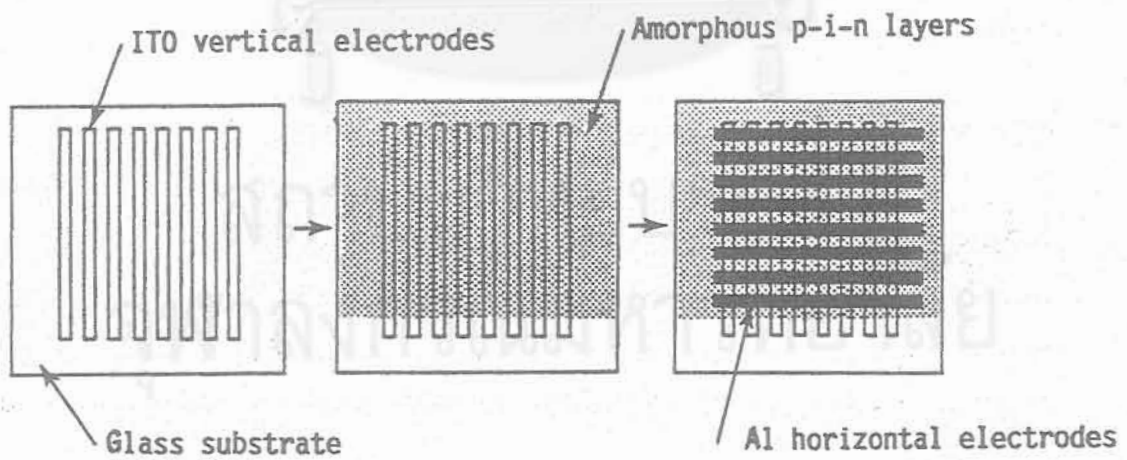
7.1 การออกแบบและวิธีการประดิษฐ์ TFLED โครงสร้างเมตริกซ์

หลักการพื้นฐานในการออกแบบ TFLED ที่สามารถเปล่งแสงภาพเคลื่อนไหวได้นั้น คล้ายคลึงกับกรณีของจอแสดงผลชนิดผลึกเหลว (LCD) และจอแสดงผลชนิดบางอื่นๆทั่วไป [4-11] กล่าวคือ จะต้องออกแบบให้ขั้วไฟฟ้าทั้ง ITO และ AI มีลักษณะเป็นเส้นตรงหลายๆเส้นจำนวนมาก ขณะเดียวกันขั้วไฟฟ้า ITO และ AI จะต้องไขว้กันแบบตั้งฉากในลักษณะเมตริกซ์ (matrix) หรือร่างแหดังแสดงในรูปที่ 7.1 สำหรับฟิล์มอะมอร์ฟิซึ้น p-i-n นั้นให้เคลือบแบบต่อเนื่องเต็มพื้นที่แผ่นฐาน

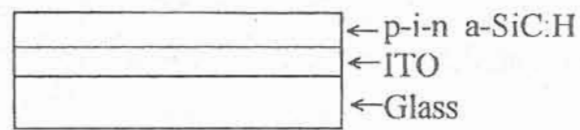
เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าผ่านขั้ว ITO และ AI บริเวณใดที่มีกระแสไฟฟ้าไหลทั้ง ITO และ AI พร้อมๆกัน บริเวณนั้นก็จะเปล่งแสงเป็นจุดตรงบริเวณที่มี ITO และ AI ไขว้กัน ถ้ามีวงจรอิเล็กทรอนิกส์สแกนสัญญาณให้จุดเหล่านั้นกระพริบสว่างอย่างรวดเร็ว ก็จะได้ภาพที่ดูด้วยตาแล้วมีเป็นภาพรูปร่างที่ต้องการและเคลื่อนไหวได้ ความถี่ของการสแกนอาจเป็นระดับ kHz-หลายสิบ kHz [12-13]



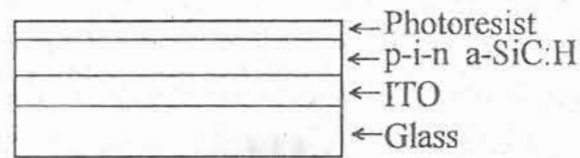
รูปที่ 7.1 โครงสร้างของ TFLED ซึ่งมีขั้วไฟฟ้า ITO และ Al ไขว้กันแบบเมตริกซ์ ส่วนฟิล์มอะมอร์ฟิอัสชั้น p-i-n นั้นเคลือบเต็มพื้นที่แผ่นฐาน



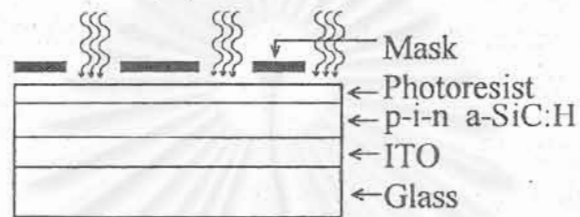
รูปที่ 7.2 ขั้นตอนการประดิษฐ์ TFLED แบบเมตริกซ์



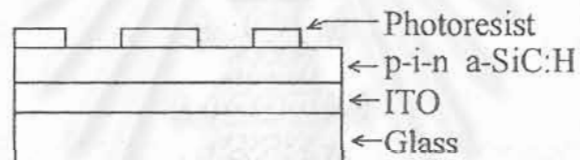
(a)



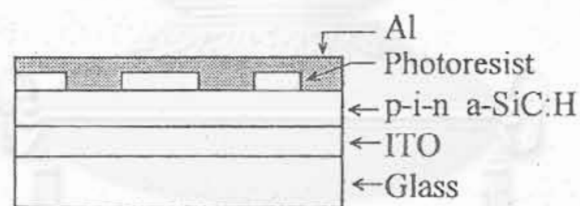
(b)



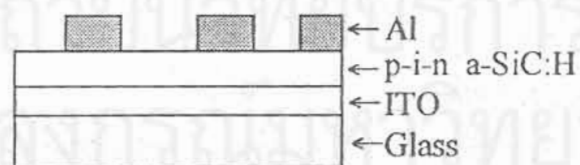
(c)



(d)



(e)



(f)

รูปที่ 7.3 วิธีการสร้างลายเส้น Al ด้วยกระบวนการ lift-off

รูปที่ 7.2 แสดงขั้นตอนการประดิษฐ์ TFLED โครงสร้างเมตริกส์ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. เคลือบ ITO ให้เต็มแผ่นกระจก และใช้น้ำยาเคมี ($\text{FeCl}_3 + \text{HCl}$) กัด ITO ให้เหลือเป็นลายเส้น โดยใช้กระบวนการโฟโตลิโทกราฟี (photolithography)
2. เคลือบฟิล์มอะมอร์ฟัสสทรอยต่อ p-i-n ให้เต็มพื้นที่แผ่นกระจก โดยเว้นให้บางส่วนของ ITO ไว้ไม่ให้มีฟิล์มอะมอร์ฟัสเคลือบ เพื่อเป็นพื้นที่สำหรับการต่อสายไฟฟ้ากับ ITO
3. เคลือบขั้ว Al ให้เป็นลายเส้นในลักษณะตั้งฉากกับ ITO โดยการใช้มาสค์ที่เปิดช่องไว้ หรืออาจใช้วิธีการแบบ lift-off ก็ได้

รูปที่ 7.3 แสดงวิธีการสร้างลายเส้น Al ด้วยวิธีการ lift-off โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. เคลือบโพโตรีซิสต์ลงบนฟิล์มอะมอร์ฟัสเต็มพื้นที่แผ่นกระจก
2. ส่องแสงผ่านมาสค์ที่มีรูปร่างตามที่ต้องการ
3. ล้างโพโตรีซิสต์บริเวณที่ถูกแสงออกให้หมด
4. เคลือบ Al เต็มพื้นที่แผ่นกระจก
5. จุ่มชิ้นงานทั้งหมดลงใน acetone บริเวณใดที่มีโพโตรีซิสต์ก็จะหลุดออก พร้อมทั้ง Al ก็หลุดด้วย ส่วนบริเวณที่ไม่มีโพโตรีซิสต์ก็จะมี Al เคลือบเหลืออยู่

7.2 วงจรสมมูลและความละเอียดของจุดภาพใน TFLED โครงสร้างเมตริกส์

TFLED โครงสร้างเมตริกส์ที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ (รูปที่ 7.1) สามารถเปล่งแสงออกมาเป็นจุดพิกเซล (pixel) คุณภาพของภาพที่ปรากฏให้เห็นนั้นจะมีแพกเตอร์ที่ต้องคำนึงถึงหลายข้อ เช่น

1. พิกเซลทุก ๆ จุดควรให้ความสว่างมากที่สุด
2. พิกเซลทุก ๆ จุดควรให้ความสว่างเท่ากันอย่างสม่ำเสมอ (uniformity)
3. พื้นที่ของพิกเซลแต่ละจุดควรเล็กที่สุด
4. ระยะห่างของพิกเซลแต่ละจุดควรชิดกันมากที่สุด

ในที่นี้จะขอพิจารณากรณีของข้อ 3 และ ข้อ 4

ในกรณีข้อ 3. กรณีพื้นที่ของพิกเซลแต่ละจุด ถ้ายิ่งเล็กก็จะทำให้สามารถแสดงภาพได้ละเอียดมากขึ้น ในทางปฏิบัติเราสามารถผลิตให้ขั้ว ITO และ Al มีความกว้างได้ถึงระดับหลายสิบลิป μm ซึ่งเล็กมาก และเพียงพอต่อความต้องการของดีสเพลย์ที่ต้องการความละเอียดสูง

ในกรณีข้อ 4. กรณีระยะห่างของพิกเซลแต่ละจุด (spacing distance หรือ pitch) จะเป็นแพกเตอร์ที่ต้องพิจารณาอย่างละเอียดดังต่อไปนี้

ในแง่ของเทคโนโลยี เราสามารถผลิตให้ขั้ว ITO แต่ละเส้น และขั้ว Al แต่ละเส้นมีระยะห่างกันระดับหลายสิบลิป μm และลงไปถึง μm ได้ แต่ในการใช้งาน TFLED ดีสเพลย์นั้นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือ

- 1) จะมีการเกิดครอสทอล์ค (cross talk) หรือไม่ [4]
 และ 2) จะมีกระแสไฟฟ้ารั่วไหลในบริเวณที่ไม่ต้องการให้ไหลหรือไม่

ทั้ง 1) และ 2) จะเป็นแฟกเตอร์กำหนดระยะห่างต่ำสุดของแต่ละพิกเซล ในงานวิจัยนี้ ได้มีการคำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้ารั่วในดิสเพลย์และหาความสัมพันธ์กับระยะห่างของพิกเซลโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

สมมติว่า TFLED มีโครงสร้างเมตริกซ์ดังที่แสดงในรูปที่ 7.4 เราจะได้วงจรสมมูลของ TFLED โครงสร้างเมตริกซ์ดังที่แสดงในรูปที่ 7.5 ซึ่งในรูปที่ 7.5 นั้นแสดงให้เห็นว่ามีไดโอดต่อเข้าด้วยกันเป็นร่างแหจำนวนมาก

อย่างไรก็ตาม ในสภาพเป็นจริง จะมีความต้านทานเกิดขึ้นระหว่างขั้ว AI ที่อยู่ใกล้เคียงกันและมีความต้านทานเกิดขึ้นระหว่างขั้ว ITO ที่อยู่ใกล้เคียงกันดังแสดงในรูปที่ 7.6 สาเหตุของการมีความต้านทานนี้อธิบายได้ด้วยรูปที่ 7.7

รูปที่ 7.7 แสดงภาพตัดขวางของ TFLED โครงสร้างเมตริกซ์ ในการใช้งาน TFLED นั้นปกติเราจะต้องฉีดให้กระแสไฟฟ้าไหลในแนวตั้งกล่าวคือจาก ITO ไปสู่ AI โดยการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้ศักย์ไฟฟ้าของ ITO สูง (high level) เช่น + 15 V และให้ศักย์ไฟฟ้าของ AI ต่ำ (low level) เช่น 0 V แต่ในขณะที่เดียวกัน ถ้าศักย์ไฟฟ้าของ ITO ช่างเคียงอยู่ในสภาพต่ำ ก็จะทำให้มีกระแสไฟฟ้ารั่วไหลในแนวราบจาก ITO เส้นหนึ่ง ผ่านชั้น p-a-SiC:H ไปสู่ ITO ช่างเคียงได้ จึงทำให้ในวงจรสมมูลของ TFLED โครงสร้างเมตริกซ์เปรียบเสมือนมีความต้านทาน (ที่มีค่าไม่เป็นอนันต์) ต่อกันระหว่าง ITO และ ITO ด้วยกันดังแสดงในรูปที่ 7.7

เนื่องจากสภาพนำไฟฟ้าของชั้น p มีค่ามากกว่าของชั้น i มาก ดังนั้นเราจึงพิจารณาได้ว่ากระแสไฟฟ้าที่รั่วนี้ส่วนใหญ่ไหลในชั้น p เท่านั้น เพราะฉะนั้นกระแสไฟฟ้ารั่วในแนวราบ I_{leak} จึงสามารถคำนวณได้ง่าย ๆ ดังนี้

$$I_{leak} = \frac{\sigma \times l \times d \times V}{S} \quad (7.1)$$

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

σ : สภาพนำไฟฟ้าของชั้น P

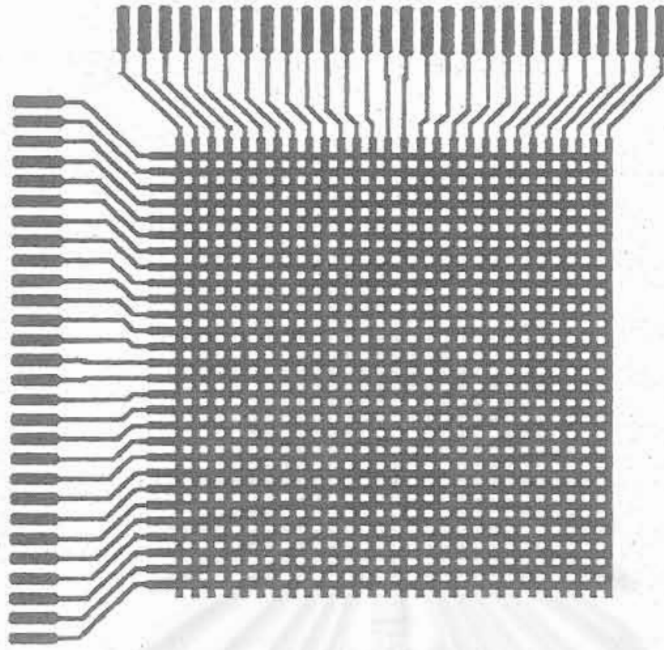
d : ความหนาของชั้น p

V : ความต่างศักย์ระหว่าง ITO ช่างเคียงกัน

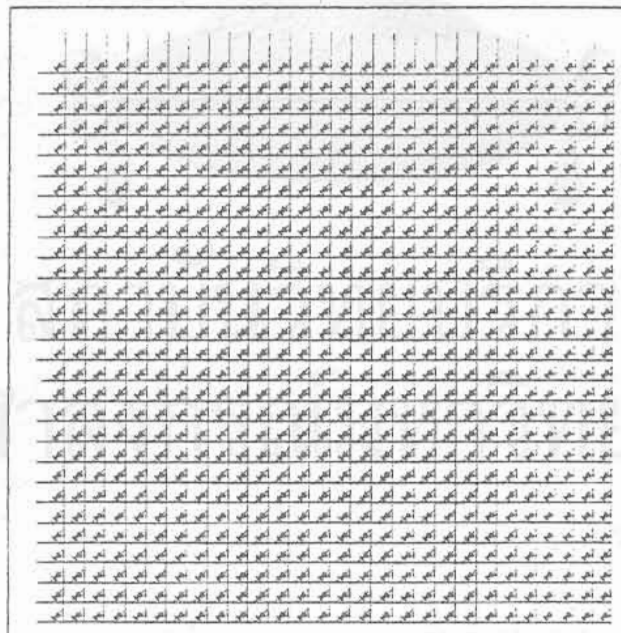
S : ระยะห่างของ ITO

l : ความยาวของขั้วไฟฟ้า AI

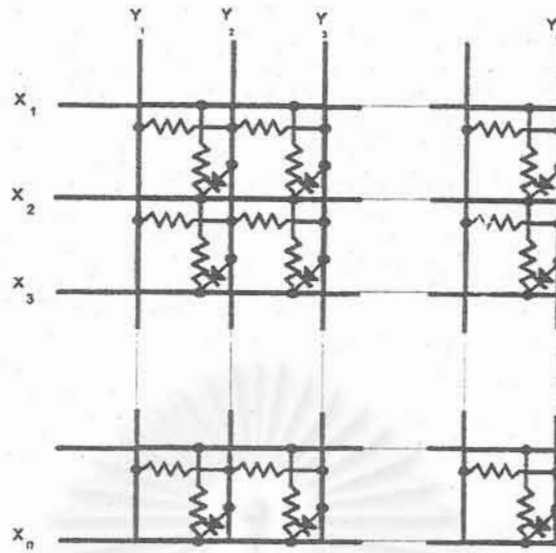
ตัวอย่างถ้าให้ $\sigma = 10^{-7}$ s/cm, $d = 150$ Å, $V = 15$ V, $S = 0.3$ μ m และ $l = 6$ cm จะมีกระแสไฟฟ้ารั่วที่น้อยมากเพียง 1 μ A เท่านั้น



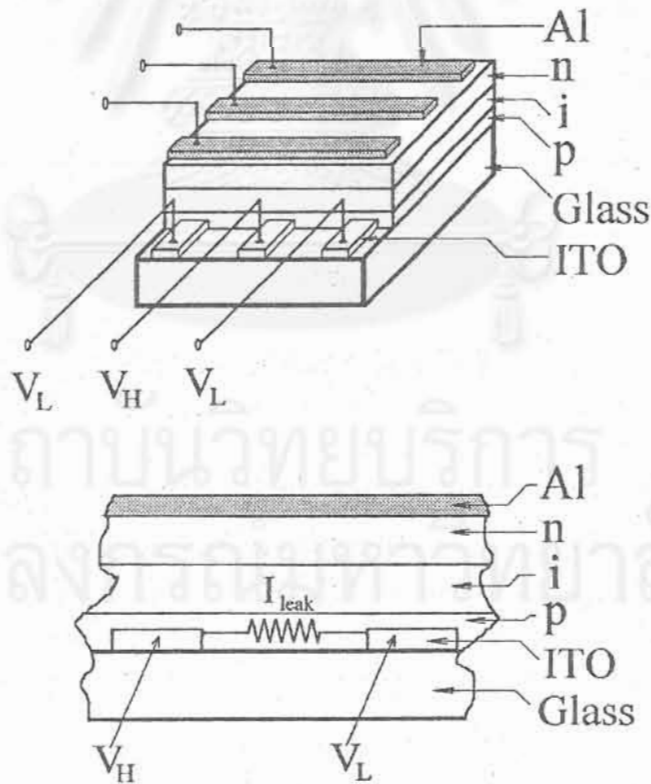
รูปที่ 7.4 ตัวอย่างลวดลายขั้วไฟฟ้า ITO และ AI ซึ่งไขว้กันแบบเมตริกซ์ ความกว้างของเส้น
ขั้วไฟฟ้าแต่ละเส้นเท่ากับ 1 mm และห่างกัน 1 mm



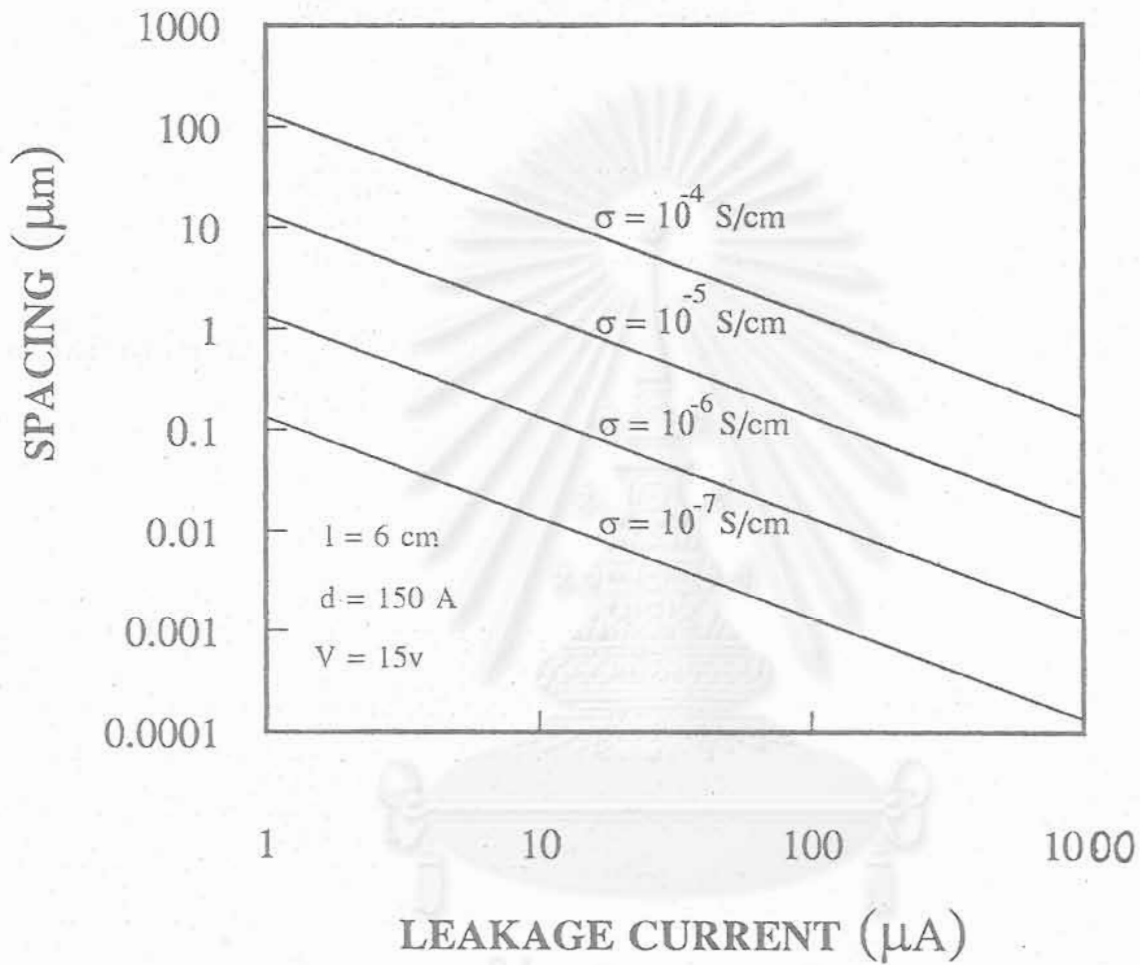
รูปที่ 7.5 วงจรสมมูลของ TFLED โครงสร้างเมตริกซ์



รูปที่ 7.6 วงจรสมมูลของ TFLED โครงสร้างเมตริกซ์ กรณีพิจารณาว่ามีกระแสไฟฟ้ารั่วผ่านจาก ITO เส้นหนึ่งผ่านชั้น p ไปสู่ ITO อีกเส้นหนึ่งข้างเคียง



รูปที่ 7.7 ภาพตัดขวางของ TFLED โครงสร้างเมตริกซ์ซึ่งใช้อธิบายการเกิดกระแสไฟฟ้ารั่วผ่านชั้น p



รูปที่ 7.8 ตัวอย่างผลการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของ ITO-ITO และกระแสไฟฟ้าที่รั่วในชั้น p พารามิเตอร์ในรูปคือ สภาพนำไฟฟ้าของชั้น p-a-SiC:H ในการคำนวณกำหนดให้ $d = 150 \text{ \AA}$, $V = 15 \text{ V}$ และ $l = 6 \text{ cm}$

รูปที่ 7.8 แสดงตัวอย่างผลการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของ ITO-ITO และกระแสไฟฟ้าที่รั่วในชั้น p พารามิเตอร์ในรูปคือ สภาพนำไฟฟ้าของชั้น p-a-SiC:H ในการคำนวณกำหนดให้ $d = 150 \text{ \AA}$, $V = 15 \text{ V}$ และ $l = 6 \text{ cm}$

เนื่องจากโดยทั่วไปค่าสภาพนำไฟฟ้าของชั้น p มีค่าอยู่ในระดับ $\sigma = 10^{-7} - 10^{-6} \text{ S/cm}$ ดังนั้นจากผลการคำนวณในรูปที่ 7.8 ทำให้เราทราบว่า แม้วาระยะห่างของ ITO-ITO จะแคบเพียง $0.1 \sim 1 \text{ \mu m}$ แต่ก็จะมีกระแสไฟฟ้าน้อยมากเพียงระดับ μA ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าไม่มีปัญหาเรื่องกระแสไฟฟ้ารั่วในแนวพื้นผิว

7.3 ผลการประดิษฐ์ TFLED โครงสร้างเมตริกซ์

ในงานวิจัยนี้ได้ทดลองออกแบบ TFLED โครงสร้างเมตริกซ์จำนวน 4 รุ่นโดยมีรายละเอียดของแต่ละรุ่นในตารางที่ 7.1 และผลการประดิษฐ์รุ่นต่างๆแสดงในรูปที่ 7.9-7.15 หนึ่ง TFLED ที่ประดิษฐ์ในบทนี้เป็นวัสดุ a-SiC:H รอยต่อ p-i-n และช่องว่างพลังงานของชั้น i เท่ากับ 3.0 eV เปล่งแสงสีส้มเหลือง

ตารางที่ 7.1 รายละเอียดต่างๆของ TFLED โครงสร้างเมตริกซ์รุ่นต่าง ๆ

Version	Glass Area	Pixel Area	Spacing	Number of Pixels
1	4 cm × 4 cm	2 mm × 2 mm	2 mm	8 × 8
2	10 cm × 10 cm	1 mm × 1 mm	1 mm	28 × 28
3	10 cm × 10 cm	0.5 mm × 0.5 mm	0.2 mm	146 × 146
4	10 cm × 10 cm	0.2 mm × 0.2 mm	0.2 mm	146 × 146

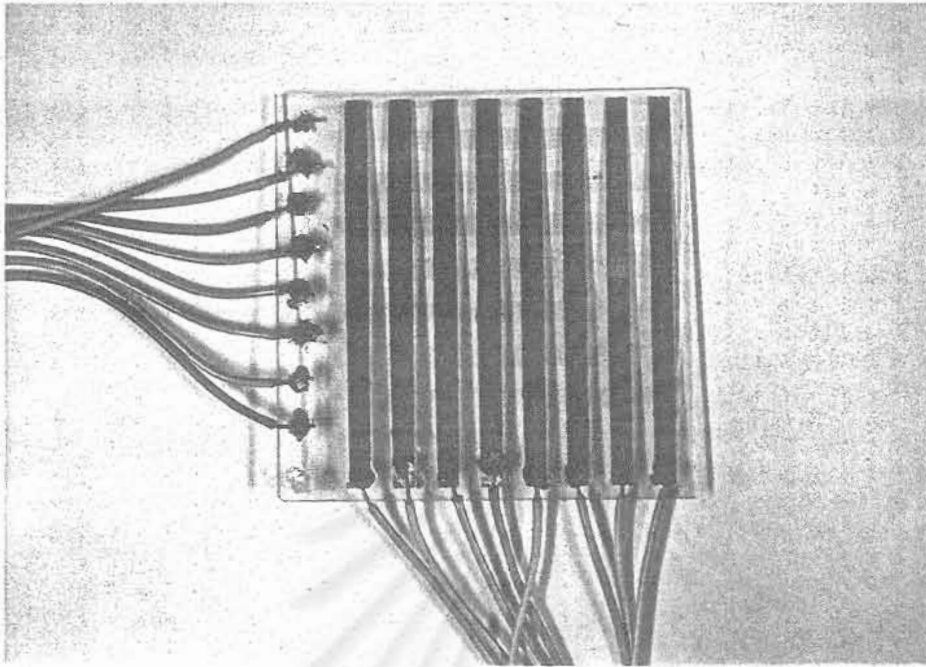
รูปที่ 7.9 แสดงภาพถ่าย TFLED เมตริกซ์รุ่นที่ 1 ขณะยังไม่ได้เปล่งแสง

รูปที่ 7.10 และ 7.11 แสดงภาพถ่าย TFLED เมตริกซ์รุ่นที่ 1 ขณะกำลังเปล่งแสงโดยป้อนกระแสไฟฟ้าให้เปล่งแสงพร้อมกันทุกพิกเซล

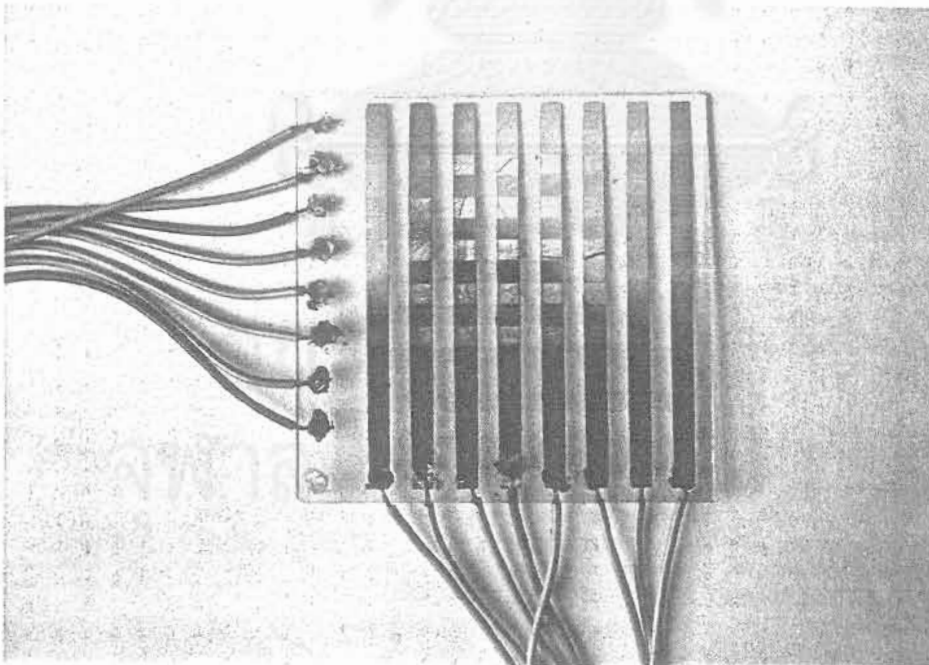
รูปที่ 7.12 แสดงภาพถ่าย TFLED เมตริกซ์รุ่นที่ 1 ขณะกำลังเปล่งแสงเพียงบางพิกเซล

รูปที่ 7.13 แสดงภาพถ่ายขั้นตอนการประดิษฐ์ TFLED เมตริกซ์รุ่นที่ 2 ซึ่งเริ่มจากการสร้าง ITO ให้เป็นลวดลายเส้น ตามด้วยการเคลือบฟิล์ม a-SiC:H p-i-n และเคลือบ Al เป็นลายเส้น

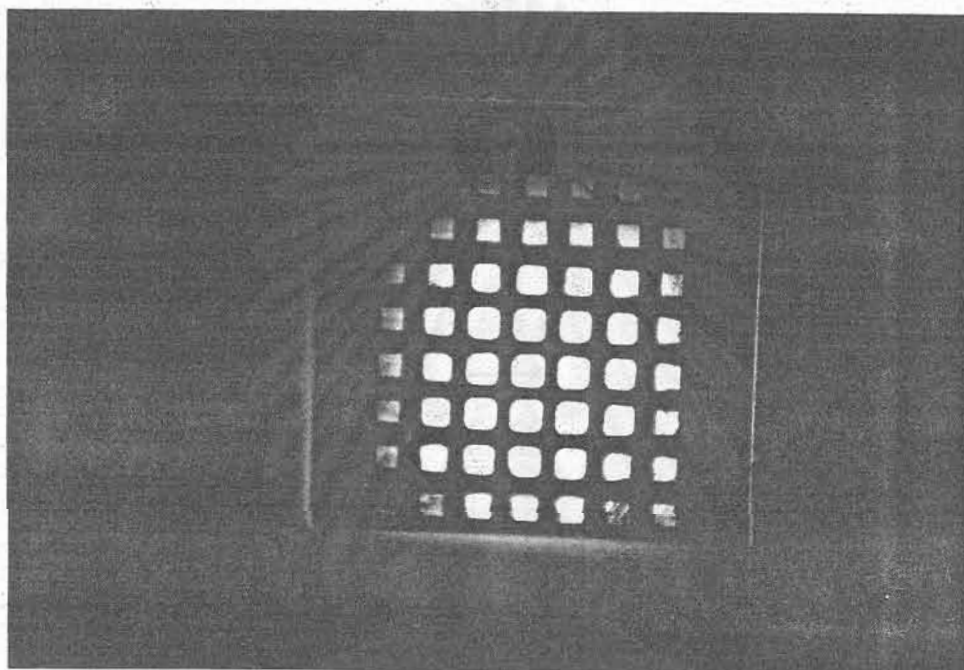
รูปที่ 7.14-7.15 แสดงภาพถ่าย TFLED เมตริกซ์รุ่นที่ 2 และตัวอย่างบรรจุลงกรอบคล้ายกรอบรูปภาพ ซึ่งจะเห็นว่าจะได้ดิสเพลย์ที่มีลักษณะบางและแบน มีศักยภาพในการใช้งานเป็นดิสเพลย์ให้กับคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก เป็นต้น ในรูปจะเห็นว่า TFLED เป็นดิสเพลย์ที่มีความ



รูปที่ 7.9 ภาพถ่าย TFLED เมตริกซ์รุ่นที่ 1 ขณะยังไม่ได้เปล่งแสง

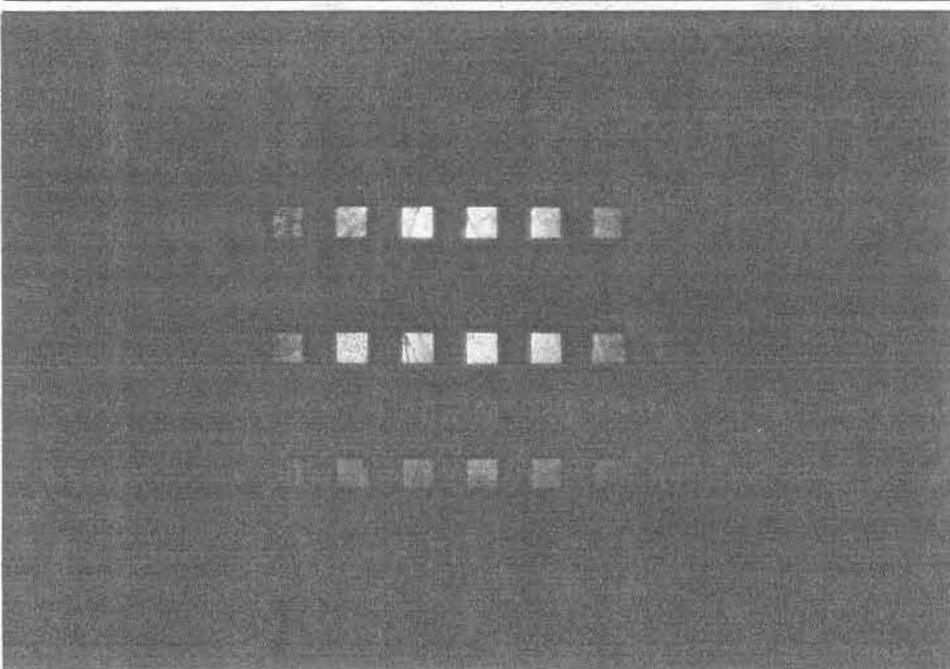
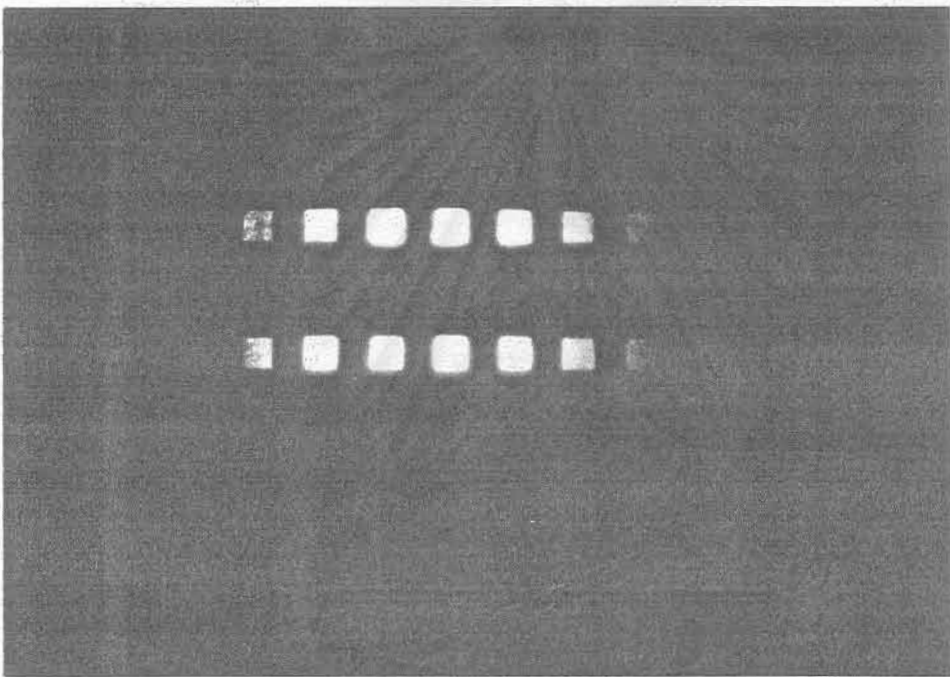
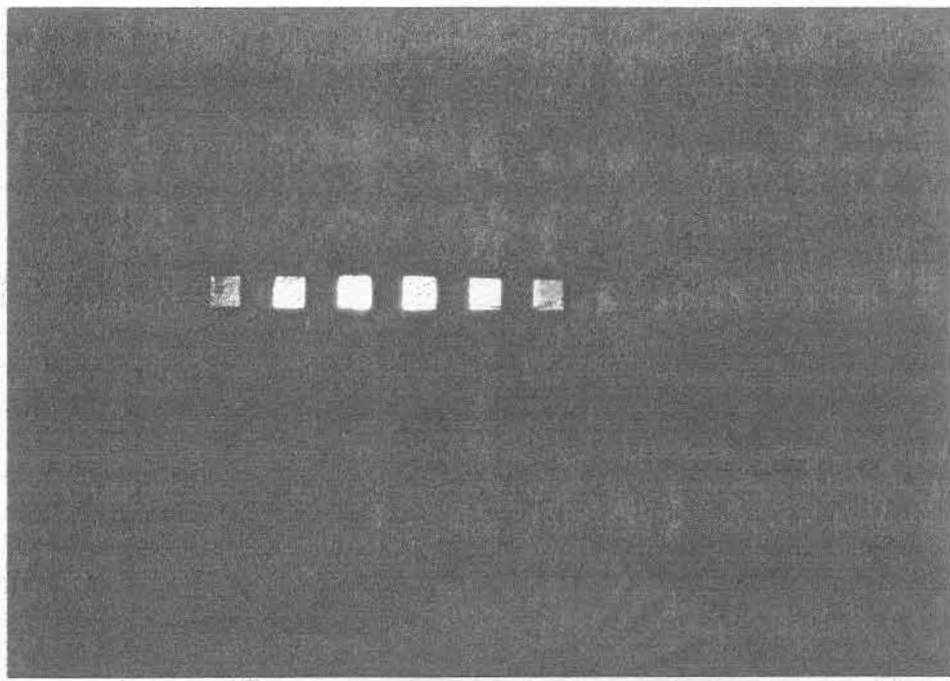


รูปที่ 7.10 ภาพถ่าย TFLED เมตริกซ์รุ่นที่ 1 ขณะกำลังเปล่งแสง

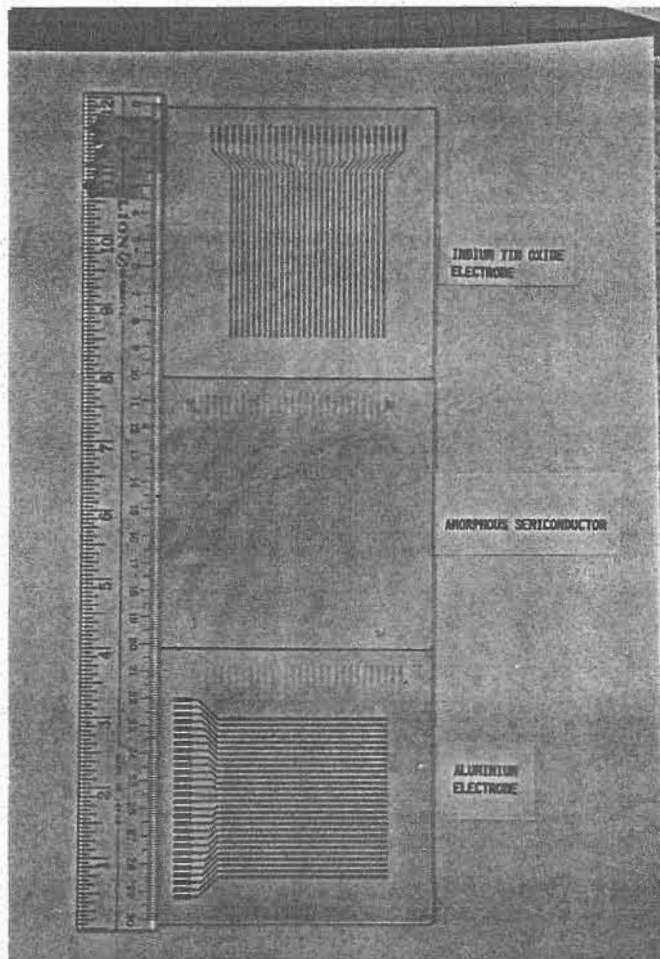


รูปที่ 7.11 ภาพถ่าย TFLED เมตริกซ์รุ่นที่ 1 ขณะกำลังเปล่งแสง โดยป้อนกระแสไฟฟ้าให้
เปล่งแสงพร้อมกันทุกพิกเซล

