การศึกษาและพัฒนาประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบเซลล์ซ้อนอะมอร์ฟัสซิลิคอนที่สร้างโดยกระบวนการเชิงปริมาณ

THE STUDY AND DEVELOPMENT TANDEM a-Si:H PV MODULE FABRICATED BY A BATCH PROCESS

ศรัณย์ สาตารมณ์

SARAN SATAROM

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

KMITL-2007-EN-M-043-133

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาและพัฒนาประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบเซลล์ซ้อนอะมอร์ฟัสซิลิคอนที่สร้างโดยกระบวนการเชิงปริมาณ

THE STUDY AND DEVELOPMENT TANDEM a-Si:H PV MODULE FABRICATED BY A BATCH PROCESS

ศรัณย์ สาตารมณ์

SARAN SATAROM

เลขหมู่.........
เลขทะเบียน 77976
วัน,เดือน,ปี 12 ก.พ. 2551

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2550

KMITL-2007-EN-M-043-133

THE STUDY AND DEVELOPMENT TANDEM a-Si:H PV MODULE FABRICATED BY A BATCH PROCESS

SARAN SATAROM

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN MICROELECTRONICS ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2007

KMITL-2007-EN-M-043-133

COPYRIGHT 2007
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาและพัฒนาประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบเซลล์ซ้อนอะมอร์ฟัสซิลิคอนที่สร้างโดยกระบวนการเชิงปริมาณ
นักศึกษา	นายศรัณย์ สาตารมณ์
รหัสประจำตัว	46061408
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
พ.ศ.	2550
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.พอพนธ์ สิชฌนุกฤษฏ์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสนอการศึกษาและพัฒนาประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบเซลล์ซ้อนอะมอร์ฟัสซิลิคอนที่สร้างโดยกระบวนการเชิงปริมาณ ด้วยเงื่อนไขการสร้างต่างๆ และการนำแผงเซลล์ไปทดสอบใช้งานกับแสงอาทิตย์ ค่าพารามิเตอร์ประสิทธิภาพต่างๆ จะถูกวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับข้อมูลแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีเสถียรภาพซึ่งสร้างจากเงื่อนไขปกติ แผงเซลล์ซ้อนอะมอร์ฟัสซิลิคอนจะมีค่ากำลังงานที่สูงขึ้นได้อย่างเด่นชัด จากเงื่อนไขการสร้างชั้นฟิล์ม p-i-n/p-i-n อะมอร์ฟัสซิลิคอนที่มีความเหมาะสม ด้วยการใช้ชั้นฟิล์ม p_1(a-SiO) ซึ่งมีการดูดกลืนแสงที่น้อยลง และการใช้อัตราส่วนผสมก๊าซไฮโดรเจนที่มากขึ้นกว่า 10 เท่าในการสร้างชั้น i_1(a-Si:H) ร่วมกับการใช้ชั้นฟิล์มบางไมโครคริสตันไลน์ชนิด n(μc-Si:H) ที่มีการเพิ่มชั้นรอยต่อในทั้งเซลล์บนและเซลล์ล่างเพื่อให้ได้รอยสัมผัสระหว่างชั้นฟิล์มที่ดีขึ้น นอกจากนี้เพื่อปรับปรุงเสถียรภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ให้ดีขึ้น ด้วยการปรับเปลี่ยนเงื่อนไขของอัตราการไหลก๊าซ CH_4 และก๊าซ SiH_4 ในระหว่างการสร้างชั้น i(a-Si:H) ก็ยังได้มีการปรับเปลี่ยนให้เหมาะสมที่สุด และภายหลังที่ร่วมกับการใช้ชั้นตัวนำโปร่งแสง ZnO ที่ด้านหลังแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 0.757 ตร.ม. จะทำให้ค่าเอาท์พุตพารามิเตอร์เริ่มต้นสูงสุดมีค่า V_{OC} 65.7 V, I_{SC} 1.208 A, FF 69.5%, Power 55.1 W และมีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานประมาณ 7.3% ซึ่งจะสูงกว่าการสร้างด้วยเงื่อนไขปกติประมาณ 1% ท้ายที่สุดระยะเวลาการสร้างชั้นฟิล์มบางของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเซลล์ซ้อนอะมอร์ฟัสซิลิคอนสามารถลดลงไปได้ถึง 40% ด้วยการใช้วิธีผ่านไอระเหยของแอลกอฮอล์ภายหลังการสร้างชั้น p_1 และ p_2 เพื่อลดการปนเปื้อนสารโบรอนที่บริเวณรอยสัมผัส p-i

Thesis Title	The Study and Development Tandem a-Si:H PV Module Fabricated by a Batch Process
Student	Mr. Saran Satarom
Student ID.	46061408
Degree	Master of Engineering
Program	Microelectronics Engineering
Year	2007
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Wisut Titiroongruang
Thesis Co Advisor	Dr. Porponth Sichanugrist

ABSTRACT

This thesis proposes the study and development a-Si:H/a-Si:H tandem modules were fabricated by the production line large batch process with the various process parameters and light soaked in outdoor sunlight. The performance parameters were analyzed and compared with module stability data fabricated by the conventional recipe. The tandem module were notably higher output power with the optimization in p-i-n/p-i-n a-Si:H deposition. By using p_1(a-SiO) for lower absorption and applying more H_2 dilution more than 10 times in i_1(a-Si:H) deposition and using n-type μc-Si:H with seed-layer in the top and bottom cells for better interface contact. Furthermore, to improve the stability of tandem module with the change in CH_4 and SiH_4 flow rate in i-layer a-Si:H deposition has also been carried out. The highest initial output parameter after development of 0.757 m^2-size tandem module with ZnO back electrode were V_{OC} 65.7 V, I_{SC} 1.208 A, FF 69.5%, Power 55.1 W and the %efficiency of (7.3% η) is higher than the tandem modules fabricated by the normal process about 1%. Finally, the processing time of cell fabrication could reduce about 40% by introduce the Alcohol vapor treatment after p_1 and p_2-layer deposition for lower boron contamination at the p-i interface.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จเป็นรูปเล่มโดยสมบูรณ์ ด้วยคำแนะนำ และคำปรึกษาจาก รศ.ดร.วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ดร.พอพนธ์ สิชฌนุกฤษฏ์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ข้าพเจ้ารู้สึกทราบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ทั้งสอง และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.สมเกียรติ ศุภเดช และ ผศ.ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ กรรมการพิจารณาหัวข้อ และเค้าโครงวิทยานิพนธ์ที่ให้คำชี้แนะที่เป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุก ๆ ท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณคณะนักวิจัยสถาบันพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ (ISET) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง คุณกอบศักดิ์ ศรีประภา และคุณนิรุธ ปิ่นเกตุ ที่ได้ให้คำปรึกษาอย่างดียิ่งในการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณบริษัทบางกอกโซลาร์ จำกัด และพนักงานทุกๆ ท่านสำหรับความร่วมมือในการปฏิบัติงานวิจัยเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (TGIS) ที่ให้การสนับสนุนทุนในการทำวิจัยและการศึกษาแก่ข้าพเจ้า และขอขอบคุณพี่จัน พี่ตู่ พี่หนิง ที่ให้ความช่วยเหลือและคำปรึกษาที่ดีอย่างต่อเนื่อง

ขอขอบคุณ พี่หมู พี่เอ พี่ๆ เพื่อนและน้องๆ ทุกคนในห้องวิจัยสารกึ่งตัวนำยิ่งยวดและสารกึ่งตัวนำเพชร สจล. ที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องต่างๆ และคอยให้กำลังใจเสมอมา

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนในทุกๆ เรื่อง ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงได้จากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ศรัณย์ สาตารมณ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ...II

กิตติกรรมประกาศ..III

สารบัญ..IV

สารบัญตาราง..VII

สารบัญรูป..IX

สัญลักษณ์และคำย่อ..XII

ศัพท์เทคนิค..XIV

บทที่ 1 บทนำ...1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..1

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา...3

1.3 สมมติฐานของการศึกษา...3

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย..4

1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน.......................................5

1.6 ขอบเขตการวิจัย...6

1.7 ขั้นตอนของการศึกษา..6

บทที่ 2 อะมอร์ฟัสซิลิคอน...8

2.1 ประวัติของอะมอร์ฟัสซิลิคอน...8

2.2 ลักษณะการเกิดของชั้นฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอน..10

2.3 คุณสมบัติของชั้นฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอน..12

2.3.1 คุณสมบัติทางโครงสร้าง...12

2.3.2 คุณสมบัติทางแสง...13

2.3.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้า...16

2.3.3.1 การนำไฟฟ้ากระแสตรง...16

2.3.3.2 การนำไฟฟ้าด้วยแสง..18

2.3.4 คุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำ a-Si:H เมื่อเทียบกับสารกึ่งตัวนำ c-Si...................................19

2.4 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน..20

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4.1 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H รอยต่อ p-i-n ……….....…...………………20

2.4.2 เซลล์แสงอาทิตย์ a-Si:H โครงสร้างอินทิเกรตที่ให้แรงดันเอาท์พุตสูง.......…...24

2.4.3 เซลล์แสงอาทิตย์แบบเซลล์ซ้อนอะมอร์ฟัสซิลิคอน…....…………...………...25

2.5 ปรากฏการณ์เสื่อมประสิทธิภาพในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H……..……..…..…28

บทที่ 3 กระบวนการสร้าง…………………………………………………………..30

3.1 การสร้างชั้นฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอน……....……………..……..…………………..…30

3.1.1 ระบบการสร้างชั้นฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอนแบบแชมเบอร์เดี่ยว…………...…...31

3.1.2 ปัจจัยการสร้างที่มีผลต่อคุณภาพของชั้นฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอน…………….32

3.1.3 การเร่งอัตราการเกิดชั้นฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอนด้วยคลื่นความถี่สูง.…..……..34

3.1.4 การเพิ่มคุณภาพชั้นฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอนด้วยไฮโดรเจนไดรูทชั่น…………35

3.2 กระบวนการสร้างแผงเซลล์แสงอาทิตย์เชิงปริมาณ..36

บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง…………………….………………...…………..……43

4.1 แนวทางการปรับปรุงและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์……………………………...……43

4.1.1 เซลล์ด้านบน (p-i-n Top Cell)…………………………………………………..43

4.1.2 เซลล์ด้านล่าง (p-i-n Bottom Cell)………………………………………………44

4.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย…………………………………………………………….44

4.3 รายละเอียดของการทดลอง…………………………………………………………….45

4.4 การศึกษาผลการทำ H_2-Plasma ก่อนสร้างชั้น p_1(a-SiC)…………………...…..…46

4.5 การศึกษาผลการใช้ชั้นฟิล์ม p(a-SiO) แทน p(a-SiC)………..……………………..…...47

4.6 การศึกษาผลการเพิ่ม H_2 Dilution ในช่วงการสร้างชั้น i(a-Si:H)…………………......49

4.7 การศึกษาผลการใช้ชั้นฟิล์มแบบ n(μc-Si:H) แทน n(a-Si:H)……………..……..…..51

4.8 การศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีโครงสร้างร่วมแบบ p(a-SiO)/i(a-Si:H) High H_2 Dilution /n(μc-Si:H) with Seed-μc-Si:H…....……...…..………………………..….55

4.9 การศึกษาผลการเพิ่มชั้นตัวนำโปร่งแสงซิงค์ออกไซด์ในเซลล์แสงอาทิตย์………..58

4.10 การศึกษาผลของก๊าซมีเทนในช่วงการสร้างชั้น Buffer-layer i(a-Si:H) ที่มีต่อการลดค่ากำลังงานแผงเซลล์แสงอาทิตย์ภายหลังการนำไปใช้งาน…………………60

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.11 การศึกษาผลการลดความหนาชั้น i_2(a-Si:H) ที่มีผลต่อเสถียรภาพด้านกำลังงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ภายหลังการนำไปใช้งาน......................................64

4.12 การลดการปนเปื้อนสารโบรอนในชั้น Intrinsic ของกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบแชมเบอร์เดี่ยว..68

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ...73

เอกสารอ้างอิง...75

ภาคผนวก..78

ภาคผนวก ก. เครื่องมือวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์...................................79

ภาคผนวก ข. เครื่องมือวัดคุณสมบัติของชั้นฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอน........................80

ภาคผนวก ค. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่..82

ประวัติผู้เขียน...89

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอน 19

3.1 วิธีการสร้างชั้นฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอนที่ปัจจุบันยังมีการศึกษาและใช้งานกันอยู่....................30

3.2 อัตราการเกิดชั้นฟิล์ม a-Si:H จากเงื่อนไขของระบบ RF-PECVD..................................32

4.1 เงื่อนไขการทดลองใช้ H_2 Plasma ก่อนทำการสร้างชั้น p_1(a-SiC)..................................46

4.2 เงื่อนไขการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ชั้น p_1(a-SiO)..48

4.3 ผลการวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ชั้น p_1(a:SiO) แทน p_1(a:SiC).........................49

4.4 เงื่อนไขการสร้างที่มีการเพิ่ม H_2 Dilution Ratio เป็น 10 และ 20 เท่าในชั้น i_1(a-Si:H)...........50

4.5 ผลการทดลองเพิ่ม H_2 Dilution Ratio ในชั้น i_1(a-Si:H)..51

4.6 เงื่อนไขการสร้างและคุณสมบัติของชั้นฟิล์มบาง n(μc-Si:H)..52

4.7 เงื่อนไขการสร้างที่มีการใช้ชั้นฟิล์ม n_1(μc-Si:H) แทน n_1(a-Si:H)....................................54

4.8 ผลการประยุกต์ใช้ชั้นฟิล์ม n(μc-Si:H) ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์......................................55

4.9 เงื่อนไขการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ a-Si:H/a-Si:H Tandem ที่มีโครงสร้างร่วมแบบ p(a-SiO)/i(a-Si:H) High H_2 Dilution /n(μc-Si:H) ที่มีการเพิ่ม Seed-μc-Si:H......................56

4.10 ผลการทดลองสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีโครงสร้างร่วมแบบ p(a-SiO)/i(a-Si:H) High H_2 Dilution /n(μc-Si:H) ที่มีการเพิ่ม Seed-μc-Si:H..57

4.11 เงื่อนไขการสร้างชั้นตัวนำโปร่งแสง ZnO และผลการทดลองที่เหมาะสมที่สุด........................59

4.12 เอาท์พุตพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีและไม่มีการเพิ่มชั้นตัวนำ ZnO.......................60

4.13 เงื่อนไขการสร้างที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณ CH_4 Flow Rate ใน Buffer-layer i(a-Si:H).......62

4.14 เอาท์พุตพารามิเตอร์เริ่มต้นของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีและไม่มีการเติมก๊าซ CH_4 ในช่วงการสร้าง Buffer-Layer i(a-Si:H)..63

4.15 ผลการทดสอบ Outdoor light soaking แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีและไม่มีการเติมก๊าซ CH_4 ในช่วง Buffer-layer i(a-Si:H) ทั้งตอนเริ่มต้นและหลังการใช้งาน 1 เดือน.............................63

4.16 เงื่อนไขการสร้างที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณ SiH_4 Flow Rate ของชั้น i_2(a-SI:H)...................65

4.17 เอาท์พุตพารามิเตอร์เริ่มต้นของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการปรับอัตราการไหลของก๊าซ SiH_4 ในช่วงหลัง Grading ของการสร้าง Buffer-layer ในชั้น i_2(a-Si:H)...................................66

4.18 การลดค่ากำลังงานที่น้อยลงหลังการใช้งาน 1 เดือน ที่ใช้การปรับอัตราการไหลของก๊าซ SiH_4 ในช่วงหลัง Grading ของการสร้าง Buffer-layer ในชั้น i_2(a-Si:H)....................67

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

4.19 เงื่อนไขการทดลองใช้ H_2O, Alcohol Vapor และ NH_3 Gas Treatment เพื่อลดการตกค้างสารเคมีในกระบวนการสร้างแบบแชมเบอร์เดี่ยว.....70

4.20 เอาท์พุตพารามิเตอร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้วิธีลดการตกค้างสารโบรอนก่อนการสร้างชั้น i_1(a-Si:H) และ i_2(a-Si:H) แบบ Vapor และ Gas Treatment.....71

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

1.1 ลำดับขั้นตอนการทดลองในบทที่ 4……………………………………………………7
2.1 ค่าความหนาแน่นกระแสต่อแรงดันไฟฟ้าของ p-i-n a-Si:H ที่สร้างโดย Carlson และ Wronski เทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Multi-Junction ที่มีขนาดพื้นที่รับแสง 0.25 cm^2……………….9
2.2 (รูปบน) แสดงสเปคตรัมการดูดกลืนแสง $\alpha(h\nu)$ ของ a-Si:H และ c-Si (รูปล่าง) แสดงสเปคตรัมการฉายแสง Solar Irradiance ซึ่งมีพลังงานสูงกว่า $h\nu$ ของ a-Si:H ที่มีความหนาประมาณ 500 nm.……..……………………………………10
2.3 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบริเวณผิวในขณะที่ทำการสร้างชั้นฟิล์ม a-Si:H……………………………11
2.4 (ก) โครงสร้างการเรียงตัวอะตอมของ a-Si:H (ข) ช่องว่างพลังงานของ a-Si:H…………….....12
2.5 (ก) พันธะอะตอมของ Hydrogen และ Silicon (ข) ค่าของ Hydrogen Deficit………………....13
2.6 ความหนาแน่นสเตตของวัสดุ c-Si……………………………………………………....14
2.7 ความหนาแน่นสเตตของวัสดุ a-Si:H………………………………………………….....14
2.8 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของวัสดุ a-Si:H ที่แบ่งออกเป็น 3 ย่าน……………………………15
2.9 การเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนระหว่างระดับพลังงานต่างๆ ของวัสดุ a-Si:H……………15
2.10 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อสภาพนำไฟฟ้ากระแสตรงของวัสดุ a-Si:H………..…………………17
2.11 แบบจำลองการฮอปปิงชนิดระยะทางแปรผัน……………………………………………18
2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้าต่ออุณหภูมิฐานรองในการสร้าง a-Si:H…………….....19
2.13 โครงสร้างพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ a-Si:H รอยต่อ p-i-n………..…………………….....21
2.14 แถบพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ a-Si:H รอยต่อ p-i-n…………………………………….22
2.15 ระยะทางการเคลื่อนที่ของโฮลและอิเล็กตรอนภายในชั้นฟิล์ม a-Si:H ในสภาวะที่สนามไฟฟ้าและอุณหภูมิคงที่…………………………………………………....24
2.16 ค่ากำลังงานของ p-i-n และ n-i-p a-Si:H ซึ่งใช้ชั้น p และ n เป็นด้านรับแสง………………...24
2.17 (ก) เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างอินทิเกรต (ข) วงจรสมมูลของอินทิเกรตโซล่าร์เซลล์.……..25
2.18 โครงสร้างและแถบพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์แบบเซลล์ซ้อน (Tandem Solar Cell)…...……..25
2.19 การเปลี่ยนแปลงของโฟตอนฟลักซ์ของแสงตามความลึกที่เดินทางเข้าสู่ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H ที่มีโครงสร้างซ้อนทับกัน 3 เซลล์……………………………....27
2.20 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเซลล์ซ้อน a-Si:H/a-Si:H Tandem……………………..27
2.21 การลดลงของค่า Output Power ต่อระยะเวลาการใช้งานของเซลล์แสงอาทิตย์ a-Si:H แบบ Single-Junction และ Multi-Junction……………………………………………………..28

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

2.22 กราฟค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเซลล์ซ้อน a-Si:H กับอุณหภูมิโดยรอบบริเวณที่ติดตั้งใช้งานในช่วง 1000 วัน..29

3.1 แผนภาพของระบบการสร้างชั้นฟิล์ม a-Si:H แบบ Single-Chamber PECVD....................31

3.2 (ก) Quantum Efficiency ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มี High และ Low Contamination
(ข) I-V Characteristic ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มี High และ Low Contamination..................34

3.3 อัตราการเกิดของ a-Si:H ต่อค่าความถี่ที่ใช้ในการสร้างภายใต้ค่ากำลังงานคงที่....................35

3.4 การเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างของสารกึ่งตัวนำแบบ a-Si:H
ภายใต้การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของ H_2/SiH_4 Dilution Ratio..36

3.5 (a) ขั้นตอนที่ 1 การเตรียมแผ่นฐานรอง..37

3.5 (b) ขั้นตอนที่ 2 Laser Patterning..37

3.5 (c) ขั้นตอนที่ 3 การสร้างชั้นฟิล์มบาง (a-Si:H Deposition)..38

3.5 (d) ขั้นตอนที่ 4 Laser Patterning..38

3.5 (e) ขั้นตอนที่ 5 การสร้างชั้นตัวนำ (Sputtering)..39

3.5 (f) ขั้นตอนที่ 6 Laser Patterning..39

3.5 (g) ขั้นตอนที่ 7 การทดสอบคุณสมบัติ I-V..40

3.5 (h) ขั้นตอนที่ 8 การลบขอบแผงเซลล์ (Sand Blast)..40

3.5 (i) ขั้นตอนที่ 9 การต่อขั้วตัวนำและการผนึกแผงเซลล์..41

3.5 (j) ขั้นตอนที่ 10 การเชื่อมต่อสายไฟและการวัดประสิทธิภาพ..41

3.6 (ก) แผงเซลล์แสงอาทิตย์ Tandem a-Si:H/a-Si:H ขนาด 64×124 cm
(ข) โครงสร้างภายในและขนาดความหนาของชั้นฟิล์มบางต่างๆ..42

4.1 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ a-Si:H/a-Si:H Tandem ที่ใช้ชั้น p_1(a-SiO) แทน p_1(a-SiC)..........47

4.2 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการเพิ่มค่า H_2/SiH_4 Dilution ในชั้น i_1(a-Si:H)....................49

4.3 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ชั้น n(μc-Si:H) แทน n(a-Si:H)..51

4.4 ภาพชั้นฟิล์ม n(μc-Si:H) ที่สร้างโดยเงื่อนไขความดัน (ก) 1,900 mTorr (ข) 1,500 mTorr
(ค) 1,000 mTorr..53

4.5 เซลล์แสงอาทิตย์ a-Si:H/a-Si:H Tandem ที่มีโครงสร้างร่วมแบบ p(a-SiO)/i(a-Si:H) High H_2 Dilution/n(μc-Si:H) ที่มีการเพิ่ม Seed-μc-Si:H..56

4.6 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการเพิ่มชั้นตัวนำโปร่งแสง ZnO..58

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.7 ชั้นตัวนำโปร่งแสง ZnO ที่ทำการสร้างลงบนแผ่นกระจก....................................59
4.8 การลดกำลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ในช่วงทดสอบ Outdoor light soaking 140 วัน.................61
4.9 การตกค้างของอะตอมคาร์บอนในชั้น i_1 และ i_2 Buffer-layer i(a-Si:H)..............................61
4.10 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการลดขนาดชั้น i_2(a-Si:H) โดยลด SiH_4 Flow Rate..........65
4.11 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการตกค้างสารโบรอนที่บริเวณผิวของชั้น i(a-Si:H)...........69
4.12 แผนภาพระบบการสร้าง a-Si:H Deposition และการทดลองใช้ Vapor และ Gas Treatment
เพื่อลดการตกค้างสารเคมีในกระบวนการสร้างแบบแชมเบอร์เดี่ยว..............................70
ก-1 เครื่องวัดประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Module Testing)....................................79
ก-2 เครื่องวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ (Spire Sun Simulator)....................................79
ข-1 เครื่องวัดความหนาชั้นฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอน (Profiler)..80
ข-2 เครื่องวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (UV-VIS Spectrometer)...................................80
ข-3 เครื่องวัดสภาพนำไฟฟ้าของชั้นฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน...81

สัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์	ความหมาย
a-Si:H	อะมอร์ฟัสซิลิคอน
μ-Si:H	ไมโครคริสตันไลน์ซิลิคอน
a-SiC	อะมอร์ฟัสซิลิคอนคาร์ไบด์
a-SiO	อะมอร์ฟัสซิลิคอนออกไซด์
c-Si	ผลึกเดี่ยวซิลิคอน
RF	ความถี่วิทยุ
VHF	คลื่นความถี่สูง
ZnO	ซิงค์ออกไซด์
SnO_2	ทินออกไซด์
E	สนามไฟฟ้า
E_C	แถบคอนดักชั่น
E_V	แถบวาเลนซ์
E_F	ระดับพลังงานเฟอร์มิ
Eg	ช่องว่างพลังงาน
FF	ฟิลด์แฟคเตอร์
I_{SC}	กระแสไฟฟ้าลัดวงจร
V_{OC}	แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด
P_M	กำลังงานสูงสุด
η	ประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน
R_S	ความต้านทานอนุกรม
R_{SH}	ความต้านทานขนาน
H_2	ก๊าซไฮโดรเจน
SiH_4	ก๊าซไซเลน
CH_4	ก๊าซมีเทน
PH_3	ก๊าซฟอสฟีน
B_2H_6	ก๊าซไดบอเรน
$B(CH_3)_3$, TMB	ก๊าซไตรเมททินโบรอน
H_2O	น้ำ
CO_2	ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

สัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย
$\hbar\omega$	โฟตอนฟลักซ์ของแสง
Ar	ก๊าซอาร์กอน
O_2	ก๊าซออกซิเจน
N_2	ก๊าซไนโตรเจน
NH_3	ก๊าซแอมโมเนีย
PECVD	พลาสมาเคมีคอลเวเปอร์เดปโพซิชั่น
SLPM	Standard Litter per Minute
TCO	Transparent Conductive Oxide

ศัพท์เทคนิค

ฟิล์มสารกึ่งตัวนำอะสัณฐานซิลิคอน	Amorphous Silicon
ฟิล์มบางผลึกซิลิคอน	Microcrystalline Silicon
เซลล์แสงอาทิตย์แบบเซลล์ซ้อน	Tandem Solar Cells
เซลล์ด้านบน	p-i-n Top Cell
เซลล์ด้านล่าง	p-i-n Bottom Cell
กระบวนการสร้างเชิงปริมาณ	Batch Process
การสร้างบนฐานรองทึบแสง	Substrate Design
การสร้างเซลล์บนฐานรองกระจก	Superstrate Design
ชั้นฟิล์มชนิดพี	p-Layer
ชั้นฟิล์มอินทรินซิค	i-Layer
ชั้นฟิล์มชนิดเอ็น	n-Layer
ชั้นอลูมิเนียม	Al-Layer
ชั้นซิงค์ออกไซด์	ZnO-Layer
ชั้นผลิตพาหะ	Active Layer
การสร้างชั้นฟิล์มโดยใช้ภาชนะเดี่ยว	Single-Chamber PECVD
การสร้างชั้นฟิล์มโดยใช้หลายภาชนะ	Multi-Chamber PECVD
อุปกรณ์บรรจุแผ่นฐานรอง	Box Carrier
การอบความร้อน	Annealing
การรวมตัวของพาหะบวก-ลบ	Recombination
การถูกจับของพาหะ	Trapping
พันธะแขนขาด	Dangling Bond
พาหะเคลื่อนที่โดยสนามไฟฟ้า	Drift
พาหะเคลื่อนที่โดยการแพร่ซึม	Diffuse
การปลูกชั้นฟิล์มจากก๊าซวัตถุดิบ	Deposition
การปลูกชั้นฟิล์มจากแท่งธาตุวัตถุดิบ	Sputtering
พลังงานโฟตอน	Photon Energy
ความยาวคลื่น	Wavelength
สภาพต้านทานไฟฟ้า	Resistivity
ประจุเรืองแสง	Plasma

ศัพท์เทคนิค (ต่อ)

ความสม่ำเสมอของชั้นฟิล์ม	Uniformity
กระจกเคลือบทินออกไซด์	SnO_2 Coated Glass
กระจกใส	Float Glass
การผนึกแผงเซลล์แสงอาทิตย์	Encapsulation
แอลกอฮอล์	Alcohol
การปล่อยสารเคมีชำระล้าง	Flushing
ขั้วนำไฟฟ้าด้านหลังเซลล์	Back Electrode
อัตราส่วนการเจือก๊าซไฮโดรเจน	H_2 Dilution Ratio
อัตราการไหลของก๊าซ	Flow Rate
เครื่องวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์จากแสงอาทิตย์เทียม	Sun Simulator
การปนเปื้อนสารโบรอน	Boron Contamination

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการพยายามหาแหล่งพลังงานทดแทน (Renewable Energy) เป็นสิ่งที่ทั่วโลกกำลังเร่งศึกษาวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพราะพลังงานเป็นสิ่งจำเป็นขั้นพื้นฐานทั้งทางตรงและทางอ้อมของการเกิดและดำรงอยู่ของสิ่งมีชีวิต รูปแบบของพลังงานที่ใช้กันส่วนใหญ่อยู่ในรูปของพลังงานความร้อนและพลังงานไฟฟ้า ซึ่งแหล่งกำเนิดพลังงานหลักๆ ในปัจจุบัน คือ น้ำมัน ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ แต่ความต้องการใช้พลังงานมีเพิ่มมากขึ้นทุกขณะทำให้แหล่งกำเนิดพลังงานจากเชื้อเพลิงเหล่านี้เริ่มลดน้อยลงและจะมีสำรองใช้ได้ไปอีกไม่นาน นอกจากนี้การเผาไหม้เชื้อเพลิงยังก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เช่น มลพิษทางอากาศ สิ่งเจือปนในน้ำจากฝนกรดและสภาวะเรือนกระจกที่ก่อให้เกิดปัญหาโลกร้อน ส่วนพลังงานไฟฟ้าจากเขื่อนกั้นน้ำนั้นได้พัฒนาไปจนถึงจุดอิ่มตัวแล้วในเกือบทุกประเทศ สำหรับประเทศไทยตามการสำรวจของกระทรวงพลังงานพบว่า เชื้อเพลิงโดยประมาณสำหรับการผลิตพลังงานไฟฟ้าได้มาจากก๊าซธรรมชาติ 35% ถ่านหิน 13% และน้ำ 3% ส่วนอีก 49% คือพลังงานที่ได้มาจากน้ำมันซึ่งเป็นการนำเข้าถึง 90% ของปริมาณการใช้งานทั้งหมด และมีแนวโน้มที่จะสูงขึ้นทั้งในระยะกลางและระยะยาว สำหรับแนวทางการแก้ปัญหาคือ การแสวงหาแหล่งพลังงานทดแทนหรือการพยายามใช้แหล่งพลังงานธรรมชาติที่มีอยู่ในประเทศ เช่น พลังงานความร้อนใต้พิภพ พลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อสร้างไฟฟ้ารวมทั้งความร้อน ซึ่งในกลุ่มพลังงานทดแทนเหล่านี้พลังงานแสงอาทิตย์มีความโดดเด่นกว่าพลังงานชนิดอื่น เพราะมีกระบวนการแปลงพลังงานที่สะอาด ไร้มลภาวะ และแสงอาทิตย์มีอยู่ทั่วไปไม่จำกัด โดยเฉพาะในภูมิอากาศเขตร้อนอย่างประเทศไทย การนำพลังงานแสงอาทิตย์มาแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าสามารถทำได้โดยตรงเพียงอาศัยตัวแปลงพลังงานที่เรียกว่าเซลล์แสงอาทิตย์หรือโซล่าร์เซลล์ ซึ่งนานาประเทศกำลังเร่งการพัฒนาให้ก้าวหน้าขึ้นทั้งในเชิงของงานวิจัยและการผลิตเชิงปริมาณเพื่อการพาณิชย์

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถแปลงพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้าด้วยปรากฏการณ์โฟโตโวลทาอิก ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแรกคือเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิคอน (c-Si) ที่พัฒนาขึ้นในปี ค.ศ. 1954 และได้มีการเริ่มต้นใช้งานในยานอวกาศเป็นครั้งแรกใน ค.ศ. 1958 จากนั้นก็เกิดเหตุการณ์วิกฤตด้านน้ำมันในต้นทศวรรษที่ 1970 ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ได้รับความสนใจมากยิ่งขึ้น ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นและใช้งานในปัจจุบันแทบทั้งหมดทำจากธาตุซิลิคอน ซึ่งเป็นธาตุที่มีมากเป็นอันดับสองบนโลกรองจากออกซิเจน ปัจจุบันนักวิจัยให้ความสนใจกับสารกึ่งตัวนำแบบอะมอร์ฟัสซิลิคอน (Hydrogenate

Amorphous Silicon : a-Si:H) มากขึ้นเนื่องจากคุณสมบัติเด่นทางฟิสิกส์ของ a-Si:H แตกต่างไปจากกรณีของผลึกเดี่ยวซิลิคอนในหลายๆ ด้าน อาทิเช่น สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ความคล่องตัวของพาหะ และแก็ปสเตต ทำให้สารกึ่งตัวนำ a-Si:H ได้รับความสนใจในการนำมาผลิตเป็นเซลล์แสงอาทิตย์อย่างมาก สำหรับคุณสมบัติโดยละเอียดของชั้นฟิล์ม a-Si:H มีดังนี้

1. a-Si:H มีค่าสัมประสิทธิการดูดกลืนแสงที่สูงมากในย่านยอดของสเปกตรัมของแสงอาทิตย์ ($<10^{5}$ cm^{-1}) ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์แบบ a-Si:H ไม่จำเป็นต้องมีความหนามาก โดยทั่วไปความหนาของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้จะมีค่าเพียง 0.5 nm ดังนั้นจึงสามารถประหยัดต้นทุนการสร้างได้มากกว่า

2. a-Si:H สร้างด้วยกระบวนการที่มีอุณหภูมิต่ำ (200-250 องศาเซลเซียส) และสามารถเคลือบเป็นพื้นที่กว้างใหญ่ได้ง่าย ทำให้ประหยัดพลังงานในการผลิตได้มากกว่า

3. ช่องว่างพลังงานของ a-Si:H มีค่าประมาณ 1.7-1.8 eV ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับพลังงานโฟตอนของยอดของสเปกตรัมของแสงอาทิตย์ จึงเหมาะต่อการนำมาใช้ในการสร้างเป็นเซลล์แสงอาทิตย์

4. ชั้นฟิล์ม a-Si:H สามารถสร้างเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีลักษณะโครงสร้างอินทิเกรต (Integrated Type) หรือซ้อนทับกันหลายชั้น (Multi-Junction) เพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าและประสิทธิภาพสูงขึ้น และด้วยกรรมวิธีของการสร้างชั้นฟิล์มบาง (Monolithic Series) ทำให้สามารถประหยัดเวลาในขั้นตอนการเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์

5. วัสดุเริ่มต้น คือซิลิคอนและไฮโดรเจน ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่ราคาถูกและมีมากบนพื้นโลก

6. สามารถสร้างชั้นฟิล์ม a-Si:H ให้เป็นสารกึ่งตัวนำชนิด n และ p ได้ง่าย โดยการเติมก๊าซฟอสฟีนและไดบอเรน ตามลำดับ ซึ่งจะทำให้ได้ชั้นฟิล์มที่มีสภาพนำไฟฟ้าที่ดีขึ้น

7. สามารถใช้แผ่นฐานรองจากวัสดุต่างๆ ได้ เช่น กระจก โลหะ เซรามิก และพอลิเมอร์ ทำให้สามารถผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีรูปร่างต่างๆ ได้ตามต้องการ และอาจดัดให้โค้งงอได้บ้างตามลักษณะของวัสดุฐานรอง

จากความน่าสนใจของชั้นฟิล์ม a-Si:H ที่ใช้ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ งานวิจัยนี้จึงมีแนวความคิดที่จะพัฒนากระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบเซลล์ซ้อนอะมอร์ฟัสซิลิคอน (a-Si:H/a-Si:H Tandem) ที่สร้างโดยกระบวนการเชิงปริมาณ (Batch Process) ให้ดียิ่งขึ้นเพื่อให้ได้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูง โดยจะมีการศึกษาและทดลองการปรับเปลี่ยนเงื่อนไขการสร้างชั้นฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอนต่างๆ ในเซลล์แสงอาทิตย์ รวมทั้งการปรับปรุงกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีความสะดวกรวดเร็วและมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำลง

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ในขณะนี้ได้มีการนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์มาผลิตกระแสไฟฟ้าเพื่อการใช้งานในถิ่นทุรกันดารที่ห่างไกลสายส่ง แต่ราคาของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกเดี่ยวซิลิคอน (c-Si PV Module) ซึ่งต้องนำเข้าจากต่างประเทศนั้นยังมีราคาที่สูงมาก แม้ว่าจะมีการเชื่อมต่อและประกอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นเองภายในประเทศแล้วก็ตาม ในขณะที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัสซิลิคอน (a-Si:H PV Modules) ซึ่งมีราคาคาถูกและสามารถผลิตขึ้นได้เองภายในประเทศ เนื่องจากใช้กระบวนการผลิตที่ไม่ซับซ้อนและมีต้นทุนต่ำ แต่ทว่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของแผงเซลล์แบบ a-Si:H นั้นยังมีค่าที่ค่อนข้างต่ำ ทำให้การลงทุนติดตั้งใช้งานแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อแหล่งเป็นพลังงานทดแทนนั้นยังไม่มีความคุ้มค่าเท่าที่ควร ดังนั้นการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการสร้างแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ a-Si:H ที่มีโครงสร้างแบบเซลล์ซ้อน (Tandem Solar Cell) ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นและมีราคาถูกลงเองภายในประเทศจึงมีความสำคัญและเป็นประโยชน์ซึ่งควรได้รับการส่งเสริมอย่างเร่งด่วน

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งหวังเพื่อศึกษาวิจัยและพัฒนากระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบเซลล์ซ้อนอะมอร์ฟัสซิลิคอนโดยกระบวนการเชิงปริมาณ ซึ่งมีวัตถุประสงค์ 2 ประการ คือ

1. เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้สูงขึ้น
2. เพื่อลดระยะเวลาการสร้างและลดต้นทุนการผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์

เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ของการศึกษา งานวิจัยนี้จึงได้ทำการปรับปรุงกระบวนการสร้างแผงเซลล์แสงอาทิตย์ของบริษัทบางกอกโซลาร์ ซึ่งได้มีการนำเข้าเครื่องจักรและใช้เงื่อนไขการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ a-Si:H/a-Si:H Tandem จากบริษัทดูน่าโซล่าร์ ประเทศฮังการี ซึ่งทำการผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัสซิลิคอนนี้มาแล้วเป็นเวลายาวนาน จึงทำให้กระบวนการสร้างบางส่วนเริ่มล้าสมัยลงแล้วหากเทียบกับเทคโนโลยีการสร้างชั้นฟิล์มบางในยุคปัจจุบัน

ประโยชน์ที่จะได้รับจากงานวิจัยนี้คือกระบวนการสร้างแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบทันเดมอะมอร์ฟัสซิลิคอนที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น สามารถผ่านเกณฑ์มาตรฐานและสามารถแข่งขันกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในท้องตลาดได้ทั้งในด้านราคาและคุณภาพการใช้งาน นอกจากนั้นความรู้และเทคโนโลยีต่างๆ ที่ได้จากงานวิจัยนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการออกแบบสร้างและพัฒนาเครื่องจักรสำหรับการผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อการพาณิชย์ต่อไป

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

สารกึ่งตัวนำอะมอร์ฟัสซิลิคอนมีการเรียงตัวของอะตอมที่ไม่แน่นอนและจะมีการเรียงตัวของพันธะระหว่างอะตอมที่เป็นระเบียบในระยะสั้น เมื่อนำไปสร้างเป็นชั้นฟิล์มซ้อนทับกัน

แนวตั้งในลักษณะ p-i-n/p-i-n เพื่อให้ได้เซลล์แสงอาทิตย์แบบเซลล์ซ้อนอะมอร์ฟัสซิลิคอนแล้วพบว่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (%Efficiency) ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ยังมีค่าที่ค่อนข้างต่ำ โดยแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อการพาณิชย์แบบอะมอร์ฟัสซิลิคอนโดยทั่วไป (a-Si:H PV Module) จะมีค่า %Efficiency ประมาณ 7-9% ซึ่งจะต่ำกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิคอน (c-Si PV Module) ที่มีค่า %Efficiency ที่สูงถึงประมาณ 14-16% แต่ก็จำเป็นต้องใช้ต้นทุนในการผลิตที่สูงกว่ามาก ด้วยการพัฒนากระบวนการสร้างชั้นฟิล์มบาง a-Si:H โดยอาศัยวิธีการเพิ่มอัตราส่วนก๊าซไฮโดรเจน (H_2 Dilution) ทำให้ได้ชั้นฟิล์มบางซึ่งมีการเรียงตัวของอะตอมที่ใกล้เคียงกับผลึกซึ่งเรียกว่า “Microcrystalline Silicon” หรือ (μc-Si:H) ซึ่งจะได้มีการนำมาใช้ร่วมในเซลล์แสงอาทิตย์แบบเซลล์ซ้อนอะมอร์ฟัสซิลิคอน และจะสามารถช่วยให้ช่องว่างความแตกต่างทางด้านประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสองชนิดนั้นลดลง

ปรากฏการณ์อย่างหนึ่งของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน คือภายหลังการนำไปใช้งานกับแสงอาทิตย์ในช่วงระยะเวลาประมาณ 200-300 ชั่วโมงแรก จะเกิดปรากฏการณ์ธรรมชาติของการเสื่อมประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (Degradation) โดยในเซลล์แสงอาทิตย์แบบ p-i-n Single-Junction และ p-i-n/p-i-n Tandem Solar Cell จะมีการเสื่อมประสิทธิภาพลงประมาณ 30% และ 20% ตามลำดับจากค่าที่วัดได้ในตอนเริ่มต้น ซึ่งนักวิจัยด้านสารกึ่งตัวนำชนิดฟิล์มบางจะเรียกปรากฏการณ์เช่นนี้ว่า “Staebler-Wronski Effect” [1] และต่างก็ให้ความสำคัญและใส่ใจกับการแก้ปัญหาดังกล่าวนี้อย่างต่อเนื่อง

สมมติฐานที่ใช้ในงานวิจัย คือ

1. ปริมาณของก๊าซสารเจือต่างๆ ที่เหมาะสมในกระบวนการสร้างชั้นฟิล์ม p-i-n a-Si:H อาทิเช่น ไฮโดรเจน, ไซเลน, ไดโบเรน, ฟอสฟีน และมีเทนเป็นต้น
2. ค่ากำลังงานไบอัสคลื่นความถี่ RF 13.56 MHz ที่เหมาะสมในการสร้างชั้นฟิล์ม
3. ระยะเวลาในการสร้างชั้นฟิล์ม p-i-n a-Si:H ซึ่งจะสัมพันธ์กับความหนาที่เหมาะสม

ซึ่งตัวแปรเหล่านี้ล้วนส่งผลถึงพารามิเตอร์ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเซลล์ซ้อนอะมอร์ฟัสซิลิคอน คือค่า V_{OC}, I_{SC}, FF, Power และ %Efficiency ซึ่งจะได้มีการนำเสนอถึงการศึกษาทดลองในหัวข้อต่างๆ ต่อไปในบทที่ 4

