

การศึกษาลักษณะสมบัติของอะมอร์ฟัสซิลิคอนและการประยุกต์ใช้ในงานออปโตอิเล็กทรอนิกส์

นาย ภาวิน สยามชัย



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2535

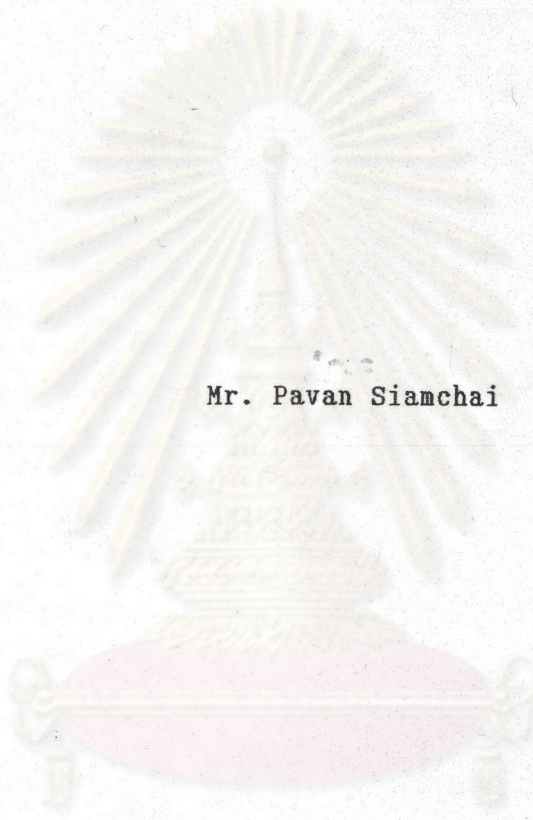
ISBN 974-581-687-6

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

018487

117173480

Characterization of Amorphous Silicon and Its Applications to
Optoelectronic Devices



Mr. Pavan Siamchai

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering

Department of Electrical Engineering

Graduate School

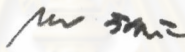
Chulalongkorn University

1992

ISBN 974-581-687-6


หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาลักษณะสมบัติของอะมอร์ฟัสซิลิคอนและการประยุกต์ใช้ในงาน
 ออปโตอิเล็กทรอนิกส์
โดย นาย ภาวัน สยามชัย
ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. ดุสิต เครื่องงาม

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของ
การศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต



..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ ดร. ถาวร วิชัยรักษ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



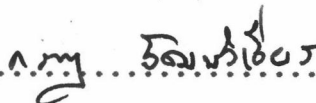
..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)



..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ดุสิต เครื่องงาม)



..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. มนต์รี สวัสดิ์ศฤงฆาร)



..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.กรกฎ วัฒนวิเชียร)



ภาควิชา สยามชัย : การศึกษาลักษณะสมบัติของอะมอร์ฟัสซิลิคอนและการประยุกต์ใช้ในงาน
ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ (CHARACTERIZATION OF AMORPHOUS AND ITS APPLICATIONS
TO OPTOELECTRONIC DEVICES) อ.ที่ปรึกษา : ผศ.ดร. กุสิต เครื่องงาม, 132 หน้า.
ISBN 974-581-687-6

ได้มีการศึกษาอย่างเป็นระบบเกี่ยวกับการผลิตและคุณสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน
(amorphous silicon ย่อว่า a-Si:H) คุณสมบัติทางด้านโครงสร้างเช่น จำนวนแขนขาของ
a-Si:H ตรวจสอบด้วยวิธี ESR (Electron Spin Resonance) และนำไปเปรียบเทียบกับ
คุณสมบัติการนำไฟฟ้าด้วยแสง พบว่า เงื่อนไขการผลิตที่จะได้ฟิล์มที่มีคุณสมบัติที่ดีที่สุด กล่าวคือจำนวนแขน
ขาน้อยที่สุดคือ อุณหภูมิของแผ่นฐานประมาณ 250 °ซ และใช้ RF power ประมาณ 40 วัตต์

