

การศึกษาคุณสมบัติของอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียม  
และการประยุกต์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์



นาย ตุลา จุฑะรสก

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

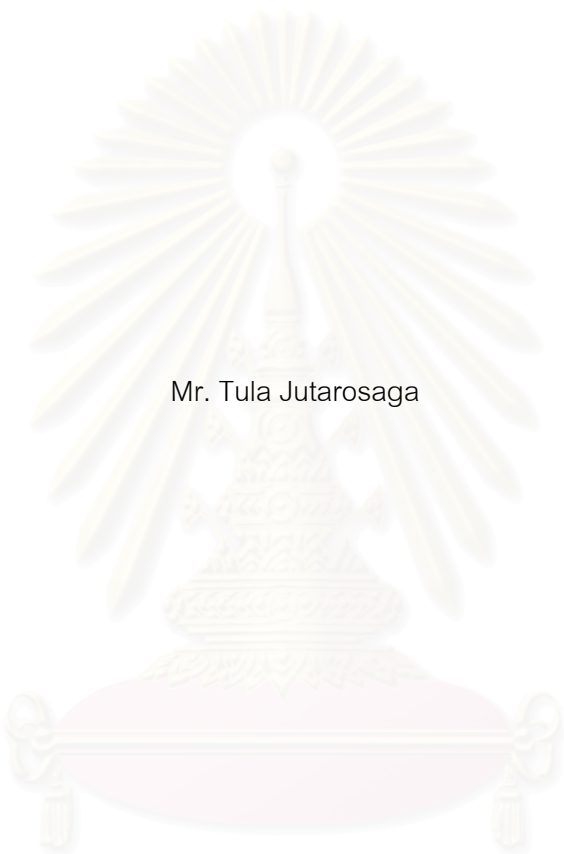
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2543

ISBN 974-13-0784-5

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A STUDY ON PROPERTIES OF AMORPHOUS SILICON GERMANIUM  
AND ITS APPLICATION TO SOLAR CELLS



Mr. Tula Jutarosaga

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2000

ISBN 974-13-0784-5

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาคุณสมบัติของอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียม และการประยุกต์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์
โดย	นายตุลา จุฑะรสก
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.ดุสิต เครืองาม
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์ ดร.พพนธ์ สีขณนุกฤษฏ์

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ดุสิต เครืองาม)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(ดร.พพนธ์ สีขณนุกฤษฏ์)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.มนตรี สวัสดิ์ศฤงฆาร)

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

ตุลา จุฑะรสก: การศึกษาคุณสมบัติของอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียมและการประยุกต์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ (A STUDY ON PROPERTIES OF AMORPHOUS SILICON GERMANIUM AND ITS APPLICATION TO SOLAR CELLS) อ.ที่ปรึกษา : รศ. ดร.ดุสิต เครื่องาม, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ดร.พพนธ์ สีชฌนุกฤษฏ์, 73 หน้า, ISBN 974-13-0784-5

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ รายงานผลการศึกษาการปลูกฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียม (a-SiGe:H) ด้วยวิธีการแยกสลายก๊าซด้วยประจุเรืองแสงโดยใช้ก๊าซผสมของ  $\text{SiH}_4$ ,  $\text{GeH}_4$  และ  $\text{H}_2$  ได้มีการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการปลูกฟิล์มและคุณสมบัติพื้นฐานของ a-SiGe:H พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการผลิตของก๊าซ  $\text{GeH}_4/(\text{SiH}_4 + \text{GeH}_4)$  จาก 0.17 ถึง 0.83 จะทำให้ช่องว่างพลังงานของ a-SiGe:H มีค่าลดลงจาก 1.59 eV เป็น 1.14 eV

ในงานวิจัย ได้ประสบความสำเร็จในการปรับปรุงค่าสภาพนำไฟฟ้าด้วยแสงของ a-SiGe:H ที่มีช่องว่างพลังงานแคบประมาณ 1.5-1.6 eV ด้วยการผสมก๊าซ  $\text{H}_2$  ปริมาณมากๆ ในขณะกำลังปลูกฟิล์ม และใช้อุณหภูมิแผ่นฐานประมาณ 250 °C ค่าอัตราส่วนของสภาพนำไฟฟ้าด้วยแสงต่อสภาพนำไฟฟ้ามีค่าประมาณสูงถึงระดับ  $10^3$ - $10^4$

ได้มีการประยุกต์ฟิล์มบาง a-SiGe:H เป็นชั้นผลิตพาหะในเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อ p-i-n ผลการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ได้แรงดันไฟฟ้าวงจรมืด 0.6 V กระแสไฟฟ้าลัดวงจร 25.8  $\text{mA/cm}^2$  ฟิลล์แพกเตอร์ 36% และประสิทธิภาพ 5.6%

นอกจากนี้ได้ทดลองประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์แบบ double-junction ซึ่งประกอบด้วยรอยต่อ p-i-n ซ้อนกัน 2 ชั้น โดยที่ชั้น i ชั้นแรกคือ a-Si:H และชั้น i ชั้นที่สองคือ a-SiGe:H ได้ค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรมืด 1.25 V กระแสไฟฟ้าลัดวงจร 12.7  $\text{mA/cm}^2$  ฟิลล์แพกเตอร์ 39% และประสิทธิภาพ 6.1% และสเปกตรัมตอบสนองต่อแสงมีความกว้างกว่ากรณีเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H

ภาควิชา .....วิศวกรรมไฟฟ้า.....

สาขาวิชา .....วิศวกรรมไฟฟ้า.....

ปีการศึกษา .....2543.....

ลายมือชื่อนิสิต .....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

## 4270333821 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD : AMORPHOUS SILICON GERMANIUM/ SOLAR CELL/ GLOW DISCHARGE PLASMA CVD

TULA JUTAROSAGA : A STUDY ON PROPERTIES OF AMORPHOUS SILICON GERMANIUM AND ITS APPLICATION TO SOLAR CELLS. THESIS ADVISOR : ASSOCIATE PROF. DUSIT KRUANGAM, Dr. Eng., COADVISOR : DR.PORPONTH SICHANUGRIST, Ph.D. Eng., 73 pp., ISBN 974-13-0784-5

The thesis reports the study on the growth of hydrogenated amorphous silicon germanium thin film (a-SiGe:H) by the glow discharge plasma CVD method using the gas mixture of SiH<sub>4</sub>, GeH<sub>4</sub> and H<sub>2</sub>. It has been found that the optical energy gap of a-SiGe:H decreases from 1.59 eV to 1.14 eV when the gas flow rate ratio of GeH<sub>4</sub>/(SiH<sub>4</sub>+GeH<sub>4</sub>) is increased from 0.17 to 0.83

It has been found that the photoconductivity of a-SiGe:H having the optical energy gap of 1.5 – 1.6 eV could be improved by adding a large amount of H<sub>2</sub> gas flow during the deposition of the films and using the substrate temperature of about 250 °C. The resulting ratio of photoconductivity and dark-conductivity is as high as 10<sup>3</sup>-10<sup>4</sup>.

The optimized a-SiGe:H have been applied to the active layer in the p-i-n junction solar cell. The open circuit voltage, short circuit current, fill factor and conversion efficiency obtained were 0.6 V, 25.8 mA/cm<sup>2</sup>, 36% and 5.6%, respectively.

The double-junction solar cells consisting of an a-Si:H solar cell and a-SiGe:H solar cell have also been fabricated. The open circuit voltage, short circuit current, fill factor and conversion efficiency obtained were 1.25V, 12.7mA/cm<sup>2</sup>, 39% and 6.1%, respectively. The spectral response of the double-junction solar cell was broader than that of a conventional a-Si:H solar cell.

Department Electrical Engineering Student's signature.....

Field of Study Electrical Engineering Advisor's signature.....

Academic Year 2000 Co-advisor's signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีจากความกรุณาของ รศ. ดร.ดุสิต เครืองาม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ดร.พอพนธ์ สิขณนุกฤษฎ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำแนะนำที่มีค่าอย่างยิ่งอย่างต่อเนื่องมาตลอด

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ซึ่งได้แก่ ศ. ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว รศ. ดร.มนตรี สวัสดิ์ศฤงฆาร รศ. ดร.กรกฎ วัฒนวิเชียร รศ. ดร.ดุสิต เครืองาม และ ดร.พอพนธ์ สิขณนุกฤษฎ์ ที่ให้คำแนะนำที่มีค่าอย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณอาจารย์ประจำห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งได้แก่ แก่ ศ. ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว รศ. ดร.มนตรี สวัสดิ์ศฤงฆาร รศ. ดร.ดุสิต เครืองาม รศ. ดร.บรรยง โตประเสริฐพงศ์ รศ. ดร.ชุมพล อันตรเสน และ ผศ. ดร.สมชัย รัตนธรรมพันธ์ ที่ให้คำแนะนำที่มีประโยชน์ต่างๆ ต่อการทำวิจัย

ผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณบัณฑิตา รัฐวิเศษ คุณศุภโชค ไทยน้อย และ คุณขวัญเรือน ไทยน้อย ที่ให้ความช่วยเหลือด้านเทคนิคต่างๆ และขอขอบคุณคุณณพนทิพย์ วงศ์วรรณ รุ่นพี่ปริญญาโท คุณสุนทร ชาวหนองหิน ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ และขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้ความร่วมมือในการวัด Electron Spin Resonance (ESR) และสเปกตรัมการทะลุผ่านแสงอินฟราเรด

ขอขอบคุณโครงการทุนการศึกษาของสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (TGIST) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ที่ให้ทุนการศึกษาปริญญาโทตลอด 2 ปี แก่ผู้วิจัย

ท้ายสุดนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา ที่ให้กำลังใจในการศึกษาวิจัยตลอดมา คุณประโยชน์อันจะเกิดจากผลงานวิจัยในครั้งนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นเครื่องบูชาพระคุณ บูรพาจารย์ ตลอดจนคุณบิดามารดา ที่ได้มีส่วนช่วยวางรากฐานการศึกษาแก่ผู้วิจัย

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ .....	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฒ

## บทที่

1. พื้นฐานและที่มาของหัวข้อวิทยานิพนธ์ .....	1
1.1 บทนำ .....	1
1.1.1 คุณสมบัติเด่นของวัสดุอะมอร์ฟัส.....	1
1.2 ความสำคัญและที่มาของหัวข้อวิทยานิพนธ์ .....	2
1.3 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ .....	4
1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	4
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ .....	4
2. การปลูกฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียม .....	6
2.1 บทนำ.....	6
2.2 โครงสร้างระบบ glow discharge plasma CVD.....	6
2.3 ขั้นตอนการปลูกฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียม .....	9
2.3.1 การเตรียมแผ่นฐาน .....	9
2.3.2 การปลูกฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียม .....	10
2.4 สรุป.....	12
3. การศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียม .....	13
3.1 บทนำ.....	13



## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3.2 การวัดคุณสมบัติพื้นฐานของ a-SiGe:H.....	13
3.2.1 การศึกษาคุณสมบัติทางโครงสร้างของ a-SiGe:H .....	13
3.2.1.1 การวัดการทะลุผ่านแสงอินฟราเรดของ a-SiGe:H .....	13
3.2.1.2 การวัดจำนวน Spin Density ด้วยวิธี Electron Spin Resonance.....	14
3.2.2 การศึกษาคุณสมบัติทางแสงของ a-SiGe:H.....	15
3.2.2.1 การวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงในย่านพลังงานโฟตอนสูงกว่า ช่องว่างพลังงาน.....	15
3.2.3 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ a-SiGe:H .....	17
3.2.3.1 การวัดสภาพนำไฟฟ้าของ a-SiGe:H.....	17
3.3 ผลการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของ a-SiGe:H.....	17
3.4 ผลการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนการไหลของก๊าซไฮโดรเจนที่มีต่อคุณสมบัติของ a-SiGe:H.....	22
3.5 ผลการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิแผ่นฐานที่มีต่อ a-SiGe:H.....	26
3.6 ผลการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนการไหลของก๊าซไฮโดรเจนที่มีต่อคุณสมบัติของ a-SiGe:H.....	28
3.7 สรุป.....	33
4. การประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียม.....	35
4.1 บทนำ.....	35
4.2 การประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-SiGe:H แบบเซลล์เดี่ยว .....	35
4.3 การวัดลักษณะสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ .....	39
4.4 ผลการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-SiGe:H แบบเซลล์เดี่ยว.....	40
4.5 สรุป.....	45
5. การประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสโครงสร้างพิเศษ .....	46
5.1 บทนำ.....	46



สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
5.2 การประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ที่ชั้นผลิตพาหะมีลักษณะช่องว่างพลังงานเป็นรูปอักษร U.....	46
5.3 การประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นผลิตพาหะมีลักษณะช่องว่างพลังงานเป็น step function .....	51
5.4 สรุป.....	58
6. การประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟิซิลิคอนโครงสร้าง tandem.....	59
6.1 บทนำ.....	59
6.2 การประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีโครงสร้างแบบ Double-Junctions .....	59
6.3 สรุป.....	65
7. สรุป.....	66
รายการอ้างอิง.....	68
การเผยแพร่ผลงานวิจัย.....	70
ภาคผนวก.....	72
ประวัติผู้วิจัย .....	73

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	แผ่นฐานสำหรับใช้ในการปลูกฟิล์มบาง a-SiGe:H ..... 9
2.2	เงื่อนไขการปลูกฟิล์ม a-SiGe:H ด้วยวิธี glow discharge plasma CVD ..... 10
3.1	เงื่อนไขการปลูกฟิล์ม a-SiGe:H ชนิดบริสุทธิ์ด้วยวิธี glow discharge plasma CVD ..... 17
3.2	เงื่อนไขการปลูกฟิล์ม a-SiGe:H สำหรับศึกษาอิทธิพลของอัตราการใช้ไฮโดรเจน ที่มีต่อคุณสมบัติของ a-SiGe:H..... 22
3.3	เงื่อนไขการปลูกฟิล์ม a-SiGe:H สำหรับศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิแผ่นฐานที่มีต่อ a-SiGe:H ..... 26
3.4	เงื่อนไขการปลูกฟิล์ม a-SiGe:H สำหรับศึกษาอิทธิพลของอัตราการใช้ไฮโดรเจนที่มีต่อ คุณสมบัติของ a-SiGe:H..... 28
3.5	สรุปความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการปลูก a-SiGe:H และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ..... 32
4.1	เงื่อนไขการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-SiGe:H แบบเซลล์เดี่ยว ..... 37
4.2	เงื่อนไขชั้นผลิตพาหะของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-SiGe:H ก่อนการปรับปรุง ..... 40
4.3	เงื่อนไขชั้นผลิตพาหะของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-SiGe:H หลังการปรับปรุง..... 40
5.1	เงื่อนไขการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งช่องว่างพลังงานของชั้นผลิตพาหะมีลักษณะเป็น รูปอักษร U..... 47
5.2	เงื่อนไขการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งชั้นผลิตพาหะมีลักษณะช่องว่างพลังงาน เป็น step function กรณี (a) ..... 52
5.3	เงื่อนไขการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งชั้นผลิตพาหะมีลักษณะช่องว่างพลังงาน เป็น step function กรณี (c) ..... 53
6.1	เงื่อนไขการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง double-junctions ..... 61

## สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
1.1 สเปกตรัมการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ที่ AM1 .....	3
1.2 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์ .....	5
2.1 โครงสร้างของระบบ Glow Discharge Plasma CVD.....	6
2.2 ระบบ Glow Discharge Plasma CVD สำหรับปลูกฟิล์มบาง a-Si:H, a-SiC:H และ a-SiGe:H .....	7
2.3 ภาพถ่ายระบบ Glow Discharge Plasma CVD .....	7
2.4 ขั้นตอนการปลูกฟิล์มบาง a-SiGe:H.....	11
3.1 ตัวอย่างสเปกตรัมการทะลุแสงย่านอินฟราเรดของ a-SiGe:H .....	14
3.2 ตัวอย่างสัญญาณ ESR ของ a-SiGe:H.....	15
3.3 ตัวอย่างสเปกตรัมสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านแสงของ a-SiGe:H.....	16
3.4 ตัวอย่างสเปกตรัมสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง และการกำหนดค่าช่องว่าง ( $E_{opt}$ ) ของ a-SiGe:H.....	16
3.5 สเปกตรัมสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านแสงย่านอินฟราเรดของ a-SiGe:H โดยที่ $GeH_4/(GeH_4+SiH_4) = 0.17 - 0.83$ .....	18
3.6 สเปกตรัมสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของอะตอมชุด Ge-H Stretching ที่ $GeH_4/(GeH_4+SiH_4) = 0.17 - 0.83$ .....	19
3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของสปิน (แขนขาด) กับอัตราส่วนของการไหลของก๊าซ $GeH_4/(GeH_4+SiH_4)$ .....	19
3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างพลังงานกับอัตราส่วนของการไหลของก๊าซ $GeH_4/(GeH_4+SiH_4)$ .....	21
3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้ากับอัตราส่วนการไหลของก๊าซ $GeH_4/(GeH_4+SiH_4)$ .....	21
3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างพลังงานกับอัตราส่วนการไหลของก๊าซ $H_2/(SiH_4+GeH_4)$ .....	23
3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้ากับอัตราส่วนของการไหลของก๊าซ $H_2/(GeH_4+SiH_4)$ ที่อุณหภูมิ 190°C .....	24
3.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้ากับอัตราส่วนของการไหลของก๊าซ $H_2/(GeH_4+SiH_4)$ ที่อุณหภูมิ 250°C .....	25
3.13 ความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างพลังงานของ a-SiGe:H กับค่า $\sigma_{ph}/\sigma_D$ กรณีที่อุณหภูมิ	

## สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
แผ่นฐานเท่ากับ 190°C และ 250°C.....	25
3.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของสปิน (แขนขาด) กับอุณหภูมิแผ่นฐาน .....	26
3.15 ความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างพลังงานกับอุณหภูมิแผ่นฐาน .....	27
3.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้ากับอุณหภูมิแผ่นฐาน .....	27
3.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของสปิน (แขนขาด) กับอัตราการไหลของ ก๊าซไฮเลน $\text{SiH}_4/(\text{GeH}_4+\text{SiH}_4)$ .....	29
3.18 ความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างพลังงานของ a-SiGe:H กับอัตราส่วนการไหลของก๊าซ $\text{SiH}_4/(\text{SiH}_4+\text{GeH}_4)$ .....	30
3.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้ากับอัตราส่วนของการไหลของก๊าซ $\text{SiH}_4/(\text{GeH}_4+\text{SiH}_4)$ .....	31
3.20 สรุปความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างพลังงานกับค่าสภาพนำไฟฟ้า .....	33
4.1 รอยต่อ p-n และ p-i-n ของสารกึ่งตัวนำชนิดอะมอร์ฟัส .....	36
4.2 แถบพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-SiGe:H แบบเซลล์เดี่ยว.....	36
4.3 ขั้นตอนประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-SiGe:H แบบเซลล์เดี่ยว .....	38
4.4 แผนผังการวัดลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วย solar simulator .....	39
4.5 แผนผังระบบการวัดผลตอบสนองเชิงสเปกตรัมของเซลล์แสงอาทิตย์ .....	39
4.6 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-SiGe:H แบบเซลล์เดี่ยว .....	40
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งมี a-SiGe:H เป็นชั้นผลิตพาหะ กับ ความหนาแน่นของชั้นผลิตพาหะ โดยที่ชั้น a-SiGe:H ถูกเตรียมด้วยเงื่อนไขตามตารางที่ 4.2 (ก่อนการปรับปรุงคุณสมบัติของฟิล์ม) .....	41
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งมี a-SiGe:H เป็นชั้นผลิตพาหะ กับ ความหนาแน่นของชั้นผลิตพาหะ กรณีชั้นผลิตพาหะมี เงื่อนไขตามตารางที่ 4.3 (หลังการปรับปรุงคุณสมบัติของฟิล์ม).....	43
4.9 เปรียบเทียบลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีความหนาแน่น i-a-SiGe:H ค่า ต่างๆ เงื่อนไขตามตารางที่ 4.3 กับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H .....	44
a) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H มีความหนาแน่น i-a-Si:H = 5,000 Å .....	44
b) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-SiGe:H มีความหนาแน่น i-a-SiGe:H = 2,000 Å .....	44
c) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-SiGe:H มีความหนาแน่น i-a-Si:H = 3,000 Å .....	44

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่

หน้า

4.10 เปรียบเทียบสเปกตรัมผลตอบสนองทางแสงของ a-SiGe:H ที่มีความหนาชั้น i-a-SiGe:H  
ค่าต่างๆ เงื่อนไขตามตารางที่ 4.3 กับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H ..... 44

a) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H มีความหนาชั้น i-a-Si:H = 5,000 Å ..... 44

b) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-SiGe:H มีความหนาชั้น i-a-SiGe:H = 2,000 Å ..... 44

c) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-SiGe:H มีความหนาชั้น i-a-SiGe:H = 3,000 Å ..... 44

5.1 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งช่องว่างพลังงานของชั้นผลิตพาหะมีลักษณะเป็น  
รูปอักษร U ..... 46

5.2 ลักษณะแถบพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งช่องว่างพลังงานของชั้นผลิตพาหะมีลักษณะเป็น  
รูปอักษร U ..... 47

5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้น  
ผลิตพาหะที่มีลักษณะแถบพลังงานเป็นรูปตัว U กับความหนาของ i-a-SiGe:H ..... 48

5.4 เปรียบเทียบลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นผลิตพาหะที่มีลักษณะ  
แถบพลังงานเป็นรูปตัว U กรณี ..... 49

a) เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้น i-a-Si:H = 5,000Å ..... 49

b) เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้น i-a-Si:H/i-a-SiGe:H/i-a-Si:H = 2,400Å/200Å/2,400Å ..... 49

c) เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้น i-a-Si:H/i-a-SiGe:H/i-a-Si:H = 2,300Å/400Å/2,300Å ..... 49

d) เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้น i-a-Si:H/i-a-SiGe:H/i-a-Si:H = 2,200Å/600Å/2,200Å ..... 49

5.5 เปรียบเทียบสเปกตรัมผลตอบสนองต่อแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นผลิตพาหะที่มี  
ลักษณะ แถบพลังงานเป็นรูปตัว U กรณี ..... 50

a) เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้น i-a-Si:H = 5,000Å ..... 50

b) เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้น i-a-Si:H/i-a-SiGe:H/i-a-Si:H = 2,400Å/200Å/2,400Å ..... 50

c) เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้น i-a-Si:H/i-a-SiGe:H/i-a-Si:H = 2,300Å/400Å/2,300Å ..... 50

5.6 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่ออกแบบสำหรับศึกษาอิทธิพลของตำแหน่ง a-SiGe:H  
ในชั้นผลิตพาหะ ..... 51

5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้น  
ผลิตพาหะมีลักษณะช่องว่างพลังงานเป็น step function และตำแหน่งของชั้น i-a-SiGe:H . 54

5.8 เปรียบเทียบลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งชั้นผลิต  
พาหะมีลักษณะช่องว่างพลังงานเป็น step function กรณี ..... 55

## สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
a) เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีโครงสร้าง p/i-a-SiGe:H/i-a-Si:H/n .....	55
b) เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีโครงสร้าง p/i-a-Si:H/i-a-SiGe:H/i-a-Si:H/n .....	55
c) เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีโครงสร้าง p/i-a-Si:H/i-a-SiGe:H/n .....	55
5.9 เปรียบเทียบสเปกตรัมผลตอบสนองต่อแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งผลิตพหุหะมี	
ลักษณะช่องว่างพลังงานเป็น step function กรณี .....	56
a) เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีโครงสร้าง p/i-a-SiGe:H/i-a-Si:H/n .....	56
b) เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีโครงสร้าง p/i-a-Si:H/i-a-SiGe:H/i-a-Si:H/n .....	56
c) เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีโครงสร้าง p/i-a-Si:H/i-a-SiGe:H/n .....	56
5.10 เปรียบเทียบแถบพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นลักษณะผลิตพหุหะมีแถบพลังงาน	
เป็น step function กรณี .....	57
a) เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีโครงสร้าง p/i-a-SiGe:H/i-a-Si:H/n .....	57
b) เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีโครงสร้าง p/i-a-Si:H/i-a-SiGe:H/i-a-Si:H/n .....	57
c) เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีโครงสร้าง p/i-a-Si:H/i-a-SiGe:H/n .....	57
6.1 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบ double-junctions ซึ่งประดิษฐ์ในงานวิจัย .....	60
6.2 ลักษณะแถบพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์แบบ double-junctions .....	60
6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์แบบ	
double-junctions และความหนาของชั้น a-Si:H ที่ทำหน้าที่เป็นชั้นผลิตพหุหะของ	
เซลล์ชั้นรับแสง โดยที่ความหนาของ a-SiGe:H เท่ากับ 2,000 Å .....	63
6.4 เปรียบเทียบลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์ .....	64
a) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H single-junction .....	64
b) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H double-junctions .....	64
6.5 เปรียบเทียบผลตอบสนองทางแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ .....	64
a) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H single-junction .....	64
b) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H double-junctions .....	64



## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$\nu$	: Frequency	(Hz)
$\sigma_D$	: Dark-conductivity	(S/cm)
$\sigma_{ph}$	: Photo-conductivity	(S/cm)
$\alpha$	: Absorption coefficient	(1/cm)
$\lambda$	: Wave length	(nm)
$\text{Å}$	: Angstrom	( $10^{-10}$ m)
a-Si:H	: Hydrogenated amorphous silicon	
a-SiC:H	: Hydrogenated amorphous silicon carbide	
a-SiGe:H	: Hydrogenated amorphous silicon germanium	
a-SiN:H	: Hydrogenated amorphous silicon nitride	
a-SiO:H	: Hydrogenated amorphous silicon oxide	
$B_2H_6$	: Diborane gas	
$PH_3$	: Phosphine gas	
$CH_4$	: Methane gas	
$GeH_4$	: Germane gas	
$H_2$	: Hydrogen gas	
$N_2$	: Nitrogen gas	
$SiH_4$	: Silane gas	
$SnO_2$	: Tin Oxide	
c	: Light velocity	(m/sec)
CVD	: Chemical Vapor Deposition	
d	: Film thickness	(Å)
$E_C$	: Conduction band	(eV)
$E_V$	: Valence band	(eV)
$E_{opt}$	: Optical energy gap	(eV)
ESR	: Electron Spin Resonance	
F	: Photon flux	(1/sec)
h	: Planck's Constant	(J.sec)



$h\nu$	: Photon energy	(eV)
IR	: Infrared	
$J_{ph}$	: Photo current density	(mA/cm <sup>2</sup> )
$\eta$	: Efficiency of solar cell	(%)
$J_{sc}$	: Short circuit current density of solar cell	(mA/cm <sup>2</sup> )
$V_{oc}$	: Opened circuit voltage of solar cell	(V)
FF	: Fill factor of solar cell	(%)
k	: Wave number	(1/cm)
P	: Power	(W)
R	: Reflectivity	(%)
RF power	: Radio frequency power	(13.56 MHz)
T%	: Transmittance	(%)



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 1

### พื้นฐานและที่มาของหัวข้อวิทยานิพนธ์

#### 1.1 บทนำ

ความต้องการพลังงานในปัจจุบันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในขณะที่แหล่งพลังงานบนโลกมีอยู่อย่างจำกัด ดังนั้นในปัจจุบันจึงมีการนำพลังงานในรูปแบบต่างๆ มาใช้เพิ่มมากขึ้น อาทิ พลังงานลม พลังงานจากคลื่น พลังงานความร้อนใต้พิภพ หรือ รวมเรียกว่า พลังงานทดแทน ซึ่ง พลังงานแสงอาทิตย์ก็เป็นพลังงานหนึ่งที่น่าสนใจอย่างยิ่ง เนื่องจากแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานที่สะอาด มีอยู่ทั่วไปและมีอยู่อย่างไม่จำกัด ต่างจากแหล่งพลังงานบนโลกแหล่งอื่น แต่การจะนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้จากเซลล์แสงอาทิตย์นั้นจำเป็นต้องมีการลงทุนสูง และต้องมีพื้นที่สำหรับติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่ กระนั้นก็ตามยังคงมีความจำเป็นที่ต้องใช้เซลล์แสงอาทิตย์ในงานบางประเภท เช่น เป็นแหล่งพลังงานสำหรับสถานีสื่อสารในที่ห่างไกล เป็นแหล่งพลังงานของดาวเทียม หรือแม้กระทั่งเป็นแหล่งพลังงานให้กับชนบทหรือถิ่นทุรกันดารที่ไฟฟ้ายังเข้าไปไม่ถึง จากเหตุผลดังกล่าวเซลล์แสงอาทิตย์จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงประสิทธิภาพ และลดต้นทุนในการผลิตลง เพื่อที่จะมีการนำเซลล์แสงอาทิตย์ไปใช้กันอย่างแพร่หลายมากขึ้น เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกมีราคาค่อนข้างสูง และมีความยุ่งยากในการผลิต ต่างจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง อะมอร์ฟัสซิลิคอนที่กระบวนการผลิตที่ง่าย และมีต้นทุนการผลิตต่ำ ดังนั้นการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอนนับว่ามีบทบาทสำคัญในการลดต้นทุนของเซลล์แสงอาทิตย์ลง

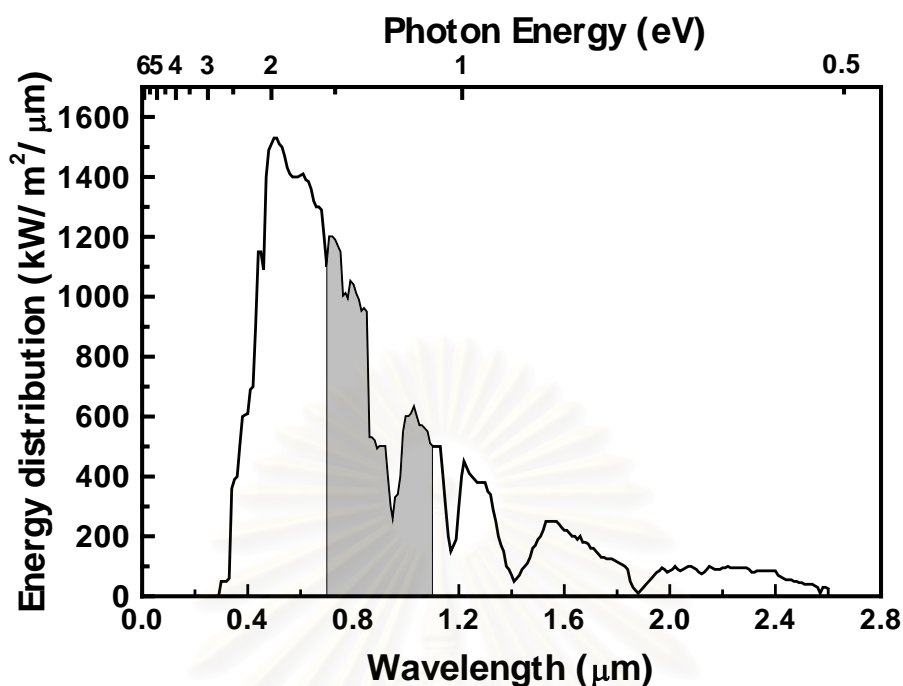
##### 1.1.1 คุณสมบัติเด่นของวัสดุอะมอร์ฟัส