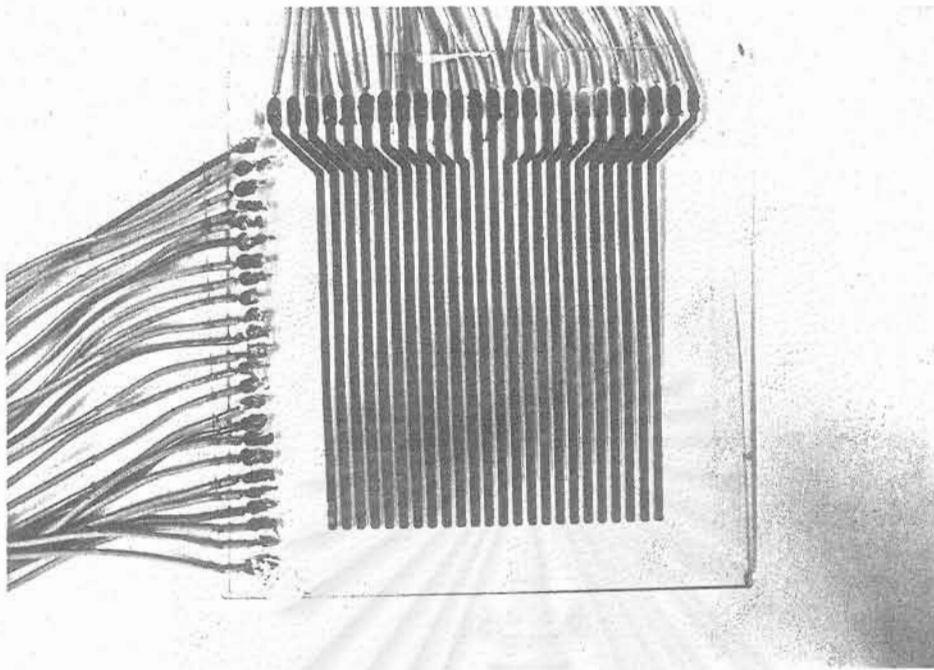
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



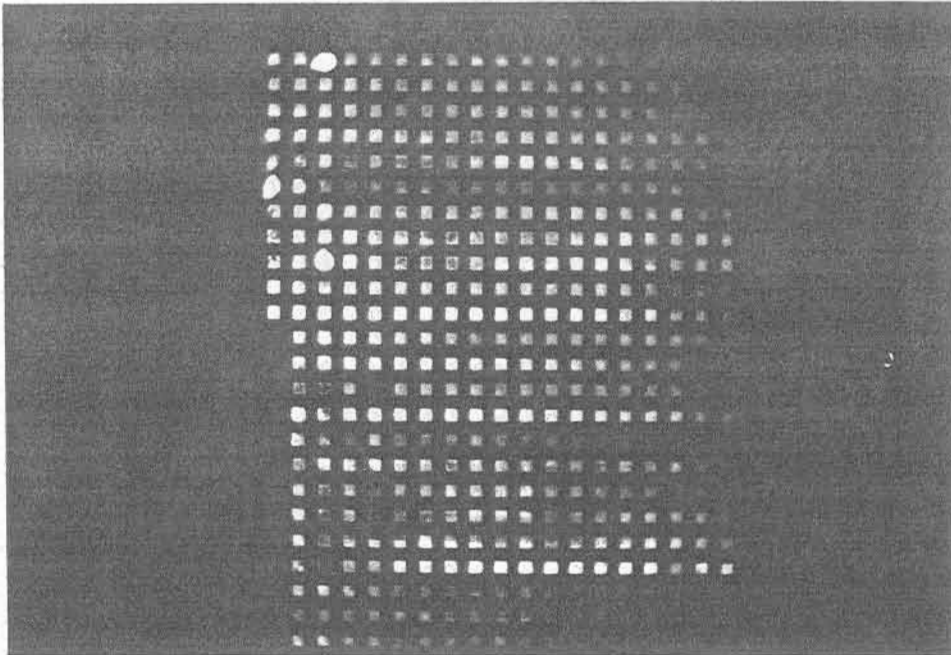
รูปที่ 7.12 ภาพถ่าย TFLED เมตริกซ์รุ่นที่ 1 ขณะกำลังเปล่งแสงเพียงบางพิกเซล



รูปที่ 7.13 ภาพถ่ายขั้นตอนการประดิษฐ์ TFLED เมตริกซ์รุ่นที่ 2 ซึ่งเริ่มจากการสร้าง ITO ให้เป็นลวดลายเส้น ตามด้วยการเคลือบฟิล์ม a-SiC:H p-i-n และเคลือบ Al เป็นลายเส้น

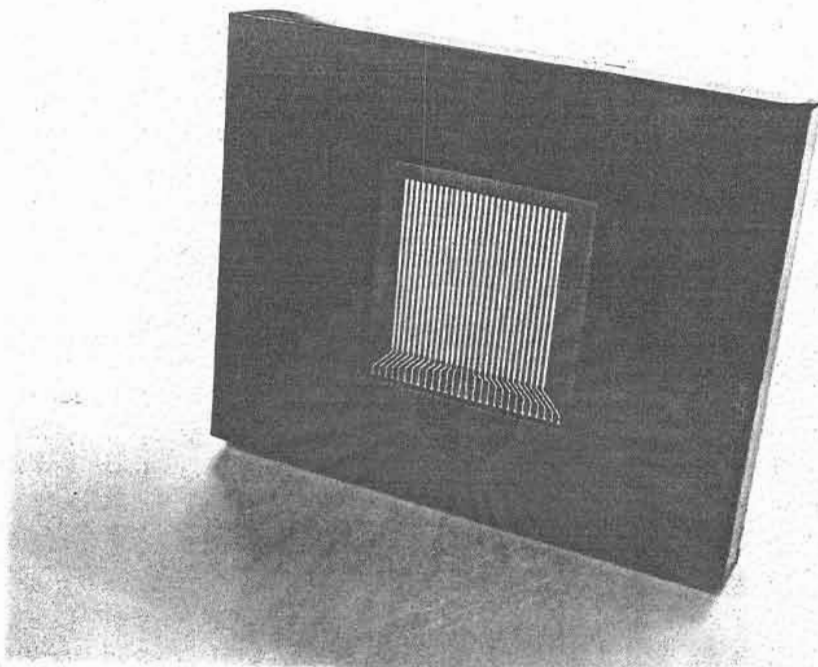


(a)

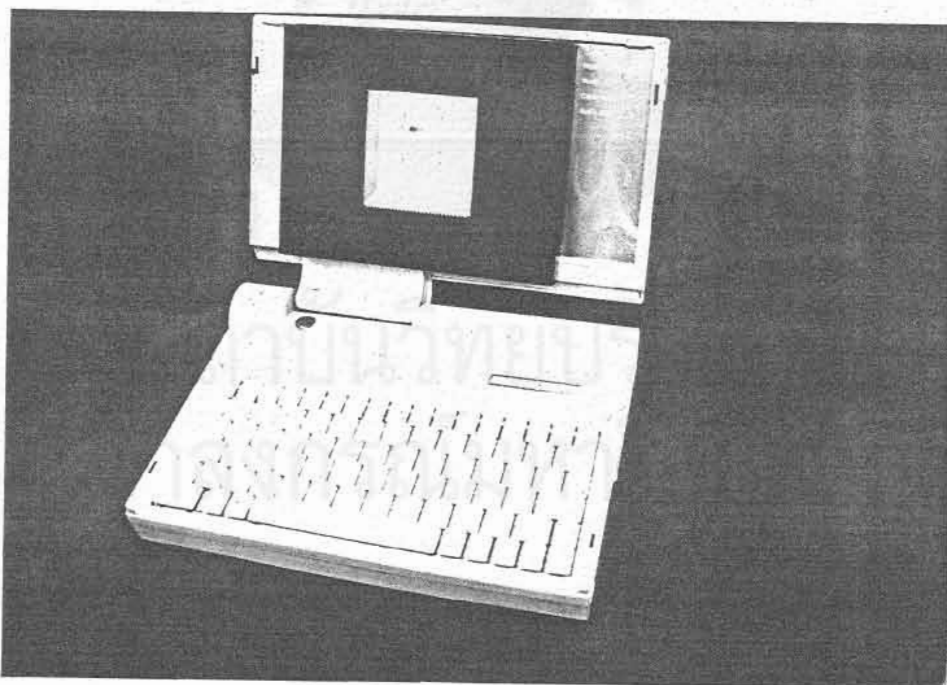


(b)

รูปที่ 7.14 (a) ภาพถ่าย TFLED เมตริกซ์รุ่นที่ 2 ขนาดจอภาพ $8 \times 8 \text{ cm}^2$ ขนาดพิกเซล $1 \times 1 \text{ mm}^2$ มีจำนวน 28 พิกเซล \times 28 พิกเซล ระยะห่างของพิกเซล 1 mm และ (b) ขณะกำลังเปล่งแสงสีส้มเหลือง

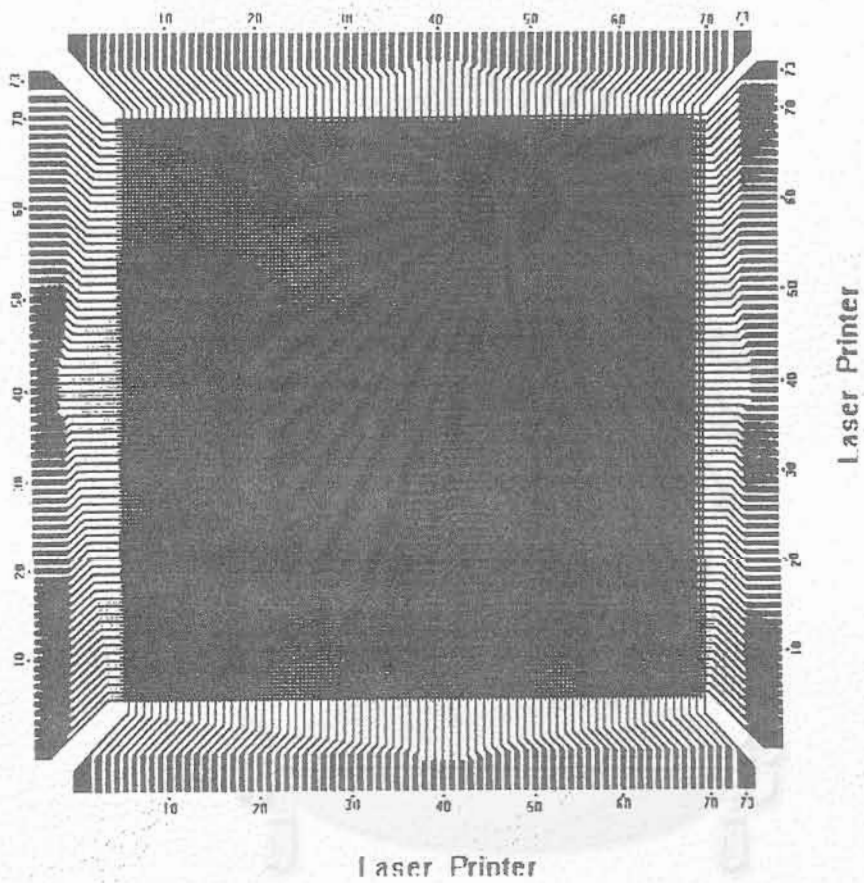


(a)

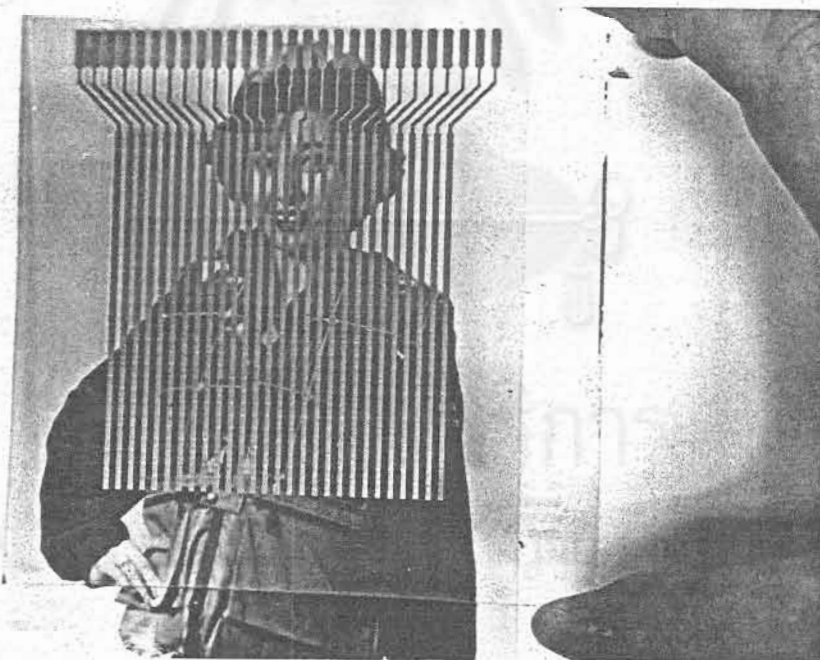
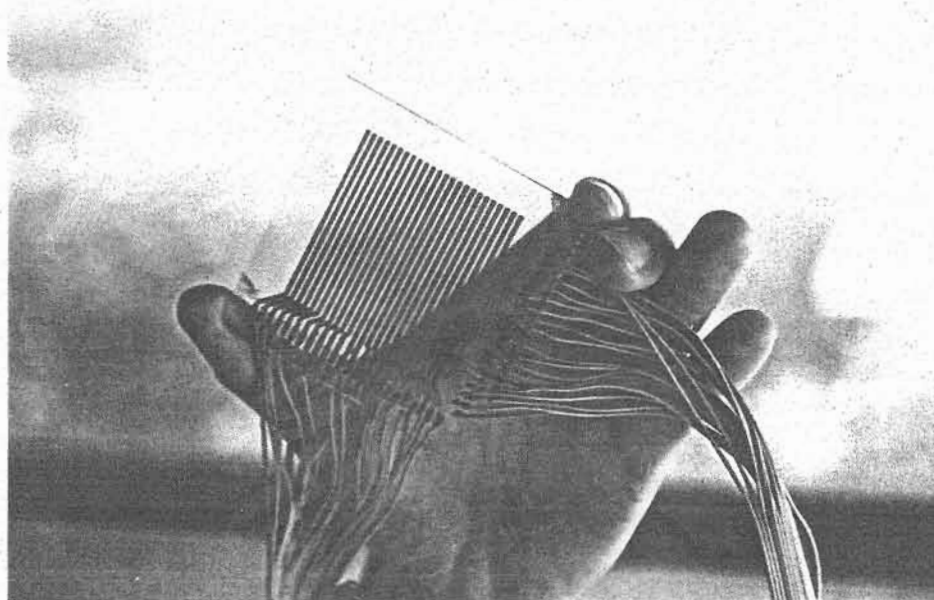


(b)

รูปที่ 7.15 ตัวอย่างการบรรจุ TFLED ลงในกรอบคล้ายกรอบรูปภาพ ซึ่งจะเห็นว่าได้ดิสเพลย์ที่มีลักษณะบางและแบน มีศักยภาพในการใช้งานเป็นดิสเพลย์ เช่น สำหรับคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก เป็นต้น ในรูปจะเห็นว่า TFLED เป็นดิสเพลย์ที่มีความสวยงามและง่ายต่อการติดตั้ง ผลงานความสำเร็จในการประดิษฐ์ TFLED เมตริกซ์นี้ถือได้ว่าเป็นนวัตกรรมการประดิษฐ์ดิสเพลย์ชนิดใหม่ของโลก



รูปที่ 7.16 ตัวอย่างลวดลายของขั้ว ITO และ Al ที่ไขว้กันสำหรับ TFLED เมตริกซ์รุ่นที่ 4 ซึ่ง ออกแบบโดยใช้คอมพิวเตอร์ ขั้วไฟฟ้าแต่ละเส้นมีความกว้าง 0.2 mm



รูปที่ 7.17 ภาพถ่าย TFLED ซึ่งมีลักษณะโปร่งแสง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ตั้งชื่อให้ว่า
 “See Through TFLED Display” จัดว่าเป็นนวัตกรรมชนิดใหม่ของโลกอีกเช่นกัน

สวยงามและง่ายต่อการติดตั้ง ผลงานความสำเร็จในการประดิษฐ์ TFLED เมตริกซ์นี้ถือได้ว่าเป็นนวัตกรรมการประดิษฐ์ดิสเพลย์ชนิดใหม่ของโลก

ผลการประดิษฐ์ TFLED เมตริกซ์ทั้งสองรุ่นได้ผลเป็นที่น่าพอใจมาก ได้ความสว่างสูงสุดหลาย cd/m^2 และความสม่ำเสมอของความสว่างของแต่ละพิกเซลก็อยู่เกณฑ์ที่พอใจ แต่มีแนวโน้มว่าความสว่างที่บริเวณรอบแผ่นกระจกค่อนข้างจะต่ำกว่าบริเวณตรงกลาง

สาเหตุที่ความสว่างของพิกเซลที่อยู่รอบๆ แผ่นกระจกต่ำกว่าตรงกลาง เพราะความหนาบริเวณรอบๆ บางกว่าตรงกลาง ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากขนาดของขั้วไฟฟ้า RF ของระบบ plasma CVD นั้นมีขนาดเล็ก ถ้าใช้ระบบ plasma CVD ที่มีขั้วไฟฟ้า RF ใหญ่อย่างเหมาะสมก็จะทำให้ความสม่ำเสมอของการเปล่งแสงดีขึ้น

รูปที่ 7.16 แสดงตัวอย่างลวดลายของลายเส้นขั้ว ITO และ Al ที่ไขว้กันสำหรับ TFLED เมตริกซ์รุ่นที่ 3 ซึ่งออกแบบโดยการใช้คอมพิวเตอร์

7.4 TFLED ดิสเพลย์ชนิดโปร่งแสง

สิ่งที่ค้นพบที่น่าสนใจอีกเรื่องหนึ่งในสิ่งประดิษฐ์ TFLED คือเป็นสิ่งประดิษฐ์ที่มีลักษณะโปร่งแสงซึ่งเราสามารถมองเห็นไปสู่อันหลังของดิสเพลย์ได้ดังที่แสดงตัวอย่างในรูปที่ 7.17

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงทำให้เกิดความคิดใหม่ในการใช้งาน TFLED ที่แปลกไปกว่าดิสเพลย์ชนิดอื่น ๆ อีกด้วย กล่าวคือ สามารถใช้งาน TFLED ดิสเพลย์เป็นกระจกใสไปในตัว ซึ่งจะมีสีเหลืองส้มบ้างตามสีของฟิล์ม a-SiC:H (ค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านแสงของ TFLED มีค่าประมาณ 70 %)

ตัวอย่าง ถ้าเราติดตั้ง TFLED ดิสเพลย์นี้ที่หน้าต่างหรือที่ประตูทางผ่าน หรือหน้าต่างตู้โชว์ ในเวลาที่ไม่ได้ใช้งาน TFLED ดิสเพลย์จะทำหน้าที่เป็นกระจกกรองแสง และเมื่อใช้งาน (ป้อนกระแสไฟฟ้า) ให้ดิสเพลย์เปล่งแสงก็จะแสดงข้อมูลเป็นตัวอักษรหรือตัวเลขหรือรูปภาพต่าง ๆ ได้ตามต้องการ หรืออาจใช้งานเป็น dush board (หน้าปัทม์) ในยานพาหนะได้ เช่น เวลาไม่ใช้งาน ผู้ขับรถก็จะเห็นข้อมูลด้านหลังดิสเพลย์ และเมื่อใช้งานก็จะเห็นข้อมูลบนดิสเพลย์ในลักษณะ “ภาพลอย”

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ตั้งชื่อดิสเพลย์ชนิด TFLED นี้่อีกลักษณะหนึ่งว่า “See Through Display” (ดิสเพลย์โปร่งแสง)

7.5 สรุป

ได้ประสบความสำเร็จเป็นครั้งแรกในการประดิษฐ์ดิสเพลย์ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบาง (TFLED) ให้มีโครงสร้างแบบเมตริกซ์ ซึ่งทำให้สามารถแสดงผลรูปภาพต่าง ๆ ที่เคลื่อนไหวได้ ผลการทดลองประดิษฐ์ได้ผลเป็นที่น่าพอใจ ไม่พบว่ามีปัญหาเรื่อง cross-talk และกระแสไฟฟ้ารั่วซึ่งไม่เกี่ยวข้องกับการเปล่งแสงก็มีค่าน้อย ความละเอียดของพิกเซลสามารถออกแบบให้มีความละเอียดระดับสิบไมครอนได้โดยไม่มีปัญหาด้านเทคโนโลยี นอกจากนี้ยังพบว่าดิสเพลย์

ชนิดนี้มีลักษณะโปร่งแสงด้วย จึงสามารถใช้งานดิสเพลย์ TFLED ในลักษณะ “See Through Display” ได้อีกด้วย

เอกสารอ้างอิง

1. D. Kruangam, W. Boonkosum, B. Ratwises, S. Panyakeow and B. DeLong, “Visible-Light Amorphous Silicon Alloys Thin Film Light Emitting Diode and Its Applications to Optoelectronic Functional Devices”, *Invited paper*, Proc. 8th Int. School on Condensed Matter Physics (ISCMP), Varna, Bulgaria, September 18-23 (1994) 87.
2. D. Kruangam, W. Boonkosum, B. Ratwises, T. Sujaridchai and S. Panyakeow, “Fabrication of Amorphous Silicon Alloy Optical Devices for New Type of Thin Film Optoelectronic Integrated Circuits”, Proc. 13th Australian Microelectronics Conference (MICRO'95), Adelaide, South Australia, July 16-19 (1995) 259.
3. M. Matsumoto editor, *Electronic Displays*, chapter 7 (Ohm-Sha, Japan, 1984) 209.
4. I.A. Mohamed, J. Thomas, A. Brenac and J.P. Noblanc, “Performance of DC EL Coevaporated ZnS:Mn, Cu Low Volage Devices”, *IEEE Trans Electron Devices*, ED-28 (1981) 694.
5. N. Ibaraki and Y. Oana, “Active Matrix Addressed Liquid Crystal Display Using Amorphous Silicon Thin Film Transistors”, *Optoelectronics -Devised and Technologies-*, 4 (1989) 209.
6. I. Fukuda and T. Uchida, “Matrix Display Characteristics of a DTN-Liquid Crystal Cell”, Proc. 3rd Int. Display Research Conference, Japan Display'83, Kobe, Japan, October 3-5 (1983) 344.
7. C.M. Waters, V. Brimmell and E.P. Raynes, “Highly Multiplexable Dyed Liquid Crystal Displays”, Proc. 3rd Int. Display Research Conference, Japan Display'83, Kobe, Japan, October 3-5 (1983) 396.
8. T.J. Scheffer, “Liquid Crystal Display with High Multiplex Rate and Wide Viwing Angle”, Proc. 3rd Int. Display Research Conference, Japan Display'83, Kobe, Japan, October 3-5 (1983) 400.
9. K. Kasahara, Y. Okada, T. Yanagisawa and H. Hori, “ A 220x180 Element MOS-LCD for 2 inch Picture Displays”, Proc. 3rd Int. Display Research Conference, Japan Display'83, Kobe, Japan, October 3-5 (1983) 408.
10. T. N. Criscimagna and P. Pleshko, chapter 3, AC Plasma Display, in *Display Devices*, J.I. Pankove editor, (Springer-Verlag, Berlin, New York, 1980) 91.

11. E.O. Johnson, chapter 7, Electronic Displays, in *Display Devices*, J.I. Pankove editor, (Springer-Verlag, Berlin, New York, 1980) 233.
12. A.H. Kitai editor, chapter 8, in *Solid State Luminescence* (Chapman & Hall, London, 1993) 263.
13. Y. Okuno, *Light Emitting Diodes*, chapter 9 (Sangyo Tosho, Japan, 1993) 159.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 8

การประยุกต์ใช้งานไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางในงาน ออปโตอิเล็กทรอนิกส์

บทนำ

ในงานวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยได้ประสบความสำเร็จในการประดิษฐ์ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบาง (TFLED) จากวัสดุตระกูลอะมอร์ฟัสซิลิคอนอัลลอย และเป็นสิ่งประดิษฐ์ที่มีศักยภาพในการใช้งานเป็นดิสเพลย์แบบบางชนิดใหม่ [1-7] ผลการทดลองประดิษฐ์ได้ความสว่างสูงสุดประมาณ 10 cd/m^2 แต่ความสว่างนี้ยังไม่สูงมากเพียงพอต่อการใช้งานเป็นดิสเพลย์ และยังมีคามจำเป็นที่จะต้องปรับปรุงความสว่างต่อไป

อย่างไรก็ตาม แม้ว่าแสงที่เปล่งจากไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางนั้น ยังไม่สว่างมากและไม่สามารถมองเห็นได้ชัดเจนในที่สว่าง แต่คณะผู้วิจัยก็ได้มีความคิดที่จะใช้งานไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางให้เกิดประโยชน์ได้ โดยการใส่ไฟโตไดโอดหรือเซลล์แสงอาทิตย์เป็นตัวตรวจรับแสง สิ่งประดิษฐ์ที่ประกอบด้วยไดโอดเปล่งแสงและไฟโตไดโอดคู่กันเช่นนี้มีชื่อเรียกกันทั่วไปว่า “ไฟโตคัปเปลอร์” และเนื่องจากในงานวิจัยนี้ ได้ประดิษฐ์ทั้งภาคเปล่งแสงและภาครับแสงจากวัสดุอะมอร์ฟัสซิลิคอนอัลลอย ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงได้ตั้งชื่อสิ่งประดิษฐ์นี้ว่า “ไฟโตคัปเปลอร์ชนิดอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำ” (amorphous semiconductor photocoupler) นับเป็นการพัฒนาไฟโตคัปเปลอร์ชนิดอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำได้สำเร็จเป็นครั้งแรกในโลก [8-9]

อะมอร์ฟัสไฟโตคัปเปลอร์ที่พัฒนาขึ้นนี้ ทำงานโดยเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าให้เป็นแสง และเปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นไฟฟ้าอีกครั้งหนึ่ง จะเป็นประโยชน์ในการประยุกต์เป็นอุปกรณ์เชื่อมต่อ (interfaces) ระหว่างวงจรไฟฟ้าหรืออุปกรณ์ต่างๆ

นอกจากไฟโตคัปเปลอร์ชนิดอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำดังกล่าวแล้ว ในบทนี้ได้มีการเสนอแนวความคิดในการออกแบบสิ่งประติษฐ์วงจรรวมออปโตอิเล็กทรอนิกส์ชนิดอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำ (Amorphous Optoelectronic Integrated Circuit ย่อว่า Amorphous OEIC) ด้วย ซึ่งประกอบด้วยไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางชนิดอะมอร์ฟัส ทางนำแสงและสิ่งประติษฐ์รับแสงชนิดอะมอร์ฟัสด้วยวงจรรวมอะมอร์ฟัส OEIC เช่นนี้อาจผลิตให้มีลักษณะเป็นสามมิติซึ่งจะทำให้เกิดฟังก์ชันการทำงานแปลกๆใหม่ขึ้นได้

ในหัวข้อที่ 8.1-8.2 จะกล่าวถึง การออกแบบ การผลิตและผลการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของไฟโตคัปเปลอร์ชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำที่ผลิตได้ และในหัวข้อที่ 8.3 จะกล่าวถึงแนวทางในการพัฒนางจรรวมออปโตอิเล็กทรอนิกส์ชนิดอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำ

8.1 ลักษณะเด่นของโฟโตคัปเปอเรอร์ชนิดอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำ

โดยความหมายทั่วไป โฟโตคัปเปอเรอร์คือ สิ่งประดิษฐ์ที่ประกอบด้วยภาคเปล่งแสงและภาครับแสงอยู่ภายในภาชนะเดียวกัน และทำงานด้วยการเปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าให้เป็นสัญญาณแสง และเปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าอีกครั้งหนึ่ง

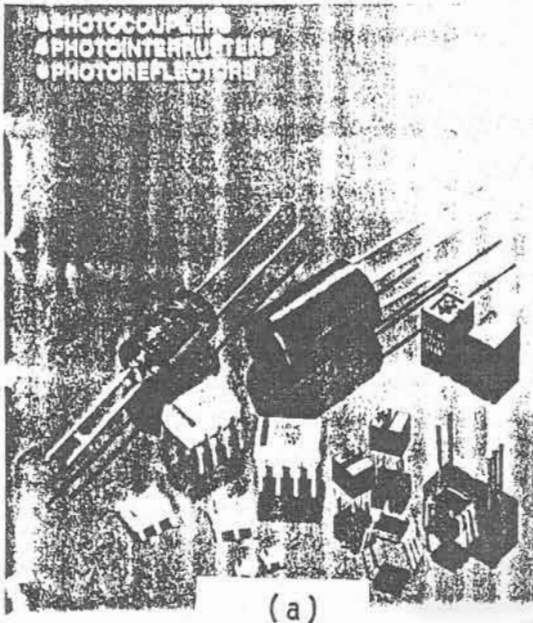
ตัวอย่างโฟโตคัปเปอเรอร์ที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในปัจจุบันแสดงในรูปที่ 8.1 (a)-(b) [10] เป็น สิ่งประดิษฐ์ที่ผลิตจากวัสดุสารกึ่งตัวนำที่เป็นผลึก อาทิเช่น แกลเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs) อินเดียม-ฟอสไฟด์ (InP) ซิลิคอน (Si) และแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) ฯลฯ มีข้อเสียคือผลิตจากวัสดุที่มี ราคาแพง มีขนาดเล็ก มีความยุ่งยากซับซ้อนและต้องใช้เทคโนโลยีในการผลิตที่แตกต่างกันเช่น ใช้วิธี LPE ในการผลิตวัสดุ GaAs และใช้วิธี CZ ในการผลิตวัสดุ Si เป็นต้น

เนื่องจากวัสดุอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำ เช่น อะมอร์ฟัสซิลิคอน (amorphous silicon) อะมอร์- ฟัสซิลิคอนไนไตรด์ (amorphous silicon nitride) และอะมอร์ฟัสซิลิคอนคาร์ไบด์ (amorphous silicon carbide) สามารถผลิตได้ในราคาถูก และผลิตเป็นพื้นที่ที่มีขนาดเล็กกระดบตั้งแต่ตาราง- มิลลิเมตรไปจนถึงระดับตารางเมตรได้ อีกทั้งมีลักษณะเป็นฟิล์มบาง (thin film) ดังนั้นในการนำ วัสดุอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำมาประดิษฐ์เป็นโฟโตคัปเปอเรอร์จึงทำให้ได้โฟโตคัปเปอเรอร์ที่มีราคาถูก มี ลักษณะเป็นฟิล์มบาง ผลิตเป็นพื้นที่ได้หลายขนาด สามารถนำไปใช้งานได้ทั้งในกรณีต้องการใช้กับ ลำแสงขนาดเล็กไปจนถึงลำแสงขนาดใหญ่มาก ๆ

โฟโตคัปเปอเรอร์ชนิดอะมอร์ฟัสนี้มีประโยชน์ในด้านการตรวจจับสิ่งของ วัตถุ เช่นในเครื่องถ่ายภาพ เอกสาร เครื่องโทรสาร คว้ามักกระตาดหรือไม้ หรือใช้ตรวจสอบจุดปลายของเทปกระดาษ เทปแม่เหล็ก เทปวีดีโอ ใช้ในการตรวจวัดความเร็วรอบของมอเตอร์ ตลอดจนใช้ในการสื่อสารด้วยแสง เป็นต้น ตัวอย่างการใช้งานโฟโตคัปเปอเรอร์ชนิดอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำแสดงในตารางที่ 8.1

ตารางที่ 8.1 ตัวอย่างการใช้งานโฟโตคัปเปอเรอร์ชนิดอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำ

-
- เป็นอินเตอร์เฟสเชื่อมต่อวงจรไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าขนาดไม่เท่ากัน
 - ใช้ถ่ายทอดสัญญาณวีดีโอ
 - เป็นสวิตช์ความเร็วสูง
 - ควบคุมความเร็วของมอเตอร์
 - เป็นรีเลย์
 - ตัดสัญญาณรบกวนในระบบคอมพิวเตอร์
 - วงจรประจุกระแสไฟฟ้าเข้าแบตเตอรี่
 - ตรวจจับสัญญาณโทรศัพท์
 - ตรวจจับสภาพไฟฟ้าดับ

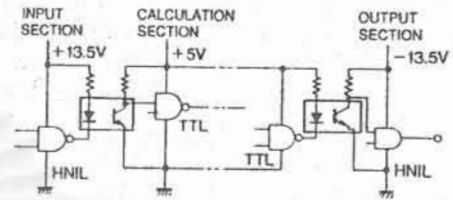


(a)

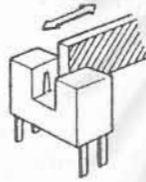
(b)

Application Examples of Photocouplers

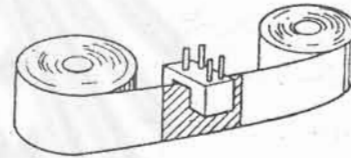
Interface Between Logic Circuits



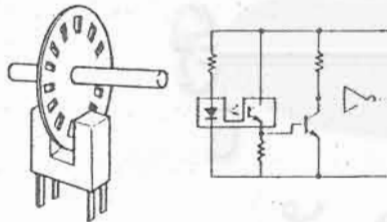
Position Detection of Moving Objects



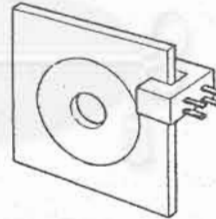
Tape end Detection



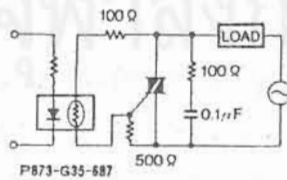
RPM Detection



FDD Write-Protection Detection/Index Detection



Triac Driver Circuit



รูปที่ 8.1 ตัวอย่างโฟโตคัปเปิลอร์ชนิดผลึกและการใช้งาน [10]

- ตรวจวัดความเร็วหมุนรอบของวัสดุเช่น วีดีโอ ดิสก์ แผ่นเสียง
- ตรวจหาทิศทางการเคลื่อนที่/หมุนของวัสดุ
- Encoder
- ตรวจสอบภาพกระดาดติดในเครื่องถ่ายภาพเอกสาร
- วัดขนาดสิ่งของ
- ตรวจวัดว่าวัสดุขาดหรือไม่ เช่น เส้นด้าย
- ตรวจกระดาดติดในเครื่องถ่ายภาพเอกสาร
- อ่านตำแหน่งการเจาะรูของกระดาด
- อ่านตำแหน่งวัสดุ สินค้า
- ระบบการสื่อสารด้วยแสง

8.2 การพัฒนาโฟโตคัปเปิลอร์ชนิดอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำ

โฟโตคัปเปิลอร์ชนิดอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำที่พัฒนาขึ้นนี้ประกอบด้วย ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำเป็นภาคเปล่งแสง และเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบางอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำเป็นภาครับแสง โฟโตคัปเปิลอร์ที่ประดิษฐ์ขึ้นนี้แบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดตามความแตกต่างของโครงสร้าง [8] คือ

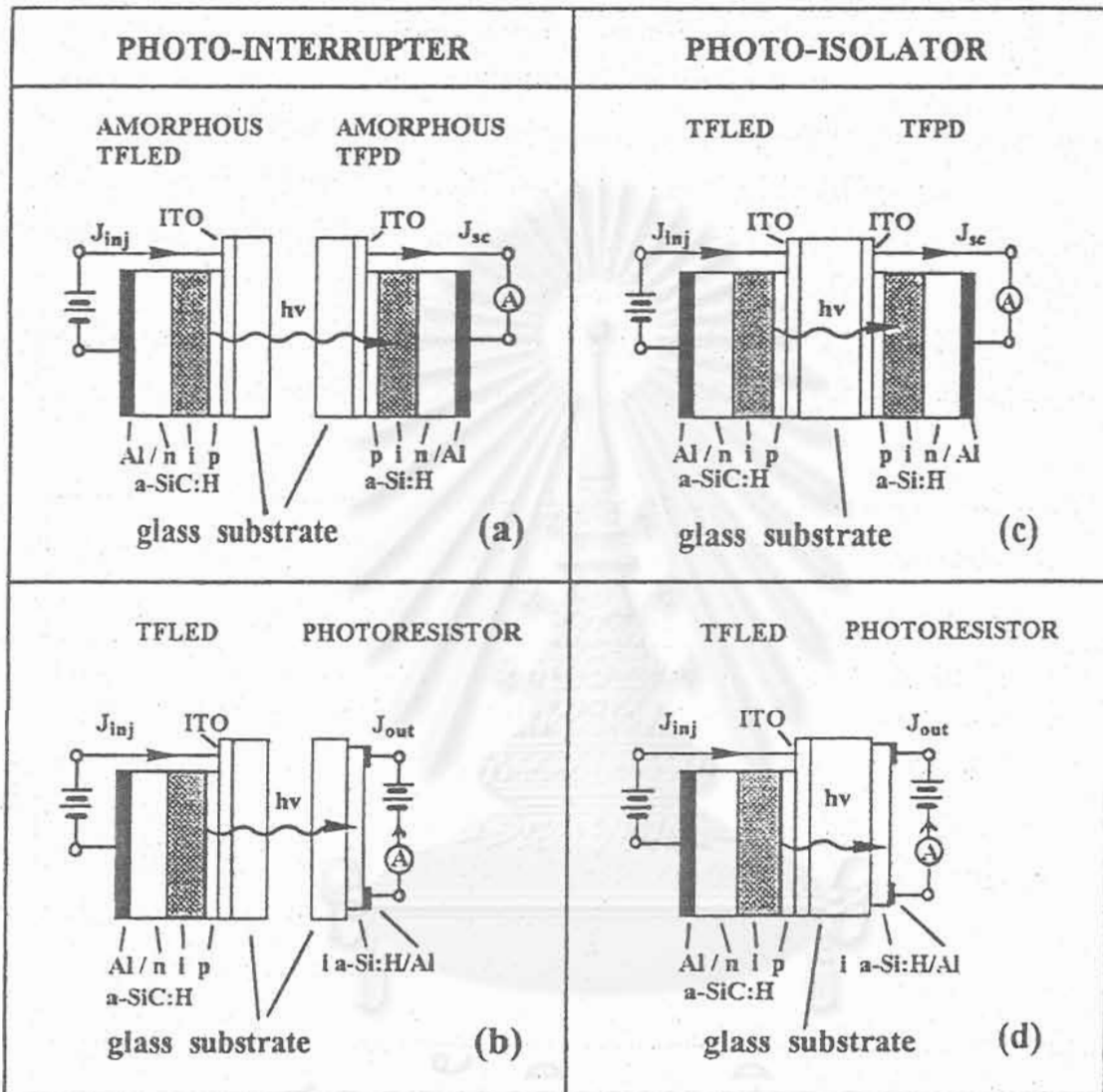
1) ชนิดโฟโตอินเทอร์รัปเตอร์ (Photointerrupter) ประกอบด้วยภาคเปล่งแสงและภาครับแสงที่สร้างอยู่บนแผ่นกระจกคนละแผ่น และ

2) ชนิดโฟโตไอโซเลเตอร์ (Photoisolator) ประกอบด้วยภาคเปล่งแสงและภาครับแสงที่อยู่บนแผ่นกระจกแผ่นเดียวกัน แต่อยู่คนละด้าน

ประสิทธิภาพของโฟโตคัปเปิลอร์ชนิดอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำในเบื้องต้นนี้มีค่าระดับ 10^{-4} - 10^{-5} % ข้อดีของโฟโตคัปเปิลอร์อะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำนี้ คือราคาถูกเป็นฟิล์มบาง ผลิตเป็นพื้นที่ใหญ่ได้ง่าย และผลิตให้มีลักษณะเป็นโครงข่ายเมตริกซ์ได้ง่าย

8.2.1 โครงสร้างชนิดต่าง ๆ ของโฟโตคัปเปิลอร์ชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำ

โฟโตคัปเปิลอร์ชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดหนึ่ง ซึ่งประกอบด้วยภาคเปล่งแสงที่ทำงานโดยการแปลงสัญญาณไฟฟ้าให้เปลี่ยนเป็นสัญญาณแสง และประกอบด้วยภาครับแสงที่แปลงสัญญาณแสงให้เปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้าอีกครั้งหนึ่ง ดังนั้นเราจึงแบ่งโครงสร้างของโฟโตคัปเปิลอร์ ออกได้เป็น 2 ส่วน คือภาคเปล่งแสงและภาครับแสง ดังแสดงในรูปที่ 8.2 (a)- (d) โดยในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบดังนี้



รูปที่ 8.2 โครงสร้างของโฟโตคัปเปิลอร์ชนิดอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำซึ่งพัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้เป็นครั้งแรกในโลก และมีตัวกัน 4 ชนิด และได้มีการจดสิทธิบัตร

1) ภาคเปล่งแสงผลิตจากไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางอะมอร์ฟิส และ

2) ภาครับแสงผลิตจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบางอะมอร์ฟิสรอยต่อ p-i-n ซึ่งทำงานโดยอาศัยหลักการโฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic effect) หรือผลิตจากฟิล์มบางอะมอร์ฟิสสารกึ่งตัวนำชนิด i อย่างเดียวซึ่งทำงานโดยอาศัยหลักการของโฟโตคอนดักทีฟ (Photoconductive effect)

ในงานวิจัยนี้ ได้ออกแบบและพัฒนาโฟโตคัปเปิลเลอร์ชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟิสสารกึ่งตัวนำและแบ่งออกเป็นชนิดย่อยได้ 2 ชนิดตามวิธีการประกอบภาคเปล่งแสงและภาครับแสงดังนี้คือ

1. โฟโตอินเทอร์รัปเตอร์ (Photointerruptor) ได้แก่การผลิตภาคเปล่งแสงและภาครับแสงให้อยู่บนแผ่นฐาน (แผ่นกระจก) คนละแผ่น แล้วนำมาประกบกัน ซึ่งผู้ใช้สามารถสอดไส้วัสดุจากภายนอกให้เข้าไปคั่นตัดแสงได้ ดังแสดงโครงสร้างในรูปที่ 8.2 (a) และ (b)

2. โฟโตไอโซเลเตอร์ (Photoisolator) ได้แก่ การผลิตให้ภาคเปล่งแสงและภาครับแสงอยู่บนแผ่นกระจกเดียวกันแต่ให้อยู่ที่ผิวคนละด้านของแผ่นกระจก ดังแสดงโครงสร้างในรูปที่ 8.2 (c) และ (d)



รายละเอียดของรูปที่ 8.2 (a)-(d) มีดังนี้

รูปที่ 8.2 (a) คือ โฟโตอินเทอร์รัปเตอร์ที่มีเซลล์แสงอาทิตย์หรือโฟโตไดโอดรอยต่อ p-i-n ของ a-Si:H (a-Si:H solar cell, photodiode) ซึ่งทำงานด้วยปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก (photovoltaic effect) เป็นภาครับแสง มีคุณสมบัติเด่นว่าจะมีเวลาการตอบสนองขาออก (output response time) ที่รวดเร็วกว่ากรณี (b) และ (d) ซึ่งมีโฟโตรีซิสเตอร์ของ a-Si:H (a-Si:H photoresistor) เป็นภาครับแสง [11-14] แต่ขนาดของสัญญาณขาออกของกรณี (a) มีค่าต่ำกว่ากรณี (b) และ (d)

รูปที่ 8.2 (c) คือ โฟโตไอโซเลเตอร์ที่มีเซลล์แสงอาทิตย์หรือโฟโตไดโอดรอยต่อ p-i-n ของ a-Si:H เป็นภาครับแสง มีลักษณะเด่นตรงที่ภาคเปล่งแสงและภาครับแสงปลูกอยู่บนกระจกแผ่นเดียวกันแต่คนละด้านของแผ่นกระจก ทำให้ลดต้นทุนการผลิตและลดกระบวนการผลิตที่ซับซ้อน

รูปที่ 8.2 (b) คือ โฟโตอินเทอร์เรปเตอร์ ที่มีโฟโตริซิสเตอร์ชนิด a-Si:H (a-Si:H photoresistor) เป็นภาครับแสง ข้อดีของโฟโตริซิสเตอร์คือผลิตง่ายและสามารถขยายสัญญาณให้มีอัตราการขยายสัญญาณสูง และมีขนาดสัญญาณสูงเพราะกระแสไฟฟ้าเอาท์พุทเกิดจาก secondary photocurrent แต่เวลาการตอบสนองช้ากว่าชนิด (a)

รูปที่ 8.2 (d) คือ โฟโตไอโซเลเตอร์ ที่มีโฟโตริซิสเตอร์เป็นภาครับแสง โดยภาคเปล่งแสงและภาครับแสงปลูกอยู่บนแผ่นฐานกระจกเดียวกันแต่ที่ผิวคนละด้าน

รูปที่ 8.3 แสดงตัวอย่างการออกแบบการบรรจุ (package) โฟโตคัปเปิลอร์ชนิดฟิล์มบาง-อะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำลงในภาชนะในลักษณะต่าง ๆ [8]

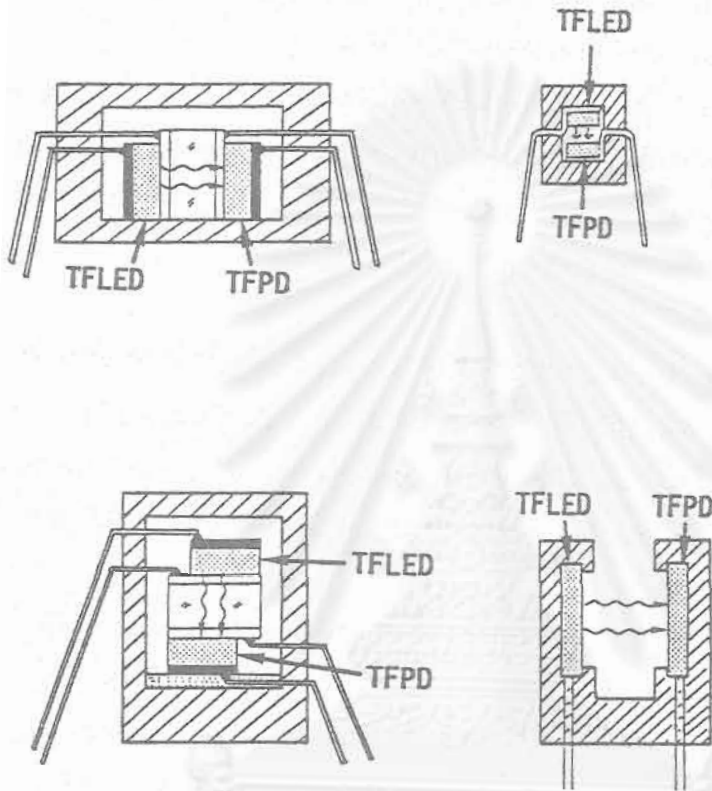
8.2.2 การประดิษฐ์โฟโตคัปเปิลอร์ชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำ

ระบบที่ใช้ในการผลิตโฟโตคัปเปิลอร์ชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำ ได้แก่ระบบการแยกสลายก๊าซด้วยประจุเรืองแสง (Glow discharge plasma CVD) ที่มีความถี่ R.F. 13.56 MHz เจือไนในการผลิตไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางและเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบาง แสดงสรุปในตารางที่ 8.2

ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางมีโครงสร้างพื้นฐานเป็นรอยต่อชนิด p-i-n ช่องว่างพลังงานของชั้น p และ n มีค่า 2.0 eV และช่องว่างพลังงานของชั้น i มีค่าระหว่าง 2.6-3.0 eV สีของการเปล่งแสงของไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางมีสีส้ม-เหลือง ส่วนเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบางมีโครงสร้างเป็นรอยต่อแบบเฮเทอโร (heterojunction) ชนิด p-i-n ของ a-SiC:H กับ a-Si:H ซึ่งมีประสิทธิภาพโดยเฉลี่ย 6 % วัดภายใต้แสงอาทิตย์ AM1 (วัดที่ความเข้มแสง 100 mW/cm²) ทั้งไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางและเซลล์แสงอาทิตย์มีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 3 x 5 mm² [14-15].

