บทที่ 7

การประยุกต์ใช้งาน a-Si:H เป็นเซนเซอร์ตรวจวัดสีของแสง (color sensor)

บทนำ

เซนเซอร์ตรวจวัดสีของแสง (color sensor) เป็นสิ่งประดิษฐ์ทางออปโตอิเล็กทรอนิกส์ชนิดหนึ่ง ที่สามารถเปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า และมันสามารถบอกให้ผู้ใช้ทราบได้ว่าแสงที่กำลังวัดอยู่ นั้นเป็นสีอะไร ดังนั้นจึงนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวาง เช่น เป็นตัว color adjusting ในกล้องถ่ายวีดีโอ เป็นตัวแยกสีของสิ่งของ หรือสินค้าในโรงงานอุตสาหกรรม หรือการขนส่ง ฯลฯ

อะมอร์ฟัสซิลิคอน (a-Si:H) เป็นวัสดุหนึ่งที่มีข้อได้เปรียบหลายประการ ในการมาทำเป็น sensor ตรวจวัดสีของแสง ในตารางที่ 7.1 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างอะมอร์ฟัสซิลิคอนกับผลึกซิลิคอนใน การนำมาใช้เป็นวัสดุพื้นฐานของเซนเซอร์สี

ในบทนี้จะเสนอวิธีการผลิต และการสร้างเซนเซอร์ตรวจวัดสีของแสงที่ใช้ a-Si:H เป็นวัสดุพื้นฐาน และแสดงผลการวัดคุณสมบัติของเซนเซอร์ตรวจวัดสีที่ผลิตได้ รวมทั้งการสร้างวงจรเพื่อประมวล ผลตอบจากเซนเซอร์และการนำเอาระบบทั้งชุดไปใช้งานจริง(19)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 7.1 การเปรียบเทียบระหว่างอะมอร์ฟัสซิลิคอนและผลึกซิลิคอนในการนำมาผลิตเป็นเซนเซอร์สี

อะมอร์ฟัสซิลิคอน	ผลึกซิลิคอน
มีช่องว่างพลังงาน≃ 1.8 eV มีการตอบสนองต่อแสงในย่าน visible ที่ดีมาก	มีช่องว่างพลังงาน≃ 1.1 eV มีการตอบสนองต่อแสงดีในย่าน infrared
ไม่ต้องใช้ IR filter	ต้องใช้ IR filter
มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงสูงกว่าผลึกซิลิคอนในย่าน visible	มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงต่ำกว่าอะมอร์ฟัสซิลิคอนในย่าน visible
สิ่งประดิษฐ์มีความหนาเพียง≃ 0.5μm (thin film)	สิ่งประดิษฐ์มีความหนา≃ 300μm
อุณหภูมิในการผลิต≃ 200 °C	อุณหภูมิในการผลิต≃ 1400 °C
สิ้นเปลืองวัตถุดิบและพลังงานในการผลิตน้อย ต้นทุนการผลิตต่ำ	สิ้นเปลืองวัตถุดิบและพลังงานในการผลิตมาก ต้นทุนการผลิตสูง
ปลูกบนแผ่นฐานได้หลายชนิด	ต้องปลูกบนผลึกซิลิคอนเท่านั้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

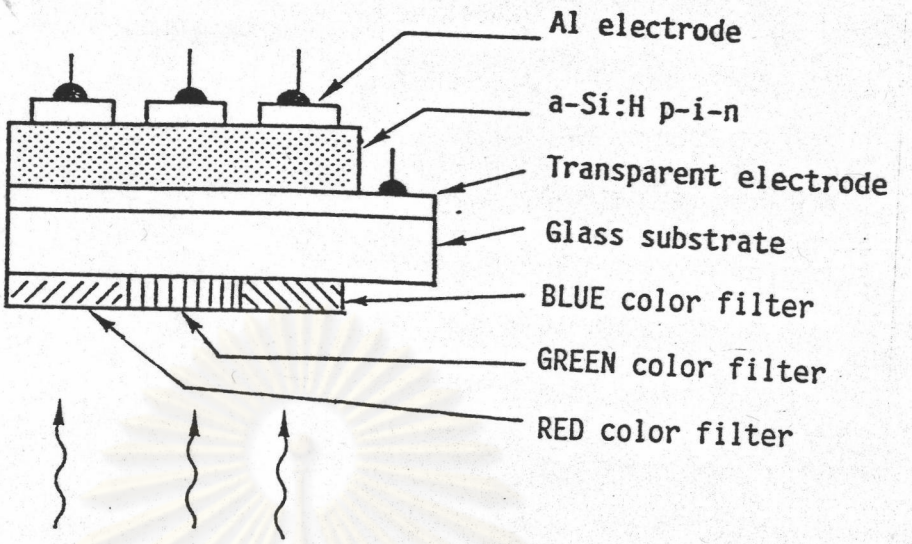
หลักการทำงานและโครงสร้างของเซนเซอร์ตรวจวัดสีของแสง

เซนเซอร์ตรวจวัดสีของแสง (ในที่นี้จะเรียกว่า เซนเซอร์สี) มีลักษณะโครงสร้างดังรูปที่ 7.1 ส่วนประกอบที่สำคัญของเซนเซอร์สีที่ประดิษฐ์นี้คือ โฟโตโวลตาอิกเซลล์ และฟิลเตอร์สี ในที่นี้โฟโตโวลตาอิกเซลล์ จะทำมาจาก a-Si:H ที่มีโครงสร้างเป็นรอยต่อ p-i-n ปลูกอยู่บนแผ่นฐานแก้วซึ่งมีขั้วโปร่งแสงฉาบอยู่และมีขั้วอะลูมิเนียมอยู่ทางด้านหลัง ซึ่งก็คือโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์นั่นเอง

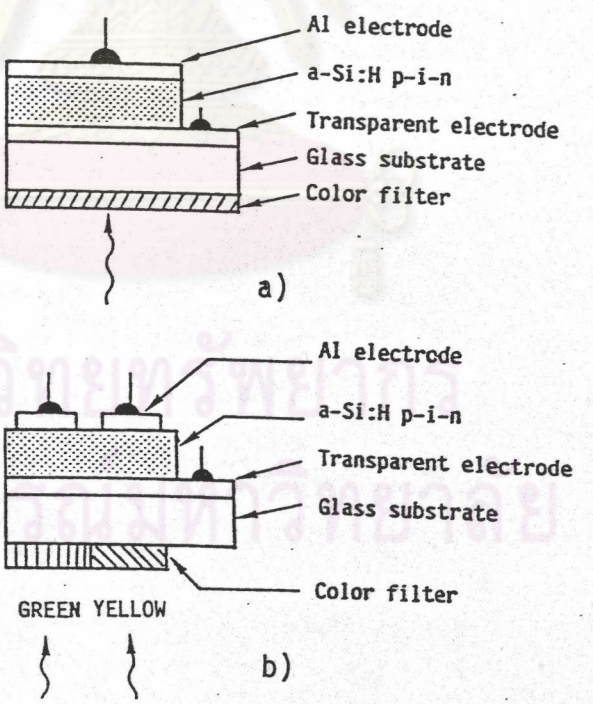
แสงที่เข้ามาทางด้าน p จะผ่านเข้าสู่ชั้น i และจะกระตุ้นให้ เกิดพาหะอิสระคือ อิเล็กตรอนและโฮล ขึ้นในชั้น i จากนั้นพาหะจะถูก กวาดด้วยสนามไฟฟ้าภายในออกสู่วงจรภายนอก โดยโฮลจะวิ่งออกจากชั้น p อิเล็กตรอนจะวิ่งออกจากชั้น n ปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้นี้จะขึ้นอยู่กับความเข้มของแสง และสเปกตรัมของแสงที่มาตกกระทบ ฟิลเตอร์สีจะทำหน้าที่เลือกแสงที่อินพุทเข้ามา โดยจะยอมให้แสงในย่านความยาวคลื่น (สี) ที่เหมาะสมเท่านั้นผ่านเข้าไปสู่ เซลล์ได้ เช่น แสงสีแดง, สีเหลือง,สีเขียว หรือสีน้ำเงิน

