

การเตรียมผิวผลึกซิลิคอนแบบร่องและการประยุกต์ใช้งานกับเซลล์แสงอาทิตย์

นายสุวัฒน์ โสภิตพันธ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2534

ISBN 947-579-656-5

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

018293 117294204

PREPARATION OF GROOVE SURFACE ON CRYSTALLINE SILICON  
AND ITS APPLICATION TO SOLAR CELL

MR. SUWAT SOPITPAN

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering  
Department of Electrical Engineering  
Graduate School  
Chulalongkorn University


1991

ISBN 947-579-656-5

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การเตรียมผิวผลิตภัณฑ์คอนกรีตแบบร่องและการประยุกต์ใช้งานกับเซลล์แสงอาทิตย์  
โดย นายสุวัฒน์ โสภิตพันธ์  
ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า  
อาจารย์ที่ปรึกษา ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว

---


บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

  
..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย  
( ศาสตราจารย์ ดร.ถาวร วัชรากัย )

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
( รองศาสตราจารย์ ดร.มนตรี สวัสดิ์ศฤงฆาร )

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
( ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว )

  
..... กรรมการ  
( ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดุสิต เครืองาม )

  
..... กรรมการ  
( อาจารย์ ช่าง ชีวะเกตุ )

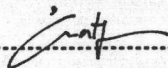
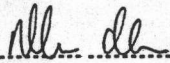


พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เรียงกันแต่ยว

ผู้พิมพ์ โสภิตพันธ์ : การเตรียมผิวผลึกซิลิคอนแบบร่องและการประยุกต์ใช้งานกับเซลล์แสง-  
อาทิตย์ (PREPARATION OF GROOVE SURFACE ON CRYSTALLINE SILICON AND ITS  
APPLICATION TO SOLAR CELL) อ.ที่ปรึกษา : ศ.ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว, 148 หน้า.  
ISBN 947-579-656-5

ได้มีการเตรียมผิวหน้าแวนผลึกซิลิคอน ที่มีลักษณะเป็นร่องรูปตัว V ด้วยวิธีการกัดเนื้อผลึกซิลิคอน  
โดยขึ้นอยู่กับทิศทางของผลึก และการใช้เทคนิคด้านโฟโตลิโทกราฟี ผิวผลึกซิลิคอนที่มีลักษณะเป็นร่องรูป  
ตัว V นี้ ให้การสะท้อนแสงที่น้อยกว่าผิวเรียบ เพราะมีการดักแสงเกิดขึ้น มีการสร้างเซลล์แสง-  
อาทิตย์แบบหัวต่อ พีเอ็น ที่มีผิวรับแสงเป็นร่องรูปตัว V และนำไปทดสอบสมรรถนะ พบว่าสามารถ  
เพิ่มประสิทธิภาพ และกระแสไฟฟ้าลัดวงจร ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบนั้นขึ้นได้อีก 25% และ 33% ตามลำดับ

ภาควิชา ..... วิศวกรรมไฟฟ้า .....  
สาขาวิชา ..... วิศวกรรมไฟฟ้า .....  
ปีการศึกษา ..... 2534 .....

ลายมือชื่อนิติ .....  .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....  .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....



พิมพ์ที่ศูนย์วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว

SUWAT SOPITPAN : PREPARATION OF GROOVE SURFACE ON CRYSTALLINE SILICON  
AND ITS APPLICATION TO SOLAR CELL.

THESIS ADVISOR : PROF.SOMSAK PANYAKEOW, Ph.D. 148 PP.

ISBN 947-579-656-5

V-groove surface of single crystal silicon wafer has been prepared by orientation dependent etching and photolithography techniques. V-groove silicon surface gives smaller reflection of incident light than flat silicon surface because of light trapping effect. PN junction solar cells with V-groove surface were fabricated and tested. The efficiency and short-circuit current of the solar cells were improved by 25% and 33%, respectively.

