

ผลของการสะท้อนแสงของผิวเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนที่มีลวดลายพีระมิด Effect of Reflectance on Pyramidal Surface of Silicon Solar Cell

กิตติศักดิ์ อมรสุนทรทวงศ์ ดร.ทิพย์วรรณ ฟังสุวรรณรักษ์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111 ถ.มหาวิทยาลัย อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000 โทร 0-8191-14175 โทรสาร 0-4422-4601 E-mail: kittisak.ee11@gmail.com

Kittisak Amonsuntawong^{*} Dr.Thipwan Fangsuwannarak

School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology

111 University Avenue, Nakhon Ratchasima 30000 Thailand Tel: 0-8191-14175 Fax: 0-4422-4601 E-mail: kittisak.ee11@gmail.com

บทคัดย่อ

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนที่มีประสิทธิภาพสูงจำเป็นต้องมีส่วนของกับดักแสง (Light trapping) การสร้างลวดลายพีระมิดแบบสุ่ม (Random pyramid texture) โดยการใช้อะซิดละลายเคมีเป็นวิธีหนึ่งที่ยอมรับใช้ในอุตสาหกรรมเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อลดปัญหาการสูญเสียแสงเนื่องจากการสะท้อนกลับ และเพิ่มโอกาสให้แสงตกกระทบผิวเซลล์มากขึ้น ในการศึกษาได้สร้างลวดลายพีระมิดบนผลึกเดี่ยวซิลิคอนด้วยกระบวนการทางเคมี เพื่อให้เกิดการกัดผิวแบบแอนนิโซโทรปิก (Anisotropic etching) โดยกระบวนการดังกล่าวได้ใช้อะซิดละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) และไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (IPA) สารละลายสามารถกัดผิวผลึกเดี่ยวซิลิคอนระนาบ (100) ให้รูปทรงผิวเป็นแบบพีระมิดขนาดไม่สม่ำเสมอ และมีการกระจายตัวที่ดี การสร้างลวดลายพีระมิดที่มีขนาด และการกระจายตัวที่เหมาะสมนั้นจะนำไปสู่การให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงที่มีค่าต่ำสุด และเป็นผลทำให้ค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์สูงขึ้นด้วย ในการศึกษาได้ทำการทดลองเปลี่ยนเงื่อนไขของอุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการกัด เพื่อให้ได้เงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด และให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง (%R) ต่ำที่สุด เมื่อทำการวัดด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ จากผลการวัดพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงที่ต่ำที่สุดเท่ากับ 8.31% การศึกษาโครงสร้างของพีระมิด ได้ทำการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM) จากผลการวัดพบว่าเงื่อนไขของกระบวนการกัดทางเคมีมีผลต่อค่าการกระจายตัว และค่าเฉลี่ยของขนาดพีระมิด ในการวิเคราะห์การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ ได้ใช้แบบจำลอง PC1D เพื่อหาความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพเชิงควอนตัม (Quantum efficiency) และพบว่าค่ากระแสลัดวงจร (Short circuit current, I_{sc}) มีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงมีค่าต่ำลง เป็นผลทำให้ค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเพิ่มสูงขึ้น

คำสำคัญ : เซลล์แสงอาทิตย์; ลวดลาย; กับดักแสง; สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง; โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์; ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์

Key words : Solar cell; Texturing; Light trapping; Reflectance; KOH; IPA

Abstract

High-efficiency silicon solar cell needs to consider a light trapping scheme. Photovoltaic production widely uses an aqueous chemical etching technique to reduce the optical loss as reflectivity and have additional opportunities for a light-ray striking on the surface of silicon. In this study, pyramidal texturing of monocrystalline silicon in (100) orientation is anisotropically done in potassium hydroxide solution and additive isopropyl alcohol (IPA). The results show the uniformity of the random square-based pyramids. The optimization of the pyramid size and uniformity leads to a minimize reflectivity on the silicon surface and subsequently higher efficiency of solar cell. In this paper, we investigate the influence of the etching process under the difference of temperature and time etching conditions. The optimized solution condition can be led to the minimize effect of reflectivity. Optical reflection measurements have been performed by using an integrating sphere UV-VIS spectrophotometer. The results show an average weighted reflectance (%R) of 8.31%. The surface morphology of the textured silicon wafers imaged by scanning electron microscopy (SEM) shows the influence of the solution condition on average pyramid size. The performance of the pyramidally textured solar cell is simulated by the PC1D computer program based on parameters measured from

reflectivity measurements. The simulation results show that efficiencies higher can be achieved due to an increase of short circuit current (I_{sc}) if the effects of reflectance on cell surface minimize.