8.2.3 ลักษณะสมบัติพื้นฐานของไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบาง

คุณสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของโฟโตคัปเปิลอร์ คือแสงที่เปล่งจากภาคเปล่งแสงซึ่งได้แก่ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบาง จะต้องออกแบบให้มีสเปกตรัมการเปล่งแสงอยู่ในย่านที่ภาครับแสงซึ่งได้แก่ เซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบางหรือ โฟโตริซิสเตอร์แบบฟิล์มบางตอบสนองได้ดีที่สุด โดยปกติเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบางสามารถตอบสนองต่อแสงที่มีสเปกตรัมอยู่ในช่วงที่ตามองเห็นซึ่งมีค่ายอดของสเปกตรัมอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 600-680 nm ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องทดลองเลือกไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางที่มีช่องว่างพลังงานที่เหมาะสม

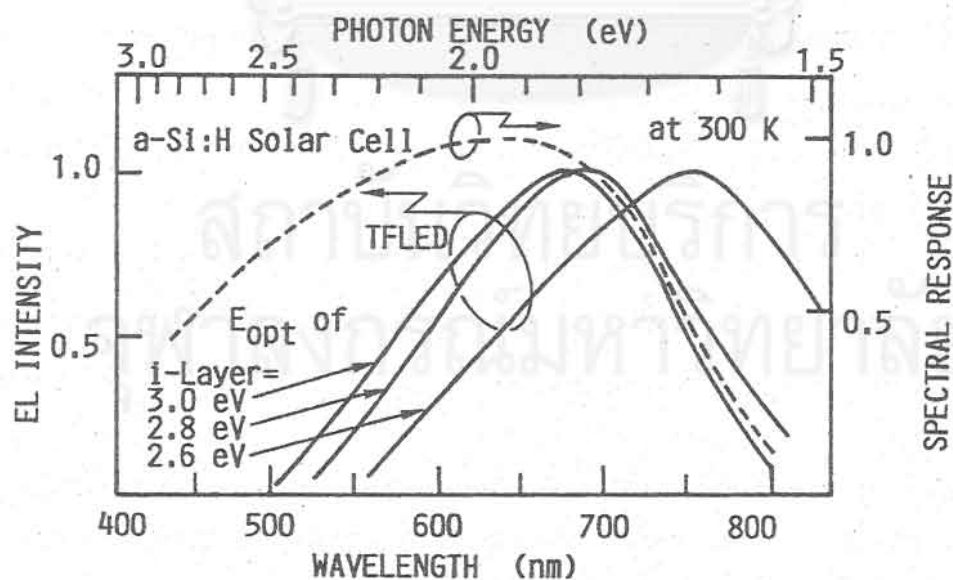


รูปที่ 8.3 ตัวอย่างการบรรจุ (package) โฟโตคัปเปลอร์ชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟิสสารกึ่งตัวนำลงในภาชนะในลักษณะต่าง ๆ และได้มีการจดสิทธิบัตร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 8.2 เปรียบเทียบในการผลิตไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางอะมอร์ฟัสและเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน

TFLED			TFPD		
p	a-SiC:H	$E_{opt} = 2.0 \text{ eV}$ $d = 150 \text{ \AA}$ $\sigma_D = 10^{-7} \text{ s/cm}$	a-SiC:H	$E_{opt} = 2.0 \text{ eV}$ $d = 150 \text{ \AA}$ $\sigma_D = 10^{-7} \text{ s/cm}$	
i	a-SiC:H	$E_{opt} = 3.0 \text{ eV}$ $d = 500 \text{ \AA}$	a-Si:H	$E_{opt} = 1.8 \text{ eV}$ $d = 5000 \text{ \AA}$	
n	a-SiC:H	$E_{opt} = 2.0 \text{ eV}$ $d = 300 \text{ \AA}$ $\sigma_D = 10^{-7} \text{ s/cm}$	$\mu\text{C-Si:H}$	$E_{opt} = 2.0 \text{ eV}$ $d = 500 \text{ \AA}$ $\sigma_D = 10^{-1} \text{ s/cm}$	
Efficiency = $10^{-3} \%$			Efficiency = 6%		



รูปที่ 8.4 สเปกตรัมการเปล่งแสงของไดโอดเปล่งแสงฟิล์มบาง 3 ตัว (เส้นทึบ) ซึ่งมีช่องว่างพลังงานของชั้น i เท่ากับ 2.6, 2.8, 3.0 eV ตามลำดับ และเส้นประในรูปแสดงผลตอบสนองแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน

เส้นทึบในรูปที่ 8.4 แสดงสเปกตรัมการเปล่งแสงของไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางซึ่งมีช่องว่างพลังงาน 3 ค่า (2.6, 2.8, 3.0 eV) และเส้นประในรูปแสดงผลตอบสนองแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ จากรูปนี้พบว่า สเปกตรัมการเปล่งแสงของไดโอดเปล่งแสงที่ซ้อนทับกับสเปกตรัมการตอบสนองของเซลล์แสงอาทิตย์มากที่สุดได้แก่ สเปกตรัมที่เกิดจากไดโอดเปล่งแสงที่มีช่องว่างพลังงานของชั้น i ประมาณ 2.8–3.0 eV

ทางด้านความเร็วในการตอบสนองต่อกระแสไฟฟ้าพัลส์ของไดโอดเปล่งแสง ในบทที่ 4 ได้เคยทราบแล้วว่า ค่าช่วงเวลาขึ้นและเวลาขาลงอยู่ในช่วงหลายสิบลิป microsecond และความเข้มของแสงที่เปล่งออกมาเริ่มลดลง เมื่อกระแสไฟฟ้าพัลส์ที่ป้อนมีความถี่สูงกว่า 200 KHz

ส่วนทางด้านค่าช่วงเวลาขึ้นและขาลงของสัญญาณเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนในงานวิจัยนี้มีค่าระดับ microsecond ดังนั้นโฟโตคัปเปิลอร์แบบฟิล์มบางที่ประกอบด้วยไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางและเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบางดังกล่าวข้างต้นจึงมีศักยภาพที่จะทำงานที่ความถี่สูงได้ถึงระดับหลายร้อยกิโลเฮิร์ต

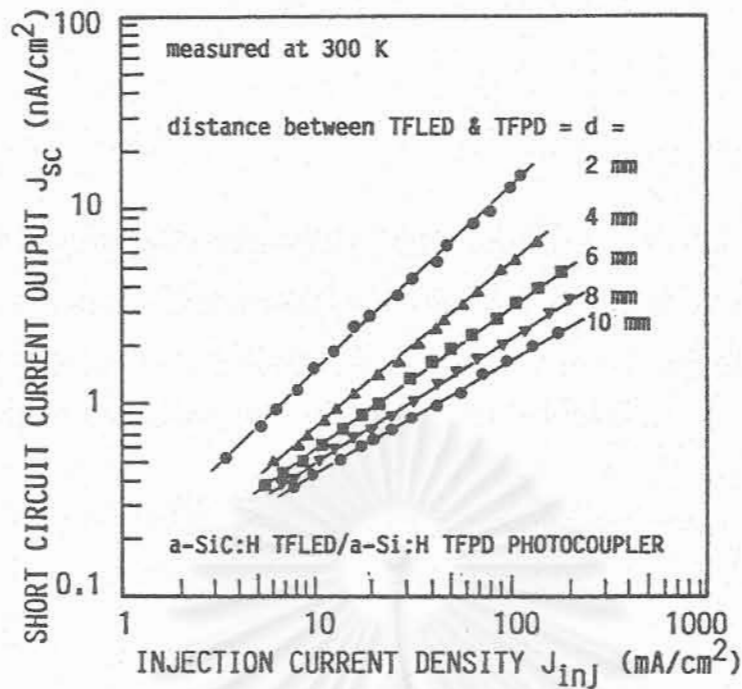
8.2.4 คุณสมบัติพื้นฐานของโฟโตคัปเปิลอร์แบบฟิล์มบางอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำ

กรณีชนิดโฟโตอินเทอร์เรปเตอร์ (โครงสร้าง (a))

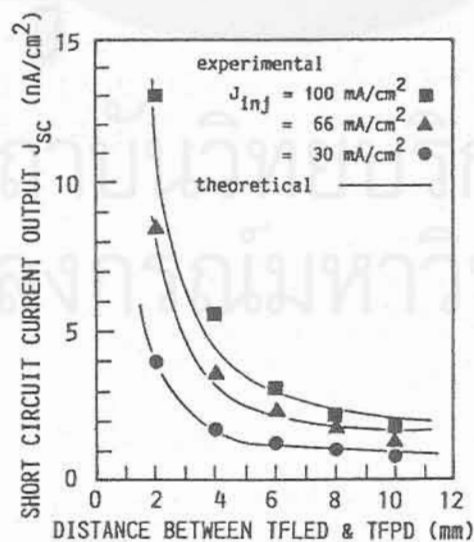
ตัวอย่างคุณสมบัติพื้นฐานของโฟโตคัปเปิลอร์แบบฟิล์มบางแสดงในรูปที่ 8.5 ซึ่งเป็นกรณีชนิดโฟโตอินเทอร์เรปเตอร์ที่มี a-Si:H solar cell เป็นภาครับแสง ในรูปที่ 8.5 นี้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าอินพุต (injection current density : J_{inj}) ที่ป้อนให้ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบาง และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต (short circuit output current : J_{sc}) ที่ออกจากเซลล์แสงอาทิตย์ (โฟโตไดโอด) แบบฟิล์มบาง พารามิเตอร์ d ในรูปนี้คือระยะห่างระหว่างภาคเปล่งแสงและภาครับแสง

จากรูปที่ 8.5 นี้พบว่า เมื่อเพิ่ม J_{inj} จะทำให้ความสว่างของแสงที่เปล่งออกมาจากไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางเพิ่มขึ้นและทำให้ J_{sc} ของเซลล์แสงอาทิตย์ (โฟโตไดโอด) แบบฟิล์มบางมีค่าเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น และเมื่อระยะห่าง d เพิ่มขึ้น สัญญาณเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์ลดลงตามสัดส่วนของระยะทาง

ในโฟโตคัปเปิลอร์ทั่วไปค่า CTR (current transfer ratio) หรือ ค่าประสิทธิภาพในการถ่ายทอดสัญญาณเป็นค่าพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญ และแสดงได้ด้วยอัตราส่วนของกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต J_{sc} กับกระแสไฟฟ้าที่ป้อน J_{inj} นั่นก็คือ [10]



รูปที่ 8.5 ลักษณะสมบัติพื้นฐานของโฟโตคัปเปิลอร์ชนิดอะมอร์ฟัส ในรูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าอินพุท (injection current density: J_{inj}) ที่ป้อนให้ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบาง และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเอาต์พุท (short circuit current output: J_{sc}) ที่ออกจากเซลล์แสงอาทิตย์ (โฟโตไดโอด) แบบฟิล์มบาง และพารามิเตอร์ d ในรูปนี้คือ ระยะห่างระหว่างภาคเปล่งแสงและภาครับแสง



รูปที่ 8.6 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าเอาต์พุทและระยะห่าง d ระหว่างภาคเปล่งแสงและภาครับแสงของโฟโตคัปเปิลอร์ชนิดอะมอร์ฟัส

$$CTR = J_{sc}/J_{inj} \times 100 \% \quad (8.1)$$

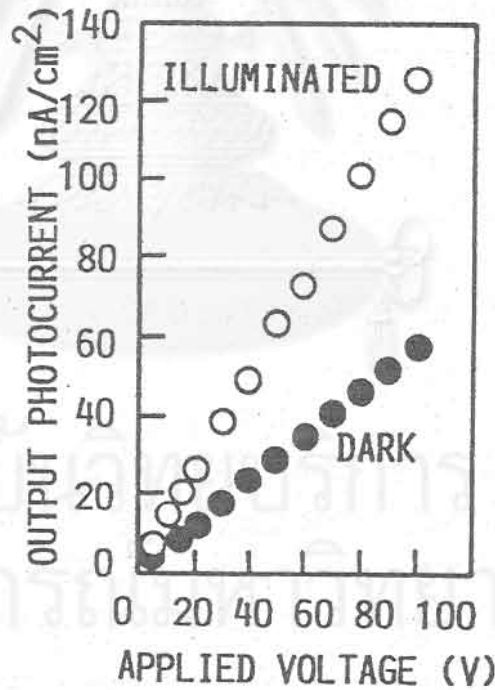
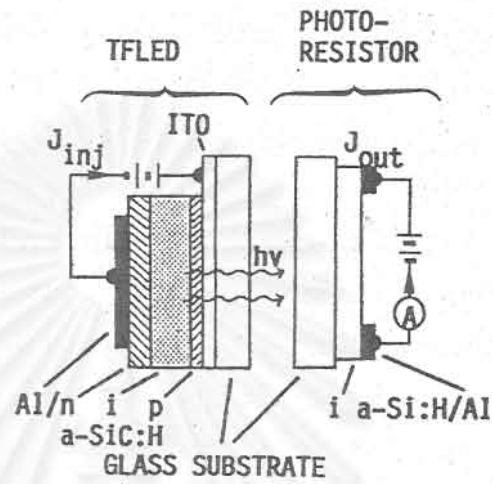
จากรูปที่ 8.5 ค่า CTR ที่ได้จากโฟโตแคปเปลอร์แบบฟิล์มบางอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำในงานวิจัยนี้มีค่าประมาณ 10^{-4} - 10^{-5} % เนื่องจากประสิทธิภาพของไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางมีค่าโดยประมาณ 10^{-3} % ดังนั้นจึงทำให้เราประเมินค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์หรือโฟโตไดโอด (ไม่มีการไบแอส) ที่รับแสงซึ่งมีความเข้มแสงน้อยมาก ๆ จากไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางนั้นว่ามีค่าประมาณ 10^{-1} - 10^{-2} %

เนื่องจากความเข้มของแสงจะลดลงเมื่อระยะห่าง d เพิ่มขึ้นในลักษณะแปรผกผันกับกำลังสองของระยะทาง ดังนั้นค่า J_{sc} จึงลดลงเมื่อ d มีค่าเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 8.6

กรณีชนิดโฟโตอินเทอร์เรปเตอร์ (โครงสร้าง (b))

รูปที่ 8.7 แสดงลักษณะสมบัติเอ้าท์พุทของโฟโตแคปเปลอร์ชนิดโฟโตอินเทอร์เรปเตอร์ที่มีโฟโตริซิสเตอร์ (photoresistor) เป็นภาครับแสง (สิ่งประดิษฐ์รูปที่ 8.2 (b)) โฟโตริซิสเตอร์นี้มีลักษณะประกอบด้วยฟิล์ม a-Si:H ชนิดบริสุทธิ์เพียงชั้นเดียวเคลือบอยู่บนแผ่นกระจกและมีขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมรูปร่าง co-planar เคลือบทับ เป็นสิ่งประดิษฐ์ที่ทำงานโดยมีการไบแอสด้วยแรงดันไฟฟ้าตรงจากภายนอกและใช้ปรากฏการณ์โฟโตคอนดักทิฟ (photoconductive effect) มีคุณสมบัติเด่นตรงที่ประสิทธิภาพควอนตัม (quantum efficiency) สูงกว่าชนิดที่ภาครับแสงเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ จึงมีกระแสไฟฟ้าเอ้าท์พุทสูงซึ่งสามารถควบคุมได้ด้วยขนาดของแรงดันไฟฟ้าไบแอส

รูปที่ 8.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้โฟโตริซิสเตอร์และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเอ้าท์พุทในสภาวะที่ไม่ได้ฉายแสง (วงกลมสีดำ) และสภาวะที่ฉายแสง (วงกลมขาว) โดยที่ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางมีความสว่างคงที่ จากรูปนี้พบว่า ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่วงจรเอ้าท์พุทของโฟโตริซิสเตอร์เพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้นกับแรงดันไฟฟ้าไบแอส และมีค่ากระแสไฟฟ้าสูงกว่ากรณีในรูปที่ 8.5



รูปที่ 8.7 ลักษณะสมบัติพื้นฐานของโฟโตคัปเปิลอร์ชนิดโฟโตอินเทอร์เรเตอร์ที่มีโฟตรีซิสเตอร์ (photoresistor) เป็นภาครับแสง (สิ่งประดิษฐ์รูปที่ 8.2 (b)) ในรูปนี้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้โฟตรีซิสเตอร์และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตในสภาวะที่ไม่ได้ฉายแสง (วงกลมสีดำ) และสภาวะที่ฉายแสงจากไดโอดเปล่งแสง (วงกลมขาว) โดยที่แสงจากไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางมีความสว่างคงที่

กรณีโฟโตโอโซเลเตอร์ (โครงสร้าง (c))

รูปที่ 8.8 แสดงลักษณะสมบัติเอทพุทของโฟโตคัปเปิลอร์ชนิดโฟโตโอโซเลเตอร์ซึ่งมีโครงสร้าง(c) ในรูปที่ 8.2 กล่าวคือมีไดโอดเปล่งแสงและเซลล์แสงอาทิตย์อยู่บนกระจกแผ่นเดียวกัน และอยู่คนละด้านของแผ่นกระจก (dual surfaces) ดังนั้นแสงที่เปล่งออกมาจากไดโอดเปล่งแสงจึงสามารถเดินทางเข้าสู่เซลล์แสงอาทิตย์ได้โดยตรง สิ่งประดิษฐ์นี้มีลักษณะเด่นที่ ทนต่อแรงสั่นสะเทือน ไม่ต้องการจัด (align) ทิศทางแสงในการใช้งาน และระยะห่างของภาคเปล่งแสงและภาครับแสงถูกกำหนดด้วยความหนาของแผ่นกระจกเท่านั้น ในรูปที่ 8.8 พบว่ากระแสไฟฟ้าเอทพุทเพิ่มแบบเชิงเส้นกับกระแสอินพุทของไดโอดเปล่งแสง แต่อย่างไรก็ตามระดับของกระแสไฟฟ้าเอทพุทในรูปที่ 8.8 นี้ต่ำกว่ากระแสไฟฟ้าเอทพุทในรูปที่ 8.5 สาเหตุอาจเกิดจากการที่สิ่งประดิษฐ์ไดโอดเปล่งแสงถูก annealed ด้วยความร้อนในขณะที่กำลังผลิตเซลล์แสงอาทิตย์อีกด้านหนึ่งของแผ่นกระจก

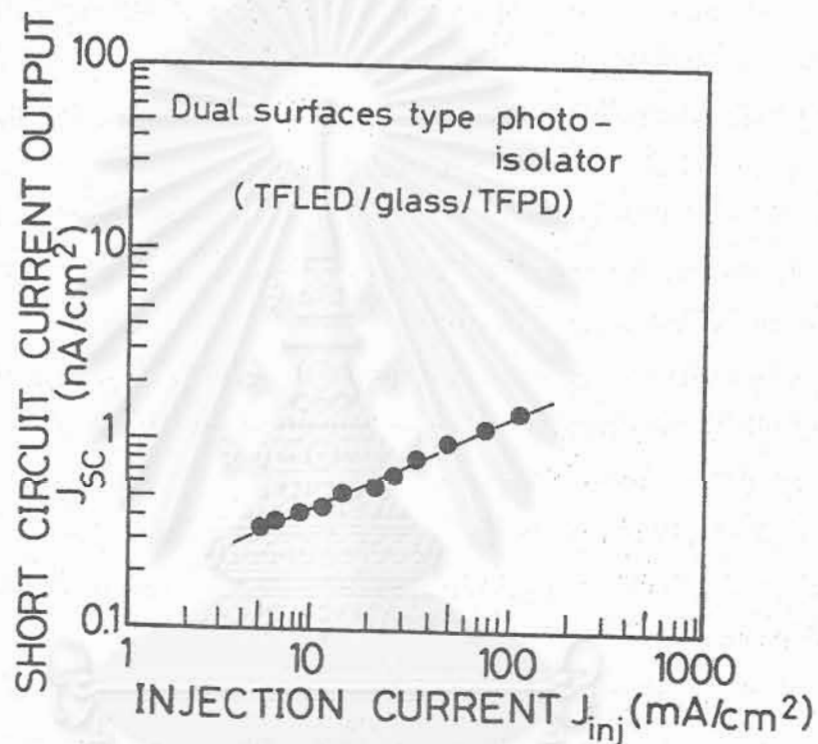
รูปที่ 8.9 แสดงภาพถ่ายสิ่งประดิษฐ์ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางและเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบางก่อนการประกอบเป็นโฟโตคัปเปิลอร์

รูปที่ 8.10 แสดงภาพถ่ายโฟโตคัปเปิลอร์ชนิดอะมอร์ฟิสสารกึ่งตัวนำซึ่งประกอบด้วย ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางอะมอร์ฟิสและเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบางอะมอร์ฟิส ขาสองขาด้านซ้ายคือขาอินพุท และขาสองขาด้านขวาคือขาเอทพุท

รูปที่ 8.11 แสดงภาพถ่ายของโฟโตคัปเปิลอร์ชนิดโฟโตโอโซเลเตอร์ ซึ่งประกอบด้วยไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางและเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบางซึ่งเคลือบอยู่บนกระจกแผ่นเดียวกัน และอยู่คนละด้าน (dual surfaces)

รูปที่ 8.12 แสดงภาพถ่ายตัวอย่างโฟโตคัปเปิลอร์ชนิดอะมอร์ฟิสสารกึ่งตัวนำซึ่งบรรจุลงในภาชนะเรียบร้อยแล้ว โดยที่รูปซ้ายมือเป็นกรณีโฟโตอินเทอร์เรปเตอร์ และรูปขวามือเป็นกรณีโฟโตโอโซเลเตอร์

โดยสรุปแล้ว ได้ประสบความสำเร็จในการประดิษฐ์โฟโตคัปเปิลอร์ชนิดวัสดุอะมอร์ฟิสสารกึ่งตัวนำได้เป็นครั้งแรก เป็นสิ่งประดิษฐ์ที่มีลักษณะเด่นหลายด้านที่โฟโตคัปเปิลอร์ชนิดผลึกไม่มี สิ่งประดิษฐ์เหล่านี้ยังไม่มีการผลิตออกขายในเชิงพาณิชย์ คาดว่าสิ่งประดิษฐ์ชนิดนี้จะมีประโยชน์ในการประยุกต์ใช้งานในกรณีที่ โฟโตคัปเปิลอร์ชนิดผลึกไม่เหมาะสม อาทิเช่น ในกรณีต้องการแสงพื้นที่ใหญ่ กรณีต้องการแสงแบบจุดที่เรียงกันจำนวนมากๆ (dot arrays) หรือในกรณีโครงสร้างแบบ matrix arrays เป็นต้น



รูปที่ 8.8 ลักษณะสมบัติเอาท์พุทของโฟโตคัปเปิลอร์ชนิดโฟโตไอโซเลเตอร์ซึ่งมีโครงสร้าง (c) ตามที่แสดงในรูปที่ 8.2 กล่าวคือมีไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางและเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบางอยู่บนกระจกแผ่นเดียวกัน และอยู่คนละด้านของแผ่นกระจก (dual surfaces)

กรณีโฟโตโอโซเลเตอร์ (โครงสร้าง (c))

รูปที่ 8.8 แสดงลักษณะสมบัติเอ้าท์พุทของโฟโตคัปเปิลอร์ชนิดโฟโตโอโซเลเตอร์ซึ่งมีโครงสร้าง(c) ในรูปที่ 8.2 กล่าวคือมีไดโอดเปล่งแสงและเซลล์แสงอาทิตย์อยู่บนกระจกแผ่นเดียวกัน และอยู่คนละด้านของแผ่นกระจก (dual surfaces) ดังนั้นแสงที่เปล่งออกมาจากไดโอดเปล่งแสงจึงสามารถเดินทางเข้าสู่เซลล์แสงอาทิตย์ได้โดยตรง สิ่งประดิษฐ์นี้มีลักษณะเด่นที่ ทนต่อแรงสั่นสะเทือน ไม่ต้องมีการจัด (align) ทิศทางแสงในการใช้งาน และระยะห่างของภาคเปล่งแสงและภาครับแสงถูกกำหนดด้วยความหนาของแผ่นกระจกเท่านั้น ในรูปที่ 8.8 พบว่ากระแสไฟฟ้าเอ้าท์พุทเพิ่มแบบเชิงเส้นกับกระแสอินพุทของไดโอดเปล่งแสง แต่อย่างไรก็ตามระดับของกระแสไฟฟ้าเอ้าท์พุทในรูปที่ 8.8 นี้ต่ำกว่ากระแสไฟฟ้าเอ้าท์พุทในรูปที่ 8.5 สาเหตุอาจเกิดจากการที่สิ่งประดิษฐ์ไดโอดเปล่งแสงถูก annealed ด้วยความร้อนในขณะที่กำลังผลิตเซลล์แสงอาทิตย์อีกด้านหนึ่งของแผ่นกระจก

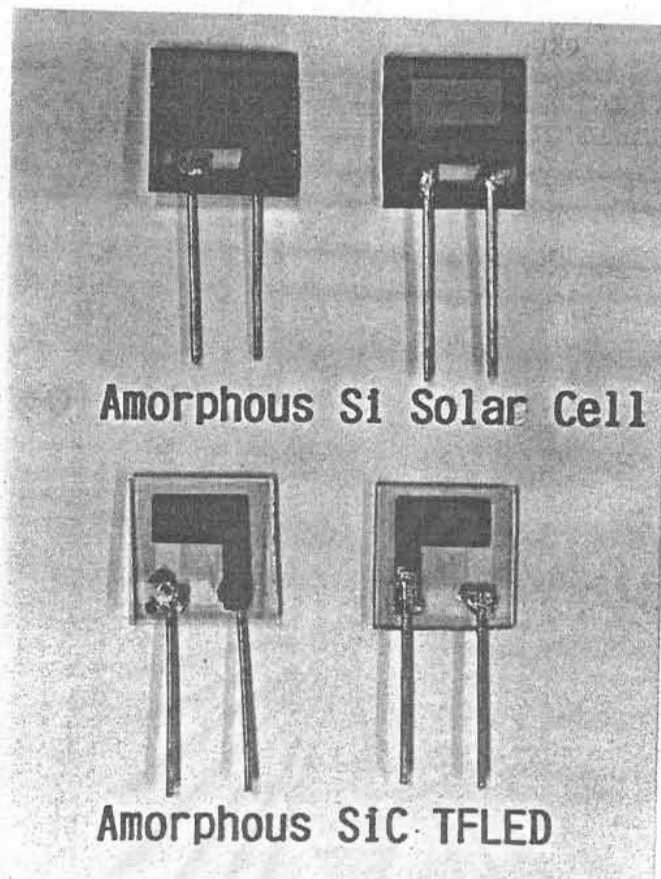
รูปที่ 8.9 แสดงภาพถ่ายสิ่งประดิษฐ์ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางและเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบางก่อนการประกอบเป็นโฟโตคัปเปิลอร์

รูปที่ 8.10 แสดงภาพถ่ายโฟโตคัปเปิลอร์ชนิดอะมอร์ฟิสสารกึ่งตัวนำซึ่งประกอบด้วย ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางอะมอร์ฟิสและเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบางอะมอร์ฟิส ขาสองขาด้านซ้ายคือขาอินพุท และขาสองขาด้านขวาคือขาเอ้าท์พุท

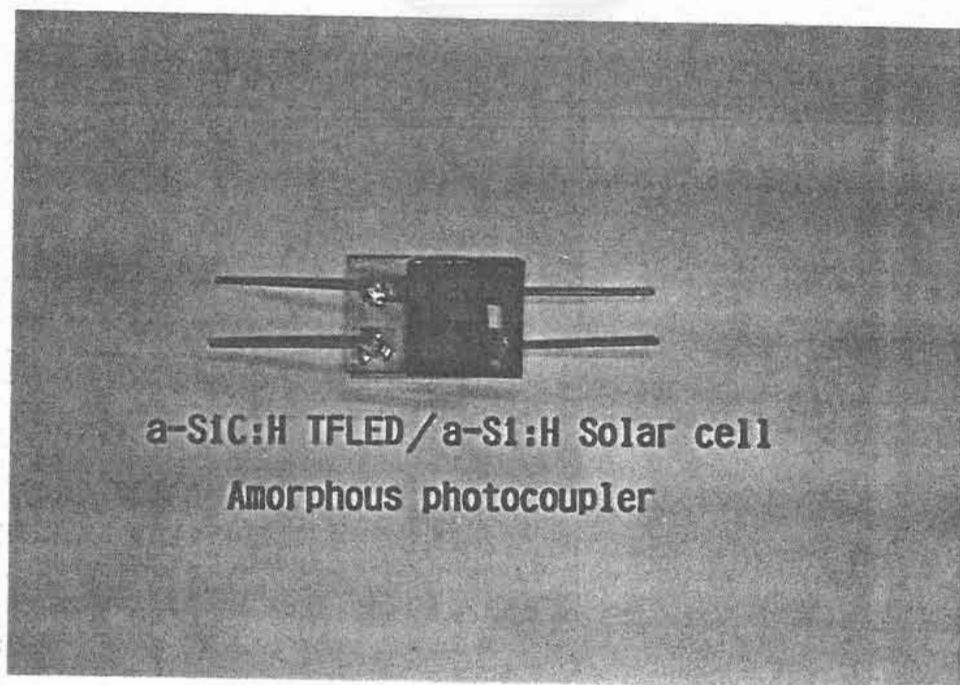
รูปที่ 8.11 แสดงภาพถ่ายของโฟโตคัปเปิลอร์ชนิดโฟโตโอโซเลเตอร์ ซึ่งประกอบด้วยไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางและเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบางซึ่งเคลือบอยู่บนกระจกแผ่นเดียวกัน และอยู่คนละด้าน (dual surfaces)

รูปที่ 8.12 แสดงภาพถ่ายตัวอย่างโฟโตคัปเปิลอร์ชนิดอะมอร์ฟิสสารกึ่งตัวนำซึ่งบรรจุลงในภาชนะเรียบร้อยแล้ว โดยที่รูปซ้ายมือเป็นกรณีโฟโตอินเทอร์รับเตอร์ และรูปขวามือเป็นกรณีโฟโตโอโซเลเตอร์

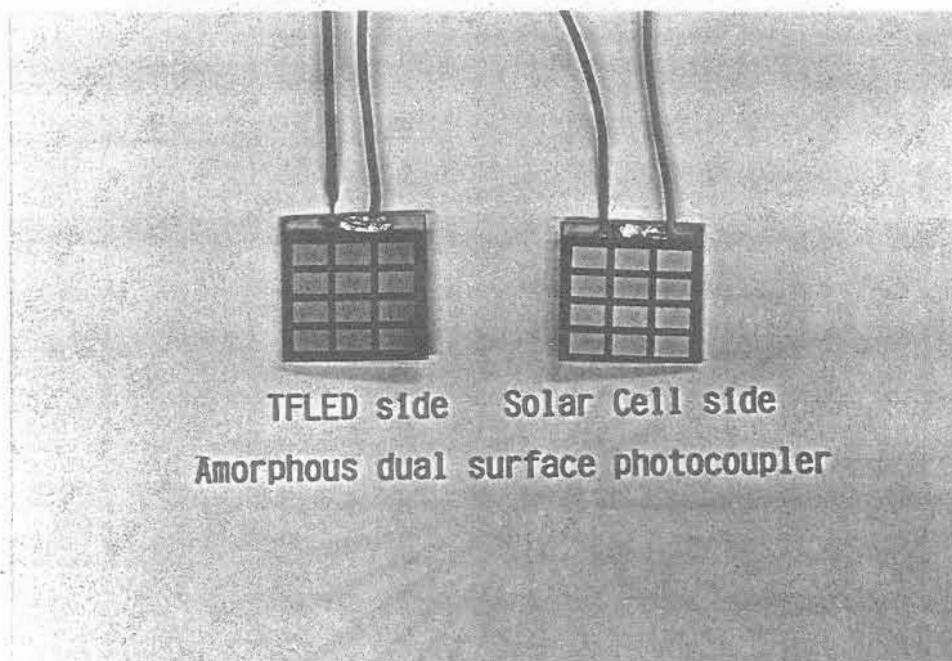
โดยสรุปแล้ว ได้ประสบความสำเร็จในการประดิษฐ์โฟโตคัปเปิลอร์ชนิดวัสดุอะมอร์ฟิสสารกึ่งตัวนำได้เป็นครั้งแรก เป็นสิ่งประดิษฐ์ที่มีลักษณะเด่นหลายด้านที่โฟโตคัปเปิลอร์ชนิดผลึกไม่มี สิ่งประดิษฐ์เหล่านี้ยังไม่มีการผลิตออกขายในเชิงพาณิชย์ คาดว่าสิ่งประดิษฐ์ชนิดนี้จะมีประโยชน์ในการประยุกต์ใช้งานในกรณีที่ โฟโตคัปเปิลอร์ชนิดผลึกไม่เหมาะสม อาทิเช่น ในกรณีต้องการแสงพื้นที่ใหญ่ กรณีต้องการแสงแบบจุดที่เรียงกันจำนวนมากๆ (dot arrays) หรือในกรณีโครงสร้างแบบ matrix arrays เป็นต้น



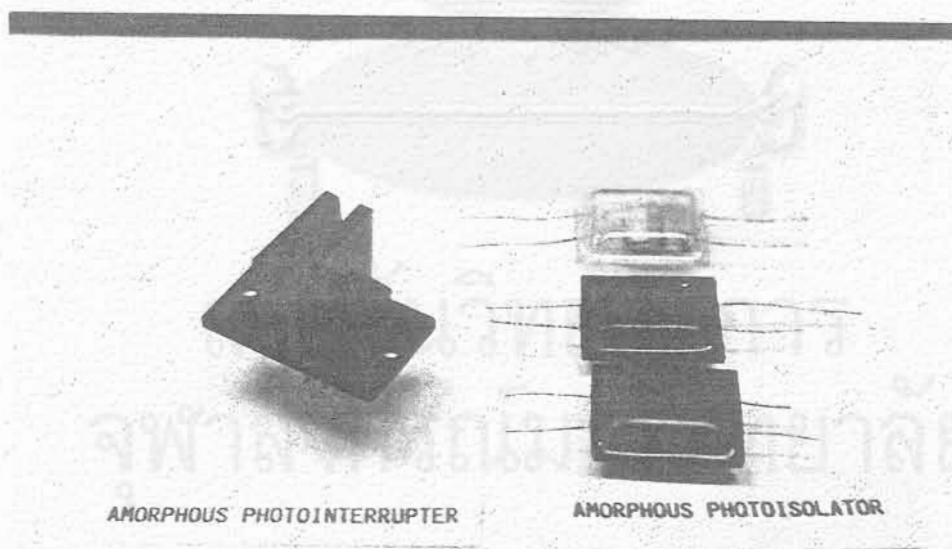
รูปที่ 8.9 ภาพถ่ายสิ่งประดิษฐ์ไดโอดเปล่งแสงฟิล์มบางและเซลล์แสงอาทิตย์ฟิล์มบางก่อนการประกอบเป็นโฟโตคัปเปิลอร์



รูปที่ 8.10 ภาพถ่ายโฟโตคัปเปิลอร์ชนิดอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำซึ่งประกอบด้วย ไดโอดเปล่งแสง-แบบฟิล์มบางอะมอร์ฟัสและเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบางอะมอร์ฟัส ขาสองขาด้านซ้ายคือขาอินพุท และขาสองขาด้านขวาคือขาเอาต์พุท



รูปที่ 8.11 ภาพถ่ายของโฟโตคัปเปิลอร์ชนิดโฟโตไอโซเลเตอร์ ซึ่งประกอบด้วยไดโอดเปล่งแสง-แบบฟิล์มบางและเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบางซึ่งเคลือบอยู่บนกระจกแผ่นเดียวกันและอยู่คนละด้าน (dual surfaces)