ภาควิชา ..... วิศวกรรมไฟฟ้า  
สาขาวิชา ..... วิศวกรรมไฟฟ้า  
ปีการศึกษา ..... 2534

ลายมือชื่อนิสิต .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความช่วยเหลือจาก ศ.ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว ท่านเป็นทั้งผู้ให้แนวความคิดในการทำวิทยานิพนธ์ และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยตลอดมา  
รศ.ดร.มนตรี สวัสดิ์ศฤงฆาร, ผศ.ดร.คุสิต เครื่องงาม และอาจารย์ชาย ชีวะเกตุ ซึ่งท่านให้คำปรึกษา และแนะแนวทางที่เป็นประโยชน์ในการเขียนวิทยานิพนธ์ นอกจากนี้ ยังสละเวลาอันมีค่าของท่าน โดยรับเป็นคณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ของผู้วิจัยด้วย

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ชুমพล อันตรเสน, อาจารย์ ดร.มานะ ศรียุทธศักดิ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อกระบวนการผลิต

ขอขอบคุณ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่เอื้อเฟื้อข้อมูลในด้านเศรษฐศาสตร์ เป็นข้อมูลที่น่าสนใจ และผู้วิจัยเห็นว่าสมควรที่จะเผยแพร่ จึงขอนำมารวมไว้ในวิทยานิพนธ์นี้ เพื่อประโยชน์ทางวิชาการแก่ผู้สนใจต่อไป

นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณศุภโชค ไทยน้อย, คุณบัณฑิตา รั้ววิเศษ ที่ได้ช่วยเหลือผู้วิจัยในด้านเทคนิค และการจัดซื้อ คุณขวัญเรือน ไทยน้อย ที่ช่วยแบ่งเบาภาระด้านธุรการ คุณกอบกุล อ่อนจันทร์ ซึ่งพากเพียรจัดพิมพ์ต้นฉบับวิทยานิพนธ์ด้วยความขยันขันแข็ง

อนึ่ง งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในรูปของทุนอุดหนุนเพื่อการทำวิทยานิพนธ์ ซึ่งผู้วิจัยขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ที่ให้การสนับสนุนทางการเงิน และกำลังใจ-กำลังใจ ตลอดมา



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญตาราง .....	ณ
สารบัญภาพ .....	ญ
บทที่	
1. บทนำ .....	1
2. ทฤษฎีพื้นฐาน .....	3
2.1 โครงสร้างของผลึกซิลิคอน .....	3
2.2 Anisotropic Etching .....	6
2.3 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ .....	9
2.4 ลักษณะสมบัติและพารามิเตอร์ที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์ .....	12
2.5 กระบวนการ Photovoltaic ในเซลล์แสงอาทิตย์ .....	14
2.6 การพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ .....	17
3. การเตรียมผิวผลึกซิลิคอนแบบร่อง .....	20
3.1 การเตรียมผิวหน้าของผลึกซิลิคอน .....	20
3.2 การสร้างรูปแบบของการกัดผิวผลึกซิลิคอน .....	23
3.3 การกัดผิวหน้าของผลึกซิลิคอน .....	28
3.4 การตรวจสอบผิวผลึกซิลิคอนแบบร่อง .....	31
3.5 การวัดการสะท้อนแสงจากผิวผลึกซิลิคอนแบบร่อง .....	41
4. การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบหัวต่อ พีเอ็น ที่มีผิวแบบร่อง .....	51
5. การวัดลักษณะสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตขึ้น .....	56
5.1 การวัดลักษณะสมบัติในสภาวะมืด .....	56
5.2 การวัดลักษณะสมบัติในสภาวะได้รับพลังงานจากแสง .....	62
5.3 การวัดการตอบสนองทางแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ .....	73



## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
6. สรุป .....	81
บรรณานุกรม .....	83
ภาคผนวก ก. โปรแกรมการวัดค่าการสะท้อนแสง .....	86
ภาคผนวก ข. โปรแกรมการวัดลักษณะสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาวะมืด .....	90
ภาคผนวก ค. โปรแกรมการวัดลักษณะสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ ในสภาวะได้รับพลังงานจากแสง .....	115
ภาคผนวก ง. โปรแกรมการวัดกระแสตอบสนองของเซลล์แสงอาทิตย์ .....	129
ภาคผนวก จ. การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงเศรษฐศาสตร์ ของระบบการผลิตกระแสไฟฟ้า จากเซลล์แสงอาทิตย์ .....	132
ประวัติผู้เขียน .....	148

