

รายงานการวิจัย

การลดการสะท้อนแสงที่ผิวหน้าเซลล์ด้วย Anisotropic Texture Etching
เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึก
เดี่ยวซิลิคอน

**Reduction of Reflection Loss by Using Anisotropic Texture Etching
for a Boost in the Conversion Efficiency of Mono-Crystalline Silicon**

ผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ทิพย์วรรณ พึ่งสุวรรณรักษ์

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2552

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

สิงหาคม 2553

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ประจำปีงบประมาณ 2552 ผู้วิจัย
ขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

พิพจน์วรรณ พึ่งสุวรรณรักษ์

2553

บทคัดย่อ

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนที่มีประสิทธิภาพสูงจำเป็นต้องมีส่วนของกับดักแสง (Light trapping) การสร้างลวดลายพีระมิตแบบสุ่ม (Random pyramid texture) โดยการใช้สารละลายเคมีเป็นวิธีหนึ่งที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อลดปัญหาการสูญเสียทางแสงเนื่องจากการสะท้อนกลับ และเพิ่มโอกาสให้แสงตกกระทบผิวเซลล์มากขึ้น งานวิจัยนี้ได้สร้างลวดลายพีระมิตบนผลึกเดี่ยวซิลิคอนด้วยกระบวนการทางเคมี เพื่อให้เกิดการกัดผิวแบบแอนไอโซโทรปิก (Anisotropic etching) โดยกระบวนการดังกล่าวได้ใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) และไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (IPA) สารละลายสามารถกัดผิวผลึกเดี่ยวซิลิคอนระนาบ (100) ให้รูปทรงผิวเป็นแบบพีระมิตขนาดไม่สม่ำเสมอ และมีการกระจายตัวที่ดี การสร้างลวดลายพีระมิตที่มีขนาด และการกระจายตัวที่เหมาะสมนั้นจะนำไปสู่การให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงที่มีค่าต่ำสุด และเป็นผลทำให้ค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์สูงขึ้นด้วย

ในการศึกษานี้ได้ทำการทดลองเปลี่ยนเงื่อนไขของอุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการกัด เพื่อให้ได้เงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด และให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง (%R) ต่ำที่สุด เมื่อทำการวัดด้วยเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ จากผลการวัดพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงที่ต่ำที่สุดเท่ากับ 14%WR การศึกษาโครงสร้างของพีระมิตได้ทำการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM) จากผลการวัดพบว่าเงื่อนไขของกระบวนการกัดทางเคมีมีผลต่อค่าการกระจายตัว และค่าเฉลี่ยของขนาดพีระมิต ในการวิเคราะห์การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ใช้แบบจำลอง PC1D เพื่อหาความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพเชิงควอนตัม (Quantum efficiency) และพบว่าค่ากระแสลัดวงจร (Short circuit current, I_{sc}) มีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงมีค่าต่ำลง เป็นผลทำให้ค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเพิ่มสูงขึ้น

Abstract

High-efficiency silicon solar cell needs to consider a light trapping scheme. Recently, photovoltaic production, specifically an aqueous chemical etching technique is widely used to reduce the optical loss as the result of reflectivity. In addition, this technique enhances the opportunities for a light-ray striking on the surface of silicon. In this study, pyramidal texturing of monocrystalline silicon in (100) orientation was anisotropically done by using potassium hydroxide solution and additive isopropyl alcohol (IPA). The results showed the uniformity of the random square-based pyramids. The optimization of the pyramid size and uniformity led to a minimize reflectivity on the silicon surface and subsequently improve the efficiency of solar cell.

In this current study, the influence of the etching process under the difference of temperature and time etching conditions were investigated. The optimized solution condition can lead to the minimize effect of reflectivity. Optical reflection measurements were performed by using an integrating sphere UV-VIS spectrophotometer. The results showed an average weighted reflectance (%R) of 14%WR. The surface morphology of the textured silicon wafers imaged by scanning electron microscopy (SEM) showed the influence of the solution condition on average pyramid size. The performance of the pyramidally textured solar cell was simulated by using the PC1D computer program based on parameters measured from reflectivity measurements. It was found that the higher of short circuit current when the lower the reflectivity of the solar cell. Therefore, higher efficiencies can be achieved due to a minimization of reflectance on cell surface.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อ	ข
Abstract	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	3
บทที่ 2 พฤติกรรมของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อ $p-n$	
2.1 บทนำ	4
2.2 อิทธิพลของแสงต่อเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อ $p-n$	4
2.3 พารามิเตอร์ทางเอ๊าท์พุทของเซลล์แสงอาทิตย์	11
2.4 ข้อจำกัดค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน และการสูญเสียในเซลล์แสงอาทิตย์	12
2.4.1 การสูญเสียทางแสง	12
2.4.2 คุณสมบัติของแสงแบบ Lambertian	15
2.4.3 รูปทรงของผิวขรุขระเพื่อการกักแสง	17
2.4.4 ประสิทธิภาพเชิงควอนตัมภายใน	20
บทที่ 3 กระบวนการสกัดผิวซิลิคอนแบบ Anisotropic ด้วยสารละลาย	
3.1 บทนำ	22
3.2 รูปแบบการสกัดผิวซิลิคอนด้วยสารละลาย	22
3.3 ผลกระทบของการสกัดในลักษณะ Anisotropic	23
3.3.1 ส่วนผสมอะคาไลน์ (Alkaline solutions)	24
3.3.2 สารละลาย KOH	25
3.3.3 กลไกการสกัด	26

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า	
3.4	ขั้นตอนและวิธีการสกัดแผ่นซิลิคอนแบบ Anisotropic ด้วยสารละลาย KOH	27
บทที่ 4	การศึกษาลักษณะทางโครงสร้าง และทางแสงของแผ่นฐานซิลิคอนที่ถูกสกัดด้วยสารละลาย KOH ที่เติม IPA	
4.1	บทนำ	31
4.2	หลักการทำงานของเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)	31
4.3	หลักการทำงานของเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer	35
4.4	ผลการวัดลักษณะทางโครงสร้างของผิวซิลิคอน	39
4.5	ผลการวัดสมบัติทางแสง	44
4.6	การทำเงื่อนไขการผลิตที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ค่าการสะท้อนแสงต่ำสุด	45
บทที่ 5	การวิเคราะห์การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยแบบจำลอง PC1D	
5.1	บทนำ	49
5.2	วิเคราะห์การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยแบบจำลอง PC1D	49
บทที่ 6	สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ	
6.1	บทนำ	52
6.2	สรุปผลการวิจัย	52
6.3	ข้อเสนอแนะ	53
บรรณานุกรม		54
ภาคผนวก		
ก	สมบัติพื้นฐานของซิลิคอน	56
ข	Air Mass 1.5 Global Spectrum	60
ค	สมบัติพื้นฐานทางแสงของซิลิคอน	61
ง	สมบัติพื้นฐานทางฟิสิกส์ของซิลิคอน	66
ประวัติผู้วิจัย		67

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1	เงื่อนไขการสกัดผิว Si ซิลิคอนด้วยสารละลาย KOH ที่มีการเติม IPA ที่เวลาคงที่ 40 นาที 29
ตารางที่ 4.1	ขนาดของพื้นที่ฐานพีระมิด ของ K-01 ที่อุณหภูมิ 90 °C 42
ตารางที่ 4.2	ขนาดของพื้นที่ฐานพีระมิด ของ K-02 ที่อุณหภูมิ 80 °C 42
ตารางที่ 4.3	ขนาดของพื้นที่ฐานพีระมิด ของ K-03 ที่อุณหภูมิ 70 °C 42
ตารางที่ 4.4	ขนาดของพื้นที่ฐานพีระมิด ของ K-04 ที่อุณหภูมิ 60 °C 42
ตารางที่ 4.5	ผลการสะท้อนแสงภายใต้เงื่อนไขของอุณหภูมิในกระบวนการผลิต 45
ตารางที่ 4.6	ผลการสะท้อนแสงภายใต้เงื่อนไขของเวลาในกระบวนการผลิต 46
ตารางที่ 5.1	พารามิเตอร์ของแบบจำลอง PC1D เพื่อนำไปคำนวณหาค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน 49

สารบัญรูปรูปภาพ

รูปที่		หน้า
รูปที่ 2.1	(ก) รอยต่อพีเอ็นที่อยู่ในสภาวะสมดุล (ข) สนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อพีเอ็นของสารกึ่งตัวนำที่ภายใต้สภาวะมืด	5
รูปที่ 2.2	กราฟ Semi-log ของการกระจายตัวของปริมาณพาหะ ในสภาวะมืด	6
รูปที่ 2.3	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า และแรงดันไบอัสของเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาวะมืด	8
รูปที่ 2.4	ไดอะแกรมแถบพลังงานของรอยต่อ $p-n$ ที่อยู่ในสภาวะได้รับแสงตกกระทบที่ผิว	9
รูปที่ 2.5	กราฟ Semi-log ของการกระจายตัวของปริมาณพาหะ ในสภาวะสว่าง	9
รูปที่ 2.6	คุณลักษณะ I-V ของไดโอดรอยต่อ $p-n$ ภายใต้สภาวะมืด และสภาวะได้รับแสง	10
รูปที่ 2.7	กราฟ I-V หัวไปในควอดแดนท์ที่ 1 แสดงจุดกระแสลัดวงจร (I_{sc}) และแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (V_{oc}) รวมถึงเส้นกราฟของกำลังไฟฟ้าเอาท์พุทและจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (P_{mp})	11
รูปที่ 2.8	บริเวณที่เกิดการสูญเสียทางแสงของเซลล์แสงอาทิตย์: (1) การบังแสงจากกลายโลหะด้านหน้า (2) การสะท้อนที่ผิวเซลล์ด้านบน (3) การสะท้อนกลับของแสงที่ผิวโลหะด้านหลัง	13
รูปที่ 2.9	การใช้หลักการของ <i>a quarter antireflection</i> เพื่อจัดการกับการสะท้อนกลับของแสงที่ผิว	13
รูปที่ 2.10	การสะท้อนแสงที่ผิวซิลิคอนที่สัมผัสกับอากาศ โดยมีชั้นป้องกันการสะท้อน ($n_1 = 1.9$) และในกรณีที่มีผิวซิลิคอนสัมผัสกับกระจกและมีชั้นป้องกันการสะท้อน $n_1 = 2.3$	14
รูปที่ 2.11	(ก) รูปทรงพีระมิดฐานสี่เหลี่ยมที่ก่อตัวบนผิวซิลิคอน (ข) ถ่ายภาพด้วยกล้องกำลังขยายสูงด้วยวิธีการสแกนจากลำอิเล็กตรอนของผิวซิลิคอนขรุขระ	14
รูปที่ 2.12	(ก) การสะท้อนแสงจากผิวด้านหลังของเซลล์หนึ่ง (ข) การสะท้อนของแสงแบบกำหนดทิศทางไม่ได้ส่งผลให้เกิดการดักแสง	15
รูปที่ 2.13	รูปแบบของการดักแสงภายในเซลล์ (ก) แสงเดินทางภายในแบบไม่มีทิศทางที่แน่นอน (ข) รูปแบบของแสงที่เดินทางตกกระทบผิวด้านหลังโครงสร้างเรขาคณิต	16
รูปที่ 2.14	ลักษณะของทางเดินแสงที่เกิดขึ้นในเซลล์ (ก) กรณีที่ไม่เกิดการกักแสง ($Z = 1$) (ข) กรณีที่มีตัวสะท้อนกลับที่ผิวด้านหลัง ($Z = 2$) (ค) กรณีที่มีตัวสะท้อนกลับที่ผิวด้านหลัง และที่ด้านบนของผิวมีลักษณะขรุขระ ($Z = 3 - 6$) (ง) กรณีที่มีตัวสะท้อนกลับที่ด้านหลังมีลักษณะขรุขระ ($Z = 10 - 25$)	16
รูปที่ 2.15	รูปแบบต่าง ๆ ของผิวขรุขระของเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อการกักแสง	18
รูปที่ 2.16	ความสัมพันธ์ของค่าเปอร์เซ็นต์ของแสงในส่วนของที่ถูกกักในเซลล์และจำนวนครั้งที่ผ่านเข้าเซลล์ โดยพิจารณาเซลล์ที่ผิวด้านบนที่มีรูปทรงต่าง ๆ กัน	18
รูปที่ 2.17	รูปทรงที่ผิวในแบบของ Tiler	19
รูปที่ 2.18	ความสัมพันธ์ของการคำนวณของค่ากระแสลัดวงจรและความหนาของเซลล์ในกรณีที่มีแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์มีโครงสร้างของผิวที่แตกต่างกัน	19

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
รูปที่ 3.1	ลักษณะของรูปแบบการสกัดผิวซิลิคอนที่มีแตกต่างกันจำแนกได้เป็น 3 ลักษณะ	23
รูปที่ 3.2	เส้นรอบนอกของการสกัดสำหรับซิลิคอนระนาบ (001)	24
รูปที่ 3.3	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสกัดและความเข้มข้น (molarity, M) ของสารละลาย KOH สำหรับแผ่นฐาน Si (100) ภายใต้อุณหภูมิการสกัด 23 °C	25
รูปที่ 3.4	อัตราการสกัดของ orientation หลักของผลึกในสารละลาย KOH ผสมด้วย IPA ที่อุณหภูมิ 80 °C	26
รูปที่ 3.5	ขั้นตอน และกระบวนการทำความสะอาดแผ่นฐานซิลิคอน	29
รูปที่ 3.6	ขั้นตอน และกระบวนการสกัดด้วยสารละลาย KOH	30
รูปที่ 4.1	ส่วนประกอบต่างๆ รวมทั้งระบบภายใน column และ console unit ของ SEM	32
รูปที่ 4.2	แผนภาพของส่วนประกอบที่สำคัญของ SEM ที่เป็นจุดกำเนิดของภาพ	33
รูปที่ 4.3	การเปลี่ยนสถานะชั้นพลังงานของอิเล็กตรอนเมื่อได้รับพลังงานโฟตอน	34
รูปที่ 4.4	ส่วนประกอบของเครื่อง UV-VIS spectrophotometer ในระบบลำแสงคู่	36
รูปที่ 4.5	ลักษณะของแสงที่เกิดขึ้นบนผิววัสดุที่มีลักษณะต่าง ๆ กัน (ก) วัสดุทึบแสงผิวมัน (ข) วัสดุทึบแสงผิวขรุขระ (ค) วัสดุโปร่งแสง (ง) วัสดุโปร่งใส	37
รูปที่ 4.6	(ก) การวัดการสะท้อน และ (ข) การส่งผ่านแสงด้วย Integrating Sphere	38
รูปที่ 4.7	(ก) การวัดแสงสะท้อนแบบ specular excluded mode และ (ข) การวัดแสงสะท้อนแบบ specular included mode	39
รูปที่ 4.8	ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย X1000 ของลักษณะผิวทรงพีระมิดด้านบนเอียง 70 ° (ก) K-01 at 90 °C (ข) K-02 at 80 °C (ค) K-03 at 70 °C (ง) K-04 at 60 °C	40
รูปที่ 4.9	ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย X1000 ของลักษณะผิวทรงพีระมิดด้านบน เวลาสำหรับกระบวนการสกัด 40 นาที (ก) K-01 90 °C (ข) K-02 80 °C (ค) K-03 70 °C (ง) K-04 60 °C	41
รูปที่ 4.10	กราฟพายความสัมพันธ์ของจำนวนพีระมิด (%) และขนาดพื้นที่ซึ่งขนาดพื้นที่ในช่วงต่าง ๆ (ก) K-01 90 °C (ข) K-02 80 °C (ค) K-03 70 °C (ง) K-04 60 °C	43
รูปที่ 4.11	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงที่วัดได้ และความยาวคลื่นแสงของ Si ที่มีกระบวนการสกัดภายใต้เงื่อนไขของอุณหภูมิ โดยใช้เวลาคงที่ 40 นาที	44
รูปที่ 4.12	ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย X1000 ของลักษณะผิวทรงพีระมิดด้านบน อุณหภูมิในกระบวนการสกัด 80 °C (ก) A-01 20 นาที (ข) A-02 30 นาที (ค) A-03 50 นาที	

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงที่วัดได้ และความยาวคลื่นแสงของ Si ที่มีกระบวนการสกัดภายใต้เงื่อนไขของเวลา โดยให้อุณหภูมิการผลิตคงที่ 80 °C	47
รูปที่ 4.14 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของผลึกเดี่ยวซิลิคอนที่ใช้สารละลาย KOH, TMEH และ Na ₂ CO ₃ solutions	48
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่ผิว Si ในช่วงความยาวคลื่น 300 – 1100 nm ภายใต้เงื่อนไขการผลิตที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ	48
รูปที่ 5.1 กราฟความสัมพันธ์ quantum efficiency (QE) ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 300 nm ถึง 1100 nm เส้นทึบแทน IQE เส้นประแทน EQE และเส้นจุดแทนผลรวมของค่าการสะท้อนแสง	50
รูปที่ 5.2 คุณลักษณะ I-V ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้จากแบบจำลอง PC1D ในเงื่อนไขการสกัดด้วยสารละลาย KOH	51

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา

จากมุมมองของปัญหาการใช้พลังงานของโลก ราคาเชื้อเพลิงมีแนวโน้มสูงขึ้นเนื่องจากปริมาณสำรองของเชื้อเพลิงลดลง ปัจจุบันประเทศไทยต้องนำเข้าแหล่งเชื้อเพลิงเหล่านี้โดยเฉพาะน้ำมันที่มีราคาสูง และจัดอยู่ในกลุ่มประเภทพลังงานที่หมดไป จากมุมมองของปัญหาดังกล่าวประเทศไทยจำเป็นต้องศึกษา และพัฒนาแหล่งพลังงานทางเลือกอื่น พลังงานจากแสงอาทิตย์จัดเป็นหนึ่งในพลังงานที่ไม่หมดและเป็นแหล่งพลังงานที่ใหญ่ที่สุดเนื่องจากประเทศไทยมีความเหมาะสมทางภูมิประเทศ ตั้งอยู่ระหว่างเส้นขนานที่ 6-10 องศาเหนือ จะได้รับแสงอาทิตย์เฉลี่ยทั้งปีประมาณ 4-5 kW-hr/m²/day ดังนั้นการนำพลังงานจากแสงอาทิตย์ไปแปลงเป็นพลังงานรูปอื่น ๆ เช่น พลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ หรือพลังงานความร้อนจากแผงรวมแสงเพื่อให้ความร้อน พลังงานเหล่านี้จะสามารถเพิ่มศักยภาพในการใช้พลังงานทดแทน และในอนาคตอาจจะลดปัญหาการนำเข้าพลังงานจากแหล่งเชื้อเพลิงได้ต่อไป

ตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา ประเทศไทยเป็นฐานการผลิตในระดับสากลที่มีศักยภาพสูงสำหรับผลิตและประกอบชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ อาจกล่าวได้ว่าส่วนประกอบที่สำคัญทั้งหมดในระบบการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อใช้งานนั้นสามารถผลิตได้ภายในประเทศ และในปัจจุบันภาคอุตสาหกรรมการประกอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ของประเทศได้เริ่มก้าวเข้าสู่บทบาทการผลิตมากขึ้น และมีแนวโน้มการเติบโตมากขึ้นทั้งด้านผู้ประกอบการและผู้ใช้ เนื่องจากนโยบายจากภาครัฐได้ให้การสนับสนุนอย่างชัดเจน โดยได้เน้นวัสดุสารกึ่งตัวนำซิลิคอนซึ่งใช้มากที่สุดในตลาดโลกถึง 98% เป็นวัสดุหลักสำหรับการผลิตบนพื้นฐานของโครงสร้างรอยต่อ *p-n* ดังนั้นการวิจัยเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงพลังงานในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิคอน จะเป็นประโยชน์และสอดคล้องต่อกระบวนการผลิต และเป็นการกระตุ้นให้เกิดการพัฒนาองค์ความรู้ในการใช้พลังงานยั่งยืนต่อไป

งานวิจัย และพัฒนาที่เกี่ยวข้องกับเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบัน ส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นและให้ความสำคัญเกี่ยวกับปัญหาข้อจำกัดของเซลล์ รวมถึงเทคนิคการผลิตที่มีต้นทุนต่ำลง การเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีการเพิ่มโอกาสให้แสงตกกระทบมากขึ้น และหาวิธีการสูญเสียภายในเซลล์ สำหรับงานวิจัยนี้ได้เน้นถึงการศึกษาเทคนิคการสร้างกับดักแสง (Light trapping) เพื่อลดการสะท้อนกลับของแสง และเพิ่มโอกาสการเกิดลำแสงตกกระทบผิวมากขึ้น หรือเรียกว่าการเพิ่มขึ้นของทางเดินแสง (pathlength enhancement) ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ดูดกลืนแสงมากขึ้น และส่งผลทำให้เซลล์มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานมากขึ้น การสร้างผิวไม่เรียบด้วยโครงสร้างปริมาตรเล็ก ๆ กับขนาดไม่เท่ากันที่ผิวของผลึกซิลิคอนระนาบ (100) เป็นหนึ่งในขั้นตอนที่สำคัญสำหรับการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ให้ได้ประสิทธิภาพสูง ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อการศึกษากระบวนการสกัดผิวซิลิคอนระนาบ (100) เพื่อหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงกลับมีค่าน้อยที่สุด

1.2 วัดอุปสรรค

1.2.1 ศึกษาคุณลักษณะของแสงด้วยหลักการของ Lambertian ที่ผิวผลึกซิลิคอน

1.2.2 ศึกษาขบวนการสกัดผิวซิลิคอนระนาบ (100) ด้วยสารละลายเคมีในเงื่อนไขต่าง ๆ เพื่อหาวิธีเพิ่มทางเดินของแสงที่ตกกระทบผิวหน้าแผ่นผลึกซิลิคอนอย่างเหมาะสมบนพื้นฐานการวิเคราะห์คุณลักษณะทางโครงสร้างและทางแสง

1.2.3 หาค่าประสิทธิภาพการกักแสง (Trapping efficiency) ของผิวซิลิคอนภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 พัฒนาการวิจัยการเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยการลดค่าสูญเสียการสะท้อนแสงที่ผิวผลึกซิลิคอนด้วยการสร้างผิวชั้นบนของแผ่นฐานรองผลึกซิลิคอนให้มีลักษณะเป็นรูปทรงปิระมิดแบบ Random pyramid ด้วยวิธีการสกัดทางเคมี

1.3.2 ทดสอบวัดคุณสมบัติทางแสง และโครงสร้างของผิวซิลิคอนรูปทรง Random pyramid และวิเคราะห์หาประสิทธิภาพการกักแสง (Trapping efficiency)

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1.4.1 ศึกษาทฤษฎีมุมการตกกระทบ และมุมหักเหของแสงที่ผิวผลึกซิลิคอนด้วยหลักการของ Lambertian และประสิทธิภาพการกักแสง

1.4.2 ศึกษาขบวนการ Anisotropic etching ของซิลิคอนระนาบ (100) ด้วยสารละลายทางเคมี KOH และ IPA เพื่อให้ผิวซิลิคอนก่อตัวเป็นโครงสร้างผิวทรงปิระมิด ภายใต้เงื่อนไขการผลิตต่าง ๆ เช่นอุณหภูมิ และเวลาที่ใช้

1.4.3 ศึกษาเปรียบเทียบและวิธีใช้งานเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer เพื่อวัดคุณสมบัติการสะท้อนแสง %R ในแบบ Integrating hemisphere ในช่วงความยาวคลื่นกว้างประมาณตั้งแต่ 200 nm ถึง 1100nm ซึ่งการวัดด้วยเครื่องดังกล่าวเป็นการวัดแบบไม่ทำลาย

1.4.4 ศึกษาเปรียบเทียบและวิธีใช้งานกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM) เพื่อการศึกษาโครงสร้างผิวของ Si หลังจากการกัดทางเคมี

1.4.5 วัดคุณสมบัติทางโครงสร้างของตัวอย่างภายใต้เงื่อนไขการผลิตต่าง ๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน และวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของขนาด และการกระจายตัวของผิวทรงปิระมิด ต่อการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขการผลิต

1.4.6 วัดคุณสมบัติทางแสง %R เพื่อหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดเพื่อให้ได้สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงกลับที่ผิวของซิลิคอนน้อยที่สุด พร้อมการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของการกระจายตัว และขนาดของผิวทรงปิระมิด ต่อค่า %R ที่วัดได้

1.4.7 ศึกษาแบบจำลองการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม PC1D

1.4.8 เปรียบเทียบผลกระทบของค่าสะท้อนแสงกลับต่อค่าประสิทธิภาพทางควอนตัม และคำนวณหาประสิทธิภาพการแปลงพลังงานด้วยแบบจำลอง PC1D

1.4.9 สรุป และวิเคราะห์ผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1.5.1 เป็นองค์ความรู้ส่วนหนึ่งที่สำคัญของโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ประสิทธิภาพสูงเพื่อผลิตเซลล์ชนิดซิลิคอนได้ภายในประเทศ และนำไปสู่การปรับปรุงประสิทธิภาพเพื่อเพิ่มมูลค่าของเซลล์แสงอาทิตย์เชิงพาณิชย์

1.5.2 เผยแพร่ผลงานวิจัยในการประชุมวิชาการ

1. กิตติศักดิ์ อมรสุนทรินทวงศ์ และทิพย์วรรณ พิงสุวรรณรักษ์ "ผลของการสะท้อนแสงของผิวเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนที่มีลวดลายพีระมิด" การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 6 จ.เพชรบุรี 5 - 7 พฤษภาคม 2553 ENETT6-1193
2. T. Fangsuwannarak and K. Amonsurintawong "*Texturisation of monocrystalline Si wafer by wet chemical etchants without surfactant additive through PTFE masks*", 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition and 5th World Photovoltaics Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Valencia, Spain, 6-10 Sep. (2010)
Accepted

บทที่ 2

พฤติกรรมของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อ $p-n$

2.1 บทนำ

เราทราบกันทั่วไปว่าวัสดุสารกึ่งตัวนำแสดงพฤติกรรมพิเศษอย่างหนึ่งเรียกว่า ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric effect) ซึ่งสามารถแปลงพลังงานแสงที่ตกกระทบวัสดุเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง จากคุณลักษณะดังกล่าวได้นำมาใช้ประโยชน์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งจัดเป็นสิ่งประดิษฐ์อิเล็กทรอนิกส์ ในกลุ่มไดโอดที่มีโครงสร้างด้วยรอยต่อของสารซิลิคอนชนิด p และ n โดยมีพาหะอิเล็กตรอนและโฮลในสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิด แต่โฮลเป็นพาหะข้างมากในสารกึ่งตัวนำชนิด p ในทางกลับกันอิเล็กตรอนจะมีจำนวนมากกว่าโฮลในสารกึ่งตัวนำชนิด n ในบทนี้ได้อธิบายถึงพฤติกรรมของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อ $p-n$ ภายใต้อิทธิพลของแสงที่ตกกระทบลงผิว และข้อจำกัดของประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน

2.2 อิทธิพลของแสงต่อเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อ $p-n$

กรณีที่เซลล์อยู่ภายใต้สภาวะมืด นั่นคือไม่มีพลังงานแสง หรือพลังงานโฟตอน (Photon) เข้ามากระตุ้นให้ผลิตคูพาหะ อิเล็กตรอน-โฮล ($e-h$ pairs) ขึ้น และไม่มีการไบอัสจากแรงดันไฟฟ้าจึงทำให้ที่รอยต่อ $p-n$ อยู่ในสภาวะสมดุล และส่งผลให้เกิดกลไกดังนี้

1) การแพร่ของอิเล็กตรอนจากด้าน n ไปด้าน p เท่ากับการพัดพาเนื่องจากสนามไฟฟ้าภายในของอิเล็กตรอน จากด้าน p ไปด้าน n ซึ่งการแพร่และการพัดพาของพาหะนั้นมีทิศทางตรงข้ามกันทำให้กระแสรวมของอิเล็กตรอนมีค่าเป็นศูนย์

$$J_n = J_{n_{diff}} - J_{n_{drift}} = 0 \quad (2.1)$$

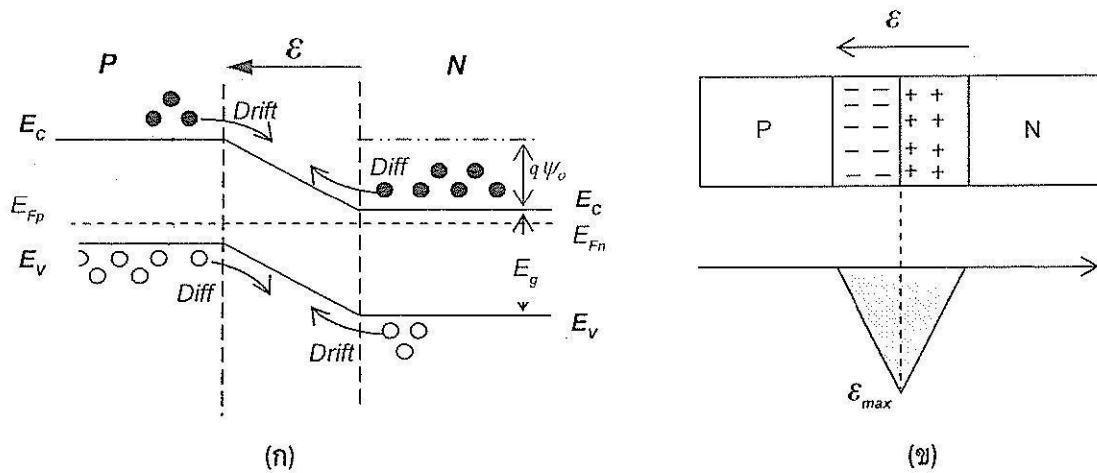
2) การแพร่ของโฮลจากจากด้าน p ไปด้าน n เท่ากับการพัดพาเนื่องจากสนามไฟฟ้าภายในของโฮล จากด้าน p ไปด้าน n ทำให้กระแสรวมของโฮลมีค่าเป็นศูนย์

$$J_h = J_{h_{diff}} - J_{h_{drift}} = 0 \quad (2.2)$$

ดังนั้น กระแสลัพธ์ของพาหะทั้งหมดที่ข้ามรอยต่อนั้นมีค่าเป็นศูนย์ทำให้ไม่มีกระแสไฟฟ้าผลิตจากเซลล์แสงอาทิตย์เสมือนเปิดวงจร และมีเพียงแรงดันไฟฟ้าภายในรอยต่อ $p-n$ ประมาณ 0.6 - 0.7V เท่านั้น

$$J = J_n + J_h = 0 \quad (2.3)$$

จากกลไกการเกิดสภาวะสมดุลนี้สามารถนำมาแสดงอยู่ในไดอะแกรมแถบพลังงานได้ในรูปที่ 2.1 (ก) สนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อจะมีค่ามากที่สุดที่กลางรอยต่อ และมีการกระจายตัวกว้างเพื่อกั้นการเดินทางของพาหะในเนื้อสารของ p และ n แสดงในรูปที่ 2.1 (ข)



รูปที่ 2.1 (ก) รอยต่อพีเอ็นที่อยู่ในสภาวะสมดุล (ข) สนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อพีเอ็นของสารกึ่งตัวนำที่ภายใต้สภาวะมีด