รูปที่ 8.12 ภาพถ่ายตัวอย่างโฟโตคัปเปิลอร์ชนิดอะมอร์ฟิสสารกึ่งตัวนำซึ่งบรรจุลงในภาชนะเรียบร้อยแล้ว โดยที่รูปซ้ายมือเป็นกรณีโฟโตอินเทอร์รัปเตอร์ และรูปขวามือเป็นกรณีโฟโตไอโซเลเตอร์

8.3 การพัฒนาวงจรรวมออปโตอิเล็กทรอนิกส์ชนิดอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำ

วงจรรวมออปโตอิเล็กทรอนิกส์ (optoelectronic IC ย่อว่า OEIC) คือ สิ่งประดิษฐ์วงจรรวม (integrated circuit) ที่ประกอบด้วยสิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์จำนวนมากอยู่บนชิป (chip) ตัวเดียวกัน ถูกเสนอความคิดมาตั้งแต่ ค.ศ. 1959 [16] เช่นอาจประกอบด้วยไดโอดเปล่งแสง ทางนำแสง ทรานซิสเตอร์ และโฟโตไดโอด ฯลฯ เป็นต้น และสามารถทำงานบางอย่างได้แล้วแต่จะ ออกแบบ เช่น ใช้คำนวณลอจิกหรือถ่ายทอดสัญญาณ สิ่งประดิษฐ์ OEIC แตกต่างกับ IC ตรงที่ใน การทำงานนั้นนอกจากอิเล็กทรอนิกส์แล้ว ยังใช้โฟตอนเป็นสื่อในการส่งสัญญาณต่างๆ เนื่องจากโฟตอน สามารถเดินทางได้รวดเร็วและไม่ถูกรบกวนด้วยคลื่นแม่เหล็ก ดังนั้นจึงเหมาะสมในการใช้งานมากกว่าการใช้อิเล็กทรอนิกส์ในหลายกรณี

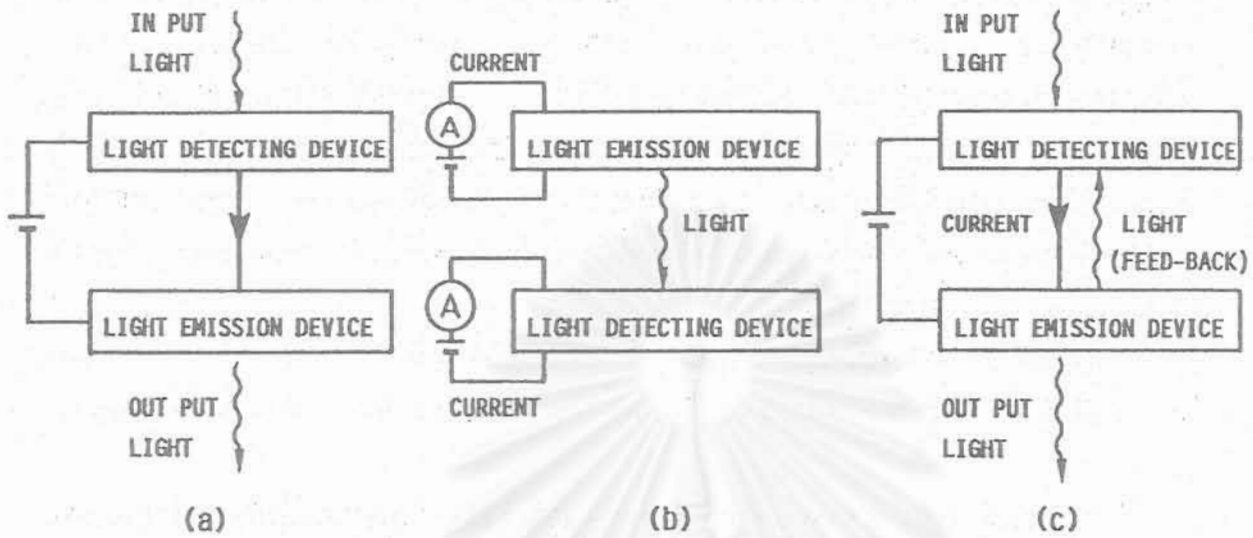
สิ่งประดิษฐ์ OEIC ที่มีอยู่ทั่วไปในปัจจุบันทั้งหมดสร้างจากวัสดุผลึกเดี่ยว อาทิเช่น GaAs, GaAlAs ซึ่งเป็นวัสดุที่มีราคาแพงและผลิตเป็นพื้นที่ใหญ่ได้ยาก และมีปัญหาเรื่อง lattice mismatch [17]

ในงานวิจัย จึงได้มีการเสนอความคิดใหม่ที่จะใช้วัสดุอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำเป็นวัสดุหลักใน OEIC และได้ตั้งชื่อสิ่งประดิษฐ์ใหม่นี้ว่า “วงจรรวมออปโตอิเล็กทรอนิกส์ชนิดอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำ” (amorphous semiconductor optoelectronic integrated circuit) OEIC ชนิดอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำ จะมีลักษณะเด่นที่แตกต่างไปจากกรณีผลึกหลายด้าน อาทิเช่น

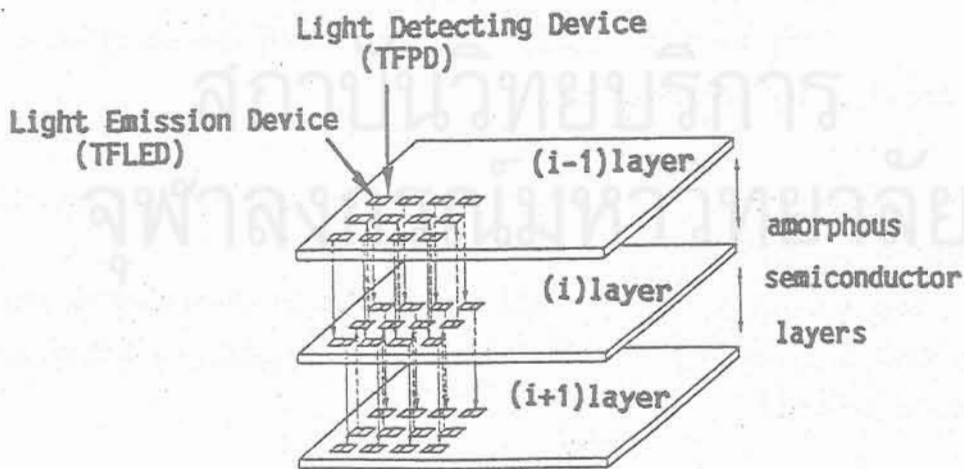
- สามารถใช้วัสดุชนิดต่างๆเป็นแผ่นฐานได้ เช่น แผ่นกระจก แผ่นโลหะ แผ่นเซรามิก แผ่นโพลิเมอร์
- สามารถผลิตให้ฟิล์มอะมอร์ฟัสซ้อนทับกันหลายๆชั้นโดยไม่มีปัญหาเรื่องความแตกต่างของโครงผลึก (lattice mismatch)
- ปัจจุบันมีสิ่งประดิษฐ์ชนิดอะมอร์ฟัสที่ทำงานได้หลายชนิดแล้วเช่น ทรานซิสเตอร์-ฟิล์มบาง ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบาง โฟโตไดโอดฟิล์มบาง ทางนำแสงฟิล์มบาง เป็นต้น
- ใช้วัสดุอะมอร์ฟัสซิลิคอนอัลลอยซึ่งสามารถผลิตได้ที่อุณหภูมิต่ำและเป็นวัสดุที่มีมาก ดังนั้นจึงประหยัดพลังงานและต้นทุนถูก

ตัวอย่างแนวความคิด (concept) เกี่ยวกับการทำงานของสิ่งประดิษฐ์ OEIC ชนิดอะมอร์ฟัส แสดงในรูปที่ 8.13 และรูปที่ 8.14

ในรูปที่ 8.13 (a) แสงอินพุทเมื่อเดินทางเข้าโฟโตไดโอด (light detecting device) จะทำให้โฟโตไดโอดส่งสัญญาณไฟฟ้าให้ไดโอดเปล่งแสง(light emission device) เปล่งแสงออกมา สามารถใช้งานเป็นสวิตช์แสงได้ (optical switch)



รูปที่ 8.13 ตัวอย่าง combination ระหว่างสิ่งประดิษฐ์เปล่งแสงและรับแสงที่ผลิตจากวัสดุอะมอร์ฟิสเพื่อประกอบเป็น optical functional elements ต่างๆ
 (a) optical switch, (b) photocoupler และ (c) optical amplifier



รูปที่ 8.14 ตัวอย่างสิ่งประดิษฐ์ multi-layer ที่ใช้วัสดุอะมอร์ฟิสส่วนต่างๆซึ่งมีประโยชน์ในงาน optical computer และ neural network ชนิดต่างๆ

ในรูปที่ 8.13 (b) เป็นกรณีโฟโตคัปเปิลเลอร์ (photocoupler) ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 8.1-8.2

ในรูปที่ 8.13 (c) แสงอินพุทจะทำให้โฟโตไดโอดส่งสัญญาณไฟฟ้าให้ไดโอดเปล่งแสง และแสงส่วนหนึ่งจากไดโอดเปล่งแสงจะป้อนกลับเข้าสู่โฟโตไดโอด และทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลเข้า ไดโอดเปล่งแสงมากขึ้น สามารถใช้งานเป็นออปติคัลแอมพลิฟายเออร์ได้ (optical amplifier)

รูปที่ 8.14 แสดงตัวอย่างการออกแบบ OEIC ซึ่งประกอบด้วยฟิล์มบางอะมอร์ฟัสหลายชั้น (multi-layer) ตัวอย่างการทำงานเช่น เมื่อมีแสงอินพุทเข้ามาจากด้านบน จะทำให้มีกระแสไฟฟ้าออกจากโฟโตไดโอดและไหลเข้าสู่ไดโอดเปล่งแสง แสงจากไดโอดเปล่งแสงชั้นบนๆจะเดินทางไปสู่โฟโตไดโอดชั้นที่อยู่ด้านล่างลงไป และอาจมีทรานซิสเตอร์เพื่อคำนวณลอจิกบางอย่างก็ได้ อาจมีประโยชน์ในงานด้าน optical computer และ neural network ชนิดต่างๆ

8.4 สรุป

ได้ประสบความสำเร็จในการประดิษฐ์โฟโตคัปเปิลเลอร์ชนิดอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำ (world's first amorphous semiconductor photocoupler) เป็นครั้งแรกในโลก และโฟโตคัปเปิลเลอร์ชนิดอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำนี้ยังแบ่งออกได้อีกเป็น 2 ชนิดตามหน้าที่การทำงานคือ ชนิดโฟโตอินเทอร์รัปเตอร์ (photointerrupter) และชนิดโฟโตไอโซเลเตอร์ (photoisolator)

โฟโตคัปเปิลเลอร์ชนิดอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำ เป็นสิ่งประดิษฐ์ที่มีคุณสมบัติเด่นกว่าชนิดผลึกหลายด้าน เช่น ราคาถูก ผลิตเป็นพื้นที่ใหญ่ได้ง่าย ผลิตให้เป็นค็อตหรือเมตริกซ์ได้ง่าย ทำให้สามารถใช้งานได้หลากหลายและสะดวกกว่ากรณีชนิดผลึกที่เคยมีมา มีประโยชน์มากมายในงานอิเล็กทรอนิกส์และอุตสาหกรรมต่างๆ และได้มีการเสนอแนวความคิดเกี่ยวกับวงจรรวมออปโตอิเล็กทรอนิกส์ชนิดอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำเป็นครั้งแรก

ผลงานความสำเร็จในการพัฒนาโฟโตคัปเปิลเลอร์ชนิดอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำดังกล่าวข้างต้น ได้มีการจดสิทธิบัตรและเผยแพร่อย่างกว้างขวาง

เอกสารอ้างอิง

1. D. Kruangam, W. Boonkosum, P. Siamchai and S. Panyakeow, "Visible-Light LED Having a-SiN:H as a Luminescent Layer", Extended Abstracts of 1992 Int. Conf. Solid State Devices and Materials, Tsukuba, Japan, August 26-28, (1992) 563.
2. W. Boonkosum, D. Kruangam and S. Panyakeow. "Amorphous Visible-Light Thin Film Light Emitting Diode Having a-SiN:H as a Luminescent Layer", Jpn. J. Appl. Phys., 32, April (1993) 1534.

3. D. Kruangam, W. Boonkosum and S. Panyakeow, "Visible Thin Film Light Emitting Diode Using a-SiN:H/a-SiC:H Heterojunctions", *J. Non-Crys. Solids*, **164-166**, (1993) 809.
4. D. Kruangam and W. Boonkosum, "Novel Thin Film Light Emitting Diode Display Made of Amorphous Silicon-Based Semiconductors", *Symp. Proc. of 1994 Spring Meeting of Materials Research Society (MRS)*, vol. **345**, -Flat Panel Display-, San Francisco, U.S.A., April 4-8 (1994) 305.
5. W. Boonkosum, D. Kruangam, B. DeLong and S. Panyakeow, "Improvement of Brightness & Threshold Current in Visible Light a-SiC:H Thin Film LED by Using Metal Sheet Substrate", *Symp. Proc. of 1994 Spring Meeting of Materials Research Society (MRS)*, vol. **336**-Amorphous Silicon Technology 1994-, San Francisco, U.S.A., April 4-8 (1994) 849.
6. D. Kruangam, W. Boonkosum, S. Panyakeow, B. Ratviset and B. DeLong, "Visible-light amorphous Silicon Alloys Thin Film Light Emitting Diode and Its Applications to Optoelectronic Functional Device", *Invited paper*, 8th International School on Condensed Matter Physics, Varnar, Bulgaria, September 18-23, (1994) 87.
7. D. Kruangam, in *Amorphous & Microcrystalline Semiconductor Devices : Optoelectronic Devices*, edited by Jerzy Kanicki (Artech House, Boston, London, 1991) 195.
8. D. Kruangam, S. Panyakeow, M. Sawadsaringkarn, B. Toprasetpong, C. Antarasena, T. Cholaprenee, M. Sriyudthsak, S. Ratanathamphan, B. Ratwiset, S. Thainoi and B. DeLong, "Amorphous Semiconductor Photocoupler", United States, Patent, Application No. 08/421089 (1995).
9. W. Boonkosum, D. Kruangam, S. Panyakeow and B. DeLong, "Novel Amorphous Photocoupler Consisting of a-SiC:H Thin Film LED and a-Si:H Thin Film Photodiode", 1994 Spring Meeting of Materials Research Society (MRS), San Francisco, U.S.A., April 4-8 (1994).
10. Hamamatsu Photonics K.K., Catalog, *Photocouplers* (Japan) (1990).
11. K. Rosan, chapter 7, Amorphous Semiconductor Image Sensors, in *Amorphous & Crystalline Semiconductor Devices: Optoelectronic Devices*, J. Kanicki editor (Artech House, Boston, London, 1991) 241.

12. S. Kaneko, chapter 8, Solid-State Image Sensor, in *Semiconductors and Semimetals*, vol. 21, *Hydrogenated Amorphous Silicon, part D*, J.I. Pankove editor, (Academic Press, Orlando, 1984) 139.
13. R.A. Street, Light Sensors, in *Hydrogenated Amorphous Silicon*, (Cambridge University Press, New York, 1991) 363.
14. D. Kruangam, "Development of Low Cost Thin Film Amorphous Silicon Solar Cell", Conference of ASIA ENERGY'91, by UNESCO, World Trade Center, Bangkok, October 17-20, (1991).
15. D. Kruangam, P. Siamchai, W. Boonkosum and S. Panyakeow, "Integrated Type a-Si:H Solar Cells Having Simple Configurations", 7th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-7), Nagoya, Japan, November 22-26, (1993) 217.
16. E.E. Loebner, "Solid State Optoelectronics", *RCA Rev.*, **20** (1959) 715.
17. O. Wada editor, *Optoelectronic Integration: Physics, Technologies and Applications*, (Kluwer Academic, Boston, 1994).



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 9

การออกแบบไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางที่มีโครงสร้างพิเศษอื่น ๆ

บทนำ

ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบาง (TFLED) ที่ได้พัฒนาและประดิษฐ์ในงานวิจัยนี้มีคุณสมบัติเด่นของการเป็นฟิล์มบาง ดังนั้นถ้าเราสามารถใช้คุณสมบัติเด่นของการผลิตด้วยฟิล์มบางให้เป็นประโยชน์เต็มที่ เช่น ความบาง และความสามารถในการเคลือบฟิล์มซ้อนทับกันหลายๆ ชั้น ฯลฯ เป็นต้น เราจะสามารถออกแบบและพัฒนาให้เป็นดิสเพลย์ที่มีคุณสมบัติแปลกๆใหม่ๆได้ ในบทนี้จะขอเสนอแนวความคิดในการออกแบบ TFLED ที่มีโครงสร้างพิเศษต่าง ๆ เช่น

1. โครงสร้าง tandem
2. โครงสร้างแบบ 2 หน้า และ
3. โครงสร้างหลายสี

9.1 TFLED โครงสร้าง Tandem

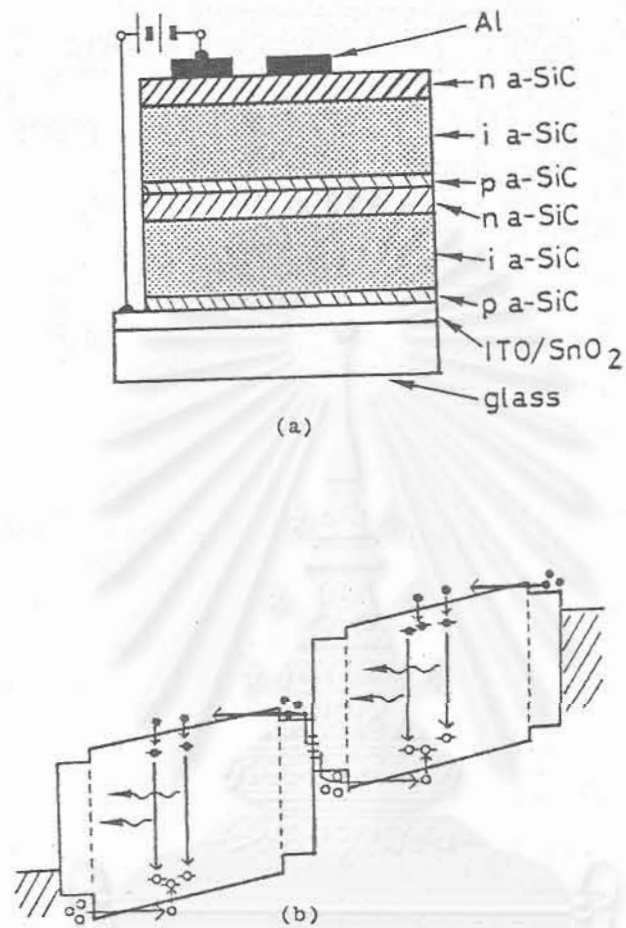
TFLED ที่มีโครงสร้างแบบ tandem หรือแบบ multi-layer แสดงในรูปที่ 9.1 มีลักษณะที่มี TFLED ตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไปเคลือบทับซ้อนกันหลายๆ ชั้น การไบแอสสามารถกระทำผ่านขั้ว ITO และ Al เพียงคู่เดียว และแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนนั้นจะตกคร่อม TFLED ทั้ง 2 ตัวพร้อมๆ กัน กระแสไฟฟ้าที่ไหลจะทำให้ TFLED ทั้ง 2 ตัวเปล่งแสงพร้อมๆ กัน โครงสร้างนี้มีลักษณะเด่น เช่น

1. ใช้ขั้วไฟฟ้าเพียง 1 คู่ จึงทำให้วงจรไฟฟ้ามudahง่าย
2. TFLED ทั้ง 2 ตัว ถ้าเปล่งแสงสีเหมือนกัน ก็จะทำให้ความสว่างดีขึ้น หรือถ้าเปล่งแสงสีต่างกันก็จะสีผสมกันได้

9.2 TFLED โครงสร้าง 2 หน้า

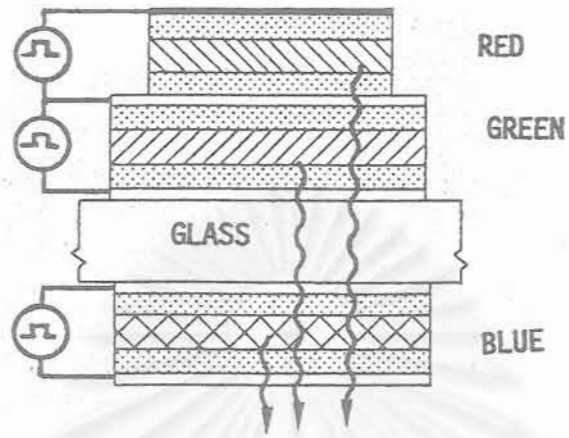
TFLED โครงสร้าง 2 หน้าในที่นี้หมายถึง TFLED ที่เคลือบลงบนทั้ง 2 ด้านของแผ่นกระจกเดียวกันดังแสดงโครงสร้างในรูปที่ 9.2 ขั้วไฟฟ้าของ TFLED แต่ละตัวจะเป็นอิสระต่อกัน ด้านที่แสงจะใช้ขั้วไฟฟ้าชนิด ITO ส่วนขั้วไฟฟ้านด้านหลังสุดจะใช้ Al เพื่อให้มีการสะท้อนด้วย Al TFLED โครงสร้างนี้มีลักษณะเด่น เช่น

1. ขั้วไฟฟ้าแยกอิสระกัน จึงสามารถไบแอสเฉพาะ TFLED ที่ต้องการใช้งานได้
2. สามารถเคลือบ TFLED ได้หลายตัว และสามารถผสมสีได้ตั้งแต่ 2 สีขึ้นไป
3. การผสมสีทำในแนวตั้ง จึงประหยัดพื้นที่

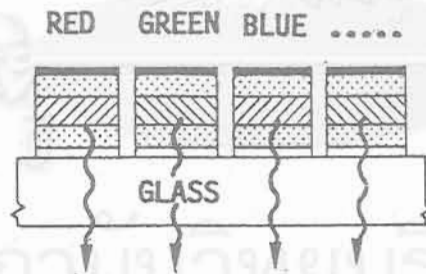


รูปที่ 9.1 โครงสร้างของ TFLED แบบ tandem

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 9.2 โครงสร้างของ TFLED แบบสร้างบนแผ่นกระจก 2 หน้า



รูปที่ 9.3 โครงสร้างของ TFLED แบบมีหลายสีบนพื้นระนาบ

9.3 TFLED โครงสร้างหลายสี

TFLED โครงสร้างหลายสีแสดงในรูปที่ 9.3 เป็นการใช้นิคมหน้ากาก (mask) ที่เจาะรูจำนวนมากเพื่อทำการสร้าง TFLED ครั้งละ 1 สี ถ้าต้องการสี Red, Green, Blue ก็ จะสร้าง TFLED 3 ครั้ง TFLED โครงสร้างนี้มีลักษณะเด่น เช่น

1. การผสมสีทำในแนวราบไม่มีการ “บัง” แสงซึ่งกันและกัน
2. สามารถกำหนดขนาดของพิกเซลของแต่ละสีได้อิสระ แต่มีข้อเสียที่ต้องมีการใช้หน้ากาก และความละเอียด (resolution) อาจเป็นปัญหา

9.4 สรุป

ในบทนี้เป็นการเสนอแนวความคิดออกแบบ TFLED ที่มีโครงสร้างแบบแปลก ๆ ซึ่งเป็นการใช้ประโยชน์ของเทคโนโลยีฟิล์มบางอย่างเต็มที่ แม้ว่าโครงสร้างที่เสนอในบทนี้ยังไม่ได้ประดิษฐ์จริง แต่ก็คาดว่าจะเป็นแนวทางที่สำคัญในการพัฒนาดีสเพลย์ที่ต้องการสีหลาย ๆ สีได้ในอนาคต

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 10

สรุป

งานวิจัยเรื่องนี้ใช้เวลาในการดำเนินการวิจัยรวม 3 ปี สามารถดำเนินการวิจัยไปได้ตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ ตลอดระยะเวลาเมื่อมีผลงานออกมา ได้ตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานวิจัยทั้งระดับในประเทศและในที่ประชุมนานาชาติและในวารสารมาตรฐานนานาชาติมากมายหลายฉบับ อีกทั้งในส่วนที่เป็น know how และการคิดค้นใหม่ๆก็ได้ดำเนินการจดสิทธิบัตรทั้งในประเทศและในต่างประเทศด้วย

ประเด็นที่สำคัญที่สุดในงานวิจัยนี้ได้แก่ ความสำเร็จในการพัฒนาไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางโดยใช้วัสดุตระกูลอะมอร์ฟิซิลิคอนอัลลอยเป็นวัสดุหลักเป็นครั้งแรก และได้ทำการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติต่างๆทั้งของฟิล์มวัสดุและของสิ่งประดิษฐ์ ได้มีการทดลองปรับปรุงความสว่างให้ดีขึ้น และยังสามารถประดิษฐ์คิดค้นสิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดใหม่ของโลกได้สำเร็จอีกชนิดหนึ่งคือ โฟโตคัปเปลอร์ชนิดอะมอร์ฟิซิลิคอนกึ่งตัวนำ ผลงานเรื่องนี้คงนับได้ว่ามีคุณค่าทั้งทางวิชาการและทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีซึ่งจะมี impact ต่อวงการอุตสาหกรรมต่อไปในอนาคต ทั้งในระดับประเทศและระดับนานาชาติ

การสรุปผลงานสำคัญในงานวิจัยนี้ สามารถอธิบายเป็นข้อๆได้ดังต่อไปนี้

- 1) ในงานวิจัยนี้ได้ดำเนินการวิจัยตั้งแต่การติดตั้งเครื่องมือ glow discharge plasma CVD สำหรับปลูกฟิล์ม a-SiN:H, a-SiC:H และ a-SiO:H โดยใช้ก๊าซผสมของก๊าซชนิดต่างๆ เป็นวัสดุเริ่มต้นซึ่งได้แก่ SiH₄, NH₃, CH₄, C₂H₄, CO₂ และใช้ก๊าซ B₂H₆ และ PH₃ เป็นก๊าซสำหรับทำให้ฟิล์มเหล่านี้มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด p และ n ตามลำดับ พื้นที่ใหญ่สุดของฟิล์มที่สามารถปลูกได้คือ พื้นที่วงกลมเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 8 cm
- 2) ฟิล์มที่เตรียมได้ ถูกนำไปศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานต่างๆอย่างละเอียดและอย่างเป็นระบบทั้งคุณสมบัติทางโครงสร้าง (IR, ESCA, ESR) คุณสมบัติทางแสง (การดูดกลืนแสง, ช่องว่างพลังงาน, การเปล่งแสงโฟโตลูมิเนสเซนซ์) และคุณสมบัติทางไฟฟ้า (สภาพนำไฟฟ้า)
- 3) ผลการวิจัยพบว่าระดับพลังงานชนิด localized states ในช่องว่างพลังงานมีอิทธิพลมากต่อคุณสมบัติพื้นฐานของฟิล์ม
- 4) ในงานวิจัยได้ประสบความสำเร็จในการปลูกฟิล์มบาง a-SiN:H, a-SiC:H และ a-SiO:H ที่มีช่องว่างพลังงานกว้างเพียงพอ (2.0-3.5 eV) ต่อการเปล่งแสงที่ตามองเห็นได้ ข้อมูลที่ได้ในการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของฟิล์มเหล่านี้มีประโยชน์มากในการนำไปใช้ออกแบบและประดิษฐ์ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบาง ตลอดจนใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติต่างๆ ของไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบาง

- 5) ได้มีการคิดค้นการออกแบบและประดิษฐ์ “ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางชนิดวัสดุอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำ” ได้สำเร็จเป็นครั้งแรก สิ่งประดิษฐ์มีโครงสร้างเป็นรอยต่อ p-i-n ของฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอนอัลลอยชนิดที่มีช่องว่างพลังงานกว้างซึ่งได้แก่ a-SiN:H, a-SiC:H และ a-SiO:H ฟิล์มบางเหล่านี้ปลูกด้วยวิธี glow discharge plasma CVD
- 6) ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางที่พัฒนาขึ้นสำเร็จในงานวิจัยนี้ มีโครงสร้างพื้นฐานประกอบด้วยฟิล์มบางชั้นต่างๆที่มีความหนาไม่เกิน 1 ไมครอนเคลือบอยู่บนแผ่นกระจก กล่าวคือประกอบด้วย “แผ่นกระจก/ฟิล์มโปร่งแสงที่นำไฟฟ้าได้ (ITO)/ ฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอนอัลลอยชั้น p-i-n/ฟิล์มขั้วไฟฟ้า Al”
- 7) ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางนี้สามารถเปล่งแสงสีต่างๆที่ตามองเห็นได้ตั้งแต่สีแดง สีส้ม สีเหลือง สีเขียว ไปจนถึงสีน้ำเงินขาว เป็นสิ่งประดิษฐ์ที่มีศักยภาพในการนำไปใช้งานเป็นดิสเพลย์ชนิดใหม่ของโลกที่มีลักษณะเด่นหลายด้านในอนาคต เช่น บาง เบา ใช้แรงดันไฟฟ้าต่ำ และมีราคาถูก
- 8) ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางนี้เปล่งแสงได้ด้วยหลักการของการฉีดกระแสไฟฟ้า กล่าวคือฉีดโฮลจากชั้น p และอิเล็กตรอนจากชั้น n ให้เข้าไปรวมตัวกันในชั้น i ซึ่งเป็นชั้นเปล่งแสง แรงดันไฟฟ้าที่ใช้ไบแอสเพื่อฉีดกระแสไฟฟ้ามีค่าประมาณ 5-15 โวลต์ ความสว่างสูงสุดของแสงที่เปล่งมีค่าอยู่ในช่วง 0.1~1 cd/m² โดยใช้กระแสไฟฟ้าประมาณ 100-1000 mA/cm² สีของการเปล่งแสงกำหนดจากขนาดของช่องว่างพลังงานของชั้น i
- 9) ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางที่ประดิษฐ์ได้นั้น ได้ถูกนำไปศึกษาวิเคราะห์กลไกการฉีดพาหะและกลไกการเปล่งแสงอย่างละเอียด ผลการวิเคราะห์พบว่า การฉีดพาหะได้อาศัยกลไกการทันเนลิง (tunneling) เป็นหลักและการเปล่งแสงเกิดจากการรวมตัวของอิเล็กตรอนและโฮลที่ระดับ localized states ในชั้น i
- 10) นอกจากนี้ได้มีการศึกษาหาความหนาที่เหมาะสมของชั้น i ทั้งทางทฤษฎีและการทดลองพบว่าความหนาที่เหมาะสมของชั้น i มีค่าประมาณ 500 Å
- 11) การวิจัยได้มีการเปรียบเทียบคุณสมบัติการเปล่งแสงของไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางที่ชั้น i ผลิตจากวัสดุอะมอร์ฟัสชนิดแตกต่างกัน ผลการวิจัยพบว่า ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางที่ชั้น i ผลิตจาก a-SiC:H จะเปล่งแสงได้สว่างมากที่สุด และรองลงไปได้แก่ a-SiN:H และ a-SiO:H ตามลำดับ
- 12) ได้มีความพยายามในการปรับปรุงความสว่างของไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางหลายวิธีได้แก่
 - 1) การปรับปรุงประสิทธิภาพของการรวมตัวแบบเปล่งแสงของพาหะ โดยการใช้แผ่นโลหะซึ่งมีคุณสมบัตินำความร้อนได้ดีและสะท้อนแสงได้ดีเป็นแผ่นฐานแทนแผ่นกระจก และ
 - 2) ได้มีการปรับปรุงประสิทธิภาพของการฉีดพาหะ (โฮล) โดยการใช้ฟิล์มไมโครคริสตัลไลน์ซิลิคอนออกไซด์ ($\mu\text{-SiO:H}$) ชนิด p ซึ่งมีคุณสมบัตินำไฟฟ้าได้ดีและมีช่องว่างพลังงานกว้างเป็นชั้นฉีดโฮลแทน a-SiC:H ชนิด p ทำให้ความสว่างของไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางสูงขึ้นถึงระดับ 10 cd/m²

- 13) ในด้านการพัฒนาเป็นดิสเพลย์ ได้ประสบความสำเร็จในการประดิษฐ์ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางให้เปล่งแสงเป็นรูปร่างลักษณะต่าง ๆ มีพื้นที่หลายตารางเซนติเมตร
- 14) อีกทั้งผลิตให้มีโครงสร้างเป็นเมตริกซ์และมีพื้นที่กว้างใหญ่ถึงระดับร้อยตารางเซนติเมตรได้สำเร็จ พิกเซลมีรูขนาด $1 \times 1 \text{ mm}^2$ และ $2 \times 2 \text{ mm}^2$ และมีการออกแบบการบรรจุดิสเพลย์เหล่านี้ลงในกรอบที่มีความสวยงาม
- ผลงานข้อนี้เป็นการพิสูจน์ว่าไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางนี้สามารถผลิตเป็นดิสเพลย์แบบบางเรียบได้จริง
- 15) นอกจากไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางจะมีประโยชน์ในด้านดิสเพลย์แล้ว ในงานวิจัยนี้ยังได้ประสบความสำเร็จในการประยุกต์ใช้งานไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบาง เป็นภาคเปล่งแสงในโพโตคัมเบิลอร์ดด้วย นั่นคือได้ประสบความสำเร็จในการพัฒนาโพโตคัมเบิลอร์ดชนิดอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำเป็นครั้งแรก ในโพโตคัมเบิลอร์ดชนิดอะมอร์ฟัสนี้ มีเซลล์แสงอาทิตย์ (โพโตไดโอด) ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนเป็นภาครับแสง
- 16) ในตอนท้ายของงานวิจัย ได้มีการวิเคราะห์และเสนอแนวทางในการออกแบบให้ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางมีโครงสร้างพิเศษอื่น ๆ เพื่อการปรับปรุงความสว่างและการใช้งานที่หลากหลาย อีกทั้งได้เสนอโครงสร้างของวงจรรวมออปโตอิเล็กทรอนิกส์ชนิดอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำเป็นครั้งแรก ซึ่งจะเป็นสิ่งประดิษฐ์พื้นฐานในระบบ optical computer และ neural network ต่อไปในอนาคต

ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางชนิดอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำนี้จัดว่าเป็นสิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดใหม่ที่เกิดขึ้นในโลก ทั้งนี้เพราะว่าไดโอดเปล่งแสงที่มีการผลิตอยู่ในปัจจุบันนั้นทำจากวัสดุผลึกเดี่ยวที่เป็น bulk ทั้งหมด ส่วนในงานวิจัยนี้ใช้วัสดุอะมอร์ฟัสทั้งหมด และเป็นการช่วยขยายการประยุกต์ใช้งานวัสดุอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำด้วย

ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางชนิดอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำนี้สามารถเปล่งแสงจากพื้นผิว (surface emission) ได้ จึงมีศักยภาพที่จะนำไปผลิตเป็นจอภาพดิสเพลย์แบบบางเรียบ (flat-panel display) หรือจอโทรทัศน์แบบบางเรียบ (flat-panel TV) ได้ ดังนั้นผลงานวิจัยการคิดค้นในงานวิจัยนี้จึงมีเนื้อหาทั้งทางวิชาการที่ลึกซึ้งและมีศักยภาพสูงในการประยุกต์ผลิตในภาคอุตสาหกรรม

ข้อดีเด่นของไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางชนิดอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำนี้ ได้แก่

- 1) ต้นทุนการผลิตต่ำเพราะใช้วัสดุราคาถูกและผลิตด้วยวิธี CVD ที่อุณหภูมิเพียง 190°C
- 2) ผลิตเป็นฟิล์มบางพื้นใหญ่ ๆ ได้ง่าย ทำให้ได้ดิสเพลย์ขนาดใหญ่
- 3) ผลิตบนแผ่นฐานวัสดุชนิดต่าง ๆ ได้ เช่น แผ่นกระจก แผ่นโลหะ แผ่นพลาสติก แผ่นเซรามิก ทำให้ได้ดิสเพลย์รูปร่างและการใช้งานหลากหลาย เป็นต้น

ผลงานวิจัยเรื่องนี้ ได้มีหลายส่วนที่นับว่าเป็นการคิดค้นที่สร้างประโยชน์ให้กับวงการวิชาการและวิทยาศาสตร์เทคโนโลยี และได้มีการเผยแพร่อย่างกว้างขวางในระดับนานาชาติและมีการจดสิทธิบัตรทั้งในและต่างประเทศ ผลงานเด่นๆที่ได้จากงานวิจัยเรื่องนี้สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ได้มีการพัฒนาไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางจากวัสดุ $a\text{-SiN:H}$, $a\text{-SiC:H}$, $a\text{-SiO:H}$ รอยต่อ $p\text{-i-n}$ จากการเปรียบเทียบความสว่างของสิ่งประดิษฐ์ พบว่าไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางซึ่งชั้น i ผลิตจากวัสดุ $a\text{-SiC:H}$ ให้ความสว่างสูงที่สุดที่ 2 cd/m^2 และความสว่างลดลงไปได้จากวัสดุ $a\text{-SiN:H}$ และ $a\text{-SiO:H}$ ตามลำดับ
2. ได้มีการปรับปรุงความสว่างของไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบาง โดยการใช้วัสดุโลหะเป็นแผ่นฐานผลการวิจัยพบว่า สามารถทำให้ความสว่างเพิ่มขึ้นเป็น 5 cd/m^2
3. ได้มีการปรับปรุงความสว่างของไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบาง โดยการใช้วัสดุไมโครคริสตัล โลนซิลิคอนออกไซด์ชนิด p ($p\text{-}\mu\text{c-SiO:H}$) เป็นชั้นฉีดยาหะโฮล ทำให้ความสว่างเพิ่มขึ้นเป็น 10 cd/m^2 .
4. ได้มีการออกแบบและพัฒนาดีสเพลย์ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางโครงสร้างเมตริกซ์ ซึ่งเป็นโครงสร้างพื้นฐานของดีสเพลย์ที่ใช้งานจริงได้สำเร็จ
5. ได้มีการพัฒนาโพโตคัปเปิลอร์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนอัลลอยได้สำเร็จ สิ่งประดิษฐ์นี้เป็นตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานจริงของไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางให้เกิดประโยชน์อย่างชัดเจน
6. ได้มีการเสนอแนวความคิดโครงสร้างวงจรรวมออปโตอิเล็กทรอนิกส์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนอัลลอยแบบต่างๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

1) การเผยแพร่ผลงานวิจัย

ผลงานวิจัยเรื่องนี้ ได้มีการเผยแพร่อย่างกว้างทั้งใน International Journals, International Conferences และในประเทศไทย ดังรายชื่อบทความดังต่อไปนี้ (ข้อมูลถึงเดือนธันวาคม 2538)

1.1) การเผยแพร่ใน International Journals / International Conferences

1. "Amorphous Visible-Light Thin Film LED Having a-SiN:H As a Luminescent Layer", Dusit Kruangam, Wirote Boonkosum, Pavan Siamchai and Somsak Panyakeow, 1992 International Conference on Solid State and Materials, Tsukuba, Japan, August 26-28 (1992) p.563.
2. "Amorphous Visible-Light Thin Film Light-Emitting Diode Having a-SiN:H as a Luminescent Layer", Wirote Boonkosum, Dusit Kruangam and Somsak Panyakeow, Japanese Journal of Applied Physics, Part I, No. 4, vol. 32, (1993) p.1534.
3. "Visible Thin Film Light Emitting Diode Using a-SiN:H/a-SiC:H Heterojunctions", Dusit Kruangam, Wirote Boonkosum and Somsak Panyakeow, Journal of Non-Crystalline Solids, vol. 164-166 (1993) p.809.
4. "Visible-Light Amorphous Silicon-Nitride Thin Film Light Emitting Diode", Wirote Boonkosum, Dusit Kruangam and Somsak Panyakeow, Symposium Proceedings of Spring Meeting of Materials Research Society (MRS), vol. 297-Amorphous Silicon Technology 1993-, San Francisco, U.S.A, April 12-16 (1993) p.1005.
5. "Novel Flat-Panel Display Made of Amorphous SiN:H/SiC:H Thin Film LED", Wirote Boonkosum, Dusit Kruangam and Somsak Panyakeow, International Symposium on Physical Concepts and Materials for Novel Optoelectronic Device Application, EUROPTO Series, SPIE Vol. 1985, Trieste, Italy, May 24-27 (1993) p.40.
6. "Novel Visible Amorphous Silicon Carbide Thin Film LED", Wirote Boonkosum, Dusit Kruangam, Somsak Panyakeow and Banched DeLong, The 1st International Symposium on Laser and Optoelectronics Technology and Application (ISLOE), Singapore, November 11-14 (1993) p.300.
7. "Integrated Type a-Si:H Solar Cells Having Simple Configuration", Dusit Kruangam, Pavan Siamchai, Wirote Boonkosum and Somsak Panyakeow, The 7th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-7), Nagoya, Japan, November 22-26 (1993) p. 217.
8. "World's First Thin Film LED Made of Amorphous Silicon Nitride-Possibility of New Type of Flat Panel Display", Dusit Kruangam, The 3th International Conference on Advanced Science & Technology Transfer to Thailand, Ambassador Hotel, Bangkok, Thailand, July (1993) p.25.
9. "Novel Amorphous Photocoupler Consisting of a-SiC:H Thin Film LED and a-Si:H Thin Film Photodiode", Wirote Boonkosum, Dusit Kruangam, Somsak Panyakeow and Banched DeLong, 1994 Spring Meeting of Materials Research Society (MRS), San Francisco, U.S.A., April 4-8 (1994).
10. "Improvement of Brightness & Threshold Current in Visible Light a-SiC:H Thin Film LED by Using Metal Sheet Substrate", Wirote Boonkosum, Dusit Kruangam, Banched DeLong and Somsak Panyakeow, Symposium Proceedings of 1994 Spring Meeting of Materials Research

- Society (MRS), vol.336-Amorphous Silicon Technology 1994-, San Francisco, U.S.A., April 4-8 (1994) p.849.
11. "Novel Thin Film Light Emitting Diode Display Made of Amorphous Silicon Based Semiconductors", Dusit Kruangam and Wirote Boonkosum, Symposium Proceedings of 1994 Spring Meeting of Materials Research Society (MRS), vol.345-Flat Panel Display Materials, San Francisco, U.S.A., April 4-8 (1994) p.305.
 12. "Visible-Light Amorphous Silicon Alloys Thin Film Light Emitting Diodes and Its Applications to Optoelectronic Functional Devices", Dusit Kruangam, Wirote Boonkosum, Bandhita Ratwises, Somsak Panyakeow and Bancherd DeLong, Invited paper, Proceedings of the 8th International School on Condensed Matter Physics (ISCMP)-Electronic, Optoelectronic and Magnetic Thin Films-, Varna, Bulgaria, September 18-23 (1994) p.87.
 13. "New Type of Flat Panel TV&Display Made of Amorphous Semiconductor Thin Film LED", Dusit Kruangam, Exhibition in Techno Indochina, Exhibition at The International Congress on Science & Technology for Good Relationship with Neighbouring Countries, United Nations Conference Center, Bangkok, Thailand, August (1994).
 14. "Hydrogenated Amorphous Silicon Alloy Photocouplers", Wirote Boonkosum, Dusit Kruangam, Somsak Panyakeow, Bunditha Ratwiset and Bancherd DeLong, Submitted to Applied Physics Letters, (1995).
 15. "Novel Matrix and Multi-Layer Amorphous Thin Film LED Flat Panel Display", Wirote Boonkosum, Thipwan Sujaridchai, Dusit Kruangam, Bundhita Ratwises and Somsak Panyakeow, 1995 Spring Meeting of Materials Research Society (MRS), Symposium V-Flat Panel Displays-, San Francisco, U.S.A., April 17-22 (1995).
 16. "Fabrication of Amorphous Silicon Alloy Optical Devices for New Types of Thin Film Optoelectronic Integrated Circuits", Dusit Kruangam, Wirote Boonkosum, Bandhita Ratwises, Thipwan Sujaridchai and Somsak Panyakeow, Proceedings of the 13th Australia Microelectronics Conference (MICRO'95), Adelaide Hilton, Adelaide South Australia, July 16-19 (1995) p.259.
 17. "Visible Amorphous SiO:H Thin Film Light Emitting Diode", Wirote Boonkosum, Dusit Kruangam, Thipwan Sujaridchai, Bandhita Ratwises, Somsak Panyakeow, S. Fujikake and H. Sakai, The 16th International Conference on Amorphous Semiconductors-Science and Technology-(ICAS 16) Kobe, Japan, September 4-8(1995).
 18. "Dot Matrix Hydrogenated Amorphous Silicon Carbide Thin Film Light Emitting Diode Flat Panel Display", Dusit Kruangam, Wirote Boonkosum, Thipwan Sujaridchai, Bandhita Ratwises, Siripong Pradipatrongroang and Somsak Panyakeow, to be submitted to Japanese Journal of Applied Physics, Part 2, Letter, January (1996).
 19. "Wide Band Gap Amorphous Silicon Alloy p-i-n Junction Thin Film Light Emitting Diodes and Their Optoelectronic Applications", Dusit Kruangam, Wirote Boonkosum, Thipwan Sujaridchai, Bandhita Ratwises, Siripong Pradipatrongroang and Somsak Panyakeow, to be submitted to IEEE Transaction on Electron Devices, January (1996).