ได้มีการทดลองผลิต a-Si:H เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง ด้วยโครงสร้างรอยต่อชนิด
p-i-n บนแผ่นฐานแก้ว และตรวจสอบคุณสมบัติพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตได้ ด้วยการวัดสเปกตรัม
ผลตอบสนองทางแสง และศักย์ไฟฟ้าภายใน (built-in potential) ต่อจากนั้นได้ทำการปรับปรุง
ประสิทธิภาพของเซลล์ให้ดีขึ้น ด้วยการหาค่าความหนาที่เหมาะสมของรอยต่อแต่ละชั้น และออกแบบให้ชั้น
p ทำจากวัสดุอะมอร์ฟัสซิลิคอนคาร์ไบด์ซึ่งมีขนาดช่องว่างพลังงานกว้างกว่าชั้น i ผลการปรับปรุงได้
เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 6.67 %

ในการนำเซลล์ฯไปใช้งาน ได้ทดลองออกแบบและผลิตเซลล์ฯ ให้มีโครงสร้างเป็นวงจรรวม
(Integrated Type) โดยได้ผลิตโมดูลที่มีเซลล์ย่อย 12 ตัว ต่ออนุกรมกันบนแผ่นฐานแก้วเดียวกัน และ
ได้นำโมดูล 3 ตัวมาต่ออนุกรมกันเป็นแผงใหญ่ เพื่อนำไปใช้งานชาร์จแบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์ได้สำเร็จ

นอกจากนี้ ได้มีการศึกษาการประยุกต์ใช้ฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน ในการผลิตเป็นเซนเซอร์
แบบฟิล์มบางตรวจวัดสีของแสง และมีการสร้างวงจรถ่ายผลตอบจากเซนเซอร์ และนำเอา
ระบบทั้งชุดไปทดลองใช้งาน ได้ผลว่าเซนเซอร์สามารถบอกสีของแสงอินพุตได้อย่างถูกต้องว่าเป็นสีอะไร
ในช่วง visible เช่น สีแดง สีเหลือง สีเขียว และสีน้ำเงิน

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2534

ลายมือชื่อนิสิต ม่อน สยามชัย
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. กุสิต เครื่องงาม
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม -

C315532 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD : AMORPHOUS SILICON/OPTOELECTRONICS/SOLAR CELL/COLOR SENSOR/
THIN FILM

PAVAN SIAMCHAI : CHARACTERIZATION OF AMORPHOUS SILICON AND ITS
APPLICATIONS TO OPTOELECTRONIC DEVICES.

THESIS ADVISOR : ASSIT.PROF. DUSIT KRANGAM, Dr.Eng. 132 PP.

ISBN 974-581-687-6

A series of systematic study has been done on the fabrication technology and basic properties of hydrogenated amorphous silicon (a-Si:H) thin film. The structural property of a-Si:H has been examined by ESR (Electron Spin Resonance) method. The result showed that a-Si:H prepared at a substrate temperature of about 250 °C and RF power of 40 watts contains the lowest dangling bond density. This is consistent with the result from the photoconductivity measurement.

The a-Si:H film was applied to a low cost thin film solar cell having a structure of a-Si:H p-i-n junction on a glass substrate. Basic device physics of a-Si:H solar cell such as spectrum response and built-in potential has also been studied. Further effort has been made to improvement of the efficiency of a-Si:H solar cell by optimization of p-i-n layer thickness and employing a wide gap p a-SiC:H as a window layer. The highest conversion efficiency obtained so far is 6.67 %.

An integrated-type a-Si:H solar cell consisting of 12 subcells connected in series was designed and fabricated on a common glass substrate. A 12 V-battery charger was realized by connecting 3 glass substrates in series.

A further effort has been made to apply a-Si:H to a thin film visible color sensor. With the data processing circuit, the sensor can distinguish the color of the light in the visible region such as red, yellow, green, and blue.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....
ปีการศึกษา..... 2534.....