1. บทนำ

การสร้างกับดักแสงลดการสูญเสียทางแสงเนื่องมาจากการสะท้อนกลับของแสงที่ผิวหน้าเซลล์ โดยกับดักแสงทำหน้าที่ควบคุมทิศทางของแสงภายในผลึกเดี่ยวซิลิคอน เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดการรั่วไหลของแสง และช่วยเพิ่มโอกาสในการดูดกลืนแสงได้มากขึ้น [1] ทำให้กระแสตรงจมีค่าเพิ่มขึ้น เป็นผลทำให้ค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับผลึกเดี่ยวซิลิคอนที่มีผิวหน้าเรียบ

การสร้างลดการสูญเสียแบบสุ่มบนผลึกเดี่ยวซิลิคอนนั้นนิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีการกัดผิวแบบแอนนิโซโทรปิก ซึ่งได้ลดการสูญเสียทางแสงที่ผิวหน้าเซลล์ (หน่วยไมครอน) กระจายตัวอยู่บนผิวหน้าผลึกเดี่ยวซิลิคอน แม้ว่าเทคนิคการกัดผิวมีด้วยกันหลายแบบเช่น การกัดผิวด้วยก๊าซ หรือไอกรด (Dry etching) และการกัดผิวด้วยสารละลายเคมี (Wet etching) เป็นต้น การกัดผิวด้วยสารเคมีประเภทสารประกอบอัลคาไลน์ ถือเป็นวิธีการพื้นฐานในการสร้างผิวขรุขระแบบทรงพีระมิด เนื่องจากมีกระบวนการผลิตที่ง่าย และต้นทุนต่ำ โดยสารประกอบอัลคาไลน์นั้นมีส่วนผสมเช่น สารประกอบโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide solution, KOH) [2], สารประกอบเตตระเมทิลไฮดรอกไซด์ (Tetramethyl hydroxide solution, TMAH) [3], และสารประกอบโซเดียมคาร์บอเนต (Sodium carbonate solution, Na_2CO_3) [4] เป็นต้น ในบทความนี้ได้ใช้สารละลาย KOH และการเติม IPA ในการสร้างลดการสูญเสียแบบสุ่ม เนื่องจากเป็นสารเคมีที่มีต้นทุนต่ำ และทำให้เกิดการกระจายตัวของพีระมิดที่ดี มีการศึกษาลักษณะทางโครงสร้างพีระมิด จากการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน อีกทั้งได้มีการศึกษาคุณสมบัติทางแสงคือ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงด้วยเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ในโหมด Integrating sphere

ผิวลดการสูญเสียแบบสุ่มโดยใช้สารละลาย KOH จะให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงต่ำที่สุดนั้น ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการผลิตที่เหมาะสม เช่น อุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการกัดผิว ซึ่งเวลาที่ใช้ในกระบวนการมีความสำคัญในการผลิตเชิงพาณิชย์มาก ซึ่งพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจะนำไปสู่ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงที่มีค่าต่ำที่สุด และนำไปคำนวณเพื่อหาประสิทธิภาพเชิงควอนตัม (Quantum Efficiency, QE) ด้วยแบบจำลอง PC1D และคำนวณหาประสิทธิภาพการทำงานเซลล์แสงอาทิตย์ต่อไป

