

การศึกษาพื้นผิวซิลิคอนด้วยการกัดปฏิกิริยาไอออนเพื่อประยุกต์ใช้งานกับเซลล์
แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อเฮเทอโรบนฐานรองผลึกเดี่ยวซิลิคอน

STUDY OF SILICON SURFACE TREATMENT BY REACTIVE ION ETCHING
FOR SINGLE CRYSTALLINE SILICON HETEROJUNCTION
SOLAR CELLS APPLICATION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2559

KMITL-2016-EN-M-043-083

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาพื้นผิวซิลิคอนด้วยการกัดปฏิกิริยาไอออนเพื่อประยุกต์ใช้งานกับเซลล์
แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อเฮเทอโรบนฐานรองผลึกเดี่ยวซิลิคอน

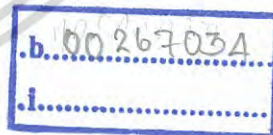
STUDY OF SILICON SURFACE TREATMENT BY REACTIVE ION ETCHING
FOR SINGLE CRYSTALLINE SILICON HETEROJUNCTION
SOLAR CELLS APPLICATION



T144047

อดิศักดิ์ คนหนองบัว
ADISAK KHONNONGBUA

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....144047
วันเดือนปี 25 ต.ค. 2559



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2559

KMITL-2016-EN-M-043-083

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY OF SILICON SURFACE TREATMENT BY REACTIVE ION ETCHING
FOR SINGLE CRYSTALLINE SILICON HETEROJUNCTION
SOLAR CELLS APPLICATION



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN MICROELECTRONICS ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2016

KMITL-2016-EN-M-043-083

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2016

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาพื้นผิวซิลิคอนด้วยการกัดปฏิกิริยาไอออนเพื่อประยุกต์ใช้งานกับเซลล์แสงอาทิตย์
ชนิดรอยต่อเฮเทอโรจังก์ชันบนฐานรองผลึกเดี่ยวซิลิคอน

Thesis Title Study of Silicon Surface Treatment by Reactive Ion Etching for Single Crystalline Silicon Heterojunction Solar Cells Application

นักศึกษา นายอดิศักดิ์ คนหนองบัว

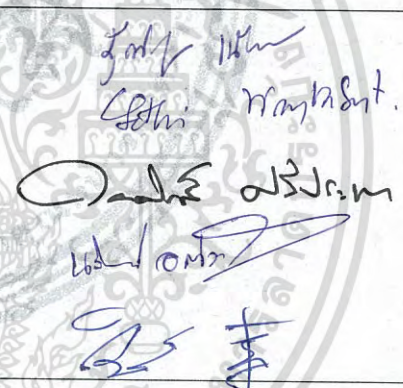
รหัสประจำตัว 57601191

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2016-EN-M-043-083

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.สุรศักดิ์	เนียมเจริญ	
ผศ.ดร.โยธิน	วงศ์ประเสริฐ	
ดร.กอบศักดิ์	ศรีประภา	
ดร.นรินทร์	อดิวงศ์แสงทอง	
รศ.ดร.วิสุทธิ	ฐิติรุ่งเรือง	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพฤหัสบดีที่ 7 กรกฎาคม พ.ศ. 2559 เวลา 11.30-13.30 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 1

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องเปิดเผยชื่อของสถาบัน

วันที่ 7 กรกฎาคม พ.ศ. 2559

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาพื้นผิวซิลิคอนด้วยการกัดปฏิกิริยาไอออนเพื่อประยุกต์ใช้งานกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อเฮเทอโรบนฐานรองผลึกเดี่ยวซิลิคอน
นักศึกษา	นายอดิศักดิ์ คนหนองบัว
รหัสนักศึกษา	57601191
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการศึกษาการกัดพื้นผิวแผ่นซิลิคอนด้วยเทคนิคการกัดปฏิกิริยาไอออนโดยใช้ก๊าซ Sulfur hexafluoride (SF_6) และก๊าซผสมระหว่าง O_2 กับ SF_6 และศึกษาพื้นผิวของแผ่นซิลิคอนที่มีผลกระทบต่อค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อแบบเฮเทอโรบนฐานรองผลึกเดี่ยวซิลิคอน จากผลการทดลองพบว่า แผ่นซิลิคอนที่ทำการกัดพื้นผิวโดยเทคนิคการกัดปฏิกิริยาไอออนด้วยก๊าซ SF_6 ลักษณะพื้นผิวของพีระมิดมีความขรุขระคล้ายหลุมครอบคลุมทั้งพื้นผิวยอดพีระมิดยังคงมียอดแหลม การเกิดการเปลี่ยนแปลงพื้นผิวเช่นนี้เป็นผลมาจากไอออนของ F^* ที่เกิดจากการแตกตัวของก๊าซ SF_6 ได้ทำปฏิกิริยากับ Si เกิดเป็น SiF_x และแผ่นซิลิคอนที่ทำการกัดพื้นผิวโดยเทคนิคการกัดปฏิกิริยาไอออนด้วยก๊าซผสมระหว่าง O_2 กับ SF_6 พื้นผิวพีระมิดมีลักษณะเรียบ ยอดของพีระมิดมีลักษณะโค้งมนไม่แหลม การเกิดปฏิกิริยาการกัดเกิดจากไอออน F^* ของก๊าซ SF_6 ที่แตกตัว มาทำปฏิกิริยากับ Si ซึ่งการกัดนั้นเกิดจากไอออน F^* เป็นหลัก ดังนั้นการเติมก๊าซ O_2 ผสมกับก๊าซ SF_6 จะทำให้เกิดปฏิกิริยาการกัดลดลงอันเนื่องมาจากการทำปฏิกิริยาระหว่าง F^* , O_2 กับ Si ก่อให้เกิดเป็น SiO_xF_y เมื่อนำแผ่นซิลิคอนที่ผ่านการกัดมาสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อเฮเทอโรบนฐานรองผลึกเดี่ยวซิลิคอน พบว่าการกัดพื้นผิวโดยใช้ก๊าซผสมระหว่าง O_2 กับ SF_6 มีค่าพารามิเตอร์ที่สูงกว่าการกัดพื้นผิวโดยใช้ก๊าซ SF_6 ซึ่งทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (V_{oc}) สูงขึ้นจาก 625 เป็น 657 mV, ค่าความหนาแน่นกระแส (J_{sc}) มีค่าประมาณ 35.5 mA/cm^2 ค่าฟิลแฟกเตอร์ (Fill factor : FF) เพิ่มขึ้นจาก 0.65 เป็น 0.71 และค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ (η) เพิ่มขึ้นเห็นได้ชัดเจนจาก 14.3% เป็น 16.5% ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสามารถพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อเฮเทอโรบนฐานรองผลึกเดี่ยวซิลิคอน ด้วยการปรับปรุงพื้นผิวแผ่นซิลิคอนโดยเทคนิคการกัดปฏิกิริยาไอออนด้วยก๊าซผสมระหว่าง O_2 กับ SF_6

Thesis Title	Study of silicon surface treatment by reactive ion etching for single crystalline silicon heterojunction solar cells application
Student	Mr. Adisuk Khonnongbua
Student ID	57601191
Degree	Master of Engineering
Program	Microelectronics Engineering
Year	2016
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Wisut Titiroongruang

ABSTRACT

This study presents Etching of Silicon Surface by Reactive Ion Etching. Using gas Sulfur hexafluoride (SF_6) and mixture O_2 with SF_6 gases and the surface of the silicon which affects the efficiency of Single Crystalline Silicon Heterojunction Solar Cells. The results have showed that, the silicon surface by techniques reactive ions etching with SF_6 gas. The results, surface roughness of a pyramid-like holes covers surface and top of the pyramid still has peaked. The surface changes as a result of ion F^* caused by disintegration of SF_6 gas is reacting with Si is SiF_x . And the silicon surface by techniques reactive ions etching a mixture of gases, O_2 with SF_6 . Found that, the pyramid surface is smooth and top of the pyramid are smooth. Without stain of a reaction etched. The reactive ion etching by F^* of the SF_6 gas that reacts with the Si, which is caused by ion etching F^* . Therefore, the addition mixture O_2 with SF_6 gases to cause a reaction etching down because of a reaction between F^* , O_2 and Si causing a SiO_xF_y . When the etched silicon substrate for fabricated of crystalline silicon heterojunction solar cells. The results, etched surface using mixture O_2 with SF_6 gases has the parameters higher than the etched surface using SF_6 gas. Which solar cells has open circuit voltage (V_{oc}), up from 625 to 657 mV, current density (J_{sc}) is about 35.5 mA/cm^2 . The Fill factor increased from 0.65 to 0.71. And efficiency of solar cells up from 14.3% to 16.5%. In conclusion, this research can development the efficiency of Single Crystalline Silicon Heterojunction Solar Cells. With improved silicon surfaces by Reactive Ion etching a mixture of gases, O_2 with SF_6 .

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความรู้และความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.วิสุทธิ จูติรุ่งเรือง ที่ให้คำปรึกษาชี้แนะแนวทางและการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในงานวิจัย ตลอดจนให้ความรู้ อบรมสั่งสอน ทั้งเรื่องเรียนและบอกเล่าประสบการณ์เพื่อเป็นแนวทางในการเรียนและการดำเนินชีวิต จนบรรลุตามเป้าหมายที่ตั้งใจไว้ด้วยดีทุกประการ

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, ดร. นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง, ดร. โยธิน วงศ์ประเสริฐ, ดร. รังสรรค์ เมืองเหลือ และ คณาจารย์ทุกท่าน ที่ให้ความเมตตาประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ตลอดจนให้คำปรึกษาทางวิชาการ รวมไปถึงปลูกฝังสิ่งที่ตั้งมาให้แก่ศิษย์ทุกคน

ขอขอบคุณ ดร.กอบศักดิ์ ศรีประภา, ดร.จรัญ ศรีธาราธิคุณ, ดร.อัศวิน หงษ์สิงห์ทอง, ดร.ทวีวัฒน์ กระจ่างสังข์, คุณสุทธินันท์ เจริญเสถียรโชคและคุณปฏิภาณ กรุดตาต คณະนักวิจัย ห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ (STL) หน่วยวิจัยอุปกรณ์และระบบอัจฉริยะ (IDSRU) ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (NSTDA) ทุกท่าน สำหรับการสนับสนุนเทคโนโลยีในการสร้างและเครื่องมือในการทดลอง ตลอดจนคำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ คุณสุรดา เอื้อมานะพงษ์, คุณอิสระ ศรีธัญชัย, คุณบุศรา นรารักษ์, คุณธนวัฒน์ ทองหนัก, คุณศุภกร จันทรประภา ที่ถ่ายทอดความรู้เกี่ยวกับเทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ รวมทั้งให้คำแนะนำเกี่ยวกับมุมมองทางวิชาการที่มีประโยชน์ต่องานวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้ และขอขอบคุณเพื่อนๆ และรุ่นน้องในศูนย์วิจัย ERC ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือในทุกๆ ด้าน

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ทุ่มเทความรัก แรงกายแรงใจ ส่งเสริมสนับสนุนข้าพเจ้าทั้งในด้านการเรียน และให้กำลังใจในยามที่ท้อแท้ จนทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สำหรับคุณประโยชน์อันพึงเกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบให้แก่คณาจารย์ที่เคารพทุกท่าน และศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งเป็นสถานที่ที่ให้ความรู้และประสบการณ์ในการทำวิจัยจนกระทั่งจบการศึกษา

อดิศักดิ์ คนหนองบัว

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
รายการคำย่อ	XI
รายการสัญลักษณ์	XIII
รายการคำศัพท์เทคนิค	XIV
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การศึกษา	2
1.3 ขอบเขตการวิจัยและขั้นตอนการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	3
1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	4
2.1 กระบวนการกัด (Etching process).....	4
2.1.1 การกัดเคมีแบบเปียก (Wet-Chemical Etching).....	4
2.1.2 การกัดพลาสมาแบบแห้ง (Dry-Plasma Etching)	5
2.2 เซลล์แสงอาทิตย์ (solar cell).....	6
2.2.1 หลักการทำงานพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์.....	6
2.2.2 ชนิดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์.....	7
2.2.2.1 เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำมาจากซิลิคอน	7
2.2.2.2 เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำมาจากสารประกอบ	9
2.2.3 ทฤษฎีเกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเฮเทอโร.....	9
2.2.3.1 ขั้วไฟฟ้าโปร่งใส (ITO).....	10
2.2.3.2 ชั้น p.....	11
2.2.3.3 ชั้น i หรือ ชั้นลดการรวมตัวของพาหะ (Passivation layer).....	11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.3.4 ชั้น n.....	13
2.2.4 พารามิเตอร์เอาต์พุตที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์.....	14
2.2.4.1 ประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (Energy conversion efficiency)	14
2.2.4.2 กระแสลัดวงจร (Short circuit current: I_{sc}).....	14
2.2.4.3 แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (Open circuit voltage: V_{oc}).....	15
2.2.4.4 ฟิลแฟคเตอร์ (Fill factor: FF).....	16
2.2.5 ข้อจำกัดของค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานเนื่องจากปัญหาการสูญเสียทางแสงในเซลล์แสงอาทิตย์.....	16
2.2.6 คุณสมบัติของกับดักแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ที่พื้นผิวไม่เรียบในแบบต่างๆ..	18
2.2.6.1 โครงสร้างสวดลายแบบพีระมิด (Pyramid layout).....	19
2.2.5.2 โครงสร้างสวดลายแบบเรขาคณิต (Geometrically layout).....	20
2.3 แนวทางการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีประสิทธิภาพสูง.....	20
2.4 การปรับลักษณะพื้นผิวแผ่นซิลิคอนด้วยสารเคมี.....	21
2.5 การทำความสะอาดแผ่นผลึกซิลิคอน (wafer cleaning).....	23
2.6 การเคลือบฟิล์มบางวิธีการตกไอสารเคมี (Chemical Vapor Deposition: CVD) .	23
บทที่ 3 การทดลอง	25
3.1 เครื่องกัดปฏิกิริยาไอออน (Reactive Ion Etching: RIE).....	25
3.1.1 ส่วนประกอบหลักเครื่องกัดปฏิกิริยาไอออน.....	27
3.2 การเตรียมแผ่นซิลิคอน.....	28
3.2.1 การกัดปรับปรุงพื้นผิวแผ่นซิลิคอนด้วยเทคนิคปฏิกิริยาไอออน	29
3.2.1.1 การทดลองปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของก๊าซ SF_6	29
3.2.1.2 การทดลองปรับเปลี่ยนอัตราการไหลก๊าซผสมระหว่าง O_2 กับ SF_6	29
3.2.1.3 การทดลองปรับเปลี่ยนเวลาการกัด.....	30
3.2.2 การทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนด้วยกระบวนการ RCA.....	30
3.3 การวัดตรวจสอบและวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิว	31
3.4 การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อเฮเทอโรบนฐานรองผลึกเดี่ยวซิลิคอนด้วยกระบวนการ PECVD (Plasma enhanced chemical vapor deposition).....	32
3.4.1 กระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยเทคนิค PECVD	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5 การวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยเครื่องจำลองแสงเทียม	34
3.6 การวัดประสิทธิภาพเชิงควอนตัม (Quantum Efficiency)	34
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	36
4.1 การศึกษาลักษณะพื้นผิวแผ่นซิลิคอน	36
4.1.1 การกัดสร้างพีระมิตด้วยสารละลาย KOH (Potassium hydroxide)	36
4.1.2 การกัดแผ่นซิลิคอนโดยเทคนิคการกัดปฏิกิริยาไอออน	36
4.1.2.1 การปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของก๊าซ SF_6	37
4.1.2.2 การปรับเปลี่ยนอัตราการไหลก๊าซผสมระหว่าง O_2 กับ SF_6	39
4.1.2.3 การปรับเปลี่ยนเวลาการกัด	41
4.2 การศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อเฮเทอโรจังก์ชันบนร่องผลึกเดี่ยวซิลิคอน	43
4.2.1 การเปรียบเทียบผลของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจากแผ่นซิลิคอนที่กัด โดยปฏิกิริยาไอออนด้วยก๊าซ SF_6 และก๊าซผสม O_2 กับ SF_6	43
4.2.2 การเปรียบเทียบผลของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจากแผ่นซิลิคอนที่กัดโดย ปฏิกิริยาไอออนด้วยก๊าซผสม O_2 กับ SF_6 ทำการปรับเปลี่ยนเวลาการกัด...	48
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย	52
เอกสารอ้างอิง	54
ภาคผนวก.....	57
ผลงานทางวิชาการของงานวิจัยนี้ที่ได้รับการตีพิมพ์.....	58
ประวัติผู้เขียน	69

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 กลไกพื้นฐานการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์และเทคโนโลยีพื้นฐานเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์.....	20
2.1 (ต่อ) กลไกพื้นฐานการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์และเทคโนโลยีพื้นฐานเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์.....	21
3.1 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง.....	28
3.2 การทดลองปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของก๊าซ SF_6	29
3.3 การทดลองปรับเปลี่ยนอัตราการไหลก๊าซผสมระหว่าง O_2 กับ SF_6	29
3.4 การทดลองปรับเปลี่ยนเวลาการกัก.....	30
4.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์.....	47
4.2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์.....	51

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 โครงสร้างจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อแบบเฮเทอโร	2
2.1 ลักษณะทิศทางการกัดแบบไอโซโทรปิกและแอนไอโซโทรปิก	4
2.2 ลักษณะการกัดแบบ Physical Etching และ Chemical Etching ที่เกิดจากกระบวนการกัดปฏิกิริยาไอออน	5
2.3 หลักการทำงานของกระบวนการกัดด้วยปฏิกิริยาไอออน	6
2.4 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์	7
2.5 เซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยว	8
2.6 เซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบผลึกโพลี	8
2.7 เซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบฟิล์มบาง	9
2.8 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อแบบเฮเทอโร	9
2.9 ไดอะแกรมเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อเฮเทอโร	10
2.10 ภาพถ่ายแผ่นผลึกซิลิคอนชนิดขัดมัน (Polished silicon wafer)	12
2.11 แผ่นซิลิคอน (ก) ภาพถ่ายแผ่นผลึกซิลิคอนชนิดไม่ขัดมัน (Unpolished silicon wafer) และ (ข) ภาพ SEM พื้นผิวแผ่นซิลิคอนชนิดไม่ขัดมัน	12
2.12 การสร้างชั้น Passivation layer ด้วยฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน (a-Si:H)	12
2.13 โครงสร้างสำหรับทดสอบคุณสมบัติ passivation	13
2.14 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ทั่วไป	15
2.15 กราฟกระแสกับแรงดันทั่วไปในควอดแดนต์ที่ 1 แสดงจุดกระแสลัดวงจร (I_{sc}) แรงดันวงจรเปิด (V_{oc}) รวมถึงกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตและจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (P_{mp})	16
2.16 การสูญเสียทางแสงเนื่องจากการสะท้อนกลับของแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ที่บริเวณ (1) ลายโลหะ (2) ผิวหน้าด้านบนของเซลล์ และ (3) ผิวโลหะด้านหลังเซลล์	17
2.17 การใช้หลักการ A quarter wavelength (ARC) เพื่อลดการสะท้อนกลับของแสงที่ผิว	18
2.18 ลักษณะแผ่นซิลิคอนแบบไม่เรียบหรือขรุขระ (ก) ลวดลายพีระมิดแบบสุ่ม และ (ข) การดัดแปลงแสง และการสะท้อนแสงภายใน	18
2.19 ลวดลายพีระมิดที่มีการจัดเรียงตัวแบบสม่ำเสมอ (ก) ภาพตัดขวางของโครงสร้างลวดลายพีระมิด และ (ข) ภาพถ่ายด้านบนลวดลายพีระมิด	19
2.20 ลวดลายพีระมิดที่มีการจัดเรียงตัวแบบสุ่ม	19

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.21 ภาพถ่าย SEM ของพื้นผิวแผ่นซิลิคอนรูปทรงพีระมิด	
(ก) พีระมิดขนาดใหญ่	
(ข) พีระมิดขนาดเล็ก	
(ค) พีระมิดขนาดใหญ่ที่ปรับสภาพพื้นผิว	
และ (ง) พีระมิดขนาดเล็กที่ปรับสภาพพื้นผิว	22
2.22 ค่าอายุพาหะจากการสร้างชั้นฟิล์ม i-a-Si:H เป็นชั้น passivation มีความหนา 50 nm ทั้งด้านหน้าและด้านหลังของแผ่นซิลิคอนที่มีขนาดความขรุขระต่างๆ	22
2.23 ค่าอายุพาหะของแผ่นผลึกซิลิคอนที่มีของชั้น a-Si:H เป็นชั้น passivation กับวิธีการทำความสะอาดแบบต่างๆ	23
2.24 กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มบางโดยวิธีการตกสะสมไอเคมีด้วยพลาสมา	24
3.1 หลักการทำงานของเทคนิคการกัดปฏิกิริยาไอออน	25
3.2 ส่วนประกอบต่างๆ ของต้นแบบเครื่องกัดปฏิกิริยาไอออน	26
3.3 ลักษณะและส่วนประกอบภายในของห้องกัดสุญญากาศ	26
3.4 ระบบปั๊มสุญญากาศ	27
3.5 ระบบควบคุมเครื่องจักร	27
3.6 ระบบจ่ายก๊าซและอุปกรณ์ควบคุมการไหลของก๊าซ	28
3.7 ขั้นตอนการทำความสะอาดแผ่นฐานซิลิคอนด้วยกระบวนการ RCA	30
3.8 เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)	31
3.9 หลักการทำงานของกล้อง Scanning Electron Microscope (SEM)	32
3.10 โครงสร้างจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อแบบเฮเทอโร	32
3.11 กระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยเทคนิค PECVD	33
3.12 การวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยการจำลองแสงเทียม	34
3.13 การวัดประสิทธิภาพเชิงควอนตัม (Quantum Efficiency)	35
3.14 Quantum Efficiency ของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างเซลล์เดี่ยว	
เซลล์ชั้น 2 และ 3 ชั้น	35
4.1 ลักษณะพื้นผิวแผ่นซิลิคอน ที่กัดด้วยสารละลาย KOH	36
4.2 ลักษณะพื้นผิวแผ่นซิลิคอนที่กัดด้วยเทคนิคปฏิกิริยาไอออน โดยใช้ก๊าซ SF ₆	38
4.2 (ต่อ) ลักษณะพื้นผิวแผ่นซิลิคอนที่กัดด้วยเทคนิคปฏิกิริยาไอออน โดยใช้ก๊าซ SF ₆	39
4.3 ลักษณะพื้นผิวแผ่นซิลิคอนที่กัดโดยเทคนิคปฏิกิริยาไอออนด้วยก๊าซผสม O ₂ กับ SF ₆	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 (ต่อ) ลักษณะพื้นผิวแผ่นซิลิคอนที่กัดโดยเทคนิคปฏิกิริยาไอออนด้วยก๊าซผสม O_2 กับ SF_6	41
4.4 ลักษณะพื้นผิวแผ่นซิลิคอนที่กัดด้วยเทคนิคปฏิกิริยาไอออน โดยปรับเปลี่ยนเวลาการกัด ..	42
4.4 (ต่อ) ลักษณะพื้นผิวแผ่นซิลิคอนที่กัดด้วยเทคนิคปฏิกิริยาไอออน โดยปรับเปลี่ยนเวลาการกัด.....	43
4.5 ลักษณะพื้นผิวแผ่นซิลิคอน ที่กัดด้วยสารละลาย KOH	43
4.6 แผ่นซิลิคอนที่กัดด้วยเทคนิคปฏิกิริยาไอออน โดยใช้ก๊าซ SF_6 ที่อัตราการไหล 10 sccm ..	44
4.7 แผ่นซิลิคอนที่กัดด้วยเทคนิคปฏิกิริยาไอออนด้วยก๊าซผสม O_2 กับ SF_6 ที่อัตราการไหลเท่ากับ 10:10 sccm	44
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแส (J_{sc}) กับค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรถัด (V_{oc}).	46
4.9 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อเฮเทอโร.....	46
4.10 การตอบสนองเชิงสเปกตรัมของเซลล์แสงอาทิตย์.....	47
4.11 ลักษณะพื้นผิวแผ่นซิลิคอนที่กัดด้วยเทคนิคปฏิกิริยาไอออน โดยปรับเวลาการกัด	48
4.11 (ต่อ) ลักษณะพื้นผิวแผ่นซิลิคอนที่กัดด้วยเทคนิคปฏิกิริยาไอออน โดยปรับเวลาการกัด	49
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแส (J_{sc}) กับค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรถัด (V_{oc}).	50
4.13 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อเฮเทอโร.....	50
4.14 การตอบสนองเชิงสเปกตรัมของเซลล์แสงอาทิตย์.....	51

รายการคำย่อ

อักษรย่อ	คำเต็มภาษาอังกฤษ	คำแปลภาษาไทย
ARC	Antireflection coating	ชั้นป้องกันการสะท้อน
B ₂ H ₆	Diborane	ไดโบเรน
CdTe	Cadmium telluride	แคดเมียมเทลเลไนด์
CIS	Copper Indium Selenide	คอปเปอร์อินเดียมไดเซเลไนด์
DC	Direct current	ไฟฟ้ากระแสตรง
FF	Fill Factor	ฟิลแฟคเตอร์
GaAs	Gallium Arsenide	แกลเลียมอาเซไนด์
HCL	Hydrochloric acid	กรดไฮโดรคลอริก
HF	Hydrofluoric acid	ไฮโดรฟลูออริก
I _{sc}	Short circuit current	กระแสลัดวงจร
In	Indium	อินเดียม
KOH	Potassium hydroxide	โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์
NECTEC	National Electronics and Computer Technology Center	ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ
O ₂	Oxygen	ก๊าซออกซิเจน
PECVD	Plasma Enhance Chemical Vapor Deposition	การสะสมสารเคมีด้วยพลาสมา
p-n	p-n junction	รอยต่อพี-เอ็น
QE	Quantum Efficiency	ประสิทธิภาพเชิงควอนตัม
RIE	Reactive Ion Etching	การกัดปฏิกิริยาไอออน
RCA	Radio Corporation of America	กระบวนการทำความสะอาด RCA
RF	Radio frequency	คลื่นสัญญาณความถี่วิทยุ
Rsh	sheet resistance	ความต้านทาน
SF ₆	Sulfur hexafluoride	ซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์
SiO ₂	Silicon dioxide	ซิลิคอนไดออกไซด์
SEM	Scanning Electron Microscope	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
TMAH	Tetramethyl ammonium hydroxide	เตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อ (ต่อ)

อักษรย่อ	คำเต็มภาษาอังกฤษ	คำแปลภาษาไทย
TCO	Transparent Conductive Oxide	ชั้นไฟฟ้าโปร่งใส
μc	Micro crystalline	ไมโครคริสตัลไลน์
V_{oc}	Open circuit voltage	แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด



รายการสัญลักษณ์

A	คือ	พื้นที่รับแสง
d_1	คือ	ความหนาที่เหมาะสมของ ARC
F^*	คือ	ไอออนฟลูออรีน
I_m	คือ	กระแสไฟฟ้าสูงสุด
I_{sc}	คือ	กระแสลัดวงจร
n_1	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การหักเหของแสงของ ARC
P_m	คือ	กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตสูงสุด
P_{in}	คือ	กำลังของแสงที่ตกกระทบบเซลล์
q	คือ	ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน
S	คือ	ความเร็วในการรวมตัวที่ผิว
V_m	คือ	แรงดันไฟฟ้าสูงสุด
W	คือ	ความหนาของแผ่นซิลิคอน
λ_0	คือ	ความยาวคลื่นที่ทำให้การสะท้อนแสงที่ผิวมีค่าลดลงเป็นศูนย์
τ_{bulk}	คือ	ค่าอายุหะอิสระที่เนื้อซิลิคอน
τ_{eff}	คือ	ค่าอายุหะอิสระเฉลี่ยทั้งหมดของผลึกซิลิคอน
τ_{front}	คือ	ค่าอายุหะอิสระที่ผิวด้านหน้าของผลึกซิลิคอน
τ_{rear}	คือ	ค่าอายุหะอิสระที่ผิวด้านหลังของผลึกซิลิคอน

รายการคำศัพท์เทคนิค

ภาษาไทย

การกัดปฏิกิริยาไอออน

การกัดเคมีแบบเปียก

การกัดด้วยพลาสมาแบบแห้ง

การกัดในทุกทิศทาง

การกัดในทิศทางใดทางหนึ่ง

การกัดใต้หน้ากากป้องกัน

การรวมตัวของพาหะที่ผิว

การทำความสะอาดแผ่นผลึกซิลิคอน

การเคลือบฟิล์มบางวิธีการตกไอสารเคมี

การแพร่

กระบวนการกำจัดสารปนเปื้อน

กระบวนการกัด

กระแสลัดวงจร

ขั้วไฟฟ้าด้านหน้า

ขั้วไฟฟ้าด้านหลัง

ขั้วไฟฟ้าโปร่งใส

ขั้วแคโทด

ขั้วแอโนด

คลื่นสัญญาณความถี่วิทยุ

ความหนาแน่นจุดบกพร่อง

โครงสร้างลวดลายแบบพีระมิด

โครงสร้างลวดลายแบบเรขาคณิต

ชิ้นงาน

ชั้นป้องกันการสะท้อนแสง

ชั้นตาย

ชั้นลดการรวมตัวของพาหะ

เซลล์แสงอาทิตย์

ซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยว

ซิลิคอนแบบผลึกโพลี

ภาษาอังกฤษ

Reactive Ion Etching

Wet Chemical Etching

Dry Plasma etching

Isotropic

Anisotropic

Undercut

Surface recombination

wafer Si cleaning

Chemical Vapor Deposition

Diffusion

Cleaning process

Etching process

Short circuit current

Front Electrode

Back Electrode

Transparent Conductive Oxide

Cathode

Anode

Radio frequency

Defect density

Pyramid layout

Geometrically layout

Sample

Antireflection layer

Dead layer

Passivation layer

Solar cell

Single crystalline silicon

Poly crystalline silicon

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำศัพท์เทคนิค (ต่อ)

ภาษาไทย

ซิลิคอนแบบไม่มีรูปผลึก

ดูดกลืน

ประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน

ประสิทธิภาพเชิงควอนตัมภายใน

แผ่นฐานรอง

แผ่นซิลิคอนพื้นผิวแบบขัดเงา

แผ่นผลึกซิลิคอนชนิดไม่ขัดมัน

ผิวหน้าแบบไม่เรียบหรือขรุขระ

พลังงานทดแทน

พันธะแขวนขาด

พีระมิดจะมียอดแหลมแบบสุ่ม

ไฟฟ้ากระแสตรง

ไมโครคริสตัลไลน์ซิลิคอน

รอยต่อแบบเฮเทอโร

รอยต่อพี-เอ็น

ริ้วรอยจากการตัด

ลักษณะสมบัติเอาต์พุต

สัณฐานหรือวัสดุอะมอร์ฟัสซิลิคอนออกไซด์

สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

สารกึ่งตัวนำชนิดพี

หน้ากากป้องกัน

อายุพาหะอิสระ

ภาษาอังกฤษ

Amorphous silicon

Absorption

Energy conversion efficiency

Quantum Efficiency

Substrate

Polished silicon wafer

Unpolished silicon wafer

Texture surface

Renewable energy

Dangling bond

Pyramids Random

DC current

Micro crystalline silicon

Hetero-junction

p-n junction

Saw damage

Output characteristics

Amorphous silicon oxide

n-type

p-type

Mask

Lifetime

บทที่ 1

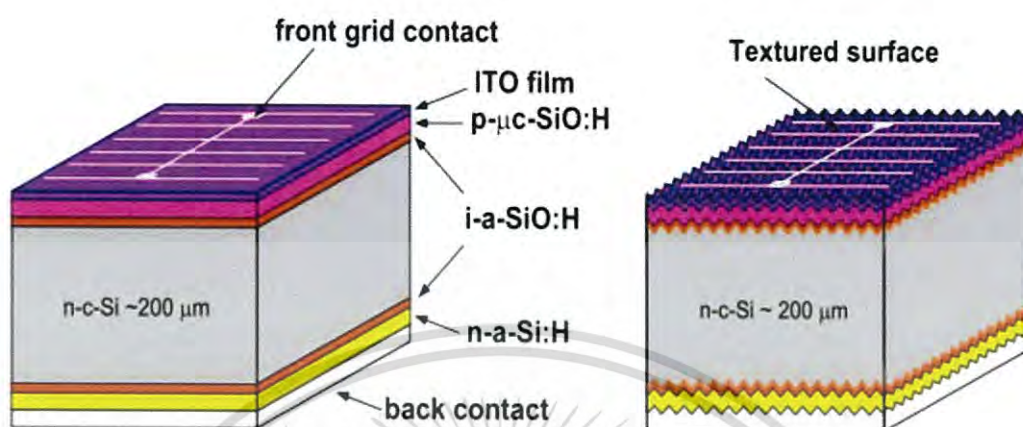
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อแบบเฮเทอโร (Heterojunction) บนฐานรองผลึกเดี่ยวซิลิคอน เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหนึ่งที่มีคุณสมบัติเหมาะสมสำหรับใช้งานในสภาพภูมิอากาศเขตร้อนชื้น อย่างประเทศไทย เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้มีค่าการเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ต่ออุณหภูมิที่น้อย สามารถให้ค่าผลผลิตทางไฟฟ้าต่อพื้นที่สูง โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ประกอบด้วยชั้นดูดกลืนแสงที่เป็นผลึกซิลิคอนกับชั้นหน้าต่างรับแสงที่เป็นฟิล์มบางซิลิคอน ทำให้มีประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าที่สูงกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางซิลิคอน (Thin-film silicon solar cells) นอกจากนี้ขั้นตอนการสร้างยังใช้อุณหภูมิในกระบวนการเคลือบฟิล์มที่ต่ำกว่า 300 °C จึงทำให้สิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าในการสร้างน้อยกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอน (Crystalline silicon solar cells) ที่สร้างจากกระบวนการแพร่สารเจือด้วยความร้อน (Thermal diffusion) จากรูปที่ 1.1 แสดงภาพจำลองโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อแบบเฮเทอโรบนฐานรองผลึกเดี่ยวซิลิคอน จากรายงานพบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อแบบเฮเทอโร นี้ยังมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อเพิ่มค่าประสิทธิภาพ เช่น การเลือกใช้ชั้นฟิล์มด้านรับแสงที่มีค่าช่องว่างพลังงานกว้างเพื่อลดการดูดกลืนแสง เช่น วัสดุที่เป็นไมโครคริสตัลไลน์ซิลิคอน (Micro crystalline silicon : $\mu\text{c-SiO:H}$) หรือสัณฐานหรือวัสดุอะมอร์ฟัสซิลิคอนออกไซด์ (Amorphous silicon oxide : a-SiO:H) [1] เป็นต้น การทำให้พื้นผิวซิลิคอนมีความขรุขระ เพื่อลดการสะท้อนแสงเป็นอีกวิธีหนึ่งในการเพิ่มค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรและทำให้ค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ให้สูงขึ้นได้ โดยทั่วไปการกัดพื้นผิวซิลิคอนเพื่อให้ได้พื้นผิวที่มีความขรุขระนั้นนิยมกัดด้วยสารละลาย ยกตัวอย่างเช่นเช่น Potassium hydroxide (KOH) หรือ Tetramethyl ammonium hydroxide (TMAH) [2-3] เป็นต้น การกัดด้วยสารละลายที่ได้กล่าวมาทำให้แผ่นซิลิคอนเปลี่ยนจากพื้นผิวเรียบให้เป็นพื้นผิวที่มีความขรุขระ มีรูปทรงแบบพีระมิดแบบสุ่ม (Pyramid random) นอกจากการกัด เพื่อทำให้พื้นผิวซิลิคอนมีความขรุขระด้วยสารละลายแล้ว การกัดแผ่นซิลิคอนด้วยพลาสมา (Plasma etching) โดยเทคนิคการกัดปฏิกิริยาไอออน (Reactive Ion Etching:RIE) [4-5] สามารถทำให้พื้นผิวแผ่นซิลิคอนมีความขรุขระและสามารถลดการสะท้อนแสงที่ด้านรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ได้เช่นกัน เทคนิคการกัดปฏิกิริยาไอออนอาศัยหลักการแยกสลายก๊าซตั้งต้นให้เป็นพลาสมา (plasma ion bombardment) ด้วยคลื่นสัญญาณความถี่วิทยุ (Radio frequency : RF) ที่บริเวณขั้วแอโนด (Anode) และขั้วคาโทด (Cathode) ซึ่งขั้วคาโทดจะมีศักย์เป็นลบ พลาสมาที่เกิดขึ้นจะประกอบด้วยไอออนที่มีประจุเป็นลบ และไอออนของก๊าซตั้งต้นที่เป็นประจุบวก ไอออนของก๊าซตั้งต้นที่แตกตัวจะถูกเร่งด้วยศักย์ไฟฟ้าที่มีทิศทางแน่นอนให้เคลื่อนที่ไปชนกับแผ่นฐานรองหรือชิ้นงาน ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างก๊าซตั้งต้นกับแผ่นฐาน สามารถกัดบริเวณที่ต้องการได้

