

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษากระบวนการสร้างและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์  
ชนิดทันเดมด้วยวิธีพลาสมาชีวิตีความถี่สูง

THE STUDY OF FABRICATION AND DEVELOPMENT OF TANDEM  
SOLAR CELLS BY VERY HIGH FREQUENCY PLASMA ENHANCED  
CHEMICAL VAPOR DEPOSITION (VHF-PECVD)



อัสวิน หงษ์สิงห์ทอง  
ASWIN HONGSINGTHONG

QW.  
0579ก  
2548

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....**60448**  
วัน,เดือน,ปี. 2.9.ค.ย. 2548

b.....1158๗๑๕x  
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์  
บัณฑิตวิทยาลัย  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ.2548  
ISBN 974-15-1974-5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**THE STUDY OF FABRICATION AND DEVELOPMENT OF TANDEM  
SOLAR CELLS BY VERY HIGH FREQUENCY PLASMA ENHANCED  
CHEMICAL VAPOR DEPOSITION (VHF-PECVD)**



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

**2005**

**ISBN 974-15-1974-5**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2005**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษากระบวนการสร้างและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดทันเดมด้วยวิธีพลาสมาซีวีดีความถี่สูง
นักศึกษา	นายอัศวิน หงษ์สิงห์ทอง
รหัสประจำตัว	46061409
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
พ.ศ.	2548
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.พจนันท์ สีขมนุกฤษณ์

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษากระบวนการสร้างและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดทันเดมด้วยวิธีพลาสมาซีวีดีความถี่สูง (VHF-PECVD) ในเบื้องต้นได้ปรับปรุงข้อวัสัญญาไฟฟ้าเพื่อให้สามารถทำงานที่คลื่นความถี่ย่าน VHF พบว่าพลาสมาแพร่กระจายเหนือข้อวัสัญญาไฟฟ้าได้ทั่วทุกบริเวณ และฟิล์มที่เคลือบบนแผ่นฐานรองจะสม่ำเสมอยิ่งขึ้น ต่อจากนั้นเป็นการศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการปลูกฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน (a-Si:H) และฟิล์มบางไมโครคริสตัลไลน์ซิลิคอน ( $\mu\text{c-Si:H}$ ) ได้แก่ ความดันก๊าซ อุณหภูมิแผ่นฐานรอง อัตราส่วนการไหลของก๊าซไฮโดรเจน ( $\text{H}_2/\text{SiH}_4$ ) อัตราส่วนการไหลของก๊าซซิลิเซน ( $\text{SiH}_4/(\text{SiH}_4 + \text{H}_2)$ ) และความหนาแน่นกำลังงานไฟฟ้าที่ส่งผลกระทบต่อสมบัติพื้นฐานของฟิล์ม พบว่าฟิล์มจะมีความสม่ำเสมอที่สุด เมื่อใช้ความดันก๊าซเท่ากับ 0.8 torr สำหรับฟิล์ม a-Si:H และ 1.5 torr สำหรับฟิล์ม  $\mu\text{c-Si:H}$  ฟิล์มจะมีสภาพนำไฟฟ้าด้วยแสงและอัตราส่วนของสภาพนำไฟฟ้าด้วยแสงต่อสภาพนำไฟฟ้ามืดที่สูง เมื่ออุณหภูมิแผ่นฐานรองเท่ากับ  $250^\circ\text{C}$  สำหรับฟิล์ม a-Si:H และ  $200^\circ\text{C}$  สำหรับฟิล์ม  $\mu\text{c-Si:H}$  ซึ่งฟิล์ม a-Si:H ที่ใช้อัตราส่วนการไหลของก๊าซ  $\text{H}_2/\text{SiH}_4$  และฟิล์ม  $\mu\text{c-Si:H}$  ที่ใช้อัตราส่วนการไหลของก๊าซ  $\text{SiH}_4/(\text{SiH}_4 + \text{H}_2)$  ที่เหมาะสมจะทำให้อัตราการปลูกฟิล์มและค่าสภาพนำไฟฟ้าสูง และยังพบว่าในการปลูกฟิล์ม เมื่อเพิ่มความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าให้สูงขึ้น จะทำให้อัตราการปลูกฟิล์มและสภาพนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ซึ่งฟิล์ม a-Si:H จะมีความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าเหมาะสมเท่ากับ  $63 \text{ mW/cm}^2$  โดยความหนาแน่นแบนด์วิดท์จะมีค่าน้อย ในส่วนของฟิล์ม  $\mu\text{c-Si:H}$  เท่ากับ  $82 \text{ mW/cm}^2$  ซึ่งมีค่า Volume Fraction ประมาณ 58 % เมื่อนำฟิล์มไปประยุกต์เป็นชั้นผลิตพาหะในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดทันเดมแบบ 2 รอยต่อระหว่าง a-Si:H/ $\mu\text{c-Si:H}$  โครงสร้าง n-i-p/n-i-p ผลการวัดประสิทธิภาพในเบื้องต้นมีค่าเท่ากับ 8.33 % และผลการปรับปรุงประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ โดยเพิ่มกระบวนการ  $\text{CO}_2$  plasma และเปลี่ยนเงื่อนไขการสร้างชั้น n พบว่ามีประสิทธิภาพเพิ่มสูงขึ้นเป็น 12.66 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis</b>	The Study of Fabrication and Development of Tandem Solar Cells by Very High Frequency Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition (VHF-PECVD)
<b>Student</b>	Mr. Aswin Hongsingthong
<b>Student ID</b>	46061409
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Programme</b>	Microelectronics Engineering
<b>Year</b>	2005
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Dr. Wisut Titiroongruang
<b>Thesis Co-advisor</b>	Dr. Porponth Sichanugrist

## ABSTRACT

This thesis would introduce about the study of fabrication and development of Tandem solar cells by very high frequency plasma enhanced chemical vapor deposition (VHF-PECVD). In prior, we improve electrode for operating on VHF frequency that due to raise plasma dispersion and good film uniformity. After that we study appropriate conditions for the growth of hydrogenated amorphous silicon (a-Si:H) thin film and hydrogenated microcrystalline silicon ( $\mu\text{c-Si:H}$ ) thin film such as gas pressure in chamber, substrate temperature, hydrogen dilution ratio ( $\text{H}_2/\text{SiH}_4$ ), silane concentration ratio ( $\text{SiH}_4/(\text{SiH}_4 + \text{H}_2)$ ) and electrical power density. They also effect to film characteristics. We found that the highest uniformity is obtained from using gas pressure at 0.8 torr for a-Si:H film and 1.5 torr for  $\mu\text{c-Si:H}$  film. The high photoconductivity and conductivity ratio of a-Si:H and  $\mu\text{c-Si:H}$  film were achieved from using substrate temperature at  $250^\circ\text{C}$  and  $200^\circ\text{C}$  respectively. In addition, good film deposition rate and good electrical conductivity was found while we improved ratio of  $\text{H}_2/\text{SiH}_4$  flow and ratio of  $\text{SiH}_4/(\text{SiH}_4 + \text{H}_2)$  flow at suitable condition. Furthermore, increased electrical power density will increase deposition rate. The suitable power density for a-Si:H film and  $\mu\text{c-Si:H}$  film were  $63 \text{ mW/cm}^2$  and  $82 \text{ mW/cm}^2$  respectively. Low dangling bond density was found in a-Si:H film and 58 % Volume fraction was found in  $\mu\text{c-Si:H}$  film. When these films were applied to the active layer in the a-Si:H/ $\mu\text{c-Si:H}$  tandem solar cells and n-i-p/n-i-p cell structure. For fundamental efficiency measurement, the efficiency was 8.33 %. When  $\text{CO}_2$  plasma process was added and adjusting condition of n-layer deposition, the efficiency was increased to 12.66 %.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รศ.ดร.วิสุทธิ์ จิตรุ่งเรือง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และ ดร.พพนธ์ สิชฌนุกฤษฏ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม สถาบันพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ที่ให้คำแนะนำ ความรู้ และความเอาใจใส่ดูแลต่างๆ ด้วยดีอย่างต่อเนื่องมาตลอด ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่ให้คำแนะนำที่มีค่าอย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณ คุณจริยา นามเสนาะ (พี่หมู) สำหรับความเป็นห่วงและดูแล ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ ห้องวิจัยสารตัวนำยิ่งยวดและสารกึ่งตัวนำเพชรที่ให้ความช่วยเหลือมาด้วยดี

ขอขอบคุณสถาบันพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ที่ให้ความเอื้อเฟื้อเครื่องจักรระบบ multi-chamber PECVD/sputtering และเครื่องมือวัดในการทำวิจัย ขอขอบคุณทีมวิจัยจากสถาบันพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ สวทช. คุณนิรุช ปิ่นเกตุ คุณจรัส ศรีธาราธิคุณ คุณพีระวุฒิ ชินวรรังสี และคุณวีระศักดิ์ เตชะกิตติโรจน์ ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำวิจัย ขอขอบคุณ คุณศักดิ์วิทย์ สุภาดีจากบริษัท Western Digital ที่ให้ความอนุเคราะห์การใช้เครื่อง Raman Spectroscope และขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้ความอนุเคราะห์การใช้เครื่องวัด Electron Spin Resonance (ESR)

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการศึกษาทุนสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (TGIST) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ที่ให้ทุนการศึกษาระดับปริญญาโทแก่ผู้วิจัย

สุดท้ายผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ มารดา คุณยาย และครอบครัวสุริยะ ที่ให้กำลังใจในการศึกษาวิจัยและมอบสิ่งดีๆ ในชีวิตที่มีค่าด้วยดีมาตลอด คุณประโยชน์อันจะเกิดจากผลงานวิจัยในครั้งนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นเครื่องบูชาพระคุณบูรพาจารย์ ตลอดจนบิดามารดาที่ได้มีส่วนช่วยวางรากฐานการศึกษาแก่ผู้วิจัย

อัศวิน หงษ์สิงห์ทอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
สัญลักษณ์และคำย่อ.....	XIV
ศัพท์เทคนิค.....	XVIII
บทที่ 1 พื้นฐานและที่มาของวิทยานิพนธ์.....	1
1.1 บทนำ.....	1
1.2 ความเป็นมาและความสำคัญของหัวข้อวิทยานิพนธ์.....	1
1.3 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	3
1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	6
2.1 บทนำ.....	6
2.2 อะมอร์ฟิซิตีคอน.....	6
2.3 ขั้นตอนการเกิดของฟิล์มอะมอร์ฟิซิตีคอน.....	6
2.4 คุณสมบัติต่างๆ ของอะมอร์ฟิซิตีคอน.....	9
2.4.1 คุณสมบัติทางโครงสร้าง.....	9
2.4.2 คุณสมบัติทางแสง.....	10
2.4.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้า.....	14
2.4.3.1 การนำไฟฟ้ากระแสตรง.....	14
2.4.3.2 การนำไฟฟ้าด้วยแสง.....	16
2.4.4 คุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำอะมอร์ฟิซิตีคอนเมื่อเทียบกับ สารกึ่งตัวนำผลึกซิลิคอน.....	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5 คุณสมบัติต่างๆ ของโม โครคริสตัล ไลน์ซิลิคอน.....	18
2.5.1 คุณสมบัติทางโครงสร้าง.....	18
2.5.2 คุณสมบัติทางแสง.....	19
2.5.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้า.....	20
2.6 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดทันเดม.....	21
2.6.1 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดทันเดม.....	21
2.6.2 หลักการทำงานและการออกแบบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดทันเดม.....	24
2.7 สนามไฟฟ้าคลื่นความถี่สูง.....	29
2.7.1 ผลของสนามไฟฟ้าคลื่นความถี่สูงที่มีต่ออัตราการปลูกฟิล์ม.....	29
2.7.2 ผลของสนามไฟฟ้าคลื่นความถี่สูงที่มีต่อวัสดุโม โครคริสตัล ไลน์ซิลิคอน.....	31
2.7.3 ผลของสนามไฟฟ้าคลื่นความถี่สูงที่มีต่อประสิทธิภาพของ เซลล์แสงอาทิตย์.....	33
บทที่ 3 กระบวนการสร้างและการทดลอง.....	34
3.1 บทนำ.....	34
3.2 ระบบ multi-chamber PECVD/sputtering.....	34
3.2.1 เครื่องจักร PECVD/sputtering.....	34
3.2.2 ระบบก๊าซ.....	37
3.3 โครงสร้างของระบบ VHF-PECVD.....	38
3.3.1 ระบบภาชนะสุญญากาศ.....	40
3.3.2 ระบบก๊าซ.....	40
3.3.3 ระบบกำเนิดสนามไฟฟ้าคลื่นความถี่สูง.....	40
3.4 การปรับปรุงเครื่องมือของระบบ VHF-PECVD.....	40
3.5 การศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบาง a-Si:H และฟิล์มบาง $\mu\text{c-Si:H}$ .....	42
3.5.1 การตรวจวัดและวิเคราะห์คุณสมบัติทางแสงของฟิล์มบาง.....	42
3.5.1.1 การวัดสเปกตรัมสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและ ค่าช่องว่างพลังงานของ a-Si:H.....	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.5.1.2 การวัดสเปกตรัมสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและ ค่าช่องว่างพลังงานของ $\mu\text{c-Si:H}$ .....	46
3.5.2 การตรวจวัดและวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง.....	47
3.5.2.1 การวัดค่าสภาพนำไฟฟ้า.....	47
3.5.3 การตรวจวัดและวิเคราะห์คุณสมบัติทางโครงสร้างของฟิล์มบาง.....	48
3.5.3.1 การวัดจำนวน Spin Density.....	48
3.5.3.2 การวัดค่า Volume Fraction.....	49
3.6 ขั้นตอนการปลูกฟิล์มบาง a-Si:H และฟิล์มบาง $\mu\text{c-Si:H}$ .....	51
3.6.1 การเตรียมแผ่นฐานรอง.....	51
3.6.2 การปลูกฟิล์มบาง a-Si:H และฟิล์มบาง $\mu\text{c-Si:H}$ .....	51
3.7 การศึกษาเงื่อนไขการปลูกฟิล์มบาง a-Si:H และฟิล์มบาง $\mu\text{c-Si:H}$ .....	52
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	55
4.1 บทนำ.....	55
4.2 ผลการศึกษาความดันก๊าซที่มีต่อคุณสมบัติของ a-Si:H.....	55
4.3 ผลการศึกษาอุณหภูมิแผ่นฐานรองที่มีต่อคุณสมบัติของ a-Si:H .....	59
4.4 ผลการศึกษาอัตราส่วนการไหลของก๊าซไฮโดรเจนที่มีต่อคุณสมบัติของ a-Si:H.....	63
4.5 ผลการศึกษาความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าที่มีต่อคุณสมบัติของ a-Si:H.....	66
4.6 ผลการศึกษาความดันก๊าซที่มีต่อคุณสมบัติของ $\mu\text{c-Si:H}$ .....	70
4.7 ผลการศึกษาอุณหภูมิแผ่นฐานรองที่มีต่อคุณสมบัติของ $\mu\text{c-Si:H}$ .....	74
4.8 ผลการศึกษาอัตราส่วนการไหลของก๊าซไฮโดรเจนที่มีต่อคุณสมบัติของ $\mu\text{c-Si:H}$ .....	77
4.9 ผลการศึกษาความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าที่มีต่อคุณสมบัติของ $\mu\text{c-Si:H}$ .....	81
4.10 สรุปผลการศึกษาคุณสมบัติของ a-Si:H และ $\mu\text{c-Si:H}$ .....	84
บทที่ 5 ผลการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดทันเดม.....	86
5.1 บทนำ.....	86
5.2 การประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดทันเดมด้วยวิธี VHF-PECVD เบื้องต้น.....	86
5.3 ผลการวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์เบื้องต้น.....	92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.4 การปรับปรุงประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดทันเดม.....	94
5.5 ผลการปรับปรุงประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดทันเดม.....	96
บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง.....	98
เอกสารอ้างอิง.....	101
ภาคผนวก.....	108
ภาคผนวก ก.....	108
ประวัติผู้เขียน.....	111



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนเมื่อเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอน.....	18
3.1 สรุปรายละเอียดของ chamber ต่างๆ ของเครื่องจักร PECVD/sputtering.....	36
3.2 ชนิดของแผ่นฐานรองสำหรับใช้ในวัตถุประสงค์การศึกษาต่างๆ.....	51
3.3 เงื่อนไขสำคัญการปลูกฟิล์มบาง a-Si:H และ $\mu\text{c-Si:H}$ ชนิดบริสุทธิ์ด้วยวิธี VHF-PECVD.....	53
4.1 เงื่อนไขการปลูกฟิล์ม a-Si:H ชนิดบริสุทธิ์ด้วยวิธี VHF-PECVD เพื่อศึกษาความดันก๊าซใน chamber ที่มีต่อคุณสมบัติของ a-Si:H.....	55
4.2 เงื่อนไขการปลูกฟิล์ม a-Si:H ชนิดบริสุทธิ์ด้วยวิธี VHF-PECVD เพื่อศึกษาอุณหภูมิแผ่นฐานรองที่มีต่อคุณสมบัติของ a-Si:H.....	59
4.3 เงื่อนไขการปลูกฟิล์ม a-Si:H ชนิดบริสุทธิ์ด้วยวิธี VHF-PECVD เพื่อศึกษาอัตราส่วนการไหลของก๊าซไฮโดรเจนที่มีต่อคุณสมบัติของ a-Si:H.....	63
4.4 เงื่อนไขการปลูกฟิล์ม a-Si:H ชนิดบริสุทธิ์ด้วยวิธี VHF-PECVD เพื่อศึกษาความหนาแน่นกำลังงานไฟฟ้าที่มีต่อคุณสมบัติของ a-Si:H.....	66
4.5 เงื่อนไขการปลูกฟิล์ม $\mu\text{c-Si:H}$ ชนิดบริสุทธิ์ด้วยวิธี VHF-PECVD เพื่อศึกษาความดันก๊าซใน chamber ที่มีต่อคุณสมบัติของ $\mu\text{c-Si:H}$ .....	70
4.6 เงื่อนไขการปลูกฟิล์ม $\mu\text{c-Si:H}$ ชนิดบริสุทธิ์ด้วยวิธี VHF-PECVD เพื่อศึกษาอุณหภูมิแผ่นฐานรองที่มีต่อคุณสมบัติของ $\mu\text{c-Si:H}$ .....	74
4.7 เงื่อนไขการปลูกฟิล์ม $\mu\text{c-Si:H}$ ชนิดบริสุทธิ์ด้วยวิธี VHF-PECVD เพื่อศึกษาอัตราส่วนการไหลของก๊าซไฮโดรเจนที่มีต่อคุณสมบัติของ $\mu\text{c-Si:H}$ .....	77
4.8 เงื่อนไขการปลูกฟิล์ม $\mu\text{c-Si:H}$ ชนิดบริสุทธิ์ด้วยวิธี VHF-PECVD เพื่อศึกษาความหนาแน่นกำลังงานไฟฟ้าที่มีต่อคุณสมบัติของ $\mu\text{c-Si:H}$ .....	81
5.1 เงื่อนไขการสร้างชั้น ZnO, Ag และ ITO ด้วยวิธี sputtering.....	90
5.2 เงื่อนไขการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดทันเดมด้วยวิธี VHF-PECVD เมื่อดัน.....	90
5.3 เงื่อนไขของการปรับปรุงประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดทันเดมโดยเพิ่มกระบวนการ $\text{CO}_2$ plasma และเปลี่ยนเงื่อนไขการสร้างชั้น n- $\mu\text{c-Si:H}$ ของเซลล์ชั้นบน.....	95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	สเปกตรัมการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ที่ AM 1.5.....3
1.2	ขั้นตอนการศึกษาของวิทยานิพนธ์.....5
2.1	ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบริเวณผิวของฟิล์มในขณะที่ทำการปลูกฟิล์ม a-Si:H.....8
2.2	โครงสร้างการเรียงตัวของอะตอมในวัสดุ a-Si:H.....9
2.3	ช่องว่างพลังงานของวัสดุ a-Si:H.....10
2.4	ความหนาแน่นสเปกตรัมของวัสดุ c-Si.....11
2.5	ความหนาแน่นสเปกตรัมของวัสดุ a-Si:H.....11
2.6	สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของวัสดุ a-Si:H สามารถแบ่งออกเป็น 3 ย่าน.....13
2.7	การเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนระหว่างระดับพลังงานต่างๆ ของวัสดุ a-Si:H.....13
2.8	ผลของอุณหภูมิที่มีต่อสภาพนำไฟฟ้ากระแสตรงของวัสดุ a-Si:H.....15
2.9	แบบจำลองการห่อหุ้มชั้นระยะทางแปรผัน.....16
2.10	ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้าและอุณหภูมิพื้นฐาน ในการเตรียมวัสดุ a-Si:H.....17
2.11	ลักษณะเครือข่ายของอะตอมของวัสดุ $\mu$ c-Si:H.....19
2.12	ตัวอย่างสเปกตรัมสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของวัสดุ $\mu$ c-Si:H ในย่านพลังงานโฟตอน ต่ำกว่าช่องว่างพลังงานที่เตรียมจากเงื่อนไข SC % ค่าต่างๆ โดยการวัดด้วยวิธี CPM.....20
2.13	แบบจำลองของเพอร์ โคเลชันซึ่งอธิบายลักษณะการนำไฟฟ้าของวัสดุ $\mu$ c-Si:H.....21
2.14	โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดทันเดมแบบ 2 รอยต่อ ระหว่าง a-Si:H และ $\mu$ c-Si:H ซึ่งแผ่นฐานรองรับเป็น stainless steel.....22
2.15	ตัวอย่างสเปกตรัมผลตอบสนองต่อแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดทันเดมแบบ 2 รอยต่อ ระหว่าง a-Si:H และ $\mu$ c-Si:H โครงสร้าง n-i-p/n-i-p.....24
2.16	ลักษณะแถบพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดทันเดมแบบ 2 รอยต่อ ระหว่าง a-Si:H และ $\mu$ c-Si:H โครงสร้าง n-i-p/n-i-p ขณะถูกแสง.....25
2.17	วงจรมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดทันเดมชนิดทันเดมแบบ 2 รอยต่อ ระหว่าง a-Si:H และ $\mu$ c-Si:H.....26
2.18	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการปลูกฟิล์ม a-Si:H และคลื่นความถี่ของสนามไฟฟ้า ค่าต่างๆ โดยนักวิจัยกลุ่มต่าง ๆ.....30
2.19	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระและความถี่ของสนามไฟฟ้า.....32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของไอออนและความถี่ของสนามไฟฟ้า.....	32
2.21 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ปลูกโดยใช้คลื่นความถี่ VHF กับอัตราการปลูกฟิล์ม.....	33
3.1 ภาพถ่ายเครื่องจักร PECVD/sputtering.....	35
3.2 โครงสร้างของเครื่องจักร PECVD/sputtering (top view).....	35
3.3 ภาพถ่ายของระบบก๊าซที่ใช้ในการปลูกฟิล์มชั้นต่างๆ.....	37
3.4 โครงสร้างของระบบก๊าซที่ใช้ในการปลูกฟิล์มชั้นต่างๆ ซึ่งต่อเชื่อมเข้ากับเครื่องจักร PECVD/sputtering (top view).....	38
3.5 ภาพถ่ายของระบบ VHF-PECVD.....	39
3.6 โครงสร้างของระบบ VHF-PECVD.....	39
3.7 ภาพถ่ายขั้วสัญญาณไฟฟ้าแบบเดิมซึ่งไม่เหมาะสมต่อการใช้งานของระบบ VHF-PECVD.....	41
3.8 ภาพถ่ายขั้วสัญญาณไฟฟ้าแบบใหม่ซึ่งเหมาะสมต่อการใช้งานของระบบ VHF-PECVD.....	41
3.9 ตัวอย่างสเปกตรัมสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านแสงของฟิล์มบาง a-Si:H ที่ปลูกด้วยวิธี VHF-PECVD.....	44
3.10 ตัวอย่างสเปกตรัมสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของฟิล์มบาง a-Si:H ที่ปลูกด้วยวิธี VHF-PECVD.....	44
3.11 ตัวอย่างสเปกตรัมสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของฟิล์มบาง a-Si:H ที่ปลูกด้วยวิธี VHF-PECVD.....	45
3.12 ตัวอย่างการกำหนดค่าช่องว่างพลังงานของฟิล์มบาง a-Si:H ที่ปลูกด้วยวิธี VHF-PECVD.....	45
3.13 ตัวอย่างการกำหนดค่าช่องว่างพลังงานของฟิล์มบาง $\mu\text{c-Si:H}$ ด้วยวิธีการคำนวณจากความสัมพันธ์ระหว่างค่า Volume Fraction และค่าช่องว่างพลังงานของ c-Si ถึง a-Si:H.....	46
3.14 แผนภาพการวัดค่าสภาพนำไฟฟ้ามืดและค่าสภาพนำไฟฟ้าด้วยแสงของฟิล์มบางซิลิคอน ที่ปลูกด้วยวิธี VHF-PECVD.....	48
3.15 ลักษณะ Raman spectrum ของฟิล์มบาง $\mu\text{c-Si:H}$ ที่ปลูกด้วยวิธี VHF-PECVD.....	50
3.16 ภาพถ่าย substrate holder ทำหน้าที่เป็นตัวยึดแผ่นฐานรองสำหรับใส่ใน chamber.....	53
3.17 สรุปขั้นตอนการปลูกฟิล์มบาง a-Si:H และ $\mu\text{c-Si:H}$ ชนิดบริสุทธิ์ด้วยวิธี VHF-PECVD.....	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการปลูกฟิล์ม a-Si:H และความดันก๊าซใน chamber ค่าต่างๆ ที่ปลูกด้วยคลื่นความถี่สนามไฟฟ้า 44 MHz.....	56
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความสม่ำเสมอของฟิล์ม a-Si:H บนแผ่นฐานรอง และความดันก๊าซใน chamber ค่าต่างๆ ที่ปลูกด้วยคลื่นความถี่สนามไฟฟ้า 44 MHz.....	57
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการปลูกฟิล์มของ a-Si:H และอุณหภูมิแผ่นฐานรองค่าต่างๆ ที่ปลูกด้วยคลื่นความถี่สนามไฟฟ้า 44 MHz.....	60
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างพลังงานของ a-Si:H และอุณหภูมิแผ่นฐานรองค่าต่างๆ ที่ปลูกด้วยคลื่นความถี่สนามไฟฟ้า 44 MHz.....	60
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้าของ a-Si:H และอุณหภูมิแผ่นฐานรองค่าต่างๆ ที่ปลูกด้วยคลื่นความถี่สนามไฟฟ้า 44 MHz.....	61
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสปีน (แขนขาด) ของ a-Si:H และอุณหภูมิ แผ่นฐานรองค่าต่างๆ ที่ปลูกด้วยคลื่นความถี่สนามไฟฟ้า 44 MHz.....	61
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการปลูกฟิล์มของ a-Si:H และอัตราส่วนการไหลของ ก๊าซ $H_2/SiH_4$ ค่าต่างๆ ที่ปลูกด้วยคลื่นความถี่สนามไฟฟ้า 44 MHz.....	63
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างพลังงานของ a-Si:H และอัตราส่วนการไหลของ ก๊าซ $H_2/SiH_4$ ค่าต่างๆ ที่ปลูกด้วยคลื่นความถี่สนามไฟฟ้า 44 MHz.....	64
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้าของ a-Si:H และอัตราส่วนการไหลของ ก๊าซ $H_2/SiH_4$ ค่าต่างๆ ที่ปลูกด้วยคลื่นความถี่สนามไฟฟ้า 44 MHz.....	64
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสปีน (แขนขาด) ของ a-Si:H และอัตราส่วน การไหลของก๊าซ $H_2/SiH_4$ ค่าต่างๆ ที่ปลูกด้วยคลื่นความถี่สนามไฟฟ้า 44 MHz.....	65
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการปลูกฟิล์มของ a-Si:H และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า ค่าต่างๆ ที่ปลูกด้วยคลื่นความถี่สนามไฟฟ้า 44 MHz.....	67
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างพลังงานของ a-Si:H และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า ค่าต่างๆ ที่ปลูกด้วยคลื่นความถี่สนามไฟฟ้า 44 MHz.....	67
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้าของ a-Si:H และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า ค่าต่างๆ ที่ปลูกด้วยคลื่นความถี่สนามไฟฟ้า 44 MHz.....	68
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสปีน (แขนขาด) ของ a-Si:H และความหนาแน่น กำลังไฟฟ้า ค่าต่างๆ ที่ปลูกด้วยคลื่นความถี่สนามไฟฟ้า 44 MHz.....	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการปลูกฟิล์ม $\mu\text{c-Si:H}$ และความดันก๊าซใน chamber ค่าต่างๆ ที่ปลูกด้วยคลื่นความถี่สนามไฟฟ้า 60 MHz.....	70
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความสม่ำเสมอของฟิล์ม $\mu\text{c-Si:H}$ บนแผ่นฐานรอง และความดันก๊าซใน chamber ค่าต่างๆ ที่ปลูกด้วยคลื่นความถี่สนามไฟฟ้า 60 MHz.....	71
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการปลูกฟิล์มของ $\mu\text{c-Si:H}$ และอุณหภูมิแผ่นฐานรองค่าต่างๆ ที่ปลูกด้วยคลื่นความถี่สนามไฟฟ้า 60 MHz.....	74
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างพลังงานของ $\mu\text{c-Si:H}$ และอุณหภูมิแผ่นฐานรองค่าต่างๆ ที่ปลูกด้วยคลื่นความถี่สนามไฟฟ้า 60 MHz.....	75
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้าของ $\mu\text{c-Si:H}$ และอุณหภูมิแผ่นฐานรองค่าต่างๆ ที่ปลูกด้วยคลื่นความถี่สนามไฟฟ้า 60 MHz.....	75
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Volume Fraction ของ $\mu\text{c-Si:H}$ และอุณหภูมิแผ่นฐานรอง ค่าต่างๆ ที่ปลูกด้วยคลื่นความถี่สนามไฟฟ้า 60 MHz.....	76
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการปลูกฟิล์มของ $\mu\text{c-Si:H}$ และอัตราส่วนการไหลของ ก๊าซ $\text{SiH}_4/(\text{SiH}_4 + \text{H}_2)$ ค่าต่างๆ ที่ปลูกด้วยคลื่นความถี่สนามไฟฟ้า 60 MHz.....	78
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างพลังงานของ $\mu\text{c-Si:H}$ และอัตราส่วนการไหลของ ก๊าซ $\text{SiH}_4/(\text{SiH}_4 + \text{H}_2)$ ค่าต่างๆ ที่ปลูกด้วยคลื่นความถี่สนามไฟฟ้า 60 MHz.....	78
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้าของ $\mu\text{c-Si:H}$ และอัตราส่วนการไหลของ ก๊าซ $\text{SiH}_4/(\text{SiH}_4 + \text{H}_2)$ ค่าต่างๆ ที่ปลูกด้วยคลื่นความถี่สนามไฟฟ้า 60 MHz.....	79
4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Volume Fraction ของ $\mu\text{c-Si:H}$ และอัตราส่วนการ ไหลของก๊าซ $\text{SiH}_4/(\text{SiH}_4 + \text{H}_2)$ ค่าต่างๆ ที่ปลูกด้วยคลื่นความถี่สนามไฟฟ้า 60 MHz.....	79
4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการปลูกฟิล์มของ $\mu\text{c-Si:H}$ และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า ค่าต่างๆ ที่ปลูกด้วยคลื่นความถี่สนามไฟฟ้า 60 MHz.....	81
4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างพลังงานของ $\mu\text{c-Si:H}$ และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า ค่าต่างๆ ที่ปลูกด้วยคลื่นความถี่สนามไฟฟ้า 60 MHz.....	82
4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้าของ $\mu\text{c-Si:H}$ และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า ค่าต่างๆ ที่ปลูกด้วยคลื่นความถี่สนามไฟฟ้า 60 MHz.....	82
4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Volume Fraction ของ $\mu\text{c-Si:H}$ และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า ค่าต่างๆ ที่ปลูกด้วยคลื่นความถี่สนามไฟฟ้า 60 MHz.....	83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.1 โครงสร้างเบื้องต้นของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดทันเดมแบบ 2 รอยต่อ ระหว่าง a-Si:H และ $\mu\text{c-Si:H}$ ซึ่งแผ่นฐานรองเป็น stainless steel.....	87
5.2 ภาพถ่าย mask สำหรับใช้เคลือบ ITO ซึ่งเป็นชั้นขั้วไฟฟ้าโปร่งใส (TCO) บนสุดของเซลล์แสงอาทิตย์.....	91
5.3 ภาพถ่าย mask สำหรับใช้เคลือบ Ag ซึ่งเป็นขั้วไฟฟ้า (grid) ด้านบนของเซลล์แสงอาทิตย์.....	91
5.4 ภาพถ่ายเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดทันเดมที่ประดิษฐ์ได้ (top view).....	92
5.5 แสดงสรุปขั้นตอนการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดทันเดมด้วยวิธี VHF-PECVD เบื้องต้น.....	93
5.6 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดทันเดมโดยเพิ่มกระบวนการ $\text{CO}_2$ plasma และเปลี่ยนเงื่อนไขการสร้างชั้น n- $\mu\text{c-Si:H}$ ของเซลล์ชั้นบน.....	95
ก-1 เครื่อง Profiler รุ่น Dektak IIA ของบริษัท Sloan Technology Corporation.....	108
ก-2 เครื่อง UV-VIS Spectrometer รุ่น Lambda 35 ของบริษัท Perkin Elmer.....	108
ก-3 เครื่องมือวัดสภาพนำไฟฟ้าของฟิล์มบางซิลิกอน.....	109
ก-4 เครื่องมือวัดจำนวน Spin Density ด้วยวิธี ESR รุ่น JES-RE2X ของบริษัท JEOL.....	109
ก-5 เครื่อง Raman spectroscopy รุ่น System 2000 ของบริษัท Renishaw.....	110
ก-6 เครื่อง Spire Sun Simulator รุ่น 350i ของบริษัท Spire Corporation.....	110

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สัญลักษณ์และคำย่อ

## สัญลักษณ์

$\alpha$

ความหมาย

สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

$\eta$

ประสิทธิภาพของอานต์

$\eta_c$

ประสิทธิภาพการรวบรวมพาหะ

$\eta_{eff}$

ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

$\lambda$

ความยาวคลื่น

$\lambda_e$

ระยะทางปลอดเฉลี่ยการชน

$\mu$

สภาพคล่องของพาหะ

$\nu$

ความถี่ของคลื่นแสง

$\sigma$

สภาพนำไฟฟ้า

$\sigma_d$

สภาพนำไฟฟ้ามืด

$\sigma_{ph}$

สภาพนำไฟฟ้าด้วยแสง

$\sigma_{ph} / \sigma_d$

อัตราส่วนสภาพนำไฟฟ้าด้วยแสงต่อสภาพนำไฟฟ้ามืด

$\tau$

อายุของพาหะ

$\Phi$

จำนวนโฟตอนที่เดินทางเข้าสู่วัสดุในหนึ่งหน่วยพื้นที่

a-Si:H

อะมอร์ฟัสซิลิคอน

$\mu$ c-Si:H

ไมโครคริสตัลไลน์ซิลิคอน

c-Si

ผลึกเดี่ยวซิลิคอน

Si

ซิลิคอน

DC

กระแสไฟฟ้าตรง

RF

ความถี่วิทยุ

VHF

ความถี่สูง

PECVD

พลาสมาซีวีดี

CPM

Constant Photocurrent Method

ZnO

ซิงค์ออกไซด์

Ag

โลหะเงิน

ITO

อินเดียมทินออกไซด์

AM

ชั้นแอมอร์ฟัส

$B$

แบนด์วิดท์ของการแผ่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

### สัญลักษณ์

### ความหมาย

$c_o$

ความเร็วของแสง

$d$

ความหนาของฟิล์ม

$d_{i^2}$

ความหนาของชั้นอินทรีนซิค

DPPH

Diphenyl Picryl Hydrazyl

$D^+$

Unoccupied state

$D^-$

Doubly occupied state

$D^0$

Singly occupied state

$e$

ประจุของอิเล็กตรอน

ESR

อิเล็กตรอนสปีนเรโซแนนซ์

$E$

สนามไฟฟ้า

$E_a$

พลังงานกระตุ้น

$E_c$

แถบคอนดักชัน

$E_f$

พลังงานเฟอร์มิ

$E_v$

แถบวาเลนซ์

$E_{opt}$

ช่องว่างพลังงานของอะมอร์ฟัสซิลิคอน

$E_{opt}^*$

ช่องว่างพลังงานของโมโนคริสตัลไลน์ซิลิคอน

$F_c$

ปริมาตรเมล็ดผลึกย่อยต่อปริมาตรอะมอร์ฟัส

$F'_c$

พื้นที่ได้กราฟของเมล็ดผลึกย่อย

FF

ฟิล์มเฟกเตอร์

$G$

ความหนาแน่นของพาหะ

$h$

ค่าคงที่ของ Planck

$h\nu$

พลังงานโฟตอน

$I$

กระแสไฟฟ้า

$I_A$

พื้นที่ได้กราฟของอะมอร์ฟัสซิลิคอน

$I_c$

พื้นที่ได้กราฟของโมโนคริสตัลไลน์ซิลิคอน

$I_o$

กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต

$I_{ph}$

กระแสไฟฟ้าโฟโตที่เกิดในเซลล์แสงอาทิตย์

$I_{phi}$

กระแสไฟฟ้าโฟโตที่เกิดในเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

### สัญลักษณ์

	ความหมาย
$I_s$	กระแสไฟฟ้าอิ่มตัว
$I_{sc}$	กระแสไฟฟ้าลัดวงจรต่อพื้นที่ทั้งหมด
$J_{sc}$	กระแสไฟฟ้าลัดวงจรต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่
$k$	ค่าคงที่ของ Boltzmann
$l$	ความยาวของขั้วโลหะ
$m$	จำนวนของเซลล์แสงอาทิตย์ย่อย
$n$	ความหนาแน่นของพาหะ
$n_D$	แฟกเตอร์อุดมคติของไดโอด
$N_o$	เลข Avogadro
$R_{reff}$	ความต้านทานรวมประสิทธิผล
$R_s$	ความต้านทานอนุกรม
$R_{sh}$	ความต้านทานขนั้ด
$R\%$	สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง
SC %	อัตราส่วนการไหลของก๊าซไฮโดรเจน
$T$	อุณหภูมิสัมบูรณ์
$T\%$	สัมประสิทธิ์การทะลุผ่านแสง
$V$	แรงดันไฟฟ้า
$V_b$	แรงดันภายในของไดโอด
$V_o$	แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต
$V_{oc}$	แรงดันไฟฟ้าวงจรถัด
$w$	ระยะห่างระหว่างขั้วโลหะไฟฟ้า
$y$	พจน์ปรับมาตรฐาน
$H_2$	ก๊าซไฮโดรเจน
$SiH_4$	ก๊าซซิลิโคน
$PH_3$	ก๊าซฟอสฟีน
$B_2H_6$	ก๊าซไดโบเรน
$SiH_2Cl_2$	ก๊าซไดคลอโรซิลิโคน
$CO_2$	ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

### สัญลักษณ์

Ar

O<sub>2</sub>

N<sub>2</sub>

### ความหมาย

ก๊าซอาร์กอน

ก๊าซออกซิเจน

ก๊าซไนโตรเจน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ศัพท์เทคนิค

กระแสไฟฟ้าตรง	Direct current
กระจก	Glass
การสั่นเชิงจลน์	Kinetic fluctuation
การสั่นเชิงสถิต	Static fluctuation
การแอนนีสล	Annealing
การขนส่งในแถบพลังงาน	Band transport
การขนส่งวิธีฮอปปีง	Hopping transport
การขนส่งวิธีฮอปปีงชนิดใกล้	Nearest site hopping
การขนส่งวิธีฮอปปีงชนิดระยะทางแปรผัน	Variable range hopping
การกระตุ้นพาหะ	Excitation
การจับ	Trapping
การปล่อยพาหะ	Detrapping
การรวมตัวของพาหะ	Recombination
การสะท้อนแสงกลับ	Back reflector
การแพร่ซึม	Diffusion
การครีพท์	Drift
การไอออนไนเซชัน	Ionization
ก๊าซไฮโดรเจน	Hydrogen gas
ก๊าซซิลเลน	Silane gas
ก๊าซฟอสฟีน	Phosphine gas
ก๊าซไดบอเรน	Diborane gas
ก๊าซไดคลอโรซิลเลน	Dichlorosilane gas
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	Carbon dioxide gas
ก๊าซอาร์กอน	Argon gas
ก๊าซออกซิเจน	Oxygen gas
ก๊าซไนโตรเจน	Nitrogen gas
การชิฟต์ของรามัน	Raman shift
กราวด์สเตต	Ground state
แก๊ปสเตต	Gap states

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ศัพท์เทคนิค (ต่อ)

กล่องแมตชิง	Matching box
ขั้วสัญญาณไฟฟ้า	Electrode
ขั้วไฟฟ้า	Grid
แขนกล	Robotic arm
ขอบของช่องว่างพลังงาน	Band edge
คาร์บอน ไดออกไซด์พลาสมา	CO <sub>2</sub> plasma
ความถี่วิทยุ	Radio Frequency
ความถี่สูง	Very High Frequency
ความยาวคลื่น	Wavelength
ความหนาแน่นสปิน	Spin Density
ความหนาแน่นแขนขาด	ESR Spin Density
ความเข้มของสัญญาณ	Intensity
ความดันก๊าซ	Pressure
ความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า	Power density
ความสม่ำเสมอ	Uniformity
เครื่องจำลองแสงอาทิตย์เทียม	Spire Sun Simulator
เครื่องทำความสะอาดอัลตราซาวด์	Ultrasonic cleaning
โคพแลนาร์	Co-planar
จุดบกพร่อง	Defects state
ช่องว่างสภาพคล่องของพาหะ	Mobility gap
ช่องว่างพลังงานแสงหรือช่องว่างพลังงาน	Optical energy gap
ชั้นเอ็น	n-layer
ชั้นพี	p-layer
ชั้นอินทรีนซิก	i-layer
ชั้นหน้าต่างรับแสง	Window layer
ชั้นผลิตพาหะ	Active layer
ชั้นขั้วไฟฟ้าโปร่งใส	Transparent Conductive Oxide layer
ชั้นป้องกันการสะท้อนแสง	Anti reflection layer
ชั้นแอร์แมส	Air mass

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ศัพท์เทคนิค (ต่อ)

ซิลิคอน	Silicon
ซิงค์ออกไซด์	Zinc Oxide
เซลล์แสงอาทิตย์	Solar cell
เซลล์แสงอาทิตย์ชั้นบน	Top cell
เซลล์แสงอาทิตย์ชั้นล่าง	Bottom cell
เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดทันเดม	Tandem solar cell
เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดมัลติเลเยอร์	Multi layer solar cell
ฐานรอง	Substrates
ดีโลคัลไลซ์สเตต	Delocalized states
ไตรคลอโรเอทิลีน	Trichloroethylene
แถบคอนดักชัน	Conduction band
แถบพลังงานอนุญาต	Allowed band
แถบวาเลนซ์	Valence band
น้ำไร้ไอออน	De-ionized water
บริเวณดูดกลืนแสงมาก	High absorption region
บริเวณดูดกลืนแสงน้อย	Weak absorption tail
แบบจำลองของเพอร์โคเลชัน	Percolation model
ประสิทธิภาพการรวบรวมพาหะ	Carrier collection efficiency
ปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิกชนิดพัดพา	Drift type photovoltaic effect
ปฏิกิริยาที่ผิว	Surface reactivity
ปริมาตรเมล็ดผลึกย่อยต่อปริมาตรอะมอร์ฟัส	Volume Fraction
ผลึกเดี่ยวซิลิคอน	Single crystalline silicon
พันธะแขวนขาด	Dangling bonds
พลังงานกระตุ้น	Activation energy
พลังงานโฟตอน	Photon energy
พลาสมา	Plasma
พลาสมาซีวีดี	Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition
โพลีเมอร์	Polymer
พจน์ปรับมาตรฐาน	Calibration term

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
XX

## ศัพท์เทคนิค (ต่อ)

ฟิล์มปริเคอร์เซอร์	Film precursor
ฟังก์ชันคลื่น	Wave function
แฟกเตอร์คุณภาพของไดโอด	Quality factor
โฟตอนฟลักซ์	Photon flux
ภาชนะสุญญากาศ	Chamber
มาสก์	Mask
เมทิลแอลกอฮอล์	Methyl alcohol
เม็ดผลึกย่อย	Grain
ไมโครคริสตัลไลน์ซิลิคอน	Hydrogenated microcrystalline silicon
ระบบกำเนิดสนามไฟฟ้าคลื่นความถี่สูง	VHF generator
ระยะทางการแพร่ซึม	Diffusion length
รอยต่อโอห์มิก	Ohmic contact
รอยต่อเรกติไฟร์	Rectifier contact
รอยต่อที่มีการรวมตัวของพาหะ	Tunnel junction
แลตทิซ	Lattice
โลคอไลซ์สเตต	Localized states
โลหะเงิน	Silver
สเปกตรัมของการกระเจิงรามัน	Raman scattering
สภาพนำไฟฟ้า	Conductivity
สภาพนำไฟฟ้ามืด	Dark conductivity
สภาพนำไฟฟ้าด้วยแสง	Photo conductivity
สปัตเตอริง	Sputtering
สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง	Reflectance
สัมประสิทธิ์การทะลุผ่านแสง	Transmittance
สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง	Absorption coefficient
หางของแถบพลังงาน	Band tail
เหล็กกล้าไร้สนิม	Stainless steel
อะมอร์ฟัสซิลิคอน	Hydrogenated amorphous silicon
อะซิโตน	Acetone

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
XXI

## ศัพท์เทคนิค (ต่อ)

อัตราการปลูกฟิล์ม	Deposition rate
อัตราส่วนการไหลของก๊าซไฮโดรเจน	Hydrogen dilution ratio
อัตราส่วนการไหลของก๊าซซิลเลน	Silane concentration ratio
อัตราส่วนสภาพนำไฟฟ้า	Conductivity ratio
อิเล็กตรอน	Electron
อิเล็กตรอนสปินเรโซแนนซ์	Electron Spin Resonance
อินเดียมทินออกไซด์	Indium Tin Oxide
อุปกรณ์วางแผ่นฐาน	Substrate holder
อุณหภูมิแผ่นฐานรอง	Substrate temperature
เอ็กซ์เทนส์สเตต	Extended state
ไอออนบอมบาร์ดเมนต์	Ion bombardment
ฮีตเตอร์	Heater
โฮล	Hole



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## พื้นฐานและที่มาของวิทยานิพนธ์

### 1.1 บทนำ

ปัจจุบันความต้องการพลังงานมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในขณะที่แหล่งพลังงานบนโลกมีอยู่อย่างจำกัด แหล่งพลังงานส่วนใหญ่ที่ใช้อยู่ในปัจจุบันได้มาจากฟอสซิล ซึ่งได้แก่ น้ำมัน ก๊าซ และถ่านหิน แต่เนื่องจากความต้องการใช้พลังงานที่มีเพิ่มมากขึ้น ทำให้แหล่งพลังงานที่ได้มาจากฟอสซิลลดลงและมีสำรองใช้ได้อีกไม่นาน นอกจากนี้การใช้พลังงานจากฟอสซิลนั้นยังก่อให้เกิดผลกระทบต่อความเป็นอยู่ของมนุษย์และระบบนิเวศ ดังนั้นในปัจจุบันจึงมีการนำพลังงานในรูปแบบต่างๆ มาใช้เพิ่มมากขึ้น อาทิ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานจากคลื่น พลังงานชีวมวลและพลังงานความร้อนใต้พิภพ ซึ่งพลังงานแสงอาทิตย์ก็เป็นพลังงานหนึ่งที่น่าสนใจอย่างยิ่ง เนื่องจากแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานที่สะอาด มีอยู่ทั่วไปและมีอยู่อย่างไม่จำกัด การนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ต้องอาศัยเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า เซลล์แสงอาทิตย์ถูกนำไปใช้งานได้หลากหลายประเภท เช่น เป็นแหล่งพลังงานของดาวเทียม เป็นแหล่งพลังงานสำหรับสถานีสื่อสารในที่ห่างไกล เป็นแหล่งพลังงานให้กับชนบทหรือถิ่นทุรกันดารที่ไฟฟ้ายังเข้าไปไม่ถึง หรือแม้กระทั่งเป็นแหล่งพลังงานให้กับเครื่องคิดเลขขนาดเล็ก

การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึก นั้นมีต้นทุนที่สูงและมีความยุ่งยากในกระบวนการการผลิต จึงทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดดังกล่าวนี้มีราคาค่อนข้างสูง ต่างจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอนที่มีกระบวนการผลิตที่ง่าย และมีต้นทุนการผลิตต่ำ ดังนั้นการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอนนับว่ามีบทบาทสำคัญในปัจจุบัน เพื่อการลดต้นทุนของเซลล์แสงอาทิตย์ลง