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

ในการสร้างแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบเซลล์ซ้อนอะมอร์ฟัสซิลิคอนที่มีประสิทธิภาพสูงมีปัจจัยสำคัญหลายสิ่งที่เป็นองค์ประกอบ ไม่ว่าจะเป็นเครื่องจักรและผู้ปฏิบัติงานที่ทำการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ แต่ปัจจัยหลักที่จะส่งผลต่อประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์อย่างมากที่สุดคือ เงื่อนไขการสร้างชั้นฟิล์มบาง a-Si:H ต่างๆ ภายในเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีความ

เหมาะสม ซึ่งในการทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิการแปลงพลังงานที่สูงขึ้นจะมีการปรับเปลี่ยนเงื่อนไขการสร้างใหม่ โดยการเปลี่ยนชั้นหน้าต่างรับแสงมาเป็นชั้น p(a-SiO) ซึ่งมีช่องว่างพลังงานและมีความโปร่งแสงที่มากกว่า การเพิ่มอัตราส่วนก๊าซไฮโดรเจน (H_2 Dilution) ที่สูงขึ้นในการสร้างชั้น i(a-Si:H) เพื่อให้ได้ชั้นฟิล์มบางที่มีคุณภาพดีขึ้น การใช้ชั้นฟิล์มที่มีสภาพต้านทานต่ำแบบ n(μc-Si:H) ซึ่งจะทำให้มีรอยสัมผัสกับชั้นฟิล์มอื่นๆ ดีขึ้นและเซลล์แสงอาทิตย์จะมีค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดที่สูงขึ้นอีกด้วย

จากการศึกษาผลงานวิจัยที่เกี่ยวกับประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน ของเซลล์แสงอาทิตย์ภายหลังการใช้งานพบว่า ชั้น i_2(a-Si:H) เป็นชั้นฟิล์มที่มีส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดการเสื่อมประสิทธิภาพสูงสุด ส่วนหนึ่งเกิดจากขนาดความหนาที่มากที่สุดของชั้น i_2 และเมื่อชั้นฟิล์มที่สร้างขึ้นมีคุณภาพที่ไม่ดี เช่นเมื่อได้รับอุณหภูมิสูงๆ แล้วจะเกิดการแตกร่อน ก็จะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์อย่างมากที่สุดด้วยเช่นกัน อีกส่วนหนึ่งเกิดจากก๊าซสารเจือ CH_4 ที่เติมเข้าไปในช่วงการสร้างชั้น i(a-Si:H) ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานเริ่มต้นมีค่าสูงแต่ภายหลังการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ไปสักระยะหนึ่ง กลับทำให้เกิดการเสื่อมประสิทธิภาพ (Degradation) อย่างมากด้วยเช่นกัน

กระบวนการสร้างที่สะดวกรวดเร็วและสามารถผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้คราวละมากๆ อย่างเช่น Batch Process a-Si:H Deposition มีส่วนสำคัญที่ทำให้ต้นทุนการผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์ลดต่ำลงได้อย่างมาก และหากมีการปรับเปลี่ยนเงื่อนไขการสร้างให้สามารถใช้ระยะเวลาที่สั้นลง โดยที่ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ไม่เปลี่ยนแปลงไปก็จะเป็นการดีและจะทำให้ต้นทุนการผลิตลดต่ำลงได้อีก โดยในส่วนเงื่อนไขการลดการตกค้างสารเคมีในกระบวนการสร้างแบบแชมเบอร์เดี่ยวนั้น จะได้มีการเปลี่ยนมาใช้วิธีการแบบ Vapor และ Gas Treatment เพื่อให้เกิดการประหยัดเวลาสูงสุด

1.5 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการแบบพื้นฐาน

ด้วยเงื่อนไขการสร้างแบบพื้นฐานปกติของบริษัทบางกอกโซล่าร์ โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบเซลล์ซ้อนอะมอร์ฟัสซิลิคอนจะประกอบไปด้วย ฐานรองกระจกซึ่งผ่านการเคลือบชั้นตัวนำโปร่งแสงทินออกไซด์ (SnO_2 Coated Glass) จากนั้นจะสร้างชั้น p_1(a-SiC) -i_1(a-Si:H) และ -n_1(a-Si:H) เป็นอันเสร็จในส่วนการสร้างเซลล์ด้านบน ต่อจากนั้นจะทำการสร้างชั้น p_2(a-SiC) -i_2(a-Si:H) -n_2(a-Si:H) และสร้างชั้นอลูมิเนียม (Al) เป็นขั้วตัวนำที่ด้านหลัง จึงจะเสร็จสิ้นกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบเซลล์ซ้อนอะมอร์ฟัสซิลิคอน ซึ่งขั้นตอนการสร้างชั้นฟิล์มต่างๆ ที่กล่าวมาจะใช้เวลาทั้งหมดประมาณ 3.5-4 ช.ม. และเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้มีค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานประมาณ 6% แต่เพื่อให้ได้เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้นและยังสามารถคงเสถียรภาพได้ดีภาพหลังการใช้งาน โดยมีเงื่อนไขการสร้างที่ไม่ต้องใช้

เวลานานนัก จึงได้มีการปรับปรุงเงื่อนไขและโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ดังนี้ เริ่มต้นด้วย Glass Substrate จากนั้นจะสร้างชั้น p_1(a-SiO) ด้วยการเจือก๊าซ CO_2 และเมื่อเสร็จสิ้นการสร้างชั้น p แล้วจะใช้วิธีลดการตกค้างสารเคมีในกระบวนการสร้างเป็นแบบ Vapor และ Gas Treatment ซึ่งจะประหยัดเวลาได้มากกว่า จากนั้นจึงสร้างชั้น i_1(a-Si:H) โดยมีการปรับเปลี่ยนค่า H_2 Dilution Ratio ให้สูงขึ้น และสร้างชั้น n_1(μc-Si:H) ด้วยการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลก๊าซ ค่าความดัน และค่ากำลังงานไบอัส ร่วมกับการสร้างชั้นรอยต่อหรือ Seed Layer เพื่อให้ง่ายต่อการเกิดชั้นฟิล์มบางแบบไมโครคริสตันไลน์ ต่อจากนั้นจะทำการสร้างชั้น p_2(a-SiC) และใช้วิธีการแบบ Vapor และ Gas Treatment ก่อนทำการสร้างชั้น i_2(a-Si:H) ซึ่งจะมีการปรับเปลี่ยนเงื่อนไขของอัตราการไหลก๊าซ CH_4 และ SiH_4 เพื่อผลด้านเสถียรภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ดีขึ้น ต่อจากนั้นจะทำการสร้างชั้นฟิล์มบางแบบ n_2(μc-Si:H) และในส่วนของขั้วตัวนำที่ด้านหลังเซลล์แสงอาทิตย์ จะมีการเพิ่มชั้นตัวนำโปร่งแสง ZnO เพื่อเกิดรอยสัมผัสที่ดียิ่งขึ้นระหว่างชั้น n_2(a-Si:H) กับชั้น Al ซึ่งด้วยเงื่อนไขการสร้างใหม่นี้คาดว่าระยะเวลาการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์จะลดลงมาเป็น 2.5-3 ช.ม. และประสิทธิภาพการแปลงพลังงานในสภาวะเริ่มต้นจะเพิ่มขึ้นเป็น 7-8%

1.6 ขอบเขตการวิจัย

ขอบเขตของงานวิจัยนี้อยู่ที่การศึกษาหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบเซลล์ซ้อนอะมอร์ฟัสซิลิคอน ด้วยกระบวนการสร้างเชิงปริมาณพื้นฐานตามปกติของบริษัทบางกอกโซล่าร์ เพื่อให้ได้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้นและยังคงเสถียรภาพได้ดีภายหลังการใช้งาน โดยจะมีการติดตั้งอุปกรณ์เครื่องจักรเพิ่มเติมในระบบการสร้างชั้นตัวนำ Al เพื่อทำการสร้างชั้นตัวนำโปร่งแสง ZnO เพิ่มขึ้นระหว่างชั้น n กับชั้น Al เดิมในโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ โดยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างเสร็จจะผ่านการทดสอบประสิทธิภาพด้วยเครื่องจำลองแสงอาทิตย์เทียมในสภาวะเริ่มต้น และภายหลังการใช้งานกับแสงอาทิตย์ก็จะมีการทดสอบอีกหลายครั้งเพื่อวัดผลด้านเสถียรภาพ สุดท้ายจะมีการทดลองปรับปรุงเงื่อนไขกระบวนการเพื่อให้สามารถใช้ระยะเวลาการสร้างแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่สั้นลง ซึ่งจะส่งผลต่อการเพิ่มกำลังการผลิตของกระบวนการสร้างให้สูงยิ่งขึ้น

1.7 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บทด้วยกันคือ

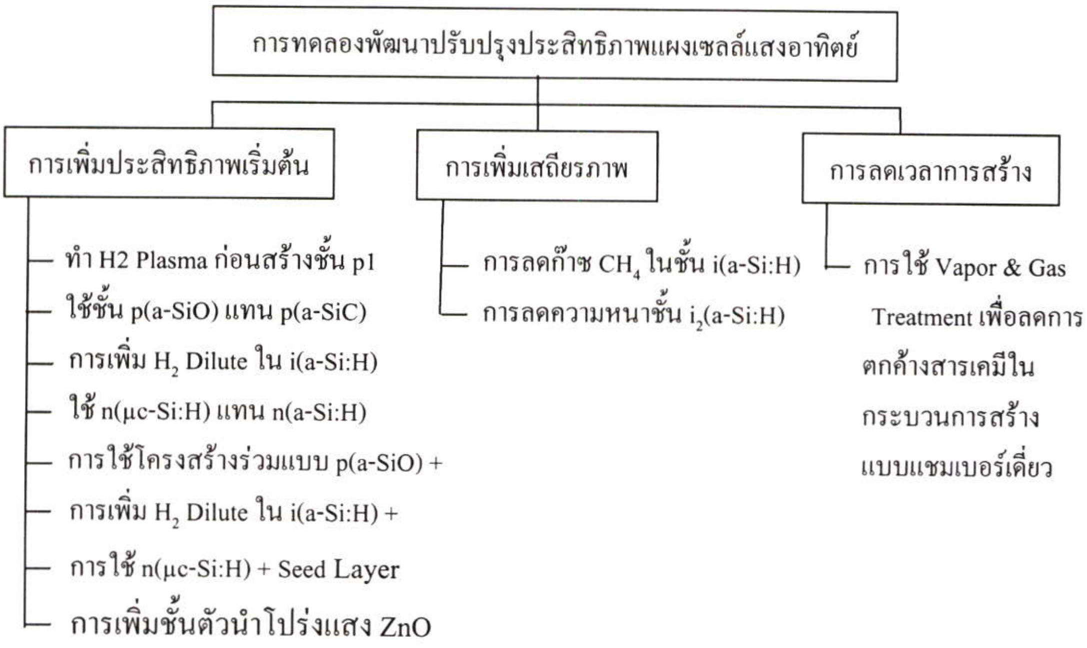
บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ สมมติฐาน แนวคิดที่ใช้ ขอบเขตและขั้นตอนการศึกษา เพื่อความเข้าใจภาพรวมของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย ประกอบด้วยประวัติของอะมอร์ฟัสซิลิคอน ลักษณะการเกิดของชั้นฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอน คุณสมบัติของชั้นฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอน

จากนั้นจะกล่าวถึงเซลล์แสงอาทิตย์อะมอร์ฟัสซิลิคอนทั้งในแบบเซลล์เดี่ยวและในแบบเซลล์ซ้อนอะมอร์ฟัสซิลิคอน รวมทั้งลักษณะการออกแบบสร้างที่ใช้ในการผลิตเชิงพาณิชย์

บทที่ 3 กล่าวถึงวิธีการสร้างชั้นฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอน ด้วยกระบวนพื้นฐานแบบแชมเบอร์เดี่ยว ปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อคุณภาพชั้นฟิล์ม และสุดท้ายจะได้กล่าวถึงกระบวนการสร้างเชิงปริมาณ (Batch Process) ที่ใช้ในการผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์

บทที่ 4 กล่าวถึงการทดลองและผลการทดลอง ในการพัฒนาปรับปรุงประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบเซลล์ซ้อนอะมอร์ฟัสซิลิคอน ซึ่งสามารถสรุปขั้นตอนได้ดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 ลำดับขั้นตอนการทดลองในบทที่ 4

บทที่ 5 เป็นสรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ เป็นการสรุปผลการทดลองที่ได้จากบทที่ 4 และข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์

บทที่ 2
อะมอร์ฟัสซิลิคอน

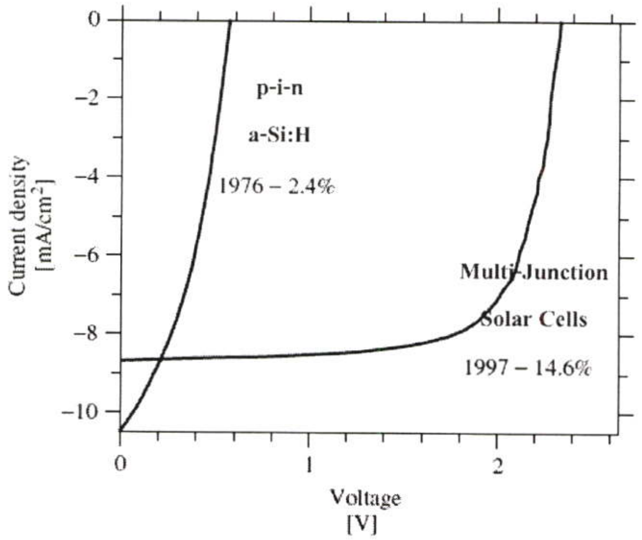
ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวกับชั้นฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอน ซึ่งประกอบไปด้วยประวัติของอะมอร์ฟัสซิลิคอน ลักษณะการเกิดของชั้นฟิล์มและคุณสมบัติต่างๆ ของชั้นฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอน จากนั้นจะกล่าวถึงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งในแบบเซลล์เดี่ยว (p-i-n a-Si:H) และในแบบเซลล์ซ้อนอะมอร์ฟัสซิลิคอน (Multiple Junction Solar Cell) รวมทั้งลักษณะของการออกแบบสร้างที่ใช้ผลิตในเชิงพาณิชย์ และในตอนท้ายของบทนี้จะได้กล่าวถึงปรากฏการณ์ธรรมชาติของการเสื่อมประสิทธิภาพในเซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัสซิลิคอน

2.1 ประวัติของอะมอร์ฟัสซิลิคอน

ในปี ค.ศ. 1973 Walter Spear และ Peter LeComber แห่งมหาวิทยาลัย Dundee, Scotland ได้ค้นพบคุณสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์ของสารกึ่งตัวนำแบบอะมอร์ฟัสซิลิคอน ที่เตรียมขึ้นได้จากวิธี “Glow Discharge” ในก๊าซไซเลน (SiH_4) พื้นฐานของสิ่งที่พวกเขาค้นพบเกิดจากผลงานในอดีตของ Chittick, Sterling และ Alexander [2] คือการกำเนิดประจุเรืองแสง (Plasma) ภายในสภาวะที่กำหนดซึ่งมีการให้แรงดันไฟฟ้าระหว่างตัวกลางก๊าซไซเลน ซึ่งจะทำให้เกิดการข้ามผ่านของกระแสไฟฟ้าและปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของแสง โมเลกุลก๊าซจะแยกสลายกลายเป็นอะตอมของธาตุซิลิคอนและถูกสนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำทำให้เกิดการทับถม จนเกิดเป็นชั้นฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอนบนฐานรองซึ่งถูกบรรจุไว้ภายในระบบ ในปี ค.ศ. 1975 Spear และ LeComber [3] ได้รายงานถึงคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของอะมอร์ฟัสซิลิคอนที่สามารถเพิ่มขึ้นได้อย่างมากจากการเติมก๊าซฟอสฟีน (PH_3) หรือก๊าซไดบอเรน (B_2H_6) จำนวนหนึ่งผสมกับก๊าซไซเลนในระหว่างทำการสร้างชั้นฟิล์มบาง การเติมก๊าซ PH_3 หรือ Phosphorus Doping จะทำให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนนำไฟฟ้าที่เกิดจากอะตอมผู้ให้สูงขึ้นและเกิดเป็นสารกึ่งตัวนำ n-type (a-Si:H) ส่วนก๊าซ B_2H_6 หรือ Boron Doping จะทำให้ความหนาแน่นของโฮลที่เกิดจากอะตอมผู้รับสูงขึ้นและเกิดเป็นสารกึ่งตัวนำ p-type a-Si:H ในลักษณะเดียวกันกับการเจือสารในสารกึ่งตัวนำแบบผลึกเดี่ยวซิลิคอนชนิด p และ n-type c-Si

ในปี ค.ศ. 1974 ห้องปฏิบัติการวิจัย Radio Corporation of America (RCA) ใน Princeton, David Carlson ได้ค้นพบว่าเขาสามารถสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอนที่มีประสิทธิภาพค่อนข้างดีได้จากกรรมวิธีของ Silane Glow Discharge และในปี ค.ศ. 1976 David Carlson กับ Christopher Wronski [4] ได้แสดงรายงานผลการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด p-i-n

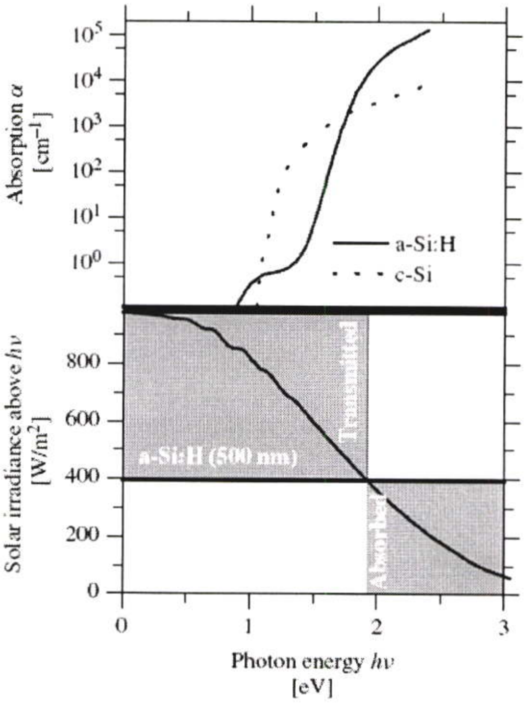
อะมอร์ฟัสซิลิคอน ซึ่งมีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานประมาณ 2.4% [5, 6] และมีค่าของความหนาแน่นกระแสต่อค่าแรงดันไฟฟ้าที่แสดงได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ค่าความหนาแน่นกระแสต่อแรงดันไฟฟ้าของ p-i-n a-Si:H ที่สร้างโดย Carlson และ Wronski เทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Multi-Junction ที่มีขนาดพื้นที่รับแสง 0.25 cm^2

จากกราฟจะเห็นว่าเส้นโค้งที่ยาวมากขึ้นนั้น หมายถึงประสิทธิภาพการแปลงพลังงานที่สูงขึ้นเป็น 14.6% ในเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Multi-Junction ดังรายงานที่มีต่อมาในปี ค.ศ. 1997 [7] ซึ่งคุณสมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำแบบอะมอร์ฟัสซิลิคอนที่สร้างขึ้นโดยวิธี Silane Glow Discharge หรือ "Plasma Deposition" นั้นจะเหนือกว่าวิธีการสร้างอะมอร์ฟัสด้วยวิธี Evaporation Silicon หลังจากนั้นหลายปีต่อมาซึ่งไม่ปรากฏแน่ชัดนักชั้นฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอนที่สร้างโดย Plasma Deposition จะอาศัยกรรมวิธีของการเติมอะตอมไฮโดรเจนเพิ่มเข้าไปในระหว่างการจับตัวโครงสร้างชั้นฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน หลังจากนั้นปริมาณของอะตอมไฮโดรเจนนี้ได้กลายเป็นหลักการสำคัญของการปรับปรุงคุณสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์ ของชั้นฟิล์มบางที่จะนำมาใช้ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัสซิลิคอน [8] ซึ่งต่อมาก็เป็นที่รู้จักกันมากขึ้นในชื่อของ "Hydrogenated Amorphous Silicon" หรือที่เขียนย่อว่า "a-Si:H"

สิ่งที่ผลักดันให้การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัสซิลิคอนมีความโดดเด่นและน่าสนใจกว่าวิธีที่สร้างแบบอื่นๆ คือการใช้กระบวนการสร้างที่ไม่ซับซ้อนและใช้ต้นทุนในการผลิตที่ต่ำกว่าอย่างค่อนข้างมาก หากเทียบกับมูลค่าการลงทุนในเทคโนโลยีที่ใช้สำหรับการปลูกผลึกซิลิคอน (Crystals Glowing) นอกจากนั้นสารกึ่งตัวนำแบบอะมอร์ฟัสซิลิคอนยังมีคุณสมบัติในการดูดกลืนพลังงานแสงที่ดีกว่า ดังที่เห็นได้จากกราฟดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 (รูปบน) แสดงสเปคตรัมการดูดกลืนแสง $\alpha(h\nu)$ ของ a-Si:H และ c-Si (รูปล่าง) แสดงสเปคตรัมการฉายแสง Solar Irradiance ซึ่งมีพลังงานสูงกว่า $h\nu$ ของ a-Si:H ที่มีความหนาประมาณ 500 nm. [9]

2.2 ลักษณะการเกิดของชั้นฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอน

ชั้นฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอน (a-Si:H) ที่สร้างโดยวิธี Plasma Deposition นั้นเกิดขึ้นจากการใช้สนามไฟฟ้ากระตุ้นให้อิเล็กตรอนอิสระเร่งความเร็วและวิ่งเข้าชนโมเลกุลของก๊าซไซเลนจนทำให้เกิดการไอออนไนเซชั่น (Ionization) และปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของแสง หรือ Photon ที่เรียกว่า “Plasma” โดยพลังงานในการไอออนไนเซชั่นจะอยู่ในช่วง 10-20 eV ซึ่งจะสามารถกำหนดได้โดยค่า $eE\lambda_e$ ซึ่งค่า e คือค่าประจุอิเล็กตรอน, E คือสนามไฟฟ้าที่ใช้, λ_e คือระยะทางเฉลี่ยปลอดการชนของอิเล็กตรอนก่อนจะเกิดการชนกับโมเลกุลก๊าซ (Mean Free Path) ซึ่งโดยทั่วไป λ_e จะมีค่าประมาณ 10^{-3}-10^{-2}cm และเมื่อความดันก๊าซขณะปลูกฟิล์มสูงขึ้นค่า λ_e จะลดลง จึงทำให้ต้องเพิ่มค่าสนามไฟฟ้าให้สูงขึ้นเพื่อให้เกิดการไอออนไนเซชั่น โดยทั่วไปความดันก๊าซที่ใช้ในการสร้างชั้นฟิล์มอะมอร์ฟัสจะอยู่ในช่วง 0.1-2 Torr ซึ่งปฏิกิริยาของการแยกสลายก๊าซไซเลน หรือ Plasma Chemical Vapor Deposition สามารถแสดงได้ดังนี้ [10]

$$SiH_4 \rightarrow SiH_2+H_2 \quad (2.1)$$

$$SiH_4 \rightarrow SiH_3+H \quad (2.2)$$

$$SiH_4 \rightarrow Si+2H_2 \quad (2.3)$$

จากนั้นภายหลังการแยกสลายก๊าซไซเลนแล้วจะเกิดปฏิกิริยารอบสอง (Secondary Reaction) ซึ่งเกิดเป็นการทับถมของโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ขึ้นได้ อาทิเช่น

$$SiH_4+H \rightarrow SiH_3+H_2 \tag{2.4}$$

$$SiH_4+SiH_2 \rightarrow Si_2+H_6 \tag{2.5}$$

$$SiH_4+SiH_3 \rightarrow Si_2H_5+H_2 \tag{2.6}$$

$$Si_2H_6+SiH_2 \rightarrow Si_3+H_8 \tag{2.7}$$

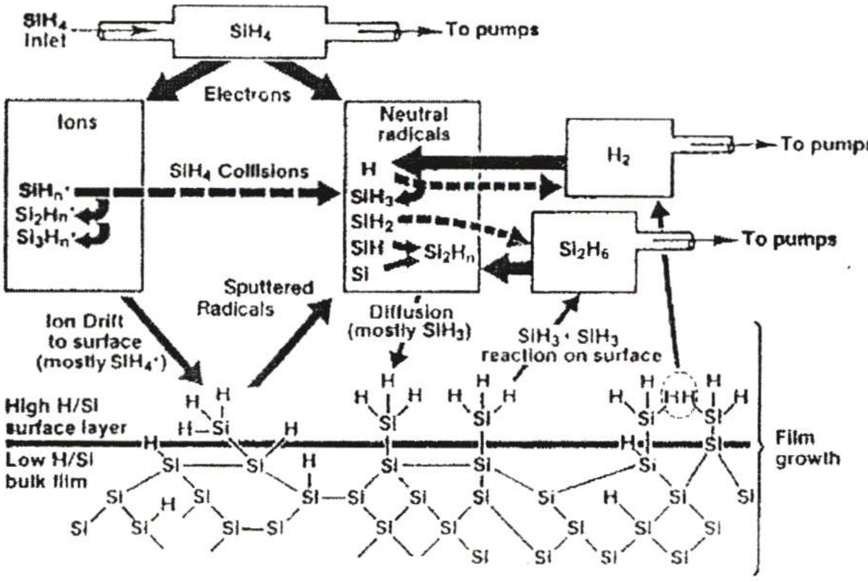
$$SiH_4+Si_2H_6 \rightarrow Si_n+H_m \tag{2.8}$$

กระบวนการเกิดชั้นฟิล์ม a-Si:H เริ่มจากมีการดูดซับโมเลกุลก๊าซที่บริเวณผิวของฐานรอง ส่วนมากจะเกิดจากโมเลกุลก๊าซ SiH_3 และการหลุดออกของอะตอมไฮโดรเจนที่ผิวขณะสร้างชั้นฟิล์ม ซึ่งสามารถเกิดจากปฏิกิริยาเคมีของก๊าซอื่นๆ ที่ผิวชั้นฟิล์มได้เช่น

$$\equiv Si\text{–}H+SiH_3 \rightarrow \equiv Si\text{–}+SiH_4 \tag{2.9}$$

$$\equiv Si\text{–}H+H \rightarrow \equiv Si\text{–}+H_2 \tag{2.10}$$

≡Si– คืออะตอมของซิลิคอนซึ่งเกิดพันธะที่ผิวฟิล์ม โดยอะตอมไฮโดรเจนที่ผิวฟิล์มจะสามารถแพร่กระจายได้รวดเร็วและสามารถจับกับแขนขาดของซิลิคอนได้ดี ทำให้ในขณะสร้างชั้นฟิล์มเกิดจุดบกพร่องน้อยลง ส่วนอะตอมซิลิคอนมีการแพร่กระจายที่ช้ากว่า เพราะซิลิคอนมีพันธะโควาเลนซ์ 4 แขนและมีมวลมากกว่าไฮโดรเจนซึ่งมีพันธะโควาเลนซ์เพียง 1 แขน



รูปที่ 2.3 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบริเวณผิวในขณะที่ทำการสร้างชั้นฟิล์ม a-Si:H [11]

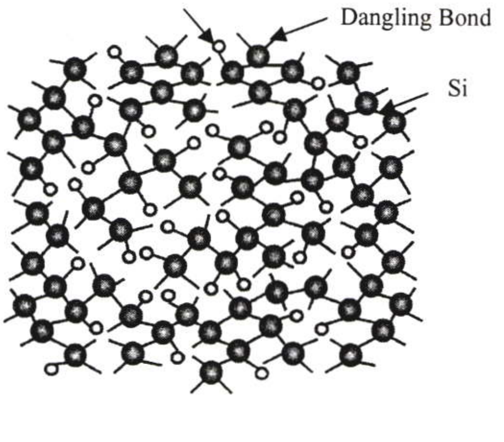
ปฏิกิริยาต่างๆ ที่เกิดขึ้นบริเวณผิวของชั้นฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอนในระหว่างที่ทำกระบวนการ Plasma CVD แสดงได้ดังรูปที่ 2.3 และสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ขั้นตอนดังนี้

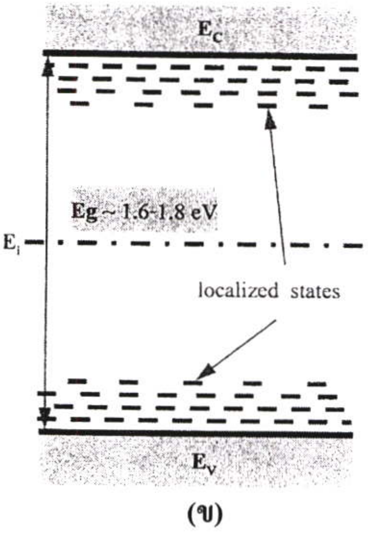
1. สนามไฟฟ้าเร่งให้อิเล็กตรอนอิสระพุ่งไปชนกับโมเลกุลก๊าซไซเลนทำให้เกิดการแยกสลายของก๊าซ
2. เกิดการแตกตัวของไอออนและโมเลกุลต่างๆ ระหว่างที่ทำการแยกสลายก๊าซไซเลน
3. เกิดการแพร่ของไอออนและโมเลกุลก๊าซลงสู่พื้นผิวฐานรอง
4. เกิดการทับถมเป็นชั้นฟิล์มและเกิดปฏิกิริยาเคมีจากก๊าซอื่นๆ ที่ทำให้อะตอมของก๊าซไฮโดรเจนที่ผิวหลุดออกมา

2.3 คุณสมบัติของชั้นฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอน

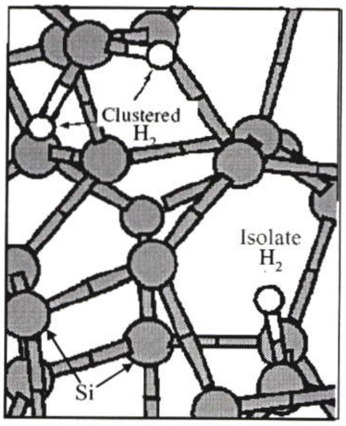
2.3.1 คุณสมบัติทางโครงสร้าง

วัสดุ a-Si:H มีการเรียงตัวของอะตอมที่ไม่แน่นอนโดยจะมีการเรียงตัวของพันธะระหว่างอะตอมที่เป็นระเบียบในระยะสั้น ซิลิคอนบางส่วนที่บางแขนไม่มีคู่จับแบบโควาเลนซ์จะทำให้เกิดพันธะแขนขาด (Dangling Bonds) ดังรูปที่ 2.4 (ก) แขนขาดเหล่านี้จะคอยจับอิเล็กตรอนทำให้สภาพนำไฟฟ้าด้วยแสงของ a-Si:H มีค่าต่ำ และพันธะแขนขาดนี้ทำให้ภายในช่องว่างพลังงานมีระดับ Localized States เกิดขึ้นและทำให้คุณสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ดีลดลงดังรูปที่ 2.4 (ข) Plasma CVD เป็นวิธีการเตรียมวัสดุ a-Si:H ซึ่งอะตอมของไฮโดรเจนที่เข้าไปสร้างพันธะกับซิลิคอนจะช่วยลดจำนวนของแขนขาดลงดังรูปที่ 2.5 (ก) และทำให้ความหนาแน่นของจุดบกพร่อง (Defect Density) ในช่องว่างพลังงานของ a-Si:H ลดลง [12] เช่นเดียวกับที่แสดงในกราฟรูปที่ 2.5 (ข) คือเมื่อค่าของ Hydrogen Deficit หรือการหลุดออกของอะตอมไฮโดรเจนด้วยพลังงานความร้อนสูงขึ้นค่าของ Defect Density ก็จะมีค่าสูงขึ้นด้วย

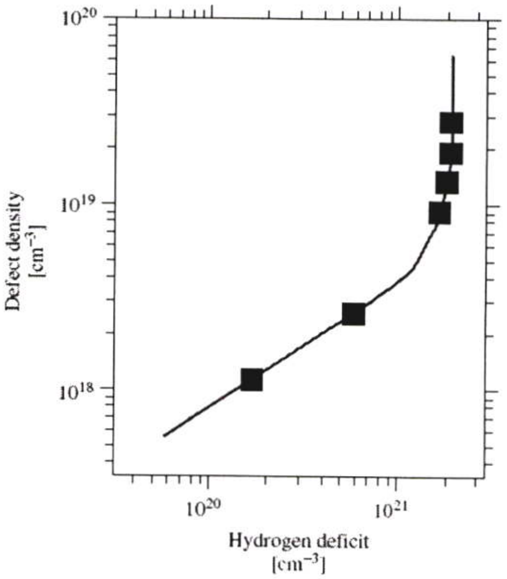




รูปที่ 2.4 (ก) โครงสร้างการเรียงตัวอะตอมของ a-Si:H **(ข)** ช่องว่างพลังงานของ a-Si:H



(ก)

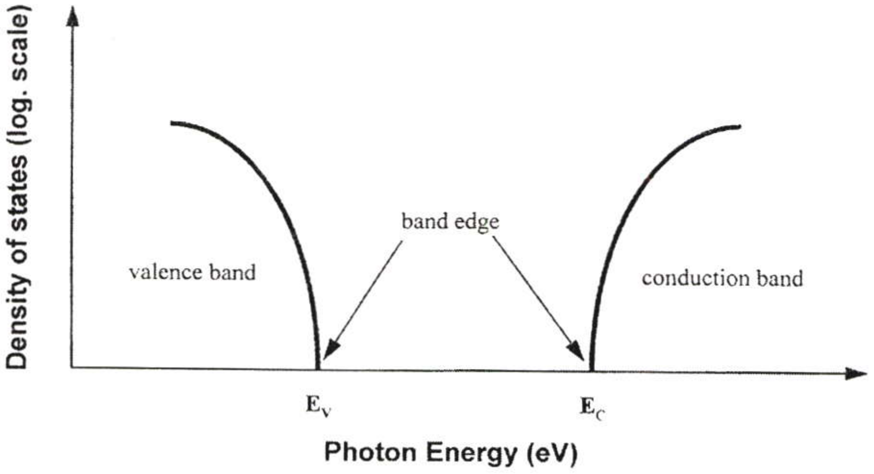


(ข)

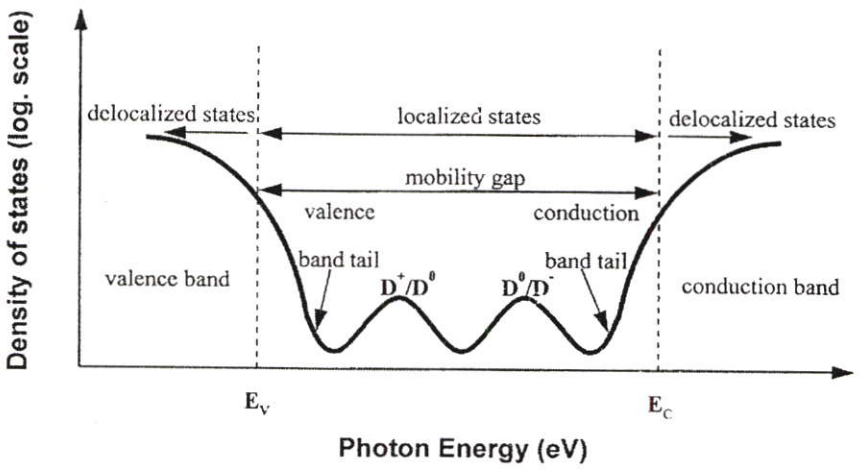
รูปที่ 2.5 (ก) พันธะอะตอมของ Hydrogen และ Silicon **(ข)** ค่าของ Hydrogen Deficit

2.3.2 คุณสมบัติทางแสง

เนื่องจากวัสดุ a-Si:H มีการเรียงตัวของพันธะระหว่างอะตอมไม่มีความเป็นระเบียบในระยะยาว ซึ่งต่างจากในวัสดุ c-Si นอกจากนี้ลักษณะแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดยังต่างกันคือ ในวัสดุ c-Si จะมีขอบของแถบคอนดักชัน (Conduction Band : E_c) และขอบของแถบวาเลนซ์ (Valence Band : E_v) ที่ชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ส่วนในวัสดุ a-Si:H ซึ่งภายในช่องว่างพลังงานจะต้องมีความหนาแน่นของสเตตเสมอ [13] และความหนาแน่นของสเตตจะเริ่มลดลงจากบริเวณขอบของช่องว่างพลังงาน (Band Edge) จนถึงตรงกลางของแถบต้องห้าม ซึ่งจะเรียกสเตตที่ลดลงนี้ว่าหางของแถบพลังงาน (Band Tail) เรียกสเตตที่อยู่ภายในช่องว่างพลังงานว่าโลคอไลซ์สเตต และเรียกสเตตที่อยู่ภายในแถบวาเลนซ์และภายในแถบคอนดักชันว่าดีโลคอไลซ์สเตต (Delocalized States) หรือเอ็กซ์เทนด์สเตต (Extended State) และเรียกช่องว่างที่อยู่ระหว่างเอ็กซ์เทนด์สเตตทั้งสองด้านว่าช่องว่างสภาพคล่องของพาหะ (Mobility Gap) ซึ่งก็คือแถบพลังงานต้องห้ามที่สภาพคล่องของพาหะเป็นศูนย์ เนื่องจากในวัสดุ a-Si:H มีจุดบกพร่องที่เกิดจากแขนขาดเสมอ การเกิดของแขนขาดทำให้ช่องว่างพลังงานของวัสดุ a-Si:H มีโลคอไลซ์สเตตเกิดขึ้น โดยระดับสเตตของจุดบกพร่องจะเกิดขึ้นที่ใกล้หางของแถบคอนดักชันและหางของแถบวาเลนซ์ ถ้าแขนขาดจับอิเล็กตรอน 2 ตัวจะเขียนว่า D^- (Doubly Occupied State) ถ้ายังไม่จับอิเล็กตรอนจะเขียนว่า D^+ (Unoccupied State) และถ้าจับอิเล็กตรอน 1 ตัว จะเขียนว่า D^0 (Singly Occupied State) ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.6 ความหนาแน่นสเตตของวัสดุ c-Si



รูปที่ 2.7 ความหนาแน่นสเตตของวัสดุ a-Si:H

วัสดุ a-Si:H สามารถแบ่งสเปกตรัมการดูดกลืนแสงออกได้เป็น 3 ย่าน [14] ดังแสดงในรูปที่ 2.8 คือ

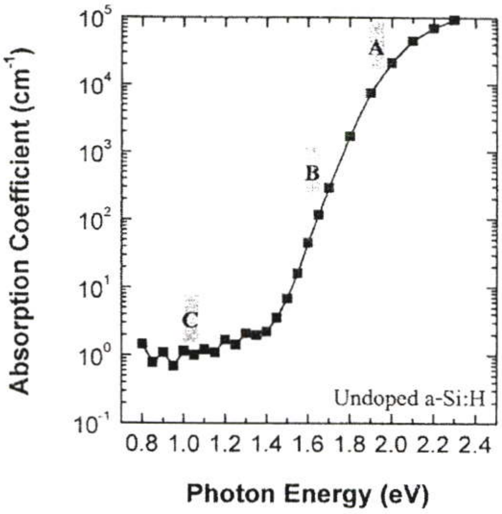
1. A : High Absorption Region ($10^3 < \alpha < 10^5$ cm^{-1}) คือบริเวณที่มีการดูดกลืนแสงมาก ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ไปสู่แถบคอนดักชัน หรือระดับดีโลคอไลซ์สเตตด้วยกันเอง

2. B : Exponential Part ($10^0 < \alpha < 10^3$ cm^{-1}) คือบริเวณเอกซ์โพเนนเชียล ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนสถานะที่เกี่ยวข้องกับหางของแถบพลังงาน กราฟจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงและเรียกกราฟแบบเอกซ์โพเนนเชียลนี้ว่าหางของเออร์แบก (Urbach's Tail) หางของเออร์แบกในวัสดุอะมอร์ฟัสจะเกิดจากการสั่นเชิงจลน์ (Kinetic Fluctuation) และการสั่นเชิงสถิต (Static Fluctuation)

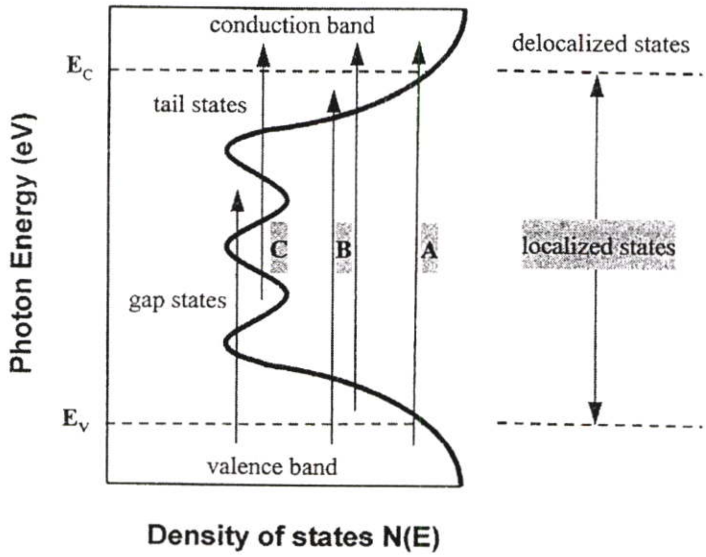
3. C : Weak Absorption Tail ($\alpha < 10^0$ cm^{-1}) คือบริเวณการดูดกลืนแสงน้อย ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนสถานะที่เกี่ยวข้องกับระดับพลังงานของจุดบกพร่องหรือระดับดีโลคอไลซ์สเตตไปสู่ระดับโลคอไลซ์สเตตหรือระดับโลคอไลซ์สเตตไปสู่ระดับดีโลคอไลซ์สเตต ซึ่งในบริเวณ

ดังกล่าวนี้สเปกตรัมจะมีลักษณะเป็นหางซึ่งรูปร่างจะขึ้นกับความบริสุทธิ์ของวัสดุ เงื่อนไขการผลิต การแอนนีล (Annealing) และการถูกแสงส่อง การดูดกลืนแสงในบริเวณนี้ซึ่งมีค่าน้อยจะแสดงว่าวัสดุนั้นมีคุณภาพดี

ซึ่งจากสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของวัสดุ a-Si:H ทั้ง 3 ย่าน เราสามารถแสดงการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนระหว่างระดับพลังงานต่าง ๆ ของวัสดุ a-Si:H โดยมีความสัมพันธ์กันดังแสดงในรูปที่ 2.9 ซึ่งข้อมูลที่ได้จากสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของวัสดุ a-Si:H จะสามารถนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าช่องว่างพลังงานของแสง (Optical Energy Gap)



รูปที่ 2.8 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของวัสดุ a-Si:H ที่แบ่งออกเป็น 3 ย่าน



รูปที่ 2.9 การเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนระหว่างระดับพลังงานต่าง ๆ ของวัสดุ a-Si:H

2.3.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้า

ในช่องว่างพลังงานของวัสดุ a-Si:H มีโลคอไลซ์สเตตหรือแก็ปสเตตเกิดขึ้นจำนวนมาก ซึ่งทำให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุ a-Si:H แตกต่างจากวัสดุ c-Si ซึ่งสามารถแบ่งได้ 2 กรณีคือ