เทคนิคการกัดปฏิกิริยาไอออน เป็นการกัดแบบแห้ง (Dry หรือ Plasma etching) ซึ่งกระบวนการกัดนี้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งหมดจะเกิดขึ้นภายในห้องกักสุญญากาศซึ่งเป็นระบบปิด จึงมีความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงาน รวมถึงสามารถควบคุมการกัดได้ง่ายและใช้กัดแผ่นฐานรองที่มีขนาดใหญ่ และวัสดุชนิดอื่นได้



(ก) พื้นผิวเรียบ

(ข) พื้นผิวขรุขระ

รูปที่ 1.1 โครงสร้างจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อแบบเฮเทอโร

1.2 วัตถุประสงค์การศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้ต้องการนำเสนอการศึกษาการกัดปรับปรุงพื้นผิวซิลิคอนด้วยเทคนิคปฏิกิริยาไอออนโดยใช้ก๊าซ SF_6 (Sulfur hexafluoride) และก๊าซผสมระหว่าง O_2 กับ SF_6 และศึกษาพื้นผิวซิลิคอนที่มีผลกระทบต่อค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อแบบเฮเทอโรบนฐานรองผลึกเดี่ยวซิลิคอน โดยมีวัตถุประสงค์ของการศึกษาตามลำดับดังต่อไปนี้

1. เพื่อปรับปรุงลักษณะพื้นผิวซิลิคอนด้วยเทคนิคการกัดปฏิกิริยาไอออนให้มีพื้นผิวที่เหมาะสม ก่อนนำแผ่นซิลิคอนไปสร้างเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อแบบเฮเทอโรด้วยเทคนิค PECVD (Plasma Enhance Chemical Vapor Deposition)
2. เพื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (Open circuit voltage: V_{oc})
3. เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อแบบเฮเทอโรให้สูงขึ้น

1.3 ขอบเขตการวิจัยและขั้นตอนการศึกษา

1. ศึกษาการกัดปรับปรุงพื้นผิวซิลิคอนด้วยเทคนิคปฏิกิริยาไอออนโดยใช้ก๊าซ SF_6
2. ศึกษาการกัดปรับปรุงพื้นผิวซิลิคอนด้วยเทคนิคปฏิกิริยาไอออนโดยใช้ก๊าซผสมระหว่าง O_2 และ SF_6
3. กระบวนการกำจัดสารปนเปื้อน (Cleaning process) ที่แผ่นซิลิคอนด้วยกระบวนการ RCA (Radio Corporation of America)
4. ศึกษาวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวแผ่นซิลิคอนหลังผ่านการกัดด้วยเทคนิคปฏิกิริยาไอออน
5. ศึกษาพื้นผิวซิลิคอนที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1. เพื่อเป็นทางเลือกในการพัฒนากระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยเทคนิคการกัดปฏิกิริยาไอออน
2. สามารถนำไปใช้กับอุตสาหกรรมการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อแบบเฮเทอโร

1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ประกอบด้วยเนื้อหาการศึกษาเกี่ยวกับลักษณะพื้นผิวซิลิคอนที่มีผลกระทบต่อกำลังประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อแบบเฮเทอโร โดยแบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บท ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึง ความสำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อแบบเฮเทอโรปัญหาที่ยังพบในการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ แนวทางในการพัฒนางานวิจัย และเหตุผลสนับสนุนในการเลือกเทคนิคการกัดปฏิกิริยาไอออนที่นำมาใช้งานวิจัย วัตถุประสงค์หลักการทางทฤษฎีที่ใช้และสมมติฐาน ขอบเขตของงานวิจัย ขั้นตอนของการศึกษาและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยในครั้งนี้

บทที่ 2 ทฤษฎี กล่าวถึง กระบวนการกัดด้วยการกัดเคมีแบบเปียก (Wet Chemical Etching) และกระบวนการกัดด้วยพลาสมาแบบแห้ง (Dry หรือ Plasma etching) ทฤษฎีเบื้องต้นของเซลล์แสงอาทิตย์ กระบวนการเคลือบฟิล์มด้วยกระบวนการ PECVD

บทที่ 3 การทดลอง กล่าวถึง เครื่องกัดปฏิกิริยาไอออน วิธีการทดลองเงื่อนไขต่างๆ การทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนด้วยกระบวนการ RCA การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อแบบเฮเทอโรด้วยเทคนิค PECVD และวัดทดสอบคุณสมบัติที่สำคัญเซลล์แสงอาทิตย์

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองประกอบด้วย ผลวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวแผ่นซิลิคอน และผลของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อเฮเทอโร

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ กล่าวถึงผลสรุปที่ได้จากการทดลอง และแนวทางการประยุกต์ใช้งานวิจัยเพื่อต่อยอดพัฒนาต่อไป

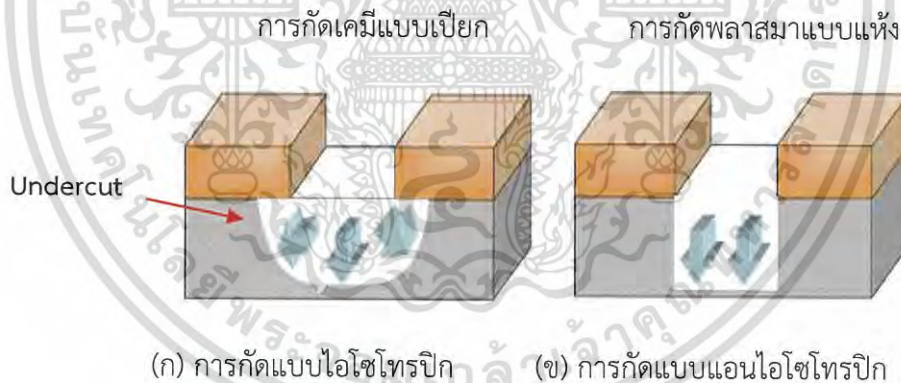
บทที่ 2

ทฤษฎี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาการปรับปรุงพื้นผิวซิลิคอนโดยเทคนิคการกัดปฏิกิริยาไอออน (Reactive Ion Etching: RIE) เพื่อประยุกต์ใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อเฮเทอโรจังก์ชันแบบผลึกซิลิคอน ในบทนี้จะกล่าวถึงการศึกษาวิจัยค้นคว้าทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเรื่อง กระบวนการกัดด้วยการกัดเคมีแบบเปียก (Wet Chemical Etching) และกระบวนการกัดด้วยพลาสมาแบบแห้ง (Dry หรือ Plasma etching) เทคนิคการกัดด้วยเครื่องกัดปฏิกิริยาไอออน ทฤษฎีเบื้องต้นของเซลล์แสงอาทิตย์ กระบวนการเคลือบฟิล์มด้วยกระบวนการ PECVD

2.1 กระบวนการกัด (Etching process)

กระบวนการกัด คือ การสกัดหรือกำจัดหรือลอกหรือปรับปรุงวัสดุที่ไม่ต้องการออกไปจากแผ่นฐานรอง (Substrate) หรือชิ้นงาน (Sample) วัสดุดังกล่าวเช่น ชั้นฟิล์มบาง ชั้นออกไซด์ และชั้นโลหะ เป็นต้น การบวนการกัดมีด้วยกัน 2 ประเภท คือ กระบวนการกัดด้วยการกัดเคมีแบบเปียก (Wet Chemical Etching) [6] ที่มีลักษณะการกัดในทุกทิศทางที่เรียกว่า ไอโซโทรปิก (Isotropic) ดังรูปที่ 2.1 (ก) และกระบวนการกัดด้วยพลาสมาแบบแห้ง (Dry หรือ Plasma etching) [7] มีลักษณะการกัดในทิศทางใดทางหนึ่งที่เรียกว่า แอนไอโซโทรปิก (Anisotropic) ดังรูปที่ 2.1 (ข)



รูปที่ 2.1 ลักษณะทิศทางการกัดแบบไอโซโทรปิกและแอนไอโซโทรปิก

2.1.1 การกัดเคมีแบบเปียก (Wet-Chemical Etching)

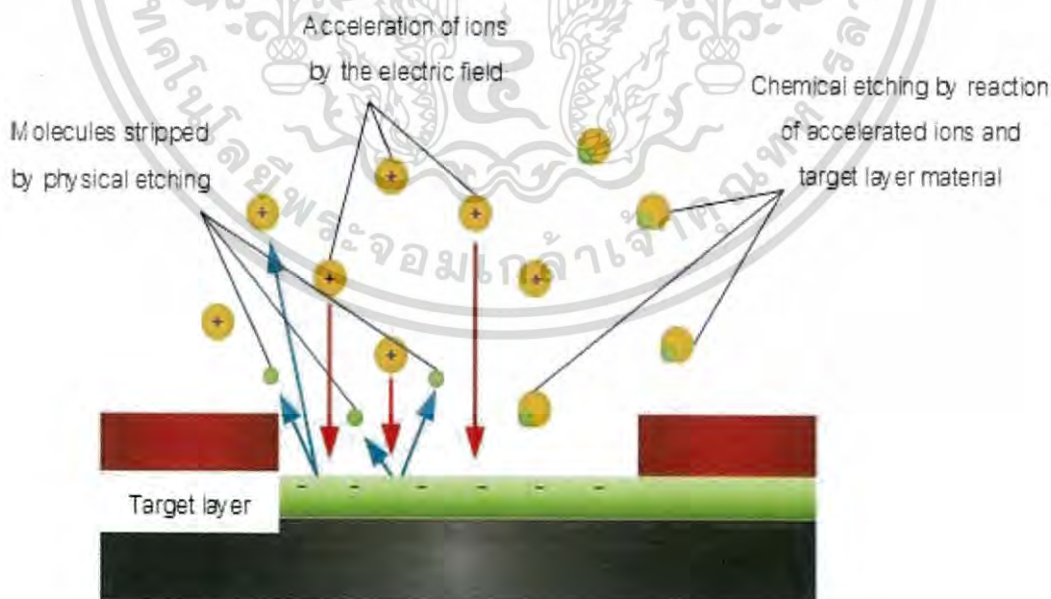
การกัดเคมีแบบเปียก คือ การกัดโดยใช้สารละลายส่วนมากนิยมใช้ ไฮโดรคลอริก (HCl) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TMAH) และไฮโดรฟลูออริก (HF) เป็นต้น เพื่อทำหน้าที่ในการกัดชิ้นงานในบริเวณที่ไม่ต้องการออก สามารถกัดแผ่นซิลิคอน ชั้นฟิล์มบาง ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) และแก้วหรือกระจก การเลือกชนิดของสารเคมีนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของชิ้นงานที่นำมาใช้ ในทางทฤษฎีสารละลายที่ใช้ในการกัด เมื่อสารละลายทำปฏิกิริยากับแผ่นฐานรองหรือชิ้นงานหากไม่มีการสร้างชั้นป้องกัน (Mask) ชิ้นงานจะถูกกัดออกในทุกทิศทางที่เรียกว่า ไอโซโทรปิก ขณะที่บริเวณที่มีการสร้างชั้นป้องกันจะไม่ถูกกัด แต่จะพบว่าบริเวณด้านล่างของชั้นป้องกันเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ป้องกันจะเกิดปฏิกิริยาการกัดใต้หน้ากากป้องกันขึ้น (undercut) และหากไม่มีการควบคุมที่ดีพอ ในขณะที่ทำการกัด อาจส่งผลให้เกิดการกัดที่ไม่สมบูรณ์ คือ การกัดสิ่งที่ต้องการกำจัดออกได้ไม่ทั้งหมด การกัดเคมีแบบเปียกเป็นการกัดที่ควบคุมอัตราการกัดแล้วทิศทางของการกัดได้ค่อนข้างยาก และการปฏิบัติงานเกี่ยวกับสารเคมีนั้นยังมีความเสี่ยงต่อผู้ปฏิบัติงาน เนื่องจากผู้ปฏิบัติงานต้องสัมผัสกับกรด หรือเบสที่มีความเข้มข้นสูงอาจทำให้เกิดอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานขึ้นได้ตลอดเวลา

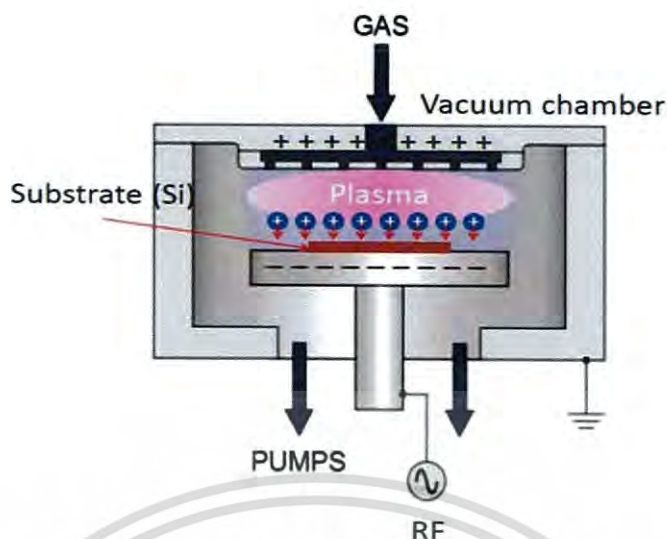
2.1.2 การกัดพลาสมาแบบแห้ง (Dry-Plasma Etching)

การกัดพลาสมาแบบแห้ง คือ เป็นการใช้อิออนของก๊าซในการกัดส่วนที่ต้องการกำจัดออกไป ซึ่งอิออนของก๊าซสามารถถูกสร้างจากการนำก๊าซมาผสมกันในห้องสุญญากาศ และใช้พลังงานไฟฟ้า เพื่อแตกตัวก๊าซบางส่วนให้ได้อิออนออกมา ซึ่งเราเรียกว่า พลาสมา เมื่อพลาสมาที่มีพลังงานสูงไป กระแทกกับผิวชิ้นงาน อิออนของก๊าซจะเป็นตัวกัดส่วนที่ไม่ต้องการออก หรือเรียกว่า การกัดปฏิกิริยาอิออน (Reactive Ion Etching) [8] ดังแสดงในรูปที่ 2.2

การทำงานของกระบวนการกัดด้วยเครื่องกัดปฏิกิริยาอิออน อาศัยหลักการแยกสลายก๊าซ ตั้งต้นให้เป็นพลาสมา (plasma ion bombardment) ด้วยคลื่นสัญญาณความถี่วิทยุ (Radio frequency :RF) ที่บริเวณขั้วแอโนด (Anode) และขั้วคาโทด (Cathode) ซึ่งขั้วแอโนดมีศักย์เป็นบวก ขั้วคาโทดมีศักย์เป็นลบ พลาสมาที่เกิดขึ้นจะประกอบด้วยอิออนที่มีประจุเป็นลบ และอิออนของก๊าซตั้งต้นที่เป็นประจุบวก อิออนของก๊าซตั้งต้นที่แตกตัวจะถูกเร่งด้วยศักย์ไฟฟ้าที่มีทิศทางแน่นอน ให้เคลื่อนที่ไปชนกับแผ่นฐานรองหรือชิ้นงาน ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างก๊าซตั้งต้นกับแผ่นฐาน โดยสามารถกัดบริเวณที่ต้องการได้ นอกจากนี้ปฏิกิริยาดังกล่าวยังก่อให้เกิดสารประกอบใหม่ขึ้น ซึ่งในที่สุดจะถูกปั๊มสุญญากาศดูดออกจากห้องกัดสุญญากาศ



รูปที่ 2.2 ลักษณะการกัดแบบ Physical Etching และ Chemical Etching ที่เกิดจากกระบวนการกัดปฏิกิริยาอิออน



รูปที่ 2.3 หลักการทำงานของกระบวนการกักด้วยปฏิกิริยาไอออน

2.2 เซลล์แสงอาทิตย์ (solar cell)

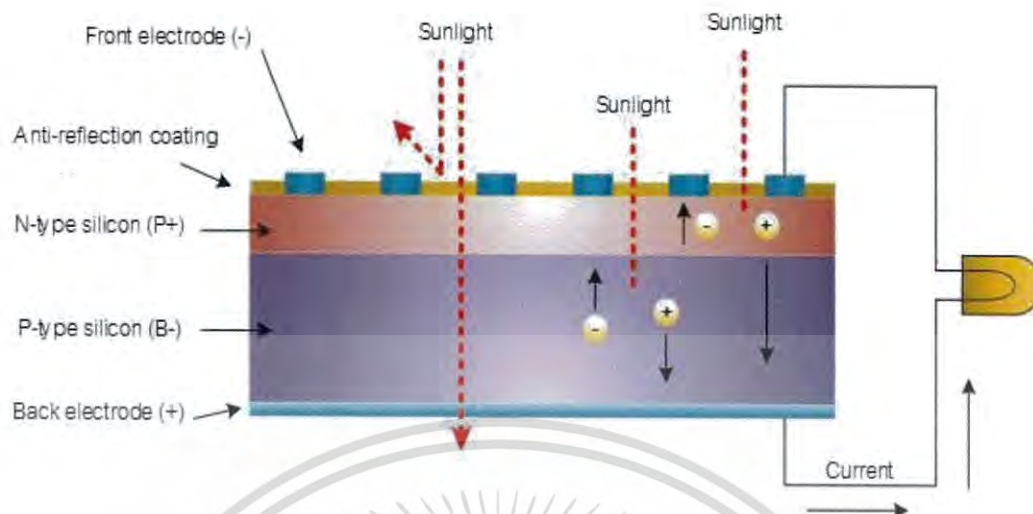
เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำสามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ ให้เป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง (DC current) เซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานทดแทนชนิดหนึ่ง (renewable energy) เมื่อมีแสงตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์จะผลิตไฟฟ้าได้ ซึ่งเป็นพลังงานสะอาดสามารถนำไปใช้ได้ทันที หรือสามารถเก็บสำรองไว้ได้ด้วยอุปกรณ์ประเภท แบตเตอรี่ จึงสะดวกในการเก็บรักษาและการนำไปใช้งาน ที่สำคัญคือ เป็นการนำเอาพลังงานธรรมชาติมาใช้ไม่สร้างมลพิษทำลายสภาพแวดล้อม และอายุการใช้งานของเซลล์แสงอาทิตย์ยาวนานมากกว่า 20 ปี [9]

2.2.1 หลักการทำงานพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์

ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก คือ คุณสมบัติพิเศษอย่างหนึ่งของวัสดุสารกึ่งตัวนำซึ่งสามารถแปลงพลังงานแสงที่ตกกระทบกับตัววัสดุ ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง จากคุณสมบัติดังกล่าวนี้สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการทำสิ่งประดิษฐ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่เรียกว่า “เซลล์แสงอาทิตย์” ซึ่งจัดเป็นสิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์ในกลุ่มของไดโอดที่มีโครงสร้างเป็นแบบรอยต่อชนิดพี และชนิดเอ็น โดยมีพาหะอิเล็กตรอน และโฮลในสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิด โฮลเป็นพาหะข้างมากในสารกึ่งตัวนำชนิดพี และในทางตรงกันข้ามอิเล็กตรอนก็เป็นพาหะข้างมากในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

เมื่อมีแสงอาทิตย์ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ จะเกิดการสร้างพาหะนำไฟฟ้าชนิดประจุลบและประจุบวกขึ้นซึ่งได้แก่ อิเล็กตรอน และ โฮล โครงสร้างรอยต่อ p-n จะทำหน้าที่สร้างสนามไฟฟ้าภายในเซลล์แสงอาทิตย์อิเล็กตรอนจะวิ่งไปยังชั้น n-type และโฮลจะวิ่งไปยังชั้น p-type อิเล็กตรอนวิ่งไปรวมกันที่ Front Electrode และโฮลวิ่งไปรวมกันที่ Back Electrode ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าแบบกระแสตรงขึ้นที่ขั้วทั้งสอง เมื่อเราต่อเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับเครื่องใช้ไฟฟ้าชนิดกระแสตรง (เช่น หลอดแสงสว่าง มอเตอร์กระแสตรง ฯลฯ) ก็จะมีกระแสไฟฟ้าไหลในวงจร ดังแสดงในรูปที่ 2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

ถ้าต้องการให้ได้กระแสไฟฟ้ามากๆ ทำได้โดยการนำเซลล์แสงอาทิตย์หลายเซลล์มาต่อขนาน หรือถ้าต้องการให้ได้แรงดันไฟฟ้าสูงๆ ก็ทำได้โดยการนำเซลล์แสงอาทิตย์หลายเซลล์มาต่ออนุกรมกัน เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีขายทั่วไปจะถูกออกแบบให้อยู่ในกรอบอะลูมิเนียมเคลือบพื้นผิวซึ่งเรียกว่า แผง หรือมอดูล (module)

เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลออกจากเซลล์แสงอาทิตย์เป็นชนิดกระแสตรง ดังนั้นถ้าผู้ใช้ต้องการนำเซลล์แสงอาทิตย์ไปจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดกระแสสลับ ต้องต่อเซลล์แสงอาทิตย์เข้ากับอินเวอร์เตอร์ (inverter) ซึ่งเป็นอุปกรณ์แปลงกระแสไฟฟ้าจากกระแสตรงให้เป็นกระแสสลับก่อนที่จะต่อเข้ากับอุปกรณ์ไฟฟ้ากระแสสลับดังกล่าว

2.2.2 ชนิดของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์มีอยู่หลายชนิดสามารถจำแนกตามวัสดุที่ใช้ผลิตเป็น 2 ประเภทดังนี้

2.2.2.1 เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำมาจากซิลิคอน

เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ ที่นิยมใช้กันมากที่สุด ซิลิคอนเป็นธาตุที่มีอยู่มากมายในโลก เช่น ในทรายที่มีอยู่ทั่วไปตามชายหาด หรือในหินที่เป็นประเภทควอตซ์ (quartz) วัตถุดิบเหล่านี้จะมีปริมาณซิลิคอนประกอบอยู่เป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะควอตซ์จะมีซิลิคอนประกอบอยู่กว่าร้อยละ 80-90 เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำมาจากซิลิคอนสามารถแบ่งตามลักษณะของโครงสร้างผลึกออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่

1. เซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยว (single crystalline silicon) เซลล์แสงอาทิตย์แบบนี้ได้จากการนำเอาซิลิคอนที่ผ่านการทำให้เป็นก้อน และมีความบริสุทธิ์สูงถึงร้อยละ 99.9999 ไปหลอมละลายที่อุณหภูมิประมาณ $1,500^{\circ}\text{C}$ เพื่อทำการปลูกเป็นแท่งผลึกเดี่ยวขนาดใหญ่ด้วยเทคโนโลยีการดึงผลึก โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 6-8 in (inch) จากนั้นก็จะนำแท่งผลึกเดี่ยวนี้ไปตัดเป็นแผ่นบางๆ เรียกว่า เวเฟอร์ มีลักษณะเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมหรือวงกลมหนาประมาณ $300\ \mu\text{m}$ แล้ว

นำไปเจือสารเพื่อสร้างเป็นรอยต่อที่เรียกว่า รอยต่อพีเอ็น (p-n junction) โดยวิธีการที่เรียกว่า การแพร่ (diffusion) ที่อุณหภูมิประมาณ $1,000^{\circ}\text{C}$ หลังจากนั้นทำเป็นขั้วไฟฟ้าเพื่อนำกระแสไฟ ออกไปใช้งาน ตัวอย่างเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยว ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูป 2.5 เซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยว

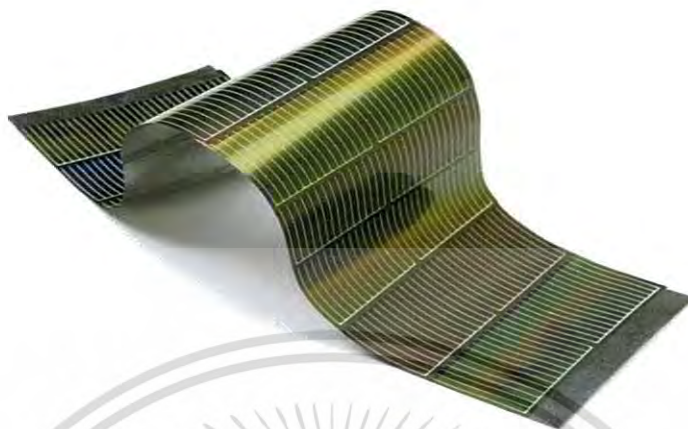
2. เซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบผลึกโพลี (poly crystalline silicon) เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกโพลีถูกพัฒนาขึ้น เพื่อแก้ปัญหาเรื่องต้นทุนในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกเดี่ยว โพลีซิลิคอนคือก้อนซิลิคอนที่เกิดจากการรวมตัวกันของชิ้นเล็กๆ ของผลึกเดี่ยวของซิลิคอน การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบผลึกโพลีมีขั้นตอนที่สั้นและง่ายกว่าแบบผลึกเดี่ยวจึงทำให้ต้นทุนการผลิตถูกลงและมีประสิทธิภาพต่ำกว่าแบบผลึกเดี่ยวเล็กน้อย



รูป 2.6 เซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบผลึกโพลี

3. เซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบไม่มีรูปผลึก (amorphous silicon) หรือเรียกว่า เซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบาง (thin film) เซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบางมีวิธีการผลิตที่แตกต่างไปจากเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกโดยสิ้นเชิง วิธีการผลิตโดยใช้ก๊าซไซเรน (SiH_4) ผ่านเข้าไปในท่อสุญญากาศซึ่งเป็นบริเวณที่มีการวางแผ่นฐานรองไว้ และทำการกระตุ้นให้ซิลิคอนแยกตัวออกจากก๊าซซิลิคอนที่แยกตัวออกจากก๊าซแล้วจะเข้าไปจับตัวกันอีกทีบนแผ่นฐานรอง ซิลิคอนจะเกิดการทับถมและสะสมอยู่บนแผ่นฐานรองเกิดเป็นแผ่นฟิล์มซิลิคอน ในขณะเดียวกันก็จะมีก๊าซโบรอน ๖ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(B_2H_6) เข้าไปเพื่อให้มีการเคลือบเป็นรอยต่อชนิดพีและแพร่ก๊าซที่เป็นสารประกอบพวกฟอสเฟตเพื่อทำเป็นรอยต่อชนิดเอ็น หลังจากได้รอยต่อพีเอ็นแล้วก็จะสร้างส่วนของขั้วไฟฟ้าต่อไป



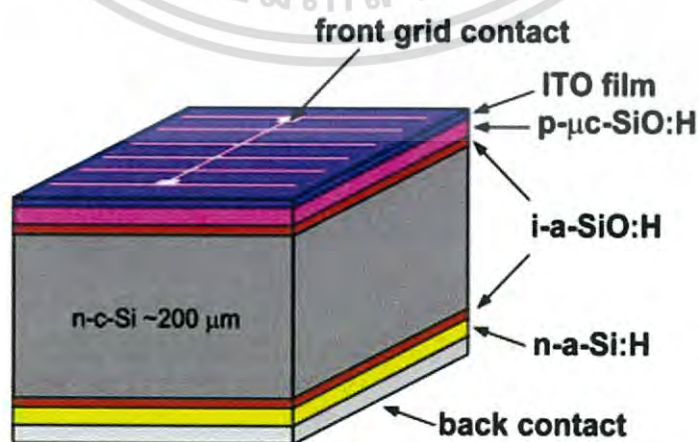
รูป 2.7 เซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนแบบฟิล์มบาง

2.2.2.2 เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำมาจากสารประกอบ

เช่น สารกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs) แคดเมียมเทลลูไรด์ (CdTe) และคอปเปอร์อินเดียมไดเซเลไนด์ (CIS) เป็นต้น เซลล์แสงอาทิตย์ประเภทนี้มีทั้งแบบผลึกเดี่ยวและผลึกโพลี มีประสิทธิภาพสูงแต่มีข้อเสียคือราคาแพงจึงทำให้ไม่ค่อยเป็นที่นิยมนำมาใช้ และมักมีปัญหาเรื่องอายุการใช้งาน [10]

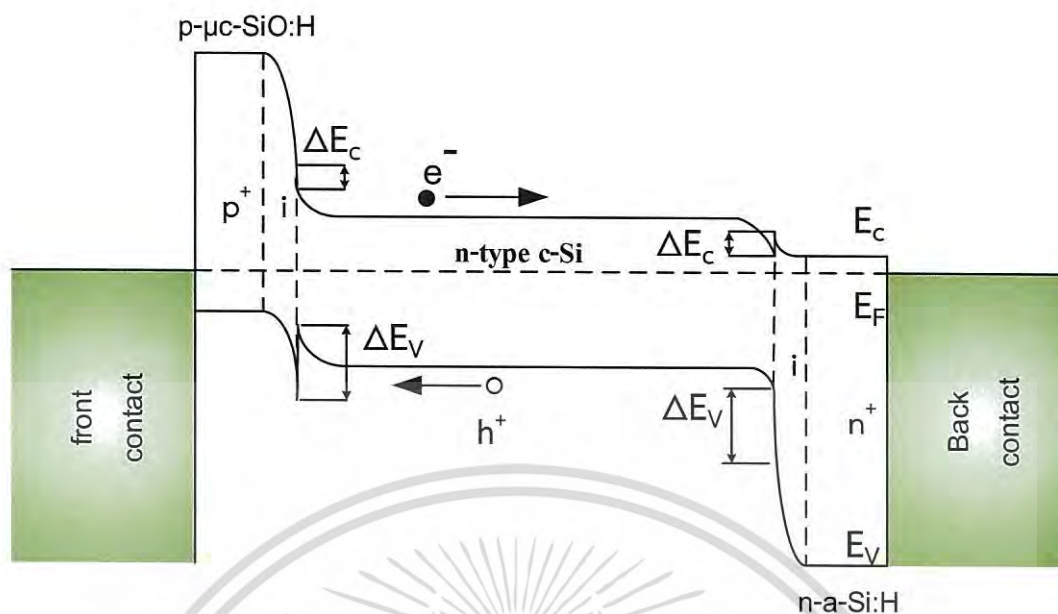
2.2.3 ทฤษฎีเกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเฮเทอโร

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อเฮเทอโร [11] คือ เซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างพลังงานไม่เท่ากันมาประกอบกันเป็นรอยต่อ p-n การประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ให้มีประสิทธิภาพสูง เป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งในการนำเซลล์แสงอาทิตย์ไปใช้งาน การเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์อาจทำได้หลายวิธี เช่น การหาวิธีเพิ่มปริมาณแสงให้เข้าสู่ชั้น i ให้ได้มากขึ้น การเพิ่มคุณภาพของฟิล์มชั้นต่างๆ ตลอดจนการหาค่าความหนาที่เหมาะสมของฟิล์มชั้นต่างๆ



รูปที่ 2.8 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อแบบเฮเทอโร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ โดย不得复制或传播โดยไม่ได้รับอนุญาต การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจะถือว่าผิดกฎหมาย และต้องรับผิดชอบต่อเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 ไดอะแกรมเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อเฮเทอโร

2.2.3.1 ขั้วไฟฟ้าโปร่งใส (TCO)

นิยมใช้ฟิล์มบาง 2 ชั้นคือ ITO/SnO₂ เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใสและมีรายละเอียดดังนี้

1. ฟิล์มบางชนิด SnO₂ มีราคาถูก แต่มีสภาพความต้านทานไฟฟ้าสูงกว่า ITO
2. ฟิล์มบาง ITO เป็นสารประกอบของ SnO₂ และ In₂O₃ โดยมีอัตราส่วนน้ำหนักของ Sn:In เท่ากับ 5:95 โดยประมาณ ITO มีสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำกว่า SnO₂ แต่ราคาแพง
3. การที่ต้องใช้ขั้วไฟฟ้าโปร่งใสถึงสองชั้นเช่นนี้มีเหตุผลคือ ถ้า SnO₂ มีความหนามากกว่า 20 nm จะช่วยกันไม่ให้อะตอมของ In จาก ITO หลุดออกแล้วแพร่ซึมเข้าไปในชั้น a-Si:H เพราะการแพร่ซึมของ In เข้าสู่ชั้น a-Si:H จะทำให้ประสิทธิภาพโดยเฉพาะอย่างยิ่ง V_{oc} ลดลง [12-13]
5. คุณสมบัติพื้นฐานของขั้วไฟฟ้าโปร่งใสเหล่านี้ที่จำเป็นคือ ควรโปร่งใสมากๆ และนำไฟฟ้าได้ดีและในขณะเดียวกันก็ควรเป็นชั้นป้องกันการสะท้อนแสงด้วย (antireflection layer)
6. นอกจากนี้ ในการใช้งานก็ควรเลือกความหนาที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง เนื่องจากความสามารถสูงสุดในการผลิตและกวาดเก็บพาหะอยู่ในช่วง 500-550 nm ดังนั้นความหนาของขั้วไฟฟ้าโปร่งใสควรมีค่าเป็น 1/4 หรือ 3/4 ของความยาวคลื่นแสง เช่น 70 nm หรือ 200 nm สิ่งที่เราควรระวังคือถ้าฟิล์มบางเกินไปจะทำให้ความต้านทานแผ่นมีค่าสูง ตัวอย่างเช่น ถ้า SnO₂ หนา 20 nm และ ITO หนา 50 nm จะมีความต้านทานแผ่น (sheet resistance) ประมาณ 40-50 Ω/cm หรือถ้า SnO₂ หนา 20 nm และ ITO หนา 180 nm จะมีความต้านทานแผ่นน้อยกว่า 10 Ω/cm
7. ในปัจจุบัน เนื่องจาก นิยมผลิตชั้น p จากวัสดุโมโครคริสตัลไลน์ซิลิคอน (p-μc-Si:H) หรือ อะมอร์ฟัสซิลิคอนคาร์ไบด์ (a-SiC:H) ซึ่งดัชนีหักเหแสงมีค่าอยู่ระหว่างดัชนีหักเหแสงของขั้วไฟฟ้าโปร่งใส และชั้น i พอดี ดังนั้นจึงช่วยลดการสะท้อนแสงที่ผิวของชั้น i ได้

8. นอกจากนี้การทำให้ผิวของแผ่นกระจกมีสภาพเป็นผิวขรุขระ (textured) ด้วยวิธีทางเคมี และทำให้ผิวของ ITO/SnO₂ ขรุขระ ก็จะช่วยทำให้แสงเดินทางเข้าสู่ชั้นอะมอร์ฟัสได้มากขึ้น และแสงสามารถเดินทางในชั้นอะมอร์ฟัสได้ไกลขึ้นซึ่งจะทำให้กระแสไฟฟ้าเอาต์พุตเพิ่มขึ้น