1.2) การเผยแพร่ในวารสารวิชาการและการประชุมวิชาการในประเทศไทย

1. "Application of Amorphous Silicon Nitride AS a Luminescent Layer in a Thin Film Light Emitting Diode", Dusit Kruangam and W. Boonkosum, The 18th Conference on Science and Technology of Thailand, National Sirikit Convention Center, Bangkok, October 27-29 (1992) p. 104.
2. "A-SiC:H/a-SiN:H Heterojunction Visible Light Thin Film LED", Dusit Kruangam, Wirote Boonkosum and Somsak Panyakeow, Conference of the Engineering Institute of Thailand Under H.M. The King's Patronage, Bangkok, November 26-29 (1992).
3. "Application of Hydrogenated Amorphous Silicon Nitride As a Luminescent Layer in Thin Film LED", Wirote Boonkosum, Dusit Kruangam and Somsak Panyakeow, The 15th Conference on Electrical Engineering, King Mongkut Institute of Technology, Thonburi, Bangkok, December 3-4 (1992) p.3/1.
4. "A Study of Optical Properties of Hydrogenated Amorphous Silicon Nitride Thin Film", Wirote Boonkosum, Dusit Kruangam, Somsak Panyakeow and Bancherd DeLong, The 16th Conference on Electrical Engineering, King Mongkut Institute of Technology (Ladkrabang), Bangkok, November 25-26 (1993) p.488.

5. "Development of Amorphous Silicon Solar Cell Panel with Integrated Type Structure Having High Output Voltage", Dusit Kruangam and Pavan Siamchai, Conference of Engineering Institute of Thailand under H.M. The King's Patronage, Bangkok, Thailand, November 27-30 (1993) p.564.
6. "Applications of ESR in Material Science", Dusit Kruangam and Witote Boonkosum, Journal of Center of Analysis Equipment for Science & Technology, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand, vol.2 (1993) p.111.
7. "Development of Amorphous Photocouplers", Wirote Boonkosum, Dusit Kruangam, Somsak Panyakeow, Bandhita Ratwiset and Bancherd DeLong, The 17th Conference on Electrical Engineering, King Mongkut Institute of Technology (North Bangkok), December 1-2 (1994) p. 626.
8. "Optical Constant Spectra of Hydrogenated Amorphous Silicon Alloys", Thipwan Sujaridchai, Wirote Boonkosum, Bandhita Ratwiset, Siripong Pradiparongroang, Dusit kruangam and Somsak Panyakeow, Proceedings of the 18th Conference on Electrical Engineering, Ambassador City Hotel, Chomtien, Choburee (organized by Mahanakorn Technology University), November 22-24 (1995).
9. "A Study of Structural Properties of Hydrogenated Amorphous Silicon Oxide By Infrared Absorption Spectroscopy and Electron Spin Resonance", Bandhita Ratwiset, Wirote Boonkosum, Thipwan Sujaridchai and Dusit Kruangam, 21st Congress on Science and Technology of Thailand, October 25-27 (1995) p.118.
10. "Measurement of Optical Constants of Hydrogenated Amorphous Silicon Thin Film", Wirote Boonkosum, Bandhita Ratwiset and Dusit Kruangam, 21st Congress on Science and Technology of Thailand, October 25-27 (1995) p.156.
11. "Advanced Research on Amorphous Semiconductors and Their Optoelectronic Devices", Dusit kruangam, Wirote Boonkosum, Thipwan Sujaridchai, Bandhita Ratwiset and Somsak Panyakeow, Invited paper. Conference of Engineering Institute of Thailand under H.M. The King's Patronage and Electrotechnology'95, Bangkok, Thailand, August 18-21 (1995) p.235.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2) การจดสิทธิบัตร (Patents)

ผลงานบางส่วนที่ได้จากงานวิจัยนี้ ได้มีการยื่นขอรับสิทธิบัตรทั้งในประเทศไทยและในต่างประเทศซึ่งได้แก่ ประเทศออสเตรเลีย และประเทศสหรัฐอเมริกา ในนามของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย รวม 6 ฉบับดังรายชื่อสิ่งประดิษฐ์ต่อไปนี้

- 2.1) “ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำ”
(กระทรวงพาณิชย์ สิทธิบัตรไทย คำขอรับสิทธิบัตรเลขที่ 021257)
- 2.2) “โฟโตคัปเปิลอร์ชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำ”
(กระทรวงพาณิชย์ สิทธิบัตรไทย คำขอรับสิทธิบัตรเลขที่ 021258)
- 2.3) “Amorphous Semiconductor Thin Film Light Emitting Diode”
(United States Patent, Application No. 08/414738).
- 2.4) “Amorphous Semiconductor Photocoupler”
(United States Patent, Application No. 08/421089)
- 2.5) “Amorphous Semiconductor Thin Film Light Emitting Diode”
(Australian Patent, Application No. PM4832).
- 2.6) “Amorphous Semiconductor Photocoupler”
(Australian Patent, Application No. PM5121)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3) รางวัลต่างๆที่ได้รับจากผลงานวิจัยเรื่องนี้

ผลงานความสำเร็จที่ได้จากงานวิจัยเรื่องนี้ มีคุณค่าทั้งทางวิชาการและเทคโนโลยี ทำให้ได้รับเกียรติให้ได้รับรางวัลหลายรางวัลทั้งระดับนานาชาติและระดับประเทศ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.1) “รางวัลนักวิทยาศาสตร์อาเซียนดีเด่นรุ่นใหม่”

ดร. ดุสิต เครื่องงาม ได้รับการคัดเลือกจากมูลนิธิส่งเสริมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทยและสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ (NRCT) ให้เป็นตัวแทนประเทศไทยไปประเทศสิงคโปร์ และได้รับการคัดเลือกจากคณะกรรมการวิทยาศาสตร์อาเซียนและรัฐบาลสิงคโปร์ให้ได้รับรางวัลชนะเลิศ “Young ASEAN Scientist & Technologist Award” ประจำปี 2535 ได้รับเงินรางวัล 5,000 เหรียญสหรัฐ ประกาศนียบัตรและโล่จากรองนายกรัฐมนตรีของสิงคโปร์

3.2) “รางวัลผลงานคิดค้นหรือสิ่งประดิษฐ์ที่เป็นประโยชน์ต่อประเทศประจำปี 2537 รางวัลที่ 1”

จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติประจำปี 2537 ได้รับเงินรางวัล 300,000 บาท และประกาศนียบัตรจากนายกรัฐมนตรีนายชวน หลีกภัย

3.3) “รางวัล EDN Innovator Award”

จากวารสาร ASIA EDN Electronics ในฮ่องกง ประจำปี 2537 ได้รับประกาศนียบัตรและโล่

3.4) “รางวัลพัฒนาวิชาชีพนักวิจัย”

จากสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ปี 2538-2542 เป็นเงินสมนาคุณและทำวิจัยช่วง 5 ปี งบประมาณ 4,500,000 บาท

ตัวอย่างประกาศนียบัตรและรูปถ่ายที่เกี่ยวข้องต่างๆ แสดงในหน้าต่อไปนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



C I T A T I O N

1 9 9 2

Presented to

Dr Dusit Kruangam

Winner of the ASEAN Young Scientist & Technologist Award

*for his pioneering development of
Amorphous Silicon - Carbide and Silicon - Nitride
Thin Film Light Emitting Diodes*

Davud Alan

Chairman
ASEAN Committee on Science & Technology

The Straits Times

Estd. 1845

TUESDAY, SEPTEMBER 22, 1992

50 CENTS MITA (P) 27/12/91

 THE STRAITS TIMES, TUESDAY, SEPTEMBER 22, 1992

Technology Week

Thai beats 4 others to Scientist award

A THAI scientist, Dr Dusit Kruangam, last night received the Asean Young Scientist and Technologist Award for his work on semiconductors and optoelectronic devices.

He won the award against four other entries.

Earlier this year, Dr Kruangam, 34, succeeded in making a thin film light emitting diode (TFLED) made of amorphous silicon nitride — the first by anyone in the world.

The TFLED can emit many colours of light which can be used for low-cost flat panel displays.

Dr Kruangam, who is an assistant professor, received a crystal trophy, a citation certificate and US\$5,000 (S\$7,950).

Last night, Deputy Prime Minister Brig-Gen (Res) Lee Hsien Loong also presented

the Asean Science and Technology Meritorious Awards to five Asean officials for their contributions towards developing a conducive environment for science and technology.

They are: Prof Dr Sanga Sabhasri, chairman of Thailand's National Research Council; Dr Quintin Kintanar, director of the Philippines' Bureau of Food and Drugs, Department of Health;

Dato Mohd Noordin Hassan, secretary-general of Malaysia's Ministry of Education; Prof Ang How Ghee, professor in chemistry at the National University of Singapore; and Prof Dr D. A. Tisna Amidjaja, who is Indonesia's Ambassador to France.

Dr Amidjaja is also a professor at the Institute of Technology in Bandung.



Asia

MAGAZINE

DECEMBER 4-6, 1992

MADE FOR TV

A Thai scientist's study into materials that could revolutionise the construction of television sets has received prestigious recognition.

Assistant professor of Chulalongkorn University's Department of Electrical Engineering Dr Dusit Kruangam, 34, recently won the inaugural ASEAN Young Scientist and Technologist Award in Singapore.

Dr Dusit's prototype of a Thin Film Lite Emitting Diode using amorphous materials could lead to the production of cheaper television sets.

The use of amorphous materials is not new. Songkhla-born Dr Dusit has painstakingly evolved his own method of producing the diode and is seeking a patent for his work.

"The key is the development of the materials — hi-tech and cheap — and the silicone. However, it is not ready for use yet. The brightness is not sufficient; it's too low for television and this could take several more years to improve. Then, we're talking of a billion-dollar invention," says Dr Dusit.



Dusit: Billion-dollar invention

มหาวิทยาลัย
รณมหาวิทยาลัย

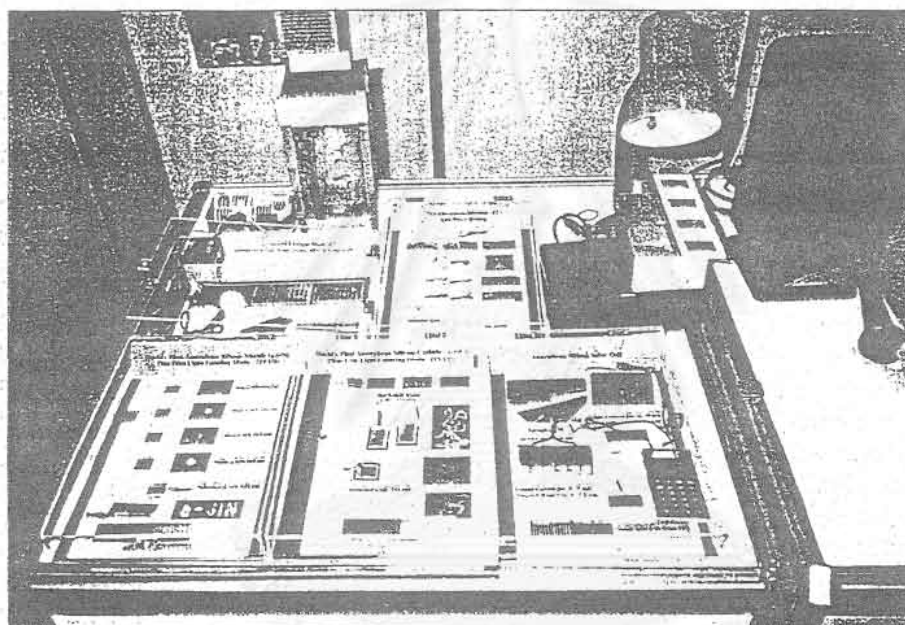
DEVELOPMENT

IN SOUTHEAST ASIA AND THE PACIFIC

NOVEMBER 27/11/91

ISSN 0217-4801

VOLUME 10, NO. 4, 1992



Thin film light emitting diode (TFLED) made of amorphous silicon ditride and silicon carbide.

สถาบันวิทยบริการ
INSTRUMENTATION AND PROCESS CONTROL
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Cooperative Program in Technological Research and Higher Education
in Southeast Asia and the Pacific, sponsored by Unesco

Thai wins 'Asean Young Scientist and Technologist Award'

Assistant Professor Dr Dusit Kruangnam, 34, from the department of electrical engineering, faculty of engineering, Chulalongkorn University, Thailand, received the Asean Young Scientist and Technologist Award for his work on semiconductors and optoelectronic devices. He won the Award against five other entries in Asean.

The Award Contest was organized by the Asean Committee on Science & Technology (COST) during the Third Asean Science and Technology week, 17-24 September 1992, in Singapore. This is the first time that the Award is announced.

The objective of the Asean Young Scientist and Technologist Award is to give public recognition to a young Asean scientist and technologist who has either shown considerable promise in or made substantial contribution to research, development and innovation in the fields of science and technology. The primary consideration for the winner was given to the scientific significance and/or technical impact of the nominee's work.

Each Asean national coordinating agency (Malaysia, Singapore, Indonesia, Philippines, Brunei and Thailand) selected one nominee for consideration by the Asean Judging Panel. The nominee had to be a citizen of an Asean country and not older than 35 years old. All of the nominees were required to exhibit and present their significant projects to the judges upon their arrival in Singapore by poster display, physical exhibits and oral explanations.

The winner, Dr Dusit, received a crystal trophy, a citation certificate and US\$5,000 from the Deputy Prime Minister Brig-Gen (Res) Lee Hsien Loong of Singapore.

The nominee from Thailand was selected by National Research Council of



Asean Young Scientist and Technologist Award winner Dr Dusit Kruangnam at his winning exhibit.

Thailand (NRCT) and the Foundation for the Promotion of Science and Technology under the patronage of His Majesty the King. The most significant work done by Dr Dusit is the world's first development of Thin Film Light Emitting Diode made of amorphous silicon nitride and silicon carbide. The Thin Film Light Emitting Diode (TFLED) has a potential to be used as a flat-panel display, a flat TV, a flat monitor for computer-car-airplane-electronic equipment-video camera, etc. The TFLED can be produced as a large area, low cost, and light weight.

Dr Dusit has conducted a lot of research works, eg, solar cells, laser, quantum devices, optoelectronics, Thin Film electronic devices. He published 33 international papers, and 34 domestic national papers. He wrote two Inter-

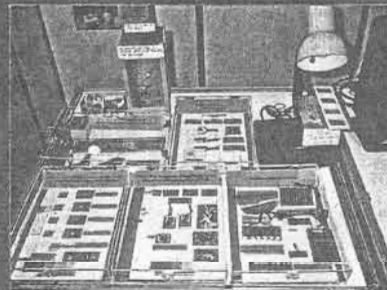
national English text books on amorphous semiconductors. He wrote three Thai text books, i.e., Solid State Physics, Optoelectronics and Basic Electricity.

His research papers have been cited in international journals more than 90 times.

Dr Dusit has also received several other academic awards, among them the Outstanding Graduate Student Award from the Materials Research Society (MRS), USA, 'Device Invention Award' from National Research Council of Thailand (NRCT) for the pioneering development of amorphous silicon thin film low cost solar cells, and the 'Thailand Promising Scientist Award' from the Foundation for the Promotion of Science and Technology, Thailand.



จดหมายข่าว วิศวกรรมฯ



● อาจารย์วิศวะฯ จุฬาฯ สร้างชื่อเสียง คว่ารางวัล นักวิทยาศาสตร์อาเซียนดีเด่นรุ่นใหม่



สภาวิจัยแห่งชาติ

มอบประกาศนียบัตรนี้ เพื่อประกาศเกียรติคุณ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์คุณสิริ เจริญงาม นายวิโรจน์ บุญโกสุมา ศาสตราจารย์สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว รองศาสตราจารย์มนตรี สวัสดิ์ตุงฆาร
รองศาสตราจารย์บรรยง โคประเสริฐพงศ์ รองศาสตราจารย์ชุมพล อันตรเสน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธารา ชลปราณี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์มานะ ศรียุทธศักดิ์ นายสมชัย รัตนธรรมพันธ์ นางบัณฑิต รั้ววิเศษ นายศกโชติ ไทยน้อย นายบรรเจิด เกลอง

ในฐานะที่ได้รับรางวัลผลงานคิดค้น/สิ่งประดิษฐ์ซึ่งเป็นประโยชน์แก่ประเทศไทย

ประจำปี 2537
รางวัล ที่ 1

ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางชนิดวัสดุอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำ-สู่อุณหภูมิสูงและคิสเพลย์แบบบาง เรียบชนิดใหม่ของโลก

ให้ไว้ ณ วันที่ 17 สิงหาคม พุทธศักราช 2537

ประธานสภาวิจัยแห่งชาติ

เลขาธิการสภาคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

ผลงานวิจัยอาจารย์จุฬาฯได้รับการยกย่องจากวารสารต่างประเทศชั้นนำให้ได้รับรางวัล

"EDN INNOVATOR AWARD"

จากผลงานความเพียรพยายามในการประดิษฐ์คิดค้นสิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีชื่อว่า "ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางอะมอร์ฟัส" จนเป็นผลสำเร็จของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ดุสิต เครื่องงาม ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ ทำให้วารสารต่างประเทศชั้นนำคือ EDN ASIA ซึ่งเป็นวารสารอิเล็กทรอนิกส์รายเดือนที่เผยแพร่ไปทั่วโลก (สำนักพิมพ์อยู่ที่ Hong Kong) ประจำฉบับเดือนกุมภาพันธ์ 2537 ประกาศเกียรติคุณยกย่องให้ ผศ. ดร. ดุสิต เครื่องงาม ได้รับรางวัล "EDN ASIA INNOVATOR AWARD" ประจำปีนี้

ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางอะมอร์ฟัสมีศักยภาพที่จะพัฒนาต่อไปเป็นจอโทรทัศน์แบบบางชนิดใหม่ตลอดจนใช้งานในสิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ เช่น โฟโตคัมเพลกซ์ ฯลฯ งานวิจัยเรื่องนี้ได้ทุนสนับสนุนจากฝ่ายวิจัย จุฬาฯ และบริษัทพีเอ็มเออร์โกลเบลคคอร์เปอเรชั่น จำกัด ได้ตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารวิชาการในต่างประเทศแล้วกว่า 10 ฉบับ จดสิทธิบัตร 2 ฉบับ

EDN ASIA INNOVATOR

Dr Dusit Kruangam


Intuition is a curious thing. One day, Dr Dusit Kruangam, in a certain moment, was thinking about the structure of a certain type of diode. After five years of work - with little but daily attention he was on the right track - Dr Dusit has developed a thin film light emitting diode (TFLED) that, if perfected, could lead to transparent, window-sized video displays for buildings and computers.

Dr Dusit is assistant professor of electrical engineering at Chulalongkorn University in Bangkok, where he works in the Semiconductor Device Research Laboratory. He started working with solar cells in 1974 at the lab, when Thai had decided this would be an appropriate technology to master. They could produce solar cells which convert light energy into electrical energy. So I thought, 'Why don't we produce a semiconductor device that turns electrical energy into light? I found that when I passed a current through a solar cell, it emitted a light. But the lightness was in the infrared region of the spectrum, as you wouldn't see it. Therefore, I tried to develop a material that would emit visible light.'

In 1980, Dr Dusit has years to produce a semi-conductor device that worked. 'At first we layered thin silicon carbon or silicon to the solar cell would produce a cell that would emit visible light. But, we had to prove it. I know that we would spend a lot of time to optimize the structure of the device. We expected this from the first. But I was always patient and we finally succeeded.'

The results from a flat-panel display made from semiconductor conductors. The panels are made of hydrogenated amorphous silicon nitride (a-SiN:H). The emission color varies with the optical energy gap between the p and n layers. So far Dr Dusit has produced red, yellow, green, blue, and white displays.

Dr Dusit's display has an advantage over current LCDs. It has a crystal display never emit light by itself, so it does not require a back light. In the case of LCDs, the



contrast also isn't very good. In my device, the display emits the light itself and the contrast is high.' The display consumes many fewer than an LCD screen by itself, but has than an LCD with backlighting.

The TFLED holds the promise of a cheap, large screen. 'LCDs use two sheets of glass with the LCD material in between. There is only about 20 microns between the sheets of glass, so the gap is very difficult to control over 14 in. If you can't control the gap, performance goes down.' With the TFLED, in contrast, 'The production technique is simple, and it can produce a large display. With my device, we can make a display the size of a table - one or two square meters.' It can be built up directly on glass, plastic, or stainless steel.

To date, Dr Dusit has enjoyed academic recognition but no commercial rewards. 'My work has been recognized in more than 30 international conferences and journals.' Unfortunately, he published his work before applying for a patent - only to discover that the act of publishing the information put it in the public domain, making it un-patentable. 'I am very sorry that I could not submit the patent for the silicon nitride device, because I had published my paper already. The process I am going to patent now is another innovation that improves the performance of the device.'

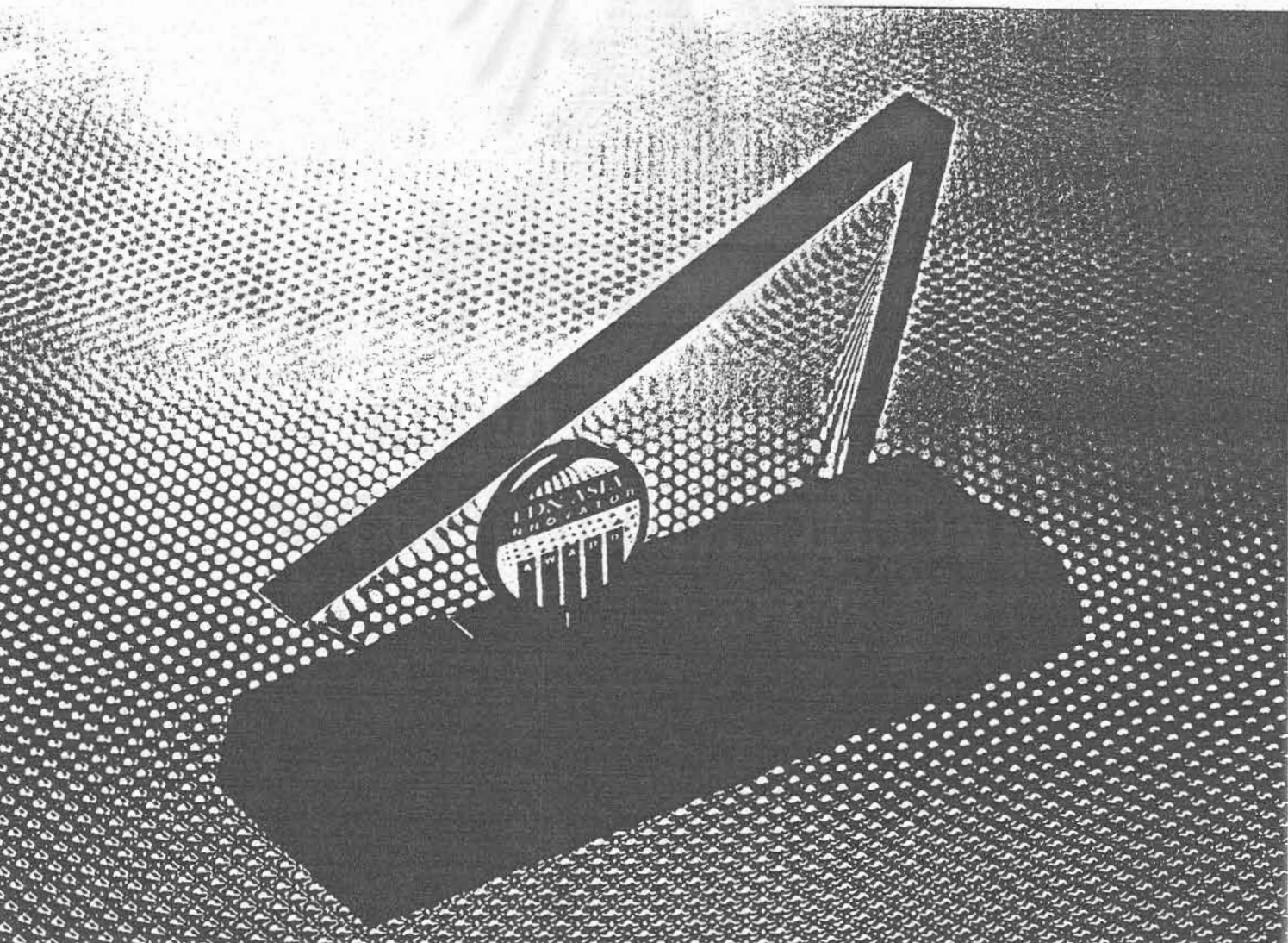
This time Dr Dusit will submit the patent and then publish his findings. Perhaps then his patience will finally be rewarded.

- John Brown

"I knew that we would need a lot of time in order to optimize the structure of our device. We expected this from the first. But I was always patient and we finally succeeded."

Dr Dusit Kruangam, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand. Phone (662) 271-6222, 662 262577 ext. 212. Only No. 212

EDN ASIA February 1994 • 17



Dr Dusit Kruangam

If patience is a virtue, then Dr Dusit Kruangam is among the virtuous. After five years of work—with little but faith to indicate he was on the right track—Dr Dusit has developed a thin-film light-emitting diode (TFLED) that, if perfected, could lead to inexpensive, window-sized color displays for televisions and computers.

Dr Dusit is assistant professor of electrical engineering at Chulalongkorn University in Bangkok, where he works in the Semiconductor Device Research Laboratory. He started working with solar cells in 1974 at the lab, when Thailand decided this would be an appropriate technology to master. "We could produce solar cells, which convert light energy into electrical energy. So I thought, 'Why don't we produce a semiconductor device that turns electrical energy into light?' I found that when I passed a current through a solar cell, it emitted a light.

But the lightwave was in the infrared region of the spectrum, so you couldn't see it. Therefore I tried to develop a material that would emit a visible light."

It took Dr Dusit five years to produce a semiconductor device that worked. "At first we believed that adding carbon or nitrogen to the solar cell would create a cell that would emit visible light. Still, we had to prove it. I knew that we would need a lot of time to optimize the structure of the device. We expected this from the first. But I was always patient and we finally succeeded."

The result was a flat-panel display made from amorphous semiconductors. The panels are made of hydrogenated amorphous silicon nitride ($a\text{-SiN:H}$). The emission color varies with the optical energy gap between the p- and n-layers. So far Dr Dusit has produced red, yellow, green, blue and white displays.

Dr Dusit's display has an advantage over current LCDs. A liquid crystal display cannot emit light by itself, he explains. It requires a back light. In the case of LCDs, the



contrast also isn't very good. In my device, the display emits the light itself, and the contrast is high. His display consumes more power than an LCD screen by itself, but less than an LCD with backlighting.

The TFLED holds the promise of a cheap, large screen. LCDs use two sheets of glass with the LCD material in between. There is only about 50 microns between the sheets of glass, so the gap is very difficult to control over 14 in. If you can't control the gap, performance goes down. With the TFLED, in contrast, "The production technique is simple, and it can produce a large display. With my device, we can make a display the size of a window—one or two square meters." It can be built up directly on glass, plastic, or stainless steel.

To date, Dr Dusit has enjoyed academic recognition but no commercial rewards.

My work has been recognized in more than 30 international conferences and journals. Unfortunately, he published his work before applying for a patent—only to discover that the act of publishing the information put it in the public domain, making it un-

“I knew that we would need a lot of time in order to optimize the structure of our device. We expected this from the first. But I was always patient and we finally succeeded.”

patentable. "I am very sorry that I could not submit the patent for the silicon nitride device, because I had published my paper already. The process I am going to patent now is another innovation that improves the performance of the device."

This time Dr Dusit will submit the patent and then publish his findings. Perhaps then his patience will finally be rewarded.

—John Donovan

Dr Dusit Kruangam, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok, 10330, Thailand. Phone: (662) 218-6522; FAX: (662) 251-8991. Circle No. 592

4) การได้รับเกียรติให้เผยแพร่ผลงานวิจัยในงานนิทรรศการต่าง ๆ

- 4.1) นิทรรศการรางวัลผลงานคิดค้นหรือสิ่งประดิษฐ์ที่เป็นประโยชน์ต่อประเทศ
ประจำปี2537 จัดโดยสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ณ ทำเนียบรัฐบาล
กรุงเทพมหานคร
- 4.2) นิทรรศการ Techno Indochina 2537
จัดโดยกระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ณ สำนักงานสหประชาชาติ
กรุงเทพมหานคร
- 4.3) นิทรรศการวันนักประดิษฐ์
จัดโดยสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ 2538 ณ ดิเกอเวสต์เทรดเซ็นเตอร์
กรุงเทพมหานคร
- 4.4) นิทรรศการก้าวไกลไทยทำ (BOI Fair)
2538 จัดโดยสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมการลงทุน ณ ท่าเรือแหลมฉบัง ชลบุรี
- 4.5) นิทรรศการสัปดาห์วิทยาศาสตร์อาเซียน
2538 จัดโดยกระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม โดยการเชิญจาก
สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ณ โรงแรมเซ็นทรัลพลาซ่า กรุงเทพมหานคร
- 4.6) นิทรรศการ WORLD TECH'95
2538 จัดโดยทบวงมหาวิทยาลัย โดยการเชิญจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่ง
ชาติ ณ มหาวิทยาลัยสุรนารี นครราชสีมา
- 4.7) นิทรรศการจุฬาไฮเทค 95
(CU High Tech'95) จัดโดยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ณ ศูนย์การค้ามาบุญครอง
กรุงเทพมหานคร
- 4.8) นิทรรศการวันนักประดิษฐ์
จัดโดยสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ 2539 ณ ห้างสรรพสินค้าเดอะมอลล์
สาขาบางกะปิ กรุงเทพมหานคร

ตัวอย่างเอกสารที่จัดทำเพื่อแจกในนิทรรศการ และภาพถ่ายบรรยากาศบูธในนิทรรศการ
ต่างๆที่กล่าวข้างต้น แสดงในหน้าต่อไป

จอแสดงผลและจอโทรทัศน์แบบบางชนิดใหม่ของโลก - ไดโอดเปล่งแสงฟิล์มบางอะมอร์ฟัส New Type of Flat Panel Display/TV - Amorphous Thin Film Light Emitting Diode-

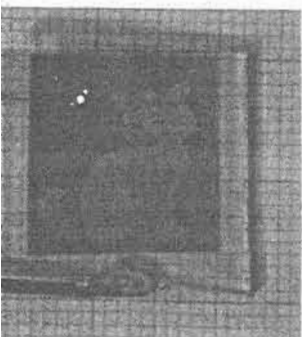
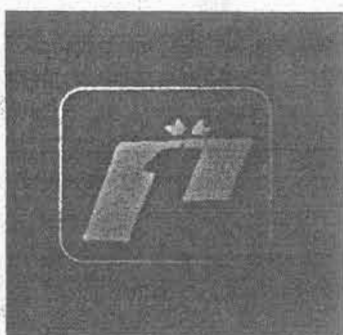
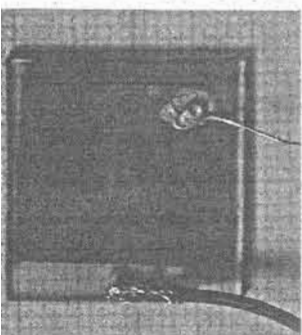
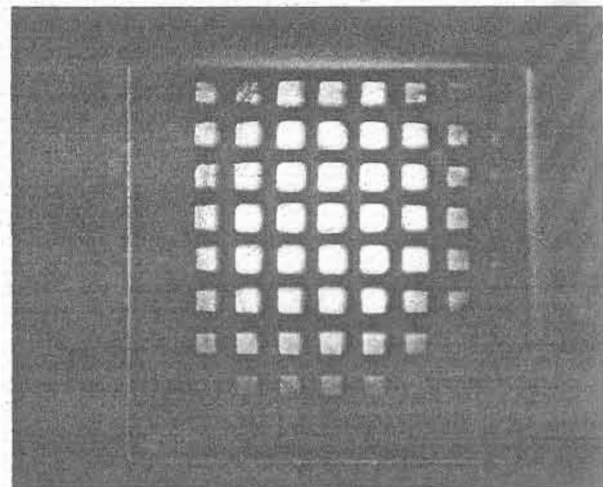
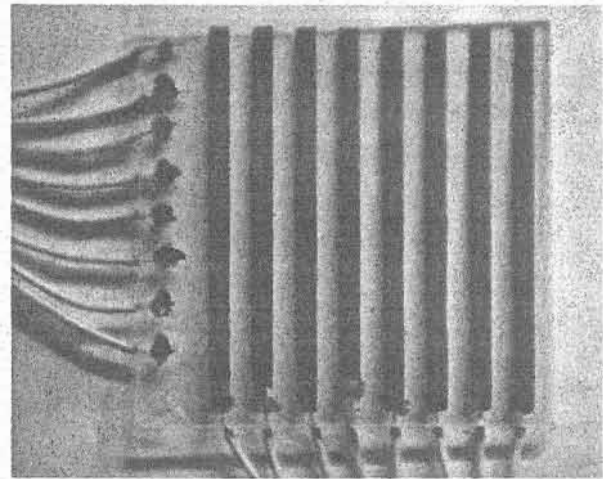
The researchers from Chulalongkorn University succeeded in the development of a new type of flat panel display for the first time. The flat panel display is made of amorphous Thin Film Light Emitting Diode (TFLED) deposited on a sheet of glass. The amorphous TFLED is a new electronic device that can emit light when electrical current flows into the device. The TFLED consists of three layers of thin films, i.e. tin oxide layer, amorphous silicon alloy layers and aluminium layer. The amorphous TFLED has advantages over conventional CRT television, e.g. the TFLED is flat and has very light-weight and uses a low operation voltage of 10-15 volt. The TFLED does not contain any vacuum tube. The TFLED holds promise of a cheap, large screen display. It can be coated directly on glass, plastic, or stainless steel.

This project is supported by Chulalongkorn University, Career Development Award from National Science & Technology Development Agency (NSTDA) and Premier Global Corporation Limited. The results of the invention have been published in more than 15 international Journals & Conferences. Two domestic patents and USA & Australian patents were filed. The researchers have received several awards, i.e., 1st Award of Device Invention from National Research Council of Thailand (NRCT) in 1994, 1st Award of ASEAN Young Scientist in 1992, Innovator Award from EDN Asia Electronic Magazine in Hong Kong in 1994. Those who would like to get more information can contact Asst. Prof. Dr. Dusit Krungam, Semiconductor Device Research Laboratory, Fac. of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok 10330. Tel 218-6522, or Fax. 251-8991.

คณะผู้วิจัยจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ประสบความสำเร็จในการพัฒนาจอแสดงผลแบบบางชนิดใหม่ของโลก จากวัสดุอะมอร์ฟัสสารประกอบซิลิคอน โดยประดิษฐ์เป็นไดโอดเปล่งแสงฟิล์มบาง ซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นกระจกบางๆ เพียงแผ่นเดียวที่ถูกเคลือบไว้ด้วยวัสดุฟิล์มบาง 3 ชั้น ซึ่งได้แก่ ชั้นฉนวนไฟฟ้าของดีบุก ออกไซด์ ชั้นเปล่งแสงของวัสดุอะมอร์ฟัสซิลิคอนอัลลอย และชั้นขั้วไฟฟ้าของอะลูมิเนียม เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ขั้วไฟฟ้าทั้งสอง จะมีแสงเปล่งออกมาจากชั้นอะมอร์ฟัสให้เห็นเป็นภาพหรือสีต่างๆ ได้ จอแสดงผลนี้มีประโยชน์ในการนำไปใช้งานเป็นจอภาพโทรทัศน์แบบบางและเบา อีกทั้งยังสามารถแขวนที่ฝาผนังให้เป็นกรอบรูปภาพที่ทำหน้าที่เป็นจอโทรทัศน์ได้อีกด้วย นับเป็นอุปกรณ์สิ่งประดิษฐ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ชนิดใหม่ที่กำลังได้รับความสนใจจากทั่วโลก เป็นผลงานที่ได้สร้างชื่อเสียงให้กับวงการวิชาการของไทยระดับโลกเป็นอย่างมาก

ผลงานเรื่องนี้เคยได้รับรางวัลมาแล้วมากมาย เช่น รางวัลนักวิทยาศาสตร์อาเซียนดีเด่นรุ่นใหม่ 2535, รางวัลผลงานคิดค้นสิ่งประดิษฐ์รางวัลที่ 1 จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ 2537, รางวัล EDN Innovator Award จากฮ่องกง 2537 ผลงานเรื่องนี้ได้ยื่นจดสิทธิบัตรในประเทศไทยไว้ 2 ฉบับ ในประเทศออสเตรเลีย 2 ฉบับ และในประเทศสหรัฐอเมริกาอีก 2 ฉบับ และคณะผู้วิจัยได้เผยแพร่ในการประชุมวิชาการนานาชาติและวารสารทางวิชาการระดับนานาชาติมาแล้วกว่า 15 เรื่อง

ผู้สนใจติดต่อขอรายละเอียดได้ที่ ผศ.ดร.ดุสิต เจริญงาม ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กทม.10330 โทร. 218-6522 โทรสาร 251-8991.