ที่เงื่อนไขการไบอัสด้วยแรงดันไฟฟ้าแบบ forward ในสภาวะมีด กระแสไฟฟ้าไหลในอุปกรณ์รอยต่อ $p-n$ เนื่องจากการเคลื่อนที่ของพาหะอิเล็กตรอน และโฮลข้ามพลังงานศักย์สัมผัสที่รอยต่อ (space-charge region หรือ depletion region) ได้จากอิทธิพลของการแพร่ (diffusion) เป็นหลัก เมื่อพาหะโฮลแพร่ข้ามไปยังด้าน n หรือพาหะอิเล็กตรอนแพร่ข้ามไปยังด้าน p เราเรียกพาหะทั้งสองในลักษณะนี้ว่า พาหะข้างน้อย (minority carriers) แสดงสมการการแพร่ได้ดังนี้

$$\text{ด้าน } n\text{-type:} \quad J_h = -qD_n \frac{dp}{dx} \quad (2.4)$$

และมีสมการต่อเนื่อง (continuity equation) ดังนี้

$$\frac{1}{q} \cdot \frac{dJ_h}{dx} = -(U - G) \quad (2.5)$$

อัตราการรวมตัวใหม่ในด้าน n -type แสดงในรูปแบบดังนี้

$$U = \frac{\Delta p}{\tau_h} \quad (2.6)$$

โดยที่ Δp คือความหนาแน่นของพาหะส่วนเกิน (excess concentration of holes) มีค่าเท่ากับความหนาแน่นพาหะโฮลทั้งหมด (p_n) ลบด้วยความหนาแน่นของพาหะโฮลที่จุดสมดุล (p_{n0})

τ_h คือช่วงอายุของพาหะข้างน้อย (minority carrier lifetime)

เมื่อแทนสมการที่ (2.4) และ (2.6) แทนในสมการที่ (2.5) จะได้ว่า

$$D_h \cdot \frac{d^2 p_n}{dx^2} = \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_h} - G \quad (2.7)$$

เมื่อไบอัสในสภาวะมีด จะได้ว่าอัตราการเกิดพาหะที่ถูกกระตุ้นด้วยแสง $G = 0$ แล้ว $\frac{d^2 p_{n0}}{dx^2} = 0$ ด้วยทำให้สมการที่

(2.7) ลดรูปเป็น

$$\frac{d^2 \Delta p}{dx^2} = \frac{\Delta p}{L_h^2} \quad (2.8)$$

โดยที่ L_h คือระยะทางการแพร่

$$L_h = \sqrt{D_h \tau_h} \quad (2.9)$$

สมการที่ (2.8) เป็นสมการอนุพันธ์ลำดับสอง เราสามารถแก้สมการได้เป็น

$$\Delta p = Ae^{x/L_h} + Be^{-x/L_h} \quad (2.10)$$

ค่าคงที่ A และ B สามารถหาได้จากการหาเงื่อนไขขอบเขต 2 เงื่อนไขคือ

1. ที่ $x = 0$ แล้ว $p_{nb} = p_{n0} \cdot e^{qV/kT}$
2. ที่ $x \rightarrow \infty$ แล้ว $A = 0$

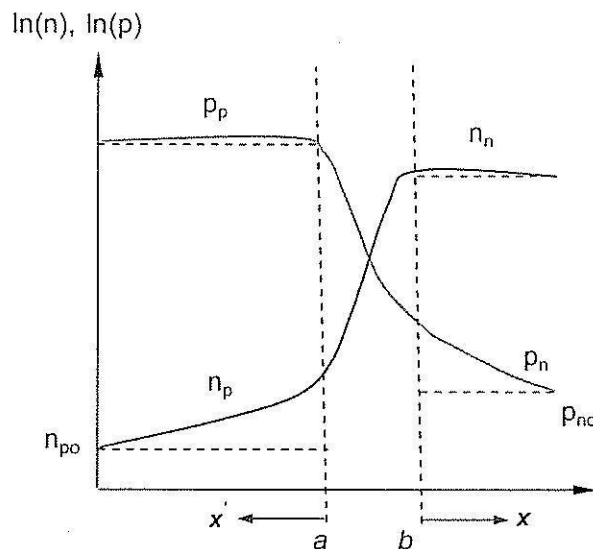
ดังนั้นสมการ (2.10) แสดงได้เป็น $\Delta p = (p_{nb} - p_{n0})e^{-x/L_h} = p_{n0}(e^{qV/kT} - 1) \cdot e^{-x/L_h}$ ดังนั้น

$$p_n(x) = p_{n0} + p_{n0}[e^{qV/kT} - 1] \cdot e^{-x/L_h} \quad (2.11)$$

ในทำนองเดียวกัน ถ้าเราพิจารณาพาหะข้างน้อย คืออิเล็กตรอนที่อยู่ด้าน p -type จะได้ว่า

$$n_p(x') = n_{p0} + n_{p0}[e^{qV/kT} - 1] \cdot e^{-x'/L_v} \quad (2.12)$$

ความหนาแน่นของพาหะข้างน้อยแต่ละด้านที่เคลื่อนที่ผ่านอุปกรณัรรอยต่อ p - n ที่มีการไบอัสด้วยแรงดันไฟฟ้าแบบ forward แสดงได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 กราฟ Semi-log ของการกระจายตัวของปริมาณพาหะ ในสภาวะมีด

ความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้าของอุปกรณัรรอยต่อ p - n สามารถพิจารณาได้จากสมการกระแสของด้าน n -type ดังสมการที่ (2.4)

$$J_h = -qD_n \frac{dp}{dx}$$

แทนสมการที่ (2.11) เป็นสมการของพาหะข้างน้อยในด้าน n -type ลงในสมการกระแสข้างบนนี้ ดังนั้นเราจะได้ว่า

$$J_h(x) = \frac{qD_n p_{n0}}{L_h} (e^{qV/kT} - 1) \cdot e^{-x/L_h} \quad (2.13)$$

ในทำนองเดียวกัน เราจะได้สมการกระแสเนื่องจากพาหะข้างน้อยทางด้าน p -type เป็น

$$J_e(x') = \frac{qD_p n_{p0}}{L_e} (e^{qV/kT} - 1) \cdot e^{-x'/L_e} \quad (2.14)$$

ดังนั้นเราจะได้ผลรวมของกระแสไฟฟ้าได้ดังนี้

$$J_{total} = J_e|_{x=0} + J_h|_{x=0} = \left(\frac{qD_e n_{p0}}{L_e} + \frac{qD_h p_{n0}}{L_h} \right) (e^{qV/kT} - 1) \quad (2.15)$$

จากสมการที่ (2.15) เราสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ไหล (I) และแรงดันไฟฟ้าที่ป้อน (V) ได้ดังสมการที่ (2.16)

$$I = I_o (e^{qV/nkT} - 1) \quad (2.16)$$

โดยที่ I_o คือค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ ซึ่งจะมีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

k คือค่าคงที่ของ Boltzmann มีค่าเท่ากับ 1.380×10^{-23} J/K

q คือค่าคงที่ของประจุไฟฟ้า (electronic charge) มีค่าเท่ากับ 1.602×10^{-19} coulomb

T คือค่าอุณหภูมิหน่วย Kelvin

n คือค่าแฟกเตอร์อุดมคติ (ideality factor)

เมื่อพิจารณาสมการที่ (2.15) และ (2.16) พบว่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ I_o มีความสัมพันธ์ต่อกลไกการเดินทางของพาหะอิเล็กตรอน-โฮลในอุปกรณ์รอยต่อ p - n แสดงได้ดังสมการที่ (2.17)

$$I_o = A \left(\frac{qD_e n_i^2}{L_e N_A} + \frac{qD_h n_i^2}{L_h N_D} \right) \quad (2.17)$$

และ $L_e = \sqrt{D_e \tau_e} \quad L_h = \sqrt{D_h \tau_h} \quad (2.18)$

สมการที่ (2.17) แสดงในเทอมของอายุพาหะได้เป็น

$$I_o = A \left(\frac{q n_i^2}{N_A} \sqrt{\frac{D_e}{\tau_e}} + \frac{q D_h n_i^2}{L_h N_D} \sqrt{\frac{D_h}{\tau_h}} \right) \quad (2.19)$$

โดยที่

L_e และ L_h คือระยะทางการแพร่ (Diffusion length) ของอิเล็กตรอน และโฮล ตามลำดับ

n_i คือ ความหนาแน่นของพาหะชนิดบริสุทธิ์ (intrinsic concentration)

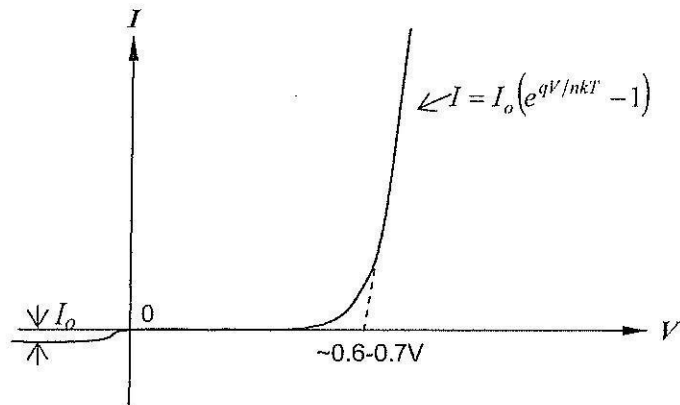
A คือ พื้นที่หน้าตัดของไดโอด

τ_e และ τ_h คืออายุของพาหะ (life time) ของ excited electron และ hole

D_e และ D_h คือสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient) ของอิเล็กตรอน และโฮล

N_A และ N_D คือความหนาแน่นของอะตอมสารเจือผู้ให้ และผู้รับ

จากสมการที่ (2.16) เราสามารถแสดงคุณลักษณะของ I-V ภายใต้สภาวะมืดซึ่งมีพฤติกรรมเช่นเดียวกับอุปกรณ์ไดโอดรอยต่อ p-n ชนิดซิลิคอนที่มีศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมภายในประมาณ 0.6-0.7 V ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า และแรงดันไบอัสของเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาวะมืด

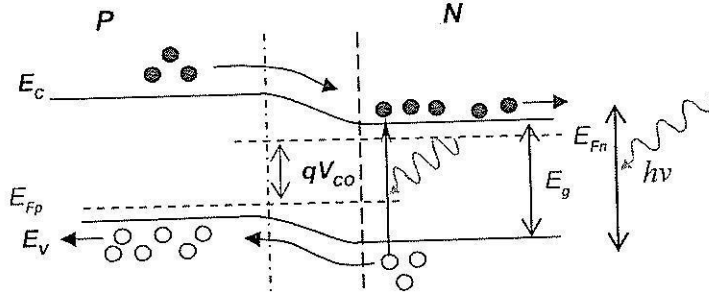
กรณีที่เซลล์อยู่ภายใต้สภาวะสว่าง (Illuminated characteristics) วัสดุสารกึ่งตัวนำสามารถดูดกลืนพลังงานแสงหรือเรียกว่าโฟตอนที่มีค่าพลังงานมากกว่าแถบพลังงานช่องว่าง (Energy band gap, E_g) ของสารกึ่งตัวนำชนิดนั้น โฟตอนที่มีพลังงานเท่ากับ E_g ถูกดูดกลืนเข้ามานั้นจะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนในระดับพลังงานวาเลนซ์ขึ้นไปอยู่ในสถานะชั้นพลังงานที่สูงกว่าคือระดับพลังงานคอนดักชัน ส่วนที่ว่างในระดับพลังงานวาเลนซ์เรียกว่า โฮล ทั้งโฮลที่เกิดขึ้นที่ระดับพลังงานวาเลนซ์ และอิเล็กตรอนที่เปลี่ยนระดับพลังงานไปอยู่ที่คอนดักชันนี้ (excited electron) เราเรียกพาหะทั้งสองนี้ว่า พาหะอิสระ และเกี่ยวข้องโดยตรงกับการเกิดกระแสไฟฟ้าในวัสดุนั้นเอง ดังนั้นกระบวนการนี้จึงเรียกว่าการเกิดคู่พาหะ อิเล็กตรอน-โฮล (Carrier generation, G) กระบวนการนี้เกิดขึ้นได้ทั้งวัสดุชนิด n และ p แต่ในวัสดุด้าน p จะมีปริมาณ hole มากกว่าปริมาณ excited electron ในทางกลับกันวัสดุชนิด n จะมีปริมาณ excited electron มากกว่าปริมาณ hole

เมื่อเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีโครงสร้างแบบรอยต่อ $p-n$ อยู่ภายใต้แสงสว่าง บริเวณรอยต่อ $p-n$ อยู่ในสภาวะไม่สมดุล (Non-equilibrium) และเป็นผลทำให้คู่พาหะอิสระที่เกิดขึ้นจากการกระตุ้นด้วยโฟตอนนี้เคลื่อนที่แบบดริฟท์ในสนามไฟฟ้า (อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากชั้น p ไปชั้น n และโฮลเคลื่อนที่จากชั้น n ไปชั้น p) ทำให้กระแสดริฟท์มีค่าเพิ่มขึ้นจากปริมาณอิเล็กตรอน n_p กับ n_n และปริมาณโฮล p_n กับ p_p ดังนั้นกระแสไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้น ขณะเดียวกันการแพร่ของพาหะทำให้เกิดผลของช่วงระยะ space charge ที่รอยต่อ ซึ่งสัมพันธ์กับพลังงานศักย์ (energy barrier, ψ_0) ของความแตกต่างระหว่างระดับพลังงาน E_{Fn} กับ E_{Fp} ปริมาณนี้มีค่าสัมพันธ์โดยตรงกับแรงดันเปิดวงจร (Open circuit voltage, V_{oc}) ของเซลล์แสงอาทิตย์นั่นเอง และระดับพลังงานเฟอร์มิของทั้งสองด้านต่างกันเท่ากับ qV_{oc} และความสูงศักย์สัมพันธ์มีค่าเท่ากับ $q(\psi_0 - V_{oc})$ ซึ่งแสดงในไดอะแกรมแถบพลังงานในรูปที่ 2.4

ในเชิงอุดมคติ อัตราการเกิดคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮลจากพลังงานของแสงนั้น (G) มีความสม่ำเสมอหรือคงที่ตลอดทั่วอุปกรณ์นั้น เมื่อพิจารณาทฤษฎีของสมการต่อเนื่อง (Continuity equations) จะได้ว่า

ด้าน n-type:
$$\frac{d^2 \Delta p}{dx^2} = \frac{\Delta p}{L_h^2} - \frac{G}{D_h} \tag{2.20}$$

โดยที่ Δp คือความหนาแน่นของพาหะส่วนเกิน ในที่นี้คือพาหะโฮล
 $\frac{G}{D_h}$ คือค่าคงที่ค่าหนึ่ง ภายใต้ภาวะส่องสว่าง



รูปที่ 2.4 โดอะแกรมแถบพลังงานของรอยต่อ p-n ที่อยู่ในสภาวะได้รับแสงตกกระทบที่ผิว

ค่า Δp ในกรณีที่มีผลของอัตราการเกิดคู่พาหะ (G) จะมีสมการเชิงอนุพันธ์อันดับ 2 แตกต่างจากสมการที่ (2.10) คือ

$$\Delta p = G\tau_h + Ce^{x/L_h} + De^{-x/L_h} \tag{2.21}$$

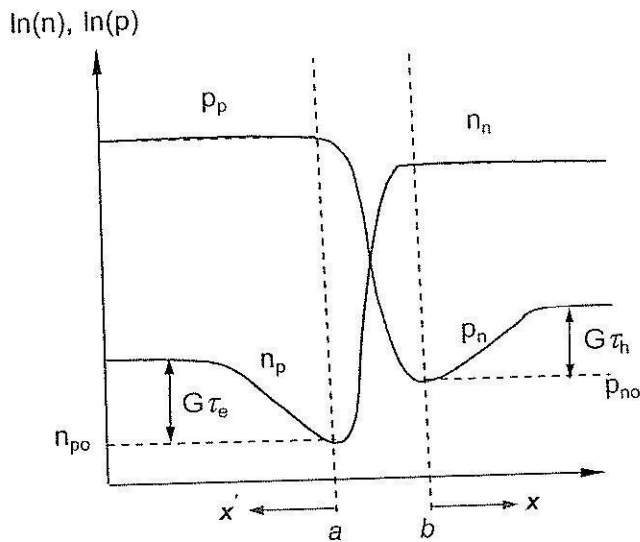
จากสมการเงื่อนไขขอบเขตจะได้

$$\Delta p = G\tau_h + [p_{n0}(e^{qV/kT} - 1) - G\tau_h] \cdot e^{-x/L_h} \tag{2.22}$$

ดังนั้น

$$p_n(x) = p_{n0} + G\tau_h + [p_{n0}(e^{qV/kT} - 1) - G\tau_h] \cdot e^{-x/L_h} \tag{2.23}$$

ในทำนองเดียวกันพาหะข้างน้อยอิเล็กตรอนทางด้านพี ค่า $n_p(x')$ แสดงการทาสสมการในลักษณะเดียวกันกับข้างต้น และความสัมพันธ์นี้แสดงด้วยกราฟ semi-log ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 กราฟ Semi-log ของการกระจายตัวของปริมาณพาหะ ในสภาวะสว่าง

จากสมการความสัมพันธ์ข้างต้น และสมการกระแสไฟฟ้าที่ (2.4) ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเนื่องจากพาหะโฮลแสดงสมการได้ดังนี้

$$J_h(x) = \frac{qD_n P_{n0}}{L_h} (e^{qV/kT} - 1) \cdot e^{-x/L_h} - qG\tau_h e^{-x/L_h} \quad (2.24)$$

ในทำนองเดียวกัน กระแสเนื่องจากพาหะอิเล็กตรอน $J_e(x')$ แสดงการหาสมการในลักษณะเดียวกัน

เมื่อการรวมตัวใหม่ของพาหะในบริเวณ space charge ที่รอยต่อกว้าง W นั้นไม่ถูกนำมาพิจารณาแล้ว ผลของกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากผลของ G แสดงได้ดังสมการ

$$|\delta J_e| = |\delta J_h| = qGW \quad (2.25)$$

ดังนั้นจากกระบวนการข้างต้น เราสามารถแสดงลักษณะของกระแสไฟฟ้าและแรงดันตกคร่อมเซลล์แสงอาทิตย์ (I-V characteristic) ได้ในสมการที่ (2.26) และแสดงความสัมพันธ์ I-V ในควอดแดนซ์ที่ 4 ของรูปที่ 2.6 (ก)

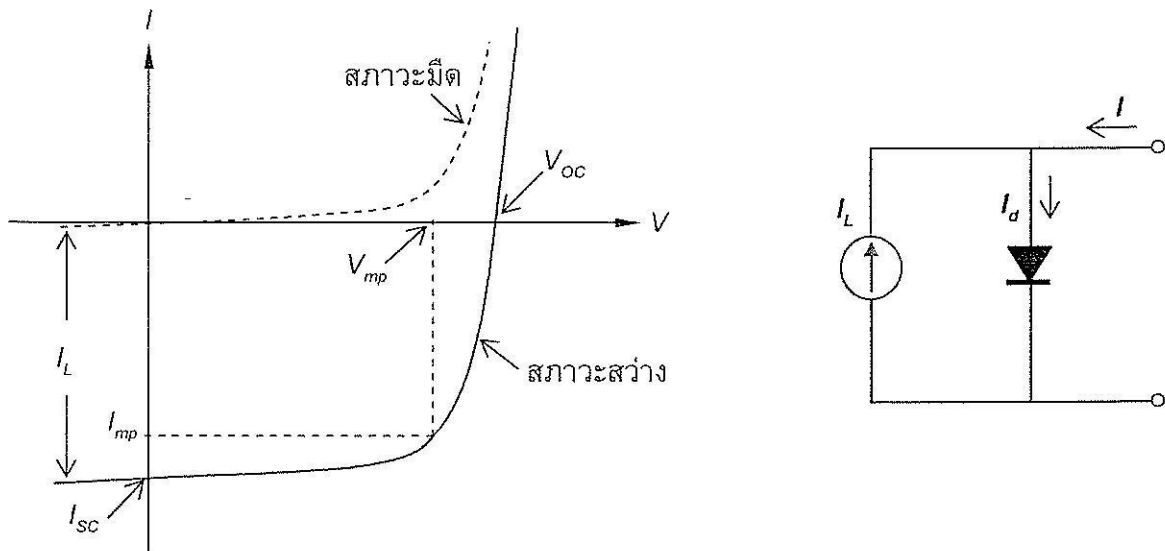
$$I = I_o (e^{qV/kT} - 1) - I_L \quad (2.26)$$

โดยที่ I_o คือกระแสอิ่มตัวมีค่าเท่ากับสมการที่ (2.17) และค่าของ I_L แสดงได้ดังสมการ

$$I_L = qAG(L_e + W + L_h) \quad (2.27)$$

จากผลของพฤติกรรมทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปแบบกราฟ I-V เราจะแสดงในรูปแบบของวงจรรวมมูลทางไฟฟ้าอุดมคติได้ในรูปที่ 2.6 (ข)

กระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้เนื่องจากพลังงานแสง (I_L) มีค่าขึ้นอยู่กับ 2 ส่วนหลักคือปริมาณพาหะที่เกิดขึ้นจากการกระตุ้นด้วยแสงที่บริเวณรอยต่อ และขึ้นอยู่กับค่าระยะการแพร่ของพาหะข้างน้อยที่เดินทางแต่ละด้าน โดยทั้งสองปัจจัยนี้ถือได้ว่าเป็นการรวบรวมอย่างแอคทีฟ ("active" collection region) ของเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อ p-n



รูปที่ 2.6 คุณลักษณะ I-V ของไดโอดรอยต่อ p-n ภายใต้สภาวะมืด และสภาวะได้รับแสง

2.3 พารามิเตอร์ทางเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์

ข้อจำกัดของค่าเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นอยู่กับ 2 พารามิเตอร์ที่สำคัญดังนี้

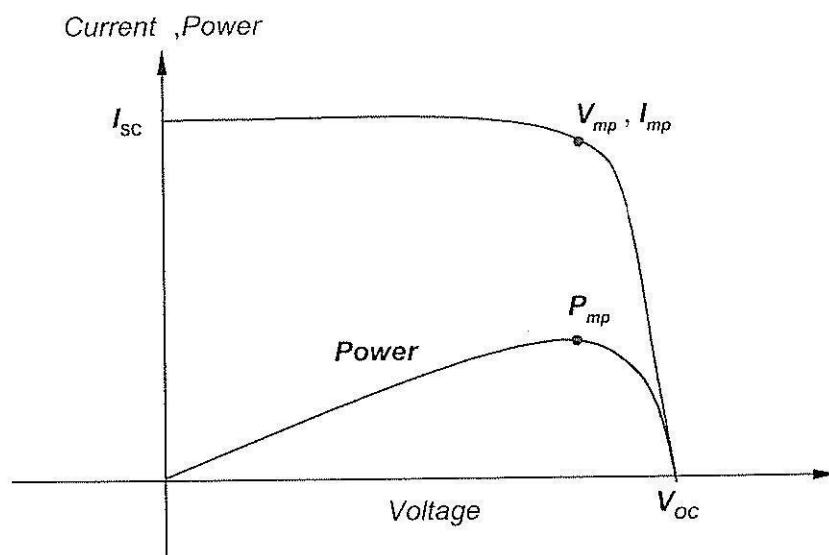
1. กระแสลัดวงจร (Short circuit current: I_{sc}) เป็นค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่แรงดันไฟฟ้าเป็นศูนย์ ในทางอุดมคติเมื่อ $V = 0$ แล้ว $I_{sc} = I_L$ ดังนั้น I_{sc} จึงมีความสัมพันธ์โดยตรงกับแสงแดดที่เซลล์นำไปใช้ประโยชน์ได้

2. แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (Open circuit voltage: V_{oc}) เป็นค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่กระแสเป็นศูนย์ ค่า V_{oc} มีค่าสูงขึ้นแบบลอการิทึมกับการเพิ่มขึ้นของแสงสว่าง คุณลักษณะนี้จึงทำให้เซลล์แสงอาทิตย์เหมาะสมต่อการชาร์จประจุแบตเตอรี่

$$\text{ที่ } I = 0 \quad V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I_L}{I_0} + 1\right) \quad (2.27)$$

จากความสัมพันธ์ของ V_{oc} เราพบว่าผลของการปรับเปลี่ยนค่ากระแสอิ่มตัว I_0 ที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยทำให้ค่า V_{oc} ลดลงมาก สาเหตุที่สำคัญอย่างหนึ่งที่สัมพันธ์กับ I_0 คือความเร็วในการรวมตัวใหม่ที่ผิว (surface recombination velocity) ถ้าความเร็วในการรวมตัวใหม่ที่ผิวมีค่าต่ำจะส่งผลให้ I_0 มีค่าต่ำด้วย และ V_{oc} ก็จะมีค่าสูงขึ้นในที่สุด

ในแต่ละจุดบนเส้นกราฟ $I-V$ นั้นเมื่อนำค่ากระแสคูณกับแรงดันไฟฟ้าจะได้กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตที่จุดการทำงานนั้น ดังนั้นเซลล์แสงอาทิตย์จึงสามารถแสดงค่าในเทอมของค่าจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum power point) ซึ่งเท่ากับ $I_{mp} \times V_{mp}$ จุดที่ให้กำลังไฟฟ้าเอาต์พุตสูงสุดจากเซลล์นั้นจะให้รูปสี่เหลี่ยมในเส้นกราฟที่มีพื้นที่มากที่สุด แสดงรูปกราฟที่ 2.7 ที่ทำการกลับด้านมาอยู่ในควอดแดนต์ที่ 1



รูปที่ 2.7 กราฟ $I-V$ ทั่วไปในควอดแดนต์ที่ 1 แสดงจุดกระแสลัดวงจร (I_{sc}) และแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (V_{oc}) รวมถึงเส้นกราฟของกำลังไฟฟ้าเอาต์พุตและจุดกำลังไฟฟ้าสูงสุด (P_{mp})

Fill factor : FF เป็นการวัดอย่างหนึ่งเพื่อหาคุณภาพของรอยต่อ p-n และหาค่าต้านทานไฟฟ้าอนุกรมแฝง (parasite series resistance, R_s) ในเซลล์ ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ในสมการที่ 2.28 โดยที่ค่า FF

เสมือนการบอกถึงความเป็นเส้นกราฟสี่เหลี่ยมของกราฟ I-V ถ้าเส้นกราฟ I-V มีรูปเป็นสี่เหลี่ยมมากขึ้นแสดงว่าค่า FF มีค่าเข้าใกล้ 1 และจะให้กำลังงานไฟฟ้าเอาต์พุตสูงขึ้นด้วย

$$FF = \frac{V_{mp} I_{mp}}{V_{oc} I_{sc}} \quad (2.28)$$

ดังนั้น

$$P_{mp} = V_{oc} I_{sc} FF \quad (2.29)$$

ประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (Energy-conversion efficiency): η คือผลของอัตราส่วนระหว่างค่ากำลังไฟฟ้าอินพุตกับกำลังไฟฟ้าเอาต์พุต ดังนั้นเราจะได้สมการเป็น

$$\eta = \frac{V_{mp} I_{mp}}{P_{in}} = \frac{V_{oc} I_{sc} FF}{P_{in}} \quad (2.30)$$

โดยที่ P_{in} คือกำลังงานไฟฟ้าทั้งหมดของแสงที่ตกกระทบลงบนเซลล์ ในอุตสาหกรรมทั่วไปเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนมีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานอยู่ในช่วง 14-16%

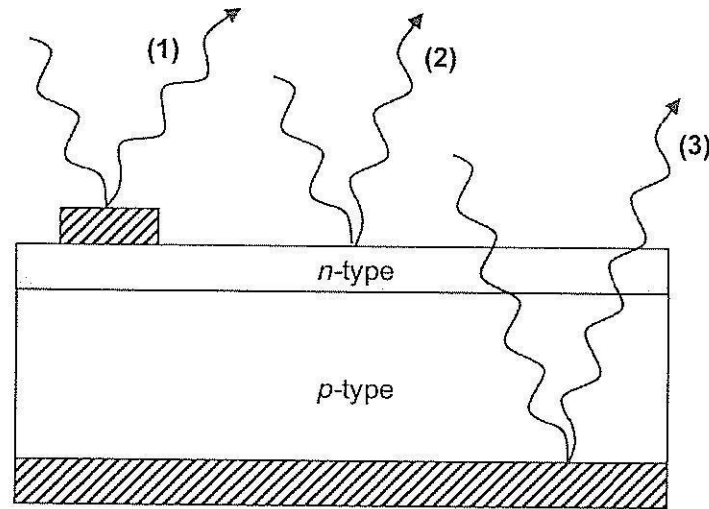
2.4 ข้อจำกัดค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน และการสูญเสียในเซลล์แสงอาทิตย์

ในเงื่อนไขของการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ เราพบว่าเซลล์ชนิดผลึกเดี่ยวซิลิคอนอาจผลิตได้ให้มีค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูงได้ว่า 24% ได้หรือให้เข้าใกล้ 30% ตามข้อจำกัดทางทฤษฎี อย่างไรก็ตามในอุตสาหกรรมการผลิตในปริมาณมาก เซลล์นั้นมีค่าประสิทธิภาพเพียง 13-15% เท่านั้น เนื่องจากมีหลายเหตุผลที่เกี่ยวข้องเช่นการมุ่งเน้นการพัฒนาเซลล์ในเชิงห้องปฏิบัติการที่มีกระบวนการซับซ้อน และต้นทุนสูง แต่ไม่สอดคล้องหรือเหมาะสมในกระบวนการผลิตเชิงอุตสาหกรรม ไม่เพียงแต่ได้ประสิทธิภาพสูงขึ้น แต่ต้นทุนของแผ่นซิลิคอนที่ต่ำนั้นเป็นสิ่งสำคัญด้วยซึ่งทั้งสองปัจจัยนี้จะทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีราคาถูกลงเนื่องจากแผ่นเซลล์เริ่มต้นมีราคาเกือบครึ่งหนึ่งของแผงเซลล์หลังกระบวนการผลิตขั้นสุดท้ายแล้ว

นอกจากการพิจารณาปัจจัยของต้นทุนการผลิตแล้วการปรับปรุงค่าประสิทธิภาพจากการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่จำกัดประสิทธิภาพอย่างเข้าใจนั้นมีความจำเป็นอย่างยิ่งต่อการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ อาทิเช่น เซลล์จากวัสดุสารกึ่งตัวนำหนึ่งจะมีค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจรจะไม่เกินค่าสูงสุดค่าหนึ่งของมันซึ่งเกี่ยวข้องกับพลังงานช่องว่างของวัสดุนั้น อีกทั้ง photon flux จากแสงแดดที่ตกลงมายังผิวโลกมีค่าจำกัดในความยาวคลื่นต่าง ๆ ข้อจำกัดพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์อีกค่าหนึ่งคือ V_{oc} เกี่ยวข้องกับคุณภาพของรอยต่อไดโอด p-n ที่ดีซึ่งสัมพันธ์โดยตรงกับกระแสอิ่มตัว I_0 ที่ต้องมีค่าน้อย ๆ รวมถึงผลของอุณหภูมิที่สูงขึ้นยังทำให้ค่า V_{oc} มีค่าลดลง อย่างไรก็ตามในส่วนนี้จะกล่าวถึงเพียงปัจจัยในทางสูญเสียทางแสง และการลดลงของคู่พาหะอิเล็กตรอน โฮล ที่กระทบต่อค่า I_{sc} และนำไปสู่ผลของประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

2.4.1 การสูญเสียทางแสง

กระบวนการต่าง ๆ ที่เกิดการสูญเสียทางแสงในเซลล์แสงอาทิตย์แสดงในรูปที่ 2.8 ซึ่งประกอบไปด้วย 1) การบังแสงจากส่วนโลหะที่อยู่ด้านหน้า 2) การสะท้อนที่ผิวเซลล์ด้านบน 3) การสะท้อนกลับของแสงที่ผิวโลหะด้านหลัง อย่างไรก็ตามก็ยังมีหลายทางที่สามารถลดการสูญเสียทางแสงเหล่านี้ได้เช่น