2.2.3.2 ชั้น p

ทำหน้าที่เป็นชั้นสร้างแรงดันไฟฟ้าภายใน เช่นเดียวกับชั้น n แต่เป็นที่น่าเสียดายที่มีค่าสภาพนำไฟฟ้าด้วยแสงต่ำมาก ดังนั้นชั้น p จึงไม่ได้มีส่วนช่วยในการผลิตพาหะด้วยแสงเท่าไรนัก เรานิยมเรียกชั้น p ว่า ชั้นตาย (dead layer) ถ้าผลิตชั้น p จากวัสดุ a-Si:H ซึ่งโด๊ปด้วยโบรอนและมีช่องว่างพลังงานแคบ ควรออกแบบให้ชั้น p-a-Si:H บางที่สุด แต่อย่างไรก็ตามถ้าชั้น p บางมากเกินไป ก็จะทำให้แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดลดลงด้วย ในปัจจุบันนิยมใช้ p-a-SiC:H ที่มีช่องว่างพลังงานประมาณ 2 eV หรือ p- μ c-SiO:H เป็นหน้าต่างกว้างรับแสง ซึ่งจะช่วยให้กระแสไฟฟ้าลัดวงจร แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดและฟิลล์แฟกเตอร์

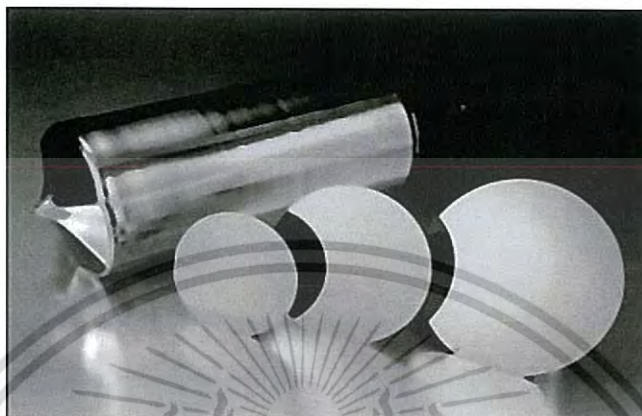
2.2.3.3 ชั้น i หรือ ชั้นลดการรวมตัวของพาหะ (Passivation layer)

คุณสมบัติพื้นฐานของ a-Si:H ชนิด i (undoped a-Si:H) นี้จะมีอิทธิพลและผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์มาก จากประสบการณ์ เงื่อนไขการผลิต i-a-Si:H ที่มีแก๊สเตตน้อยคือ ควรใช้กำลังไฟฟ้าในการแยกสลายก๊าซให้ต่ำๆ และใช้ก๊าซไฮโดรเจนด้วยอัตราที่มากกว่า เพื่อให้ได้อัตราการเติบโตของฟิล์มประมาณ 1 μ m ต่อชั่วโมง อุณหภูมิแผ่นฐานที่เหมาะสมคือประมาณ 200-250 องศาเซลเซียส แม้ว่าในกระบวนการผลิตชั้น i-a-Si:H จะไม่ได้โด๊ป i-a-Si:H แต่ผลที่ได้คือ จะได้ฟิล์ม i-a-Si:H ที่มีคุณสมบัติเป็นชนิด n แบบอ่อนเสมอ เพราะระดับพลังงานเฟอร์มีของ i-a-Si:H ไม่ได้อยู่ที่กลางช่องว่างพลังงาน แต่จะอยู่ในตำแหน่งที่ค่อนข้างไปทางแถบคอนดักชัน การเติมโบรอนบ้างเล็กน้อย (เช่นประมาณ 1 ppm) จะทำให้ระดับพลังงานเฟอร์มีเคลื่อนมาอยู่ตรงกลางช่องว่างพลังงานพอดี และจะทำให้สนามไฟฟ้าในชั้น i มีค่าเพิ่มขึ้น และประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น [14] โดยทั่วไปแผ่นซิลิคอนได้มาจากการตัดให้เป็นแผ่นจากแท่งซิลิคอน (Ingot) ด้วยใบเลื่อยซึ่งสามารถแบ่งแผ่นผลึกได้เป็น 2 แบบ คือ แผ่นซิลิคอนพื้นผิวแบบขัดเงา (Polished silicon wafer) แสดงในรูปที่ 2.10 และแผ่นซิลิคอนแบบไม่ขัดเงา Unpolished silicon wafer) แสดงในรูปที่ 2.11 (ก) ในกรณีแผ่นซิลิคอนแบบไม่ขัดเงา ก่อนนำมาสร้างเซลล์แสงอาทิตย์จะต้องทำการกัดพื้นผิวเพื่อลดริ้วรอยจากการตัด (Saw damage) ดังแสดงในรูปที่ 2.11 (ข) ส่วนในกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อเฮเทอโรจังก์ชันที่มีค่าประสิทธิภาพที่สูงนั้น นอกจากคุณสมบัติของแผ่นซิลิคอนที่มีความเหมาะสมแล้ว การสร้างชั้นเพื่อลดการรวมตัวของพาหะที่พื้นผิวแผ่นซิลิคอนก็มีความสำคัญเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ถึงแม้ว่าแผ่นซิลิคอนที่มีการขัดพื้นผิวหรือทำการกัดด้วยสารละลายเพื่อลดริ้วรอยจากการตัด แต่พื้นผิวของแผ่นซิลิคอนจะยังมีพันธะแขวนขาด (Dangling bond) ซึ่งทำให้โครงสร้างของซิลิคอนไม่สมบูรณ์และเกิดการดักจับอิเล็กตรอนอิสระหรือเกิดการรวมตัวของพาหะ (Surface recombination) เพิ่มขึ้น ดังนั้นในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อเฮเทอโรจังก์ชันจึงจำเป็นต้องมีชั้นลดการรวมตัวของพาหะซึ่งส่วนใหญ่ก็นิยมใช้วัสดุในกลุ่มฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน (Amorphous silicon-based thin film) ชั้นฟิล์มของ i-a-Si:H ถูกเคลือบอยู่ระหว่างชั้นโด๊ปกับแผ่นซิลิคอนทั้งสองด้าน ดังรูปที่ 2.13 โดยชั้นนี้จะมีหน้าที่ลดค่าความหนาแน่นจุดบกพร่อง (Defect density) บริเวณพื้นผิวซิลิคอน ทำให้การรวมตัวของประจุพาหะบริเวณดังกล่าวลดลงด้วย ส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดและ

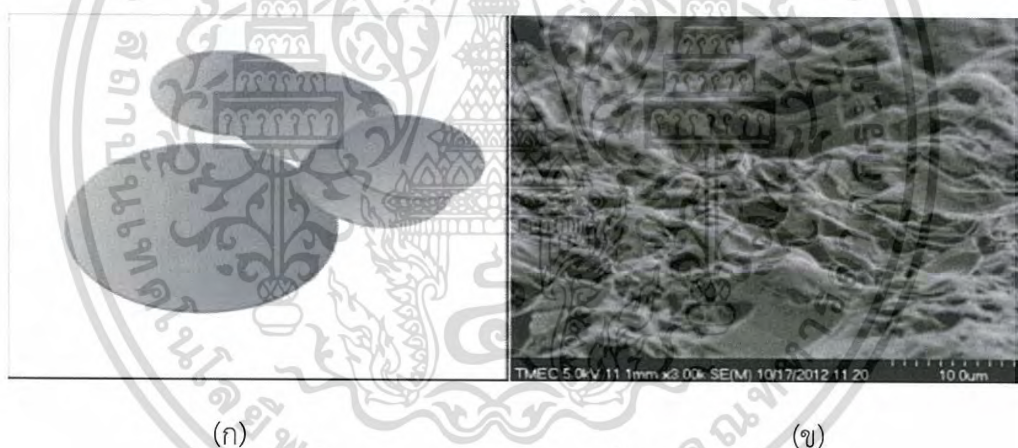
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อผู้เผยแพร่เนื้อหาไปใช้ประโยชน์ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

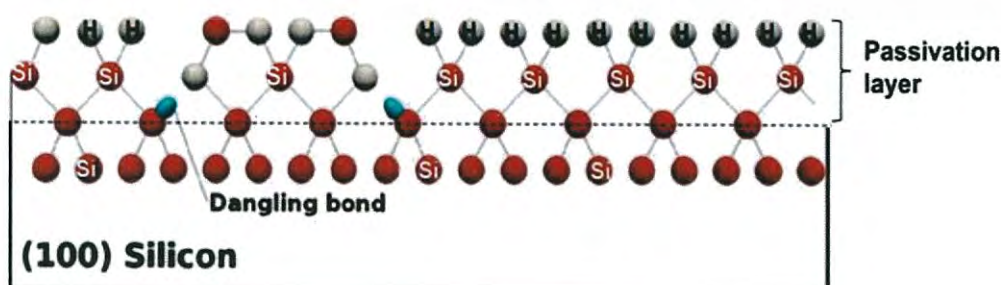
กระแสไฟฟ้าลัดวงจรเพิ่มขึ้น สามารถวัดค่าเวลาการรวมตัวของประจุพาหะอิสระแผ่นผลึกซิลิคอน (Effective lifetime; τ_{eff}) ได้ด้วยเครื่อง WCT-120 Lifetime Test Instrument ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.1) และอธิบายในรูปของความเร็วในการรวมตัวที่ผิวได้ตามสมการที่ (2.2) ส่วนโครงสร้างที่ใช้ในการวัดผลจะมีลักษณะดังรูปที่ 2.13 [17]



รูปที่ 2.10 ภาพถ่ายแผ่นผลึกซิลิคอนชนิดขัดมัน (Polished silicon wafer)

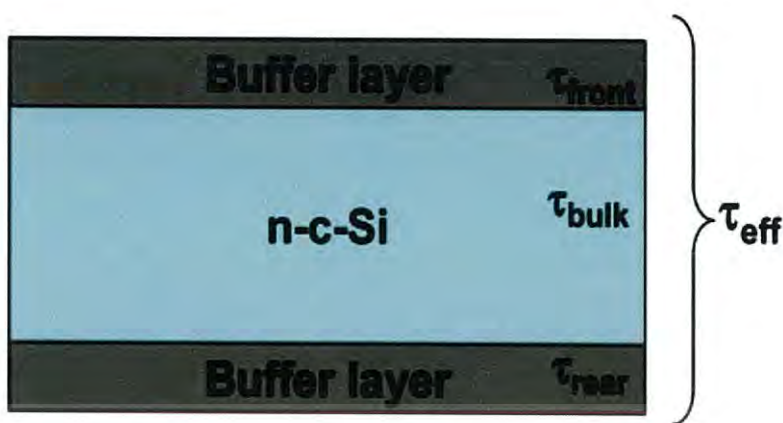


รูปที่ 2.11 แผ่นซิลิคอน (ก) ภาพถ่ายแผ่นผลึกซิลิคอนชนิดไม่ขัดมัน (Unpolished silicon wafer) และ (ข) ภาพ SEM พื้นผิวแผ่นซิลิคอนชนิดไม่ขัดมัน



รูปที่ 2.12 การสร้างชั้น Passivation layer ด้วยฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน (a-Si:H)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 โครงสร้างสำหรับทดสอบคุณสมบัติ passivation

$$\frac{1}{\tau_{eff}} = \frac{1}{\tau_{bulk}} + \frac{1}{\tau_{front}} + \frac{1}{\tau_{rear}} \mu\text{sec}^{-1} \quad (2.1)$$

$$\frac{1}{\tau_{eff}} = \frac{1}{\tau_{bulk}} + \frac{2S}{W} \quad (2.2)$$

โดยที่

- τ_{eff} คือ ค่าอายุพาหะอิสระเฉลี่ยทั้งหมดของผลึกซิลิคอน (μsec)
- τ_{bulk} คือ ค่าอายุพาหะอิสระที่เนื้อซิลิคอน (μsec)
- τ_{front} คือ ค่าอายุพาหะอิสระที่ผิวด้านหน้าของผลึกซิลิคอน (μsec)
- τ_{rear} คือ ค่าอายุพาหะอิสระที่ผิวด้านหลังของผลึกซิลิคอน (μsec)
- W คือ ความหนาของแผ่นซิลิคอน (cm)
- S คือ ความเร็วการรวมตัวที่ผิว (cm/sec)

2.2.3.4 ชั้น n

มีคุณสมบัติที่เด่นดังนี้

1. ระดับพลังงานเฟอร์มิของ a-Si:H ชนิด n อยู่ใกล้แถบคอนดักชันมาก และสภาพนำไฟฟ้าก็มีค่า สูงมาก ($1-10 \text{ S.cm}^{-1}$) จึงทำให้แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่ามากขึ้น
2. ช่องว่างพลังงานของ n-a-Si:H มีค่าประมาณ 1.9-2.0 eV มีความโปร่งใสและช่วยให้แสงที่สะท้อนจากขั้วโลหะด้านหลังกลับเข้าสู่ชั้น i ได้ดีขึ้น ทำให้ได้กระแสไฟฟ้าเอาต์พุตมากขึ้น
3. เนื่องจาก n-a-Si:H มีค่าสภาพนำไฟฟ้าสูง จึงสร้างขั้วไฟฟ้าโอห์มิกชนิด Al ได้ง่าย เงื่อนไขของการปลูกฟิล์มบางชนิด a-Si:H ได้แก่ การใช้กำลังไฟฟ้าสูงๆ ในการแยกสลายก๊าซ SiH_4 และผสมด้วยก๊าซ H_2 ที่อัตราส่วนสูงมากๆ [15-16]

2.2.4 พารามิเตอร์เอาต์พุตที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์

พารามิเตอร์ที่สำคัญที่ใช้อธิบายลักษณะสมบัติเอาต์พุต (output characteristics) ของเซลล์แสงอาทิตย์มีดังนี้

2.2.4.1 ประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (Energy conversion efficiency)

คืออัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตสูงสุดต่อพลังงานของแสงที่ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ อาจเรียกสั้นๆ ว่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์และใช้สัญลักษณ์ว่า η เขียนเป็นสูตรได้ว่า

$$\eta = \frac{P_m}{A \times P_{in}} \times 100\% \quad (2.3)$$

เมื่อ

P_m คือ กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตสูงสุด

P_{in} คือ กำลังของแสงที่ตกกระทบเซลล์

A คือ พื้นที่รับแสง

2.2.4.2 กระแสลัดวงจร (Short circuit current : I_{sc})

เป็นค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่แรงดันไฟฟ้าเป็นศูนย์ ในทางอุดมคติเมื่อ $V=0$ แล้ว $I_{sc} = I_L$ ดังนั้น I_{sc} จึงมีความสัมพันธ์โดยตรงกับแสงที่เซลล์นำไปใช้ประโยชน์ได้ ถ้าเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ในสภาวะลัดวงจร เราเรียกกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรว่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรรูปที่ 2.13 แสดงวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ทั่วไป ถ้าเซลล์แสงอาทิตย์ไม่ถูกส่องด้วยแสงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ามืด และแรงดันไฟฟ้า V ของเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาวะมืดจะมีรูปเหมือนกับสมการของกระแสไฟฟ้าของไดโอด กล่าวคือ

$$I = I_0 [\exp(qV/nkT) - 1] \quad (2.4)$$

โดยที่ $I_0 = qA \left(\frac{D_h p_n}{L_h} + \frac{D_e n_p}{L_e} \right)$ เรียกว่า กระแสไฟฟ้าย้อนอิมิต์ และ n คือค่าแฟกเตอร์อุดมคติของไดโอด

ดังนั้นกระแสไฟฟ้า I_{out} ที่ไหลออกสู่วงจรภายนอกจะเท่ากับผลต่างระหว่างกระแสไฟฟ้ามืด I และกระแสไฟฟ้าโฟโต $I_{ph} = I_{sc}$ ดังนี้

$$I_{out} = I - I_{ph} \quad (2.5)$$

ในที่นี้ $I_{ph} (= I_{sc})$ คำนวณได้จากสมการ $n_{ext}(\lambda) = n_{in}(\lambda)[1 - R(\lambda)] = \frac{J_{sc}(\lambda)}{qF(\lambda)}$

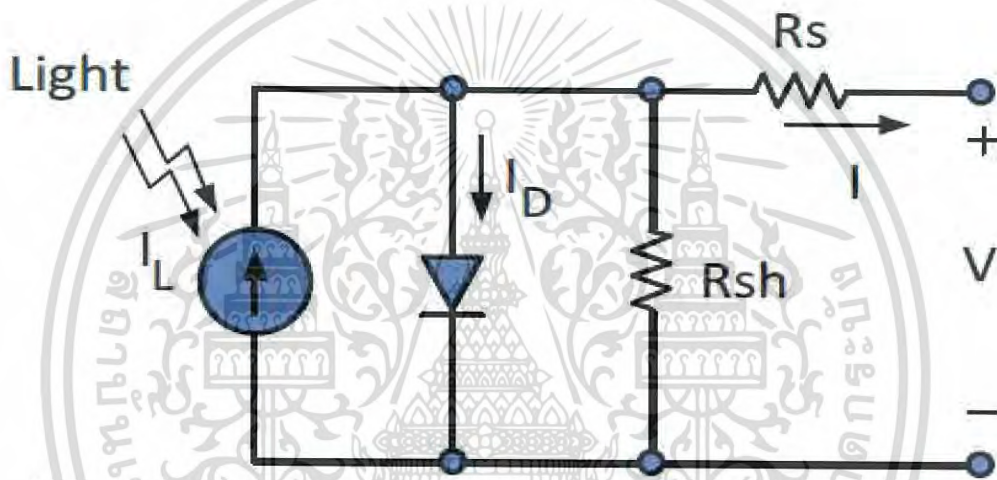
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และถ้าให้ A คือพื้นที่รับแสง จะได้ว่า

$$I_{sc} = qA \int_0^{\infty} F(\lambda) \eta_{ext}(\lambda) d\lambda \quad (2.6)$$

ถ้าพิจารณาความต้านทานภายในของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งได้แก่ ความต้านทานอนุกรม R_s และความต้านทานขนั้ R_{sh} ด้วย จะทำให้กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต I_{out} มีค่าดังนี้

$$I_{out} = I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V = IR_s)}{nkT} \right] - 1 \right\} + \frac{V = IR_s}{R_{sh}} - I_{ph} \quad (2.7)$$



รูปที่ 2.14 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ทั่วไป

2.2.4.3 แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (Open circuit voltage : V_{oc})

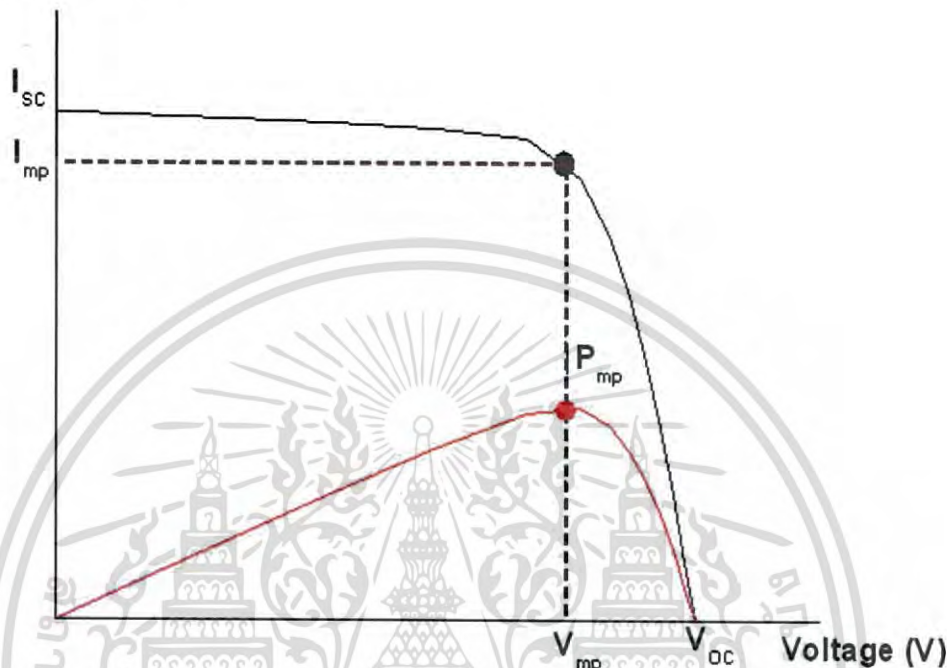
ถ้าเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์อยู่ในสภาพวงจรเปิด (open circuit) แรงดันไฟฟ้าที่วัดได้เรียกว่า แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด ค่า V_{oc} คำนวณได้จากสมการที่ (2.7) โดยแทนค่า $I_{out} = 0$ ดังนั้นจึงได้ว่าที่ $I = 0$

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1 \right) \quad (2.8)$$

จากความสัมพันธ์ของแรงดันเปิดวงจรเราพบว่าผลของการปรับเปลี่ยนค่ากระแสอิ่มตัวที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยทำให้ค่าแรงดันเปิดวงจรลดลงมาก สาเหตุที่สำคัญอย่างหนึ่งที่สัมพันธ์กับกระแสลัดวงจรคือความเร็วในการรวมตัวใหม่ที่ผิว ถ้าความเร็วในการรวมตัวใหม่ที่ผิวมีค่าต่ำจะส่งผลให้กระแสลัดวงจรมีค่าต่ำด้วย และแรงดันเปิดวงจรก็จะมีค่าสูงขึ้นที่สุดในแต่ละจุดบนเส้นกราฟกระแสกับแรงดัน นั้นเมื่อนำค่ากระแสคูณกับแรงดันไฟฟ้าจะได้กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตที่จุดการทำงานนั้น ดังนั้นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซลล์แสงอาทิตย์จึงสามารถแสดงค่าในเทอมของค่าจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด ซึ่งเท่ากับกระแสลัดวงจรสูงสุดคูณกับแรงดันเปิดวงจรสูงสุดจุดที่ให้กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตสูงสุดจากเซลล์นั้นจะให้รูปสี่เหลี่ยมในเส้นกราฟที่มีพื้นที่มากที่สุด และรูปกราฟที่ทำการกลับด้านมาอยู่ในควอดแดนต์ที่ 1 ดังรูปที่ 2.15

Current, Power



รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันในควอดแดนต์ที่ 1 แสดงจุดกระแสลัดวงจร (I_{sc}) แรงดันวงจรเปิด (V_{oc}) รวมถึงกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตและจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (P_{mp})

2.2.4.4 ฟิลแฟคเตอร์ (Fill factor: FF)

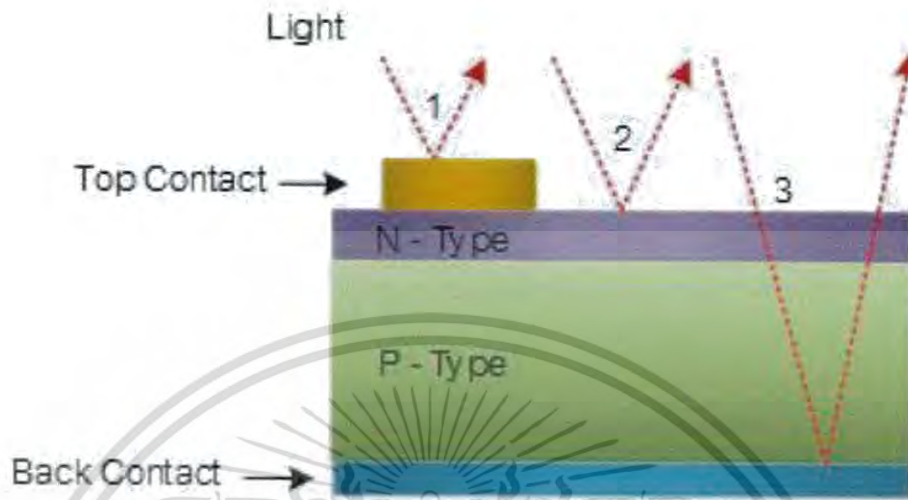
เป็นการวัดอย่างหนึ่งเพื่อหาคุณภาพของรอยต่อพี-เอ็น เอาต์พุตพารามิเตอร์ที่สำคัญอีกตัวหนึ่งคือ ฟิลล์แฟคเตอร์ (fill factor) เขียนย่อว่า FF นิยามของ FF คืออัตราส่วนของพื้นที่ของ $V_{max} \times I_{max}$ ต่อพื้นที่ของ $V_{oc} \times I_{sc}$ และเขียนเป็นสูตรได้ว่า

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}} \quad (2.9)$$

2.2.5 ข้อจำกัดของค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานเนื่องจากปัญหาการสูญเสียทางแสงในเซลล์แสงอาทิตย์

การศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่เป็นข้อจำกัดของประสิทธิภาพการแปลงพลังงานอันเนื่องมาจากการสูญเสียทางแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งจะประกอบไปด้วยการสูญเสียทางแสง (Optical losses) เนื่องจากการสะท้อนกลับของแสงที่ผิวหน้ารับแสงของเซลล์ ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์โดยทั่วไปแล้ว จะไม่สามารถดูดกลืนแสง หรือโฟตอนได้ทั้งหมดนั่นคือแสงไม่สามารถหักเหเข้าสู่เนื้อสารกึ่งตัวนำได้ทั้งหมด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยจะมีแสง หรือโฟตอนบางส่วน (ส่วนมาก) ที่สะท้อนออกจากผิวหน้ารับแสง ดังแสดงในรูปที่ 2.16 ซึ่งทำให้ไม่สามารถนำแสง หรือโฟตอนไปใช้ได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ



รูปที่ 2.16 การสูญเสียทางแสงเนื่องจากการสะท้อนกลับของแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ที่บริเวณ (1) ลายโลหะ (2) ผิวหน้าด้านบนของเซลล์ และ (3) ผิวโลหะด้านหลังเซลล์

ดังนั้นจึงมีแนวทางที่จะลดปัญหาการสูญเสียทางแสง หลัก ๆ ดังนี้

- 1) การสร้างหน้าสัมผัสโลหะของผิวหน้าเซลล์ให้มีขนาดเล็กลง (แม้ว่าจะเป็นผลทำให้ความต้านทานอนุกรมแฝง มีค่าเพิ่มขึ้นก็ตาม)
- 2) การสร้างชั้น หรือเคลือบชั้นป้องกันการสะท้อน (Antireflection coating: ARC) เช่นชั้นออกไซด์ หรือชั้นฟิล์มบางไดอิเล็กทริกที่มีความหนาที่เหมาะสมและสอดคล้องกับความยาวคลื่นหารสี่ที่เรียกว่า A quarter wavelength ARC ซึ่งมีค่าดังสมการที่ (2.10) ลงบนผิวหน้าของเซลล์เพื่อช่วยลดการสูญเสียทางแสงที่เกิดจากการสะท้อนกลับของแสง

$$d_1 = \frac{\lambda_0}{4n_1} \quad (2.10)$$

โดยที่

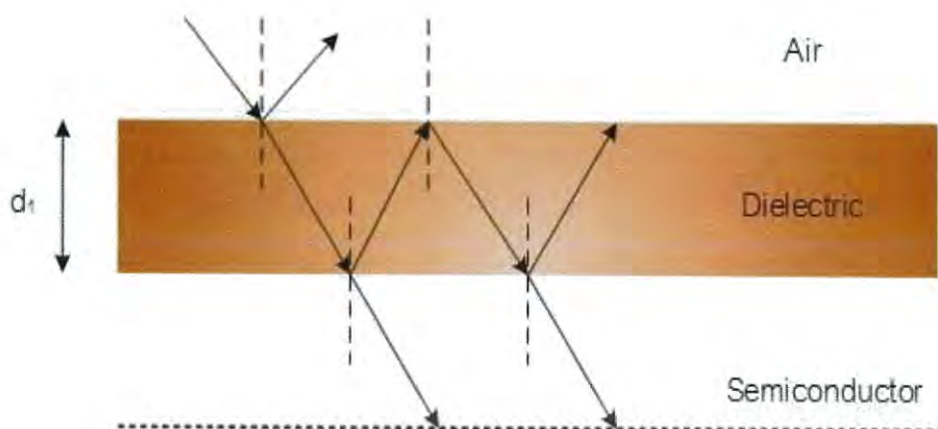
d_1 คือ ความหนาที่เหมาะสมของ ARC

λ_0 คือ ความยาวคลื่นที่ทำให้การสะท้อนแสงที่ผิวมีค่าลดลงเป็นศูนย์ ($=0.6\mu\text{m}$)

n_1 คือ ค่าสัมประสิทธิ์การหักเหของแสงของ ARC

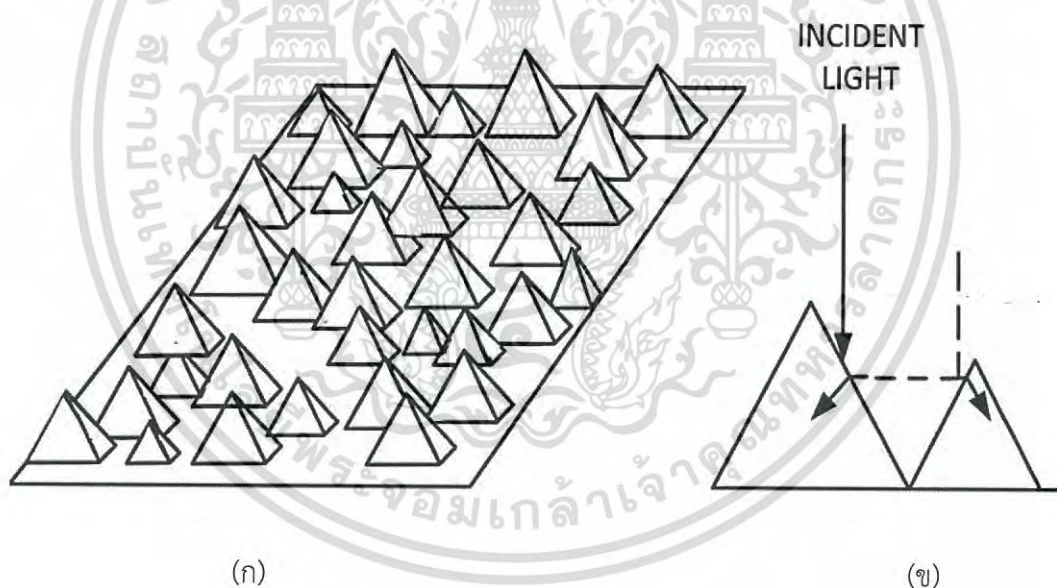
ถ้าไม่พิจารณาผลของการสะท้อนเนื่องจากผลของการแทรกสอดของแสงที่ผิวสัมผัสของฟิล์มสารกึ่งตัวนำ ARC ที่เกิดเฟสตรงข้ามกัน 180° แล้ว เราสามารถสร้างไดอะแกรมของการใช้ A quarter wavelength (ARC) ลดการสะท้อนแสงที่ผิวได้ [18] ดังแสดงในรูปที่ 2.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 การใช้หลักการ A quarter wavelength (ARC) เพื่อลดการสะท้อนกลับของแสงที่ผิว

3) สร้างผิวหน้าเซลล์ในแบบไม่เรียบหรือขรุขระ (Texture surface) เพื่อช่วยดักแสงโดยการเพิ่มโอกาสให้แสงถูกสะท้อนกลับลงบนผิวหน้าเซลล์มากขึ้น ทำให้เซลล์สามารถดูดกลืน (absorption) แสงได้มากขึ้นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 ลักษณะแผ่นซิลิคอนแบบไม่เรียบหรือขรุขระ (ก) ลวดลายพีระมิดแบบสุ่ม และ (ข) การดูดกลืนแสง และการสะท้อนแสงภายใน

2.2.6 คุณสมบัติของกับดักแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ที่พื้นผิวไม่เรียบในแบบต่างๆ

การทำพื้นผิวเซลล์ไม่เรียบ คือการทำให้กับดักแสงให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ โดยมีจุดประสงค์เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดการรั่วไหลของแสง และการสะท้อนกลับของแสง ทำให้ได้จำนวนการผ่านของแสงภายในเซลล์มากที่สุด ดังนั้นจึงทำให้เซลล์สามารถดูดกลืนแสง หรือพลังงานโฟตอนมาใช้ประโยชน์ได้มากยิ่งขึ้น โดยโครงสร้างของกับดักแสงที่ถูกรวบรวมจากงานวิจัยที่ผ่านมาจะมีลักษณะโครงสร้างของลวดลายที่นิยมในปัจจุบัน หลักๆ ดังต่อไปนี้

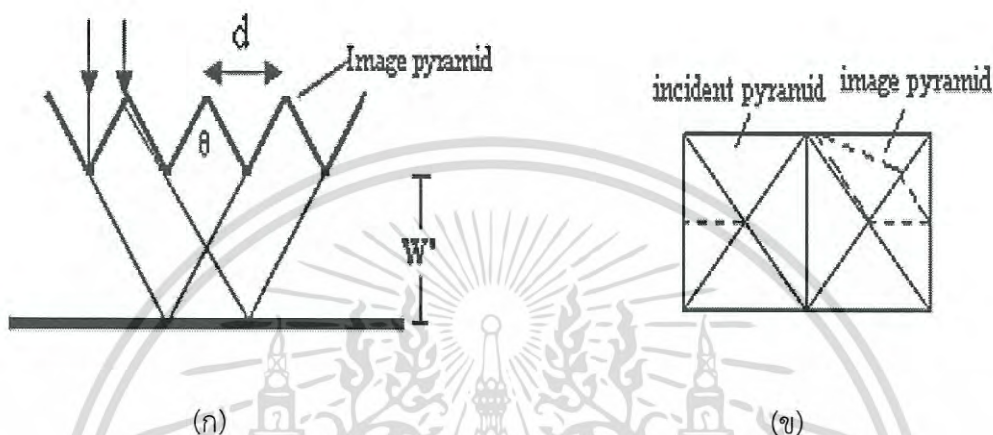
เอกสารข้อลวดลายที่นิยมในปัจจุบัน หลักๆ ดังต่อไปนี้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.6.1 โครงสร้างลวดลายแบบพีระมิต (Pyramid layout)

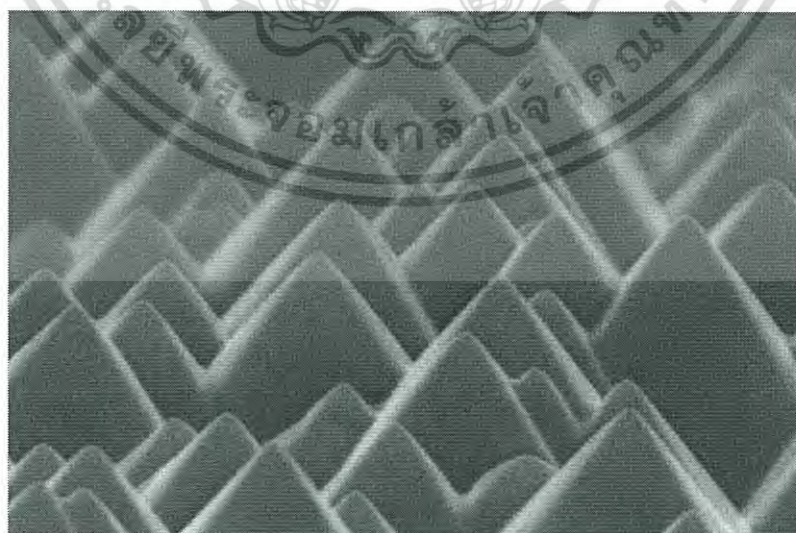
แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ

1) ลวดลายพีระมิตแบบสม่ำเสมอ (Regular pyramid layout) คือ โครงสร้างอย่างง่ายในปัจจุบันที่มีลวดลายเป็นแบบพีระมิตขนาดเท่ากัน และมีการจัดเรียงตัวกันอย่างสม่ำเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 2.19 ซึ่งสามารถสร้างขึ้นโดยใช้เทคนิคการสร้างลวดลายด้วยแสง (Photolithography) หรือการใช้เลเซอร์ (laser) สร้างลวดลายเปิดช่อง



รูปที่ 2.19 ลวดลายพีระมิตที่มีการจัดเรียงตัวแบบสม่ำเสมอ (ก) ภาพตัดขวางของโครงสร้างลวดลายพีระมิต และ (ข) ภาพถ่ายด้านบนลวดลายพีระมิต

2) ลวดลายพีระมิตแบบสุ่ม (Random pyramid layout) คือ โครงสร้างที่มีลวดลายเป็นแบบพีระมิตขนาดไม่เท่ากัน และมีการจัดเรียงตัวแบบสุ่ม (ไม่สม่ำเสมอ) ซึ่งสามารถสร้างขึ้นโดยใช้เทคนิคการกัด (Etching) ด้วยกระบวนการทางเคมี [19] ดังแสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 ลวดลายพีระมิตที่มีการจัดเรียงตัวแบบสุ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.6.2 โครงสร้างลดทลายแบบเรขาคณิต (Geometrically layout)

โครงสร้างที่มีลดทลายเป็นแบบรูปทรงเรขาคณิตในลักษณะต่างๆ ยกตัวอย่างเช่น รูปทรงตัววี (V-Groove) รูปทรงปริซึม, รูปทรงกรวย เป็นต้น และมีการจัดเรียงตัวแบบสม่ำเสมอ ซึ่งสามารถสร้างขึ้นโดยใช้เทคนิคการสร้างลดทลายด้วยแสง หรือการใช้เลเซอร์

2.3 แนวทางการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีประสิทธิภาพสูง

เซลล์แสงอาทิตย์สามารถประดิษฐ์ได้จากวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ ได้มากมาย สารกึ่งตัวนำเป็นวัสดุที่นิยมนำมาใช้งานมากที่สุดเพราะมีคุณสมบัติทางแสงที่ดีกว่าวัสดุชนิดอื่น ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์หมายถึงอัตราส่วนของพลังงานไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตได้สูงสุดต่อพลังงานของแสงที่ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ เหตุผลความจำเป็นที่เราต้องการเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงก็เพราะจะช่วยลดพื้นที่การใช้งานลงได้ ซึ่งจะช่วยให้ระบบการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์มีราคาถูกลง เซลล์แสงอาทิตย์จะทำงานได้ประสิทธิภาพสูงเพียงไรนั้นมีหลักการที่สำคัญ คือจะต้องชักนำให้พลังงานแสงเดินทางเข้าสู่เซลล์แสงอาทิตย์ให้มากที่สุด จะต้องผลิตคู่อิเล็กตรอนและโฮลด้วยพลังงานแสงให้ได้ปริมาณมากที่สุดและจะต้องกวาดอิเล็กตรอนและโฮลเหล่านั้นให้ไหลออกไปสู่วงจรภายนอกให้ได้มากที่สุด ตารางที่ 2.1 แสดงกลไกพื้นฐานที่จำเป็นและเทคโนโลยีเพื่อปรับปรุงให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สูงขึ้นได้ [20] ในหัวข้อนี้เราจะสรุปอีกครั้งว่าจะมีเทคโนโลยีในการปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ให้สูงขึ้นได้อย่างไร

ตารางที่ 2.1 กลไกพื้นฐานของการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์และเทคโนโลยีพื้นฐานเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

กลไกพื้นฐานที่จำเป็น	เทคโนโลยีทางปฏิบัติ
1. ชักนำให้แสงเข้าสู่สารกึ่งตัวนำให้มากที่สุด และขยายผลตอบสนองเชิงสเปกตรัมให้กว้างที่สุด	1.1 เคลือบวัสดุป้องกันการสะท้อนแสงที่ผิวด้านหน้า 1.2 ทำผิวให้ขรุขระเพื่อเพิ่มระยะทางเดินของแสงในสารกึ่งตัวนำ 1.3 เพิ่มการสะท้อนแสงที่ผิวด้านหลัง
2. ผลิตคู่อิเล็กตรอนและโฮลให้ได้มากที่สุด	2.1 เลือกสารกึ่งตัวนำที่มีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงสูงและมีสภาพนำไฟฟ้าด้วยแสงสูง 2.2 ปรับปรุงที่คุณภาพของสารกึ่งตัวนำ โดยที่พยายามเพิ่มผลคูณของอายุพาหะและความคล่องตัว 2.3 ลดการรวมตัวของคู่อิเล็กตรอนและโฮลที่ถูกผลิตด้วยแสงโดยลดการรวมตัวที่รอยต่อ p-n, p-i และ i-n (เช่น ใช้อั้วรอยต่อแบบลาดเพื่อลดความไม่เข้าคู่ของแลตทิซ) และที่ผิวด้านหน้าและด้านหลัง

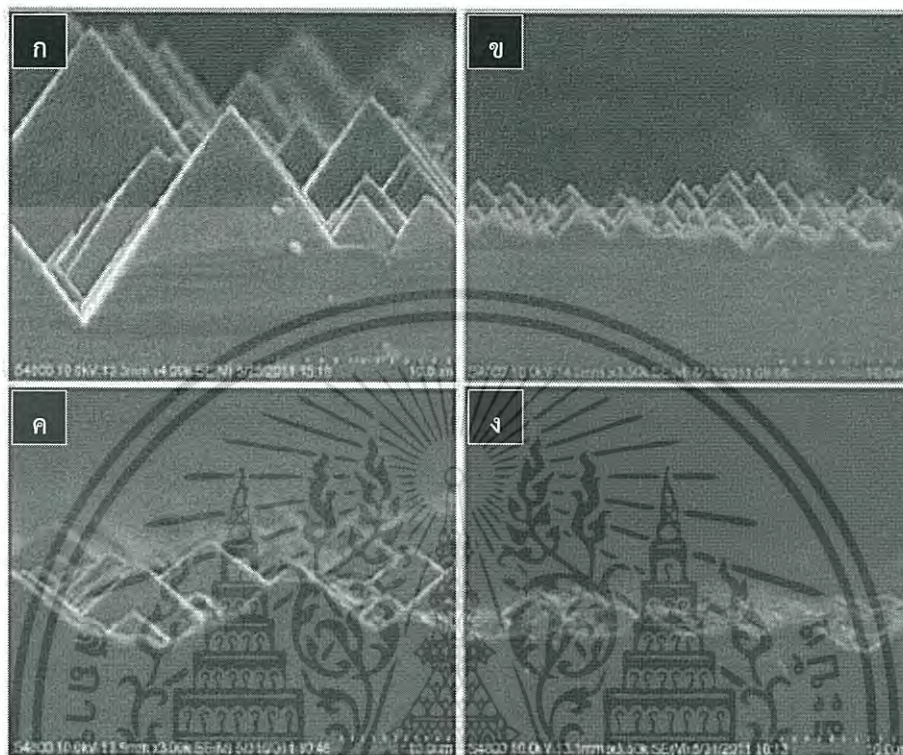
ตารางที่ 2.1 (ต่อ) กลไกพื้นฐานการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์และเทคโนโลยีพื้นฐานเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

กลไกพื้นฐานที่จำเป็น	เทคโนโลยีทางปฏิบัติ
3. รวบรวมคู่อิเล็กตรอนและโฮลที่ผลิตด้วยแสงให้มากที่สุด	3.1 ใช้ปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิกแบบพัดพา (drift type) เช่น ใช้อรอยต่อ p-i-n 3.2 ใช้ช่องว่างพลังงานแบบลาด การโดปสารเจือปนแบบลาดและใช้ back surface field effect (BSF) 3.3 ใช้การเป็นปรากฏการณ์ minority carrier mirroeffect 3.4 ใช้โครงสร้างซูเปอร์แลตทิซ
4. ลดการสูญเสียอันเนื่องมาจากความต้านทานอนุกรมภายในของเซลล์แสงอาทิตย์	4.1 ลดความต้านทานของขั้วโปร่งใสด้านหน้า 4.2 ออกแบบรูปร่างของขั้วโลหะให้เหมาะสมที่สุด 4.3 ใช้ปรากฏการณ์ tunneling injection (MIS)
5. ลดการสูญเสียของแรงดันไฟฟ้า	5.1 ลดการรวมตัวของคู่อิเล็กตรอนและโฮลโดยใช้ mirror effect ของรอยต่อแบบเฮเทอโร 5.2 ใช้ปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิกแบบพัดพา 5.3 ใช้โครงสร้าง BSF
6. เพิ่มผลตอบสนองทางสเปกตรัมให้มีความกว้างที่สุด	6.1 ใช้เซลล์แสงอาทิตย์แบบ stack 4 ขั้ว 6.2 ใช้เซลล์แสงอาทิตย์แบบ stack 2 ขั้ว 6.3 ใช้อรอยต่อแบบเฮเทอโร 6.4 ใช้ชั้นหน้าต่างที่มีช่องว่างพลังงานกว้าง เช่น รอยต่อเฮเทอโรและซูเปอร์แลตทิซ

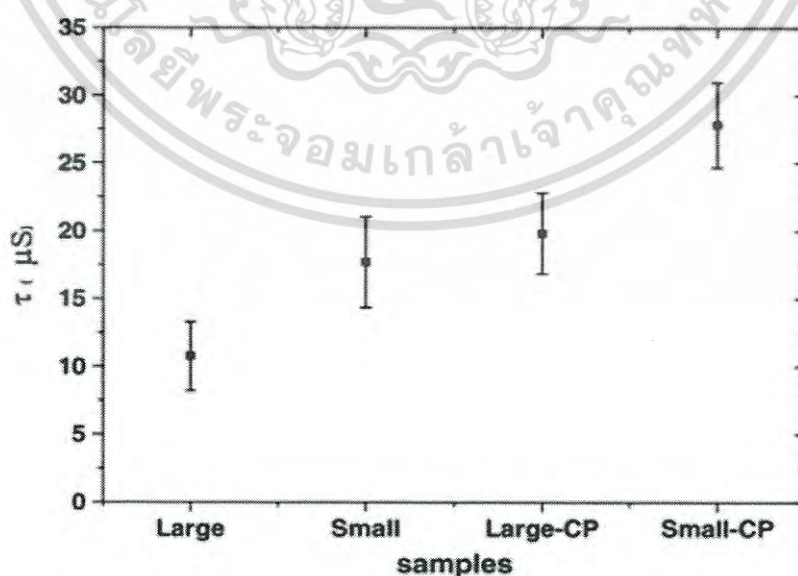
2.4 การปรับลักษณะพื้นผิวแผ่นซิลิคอนด้วยสารเคมี

โดยทั่วไปการกัดแผ่นซิลิคอนเพื่อให้มีพื้นผิวซิลิคอนขรุขระในสารละลาย เช่น Potassium hydroxide (KOH) จะได้พื้นผิวที่มีลักษณะเป็นแบบพีระมิดมีขนาดประมาณ 1-10 μm ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลาย อย่างไรก็ตามการสร้างขึ้นเพื่อลดการรวมตัวของพาหะ (Passivation layer) บนพื้นผิวที่ขรุขระยังอาจมีความไม่สมบูรณ์เกิดขึ้นได้เนื่องมาจากพื้นผิวและยอดของพีระมิด ดังนั้น ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์จึงจำเป็นต้องเลือกขนาดของพีระมิดหรือปรับลดความแหลมคมของยอดพีระมิด เพื่อให้พื้นผิวมีความเรียบมากขึ้น เช่น การใช้สารละลายปรับสภาพพื้นผิว (Chemical polished :CP) ดังแสดงในรูปที่ 2.21 จากรูปที่ 2.21 (ก) จะเห็นว่าพีระมิดจะมีลักษณะที่มียอดแหลม และเมื่อทำการปรับลักษณะพื้นผิวด้วยสารละลายแล้วจะทำให้ขนาดและความแหลมของยอดพีระมิดลดลงดังแสดงในรูปที่ 2.21 (ค) และแสดงในรูปที่ 2.21 (ข) แสดงพื้นผิวของที่เป็นขนาดเล็ก ซึ่งก็พบว่ายอดของพีระมิดจะมีความแหลมคมเช่นกัน และหลังจากการปรับลักษณะพื้นผิวแล้วจะทำให้พื้นผิวเรียบขึ้นแต่ยังคงความขรุขระไว้ดังรูปที่ 2.21 (ง) จากรายงานพบว่าหลังการปรับไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาพพื้นผิวแผ่นซิลิคอนจะช่วยทำให้การเคลือบฟิล์มในการสร้างชั้น passivation ลงบนแผ่นซิลิคอนได้สมบูรณ์มากขึ้นและยังส่งผลให้ค่าอายุพาหะ (Effective lifetime) เพิ่มขึ้นด้วย [17] ดังแสดงในรูปที่ 2.22



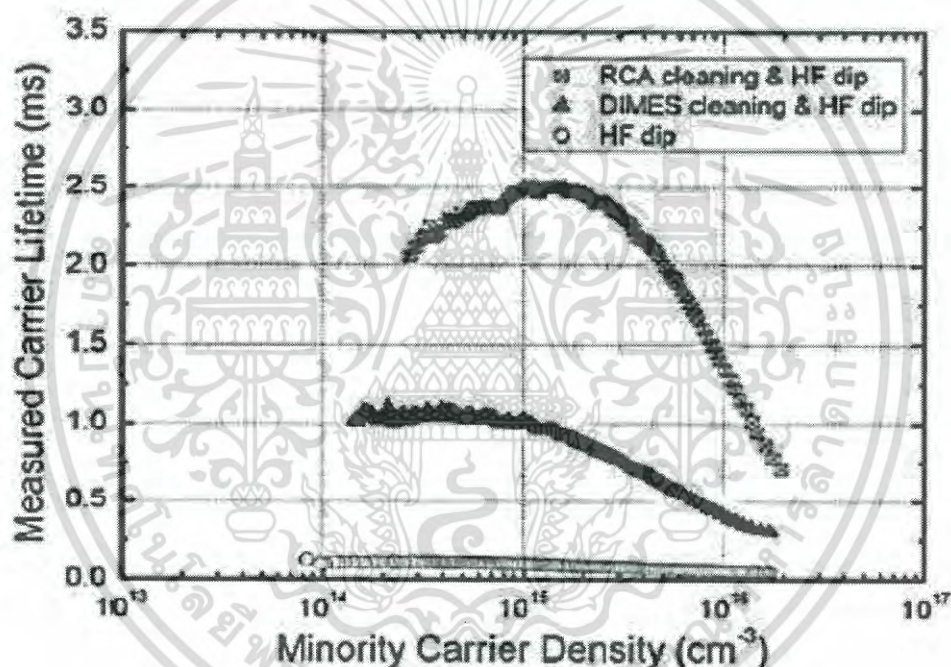
รูปที่ 2.21 ภาพถ่าย SEM ของพื้นผิวแผ่นซิลิคอนรูปทรงพีระมิด (ก) พีระมิดขนาดใหญ่ (ข) พีระมิดขนาดเล็ก (ค) พีระมิดขนาดใหญ่ที่ปรับพื้นผิว และ (ง) พีระมิดขนาดเล็กที่ปรับพื้นผิว



รูปที่ 2.22 ค่าอายุพาหะจากการสร้างชั้นฟิล์ม i-a-Si:H เป็นชั้น passivation มีความหนา 50 nm เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ทางหน่วยงานวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 การทำความสะอาดแผ่นผลึกซิลิคอน (wafer Si cleaning)

การทำความสะอาดแผ่นผลึกซิลิคอน ก่อนการนำไปสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อเฮเทอโร นั้นมีความสำคัญอย่างมาก ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 เหตุผล คือ เหตุผลที่ 1 คือเพื่อทำการกำจัด อนุภาคและโลหะหนักจากพื้นผิวแผ่นผลึกและ เหตุผลที่ 2 คือการลดพันธะแขวนขาดที่พื้นผิวผลึกด้วย อะตอม H กระบวนการทำความสะอาดจึงเป็นขั้นตอนสำคัญที่ทำให้ลดความหนาแน่นของจุดบกพร่อง (Defect density) ที่รอยต่อระหว่างฟิล์ม a-Si:H กับแผ่นผลึกซิลิคอน (c-Si) ผลจากการทำความสะอาดแผ่นผลึกซิลิคอนสามารถวัดได้จากค่าอายุพาหะ (Carrier lifetime) ซึ่งจะบอกได้ว่าเงื่อนไขในการทำความสะอาดมีคุณภาพเป็นอย่างไร จากรูปที่ 2.23 แสดงค่าอายุพาหะของแผ่นผลึกซิลิคอนที่มีของชั้น a-Si:H เป็นชั้น passivation กับวิธีการทำความสะอาดในแบบต่างๆ จากการทดลองนี้ พบว่าวิธีการของ RCA cleaning & HF dip นั้นให้ค่าอายุพาหะที่สูงที่สุดซึ่งจะส่งผลต่อค่าแรงดันวงจรไฟฟ้าเปิดและค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ [21]



รูปที่ 2.23 ค่าอายุพาหะของแผ่นผลึกซิลิคอนที่มีของชั้น a-Si:H เป็นชั้น passivation กับวิธีการทำความสะอาดแบบต่างๆ

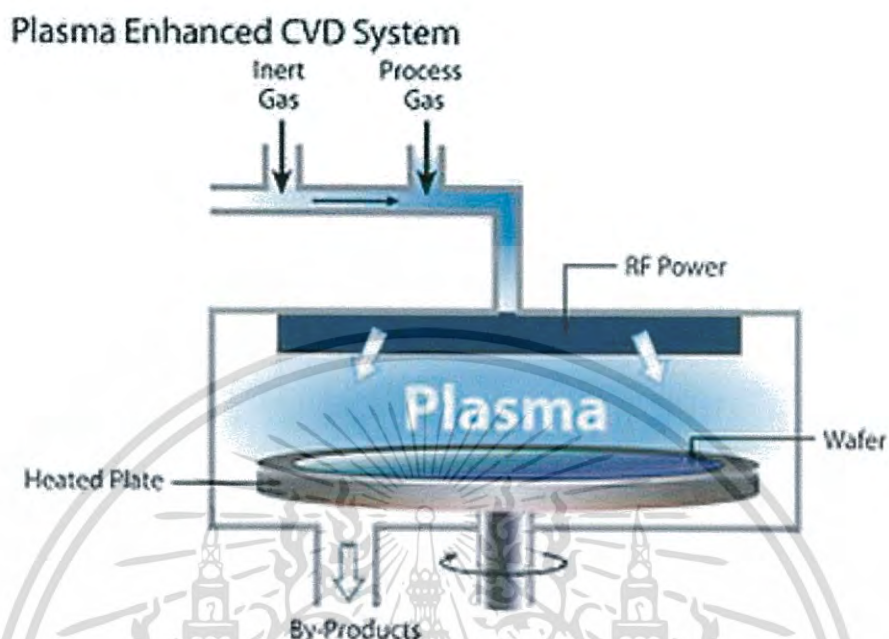
2.6 การเคลือบฟิล์มบางวิธีการตกไอสารเคมี (Chemical Vapor Deposition:CVD)

วิธีการตกสะสมไอสารเคมี [22] เป็นวิธีที่ให้ความร้อนไปยังแก๊สไฮโดรคาร์บอนที่หน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดคาร์บอน โดยแก๊สที่นิยมใช้คือ มีเทน (CH₄) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และอะเซทิลีน (C₂H₂) เป็นต้น ส่วนแหล่งความร้อนที่ใช้ในการแยกโมเลกุลของแก๊สให้แตกเป็นอะตอมของคาร์บอนนั้นนิยมใช้ พลาสมาหรือขดลวดความร้อน การควบคุมความหนาของฟิล์มที่ได้สามารถควบคุมโดยอัตราการไหลของก๊าซและความร้อนที่ให้ไปได้ ทั้งนี้วิธีการนี้ต้องทำภายใต้บรรยากาศแก๊สเฉื่อย เช่น ฮีเลียม อาร์กอน เป็นต้น เทคนิคการตกสะสมไอสารเคมีด้วยพลาสมา (Plasma enhanced chemical vapor deposition) โดยให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงระหว่างขั้วอิเล็กโทรด เพื่อให้เกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แก๊สไฮโดรคาร์บอน เช่น อะเซทิลีน มีเทน เอทิลีน เป็นต้น แตกตัวและตกบนฐานรอง เช่น ซิลิกอน ซิลิกอนไดออกไซด์ และ แก้ว ดังแสดงในรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มบางโดยวิธีการตกสะสมไอเคมีด้วยพลาสมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

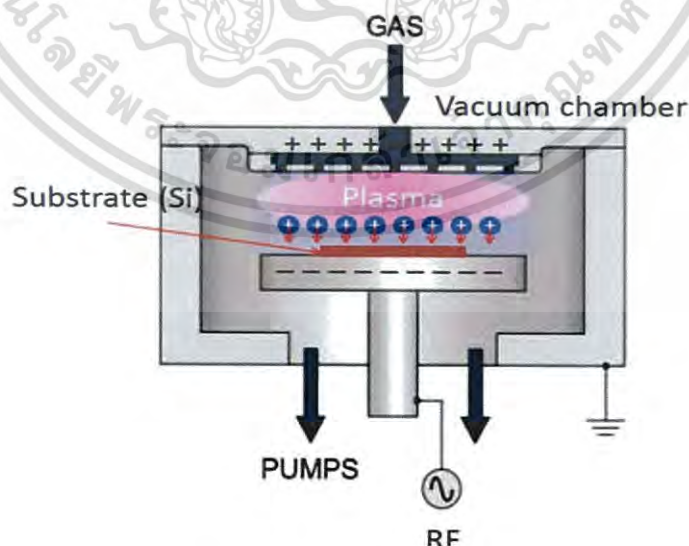
บทที่ 3

การทดลอง

ในบทนี้กล่าวถึงการปรับปรุงลักษณะพื้นผิวซิลิคอนด้วยเทคนิคการกัดปฏิกิริยาไอออน (Reactive-ion etching: RIE) เพื่อประยุกต์ใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อเฮเทอโรบนฐานรองผลึกซิลิคอน มีขั้นตอนการดำเนินงานดังต่อไปนี้ การกัดพื้นผิวซิลิคอนด้วยเทคนิคการกัดปฏิกิริยาไอออนด้วยก๊าซ SF_6 และการผสมก๊าซระหว่าง O_2 กับ SF_6 การทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนที่ผ่านการกัดด้วยกระบวนการ RCA (Radio Corporation of America) ตรวจสอบและวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวซิลิคอนด้วย SEM (Scanning Electron Microscope) การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อเฮเทอโร ด้วยกระบวนการ PECVD (Plasma-enhanced chemical vapor deposition) การวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ และการวัดประสิทธิภาพเชิงควอนตัม (Quantum Efficiency)

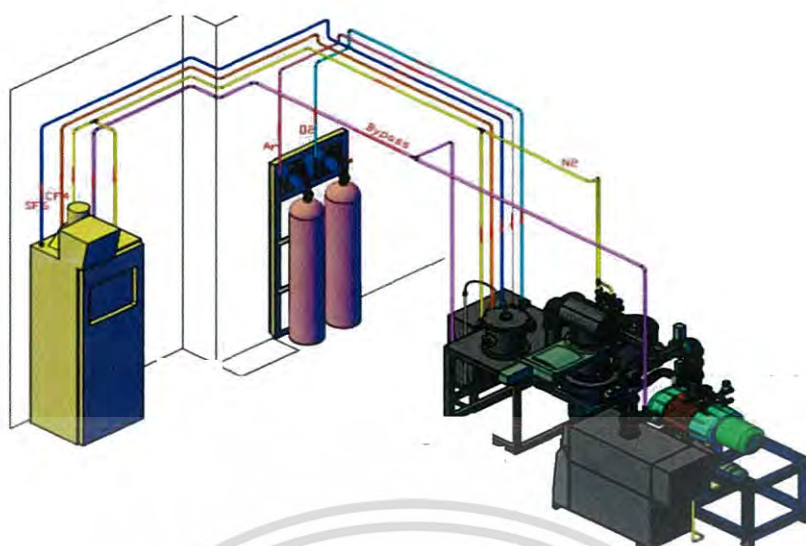
3.1 เครื่องกัดปฏิกิริยาไอออน (Reactive Ion Etching: RIE)

เทคนิคการกัดปฏิกิริยาไอออนใช้หลักการแยกสลายก๊าซตั้งต้นให้แตกตัวได้อิออนออกมาด้วยคลื่นสัญญาณความถี่วิทยุ (Radio frequency :RF) ซึ่งเราเรียกว่า พลาสมา ที่บริเวณขั้วแอโนด (Anode) และขั้วคาโทด (Cathode) ซึ่งขั้วคาโทดจะมีศักย์เป็นลบ พลาสมาที่เกิดขึ้นจะประกอบด้วยไอออนที่มีประจุเป็นลบ และไอออนของก๊าซตั้งต้นที่เป็นประจุบวก ไอออนของก๊าซตั้งต้นที่แตกตัวจะถูกเร่งด้วยศักย์ไฟฟ้าที่มีทิศทางแน่นอนให้เคลื่อนที่ไปกระทบกับพื้นผิวแผ่นฐานรองหรือชิ้นงาน ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างก๊าซตั้งต้นกับแผ่นฐานรองหรือชิ้นงาน โดยจะสามารถกัดบริเวณที่ต้องการได้ นอกจากนี้ปฏิกิริยาดังกล่าวยังก่อให้เกิดสารประกอบใหม่ขึ้นได้ ซึ่งในที่สุดจะถูกปั๊มสุญญากาศดูดออกจากห้องกัดสุญญากาศ แสดงดังรูปที่ 3.1



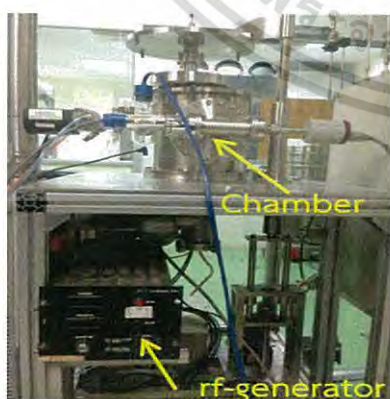
รูปที่ 3.1 หลักการทำงานของเทคนิคการกัดปฏิกิริยาไอออน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

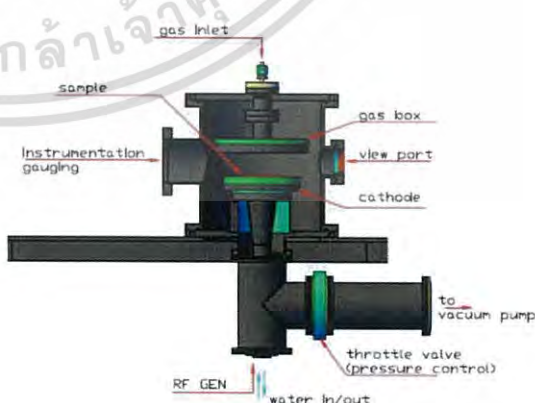


รูปที่ 3.2 ส่วนประกอบต่างๆ ของต้นแบบเครื่องกัดปฏิกิริยาไอออน

ห้องกัดสุญญากาศ (Vacuum chamber) ทำจากวัสดุสแตนเลสที่ผ่านการขัดเงา เนื่องจากสแตนเลสมีความทนทาน แข็งแรง ไม่เป็นสนิม และมีปริมาณก๊าซสะสมในเนื้อวัสดุน้อย (Outgassing) ซึ่งจะช่วยให้ง่ายต่อการทำให้มีสภาพเป็นสุญญากาศได้ดี และไม่มีสิ่งแปลกปลอมหลุดออกมาเจือปนขณะที่ทำการกระบวนการกัด ภายในห้องกัดสุญญากาศจะประกอบไปด้วย ขั้วคาโทด ซึ่งถูกติดตั้งอยู่บริเวณด้านล่าง โดยมีจุดสำหรับใช้เชื่อมต่อกับที่สายสัญญาณความถี่วิทยุ และระบบหล่อเย็น แผ่นฐานรองหรือชิ้นงานที่ต้องการกัดจะถูกวางบนขั้วคาโทด ส่วนขั้วแอโนดจะติดตั้งอยู่บริเวณด้านบน ขนาดกับขั้วคาโทด ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับฝักบัว (Shower gas box) เพื่อทำหน้าที่จ่ายก๊าซตั้งต้น ห้องกัดสุญญากาศจะถูกติดตั้งอุปกรณ์วัดความดันภายใน (Instrumentation gauging) เพื่อตรวจสอบความดันก่อนเริ่มขั้นตอนการกัดและในขณะทำการกัด ด้านล่างสุดของห้องกัดสุญญากาศจะเชื่อมต่อกับท่อดูดอากาศหรือก๊าซไปยังระบบปั๊มสุญญากาศ โดยมีวาล์วปีกผีเสื้อ (Throttle valve) สำหรับควบคุมความดันภายในห้องกัดสุญญากาศ ดังรูปที่ 3.3



(ก) ลักษณะห้องกัดสุญญากาศ



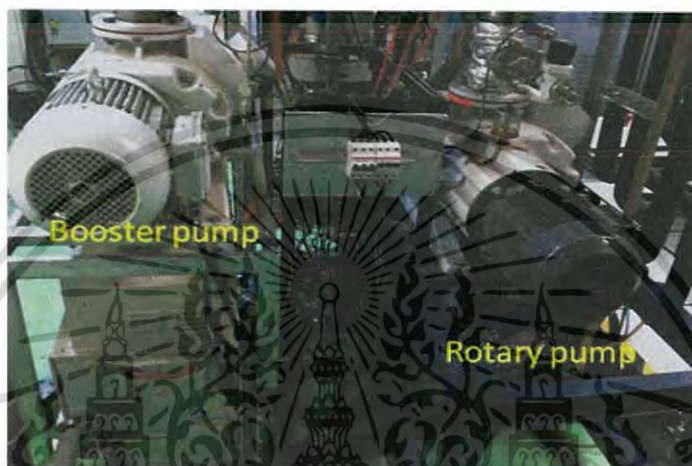
(ข) ส่วนประกอบภายในของห้องกัดสุญญากาศ

รูปที่ 3.3 ลักษณะและส่วนประกอบภายในของห้องกัดสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1 ส่วนประกอบหลักเครื่องกักปฏิกิริยาไอออน

1. ระบบปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump system) ประกอบด้วยปั๊มสุญญากาศ 2 ประเภท คือ ปั๊มสุญญากาศชนิด Rotary Pump มีหน้าที่ในการในการดูดอากาศออกจากห้องกักสุญญากาศในช่วงเริ่มต้น ตั้งแต่ความดันบรรยากาศปกติ (1 ATM หรือ 760 Torr) ถึงความดันประมาณ 10^{-3} Torr ขณะที่ช่วงของความดันตั้งแต่ 10^{-3} Torr จนถึงระดับที่ต่ำกว่า 10^{-6} Torr หรือความเป็นสุญญากาศสูง (High Vacuum) จะใช้ปั๊มสุญญากาศชนิด Diffusion Pump หรือปั๊มสุญญากาศชนิด Booster ร่วมด้วย เพื่อช่วยให้ห้องกักสุญญากาศมีสภาพเป็นสุญญากาศสูงได้เร็วขึ้น ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ระบบปั๊มสุญญากาศ

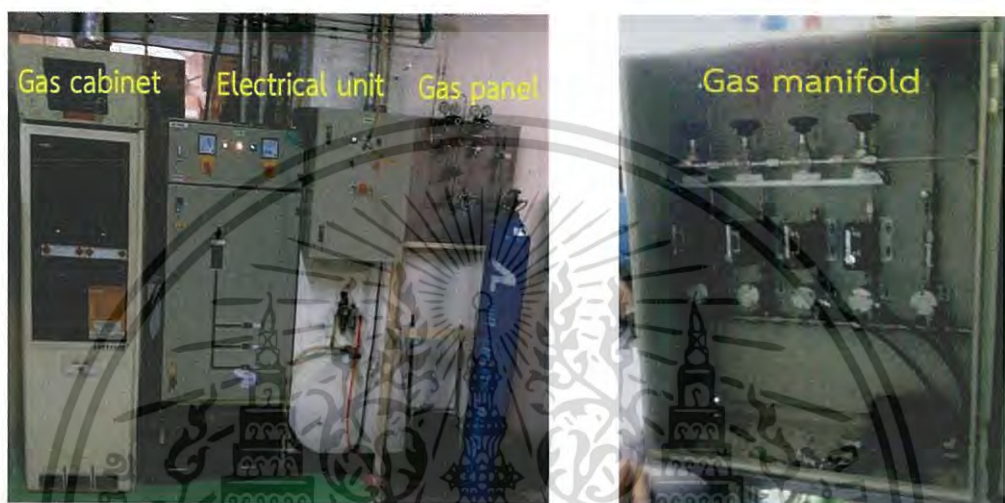
2. ระบบควบคุมเครื่องจักร (Control station) ประกอบไปด้วย ส่วนควบคุมการทำงานของปั๊มสุญญากาศ ส่วนควบคุมระบบวาล์วสุญญากาศ ส่วนควบคุมระบบการไหลของก๊าซที่ใช้ในกระบวนการกัก ส่วนควบคุมความดันภายในห้องกักสุญญากาศ และสุดท้ายมีอุปกรณ์สำหรับตรวจสอบสถานะทำงานของเครื่องจักรในส่วนต่างๆ ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ระบบควบคุมเครื่องจักร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ระบบจ่ายก๊าซ (Gas supply) ก๊าซตั้งต้นที่ใช้ในกระบวนการกัดของเครื่องต้นแบบนี้ ได้แก่ ก๊าซ SF_6 , (Carbon tetrafluoride: CF_4), O_2 และ Ar ในบรรดาก๊าซตั้งต้นเหล่านี้ ก๊าซ SF_6 และ CF_4 จะถูกติดตั้งหรือเก็บไว้ในตู้บรรจุ (Gas cabinet) เพื่อป้องกันอันตรายที่อาจเกิดขึ้น ขณะที่ก๊าซ O_2 และ Ar จะถูกติดตั้งหรือเก็บไว้ใน Gaspanel ในระบบจ่ายก๊าซดังกล่าวนี้ ก๊าซ (Nitrogen: N_2) จะถูกใช้สำหรับ เจือจางก๊าซตั้งต้นที่เป็นอันตราย ซึ่งจะตกค้างอยู่ภายในห้องกัดสุญญากาศหลังจากทำการกระบวนการกัด ก๊าซชนิดต่างๆ จะถูกต่อเชื่อมเข้ากับห้องกัดสุญญากาศ โดยผ่านอุปกรณ์ควบคุมการไหลของก๊าซ (Mass flow controller: MFC) ซึ่งถูกติดตั้งอยู่ในตู้ Gas manifold ดังรูปที่ 3.6



(ก) ระบบจ่ายก๊าซ

(ข) อุปกรณ์ควบคุมการไหลของก๊าซ

รูปที่ 3.6 ระบบจ่ายก๊าซและอุปกรณ์ควบคุมการไหลของก๊าซ

3.2 การเตรียมแผ่นซิลิคอน

ชิ้นงานที่ใช้สำหรับการทดลองในงานวิจัยนี้คือ แผ่นซิลิคอนผลึกเดี่ยวชนิดเอ็น (Single crystalline silicon n-type) ที่ผ่านการกัดเพื่อสร้างพื้นผิวขรุขระด้วยสารละลาย KOH (Potassium hydroxide) ที่ความเข้มข้น เท่ากับ 0.65 mol อุณหภูมิ 80°C และกัดเป็นเวลานาน 30 นาที ซึ่งพื้นผิวที่ได้จะมีลักษณะเป็นแบบพีระมิดแบบสุ่ม (Pyramids random) และพีระมิดมียอดแหลม ระนาบ (111) มีค่าสภาพความต้านทานประมาณ $1\text{--}5 \Omega\text{cm}$ และมีความหนาแผ่นประมาณ $180 \mu\text{m}$