ปัจจุบันวัสดุอะมอร์ฟัสซิลิคอน (hydrogenated amorphous silicon : a-Si:H) และ อะมอร์ฟัสซิลิคอนอัลลอย เช่น อะมอร์ฟัสซิลิคอนคาร์ไบด์ (hydrogenated amorphous silicon carbide : a-SiC:H), อะมอร์ฟัสซิลิคอนไนไตรด์ (hydrogenated amorphous silicon nitride : a-SiN:H), อะมอร์ฟัสซิลิคอนออกไซด์ (hydrogenated amorphous silicon oxide : a-SiO:H) มีการนำไปใช้งานเป็นสิ่งประดิษฐ์อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หลายชนิด เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ [1] ไดโอดเปล่งแสงชนิดฟิล์มบาง [2-3] เซ็นเซอร์ตรวจจับสีของแสง ฯลฯ วัสดุสารกึ่งตัวนำอะมอร์ฟัสเหล่านี้มีข้อเด่นหลายด้าน เช่น การผลิตเป็นฟิล์มบางได้ง่ายโดยกระบวนการ glow discharge plasma CVD ใช้วัสดุน้อย ต้นทุนการผลิตต่ำ ผลิตเป็นพื้นที่ได้หลายขนาด ใช้คุณสมบัติการผลิตต่ำ [4] และคุณสมบัติด้านอิเล็กทรอนิกส์ที่น่าสนใจมากคือ คุณสมบัติของการที่ช่องว่างพลังงานสามารถเปลี่ยนแปลงได้ด้วยการเปลี่ยนอัตราส่วนผสมของธาตุต่างๆ ในฟิล์มบาง เช่น หากต้องการวัสดุ

ตระกูลสารกึ่งตัวนำอะมอร์ฟัสซิลิคอนที่มีค่าช่องว่างพลังงานกว้างกว่า 1.7 eV ก็สามารถเตรียมได้ โดย การใช้ก๊าซผสมระหว่าง  $\text{SiH}_4$  และ  $\text{CH}_4$  หรือหากต้องการวัสดุตระกูลสารกึ่งตัวนำอะมอร์ฟัส ซึ่งช่องว่างพลังงานมีขนาดแคบกว่า 1.7 eV ก็สามารถเตรียมได้โดย การใช้ก๊าซผสมระหว่าง  $\text{SiH}_4$  และ  $\text{GeH}_4$

## 1.2 ความสำคัญและที่มาของหัวข้อวิทยานิพนธ์

ที่ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้มีการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัส โครงสร้างรอยต่อ p-i-n โดยมีชั้นผลิตพาหะ (i) เป็น a-Si:H ในระยะแรกได้ประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีโครงสร้างรอยต่อเดี่ยวแบบ homojunction มีประสิทธิภาพประมาณ 4.87% [5] เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างนี้มีประสิทธิภาพไม่สูงนัก เนื่องจาก ชั้นอะมอร์ฟัสซิลิคอนที่ทำหน้าที่รับแสงไม่ว่าจะเป็นชั้น p หรือชั้น n จะดูดกลืนแสงมาก เนื่องจากช่องว่างพลังงานมีขนาดเท่ากับชั้น i ทำให้กระแสเอาต์พุตที่ได้มีค่าน้อย ต่อมา จึงได้มีการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างรอยต่อเดี่ยวแบบ heterojunction ขึ้น ซึ่งมีประสิทธิภาพประมาณ 6.67% [6] สำหรับโครงสร้าง heterojunction นี้ แสงสามารถทะลุผ่านไปยังชั้น i ได้มากขึ้น เซลล์แสงอาทิตย์ตอบสนองต่อแสงความยาวคลื่นสั้นได้ดีขึ้น กระแสเอาต์พุตเพิ่มสูงขึ้น ประสิทธิภาพจึงเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบการตอบสนองต่อแสงอาทิตย์ของเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสองชนิดที่กล่าวมาข้างต้น พบว่าเซลล์ที่มีโครงสร้างแบบ heterojunction มีการตอบสนองทางแสงที่ดีกว่าเซลล์แบบ homojunction [6] กระนั้นก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบช่วงของความยาวคลื่นแสงที่เซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสองโครงสร้างตอบสนองกับช่วงความยาวคลื่นแสงของดวงอาทิตย์พบว่า เซลล์แสงอาทิตย์ยังไม่สามารถดูดกลืนพลังงานโฟตอนของแสงได้ทั้งหมด มีพลังงานบางส่วนสูญเสียไปโดยเปล่าประโยชน์ เนื่องจากแสงช่วงนั้นมีความยาวคลื่นยาวกว่าช่วงความยาวคลื่นที่เซลล์แสงอาทิตย์สามารถดูดกลืนได้ วิทยานิพนธ์นี้จึงได้มีการพัฒนาวัสดุที่มีช่องว่างพลังงานแคบลง อาทิ อะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียม (a-SiGe:H) และยังมีแนวความคิดในการรวมเซลล์แสงอาทิตย์หลายเซลล์เข้าด้วยกัน โดยการปลูกซ้อนทับกัน เพื่อให้เซลล์แต่ละตัวดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นต่างกัน ทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้สูงขึ้น ซึ่งโครงสร้างนี้ คือ โครงสร้างแบบหลายชั้น (tandem type solar cell) [7] การประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ จำเป็นต้องมีวัสดุที่มีค่าช่องว่างพลังงานที่แตกต่างกัน เพื่อที่จะสามารถดูดกลืนแสงได้เหมาะสมกับแสงของดวงอาทิตย์ เนื่องจากวัสดุอะมอร์ฟัสมีคุณสมบัติสำคัญ คือสามารถเปลี่ยนค่าช่องว่างพลังงานได้ เมื่ออัตราส่วนของอะตอมของสารในวัสดุเปลี่ยนไป รวมถึงสามารถผลิตได้ที่อุณหภูมิต่ำเมื่อเทียบกับวัสดุที่เป็นผลึก [4] ดังนั้นวัสดุอะมอร์ฟัสจึงมีข้อได้เปรียบสำหรับการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างแบบหลายรอยต่อ



รูปที่ 1.1 สเปกตรัมการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ที่ AM1 [8]

เพื่อที่จะสามารถประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียมให้มีประสิทธิภาพสูง จึงจำเป็นต้องศึกษาเงื่อนไขในการปลูกฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียมเพื่อให้ได้ค่าช่องว่างพลังงานให้เหมาะสมกับสเปกตรัมของแสงอาทิตย์ที่ดียิ่งขึ้น และเพราะว่าค่าช่องว่างพลังงานอย่างเดียวไม่สามารถบอกได้ว่าฟิล์มที่จะนำมาทำเป็นชั้น  $i$  นั้นมีคุณภาพดี ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการศึกษา และหาเงื่อนไขในการปลูกฟิล์มบาง  $a\text{-SiGe:H}$  ที่มีคุณสมบัติทางแสงและทางไฟฟ้าที่ดี ด้วยเหตุนี้ จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงคุณสมบัติของฟิล์ม  $a\text{-SiGe:H}$  ซึ่งคุณสมบัติที่สำคัญได้แก่ คุณสมบัติทางโครงสร้าง (ความหนาแน่นของพันธะต่างๆ ความหนาแน่นของแขนขาด) คุณสมบัติทางแสง (ช่องว่างพลังงาน) และคุณสมบัติทางไฟฟ้า (ค่าสภาพนำไฟฟ้ามืด และสภาพนำไฟฟ้าสว่าง) ด้วย รูปที่ 1.1 แสดงสเปกตรัมการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ที่ AM1 พื้นที่ส่วนที่แรเงา แสดงถึงพลังงานของแสงอาทิตย์ที่ถูกนำไปใช้ได้เพิ่มขึ้น เมื่อเปลี่ยนค่าช่องว่างพลังงานของชั้นผลิตพาหะลดลงหรือ ชั้นผลิตพาหะเปลี่ยนจาก  $a\text{-Si:H}$  เป็น  $a\text{-Ge:H}$

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์นั้น จำเป็นต้องพัฒนาคุณสมบัติของวัสดุ ( $a\text{-SiGe:H}$ ) และโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ควบคู่กันไป จึงจะทำให้เพิ่มประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ได้

สำหรับวิทยานิพนธ์นี้เป็น การศึกษาเทคโนโลยีการปลูกฟิล์มบางชนิด  $a\text{-SiGe:H}$  ให้มีช่องว่างพลังงานแคบกว่า  $1.7\text{ eV}$  ด้วยวิธีการแยกสลายก๊าซด้วยประจุเรืองแสง และศึกษาคุณสมบัติ

พื้นฐานต่างๆ ของฟิล์มบางนี้ ทั้งคุณสมบัติทางโครงสร้าง ทางแสง และทางไฟฟ้า เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ประโยชน์ในการออกแบบและประดิษฐ์สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ a-SiGe:H อาทิ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสที่มีชั้นผลิตพาหะเป็นอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียมเพื่อให้สามารถตอบสนองต่อแสงอินฟราเรดได้ดีขึ้น หรือเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง tandem โดยมี a-SiGe:H เป็นชั้นดูดกลืนแสงความยาวคลื่นยาวอยู่ชั้นล่าง และมี a-Si:H เป็นชั้นดูดกลืนแสงความยาวคลื่นสั้นอยู่ชั้นบน

### 1.3 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

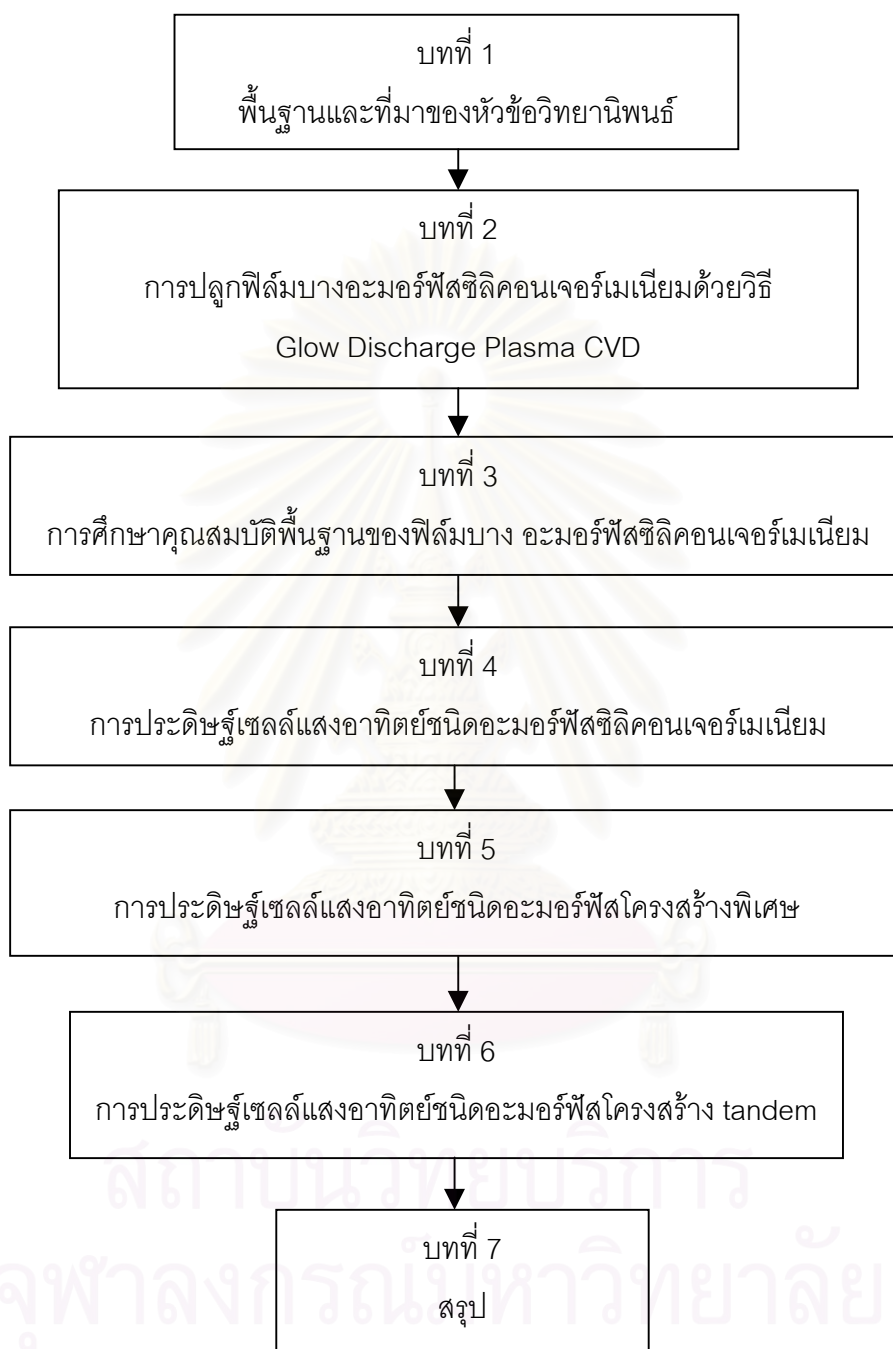
1. เพื่อศึกษาเทคโนโลยีการปลูกฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียม (a-SiGe:H) ด้วยวิธี Glow Discharge Plasma CVD
2. เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางโครงสร้าง ทางแสง และทางไฟฟ้าของ a-SiGe:H
3. เพื่อศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการผลิต a-SiGe:H สำหรับใช้งานเป็นชั้นผลิตพาหะในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียม
4. เพื่อศึกษาเทคโนโลยีการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ที่มี a-SiGe:H เป็นชั้นผลิตพาหะ

### 1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ได้แก่ การศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียม ซึ่งได้แก่ คุณสมบัติทางโครงสร้าง (จำนวนความหนาแน่นของแขนขาด การดูดกลืนแสงอินฟราเรด) คุณสมบัติทางแสง (สัมประสิทธิ์การทะลุผ่านแสง ค่าช่องว่างพลังงาน) และคุณสมบัติทางไฟฟ้า (ค่าสภาพนำไฟฟ้ามืด และค่าสภาพนำไฟฟ้าด้วยแสง) เพื่อนำไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสที่มีชั้นผลิตพาหะเป็นอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียม และประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีโครงสร้างรอยต่อหลายชั้น (tandem) โครงสร้างของวิทยานิพนธ์แสดงได้ตามรูปที่ 1.2

### 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ความรู้และเทคโนโลยีการปลูกฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียม
2. ความรู้และเทคโนโลยีการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 1.2 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์



## บทที่ 2

### การปลูกฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียม

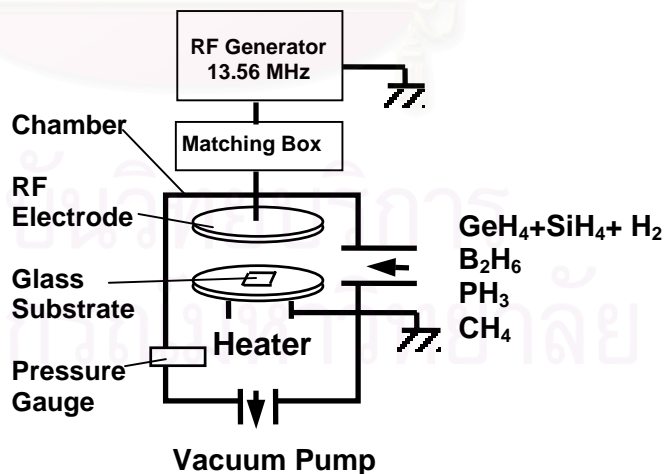
#### 2.1 บทนำ

วัสดุสารกึ่งตัวนำอะมอร์ฟัสซิลิคอนสามารถเตรียมได้หลายวิธี วิธี glow discharge plasma CVD (การแยกสลายก๊าซด้วยวิธีประจุเรืองแสงด้วยไฟฟ้า) เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุด เพราะต้นทุนต่ำ สามารถให้ฟิล์มบางที่มีคุณภาพสูง และสามารถผลิตเป็นพื้นที่ใหญ่ได้ง่าย

บทนี้จะกล่าวถึงกรรมวิธีการปลูกฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียม (a-SiGe:H) โดยจะกล่าวถึงโครงสร้างของระบบ glow discharge plasma CVD ขั้นตอนการปลูกฟิล์มบาง การเตรียมแผ่นฐาน เงื่อนไขสำคัญในการปลูกฟิล์มบาง a-SiGe:H

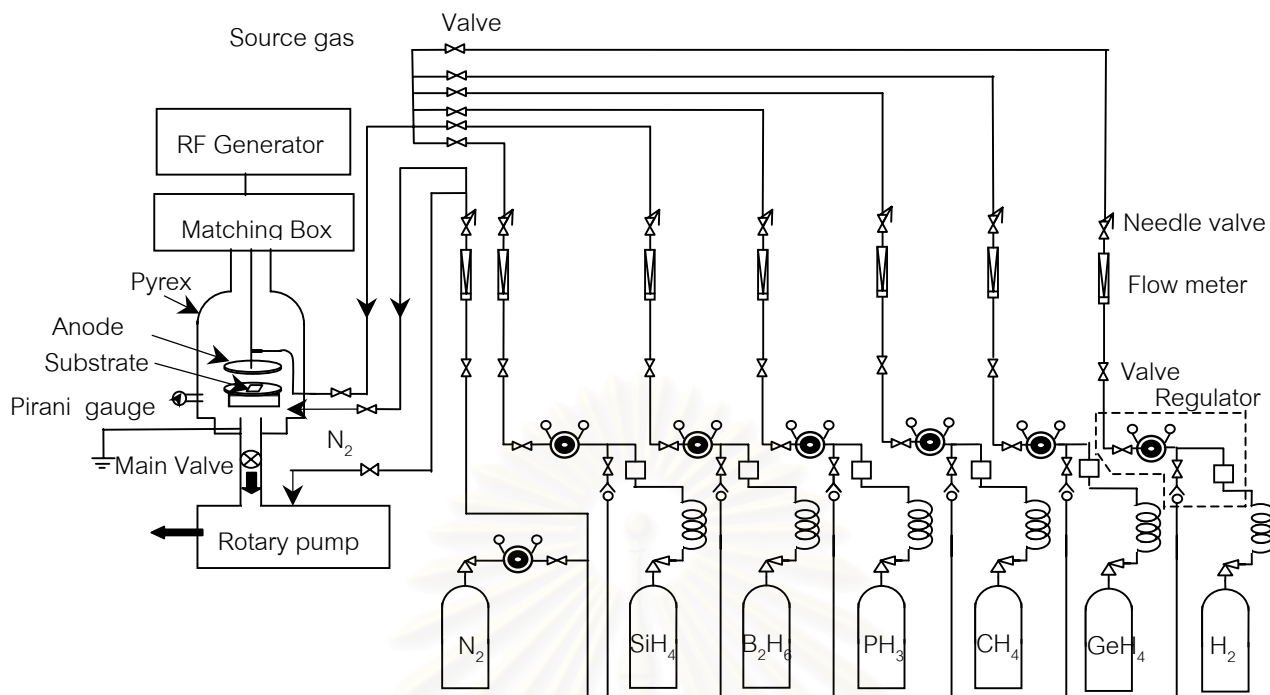
#### 2.2 โครงสร้างระบบ glow discharge plasma CVD

ระบบ glow discharge plasma CVD (chemical vapor deposition) ตั้งอยู่ที่ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วนคือ ระบบก๊าซ ระบบภาชนะสุญญากาศ และระบบไฟฟ้าความถี่วิทยุ รูปที่ 2.1 และรูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างของระบบ glow discharge plasma CVD

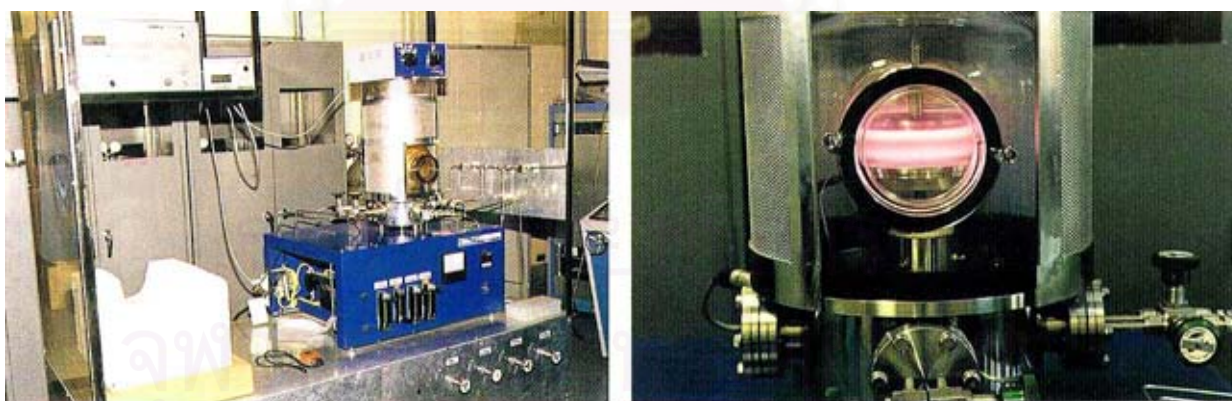


รูปที่ 2.1 โครงสร้างของระบบ Glow Discharge Plasma CVD





รูปที่ 2.2 ระบบ Glow Discharge Plasma CVD สำหรับปลูกฟิล์มบาง a-Si:H, a-SiC:H และ a-SiGe:H



รูปที่ 2.3 ภาพถ่ายระบบ Glow Discharge Plasma CVD

ระบบ Glow Discharge Plasma CVD ที่ใช้นี้เป็นชนิด vertical direction กล่าวคือ สนามไฟฟ้าความถี่วิทยุมีทิศทางตั้งฉากกับระนาบของแผ่นฐาน ประกอบด้วยระบบย่อยที่สำคัญ 3 ส่วนคือ

### 1) ระบบก๊าซ

ในระบบ glow discharge plasma CVD ใช้ก๊าซเป็นวัสดุเริ่มต้น ในกรณีการปลูกฟิล์มบางชนิด a-Si:H, a-SiC:H และ a-SiGe:H สำหรับการประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์นั้น ก๊าซที่ใช้มีดังนี้คือ

ก๊าซไฮเลน ( $\text{SiH}_4/\text{H}_2$ )	10%	ขนาดถังบรรจุ 40 ลิตร
ก๊าซเจอร์เมน ( $\text{GeH}_4/\text{H}_2$ )	10%	ขนาดถังบรรจุ 10 ลิตร
ก๊าซมีเทน ( $\text{CH}_4/\text{H}_2$ )	10%	ขนาดถังบรรจุ 40 ลิตร
ก๊าซไฮโดรเจน ( $\text{H}_2$ )	100%	ขนาดถังบรรจุ 10 ลิตร
ก๊าซฟอสฟีน ( $\text{PH}_3/\text{H}_2$ )	500 ppm	ขนาดถังบรรจุ 10 ลิตร สำหรับโดปชั้น n
ก๊าซไดโบเรน ( $\text{B}_2\text{H}_6/\text{H}_2$ )	500 ppm	ขนาดถังบรรจุ 10 ลิตร สำหรับโดปชั้น p

### 2) ระบบภาชนะสุญญากาศ

ระบบภาชนะสุญญากาศประกอบด้วยครอบแก้ว (chamber) ทำจากแก้วไฟเร็กซ์ มีรูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลางด้านล่าง 22 cm เส้นผ่านศูนย์กลางด้านบน 10 cm สูงประมาณ 40 cm ภายในมีฐานรอง (susceptor) ทำหน้าที่เป็นฮีตเตอร์ให้ความร้อนแก่ชิ้นงาน ครอบแก้วจะสูบให้เป็นสุญญากาศด้วยเครื่องสูบลสุญญากาศ (ชนิด rotary vacuum pump)

### 3) ระบบกำเนิดสนามไฟฟ้าความถี่วิทยุ

ระบบกำเนิดสนามไฟฟ้าความถี่วิทยุ (RF generator) เป็นส่วนที่ทำหน้าที่กำเนิดสนามไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่ 13.56 MHz เพื่อกระตุ้นให้ก๊าซในครอบแก้วเกิดการแตกตัวเป็นพลาสมา สนามไฟฟ้างดักส่งผ่านสายเคเบิลแบบ coaxial ไปสู่กล่อง matchnig box และขั้วโลหะไฟฟ้าที่วางอยู่ในภาชนะสุญญากาศ ก๊าซที่อยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองจะถูกกระตุ้นให้แตกตัวเป็นพลาสมา

## 2.3 ขั้นตอนการปลูกฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียม

### 2.3.1 การเตรียมแผ่นฐาน

เนื่องจากการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของ a-SiGe:H ต้องใช้กรรมวิธีการศึกษาหลายวิธี ดังนั้นแผ่นฐาน (substrates) สำหรับปลูกฟิล์มบาง a-SiGe:H จึงต้องใช้วัสดุหลายชนิดที่แตกต่างกัน ตารางที่ 2.1 แสดงรายชื่อของวัสดุแผ่นฐานและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

แผ่นฐานทุกแผ่นก่อนนำไปใช้งาน จะต้องผ่านกรรมวิธีการล้างก่อนดังนี้

1. ล้างด้วย Trichloroethylene ด้วยเครื่อง Ultrasound เป็นเวลา 20 นาที
2. ล้างด้วย Acetone ด้วยเครื่อง Ultrasound เป็นเวลา 20 นาที
3. ล้างด้วย Methylalcohol ด้วยเครื่อง Ultrasound เป็นเวลา 20 นาที
4. เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

สำหรับผลึกซิลิคอน (c-Si) หลังจากการล้างข้างต้นแล้ว ให้นำไปกัดชั้นออกไซด์ออกด้วยสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก:น้ำ ในอัตราส่วน 1:10 โดยปริมาตร จากนั้นล้างทำความสะอาดด้วยน้ำ DI (De-ionized water) และเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

ตารางที่ 2.1 แผ่นฐานสำหรับใช้ในการปลูกฟิล์มบาง a-SiGe:H

ชนิดของแผ่นฐาน	ขนาด	วัตถุประสงค์เพื่อวัตถุประสงค์
แผ่นกระจกของ Corning #7059	2 cm x 2 cm x 1 mm	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงย่าน UV-Visible
Microglass	1.8 cm x 1.8 cm x 0.5 mm	Electron Spin Resonance (ESR)
ผลึกเดี่ยว Si สภาพต้านทานไฟฟ้าสูง	1 cm x 1 cm x 0.1 mm	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงย่านแสงอินฟราเรด
แผ่นกระจก/SnO <sub>2</sub>	2 cm x 2 cm x 1 mm	เซลล์แสงอาทิตย์

### 2.3.2 การปลูกฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียม

นำแผ่นฐานที่ผ่านการล้างแล้วใส่เข้าไปใน chamber แล้วสูบลมภายใน chamber ให้เป็นสุญญากาศ ความดันประมาณ 0.03 torr ปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้า heater เพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้แผ่นฐาน จากนั้นรอประมาณ 1 ชั่วโมง

เมื่อได้อุณหภูมิแผ่นฐานตามต้องการแล้ว จึงเริ่มทำการปล่อยก๊าซต่างๆ เข้าไปใน chamber ควบคุมความดันให้คงที่ จากนั้นเปิด RF Power เพื่อทำการดิสชาร์จ

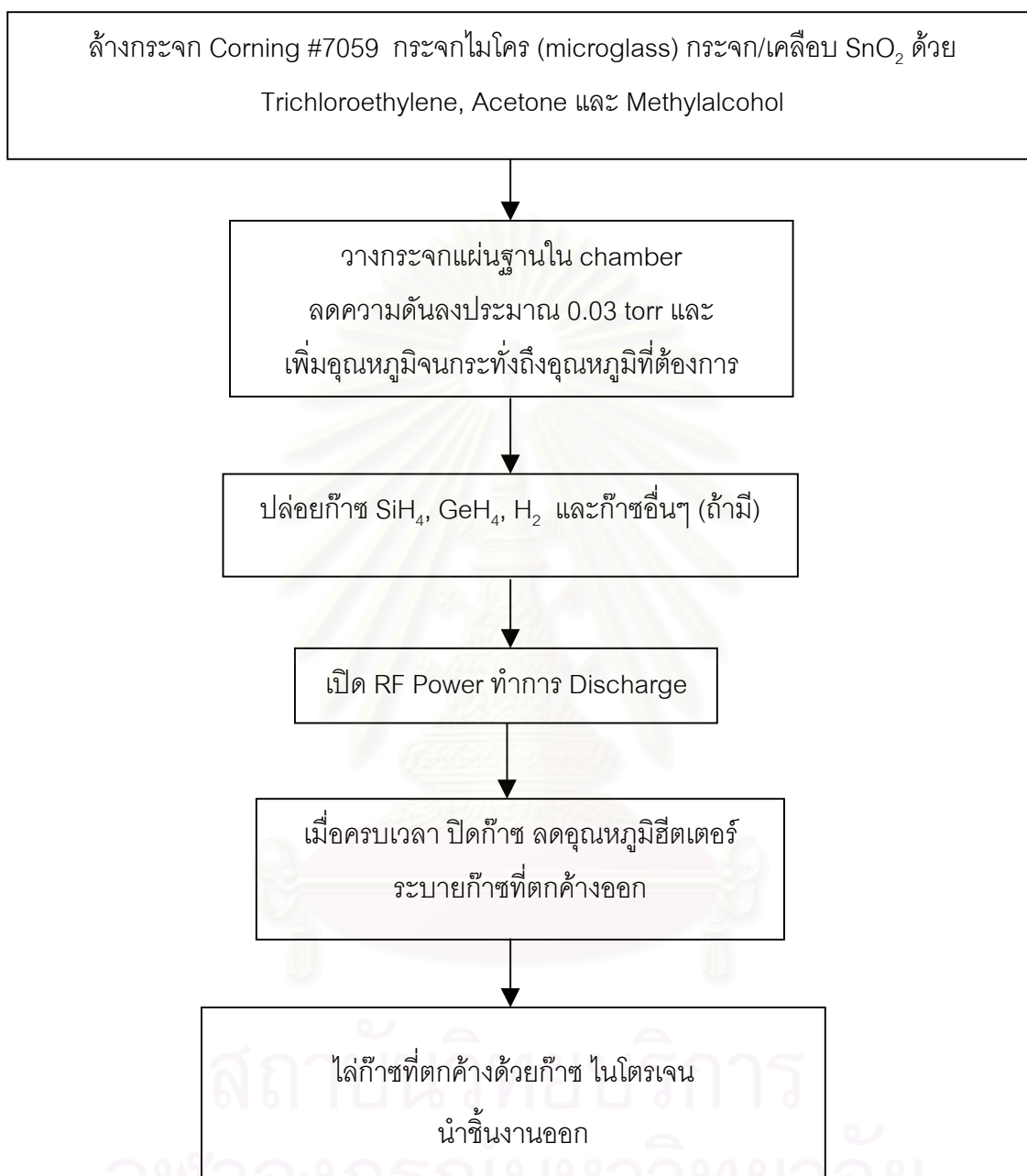
ตารางที่ 2.2 แสดงสรุปเงื่อนไขสำคัญในการปลูกฟิล์มบาง a-SiGe:H ด้วยวิธี glow discharge plasma CVD