1. การนำไฟฟ้ากระแสตรง
2. การนำไฟฟ้าด้วยแสง

2.3.3.1 การนำไฟฟ้ากระแสตรง

วัสดุ a-Si:H มีกระบวนการการนำไฟฟ้ากระแสตรงอยู่ 2 แบบด้วยกันคือ การขนส่งในแถบพลังงาน (Band Transport) และการขนส่งด้วยวิธีฮอปปิ้ง (Hopping Transport) [15] รูปที่ 2.10 แสดงตัวอย่างการขึ้นกับอุณหภูมิของสภาพนำไฟฟ้ากระแสตรงของวัสดุ a-Si:H บริเวณหมายเลข (1) ในรูปนี้เกิดจากการขนส่งในแถบพลังงาน บริเวณหมายเลข (2) เกิดจากการขนส่งด้วยวิธี ฮอปปิงชนิดใกล้ที่สุด (Nearest Site Hopping) และบริเวณหมายเลข 3 เกิดจากการขนส่งด้วยวิธี ฮอปปิงชนิดระยะทางแปรผันได้ (Variable Range Hopping) [16]

การขนส่งในแถบพลังงานจะมีสภาพนำไฟฟ้าที่เกิดจากการขนส่งในแถบพลังงานอนุญาต (Allowed Band) ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.11)

$$\sigma = n e \mu \qquad (2.11)$$

เมื่อ n คือความหนาแน่นของพาหะ

e คือประจุของอิเล็กตรอน

μ คือสภาพคล่องของพาหะ

σ คือสภาพนำไฟฟ้า

พารามิเตอร์ที่ขึ้นกับอุณหภูมิมากที่สุดดังสมการ สามารถหาความหนาแน่นของพาหะได้ว่า

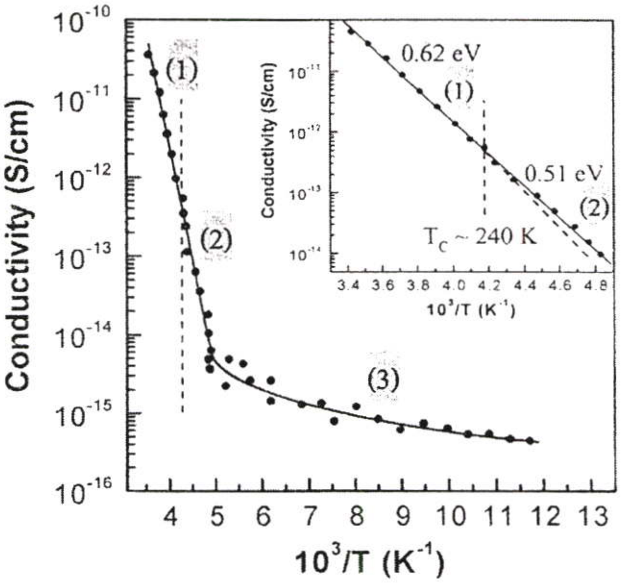
$$n = n_o \exp\left(\frac{-E_a}{kT}\right) \qquad (2.12)$$

ดังนั้นสมการของสภาพนำไฟฟ้าทั่ว ๆ ไป คือ

$$\sigma = \sigma_o \exp\left(\frac{-E_a}{kT}\right) \qquad (2.13)$$

โดยที่ E_a คือ พลังงานกระตุ้น (Activation Energy)

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



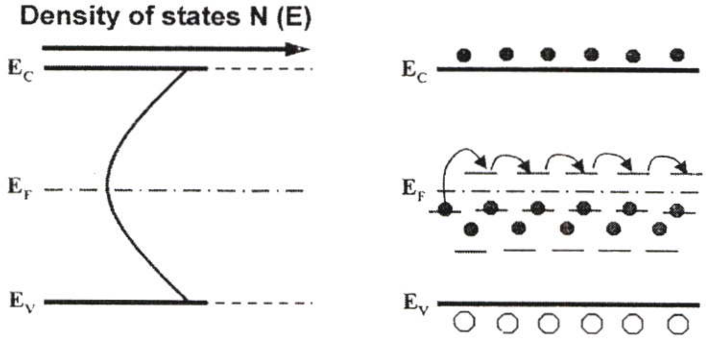
รูปที่ 2.10 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อสภาพนำไฟฟ้ากระแสตรงของวัสดุ a-Si:H [16]

ซึ่ง E_a มีค่าเท่ากับความแตกต่างของระดับพลังงานจากขอบของแถบคอนดักชันหรือแถบวาเลนซ์และระดับพลังงานเฟอร์มิ (E_C- E_F หรือ E_F-E_V) ในสมการที่ (2.13) จะเป็นจริงที่อุณหภูมิต่ำกว่าหรือสูงกว่าอุณหภูมิห้องเล็กน้อย ถ้านำข้อมูลไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\sigma$ และ $1/T$ จะได้กราฟเส้นตรง และจากความชันของกราฟจะสามารถคำนวณค่าพลังงานพลังงานกระตุ้นได้

การขนส่งด้วยวิธีฮอปปิงเป็นการที่พาหะกระโดดจากระดับโลคอไลซ์หนึ่งไปสู่ระดับโลคอไลซ์ข้างเคียงที่อยู่ภายในช่องว่างพลังงาน การขนส่งด้วยวิธีฮอปปิงสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กรณี [17] กรณีแรกคือ การขนส่งด้วยวิธีฮอปปิงชนิดใกล้ที่สุด ได้แก่การที่อิเล็กตรอนกระโดดแบบฮอปปิงระหว่างโลคอไลซ์สเตตที่อยู่ระดับพลังงานแตกต่างกันแต่อยู่ชิดติดกันมาก เพราะฟังก์ชันคลื่น (Wave Function) ของอิเล็กตรอนนั้นซ้อนกัน การฮอปปิงชนิดนี้แต่ละครั้งต้องอาศัยพลังงานจากโฟตอนเข้าช่วย สภาพนำไฟฟ้าจะขึ้นกับอุณหภูมิ การขนส่งด้วยวิธีฮอปปิงชนิดใกล้ที่สุดนี้เกิดในช่วงอุณหภูมิต่ำๆ ประมาณ 200 K ส่วนในกรณีที่สองคือการขนส่งด้วยวิธีฮอปปิงชนิดระยะทางแปรผัน ได้แก่การที่อิเล็กตรอนกระโดดแบบฮอปปิงระหว่างโลคอไลซ์สเตตที่อยู่ระดับพลังงานระดับเดียวกันแต่กระโดดไปได้ไกลด้วยการช่วยของโฟตอน รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะการขนส่งพาหะด้วยวิธีฮอปปิงชนิดระยะทางแปรผัน ผลของอุณหภูมิต่อสภาพนำไฟฟ้าอันเนื่องจากการขนส่งด้วยวิธีฮอปปิงชนิดระยะทางแปรผันสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\sigma = \sigma_o \exp\left(\frac{B}{T^{\frac{1}{4}}}\right) \tag{2.14}$$

โดยที่ B คือค่าคงตัวที่เกี่ยวข้องกับการแผ่ของฟังก์ชันคลื่นและจำนวนโลคอไลซ์สเตตที่เกี่ยวข้องกับการฮอปปิง



รูปที่ 2.11 แบบจำลองการฮอปปิงชนิดระยะทางแปรผัน [17]

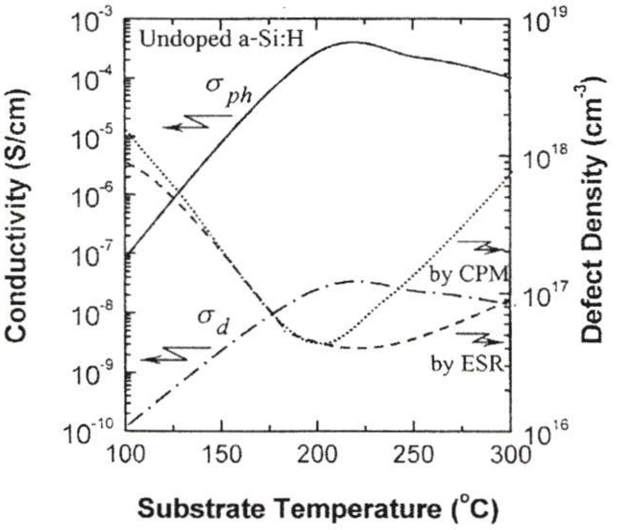
2.3.3.2 การนำไฟฟ้าด้วยแสง

สภาพนำไฟฟ้าด้วยแสง (Photo Conductivity : σ_{ph}) จะเกิดขึ้นเมื่อทำการส่องแสงเข้าสู่วัสดุ a-Si:H แสงจะกระตุ้นอิเล็กตรอนให้กระโดดจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปสู่แถบคอนดักชัน จึงทำให้สภาพนำไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น กระบวนการนำไฟฟ้าด้วยแสงของสารกึ่งตัวนำจะประกอบด้วยกระบวนการกระตุ้นพาหะ (Excitation) กระบวนการจับและปล่อยพาหะ (Trapping and Detrapping) และกระบวนการรวมตัวของพาหะ (Recombination) ถ้าเราให้ η คือประสิทธิภาพควอนตัม, Φ คือจำนวนของโฟตอนที่เดินทางเข้าสู่วัสดุในหนึ่งหน่วยพื้นที่ และ α คือสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ดังนั้นความหนาแน่นของพาหะ G ที่เกิดขึ้นจากแสงในหนึ่งหน่วยเวลาจะมีค่าเท่ากับสมการที่ (2.15) ในสถานะคงตัว การจับและปล่อยพาหะด้วยระดับโลคอไลซ์สเตตจะอยู่ในสภาพสมดุล ดังนั้นกระบวนการจับและปล่อยพาหะจึงไม่แสดงผลให้เห็น แต่ขณะเดียวกันจำนวนของพาหะส่วนเกิน n ที่เกิดจากแสงจะถูกกำหนดด้วยเวลาอายุของพาหะ (τ) ซึ่งสูญหายไปอันเนื่องจากกระบวนการรวมตัวมีค่าดังนี้ อิเล็กตรอนสภาพนำไฟฟ้าด้วยแสงมีรูปทำนองเดียวกับสมการที่ (2.11) เนื่องจาก n และ τ มีค่าที่ขึ้นกับอุณหภูมิ

$$G = \eta \Phi \alpha \tag{2.15}$$

$$n = G\tau \tag{2.16}$$

ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าด้วยแสงจึงมีค่าที่ขึ้นกับอุณหภูมิด้วย ในการประยุกต์ใช้วัสดุ a-Si:H เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ จะต้องสร้างให้ชั้นฟิล์มมีค่าสภาพนำไฟฟ้าด้วยแสงที่สูง ดังนั้นเงื่อนไขการสร้างชั้นฟิล์มจึงมีอิทธิพลต่อสภาพนำไฟฟ้าด้วยแสงมากดังรูปที่ 2.12 แสดงการขึ้นกับอุณหภูมิแผ่นฐานต่อสภาพนำไฟฟ้ามืดและสภาพนำไฟฟ้าด้วยแสงของสารกึ่งตัวนำ a-Si:H



รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้าต่ออุณหภูมิฐานรองในการสร้าง a-Si:H [18]

2.3.4 คุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำ a-Si:H เมื่อเทียบกับสารกึ่งตัวนำ c-Si

สารกึ่งตัวนำ a-Si:H และ c-Si นิยมนำมาใช้ในการผลิตเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ที่ใช้งานกันอยู่ในปัจจุบัน และตารางที่ 2.1 แสดงให้เห็นการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นโดยสารกึ่งตัวนำแบบ a-Si:H และ c-Si

ตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอน [19]

Item	Mono Crystalline Si	Amorphous Si
Atomic Arrangement	Regular	Disordered
Forbidden Band Gap (eV)	1.1	1.6-1.8
Absorption Coefficient (Visible Spectrum)	Small	Large
Minority Carrier Diffusion Length (μm)	10-100	0.1-2
Electron Mobility ($cm^2 V^{-1}s^{-1}$)	~1000	0.1-1
Conductivity (Scm^{-1})	10^{-4}-10^{4}	10^{-13}-10^{2}
p-n Junction Characteristics	Rectifying	Ohmic
p-i-n Junction Depletion Layer Width	1-10 μm	0.5-1 μm
Thickness of Solar Cell	~200 μm	0.5-1 μm

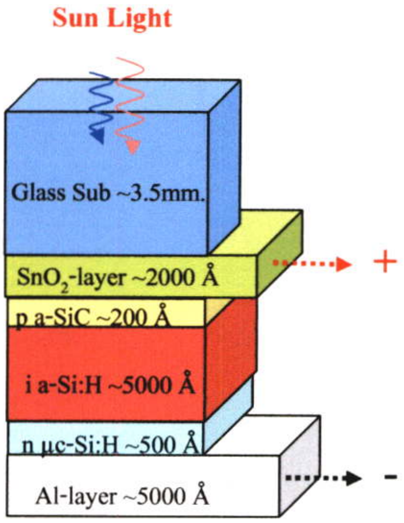
2.4 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน

สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ที่ผลิตจากสารกึ่งตัวนำอะมอร์ฟัสซิลิคอน (a-Si:H) ที่มีการใช้งานกันแพร่หลายและรู้จักกันมากที่สุดได้แก่ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H ซึ่งมีข้อดีเด่นที่เหนือกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยว (c-Si) หลายประการ อาทิเช่นผลิตจากวัสดุอะมอร์ฟัสซิลิคอนซึ่งมีราคาถูกกว่า ผลิตเป็นฟิล์มบางจึงประหยัดวัสดุและมีน้ำหนักเบากว่า ผลิตเป็นพื้นที่กว้างใหญ่ได้ เป็นต้น ซึ่งปัจจุบันได้มีการนำไปใช้งานตั้งแต่การผลิตกระแสไฟฟ้าในเครื่องคิดเลขขนาดเล็กๆ ไปจนถึงผลิตกระแสไฟฟ้าในปริมาณมากๆ เพื่อใช้งานตามอาคารและบ้านพักอาศัย

เนื่องจากคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของสารกึ่งตัวนำ a-Si:H แตกต่างไปจากกรณีของผลึกเดี่ยวในหลายๆ ด้าน อาทิเช่น สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ความคล่องตัว และแก็ปสเตต ดังนั้นการออกแบบสร้างจึงแตกต่างกัน ซึ่งในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงแนวคิดพื้นฐานจากอดีตสู่ปัจจุบันของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H รอยต่อ p-i-n, เซลล์แสงอาทิตย์ a-Si:H โครงสร้างอินทิเกรต, เซลล์แสงอาทิตย์แบบเซลล์ซ้อนอะมอร์ฟัสซิลิคอน หรือทันเดมโซล่าร์เซลล์ (Tandem Solar Cell)

2.4.1 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H รอยต่อ p-i-n

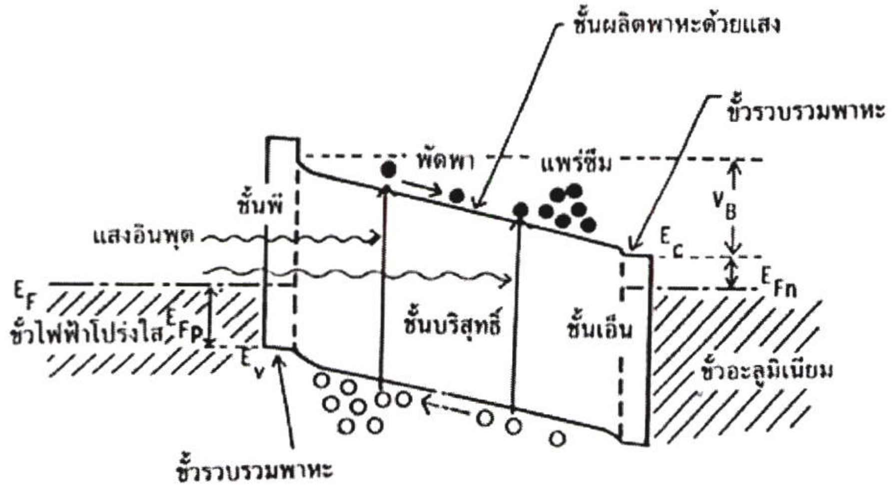
โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H ประกอบไปด้วยชั้นฟิล์มบางต่างๆ ที่มีหน้าที่ต่างกัน ซึ่งวัสดุ a-Si:H สามารถโดปได้ด้วยการเติมอะตอมของ Phosphorus หรือ Boron เพื่อให้ได้ชั้นฟิล์มบางชนิด p และ n-type ตามลำดับ แต่การโดปวัสดุ a-Si:H ก็จะทำให้ความหนาแน่นของจุดบกพร่องซึ่งเป็นศูนย์กลางการรวมตัวของพาหะเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นแม้จะนำ a-Si:H ชนิด p และ n มาสร้างเป็นรอยต่อแต่ก็จะไม่ได้ลักษณะสมบัติ p-n ของไดโอดที่ดีได้เลย ด้วยเหตุนี้จึงหาวิธีแก้ไขโดยการใส่ชั้นวัสดุ Intrinsic a-Si:H เข้าไปตรงกลางระหว่างชั้น p และ n ซึ่งจะทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีโครงการสร้างพื้นฐานเป็นรอยต่อแบบ p-i-n ในโครงสร้างเช่นนี้ชั้น i(a-Si:H) จะทำหน้าที่เป็นชั้นผลิตกระแสไฟฟ้าโฟโต ส่วนชั้น p และ n จะทำหน้าที่สร้างแรงดันไฟฟ้าของรอยต่อกระแสไฟฟ้าโฟโตที่ได้จากรอยต่อ p-i-n จะมีค่ามากน้อยเพียงไรขึ้นกับความสามารถในการดูดกลืนแสงอย่างมีประสิทธิภาพในชั้น i จากแนวความคิดที่จะพยายามให้แสงผ่านเข้าสู่ชั้น i มากที่สุด ได้มีการพัฒนาวัสดุสำหรับชั้น p และ n แบบใหม่ที่มีช่องว่างพลังงานกว้างกว่าช่องว่างพลังงานของชั้น i อาทิเช่น อะมอร์ฟัสซิลิคอนคาร์ไบด์ (a-SiC) และไมโครคริสตัลไลน์ซิลิคอน (μc-Si:H) นอกจากนี้เนื่องจากสภาพนำไฟฟ้าของชั้น p และ n ยังไม่ดีพอ ดังนั้นเพื่อลดการสูญเสียกระแสไฟฟ้าอันเนื่องจากความต้านทาน จึงได้มีการใช้ชั้นขั้วโปร่งแสงชนิด SnO_2 หรือ ITO เคลือบไว้ที่ด้านหน้า และใช้ชั้นตัวนำโลหะ เช่น Al หรือ Ag เคลือบไว้ที่ด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ a-Si:H รอยต่อ p-i-n ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 โครงสร้างพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ a-Si:H รอยต่อ p-i-n

โครงสร้างพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ a-Si:H รอยต่อ p-i-n ประกอบไปด้วยชั้นฟิล์มบางต่างๆ ที่เคลือบบนแผ่นฐานรอง (Substrate) ซึ่งอาจเป็นแผ่นกระจกหรือแผ่นโลหะก็ได้ แต่สำหรับในแบบที่สร้างบนแผ่นฐานรองกระจกจะเรียกว่า “Superstrate Design” โดยแสงอาทิตย์จะส่องผ่านฐานรองที่โปร่งแสงก่อนลงไปสู่เซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งวัสดุที่เป็นฉนวนเช่นกระจกนี้จำเป็นจะต้องมีการสร้างชั้นตัวนำโปร่งแสง (Transparent Conductive Oxide : TCO) ขึ้นก่อนเช่น SnO_2 จากนั้นชั้นฟิล์ม a-Si:H จะถูกสร้างลงบนชั้นฟิล์ม TCO โดยเริ่มต้นจากชั้น p-i-n ตามลำดับ สุดท้ายจะทำการสร้างชั้นสะท้อนแสงกลับ (Back Reflector) ลงบนชั้น n-layer ซึ่งจะมีหน้าที่เป็นขั้วตัวนำกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์อีกด้วย

เซลล์แสงอาทิตย์ a-Si:H รอยต่อ p-i-n ดังรูปที่ 2.14 มีการทำงานได้ เมื่อได้รับแสงที่มีพลังงานโฟตอนมากกว่าหรือเท่ากับช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ แสงจะถูกสารกึ่งตัวนำกลืนและจะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนอิสระเปลี่ยนสถานะ จากแถบเวเลนซ์ขึ้นไปสู่แถบคอนดักชันและจะเกิดโฮลอิสระขึ้นในแถบเวเลนซ์ ปรากฏการณ์เช่นนี้สังเกตได้จากการเพิ่มขึ้นของสภาพนำไฟฟ้าด้วยแสง (Photoconductivity) หรือกระแสไฟฟ้าโฟโต (Photocurrent) การเกิดขึ้นของคู่พาหะอิสระอิเล็กตรอนและโฮลจะเกิดขึ้นภายในบริเวณชั้น i (p-i, n-i Junction) ซึ่งที่รอยต่อนั้นจะมีความลาดของพลังงานศักย์ กล่าวคือมีแรงดันไฟฟ้าภายใน (Built-In Potential) อิเล็กตรอนและโฮลอิสระที่ถูกผลิตด้วยแสงก็จะถูกแรงดันไฟฟ้าภายในนั้นพัดพาหรือเรียกว่าการดริฟท์ (Drift) ให้ไหลไปในทิศทางตรงข้ามกัน โดยอิเล็กตรอนจะไหลสวนทางกับทิศของสนามไฟฟ้า ส่วนโฮลจะไหลตามทิศของสนามไฟฟ้า ทำให้ประจุอิเล็กตรอนและโฮลแยกตัวออกจากกัน ซึ่งเป็นผลให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตขึ้นที่ปลายทั้งสองด้านของเซลล์แสงอาทิตย์ a-Si:H รอยต่อ p-i-n ซึ่งเราจะเรียกปรากฏการณ์เช่นนี้ว่า ปรากฏการณ์โฟโตโวลทาอิก (Photovoltaic effect) ซึ่งเป็นหลักการทำงานพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 2.14 แถบพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ a-Si:H รอยต่อ p-i-n

ในการออกแบบสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H รอยต่อ p-i-n นั้นจำเป็นต้องคำนึงถึงคุณสมบัติและความเหมาะสมของการสร้างชั้นฟิล์มบางต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. ขั้วไฟฟ้าโปร่งใส (SnO_2) เป็นชั้นฟิล์มที่มีต้นทุนการสร้างไม่สูงนัก จึงนิยมเคลือบลงบนฐานรองกระจกที่จะนำมาใช้ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบ a-Si:H ซึ่งมีคุณสมบัติพื้นฐานที่จำเป็นคือ มีความโปร่งใสมากๆ สามารถนำไฟฟ้าได้ดี และในขณะเดียวกันก็ควรเป็นชั้นที่สามารถป้องกันการสะท้อนแสง (Antireflection Layer) ได้ด้วย ซึ่งการใช้งานก็ควรเลือกความหนาที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง

2. ชั้น p (p-layer) ทำหน้าที่เป็นขั้วสร้างแรงดันไฟฟ้าภายในเช่นเดียวกับชั้น n แต่จะมีค่าสภาพนำไฟฟ้าด้วยแสงที่ต่ำมากดังนั้นชั้น p จึงไม่มีส่วนช่วยในการผลิตพาหะด้วยแสงเท่าไรนัก บางครั้งจะเรียกชั้น p ว่าชั้นตาย (Dead Layer) ถ้าผลิตชั้น p จากวัสดุ a-Si:H ซึ่งโดปด้วยโบรอนและมีช่องว่างพลังงานแคบ ควรออกแบบให้ชั้น p(a-Si:H) บางที่สุด แต่อย่างไรก็ตามถ้าชั้น p บางมากเกินไปก็จะทำให้แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดลดลงด้วย ในปัจจุบันนิยมใช้ p(a-SiC) ที่มีช่องว่างพลังงานประมาณ 2 eV หรือ p(μc-Si:H) เป็นหน้าต่างกว้างรับแสง ซึ่งจะช่วยเพิ่มกระแสไฟฟ้าลัดวงจรและแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด

3. ชั้น Intrinsic (i-layer) เป็นชั้นฟิล์มที่มีอิทธิพลและต่อประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์อย่างมาก โดยเงื่อนไขการสร้างชั้น i(a-Si:H) ที่มีแก็ปสเตตแคบนั้นจะต้องใช้กำลังไฟฟ้าในการแยกสลายก๊าซต่ำและใช้อัตราการไหลก๊าซไซเลน มากๆซึ่งจะได้อัตราการเติบโตของฟิล์มประมาณ 1 mm/Hr. โดยอุณหภูมิแผ่นฐานที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วงประมาณ 200-250 องศาเซลเซียส แม้ว่าในกระบวนการผลิตชั้น i(a-Si:H) จะไม่ได้มีการโดปใดๆ แต่ผลที่ได้จะเป็นชั้นฟิล์มที่มีคุณสมบัติเป็นชนิด n แบบอ่อนเสมอ เพราะ

ระดับพลังงานเฟอร์มิของ i(a-Si:H) ไม่ได้อยู่กึ่งกลางช่องว่างพลังงาน แต่จะอยู่ในตำแหน่งที่ค่อนไปทางแถบคอนดักชัน การเติมโบรอนบ้างเล็กน้อยประมาณ 1 ppm จะช่วยทำให้ระดับพลังงานเฟอร์มีเคลื่อนมาอยู่ตรงกลางช่องว่างพลังงานพอดี และจะทำให้สนามไฟฟ้าในชั้น i(a-Si:H) มีค่าเพิ่มขึ้นและเซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพสูงขึ้น [20]

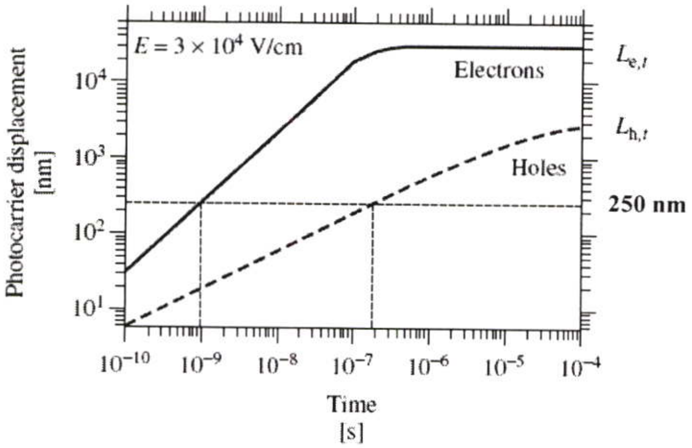
4. ชั้น n (n-layer) ปัจจุบันนิยมใช้วัสดุแบบไมโครคริสตัลไลน์ซิลิคอน n(μc-Si:H) ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์มากกว่าวัสดุแบบ n(a-Si:H) เนื่องจากคุณสมบัติที่ดีเด่น ดังนี้

- ระดับพลังงานเฟอร์มีของวัสดุ n(μc-Si:H) จะอยู่ใกล้แถบคอนดักชันมากและสภาพนำไฟฟ้าก็มีค่าสูงมาก (1-10 $S.cm^{-1}$) จึงทำให้แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่ามากขึ้น

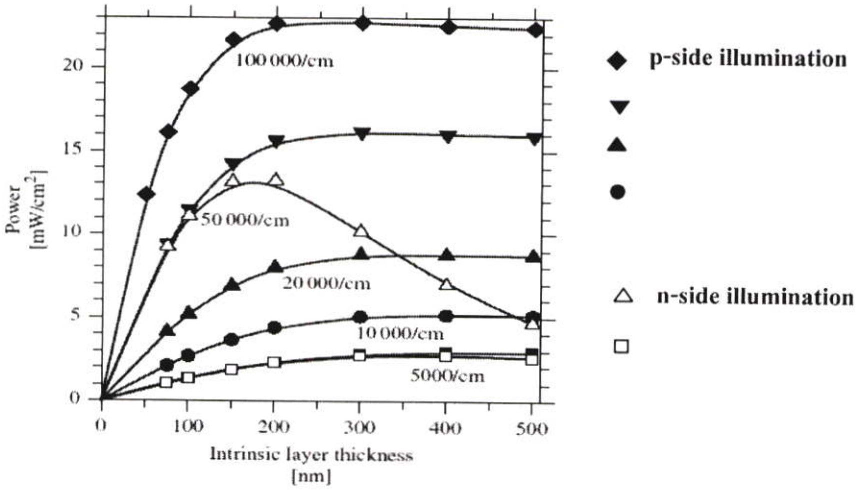
- ช่องว่างพลังงานของ n(μc-Si:H) จะมีค่าประมาณ 1.9 - 2.0 eV ซึ่งกว้างกว่าของ n(a-Si:H) จึงมีความโปร่งใสดีและช่วยให้แสงที่สะท้อนจากขั้วโลหะด้านหลังกลับเข้าสู่ชั้น i ได้ดีขึ้น ทำให้ได้กระแสไฟฟ้าเอาต์พุตมากขึ้น

- เนื่องจาก n(μc-Si:H) มีค่าสภาพนำไฟฟ้าสูงจึงสร้างขั้วไฟฟ้าโอห์มิกกับชั้น Al ได้ง่าย ซึ่งเงื่อนไขของการปลูกชั้นฟิล์ม n(μc-Si:H) ได้แก่การใช้กำลังไฟฟ้าสูงๆ ในการแยกสลายก๊าซ SiH_4 และผสมด้วยก๊าซ H_2 ในอัตราส่วนที่สูงมากๆ [21, 22]

ในการสร้างแบบ Superstrate Design จะมีลำดับการสร้างชั้นฟิล์มคือ Glass Sub/SnO_2/p-i-n/Al ส่วนในแบบ Substrate Design จะมีลำดับการสร้างชั้นฟิล์มคือ Stainless Sub/Al/ZnO/n-i-p/ITO แต่ในการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสองแบบจะต้องให้ชั้น p เป็นด้านรับแสง ก็เนื่องมาจากในสภาวะที่สนามไฟฟ้าและอุณหภูมิคงที่นั้นโฮล (Photo Hole) ที่เกิดขึ้นในชั้นฟิล์ม a-Si:H จะมีระยะทางการเคลื่อนที่ (Displacement) ที่ต่ำกว่าอิเล็กตรอน (Photo Electron) ดังรูปที่ 2.15 ก่อนโฮลจะถูกจับ (Trapping) โดยจุดบกพร่องของชั้นฟิล์มและเกิดการรวมตัวกับอิเล็กตรอน (Recombination) ที่ทำให้เกิดการสูญเสียขึ้นภายในเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนั้นเพื่อให้โฮลซึ่งเป็นพาหะส่วนมากในชั้น p-layer มีระยะการเคลื่อนที่สั้นลงและสามารถเคลื่อนที่ออกไปสู่ขั้วตัวนำได้อย่างรวดเร็วและมีการสูญเสียที่น้อยกว่า จึงต้องมีการออกแบบสร้างให้ชั้น p อยู่ติดกับขั้วตัวนำ SnO_2 เป็นด้านรับพลังงานแสงในการสร้างแบบ Superstrate Design ดังจะเห็นได้จากกราฟรูปที่ 2.16 ซึ่งหากกลับด้านให้ชั้น n เป็นด้านรับแสงแล้ว ค่า Output Power ของเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะลดต่ำลง และในการสร้างแบบ Substrate Design นั้นก็จะให้ชั้น p อยู่ติดกับชั้น ITO และใช้เป็นด้านรับแสงด้วยเช่นกัน ส่วนชั้น n จะอยู่ติดกับชั้นตัวนำ Al/ZnO ที่ถูกสร้างลงบนฐานรอง Stainless ซึ่งจะช่วยให้มีการนำไฟฟ้าดีขึ้น



รูปที่ 2.15 ระยะทางการเคลื่อนที่ของโฮลและอิเล็กตรอนภายในชั้นฟิล์ม a-Si:H ในสภาวะที่สนามไฟฟ้าและอุณหภูมิคงที่

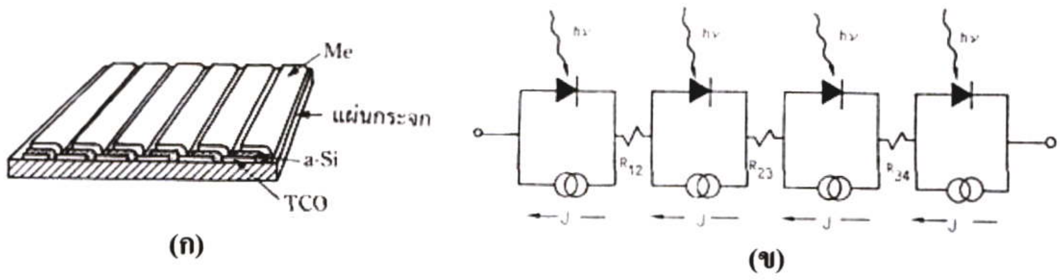


รูปที่ 2.16 ค่ากำลังงานของ p-i-n และ n-i-p a-Si:H ซึ่งใช้ชั้น p และ n เป็นด้านรับแสง

2.4.2 เซลล์แสงอาทิตย์ a-Si:H โครงสร้างอินทิเกรตที่ให้แรงดันเอาต์พุตสูง

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H มีข้อได้เปรียบเทียบกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยว c-Si คือมีแรงดันวงจรเปิดที่สูงประมาณ 0.8-0.9 V และมีลักษณะเป็นฟิล์มบาง สามารถผลิตให้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H ต่ออนุกรมกันบนแผ่นฐาน เช่น แผ่นกระจกแผ่นเดียวกันได้โดยตรงโดยไม่ต้องใช้สายไฟฟ้ามาต่อเชื่อม ทำให้สามารถลดขั้นตอนการผลิต ลดต้นทุน มีความสวยงามและกะทัดรัด ซึ่งบริษัท Sanyo ประเทศญี่ปุ่น เป็นบริษัทแรกที่พัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H ซึ่งต่ออนุกรมกันโดยตรงบนกระจกแผ่นเดียว และให้ชื่อว่า Integrated Type Solar Cell [23]

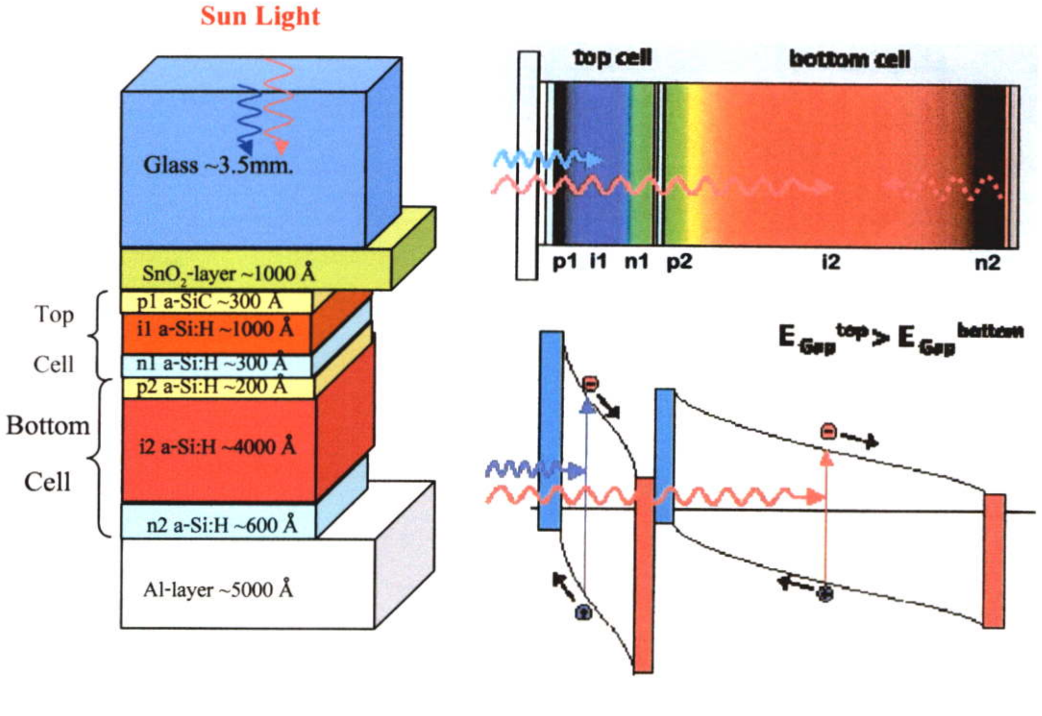
เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างอินทิเกรตมีวงจรสมมูลที่แสดงได้ดังในรูปที่ 2.17 ซึ่งจะสามารถให้แรงดันวงจรเปิดได้สูงตามจำนวนของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มาต่ออนุกรมกัน มีประโยชน์ในการใช้งานหลายอย่าง เช่น ใช้ประจุถ่านไฟฉาย ประจุแบตเตอรี่หรือใช้เป็นแหล่งผลิตกระแสไฟฟ้าให้กับเครื่องใช้ไฟฟ้าต่าง ๆ เช่น นาฬิกา เครื่องคิดเลข โทรศัพท์ และไฟฉาย



รูปที่ 2.17 (ก) เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างอินทิเกรต **(ข)** วงจรสมมูลของอินทิเกรตโซล่าร์เซลล์

2.4.3 เซลล์แสงอาทิตย์แบบเซลล์ซ้อนอะมอร์ฟัสซิลิคอน

เซลล์แสงอาทิตย์แบบเซลล์ซ้อนอะมอร์ฟัสซิลิคอน หรือ Multi-Junction Solar Cells คือ เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการต่ออนุกรมเซลล์ในแนวตั้งซ้อนทับกันหลายชั้นบนฐานรอง ทำให้มีต้นทุนถูกกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวและผลึกโพลีซิลิคอน โครงสร้างโดยทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์ a-Si:H แบบเซลล์ซ้อนระหว่าง 2 เซลล์ หรือที่เรียกว่าทันเดมโซล่าร์เซลล์ (Tandem Solar Cells) จะมีโครงสร้างที่ประกอบไปด้วย Glass Sub/SnO_2/p_1-i_1-n_1/p_2-i_2-n_2(a-Si:H)/Al ดังรูปที่ 2.18 โดยที่ชั้น i เป็นชั้นผลิตพาหะ และชั้น p และ n ทำหน้าที่สร้างแรงดันไฟฟ้าภายในเพื่อพัดพาพาหะให้ไหลออกสู่วงจรภายนอก โดยทั่วไปในโครงสร้างแบบเซลล์ซ้อน (Tandem Structure) จะทำให้แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (V_{OC}) ของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าสูงขึ้นเป็น 1.4-1.6 V ซึ่งจะมีค่าสูงกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซึ่งมีค่าเพียงประมาณ 0.5-0.6 V



รูปที่ 2.18 โครงสร้างและแถบพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์แบบเซลล์ซ้อน (Tandem Solar Cell)

ลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเซลล์ซ้อน ขึ้นกับความหนาของชั้น p, i และ n [24] ซึ่งปัจจุบันพบว่าความหนาที่เหมาะสมที่สุดของชั้น i อยู่ในช่วงประมาณ 5000-6500 Å ซึ่งค่อนข้างจะบางมากเมื่อเปรียบเทียบกับความหนาหลายไมครอนของชั้นปลอดพาหะ p-n Junction ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยว (c-Si) สาเหตุที่ชั้น i มีขนาดที่บางมากเช่นนี้ก็เพราะระยะทางแพร่ซึม (Diffusion Length) ของพาหะโดยเฉพาะอย่างยิ่งของโฮลมีค่าสั้น และย่านที่สนามไฟฟ้ามีค่าสูงในชั้น i มีค่าสั้น [25] สาเหตุเหล่านี้ทำให้ประสิทธิภาพของการกวาดเก็บพาหะของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเซลล์ซ้อนลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อชั้น i มีความหนาที่มากขึ้น

ขนาดความหนา d_i ของชั้น i ในเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละตัวในเซลล์ซ้อนมีอิทธิพลต่อกระแสไฟฟ้าโฟโต I_{Li} รวมทั้งประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์โดยรวมเป็นอย่างมาก ในการออกแบบขนาดความหนา d_i ของชั้น i ที่เหมาะสมในเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละตัวนั้น เริ่มแรกควรจะสอดคล้องกับเงื่อนไขดังนี้

$$I_{Li} = \frac{I_L}{m} \qquad (\mathrm{i} = 1, 2, 3, \ldots\ldots\mathrm{m})$$

กล่าวคือ เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลในเซลล์แสงอาทิตย์ทุกตัวจะถูกกำหนดโดยเซลล์แสงอาทิตย์ตัวที่ให้กระแสไฟฟ้าเอาต์พุตน้อยที่สุด และเนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ในชั้นที่ 1 จะได้รับแสงเข้มมากที่สุด ในขณะที่เซลล์แสงอาทิตย์ที่อยู่ลึกเข้าไปด้านหลังจะได้รับแสงเข้มน้อยลงอย่างเอกซ์โพเนนเชียล ดังนั้นเราจึงคาดคะเนได้ว่าความหนา d_i ของชั้น i นั้นควรจะเพิ่มขึ้นเมื่อเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ลึกเข้าไปดังแสดงในรูปที่ 2.19 นั่นคือ $d_1 < d_2 < d_3 < \ldots d_m$

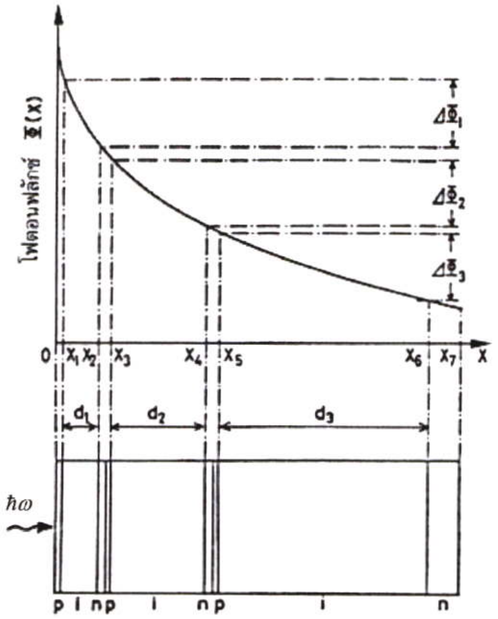
ถ้าให้ $\Phi(\hbar\omega, x)$ คือโฟตอนฟลักซ์ของแสง ณ ที่ตำแหน่ง x ในเซลล์แสงอาทิตย์ และ Eg คือช่องว่างพลังงานของ a-Si:H ซึ่งปกติจะมีค่าประมาณ 1.7-1.8 eV เราจะได้ค่า I_{Li} ดังนี้ [26]

$$I_{Li} = q\int_{E_g}^{\infty}[\Phi(\hbar\omega, x_{2i}) - \Phi(\hbar\omega, x_{2i-1})]d(\hbar\omega)$$

$$= q[\Phi(x_{21}) - \Phi(x_{21-1})]$$

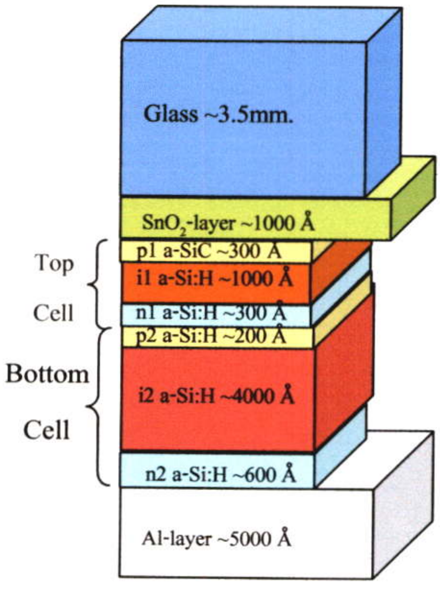
$$= q\Delta\Phi$$

โดยที่ $d_i = x_{21} - x_{21-1}$ และ $\Phi(x) = \int_{E_g}^{\infty}\Phi(\hbar\omega, x)d(\hbar\omega)$