### 1.2 ความเป็นมาและความสำคัญของหัวข้อวิทยานิพนธ์

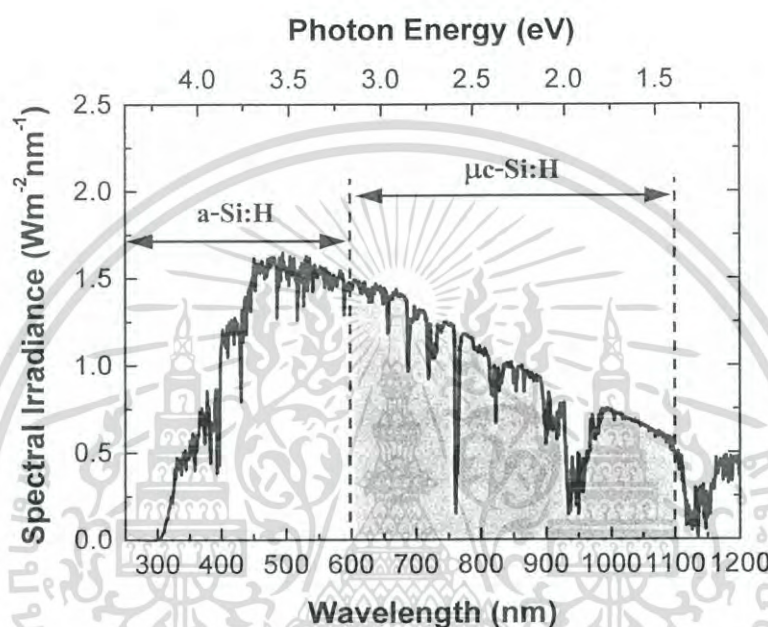
วัสดุอะมอร์ฟัสซิลิคอน (hydrogenated amorphous silicon : a-Si:H) ซึ่งผสมด้วยไฮโดรเจนถูกเตรียมขึ้นครั้งแรกเมื่อ ค.ศ. 1965 โดย H.F. Sterling และ R.C.G Swann ต่อมาในปี ค.ศ. 1975 ศาสตราจารย์ W.F. Spear และ P.G. Le Comber แห่งมหาวิทยาลัย Dundee ได้พัฒนาวัสดุ a-Si:H ขึ้น โดยการเติมสารเจือสำเร็จเป็นครั้งแรก ทำให้วัสดุ a-Si:H มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพีและชนิดเอ็น ต่อมาเมื่อปี ค.ศ. 1976 RCA Laboratory [1-2] ได้พัฒนาวัสดุ a-Si:H เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ (solar cell) ขึ้น ซึ่งขณะนั้นเซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพต่ำ ด้วยสาเหตุเนื่องจากฟิล์มมีคุณภาพยังไม่ดีนักและโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เป็นแบบขอต็คกีแบร์เรียร์ ในเวลา

ต่อมา Dr Hamakawa แห่งมหาวิทยาลัยโอซาก้า ได้พัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้มีโครงสร้างแบบ p-i-n อันมีวัสดุ a-Si:H เป็นชั้นผลิตพาหะ [3] เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดดังกล่าวนี้ ในระยะแรกประสิทธิภาพยังไม่สูงมากนัก เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้สามารถดูดกลืนพลังงานโฟตอนของแสงอาทิตย์ที่ผ่านความยาวคลื่นสั้นได้ดี แต่ไม่สามารถดูดกลืนพลังงานโฟตอนของแสงอาทิตย์ที่ผ่านความยาวคลื่นยาวได้ มีพลังงานบางส่วนสูญเสียไป วิทยานิพนธ์นี้จึงได้ ทำการศึกษาวัสดุฟิล์มบาง a-Si:H ซึ่งสามารถดูดกลืนพลังงานโฟตอนของแสงอาทิตย์ที่ผ่านความยาวคลื่นสั้น และทำการศึกษาวัสดุฟิล์มบางไมโครคริสตัลไลน์ซิลิคอน (hydrogenated microcrystalline silicon :  $\mu\text{c-Si:H}$ ) ซึ่งวัสดุดังกล่าวนี้สามารถดูดกลืนพลังงานโฟตอนของแสงอาทิตย์ที่ผ่านความยาวคลื่นยาวได้ดี ทั้งยังได้มีแนวความคิดในการรวมเซลล์แสงอาทิตย์หลายเซลล์เข้าด้วยกัน โดยการปลูกซ้อนทับกัน เพื่อให้เซลล์แต่ละตัวดูดกลืนพลังงานโฟตอนของแสงอาทิตย์ที่ความยาวคลื่นต่างกัน รูปที่ 1.1 แสดงสเปกตรัมการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ที่ AM 1.5 พื้นที่ส่วนแรเงาจะแสดงถึงพลังงานโฟตอนของแสงอาทิตย์ที่จะสามารถนำไปใช้ได้เพิ่มขึ้น เมื่อเซลล์แสงอาทิตย์มีโครงสร้างดังกล่าวจะทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้สูงขึ้น [4-6] เรียกเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีโครงสร้างเช่นนี้ว่า เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดทันเดม (tandem solar cell) หรือ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดมัลติเลเยอร์ (multi layer solar cell) [6-9] โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดทันเดมในวิทยานิพนธ์เบื้องต้นคือ stainless steel/ Ag/ ZnO/ n- $\mu\text{c-Si:H}$ / i- $\mu\text{c-Si:H}$ / p-a-Si:H/ n- $\mu\text{c-Si:H}$ / i-a-Si:H/ p- $\mu\text{c-Si:H}$ / ITO โดยที่ชั้น i เป็นชั้นผลิตพาหะ ชั้น p และ n ทำหน้าที่สร้างแรงดันไฟฟ้าภายใน ซึ่งชั้น i จะมีความหนาแน่นมากเมื่อเปรียบเทียบกับชั้น p และ n ทำให้ต้องใช้ระยะเวลาในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ที่ยาวนาน และทำให้ราคาของเซลล์แสงอาทิตย์ยังไม่ถูกลงเท่าที่ควร ซึ่งปัจจุบันความต้องการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มมากขึ้นทุกปี จึงมีความพยายามที่จะ ปลูกฟิล์มชั้น i ให้มีอัตราการเติบโตสูงขึ้น เพื่อลดระยะเวลาในการปลูกฟิล์มชั้น i ลง กระบวนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ในอดีตนั้นนิยมใช้สนามไฟฟ้าคลื่นความถี่วิทยุ (Radio Frequency : RF , 13.56 MHz) สำหรับกระตุ้นให้ก๊าซไฮโดรเจนแตกตัวเป็นพลาสมาหรือเรียกว่าวิธีพลาสมาซีวีดีความถี่วิทยุ (RF Plasma CVD) [10] แต่วิธีดังกล่าวนี้มีข้อด้อยคือ ได้อัตราการเติบโตของฟิล์มบางซิลิคอนที่ช้า วิธีการที่จะปลูกฟิล์มให้มีอัตราการเติบโตสูง อาทิเช่น การเพิ่มความหนาแน่นของกำลังงานไฟฟ้าและการเพิ่มคลื่นความถี่ของสนามไฟฟ้า แต่การเพิ่มความหนาแน่นของกำลังงานไฟฟ้าคลื่นความถี่วิทยุจะทำให้คุณภาพของฟิล์มลดลง [11-12] ดังนั้นจึงให้ความสนใจกับการเพิ่มคลื่นความถี่ของสนามไฟฟ้าเป็นสำคัญ ซึ่งการเพิ่มคลื่นความถี่ของสนามไฟฟ้าดังกล่าวนี้ จะเป็นการใช้เทคโนโลยีการแยกสลายก๊าซไฮโดรเจน ให้ประสิทธิภาพการแยกสลายสูงสุด โดยการเพิ่มคลื่นความถี่ของสนามไฟฟ้าที่ใช้แยกสลายก๊าซไฮโดรเจนจากคลื่นความถี่วิทยุเป็นคลื่นความถี่สูง (Very High Frequency : VHF , 30-300 MHz) หรือเรียกว่าวิธีพลาสมาซีวีดีความถี่สูง (Very High Frequency Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition : VHF-PECVD) [13-14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับวิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาเทคโนโลยีการปลูกฟิล์มบาง a-Si:H และฟิล์มบาง  $\mu\text{c-Si:H}$  ด้วยวิธีพลาสมาซีวีความถี่สูง เพื่อให้ได้ฟิล์มที่มีคุณภาพดี มีอัตราการปลูกฟิล์มสูง และศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานต่างๆ ของฟิล์มบางทั้งสองนี้ ทั้งคุณสมบัติทางแสง คุณสมบัติทางไฟฟ้าและคุณสมบัติทางโครงสร้าง เพื่อนำไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดทันเดมที่มีชั้นผลิตพาหะเป็นวัสดุ a-Si:H และวัสดุ  $\mu\text{c-Si:H}$



รูปที่ 1.1 สเปกตรัมการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ที่ AM 1.5

### 1.3 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. เพื่อศึกษาเทคโนโลยีการปลูกฟิล์มบาง a-Si:H และ  $\mu\text{c-Si:H}$  ด้วยวิธี VHF-PECVD
2. เพื่อศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานฟิล์มบาง a-Si:H และ  $\mu\text{c-Si:H}$  ที่เตรียมได้จากวิธี VHF-PECVD
3. เพื่อศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเตรียมฟิล์มบาง a-Si:H และ  $\mu\text{c-Si:H}$  ที่มีคุณภาพ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นชั้นผลิตพาหะในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดทันเดม
4. ประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดทันเดมในเบื้องต้น แบบ 2 รอยต่อระหว่าง a-Si:H และ  $\mu\text{c-Si:H}$  โครงสร้าง n-i-p/n-i-p ซึ่งชั้นผลิตพาหะ เตรียมด้วยวิธี VHF-PECVD

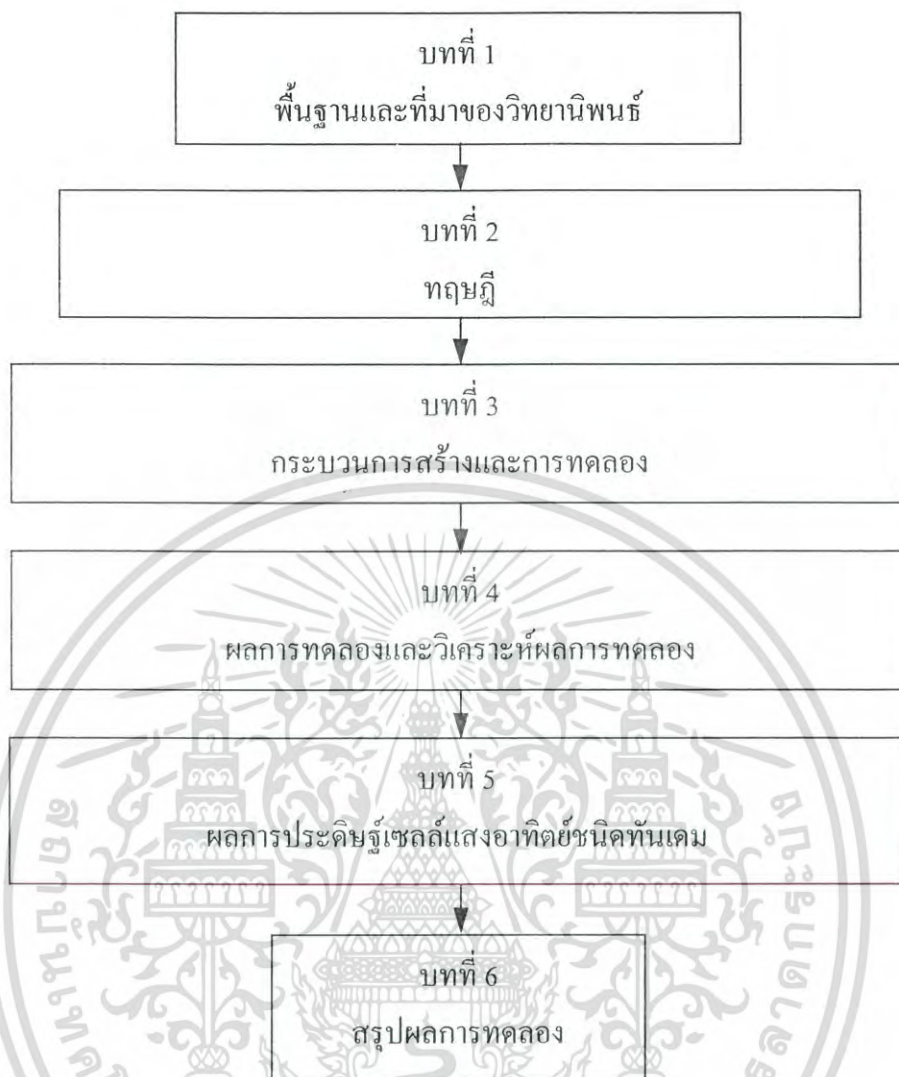
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

ขอบเขตของการวิจัยได้แก่ การศึกษาเงื่อนไขการปลูกฟิล์มบาง a-Si:H และฟิล์มบาง  $\mu\text{c-Si:H}$  ซิลิคอนด้วยวิธี VHF PECVD เพื่อให้ได้ฟิล์มที่มีความสม่ำเสมอ มีคุณภาพดี และอัตราการปลูกฟิล์มสูง ด้วยเงื่อนไขดังนี้ ความดันก๊าซใน chamber อุณหภูมิแผ่นฐานรอง อัตราส่วนการไหลของก๊าซไฮโดรเจน ( $\text{H}_2/\text{SiH}_4$ ) อัตราส่วนการไหลของก๊าซไซเลน ( $\text{SiH}_4/(\text{SiH}_4 + \text{H}_2)$ ) และความหนาแน่นกำลังงานไฟฟ้า ฟิล์มที่ปลูกได้จะนำมาศึกษาคุณสมบัติพื้นฐาน ได้แก่ คุณสมบัติทางแสง คุณสมบัติทางไฟฟ้าและคุณสมบัติทางโครงสร้าง ซึ่งนำไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดทันเดมที่มีชั้นผลิตพาหะเป็นวัสดุ a-Si:H และวัสดุ  $\mu\text{c-Si:H}$  ชั้นตอนการศึกษาของวิทยานิพนธ์แสดงได้ดังรูปที่ 1.2

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ความรู้และเทคโนโลยีการปลูกฟิล์มบาง a-Si:H และฟิล์มบาง  $\mu\text{c-Si:H}$  ด้วยวิธี VHF-PECVD โดยมีเงื่อนไขที่เหมาะสมในการปลูกฟิล์มให้มีคุณภาพดี
2. เทคโนโลยีการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดทันเดมด้วยวิธี VHF-PECVD
3. สามารถนำเทคโนโลยีที่พัฒนาได้ไปใช้งาน ในสายการผลิตเชิงปริมาณของภาคเอกชน ซึ่งจะตอบสนองความต้องการของตลาดเซลล์แสงอาทิตย์ภายในประเทศ และกระตุ้นให้เกิดอุตสาหกรรมการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นภายในประเทศ



รูปที่ 1.2 ขั้นตอนการศึกษาของวิทยานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎี

#### 2.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวกับวัสดุอะมอร์ฟัสซิลิคอนและวัสดุไมโครคริสตัลไลน์ ตลอดจนคุณสมบัติพื้นฐานต่างๆ ของวัสดุทั้งสองนี้ และเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดทันเดม ซึ่งจะมีรายละเอียดของโครงสร้างและหลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดทันเดม สู่สุดท้ายของบทนี้จะกล่าวถึงสนามไฟฟ้าคลื่นความถี่สูงและผลของสนามไฟฟ้าคลื่นความถี่สูงที่มีต่ออัตราการปลูกฟิล์ม วัสดุไมโครคริสตัลไลน์ซิลิคอนและประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

#### 2.2 อะมอร์ฟัสซิลิคอน

อะมอร์ฟัสแปลว่าสิ่งซึ่งมีรูปร่างไม่แน่นอน วัสดุอะมอร์ฟัสไม่มีการเรียงตัวของอะตอมที่แน่นอนและมีการเรียงตัวของพันธะระหว่างอะตอมเป็นระเบียบในระยะสั้น ซึ่งในวัสดุผลึกเดี่ยวซิลิคอน (single crystalline silicon : c-Si) จะมีการเรียงตัวของพันธะระหว่างอะตอมเป็นระเบียบในระยะยาว [15] จากการเรียงตัวของพันธะระหว่างอะตอมเป็นระเบียบในระยะสั้น ซึ่งมีผลทำให้วัสดุอะมอร์ฟัสนั้นมีคุณสมบัติคล้ายผลึกที่เกิดจากธาตุชนิดเดียวกัน แต่ในขณะที่เดียวกันเนื่องจากพันธะระหว่างอะตอมไม่มีระเบียบในระยะยาว จากเหตุดังกล่าววัสดุอะมอร์ฟัส จึงมีคุณสมบัติที่สำคัญต่างไปจากวัสดุ c-Si อาทิเช่น การเป็นเนื้อเดียวกันตลอดของสารกึ่งตัวนำอะมอร์ฟัส ค่าคงตัวต่างๆ ทางฟิสิกส์ของสารกึ่งตัวนำอะมอร์ฟัสสามารถเปลี่ยนแปลงได้ และในทางระบบอุณหพลศาสตร์ สารกึ่งตัวนำอะมอร์ฟัสอยู่ในภาวะไม่สมดุลเชิงความร้อนเป็นต้น สารกึ่งตัวนำอะมอร์ฟัสที่มีการนิยมนำมาใช้งานกันมากในปัจจุบัน คือ อะมอร์ฟัสซิลิคอน (a-Si:H)

#### 2.3 ขั้นตอนการเกิดของฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอน

ฟิล์ม a-Si:H ที่ปลูกด้วยวิธีพลาสมาซีวีดี ซึ่งใช้สนามไฟฟ้ากระตุ้นให้ก๊าซไฮเลินแตกตัวเป็นพลาสมา โดยอิเล็กตรอน (electron) อิสรจะถูกเร่งความเร็วภายใต้สนามไฟฟ้า ซึ่งอิเล็กตรอนอิสระเหล่านี้จะวิ่งชนโมเลกุลของก๊าซไฮเลินทำให้เกิดการไอออนไนเซชัน (ionization) ของก๊าซไฮเลินและปล่อยพลังงานออกมา พลังงานในการไอออนไนซ์โดยทั่วไปอยู่ในช่วง 10 eV ถึง 20 eV พลังงานของอิเล็กตรอนอิสระสามารถกำหนดโดยค่า  $eE\lambda_e$  ซึ่งค่า  $e$  คือค่าประจุของอิเล็กตรอน  $E$  คือสนามไฟฟ้าที่ใช้  $\lambda_e$  คือระยะทางเฉลี่ยตลอดการชน (mean free path) ของอิเล็กตรอนอิสระก่อนที่จะเกิดการชนกับโมเลกุลของก๊าซ โดยทั่วไปค่า  $\lambda_e$  มีประมาณ  $10^{-3}$  cm ถึง  $10^{-2}$  cm เมื่อความดันของก๊าซขณะปลูกฟิล์มมีค่าสูงขึ้น ค่า  $\lambda_e$  จะลดลง ซึ่งทำให้ต้องใช้สนามไฟฟ้าสูงขึ้นเพื่อให้เกิดเอกสารเป็นเอกสารที่ส่งในเวลาสำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตเห็นไปไซประโยชน์ดานการค้ำไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การไอออนไนเซชัน และหากใช้ความดันก๊าซต่ำจะทำให้  $\lambda_e$  มีค่ามาก การเกิดการชนของอิเล็กตรอนอิสระกับโมเลกุลของก๊าซจะลดลง ค่าสนามไฟฟ้าที่ใช้เพื่อให้เกิดการไอออนไนเซชันจึงต้องมากขึ้นด้วย โดยทั่วไปความดันของก๊าซขณะปลูกฟิล์มมีค่าประมาณ 0.1 torr ถึง 1 torr การเกิดการชนของอิเล็กตรอนอิสระและโมเลกุลของก๊าซไซเลน จะทำให้โมเลกุลของก๊าซไซเลนมีพลังงานสูงขึ้น และปล่อยพลังงานออกมาก่อนที่จะตกสู่กราวด์สเตต (ground state) พลังงานที่ปล่อยออกมาเป็นแสง (photon) ในย่านอัลตราไวโอเลต ก๊าซไซเลนที่ถูกชนด้วยอิเล็กตรอนอิสระสามารถเกิดการแยกสลายได้ดังนี้ [16]

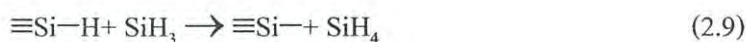


นอกจากนี้ยังสามารถเกิดกระบวนการ secondary reaction หลังการแยกสลายก๊าซไซเลนแล้ว สามารถเกิดเป็นโมเลกุลก๊าซที่ใหญ่ขึ้นได้ เช่น



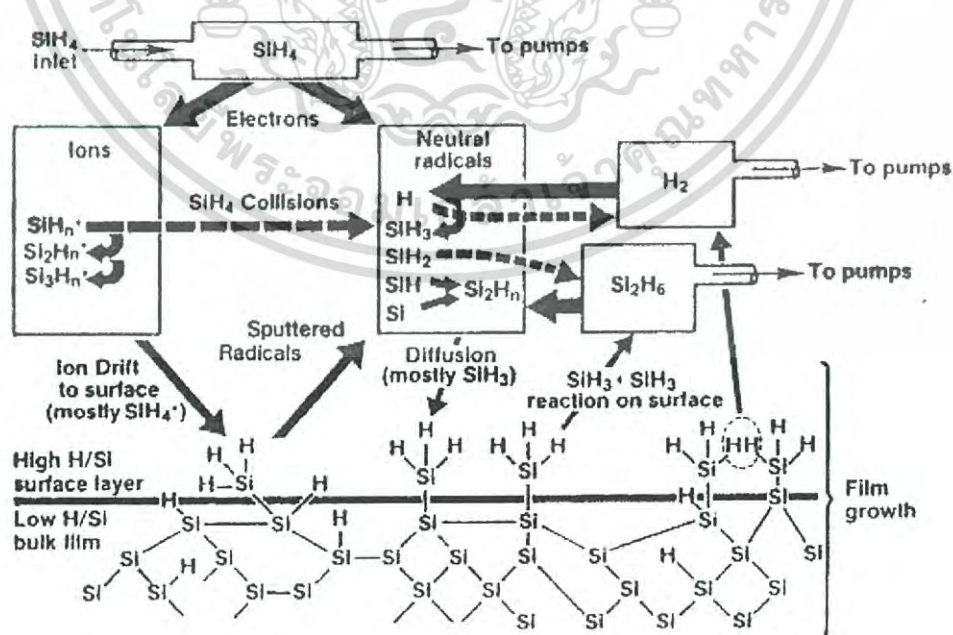
กระบวนการเกิดฟิล์ม a-Si:H เริ่มจากการดูดซับโมเลกุลของก๊าซที่บริเวณผิวของแผ่นฐานรอง ส่วนมากจะเกิดจากโมเลกุลก๊าซ  $\text{SiH}_3$  และการหลุดออกของอะตอมหรือโมเลกุลของไฮโดรเจนที่ผิวขณะปลูกฟิล์ม การหลุดออกของอะตอมหรือโมเลกุลของไฮโดรเจนจากผิวฟิล์มสามารถเกิดจากปฏิกิริยาเคมีจากก๊าซอื่นๆ ที่ผิวฟิล์มได้ เช่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



$\equiv\text{Si}-$  คืออะตอมของซิลิคอน (silicon : Si) ซึ่งเกิดพันธะที่ผิวฟิล์ม อะตอมไฮโดรเจนที่ผิวฟิล์มสามารถแพร่กระจายได้รวดเร็ว และสามารถจับกับแขนขาของซิลิคอนได้ ซึ่งทำให้จุดบกพร่องมีจำนวนลดลงในขณะที่ทำการปลูกฟิล์ม ส่วนอะตอมของซิลิคอนมีการแพร่กระจายได้ช้ามากเพราะซิลิคอนมีพันธะโควาเลนต์ 4 แขนและมีมวลมาก ในขณะที่ไฮโดรเจนมีพันธะโควาเลนต์เพียง 1 แขน รูปที่ 2.1 แสดงปฏิกิริยาต่างๆ ที่เกิดขึ้นบริเวณผิวของฟิล์มในขณะที่ทำการปลูกฟิล์ม a-Si:H ขั้นตอนการเกิดของฟิล์ม a-Si:H สามารถแบ่งเป็น 4 ขั้นตอนดังนี้

1. สนามไฟฟ้าจะเร่งให้อิเล็กตรอนอิสระไปชนกับโมเลกุลก๊าซไซเลนเพื่อให้เกิดการแยกสลาย
2. เกิดการแพร่ของไอออนและโมเลกุลต่างๆ ที่เกิดจากการแยกสลายก๊าซไซเลนบริเวณผิวของแผ่นฐานรอง
3. เกิดการดูดซับ ไอออนและโมเลกุลของก๊าซ ที่บริเวณผิวของแผ่นฐานรอง
4. เกิดการก่อตัวของฟิล์มและปฏิกิริยาเคมีจากก๊าซอื่นทำให้อะตอมหรือโมเลกุลของก๊าซไฮโดรเจนที่ผิวหลุดออกมา



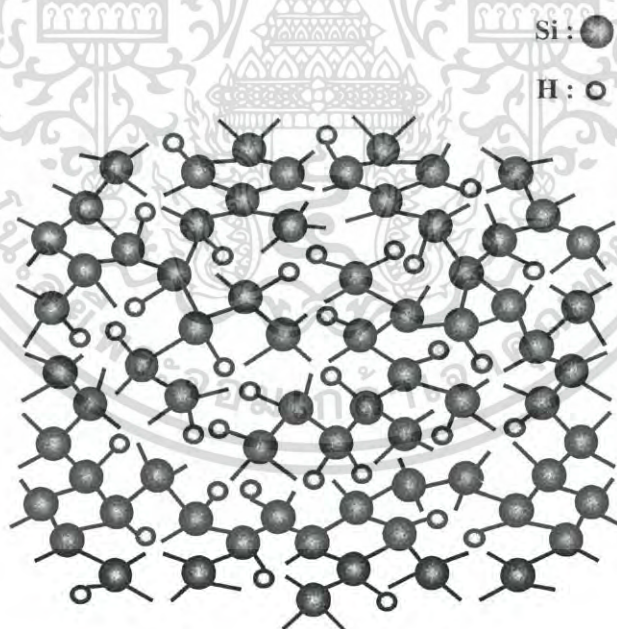
รูปที่ 2.1 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบริเวณผิวของฟิล์มในขณะที่ทำการปลูกฟิล์ม a-Si:H [17]  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการวิจัยเท่านั้น เมื่อผู้ใช้เห็นเข้าใช้ควรระมัดระวังในการนำ  
 ไปว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 คุณสมบัติต่างๆ ของอะมอร์ฟัสซิลิคอน

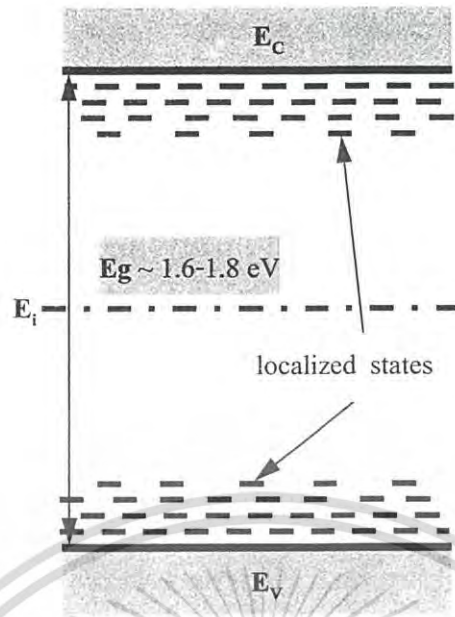
ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติของวัสดุ  $a\text{-Si:H}$  3 คุณสมบัติใหญ่คือ คุณสมบัติทางโครงสร้าง คุณสมบัติทางแสง และคุณสมบัติทางไฟฟ้า

### 2.4.1 คุณสมบัติทางโครงสร้าง

วัสดุ  $a\text{-Si:H}$  ไม่มีการเรียงตัวของอะตอมที่แน่นอนและมีการเรียงตัวของพันธะระหว่างอะตอมเป็นระเบียบในระยะสั้น จะพบว่ามีซิลิคอนบางส่วนที่บางแขนไม่มีคู่จับแบบโควาเลนซ์จึงทำให้เกิดพันธะแขนขาด (dangling bonds) ขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.2 แขนขาดเหล่านี้จะคอยจับอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่เข้ามาใกล้ ทำให้สภาพนำไฟฟ้าด้วยแสงของ  $a\text{-Si:H}$  มีค่าต่ำ และการเกิดของแขนขาดทำให้ภายในช่องว่างพลังงานของ  $a\text{-Si:H}$  มีโลคัลไลซ์สเตต (localized states) หรือแก๊ปสเตต (gap states) เกิดขึ้น ทำให้คุณสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ฟิล์มบาง  $a\text{-Si:H}$  ที่เตรียมด้วยวิธีพลาสมา ซีวีดีจากก๊าซไซเลน ( $\text{SiH}_4$ ) นั้นจะมีอะตอมของไฮโดรเจนสร้างพันธะกับซิลิคอน สามารถช่วยลดจำนวนของแขนขาดใน  $a\text{-Si:H}$  ลง และทำให้จำนวนของสเตตที่เกิดจากจุดบกพร่อง (defect states) ในช่องว่างพลังงานของ  $a\text{-Si:H}$  ลดลงมาก [18] ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าด้วยแสงของ  $a\text{-Si:H}$  จึงมีค่าดีขึ้น



รูปที่ 2.2 โครงสร้างการเรียงตัวของอะตอมในวัสดุ  $a\text{-Si:H}$



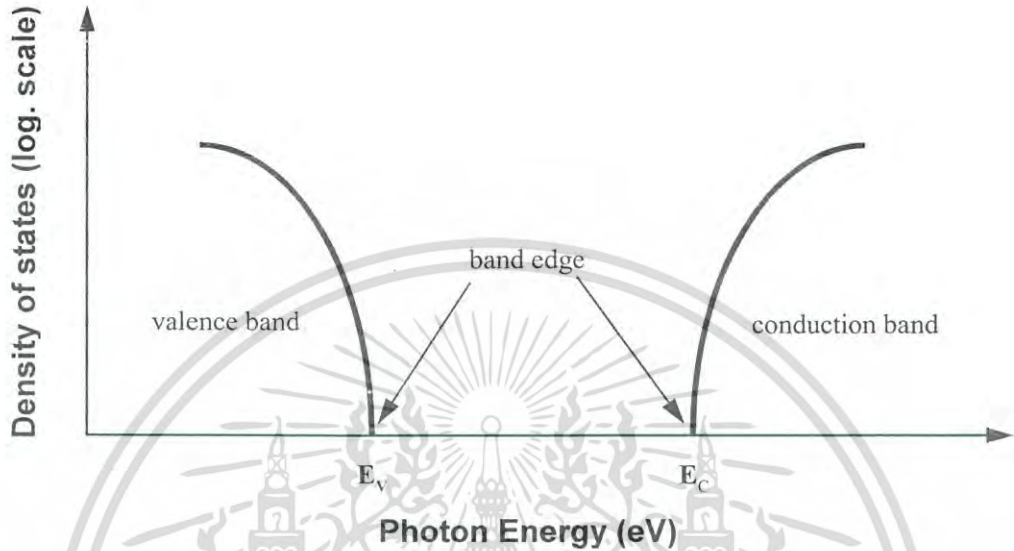
รูปที่ 2.3 ช่องว่างพลังงานของวัสดุ a-Si:H [10]

การหาค่า Spin Density เพื่อวัดจำนวนแขนขาของวัสดุ a-Si:H จะกล่าวรายละเอียดในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.5.3 เรื่องการตรวจวัดและวิเคราะห์คุณสมบัติทางโครงสร้างของฟิล์มบาง

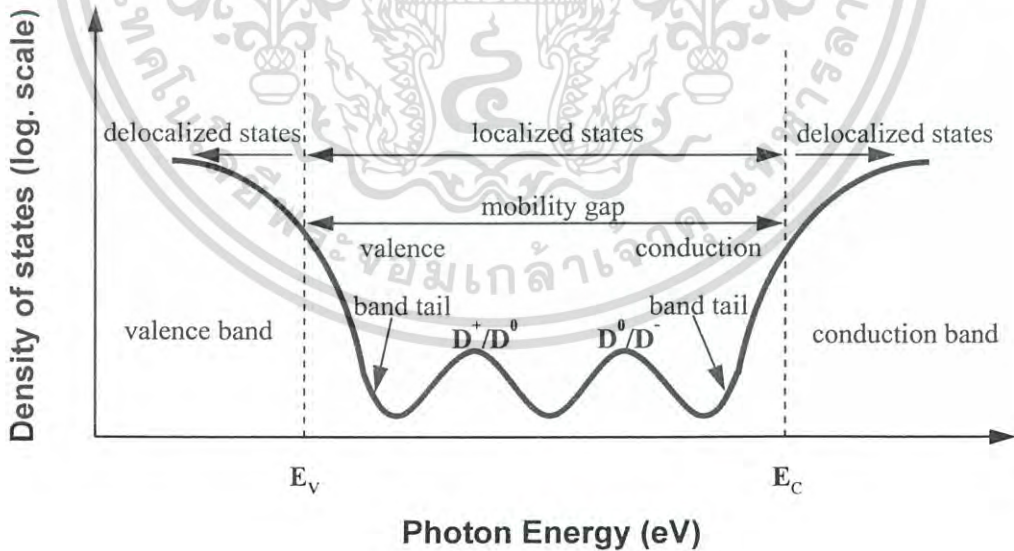
#### 2.4.2 คุณสมบัติทางแสง

เนื่องจากวัสดุ a-Si:H มีการเรียงตัวของพันธะระหว่างอะตอมไม่มีความเป็นระเบียบในระยะยาว ซึ่งต่างจากในวัสดุ c-Si นอกจากนี้ลักษณะแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดยังต่างกันคือ ในวัสดุ c-Si จะมีขอบของแถบคอนดักชัน (conduction band :  $E_C$ ) และขอบของแถบวาเลนซ์ (valence band :  $E_V$ ) ที่ชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ส่วนในวัสดุ a-Si:H ซึ่งภายในช่องว่างพลังงาน จะต้องมีความหนาแน่นของสแตตเสมอ [16] และความหนาแน่นของสแตต จะเริ่มลดลงจากบริเวณขอบของช่องว่างพลังงาน (band edge) จนถึงตรงกลางของแถบต้องห้าม เรียก สแตตที่ลดลงนี้ว่าหางของแถบพลังงาน (band tail) เรียกสแตตที่อยู่ภายในช่องว่างพลังงานว่า โลคอไลซ์สแตต และเรียกสแตตที่อยู่ภายในแถบวาเลนซ์และภายในแถบคอนดักชันว่าดีโลคอไลซ์สแตต (delocalized states) หรือเอ็กซ์เทนดส์สแตต (extended state) และเรียกช่องว่างที่อยู่ระหว่างเอ็กซ์เทนดส์สแตตทั้งสองด้านว่า ช่องว่างสภาพคล่องของพาหะ (mobility gap) ซึ่งก็คือ แถบพลังงานต้องห้ามที่สภาพคล่องของพาหะเป็นศูนย์ เนื่องจากในวัสดุ a-Si:H มีจุดบกพร่อง ที่เกิดจากแขนขาเสมอ การเกิดของแขนขาทำให้ในช่องว่างพลังงานของวัสดุ a-Si:H มีโลคอไลซ์สแตตเกิดขึ้น โดยระดับสแตตของจุดบกพร่อง จะเกิดขึ้นที่ใกล้หางของแถบคอนดักชันและหางของแถบวาเลนซ์ ถ้าแขนขาจับ

อิเล็กตรอน 2 ตัวจะเขียนว่า  $D^-$  (doubly occupied state) ถ้ายังไม่จับอิเล็กตรอนจะเขียนว่า  $D^+$  (unoccupied state) และถ้าจับอิเล็กตรอน 1 ตัวจะเขียนว่า  $D^0$  (singly occupied state) ดังในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.4 ความหนาแน่นสถานะของวัสดุ c-Si



รูปที่ 2.5 ความหนาแน่นสถานะของวัสดุ a-Si:H [19]

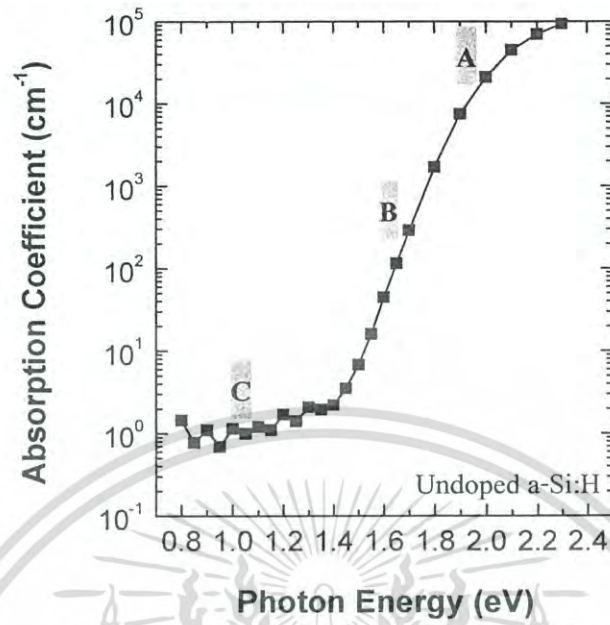
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุ a-Si:H สามารถแบ่งสเปกตรัมการดูดกลืนแสงออกเป็น 3 ย่าน [20] ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ได้แก่

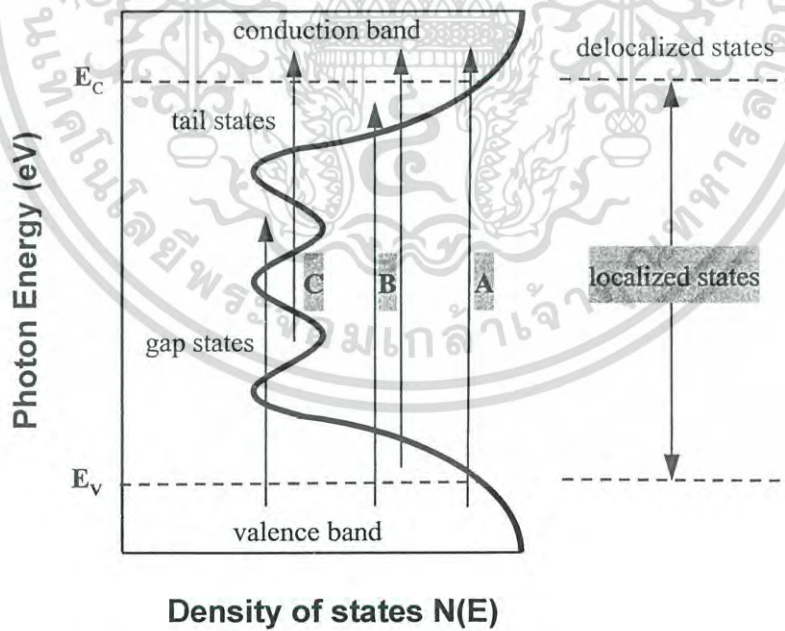
1. A : high absorption region ( $10^3 < \alpha < 10^5 \text{ cm}^{-1}$ ) คือบริเวณที่มีการดูดกลืนแสงมาก ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ไปสู่แถบคอนดักชันหรือระดับดีโลคัลไลซ์สเตตด้วยตัวเอง
2. B : exponential part ( $10^0 < \alpha < 10^3 \text{ cm}^{-1}$ ) คือบริเวณเอกซ์โพเนนเชียล ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนสถานะที่เกี่ยวข้องกับหางของแถบพลังงาน กราฟจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงและเรียกกราฟแบบเอกซ์โพเนนเชียลนี้ว่าหางของเออร์แบค (Urbach's tail) หางของเออร์แบคในวัสดุอะมอร์ฟัสจะเกิดจากการสั่นเชิงจลน์ (kinetic fluctuation) และการสั่นเชิงสถิต (static fluctuation)
3. C : weak absorption tail ( $\alpha < 10^0 \text{ cm}^{-1}$ ) คือบริเวณการดูดกลืนแสงน้อย ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนสถานะที่เกี่ยวข้องกับระดับพลังงานของจุดบกพร่องหรือระดับดีโลคัลไลซ์สเตตไปสู่ระดับดีโลคัลไลซ์สเตตหรือระดับดีโลคัลไลซ์สเตตไปสู่ระดับดีโลคัลไลซ์สเตต ในบริเวณดังกล่าวนี้สเปกตรัมมีลักษณะเป็นหางซึ่งรูปร่างขึ้นกับความบริสุทธิ์ของวัสดุ เนื่องจากการผลิต การแอนนัล (annealing) และการถูกแสงส่อง การดูดกลืนแสงในบริเวณนี้มีค่าน้อย จะแสดงว่าวัสดุมีคุณภาพดี

ซึ่งจากสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของวัสดุ a-Si:H ทั้ง 3 ย่าน เราสามารถแสดงการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนระหว่างระดับพลังงานต่างๆ ของวัสดุ a-Si:H โดยมีความสัมพันธ์กัน ดังแสดงในรูปที่ 2.7

ข้อมูลที่ได้จากสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของวัสดุ a-Si:H สามารถนำไปคำนวณหาค่าช่องว่างพลังงานแสง (optical energy gap) หรือช่องว่างพลังงาน ซึ่งขั้นตอนการหาค่าช่องว่างพลังงานจะกล่าวรายละเอียดในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.5.1 เรื่องการตรวจวัดและวิเคราะห์คุณสมบัติทางแสงของฟิล์มบาง



รูปที่ 2.6 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของวัสดุ a-Si:H สามารถแบ่งออกเป็น 3 ย่าน



รูปที่ 2.7 การเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนระหว่างระดับพลังงานต่างๆ ของวัสดุ a-Si:H

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้า

ในช่องว่างพลังงานของวัสดุ a-Si:H มีโลคอโลซิสแคตหรือแก๊ปแคตเกิดขึ้น จำนวนมากซึ่งจะทำให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุ a-Si:H แตกต่างจากวัสดุ c-Si ซึ่งสามารถแบ่งออกได้ดังนี้

1. การนำไฟฟ้ากระแสตรง
2. การนำไฟฟ้าด้วยแสง

#### 2.4.3.1 การนำไฟฟ้ากระแสตรง

วัสดุ a-Si:H มีกระบวนการนำไฟฟ้ากระแสตรงอยู่ 2 แบบด้วยกันคือ การขนส่งในแถบพลังงาน (band transport) และการขนส่งด้วยวิธีฮอปป์ (hopping transport) [21] รูปที่ 2.8 แสดงตัวอย่างการขึ้นกับอุณหภูมิของสภาพนำไฟฟ้ากระแสตรงของวัสดุ a-Si:H บริเวณหมายเลข (1) ในรูปนี้เกิดจากการขนส่งในแถบพลังงาน บริเวณหมายเลข (2) เกิดจากการขนส่งด้วยวิธีฮอปป์ชนิดใกล้ที่สุด (nearest site hopping) และบริเวณหมายเลข (3) เกิดจากการขนส่งด้วยวิธีฮอปป์ชนิดระยะทางแปรผันได้ (variable range hopping) [22]

การขนส่งในแถบพลังงาน จะมีสภาพนำไฟฟ้าที่เกิดจากการขนส่งในแถบพลังงานอนุญาต (allowed band) ดังแสดงในสมการที่ (2.11) ค่า  $n$  คือความหนาแน่นของพาหะ  $e$  คือประจุของอิเล็กตรอน  $\mu$  คือสภาพคล่องของพาหะ และ  $\sigma$  คือสภาพนำไฟฟ้า ซึ่งมีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$\sigma = ne\mu \quad (2.11)$$

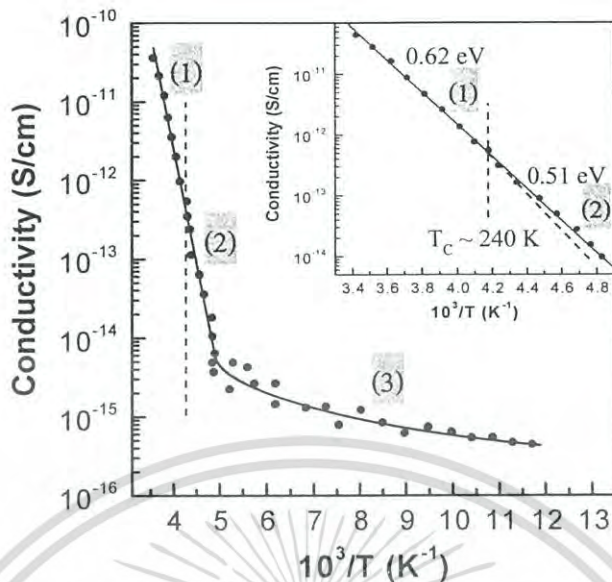
พารามิเตอร์ที่ขึ้นกับอุณหภูมิมากที่สุดในสมการนี้คือ ความหนาแน่นของพาหะจะได้ว่า

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

ดังนั้นสมการของสภาพนำไฟฟ้าทั่วๆ ไปคือ

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

โดยที่  $E_a$  คือ พลังงานกระตุ้น (activation energy)



รูปที่ 2.8 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อสภาพนำไฟฟ้ากระแสตรงของวัสดุ a-Si:H [22]

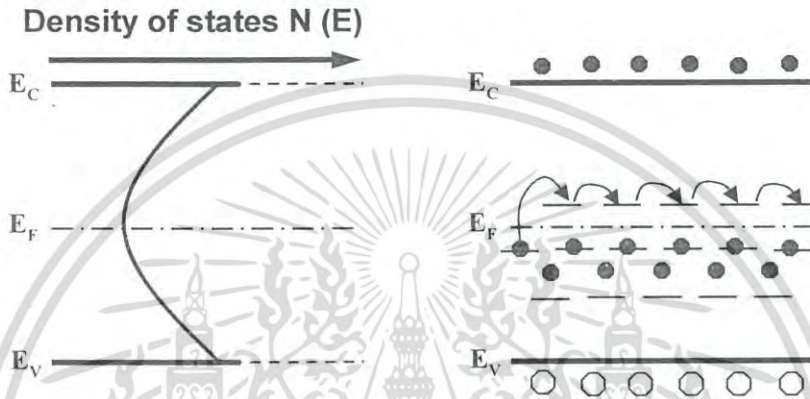
ซึ่ง  $E_a$  มีค่าเท่ากับความแตกต่างของระดับพลังงานจากขอบของแถบคอนดักชันหรือแถบวาเลนซ์และระดับพลังงานเฟอร์มิ ( $E_c - E_f$  หรือ  $E_f - E_v$ ) ในสมการที่ (2.13) จะเป็นจริงที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้องเล็กน้อยและที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้องเล็กน้อย ถ้านำข้อมูลไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln \sigma$  และ  $1/T$  จะได้กราฟเส้นตรงและจากความชันของกราฟจะสามารถคำนวณค่าพลังงานพลังงานกระตุ้นได้

การขนส่งด้วยวิธีฮอปปีงเป็นการที่พาหะประจุโคดแบบฮอปปีง จากระดับโลคอไลซ์หนึ่งไปสู่ระดับโลคอไลซ์ข้างเคียงที่อยู่ภายในช่องว่างพลังงาน การขนส่งด้วยวิธีฮอปปีงสามารถแบ่งออกได้ 2 กรณี [23] กรณีแรก คือการขนส่งด้วยวิธีฮอปปีงชนิดใกล้ที่สุด ได้แก่การที่อิเล็กตรอนกระโคดแบบ ฮอปปีงระหว่างโลคอไลซ์สแตกที่อยู่ระดับพลังงานแตกต่างกัน แต่อยู่ชิดติดกันมาก เพราะฟังก์ชันคลื่น (wave function) ของอิเล็กตรอนนั้นซ้อนกัน การฮอปปีงชนิดนี้แต่ละครั้งต้องอาศัยพลังงานจากโฟนอนเข้าช่วย สภาพนำไฟฟ้าจะขึ้นกับอุณหภูมิ การขนส่งด้วยวิธีฮอปปีงชนิดใกล้ที่สุดนี้เกิดในช่วงอุณหภูมิต่ำๆ ประมาณ 200 K ต่อมากรณีที่สอง คือการขนส่งด้วยวิธีฮอปปีงชนิดระยะทางแปรผัน ได้แก่การที่อิเล็กตรอนกระโคดแบบฮอปปีงระหว่างโลคอไลซ์สแตกที่อยู่ระดับพลังงานระดับเดียวกัน แต่กระโคดไปได้ไกลด้วยการช่วยของโฟนอน รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะการขนส่งของพาหะด้วยวิธีฮอปปีงชนิดระยะทางแปรผัน ผลของอุณหภูมิที่มีต่อสภาพนำไฟฟ้าอันเนื่องจากการขนส่งด้วยวิธีฮอปปีงชนิดระยะทางแปรผัน สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

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

โดยที่  $B$  คือ ค่าคงตัวที่เกี่ยวข้องกับการแผ่ของฟังก์ชันคลื่นและจำนวน โลคอไลซ์สเตตที่เกี่ยวข้องกับ