ตารางที่ 2.2 เงื่อนไขการปลูกฟิล์ม a-SiGe:H ด้วยวิธี glow discharge plasma CVD

ความถี่สนามไฟฟ้า RF	13.56 MHz
กำลังไฟฟ้า RF	3 watt
อุณหภูมิแผ่นฐาน	190-250 °C
ความดันก๊าซ	1-3 torr
ก๊าซดิบ	GeH <sub>4</sub> + SiH <sub>4</sub> + H <sub>2</sub>

เมื่อปลูกฟิล์มจนได้ความหนาหรือได้เวลาตามที่ต้องการแล้ว จึงปิด RF Power เพื่อหยุดการดิสชาร์จปิดถังก๊าซ จากนั้นลดอุณหภูมิของฮีตเตอร์ให้ลงมาถึงอุณหภูมิห้อง ในระหว่างนั้นให้ระบายก๊าซที่เหลืออยู่ภายในห้องก๊าซทั้งหมดผ่านระบบสุญญากาศให้หมด จากนั้นปล่อยก๊าซไนโตรเจนเข้าไปในห้องก๊าซและ chamber เพื่อล้างห้องก๊าซและ chamber ให้สะอาดเป็นเวลาประมาณ 15 นาที

ในการเปิด chamber ให้ปิด main valve ของ chamber และปล่อยก๊าซ N<sub>2</sub> เข้าไปใน chamber จนกระทั่งความดันของ chamber เท่ากับความดันห้อง จึงเปิดฝาของ chamber และนำชิ้นงานที่ปลูกฟิล์มแล้วออก รูปที่ 2.4 สรุปขั้นตอนการปลูกฟิล์มบาง a-SiGe:H



รูปที่ 2.4 ขั้นตอนการปลูกฟิล์มบาง a-SiGe:H

## 2.4 สรุป

1. ได้ทำการศึกษากรรณวิธีการปลูกฟิล์มบาง a-SiGe:H ด้วยวิธี glow discharge plasma CVD
2. ก๊าซสำหรับปลูกฟิล์มบาง a-SiGe:H ได้แก่  $\text{SiH}_4$  และ  $\text{GeH}_4$  ซึ่งบรรจุผสมอยู่ในก๊าซ  $\text{H}_2$  ด้วยอัตราส่วนความดัน  $\text{SiH}_4/\text{H}_2=1/10$  และ  $\text{GeH}_4/\text{H}_2=1/10$
3. เงื่อนไขอื่นๆ ที่เป็นตัวกำหนดคุณสมบัติและคุณภาพที่สำคัญของ a-SiGe:H ได้แก่ RF power, อุณหภูมิแผ่นฐาน และอัตราการไหลของก๊าซ  $\text{H}_2$  ดังจะได้กล่าวถึงรายละเอียดในบทต่อไป



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## บทที่ 3

### การศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียม

#### 3.1 บทนำ

ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยได้ทดลองปลูกฟิล์มบาง a-Si:H, a-SiC:H และ a-SiN:H มาตั้งแต่ พ.ศ. 2531 ในงานวิทยานิพนธ์นี้เป็นการเริ่มศึกษาการปลูกฟิล์มบาง a-SiGe:H และวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานของ a-SiGe:H

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการศึกษาค้นคว้าคุณสมบัติพื้นฐานด้านต่างๆ ของ a-SiGe:H ได้แก่ คุณสมบัติทางโครงสร้าง (พันธะของอะตอม ความบกพร่องแบบแขนขาด) คุณสมบัติทางแสง (สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง และค่าช่องว่างพลังงาน) คุณสมบัติทางไฟฟ้า (สภาพนำไฟฟ้ามืดและสภาพนำไฟฟ้าด้วยแสง) ตลอดจนจะรายงานผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติพื้นฐานและเงื่อนไขการปลูกฟิล์มด้วยวิธี glow discharge plasma CVD

#### 3.2 การวัดคุณสมบัติพื้นฐานของ a-SiGe:H

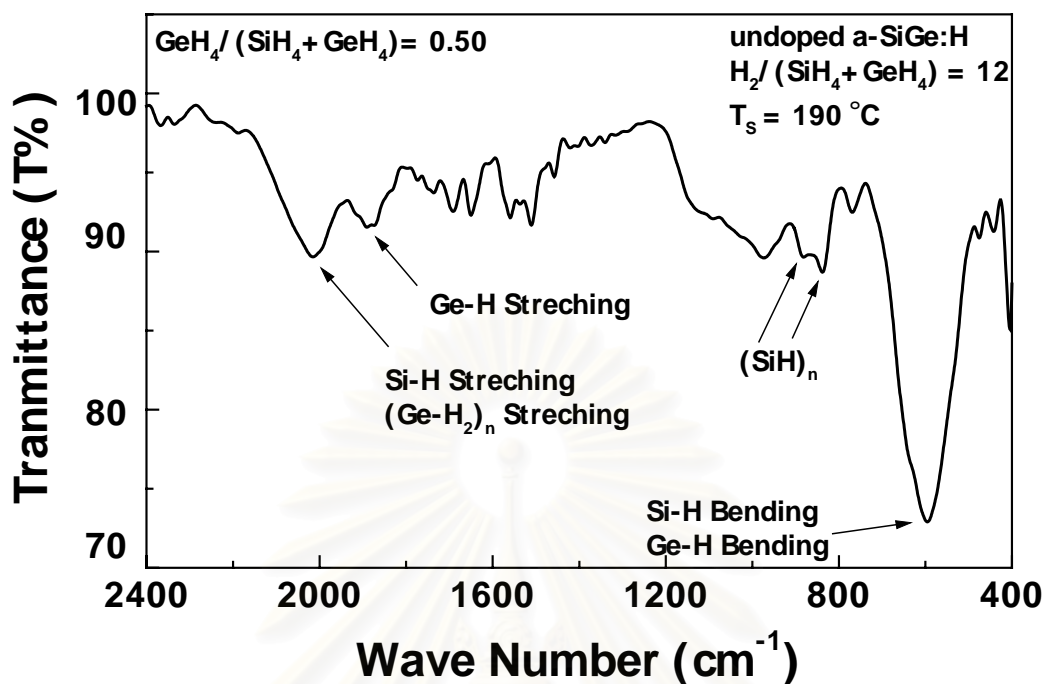
##### 3.2.1 การศึกษาค้นคว้าคุณสมบัติทางโครงสร้างของ a-SiGe:H

###### 3.2.1.1 การวัดการทะลุผ่านแสงอินฟราเรดของ a-SiGe:H

พันธะต่างๆ ภายใน a-SiGe:H จะเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติทางแสง และทางไฟฟ้าของ a-SiGe:H การวัดการทะลุผ่านแสงอินฟราเรดจะทำให้ทราบว่าใน a-SiGe:H มีความหนาแน่นของปริมาณพันธะต่างๆ อยู่เท่าไร [9-11]

ในงานวิจัยนี้ ได้มีการวัดสเปกตรัมการทะลุผ่านแสงอินฟราเรดด้วยเครื่องวัด IR Absorption ตรา Shimadzu ซึ่งติดตั้งอยู่ที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



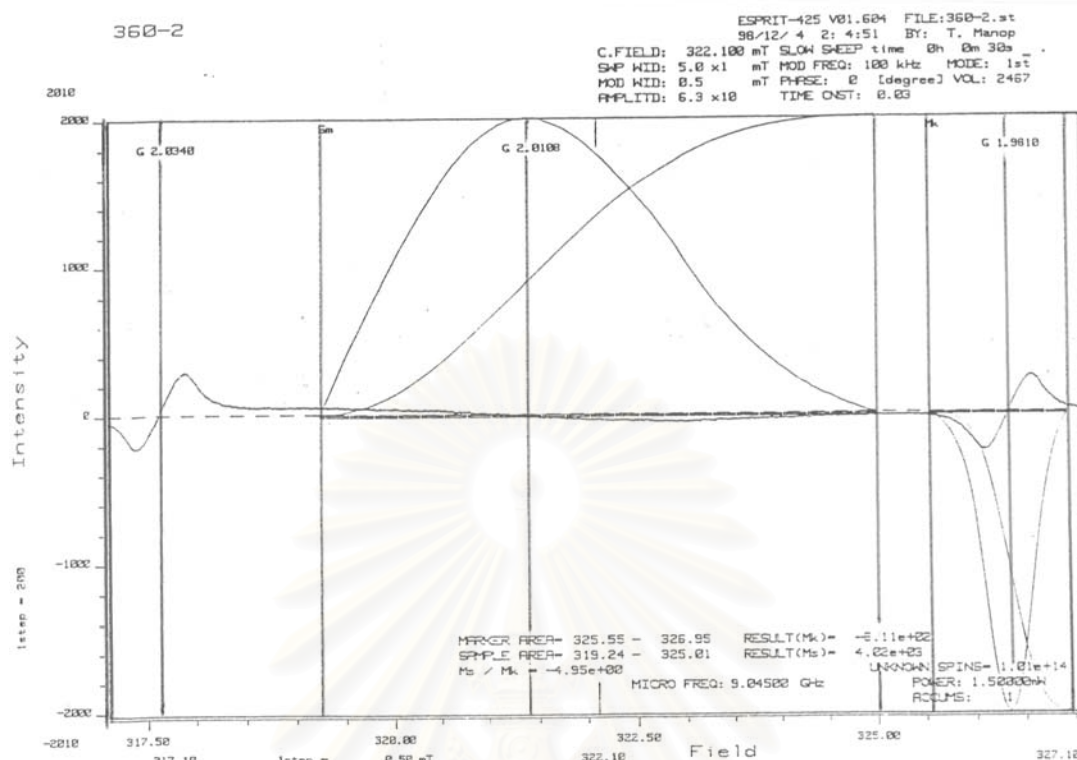


รูปที่ 3.1 ตัวอย่างสเปกตรัมการทะลุแสงย่านอินฟราเรดของ a-SiGe:H

### 3.2.1.2 การวัดจำนวน Spin Density ด้วยวิธี Electron Spin Resonance

เนื่องจากโดยทั่วไปในวัสดุสารกึ่งตัวนำอะมอร์ฟัสจะมีจุดบกพร่องชนิดแขนขาด (dangling bonds) อยู่จำนวนมาก และแขนขาดเหล่านี้มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติด้านต่างๆ อีกทั้งจำนวนของแขนขาดก็ขึ้นกับเงื่อนไขการปลูกฟิล์มด้วย จำนวนของแขนขาดนี้มีอิทธิพลในการกำหนดคุณสมบัติทั้งทางแสงและทางไฟฟ้าของวัสดุอะมอร์ฟัส โดยที่จะทำให้เกิดระดับโลคอไลซ์ขึ้นภายในช่องว่างพลังงานของวัสดุอะมอร์ฟัส ระดับโลคอไลซ์เหล่านี้จะดักจับพาหะที่วิ่งเข้ามาใกล้ ทำให้ค่าสภาพการนำไฟฟ้าด้วยแสง (photoconductivity) มีค่าลดลง และทำให้ประสิทธิภาพของสิ่งประดิษฐ์ลดลงด้วย ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เทคนิคของอิเล็กทรอนิกส์สปินเรโซแนนซ์ (Electron Spin Resonance: ESR) สำหรับวัดค่าความหนาแน่นของแขนขาด

เครื่องมือวัด spin density ด้วยวิธี ESR ที่ใช้นั้น เป็นรุ่น JES-RE2X ติดตั้งอยู่ที่ ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.2 ตัวอย่างสัญญาณ ESR ของ a-SiGe:H

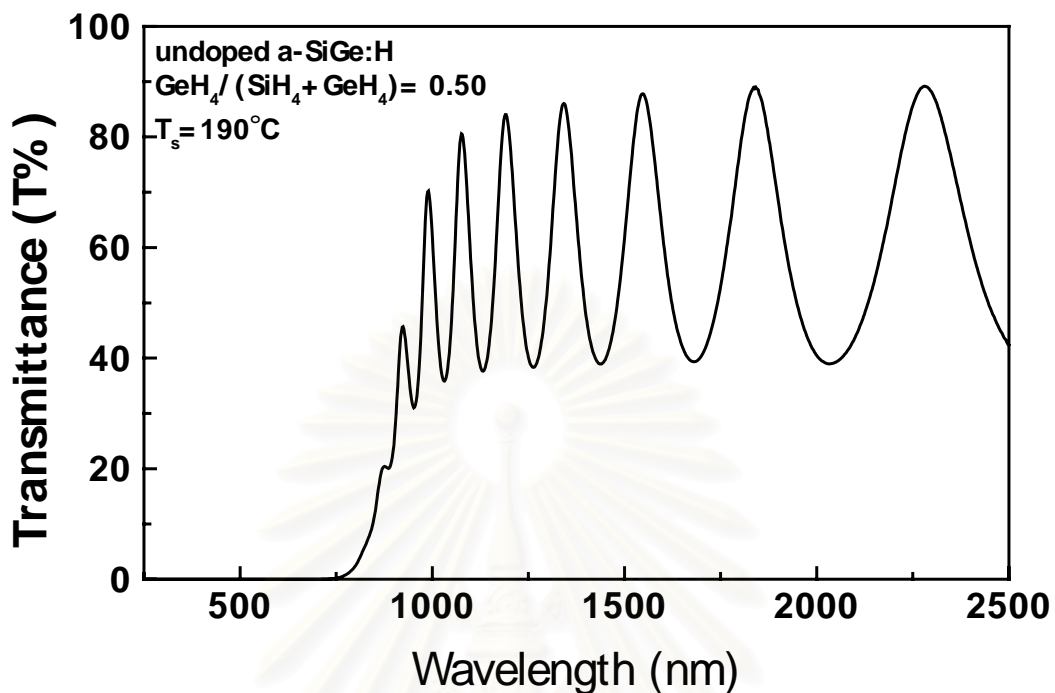
### 3.2.2 การศึกษาคุณสมบัติทางแสงของ a-SiGe:H

#### 3.2.2.1 การวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงในย่านพลังงานโฟตอนสูงกว่าช่องว่างพลังงานของ a-SiGe:H

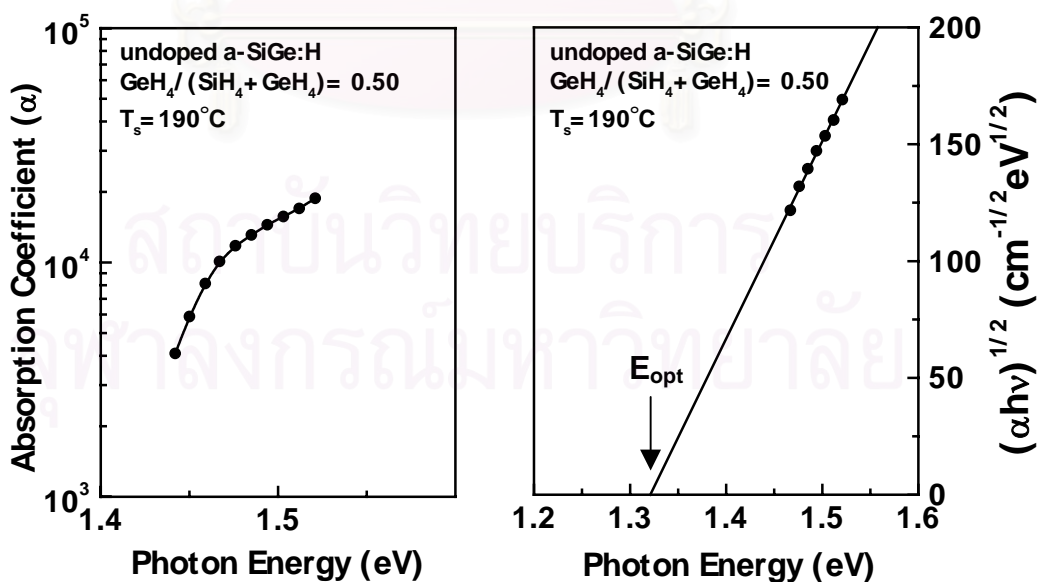
การศึกษาคุณสมบัติที่สำคัญอีกประการหนึ่งของฟิล์มบางอะมอร์ฟัสคือ การวัดค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง และช่องว่างพลังงาน ซึ่งข้อมูลทั้งสองนี้มีความจำเป็นในการใช้ออกแบบสิ่งประดิษฐ์ทางออปโตอิเล็กทรอนิกส์

ฟิล์ม a-SiGe:H ถูกนำมาวัดสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านแสง (Transmittance T%) ด้วยเครื่อง UV Spectrophotometer (UV-3101PC) ซึ่งติดตั้งอยู่ที่ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านแสงที่วัดได้สามารถนำไปคำนวณหาค่าความหนาของฟิล์ม [10] ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงในย่านพลังงานโฟตอนสูงกว่าช่องว่างพลังงาน และสามารถคำนวณหาค่าช่องว่างพลังงานโดยอาศัยความสัมพันธ์ของ  $T_{auc}$  [10,11]



รูปที่ 3.3 ตัวอย่างสเปกตรัมสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านแสงของ a-SiGe:H



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างสเปกตรัมสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง และการกำหนดค่าช่องว่าง ( $E_{opt}$ )

ของ a-SiGe:H

### 3.2.3 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ a-SiGe:H

#### 3.2.3.1 การวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าของ a-SiGe:H

ค่าสภาพนำไฟฟ้าของฟิล์ม a-SiGe:H เป็นตัวแปรที่มีความสำคัญตัวแปรหนึ่งที่จะบ่งชี้คุณภาพของฟิล์ม ในงานวิจัยนี้ได้มีการวัดค่าสภาพนำไฟฟ้ามืดและค่าสภาพนำไฟฟ้าด้วยแสงของฟิล์ม a-SiGe:H

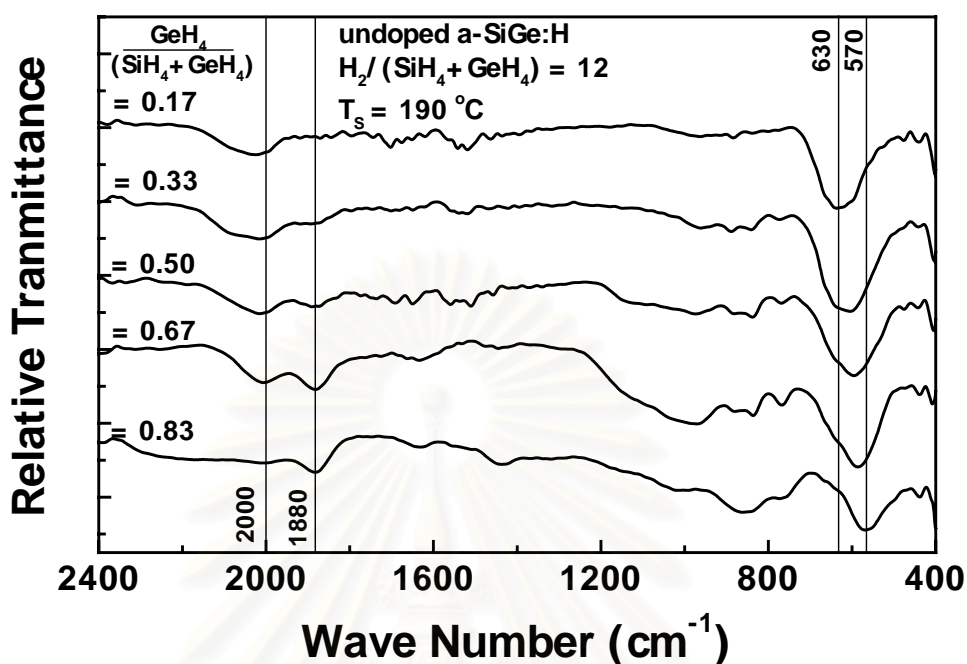
การวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าของ a-SiGe:H ทำโดยการเคลือบขั้วไฟฟ้า Al แบบโคแพลนาร์จำนวน 2 ขั้วลงบน a-SiGe:H ระยะห่างของขั้ว Al เท่ากับ 1 mm และขั้ว Al มีความยาว 1.5 cm ทำการป้อนแรงดัน 10 V ผ่านขั้ว Al ทั้งสอง และวัดค่ากระแสไฟฟ้า ค่าสภาพนำไฟฟ้าด้วยแสงวัดโดยการส่องด้วยแสงจากเครื่อง solar simulator ที่มีหลอดไฟขึ้นอนความเข้ม  $100 \text{ mW/cm}^2$  (AM1) [10,12]

### 3.3 ผลการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของ a-SiGe:H

ในเบื้องต้นได้มีการเตรียมฟิล์มบาง a-SiGe:H ชนิดบริสุทธิ์ด้วยวิธี glow discharge plasma CVD โดยเปลี่ยนอัตราส่วนของการไหลของก๊าซ  $\text{GeH}_4/(\text{GeH}_4+\text{SiH}_4)$  ในช่วง 0.17 – 0.83 เงื่อนไขต่างๆ แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขการปลูกฟิล์ม a-SiGe:H ชนิดบริสุทธิ์ด้วยวิธี glow discharge plasma CVD

ความถี่สนามไฟฟ้า RF	13.56 MHz
กำลังไฟฟ้า RF	3 watts
อุณหภูมิแผ่นฐาน	190 °C
ความดันก๊าซ	1-1.5 torr
ก๊าซดิบ	$\text{GeH}_4 + \text{SiH}_4 + \text{H}_2$
อัตราการไหลของ $\text{GeH}_4$ (10% in $\text{H}_2$ )	10 – 50 cc/min
อัตราการไหลของ $\text{SiH}_4$ (10% in $\text{H}_2$ )	10 – 50 cc/min
อัตราการไหลของ $\text{H}_2$	20 cc/min



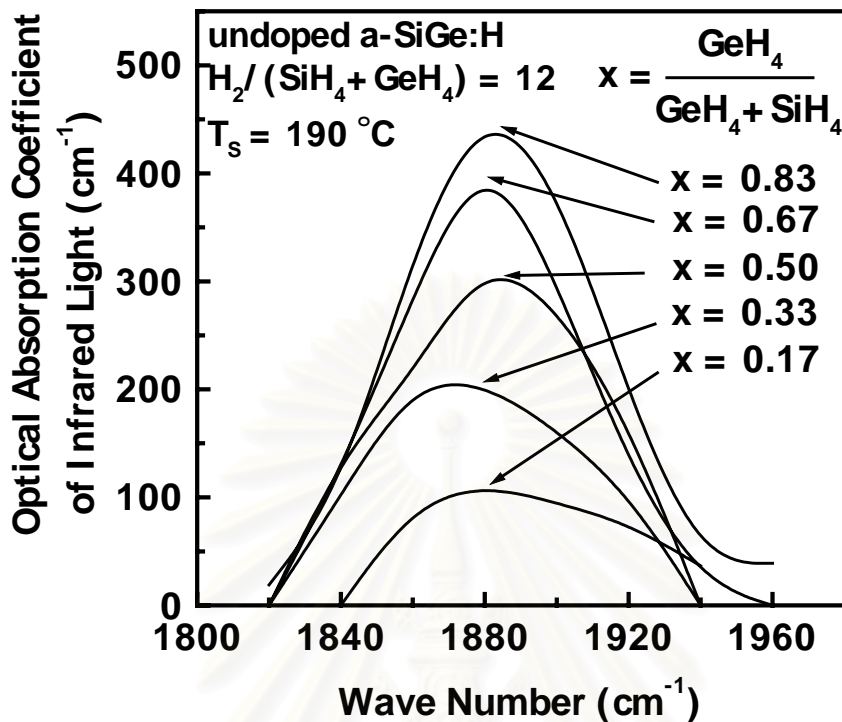
รูปที่ 3.5 สเปกตรัมสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านแสงย่านอินฟราเรดของ a-SiGe:H โดยที่  $\text{GeH}_4/(\text{GeH}_4+\text{SiH}_4) = 0.17 - 0.83$

พันธะต่างๆ ของ a-SiGe:H สามารถตรวจสอบได้โดยการวัดสเปกตรัมการทะลุผ่านแสงอินฟราเรด รูปที่ 3.5 แสดงสเปกตรัมสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านแสงอินฟราเรดของ a-SiGe:H จากรูปนี้พบว่า เมื่ออัตราส่วนก๊าซ  $\text{GeH}_4/(\text{GeH}_4+\text{SiH}_4)$  เพิ่มขึ้นจาก 0.17 - 0.83 ยอดการดูดกลืนแสงอินฟราเรดที่เลขคลื่น (wave number)  $630 \text{ cm}^{-1}$  (Si-H stretching) เลื่อนไปในทิศทางลดลงอยู่ที่เลขคลื่นย่าน  $570 \text{ cm}^{-1}$  (Ge-H bending) [8,10]

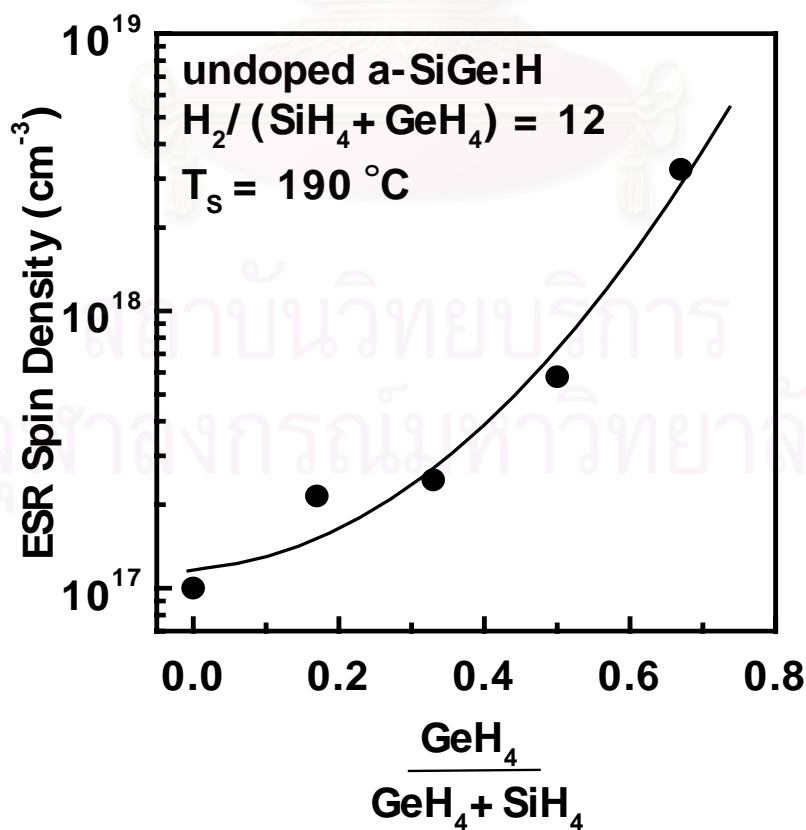
การเลื่อนของยอดการดูดกลืนแสงแสดงให้เห็นว่าฟิล์มที่เตรียมได้มีความหนาแน่นของอะตอม Ge สูงขึ้น และยังพบว่าที่เลขคลื่นย่าน  $1,850 - 1,900 \text{ cm}^{-1}$  การดูดกลืนแสงมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เมื่ออัตราส่วนก๊าซ  $\text{GeH}_4/(\text{GeH}_4+\text{SiH}_4)$  เพิ่มขึ้นจาก 0.17 - 0.83 ซึ่งเป็นการดูดกลืนอันเนื่องจากการสั่นของอะตอมชุด Ge-H ในลักษณะการสั่นแบบ stretching mode [8,10]

เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านแสงไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง จะได้สเปกตรัมสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของอะตอมชุด Ge-H ดังที่ แสดงในรูปที่ 3.6 จากรูปนี้พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนก๊าซ  $\text{GeH}_4$  จะทำให้สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของ Ge-H มีค่ามากขึ้น และเนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงอินฟราเรดแปรผันตรงกับจำนวนของอะตอม ดังนั้น

ข้อมูลในรูปที่ 3.6 จึงทำให้ทราบว่า การเพิ่มของอัตราส่วนไฮโดรเจนของก๊าซ  $\text{GeH}_4/(\text{GeH}_4+\text{SiH}_4)$  สามารถทำให้ในฟิล์มบาง a-SiGe:H มีจำนวนของอะตอม Ge มากขึ้น



รูปที่ 3.6 สเปกตรัมสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของอะตอมชุด Ge-H Stretching ที่  $\text{GeH}_4/(\text{GeH}_4+\text{SiH}_4) = 0.17 - 0.83$





รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของสปีน (แขนขาด) กับอัตราส่วนของการไหลของก๊าซ  $\text{GeH}_4/(\text{GeH}_4+\text{SiH}_4)$