หนังสือพิมพ์มติชนรายวัน

สาธารณสุข ☆ สิ่งแวดล้อม

ลัทธิวิทยาศาสตร์ไทย ก้าวไกลเทียบบราซิล



รายงานพิเศษ

18-24 สิงหาคมทุกปี เป็นช่วงเทศกาลของงาน "สัปดาห์วิทยาศาสตร์แห่งชาติ" ที่ยิ่งใหญ่ช่วงหนึ่ง แต่ในพิธีที่สวนวชิรเบญจทัศ "สัปดาห์วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอาเซียน" ครั้งที่ 1

ระหว่างวันที่ 21 สิงหาคม 1 วันพิเศษ ซึ่งจะจัดไว้ประเทศไทยกลายเป็น "ศูนย์รวมนักวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีจากทั่วภูมิภาคอาเซียน" รวมทั้งนักวิทยาศาสตร์จากประเทศคู่แข่งอย่างไต้หวันด้วย 800 คน

งานสัปดาห์วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอาเซียน ครั้งที่ 4 ที่จะจัดขึ้นภายใต้หัวข้องานว่า "วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี : ความก้าวหน้าของอาเซียน" ณ โรงแรมเซ็นทรัลพลาซา ครั้งที่ 4 นี้ มีนักวิทยาศาสตร์จาก 10 ประเทศอาเซียน รวมทั้งนักวิทยาศาสตร์จากประเทศคู่แข่งอย่างไต้หวันด้วย

ซอกหลุมร่วมมืออาเซียนทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีของชาติ ร่วมกันสร้างระบบวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ซึ่งนับเป็นครั้งแรกที่ประเทศไทยจะได้ไปมา จักรเย็บผ้าเหมือนนี้ ทว่างานที่ประเทศประจักษ์มาคือวิทยาศาสตร์นอกเหนือจากเทคโนโลยีแบบเก่าที่คนไทยเคยชินมาแต่อดีตและเทคโนโลยีที่ทันสมัยที่เรารู้จักกันดีในแวดวงวิชาการระดับนานาชาติทั่วโลก เติบโตมาเรื่อยๆ จากกิจกรรมที่งานทุกๆ 3 ปีหมุนเวียนกันไปในกลุ่มประเทศอาเซียน ซึ่งไป 3 ครั้งที่ผ่านมามีจัดขึ้นที่ประเทศ มาเลเซีย ฟิลิปปินส์ และสิงคโปร์ ตามลำดับ



ดร.ดุจิต เด็กโรม

กิจกรรมภายนอกในการประชุมวิจัยเทคโนโลยี และการประชุมในระดับต่างๆ รวมทั้งการเสวนาอภิปรายทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีของกลุ่มประเทศอาเซียน และประเทศคู่แข่งอย่างไต้หวัน ล้วนแต่มีจุดมุ่งหมายที่จะพัฒนาบุคลากรและงานทางด้านวิทยาศาสตร์ การอบรมเรื่องวิวัฒนาการของเทคโนโลยี 3 ประเทศคือ

- รมว.ทบ.กับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีระดับสากลของอาเซียน 1 รางวัล
- รมว.ทบ.กับวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีรุ่นใหม่ 1 รางวัล
- รมว.ทบ.กับเทคโนโลยีสารสนเทศของอาเซียน 1 รางวัล

เมื่อมองย้อนกลับมาจะเห็นว่ากว่า 10 ปีที่ผ่านมาถึง 3 ปีนี้จะจัดให้มีขึ้นอีกครั้งในชื่อเป็นไปโดยพระราชกฤษฎีกาจะจัดกิจกรรม จะนับจึงไม่ใช่เรื่องยากอีกสำหรับนักวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่ไปทีละได้บ้างแล้ว ก็จะนับเป็นวิทยาศาสตร์ของประเทศไทยไปภูมิภาคอาเซียน จึงหวังพัฒนาคุณภาพของงานที่ร่วมจัดแบบครั้งละ 1 ประเทศโดยงานเชิงวิจัยประยุกต์ที่มุ่งเน้นการวิจัยทางวิทยาศาสตร์ ที่สัมพันธ์กับพื้นที่ของประเทศไทยที่มีนักวิทยาศาสตร์ได้รับรางวัล

เช่นเดียวกับประเทศไทย มีเอกอ. ดร.ดุจิต เด็กโรม ผู้เชี่ยวชาญทางด้านวิทยาศาสตร์ การวิจัยและพัฒนา ภาควิชาการศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เข้าร่วมจัดขึ้นด้วย 5 ประเทศเพื่อนบ้าน

คือ ประเทศมาเลเซีย สิงคโปร์ อินโดนีเซีย ฟิลิปปินส์ และ
บรูไน ในงานสัปดาห์วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ
เชียน ครั้งที่ 3 ณ ประเทศสิงคโปร์

โดยในครั้งนี้จะเป็นครั้งแรกที่จัดการแข่งขันดังกล่าว ดร.
คุณฉัตรเป็นผู้อำนวยการฝ่ายวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
ของกรมศึกษาธิการร่วมกับสวนหลวงและแสดงภาพโปส
เตอร์ตลอดจนกล่าวรายงานผลงานของคณะคณะกรรมการ
ผู้ทรงคุณวุฒิของอาเซียนที่การตัดสินด้วยเกณฑ์การพิจารณา
จากผลงานวิจัยที่มีคุณภาพระดับองค์การวิทยาศาสตร์
และเทคโนโลยี และคณะผู้จัดทำโครงการวิจัยอย่างต่อเนื่อง
ดร.คุณฉัตรเป็นผู้ผลงานวิจัยดีเด่นด้านเทคโนโลยีของ

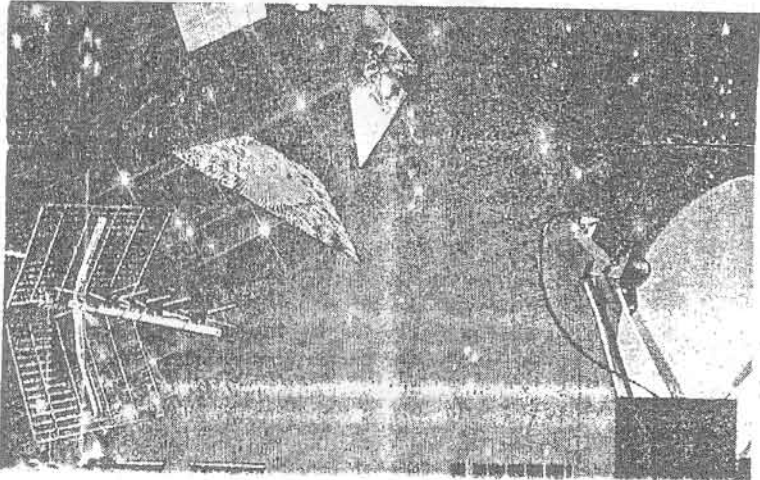
วัสดุและสิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์ครั้งนี้นับว่า
และสิ่งที่น่าสนใจและโครงการในการตัดสินครั้งนี้
ก็คือ เป็นคนแรกที่คิดค้นและประดิษฐ์องค์ประกอบ
ผล (ดิฟเฟอเรนเชียล) แบบแบบชนิดไดโอดเปล่งแสงแบบ
ฟิล์มบางจากวัสดุสารกึ่งตัวนำออสซิลเลชันของอะมอร์
ฟิซิลิโคนอเนกไซด์ และอะมอร์ฟิซิลิโคนในโครงสร้าง
โพลีเมอร์เป็นครั้งแรกของโลก ซึ่งสิ่งประดิษฐ์นี้มี
ศักยภาพที่จะนำมาสร้างเป็นจอภาพโทรทัศน์แบบ
แบบชนิดใหม่ที่มีขนาดเล็ก ราคาถูก และมีพื้นที่ขนาดใหญ่
ใหญ่แทนจอโทรทัศน์ในปัจจุบันได้

รางวัลนี้ทรงเกียรติที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
สุรนารีได้ในครั้งนี้นับว่าแสดงให้เห็นถึงการยอมรับ
ในระดับสากลว่ามีความสามารถของนักวิทยาศาสตร์ไทย
ที่มีความรู้ความสามารถระดับแนวหน้าของอาเซียน

และในโอกาสที่มหาวิทยาลัยและเทคโนโลยี
อนเทคโนโลยีของอาเซียน ที่จะจัดขึ้นในประเทศไทยครั้งนี้
จึงทำให้ทุกประเทศสมาชิกต่างกลุ่มและหวังถึงผล
รางวัลที่โครงการประกาศชื่อมหาวิทยาลัยของ
ประเทศตนเข้ารับการคัดเลือกแบบรัฐบาลไทยใน
ฐานะเจ้าภาพ เพื่อเป็นเกียรติประวัติต่อแวดวงวิทยา
การของประเทศนั้นๆ

สำหรับประชาชนที่เข้าชมงาน ถึงแม้ว่าจะร่วม
ชมการแข่งขันเสนอผลงานของนักวิทยาศาสตร์ไม่
ได้ก็ยังมีงานนิทรรศการที่กลุ่มประเทศอาเซียน และ
ประเทศผู้เจรจาผู้ดูแลสำหรับชาวอาเซียนเข้า
ชมและเข้ามาให้คนไทยได้ชมได้เห็นนอกเหนือจาก
การแสดงนิทรรศการของไทยในหัวข้อ "เทคโนโลยี
สารสนเทศทั่วโลก เศรษฐกิจไทยมั่นคง"
ในงานสัปดาห์วิทยาศาสตร์แห่งชาติที่จัดใน
ภาคเดียวทั้งและระยะเวลาที่ค่อนข้างยาวกับ

ถือได้ว่า ในช่วงเวลานี้คนไทยจะมีโอกาส
ได้สัมผัสกับงานวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
ที่ยิ่งใหญ่ครั้งหนึ่งของประเทศ



ณตยา แว่ววิรุพต์

สถาบันวิทยบริการ
สงครณมหาวิทยาลัย

5) การได้รับเกียรติเผยแพร่ผลงานโดยสื่อมวลชนแขนงต่าง ๆ

ผลงานการวิจัยเรื่องนี้ได้รับความสนใจจากสื่อมวลชนทุกแขนง ได้รับเกียรติเผยแพร่ผลงานทั้งในสื่อวิทยุ โทรทัศน์ หนังสือพิมพ์ วารสาร นิตยสารมากมาย ดังตัวอย่างเอกสารที่แนบต่อไปนี้



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



วันจันทร์ที่ 29 สิงหาคม พ.ศ. 2537 แรม 8 ค่ำ เดือน 9 ปีมะ

5



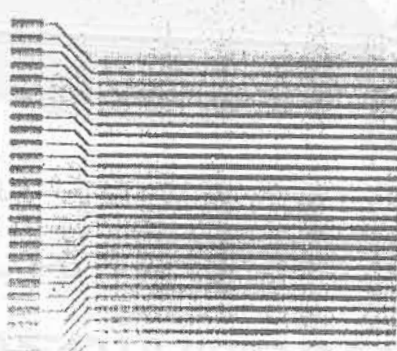
บพิตร เกาภูรีระ



ดร.คูลิศ เกรื่องาม

อาจารย์วิศวะ จุฬาสรางชื่อ

ศึกษามัธยมศึกษาเปล่งแสงทั่วไทยให้โลก



วิศวกรไทยสร้างชื่อ
 กระฉ่อนโลกอีกครั้ง
 ตามแนวคิดค้นได้อุด
 เปล่งแสงชนิดล่าสุดแบบ
 फिल्มบาง ใช้อะมอร์ฟิส
 สารกึ่งตัวนำ พาเข้าสู่โลก
 แห่งจอแสดงผลด้วยภาพ
 และแสงแบบใหม่บาง
 เนิบเหลือเชื่อ สร้าง
 ความทิ้งและกระหาย
 ไฮเทคนี้แก้จุดตำหนิ
 อีเล็กทรอนิกส์ที่วงการ

จอภาพโทรทัศน์แบบบาง ชนิดอะมอร์ฟิส ความหวังใหม่ของโลกขณะนี้



TDO QUARTERLY

THE JOURNAL OF TECHNOLOGY DEVELOPMENT OFFICE
PREMIER GLOBAL CORPORATION LIMITED.

VOL.1 NO. 2

JULY-SEPTEMBER, 1992

ISSN 0858-5474

ไทยชนะเลิศ “นักวิทยาศาสตร์อาเซียน”



คว้ารางวัลที่ 1 ด้วยผลงาน สารกึ่งตัวนำ



โครงการเผยแพร่ผลงานวิจัย ฝ่ายวิจัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย แจ้งว่า การจัดการประกวดแข่งขันรางวัลนักวิทยาศาสตร์อาเซียนรุ่นใหม่นี้ เป็นกิจกรรมส่วนหนึ่งในงานสัปดาห์วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติครั้งที่ 3 (จัดทุก 3 ปี ครั้งต่อไปจัดที่ประเทศไทย) ซึ่งจัดขึ้นที่ประเทศสิงคโปร์ ระหว่างวันที่ 17-24 ก.ย. ศกนี้ และปีนี้เป็นปีแรกที่ได้มีการจัดการแข่งขันดังกล่าวเพื่อส่งเสริมและประกาศเกียรติคุณแก่นักวิจัย นักวิทยาศาสตร์ และนักเทคโนโลยีรุ่นใหม่ ๆ ที่มีผลงานวิจัยพัฒนาและค้นคิดที่เป็นประโยชน์ต่อวงการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ไม่มีกำลังใจในการทำงานต่อไป

ในปีนี้ ประเทศต่าง ๆ ในอาเซียนอินได้แก่ มาเลเซีย สิงคโปร์ อินโดนีเซีย ฟิลิปปินส์ บรูไนและไทย ได้ส่งตัวแทนประเทศละ 1 คน เข้าร่วมแข่งขัน โดยมีกติกาว่าจะต้องมีอายุไม่เกิน 35 ปี และในการแข่งขันแต่ละคนต้องนำผลงานและโปสเตอร์ไปแสดง อีกทั้งต้องกล่าวรายงานผลงานของตนให้คณะกรรมการฟัง

จากผลการตัดสินที่พิจารณาจากผลงานวิจัยที่มีคุณประโยชน์ต่อวงการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และความเหมาะสมในการทำวิจัยที่ต่อเนื่อง ปรากฏว่า ผศ.ดร.ดุสิต

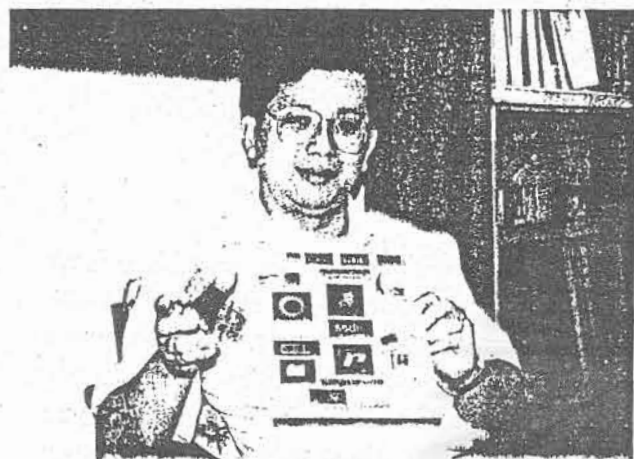
เครื่องาม อาจารย์นักวิจัยวัย 34 ปี ได้รับรางวัลชนะเลิศ ได้รับเงินสด จำนวน 5,000 ดอลลาร์สหรัฐ (ประมาณ 125,000 บาท) พร้อมทั้งถ้วยเกียรติยศและประกาศนียบัตร ประกาศเกียรติคุณจาก นายตี เชียง จุง รองนายกรัฐมนตรี และรัฐมนตรีว่าการกระทรวงการคลังและอุตสาหกรรมของสิงคโปร์

ผศ.ดร.ดุสิต มีผลงานวิจัยดีเยี่ยมทางด้านเทคโนโลยีของวัสดุและสิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์ของสารกึ่งตัวนำอย่างมาก ผลงานวิจัยที่ชนะใจกรรมการในครั้งนี้คือ เป็นคนแรกที่คิดค้นและประดิษฐ์จอภาพแสดงผล (ดีสเพลย์) แบบแบนชนิดไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางจากวัสดุสารกึ่งตัวนำออสตรอนของอะมอร์ฟิซิลิกอนคาร์ไบด์และอะมอร์ฟิซิลิกอนไนไตรด์ได้สำเร็จเป็นคนแรกในโลก สิ่งประดิษฐ์ชิ้นนี้มีศักยภาพที่จะนำมาสร้างเป็นจอภาพโทรทัศน์แบบแบนชนิดใหม่ที่มีบางเบา ราคาถูก และมีพื้นฐานที่ขนาดใหญ่แทนจอโทรทัศน์ในปัจจุบันได้

จาก ไทยรัฐ 24 กันยายน 2535 (หน้า 8)

Pioneering Development of Flat Television & Display by Thai Scientist

by Nuttaya Apisiridej



Thai researcher has succeeded in the development of a new type of flat panel television & display for the first time.

Accomplished by Asst Prof Dr Dusit Krua-ngam, 3A, from the Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, the flat panel is made of amorphous Thin Film Light Emitting

Diode (TFLED) deposited on a sheet of glass.

"The amorphous TFLED is a new electronic device that can emit light when electrical currents flow into the device," said the professor. "The TFLED consists of three layers of thin films, so called Tin Oxide layer, Amorphous Silicone alloys layer and Aluminium layer."

"The operation is done by running a voltage of 10-20 volts through the Tin Oxide layer and the Aluminium layer. The emission of light comes from the middle amorphous layer. The emission can be observed through the glass sheet."

"The amorphous TFLED has advantages over conventional televisions with a Cathode Ray Tube (CRT). CRT need several ten thousand volts and uses a vacuum tube that can be burst when it is broken. The CRT is

heavy and has a bulky shape, while the TFLED is very light and flat, having a total thickness of only 0.8 microns."

More importantly, the TFLED can emit many colours of light: red, yellow, green through blue and white. The TFLED can produce a screen as large as a window at a low cost.

However, this new electronic device needs further development to be applied as a TV frame, computer monitor, electronic equipment, video camera monitor, watch dial, calculator, X-ray monitor, etc. The device has not yet been produced at factory level.

The project has been supported by Chulalongkorn University and 1,441,820 baht have been donated to the project, plus another 200,000 baht from Premier Global Corporation. Two domestic patents and two international patents have been filed.

With this research and development, Dr Dusit recently won the first prize for the 1994 Best Achievement for the Benefit of the Country given by the National Research Council of Thailand and EDN Asia Innovator Award from EDN Asia Electronic journal of Hong Kong in 1994. He also earned an international reputation when he was awarded ASEAN Young Scientist & Technologist Award in 1992.

Those who would like to get more information can contact Asst Prof Dr Dusit Krua-ngam, tel 218-6522.

โทรทัศน์จอขาว... ประดิษฐกรรมไทยฝีมือระดับโลก

ประเทศไทยเราเป็นหนึ่งในประเทศที่กำลังพัฒนาและกำลังวาดฝันที่จะก้าวไปสู่การเป็นประเทศอุตสาหกรรมใหม่ แต่...ทราบใดที่เราจะต้องพึ่งพาเทคโนโลยีและซื้อสินค้าทางเทคโนโลยีจากต่างประเทศเป็นส่วนใหญ่ ทราบนั้นเราคงเป็นได้แค่เพียงทาสทางเทคโนโลยีของประเทศเหล่านั้นและคงยากที่ฝันจะเป็นจริง หนทางที่จะสร้างฝันให้เป็นจริงนั้นมีอยู่ ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับว่า เราจะต้องพัฒนาขีดความสามารถทางเทคโนโลยีภายในประเทศให้มากขึ้น เพื่อนำไปสู่การผลิตสินค้าทางเทคโนโลยีที่เป็นของตัวเองที่สามารถนำไปขายยังตลาดต่างประเทศได้ และครั้งนี้...นักวิจัยไทยของเราได้ทำฝันที่ว่าให้ใกล้ความจริงเข้าไปอีกขั้น เมื่อประสบความสำเร็จในการสร้างประดิษฐกรรมทางเทคโนโลยีชิ้นใหม่ที่ไม่เคยมีมาก่อนในโลก นับเป็นผลงานทางเทคโนโลยีชิ้นเอกที่ทั่วโลกให้การยอมรับและสร้างความภาคภูมิใจให้แก่พวกเราชาวไทย ประดิษฐกรรมนั้นก็คือ “ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางชนิดวัสดุอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำ” จอโทรทัศน์และดีสเพลย์แบบบางเรียบชนิดใหม่ของโลก

การคิดค้น “ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางชนิดวัสดุอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำ” หรือที่เรียกสั้นๆว่า “ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบาง” นี้เป็นผลงานของ ดร.ดุสิต เครื่องงาม แห่งห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และคณะ ที่ได้เล็งเห็นถึงความต้องการของตลาดในเรื่องของอุปกรณ์แสดงผลที่มีราคาถูกแต่มีประสิทธิภาพมากขึ้นกว่าที่เป็นอยู่ในปัจจุบัน คณะผู้วิจัยจึงได้เริ่มทำงานวิจัยสิ่งประดิษฐ์ชิ้นนี้ในปี 2531 และต่อเนื่องมาจนกระทั่งถึงปัจจุบัน

เนื่องจากปัจจุบัน อุปกรณ์แสดงผลที่เรารู้จักและนิยมใช้กันอยู่นั้นยังมีข้อเสียในหลายๆด้าน กล่าวคือ หลอดภาพโทรทัศน์ชนิด CRT (Cathode Ray Tube)

ที่ใช้กับโทรทัศน์จอคู่ตามบ้านนั้น แม้จะให้ภาพที่คมชัด แต่หลอดภาพก็เป็นหลอดสูญญากาศที่แตกระเบิดได้ง่าย ต้องใช้แรงดันไฟฟ้าสูงหลายพันหลายหมื่นโวลต์สำหรับการยิงลำอิเล็กตรอนเพื่อกระตุ้นให้เกิดแสงในการสร้างภาพ นอกจากนี้ยังมีความหนาและน้ำหนักมาก ทำให้เปลืองพื้นที่ในการติดตั้งและเคลื่อนย้ายไม่สะดวก สำหรับจอภาพชนิดผลึกเหลวหรือ LCD (Liquid Crystal Display) ซึ่งใช้กันในนาฬิกาข้อมือ เครื่องคิดเลข และมอนิเตอร์ของคอมพิวเตอร์ขนาดพกพานั้น แม้จะเด่นที่ใช้



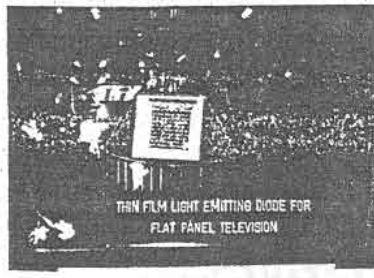
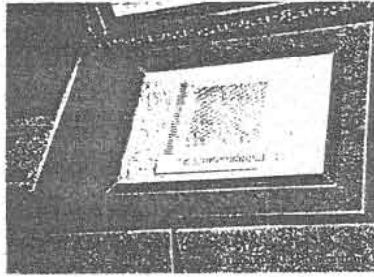
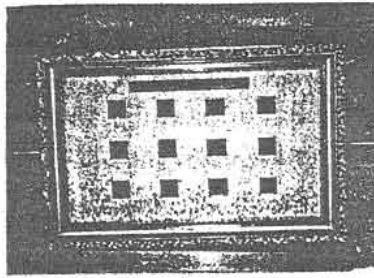
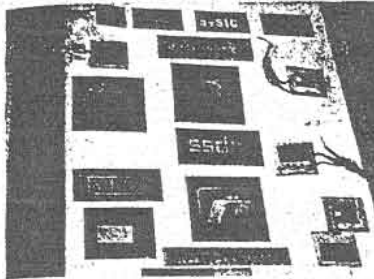
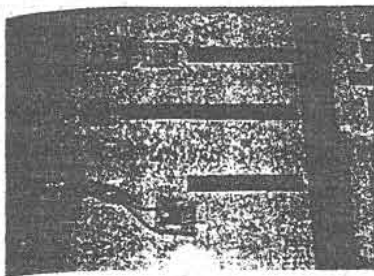
ดร.ดุสิต เครื่องงาม หัวหน้าผู้ประดิษฐ์คิดค้น(ซ้าย) และคุณศุภโชค ไทยน้อย หนึ่งในคณะผู้วิจัย(ขวา)

แรงดันไฟฟ้าต่ำและกินกระแสไฟฟ้าต่ำกว่าหลอดภาพชนิด CRT แต่ก็มีข้อเสียที่ตัว LCD ไม่สามารถเปล่งแสงได้ด้วยตัวเอง ต้องอาศัยแสงจากภายนอกส่องไปที่จอภาพ จึงจะมองเห็นได้ในที่มืด อีกทั้งยังมีข้อจำกัดในเรื่องมุมของการมองเห็น คือ ถ้าเรามองในมุมเอียงมากๆ (ไม่ได้มองตั้งฉากกับจอภาพ) เราก็อาจมองไม่เห็นภาพ ส่วนอุปกรณ์แสดงผลพวก EL (Electroluminescence) ซึ่งแม้จะเป็นแผ่นบาง

เบาและมีพื้นที่เปล่งแสงกว้างใหญ่ แต่ก็ยังต้องใช้งานที่แรงดันไฟฟ้าสูงๆ ทางด้านอุปกรณ์แสดงผลพวกไดโอดเปล่งแสงหรือ LED (Light Emitting Diode) นั้น ในท้องตลาดก็มีขนาดเล็กเกินไป ทั้งยังทำจากผลึก ราคาจึงแพงและผลิตให้เป็นพื้นที่ใหญ่ได้ยาก

แต่สำหรับไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางที่คณะผู้วิจัยได้ประดิษฐ์ขึ้นนี้ จะไม่มีข้อเสียเหมือนอุปกรณ์แสดงผลในปัจจุบัน แต่กลับมีข้อดีอีกหลายด้าน อาทิเช่น บางเบา มีพื้นที่ที่กว้างใหญ่ซึ่งสามารถปลูกบนแผ่นฐานอะไรก็ได้ไม่ว่าจะเป็น กระดาษ โลหะ หรือพลาสติก ใช้แรงดันไฟฟ้าต่ำ (ไม่ถึง 20 โวลต์) สามารถเปล่งแสงได้ด้วยตัวเองจึงไม่มีข้อจำกัดเรื่องมุมของการมองเห็น และที่สำคัญคือวัสดุที่ใช้ในการผลิตมีราคาถูก แล้วยังง่ายต่อการผลิต

จากหลักการที่ว่า เซลล์แสงอาทิตย์อันเป็นสิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีรูปร่างแบน บาง และมีพื้นที่



ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบาง สิ่งประดิษฐ์
ชิ้นใหม่ของโลกที่เป็นงานคิดค้นของคนไทย

ใหญ่ สามารถเปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าได้ในทางกลับกันถ้าป้อนสัญญาณไฟฟ้าเข้าสู่เซลล์แสงอาทิตย์ก็ว่าจะทำให้เซลล์เปล่งแสงได้ ซึ่งจากการทดลองของคณะผู้วิจัยก็พบว่าเซลล์เกิดการเปล่งแสงได้ แต่คุณภาพไม่ดี และเป็นแสงอินฟราเรดที่ตามนุษย์เรามองไม่เห็น คณะผู้วิจัยจึงได้ค้นคว้าต่อไปจนพบว่า การเพิ่มธาตุบางชนิดลงในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอนที่ประกอบด้วยสารประกอบของธาตุซิลิคอนและธาตุไนโตรเจน (หรือซิลิคอนไนไตรด์) และสารประกอบของธาตุซิลิคอนและธาตุคาร์บอน (หรือซิลิคอนคาร์ไบด์) จะทำให้เซลล์เกิดการเปล่งแสงที่ตามนุษย์มองเห็นได้ จึงเป็นที่มาของการผลิต "ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบาง" ที่นำไปสู่การสร้างจอโทรทัศน์และดิสเพลย์แบบบางเรียบชนิดใหม่ของโลกนี้

ขั้นตอนการผลิตไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางของคณะผู้วิจัยสามารถที่จะแบ่งคร่าวๆได้เป็น 3 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนที่ 1 : เป็นการนำแผ่นฐาน (ในการทดลองใช้กระจกขนาด 10x10 เซนติเมตร) มาเคลือบด้วยวัสดุทินุกออกไซด์ (SnO₂) โดยขั้นนี้จะทำหน้าที่เป็นขั้วนำไฟฟ้าที่ค่อนข้างจะโปร่งใส ขั้นตอนที่ 2 : เป็นการเคลือบฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอน ซึ่งขั้นนี้จะเป็นขั้นที่มีความสำคัญมากที่สุดเพราะเป็นขั้นที่จะเปล่งแสงออกมา และขั้นตอนที่ 3 : เป็นการเคลือบชั้นฟิล์มของอะลูมิเนียม โดยขั้นนี้ทำหน้าที่เป็นขั้วนำไฟฟ้าอีกชั้นหนึ่ง ซึ่งความหนาของฟิล์มบางทั้ง 3 ชั้นนี้รวมกันแล้วจะหนาเพียง 0.0008 มิลลิเมตรเท่านั้น

เมื่อได้เคลือบฟิล์มบางทั้ง 3 ชั้นบนแผ่นกระจกเรียบร้อยแล้ว เวลาใช้งานก็จะต่อขั้วไฟฟ้าขั้วบวก

เข้าสู่ชั้นทินุกออกไซด์ และขั้วไฟฟ้าขั้วลบเข้าสู่ชั้นอะลูมิเนียม เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ขั้วบวก-ขั้วลบผ่านชั้นทินุกออกไซด์และชั้นอะลูมิเนียมแล้ว กระแสไฟฟ้าก็จะไหลผ่านทะลุชั้นอะมอร์ฟัสซิลิคอนซึ่งอยู่ตรงกลาง ในขณะที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านชั้นตรงกลางก็จะทำให้มีแสงเปล่งออกมาจากชั้นอะมอร์ฟัสซิลิคอนนี้ ในกรณีที่เราต้องการให้สิ่งประดิษฐ์นี้สามารถเปล่งแสงให้เห็นได้เป็นสีต่างๆ เช่น สีแดง สีเหลือง สีเขียว ก็ทำได้โดยการเปลี่ยนอัตราส่วนผสมของวัสดุในชั้นอะมอร์ฟัสซิลิคอนนี้ และหากต้องการผสมสีก็สามารถทำได้โดยใช้ชั้นสีต่างๆ วางซ้อนทับกันแบบขมมั้น โดยถ้าต้องการผสมสีระหว่างชั้นไหนกับชั้นไหนก็ป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าไปพร้อมๆ กัน แสงที่เปล่งออกจากชั้นขมมั้นนี้ก็จะมีผสมกันเอง

ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางที่ผลิตขั้นนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลายด้านด้วยกัน อาทิเช่น นำไปใช้เป็นจอภาพโทรทัศน์แบบบางเสมือนหนึ่งเป็นกรอบภาพแว่นผ่นัง ใช้เป็นจอภาพดิสเพลย์ในเครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ใช้แทนจอมอนิเตอร์คอมพิวเตอร์ขนาดพกพา ใช้เป็นหน้าปัดมาตรวัดในยานพาหนะ ใช้เป็นจอเรดาร์ หรือจอสื่อสาร ใช้เป็นจอภาพตรวจคนไข้ในทางการแพทย์ เช่น จอภาพสำหรับเครื่องเอกซเรย์ จอภาพสำหรับเครื่องอัลตราซาวนด์ หรือจะใช้เป็นไฟโต้คัปเปลอร์ในแกนออกตากรรมวัดคุมอัตโนมัติซึ่งสามารถใช้ตรวจนับวัสดุที่วิ่งตัดผ่านแสงด้วยความเร็วสูงก็ได้

อย่างไรก็ดี ในขณะนี้ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางที่ได้ก็ยังมีปัญหาเรื่องของความสว่างซึ่งยังสว่างสู้จอโทรทัศน์แบบ CRT ไม่ได้ และอายุการใช้งานยังไม่นานพอ ดังนั้นคณะผู้วิจัยยังต้องการเวลาและผู้สนับสนุนงานวิจัยอีกมาก ซึ่งแน่นอน...หากประดิษฐ์กรรมขั้นนี้เสร็จสมบูรณ์จนสามารถผลิตเป็นสินค้าออกสู่ตลาดได้แล้วมูลค่าทางเศรษฐกิจของสินค้าทางเทคโนโลยีชนิดนี้จะมีค่าสูงนับพันนับหมื่นล้านบาทเลยทีเดียว

และนี่ก็คือผลงานชิ้นโบว์แดงของนักวิจัยไทยในประดิษฐ์กรรมระดับโลก ที่จะนำไปสู่สินค้าทางเทคโนโลยีโดยคนไทยครั้งสำคัญ!

๒

สอบถามข้อมูลเพิ่มเติมได้ที่ : ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถนน.10330 โทร.218-6522-24

6) ตัวอย่างข้อมูลที่แสดงว่าผลงานวิจัยเรื่องนี้ได้รับความสนใจ จากนักวิทยาศาสตร์ทั่วโลก

ตลอดระยะเวลาที่ทำการวิจัยเรื่องนี้ ผลงานวิจัยเรื่องนี้ได้รับความสนใจจากนักวิจัย นักวิทยาศาสตร์ในหลายๆประเทศเป็นอย่างมาก ดังจะเห็นได้จากการได้รับการติดต่อทั้งทางจดหมาย และการพบโดยตรงในที่ประชุมนานาชาติเพื่อขอ Reprints ของบทความและรายละเอียดต่าง ๆ โดยมีตัวอย่างรายชื่อต่อไปนี้

6.1) การเป็นแหล่งอ้างอิงทางวิชาการในระดับมาตรฐานนานาชาติ (Citation Search)

บทความวิชาการเผยแพร่ผลงานวิจัยเรื่อง ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบางอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำนี้ ได้ถูกนำไปใช้อ้างอิงมากมายหลายครั้งในวารสารและตำราวิชาการมาตรฐานนานาชาติ ต่อไปนี้เป็นตัวอย่างรายชื่อบทความที่อ้างอิงผลงานวิจัย (จาก SCI CDE Search)

- 1) D. Ruter, S. Rolf and W. Bauhofer, "Amorphous Silicon Carbon Based Thin-Films with Efficient Ultraviolet-Excited Photoluminescence and Low Self-Absorptivity in the Emission Spectra Range", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 67 (1995) 149.
- 2) A.B. Pevtsov, A.V. Zherzdev, N.A. Feoktistov, G. Juska, T. Muschik and R. Schwarz, "Electroluminescence in a-SiC:H p-i-n Structures", *Int. J. Electronic.*, vol. 78 (1995) 289.
- 3) S. Wickramanayaka, Y. Nakanishi and Y. Hatanaka, "Relationship Between Hydrogenation and Optical Properties of Dielectric a-SiC:H Films Prepared by Tetraakis (Trimethylsilyl) Silane in Remoted H-2 Plasma", *J. Appl. Phys.*, vol. 77 (1995) 2061.
- 4) T.S. Jen, J.W. Pan, N.F. Shin, J.W. Hong and C.Y. Chang, "Electroluminescence Characteristics and Current-Conduction Mechanism of a-SiC:H p-i-n Thin Film Light Emitting Diode with Barrier Layer Inserted at p-I Interface", *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 41 (1994) 1761.
- 5) S.P. Lau, J.M. Marshall, T.E. Dyer, A.R. Hepburn and J.F. Davies, "a-SiC:H Thin Film Visible Light Emitting Diodes with Highly Conductive Wide Band Gap a-SiC:H as the carrier Injection Layers", *J. Non-Crys. Solid*, vol. 166 (1993) 813.
- 6) T.S. Jen, J.W. Pan, N.F. Shin, W.C. Tsay, J.W. Hong and C.Y. Chang, "Hydrigenated a-SiC:H p-i-n Thin Film Light Emitting Diodes with Barrier Layers Inserted at p-i Interfaces", *Jpn. J. Appl. Phys.*, part 1, vol. 33 (1994) 827.
- 7) T.S. Jen, J.W. Pan, N.F. Shin, W.C. Tsay, J.W. Hong and C.Y. Chang, "Electroluminescence of a-SiC:H p-i-n Thin Film Light Emitting Diodes with Quantum Well Injection Structures", *Solid State Electronics*, vol. 37 (1994) 1619.
- 8) F. Demichelis, G. Crovini, C.F. Pirri, E. Tresso, G. Amato, U. Coscia, G. Ambrosone and P. Rava, "Optimization of a-SiC Films Prepared by Ultrahigh-Vacuum Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition for Electroluminescent Devices", *Thin Solid Films*, vol. 241 (1994) 274.
- 9) T.S. Jen, J.W. Pan, N.F. Shin, W.C. Tsay, J.W. Hong and C.Y. Chang, "Hydrogenated Amorphous Silicon Carbide Thin Film Light Emitting Diode with Quantum Well Injection Structure", *Electronic Letters*, vol. 29 (1993) 707.
- 10) T.S. Jen, J.W. Pan, N.F. Shin, W.C. Tsay, J.W. Hong and C.Y. Chang, "Hydrogenated Amorphous Silicon Carbide Double Graded Gap P-i-n Thin Film Light Emitting Diodes", *IEEE Electron Device Letters*, vol. 14 (1993) 453.
- 11) J.W. Hong, N.F. Shin, T.S. Jen, S.L. Ning and C.Y. Chang, "Graded Gap a-SiC:H p-i-n Thin Film Light Emitting Diodes", *IEEE Electron Device Letters*, vol. 13 (1992) 375.

- 12) A.V. Zherzdev, V.G. Karpov, A.B. Pevtsov, A.G. Feoktistiv, "Electroluminescent Emitted by p-i-n Structures Made of a-SiC:H", Soviet Phys. Semiconductors-USSR, vol. 26 (1992) 421.
- 13) R. Rizzoli, C. Summonte, R. Galloni, M. Ruth, A. Desalvo, F. Zignani, P. Rava, F. Demichelis, C.F. Tresso, G. Crovini, F. Giorgis and A. Madan, "Brughtness Degradation Controlled by Current Induced Metastable Defect Creation in a-SiC:H Based Light Emitting Diodes", Materials Research Society, Spring Symposium, April (1995).
- 14) E.A. Schiff, M.J. Thomson, A. Madan and K. Tanaka, perface of "Amorphous Silicon Technology", (1993).
- 15) K. Gaughan, J.M. Viner and P.C. Taylor, "Electronic and Optical Properties of a-SiC:H Films Produced from Admixtures of Silane and Ditertiarybutylsilane", Materials Research Society, Spring Meeting, Symp. Proc. vol. 336 (1994) 553.
- 16) M. Shur, Text Book, "Phycsis of Semiconductor Devices", (Prentice-Hall International), chapter 5, pp. 514-516.
- 17) R.A. Street, Text Book, "Hydrogenated Amorphous Silicon", Cambridge Solid State Science Series, (Cambridge University Press, 1991), chapter 10, pp. 378-380.
- 18) T. Shimizu editor, Text Book, "Amorphous Silicon", (Ohm-Sha, Japan 1994), chapter 8.

6.2) รายชื่อนักวิทยาศาสตร์ที่ติดต่อขอ Reprints ของบทความเรื่อง ไดโอดเปล่งแสงแบบฟิล์มบาง ซึ่งเผยแพร่ในที่ประชุม 16th Int. Conf. Amorphous Semiconductors, วันที่ 4-8 กันยายน 2538 เมืองโกเบ ญี่ปุ่น

- 1) Prof. Jin Jang, Department of Physics, Kyung hee University, Dongdaemoon-ku, SEOUL, 130-701, Korea.
- 2) Prof. Naoto Tsuji, Department of Chemical Engineering, University of Tokyo, 7-3-1 Hongo Bunkyo-ku, Tokyo 113, Japan.
- 3) Prof. Akitomo Teshima, Senior Research Specialist, Electronics & Photonics Laboratory, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., Technical Headquarters, Advanced Technology Research Center, 8-1, Sachiura, 1-Chome, Kanazawa-ku, Yokohama, 236, Japan.
- 4) Prof. J.M. Marshall, Professor of Electronic Materials, Department of Materials Engineering, University College, Singleton Park, Swansea SA2 8PP, UK.
- 5) Prof. Elvira Fortunato, Instituto de Desenvolvimento de Novas Tecnologias, Campus da FCT/UNL Quinta da Torre, 2825 Monte da Caparica, Portugal.
- 6) Prof. M. Heintze, Institut fur Physikalische Elektronik, Universitat Stuttgart, Pfaffenwaldring 47, 70569 Stuttgart, F.R. Germany.
- 7) Prof. Masamichi Okamura, Senior Research Engineer, Visual Systems Research Group, Information Hardware Systems Laboratory, NTT Interdisciplinary Research Laboratories, Nippon Telegraph and Telephone Corporation, 3-9-11, Midori-Cho, Musashino, Tokyo 180, Japan.
- 8) Prof. Dr. Martin Stutzmann, Walter Schottky Institut, Technische Universitat Munchen, Am Coulombwall, D-85748 Garching, Germany.
- 9) Prof. Dirk Ruter, Materlalien d. Mikroelektronik, Martin Leuschel-Ring 16, 21073 Hamburg, Germany.
- 10) RN Dr Jan Kocka, DrSc., Institute of Physics, Department of Thin Films, Czech Academy of Sciences, Cukrovarnicka 10, 162 00 PRAHA 6, Czech Republic.
- 11) Prof. Zhu Meifang, Department of Physics, Graduate School Academia Sinica, Beijing 100039, P.O. Box 3908, China.
- 12) Prof. Dr. Mario Tucci, University of Rome "La Sapienza", Department of Electronic Engineering, Via Eudossiana 18 00184 Roma, Italy.
- 13) Prof. Aldo Ferrari, University of Rome "La Sapienza", Department of Electronic Engineering, Via Eudossiana 18 00184 Roma, Italy.