วิธีการผลิตเซนเซอร์สีชนิด a-Si:H

ระบบหลักที่ใช้ในการผลิตโฟโตโวลตาอิกเซลล์คือ ระบบ glow discharge plasma CVD และเงื่อนไขในการผลิต จะใช้เหมือนกับการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H ที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 4 เมื่อทำโฟโตโวลตาอิกเซลล์เสร็จแล้ว จะติดแบนด์พาสฟิลเตอร์แสง สีต่าง ๆ บนแผ่นแก้วด้านรับแสง ให้ครอบคลุมพื้นที่ของโฟโตโวลตาอิกเซลล์แต่ละตัว เซนเซอร์สีที่ทำการผลิต มีอยู่สองแบบคือ เซนเซอร์ที่ติดฟิลเตอร์สีเดียว (มีโฟโตโวลตาอิกเซลล์ 1 ตัว) และเซนเซอร์ที่ติดฟิลเตอร์สองสี (มีโฟโตโวลตาอิกเซลล์ 2 ตัว) ภาพตัดขวางโครงสร้างของเซนเซอร์สีทั้งสองแบบ แสดงอยู่ในรูปที่ 7.2 รูปที่ 7.3 เป็นแผนภูมิแสดงขั้นตอนการผลิตเซนเซอร์ทั้งสองแบบ รูปที่ 7.4 เป็นภาพถ่ายของเซนเซอร์สีที่ผลิตได้ (20)



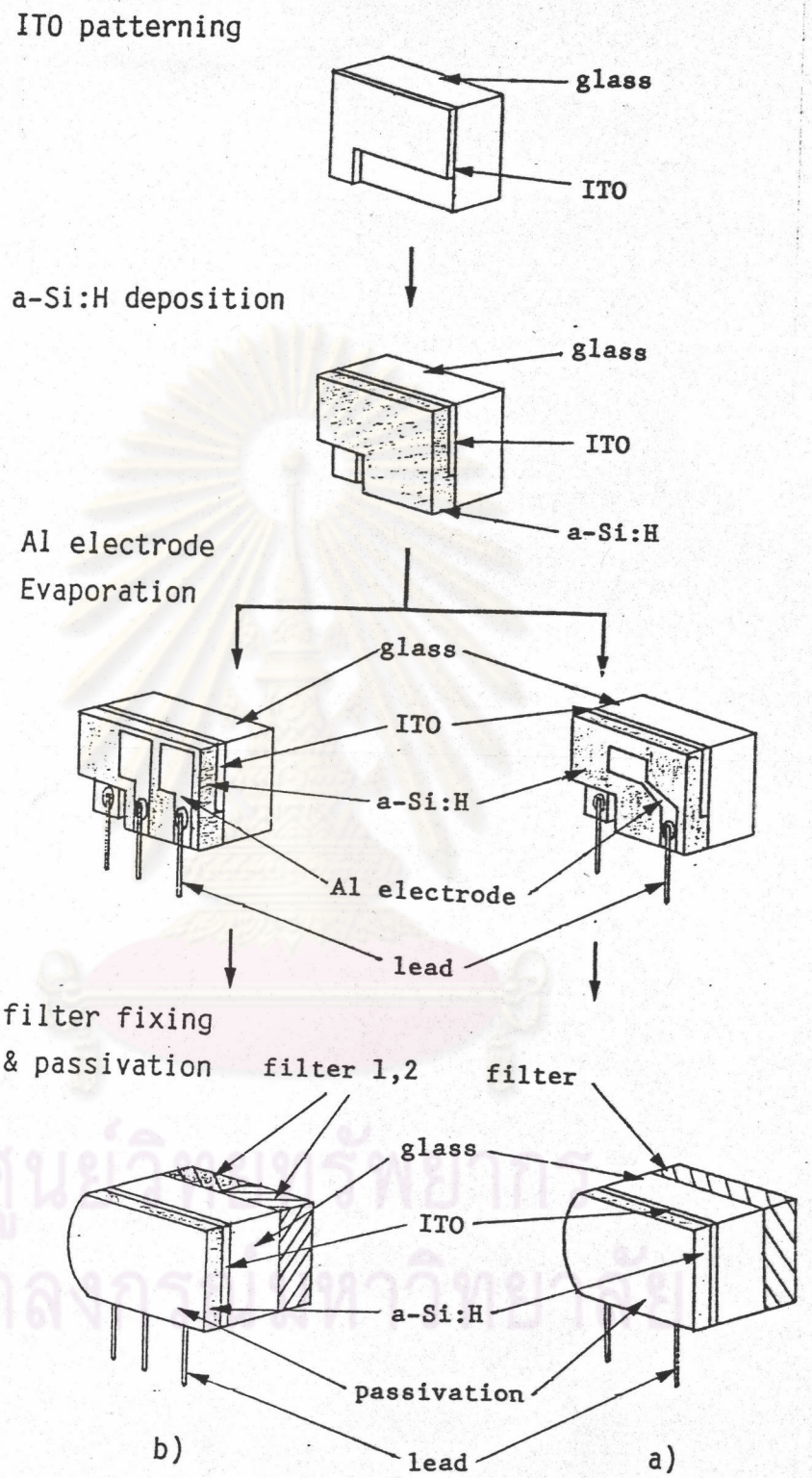
รูปที่ 7.1 โครงสร้างของเซนเซอร์ตรวจวัดสีของแสง (color sensor)