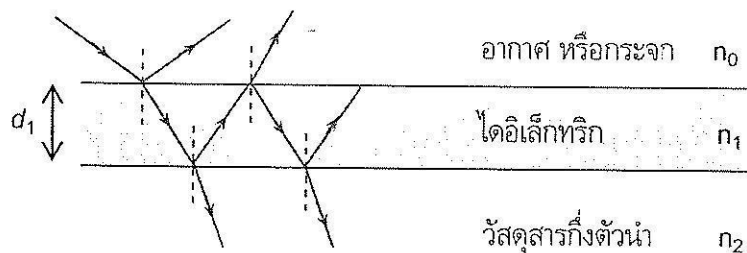


รูปที่ 2.8 บริเวณที่เกิดการสูญเสียทางแสงของเซลล์แสงอาทิตย์: (1) การบังแสงจากกลายโลหะด้านหน้า (2) การสะท้อนที่ผิวเซลล์ด้านหลัง (3) การสะท้อนกลับของแสงที่ผิวโลหะด้านหลัง

1. สร้างโลหะด้านหน้าให้มีพื้นที่ลดลง (แต่ผลนี้ทำให้เกิดความต้านทานอนุกรมแฝงเพิ่มค่าขึ้น)
2. ที่ผิวหน้าเซลล์สามารถนำไปเคลือบด้วยชั้นป้องกันการสะท้อนแสง (antireflection coating: ARC) เป็นวัสดุฟิล์มบางไดอิเล็กทริกที่ต้องมีความหนาที่สอดคล้องกับความยาวคลื่นทาร์สี่ ที่เรียกว่า *A quarter wavelength* ARC ซึ่งมีค่าเท่ากับสมการที่ (2.31)

$$d_1 = \frac{\lambda_o}{4n_1} \quad (2.31)$$

ถ้าไม่พิจารณาผลของการสะท้อนเนื่องจากผลของการแทรกสอดของแสงที่ผิวสัมผัสของฟิล์มสารกึ่งตัวนำ ARC ที่เกิดเฟสตรงข้ามกัน 180° แล้ว เราสามารถแสดงไดอะแกรมของการใช้ *A quarter wavelength* ARC เพื่อลดผลการสะท้อนแสงที่ผิวได้ดังรูปที่ 2.9

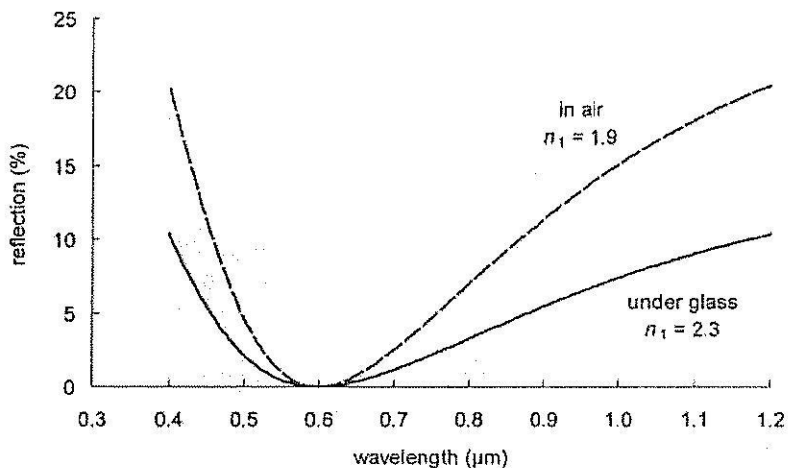


รูปที่ 2.9 การใช้หลักการของ *a quarter antireflection* เพื่อจัดการกับการสะท้อนกลับของแสงที่ผิว

ผลของการสะท้อนกลับของแสงจะมีค่าลดลงถ้าค่าดัชนีหักเหแสงของฟิล์ม ARC มีความสัมพันธ์ในรากที่สองของผลคูณ $n_0 n_2$ ดังสมการที่ (2.32)

$$n_1 = \sqrt{n_0 n_2} \quad (2.32)$$

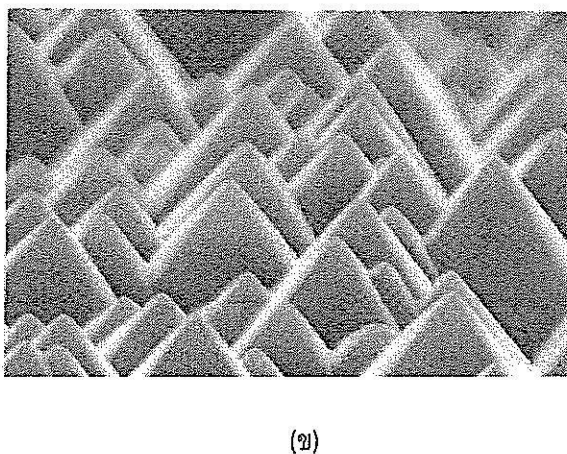
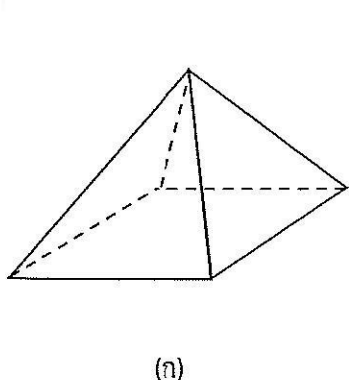
ในกรณีนี้ที่เซลล์เป็นวัสดุชนิด Si ($n_2 = 3.8$) ผิวเซลล์มีชั้น ARC ซึ่งสัมผัสกับอากาศ ($n_0 = 1$) และในกรณีนี้ที่สัมผัสกับแผ่นกระจก ($n_0 = 1.5$) จากความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นแสงกับค่าการสะท้อนกลับของแสงที่ผิว Si นั้น พบว่าการสะท้อนแสงที่ผิวสามารถให้ค่าลดลงจนเป็นศูนย์ที่ความยาวคลื่นแสงเท่ากับ $0.6 \mu\text{m}$ ซึ่งแสดงดังกราฟรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การสะท้อนแสงที่ผิวซิลิคอนที่สัมผัสกับอากาศ โดยมีชั้นป้องกันการสะท้อน ($n_1 = 1.9$) และในกรณีนี้ที่ผิวซิลิคอนสัมผัสกับกระจกและมีชั้นป้องกันการสะท้อน $n_1 = 2.3$

3. สร้างผิวหน้าซิลิคอนให้มีโครงสร้างขรุขระ (surface texturing) สามารถลดการสะท้อนกลับของแสงที่ออกจากผิวได้ อีกทั้งยังสามารถเพิ่มโอกาสให้แสงที่ผ่านเข้าแผ่นเซลล์สะท้อนกลับจากด้านหลังขึ้นมาที่ผิวได้อีก

ผิวของผลึกซิลิคอนสามารถนำมาสร้างให้ผิวขรุขระให้มีโครงสร้างรูปร่างเดียวกันด้วยวิธีการกัดผิวตามแนวระนาบของผลึก ซึ่งผิวที่ได้จะมีรูปแบบเป็นทรงพีระมิดเล็ก ๆ ฐานสี่เหลี่ยมเช่นรูปที่ 2.11 (ก) ถ้ามีการวางในแนวเดียวกันกับอะตอมต่าง ๆ อย่างเหมาะสม เมื่อนำไปถ่ายภาพด้วยกล้องกำลังขยายสูงด้วยวิธีการสแกนจากลำอิเล็กตรอนรูปผิวหน้าเซลล์มีรูปดังภาพ 2.11 (ข)



รูปที่ 2.11 (ก) รูปทรงพีระมิดฐานสี่เหลี่ยมที่ก่อตัวบนผิวซิลิคอน (ข) ถ่ายภาพด้วยกล้องกำลังขยายสูงด้วยวิธีการสแกนจากลำอิเล็กตรอนของผิวซิลิคอนขรุขระ

ประโยชน์ของการสร้างผิวขรุขระอีกด้านคือ แสงสามารถหักเหเข้าสู่แผ่นเซลล์หรืออาจเรียกว่าการกักแสง (light trapping) ด้วยหลักการของกฎของ Snell (Snell's law) ที่ว่า

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (2.33)$$

โดยที่ n_1 คือ ค่าดัชนีหักเหแสงของตัวกลางในส่วนที่แสงตกกระทบ

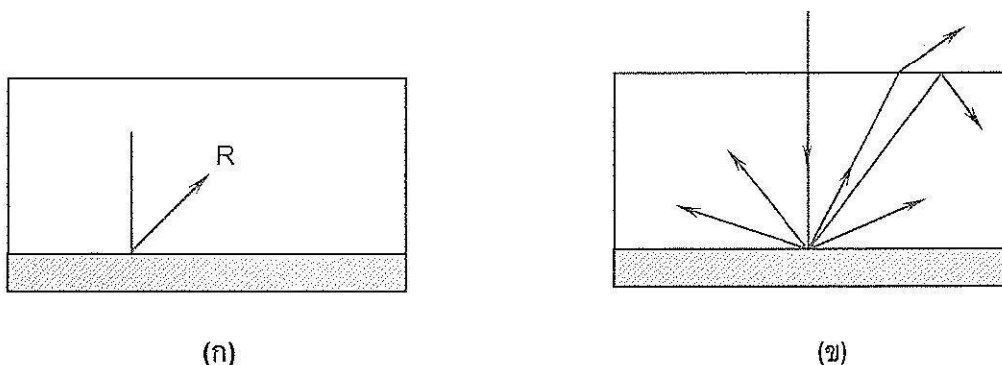
n_2 คือ ค่าดัชนีหักเหแสงของตัวกลางที่ในส่วนของแสงหักเหเข้าตัวกลาง

θ_1 คือ มุมของแสงที่ตกกระทบบนผิวสัมผัสที่เทียบกับระนาบเส้นปกติ

และ θ_2 คือ มุมของแสงที่หักเหออกจากผิวสัมผัสที่เทียบกับระนาบเส้นปกติ

4. สร้างตัวสะท้อนแสงที่ผิวด้านหลัง เพื่อป้องกันแสงที่ผ่านเข้าเซลล์แล้วหักเหออกไป และยอมให้แสงสะท้อนกลับเข้าเนื้อเซลล์ ให้เซลล์ดูดกลืนแสงอีกครั้ง ถ้าแสงที่สะท้อนด้านหลังเป็นแบบกำหนดทิศทางไม่ได้แล้วแสงนี้จะสามารถถูกดักได้ทั้งหมดภายในเซลล์ เรียกว่า การสะท้อนกลับภายในทั้งหมด (total internal reflection) โอกาสของแสงที่จะถูกดูดกลืนอีกครั้งมีมากขึ้นและแสงที่ตกกระทบมีทางเดินแสงเพิ่มขึ้นถึง $4n^2$ (~50) ซึ่ง n คือค่าดัชนีหักเหแสงของวัสดุ

รูปที่ 2.12 แสดงการสะท้อนแสงด้านหลังเซลล์ ซึ่งในลักษณะที่แสงมีทิศทางกำหนดไม่ได้นั้นส่งผลให้เกิดทางเดินแสง (pathlength) เพิ่มขึ้นและเกิดโอกาสให้เซลล์สามารถผลิตพาหะได้มากขึ้นซึ่งมีผลโดยตรงต่อการเพิ่มขึ้นของ I_{sc}



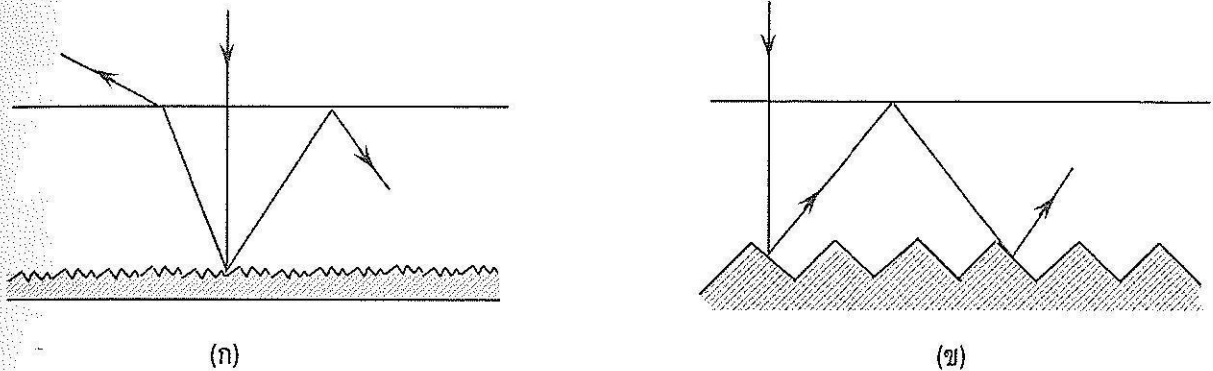
รูปที่ 2.12 (ก) การสะท้อนแสงจากผิวด้านหลังของเซลล์หนึ่ง (ข) การสะท้อนของแสงแบบกำหนดทิศทางไม่ได้ส่งผลให้เกิดการดักแสง

2.4.2 คุณสมบัติของแสงแบบ Lambertian

ถ้าต้องการให้เซลล์แสงอาทิตย์มีศักยภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า (photovoltaic) ที่สูงแล้วเซลล์ต้องมีการดูดกลืนแสงได้มาก ดังนั้นแสงต้องมีโอกาสเดินทางภายในเนื้อเซลล์ให้มากที่สุดหมายถึงมีทางเดินของแสงเพิ่มมากขึ้น (pathlength enhancement) หรืออาจเรียกว่าการดักแสง (light trapping) ซึ่งมีการสะท้อนหลายครั้งของแสงภายนอกที่มาตกกระทบกับผิวเซลล์แบบไม่เรียบ และแสงที่เดินทางภายในเซลล์มีทิศทางที่ไม่แน่นอน ในลักษณะนี้เราเรียกว่า คุณสมบัติ Lambertian

เมื่อพิจารณาโครงสร้างแบบ 2 มิติ รูปแบบของการดักแสงแบ่งได้เป็น 2 แบบตามรูปที่ 2.13 คือ แบบที่ใช้ผิวด้านหลังแบบขรุขระซึ่งไม่มีโครงสร้างเหมือนกันจะได้แสงสะท้อนที่ไม่สามารถกำหนดทิศทางได้ และแบบที่ใช้ผิว

ด้านหลังที่มีโครงสร้างทรงเรขาคณิต สำหรับแสงที่ตกกระทบผิวแบบขรุขระเล็ก ๆ จะเกิดการสะท้อนที่ไร้ทิศทางที่แน่นอนส่วนหนึ่งเกิดการสะท้อนกลับและเดินทางไปในเนื้อสาร อีกส่วนหนึ่งเดินทางไปยังผิวหน้าเซลล์และหักเหแสงออกนอกเนื้อวัสดุ โดยที่ลำแสงที่ตกกระทบผิวซิลิคอนมีมุมค่าหนึ่งเทียบกับเส้นปกติแล้วเท่ากับ $\sin^{-1}(1/n)$ และ n คือค่าดัชนีหักเหแสงของซิลิคอน ซึ่งมุมนี้มีค่าเท่ากับ $16^\circ - 17^\circ$ กรณีรูปแบบที่สองที่ใช้ผิวด้านหลังมีโครงสร้างทรงเรขาคณิตซึ่งมีรูปทรงเล็ก ๆ เหมือนกันตลอด

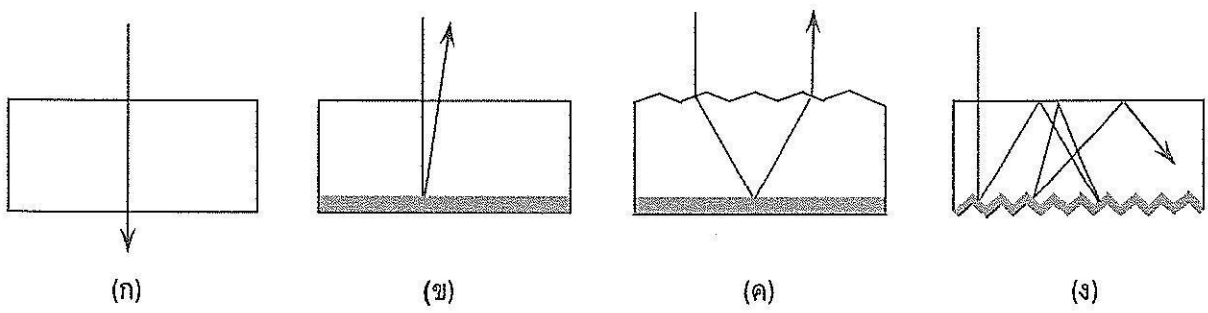


รูปที่ 2.13 รูปแบบของการตกแสงภายในเซลล์ (ก) แสงเดินทางภายในแบบไม่มีทิศทางที่แน่นอน (ข) รูปแบบของแสงที่เดินทางตกกระทบผิวด้านหลังโครงสร้างเรขาคณิต

สมมุติว่าให้แสงที่ทะลุผ่านเนื้อวัสดุได้ทั้งหมดแล้ว การเดินทางของแสง $Z = 1$ แสดงในรูป 2.14 (ก) สำหรับในกรณี (ข) ที่ผิวด้านหลังมีตัวสะท้อนกลับหมดที่เรียกว่า rear-surface reflector แล้ว ทางเดินของแสง $Z = 2$ ซึ่งแสงส่วนที่สะท้อนจากด้านหลังนี้สามารถเดินทางเข้าสู่เนื้อเซลล์ในทิศทางที่เข้าใกล้เส้นปกติของผิวด้านบนเซลล์ ในกรณี (ค) ที่ด้านบนของผิวมีลักษณะขรุขระที่เรียกว่า front surface texturing ทางเดินของแสง $Z = 3 - 6$ ในกรณี (ง) ที่ด้านหลังของผิวด้านหลังมีลักษณะขรุขระ ทางเดินของแสง $Z = 10 - 25$

ทางเดินของแสงในเซลล์ (Z) มีความสัมพันธ์กับระยะทางที่แสงสะท้อนกลับไปมาภายใน (W_{opt}) และความหนาของเซลล์ (W) ซึ่งเราสามารถแสดงสมการได้ดังนี้

$$Z = \frac{W_{opt}}{W} \tag{2.34}$$



รูปที่ 2.14 ลักษณะของทางเดินแสงที่เกิดขึ้นในเซลล์ (ก) กรณีที่ไม่เกิดการกักแสง ($Z = 1$) (ข) กรณีที่มีตัวสะท้อนกลับที่ผิวด้านหลัง ($Z = 2$) (ค) กรณีที่มีตัวสะท้อนกลับที่ผิวด้านหลัง และที่ด้านบนของผิวมีลักษณะขรุขระ ($Z = 3 - 6$) (ง) กรณีที่ผิวด้านหลังมีลักษณะขรุขระ ($Z = 10 - 25$)

แฟกเตอร์การเพิ่มขึ้นของทางเดินแสง (pathlength enhancement) แทนด้วย B มีนิยามดังนี้

$$\text{การเพิ่มขึ้นของทางเดินแสง (B)} = \frac{\text{ค่าเฉลี่ยของทางเดินทางลำแสง}}{\text{ทางเดินทางลำแสงที่สั้นที่สุด (ความหนาของเซลล์, W)}} \quad (2.35)$$

กรณีที่ผิวด้านหน้าขรุขระไม่มีรูปแบบ และด้านหลังมีชั้นสะท้อนกลับแล้ว ค่าเฉลี่ยของทางเดินแสงสามารถแสดงสมการในรูปของอนุกรมกำลังได้ดังนี้

$$\bar{Z} = \frac{2W}{n^2} + \frac{6W(n^2-1)}{n^4} + \frac{10W(n^2-1)^2}{n^6} + \dots \quad (2.36)$$

ใช้หลักการของการขยายอนุกรมกำลัง (power series expansion) ที่ว่า

$$\frac{1}{(1-x)} = 1 + x + x^2 + x^3 + x^4 + \dots \quad (2.37)$$

ดังนั้นค่าแฟกเตอร์การเพิ่มขึ้นของทางเดินแสง B จะได้

$$B = 4n^2 - 2 \approx 4n^2 \quad (2.38)$$

ในกรณีค่า n (Si) = 3.54 ค่า B จะมีค่าเข้าใกล้ 50 ดังนั้นข้อมูลการเพิ่มขึ้นของทางเดินแสงนั้นจึงเป็นหลักฐานที่สำคัญที่ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์จำเป็นต้องมีโครงสร้างที่ผิวด้านหน้า และหลังให้สามารถกักแสงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

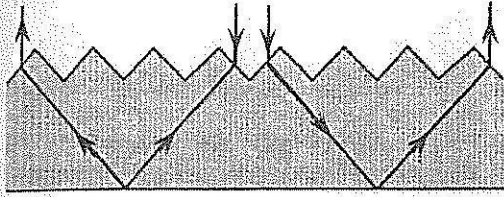
2.4.3 รูปทรงของผิวขรุขระเพื่อการกักแสง

ระดับคุณภาพของการกักแสงซึ่งได้ให้นิยามไว้ในคุณสมบัติของ Lambertian ที่กล่าวไว้ข้างต้นนั้นมีข้อจำกัดสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ ข้อจำกัดนี้คือมีการตอบสนองในแบบเดียว (isotropic response) ที่ไม่ขึ้นกับมุมของแสงตกกระทบ อย่างไรก็ตามทิศทางของแสงที่ตกกระทบส่วนใหญ่สามารถนำมาทำนายได้ แต่ลักษณะของการตอบสนองในแบบเดียวกันนี้ไม่สามารถให้ค่าเหมาะสมได้ ดังนั้นการออกแบบเซลล์แสงอาทิตย์ควรคำนึงอย่างดีเพื่อการตอบสนองของแสงที่ตกกระทบบนผิว ซึ่งถ้าผิวมีมุมเอียงเล็กน้อยก็ดีกว่าแสงที่ตกกระทบเกือบตั้งฉากกัน รูปทรงของผิวขรุขระจึงมีผลต่อการหักเหแสงเข้าสู่เซลล์ด้วย ในหัวข้อนี้เราแบ่งลักษณะของรูปทรงผิวได้เป็น 3 แบบใหญ่ ๆ แสดงดังรูปที่ 2.15 ซึ่งประกอบไปด้วย

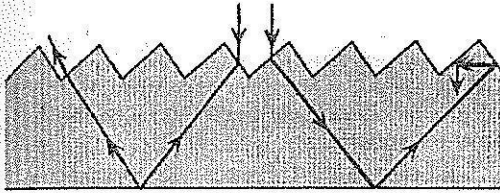
1. ผิวทรงพีระมิดแบบสมมาตร (symmetrical pyramid textures)
2. ผิวทรงพีระมิดแบบเอียง (tilted pyramid textures)
3. ผิวร่องตัววีมุมตั้งฉากแบบเอียง (skewed perpendicular grooves)

รูปที่ 2.16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของค่าเปอร์เซ็นต์ของแสงในส่วนที่ถูกกักในเซลล์และจำนวนครั้งที่ผ่านเข้าเซลล์ ผิวที่มีลักษณะแบบ Lambertian หรือขรุขระที่ไม่มีรูปทรงทางเรขาคณิตให้ผลการกักแสงที่ดีกว่าทั้งหมด แต่ควบคุมการก่อดัวยากกว่า ในทางปฏิบัติรูปทรงพีระมิดที่มีขนาดไม่เท่ากัน (random pyramids) ทำได้ง่ายกว่ารูปทรงพีระมิดที่เหมือนกัน (regular pyramid) ส่วนผิวรูปทรงพีระมิดแบบกลับหัว (inverted pyramids) ให้ผลที่ดีกว่า

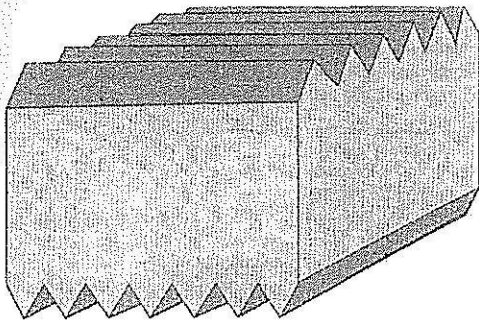
เล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับรูปทรงพีระมิดแนวยอดตั้งที่เหมือนกัน เนื่องจากมีโอกาสที่แสงที่ออกไปหักเหกลับเข้ามาอีก ครั้งสูงกว่า ในรูปแบบของ brickwork หรือเรียกว่ารูปแบบของ Tiler แสดงกำหนดรูปที่ 2.17 รูปดังกล่าวเป็น รูปทรงพีระมิดแต่เลื่อนตำแหน่งเล็กน้อยอย่างเหมาะสมเพื่อให้เกิดผลของการหักเหแสงที่ดีขึ้น



(ก) ผิวทรงพีระมิดแบบสมมาตร

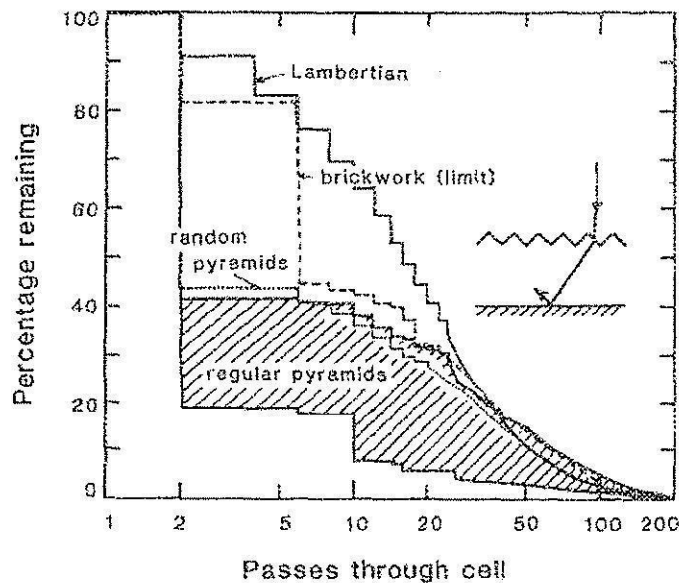


(ข) ผิวทรงพีระมิดแบบเอียง

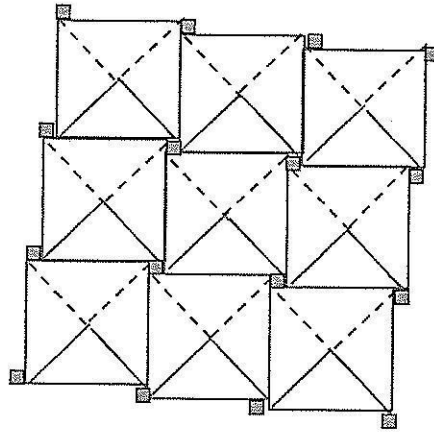


(ค) ผิวร่องตัววีมุมตั้งฉากแบบเอียง หรือเรียกว่า Perpendicular slats

รูปที่ 2.15 รูปแบบต่าง ๆ ของผิวขรุขระของเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อการกักแสง



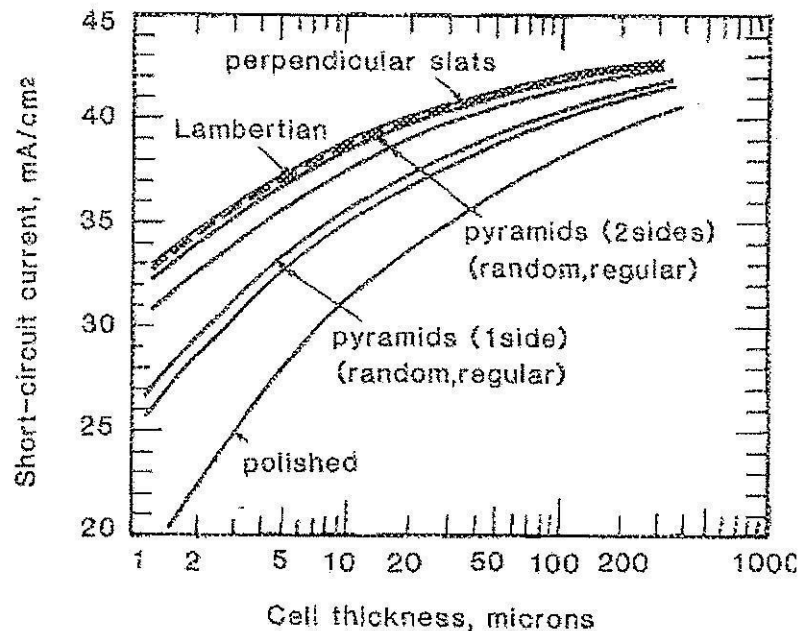
รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ของค่าเปอร์เซ็นต์ของแสงในส่วนที่ถูกกักในเซลล์และจำนวนครั้งที่ผ่านเข้าเซลล์ โดยพิจารณา เซลล์ที่ผิวด้านบนที่มีรูปทรงต่าง ๆ กัน



รูปที่ 2.17 รูปทรงที่ผิวในแบบของ Tiler

การเพิ่มศักยภาพของการกักแสงของโครงสร้างที่ผิวแบบรูปทรงพีระมิดมีหลักการอยู่ 3 แบบคือ

1. มีโครงสร้างพีระมิดที่ผิวด้านหลังของเซลล์
2. ออกแบบลายพีระมิดให้อยู่ในตำแหน่งที่ต้องการ
3. โครงสร้างผิวรูปทรงพีระมิดเอียงเล็กน้อย



รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ของการคำนวณของค่ากระแสลัดวงจรและความหนาของเซลล์ ในกรณีที่มีแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ มีโครงสร้างของผิวที่แตกต่างกัน

คุณสมบัติของการกักแสงที่ดีย่อมนำไปสู่ผลของกระแสลัดวงจรที่สูงขึ้น รูปที่ 2.18 แสดงความสัมพันธ์ของการคำนวณค่ากระแสลัดวงจรและความหนาของเซลล์ ซึ่งกราฟแสดงให้เห็นว่าเซลล์ที่มีผิวโครงสร้างต่าง ๆ กันต่างก็ให้ค่ากระแสลัดวงจรสูงขึ้นเมื่อเซลล์มีความหนาขึ้น แต่หลังจากค่าความหนา 200 – 300 ไมครอนแล้วค่ากระแสลัดวงจรจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ดังนั้นความหนาของแผ่นเซลล์จึงเป็นแฟคเตอร์ที่สำคัญต่อค่า I_{sc} เป็นอย่างมาก จากกราฟเราจะ

เห็นว่าผิวของแผ่นเซลล์ที่มีลักษณะขรุขระในรูปแบบต่าง ๆ กันนั้นให้ค่า I_{sc} สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นเซลล์ที่มีผิวเรียบ เมื่อพิจารณาผิวขรุขระของแผ่นเซลล์ที่มีโครงสร้างแบบร่องตัววีมุมตั้งฉาก (perpendicular slats) เราพบว่าเซลล์ให้ค่า I_{sc} ที่สูงใกล้เคียงกับแบบ Lambertian และรูปทรงพีระมิต 2 ด้าน (ด้านหน้า และด้านหลัง) แบบ random ส่วนรูปทรงพีระมิต 2 ด้านแบบ regular ให้ค่า I_{sc} น้อยกว่าเช่นเดียวกับรูปทรงพีระมิตด้านเดียว

2.4.4 ประสิทธิภาพเชิงควอนตัมภายใน

จากหัวข้อที่กล่าวมานั้นการกักแสงในเซลล์ด้วยโครงสร้างผิวขรุขระเกิดขึ้นเพื่อนำไปสู่การให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงที่ผิวมีค่าต่ำที่สุด ทำให้ได้ค่าประสิทธิภาพเชิงควอนตัม (Quantum Efficiency, QE) ของเซลล์มีค่าสูง