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ลักษณะของระบบผลึกทั้ง 7 ชนิด .....	4
2.2 ตัวอย่างสารละลายที่ใช้กัดซิลิคอน .....	8
3.1 ขนาดของ Mask .....	26
3.2 ลักษณะต่าง ๆ ของร่อง 5 แบบ .....	41
5.1 ผลการคำนวณค่า $I_0$ และ $n$ ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีผิวต่าง ๆ .....	62
5.2 แสดงผลการวัดและคำนวณค่าพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้น .....	71
จ.1 ข้อมูลระบบ Photovoltaic 50% BOS .....	136
จ.2 ข้อมูลระบบ Photovoltaic 100% BOS .....	137
จ.3 ข้อมูลระบบ Diesel Generator Power Plant ขนาด 5 kW .....	138
จ.4 ข้อมูลระบบ 2 x Diesel Generator Power Plant ขนาด 5 kW .....	139
จ.5 ข้อมูลระบบสายส่งกำลัง ในระบบ 22 kV. (BAHT/kWH) .....	140
จ.6 ข้อมูลระบบสายส่งกำลัง ในระบบ 22 kV. (BAHT/kWH) .....	141



สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	ระบบแกนอ้างอิงของ Unit Cell .....	4
2.2	การระบุ ระนาบ XYZ .....	5
2.3	Si Cubic Unit Cell .....	5
2.4	ระนาบ [100], [110] และ [111] .....	5
2.5	โครงสร้างของ VMOS .....	7
2.6	การสร้าง Pressure Sensor .....	7
2.7	โครงสร้างทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์ .....	11
2.8	ลักษณะสมบัติ กระแส-แรงดัน ของเซลล์แสงอาทิตย์ .....	11
2.9	กระบวนการทางไฟฟ้า จากปรากฏการณ์ Photovoltaic .....	13
2.10	วงจรสมมูล ของเซลล์แสงอาทิตย์ .....	13
2.11	ลักษณะผิวแบบพีระมิด .....	19
2.12	ลักษณะผิวแบบร่องรูปตัว วี .....	19
3.1	กระบวนการ Thermal Oxidation .....	21
3.2	เตา Oxidation ที่อุณหภูมิ 1000 °C .....	22
3.3	ระบบ Oxygen Bubble .....	22
3.4	Spinner .....	24
3.5	Mask Aligner .....	24
3.6	Mask .....	25
3.7	ลักษณะของลวดลายบน Mask .....	25
3.8	ระบบการกัด groove .....	29
3.9	สารละลาย P-ED ในภาชนะปิดผนึก .....	29
3.10	Thermometer .....	30
3.11	วงจรควบคุมอุณหภูมิ .....	30
3.12	กล้องจุลทรรศน์ .....	31
3.13	ผิวแบบร่องทั้ง 5 แบบ ที่ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ .....	32
3.14	Scanning Electron Microscope .....	33



สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.15 ภาพถ่าย SEM แสดงการเกิด V-groove .....	35
3.16 ภาพ SEM แสดงลักษณะของผิวผลึกซิลิคอนทั้ง 5 แบบ .....	36
3.17 ภาพของผลึกซิลิคอนที่ได้เตรียมผิวหน้าเป็นร่องแล้ว .....	37
3.18 แสดงขนาดของร่องทั้ง 5 แบบ .....	37
3.19 ภาพ SEM ของผิวผลึกที่ถักกัดเป็นร่องแบบที่ 5 นาน 15 นาที .....	38
3.20 ภาพ SEM ของผิวผลึกที่ถักกัดเป็นร่องแบบที่ 5 นาน 20 นาที .....	39
3.21 ภาพ SEM ของผิวผลึกที่ถักกัดเป็นร่องแบบที่ 5 นาน 25 นาที .....	39
3.22 ภาพ SEM ของผิวผลึกที่ถักกัดเป็นร่องแบบที่ 5 นาน 30 นาที .....	40
3.23 ภาพประกอบการคำนวณพื้นที่ผิวประสิทธิผล .....	40
3.24 การวัดค่าการสะท้อนแสง .....	43
3.25 ภาพของระบบการวัดค่าการสะท้อนแสง .....	43
3.26 ภายใน Mirror Box .....	44
3.27 Optical Power Meter และ Optical Sensor .....	44
3.28 Flow chart แสดงการวัดค่าการสะท้อนแสง .....	45
3.29 วงจรแปลงสัญญาณ Marker .....	47
3.30 ภาพผลึกซิลิคอนบนแผ่นยึด เตรียมติดตั้งใน Mirror Box .....	48
3.31 กราฟข้อมูลจากการวัดค่าการสะท้อนแสงจากผิวชนิดต่าง ๆ .....	49
3.32 กราฟการสะท้อนเปรียบเทียบที่ทำการ normalize แล้ว .....	49
3.33 ภาพจำลองลักษณะการสะท้อนแสงของผิวแบบร่อง .....	50
4.1 เตาแพร่ขีมีสารเจือปนชนิด เอ็น .....	53
4.2 Template ที่ใช้ทำการระเหยไอโลหะ .....	53
4.3 เครื่องระเหยไอโลหะในสุญญากาศ .....	54
4.4 โครงสร้างเปรียบเทียบระหว่างเซลล์แบบปกติ กับแบบผิวร่อง .....	54
4.5 เซลล์แสงอาทิตย์ แบบผิวร่องที่ผลิตขึ้น .....	55
5.1 การจัดวางจรภายใน hp 16055A Test Fixture .....	57
5.2 Test Fixture เมื่อเปิดออกให้เห็นแท่นยึดเซลล์แสงอาทิตย์ และตัวเซลล์ฯ .	57
5.3 hp 4140B pA Meter / DC Voltage Source .....	58

## สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.4	ระบบการวัดหาลักษณะสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ ในสภาวะมืด ..... 58
5.5	กราฟคุณสมบัติกระแส-แรงดันในสภาวะมืด
	ก. แบบ Linear-Linear ข. แบบ Log-Linear ..... 60
5.6	การหาค่า $I_0$ และ $n$ ..... 61
5.7	ระบบการวัดลักษณะสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาวะได้รับพลังงานจากแสง . 64
5.8	วงจรการวัดลักษณะสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาวะได้รับพลังงานจากแสง . 64
5.9	วงจรของกล่องจัดวงจร ..... 65
5.10	Standard Solar Cell ..... 65
5.11	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสลัดวงจร กับความเข้มแสง ของ Standard Solar Cell ..... 66
5.12	Flow chart การวัดลักษณะสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยคอมพิวเตอร์ .... 67
5.13	ตัวอย่างผลการวัดคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ ..... 69
5.14	ลักษณะสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ 6 แบบ ..... 70
5.15	เปรียบเทียบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์ฯ ทั้ง 6 แบบในรูปเดียวกัน . 71
5.16	ภาพสัณนิษฐานการเกิด Diffusion-spike ที่เกิดขึ้น ..... 72
5.17	สเปกตรัมของแสงอาทิตย์ที่ผิวโลกทั่วไป ( AM1.5 ) เทียบกับในอวกาศ ( AMO ) และวัตถุดำที่มีอุณหภูมิ 6000 K ..... 74
5.18	Flow chart แสดงการวัดค่ากระแสตอบสนอง ..... 76
5.19	ระบบการวัดพลังงานแสง ..... 77
5.20	ระบบการวัดกระแสลัดวงจรตอบสนอง ..... 77
5.21	การตอบสนองต่อแสงของ Optical Sensor ..... 79
5.22	ผลการวัดพลังงานแสงจาก Optical Power Meter ..... 79
5.23	ผลการวัดกระแสลัดวงจรตอบสนอง ..... 80
5.24	Quantum Efficiency ของเซลล์แสงอาทิตย์ทั้ง 6 แบบ ..... 80

## สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
จ.1	เปรียบเทียบ Unit Cost ระหว่าง PV กับ Diesel (PV cost = 300 BAHT/W <sub>p</sub> + BOS 50%) ..... 142
จ.2	เปรียบเทียบ Unit Cost ระหว่าง PV กับ Diesel (PV cost = 200 BAHT/W <sub>p</sub> + BOS 50%) ..... 143
จ.3	เปรียบเทียบ Unit Cost ระหว่าง PV กับ Diesel (PV cost = 100 BAHT/W <sub>p</sub> + BOS 50%) ..... 144
จ.4	เปรียบเทียบ Unit Cost ระหว่าง PV กับ Diesel ..... 145
จ.5	เปรียบเทียบ Unit Cost ระหว่าง PV กับ สายส่งกำลัง (ราคาสาย = 120,000 บาท/กม.) ..... 146
จ.6	เปรียบเทียบ Unit Cost ระหว่าง PV กับ สายส่งกำลัง (ราคาสาย = 500,000 บาท/กม.) ..... 147