การขอปปีง



รูปที่ 2.9 แบบจำลองการขอปปีงชนิดระยะทางแปรผัน [23]

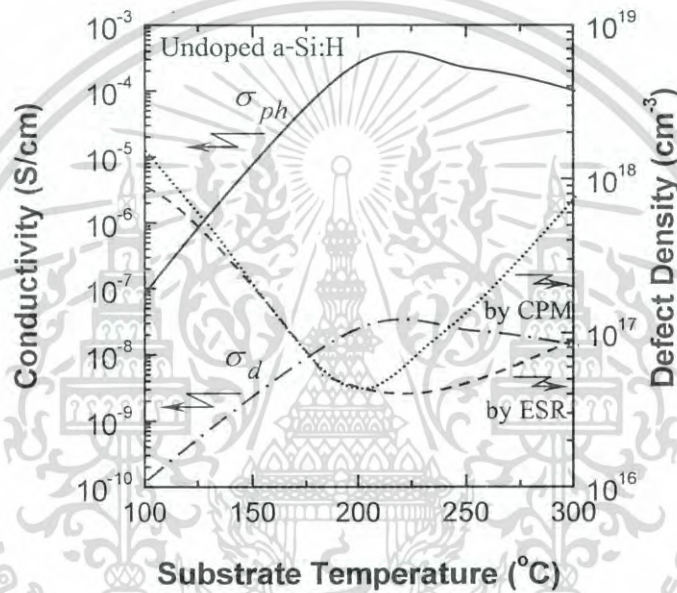
#### 2.4.3.2 การนำไฟฟ้าด้วยแสง

สภาพนำไฟฟ้าด้วยแสง (photo conductivity :  $\sigma_{ph}$ ) จะเกิดขึ้นเมื่อทำการส่องแสงเข้าสู่วัสดุ a-Si:H แสงจะกระตุ้นอิเล็กตรอนให้กระโดดจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปสู่แถบคอนดักชัน จึงทำให้สภาพนำไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น กระบวนการนำไฟฟ้าด้วยแสงของสารกึ่งตัวนำจะประกอบด้วย กระบวนการกระตุ้นพาหะ (excitation) กระบวนการจับและปล่อยพาหะ (trapping and detrapping) และกระบวนการรวมตัวของพาหะ (recombination) ถ้าเราให้  $\eta$  คือประสิทธิภาพควอนตัม  $\Phi$  คือจำนวนของโฟตอนที่เดินทางเข้าสู่วัสดุในหนึ่งหน่วยพื้นที่ และ  $\alpha$  คือสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ดังนั้นความหนาแน่นของพาหะ  $G$  ที่เกิดขึ้นจากแสงในหนึ่งหน่วยเวลามีค่าเท่ากับ สมการที่ (2.15) ในสถานะคงตัว การจับและปล่อยพาหะด้วยระดับ โลคอไลซ์สเตตจะอยู่สภาพสมดุล ดังนั้น กระบวนการจับและปล่อยพาหะจึงไม่แสดงผลให้เห็น แต่ขณะเดียวกันจำนวนของพาหะส่วนเกิน  $n$  ที่เกิดจากแสงจะถูกกำหนดด้วยเวลาอายุของพาหะ ( $\tau$ ) ซึ่งสูญหายไปอันเนื่องจากการรวมตัวมีค่าดังนี้ อิเล็กตรอน สภาพนำไฟฟ้าด้วยแสงมีรูปทำนองเดียวกับสมการที่ (2.11) เนื่องจาก  $n$  และ  $\tau$  มีค่าขึ้นกับอุณหภูมิ

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

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

ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าด้วยแสงจึงมีค่าขึ้นกับอุณหภูมิด้วย ในการประยุกต์ใช้วัสดุ a-Si:H เป็น เซลล์แสงอาทิตย์ จะต้องผลิตให้ฟิล์มมีค่าสภาพนำไฟฟ้าด้วยแสงที่สูง ดังนั้นเงื่อนไขการผลิตฟิล์ม มีอิทธิพลต่อสภาพนำไฟฟ้าด้วยแสงมาก รูปที่ 2.10 แสดงการขึ้นอยู่กัอุณหภูมิพื้นฐานของสภาพ นำไฟฟ้ามืดและสภาพนำไฟฟ้าด้วยแสงของสารกึ่งตัวนำ a-Si:H



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้าและอุณหภูมิพื้นฐานในการเตรียมวัสดุ a-Si:H [24]

ในวิทยานิพนธ์นี้ทำการวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าของฟิล์มบาง โดยการเคลือบขั้วโลหะเงิน (Ag) แบบโคแพลนาร์ (co-planar) ด้วยวิธี sputtering จำนวน 2 ขั้วลงบนฟิล์ม a-Si:H ซึ่งชั้นตอนต่างๆ จะกล่าวรายละเอียดในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.5.2 เรื่องการตรวจวัดและวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของ ฟิล์มบาง

#### 2.4.4 คุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำอะมอร์ฟัสซิลิคอนเมื่อเทียบกับสารกึ่งตัวนำผลึกซิลิคอน

สารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดนิยมใช้เป็นสารกึ่งตัวนำหลักในการผลิตเป็นอุปกรณ์ต่างๆ ทาง อิเล็กทรอนิกส์ ดังในตารางที่ 2.1 แสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของเซลล์ แสงอาทิตย์ เมื่อนำสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดมาประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์

ตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนเมื่อเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอน [10]

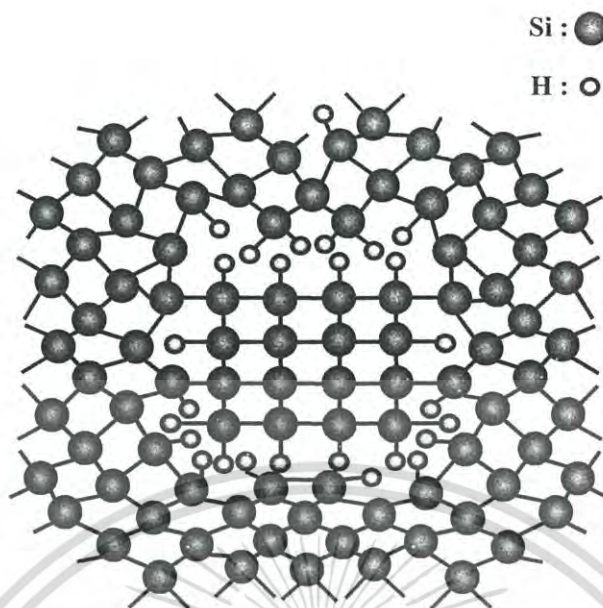
Item	Mono crystalline Si	Amorphous Si
Atomic arrangement	regular	disordered
Forbidden band gap (eV)	1.1	1.6-1.8
Absorption coefficient (visible spectrum)	small	large
Minority carrier diffusion length ( $\mu\text{m}$ )	10-100	0.1-2
Electron mobility ( $\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ )	$\sim 1000$	0.1-1
Conductivity ( $\text{Scm}^{-1}$ )	$10^{-4} - 10^4$	$10^{-13} - 10^2$
p-n junction characteristics	rectifying	ohmic
p-i-n junction depletion layer width	1-10 $\mu\text{m}$	0.5-1 $\mu\text{m}$
Thickness of solar cell	$\sim 200 \mu\text{m}$	0.5-1 $\mu\text{m}$

## 2.5 คุณสมบัติต่างๆ ของไมโครคริสตัลไลน์ซิลิคอน

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติของวัสดุ  $\mu\text{c-Si:H}$  3 คุณสมบัติใหญ่ๆ คือ คุณสมบัติทางโครงสร้าง คุณสมบัติทางแสง และคุณสมบัติทางไฟฟ้า

### 2.5.1 คุณสมบัติทางโครงสร้าง

วัสดุ  $\mu\text{c-Si:H}$  คือ วัสดุที่มีเม็ดผลึกย่อยๆ (grain) ของซิลิคอนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 50-200 Å จำนวนมากผสมอยู่ในเครือข่ายของ a-Si:H ดังแสดงในรูปที่ 2.11 [25] การตรวจสอบคุณสมบัติทางโครงสร้างของฟิล์ม  $\mu\text{c-Si:H}$  ที่นิยมใช้มีอยู่ด้วยกันหลายวิธีด้วยกัน แต่วิธีที่ให้ความสนใจและได้ผลดีอีกวิธีหนึ่งคือ การวัดสเปกตรัมการกระเจิงรามัน (raman scattering) [26] โดยให้แกนในแนวนอนคือ ค่าการชิฟต์ของรามัน (raman shift) จะแสดงถึงความแตกต่างของความถี่ของแสงกระเจิงเอาต์พุตและความถี่ของแสงเลเซอร์อินพุต ส่วนแกนในแนวตั้งคือ ค่าความเข้มของสัญญาณ (intensity) สเปกตรัมที่วัดได้จะประกอบด้วยสัญญาณที่เป็นยอดแหลมที่  $520 \text{ cm}^{-1}$  เกิดจากวัสดุ  $\mu\text{c-Si:H}$  และสัญญาณที่มีลักษณะคล้ายภูเขากว้างที่  $480 \text{ cm}^{-1}$  เกิดจากวัสดุ a-Si:H ข้อมูลที่ได้จากสเปกตรัมการกระเจิงรามันสามารถนำไปคำนวณหาค่าอัตราส่วนปริมาตรของเม็ดผลึกย่อยต่อปริมาตรของ a-Si:H (Volume Fraction :  $F_C$ ) ซึ่งขั้นตอนการหาค่า Volume Fraction จะกล่าวรายละเอียดในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.5.3 เรื่องการตรวจวัดและวิเคราะห์คุณสมบัติทางโครงสร้างของฟิล์มบาง



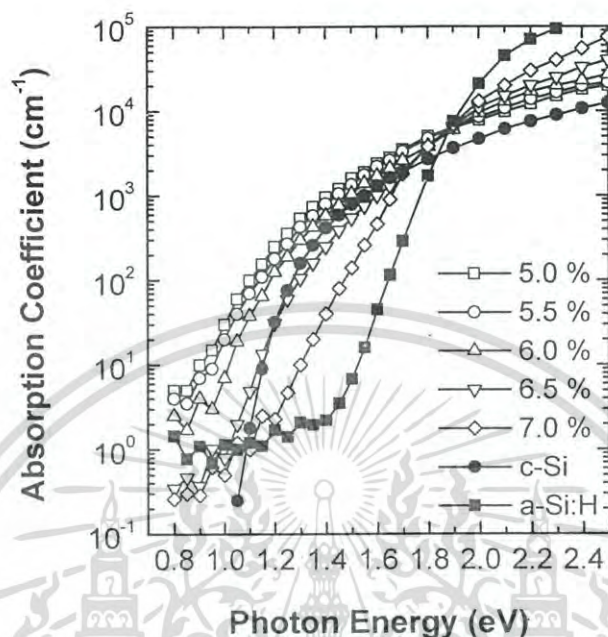
รูปที่ 2.11 ลักษณะเครือข่ายของอะตอมของวัสดุ  $\mu\text{c-Si:H}$

### 2.5.2 คุณสมบัติทางแสง

วัสดุ  $\mu\text{c-Si:H}$  จะมีข้อได้เปรียบวัสดุ  $\text{a-Si:H}$  คือการประยุกต์ใช้เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งวัสดุดังกล่าวนี้สามารถดูดกลืนพลังงานโฟตอนของแสงอาทิตย์ที่ผ่านความยาวคลื่นยาวหรือย่านอินฟราเรด (ประมาณ 700 nm ถึง 1100 nm) [25] วัสดุ  $\mu\text{c-Si:H}$  มีช่องว่างพลังงานในช่วงค่าช่องว่างพลังงานของวัสดุ  $\text{c-Si}$  ถึงวัสดุ  $\text{a-Si:H}$  (1.10 eV ถึง 1.75 eV) ในการพิจารณาคุณสมบัติทางแสงของวัสดุ  $\mu\text{c-Si:H}$  จะเทียบเคียงได้กับวัสดุ  $\text{c-Si}$  เนื่องจากผลของสเปกตรัมของการกระเจิงรามันของวัสดุ  $\mu\text{c-Si:H}$  มีลักษณะเดียวกันกับวัสดุ  $\text{c-Si}$  นั่นคือ สเปกตรัมการดูดกลืนแสงในย่านพลังงานโฟตอนต่ำกว่าช่องว่างพลังงาน

ในรูปที่ 2.12 แสดงตัวอย่างสเปกตรัมสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของวัสดุ  $\mu\text{c-Si:H}$  ในย่านพลังงานโฟตอนต่ำกว่าช่องว่างพลังงานที่เตรียมจากเงื่อนไขอัตราส่วนการไหลของก๊าซซิลเลน (Silane Concentration ratio: SC %) ค่าต่างๆ ได้แก่ 5.0 % 5.5 % 6.0 % 6.5 % และ 7.0 % ตามลำดับ [27] โดยการวัดด้วยวิธี Constant Photocurrent Method (CPM) [28-29] ซึ่งวิธี CPM นี้เป็นที่ยอมรับว่าสามารถใช้วัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงบริเวณการดูดกลืนน้อย (weak absorption tail) ของวัสดุ เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง และสามารถวัดได้ลึกตลอดทั้งเนื้อชิ้นงาน และจากรูปที่ 2.12 วัสดุ  $\mu\text{c-Si:H}$  ที่เตรียมด้วยเงื่อนไข SC % เท่ากับ 5.0 % 5.5 % และ 6.0 % มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงอยู่ในช่วง  $3 \times 10^4$  ถึง  $4 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$  ซึ่งแสดงว่าวัสดุมีคุณสมบัติเป็น  $\mu\text{c-Si:H}$  ที่สูง และที่ SC % เท่ากับ 6.5 % และ 7.0 % จะเป็นวัสดุ  $\mu\text{c-Si:H}$  ที่มีวัสดุ  $\text{a-Si:H}$  ผสมอยู่โดยที่ 6.5 % จะมี

วัสดุ a-Si:H ผสมอยู่น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับที่ 7.0 % และวัสดุ a-Si:H จะมีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงสูงประมาณ  $10^5 \text{ cm}^{-1}$



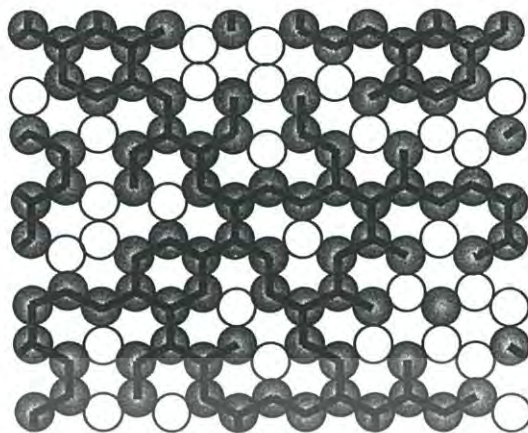
รูปที่ 2.12 ตัวอย่างสเปกตรัมสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของวัสดุ  $\mu\text{c-Si:H}$  ในย่านพลังงานโฟตอนต่ำกว่าช่องว่างพลังงานที่เตรียมจากเงื่อนไข SC % ค่าต่างๆ โดยการวัดด้วยวิธี CPM [27]

การหาค่าช่องว่างพลังงานแสง (optical energy gap) หรือช่องว่างพลังงานของวัสดุ  $\mu\text{c-Si:H}$  ซึ่งขั้นตอนการหาค่าช่องว่างพลังงานจะกล่าวรายละเอียดในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.5.1 เรื่องการตรวจวัดและวิเคราะห์คุณสมบัติทางแสงของฟิล์มบาง

### 2.5.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้า

สภาพนำไฟฟ้าของวัสดุ  $\mu\text{c-Si:H}$  จะมีความสอดคล้องกับ Volume Fraction และขนาดของเม็ดผลึกย่อย ซึ่งสามารถอธิบายได้คือ เมื่อ Volume Fraction มีค่าสูงกว่าค่าวิกฤติค่าหนึ่ง (ประมาณ 50 %) จะทำให้สภาพนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองของเพอร์โคเลชัน (percolation model) [30] ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ถ้าเม็ดผลึกย่อยมีจำนวนมากและขนาดโตเพียงพอ ก็จะทำให้ร่างแหของเม็ดผลึกย่อยเชื่อมต่อกันตลอด ดังนั้นพาหะจึงสามารถวิ่งผ่านเม็ดผลึกย่อยได้อย่างต่อเนื่องตลอดเนื้อฟิล์ม จึงทำให้สภาพนำไฟฟ้ามีค่าสูง การวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าของฟิล์มบางโดยการเคลือบขั้วโลหะเงิน (Ag) แบบโคแพลนาร์ (coplanar) ด้วยวิธี sputtering จำนวน 2 ขั้วลงบนฟิล์ม ซึ่งขั้นตอนต่างๆ จะกล่าวรายละเอียดในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.5.2 เรื่องการตรวจวัดและวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



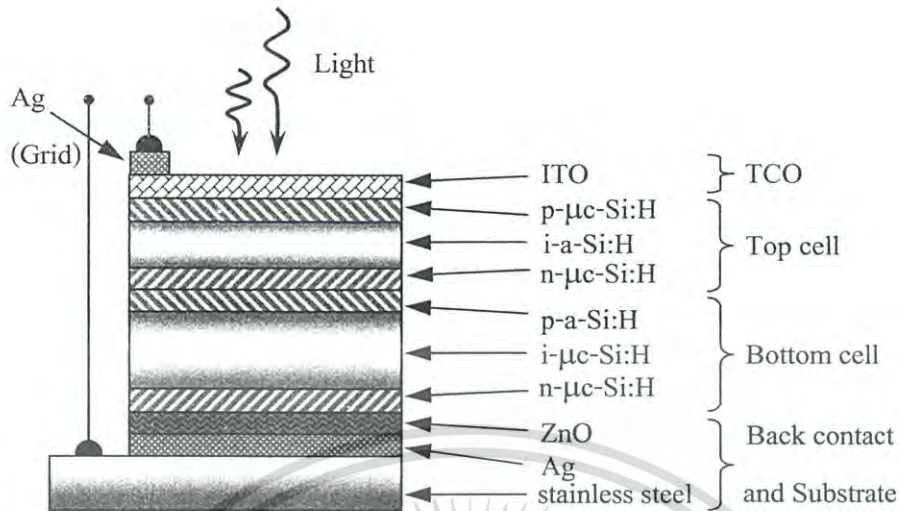
รูปที่ 2.13 แบบจำลองของเพอร์โคเลชันซึ่งอธิบายลักษณะการนำไฟฟ้าของวัสดุ  $\mu\text{c-Si:H}$

## 2.6 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด tandem

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด tandem (tandem solar cell) หรือเรียกชื่ออีกอย่างว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดมัลติเลเยอร์ (multi-layer solar cell) [6-9] คือ เซลล์แสงอาทิตย์ที่ปลูกซ้อนทับกันหลายชั้นในแนวตั้ง ในวิทยานิพนธ์นี้จะเป็นการรวมเซลล์แสงอาทิตย์ย่อยเข้าด้วยกันระหว่างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟิซิลิคอน ( $\text{a-Si:H}$ ) เป็นเซลล์ชั้นบน (top cell) และเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดไมโครคริสตัลไลน์ซิลิคอน ( $\mu\text{c-Si:H}$ ) เป็นเซลล์ชั้นล่าง (bottom cell) ลักษณะเด่นของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด tandem โครงสร้างนี้ ได้แก่ สามารถดูดกลืนแสงอาทิตย์ได้มากขึ้นและเหมาะสมกับแสงของดวงอาทิตย์

### 2.6.1 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด tandem

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด tandem แบบ 2 รอยต่อ ระหว่าง  $\text{a-Si:H}$  และ  $\mu\text{c-Si:H}$  ตัวอย่างโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด tandem โดยทั่วไป เบื้องต้นคือ stainless steel/ Ag/ Zn/ n/  $\mu\text{c-Si:H}$ / p/ n/  $\text{a-Si:H}$ / p/ ITO มีแผ่นฐานรองเป็นแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (stainless steel) ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ในการออกแบบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด tandem จะต้องคำนึงถึงความเหมาะสมในการผลิตชั้นต่าง ๆ ดังจะได้กล่าวต่อไป



รูปที่ 2.14 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด tandem แบบ 2 รอยต่อ ระหว่าง a-Si:H และ  $\mu\text{c-Si:H}$  ซึ่งแผ่นฐานรองเป็น stainless steel

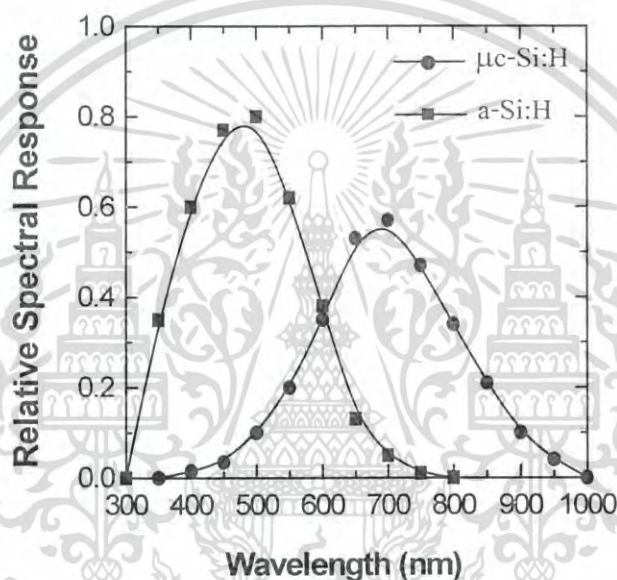
1. ชั้น Zinc Oxide (ZnO) และชั้นโลหะ จากโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด tandem วัสดุทั้งสองจะอยู่ล่างสุด ชั้น ZnO โดยปกติจะมีค่าช่องว่างพลังงานประมาณ 3.2 eV มีความโปร่งใสสูง ชั้น ZnO จะช่วยทำให้แสงที่ผ่านเข้ามาตกกระทบเกิดการหักเหและกระเจิงเพิ่มมากขึ้น ซึ่งแสงจะสะท้อนแสงกลับ (back reflector) เข้าสู่ชั้น i ได้อีก ดังนั้นจึงช่วยเพิ่มกระแสไฟฟ้าที่ดวงจรให้สูงขึ้นได้ ส่วนชั้นโลหะ วัสดุที่นำมาใช้จะเป็นโลหะเงิน (Ag) ที่บดแสงและมีผิวที่ขรุขระ วัสดุ Ag จะมีความนำไฟฟ้าที่ดี ซึ่งช่วยให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพเพิ่มสูงขึ้น
2. ชั้นเอ็น (n-layer) วัสดุ  $\mu\text{c-Si:H}$  มีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการใช้งานเป็นชั้น n สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด tandem มาก ทั้งนี้เพราะว่าฟิล์มไมโครคริสตัลไลน์ซิลิคอนชนิดเอ็น ( $n\text{-}\mu\text{c-Si:H}$ ) มีคุณสมบัติดังนี้
  - ระดับพลังงานเฟอร์มิของ  $n\text{-}\mu\text{c-Si:H}$  อยู่ใกล้กับแถบคอนดักชันมาก และสภาพนำไฟฟ้าก็มีค่าสูงมาก ( $1\text{--}10 \text{ S.cm}^{-1}$ ) จึงทำให้แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่ามากขึ้น
  - ช่องว่างพลังงานของ  $n\text{-}\mu\text{c-Si:H}$  มีค่าประมาณ 1.8-2.0 eV ซึ่งกว้างกว่าของ  $n\text{-a-Si:H}$  มีความโปร่งใสดีและช่วยให้แสงที่สะท้อนจากขั้วโลหะด้านหลังกลับเข้าสู่ชั้น i ได้ดีขึ้น ทำให้ได้กระแสไฟฟ้าเอาต์พุตมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เนื่องจาก  $n\text{-}\mu\text{c-Si:H}$  มีค่าสภาพนำไฟฟ้าสูง จึงสามารถสร้างรอยต่อโอห์มิกกับขั้วโลหะไฟฟ้าได้ง่าย เงื่อนไขของการปลูกฟิล์มบางชนิด  $\mu\text{c-Si:H}$  ได้แก่การใช้การใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่ย่านสูง ในการแยกสลายก๊าซไฮโดรเจน ( $\text{SiH}_4$ ) และผสมด้วยก๊าซไฮโดรเจน ( $\text{H}_2$ ) ที่อัตราส่วนสูงมาก ๆ [25]
3. ชั้นพี (p-layer) ทำหน้าที่สร้างแรงดันไฟฟ้าภายในเช่นเดียวกับชั้น n วัสดุที่นำมาใช้งานเป็นชั้น p นั้นจะมีด้วยกัน 2 ชนิดคือ วัสดุ a-Si:H และวัสดุ  $\mu\text{c-Si:H}$  ถ้าผลิตชั้น p จากวัสดุ a-Si:H ซึ่งโคปด้วยโบรอนจะมีช่องว่างพลังงานแคบ จึงควรออกแบบให้ชั้นฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอนชนิดพี (p-a-Si:H) บางที่สุด แต่อย่างไรก็ตามถ้าชั้น p บางมากเกินไป ก็จะทำให้แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดลดลงด้วย ในปัจจุบันนิยมใช้ฟิล์มไมโครคริสตัลไลน์ซิลิคอนชนิดพี (p- $\mu\text{c-Si:H}$ ) หรือฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอนคาร์ไบด์ชนิดพี (p-a-SiC:H) ที่มีช่องว่างพลังงานประมาณ 2 eV ประยุกต์เป็นชั้นหน้าต่างรับแสง (window layer) เพื่อให้แสงอาทิตย์ที่ความยาวคลื่นเหมาะสมสามารถผ่านเข้าสู่ชั้น i ได้มากขึ้น และดัชนีหักเหแสงของวัสดุเหล่านี้จะมีค่าอยู่ระหว่างดัชนีหักเหแสงของขั้วไฟฟ้าโปร่งใสและชั้น i พอดี ดังนั้นจึงช่วยลดการสะท้อนแสงที่ผิวของชั้น i ได้ จึงช่วยเพิ่มทั้งกระแสไฟฟ้าลัดวงจร ( $I_{sc}$ ) แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด ( $V_{oc}$ ) และฟิลด์แฟกเตอร์ (FF)
  4. ชั้นอินทรินซิก (i-layer) จากโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดทันเดม โดยเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H เป็นเซลล์ชั้นบน ซึ่งวัสดุชั้น i คือฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอนชนิดบริสุทธิ์ (i-a-Si:H) และเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด  $\mu\text{c-Si:H}$  เป็นเซลล์ชั้นล่างมีวัสดุชั้น i คือฟิล์มไมโครคริสตัลไลน์ซิลิคอนชนิดบริสุทธิ์ (i- $\mu\text{c-Si:H}$ ) คุณสมบัติพื้นฐานของชั้น i นี้จะมีอิทธิพลและผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์มาก เนื่องจากทำหน้าที่เป็นชั้นผลิตพาหะ (active layer) หรือผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนั้นจึงพยายามที่จะให้แสงผ่านเข้าสู่ชั้น i ได้มากที่สุด การปลูกฟิล์มชั้น i ต้องมีเงื่อนไขที่เหมาะสม เพื่อให้ฟิล์มมีคุณภาพดี ฟิล์มชั้น i-a-Si:H มีช่องว่างพลังงานประมาณ 1.6-1.8 eV ส่วนฟิล์มชั้น i- $\mu\text{c-Si:H}$  มีช่องว่างพลังงานประมาณ 1.1-1.2 eV แม้ว่าในกระบวนการผลิตชั้น i-a-Si:H จะไม่ได้โคป แต่ผลที่ได้คือจะได้ฟิล์ม i-a-Si:H มีคุณสมบัติเป็นชนิด n แบบอ่อนเสมอ เพราะระดับพลังงานเฟอร์มิของชั้น i-a-Si:H ไม่ได้อยู่ที่กึ่งกลางระหว่างช่องว่างพลังงาน แต่จะอยู่ในตำแหน่งที่ค่อนข้างไปทางแถบคอนดักชัน การเติมโบรอน (boron) บ้างเล็กน้อย จะทำให้ระดับพลังงานเฟอร์มิเคลื่อนมาอยู่ตรงกลางช่องว่างพลังงานพอดี และจะทำให้สนามไฟฟ้าในชั้น i มีค่าเพิ่มขึ้น และประสิทธิภาพดีขึ้น [31]

5. ชั้นขั้วไฟฟ้าโปร่งใส (Transparent Conductive Oxide layer) จากโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดทึบแน่น ชั้นดังกล่าวนี้จะอยู่บนสุดเป็นวัสดุ Indium Tin Oxide (ITO) फिल्मบางนี้เป็นสารประกอบของ  $\text{SnO}_2$  และ  $\text{In}_2\text{O}_3$  โดยมีอัตราส่วนน้ำหนักของ Sn : In เท่ากับ 5 : 95 โดยประมาณ คุณสมบัติพื้นฐานของชั้นนี้ควรโปร่งใสมากๆ นำไฟฟ้าได้ดี และในขณะเดียวกันก็ควรเป็นชั้นป้องกันการสะท้อนแสงด้วย (anti reflection layer)

จากโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดทึบแน่นแบบ 2 รอยต่อ ระหว่าง a-Si:H และ  $\mu\text{c-Si:H}$  จะมีสเปกตรัมผลตอบสนองทางแสงอาทิตย์ดังแสดงในรูปที่ 2.15

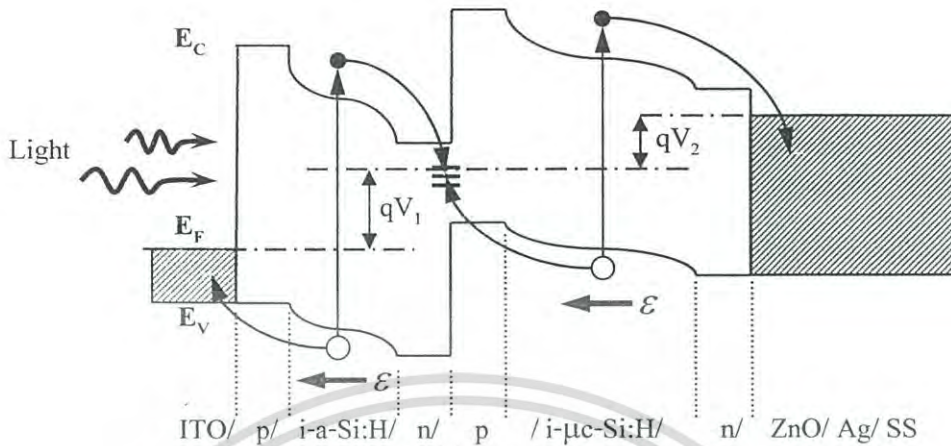


รูปที่ 2.15 ตัวอย่างสเปกตรัมผลตอบสนองต่อแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดทึบแน่นแบบ 2 รอยต่อ ระหว่าง a-Si:H และ  $\mu\text{c-Si:H}$  โครงสร้าง n-i-p/n-i-p [32]

### 2.6.2 หลักการทำงานและการออกแบบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดทึบแน่น

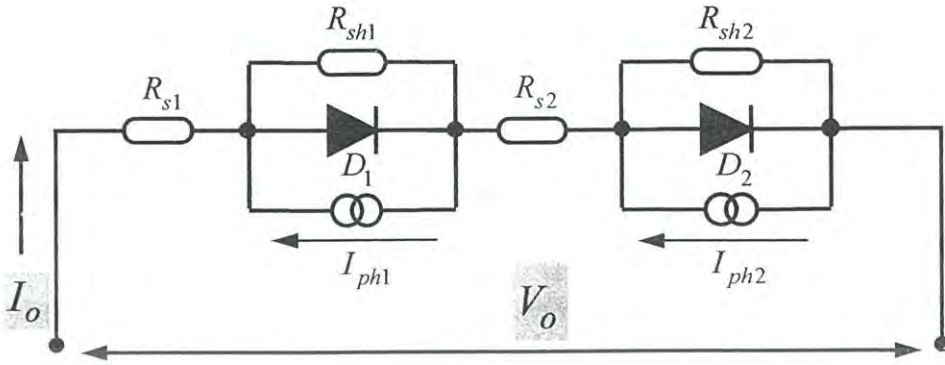
หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดทึบแน่นที่ประกอบขึ้นระหว่างเซลล์ย่อย 2 เซลล์ระหว่างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H เป็นเซลล์ชั้นบน และเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด  $\mu\text{c-Si:H}$  เป็นเซลล์ชั้นล่าง ซึ่งชั้น i ของเซลล์ชั้นบนและเซลล์ล่างเป็นวัสดุ a-Si:H และ  $\mu\text{c-Si:H}$  ตามลำดับ ชั้น i ทำหน้าที่เป็นชั้นผลิตพาหะ หรือผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อมีแสงมาตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ และถ้าพลังงานโฟตอนของแสงมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ แสงจะถูกสารกึ่งตัวนำดูดกลืน ซึ่งพลังงานโฟตอนของแสงจะไปกระตุ้นการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนจากแถบเวเลนซ์ไปสู่แถบคอนดักชัน และที่แถบวาเลนซ์จะเหลือโฮล (hole) อยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 ลักษณะแถบพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด tandem แบบ 2 รอยต่อ ระหว่าง a-Si:H และ  $\mu\text{c-Si:H}$  โครงสร้าง n-i-p/n-i-p ขณะถูกแสง

การเกิดคู่พาหะอิเล็กตรอนและโฮลสามารถเกิดขึ้นได้ที่ชั้น i พาหะเหล่านี้จะเคลื่อนที่ด้วยการแพร่ซึม (diffusion) และการดริฟท์ (drift) แต่ในความเป็นจริงการปลุกชั้น i จะต้องมีควมหนาพอสมควร ซึ่งวัสดุมีระยะทางการแพร่ซึมที่สั้น (diffusion length) ดังนั้นการเคลื่อนที่ของพาหะดังกล่าวนี้เกิดจากการดริฟท์หรือพัดพาด้วยสนามไฟฟ้า เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อ n-i-p จะมีสนามไฟฟ้าที่มีค่าสูงในชั้น i [33] ปรากฏการณ์ของการผลิตกระแสไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์ดังกล่าวนี้เรียกว่า “ปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิกชนิดพัดพา” (drift type photovoltaic effect) ดังแสดงในรูปที่ 2.16 ในจำนวนพาหะที่ถูกผลิตด้วยแสง พาหะบางตัวจะถูกกักหรือรวมตัวกันที่ระดับพลังงานของโลคอิลส์เตตในชั้น i หรือที่รอยต่อ ซึ่งทำให้ลักษณะของสนามไฟฟ้าในชั้น i เปลี่ยนแปลง และการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้านี้จะมีอิทธิพลต่อกระบวนการพัดพาของพาหะการที่จะรักษาไว้ซึ่งเงื่อนไขความสมดุลของพาหะ จึงต้องมีการเปลี่ยนแปลงการแจกแจงพาหะส่วนเกินที่เกิดขึ้นทั้งจากการกระตุ้นด้วยแสงและด้วยความร้อน จากผลของการหมุนเวียนของกระบวนการเหล่านี้ ทำให้เกิดการแจกแจงอิเล็กตรอนและโฮลในสภาวะคงที่และมีกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตไหลออกสู่วงจรภายนอกในลักษณะที่เป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่น ความเข้มของแสง และโวลต์ที่ต่อภายนอก เซลล์แสงอาทิตย์ย่อยเมื่อถูกแสงก็จะผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยแสงซึ่งจะมีค่ามากหรือน้อยนั้นขึ้นกับความเข้มแสงของโฟตอนฟลักซ์ (photon flux) ที่เซลล์แสงอาทิตย์แต่ละตัวดูดกลืนได้



รูปที่ 2.17 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดทันทันแบบ 2 รอยต่อ ระหว่าง a-Si:H และ  $\mu\text{c-Si:H}$

[34]

ส่วนชั้น p และ n ทำหน้าที่สร้างแรงดันไฟฟ้าภายในเพื่อพัฒนาพาหะให้ไหลออกสู่วงจรภายนอก โครงสร้างในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดทันทันแบบรอยต่อ p-n (tunnel junction) จะมีคุณสมบัติเหมือนรอยต่อแบบโอห์มิก (ohmic contact) และเหมือนตัวต้านทานเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์ข้างเคียงให้ต่อกันได้เท่านั้นเอง ดังนั้นจึงไม่มีแรงดันไฟฟ้าภายในที่รอยต่อ p-n แต่จะมีแรงดันไฟฟ้าภายในที่รอยต่อ n-i-p เท่านั้น ซึ่งมีคุณสมบัติเหมือนรอยต่อแบบเรกติไฟร์ (rectifier contact) จากโครงสร้างดังกล่าวนี้ เราคาดว่าประสิทธิภาพการกวาดเก็บพาหะจะมีค่าสูงสม่ำเสมอ ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพของการผลิตพาหะสูงและได้กระแสไฟฟ้าด้วยแสง ตลอดจนฟิล์มแพกเตอร์สูงมากขึ้น ซึ่งในเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างทันทันแบบมีค่าสูงกว่าเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อ n-i-p เพียงชุดเดียว [4-6] รูปที่ 2.17 แสดงวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดทันทันแบบ 2 รอยต่อระหว่าง a-Si:H และ  $\mu\text{c-Si:H}$  เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดทันทันแบบ จะมีแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตทั้งหมดเท่ากับผลรวมของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์ย่อยแต่ละตัว และกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตจะมีค่าเท่ากับกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตที่มีค่าน้อยที่สุดของเซลล์แสงอาทิตย์ย่อย ในเซลล์แสงอาทิตย์ทั่วไปความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้ามีดังนี้ [34]

$$I_o = I_s \left( \exp \left( \frac{q(V_o - I_o R_s)}{n_D kT} \right) - 1 \right) + \frac{V_o - I_o R_s}{R_{sh}} - I_{ph} \quad (2.17)$$

โดยที่  $I_o$  คือ กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต

$I_s$  คือ กระแสไฟฟ้าอิ่มตัว

$I_{ph}$  คือ กระแสไฟฟ้าโฟโตที่เกิดในเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$V_o$  คือ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตทั้งหมด

$R_{sh}$  คือ ความต้านทานขนั้ด

$R_s$  คือ ความต้านทานอนุกรม

$n_D$  คือ แฟกเตอร์อุดมคติของไดโอด (quality factor) ในทางอุดมคติถือว่ามีค่าเท่ากับ 1

$k$  คือ ค่าคงที่ของโบลทซ์มันน์ (Boltzmann's constant) มีค่าเท่ากับ  $8.617 \times 10^{-5}$  eV/K

$T$  คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์

ซึ่งจากแบบจำลองของปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิกของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H เป็นเซลล์ชั้นบนและเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด  $\mu\text{-Si:H}$  เป็นเซลล์ชั้นล่าง ที่แต่ละเซลล์มีรอยต่อ n-i-p สามารถเขียนความสัมพันธ์ของ  $I_{ph}$  และประสิทธิภาพการรวบรวมพาหะ (carrier collection efficiency :  $\eta_c$ ) ได้ว่า

$$I_{ph}(V) = I_{ph,max} \times \eta_c(V) \quad (2.18)$$

โดยที่  $\eta_c$  มีค่าดังสมการ

$$\eta_c(V) = \frac{2\mu\tau(V_b - V)}{d_{i2}} \left( 1 - \exp\left( -\frac{d_{i2}}{2\mu\tau(V_b - V)} \right) \right) \quad (2.19)$$

โดยที่  $\mu$  คือ ความคล่องตัวของพาหะ

$\tau$  คือ เวลาอายุของพาหะ

$V_b$  คือ แรงดันภายในของไดโอด

$d_{i2}$  คือ ความหนาของชั้น i

ถ้าสมมติให้  $R_{sh}$  มีค่าสูงมากใกล้อนันต์ สมการที่ (2.17) จะเขียนใหม่ได้ว่า

$$V_o - I_o R_s = \frac{n_D k T}{q} \ln \left( \frac{I_{ph} + I_s + I_o}{I_s} \right) \quad (2.20)$$

ดังนั้นในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดทันเดมในรูปที่ 2.17 จะได้ว่า [35]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_o - I_o R_s = \frac{n_D k T}{q} \ln \left( \prod_{i=1}^m \left( \frac{I_{phi} + I_s + I_o}{I_s} \right) \right) \quad (2.21)$$

โดยที่  $I_{phi}$  คือ กระแสไฟฟ้าโฟโตที่เกิดในเซลล์แสงอาทิตย์แต่ละตัว

$m$  คือ จำนวนของเซลล์แสงอาทิตย์ย่อย

จากสมการที่ (2.21) ได้  $V_{oc}$  และ  $I_{sc}$  จะมีค่าสูงสุดเมื่อ  $I_{phi}$  มีค่าเท่ากับ  $1/m$  ของ  $I_{ph}$  และถ้า  $I_{ph} = \sum_{i=1}^m I_{phi}$  ดังนั้นค่าสูงสุดของ  $V_{oc}$  และ  $I_{sc}$  คือ

$$V_{oc} = m \left( \frac{n_D k T}{q} \right) \left( \ln \left( \frac{I_{ph}}{I_s} \right) - \ln(m) \right) \quad (2.22)$$

ซึ่ง

$$I_{ph} \gg I_s \text{ และ } I_{sc} \approx \frac{I_{ph}}{m} \quad (2.23)$$

ดังนั้นจากสมการที่ (2.22) และสมการที่ (2.23) ทำให้ทราบว่า  $V_{oc}$  แปรผันตรงกับจำนวน  $m$  ของเซลล์แสงอาทิตย์ แต่  $I_{sc}$  แปรผกผันกับจำนวน  $m$  ของเซลล์แสงอาทิตย์ และสมการที่ (2.21) สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$V_o - I_o R_s = \frac{n_D k T}{q} \ln \left( \left( \frac{I_{ph} + I_s + I_o}{m I_s} \right)^m \right) = m \frac{n_D k T}{q} \ln \left( \frac{I_{ph} + m I_s + m I_o}{m I_s} \right) \quad (2.24)$$

$$\frac{V_o}{m} - m I_o \frac{R_s}{m^2} = \frac{n_D k T}{q} \ln \left( \frac{I_{ph} + m I_s + m I_o}{m I_s} \right) \quad (2.25)$$

$$\overline{V_o} - \overline{I_o} R_{reff} = \frac{n_D k T}{q} \ln \left( \frac{I_{ph} + \overline{I_s} + \overline{I_o}}{\overline{I_s}} \right) \quad (2.26)$$

ซึ่ง

$$\overline{V_o} = \frac{V_o}{m}, \quad \overline{I_o} = m I_o, \quad \overline{I_s} = m I_s \text{ และ } R_{reff} = \frac{R_s}{m^2} \quad (2.27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

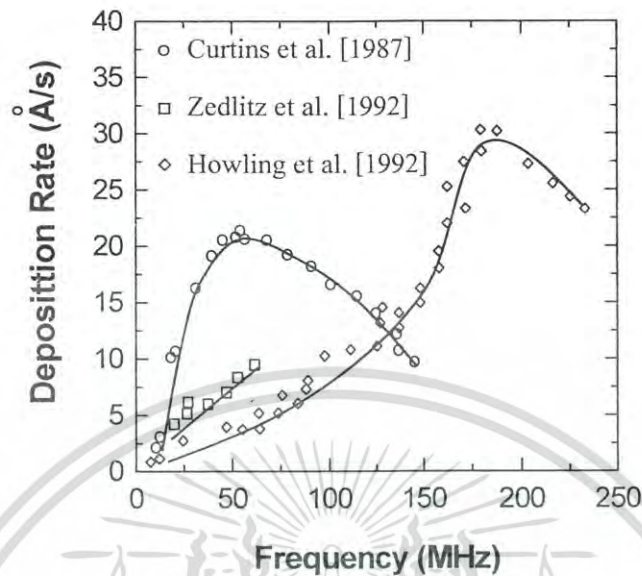
จากสมการที่ (2.26) และสมการที่ (2.27) ทำให้เราทราบว่าแม้ว่าการเพิ่มจำนวน  $m$  ของเซลล์แสงอาทิตย์จะทำให้  $R_s$  เพิ่มขึ้น แต่โดยรวมแล้วความต้านทานรวมประสิทธิผล  $R_{eff}$  (effective series resistance) จะลดน้อยลงตามแฟกเตอร์  $1/m^2$  ดังนั้นจึงคาดหวังว่า การเพิ่มจำนวนเซลล์แสงอาทิตย์หลายๆ ชั้นจะทำให้ฟิล์มแพกเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเพิ่มขึ้น

## 2.7 สนามไฟฟ้าคลื่นความถี่สูง

การใช้สนามไฟฟ้าคลื่นความถี่สูง (Very High Frequency : VHF , 30-300 MHz) ปลูกฟิล์มบาง a-Si:H และฟิล์มบาง  $\mu\text{-Si:H}$  หรือที่เรียกว่าวิธีพลาสมาชีวิตความถี่สูง (Very High Frequency Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition : VHF-PECVD) เริ่มต้นขึ้นตั้งแต่ปี ค.ศ. 1987 [11-12] ซึ่งสามารถปลูกฟิล์มบางที่มีอัตราการปลูกฟิล์มสูงถึง 20 Å/sec ในขณะที่ฟิล์มบางที่ปลูกโดยใช้สนามไฟฟ้าคลื่นความถี่วิทยุ (Radio Frequency : RF , 13.56 MHz) หรือที่เรียกว่าวิธีพลาสมาชีวิตความถี่วิทยุ (RF Plasma CVD) [10] จะมีอัตราการปลูกฟิล์มเพียง 3 Å/sec ฟิล์มบางที่ปลูกโดยใช้สนามไฟฟ้าคลื่นความถี่สูงจะมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับฟิล์มที่ปลูกโดยใช้สนามไฟฟ้าคลื่นความถี่วิทยุ การเพิ่มอัตราการปลูกฟิล์มด้วยวิธีเพิ่มคลื่นความถี่ของสนามไฟฟ้าดังกล่าวนี้ จะได้ผลที่แตกต่างจากการเพิ่มอัตราการปลูกฟิล์มด้วยวิธีเพิ่มความหนาแน่นของกำลังงานไฟฟ้าคลื่นความถี่วิทยุ ซึ่งการเพิ่มความหนาแน่นของกำลังงานไฟฟ้าคลื่นความถี่วิทยุจะทำให้คุณภาพของฟิล์มลดลง [11-12]

### 2.7.1 ผลของสนามไฟฟ้าคลื่นความถี่สูงที่มีต่ออัตราการปลูกฟิล์ม

การปลูกฟิล์มบาง a-Si:H ด้วยวิธี VHF-PECVD จะได้ฟิล์มที่มีอัตราการปลูกสูงกว่าวิธี RF Plasma CVD ดังรูปที่ 2.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการปลูกฟิล์มบาง a-Si:H และคลื่นความถี่สนามไฟฟ้าที่ใช้กระตุ้นพลาสมาโดยนักวิจัยกลุ่มต่างๆ ซึ่งอัตราการปลูกฟิล์มจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อคลื่นความถี่ของสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้น อัตราการปลูกฟิล์มที่ได้นั้นจะมีความแตกต่างกันเนื่องมาจากความแตกต่างกันในการแมชซิ่งของระบบชีวิต (load impedance) และอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (input impedance) [36]



รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการปลูกฟิล์ม a-Si:H และคลื่นความถี่ของสนามไฟฟ้าค่าต่างๆ โดยนักวิจัยกลุ่มต่างๆ [37]

สาเหตุที่อัตราการปลูกฟิล์มเพิ่มสูงขึ้น เมื่อคลื่นความถี่ของสนามไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นนั้น เนื่องจากคลื่นความถี่ของสนามไฟฟ้าที่เพิ่มสูงขึ้นจะทำให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระและความหนาแน่นของไอออนในพลาสมาเพิ่มขึ้น สามารถอธิบายจากดังนี้

1. อิทธิพลของสนามไฟฟ้าคลื่นความถี่ VHF ที่มีผลต่ออิเล็กตรอนอิสระในพลาสมาคือ การเพิ่มความถี่ของสนามไฟฟ้าสูงขึ้น จะทำให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระในพลาสมาเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.19 จากการเพิ่มขึ้นของอิเล็กตรอนอิสระดังกล่าวนี้ ส่งผลให้ประสิทธิภาพการแยกสลายก๊าซไฮโดรเจนจะสูงขึ้นด้วย [14] เป็นผลให้ปฏิกิริยาการสร้างพันธะที่ผิวของฟิล์มบาง a-Si:H ดีขึ้น [13,38] เนื่องจากอิเล็กตรอนเป็นอนุภาคที่วิ่งชนก๊าซไฮโดรเจนและทำให้ก๊าซไฮโดรเจนแตกตัวเป็นพลาสมา แต่การเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระดังกล่าวนี้จะไม่ทำให้พลังงานและอุณหภูมิของอิเล็กตรอนเองเพิ่มขึ้น [39] การเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระเมื่อเพิ่มความถี่ของสนามไฟฟ้ามีสาเหตุมาจากอิมพีแดนซ์ของโหลดลดลง ส่งผลให้สามารถส่งกำลังไฟฟ้าเข้าไปในพลาสมาได้มากขึ้น ทำให้มีกระแสไฟฟ้าที่ไหลในพลาสมาเพิ่มขึ้น [40] กระแสไฟฟ้าที่ไหลในพลาสมาคือ อิเล็กตรอนและไอออนในพลาสมา