ตารางที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

ลำดับ	รายละเอียดการดำเนินงาน
1	แผ่นซิลิคอนที่ผ่านการกัดด้วย KOH เพื่อสร้างพื้นผิวพีระมิด
2	นำแผ่นซิลิคอนมากัดปรับปรุงพื้นผิวด้วยเทคนิคการกัดปฏิกิริยาไอออน
3	การทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนด้วยกระบวนการ RCA
4	วิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วย SEM
5	สร้างเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยกระบวนการ PECVD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการวัดค่าพารามิเตอร์เอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1 การกัดปรับปรุงพื้นผิวซิลิคอนด้วยเทคนิคปฏิกิริยาไอออน

แผ่นซิลิคอนผลึกเดี่ยวชนิดเอ็น (Singlecrystalline silicon n-type) ที่ผ่านการกัดเพื่อสร้างพื้นผิวขรุขระด้วยสารละลาย KOH (Potassium hydroxide) ซึ่งพื้นผิวที่ได้จะมีลักษณะเป็นแบบพีระมิดแบบสุ่ม (Pyramid random) และพีระมิดมียอดแหลม ระนาบ (111) มีค่าสภาพความต้านทานประมาณ 1-5 Ωcm และมีความหนาแผ่นประมาณ 180 μm นำเอาแผ่นซิลิคอนมาทำการกัดปรับปรุงพื้นผิวด้วยเทคนิคการกัดปฏิกิริยาไอออนเพื่อทำการปรับปรุงลักษณะพื้นผิวเพื่อลดยอดแหลมของพีระมิดให้เรียบ ด้วยการทดลองต่อไปนี้

3.2.1.1 การทดลองปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของก๊าซ SF_6

ในเงื่อนไขการทดลองนี้ทำการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของก๊าซ SF_6 เท่ากับ 2, 10, 20 และ 30 sccm โดยที่ควบคุมความดันภายในห้องกักสุญญากาศคงที่ 20 mTorr ใช้กำลังไฟฟ้าที่ 20 W และเวลาที่ใช้ในการกัดคงที่ที่ 5 นาที

ตารางที่ 3.2 การทดลองปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของก๊าซ SF_6

เงื่อนไข	จำนวน
อัตราการไหลก๊าซ SF_6 (sccm)	2, 10, 20 และ 30
ความดันก๊าซ (mTorr)	20
กำลังไฟฟ้า (W)	20
ระยะเวลา (นาที)	5

3.2.1.2 การทดลองปรับเปลี่ยนอัตราการไหลก๊าซผสมระหว่าง O_2 กับ SF_6

ในเงื่อนไขการทดลองนี้ทำการผสมก๊าซระหว่าง O_2 กับ SF_6 ปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของก๊าซ O_2 เท่ากับ 2, 6, 10, และ 12 sccm โดยที่ควบคุมอัตราการไหลของก๊าซ SF_6 คงที่ 10 sccm ความดันภายในห้องกักสุญญากาศคงที่ 20 mTorr ใช้กำลังไฟฟ้าในการกัดคงที่ 20 W และเวลาที่ใช้ในการกัดคงที่ 5 นาที

ตารางที่ 3.3 การทดลองปรับเปลี่ยนอัตราการไหลก๊าซผสมระหว่าง O_2 กับ SF_6

เงื่อนไข	จำนวน
อัตราการไหลก๊าซ O_2 (sccm)	2, 6, 10, และ 12
อัตราการไหลก๊าซ SF_6 (sccm)	10
ความดันก๊าซ (mTorr)	20
กำลังไฟฟ้า (W)	20
ระยะเวลา (นาที)	5

3.2.1.3 การทดลองปรับเปลี่ยนเวลาการกัด

ในเงื่อนไขการทดลองนี้ทำการปรับเปลี่ยนเวลาที่ใช้ในการกัด เท่ากับ 3, 5 และ 7 นาที โดยควบคุมอัตราการไหลของก๊าซ $O_2:SF_6$ คงที่ที่ 10:10 sccm ความดันภายในห้องกัดสุญญากาศคงที่ 20 mTorr และใช้กำลังไฟฟ้าในการกัดคงที่ 20 W

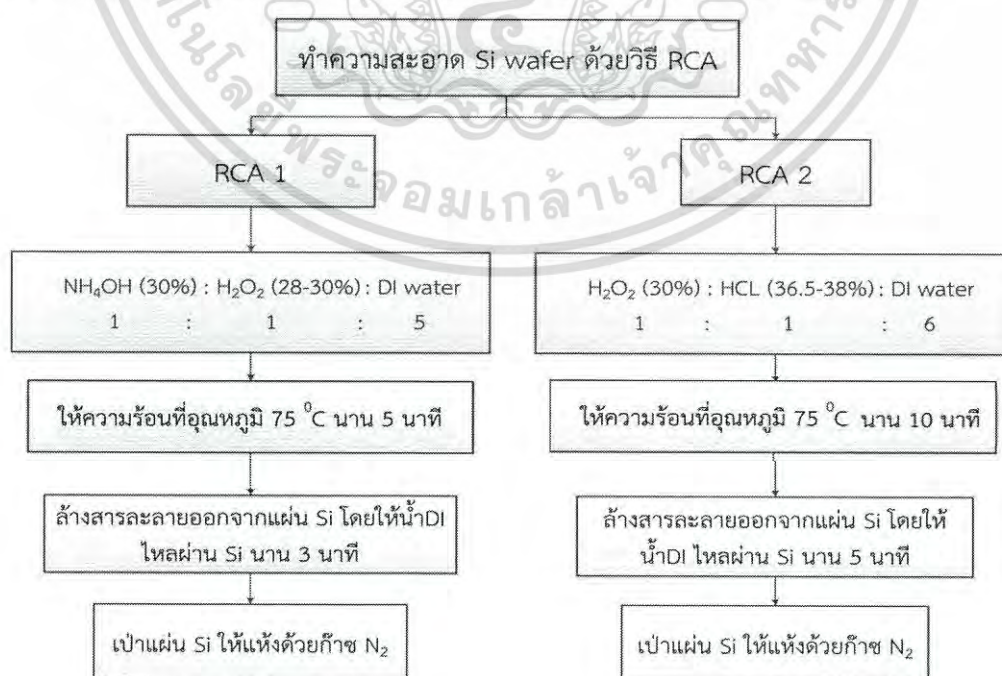
ตารางที่ 3.4 การทดลองปรับเปลี่ยนเวลาการกัด

เงื่อนไข	จำนวน
อัตราการไหลก๊าซ O_2 (sccm)	10
อัตราการไหลก๊าซ SF_6 (sccm)	10
ความดันก๊าซ (mTorr)	20
กำลังไฟฟ้า (W)	20
ระยะเวลา (นาที)	3, 5 และ 7

3.2.2 การทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนด้วยกระบวนการ RCA

แผ่นซิลิคอนที่ผ่านกระบวนการกัดปรับปรุงด้วยเครื่องกัดปฏิกิริยาไอออนแล้ว แผ่นซิลิคอนจะมีสิ่งสกปรกอยู่ไม่ว่าจะเป็น อินทรีย์สารหรืออะตอมโลหะต่างๆ ที่เป็นผลมาจากพลาสมาของก๊าซที่แตกตัวทำปฏิกิริยากับแผ่นซิลิคอน ดังนั้นต้องทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนด้วยกระบวนการ RCA เพื่อกำจัดอินทรีย์สารหรืออะตอมโลหะต่างๆ ก่อนที่จะนำแผ่นซิลิคอนไปสร้างเซลล์แสงอาทิตย์โดยมีขั้นตอนการทำความสะอาดดังต่อไปนี้ [21]

การทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนด้วยกระบวนการ RCA ประกอบด้วยขั้นตอน (RCA 1) เพื่อกำจัด อนุภาคอินทรีย์สารออกจากผิวซิลิคอน และขั้นตอนกำจัดอะตอมโลหะออกจากผิวซิลิคอนด้วยกระบวนการ (RCA 2) ขั้นตอนของกระบวนการทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนดังรูปที่ 3.7

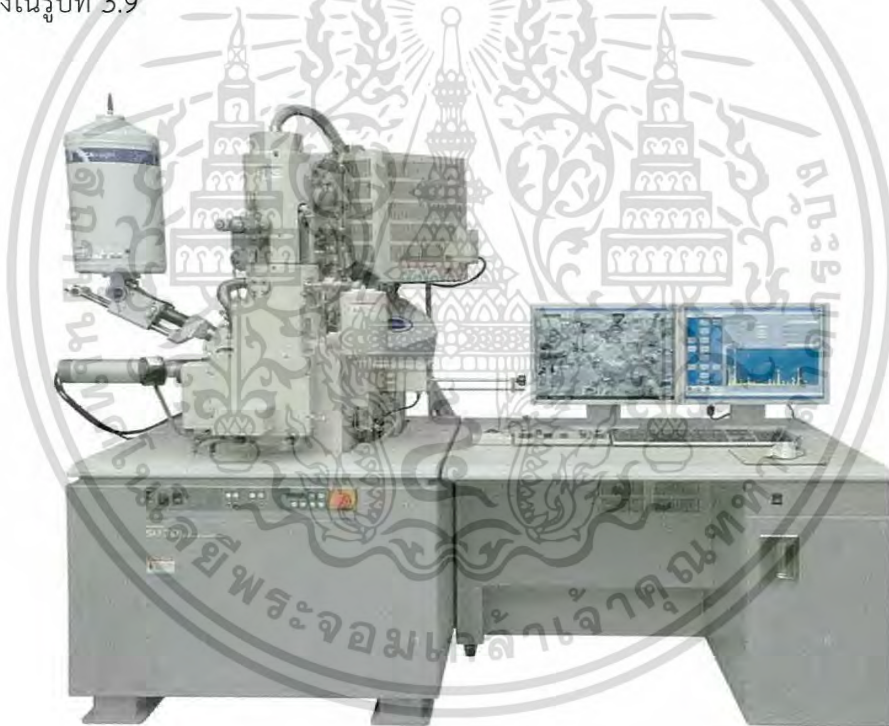


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 3.7 ขั้นตอนการทำความสะอาดแผ่นฐานซิลิคอนด้วยกระบวนการ RCA โดยขั้นตอนการคำนวณค่า ไม่สามารถแก้ไขได้ หากต้องการแก้ไขให้ติดต่อผู้จัดทำเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การวัดตรวจสอบและวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิว

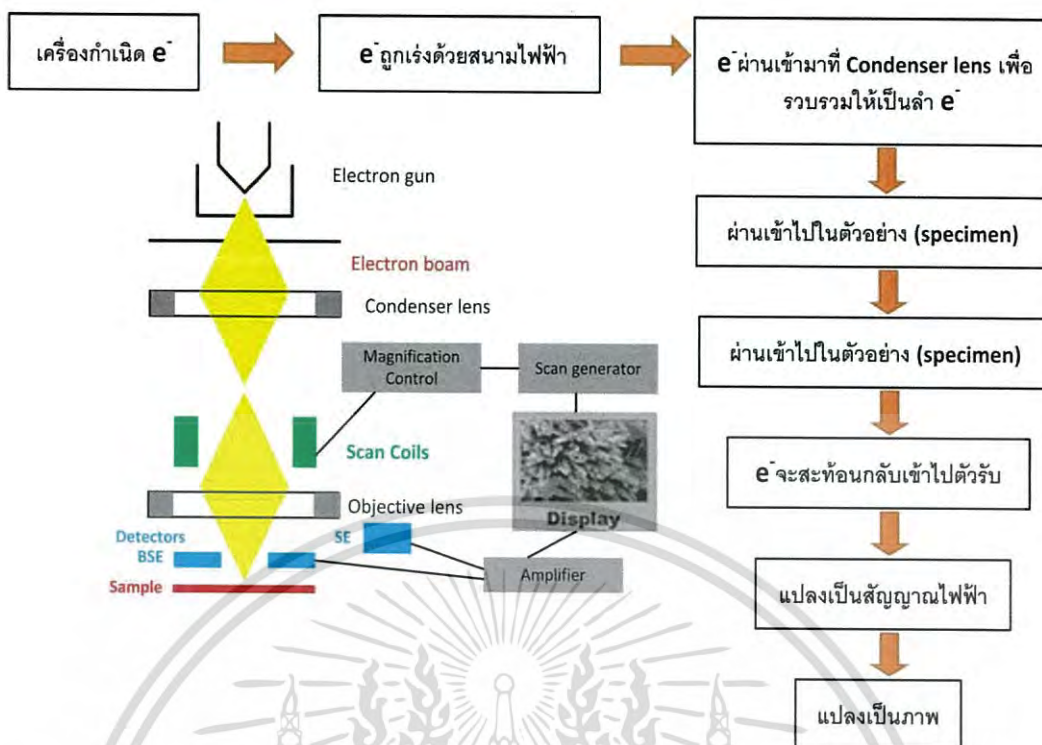
นำแผ่นซิลิคอนที่ผ่านกระบวนการกัดปรับปรุงด้วยปฏิกิริยาไอออนและทำความสะอาดด้วยกระบวนการ RCA แล้วมาวัดตรวจสอบและวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วย Scanning Electron Microscope (SEM) [23]

หลักการทำงานของเครื่อง SEM จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) ขึ้น ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึก และแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไปและสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอโทรทัศน์ได้เลย ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.8 เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

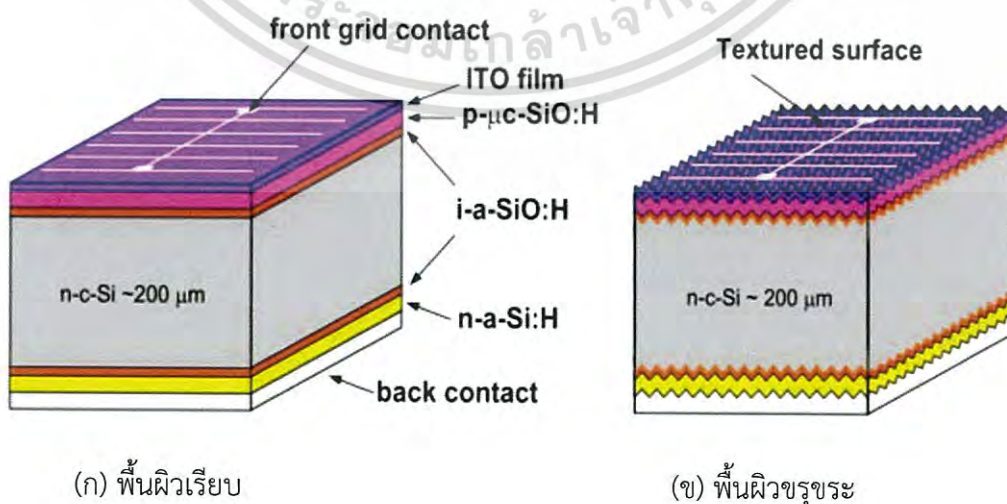
ข้อดีเครื่อง SEM เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่อง Transmission electron microscopy (TEM) คือ ภาพโครงสร้างที่เห็นจากเครื่อง SEM จะเป็นภาพลักษณะ 3 มิติ ในขณะที่ภาพจากเครื่อง TEM จะให้ภาพลักษณะ 2 มิติ อีกทั้งวิธีการใช้งานเครื่อง SEM จะมีความรวดเร็วและสามารถใช้งานง่ายกว่าเครื่อง TEM มาก



รูปที่ 3.9 หลักการทำงานของกล้อง Scanning Electron Microscope (SEM)

3.4 การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อเฮเทอโรบนฐานรองผลึกเดี่ยวซิลิคอนด้วยกระบวนการ PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition)

นำแผ่นซิลิคอนที่ได้ทำการกัดปรับปรุงพื้นผิวแล้วมาสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อแบบเฮเทอโร ที่มีโครงสร้าง Front grid/ Indium tin oxide (ITO)/ p- μ c-SiO:H/ Intrinsic amorphous silicon oxide (i-a-SiO:H)/ n-c-Si/ n-type amorphous silicon (n-a-Si:H)/ Back contact ด้วยกระบวนการ PECVD รูปจำลองโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อแบบเฮเทอโร แสดงดังรูปที่ 3.10

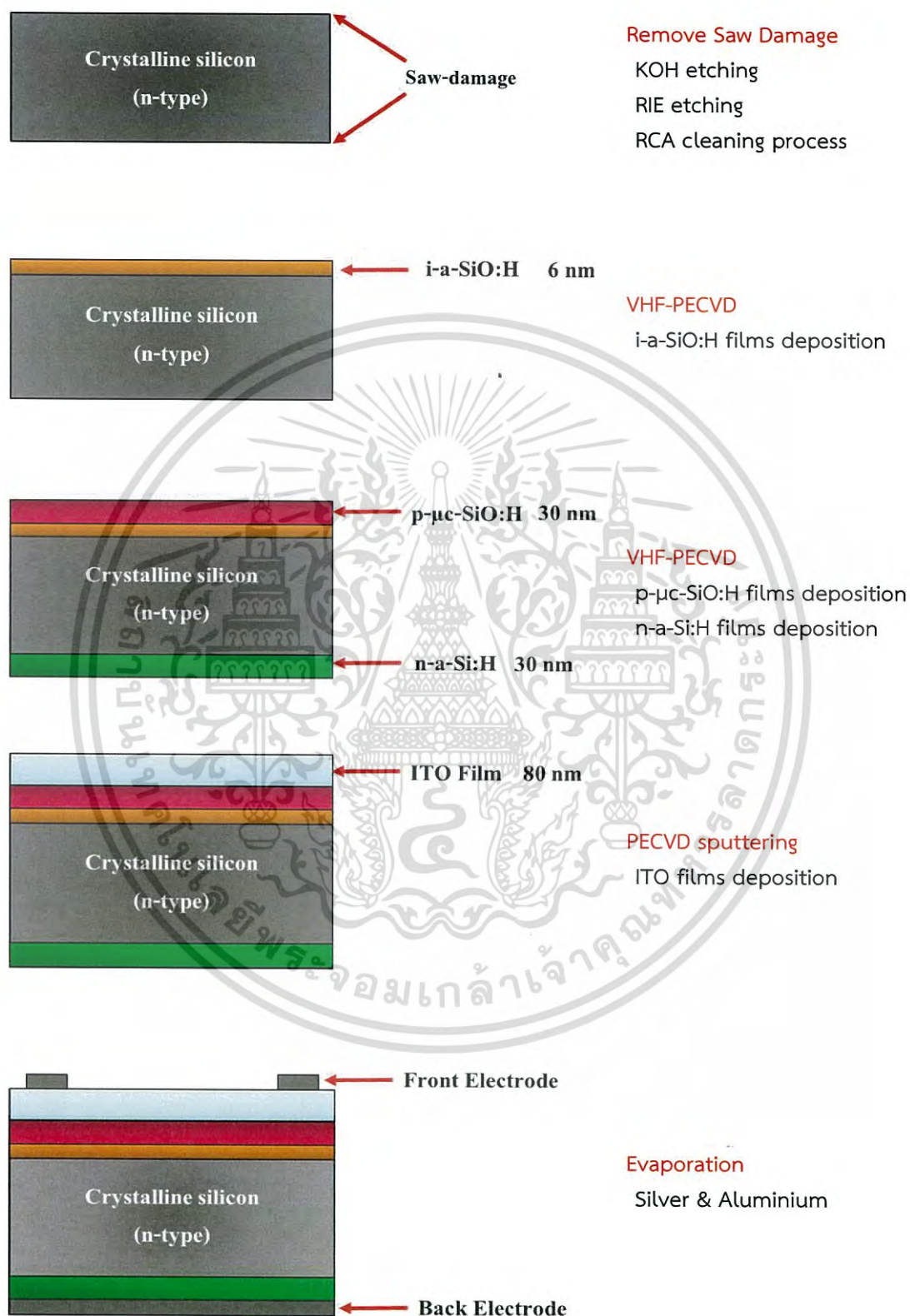


(ก) พื้นผิวเรียบ

(ข) พื้นผิวขรุขระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารรูปที่ 3.10 โครงสร้างจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อแบบเฮเทอโร โยชนด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.1 กระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยเทคนิค PECVD

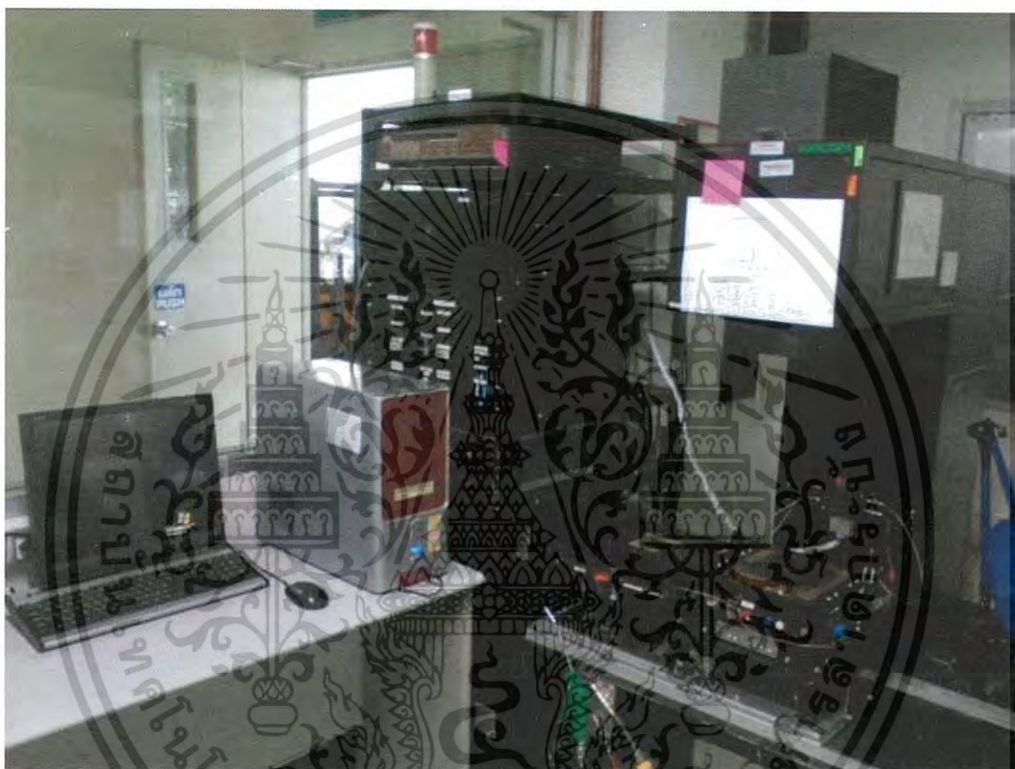


รูปที่ 3.11 กระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยเทคนิค PECVD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยเครื่องจำลองแสงเทียม

ทำการวัดค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อแบบเฮเทอโรโดยเครื่องจำลองแสงเทียม (Super solar simulation) รุ่น WXS-155S-L2 AM 1.5 GMM บริษัท WACOM เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวัดประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ดังรูปที่ 3.12 และยิ่งกว่านั้นสามารถตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ ซึ่งการวัดประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์นี้ใช้แสงที่มีความเข้มเท่ากับ 100 mW/cm^2 (AM 1.5 G) ภายใต้อุณหภูมิ 25°C เซลล์แสงอาทิตย์ที่ถูกสร้างขึ้นในงานวิจัยนี้มีพื้นที่เท่ากับ 1 cm^2



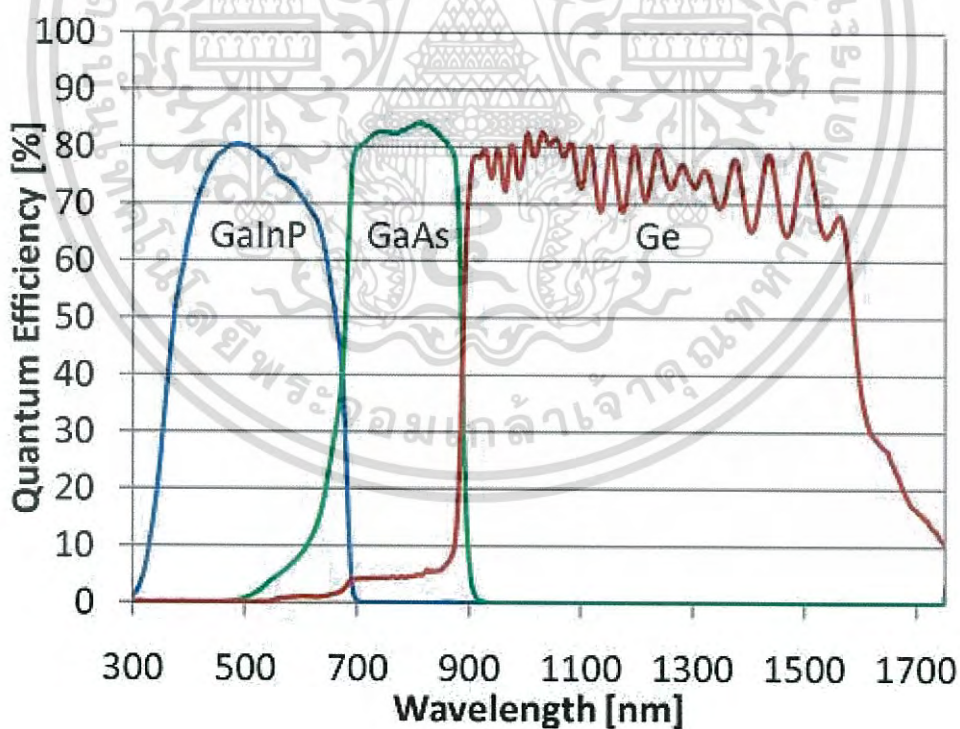
รูปที่ 3.12 ระบบการวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยการจำลองแสงเทียม

3.6 การวัดประสิทธิภาพเชิงควอนตัม (Quantum Efficiency)

เซลล์แสงอาทิตย์จะถูกวัดประสิทธิภาพควอนตัม (Quantum Efficiency : QE) ด้วยเครื่อง Quantum Efficiency ผลิตโดยบริษัท PV measurement ดังรูปที่ 3.13 ซึ่งสามารถที่จะทำการวัดได้ทั้งเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างเซลล์เดี่ยว เซลล์ซ้อน 2 และ 3 ชั้น ตามลำดับ เพื่อเป็นการวิเคราะห์ค่าการตอบสนองทางแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ที่พลังงานโฟตอนค่าต่างๆ ในรูปของฟังก์ชันความยาวคลื่น โดยค่า QE จะคำนวณจากสัดส่วนของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า J (E_{photon}) ที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตขึ้นหารด้วยผลคูณของประจุไฟฟ้า (q) และโฟตอนฟลักซ์ (Photon flux) ของแสงที่ตกกระทบ โดยจะถูกเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงมาตรฐานของกระแสโฟโตไดโอดที่ใช้เป็นเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง



รูปที่ 3.13 เครื่องวัดประสิทธิภาพเชิงควอนตัม



รูปที่ 3.14 Quantum Efficiency ของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างเซลล์เดี่ยว
เซลล์ชั้น 2 และ 3 ชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวซิลิคอนที่ผ่านการกัดปรับปรุงพื้นผิวโดยเทคนิคการกัดปฏิกิริยาไอออนด้วยก๊าซ SF_6 และก๊าซผสมระหว่าง O_2 กับ SF_6 แล้วศึกษาลักษณะพื้นผิวซิลิคอนที่มีผลกระทบต่อค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อแบบเฮเทอโรจังก์ชันร่อนผลึกเดี่ยวซิลิคอน

4.1 การศึกษาลักษณะพื้นผิวซิลิคอน

การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวซิลิคอนหลังผ่านการกัดเพื่อปรับปรุงพื้นผิวด้วยเทคนิคปฏิกิริยาการกัดไอออนโดยใช้เครื่อง SEM (Scanning Electron Microscope) เพื่อวิเคราะห์พื้นผิวซิลิคอนที่มีความเหมาะสมจากการทดลองในเงื่อนไขต่างๆ แล้วนำไปสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อเฮเทอโร

4.1.1 การกัดสร้างลวดลายพีระมิดด้วยสารละลาย KOH (Potassium hydroxide)

การกัดแผ่นซิลิคอนเพื่อสร้างพื้นผิวขรุขระด้วยสารละลาย KOH ใช้ความเข้มข้นของสารละลาย KOH เท่ากับ 0.65 mol อุณหภูมิ 80 °C และกัดเป็นเวลานาน 30 นาที จะได้ลักษณะแผ่นซิลิคอนดังรูปที่ 4.1 แสดงภาพถ่าย SEM ลักษณะพื้นผิวซิลิคอนที่ผ่านการกัดสร้างพื้นผิวขรุขระด้วยสารละลาย KOH ซึ่งมีลักษณะพื้นผิวที่เป็นแบบพีระมิดแบบสุ่ม พีระมิดมีพื้นผิวที่เรียบและยอดพีระมิดมียอดแหลม



รูปที่ 4.1 ลักษณะพื้นผิวซิลิคอนที่กัดด้วยสารละลาย KOH

4.1.2 การกัดพื้นผิวซิลิคอนโดยเทคนิคการกัดปฏิกิริยาไอออน

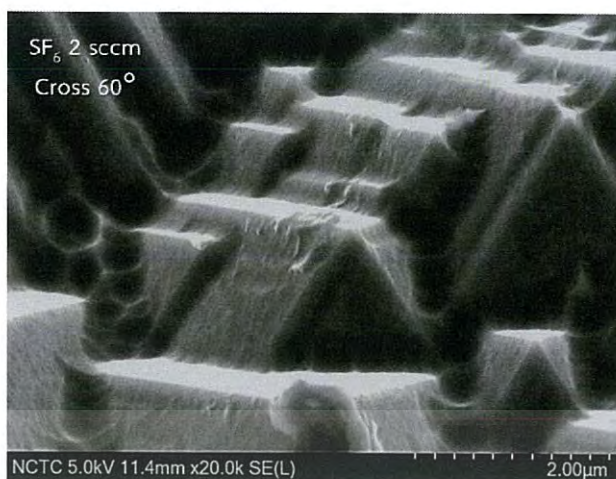
แผ่นซิลิคอนที่ผ่านการกัดสร้างพื้นผิวขรุขระด้วยสารละลาย KOH นำมาทำการกัดปรับปรุงพื้นผิวเพื่อลดความแหลมของยอดพีระมิดให้มีความโค้งมน โดยเทคนิคการกัดปฏิกิริยาไอออนด้วยก๊าซ SF_6 และก๊าซผสมระหว่าง O_2 กับ SF_6 แล้วทำการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวซิลิคอนด้วยเครื่อง SEM การคำนวณหาความถี่ของลักษณะพื้นผิวที่ปรากฏขึ้น และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2.1 การปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของก๊าซ SF₆

แผ่นซิลิคอนที่ผ่านการกัดสร้างพื้นผิวขรุขระด้วยสารละลาย KOH จะลักษณะพื้นผิวเป็นพีระมิดแบบสุ่มที่มีขนาดเล็กและใหญ่ผสมกัน (Random pyramids) ดังแสดงในรูปที่ 4.1 พีระมิดที่ได้จะมีพื้นผิวที่เรียบเนียนและส่วนยอดพีระมิดมียอดแหลม จากนั้นทำการนำแผ่นซิลิคอนที่ผ่านการกัดสร้างพื้นผิวขรุขระด้วยสารละลาย KOH ดังกล่าวมาทำการกัดปรับปรุงพื้นผิวโดยเทคนิคการกัดปฏิกิริยาไอออนด้วยก๊าซ SF₆ เพื่อลดความแหลมของยอดพีระมิดให้มีความโค้งมน แล้วทำการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวซิลิคอนด้วยเครื่อง SEM จากผลการทดลองพบว่า รูปที่ 4.2 แสดงภาพถ่าย SEM ลักษณะพื้นผิวซิลิคอนที่กัดโดยเทคนิคปฏิกิริยาไอออนด้วยก๊าซ SF₆ ในรูปที่ 4.2 (ก) ลักษณะพื้นผิวซิลิคอนที่ผ่านการกัดด้วยอัตราการไหลของก๊าซ SF₆ เท่ากับ 2 sccm มีความขรุขระคล้ายหลุมขนาดเล็กกระจายอยู่เป็นจุดๆ ตรงบริเวณพื้นผิวของพีระมิด ไม่ครอบคลุมทั่วทั้งแผ่นซิลิคอน แสดงว่าการเกิดปฏิกิริยาของการกัดเนื่องมาไอออน F* ที่เกิดจากการแตกตัวก๊าซตั้งต้น SF₆ มีปริมาณน้อยจึงไม่เพียงพอที่จะสามารถทำปฏิกิริยาการกัดพื้นผิวซิลิคอนได้ครอบคลุมทั่วแผ่น พื้นผิวของพีระมิดส่วนบริเวณยอดยังคงมียอดแหลมดังเดิม รูปที่ 4.2 (ข) พื้นผิวซิลิคอนที่ผ่านการกัดด้วยอัตราการไหลของก๊าซ SF₆ เท่ากับ 10 sccm ตรงบริเวณพื้นผิวของพีระมิดมีลักษณะที่ขรุขระคล้ายหลุมขนาดเล็กครอบคลุมทั้งแผ่นซิลิคอน ทำให้แผ่นซิลิคอนมีความขรุขระเพิ่มมากยิ่งขึ้น และมีปฏิกิริยาการกัดบางส่วนที่เกิดขึ้นที่บริเวณส่วนยอดของพีระมิดแต่ไม่มากเพียงพอจะทำให้ยอดพีระมิดที่มียอดแหลมโค้งมนได้ และเมื่อทำการเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซ SF₆ เท่ากับ 20 sccm ในรูปที่ 4.2 (ค) พบว่าสภาพพื้นผิวของพีระมิดมีความขรุขระที่เกิดจากปฏิกิริยาการกัดมีลักษณะคล้ายหลุมขนาดใหญ่ที่บริเวณพื้นผิวของพีระมิด นอกจากจะเกิดที่พื้นผิวแล้วยังเกิดเป็นหลุมขนาดใหญ่ที่บริเวณยอดของพีระมิดอีกด้วย เนื่องมาไอออน F* ที่เกิดจากการแตกตัวก๊าซตั้งต้น SF₆ นั้นมีปริมาณมากจึงทำอัตราการกัดแผ่นซิลิคอนมีค่าสูงขึ้น ทำให้การกัดพื้นผิวซิลิคอนมีพื้นผิวที่มีลักษณะคล้ายหลุมขนาดใหญ่ ดังกล่าว ในขณะที่ทำการปรับเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซ SF₆ ขึ้นไปอีกโดยเพิ่มขึ้นเท่ากับ 30 sccm จากรูปที่ 4.2 (ง) ลักษณะพื้นผิวของพีระมิดมีความขรุขระเกิดเป็นหลุมขนาดใหญ่กระจายอยู่ทั่วพื้นผิวและบริเวณส่วนยอดของพีระมิด การเกิดเป็นหลุมใหญ่ทำให้พื้นผิวของพีระมิดเสียหาย

การเกิดการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวพีระมิดที่มีลักษณะเป็นหลุมขรุขระเช่นนี้ ทำให้พื้นผิวพีระมิดมีความขรุขระเพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากไอออนของ F* ที่เกิดจากการแตกตัวของก๊าซ SF₆ ได้ทำปฏิกิริยากับแผ่นซิลิคอนเกิดเป็น SiF_x [24] ดังนั้นเมื่อมีการเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซ SF₆ ความหนาแน่นของไอออน F* ที่เกิดจากการแตกตัวก็มีปริมาณเพิ่มขึ้นด้วย ทำให้ปฏิกิริยาระหว่างไอออน F* กับ Si มีปริมาณมาก อัตราการกัดจึงสูงขึ้น เป็นผลให้พื้นผิวพีระมิดเกิดความขรุขระที่มีรูพรุนคล้ายหลุมขนาดใหญ่ขึ้นครอบคลุมทั่วทั้งแผ่นซิลิคอน

การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวซิลิคอนจากผลการทดลองที่ทำการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของก๊าซ SF₆ พบว่า แผ่นซิลิคอนที่กัดปรับปรุงพื้นผิวจากเงื่อนไขการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของก๊าซ SF₆ เท่ากับ 10 sccm ที่เวลาการกัดเท่ากับ 5 นาที พื้นผิวซิลิคอนมีลักษณะที่เหมาะสมมากที่สุดเพื่อจะทำการทดลองต่อไปคือการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลก๊าซผสมระหว่าง O₂ กับ SF₆ ต่อไป เนื่องจากเหตุผลที่เงื่อนไขการทดลองนี้ทำให้พื้นผิวพีระมิดของแผ่นซิลิคอนมีลักษณะเป็นหลุมเล็กๆ กระจายอยู่ครอบคลุมพื้นผิวพีระมิดไม่ถูกทำลายจากปฏิกิริยาการกัดจนเกิดความเสียหายมากเกินไป ปฏิกิริยาการกัดสามารถเกิดขึ้นได้กระจายครอบคลุมทั่วแผ่นซิลิคอน



(ก) อัตราการไหลของก๊าซ SF_6 2 sccm



(ข) อัตราการไหลของก๊าซ SF_6 10 sccm



(ค) อัตราการไหลของก๊าซ SF_6 20 sccm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 4.2 ลักษณะพื้นผิวซิลิคอนที่กัดด้วยเทคนิคปฏิกิริยาไอออน โดยใช้ก๊าซ SF_6 ในการดำเนินการ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ง) อัตราการไหลของก๊าซ SF_6 30 sccm

รูปที่ 4.2 (ต่อ) ลักษณะพื้นผิวซิลิคอนที่ก่อกด้วยเทคนิคปฏิกิริยาไอออน โดยใช้ก๊าซ SF_6

4.1.2.2 การปรับเปลี่ยนอัตราการไหลก๊าซผสมระหว่าง O_2 กับ SF_6

ผลการทดลองก่อนหน้านี้ที่ได้กล่าวมาในข้างต้น การปรับเปลี่ยนอัตราการไหลก๊าซ SF_6 ซึ่งเงื่อนไขจากการทดลองที่ทำให้แผ่นซิลิคอนมีพื้นผิวที่เหมาะสมมากที่สุด คือ เงื่อนไขการทดลองการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลก๊าซ SF_6 เท่ากับ 10 sccm และเวลาที่ใช้ในการกัดเท่ากับ 5 นาที ปัญหาที่ยังพบอยู่จากการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลก๊าซ SF_6 คือพื้นผิวที่ระมัดเมื่อทำการกัดด้วยก๊าซ SF_6 พื้นผิวมีความขรุขระลักษณะคล้ายหลุมขนาดกระจายอยู่ครอบคลุมทั่วทั้งแผ่นซิลิคอน ดังนั้นในการทดลองนี้ทำการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลก๊าซผสมระหว่าง O_2 กับ SF_6 โดยอ้างอิงอัตราการไหลของก๊าซ SF_6 เท่ากับ 10 sccm เวลาในการกัดควบคุมให้คงที่เท่ากับ 5 นาที ตามการทดลองที่ผ่านมาส่วนในการเติมก๊าซ O_2 ผสมเข้ามา เพื่อที่จะทำการแก้ไขปัญหาลักษณะพื้นผิวที่ยังคงเป็นพื้นผิวที่เรียบเนียนและปรับปรุงพื้นผิวที่บริเวณส่วนยอดของพีระมิดเพื่อลดความแหลมยอดพีระมิดลง

จากแผ่นซิลิคอนที่ผ่านการกัดสร้างพื้นผิวขรุขระด้วยสารละลาย KOH จะลักษณะพื้นผิวเป็นพีระมิดแบบสุ่ม มีพื้นผิวที่เรียบเนียนและส่วนยอดของพีระมิดมียอดแหลม จากนั้นทำการนำแผ่นซิลิคอนที่ผ่านการกัดสร้างพื้นผิวขรุขระด้วยสารละลาย KOH ดังกล่าวมาทำการกัดปรับปรุงพื้นผิวโดยเทคนิคการกัดปฏิกิริยาไอออนด้วยก๊าซผสมระหว่าง O_2 กับ SF_6 เพื่อลดความแหลมของยอดพีระมิดให้มีความโค้งมน แล้วทำการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวซิลิคอนด้วยเครื่อง SEM ผลการทดลองของการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลก๊าซผสมระหว่าง O_2 กับ SF_6 มีดังต่อไปนี้ รูปที่ 4.3 แสดงภาพถ่าย SEM ลักษณะพื้นผิวซิลิคอนที่ก่อกด้วยเทคนิคปฏิกิริยาไอออนโดยก๊าซผสมระหว่าง O_2 กับ SF_6 ในรูปที่ 4.3 (ก) และ (ข) การปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของก๊าซ $\text{O}_2:\text{SF}_6$ เท่ากับ 2:10 sccm และ 6:10 sccm พื้นผิวพีระมิดมีลักษณะที่เรียบขึ้นไม่มีความขรุขระ ส่วนบริเวณยอดของพีระมิดเกิดปฏิกิริยาการกัดสามารถปรับปรุงให้ยอดของพีระมิดมีความโค้งมนได้ แต่มีคราบของการเกิดการทำปฏิกิริยาการกัดที่บริเวณพื้นผิวของพีระมิด เมื่อทำการเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซ O_2 ในรูปที่ 4.3 (ค) การปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของก๊าซ $\text{O}_2:\text{SF}_6$ เท่ากับ 10:10 sccm พบว่าพื้นผิวพีระมิดมีลักษณะเรียบเนียนพื้นผิวไม่เป็นหลุมขรุขระเกิดขึ้นที่บริเวณผิวของพีระมิด ยอดของพีระมิดมีลักษณะโค้งมนเรียบไม่แหลม ไม่มีคราบจากการทำปฏิกิริยาการกัดเหลืออยู่ ซึ่งมีพื้นผิวที่เหมาะสมอย่างมากที่สุด และเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซ

$O_2:SF_6$ เป็น 12:10 sccm ดังรูปที่ 4.3 (ง) สังเกตเห็นว่าพื้นผิวพริสมิตมีความเรียบเนียนพื้นผิวไม่ขรุขระเป็นหลุม แต่ในบริเวณส่วนยอดของพริสมิตถูกกัดเสียหายกลายเป็นพริสมิตยอดตัด

ดังที่ทราบกันดีดังที่กล่าวมาในการทดลองข้างต้นแล้วว่า การเกิดปฏิกิริยาการกัดเกิดจากไอออน F^* ของก๊าซ SF_6 ที่แตกตัว และทำปฏิกิริยากับ Si เนื่องจากการกัดนั้นเกิดจากไอออน F^* เป็นส่วนใหญ่ การเติมก๊าซ O_2 ผสมกับก๊าซ SF_6 จะทำให้เกิดปฏิกิริยาการกัดลดลงอันเนื่องมาจากการทำปฏิกิริยาระหว่าง F^* , O_2 กับ Si ซึ่งก่อให้เกิดเป็น SiO_xF_y ที่ผิวของแผ่นซิลิคอน [25] ทำหน้าที่เป็นหน้ากากป้องกันปฏิกิริยาการกัดที่เกิดจากไอออน F^* ดังนั้นจึงสามารถกัดลดความแหลมของยอดพริสมิตลงได้และสามารถลดอัตราการเกิดปฏิกิริยาการกัดลงทำให้ได้พื้นผิวเรียบเนียน การวิเคราะห์ผลการทดลองปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของก๊าซ O_2 ผสมกับก๊าซ SF_6 แล้วนี้พบว่า ที่อัตราการไหลของก๊าซผสม $O_2:SF_6$ ที่ 10:10 sccm พื้นผิวมีลักษณะที่เหมาะสมที่สุดเนื่องจากพื้นผิวมีความเรียบและส่วนบริเวณยอดของพริสมิตมีความโค้งมนเรียบไม่แหลม

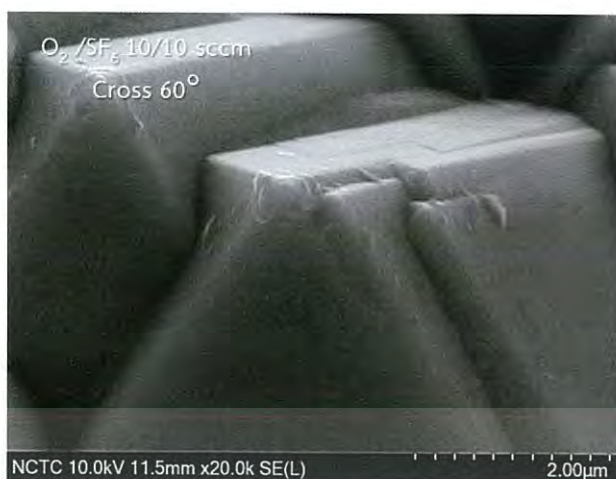


(ง) อัตราการไหลของก๊าซผสม $O_2:SF_6$ เท่ากับ 2:10 sccm



(ข) อัตราการไหลของก๊าซผสม $O_2:SF_6$ เท่ากับ 6:10 sccm

เอกสารนี้เป็นรูปที่ 4.3 ลักษณะพื้นผิวซิลิคอนที่กัดโดยเทคนิคปฏิกิริยาไอออนด้วยก๊าซผสม O_2 กับ SF_6 ในการคำนวณการคำนวณใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) อัตราการไหลของก๊าซผสม $O_2:SF_6$ เท่ากับ 10:10 sccm



(ง) อัตราการไหลของก๊าซผสม $O_2:SF_6$ เท่ากับ 12:10 sccm

รูปที่ 4.3 (ต่อ) ลักษณะพื้นผิวซิลิคอนที่กัดด้วยเทคนิคปฏิกิริยาไอออนด้วยก๊าซผสม O_2 กับ SF_6

4.1.2.3 การปรับเปลี่ยนเวลาในการกัด

จากการทดลองการปรับอัตราการไหลของก๊าซผสม O_2 กับ SF_6 พื้นผิวซิลิคอนที่มีความเหมาะสมคือ ที่อัตราการไหลของก๊าซ O_2 กับ SF_6 เท่ากับ 10:10 sccm และเวลาการกัดเท่ากับ 5 นาที สำหรับการทดลองนี้ทำการปรับเปลี่ยนเวลาในการกัดเป็น 3 นาที 5 นาที และ 7 นาที โดยใช้เงื่อนไขการปรับอัตราการไหลของก๊าซ O_2 กับ SF_6 เท่ากับ 10:10 sccm ตามการทดลองก่อนหน้านี้ จากผลการทดลองการปรับเปลี่ยนเวลาในการกัดพบว่า รูปที่ 4.4 แสดงภาพถ่าย SEM ลักษณะพื้นผิวซิลิคอนที่กัดด้วยเทคนิคปฏิกิริยาไอออน โดยปรับเปลี่ยนเวลาการกัด รูปที่ 4.4 (ก) ที่เวลาการกัด 3 นาที พื้นผิวของพีระมิดมีความเรียบเนียนไม่เป็นหลุมขรุขระ แต่ที่บริเวณส่วนยอดของพีระมิดยังคงมียอดแหลม เนื่องจากเวลาของการเกิดปฏิกิริยาการกัดน้อยเกินไปจึงทำให้การกัดยังไม่ทันผลต่อพื้นผิวพีระมิดมาก รวมไปถึงปฏิกิริยาการกัดยังเกิดขึ้นไม่ครอบคลุมทั่วทั้งพื้นผิว และเมื่อทำการเพิ่มเวลาการกัดขึ้นเท่ากับ 5 นาที ดังรูปที่ 4.4 (ข) พื้นผิวของพีระมิดมีความเรียบเนียนไม่เป็นค้ำไม่วาร์ณใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลุมขรุขระ บริเวณส่วนยอดของพีระมิดโค้งมนและเรียบไม่แหลม และรูปที่ 4.4 (ค) ที่เวลาการกัดเท่ากับ 7 นาที พบว่าพื้นผิวของพีระมิดมีความเรียบเนียน บริเวณยอดของพีระมิดมีความโค้งมนไม่แหลม แต่กลับพบว่ามีเศษสิ่งสกปรกซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาการกัดทำให้พื้นผิวมีความขรุขระอันเกิดจากสิ่งสกปรก กระจายอยู่ครอบคลุมทั่วทั้งพื้นผิวแผ่นซิลิคอน ดังที่ได้ให้เหตุผลมาในการทดลองข้างต้นแล้วว่า การเกิดปฏิกิริยาการกัดเกิดจากไอออน F^+ ของก๊าซ SF_6 ที่แตกตัว และทำปฏิกิริยากับ Si เนื่องจากการกัดนั้นเกิดจากไอออน F^+ เป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นการปรับเปลี่ยนเวลาการกัด เช่นการเพิ่มเวลาการเกิดปฏิกิริยาการกัดระหว่างไอออน F^+ กับ Si ให้มีระยะเวลาเวลานานมากขึ้น อัตราการกัดมีค่าสูง ทำให้พื้นผิวซิลิคอนมีความขรุขระเพิ่มขึ้นเนื่องมาจากสิ่งสกปรกที่เกิดจากปฏิกิริยาการกัด



(ก) เวลาการกัด 3 นาที



(ข) เวลาการกัด 5 นาที

รูปที่ 4.4 ลักษณะพื้นผิวแผ่นซิลิคอนที่กัดด้วยเทคนิคปฏิกิริยาไอออน โดยปรับเวลาการกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



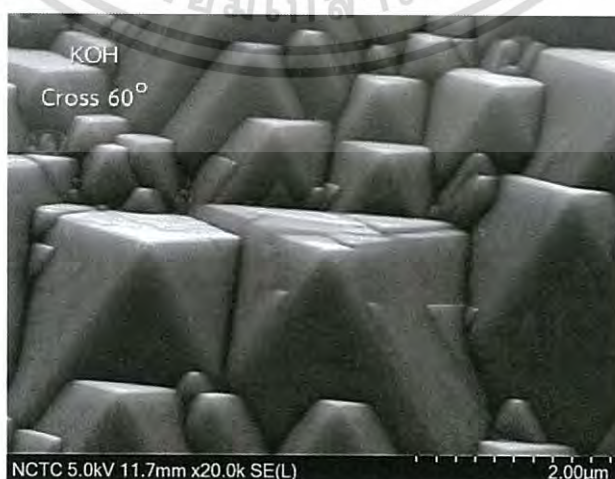
(ค) เวลาการกัด 7 นาที

รูปที่ 4.4 (ต่อ) ลักษณะพื้นผิวแผ่นซิลิคอนที่กัดด้วยเทคนิคปฏิกิริยาไอออน โดยปรับเวลาการกัด

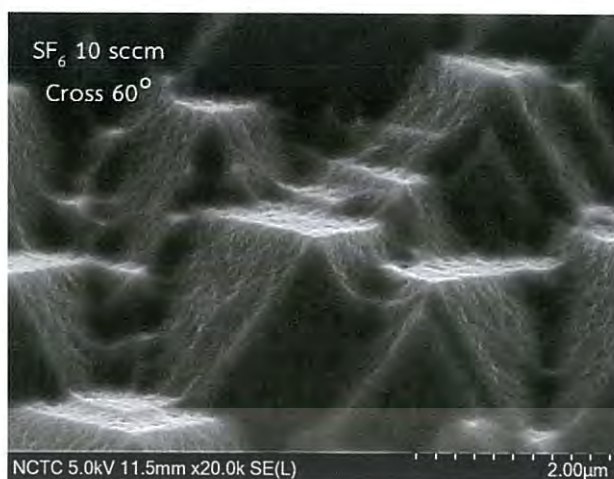
4.2 การศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อเฮเทอโรบนฐานรองผลึกเดี่ยวซิลิคอน

4.2.1 การเปรียบเทียบผลของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจากแผ่นซิลิคอนที่กัดโดยปฏิกิริยาไอออนด้วยก๊าซ SF_6 และ ก๊าซผสม O_2 กับ SF_6

แผ่นซิลิคอนที่มีพื้นผิวเหมาะสมของการที่ผ่านการกัดโดยปฏิกิริยาไอออนด้วยก๊าซ SF_6 ที่อัตราการไหล 10 sccm และที่ผ่านการกัดโดยปฏิกิริยาไอออนด้วยก๊าซผสม O_2 กับ SF_6 ที่อัตราการไหล 10:10 sccm ซึ่งมีลักษณะพื้นผิวซิลิคอนแตกต่างกันดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น หลังจากผ่านการทำความสะอาดสิ่งสกปรกด้วยกระบวนการ RCA แล้วนำแผ่นซิลิคอนทั้ง 3 แบบมาทำการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ แล้ววัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า และวัดค่าประสิทธิภาพทางควอนตัมของเซลล์แสงอาทิตย์ รูปที่ 4.5 แผ่นซิลิคอนที่ผ่านการกัดสร้างพีระมิดด้วยสารละลาย KOH ซึ่งเป็นแผ่นซิลิคอนอ้างอิง รูปที่ 4.6 แผ่นซิลิคอนที่ผ่านการกัดโดยปฏิกิริยาไอออนด้วยก๊าซ SF_6 ที่อัตราการไหล 10 sccm และรูปที่ 4.7 แผ่นซิลิคอนที่ผ่านการกัดโดยปฏิกิริยาไอออนด้วยก๊าซผสม O_2 กับ SF_6 ที่อัตราการไหล 10:10 sccm



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนรูปที่ 4.5 ลักษณะพื้นผิวซิลิคอนที่กัดด้วยสารละลาย KOH ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 พื้นผิวซิลิคอนที่กัดด้วยเทคนิคปฏิกิริยาไอออน โดยใช้ก๊าซ SF_6 ที่อัตราการไหล 10 sccm

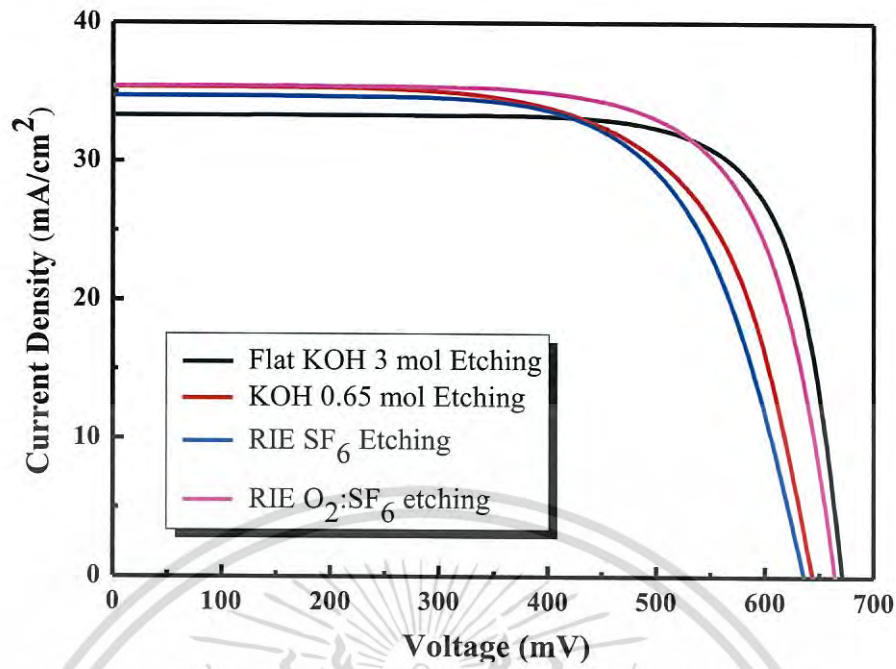


รูปที่ 4.7 พื้นผิวซิลิคอนที่กัดด้วยเทคนิคปฏิกิริยาไอออนด้วยก๊าซผสม O_2 กับ SF_6 ที่อัตราการไหลเท่ากับ 10:10 sccm

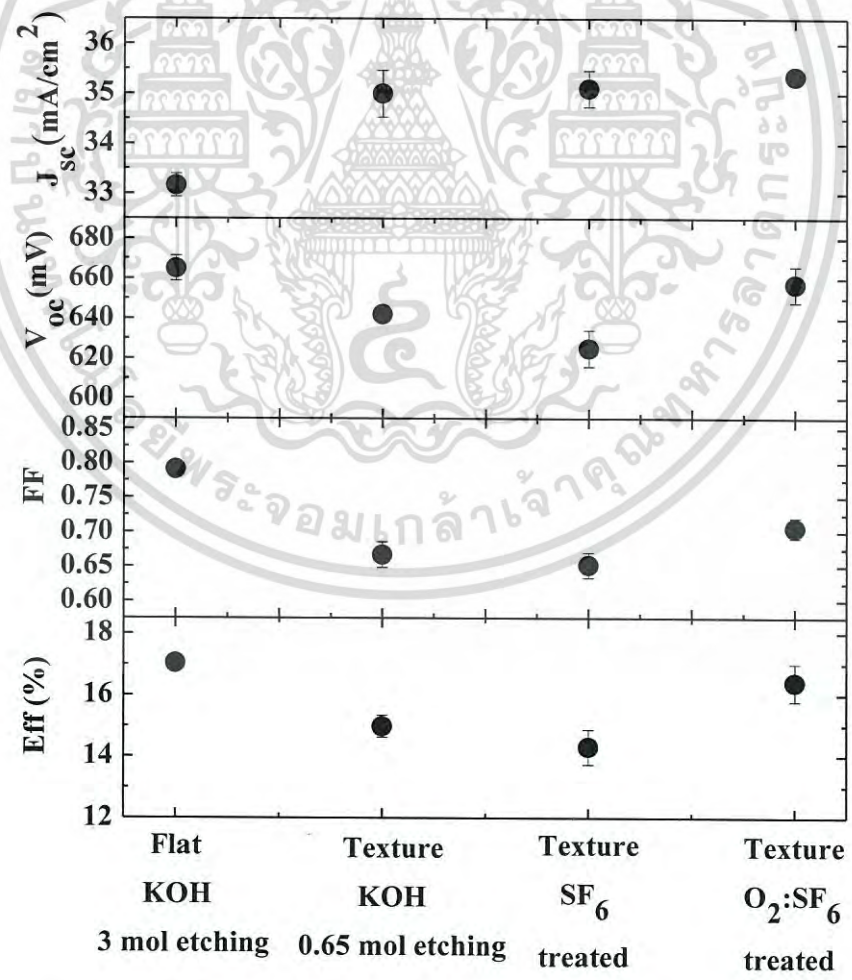
การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจากแผ่นซิลิคอนที่กัดด้วยสารละลาย KOH แผ่นซิลิคอนที่ผ่านการกัดโดยปฏิกิริยาไอออนด้วยก๊าซ SF_6 และแผ่นซิลิคอนที่ผ่านการกัดโดยปฏิกิริยาไอออนด้วยก๊าซผสม O_2 กับ SF_6 เนื่องจากลักษณะพื้นผิวซิลิคอนที่นำมาสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 แบบนั้น มีความแตกต่างกัน พื้นผิวซิลิคอนที่กัดด้วยสารละลาย KOH เป็นแบบพีระมิดแบบสุ่ม พื้นผิวของพีระมิดเรียบไม่ขรุขระ และพีระมิดมียอดแหลม พื้นผิวซิลิคอนที่ผ่านการกัดโดยปฏิกิริยาไอออนด้วยก๊าซ SF_6 พื้นผิวของพีระมิดจะมีลักษณะที่ขรุขระคล้ายหลุมขนาดเล็กครอบคลุมทั้งพื้นผิวแผ่นซิลิคอน ทำให้แผ่นซิลิคอนมีความขรุขระเพิ่มมากยิ่งขึ้น ส่วนบริเวณยอดของพีระมิดยังมียอดแหลม และพื้นผิวซิลิคอนที่ผ่านการกัดโดยปฏิกิริยาไอออนด้วยก๊าซผสม O_2 กับ SF_6 พื้นผิวของพีระมิดมีลักษณะเรียบเนียน ยอดพีระมิดมีลักษณะโค้งมนไม่แหลม เมื่อสร้างเซลล์แสงอาทิตย์บนแผ่นฐานรองซิลิคอนทั้ง 3 แบบ แล้ววัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ พบว่า จากรูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแส (J_{sc}) กับค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (V_{oc}) เปรียบเทียบเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจากแผ่นซิลิคอนที่ผ่านการกัดด้วยสารละลาย KOH และเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากแผ่นซิลิคอนที่ผ่านการกัดโดยปฏิกิริยาไอออนด้วยก๊าซ SF_6 ค่า J_{sc} ของเซลล์แสงอาทิตย์สร้างจากแผ่นซิลิคอนที่ผ่านการกัดด้วยสารละลาย KOH มีค่า 34.9 mA/cm^2 ซึ่งมีความน้อยกว่า เซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจากแผ่นซิลิคอนที่กัดโดยปฏิกิริยาไอออนด้วยก๊าซ SF_6 ที่มีค่า J_{sc} เท่ากับ 35.1 mA/cm^2 การเพิ่มขึ้นของ J_{sc} ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจากแผ่นซิลิคอนที่กัดโดยปฏิกิริยาไอออนด้วยก๊าซ SF_6 เมื่อพื้นผิวแผ่นซิลิคอนมีความขรุขระมากขึ้น การดูดกลืนแสงและการสะท้อนแสงภายในเซลล์แสงอาทิตย์นั้นมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นจึงส่งผลให้มีค่า J_{sc} สูงขึ้นตามไปด้วย ค่า V_{oc} ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจากแผ่นซิลิคอนที่ผ่านการกัดด้วยสารละลาย KOH มีค่า 665 mV ซึ่งสูงกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจากแผ่นซิลิคอนที่กัดโดยปฏิกิริยาไอออนด้วยก๊าซ SF_6 ที่มีค่า V_{oc} เพียง 637 mV เนื่องจากการที่พื้นผิวซิลิคอนที่กัดโดยปฏิกิริยาไอออนด้วยก๊าซ SF_6 พื้นผิวที่ระมัดที่มีความขรุขระคล้ายหลุมขนาดเล็กซึ่งทำให้เกิดเป็นจุดบกพร่องของผลึกซิลิคอนขึ้น การเคลือบฟิล์มชั้น passivation (i-a-SiO:H) และชั้นฟิล์มของรอยต่อพี-เอ็นดี (p- $\mu\text{c-SiO:H}$, n-a-Si:H) บนแผ่นฐานรองซิลิคอนเกิดความไม่สมบูรณ์ทำให้เกิดการรวมตัวของพาหะเร็วขึ้น [26-27] จึงส่งผลให้ค่า V_{oc} ของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าน้อยลง การลดลงของค่า V_{oc} ยังส่งผลไปถึงค่าฟิลแฟกเตอร์ (Fill factor : FF) และค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ (η) ด้วย โดยมีค่า FF และค่า η ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจากแผ่นซิลิคอนที่กัดโดยปฏิกิริยาไอออนด้วยก๊าซ SF_6 มีค่าลดลงจาก 0.67 เหลือ 0.65 และจาก 14.9% ลดเหลือ 14.3% ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์

จากปัญหาที่ยังพบว่า พื้นผิวซิลิคอนที่ผ่านการกัดโดยปฏิกิริยาไอออนด้วยก๊าซ SF_6 มีความขรุขระมากและยอดของพีระมิดยังคงมียอดแหลม เราทำการแก้ปัญหาโดยผสมก๊าซ O_2 เพื่อแก้ปัญหาความขรุขระของพื้นผิวให้น้อยลง โดยการเติมก๊าซ O_2 ผสมกับก๊าซ SF_6 จะทำให้เกิดปฏิกิริยาการกัดลดลงอันเนื่องมาจากการทำปฏิกิริยาระหว่าง F^* , O_2 กับ Si ซึ่งก่อให้เกิดเป็น SiO_xF_y ที่ผิวของแผ่นซิลิคอน มีทำหน้าที่เป็นหน้ากากป้องกันปฏิกิริยาการกัดที่เกิดจากไอออน F^* ดังนั้นจึงสามารถกัลดความแหลมของยอดพีระมิดลงได้และสามารถลดอัตราการเกิดปฏิกิริยาการกัดลงทำให้ได้พื้นผิวเรียบเนียน ผลของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจากแผ่นซิลิคอนที่ผ่านการกัดโดยปฏิกิริยาไอออนด้วยก๊าซผสม O_2 กับ SF_6 พบว่า เราสามารถเพิ่มค่า J_{sc} , ค่า V_{oc} , ค่า FF และค่า η ขึ้นได้ ดังตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยมีค่า J_{sc} เท่ากับ 35.5 mA/cm^2 ค่า V_{oc} เท่ากับ 657 mV ค่า FF เท่ากับ 0.71 และค่า η เท่ากับ 16.5% การที่พื้นผิวพีระมิดเรียบไม่มีความขรุขระเป็นหลุม บริเวณส่วนยอดของพีระมิดมีความโค้งมน ทำให้ในกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชั้น passivation (i-a-SiO:H) และชั้นฟิล์มของรอยต่อพี-เอ็นดี (p- $\mu\text{c-SiO:H}$, n-a-Si:H) สามารถยึดเกาะกับแผ่นฐานรองซิลิคอนได้ดี จุดบกพร่องของผลึกซิลิคอนน้อยลง พาหะอิสระที่เกิดมีการรวมตัวช้าลงคือมีค่าอายุพาหะที่สูง จึงส่งผลทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพที่เพิ่มสูงขึ้น



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแส (J_{sc}) กับค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (V_{oc})



รูปที่ 4.9 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อเฮเทอโร

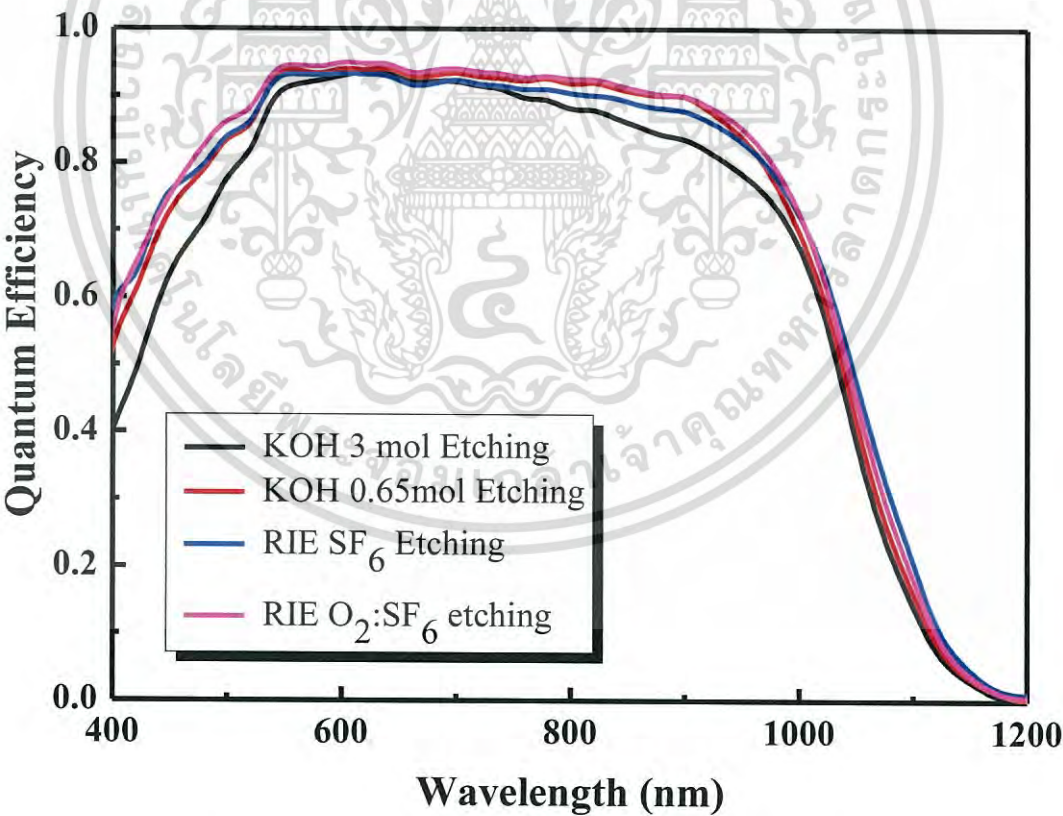
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์

Parameter	KOH Etching	RIE (SF ₆) Etching	RIE (O ₂ :SF ₆) Etching
V _{oc} (mV)	642	625	657
J _{sc} (mA/cm ²)	34.9	35.1	35.5
FF	0.67	0.65	0.71
Eff. (%)	14.9	14.3	16.5

จากผลการทดลองนี้ได้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดคือเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจากแผ่นซิลิคอนที่ผ่านการกัดโดยปฏิกิริยาไอออนด้วยก๊าซผสม O₂ กับ SF₆

ในรูปที่ 4.10 แสดงผลการวัดค่าประสิทธิภาพทางควอนตัม (Quantum efficiency, QE) ของเซลล์แสงอาทิตย์ พบว่าที่ความยาวคลื่นระหว่าง 550-900 nm เซลล์แสงอาทิตย์มีการตอบสนองทางแสงที่สูงขึ้นซึ่งสอดคล้องกับค่า J_{sc} ที่เพิ่มขึ้น [28-29] ดังที่ได้กล่าวไว้ในข้างต้น



รูปที่ 4.10 การตอบสนองเชิงสเปกตรัมของเซลล์แสงอาทิตย์

4.2.2 การเปรียบเทียบผลเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจากแผ่นซิลิคอนที่กัดโดยปฏิกิริยาไอออนด้วยก๊าซผสม O_2 กับ SF_6 ที่ทำการปรับเปลี่ยนเวลาการกัด

แผ่นซิลิคอนที่ผ่านการกัดปรับปรุงพื้นผิวโดยปฏิกิริยาไอออนด้วยก๊าซผสม O_2 กับ SF_6 ที่มีอัตราการไหล 10:10 sccm และทำการปรับเปลี่ยนเวลาในการกัด 3 นาที 5 นาที และ 7 นาที แผ่นซิลิคอนที่ผ่านการกัดปรับปรุงพื้นผิวโดยปฏิกิริยาไอออนด้วยก๊าซผสม O_2 กับ SF_6 ที่มีอัตราการไหล 10:10 sccm เวลาการกัด 3 นาที พบว่า พื้นผิวของพีระมิดมีความเรียบเนียนไม่เป็นหลุมขรุขระ แต่ที่บริเวณส่วนยอดของพีระมิดยังคงมียอดแหลม รวมไปถึงปฏิกิริยาการกัดยังเกิดขึ้นไม่ครอบคลุมทั่วทั้งพื้นผิว ที่เวลาการกัดขึ้นเท่ากับ 5 นาที พื้นผิวของพีระมิดมีความเรียบเนียนไม่เป็นหลุมขรุขระ บริเวณส่วนยอดของพีระมิดโค้งมนและเรียบไม่แหลม และเมื่อทำการเพิ่มเวลาการกัดเท่ากับ 7 นาที พบว่า พื้นผิวของพีระมิดมีความเรียบเนียน บริเวณยอดของพีระมิดมีความโค้งมนไม่แหลม แต่เศษสิ่งสกปรกซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาการกัดทำให้พื้นผิวมีความขรุขระ กระจ่ายอยู่ครอบคลุมทั่วทั้งพื้นผิว