- 14) Priv.-Doz. Dr. Habil, Tilo P. Drusedau, Otto-von-Guericke-Universitat, Institut fur Experimentelle Physik, Abteilung Festkorperphysik, Postfach 41 20, D - 39016 Magdeburg, Germany.
- 15) Prof. Dr. C. Godet, Laboratoire de Physique des Interfaces et des Couches Minces, Ecole Polytechnique, 91128 Palaiseau - Cedex, France.
- 16) Prof. A. Filipe Macarico, Instituto De Desenvolvimento de Novas Tecnologias, Campus da FCT/UNL, Quinta da Torre, 2825 Monte da Caparica - Portugal.
- 17) Prof. Takashi Hatai, Central Research Laboratory, National Matsushita Electric Works, Ltd., 1048, Kadoma, Osaka 571, Japan.
- 18) Prof. Ashtosh Ganjoo, Electron Device Group, Department of Electrical and Electronic Engineering, Toyohashi University of Technology, 1-1, Hibarigaoka, Tempaku-cho, Toyohashi, 441, Japan.
- 19) Prof. Dr. Xinwei Zhao, Special Researcher, Basic Science Laboratory For Nano-Electronics Materials, Frontier Research Program Riken (The Institute of Physical and chemical Research), 2-1, Hirosawa, Wako-shi, Saitama 351-01, Japan.
- 20) Shigeo Nakajima Dr. Sc., General Manager, Planning and Development, Corporate advanced Technology Planning, Corporate Research and Development Group, Sharp Corporation, 1-9-2 Nakase, Mihama-ku, Chiba-shi, Chiba 261, Japan.
- 21) Prof. Denis Mencaraglla, Laboratoire de Genie Electrique de Paris, Ecole Superieure d'Electricite-Universites Paris VI et Paris XI, C.N.R.S., I.G.E.P.-Supelec-Plateau de Moulon, 91192 GIF-SUR-YVETTE Cedex - France.
- 22) Prof. Hiroaki Okamoto, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering Science, Osaka University, Toyonaka, Osaka 560, Japan.
- 23) Prof. Fabrizio Giorgis, Politecnico di Torino, Physics Department, C.SO Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino, Italy.
- 24) Dr. Yoshihiko Takeda, Supervisor, Research Dept. 1, Energy Conversion Laboratories, Corporate Research and Development Group, SHARP Corporation, 282-1 Hajikami, Shinjyo-cho, Kitakatsuragi-Gun, Nara 639-21, Japan.
- 25) Dr. Shinji Fujikake, Functional Device Laboratory, Fuji Electric Corporate Research and Development, Ltd., 2-2-1, Nagasaka, Yokosuka City 240-01, Japan.
- 26) Dr. Shuji Komuro, Faculty of Engineering, Toyo University, Kawagoe-Shi, Saitama 350, Japan.
- 27) Prof. Shogo Ura, Department of Electronic Engineering, Faculty of Engineering, Osaka University, 2-1 Yamada-Oka, Suita, Osaka 565, Japan.
- 28) Prof. Masatoshi Fujimura, Department of Electronic Engineering, Faculty of Engineering, Osaka University, 2-1 Yamada-Oka, Suita, Osaka 565, Japan.
- 29) Prof. Toshiaki Suhara, Department of Electronic Engineering, Faculty of Engineering, Osaka University, 2-1 Yamada-Oka, Suita, Osaka 565, Japan.
- 30) Prof. Hiroshi Nishihara, Department of Electronic Engineering, Faculty of Engineering, Osaka University, 2-1 Yamada-Oka, Suita, Osaka 565, Japan.
- 31) Prof. Reiji Hattori, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Osaka University, 2-1 Yamada-Oka, Suita, Osaka 565, Japan.
- 32) Prof. Hirotshu Kida, Faculty of Engineering, Kobe University, 1-1 Rokkodai, Nada-Ku, Kobe 657, Japan.
- 33) Dr. Wen Ma, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering Science, Osaka University, Toyonaka 560, Japan.
- 34) Mr. Masataka Kondo, Researcher, Electronic Materials Research Lab., KANEKA Corporation, 1-1 Hieitsuji, 2 chome, Otsu, Shiga 520-01, Japan.
- 35) Dr. Kenji Yamamoto, KANEKA Corporation, 2-80, 1-chome, Yoshida-cho, Hyogo-Ku, Kobe 652, Japan.
- 36) Dr. Hideo Yamagishi, KANEKA Corporation, 1-1 Hieitsuji, 2 chome, Otsu, Shiga 520-01, Japan.
- 37) Dr. Yoshihisa Tawada, General Manager, KANEKA Corporation, 1-1 Hieitsuji, 2 chome, Otsu, Shiga 520-01, Japan.
- 38) Prof. Shuichi Nonomura, Gifu University, Faculty of Engineering, 1-1, Yanaido, Gifu 501-11, Japan.

- 39) Dr. Yoshiteru Nitta, Manager, Technical Dept., Photovoltaic Power Generation Technology Research Association, Otowa MF Bldg., 1-22-12 Otowa Bunkyo-Ku, Tokyo 112, Japan.
- 40) Dr. Ravi Silva, Electronic Devices Group, Department of Engineering, University of Cambridge, Trumpington Street, Cambridge CB2 1PZ.
- 41) Dr. Masahiko Ando, Liquid Crystal Displays Section, Electronic Imaging Dept., Hitachi Ltd., 1-1, Omika-cho, 7-chome, Hitachi-shi, Ibaraki-ken 319-12, Japan.
- 42) Dr. Howard M. Branz, Senior Scientist, National Renewable Energy Laboratory, 1617 Cole Boulevard, Golden, Colorado 80401-3393, U.S.A.
- 43) Dr. Dirk Ruter, Materialien d. Mikroelektronik, Martin-Leuschel-Ring 16, 21073 Hamburg,
- 44) Dr. Toshikazu Shimada, Manager, Senior Advisory Staff, Hitachi, Ltd., Central Research Lab., 1-280, Higashi-Koigakubo, Kokubunji-shi, Tokyo 185, Japan.

6.3) รายชื่อนักวิทยาศาสตร์ที่ติดต่อขอ Reprints ของบทความเรื่อง ไดโอดเปล่งแสง-แบบฟิล์มบางซึ่งตีพิมพ์ใน Japanese Journal of Applied Physics 1993

- 1) Prof. Dr. S. Veprek, Institute für Chemie der, Informationsaufzeichnung, der Technischen Universität München, Lichtenbergstrabe 4, D-8046 Garching, F.R/G.
- 2) Dr. Sharon A. Martino, Solarex Corporation, 826 Newtown-Yardley Road, Newtown, PA 18940, U.S.A.
- 3) Dr. Th. Fischer, Physik-Department E16, der Technischen Universität, München, 8046 Garching, F.R.G. (Lehrstuhl Prof. Koch).
- 4) Dr. Kisholoy Goswami, FCI, Fiberchem, Inc., 1181 Grier Dr. #B, Las Vegas, NV 89119, U.S.A.
- 5) Dr. Andrew Chuang, Orchard Bank, Maxwell Road, Ukley, West Yorkshire, UK, S298RP.
- 6) Dr. A.M. Wrobel, Polish Academy of Sciences, Center of Molecular and Macromolecular Studies, 90-363 Lodz, Sienkiewicza 112, Poland.

6.4) รายชื่อนักวิทยาศาสตร์ที่ติดต่อขอ Reprints ของบทความเรื่อง ไดโอดเปล่งแสง-แบบฟิล์มบาง ซึ่งเผยแพร่ในที่ประชุม Materials Research Society (MRS) เมษายน 2537 เมืองซานฟรานซิสโก สหรัฐอเมริกา

- 1) Dr. John P. de Neufville, President, Voltaix. Inc., P.O. Box 5378, 197 Meister Avenue, North Branch, NJ 08876, U.S.A.
- 2) Dr. Arup Bhattacharyya, IBM Microelectronics, 1000 River Road, Esses Junction, Vermont 05452, U.S.A.
- 3) Dr. S. Nishida, Display Device Research Laboratory, Functional Devices Research Laboratories, NEC Corporation, 4-1-1 Miyazaki, Miyamae-Ku, Kawasaki, Kanagawa 216, Japan.
- 4) Dr. Mohamed Boumerzoug, Center For Electrophotonic, Materials and Devices, Eng. Phys. Dept., McMaster University, Hamilton, Ontario, Canada, L8S 4L7.
- 5) Prof. Zhu Meifang, Department of Physics, Graduate School Academia Sinica, Beijing 100039, P.O. Box 3908, China.
- 6) Dr. Ziegler Yvan, Institut de Microtechnique, Universite de Neuchatel, Rue A,-L, Breguet 2, CH-2000 Neuchatel, Switzerland.
- 7) Prof. Felix Edelman, Department of Materials Engineering, Department of materials Engineering, TECHNION, Israel Institute of Technology, Technion City, 32000 Haifa, Israel.
- 8) Dr. Reinhard Schwarz, Techn. Universität München, Physik Department E16, 8046 Garching, F.R.G.
- 9) Dr. Si Yuan (Frank) Yang, Research Assistant, University of Illinois at U.C., Coordinated Science Lab/UIUC, 1101 W Springfield, Urbana, IL 61801, U.S.A.

- 10) Dr. Shusheng He, Department of Physics, North Carolina State University, P.O. Box 8202, North Carolina State University, Raleigh, NC 27695-8202, U.S.A.
- 11) Dr. Peter N. Morgan, Department of Engineering, University of Cambridge, Trumpington Street, Cambridge CB2 1PZ, Great Britain.
- 12) Dr. David L. Staebler, Materials Science Branch, National Renewable Energy Laboratory, 1617 Cole Boulevard, Golden, Colorado 80401-3393, U.S.A.
- 13) M. Tran, The University of Chicago, 5640 S. Ellis, Chicago IL 60637, U.S.A.
- 14) G. Tas, P.O. Box 5031, 2600GA, Netherlands.
- 15) Dr. Joao Conde, Department of Physics, I.S.T., Av Rovisco Pais, 1096 Lisboa, Portugal.
- 16) Dr. Rob Kwosnick, KWB 320, GE-Corporate Research and Delepment, P.O. Box 8, NY 12301, U.S.A.
- 17) Dr. Serag M. Gadelrab, E&CE, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, NZL 3G1, Canada.
- 18) Dr. Lan French, Philips Research Lab, Redhill, Surrey RH1 5HA, England.
- 19) Dr. V. Chu, INESC, Rua Alves Pedol, 9 1000 Lisboa, Portugal.
- 20) Dr. Pawan K. Bhat, Materials Research Group, Inc., 12441 West 49th Avenue, Wheat Ridge, Colorado 80033-1927, U.S.A.
- 21) Dr. Yoon Soon Fatt, NanYang Technological University, School of Electrical and Electronic Engineering, NanYang Avenue, Singapore 2263, Singapore.
- 22) Dr. Virginia Chu, INESC, Rua Alves Redol, 9-3, 1000 Lisbon, Portugal.

6.5) รายชื่อนักวิทยาศาสตร์ที่ติดต่อขอ Reprints ของบทความเรื่อง ไดโอดเปล่งแสง-แบบฟิล์มบาง ซึ่งเผยแพร่ในที่ประชุม Materials Research Society (MRS) เมษายน 2538 เมืองซานฟรานซิสโก สหรัฐอเมริกา

- 1) Dr. Rita Rizzoli, CNR 1st. Lamel, Via P. Gobetti, 101, 40129 Bologna, Italy.
- 2) Dr. Jiann G. Yu, R&D Engineer, Materials Technology R&D, Optoelectronics Division, Hewlett-Packard Company, 370 W Trimble Road, MS 91ML, San Jose, California 95131, U.S.A.
- 3) Dr. Anne Chiang, Manager, Poly Si Materials and Technology, Electronics and Imaging Laboratory, Xerox Palo Alto Research Center, 3333 Coyote Hill Road, Palo Alto, California 94304, U.S.A.

6.6) รายชื่อนักวิทยาศาสตร์ที่ติดต่อขอ Reprints ของบทความเรื่อง ไดโอดเปล่งแสง-แบบฟิล์มบาง ซึ่งเผยแพร่ในวารสาร EDN ASIA Electronics, Hong Kong 1994

- 1) Dr. J.R. Deng, Optoelectronics & Systems Lab., ITRI, 195 8 Chung Hsing Road, Sec. 4, Chutung Hsin Chu 1027, Taiwan.
- 2) Dr. Lye Poh Huat, Materials Engineer, Hewlett Packard M, Bayan Lepas FTZ, Penang, Malasia.
- 3) Dr. Calvin Chen, Hewlett Packard Singapore, Sales PTE Ltd., 150 Beach Road 29 00, Gateway West, Singapore.
- 4) Dr. J.S. Jeon, Project Manager, CNF Engineering Co.Ltd, CPO Box 2587, Seoul, South Korea.
- 5) Dr. H. Shrividhya, Sys Sw Analyst, Suite 518, 5th Floor, 17/A Flank Road, Bombay, India.
- 6) Mrs. Francis Ann, SNR Project Engineer, Singapore Electronic & Engineer, 24 Ang. Mo Kio, St 65, Singapore 2056, Singapore.
- 7) Prof. V.P. Haran, Hrd Facilitator, 518 Veena Vihar, Adj. Shnmukh Hall, Bombay, India.
- 8) Mr. Myung Jin Kim, 455-6 Masan-Ri, Jin Wi-My, Pyung Tuek-Gn, Kyung Gi-Do, 451-860, Korea.

7) การพัฒนาโปรแกรมซอฟต์แวร์

ในการดำเนินการวิจัยเรื่องนี้ ได้มีการพัฒนาโปรแกรมซอฟต์แวร์หลายโปรแกรม เพื่อใช้ในการคำนวณและวัดคุณสมบัติต่างๆของสิ่งประดิษฐ์ด้วยคอมพิวเตอร์อย่างอัตโนมัติ ในที่นี้จะขอยกตัวอย่างแบบโปรแกรมการวัดสเปกตรัมโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (PL) และอิเล็กโตรลูมิเนสเซนซ์ (EL) อย่างอัตโนมัติ

(โปรแกรมการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและความสว่างของ TFLED ดูได้ในรายงานการวิจัยเรื่องนี้ระยะที่ 1)



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```

1000 *****
1010 *
1020 *          PHOTOLUMINESCENCE SPECTROSCOPY *
1030 *
1040 *    by 5101 Analog Lock-in Amp. *
1050 *    Jobin Yvon HR320 & DataLink      (RS 232) *
1060 *    ADVANTEST TR6847 Digital Multimeter (GPIB 1) *
1070 *****
1080 ' Version   : 3.0  January, 1995.
1085           update for maximum peak display
1090 ' Author    : Suwat Sopotpan
1100
1105 ' SERIAL PORT : DataLink -> #2 (1200,n,8,1)
1110 ' GPIB       : AVT   -> @1
1120 '----- MAIN PROGRAM -----
1122 CONSOLE 0,25,0,1
1123 CLS 3
1125 AVT = 1 : DL = 2 ' GPIB and RS232 address
1130 GOSUB *ENTRANCE ' Initialize the Data Link
1135 GOSUB *DATASET
1140 GOSUB *DEVICESET
1145 *MAIN
1150 CONSOLE 0,25,0,1 : SCREEN 3,0,0,1
1155 CLS 1
1160 GOSUB *TIMEDISPLAY : GOSUB *MAINSR
1170 ON KEY GOSUB *MEASURE,*PARA,*LFILE,*SFILE,
*EPSON,*RELMOVE,*RELMOVER,
*ABSMOVE,*RESCALE,*TERMINATE
1180
1190 FOR I = 1 TO 10
1192     KEY I, ""
1195     KEY(I) ON
1197 NEXT I
1200 *HERE
1210 GOSUB *TIMEDISPLAY
1215 GOTO *HERE
1220 *DUMMY
1230 RETURN
1240 *TERMINATE
1245 GOSUB *STOPMOTOR
1250 LOCATE 10,10 : INPUT "Are you sure to exit this program ";A$
<> "Y" THEN RETURN *MAIN : IF A$
1255 IRESET REN
1260 SCREEN 3,0,0,1
1270 VIEW (1,1)-(638,398),0,0
1280 CLS 3 : COLOR 7
1285 END
1290 '----- DATA SET -----
1300 *DATASET
1310
1315 DIM P(5001),T(5001)
1320
1330 WMIN = 400
1340 WMAX = 900
1350 WVAL = 1
1360 ITOT = 0
1370
1380 DV$ = "B:" ' DATA FILES DIRECTORY
1390
1400 DFEXT$ = ".dat" ' Data file extension
1410 SAVEFLAG = 0 ' Flag for saving routine
1420 SCALEFLAG = 0 ' 0 = ordinary, 1 = rescale
1430 MARK = 250 ' marking triangle position
1440 MFLAG = 0 ' moving flag
1450 PEAK = 0 ' maximum peak
1460 LMAX = 2200 ' maximum lambda of the grating
1470 LMIN = 200 ' minimum lambda
1480 LVAL = .005 ' most resolution
1490 SMAX = 1 : SMIN = -.25

```

```

1495 SCALEMAX = SMAX : SCALEMIN = SMIN
1500 RETURN
10000 '----- AUTO MEASUREMENT -----
10010 *MEASURE
10015 GOSUB *STOPMOTOR : GOSUB *INITSET : GOSUB *DEVICESET
10017 SMIN = -.25 : SMAX = 1
10020 SAVEFLAG = 0:LFLAG = 0:SCALEFLAG = 0:GOSUB *TIMEDISPLAY : GOSUB *MAINSR
10025 C$ = STRING$(60," ")
10030 LOCATE 21,0 : PRINT C$;
10035 LOCATE 21,1 : PRINT C$;
10040 LOCATE 21,0 : PRINT "Move to start position.....";
10045 FOR I = 1 TO 9 : KEY(I) OFF : NEXT I
10060 '
10070 MREADY = 0
10080 READACQ = 0
10097 P1 = T(1) : GOSUB *MOVETO
10110 '
10140 LOCATE 21,0 : PRINT "Measuring.....";
10150 FOR I=1 TO ITOT
10160 P1 = T(I) : GOSUB *MOVETO
10170 GOSUB *RDATA
10175 P(I) = VOLT : LOCATE 71,17 : PRINT VOLT
10180 GOSUB *PDATA
10190 NEXT I
10200 MMIN = T(1) : MMAX = T(ITOT) : MVAL = WVAL : MTOT = ITOT
10210 SUM = 0
10220 FOR I = 1 TO ITOT
10230 IF P(I) > PMAX THEN PMAX = P(I)
10240 IF P(I) < PMIN THEN PMIN = P(I)
10250 SUM = SUM + LEN(STR$(P(I)))+ 3
10260 NEXT I
10290 FOR I = 1 TO 10
10300 BEEP
10310 NEXT I
10320 FOR I = 1 TO 9 : KEY(I) ON : NEXT I
10330 LOCATE 21,0 : PRINT C$;
10335 LFLAG = 1 : MREADY = 1
10340 RETURN
10350 '----- INITIAL DATA SET -----
10360 *INITSET
10490 ITOT=ABS(INT((WMAX-WMIN)/WVAL))+1
10495 IF ITOT > 5001 THEN ITOT = 5001
10500 FOR I=1 TO ITOT
10510 T(I)=WMIN+WVAL*(I-1)
10520 NEXT I
10600 PMIN = 0
10660 PMAX = 0
10670 WMAX = T(ITOT)
10680 RETURN
10690 '----- DEVICE INITIAL SET -----
10700 *DEVICESET
10710 ISET IFC :ISET REN :CMD DELIM=0
10720 'POLL AVT,S
10730 PRINT @AVT;"F1" ' DC voltage measurement
10740 PRINT @AVT;"R0" ' Auto range
10750 PRINT @AVT;"NL0" ' NULL Off
10760 PRINT @AVT;"M0" ' Free run
10770 PRINT @AVT;"CO0" ' Comparator Off
10780 PRINT @AVT;"PR2" ' Sampling rate --> Medium
10790 PRINT @AVT;"PH0" ' Header Off
10800 RETURN
10960 '-----
10970 *POSITION
10980 '
10990 GOSUB *ASKPOS ' return wavelength in p [nm]
11000 COLOR 6
11005 VIEW (560,210)-(630,240),0.7 ' Actual wavelength
11010 LOCATE 71,13 : PRINT USING "####.##" ; P
11020 LOCATE 71,14 : PRINT USING "##.####" ; 1240/P

```

```

11060 LOCATE 71,15 : COLOR SLINE : PRINT "Actual"
11070 RETURN
11080 '
11090 '-----
11100 *MARKDISPLAY
11110 '
11120 VIEW (1,34)-(555,49),1
11125 *MARK1
11130 LINE (49+MARK,14)-(44+MARK, 1),6
11140 LINE (49+MARK,14)-(54+MARK, 1),6
11150 LINE (44+MARK, 1)-(54+MARK, 1),6
11160 COLOR 6
11170 LAMBDA = WMIN + ((( WMAX - WMIN )/ 50)*(MARK/10))
11175 VIEW (560,130)-(630,160),0,7 ' Mark wavelength
11180 LOCATE 71,8 : PRINT USING "####.##" ; LAMBDA
11190 LOCATE 71,9 : PRINT USING "###.####" ; 1240/LAMBDA
11195 LOCATE 71,10 : COLOR SLINE : PRINT "Mark"
11200 RETURN
11210 '-----
11220 *PLOTSCR
11225 IF MREADY THEN *PLOTSCR1
11230 IF (MTOT = 0) OR (SAVEFLAG = 0) THEN RETURN
11235 LOCATE 21,0 : PRINT LEFT$(C$,60);
11240 LOCATE 21,1 : PRINT "Sensitivity : ";SENSE*1000;" mV"
11245 *PLOTSCR1 : SUM = 0
11250 FOR I = 1 TO MTOT
11255 IF SCALEFLAG = 1 THEN GOSUB *SDATA ELSE GOSUB *PDATA
11260 SUM = SUM + LEN(STR$(P(I))) + 3
11270 NEXT I
11280 RETURN
11290 '-----
11300 *EPSON
11310 VIEW (1,1)-(638,398),0,7
11320 VIEW (10,365)-(620,385),0,7
11330 LOCATE 0,23 : PRINT STRING$(80, " ");
11340 SDRL$ = "Semiconductor Device Research Laboratory (SDRL) Chulalongkorn University"
11350 LOCATE 40-(LEN(SDRL$)/2),23 : PRINT SDRL$;
11360 LOCATE 71,13: PRINT " ";
11370 LOCATE 71,14: PRINT " ";
11380 LOCATE 71,15: PRINT " "; ' clear the actual window
11390 VIEW (1,34)-(555,49) : GOSUB *MARK1
11400 FOR K = 1 TO 10 : KEY(K) OFF : NEXT K
11410 REPORT = 0
11420 IF SCALEFLAG = 1 THEN GOSUB *RESCALE ELSE GOSUB *MONSCR
11430 LPRINT CHR$(27);"!": COPY 3 : LPRINT CHR$(27);CHR$(34)
11440 FOR K = 1 TO 10 : KEY(K) ON : NEXT K
11450 EPSON = 1 : GOSUB *DESCRIB : EPSON = 0
11460 RETURN *MAIN
11470 '----- DATA INPUT FROM ACQ -----
11480 *RDATA
11485 INPUT @AVT;IN$
11490 VOLT = VAL(IN$)
11500 IF IN$ = "-8.88888E+8" THEN *RDATA
11510 RETURN
11520 '----- plot a point of data -----
11530 *PDATA
11540 VIEW (50,50)-(550,300)
11550 X% = ((T(I)-WMIN)*500)/(WMAX-WMIN)
11560 Y% = 200 - ( P(I) * 200 )
11570 GOSUB *MAXDISPLAY
11660 IF I = 1 THEN PSET(X%,Y%),6 ELSE *PDATA1
11665 RETURN
11670 *PDATA1
11675 X1% = ((T(I-1)-WMIN)*500)/(WMAX-WMIN)
11677 Y1% = 200 - ( P(I-1) * 200 ) : LINE (X%,Y%)-(X1%,Y1%),6
11679 RETURN
11680 '----- TIME DELAY -----
11690 *TDELAY
11700 TD$ = TIMES

```



```

11710 WHILE ((VAL(RIGHT$(TIMES$,2))+(60*VAL(MID$(TIMES$,4,2)))) - (VAL
(RIGHT$(TD$ ,2))+(60*VAL(MID$(TD$ ,4,2)))) < TDEL
11720
11730 WEND
11740 RETURN
11750 '-----
11760 *TIMEDISPLAY
11770 FOR K = 6 TO 8 : KEY(K) OFF : NEXT K
11775 COLOR 3
11780 LOCATE 70,0
11790 'PRINT DATES;
11800 LOCATE 70,1
11810 'PRINT TIMES;
11820 FOR K = 6 TO 8 : KEY(K) ON : NEXT K
11830 IF SAVEFLAG = 0 THEN KEY(5) OFF ELSE KEY(5) ON
11840 '
11850 RETURN
11910 '
11920 '----- DEVICE RESET -----
11930 *DRESET
11940 '
11950 IRESET REN      ' RESET THE GPIB
11955 '
11960 RETURN
11970 '
11980 '----- DATA DISPLY -----
11990 *WDATA ' not used
12000 COLOR 7
12010 IF I MOD 10 = 1 THEN K=K+10 :CONSOLE 11,10,0,1 :CLS 1
12020 LOCATE 15,20+(I-K) :PRINT T(I);
12030 LOCATE 31,20+(I-K) :PRINT P(I);
12040 LOCATE 46,20+(I-K) :PRINT PHAI;
12050 RETURN
12060 '
12070 '----- ERROR MANAGEMENT -----
12080 *ERRMNG ' not used
12090 FOR N=1 TO 10 :BEEP:NEXT N
12100 PRINT@ 2;"OSS0 SRQ0":SRQ OFF:IRESET REN
12110 IF SP AND 1 THEN PRINT "OVER FLOW"
12120 IF SP AND 8 THEN PRINT "ERROR"
12130 IF SP AND 32 THEN PRINT "UNLOCK"
12140 END
12150 '
12160 '
12170 '
13000 '-----
13010 *MAINSCR
13015 GOSUB *SCREEN1 : VIEW (0,0)-(639,399) : CLS 1
13020 RESTORE *VMAIN
13030 READ NDATA
13040 FOR V = 1 TO NDATA
13050   READ X1,Y1,X2,Y2,AX,BX
13055   IF (SAVEFLAG = 0) AND (V = 6) THEN AX = 1 'check for <F5>
13060   VIEW (X1,Y1) - (X2,Y2),AX,BX
13070 NEXT V
13080 RESTORE *DMAIN
13090 READ NDATA
13100 FOR V = 1 TO NDATA
13110   READ FARB,X1,Y1,AS
13115   IF (SAVEFLAG = 0) AND (V = 6) THEN FARB = 1 'check for <F5>
13120   LOCATE X1,Y1 : COLOR(FARB) : PRINT AS;
13130 NEXT V
13135 REPORT = 1 : GOSUB *MONSCR
13137 RETURN
13140 *VMAIN
13150 DATA 11
13160 DATA 1 ,1 ,638,398,1,7 ' background
13170 DATA 10 ,365,60 ,385,0,5 ' F1
13180 DATA 70 ,365,120,385,0,5 ' F2

```

```

13190 DATA 130,365,180,385,0,5 ' F3
13200 DATA 190,365,240,385,0,5 ' F4
13210 DATA 250,365,300,385,0,5 ' F5
13220 DATA 330,365,380,385,0,5 ' F6
13230 DATA 390,365,440,385,0,5 ' F7
13240 DATA 450,365,500,385,0,5 ' F8
13250 DATA 510,365,560,385,0,5 ' F9
13260 DATA 570,365,620,385,0,5 ' F10
13270 DATA 500, 2 ,630, 30,0,5 ' date & time
13300 *DMAIN
13310 DATA 12
13320 DATA 4,1 ,0 , "Photoluminescence : "
13330 DATA 6,2 ,23, "Scan"
13340 DATA 6,10,23, "Edit"
13350 DATA 6,17,23, "Load"
13360 DATA 6,25,23, "Save"
13370 DATA 6,32,23, "Print"
13380 DATA 6,42,23, " < - "
13390 DATA 6,50,23, " -> "
13400 DATA 6,57,23, "Move"
13410 DATA 6,65,23, "Scale"
13420 DATA 6,72,23, "Quit"
13430 DATA 3,1 ,1 , "PLA Version 3.0"
13440 DATA 6,63,0 , "Date : "
13450 DATA 6,63,1 , "Time : "
13460 '
13470 '
13500 ----- Monitor screen -----
13510 *MONSCR
13520 SLINE = 7
13525 IF SCALEFLAG = 1 THEN *MONSCR1
13530 SCALEMIN = -.25 : SCALEMAX = 1 ' ordinary monitor
13535 *MONSCR1
13540 COLOR@ (0,3 )-(79 ,22 ),1
13545 VIEW (50 ,50 )-(550,300),0,1
13550 LINE ( 0 , 0 )-(500, 0 ),SLINE
13560 LINE (500, 0 )-(500,250),SLINE
13570 LINE (500,250)-( 0 ,250),SLINE
13580 LINE ( 0 ,250)-( 0 , 0 ),SLINE
13590 FOR Y = 50 TO 200 STEP 50
13600   FOR X = 0 TO 500 STEP 10
13610     PSET(X,Y),1
13620   NEXT X
13630 NEXT Y
13640 '
13650 FOR X = 50 TO 450 STEP 50
13660   FOR Y = 0 TO 250 STEP 10
13670     PSET(X,Y),1
13680   NEXT Y
13690 NEXT X
13700 XX$ = "Wavelength [nm]" : X = 40-(LEN(XX$)/2)
13710 COLOR SLINE : LOCATE X,19 : PRINT XX$
13715 XX$ = "Photon energy [eV]": X = 40-(LEN(XX$)/2)
13720 COLOR SLINE : LOCATE X,20 : PRINT XX$
13730 '
13740 '
13750 COLOR SLINE : LOCATE 1,3 : PRINT USING "###.###";SCALEMAX
13755   LOCATE 1,18: PRINT USING "###.###";SCALEMIN
13760 IF REPORT = 0 THEN *MONEXIT
13770 GOSUB *POSITION
13780 GOSUB *MARKDISPLAY
13790 *MONEXIT
13795 GOSUB *MAXWINDOW
13800 GOSUB *XAXISCAL
13810 IF (LFLAG = 1) OR (SCALEFLAG = 1) THEN GOSUB *PLOTSCL
13820 RETURN
13830 -----
13840 *SCREEN1
13850 SCREEN 3,0,0,1

```

```

13860 RETURN
13870 '-----
13880 *SCREEN2
13890 SCREEN 3,0,1,17
13900 RETURN
14000 '----- Parameter editing -----
14010 *PARA
14015 GOSUB *TIMEDISPLAY : GOSUB *STOPMOTOR
14020 SCALEFLAG = 0 : PFLAG = 0
14030 *PARA1
14040 VIEW (60,150)-(240,250),2,7
14050 COLOR@ (10,12)-(27,14),2
14060 COLOR 6
14070 LOCATE 10,10 : PRINT "Scanning parameter"
14080 LOCATE 10,12 : PRINT "From : ";WMIN
14090 LOCATE 10,13 : PRINT "To : ";WMAX
14100 LOCATE 10,14 : PRINT "Step : ";WVAL
14110 IF PFLAG = 1 THEN *PARA2
14120 LOCATE 18,12 : INPUT "",WS
14130     IF WS < "" THEN WMIN = VAL(WS)
14135     IF WMIN < LMIN THEN WMIN = LMIN
14140 LOCATE 18,13 : INPUT "",WS
14150     IF WS < "" THEN WMAX = VAL(WS)
14155     IF WMAX > LMAX THEN WMAX = LMAX
14160 LOCATE 18,14 : INPUT "",WS
14170     IF WS < "" THEN WVAL = VAL(WS)
14175     IF WVAL < LVAL THEN WVAL = LVAL
14180 IF WMIN > WMAX THEN SWAP WMAX,WMIN
14190 IF WMIN < LMIN THEN WMIN = LMIN
14200 IF WMAX > LMAX THEN WMAX = LMAX
14210 IF WVAL < LVAL THEN WVAL = LVAL
14215 IF WMIN = WMAX THEN GOSUB *DEFAULTW
14220 *PARA2
14225 PFLAG = PFLAG + 1
14230 IF PFLAG < 2 THEN *PARA1
14240 TDEL = 2 : GOSUB *TDELAY
14250 GOSUB *MAINSR      : ITOT = 0
14260 RETURN
14300 '----- Set default value for scanning wavelength -----
14310 *DEFAULTW
14320 WMAX = 900
14330 WMIN = 400
14340 '
14350 RETURN
14400 '-----
14410 *TRACESCR
14420 ZERO% = (250/(SCALEMAX-SCALEMIN))*SCALEMAX)
14430 VIEW (50,50)-(550,300)
14440 X% = ((P - WMIN)*500)/(WMAX-WMIN)
14450 GOSUB *RDATA
14460 Y = VOLT : LOCATE 71,17 : PRINT Y
14470 Y% = ZERO% - ((Y / SCALEMAX) * ZERO%)
14480 IF LAMBDA > P THEN PIX = 2 ELSE PIX = 4
14490 PSET (X%,Y%),PIX
14500 RETURN
15000 '----- Data file loading -----
15010 *LFILE
15020 GOSUB *TIMEDISPLAY
15030 GOSUB *STOPMOTOR : GOSUB *SCREEN2 : VIEW (0,0)-(639,399) : CLS 1
15035 LOCATE 5 ,20 : PRINT "**** Load file ****"
15040 LOCATE 5 ,21 : PRINT "Path name : "; DV$
15050 LOCATE 17,21 : INPUT "", A$
15060 IF A$ < "" THEN DV$ = A$
15065 DIR$ = DV$+"*.dat" : CONSOLE 0,19,0,1
15067 LOCATE 0,0 : COLOR 5 : FILES DIR$ : COLOR 6 : CONSOLE 0,24,0,1
15070 LOCATE 5,22 : INPUT "File name : ", FS
15080 IF FS = "" THEN RETURN *MAIN
15090 OPEN DV$+FS+DFEXT$ FOR INPUT AS #1
15095 PMAX = 0 : PMIN = 0

```

```

15100 INPUT #1,C$
15105 INPUT #1,SENSE
15110 INPUT #1,MMIN
15120 INPUT #1,MMAX
15130 INPUT #1,MVAL
15140 INPUT #1,MTOT
15150 PMAX = 0 : PMIN = 0
15160 FOR I = 1 TO MTOT
15170   INPUT #1,P(I)
15175   T(I) = MMIN+MVAL*(I-1)
15180   IF P(I) > PMAX THEN PMAX = P(I)
15190   IF P(I) < PMIN THEN PMIN = P(I)
15200 NEXT I
15210 CLOSE #1
15220 GOSUB *SCREEN1
15230 LFLAG = 1 : SCALEFLAG = 0 : SAVEFLAG = 1 : MREADY = 0
15290 RETURN *MAIN
15500 '----- Calculate nearest value for interval 0.5
15510 *NEARVALUE
15520 IF VALUE = 0 THEN RETURN
15530 FORN% = VALUE
15540 HINT = VALUE - FORN%
15550 IF (VALUE < 0) AND (HINT < 0) THEN VALUE = FORN% - .5
15560 IF (VALUE < 0) AND (HINT >=0) THEN VALUE = FORN%
15570 IF (VALUE > 0) AND (HINT >=0) THEN VALUE = FORN% + .5
15580 IF (VALUE > 0) AND (HINT < 0) THEN VALUE = FORN%
15590 '
15600 RETURN
15700 '----- plot a point of data (Scaling)-----
15710 *SDATA
15720 VIEW (50,50)-(550,300)
15730 X% = ((T(I)-WMIN)*500)/(WMAX-WMIN)
15740 Y% = ZERO% - ( (P(I)/SMAX) * ZERO% )
15745 GOSUB *MAXDISPLAY
15750 IF I = 1 THEN PSET(X%,Y%),5 ELSE *SDATA1
15760 RETURN
15770 *SDATA1
15780 X1% = ((T(I-1)-WMIN)*500)/(WMAX-WMIN)
15790 Y1% = ZERO% - ( (P(I-1)/SMAX) * ZERO% )
15795 LINE (X%,Y%)-(X1%,Y1%),5
15800 RETURN
16000 '----- Data file saving -----
16010 *SFILE
16020 GOSUB *TIMEDISPLAY
16030 GOTO *SFILE2
16040 *SFILE1
16050 LOCATE 5,22 : BEEP : INPUT "File already exist, overwrite ";OV$
16060 IF (OV$ = "Y") OR (OV$ = "y") THEN *SFILE3
16070 CLOSE #1
16080 '
16090 *SFILE2
16100 GOSUB *STOPMOTOR
16110 GOSUB *SCREEN2 : VIEW(0,0)-(639,399) : CLS 3
16120 LOCATE 5,19 : PRINT "++++ Save File ++++"
16130 LOCATE 5,20 : PRINT "Path name : "; DV$
16140 LOCATE 17,20 : INPUT "", A$
16150 IF A$ <> "" THEN DV$ = A$
16160 DIR$ = DV$ + "*.dat" : CONSOLE 0,19,0,1
16170 LOCATE 0,0 : COLOR 5 : FILES DIR$ : COLOR 6 : CONSOLE 0,24,0,1
16180 PRINT "Space available : "; DSKF(DV$); " byte",
16185 PRINT "Approximate data : "; SUM + 90 ; " byte"
16190 LOCATE 5,21 : INPUT "File name : ", FS
16200 IF FS = "" THEN RETURN *MAIN
16210 OPEN DV$ + FS + DFEXT$ AS #1
16220 IF LOF(1) > 0 THEN *SFILE1
16230 '
16240 *SFILE3
16250 LOCATE 5,22 : PRINT "
16260 LOCATE 5,22 : INPUT "Comment : ",CS$ : IF CS$ = "" THEN *SFILE3

```

```

16270 GOSUB *GETSENSE
16280 '
16290 *SFILE4
16300 PRINT #1,C$
16310 PRINT #1,SENSE
16320 PRINT #1,MMIN
16330 PRINT #1,MMAX
16340 PRINT #1,MVAL
16350 PRINT #1,MTOT
16360 FOR I = 1 TO MTOT
16370     PRINT #1,P(I)
16380 NEXT I
16390 CLOSE #1
16400 SAVEFLAG = 1
16410 MREADY = 0
16420 GOSUB *SCREEN1
16430 RETURN *MAIN
16500 '----- INput the usage sensitivity -----
16510 *GETSENSE
16520 LOCATE 0,0
16530 FOR I = 1 TO 18 : PRINT STRING$(80," "); : NEXT I
16540 LOCATE 0,0
16550 SEL = 0
16560 PRINT
16570 PRINT "Please select the sensitivity"
16580 PRINT
16590 PRINT
16600 PRINT "1 : 1 microvolt  7 : 1 millivolt"
16610 PRINT "2 : 2.5 microvolt  8 : 2.5 millivolt"
16620 PRINT "3 : 10 microvolt  9 : 10 millivolt"
16630 PRINT "4 : 25 microvolt  10 : 25 millivolt"
16640 PRINT "5 : 100 microvolt  11 : 100 millivolt"
16650 PRINT "6 : 250 microvolt  12 : 250 millivolt"
16660 PRINT : COLOR@(0,4)-(0,9),5 : COLOR@(19,4)-(20,9),5
16670 *GETS1
16680 LOCATE 5,12 : INPUT "Select : ",SEL
16690 IF (SEL < 1) OR (SEL > 12) THEN *GETS1
16700 RESTORE *GETSDATA
16710 FOR I = 1 TO SEL
16720 READ SENSE
16730 NEXT I
16740 LOCATE 5,23 : PRINT "Sensitivity : ";SENSE*1000 ; " mV"
16750 RETURN
16800 *GETSDATA
16810 DATA 1.0e-06
16820 DATA 2.5e-06
16830 DATA 1.0e-05
16840 DATA 2.5e-05
16850 DATA 1.0e-04
16860 DATA 2.5e-04
16870 DATA 1.0e-03
16880 DATA 2.5e-03
16890 DATA 1.0e-02
16900 DATA 2.5e-02
16910 DATA 1.0e-01
16920 DATA 2.5e-01
17000 '----- Absolute movment -----
17010 *ABSMOVE
17020 '
17030 GOSUB *STOPMOTOR
17040 P1 = LAMBDA
17050 READACQ = 1
17060 GOSUB *MOVETO
17070 READACQ = 0
17080 '
17090 '
17100 BEEP
17110 '
17999 RETURN

```

```

18000 '----- Relative movment -----
18010 *RELMOVEL
18040 MARK = MARK - 5
18050 IF ((MARK + 50)<50) THEN MARK = 0
18060 GOSUB *MARKDISPLAY
18090 RETURN
18500 '-----
18510 *RELMOVER
18520 MARK = MARK + 5
18530 IF ((MARK + 50)>550) THEN MARK = 500
18540 GOSUB *MARKDISPLAY
18590 RETURN
19000 '----- Lambda <-> eV toggle -----
19010 *XTOGGLE
19015 GOSUB *TIMEDISPLAY
19020 IF XAXIS > 0 THEN XAXIS = 0 ELSE XAXIS = 1
19030 GOSUB *SCALECAL
19040 REPORT = 1
19050 GOSUB *MONSCR
19060 GOSUB *PLOTSCR
19070 '
19090 RETURN
19200 '----- Re-scale routine -----
19210 *RESCALE
19220 IF MTOT = 0 THEN RETURN
19230 SCALEFLAG = 1
19240 VALUE = PMAX : GOSUB *NEARVALUE : SMAX = VALUE
19250 VALUE = PMIN : GOSUB *NEARVALUE : SMIN = VALUE
19270 IF SMAX = 0 THEN SMAX = .5
19280 WMIN = MMIN
19290 WMAX = MMAX
19300 WVAL = MVAL
19310 ITOT = MTOT
19320 '
19330 GOSUB *STOPMOTOR
19340 ZERO% = (250/(SMAX-SMIN)*SMAX)
19350 SCALEMIN = SMIN : SCALEMAX = SMAX
19360 GOSUB *MONSCR
19370 '
19380 '
19390 '
19400 '
19410 '
19420 '
19430 '
19440 RETURN
19500 '----- Print the description -----
19510 *DESCRIB
19520 IF EPSON = 0 THEN RETURN
19530 LPRINT
19540 LPRINT "Photoluminescence Spectroscopy"
19550 LPRINT "PLA Version 3.0"
19560 LPRINT
19570 LPRINT "File : ";F$+DFEXTS
19580 LPRINT "      ";CS
19590 LPRINT "Scan from : ";MMIN," [nm]"
19600 LPRINT "      until : ";MMAX," [nm]"
19610 LPRINT "      step : ";MVAL," [nm]"
19620 LPRINT
19630 LPRINT "Sensitivity : ";SENSE*1000;" mV"
19640 LPRINT
19650 LPRINT "Maximum peak : ";PEAKPOS;" [nm]",(1240/PEAKPOS);" [eV]"
19660 LPRINT
19670 LPRINT CHR$(12) ' form feed
19680 RETURN
19690 '-----
20000 *MAXWINDOW
20010 'maximum peak position window
20020 COLOR 6

```