รูปที่ 3.7 แสดงผลการวัดค่าความหนาแน่นของแขนขาดของ a-SiGe:H ซึ่งปลูกด้วยเงื่อนไขอัตราส่วนของการไหลของก๊าซค่าต่างๆ ผลการศึกษาพบว่าเมื่ออัตราส่วนการไหลของก๊าซ  $\text{GeH}_4/(\text{GeH}_4+\text{SiH}_4)$  เพิ่มขึ้นจาก 0.17 เป็น 0.83 จะทำให้ความหนาแน่นของแขนขาดเพิ่มจาก  $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  เป็น  $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  ข้อมูลเหล่านี้บ่งชี้ให้ทราบว่า เมื่อจำนวนของอะตอม Ge เพิ่มขึ้น จะทำให้ความหนาแน่นของแขนขาดเพิ่มมากขึ้น มีงานวิจัยรายงานว่า a-SiGe:H เป็นวัสดุที่ประกอบด้วยอะตอมของ Si, Ge และ H และที่น่าสนใจคือ อะตอม H นั้น ส่วนใหญ่จะสร้างพันธะกับ Si ดังนั้นถ้าจำนวนของอะตอม Ge เพิ่มมากขึ้น ความหนาแน่นของแขนขาดจึงเพิ่มสูงขึ้น [13]

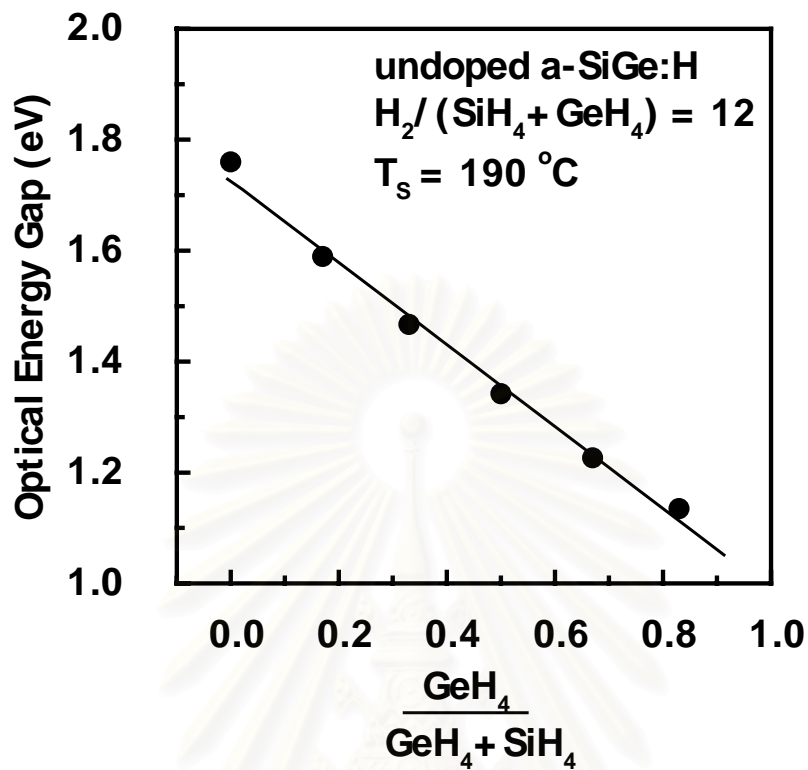
นอกจากนี้ ยังมีรายงานว่า การเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นของแขนขาดอาจจะมาจากการเพิ่มขึ้นของ  $\text{SiH}_2$  และ  $(\text{SiH}_2)_n$  หากพิจารณาจากรูปที่ 3.5 จะพบว่าเมื่ออัตราส่วนการไหลของก๊าซ  $\text{GeH}_4/(\text{GeH}_4+\text{SiH}_4)$  เพิ่มขึ้นจาก 0.17 เป็น 0.83 ที่เลขคลื่นย่าน 880 – 890  $\text{cm}^{-1}$  จะมีการดูดกลืนแสงมากขึ้น ซึ่งการดูดกลืนแสงย่านนี้เป็นการดูดกลืนแสงเนื่องจากอะตอมชุด  $\text{SiH}_2$  และ  $(\text{SiH}_2)_n$  อะตอมกลุ่มนี้เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดแขนขาดเพิ่มขึ้น [8,11] ดังนั้นค่าความหนาแน่นของแขนขาดจึงเพิ่มมากขึ้น เมื่อปริมาณของอะตอม Ge เพิ่มขึ้น

รูปที่ 3.8 แสดงสรุปความสัมพันธ์ ระหว่างอัตราส่วน ของการไหลของก๊าซ  $\text{GeH}_4/(\text{GeH}_4+\text{SiH}_4)$  และช่องว่างพลังงาน จากรูปนี้พบว่า เมื่อเพิ่มค่า  $\text{GeH}_4/(\text{GeH}_4+\text{SiH}_4)$  จาก 0.17 ถึง 0.83 จะทำให้ช่องว่างพลังงานของ a-SiGe:H ลดลงจาก 1.59 eV เป็น 1.14 eV และสีของ a-SiGe:H จะเปลี่ยนจากสีน้ำตาลเข้มเป็นสีเทาเข้ม จากข้อมูลในรูปที่ 3.6 และรูปที่ 3.8 ทำให้เราทราบว่าเมื่อจำนวนของอะตอม Ge เพิ่มขึ้น ช่องว่างพลังงานของ a-SiGe:H จะแคบลง ผลของการศึกษาเทคโนโลยีการปลูกฟิล์มบาง a-SiGe:H เหล่านี้ทำให้เราทราบว่า เราสามารถปลูกฟิล์มบาง a-SiGe:H ให้มีค่าช่องว่างพลังงานต่างๆ ในช่วง 1.1 eV ถึง 1.6 eV ได้

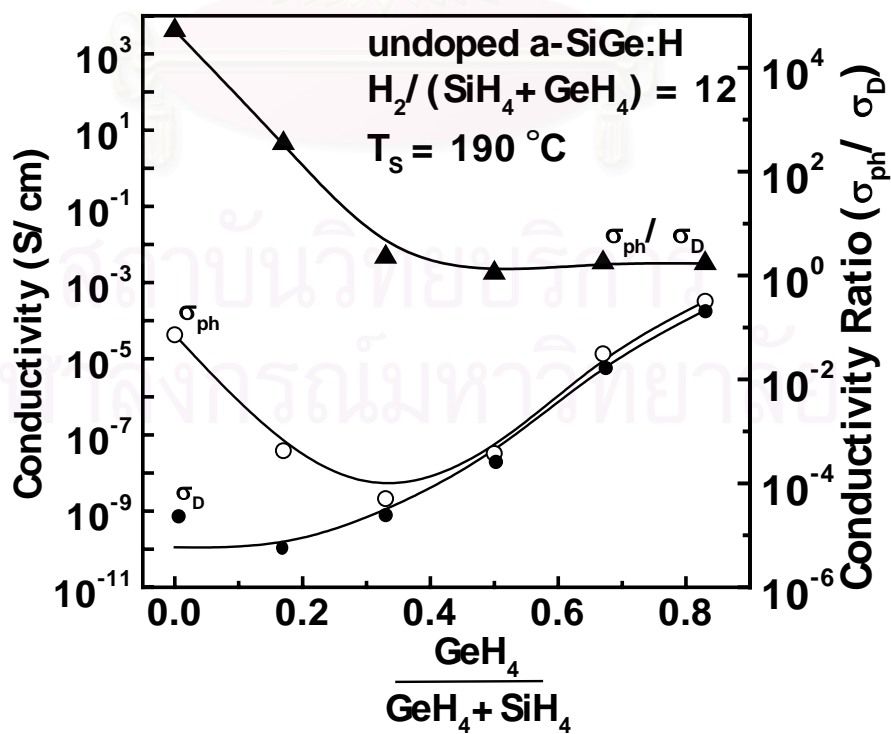
รูปที่ 3.9 แสดงผลการวัดความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของการไหลของก๊าซ  $\text{GeH}_4/(\text{GeH}_4+\text{SiH}_4)$  และค่าสภาพนำไฟฟ้ามืด ( $\sigma_D$ ) ค่าสภาพนำไฟฟ้าด้วยแสง ( $\sigma_{ph}$ ) และอัตราส่วนระหว่างสภาพนำไฟฟ้าด้วยแสงต่อสภาพนำไฟฟ้ามืด ( $\sigma_{ph}/\sigma_D$ ) จากรูปที่ 3.9 พบว่าเมื่ออัตราส่วนของการไหลของก๊าซ  $\text{GeH}_4/(\text{GeH}_4+\text{SiH}_4)$  เพิ่มขึ้น สภาพนำไฟฟ้ามืดจะเพิ่มขึ้นจากระดับ  $10^{-10} \text{ S/cm}$  ไปถึงระดับ  $10^{-4} \text{ S/cm}$

การเพิ่มขึ้นของค่าสภาพนำไฟฟ้ามืดเมื่อช่องว่างพลังงานของ a-SiGe:H แคบลงมาสาเหตุจากระดับพลังงานเฟอร์มิเคลื่อนที่เข้าใกล้แถบคอนดักชัน





รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างพลังงานกับอัตราส่วนของกาซไฮโดรเจนของก๊าซ  $GeH_4 / (GeH_4 + SiH_4)$



รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้ากับอัตราส่วนการไหลของก๊าซ

$$\text{GeH}_4/(\text{GeH}_4+\text{SiH}_4)$$

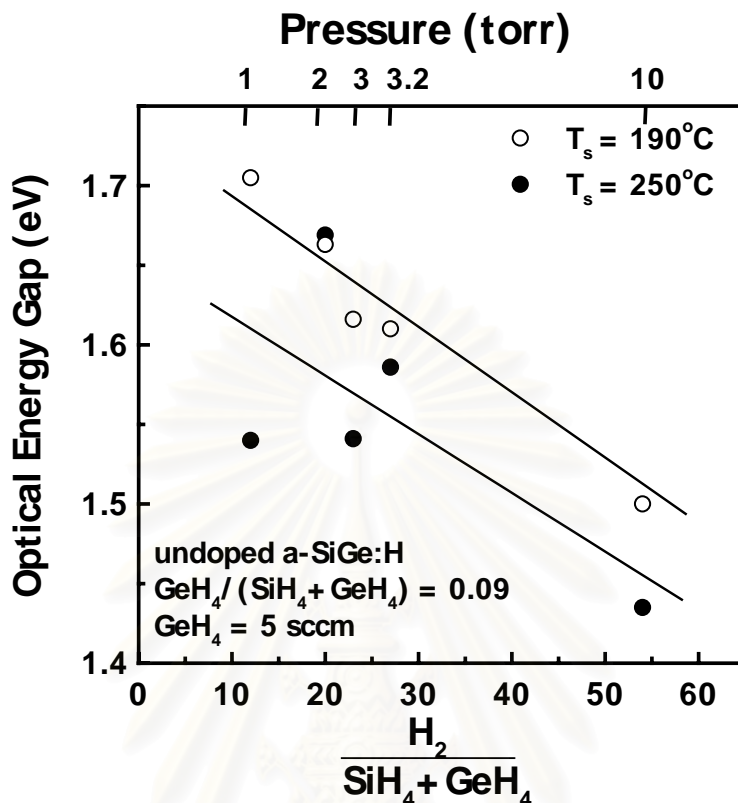
ทางด้านสำหรับความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสภาพนำไฟฟ้าด้วยแสงต่อสภาพนำไฟฟ้ามืด และอัตราส่วนการไหลของก๊าซ  $\text{GeH}_4/(\text{GeH}_4+\text{SiH}_4)$  พบว่า ที่อัตราส่วนการไหลของก๊าซ  $\text{GeH}_4/(\text{GeH}_4+\text{SiH}_4) = 0.17$  จะได้ค่าอัตราส่วนของ  $\sigma_{\text{ph}}/\sigma_{\text{D}} = 4 \times 10^2$  แต่เมื่ออัตราส่วนการไหลของก๊าซ  $\text{GeH}_4/(\text{GeH}_4+\text{SiH}_4)$  เพิ่มขึ้น อัตราส่วนของ  $\sigma_{\text{ph}}/\sigma_{\text{D}}$  จะลดน้อยลงเรื่อยๆ การลดลงของอัตราส่วนของ  $\sigma_{\text{ph}}/\sigma_{\text{D}}$  สามารถอธิบายได้ว่ามีสาเหตุมาจากการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นของแขนขาดใน a-SiGe:H ดังจะเห็นจากรูปที่ 3.7 ทั้งนี้เนื่องจากถ้าแขนขาดมีจำนวนมาก แขนขาดจะเป็นตัวดักจับพาหะที่เกิดจากแสง

### 3.4 ผลการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนการไหลของก๊าซไฮโดรเจนที่มีต่อคุณสมบัติของ a-SiGe:H

ในงานวิทยานิพนธ์นี้ ได้มีการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนการไหลของก๊าซไฮโดรเจนที่มีต่อคุณสมบัติด้านต่างๆ ของฟิล์มบาง a-SiGe:H โดยเปลี่ยนอัตราการไหลของก๊าซ  $\text{H}_2/(\text{GeH}_4+\text{SiH}_4)$  ในช่วง 12 – 54 ซึ่งแสดงเงื่อนไขในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขการปลูกฟิล์ม a-SiGe:H สำหรับศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนที่มีต่อคุณสมบัติของ a-SiGe:H

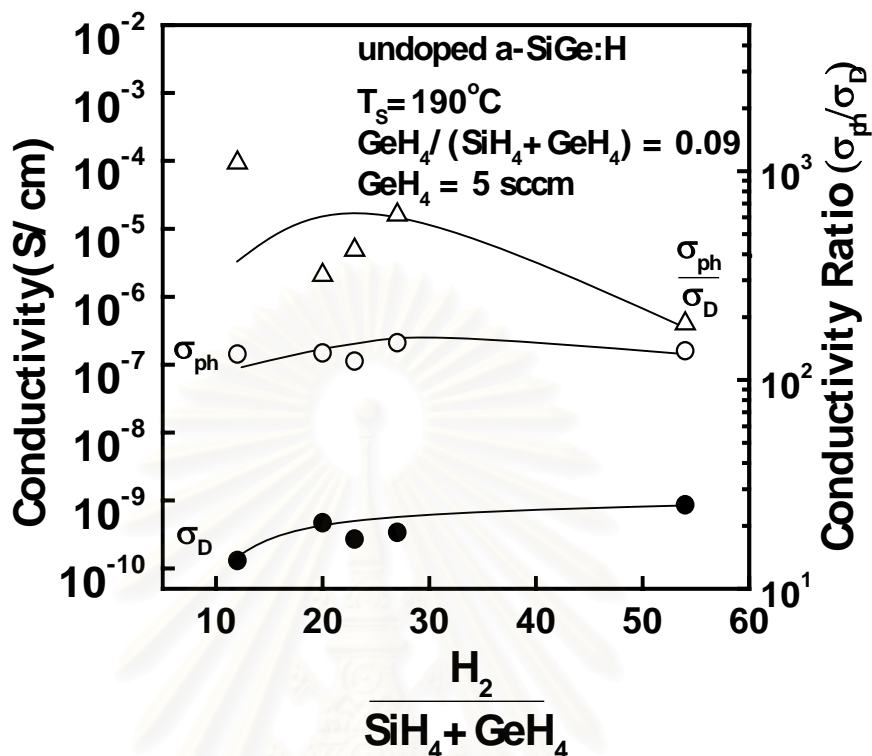
อุณหภูมิแผ่นฐาน	190°C, 250°C
ความดันก๊าซ	1-9 torr
ก๊าซดิบ	$\text{GeH}_4 + \text{SiH}_4 + \text{H}_2$
อัตราการไหลของ $\text{GeH}_4$	5 cc/min
อัตราการไหลของ $\text{SiH}_4$	50 cc/min
อัตราการไหลของ $\text{H}_2$	20 - 250 cc/min
$\text{H}_2/(\text{GeH}_4+\text{SiH}_4)$	12 – 54



รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างพลังงานกับอัตราส่วนการไหลของก๊าซ  $H_2/(SiH_4+GeH_4)$

รูปที่ 3.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการไหลของก๊าซไฮโดรเจน  $H_2/(SiH_4+GeH_4)$  และช่องว่างพลังงานของ a-SiGe:H โดยที่พารามิเตอร์คือ อุณหภูมิแผ่นฐาน ( $190^\circ C$  และ  $250^\circ C$ ) จากรูปนี้พบว่าช่องว่างพลังงานลดลงเมื่ออัตราส่วนการไหลของก๊าซไฮโดรเจน  $H_2/(SiH_4+GeH_4)$  เพิ่มขึ้น ผลการทดลองในรูปที่ 3.10 นี้ อาจอธิบายได้ดังต่อไปนี้

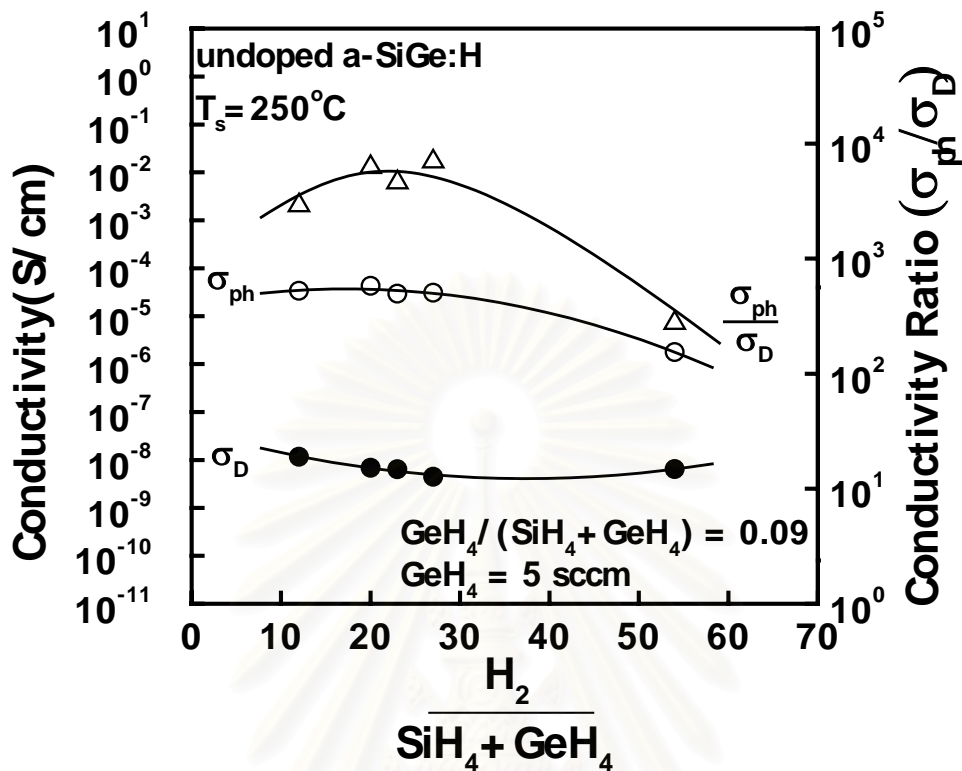
การเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจน  $H_2/(SiH_4+GeH_4)$  ในทางปฏิบัติได้ส่งผลทำให้ความดันของก๊าซใน chamber สูงขึ้น เมื่อความดันก๊าซสูงขึ้น จะส่งผลทำให้พลังงานและอุณหภูมิของอิเล็กตรอนในพลาสมาลดลง เมื่อพลังงานของอิเล็กตรอนลดลง ก็จะทำให้ประสิทธิภาพความสามารถในการแยกสลายก๊าซซิลเลน ( $SiH_4$ ) ลดลง แต่ความสามารถในการแยกสลายก๊าซเจอร์แมน ( $GeH_4$ ) ยังคงเท่าเดิม (ทั้งนี้เนื่องจาก ก๊าซ  $GeH_4$  ใช้พลังงานในการแยกสลายต่ำกว่า ก๊าซ  $SiH_4$ )



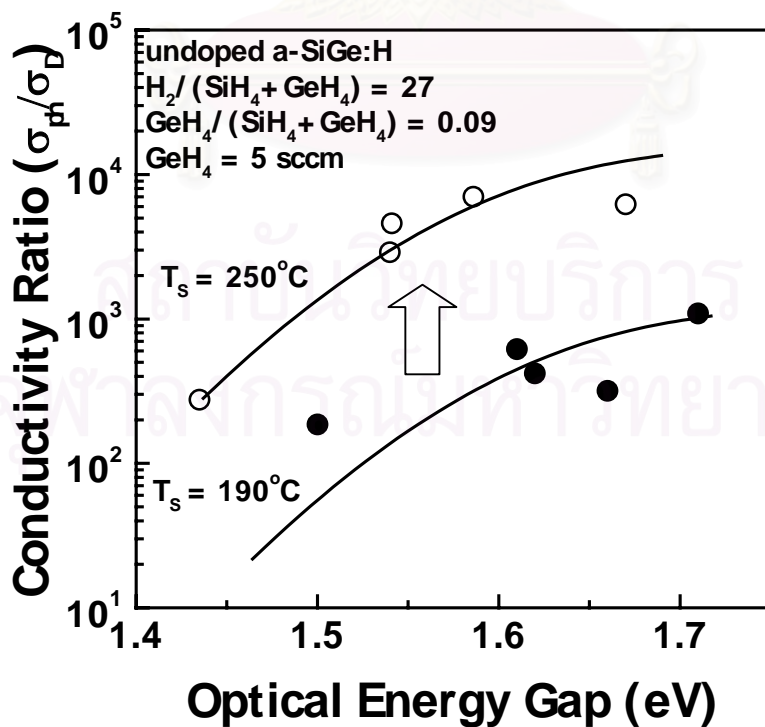
รูปที่ 3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้ากับอัตราส่วนของการไหลของก๊าซ  $\text{H}_2/(\text{GeH}_4 + \text{SiH}_4)$  ที่อุณหภูมิ 190°C

รูปที่ 3.11 และรูปที่ 3.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้ามืด ( $\sigma_D$ ) สภาพนำไฟฟ้าด้วยแสง ( $\sigma_{ph}$ ) และอัตราส่วนการไหลของก๊าซไฮโดรเจนของ a-SiGe:H ที่อุณหภูมิแผ่นฐาน 190°C และ 250°C ตามลำดับ ในทั้งสองรูปนี้ได้แสดงค่าอัตราส่วนของสภาพนำไฟฟ้าด้วยแสงต่อสภาพนำไฟฟ้ามืด ( $\sigma_{ph}/\sigma_D$ ) ไว้ด้วย จากรูปพบว่าค่า  $\sigma_{ph}/\sigma_D$  มีค่าสูงสุดระดับ  $10^2 - 10^3$  และ  $10^3 - 10^4$  เมื่ออัตราส่วนก๊าซไฮโดรเจน  $\text{H}_2/(\text{SiH}_4 + \text{GeH}_4)$  มีค่าประมาณ 20-30 สำหรับที่อุณหภูมิแผ่นฐาน 190°C และ 250°C ตามลำดับ

รูปที่ 3.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างพลังงานของ a-SiGe:H กับค่า  $\sigma_{ph}/\sigma_D$  กรณีที่อุณหภูมิแผ่นฐานเท่ากับ 190°C และ 250°C เมื่ออัตราส่วนก๊าซ  $\text{H}_2/(\text{SiH}_4 + \text{GeH}_4)$  มีค่าตั้งแต่



รูปที่ 3.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้ากับอัตราส่วนของการไหลของก๊าซ  $\text{H}_2/(\text{GeH}_4 + \text{SiH}_4)$  ที่อุณหภูมิ 250°C



รูปที่ 3.13 ความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างพลังงานของ a-SiGe:H กับค่า  $\sigma_{ph}/\sigma_D$  กรณีที่อุณหภูมิ

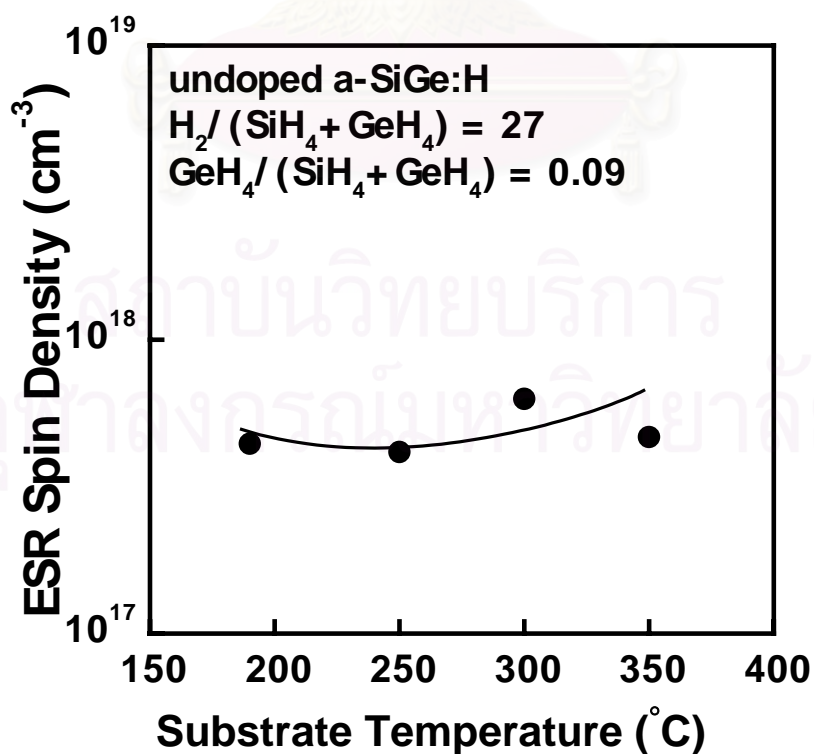
แผ่นฐานเท่ากับ 190°C และ 250°C

### 3.5 ผลการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิแผ่นฐานที่มีต่อ a-SiGe:H

เพื่อให้ได้ค่าสภาพนำไฟฟ้าที่ดีในขณะที่ช่องว่างพลังงานแคบ อุณหภูมิแผ่นฐานก็เป็นเงื่อนไขที่จะส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของฟิล์ม ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิแผ่นฐานที่มีต่อคุณสมบัติของ a-SiGe:H โดยเปลี่ยนอุณหภูมิแผ่นฐานจาก 190°C – 350°C ตารางที่ 3.3 แสดงเงื่อนไขการปลูกฟิล์ม a-SiGe:H

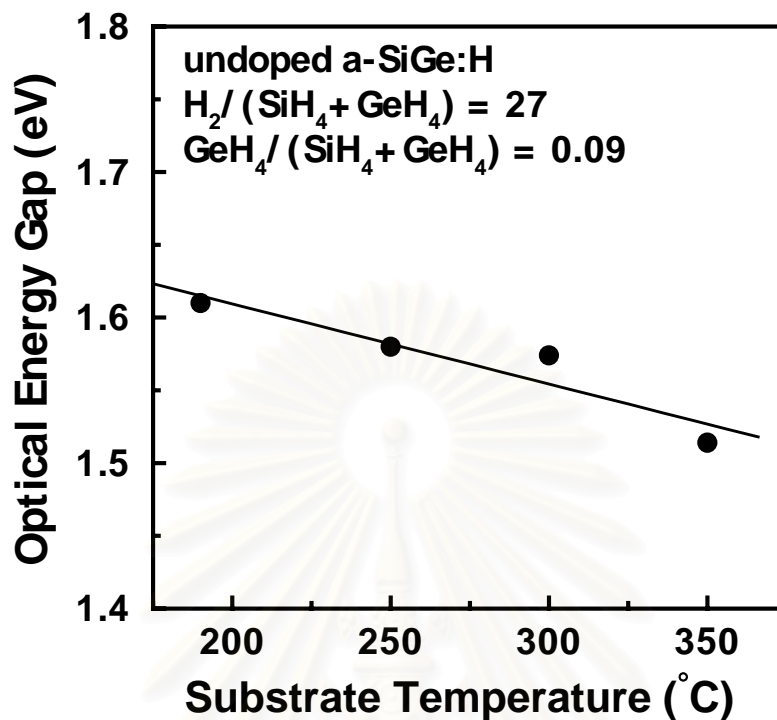
ตารางที่ 3.3 เงื่อนไขการปลูกฟิล์ม a-SiGe:H สำหรับศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิแผ่นฐานที่มีต่อ a-SiGe:H

อุณหภูมิแผ่นฐาน	190 °C -350 °C
ความดันก๊าซ	1-3 torr
อัตราการไหลของ GeH <sub>4</sub>	5 cc/min
อัตราการไหลของ SiH <sub>4</sub>	50 cc/min
อัตราการไหลของ H <sub>2</sub>	100 cc/min
GeH <sub>4</sub> /(GeH <sub>4</sub> +SiH <sub>4</sub> )	0.09

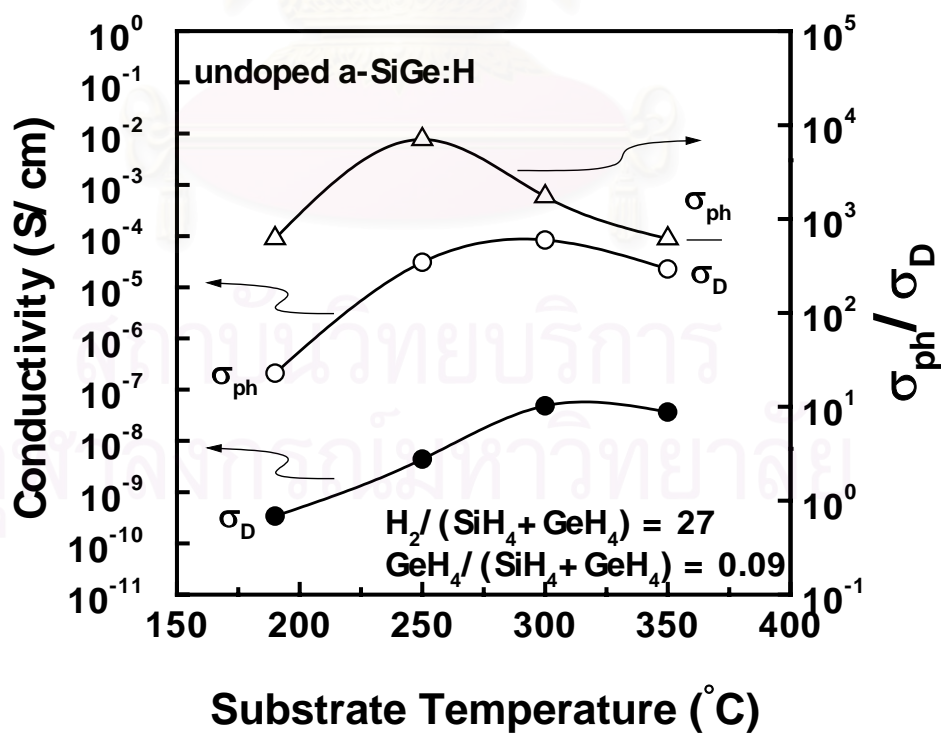




รูปที่ 3.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของสปีน (แขนขาด) กับอุณหภูมิแผ่นฐาน