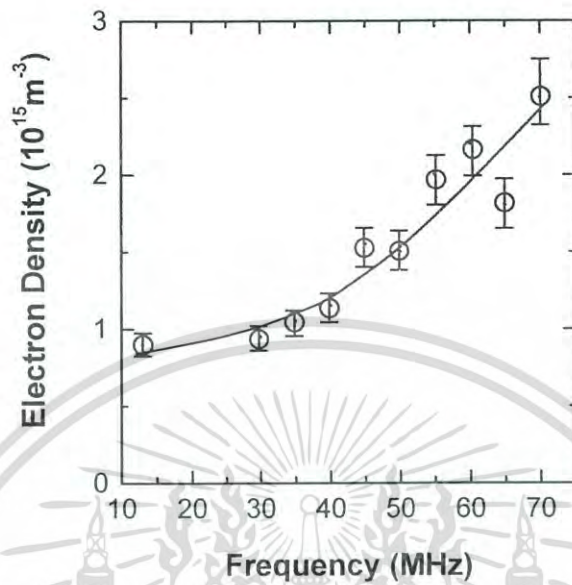
2. อิทธิพลของสนามไฟฟ้าคลื่นความถี่ VHF ที่มีผลต่อไอออนในพลาสมาคือ การเพิ่มความถี่ของสนามไฟฟ้าสูงขึ้น จะทำให้ความหนาแน่นของไอออนในพลาสมาเพิ่มขึ้น [13,38] และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

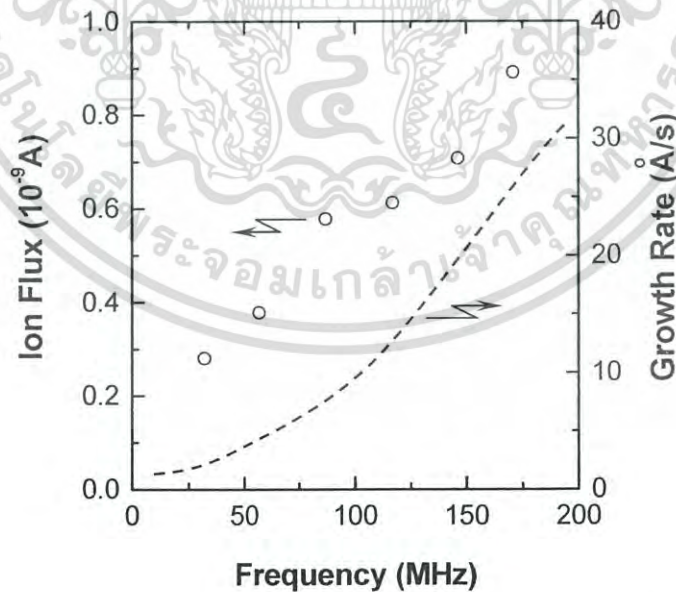
อัตราการเติบโตของฟิล์มเพิ่มขึ้นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.20 แต่การเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นของไอออนนี้จะส่งผลให้พลังงานไอออนในพลาสมาลดลง [38] อัตราการปลูกฟิล์มขึ้นกับปฏิกิริยาที่ผิว (surface reactivity) ของ film precursor และปฏิกิริยาที่ผิวของ film precursor ขึ้นอยู่กับจำนวนของอะตอมไฮโดรเจนที่ผิวฟิล์ม [13] ไอออนสามารถทำให้อะตอมไฮโดรเจนที่ผิวฟิล์มหลุดออกมาได้โดยการกระแทกฟิล์ม เนื่องจากการเร่งไอออนโดยสนามไฟฟ้า ให้มีพลังงานหลายสิบลีตริกตรอนโวลต์ซึ่งเพียงพอที่จะทำลายพันธะของไฮโดรเจนกับซิลิคอนที่ผิว การหลุดของอะตอมไฮโดรเจนจากผิวฟิล์มช่วยการจับพันธะของ film precursor กับผิวฟิล์ม ดังนั้นไอออนจึงสามารถควบคุมอัตราการปลูกฟิล์มได้ สนามไฟฟ้าคลื่นความถี่ VHF ทำให้ได้อัตราการปลูกฟิล์มที่สูงขึ้น แต่ไม่ทำให้คุณสมบัติของฟิล์มแย่ลง เนื่องจากคลื่นความถี่ VHF ทำให้ความหนาแน่นของไอออนเพิ่มขึ้นแต่พลังงานของไอออนลดลง การลดลงของพลังงานไอออนนี้ทำให้ ion bombardment ลดลง [41-43]

### 2.7.2 ผลของสนามไฟฟ้าคลื่นความถี่สูงที่มีต่อวัสดุไมโครคริสตัลไลน์ซิลิคอน

ในปี ค.ศ. 1983 A. Matsuda ทำการปลูกฟิล์มบาง  $\mu\text{c-Si:H}$  โดยใช้สนามไฟฟ้าคลื่นความถี่ RF ซึ่งมีอัตราการปลูกฟิล์มยังไม่สูงนัก ต่อมาในปี ค.ศ. 1988 S. Oda และคณะฯ ได้ทำปลูกฟิล์มบาง  $\mu\text{c-Si:H}$  โดยใช้สนามไฟฟ้าคลื่นความถี่ VHF ซึ่งมีรายงานว่าอัตราการปลูกฟิล์มบาง  $\alpha\text{-Si:H}$  โดยใช้สนามไฟฟ้าคลื่นความถี่ VHF จะทำให้ฟิล์มบาง  $\alpha\text{-Si:H}$  เปลี่ยนคุณสมบัติเป็นวัสดุไมโครคริสตัลไลน์ได้ง่ายยิ่งขึ้น สาเหตุที่คลื่นความถี่ VHF ทำให้เกิดฟิล์มโครงสร้างไมโครคริสตัลไลน์ได้ง่าย คือคลื่นความถี่ VHF ทำให้ความหนาแน่นของไอออนเพิ่มขึ้น แต่พลังงานของไอออนลดลง ไอออนที่มีพลังงานต่ำๆ นี้มีผลช่วยทำให้เกิดฟิล์มโครงสร้างไมโครคริสตัลไลน์ได้ง่าย [42,44] และการปลูกฟิล์มบาง  $\mu\text{c-Si:H}$  ด้วยวิธี VHF-PECVD จะได้ฟิล์มที่มีอัตราการปลูกฟิล์มสูงอีกด้วย [43-47]



รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระและความถี่ของสนามไฟฟ้า [14]

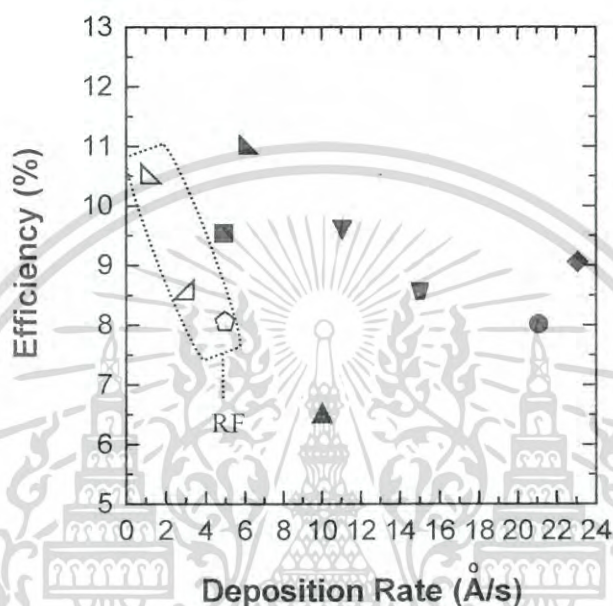


รูปที่ 2.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของไอออนและความถี่ของสนามไฟฟ้า [40]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.7.3 ผลของสนามไฟฟ้าคลื่นความถี่สูงที่มีต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

รูปที่ 2.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ปลูกโดยคลื่นความถี่ VHF และอัตราการปลูกฟิล์มบาง a-Si:H และฟิล์มบาง  $\mu\text{c-Si:H}$  จากรูปนี้แสดงให้เห็นว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่ปลูกโดยใช้สนามไฟฟ้าคลื่นความถี่ VHF สามารถประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพใกล้เคียงหรือสูงกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่ปลูกโดยใช้สนามไฟฟ้าคลื่นความถี่ RF ได้



รูปที่ 2.21 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ปลูกโดยใช้คลื่นความถี่ VHF กับอัตราการปลูกฟิล์ม  $\nabla$ ,  $\blacktriangle$  : [48],  $\triangle$  : [49],  $\square$  : [50],  $\blacktriangle$  : [51],  $\blacksquare$  : [52],  $\blacktriangledown$  : [53],  $\bullet$  : [54],  $\blacklozenge$  : [55],  $\blacktriangledown$  : [56]

ลักษณะเด่นของระบบ VHF-PECVD ที่มีต่อการปลูกฟิล์มดังนี้

1. อัตราการปลูกฟิล์มเพิ่มขึ้น เมื่อความถี่ของสนามไฟฟ้าสูงขึ้น
2. ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระในพลาสมาเพิ่มขึ้น เมื่อความถี่ของสนามไฟฟ้าสูงขึ้น
3. ความหนาแน่นของไอออนในพลาสมาเพิ่มขึ้น แต่พลังงานของไอออนลดลง เมื่อความถี่ของสนามไฟฟ้าสูงขึ้น
4. คลื่นความถี่ VHF ทำให้ ion bombardment ลดลงและทำให้เกิดฟิล์มโครงสร้าง  $\mu\text{c-Si:H}$  ได้ง่าย
5. เซลล์แสงอาทิตย์ที่ปลูกโดยใช้สนามไฟฟ้าคลื่นความถี่ VHF มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับเซลล์แสงอาทิตย์ที่ปลูกโดยใช้สนามไฟฟ้าคลื่นความถี่ RF

## บทที่ 3

# กระบวนการสร้างและการทดลอง

### 3.1 บทนำ

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้การปลูกฟิล์มบาง a-Si:H และฟิล์มบาง  $\mu$ c-Si:H ใช้วิธีพลาสมาซีวีดีความถี่สูง (VHF-PECVD) ซึ่งจะต้องเตรียมการหลายขั้นตอนด้วยกัน บทนี้จะกล่าวถึงระบบ multi-chamber PECVD/sputtering โครงสร้างของระบบ VHF-PECVD การปรับปรุงเครื่องมือของระบบ VHF-PECVD ให้สามารถทำงานที่คลื่นความถี่ VHF การศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบาง a-Si:H และ  $\mu$ c-Si:H ขั้นตอนการปลูกฟิล์มบาง a-Si:H และ  $\mu$ c-Si:H และหัวข้อสุดท้ายเป็นการศึกษาเงื่อนไขการปลูกฟิล์มบาง a-Si:H และ  $\mu$ c-Si:H

### 3.2 ระบบ multi-chamber PECVD/sputtering

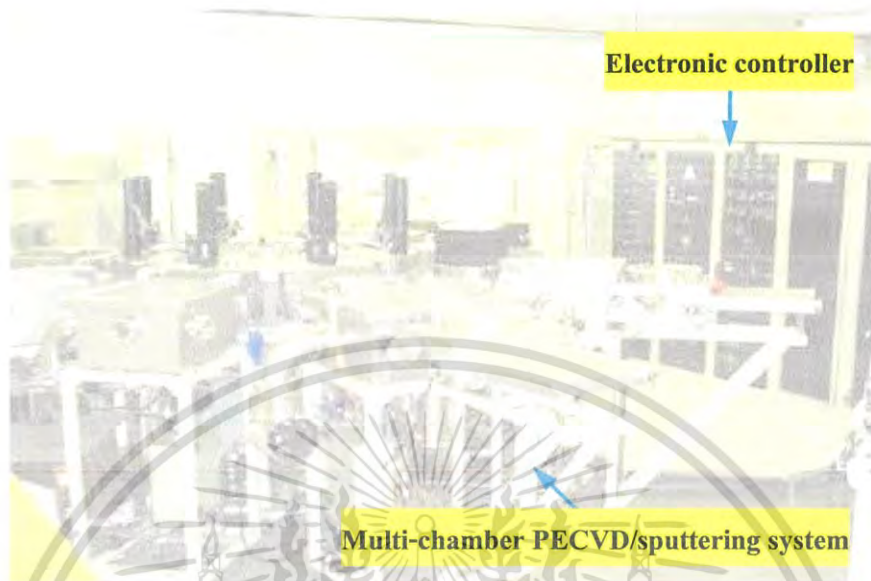
ระบบ multi-chamber PECVD/sputtering ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ติดตั้งอยู่ที่ชั้นที่ 1 ของอาคารโรงงานต้นแบบเซลล์แสงอาทิตย์ สถาบันพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ (Institute of Solar Energy Technology Development : ISET) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) เลขที่ 111 อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย ถ.พหลโยธิน ต.คลองหนึ่ง อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120 ระบบ multi-chamber PECVD/sputtering สามารถปลูกฟิล์มได้ทั้งวิธี PECVD และ sputtering บนวัสดุที่เป็นแผ่นฐานรอง (substrates) หลายชนิดเช่น แผ่นกระจก (glass) แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม (stainless steel) และแผ่นโพลีเมอร์ (polymer) โดยแผ่นฐานรองมีขนาด 30 cm x 40 cm การทำงานของระบบ multi-chamber PECVD/sputtering สามารถควบคุมได้ด้วยคอมพิวเตอร์ ระบบประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน ได้แก่

1. เครื่องจักร PECVD/sputtering
2. ระบบก๊าซ

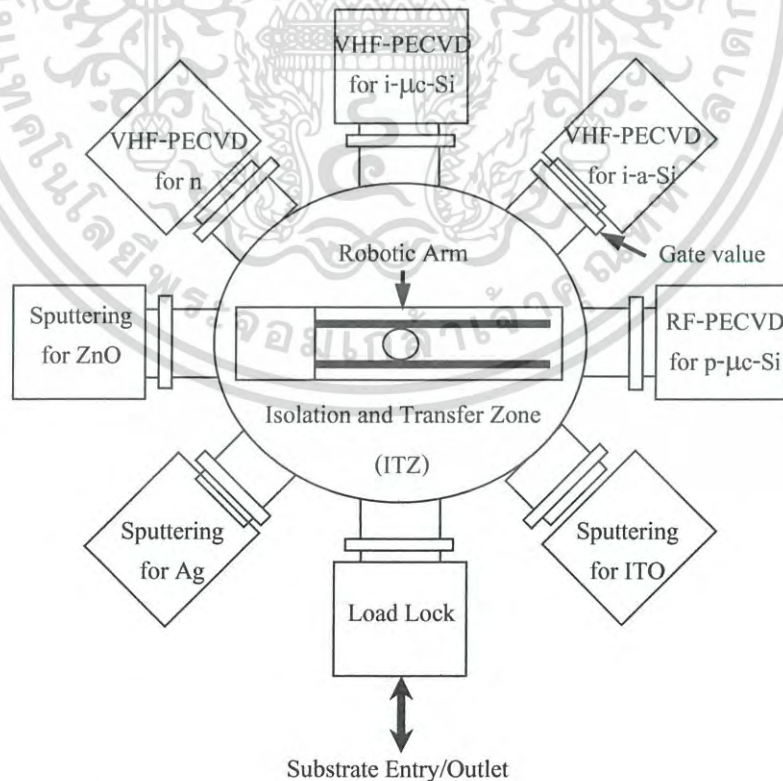
#### 3.2.1 เครื่องจักร PECVD/sputtering

เครื่องจักร PECVD/sputtering ประกอบด้วยภาชนะสุญญากาศ (chamber) ระดับสูงจำนวน 8 chamber ซึ่ง 4 chamber ใช้สำหรับปลูกฟิล์มบางด้วยวิธี PECVD 3 chamber สำหรับปลูกฟิล์มบางด้วยวิธี sputtering และ 1 chamber สำหรับนำแผ่นฐานรองเข้าและออกจากระบบ ทั้ง 8 chamber ทำมาจากวัสดุ stainless steel-type 304 และเชื่อมต่อกันโดยผ่าน chamber ที่อยู่ตรงกลางเรียกว่า Isolation Transfer Zone (ITZ) ภายใน ITZ มีแขนกล (robotic arm) สำหรับเคลื่อนย้ายแผ่นฐานรอง

ระหว่าง chamber ต่างๆ รูปที่ 3.2 แสดงโครงสร้างของเครื่องจักร PECVD/sputtering และตารางที่ 3.1 แสดงสรุปรายละเอียดของ chamber ต่างๆ ของเครื่องจักร PECVD/sputtering



รูปที่ 3.1 ภาพถ่ายเครื่องจักร PECVD/sputtering



รูปที่ 3.2 โครงสร้างของเครื่องจักร PECVD/sputtering (top view)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 สรุปรายละเอียดของ chamber ต่างๆ ของเครื่องจักร PECVD/sputtering

ประเภท chamber	หน้าที่	ขนาด (ก. x ย. x ส.) cm <sup>3</sup>	แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า	ก๊าซที่ใช้
1. load lock	นำแผ่นฐานรองเข้าและออก	40 x 50 x 20	-	N <sub>2</sub>
2. sputtering chamber	ปลูกฟิล์มชั้น Ag	50 x 60 x 40	DC 1500 W	Ar
3. sputtering chamber	ปลูกฟิล์มชั้น ZnO	50 x 60 x 40	RF (13.56 MHz) 1500 W	Ar
4. PECVD chamber	ปลูกฟิล์มชั้น n	40 x 50 x 30	VHF (30-300 MHz) 300 W	SiH <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> , PH <sub>3</sub>
5. PECVD chamber	ปลูกฟิล์มชั้น i-a-Si:H	40 x 50 x 30	VHF (30-300 MHz) 300 W	SiH <sub>4</sub> , H <sub>2</sub>
6. PECVD chamber	ปลูกฟิล์มชั้น i-μc-Si:H	40 x 50 x 30	VHF (30-300 MHz) 300 W	SiH <sub>4</sub> , H <sub>2</sub>
7. PECVD chamber	ปลูกฟิล์มชั้น p	40 x 50 x 30	RF (13.56 MHz) 300 W	SiH <sub>4</sub> , B <sub>2</sub> H <sub>6</sub> , H <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , SiH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>
8. sputtering chamber	ปลูกฟิล์มชั้น ITO	50 x 60 x 40	RF (13.56 MHz) 1500 W	Ar

หมายเหตุ

DC : Direct Current

RF : Radio Frequency

VHF : Very High Frequency

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2 ระบบก๊าซ

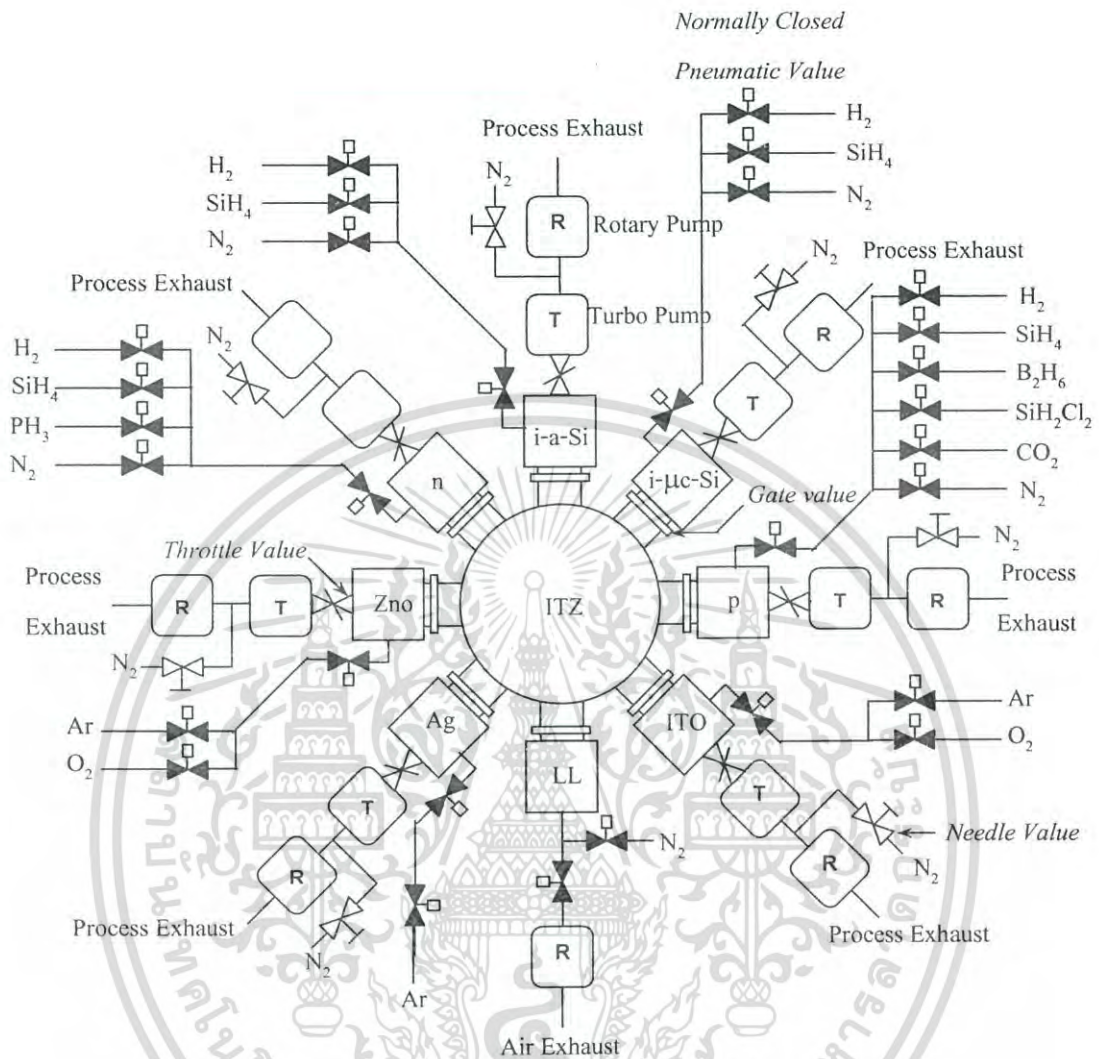
ในการปลูกฟิล์มชั้นแต่ละชั้น วัสดุที่ใช้คือ ก๊าซชนิดต่างๆ รูปที่ 3.3 แสดงภาพถ่ายของระบบก๊าซที่ใช้ในการปลูกฟิล์มชั้นต่างๆ ซึ่งต่อเชื่อมเข้ากับเครื่องจักร PECVD/sputtering ในระบบ multi-chamber PECVD/sputtering ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ก๊าซที่ใช้มีดังนี้คือ

ก๊าซไฮโดรเจน ( $H_2$ )	100%	ขนาดถังบรรจุ 47 ลิตร
ก๊าซซิลเลน ( $SiH_4$ )	100%	ขนาดถังบรรจุ 47 ลิตร
ก๊าซฟอสฟีน ( $PH_3/H_2$ )	1000 ppm	ขนาดถังบรรจุ 10 ลิตร
ก๊าซไดโบรเจน ( $B_2H_6/H_2$ )	1000 ppm	ขนาดถังบรรจุ 10 ลิตร
ก๊าซไดคลอโรซิลเลน ( $SiH_2Cl_2/H_2$ )	10%	ขนาดถังบรรจุ 47 ลิตร
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ )		ขนาดถังบรรจุ 47 ลิตร
ก๊าซอาร์กอน (Ar)		ขนาดถังบรรจุ 47 ลิตร
ก๊าซออกซิเจน ( $O_2$ )		ขนาดถังบรรจุ 47 ลิตร
ก๊าซไนโตรเจน ( $N_2$ )		ขนาดถังบรรจุ 47 ลิตร



รูปที่ 3.3 ภาพถ่ายของระบบก๊าซที่ใช้ในการปลูกฟิล์มชั้นต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

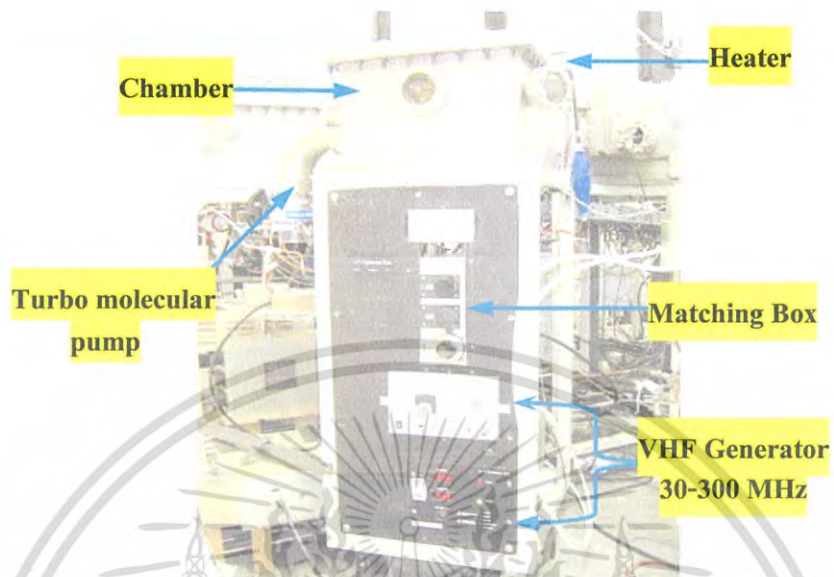


รูปที่ 3.4 โครงสร้างของระบบก๊าซที่ใช้ในการปลูกฟิล์มชั้นต่างๆ ซึ่งต่อเชื่อมเข้ากับเครื่องจักร PECVD/sputtering (top view)

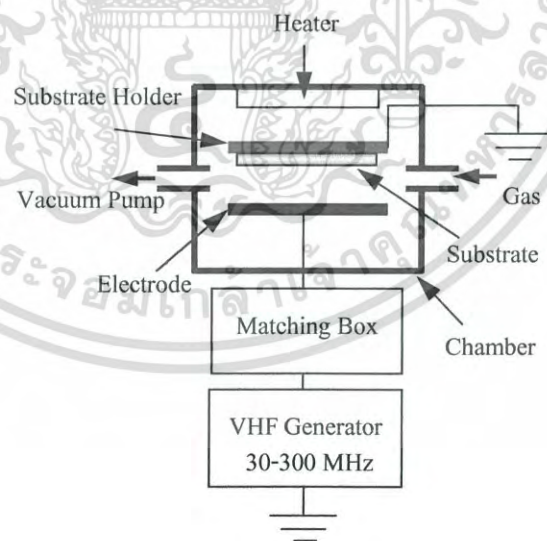
### 3.3 โครงสร้างของระบบ VHF-PECVD

ระบบ VHF-PECVD เป็นส่วนหนึ่งของระบบ multi-chamber PECVD/sputtering ใช้สำหรับปลูกฟิล์มบาง a-Si:H และฟิล์มบาง  $\mu\text{c-Si:H}$  ชนิดบริสุทธิ์หรือชั้น i ระบบ VHF-PECVD ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วนคือ ระบบภาชนะสุญญากาศ ระบบก๊าซ และระบบกำเนิดสนามไฟฟ้าคลื่นความถี่สูง (VHF generator) รูปที่ 3.5 แสดงภาพถ่ายของระบบ VHF-PECVD ระบบดังกล่าวนี้เป็นชนิด vertical direction ซึ่งสนามไฟฟ้ามีทิศทางตั้งฉากกับระนาบของแผ่นฐานรอง ดังแสดงในรูปที่ 3.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 ภาพถ่ายของระบบ VHF-PECVD



รูปที่ 3.6 โครงสร้างของระบบ VHF-PECVD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.1 ระบบภาชนะสุญญากาศ

ระบบภาชนะสุญญากาศประกอบด้วย chamber ที่ทำจากวัสดุ stainless steel-type 304 มีรูปทรงสี่เหลี่ยมกว้างประมาณ 40 cm ยาวประมาณ 50 cm และสูงประมาณ 30 cm ด้านบนของ chamber มีฮีตเตอร์ (heater) ให้ความร้อนแก่ฐานรอง ซึ่ง chamber จะถูกสูบล้ออากาศออกให้เป็นสุญญากาศด้วย turbo molecular pump และ rotary vacuum pump ตามลำดับ

### 3.3.2 ระบบก๊าซ

ก๊าซที่ใช้ในระบบ VHF-PECVD มีดังนี้คือ

ก๊าซไฮโดรเจน ( $H_2$ ) 100% ขนาดถังบรรจุ 47 ลิตร

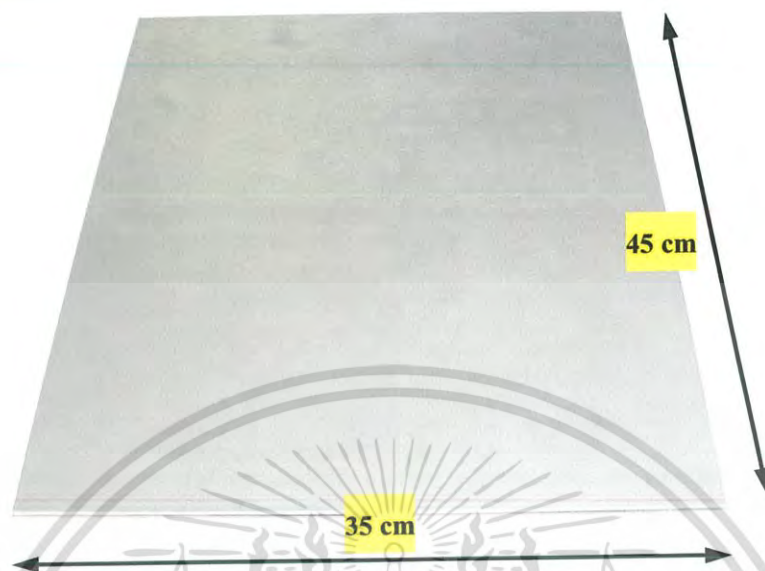
ก๊าซซิลิโคน ( $SiH_4$ ) 100% ขนาดถังบรรจุ 47 ลิตร

### 3.3.3 ระบบกำเนิดสนามไฟฟ้าคลื่นความถี่สูง

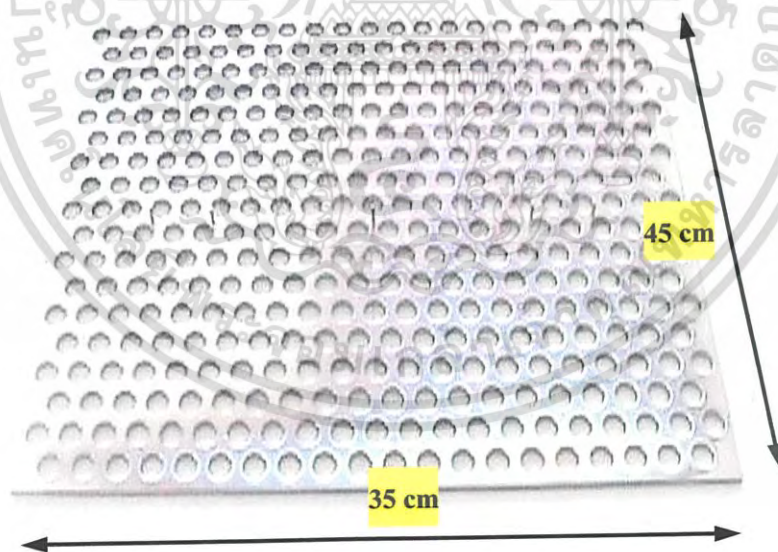
ระบบกำเนิดสนามไฟฟ้าคลื่นความถี่สูง (VHF generator) จะติดตั้งอยู่ด้านล่างของ chamber โดยเป็นส่วนที่ทำหน้าที่กำเนิดสนามไฟฟ้าแรงดันสูงด้วยคลื่นความถี่ 30-100 MHz เพื่อกระตุ้นให้ก๊าซใน chamber เกิดการแตกตัวเป็นพลาสมา สนามไฟฟ้าดังกล่าวจะถูกส่งผ่านสายสัญญาณแบบ coaxial ไปสู่กล่องแมตซิง (matching box) เพื่อปรับอิมพีแดนซ์ของแหล่งกำเนิดสนามไฟฟ้าให้เท่ากับอิมพีแดนซ์ของระบบซีวีดี โดยมีขั้วสัญญาณไฟฟ้า (electrode) ที่อยู่ใน chamber เป็นส่วนรับสนามไฟฟ้าคลื่นความถี่สูงดังกล่าว

## 3.4 การปรับปรุงเครื่องมือของระบบ VHF-PECVD

หัวข้อนี้ของวิทยานิพนธ์จะกล่าวถึงปัญหาในเบื้องต้นที่เกิดจากการปลูกฟิล์มบางชนิดบริสุทธิ์บนแผ่นฐานรองที่มีขนาด  $30 \times 40 \text{ cm}^2$  ด้วยขั้วสัญญาณไฟฟ้าที่มีขนาด  $35 \times 45 \text{ cm}^2$  สำหรับกระตุ้นพลาสมาของระบบ VHF-PECVD แบบเดิม ซึ่งแบบเดิมมีลักษณะแบบแบนเรียบ (flat plate) ดังแสดงในรูปที่ 3.7 เมื่อทำการเปลี่ยนคลื่นความถี่ของสนามไฟฟ้าที่ใช้กระตุ้นพลาสมาจากคลื่นความถี่ RF เป็นคลื่นความถี่ VHF พบว่าพลาสมาไม่สามารถแพร่กระจายเหนือแผ่นขั้วสัญญาณไฟฟ้าได้ทั่วทุกบริเวณ และฟิล์มที่เกิดขึ้นบนแผ่นฐานรองจะไม่สม่ำเสมอในบางบริเวณ ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงทำการปรับปรุงขั้วสัญญาณไฟฟ้า เพื่อให้สามารถทำงานที่คลื่นความถี่ย่าน VHF โดยออกแบบแผ่นขั้วสัญญาณไฟฟ้าดังกล่าวให้มีลักษณะเป็นแบบแบนเรียบมีรูเจาะ ซึ่งมีขนาดเท่าเดิม ดังแสดงในรูปที่ 3.8 ผลทำให้พลาสมาสามารถแพร่กระจายเหนือแผ่นขั้วสัญญาณไฟฟ้าได้ทั่วทุกบริเวณ และฟิล์มที่เกิดขึ้นบนแผ่นฐานรองจะสม่ำเสมอยิ่งขึ้น [57]



รูปที่ 3.7 ภาพถ่ายขั้วสัญญาณไฟฟ้าแบบเดิมซึ่งไม่เหมาะสมต่อการใช้งานของระบบ VHF-PECVD



รูปที่ 3.8 ภาพถ่ายขั้วสัญญาณไฟฟ้าแบบใหม่ซึ่งเหมาะสมต่อการใช้งานของระบบ VHF-PECVD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 การศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบาง a-Si:H และฟิล์มบาง $\mu\text{c-Si:H}$

การศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบาง a-Si:H และฟิล์มบาง  $\mu\text{c-Si:H}$  โดยการตรวจวัดและวิเคราะห์หมีหลายวิธีการ เพื่อที่จะทราบว่าฟิล์มบางที่ปลูกได้มีคุณภาพเหมาะสมที่จะนำไปประดิษฐ์เป็นสิ่งประดิษฐ์ทางออปโตอิเล็กทรอนิกส์หรือไม่ ถ้าต้องการตรวจวัดและวิเคราะห์คุณสมบัติทางแสงของฟิล์มบาง นิยมใช้วิธีการวัดสเปกตรัมของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและค่าช่องว่างพลังงาน ถ้าต้องการตรวจวัดและวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง นิยมใช้วิธีการวัดค่าสภาพนำไฟฟ้า และถ้าต้องการตรวจวัดและวิเคราะห์คุณสมบัติทางโครงสร้างของฟิล์มบาง นิยมใช้วิธีการวัดจำนวน spin density ของ a-Si:H และการวัด Volume Fraction ของ  $\mu\text{c-Si:H}$  สำหรับวิทยานิพนธ์นี้จะใช้การตรวจวัดและวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบาง a-Si:H และฟิล์มบาง  $\mu\text{c-Si:H}$  ดังนี้

1. การตรวจวัดและวิเคราะห์คุณสมบัติทางแสงของฟิล์มบาง
2. การตรวจวัดและวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง
3. การตรวจวัดและวิเคราะห์คุณสมบัติทางโครงสร้างของฟิล์มบาง

#### 3.5.1 การตรวจวัดและวิเคราะห์คุณสมบัติทางแสงของฟิล์มบาง

##### 3.5.1.1 การวัดสเปกตรัมสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและค่าช่องว่างพลังงานของ a-Si:H

คุณสมบัติทางแสงของฟิล์มบาง a-Si:H เป็นข้อมูลที่มีความจำเป็นในการใช้ออกแบบสิ่งประดิษฐ์ทางออปโตอิเล็กทรอนิกส์ การศึกษาคุณสมบัติทางแสงของ a-Si:H ซึ่งได้แก่ การวัดสเปกตรัมสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของวัสดุ a-Si:H ในย่านพลังงานโฟตอนสูงกว่าช่องว่างพลังงานและหาค่าช่องว่างพลังงานของ a-Si:H เริ่มต้นนำฟิล์มที่ปลูกมาวัดความหนา ( $d$ ) ของฟิล์ม จากนั้นนำฟิล์มมาวัดสเปกตรัมสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านแสง (transmittance :  $T\%$ ) และสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง (reflectance :  $R\%$ ) ดังแสดงในรูปที่ 3.9 และรูปที่ 3.10 ตามลำดับ จากนั้นนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (absorption coefficient :  $\alpha$ ) ของ a-Si:H ดังสมการที่ (3.1) และค่าช่องว่างพลังงานแสงหรือช่องว่างพลังงาน (optical energy gap :  $E_{opt}$ ) ของ a-Si:H โดยการเขียนกราฟแบบเทาซ์ (Tauc's plot) [17] ดังสมการที่ (3.2) ดังแสดงในรูปที่ 3.11 และรูปที่ 3.12 ตามลำดับ

$$\alpha = -\left(\frac{1}{d} \ln\left(\frac{T\%}{1-R\%}\right)\right) \quad (3.1)$$

โดยที่  $\alpha$  คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

$d$  คือ ความหนาของฟิล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$T\%$  คือ สัมประสิทธิ์การทะลุผ่านแสงของฟิล์ม

$R\%$  คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของฟิล์ม

จากสมการที่ (3.1) จะได้ค่าช่องว่างพลังงาน โดยอาศัยความสัมพันธ์ของ  $T_{auc}$  ดังนี้

$$E_{opt} = (\alpha hv)^2 \quad (3.2)$$

หรือ

$$E_{opt} = \left( \frac{\alpha hc_0}{\lambda} \right)^2 \quad (3.3)$$

โดยที่  $E_{opt}$  คือ ช่องว่างพลังงานของ a-Si:H

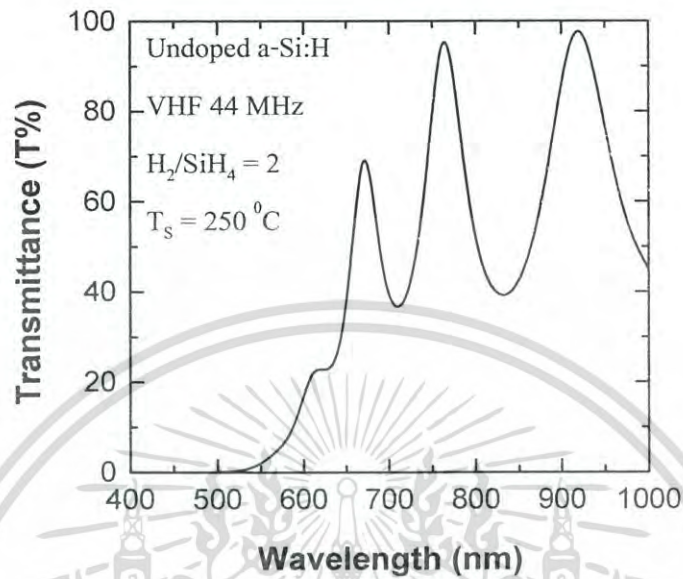
$h$  คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant) มีค่าเท่ากับ  $6.626 \times 10^{-34}$  J-sec

$c_0$  คือ ความเร็วของแสงที่เดินทางในสุญญากาศมีค่าเท่ากับ  $2.998 \times 10^8$  ms<sup>-1</sup>

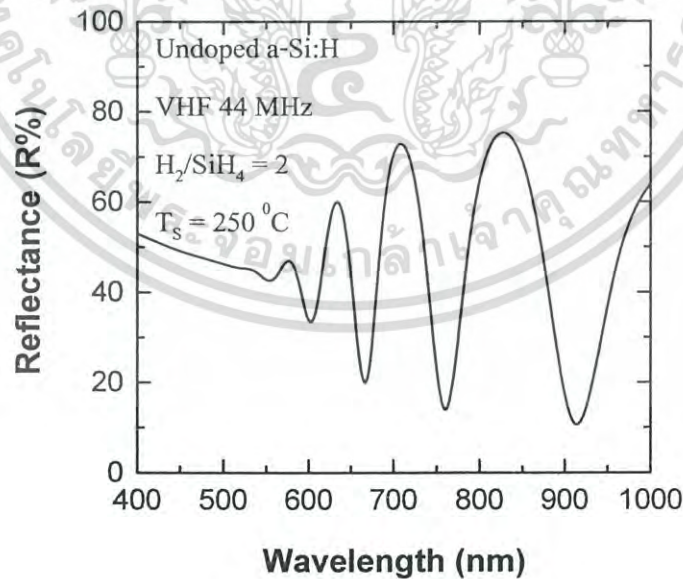
$\nu$  คือ ความถี่ของคลื่นแสง

$\lambda$  คือ ความยาวคลื่นแสง

การวัดความหนาของฟิล์มบาง a-Si:H โดยเครื่อง Profiler แสดงในภาคผนวก ก-1 ส่วนการวัดค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านแสงและสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง โดยเครื่อง UV-VIS Spectrometer แสดงในภาคผนวก ก-2 ติดตั้งอยู่ที่สถาบันพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ (ISET) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

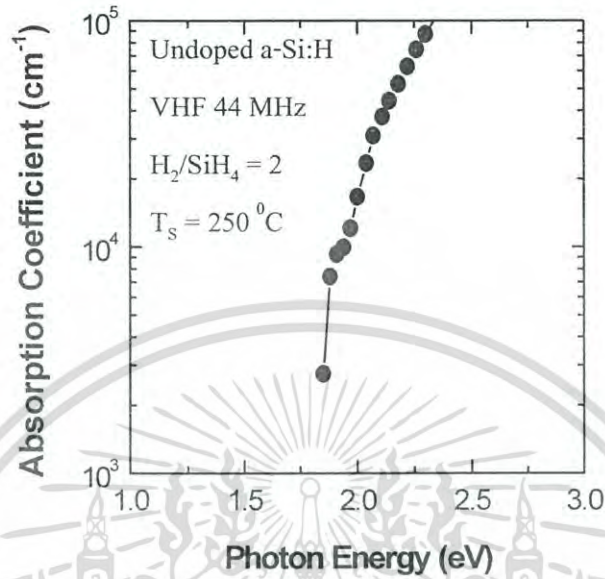


รูปที่ 3.9 ตัวอย่างสเปกตรัมสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านแสงของฟิล์มบาง a-Si:H ที่ปลูกด้วยวิธี VHF-PECVD

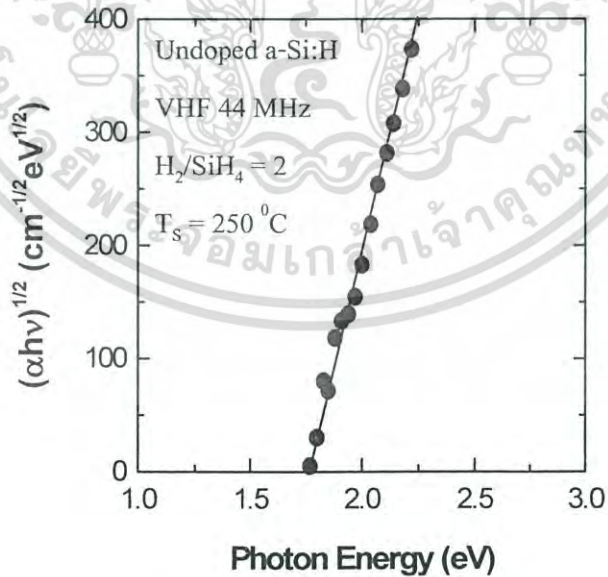


รูปที่ 3.10 ตัวอย่างสเปกตรัมสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของฟิล์มบาง a-Si:H ที่ปลูกด้วยวิธี VHF-PECVD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 ตัวอย่างสเปกตรัมสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของฟิล์มบาง a-Si:H ที่ปลูกด้วยวิธี VHF-PECVD



รูปที่ 3.12 ตัวอย่างการกำหนดค่าช่องว่างพลังงานของฟิล์มบาง a-Si:H ที่ปลูกด้วยวิธี VHF-PECVD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5.1.2 การวัดสเปกตรัมสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและค่าช่องว่างพลังงานของ $\mu\text{c-Si:H}$

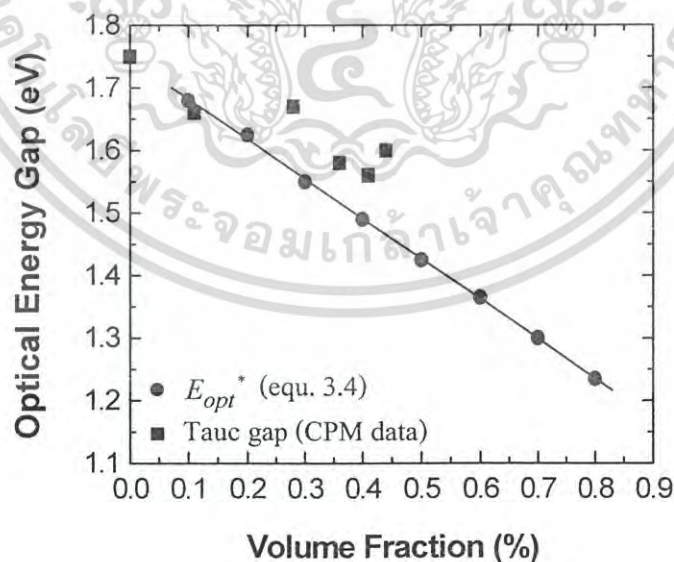
การศึกษาคุณสมบัติทางแสงของ  $\mu\text{c-Si:H}$  ได้แก่ การวัดสเปกตรัมสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของ  $\mu\text{c-Si:H}$  ในย่านพลังงานโฟตอนต่ำกว่าช่องว่างพลังงาน โดยทั่วไปใช้การวัดด้วยวิธี Constant Photocurrent Method (CPM) [27-29] เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการคำนวณค่าช่องว่างพลังงาน ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้การหาช่องว่างพลังงานแสงหรือช่องว่างพลังงานของ  $\mu\text{c-Si:H}$  จะใช้วิธีการคำนวณจากความสัมพันธ์ที่เป็นเชิงเส้นต่อกันระหว่างค่า Volume Fraction ของ  $\mu\text{c-Si:H}$  และค่าช่องว่างพลังงานของ  $\mu\text{c-Si:H}$  ที่อยู่ในช่วงค่าช่องว่างพลังงานของ c-Si ถึง a-Si:H (1.10 eV ถึง 1.75 eV) ดังสมการที่ (3.4) [58]

$$E_{opt}^* = (F_c \times 1.1) + ((1 - F_c) \times 1.75) \quad (3.4)$$

โดยที่  $F_c$  คือ Volume Fraction (%)

$E_{opt}^*$  คือ ช่องว่างพลังงานของ  $\mu\text{c-Si:H}$

ซึ่งค่าช่องว่างพลังงานของ  $\mu\text{c-Si:H}$  ที่คำนวณได้จากสมการ (3.4) จะเป็นค่าที่ได้จากการประมาณดังแสดงในรูปที่ 3.13 ส่วนค่า Volume Fraction ของ  $\mu\text{c-Si:H}$  จะแสดงรายละเอียดในหัวข้อ 3.5.3.2



รูปที่ 3.13 ตัวอย่างการกำหนดค่าช่องว่างพลังงานของฟิล์มบาง  $\mu\text{c-Si:H}$  ด้วยวิธีการคำนวณจาก

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Volume Fraction และค่าช่องว่างพลังงานของ c-Si ถึง a-Si:H

[58]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5.2 การตรวจวัดและวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง

#### 3.5.2.1 การวัดค่าสภาพนำไฟฟ้า

การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มเป็นข้อมูลที่บ่งชี้คุณภาพฟิล์มว่าเหมาะสมมากน้อยเพียงใดที่จะนำไปสร้างเป็นสิ่งประดิษฐ์ การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าได้แก่ การวัดค่าสภาพนำไฟฟ้ามืด (dark conductivity :  $\sigma_d$ ) และค่าสภาพนำไฟฟ้าด้วยแสง (photo conductivity :  $\sigma_{ph}$ ) ในงานวิจัยนี้ได้มีการวัดค่าสภาพนำไฟฟ้ามืดและค่าสภาพนำไฟฟ้าด้วยแสงของฟิล์ม โดยการเคลือบขั้วโลหะเงิน (Ag) แบบโคพลานาร์ (co-planar) ด้วยวิธี sputtering จำนวน 2 ขั้วลงบนฟิล์ม ระยะห่างของขั้วโลหะเงินเท่ากับ 1 mm และขั้วโลหะเงินมีความยาว 1.5 cm ทำการป้อนแรงดัน 10 V ผ่านขั้วโลหะเงินทั้งสอง เพื่อวัดค่ากระแสไฟฟ้า ดังที่แสดงในรูป 3.14 จากนั้นนำค่าต่างๆ ไปคำนวณหาค่าสภาพนำไฟฟ้ามืด ส่วนค่าสภาพนำไฟฟ้าด้วยแสงวัดในขณะที่ส่องด้วยแสงอาทิตย์เทียมที่มีความเข้มแสง 100 mW/cm<sup>2</sup> (AM1.5) การคำนวณค่าสภาพนำไฟฟ้าดังแสดงในสมการต่อไปนี

$$\sigma = \frac{wI}{ldV} \quad (3.5)$$

โดยที่  $\sigma$  คือ สภาพนำไฟฟ้า

$w$  คือ ระยะห่างระหว่างขั้วโลหะไฟฟ้า

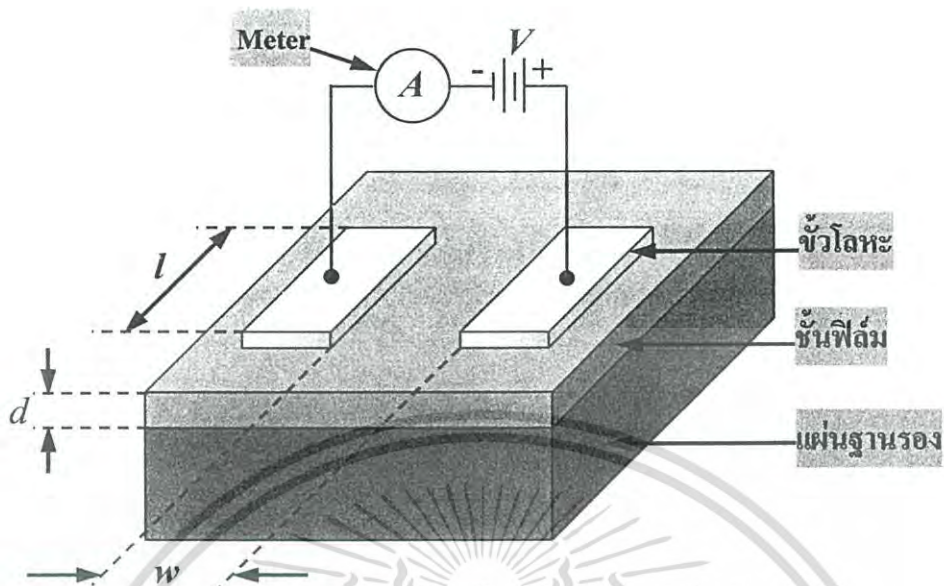
$l$  คือ ความยาวของขั้วโลหะไฟฟ้า

$d$  คือ ความหนาของฟิล์ม

$V$  คือ แรงดันไฟฟ้า

$I$  คือ กระแสไฟฟ้า

การหาค่าสภาพนำไฟฟ้าของฟิล์มบาง ด้วยการวัดค่ากระแสไฟฟ้า โดยเครื่องมือแสดงในภาคผนวก ก-3 ติดตั้งอยู่ที่สถาบันพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ (ISET) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ



รูปที่ 3.14 แผนภาพการวัดค่าสภาพนำไฟฟ้ามีดและค่าสภาพนำไฟฟ้าด้วยแสงของฟิล์มบางซิลิคอน  
ที่ปลูกด้วยวิธี VHF-PECVD

### 3.5.3 การตรวจวัดและวิเคราะห์คุณสมบัติทางโครงสร้างของฟิล์มบาง

การศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ คุณสมบัติทางโครงสร้างของฟิล์มบาง ในงานวิจัยนี้ได้มีการศึกษาคุณสมบัติทางโครงสร้างของฟิล์มบาง a-Si:H และฟิล์มบาง  $\mu\text{-Si:H}$  ด้วยการวัดจำนวน spin density และการวัด Volume Fraction ตามลำดับดังนี้

#### 3.5.3.1 การวัดจำนวน Spin Density

การวัดจำนวน spin density ด้วยวิธี Electron Spin Resonance (ESR) เพื่อวัดจำนวนของแขนขาด เนื่องจากวัสดุ a-Si:H จะมีจุดบกพร่องชนิดแขนขาดอยู่จำนวนมาก และแขนขาดเหล่านี้มีอิทธิพลในการกำหนดคุณสมบัติทั้งทางแสงและทางไฟฟ้าของวัสดุอะมอร์ฟัส โดยที่จะทำให้เกิดระดับโลคอไลซ์ ขึ้นภายในช่องว่างพลังงานของวัสดุอะมอร์ฟัส ระดับโลคอไลซ์เหล่านี้จะจับพาหะที่วิ่งเข้ามาใกล้ ทำให้ค่าสภาพการนำไฟฟ้าด้วยแสงมีค่าลดลง และทำให้ประสิทธิภาพของสิ่งประดิษฐ์ลดลงด้วย ในการวัดจำนวน spin density ในฟิล์มจะต้องใช้วัสดุมาตรฐานคือ Diphenyl Picryl Hydrazyl (DPPH) เป็นตัวเปรียบเทียบ ซึ่งต้องทำการวัด ESR ของ DPPH ที่ทราบจำนวนโมเลกุล และคำนวณจำนวนแขนขาดของ DPPH โดยที่ DPPH 1 โมเลกุลจะมีแขนขาด 1 ตัว ดังสมการต่อไปนี้

$$ESR \text{ Spin Density } DPPH = N_o \times \text{volume of } DPPH \quad (3.6)$$

โดยที่  $N_o$  คือ เลขอะโวกาโด (Avogadro's number) มีค่าเท่ากับ  $6.023 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

$\text{volume of } DPPH$  คือ ปริมาตรของ DPPH

$ESR \text{ Spin Density } DPPH$  คือ จำนวนโมเลกุลของ DPPH

จากสมการที่ (3.5) สามารถคำนวณความหนาแน่นของแขนขาได้ดังสมการที่ (3.6)

$$ESR \text{ Spin Density} = \left( \frac{ESR \text{ Spin Density } DPPH \times \text{area of } ESR \text{ signal of } a-Si}{\text{area of } ESR \text{ signal of } DPPH \times \text{volume of } a-Si} \right) \quad (3.7)$$

โดยที่  $\text{volume of } a-Si$

คือ ปริมาตรของวัสดุ a-Si:H

$ESR \text{ Spin Density}$

คือ ความหนาแน่นแขนขาของวัสดุ a-Si:H

$\text{area of } ESR \text{ signal of } a-Si$

คือ พื้นที่สเปกตรัม ESR ของ a-Si:H

$\text{area of } ESR \text{ signal of } DPPH$

คือ พื้นที่สเปกตรัม ESR ของ DPPH

การวัดจำนวนแขนขาของวัสดุ a-Si:H ด้วยวิธี ESR โดยเครื่องมือแสดงในภาคผนวก ก-4 ติดตั้งอยู่ที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 3.5.3.2 การวัดค่า Volume Fraction

การหาค่าอัตราส่วนปริมาตรของเม็ดผลึกย่อยต่อปริมาตรของ a-Si:H (Volume Fraction :  $F_c$ ) เนื่องจากวัสดุ  $\mu\text{-Si:H}$  จะเป็นเม็ดผลึกย่อยๆ ของซิลิคอนจำนวนมากผสมอยู่ในเครือข่ายของ a-Si:H ดังนั้นจึงต้องอาศัยการวัดสเปกตรัมของการกระเจิงรามัน (raman scattering) ซึ่งจะแสดงความแตกต่างของความถี่ของแสงกระเจิงเอาต์พุตและแสงเลเซอร์อินพุต โดยสเปกตรัมของการกระเจิงรามันที่วัดได้จะประกอบด้วยสัญญาณที่เป็นยอดแหลมที่  $520 \text{ cm}^{-1}$  เกิดจากวัสดุ  $\mu\text{-Si:H}$  และสัญญาณที่มีลักษณะคล้ายภูเขากว้างที่  $480 \text{ cm}^{-1}$  เกิดจากวัสดุ a-Si:H ดังแสดงในรูป 3.15 การหาค่า Volume Fraction ทำได้โดยแบ่งเส้นสเปกตรัมในรูป โดยแยกออกเป็นสัญญาณที่มียอดที่  $480 \text{ cm}^{-1}$  และ  $520 \text{ cm}^{-1}$  ดังแสดงด้วยเส้นประในรูป ต่อจากนั้นหาค่าพื้นที่ใต้กราฟทั้งสองส่วนนี้ ถ้าให้  $I_a$  คือพื้นที่ใต้กราฟของ a-Si:H และ  $I_c$  คือพื้นที่ใต้กราฟของ  $\mu\text{-Si:H}$  สามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี [59]

$$F'_c = \left( \frac{I_c}{I_c + I_A} \right) \quad (3.8)$$

ดังนั้น Volume Fraction จะได้ว่า

$$F_c = \left( \frac{F'_c}{F'_c + y(1 - F'_c)} \right) \quad (3.9)$$

โดยที่  $I_A$  คือ พื้นที่ใต้กราฟของ a-Si:H

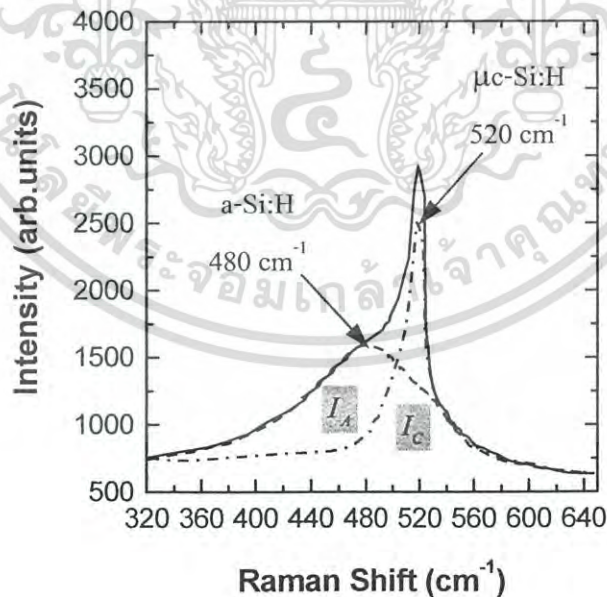
$I_c$  คือ พื้นที่ใต้กราฟของ  $\mu$ c-Si:H

$y$  คือ พจน์ปรับมาตรฐาน (calibration term) มีค่าเท่ากับ 0.88 [59]

$F'_c$  คือ พื้นที่ใต้กราฟของเม็คผลึกย่อย

$F_c$  คือ Volume Fraction (%)

การหา Volume Fraction ของวัสดุ  $\mu$ c-Si:H ด้วยวิธีการวัดสเปกตรัมของการกระเจิงรามัน โดยเครื่อง Raman spectroscope แสดงในภาคผนวก ก-5 ติดตั้งอยู่ที่บริษัท Western Digital



รูปที่ 3.15 ลักษณะ Raman spectrum ของฟิล์มบาง  $\mu$ c-Si:H ที่ปลูกด้วยวิธี VHF-PECVD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6 ขั้นตอนการปลูกฟิล์มบาง a-Si:H และฟิล์มบาง $\mu\text{c-Si:H}$

#### 3.6.1 การเตรียมแผ่นฐานรอง

ในการเตรียมแผ่นฐานรอง เพื่อศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของ a-Si:H และ  $\mu\text{c-Si:H}$  ซึ่งมีวิธีการศึกษาอยู่หลายวิธี ดังนั้นแผ่นฐานรองสำหรับใช้ปลูกฟิล์มบาง a-Si:H และ  $\mu\text{c-Si:H}$  จึงต้องใช้วัสดุหลายชนิด ซึ่งแสดงรายชื่อวัสดุแผ่นฐานรองและวัตถุประสงค์ของการศึกษา ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ชนิดของแผ่นฐานรองสำหรับใช้ในวัตถุประสงค์การศึกษาต่างๆ

แผ่นฐานรอง	ขนาด	วัตถุประสงค์
แผ่นกระจก Corning # 7059	3 cm x 3 cm x 1 mm	อัตราการผลิตฟิล์ม ค่าช่องว่างพลังงาน ค่าสภาพนำไฟฟ้า Volume Fraction
Micro glass	1.8 cm x 1.8 cm x 0.5 mm	Spin Density
Stainless steel	20 cm x 30 cm x 0.4 mm	เซลล์แสงอาทิตย์

การล้างทำความสะอาดแผ่นฐานรอง

1. ล้างด้วยไตรคลอโรเอธิลีน (Trichloroethylene) ด้วยเครื่องสั่นความถี่สูง (Ultrasonic cleaning) เป็นเวลา 20 นาที
2. ล้างด้วยอะซิโตน (Acetone) ด้วยเครื่องสั่นความถี่สูง เป็นเวลา 20 นาที
3. ล้างด้วยเมทิลแอลกอฮอล์ (Methyl alcohol) ด้วยเครื่องสั่นความถี่สูง เป็นเวลา 20 นาที
4. เป่าให้แห้งด้วยก๊าซ  $\text{N}_2$

#### 3.6.2 การปลูกฟิล์มบาง a-Si:H และฟิล์มบาง $\mu\text{c-Si:H}$

ในการปลูกฟิล์มบาง a-Si:H และ  $\mu\text{c-Si:H}$  ชนิดบริสุทธิ์จะต้องใช้อุปกรณ์วางแผ่นฐาน (substrate holder) ดังที่แสดงในรูป 3.16 ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวยึดแผ่นฐานรองเอาไว้ ขั้นตอนการปลูกฟิล์มบาง a-Si:H และ  $\mu\text{c-Si:H}$  มีดังนี้

1. ลดความดันภายในระบบ multi-chamber PECVD/Sputtering และ chamber ของระบบ VHF-PECVD ให้เป็นสุญญากาศที่ความดันประมาณ  $10^{-6}$  torr และเพิ่มอุณหภูมิภายใน chamber จนกระทั่งถึงอุณหภูมิที่ต้องการ
2. นำแผ่นฐานรองที่ผ่านการล้างมาวางบน substrate holder จากนั้นนำ substrate holder ที่มีแผ่นฐานรองใส่เข้าไปใน load lock แล้วลดความดันให้เป็นสุญญากาศ ในขณะเดียวกันเพิ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิภายใน load lock ให้เท่ากับอุณหภูมิภายใน chamber ของระบบ VHF-PECVD จากนั้นรอกความดันภายใน load lock มีค่าประมาณ 100 mtorr ถึง 130 mtorr และอุณหภูมิภายใน load lock มีค่าตามที่ต้องการ

3. ใช้แขนกลนำ substrate holder จาก load lock เข้าไปใน chamber ของระบบ VHF-PECVD จากนั้นทำการปล่อยก๊าซต่างๆ เข้าไปใน chamber แล้วทำการควบคุมความดันภายใน chamber ให้ได้ตามที่ต้องการ ตั้งความถี่สนามไฟฟ้าและกำลังงานไฟฟ้าตามเงื่อนไขที่ต้องการ ดังแสดงในตารางที่ 3.3 แล้วจึงเริ่มทำการเปิด power เพื่อทำการ discharge เข้าไปยังแผ่นขั้วโลหะไฟฟ้าที่วางอยู่ภายใน chamber เพื่อกระตุ้นให้ก๊าซต่างๆ ที่อยู่ระหว่างขั้วโลหะไฟฟ้าและ substrate holder เกิดการแตกตัวเป็นพลาสมา เกิดฟิล์มเคลือบบนแผ่นฐาน
4. เมื่อปลูกฟิล์มครบตามเวลาหรือความหนาที่ต้องการ จึงทำการปิด power เพื่อหยุดการปลูกฟิล์ม จากนั้นทำการระบายก๊าซต่างๆ ที่เหลืออยู่ภายใน chamber ออกให้หมด
5. ใช้แขนกลนำ substrate holder จาก chamber ของระบบ VHF-PECVD เข้าไปใน load lock แล้วทำการปล่อยก๊าซ  $N_2$  เข้าไปใน load lock จนกระทั่งความดันของ load lock เท่ากับความดันห้อง จึงปิดก๊าซ  $N_2$  จากนั้นเปิด load lock แล้วนำ substrate holder ออก และนำชิ้นงานที่ปลูกฟิล์มเสร็จแล้วออกจาก substrate holder รูปที่ 3.17 แสดงสรุปขั้นตอนของการปลูกฟิล์มบาง a-Si:H และ  $\mu\text{-Si:H}$  ชนิดบริสุทธิ์ด้วยวิธี VHF-PECVD

### 3.7 การศึกษาเงื่อนไขการปลูกฟิล์มบาง a-Si:H และฟิล์มบาง $\mu\text{-Si:H}$

การประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์นั้น ก่อนอื่นจำเป็นต้องศึกษาเงื่อนไขการปลูกฟิล์มบาง a-Si:H และ  $\mu\text{-Si:H}$  ชนิดบริสุทธิ์ด้วยวิธี VHF-PECVD เพื่อให้ได้ฟิล์มที่มีคุณภาพดีและมีอัตราการปลูกฟิล์มสูง ด้วยเงื่อนไขที่เป็นตัวกำหนดคุณสมบัติและคุณภาพที่สำคัญของฟิล์ม a-Si:H และ  $\mu\text{-Si:H}$  ได้แก่ อุณหภูมิแผ่นฐานรอง และอัตราการไหลของก๊าซ  $H_2$  และ  $SiH_4$  เงื่อนไขที่เป็นตัวกำหนดอัตราการปลูกฟิล์ม ได้แก่ ความดันก๊าซใน chamber อัตราการไหลของก๊าซ  $H_2$  และ  $SiH_4$  และความหนาแน่นกำลังงานไฟฟ้า ซึ่งสามารถแบ่งเงื่อนไขของการศึกษาได้ดังนี้

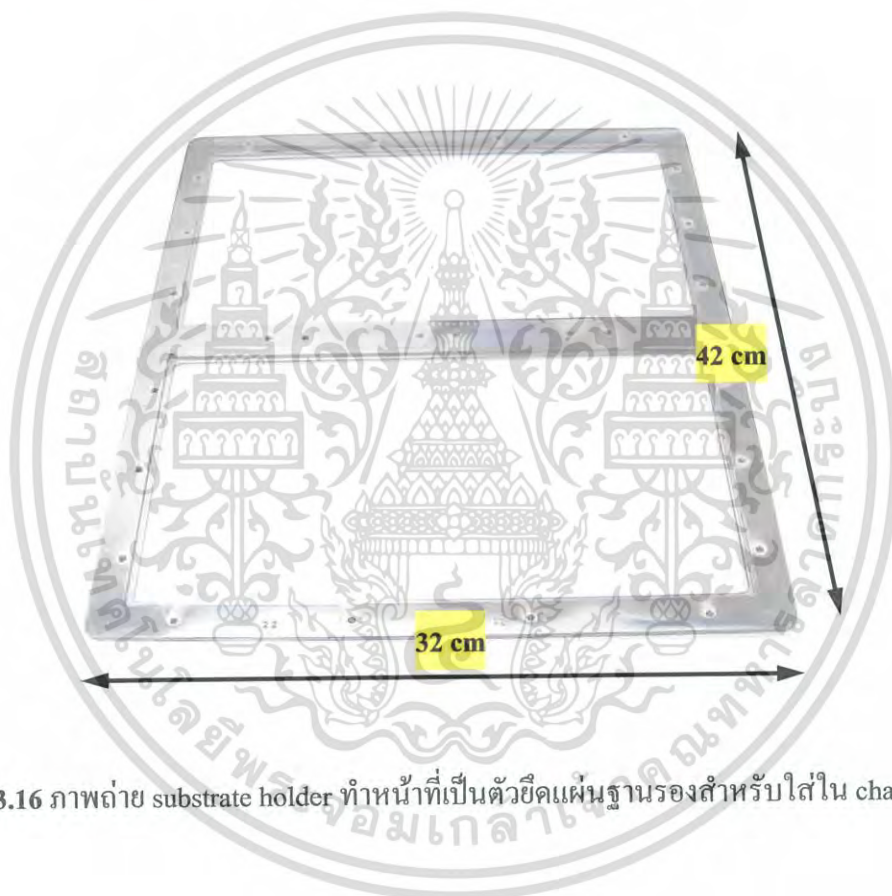
1. การศึกษาความดันก๊าซใน chamber
2. การศึกษาอุณหภูมิแผ่นฐานรอง
3. การศึกษาอัตราการไหลของก๊าซ  $H_2$  และ  $SiH_4$
4. การศึกษาความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า

เงื่อนไขต่างๆ ของการปลูกฟิล์ม a-Si:H และ  $\mu\text{-Si:H}$  ชนิดบริสุทธิ์ จะแสดงในตารางที่ 3.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

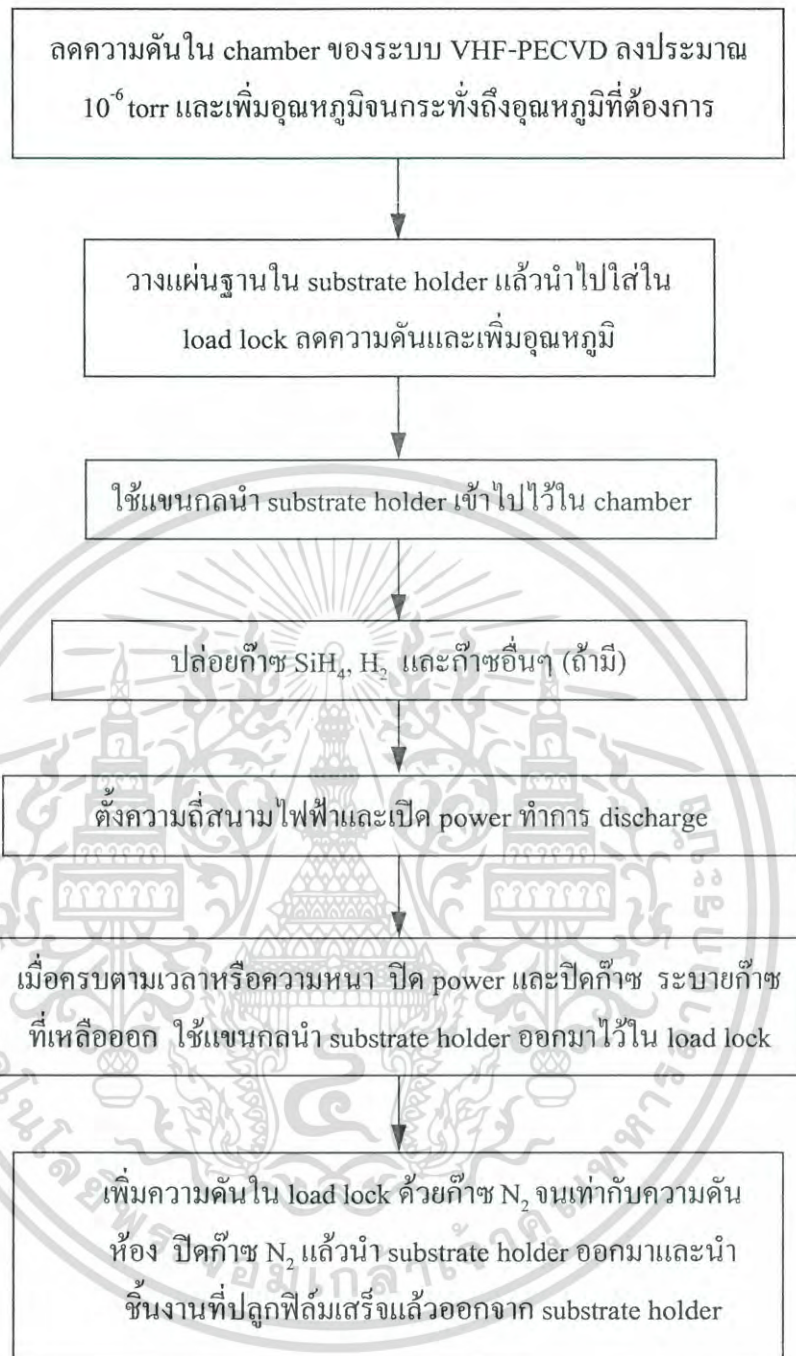
ตารางที่ 3.3 เงื่อนไขสำคัญการปลูกฟิล์มบาง a-Si:H และ  $\mu\text{c-Si:H}$  ชนิดบริสุทธิ์ด้วยวิธี VHF-PECVD

เงื่อนไขการปลูกฟิล์มชนิดบริสุทธิ์	ฟิล์มบาง a-Si:H	ฟิล์มบาง $\mu\text{c-Si:H}$
คลื่นความถี่สนามไฟฟ้า	44 MHz (VHF)	60 MHz (VHF)
ความดันก๊าซใน chamber	0.5 – 1.5 torr	0.5 – 2.0 torr
อุณหภูมิแผ่นฐานรอง	180 – 300 °C	180 – 250 °C
อัตราการไหลของก๊าซ $\text{SiH}_4$ , $\text{H}_2$	40 sccm, 40 – 160 sccm	9.5 – 22.5 sccm, 260 sccm
ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า	38 – 76 $\text{mW/cm}^2$	63 – 95 $\text{mW/cm}^2$



รูปที่ 3.16 ภาพถ่าย substrate holder ทำหน้าที่เป็นตัวยึดแผ่นฐานรองสำหรับใส่ใน chamber

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.17 สรุปขั้นตอนการปลูกฟิล์มบาง a-Si:H และ  $\mu\text{c-Si:H}$  ชนิดบริสุทธิ์ด้วยวิธี VHF-PECVD

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 4.1 บทนำ

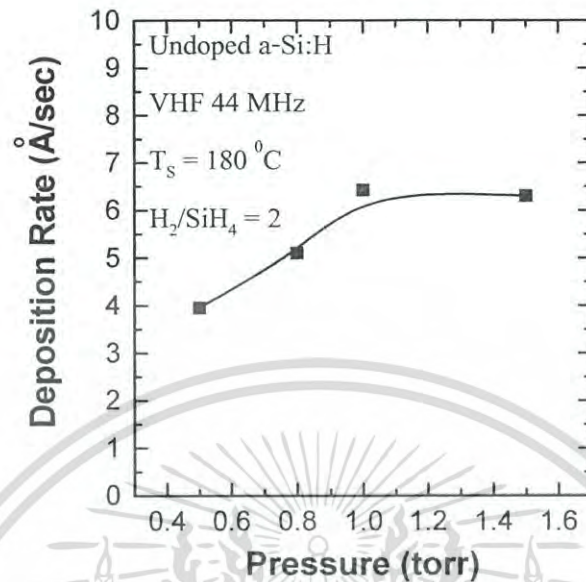
ในบทนี้เป็นการนำเสนอผลการศึกษาคูณสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบาง a-Si:H และ  $\mu\text{c-Si:H}$  ชนิดบริสุทธิ์ที่ปลูกด้วยวิธี VHF-PECVD ซึ่งฟิล์มที่ปลูกได้ในแต่ละเงื่อนไขจำเป็นต้องทำการวัดคุณสมบัติต่างๆ ได้แก่ ได้แก่ คุณสมบัติทางแสง คุณสมบัติทางไฟฟ้าและคุณสมบัติทางโครงสร้าง เพื่อนำไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด thin film ที่มีชั้นผลิตพาหะเป็นวัสดุ a-Si:H และ  $\mu\text{c-Si:H}$  ต่อไป

#### 4.2 ผลการศึกษาความดันก๊าซที่มีต่อคุณสมบัติของ a-Si:H

ในเบื้องต้นได้ทำการปลูกฟิล์มบาง a-Si:H ด้วยวิธี VHF-PECVD โดยทำการเปลี่ยนความดันก๊าซใน chamber จาก 0.5 torr ถึง 1.5 torr ซึ่งฟิล์มที่ได้จากการสร้างจะต้องมีอัตราการปลูกฟิล์ม (deposition rate) สูงและมีความสม่ำเสมอ (uniformity) ทุกบริเวณบนแผ่นฐานรอง ดังแสดงเงื่อนไขการปลูกฟิล์มในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 เงื่อนไขการปลูกฟิล์ม a-Si:H ชนิดบริสุทธิ์ด้วยวิธี VHF-PECVD เพื่อศึกษาความดันก๊าซใน chamber ที่มีต่อคุณสมบัติของ a-Si:H

เงื่อนไขการปลูกฟิล์มชนิดบริสุทธิ์	ฟิล์มบาง a-Si:H
คลื่นความถี่สนามไฟฟ้า	44 MHz (VHF)
ความดันก๊าซใน chamber	0.5 torr – 1.5 torr
อุณหภูมิแผ่นฐานรอง	180 °C
อัตราการไหลของก๊าซ $\text{SiH}_4$ , $\text{H}_2$	40 sccm, 80 sccm
$\text{H}_2$ dilution = $\text{H}_2/\text{SiH}_4$	2
ความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า	50 mW/cm <sup>2</sup>



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการปลูกฟิล์ม a-Si:H และความดันก๊าซใน chamber ค่าต่างๆ ที่ปลูกด้วยคลื่นความถี่สนามไฟฟ้า 44 MHz

จากรูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการปลูกฟิล์ม a-Si:H และความดันก๊าซใน chamber ค่าต่างๆ ที่ปลูกด้วยคลื่นความถี่สนามไฟฟ้า 44 MHz สำหรับกระดุนพลาสมา พบว่า เมื่อความดันก๊าซเพิ่มขึ้นจาก 0.5 torr ถึง 1.0 torr อัตราการปลูกฟิล์มของ a-Si:H เพิ่มขึ้นจาก 3.90 Å/sec เป็น 6.43 Å/sec และอัตราการปลูกฟิล์มของ a-Si:H จะลดลงจาก 6.43 Å/sec เป็น 6.20 Å/sec เมื่อความดันก๊าซเพิ่มสูงยิ่งขึ้นต่อไปอีก เนื่องจากความดันก๊าซที่เพิ่มขึ้น (0.5 torr ถึง 1.0 torr) ในขณะที่อัตราการไหลของก๊าซต่างๆ คงที่จะส่งผลให้ความหนาแน่นของโมเลกุลก๊าซเพิ่มขึ้น โมเลกุลก๊าซจะอยู่ใน chamber นานขึ้น ทำให้โอกาสที่ก๊าซไฮโดรเจนจะถูกแยกสลายเพิ่มขึ้น ดังนั้นอัตราการปลูกฟิล์มจึงเพิ่มขึ้น และพบว่า เมื่อความดันก๊าซเพิ่มสูงยิ่งขึ้นต่อไปอีก (มากกว่า 1.0 torr) ความหนาแน่นโมเลกุลก๊าซก็จะยิ่งเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ระยะทางเฉลี่ยปลดการชนของอิเล็กตรอนมีค่าลดลง เมื่อระยะทางเฉลี่ยปลดการชนของอิเล็กตรอนลดลง จะมีผลทำให้พลังงานหรืออุณหภูมิของอิเล็กตรอนมีค่าลดลง เมื่อพลังงานของอิเล็กตรอนลดลง จะทำให้ประสิทธิภาพการแยกสลายก๊าซไฮโดรเจนลดลง อัตราการปลูกฟิล์มของ a-Si:H จึงลดลง และจากรูปนี้อัตราการปลูกฟิล์มของ a-Si:H มีค่าสูงสุดที่ความดันก๊าซประมาณ 1.0 torr



(a) ความดันก๊าซใน chamber 0.5 torr

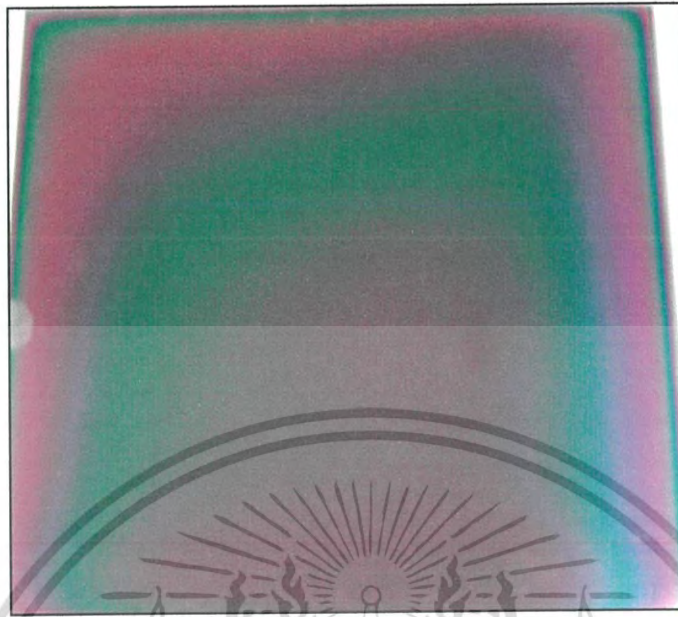


(b) ความดันก๊าซใน chamber 0.8 torr

#### รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความสม่ำเสมอของฟิล์ม a-Si:H บนแผ่นฐานรองและความดันก๊าซ

ใน chamber ค่าต่างๆ ที่ปลูกด้วยคลื่นความถี่สนามไฟฟ้า 44 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(c) ความดันก๊าซใน chamber 1.0 torr



(d) ความดันก๊าซใน chamber 1.5 torr

**รูปที่ 4.2 (ต่อ) ความสัมพันธ์ระหว่างความสม่ำเสมอของฟิล์ม a-Si:H บนแผ่นฐานรองและความดันก๊าซใน chamber ค่าต่างๆ ที่ปลูกด้วยคลื่นความถี่สนามไฟฟ้า 44 MHz**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.2 (a) (b) (c) และ (d) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสม่ำเสมอของฟิล์ม a-Si:H บนแผ่นฐานรองและความดันก๊าซใน chamber ที่ 0.5 torr, 0.8 torr, 1.1 torr และ 1.5 torr ตามลำดับ รูปที่ 4.2 (a) (c) และ (d) พบว่าที่บริเวณขอบและบางบริเวณบนแผ่นฐานรองจะมีฟิล์มเคลือบติดอยู่น้อยซึ่งมีลักษณะเป็นริ้ว สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าโดยการส่องแสงจากหลอด fluorescent ลงไปยังฟิล์มในแนวตั้งฉาก เมื่อนำฟิล์มไปตรวจวัดความหนาที่บริเวณขอบของแผ่นฐานรองจะมีความหนาของฟิล์มน้อยกว่าที่บริเวณกลางแผ่นฐานรองถึง 1/2 เท่า สาเหตุที่ฟิล์มไม่สม่ำเสมอในบางบริเวณของแผ่นฐานรองนั้น เนื่องจากเมื่อใช้เงื่อนไขคลื่นความถี่สนามไฟฟ้าที่สูงและความดันก๊าซใน chamber ที่ต่ำหรือสูงมากในการปลูกฟิล์ม จะทำให้พลาสมาแพร่กระจายได้น้อย ระหว่างแผ่นขั้วสัญญาณไฟฟ้าและแผ่นฐานรอง [13,41] ทั้งนี้การแพร่กระจายของพลาสมาจะขึ้นอยู่กับขนาดของแผ่นขั้วสัญญาณไฟฟ้าและขนาดของแผ่นฐานรอง และจากรูปที่ 4.2 (b) พบว่าฟิล์มที่เคลือบบนแผ่นฐานรองมีความสม่ำเสมอที่สุด ซึ่งเป็นการปลูกฟิล์มที่ความดันก๊าซใน chamber เท่ากับ 0.8 torr

#### 4.3 ผลการศึกษาอุณหภูมิแผ่นฐานรองที่มีต่อคุณสมบัติของ a-Si:H

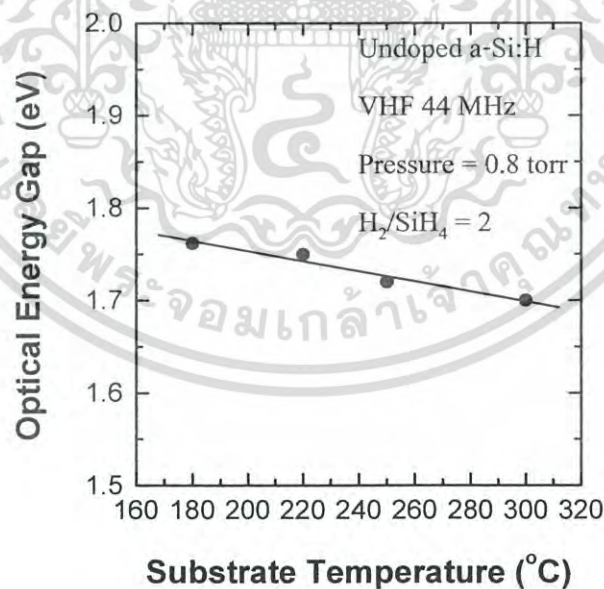
อุณหภูมิแผ่นฐานรองเป็นเงื่อนไขที่ส่งผลต่อคุณสมบัติและคุณภาพที่สำคัญของฟิล์ม a-Si:H เพื่อให้ได้ฟิล์มที่มีค่าสภาพนำไฟฟ้าที่ดีในขณะที่อัตราการปลูกฟิล์มสูง โดยได้ทำการเปลี่ยนอุณหภูมิแผ่นฐานรองจาก 180 °C ถึง 300 °C ดังแสดงเงื่อนไขการปลูกฟิล์มในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 เงื่อนไขการปลูกฟิล์ม a-Si:H ชนิดบริสุทธิ์ด้วยวิธี VHF-PECVD เพื่อศึกษาอุณหภูมิแผ่นฐานรองที่มีต่อคุณสมบัติของ a-Si:H

เงื่อนไขการปลูกฟิล์มชนิดบริสุทธิ์	ฟิล์มบาง a-Si:H
คลื่นความถี่สนามไฟฟ้า	44 MHz (VHF)
ความดันก๊าซใน chamber	0.8 torr
อุณหภูมิแผ่นฐานรอง	180 °C – 300 °C
อัตราการไหลของก๊าซ SiH <sub>4</sub> , H <sub>2</sub>	40 sccm, 80 sccm
H <sub>2</sub> dilution = H <sub>2</sub> /SiH <sub>4</sub>	2
ความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า	50 mW/cm <sup>2</sup>

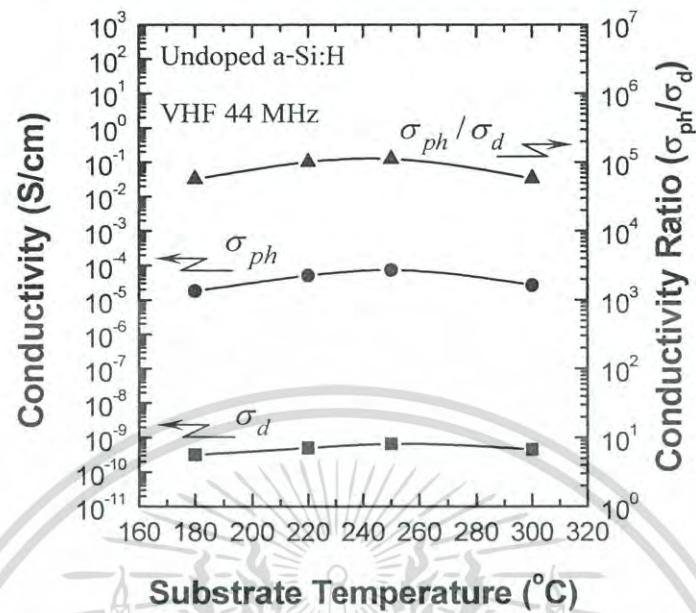


รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการปลูกฟิล์มของ a-Si:H และอุณหภูมิแผ่นฐานรองค่าต่างๆ ที่ปลูกด้วยคลื่นความถี่สนามไฟฟ้า 44 MHz.

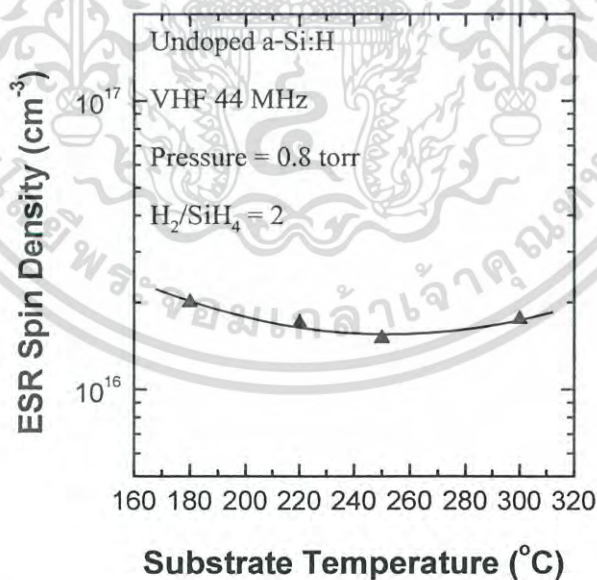


รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างพลังงานของ a-Si:H และอุณหภูมิแผ่นฐานรองค่าต่างๆ ที่ปลูกด้วยคลื่นความถี่สนามไฟฟ้า 44 MHz.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้าของ a-Si:H และอุณหภูมิแผ่นฐานรองค่าต่างๆ ที่ปลูกด้วยคลื่นความถี่สนามไฟฟ้า 44 MHz



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสปิน (แชนชาด) ของ a-Si:H และอุณหภูมิแผ่นฐานรองค่าต่างๆ ที่ปลูกด้วยคลื่นความถี่สนามไฟฟ้า 44 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการปลูกฟิล์ม a-Si:H และอุณหภูมิแผ่นฐานรองค่าต่างๆ พบว่า เมื่ออุณหภูมิแผ่นฐานรองเพิ่มขึ้นจาก 180 °C เป็น 300 °C อัตราการปลูกฟิล์ม a-Si:H เพิ่มขึ้นจาก 5.10 Å/sec เป็น 6.30 Å/sec เนื่องจากพลังงานความร้อนจะกระตุ้นให้พันธะระหว่างซิลิคอนและไฮโดรเจนเกิดการสั่น เมื่ออุณหภูมิแผ่นฐานรองเพิ่มสูงขึ้น พลังงานความร้อนที่มากขึ้นจะส่งผลให้อะตอมไฮโดรเจนที่อยู่ในฟิล์มหลุดออกมาเพิ่มขึ้น ทำให้ฟิล์มมีอะตอมไฮโดรเจนลดลง [60] การลดลงของอะตอมไฮโดรเจนดังกล่าวนี้จะช่วยให้ฟิล์มจับกับ film precursor ได้ดีขึ้น [13,61] ดังนั้นอัตราการปลูกฟิล์ม a-Si:H จึงเพิ่มขึ้น

จากรูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างพลังงานของ a-Si:H และอุณหภูมิแผ่นฐานรองค่าต่างๆ พบว่า เมื่ออุณหภูมิแผ่นฐานรองเพิ่มขึ้นจาก 180 °C เป็น 300 °C ค่าช่องว่างพลังงานของ a-Si:H ลดลงจาก 1.76 eV เป็น 1.70 eV เนื่องจากการลดลงของอะตอมไฮโดรเจนในฟิล์ม a-Si:H ซึ่งถูกกระตุ้นโดยพลังงานความร้อนที่เพิ่มขึ้น ทำให้อะตอมไฮโดรเจนหลุดออกจากฟิล์ม a-Si:H เพิ่มขึ้น จำนวนอะตอมไฮโดรเจนในฟิล์ม a-Si:H ลดลง [60] ซึ่งอะตอมของไฮโดรเจนจะสร้างพันธะกับซิลิคอน ช่วยลดจำนวนแขนขาในฟิล์ม a-Si:H และส่งผลให้จำนวนจุดบกพร่องภายในช่องว่างพลังงานของ a-Si:H ลดลงได้ จากการที่อะตอมของไฮโดรเจนลดลงนี้ จะส่งผลให้จำนวนจุดบกพร่องภายในช่องว่างพลังงานของ a-Si:H เพิ่มสูงขึ้น โดยมีผลทำให้ช่องว่างพลังงานของ a-Si:H มีค่าลดลง

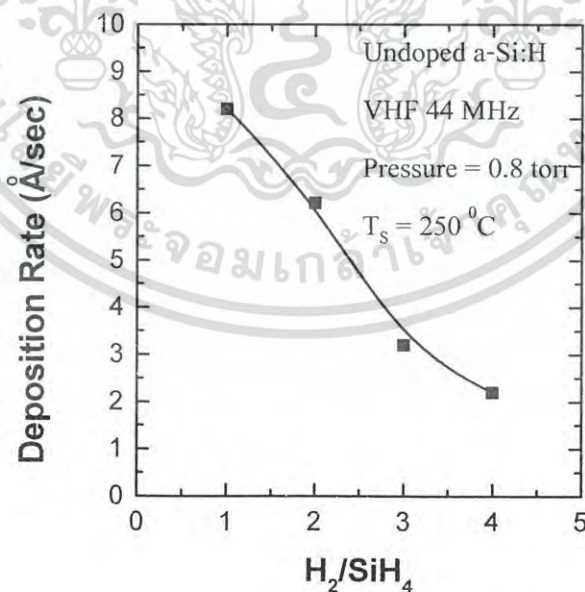
จากรูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้าของ a-Si:H และอุณหภูมิแผ่นฐานรองค่าต่างๆ พบว่า เมื่ออุณหภูมิแผ่นฐานรองเพิ่มจาก 180 °C เป็น 250 °C ค่าสภาพนำไฟฟ้าด้วยแสง ( $\sigma_{ph}$ ) และค่าอัตราส่วนของสภาพนำไฟฟ้าด้วยแสงต่อสภาพนำไฟฟ้ามืด ( $\sigma_{ph}/\sigma_d$ ) ของ a-Si:H เพิ่มขึ้น เนื่องจากที่อุณหภูมิ 180 °C อะตอมไฮโดรเจนที่อยู่ในฟิล์ม a-Si:H มีจำนวนมากกว่าที่อุณหภูมิ 250 °C จึงส่งผลให้เครือข่ายของซิลิคอนเกิดการบิดตัวที่สูงกว่า ซึ่งทำให้ค่า  $\sigma_{ph}$  และค่า  $\sigma_{ph}/\sigma_d$  ต่ำกว่าที่อุณหภูมิ 250 °C และพบว่า เมื่ออุณหภูมิแผ่นฐานรองสูงเกินกว่า 250 °C ค่า  $\sigma_{ph}$  และค่า  $\sigma_{ph}/\sigma_d$  ลดลง เนื่องจากอุณหภูมิแผ่นฐานรองที่เพิ่มสูงขึ้นจะทำให้อะตอมไฮโดรเจนหลุดออกจากฟิล์ม a-Si:H ได้มากยิ่งขึ้น ซึ่งส่งผลให้ฟิล์มมีแขนขาเกิดขึ้นจำนวนมาก ผลของการเกิดแขนขาจำนวนมากนี้ จะทำให้ค่า  $\sigma_{ph}$  และค่า  $\sigma_{ph}/\sigma_d$  ลดลง ซึ่งการวัดค่า  $\sigma_{ph}$  ของฟิล์ม a-Si:H จะมีความสอดคล้องกับผลการวัดความหนาแน่นของแขนขาที่แสดงในรูปที่ 4.6

#### 4.4 ผลการศึกษาอัตราส่วนการไหลของก๊าซไฮโดรเจนที่มีต่อคุณสมบัติของ a-Si:H

ในการศึกษาอัตราส่วนการไหลของก๊าซไฮโดรเจนที่มีต่อฟิล์ม a-Si:H เป็นเงื่อนไขที่ส่งผลต่อคุณสมบัติและคุณภาพของฟิล์ม ซึ่งรวมไปถึงอัตราการปลูกฟิล์ม a-Si:H โดยในหัวข้อนี้ได้กำหนดอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนคงที่ไว้ที่ 40 sccm และทำการเพิ่มอัตราส่วนการไหลของก๊าซไฮโดรเจนจาก 40 sccm ถึง 160 sccm หรือเรียกว่าอัตราส่วนการไหลของก๊าซ  $H_2/SiH_4$  จาก 1 ถึง 4 ดังในตารางที่ 4.3

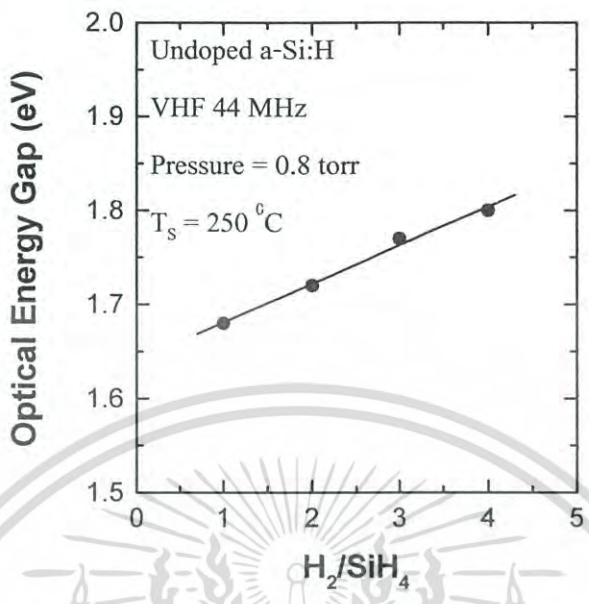
ตารางที่ 4.3 เงื่อนไขการปลูกฟิล์ม a-Si:H ชนิดบริสุทธิด้วยวิธี VHF-PECVD เพื่อศึกษาอัตราส่วนการไหลของก๊าซไฮโดรเจนที่มีต่อคุณสมบัติของ a-Si:H