รูปที่ 7.2 ภาพตัดขวางของเซนเซอร์สีชนิด a-Si:H ที่ผลิตได้

a) เซนเซอร์ที่ติดฟิลเตอร์สีเดียว

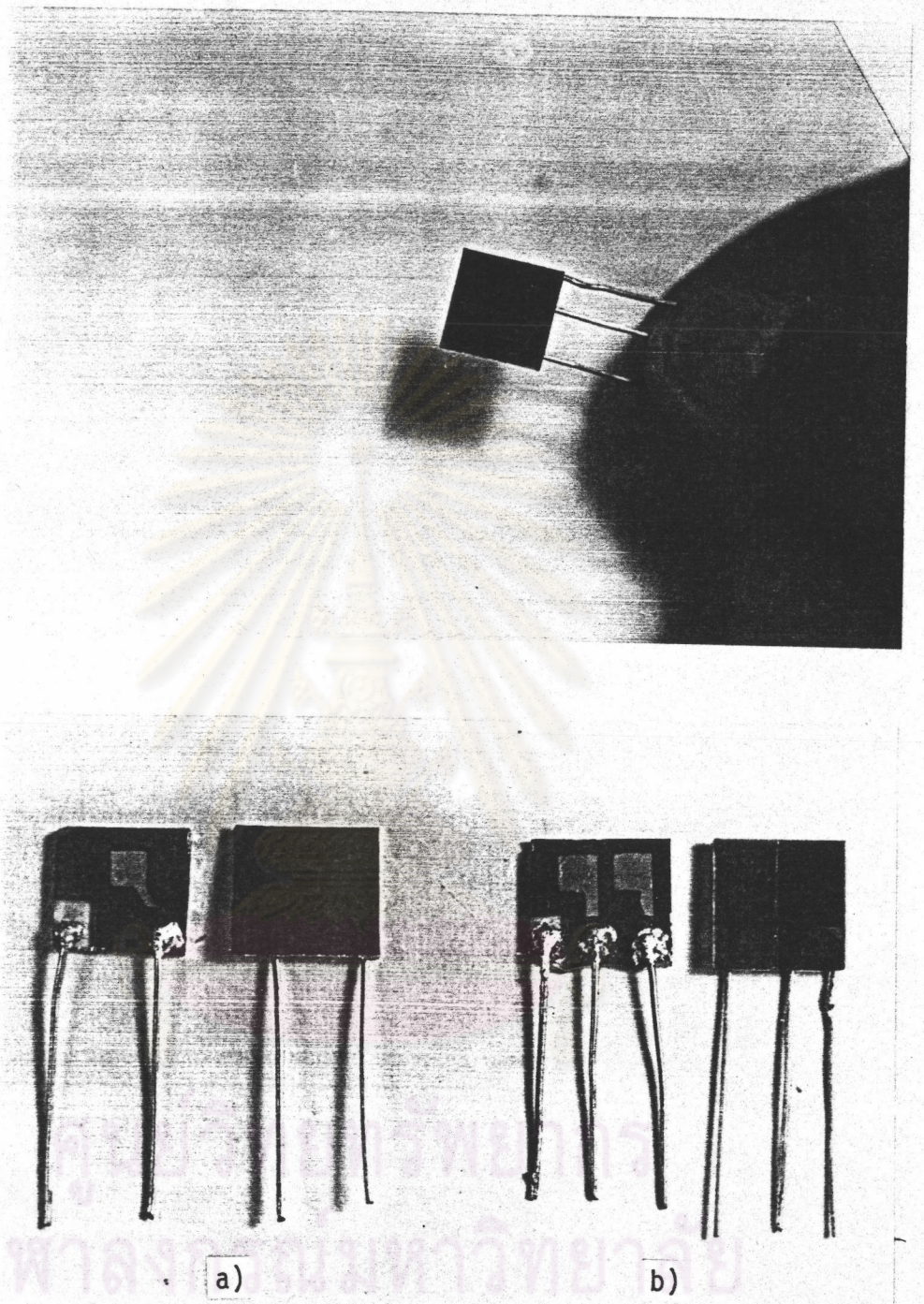
b) เซนเซอร์ที่ติดฟิลเตอร์สองสี



รูปที่ 7.3 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการผลิตเซนเซอร์สี

a) เซนเซอร์ที่ติดฟิลเตอร์สีเดียว

b) เซนเซอร์ที่ติดฟิลเตอร์สองสี



รูปที่ 7.4 ภาพถ่ายของเซนเซอร์สีที่ผลิตได้

a) เซนเซอร์ที่ติดฟิลเตอร์สีเดียว

b) เซนเซอร์ที่ติดฟิลเตอร์สองสี

ผลการผลิตเซนเซอร์สีชนิด a-Si:H

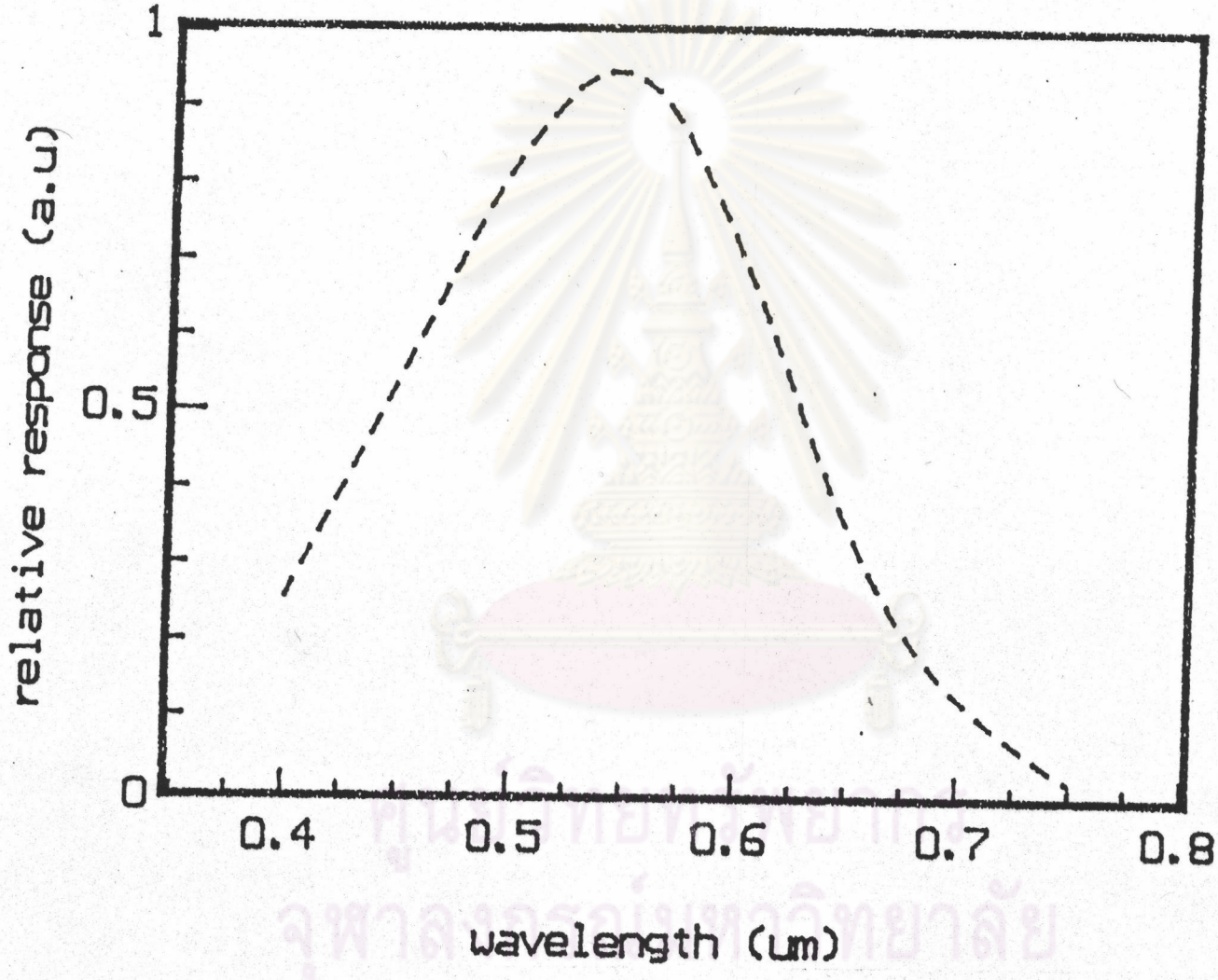
1. สเปกตรัมผลตอบสนองทางแสงของ a-Si:H โฟโตโวลตาอิกเซลล์ (ที่ยังไม่ได้ติดฟิลเตอร์)

เซนเซอร์สีที่ผลิตในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนคือโฟโตโวลตาอิกเซลล์และฟิลเตอร์ สเปกตรัมผลตอบสนองทางแสงของโฟโตโวลตาอิกเซลล์นั้น จะเป็นตัวบอกช่วงของความยาวคลื่นของแสงที่สามารถวัดได้ ในการวัดสเปกตรัมผลตอบสนองของ a-Si:H โฟโตโวลตาอิกเซลล์ ใช้แสงจากหลอดทังสเตนที่ผ่านออกจาก monochromator แล้วส่งผ่านออกไปยังโฟโตโวลตาอิกเซลล์ กระแสไฟฟ้าเอาท์พุทจากโฟโตโวลตาอิกเซลล์จะถูกขยายด้วย lock-in Amplifier ช่วงความยาวคลื่นของแสงที่วัดคือ 300 - 800 nm (21)