ค่าประสิทธิภาพเชิงควอนตัมคือจำนวนของคู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้นมาเมื่อมีแสงโฟตอนตกกระทบผิวเซลล์ และเราสามารถพิจารณาได้เป็น 2 ประเภทคือ 1. ประสิทธิภาพเชิงควอนตัมภายนอก (External quantum efficiency, EQE) 2. ประสิทธิภาพเชิงควอนตัมภายใน (internal quantum efficiency, IQE)

ประสิทธิภาพเชิงควอนตัมภายนอก (EQE) คือ ประสิทธิภาพของการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ที่พิจารณาผลของการสะท้อนแสงที่ผิวด้านบน แสดงดังสมการที่ (2.39)

$$EQE = \frac{hc}{q\lambda} SR \quad (2.39)$$

โดยที่ SR คือสเปกตรัมการตอบสนอง

$hc/q\lambda$ เท่ากับ 1.24 เมื่อพิจารณาให้ความยาวคลื่น (λ) มีหน่วยเป็น μm

ประสิทธิภาพเชิงควอนตัมภายใน (Internal quantum efficiency, IQE) คือ ประสิทธิภาพการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล เมื่อพิจารณาว่าไม่มีการสะท้อนแสงกลับที่ผิวด้านบนซึ่งมีความสัมพันธ์กับ EQE ดังสมการที่ (2.30)

$$IQE = \frac{EQE}{(1-R)} \quad (2.30)$$

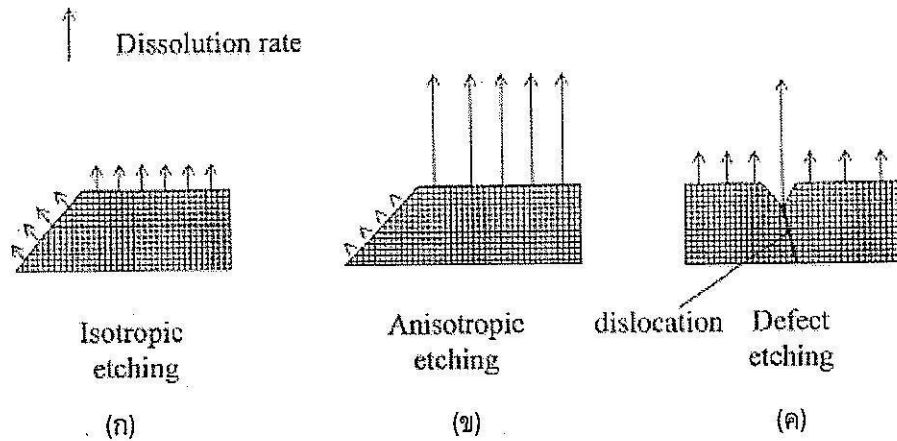
โดยที่ R คือสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงที่ผิวของเซลล์แสงอาทิตย์ จากความสัมพันธ์เราพบว่า EQE และ IQE มีความเกี่ยวข้องกับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง ดังนั้นเมื่อเราสามารถลดผลกระทบของแสงสะท้อนกลับได้ ค่าประสิทธิภาพเชิงควอนตัมจะมีค่าสูง

ในทางปฏิบัติเราสามารถคำนวณหาประสิทธิภาพเชิงควอนตัมภายใน (internal quantum efficiency, IQE) ของเซลล์ได้จากการวัดค่าตอบสนองสเปกตรัม (spectral response) $SR(\lambda)$ หน่วย A/watt ในแต่ละค่าความยาวคลื่น และค่าการสะท้อนแสงรวมในครึ่งวงกลม (hemispherical reflectance) $R(\lambda)$ ซึ่ง IQE แสดงสมการได้ดังนี้

$$IQE = SR \cdot \frac{hc}{q\lambda(1-R)} \quad (2.31)$$

ค่า IQE ยังสามารถนำไปสู่การหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ ประกอบด้วย

1. ที่ช่วงความยาวคลื่นยาว ๆ ค่า IQE สามารถนำไปสู่การหาค่าความเร็วในการรวมตัวที่ผิว
2. คุณสมบัติของการกักแสง
3. ที่บริเวณความยาวคลื่นช่วงอินฟราเรด ค่า IQE สามารถนำไปคำนวณหาค่าความยาวในการแพร่ของพาหะ
ข้างน้อยได้ (minority carrier diffusion length)



รูปที่ 3.1 ลักษณะของรูปแบบการกัดผิวซิลิคอนที่มีแตกต่างกันจำแนกได้เป็น 3 ลักษณะ

ในกรณีของผลึกซิลิคอนในระนาบหลักที่ประกอบด้วยระนาบ (100) (110) และ (111) ค่าความหนาแน่นของอะตอมมีอัตราส่วนเท่ากับ 1:1.414:1.155 และในระนาบเหล่านี้มีพันธะแขวนขาด (dangling bonds) เท่ากับ 1, 2 และ 1 ตามลำดับ ความหนาแน่นของพันธะที่เสียหายนี้ในระนาบทั้ง 3 มีอัตราส่วนเป็น 1:0.707:0.577 ตามลำดับ ตำแหน่งระนาบของผลึกที่เกิดการละลายเรียกว่า crystal dissolution ซึ่งจะมีสัมพันธ์กับความหนาแน่นของพันธะที่เสียหาย

3.3 ผลกระทบของการกัดในลักษณะ Anisotropic

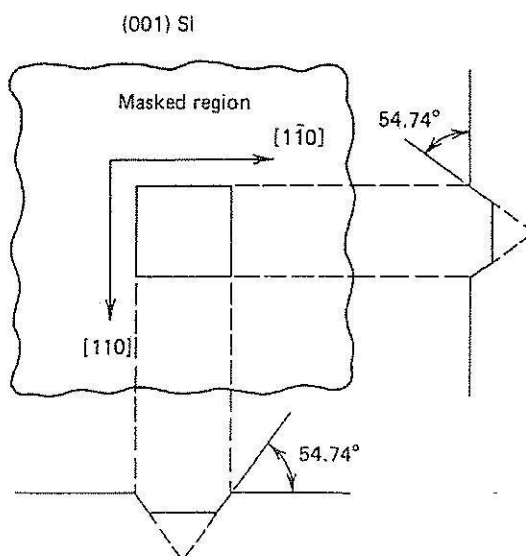
โดยทั่วไปแล้วการกัดแบบ Anisotropic จะมุ่งเน้นสำหรับการตัดส่วนเล็ก ๆ ของชิปสารกึ่งตัวนำ หรือทำผิวขรุขระ (Texturing surface) ให้แก่เซลล์แสงอาทิตย์ การกัดสามารถก่อให้เกิดรูปร่างตัววี และร่องแนวตั้ง (vertical grooves) รวมถึงเป็นเทคนิคที่สำคัญในเทคโนโลยีวงจรรวมในขนาดสเกลไมโคร

การกัดผิววัสดุสารกึ่งตัวนำเกิดขึ้นในบริเวณที่มีการละลายได้ (dissolution) กระบวนการละลายของชั้นผิวจะเกิดขึ้นที่ระนาบ (111) เนื่องจากระนาบนี้มีความหนาแน่นของพันธะที่เสียหายน้อยที่สุด และให้อัตราการละลายก็ถูกจำกัด การกัดที่ถูกจำกัดการแพร่จะเกิดขึ้นเมื่อให้อุณหภูมิสารละลายสูงขึ้นและนำไปสู่การกัดผิวที่มีรูปแบบเดียวกันในทุกๆ ทิศทาง

ที่ระนาบ (111) ของ Si ที่เกิดออกซิไดซ์เร็วกว่าระนาบอื่น ๆ นั้นมีระดับดีกรีของ anisotropy สูง ผลกระทบนี้จะเกิดผลมากเมื่ออุณหภูมิลดลง และมักจะพบในกระบวนการกัดที่อุณหภูมิ 0-100°C ด้วยสารละลายเคมี (wet chemical etching) ดังนั้นที่ผิวของ Si (111) จึงเกิดออกไซด์ปกคลุมที่ผิวเร็วมาก และไม่สกัดกั้นการละลายในเวลาต่อมา การสนับสนุนของหลักการข้างต้นนี้ เรายังพบว่า อัตราการกัดผิวซิลิคอนที่ระนาบ (111) และการทำละลาย SiO_2 ที่ปกคลุมบนผิวหน้าประมาณได้เป็น 85 Å/min ที่อุณหภูมิ 85°C

ผลกระทบของการกัดในแบบ Anisotropic ที่ระนาบ (100) ของซิลิคอนแสดงในรูปที่ 3.2 โดยที่ทิศทางการหันของระนาบของช่องเปิดด้วยหน้ากากแสดงในรูป เมื่อเราสมมุติว่าอัตราการกัดของทุก ๆ ระนาบ (111) เป็นค่าเฉพาะที่มีค่าน้อยมาก ๆ ทำให้อัตราการส่วนการกัดของระนาบ (100) : (111) มีค่ามากกว่า 100 เท่า ในเหตุการณ์นี้

เส้นรอบนอกของการกัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่าหลังจากช่วงเวลาที่กำหนด อย่างไรก็ตามในที่สุด การกัดก็จะจำแนกได้เป็นรูปร่างตัววี (V-groove) แสดงในรูปของรอยเส้นประ ในทางปฏิบัติอัตราการกัดที่ระนาบ (111) นั้นเกิดน้อยมากแต่ก็เกิดค่าจำกัดค่าหนึ่ง ดังนั้นอาจจะเกิดร่องรอยการตัดข้างได้เกิดขึ้นได้



รูปที่ 3.2 เส้นรอบนอกของการกัดสำหรับซิลิคอนระนาบ (001)

3.3.1 ส่วนผสมอะคาไลน์ (Alkaline solutions)

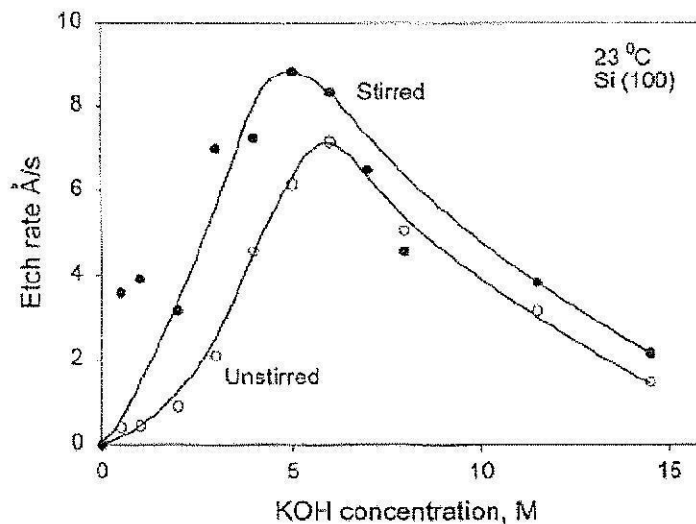
ส่วนผสมของของกลุ่มสารละลายอัลคาไลน์ได้มีการนำมาใช้อย่างแพร่หลายในกระบวนการกัดผิวซิลิคอน สารละลายอัลคาไลด์พื้นฐานที่ใช้กันมากที่สุดคือ KOH (Potassium Hydroxide) และ EPD หรืออาจเรียก EPW ซึ่งเป็นส่วนผสมของ ethylenediamine และ pyrocatecol และน้ำ แต่ก็มีสารละลายอัลคาไลน์อื่น ๆ ที่ใช้กัน อาทิเช่น NH_4OH , hydrazine, ethanolamine และ tetramethyl ammonia hydroxide (TMAH) การนำส่วนผสมชนิดต่าง ๆ มาใช้งานต้องคำนึงถึงปัจจัยที่สำคัญประกอบด้วย อัตราการกัด การเลือกกัดแบบ anisotropic การกัดกร่อนวัสดุของหน้ากาก คุณภาพของผิว กระบวนการที่สามารถควบคุมได้ ความปลอดภัย ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และต้นทุนของสารละลาย

สำหรับข้อดีของการใช้ส่วนผสมของ KOH กับความเข้มข้น 44 wt% ในน้ำก็มีอัตราส่วนการกัดที่สูงระหว่าง (100):(111) ต้นทุนต่ำกว่าสารละลาย TMAH และไม่เป็นพิษ อีกทั้งยังได้ผลการกัดที่ดีที่อุณหภูมิประมาณ 80°C กับอัตราส่วนการกัดแบบ anisotropic เท่ากับ 300:600:1 สำหรับซิลิคอนระนาบ (100):(110):(111) ด้วยอัตราการกัดเท่ากับ $1.20 \mu\text{m}/\text{min}$ บนระนาบ (110) การเจือจางความเข้มข้นของส่วนผสมทำให้ลดค่าอัตราส่วนการกัดลง แต่ผลที่ได้เราก็สามารถควบคุมอัตราการกัดได้ดีขึ้น การเติม IPA (isopropanol alcohol) ลงในสารละลายยังสามารถลดผลการกัดของหน้ากากชนิดออกไซด์ได้ อย่างไรก็ตามมันยังส่งผลถึงการเปลี่ยนแปลงของพฤติกรรมกัดซึ่งระนาบ (100) จะกัดออกไปอย่างรวดเร็วกว่าที่ระนาบ (110) อีกทั้งการควบคุมความหนาแน่นของ alcohol เป็นสิ่งจำเป็นเพราะมันสามารถระเหยไปในระหว่างกระบวนการกัดที่ใช้เวลานาน

สารละลาย EPD อยู่ในกลุ่มอัลคาไลน์ซึ่งมีคุณสมบัติ 3 แบบที่ดีที่สุดสำหรับการสกัดขนาดไมโครนั้นคือ เป็นการสกัดแบบ anisotropic และมีการสกัดแบบเลือกพื้นที่ที่ดี อีกหนึ่งใช้ได้กับหน้ากาทหลากหลายชนิดเช่น SiO_2 , Si_3N_4 , Cr และ Au ในกรณีนี้ Si เต็มอะตอมสารเจือปนไฮโดรเจนเข้มข้นสูงแล้ว สารละลาย EPD ยังแสดงผลอัตราการสกัดที่ต่ำมากเกือบเป็นศูนย์ด้วย อย่างไรก็ตามสารละลาย EPD นั้นมีอัตราการสกัดแบบ anisotropic ที่ต่ำกว่าการใช้สารละลาย KOH อยู่มาก ดังนั้นเราจึงพบเห็นการใช้สารละลาย KOH เพื่อใช้ในกระบวนการสกัดแบบ anisotropic ใน Si อย่างแพร่หลาย ดังนั้นในงานวิจัยนี้เรจึงนำสารละลาย KOH มาใช้เพื่อทำการสกัดผิวซิลิคอนแบบ anisotropic

3.3.2 สารละลาย KOH

อัตราการสกัดผิวซิลิคอนในสารละลาย KOH นั้นมีค่าอยู่ในช่วงต่ำตั้งแต่ 1 Å/s ที่อุณหภูมิห้องเมื่อทำการเจือจาง KOH 0.5 M และอัตราจะสูงขึ้นถึง 2000 Å/s ที่อุณหภูมิสูงเมื่อใช้สารละลายเข้มข้นถึง 40% รูปที่ 3.3 แสดงความสัมพันธ์ของอัตราการสกัดผิว Si (100) ที่สูงขึ้นที่อุณหภูมิห้องในสารละลาย KOH ที่มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น และจะเริ่มลดลงเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นหลัง 5 M อย่างไรก็ตามปัจจัยภายนอกอย่างการกวนสารละลายก็เป็นปัจจัยที่สำคัญที่ทำให้อัตราการสกัดมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากผลของการส่งถ่ายมวลที่เกิดขึ้นในกระบวนการ อีกทั้งระยะเวลาของการสกัดที่ยาวนานขึ้นก็เป็นผลให้อัตราการสกัดลดลงด้วยเช่นกัน



รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสกัดและความเข้มข้น (molarity, M) ของสารละลาย KOH สำหรับแผ่นฐาน Si (100) ภายใต้อุณหภูมิการสกัด 23°C

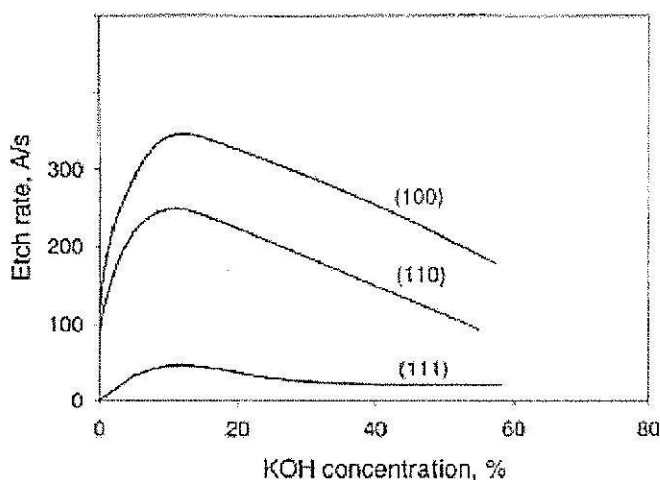
อัตราการสกัดภายใต้การเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้น KOH-IPA นั้นยังขึ้นอยู่กับระนาบของผลึก Si ซึ่งแสดงกราฟความสัมพันธ์ดังรูปที่ 3.4 อย่างไรก็ตามระนาบต่าง ๆ กันที่มีผลกระทบต่ออัตราการสกัดนี้จะเกิดผลไม่ชัดเจนที่มีกระบวนการภายใต้อุณหภูมิต่ำ ๆ ระดับพลังงานแอกติเวชัน (activation energy) ของกระบวนการสกัดเท่ากับ 0.56-62 eV สำหรับ KOH ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการสกัดถูกควบคุมด้วยกระบวนการที่ผิว (surface process) สารละลาย KOH จะถูกลดความเป็นต่างด้วยการเติมสารละลาย IPA ทำให้อัตราการสกัดลดลง

คุณลักษณะเด่นของการสกัดผิวในสารละลาย KOH จะให้คุณสมบัติการสกัดแบบ anisotropic ได้โดยธรรมชาติ โดยมีอัตราการสกัดขึ้นเปลี่ยนแปลงตาม orientation ของแผ่นผลึก Si ดังนั้นอัตราการสกัดของแผ่นผลึก

Si สำหรับระนาบหลัก ๆ คือ (110) > (100) > (111) ความแตกต่างอย่างชัดเจนสำหรับอัตราการกัดที่ระนาบต่าง ๆ กันนั้นขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลาย อุณหภูมิ และขั้นตอนการวัด ยกตัวอย่างเช่น ในสารละลาย KOH เข้มข้น 20% มีกระบวนการภายใต้อุณหภูมิ 100°C ค่าอัตราการกัดสำหรับ (110):(100):(111) เท่ากับ 930:560:19 Å/s หรือแสดงความสัมพันธ์ในอัตราส่วนดังนี้ 50:30:1 ค่าอัตราส่วนของอัตราการกัดนี้จะยิ่งสูง และแตกต่างกันมากขึ้นที่กระบวนการภายใต้อุณหภูมิห้องซึ่งจะมีอัตราส่วนเป็น 160:100:1 ในสารละลาย 20% KOH

อัตราส่วนของ IPA ต่อ KOH ยังเป็นปัจจัยสำหรับ anisotropic etching ที่ทำให้อัตราการกัดผลึกผิว Si ทั้งสามระนาบนั้นลดลง และเป็นผลให้อัตราการกัดที่ระนาบ (110) และ (100) เปลี่ยนไปตามความสัมพันธ์ในรูปที่

3.4



รูปที่ 3.4 อัตราการกัดของ orientation หลักของผลึกในสารละลาย KOH ผสมด้วย IPA ที่อุณหภูมิ 80°C

แผ่นผลึกซิลิคอนที่มีการเติมอะตอมสารเจืออย่างเข้มข้นจะไม่มีผลต่ออัตราการกัดในระนาบต่าง ๆ ถ้าความหนาแน่นของสารเจือไม่เกิน 10^{19} /cm³ แต่ในกรณีที่เติมสารเจือมากขึ้นจะทำให้อัตราการกัดลดลงอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารเจือชนิดโบรอน

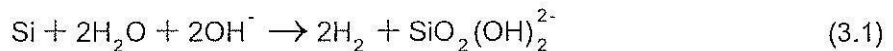
ในระหว่างการกัด Si ในสารละลาย KOH นั้นอาจเกิดคราบสีขาวซึ่งมีแนวโน้มมากขึ้นเมื่อ KOH ความเข้มข้นมากขึ้นแต่ต่ำกว่า 15% ค่าอัตราการกัดที่สูงยังก่อให้เกิดการสะสมและจับตัวกันของ Si(OH)₄ ขึ้นที่ผิวและนำไปสู่การก่อตัวของชั้น SiO₂ แต่ในกรณีที่ KOH มีความเข้มข้นต่ำกว่า 30% เราจะพบแนวโน้มการก่อตัวของรูปทรงพีระมิดที่ผิวของแผ่น Si ระนาบ (100) ซึ่งความหนาแน่นของภูเขาพีระมิดนี้แปรผันตามอุณหภูมิ ความเข้มข้นของ KOH

3.3.3 กลไกการกัด

การกัดผิวซิลิคอนด้วยสารละลาย KOH เป็นกระบวนการที่ค่อย ๆ เกิดขึ้นของบริเวณที่สามารถละลายได้ (dissolution) และการเกิดขึ้นของฟองไฮโดรเจนที่มีขนาดประมาณ 1-3 มิลลิเมตร โดยที่ไฮโดรเจน 2 โมเลกุลนั้นก่อเกิดจากอะตอม Si แต่ละอะตอมละลายแตกออกจากโครงผลึกไปในระหว่างกระบวนการกัด กลไกหลัก ๆ ของการ

สกัดคือการได้สารประกอบ $\text{SiO}_2(\text{OH})_2^{2-}$ ซึ่งสามารถเปลี่ยนเป็นสารประกอบที่มีอนุกรมมาก ๆ (polymerized) ผลของการวัด Raman spectra พบว่า OH^- ยังเป็น species ชนิดหนึ่งสำหรับ activate etching อีกด้วย ซึ่งความหนาแน่นของ OH^- จะลดลงในระหว่างการสกัด อีกทั้งน้ำก็ยังเป็น activate species ชนิดหนึ่งเพราะ Si จะไม่ถูกสกัดผิวจากผลของสารละลาย alcohol (ไม่มีส่วนของน้ำ) ใน KOH ส่วน K^+ เป็นประจุบวกในสารละลายนั้นจะไม่เกี่ยวข้องโดยตรงกับปฏิกิริยาการสกัด อย่างไรก็ตาม K^+ อาจกระทบต่อสมบัติทางไฟฟ้าซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการในกระบวนการผลิตวงจรรวม และอุปกรณ์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ถึงแม้ว่าการใช้สารละลาย TMAH ซึ่งแพร่หลายในกระบวนการผลิต ICs และ MEMs แต่ก็ยังไม่แพร่หลายในอุตสาหกรรมการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์มากนักเนื่องจากยังมีต้นทุนที่สูงกว่าในอัตราการสกัดเดียวกัน

ลักษณะการกัดผิว Si จะเกิดขึ้นในส่วนผสมสารละลาย KOH ต่างกัน ในกรณีที่ทำการเติม IPA-buffered สารละลาย IPA นี้จะไม่เปลี่ยนส่วนประกอบของสารละลายหลักหรือไม่มีความเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาการกัด (etching reaction) ผลรวมของปฏิกิริยาการกัด Si ในสารละลาย KOH แสดงในสมการที่ (3.1) เราจะพบว่า H_2O และ OH^- (hydroxide) แสดงคุณสมบัติเป็น reactants ส่วน $\text{Si}(\text{OH})_2(\text{O}^-)_2$ แสดงผลผลิตของปฏิกิริยา (reaction products)



กรณีที่เราพิจารณาผลของจลศาสตร์การกัด (etching kinetic) แล้ว ความสัมพันธ์ของอัตราการกัด (R) ต่อความเข้มข้นของ KOH ในช่วง 10% - 60% นั้นสามารถนำมาแสดงโมเดลได้ด้วยสมการที่ (3.2)

$$R = k[\text{H}_2\text{O}]^4 [\text{OH}^-]^{1/4} \quad (3.2)$$

โมเดลนี้แสดงถึงผลของ H_2O และ OH^- ต่อปฏิกิริยาการกัด เมื่อพิจารณาการมีน้ำในสารละลายแล้วในไอออนของ $\text{H}_2\text{O}_{\text{free}}$ และ $\text{OH}^-_{\text{free}}$ มีผลต่อปฏิกิริยาการกัด ดังนั้นความสัมพันธ์ของอัตราการกัดแสดงได้ดังนี้

$$R = C[\text{H}_2\text{O}_{\text{free}}]^r [\text{OH}^-_{\text{free}}]^s \quad (3.3)$$

สมการที่ (3.3) แสดงรูปแบบคล้ายกับสมการที่ (3.2) เมื่อความเข้มข้นของ hydroxide ต่ำ นั่นคือ $[\text{OH}^-_{\text{free}}]$ มีค่าน้อยเป็นผลให้อัตราการกัดมีค่าต่ำ แต่ถ้ามีความเข้มข้นสูงขึ้น ทำให้ $\text{H}_2\text{O}_{\text{free}}$ มีค่าต่ำลงแล้วอัตราการกัดที่เกิดขึ้นก็จะมีค่าลดลงด้วยเช่นกัน ดังนั้นแล้วในกรณีส่วนผสมมีความเข้มข้นปานกลาง นั่นคือทั้ง $\text{OH}^-_{\text{free}}$ และ $\text{H}_2\text{O}_{\text{free}}$ ต่างก็มีค่าสูงเป็นผลให้อัตราการกัดมีค่าสูงสุดค่าหนึ่งดังกราฟรูปที่ 3.3 อัตราการกัดผิวจึงขึ้นอยู่กับความแตกต่างส่วนผสมสารละลาย alkaline เนื่องจากมีตัวเลข hydration ที่ต่างกันในส่วนผสม

3.4 ขั้นตอนและวิธีการกัดแผ่นซิลิคอนแบบ Anisotropic ด้วยสารประกอบ KOH

การกัดแผ่นซิลิคอนแบบ anisotropic ด้วยสารประกอบ KOH (Potassium hydroxide) และ IPA (Isopropyl alcohol) เมื่อน้ำทำให้เกิดกลไกการกัด (etching mechanisms) สามารถจำแนกได้ดังนี้

- สารละลาย KOH ซึ่งเป็นส่วนสำคัญสำหรับการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี มีทำหน้าที่สกัดแผ่นฐานซิลิคอนโดยในแต่ละระนาบมีอัตราการสกัดที่แตกต่างกัน ที่เรียกว่า anisotropic etching ทำให้เกิดผิวหน้าขรุขระและก่อตัวเป็นโครงสร้างรูปร่างแบบพีระมิดเมื่อเวลาผ่านไป

- IPA ที่เติมลงไปเพื่อลดความเป็นด่าง และอัตราการสกัดให้ลดลง และยังทำหน้าที่ยับยั้งการเกิดฟองไฮโดรเจนไม่ให้มีมากเกินไป หรือกำจัดฟองไฮโดรเจนให้ออกจากผิว Si และช่วยให้เกิดการกระจายตัวของพีระมิดเป็นแบบสม่ำเสมอ (uniformity) และขนาดของพีระมิดมีความใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ยังช่วยให้พีระมิดมีความแหลมคมมากขึ้นอีกด้วย

- อุณหภูมิที่ควบคุมในระหว่างกระบวนการทางเคมีนั้นจะเป็นตัวกำหนด และควบคุมขนาดและปริมาณของฟองไฮโดรเจน ซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญที่สามารถกำหนดขนาดของพีระมิดที่เกิดขึ้นได้

- การกวนสารละลายในระหว่างการสกัดผิวเพื่อช่วยเร่งให้กระบวนการทางเคมีเกิดเร็วขึ้นนั้น

ในการศึกษานี้ได้ใช้แผ่นฐานผลึกเดี่ยวซิลิคอน CZ p-type ความต้านทานไฟฟ้า 2.4 ohm-cm, ขนาด 2 นิ้ว และหนา 270 μm . ผิวขัดมัน 1 ด้าน ขั้นตอนการสกัดแผ่นซิลิคอนแบบ anisotropic ด้วยสารละลายประกอบ KOH และ IPA สามารถแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

1) การทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนด้วยกระบวนการ RCA (Radio Corporation of America) ประกอบด้วยขั้นตอน RCA 1 เพื่อกำจัด organic ออกไปจากผิวซิลิคอน ต่อมาผ่านขั้นตอนกำจัดโลหะออกจากผิวซิลิคอนด้วยกระบวนการ RCA 2 ขั้นตอนของกระบวนการทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนมีรายละเอียดดังนี้

1.1 ขั้นตอน RCA 1

- เตรียม (30%) H_2O_2 : (28-30%) NH_4 :DI water มีอัตราส่วนของสารละลายเท่ากับ 1:1:5

- วางแผ่น Si ลงใน slot holder และแช่ลงในสารละลาย และต้มให้ร้อนควบคุมอุณหภูมิคงที่ที่ 70 °C เป็นเวลา 10 นาที

- ล้างสารละลายออกจากแผ่น Si ด้วยน้ำ DI ไหลผ่านนาน 10 นาที

- เป่าแผ่น Si ให้แห้งด้วยก๊าซ N_2 บริสุทธิ์

1.2 ขั้นตอน RCA 2

- เตรียม (30%) H_2O_2 :(36.5-38%) HCL :DI water มีอัตราส่วนของสารละลายเท่ากับ 1:1:5

- วางแผ่น Si ลงใน slot holder และแช่ลงในสารละลาย และต้มให้ร้อนควบคุมอุณหภูมิคงที่ที่ 70 °C เป็นเวลา 10 นาที

- ล้างสารละลายออกจากแผ่น Si ด้วยน้ำ DI ไหลผ่านนาน 10 นาที

- เป่าแผ่น Si ให้แห้งด้วยก๊าซ N_2 บริสุทธิ์

2) การกำจัดชั้น native oxide ด้วย การจุ่มแผ่น Si ลงกรด Hydrofluoric (HF dip) ประมาณ 1 นาที

3) การสกัดแผ่น Si แบบ anisotropic ด้วยสารละลาย KOH โดยมีเงื่อนไขต่าง ๆ สำหรับการผลิตเพื่อให้ได้คุณสมบัติทางโครงสร้าง และทางแสงที่เหมาะสม โดยแสดงรายละเอียดในตารางที่ 3.1