ลายมือชื่อนิติ..... ท่อน สยามชัย.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... [Signature].....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม..... -.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโทฉบับนี้ ได้ทำการวิจัยที่ ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์ สารกึ่งตัวนำ (SDRL) ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ ด้วยความช่วยเหลือทั้งใน ด้านวิชาการ และด้านการปฏิบัติการจาก ผศ.ดร.คณิศร เครื่องงาม ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ ขอขอบพระคุณคณาจารย์ประจำห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ซึ่งได้แก่ ศ.ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว รศ.ดร.มนตรี สวัสดิ์ศฤงฆาร รศ.ดร.บรรยง โตประเสริฐพงศ์ ผศ.ดร.ชัมพล อังตรเสน ผศ.ดร.เกรียงศักดิ์ เจริมดิระกุล ผศ.ดร.ชารา ชลปราชญ์ และ ดร.มานะ ศรียุทธศักดิ์ ที่ได้ให้คำแนะนำที่มีค่า และได้ให้กำลังใจในการทำงานแก่ผู้วิจัยมาโดย ตลอด

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้แก่ ศ.ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว รศ.ดร.มนตรี สวัสดิ์ศฤงฆาร รศ.ดร.กรกฎ วัฒนวิเชียร และ ผศ.ดร.คณิศร เครื่องงาม สำหรับคำแนะนำ ข้อคิดเห็นและคำวิจารณ์ต่าง ๆ ที่มีค่ายิ่ง

นอกจากนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ นิสิตปริญญาเอก คุณสมชัย รัตนธรรมพันธ์ และนิสิต ปริญญาโทอันได้แก่ คุณสุวัฒน์ โสภิตพันธ์ คุณวิโรจน์ บุญโกสัมภ์ สำหรับข้อคิดเห็นและคำแนะนำ ในการทำงาน รวมทั้ง นิสิตปริญญาตรี คือ คุณบัณฑิต อุดมพรวิรัตน์ คุณพรศักดิ์ วัฒนภักดีเดชา และคุณวรยุทธ วรสุบิน ซึ่งให้ความช่วยเหลือในงานวิจัยเป็นอย่างดี ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ของ SDRL ทุกท่าน โดยเฉพาะ คุณบัณฑิตา รัฐวิเศษ คุณศุภโชค และคุณขวัญเรือน ไทยน้อย คุณอนุศักดิ์ เกตุสำราญ สำหรับความช่วยเหลือทางด้านเทคนิคต่าง ๆ และงานทางด้านธุรการ

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ สถาบันเทคโนโลยีชีวภาพและวิศวกรรมพันธุศาสตร์ และศูนย์ เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับความช่วยเหลือทางด้านเครื่องมือวัด และที่สำคัญคือ คณะกรรมการพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (ก.พ.ว.ท.) ผู้สนับสนุนทางด้านทุนการศึกษาตลอดระยะเวลา 2 ปีของการศึกษาในระดับปริญญาโทฉบับนี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฉ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
2. การผลิตฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน.....	5
ระบบ Glow Discharge Plasma CVD.....	5
ขั้นตอนการผลิตฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน.....	9
3. การศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน.....	13
ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับอะมอร์ฟัสซิลิคอน.....	14
1. อะมอร์ฟัสคืออะไร.....	14
2. คุณสมบัติสำคัญของวัสดุอะมอร์ฟัส.....	14
3. โครงสร้างของอะมอร์ฟัสซิลิคอน (a-Si:H).....	17
การศึกษาคุณสมบัติทางโครงสร้างของ a-Si:H ด้วยวิธี Electron Spin Resonance (ESR).....	17
1. หลักการของ ESR.....	19