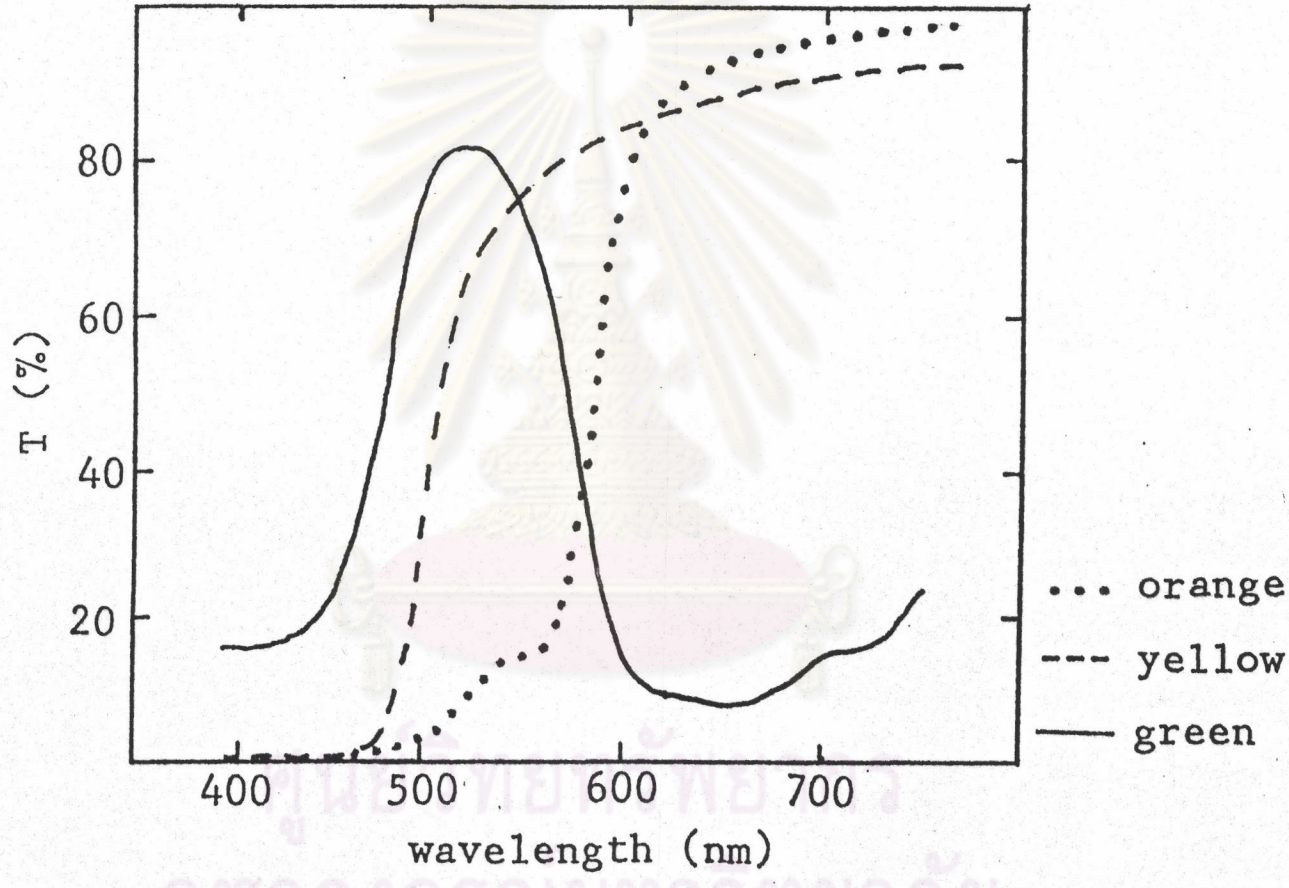
ผลการวัดสเปกตรัมผลตอบสนองทางแสงของ a-Si:H โฟโตโวลตาอิกเซลล์ แสดงอยู่ในรูปที่ 7.5 จากรูปนี้จะเห็นได้ว่า ผลตอบสนองทางแสงของโฟโตโวลตาอิกเซลล์ จะอยู่ในย่านที่ตามองเห็นได้ดี (visible) คือระหว่าง 400 - 750 nm ดังนั้น จึงกล่าวได้ว่าโฟโตโวลตาอิกเซลล์สามารถนำไปใช้ทำเป็นเซนเซอร์สีได้ตามต้องการ

2. การวัดการทะลุผ่านของแสงที่ผ่านฟิลเตอร์สี

ฟิลเตอร์สีที่จะนำมาใช้ทำเซนเซอร์สีนั้น ควรหาได้ง่ายและมีราคาถูก มีสเปกตรัมการทะลุผ่านของแสงที่เหมาะสม ในงานวิจัยนี้ได้เลือกสติกเกอร์สี ที่ใช้กับแผ่นใสสำหรับเครื่อง Overhead Projector (OHP) เป็นฟิลเตอร์ เช่น สีน้ำเงิน เขียว เหลือง ส้มและแดง ผลการวัดสเปกตรัมการทะลุผ่าน (transmittance) ของฟิลเตอร์เหล่านี้ แสดงในรูปที่ 7.6



รูปที่ 7.5 สเปกตรัมการตอบสนองทางแสงของ a-Si:H โฟโตโวลตาอิกเซลล์



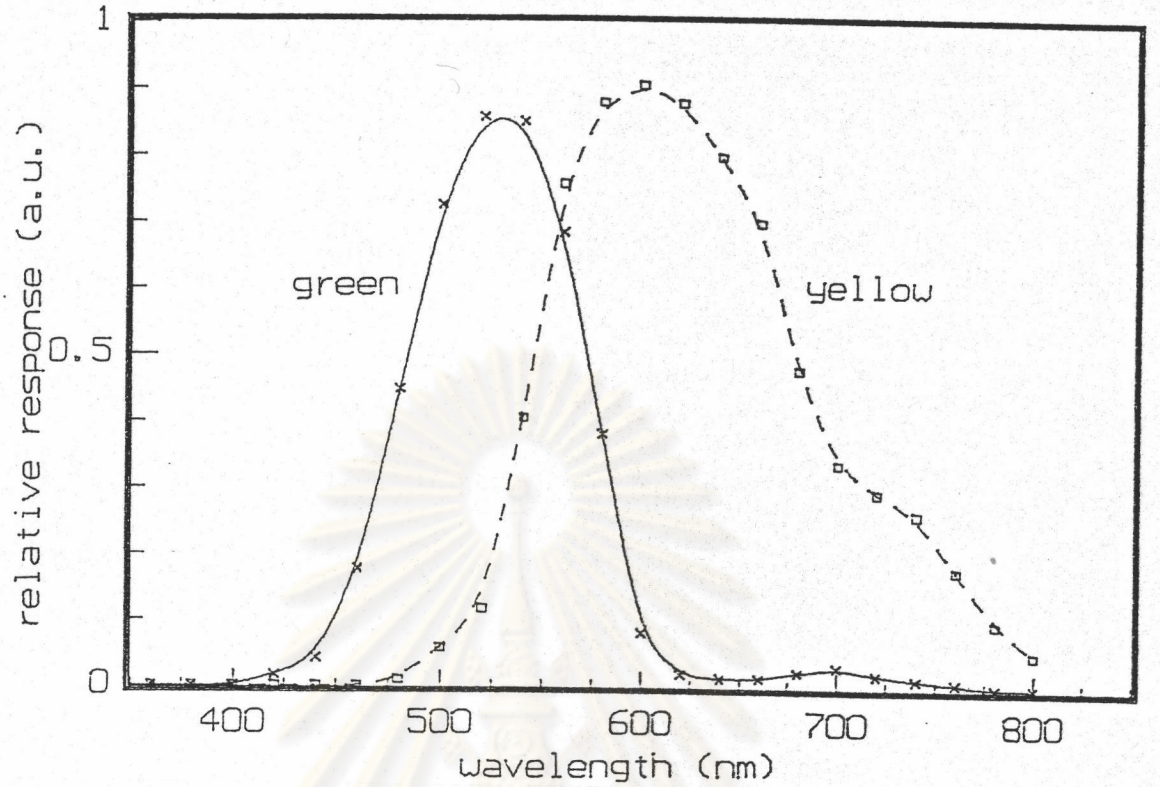
รูปที่ 7.6 สเปกตรัมการทะลุผ่านแสงของฟิลเตอร์สีต่างๆ

3. สเปกตรัมผลตอบสนองทางแสงของเซนเซอร์สี a-Si:H (มี color filter)