รูปที่ 3.15 ความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างพลังงานกับอุณหภูมิแผ่นฐาน



รูปที่ 3.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้ากับอุณหภูมิแผ่นฐาน

รูปที่ 3.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างพลังงานของ a-SiGe:H และอุณหภูมิแผ่นฐาน จากรูปที่ 3.15 พบว่าเมื่ออุณหภูมิแผ่นฐานเพิ่มขึ้นจาก 190 °C เป็น 350 °C ค่าช่องว่างพลังงานของ a-SiGe:H จะลดลงจาก 1.61 eV เป็น 1.51 eV ทั้งนี้เนื่องจาก อะตอมไฮโดรเจนส่วนใหญ่ในฟิล์มบาง a-SiGe:H ที่เตรียมที่อุณหภูมิแผ่นฐานต่ำ จะอยู่ในรูปของ  $(\text{SiH}_2)_n$  และเป็นที่ทราบกันว่าคุณสมบัติของ  $(\text{SiH}_2)_n$  นี้ ทำให้ฟิล์มมีคุณภาพไม่ดี [10-11,13] และเมื่ออุณหภูมิแผ่นฐานสูงขึ้น จำนวนของอะตอมไฮโดรเจนใน a-SiGe:H จะลดลง ส่งผลให้ระดับพลังงานโคอโรเลชันมีจำนวนมากขึ้น ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุให้ ช่องว่างพลังงานมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิแผ่นฐานสูงขึ้น

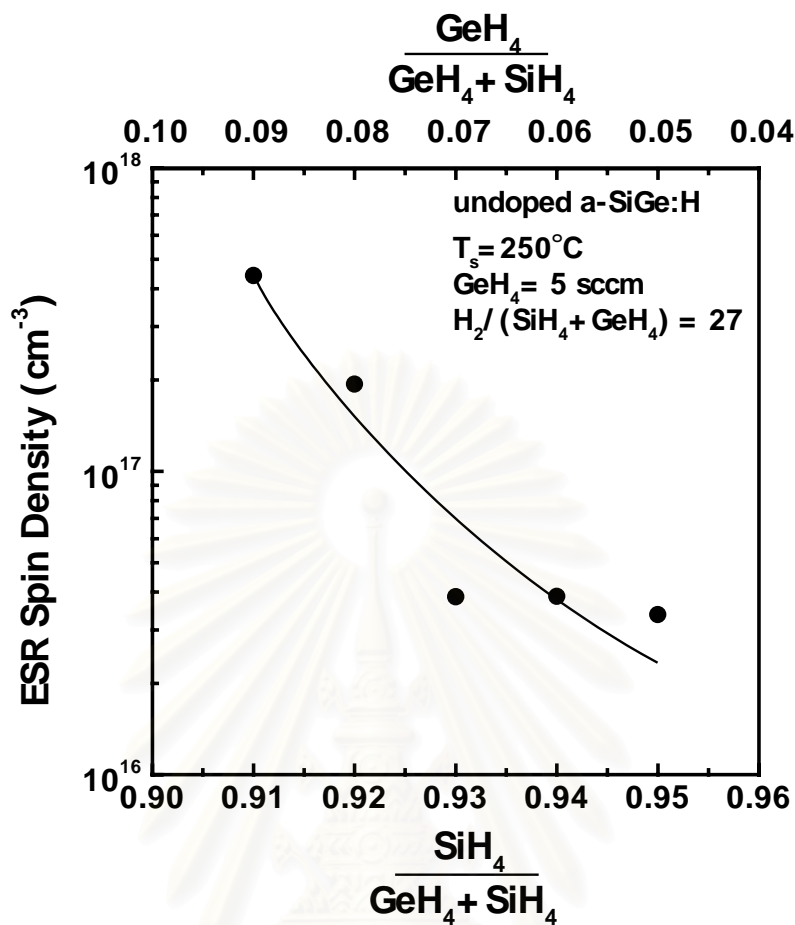
รูปที่ 3.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้ามืด ( $\sigma_D$ ) สภาพนำไฟฟ้าด้วยแสง ( $\sigma_{ph}$ ) และอุณหภูมิแผ่นฐาน ในรูปนี้ได้แสดงค่าอัตราส่วนของสภาพนำไฟฟ้าด้วยแสงต่อสภาพนำไฟฟ้ามืด ( $\sigma_{ph}/\sigma_D$ ) ไว้ด้วย ผลการทดลองพบว่า  $\sigma_{ph}/\sigma_D$  มีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิแผ่นฐานประมาณ 250°C ซึ่งสอดคล้องกับผลการวัดความหนาแน่นของแขนขาดในรูปที่ 3.14

### 3.6 ผลการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนการไหลของก๊าซไฮโดรเจนที่มีต่อคุณสมบัติของ a-SiGe:H

การเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซ  $\text{SiH}_4$  คาดว่าจะทำให้คุณสมบัติของ a-SiGe:H ดีขึ้น ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนก๊าซ  $\text{SiH}_4/(\text{GeH}_4+\text{SiH}_4)$  (ในช่วง 0.91-0.95) ที่มีต่อคุณสมบัติของ a-SiGe:H โดยคงที่อัตราส่วนก๊าซไฮโดรเจน  $\text{H}_2/(\text{GeH}_4+\text{SiH}_4)$  ไว้ที่ 27 และอัตราการไหลของก๊าซ  $\text{GeH}_4 = 5 \text{ cc/min}$  ตารางที่ 3.4 แสดงสรุปเงื่อนไขการปลูกฟิล์มบาง a-SiGe:H

ตารางที่ 3.4 เงื่อนไขการปลูกฟิล์ม a-SiGe:H สำหรับศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนที่มีต่อคุณสมบัติของ a-SiGe:H

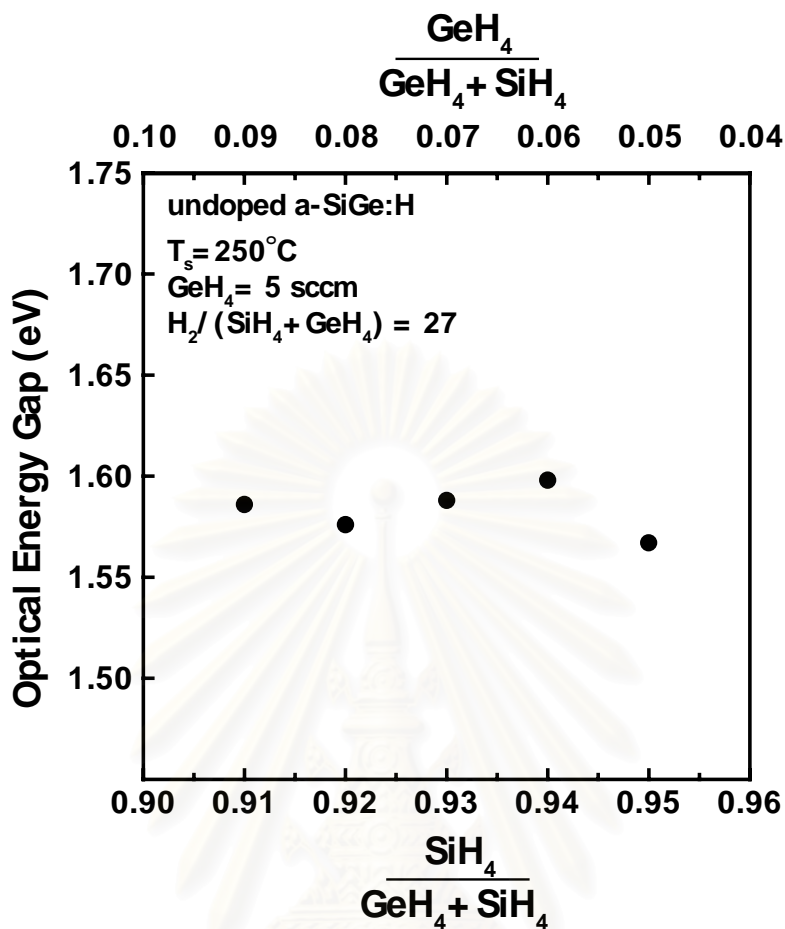
อุณหภูมิแผ่นฐาน	250 °C
ความดันก๊าซ	2 – 6 torr
อัตราการไหลของ $\text{GeH}_4$	5 cc/min
อัตราการไหลของ $\text{SiH}_4$	50 - 90 cc/min
อัตราการไหลของ $\text{H}_2$	100 - 175 cc/min
$\text{SiH}_4/(\text{GeH}_4+\text{SiH}_4)$	0.91-0.95
$\text{H}_2/(\text{GeH}_4+\text{SiH}_4)$	27



รูปที่ 3.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของสปิน (แกนขาด) กับอัตราการผลิตของก๊าซไฮโดรเจน  $\text{SiH}_4/(\text{GeH}_4 + \text{SiH}_4)$

รูปที่ 3.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของสปินและอัตราส่วนการผลิตของก๊าซ  $\text{SiH}_4/(\text{GeH}_4 + \text{SiH}_4)$  พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนการผลิตของก๊าซไฮโดรเจนจาก 0.91 – 0.95 จะทำให้ความหนาแน่นของสปินมีค่าลดลง

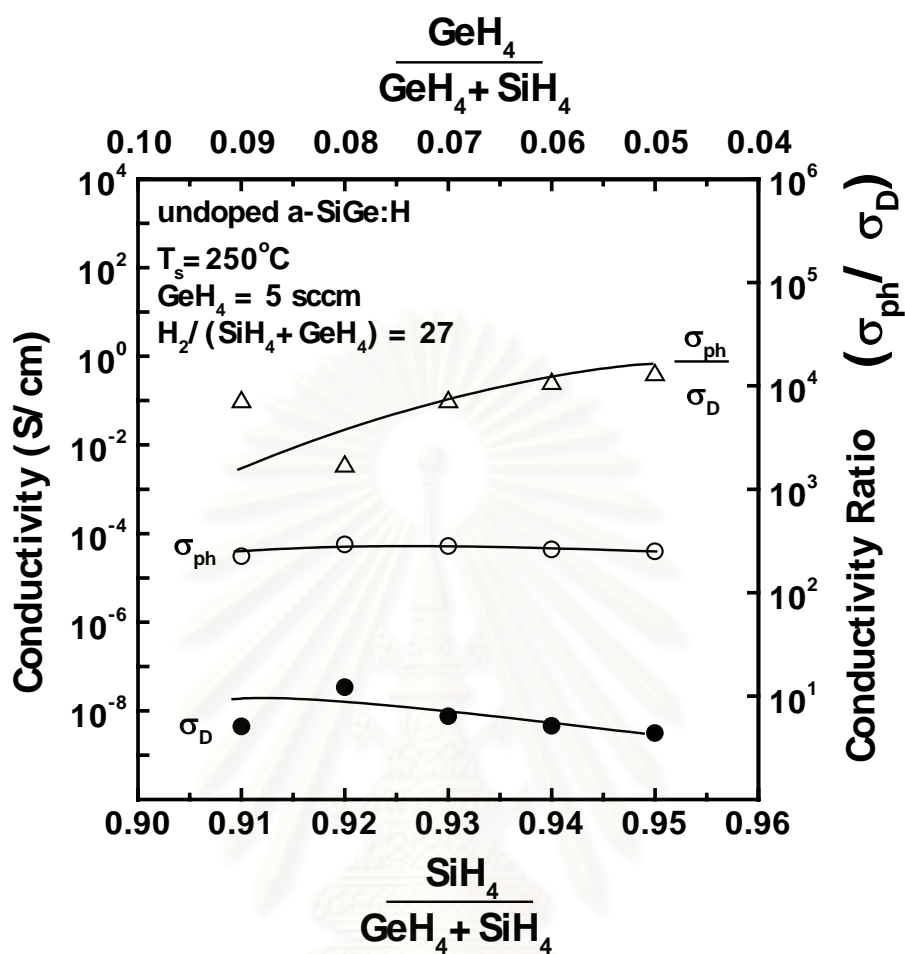
รูปที่ 3.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างพลังงานของ a-SiGe:H และอัตราส่วนการผลิตของก๊าซ  $\text{SiH}_4/(\text{SiH}_4 + \text{GeH}_4)$  จากรูปนี้พบว่าช่องว่างพลังงานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นไม่เด่นชัดเมื่ออัตราส่วนการผลิตของก๊าซ  $\text{SiH}_4/(\text{SiH}_4 + \text{GeH}_4)$  เพิ่มขึ้น เมื่อความดันภายในระบบ CVD เพิ่มสูงขึ้น อัตราการแยกสลายของก๊าซ  $\text{GeH}_4$  เมื่อเทียบกับก๊าซ  $\text{SiH}_4$  ควรเพิ่มสูงขึ้น แต่เนื่องจากอัตราการผลิตก๊าซ  $\text{SiH}_4$  มีค่าสูง จึงเป็นผลให้อัตราส่วนการผลิตแยกสลายก๊าซ  $\text{SiH}_4$  ไม่ลดลง ค่าช่องว่างพลังงานจึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นไม่เด่นชัด



รูปที่ 3.18 ความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างพลังงานของ a-SiGe:H กับอัตราส่วนการไหลของก๊าซ  $\text{SiH}_4/(\text{SiH}_4+\text{GeH}_4)$

รูปที่ 3.19 แสดงผลการวัดค่าสภาพนำไฟฟ้ามืด ( $\sigma_D$ ) ค่าสภาพนำไฟฟ้าด้วยแสง ( $\sigma_{ph}$ ) และอัตราส่วนระหว่างสภาพนำไฟฟ้าด้วยแสงต่อสภาพนำไฟฟ้ามืด ( $\sigma_{ph}/\sigma_D$ ) และอัตราส่วนของการไหลของก๊าซ  $\text{SiH}_4/(\text{GeH}_4+\text{SiH}_4)$

จากรูปที่ 3.19 พบว่าเมื่ออัตราส่วนของการไหลของก๊าซ  $\text{SiH}_4/(\text{GeH}_4+\text{SiH}_4)$  เพิ่มขึ้น สภาพนำไฟฟ้ามืดมีแนวโน้มลดลง การลดลงของค่าสภาพนำไฟฟ้ามืดนั้นเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของช่องว่างพลังงานของ a-SiGe:H เมื่ออัตราส่วนการไหลของก๊าซ  $\text{SiH}_4/(\text{GeH}_4+\text{SiH}_4)$  เพิ่มขึ้นจาก 0.91 เป็น 0.95 อัตราส่วนของ  $\sigma_{ph}/\sigma_D$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นจากระดับ  $10^3$  ถึงระดับ  $10^4$



รูปที่ 3.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้ากับอัตราส่วนของการไหลของก๊าซ

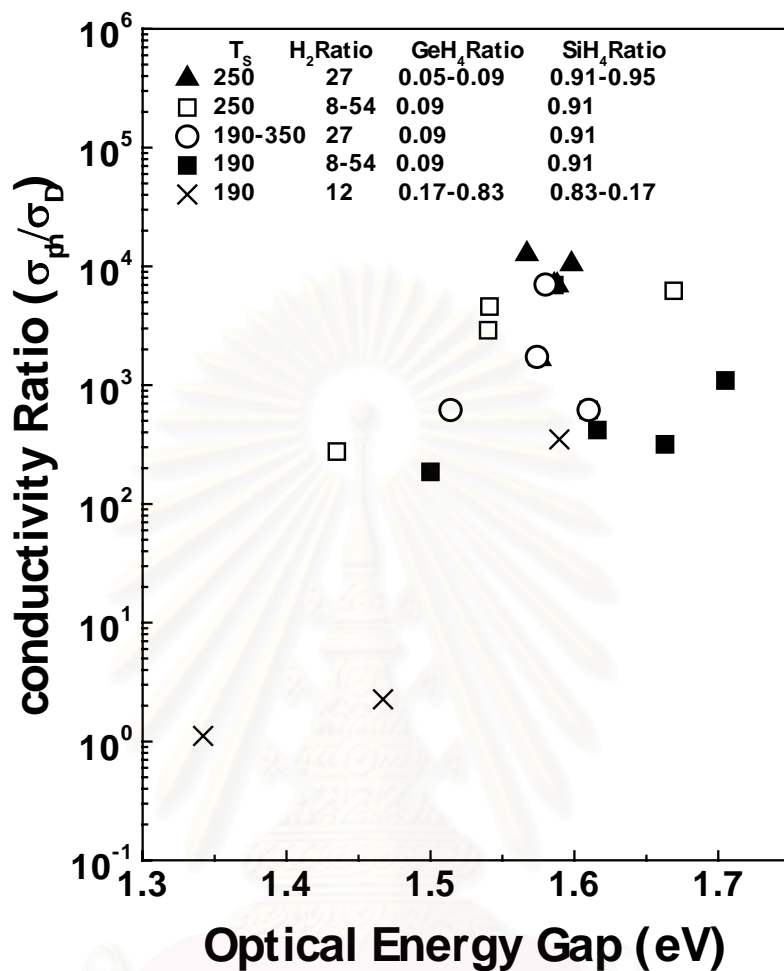
$$\frac{SiH_4}{GeH_4 + SiH_4}$$

การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนของ  $\sigma_{ph}/\sigma_D$  สามารถอธิบายได้ว่ามีสาเหตุมาจากการลดลงของความหนาแน่นของแขนขาดใน a-SiGe:H ดังจะเห็นจากรูปที่ 3.17

ตารางที่ 3.5 สรุปความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขการปลูก a-SiGe:H และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

No.	$\frac{\text{GeH}_4}{(\text{SiH}_4+\text{GeH}_4)}$	$\frac{\text{H}_2}{(\text{SiH}_4+\text{GeH}_4)}$	Substrate Temperature (°C)	Eopt (eV)	photo-conductivity ( $\sigma_{\text{ph}}$ ) (S/cm)	dark-conductivity ( $\sigma_{\text{D}}$ ) (S/cm)	$\sigma_{\text{ph}}/\sigma_{\text{D}}$	ESR spin density ( $\text{cm}^{-1}$ )
1	0.00	12	190	1.76	4.24E-05	1.13E-10	5.21E+04	1.00E+17
	0.17	12	190	1.59	3.82E-08	1.09E-10	3.50E+02	2.15E+17
	0.33	12	190	1.47	2.12E-09	9.36E-10	2.27E+00	2.46E+17
	0.50	12	190	1.34	3.25E-08	2.91E-08	1.12E+00	5.79E+17
	0.67	12	190	1.23	1.34E-05	7.55E-06	1.77E+00	3.24E+18
	0.83	12	190	1.14	3.21E-04	1.87E-04	1.72E+00	-
2	0.09	12	190	1.71	1.43E-07	1.31E-10	1.09E+03	-
	0.09	20	190	1.66	1.49E-07	4.70E-10	3.17E+02	-
	0.09	23	190	1.62	1.13E-07	2.70E-10	4.19E+02	-
	0.09	27	190	1.61	2.10E-07	3.40E-10	6.18E+02	-
	0.09	54	190	1.50	1.60E-07	8.60E-10	1.86E+02	-
3	0.09	27	190	1.61	2.10E-07	3.40E-10	6.18E+02	4.42E+17
	0.09	27	250	1.58	3.09E-05	4.40E-09	7.02E+03	4.15E+17
	0.09	27	300	1.57	8.40E-05	4.85E-08	1.73E+03	6.29E+17
	0.09	27	350	1.51	2.26E-05	3.67E-08	6.16E+02	4.66E+17
4	0.09	12	250	1.54	3.38E-05	1.17E-08	2.90E+03	7.87E+16
	0.09	20	250	1.67	4.28E-05	6.88E-09	6.22E+03	6.55E+17
	0.09	23	250	1.54	2.95E-05	6.43E-09	4.59E+03	8.48E+16
	0.09	27	250	1.59	3.09E-05	4.44E-09	6.96E+03	4.42E+17
	0.09	54	250	1.44	1.78E-06	6.46E-09	2.76E+02	1.13E+17
5	0.09	27	250	1.59	3.09E-05	4.44E-09	6.96E+03	4.42E+17
	0.08	27	250	1.58	5.68E-05	3.42E-08	1.66E+03	1.94E+17
	0.07	27	250	1.59	5.23E-05	7.52E-09	6.95E+03	3.86E+16
	0.06	27	250	1.60	4.38E-05	4.58E-09	1.04E+04	3.87E+16
	0.05	27	250	1.57	3.99E-05	3.15E-09	1.27E+04	3.37E+16





รูปที่ 3.20 สรุปความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างพลังงานกับค่าสภาพนำไฟฟ้า

### 3.7 สรุป

ผลการศึกษาคอนดักตีฟิตีพื้นฐานของ a-SiGe:H และการปรับปรุงคุณภาพของ a-SiGe:H ในบทที่ 3 สรุปได้ดังนี้

1. ได้ประสบความสำเร็จในการปลูกฟิล์มบาง a-SiGe:H ชนิดบริสุทธิ์ด้วยวิธี glow discharge plasma CVD โดยใช้ก๊าซผสมของ  $SiH_4$ ,  $GeH_4$  และ  $H_2$
2. ช่องว่างพลังงานของ a-SiGe:H มีค่าลดลงจาก 1.59 eV เป็น 1.14 eV เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของการไหลของก๊าซ  $GeH_4/(GeH_4+SiH_4)$  จาก 0.17 เป็น 0.83

3. การเพิ่มอัตราส่วนการไหลของก๊าซ  $\text{GeH}_4/(\text{GeH}_4+\text{SiH}_4)$  จะทำให้จำนวนของแขนขาเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าสภาพนำไฟฟ้าด้วยแสงลดลง
4. ประสบความสำเร็จในปรับปรุงค่าสภาพนำไฟฟ้าด้วยแสงของ a-SiGe:H โดยการผสมก๊าซ  $\text{H}_2$  ด้วยปริมาณที่เหมาะสมลงในก๊าซ  $\text{SiH}_4+\text{GeH}_4$
5. ได้มีการค้นพบว่า สามารถลดค่าช่องว่างพลังงานของ a-SiGe:H ลงได้โดยการเพิ่มค่าอัตราส่วนของการไหลของก๊าซไฮโดรเจน และด้วยวิธีการนี้ ไม่ทำให้ค่าสภาพนำไฟฟ้าด้วยแสงลดลง
6. พิล์มบาง a-SiGe:H ที่ผลิตได้สามารถเปลี่ยนค่าช่องว่างพลังงานให้มีค่าอยู่ในช่วง 1.44 - 1.67 eV ได้โดยรักษาค่า  $\sigma_{\text{ph}}/\sigma_{\text{D}}$  ไว้สูงได้ โดยการใช้อุณหภูมิแผ่นฐาน  $250^\circ\text{C}$  และใช้อัตราส่วนการไหลของก๊าซไฮโดรเจน  $\text{H}_2/(\text{SiH}_4+\text{GeH}_4) = 27$
7. ประสบความสำเร็จในการปรับปรุงค่าสภาพนำไฟฟ้าด้วยแสงของ a-SiGe:H โดยการเพิ่มอัตราส่วนการไหลของก๊าซไซเลน  $\text{SiH}_4/(\text{SiH}_4+\text{GeH}_4)$  และใช้อัตราส่วนการไหลของก๊าซไฮโดรเจน  $\text{H}_2/(\text{SiH}_4+\text{GeH}_4)$  ที่สูง ทำให้ค่า  $\sigma_{\text{ph}}/\sigma_{\text{D}}$  อยู่ในระดับ  $10^3 - 10^4$  ได้ในขณะที่ค่าช่องว่างพลังงานทางแสงแคบอยู่ในช่วง 1.56 – 1.60 eV

## บทที่ 4

### การประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียม

#### 4.1 บทนำ

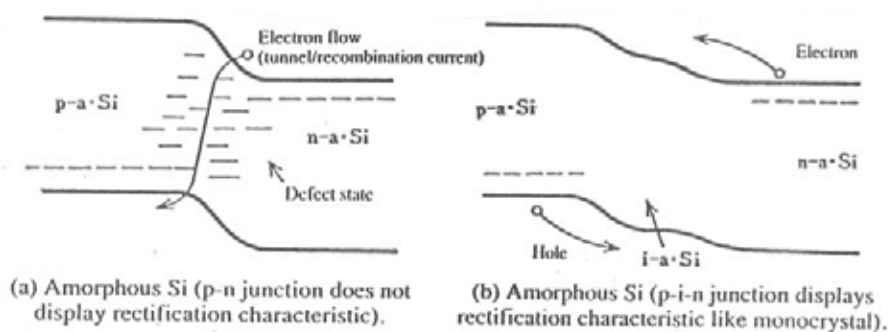
ในบทที่ 3 ได้กล่าวถึงความพยายามในการศึกษาหาเงื่อนไขในการปลูกฟิล์มบาง a-SiGe:H ให้ได้คุณสมบัติที่ดีที่สุด เช่น ได้มีการค้นพบเทคโนโลยีการผสมก๊าซ  $H_2$  ด้วยอัตราส่วนที่สูง และใช้อัตราการไหลของก๊าซ  $SiH_4/(SiH_4+GeH_4)$  ที่เหมาะสม และอุณหภูมิแผ่นฐานประมาณ  $250^\circ C$  ผลการศึกษาทำให้ได้ a-SiGe:H ที่มีช่องว่างพลังงาน 1.56-1.60 eV และมีอัตราส่วนของสภาพนำไฟฟ้าด้วยแสงต่อสภาพนำไฟฟ้ามืดสูงถึง  $10^3-10^4$  คาดว่า a-SiGe:H นี้จะสามารถนำไปใช้งานเป็นชั้นผลิตพาหะในเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อ p-i-n ได้ เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีช่องว่างพลังงานแคบดังกล่าวจะมีผลตอบสนองเชิงสเปกตรัมต่อแสงย่านแสงความยาวคลื่นยาวดีกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่มี a-Si:H (ช่องว่างพลังงาน 1.7-1.8 eV) เป็นชั้นผลิตพาหะ

ในบทนี้จะกล่าวถึง ผลการศึกษาการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อ p-i-n โดยใช้ a-SiGe:H เป็นวัสดุผลิตพาหะในชั้น i นอกจากนี้จะกล่าวถึงการหาความหนาที่เหมาะสมของชั้น i

#### 4.2 การประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-SiGe:H แบบเซลล์เดี่ยว

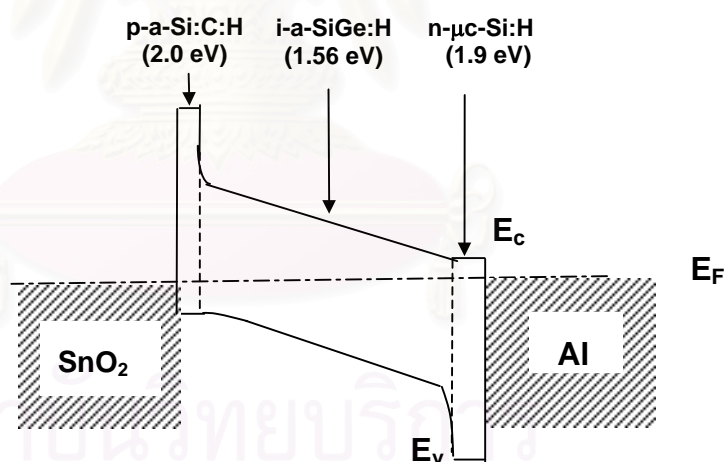
สำหรับวัสดุ a-Si:H รอยต่อ p-n ไม่สามารถแสดงคุณสมบัติการเรียงกระแสได้ (ไม่แสดงคุณสมบัติการเป็นไดโอด) ทั้งนี้เนื่องมาจากการรวมตัวของพาหะที่ระดับ localized states ที่มีอยู่มากภายในช่องว่างพลังงาน จึงเป็นสาเหตุให้สารกึ่งตัวนำชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนที่มีรอยต่อ p-n ไม่สามารถนำมาประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ได้ ดังนั้นจึงมีการนำอะมอร์ฟัสสารกึ่งตัวนำชนิดบริสุทธิ์ (ชั้น i) มาแทรกไว้ตรงกลางระหว่างชั้น p และชั้น n ดังแสดงในรูปที่ 4.1 เพื่อประโยชน์ 2 ประการสำคัญ คือ

1. ชั้น i ที่นำมาแทรกไว้ตรงกลางมีความหนาแน่น localized states น้อยกว่าในชั้น p และ n ดังนั้นจึงช่วยลดการรวมตัวในระดับ localized states ลง
2. ชั้น i ทำหน้าที่เป็นชั้นผลิตพาหะให้กับเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 4.1 รอยต่อ p-n และ p-i-n ของสารกึ่งตัวนำชนิดอะมอร์ฟัส [8]

ในบทนี้ได้นำเสนอแผนผังการปลูกฟิล์ม a-SiGe:H ที่ได้รับการปรับปรุงคุณภาพแล้วในบทที่ 3 ไปประยุกต์ใช้งานเป็นชั้นผลิตพาหะในเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งมีโครงสร้าง glass/SnO<sub>2</sub>/p-a-SiC:H/i-a-SiGe:H/n- $\mu$ C-Si:H/Al ตารางที่ 4.1 แสดงแผนผังการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ รูปที่ 4.2 แสดงลักษณะแถบพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ และรูปที่ 4.3 แสดงขั้นตอนการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 4.2 แถบพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-SiGe:H แบบเซลล์เดี่ยว