รูปที่ 2.19 การเปลี่ยนแปลงของโฟตอนฟลักซ์ของแสงตามความลึกที่เดินทางเข้าสู่เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H ที่มีโครงสร้างซ้อนทับกัน 3 เซลล์

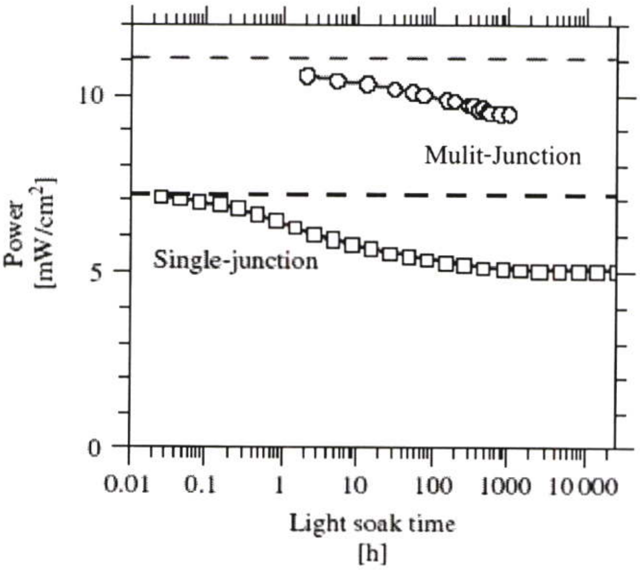
สำหรับขนาดความหนาชั้นฟิล์มบางต่างๆ ในเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างโดยบริษัทบางกอกโซล่าร์ จะเป็นดังรูปที่ 2.20 โดยโครงสร้าง a-Si:H/a-Si:H Tandem นี้จะมีชั้น i_1 และ i_2 ที่มีความหนาประมาณ 1000 และ 4000 Å ตามลำดับ เพื่อแบ่งแยกช่วงความยาวคลื่นแสงที่ตอบสนองต่อเซลล์แต่ละตัว สำหรับชั้น p จะใช้วัสดุ p(a-SiC) ซึ่งมี Eg ประมาณ 2.0 eV เป็นหน้าต่างรับแสง และใช้ชั้น n_1 และ n_2 แบบ n(a-Si:H) ส่วนฐานรองที่ใช้คือกระจกเคลือบทินออกไซด์ (SnO_2) ซึ่งมีขนาด 64×124 ซ.ม. และใช้ขั้วตัวนำด้านหลังเซลล์แสงอาทิตย์แบบอลูมิเนียม (Al)



รูปที่ 2.20 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเซลล์ซ้อน a-Si:H/a-Si:H Tandem

2.5 ปรากฏการณ์เสื่อมประสิทธิภาพในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H

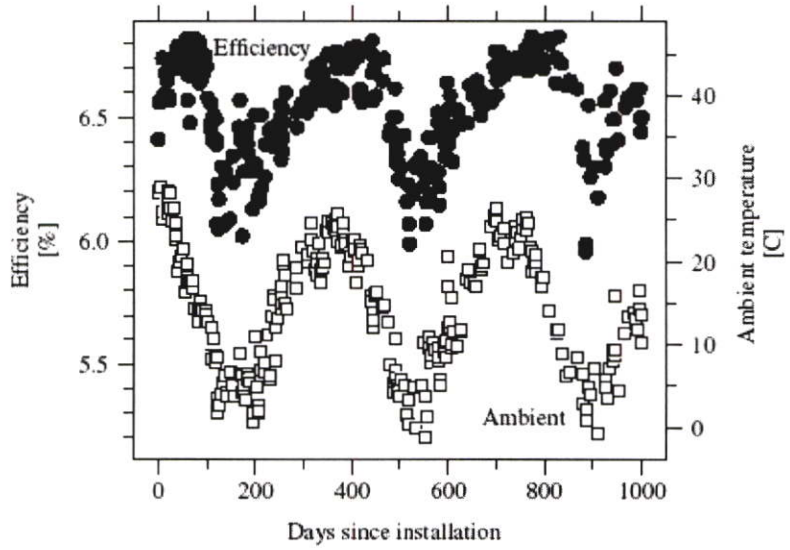
ปรากฏการณ์หนึ่งซึ่งเป็นที่น่าสังเกตและทำให้เกิดการศึกษาในด้านเสถียรภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัสซิลิคอนคือ เซลล์แสงอาทิตย์แบบ a-Si:H จะค่อยๆ ลดประสิทธิภาพการแปลงพลังงานลงมาในช่วง 200-300 ชั่วโมงแรกของการใช้งานกับแสงอาทิตย์ จากข้อมูลแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัสซิลิคอนของบริษัท United Solar [27, 28] เซลล์แสงอาทิตย์แบบ Single-Junction (p-i-n a-Si:H) จะมีการลดลงของ Output Power ประมาณ 30% จากค่าเริ่มต้น ส่วนในแผงเซลล์แสงอาทิตย์ a-Si:H แบบ Mulit-Junction จะมีการลดลงของ Output Power ประมาณ 15% จากค่าเริ่มต้น ดังข้อมูลในรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 การลดลงของค่า Output Power ต่อระยะเวลาการใช้งานของเซลล์แสงอาทิตย์ a-Si:H แบบ Single-Junction และ Multi-Junction

ลักษณะของการค่อยๆ เสื่อมประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ในช่วงต้นของการใช้งานกับแสงอาทิตย์เช่นนี้ เป็นปรากฏการณ์ที่เรียกว่า “Staebler-Wronski Effect” ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับการที่พลังงานแสงเข้าไปกระตุ้นและทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างในวัสดุชั้นฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอนภายในเซลล์แสงอาทิตย์ แม้ว่าจะยังไม่สามารถทราบเหตุผลที่แน่ชัดในการเสื่อมประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบ a-Si:H แต่การลดปัญหาดังกล่าวสามารถทำได้โดยการอบความร้อน (Annealing) ด้วยอุณหภูมิประมาณ 160 °C ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพเริ่มต้นของเซลล์แสงอาทิตย์สามารถกลับคืนมาได้พอสมควร นอกจากนี้การไม่คงที่ของเสถียรภาพเซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัสซิลิคอนยังขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิโดยรอบตามฤดูกาลที่มีการติดตั้งใช้งานแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ดังข้อมูลในกราฟรูปที่ 2.22 แสดงการเปลี่ยนแปลง

ระหว่างประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (%Efficiency) ต่อสภาพอุณหภูมิโดยรอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Ambient Temperature) ในช่วงระยะเวลาการทดสอบใช้งานแผงเซลล์ 1000 วัน



รูปที่ 2.22 กราฟค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเซลล์ซ้อน a-Si:H กับอุณหภูมิโดยรอบบริเวณที่ติดตั้งใช้งานในช่วง 1000 วัน

แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ a-SiH จะแสดงประสิทธิภาพการแปลงพลังงานที่สูงสุดในสภาพอากาศที่สูงประมาณ 29 °C และประสิทธิภาพการแปลงพลังงานจะลดต่ำลงเมื่ออุณหภูมิโดยรอบลดลง ตามฤดูกาลต่างๆ ในช่วงเวลาประมาณ 1000 วันของการทดสอบใช้งานแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ a-SiH โดยมีสัมประสิทธิการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพการแปลงพลังงานต่ออุณหภูมิอยู่ที่ประมาณ $+5\times10^{-3}$/K ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าไม่มีการเสื่อมประสิทธิภาพที่ถาวรของแผงเซลล์แบบ a-SiH ตลอดช่วงสามปีของการทดสอบ โดยข้อสรุปของ Advanced Photovoltaics Systems, Inc ได้พบว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ a-SiH จะมีการเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady-State) ภายหลังจากได้รับการส่องด้วยแสงจำลองต่อเนื่องในช่วงระยะเวลาประมาณ 1000 ชั่วโมง

บทที่ 3
กระบวนการสร้าง

ในปัจจุบันแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัสซิลิคอนในท้องตลาดมีการแข่งขันที่สูงขึ้นทั้งในด้านประสิทธิภาพและราคา ดังนั้นกระบวนการสร้างที่มีความสะดวกรวดเร็วและสามารถผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้จำนวนมาก จึงมีความสำคัญและเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อภาคอุสาหกรรม ในบทนี้จะได้กล่าวถึงพื้นฐานของการสร้างชั้นฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอน ซึ่งประกอบไปด้วยกระบวนการสร้างแบบแชมเบอร์เดี่ยว ปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อคุณภาพชั้นฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอน และสุดท้ายจะได้กล่าวถึงกระบวนการสร้างเชิงปริมาณ (Batch Process) ที่ใช้ในการผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์ของบริษัทบางกอกโซล่าร์และใช้สำหรับการวิจัยครั้งนี้ เพื่อศึกษาและพัฒนาเงื่อนไขการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบเซลล์ซ้อนอะมอร์ฟัสซิลิคอน ให้มีประสิทธิภาพสูงและเหมาะสมกับการผลิตในเชิงพาณิชย์

3.1 การสร้างชั้นฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอน

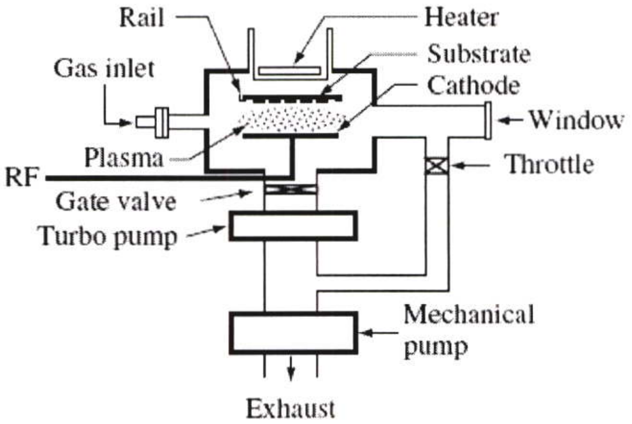
จากในอดีตซึ่งเริ่มต้นใช้วิธี Silane Glow Discharge ด้วยคลื่นความถี่เพื่อทำการสร้างชั้นฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอน จนมาถึงวันนี้ได้มีการพัฒนาวิธีการไปเป็นแบบ Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition (PECVD) ซึ่งก็ได้มีการค้นพบวิธีปรับปรุงคุณภาพของชั้นฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอนและเพิ่มอัตราการปลูกของชั้นฟิล์มให้สูงขึ้น ในจำนวนวิธีการสร้างทั้งหมดนั้นวิธีการแบบ RF PECVD (13.56 MHz) ยังคงมีการใช้งานอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน ทั้งในด้านงานวิจัยเพื่อสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดเล็ก และเพื่อการผลิตในรูปแบบเชิงปริมาณ ตารางที่ 3.1 ได้รวบรวมวิธีการสร้างชั้นฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอนที่ปัจจุบันยังมีการศึกษาและใช้งานกันอยู่

ตารางที่ 3.1 วิธีการสร้างชั้นฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอนที่ปัจจุบันยังมีการศึกษาและใช้งานกันอยู่

Process	Max. Rate	Advantage	Disadvantage	Manufacturing
RF-PECVD	3 Å/s	high quality uniform	slow	many
DC-PECVD	3 Å/s	high quality uniform	slow	BP Solar
VHF-PECVD	15 Å/s	fast	poor uniformity	none
MW-PECVD	50 Å/s	very fast	film not as good	Canon
Hot-Wire	50 Å/s	very fast	poor uniformity	none
Photo-CVD	1 Å/s	high quality	slow	none
Sputtering	3 Å/s		poor quality, slow	none

3.1.1 ระบบการสร้างชั้นฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอนแบบแชมเบอร์เดี่ยว

ระบบการสร้างชั้นฟิล์ม a-Si:H ด้วยวิธี Single-Chamber PECVD แสดงได้ดังแผนภาพในรูปที่ 3.1 โดยก๊าซไซเลน (SiH_4) ซึ่งเป็นก๊าซที่มีธาตุประกอบของซิลิคอน กับก๊าซไฮโดรเจน (H_2) จะถูกปล่อยเข้าสู่ภาชนะสุญญากาศ (Chamber) ซึ่งต่ออยู่กับปั๊มสุญญากาศที่ระดับประมาณ 10^{-6} Torr ภายในจะมีแผ่นโลหะ 2 แผงติดตั้งอยู่ แผ่นหนึ่งเป็น Electrode อีกแผ่นหนึ่งเป็น Ground ต่ออยู่กับ RF Generator (13.56 MHz) หรือเครื่องกำเนิดกำลังงานความถี่ เมื่อมีการให้ความต่างศักย์สูงๆ ตกคร่อมระหว่างขั้วทั้งสองจะเกิด Plasma หรือประจุเรืองแสงที่เกิดจากกระบวนการแยกสลายก๊าซ แผ่นฐานรองหรือ Substrate อาทิเช่นแผ่นกระจก หรือแผ่น Stainless จะถูกติดตั้งไว้ที่ด้านหนึ่งหรือทั้งสองด้านของ Electrode เพื่อให้ชั้นฟิล์ม a-Si:H ถูกสร้างลงบนแผ่นฐานรองนั้น



รูปที่ 3.1 แผนภาพของระบบการสร้างชั้นฟิล์ม a-Si:H แบบ Single-Chamber PECVD

ระบบการสร้างชั้นฟิล์ม a-Si:H ด้วยวิธีการแบบ Single-Chamber PECVD จะมีอุปกรณ์สำคัญและส่วนประกอบต่างๆ ซึ่งจะสามารถแบ่งแยกออกได้เป็น 5 หัวข้อดังต่อไปนี้

1. ระบบการจ่ายก๊าซ ซึ่งจะประกอบไปด้วยถังประจุก๊าซดิบ อาทิเช่น SiH_4, H_2, B_2H_6, PH_3, CH_4 และ CO_2 อุปกรณ์ควบคุมแรงดันก๊าซ, อุปกรณ์ควบคุมการไหลก๊าซ และวาล์วต่างๆ ที่ใช้ในการเปิด-ปิดก๊าซ
2. แชมเบอร์หรือภาชนะที่ใช้ในการสร้าง ซึ่งจะประกอบไปด้วย อิเล็กโทรด, อุปกรณ์วางแผ่นฐานรอง, อุปกรณ์ให้ความร้อนแผ่นฐานรอง, เครื่องกำเนิดกำลังงานและสายต่อเชื่อมส่งสัญญาณความถี่จากภายนอกเข้าสู่ภายในแชมเบอร์
3. ระบบปั๊มสุญญากาศ ซึ่งจะประกอบไปด้วยปั๊มสุญญากาศระดับสูง ($\sim 10^{-6}$ Torr) คือ Diffusion Pump หรือ Turbo Molecular Pump ซึ่งจำเป็นจะต้องมี Mechanical Pump หรือ Rotary Pump เป็น Backup Pump

4. ระบบควบคุมความดันก๊าซ ซึ่งจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ Capacitance Manometer, Ionization Gauge, Thermocouple Gauge และ Throttle Valve เพื่อใช้ในการวัดค่าและควบคุมความดันภายในแชมเบอร์
5. ระบบกำจัดก๊าซพิษที่เหลือจากกระบวนการสร้าง ซึ่งจะประกอบไปด้วยเครื่อง Chemical Scrubber หรือ Burn Box ซึ่งจะทำหน้าที่ควบคุมการเผาทำลายก๊าซพิษก่อนปล่อยออกสู่บรรยากาศภายนอก

อุปกรณ์ต่างๆ เหล่านี้จะมีการควบคุมและสั่งการด้วยคอมพิวเตอร์ พร้อมกันนั้นก็จะมีการแสดงผลการทำงานต่างๆ ผ่านทางหน้าจอมอนิเตอร์

3.1.2 ปัจจัยการสร้างที่มีผลต่อคุณภาพของชั้นฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอน

คุณภาพของชั้นฟิล์ม a-Si:H จะขึ้นอยู่กับปัจจัยการสร้างหลายๆ อย่าง อาทิเช่น ค่าความดันภายในแชมเบอร์, ค่ากำลังงานไบอัสที่จ่ายให้กับอิเล็กโทรด, อุณหภูมิแผ่นฐานรอง, ระยะห่างของอิเล็กโทรดกับฐานรอง และอัตราการไหลของก๊าซ โดยเงื่อนไขการสร้างชั้นฟิล์ม a-SI:H เหล่านี้จะต้องอยู่ในช่วงที่เหมาะสม โดยทั่วไปแล้วพารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างชั้นฟิล์ม a-Si:H ในย่านที่มีอัตราการสร้างสูง กลาง และต่ำ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 อัตราการเกิดชั้นฟิล์ม a-Si:H จากเงื่อนไขของระบบ RF-PECVD

Dep. Rate	Pressure (Torr)	RF Power (mW/cm^2)	Substrate Temp. (°C)	Electrode Spacing (cm.)	Active Gas Flow ($sccm/cm^2$)	H_2 Dilution
High	2	100	350	5	0.02	100
Medium	0.5	20	250	3	0.01	10
Low	0.05	10	150	1	0.002	0

ช่วงของความดันในการสร้างชั้นฟิล์ม a-Si:H โดยปกติจะอยู่ระหว่าง 0.05-2 Torr สำหรับการใช้ความดันต่ำจะทำให้ได้ Uniform หรือความสม่ำเสมอของชั้นฟิล์มที่ดี ส่วนการใช้ความดันสูงจะทำให้สามารถสร้างชั้นฟิล์มบางแบบ Microcrystalline (μc-Si:H) ที่มีความสามารถตอบสนองต่อแสงที่มีช่วงความยาวคลื่นยาว และมีสภาพนำไฟฟ้าที่ดีกว่าชั้นฟิล์มแบบ a-Si:H

ค่ากำลังงานของ RF Generator ในระบบ Capacitive Couple Reactor หรือระบบการสร้างที่มี Substrate อยู่ระหว่าง Electrode และ Ground นี้โดยปกติจะมีค่าอยู่ที่ประมาณ 10-100 mW/cm^2 ซึ่งหากใช้ค่ากำลังงานที่ต่ำกว่า 10 mW/cm^2 จะยากต่อการปรับค่า Matching Impedance เพื่อให้เกิด Plasma ส่วนการใช้ค่ากำลังงานที่สูงกว่า จะทำให้ได้อัตราการปลูกชั้นฟิล์มที่สูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามหากมีการใช้กำลังงานที่สูงเกินกว่า 100 mW/cm^2 ปฏิกิริยาตอบสนองของการ

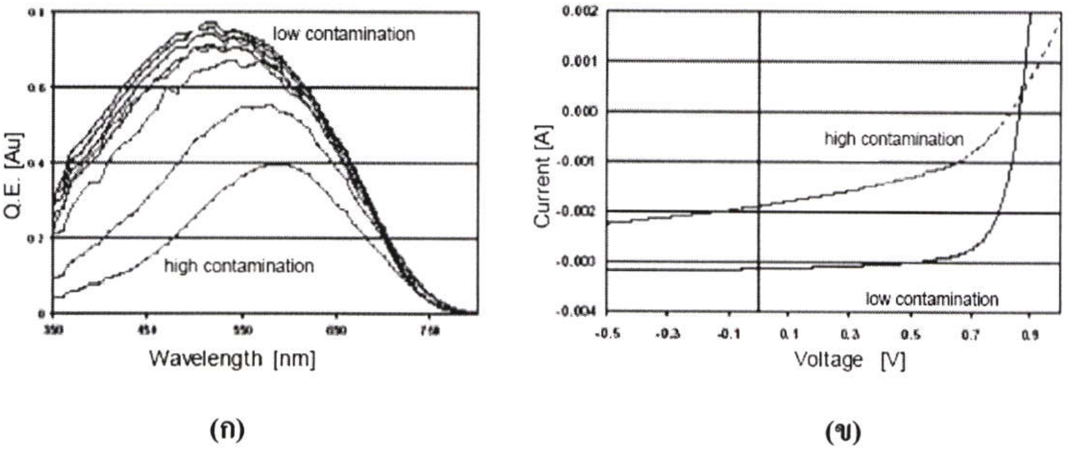
แยกสลายก๊าซที่รวดเร็วจะทำให้เกิด Silicon Polyhydride ซึ่งมีลักษณะเป็นผงฝุ่นที่จะเข้าไปแทรกในช่วงการทับถมของชั้นฟิล์ม a-Si:H ซึ่งปัญหาเช่นนี้สามารถทำให้ลดน้อยลงได้บ้าง ด้วยการสร้างที่ใช้ค่าความดันก๊าซที่ต่ำมากๆ หรือเพิ่มค่าอัตราส่วนของ H_2 Dilution ให้สูงขึ้น

อุณหภูมิของฐานรองในระหว่างการสร้างโดยปกติจะกำหนดให้อยู่ในช่วงระหว่าง 150-350 °C ในเงื่อนไขที่ฐานรองมีอุณหภูมิต่ำๆ นั้นอะตอมไฮโดรเจนจะเข้าไปในชั้นฟิล์ม a-Si:H ได้มาก และจะทำให้ช่องว่างพลังงานของชั้นฟิล์มกว้างขึ้น [29, 30] แต่หากฐานรองมีอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 150 °C จะทำให้มีความเป็นไปได้ของการเกิดผงฝุ่นของ Silicon Polyhydride ขึ้นได้มากในเงื่อนไขที่ไม่มีการเพิ่มปริมาณ H_2 Dilution ให้สูงมากนัก ส่วนในการสร้างที่ฐานรองมีอุณหภูมิค่อนข้างสูงนั้นอะตอมไฮโดรเจนจะเข้าไปในชั้นฟิล์มได้น้อยและจะทำให้ช่องว่างพลังงานแคบลง ซึ่งปรากฏการณ์เช่นนี้ยังส่งผลให้ความสามารถในการแพร่อะตอมสารเจือลงสู่พื้นผิวในระหว่างการสร้างมีสูงมากขึ้น ซึ่งสันนิษฐานได้ว่าที่อุณหภูมิสูงๆ นั้นโครงข่ายอะตอมซิลิคอนจะค่อนข้างมีความใกล้เคียงกับอุดมคติ แต่อย่างไรก็ตามหากฐานรองมีอุณหภูมิที่สูงกว่า 350 °C คุณภาพของชั้นฟิล์ม a-Si:H ก็จะเสื่อมลงซึ่งเป็นผลมาจากการขาด Hydrogen Passivation และเกิด Dangling Bonds ขึ้นในชั้นฟิล์ม ฉะนั้นในการสร้างชั้นฟิล์มจะอาศัยค่าอุณหภูมิของฐานรองเป็นตัวบังคับขนาดของช่องว่างพลังงานของชั้นฟิล์ม a-Si:H สำหรับในเซลล์แสงอาทิตย์ a-Si:H วัสดุแบบ Wider Bandgap a-Si:H เช่นชั้น p(a-SiO) จะใช้ในการสร้างชั้นหน้าต่างรับแสงซึ่งอยู่ด้านบนสุดภายในเซลล์แสงอาทิตย์แบบเซลล์ซ้อน [31, 32] ส่วนวัสดุแบบ Narrower Bandgap i(a-Si:H) จะถูกนำมาใช้ในการสร้างชั้นผลิตพาหะ (Intrinsic) ภายในเซลล์แสงอาทิตย์

ระยะห่างระหว่าง Electrode กับฐานรอง หรือ Electrode Spacing ในระบบการสร้าง RF-PECVD โดยปกติในการสร้างชั้นฟิล์มแบบ a-Si:H จะกำหนดให้มีระยะห่างระหว่าง 1 - 5 ซ.ม. ในเงื่อนไขที่มีระยะห่างน้อยๆ จะทำให้ได้ชั้นฟิล์มที่มี Uniform หรือความสม่ำเสมอที่ดี ส่วนในเงื่อนไขที่มีระยะห่างมากๆ จะค่อนข้างง่ายกว่าในการทำให้เกิด Plasma สำหรับอัตราการไหลของก๊าซที่เข้าสู่ Chamber จะขึ้น Deposition Rate ที่ต้องการ และขึ้นอยู่กับขนาดของ Electrode ที่อยู่ภายใน Chamber ซึ่งอะตอมของซิลิคอนบางส่วนอาจมีการเคลือบไปที่ผนังของ Chamber ด้วยในขณะที่ทำการสร้างแม้จะมีการปั๊มสุญญากาศเพื่อดูดเอาก๊าซออกไป สำหรับในกระบวนการสร้างเชิงปริมาณที่มีขนาดใหญ่นั้น จำเป็นต้องใช้เงื่อนไขที่ทำให้เกิดการใช้ก๊าซอย่างมีประโยชน์สูงสุด เช่นการให้อัตราการไหลก๊าซที่ต่ำแต่ให้กำลังงานไบอัสฐานรองสูงๆ และมักจะออกแบบเครื่องจักรให้มีการใส่ฐานรองในแนวตั้งเรียงชิดติดกันเป็นจำนวนมากเพื่อให้ได้กำลังการผลิตสูง

ปัจจัยการสร้างชั้นฟิล์ม a-Si:H ต่างๆ ดังที่กล่าวมาจำเป็นต้องมีการกำหนดและควบคุมให้เหมาะสมเพื่อให้ได้ชั้นฟิล์มที่มีคุณภาพดี แต่ยังมีอีกปัจจัยหนึ่งซึ่งค่อนข้างยากต่อการควบคุมและจะมีผลเสียต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบ a-Si:H คือปัญหาของ Contamination หรือการปนเปื้อนในขณะทำการสร้างชั้นฟิล์ม a-Si:H อาทิเช่น ออกซิเจน, คาร์บอน, ธาตุโลหะต่างๆ และที่เป็นปัญหาซึ่งไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้สำหรับกระบวนการสร้างแบบแชมเบอร์เดี่ยว (Single-

Chamber a-Si:H Deposition) การปนเปื้อนสารโบรอน หรือ “Boron Contamination” ซึ่งสารโบรอนเป็นสารประกอบในก๊าซ Trimethylboron หรือ $B(CH_3)_3$, TMB ซึ่งใช้เป็นก๊าซสารเจือสำหรับการสร้างชั้นฟิล์ม p-type สารโบรอนที่ตกค้างอยู่หลังการสร้างชั้น p จะเข้าไปปนเปื้อนที่บริเวณผิวของชั้น i(a-Si:H) และจะทำให้ระดับเฟอร์มิของชั้น Intrinsic ไม่อยู่ตรงกึ่งกลางระหว่างแถบคอนดักชันและแถบวาเลนซ์ตามคุณสมบัติปกติที่ควรจะเป็น แต่จะเลื่อนต่ำลงมาค่อนไปยังแถบวาเลนซ์ซึ่งจะมากหรือน้อยนั้นก็ขึ้นอยู่กับปริมาณของการปนเปื้อน จากการทดลองวัดประสิทธิภาพ (Q.E.) เปรียบเทียบระหว่างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการปนเปื้อนสารโบรอนในปริมาณมากและน้อยจะได้ผลดังรูปที่ 3.2 สำหรับการแก้ปัญหาจะได้มีการกล่าวถึงอย่างละเอียดในบทที่ 4 หัวข้อที่ 4.12 การลดการปนเปื้อนสารโบรอนในชั้น Intrinsic ของกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบแชมเบอร์เดี่ยว

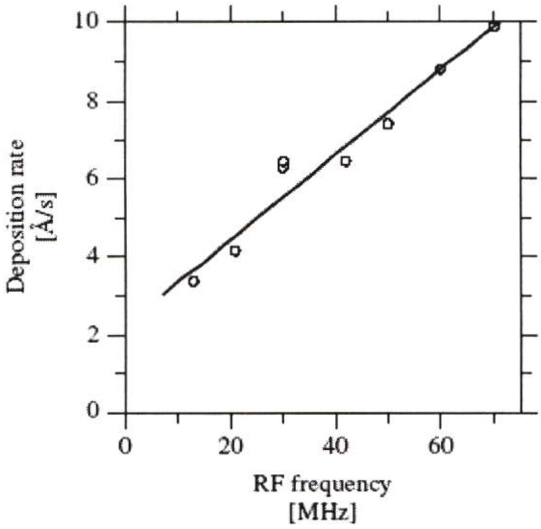


รูปที่ 3.2 (ก) Quantum Efficiency ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มี High และ Low Contamination

(ข) I-V Characteristic ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มี High และ Low Contamination

3.1.3 การเร่งอัตราการเกิดชั้นฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอนด้วยคลื่นความถี่สูง

ค่าความถี่มาตรฐานที่เป็นสากลสำหรับวิธีการสร้างชั้นฟิล์ม a-Si:H แบบ PECVD คือ 13.56 MHz ซึ่งส่วนใหญ่ใช้ค่าความถี่นี้กับกระบวนการผลิตเชิงปริมาณ ซึ่งที่ผ่านมาก็ได้มีการค้นพบวิธีการสร้างชั้นฟิล์ม a-Si:H ด้วยวิธีการต่างๆ เช่น DC PECVD (f=0) ซึ่งได้มีการค้นพบในช่วงแรกของการสร้างชั้นฟิล์ม a-Si:H และปัจจุบันยังใช้งานในกระบวนการผลิตของบริษัท BP Solar [33, 34] ส่วนวิธีการสร้างที่ใช้กำลังไฟฟ้า AC ความถี่สูงๆ อาทิเช่น RF PECVD (f~kHz), VHF PECVD (f~20-150 Mhz) และ MW PECVD (f=2.45 GHz) จะมีการใช้งานอย่างกว้างขวางมากกว่าเนื่องจากมีขีดความสามารถในการแยกสลายก๊าซที่ดีแตกต่างกันไปในแต่ละแบบ



รูปที่ 3.3 อัตราการเกิดของ a-Si:H ต่อค่าความถี่ที่ใช้ในการสร้างภายใต้ค่ากำลังงานคงที่

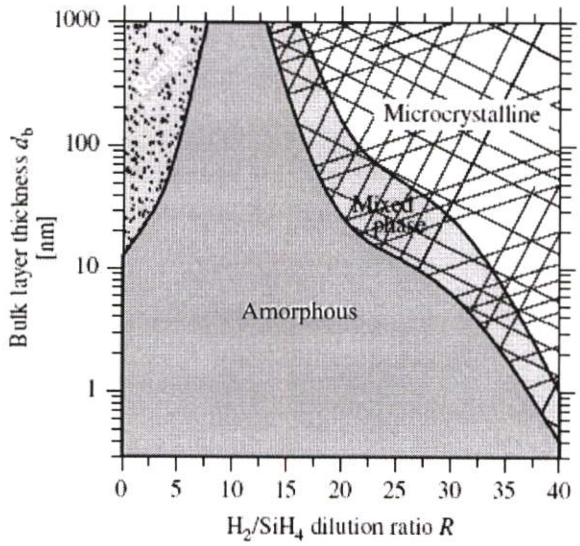
สำหรับวิธีการสร้างแบบ VHF PECVD ได้มีการทำการศึกษาอัตราการเกิดของชั้นฟิล์ม a-Si:H ต่อค่าความถี่ที่ใช้ในการสร้างในช่วงระหว่าง 7-70 MHz ดังกราฟรูปที่ 3.3 จะเห็นได้ว่า อัตราการเกิดของชั้นฟิล์ม a-Si:H มีการเพิ่มขึ้นอย่างคงที่ตามการเพิ่มของค่าความถี่ที่ใช้ในการสร้างภายใต้ค่ากำลังงานคงที่ที่กำหนด ความโดดเด่นอย่างหนึ่งของวิธีการแบบ VHF PECVD คือการใช้ความถี่ที่สูงในกระบวนการสร้างจนทำให้สามารถเพิ่มอัตราการเกิดชั้นฟิล์ม a-Si:H ให้สูงขึ้นเป็น 1 nm/sec. โดยไม่เกิดฝุ่นผง Silicon Polyhydride ดังเช่นการเพิ่มอัตราการเกิดชั้นฟิล์ม a-Si:H ด้วยวิธีการเพิ่มค่ากำลังงานในระบบการสร้างที่ใช้ความถี่ต่ำๆ แม้ว่าวิธีการสร้างแบบ VHF PECVD จะมีคุณประโยชน์ แต่ก็ยังไม่สามารถใช้ในกระบวนสร้างเชิงปริมาณซึ่งมีการสร้างชั้นฟิล์ม a-Si:H บนพื้นที่ใหญ่ๆ ได้อันเนื่องมาจากไม่สามารถสร้างชั้นฟิล์มขนาดใหญ่ที่มี Uniformity ที่ดีได้ และการเชื่อมต่อกำลังงานความถี่สูงสู่ Electrode ขนาดใหญ่ๆ ทำได้ค่อนข้างยาก

วิธีการสร้างแบบ MW PECVD ด้วยความถี่ 2.45 GHz ก็ได้มีผู้ทำการศึกษาทดลองใช้งานอยู่บ้าง ซึ่งผลก็เป็นไปในทิศทางเดียวกับวิธี VHF PECVD คือจะมีอัตราการเกิดที่สูงมากถึงประมาณ 50°A/sec. แต่ชั้นฟิล์ม a-Si:H นั้นจะมีคุณสมบัติทางแสง (Optoelectronic) ที่ไม่ค่อยดี เมื่อเทียบวิธีการสร้างแบบ RF-PECVD จึงยังไม่เหมาะสมกับการนำไปใช้สร้างชั้น Intrinsic ในเซลล์แสงอาทิตย์ประสิทธิภาพสูง จึงได้มีการศึกษาต่อไปในรูปแบบ Remote MW-PECVD คือวิธีการสร้างที่ให้ฐานรองอยู่ห่างจากระยะการเกิดของ Plasma แต่ก็ยังได้ผลลัพธ์ที่ไม่ค่อยดีนัก

3.1.4 การเพิ่มคุณภาพชั้นฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอนด้วยไฮโดรเจนไดรูทชั่น

การเพิ่มปริมาณก๊าซไฮโดรเจนต่อก๊าซไซเลน หรือ H_2/SiH_4 Dilution Ratio ในระหว่างทำการสร้างชั้นฟิล์ม a-Si:H ได้ถูกค้นพบว่าสามารถลดความหนาแน่นของจุดบกพร่อง (Defect States) และช่วยเพิ่มเสถียรภาพของวัสดุ a-Si:H จากการลดทอนด้วยแสงอาทิตย์ [35, 36, 37] โดย

เซลล์แสงอาทิตย์ a-Si:H ที่มีการสร้างชั้น Intrinsic ซึ่งใช้ปริมาณ H_2 Dilution สูงๆ จะมีประสิทธิภาพและเสถียรภาพที่ดีขึ้น แต่ก็จะมีผลกระทบตามมาคือ อัตราการเกิดของชั้นฟิล์มจะลดต่ำลง และชั้นฟิล์มที่สร้างขึ้นจะเกิดเป็นฟิล์มบางแบบผลึกซิลิคอน (Microcrystalline)



รูปที่ 3.4 การเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างของสารกึ่งตัวนำแบบ a-Si:H ภายใต้การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของ H_2/SiH_4 Dilution Ratio

ได้มีการศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างสารกึ่งตัวนำ (Phase Diagram) ของชั้นฟิล์ม a-Si:H ที่มีการสร้างภายใต้การเปลี่ยนแปลงอัตราของ H_2/SiH_4 Dilution Ratio แต่จะกำหนดให้ตัวแปรอื่นๆ คงที่คือ RF Power, ฐานรอง และอุณหภูมิการสร้าง ดังกราฟรูปที่ 3.4 จะเห็นได้ว่าที่ Dilution Ratio ต่ำๆ (R<5) ชั้นฟิล์มจะเป็นแบบ a-Si:H จนถึงความหนาของการสร้างระดับหนึ่งก็จะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็น Rough และเมื่อเพิ่ม Dilution Ratio ให้สูงขึ้น (R>25) ชั้นฟิล์มจะมีลักษณะเป็นโครงสร้างผสมระหว่าง Amorphous กับ Crystalline ซึ่งเรียกว่า “Mixed Phase” ได้ที่ความหนาระดับหนึ่ง ส่วนชั้นฟิล์มแบบ Microcrystalline : μ-Si:H โดยสมบูรณ์จะเกิดขึ้นเมื่อ Dilution Ratio มีค่าที่สูงมาก (R>40) ซึ่งชั้นฟิล์มทั้งในลักษณะของ a-Si:H และ μ-Si:H จะมีคุณสมบัติที่ดีแตกต่างกัน ซึ่งจะได้มีการนำไปประยุกต์ใช้ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบเซลล์ซ้อนอะมอร์ฟัสซิลิคอน หรือ “Tandem Solar Cells”

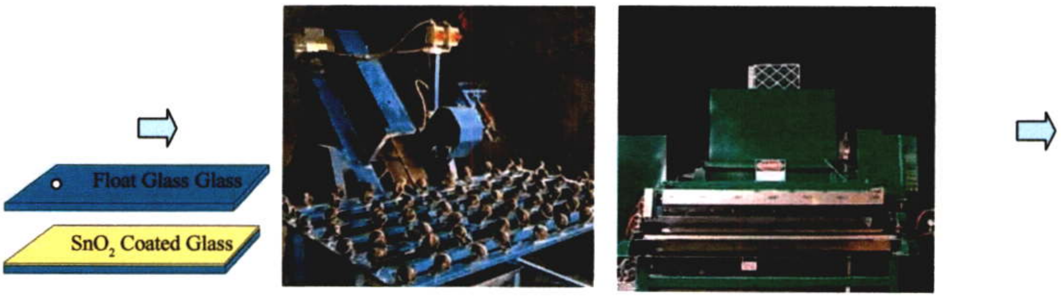
3.2 กระบวนการสร้างแผงเซลล์แสงอาทิตย์เชิงปริมาณ

ปัจจุบันการผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ a-Si:H มีพัฒนาการที่ดีขึ้นได้ทั้งในด้านความรวดเร็วและต้นทุนการผลิต โดยอาศัยกระบวนการสร้างเชิงปริมาณ (Batch Process) ที่สามารถสร้างแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้คราวละมากๆ ในการผลิตเพียง 1 ครั้ง ซึ่งบริษัท Energy

Photovoltaics, Inc (EPV) เป็นบริษัทที่มีการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์และยังทำการออกแบบสร้างเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตแผงเซลล์ออกจำหน่าย โดยเป็นเจ้าของลิขสิทธิ์เครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์เชิงปริมาณแบบ EPV Batch Process ที่บริษัทบางกอกโซลาร์ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน ซึ่งจะมีกำลังการผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์ a-Si:H/a-Si:H Tandem โดยประมาณอยู่ที่ 10 MW. ต่อปี และทางผู้วิจัยจะใช้เครื่องจักรนี้ในการทำงานวิจัย สำหรับกระบวนการสร้างแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในขั้นตอนต่างๆ สามารถแจกแจงออกได้เป็น 10 ขั้นตอนดังรูปที่ 3.5 (a - j)

ขั้นตอนที่ 1 การเตรียมแผ่นฐานรอง

ในขั้นตอนแรกนี้ Float Glass ซึ่งใช้ปิดประกบเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกนำไปเจาะรู จากนั้นทั้ง Float Glass และ SnO_2 Coated Glass จะถูกนำไปขัดลบคม และล้างทำความสะอาดด้วยน้ำบริสุทธิ์ (DI Water)



รูปที่ 3.5 (a) ขั้นตอนที่ 1 การเตรียมแผ่นฐานรอง

ขั้นตอนที่ 2 Laser Patterning

ในขั้นตอนนี้ฐานรอง SnO_2 coated glass จะถูกนำไปเข้าเครื่อง Laser-Scribe SnO_2 เพื่อตัดแบ่งพื้นที่ของชั้น SnO_2 ออกเป็น Pattern เพื่อจะใช้สำหรับการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์

รูปที่ 3.5 (b) ขั้นตอนที่ 2 Laser Patterning

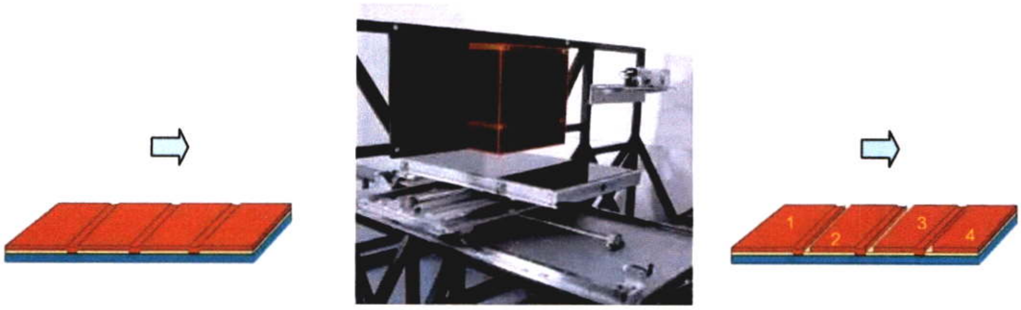
ขั้นตอนที่ 3 การสร้างชั้นฟิล์มบาง (a-Si:H Deposition)

ในขั้นตอนนี้ SnO_2 coated glass จะถูกบรรจุเข้าสู่ Deposition Chamber ซึ่งสามารถบรรจุได้สูงสุด 48 แผ่นเพื่อทำการสร้างชั้นฟิล์ม a-Si:H (p-i-n/p-i-n) ด้วยวิธี RF-PECVD 13.56 MHz

รูปที่ 3.5 (c) ขั้นตอนที่ 3 การสร้างชั้นฟิล์มบาง (a-Si:H Deposition)

ขั้นตอนที่ 4 Laser Patterning

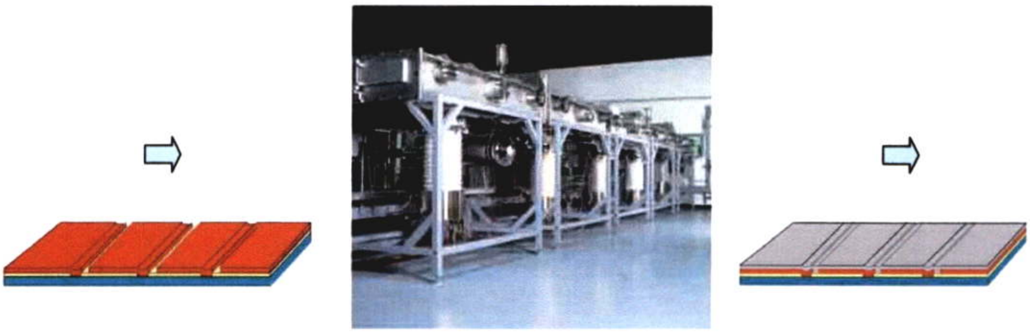
ในขั้นตอนนี้ชั้นฟิล์ม a-Si:H จะผ่านกรรมวิธี Laser-Scribe a-Si:H เพื่อสร้าง Pattern ลงบนเฉพาะชั้นฟิล์ม a-Si:H และในขั้นตอนนี้จะทำให้เกิดการตัดแบ่งชั้นฟิล์ม p-i-n/p-i-n ออกเป็นเซลล์ย่อยๆ