2. ขั้นตอนการผลิต

กระบวนการสร้างผิวลดการสูญเสียแบบสุ่มในบทความนี้ใช้ผลึกเดี่ยวซิลิคอนชนิด CZ, p-type, ความต้านทาน 2.4 ohm.cm, ขนาด 2 นิ้ว และหนา 270 μ m. ผิวขัดมัน 1 ด้าน โดยในขั้นตอนแรกคือการทำ ความสะอาดผิวหน้าตัวอย่างด้วยวิธี RCA [5] เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ (Organic) และไอออนของโลหะ (Metal ions) ออกจากผิวซิลิคอน เพื่อให้กระบวนการกัดผิวซิลิคอนมีประสิทธิภาพมากขึ้น ตัวอย่าง

ทั้งหมดถูกนำไปแช่ลงในสารละลายกรด 5%HF นาน 1 นาที เพื่อกำจัดเนทีฟออกไซด์ (Native oxide) [6] ก่อนจะนำไปกัดผิวด้วยสารละลาย KOH/IPA ต่อไป ในขั้นตอนการกัดผิวทำในอ่างเพลลอน ภายใต้การกวนด้วยแท่งแม่เหล็ก โดยมีฝาปิดเพื่อป้องกันการระเหยออกของสารละลาย จากนั้นทำการเตรียมสารละลายที่ใช้กัดโดยมีเงื่อนไขการกัดคือ 2.9%KOH+10%IPA+DI water (การเติม IPA ในการทดลองนี้เพื่อกำจัดฟองไฮโดรเจนบนผิวหน้าซิลิคอนที่เกิดขึ้นในระหว่างขบวนการกัดทางเคมี ซึ่งเรียก IPA ว่าเป็น additive surfactant [7]) ในการทดลองลำดับแรกได้ทำการทดลองเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตั้งแต่ 60-90°C แต่กำหนดเวลาการกัดให้คงที่เท่ากับ 40 นาที เงื่อนไขดังกล่าวแสดงในตารางที่ 1 โดยอุณหภูมิที่กำหนดสามารถมีค่าเบี่ยงเบนได้ไม่เกิน $\pm 1^\circ C$ ด้วยชุดควบคุมอุณหภูมิ สำหรับทุกๆ เงื่อนไข ภายหลังจากขบวนการกัดได้นำตัวอย่างทั้งหมดมาล้างด้วยน้ำ DI ไหลผ่านประมาณ 10 นาที

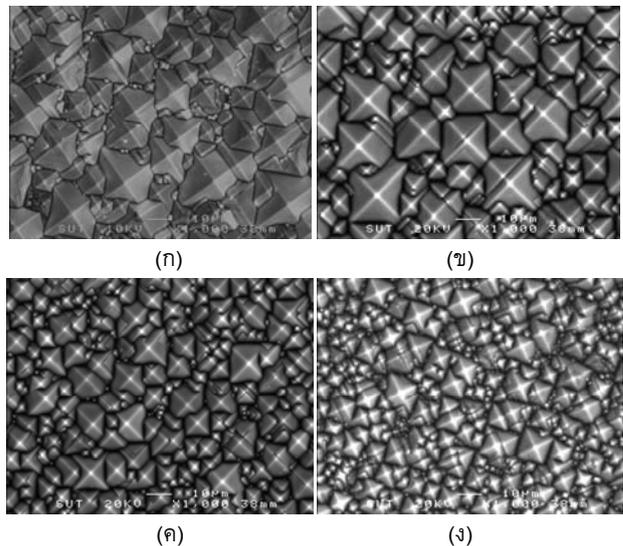
ตารางที่ 1 ตัวอย่างภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

ตัวอย่าง	เงื่อนไข		
K-01	2.9%KOH+10%IPA	90°C	40 นาที
K-03		80°C	
K-04		70°C	
K-05		60°C	

3. ผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

3.1 คุณสมบัติทางโครงสร้างลดการสูญเสียแบบสุ่ม

รูปที่ 1 แสดงภาพถ่ายผิวด้านบนของผิวซิลิคอนระนาบ (100) ที่ถูกกัดด้วยสารละลาย KOH/IPA ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน 20kV กำลังขยาย 1000 เท่า