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2. วิธีการวัด ESR.....	22
2.1 เครื่องมือวัด ESR.....	22
2.2 การคำนวณจำนวนของแกนขาด(Spin density)....	25
2.3 การวัดค่า g-factor ของ a-Si:H.....	26
3. ผลการทดลองวัดจำนวนแกนขาดใน a-Si:H.....	29
สรุปและวิจารณ์.....	33
4. การประยุกต์ใช้งานฟิล์มบาง a-Si:H เป็นเซลล์แสงอาทิตย์.....	34
คุณสมบัติเด่นของการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์จากอะมอร์ฟัสซิลิคอน.....	34
ทฤษฎีพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H.....	38
1. คุณสมบัติทางกายภาพและโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์.....	38
2. ลักษณะสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์.....	43
วิธีการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H.....	45
สรุปและวิจารณ์.....	49
5. การปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน.....	52
หลักการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์	
ด้วยรอยต่อเฮตเตอโรของ p a-Si:H/i a-Si:H.....	52
การปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H	
รอยต่อเฮตเตอโรที่ใช้ p a-SiC:H เป็นชั้นหน้าต่างกว้างรับแสง.....	56
การวิเคราะห์เหตุผลของการเพิ่มของประสิทธิภาพ	
ด้วยรอยต่อเฮตเตอโร p a-SiC:H / i a-Si:H.....	66
1. สเปกตรัมผลตอบสนองทางแสงของเซลล์แสงอาทิตย์	
ชนิด a-Si:H.....	66
3. Built-in Potential ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด	
a-Si:H.....	69
สรุปและวิจารณ์.....	75

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6. การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Integrated Type และการ ประจุกต์ใช้งานเป็น battery charger.....	76
การออกแบบเซลล์ฯ แบบ Integrated Type.....	77
การผลิตเซลล์ฯ แบบ Integrated Type.....	81
ผลการผลิตเซลล์ฯ แบบ Integrated Type.....	84
สรุปและวิจารณ์.....	95
7. การประจุกต์ใช้งาน a-Si:H เป็นเซนเซอร์ตรวจวัดสีของแสง (Color Sensor).....	99
หลักการทํางานและโครงสร้างของเซนเซอร์ตรวจวัดสีของแสง.....	101
วิธีการผลิตเซนเซอร์สี ชนิด a-Si:H.....	101
ผลการผลิตเซนเซอร์สี ชนิด a-Si:H.....	105
1. สเปกตรัมผลตอบสนองทางแสงของ a-Si:H โพลีโวลตาอิกเซลล์ (ที่ยังไม่ได้ติดฟิลเตอร์).....	105
2. การวัดการทะลุผ่านของแสงผ่านฟิลเตอร์สี.....	105
3. สเปกตรัมผลตอบสนองทางแสงของเซนเซอร์สี a-Si:H (มี color filter).....	108
วงจรประมวลผลเอาต์พุทของเซนเซอร์สี.....	112
สรุปและวิจารณ์.....	114
8. สรุป.....	118
รายการอ้างอิง.....	116
รายชื่อผลงานตีพิมพ์และประชุมทางวิชาการ.....	124
ภาคผนวก	
ก.	127
ข.	131
ประวัติผู้เขียน.....	132

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1	แผ่นฐานที่ใช้ปลูก a-Si:H ในงานวิจัย..... 11
ตารางที่ 2.2	เงื่อนไขโดยสรุปในการผลิตฟิล์ม a-Si:H..... 12
ตารางที่ 4.1	ต้นทุนการผลิต(จากการคำนวณ)ของเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิดผลึกซิลิคอนและอะมอร์ฟิซิลิคอน (2)..... 37
ตารางที่ 4.2	เปรียบเทียบพารามิเตอร์ที่สำคัญของซิลิคอนผลึกเดี่ยวและ อะมอร์ฟิซิลิคอน (10)..... 39
ตารางที่ 4.3	เงื่อนไขในการปลูกฟิล์ม a-Si:H ชั้นต่างๆ ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์..... 48
ตารางที่ 5.1	ผลการผลิตเซลล์ฯ ก่อน(No.1) และ หลัง(No.2) การปรับปรุงเครื่องมือ..... 57
ตารางที่ 5.2	ผลการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H..... 63
ตารางที่ 5.3	ค่า built-in potential(V_b) และ open circuit voltage (V_{oc}) ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H..... 70
ตารางที่ 6.1	เปรียบเทียบลักษณะสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Integrated Type รุ่นต่างๆ ที่ผลิตได้..... 98
ตารางที่ 7.1	การเปรียบเทียบระหว่างอะมอร์ฟิซิลิคอนและผลึกซิลิคอน ในการมาทำเป็นเซนเซอร์สี..... 100
ตารางที่ 7.2	ลักษณะสมบัติของเซนเซอร์สีเหลืองและสีเขียว..... 110
ตารางที่ 7.3	ผลตอบของวงจรเมื่อแสงที่ตกกระทบมีสีต่างๆ กัน..... 114