รูปที่ 3.5 (d) ขั้นตอนที่ 4 Laser Patterning

ขั้นตอนที่ 5 การสร้างชั้นตัวนำ (Sputtering)

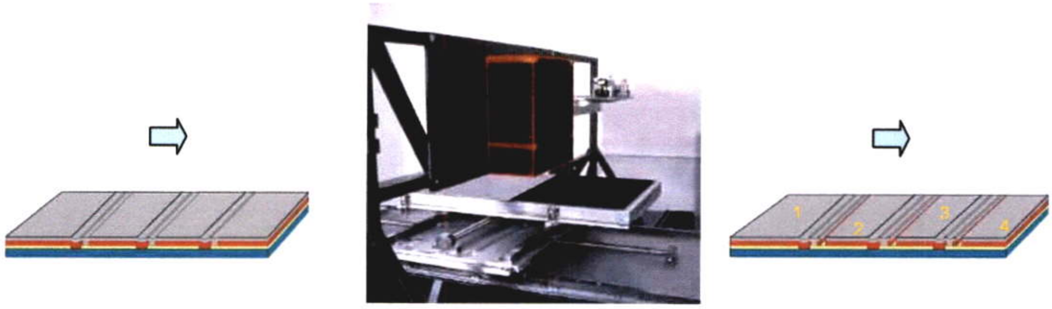
ในขั้นตอนนี้ชั้นฟิล์ม p-i-n/p-i-n ที่ถูกตัดออกเป็นเซลล์ย่อยๆ จะถูกนำไปเข้าสู่กระบวนการ Sputtering เพื่อทำการสร้างชั้นตัวนำโปร่งแสง ZnO และชั้นตัวนำ Al



รูปที่ 3.5 (e) ขั้นตอนที่ 5 การสร้างชั้นตัวนำ (Sputtering)

ขั้นตอนที่ 6 Laser Patterning

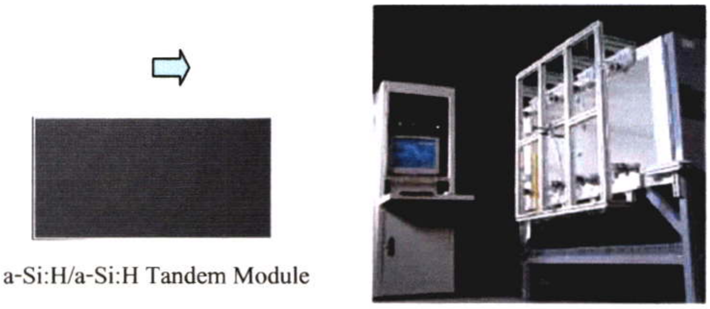
ในขั้นตอนนี้ชั้นโลหะตัวนำจะผ่านกรรมวิธี Laser-Scribe ZnO/Al เพื่อสร้าง Pattern ลงบนเฉพาะชั้น ZnO/Al และในขั้นตอนนี้เซลล์ย่อยๆ จะเกิดการอนุกรมกันโดยเทคนิคของการสร้างชั้นฟิล์มบาง (Monolithic Series)



รูปที่ 3.5 (f) ขั้นตอนที่ 6 Laser Patterning

ขั้นตอนที่ 7 การทดสอบคุณสมบัติ I-V

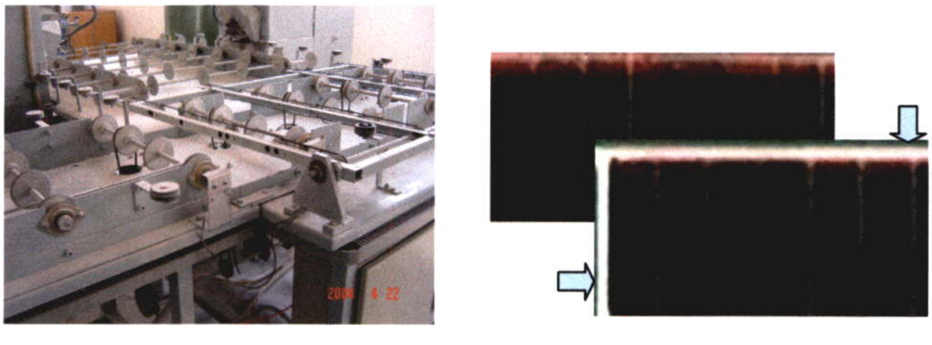
ในขั้นตอนนี้ Initial Cell จะถูกนำไปทดสอบฉายแสงด้วยเครื่อง Solar Simulator เพื่อดูความสามารถด้านกระแสและแรงดัน จากนั้น Initial Cell ที่ผ่านการทดสอบจะถูกนำไปอบความร้อน (Annealing) เพื่อให้ชั้น Al กับชั้นฟิล์ม a-Si:H มีการประสานกันได้ดียิ่งขึ้น



รูปที่ 3.5 (g) ขั้นตอนที่ 7 การทดสอบคุณสมบัติ I-V

ขั้นตอนที่ 8 การลบขอบแผงเซลล์ (Sand Blast)

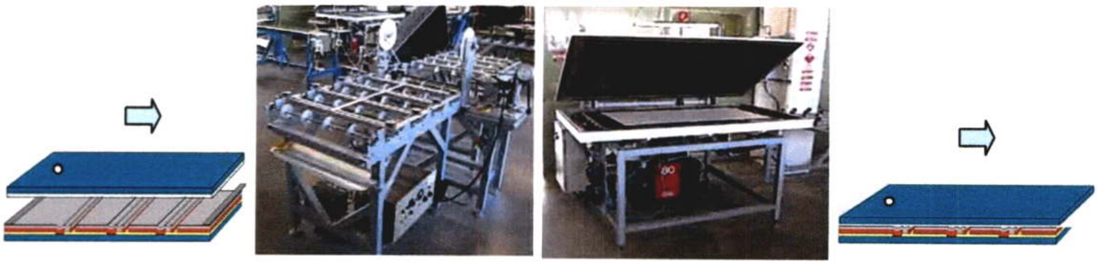
ในขั้นตอนนี้แผงเซลล์แสงอาทิตย์จะถูกนำไปผ่านเครื่องพ่นทรายที่บริเวณขอบทั้งด้านกว้างและด้านยาว เพื่อขจัดชั้นฟิล์มบางที่มี Uniform ไม่ดีที่บริเวณขอบๆ ของแผงเซลล์ออกไป



รูปที่ 3.5 (h) ขั้นตอนที่ 8 การลบขอบแผงเซลล์ (Sand Blast)

ขั้นตอนที่ 9 การต่อขั้วตัวนำและการผนึกแผงเซลล์

ในขั้นตอนนี้แถบ Aluminum Foil จะถูกนำมารีดร้อนที่ขอบเพื่อเป็นขั้วตัวนำไฟฟ้าให้กับแผงเซลล์ ก่อนผนึก Initial Cell เข้ากับ Float Glass (Encapsulation) เพื่อให้สามารถป้องกันน้ำและความชื้นได้



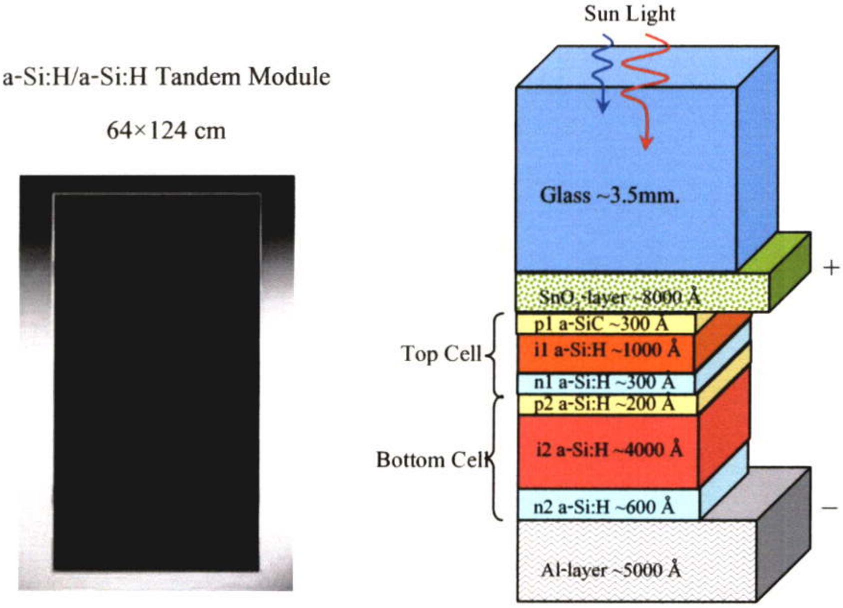
รูปที่ 3.5 (i) ขั้นตอนที่ 9 การต่อขั้วตัวนำและการผนึกแผงเซลล์

ขั้นตอนที่ 10 การเชื่อมต่อสายไฟและการวัดประสิทธิภาพ

ในขั้นตอนสุดท้ายนี้แถบตัวนำ Aluminum Foil จะถูกเชื่อมต่อเข้ากับสายไฟฟ้าเพื่อนำไปวัดประสิทธิภาพ และเพื่อสำหรับการนำไปใช้งานจริงต่อไป

รูปที่ 3.5 (j) ขั้นตอนที่ 10 การเชื่อมต่อสายไฟและการวัดประสิทธิภาพ

เมื่อเสร็จสิ้นขั้นตอนการสร้างทั้งหมดก็จะได้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ Tandem a-Si:H/a-Si:H ขนาด 64×124 cm (0.79 m^2) ที่เสร็จสมบูรณ์ดังรูปที่ 3.6 (ก) โดยจะมีโครงสร้างภายในและขนาดความหนาของชั้นฟิล์มบางต่างๆ ที่แสดงได้ดังรูป 3.6 (ข)



(ก) **(ข)**

รูปที่ 3.6 (ก) แผงเซลล์แสงอาทิตย์ Tandem a-Si:H/a-Si:H ขนาด 64×124 cm
(ข) โครงสร้างภายในและขนาดความหนาของชั้นฟิล์มบางต่างๆ

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

ในบทนี้เป็นการนำเสนอการทดลองปรับปรุงเงื่อนไขการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบเซลล์ซ้อน a-Si:H/a-Si:H Tandem และผลการทดลอง อาทิเช่น การปรับเปลี่ยนค่าอัตราการไหลของก๊าซต่างๆ ค่าความดันและค่ากำลังงานความถี่ที่ใช้ในการสร้างชั้นฟิล์มบาง a-Si:H เพื่อให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นมีค่ากำลังงานที่สูงและคงเสถียรภาพที่ดีหลังการนำไปใช้งานกับแสงอาทิตย์ พร้อมกันนั้นยังได้มีการพัฒนากระบวนการสร้าง อาทิเช่น การติดตั้งอุปกรณ์ Sputtering เพิ่มขึ้นเพื่อทำการสร้างชั้นตัวนำโปร่งแสง ZnO และอุปกรณ์การสร้างไอระเหยเพื่อใช้สำหรับวิธีลดการตกค้างสารโบรอนในกระบวนการสร้างที่จะไม่เป็นการสิ้นเปลืองเวลามากนัก

4.1 แนวทางการปรับปรุงและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์

จากที่ได้ศึกษาการสร้างแผงเซลล์แสงอาทิตย์ a-Si:H/a-Si:H Tandem ในรูปแบบเชิงปริมาณ (Batch Process) รวมทั้งศึกษาเงื่อนไขการสร้างปกติของบริษัทบางกอกโซล่าร์ (Normal Condition) พบว่าค่าพารามิเตอร์ประสิทธิภาพต่างๆ ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ คือค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (V_{OC}), ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร (I_{SC}), ค่าฟิลแฟคเตอร์ (%FF) และค่ากำลังงาน (P_M) ที่ได้จากการสร้างในเงื่อนไขปกติของบริษัทบางกอกโซลาร์ เมื่อคิดเป็นค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (%Efficiency) ยังมีค่าที่ค่อนข้างต่ำและยังไม่สามารถผ่านเกณฑ์มาตรฐานการสั่งซื้อจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิต (<7%) ได้ ดังนั้นจึงได้ทำการค้นคว้าหาแนวทางการพัฒนาประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์ a-Si:H/a-Si:H Tandem ให้ดีขึ้นโดยแบ่งแยกการพัฒนาออกได้ดังนี้

4.1.1 เซลล์ด้านบน (p-i-n Top Cell)

1. ปรับปรุงรอยสัมผัส (Interface) ระหว่างชั้นทินออกไซด์ (SnO_2) กับชั้นฟิล์ม p ให้ดีขึ้นโดยการทำไฮโดรเจนพลาสมา (H_2-Plasma) ก่อนการสร้างชั้น p
2. ปรับช่องว่างพลังงาน (Energy Bandgap) ของชั้นฟิล์ม p ให้สูงขึ้น โดยการเจือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในระหว่างทำการสร้างชั้น p
3. ปรับปรุงรอยสัมผัส p/i interface ให้ดีขึ้น โดยการเพิ่มปริมาณ H_2 Dilution ในการสร้างชั้นฟิล์ม i(a-Si:H) และทำการทดลองใช้เงื่อนไขการลดการตกค้างสารโบรอนโดยวิธี Vapor & Gas Treatment เพื่อลดเวลาการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์

4.1.2 เซลล์ด้านล่าง (p-i-n Bottom Cell)

1. ปรับปรุงรอยสัมผัสของ Top/Bottom Cell ให้ดีขึ้นโดยใช้ n_1(μc-Si:H)/p_2(a-SiC)
2. ปรับปรุงคุณสมบัติของชั้นฟิล์ม n(μc-Si:H) ให้ดีขึ้นโดยการเพิ่มชั้น Buffer-layer
3. ทำการทดลองใช้เงื่อนไขการลดการตกค้างสารโบรอนโดยวิธี Vapor & Gas Treatment เพื่อลดเวลาการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์
4. เพิ่มชั้นตัวนำโปร่งแสงซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เพื่อลดความต้านทานระหว่างชั้นฟิล์ม n(a-Si:H) กับชั้นตัวนำอลูมิเนียม (Al)
5. ปรับเปลี่ยนเงื่อนไขการสร้างชั้น i(a-Si:H) โดยการไม่เติมก๊าซ CH_4 และลดความหนาของชั้นฟิล์ม เพื่อผลด้านเสถียรภาพเซลล์แสงอาทิตย์ที่เหมาะสมที่สุด

4.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

เพื่อให้การดำเนินงานวิจัยเป็นไปตามแนวทางการปรับปรุงและพัฒนาประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์ดังที่กล่าวมา จึงได้มีการวางแผนขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังต่อนี้

1. ทำการปรับปรุงเปลี่ยนแปลงและเพิ่มเติมเงื่อนไขการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์และวัสดุอุปกรณ์ เพื่อให้พารามิเตอร์ประสิทธิภาพต่างๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์ a-Si:H/a-Si:H Tandem มีค่าสูงขึ้น มากกว่าการสร้างด้วยเงื่อนไขเดิมของบริษัทบางกอกโซลาร์ (Normal Condition) พร้อมกันนั้นจะมีการพัฒนากระบวนการสร้างให้มีความสะดวกรวดเร็วขึ้น โดยเฉพาะในขั้นตอนการลดการตกค้างสารเคมีภายในแชมเบอร์เดี่ยว ดังรายละเอียดที่จะกล่าวต่อไปในหัวข้อที่ 4.12 การลดการปนเปื้อนสารโบรอนในชั้น Intrinsic ของกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบแชมเบอร์เดี่ยว
2. เมื่อได้เงื่อนไขการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่ดีแล้วจะนำมาใช้สร้างร่วมกับชั้นตัวนำโปร่งแสง ZnO เพื่อเพิ่มค่าพารามิเตอร์กระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ให้สูงขึ้นอีก ซึ่งจำเป็นต้องมีการติดตั้งชุดอุปกรณ์เพิ่มเติมเพื่อใช้สำหรับการ Sputtering ZnO
3. นำแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างเสร็จ (PV Module) จากเงื่อนไขการทดลองต่างๆ ไปทดสอบใช้งานภายใต้แสงอาทิตย์ (Outdoor light soaking) ในช่วงระยะหนึ่งแล้วนำกลับมาวัดผลประสิทธิภาพ เพื่อสังเกตการณ์ผลเปลี่ยนแปลงและเก็บบันทึกสถิติ
4. นำข้อมูลที่เก็บบันทึกไปวิเคราะห์ และแก้ไขปรับปรุงกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อให้ได้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงและคงเสถียรภาพที่ดีภายหลังการนำไปใช้งาน

4.3 รายละเอียดของการทดลอง

เนื่องจากกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้เป็นแบบเชิงปริมาณที่ใช้สำหรับผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้กับบริษัทบางกอกโซลาร์ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีข้อกำหนดเพื่อให้ผลการทดลองที่ได้มีความเที่ยงตรง รวดเร็ว และไม่เป็นการสิ้นเปลืองวัสดุการสร้างที่นำมาใช้ในการทดลองครั้งนี้มากนัก ซึ่งในระหว่างการดำเนินการทดลองนั้น จะมีเฉพาะการสร้างชั้นฟิล์มบางลงบนแผ่นกระจกธรรมดา เพื่อเช็คความสม่ำเสมอโดยตลอด (Uniformity) และการสร้างเป็นแบบเซลล์ซ้อน (p-i-n/p-i-n a-Si:H) แล้วนำไปวัดผลพารามิเตอร์ประสิทธิภาพ ซึ่งข้อกำหนดต่างๆ จะอยู่ภายใต้เงื่อนไขรายละเอียดของการทดลอง ดังต่อไปนี้

1. เครื่องจักรผลิตเชิงปริมาณ Deposition Unit No.1 จะกำหนดให้ใช้สำหรับการทดลอง โดยจะทำการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ a-Si:H/a-Si:H Tandem ด้วย Sector No.8
2. การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ a-Si:H/a-Si:H Tandem จะสร้างบนฐานรองกระจกเคลือบทินออกไซด์ (SnO_2 Glass Plate) โดยจะสร้างจำนวน 4 แผ่น หรือทำการสร้างเพียง 1 Sector จากจำนวนการสร้างทั้งหมด 12 Sector
3. การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ประสิทธิภาพต่างๆ ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจากการทดลองกับที่สร้างโดยใช้เงื่อนไขปกติของบริษัทบางกอกโซลาร์ (Normal Condition) จะสุ่มจากการผลิตปกติ 3 ครั้ง คือ 0140H, 0143H และ 0157H และจะใช้เฉพาะเซลล์แสงอาทิตย์ใน Sector No.8 มาคิดหาค่าเฉลี่ยของ V_{OC}, I_{SC}, %FF และ P_m ซึ่งจะได้ข้อมูลเพื่อนำไปใช้เปรียบเทียบ ดังต่อนี้

Average of Sector No.8
Modules Run No. 0140H,
0143H, 0157H

V_{OC}	62.1 V
I_{SC}	1.198 A
%FF	65.9
P_M	49.0 W

เมื่อนำค่า Output Power เฉลี่ยที่ 49 W มาคำนวณหาประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่สภาวะทดสอบมาตรฐาน (1,000 W/m^2, ที่อุณหภูมิ 25 °C และมวลอากาศ 1.5) แผงเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งมีพื้นที่รับแสงประมาณ 0.757 m^2 จะมีค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานประมาณ 6.4% สำหรับพารามิเตอร์อ้างอิงเปรียบเทียบผลการทดลองจะใช้ค่ากำลังงาน (P_M) เป็นหลัก เพราะเป็นค่าที่สามารถอ่านได้โดยตรงจากเครื่องจำลองแสงอาทิตย์เทียม (Solar Simulator) โดยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ a-Si:H/a-Si:H Tandem ในสภาวะเบื้องต้นภายหลังที่ได้รับการพัฒนาปรับปรุงเงื่อนไขการสร้างแล้ว ควรจะมีค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานประมาณ 7-8% จึงจะใกล้เคียงกับมาตรฐานสากลของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อการพาณิชย์ (Commercial Module) แบบเซลล์ซ้อนอะมอร์ฟัสซิลิคอน

4.4 การศึกษาผลการทำ H_2-Plasma ก่อนสร้างชั้น p_1 (a-SiC)

ก่อนทำกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ ($p_1i_1n_1/p_2i_2n_2$ a-Si:H Deposition) แผ่นฐานรองกระจกเคลือบทินออกไซด์ (SnO_2 Glass Plate) จะผ่านขั้นตอนการขัดลบคมและการล้างทำความสะอาด จากนั้นจะทำ Laser Scribe SnO_2 เพื่อเป็นการกำหนดพื้นที่ของการสร้างแต่ละตัวเซลล์ลงบนฐานรอง SnO_2 Glass Plate จากนั้นจึงนำไปอบเพื่อเพิ่มอุณหภูมิก่อนทำการสร้าง (Preheat Substrate) ที่อุณหภูมิประมาณ 200 °C ก่อนบรรจุเข้าสู่ Deposition Chamber เพื่อทำการสร้างชั้นฟิล์มบางต่างๆ แม้แผ่นฐานรองจะมีความสะอาดและปราศจากความชื้นแล้วก็ตาม แต่เพื่อให้รอยสัมผัส SnO_2/p_1 Interface มีคุณภาพที่ดีขึ้น ซึ่งอาจทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ a-Si:H/a-Si:H Tandem มีพารามิเตอร์ประสิทธิภาพต่างๆ ที่สูงขึ้นได้ จึงทดลองทำ H_2-Plasma ก่อนทำการสร้างชั้นฟิล์ม p_1 โดยเงื่อนไขการทดลองใช้ H_2-Plasma แสดงได้ดังตารางที่ 4.1

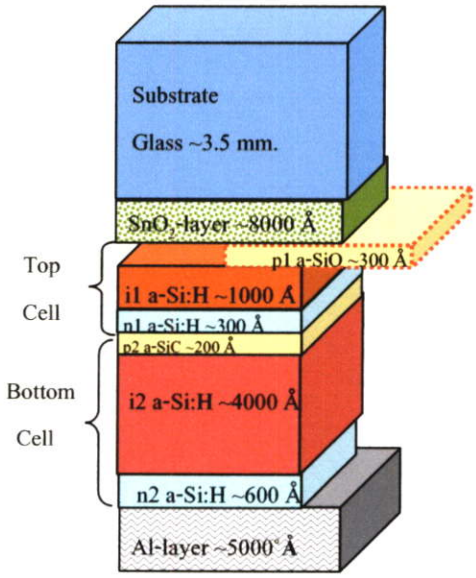
ตารางที่ 4.1 เงื่อนไขการทดลองใช้ H_2 Plasma ก่อนทำการสร้างชั้น p_1(a-SiC)

Step	*a-Si:H Deposition Process*	*Gas Flow Rate (SLPM)*	*Pressure (mTorr)*	*Power (W)*	*Time (Sec.)*
1	*Preheat Substrate*				-
2	*Total Pump down, High Vacuum*				*1800*
3	*Ar Plasma : Test connector*	*Ar1.5*	*500*	*200*	*180*
*Exp-1**	*H_2 Plasma*	*$H_2$1.5.*	*1000*	*150*	*90*
4	*P1-layer*	*$SiH_4$0.61, $CH_4$1.02, $H_2$2.1, TMB0.27*	*1500*	*300*	*38*
5	*Ar purge*	*Ar1.5*			*120*
6	*High Vacuum : 10^{-6}-10^{-7} Torr*				*2400*
7	*I1-layer*	*$SiH_4$1.4, $CH_4$1.36, $H_2$1.7*	*2000*	*1000*	*560*
8	*N1-layer*	*$SiH_4$0.45, $H_2$3.5, $PH_3$0.9*	*1500*	*400*	*84*
9	*Ar purge, Pump down*	*Ar1.5*			*480*
10	*P2-layer*	*$SiH_4$0.51, $CH_4$0.57, $H_2$2.1, TMB0.41*	*1500*	*500*	*57*
11	*Ar purge*	*Ar1.5*			*120*
12	*High Vacuum : 10^{-6}-10^{-7} Torr*				*3300*
13	*I2-layer*	*$SiH_4$1.4, $CH_4$1.36, $H_2$1.7*	*2000*	*1000*	*2800*
14	*N2-layer*	*$SiH_4$0.45, $H_2$3.5, $PH_3$0.9*	*1500*	*400*	*300*
15	*Ar purge, Pump down, High Vac*	*Ar1.5*			*1080*
16	*Cool down Substrate*				-

ผลการทดลอง วัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ a-Si:H/a-Si:H Tandem ในการทดลอง Exp-1 ซึ่งมีการเพิ่มวิธี H_2-Plasma ก่อนทำการสร้างชั้นฟิล์ม p_1 จะพบว่าค่าพารามิเตอร์กำลังงานจะมีค่าอยู่ที่ 49.48 W ซึ่งแทบจะไม่มีความแตกต่างเมื่อเทียบกับเงื่อนไขการสร้างปกติของบริษัทบางกอกโซล่าร์ (Normal Condition) ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์กำลังงานอยู่ที่ 49 W

4.5 การศึกษาผลการใช้ชั้นฟิล์ม p(a-SiO) แทน p(a-SiC)

ชั้นฟิล์มบางชนิด p ในเซลล์แสงอาทิตย์ทำหน้าที่เป็นขั้วสร้างแรงดันไฟฟ้าภายในเช่นเดียวกับชั้นฟิล์มบางชนิด n แต่จะมีค่าสภาพนำไฟฟ้าด้วยแสงที่ค่อนข้างต่ำ ดังนั้นชั้น p จึงเรียกได้ว่าเป็น “Dead layer” ซึ่งจะไม่มีส่วนช่วยในการผลิตพาหะด้วยแสง ในเงื่อนไขการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ปกติ (Normal Condition) จะใช้ชั้น p(a-SiC) ที่มีความหนาประมาณ 300°A ซึ่งจะมี (Eg) ประมาณ 2 eV แต่เพื่อให้ได้ชั้นหน้าต่างรับแสง p_1-layer ซึ่งมีความโปร่งใสมากกว่า จึงได้ทำการทดลองใช้ชั้น p(a-SiO) แทนชั้น p(a-SiC) ดังโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ a-Si:H/a-Si:H Tandem ที่ใช้ชั้น p_1(a-SiO) แทน p_1(a-SiC)

ชั้นฟิล์ม p(a:SiO) สร้างขึ้นได้จากการเจือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในระหว่างทำการสร้างชั้นฟิล์มชนิด p จะสามารถทำให้ช่องว่างพลังงาน (Energy Bandgap) ของชั้นฟิล์ม p กว้างมากขึ้น และจะสามารถช่วยให้ค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (V_{OC}) และกระแสไฟฟ้าลัดวงจร (I_{SC}) ของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าสูงขึ้น ดังนั้นจึงทำการทดลองสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โดยในชั้น p_1 ของ Top cell จะใช้ชั้นฟิล์มแบบ p_1(a:SiO) ซึ่งมีเงื่อนไขการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ดังตารางที่ 4.2 สำหรับการเปรียบเทียบประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ระหว่างเงื่อนไขการสร้างที่ปรับปรุงใหม่

โดยใช้ชั้น p_1(a-SiO) และเงื่อนไขการสร้างปกติของบริษัทบางกอกโซล่าร์ (Normal Condition) ที่ใช้ชั้น p_1(a-SiC) จะสร้างขึ้นโดย Deposition Unit No.1 Sector No.8 เช่นเดียวกันทั้งสองกรณี

ตารางที่ 4.2 เงื่อนไขการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ชั้น p_1(a-SiO)

Step	*a-Si:H Deposition Process*	*Gas Flow Rate (SLPM)*	*Pressure (mTorr)*	*Power (W)*	*Time (Sec.)*
1	*Preheat Substrate*				-
2	*Total Pump down, High Vacuum*				*1800*
3	*Ar Plasma : Test Connector*	*Ar1.5*	*500*	*200*	*180*
*4**	*P1-layer (p-a-SiO)*	*$SiH_4$0.61, $CO_2$1.0, $H_2$2.1, TMB0.27*	*1500*	*300*	*38*
5	*Ar purge*	*Ar1.5*			*120*
6	*High Vacuum : 10^{-6}-10^{-7} Torr*				*2400*
7	*I1-layer*	*$SiH_4$1.4, $CH_4$1.36, $H_2$1.7*	*2000*	*1000*	*560*
8	*N1-layer*	*$SiH_4$0.45, $H_2$3.5, $PH_3$0.9*	*1500*	*400*	*84*
9	*Ar purge, Pump down*	*Ar1.5*			*480*
10	*P2-layer*	*$SiH_4$0.51, $CH_4$0.57, $H_2$2.1, TMB0.41*	*1500*	*500*	*57*
11	*Ar purge*	*Ar1.5*			*120*
12	*High Vacuum : 10^{-6}-10^{-7} Torr*				*3300*
13	*I2-layer*	*$SiH_4$1.4, $CH_4$1.36, $H_2$1.7*	*2000*	*1000*	*2800*
14	*N2-layer*	*$SiH_4$0.45, $H_2$3.5, $PH_3$0.9*	*1500*	*400*	*300*
15	*Ar purge, Pump down, High Vac*	*Ar1.5*			*1080*
16	*Cool down Substrate*				-

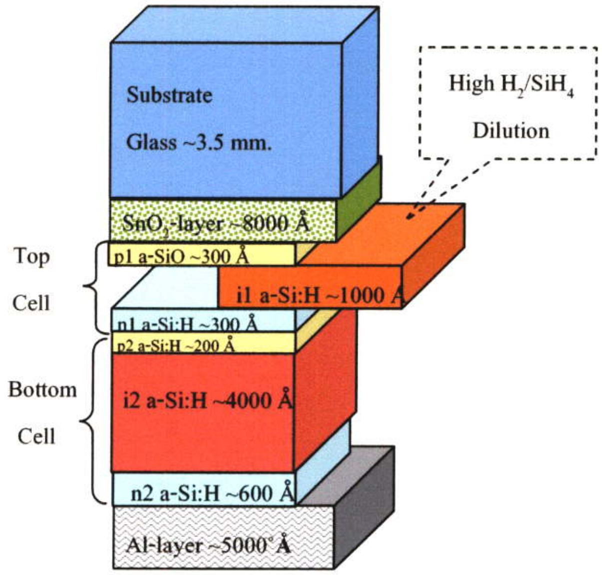
ผลการทดลอง วัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ a-Si:H/a-Si:H Tandem ดังข้อมูลในตารางที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าเซลล์ Exp-2 ที่มีชั้นฟิล์มแบบ p_1(a:SiO) ซึ่งสร้างโดยเงื่อนไขที่ความดัน 650 mTorr นั้นจะมีผลของพารามิเตอร์กำลังงานที่ไม่ดีนักประมาณ 43.1 W เนื่องมาจากความดันที่ใช้ในการสร้างชั้น p_1(a:SiO) ต่ำเกินไป ก๊าซภายในแชมเบอร์จึงไหลออกเร็วและทำให้ชั้นฟิล์มที่สร้างขึ้นมีขนาดที่บางมาก และความสม่ำเสมอโดยตลอดของชั้นฟิล์มไม่ดีนัก ส่งผลให้ค่า V_{OC} และ I_{SC} ของเซลล์มีค่าต่ำ ดังนั้นจึงทดลองปรับค่าความดันที่ใช้ในการสร้างชั้น p_1(a:SiO) ของเซลล์ Exp-3 ขึ้นเป็น 1000 mTorr ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่า V_{OC} และ I_{SC} ของเซลล์จะมีค่าสูงมากกว่าเซลล์ที่ใช้ชั้น p_1(a-SiC) ส่วนค่าพารามิเตอร์ %FF และ Power ของเซลล์ที่มีชั้น p_1(a:SiO) จะมีค่าค่อนข้างต่ำ ซึ่งเป็นผลมาจากความต้านทานอนุกรม (R_S) ของชั้นฟิล์มที่สูงขึ้นจากการเจือก๊าซ CO_2

ตารางที่ 4.3 ผลการวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ชั้น p_1(a:SiO) แทน p_1(a:SiC)

Experiment Number	Pressure P_{Top}(mTorr)	V_{OC} (V)	I_{SC} (A)	%FF	Power (W)	Rs (Ω)
Exp-2 p_1(a:SiO)	650	60.8	1.1	63.4	43.1	14.9
Exp-3 p_1(a:SiO)	1000	63.7	1.206	62.3	47.9	12.6
(Normal) p_1(a-SiC) Average of [0140H, 0143H and 0157H]	650	62.1	1.198	65.9	49.0	10.1

4.6 การศึกษาผลการเพิ่ม H_2 Dilution ในช่วงการสร้างชั้น i(a-Si:H)

ปริมาณของอะตอมไฮโดรเจน (H_2) ที่สูงขึ้นในระหว่างการจับตัวของโครงสร้างชั้นฟิล์ม i(a-Si:H) ดังในรูปที่ 4.2 จะมีผลทำให้ความบกพร่องของพันธะอะตอม (Dangling Bond) ลดน้อยลง และทำให้ช่องว่างพลังงาน (Energy Bandgap) ของชั้น i กว้างมากขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้เซลล์แสงอาทิตย์มีค่า V_{OC} ที่สูงขึ้นได้ นอกจากนั้นยังอาจมีส่วนช่วยให้การเสื่อมประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ (Degradation) ลดน้อยลง เนื่องจากพันธะอะตอมของอะมอร์ฟัสซิลิคอนมีความสมบูรณ์ขึ้น ซึ่งการศึกษาผลการเสื่อมประสิทธิภาพด้านกำลังงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Outdoor light soaking) จะได้นำเสนอต่อไปอย่างละเอียดในหัวข้อที่ 4.10 และ 4.11



รูปที่ 4.2 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการเพิ่มค่า H_2/SiH_4 Dilution ในชั้น i_1(a-Si:H)

สำหรับเงื่อนไขการทดลองเพิ่มปริมาณก๊าซไฮโดรเจน หรือเพิ่ม H_2 Dilution ในช่วงการสร้างชั้น i_1(a-Si:H) จะเพิ่มให้มีอัตราส่วน H_2/SiH_4 Dilution Ratio เป็น 10 และ 20 เท่า ดังเงื่อนไขการทดลองในตารางที่ 4.4 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับเงื่อนไขการสร้างปกติของบริษัทบางกอกโซลาร์ (Normal Condition) จะมีอัตราส่วน H_2/SiH_4 Dilution Ratio เพียง 0.73 เท่า

ตารางที่ 4.4 เงื่อนไขการสร้างที่มีการเพิ่ม H_2 Dilution Ratio เป็น 10 และ 20 เท่า ในชั้น i_1(a-Si:H)

Step	*a-Si:H Deposition Process*	*Gas Flow Rate (SLPM)*	*Pressure (mTorr)*	*Power (W)*	*Time (Sec.)*
1	*Preheat Substrate*				-
2	*Total Pump down, High Vacuum*				*1800*
3	*Ar Plasma : Test Connector*	*Ar1.5*	*500*	*200*	*180*
4	*P1-layer*	*$SiH_4$0.61, $CH_4$1.02 , $H_2$2.1, TMB0.27*	*1500*	*300*	*38*
5	*Ar purge*	*Ar1.5*			*120*
6	*High Vacuum : 10^{-6}-10^{-7} Torr*				*2400*
*7**	*I1-layer (High H_2 Dilution)*	*$SiH_4$1.4, $CH_4$1.36, H_2 Dilute 10×, 20×*	*2000*	*1000*	*560*
8	*N1-layer*	*$SiH_4$0.45, $H_2$3.5, $PH_3$0.9*	*1500*	*400*	*84*
9	*Ar purge, Pump down*	*Ar1.5*			*480*
10	*P2-layer*	*$SiH_4$0.51, $CH_4$0.57, $H_2$2.1 , TMB0.41*	*1500*	*500*	*57*
11	*Ar purge*	*Ar1.5*			*120*
12	*High Vacuum : 10^{-6}-10^{-7} Torr*				*3300*
13	*I2-layer*	*$SiH_4$1.4, $CH_4$1.36, $H_2$1.7*	*2000*	*1000*	*2800*
14	*N2-layer*	*$SiH_4$0.45, $H_2$3.5, $PH_3$0.9*	*1500*	*400*	*300*
15	*Ar purge, Pump down, High Vac*	*Ar1.5*			*1080*
16	*Cool down Substrate*				-

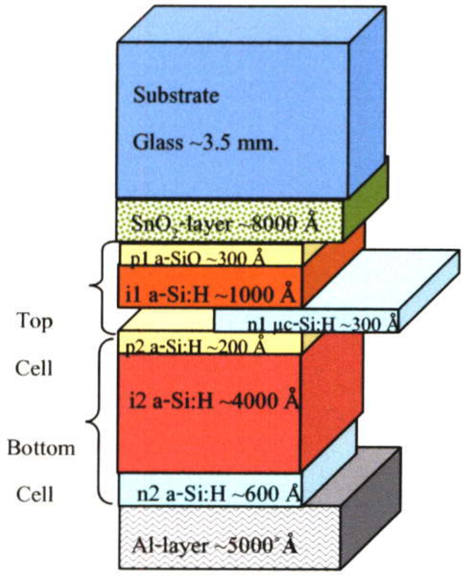
ผลการทดลอง วัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ a-Si:H/a-Si:H Tandem ดังตารางที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าเซลล์ Exp-6 ที่มีอัตราส่วน H_2/SiH_4 Dilution Ratio 10 เท่า และใช้ความดันการสร้างที่ 1000 mTorr ในการสร้างชั้น i_1(a-Si:H) จะมีค่าพารามิเตอร์ V_{OC} เป็น 63.4 V ซึ่งสูงกว่าเงื่อนไขการสร้างปกติ (Normal Condition) ส่วนการทดลองในเซลล์ Exp-4 และ -5 ใช้ความดันการสร้างที่ 600 mTorr ซึ่งจะต่ำเกินไปและทำให้ชั้น i_1(a-Si:H) มีขนาดที่ค่อนข้างบาง อีกทั้งความสม่ำเสมอโดยตลอด ของชั้นฟิล์ม (Uniformity) ก็ไม่ดี จึงทำให้ค่าพารามิเตอร์ V_{OC} และ I_{SC} ของเซลล์มีค่าต่ำ สำหรับการทดสอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์หลังการใช้งานจะได้นำเสนอต่อไปในหัวข้อ 4.11

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองเพิ่ม H_2 Dilution Ratio ในชั้น i_1(a-Si:H)

Experiment Number	Pressure I_{Top}(mTorr)	V_{OC} (V)	I_{SC} (A)	%FF	Power (W)
Exp-4 i_{Top}(a-Si:H), H_2 Dilution Ratio 20 เท่า	600	63.0	0.7	59.6	25.7
Exp-5 i_{Top}(a-Si:H), H_2 Dilution Ratio 10 เท่า	600	62.0	1.0	49.2	30.9
Exp-6 i_{Top}(a-Si:H), H_2 Dilution Ratio 10 เท่า	1000	63.4	1.206	63.5	48.6
Normal Condition (BSC)	600	62.1	1.198	65.9	49.0

4.7 การศึกษาผลการใช้ชั้นฟิล์มแบบ n(μc-Si:H) แทน n(a-Si:H)

ชั้นฟิล์มบางแบบไมโครคริสตันไลน์ n(μc-Si:H) มีคุณสมบัติของความต้านทานที่ต่ำ จึงสามารถมีผิวสัมผัสกับชั้นฟิล์มอื่นๆ ได้ดีกว่าชั้นฟิล์ม n(a-Si:H) ซึ่งผลของความต้านทานที่ต่ำลงของรอยสัมผัส n_1(μc-Si:H)/p_2(a:SiC) Interface ทำให้การออกแบบสร้างชั้น p(a:SiC) นั้นสามารถมีแถบพลังงานที่กว้างขึ้นได้ด้วยการเพิ่มก๊าซ CH_4 ให้มากขึ้น ซึ่งความต้านทานที่สูงขึ้นของชั้นฟิล์ม p(a:SiC) นี้จะถูกชดเชยด้วยชั้น n(μc-Si:H) นอกจากนั้นด้วยความโปร่งแสงของชั้นฟิล์ม n(μc-Si:H) ทำให้มีการดูดกลืนแสงที่น้อยกว่าชั้น n(a-Si:H) ฉะนั้นแสงจึงสามารถทะลุผ่านไปสู่เซลล์ด้านล่างของ a-Si:H/a-Si:H Tandem ได้มากขึ้นดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ชั้น n(μc-Si:H) แทน n(a-Si:H)

ข้อดีอีกอย่างของชั้นฟิล์ม n(μc-Si:H) คือสามารถให้ผิวสัมผัสกับชั้นตัวนำโปร่งแสงซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ได้ดีอีกด้วย สำหรับการทดลองเพื่อหาเงื่อนไขการสร้างชั้นฟิล์มบางแบบ n(μc-Si:H) จะทำโดยเริ่มต้นสร้างเฉพาะชั้นฟิล์ม n ลงบนแผ่นกระจกธรรมดา (Float Glass) ที่มีขนาดเท่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และสร้างพร้อมกันทั้งหมดจำนวน 48 แผ่น เพื่อจะทดสอบขีดความสามารถของระบบการสร้างเชิงปริมาณ (Batch Process) RF 13.56 MHz-PECVD ที่ใช้งานอยู่เดิมซึ่งมีกำลังงาน 1,000 W ว่าสามารถสร้างชั้นฟิล์มบางแบบไมโครคริสตันไลน์ซิลิคอนซึ่งมีเงื่อนไขการสร้างที่ต้องใช้กำลังงานไบอัสสูงๆ ได้ดีเพียงใด ก่อนจะนำเงื่อนไขการสร้างชั้น n(μc-Si:H) ที่เหมาะสมที่สุดไปประยุกต์ใช้กับการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ a-Si:H/a-Si:H Tandem ต่อไป ซึ่งเงื่อนไขการสร้างและคุณสมบัติของชั้นฟิล์มบาง n(μc-Si:H) แสดงไว้ในตารางที่ 4.6

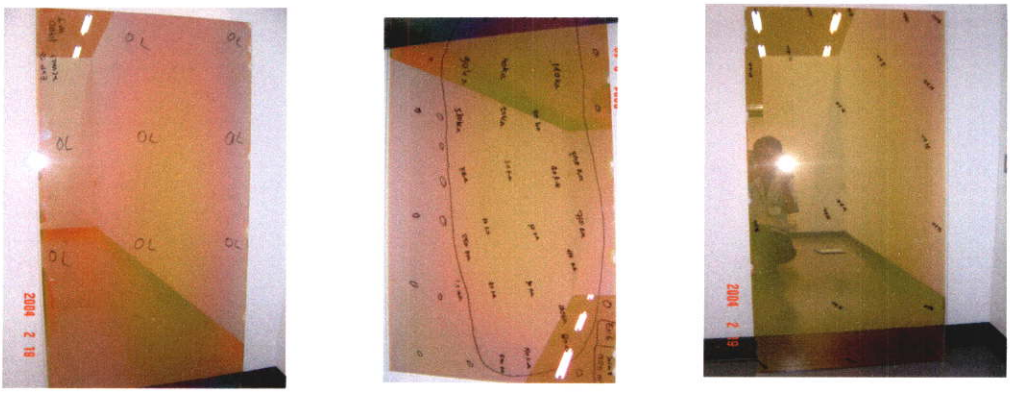
ตารางที่ 4.6 เงื่อนไขการสร้างและคุณสมบัติของชั้นฟิล์มบาง n(μc-Si:H)