รูปที่ 1 ภาพถ่ายผิวด้านบนด้วยกล้อง SEM ของผลึกเดี่ยวซิลิคอน โครงสร้างพีระมิดแบบสุ่มที่ทำการกัดด้วยสารละลาย KOH (ก) ที่ 90°C (ข) ที่ 80°C (ค) ที่ 70°C (ง) ที่ 60°C

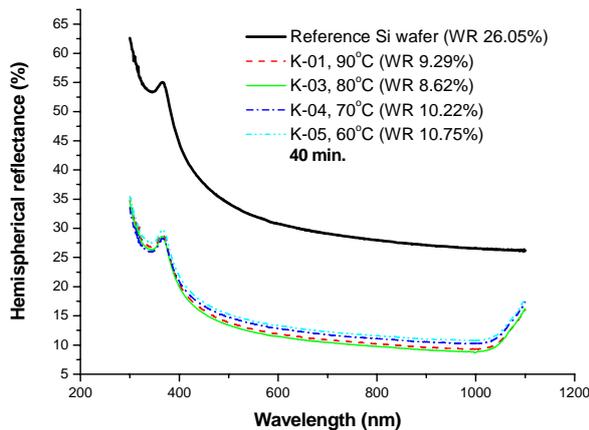
เราพบว่าลดการสูญเสียแบบสุ่มได้ก่อตัวขึ้นที่ผิวของซิลิคอนระนาบ (100) นั้นเกิดจากการกัดในทิศทางที่ไม่เท่ากัน ปริมาณ และการกระจายตัวของพีระมิดที่เกิดขึ้นนั้นมีปัจจัยมาจากฟองก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นที่ผิวซิลิคอนในระหว่างกระบวนการกัดผิวทางเคมี [7] โดยทั่วไป

ขนาดของฟองไฮโดรเจนเสมือนเป็นหน้าปกกลุ่มผิวซิลิคอนซึ่งมีขนาด 1-3 μm เราสามารถกำจัดปริมาณของฟองไฮโดรเจนได้จากการเติมสารละลายประเภท surfactant เช่น IPA ดังนั้นเมื่อต้องการให้ผิวซิลิคอนมีความขรุขระกับโครงสร้างพีระมิดเล็ก ๆ เราจำเป็นต้องควบคุมการเกิดฟองไฮโดรเจนให้เหมาะสมภายใต้อุณหภูมิที่เหมาะสม

ในเงื่อนไขแรก ได้ทำการเตรียมสารละลายที่ประกอบด้วย 2.9%KOH 10%IPA และกำหนดเวลาที่ใช้ในกระบวนการกัด 40 นาที ภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตั้งแต่ 60-90°C และเมื่อนำมาวัดผลทางโครงสร้างด้วยกล้อง SEM แสดงผลดังรูปที่ 1 เราพบว่าที่อุณหภูมิ 80-90°C ดังรูป 1(ก) และ (ข) พีระมิดที่เกิดขึ้นมีขนาดใหญ่กว่าที่อุณหภูมิ 60-70°C ดังรูป 1(ค) และ (ง) เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงทำให้ฟองก๊าซจำนวนมากนั้นแตกออกไป และนำไปสู่การกัดในทรงพีระมิดที่มีขนาดไม่สม่ำเสมอ ในขณะที่อุณหภูมิต่ำเป็นผลทำให้เกิดการกระจายตัวของพีระมิดที่สม่ำเสมอมากกว่า (พีระมิดมีขนาดใกล้เคียงกัน) กว่าที่อุณหภูมิสูง

3.2 ผลรวมของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงกับแบบ Integrating sphere

รูปที่ 2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 300-1100 nm ด้วยเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ในโหมด Integrating sphere ที่เงื่อนไขการผลิตภายใต้อุณหภูมิตั้งแต่ 60-90°C



รูปที่ 2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 300-1100 nm ภายใต้อุณหภูมิต่างๆ