สารบัญภาพ

		หน้า
รูปที่ 1.1	แผนภูมิแสดงขั้นตอนและขอบเขตของงานวิจัย.....	4
รูปที่ 2.1	แผนผังระบบ glow discharge plasma CVD สำหรับปลูก a-Si:H.....	6
รูปที่ 2.2	ภาพถ่ายลักษณะการติดตั้งถังก๊าซและ regulator.....	8
รูปที่ 2.3	ครอบแก้วสุญญากาศ (quartz chamber) สำหรับปลูก a-Si:H.....	8
รูปที่ 2.4	ภาพถ่ายระบบ glow discharge plasma CVD ที่ใช้ในงานวิจัยนี้.....	10
รูปที่ 2.5	ขั้นตอนการผลิต a-Si:H.....	10
รูปที่ 3.1	ลักษณะโครงสร้างของอะตอมซิลิคอนผลึกเดี่ยว a) และ อะมอร์ฟัสซิลิคอน b).....	15
รูปที่ 3.2	เปรียบเทียบโครงสร้างทางอะตอมของวัสดุชนิดต่าง ๆ.....	18
รูปที่ 3.3	ลักษณะ density of states ของผลึก และอะมอร์ฟัสซิลิคอน.....	18
รูปที่ 3.4	การเกิดอิเล็กตรอนสปิน.....	20
รูปที่ 3.5	การเกิด pair electron ด้วยพันธะโควาเลนต์ และการเกิด lone pair electron ในอะมอร์ฟัสซิลิคอน.....	20
รูปที่ 3.6	ปรากฏการณ์ Zeeman โดสระดับพลังงานของอิเล็กตรอนจะถูกแยกออก เป็นหลายระดับเมื่อมีสนามแม่เหล็กมากกระทำ.....	21
รูปที่ 3.7	ชนิดต่างๆ ของ dangling bond.....	21
รูปที่ 3.8	ตัวอย่างการวัด Electron Spin Resonance เพื่อศึกษา คุณสมบัติของวัสดุต่าง ๆ.....	23
รูปที่ 3.9	ภาพเครื่องมือที่ใช้วัด ESR	24
รูปที่ 3.10	ภาพกล่อง (cavity) ใส่ sample ที่จะใช้วัด ESR	24
รูปที่ 3.11	ภาพสเปกตรัมของสัญญาณ ESR ในรูปนี้มีสัญญาณจาก Mn^{++} ซึ่งใช้เป็น Marker เพื่อวัดค่า g-factor ของอะมอร์ฟัสซิลิคอน.....	27