```

20030 PEAK = 0
20040 VIEW (560,50)-(630,80),0,7
20050 LOCATE 71,5
20060 COLOR SLINE
20070 PRINT "Max.Peak"
20080 RETURN
20090 '-----
20100 *MAXDISPLAY
20110 find the new max.peak and display
20120 COLOR 6
20130 IF I = 1 THEN RETURN
20140 IF P(I) >= P(I-1) THEN RETURN
20150 IF P(I-1) < PEAK THEN RETURN
20160 '
20170 PEAK = P(I-1)
20180 PEAKPOS = T(I-1)
20190 '
20200 LOCATE 71,3
20210 PRINT USING "####.##" ; T(I-1)
20220 LOCATE 71,4
20230 PRINT USING "###.####" ; 1240/T(I-1)
20240 '
20250 RETURN
29000 '----- x - axis calculation & display -----
29010 *XAXISCAL
29020 LOCATE 3,19 : COLOR SLINE : PRINT USING "####.##" ; WMIN
29030 LOCATE 66,19: COLOR SLINE : PRINT USING "####.##" ; WMAX
29040 LOCATE 3,20 : COLOR SLINE : PRINT USING "###.####" ; 1240/WMIN
29050 LOCATE 66,20: COLOR SLINE : PRINT USING "###.####" ; 1240/WMAX
29060 '
29070 RETURN
29080 '
30000 '----- Initialize procedure -----
30010 '           for
30020 '           JOBIN YVON DATA LINK with HR 320
30030 '-----
30040 '
30050 ' by      Suwat Sopotpan
30060 ' date    5 January,1994
30070 '
30080 '-----
30090 *ENTRANCE
30100 OPEN "com:N81NS128" AS #DL
30105 CLS 3 : COLOR 6
30110 PRINT "THE MONOCHROMATOR SYSTEM BEING INITIATED ; PLEASE WAIT..."
30120 TDEL = 3 : GOSUB *TDELAY : COLOR 3
30130 *PHASE1
30140 PRINT #DL,CHR$(32);           : GOSUB *TDELAY
30150 IF LOC(DL) = 0 THEN *PHASE1
30160 *PHASE2
30170 IF LOC(DL) > 1 THEN *PHASE3
30180 S$ = INPUT$(LOC(DL),DL)       : PRINT "*";
30190 IF S$ = "F" THEN *PASS ELSE *NOTPASS
30200 '-----
30210 S$ = INPUT$(LOC(DL),DL)       : PRINT "*";
30220 *PHASE3
30230 FOR N = 1 TO 4
30240 PRINT #DL,CHR$(13);           : GOSUB *TDELAY
30250 IF LOC(DL) = 0 THEN *PHASE3
30260 S$ = INPUT$(LOC(DL),DL)       : PRINT "*";
30270 NEXT N
30280 PRINT #DL,CHR$(248);          : GOSUB *TDELAY
30290 PRINT #DL,CHR$(222);          : GOSUB *TDELAY
30300 IF LOC(DL) = 0 THEN *PHASE3
30310 S$ = INPUT$(LOC(DL),DL)       : PRINT "*";
30320 IF S$ <> "b" THEN *NOTPASS
30330 PRINT #DL,CHR$(32);           : GOSUB *TDELAY
30340 IF LOC(DL) = 0 THEN *PHASE3
30350 S$ = INPUT$(LOC(DL),DL)       : PRINT "*";

```

```

30360 IF S$ = "bF" THEN *PASS
30370 *NOTPASS
30375 COLOR 5
30380 PRINT "INITIALIZE FAIL !!!"
30390 GOTO *EXIT
30400 *PASS
30405 COLOR 5
30407 PRINT
30410 PRINT "INITIALIZE OK. YOU CAN CONTROL THE MONOCHROMATOR"
30415 PRINT "-----"
30417 PRINT : COLOR 3
30420 GOSUB *CALIBRATE
30430 RETURN
30440 *EXIT
30450 CLOSE #DL
30460 END
30470 *WAITING
30480 FOR DD = 1 TO DELAY
30490 NEXT DD
30500 RETURN
30510 *CALIBRATE
30520 PRINT "PLEASE KEY THE WAVELENGTH ON HR 320 [nm] : ";
30530 *CALB1
30540 GOSUB *SETPOS
30570 *CALB2
30580 IF LOC(DL) = 0 THEN *CALB2
30590 S$ = INPUT$(LOC(DL),DL)
30600 IF S$ <> "o" THEN *CALB1
30610 RETURN
31000 '-----
31010 ' HR 320 Service subroutines.
31015 '-----
31020 ' *moveleft : decrease .1 nm
31025 ' *moveright : increse .1 nm
31030 ' *moveto : goto any position
31040 ' *askpos : ask for the actual position
31050 ' *setpos : set the position
31060 '
31070 '
40000 '-----
40540 *MOVEMENT
40545 DELAY = 800 : REPORT = 1
40550 CLS 3 : LOCATE 15,10 : PRINT "USE <- OR -> KEY TO MOVE"
40553 LOCATE 15,11 : PRINT "USE <G> TO KEY IN"
40555 LOCATE 15,12 : PRINT "USE <ESC> TO EXIT"
40556 GOSUB *ASKPOS
40557 *MOVING
40560 A$ = INPUT$(1)
40565 IF A$ = "" THEN *MOVING
40570 IF A$ = CHR$(29) THEN GOSUB *MOVELEFT
40580 IF A$ = CHR$(28) THEN GOSUB *MOVERIGHT
40585 IF A$ = "g" THEN GOSUB *MOVETO
40587 IF A$ = "G" THEN GOSUB *MOVETO
40590 IF A$ = CHR$(27) THEN RETURN
40600 GOTO *MOVING
40605 '-----
41000 *MOVELEFT
41010 SIGN$="-" : PULSE$ = "20"
41020 GOSUB *BUSY : GOSUB *MOVE : GOSUB *ASKPOS
41030 RETURN
41035 '-----
41040 *MOVERIGHT
41050 SIGN$="+" : PULSE$ = "20"
41060 GOSUB *BUSY : GOSUB *MOVE : GOSUB *ASKPOS
41070 RETURN
41075 '-----
42000 *MOVETO
42010 '
42015 *MOVETO1

```



```

42020 IF (P1>LMAX) OR (P1<LMIN) THEN RETURN
42030 GOSUB *BUSY : GOSUB *ASKPOS
42040 P1 = P1 * 200 : P = P * 200
42050 IF P1 > P THEN SIGN$ = "+" ELSE SIGN$ = "-"
42060 PULSE$ = STR$(ABS(P - P1))
42065 PULSE$ = RIGHT$(PULSE$,LEN(PULSE$)-1)
42070 GOSUB *MOVE : GOSUB *BUSY : GOSUB *ASKPOS
42075 '
42080 GOSUB *POSITION
42090 RETURN
49000 '-----
49005 *CLEARBUFF
49010 IF LOC(DL) = 0 THEN RETURN
49020 A$ = INPUT$(LOC(DL),DL)
49030 RETURN
50000 '----- SUBROUTINE ASK for POSITION -----'
50005 *ASKPOS
50010 P$=""
50020 *AP2
50030 PRINT #DL,"H0"+CHR$(13);
50040 *AP3
50050 IF LOC(DL)=0 THEN *AP3
50060 A$=INPUT$(1,DL)
50070 IF A$="o" THEN *AP4 ELSE GOSUB *CLEARBUFF
50080 GOTO *AP2
50090 *AP4
50100 A$=INPUT$(1,DL)
50110 IF A$=CHR$(13) THEN *AP5 ELSE *AP6
50120 *AP5
50130 P=VAL(P$)
50140 P=P/200      ' return value in nanometer
50150 '
50160 RETURN
50170 *AP6
50180 P$=P$+A$
50190 GOTO *AP4
50200 '-----
50205 *SETPOS
50210 INPUT " ",W
50220 W = INT( W * 200 )
50230 W$ = STR$(W)
50240 PRINT #DL,"G0,"+W$+CHR$(13);
50250 RETURN
60000 '----- SUBROUTINE MOTOR BUSY ? -----
60010 *BUSY
60020 PRINT #DL,"E";
60030 *BUSY1
60040 IF LOC(DL)=0 THEN *BUSY1
60050 A$=INPUT$(1,DL)
60060 IF A$="o" THEN *BUSY2 ELSE GOSUB *CLEARBUFF
60070 GOTO *BUSY
60080 *BUSY2
60090 A$=INPUT$(1,DL)
60100 IF A$ <> "z" THEN GOSUB *CLEARBUFF ELSE RETURN
60105 GOSUB *POSITION      ' up-date motor position
60110 IF READACQ THEN GOSUB *TRACESCR
60120 GOTO *BUSY
61000 '----- SUBROUTINE MOVE RELATIVE -----
61010 *MOVE
61020 PRINT #DL,"F0,"+SIGN$+PULSE$+CHR$(13);
61030 *MOVE1
61040 IF LOC(DL) =0 THEN *MOVE1
61050 A$=INPUT$(1,DL)
61060 IF A$ <> "o" THEN GOSUB *CLEARBUFF ELSE RETURN
61070 GOTO *MOVE
61080 '-----
62000 *STOPMOTOR
62005 MFLAG = 0
62007 *STOP1

```

```

62010 PRINT #DL,"L"; : TDEL = 1 : GOSUB *TDELAY
62015 *STOP2
62020 IF LOC(DL) = 0 THEN *STOP2
62030 A$ = INPUT$(1,DL)
62040 IF A$ <> "o" THEN GOSUB *CLEARBUFF ELSE *STOP3
62045 GOTO *STOP1
62050 *STOP3
62055 GOSUB *POSITION : RETURN
62060 -----
62200 *MOTOR
62210 PRINT #DL,"E"; : TDEL = 1 : GOSUB *TDELAY
62220 *MOTOR1
62230 IF LOC(DL) = 0 THEN *MOTOR1
62240 A$ = INPUT$(1,DL)
62250 IF A$ = "o" THEN *MOTOR2 ELSE GOSUB *CLEARBUFF
62260 GOTO *MOTOR
62270 *MOTOR2
62280 A$ = INPUT$(1,DL)
62290 IF A$ = "z" THEN MFLAG = 0 ' motor stop
62300 IF A$ = "q" THEN MFLAG = 1 ' motor is moving
62310 RETURN
62320 -----

```



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

8) วิธีการใช้เครื่องมือต่าง ๆ ในงานวิจัย

8.1) วิธีการใช้ระบบ Glow Discharge Plasma CVD (ดูรูปที่ 8.a)

1. ขั้นตอน ความปลอดภัย ตรวจสอบและเริ่มใช้ระบบ

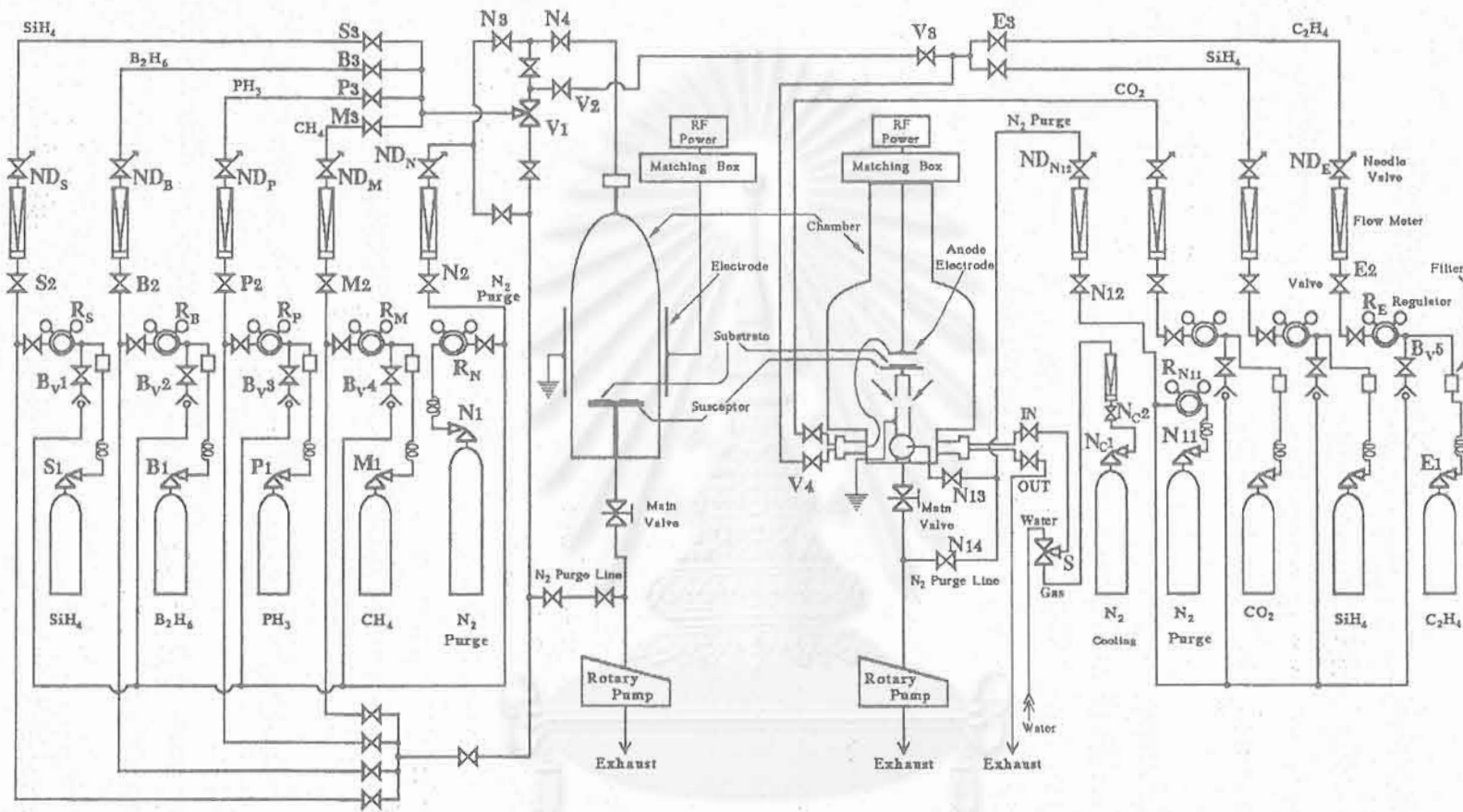
- Check valve หน้าแผงควบคุม valve , valve $B_{V1} - B_{V7}$ ทุกตัวให้อยู่ในสภาพที่ "Close" สนิทหมดจริง ๆ และ Check Outlet Valve ของ cooling ต้อง "Open" ด้วย
- ต้องระวังการหมุน $ND_S, ND_B, ND_P, ND_M, ND_N, ND_{N12}, ND_E$ ไม่ให้ "Open Close" มากเกินไปจะทำให้ Flow meter รั่วได้
- Check $ND_S, ND_B, ND_P, ND_M, ND_N, ND_{N12}, ND_E$ ให้ลดลงหมด
- Check ว่า RF switch และ volume RF control "OFF" อยู่ , "ON" RF power (13.5 MHz)
- "Open" Valve N 11 ($\sim 90^\circ$) ปรับ R_{N11} ให้ 2nd pressure ไม่ต่ำกว่า 15 psi.
- "Open" Valve N 1 ($\sim 90^\circ$) ปรับ R_N ให้ 2nd pressure ไม่ต่ำกว่า 15 psi.
1st pressure ของ N_2 ทั้ง 2 ต้องมี ~ 100 psi. หรือมากกว่า
- "ON" rotary pump switch
- "ON" GD system switch

2. ขั้นตอน การใส่แผ่นฐานเข้า Chamber

- "Open" main valve ลดความดันใน chamber ≤ 0.01 Torr แล้ว "Close"
- leak chamber โดย "Open" valve N12 , N13 ปรับ ND_{N12} ปลดปล่อย N_2 ในอัตรา 2-4 l/min ให้ pressure ใน chamber เท่ากับบรรยากาศ
- "Close" valve N12 , N13
- "Open" ฝา chamber ต้องระวังมิให้ฝากระทบของแข็งเด็ดขาด
- ใส่แผ่นฐาน "Close" ฝา chamber
- "Open" main valve ช้า ๆ ซึ่งถ้าได้ยินเสียงแปลก ๆ จาก pump ให้หยุดหมุน valve ชั่วคราว
- พิจารณา reaction gas ที่ต้องการใช้ปลุก Film เพื่อடுத்தอง gas ที่ต้องการให้เป็น สูญญากาศ

3. ขั้นตอน การดูด gas N_2 ในท่อ gas stainless ให้เป็นสูญญากาศ

- "Open" valve V4 , V3 , V2 และ V1 (ปิดไปทาง V2)
- กรณีเส้นท่อของ gas SiH_4 ให้ "Open" valve S3 , S2



รูปที่ 8.๑ ระบบ Glow Discharge Plasma CVD

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- กรณีเส้นท่อของ gas B_2H_6 ให้ "Open" valve B3 , B2
- กรณีเส้นท่อของ gas PH_3 ให้ "Open" valve P3 , P2
- กรณีเส้นท่อของ gas CH_4 ให้ "Open" valve M3 , M2
- กรณีเส้นท่อของ gas C_2H_4 ให้ "Open" valve E3 , E2
- "Open" R_S , R_B , R_P , R_M , R_E หมุนไปทางที่ด้านมือให้หมด
- ขณะนี้ main valve ยังเปิดไม่หมดให้หมุนเปิดไปเรื่อย ๆ (ถ้าไม่มีเสียงแปลก ๆ) จนหมด
- ปรับ ND_S , ND_B , ND_P , ND_M , ND_E ให้ N_2 ไหลประมาณ 50 - 100 sccm (เมื่อเวลาผ่านไป Flow rate จะลดลง ให้ปรับเพิ่มได้ แต่ต้องระวังอย่าเปิดมากเกินไป จะทำให้ Flow meter รั่วได้)
- Set อุณหภูมิแผ่นฐานตามกำหนด (เช่น $190^\circ C$ ซึ่งการดูด N_2 และ heat up ใช้เวลา ~ 1 ชม.)
- Gas N_2 จะหมดไปจากท่อเมื่อ
 - 1 pressure ใน Chamber ≤ 0.01 Torr
 - 2 Flow meter ลดลงเป็นศูนย์หมดทุกตัว
 - 3 2nd Pressure ที่ปรากฏยัง regulator ≤ -30 psi.
- "Close" valve V4 , V3 , V2 และ V1 (บิดไปตรงกลาง)
- กรณีท่อ gas SiH_4 ให้ "Close" valve S3 , S2
- กรณีท่อ gas B_2H_6 ให้ "Close" valve B3 , B2
- กรณีท่อ gas PH_3 ให้ "Close" valve P3 , P2
- กรณีท่อ gas CH_4 ให้ "Close" valve M3 , M2
- กรณีท่อ gas C_2H_4 ให้ "Close" valve E3 , E2
- "Close" R_S , R_B , R_P , R_M , R_E โดยหมุนไปทางทิศที่เขามือให้หลวมหมด
- "Close" ND_S , ND_B , ND_P , ND_M , ND_E

4. ขั้นตอน การเปิด Valve ถึง Reaction gas ให้ปลอดภัย

- Check ให้แน่ใจว่า $B_V1 - B_V7$ ที่ต่อมาจาก N_2 "Close" สนิทจริง ๆ
- Valve ทุกตัวตั้งแต่ chamber จนถึง regulator "Close" หมด (ขณะนี้ main valve ยังเปิดหมดอยู่)

กรณีตัวอย่าง เปิด gas SiH_4

- บิด "Open แล้ว Close" valve S1 ให้ได้ค่า 1st Pressure ที่ต้องการ บิด valve S1 ให้ "Open" เพียงเล็กน้อยซ้า ๆ ($5^\circ - 10^\circ$ จะทำให้เข็ม scale เคลื่อนไปซ้า ๆ ราว 0.5-2.0 รอบ/นาที ทำให้สามารถสังเกตปริมาณ gas ได้ง่าย) แล้ว "Close" ทันที (เช่น การปลูก Film a-Si:H 2 ชั่วโมง จะต้องตั้ง 1st Pressure ให้มีค่าประมาณ 1,000 psi. ที่ Flow rate 60 cc./min.)

- "Open" R_S ซ้ำ ๆ ตั้งให้ 2nd pressure มีค่า 15 psi
กรณี gas ชนิดอื่น

- ปฏิบัติแบบเดียวกับกรณี gas SiH_4
{ SiH_4 บิด S1 ปรับ R_S , B_2H_6 บิด B1 ปรับ R_B , PH_3 บิด P1 ปรับ R_P
 C_2H_4 บิด E1 ปรับ R_E , CH_4 บิด M1 ปรับ R_M }

Gas ที่ใช้ทำชั้น p-i-n ของ LED

- ชั้น p a-SiC:H ใช้ gas SiH_4 , CH_4 , B_2H_6
- ชั้น i a-SiC:H ใช้ gas SiH_4 , C_2H_4
- ชั้น n a-SiC:H ใช้ gas SiH_4 , CH_4 , PH_3
- ในขณะที่ gas แต่ละชนิดไหลมาอยู่ใต้ valve ของ Flow meter แล้ว

5. ขั้นตอนการปล่อย gas ชั้น p เข้า discharge ใน chamber

- "Open" เฉพาะ valve ที่เกี่ยวข้องเท่านั้น
"Open" Valve V4 , V3 , V2 , V1 (บิดไปทาง V2)
 SiH_4 Open Valve S3
 B_2H_6 Open Valve B3
 CH_4 Open Valve M3
- "Open" Valve S2 , B2 , M2 , ปรับ ND_S , ND_B , ND_M ให้ gas ไหลตามอัตราที่กำหนดขณะเดียวกัน ต้องสังเกต pressure ใน chamber ไปพร้อมกันด้วย ไม่ให้สูงต่ำมากจนผิดปกติโดยปรับ main valve
- รีบไป check 2nd pressure ที่ R_S , R_B , R_M ให้อยู่ที่ 15 psi.
และ 1st pressure ให้มีค่าสูงพอจ่ายให้ตลอดกระบวนการ discharge โดยบิด S 1 , B 1 , M 1 เพิ่ม pressure
- ขณะนี้อุณหภูมิกำลังแกว่งอยู่ ต้องรอ 5 - 10 นาที เพื่อให้คงที่
ต้องคอย check 1st pressure (ให้เพียงพอ โดยบิด S1, B1, M1 เพิ่ม pressure)
2nd pressure (ปรับ R_S , R_B , R_M)
pressure ใน chamber (ปรับ Main valve)
Flow rate (ปรับ ND_S , ND_B , ND_M)
ให้ได้ค่าที่กำหนดไว้แล้วเสมอ

6. ขั้นตอน การ discharge ชั้น p a-SiC:H

- check ความถูกต้องของเงื่อนไขทั้งหมด 2nd pressure (ปรับ R_S, R_B, R_M)
pressure ใน chamber (ปรับ Main valve)
Flow rate (ปรับ ND_S, ND_B, ND_M)
อุณหภูมิ (ต้องรอให้คงที่ก่อน)
- เตรียมนาฬิกาจับเวลา
- “ ON ” RF switch
- หมุน RF control ซ้ำ ๆ และ จับเวลาที่เห็นเมื่อเห็นแสง discharge
- ตั้งค่า watt ให้ได้ภายใน 5 วินาที (ทั้ง forward , reflect) อาจใช้ matching box ช่วย
- ขณะ discharge ต้อง check Power (Forward , Reflect โดยปรับ RF control)
1st pressure (ให้เพียงพอโดยปิด S1, B1, M1 เพิ่ม pressure)
2nd pressure (ปรับ R_S, R_B, R_M)
pressure ใน chamber (ปรับ Main valve)
Flow rate (ปรับ ND_S, ND_B, ND_M)
- ลด RF control ลงเมื่อสิ้นสุดเวลา discharge

ขั้นตอนการไล่ gas ชั้น p ทั้ง (ใช้เวลา ~ 3 - 4 นาที)

- “Close” valve S2 , B2 , M2
- “Open” main valve ให้หมด
- ปรับ ND_S, ND_B, ND_M ให้ gas flow ~ 50 - 100 sccm
- รอให้ pressure ใน chamber ≤ 0.01 Torr
- หมุน ND_S, ND_B, ND_M ลดลงให้หมด
- “Close” valve B3 , M3 (S3 ให้ “Open” ไว้)

7. ขั้นตอนการปล่อย gas ชั้น i เข้า discharge ใน chamber

- “Open” Valve ท่อ C_2H_4 “ E3 ” (ขณะนี้ S3 “Open” อยู่)
- “Open” Valve S2 , E2 , ปรับ ND_S, ND_E ให้ gas ไหลตามอัตราที่กำหนด
ขณะเดียวกันต้องสังเกต pressure ใน chamber ไปพร้อมกันด้วย ไม่ให้สูงต่ำมากจน
ผิดปกติโดยปรับ Main valve (ขณะนี้ main valve ยัง Open หมดอยู่)
- รีบไป check 2nd pressure ที่ R_S, R_E ให้เท่ากับ 15 psi.
และ 1st pressure ให้มี pressure สูงพอจ่ายให้ตลอดกระบวนการ discharge
โดยปิด S1 , E1 เพิ่ม pressure
- ขณะนี้อุณหภูมิกำลังแกว่งอยู่ ซึ่งต้องรอ 5 - 10 นาที เพื่อให้คงที่
ต้องคอย check 1st pressure (ให้เพียงพอ โดยปิด S1, E1 เพิ่ม pressure)
2nd pressure (ปรับ R_S, R_E)
pressure ใน chamber (ปรับ Main valve)

Flow rate (ปรับ ND_S , ND_E)

ให้ได้ค่าที่กำหนดไว้แล้วเสมอ

8. ขั้นตอน การ discharge ชั้น i a-SiC:H

- check ความถูกต้องของเงื่อนไขทั้งหมด 2nd pressure (ปรับ R_S , R_E)
pressure ใน chamber (ปรับ Main valve)
Flow rate (ปรับ ND_S , ND_E)
อุณหภูมิ (ต้องรอให้คงที่)
- เตรียมนาฬิกาจับเวลา
- หมุน RF control ซ้ำ ๆ และ จับเวลาที่ทันทีเมื่อเห็นแสง discharge
- ตั้งค่า watt ให้ได้ภายใน 5 วินาที (ทั้ง forward , reflect) อาจใช้ matching box ช่วย
- ขณะ discharge ต้อง check Power (Forward , Reflect โดยปรับ RF control)
1st pressure (ปิด S 1 , E 1 เพิ่ม pressure)
2nd pressure (ปรับ R_S , R_E)
pressure ใน chamber (ปรับ Main valve)
Flow rate (ปรับ ND_S , ND_E)
- ลด RF control ลงเมื่อสิ้นสุดเวลา discharge

ขั้นตอนการไล่ gas ชั้น i ที่

- "Close" valve S2 , E2
- "Open" main valve ให้หมด
- ปรับ ND_S , ND_E ให้ gas flow ประมาณ 50 - 100 sccm
- รอให้ pressure ใน chamber ≤ 0.01 Torr
- หมุน ND_S , ND_E ลดลงให้หมด
- "Close" valve E3 (ปลดปล่อยให้ S3 Open ไว้)

9. ขั้นตอนการปล่อย gas ชั้น n เข้า discharge ใน chamber

- "Open" Valve P3 , M3
- "Open" Valve S2 , P2 , M2 , ปรับ ND_S , ND_P , ND_M ให้ gas ไหลตามอัตราที่กำหนด ขณะเดียวกัน ต้องสังเกต pressure ใน chamber ไปพร้อมกันด้วย ไม่ให้สูงต่ำมากจนผิดปกติโดยปรับ main valve (ขณะนี้ main valve ยัง Open หมุดอยู่)
- รีบไป check 2nd pressure ที่ R_S , R_P , R_M ให้อยู่ที่ 15 psi.
และ 1st pressure ให้มีค่าสูงพอจ่ายให้ตลอดกระบวนการ discharge
โดยปิด S1 , P1 , M1 เพิ่ม pressure

- ขณะนี้อุณหภูมิกำลังแกว่งอยู่ ต้องรอ 5 - 10 นาที เพื่อให้คงที่
 - ต้องคอย check 1st pressure (ให้เพียงพอ โดยปิด S1,P1, M1 เพิ่ม pressure)
 - 2nd pressure (ปรับ R_s , R_p , R_M)
 - pressure ใน chamber (ปรับ Main valve)
 - Flow rate (ปรับ ND_s , ND_p , ND_M)
 - ให้ได้ค่าที่กำหนดไว้แล้วเสมอ

10. ขั้นตอน การ discharge ชั้น n a-SiC:H

- check ความถูกต้องของเงื่อนไขทั้งหมด 2nd pressure (ปรับ R_s , R_p , R_M)
 - pressure ใน chamber (ปรับ Main valve)
 - Flow rate (ปรับ ND_s , ND_p , ND_M)
 - อุณหภูมิ (ต้องรอให้คงที่)
- เตรียมนาฬิกาจับเวลา
- หมุน RF control ซ้ำ ๆ และ จับเวลาที่เมื่อเห็นแสง discharge
- ตั้งค่า watt ให้ได้ภายใน 5 วินาที (ทั้ง forward , reflect) อาจใช้ matching box ช่วย
- ขณะ discharge ต้อง check Power (ปรับ RF control volume)
 - 1st pressure (ปิด S1 , P1 , M1 เพิ่ม pressure)
 - 2nd pressure (ปรับ R_s , R_p , R_M)
 - pressure ใน chamber (ปรับ Main valve)
 - Flow rate (ปรับ ND_s , ND_p , ND_M)
- ลด RF control ลงเมื่อสิ้นสุดเวลา discharge

ขั้นสิ้นสุดกระบวนการ Discharge ชั้น p-i-n

- “ OFF ” RF switch
- “ OFF ” RF power
- “ OFF ” Heater switch
- ลดค่าอุณหภูมิที่ set บน Display ไว้ให้เป็นศูนย์
- ลดอุณหภูมิแผ่นฐานให้อยู่ในช่วง 20° - 30° เพื่อไม่ให้ชิ้นงานเสียหายจากความร้อนด้วยขั้นตอนการ “ Cooling ” (เพื่อความรวดเร็ว)

11. ขั้นตอนการ "ปิด" ระบบทั้งหมด

การดูด Gas ที่งทุก ๆ เส้นท่อ ขณะที่รอให้อุณหภูมิของแผ่นฐานลดลง

- "Open" main valve ให้หมด
- "Open" valve N12 , N13 เพื่อปล่อย gas N_2 เข้าผสมใน chamber โดย "ปรับ" ND_{N12} ให้ gas N_2 ไหลประมาณ 2 - 4 l/min. เพื่อ purge chamber , pump Exhaust Line ขณะเดียวกันต้องควบคุม pressure ใน chamber ไม่ให้เกิน 20 Torr
- "Open" valve B3 , E3 , B2 , E2
(S2 , S3 , M2 , M3 , P2 , P3 ขณะนี้เปิดอยู่แล้ว)
ปรับ ND_S , ND_B , ND_P , ND_M , ND_E ให้ gas ไหลประมาณ 50 - 100 sccm
- "Open" R_S , R_B , R_P , R_M , R_E ให้หมด
- รอให้ Reaction gas หมด โดยสังเกต
 - 1 Flow meter ปรากฏเป็นศูนย์หมดทุกตัว (ยกเว้น N_2)
 - 2 2nd Pressure ที่ปรากฏยัง R_S , R_B , R_P , R_M , $R_E \leq -30$ psi. (เว้น R_{N11} , R_N)
 - 3 1st Pressure ปรากฏเป็นศูนย์หมดทุกตัว (ยกเว้น N_2)
- "Close" Valve N13

Purge ทุกเส้นท่อ , Chamber และ Exhaust Line ด้วย gas N_2

- Check ให้แน่ใจว่า
 - 1st pressure , 2nd pressure (≤ -30 psi.) และ flow rate ของถึง gas SiH_4 , CH_4 , B_2H_6 , PH_3 , C_2H_4 เป็นศูนย์จริง ๆ
- "Open" Valve B_{V1} , B_{V2} , B_{V3} , B_{V4} และ B_{V5}
- ปรับ ND_S , ND_B , ND_P , ND_M , ND_E ให้ N_2 ไหลประมาณ 50-100 sccm นาน 5 นาที
- "Close" Valve V4

ลด pressure ใน chamber ≤ 0.01 Torr

- ปล่อยให้ pressure ลดลงไปเรื่อย ๆ

ซิง gas N_2 ในท่อ Stainless

ขณะที่รอให้ pressure ใน chamber ลดลงไปเรื่อย ๆ

- ปรับ R_S , R_B , R_P , R_M , R_E ให้ได้ 15 psi. แล้ว "Close"
- "Close" Valve B_{V1} , B_{V2} , B_{V3} , B_{V4} และ B_{V5}
- "Close" V4 , V3 , V2 , V1 (ปิดไปตรงกลาง)
 - S3 , B3 , P3 , M3 , E3
 - S2 , B2 , P2 , M2 , E2
 - ND_S , ND_B , ND_P , ND_M , ND_E

ขั้นสุดท้าย

- "Open" valve N14 ปลดปล่อย N₂ เข้า leak pump ในปริมาณ 4 l/min.
- "OFF" Pump breaker (หลังจากปลดปล่อย gas N₂ leak pump แล้วเพียง 5-10 วินาที)
- "OFF" GD system
- รอให้ N₂ leak pump ต่อเป็นเวลา 2 - 3 นาที
- "Close" valve N14 , N12 , ND_{N12} , N 11 และ N 1

Check ไล่ "Close" Valve ทั้งหมดอีกครั้ง

- V4 , V3 , V2 , V1 (ปิดไปตรงกลาง)
- S3 , B3 , P3 , M3 , E3 N1 , N2 , Main Valve
- S2 , B2 , P2 , M2 , E2 B_V1 , B_V2 , B_V3 , B_V4 , B_V5
- R_S , R_B , R_P , R_M , R_E N11 , N12 , N13 , N14
- ND_S , ND_B , ND_P , ND_M , ND_N , ND_{N12} , ND_E

8.2) วิธีการใช้เครื่อง Electron Beam Evaporator (EB) (ดูรูปที่ 8.b)

1. เตรียมระบบ Pump

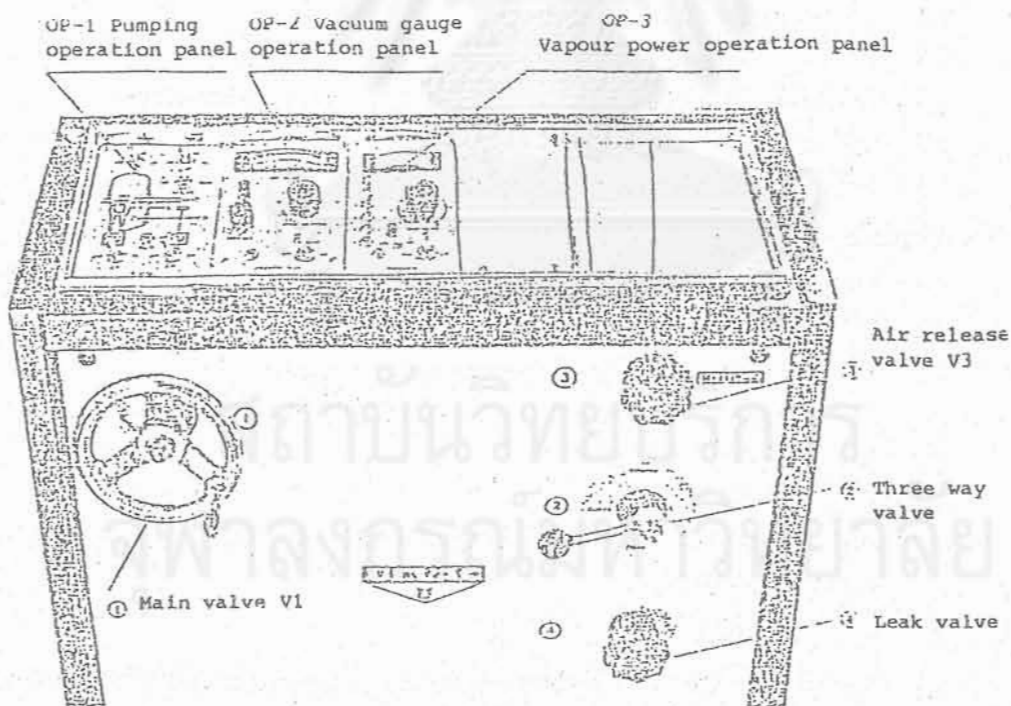
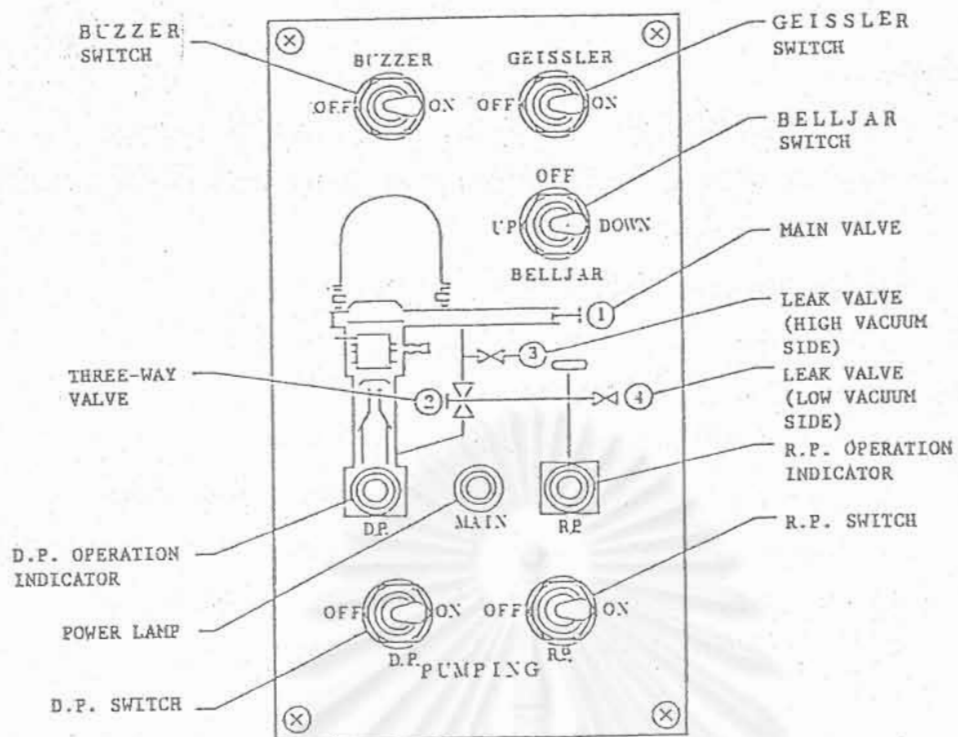
- 1.1 ON switchboard water pump และ cooling system
- 1.2 ON breaker หลังตู้ EB supply
- 1.3 ON main switch ของเครื่อง EB (40A)
- 1.4 เสียบปลั๊ก water pump ตัวที่ 1 (ด้านนอกกำแพง) และเปิดวาล์วน้ำ
- 1.5 ON rotary pump
- 1.6 รอให้น้ำเย็นประมาณ 1 ชั่วโมง แล้วจึงจะเปิด ON diffusion pump

2. ทำการเปิด chamber

- 2.1 OPEN vent valve เพื่อดูดอากาศเข้า chamber สังเกตที่ท่อสายยางจะมีลมเข้า
- 2.2 UP switch bell jar
- 2.3 ทำความสะอาด substrate , ใส่ source และ set sample
- 2.4 SET crystal ให้ค่า time/data ~5 ถ้าไม่ถึงให้ทำความสะอาดชุด crystal
- 2.5 DOWN switch bell jar
- 2.6 CLOSE vent valve
- 2.7 ก้อย ๆ ปรับ three way valve ไปทาง ROUGH valve เพื่อให้ rotary pump ทำงาน รอประมาณ 10 นาที

3. เตรียมระบบการ Evaporate

- 3.1 ON GEISSLER สังเกตหลอด discharge (ionize gage) จะมีสีม่วงต้องรอจนสีจาง เพื่อตรวจดู back pressure ของ diffusion pump
- 3.2 OFF GEISSLER
- 3.3 ก้อย ๆ ปรับ three way valve ไปทาง FORE valve เพื่อให้ diffusion pump ทำงาน
- 3.4 เติม Liquid Nitrogen
- 3.5 ON main valve
- 3.6 ปรับ jig driver ที่ 5 รอบ / นาที



รูปที่ 8.๖ ระบบ Electron Beam Evaporator



- 3.7 ตรวจสอบ Pressure บ่อยๆ โดยกด out gas , filament
- 3.8 SET Temp. control
- 3.9 SET substrate heater จดบันทึก ~12.5 A H (55) L (50)
- 3.10 ON substrate heater ปรับ high , low
- 3.11 สังเกต pressure ถ้าได้ $\sim 10^{-6}$ เสียบปลั๊ก water pump ตัวที่ 2 (ด้านในติดกำแพง) เพิ่ม และเปิดวาล์ว

4. เริ่มทำการ Evaporate

- 4.1 SET parameter จาก <PRGM/RCL> ที่ตู้ controller
 - 4.2 ON switch main ของ supply EB (gun filament, main switch) 2 ชุด หลอดไฟของระบบสว่าง ส่วนหลอด hour time delay สว่างหลังจาก ON switch main 1/2 hr.
 - 4.3 ON key switch
 - 4.4 ON high volt. switch (สวิตซ์สีเหลือง)
 - 4.5 SET remote controller ปรับ emission control ให้มีความเข้มกระแสน้ำของ electron beam , ปรับ X-axis ที่ตำแหน่ง 2.00
 - 4.7 อุณหภูมิ source ประมาณ 5-10 นาที ก่อนเปิด shutter
 - 4.8 กรณียิง ITO เปิดถึงออกซิเจน ~ 2000 psi ปรับ needle valve ที่ระดับ 4
 - 4.9 พยายามปรับ beam ให้ตรงกับเม็ดผลึก จนกระทั่งเม็ดผลึกแดง
 - 4.10 เปิด shutter ให้เริ่มกด reset ทันที
 - 4.11 ปรับ emission control ให้มีค่า rate และกระแสมีค่าคงที่ตามชนิดของวัสดุที่เป็น source
 - 4.12 เมื่อได้ความหนาที่ต้องการ ปิด shutter และปรับ emission control = 0 ทันที
 - 4.13 OFF high volt. switch (สวิตซ์สีเขียว)
 - 4.14 OFF key switch
 - 4.13 OFF main switch ของ EB supply ทั้ง 2 ชุด
 - 4.14 OFF power substrate , OFF heater
 - 4.15 OFF ถึงก๊าซออกซิเจนรอบประมาณ 5 นาที
 - 4.16 OFF main valve
 - 4.17 OFF diffusion pump ด้วยสวิตซ์ SS1 ใช้พัดลมเป่าให้เย็นประมาณ 1 ชั่วโมง
 - 4.18 CLOSE three way valve
 - 4.19 OFF rotary pump ด้วยสวิตซ์ SS1
 - 4.20 OPEN valve เพื่อให้อากาศเข้าไปใน rotary pump
 - 4.21 ปิดสวิตซ์ และ valve ทุกตัว ปิด switch pump ทั้งหมด
-