Film n(μc-Si)	*Gas Flow (SLPM)*	*Pressure (mTorr)*	*Bias Current (A)*	*Time (Sec)*	Film Uniformity	Resistivity (kΩ/cm)
1	SiH_4:0.144, H_2:7.0, PH_3:0.23	*1000*	*4.6*	*1800*	No	∞
2	SiH_4:0.100, H_2:7.0, PH_3:0.20	*1000*	*5.5*	*1800*	No	∞
3	SiH_4:0.090, H_2:7.0, PH_3:0.17	*1000*	*5.5*	*1800*	No	∞
4	SiH_4:0.115, H_2:7.0, PH_3:0.055	*1000*	*5.5*	*1800*	Good	200-300
5	SiH_4:0.115, H_2:7.0, PH_3:0.055	*1900*	*5.5*	*1800*	No	∞
6	SiH_4:0.115, H_2:7.0, PH_3:0.055	*1500*	*5.5*	*1800*	No	30
7	SiH_4:0.100, H_2:7.0, PH_3:0.055	*1000*	*5.5*	*1800*	Good	14

การสร้างชั้นฟิล์ม n(μc-Si:H) ที่เงื่อนไขของ PH_3 Flow Rate มีค่าสูงมากเกินไป เช่นในฟิล์มหมายเลข 1, 2 และ 3 จากในตารางที่ 4.6 นั้นจะมีคุณสมบัติของการนำไฟฟ้าที่ไม่ดี ($\infty\Omega$) แต่ชั้นฟิล์ม n(μc-Si:H) จะเริ่มนำไฟฟ้าก็ต่อเมื่อเงื่อนไขการสร้างมีค่า PH_3 Flow Rate ลดต่ำลงเหลือประมาณ 0.055 SLPM ตามเงื่อนไขการสร้างชั้นฟิล์ม n(μc-Si:H) หมายเลข 4 โดยก๊าซ PH_3 ที่ใช้เป็นสารเจือ n-type นั้นเป็นก๊าซผสมระหว่าง PH_3 กับ Ar ดังนั้นถ้าหากใช้ PH_3 Flow Rate ที่สูง

มากเกินไปแล้วอะตอม Ar ก็จะเข้าไปร่วมในปริมาณมาก ทำให้พันธะการเกิดไมโครคริสตัลไลน์ซิลิคอนไม่สมบูรณ์ และจะทำให้ชั้นฟิล์ม n ที่สร้างขึ้นนั้นมีคุณสมบัติของการนำไฟฟ้าที่ไม่ดี

สำหรับค่าความดันภายในแชมเบอร์ระหว่างทำการสร้างชั้นฟิล์ม n(μc-Si:H) ถ้าเพิ่มมากขึ้นอัตราการเกิดชั้นฟิล์ม (Deposition Rate) ก็จะสูง แต่หากเพิ่มให้มีอัตราการเกิดที่สูงมากเกินไป คุณสมบัติการเป็นชั้นฟิล์ม n(μc-Si:H) โดยตลอดก็จะไม่ดีนัก เช่นในเงื่อนไขการสร้างชั้นฟิล์มหมายเลข 5 ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าจะสูงมากเพราะใช้ค่าความดันที่ 1,900 mTorr ส่วนชั้นฟิล์มหมายเลข 6 ซึ่งลดค่าความดันลงมาที่ 1,500 mTorr ฟิล์มบริเวณตรงกลางจะเริ่มนำไฟฟ้าแต่บริเวณขอบๆ ยังไม่นำไฟฟ้า และเมื่อลดค่าความดันลงมาที่ 1,000 mTorr ชั้นฟิล์มจะมีความสม่ำเสมอที่ดี และยังมีค่า Resistivity ที่ต่ำมากถึง 14 kΩ/cm ซึ่งจะเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ a-Si:H/a-Si:H Tandem ต่อไป



(ก) 1, 900 mTorr **(ข)** 1,500 mTorr **(ค)** 1,000 mTorr

รูปที่4.4 ภาพชั้นฟิล์ม n(μc-Si:H) ที่สร้างโดยเงื่อนไขความดัน **(ก)** 1,900 mTorr **(ข)** 1,500 mTorr **(ค)** 1,000 mTorr

ผลการทดลอง สร้างชั้นฟิล์ม n(μc-Si:H) ด้วยความดัน 1,900 mTorr Uniformity จะไม่ดี และมีสภาพต้านทานชั้นฟิล์มที่สูงมาก ที่ความดัน 1,500 mTorr บริเวณตรงกลางชั้นฟิล์มเริ่มนำไฟฟ้าแต่บริเวณขอบยังไม่นำ ฉะนั้นเงื่อนไขการสร้างที่เหมาะสมที่สุดจะเป็นไปตามการทดลองสร้างชั้นฟิล์มหมายเลข 7 ดังที่แสดงในตารางที่ 4.6 ซึ่งจะเห็นได้ชัดดังรูปที่ 4.4 **(ค)** ว่าชั้นฟิล์ม n(μc-Si:H) ที่สร้างด้วยความดัน 1000 mTorr นั้นจะมี Uniformity ที่ดีและมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ค่อนข้างต่ำประมาณ 14 kΩ/cm สำหรบเงื่อนไขการสร้างชั้นฟิล์ม n(μc-Si:H) นี้จะนำไปประยุกต์ใช้กับการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ a-Si:H/a-Si:H Tandem ดังรายละเอียดที่แสดงในตารางที่ 4.7 ส่วนเงื่อนไขการสร้างชั้นฟิล์มบางอื่นๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์นั้นจะเป็นไปตามเงื่อนไขการสร้างปกติของบริษัทบางกอกโซลาร์ (Normal Condition)

ตารางที่ 4.7 เงื่อนไขการสร้างที่มีการใช้ชั้นฟิล์ม n_1(μc-Si:H) แทน n_1(a-Si:H)

Step	*a-Si:H Deposition Process*	*Gas Flow Rate (SLPM)*	*Pressure (mTorr)*	*Power (W)*	*Time (Sec.)*
1	Preheat Substrate				-
2	Total Pump down, High Vacuum				1800
3	Ar Plasma : Test Connector	Ar1.5	500	200	180
4	P1-layer	$SiH_4$0.61, $CH_4$1.02 , $H_2$2.1, TMB0.27	1500	300	38
5	Ar purge	Ar1.5			120
6	High Vacuum : 10^{-6}-10^{-7} Torr				2400
7	I1-layer	$SiH_4$1.4, $CH_4$1.36, $H_2$1.02	2000	1000	560
8*	N1-layer n_1(μc-Si:H)	$SiH_4$0.1, $H_2$7.0, $PH_3$0.055	1000	400	240
9	Ar purge, Pump down	Ar1.5			480
10	P2-layer	$SiH_4$0.51, $CH_4$0.57, $H_2$2.1, TMB0.41	1500	500	57
11	Ar purge	Ar1.5			120
12	High Vacuum : 10^{-6}-10^{-7} Torr				3300
13	I2-layer	$SiH_4$1.4, $CH_4$1.36, $H_2$1.7	2000	1000	2800
14	N2-layer	$SiH_4$0.45, $H_2$3.5, $PH_3$0.9	1500	400	300
15	Ar purge, Pump down, High Vac	Ar1.5			1080
16	Cool down Substrate				-

ผลการทดลอง วัดประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์ a-Si:H/a-Si:H Tandem ที่มีการประยุกต์ใช้ชั้นฟิล์ม n_1(μc-Si:H) ดังตารางที่ 4.8 จะมีเงื่อนไขการสร้างที่แตกต่างกันดังในการทดลองที่ Exp-7, -8 และ Exp-9 ซึ่งสามารถสรุปผลได้ว่า เงื่อนไขการทดลองสร้างเซลล์ Exp-8 นั้นจะได้ค่า V_{OC} สูงที่สุด เนื่องจากเงื่อนไขการสร้างเช่นนี้ชั้นฟิล์ม n จะมีคุณสมบัติเป็นไมโครคริสตัลไลน์ที่ดีที่สุด เมื่อเทียบกับการทดลองสร้างเซลล์ Exp-7 และ Exp-9 เนื่องจากมีขั้นตอนการทำ CO_2 Plasma เข้ามาร่วมด้วยเพื่อที่จะสร้างชั้นรอยต่อหรือที่เรียกว่า “Seed-layer” ที่ทำให้ชั้น n_{12}(μc-Si:H) ที่สร้างต่อจาก Seed-layer นั้นเป็นไมโครคริสตัลไลน์ได้ดียิ่งขึ้น แต่หากเปรียบเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจากเงื่อนไขการสร้างปกติ (Normal Condition) แล้วเซลล์ Exp-8 ก็ยังมีค่ากำลังงานที่ต่ำกว่าพอสมควร ซึ่งปัญหาอาจเกิดจากผลของการ Interface ระหว่างชั้น i(a-Si:H) กับชั้น n(μc-Si:H) ซึ่งยังไม่ดีพอ

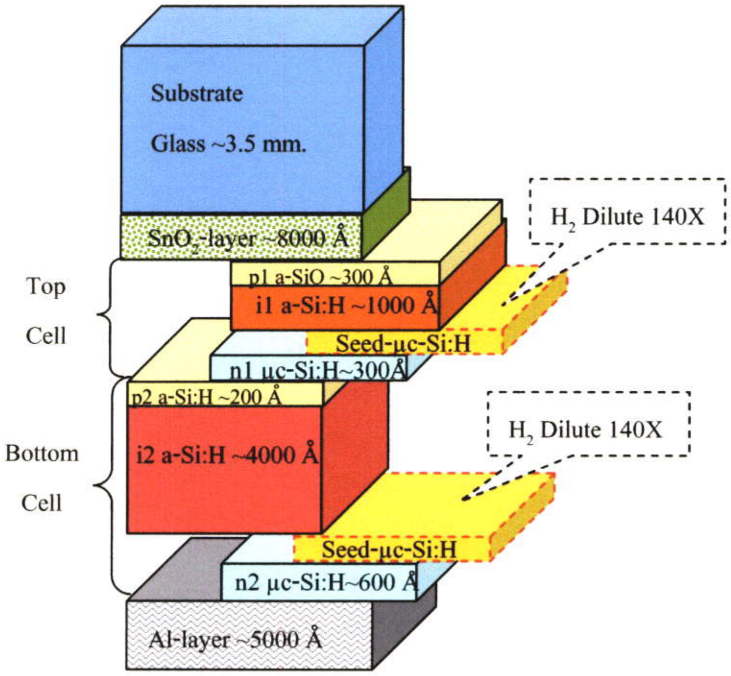
ตารางที่ 4.8 ผลการประยุกต์ใช้ชั้นฟิล์ม n(μc-Si:H) ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์

Experiment Number	V_{OC} (V)	I_{SC} (A)	%FF	Power (W)
Exp-7 i_1(a-Si:H)/n_1(μc-Si:H)	58.8	1.204	60.8	43.1
Exp-8 i_1(a-Si:)/n_{11}(μc-Si:H) CO_2 growth/n_{12}(μc-Si:H)	60.9	1.182	59.2	42.7
Exp-9 i_1(a-Si:H)/n_1(BSC)/CO_2 growth /n_{12}(μc-Si:H)	52.7	1.098	51.5	29.8
(Normal Condition) [0140H, 0143H and 0157H]	62.1	1.198	65.9	49.0

โดยทั่วไปแล้วช่วงเริ่มต้นของการสร้างชั้นฟิล์ม n(μc-Si:H) บนชั้นฟิล์ม i(a-Si:H) นั้นมักจะเกิดชั้น n(a-Si:H) บางๆ ขึ้นก่อนที่จะเกิดเป็นชั้นฟิล์ม n(μc-Si:H) เสมอๆ ซึ่งจะทำให้ไม่สามารถสร้างชั้นฟิล์มแบบ n(μc-Si:H) ที่มีคุณสมบัติที่ดีได้ วิธีแก้ไขก็คือต้องแทรกชั้นรอยต่อหรือ "Seed- μc-Si:H " เข้าไปโดยการเพิ่มเงื่อนไขการสร้างที่จะสามารถทำให้เกิดเป็น Seed-μc-Si:H ขึ้นก่อนในช่วงเริ่มต้นของการสร้างชั้นฟิล์ม n(μc-Si:H) โดยใช้เงื่อนไขการสร้างชั้นฟิล์มที่มีปริมาณ H_2 Dilution สูงๆ ซึ่งอัตราส่วนที่ใช้นี้จะมีค่า H_2/SiH_4 Dilution Ratio อยู่ที่ประมาณ 120-140 เท่า จึงจะเกิดเป็น Seed-μc-Si:H ที่สมบูรณ์ และเมื่อได้ชั้น n(μc-Si:H) ที่มีคุณภาพดีแล้วก็จะทำให้เกิดรอยสัมผัส n_1(μc-Si:H)/p_2(a-SiC) ซึ่งเป็น "Tunneling Junction" ที่มีความบางเป็นพิเศษและมีคุณสมบัติเป็น Ohmic Contact ที่ดีเยี่ยมและมีการเชื่อมต่อกันได้เป็นอย่างดีระหว่าง Top cell/Bottom cell สำหรับผลการทดลองสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ a-Si:H/a-Si:H Tandem ที่มีการสร้างชั้น n(μc-Si:H) ซึ่งมีชั้น seed- μc-Si:H นี้จะได้มีการนำเสนอต่อไปในหัวข้อที่ 4.8

4.8 การศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีโครงสร้างร่วมแบบ p(a-SiO)/i(a-Si:H) High H_2 Dilution/n(μc-Si:H) with Seed- μc-Si:H

จากการทดลองสร้างเซลล์ที่ผ่านมาในหัวข้อ 4.4, 4.5, 4.6 และ 4.7 นั้น เป็นการทดลองเพื่อหาเงื่อนไขการสร้างชั้นฟิล์มบางชนิด p, ชนิด i และชนิด n ที่เหมาะสมที่สุด สำหรับการนำมาร่วมกันสร้างเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ a-Si:H/a-Si:H Tandem เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานไฟฟ้าที่ดียิ่งขึ้น โครงสร้างต่างๆ ที่จะนำมาใช้ร่วมในการการทดลองนี้แสดงได้ดังรูปที่ 4.5 คือใช้ชั้นฟิล์มบางแบบ p_1(a:SiO) เป็นชั้นหน้าต่างกว้างรับแสงอาทิตย์ด้านบน และใช้ชั้นผลิตพาหะ i_1(a-Si:H) ที่มีเงื่อนไขของ H_2/SiH_4 Dilution Ratio ที่สูงถึง 10 เท่า เพื่อให้ได้พันธะโครงสร้างของชั้น Intrinsic ที่มีคุณภาพดี และใช้ชั้นฟิล์มบางแบบ n(μc-Si:H) ที่มีการเพิ่มชั้น Seed-μc-Si:H (H_2 Dilute 140 เท่า) เพื่อให้เกิดเป็นชั้นฟิล์ม n(μc-Si:H) โดยสมบูรณ์และให้การ Interface ระหว่าง Top cell และ Bottom cell ได้เป็นอย่างดีดังเงื่อนไขการทดลองในตารางที่ 4.9



รูปที่ 4.5 เซลล์แสงอาทิตย์ a-Si:H/a-Si:H Tandem ที่มีโครงสร้างร่วมแบบ p(a-SiO)/i(a-Si:H) High H_2 Dilution/n(μc-Si:H) ที่มีการเพิ่ม Seed-μc-Si:H

ตารางที่ 4.9 เงื่อนไขการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ a-Si:H/a-Si:H Tandem ที่มีโครงสร้างร่วมแบบ p(a-SiO)/i(a-Si:H) High H_2 Dilution/n(μc-Si:H) ที่มีการเพิ่ม Seed-μc-Si:H

Step	*a-Si:H Deposition Process*	*Gas Flow Rate (SLPM)*	*Pressure (mTorr)*	*Power (W)*	*Time (Sec.)*
1	*Preheat Substrate*				-
2	*Total Pump down, High Vacuum*				*1800*
3	*Ar Plasma : Test Connector*	*Ar1.5*	*500*	*200*	*180*
*4**	*P1-layer* p_1*(a-SiO)*	SiH_4*0.61,* CO_2*1.0 ,* H_2*2.1, TMB0.27*	*1500*	*300*	*38*
5	*Ar purge*	*Ar1.5*			*120*
6	*High Vacuum :* 10^{-6}*-*10^{-7} *Torr*				*2400*
*7**	*I1-layer (*H_2*Dilution)*	SiH_4*1.4,*CH_4*1.36,*H_2*10×*	*2000*	*1000*	*560*
S_1***	*Seed-layer (μc-Si:H) with* H_2 *Dilution 140×*		*1000*	*400*	*60*
*8**	*N1-layer* n_1*(μc-Si:H)*	SiH_4*0.1,* H_2*7.0,* PH_3*0.055*	*1000*	*400*	*240*
9	*Ar purge, Pump down*	*Ar1.5*			*480*
10	*P2-layer*	SiH_4*0.51,* CH_4*0.57,* H_2*2.1 ,TMB0.41*	*1500*	*500*	*57*
11	*Ar purge*	*Ar1.5*			*120*
12	*High Vacuum :* 10^{-6}*-*10^{-7} *Torr*				*3300*

Step	*a-Si:H Deposition Process*	*Gas Flow Rate (SLPM)*	*Pressure (mTorr)*	*Power (W)*	*Time (Sec.)*
13	*I2-layer*	*$SiH_4$1.4, $CH_4$1.36, $H_2$1.7*	*2000*	*1000*	*2800*
*S_2**	*Seed-layer (μc-Si:H) with H_2 Dilution 140×*		*1000*	*400*	*60*
*14**	*N1-layer n_2(μc-Si:H)*	*$SiH_4$0.1, $H_2$7.0, $PH_3$0.055*	*1500*	*400*	*800*
15	*Ar purge, Pump down, High Vac*	*Ar1.5*			*1080*
16	*Cool down Substrate*				*-*

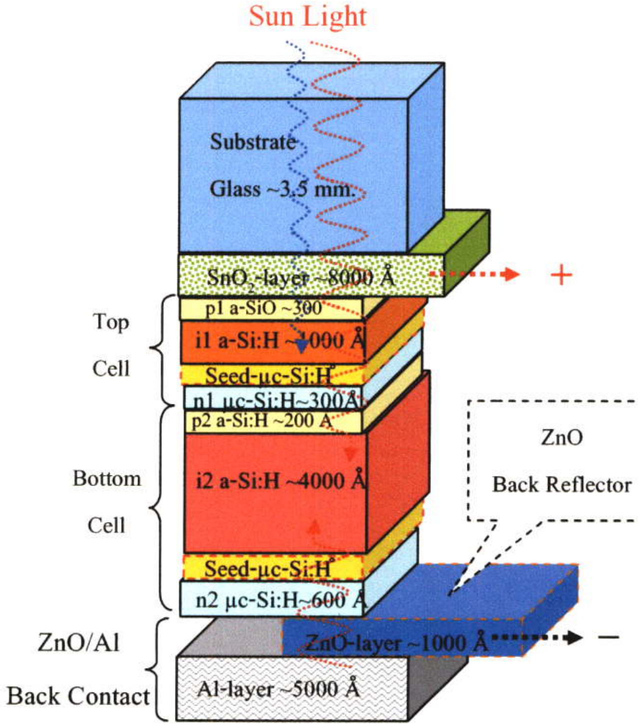
ผลการทดลอง วัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ a-Si:H/a-Si:H Tandem ที่มีโครงสร้างร่วมแบบ p(a-SiO)/i(a-Si:H) High H_2 Dilution/n(μc-Si:H) with Seed-layer ดังข้อมูลในตารางที่ 4.10 จะเห็นได้ว่าค่ากำลังงานไฟฟ้าของเซลล์ Exp-10 และ 11 มีค่าสูงกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจากเงื่อนไขปกติ (Normal Condition) โดยเฉพาะการทดลองของเซลล์ Exp-11 นั้นยังได้มีการปรับเปลี่ยนเงื่อนไขการสร้างในส่วนของ Bottom cell คือใช้ชั้น n_2(μc-Si:H) ที่มีการสร้างชั้น Seed- μc-Si:H ร่วมด้วย ซึ่งจะทำให้ค่ากำลังงานของเซลล์ Exp-11 สูงขึ้นเป็น 52.9 W ซึ่งจะสูงกว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจากเงื่อนไขปกติ (Normal Condition) ที่มีค่ากำลังงาน 49 W สำหรับพารามิเตอร์ประสิทธิภาพของ V_{OC} และ %FF ก็มีค่าสูงขึ้นกว่าเงื่อนไขการสร้างปกติด้วยเช่นกันดังที่เห็นจากข้อมูลในตารางที่ 4.8 แต่จะมีเพียงค่าพารามิเตอร์กระแส I_{SC} ซึ่งเซลล์ Exp-11 จะมีค่าอยู่ที่ 1.165 A ซึ่งยังคงต่ำกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจากเงื่อนไขการสร้างปกติซึ่งมีค่า 1.198 A แต่ก็มีวิธีการที่สามารถปรับปรุงพารามิเตอร์กระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ให้สูงขึ้นได้โดยการเพิ่มชั้นตัวนำโปร่งแสงซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ระหว่างชั้น n_2 กับชั้นอลูมิเนียม (Al) ซึ่งจะได้ทำการทดลองต่อไปในหัวข้อ 4.9 การศึกษาผลการเพิ่มชั้นตัวนำโปร่งแสง ZnO ในเซลล์แสงอาทิตย์

ตารางที่ 4.10 ผลการทดลองสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีโครงสร้างร่วมแบบ p(a-SiO)/i(a-Si:H) High H_2 Dilution /n(μc-Si:H) ที่มีการเพิ่ม Seed-μc-Si:H

Experiment Number	V_{OC} (V)	I_{SC} (A)	%FF	Power (W)
Exp-10 p(a-SiO)/i(a-Si:H) H_2dilute 10x /N_{11}(Seed) +n_{12}(μc-Si:H)	65.3	1.117	68.3	50.1
Exp-11 (Re:Exp-10) แต่ในชั้น N_2 ใช้ N_{21}(Seed) +N_{22} (μc-Si:H)	65.5	1.165	69.8	52.9
(Normal Condition) [0140H, 0143H and 0157H]	62.1	1.198	65.9	49.0

4.9 การศึกษาผลการเพิ่มชั้นตัวนำโปร่งแสงซิงค์ออกไซด์ในเซลล์แสงอาทิตย์

ชั้นตัวนำซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide : ZnO) มีคุณสมบัติเป็นชั้นฟิล์มโปร่งแสงที่มีความต้านทานต่ำ จึงสามารถช่วยให้การ Interface ระหว่างชั้นฟิล์ม n_2(μc-Si:H) กับชั้นตัวนำอลูมิเนียม (Al) ดียิ่งขึ้น และด้วยความโปร่งแสงของชั้น ZnO จึงสามารถให้โฟตอนแสงที่ยังมีพลังงานสูงอยู่สะท้อนจากชั้น Al Back-Reflector ผ่านกลับไปสู่บริเวณผลิตพาหะ i_2(a-Si:H) ได้อีกครั้งดังรูปที่ 4.6 ซึ่งที่ผ่านมาก็ได้มีการใช้งานชั้น ZnO กับเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดเล็กๆ ในห้องทดลอง (Small Area :10×25 cm^2) เพื่อเพิ่มค่าพารามิเตอร์กระแส I_{SC} ของเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 4.6 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการเพิ่มชั้นตัวนำโปร่งแสง ZnO

เนื่องจากเงื่อนไขการสร้างปกติของบริษัทบางกอกโซลาร์ เซลล์แสงอาทิตย์ a-Si:H/a-Si:H Tandem จะมีขั้วตัวนำด้านหลังเซลล์เป็นชั้นอลูมิเนียม (Al) ที่สร้างด้วยวิธี Sputtering ฉะนั้นหากต้องการสร้างชั้นตัวนำโปร่งแสง ZnO ก็เพียงติดตั้งอุปกรณ์เพิ่มเติมสำหรับการ Sputtering ZnO คือ ZnO Cathode และ ZnO Target สำหรับการสร้างชั้นตัวนำโปร่งแสง ZnO จะต้องมีการปรับเปลี่ยนเงื่อนไขการสร้างที่สำคัญให้เหมาะสม เช่น Bias Power และ Substrate Drive Speed เพื่อให้ได้ชั้นฟิล์ม ZnO ที่มีความหนาและค่าความต้านทานที่เหมาะสมตามต้องการ และจะต้องมีความสม่ำเสมอโดยตลอดทั่วทั้งแผ่นฐานรอง และมีดัชนีหักเหแสงที่เหมาะสำหรับการใช้งานกับเซลล์แสงอาทิตย์ สำหรับตัวอย่างชั้นฟิล์ม ZnO ที่สร้างบนฐานรอง Float Glass แสดงดังรูปที่ 4.7

รูปที่ 4.7 ชั้นตัวนำโปร่งแสง ZnO ที่ทำการสร้างลงบนแผ่นกระจก

การทดลองสร้างชั้นตัวนำโปร่งแสง ZnO จะใช้เซลล์แสงอาทิตย์จากการทดลอง Exp-11 เป็นเซลล์อ้างอิง สำหรับการปรับเปลี่ยนเงื่อนไขการสร้างชั้น ZnO เพื่อให้เหมาะสมกับการนำมาสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่สุด โดยจะนำเซลล์แสงอาทิตย์จากการสร้างใน Sector 1-12 ไปทำการ Sputtering ZnO ณ อุณหภูมิห้อง (~25 °C) ด้วยเงื่อนไขการสร้างชั้นตัวนำ ZnO แบบต่างๆ ดังรายละเอียดในตารางที่ 4.11 จากนั้นจึงนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไปวัดค่าพารามิเตอร์ประสิทธิภาพ

ตารางที่ 4.11 เงื่อนไขการสร้างชั้นตัวนำโปร่งแสง ZnO และผลการทดลองที่เหมาะสมที่สุด

Exp-11	*ZnO-layer Sputtering Recipes*				Output Parameter			
Sector No.	*Bias Power & Bias Round.*	*Ar Flow (SPLM)*	*Drive Speed (V)*	*Pressure (mTorr)*	V_{OC} (V)	I_{SC} (A)	%FF	P_W (w)
1	*5200×1R*	*0.25*	*3.5*	*5*	64.3	1.236	68.6	54.5
2	*5200×1R*	*0.25*	*3.1*	*5*	63.5	1.22	70.8	54.8
3	*5200×1R*	*0.25*	*3.3*	*5*	63.2	1.164	70.8	53.1
4	*5200×1R*	*0.3*	*3.1*	*10*	64.4	1.164	70.8	53.1
6	*5200×1R*	*0.32*	*3.1*	*15*	64.4	1.187	67.5	51.6
7	*2000×2R*	*0.25*	*3.1*	*5*	64.0	1.241	67.1	53.3
8	*2600×2R*	*0.23*	*3.1*	*5*	65.0	1.202	70.0	54.7
9	*3000×2R*	*0.23*	*3.5*	*5*	64.9	1.235	68.5	55.0
10	*3000×2R*	*0.32*	*3.5*	*15*	63.8	1.200	66.2	50.7
11	*3300×2R*	*0.23*	*3.5*	*5*	65.1	1.228	68.4	54.7
12	*3700×2R*	*0.23*	*3.5*	*5*	65.7	1.254	70.3	57.9

การทดลองเพิ่มชั้นตัวนำโปร่งแสง ZnO ระหว่างชั้น n_2(μc-Si:H) กับชั้น Al ในเซลล์แสงอาทิตย์ a-Si:H/a-Si:H Tandem และวัดประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน ดังตารางที่ 4.8 จะพบว่าเงื่อนไขการ Sputtering ZnO บนเซลล์ทดลอง Exp-11 (Sector 12) ซึ่งใช้ค่า Bias Power 3700 W, Ar 0.23 SLPM, Pressure 5 mTorr และ Drive Speed ฐานรองไป-กลับ 2 รอบที่ 3.5 V จะทำให้พารามิเตอร์ของเซลล์ Exp-11 (Sector 12 with ZnO-layer) มีค่ากำลังงานสูงที่สุดจากการทดลองทั้งหมด คือ 57.9 W และมีค่ากระแส (I_{SC}) เป็น 1.254 A, มีค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (V_{OC}) เป็น 65.7 V และมีค่า%FF เป็น 70.3% ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับเซลล์ Exp-11 (Sector 8) ซึ่งไม่มีการเพิ่มชั้นตัวนำ ZnO และ เซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจากเงื่อนไขปกติ (Normal Condition : No ZnO) ดังข้อมูลในตารางที่ 4.12 จะเห็นได้ว่าการ Sputtering ZnO ณ อุณหภูมิห้องจะสามารถทำให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ a-Si:H/a-Si:H Tandem มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานที่สูงขึ้นอย่างมาก

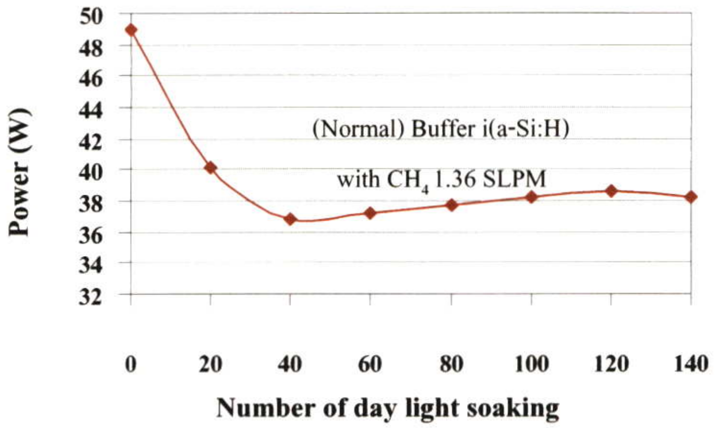
ตารางที่ 4.12 เอาท์พุตพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีและไม่มีการเพิ่มชั้นตัวนำ ZnO

Experiment Number	V_{OC} (V)	I_{SC} (A)	%FF	Power (W)
Exp-11 With ZnO-layer (Sector 12) p(a-SiO)/i(a-Si:H) H_2dilute 10x /$N_{11,21}$(Seed) +$n_{12,22}$(μc-Si:H)	65.7	1.254	70.3	57.9
Exp-11 NO ZnO-layer (Sector 8) p(a-SiO)/i(a-Si:H) H_2dilute 10x /$N_{11,21}$(Seed) +$n_{12,22}$(μc-Si:H)	65.5	1.165	69.8	52.9
(Normal Condition) [0140H, 0143H and 0157H]	62.1	1.198	65.9	49.0

เพื่อให้การเพิ่มเงื่อนไขการสร้างชั้นตัวนำโปร่งแสง ZnO ไม่ไปกระทบต่อระยะเวลาการผลิตรวมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์มากนัก และมีความสะดวกรวดเร็วขึ้น จึงได้ทำการเพิ่มอุปกรณ์ ZnO Cathode, ZnO Target และ DC Generator เป็น 2 ชุด เพื่อให้การ Sputtering ZnO เพียง 1 รอบก็สามารถได้ความหนาของชั้นฟิล์ม ZnO ที่เหมาะสมตามต้องการ

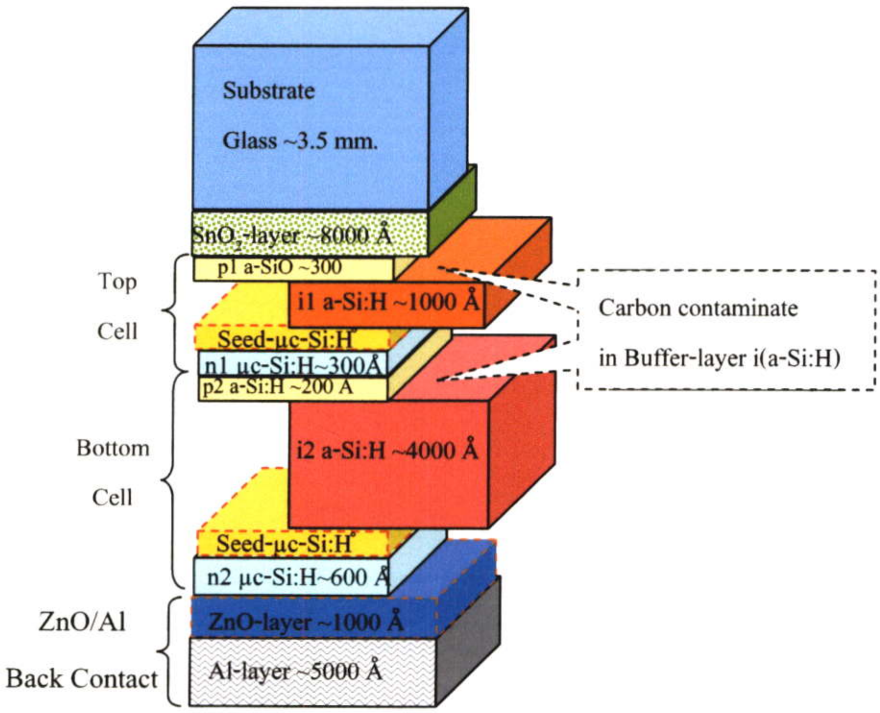
4.10 การศึกษาผลของก๊าซมีเทนในช่วงการสร้างชั้น Buffer-layer i(a-Si:H) ที่มีต่อการลดค่ากำลังงานแผงเซลล์แสงอาทิตย์ภายหลังการนำไปใช้งาน

จากการวัดประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นโดยเงื่อนไขปกติของบริษัทบางกอกโซลาร์ (Normal Condition) หลังการนำไปทดสอบใช้งานกับแสงอาทิตย์ (Outdoor light soaking) ในช่วงระยะเวลาประมาณ 140 วัน จะพบว่าค่ากำลังงานเริ่มต้นของเซลล์แสงอาทิตย์ (Initial Power) จะมีการลดต่ำลงจาก 49 W ไปเป็น 38.2 W ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การลดกำลังงานประมาณ -22% โดยจำนวนที่วันทดสอบต่อค่ากำลังงานที่ลดลงแสดงได้ดังกราฟรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 การลดกำลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ในช่วงทดสอบ Outdoor light soaking 140 วัน

การเสื่อมประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ หรือที่เรียกว่า “Degradation” เช่นนี้ส่วนหนึ่งเกิดจากการตกค้างของอะตอมคาร์บอนในก๊าซมีเทน (CH_4) ที่ช่วงรอยต่อระหว่างชั้น p กับชั้น Buffer i_1 และ i_2(a-Si:H) ดังรูปที่ 4.9 ซึ่งก๊าซ CH_4 นั้นจะต้องใช้ร่วมในการสร้างชั้นผลิตพาหะ (Intrinsic a-Si:H) ซึ่งจะช่วยให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานที่สูงขึ้น แต่ก็จะสูงเฉพาะในตอนเริ่มแรก เพราะเมื่อนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไปทดสอบเสถียรภาพกับแสงอาทิตย์ในช่วงระยะเวลาประมาณ 1000 ชั่วโมง ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์หลังการทดสอบ (Stable Efficiency) จะมีค่าลดต่ำลงซึ่งเป็นไปตามปรากฏการณ์ธรรมชาติของการเสื่อมสภาพในสารกึ่งตัวนำอสัณฐานหรือเซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัสซิลิคอนโดยทั่วไป



รูปที่ 4.9 การตกค้างของอะตอมคาร์บอนในชั้น i_1 และ i_2 Buffer-layer i(a-Si:H)

เพื่อศึกษาผลของปริมาณก๊าซ CH_4 ที่มีต่อการลดค่ากำลังงานแผงเซลล์แสงอาทิตย์หลังการนำไปใช้งาน จึงได้ทำการทดลองสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ Exp-11 และ Exp-12 ที่มีการเติมก๊าซ CH_4 ในช่วงการสร้าง i_1 และ i_2Buffer-layer (a-Si:H) ในปริมาณ 1.36 และ 0.115 SLPM ตามลำดับ ส่วนในเซลล์ทดลอง Exp-13 จะไม่มีการเติมก๊าซ CH_4 เพื่อเปรียบเทียบการลดค่ากำลังงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งก่อนการนำไปทดสอบ และภายหลังการนำไปทดสอบ Outdoor light soaking สำหรับเงื่อนไขการสร้าง Buffer-layer i(a-Si:H) ที่มีการปรับเปลี่ยนจะแสดงได้ดังตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 เงื่อนไขการสร้างที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณ CH_4 Flow Rate ใน Buffer-layer i(a-Si:H)

Step	*a-Si:H Deposition Process*	*Gas Flow Rate (SLPM)*	*Pressure (mTorr)*	*Power (W)*	*Time (Sec.)*
1	*Preheat Substrate*				-
2	*Total Pump down, High Vacuum*				*1800*
3	*Ar Plasma : Test Connector*	*Ar1.5*	*500*	*200*	*180*
4	*P1-layer*	*$SiH_4$0.61,$CH_4$1.02 , $H_2$2.1 ,TMB0.27*	*1500*	*300*	*38*
5	*Ar purge*	*Ar1.5*			*120*
6	*High Vacuum : 10^{-6}-10^{-7} Torr*				*2400*
*B1**	*Buffer-layer i(a-Si:H) with CH_4 Contain 1.36, 0.115 and NO CH_4*		*2000*	*1000*	*120*
7	*I1-layer*	*$SiH_4$14,$CH_4$1.36,$H_2$1.02*	*2000*	*1000*	*560*
8	*N1-layer n_1(μc-Si:H)*	*$SiH_4$0.1, $H_2$7.0, $PH_3$0.055*	*1000*	*400*	*240*
9	*Ar purge, Pump down*	*Ar1.5*			*480*
10	*P2-layer*	*$SiH_4$0.51, $CH_4$0.57, $H_2$2.1, TMB0.41*	*1500*	*500*	*57*
11	*Ar purge*	*Ar1.5*			*120*
12	*High Vacuum : 10^{-6}-10^{-7} Torr*				*3300*
*B2**	*Buffer-layer i(a-Si:H) with CH_4 Contain 1.36, 0.115 and NO CH_4*		*2000*	*1000*	*120*
13	*I2-layer*	*$SiH_4$1.4, $CH_4$1.36, $H_2$1.7*	*2000*	*1000*	*2800*
14	*N2-layer*	*$SiH_4$0.45, $H_2$3.5, $PH_3$0.9*	*1500*	*400*	*300*
15	*Ar purge, Pump down, High Vac*	*Ar1.5*			*1080*
16	*Cool down Substrate*				-

ตารางที่ 4.14 เอาท์พุตพารามิเตอร์เริ่มต้นของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีและไม่มีการเติมก๊าซ CH_4 ในช่วงการสร้าง Buffer-layer i(a-Si:H)

Experiment Number	V_{OC} (V)	I_{SC} (A)	%FF	Power (W)
Exp 11 p(a:SiO)/i(a-Si:H) with CH_4 1.36 in Buffer/ H_2Dilution 10×/n11(Seed)+n12(μc-Si:H)	65.7	1.254	70.3	57.9
Exp-12 p(a:SiO)/i(a-Si:H) with CH_4 0.115 in Buffer/ H_2Dilution 10×/n11(Seed)+n12(μc-Si:H)	65.5	1.069	72.5	51.95
Exp-13 p(a:SiO)/i(a-Si:H) with NO CH_4 in Buffer/ H_2Dilution 10×/n11(Seed)+n12(μc-Si:H)	65.5	1.107	67.9	49.48

ผลการทดลองวัดประสิทธิภาพ จะเห็นได้ว่าเซลล์แสงอาทิตย์ a-Si:H/a-Si:H Tandem (Exp-13) ดังตารางที่ 4.14 ซึ่งไม่มีการเติมก๊าซ CH_4 ในช่วงการสร้าง Buffer-layer i(a-Si:H) นั้นจะทำให้ค่า Initial Power ของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเพียง 49.48 W ส่วนในเซลล์ Exp-12 ที่มีการเติมก๊าซ CH_4 0.115 SLPM จะทำให้ค่า Initial Power สูงขึ้นเป็น 51.95 W และในเซลล์ Exp-11 ที่มีการเติมก๊าซ CH_4 1.36 SLPM จะทำให้ค่า Initial Power สูงขึ้นเป็น 57.9 W ซึ่งจะเห็นได้ว่า ค่า Initial Power สูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของก๊าซ CH_4 หลังจากนั้นจึงนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสามเงื่อนไขการทดลองที่มีและไม่มีการเติมก๊าซ CH_4 ไปทำการทดสอบ Outdoor light soaking เพื่อดูผลการลดค่ากำลังงานแผงเซลล์แสงอาทิตย์ต่อไป

ตารางที่ 4.15 ผลการทดสอบ Outdoor light soaking แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีและไม่มีการเติมก๊าซ CH_4 ในช่วง Buffer-layer i(a-Si:H) ทั้งตอนเริ่มต้นและหลังการใช้งาน 1 เดือน

Experiment Number	Average Initial Power (W)	Average Stable Power After 1 Month (W)	% Degrade
Exp-11 (with CH_4 1.36 SLPM)	57.9	44.0	-24
Exp-12 (With $CH_4$0.115 SLPM)	51.95	42.6	-18
Exp-13 (With NO CH_4)	49.48	42.1	-15

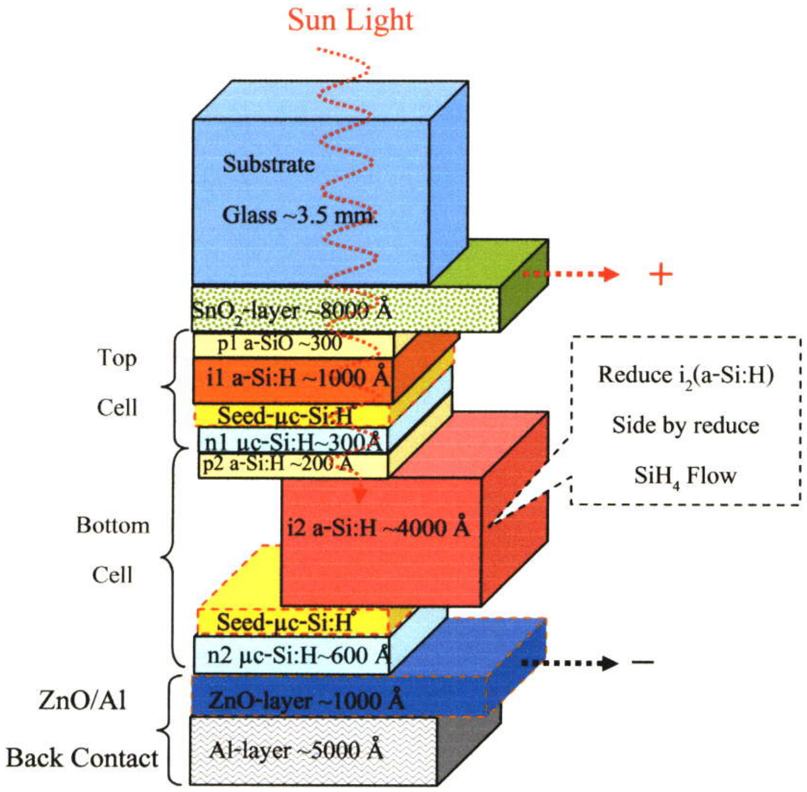
ผลทดสอบการเสื่อมประสิทธิภาพ ดังตารางที่ 4.15 โดยวางแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไว้กลางแจ้ง (Outdoor light soaking) เป็นเวลา 1 เดือน ก่อนนำกลับไปวัดประสิทธิภาพอีกครั้งหนึ่ง พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ a-Si:H/a-Si:H Tandem (Exp-11) ซึ่งมีการเติมก๊าซ CH_4 1.36 SLPM ในช่วงการสร้าง Buffer-layer i(a-Si:H) นั้นจะมีค่า Average Initial Power หลังการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ที่ประมาณ 57.9 W เปรียบเทียบกับค่า Average Stable Power ภายหลังการทดสอบ