จากรูปที่ 2 เราพบว่าที่เงื่อนไข 2.9%KOH, 10%IPA, 80°C, 40 นาที ผิวซิลิคอนมีรูปทรงดังรูป 1 (ข) ได้ให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงต่ำที่สุดมีค่าเท่ากับ 8.62% เมื่อเปรียบเทียบกับซิลิคอนผิวเรียบมีการสะท้อนแสงที่ประมาณ 26% อย่างไรก็ตามในช่วงความยาวคลื่นยาวและช่วงคลื่นสั้นนั้นผิวทรงพีระมิดแสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงมีแนวโน้มสูงขึ้น

3.3 กระบวนการกัดด้วยสารละลาย KOH/IPA ในเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด

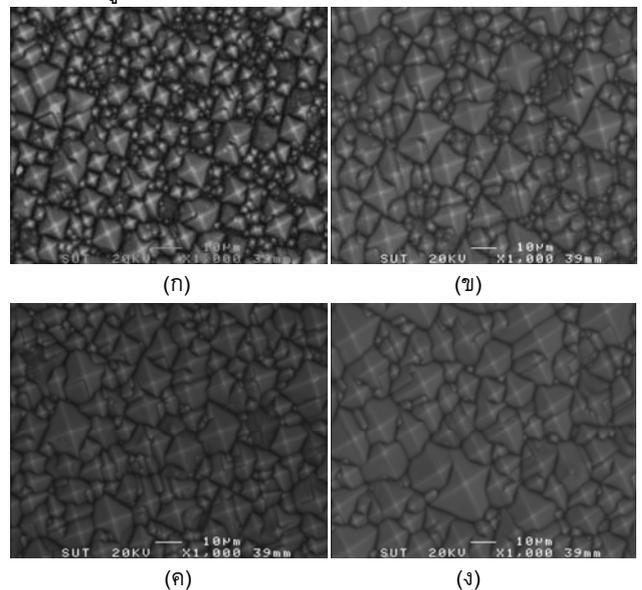
ในการทดลองนี้ได้ศึกษากระบวนการกัดด้วยสารละลาย KOH/IPA เพื่อให้ได้ผิวของซิลิคอนเกิดการสะท้อนแสงกลับมีค่าต่ำสุดในเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด และใช้เวลาที่สั้นที่สุด ดังนั้นเราได้กำหนดเงื่อนไขของอุณหภูมิที่ 80°C เนื่องจากเป็นอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการ และได้ผล

ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงต่ำที่สุด และเปลี่ยนเงื่อนไขของเวลาที่ใช้ในกระบวนการตั้งแต่ 20-60 นาที แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ตัวอย่างภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงของเวลาที่ใช้

ตัวอย่าง	เงื่อนไข		
A-01	2.9%KOH+10%IPA	20 นาที	80°C
A-02		30 นาที	
A-03		50 นาที	
A-04		60 นาที	

รูปที่ 3 แสดงภาพถ่ายผิวด้านบนของผลึกเดี่ยวซิลิคอนโครงสร้างพีระมิดแบบสุ่ม ที่ใช้เวลาดังๆ กัน จากรูปถ่ายเราพบว่ากระบวนการกัดผิวที่ใช้เวลาน้อยกว่าได้ให้การกระจายตัวของพีระมิดที่บางตากว่า และมีขนาดเล็กกว่า แสดงดังรูปที่ 3(ก) และ (ข) เนื่องจากพีระมิดมีการสร้างตัวที่ไม่สมบูรณ์ทั่วทั้งผิวหน้าแผ่นซิลิคอน ในทางตรงกันข้ามถ้ากระบวนการกัดผิวใช้เวลามากขึ้น เราพบว่าการกระจายตัวของพีระมิดมีความหนาแน่นและมีความสม่ำเสมอมากขึ้น อีกทั้งยังมีขนาดใหญ่กว่า ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3(ค) และ (ง)