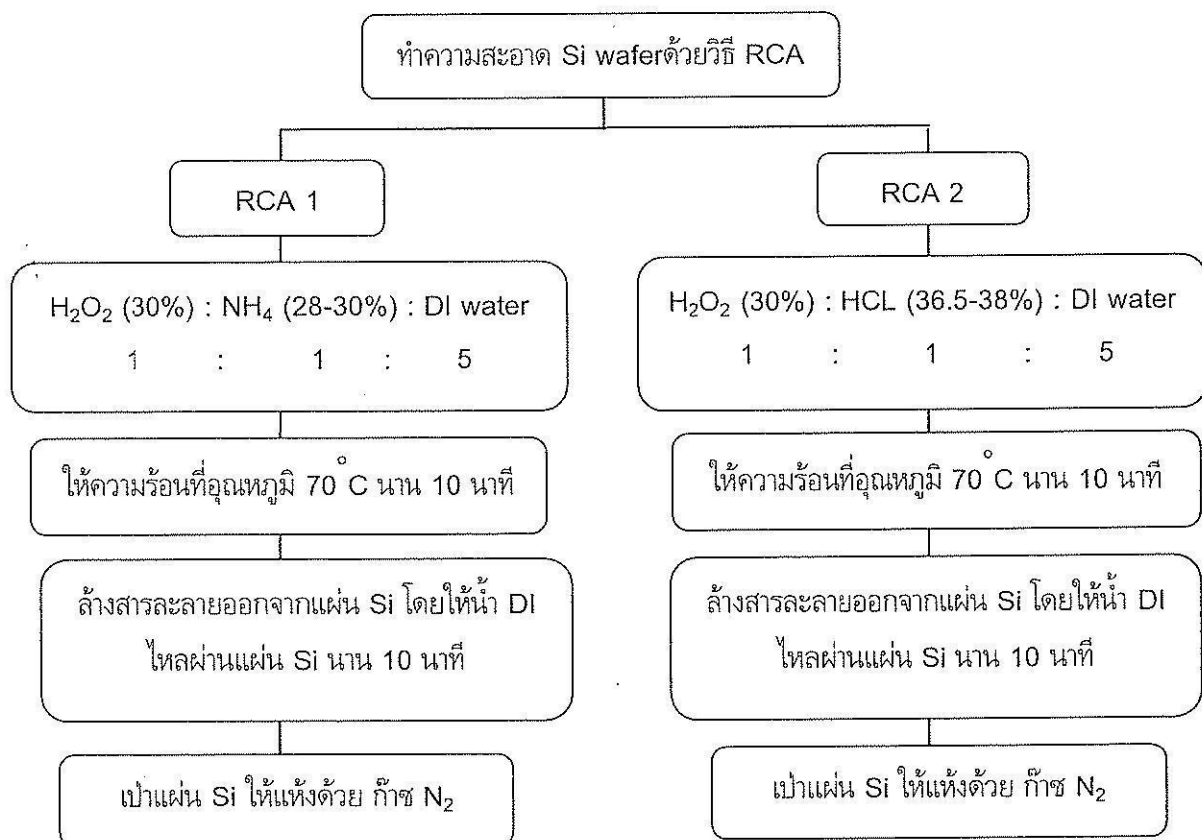
ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขการสกัดผิว Si ซิลิคอนด้วยสารละลาย KOH ที่มีการเติม IPA ที่เวลาคงที่ 40 นาที

ชื่อรหัสของตัวอย่าง	อุณหภูมิ (°C)	เวลาที่ใช้ในกระบวนการ	ส่วนประกอบของสารละลาย
K-01	90	40 นาที	(2.9%wt) KOH + (10%wt) IPA + (87.1%wt) DI water
K-02	80		
K-03	70		
K-04	60		

*หมายเหตุ (2.9%wt) KOH (ของแข็ง) คือ ใช้ KOH 2.9 g ต่อน้ำ 100 ml, (10%wt) IPA (ของเหลว) คือ IPA มีความเข้มข้น 786 g ต่อน้ำ 1000 ml ดังนั้นถ้าต้องการ IPA 10 g จะต้องใช้ IPA 12.7 ml และส่วนที่เหลือคือการเติมน้ำ DI ลงไปให้ครบ 100 ml

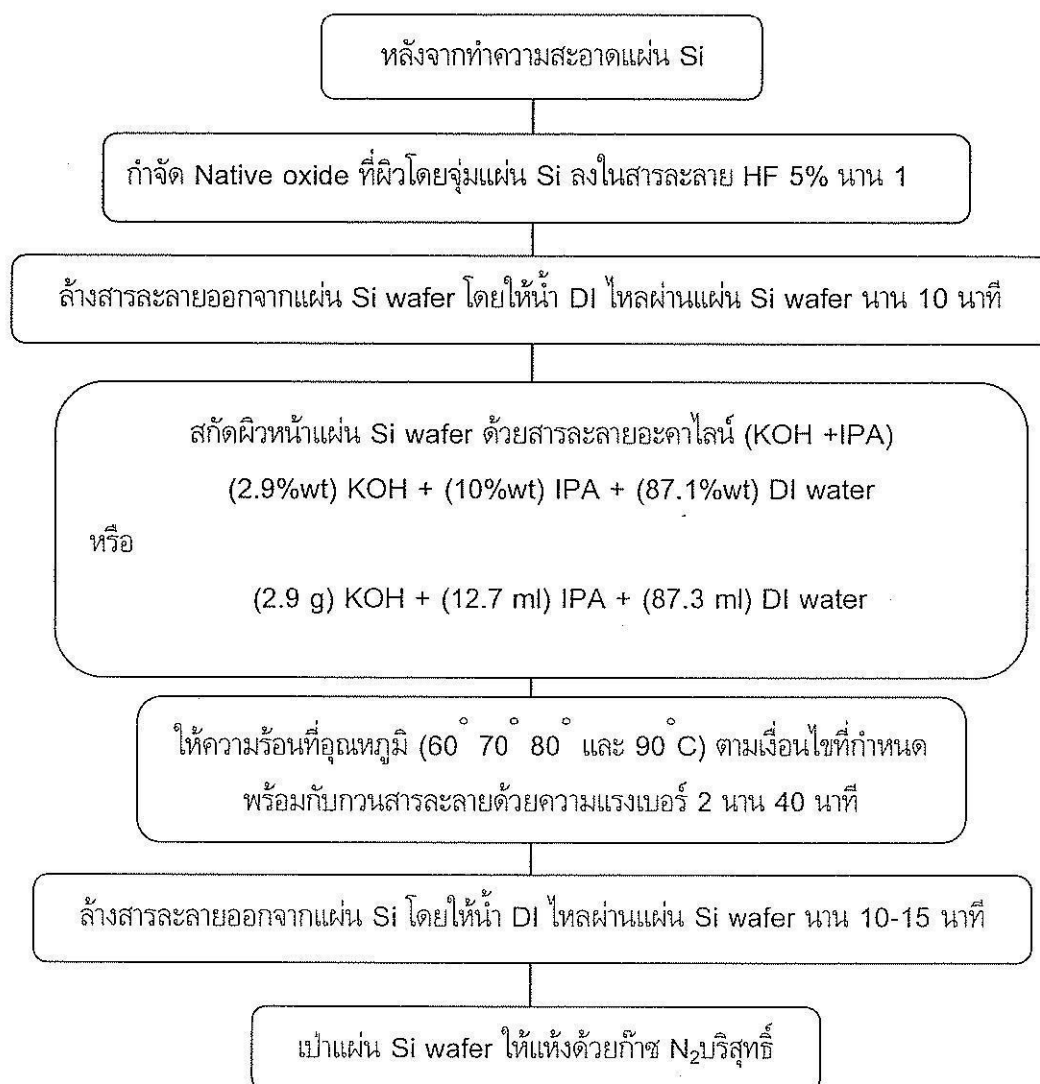
4) ล้างสารละลาย alkaline ออกจากแผ่น Si ด้วยน้ำ DI ไหลผ่านนาน 10 นาที และเป่าแผ่น Si ให้แห้งด้วยก๊าซ N₂ บริสุทธิ์

ขั้นตอนของกระบวนการทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนนั้น สามารถนำมาเขียนเป็นแผนภาพ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ขั้นตอน และกระบวนการทำความสะอาดแผ่นฐานซิลิคอน

ขั้นตอนของกระบวนการสกัดผิว Si (100) แบบ anisotropic ด้วยสารละลาย KOH ที่เติม IPA แสดง
 ในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ขั้นตอน และกระบวนการสกัดด้วยสารละลาย KOH

ผลที่ได้หลังกระบวนการสกัด

ผิวด้านขัดมันวาวเกิดเป็นผิวด้านทุก ๆ ตัวอย่างอย่างสม่ำเสมอ โดยสังเกตได้ด้วยตาเปล่าหลังการสกัดด้วยสารละลาย KOH กับการผสมของ IPA และน้ำ DI อีกทั้งผิวยังไม่เกิดคราบสีขาว ดังนั้นในขั้นตอนนี้จึงได้ผลขั้นต้นเป็นที่น่าพอใจก่อนนำไปศึกษาสมบัติทางโครงสร้างผิวของแผ่น Si ที่ถูกสกัดด้วยสารละลายดังกล่าว วิธีการส่องกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดด้วยอิเล็กตรอนกำลังไฟฟ้าสูงจะได้กล่าวรายละเอียดในบทที่ 4 ต่อไป

บทที่ 4

การศึกษาลักษณะทางโครงสร้าง และทางแสงของแผ่นฐานซิลิคอนที่ถูกสกัดด้วยสารละลาย KOH ที่เติม IPA

4.1 บทนำ

โครงสร้างแบบรูปทรงพีระมิดที่เกิดบนผิวซิลิคอนระนาบ (100) สามารถลดผลของการสะท้อนแสงกลับออกไปได้ เมื่อนำไปสร้างเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ เราจะได้เซลล์ที่มีประสิทธิภาพสูง อย่างไรก็ตามผิวที่เกิดขรุขระย่อมทำให้เกิดจุดพบพร่องที่ผิว (surface defects) ซึ่งจะส่งผลให้เกิดอัตราการรวมตัวที่ผิวสูงด้วยเช่นกัน ดังนั้นการออกแบบเซลล์แสงอาทิตย์ที่ดีจำเป็นต้องคำนึงถึงผลทางโครงสร้าง และทางแสงเพื่อให้ได้จุดเหมาะสมที่สุด ในการศึกษานี้จะมุ่งเน้นถึงการศึกษาหาเงื่อนไขทางอุณหภูมิต่ำ และระยะเวลาที่สั้นที่สุดเพื่อให้ได้โครงสร้างพีระมิดที่สม่ำเสมอและได้ค่าการสูญเสียทางแสงน้อยที่สุด โดยภาพโครงสร้างที่ผิวได้จากการส่องกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดด้วยอิเล็กตรอนกำลังไฟฟ้าสูงที่เรียกว่า Scanning Electron Microscope (SEM) การศึกษาการสะท้อนแสงได้จากผลการวัดด้วย UV-NIR Spectroscopy ในโหมด Hemisphere reflection mode

4.2 หลักการทำงานของเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

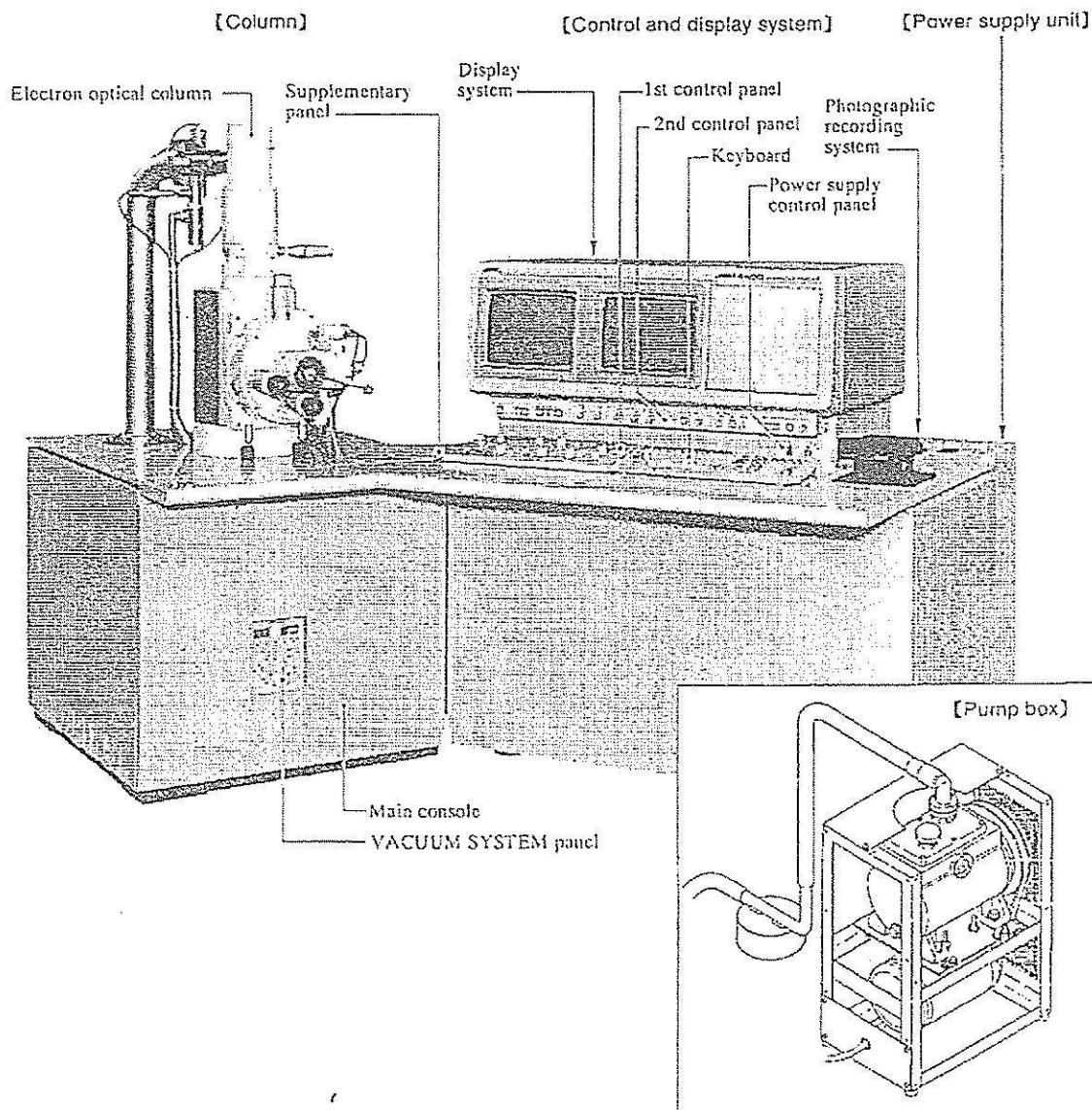
Scanning Electron Microscope เรียกโดยย่อว่า SEM หรือเรียกว่า กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีหลักการคือการใช้อิเล็กตรอนเพื่อสร้างภาพขยาย ซึ่งอิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกสร้างขึ้นโดยใช้ Electron Gun จากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกโฟกัสให้เข้มข้นและเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลงด้วยการผ่าน Condenser Lens จากนั้นจะถูกโฟกัสให้ตกลงบนผิวตัวอย่างด้วยการผ่าน Objective Lens อีกครั้งหนึ่ง ดังนั้นอิเล็กตรอนที่ตกลงบนผิวตัวอย่างนี้เป็นจุดที่เล็กมาก

ขดลวดควบคุมการเคลื่อนของลำแสงอิเล็กตรอน (Scan coil) จะควบคุมการกวาดของลำอิเล็กตรอนให้กวาดจากซ้ายไปขวา บริเวณผิวตัวอย่างที่อิเล็กตรอนตกลงนั้นจะเกิดสัญญาณอิเล็กตรอนขึ้นหลายรูปแบบซึ่งคล้ายกับการที่แสงตกกระทบลงวัตถุและสะท้อนออกจากผิว เราสามารถรับสัญญาณได้โดยใช้ Detector ที่เหมาะสมกับชนิดของสัญญาณ สัญญาณที่ได้จะนำมาขยายให้มีความแรงที่เหมาะสมแล้วนำมาสร้างเป็นภาพ

จอหลอดรังสีแคโทด (Cathod ray tube, CRT) เป็นส่วนแสดงภาพ ในหลอดรังสีแคโทดจะมีการสร้างลำอิเล็กตรอนและถูกบีบให้เป็นลำเล็กๆ แต่มีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าในกล้อง SEM มาก กล่าวคือใน SEM ลำอิเล็กตรอนมีขนาดศูนย์กลางในระดับนาโนเมตร คืออาจต่ำได้ถึง 5 นาโนเมตรหรือต่ำกว่า แต่ในจอ CRT มีขนาดศูนย์กลางประมาณ 0.1 เซนติเมตร เมื่อพิจารณาอัตราส่วนของลำอิเล็กตรอนของ SEM ต่อ CRT จะพบว่าห่างกันถึง 20000 เท่า ทำให้เกิดเป็นอัตราส่วนของกำลังขยายที่จะทำให้ภาพที่มีรายละเอียดได้ดี การสแกนใน CRT จะถูกควบคุมให้มีการสแกนแบบ Raster scan พร้อม ๆ กับการสแกนของลำอิเล็กตรอนในกล้อง ขณะเดียวกันความสว่างของจุดอิเล็กตรอนใน CRT จะขึ้นอยู่กับความแรงของสัญญาณจาก Amplifier ที่ขยายสัญญาณจาก Detector รับสัญญาณอิเล็กตรอนในกล้อง ถ้าสัญญาณแรงก็จะให้ความสว่างของลำอิเล็กตรอนมาก เมื่อส่งลงบนจอของ CRT ก็จะปรากฏเป็น

จุดสว่าง ในทางกลับกันถ้าสัญญาณแบกก็ได้จุดที่มีความสว่างน้อย บนจอก็จะปรากฏเป็นจุดสว่างน้อยด้วย บนจอ CRT จะทำการเรียงจุดของสัญญาณที่ได้นี้เป็นแถวจนครบเฟรมก็จะได้เป็นภาพออกมา

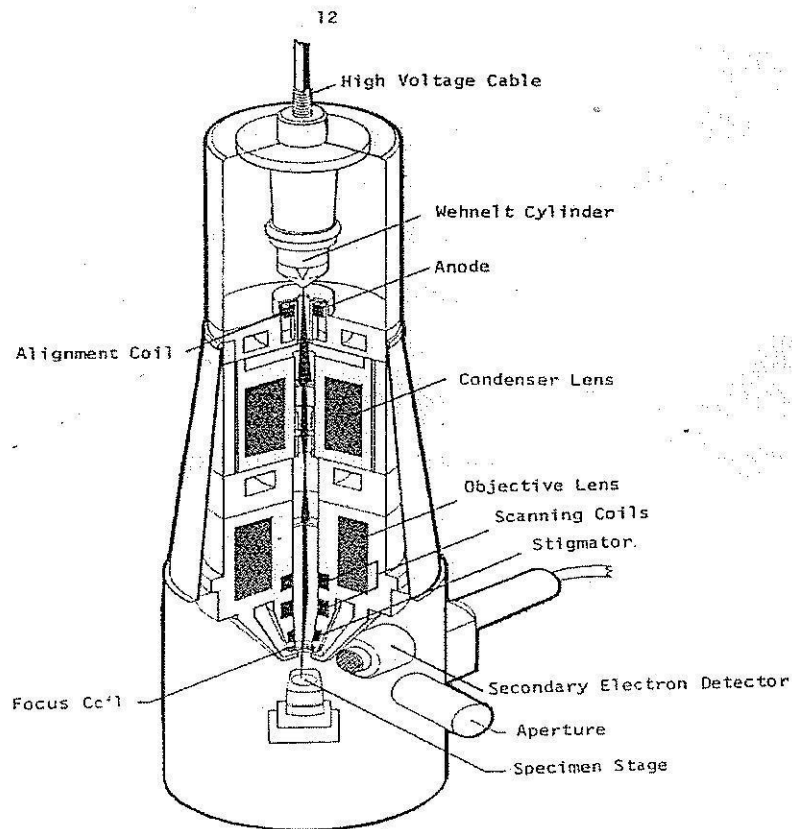
ส่วนประกอบของเครื่อง SEM ทั่วไปสามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ แสดงดังรูปที่ 4.1 คือ 1. ส่วนที่คล้ายกับปล่องภายในหลอดเรียกว่า Column 2. ส่วนตู้ควบคุมระบบไฟฟ้าทั้งหมดเรียกว่า Console unit ส่วน Column ยังประกอบด้วยส่วนประกอบพื้นฐานที่ให้กำเนิดอิเล็กตรอนแล้วรวบรวมให้ส่องไปยังผิวของตัวอย่างที่วางอยู่ในช่องตัวอย่าง ส่วนภายใน Console unit ควบคุมระบบไฟฟ้าแรงสูง ระบบสุญญากาศ และระบบถ่ายภาพซึ่งประกอบด้วยชิ้นส่วนของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่จัดไว้เป็นระบบเช่นการควบคุมลำแสงอิเล็กตรอนภายใน column จำเป็นต้องใช้ปุ่มบังคับที่อยู่บนแผงควบคุมของ Console unit นอกเหนือจาก Column และ Console unit



รูปที่ 4.1 ส่วนประกอบต่างๆ รวมทั้งระบบภายใน column และ console unit ของ SEM

พื้นฐานของ SEM แสดงส่วนประกอบได้ดังรูปที่ 4.2 มีรายละเอียดดังนี้

1. แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron Gun)
2. เส้นลวดควบคุมลำแสงอิเล็กตรอน (Electromagnetic Lens) และขดลวดควบคุมการเคลื่อนของลำแสงอิเล็กตรอน (Scan coil)
3. ช่องตัวอย่าง (Specimen Chamber)
4. อุปกรณ์รวบรวมสัญญาณ (Collector and Scintillator)
5. อุปกรณ์สร้างภาพและถ่ายภาพ (Imaging Photographic Devices)



รูปที่ 4.2 แผนภาพของส่วนประกอบที่สำคัญของ SEM ที่เป็นจุดกำเนิดของภาพ

1. แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron Gun) อยู่ด้านบนปลายบนสุดของ Column ซึ่งต่อกับสายไฟฟ้าแรงสูงที่ต่อจากหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูงซึ่งแปลงจากระดับ 220 V เป็นระดับ 1-30 kV แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนประกอบด้วยลวดโลหะ Tungsten filament ที่บิดเป็นรูปตัววี และล้อมด้วยโลหะรูปกรวยมีรูอยู่ปลายกรวย เมื่อกระแสไฟฟ้าตั้งแต่ 1000 V ไปเข้ามาสู่ลวดตัววีนี้แล้วจะมีความร้อนสูงทำให้ประจุอิเล็กตรอนกระจายออกมาในสุญญากาศภายใน Column ประจุอิเล็กตรอนนี้เป็นประจุลบจะถูกดึงดูดด้วยแผ่นขั้วบวก (Anode plate) ที่อยู่ด้านล่างของแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ประจุอิเล็กตรอนส่วนใหญ่จะถูกดึงดูดผ่านรูของกรวยไปยังทิศทางที่กำหนดคือลงสู่สนามแม่เหล็กที่สามารถรวบรวมประจุอิเล็กตรอนที่มีอยู่ให้เป็นลำแสงอิเล็กตรอนที่มีความหนาแน่นเพียงพอสำหรับฉายลงบนตัวอย่าง แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งมี filament และ Wehnelt cylinder อยู่ภายในสามารถทำให้ขยับเขยื้อนได้ด้วยสกรูที่อยู่รอบ ๆ ด้านนอก

แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ทั้งนี้เพื่อปรับให้แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนอยู่ในแนวตรงได้ ศูนย์กลางหรือตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กของเลนส์สนามแม่เหล็กภายใน Column ใน SEM สมัยใหม่นอกจากจะมีป้อมหรือสกรูที่ช่วยปรับ Electron Gun ให้ได้ศูนย์แล้วยังมีขดลวดที่มีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าบริเวณแผ่น Anode เพื่อจะช่วยปรับลำแสงอิเล็กตรอนให้อยู่ศูนย์กลางของสนามแม่เหล็กในเลนส์ชุดแรก ขดลวดดังกล่าวเรียกว่า Alignment Coil ซึ่งสามารถควบคุมและปรับได้ตามต้องการโดยหมุนและปรับป้อม (Alignment knobs) บนแผงของ Console unit เหตุที่ต้องปรับ Electron Gun ก็เพื่อจะให้ลำแสงอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นมีความสมบูรณ์เป็นรูปทรง กระบอกที่ไม่บิดเบี้ยวออกไปจากศูนย์กลาง หากมีการบิดของลำแสงอิเล็กตรอนออกนอกทิศทางอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (Primary Electron) แล้วบางส่วนจะถูกกั้นออกไปซึ่งมีผลกระทบต่อปริมาณของอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron)

2. เลนส์ควบคุมลำแสงอิเล็กตรอนพร้อมขดลวดขับเคลื่อนลำแสงอิเล็กตรอน (Electromagnetic Lens and Scan coils) เป็นชุดอุปกรณ์ที่ทำงานร่วมกันทำหน้าที่รวบรวมอิเล็กตรอนปฐมภูมิให้เป็นลำแสงรูปกรวยที่เล็กที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ลำแสงดังกล่าวไปตกกระทบบนผิวตัวอย่างและจะใช้สนามแม่เหล็กขับเคลื่อนลำแสงอิเล็กตรอนปฐมภูมิเคลื่อนไปบนผิวตัวอย่างในแนวที่ต้องการเป็นบริเวณรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส เลนส์แต่ละชุดมี Aperture ซึ่งเป็นโลหะประเภททองขาว ทองเหลืองมีรูขนาดต่างๆกัน ($50\mu\text{m}$ - $400\mu\text{m}$) และสามารถเปลี่ยนได้ตามขนาดที่ต้องการ Aperture ดังกล่าวมักจะจัดไว้ในเลนส์แต่ละชุดภายในบริเวณที่ไร้สนามแม่เหล็กของเลนส์ Aperture เหล่านี้ ทำหน้าที่กำหนดให้ลำแสงอิเล็กตรอนที่ผ่านสนามแม่เหล็กของเลนส์แต่ละชุดให้มีรูปกรวยที่เหมาะสม Aperture ของเลนส์ชุดสุดท้ายก่อนที่ลำแสงอิเล็กตรอนจะมาสัมผัสกับตัวอย่างเป็น Aperture พิเศษเรียกว่า Objective Aperture มีไว้เพื่อกองลำแสงอิเล็กตรอนให้เป็นรูปกรวยขนาดเล็กที่มีความสมมาตรที่สุดและกำหนดขนาดและปริมาณของอิเล็กตรอนให้กระทบลงบนจุดต่างๆที่ผิวตัวอย่างเพื่อให้ภาพที่มีความลึกมากกว่าปกติ ส่วนขดลวดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ขับเคลื่อนลำแสงอิเล็กตรอนปฐมภูมิให้กระดกไปบนผิวของตัวอย่างชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์นี้เรียกว่า Scancoils ซึ่งควบคุมโดยระบบไฟฟ้า และยังควบคุมการกระดกของลำแสงที่เป็นเส้นในจอร์รับภาพให้เคลื่อนที่ไปในทิศทาง และเวลาเดียวกันกับลำแสงอิเล็กตรอน

3. ช่องใส่ตัวอย่าง (Specimen Chamber) ของ SEM เป็นช่องว่างใต้เลนส์สุดท้าย ส่วนที่สำคัญของช่องใส่ตัวอย่างคือฐานวางตัวอย่างและปุ่มควบคุมโดยใช้เฟืองขนาดต่าง ๆ เพื่อเลื่อนฐานไปมาภายในช่องตัวอย่างได้อย่างน้อย 6 ทิศทาง ฐานวางตัวอย่างที่มีส่วนประกอบและคุณสมบัติเหล่านี้เรียกว่า Goniometer Stage

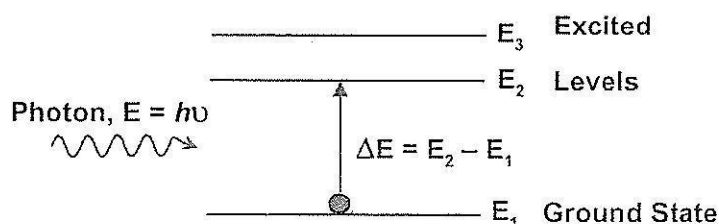
4. อุปกรณ์รวบรวมสัญญาณ (Collector & Scintillator) เป็นแท่งแก้วใสมีปลายมลทำด้วยพลาสติกฉาบผิวด้วยอลูมิเนียมและส่วนปลายของแท่งนี้ล้อมด้วยตาข่ายโลหะที่ต่อกับวงจรไฟฟ้าประจุบวกขนาด 30-250 V เพื่อดึงคูประจุอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างประจุอิเล็กตรอนปฐมภูมิกระทบกับผิวของตัวอย่าง

5. อุปกรณ์สร้างภาพและถ่ายภาพ (Imaging & Photographic Devices) ทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงสัญญาณที่ได้รับเป็นภาพและภาพที่ปรากฏบนจอ CRT ก็พร้อมที่จะทำการบันทึก อุปกรณ์สร้างภาพประกอบด้วยท่อนำแสงและเครื่องขยายและเปลี่ยนสัญญาณอิเล็กตรอนให้เป็นแสงไฟฟ้า การสร้างภาพเริ่มจากประจุอิเล็กตรอนทุติยภูมิซึ่งประจุอิเล็กตรอนชุดนี้จะถูกจับและรวบรวมไว้แล้วนำสู่แท่งแก้วใสประเภทท่อนำแสง ในลักษณะของแสงแสงที่ผ่านท่อ

แท่งแก้วนี้จะเคลื่อนไปสู่เครื่องขยายแสง (Photomultiplier) ซึ่งจะเปลี่ยนแสงชนิด Photons นี้ไปเป็นอิเล็กตรอนอีกครั้งหนึ่ง อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะผ่านเครื่องขยายให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าไปปรากฏในจอภาพที่ติดตั้งไว้บน Console unit

4.3 หลักการทำงานของเครื่อง UV-VIS Spectrophotometer

Ultraviolet-Visible Infrared Spectroscopy เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณของสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อน และสารอนินทรีย์ ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นแสง โดยอาศัยกระบวนการดูดกลืนและการส่งผ่านของแสงในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วง Ultraviolet (ความยาวคลื่น 10-380 นาโนเมตร) และ ช่วง Visible (ความยาวคลื่น 380 – 700 นาโนเมตร) โดยเมื่อแสงผ่านไปยังตัวอย่าง ตัวอย่างจะมีการดูดกลืนแสงบางส่วนไว้และแสงที่ไม่ถูกดูดกลืนก็จะสามารถผ่านตัวอย่างออกไปได้ เครื่องนี้ให้หลักการพื้นฐานจาก คุณสมบัติในการดูดกลืนแสงของสาร เมื่อโมเลกุลของตัวอย่างถูกฉายด้วยแสงในช่วงรังสี UV ที่มีพลังงานเหมาะสมจะทำให้อิเล็กตรอนภายในอะตอมเกิดการดูดกลืนแสงแล้วเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในชั้นที่มีระดับพลังงานสูงกว่า เมื่อทำการวัดปริมาณ ของแสงที่ผ่านหรือสะท้อนมาจากตัวอย่างเทียบกับแสงจาก แหล่งกำเนิด ที่ความยาว คลื่นค่าต่างๆตามกฎของ Beer-Lambert ค่า การดูดกลืนแสง (absorbance) ของสารจะแปรผันกับจำนวนโมเลกุลที่มีการดูดกลืนแสง ดังนั้นเราจึงสามารถระบุ ชนิดและปริมาณของสารที่มีอยู่ในตัวอย่างได้