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.12 ผลการวัด สัญญาณของ ESR ของอะมอร์ฟิซิลิคอนซึ่งปลูกด้วยเงื่อนไขกำลังไฟฟ้าที่ต่างกัน.....	30
รูปที่ 3.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง photoconductivity, ESR spin density และ RF power สำหรับปลูกอะมอร์ฟิซิลิคอน.....	31
รูปที่ 3.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง photoconductivity, ESR spin density และอุณหภูมิแผ่นฐานขณะปลูกอะมอร์ฟิซิลิคอน.....	32
รูปที่ 4.1 ตัวอย่างโมดูลของเซลล์ชนิด a-Si:H ขนาดเล็ก สำหรับใช้งาน consumer electronics (2).....	35
รูปที่ 4.2 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ a-Si:H สำหรับการผลิตพลังงานในที่ห่างไกล ชุดนี้มีขนาด 20 kW ตั้งอยู่ที่ Limerick Philadelphia (2).....	35
รูปที่ 4.3 การพัฒนาของประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H (2).....	37
รูปที่ 4.4 a) โครงสร้างของเซลล์ชนิด a-Si:H ที่ใช้แผ่นแก้วเป็นแผ่นฐาน (ชนิดรอยต่อโฮโม) b) โครงสร้างของเซลล์ชนิด a-Si:H ที่ใช้สแตนเลสเป็นแผ่นฐาน.....	39
รูปที่ 4.5 สเปกตรัมสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของ a-Si:H และของผลึก Si(6).....	40
รูปที่ 4.6 ความแตกต่างระหว่างรอยต่อ p-n และ p-i-n ของ a-Si:H.....	42
รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบลักษณะสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอนผลึกเดี่ยว กับแบบอะมอร์ฟิซิลิคอน ที่ AM1, 100 mW/cm ² (10).....	42
รูปที่ 4.8 กลไกการเกิด photocurrent ขณะที่มี และไม่มีกรไบแอส a) ในสภาวะลัดวงจร: สนามไฟฟ้าภายในมีค่าสูง, โวลต์ที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยแสง ส่วนใหญ่ไปถึงรอยต่อ p-i b) ในสภาวะเปิดวงจร: เนื่องจากสนามไฟฟ้าภายในมีค่าน้อย โวลต์ที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยแสงที่อยู่ถัดจากรอยต่อ p-i จะรวมตัวกับอิเล็กตรอนและหายไป.....	44

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า	
รูปที่ 4.9	ลักษณะสมบัติ J/V ของเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาวะมืด และเมื่อได้รับแสง ซึ่งได้รับผลจาก การขึ้นกับการไบแอสของ photocurrent.....	44
รูปที่ 4.10	แผนภูมิขั้นตอนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์.....	50
รูปที่ 4.11	ภาพถ่ายแผ่น Mask สแตนเลส สำหรับใช้เคลือบอะลูมิเนียมเป็นขั้ว ด้านหลังเซลล์แสงอาทิตย์.....	51
รูปที่ 4.12	ภาพถ่ายเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตได้ในขั้นตอนต่างๆ.....	51
รูปที่ 5.1	โครงสร้างของเซลล์ฯ ชนิดรอยต่อเฮเทอโร (heterojunction).....	54
รูปที่ 5.2	แผนภูมิแถบพลังงานของเซลล์ฯ ชนิดรอยต่อเฮเทอโร.....	54
รูปที่ 5.3	สเปกตรัมผลตอบสนอง(collection efficiency) ของ เซลล์ฯ a-Si:H ชนิดรอยต่อโพลิโม และชนิดรอยต่อเฮเทอโร จาก Y.Hamakawa (16).....	55
รูปที่ 5.4	เกียร์ทดขนาด 6:1 ที่ต่อเข้ากับมอเตอร์หมุนแท่นวางแผ่นฐาน.....	55
รูปที่ 5.5	ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะสมบัติเอากัฟท์ของเซลล์ฯ กับความหนาของ ชั้น p a-SiC:H.....	59
รูปที่ 5.6	ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะสมบัติเอากัฟท์ของเซลล์ฯ กับความหนาของ ชั้น i a-Si:H.....	60
รูปที่ 5.7	ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะสมบัติเอากัฟท์ของเซลล์ฯ กับความหนาของ ชั้น n μ C-Si.....	61
รูปที่ 5.8	ลักษณะสมบัติเอากัฟท์ของเซลล์แสงอาทิตย์ 3 รุ่น.....	64
รูปที่ 5.9	ตัวอย่างการ optimize ค่าความหนาของชั้น p a-SiC:H ของ Y. Hamakawa(12).....	65
รูปที่ 5.10	ตัวอย่างการ optimize ค่าความหนาของชั้น i a-Si:H ของ Y. Tawada (17).....	65
รูปที่ 5.11	ระบบการวัดสเปกตรัมผลตอบสนองทางแสง (collection efficiency) ของเซลล์แสงอาทิตย์.....	67