(ก) เวลาการกัด 3 นาที



(ข) เวลาการกัด 5 นาที

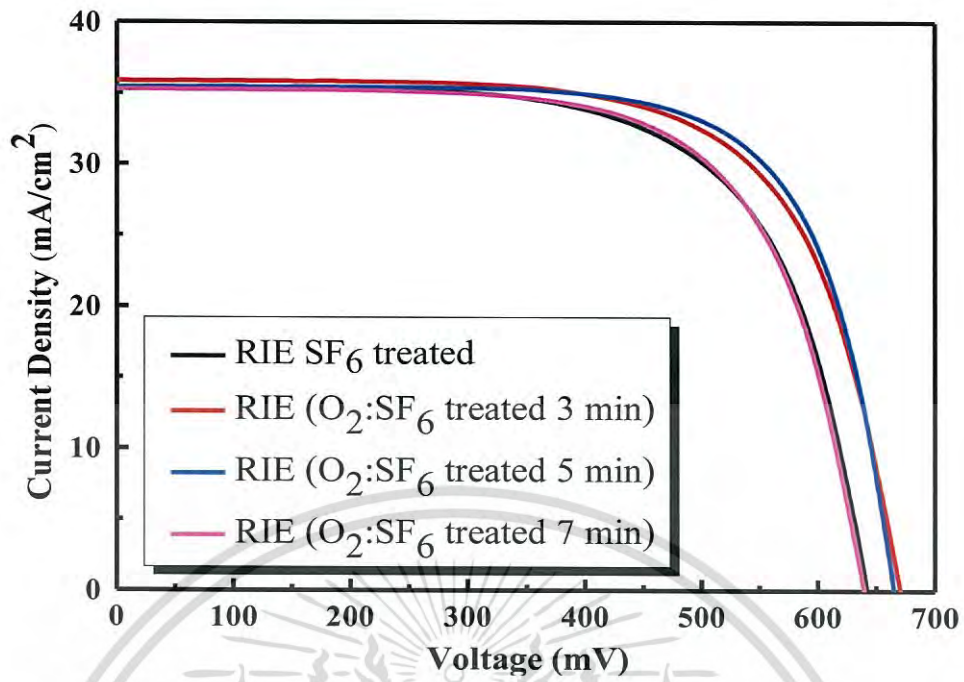
เอกสารนี้รูปที่ 4.11 ลักษณะพื้นผิวแผ่นซิลิคอนที่กัดด้วยเทคนิคปฏิกิริยาไอออน โดยเปลี่ยนเวลาการกัดการคำนวณค่าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



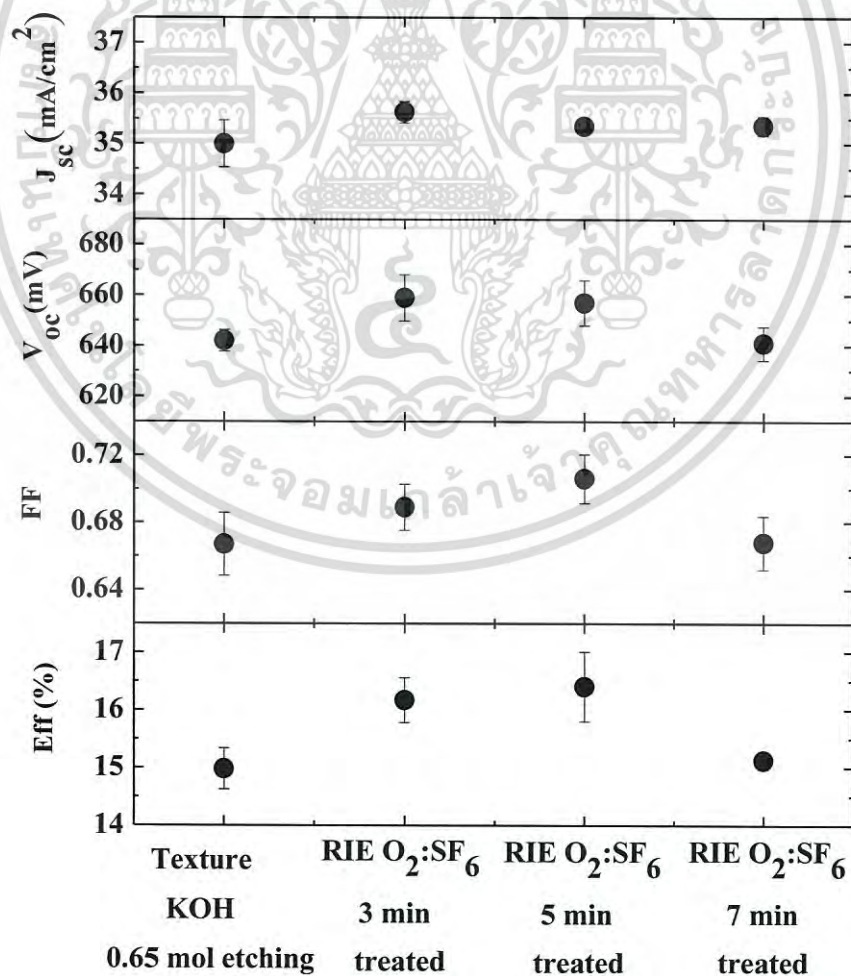
(ค) เวลาการกัด 7 นาที

รูปที่ 4.11 (ต่อ) ลักษณะพื้นผิวแผ่นซิลิคอนที่กัดด้วยเทคนิคปฏิกิริยาไอออน โดยเปลี่ยนเวลาการกัด

แผ่นซิลิคอนที่ผ่านการกัดด้วยเงื่อนไขทั้ง 3 เวลาการกัด มีพื้นผิวที่ระมัดที่เรียบ และยอดของพีระมิดโค้งมนเหมือนกันทั้ง 3 เงื่อนไขการทดลอง เรานำแผ่นซิลิคอนทั้ง 3 เงื่อนไขมาสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แล้วตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ พบว่า เซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจากแผ่นซิลิคอนที่กัดโดยปฏิกิริยาไอออนด้วยก๊าซผสม O_2 กับ SF_6 ในเวลาการกัด 3 นาที มีค่า J_{sc} และ V_{oc} สูงที่สุด โดยมีค่า J_{sc} เท่ากับ 35.6 mA/cm^2 และค่า V_{oc} เท่ากับ 659 mV รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแส (J_{sc}) กับค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (V_{oc}) แต่พบว่ามีค่า FF และค่า η ต่ำกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจากแผ่นซิลิคอนที่กัดโดยปฏิกิริยาไอออนด้วยก๊าซผสม O_2 กับ SF_6 ในเวลาการกัด 5 นาที ซึ่งมีค่า FF เท่ากับ 0.71 และค่า η เท่ากับ 16.5% ดังตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์ ในขณะที่เซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจากแผ่นซิลิคอนที่กัดโดยปฏิกิริยาไอออนด้วยก๊าซผสม O_2 กับ SF_6 ในเวลาการกัด 7 นาที นั้นมีค่าพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ต่ำที่สุด เนื่องจากแผ่นซิลิคอนเศษสิ่งสกปรกซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาการกัดทำให้พื้นผิวมีความขรุขระซึ่งเกิดจากสิ่งสกปรก ทำให้เกิดเป็นจุดบกพร่องของผลึกซิลิคอนขึ้น การเคลือบฟิล์มชั้น passivation (i-a-SiO:H) และชั้นฟิล์มของรอยต่อพี-เอ็นดี (p- μ c-SiO:H, n-a-Si:H) บนแผ่นฐานรองซิลิคอนเกิดความไม่สมบูรณ์ทำให้เกิดการรวมตัวของพาหะเร็วขึ้น ค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์จึงมีค่าต่ำลง ดังนั้นจากผลการทดลองนี้สรุปได้ว่าค่าประสิทธิภาพสูงสุดคือเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจากแผ่นซิลิคอนที่ผ่านการกัดโดยปฏิกิริยาไอออนด้วยก๊าซผสม O_2 กับ SF_6 โดยที่ใช้เวลาในการกัด 5 นาที ซึ่งมีค่า J_{sc} เท่ากับ 35.5 mA/cm^2 , ค่า V_{oc} เท่ากับ 657 mV , ค่า FF เท่ากับ 0.71 และค่า η เท่ากับ 16.5%



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแส (J_{sc}) กับค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (V_{oc})



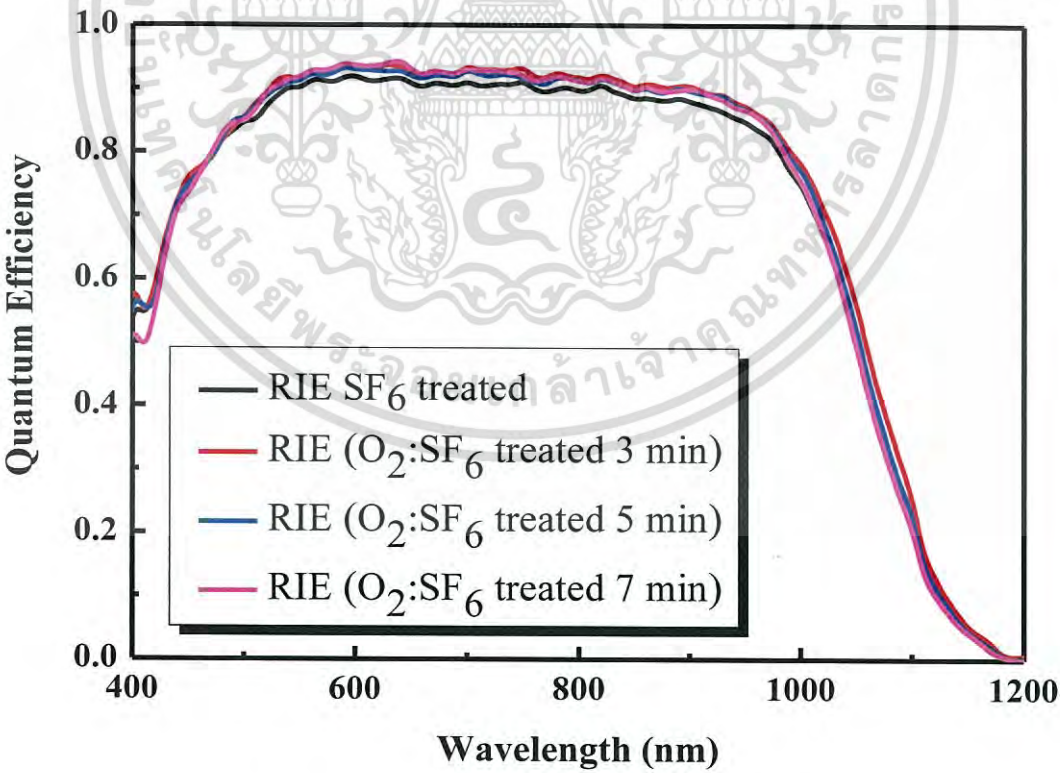
เอกสารนี้เป็นเอกสารรูปที่ 4.13 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อเฮเทอโรจังก์ชันด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์

Unit	RIE (O ₂ :SF ₆) Etching 3 min	RIE (O ₂ :SF ₆) Etching 5 min	RIE (O ₂ :SF ₆) Etching 7 min
V _{oc} (mV)	659	657	641
J _{sc} (mA/cm ²)	35.6	35.5	35.4
FF	0.69	0.71	0.67
Eff. (%)	16.2	16.5	15.1

จากผลการทดลองนี้ได้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดคือเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจากแผ่นซิลิคอนที่ผ่านการกัดโดยปฏิกิริยาไอออนด้วยก๊าซผสม O₂ กับ SF₆ โดยใช้เวลาในการกัด 5 นาที

ในรูปที่ 4.14 แสดงผลการวัดค่าประสิทธิภาพทางควอนตัม (Quantum efficiency, QE) ของเซลล์แสงอาทิตย์พบว่าที่ความยาวคลื่นระหว่าง 600-900 nm เซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจากแผ่นซิลิคอนที่ผ่านการกัดโดยปฏิกิริยาไอออนด้วยก๊าซผสม O₂ กับ SF₆ โดยใช้เวลาในการกัด 3 นาที มีการตอบสนองทางแสงที่สูง ซึ่งสอดคล้องกับค่า J_{sc} ที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.14 การตอบสนองเชิงสเปกตรัมของเซลล์แสงอาทิตย์

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการศึกษาการกัดพื้นผิวซิลิคอนด้วยเทคนิคการกัดปฏิกิริยาไอออนโดยใช้ก๊าซ SF_6 และก๊าซผสมระหว่าง O_2 กับ SF_6 และศึกษาพื้นผิวซิลิคอนที่มีผลกระทบต่อค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อแบบเฮเทอโรจังก์ชันของผลึกเดี่ยวซิลิคอน

แผ่นซิลิคอนที่กัดในสารละลาย KOH จะมีลักษณะพื้นผิวเป็นแบบพีระมิดที่มีขนาดเล็กและใหญ่ผสมกัน (Random pyramids) พีระมิดมีพื้นผิวที่เรียบและยอดพีระมิดมียอดแหลม มีค่าสภาพความต้านทานประมาณ $1-5 \Omega\text{cm}$ และมีความหนาประมาณ $180 \mu\text{m}$ เมื่อนำแผ่นซิลิคอนมาทำกัดพื้นผิวด้วยเทคนิคการกัดปฏิกิริยาไอออนด้วยก๊าซ SF_6 พบว่าพื้นผิวพีระมิดจะมีลักษณะที่ขรุขระคล้ายหลุมขนาดเล็กครอบคลุมทั้งพื้นผิวแผ่นซิลิคอน ทำให้แผ่นซิลิคอนมีความขรุขระเพิ่มมากยิ่งขึ้น และมีปฏิกิริยาการกัดบางส่วนที่เกิดขึ้นที่บริเวณส่วนยอดของพีระมิดแต่ไม่มาเพียงพอที่จะทำให้ยอดพีระมิดมียอดแหลมลดลงได้ การเกิดการเปลี่ยนแปลงพื้นผิวเช่นนี้เป็นผลมาจากไอออนของ F^* ที่เกิดจากการแตกตัวของก๊าซ SF_6 ได้ทำปฏิกิริยากับ Si เกิดเป็น SiF_x ดังนั้นเมื่อมีการเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซ SF_6 ความหนาแน่นของไอออน F^* ที่เกิดจากการแตกตัวก็มีปริมาณเพิ่มขึ้นด้วยทำให้ปฏิกิริยาระหว่างไอออน F^* กับ Si มีมาก อัตราการกัดจึงสูงขึ้น การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวซิลิคอนจากการทดลองที่ทำการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของก๊าซ SF_6 พบว่า แผ่นซิลิคอนที่กัดปรับปรุงพื้นผิวจากเงื่อนไขการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของก๊าซ SF_6 เท่ากับ 10 sccm ที่เวลาการกัดเท่ากับ 5 นาที พื้นผิวซิลิคอนมีลักษณะที่เหมาะสมมากที่สุด เพื่อทำการแก้ไขปัญหายังพบอยู่คือพื้นผิวพีระมิดเมื่อทำการกัดแล้ว พบว่ายังคงมีพื้นผิวขรุขระ ลักษณะคล้ายหลุมอยู่ทั่วทั้งแผ่นซิลิคอน เพื่อที่จะทำการแก้ไขปัญหายังพบอยู่คือแผ่นซิลิคอนเมื่อทำการกัดแล้ว พบว่ายังคงมีพื้นผิวขรุขระ ลักษณะคล้ายหลุมขนาดกระจายอยู่ครอบคลุมทั่วทั้งแผ่นซิลิคอน ให้มีพื้นผิวที่ยังคงเป็นพีระมิดที่มีพื้นผิวที่เรียบเนียนแล้วเกิดปฏิกิริยาการกัดปรับปรุงพื้นผิวที่บริเวณส่วนยอดของพีระมิดเป็นหลักเพื่อลดความแหลมของยอดพีระมิดลง จึงทำการผสมก๊าซ O_2 ผสมกับก๊าซ SF_6 ผลการทดลองของการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลก๊าซผสมระหว่าง O_2 กับ SF_6 พบว่าพื้นผิวพีระมิดมีลักษณะเรียบเนียนพื้นผิวไม่เป็นหลุมขรุขระเกิดขึ้นที่บริเวณผิวของพีระมิด ยอดของพีระมิดมีลักษณะโค้งมนเรียบไม่แหลม ไม่มีคราบจากการทำปฏิกิริยาการกัดเหลืออยู่ ซึ่งมีพื้นผิวที่เหมาะสมอย่างมากที่สุด การเกิดปฏิกิริยาการกัดเกิดจากไอออน F^* ของก๊าซ SF_6 ที่แตกตัว มาทำปฏิกิริยากับ Si ซึ่งการกัดนั้นเกิดจากไอออน F^* เป็นหลัก ดังนั้นการเติมก๊าซ O_2 ผสมกับก๊าซ SF_6 จะทำให้เกิดปฏิกิริยาการกัดลดลงอันเนื่องมาจากการทำปฏิกิริยาระหว่าง F^* , O_2 กับ Si ก่อให้เกิดเป็น SiO_xF_y ที่พื้นผิวพีระมิดซึ่งทำหน้าที่เป็นหน้ากักป้องกันปฏิกิริยาการกัดที่เกิดจากไอออน F^* จึงสามารถลดอัตราการเกิดปฏิกิริยาการกัดลงทำให้พื้นผิวยังคงเรียบเหมือนกันกับแผ่นซิลิคอนที่ผ่านการกัดด้วยสารละลาย KOH และสามารถลดความแหลมของยอดพีระมิดลงได้ การวิเคราะห์ผลการทดลองปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของก๊าซ O_2 ผสมกับก๊าซ SF_6 แล้วพบว่า ที่อัตราการไหลของก๊าซผสม $\text{O}_2:\text{SF}_6$ ที่ 10:10 sccm และเวลาในการกัดเท่ากับ 5 นาที เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พื้นผิวมีลักษณะที่เหมาะสมที่สุดเนื่องจากพื้นผิวมีความเรียบและส่วนบริเวณยอดของพีระมิดมีความโค้งมนเรียบไม่แหลม พื้นผิวมีลักษณะที่เหมาะสมที่สุด ในการนำแผ่นซิลิคอนไปสร้างเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อเฮเทอโร เนื่องจากพื้นผิวมีความเรียบเนียนและส่วนยอดของพีระมิดมีความโค้งมน

การเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจากแผ่นซิลิคอนที่กัดด้วยสารละลาย KOH แผ่นซิลิคอนที่ผ่านการกัดโดยปฏิกิริยาไอออนด้วยก๊าซ SF_6 ที่อัตราการไหลเท่ากับ 10 sccm และแผ่นซิลิคอนที่ผ่านการกัดโดยปฏิกิริยาไอออนด้วยก๊าซผสม O_2 กับ SF_6 เท่ากับ 10:10 sccm เนื่องจากลักษณะพื้นผิวซิลิคอนที่นำมาสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 3 แบบนั้น มีความแตกต่างกัน พื้นผิวซิลิคอนที่กัดด้วยสารละลาย KOH เป็นแบบพีระมิดแบบสุ่ม พื้นผิวของพีระมิดเรียบไม่ขรุขระ และพีระมิดมียอดแหลม พื้นผิวซิลิคอนที่ผ่านการกัดโดยปฏิกิริยาไอออนด้วยก๊าซ SF_6 พื้นผิวพีระมิดจะมีลักษณะที่ขรุขระคล้ายหลุมขนาดเล็กครอบคลุมทั้งพื้นผิวแผ่นซิลิคอน ทำให้แผ่นซิลิคอนมีความขรุขระเพิ่มมากยิ่งขึ้น ส่วนบริเวณยอดของพีระมิดยังมียอดแหลม และพื้นผิวซิลิคอนที่ผ่านการกัดโดยปฏิกิริยาไอออนด้วยก๊าซผสม O_2 กับ SF_6 พื้นผิวของพีระมิดมีลักษณะเรียบเนียน ยอดพีระมิดมีลักษณะโค้งมนไม่แหลม เมื่อสร้างเซลล์แสงอาทิตย์บนแผ่นฐานรองซิลิคอนทั้ง 3 แบบ แล้ววัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ พบว่า เซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจากแผ่นซิลิคอนที่ผ่านการกัดโดยปฏิกิริยาไอออนด้วยก๊าซผสม O_2 กับ SF_6 มีค่าพารามิเตอร์เซลล์แสงอาทิตย์สูงที่สุด สามารถเพิ่มค่า J_{sc} , ค่า V_{oc} , ค่า FF และค่า η ขึ้นได้ โดยมีค่า J_{sc} เท่ากับ 35.5 mA/cm^2 , ค่า V_{oc} เท่ากับ 657 mV, ค่า FF เท่ากับ 0.71 และค่า η เท่ากับ 16.5% การที่พื้นผิวซิลิคอนเรียบเนียนไม่มีความขรุขระเป็นหลุม บริเวณส่วนยอดของพีระมิดมีความโค้งมนไม่แหลม ทำให้ในกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ การเคลือบฟิล์มชั้น passivation (i-a-SiO:H) และชั้นฟิล์มของรอยต่อพี-เอ็นดี (p- $\mu\text{c-SiO:H}$, n-a-Si:H) สามารถยึดเกาะกับแผ่นฐานรองซิลิคอนได้ดี จุดบกพร่องของผลึกซิลิคอนน้อยลง พาหะอิสระที่เกิดขึ้นมีการรวมตัวข้ามลงคือมีค่าอายุพาหะที่สูง จึงส่งผลทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีค่า V_{oc} และมีค่าประสิทธิภาพที่เพิ่มสูงขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] Johannes Peter Seif and et al. 2014. "Amorphous silicon oxide window layers for high-efficiency silicon heterojunction solar cells." *J. Appl. Phys.* 115.
- [2] Charanpreet Sethi and et al. 2012. "Optimization of Surface Reflectance for Alkaline Textured Monocrystalline Silicon Solar Cell." *International Journal of Computing Science and Communication Technologies.* 5(1): 0974-3375.
- [3] P. Papet and et al. 2006. "Pyramidal texturing of silicon solar cell with TMAH chemical anisotropic etching." *Selected Papers from the Solar Cells and Solar Energy Materials Symposium.* 90(22): 2319-2328.
- [4] M. Moreno and et al. 2014. "A comparative study of wet and dry texturing processes of c-Si wafers for the fabrication of solar cells." *Solar Energy.* 101: 182-191.
- [5] S.Zaidi, D.Ruby, J.Gee. 2001. "Characterization of random reactive ion etched-textured silicon solar cells." *IEEE Transactions on Electron Devices.* 48 (6): 1200-1206.
- [6] MicroChemicals GmbH. 2013. *Wet-Chemical Etching of Silicon.* [Online]. Available: http://www.microchemicals.eu/technical_information/silicon_etching.pdf
- [7] H.F.W.Dekkers, F.Duerinckx, J.Szlufcik and J.Nijs. 2000. "Silicon surface texturing by reactive ion etching." *Opto-Electronics Review.* 8 (4): 311-316.
- [8] The Oxford Instruments. *Reactive Ion Etching (RIE).* [Online]. Available: <http://www.oxford-instruments.com/products/etching-deposition-and-growth/plasma-etch-deposition/rie>
- [9] Stephen J. Fonash. 2010. *Solar Cell Device Physics.* 2nd ed.: Elsevier Inc.
- [10] ดุสิต เครื่องาม. 2542. *สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ฟิสิกส์ เทคโนโลยี และการใช้งาน. เล่มที่ 1: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย*
- [11] H.J. Hovel. 1975. *Semiconductors and Semimetals.* 11: Academic Press
- [12] J. H. Thomas and A. Catalano. 1983. "AES and XPS Analysis of the a-Si:H/SnO₂ Interface: Evidence of Plasma Induced Reaction." *Appl. Phys. Lett.* 43: 101.
- [13] C. Gianetti et al. 1989. "SnO₂ Reduction by H-Bombardment and its Effects on SnO₂/a-Si Interfaces." *J. Non-Cryst. Solid.* 115: 204.
- [14] A. Catalano, B. W. Faughnan and A. R. Moore. 1986. "Effects of Low Level Boron Doping of the ilayer Performance of a-SiC:H p-i-n Devices." *Solar Energy Material.* 13: 65.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [15] D.Kruangam, K.Hanaki, S.Nonomura, H.Okamoto and Y.Hamakawa. 1984.
“Characterization of Undoped Microcrystalline Silicon for Solar Cell Application.” *Technical Digest of Int. Photovoltaic Science & Engineering Conf. (PVSEC-1)*. Kobe. Japan. 437.
- [16] A.Matsuda. 1983. “Formation Kinetics and Control of Microcrystalline in $\mu\text{-Si:H}$ From Glow Discharge Plasma.” *J. Non-Cryst. Solids*. 59&60: 767.
- [17] Guorong Li, Yuqin Zhou and Fengzhen Liu. 2012. “Influence of textured c-Si surface morphology on the interfacial properties of heterojunction silicon solar cells.” *Journal of Non-Crystalline Solid*. 358: 2223–2226.
- [18] E.S.Heavens. 1955. *Optical Properties of Thin Solid Films*. Buterworths
- [19] Thomas Lauinger, Jan Schmidt, Armin G. Aberle and Rudolf Hezel. 2539.
“Record low surface recombination velocities on 1 Ωcm p-silicon using remote plasma silicon nitride passivation.” *Appl. Phys. Lett.* 68: 1232.
- [20] ดุสิต เครื่องาม. 1989. *สถานภาพของเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์*. วิศวกรรมสาร 65
- [21] Van Sark, Wilfried G. J. H. M., Korte, Lars, Roca, Francesco (Eds.). 2012. “Physics and Technology of Amorphous-Crystalline Heterostructure Silicon Solar Cells” *Engineering Materials*.15
- [22] Pathros Cardenas & David Tung. *Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition*.
- [23] Geochemical Instrumentation and Analysis.
Scanning Electron Microscopy (SEM). [Online].
Available: http://serc.carleton.edu/research_education/geochemsheets/techniques/SEM.html
- [24] M. REICHE, U. GOSELE, M. WIEGAND. 2000 .//“Modification of Si (100)-Surfaces by SF_6 Plasma Etching – Application to Wafer Direct Bonding.”
Cryst. Res. Technol. 35: 807-821.
- [25] Yeong-Dae Lim, Seung-Hwan Lee and Won Jong Yoo. 2009. “Roles of F and O Radicals and Positive Ions in a SF_6/O_2 Plasma in Forming Deep via Structures.” *Journal of the Korean Physical Society*. 54(5): 1774-1778.
- [26] Guorong Li, Yuqin Zhou, Fengzhen Liu. 2012. “Influence of textured c-Si surface morphology on the interfacial properties of heterojunction silicon solar cells.” *Proceedings of the 24th International Conference on Amorphous and Nanocrystalline Semiconductors (ICANS 24)* Nara. 358(17): 2223-2226.
- [27] H.Watanabe, K.Haga and T.Lohner. 1993. “Structure of high-photosensitivity silicon-oxygen alloy films” *J. Non-Cryst. Solids*. 1085: 164-166.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [28] Q.Wang, M.R.Page, E.Iwaniczko, Y.Q.Xu, L.Roybal, R.Bauer, B.To, H.C.Yuan, A.Duda, and Y.F.Yan. 2008. "Crystal Silicon Heterojunction Solar Cells by Hot-Wire CVD." the 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, San Diego, California.
- [29] Kegel Jan, Angermann Heike, St.rzebecher Uta, Conrad Erhard, Mews Mathias, Korte Lars, and Stegemann Bert. "Over 20% conversion efficiency on silicon heterojunction solar cells by IPA-free substrate texturization." Applied Surface Science. 301:56-62



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลงานทางวิชาการของงานวิจัยนี้ที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

- [1] อติศักดิ์ คนหนองบัว, สุทธินันท์ เจริญเสถียรโชค, ทวีวัฒน์ กระจำงสังข์, อัศวิน หงส์สิงห์ทอง จรรย์ ศรีธรรมาธิคุณ, กอบศักดิ์ ศรีประภา และวิสุทธิ ฐิตรุ่งเรือง “การศึกษาการกัดฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอนด้วยปฏิกิริยาไอออนของก๊าซคาร์บอนเตตระฟลูออไรด์” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 7 หน้า 572-575, 27-29 พฤษภาคม พ.ศ. 2558
- [2] อติศักดิ์ คนหนองบัว, สุทธินันท์ เจริญเสถียรโชค, ปฏิภาณ กรุดตาต, ทวีวัฒน์ กระจำงสังข์, จรรย์ ศรีธรรมาธิคุณ, กอบศักดิ์ ศรีประภา และวิสุทธิ ฐิตรุ่งเรือง “การกัดพื้นผิวซิลิคอนด้วยการกัดปฏิกิริยาไอออนเพื่อประยุกต์ใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อเฮเทอโรจังก์ชันบนฐานรองผลึกเดี่ยวซิลิคอน” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 8 หน้า 625-628, 25-27 พฤษภาคม พ.ศ. 2559

RMUTK

EENET 2015

Creative Technology for Green Energy
27-29 May 2015, A-one The Royal Cruise Hotel

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 7

The 7th Conference of Electrical Engineering Network
of Rajamangala University of Technology

Conference Topics

- ไฟฟ้ากำลัง (PW)
- อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
- อิเล็กทรอนิกส์ (EL)
- ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)
- ระบบควบคุมและการวัด (CT)
- การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DS)
- พลังงานและการอนุรักษ์พลังงาน (ES)
- งานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)
- คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)
- นวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์ (IN)

คณะกรรมการจัดการประชุมวิชาการ
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพฯ 10120
<http://www.eenet2015.org>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ครั้งที่ 7

Proceedings of the 7th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2015 (EENET 2015)

การศึกษาการกัดฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอนด้วยการกัดปฏิกิริยาไอออน

Study Etching Amorphous Silicon Thin Film By Reactive Ion Etching

อดิศักดิ์ คนหนองบัว¹ สุทธิพันธ์ เจริญเชษฐาโชค¹ ปฏิกานต์ กุศลาค¹ ทวีวัฒน์ กระแสสังข์¹ อัศวิน หงษ์สิงห์ทอง¹จรัญ ศรีวรารักษ์² กอบศักดิ์ ศรีประภา² และ วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง²¹ สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขที่ 1 ซอยคลองกรุง 1 ถนนคลองกรุง แขวงลำปลาทิว เขตคลองกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

โทรศัพท์ 02-3298000 E-mail: an.khonongbua@gmail.com

² ห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ (STL) ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC)

เลขที่ 112 อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย ถนนพหลโยธิน ต.คลองหนึ่ง อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอัตราการกัด (Etching rate) และพื้นผิวฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน (a-Si:H) ที่ปลูกบนฐานรองกระจก โดยนำฟิล์มบาง a-Si:H มากัดด้วยเครื่องกัดปฏิกิริยาไอออน (Reactive Ion Etching : RIE) จากการศึกษาพบว่า อัตราการกัดฟิล์มเพิ่มขึ้นและพื้นผิวมีลักษณะเรียบ เมื่อเพิ่มความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า (power density) โดยมีความหนาแน่นของ a-Si:H หลังการกัด 150 nm และอัตราการกัดสูงสุด 13.3 nm/min ที่ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 0.47 W/cm² ในขณะที่อัตราการกัดฟิล์มลดลง เมื่ออัตราการไหลของก๊าซคาร์บอนเตตระฟลูออไรด์ (CF₄) เพิ่มขึ้น โดยมีความหนาแน่นของ a-Si:H หลังการกัด 39 nm และมีอัตราการกัดสูงสุด 16 nm/min ที่อัตราการไหลของก๊าซ CF₄ เท่ากับ 10 sccm และพื้นผิวมีลักษณะขรุขระ เมื่ออัตราการไหลของก๊าซ CF₄ ในช่วง 10 ถึง 20 sccm ในขณะที่พื้นผิวจะมีลักษณะเรียบขึ้น เมื่ออัตราการไหลของก๊าซ CF₄ ในช่วง 30 ถึง 40 sccm ดังนั้น จากผลการศึกษานี้ ฟิล์มบาง a-Si:H ที่มีพื้นผิวแบบต่างๆ จะถูกนำไปประยุกต์ใช้งานในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางซิลิคอน เพื่อดูว่าพื้นผิวแบบใดจะทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพสูงที่สุดต่อไป

คำสำคัญ: ฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน, การกัดปฏิกิริยาไอออน, ก๊าซคาร์บอนเตตระฟลูออไรด์

Abstract

This paper objective to study the etching rate and the surface of thin film amorphous silicon (a-Si:H) are grown on a glass substrate. By thin-film a-Si:H was etched with reactive ion etching machine (RIE). The study found that increases etching rate film and the film

surface is smooth, when increases power density. The thickness of thin film a-Si:H after etching is 150 nm and maximum etching rate 13.3 nm/min at a power density of 0.47 W/cm². While etching rate film decreases, when the flow rate of carbon tetrachloride fluoride (CF₄) increases. The thickness of thin film a-Si:H after etching is 39 nm and maximum etching rate 16 nm/min at a flow rate of CF₄ gas was 10 sccm. And the surface is roughness, when flow rate CF₄ gas in the range of 10 to 20 sccm. While the surface it is smooth, when CF₄ gas flow rate in the range of 30 to 40 sccm. Therefore the results of this study thin film a-Si:H types surface. Can be applied in thin-film Si solar cells. To see how the texture will make the most efficient solar cells.