เงื่อนไขการปลูกฟิล์มชนิดบริสุทธิ	ฟิล์มบาง a-Si:H
คลื่นความถี่สนามไฟฟ้า	44 MHz (VHF)
ความดันก๊าซใน chamber	0.8 torr
อุณหภูมิแผ่นฐานรอง	250 °C
อัตราการไหลของก๊าซ $SiH_4, H_2$	40 sccm, 40 sccm – 160 sccm
$H_2$ dilution = $H_2/SiH_4$	1 – 4
ความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า	50 mW/cm <sup>2</sup>

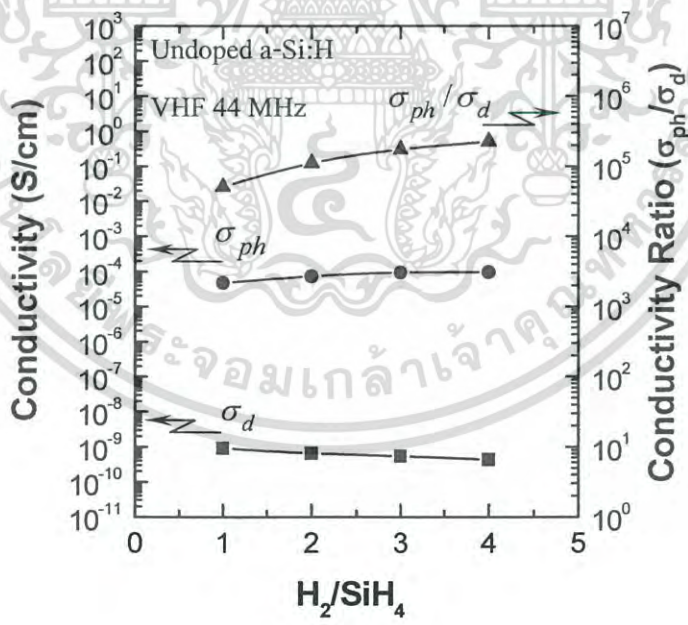


รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการปลูกฟิล์มของ a-Si:H และอัตราส่วนการไหลของก๊าซ  $H_2/SiH_4$  ค่าต่างๆ ที่ปลูกด้วยคลื่นความถี่สนามไฟฟ้า 44 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

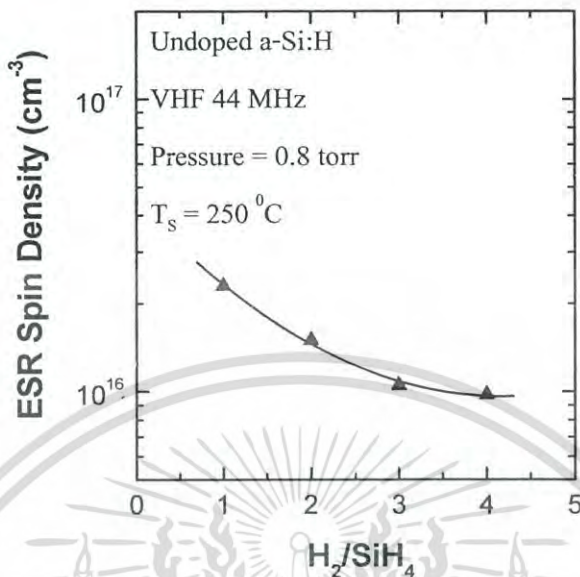


รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างพลังงานของ a-Si:H และอัตราส่วนการไหลของก๊าซ  $H_2/SiH_4$  ค่าต่างๆ ที่ปลูกด้วยคลื่นความถี่สนามไฟฟ้า 44 MHz



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้าของ a-Si:H และอัตราส่วนการไหลของก๊าซ  $H_2/SiH_4$  ค่าต่างๆ ที่ปลูกด้วยคลื่นความถี่สนามไฟฟ้า 44 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสปิน (แกนขาด) ของ a-Si:H และอัตราส่วนการไหลของก๊าซ  $H_2/SiH_4$  ค่าต่างๆ ที่ปลูกด้วยคลื่นความถี่สนามไฟฟ้า 44 MHz

จากรูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการปลูกฟิล์ม a-Si:H และอัตราส่วนการไหลของก๊าซ  $H_2/SiH_4$  ค่าต่างๆ พบว่า เมื่ออัตราส่วนการไหลของก๊าซ  $H_2/SiH_4$  เพิ่มสูงขึ้นจาก 1 เป็น 4 อัตราการปลูกฟิล์ม a-Si:H ลดลงจาก 8.20 Å/sec เป็น 2.20 Å/sec เนื่องจากเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจน ในขณะที่ความดันของก๊าซใน chamber และอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจน (พลังงานและอุณหภูมิของอิเล็กตรอนลงที่) ส่งผลทำให้ความหนาแน่นของก๊าซไฮโดรเจนใน chamber ลดลง ซึ่งก๊าซไฮโดรเจนที่ถูกแยกสลายจะมีปริมาณลดลง ดังนั้นอัตราการปลูกฟิล์ม a-Si:H จึงลดลง

จากรูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างพลังงานของ a-Si:H และอัตราส่วนการไหลของก๊าซ  $H_2/SiH_4$  ค่าต่างๆ พบว่า เมื่ออัตราส่วนการไหลของก๊าซ  $H_2/SiH_4$  เพิ่มสูงขึ้นจาก 1 เป็น 4 ค่าช่องว่างพลังงานของ a-Si:H เพิ่มขึ้นจาก 1.68 eV เป็น 1.80 eV เนื่องจากอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนที่เพิ่มขึ้น จะทำให้ฟิล์มมีจำนวนอะตอมไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น ซึ่งอะตอมของไฮโดรเจนจะสร้างพันธะกับซิลิคอน ช่วยลดจำนวนแกนขาดในฟิล์ม a-Si:H และจำนวนจุดบกพร่องภายในช่องว่างพลังงานของ a-Si:H ลง และทำให้ช่องว่างพลังงานของ a-Si:H มีค่าเพิ่มสูงขึ้น

จากรูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้าของ a-Si:H และอัตราส่วนการไหลของก๊าซ  $H_2/SiH_4$  ค่าต่างๆ พบว่า เมื่ออัตราส่วนการไหลของก๊าซ  $H_2/SiH_4$  เพิ่มสูงขึ้นจาก 1 เป็น 4 ค่า  $\sigma_{ph}$  และค่า  $\sigma_{ph}/\sigma_d$  ของ a-Si:H เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอะตอมไฮโดรเจนในฟิล์ม a-Si:H ซึ่งสามารถช่วยลดจำนวนแขนขาดในฟิล์ม a-Si:H ลง ส่งผลให้จำนวนจุดบกพร่องภายในช่องว่างพลังงานของ a-Si:H ลดลงด้วย [18] ดังนั้นค่า  $\sigma_{ph}$  และค่า  $\sigma_{ph}/\sigma_d$  ของ a-Si:H จึงมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการวัดความหนาแน่นของแขนขาดที่ลดลงในรูปที่ 4.10

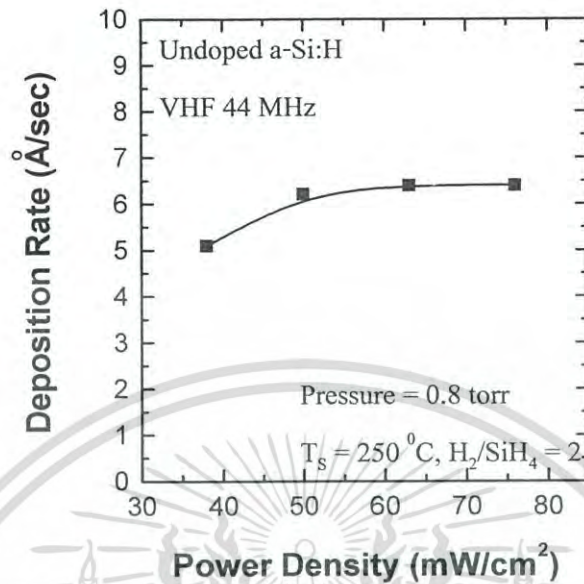
#### 4.5 ผลการศึกษาความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าที่มีต่อคุณสมบัติของ a-Si:H

อิทธิพลของความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า เป็นเงื่อนไขที่ส่งผลต่ออัตราการปลูกฟิล์ม a-Si:H เพื่อให้ได้ฟิล์มที่มีอัตราการปลูกฟิล์มสูงในขณะที่ค่าสภาพนำไฟฟ้าสูงด้วย โดยได้ทำการเปลี่ยนความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าจาก  $38 \text{ mW/cm}^2$  ถึง  $76 \text{ mW/cm}^2$  ดังแสดงเงื่อนไขการปลูกฟิล์มในตารางที่ 4.4

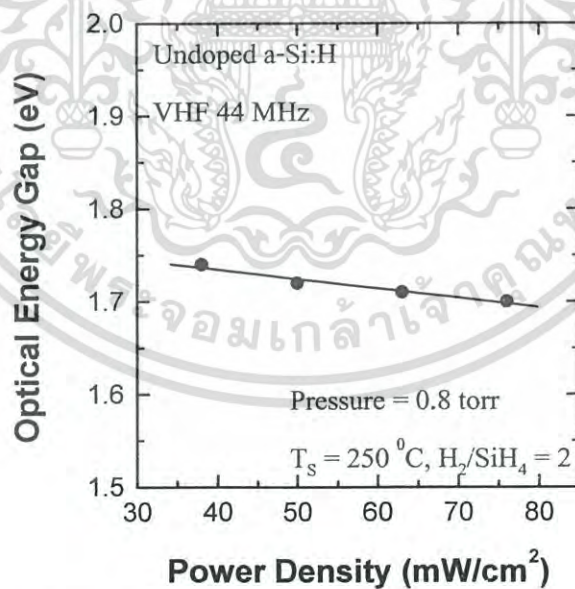
ตารางที่ 4.4 เงื่อนไขการปลูกฟิล์ม a-Si:H ชนิดบริสุทธิ์ด้วยวิธี VHF-PECVD เพื่อศึกษาความหนาแน่นกำลังงานไฟฟ้าที่มีต่อคุณสมบัติของ a-Si:H

เงื่อนไขการปลูกฟิล์มชนิดบริสุทธิ์	ฟิล์มบาง a-Si:H
คลื่นความถี่สนามไฟฟ้า	44 MHz (VHF)
ความดันก๊าซใน chamber	0.8 torr
อุณหภูมิแผ่นฐานรอง	$250^\circ\text{C}$
อัตราการไหลของก๊าซ $SiH_4, H_2$	40 sccm, 80 sccm
$H_2$ dilution = $H_2/SiH_4$	2
ความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า	$38 \text{ mW/cm}^2 - 76 \text{ mW/cm}^2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

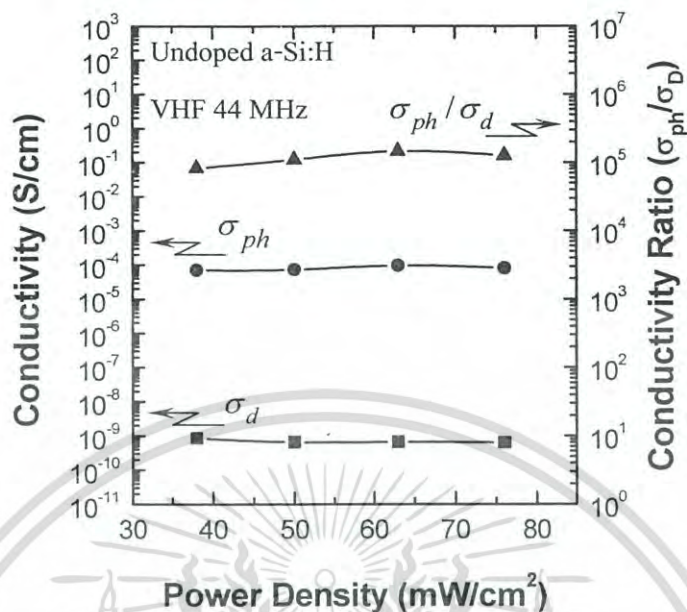


รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการปลูกฟิล์มของ a-Si:H และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าค่าต่างๆ ที่ปลูกด้วยคลื่นความถี่สนามไฟฟ้า 44 MHz

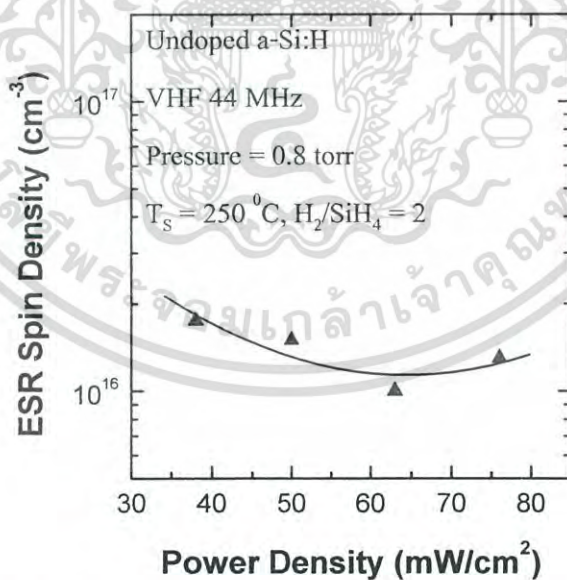


รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างพลังงานของ a-Si:H และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าค่าต่างๆ ที่ปลูกด้วยคลื่นความถี่สนามไฟฟ้า 44 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้าของ a-Si:H และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าค่าต่างๆ ที่ปลูกด้วยคลื่นความถี่สนามไฟฟ้า 44 MHz



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นสปิน (แกนขาด) ของ a-Si:H และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าค่าต่างๆ ที่ปลูกด้วยคลื่นความถี่สนามไฟฟ้า 44 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการปลูกฟิล์ม a-Si:H และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าค่าต่างๆ พบว่า เมื่อความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าเพิ่มจาก  $38 \text{ mW/cm}^2$  เป็น  $63 \text{ mW/cm}^2$  อัตราการปลูกฟิล์ม a-Si:H เพิ่มขึ้นจาก  $5.10 \text{ \AA/sec}$  เป็น  $6.40 \text{ \AA/sec}$  เนื่องจากความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าที่เพิ่ม จะส่งผลต่อกระแสที่ไหลในพลาสมาให้เพิ่มขึ้น (อิเล็กตรอนและไอออนในพลาสมา) โดยความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระในพลาสมาและความหนาแน่นของไอออนในพลาสมาเพิ่มขึ้น ซึ่งจากการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระในพลาสมา จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการแยกสลายก๊าซไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น และจากการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นของไอออนในพลาสมา จะส่งผลให้อะตอมไฮโดรเจนถูกกระแทกหลุดออกจากฟิล์มเพิ่มมากขึ้น ฟิล์ม a-Si:H มีจำนวนอะตอมไฮโดรเจนลดลง ทำให้ฟิล์มจับกับฟิล์ม precursor ดีขึ้น จึงมีอัตราการปลูกฟิล์มเพิ่มสูงขึ้น และพบว่า เมื่อความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าเพิ่มสูงมากกว่า  $63 \text{ mW/cm}^2$  อัตราการปลูกฟิล์มจะคงที่  $6.40 \text{ \AA/sec}$  เนื่องจากเมื่อความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น จนถึงค่าๆ หนึ่งจะทำให้ก๊าซไฮโดรเจนถูกแยกสลายจนหมด ซึ่งทำให้อัตราการปลูกฟิล์มคงที่

จากรูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างพลังงานของ a-Si:H และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าค่าต่างๆ พบว่า เมื่อความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าเพิ่มจาก  $38 \text{ mW/cm}^2$  เป็น  $76 \text{ mW/cm}^2$  ค่าช่องว่างพลังงานของ a-Si:H ลดลงจาก  $1.74 \text{ eV}$  เป็น  $1.70 \text{ eV}$  เนื่องจากความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มสูงขึ้น จะทำให้ความหนาแน่นของไอออนในพลาสมาเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้อะตอมไฮโดรเจนถูกกระแทกหลุดออกจากฟิล์มเพิ่มมากขึ้น ฟิล์ม a-Si:H มีจำนวนอะตอมไฮโดรเจนลดลง และจำนวนจุดบกพร่องภายในช่องว่างพลังงานของ a-Si:H เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งช่องว่างพลังงานของ a-Si:H จะมีค่าลดลง

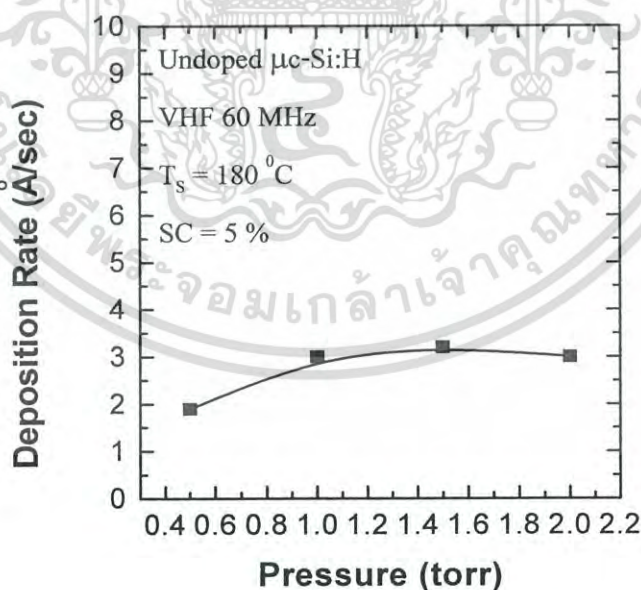
จากรูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้าของ a-Si:H และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าค่าต่างๆ พบว่า เมื่อความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าเพิ่มจาก  $38 \text{ mW/cm}^2$  เป็น  $63 \text{ mW/cm}^2$  ค่า  $\sigma_{ph}$  และค่า  $\sigma_{ph}/\sigma_d$  ของ a-Si:H เพิ่มขึ้น เนื่องจากความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าช่วงนี้ ฟิล์ม a-Si:H มีจำนวนอะตอมไฮโดรเจนลดลง ทำให้จำนวนของพันธะระหว่างซิลิคอนและไฮโดรเจนแบบ SiH มีมากขึ้น ซึ่งฟิล์มมีจำนวนของซิลิคอนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่า  $\sigma_{ph}$  และค่า  $\sigma_{ph}/\sigma_d$  เพิ่มขึ้น และพบว่า เมื่อความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าเพิ่มสูงมากกว่า  $63 \text{ mW/cm}^2$  ค่า  $\sigma_{ph}$  และค่า  $\sigma_{ph}/\sigma_d$  ลดลง เนื่องจากความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มสูงมากยิ่งขึ้น จะทำให้พลังงานของไอออนเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งส่งผลให้ ion bombardment เพิ่มขึ้นด้วย และทำให้เกิดแขนขาดขึ้นในฟิล์มได้ง่าย ส่งผลให้จำนวนจุดบกพร่องภายในช่องว่างพลังงานของฟิล์ม a-Si:H เพิ่มสูงขึ้น [41-43] ค่า  $\sigma_{ph}$  และค่า  $\sigma_{ph}/\sigma_d$  จึงลดลง ซึ่งการวัดค่า  $\sigma_{ph}/\sigma_d$  จะมีความสอดคล้องกับผลการวัดความหนาแน่นของแขนขาดในรูปที่ 4.14

#### 4.6 ผลการศึกษาความดันก๊าซที่มีต่อคุณสมบัติของ $\mu\text{c-Si:H}$

ในเบื้องต้นได้ทำการปลูกฟิล์มบาง  $\mu\text{c-Si:H}$  ด้วยวิธี VHF-PECVD โดยทำการเปลี่ยนความดันก๊าซใน chamber จาก 0.5 torr ถึง 2.0 torr ซึ่งฟิล์มที่ได้จากการสร้างจะต้องมีอัตราการปลูกฟิล์มสูงและมีความสม่ำเสมอ (uniformity) ทุกบริเวณบนแผ่นฐานรอง ดังแสดงเงื่อนไขการปลูกฟิล์มในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 เงื่อนไขการปลูกฟิล์ม  $\mu\text{c-Si:H}$  ชนิดบริสุทธิ์ด้วยวิธี VHF-PECVD เพื่อศึกษาความดันก๊าซใน chamber ที่มีต่อคุณสมบัติของ  $\mu\text{c-Si:H}$

เงื่อนไขการปลูกฟิล์มชนิดบริสุทธิ์	ฟิล์มบาง $\mu\text{c-Si:H}$
คลื่นความถี่สนามไฟฟ้า	60 MHz (VHF)
ความดันก๊าซใน chamber	0.5 torr – 2.0 torr
อุณหภูมิแผ่นฐานรอง	180 °C
อัตราการไหลของก๊าซ $\text{SiH}_4$ , $\text{H}_2$	13.5 sccm, 260 sccm
Silane Concentration (SC %) = $(\text{SiH}_4 / (\text{SiH}_4 + \text{H}_2)) \times 100 \%$	5.0 %
ความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า	76 mW/cm <sup>2</sup>



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการปลูกฟิล์ม  $\mu\text{c-Si:H}$  และความดันก๊าซใน chamber ค่าต่างๆ ที่ปลูกด้วยคลื่นความถี่สนามไฟฟ้า 60 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการปลูกฟิล์ม  $\mu\text{c-Si:H}$  และความดันก๊าซใน chamber ค่าต่างๆ ที่ปลูกด้วยคลื่นความถี่สนามไฟฟ้า 60 MHz สำหรับกระดุนพลาสมาพบว่า เมื่อความดันก๊าซเพิ่มขึ้นจาก 0.5 torr ถึง 1.5 torr อัตราการปลูกฟิล์มของ  $\mu\text{c-Si:H}$  เพิ่มขึ้นจาก 1.90 Å/sec เป็น 3.20 Å/sec และอัตราการปลูกฟิล์มของ  $\mu\text{c-Si:H}$  จะลดลงจาก 3.20 Å/sec เป็น 3.00 Å/sec เมื่อความดันก๊าซเพิ่มสูงยิ่งขึ้นต่อไปอีก เนื่องจากความดันก๊าซที่เพิ่มขึ้น (0.5 torr ถึง 1.5 torr) ในขณะที่อัตราการไหลของก๊าซต่างๆ คงที่จะส่งผลให้ความหนาแน่นของโมเลกุลก๊าซเพิ่มขึ้น โมเลกุลก๊าซจะอยู่ใน chamber นานขึ้น ทำให้โอกาสที่ก๊าซไฮโดรเจนจะถูกแยกสลายเพิ่มขึ้น ดังนั้น อัตราการปลูกฟิล์มจึงเพิ่มขึ้น และพบว่า เมื่อความดันก๊าซเพิ่มสูงยิ่งขึ้นต่อไปอีก (มากกว่า 1.5 torr) ความหนาแน่นโมเลกุลก๊าซก็ยิ่งเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ระยะทางเฉลี่ยปลอดการชนของอิเล็กตรอนมีค่าลดลง เมื่อระยะทางเฉลี่ยปลอดการชนของอิเล็กตรอนลดลง จะมีผลทำให้พลังงานหรืออุณหภูมิของอิเล็กตรอนมีค่าลดลง เมื่อพลังงานของอิเล็กตรอนลดลง จะทำให้ประสิทธิภาพการแยกสลายก๊าซไฮโดรเจนลดลง อัตราการปลูกฟิล์มของ  $\mu\text{c-Si:H}$  จึงลดลง และจากรูปนี้ อัตราการปลูกฟิล์มของ  $\mu\text{c-Si:H}$  มีค่าสูงสุดที่ความดันก๊าซประมาณ 1.5 torr



(a) ความดันก๊าซใน chamber 0.5 torr

**รูปที่ 4.16** ความสัมพันธ์ระหว่างความสม่ำเสมอของฟิล์ม  $\mu\text{c-Si:H}$  บนแผ่นฐานรองและความดันก๊าซใน chamber ค่าต่างๆ ที่ปลูกด้วยคลื่นความถี่สนามไฟฟ้า 60 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



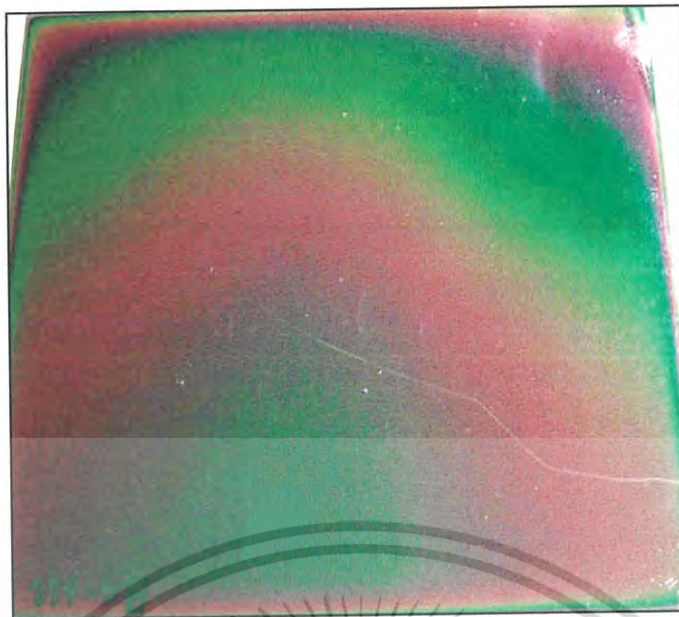
(b) ความดันก๊าซใน chamber 1.0 torr



(c) ความดันก๊าซใน chamber 1.5 torr

**รูปที่ 4.16 (ต่อ)** ความสัมพันธ์ระหว่างความสม่ำเสมอของฟิล์ม  $\mu\text{c-Si:H}$  บนแผ่นฐานรองและความดันก๊าซใน chamber ค่าต่างๆ ที่ปลูกด้วยคลื่นความถี่สนามไฟฟ้า 60 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(d) ความดันก๊าซใน chamber 2.0 torr

รูปที่ 4.16 (ต่อ) ความสัมพันธ์ระหว่างความสม่ำเสมอของฟิล์ม  $\mu\text{c-Si:H}$  บนแผ่นฐานรองและความดันก๊าซใน chamber ค่าต่างๆ ที่ปลูกด้วยคลื่นความถี่สนามไฟฟ้า 60 MHz

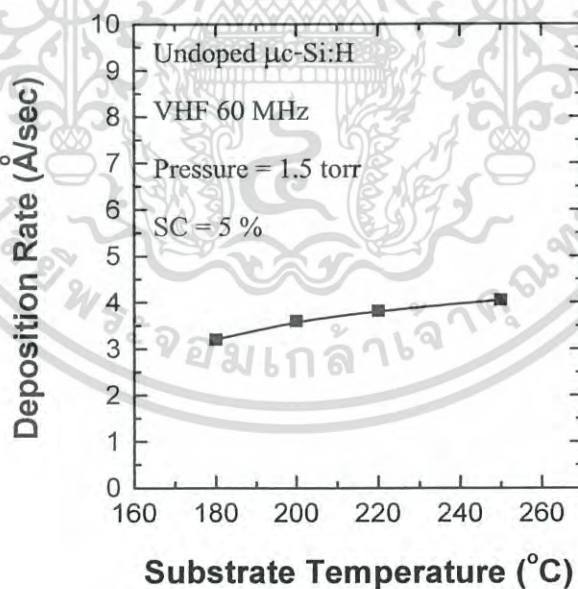
จากรูปที่ 4.16 (a) (b) (c) และ (d) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสม่ำเสมอของฟิล์ม  $\mu\text{c-Si:H}$  บนแผ่นฐานรองและความดันก๊าซใน chamber ที่ 0.5 torr, 1.0 torr, 1.5 torr และ 2.0 torr ตามลำดับรูปที่ 4.16 (a) (b) และ (d) พบว่าที่บริเวณขอบและบางบริเวณบนแผ่นฐานรองจะมีฟิล์มเคลือบติดอยู่น้อยซึ่งมีลักษณะเป็นริ้ว สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าโดยการส่องแสงจากหลอด fluorescent ลงไปยังฟิล์มในแนวตั้งฉาก เมื่อนำฟิล์มไปตรวจวัดความหนาที่บริเวณขอบของแผ่นฐานรองจะมีความหนาของฟิล์มน้อยกว่าที่บริเวณกลางแผ่นฐานรอง สาเหตุที่ฟิล์มไม่สม่ำเสมอในบางบริเวณของแผ่นฐานรองนั้น เนื่องจากเมื่อใช้เงื่อนไขความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สูงขึ้นและความดันก๊าซใน chamber ที่ต่ำหรือสูงมากในการปลูกฟิล์ม เนื่องจากเมื่อใช้เงื่อนไขความถี่สนามไฟฟ้าที่สูงและความดันก๊าซใน chamber ที่ต่ำหรือสูงมากในการปลูกฟิล์ม จะทำให้พลาสมาแพร่กระจายได้น้อย ระหว่างแผ่นขั้วสัญญาณไฟฟ้าและแผ่นฐานรอง [13,41] ส่งผลให้ฟิล์มที่เคลือบบนแผ่นฐานรองมีลักษณะเป็นริ้ว และจากรูปที่ 4.16 (c) พบว่าฟิล์มที่เคลือบบนแผ่นฐานรองมีความสม่ำเสมอที่สุด ซึ่งเป็นการปลูกฟิล์มที่ความดันก๊าซใน chamber เท่ากับ 1.5 torr

#### 4.7 ผลการศึกษาอุณหภูมิจากแผ่นฐานรองที่มีต่อคุณสมบัติของ $\mu\text{c-Si:H}$

อุณหภูมิจากแผ่นฐานรองเป็นเงื่อนไขที่ส่งผลต่อคุณสมบัติและคุณภาพที่สำคัญของฟิล์ม  $\mu\text{c-Si:H}$  เพื่อให้ได้ฟิล์มที่มีค่าสภาพนำไฟฟ้าที่ดีในขณะที่อัตราการปลูกฟิล์มสูง โดยได้ทำการเปลี่ยนอุณหภูมิจากแผ่นฐานรองจาก  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$  ถึง  $250\text{ }^{\circ}\text{C}$  ดังแสดงเงื่อนไขการปลูกฟิล์มในตารางที่ 4.6

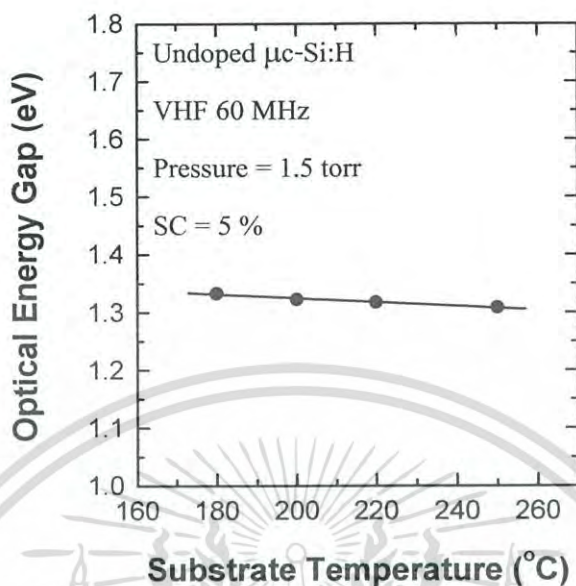
ตารางที่ 4.6 เงื่อนไขการปลูกฟิล์ม  $\mu\text{c-Si:H}$  ชนิดบริสุทธิ์ด้วยวิธี VHF-PECVD เพื่อศึกษาอุณหภูมิจากแผ่นฐานรองที่มีต่อคุณสมบัติของ  $\mu\text{c-Si:H}$

เงื่อนไขการปลูกฟิล์มชนิดบริสุทธิ์	ฟิล์มบาง $\mu\text{c-Si:H}$
คลื่นความถี่สนามไฟฟ้า	60 MHz (VHF)
ความดันก๊าซใน chamber	1.5 torr
อุณหภูมิจากแผ่นฐานรอง	$180\text{ }^{\circ}\text{C} - 250\text{ }^{\circ}\text{C}$
อัตราการไหลของก๊าซ $\text{SiH}_4$ , $\text{H}_2$	13.5 sccm, 260 sccm
Silane Concentration (SC %) = $(\text{SiH}_4 / (\text{SiH}_4 + \text{H}_2)) \times 100\%$	5.0 %
ความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า	$76\text{ mW/cm}^2$

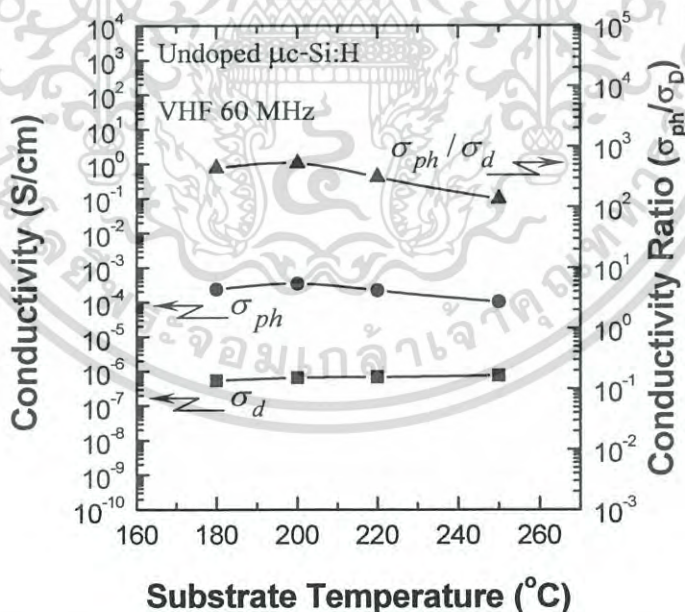


รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการปลูกฟิล์มของ  $\mu\text{c-Si:H}$  และอุณหภูมิจากแผ่นฐานรองค่าต่างๆ ที่ปลูกด้วยคลื่นความถี่สนามไฟฟ้า 60 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

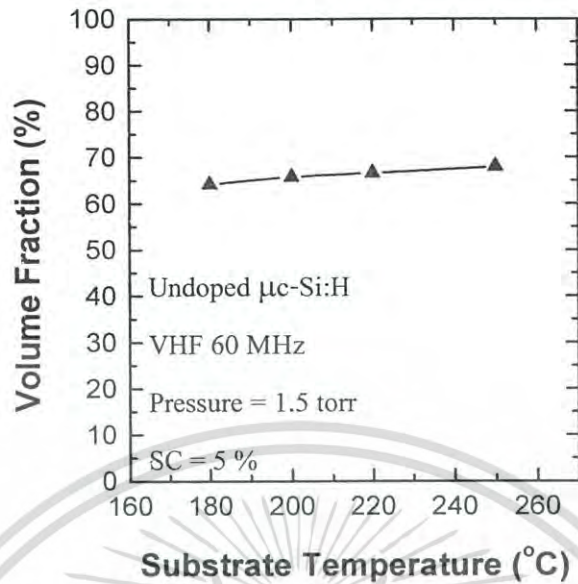


รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างพลังงานของ  $\mu\text{c-Si:H}$  และอุณหภูมิแผ่นฐานรองค่าต่างๆ ที่ปลูกด้วยคลื่นความถี่สนามไฟฟ้า 60 MHz



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้าของ  $\mu\text{c-Si:H}$  และอุณหภูมิแผ่นฐานรองค่าต่างๆ ที่ปลูกด้วยคลื่นความถี่สนามไฟฟ้า 60 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Volume Fraction ของ  $\mu\text{c-Si:H}$  และอุณหภูมิแผ่นฐานรองค่าต่างๆ ที่ปลูกด้วยคลื่นความถี่สนามไฟฟ้า 60 MHz

จากรูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการปลูกฟิล์ม  $\mu\text{c-Si:H}$  และอุณหภูมิแผ่นฐานรองค่าต่างๆ พบว่า เมื่ออุณหภูมิแผ่นฐานรองเพิ่มขึ้นจาก  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$  เป็น  $250\text{ }^{\circ}\text{C}$  อัตราการปลูกฟิล์ม  $\mu\text{c-Si:H}$  เพิ่มขึ้นจาก  $3.20\text{ }\text{\AA}/\text{sec}$  เป็น  $4.05\text{ }\text{\AA}/\text{sec}$  เนื่องจากพลังงานความร้อนจะกระตุ้นให้พันธะระหว่างซิลิคอนและไฮโดรเจนเกิดการฉีก เมื่ออุณหภูมิแผ่นฐานรองเพิ่มสูงขึ้น พลังงานความร้อนที่มากขึ้นจะส่งผลให้อะตอมไฮโดรเจนที่อยู่ในฟิล์มหลุดออกมาเพิ่มขึ้น ทำให้ฟิล์มมีอะตอมไฮโดรเจนลดลง [62] การลดลงของอะตอมไฮโดรเจนดังกล่าวนี้จะช่วยให้ฟิล์มจับกับ film precursor ได้ดีขึ้น [13,61] ดังนั้นอัตราการปลูกฟิล์ม  $\mu\text{c-Si:H}$  จึงเพิ่มขึ้น

จากรูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างพลังงานของ  $\mu\text{c-Si:H}$  และอุณหภูมิแผ่นฐานรองค่าต่างๆ พบว่า เมื่ออุณหภูมิแผ่นฐานรองเพิ่มขึ้นจาก  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$  เป็น  $250\text{ }^{\circ}\text{C}$  ค่าช่องว่างพลังงานของ  $\mu\text{c-Si:H}$  ลดลงจาก  $1.33\text{ eV}$  เป็น  $1.30\text{ eV}$  เนื่องจากการลดลงของอะตอมไฮโดรเจนในฟิล์ม  $\mu\text{c-Si:H}$  ซึ่งถูกกระตุ้นโดยพลังงานความร้อนที่เพิ่มขึ้น ทำให้อะตอมไฮโดรเจนหลุดออกจากฟิล์ม  $\mu\text{c-Si:H}$  เพิ่มขึ้น จำนวนอะตอมไฮโดรเจนในฟิล์ม  $\mu\text{c-Si:H}$  ลดลง [62] ซึ่งอะตอมของไฮโดรเจนจะสร้างพันธะกับซิลิคอน ช่วยลดจำนวนแขนขาดในฟิล์ม  $\mu\text{c-Si:H}$  และส่งผลให้จำนวนจุดบกพร่องภายในช่องว่างพลังงานของ  $\mu\text{c-Si:H}$  ลดลงได้ จากการที่อะตอมของไฮโดรเจนลดลงนี้จะส่งผลให้จำนวนจุดบกพร่องภายในช่องว่างพลังงานของ  $\mu\text{c-Si:H}$  เพิ่มสูงขึ้น และมีผลทำให้ช่องว่างพลังงานของ  $\mu\text{c-Si:H}$  มีค่าลดลง

จากรูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้าของ  $\mu\text{c-Si:H}$  และอุณหภูมิแผ่นฐานรองค่าต่างๆ พบว่า เมื่ออุณหภูมิแผ่นฐานรองเพิ่มจาก  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$  เป็น  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  ค่า  $\sigma_{ph}$  และค่า  $\sigma_{ph}/\sigma_d$  เพิ่มขึ้น เนื่องจากที่อุณหภูมิ  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$  อะตอมไฮโดรเจนที่อยู่ในฟิล์ม  $\text{a-Si:H}$  มีจำนวนมากกว่าที่อุณหภูมิ  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  จึงส่งผลให้เครือข่ายของซิลิคอนเกิดการบิดตัวที่สูงกว่า ซึ่งทำให้ค่า  $\sigma_{ph}$  และค่า  $\sigma_{ph}/\sigma_d$  มีค่าที่ต่ำกว่าที่อุณหภูมิ  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  และพบว่า เมื่ออุณหภูมิแผ่นฐานรองสูงเกินกว่า  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  ค่า  $\sigma_{ph}$  และค่า  $\sigma_{ph}/\sigma_d$  ลดลง เนื่องจากอุณหภูมิแผ่นฐานรองที่เพิ่มสูงขึ้นจะทำให้อะตอมไฮโดรเจนหลุดออกจากฟิล์ม  $\mu\text{c-Si:H}$  ได้มากยิ่งขึ้น ซึ่งส่งผลให้ฟิล์มมีแขนขาเกิดขึ้นจำนวนมาก ผลของการเกิดแขนขาจำนวนมากนี้ จะทำให้ฟิล์มมีจุดบกพร่องเพิ่มขึ้น ทำให้ค่า  $\sigma_{ph}$  และค่า  $\sigma_{ph}/\sigma_d$  ลดลง และเป็นที่สังเกตว่าค่า  $\sigma_d$  จะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิแผ่นฐานรองเพิ่มจาก  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$  เป็น  $250\text{ }^{\circ}\text{C}$  เนื่องจากอะตอมไฮโดรเจนที่อยู่ในฟิล์มมีจำนวนลดลง ทำให้พันธะของซิลิคอนกับซิลิคอนมีมากขึ้น จากการวัดค่า  $\sigma_d$  จะมีความสอดคล้องกับผลการวัด Volume Fraction ในรูปที่ 4.20

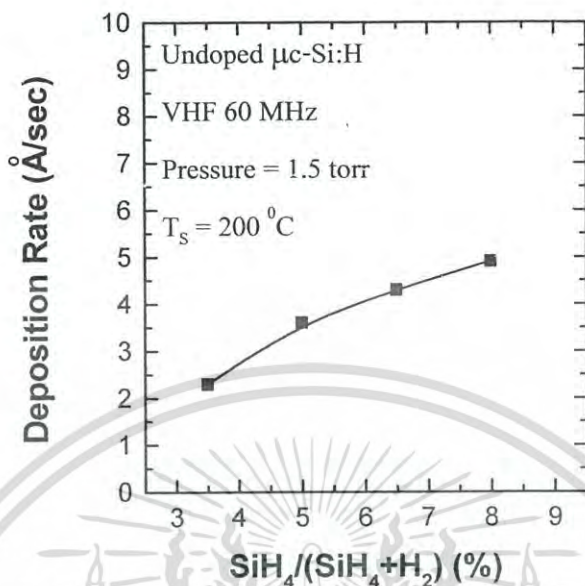
#### 4.8 ผลการศึกษาอัตราส่วนการไหลของก๊าซไฮโดรเจนที่มีต่อคุณสมบัติของ $\mu\text{c-Si:H}$

ในการศึกษาอัตราส่วนการไหลของก๊าซไฮโดรเจนที่มีต่อฟิล์ม  $\mu\text{c-Si:H}$  เป็นเงื่อนไขที่ส่งผลต่อคุณสมบัติและคุณภาพของฟิล์ม ซึ่งรวมไปถึงอัตราการปลูกฟิล์ม  $\mu\text{c-Si:H}$  โดยในหัวข้อนี้ได้กำหนดอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนคงที่ไว้ที่  $260\text{ sccm}$  และทำการเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนจาก  $9.5\text{ sccm}$  ถึง  $22.5\text{ sccm}$  หรือเรียกว่าอัตราส่วนการไหลของก๊าซ  $\text{SiH}_4/(\text{SiH}_4 + \text{H}_2)$  จาก  $3.5\%$  ถึง  $8.0\%$  ดังแสดงเงื่อนไขในตารางที่ 4.7

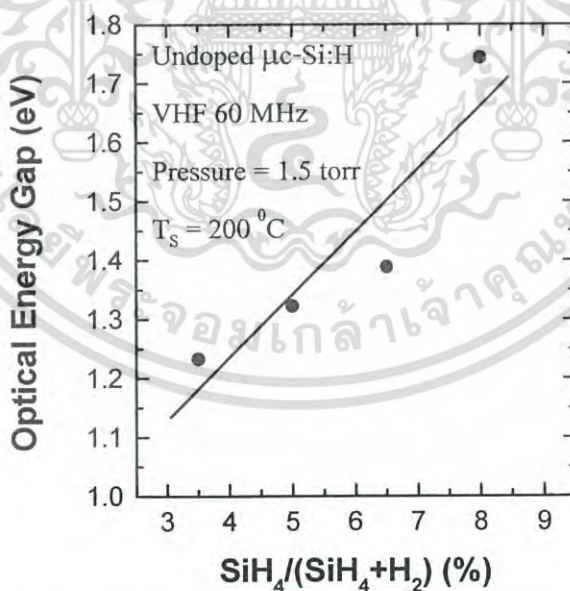
ตารางที่ 4.7 เงื่อนไขการปลูกฟิล์ม  $\mu\text{c-Si:H}$  ชนิดบริสุทธิ์ด้วยวิธี VHF-PECVD เพื่อศึกษาอัตราส่วนการไหลของก๊าซไฮโดรเจนที่มีต่อคุณสมบัติของ  $\mu\text{c-Si:H}$

เงื่อนไขการปลูกฟิล์มชนิดบริสุทธิ์	ฟิล์มบาง $\mu\text{c-Si:H}$
คลื่นความถี่สนามไฟฟ้า	60 MHz (VHF)
ความดันก๊าซใน chamber	1.5 torr
อุณหภูมิแผ่นฐานรอง	$200\text{ }^{\circ}\text{C}$
อัตราการไหลของก๊าซ $\text{SiH}_4, \text{H}_2$	9.5 sccm – 22.5 sccm, 260 sccm
Silane Concentration (SC %) = $(\text{SiH}_4/(\text{SiH}_4 + \text{H}_2)) \times 100\%$	3.5% – 8.0%
ความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า	$76\text{ mW/cm}^2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

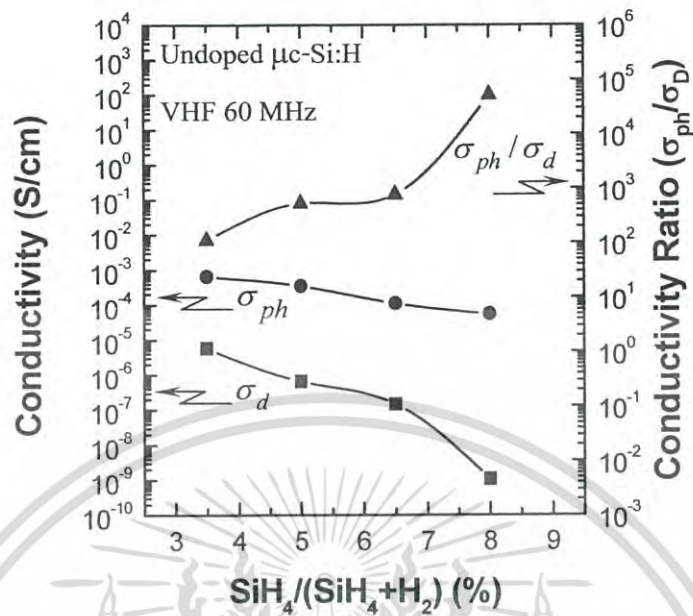


รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการปลูกฟิล์มของ  $\mu\text{c-Si:H}$  และอัตราส่วนการไหลของก๊าซ  $\text{SiH}_4/(\text{SiH}_4 + \text{H}_2)$  ค่าต่างๆ ที่ปลูกด้วยคลื่นความถี่สนามไฟฟ้า 60 MHz

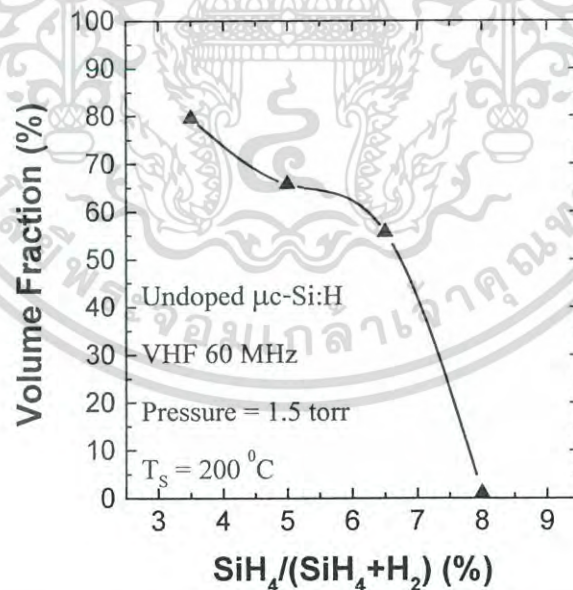


รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างพลังงานของ  $\mu\text{c-Si:H}$  และอัตราส่วนการไหลของก๊าซ  $\text{SiH}_4/(\text{SiH}_4 + \text{H}_2)$  ค่าต่างๆ ที่ปลูกด้วยคลื่นความถี่สนามไฟฟ้า 60 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้าของ  $\mu\text{c-Si:H}$  และอัตราส่วนการไหลของก๊าซ  $\text{SiH}_4/(\text{SiH}_4 + \text{H}_2)$  ค่าต่างๆ ที่ปลูกด้วยคลื่นความถี่สนามไฟฟ้า 60 MHz