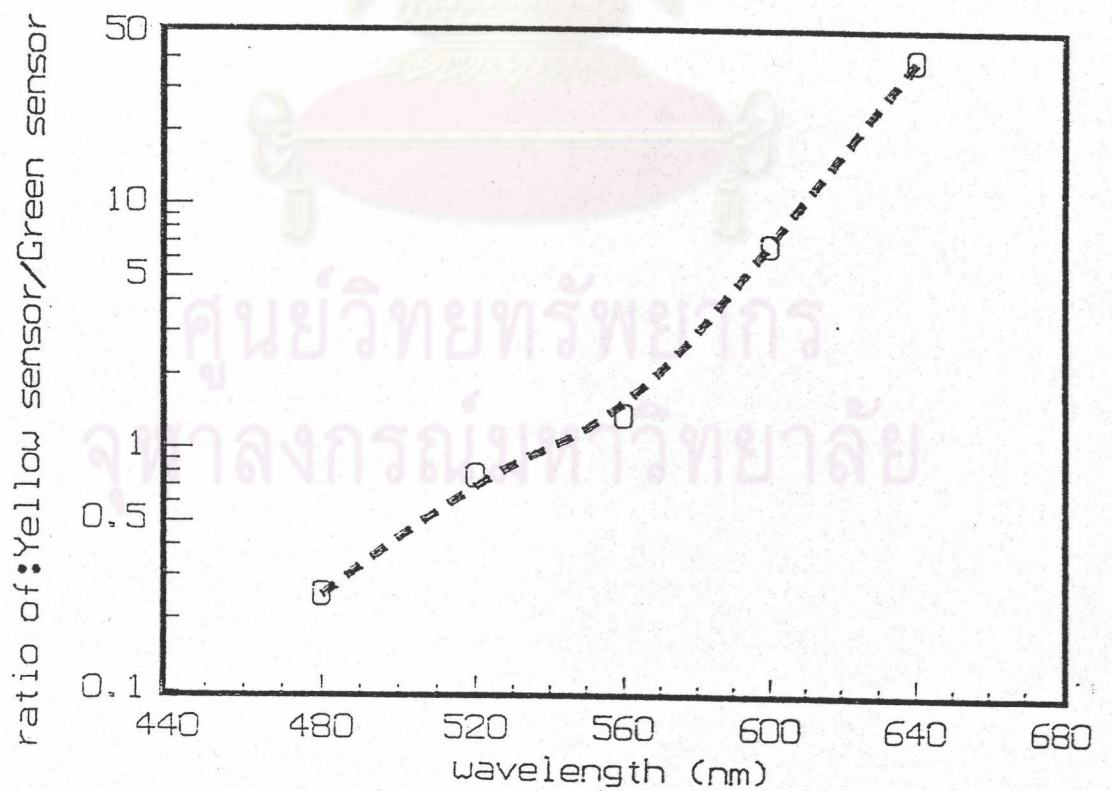
เมื่อนำ color filter ที่คัดเลือกไว้ในหัวข้อ 2. มาติดบนโฟโตโวลตาอิกเซลล์จะได้สิ่งประดิษฐ์เซนเซอร์สี ลักษณะสเปกตรัมการตอบสนองทางแสง(กระแสไฟฟ้าเอาท์พุท) ของเซนเซอร์สี เกิดจากผลคูณของสเปกตรัมของเซลล์ และสเปกตรัมของฟิลเตอร์ รูปที่ 7.7 แสดงผลการวัดสเปกตรัมการตอบสนองทางแสง(กระแสไฟฟ้าเอาท์พุท) ของเซนเซอร์สีเหลืองและเซนเซอร์สีเขียว จากรูปจะพบว่า สเปกตรัมของเซนเซอร์ทั้งสองมีการเหลื่อมซ้อนกันในช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสม อัตราส่วน(ผลหาร) ระหว่างผลตอบสนองทางแสง(กระแสไฟฟ้าเอาท์พุท) ของเซนเซอร์ทั้งสองตัวจะเปลี่ยนไปตามความ ยาวคลื่นแสงและอัตราส่วนนี้จะไม่ขึ้นกับความเข้มแสง ดังแสดงในรูปที่ 7.8

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของผลตอบ กับความยาวคลื่นแสง ในช่วง 480-640 nm มีลักษณะเป็นฟังก์ชันแบบเชิงเส้น ดังนั้น ถ้าเราทราบอัตราส่วนของผลตอบสนองทางแสงของเซนเซอร์ทั้งสองตัวนี้ เราก็จะสามารถบอกถึงค่าความยาวคลื่น (สีของแสงที่มาตกกระทบ)ได้ ความแตกต่างของอัตราส่วนที่สีต่างๆ กันนั้น แสดงถึงความสามารถในการแยกแยะสี ด้วยเซนเซอร์ตัวนี้เราสามารถแยกแยะได้ว่า แสงที่เข้ามานั้นเป็นสี น้ำเงิน เขียว เหลือง หรือแดงได้(21) นอกจากนี้ เนื่องจากอัตราส่วนของผลตอบไม่ขึ้นกับความเข้มแสง จึงทำให้เซนเซอร์ที่ผลิตได้สามารถทำงานได้ถูกต้อง แม้ความเข้มแสงจะแตกต่างกันไปตามสภาพแวดล้อม ตารางที่ 7.2 สรุปลักษณะสมบัติต่าง ๆ ของเซนเซอร์สีที่ผลิตได้

ผลตอบสนองเชิงเวลาของเซนเซอร์สี ซึ่งจะทำให้ทราบถึง ความเร็วในการทำงาน แสดงอยู่ในรูปที่ 7.9 โดยอินพุทคือสัญญาณแสงจาก LED ความถี่ 2 kHz เราจะได้ค่าความเร็วในการตอบสนอง (Rise Time T_r) ประมาณ 29 μS ที่ R_L = 1 kΩ ซึ่งก็อยู่ใน order เดียวกัน ถ้าเปรียบเทียบกับเซนเซอร์สีประเภทเดียวกันที่ผลิตขายในท้องตลาด เช่น ของบริษัท SANYO ซึ่งมีความเร็วในการตอบสนอง (Rise Time T_r) ประมาณ 10 μs ที่ R_L = 1 kΩ



รูปที่ 7.7 สเปกตรัมการตอบสนองทางแสงของเซนเซอร์สีชนิด a-Si:H



รูปที่ 7.8 อัตราส่วนของผลตอบของเซนเซอร์สี ที่ความยาวคลื่นแสงค่าต่างๆ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

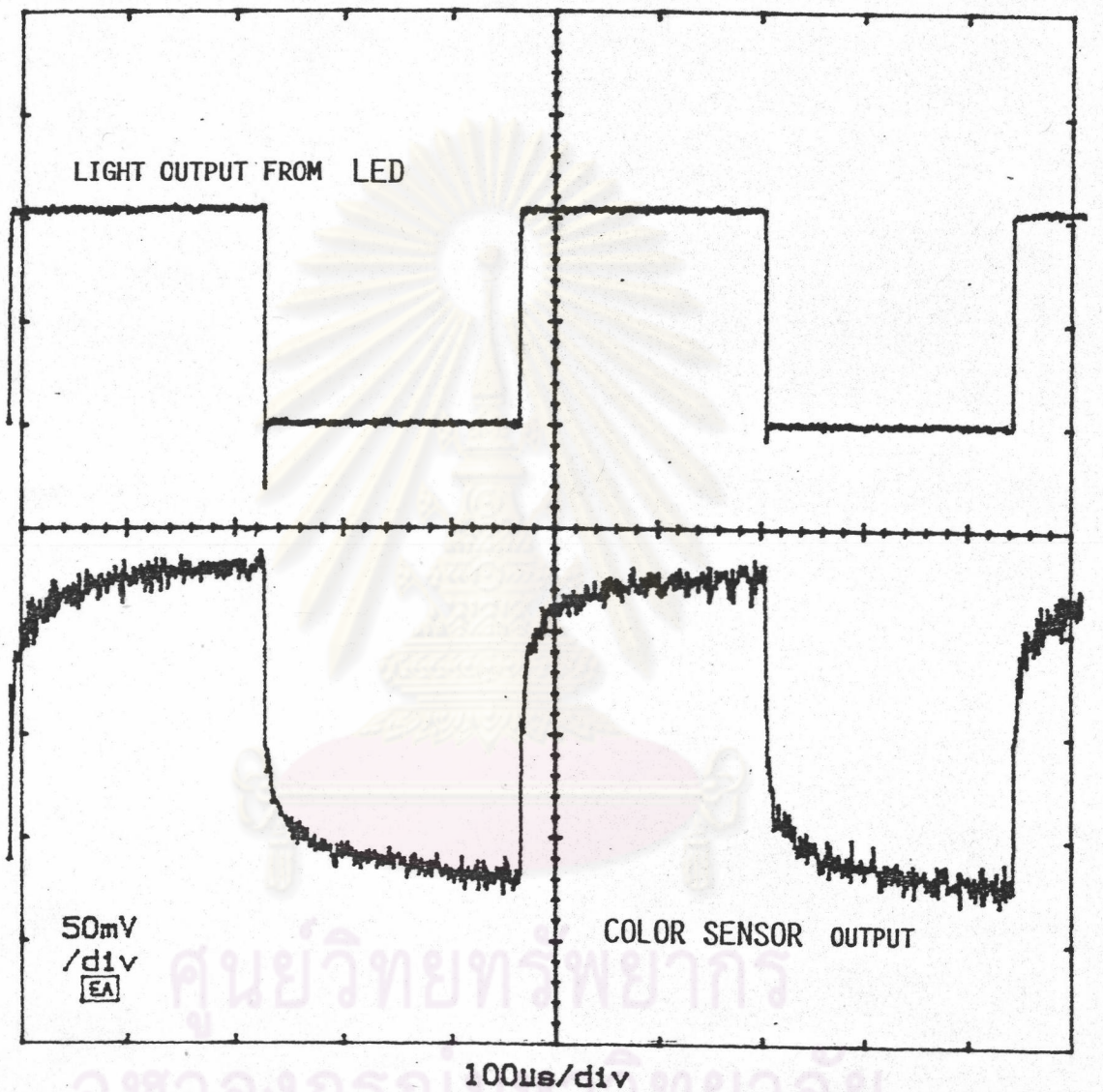
ตารางที่ 7.2 ลักษณะสมบัติของเซนเซอร์สีเหลืองและสีเขียว