Keywords: thin film amorphous silicon, reactive ion etching, carbon tetrafluoride gas

1. บทนำ

การกัดปฏิกิริยาไอออน (Reactive Ion Etching : RIE) เป็นกระบวนการหนึ่งที่มีความสำคัญมาก โดยทั่วไปเครื่อง RIE สามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย เช่น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ [1,2] และเซลล์แสงอาทิตย์ ในงานด้านเซลล์แสงอาทิตย์เครื่อง RIE สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ โดยการกัดกระจกฐานรองให้มีพื้นผิวขรุขระก่อนนำไปสกรีนชั้นไฟฟ้าโปร่งแสง [3] นอกจากนี้ยังใช้ในกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางซิลิคอน เพื่อกำหนดพื้นที่ของเซลล์ให้ถูกต้องและลดกระแสรั่วไหล (Leakage current) [4] โดยการกัดหรือกัดฟิล์มส่วนที่ไม่ต้องการของชั้นฟิล์มซิลิคอนชนิดอื่น (n-layer) ดังแสดงในรูปที่ 1 แผนการใช้เลเซอร์ [5] ซึ่งเลเซอร์สามารถ

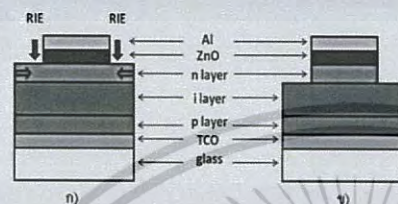
บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 7

Proceedings of the 7th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2015 (EENET 2015)

กำลังการกัดที่เพิ่มได้เพียงบางส่วน แต่ไม่สามารถกำจัดหรือกัดฟิล์มบนพื้นที่ใหญ่ได้ในคราวเดียวกัน และการควบคุมความลึกของกำลังการกัดที่เพิ่มค่อนข้างยาก ซึ่งไปกว่านี้เครื่องจักรและอุปกรณ์ของระบบเซมิคอนดักเตอร์ราคาสูงหากเทียบกับเครื่อง RIE

บทความนี้จะนำเสนอการศึกษาการกัดฟิล์มบาง a-Si:H ด้วยเครื่อง RIE โดยการปรับเปลี่ยนเงื่อนไขความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า (power density) และอัตราการไหลของก๊าซ CF₄ (Etching rate) ที่ส่งผลต่ออัตราการกัดฟิล์มและลักษณะพื้นผิวฟิล์ม



รูปที่ 1 โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางซิลิคอนแบบ p-i-n
ก) ก่อนการกัดด้วย RIE และ ข) หลังการกัดด้วย RIE

2. วิธีการทดลอง

เครื่องจักรรุ่นแบบ RIE ที่ใช้ในการทำวิจัยนี้ได้รับการออกแบบและพัฒนามาโดยห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ ซึ่งมีส่วนประกอบหลัก ได้แก่ แหล่งกำเนิดสุญญากาศ ระบบปั๊มสุญญากาศ ระบบควบคุมเครื่องจักร ระบบนำแหล่งเย็น เครื่องกำเนิดสุญญากาศความถี่วิทยุ (Radio Frequency : RF 13.56 MHz) และระบบจ่ายก๊าซ เป็นต้น ชิ้นงานหรือฟิล์มบาง a-Si:H ที่ใช้ในการทดลองนี้ถูกเตรียมขึ้นบนฐานรองกระจกด้วยกระบวนการ (Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition : PECVD) ซึ่งมีควมหนาประมาณ 540 nm ต่อมาชิ้นงานหรือฟิล์มบาง a-Si:H จะถูกนำมากัดด้วยเครื่อง RIE ด้วยก๊าซ CF₄ ซึ่งในการทดลองที่ 1 ปรับเปลี่ยนเงื่อนไขอัตราการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มได้ 0.12 ถึง 0.47 W/cm² ทำการควบคุมอัตราการไหลของก๊าซ CF₄ ให้คงที่ที่ 20 sccm และการทดลองที่ 2 ปรับเปลี่ยนเงื่อนไขโดยการปรับอัตราการไหลของก๊าซ CF₄ ตั้งแต่ 10 ถึง 40 sccm ทำการควบคุมความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าให้คงที่ที่ 0.47 W/cm² โดยที่ความดันห้องเกิดสุญญากาศและเวลาในการกัดทั้งสองการทดลองควบคุมให้คงที่ที่ 10 mTorr และ 30 นาทีตามลำดับ รายละเอียดการกัดสรุปในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เงื่อนไขการกัดฟิล์มบาง a-Si:H

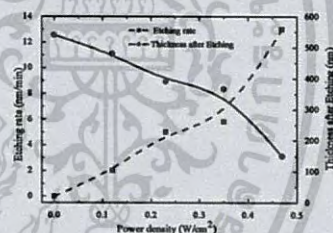
ตัวแปร	เงื่อนไข
ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า (W/cm ²)	0.12, 0.23, 0.35, 0.47
อัตราการไหลของก๊าซ CF ₄ (sccm)	10, 20, 30, 40
ความดันห้องเกิดสุญญากาศ (mTorr)	10
เวลาในการกัด (min)	30

ฟิล์มบาง a-Si:H ที่ผ่านกัจะถูกนำมาตรวจสอบความหนาเพื่อหาอัตราการกัดฟิล์มด้วยเครื่อง Dektak-150 surface profiler และวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

3. ผลการทดลอง

3.1 ผลของการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า

การทดลองนี้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการกัดฟิล์มบาง a-Si:H จาก 0.12 ถึง 0.47 W/cm² และอัตราการไหลของก๊าซ CF₄ ควบคุมให้คงที่เท่ากับ 20 sccm จากรูปที่ 2 แสดงอัตราการกัดและความหนาของฟิล์มบาง a-Si:H หลังการกัดที่ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าที่ต่างกัน พบว่า เมื่อเพิ่มความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าส่งผลให้อัตราการกัดฟิล์มบาง a-Si:H เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณหัวโหนดและขั้วแคโทดมีค่ามาก จึงเร่งไอออนของก๊าซที่แตกตัวให้ไปชนกับชิ้นงานได้เพิ่มขึ้น (ion bombardments) [6] โดยมีอัตราการกัดสูงสุด 13.3 nm/min และมีความหนาฟิล์มบาง a-Si:H หลังการกัด 150 nm ที่ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 0.47 W/cm²



รูปที่ 2 อัตราการกัดและความหนาฟิล์มบาง a-Si:H หลังการกัด ที่ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าที่ต่างกัน

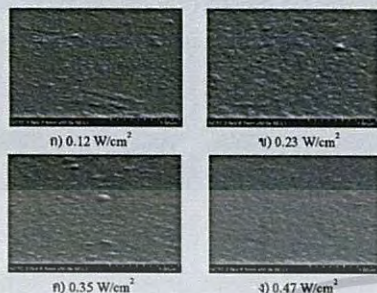
นำชิ้นงานฟิล์มบาง a-Si:H หลังผ่านการกัดด้วยเครื่อง RIE มาวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวดูจากภาพถ่ายจาก SEM ดังแสดงในรูปที่ 3

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้าพื้นมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 7

Proceedings of the 7th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2015 (EENET 2015)

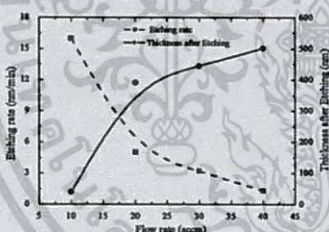
จะเห็นว่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้พื้นผิวของฟิล์มบาง a-Si:H มีลักษณะเรียบขึ้น



รูปที่ 3 ภาพถ่ายจาก SEM ลักษณะพื้นผิวฟิล์มบาง a-Si:H ที่ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าค่าต่างๆ

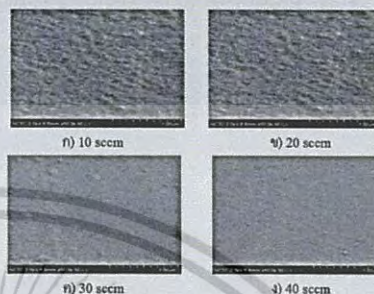
3.2 ผลของการปรับอัตราการไหลของก๊าซ CF₄

การทดลองนี้ทำการศึกษาอัตราการไหลของก๊าซ CF₄ จาก 10 ถึง 40 sccm โดยควบคุมความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าที่คงที่เท่ากับ 0.47 W/cm² จากรูปที่ 4 แสดงอัตราการเกิดและความหนาฟิล์มบาง a-Si:H หลังจากการที่อัตราการไหลของก๊าซ CF₄ ค่าต่างๆ พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซ CF₄ จะส่งผลให้อัตราการเกิดฟิล์มบาง a-Si:H ลดลง [7] โดยมีอัตราการเกิดสูงสุด 16 nm/min และมีความหนาฟิล์มบาง a-Si:H หลังการเกิด 39 nm ที่อัตราการไหลของก๊าซ CF₄ เท่ากับ 10 sccm ซึ่งเป็นผลมาจากการไหลของก๊าซ CF₄ ที่มีปริมาณต่ำ ก๊าซจึงแตกตัวได้มากและไม่มีการสูญเสียไอออนหลังจากที่อะตอมก๊าซแตกตัวแล้ว ทำให้ไอออนวิ่งชนชิ้นงานได้ จึงเกิดชิ้นงานได้มากขึ้น



รูปที่ 4 อัตราการเกิดและความหนาฟิล์มบาง a-Si:H หลังการเกิด ที่อัตราการไหลของก๊าซ CF₄ ค่าต่างๆ

รูปที่ 5 แสดงลักษณะพื้นผิวฟิล์มด้วยภาพถ่ายจาก SEM ที่ได้จาก การปรับอัตราการไหลของก๊าซ CF₄ จากรูปจะเห็นว่าอัตราการไหลของก๊าซ CF₄ ที่ใช้ในการเกิดฟิล์มบาง a-Si:H จาก 10 ถึง 20 sccm พื้นผิวของฟิล์มบาง a-Si:H จะมีลักษณะขรุขระ ในขณะที่เพิ่มอัตราการไหลของก๊าซ CF₄ จาก 30 ถึง 40 sccm จะมีลักษณะพื้นผิวเรียบขึ้น



รูปที่ 5 ภาพถ่ายจาก SEM พื้นผิวฟิล์มบาง a-Si:H ที่อัตราการไหลของก๊าซ CF₄ ค่าต่างๆ

4. สรุป

จากการศึกษาการเกิดฟิล์มบาง a-Si:H ด้วยเครื่อง RIE จากผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า ส่งผลให้อัตราการเกิดฟิล์มบาง a-Si:H เพิ่มขึ้น ซึ่งมีความหนาฟิล์มบาง a-Si:H หลังการเกิด 150 nm และมีอัตราการเกิดสูงสุด 13.3 nm/min ที่ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 0.47 W/cm² ในขณะที่เพิ่มอัตราการไหลของก๊าซ CF₄ ส่งผลให้อัตราการเกิดฟิล์มบาง a-Si:H ลดลง โดยมีความหนาฟิล์มบาง a-Si:H หลังการเกิด 39 nm และมีอัตราการเกิดสูงสุด 16 nm/min ที่อัตราการไหลของก๊าซ CF₄ เท่ากับ 10 sccm จากนั้นทำการศึกษาลักษณะพื้นผิวฟิล์มหลังการเกิด พบว่า การเพิ่มความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า ส่งผลให้พื้นผิวของฟิล์มบาง a-Si:H มีลักษณะเรียบขึ้น ในขณะที่การปรับอัตราการไหลของก๊าซ CF₄ ในช่วง 10 ถึง 20 sccm พื้นผิวของฟิล์มบาง a-Si:H จะมีลักษณะขรุขระ และเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซ CF₄ ในช่วง 30 ถึง 40 sccm จะมีลักษณะพื้นผิวเรียบขึ้น ดังนั้นการศึกษากการเกิดฟิล์มบาง a-Si:H ด้วยเครื่อง RIE ที่ห้องปฏิบัติการฯ ได้พัฒนาขึ้นมีศักยภาพนำไปใช้ควบคุมพื้นที่ของเซลล์แสงอาทิตย์ในกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางซิลิคอนและการเกิดฟิล์มชนิดอื่นๆ ต่อไป

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 7

Proceedings of the 7th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2015 (EENET 2015)

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะกรรมการวิจัยของห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ (STL) ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) ซึ่งคอยให้คำปรึกษาและอนุเคราะห์ในด้านเครื่องมือต่างๆ ของงานวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Kevin A. Shaw, Z. Lisa Zhang, and Noel C. MacDonald, "A single mask, single-crystal silicon, reactive ion etching process for microelectromechanical structures," *Sensors and Actuators A*, 40 1994, pp. 63-70.
- [2] E. Aperathitis, D. Cengher, M. Kayambaki, M. Androulidaki, G. Deligeorgis, K. Tsarakis, Z. Hatzopoulos, and A. Georgakilas, "Evaluation of reactive ion etching processes for fabrication of integrated GaAs/AlGaAs optoelectronic devices," *Materials Science and Engineering B80*, 2001, pp. 77-80.
- [3] P. Manshanden, A.R. Burgers, W.A. Nostichka, O. Voigt, and A.W. Weber, "Silicon solar cells textured by low damage RIE with natural lithography," 29th IEEE PVSC 1P2.9.
- [4] Jae-Hong Jeon, "Leakage Current of Bottom-Gated Amorphous Silicon Thin Film Transistors under Backside Illumination," *Journal of the Korean Physical Society*, Vol. 50, No. 4, April 2007, pp. 1189-1192.
- [5] H.L. Hao, S.H. Zhong, X. Zhang, and W.Z. Shen, "Optimization of shunt isolation processing for silicon solar cells via laser and chemical etching," *Applied Surface Science*, Vol 311, 30 August 2014, pp. 870-875.
- [6] Aswin Hongsingthong, Taweeat Krajangsang, Anomrat Limanee, Kobsak Sriprapha, Jaran Sutharathakun, and Makoto Konagai, "Development of textured ZnO-coated low-cost glass substrate with very high haze ratio for silicon-based thin film solar cells" *Thin Solid Films* 537, 2013, pp. 291-295.
- [7] S.N.R. Kazmi and C. Salm, J. Schmitz, "Deep reactive ion etching of in situ boron doped LPCVD $\text{Ge}_{0.2}\text{Si}_{0.8}$ using SF_6 and O_2 plasma," *Microelectronic Engineering* 110, 2013, pp. 311-314.



นายอดิศักดิ์ คนหนองบัว
ปริญญาดุษฎี วท.บ. สาขาฟิสิกส์ สจล.
ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชา
วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ สจล.



นายสุทธินันท์ เจริญเสถียรโชค
ผู้ช่วยนักวิจัยของ NECTEC ภายใน NSTDA
ทำงานวิจัยทางด้านเซลล์แสงอาทิตย์



นายปฏิภาณ กฤตคต
ผู้ช่วยนักวิจัยของ NECTEC ภายใน NSTDA
ทำงานวิจัยทางด้านเซลล์แสงอาทิตย์



ดร.อศวิณ หงษ์สิงห์ทอง
นักวิจัยของ NECTEC ภายใน NSTDA
ทำงานวิจัยทางด้านเซลล์แสงอาทิตย์



ดร.ทวีวัฒน์ กระจำรังษี
นักวิจัยของ NECTEC ภายใน NSTDA
ทำงานวิจัยทางด้านเซลล์แสงอาทิตย์



ดร.จริญ ศรีวาริชคุ้ม
นักวิจัยของ NECTEC ภายใน NSTDA
ทำงานวิจัยทางด้านเซลล์แสงอาทิตย์



ดร.กอบศักดิ์ หิรีประภา
นักวิจัยของ NECTEC ภายใน NSTDA
ทำงานวิจัยทางด้านเซลล์แสงอาทิตย์



ดร.วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง
ปัจจุบันดำรงตำแหน่งรองศาสตราจารย์ระดับ
9 สาขาวิชา อิเล็กทรอนิกส์ คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ สจล.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



EENET2016

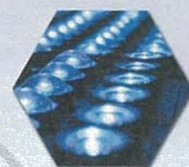
Innovation for Sustainability Entrepreneur

25-27 May 2016, Duangjitt Resort & Spa,
Patong Beach, Phuket



การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 8

**The 8th Conference of Electrical Engineering Network
of Rajamangala University of Technology**



Conference Topics

ไฟฟ้ากำลัง (PW)
อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
อิเล็กทรอนิกส์ (EL)
ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)
ระบบควบคุมและการวัด (CT)
คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)
การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DS)
พลังงานและการอนุรักษ์พลังงาน (ES)
นวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์ (IN)
งานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 8

Proceedings of the 8th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2016 (EENET 2016)

การกัดพื้นผิวซิลิคอนด้วยการกัดปฏิกิริยาไอออนเพื่อประยุกต์ใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อเฮเทอโรจังก์ชัน

Etching of Silicon Surface by Reactive Ion Etching and Its Application for Single Crystalline Silicon Heterojunction Solar Cells

อดิศักดิ์ คนหนองบัว¹ สุทธิรัตน์ เจริญนิธินโรจน์² ปริญญา กรุดคำ³ ทวีวัฒน์ กระอ้างสังข์⁴ จริญญา ศรีธาราธิคุณ⁵ กอบศักดิ์ ศรีประภา⁶
และ วิภาณี สุทธิรุ่งเรือง¹

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 ถนนฉลองกรุง แขวงลำปลาเทียว เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

โทรศัพท์ 02-3298000 E-mail: an.khonongbua@gmail.com

² ห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ (STL) ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC)

สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)

เลขที่ 112 อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย ถนนพหลโยธิน ด.คลองหนึ่ง อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120

บทคัดย่อ

การศึกษากัดพื้นผิวแผ่นซิลิคอนที่มีลักษณะแบบพีระมิด ด้วยเทคนิคการกัดปฏิกิริยาไอออนโดยใช้ก๊าซ SF_6 พบว่าพื้นผิวของพีระมิดมีความขรุขระคล้ายหลุมขนาดเล็กครอบคลุมทั้งพื้นผิวในขณะที่เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซ SF_6 ให้สูงขึ้นจะทำให้สภาพพื้นผิวของพีระมิดมีความขรุขระและเกิดเป็นหลุมขนาดใหญ่กระจายทั่วพื้นผิวของพีระมิด เมื่อนำแผ่นซิลิคอนที่ผ่านการกัดมาสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อเฮเทอโรจังก์ชันบนฐานรองผลึกเดี่ยวซิลิคอน พบว่าการกัดพื้นผิวโดยใช้ก๊าซ SF_6 สามารถเพิ่มค่า J_{sc} ของเซลล์แสงอาทิตย์ให้สูงขึ้นแต่ค่า V_{oc} และค่า FF ของเซลล์แสงอาทิตย์กลับมีค่าที่ลดลง เซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้จากการกัดด้วยก๊าซ SF_6 จะมีค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 14.2% ($V_{oc} = 624 \text{ mV}$, $J_{sc} = 35.4 \text{ mA/cm}^2$ และ $FF = 0.64$)

คำสำคัญ: เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อแบบเฮเทอโรจังก์ชันบนฐานรองผลึกเดี่ยวซิลิคอน เทคนิคการกัดปฏิกิริยาไอออน

Abstract

Etching on pyramids texture silicon surface by reactive ion etching technique with SF_6 gas was studied. The results exhibited that surface morphology of pyramids surface changed to rough surface. Moreover, to increase the SF_6 gas with high flow rate, surface morphology of pyramids surface became rough and porous. In order to comparison, we used wet and plasma etched silicon substrate for fabrication of crystalline silicon heterojunction solar cells. The experimental results showed that the solar cells with etching by SF_6 gas

can increase the J_{sc} , whereas the V_{oc} and FF were decreased. The efficiency of crystalline silicon heterojunction solar cells with SF_6 gas etched on pyramids texture surface was 14.2% ($V_{oc} = 624 \text{ mV}$, $J_{sc} = 35.4 \text{ mA/cm}^2$ and $FF = 0.64$).

Keywords: Crystalline silicon heterojunction solar cells, Reactive ion etching

1. บทนำ

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อแบบเฮเทอโรจังก์ชันบนฐานรองผลึกเดี่ยวซิลิคอนเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหนึ่งที่มีคุณสมบัติเหมาะสมสำหรับใช้งานในสภาพภูมิอากาศเขตร้อนชื้นอย่างประเทศไทย เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้มีค่าสัมประสิทธิ์ต่ออุณหภูมิค่าต่ำ สามารถให้ค่าผลผลิตทางไฟฟ้าต่อพื้นที่สูง จากรูปที่ 1 (ก) แสดงภาพจำลองโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อแบบเฮเทอโรจังก์ชันบนฐานรองผลึกเดี่ยวซิลิคอน จากรายงานพบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อแบบเฮเทอโรจังก์ชันนี้ยังมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อเพิ่มค่าประสิทธิภาพ เช่น การเลือกใช้ชั้นฟิล์มกันรังสีแสงที่มีค่าช่องว่างพลังงานกว้างเพื่อลดการดูดกลืนแสง เช่น วัสดุที่เป็นไมโครคริสตัลไลน์ซิลิคอน (Micro crystalline silicon : $\mu\text{-SiO:H}$) หรือวัสดุอะมอร์ฟิซิลิคอนออกไซด์ (Amorphous silicon oxide : a-SiO:H) [1] เป็นต้น การทำให้พื้นผิวซิลิคอนมีความขรุขระเพื่อลดการสะท้อนแสงเป็นอีกวิธีหนึ่งในการเพิ่มค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรและทำให้ค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ให้สูงขึ้นได้ โดยทั่วไปการกัดแผ่นซิลิคอนเพื่อให้ได้พื้นผิวที่มีความขรุขระนั้นนิยมใช้สารละลาย เช่น

25-27 พฤษภาคม พ.ศ. 2559 โรงแรมดวงจิตต์ริเวอร์ท แอนด์ สปา จังหวัดภูเก็ต

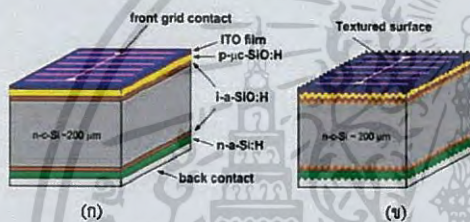
บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 8

Proceedings of the 8th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2016 (EENET 2016)

Potassium hydroxide (KOH) หรือ Tetramethyl ammonium hydroxide (TMAH) [2,3] เป็นต้น ซึ่งการกัดด้วยสารละลายดังกล่าวจะเป็นการกัดที่สามารถกำหนดทิศทางการกัดได้ (Anisotropic etching) ทำให้แผ่นซิลิคอนเปลี่ยนจากพื้นผิวเรียบไปเป็นพื้นผิวที่มีความขรุขระ มีรูปทรงแบบพีระมิด นอกจากการกัดเพื่อทำให้พื้นผิวแผ่นซิลิคอนมีความขรุขระด้วยสารละลายแล้ว การกัดแผ่นซิลิคอนด้วยพลาสมา (Plasma etching) ด้วยเทคนิคการกัดปฏิกิริยาไอออน (Reactive Ion Etching:RIE) ซึ่งจะเป็นการกัดที่ไม่สามารถกำหนดทิศทาง (Isotropic etching) สามารถทำให้พื้นผิวแผ่นซิลิคอนมีความขรุขระและสามารถลดการสะท้อนแสงที่ด้านรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ได้เช่นกัน

ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษากำหนดบนพื้นผิวของพีระมิดด้วยเทคนิคการกัดปฏิกิริยาไอออนโดยใช้ก๊าซ Sulfur hexafluoride (SF_6) และศึกษาผลกระทบที่มีต่อค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อแบบเฮเทอโรจังก์ชันบนฐานรองหลักเดี่ยวซิลิคอน



รูปที่ 1 โครงสร้างจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อแบบเฮเทอโรจังก์ชันบนพื้นผิวเรียบและ (ข) พื้นผิวขรุขระ

2. วิธีการทดลอง

การทดลองนี้ใช้แผ่นซิลิคอนผลึกเดี่ยวชนิดเอ็น (Single crystalline silicon n-type) หนา 100 ไมครอน ความต้านทานประมาณ 1-5 $\Omega\cdot\text{cm}$ มีความหนาประมาณ 180 μm เริ่มจากนำชิ้นงานไปกัดในสารละลาย KOH เพื่อทำให้พื้นผิวแผ่นซิลิคอนมีลักษณะขรุขระแบบพีระมิด จากนั้นนำชิ้นงานมาทำการกัดบนพื้นผิวของพีระมิดด้วยเทคนิคการกัดแบบปฏิกิริยาไอออน [4] ด้วยก๊าซ SF_6 โดยได้ทำการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลของก๊าซ SF_6 ในการทดลองนี้ ได้ควบคุมค่าความดันก๊าซคงที่ 20 mTorr ใช้กำลังไฟฟ้าในการกัดที่ 20 W และระยะเวลาที่ใช้ในการกัดคงที่ 7 นาที ระยะเวลาของการทดลองได้สรุปดังตารางที่ 1 หลังจากทำการกัดแล้วนำแผ่นซิลิคอนมาวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

นำแผ่นซิลิคอนที่ได้ทำการกัดพื้นผิวมาสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อแบบเฮเทอโรจังก์ชันที่มีโครงสร้าง Front grid/Indium tin oxide (ITO)/p- $\mu\text{c-SiO:H}$ /Intrinsic amorphous silicon oxide (i-a-SiO:H) /n-c-

Si/ n-type amorphous silicon (n-a-Si:H)/Back contact รูปจำลองโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อแบบเฮเทอโรจังก์ชันแสดงดังรูปที่ 1 (ข) จากนั้นทดสอบเพื่อเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้จากการกัดพื้นผิวด้วยเครื่องจำลองแสงอาทิตย์โดยใช้เงื่อนไขมาตรฐานที่ AM 1.5 มีความเข้มแสง 100 mW/cm^2 ภายใต้อุณหภูมิ 25 $^{\circ}\text{C}$

ตารางที่ 1 เงื่อนไขการกัดแผ่นซิลิคอนด้วยเครื่อง RIE

เงื่อนไข	จำนวน
อัตราการไหลของก๊าซ SF_6 (sccm)	10 - 30
ความดันก๊าซ (mTorr)	20
กำลังไฟฟ้า (W)	20
ระยะเวลา (นาที)	7

3. ผลการทดลอง

3.1 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวแผ่นซิลิคอน

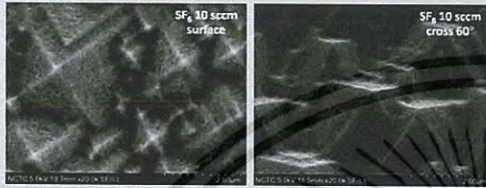
แผ่นซิลิคอนที่ทำการกัดในสารละลาย KOH จะทำให้ได้พื้นผิวที่มีลักษณะเป็นแบบพีระมิดที่มีขนาดเล็กและใหญ่ผสมกัน (Random pyramids) ดังแสดงในรูปที่ 2 พบว่าพื้นผิวของพีระมิดมีพื้นผิวที่เรียบ จากนั้นนำแผ่นซิลิคอนที่มีลักษณะในรูปที่ 2 มาทำการกัดพื้นผิวด้วยเทคนิคการกัดปฏิกิริยาไอออนด้วยก๊าซ SF_6 จากรูปที่ 3 จะพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซ SF_6 ที่ใช้ในการกัดจะทำให้พื้นผิวของพีระมิดมีลักษณะที่เปลี่ยนไป จากรูปที่ 3 (ก) พบว่าที่อัตราการไหลของก๊าซ SF_6 ที่ 10 sccm (Standard cubic centimeters per minute) ลักษณะพื้นผิวของพีระมิดมีความขรุขระคล้ายหลุมขนาดเล็กครอบคลุมทั้งพื้นผิว และเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซ SF_6 เท่ากับ 20 sccm จะทำให้สภาพพื้นผิวของพีระมิดมีความขรุขระและเกิดเป็นหลุมขนาดใหญ่ที่บริเวณยอดของพีระมิด ในขณะที่ปรับอัตราการไหลของก๊าซ SF_6 เพิ่มขึ้นเท่ากับ 30 sccm จะทำให้สภาพพื้นผิวของพีระมิดมีความขรุขระและเกิดเป็นหลุมขนาดใหญ่กระจายทั่วพื้นผิวของพีระมิด การเปลี่ยนแปลงพื้นผิวนี้เป็นผลมาจาก ไอออน F^+ ที่เกิดจากการแตกตัวของก๊าซ SF_6 ได้ทำปฏิกิริยากับ Si เกิดเป็น SiF_4 ดังนั้นเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นไอออน F^+ ส่งผลทำให้พื้นผิวของแผ่นซิลิคอนเกิดความขรุขระ มีรูพรุนคล้ายหลุมขนาดใหญ่ขึ้นครอบคลุมทั่วทั้งพื้นผิวซิลิคอน [5]

บทความวิจัย

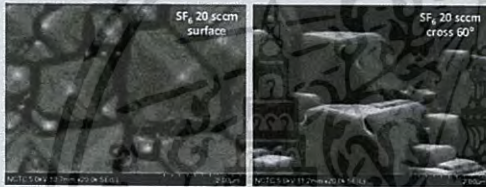
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 8

Proceedings of the 8th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2016 (EENET 2016)

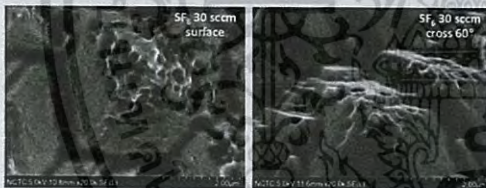
รูปที่ 2 ลักษณะพื้นผิวแผ่นซิลิคอนที่กัดด้วยสารละลาย KOH



(n)



(u)



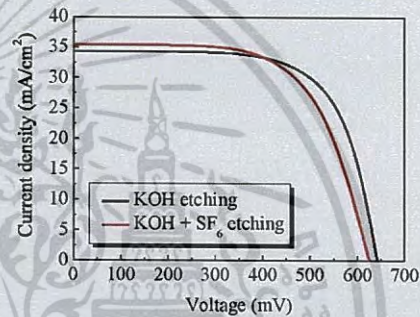
(k)

รูปที่ 3 ลักษณะพื้นผิวแผ่นซิลิคอนที่กัดด้วยเครื่อง RIE โดยใช้ก๊าซ SF_6 ที่อัตราการไหล (n) 10 sccm (u) 20 sccm และ (k) 30 sccm

3.2 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนที่เคลือบด้วยฟิล์มซิลิคอน

นำแผ่นซิลิคอนที่ได้จากการกัดในสารละลาย KOH ที่แสดงในรูปที่ 2 และแผ่นซิลิคอนที่ได้จากการกัดแบบปฏิกิริยาไอออนที่แสดงในรูปที่ 3 (n) ซึ่งมีลักษณะพื้นผิวที่เหมาะสมกับการนำมาสร้างเซลล์แสงอาทิตย์และวิเคราะห์การเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพ รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรและค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนที่เคลือบด้วยฟิล์มซิลิคอน

สร้างโดยใช้แผ่นซิลิคอนที่ผ่านการกัดพื้นผิวโดยใช้ก๊าซ SF_6 จะมีค่า J_{sc} เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้การกัดในสารละลาย KOH โดยค่า J_{sc} เพิ่มขึ้นจาก 34.3 mA/cm^2 เป็น 35.4 mA/cm^2 การเพิ่มขึ้นของค่า J_{sc} นั้นอาจเป็นผลมาจากพื้นผิวของฟิล์มมีความขรุขระมากขึ้นและทำให้มีการดูดกลืนแสงได้สูงขึ้น ในทางกลับกันค่า V_{oc} และค่า FF ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่กัดด้วย SF_6 พบว่ามีค่าลดลงเนื่องจากพื้นผิวของฟิล์มที่มีความขรุขระมากขึ้นส่งผลทำให้รอยต่อระหว่างแผ่นซิลิคอนกับชั้นฟิล์มบางซิลิคอนเกิดจุดบกพร่องขึ้นทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าลดลงเท่ากับ 14.2% [6] ซึ่งต่ำกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างบนแผ่นซิลิคอนที่กัดด้วยสารละลาย KOH ที่มีค่าประสิทธิภาพ 15.2% รายละเอียดค่าพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์สรุปดังตารางที่ 2



รูปที่ 4 ผลของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนที่เคลือบด้วยฟิล์มซิลิคอน

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ต่างๆของเซลล์แสงอาทิตย์ที่พื้นผิวต่างกัน

Sample	V_{oc} (mV)	J_{sc} (mA/cm^2)	FF	Eff (%)
KOH etching	641	34.3	0.68	15.2
KOH + SF_6 etching	624	35.4	0.64	14.2

4. สรุป

การกัดพื้นผิวแผ่นซิลิคอนบนพื้นผิวของฟิล์มซิลิคอนด้วยการใช้ก๊าซ SF_6 นั้นจะทำให้พื้นผิวฟิล์มมีความขรุขระคล้ายหลุมขนาดเล็กครอบคลุมทั้งพื้นผิว และเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซ SF_6 ให้สูงขึ้นจะทำให้สภาพพื้นผิวของฟิล์มมีความขรุขระและเกิดเป็นหลุมขนาดใหญ่กระจายทั่วพื้นผิวของฟิล์ม เมื่อนำแผ่นซิลิคอนที่ผ่านการกัดมาทำเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนที่เคลือบด้วยฟิล์มซิลิคอน พบว่า การกัดพื้นผิวโดยใช้ก๊าซ SF_6

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 8

Proceedings of the 8th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2016 (EENET 2016)

สามารถเพิ่มค่า J_{sc} ของเซลล์แสงอาทิตย์ให้สูงขึ้นแต่ในทางกลับกันค่า V_{oc} และค่า FF ของเซลล์แสงอาทิตย์กลับมีค่าที่ลดลง จากการวัดค่าประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้จากการกัดด้วยก๊าซ SF_6 จะมีค่าเท่ากับ 14.2% ($V_{oc}=624$ mV, $J_{sc}=35.4$ mA/cm² และ FF = 0.64)

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะนักวิจัยของห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ (STL) ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) ซึ่งคอยให้คำปรึกษาและอนุเคราะห์ในด้านเครื่องมือต่างๆ ของงานวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Johannes Peter Seif and et al, "Amorphous silicon oxide window layers for high-efficiency silicon heterojunction solar cells," J. Appl. Phys. School of Electrical, Computer & Energy Engineering, Arizona State University, Tempe, AZ, USA.
- [2] Charanpreet Sethi and et al, "Optimization of Surface Reflectance for Alkaline Textured Monocrystalline Silicon Solar Cell," International Journal of Computing Science and Communication Technologies, vol 5, no. 1, July 2012, ISSN 0974-3375
- [3] P. Papet and et al, "Pyramidal texturing of silicon solar cell with TMAH chemical anisotropic etching," Selected Papers from the Solar Cells and Solar Energy Materials Symposium -IMRC 2005 vol 90, Issue 15, 22 September 2006, Pages 2319-2328.
- [4] Jinsu Yoo and et al, "Solar Energy Materials and Solar Cells," 19th International Photovoltaic Science and Engineering Conference and Exhibition (PVSEC-19) Jeju, Korea, 9-13 November 2009 vol 95, Issue 1, January 2011, pp. 2-6.
- [5] M. REICHE and et al, "Modification of Si (100)-Surfaces by SF_6 Plasma Etching – Application to Wafer Direct Bonding," Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik, Halle, Germany.
- [6] Guorong Li and et al, "Influence of textured c-Si surface morphology on the interfacial properties of heterojunction silicon solar cells," Journal of Non-Crystalline Solids 358, 23 January 2012, pp. 2223-2226



นายชดศักดิ์ คนหนองบัว
ปริญญาตรี วท.บ. สาขาฟิสิกส์ สจล.
ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชา
วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ สจล.



นายสุทธชินันท์ เจริญเสถียรโชค
ผู้ช่วยนักวิจัยของ NECTEC ภายใน NSTDA
ทำงานวิจัยทางด้านเซลล์แสงอาทิตย์



นายปฐภาณ กรุดาค
ผู้ช่วยนักวิจัยของ NECTEC ภายใน NSTDA
ทำงานวิจัยทางด้านเซลล์แสงอาทิตย์



ดร.ทวีวัฒน์ กระจำงสังข์
นักวิจัยของ NECTEC ภายใน NSTDA
ทำงานวิจัยทางด้านเซลล์แสงอาทิตย์



ดร.จริญ ศรีธารชิตคุณ
นักวิจัยของ NECTEC ภายใน NSTDA
ทำงานวิจัยทางด้านเซลล์แสงอาทิตย์



ดร.กอบศักดิ์ ศรีประภา
นักวิจัยของ NECTEC ภายใน NSTDA
ทำงานวิจัยทางด้านเซลล์แสงอาทิตย์



ดร.วิฑูรย์ วิฑูรย์เรือง
ปัจจุบันดำรงตำแหน่งรองศาสตราจารย์ระดับ 9
ภาควิชา อิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายอดิศักดิ์ คนหนองบัว
วัน เดือน ปีเกิด	04 กุมภาพันธ์ 2535 ที่จังหวัดชัยภูมิ
ที่อยู่	49/1 หมู่ 9 ตำบลยางหวาย อำเภอคอนสวรรค์ จังหวัดชัยภูมิ 36140
ประวัติการศึกษา	2556 วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1.) สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ 2.) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อเฮเทอโร
ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์	[1] อดิศักดิ์ คนหนองบัว, สุทธินันท์ เจริญเสถียรโชค, ทวีวัฒน์ กระจ่างสังข์, อัศวิน หงส์สิงห์ทอง จรรย์ ศรีธาราธิคุณ, กอบศักดิ์ ศรีประภา และวิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง “การศึกษาการกัดฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอนด้วยปฏิกิริยาไอออนของก๊าซคาร์บอนเตตระฟลูออไรด์” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 7 หน้า 572-575, 27-29 พฤษภาคม พ.ศ. 2558 [2] อดิศักดิ์ คนหนองบัว, สุทธินันท์ เจริญเสถียรโชค, ปฏิภาณ กรุดตาด, ทวีวัฒน์ กระจ่างสังข์, จรรย์ ศรีธาราธิคุณ, กอบศักดิ์ ศรีประภา และวิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง “การกัดพื้นผิวซิลิคอนด้วยการกัดปฏิกิริยาไอออนเพื่อประยุกต์ใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อเฮเทอโรบนฐานรองผลึกเดี่ยวซิลิคอน” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 8 หน้า 625-628, 25-27 พฤษภาคม พ.ศ. 2559