กับแสงอาทิตย์ซึ่งจะมีค่ากำลังงานที่ลดลงเหลือเพียง 44 W ซึ่งคิดเป็นค่า %Degrade ถึง -24% และเซลล์ Exp-12 ที่มีการเติมก๊าซ CH_4 0.115 SLPM จะมีค่า Average Initial Power อยู่ที่ประมาณ 51.95 W เปรียบเทียบกับค่า Average Stable Power ซึ่งมีค่าประมาณ 42.6 W แล้วจะมีค่า %Degrade ถึง -18% ส่วนเซลล์ Exp-13 ที่ไม่มีการเติมก๊าซ CH_4 จะมีค่า Average Initial Power อยู่ที่ประมาณ 49.48 W เปรียบเทียบกับค่า Average Stable Power ซึ่งมีค่าประมาณ 42.1 W แล้วจะมีค่า %Degrade เพียง -15% แสดงให้เห็นว่าการไม่เติมก๊าซ CH_4 ในช่วงการสร้างชั้น i1 และ i2 Buffer-layer i(a-Si:H) จะทำให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ a-Si:H/a-Si:H Tandem คงเสถียรภาพหลังการใช้งานกับแสงอาทิตย์ได้ดีกว่าเงื่อนไขการสร้างที่มีการเติมก๊าซ CH_4 ใน Buffer-layer i(a-Si:H)

4.11 การศึกษาผลการลดความหนาชั้น i_2(a-Si:H) ที่มีผลต่อเสถียรภาพด้านกำลังงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ภายหลังการนำไปใช้งาน

โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ a-Si:H/a-Si:H Tandem ที่สร้างขึ้นสำหรับงานวิจัยนี้แสดงได้ดังรูปที่ 4.10 ซึ่งชั้นผลิตพาหะอินทรินซิก i_2(a-Si:H) ในเซลล์ด้านล่างจะมีความหนามากกว่าชั้นฟิล์ม i_1(a-Si:H) ประมาณ 4 เท่า และจะหนากว่าชั้นฟิล์มบาง a-Si:H อื่นๆ ทั้งหมด เพื่อให้โฟตอนแสงที่ทะลุผ่านลงมาแล้วถูกดูดกลืนไว้ทั้งหมดในชั้น i_2(a-Si:H) นี้ แต่การเสื่อมสภาพทางโครงสร้างของสารกึ่งตัวนำอะสัณฐานหรือชั้นฟิล์ม i_2(a-Si:H) ก็จะไปกระทบต่อประสิทธิภาพรวมของเซลล์แสงอาทิตย์ a-Si:H/a-Si:H Tandem อย่างมากด้วยเช่นกัน ฉะนั้นหากมีการลดความหนาของชั้น i_2(a-Si:H) ลงบ้าง แต่ไม่บางจนชั้นผลิตพาหะแคบเกินไปจนทำให้ค่าพารามิเตอร์กระแส (I_{SC}) ของเซลล์แสงอาทิตย์ต่ำลงไปมาก จนเกินขีดความสามารถการชดเชยกระแสจากชั้นตัวนำโปร่งแสง ZnO แล้ว จะสามารถทำให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นมีค่าประสิทธิภาพที่สูงทั้งในตอนเริ่มต้น (Initial Efficiency) และยังคงเสถียรภาพที่ดีภายหลังการนำไปใช้งาน (Stable Efficiency)

การลดความหนาชั้น i_2(a-Si:H) ในการทดลองนี้จะใช้วิธีลดอัตราการเกิดของชั้นฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอน หรือการลด Deposition Rate ด้วยการลดอัตราการไหลของก๊าซไซเลน (SiH_4 Flow Rate) ลงในช่วงหลัง Grading ของการสร้าง Buffer-layer ในชั้นฟิล์ม i_2(a-Si:H) ดังเงื่อนไขการทดลองในตารางที่ 4.16 โดยจะลดลงมาเป็น 1.5, 1.4, 1.275, 1.1 และ 1.0 SLPM (Standard Liter per Minute) ในการทดลองสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ Exp-13, -14, -15, 16 และ Exp-17 ตามลำดับ เพื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ประสิทธิภาพเริ่มต้น (Initial Efficiency) ต่างๆ กับเซลล์แสงอาทิตย์ในเงื่อนไขการสร้างปกติที่มีค่า SiH_4 Flow Rate เท่ากับ 1.4 SLPM (Exp-13) หลังจากนั้นจึงนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไปทดสอบใช้งานกับแสงอาทิตย์ (Outdoor light soaking) เพื่อวัดค่าประสิทธิภาพหลังการใช้งาน (Stable Efficiency) ต่อไป



รูปที่ 4.10 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการลดขนาดชั้น i_2(a-Si:H) โดยลด SiH_4 Flow Rate

ตารางที่ 4.16 เงื่อนไขการสร้างที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณ SiH_4 Flow Rate ของชั้น i_2(a-Si:H)

Step	*a-Si:H Deposition Process*	*Gas Flow Rate (SLPM)*	*Pressure (mTorr)*	*Power (W)*	*Time (Sec.)*
1	*Preheat Substrate*				-
2	*Total Pump down, High Vacuum*				*1800*
3	*Ar Plasma : Test Connector*	*Ar1.5*	*500*	*200*	*180*
4	*P1-layer*	$SiH_4 0.61, CH_4 1.02, H_2 2.1, TMB0.27$	*1500*	*300*	*38*
5	*Ar purge*	*Ar1.5*			*120*
6	*High Vacuum : 10^{-6}-10^{-7} Torr*				*2400*
B1	*Buffer-layer i(a-Si:H) with NO CH_4*		*2000*	*1000*	*120*
7	*I1-layer*	$SiH_4 14, CH_4 1.36, H_2 1.02$	*2000*	*1000*	*560*
8	*N1-layer n_1(μc-Si:H)*	$SiH_4 0.1, H_2 7.0, PH_3 0.055$	*1000*	*400*	*240*
9	*Ar purge, Pump down*	*Ar1.5*			*480*
10	*P2-layer*	$SiH_4 0.51, CH_4 0.57, H_2 2.1, TMB0.41$	*1500*	*500*	*57*
11	*Ar purge*	*Ar1.5*			*120*

Step	*a-Si:H Deposition Process*	*Gas Flow Rate (SLPM)*	*Pressure (mTorr)*	*Power (W)*	*Time (Sec.)*
12	*High Vacuum : 10^{-6}-10^{-7} Torr*				*3300*
B2	*Buffer-layer i(a-Si:H) with NO CH_4*		*2000*	*1000*	*120*
*13**	*I2-layer (Reduce SiH4 Flow Rate)*	*SiH_4 Flow 1.5-1.0, $CH_4$1.36, $H_2$1.7*	*2000*	*1000*	*2800*
14	*N2-layer*	*$SiH_4$0.45, $H_2$3.5, $PH_3$0.9*	*1500*	*400*	*300*
15	*Ar purge, Pump down, High Vac*	*Ar1.5*			*1080*
16	*Cool down Substrate*				*-*

ตารางที่ 4.17 เอาท์พุตพารามิเตอร์เริ่มต้นของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการปรับอัตราการไหลของก๊าซ SiH_4 ในช่วงหลัง Grading ของการสร้าง Buffer-layer ในชั้น i_2(a-Si:H)

Experiment Number	SiH_4 Flow after grade i_2(a-Si:H) (SLPM)	V_{OC} (V)	I_{SC} (A)	%FF	Power (W)
Exp-14	1.5	65.7	1.276	66.2	56.0
Exp-13 (Normal)	1.4	65.5	1.107	67.9	49.48
Exp-15	1.275	65.9	1.229	67.3	54.6
Exp-16	1.1	65.7	1.208	69.5	55.1
Exp-17	1.0	65.9	1.164	68.5	52.5

ผลการทดลอง วัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ Tandem a-Si:H/a-Si:H ดังตารางที่ 4.17 จะเห็นได้ว่าเงื่อนไขการสร้างปกติ Exp-13 (Normal) ซึ่งมีค่า SiH_4 Flow Rate เท่ากับ 1.4 SLPM ในช่วงหลัง Grading ของการสร้าง Buffer-layer ในชั้นฟิล์ม i_2(a-Si:H) นั้นเซลล์แสงอาทิตย์จะมีค่าพารามิเตอร์ V_{OC} 65.5 V, I_{SC} 1.107 A, %FF 67.9% และมีค่า Power 49.48 W ส่วนในเซลล์ Exp-14 มีค่าการเพิ่ม SiH_4 Flow Rate เป็น 1.5 SLPM จะทำให้ค่า I_{SC} เพิ่มขึ้นเป็น 1.276 A และค่า Power เพิ่มขึ้นเป็น 56 W ซึ่งการเพิ่มขึ้นของพารามิเตอร์ประสิทธิภาพเช่นนี้เกิดจากขนาดที่ใหญ่ขึ้นของชั้นผลิตพาหะ i_2(a-Si:H) ส่วนในเซลล์ทดลองที่ Exp-15, -16 และ Exp-17 ที่มีการลดค่า SiH_4 Flow Rate ลงเป็น 1.275, 1.1 และ 1.1 SLPM เซลล์แสงอาทิตย์ก็จะมี I_{SC} ลดลงเป็น 1.229 A, 1.208 และ 1.164 A ตามลำดับ และค่า Power ที่วัดได้คือ 54.6 W, 55.1 W และ 52.5 W ตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าเมื่อลดค่า SiH_4 Flow Rate ลงเป็น 1.0 SLPM ในเซลล์ Exp-17 จะทำให้ค่า I_{SC} ลดลงค่อนข้างมากเป็น 1.164 A และค่า Power ลดลงเป็น 52.5 W เนื่องจากในเซลล์ซ้อน Tandem a-Si:H/a-Si:H นั้น เซลล์ด้านล่าง (Bottom Cell) จะมีค่ากระแสไฟฟ้ามากกว่าเซลล์ด้านบน (Top Cell) ฉะนั้นหากมีการลดขนาดชั้นผลิตพาหะในเซลล์ด้านล่าง i_2(a-Si:H) ลงมากเกินไปแล้ว จะทำให้กระแสรวมของเซลล์ a-Si:H/a-Si:H Tandem ลดลงอย่างมากตามไปด้วย

ขั้นตอนทดลองต่อไปจึงนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไปทดสอบเสถียรภาพกับแสงอาทิตย์ โดยนำแผงเซลล์แสงอาทิตย์ไปวางไว้กลางแจ้ง (Outdoor light soaking) ในช่วงเวลาประมาณ 1 เดือนก่อนนำกลับมาวัดประสิทธิภาพอีกครั้งด้วยเครื่อง Solar Simulator

ตารางที่ 4.18 การลดค่ากำลังงานที่น้อยลงหลังการใช้งาน 1 เดือน ที่ใช้การปรับอัตราการไหลของก๊าซ SiH_4 ในช่วงหลัง Grading ของการสร้าง Buffer-layer ในชั้น i_2(a-Si:H)

Experiment Number	SiH_4 Flow Rate i_2(a-Si:H) Grading (SLPM)	Initial Power (W)	Stable Power After 1 Month	%Degrade
Exp-14	1.5	56.0	46.87	-16.3
Exp-13 (Normal)	1.4	49.48	42.1	-15
Exp-15	1.275	54.6	47.17	-13.6
Exp-16	**1.1**	**55.1**	**48**	**-12.8**
Exp-17	1.0	52.5	46.57	-11.3

ผลการทดลอง วัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ a-Si:H/a-Si:H Tandem หลังทดสอบเสถียรภาพกับแสงอาทิตย์โดยนำแผงเซลล์ไปวางไว้กลางแจ้ง (Outdoor light soaking) ในช่วงเวลาประมาณ 1 เดือน ดังข้อมูลในตารางที่ 4.18 จะเห็นได้ว่าเซลล์ Exp-16 ซึ่งมีการลดความหนาชั้น i_2(a-Si:H) ด้วยการลดค่า SiH_4 Flow Rate ลงเป็น 1.1 SLPM ในช่วงหลัง Grading ของการสร้าง Buffer-layer ในชั้นฟิล์ม i_2(a-Si:H) จะมีค่ากำลังงานแผงเซลล์เริ่มต้น (Initial Power) เป็น 55.1 W และมีค่ากำลังงานหลังการทดสอบประมาณ 1 เดือน (Stable Power) เป็น 48 W ซึ่งดีที่สุดจากการทดลองทั้งหมด และคิดเป็นการเสื่อมประสิทธิภาพ (Degradation) ของกำลังงานไฟฟ้าเพียง -12.8% ซึ่งต่ำกว่าเงื่อนไขการสร้างปกติ Exp-13 (Normal) ที่ใช้ SiH_4 Flow Rate 1.4 SLPM ซึ่งจะมีการลดค่ากำลังงานลงถึง -16.3% และข้อดีอีกอย่างหนึ่งจากการลดความหนาชั้น i_2(a-Si:H) คือสามารถลดปริมาณการใช้ก๊าซ SiH_4 ลงไปได้ถึงประมาณ 26% และยังทำให้เฟสโครงสร้างของชั้นฟิล์ม i_2(a-Si:H) มีคุณสมบัติค่อนไปในทางไมโครคริสตันไลน์

จากการทดลองปรับปรุงเงื่อนไขการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผ่านมาในหัวข้อ 4.10 และ 4.11 เพื่อหวังผลต่อเสถียรภาพที่ดีหลังการใช้งานกับแสงอาทิตย์ จะเห็นได้ว่าการทดลองสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ Exp-16 ซึ่งไม่มีการเติมก๊าซ CH_4 ใน Buffer-layer i_1 และ i_2(a-Si:H) ร่วมกับการลด SiH_4 Flow rate เป็น 1.1 SLPM ในช่วงหลัง Grading ของการสร้าง Buffer-layer ในชั้นฟิล์ม i_2(a-Si:H) จะทำให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบเซลล์ซ้อนอะมอร์ฟัสซิลิคอน ในสภาวะเริ่มต้นมีค่าพารามิเตอร์ดังนี้ V_{OC} 65.7 V, I_{SC} 1.208 A, %FF 69.5 % และ Power 55.1 W ซึ่งคิดเป็นค่า Initial Efficiency ได้ประมาณ 7.3 % ส่วนผลประสิทธิภาพในสภาวะเสถียรภายหลังการทดสอบใช้งานกับแสงอาทิตย์ ซึ่งจะทำให้พารามิเตอร์ต่างๆ ลดลงเป็น V_{OC} 63.9 V, I_{SC} 1.19 A, %FF

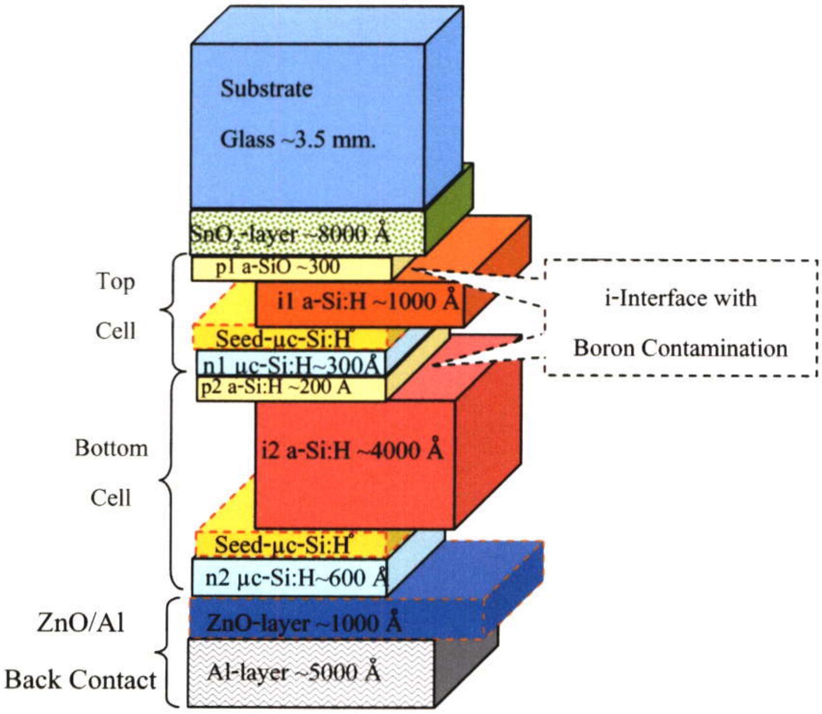
63.2 %, Power 48 W และคิดเป็นค่า Stable Efficiency ได้ประมาณ 6.3 % ซึ่งจะสูงกว่าเงื่อนไขการสร้างปกติที่ใช้ในกระบวนการผลิตเดิมของบริษัทบางกอกโซลาร์

จากการลดความหนาของชั้น i_2(a-Si:H) โดยวิธีลดปริมาณก๊าซ SiH_4 นอกจากจะทำให้ค่ากำลังงานแผงเซลล์แสงอาทิตย์ภายหลังการใช้งาน (Stable Power) ไม่ลดลงมากนักแล้ว ยังได้ประโยชน์จากการลดต้นทุนการใช้ก๊าซได้อีกด้วย แต่ที่สิ่งจำเป็นสำหรับการใช้เงื่อนไขดังกล่าวนี้คือต้องใช้ร่วมกับเงื่อนไขการสร้าง ZnO/Al Back Contact เท่านั้น เพราะถ้าใช้ชั้น Al เพียงอย่างเดียวประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบ a-Si:H/a-Si:H Tandem จะมีการลดลงอย่างค่อนข้างมากเนื่องจากความไม่สมดุลกระแสของเซลล์ด้านบนกับเซลล์ด้านล่างภายในเซลล์ซ้อน

4.12 การลดการปนเปื้อนสารโบรอนในชั้น Intrinsic ของกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบแชมเบอร์เดี่ยว

การสร้างแผงเซลล์แสงอาทิตย์ a-Si:H/a-Si:H Tandem หรือ "PV Modules" โดยกระบวนการเชิงปริมาณแบบแชมเบอร์เดี่ยว (Batch process Single-Chamber PECVD) จะสามารถช่วยให้ต้นทุนการผลิตและระยะเวลาการสร้างแผงเซลล์แสงอาทิตย์ลดลงได้ค่อนข้างมาก แต่ทว่าปัญหาการตกค้างสารเคมีภายในแชมเบอร์เดี่ยวก็เป็นปัญหาใหญ่ ที่ทำให้ประสิทธิภาพการแปลงกำลังงานไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ a-Si:H/a-Si:H Tandem ยังมีค่าที่ค่อนข้างต่ำ และจะต้องสูญเสียระยะเวลาไปอย่างมากกับการกำจัดสารเคมีที่ตกค้างอยู่ภายในแชมเบอร์เดี่ยว โดยเฉพาะสารโบรอนซึ่งเป็นสารประกอบในก๊าซ Trimethylboron หรือ $B(CH_3)_3$, TMB ซึ่งใช้เป็นก๊าซสารเจือสำหรับการสร้างชั้นฟิล์ม p-type ซึ่งสารโบรอนที่ตกค้างอยู่หลังการสร้างชั้น p จะเข้าไปปนเปื้อนที่บริเวณผิวของชั้น i(a-Si:H) ดังรูปที่ 4.11 และจะทำให้ระดับเฟอร์มิของชั้น Intrinsic ไม่อยู่ตรงกึ่งกลางระหว่างแถบคอนดักชันและแถบวาเลนซ์ตามคุณสมบัติปกติที่ควรจะเป็น แต่จะเลื่อนต่ำลงมาค่อนไปยังแถบวาเลนซ์ ซึ่งจะมากหรือน้อยนั้นก็ขึ้นอยู่กับปริมาณการปนเปื้อนของสารโบรอนในระหว่างทำการสร้างชั้น i(a-Si:H)

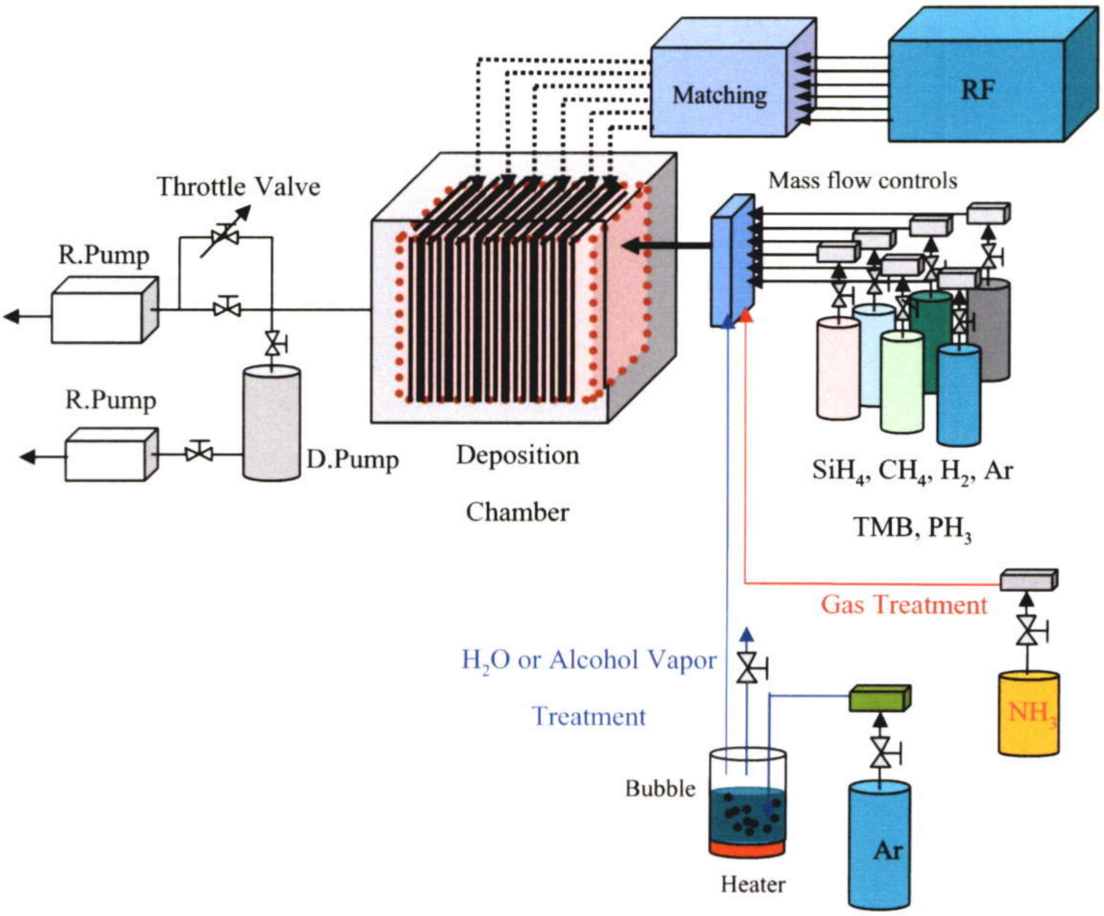
สำหรับวิธีลดการปนเปื้อนสารเคมีแบบปกติของบริษัทบางกอกโซลาร์ (Normal Condition) จะใช้วิธีชำระล้างด้วยก๊าซอาร์กอนซึ่งมีเงื่อนไขโดยใช้ Ar Flow 1.5 SLPM เป็นเวลา 2 นาที จากนั้นจะปั๊มสุญญากาศระดับสูง (~10^{-6} Torr) ออกจากแชมเบอร์ก่อนการสร้าง i_1(a-Si:H) ประมาณ 40 นาที และก่อนการสร้างชั้น i_2(a-Si:H) ประมาณ 55 นาที โดยวิธีการแบบเดิมนี้จะทำให้ต้องสูญเสียเวลาประมาณ 1.5 ช.ม. สำหรับการกำจัดสารโบรอนออกจากแชมเบอร์เดี่ยว จากเวลาการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์รวม (a-Si:H Deposition Process) ที่ประมาณ 3.5-4 ช.ม.



รูปที่ 4.11 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการตกค้างสารโบรอนที่บริเวณผิวของชั้น i(a-Si:H)

ฉะนั้นจึงได้ทดลองใช้วิธีการอื่นๆ ซึ่งมีระยะเวลาสั้นกว่า ไม่มีความซับซ้อนยุ่งยากในการเพิ่มเติมอุปกรณ์เพื่อดำเนินวิธีการมากนัก และไม่กระทบต่อโครงสร้างและประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ อาทิเช่น วิธีการปล่อยไอระเหยของแอลกอฮอล์หรือน้ำผ่านเข้าสู่แชมเบอร์ (Alcohol or H_2O Vapor Treatment) หรือวิธีการปล่อยก๊าซแอมโมเนียผ่านเข้าสู่แชมเบอร์ (NH_3 Gas Treatment) เพื่อดึงเอาอะตอมโบรอนที่ตกค้างอยู่บริเวณพื้นผิวต่างๆ ภายในแชมเบอร์ออกจากกระบวนการสร้างเชิงปริมาณ (Batch Process)

สำหรับวิธี Alcohol และ H_2O Vapor Treatment ดังแผนภาพในรูปที่ 4.12 จะทำโดยต่อท่อก๊าซ Ar เข้าสู่อุปกรณ์สร้างไอระเหย (Bubble) แล้วต่อท่อของไอระเหยเข้าสู่ Mass Flow Control ของระบบเพื่อควบคุมปริมาณ Flow Rate ของไอระเหยที่จะใช้งาน ส่วนวิธี NH_3 Gas Treatment จะสะดวกกว่าโดยทำการต่อท่อก๊าซแอมโมเนียเข้าสู่ Mass Flow Control เพื่อใช้งานได้เลย ซึ่งการทดลองปรับเปลี่ยนเงื่อนไขการลดการตกค้างสารเคมี แสดงได้ดังตารางที่ 4.19



รูปที่ 4.12 แผนภาพระบบการสร้าง a-Si:H Deposition และการทดลองใช้ Vapor และ Gas Treatment เพื่อลดการตกค้างสารเคมีในกระบวนการสร้างแบบแชมเบอร์เดี่ยว

ตารางที่ 4.19 เงื่อนไขการทดลองใช้ H_2O , Alcohol Vapor และ NH_3 Gas Treatment เพื่อลดการตกค้างสารเคมีในกระบวนการสร้างแบบแชมเบอร์เดี่ยว

Step	*a-Si:H Deposition Process*	*Gas Flow Rate (SLPM)*	*Pressure (mTorr)*	*Power (W)*	*Time (Sec.)*
1	*Preheat Substrate*				-
2	*Total Pump down, High Vacuum*				*1800*
3	*Ar Plasma : Test Connector*	*Ar1.5*	*500*	*200*	*180*
4	*P1-layer*	*$SiH_4$0.61,$CH_4$1.02 , $H_2$2.1 ,TMB0.27*	*1500*	*300*	*38*
*5**	*Vapor & Gas Treatment*	*H_2O or Alcohol 0.68 and $NH_3$0.15*	*200*		*300, 60*
*6**	*High Vacuum : 10^{-6}-10^{-7} Torr*				*300*
B1	*Buffer-layer i(a-Si:H) with NO CH_4*		*2000*	*1000*	*120*
7	*I1-layer*	*$SiH_4$14,$CH_4$1.36,$H_2$1.02*	*2000*	*1000*	*560*

Step	*a-Si:H Deposition Process*	*Gas Flow Rate (SLPM)*	*Pressure (mTorr)*	*Power (W)*	*Time (Sec.)*
8	*N1-layer n_1(μc-Si:H)*	*$SiH_4$0.1, $H_2$7.0, $PH_3$0.055*	*1000*	*400*	*240*
9	*Ar purge, Pump down*	*Ar1.5*			*480*
10	*P2-layer*	*$SiH_4$0.51, $CH_4$0.57, $H_2$2.1 ,TMB0.41*	*1500*	*500*	*57*
*11**	*Vapor & Gas Treatment*	*H_2O or Alcohol 0.7 & $NH_3$0.3-1.3*	*200*		*300& 60*
*12**	*High Vacuum : 10^{-6}-10^{-7} Torr*				*300*
B2	*Buffer-layer i(a-Si:H) with NO CH_4*		*2000*	*1000*	*120*
13	*I2-layer (Reduce SiH4 Flow Rate)*	*SiH_4 Flow 1.1 $CH_4$1.36, $H_2$1.7*	*2000*	*1000*	*2800*
14	*N2-layer*	*$SiH_4$0.45, $H_2$3.5, $PH_3$0.9*	*1500*	*400*	*300*
15	*Ar purge, Pump down, High Vac*	*Ar1.5*			*1080*
16	*Cool down Substrate*				-

ตารางที่ 4.20 เอาท์พุตพารามิเตอร์ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ใช้วิธีลดการตกค้างสารโบรอนก่อนการสร้างชั้น i_1(a-SI:H) และ i_2(a-Si:H) แบบ Vapor และ Gas Treatment

Experimental	*Process*			Output Parameter				
	Flush Time(s)	*Pressure (mTorr)*	*High-Vac Time(s)*	Voc (V)	Isc (A)	FF (%)	Power (W)	Rs (Ω)
1. (Normal Condition) Ar purge + High Vacuum	*120*	*Open*	*3300*	62.1	1.198	65.9	49	10.3
2.Alcohol flush	*300*	*200*	*300*	65.6	1.075	69	48	12.7
3. Alcohol flush*	***600***	***200***	***300***	**65.5**	**1.16**	**66.3**	**50.5**	**11.8**
4. Alcohol flush 90 □C	*300*	*200*	*300*	65.5	1.087	65.8	46.3	13
5. Alcohol flush 90 □C	*600*	*200*	*300*	65.4	1.015	65	43.1	14.9
6. H_2O flush	*300*	*200*	*300*	63.3	1.08	58.1	38.6	18.8
7. H_2O flush 90 □C	*300*	*200*	*300*	64.4	1.029	54.3	36	20.1
8. NH_3 1.3 (SLPM)	*60*	*200*	*300*	63.5	1.043	61.9	40.9	15.8
9. NH_3 plasma	*50*	*200*	*300*	37.4	1.02	35.3	13.5	31.3
10. NH_3 0.5+Ar 0.5	*60*	*Open*	*300*	65.2	1.026	63	41	15.6
11. NH_3 0.3+Ar 0.7	*60*	*Open*	*300*	65.3	1.036	62.3	42.2	14.2
12. NH_3+Ar+120%p-layer	*60*	*Open*	*300*	64.6	1.051	65.8	44.7	14.4
13.NH_3+Ar+150%p-layer	*60*	*Open*	*300*	65.5	1.087	64.3	45.7	13

ผลการทดลอง สร้างแผงเซลล์แสงอาทิตย์ a-Si:H/a-Si:H Tandem ที่ใช้วิธีลดการตกค้างสารโบรอน โดยใช้การผ่านไอระเหยของแอลกอฮอล์ (Alcohol Vapor Treatment) ประมาณ 10 นาที และปั๊มสุญญากาศระดับสูงต่ออีกประมาณ 5 นาที ก่อนการสร้างชั้น i_1(a-Si:H) ในเซลล์ด้านบนและ i_2(a-Si:H) ในเซลล์ด้านล่าง สามารถทำให้เวลาการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ (a-Si:H Deposition) ลดลงไปได้ประมาณ 40% จากเวลาการสร้างรวม และยังทำให้ค่ากำลังงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ยังมีค่าสูงอยู่ที่ประมาณ 50.5 W ซึ่งจะสูงกว่าวิธีการสร้างแบบปกติ (Ar Purge+High Vacuum) ที่มีค่ากำลังงานที่ 49 W อยู่เพียงเล็กน้อย ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากวิธีการลดการตกค้างสารเคมีแบบ Vapor & Gas Treatment นี้ นอกจากจะเป็นการพัดพา $B(CH_3)_3$ ที่ตกค้างอยู่ออกไปแล้ว B-Oxide หรือ Boric-Acid ที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวยังช่วยจำกัด B-Atom มิให้ปนเปื้อนเข้าสู่ชั้นผลิตพาหะ Intrinsic และไม่ไปเพิ่มค่าความต้านทานอนุกรมของชั้นฟิล์มบางภายในเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีค่าสูงขึ้นมากนัก ซึ่งคาดว่าน่าจะเป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมอย่างยิ่งกับการนำไปประยุกต์ใช้ในการผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในเชิงพาณิชย์ต่อไป

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาและพัฒนาประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบเซลล์ซ้อนอะมอร์ฟัสซิลิคอนที่สร้างโดยกระบวนการเชิงปริมาณ แบบ Batch Process RF-PECVD 13.56 MHz ซึ่งได้มีการร่วมทำวิจัยกับทางบริษัทบางกอกโซลาร์ จำกัด จากการศึกษาเครื่องจักรที่สำคัญคือ a-Si:H Deposition System และ Sputtering System ที่ใช้ในกระบวนการผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์รวมทั้งเงื่อนไขการสร้างชั้นฟิล์มบางต่างๆ เป็นอย่างดีแล้ว จึงทำการทดลองสร้างแผงเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยเงื่อนไขการสร้างปกติของบริษัทบางกอกโซลาร์แบบ **Normal Condition** เพื่อวัดพารามิเตอร์ประสิทธิภาพต่างๆ และทำการจดบันทึกเพื่อนำไปหาค่าเฉลี่ยจากหลายๆ การผลิต ก็จะได้**ค่าพารามิเตอร์ประสิทธิภาพอ้างอิงดังนี้ V_{OC} 62.1 V, I_{SC} 1.198 A, %FF 65.9 % และ Power 49 W** และเมื่อนำมาคำนวณหาประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน หรือค่า %Efficiency ด้วยสภาวะทดสอบมาตรฐานที่ AM 1.5, 1000 W/m^2 และ 25 °C แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างโดย Normal Condition ซึ่งมีขนาดพื้นที่รับแสง 0.757 m^2 จะมีค่า **Initial Efficiency ประมาณ 6.4 %** แต่**หลังการทดสอบใช้งานกับแสงอาทิตย์**ในช่วงระยะเวลามากกว่า 1000 ช.ม. แล้วพบว่า **ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จะลดลงเป็น V_{OC} 62.5 V, I_{SC} 1.14 A, %FF 54.1 % และ Power 38.2 W ซึ่งคิดเป็นค่า Stable Efficiency ได้ประมาณ 5 %** เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานที่สูงขึ้นและยังคงเสถียรภาพได้ดีภายหลังการใช้งาน จึงทำการทดลองปรับปรุงเงื่อนไขและกระบวนการสร้างต่างๆ โดยนำผลพารามิเตอร์ประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่วัดได้มาวิเคราะห์เปรียบเทียบเพื่อให้ได้พัฒนาการที่ดีขึ้น

จากการทดลองใช้ชั้น p_1(a-SiO) แทน p_1(a-SiC) แผงเซลล์แสงอาทิตย์ a-Si:H/a-Si:H Tandem จะมีค่า V_{OC} และ I_{SC} ที่สูงขึ้นกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างโดย Normal Condition เป็น 63.7 V และ 1.206 A ส่วนค่า %FF และ Power จะลดลงเป็น 62.3 % และ 47.9 W ซึ่งค่าที่ลดลงนี้เป็นผลมาจากความต้านทานอนุกรมของชั้นฟิล์ม p_1(a-SiO) ที่มีการเจือก๊าซ CO_2 และในส่วนของการทดลองเพิ่ม H_2 Dilution ในการสร้างชั้น i_1(a-Si:H) เป็น 10 เท่า แผงเซลล์แสงอาทิตย์จะมีค่า V_{OC} และค่า I_{SC} ที่สูงขึ้นกว่า Normal Condition เป็น 63.4 V และ 1.206 A ส่วนค่า %FF และ Power จะลดลงเป็น 63.5 % และ 48.6 W และในส่วนของการทดลองใช้ชั้นฟิล์มบางแบบ n_1 และ n_2(μc-Si:H) ซึ่งมี Seed-Layer Interface ร่วมกับการใช้ชั้นตัวนำโปร่งแสง ZnO ด้านหลังเซลล์แสงอาทิตย์ สามารถทำให้พารามิเตอร์ประสิทธิภาพทั้งหมดคือ V_{OC}, I_{SC}, %FF และ Power มีค่าสูงขึ้นกว่า Normal Condition เป็น 65.7 V, 1.254 A, 70.3 % และ 57.9 W ซึ่งจะทำให้ Initial Efficiency ที่ดีที่สุดที่สามารถพัฒนาได้ในเซลล์แสงอาทิตย์ a-Si:H/a-Si:H Tandem มีค่าเป็น 7.5 %

สำหรับการทดลองที่มุ่งเน้นผลด้านเสถียรภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์ภายหลังการใช้งาน ได้มีการทดลองไม่เติมก๊าซ CH_4 เพื่อลดการตกค้างของอะตอมคาร์บอนในช่วงการสร้างชั้น i_1 และ i_2 Buffer-layer (a-Si:H) ร่วมกับการลดความหนาชั้น i_2(a-Si:H) ด้วยการทดลองลด SiH_4 Flow Rate ลงเป็น 1.1 SLPM เพื่อให้สามารถลดผลกระทบจากการเสื่อมสภาพชั้นฟิล์ม ซึ่งภายหลังการพัฒนาปรับปรุงเงื่อนไขการสร้างให้เหมาะสมที่สุด โดยคำนึงถึงผลประสิทธิภาพสูงสุดทั้งก่อนและหลังการใช้งานแล้ว จะทำให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบเซลล์ซ้อนอะมอร์ฟัสซิลิคอน ในสภาวะเริ่มต้นมีค่าพารามิเตอร์ดังนี้ V_{OC} 65.7 V, I_{SC} 1.208 A, %FF 69.5 % และ Power 55.1 W ซึ่งคิดเป็นค่า Initial Efficiency ได้ประมาณ 7.3 % ส่วนผลประสิทธิภาพในสภาวะเสถียรภายหลังการทดสอบใช้งานกับแสงอาทิตย์ ซึ่งจะทำให้พารามิเตอร์ต่างๆ ลดลงเป็น V_{OC} 63.9 V, I_{SC} 1.19 A, %FF 63.2 %, Power 48 W และคิดเป็นค่า Stable Efficiency ได้ประมาณ 6.3 % ซึ่งยังสูงกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจากเงื่อนไขปกติเดิมที่มีประสิทธิภาพประมาณ 5 % ภายหลังการใช้งาน

การทดลองสุดท้ายเป็นการพัฒนากระบวนการสร้างแผงเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีความสะดวกรวดเร็ว และเพื่อให้เหมาะสมกับการผลิตในรูปแบบเชิงพาณิชย์มากขึ้น จึงทดลองใช้วิธีลดการตกค้างสารโบรอนในกระบวนการสร้างแบบแชมเบอร์เดี่ยวด้วยวิธีการแบบ Vapor & Gas Treatment แทนวิธีการผ่านก๊าซ Ar และปั๊มสุญญากาศระดับสูงเป็นเวลานานๆ ในเงื่อนไขปกติ ซึ่งจะสามารถทำให้เวลาการสร้าง a-Si:H Deposition ลดลงไปได้ประมาณ 40% และด้วยวิธีผ่านไอระเหยของแอลกอฮอล์ 10 นาที แล้วปั๊มสุญญากาศระดับสูงอีก 5 นาที ก่อนการสร้างชั้น i_1 และ i_2(a-Si:H) จะทำให้ค่ากำลังงานแผงเซลล์แสงอาทิตย์ยังมีค่าอยู่ที่ประมาณ 50.5 W ซึ่งสูงกว่าวิธีการสร้างแบบ Normal Condition ที่มีค่ากำลังงานอยู่ที่ 49 W เพียงเล็กน้อย แต่ประโยชน์ที่ได้รับนั้นก็คือระยะเวลาการสร้างและต้นทุนการผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ลดลง

เอกสารอ้างอิง

[1] Staebler D, Wronski C, *Appl. Phys. Lett.* 31, 292 (1977).

[2] Chittick R, Sterling H, in Adler D, Fritzsche H, Eds, *Tetrahedrally Bonded Amorphous Semiconductors*, pp. 1–11, Plenum Press, New York, NY (1985).

[3] Spear W, LeComber P, *Solid State Commun.* 17, 1193 (1975).

[4] Carlson D, Wronski C, *Appl. Phys. Lett.* 28, 671 (1976).

[5] Perlin J, *Space to Earth: The Story of Solar Electricity*, aatec Publications, Ann Arbor (1999).

[6] Wronski C, Carlson D, in Archer M, Hill R, Eds, *Clean Electricity from Photovoltaics*, World Scientific, Singapore (2001).

[7] Yang J, Banerjee A, Guha S, *Appl. Phys. Lett.* 70, 2977 (1997).

[8] Fritzsche H, *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* 609, A17.1.1–12 (2001).

[9] Vanˇeˇcek M Poruba A, Remeˇs Z, Beck N, Nesl´adek M, *J. Non-Cryst. Solids* 227–230, 967(1998).

[10] Street R.A., Cahn. R.W., Davis E.A. and Ward I.M. Hydrogenated Amorphous Silicon. London : Press Syndicate of the University Cambridge, 1991.

[11] Lufit W., Tsuso S. Hydrogenated Amorphous Silicon Alloy Deposition Process. New York : Marcel Dekker Inc. 1993.

[12] Street R.A. Hydrogenated Amorphous Silicon, Cambridge University Press. London : Press Syndicate of the University Cambridge, 1991.

[13] ดุสิต เครืองาม. สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ เล่ม 2. พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. พ.ศ. 2542.

[14] Tauc J. Amorphous and Liquid Semiconductors, London and New York : Plenum Press, 1974, p. 159.

[15] Mott N.F. "Conduction in Non Crystalline Material III." Phil. Mag., Vol. 19, 1969, p. 853.

[16] Ichinose N., Hirano H. and Kuwano Y. Electronic Device. Baifukan, Japan : Physics and Application, 1987, p. 148.

[17] Fritzche H., Pollak M., Editors. Hopping and Related Phenomena. Advance in Disorder Semiconductors, Vol. 2, World Scientific, Singapore, 1990

[18] Chirakawikul K., Kruangam D. and Panyakeow S. Measurements of Density of Defects in Hydrogenaie Amorphous Silicon by Constant Photocurrent Metood and Electron

Spin Resonance. "Proceeding of the 2" Conference on Electrical Engineering. King MongKut's University of Technology Thonbury, Bangkok, Thailand, 1998, p. 304.

[19] Takahashi K.,Konagai M. Amorphous Silicon Solar Cells. London : North Oxford Academic Publisher, 1986.