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.12 ผลการวัดสเปกตรัมผลตอบสนองทางแสง(collection efficiency) ของเซลล์ฯ ชนิดรอยต่อโฮโม และชนิดรอยต่อเฮเทอโร.....	68
รูปที่ 5.13 แผนภาพระบบการวัด built-in-potential ของเซลล์ฯ a-Si:H ด้วยวิธี BASREA (Back-Surface-Reflected-Electro-Absorption).....	71
รูปที่ 5.14 ภาพถ่ายระบบการวัด built-in-potential ของเซลล์ฯ a-Si:H ด้วยวิธี BASREA ที่ใช้จริง.....	72
รูปที่ 5.15 ผลการวัดสเปกตรัมของ BASREA (ΔS) ของเซลล์แสงอาทิตย์ การเกิด peak หลายตำแหน่ง เกิดจาก interference สอดของสเปกตรัมอยู่ที่ความยาวคลื่น 690 nm ซึ่งตรงกับขนาดช่องว่างพลังงานของ a-Si:H พอดี.....	73
รูปที่ 5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณ BASREA กับแรงดันไบแอส V_{dc} ที่ป้อนเข้าสู่เซลล์ฯ V_{pp} คือค่า peak-to-peak ของแรงดัน V_{ac} ที่ modulate V_{dc}	74
รูปที่ 6.1 ภาพ top view ของเซลล์ฯ integrated type รุ่นที่ 1 ในขั้นตอนการผลิต.....	78
รูปที่ 6.2 วงจรสมมูลของเซลล์ฯ แบบ integrated type.....	79
รูปที่ 6.3 ภาพ top view ของเซลล์ฯ integrated type รุ่นที่ 2 ในขั้นตอนการผลิต.....	80
รูปที่ 6.4 ภาพ top view ของเซลล์ฯ integrated type รุ่นที่ 3 ในขั้นตอนการผลิต.....	82
รูปที่ 6.5 กระบวนการกัด pattern ของ แผ่นฐาน ITO.....	83
รูปที่ 6.6 ภาพถ่ายขั้นตอนการผลิตเซลล์ฯ แบบ integrated type รุ่นที่ 1.....	85
รูปที่ 6.7 ภาพถ่ายขั้นตอนการผลิตเซลล์ฯ แบบ integrated type รุ่นที่ 2.....	86
รูปที่ 6.8 ภาพถ่ายขั้นตอนการผลิตเซลล์ฯ แบบ integrated type รุ่นที่ 3.....	87