ลักษณะสมบัติเฉพาะ	เซนเซอร์สี #1	หน่วย	หมายเหตุ
พื้นที่ (A) Y*	3.3	mm^2	-
G*	3.3	mm^2	
กระแสลัดวงจรขาออก			แสงอินพุท:
(I_{sc}) Y	2.62	μA	แสงขาว
G	1.04	μA	1000 Lx
ความยาวคลื่นยอด			
สเปกตรัม(λ_p) Y	600	nm	-
G	520	nm	
Full Width at Half			
Maximum (FWHM) Y	140	nm	-
G	100	nm	
กระแสมืด (I_d)	180	pA	ไบแอสย้อน:
			V_r=10 mV
Rise Time (T_s)	29	μs	R_L= 1 kΩ
			f= 2 kHz
ความจุไฟฟ้า (C_j)	450	pF	f= 1 kHz

* Y คือเซนเซอร์สีที่ติดฟิลเตอร์สีเหลือง

G คือเซนเซอร์สีที่ติดฟิลเตอร์สีเขียว

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 7.9 ผลตอบสนองเชิงเวลาของเซนเซอร์สี

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วงจรประมวลผลเอาท์พุทของเซนเซอร์สี

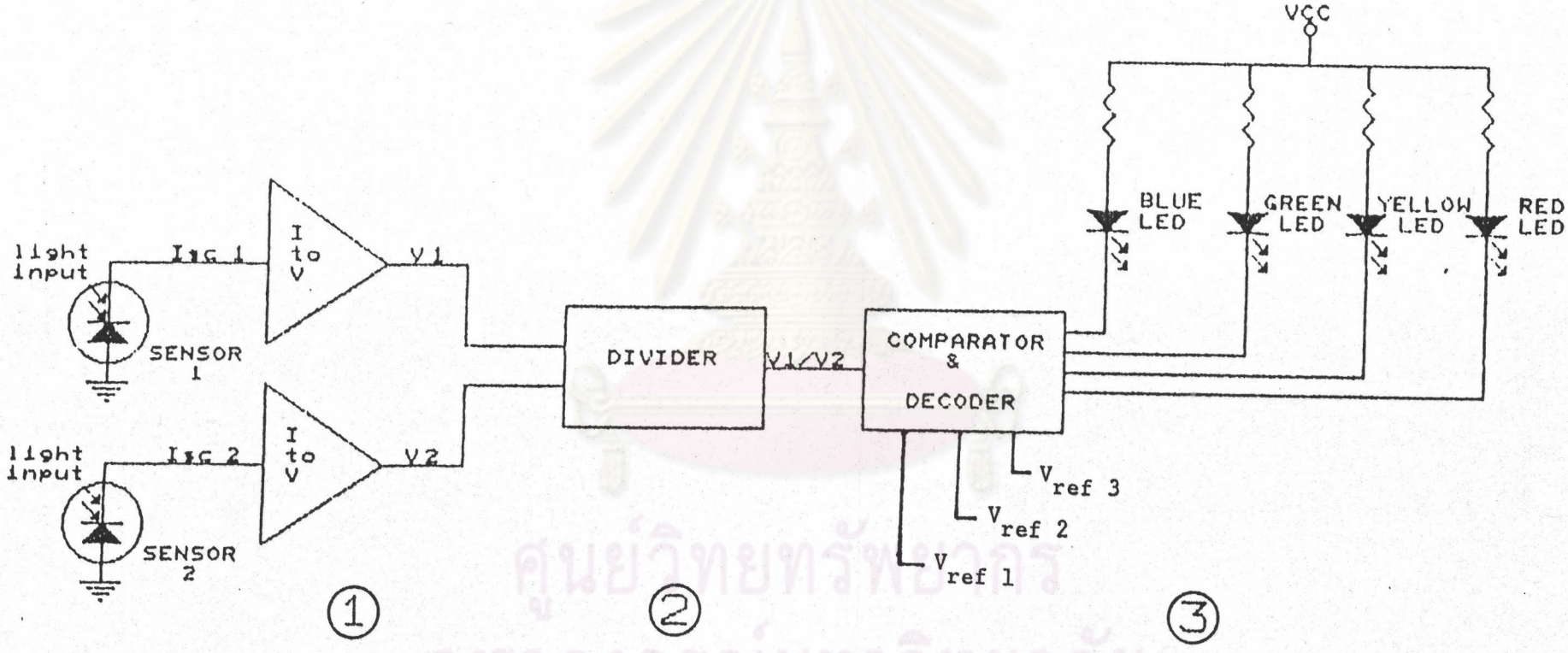
ในการนำเอาเซนเซอร์สีมาใช้งานจริงนั้น จำเป็นจะต้องมีวงจร เพื่อหาอัตราส่วนของผลตอบจากเซนเซอร์ และแสดงผลว่าเป็นสีอะไรหรือควบคุมอุปกรณ์อื่นๆ โดยอัตโนมัติ รูปที่ 7.10 แสดง Block Diagram ของวงจรประมวลผลตอบจากเซนเซอร์และแสดงผลด้วย LED (22) ส่วนประกอบที่สำคัญของวงจรมีดังต่อไปนี้

1. วงจรเปลี่ยนสัญญาณกระแสลัดวงจรเป็นแรงดันไฟฟ้า และขยายให้มีค่ามากพอ เพื่อส่งเข้าสู่วงจรหาร

2. วงจรหาร ทำหน้าที่หาอัตราส่วนของสัญญาณแรงดันที่มาจากวงจรขยาย อัตราส่วนนี้จะสัมพันธ์กับความยาวคลื่นแสง(สี)ที่มาตกกระทบเซนเซอร์

3. วงจรเปรียบเทียบและแสดงผล จะทำการเปรียบเทียบอัตราส่วนที่หาได้กับแรงดันอ้างอิง 3 ระดับ จากนั้นทำการถอดรหัสจากสัญญาณของวงจรเปรียบเทียบเพื่อเลือกขับ LED ตัวใดตัวหนึ่งใน 4 ตัวให้สว่าง ดังแสดงในตารางที่ 7.3 ส่วนในรูปที่ 7.11 เป็น schematic diagram ของวงจรทั้งหมด รูปที่ 7.12 เป็นภาพถ่ายของวงจรจริง(19)