รูปที่ 4.3 การเปลี่ยนสถานะชั้นพลังงานของอิเล็กตรอนเมื่อได้รับพลังงานโฟตอน

เครื่อง UV-VIS Spectrophotometer เป็นเครื่องมือที่นำเทคนิค UV-VIS spectroscopy มาใช้งาน เครื่องมือนี้ทำหน้าที่ในการตรวจวัดความเข้มแสงที่ผ่านหรือสะท้อนจากตัวอย่างเปรียบเทียบกับความเข้มแสงจากแหล่งกำเนิด เครื่อง UV-VIS spectrophotometer โดยทั่วไปแล้วจะมีส่วนประกอบหลักๆ ได้แก่ แหล่งกำเนิดแสง ชุด grating หรืออาจเรียกว่า monochromatic กระบอกที่บรรจุสารตัวอย่าง และเครื่องตรวจวัดแสง แหล่งกำเนิดแสง จะต้องให้แสงคงที่อย่างต่อเนื่อง ที่นิยมใช้คือ หลอด tungsten halogen ซึ่งให้แสงที่ความยาวคลื่นในช่วง 320-2,500 nm สำหรับ แหล่งกำเนิดแสงในช่วงรังสียูวีนั้นจะใช้หลอดไฮโดรเจนหรือหลอดดีทิวที่เรียม ซึ่งให้แสงในช่วงความยาวคลื่น 160-375 nm แต่แสงที่จากแหล่งกำเนิดเหล่านั้นยังมีความยาวคลื่นค่าต่างๆ ดังนั้นจึงต้องใช้ monochromatic ทำหน้าที่แยกลำแสงจากแหล่งกำเนิดแสง โดยแสงจะผ่านเข้าที่ entrance slit และจะถูกแยกด้วย grating หรือ prism จากนั้นแสงที่ความยาวคลื่นหนึ่ง ๆ เท่านั้นจะออกจาก Monochromatic โดยผ่านทาง exit slit เพื่อให้แสงที่ผ่านไปยังตัวอย่างมีความยาวคลื่นค่าเดียวตามที่ต้องการ หลังจากนั้นแสงความยาวคลื่นค่าเดียวจะผ่านไป ยังที่เก็บบรรจุสาร (Cuvette) ทำจาก quartz หรือ fused silica เป็นอุปกรณ์สำหรับใส่ตัวอย่างซึ่งมีรูปร่างต่างๆ กันออกไป แต่โดยส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นกล่องทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีความกว้างภายใน 1 เซนติเมตร ซึ่งค่านี้จะเป็นค่า

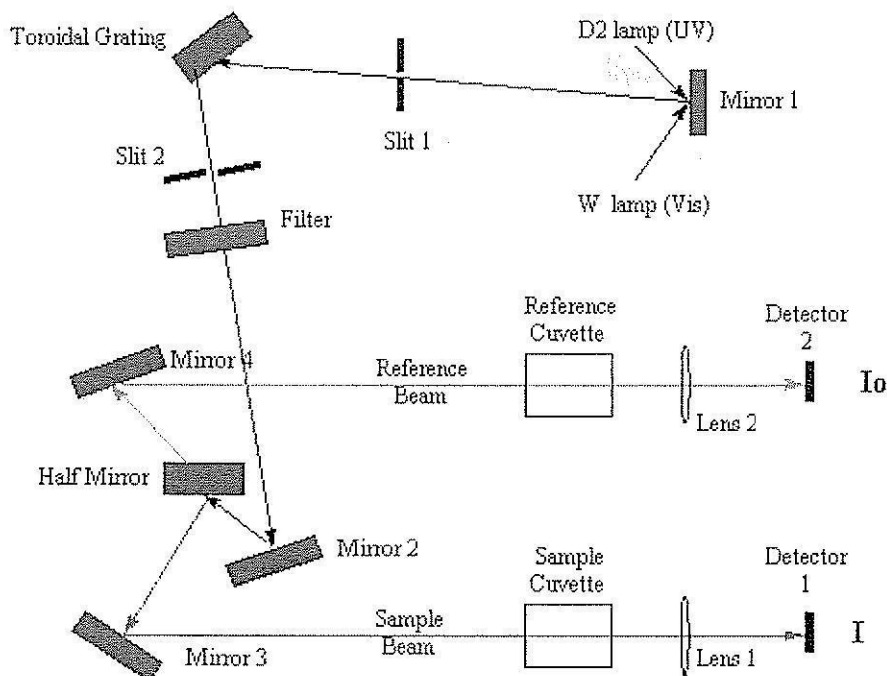
ระยะทางเดินของแสงที่ผ่านเข้าไปใน ตัวอย่างตาม กฎของ Beer-Lambert ซึ่งปริมาณความเข้มข้นของสารตัวอย่างในสารละลายจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าการดูดซับ (Absorbance) ของสารละลายนั้น ดังสมการ

$$\text{Absorbance } A = \text{constant} \times \text{path length} \times \text{concentration}$$

ซึ่งกฎนี้จะเป็นจริงกับแสงที่มีความยาวคลื่นเดียว (Monochromatic radiation) ซึ่งก็คือแสงที่มีความยาวคลื่นหนึ่ง ๆ เท่านั้น โดยแสงเมื่อผ่านสารตัวอย่างที่อยู่ในกระบอก ความเข้มของแสงที่ปล่อยออกมาจะขึ้นกับความหนาของกระบอก (path length) และความเข้มข้นของสาร (concentration) นั้น แต่จะเกิดการเบี่ยงเบนไปจากกฎนี้ที่ความเข้มข้นสูงมาก ๆ

สำหรับเครื่องตรวจวัดที่นิยมใช้ได้แก่ PMT (photomultiplier tube), diode arrays และ CCDs (charge coupled devices) เครื่องจะทำการบันทึกค่าความยาวคลื่นร่วมกับค่ามุมของแต่ละความยาวคลื่นที่เกิดการดูดกลืนแสง โดยเครื่องตรวจวัดที่ใช้มีหลายชนิดได้แก่

1. Photomultiplier tube เป็นเครื่องตรวจวัดที่ไวต่อแสงทั้งในช่วง UV และ visible โดยสามารถตรวจวัดได้อย่างรวดเร็ว และตรวจวัดสารที่มีปริมาณต่ำ ๆ ได้ดี ในช่วงความยาวคลื่น 190 – 900 nm
2. Photodiode array detector เป็นเครื่องตรวจวัดที่สามารถตรวจวัดในทุกความยาวคลื่นของแสงได้ในเวลาเดียวกัน โดยมีราคาถูกและตรวจวัดได้ตั้งแต่ช่วง 190 – 1100 nm



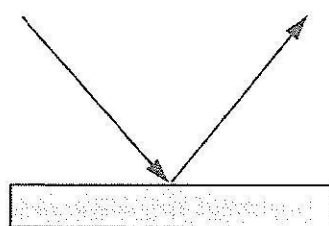
รูปที่ 4.4 ส่วนประกอบของเครื่อง UV-VIS spectrophotometer ในระบบลำแสงคู่

เครื่อง UV-VIS spectrophotometer สามารถแบ่งได้เป็น 2 ระบบ คือ แบบลำแสงเดี่ยว และแบบลำแสงคู่ สำหรับเครื่องแบบลำแสงเดี่ยวเป็นเครื่องที่ใช้ลำแสงเดี่ยวจากแหล่งกำเนิดผ่านไปยังตัวอย่าง สำหรับเครื่องแบบลำแสงคู่ นั้น แสงจะถูกแยกออกเป็น 2 ลำ ก่อนที่จะไปตกลงบนตัวอย่าง โดยแสงลำหนึ่งจะใช้เป็นลำแสงอ้างอิง ขณะที่อีกลำจะผ่านไปยังตัวอย่าง เครื่องมือที่เป็นแบบลำแสงคู่บางรุ่นจะมีเครื่องตรวจวัด 2 ตัว เพื่อที่จะตรวจวัดแสงอ้างอิงและแสง

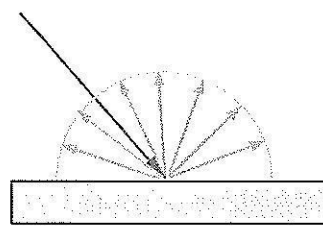
ที่มาจากตัวอย่างได้พร้อมกัน แต่ในบางรุ่นมีเครื่องตรวจวัดเพียงตัวเดียว โดยแสงทั้งสองลำจะผ่านตัว beam chopper ซึ่งจะทำหน้าที่กักแสงลำหนึ่งไว้ในช่วงระยะเวลาหนึ่งเครื่องตรวจวัดจึงสามารถตรวจวัดความแตกต่างของแสงทั้งสองลำได้

การใช้ Integrating Sphere ร่วมกับ UV-VIS Spectrophotometer

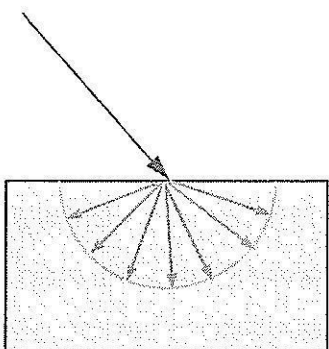
วัสดุที่มีสีและลักษณะพื้นผิวที่แตกต่างกันย่อมเกิดการสะท้อน การดูดกลืน และการส่งผ่านแสงที่แตกต่างกันด้วย ถ้าวัสดุทึบแสงมีพื้นผิวที่เงามัน เมื่อแสงส่องผ่านจะเกิดการสะท้อนแสงกลับที่มีทิศทางเดียวเรียกว่า specular reflection ซึ่งมีมุมสะท้อนเท่ากับมุมกระทบเทียบกับเส้นตั้งฉากที่ผิวของวัสดุ แต่ถ้าผิวของวัสดุทึบแสงนี้ไม่เรียบมีผิวขรุขระจะเกิดการกระเจิงของแสงเกิดขึ้นเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า diffusion reflection แต่ส่วนวัสดุที่โปร่งแสงจะเรียกว่า diffusion transmission ในกรณีของวัสดุโปร่งใสเช่นกระจกจะเกิดการทะลุผ่านของแสงเรียกว่า regular transmission ลักษณะการการส่งผ่านแสงในแบบต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.5



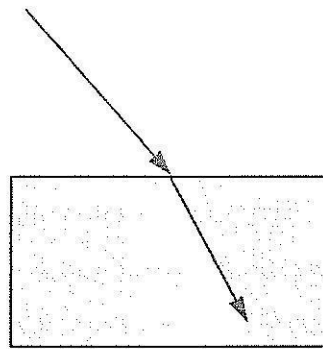
(ก) Specular Reflection



(ข) Diffusion Reflection



(ค) Diffusion Transmission

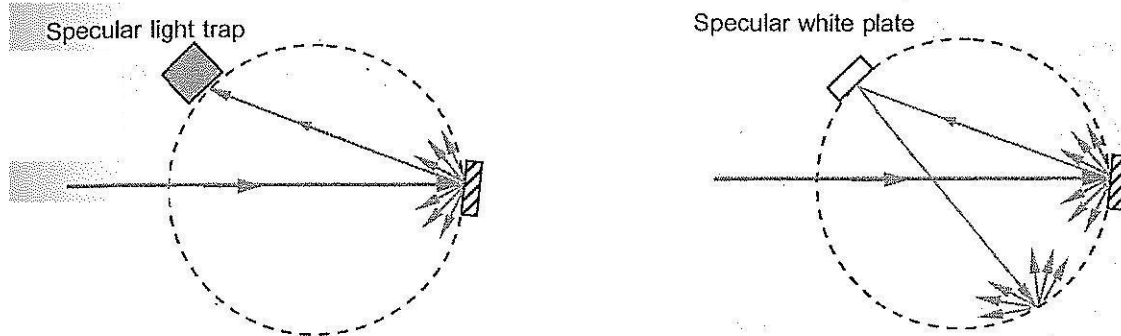


(ง) Regular Transmission

รูปที่ 4.5 ลักษณะของแสงที่เกิดขึ้นบนผิววัสดุที่มีลักษณะต่าง ๆ กัน (ก) วัสดุทึบแสงผิวมัน (ข) วัสดุทึบแสงผิวขรุขระ (ค) วัสดุโปร่งแสง (ง) วัสดุโปร่งใส

ลักษณะของแสงสามารถสามารถวัดค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของการสะท้อนแสง ที่ส่องผ่านเครื่อง UV-VIS spectrophotometer แต่ผลที่ได้เกิดความคลาดเคลื่อนจากผิวของวัสดุที่ไม่เรียบทำให้เกิดการหักเหและเบี่ยงเบนลำแสงที่ตกลงบนตัวรับแสงในตำแหน่งที่ต่างกัน และเพิ่มจำนวนการหักเหแสงในระบบทำให้สัญญาณที่ได้ไม่ใช่ค่าการ

ตรง ๆ เท่านั้น การวัดค่าการส่งผ่านแสงนั้นยังสามารถวัดกับวัตถุผิวหยาบด้าน หรือผิวแบบขุ่นมัวได้ด้วยการส่งผ่านแสงแบบกระเจิงหรือ diffuse transmittance



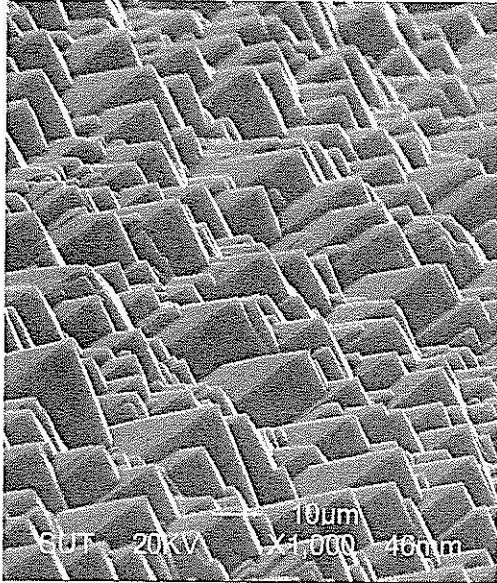
รูปที่ 4.7 (ก) การวัดแสงสะท้อนแบบ specular excluded mode และ (ข) การวัดแสงสะท้อนแบบ specular included mode

ส่วนการนำ Integrating sphere ร่วมกับเครื่อง UV-VIS spectrophotometer มาใช้สำหรับการวิจัยนี้เพื่อวัดการสะท้อนแสงของแผ่นฐานซิลิคอนที่มีลักษณะหยาบ ซึ่งแผ่น Si นี้ผ่านกระบวนการสกัดด้วยสารละลาย KOH เพื่อวัตถุประสงค์ให้เกิดการสูญเสียของแสงเนื่องจากการสะท้อนออกจากผิวให้น้อยที่สุด และให้เกิดทางเดินแสงภายในแผ่น Si ให้มากที่สุด

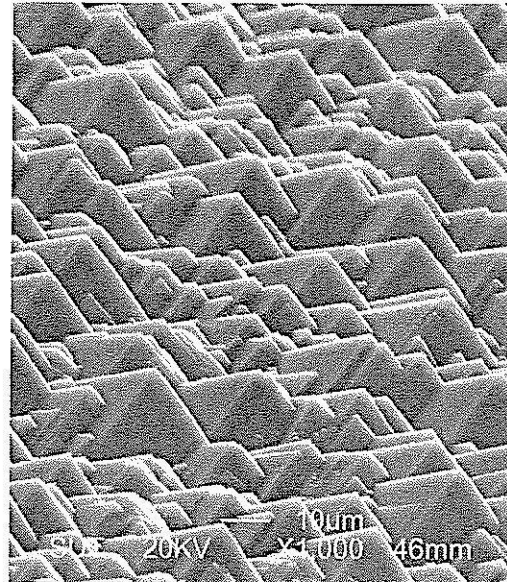
4.4 ผลการวัดลักษณะทางโครงสร้างของผิวซิลิคอน

ลักษณะทางโครงสร้างของผิว Si ผ่านกระบวนการสกัดผิวด้วยสารละลาย KOH ตามเงื่อนไขในรายละเอียดในบทที่ 3 ได้นำมาศึกษาโครงสร้างผิวด้วยวิธีการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) รุ่น JSM-6400 บริษัท JEOL ที่แผนกฝ่ายวิเคราะห์ อาคารเครื่องมือ 1 (F1) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งได้ปรับอัตราการขยาย 1000 เท่า แสดงภาพถ่ายที่ผิวเอียง 70° ดังรูปที่ 4.8 (ก) – (ง) ส่วนรูปที่ 4.9 (ก) – (ง) แสดงภาพทางด้านบน

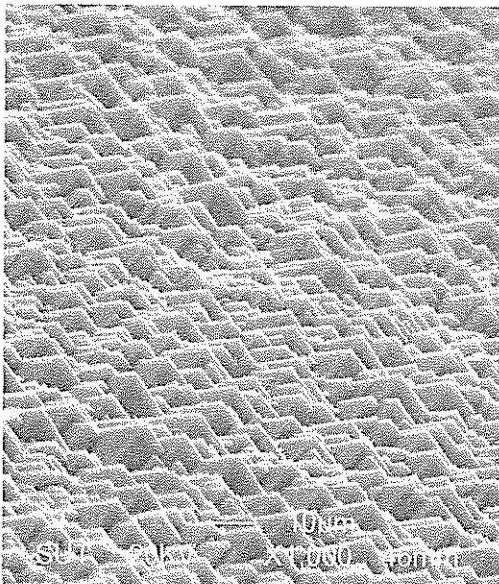
จากภาพถ่ายรูปที่ 4.8 และ 4.9 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิเป็นปัจจัยการผลิตที่สำคัญมากอย่างหนึ่งของการสกัดด้วยสารละลาย KOH ที่อุณหภูมิต่ำลงคือ 70°C และ 60°C ลักษณะผิวรูปทรงพีระมิดมีขนาดเฉลี่ยเล็กลงมากสามารถแยกชัดได้ด้วยภาพ ทุก ๆ เงื่อนไขนั้นได้การกระจายของผิวทรงพีระมิดที่ดีในทุก ๆ พื้นที่ เมื่อทำการวัดขนาดในจำนวนทั้งหมด เราสามารถหาค่าเฉลี่ยของขนาดพื้นที่ฐานพีระมิดของแต่ละเงื่อนไขและนำมาเปรียบเทียบกันซึ่งแสดงในตารางที่ 4.1-4.4



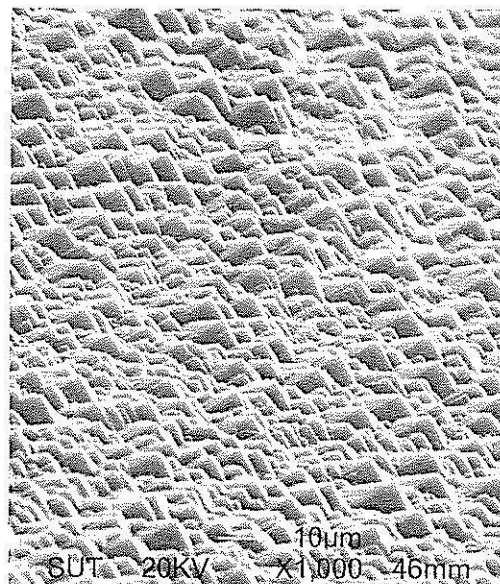
(ก)



(ข)



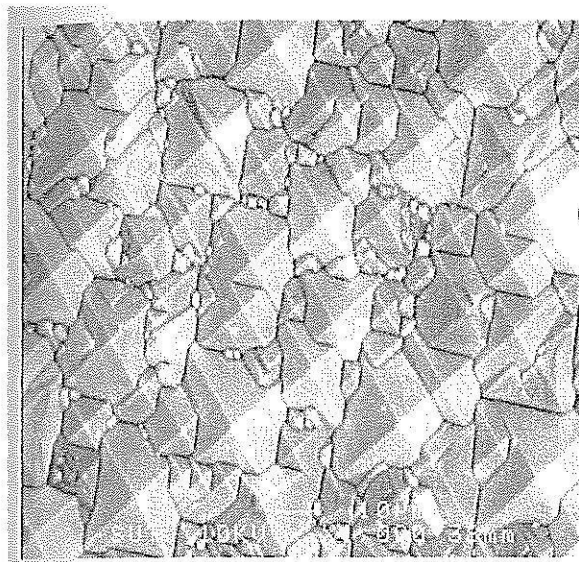
(ค)



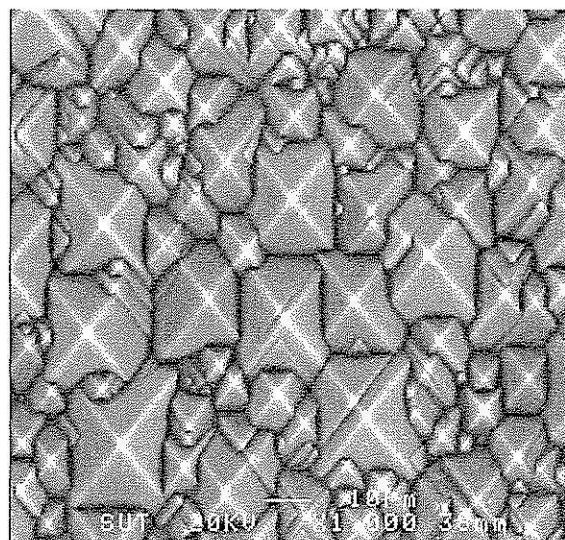
(ง)

รูปที่ 4.8 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย $\times 1000$ ของลักษณะผิวรูปทรงพีระมิดด้านบนเอียง 70°

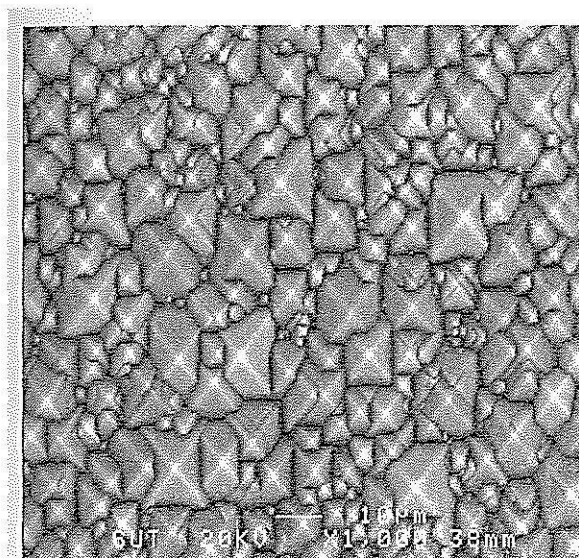
(ก) K-01 at 90°C (ข) K-02 at 80°C (ค) K-03 at 70°C (ง) K-04 at 60°C



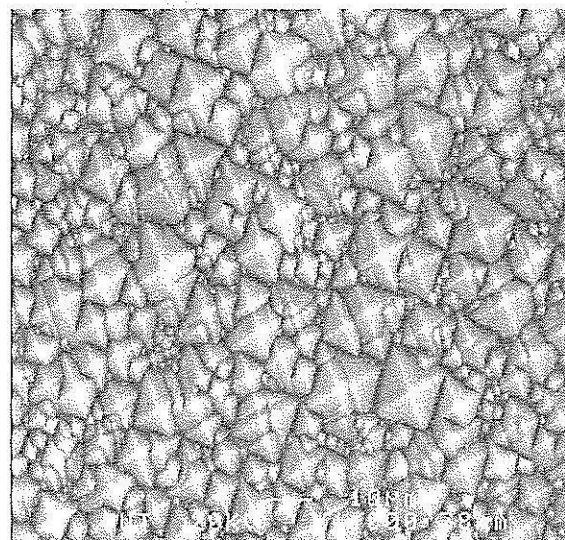
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.9 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย $\times 1000$ ของลักษณะผิวทรงพีระมิดด้านบน เวลาสำหรับกระบวนการสกัด 40 นาที (ก) K-01 90°C (ข) K-02 80°C (ค) K-03 70°C (ง) K-04 60°C

ตารางที่ 4.1 ขนาดของพื้นที่ฐานพีระมิด ของ K-01 ที่อุณหภูมิ 90 °C

	Width (μm)	Length (μm)	Area (μm^2)
Max	20.74	26.67	553.09
Mean	9.62	12.65	146.42
Min	3.70	4.44	16.46
S.D.	4.51	5.83	126.06

ตารางที่ 4.2 ขนาดของพื้นที่ฐานพีระมิด ของ K-02 ที่อุณหภูมิ 80 °C

	Width (μm)	Length (μm)	Area (μm^2)
Max	19.26	23.70	456.52
Mean	8.53	10.78	111.69
Min	4.44	4.44	19.75
S.D.	3.98	5.20	110.45

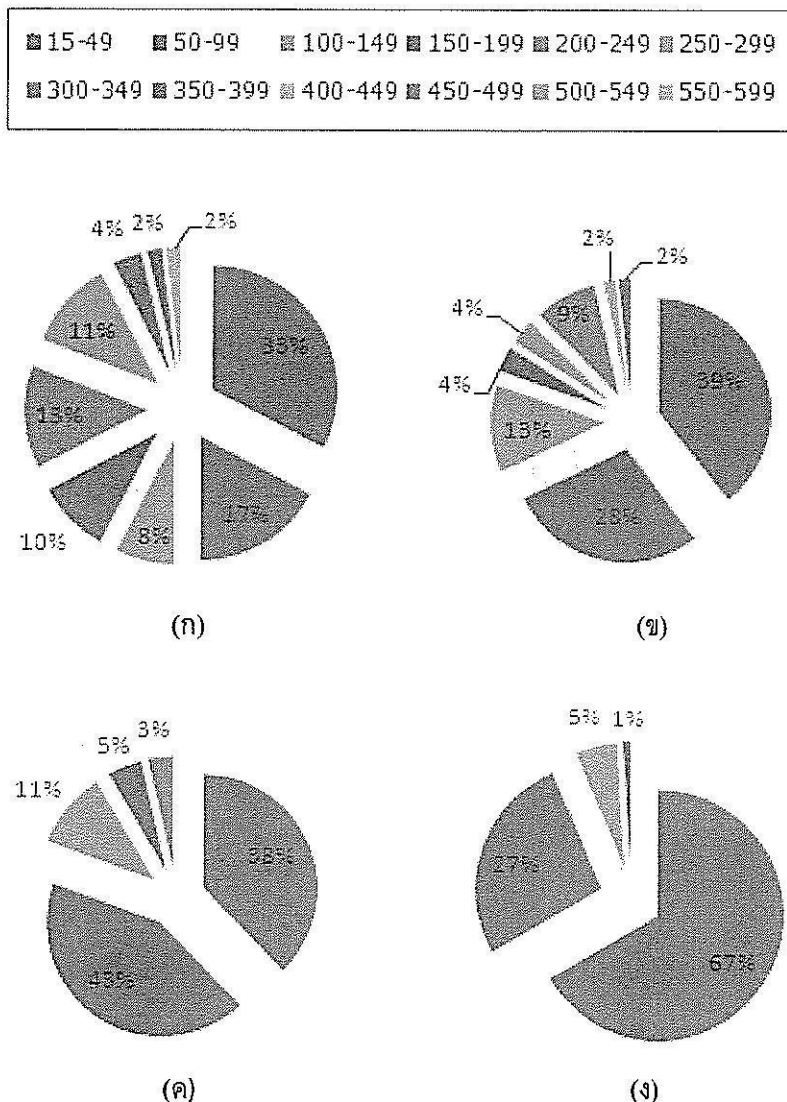
ตารางที่ 4.3 ขนาดพื้นที่ฐานพีระมิด ของ K-03 ที่อุณหภูมิ 70 °C

	Width (μm)	Length (μm)	Area (μm^2)
Max	8.89	10.37	79.01
Mean	5.91	7.06	44.37
Min	3.70	3.70	13.72
S.D.	1.52	1.93	21.13

ตารางที่ 4.4 ขนาดพื้นที่ฐานพีระมิด ของ K-04 ที่อุณหภูมิ 60 °C

	Width (μm)	Length (μm)	Area (μm^2)
Max	6.67	7.41	49.38
Mean	4.76	5.34	26.65
Min	2.96	2.96	8.78
S.D.	1.14	1.19	11.51

เมื่อทำการวัดขนาดของฐานทรงพีระมิดแล้ว ได้นำมาแสดงกราฟพายดังรูปที่ 4.10 มีความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนพีระมิด (%) กับขนาดพื้นที่ซึ่งขนาดพื้นที่ในช่วงต่าง ๆ กำหนดในหน่วยตารางไมโครเมตร (μm^2)



รูปที่ 4.10 กราฟพายความสัมพันธ์ของจำนวนพีระมิด (%) และขนาดพื้นที่ซึ่งขนาดพื้นที่ในช่วงต่าง ๆ (ก) K-01 90 °C (ข) K-02 80 °C (ค) K-03 70 °C (ง) K-04 60 °C

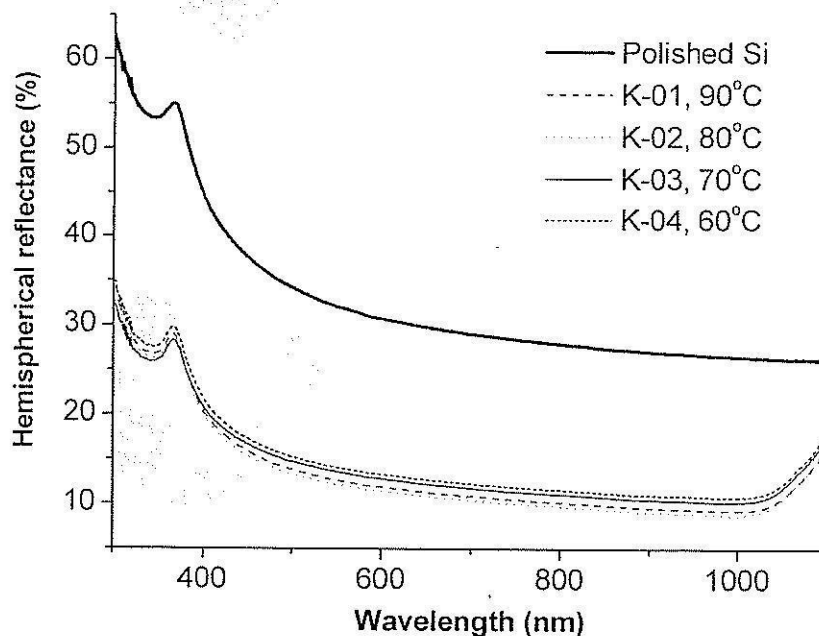
จากกราฟพายที่เงื่อนไขอุณหภูมิ 90 ° และ 80 ° C เราพบว่ารูปทรงพีระมิดเล็ก ๆ ที่ผิว Si มีขนาดโดยเฉลี่ยใหญ่กว่า Si ภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิ 70 ° และ 60 ° C เนื่องจากอุณหภูมิสูงจะก่อให้เกิดการเร่งปฏิกิริยาเคมีทำให้เกิดฟองไฮโดรเจนมากมีขนาดเล็กประมาณ 1-3 mm และฟองจะสามารถหลุดลอยออกจากผิว Si ได้ง่ายขึ้นจากการเติม IPA ทำให้ผิว Si มีลักษณะไม่เกาะน้ำหรือ Hydrophobic surface และการกวนด้วยแท่งแม่เหล็กทำให้กระบวนการสกัดผิวเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง เป็นผลให้กระบวนการสกัดดำเนินอย่างต่อเนื่องในบริเวณนั้น ดังนั้นพีระมิดที่เกิดขึ้นจึงมีขนาดใหญ่ และการกระจายตัวที่ดี ฟองไฮโดรเจนเล็ก ๆ ที่เกิดในปฏิกิริยานี้จะเกาะติดผิว Si ได้ง่ายเสมือนเป็นหน้ากากเล็ก

ๆ ป้องกันผิวจากสารละลายที่จะสกัดอะตอมซิลิคอน ดังนั้นในกรณีนี้ ปริมาณการกระจายและขนาดของฟองไฮโดรเจน จึงเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องควบคุมเพื่อให้ผิวเกิดพีระมิดอย่างสม่ำเสมอทั่วแผ่น เพื่อให้เกิดการสูญเสียทางแสงต่ำ

4.5 ผลการวัดสมบัติทางแสง

หลังจากตรวจพบลักษณะโครงสร้างพีระมิดเกิดขึ้นที่ผิวอย่างสม่ำเสมอทั่วแผ่นแล้ว ได้มีการวัดสมบัติทางแสง เพื่อวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง (%Reflectance) ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 350-1100 nm (Ultra violet – Near Infrared, UV-NIR IR) ด้วยเครื่อง SPECORD Spectrophotometer รุ่น 250 PLUS Double Beam UV-VIS พร้อมกับการใช้ Integrating sphere แบบ Specular excluded mode ผลของการวัดค่า % R แสดงความสัมพันธ์ในฟังก์ชันของความยาวคลื่นในรูปที่ 4.11

ค่า Weighted reflectance (WR) คือค่าที่ได้จากการคำนวณเทียบกับสัดส่วนของการตอบสนองของสเปกตรัมแสง AM1.5D (ภาคผนวก ก.) โดยทำ normalize ค่าสเปกตรัมการสะท้อนแสงในช่วงความยาว 310 nm ถึง 1100 nm ด้วยสเปกตรัมแสง AM1.5D (ภาคผนวก ก.)



รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงที่วัดได้ และความยาวคลื่นแสงของ Si ที่มีกระบวนการสกัดภายใต้เงื่อนไขของอุณหภูมิ โดยใช้เวลาคงที่ 40 นาที

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 350-1100 nm และทำการ normalize กับการเทียบสเปกตรัมที่ AM 1.5D เพื่อคำนวณหา weighted reflectance ดังแสดงข้อมูลในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลการสะท้อนแสงภายใต้เงื่อนไขของอุณหภูมิในกระบวนการผลิต

ชื่อตัวอย่าง (แผ่นซิลิคอน)	อุณหภูมิการสกัด ($^{\circ}\text{C}$)	เวลาที่ใช้ในการ สกัด	พื้นที่ฐานพีระมิด (μm^2)	Weighted Reflectance (%WR)
Polished Si	-	40 นาที พร้อมกวนด้วย แท่งแม่เหล็ก	-	40.7
K-01	90		146.42	15.9
K-02	80		111.69	14.8
K-03	70		44.37	17.1
K-04	60		26.65	17.9

จากข้อมูลการวัดในตารางที่ 4.5 เราสามารถนำมาแสดงความสัมพันธ์ได้ในกราฟรูปที่ 4.12 จากผลการวัดพบว่ากระบวนการสกัดแผ่นฐาน Si ที่ให้อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลาที่ 40 นาที ให้ค่าการสะท้อนแสงต่ำสุดมีค่า 14.8% WR นอกจากนี้ยังพบว่าขนาดพื้นที่ฐานพีระมิดในที่ได้จากกระบวนการที่ให้อุณหภูมิต่างกันนั้นยังมีผลต่อค่าการสะท้อนแสงอีกด้วย โดยพบว่าพีระมิดที่มีขนาดเล็กกลางของตัวอย่าง K-03 และ K-04 จะทำให้ค่าการสะท้อนแสงมีค่าสูง ส่วนพีระมิดที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจากตัวอย่าง K-01 และ K-02 นั้นได้ค่าการสะท้อนแสงมีค่าน้อยกว่า การได้ขนาดพีระมิดที่ใหญ่กว่า เนื่องจากที่อุณหภูมิสูง 80°C ถึง 90°C ทำให้เกิดฟองก๊าซ H_2 จำนวนมากที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการสกัดนั้นแตกออกไปจากผิวได้เร็วกว่าฟอง H_2 ขนาดเล็กๆ ที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่าซึ่งจะนำไปสู่การสกัดกั้นการสกัดแบบ anisotropic ทำให้ได้ทรงพีระมิดที่มีขนาดเล็ก แต่การกระจายตัวของพีระมิดจะสม่ำเสมอมากกว่า (พีระมิดมีขนาดใกล้เคียงกัน)

4.6 การหาเงื่อนไขการผลิตที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ค่าการสะท้อนแสงต่ำสุด

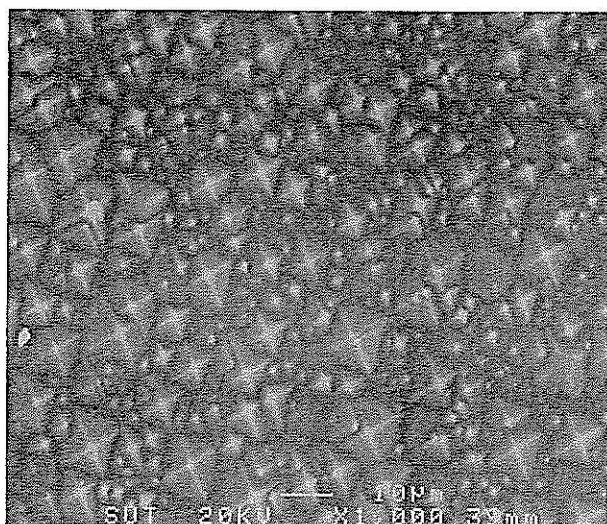
จากการผลิตที่กำหนดเวลาการสกัดคงที่ 40 นาที เราพบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมคือ 80°C เพื่อเกิดการสูญเสียทางแสงน้อยที่สุด และกักแสง (light trapping) ที่ผิวมากที่สุด การทดสอบต่อไปได้กำหนดอุณหภูมิคงที่เพื่อหาระยะเวลาสกัดที่ทำให้การสะท้อนแสงต่ำสุดโดยมีรายละเอียดเงื่อนไขแสดงในตารางที่ 4.6

หลังจากผ่านกระบวนการสกัดภายใต้เงื่อนไขของเวลาแล้ว ได้นำแผ่น Si ไปทำการวัด SEM เพื่อศึกษาถึงผลการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 4.12 (ก) – (ง) จากผลของภาพถ่าย SEM เราพบว่าเวลาที่ใช้ในการสกัดเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญมากเช่นกัน เมื่อใช้เวลาเพียง 20 นาที การก่อตัวของผิวทรงพีระมิดมีความหนาแน่นน้อยและขนาดเล็กเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ใช้เวลาการสกัดมากขึ้น เนื่องจากเกิดกลไกการสกัดที่ผิวอย่างต่อเนื่อง

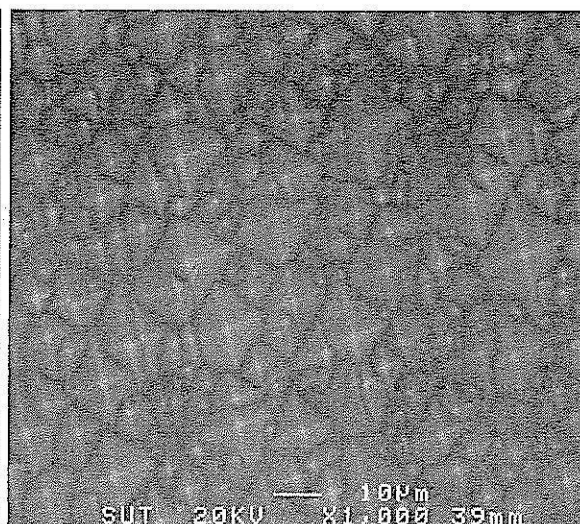
หลังจากตรวจพบลักษณะโครงสร้างพีระมิดเกิดขึ้นที่ผิวอย่างสม่ำเสมอทั่วแผ่นแล้ว ได้ทำการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง (%Reflectance) ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 350-1100 nm ด้วยเครื่อง SPECORD Spectrophotometer รุ่น 250 PLUS Double Beam UV-VIS พร้อมกับการใช้ Integrating sphere แบบ Specular excluded mode ผลของการวัดค่า % R แสดงความสัมพันธ์ในฟังก์ชันของความยาวคลื่นในรูปที่ 4.13

ตารางที่ 4.6 ผลการสะท้อนแสงภายใต้เงื่อนไขของเวลาในกระบวนการผลิต

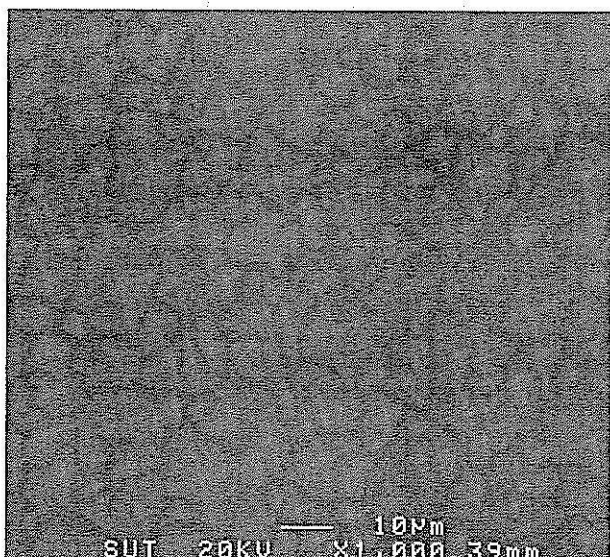
ชื่อตัวอย่าง (แผ่นซิลิคอน)	เวลาที่ใช้ใน กระบวนการสกัด (นาที)	อุณหภูมิ	Weighted Reflectance (%WR)
A-01	20	80 °C พร้อมกวนด้วยแท่ง แม่เหล็ก	18.8
A-02	30		18.3
A-03	50		14.4
A-04	60		14.6



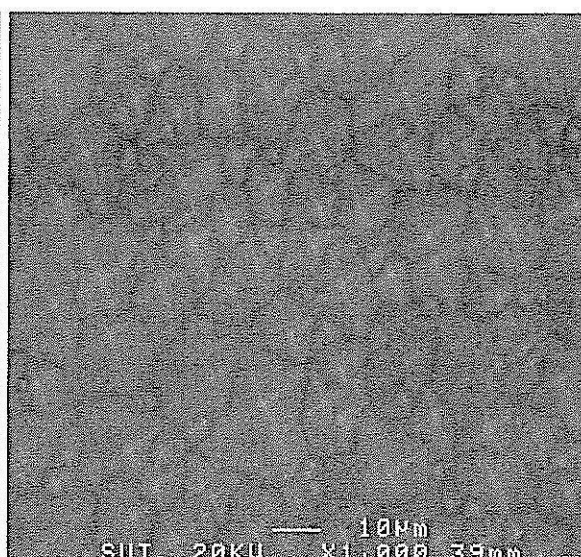
(ก)



(ข)

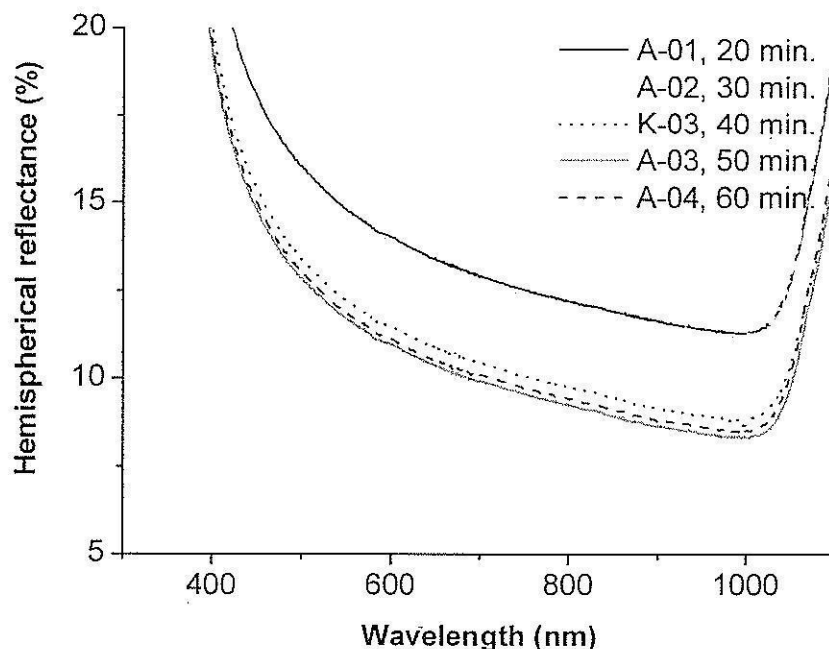


(ค)



(ง)

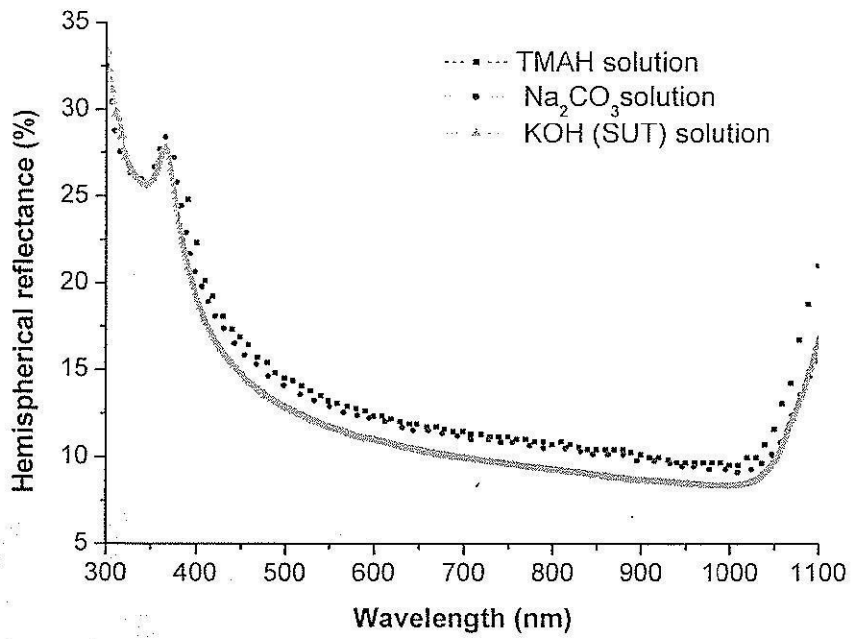
รูปที่ 4.12 ภาพถ่าย SEM กำลังขยาย X1000 ของลักษณะผิวทรงพีระมิดด้านบน อุณหภูมิในกระบวนการสกัด 80 °C
(ก) A-01 20 นาที (ข) A-02 30 นาที (ค) A-03 50 นาที (ง) A-04 60 นาที



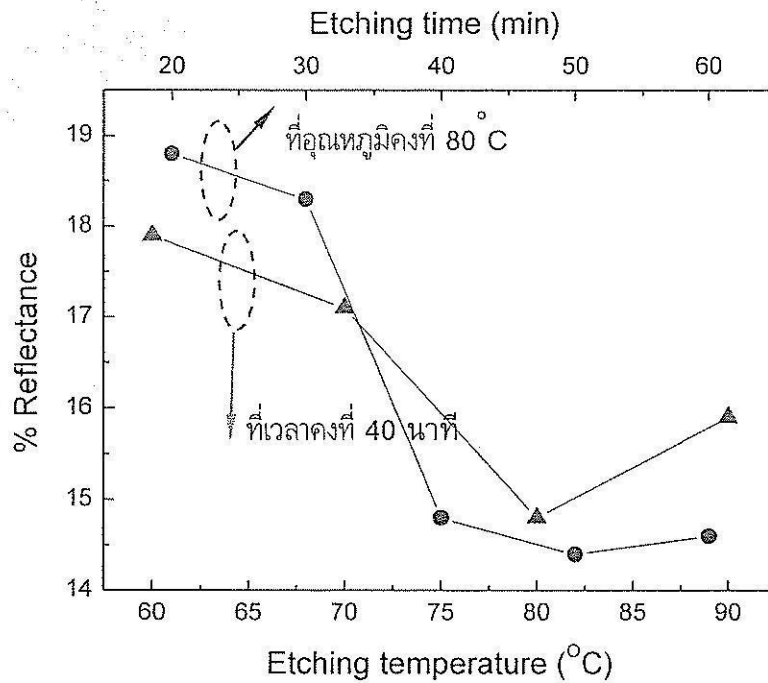
รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพัทธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงที่วัดได้ และความยาวคลื่นแสงของ Si ที่มีกระบวนการสกัดภายใต้เงื่อนไขของเวลา โดยให้อุณหภูมิการผลิตคงที่ 80°C

จากผลการวัดพบว่าลักษณะการก่อตัวของผิวที่ระมัดที่ความสัมพัทธ์กับเวลานั้นยังมีความสัมพันธ์ต่อค่าการสะท้อนแสงด้วยเช่นกัน เมื่อใช้เวลาการสกัดเพิ่มขึ้นเป็น 50 นาที และ 60 นาที ค่า weight reflectance (%WR) ลดลงเป็น 14.4 และ 14.6 ตามลำดับ ในช่วงความยาวคลื่นแสงสั้น 300 - 400 nm นั้นค่าการสะท้อนแสงที่ผิว Si มีค่าสูง และจะลดลงในช่วง 400 - 1000 nm และการสะท้อนแสงที่ผิวจะมีค่าสูงมากในช่วงแสง far IR ดังนั้นเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการวิจัยนี้คือเมื่อใช้สารละลาย 2.9% KOH ในน้ำ DI ภายใต้เวลาการสกัด 50 นาทีสามารถลดการสะท้อนแสงได้จาก 40.7% เป็น 14.4% รูปที่ 4.14 แสดงผลการเปรียบเทียบของค่าการสะท้อนแสงที่ผิว Si ในเงื่อนไขของสูตรสารละลาย 3 ประเภทคือ 1. KOH solution จากผลของงานวิจัยครั้งนี้ 2. TMEH solution จากผลของ Papet, et.al., (2006) 3. Na_2CO_3 solution จากผลของ Vallejo, et.al., (2007)

รูปที่ 4.15 แสดงกราฟความสัมพัทธ์ระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่ผิว Si ในช่วงความยาวคลื่น 300 - 1100 nm เส้นสัญลักษณ์ ● แสดงเงื่อนไขการผลิตที่อุณหภูมิคงที่ 80°C ในเวลา 20 - 60 นาที และเส้นสัญลักษณ์ ▲ แสดงเงื่อนไขการผลิตที่เวลาคงที่ 40 นาที และอุณหภูมิตั้งแต่ 60 - 80°C



รูปที่ 4.14 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงของผลึกเดี่ยวซิลิคอนที่ใช้สารละลาย KOH, TMEH และ Na₂CO₃ solutions



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสะท้อนแสงที่ผิว Si ในช่วงความยาวคลื่น 300 – 1100 nm ภายใต้เงื่อนไขการผลิตที่อุณหภูมิและเวลาต่าง ๆ

บทที่ 5

การวิเคราะห์การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยแบบจำลอง PC1D

5.1 บทนำ

การกักแสงที่เกิดขึ้นภายในเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโครงสร้างผิวขรุขระที่ผิวเซลล์นี้สามารถนำไปสู่การให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงที่ผิวต่ำ และทำให้เซลล์นี้มีค่าประสิทธิภาพเชิงควอนตัม (Quantum Efficiency, QE) สูงขึ้น จากบทที่ 2 ได้แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพเชิงควอนตัมภายนอก (EQE) และ ประสิทธิภาพเชิงควอนตัมภายใน (IQE) ที่มีความเกี่ยวข้องกับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง ดังนั้นในบทที่ 5 จึงได้นำค่าการสะท้อนแสงไปคำนวณหาค่าประสิทธิภาพเชิงควอนตัมด้วยแบบจำลอง PC1D

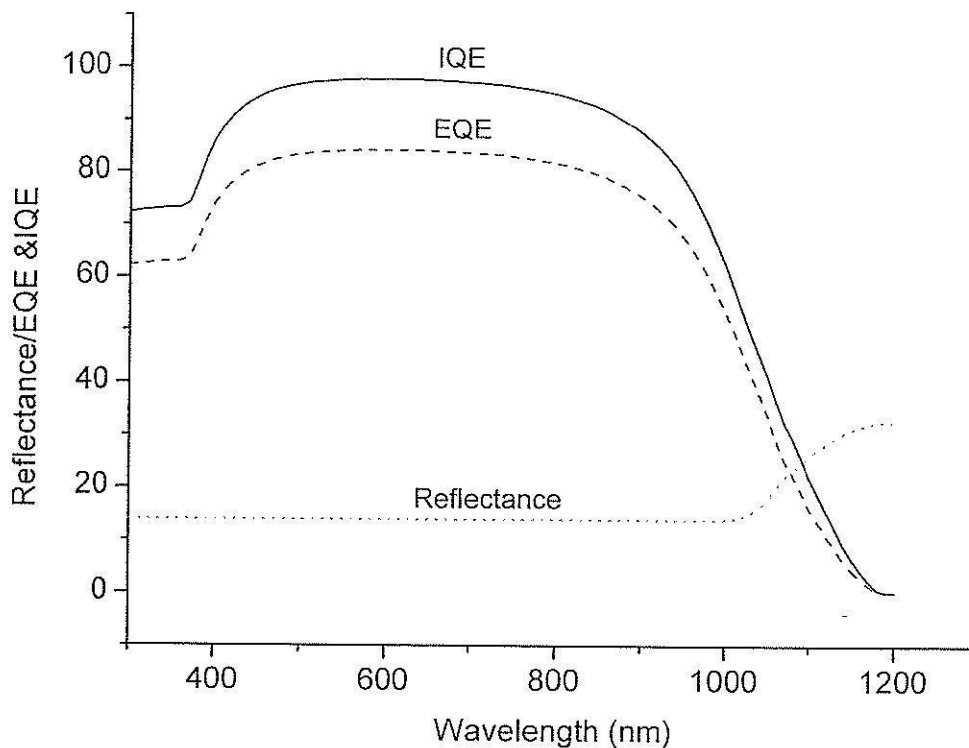
5.2 วิเคราะห์การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยแบบจำลอง PC1D

แบบจำลอง PC1D คือโปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณ หรือตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ และที่สำคัญกว่านั้นแบบจำลอง PC1D ถูกใช้ในการออกแบบอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำโดยเฉพาะเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อให้คำนวณหาประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน

เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัด และนำมาคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสลัดวงจรกับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง และค่าประสิทธิภาพเชิงควอนตัม เพื่อนำไปสู่ค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน แบบจำลองของโครงสร้างเซลล์คือ n^+/p^+ ภายใต้พารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์มาตรฐานต้นหุนต่ำ ซึ่งกรณีนี้ไม่พิจารณาชั้นป้องกันการสะท้อนแสงกลับ (Antireflection coating, ARC) และชั้นออกไซด์พาสซีเวชัน ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่จำเป็นในการคำนวณค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (77) ด้วยแบบจำลอง PC1D แสดงในตารางที่ 5.1

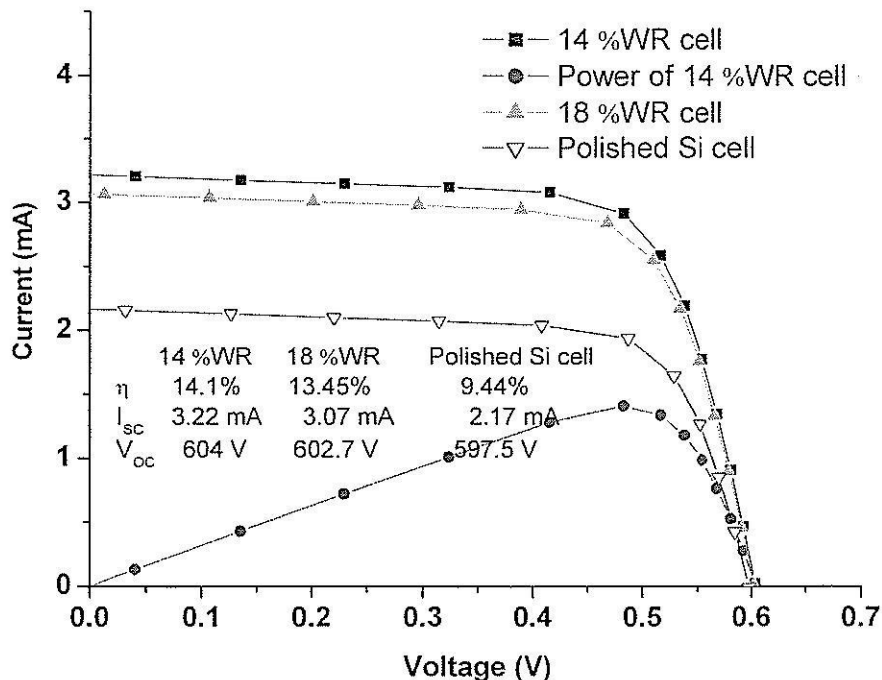
ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์ของแบบจำลอง PC1D เพื่อนำไปคำนวณหาประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน

Cell Parameters	Si Cell
Device area (cm ²)	100
Thickness (μm)	300
Texture angle (degrees)	54.74
Texture depth (μm)	8
Front, Rear Reflectance (%)	%R
τ_{bulk} (μs)	10
Front surface recombination velocity (FSRV, cm/s)	10^5
Back surface recombination velocity (BSRV, cm/s)	10^6
1 st front diff. (cm ⁻³)	2.87×10^{18}
1 st rear diff. (cm ⁻³)	1×10^{20}



รูปที่ 5.1 กราฟความสัมพันธ์ quantum efficiency (QE) ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 300 nm ถึง 1100 nm เส้นทึบแทน IQE เส้นประแทน EQE และเส้นจุดแทนผลรวมของค่าการสะท้อนแสง

รูปที่ 5.1 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของ quantum efficiency (QE) ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 300 nm ถึง 1100 nm ในกราฟประกอบด้วยเส้นทึบคือ internal quantum efficiency (IQE) แสดงถึงปริมาณอิเล็กตรอนที่ถูกรวบรวมได้ต่อโฟตอนที่ไม่มีถูกสะท้อนกลับ ส่วนโฟตอนที่ถูกสะท้อนกลับนั้นมาจาก 2 ส่วนคือส่วนสะท้อนโดยตรงที่ผิวตกกระทบ และอีกส่วนมาจากโฟตอนที่เข้าสู่เซลล์แต่สะท้อนกลับออกมาผิวภายหลัง เส้นประแทน external quantum efficiency (EQE) บ่งบอกถึงปริมาณของอิเล็กตรอนที่ถูกรวบรวมได้ต่อโฟตอนที่ตกกระทบ และเส้นจุดแทนผลรวมของค่าการสะท้อนแสง (Total reflectance) ซึ่งเป็นการรวมแสงที่สะท้อนออกจากผิวเมื่อแสงตกกระทบ และส่วนของแสงสะท้อนที่ออกจากตัวเซลล์มายังผิวเซลล์



รูปที่ 5.2 คุณลักษณะ I-V ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้จากแบบจำลอง PC1D ในเงื่อนไขการสกัดด้วยสารละลาย KOH

รูปที่ 5.2 แสดงกราฟคุณลักษณะ I-V ของแบบจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม PC1D ภายใต้ความเข้มแสง 0.1 watt/cm^2 เงื่อนไขของพารามิเตอร์ต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 5.1 เส้นประแสดงความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์ ซึ่ง $P_{max} = 1.41 \text{ watt}$ $I_{sc} = 3.216 \text{ mA}$ และ $V_{oc} = 604 \text{ mV}$ และให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน $\eta = 14.1\%$ ซึ่งมีค่าสูงกว่าเซลล์ 18%WR ที่มี $\eta = 13.45\%$ และเซลล์ที่มีผิวเรียบได้ให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด $P_{max} = 0.944 \text{ watt}$ $I_{sc} = 2.17 \text{ mA}$ $V_{oc} = 597.5 \text{ mV}$ และ $\eta = 9.44\%$

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

6.1 บทนำ

การเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีการเพิ่มโอกาสให้แสงตกกระทบมากขึ้น และลดการสะท้อนกลับของแสง โดยการสร้างผิวขรุขระให้กับผลึกซิลิคอนระนาบ (100) ในกระบวนการผลิตสามารถทำได้หลายวิธีเช่น เทคนิคโฟโตลิโทกราฟี เทคนิคการกัดด้วย Reaction Ion (RIE) และเทคนิคการใช้สารละลายอะคาไลด์ แต่ในภาคอุตสาหกรรมการผลิตนิยมใช้สารละลายอะคาไลด์ เช่น KOH, Na₂CO หรือ TMAH solutions เนื่องจากกระบวนการมีความซับซ้อนน้อย และมีต้นทุนการผลิตต่ำกว่า ในบทที่ 6 ได้กล่าวถึงผลสรุปและข้อเสนอแนะของงานวิจัยที่ได้ศึกษากระบวนการกัดผิวซิลิคอน (100) ด้วย KOH เพื่อหาเงื่อนไขที่ดีที่สุดที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงกลับมีค่าน้อยที่สุด และทำนายผลของค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานด้วยโปรแกรม PC1D

6.2 สรุปผลการวิจัย

1. การกัดด้วยสารละลาย (2.9% wt.)KOH ผสม (10% wt.)IPA และน้ำ DI ทำให้ผิวขรุขระเกิดเป็นผิวด้านอย่างสม่ำเสมออีกทั้งผิวยังไม่เกิดคราบสีขาว
2. กระบวนการกัดที่อุณหภูมิ 90° และ 80° C เราพบว่ารูปทรงพีระมิดเล็ก ๆ ที่ผิว Si มีขนาดเล็ก 8-9 μm ใหญ่ เนื่องจากอุณหภูมิสูงจะก่อให้เกิดการเร่งปฏิกิริยาเคมีทำให้เกิดฟอง H₂ มากและการเติม IPA ทำให้ผิว Si มีลักษณะไม่เกาะน้ำหรือ Hydrophobic surface และการกวาดด้วยแท่งแม่เหล็กทำให้กระบวนการกัดผิวเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง เป็นผลให้กระบวนการกัดดำเนินอย่างต่อเนื่องในบริเวณนั้น ดังนั้นพีระมิดที่เกิดขึ้นจึงมีขนาดใหญ่ และการกระจายตัวที่ดี ฟองไฮโดรเจนเล็ก ๆ ที่เกิดในปฏิกิริยาจะเกาะติดผิว Si ได้ง่ายเสมือนเป็นหน้ากากเล็ก ๆ ป้องกันผิวจากสารละลายที่จะกัดต่อซิลิคอน ดังนั้นในกรณีนี้ ปริมาณการกระจายและขนาดของฟองไฮโดรเจนจึงเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องควบคุมเพื่อให้ผิวเกิดพีระมิดอย่างสม่ำเสมอทั่วแผ่น เพื่อให้เกิดการสูญเสียทางแสงต่ำ
3. ลักษณะการก่อดาวของผิวพีระมิดมีความสัมพันธ์กับเวลา และยังสัมพันธ์ต่อค่าการสะท้อนแสงด้วย ค่า weight reflectance (%WR) มีค่าเท่ากับ 14.4%WR และ 14.6 %WR เมื่อใช้เวลากัดเพิ่มขึ้นเป็น 50 นาที และ 60 นาที ตามลำดับ เมื่อไม่มีการเคลือบผิวกันสะท้อน (ARC) แล้วค่าการสะท้อนแสงที่ผิว Si มีค่าสูงในช่วงความยาวคลื่นแสงสั้น 300 - 400 nm และจะลดลงในช่วง 400 - 1000 nm และการสะท้อนแสงที่ผิวจะมีค่าสูงมากในช่วงแสง far IR ดังนั้นเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการวิจัยนี้คือเมื่อใช้สารละลาย 2.9%KOH ในน้ำ DI ภายใต้อุณหภูมิการกัด 50 นาทีสามารถลดการสะท้อนแสงได้จาก 40.7 %WR เป็น 14.4 %WR
4. ค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (η) ของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยแบบจำลอง PC1D มีค่าเท่ากับ 14.1% แบบจำลองของโครงสร้างเซลล์ในการวิจัยนี้คือ $n^+ / p / p^+$ ภายใต้อุปกรณ์ของเซลล์แสงอาทิตย์มาตรฐานต้นทุนต่ำ ซึ่งกรณีนี้ไม่พิจารณาชั้นป้องกันการสะท้อนแสงกลับ (Antireflection coating, ARC) และชั้นออกไซด์พาสซีเวชัน