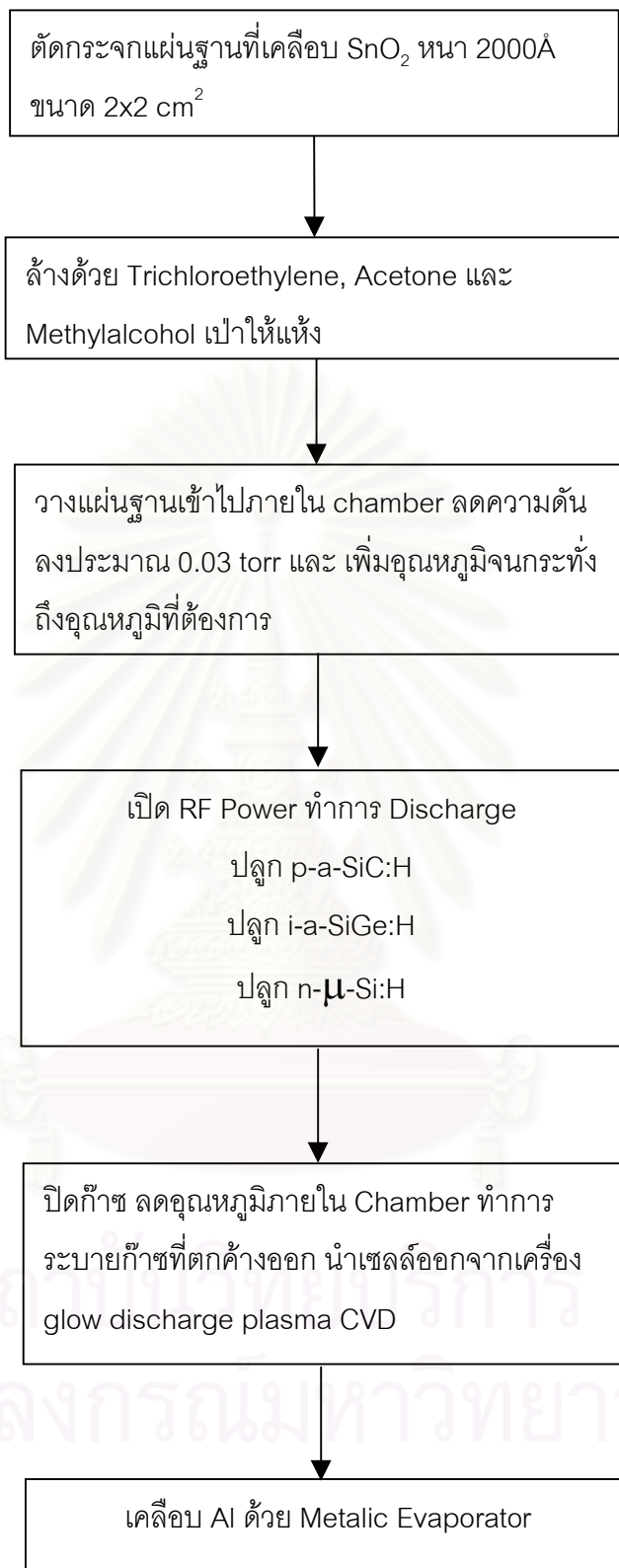
ตารางที่ 4.1 เงื่อนไขการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-SiGe:H แบบเซลล์เดี่ยว

กรณีที่ 1

ชั้น	ชนิด	ก๊าซดิบ	อุณหภูมิแผ่นฐาน (°C)	ความหนา (Å)
p	a-SiC:H	$CH_4/(SiH_4 + CH_4) = 0.67$ $B_2H_6/(SiH_4 + CH_4) = 0.007$ $SiH_4 = 15$ sccm $B_2H_6 = 60$ sccm $CH_4 = 30$ sccm	190	120
i	a-SiGe:H	$GeH_4/(GeH_4 + SiH_4) = 0.09$ $H_2/(GeH_4 + SiH_4) = 27$ $SiH_4 = 50$ sccm $GeH_4 = 5$ sccm $H_2 = 100$ sccm	250	200 – 1,000
n	$\mu$ c-Si:H	$PH_3/SiH_4 = 0.025$ $SiH_4 = 10$ sccm $PH_3 = 50$ sccm	190	400

กรณีที่ 2

p	a-SiC:H	$CH_4/(SiH_4 + CH_4) = 0.67$ $B_2H_6/(SiH_4 + CH_4) = 0.007$ $SiH_4 = 15$ sccm $B_2H_6 = 60$ sccm $CH_4 = 30$ sccm	190	120
i	a-SiGe:H	$GeH_4/(GeH_4 + SiH_4) = 0.05$ $H_2/(GeH_4 + SiH_4) = 27$ $SiH_4 = 90$ sccm $GeH_4 = 5$ sccm $H_2 = 175$ sccm	250	400 – 3,000
n	$\mu$ c-Si:H	$PH_3/SiH_4 = 0.025$ $SiH_4 = 10$ sccm $PH_3 = 50$ sccm	190	400

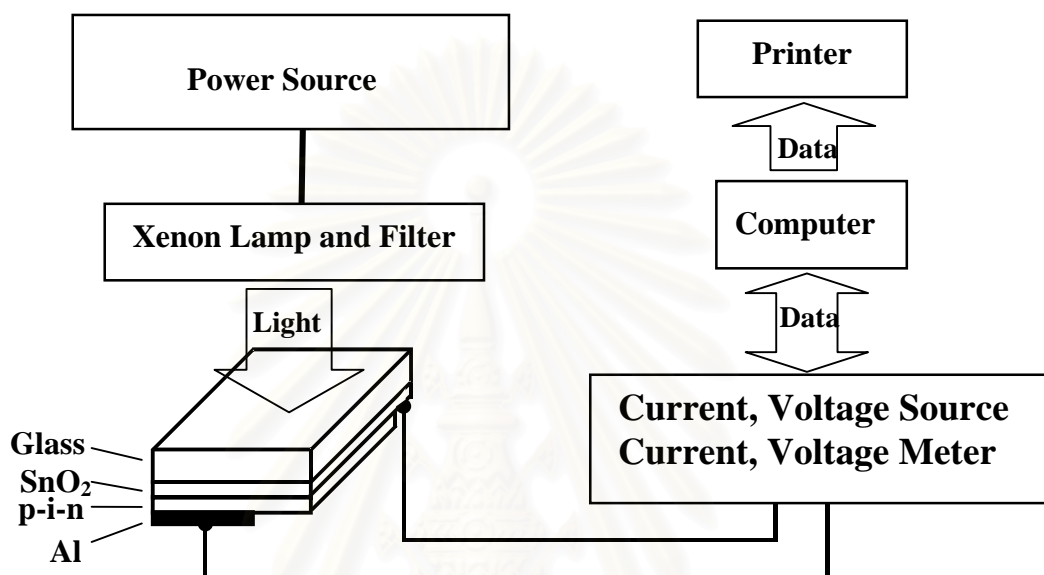


รูปที่ 4.3 ขั้นตอนประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-SiGe:H แบบเซลล์เดี่ยว

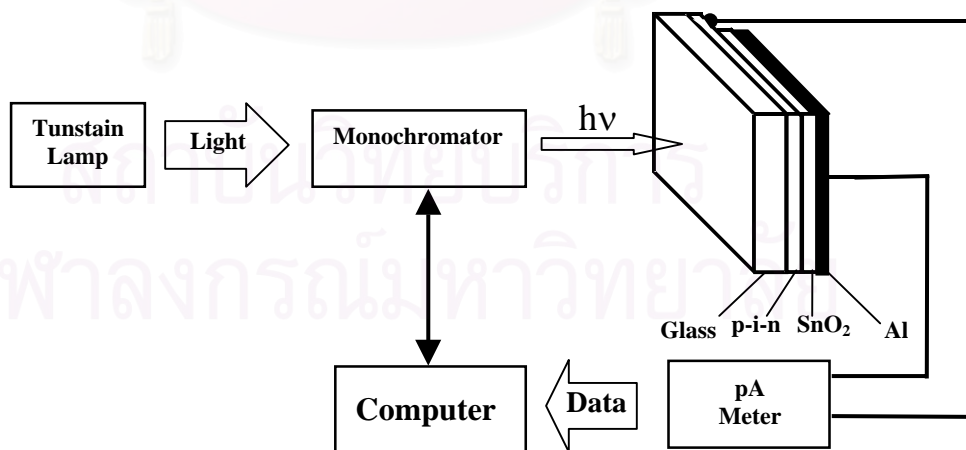


### 4.3 การวัดลักษณะสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-SiGe:H ที่ประดิษฐ์ได้ ถูกนำไปวัดลักษณะสมบัติเอาต์พุตด้วยแสงอาทิตย์เทียม ความเข้มแสง  $100 \text{ mW/cm}^2$  ดังที่แสดงในรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 แสดงแผนผังระบบการวัดผลของเชิงสเปกตรัมของเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 4.4 แผนผังการวัดลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วย solar simulator



รูปที่ 4.5 แผนผังระบบการวัดผลตอบสนองเชิงสเปกตรัมของเซลล์แสงอาทิตย์

#### 4.4 ผลการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-SiGe:H แบบเซลล์เดี่ยว

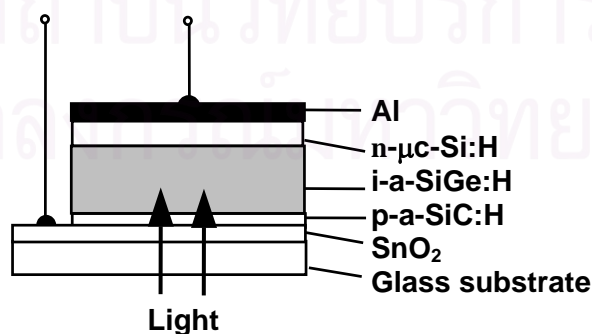
เซลล์แสงอาทิตย์ที่ประดิษฐ์มีโครงสร้างคือ Glass/SnO<sub>2</sub>/p-a-SiC:H/i-a-SiGe:H/n- $\mu$ c-Si:H/Al ดังที่แสดงในรูปที่ 4.6 โดยใช้เงื่อนไขในตารางที่ 4.1, 4.2 และ 4.3

ตารางที่ 4.2 เงื่อนไขชั้นผลิตพาหะของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-SiGe:H ก่อนการปรับปรุง

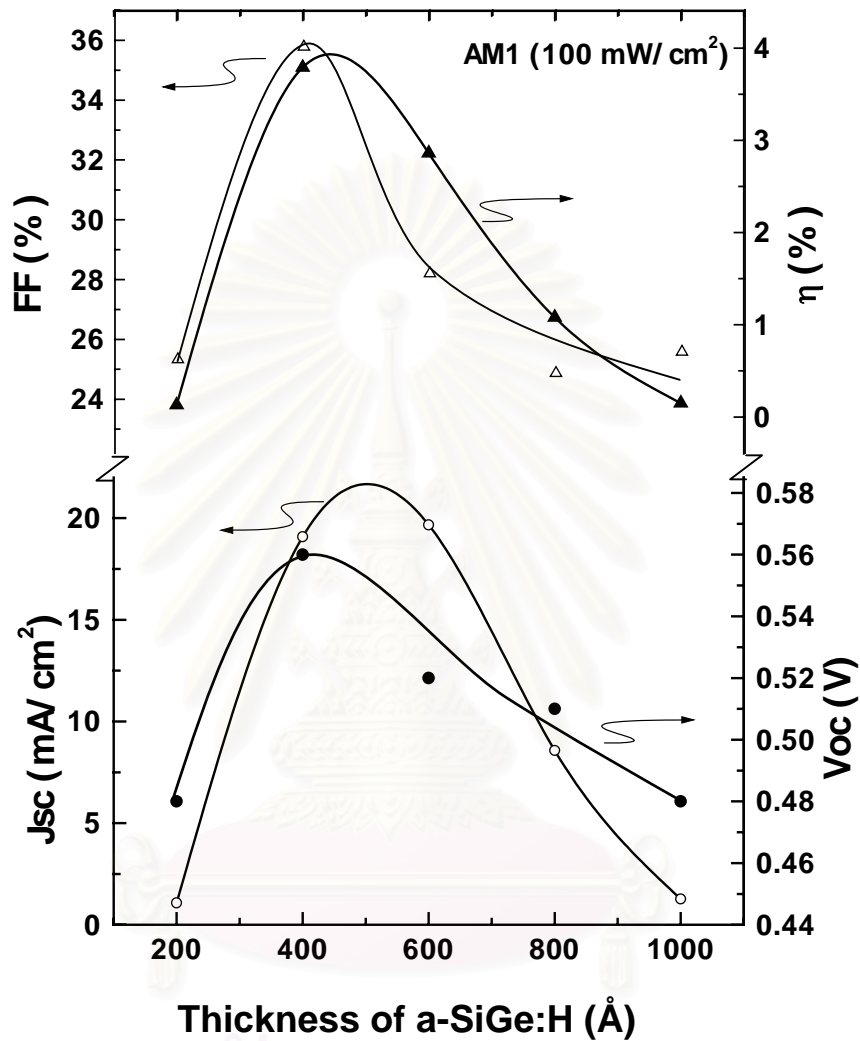
$\text{GeH}_4/(\text{GeH}_4 + \text{SiH}_4)$	0.09
$\text{H}_2/(\text{GeH}_4 + \text{SiH}_4)$	27
$\text{SiH}_4$	50 cc/m
$\text{GeH}_4$	5 cc/m
$\text{H}_2$	100 cc/m

ตารางที่ 4.3 เงื่อนไขชั้นผลิตพาหะของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-SiGe:H หลังการปรับปรุง

$\text{GeH}_4/(\text{GeH}_4 + \text{SiH}_4)$	0.05
$\text{H}_2/(\text{GeH}_4 + \text{SiH}_4)$	27
$\text{SiH}_4$	90 cc/m
$\text{GeH}_4$	5 cc/m
$\text{H}_2$	175 cc/m



รูปที่ 4.6 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-SiGe:H แบบเซลล์เดี่ยว



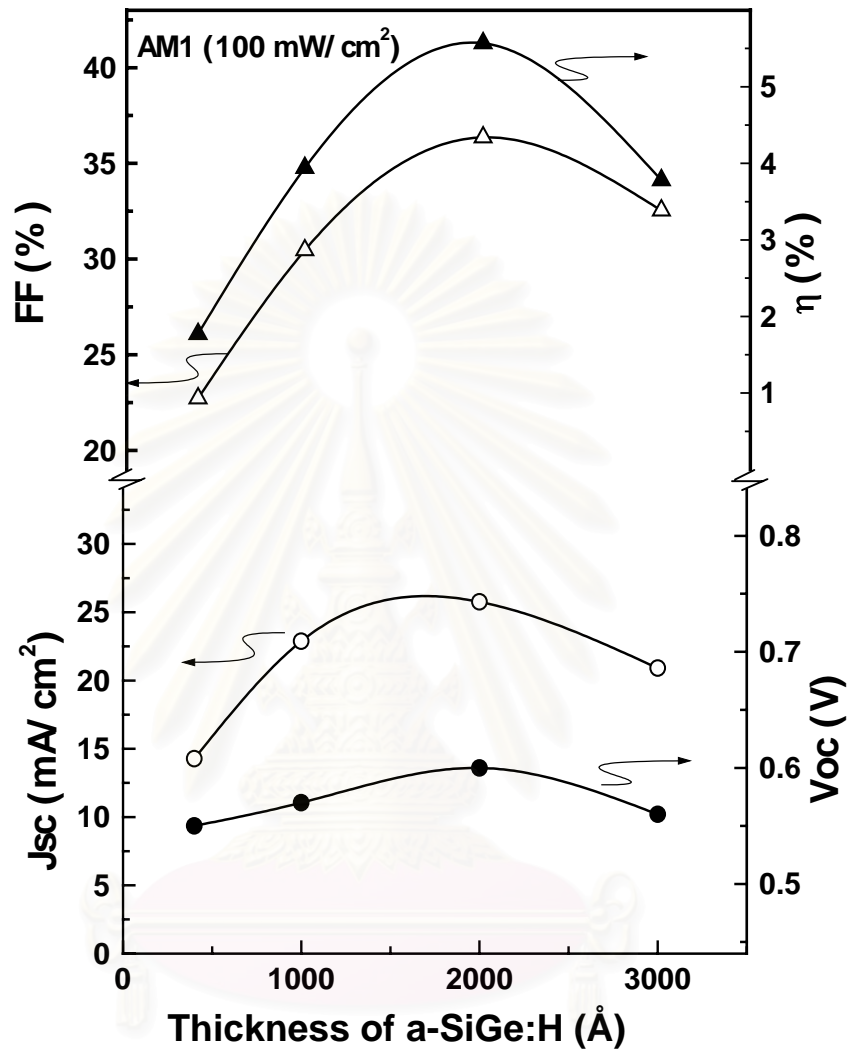
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งมี a-SiGe:H เป็นชั้นผลิตพาหะ กับ ความหนาของชั้นผลิตพาหะ โดยที่ชั้น a-SiGe:H ถูกเตรียมด้วยเงื่อนไขตามตารางที่ 4.2 (ก่อนการปรับปรุงคุณสมบัติของฟิล์ม)

ผลการวัดลักษณะสมบัติเอวต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์พบว่า ความหนาของชั้น i-a-SiGe:H มีอิทธิพลมากต่อลักษณะสมบัติเอวต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ของลักษณะสมบัติเอวต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์และความหนาของชั้น i-a-SiGe:H ในช่วง 200-1,000 Å

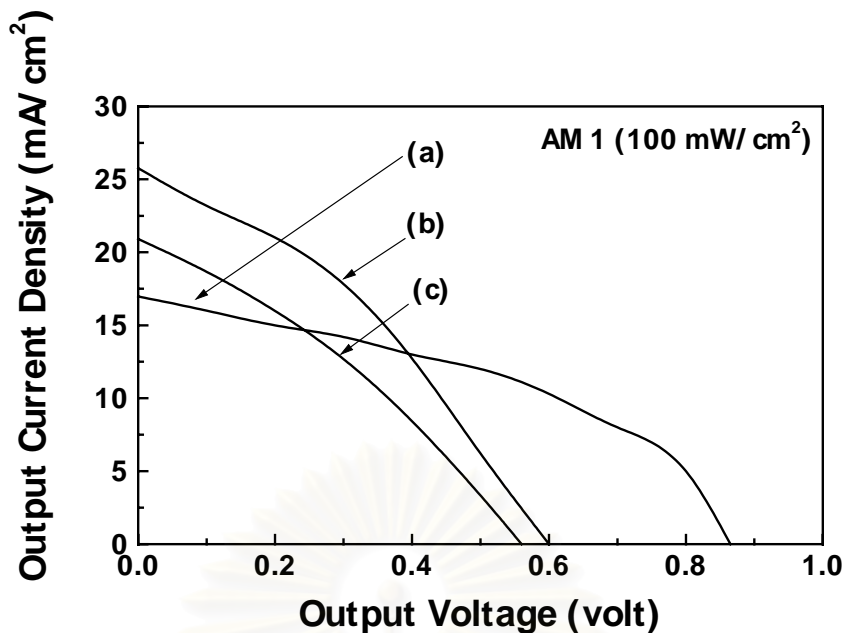
ผลการทดลองพบในรูปที่ 4.7 ว่าความหนาที่เหมาะสมของชั้น i-a-SiGe:H มีค่าน้อยมากเพียงประมาณ 400 Å ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้ประมาณ 3.7% เป็นที่น่าสังเกตว่า ในขณะที่ความหนาที่เหมาะสมของชั้น i-a-Si:H ในเซลล์แสงอาทิตย์ทั่วไปหนาถึง 5,000 Å ทั้งนี้เพราะว่าในกรณีของ a-SiGe:H ในเบื้องต้นนั้นยังมีคุณภาพที่ยังต่ำมาก และอิเล็กทรอนิกส์และโฮลมีค่าความคล่องตัวต่ำและระยะทางเฉลี่ยปลอดการชนสั้นกว่าของ a-Si:H มาก

ดังนั้น จึงมีความจำเป็นต้องปรับปรุงคุณสมบัติพื้นฐานของ a-SiGe:H ให้ดีขึ้นโดยใช้เงื่อนไขในตารางที่ 4.3

รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ลักษณะสมบัติเอวต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์และความหนาของชั้น a-SiGe:H (โดยใช้เงื่อนไขตารางที่ 4.3) พบว่าความหนาที่เหมาะสมของ i-a-SiGe:H ที่ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพสูงสุดคือประมาณ 2,000 Å ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้มีค่าประมาณ 5.6%

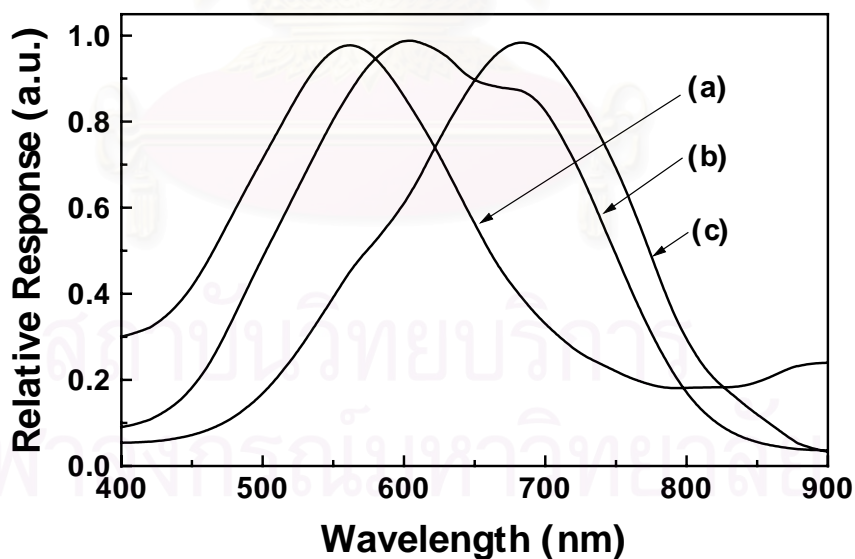


รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งมี a-SiGe:H เป็นชั้นผลิตพาหะ กับ ความหนาของชั้นผลิตพาหะ กรณีชั้นผลิตพาหะมีเงื่อนไขตามตารางที่ 4.3 (หลังการปรับปรุงคุณสมบัติของฟิล์ม)



รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีความหนาชั้น i-a-SiGe:H ค่าต่างๆ เงื่อนไขตามตารางที่ 4.3 กับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H

- a) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H มีความหนาชั้น i-a-Si:H = 5,000 Å
- b) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-SiGe:H มีความหนาชั้น i-a-SiGe:H = 2,000 Å
- c) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-SiGe:H มีความหนาชั้น i-a-Si:H = 3,000 Å



รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบสเปกตรัมผลตอบสนองทางแสงของ a-SiGe:H ที่มีความหนาชั้น i-a-SiGe:H ค่าต่างๆ เงื่อนไขตามตารางที่ 4.3 กับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H

- a) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H มีความหนาชั้น i-a-Si:H = 5,000 Å
- b) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-SiGe:H มีความหนาชั้น i-a-SiGe:H = 2,000 Å
- c) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-SiGe:H มีความหนาชั้น i-a-Si:H = 3,000 Å



รูปที่ 4.9 แสดงลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด  $a\text{-SiGe:H}$  ที่ความหนาแน่น  $i\text{-}a\text{-SiGe:H}$  ต่างๆ กัน เมื่อเปรียบเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด  $a\text{-Si:H}$  และรูปที่ 4.10 แสดงผลตอบสนองเชิงสเปกตรัมของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด  $a\text{-SiGe:H}$  พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด  $a\text{-SiGe:H}$  มีผลตอบสนองต่อแสงความยาวคลื่นยาวดีกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด  $a\text{-Si:H}$

นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อความหนาแน่นของชั้น  $i\text{-}a\text{-SiGe:H}$  เพิ่มขึ้นเซลล์แสงอาทิตย์สามารถตอบสนองต่อแสงที่มีความยาวคลื่นยาวได้ดีขึ้นด้วย ทั้งนี้อาจอธิบายได้ดังนี้คือ เนื่องจากวัสดุ  $a\text{-SiGe:H}$  มีค่าอายุพาหะและความคล่องตัวน้อยเมื่อเทียบกับ  $a\text{-Si:H}$  ดังนั้นพาหะ (อิเล็กตรอน) เนื่องจากแสงความยาวคลื่นสั้น ที่เกิดขึ้นบริเวณใกล้รอยต่อชั้น  $p$  (ด้านรับแสง) จะรวมตัวก่อนที่จะไปถึงชั้น  $n$  ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ตอบสนองต่อแสงที่มีความยาวคลื่นสั้นได้ไม่ดี ดังนั้นจึงคาดว่าที่ความหนาแน่น  $i\text{-}a\text{-SiGe:H}$  ประมาณ  $2,000 \text{ \AA}$  เป็นความหนาแน่นที่เหมาะสมที่จะทำให้พาหะที่เกิดขึ้นใกล้รอยต่อด้าน  $p$  สามารถเคลื่อนที่ไปถึงชั้น  $n$  ได้ และเป็นความหนาแน่นที่เหมาะสมที่จะทำให้เซลล์แสงอาทิตย์สามารถดูดกลืนแสงได้ดีที่สุด ซึ่งความหนาแน่นนี้อาจเพิ่มขึ้นได้หากฟิล์ม  $a\text{-SiGe:H}$  ได้มีการปรับปรุงขึ้นอีก

#### 4.5 สรุป

ผลการศึกษาการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด  $a\text{-SiGe:H}$  แบบเซลล์เดี่ยวในบทที่ 4 สรุปได้ดังนี้

1. ในเบื้องต้นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด  $a\text{-SiGe:H}$  ที่ประดิษฐ์ได้มีประสิทธิภาพประมาณ 3.7% ที่ความหนาแน่นของชั้น  $i\text{-}a\text{-SiGe:H}$  เท่ากับ  $400 \text{ \AA}$  ในขณะที่ความหนาแน่นที่เหมาะสมของชั้น  $i\text{-}a\text{-Si:H}$  ในเซลล์แสงอาทิตย์ทั่วไปหนาถึง  $5,000 \text{ \AA}$  ทั้งนี้เพราะว่าในกรณีของ  $a\text{-SiGe:H}$  นั้นอิเล็กตรอนและโฮลมีค่าความคล่องตัวต่ำและระยะทางเฉลี่ยปลอดการชนสั้นกว่าของ  $a\text{-Si:H}$
2. เมื่อมีการปรับปรุงคุณสมบัติของฟิล์ม  $a\text{-SiGe:H}$  ให้มีคุณสมบัติดีขึ้น เซลล์แสงอาทิตย์ที่ประดิษฐ์ได้มีประสิทธิภาพสูงถึง 5.6% ที่ความหนาแน่นของชั้น  $i\text{-}a\text{-SiGe:H}$  เท่ากับ  $2,000 \text{ \AA}$
3. ผลการวัดสเปกตรัมตอบสนองต่อแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด  $a\text{-SiGe:H}$  ซึ่งมีช่องว่างพลังงาน 1.5-1.6 eV ได้ผลว่าตอบสนองต่อแสงที่มีความยาวคลื่นยาวดีกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด  $a\text{-Si:H}$

## บทที่ 5

### การประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสโครงสร้างพิเศษ

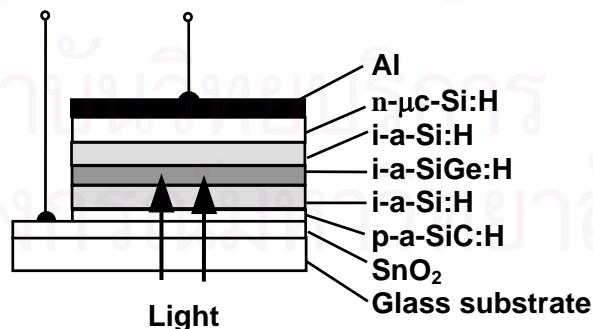
#### 5.1 บทนำ

ในบทที่ 4 ได้กล่าวถึงการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-SiGe:H แบบเซลล์เดี่ยวซึ่งมีโครงสร้างรอยต่อ p-i-n ได้ประสิทธิภาพสูงสุดประมาณ 5.6% อย่างไรก็ตาม เนื่องจากเทคนิคการปลูกฟิล์มบาง a-Si:H และ a-SiGe:H นั้น สามารถสร้างให้ฟิล์มซ้อนทับกันเป็น multi-layers ได้ ดังนั้นจึงเป็นที่น่าสนใจว่า ถ้ามีการออกแบบให้ชั้นผลิตพาหะมีลักษณะโครงสร้างที่มีทั้งชั้นของ a-Si:H (ช่องว่างพลังงาน 1.8 eV) และชั้น a-SiGe:H (ช่องว่างพลังงาน 1.6 eV) ซ้อนกันเป็น multi-layers อาจจะทำให้ได้เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีลักษณะสมบัติเอาต์พุตที่น่าสนใจ

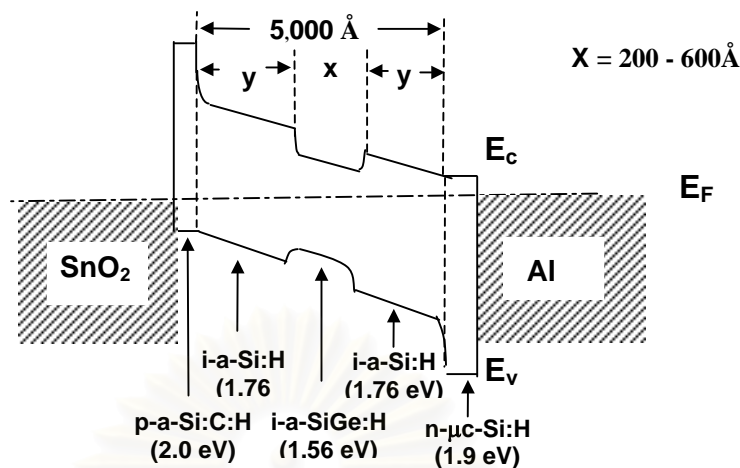
บทนี้ จะกล่าวถึงผลการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดที่มีชั้นผลิตพาหะซ้อนกันหลายชั้น ซึ่งทำให้ช่องว่างพลังงานมีลักษณะแปลกๆ หลายรูปแบบ ได้แก่ กรณีช่องว่างพลังงานของชั้นผลิตพาหะมีลักษณะเป็นรูปตัว U (i-a-Si:H/i-a-SiGe:H/i-a-Si:H) กรณีช่องว่างพลังงานของชั้นผลิตพาหะมีลักษณะเป็นรูป step function (i-a-SiGe:H/i-a-Si:H และ i-a-Si:H/i-a-SiGe:H)

#### 5.2 การประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ที่ชั้นผลิตพาหะมีลักษณะช่องว่างพลังงานเป็นรูปอักษร U

โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ชั้นผลิตพาหะมีช่องว่างพลังงานเป็นรูปอักษร U แสดงในรูปที่ 5.1 และลักษณะแถบพลังงานแสดงในรูปที่ 5.2 ความหนารวมของชั้นผลิตพาหะเท่ากับ 5,000 Å