ได้มีการนำเอาเซนเซอร์และวงจรทั้งระบบ ไปทดลองใช้งานตรวจวัดสีที่ส่องมาจาก Tungsten lamp ผ่านกระดาษแก้วสีต่างๆ ปรากฏผลว่า สามารถตรวจรู้สีและแสดงผลออกมาได้ว่าสีที่เข้ามาเป็นสี แดง เหลือง เขียว หรือน้ำเงิน ในรูปที่ 7.13 เป็นระบบเซนเซอร์ที่สร้างเสร็จสมบูรณ์แล้ว



รูปที่ 7.10 block diagram ของวงจรที่ใช้ร่วมกับเซนเซอร์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 7.3 ผลตอบของวงจรเมื่อแสงที่ตกกระทบเป็นสีต่างๆ กัน

สีของแสงอินพุท	V_{in}	หลอดไฟ หรือ LED ที่จะสว่าง
น้ำเงิน	$V_{in} < V_{ref1}$	น้ำเงิน
เขียว	$V_{ref1} < V_{in} < V_{ref2}$	เขียว
เหลือง	$V_{ref2} < V_{in} < V_{ref3}$	เหลือง
แดง	$V_{ref3} < V_{in}$	แดง

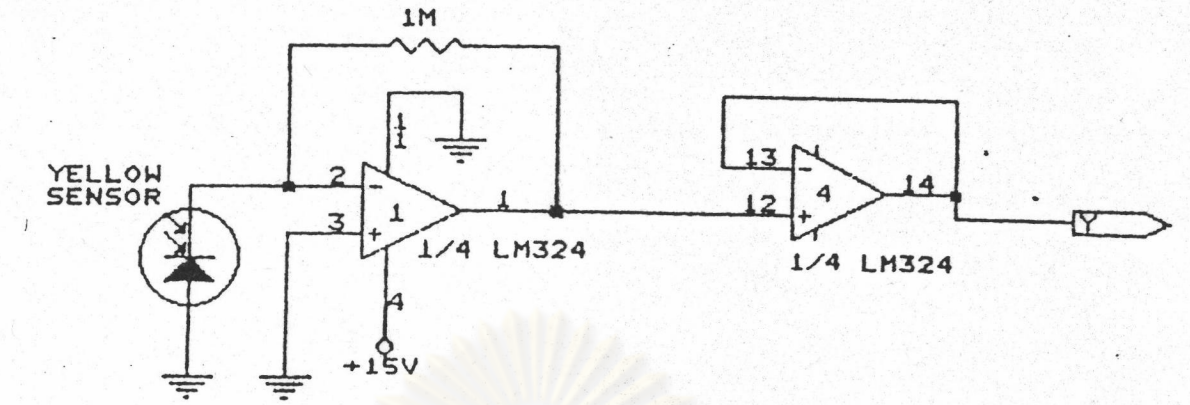
หมายเหตุ $V_{ref1} < V_{ref2} < V_{ref3}$

สรุปและวิจารณ์

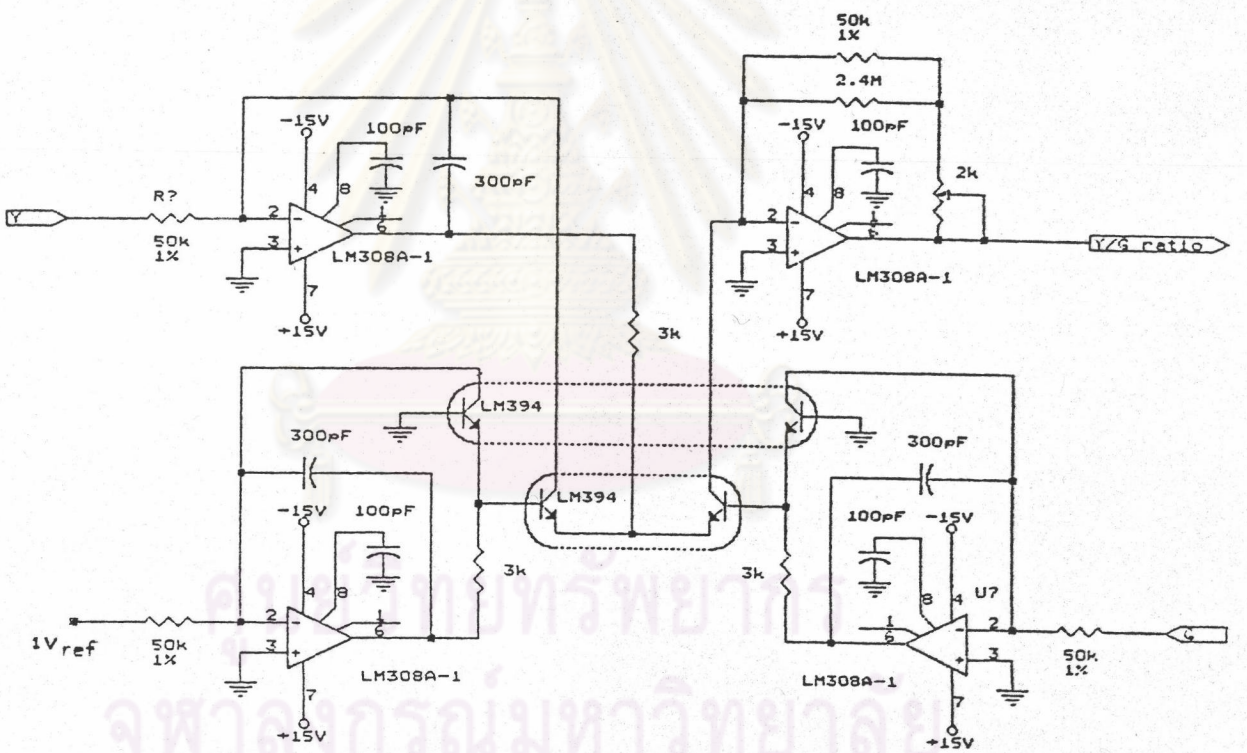
ประสบความสำเร็จในการออกแบบ และผลิตเซนเซอร์ตรวจวัดสีของแสง จากวัสดุอะมอร์ฟัสซิลิคอน เซนเซอร์ตรวจวัดสีของแสงที่พัฒนาขึ้นนี้เป็นตัวอย่างหนึ่งของการนำเซลล์แสงอาทิตย์มาประยุกต์ใช้งาน โดยเพียงแต่ติดฟิลเตอร์สีไว้ด้านหน้าของเซลล์ฯ ก็จะได้เซนเซอร์สีตามต้องการ

เซนเซอร์สีที่ผลิตได้มีทั้งรุ่น single color (มีฟิลเตอร์สีเดียว) และรุ่น multi color (มีฟิลเตอร์สี 2 สี) ลักษณะเด่นของชนิด multi color คือ สามารถตรวจสอบสีของแสงได้ตั้งแต่สีแดง สีเหลือง สีเขียว ไปจนถึงสีน้ำเงิน อย่างไรก็ดี เซนเซอร์สีที่มีฟิลเตอร์ 2 สี ก็ยังมีข้อจำกัดอยู่ที่ สามารถตรวจรู้สีที่อยู่ในสเปกตรัมของแสงที่เป็นสี monochrome คือมีสีเดียวเท่านั้น ถ้าแสงอินพุทเกิดจากแสงหลายสีผสมกันการตรวจวัดจะให้ผลผิดพลาดได้ ดังนั้นการพัฒนาในขั้นต่อไป ควรจะทำเซนเซอร์สีที่มีฟิลเตอร์ 3 สีซึ่งจะสามารถตรวจวัดสีได้อย่างครอบคลุมที่สุด

เซนเซอร์สีเป็นสิ่งประดิษฐ์ทางออปโตอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถบอกสีของแสงได้โดยตรง ดังนั้นจึงหวังว่า ผลงานวิจัยเรื่องนี้คงจะเป็นประโยชน์ต่อภาคอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการตรวจวัดสีบ้างไม่มากก็น้อย



a)