6.3 ข้อเสนอแนะ

การสกัดผิว Si (100) เพื่อให้ได้รูปทรงพีระมิดหนาแน่นสม่ำเสมอทั่วแผ่นด้วยเทคนิคการใช้สารละลาย alkaline เราพบว่าการเติมสารละลาย IPA เป็นปริมาณที่มากกว่า เพื่อเป็นสาร surfactant ให้แก่ผิว Si นั้นเป็นต้นทุนสูงในกระบวนการ เนื่องจาก IPA เกิดการระเหยตลอดเวลาจำเป็นต้องเติมทดแทนซึ่งปริมาณที่ไม่รู้แน่นอนทำให้อัตราการสกัดเปลี่ยนแปลงได้ ดังนั้นการกำจัดฟอง H₂ ด้วยวิธีที่ไม่เติมสาร surfactant ใด ๆ จึงเป็นสิ่งที่ท้าทายเพื่อลดต้นทุนในกระบวนการผลิต

จากองค์ความรู้ที่ได้จากการทดลองในการวิจัยนี้พบว่าฟอง H₂ ที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการมีปริมาณมากเมื่ออุณหภูมิสูง ขนาดของฟองอยู่ระหว่าง 1-3 mm ดังนั้นในส่วนของข้อเสนอแนะจึงเป็นไปได้ว่าเมื่อไม่เติม surfactant กระบวนการสกัดผิว Si ให้เกิดขึ้นภายใต้หน้าปกที่มีช่องเปิดเล็ก ๆ ขนาดประมาณเท่ากับฟองของ H₂ และมีระยะห่างอย่างเหมาะสมระหว่างแผ่น Si กับหน้าปกช่องเปิดเล็ก ๆ

นอกจากการทำโครงสร้างผิวให้ลดค่าการสะท้อนแสงแล้ว การเคลือบชั้นป้องกันการสะท้อนแสง (ARC) เช่น Si₃N₄ ยังสามารถลด %R ในช่วงความยาวคลื่น 300 – 600 nm ได้ดีมาก

การสกัดผิว Si ด้วยวิธีต่าง ๆ นั้นต่างก็ส่งผลต่อคุณภาพโครงสร้างผลึกที่ขึ้นผิวด้วย ทำให้เกิดจุดบกพร่องที่ผิวอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ เกิด allowed states ขึ้นภายในแถบพลังงาน forbidden ค่าความเร็วของการรวมตัวที่ผิวด้านบน (Front surface recombination velocity, S_f) จะมีค่าสูงและส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานลดลง ดังนั้นนอกจากการสร้างผิวให้สามารถดักแสงมากที่สุดแล้ว คุณภาพของชั้นผิวควรเกิดจุดบกพร่องในระดับที่ยอมรับได้ เพื่อส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพของเซลล์ให้น้อยที่สุด

บรรณานุกรม

1. M. A. Martin, Solar Cells (Operating Principles, Technology and System Applications), The University of New South Wales, (1992)
2. X. G. Zhang, Electrochemistry of Silicon and Its Oxide, Chapter 7, Springer US (2001)
3. W. Kern, Handbook of Semiconductor Cleaning Technology, Noyrs Publishing : Park Ridge, NJ, (1993).
4. W. Kern and J. Vossen, Thin film processes, Academic Press : Nw York, (1978).
5. S. R. Wenham, M. A. Green, M. E. Watt and R. Corkish, Applied Photovoltaics, 2nd edition, Earthscan, (2007).
6. H. Robert, Properties of crystalline silicon, Institution of Engineering and Technology, (1999)
7. P. Campbell and M. A. Green, "Light trapping properties of pyramidally textured surfaces", J. Appl. Phys. 62, pp. 243-249 (1987).
8. D. L. King and M. E. Buck, Proceedings of the 22th IEEE PVSC, Las Vegas, NV, USA, pp. 303-308 (1991).
9. 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).
10. B. Vallejo, M. Gonzalez-Manas, J. Martinez-Lopez and M. A. Cabllero, "On the texturization of monocrystalline silicon with sodium carbonate solution", Solar energy 81, pp. 565-569 (2007).
11. E. D. Palik, I. Heard, P. S. Burno, and L. Tenerz, "Etching roughness for (100) silicon surfaces in aqueous KOH", J. Appl. Phys. 70, pp. 3291-3300 (1991).
12. J. S. You, J. Y. Huh, H. J. Park, J. J. Pak, and C. S. Kang "Experiments on anisotropic etching of Si in TMAH", Solar energy materials & Solar cell 66, pp. 37-44 (2001).
13. N. Marrero, B. González-Díaz, R. Guerrero-Lemus, D. Borchert, and C. Hernández-Rodríguez "Optimization of sodium carbonate texturization on large-area crystalline silicon solar cells" Solar energy materials & Solar cell 91, pp. 1943-1947 (2007).
14. A. K. Chu, J. S. Wang, Z. Y. Tsai, and C. K. Lee "A simple and low-effective approach for fabricating pyramids on crystalline silicon wafers" Solar energy materials & Solar cell 93, pp. 1276-1280 (2009).

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

Air Mass 1.5 Global Spectrum

Column A: (mm) wavelength

Column B: ($\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$) Spectral irradiance (Centered at wavelength A and calculated using absorption data with a resolution of 20 cm^{-1})

Column C: (W m^{-2}) Integrated irradiance in the wavelength range $0 \mu\text{m}$ to $A \mu\text{m}$

Column D: Fraction of the total irradiance (integrated over the entire spectrum) that is in the wavelength range $0 \mu\text{m}$ to $A \mu\text{m}$

Column E,F,G: as defined above but for the spectrum normalised to 1000 W m^{-2}

A	B	C	D	E	F	G
0.3050	9.2	0.05	0.0000	9.5	0.05	0.0000
0.3100	40.8	0.25	0.0003	42.3	0.26	0.0003
0.3150	103.9	0.77	0.0008	107.8	0.80	0.0008
0.3200	174.4	1.64	0.0017	181.0	1.70	0.0017
0.3250	237.9	2.83	0.0029	246.9	2.94	0.0029
0.3300	381.0	4.74	0.0049	395.4	4.92	0.0049
0.3350	376.0	6.62	0.0069	390.2	6.87	0.0069
0.3400	419.5	8.71	0.0090	435.4	9.04	0.0090
0.3450	423.0	10.83	0.0112	439.0	11.24	0.0112
0.3500	466.2	14.33	0.0149	483.8	14.87	0.0149
0.3600	501.4	19.34	0.0201	520.4	20.07	0.0201
0.3700	642.1	25.76	0.0267	666.4	26.73	0.0267
0.3800	686.7	32.63	0.0339	712.7	33.86	0.0339
0.3900	694.6	39.57	0.0411	720.9	41.07	0.0411
0.4000	976.4	49.34	0.0512	1013.3	51.20	0.0512
0.4100	1116.2	60.50	0.0628	1158.4	62.79	0.0628
0.4200	1141.1	71.91	0.0746	1184.3	74.63	0.0746
0.4300	1033.0	82.24	0.0854	1072.1	85.35	0.0854
0.4400	1254.8	94.79	0.0984	1302.3	98.37	0.0984

0.4500	1470.7	109.50	0.1136	1526.3	113.64	0.1136
0.4600	1541.6	124.91	0.1296	1599.9	129.63	0.1296
0.4700	1523.7	140.15	0.1454	1581.3	145.45	0.1454
0.4800	1569.3	155.84	0.1617	1628.6	161.73	0.1617
0.4900	1483.4	170.68	0.1771	1539.5	177.13	0.1771
0.5000	1492.6	185.60	0.1926	1549.0	192.62	0.1926
0.5100	1529.0	200.89	0.2085	1586.8	208.49	0.2085
0.5200	1431.1	215.20	0.2233	1485.2	223.34	0.2233
0.5300	1515.4	230.36	0.2391	1572.7	239.07	0.2391
0.5400	1494.5	245.30	0.2546	1551.0	254.58	0.2546
0.5500	1504.9	267.87	0.2780	1561.8	278.00	0.2780
0.5700	1447.1	296.82	0.3080	1501.8	308.04	0.3080
0.5900	1344.9	323.71	0.3360	1395.8	335.96	0.3360
0.6100	1431.5	352.34	0.3657	1485.6	365.67	0.3657
0.6300	1382.1	379.99	0.3944	1434.4	394.36	0.3944
0.6500	1368.4	407.35	0.4228	1420.1	422.76	0.4228
0.6700	1341.8	434.19	0.4506	1392.5	450.61	0.4506
0.6900	1089.0	455.97	0.4732	1130.2	473.21	0.4732
0.7100	1269.0	473.74	0.4917	1317.0	491.65	0.4917
0.7180	973.7	480.75	0.4989	1010.5	498.93	0.4989
0.7244	1005.4	491.81	0.5104	1043.4	510.41	0.5104
0.7400	1167.3	508.21	0.5274	1211.4	527.43	0.5274
0.7525	1150.6	518.27	0.5379	1194.1	537.87	0.5379
0.7575	1132.9	523.94	0.5438	1175.7	543.75	0.5438
0.7625	619.8	527.04	0.5470	643.2	546.97	0.5470
0.7675	993.3	535.73	0.5560	1030.9	555.99	0.5560
0.7800	1090.1	553.44	0.5744	1131.3	574.37	0.5744
0.8000	1042.4	572.21	0.5938	1081.8	593.85	0.5938
0.8160	818.4	581.91	0.6039	849.4	603.91	0.6039
0.8237	756.5	587.77	0.6100	785.1	610.00	0.6100
0.8315	883.2	594.97	0.6176	916.6	617.47	0.6175
0.8400	925.1	608.16	0.6311	960.1	631.15	0.6311
0.8600	943.4	627.02	0.6507	979.1	650.73	0.6507
0.8800	899.4	647.25	0.6717	933.4	671.73	0.6717
0.9050	721.4	659.88	0.6848	748.7	684.83	0.6848

0.9150	643.3	666.31	0.6915	667.6	691.51	0.6915
0.9250	665.3	671.30	0.6967	690.5	696.69	0.6967
0.9300	389.0	673.63	0.6991	403.7	699.11	0.6991
0.9370	248.9	675.87	0.7014	258.3	701.43	0.7014
0.9480	302.2	680.11	0.7058	313.6	705.83	0.7058
0.9650	507.7	688.23	0.7143	526.9	714.26	0.7143
0.9800	623.0	697.11	0.7235	646.6	723.47	0.7235
0.9935	719.7	718.70	0.7459	746.9	745.88	0.7459
1.0400	665.5	744.15	0.7723	690.7	772.29	0.7723
1.0700	614.4	762.58	0.7914	637.6	791.42	0.7914
1.1000	397.6	772.52	0.8017	412.6	801.74	0.8017
1.1200	105.0	774.10	0.8034	109.0	803.37	0.8034
1.1300	182.2	775.65	0.8050	189.1	804.98	0.8050
1.1370	127.4	777.62	0.8070	132.2	807.03	0.8070
1.1610	326.7	784.65	0.8143	339.1	814.32	0.8143
1.1800	443.3	793.29	0.8233	460.1	823.29	0.8233
1.2000	408.2	804.52	0.8349	423.6	834.94	0.8349
1.2350	463.1	825.36	0.8566	480.6	856.57	0.8566
1.2900	398.1	842.28	0.8741	413.2	874.13	0.8741
1.3200	241.1	849.51	0.8816	250.2	881.64	0.8816
1.3500	31.3	850.68	0.8829	32.5	882.85	0.8829
1.3950	1.5	850.75	0.8829	1.6	882.93	0.8829
1.4425	58.7	852.56	0.8848	55.7	884.81	0.8848
1.4625	101.3	854.31	0.8866	105.1	886.62	0.8866
1.4770	101.7	856.07	0.8884	105.5	888.44	0.8884
1.4970	175.5	859.84	0.8924	182.1	892.36	0.8924
1.5200	253.1	865.15	0.8979	262.7	897.87	0.8979
1.5390	264.3	870.18	0.9031	274.3	903.08	0.9031
1.5580	265.0	875.34	0.9084	275.0	908.45	0.9084
1.5780	235.7	879.35	0.9126	244.6	912.61	0.9126
1.5920	238.4	883.16	0.9166	247.4	916.56	0.9166
1.6100	220.4	887.35	0.9209	228.7	920.91	0.9209
1.6300	235.6	891.59	0.9253	244.5	925.31	0.9253
1.6460	226.3	897.02	0.9309	234.9	930.95	0.9309
1.6780	212.5	907.01	0.9413	220.5	941.31	0.9413

1.7400	165.3	917.10	0.9518	171.6	951.78	0.9518
1.8000	29.6	918.87	0.9536	30.7	953.62	0.9536
1.8600	1.9	918.99	0.9537	2.0	953.74	0.9537
1.9200	1.2	919.05	0.9538	1.2	953.80	0.9538
1.9600	20.4	919.71	0.9545	21.2	954.49	0.9545
1.9850	87.8	921.68	0.9565	91.1	956.54	0.9565
2.0050	25.8	922.33	0.9572	26.8	957.21	0.9572
2.0350	95.9	925.21	0.9602	99.5	960.20	0.9602
2.0650	58.2	927.10	0.9622	60.4	962.16	0.9622
2.1000	85.9	930.66	0.9659	89.1	965.86	0.9659
2.1480	79.2	934.54	0.9699	82.2	969.89	0.9699
2.1980	68.9	938.75	0.9742	71.5	974.25	0.9742
2.2700	67.7	944.23	0.9799	70.3	979.94	0.9799
2.3600	59.8	949.61	0.9855	62.1	985.52	0.9855
2.4500	20.4	950.98	0.9869	21.2	986.94	0.9869
2.4940	17.8	951.75	0.9877	18.5	987.75	0.9877
2.5370	3.1	952.45	0.9885	3.2	988.46	0.9885
2.9410	4.2	953.36	0.9894	4.4	989.42	0.9894
2.9730	7.3	953.59	0.9897	7.6	989.66	0.9897
3.0050	6.3	953.86	0.9899	6.5	989.93	0.9899
3.0560	3.1	954.05	0.9901	3.2	990.13	0.9901
3.1320	5.2	954.31	0.9904	5.4	990.40	0.9904
3.1560	18.7	954.99	0.9911	19.4	991.10	0.9911
3.2040	1.3	955.04	0.9912	1.3	991.16	0.9912
3.2450	3.1	955.22	0.9913	3.2	991.34	0.9913
3.3170	12.6	955.84	0.9920	13.1	991.99	0.9920
3.3440	3.1	956.05	0.9922	3.2	992.20	0.9922
3.4500	12.8	957.51	0.9937	13.3	993.73	0.9937
3.5730	11.5	959.33	0.9956	11.9	995.61	0.9956
3.7650	9.4	961.54	0.9979	9.8	997.91	0.9979
4.0450	7.2	963.56	1.0000	7.5	1000.00	1.0000

ภาคผนวก ข.

General Properties of Silicon (at 300 K except where noted).

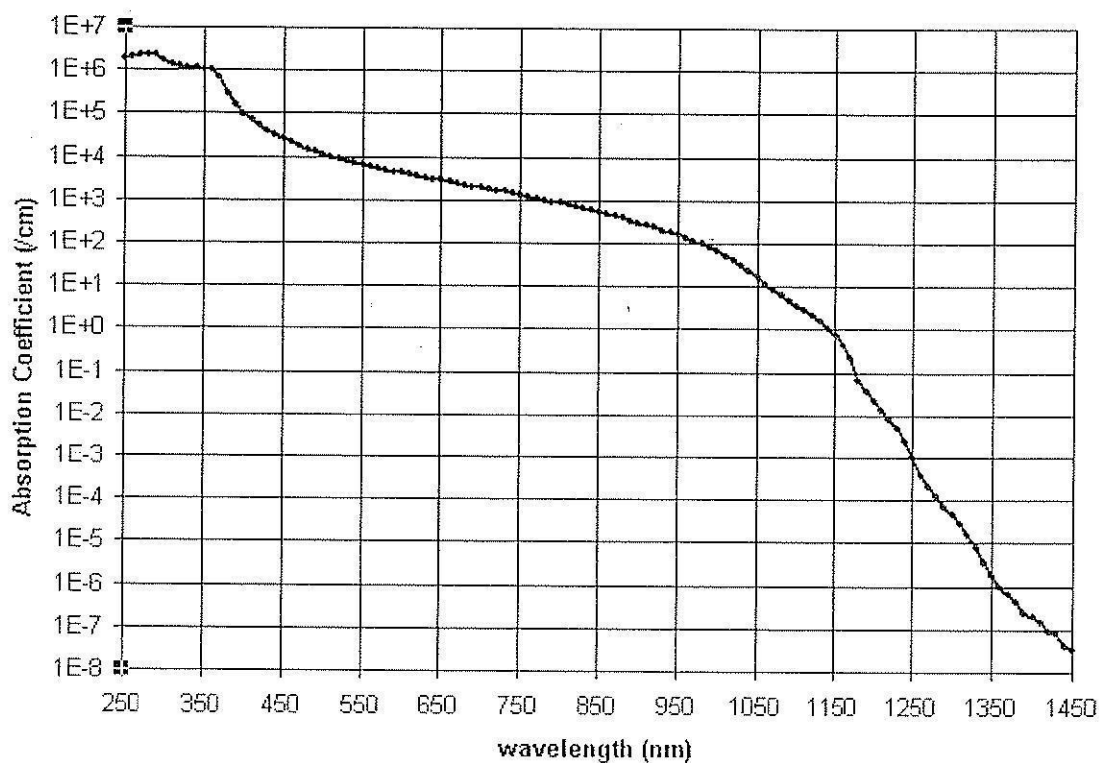
Property	Value
Atomic Density	$5 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ $5 \times 10^{28} \text{ m}^{-3}$
Atomic Weight	28.09
Density (ρ)	2.328 g cm^{-3} 2328 kg m^{-3}
Energy Bandgap (E_G)	1.1242 eV
Intrinsic Carrier Concentration (n_i)*	$1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ $1 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$
Intrinsic Carrier Concentration (n_i) at 25°C*	$8.6 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$ $8.6 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$
Lattice Constant	0.543095 nm
Melting Point	1415 °C
Thermal Conductivity	$1.5 \text{ Wcm}^{-1} \text{ K}^{-1}$ $150 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Thermal Expansion Coefficient	$2.6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Effective Density of States in the Conduction Band (N_C)	$3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ $3 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$
Effective Density of States in the Conduction Band (N_V)	$1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ $1 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$
Relative Primitivity (ϵ_r)	11.7
Electron Affinity	4.05 eV
Electron Diffusion Coefficient (D_e)	$kT/q \mu_e$
Hole Diffusion Coefficient (D_h)	$kT/q \mu_h$

- updated values given in Sproul '90 and Sproul '91.

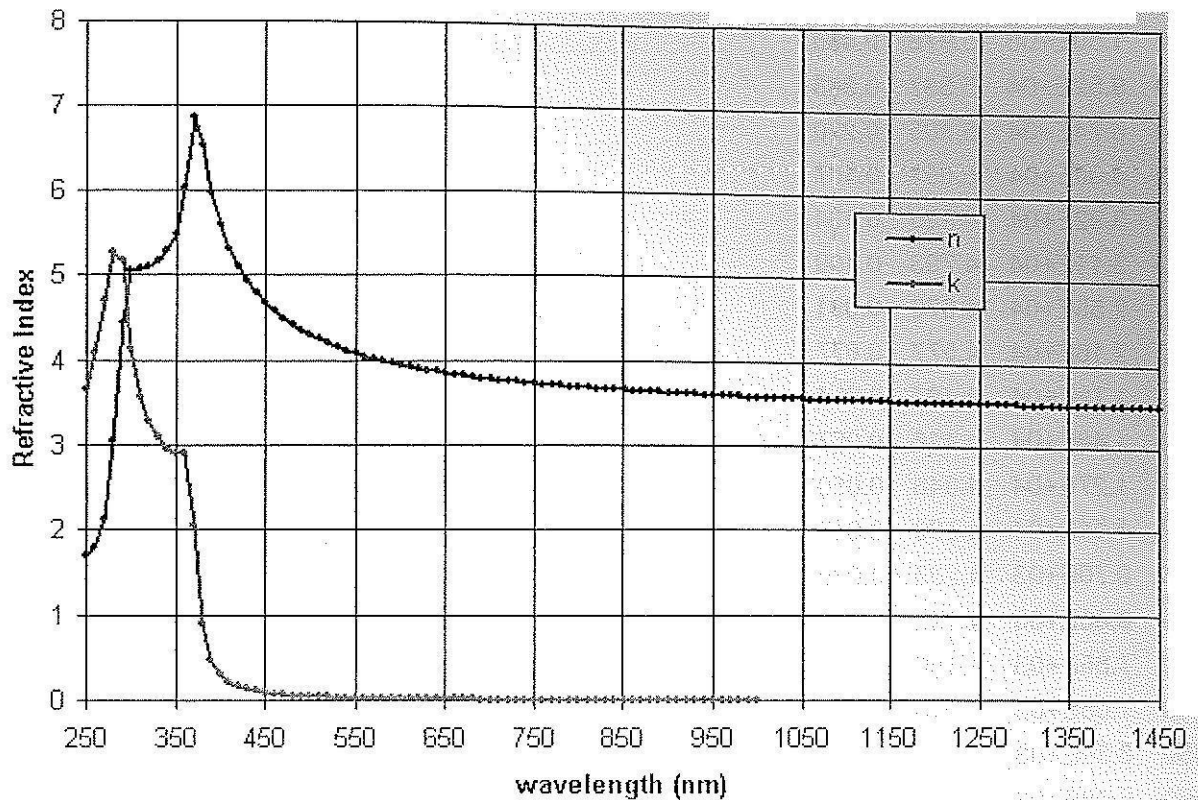
ภาคผนวก ค.

Optical Properties of Silicon

The optical properties of silicon measure at 300K (Green and Keevers). While a wide range of wavelengths is given here, silicon solar cells typical only operate from 400 to 1100 nm.



Absorption Coefficient of Silicon at 300K (log scale) graphed from the data given below. Silicon is an indirect semiconductor and has a long tail to the absorption coefficient due to multiple phonon processes.



Real and (negative) imaginary components of the refractive index for silicon at 300 K.

W - wavelength

α - absorption coefficient

n - real component of refractive index

k - extinction coefficient

refractive index = $n - ik$

W(nm)	α (/cm)	n	k
250	1.84E+06	1.694	3.666
260	1.97E+06	1.800	4.072
270	2.18E+06	2.129	4.690
280	2.36E+06	3.052	5.258
290	2.24E+06	4.426	5.160
300	1.73E+06	5.055	4.128
310	1.44E+06	5.074	3.559
320	1.28E+06	5.102	3.269
330	1.17E+06	5.179	3.085
340	1.09E+06	5.293	2.951
350	1.04E+06	5.483	2.904
360	1.02E+06	6.014	2.912
370	6.97E+05	6.863	2.051
380	2.93E+05	6.548	0.885

390	1.50E+05	5.976	0.465
400	9.52E+04	5.587	0.303
410	6.74E+04	5.305	0.220
420	5.00E+04	5.091	0.167
430	3.92E+04	4.925	0.134
440	3.11E+04	4.793	0.109
450	2.55E+04	4.676	0.091
460	2.10E+04	4.577	0.077
470	1.72E+04	4.491	0.064
480	1.48E+04	4.416	0.057
490	1.27E+04	4.348	0.050
500	1.11E+04	4.293	0.045
510	9.70E+03	4.239	0.039
520	8.80E+03	4.192	0.036
530	7.85E+03	4.150	0.033
540	7.05E+03	4.110	0.030
550	6.39E+03	4.077	0.028
560	5.78E+03	4.044	0.026
570	5.32E+03	4.015	0.024
580	4.88E+03	3.986	0.023
590	4.49E+03	3.962	0.021
600	4.14E+03	3.939	0.020
610	3.81E+03	3.916	0.018
620	3.52E+03	3.895	0.017
630	3.27E+03	3.879	0.016
640	3.04E+03	3.861	0.015
650	2.81E+03	3.844	0.015
660	2.58E+03	3.830	0.014
670	2.38E+03	3.815	0.013
680	2.21E+03	3.800	0.012
690	2.05E+03	3.787	0.011
700	1.90E+03	3.774	0.011
710	1.77E+03	3.762	0.011
720	1.66E+03	3.751	0.010
730	1.54E+03	3.741	0.009
740	1.42E+03	3.732	0.008
750	1.30E+03	3.723	0.008
760	1.19E+03	3.714	0.007
770	1.10E+03	3.705	0.007
780	1.01E+03	3.696	0.006
790	9.28E+02	3.688	0.006

800	8.50E+02	3.681	0.005
810	7.75E+02	3.674	0.005
820	7.07E+02	3.668	0.005
830	6.47E+02	3.662	0.004
840	5.91E+02	3.656	0.004
850	5.35E+02	3.650	0.004
860	4.80E+02	3.644	0.003
870	4.32E+02	3.638	0.003
880	3.83E+02	3.632	0.003
890	3.43E+02	3.626	0.002
900	3.06E+02	3.620	0.002
910	2.72E+02	3.614	0.002
920	2.40E+02	3.608	0.002
930	2.10E+02	3.602	0.002
940	1.83E+02	3.597	0.001
950	1.57E+02	3.592	0.001
960	1.34E+02	3.587	0.001
970	1.14E+02	3.582	0.001
980	9.59E+01	3.578	0.001
990	7.92E+01	3.574	0.001
1000	6.40E+01	3.570	0.001
1010	5.11E+01	3.566	-
1020	3.99E+01	3.563	-
1030	3.02E+01	3.560	-
1040	2.26E+01	3.557	-
1050	1.63E+01	3.554	-
1060	1.11E+01	3.551	-
1070	8.00E+00	3.548	-
1080	6.20E+00	3.546	-
1090	4.70E+00	3.544	-
1100	3.50E+00	3.541	-
1110	2.70E+00	3.539	-
1120	2.00E+00	3.537	-
1130	1.50E+00	3.534	-
1140	1.00E+00	3.532	-
1150	6.80E-01	3.530	-
1160	4.20E-01	3.528	-
1170	2.20E-01	3.526	-
1180	6.50E-02	3.524	-
1190	3.60E-02	3.522	-
1200	2.20E-02	3.520	-

1210	1.30E-02	3.528	-
1220	8.20E-03	3.516	-
1230	4.70E-03	3.515	-
1240	2.40E-03	3.513	-
1250	1.00E-03	3.511	-
1260	3.60E-04	3.510	-
1270	2.00E-04	3.508	-
1280	1.20E-04	3.507	-
1290	7.10E-05	3.506	-
1300	4.50E-05	3.504	-
1310	2.70E-05	3.503	-
1320	1.60E-05	3.501	-
1330	8.00E-06	3.500	-
1340	3.50E-06	3.498	-
1350	1.70E-06	3.497	-
1360	1.00E-06	3.496	-
1370	6.70E-07	3.495	-
1380	4.50E-07	3.493	-
1390	2.50E-07	3.492	-
1400	2.00E-07	3.491	-
1410	1.50E-07	3.490	-
1420	8.50E-08	3.489	-
1430	7.70E-08	3.488	-
1440	4.20E-08	3.487	-
1450	3.20E-08	3.486	-

ภาคผนวก ง.

Physical Constants of Silicon

Symbol	Value	Description
q	1.602×10^{-19} coulomb	electronic charge
m_0	9.108×10^{-31} kg	electron rest mass
c	2.998×10^8 m/s	speed of light in vacuum
ϵ_0	8.85418×10^{-14} farad/cm 8.85418×10^{-12} farad/m	permittivity of free space
h	6.626×10^{-27} erg·s 6.626×10^{-34} joule·s	Planck's constant
k	1.380×10^{-16} erg/K 1.380×10^{-23} joule/K	Boltzmann's constant
σ	5.67×10^{-8} J/m ² s K ⁴	Stefan-Boltzmann constant
kT/q	0.02586 V	thermal voltage at 300 K
λ_0	wavelength of 1eV photon	1.24 mm

ประวัติของผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการวิจัย

ดร.ทิพย์วรรณ ฟังสุวรรณรักษ์

Dr. Thipwan Fangsuwannarak

การศึกษา/คุณวุฒิ

- 2536 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์) มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล เกียรตินิยมอันดับ 2
- 2540 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ (SDRL) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- 2551 Ph.D. (Photovoltaics and Solar Energy Engineering) Centre of Excellence for Advanced Silicon Photovoltaics and Photonics, University of New South Wales, Australia

ตำแหน่งปัจจุบัน

อาจารย์ประจำในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 111 ถ.มหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000 โทรศัพท์ 0 4422 4582 โทรสาร 0 4422 4601

ประวัติการทำงาน

- พ.ศ. 2536 - 2537 อาจารย์ประจำในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
- พ.ศ. 2540 นักวิจัย ณ ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ (SDRL) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- พ.ศ. 2540 – ปัจจุบัน อาจารย์ประจำในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ทุนวิจัยที่เคยได้รับ

- งานวิจัยเรื่อง การศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของอะมอร์ฟัสซิลิคอนอัลลอย และการประยุกต์ใช้งานออปโตอิเล็กทรอนิกส์
สถานภาพ ผู้ร่วมวิจัย/วิทยานิพนธ์ปริญญาโท
แหล่งทุน ฝ่ายวิจัยจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุนพัฒนาวิชาชีพนักวิจัย สวทช.
- งานวิจัยฉบับสมบูรณ์เรื่อง การศึกษาเครื่องยนต์ฟลูอิดไดน์และการประยุกต์ใช้งาน : ออกแบบทรานสดิวเซอร์ในภาค tuning line
สถานภาพ ผู้วิจัย หัวหน้าโครงการ ใช้ระยะเวลา 1 ปี (2545)
แหล่งทุน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- งานวิจัยเรื่อง Electronic and Optical Characterizations of Silicon Quantum Dots and Its Applications in Solar Cells
สถานภาพ ผู้ร่วมวิจัย/วิทยานิพนธ์ปริญญาเอก
แหล่งทุน สำนักงานแผนนโยบายพลังงานแห่งชาติ (ประเทศไทย) และ Centre of Excellence for Advanced Silicon Photovoltaics and Photonics (UNSW, Australia) และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- งานวิจัยเรื่อง Solar Energy: Nanostructured Silicon-Based Tandem Solar Cells
สถานภาพ ผู้ร่วมวิจัย

แหล่งทุน Stanford University: Global Climate and Energy Project (GCEP) in 2005-2007

5. งานวิจัยเรื่อง Reduction of Reflection Loss by Using Anisotropic Texture Etching for a Boost in the Conversion Efficiency of Mono-Crystalline Silicon

สถานภาพ หัวหน้าโครงการวิจัย

แหล่งทุน วช. 2552 (1 ปี)

ทุนวิจัยในปัจจุบัน

1. งานวิจัยเรื่อง Investigation of Low-Cost Rear surface Passivation for c-Si Solar Cells

สถานภาพ หัวหน้าโครงการวิจัย

แหล่งทุน สกว. (อาจารย์รุ่นใหม่) 2552 (2 ปี)

2. งานวิจัยเรื่อง Preparation of Nanocrystalline Silicon and Its Applications on Photovoltaic Cells

สถานภาพ หัวหน้าโครงการวิจัย

แหล่งทุน วช. 2553

3. งานวิจัยเรื่อง Doped ZnO nanoparticles Thin Film by Sol-gel Spin Coating for Solar Cell Applications

สถานภาพ ผู้ร่วมโครงการวิจัย

แหล่งทุน NANOTECH

ความชำนาญ

- Fabrication Processes of Thin film Opto-electronics devices (LEDs, OEIC and Photodiodes)
- Semiconductor Material Characterizations (Physical, Optical and Electrical Measurements)
- Solar Cells Fabrication and Characterization