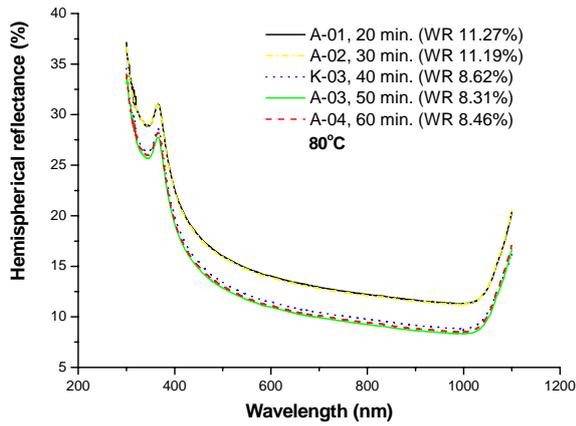


รูปที่ 3 ภาพถ่ายผิวด้านบนด้วยกล้อง SEM ของผลึกเดี่ยวซิลิคอนโครงสร้างพีระมิดแบบสุ่ม โดยควบคุมอุณหภูมิที่ 80°C (ก) ที่ 20 นาที (ข) ที่ 30 นาที (ค) ที่ 50 นาที (ง) ที่ 60 นาที

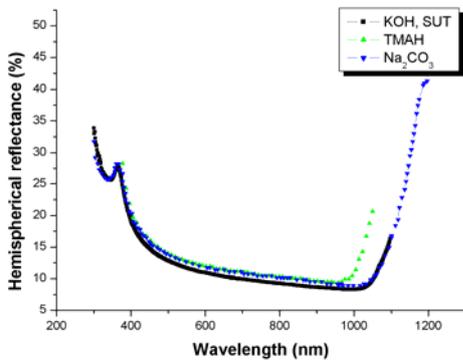
รูปที่ 4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงต่ำที่สุดมีค่าเท่ากับ 8.31% ที่เวลา 50 นาที อุณหภูมิ 80°C ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่ดีที่สุดของกระบวนการกัดผิวหน้าซิลิคอนด้วยสารละลาย KOH/IPA ของการทดลองนี้

รูปที่ 5 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงที่ดีที่สุดของการทดลองนี้เปรียบเทียบกับเงื่อนไขการกัดผิวที่ใช้กับสารละลายเคมี TMAH/IPA (2%TMAH, 8%IPA, 80°C, 30 นาที) [3] และ Na₂CO₃/NaHCO₃ (20%Na₂CO₃, 4%NaHCO₃, 90°C, 20 นาที) [4] จะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงที่ได้จากสารละลายเคมี KOH/IPA (2.9%KOH, 10%IPA, 80°C, 50 นาที) ของการทดลองนี้มีค่าต่ำที่สุด

$$EQE = IQE[1 - R] \quad (2)$$



รูปที่ 4 กราฟสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงที่ได้จากกระบวนการกัดผิวที่เงื่อนไขเวลาตั้งแต่ 20 ถึง 60 นาที ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 300-1100 nm



รูปที่ 5 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของผลึกเดี่ยวซิลิคอนที่ใช้สารละลายแตกต่างกัน ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 300-1100

ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงที่ได้จากการทดลองข้างต้น ถือเป็นตัวแปรที่สำคัญที่ใช้ในการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพเชิงควอนตัมกับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง ด้วยแบบจำลอง PC1D ค่าประสิทธิภาพเชิงควอนตัมคือจำนวนของคู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้นมาเมื่อมีแสงโฟตอนตกกระทบ และสามารถพิจารณาได้เป็น 2 ประเภทคือ ประสิทธิภาพเชิงควอนตัมภายนอก (External quantum efficiency, EQE) คือ ประสิทธิภาพของการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ที่พิจารณาผลของการสะท้อนแสงที่ผิวด้านบน แสดงดังสมการที่ (1) [8]

$$EQE = \frac{hc}{q\lambda} SR \quad (1)$$

โดยที่ SR คือ สเปกตรัมการตอบสนอง, $hc/q\lambda$ เท่ากับ 1.24 เมื่อพิจารณาให้ความยาวคลื่น (λ) มีหน่วยเป็น μm

ประสิทธิภาพเชิงควอนตัมภายใน (Internal quantum efficiency, IQE) คือ ประสิทธิภาพการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล เมื่อพิจารณาว่าไม่มีการสะท้อนแสงกลับที่ผิวด้านบนซึ่งมีความสัมพันธ์กับ EQE ดังสมการที่ (2)