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 6.9 ผลการวัดลักษณะสมบัติเอากัฟของเซลล์ฯ แบบ integrated type รุ่นที่ 2 เปรียบเทียบกับเซลล์ฯ เดี่ยวขนาด 0.03 cm^2	88
รูปที่ 6.10 ผลการวัดลักษณะสมบัติเอากัฟของเซลล์ฯ แบบ integrated type รุ่นที่ 2 เปรียบเทียบเซลล์ฯ ในแผ่นเดือวกันที่ต่ออนุกรมกันตั้งแต่ 1 ตัว 2 ตัว 3 ตัว 4 ตัว จนถึง 5 ตัว.....	89
รูปที่ 6.11 ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะสมบัติเอากัฟของเซลล์ฯ แบบ integrated type รุ่นที่ 2 กับจำนวนเซลล์ฯ ที่ต่ออนุกรมกันบนแผ่นฐานเดือวกัน.....	90
รูปที่ 6.12 ผลการวัดลักษณะสมบัติเอากัฟของเซลล์ฯ แบบ integrated type รุ่นที่ 3 ซึ่งเป็นเซลล์ฯ ที่ต่ออนุกรม 12 ตัวบนแผ่นฐานเดือวกัน	92
รูปที่ 6.13 ผลการวัดลักษณะสมบัติเอากัฟของเซลล์ฯ แบบ integrated type รุ่นที่ 3 เปรียบเทียบเซลล์ฯ ในแผ่นเดือวกันที่ต่ออนุกรมกันตั้งแต่ 1 ตัว 3 ตัว 6 ตัว 9 ตัว จนถึง 12 ตัว.....	93
รูปที่ 6.14 ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะสมบัติเอากัฟของเซลล์ฯ แบบ integrated type รุ่นที่ 3 กับจำนวนเซลล์ฯ ที่ต่ออนุกรมกันบนแผ่นฐานเดือวกัน.....	94
รูปที่ 6.15 ภาพถ่ายขั้นตอนการประกอบ case ให้แก่โมดูล.....	96
รูปที่ 6.16 ภาพถ่ายการใช้งานโมดูลเซลล์ฯ ที่ผลิตได้ในการชาร์จแบตเตอรี่ขนาด 12 V.....	96
รูปที่ 6.17 ภาพถ่ายการใช้งานโมดูลเซลล์ฯ ที่ผลิตได้เป็นแหล่งจ่ายไฟให้แก่เครื่องคิดเลข.....	97
รูปที่ 6.18 ภาพถ่ายการใช้งานโมดูลเซลล์ฯ ที่ผลิตได้ในการชาร์จถ่าน NiCd ขนาด 2.4 V.....	97
รูปที่ 7.1 โครงสร้างของเซนเซอร์ตรวจวัดสีของแสง (color sensor).....	102

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 7.2 ภาพตัดขวางของเส้นเชอร์รี่ชนิด a-Si:H ที่ผลิตได้	
a) เส้นเชอร์รี่ที่ติดฟิลเตอร์สีเดียว	
b) เส้นเชอร์รี่ที่ติดฟิลเตอร์สองสี	102
รูปที่ 7.3 แผนภูมิแสดงขั้นตอนการผลิตเส้นเชอร์รี่	
a) เส้นเชอร์รี่ที่ติดฟิลเตอร์สีเดียว	
b) เส้นเชอร์รี่ที่ติดฟิลเตอร์สองสี	103
รูปที่ 7.4 ภาพถ่ายของเส้นเชอร์รี่ที่ผลิตได้	
a) เส้นเชอร์รี่ที่ติดฟิลเตอร์สีเดียว	
b) เส้นเชอร์รี่ที่ติดฟิลเตอร์สองสี	104
รูปที่ 7.5 สเปกตรัมการตอบสนองทางแสงของ a-Si:H โฟโตโวลตาอิกเซลล์.....	106
รูปที่ 7.6 สเปกตรัมการทะลุผ่านแสงของฟิลเตอร์สีต่างๆ.....	107
รูปที่ 7.7 สเปกตรัมการตอบสนองทางแสงของเส้นเชอร์รี่ชนิด a-Si:H.....	109
รูปที่ 7.8 อัตราส่วนของผลตอบของเส้นเชอร์รี่ ที่ความยาวคลื่นแสงค่าต่างๆ.....	109
รูปที่ 7.9 ผลตอบสนองเชิงเวลาของเส้นเชอร์รี่.....	111
รูปที่ 7.10 block diagram ของวงจรที่ใช้ร่วมกับเส้นเชอร์รี่.....	113
รูปที่ 7.11 แสดง schematic diagram ของวงจร	
a) วงจรเปลี่ยนสัญญาณกระแสลัดวงจรเป็นแรงดันไฟฟ้า	
b) วงจรหาร.....	115
c) วงจรเปรียบเทียบและแสดงผล.....	116
รูปที่ 7.12 ภาพถ่ายของวงจรที่ใช้กับเส้นเชอร์รี่.....	117
รูปที่ 7.13 ภาพถ่ายระบบเส้นเชอร์รี่ตรวจวัดสีที่สร้างเสร็จสมบูรณ์แล้ว.....	117