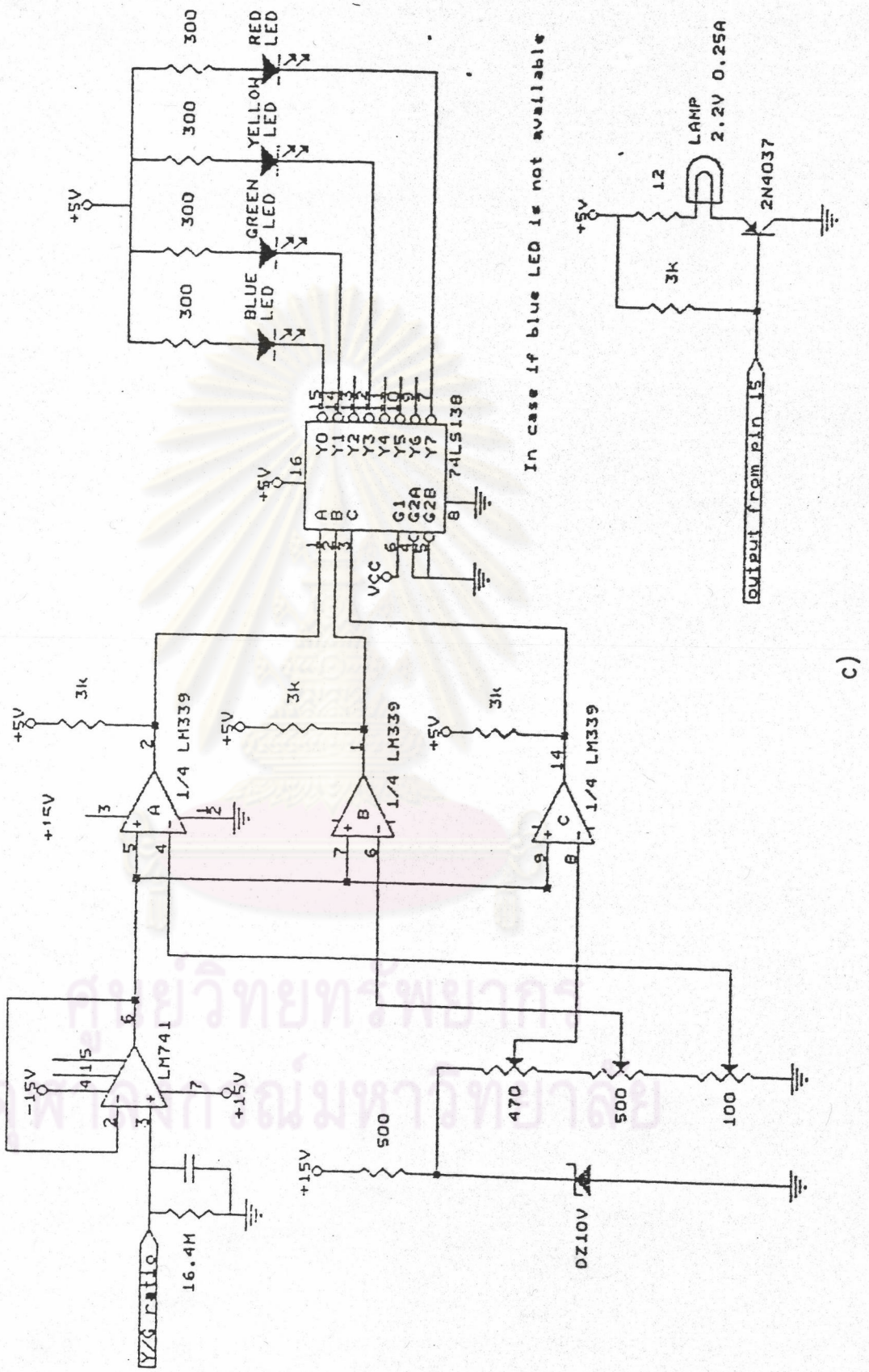
b)

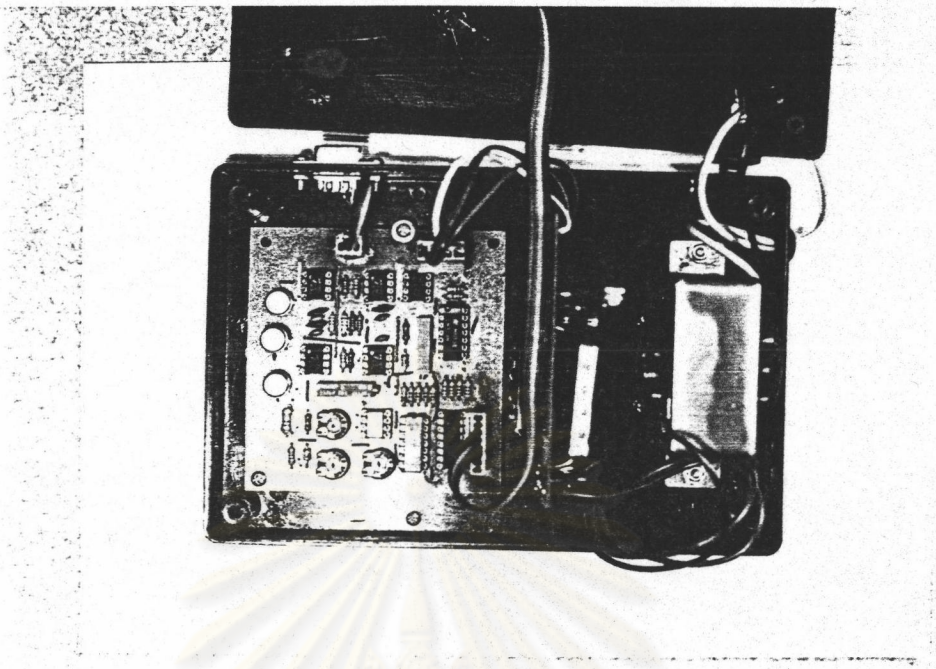
รูปที่ 7.11 แสดง schematic diagram ของวงจร

a) วงจรเปลี่ยนสัญญาณกระแสลัดวงจรเป็นแรงดันไฟฟ้า

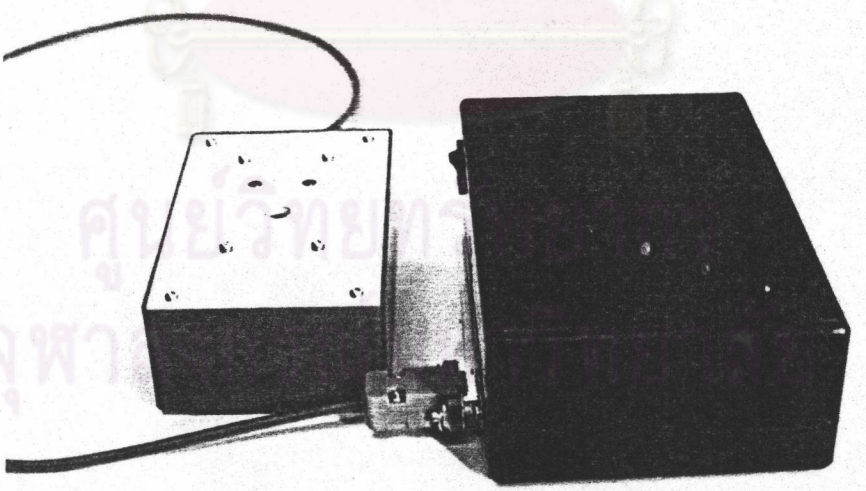
b) วงจรหาร

c) วงจรเปรียบเทียบและแสดงผล


RED LED
YELLOW LED
GREEN LED
BLUE LED
300
+5V
74LS138
Y0 Y1 Y2 Y3 Y4 Y5 Y6 Y7
A B C G1 G2A G2B
VCC
In case if blue LED is not available
LAMP 2.2V 0.25A
2N4037
12
3k
output from pin 15
LM339
1/4 LM339
+15V
-15V
LM741
16.4M
Y/G ratio
470
500
100
DZ10V
c)



รูปที่ 7.12 ภาพถ่ายของวงจรที่ใช้กับเซนเซอร์สี



รูปที่ 7.13 ภาพถ่ายระบบเซนเซอร์ตรวจวัดสีที่สร้างเสร็จสมบูรณ์แล้ว