โดยที่ R คือสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงที่ผิวของเซลล์แสงอาทิตย์ จากความสัมพันธ์เราพบว่า EQE และ IQE มีความเกี่ยวข้องกับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง ดังนั้นเราจึงได้นำค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงที่ดีที่สุดไปทำการคำนวณหาประสิทธิภาพเชิงควอนตัมด้วยแบบจำลอง PC1D ต่อไป

3.3 การวิเคราะห์การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยแบบจำลอง PC1D

แบบจำลอง PC1D คือโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณ หรือตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ และที่สำคัญกว่านั้นแบบจำลอง PC1D ถูกใช้ในการออกแบบอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำโดยเฉพาะเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อให้คำนวณหาประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน

เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ได้จากเงื่อนไขของกระบวนการกัดที่ดีที่สุดมาคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสลัดวงจรกับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง และค่าประสิทธิภาพเชิงควอนตัม เพื่อนำไปสู่ค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน โดยมีแบบจำลองของโครงสร้างเซลล์ในแบบ $n^+/p/p^+$ และเมื่อไม่พิจารณาชั้นป้องกันการสะท้อนแสงกลับ (ARC) และชั้นออกไซด์พาสซีเวชัน กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่จำเป็นในการคำนวณด้วยแบบจำลอง PC1D ดังตารางที่ 3

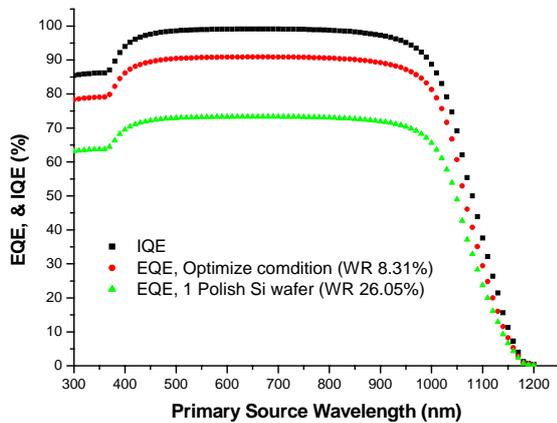
ตารางที่ 3 พารามิเตอร์ของแบบจำลอง PC1D เพื่อนำไปคำนวณหาประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน

Cell Parameters	CZ Cell
Device area (cm^2)	100
Thickness (μm)	270
Texture angle (degrees)	65
Texture depth (μm)	10
Front, Rear Reflectance (%)	8.31
τ_{bulk} (μs)	100
FSRV (cm/s)	10^5
BSRV (cm/s)	10^5
1 st front diff. (cm^{-3})	3×10^{18}
1 st rear diff. (cm^{-3})	10^{20}
V_{oc} (mV)	582.8
J_{sc} (mA/cm^2)	37.17
P_{mp} (W)	1.54
FF (%)	0.71
Efficiency (%)	15.4

จากตารางที่ 3 ได้นำค่าพารามิเตอร์ต่างๆ มาคำนวณด้วยแบบจำลอง PC1D แล้วพบว่า เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงมีค่าต่ำลงทำให้ค่ากระแสลัดวงจรมีค่าเพิ่มขึ้น และเป็นผลให้ค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูงสุดมีค่า 15.4% ที่ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงต่ำสุด 8.31%

รูปที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบผลของ EQE ที่ความยาวคลื่นช่วง 300-1200 nm ของแผ่นซิลิคอนที่มีผิวลวดลายพีระมิดภายใต้เงื่อนไขการกัดที่ดีที่สุด กับแผ่นซิลิคอนที่มีผิวเรียบ พบว่าแผ่นซิลิคอนที่มีผิวลวดลายพีระมิดให้ค่า EQE สูงกว่าแผ่นซิลิคอนที่มีผิวเรียบ 16%

เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงที่ต่ำกว่า (ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานมีค่าสูงสุดเมื่อ IQE มีค่าใกล้เคียงกับค่า EQE) และนอกจากนี้ยังพบว่าในช่วงความยาวคลื่นยาวค่า IQE และ EQE มีค่าลดลงเนื่องจากเกิดการสูญเสียจากการสะท้อนกลับของแสงมากขึ้น และเกิดการสูญเสียเนื่องจากการรวมตัวใหม่ของคูพาหะที่บริเวณเนื้อวัสดุ (Bulk Recombination) ส่วนที่ความยาวคลื่นสั้นค่า IQE และ EQE มีค่าลดลง เนื่องจากผลของการสะท้อนกลับบางส่วน โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลของการรวมตัวใหม่ของคูพาหะที่ผิว (Surface) แผ่นผลึก



รูปที่ 6 กราฟเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพเชิงควอนตัมที่ความยาวคลื่นช่วง 300-1200 nm

แบบจำลอง PC1D จะประมวลผล และแสดงค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์ได้อย่างถูกต้องยิ่งขึ้นนั้น เราจำเป็นต้องแทนค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ได้จากการวัดจริง

4. สรุป

บทความนี้ได้แสดงถึงกระบวนการสร้างกับดักแสงลดสูญเสียที่ระมัดระวัง โดยวิธีการกัดผิวหน้าแบบแอนไอโซโทรปิกบนผลึกเดี่ยวซิลิคอนด้วยสารละลาย KOH/IPA ซึ่งในบทความนี้ได้ทำการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขของอุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในกระบวนการกัดผิว ทำให้ได้เงื่อนไขของกระบวนการกัดผิวที่ดีที่สุดคือ 2.9%KOH, 10%IPA, 80°C, 50 นาที โดยผลที่ได้จากการกัดนี้ทำให้เกิดลดสูญเสียที่ระมัดระวังที่มีขนาด และการกระจายตัวที่เหมาะสม ซึ่งลักษณะทางโครงสร้างนี้นำไปสู่ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงที่ต่ำที่สุด 8.31% และเมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงที่ได้จากการทดลองนี้ไปประมวลผลด้วยแบบจำลอง PC1D ทำให้ได้ค่าประสิทธิภาพเชิงควอนตัมมีค่าสูงขึ้น ซึ่งนำไปสู่ค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานเท่ากับ 15.4%

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติประจำปีงบประมาณ 2552 และขอขอบคุณ คุณอนุชิต เรืองวิทย์พานนท์ อาจารย์เครื่องมือ 1 (F1) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้การสนับสนุนการใช้เครื่องกล่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน

เอกสารอ้างอิง

1. P. Campbell and M. A. Green, "Light trapping properties of pyramidally textured surfaces", J. Appl. Phys. 62, pp. 243-249 (1987).
2. D. L. King, M. E. Buck, Proceedings of the 22th IEEE PVSC, Las Vegas, NV, USA, pp. 303-308 (1991).
3. P. Papet, O. Nichiporuk, A. Kaminski, Y. Rozier, J. Kraiem, J. F. Lelievre, A. Chaumartin, A. Fave and M. Lemiti, "Pyramidal texturing of silicon solar cell with TMAH chemical anisotropic etching", Solar energy materials & Solar cell 90, pp. 2319-2328 (2006).
4. B. Vallejo, M. Gonzalez-Manas, J. Martinez-Lopez and M. A. Cablero, "On the texturization of monocrystalline silicon with sodium carbonate solution", Solar energy 81, pp. 565-569 (2007).
5. W. Kern, Handbook of Semiconductor Cleaning Technology, Noyrs Publishing : Park Ridge, NJ, (1993).
6. W. Kern and J. Vossen, Thin film processes, Academic Press : Nw York, (1978).
7. E. D. Palik et al., "Etching roughness for (100) silicon surfaces in aqueous KOH", J. Appl. Phys. 70, pp. 3291-3300 (1991).
8. S. R. Wenham, M. A. Green, M. E. Watt and R. Corkish, Applied Photovoltaics, 2nd edition, Earthscan, (2007).