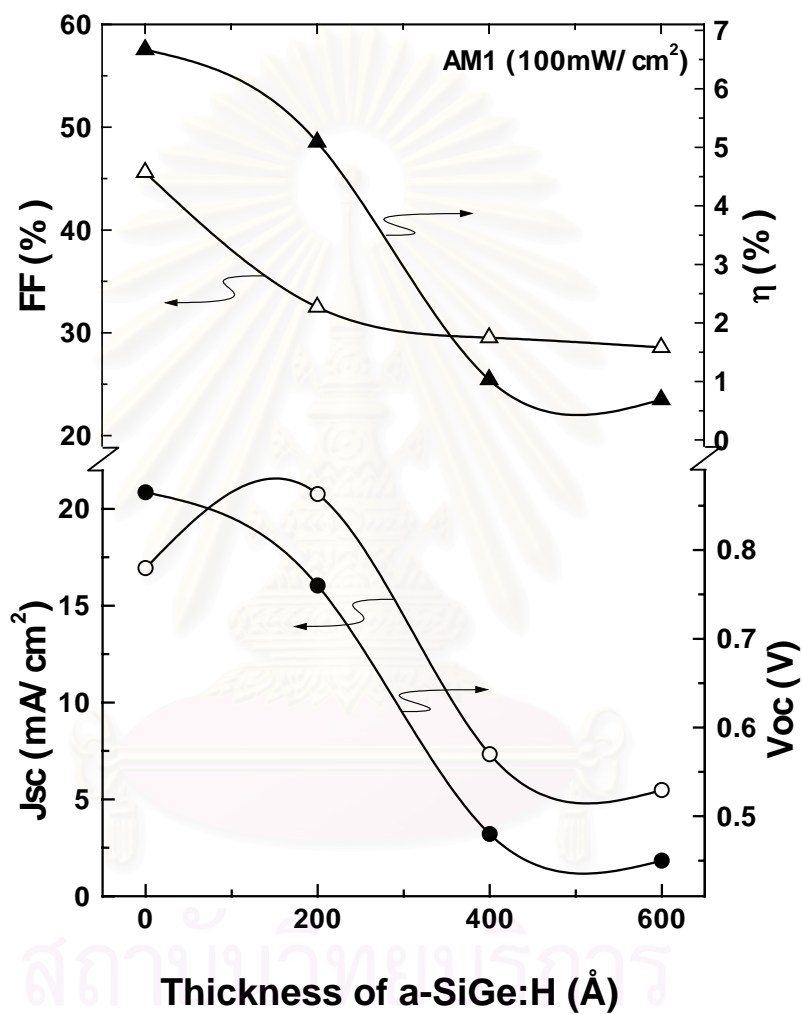
รูปที่ 5.1 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งช่องว่างพลังงานของชั้นผลิตพาหะมีลักษณะเป็นรูปอักษร U



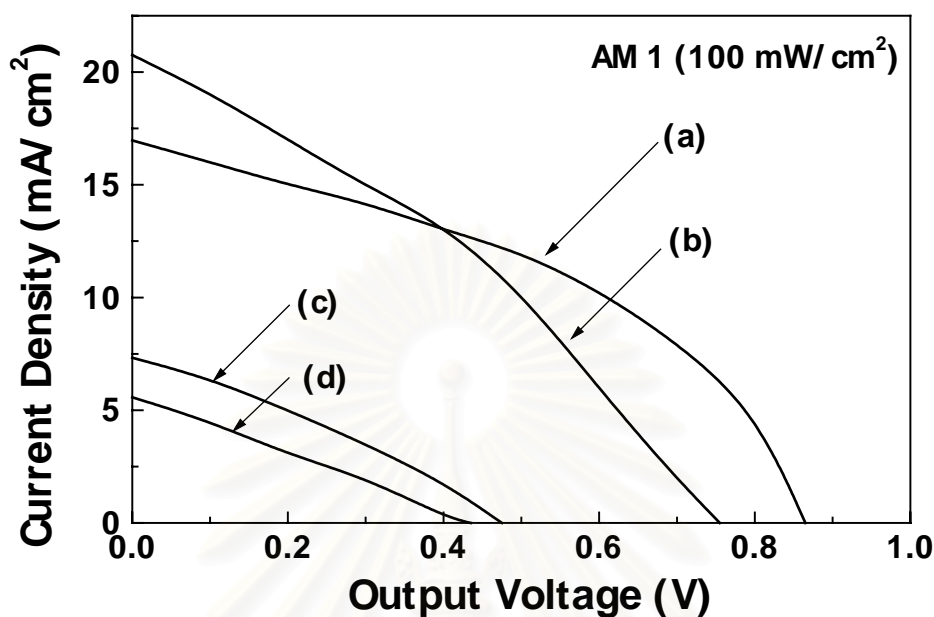
รูปที่ 5.2 ลักษณะแถบพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งช่องว่างพลังงานของชั้นผลิตพาหะมีลักษณะเป็นรูปอักษร U

ตารางที่ 5.1 เงื่อนไขการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งช่องว่างพลังงานของชั้นผลิตพาหะมีลักษณะเป็นรูปอักษร U

ชั้น	ชนิด	ก๊าซดิบ	อุณหภูมิแผ่นฐาน (°C)	ความหนา (Å)
p	a-SiC:H	$CH_4/(SiH_4 + CH_4) = 0.67$ $B_2H_6/(SiH_4 + CH_4) = 0.007$ $SiH_4 = 15$ sccm $B_2H_6 = 60$ sccm $CH_4 = 30$ sccm	190	120
i	a-Si:H	$SiH_4 = 20$ sccm	190	2,200 - 2,400
i	a-SiGe:H	$GeH_4/(GeH_4 + SiH_4) = 0.09$ $H_2/(GeH_4 + SiH_4) = 27$ $SiH_4 = 50$ sccm $GeH_4 = 5$ sccm $H_2 = 100$ sccm	250	200 - 600
i	i-a-Si:H	$SiH_4 = 20$ sccm	190	2,200 - 2,400
n	μc-Si:H	$PH_3/SiH_4 = 0.025$ $SiH_4 = 10$ sccm $PH_3 = 50$ sccm	190	400



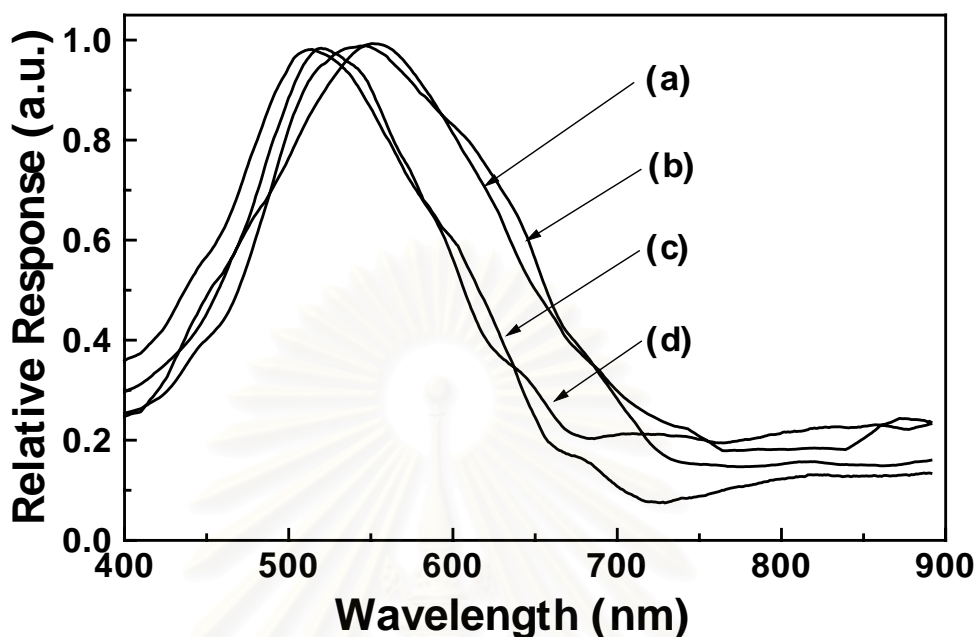
รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นผลิตพาหะที่มีลักษณะแถบพลังงานเป็นรูปอักษร U กับความหนาของ i-a-SiGe:H



รูปที่ 5.4 เปรียบเทียบลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นผลิตพาหะที่มีลักษณะแถบพลังงานเป็นรูปอักษร U กรณี

- เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้น i-a-Si:H = 5,000Å
- เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้น i-a-Si:H/i-a-SiGe:H/i-a-Si:H = 2,400Å/200Å/2,400Å
- เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้น i-a-Si:H/i-a-SiGe:H/i-a-Si:H = 2,300Å/400Å/2,300Å
- เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้น i-a-Si:H/i-a-SiGe:H/i-a-Si:H = 2,200Å/600Å/2,200Å

รูปที่ 5.3 และ 5.4 แสดงลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งชั้นผลิตพาหะมีลักษณะของช่องว่างพลังงานเป็นรูปอักษร U (i-a-Si:H/i-a-SiGe:H/i-a-Si:H) พบว่าเมื่อเพิ่มความหนาของชั้น i-a-SiGe:H จาก 0 เป็น 600Å จะทำให้ประสิทธิภาพลดลง แต่สิ่งที่น่าสนใจคือ เมื่อความหนาของ i-a-SiGe:H มีค่าเท่ากับ 200 Å กระแสลัดวงจรจะมีค่าสูงที่สุดอยู่ที่ประมาณ 22 mA/cm<sup>2</sup> แต่เมื่อความหนาของชั้น i-a-SiGe:H มากกว่า 200 Å กระแสไฟฟ้าลัดวงจรก็จะลดลง



รูปที่ 5.5 เปรียบเทียบสเปกตรัมผลตอบสนองต่อแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นผลิตพาหะที่มี

ลักษณะ แถบพลังงานเป็นรูปอักษร U กรณี

a) เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้น  $i\text{-a-Si:H} = 5,000\text{\AA}$

b) เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้น  $i\text{-a-Si:H}/i\text{-a-SiGe:H}/i\text{-a-Si:H} = 2,400\text{\AA}/200\text{\AA}/2,400\text{\AA}$

c) เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้น  $i\text{-a-Si:H}/i\text{-a-SiGe:H}/i\text{-a-Si:H} = 2,300\text{\AA}/400\text{\AA}/2,300\text{\AA}$

d) เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้น  $i\text{-a-Si:H}/i\text{-a-SiGe:H}/i\text{-a-Si:H} = 2,200\text{\AA}/600\text{\AA}/2,200\text{\AA}$

รูปที่ 5.5 แสดงการเปรียบเทียบสเปกตรัมผลตอบสนองต่อแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นผลิตพาหะที่มีลักษณะ แถบพลังงานเป็นรูปอักษร U พบว่าเมื่อความหนาของ  $i\text{-a-SiGe:H}$  เพิ่มขึ้น การตอบสนองต่อแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ในช่วงความยาวคลื่นยาวมีค่าลดลง อาจจะมีสาเหตุมาจากการที่พาหะรวมตัวกันก่อนที่จะสามารถเคลื่อนผ่านชั้น  $i\text{-a-SiGe:H}$  ไปยังภายนอกได้



### 5.3 การประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นผลิตพาหะมีลักษณะช่องว่างพลังงานเป็น step function

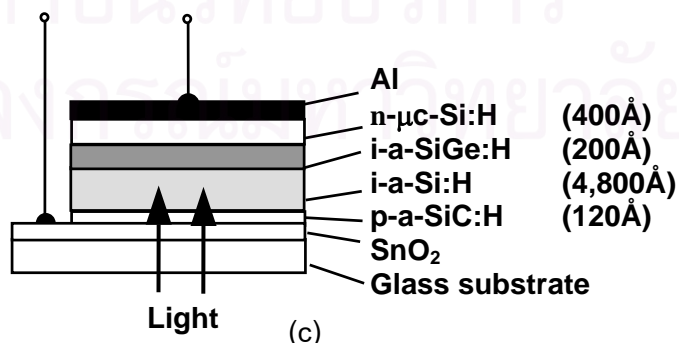
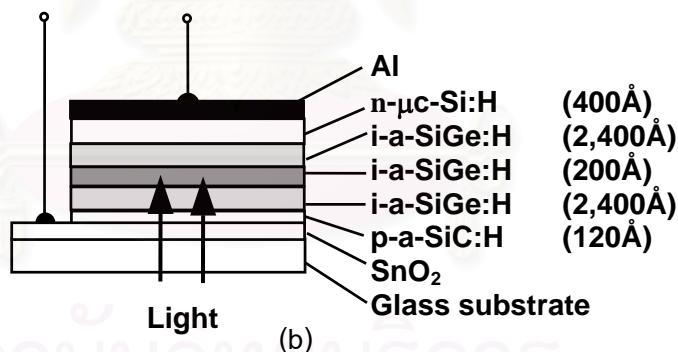
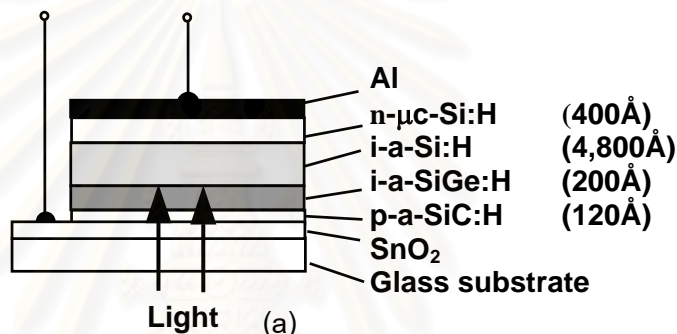
ในหัวข้อนี้ ได้ทำการศึกษาลักษณะสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นผลิตพาหะมีลักษณะช่องว่างพลังงานเป็น step function โดยมีโครงสร้าง 3 แบบตามที่แสดงในรูปที่ 15.6 กล่าวคือ

กรณี (a) ได้แก่ กรณีที่ชั้น i ประกอบด้วย a-SiGe:H/a-Si:H

กรณี (b) ได้แก่ กรณีที่ชั้น i ประกอบด้วย a-Si:H/a-SiGe:H/a-Si:H

กรณี (c) ได้แก่ กรณีที่ชั้น i ประกอบด้วย a-Si:H/a-SiGe:H

โดยที่ความหนาของชั้นผลิตพาหะเท่ากับ  $5,000\text{\AA}$  เงื่อนไขการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ในรูปที่ 5.6 (a) และ (c) แสดงในตารางที่ 5.2 และ 5.3 ตามลำดับ สำหรับเงื่อนไขการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ในรูปที่ 5.6 (b) แสดงในตารางที่ 5.1



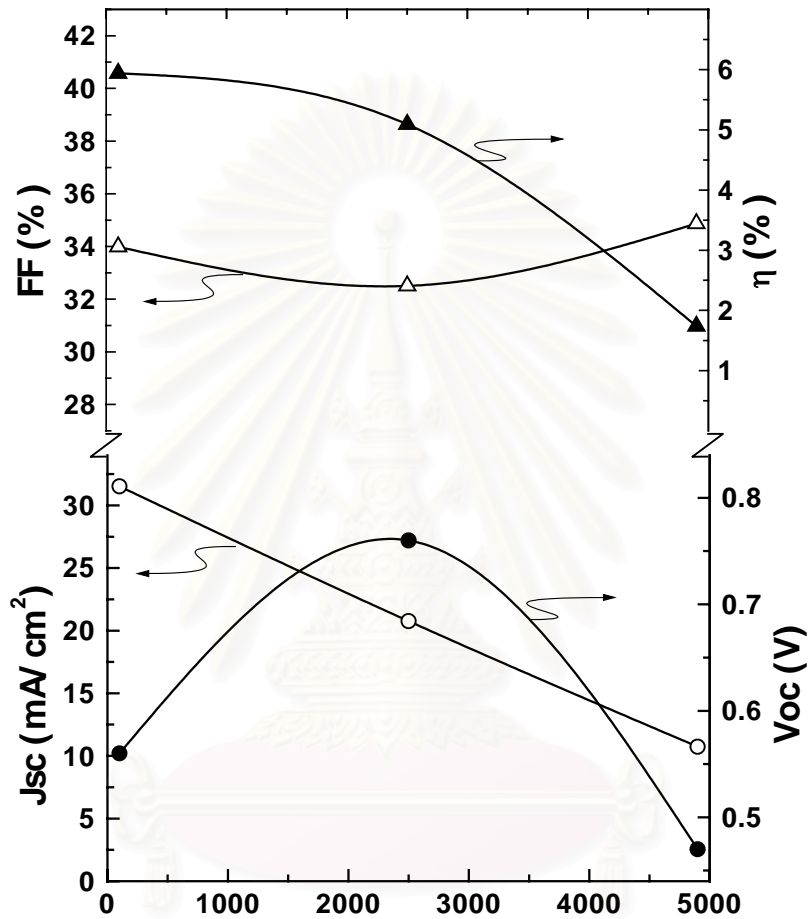
รูปที่ 5.6 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่ออกแบบสำหรับศึกษาอิทธิพลของตำแหน่ง a-SiGe:H ในชั้นผลิตพาหะ

ตารางที่ 5.2 เงื่อนไขการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งชั้นผลิตพาหะมีลักษณะช่องว่างพลังงาน เป็น step function กรณี (a)

ชั้น	ชนิด	ก๊าซดิบ	อุณหภูมิแผ่นฐาน (°C)	ความหนา (Å)
p	a-SiC:H	$CH_4/(SiH_4 + CH_4) = 0.67$ $B_2H_6/(SiH_4 + CH_4) = 0.007$ $SiH_4 = 15$ sccm $B_2H_6 = 60$ sccm $CH_4 = 30$ sccm	190	120
i	a-SiGe:H	$GeH_4/(GeH_4 + SiH_4) = 0.05$ $H_2/(GeH_4 + SiH_4) = 27$ $SiH_4 = 50$ sccm $GeH_4 = 5$ sccm $H_2 = 100$ sccm	250	200
i	i-a-Si:H	$SiH_4 = 20$ sccm	190	4,800
n	$\mu$ c-Si:H	$PH_3/SiH_4 = 0.025$ $SiH_4 = 10$ sccm $PH_3 = 50$ sccm	190	400

ตารางที่ 5.3 เงื่อนไขการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งชั้นผลิตพาหะมีลักษณะช่องว่างพลังงาน  
เป็น step function กรณี (c)

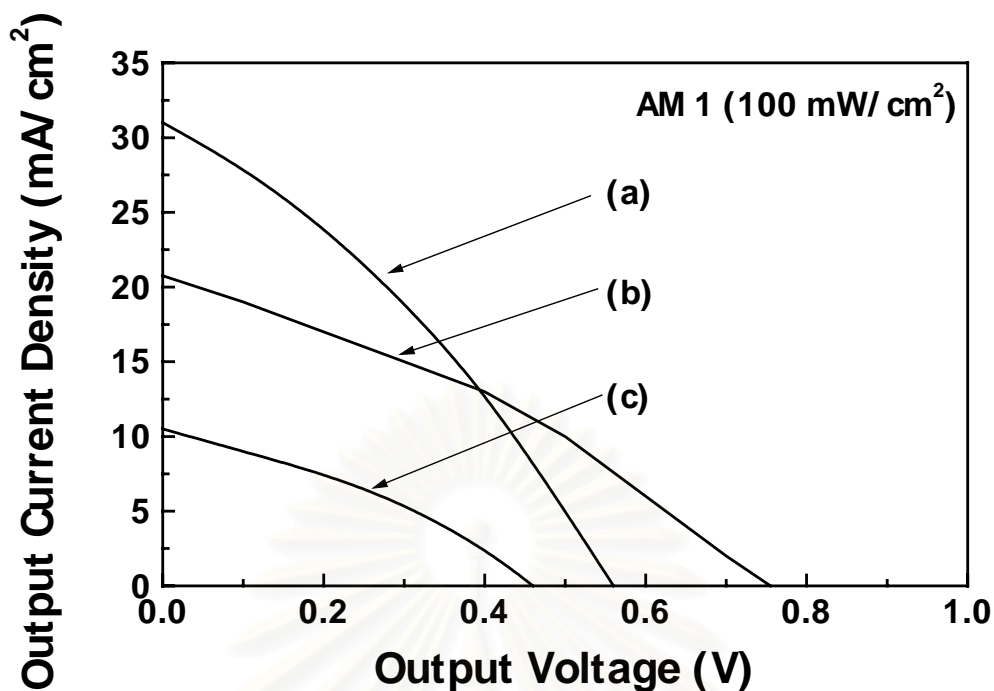
ชั้น	ชนิด	ก๊าซดิบ	อุณหภูมิแผ่นฐาน (°C)	ความหนา (Å)
p	a-SiC:H	$\text{CH}_4/(\text{SiH}_4 + \text{CH}_4) = 0.67$ $\text{B}_2\text{H}_6/(\text{SiH}_4 + \text{CH}_4) = 0.007$ $\text{SiH}_4 = 15 \text{ sccm}$ $\text{B}_2\text{H}_6 = 60 \text{ sccm}$ $\text{CH}_4 = 30 \text{ sccm}$	190	120
i	i-a-Si:H	$\text{SiH}_4 = 20 \text{ sccm}$	190	4,800
i	a-SiGe:H	$\text{GeH}_4/(\text{GeH}_4 + \text{SiH}_4) = 0.05$ $\text{H}_2/(\text{GeH}_4 + \text{SiH}_4) = 27$ $\text{SiH}_4 = 50 \text{ sccm}$ $\text{GeH}_4 = 5 \text{ sccm}$ $\text{H}_2 = 100 \text{ sccm}$	250	200
n	$\mu\text{c-Si}$	$\text{PH}_3/ \text{SiH}_4 = 0.025$ $\text{SiH}_4 = 10 \text{ sccm}$ $\text{PH}_3 = 50 \text{ sccm}$	190	400



Distance of the middle of a-SiGe:H from p-a-SiC:H (Å)

รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้น

ผลิตพาหะมีลักษณะช่องว่างพลังงานเป็น step function และตำแหน่งของชั้น i-a-SiGe:H



รูปที่ 5.8 เปรียบเทียบลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งชั้นผลิต

พาหะมีลักษณะช่องว่างพลังงานเป็น step function กรณี

a) เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีโครงสร้าง p/i-a-SiGe:H/i-a-Si:H/n

b) เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีโครงสร้าง p/i-a-Si:H/i-a-SiGe:H/i-a-Si:H/n

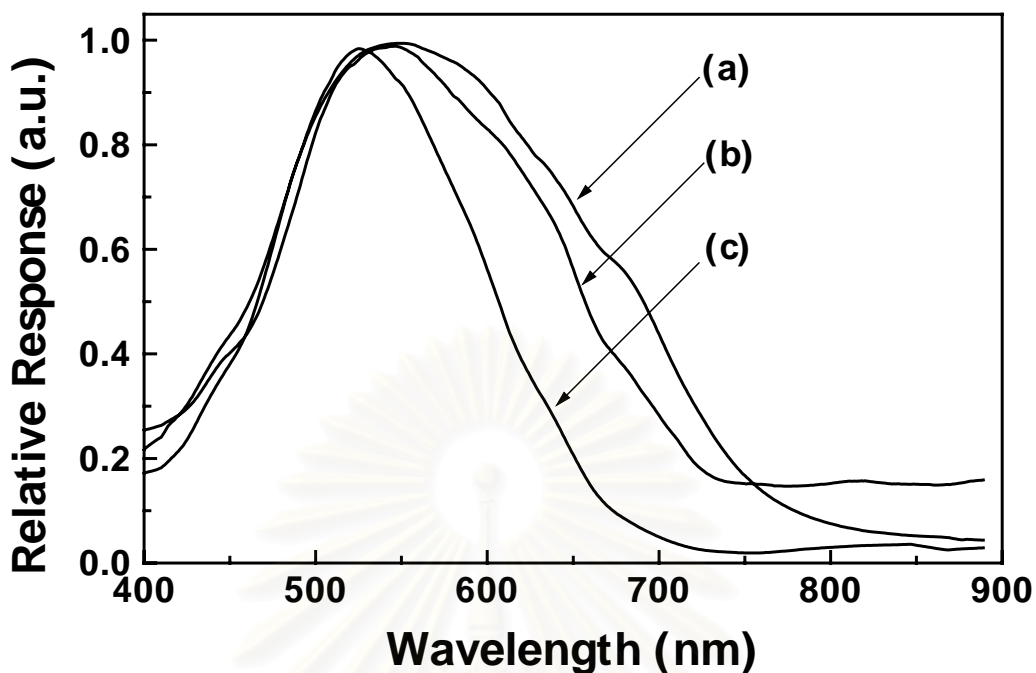
c) เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีโครงสร้าง p/i-a-Si:H/i-a-SiGe:H/n

รูปที่ 5.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งชั้นผลิตพาหะมีลักษณะช่องว่างพลังงานเป็น step function และตำแหน่งของชั้น i-a-SiGe:H รูปที่ 5.8 แสดงลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งชั้นผลิตพาหะมี

ลักษณะช่องว่างพลังงานเป็น step function แบบต่างๆ รูปที่ 5.9 เปรียบเทียบสเปกตรัมผลตอบสนองต่อแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งผลิตพาหะมีลักษณะช่องว่างพลังงานเป็น step function

ผลการศึกษาในรูปที่ 5.7-5.9 สรุปได้ดังนี้

- 1) เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้น i-a-SiGe:H ติดกับชั้น p (ชั้นรับแสง) ให้ค่าประสิทธิภาพ และกระแสไฟฟ้าลัดวงจร มากที่สุด
- 2) เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้น i-a-SiGe:H ติดกับชั้น p (ชั้นรับแสง) มีสเปกตรัมผลตอบสนองต่อแสงที่มีความยาวคลื่นยาวได้ดีที่สุด



รูปที่ 5.9 เปรียบเทียบสเปกตรัมผลตอบสนองต่อแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งผลิตพหะมี

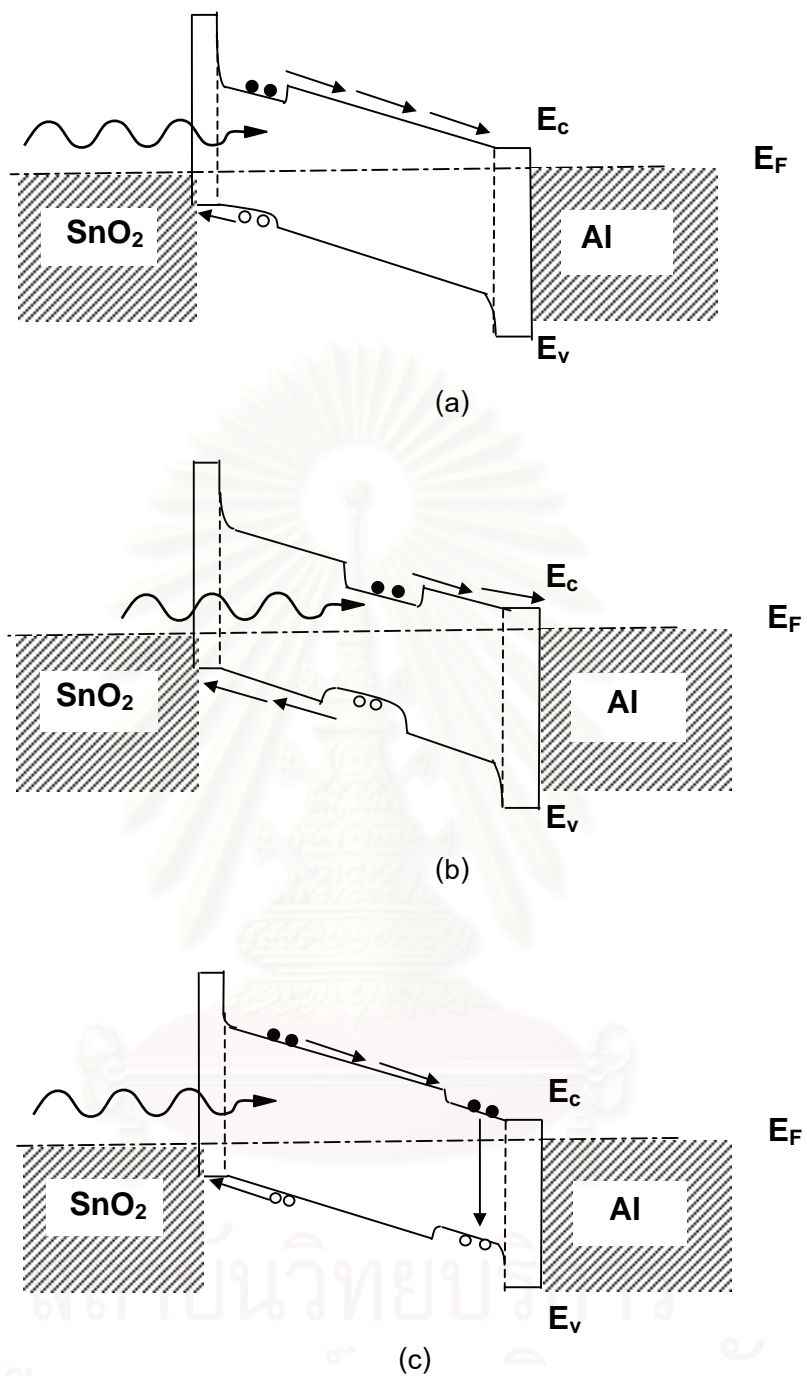
ลักษณะช่องว่างพลังงานเป็น step function กรณี

- a) เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีโครงสร้าง p/i-a-SiGe:H/i-a-Si:H/n
- b) เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีโครงสร้าง p/i-a-Si:H/i-a-SiGe:H/i-a-Si:H/n
- c) เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีโครงสร้าง p/i-a-Si:H/i-a-SiGe:H/n

รูปที่ 5.10 เปรียบเทียบลักษณะของช่องว่างพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งชั้นผลิตพหะมีลักษณะช่องว่างพลังงานเป็น step function เมื่ออาศัยรูปที่ 5.10 ประกอบการอธิบาย จะสามารถอธิบายลักษณะสมบัติเอ๊าต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด step function ได้ดังนี้

- 1) ในกรณี (a) ที่ชั้น a-SiGe:H อยู่ติดกับชั้น p เมื่อแสงกระตุ้นให้เกิดพหะมีในชั้น a-SiGe:H อิเล็กตรอนจะได้รับศักย์ไฟฟ้าภายใน (built-in potential) และถูกขับเคลื่อนให้ไหลไปทางขวา ไปถึงชั้น n ได้ ส่วนโฮลก็จะไหลไปทางชั้น p ทำให้กระแสไฟฟ้าเอ๊าต์พุตมีค่ามาก
- 2) ในกรณี (c) ที่ชั้น a-SiGe:H อยู่ติดกับชั้น n โฮลที่เกิดขึ้นจะถูกกำแพงศักย์กั้นมิให้ไหลได้สะดวก อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในชั้น a-SiGe:H จะรวมตัวกับโฮลอย่างรวดเร็วในชั้น a-SiGe:H ทำให้กระแสไฟฟ้าเอ๊าต์พุตมีค่าน้อยที่สุด





รูปที่ 5.10 เปรียบเทียบแถบพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นลักษณะผลิตพาหะมีแถบพลังงาน