[20] A.Catalano, B.W.Faughnan and A.R.Moore, "Effects of Low Level Boron Doping of the i-layer Performance of a-SiC:H p-i-n Devices", Solar Energy Materials, 13, 65 (1986)

[21] D.Kruangam, K.Hanaki, S.Nonomura, H.Okamoto and Y.Hamakawa, "Characterization of Undoped Microcrystalline Silicon for Solar Cell Application", Technical Digest of Int. Photovoltaic Science & Engineering Conf. (PVSEC-1), Kobe, Japan, 437 (1984)

[22] A.Matsuda, "Formation Kinetics and Control of Microcrystalline in uc-Si:H From Glow Dischrage Plasma", J.Non-Cryst.Solids, 59&60, 767 (1983).

[23] Y.Kuwano, "A New Integrated Type Amorphous Si Solar Cell ", Jpn.J.Appl.Phys., supplement 20-2, 213 (1981).

[24] ดุสิต เครืองาม และคณะฯ, "เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน", การประชุมวิชาการของเนคเทค ครั้งที่ 4, โรงแรมอโนมา, กรุงเทพมหานคร, 190 (1992)

[25] ดุสิต เครืองาม และคณะฯ, รายงานวิจัยฉบับสมบรูณ์, เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน, ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เสนอศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (1993) 130 หน้า

[26] D.Kruangam,W.Boonkosum and P.Siamchai, "Development of Amorphous Si:H High-Voltage Solar Cell Based upon p-i-n Multi-Layered Structrues",Proc.16th Conf.on Electrical Engineering,King Mongkut Institute of Technology (Ladkrabang), Bankok,482 (1993).

[27] Schiff E, *J. Non-Cryst. Solids* 190, 1 (1995).

[28] Guha S, in Street R, Ed, *Technology and Applications of Amorphous Silicon*, 252–305, Springer, Berlin (1999). Figure 6.10 of this paper is a valuable compilation of power measurements for varying cell thicknesses and light-soaking histories.

[29] Hama S, Okamoto H, Hamakawa Y, Matsubara T, *J. Non-Cryst. Solids* 59–60, 333 (1983).

[30] Tsukada T, in Street R, Ed, *Technology and Applications of Amorphous Silicon*, 7–93, Springer, Berlin, Germany (2000).

[31] Deng X, Narasimhan K, Evans J, Izu M, Ovshinsky S, *Proc. 1st World Conf. on PhotovoltaicEnergy Conversion*, 678 (1994).

[32] Yang J, Xu X, Banerjee A, Guha S, *Proc. 25th Photovoltaic Specialists Conference*, 1041, IEEE (1996).

[33] Arya R, Carlson D, *Prog. Photovoltaics* 10, 69–76 (2002).

[34] Carlson D, US Patent 4,317,844 (1982).

[35] Guha S, Narasimhan K, Pietruszko S, *J. Appl. Phys.* 52, 859 (1981).

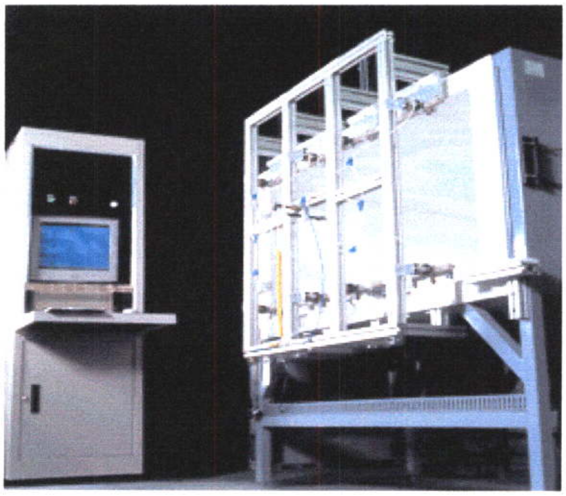
[36] Tanaka K, Matsuda A, *Mater. Sci. Rep.* 2, 139–184 (1987).

[37] Yang J, Lord K, Guha S, Ovshinsky S, *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* 609, A15.4 (2000).

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

เครื่องมือวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ ก-1 เครื่องวัดประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Module Testing)

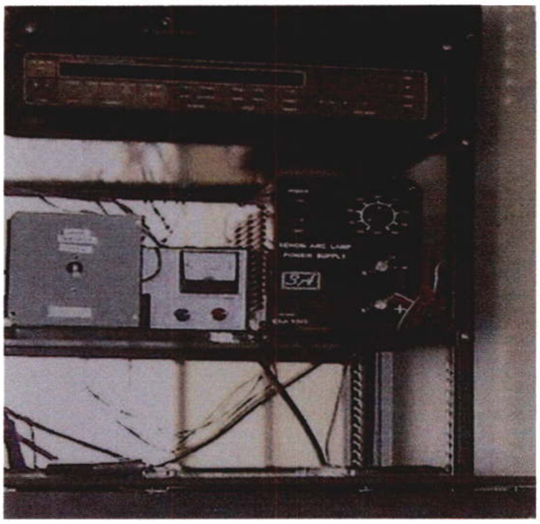
รูปที่ ก-2 เครื่องวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ (Spire Sun Simulator)

ภาคผนวก ข.

เครื่องมือวัดคุณสมบัติของชั้นฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอน

รูปที่ ข-1 เครื่องวัดความหนาชั้นฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอน (Profiler)

รูปที่ ข-2 เครื่องวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (UV-VIS Spectrometer)



รูปที่ ข-3 เครื่องวัดสภาพนำไฟฟ้าของชั้นฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน

ภาคผนวก ค.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

ISSN 0125-1724

วิศวสาร ลาดกระบัง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

LADKRABANG ENGINEERING JOURNAL

ปีที่ 24 ฉบับที่ 2 มิถุนายน 2550

1. การผลิตกระแสไฟฟ้าและพลังงานความร้อนจากระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็งโดยใช้ก๊าซธรรมชาติ และ ก๊าซสังเคราะห์ที่ได้จากชีวมวลเป็นแหล่งพลังงาน 1
วาทิต วทัญญูไพศาล รพีพงศ์ สุวรรณวรางกูร นริศรา ทองบุญชู

2. การปรับปรุงตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับอะลูมินาเพื่อใช้ผลิตไฮโดรเจนจากปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งเอทานอลด้วยไอน้ำ 7
ดวงกมล ณ ระนอง วิศรุต ใหญ่ยอด พัฒนา เอี่ยมวิลาวัณย์ อาภาภรณ์ จันทร์ปีรักษ์ กันยรัตน์ บัวเกตุ ณัฐณิชา ณัฐนรากร พรสวรรค์ กาญจนวณิชย์กุล

3. การเร่งปฏิกิริยาขจัดไฮโดรเจนของเอทานอลเพื่อได้อะซีตัลดีไฮด์บนตังเร่งปฏิกิริยานิกเกิล 13
อาทิตย์ เนรมิตตกพงศ์ วิภาดา อัตไพบูลย์ สุธาสินี เนรมิตตกพงศ์

4. การสังเคราะห์เอทิลีนจากเอทานอลบนตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะฟอสเฟต 19
อาทิตย์ เนรมิตตกพงศ์ วัชราภรณ์ ปราณี สุธาสินี เนรมิตตกพงศ์

5. การปรับปรุงสมบัติป้องกันโอโซนของยางธรรมชาติโดยใช้ไมโครคริสตัลไลน์แว๊กซ์ 25
เศรษฐการ พรมศิริ กาเหว่า เทพนอก สุรัตน์ อารีรัตน์

6. แผงเซลล์แสงอาทิตย์ทันเดมอะมอร์ฟัสซิลิคอนประสิทธิภาพสูงที่สร้างโดยกระบวนการเชิงปริมาณ 31
ศรัณย์ สาตารมณ์ วิสุทธิ์ รุ้ติรุ่งเรือง เกรียงศักดิ์ สุวรรณโพธิ์ศรี นิรุธ ปิ่นเกตุ

7. ลักษณะสมบัติของซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ PIN ที่มีชั้นพอรัสซิลิคอนจากการกัดย้อมสีเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง 37
จิรวัฒน์ ปราบเขต สมเกียรติ ศุภเดช

8. การสังเคราะห์อนุภาคขนาดนาโนของเหล็กด้วยวิธี CVD จากละอองเฟอร์โรเซน-เอธานอล 43
ธนูทอง คำยา สุธิชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์

9. เครื่องผลิตก๊าซโอโซนแบบใช้แหล่งจ่ายเฟสชิฟท์พีดับบลิวเอ็มฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ 49
อนุรักษ์ มั่นสุข วิจิตร กิณเรศ

10. การรู้จำใบหน้าโดยใช้อัลกอริทึม WPS-CSLDA 55
วีรรัตน์ ลีลาธรรม ยุทธพงษ์ รังสรรค์เสรี

11. การจัดแบ่งภาระงานของเวปคลัสเตอร์ด้วยลำดับเสมือน 61
กริช กองศรีมา มยุรี เลิศเวชกุล

12. ปรากฏการณ์การเคลื่อนที่วนของวัสดุเมล็ดเล็กภายใต้การสั่นแนวดิ่ง 67
สกนธ์ คล่องบุญจิต

13. Equations for Determining Characteristics of Resonance-Type Silencers 73
M. Lokitsangtong A. Sindhuphak T. Komori

14. Design Techniques for Energy Efficient Multiplier 77
W. Suntiamorntut C. Vongchumyen

แผงเซลล์แสงอาทิตย์ทันเดมอะมอร์ฟัสซิลิคอน ประสิทธิภาพสูงที่สร้างโดยกระบวนการเชิงปริมาณ

High-Efficiency Tandem a-Si:H PV Modules Fabricated by a Batch Process

ศรัณย์ สาตารมณ์ วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง เกรียงศักดิ์ สุวรรณโพธิ์ศรี[1] นิรุธ ปิ่นเกตุ[2]

ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

[1]ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

[2]สถาบันพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

บทคัดย่อ

รายงานฉบับนี้ได้นำเสนอการทดลองและผลการทดลองของการสร้างแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทันเดมอะมอร์ฟัสซิลิคอนโดยกระบวนการเชิงปริมาณ ด้วยเงื่อนไขการสร้างต่างๆ และการนำไปใช้งานกับแสงอาทิตย์ ประสิทธิภาพเซลล์จะถูกวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับข้อมูลแผงเซลล์ที่มีเสถียรภาพซึ่งสร้างจากเงื่อนไขปกติ เซลล์แสงอาทิตย์แบบทันเดมมีค่ากำลังงานที่สูงขึ้นอย่างเด่นชัดจากการสร้างชั้นฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอน p-i-n ที่เหมาะสม ในการสร้างชั้น i อะมอร์ฟัสซิลิคอนจะเพิ่มอัตราส่วนของก๊าซไฮโดรเจนให้สูงขึ้นร่วมกับการใช้ชั้น n แบบไมโครคริสตัลไลน์เพื่อให้รอยสัมผัสของชั้นฟิล์มที่ดีขึ้นและมีการดูดกลืนแสงที่น้อยลง ซึ่งการใช้ชั้นตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสงซิงค์ออกไซด์เพื่อเพิ่มการสะท้อนแสงกลับด้านหลังเซลล์ทำให้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด 0.79 ตร.ม. มีกำลังงานเริ่มต้นที่สูงถึง 57.9 วัตต์ นอกจากนั้นในเรื่องของเสถียรภาพแผงเซลล์ก็ได้มีการปรับปรุงขึ้นด้วย ท้ายที่สุดในส่วนของระยะเวลาการสร้างเซลล์สามารถลดลงไปประมาณ 40% โดยใช้วิธีผ่านไอระเหยแอลกอฮอล์ภายหลังการสร้างชั้น p เพื่อลดการปนเปื้อนสารโบรอนระหว่างชั้น p และ i

Abstract

This paper presents the experiments and results of tandem a-Si:H PV modules fabricated by a batch process with the various process parameters and light soaked in outdoor sunlight. Solar cell performances were analyzed and compared with module stability data fabricated by the conventional recipe. The tandem modules were notably higher output power with the optimized in p-i-n a-Si:H deposition. By applying more H_2-dilued in a-Si:H i-layer deposited and using μc-Si:H n-layer for better interface contact and lower absorption. The highest initial output power of 0.79 m^2-size tandem module with ZnO back reflector was 57.9 W. Furthermore, the improvement of module stability has also been carried out. Finally, the processing time of cell fabrication could reduce about 40% by introducing the Alcohol flush oxidation treatment after p-layer deposition for lower boron cross contamination at p/i interface.

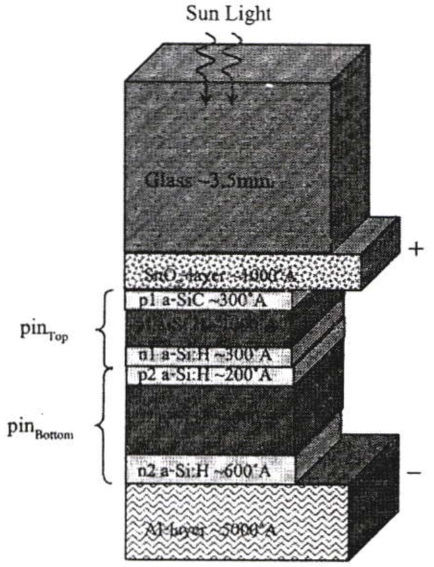
1. บทนำ

เทคโนโลยีการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์อะมอร์ฟัสซิลิคอน (a-Si:H) มีความโดดเด่นและน่าสนใจ เพราะฟิล์ม a-Si:H สร้างได้ง่ายบนฐานรองขนาดใหญ่ การเชื่อมต่อรวมเซลล์ (Monolithic Series) เป็นไปโดยกระบวนการสร้างทำให้มีความสะดวกรวดเร็ว และใช้อุณหภูมิการสร้างเซลล์ประมาณ 200-250°C จึงทำให้ต้นทุนการผลิตต่ำกว่าเซลล์แสงอาทิตย์แบบอื่น ปัจจุบันแผงเซลล์สำหรับการพานิชย์มีประสิทธิภาพ (%Efficiency) ประมาณ 7-9% ขึ้นอยู่กับลักษณะการสร้างจำนวนเซลล์ซ้อน คุณภาพของชั้นฟิล์มบางและฐานรองที่นำมาใช้ในการสร้างแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ที่ผ่านมาบริษัทบางกอกโซลาร์ได้นำระบบการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์เชิงปริมาณ (Batch Process) ของ Energy Photovoltaics, Inc. (EPV) [1] เข้ามาทำการผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัสซิลิคอนนี้

บทความฉบับนี้ได้นำเสนอการทดลองและผลการทดลอง เพื่อศึกษาและปรับปรุงเงื่อนไขการสร้างแผงเซลล์แสงอาทิตย์ a-Si:H เพื่อให้ค่าพารามิเตอร์ประสิทธิภาพต่างๆ ของแผงเซลล์ที่ผลิตโดยบริษัทบางกอกโซลาร์มีค่าเพิ่มสูงขึ้นทั้งในตอนต้นและยังคงเสถียรภาพที่ดีภายหลังการนำไปใช้งานกับแสงอาทิตย์

2. โครงสร้างและหลักการทำงาน

เซลล์แสงอาทิตย์อะมอร์ฟัสซิลิคอนสำหรับการพาณิชย์นิยมสร้างแบบเซลล์ซ้อน (Double-Junction) เช่น Tandem a-Si:H/a-Si:H ที่สร้างโดยบริษัทบางกอกโซลาร์จะมีโครงสร้างเซลล์ที่ประกอบไปด้วยชั้นฟิล์ม p_1a-SiC/i_1a-Si:H/n_1a-Si:H/p_2a-SiC/i_2a-Si:H/n_2a-Si:H ที่สร้างบนฐานรองกระจกเคลือบทินออกไซด์ (SnO_2) ขนาดความหนาของชั้นฟิล์มต่างๆ โดยประมาณแสดงดังรูปที่ 1 โดยเซลล์ pin_{Top} จะทำหน้าที่ "Low-Pass" Optical Filter ตอบสนองต่อแสงช่วงคลื่นสั้นประมาณ 350-650 nm และเซลล์ pin_{Bottom} ทำหน้าที่ "High-Pass" Optical Filter ตอบสนองต่อแสงช่วงคลื่นยาวประมาณ 600-900 nm จึงทำให้เซลล์แบบ Tandem มีช่วงการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงที่กว้างมากและสามารถดูดกลืนพลังงานแสงจากดวงอาทิตย์ได้สูงสุด



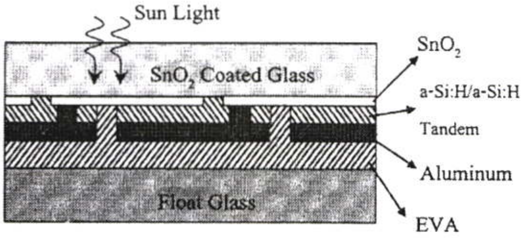
รูปที่ 1 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ Tandem a-Si:H/a-Si:H

เซลล์แสงอาทิตย์ Tandem a-Si:H/a-Si:H จะมีชั้นผลิตพาหะ Intrinsic i(a-Si:H) ทำหน้าที่ผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยแสง สำหรับชั้น i_{Top}(a-Si:H) จะมีความหนาประมาณ 1000 °A ส่วนชั้น i_{Bottom}(a-Si:H) จะมีความหนาที่มากกว่าประมาณ 4 เท่าหรือ 4000 °A ทำให้เซลล์ pin_{Top} และเซลล์ pin_{Bottom} ที่ใช้ชั้นผลิตพาหะแบบ i(a-Si:H) เช่นเดียวกันนั้นสามารถตอบสนองต่อช่วงความยาวคลื่นแสงที่แตกต่างกัน

โฟตอนของแสงที่ตกกระทบเซลล์เมื่อมีพลังงานสูงกว่าช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ($h\nu > Eg$) จะทำให้มีการดูดกลืนโฟตอนในสารกึ่งตัวนำและเกิดคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮลขึ้น จากนั้นสนามไฟฟ้าที่บริเวณชั้น Intrinsic (p-i, n-i Junction) จะพัดพาอิเล็กตรอนไปยังชั้น n และโฮลไปยังชั้น p และที่รอยต่อของเซลล์บน-ล่าง (n-p junction) เป็นเสมือน Ohmic Contact ทำให้เซลล์ทั้งสองอนุกรมกัน เมื่อต่อโหลดความต้านทานเข้ากับแผงเซลล์เทนเดมอะมอร์ฟัสซิลิคอน กระแสไฟฟ้าจะไหลออกจากขั้วด้าน p หรือชั้นตัวนำโปร่งแสง SnO_2 ผ่านโหลดไปเข้ายังขั้วด้าน n หรือชั้น Aluminum เกิดสภาวะครบวงจรไฟฟ้า

3. กระบวนการสร้างแผงเซลล์แสงอาทิตย์

การสร้างแผงเซลล์แสงอาทิตย์ Tandem a-Si:H/a-Si:H สำหรับการทดลองครั้งนี้ใช้กระบวนการสร้างเชิงปริมาณแบบ EPV Batch Process [1] ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้ ขั้นที่ 1 การเตรียมฐานรองโดย Float Glass และ SnO_2 Coated Glass จะถูกนำไปขัดลบคมและล้างทำความสะอาด ขั้นที่ 2 การทำ Laser-Scribe SnO_2 เพื่อสร้างแนวลวดลาย (Patterning) ของชั้น SnO_2 ขั้นที่ 3 การสร้างชั้นฟิล์ม p-i-n/p-i-n a-Si:H Deposition บน SnO_2 Coated Glass จำนวน 48 แผ่นด้วยวิธี RF-PECVD 13.56 MHz ขั้นที่ 4 การทำ Laser-Scribe a-Si:H เพื่อสร้างแนวลวดลายของชั้น a-Si:H ขั้นที่ 5 การ Sputtering ZnO/Al เพื่อสร้างชั้นตัวนำด้านหลังเซลล์ ขั้นที่ 6 การทำ Laser-Scribe เพื่อสร้างแนวลวดลายของชั้น ZnO/Al ขั้นที่ 7 การทดสอบคุณสมบัติ I-V โดยนำเซลล์ไปวัดค่าด้วย Solar Simulator ขั้นที่ 8 การอบความร้อนแผงเซลล์ (Annealing) ขั้นที่ 9 การต่อขั้วเซลล์กับแถบตัวนำ Aluminum Foil ขั้นที่ 10 การผนึกแผงเซลล์ (Encapsulation) และต่อขั้วสายไฟเพื่อการใช้งาน ขั้นที่ 11 การวัดประสิทธิภาพแผงเซลล์ (Module Test) ในขั้นสุดท้ายนี้แผงเซลล์จะถูกนำไปวัดเพื่อบันทึกค่า I_{SC}, V_{OC}, %FF และ Power โดยภาพตัดขวางโครงสร้างแผงเซลล์แสงอาทิตย์ Tandem a-Si:H/a-Si:H ที่ผ่านกระบวนการผลิตแสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ภาพตัดขวางโครงสร้างแผงเซลล์ Tandem a-Si:H/a-Si:H ที่ผ่านกระบวนการผลิตแบบ EPV Batch Process

4. การทดลองและผลการทดลอง

จากการหาค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์ประสิทธิภาพต่างๆ ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดพื้นที่ 64×124 cm. (0.79 m^2) ในการผลิตปกติ (Normal Run) BSC 0140H, 0143H และ 0157H จะได้ค่าพารามิเตอร์เฉลี่ยคือ V_{OC} = 62.1 V, I_{SC} = 1.198 A, FF = 65.9% และPower = 49 W เมื่อคิดเป็น %efficiency (η) จะมีค่าประมาณ 6.47% ซึ่งถือว่ายังไม่สูงนักหากเทียบกับผู้ผลิตรายอื่นๆ เช่น Uni-Solar และ Kaneka ที่มีค่าประสิทธิภาพถึงประมาณ 7-9% [2]

จากที่ศึกษากระบวนการสร้างเซลล์พบว่า ขีดจำกัดบางอย่างมีแนวทางที่จะพัฒนาให้ดีขึ้นได้ทั้งในด้านประสิทธิภาพเซลล์เริ่มต้นและเสถียรภาพเซลล์ อีกทั้งในด้านของกระบวนการสร้างให้มีระยะเวลาที่สั้นลง ฉะนั้นจึงได้มีการพัฒนาปรับปรุงกระบวนการสร้างใหม่ดังต่อไปนี้

4.1 การพัฒนาประสิทธิภาพ (Initial Modules)

4.1.1 การเพิ่ม H_2 Dilution ในชั้น i_{Top}(a-Si:H)

ปริมาณอะตอมไฮโดรเจนที่สูงขึ้นในระหว่างการจับตัวโครงสร้างของชั้นฟิล์มบาง i_{Top}(a-Si:H) จะมีผลทำให้ความบกพร่องของพันธะอะตอม (Dangling Bond) ลดน้อยลงและช่องว่างพลังงาน (Eg) จะกว้างขึ้น ซึ่งจะสามารถทำให้พารามิเตอร์ V_{OC} ของเซลล์แสงอาทิตย์สูงขึ้นได้

ตารางที่ 1 อัตราส่วน H_2/SiH_4 Dilution ในการสร้างชั้น i_{Top}(a-Si:H) ต่อพารามิเตอร์ประสิทธิภาพของแผงเซลล์

Experiment No.	V_{OC} (V)	I_{SC} (A)	%FF	P_M (W)
(Exp 14) H_2/SiH_4 Dilution = 20	63	0.7	59.6	25.7
(Exp 21) H_2/SiH_4 Dilution = 10	64	1.187	66.5	49.6
(Normal Run) H_2/SiH_4 = 0.73 (BSC 0140H, 0143H, 0157H)	62.1	1.198	65.9	49

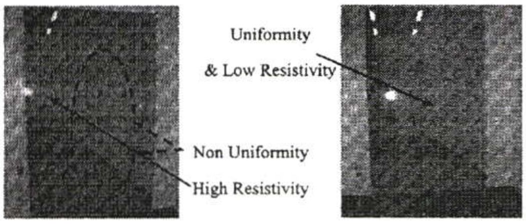
H_2/SiH_4 = 0.73 ในเซลล์ปกติ (Normal Run) ทำให้ค่าเฉลี่ย V_{OC} = 62.1 V ดังตารางที่ 1 แต่เมื่อเพิ่ม H_2/SiH_4 ในการสร้างชั้น i_{Top}(a-Si:H) ให้สูงขึ้นเป็น 10 เท่า พบว่าค่า V_{OC} ของเซลล์ Exp 21 จะเพิ่มขึ้นเป็น 64 V แต่หากเพิ่มค่า H_2/SiH_4 เป็น 20 เท่าแล้วจะทำให้ Optical Absorption ของชั้นฟิล์มลดลงมากจนทำให้ค่า I_{SC} ของเซลล์ Exp 14 มีค่าเพียง 0.7 A และค่ากำลังงานของเซลล์มีค่าเพียง 25.7 W

4.1.2 การใช้ชั้น n(μc-Si:H) แทน n(a-Si:H)

ชั้น n(μc-Si:H) มีคุณสมบัติของความต้านทานที่ต่ำจึงให้ผิวสัมผัสกับชั้นฟิล์มอื่นๆ (Interface) ได้ดีกว่าชั้นฟิล์ม

n(a-Si:H) ซึ่งผลความต้านทานที่ต่ำลงของรอยต่อ n_{Top}(μc-Si:H)/p_{Bottom}(a:SiC) ทำให้สามารถสร้างชั้น p(a:SiC) ที่มี Eg กว้างขึ้นได้ด้วยการเติมก๊าซมีเทน (CH_4) ให้มากขึ้น ซึ่งความต้านทานที่สูงขึ้นของ p(a:SiC) นี้จะถูกชดเชยด้วยชั้น n(μc-Si:H) นอกจากนั้นด้วยความโปร่งแสงของชั้นฟิล์มแบบ n(μc-Si:H) แสงจึงสามารถผ่านไปสู่เซลล์ล่างได้มากขึ้น

การหาเงื่อนไขของชั้น n(μc-Si:H) จะอาศัยการปรับอัตราไหลของก๊าซฟอสฟีน (PH_3) พบว่าที่ 0.55 SLPM ความต้านทานของฟิล์ม (Resistivity) จะมีค่าประมาณ 200 kΩ แต่มีความสม่ำเสมอ (Uniformity) ที่ไม่ดีนักเพราะบางบริเวณจะมี Resistivity ที่สูงมากดังรูปที่ 3 (1) จึงลองปรับความดันลง พบว่าที่ 1000 mTorr ชั้นฟิล์มจะมี Uniformity ที่ดีและมี Resistivity ต่ำประมาณ 40 kΩ ดังรูปที่ 3 (2)



รูปที่ 3 ฟิล์ม n(μc-Si:H) ที่สร้างจากความดันต่างๆ (1) 1900 mTorr ฟิล์มที่ได้ไม่สม่ำเสมอเพราะบางบริเวณมี Resistivity สูง (2) 1000 mTorr ฟิล์มที่ได้สม่ำเสมอและมี Resistivity ต่ำ

จากการนำชั้นฟิล์ม n(μc-Si:H) ไปประยุกต์ใช้งานกับเซลล์ (Exp 17) จะพบว่าในช่วงเริ่มต้นของการสร้างชั้น n(μc-Si:H) บนชั้น i(a-Si:H) มักเกิดชั้น n(a-Si:H) บางๆ ขึ้นก่อน ซึ่งจะทำให้ชั้น n ที่ได้ไม่เป็นผลึกที่สมบูรณ์ แต่หากสร้างชั้นผลึกบางๆ (Seed Layer) ขึ้นก่อนบนชั้น i(a-Si:H) โดยใช้อัตราส่วนของ H_2/SiH_4 ที่สูงถึงประมาณ 140 เท่า ร่วมกับใช้ H_2 Dilution ใน i_{Top}(a-Si:H) จะทำให้ชั้น n(μc-Si:H) ของเซลล์ (Exp 60) เป็นผลึกที่สมบูรณ์และทำให้ค่า Power เพิ่มขึ้นเป็น 50.1 W ดังข้อมูลในตารางที่ 2 ซึ่งสูงกว่าเซลล์ปกติ (Normal Run=49 W) ที่ใช้ชั้นฟิล์มแบบ n(a-Si:H)

ตารางที่ 2 เงื่อนไข n(μc-Si:H) ต่อค่าพารามิเตอร์ของเซลล์

Experiment No.	V_{OC} (V)	I_{SC} (A)	%FF	P_M (W)
(Exp 17) i_1(a-Si:H)/n_1(μc-Si:H)	58.8	1.204	60.8	43.1
(Exp 60) H_2 Dilution i_1(a-Si:H) /n_{11} (Seed-layer)/n_{12}(μc-Si:H)	65.3	1.117	68.3	50.1
(Exp 60-3) i(a-Si:H)+100 Sec, P_2 CH_4 0.5 to 0.7 SLPM	65.5	1.170	71.4	54.7
(Normal Run) (Average of BSC 0140H, 0143H and 0157H)	62.1	1.198	65.9	49.0

สำหรับเซลล์ (Exp 60-3) ยังได้มีการปรับเงื่อนไขการสร้างอื่นๆ อีกด้วย คือเพิ่มเวลาอีก 100 วินาทีเพื่อให้ชั้น i(a-Si:H) หนาขึ้น และเพิ่ม CH_4 Flow Rate เป็น 0.7 SLPM เพื่อให้ Eg ชั้น p_2(a-SiC) กว้างขึ้น ซึ่งทำให้ค่า Power สูงขึ้นเป็น 54.7 W โดยอาศัยระบบสร้างเดิมซึ่งมีความถี่ต่ำ(13.56 MHz) และมีขีดจำกัดในการสร้างชั้นฟิล์มแบบ μc-Si:H

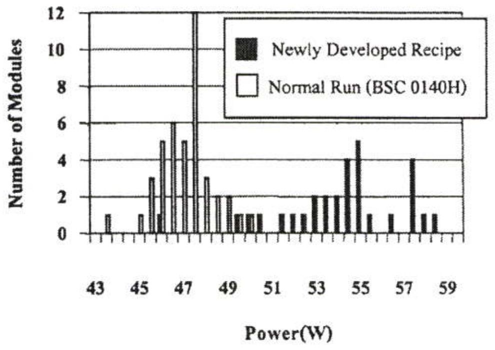
4.1.3 การเพิ่มชั้นซิงค์ออกไซด์ (ZnO)

ในเงื่อนไขการสร้างเซลล์ปกติ (Exp 111) จะมีเพียงการ Sputtering ชั้น Al เท่านั้น จึงได้ทำการติดตั้ง ZnO Target เพิ่มและสร้างชั้น ZnO ณ อุณหภูมิห้อง (25 °C) เพิ่มขึ้นในโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ (Exp 111-1) พบว่าเงื่อนไขการสร้างชั้น ZnO ที่ดีที่สุดคือ 3700 W. 2 รอบ ซึ่งจะทำให้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เพิ่มสูงขึ้นดังข้อมูลในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 เงื่อนไข ZnO และค่าพารามิเตอร์ของเซลล์

Experiment No.	V_{OC} (V)	I_{SC} (A)	%FF	P_M (W)
(Exp 101) ZnO 1×5200 W.	64.3	1.236	68.6	54.5
(Exp 111-1) ZnO 2×3700 W.	65.7	1.254	70.3	57.9
(Exp 111) without ZnO	65.2	1.172	69.3	53.4

จากการเก็บสถิติค่า Power ของแผงเซลล์ที่มีการพัฒนาเงื่อนไขโดยเพิ่ม H_2 Dilution i(a-Si:H), การใช้ชั้น n(μc-Si:H) และการเพิ่มชั้นตัวนำ ZnO เมื่อเทียบกับเงื่อนไขการสร้างปกติ (BSC 0140H) จะเป็นดังกราฟรูปที่ 4

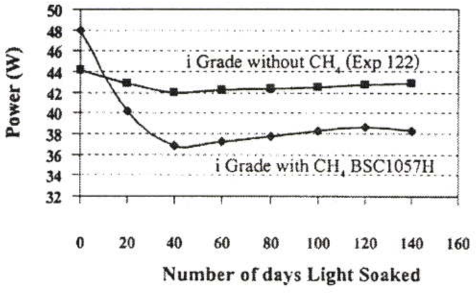


รูปที่ 4 กราฟเปรียบเทียบกำลังงานแผงเซลล์ระหว่างเงื่อนไขที่พัฒนาขึ้นใหม่กับเงื่อนไขการสร้างปกติ (BSC 0140H)

4.2 การพัฒนาเสถียรภาพ (Stable Modules)

4.2.1 การไม่เติม CH_4 ในช่วง i Interface Grading

จากการศึกษาแผงเซลล์หลังการใช้งานพบว่าค่า Power จะมีการลดต่ำลง (Degradation) ซึ่งผลส่วนหนึ่งเกิดจากการตกค้างของอะตอมคาร์บอนที่ประกอบอยู่ในก๊าซ CH_4 ระหว่างรอยต่อ p_1-i_1 และ p_2- i_2 ซึ่งก๊าซ CH_4 จะถูกเติมทั้งในช่วง i_1 และ i_2 ของ i Interface Grading ในเซลล์ (BSC 1057H) เพื่อให้เซลล์มีค่า Power สูง แต่จะมีค่าสูงเฉพาะตอนเริ่มต้นเพราะหลังการใช้งานกับแสงอาทิตย์ประมาณ 140 วัน ค่า Power จะมีการลดลง ดังกราฟรูปที่ 5



รูปที่ 5 การลดค่า Power ในช่วง 140 วันของเซลล์ที่เติม CH_4 ใน i Grade (BSC 1057H) และที่ไม่เติม CH_4 (Exp 122)

ผลการสร้างเซลล์ (BSC1057H) ที่เติมก๊าซ CH_4 จะทำให้พารามิเตอร์ต่างๆ ในตอนเริ่มต้น (Initial) สูงกว่าเซลล์ (Exp 122) แต่หลังจากนำเซลล์ไปใช้งานประมาณ 140 วัน ค่า I_{SC}, %FF และ Power ของเซลล์ (Exp 122) ที่ไม่เติมก๊าซ CH_4 จะสูงกว่าเซลล์ (BSC1057H) ดังข้อมูลในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 พารามิเตอร์ของเซลล์ (BSC 1057H) ที่เติม CH_4 ใน i_1 และ i_2 Grade กับ (Exp 122) ที่ไม่เติม CH_4 ทั้งก่อนการใช้งาน (Ini) และหลังการใช้งาน (Af.LS) ประมาณ 140 วัน

Experiment	V_{OC}(V)			I_{SC}(A)		
No.	Ini	Af.LS	%	Int	Af.L.S	%
(BSC1057H)	63.9	62.5	-2.2	1.19	1.14	-4.5
(Exp 122)	61.7	59.9	-2.9	1.19	1.21	+1.6

Experiment	FF(%)			Power(W)		
No.	Ini	Af.LS	%	Int	Af.L.S	%
(BSC1057H)	63.2	54.1	-14.4	48	38.2	-20.4
(Exp 122)	60.1	59.4	-1.2	44.1	42.98	-2.5

4.2.2 การลดความหนาชั้น i_{Bottom}(a-Si:H)

ชั้น i_{Bottom}(a-Si:H) ในเซลล์ล่างมีความหนามากกว่าชั้นฟิล์มอื่นๆ เพื่อให้แสงที่ผ่านลงมาถูกดูดกลืนไว้ทั้งหมด ซึ่งการเสื่อมสภาพทางโครงสร้างของชั้นอะมอร์ฟัส i_{Bottom} จะกระทบต่อประสิทธิภาพรวมของเซลล์อยู่มากพอสมควร ฉะนั้นหากมีการลดความหนาของชั้น i_{Bottom} ลงบ้าง แต่ไม่บางจนชั้นผลิตพาหะแคบเกินไปจนทำให้ค่า I_{SC} ของเซลล์ต่ำลงไปมากจนเกินความสามารถการชดเชยกระแสจากชั้นตัวนำ ZnO/Al แล้วจะทำให้แผงเซลล์สามารถให้ค่ากำลังงานที่สูงทั้งในตอนเริ่มต้นและภายหลังการใช้งาน

ตารางที่ 5 ค่า SiH_4 Flow Rate ในชั้น i_2 ต่อค่ากำลังงานของเซลล์ทั้งก่อนและหลังการใช้งานประมาณ 1 เดือน

Experiment No.	SiH_4 Flow in i_2(SLPM)	Power(W)		%Degrade
		Initial	Af.L.S.	
(BSC0707)	1.5	55.0	46.0	-16.3
(Exp 161)	1.275	55.1	47.2	-13.6
(Exp 163)	1.1	54.8	48.2	-12.0

การลดความหนาชั้น i(a-Si:H) จะใช้วิธีลด SiH_4 Flow Rate ดังตารางที่ 5 จะเห็นได้ว่า Initial Power ของเซลล์จะมีค่าลดลงเพียงเล็กน้อยตามการลดลงของ SiH_4 แต่หลังจากนำเซลล์ไปใช้งานประมาณ 1 เดือน จะพบว่าการลดประสิทธิภาพของเซลล์ (Exp 163) จะมีค่าเพียง -12% จากการใช้ SiH_4 Flow Rate ที่ 1.1 SLPM ในชั้น i_{Bottom}(a-Si:H)

4.3 การลดเวลาสร้างเซลล์แสงอาทิตย์

วิธีลดการปนเปื้อนสารโบรอนในชั้น i

ระบบ EPV Batch Process แม้จะมีต้นทุนต่ำแต่การตกค้างสารเจือก็เป็นปัญหาใหญ่ที่ทำให้ประสิทธิภาพเซลล์ต่ำและต้องสูญเสียระยะเวลาในการกำจัด โดยเฉพาะสารโบรอน $B(CH_3)_3$ ที่ตกค้างอยู่หลังการสร้างชั้น p ซึ่งจะเข้าไปปนเปื้อนที่ p/i Interface และทำให้ศักย์เฟอร์มิของชั้น i ไม่เป็นไปตามที่ต้องการ โดยปกติวิธีลดการปนเปื้อนจะใช้การผ่านอาร์กอน (Ar) และปั๊มสุญญากาศออก ซึ่งจะใช้เวลาถึงประมาณ 1.5 ช.ม. ฉะนั้นจึงทดลองใช้วิธีอื่นๆ ที่มีระยะเวลาสั้นลงเช่น Alcohol, NH_3 หรือ H_2O Flush เพื่อดึงเอาโบรอนที่ตกค้างอยู่ออกจากกระบวนการสร้าง [3] ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบวิธีลดการปนเปื้อนสารโบรอน ในชั้น i_1 และ i_2 ต่อค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

Treatment Recipe	Time	V_{OC}	I_{SC}	%FF	Power
Ar+High Vacuum	1.5 Hrs.	65.6	1.11	70.3	51.3
Alcohol Flush	10 min.	65.5	1.16	66.3	50.5
NH_3 Flush	1 min.	64.6	1.05	65.8	44.7
H_2O Flush (90°C)	10 min.	64.4	1.03	54.3	36.0

ผลการสร้างเซลล์ที่ใช้วิธีผ่านไอระเหยของแอลกอฮอล์ (Alcohol Flush) เพียง 10 นาทีหลังการสร้างชั้น p_1 และ p_2 จะสามารถให้ค่า Power ที่สูงถึง 50.5 W ซึ่งใกล้เคียงกับวิธีปกติ (Ar+High Vacuum) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้นอกจากจะเป็นการพัดพา $B(CH_3)_3$ ที่ตกค้างอยู่ออกไปแล้ว B-Oxide หรือ Boric-Acid ที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวยังช่วยจำกัด B-Atom มิให้ปนเปื้อนเข้าสู่ชั้น i [4] โดยสามารถทำให้เวลาการสร้างเซลล์ลดลงไปได้ประมาณ 40% ซึ่งจะเหมาะกับการนำไปประยุกต์ใช้ในการผลิตแผงเซลล์เชิงพาณิชย์ต่อไป

5. สรุป

จากการทดลองจะเห็นได้ว่าแผงเซลล์แสงอาทิตย์ Tandem a-Si:H/a-Si:H มีค่ากำลังงานที่สูงขึ้นได้จากการใช้อัตราส่วน H_2/SiH_4 Dilution ประมาณ 10 เท่าในชั้น i_{Top}(a-Si:H) ร่วมด้วยการใช้ชั้นผลึกฟิล์มบาง n_{Bottom}(μc-Si:H) ร่วมกับการเพิ่มชั้นตัวนำโปร่งแสง ZnO ที่ด้านหลังเซลล์ก็จะสามารถทำให้เซลล์มีค่า Initial Power เป็น 57.9 W คิดเป็นค่า %efficiency ประมาณ 7.64% ส่วนในด้านเสถียรภาพของเซลล์นั้นการไม่เติมก๊าซ CH_4 ในช่วง Grade ของ i_1 และ i_2 ร่วมกับการลดความหนาของชั้น i_{Bottom}(a-Si:H) ก็ช่วยให้การเสื่อมประสิทธิภาพเซลล์ภายหลังการใช้งาน (Degradation) ลดน้อยลง และเพื่อให้การสร้างเซลล์มีความรวดเร็วขึ้นซึ่งเหมาะกับการผลิตในเชิงพาณิชย์ การใช้วิธี Alcohol Flush ภายหลังการสร้างชั้น p_1 และ p_2 เพื่อลดการตกค้างสารโบรอนในแชมเบอร์เดี่ยวจะทำให้เวลาการสร้างเซลล์ (Deposition Time) สามารถลดลงไปได้ประมาณ 40%

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะนักวิจัย (ISET) สวทช. ที่ให้คำปรึกษาในการทำวิจัยอย่างดียิ่งมาโดยตลอด ขอบคุณบริษัทบางกอกโซลาร์ จำกัด ที่ให้ความเอื้อเฟื้อเครื่องจักรและวัสดุอุปกรณ์ในการสร้างแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และงานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนจากสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (TGIST)

7. เอกสารอ้างอิง

[1] J.A. Anna Selvan, Yuan-Min Li, Alan E. Delahoy, L. Chen, H. Volltrauer, T. Varvar, D. Jackson, N.B. Urli, R. Lyndall and Z. Kiss, Proceeding of the 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Osaka, May 2003.

[2] Yamamoto K, Yoshimi M, Suzuki T, Nakata T, Swada T, Nakajima A, Hayashi K, Conference Record of the 28th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 1428–1432 (2000).

[3] U. Kroll, C. Bucher, S Benagli, I. Schonbachler, J. Meier, A. Shah, J. Ballutaud, A. Howling, Ch. Hollenstein, A. Buchel, M. Poppeller, Thin Solid Films 451-452 (2004) p525-530.

[4] J.Ballutaud, C.Bucher, Ch. Hollenstein, A.A.Howling "Reduction of the boron cross-contamination for plasma deposition of p-i-n devices in a single-chamber large area radio-frequency reactor.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายศรัณย์ สาตารมณ์
วัน เดือน ปีเกิด	16 สิงหาคม พ.ศ. 2519
ที่อยู่	99/27 หมู่ 2 ตำบลเสม็ด อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี 20000
ประวัติการศึกษา	อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ ภาควิชาเทคนิคอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2543
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1) การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน 2) กระบวนการผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์เชิงปริมาณ