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Volume Fraction ของ  $\mu\text{c-Si:H}$  และอัตราส่วนการไหลของก๊าซ  $\text{SiH}_4/(\text{SiH}_4 + \text{H}_2)$  ค่าต่างๆ ที่ปลูกด้วยคลื่นความถี่สนามไฟฟ้า 60 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการปลูกฟิล์ม  $\mu\text{c-Si:H}$  และอัตราส่วนการไหลของก๊าซ  $\text{SiH}_4/(\text{SiH}_4 + \text{H}_2)$  ค่าต่างๆ พบว่า เมื่ออัตราส่วนการไหลของก๊าซ  $\text{SiH}_4/(\text{SiH}_4 + \text{H}_2)$  เพิ่มขึ้นจาก 3.5 % เป็น 8.0 % อัตราการปลูกฟิล์ม  $\mu\text{c-Si:H}$  เพิ่มขึ้นจาก 2.30 Å/sec เป็น 4.91 Å/sec เนื่องจากการเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจน ในขณะที่มีความดันของก๊าซใน chamber และอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนคงที่ (พลังงานและอุณหภูมิของอิเล็กตรอนคงที่) ส่งผลให้ความหนาแน่นของก๊าซไฮโดรเจนใน chamber เพิ่มขึ้น จากความหนาแน่นของก๊าซไฮโดรเจนใน chamber ที่เพิ่มขึ้น จะส่งผลต่อก๊าซไฮโดรเจนที่ถูกแยกสลายมีปริมาณที่เพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นอัตราการปลูกฟิล์ม  $\mu\text{c-Si:H}$  จึงเพิ่มขึ้น

จากรูปที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างพลังงานของ  $\mu\text{c-Si:H}$  และอัตราส่วนการไหลของก๊าซ  $\text{SiH}_4/(\text{SiH}_4 + \text{H}_2)$  ค่าต่างๆ พบว่า เมื่ออัตราส่วนการไหลของก๊าซ  $\text{SiH}_4/(\text{SiH}_4 + \text{H}_2)$  เพิ่มขึ้นจาก 3.5 % เป็น 8.0 % ค่าช่องว่างพลังงานของ  $\mu\text{c-Si:H}$  เพิ่มขึ้นจาก 1.23 eV เป็น 1.74 eV การเพิ่มขึ้นของช่องว่างพลังงานเมื่ออัตราส่วนการไหลของก๊าซ  $\text{SiH}_4/(\text{SiH}_4 + \text{H}_2)$  เพิ่มขึ้น เนื่องจากการไหลของก๊าซไฮโดรเจนที่เพิ่มขึ้น โดยที่อัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนคงที่ ทำให้ฟิล์ม  $\mu\text{c-Si:H}$  มีวัสดุ a-Si:H เจือปนเพิ่มมากขึ้น และในที่สุดส่งผลให้ฟิล์ม  $\mu\text{c-Si:H}$  มีคุณสมบัติกลายเป็นวัสดุ a-Si:H [63] ที่อัตราส่วนการไหลของก๊าซ  $\text{SiH}_4/(\text{SiH}_4 + \text{H}_2)$  เท่ากับ 8.0 % ซึ่งทำให้ช่องว่างพลังงานของ  $\mu\text{c-Si:H}$  มีค่าเพิ่มสูงขึ้น

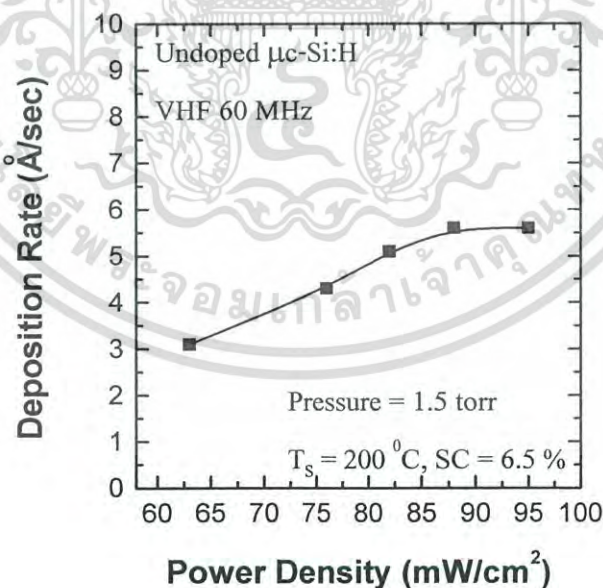
จากรูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้าของ  $\mu\text{c-Si:H}$  และอัตราส่วนการไหลของก๊าซ  $\text{SiH}_4/(\text{SiH}_4 + \text{H}_2)$  ค่าต่างๆ พบว่า เมื่ออัตราส่วนการไหลของก๊าซ  $\text{SiH}_4/(\text{SiH}_4 + \text{H}_2)$  เพิ่มขึ้นจาก 3.5 % เป็น 8.0 % ค่า  $\sigma_d$  และค่า  $\sigma_{ph}$  ของ  $\mu\text{c-Si:H}$  ลดลง มีสาเหตุจากการเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจน โดยที่อัตราการไหลของก๊าซไฮโดรเจนคงที่ จะทำให้ฟิล์ม  $\mu\text{c-Si:H}$  มีวัสดุ a-Si:H เจือปนเพิ่มมากขึ้น และในที่สุดส่งผลให้ฟิล์ม  $\mu\text{c-Si:H}$  มีคุณสมบัติกลายเป็นวัสดุ a-Si:H [63] ซึ่งค่า  $\sigma_d$  ค่าระดับ  $10^{-9}$  ค่า  $\sigma_{ph}$  ค่าระดับ  $10^{-5}$  และค่า  $\sigma_{ph}/\sigma_d$  เพิ่มขึ้นระดับ  $10^4$  ที่อัตราส่วนการไหลของก๊าซ  $\text{SiH}_4/(\text{SiH}_4 + \text{H}_2)$  เท่ากับ 8.0 % ซึ่งจากการวัดค่า  $\sigma_d$  จะมีความสอดคล้องกับผลการวัด Volume Fraction ที่ลดลงในรูปที่ 4.24

#### 4.9 ผลการศึกษาความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าที่มีต่อคุณสมบัติของ $\mu\text{c-Si:H}$

อิทธิพลของความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า เป็นเงื่อนไขที่ส่งผลต่ออัตราการปลูกฟิล์ม  $\mu\text{c-Si:H}$  เพื่อให้ได้ฟิล์มที่มีอัตราการปลูกฟิล์มสูง ในขณะที่ค่าสภาพนำไฟฟ้าสูงด้วย โดยได้ทำการเปลี่ยนความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าในช่วง  $63 \text{ mW/cm}^2$  ถึง  $95 \text{ mW/cm}^2$  ดังแสดงเงื่อนไขการปลูกฟิล์มในตารางที่ 4.8

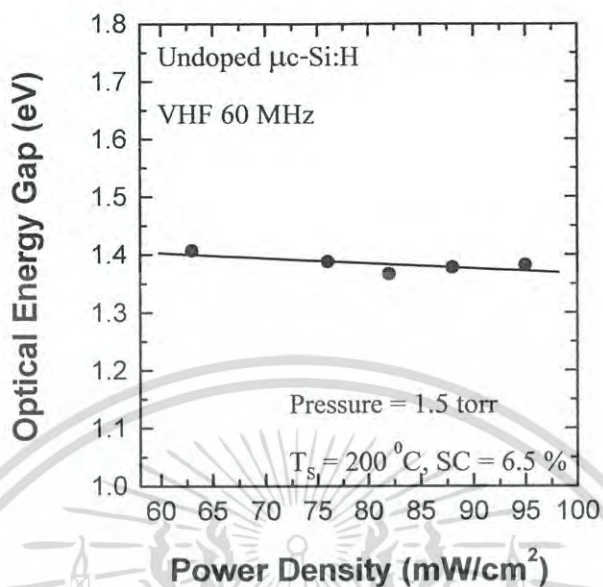
ตารางที่ 4.8 เงื่อนไขการปลูกฟิล์ม  $\mu\text{c-Si:H}$  ชนิดบริสุทธิ์ด้วยวิธี VHF-PECVD เพื่อศึกษาความหนาแน่นกำลังงานไฟฟ้าที่มีต่อคุณสมบัติของ  $\mu\text{c-Si:H}$

เงื่อนไขการปลูกฟิล์มชนิดบริสุทธิ์	ฟิล์มบาง $\mu\text{c-Si:H}$
คลื่นความถี่สนามไฟฟ้า	60 MHz (VHF)
ความดันก๊าซใน chamber	1.5 torr
อุณหภูมิแผ่นฐานรอง	$200^\circ\text{C}$
อัตราการไหลของก๊าซ $\text{SiH}_4$ , $\text{H}_2$	18 sccm, 260 sccm
Silane Concentration (SC %) = $(\text{SiH}_4 / (\text{SiH}_4 + \text{H}_2)) \times 100 \%$	6.5 %
ความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า	$63 \text{ mW/cm}^2 - 95 \text{ mW/cm}^2$

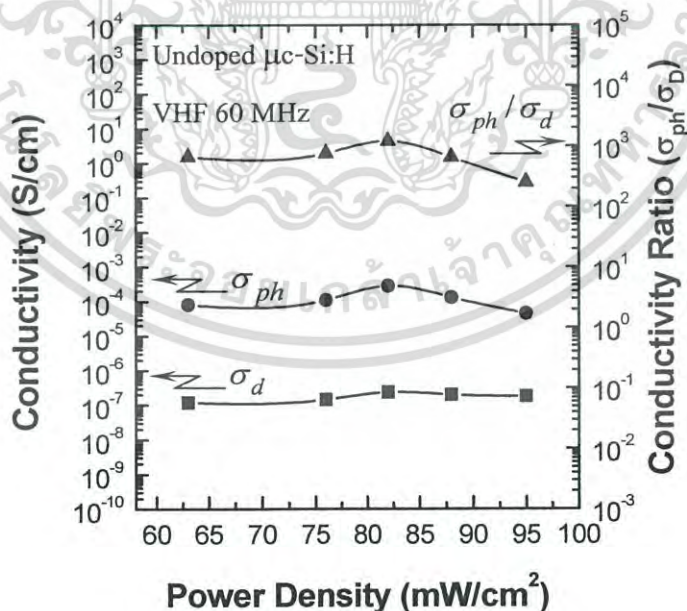


รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการปลูกฟิล์มของ  $\mu\text{c-Si:H}$  และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าค่าต่างๆ ที่ปลูกด้วยคลื่นความถี่สนามไฟฟ้า 60 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

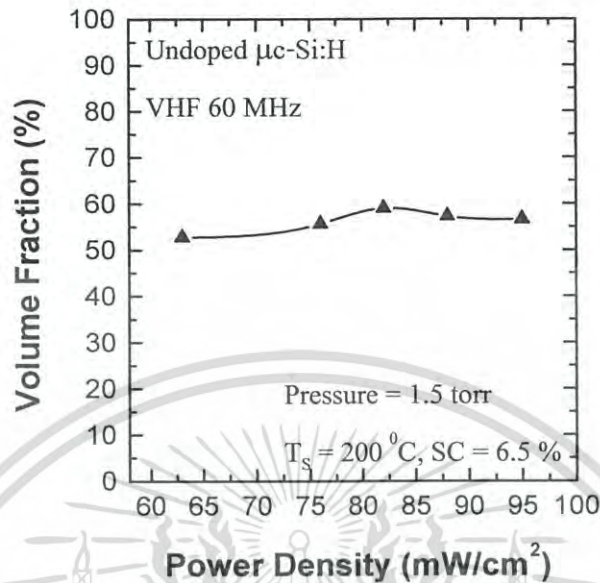


รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างพลังงานของ  $\mu\text{c-Si:H}$  และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าค่าต่างๆ ที่ปลูกด้วยคลื่นความถี่สนามไฟฟ้า 60 MHz



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้าของ  $\mu\text{c-Si:H}$  และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าค่าต่างๆ ที่ปลูกด้วยคลื่นความถี่สนามไฟฟ้า 60 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Volume Fraction ของ  $\mu\text{c-Si:H}$  และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าค่าต่างๆ ที่ปลูกด้วยคลื่นความถี่สนามไฟฟ้า 60 MHz

จากรูปที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการปลูกฟิล์ม  $\mu\text{c-Si:H}$  และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าค่าต่างๆ พบว่า เมื่อความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าเพิ่มจาก  $63 \text{ mW/cm}^2$  เป็น  $88 \text{ mW/cm}^2$  อัตราการปลูกฟิล์ม  $\mu\text{c-Si:H}$  เพิ่มขึ้นจาก  $3.10 \text{ \AA/sec}$  เป็น  $5.60 \text{ \AA/sec}$  เนื่องจากความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าที่เพิ่ม จะส่งผลต่อกระแสที่ไหลในพลาสมาให้เพิ่มขึ้น (อิเล็กตรอนและไอออนในพลาสมา) โดยความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระในพลาสมาและความหนาแน่นของไอออนในพลาสมาเพิ่มขึ้น ซึ่งจากการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระในพลาสมา จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการแยกสลายก๊าซไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น และจากการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นของไอออนในพลาสมา จะส่งผลให้อะตอมไฮโดรเจนถูกกระแทกหลุดออกจากฟิล์มเพิ่มมากขึ้น ฟิล์ม  $\mu\text{c-Si:H}$  มีจำนวนอะตอมไฮโดรเจนลดลง ทำให้ฟิล์มจับกับฟิล์ม precursor ดีขึ้น จึงมีอัตราการปลูกฟิล์มเพิ่มสูงขึ้น และพบว่า เมื่อความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าเพิ่มสูงมากกว่า  $88 \text{ mW/cm}^2$  อัตราการปลูกฟิล์มจะคงที่  $5.60 \text{ \AA/sec}$  เนื่องจากเมื่อความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น จนถึงค่าๆ หนึ่งจะทำให้ก๊าซไฮโดรเจนถูกแยกสลายจนหมด ซึ่งทำให้อัตราการปลูกฟิล์มคงที่

จากรูปที่ 4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างพลังงานของ  $\mu\text{c-Si:H}$  และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าค่าต่างๆ พบว่า เมื่อความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ค่าช่องว่างพลังงานของ  $\mu\text{c-Si:H}$  ลดลงจาก  $1.40 \text{ eV}$  เป็น  $1.38 \text{ eV}$  การลดลงของช่องว่างพลังงานเมื่อความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เนื่องจากความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มสูงขึ้น จะทำให้ความหนาแน่นของไอออนใน

พลาสมาเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้อะตอมไฮโดรเจนถูกกระแทกหลุดออกจากฟิล์มเพิ่มมากขึ้น ฟิล์ม  $\mu\text{-Si:H}$  มีจำนวนอะตอมไฮโดรเจนลดลง ซึ่งช่องว่างพลังงานของ  $\mu\text{-Si:H}$  จะมีค่าลดลง

จากรูปที่ 4.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้าของ  $\mu\text{-Si:H}$  และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าค่าต่างๆ พบว่า เมื่อความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าเพิ่มจาก  $63 \text{ mW/cm}^2$  เป็น  $82 \text{ mW/cm}^2$  ค่า  $\sigma_{ph}$  และค่า  $\sigma_{ph}/\sigma_d$  ของ  $\mu\text{-Si:H}$  เพิ่มขึ้น เนื่องจากความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าช่วงนี้ ฟิล์ม  $\mu\text{-Si:H}$  มีจำนวนอะตอมไฮโดรเจนลดลง ทำให้จำนวนของพันธะระหว่างซิลิคอนและไฮโดรเจนแบบ SiH มีมากขึ้น ซึ่งฟิล์มมีจำนวนของซิลิคอนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่า  $\sigma_{ph}$  และค่า  $\sigma_{ph}/\sigma_d$  เพิ่มขึ้น และพบว่า เมื่อความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าเพิ่มสูงมากกว่า  $82 \text{ mW/cm}^2$  ค่า  $\sigma_{ph}$  และค่า  $\sigma_{ph}/\sigma_d$  ลดลง เนื่องจากความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มสูงมากยิ่งขึ้น จะทำให้พลังงานของไอออนเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ ion bombardment เพิ่มขึ้น [41-43] การเพิ่มขึ้นของ ion bombardment จะทำให้ฟิล์มมีจำนวนของซิลิคอนลดลง และทำให้เกิดแขนขาดขึ้นในฟิล์ม  $\mu\text{-Si:H}$  ได้ง่าย [64] ส่งผลให้จำนวนจุดบกพร่องภายในช่องว่างพลังงานของฟิล์ม  $\mu\text{-Si:H}$  เพิ่มสูงขึ้น ค่า  $\sigma_{ph}$  และค่า  $\sigma_{ph}/\sigma_d$  จึงลดลง ซึ่งจากการวัดค่า  $\sigma_d$  ของฟิล์ม  $\mu\text{-Si:H}$  จะมีความสอดคล้องกับผลการวัด Volume Fraction ในรูปที่ 4.28

#### 4.10 สรุปผลการศึกษาคูณสมบัติของ a-Si:H และ $\mu\text{-Si:H}$

ผลการศึกษาคูณสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบาง a-Si:H และ  $\mu\text{-Si:H}$  ชนิดบริสุทธิ์ที่ปลูกด้วยวิธี VHF-PECVD เพื่อนำไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด thin film ที่มีชั้นผลิตพาหะเป็นวัสดุ a-Si:H และ  $\mu\text{-Si:H}$  ต่อไป สรุปได้ดังนี้

1. การปลูกฟิล์มบาง a-Si:H ชนิดบริสุทธิ์ที่ปลูกด้วยวิธี VHF-PECVD โดยใช้คลื่นความถี่สนามไฟฟ้า 44 MHz สำหรับกระตุ้นพลาสมา ซึ่งความดันก๊าซใน chamber ที่เหมาะสมคือ 0.8 torr พบว่าฟิล์มที่เคลือบบนแผ่นฐานรองมีความสม่ำเสมอ (uniformity) ที่สูง
2. การปรับปรุงค่า  $\sigma_{ph}$  ของฟิล์มบาง a-Si:H ชนิดบริสุทธิ์ให้มีค่าสูงขึ้น โดยเพิ่มอุณหภูมิแผ่นฐานรอง พบว่าฟิล์มที่ปลูกโดยใช้อุณหภูมิแผ่นฐานรอง  $250^\circ\text{C}$  จะมีค่า  $\sigma_{ph}$  และค่า  $\sigma_{ph}/\sigma_d$  ที่สูง
3. การปลูกฟิล์มบาง a-Si:H ชนิดบริสุทธิ์ที่ปลูกด้วยวิธี VHF-PECVD โดยใช้อัตราส่วนการไหลของก๊าซ  $\text{H}_2/\text{SiH}_4$  ที่เหมาะสม พบว่าจะทำให้มีอัตราการปลูกฟิล์มที่สูง และมีค่าสภาพนำไฟฟ้าที่สูง
4. การเพิ่มอัตราการปลูกฟิล์มบาง a-Si:H ชนิดบริสุทธิ์ให้สูงขึ้น ในขณะที่สภาพนำไฟฟ้ามีค่าสูง พบว่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมคือ  $63 \text{ mW/cm}^2$  ซึ่งใช้ความดันก๊าซใน chamber 0.8 torr อุณหภูมิแผ่นฐาน  $250^\circ\text{C}$  และอัตราส่วนการไหลของก๊าซ  $\text{H}_2/\text{SiH}_4$  เท่ากับ

- 2 ( $\text{SiH}_4 = 40 \text{ sccm}$  และ  $\text{H}_2 = 80 \text{ sccm}$ ) พบว่ามีอัตราการปลูกฟิล์มสูงถึง  $6.4 \text{ \AA/sec}$  ค่าช่องว่างพลังงาน  $1.71 \text{ eV}$  ในขณะที่ค่า  $\sigma_{ph}/\sigma_d$  อยู่ระดับ  $1.46 \times 10^5$  และมีความหนาแน่นของแขนขาดำระดับ  $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$
5. การปลูกฟิล์มบาง  $\mu\text{-Si:H}$  ชนิดบริสุทธิ์ที่ปลูกด้วยวิธี VHF-PECVD โดยใช้คลื่นความถี่สนามไฟฟ้า  $60 \text{ MHz}$  สำหรับกระตุ้นพลาสมา ซึ่งความดันก๊าซใน chamber ที่เหมาะสมคือ  $1.5 \text{ torr}$  พบว่าฟิล์มที่เคลือบบนแผ่นฐานรองมีความสม่ำเสมอ (uniformity) ที่สุด
  6. การปรับปรุงค่า  $\sigma_{ph}$  ของฟิล์มบาง  $\mu\text{-Si:H}$  ชนิดบริสุทธิ์ให้มีค่าสูงขึ้น โดยเพิ่มอุณหภูมิแผ่นฐานรอง พบว่าฟิล์มที่ปลูกโดยใช้อุณหภูมิแผ่นฐานรอง  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  จะมีค่า  $\sigma_{ph}$  และค่า  $\sigma_{ph}/\sigma_d$  ที่สูง
  7. การปลูกฟิล์มบาง  $\mu\text{-Si:H}$  ชนิดบริสุทธิ์ที่ปลูกด้วยวิธี VHF-PECVD โดยใช้อัตราส่วนการไหลของก๊าซ  $\text{SiH}_4/(\text{SiH}_4 + \text{H}_2)$  ที่เหมาะสม พบว่าจะทำให้มีอัตราการปลูกฟิล์มที่สูง และมีค่าสภาพนำไฟฟ้าที่สูง
  8. การเพิ่มอัตราการปลูกฟิล์มบาง  $\mu\text{-Si:H}$  ชนิดบริสุทธิ์ให้สูงขึ้น ในขณะที่สภาพนำไฟฟ้ามีค่าสูง พบว่าความหนาแน่นของกำลังงานไฟฟ้าที่เหมาะสมคือ  $82 \text{ mW/cm}^2$  ซึ่งใช้ความดันก๊าซใน chamber  $1.5 \text{ torr}$  อุณหภูมิแผ่นฐาน  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  และอัตราส่วนการไหลของก๊าซ  $\text{SiH}_4/(\text{SiH}_4 + \text{H}_2)$  เท่ากับ  $6.5 \%$  ( $\text{SiH}_4 = 18 \text{ sccm}$  และ  $\text{H}_2 = 260 \text{ sccm}$ ) พบว่ามีอัตราการปลูกฟิล์มสูงถึง  $5.1 \text{ \AA/sec}$  ค่าช่องว่างพลังงาน  $1.36 \text{ eV}$  ในขณะที่ค่า  $\sigma_{ph}/\sigma_d$  อยู่ระดับ  $1.20 \times 10^3$  และมีค่า Volume Fraction ประมาณ  $58 \%$

## บทที่ 5

# ผลการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดทันเดม

### 5.1 บทนำ

จากบทที่ 4 ได้ทำการศึกษาหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการปลูกฟิล์ม a-Si:H และ  $\mu\text{c-Si:H}$  ชนิดบริสุทธิ์ที่ปลูกด้วยวิธี VHF-PECVD เพื่อให้ได้ฟิล์มที่มีความสม่ำเสมอ มีคุณภาพดี และอัตราการปลูกฟิล์มสูง ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่า เงื่อนไขที่เหมาะสมต่อการปลูกฟิล์ม a-Si:H ชนิดบริสุทธิ์ด้วยวิธี VHF-PECVD (44 MHz) มีดังนี้ ความดันก๊าซใน chamber เท่ากับ 0.8 torr อุณหภูมิแผ่นฐานรองเท่ากับ  $250\text{ }^{\circ}\text{C}$  อัตราส่วนการไหลของก๊าซ  $\text{H}_2/\text{SiH}_4$  เท่ากับ 2 ( $\text{SiH}_4 = 40\text{ sccm}$  และ  $\text{H}_2 = 80\text{ sccm}$ ) และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าเท่ากับ  $63\text{ mW/cm}^2$  และเงื่อนไขที่เหมาะสมต่อการปลูกฟิล์ม  $\mu\text{c-Si:H}$  ชนิดบริสุทธิ์ด้วยวิธี VHF-PECVD (60 MHz) มีดังนี้ ความดันก๊าซใน chamber เท่ากับ 1.5 torr อุณหภูมิแผ่นฐานรองเท่ากับ  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  อัตราส่วนการไหลของก๊าซ  $\text{SiH}_4/(\text{SiH}_4 + \text{H}_2)$  เท่ากับ 6.5 % ( $\text{SiH}_4 = 18\text{ sccm}$  และ  $\text{H}_2 = 260\text{ sccm}$ ) และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าเท่ากับ  $82\text{ mW/cm}^2$  โดยคาดว่าฟิล์ม a-Si:H และ  $\mu\text{c-Si:H}$  ชนิดบริสุทธิ์นี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นชั้นผลิตพาหะในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดทันเดมแบบ 2 รอยต่อระหว่าง a-Si:H และ  $\mu\text{c-Si:H}$  ได้

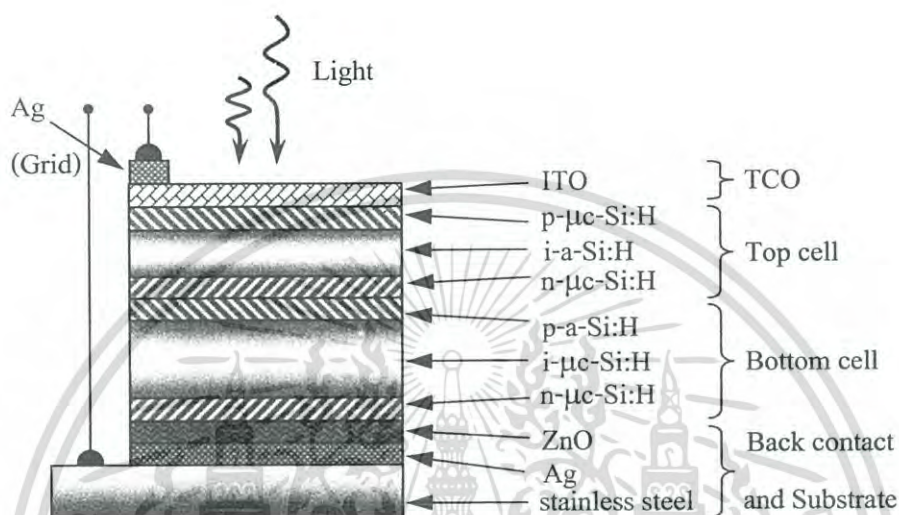
บทนี้จะกล่าวถึงการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดทันเดมด้วยวิธี VHF-PECVD รวมถึงผลการวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ในเบื้องต้น และการปรับปรุงประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดทันเดม รวมถึงผลการปรับปรุงประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยการวัดลักษณะสมบัติทางเอาต์พุต

### 5.2 การประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดทันเดมด้วยวิธี VHF-PECVD เบื้องต้น

การประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดทันเดมด้วยวิธี VHF-PECVD ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เบื้องต้นโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดทันเดมคือ stainless steel/ Ag/ Zn/ n- $\mu\text{c-Si:H}$ / i- $\mu\text{c-Si:H}$ / p-a-Si:H/ n- $\mu\text{c-Si:H}$ / i-a-Si:H/ p- $\mu\text{c-Si:H}$ / ITO มีแผ่นฐานรองเป็น stainless steel ดังแสดงในรูปที่ 5.1 จากโครงสร้างเบื้องต้นของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดทันเดมนี้ ชั้น p- $\mu\text{c-Si:H}$  ได้มาจากการการพัฒนาฟิล์มบางซิลิคอนชนิด p เพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นชั้นหน้าด่างกว้างรับแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ ผลการปลูกฟิล์ม p- $\mu\text{c-Si:H}$  ด้วยวิธี RF-PECVD อันมีก๊าซหลักได้แก่  $\text{H}_2$ ,  $\text{SiH}_4$  และ  $\text{B}_2\text{H}_6$  ใช้ก๊าซ  $\text{SiH}_2\text{Cl}_2$  ทำหน้าที่เป็นก๊าซเจือ ฟิล์ม p- $\mu\text{c-Si:H}$  ที่สร้างได้จะมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่ต่ำ ช่องว่างพลังงานและสภาพนำไฟฟ้าของฟิล์มจะมีค่าสูง เมื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นชั้นรับแสงในเซลล์แสงอาทิตย์จะทำให้มีประสิทธิภาพเพิ่มสูงขึ้น [65] และจากการศึกษาพบว่า

เอกสารการใช้อุณหภูมิแผ่นฐานที่ต่ำยังช่วยให้ช่องว่างพลังงานของฟิล์มชนิด p- $\mu\text{c-Si:H}$  มีค่าสูงด้วย ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดทันเดม จะคล้ายกับขั้นตอนการปลูกฟิล์มในบทที่ 3 ซึ่งการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดทันเดมจะมีเงื่อนไขและขั้นตอนการปลูกฟิล์มชั้นอื่นเพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 5.1 ซึ่งแสดงเงื่อนไขการสร้างชั้น Ag, ZnO และ ITO ด้วยวิธี sputtering และ ตารางที่ 5.2 แสดงเงื่อนไขการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดทันเดมด้วยวิธี VHF-PECVD เบื้องต้น



รูปที่ 5.1 โครงสร้างเบื้องต้นของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดทันเดมแบบ 2 รอยต่อ ระหว่าง a-Si:H และ  $\mu\text{c-Si:H}$  ซึ่งแผ่นฐานรองเป็น stainless steel

ในการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดทันเดมจะต้องใช้ substrate holder ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวยึดแผ่นฐานรอง และเริ่มต้นสร้างชั้นต่างๆ จากเซลล์ชั้นล่างไปจนถึงเซลล์ชั้นบนสุด ขั้นตอนการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดทันเดม มีดังนี้

1. ตัดแผ่น stainless steel ให้ได้ขนาด  $20 \times 30 \text{ cm}^2$  จากนั้นนำแผ่น stainless steel มาล้างทำความสะอาดด้วย trichloroethylene, acetone และ mythylalcohol แล้วเป่าให้แห้งด้วยก๊าซ  $\text{N}_2$  ในขณะเดียวกันลดความดันภายในระบบ multi-chamber PECVD/sputtering ให้เป็นสุญญากาศที่ความดันประมาณ  $10^{-6}$  torr และเพิ่มอุณหภูมิภายใน chamber ต่างๆ จนกระทั่งถึงอุณหภูมิที่ต้องการ
2. นำแผ่นฐานรองที่ผ่านการล้างมาวางบน substrate holder จากนั้นนำ substrate holder ที่มีแผ่นฐานรองใส่เข้าไปใน load lock แล้วลดความดันให้เป็นสุญญากาศ ในขณะเดียวกันเพิ่มอุณหภูมิภายใน load lock ให้เท่ากับอุณหภูมิภายใน chamber ของระบบ sputtering เพื่อเริ่มต้นสร้างชั้น Ag ก่อนเป็นชั้นแรก จากนั้นรอนความดันภายใน load lock มีค่าประมาณ 0.1 torr ถึง 0.3 torr และอุณหภูมิภายใน load lock มีค่าตามที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับภาควิชาเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญตใดนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ใช้แขนกลนำ substrate holder ออกจาก load lock เข้าไปใน chamber ของระบบ DC sputtering จากนั้นทำการปล่อยก๊าซ Ar เข้าไปใน chamber แล้วทำการควบคุมความดันภายใน chamber ให้ได้ตามที่ต้องการ ตั้งกำลังงานไฟฟ้าตามเงื่อนไขการสร้างชั้น Ag แล้วจึงเริ่มทำการเปิด power แหล่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้า เพื่อเริ่มสร้างชั้น Ag ดังแสดงเงื่อนไขในตารางที่ 5.1 เมื่อปลูกฟิล์มชั้น Ag ครบตามเวลาหรือความหนาที่ต้องการ จึงทำการปิด power เพื่อหยุดการสร้าง จากนั้นทำการระบายก๊าซที่เหลืออยู่ภายใน chamber ของระบบ DC sputtering ออกให้หมด
4. สร้างชั้น ZnO โดยใช้แขนกลนำ substrate holder ออกจาก chamber ที่สร้างชั้น Ag เข้าไปใน chamber ของระบบ RF sputtering จากนั้นทำการปล่อยก๊าซ Ar เข้าไปใน chamber แล้วทำการควบคุมความดันภายใน chamber ให้ได้ตามที่ต้องการ ตั้งกำลังงานไฟฟ้าตามเงื่อนไขของการสร้างชั้น ZnO แล้วจึงเริ่มทำการเปิด power แหล่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้า เพื่อเริ่มสร้างชั้น ZnO ดังแสดงเงื่อนไขในตารางที่ 5.1 เมื่อปลูกฟิล์มชั้น ZnO ครบตามเวลาหรือความหนาที่ต้องการ จึงทำการปิด power เพื่อหยุดการสร้าง จากนั้นทำการระบายก๊าซที่เหลืออยู่ภายใน chamber ของระบบ RF sputtering ออกให้หมด
5. สร้างเซลล์ชั้นล่าง เริ่มต้นจากชั้น n- $\mu\text{c-Si:H}$  i- $\mu\text{c-Si:H}$  และ p-a-Si:H ตามลำดับ ใช้แขนกลนำ substrate holder ออกจาก chamber ของระบบ RF sputtering เข้าไปใน chamber ของระบบ VHF-PECVD จากนั้นทำการปล่อยก๊าซต่างๆ เข้าไปใน chamber แล้วทำการควบคุมความดันภายใน chamber ให้ได้ตามที่ต้องการ ตั้งความถี่สนามไฟฟ้าและกำลังงานไฟฟ้าตามเงื่อนไขของการสร้าง แล้วจึงเริ่มทำการเปิด power แหล่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้า เพื่อเริ่มสร้างชั้น n- $\mu\text{c-Si:H}$  เป็นชั้นแรก เมื่อปลูกฟิล์มชั้น n- $\mu\text{c-Si:H}$  ครบตามเวลาหรือความหนาที่ต้องการ จึงทำการปิด power เพื่อหยุดการสร้าง จากนั้นทำการระบายก๊าซที่เหลืออยู่ภายใน chamber ออกให้หมด แล้วใช้แขนกลนำ substrate holder ออกจาก chamber ที่สร้างชั้น n เข้าไปใน chamber ของระบบ VHF-PECVD เพื่อสร้างชั้น i- $\mu\text{c-Si:H}$  เมื่อสร้างชั้น i- $\mu\text{c-Si:H}$  เสร็จ ระบายก๊าซที่เหลืออยู่ภายใน chamber ออกให้หมด แล้วใช้แขนกลนำ substrate holder ออกจาก chamber ที่สร้างชั้น i เข้าไปใน chamber ของระบบ RF-PECVD เพื่อสร้างชั้น p-a-Si:H เมื่อสร้างชั้น p-a-Si:H เสร็จ ระบายก๊าซที่เหลืออยู่ภายใน chamber ออกให้หมด ซึ่งเงื่อนไขในการสร้างชั้นต่างๆ ของเซลล์ชั้นล่างนี้จะคล้ายคลึงกัน แต่มีข้อแตกต่าง คือ พารามิเตอร์ในการสร้างของแต่ละชั้น ดังแสดงในตารางที่ 5.2
6. สร้างเซลล์ชั้นบน เริ่มต้นจากชั้น n- $\mu\text{c-Si:H}$  i-a-Si:H และ p- $\mu\text{c-Si:H}$  ตามลำดับ ใช้แขนกลนำ substrate holder ออกจาก chamber ที่สร้างชั้น p เข้าไปใน chamber ของระบบ VHF-PECVD เพื่อสร้างชั้น n- $\mu\text{c-Si:H}$  จากนั้นทำการปล่อยก๊าซต่างๆ เข้าไปใน chamber แล้วทำการควบคุมความดันภายใน chamber ให้ได้ตามที่ต้องการ ตั้งความถี่สนามไฟฟ้าและกำลัง

งานไฟฟ้าตามเงื่อนไขของการสร้าง แล้วจึงเริ่มทำการเปิด power แหล่งจ่ายกำลังงานไฟฟ้า เพื่อเริ่มสร้างชั้น n- $\mu\text{c-Si:H}$  เป็นชั้นแรก เมื่อปลูกฟิล์มชั้น n- $\mu\text{c-Si:H}$  ครบตามเวลาหรือความหนาที่ต้องการ จึงทำการปิด power เพื่อหยุดการสร้าง จากนั้นทำการระบายก๊าซที่เหลืออยู่ภายใน chamber ออกให้หมด แล้วใช้แขนกลนำ substrate holder ออกจาก chamber ที่สร้างชั้น n เข้าไปใน chamber ของระบบ VHF-PECVD เพื่อสร้างชั้น i-a-Si:H เมื่อสร้างชั้น i-a-Si:H เสร็จ ระบายก๊าซที่เหลืออยู่ภายใน chamber ออกให้หมด แล้วใช้แขนกลนำ substrate holder ออกจาก chamber ที่สร้างชั้น i เข้าไปใน chamber ของระบบ RF-PECVD เพื่อสร้างชั้น p- $\mu\text{c-Si:H}$  [65] เมื่อสร้างชั้น p- $\mu\text{c-Si:H}$  เสร็จ ระบายก๊าซที่เหลืออยู่ภายใน chamber ออกให้หมด ซึ่งเงื่อนไขในการสร้างชั้นต่างๆ ของเซลล์ชั้นบนจะแสดงในตารางที่ 5.2

7. สร้างชั้น ITO ซึ่งเป็นชั้นขั้วไฟฟ้าโปร่งใส (TCO) บนสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยนำแผ่นฐานรองที่สร้างเซลล์ชั้นต่างๆ เสร็จแล้วออกมาทำการตัดให้ได้ขนาด  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  จากนั้นนำแผ่นฐานรองวางบนมาสก์ (mask) ดังที่แสดงในรูป 5.2 นำ mask ใส่กลับเข้าไปใน chamber ของระบบ RF sputtering ซึ่งจะมีขั้นตอนการสร้างเหมือนกับการสร้างชั้น ZnO แต่มีข้อแตกต่างคือพารามิเตอร์ในการสร้าง ดังแสดงในตารางที่ 5.1
8. สร้างขั้ว Ag ซึ่งเป็นขั้วไฟฟ้า (grid) ด้านบนของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยนำแผ่นฐานรองที่สร้างชั้น ITO เสร็จแล้วออกมาวางบน mask ดังที่แสดงในรูป 5.3 นำ mask ใส่กลับเข้าไปใน chamber ของระบบ DC sputtering ซึ่งจะมีขั้นตอนการสร้างดังแสดงในตารางที่ 5.1 เมื่อสร้างเสร็จแล้วใช้แขนกลนำ mask ออกจาก chamber ของระบบ DC sputtering เข้าไปใน load lock แล้วทำการปล่อยก๊าซ  $\text{N}_2$  เข้าไปใน load lock จนกระทั่งความดันของ load lock เท่ากับความดันห้อง จึงปิดก๊าซ  $\text{N}_2$  จากนั้นเปิด load lock แล้วนำ mask ออก และนำชิ้นงานที่ปลูกฟิล์มเสร็จแล้วออกจาก mask ดังแสดงภาพถ่ายเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปที่ 5.4 รูปที่ 5.5 แสดงสรุปขั้นตอนการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด thin film ด้วยวิธี VHF-PECVD เบื้องต้น

ตารางที่ 5.1 เงื่อนไขการสร้างชั้น ZnO, Ag และ ITO ด้วยวิธี sputtering

ชั้น	ก๊าซดิบ	ความดัน (torr)	อุณหภูมิแผ่นฐาน ( $^{\circ}$ C)	ความหนา ( $\text{\AA}$ )	Sputtering
Ag	Ar = 15 sccm	0.005	150	1500	DC
ZnO	Ar = 10 sccm	0.005	250	1000	RF
ITO	Ar = 20 sccm	0.005	170	1000	RF

ตารางที่ 5.2 เงื่อนไขการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดทันเดมด้วยวิธี VHF-PECVD เบื้องต้น

ชั้น	ก๊าซดิบ	ความดัน (torr)	อุณหภูมิแผ่นฐาน ( $^{\circ}$ C)	ความหนา ( $\text{\AA}$ )	PECVD
n- $\mu$ c-Si:H (bottom cell)	SiH <sub>4</sub> = 7 sccm PH <sub>3</sub> = 21 sccm H <sub>2</sub> = 160 sccm	0.2	240	300	VHF (100 MHz)
i- $\mu$ c-Si:H (bottom cell)	SiH <sub>4</sub> = 18 sccm H <sub>2</sub> = 260 sccm	1.5	200	9180	VHF (60 MHz)
p-a-Si:H (bottom cell)	SiH <sub>4</sub> = 5 sccm B <sub>2</sub> H <sub>6</sub> = 25 sccm H <sub>2</sub> = 75 sccm	0.5	100	300	RF (13.56 MHz)
n- $\mu$ c-Si:H (top cell)	SiH <sub>4</sub> = 6 sccm PH <sub>3</sub> = 42 sccm H <sub>2</sub> = 142 sccm SC = 4 %	0.2	240	260	VHF (100 MHz)
i-a-Si:H (top cell)	SiH <sub>4</sub> = 40 sccm H <sub>2</sub> = 80 sccm	0.8	250	5760	VHF (44 MHz)
p- $\mu$ c-Si:H (top cell)	SiH <sub>4</sub> = 3 sccm B <sub>2</sub> H <sub>6</sub> = 21 sccm H <sub>2</sub> = 300 sccm SiH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> = 3 sccm	2.0	100	200	RF (13.56 MHz)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

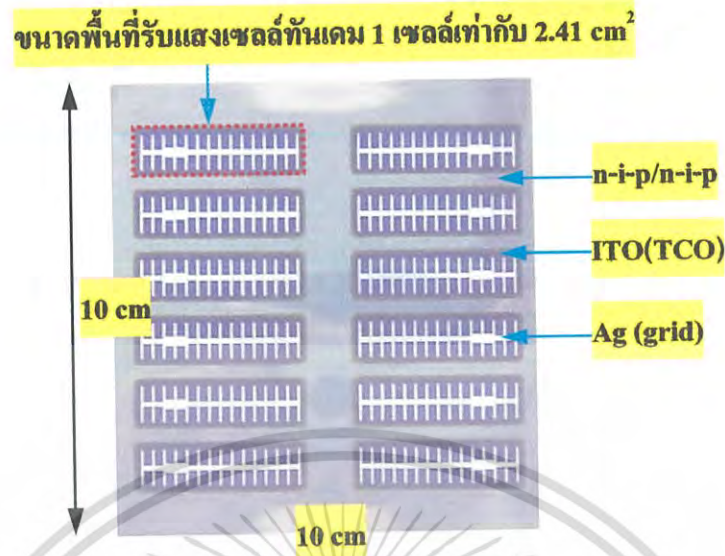


รูปที่ 5.2 ภาพถ่าย mask สำหรับใช้เคลือบ ITO ซึ่งเป็นชั้นขั้วไฟฟ้าโปร่งใส (TCO) บนสุดของเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 5.3 ภาพถ่าย mask สำหรับใช้เคลือบ Ag ซึ่งเป็นขั้วไฟฟ้า (grid) ด้านบนของเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

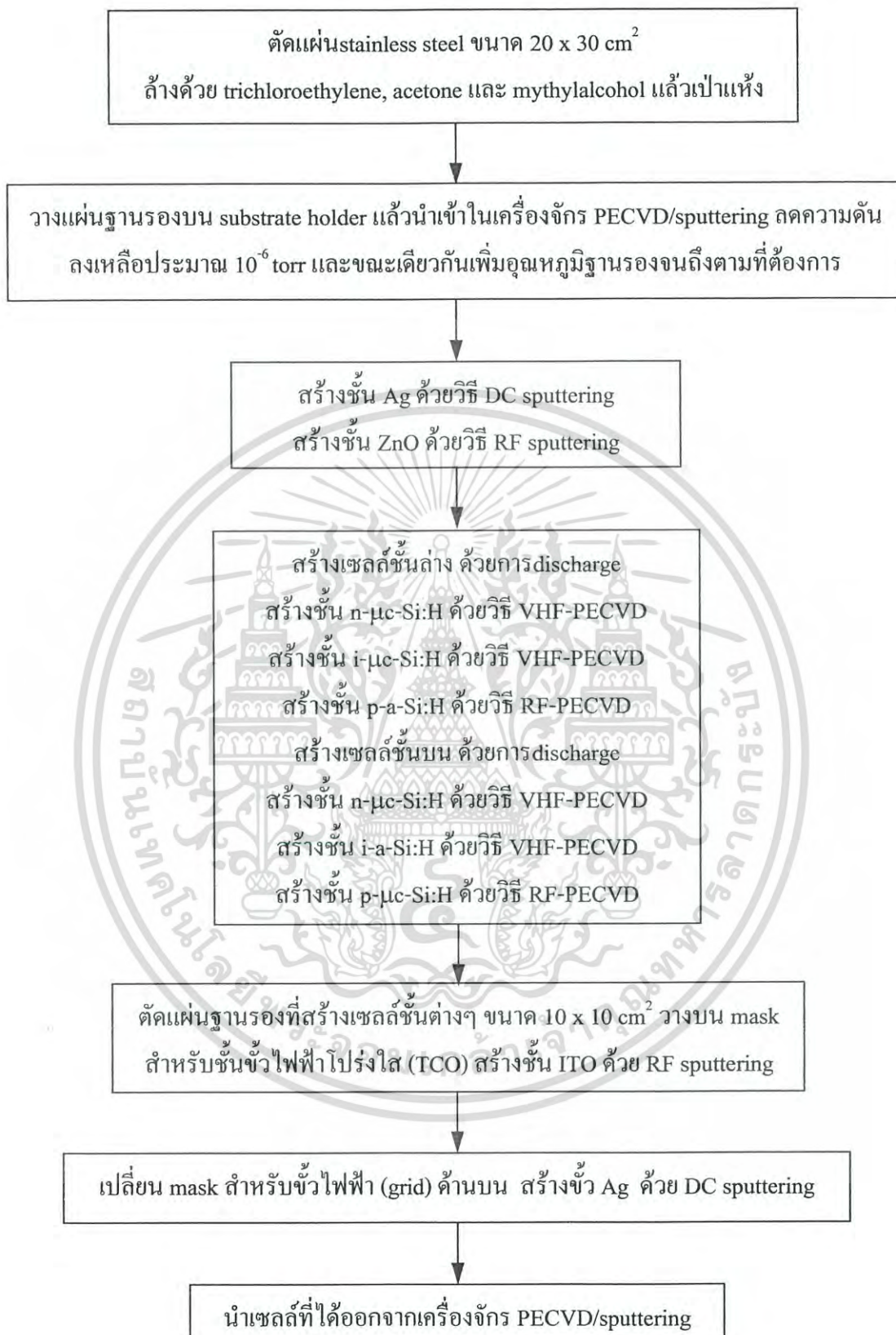


รูปที่ 5.4 ภาพถ่ายเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางที่ประดิษฐ์ได้ (top view)

### 5.3 ผลการวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์เบื้องต้น

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางที่ประดิษฐ์ได้ในเบื้องต้น เมื่อวัดลักษณะสมบัติทางเอาต์พุตด้วยเครื่องจำลองแสงอาทิตย์เทียม (Spire Sun Simulator) ที่ความเข้มแสง  $100 \text{ mW/cm}^2$  (AM 1.5) จะได้ค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด ( $V_{oc}$ ) 1.21 V กระแสไฟฟ้าลัดวงจร ( $J_{sc}$ ) มีค่าเท่ากับ  $11.72 \text{ mA/cm}^2$  ฟิลด์แฟกเตอร์ ( $FF$ ) มีค่าเท่ากับ 0.588 และประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ ( $\eta_{eff}$ ) มีค่าประมาณ 8.33 %

การวัดลักษณะสมบัติทางเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง โดยเครื่อง Spire Sun Simulator แสดงในภาคผนวก ก-6 ตั้งอยู่ที่สถาบันพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ (ISET) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ



รูปที่ 5.5 แสดงสรุปขั้นตอนการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด thin film ด้วยวิธี VHF-PECVD

เบื้องต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.4 การปรับปรุงประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดทันเดม

โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบทันเดมเป็นโครงสร้างที่ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีเสถียรภาพและประสิทธิภาพที่สูง จากโครงสร้างแบบทันเดมจะประกอบด้วยเซลล์ชั้นบนและเซลล์ชั้นล่าง ซึ่งรอยต่อของเซลล์ทั้งสองดังกล่าวนี้ คือรอยต่อ p-n (tunnel junction) รอยต่อดังกล่าวนี้อาจทำหน้าที่เสมือนรอยสัมผัสแบบโอห์มิก และเสมือนตัวต้านทานเชื่อมต่อเซลล์แสงอาทิตย์ข้างเคียงให้ต่ออนุกรมกันได้เท่านั้นเอง จึงไม่มีแรงดันไฟฟ้าภายในที่รอยต่อ p-n รอยต่อดังกล่าวนี้อาจมีเทอมบ่งชี้ถึงคุณสมบัติที่คล้ายกันได้แก่ การดูดกลืนแสงที่ต่ำของรอยต่อและการรวมตัวของพาหะที่บริเวณรอยต่อ ซึ่งถ้ามีการดูดกลืนแสงที่สูงจะนำไปสู่การลดลงของกระแสไฟฟ้าภายในเซลล์แสงอาทิตย์ และการที่จะทำให้รอยต่อ p-n มีการรวมตัวของพาหะที่มีประสิทธิภาพนั้นสามารถทำได้โดยรอยต่อ p-n จะต้องเป็นวัสดุโมโนคริสตัลไลน์ แต่จากการศึกษาพบว่า การสร้างวัสดุโมโนคริสตัลไลน์ชนิด n ( $n\text{-}\mu\text{c-Si:H}$ ) บนวัสดุอะมอร์ฟิสนชนิด p ( $p\text{-a-Si:H}$ ) นั้น ในช่วงแรกชั้น n จะไม่เกิดเป็นวัสดุโมโนคริสตัลไลน์ตามที่เรากำลังต้องการ แต่จะเกิดเป็นวัสดุโมโนคริสตัลไลน์เมื่อฟิล์มมีความหนาที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจากความหนาที่เพิ่มขึ้นนี้เองจะทำให้ชั้น n มีการดูดกลืนแสงเพิ่มมากขึ้นด้วย ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าภายในเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการปรับปรุงชั้น  $n\text{-}\mu\text{c-Si:H}$  โดยทำการปลูกบนชั้น  $p\text{-a-Si:H}$  เพื่อประยุกต์ใช้เป็นรอยต่อ p-n ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดทันเดมซึ่ง คุณสมบัติของรอยต่อ p-n ส่งผลต่อคุณสมบัติทางเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยประสิทธิภาพการรวมตัวของพาหะที่รอยต่อ p-n สามารถหาค่าได้จากการวัดลักษณะสมบัติทางเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์

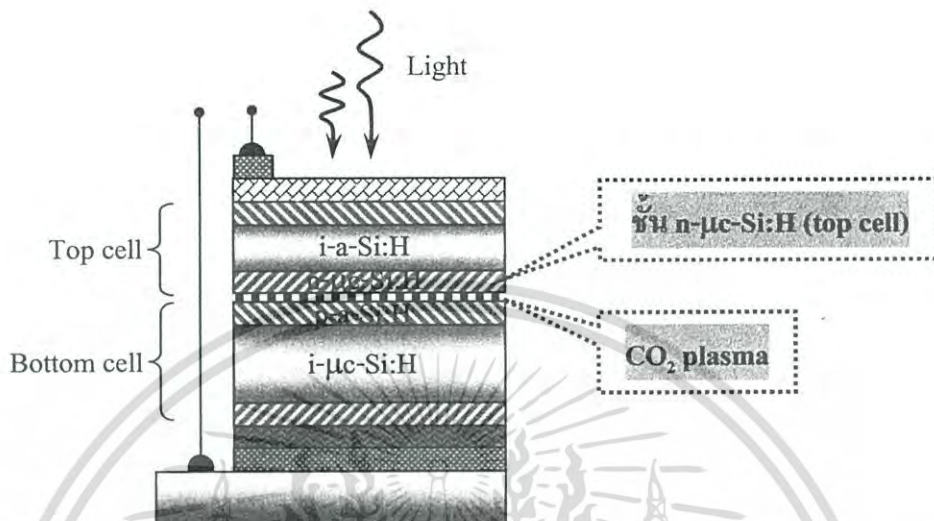
ขั้นตอนในการปรับปรุงประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดทันเดม ดังนี้

1. เพิ่มกระบวนการ  $\text{CO}_2$  plasma ชั้นระหว่างชั้น  $p\text{-a-Si:H}$  ของเซลล์ชั้นล่าง (bottom cell) และชั้น  $n\text{-}\mu\text{c-Si:H}$  ของเซลล์ชั้นบน (top cell) เพื่อให้รอยต่อ p-n มีคุณสมบัติเสมือนรอยสัมผัสแบบโอห์มิกที่ดี ซึ่งกระบวนการ  $\text{CO}_2$  plasma ดังกล่าวนี้อาจใช้วิธี RF-PECVD ใช้ระยะเวลาในการสร้างที่สั้นและใช้ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าต่ำๆ
2. เปลี่ยนเงื่อนไขการสร้างชั้น  $n\text{-}\mu\text{c-Si:H}$  ของเซลล์ชั้นบน โดยเพิ่มอัตราส่วนการไหลของก๊าซ  $\text{SiH}_4$  ( $\text{SiH}_4 + \text{H}_2$ ) จาก 4 % เป็น 5.1 % เพื่อให้เซลล์ชั้นบนมีค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดเพิ่มสูงขึ้น และลดความหนาของชั้น  $n\text{-}\mu\text{c-Si:H}$  จาก 260 Å เป็น 220 Å เพื่อให้กระแสไฟฟ้าภายในเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มสูงขึ้น

จากขั้นตอนการปรับปรุงข้างต้นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดทันเดมจะมีโครงสร้างคือ stainless steel/ Ag/ Zn/  $n\text{-}\mu\text{c-Si:H}$ /  $i\text{-}\mu\text{c-Si:H}$ /  $p\text{-a-Si:H}$ /  $\text{CO}_2$  plasma/  $n\text{-}\mu\text{c-Si:H}$ /  $i\text{-a-Si:H}$ /  $p\text{-}\mu\text{c-Si:H}$ / ITO ดัง

แสดงในรูปที่ 5.6 และตารางที่ 5.3 แสดงเงื่อนไขของการปรับปรุงประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์  
เอกสารฉบับนี้  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิดทันเดมโดยเพิ่มกระบวนการ CO<sub>2</sub> plasma และเปลี่ยนเงื่อนไขการสร้างชั้น n-μc-Si:H ของเซลล์ชั้นบน



รูปที่ 5.6 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดทันเดมโดยเพิ่มกระบวนการ CO<sub>2</sub> plasma และเปลี่ยนเงื่อนไขการสร้างชั้น n-μc-Si:H ของเซลล์ชั้นบน

ตารางที่ 5.3 เงื่อนไขของการปรับปรุงประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดทันเดมโดยเพิ่มกระบวนการ CO<sub>2</sub> plasma และเปลี่ยนเงื่อนไขการสร้างชั้น n-μc-Si:H ของเซลล์ชั้นบน

ชั้น	ก๊าซดิบ	ความดัน (torr)	อุณหภูมิแผ่นฐาน (°C)	ความหนา (Å)	PECVD
n-μc-Si:H (bottom cell)	SiH <sub>4</sub> = 7 sccm PH <sub>3</sub> = 21 sccm H <sub>2</sub> = 160 sccm	0.2	240	300	VHF (100 MHz)
i-μc-Si:H (bottom cell)	SiH <sub>4</sub> = 18 sccm H <sub>2</sub> = 260 sccm	1.5	200	9180	VHF (60 MHz)
p-a-Si:H (bottom cell)	SiH <sub>4</sub> = 5 sccm B <sub>2</sub> H <sub>6</sub> = 25 sccm H <sub>2</sub> = 75 sccm	0.5	100	300	RF (13.56 MHz)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.3 (ต่อ) เงื่อนไขของการปรับปรุงประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดทันเดม โดยเพิ่มกระบวนการ CO<sub>2</sub> plasma และเปลี่ยนเงื่อนไขการสร้างชั้น n- $\mu$ c-Si:H ของเซลล์ชั้นบน

ชั้น	ก๊าซดิบ	ความดัน (torr)	อุณหภูมิแผ่นฐาน (°C)	ความหนา (Å)	PECVD
CO <sub>2</sub> plasma	CO <sub>2</sub> = 10 sccm	0.15	-	40 sec	RF (13.56 MHz)
n- $\mu$ c-Si:H (top cell)	SiH <sub>4</sub> = 7 sccm PH <sub>3</sub> = 49 sccm H <sub>2</sub> = 130 sccm SC = 5.1 %	0.2	240	220	VHF (100 MHz)
i-a-Si:H (top cell)	SiH <sub>4</sub> = 40 sccm H <sub>2</sub> = 80 sccm	0.8	250	5760	VHF (44 MHz)
p- $\mu$ c-Si:H (top cell)	SiH <sub>4</sub> = 3 sccm B <sub>2</sub> H <sub>6</sub> = 21 sccm H <sub>2</sub> = 300 sccm SiH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> = 3 sccm	2.0	100	200	RF (13.56 MHz)

### 5.5 ผลการปรับปรุงประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดทันเดม

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดทันเดมที่ได้รับการปรับปรุงประสิทธิภาพ โดยเพิ่มกระบวนการ CO<sub>2</sub> plasma และเปลี่ยนเงื่อนไขการสร้างชั้น n- $\mu$ c-Si:H ของเซลล์ชั้นบน เมื่อวัดลักษณะสมบัติทางเอาต์พุตด้วยเครื่องจำลองแสงอาทิตย์เทียมที่ความเข้มแสง 100 mW/cm<sup>2</sup> (AM 1.5) จะได้แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดเท่ากับ 1.44 V กระแสไฟฟ้าลัดวงจรเท่ากับ 12.78 mA/cm<sup>2</sup> และฟิลล์แฟกเตอร์เท่ากับ 0.688

เมื่อเปรียบเทียบผลการวัดลักษณะสมบัติทางเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดทันเดมที่ประดิษฐ์ได้ในเบื้องต้น และเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดทันเดมที่ผ่านการปรับปรุงประสิทธิภาพ พบว่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดเพิ่มขึ้นจาก 1.21 V เป็น 1.44 V และฟิลล์แฟกเตอร์เพิ่มขึ้นจาก 0.588 เป็น 0.688 ผลที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายได้ดังนี้ การเพิ่มกระบวนการ CO<sub>2</sub> plasma ขึ้นระหว่างชั้น p-a-Si:H ของเซลล์ชั้นล่างและชั้น n- $\mu$ c-Si:H ของเซลล์ชั้นบน จะทำให้ชั้น n- $\mu$ c-Si:H ในช่วงแรกเกิดเป็นวัสดุโมโนคริสตัลไลน์ที่สูงได้อย่างรวดเร็วตั้งแต่เริ่มต้นปลูกฟิล์ม ส่งผลให้รอยต่อ p-n มีคุณสมบัติเสมือนรอยสัมผัสแบบโอห์มิกที่ดีขึ้น และประสิทธิภาพการรวมตัวของพาหะที่รอยต่อ p-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

n จะเพิ่มสูงยิ่งขึ้น ดังจะสามารถทราบได้จากการเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดและฟิลด์แฟกเตอร์ และอีกปัจจัยที่มีผลทำให้แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดเพิ่มสูงขึ้นคือ การเปลี่ยนเงื่อนไขการสร้างชั้น n- $\mu\text{c-Si:H}$  ของเซลล์ชั้นบน โดยเพิ่มอัตราส่วนการไหลของก๊าซ  $\text{SiH}_4/(\text{SiH}_4 + \text{H}_2)$  จาก 4 % เป็น 5.1 % จะทำให้ภายในฟิล์มมีจำนวน Volume Fraction ลดลง ซึ่งค่า Volume Fraction นี้จะเป็นตัวกำหนดหรือควบคุมปริมาณของสัทธิไฟฟ้าภายในของเซลล์แสงอาทิตย์ จากการที่ฟิล์มชั้น n- $\mu\text{c-Si:H}$  มีจำนวน Volume Fraction ลดลง การต่อเชื่อมของแถบหรือแลตทิซ (lattice) ที่บริเวณรอยต่อ p-n จะต่อเนื่องยิ่งขึ้นหรือมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น [66] ซึ่งเป็นผลทำให้มีแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดเพิ่มขึ้น และส่วนของกระแสไฟฟ้าลัดวงจรพบว่าเพิ่มขึ้นจาก  $11.72 \text{ mA/cm}^2$  เป็น  $12.78 \text{ mA/cm}^2$  ซึ่งผลที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายได้ดังนี้ การเปลี่ยนเงื่อนไขการสร้างชั้น n- $\mu\text{c-Si:H}$  ของเซลล์ชั้นบน โดยลดความหนาของชั้น n- $\mu\text{c-Si:H}$  จาก  $260 \text{ \AA}$  เป็น  $220 \text{ \AA}$  จากการลดลงของความหนาของฟิล์มนี้จะทำให้แสงสามารถผ่านเข้าสู่เซลล์ชั้นล่างได้มากขึ้น เป็นผลให้เซลล์แสงอาทิตย์มีกระแสไฟฟ้าลัดวงจรเพิ่มขึ้น

จากผลของการเพิ่มขึ้นของค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด กระแสไฟฟ้าลัดวงจรและฟิลด์แฟกเตอร์ จะทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดทันเดมที่ผ่านการปรับปรุงมีประสิทธิภาพเพิ่มสูงขึ้นเป็น 12.66 %

## บทที่ 6

### สรุปผลการทดลอง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษากระบวนการสร้างและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดทันเคมด้วยวิธี VHF-PECVD ที่มีชั้นผลิตพาหะเป็นวัสดุ a-Si:H และวัสดุ  $\mu\text{-Si:H}$  ซึ่งในเบื้องต้นเป็นการศึกษาการเทคนิโกลยการปลูกฟิล์มบาง a-Si:H และฟิล์มบาง  $\mu\text{-Si:H}$  ชนิดบริสุทธิ์ด้วยวิธี VHF-PECVD ซึ่งการปลูกฟิล์มในเบื้องต้นจะเกิดปัญหาเมื่อทำการเปลี่ยนคลื่นความถี่ของสนามไฟฟ้าที่ใช้กระตุ้นพลาสมาจากคลื่นความถี่ RF เป็นคลื่นความถี่ VHF พบว่าพลาสมาไม่สามารถแพร่กระจายเหนือแผ่นขั้วสัญญาณไฟฟ้าได้ทั่วทุกบริเวณ และฟิล์มที่เคลือบบนแผ่นฐานรองจะไม่สม่ำเสมอในบางบริเวณ ดังนั้นจึงได้ทำการปรับปรุงขั้วสัญญาณไฟฟ้าซึ่งเป็นส่วนประกอบของระบบ VHF-PECVD เพื่อให้สามารถทำงานที่คลื่นความถี่ย่าน VHF โดยออกแบบขั้วสัญญาณไฟฟ้างดงกล่าวให้มีลักษณะเป็นแบบแบนเรียบมีรูเจาะ พบว่ามีผลทำให้พลาสมาสามารถแพร่กระจายเหนือแผ่นขั้วสัญญาณไฟฟ้าได้ทั่วทุกบริเวณ และฟิล์มที่เคลือบบนแผ่นฐานรองจะสม่ำเสมอยิ่งขึ้น ในส่วนที่สองเป็นการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานต่างๆ ทั้งคุณสมบัติทางแสง คุณสมบัติทางไฟฟ้าและคุณสมบัติทางโครงสร้างของฟิล์มบาง a-Si:H และฟิล์มบาง  $\mu\text{-Si:H}$  ชนิดบริสุทธิ์ เพื่อให้ได้ฟิล์มที่มีความสม่ำเสมอ มีคุณภาพดี และอัตราการปลูกฟิล์มสูง

โดยเริ่มต้นทำการศึกษาความดันก๊าซที่มีต่อคุณสมบัติของ a-Si:H โดยสร้างฟิล์มบาง a-Si:H ด้วยวิธี VHF-PECVD ซึ่งใช้คลื่นความถี่สนามไฟฟ้า 44 MHz และทำการเปลี่ยนความดันก๊าซใน chamber จาก 0.5 torr ถึง 1.5 torr พบว่าที่ความดันก๊าซใน chamber เท่ากับ 0.8 torr ฟิล์มบาง a-Si:H ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองมีความสม่ำเสมอ (uniformity) ที่สุด ซึ่งในเบื้องต้นฟิล์มบาง a-Si:H มีอัตราการปลูกฟิล์มเท่ากับ 5.1 Å/sec และจากการศึกษาอุณหภูมิแผ่นฐานรองที่มีต่อคุณสมบัติของ a-Si:H โดยการสร้างฟิล์มบาง a-Si:H ซึ่งทำการเปลี่ยนอุณหภูมิแผ่นฐานรองจาก 180 °C ถึง 300 °C พบว่าที่อุณหภูมิแผ่นฐานรองเท่ากับ 250 °C ฟิล์มบาง a-Si:H จะมีค่า  $\sigma_{ph}$  และค่า  $\sigma_{ph}/\sigma_d$  มีค่าที่สูง และจากการศึกษาอัตราส่วนการไหลของก๊าซไฮโดรเจนที่มีต่อคุณสมบัติของ a-Si:H โดยการสร้างฟิล์มบาง a-Si:H ซึ่งทำการเปลี่ยนอัตราส่วนการไหลของก๊าซ  $\text{H}_2/\text{SiH}_4$  ในช่วง 1 ถึง 4 พบว่าที่อัตราส่วนการไหลของก๊าซ  $\text{H}_2/\text{SiH}_4$  ที่เหมาะสม จะทำให้มีอัตราการปลูกฟิล์มที่สูง และมีค่าสภาพนำไฟฟ้าที่สูง และส่วนสุดท้ายของ a-Si:H เป็นการศึกษาความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าที่มีต่อคุณสมบัติของ a-Si:H โดยการสร้างฟิล์มบาง a-Si:H ซึ่งทำการเปลี่ยนความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าจาก 38 mW/cm<sup>2</sup> ถึง 76 mW/cm<sup>2</sup> พบว่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมคือ 63 mW/cm<sup>2</sup> ซึ่งใช้ความดันก๊าซใน chamber 0.8 torr อุณหภูมิแผ่นฐาน 250 °C และอัตราส่วนการไหลของก๊าซ

$\text{H}_2/\text{SiH}_4$  เท่ากับ 2 ( $\text{SiH}_4 = 40$  sccm และ  $\text{H}_2 = 80$  sccm) จะมีอัตราการปลูกฟิล์มสูงถึง 6.4 Å/sec ค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่องว่างพลังงาน 1.71 eV ในขณะที่ค่า  $\sigma_{ph}/\sigma_d$  อยู่ระดับ  $1.46 \times 10^5$  และมีความหนาแน่นของ แขนขาดต่ำระดับ  $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$

ต่อมาทำการศึกษาความดันก๊าซที่มีต่อคุณสมบัติของ  $\mu\text{c-Si:H}$  โดยสร้างฟิล์มบาง  $\mu\text{c-Si:H}$  ด้วยวิธี VHF-PECVD ซึ่งใช้คลื่นความถี่สนามไฟฟ้า 60 MHz และทำการเปลี่ยนความดันก๊าซใน chamber จาก 0.5 torr ถึง 2.0 torr พบว่าที่ความดันก๊าซใน chamber เท่ากับ 1.5 torr ฟิล์มบาง a-Si:H ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองมีความสม่ำเสมอ (uniformity) ที่สุด ซึ่งในเบื้องต้นฟิล์มบาง  $\mu\text{c-Si:H}$  มีอัตราการปลูกฟิล์มเท่ากับ  $3.2 \text{ \AA/sec}$  และจากการศึกษาอุณหภูมิแผ่นฐานรองที่มีต่อคุณสมบัติของ  $\mu\text{c-Si:H}$  โดยการสร้างฟิล์มบาง  $\mu\text{c-Si:H}$  ซึ่งทำการเปลี่ยนอุณหภูมิแผ่นฐานรองจาก  $180^\circ\text{C}$  ถึง  $250^\circ\text{C}$  พบว่าที่อุณหภูมิแผ่นฐานรองเท่ากับ  $200^\circ\text{C}$  ฟิล์มบาง  $\mu\text{c-Si:H}$  จะมีค่า  $\sigma_{ph}$  และค่า  $\sigma_{ph}/\sigma_d$  มีค่าที่สูง และจากการศึกษาอัตราส่วนการไหลของก๊าซไฮโดรเจนที่มีต่อคุณสมบัติของ  $\mu\text{c-Si:H}$  โดยการสร้างฟิล์มบาง  $\mu\text{c-Si:H}$  ซึ่งทำการเปลี่ยนอัตราส่วนการไหลของก๊าซ  $\text{SiH}_4/(\text{SiH}_4 + \text{H}_2)$  จาก 1 ถึง 4 พบว่าที่อัตราส่วนการไหลของก๊าซ  $\text{SiH}_4/(\text{SiH}_4 + \text{H}_2)$  ที่เหมาะสม จะทำให้มีอัตราการปลูกฟิล์มที่สูง และมีค่าสภาพนำไฟฟ้าที่สูง และส่วนสุดท้ายของ  $\mu\text{c-Si:H}$  เป็นการศึกษาความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าที่มีต่อคุณสมบัติของ  $\mu\text{c-Si:H}$  โดยการสร้างฟิล์มบาง  $\mu\text{c-Si:H}$  ซึ่งทำการเปลี่ยนความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าจาก  $63 \text{ mW/cm}^2$  ถึง  $95 \text{ mW/cm}^2$  พบว่าที่ความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมคือ  $82 \text{ mW/cm}^2$  ซึ่งใช้ความดันก๊าซใน chamber 1.5 torr อุณหภูมิแผ่นฐาน  $200^\circ\text{C}$  และอัตราส่วนการไหลของก๊าซ  $\text{SiH}_4/(\text{SiH}_4 + \text{H}_2)$  เท่ากับ 6.5 % ( $\text{SiH}_4 = 18 \text{ sccm}$  และ  $\text{H}_2 = 260 \text{ sccm}$ ) จะมีอัตราการปลูกฟิล์มสูงถึง  $5.1 \text{ \AA/sec}$  ค่าช่องว่างพลังงาน 1.36 eV ในขณะที่ค่า  $\sigma_{ph}/\sigma_d$  อยู่ระดับ  $1.20 \times 10^3$  และมีค่า Volume Fraction ประมาณ 58 %

ในส่วนสุดท้ายเป็นการนำฟิล์มบาง a-Si:H และฟิล์มบาง  $\mu\text{c-Si:H}$  ชนิดบริสุทธิ์ไปประยุกต์ใช้เป็นชั้นผลิตพาหะในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดทันเดม ซึ่งมีโครงสร้างคือ stainless steel/ Ag/ Zn/ n- $\mu\text{c-Si:H}$ / i- $\mu\text{c-Si:H}$ / p-a-Si:H/ n- $\mu\text{c-Si:H}$ / i-a-Si:H/ p- $\mu\text{c-Si:H}$ / ITO จากผลการวัดลักษณะสมบัติทางเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้มแสง  $100 \text{ mW/cm}^2$  (AM 1.5) เบื้องต้น พบว่าแรงดันไฟฟ้าวงจรมีค่าเท่ากับ 1.21 V กระแสไฟฟ้าลัดวงจรมีค่าเท่ากับ  $11.72 \text{ mA/cm}^2$  ฟิลด์แฟกเตอร์มีค่าเท่ากับ 0.588 และประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าประมาณ 8.33 % และทำการปรับปรุงประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดทันเดม ซึ่งมีโครงสร้างคือ stainless steel/ Ag/ Zn/ n- $\mu\text{c-Si:H}$ / i- $\mu\text{c-Si:H}$ / p-a-Si:H/  $\text{CO}_2$  plasma/ n- $\mu\text{c-Si:H}$ / i-a-Si:H/ p- $\mu\text{c-Si:H}$ / ITO โดยเพิ่มกระบวนการ  $\text{CO}_2$  plasma ขึ้นระหว่างชั้น p-a-Si:H ของเซลล์ชั้นล่างและชั้น n- $\mu\text{c-Si:H}$  ของเซลล์ชั้นบน จากผลการวัดลักษณะสมบัติทางเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความเข้มแสง  $100 \text{ mW/cm}^2$  พบว่าแรงดันไฟฟ้าวงจรมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 1.44 V และฟิลด์แฟกเตอร์เพิ่มขึ้นเป็น 0.688 เนื่องจากชั้น n- $\mu\text{c-Si:H}$  ในช่วงแรกเกิดเป็นวัสดุโมโนคริสตัลไลน์ที่สูงได้อย่างรวดเร็วตั้งแต่เริ่มต้นปลูกฟิล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่งผลให้รอยต่อ p-n มีคุณสมบัติเหมือนรอยสัมผัสแบบโอห์มิกที่ดีขึ้น ประสิทธิภาพการรวมตัวของพาหะที่รอยต่อ p-n จะเพิ่มสูงขึ้น และอีกปัจจัยที่มีผลทำให้แรงดันไฟฟ้าวงจรถูกเปิดเพิ่มสูงขึ้นคือการเปลี่ยนเงื่อนไขการสร้างชั้น n- $\mu\text{c-Si:H}$  ของเซลล์ชั้นบน โดยเพิ่มอัตราส่วนการไหลของก๊าซ  $\text{SiH}_4/(\text{SiH}_4 + \text{H}_2)$  เป็น 5.1 % จะทำให้ภายในฟิล์มมีจำนวน Volume Fraction ลดลง จากการที่ฟิล์มมีจำนวน Volume Fraction ลดลง การต่อเชื่อมของแถบหรือแลตทิซที่บริเวณรอยต่อ p-n จะต่อเนื่องยิ่งขึ้นหรือมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น และจากการเปลี่ยนเงื่อนไขการสร้างชั้น n- $\mu\text{c-Si:H}$  ของเซลล์ชั้นบน โดยความหนาของชั้น n- $\mu\text{c-Si:H}$  ลดลงเป็น 220 Å พบว่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรเพิ่มขึ้นเป็น  $12.78 \text{ mA/cm}^2$  เนื่องจากแสงสามารถผ่านเข้าสู่เซลล์ชั้นล่างได้มากขึ้น ซึ่งเป็นผลให้เซลล์แสงอาทิตย์มีกระแสไฟฟ้าลัดวงจรเพิ่มสูงขึ้น จากการเพิ่มขึ้นของค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรถูกเปิด กระแสไฟฟ้าลัดวงจรและฟิลด์แฟกเตอร์ จะทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดทันเดมที่ผ่านการปรับปรุงมีประสิทธิภาพเพิ่มสูงขึ้นเป็น 12.66 %

การทดลองทั้งหมดในงานวิจัยนี้ สามารถนำฟิล์มบาง a-Si:H และฟิล์มบาง  $\mu\text{c-Si:H}$  ชนิดบริสุทธิ์ที่ปลูกด้วยวิธี VHF-PECVD ไปประยุกต์ใช้เป็นชั้นผลิตพาหะในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดทันเดมได้ และเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผ่านการปรับปรุงประสิทธิภาพจะมีประสิทธิภาพที่เพิ่มสูงขึ้นถึง 50 % ซึ่งงานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยที่น่าจะได้รับการพัฒนาประสิทธิภาพให้เพิ่มสูงขึ้นต่อไปอีก และใช้งานได้จริงในอุตสาหกรรมการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ของภาคเอกชนต่อไป

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Carlson D.E., Wronski C.R. "Amorphous Silicon Solar Cell." **Applied Physics Letters**, Vol. 28, 1976, p. 671.
- [2] Carlson D.E., Wronski C.R. "**Amorphous Silicon Solar Cell.**" U.S. Patent No. 4,064,521. 20 December 1977.
- [3] Hamakawa Y., Tawada Y. "Valency Control of Glow Discharge Produced a-SiC:H and Its Application to Heterojunction Solar Cells." **Int. J. Solar Energy**, 1, 1982, p.125.
- [4] Meier J., Torres P., Platz R., Dubail S., Kroll U., Anna Selvan J.A., Pellaton-Vaucher N., Hof C., Fischer D., Keppner H., Shah A.V., Ufert K.-D., Giannoulès P. and Köhler J. "On the Way towards High-Efficiency Thin Film Silicon Solar Cells by the 'Micromorph' Concept." **Material Research Society Symposium Proceedings Spring Meeting**, Vol. 420, San Francisco, April 1996, pp. 3-14.
- [5] Yamamoto K., Yoshimi M., Suzuki T., Tawada Y., Okamoto Y., Nakajima A. and Igari S. "Below 5m Thin Film Poly-Si Solar Cell on Glass Substrate Fabricated at Low Temperature." **Proceedings of 2<sup>nd</sup> World Conference on Photovoltaic Energy Conversion**, Vienna, Austria, July 1998, pp. 1284-1289.
- [6] Meier J., Keppner H., Dubail S., Ziegler Y., Feitknecht L., Torres P., Hof Ch., Kroll U., Fischer D., Cuperus J., Anna Selvan J.A., Shah A. "Microcrystalline and Micromorph Thin-Film Silicon Solar Cells." **Proceedings of the 2<sup>nd</sup> World Conference on Photovoltaic Energy Conversion**, Vienna, July 1998, Vol. 1, pp. 375-380.
- [7] Yamamoto K., Yoshimi M., Tawada Y., Okamoto Y. and Nakajima A. "Cost effective and High Performance Thin Film Si Solar Cell towards the 21<sup>st</sup> century." **Technical Digest of the 11<sup>th</sup> International Photovoltaic Science and Engineering Conference**, Sapporo, Japan, 1999, pp. 255-259.
- [8] Shah A., Meier J., Vallat-Sauvain E., Droz C., Kroll U., Wyrsh N., Guillet J. and Graf U. "Microcrystalline Silicon and Micromorph Tandem Solar Cells." **Thin Solid Films**, Vol. 403-404, 2002, pp. 179-187.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [9] Sriprapa K., Sichanugrist P. "Amorphous/Microcrystalline Silicon Solar Cell Fabricated on Metal Substrate and Its Pilot Production." **Technical Digest of the 14<sup>th</sup> International Photovoltaic Science and Engineering Conference**, Vol. 1, Bangkok, Thailand, January 2004, pp. 99-101.
- [10] Takahashi K., Konagai M. **Amorphous Silicon Solar Cells**. London : North Oxford Academic Publisher, 1986.
- [11] Curtins H., Wyrsh N., Favre M. and Shah A.V. "Influence of Plasma Excitation Frequency for a-Si:H Thin Film Deposition." **Plasma Chemistry and Plasma Processing**, Vol. 7, 1987, pp. 267-273.
- [12] Curtins H., Wyrsh N., Favre M., Prasad K., Brêchet M. and Shah A.V. "Influence of Plasma Excitation Frequency on Deposition Rate and on Film Properties for Hydrogenated Amorphous Silicon." **Material Research Society Symposium Proceedings**, Vol. 95, California, April 1987, pp. 249-253.
- [13] Heintze M. "Versatile High Rate Plasma Deposition and Processing with Very High Frequency Excitation." **Material Research Society Symposium Proceedings**, Vol. 467, April 1997, pp. 471-481.
- [14] Sansonnens L., Howling A. and Hollenstein Ch. "Large Area Deposition of Amorphous and Microcrystalline Silicon by Very High Frequency Plasma." **Material Research Society Symposium Proceedings**, Vol. 507, San Francisco, April 1998, pp. 541-546.
- [15] Brodsky M.H., Editor. **Amorphous Semiconductors**. New York : Springer Verlag, 1979.
- [16] Street R.A., Cahn. R.W., Davis E.A. and Ward I.M. **Hydrogenated Amorphous Silicon**. London : Press Syndicate of the University of Cambridge, 1991.
- [17] Lufty W., Tsuso S. **Hydrogenated Amorphous Silicon Alloy Deposition Process**. New York : Marcel Dekker Inc. 1993.
- [18] Street R.A. **Hydrogenated Amorphous Silicon**, Cambridge University Press. London : Press Syndicate of the University of Cambridge, 1991, p. 95.
- [19] คุณิต เครื่องาม. **สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ เล่ม 2**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. พ.ศ. 2542.
- [20] Tauc J. **Amorphous and Liquid Semiconductors**, London and New York : Plenum Press, 1974, p. 159.

- [21] Mott N.F. “**Conduction in Non Crystalline Materials III.**” *Phil. Mag.*, Vol. 19, 1969, p. 853.
- [22] Ichinose N., Hirano H. and Kuwano Y. **Electronic Devices**. Baifukan, Japan : Physics and Applications, 1987, p.148.
- [23] Fritzsche H., Pollak M., Editors, **Hopping and Related Phenomena**. Advance in Disorder Semiconductors, Vol. 2, World Scientific, Singapore, 1990.
- [24] Chirakawikul K., Kruangam D. and Panyakeow S. “Measurements of Density of Defects in Hydrogenated Amorphous Silicon by Constant Photocurrent Method and Electron Spin Resonance.” **Proceedings of the 21<sup>st</sup> Conference on Electrical Engineering**, King Mongkut’s University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand, 1998, p. 304.
- [25] Matsuda A. “Formation Kinetics and Control of Microcrystallinity in Microcrystalline Si from Glow Discharge Plasma.” **Journal of Non-Crystalline Solids**, Vol. 59-60, 1983, pp. 767-771.
- [26] Iqbal Z., Veprek S., Webb A.P. and Capezzuto P. “Raman Scattering from Small Particle Size Polycrystalline Silicon.” **Solid State Communication**, Vol. 37, 1981, p. 993.
- [27] Vanecek M., Kocka J., Poruba A. and Fejfar A. “Direct Measurement of Deep Defect Density in Thin Amorphous Silicon films with the Absolute Constant Photocurrent Method.” **Journal of Applied Physics**, Vol. 78, 1995, p. 6203.
- [28] Vanecek M., Kocka J., Stuchlik J. and Triska A. “Direct Measurement of the Gap States and Band Tail Absorption by Constant Photocurrent Method in Amorphous Silicon.” **Sol. State Comm.**, Vol. 39, 1981, p. 1199.
- [29] Vanecek M., Poruba A., Remes Z., Beck N. and Nesladek M. “Optical Properties of Microcrystalline Materials.” **Journal of Non-Crystalline Solids**, Vol. 227-230, 1998, pp. 967-972.
- [30] Scher H. and Zallen R. “Critical Density in Percolation Processes.” **J. Chem. Phys.**, Vol. 53, 1970, p. 3759.
- [31] Catalano A., Faughnan B.W. and Moore A.R. “Effects of Low Level Boron Doping of the i-layer Performance of a-SiC:H p-i-n Devices.” **Solar Energy Materials**, 1986, p. 1365.

- [32] Wyrsh N., Torres P., Goetz M., Dubail S., Feitknecht L., Cuperus J., Shah A., Rech B., Kluth O., Wieder S., Vetterl O., Stiebig H., Beneking C. and Wagner H. "Development of Inverted Micromorph Solar Cells." **Proceedings of the 2<sup>nd</sup> World Conference on Photovoltaic Energy Conversion**, Vienna, July 1998, Vol. 1, pp. 467-471.
- [33] Hamakawa Y., Editor. **Amorphous Semiconductor**. North Holland OHM : Japan Annual Reviews in Electronics, Computers & Telecommunications (JARECT), 1982, p. 134.
- [34] Crandall R.S. "Modeling of Thin Film Solar Cells : Uniform Field Approximation." **Journal of Applied Physics**, Vol. 54, 1983, pp. 7176-7186.
- [35] Kruangam D., Boonkosum W. and Siamchai P. "Development of Amorphous Si:H High Voltage Solar Cell Based upon p-i-n Multi Layered Structures." , **Proceedings of the 16<sup>th</sup> Conference on Electrical Engineering**, King Mongkut Institute of Technology (Ladkrabang), Bangkok, 1993, p. 482.
- [36] Schropp, Ruud E.I. and Miro Zemn. **Amorphous and Microcrystalline Silicon Solar Cells : Modeling, Materials and Device Technology**. Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [37] Shah A., Kroll U., Keppner H., Meier J., Torres P. and Fischer D. "Potential of VHF-Plasma for Low-Cost Production of a-Si:H Solar Cells." **Technical Digest of the 9<sup>th</sup> International Photovoltaic Science and Engineering Conference**, Miyazaki, Japan, 1996, pp. 267-270.
- [38] Heintze M., Zedlitz R. "Control of a-Si:H Deposition by the Ion flux in a VHF Plasma." **Journal of Non-Crystalline Solids**, Vol. 164-166, 1993, pp. 55-58.
- [39] Zedlitz R., Heintze M. and Gotteried H.B. "Analysis of VHF Glow Discharge of a-Si:H over a Wide Frequency Range." **Material Research Society Symposium Proceedings**, Vol. 258, April 1992, pp. 147-151.
- [40] Heintze M., Zedlitz R. "New Diagnostic of High Rate a-Si:H Deposition in a VHF Plasma." **Journal of Non-Crystalline Solids**, Vol. 198-200, 1996, pp. 1038-1041.
- [41] Kuske J., Stephan U., Schade K. and Fuhs W. "Diagnostics of VHF Plasma Deposition." **Material Research Society Symposium Proceedings**, Vol. 258, April 1992, pp. 141-146.

- [42] Howling A.A., Dorier J.-L., Hollenstein Ch., Kroll U. and Finger F. "Frequency Effects in Silane Plasmas for PECVD." **Journal of Vacuum Science & Technology A** , Vol. 10, August 1992, pp. 1080-1085.
- [43] Torres P., Meier J., Kroll U., Beck N., Keppner H., Shah A. and Malang U. "Fast Deposited Microcrystalline Silicon Solar Cells." **Proceedings of the 26<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Anaheim, CA, October 1997**, pp. 711-714 .
- [44] Prasad K. "**Microcrystalline Silicon Prepared with Very High Frequency Glow Discharge Process.**" Ph.D. Thesis of Institute of Microtechnology, University of Neuchatel. 1991.
- [45] Flückiger R., Meier J., Keppner H., Kroll U., Shah A., Greim O., Morris M., Pohl J., Hapke P. and Carius R. "Microcrystalline Silicon Prepared with the Very High Frequency Glow Discharge Technique for p-i-n Solar Cell Application." **Proceedings of the 11<sup>th</sup> EC Photovoltaic Solar Energy Conference, Montreux, October 1992**, pp. 617-620.
- [46] Finger F., Hapke P., Luysberg M., Carius R., Wagner H. and Scheib M. "Improvement of Grain Size and Deposition Rate of Microcrystalline Silicon by Use of Very High Frequency Glow Discharge." **Applied Physics Letters**, vol. 65, November 1994, pp. 2588-2590.
- [47] Flückiger R., Meier J., Crovini G., Demichelis F., Giorgis F., Pirri C.F., Tresso E., Pohl j., Rigato V., Zandolin S. and Caccavale F. "Structural and Electrical Properties of Undoped Microcrystalline Silicon Grown by 70 MHz and 13.56 MHz PECVD." **Material Research Society Symposium Proceedings**, Vol. 358, Boston, April 1995, pp. 751-756.
- [48] Yang J., Sugiyama S. and Guha S. "Effect of Excitation Frequency on the Performance of Amorphous Silicon Alloy Solar Cells." **Material Research Society Symposium Proceedings**, Vol. 507, April 1998, pp. 157-161.
- [49] Kroll U., Benagli S., Meier j., Hugli A., Spitznagel J., Androustopoulos G., Roschek T., Ellert Ch., Buchel A, Bucher C. and Shah A. "High Efficiency p-i-n a-Si:H Solar Cells Prepared in a Large Area Single Chamber Process on LPCVD ZnO." **Proceedings of the 19<sup>th</sup> EC Photovoltaic Solar Energy Conference, Paris, France, June 2004**, pp. 1374-1377.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [50] Rech B., Kluth O., Repmann T., Roschek T., Springer J., Müller J., Finger F., Stiebig H. and Wagner H. "New Materials and Deposition Techniques for Highly Efficient Silicon Thin Film Solar Cells." **Solar Energy Materials and Solar Cells**, Vol. 74, October 2002, pp. 439-447.
- [51] Jones S.J., Deng X., Liu T. and Izu M. "Preparation of a-Si:H and a-SiGe:H i-Layers for n-p Solar Cells at High Deposition Rates Using a Very High Frequency Technique." **Material Research Society Symposium Proceedings**, Vol. 507, April 1998, pp. 113-118.
- [52] Meier J., Kroll U., Spitznagel J., Fay S., Bucher C., Graf U. and Shah A. "Progress in Amorphous and Micromorph Silicon Solar Cells." **Proceedings of the PV in Europe from Technology to Energy Solutions**, Rome, Italy, October 2002, pp. 440-443.
- [53] Mai Y., Klein S., Geng X. and Finger F. "Structure Adjustment During High Deposition Rate Growth of Microcrystalline Silicon Solar Cells." **Applied Physics Letters**, Vol. 85, October 2004, pp. 2839-2841.
- [54] Yamauchi Y., Takatsuka H., Yonekura Y., Noda M., Takeuchi Y. and Yamashita N. "High Efficiency Large Area Solar Module in Mitsubishi Heavy Industries." **Mitsubishi Heavy Industries. Ltd. Technical Review**, Vol. 41, October 2004, pp. 1-4.
- [55] Matsui T., Kondo M. and Matsuda A. "High Rate Microcrystalline Silicon Deposition for p-i-n Junction Solar Cells." **Technical Digest of the 14<sup>th</sup> International Photovoltaic Science and Engineering Conference**, Vol 2, Bangkok, Thailand, January 2004, pp. 1009-1010.
- [56] Mai Y., Klein S., Carius R., Wolff J., Lambertz A., Finger F. and Geng X. "Microcrystalline Silicon Solar Cells Deposited at High Rates." **Journal of Applied Physics**, Vol. 97, June 2005, pp. 1399-1402.
- [57] อัครวิน หงษ์สิงห์ทอง, วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง และ พอพนธ์ สีขณนุกฤษณ์. "การศึกษาการปลูกฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอนชนิดบริสุทธิ์ด้วยวิธีพลาสมาซีวีดีความถี่สูง" **วิศวกรรมลาดกระบัง**. ปีที่ 22, ฉบับที่ 1. มีนาคม 2548. หน้า 1-6.
- [58] Droz C. "**Thin Film Microcrystalline Silicon Layers and Solar Cells : Microstructure and Electrical Performances.**" Ph.D. Thesis of University of Neuchatel and Institute of Microtechnology. November 2003.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [59] Tsu R., Hernandez J.G., Chao S.S., Lee Sc. and Tanaka K. "Critical Volume Fraction of Crystalline for Conductivity Percolation in Phosphorus-Dope Si:F:H Alloy." **Applied Physics Letters**, Vol. 40, 1982, p. 534.
- [60] Kessels W.M.M., Severens R.J., van de Sanden M.C.M. and Schram D.C. "Temperature and Growth-Rate Effects on the Hydrogen Incorporation in a-Si:H." **Journal of Non-Crystalline Solids**, Vol. 227-230, 1998, pp. 133-137.
- [61] Kroll U., Meier J., Goetz M., Hoeling A., Dorier J.-L., Dutta J., Shah A. and Hollenstein Ch. "Influence of Higher Deposition Temperature on a-Si:H Material Properties, Powder Formation and Light-Induced Degradation, Using the VHF (70MHz) Glow Discharge Technique." **Journal of Non-Crystalline Solids**, Vol. 164-166, 1993, pp. 59-62.
- [62] Kondo M. and Matsuda A. "Low Temperature Growth of Microcrystalline Silicon and its Application to Solar Cells." **Thin Solid Films**, Vol. 383, February 2001, pp. 1-6.
- [63] Feitknecht L. "**Microcrystalline Silicon Solar Cells in the n-i-p Configuration : Optimisations on Light Scattering Back-Reflectors.**" Ph.D. Thesis of University of Neuchatel and Institute of Microtechnology. September 2003.
- [64] Amanatides E., Mataras D. and Rapakoulias D.E. "Deposition Rate Optimization in SiH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> PECVD of Hydrogenated Microcrystalline Silicon." **Thin Solid Films**, Vol. 383, February 2001, pp. 15-18.
- [65] อัสวิน หงษ์สิงห์ทอง, วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง และ พอพนธ์ สีขณนุกฤษฎ์. "การพัฒนาฟิล์มบางซิลิคอนชนิดพีด้วยวิธี PECVD เพื่อประยุกต์ใช้เป็นชั้นหน้าต่างรับแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน" **วิศวกรรมลาดกระบัง**, ปีที่ 22, ฉบับที่ 1. มีนาคม 2548. หน้า 7-12.
- [66] Pellaton Vaucher N., Rech B., Fischer D., Dubail S., Goetz M., Keppner H., Wyrsh N., Beneking C., Hadjadj O., Shklover V. and Shah A. "Controlled Nucleation of Thin Microcrystalline Layers for the Recombination Junction in a-Si Stacked Cells." **Solar Energy Materials and Solar Cells**, Vol. 49, December 1997, pp. 27-33.

## ภาคผนวก

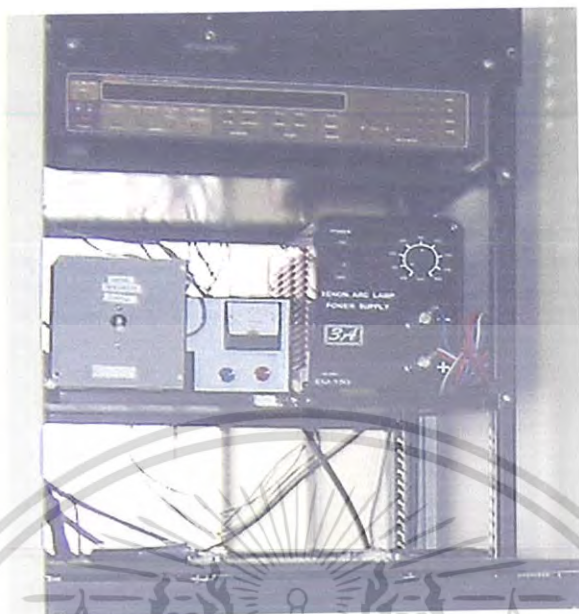
### ภาคผนวก ก



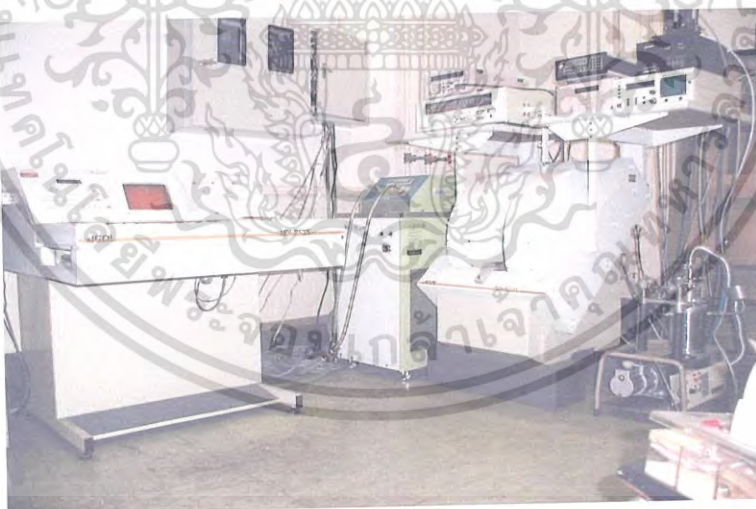
รูปที่ ก-1 เครื่อง Profiler รุ่น Dektak IIA ของบริษัท Sloan Technology Corporation ติดตั้งประจำอยู่ที่สถาบันพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

รูปที่ ก-2 เครื่อง UV-VIS Spectrometer รุ่น Lambda 35 ของบริษัท Perkin Elmer ติดตั้งประจำอยู่ที่สถาบันพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-3 เครื่องมือวัดสภาพนำไฟฟ้าของฟิล์มบางซิลิกอน ติดตั้งประจำอยู่ที่สถาบันพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

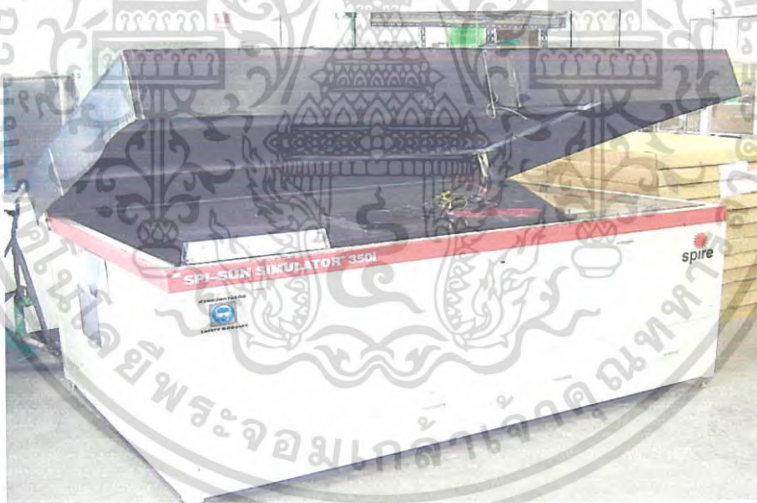


รูปที่ ก-4 เครื่องมือวัดจำนวน Spin Density ด้วยวิธี ESR รุ่น JES-RE2X ของบริษัท JEOL ติดตั้งประจำอยู่ที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก-5 เครื่อง Raman spectroscope รุ่น System 2000 ของบริษัท Renishaw ติดตั้งประจำอยู่ที่  
บริษัท Western Digital



รูปที่ ก-6 เครื่อง Spire Sun Simulator รุ่น 350i ของบริษัท Spire Corporation ติดตั้งประจำอยู่ที่  
สถาบันพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน	นายอัสวิน หงษ์สิงห์ทอง
วันเดือนปีเกิด	วันที่ 19 ธันวาคม พ.ศ. 2519
สถานที่เกิด	จังหวัดขอนแก่น
วุฒิการศึกษาระดับปริญญาตรี	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์)
สถานที่สำเร็จการศึกษา	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
ปีที่สำเร็จการศึกษา	ปีการศึกษา 2543



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้