เป็น step function กรณี

a) เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีโครงสร้าง p/i-a-SiGe:H/i-a-Si:H/n

b) เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีโครงสร้าง p/i-a-Si:H/i-a-SiGe:H/i-a-Si:H/n

c) เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีโครงสร้าง p/i-a-Si:H/i-a-SiGe:H/n

## 5.4 สรุป

ได้มีการทดลองประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งชั้นผลิตพาหะประกอบฟิล์มบาง a-Si:H (ช่องว่างพลังงาน 1.8 eV) และ/หรือ a-SiGe:H (ช่องว่างพลังงาน 1.6 eV) ที่มีโครงสร้างพิเศษแบบต่างๆ ผลการศึกษามีดังนี้

1. ได้มีการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งชั้นผลิตพาหะมีลักษณะช่องว่างพลังงานเป็นรูปอักษร U (a-Si:H/a-SiGe:H/a-Si:H) ได้ประสิทธิภาพประมาณ 5.1% โดยที่ชั้น a-SiGe:H มีความหนาเท่ากับ 200 Å
2. ได้มีการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งชั้นผลิตพาหะมีลักษณะช่องว่างพลังงานเป็น step function พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้น a-SiGe:H ติดกับชั้น p จะให้มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยได้ประสิทธิภาพเท่ากับ 5.8%



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 6

### การประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนโครงสร้าง tandem

#### 6.1 บทนำ

ข้อเด่นด้านหนึ่งของวัสดุอะมอร์ฟัสซิลิคอนได้แก่ การผลิตให้เป็นฟิล์มบางซ้อนกันได้หลายๆ ชั้น ดังนั้นหาก ออกแบบให้เซลล์แสงอาทิตย์ประกอบด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ย่อยๆ ที่มีช่องว่างพลังงานแตกต่างกันซ้อนทับกันหลายชั้น ก็จะทำให้ได้เซลล์แสงอาทิตย์ที่ดูดกลืนแสงอาทิตย์ในช่วงความยาวคลื่นที่กว้างได้ การออกแบบจะกำหนดให้ช่องว่างพลังงานของเซลล์ชั้นที่รับแสงก่อนกว้างกว่าเซลล์ชั้นถัดไป โดยทั่วไปนิยมเรียกเซลล์แสงอาทิตย์ที่ประกอบด้วยเซลล์ย่อยที่มีช่องว่างพลังงานแตกต่างกันซ้อนทับกันว่า “เซลล์แสงอาทิตย์แบบ tandem” หรือ “เซลล์แสงอาทิตย์แบบ multi-junctions” ถ้าหากประกอบด้วยเซลล์ 2 ชั้น เรียกว่า “เซลล์แสงอาทิตย์แบบ double-junctions” ถ้าหากประกอบด้วยเซลล์ 3 ชั้น เรียกว่า “เซลล์แสงอาทิตย์แบบ triple-junctions”

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการวิจัยการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์แบบ double-junctions โดยเซลล์ชั้นแรกที่ได้รับแสงได้เซลล์ชนิด a-Si:H (ช่องว่างพลังงาน 1.8 eV) และเซลล์ชั้นที่สองได้แก่ เซลล์ชนิด a-SiGe:H (ช่องว่างพลังงาน 1.5-1.6 eV)

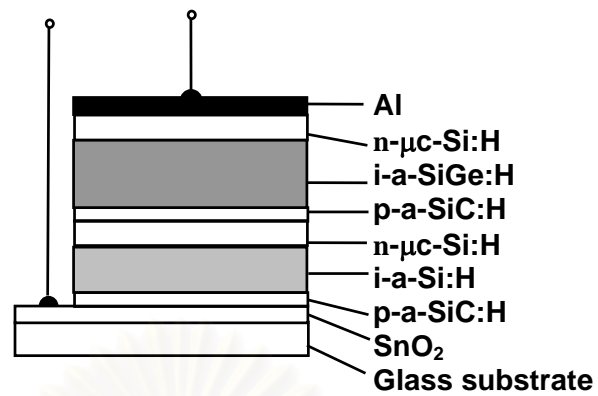
#### 6.2 การประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีโครงสร้างแบบ Double-Junctions

เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีโครงสร้างแบบ double-junctions แสดงในรูปที่ 6.1 โดยที่

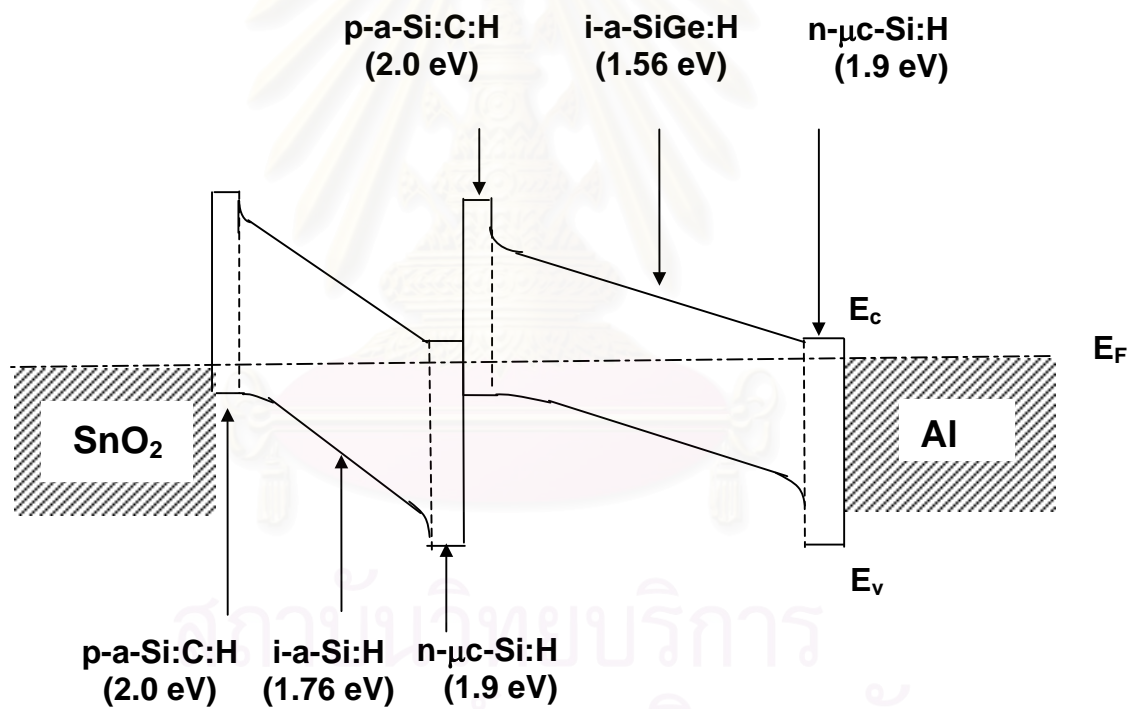
เซลล์ชั้นแรกที่ได้รับแสงมีรอยต่อ glass/SnO<sub>2</sub>/p-a-SiC:H/i-a-Si:H/n- $\mu$ c-Si:H

เซลล์ชั้นที่สองมีรอยต่อ p-a-SiC:H/i-a-SiGe:H/n- $\mu$ c-Si:H/Al

ในที่นี้ ได้กำหนดให้ความหนาของชั้น a-SiGe:H เท่ากับ 2,000 Å และทดลองเปลี่ยนความหนาของชั้น a-Si:H ในช่วง 450-600 Å ตารางที่ 6.1 แสดงรายละเอียดเงื่อนไขการปลูกฟิล์มชั้นต่างๆ



รูปที่ 6.1 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบ double-junctions ซึ่งประดิษฐ์ในงานวิจัย



รูปที่ 6.2 ลักษณะแถบพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์แบบ double-junctions

ตารางที่ 6.1 เงื่อนไขการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง double-junctions

ชั้น	ชนิด	ก๊าซดิบ	อุณหภูมิพื้นฐาน (°C)	ความหนา (Å)
P	a-SiC:H	$CH_4/(SiH_4 + CH_4) = 0.67$ $B_2H_6/(SiH_4 + CH_4) = 0.007$ $SiH_4 = 15$ sccm $B_2H_6 = 60$ sccm $CH_4 = 30$ sccm	190	120
i	a-Si:H	$SiH_4 = 20$ sccm	250	450 – 600
n	$\mu$ c-Si	$PH_3/SiH_4 = 0.025$ $SiH_4 = 10$ sccm $PH_3 = 50$ sccm	190	100
p	a-SiC:H	$CH_4/(SiH_4 + CH_4) = 0.67$ $B_2H_6/(SiH_4 + CH_4) = 0.007$ $SiH_4 = 15$ sccm $B_2H_6 = 60$ sccm $CH_4 = 30$ sccm	190	50
i	a-SiGe:H	$GeH_4/(GeH_4 + SiH_4) = 0.05$ $H_2/(GeH_4 + SiH_4) = 27$ $SiH_4 = 90$ sccm $GeH_4 = 5$ sccm $H_2 = 175$ sccm	190	2,000
n	$\mu$ c-Si:H	$PH_3/SiH_4 = 0.025$ $SiH_4 = 10$ sccm $PH_3 = 50$ sccm	190	400

รูปที่ 6.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ลักษณะสมบัติเอานต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์แบบ double-junctions และความหนาของชั้น a-Si:H ในเซลล์ด้านรับแสง โดยที่ชั้น a-SiGe:H มีความหนาคงที่เท่ากับ 2,000 Å จากรูปนี้พบว่าประสิทธิภาพ กระแสไฟฟ้าลัดวงจร แรงดันวงจรเปิดและฟิล์แพกเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาของ a-Si:H เพิ่มขึ้นจาก 450 Å เป็น 600 Å

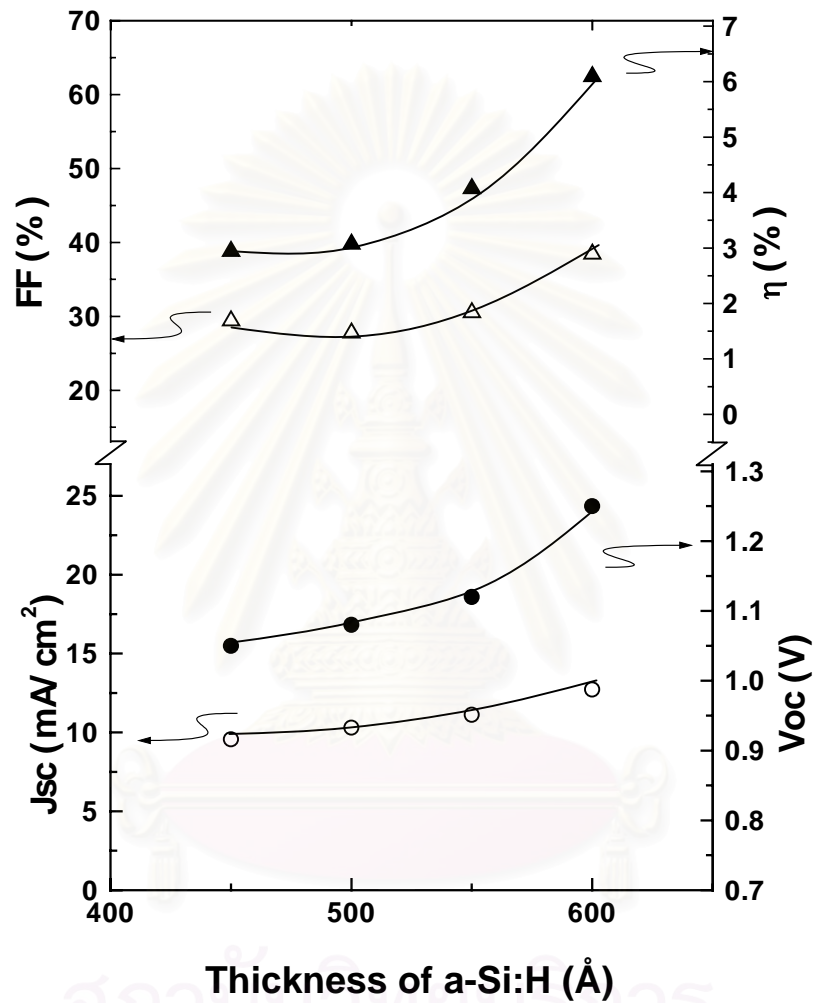
หลักการดำเนินงานพื้นฐานของเซลล์แบบ double-junctions คือ กระแสไฟฟ้าจะถูกกำหนดด้วยกระแสไฟฟ้าของเซลล์ที่ให้กระแสไฟฟ้าน้อยที่สุด ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าจะเป็นผลรวมของเซลล์ทั้งสอง

(ในการทดลองยังไม่ได้เพิ่มความหนามากกว่า 600 Å แต่คาดว่า ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์คงจะเพิ่มขึ้นอีก เมื่อความหนาเพิ่มขึ้นไม่เกินประมาณ 1,000 Å)

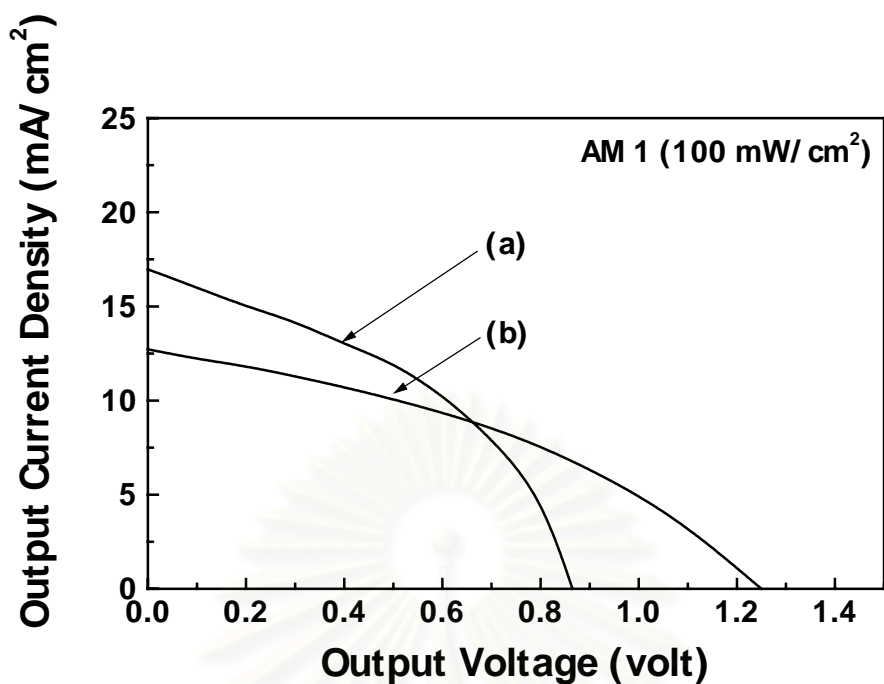
รูปที่ 6.4 เปรียบเทียบลักษณะสมบัติเอานต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเซลล์เดี่ยว (a-Si:H) และชนิด double-junctions เป็นที่น่าสังเกตว่า แรงดันไฟฟ้าวงจรถัดของเซลล์ชนิด double-junctions มีค่าสูงถึง 1.25 V ซึ่งเกิดจากผลรวมของแรงดันไฟฟ้าวงจรถัดของเซลล์ 2 เซลล์โดยประมาณซึ่งต่ออนุกรมกันนั่นเอง

รูปที่ 6.5 เปรียบเทียบสเปกตรัมผลตอบสนองต่อแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์ 2 ชนิด คือ เซลล์ซึ่งมี a-Si:H เป็นชั้นผลิตพาหะแบบ single-junction และ เซลล์แบบ double-junctions จากรูปนี้ จะเห็นได้ว่าเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง double-junctions ให้สเปกตรัมตอบสนองต่อแสงที่กว้างขึ้นกว่าเซลล์แสงอาทิตย์แบบ single-junction





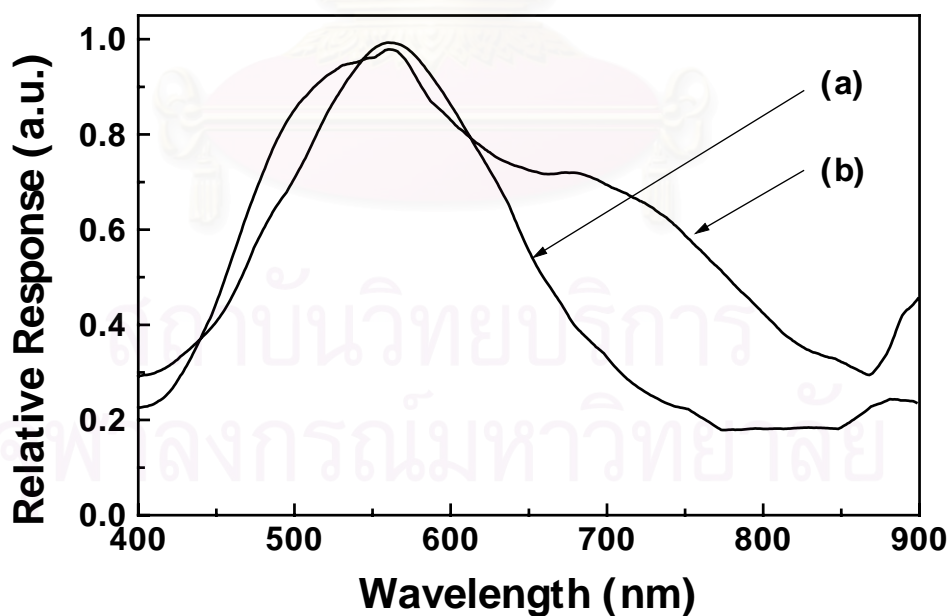
รูปที่ 6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์แบบ double-junctions และความหนาของชั้น a-Si:H ที่ทำหน้าที่เป็นชั้นผลิตพาหะของเซลล์ชั้นรับแสง โดยที่ความหนาของ a-SiGe:H เท่ากับ 2,000 Å



รูปที่ 6.4 เปรียบเทียบลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์

a) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H single-junction

b) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H double-junctions



รูปที่ 6.5 เปรียบเทียบผลตอบสนองทางแสงของเซลล์แสงอาทิตย์

a) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H single-junction

b) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H double-junctions

### 6.3 สรุป

ในบทนี้ได้ประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีโครงสร้างแบบ double-junctions โดยมีข้อสรุปดังนี้

1. เซลล์แสงอาทิตย์แบบ double-junctions ประกอบด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ 2 เซลล์ที่ซ้อนทับกันและต่ออนุกรมกัน
2. วัสดุของชั้นผลิตพาหะในเซลล์ชั้นแรกที่ได้รับแสงคือ a-Si:H (ช่องว่างพลังงาน 1.8 eV) และวัสดุของชั้นผลิตพาหะในเซลล์ชั้นที่สองคือ a-SiGe:H (ช่องว่างพลังงาน 1.6 eV)
3. ตัวอย่างผลการประดิษฐ์ พบว่า ถ้ากำหนดให้ความหนาของ a-Si:H เท่ากับ 2,000 Å และความหนาของชั้น a-SiGe:H เท่ากับ 600 Å จะได้ประสิทธิภาพเท่ากับ 6.1% กระแสไฟฟ้าลัดวงจรเท่ากับ 12.5 mA/cm<sup>2</sup> แรงดันวงจรเปิดเท่ากับ 1.25 V และฟิลล์แฟกเตอร์เท่ากับ 39%
4. เซลล์แสงอาทิตย์แบบ double-junctions ที่ประดิษฐ์นั้น มีสเปกตรัมผลตอบสนองต่อแสงที่กว้างกว่ากรณีของเซลล์เดี่ยว

## บทที่ 7

### สรุป

ผลการวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้ สามารถสรุปเป็นข้อ ๆ ได้ดังนี้

1. ประสิทธิภาพสำเร็จในการปลูกฟิล์มบาง a-SiGe:H ชนิดบริสุทธิ์ด้วยวิธี glow discharge plasma CVD โดยใช้ก๊าซผสมของ  $\text{SiH}_4$ ,  $\text{GeH}_4$  และ  $\text{H}_2$
2. ช่องว่างพลังงานของ a-SiGe:H มีค่าลดลงจาก 1.59 eV เป็น 1.14 eV เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของการไหลของก๊าซ  $\text{GeH}_4/(\text{GeH}_4+\text{SiH}_4)$  จาก 0.17 เป็น 0.83 การเพิ่มอัตราส่วนการไหลของก๊าซ  $\text{GeH}_4/(\text{GeH}_4+\text{SiH}_4)$  จะทำให้จำนวนของแขนขาดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าสภาพนำไฟฟ้าด้วยแสงลดลง
3. ประสิทธิภาพสำเร็จในปรับปรุงค่าสภาพนำไฟฟ้าด้วยแสงของ a-SiGe:H โดยการผสมก๊าซ  $\text{H}_2$  ด้วยปริมาณที่เหมาะสมลงในก๊าซ  $\text{SiH}_4+\text{GeH}_4$
4. ได้มีการค้นพบว่า สามารถลดค่าช่องว่างพลังงานของ a-SiGe:H ลงได้โดยการเพิ่มค่าอัตราส่วนของการไหลของก๊าซไฮโดรเจน และด้วยวิธีการนี้ ไม่ทำให้ค่าสภาพนำไฟฟ้าด้วยแสงลดลง
5. ฟิล์มบาง a-SiGe:H ที่ผลิตได้สามารถเปลี่ยนค่าช่องว่างพลังงานให้มีค่าอยู่ในช่วง 1.44 - 1.67 eV ได้โดยรักษาค่า  $\sigma_{\text{ph}}/\sigma_{\text{D}}$  ไว้สูงได้ โดยการใช้อุณหภูมิแผ่นฐาน  $250^\circ\text{C}$  และใช้อัตราส่วนการไหลของก๊าซไฮโดรเจน  $\text{H}_2/(\text{SiH}_4+\text{GeH}_4) = 27$
6. ประสิทธิภาพสำเร็จในการปรับปรุงค่าสภาพนำไฟฟ้าด้วยแสงของ a-SiGe:H โดยการเพิ่มอัตราส่วนการไหลของก๊าซไฮโดรเจน  $\text{SiH}_4/(\text{SiH}_4+\text{GeH}_4)$  และใช้อัตราส่วนการไหลของก๊าซไฮโดรเจน  $\text{H}_2/(\text{SiH}_4+\text{GeH}_4)$  ที่สูง ทำให้ค่า  $\sigma_{\text{ph}}/\sigma_{\text{D}}$  อยู่ในระดับ  $10^3 - 10^4$  ได้ในขณะที่ค่าช่องว่างพลังงานทางแสงแคบอยู่ในช่วง 1.56 - 1.60 eV
7. ผลการศึกษาการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-SiGe:H แบบเซลล์เดี่ยวรอย p-i-n ได้ประสิทธิภาพประมาณ 3.7% ที่ความหนาของชั้น i-a-SiGe:H เท่ากับ 400 Å
8. เมื่อมีปรับปรุงคุณสมบัติของฟิล์ม a-SiGe:H ให้มีคุณสมบัติดีขึ้น เซลล์แสงอาทิตย์ที่ประดิษฐ์ได้มีประสิทธิภาพสูงถึง 5.6% ที่ความหนาของชั้น i-a-SiGe:H เท่ากับ 2,000 Å

9. ผลการวัดสเปกตรัมตอบสนองต่อแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-SiGe:H ซึ่งมีช่องว่างพลังงาน 1.5-1.6 eV ได้ผลว่าตอบสนองต่อแสงที่มีความยาวคลื่นยาวดีกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H
10. ได้มีการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งชั้นผลิตพาหะมีลักษณะช่องว่างพลังงานเป็นรูปตัว U (a-Si:H/a-SiGe:H/a-Si:H) ได้ประสิทธิภาพประมาณ 5.1% โดยที่ชั้น a-SiGe:H มีความหนาเท่ากับ 200 Å
11. ได้มีการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งชั้นผลิตพาหะมีลักษณะช่องว่างพลังงานเป็น step function พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้น a-SiGe:H ติดกับชั้น p จะให้มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยได้ประสิทธิภาพเท่ากับ 5.8%
12. ได้มีการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีโครงสร้างแบบ double-junctions ซึ่งประกอบด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ 2 เซลล์ที่ซ้อนทับกันและต่ออนุกรมกัน วัสดุของชั้นผลิตพาหะในเซลล์ชั้นแรกที่ได้รับแสงคือ a-Si:H (ช่องว่างพลังงาน 1.8 eV) และวัสดุของชั้นผลิตพาหะในเซลล์ชั้นที่สองคือ a-SiGe:H (ช่องว่างพลังงาน 1.6 eV)
13. ตัวอย่างผลการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์แบบ double-junctions ได้ผลว่า ถ้ากำหนดให้ความหนาของ a-Si:H เท่ากับ 2,000 Å และความหนาของชั้น a-SiGe:H เท่ากับ 600 Å จะได้ประสิทธิภาพเท่ากับ 6.1% กระแสไฟฟ้าลัดวงจรเท่ากับ 12.5 mA/cm<sup>2</sup> แรงดันวงจรเปิดเท่ากับ 1.25 V และฟิลล์แฟกเตอร์เท่ากับ 39%
14. เซลล์แสงอาทิตย์แบบ double-junctions ที่ประดิษฐ์นั้น มีสเปกตรัมผลตอบสนองต่อแสงที่กว้างกว่ากรณีของเซลล์เดี่ยว

## รายการอ้างอิง

1. Kruangam, D., P. Siamchai, W. Boonkosum and S. Panyakeow. Integrated Type a-Si:H Solar Cell Having Simple Configuration, Proceedings of 7<sup>th</sup> International Photovoltaic Science and Engineering Conference. (PVSEC-7), Nagoya, Japan, November 2-26 (1993): 217-218.
2. Boonkosum, W., D. Kruangam and S. Panyakeow. Amorphous Visible-Light Thin Film Light-Emitting Diode Having a-SiN:H as a Luminescent Layer. Japanese Journal of Applied Physics 32 (1993): 1534-1538.
3. Kruangam, D., T. Sujaridchai, K. Chirakawikul, B. Ratwises and S. Panyakeow. Novel Amorphous Silicon Alloy Optoelectronic Integrated Circuits. J. Non-Crystalline Solids 227-230 (1998): 1146-1150.
4. ดุสิต เครื่องงาม. สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ เล่ม 2. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
5. ดุสิต เครื่องงาม และสมศักดิ์ปัญญาแก้ว. การประดิษฐ์อะมอร์ฟัสซิลิคอน และการประยุกต์ใช้งานเป็นเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบาง. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 12, หน้า 772-781. 16-17 พฤศจิกายน 2532 ณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ.
6. ดุสิต เครื่องงาม, บรรยง โตประเสริฐพงศ์ และ ชุมพล อัครเสน. เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน. รายงานการวิจัยพัฒนาฉบับสมบูรณ์. ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์, 2535.
7. ดุสิต เครื่องงาม, วิโรจน์ บุญโกสุ่มภ์ และ ภาวัน สยามชัย. การพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน โครงสร้าง p-i-n Multilayer ที่ให้แรงดันเอาต์พุตสูง. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 16, หน้า 482-487. 25-26 พฤศจิกายน 2536 ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ.
8. Takahashi, K. and M. Konagai. Amorphous Silicon Solar Cells. North Oxford Academic, 1986 : 22
9. ดุสิต เครื่องงาม และคณะ. การประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ราคาถูกรูปแบบฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์. ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2533.

10. Lufty, W. and S. Tsuso. Hydrogenated Amorphous Silicon Alloy Deposition Process. New York : Marcel Dekker,1993 : 82 - 93.
11. Yukimoto, Y. Hydrogenated a-SiGe Alloy and Its Optoelectronic Properties. Jarect vol 6, Amorphous Semiconductor Technologies & Devices (1983) : 136 – 147.
12. Schorpp, E.I. R. and M. Zeman. Amorphous and Microcrystalline Silicon Solar Cells: Modeling, Materials and Device Technology. Boston : Kluwer Academic, 1998
13. Fortman C.M. and J.C. Tu, Defects in Amorphous Silicon Germanium Alloys. Conference Record of the Twentieth IEEE 1 (1988) : 139 -142.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## การเผยแพร่ผลงานวิจัย

### การเผยแพร่ผลงานวิจัยระดับนานาชาติ

1. Kruangam, D., F. Wongwan, T. Jutarosaga. Amorphous Silicon Germanium Photodiodes and Amorphous Silicon Carbide Light Emitting Diodes. Proceeding of 1<sup>st</sup> NRCT-KOSEF Joint Seminar on Semiconductors Bangkok, Thailand (November 30 – December 1, 1999) : 40-45.
2. Kruangam, D., F. Wongwan, T. Chutarasok (Jutarosaga), K. Chirakawikul, S. Panyakeow. Amorphous Photocoupler Consisting of a-SiC:H Thin Film Light Emitting Diode and a-SiGe:H Thin Film Photodiode. Journal of Non-Crystalline Solids, (2000) : 266 – 269.
3. Jutarosaga, T., S. Chaononghin, D. Kruamgam. Fabrication of Hydrogenated Amorphous Silicon Germanium Solar Cells by the Glow Discharge Plasma CVD Method, The First Regional Conference on Energy Technology Towards a Clean Environment, Chiang Mai, Thailand (December 1-2, 2000).

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### การเผยแพร่ผลงานวิจัยระดับชาติ

1. ตูลา จุฑะรสก, ฝนทิพย์ วงศ์วรรณ, เกรียงไกร จิรกวีกุล,ดุสิต เครื่องงาม และ สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว. การศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบางชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียม. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 22 ณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ (2-3 ธันวาคม 2542) : EL 33-36.
2. ฝนทิพย์ วงศ์วรรณ, ตูลา จุฑะรสก, เกรียงไกร จิรกวีกุล,ดุสิต เครื่องงาม และ สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว. การประดิษฐ์โฟโตไดโอดชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียมสำหรับแสงอินฟราเรด. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 22 ณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ (2-3 ธันวาคม 2542) : EL 37-40.
3. ตูลา จุฑะรสก, ฝนทิพย์ วงศ์วรรณ, สุนทร ชาวหนองหิน และ ดุสิต เครื่องงาม. การศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียมและการประยุกต์ใช้เป็นชั้นผลิตพาหะในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัส. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 23 ณ โรงแรมดิเอมเพลส เชียงใหม่ (23-24 พฤศจิกายน 2543) : 705 – 708.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประวัติผู้วิจัย

นายตุลา จุฑะรสก เกิดเมื่อวันที่ 16 ตุลาคม พ.ศ. 2520 ที่ตำบลกาฬสินธุ์ อำเภอมือทอง จังหวัดกาฬสินธุ์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต จากภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2541 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2542



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย