



การปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของ
เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิคอนแบบโพลีคริสตัลไลน์

โดย

ดร. บรรจง โดประเสริฐหงส์
ดร. ภนตรี สวัสดิ์สูงเนิน
ดร. เกียรติศักดิ์ เฉลิมทีระกุล
ดร. สมศักดิ์ บัญญาแก้ว

โครงการวิจัยเลขที่ 24G-EE-2529

ทุนงบประมาณแผ่นดิน

สถาบันวิจัยและพัฒนาของคณะวิศวกรรมศาสตร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรุงเทพฯ ๙

พฤษภาคม ๒๕๓๑

การปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของ
เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิคอนแบบโพลีคริสตัลไลน์

โดย

รองศาสตราจารย์ ดร. บรรยง โทประเสริฐพงศ์

(วุฒิ) วศ.บ. (ไฟฟ้า) เกียรตินิยมอันดับหนึ่ง จุฬาฯ

D.E.A. University of Paul Sabatier, France

Dr.Ing. University of Paul Sabatier, France

รองศาสตราจารย์ ดร. มนตรี สวัสดิ์ศฤงฆาร

(วุฒิ) วศ.บ. (ไฟฟ้า) เกียรตินิยม จุฬาฯ, วศ.ม. (ไฟฟ้า) จุฬาฯ

D.E.A. and Dr. Ing, l'ENSEEIH, Toulouse, France

ดร. เกรียงศักดิ์ เจริมศิริกุล

(วุฒิ) B.E. (E.E.) Auckland, M.S.E.E. and Ph.D (Notre-Dame)

ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว

(วุฒิ) B.E., M.E., and Ph.D. (Osaka University)

โครงการวิจัยเลขที่ 26 G-EE-2529

ทุนงบประมาณแผ่นดิน

สถาบันวิจัยและพัฒนาของคณะวิศวกรรมศาสตร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรุงเทพฯ

พฤษภาคม 2531



ชื่อโครงการวิจัย	การปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิคอนแบบโพลีคริสตัลไลน์
ชื่อผู้วิจัยหลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. บรรยง โทประเสริฐพงศ์
ผู้วิจัยร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร. มนต์รี สวัสดิ์ศฤงฆาร ดร. เกรียงศักดิ์ เฉลิมศิริระกุล ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว
เดือนและปีที่ทำวิจัยเสร็จ	มีนาคม 2531

บทคัดย่อ

ได้มีการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์แบบหัวต่อพี-เอ็นลงบนแว่นผลึกของโพลีคริสตัลไลน์ซิลิคอนชนิดพี ซึ่งมีความหนา 400 ไมครอน และมีความต้านทานแผ่น 80 Ω/\square โดยได้เน้นที่ 3 ขั้นตอนการผลิตคือ (i) เทคนิคการเตรียมแว่นผลึก (ii) การใช้สารเคมีกัดชั้นที่ถูกรั่วซึมเพื่อลดผลของ dead layer และควบคุมความลึกของหัวต่อ และ (iii) เทคนิคการชุบตะกั่วบัดกรี ผลการวัดภายใต้แสงอาทิตย์พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นมีกระแสมีค่าน้อยมากจนสังเกตแทบไม่เห็น ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้นจะเพิ่มขึ้นเมื่อความลึกของหัวต่อน้อยลง และจะลดลงเมื่ออุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพสูงสุดวัดได้ 9.97 เปอร์เซ็นต์ และค่าฟิลล์แฟกเตอร์ดีที่สุดมีค่า 0.776 เมื่ออุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์เท่ากับ 22 ° ซ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



Research Title	Process Improvement to Increase the Efficiency of Polycrystalline Silicon Solar Cells
Name of the Principal Investigator	Associate Professor Dr. Banyong Toprasertpong
Name of the Co-Investigator	Associate Professor Dr. Montri Sawadsaringkarn Dr. Kriengsak Chalermtiragool Professor Dr. Somsak Panyakeow
Date of Completion	March 1988

Abstract

PN junction polycrystalline solar cells were fabricated on p-type silicon substrates with 400 microns thickness and sheet resistance of $80 \Omega/\square$. The fabrication processes were emphasized on the following 3 steps. (i) Wafer preparation technique. (ii) Using the chemical etchant to etch the diffused layer to eliminate the dead layer effect and to control the junction depth. And (iii) plating technique using Tin-Lead Solder. The experimental results under sun light showed that solar cells fabricated had negligible dark current. The solar cells efficiency increased with decreasing junction depth and decreased with increasing cells temperature. The maximum efficiency was measured to be 9.97 percent and the best fill factor to be 0.776 at cell temperature of 22°C .



กิติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนาคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้อนุมัติเงินทุนงบประมาณแผ่นดินปี 2529 เพื่อสนับสนุนโครงการวิจัยนี้

ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่ได้สนับสนุนโครงการวิจัยนี้ตลอดมา
สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ร่วมงานทุกคนแห่งห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง คุณขวัญเรือน ชันทะกิตติ ที่ได้พิมพ์รายงานวิจัยฉบับนี้ด้วยความมานะพยายาม

บรรรยง	โตประเสริฐพงศ์
มนตรี	สวัสดิ์ศฤงฆาร
เกรียงศักดิ์	เฉลิมติระกุล
สมศักดิ์	ปัญญาแก้ว

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

มีนาคม 2531

สารบัญ

		หน้า
1	บทนำ.....	1
2	สรุปเกี่ยวกับ เซลล์แสงอาทิตย์.....	2
2.1	เซลล์แสงอาทิตย์แบบ โพลีคริสตัลไลน์ซิลิคอน.....	2
2.2	ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของ เซลล์แสงอาทิตย์.....	6
2.3	ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ เซลล์แสงอาทิตย์.....	9
3.	การผลิต เซลล์แสงอาทิตย์แบบ โพลีคริสตัลไลน์.....	14
3.1	การเตรียมแว่นผลึก.....	14
3.2	การปลูกชั้นออกไซด์ด้วยความร้อน.....	15
3.3	การแพร่ซึมฟอสฟอรัส.....	17
3.4	การกัดผิวหน้าของซิลิคอน.....	17
3.5	การทำชั้นด้านการสะท้อนแสง.....	18
3.6	การทำขั้วอิเล็กทรอนิกส์.....	18
3.6.1	การทำอิเล็กทรอนิกส์ด้านหลัง.....	19
3.6.2	การทำอิเล็กทรอนิกส์ด้านหน้า.....	19
3.7	การชุบตะกั่วบัดกรี.....	19
4.	การทดสอบและการวิเคราะห์ผล.....	22
4.1	วิธีการทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์.....	22
4.2	ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลของเซลล์แสงอาทิตย์.....	22
4.2.1	ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันเมื่อไม่มีการโหลดเย็น.....	22
4.2.2	ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันเมื่อโหลดเย็น.....	29
5.	สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	38
	เอกสารอ้างอิง.....	40

บทที่ 1
บทนำ

เซลล์แสงอาทิตย์ในระยะแรก ๆ ถูกนำมาใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับปั๊มน้ำกลางทะเลทราย สัญญาณไฟของประกาศาร ในระยะหลังนำไปใช้กับ repeater station ขององค์การโทรศัพท์ โทรศัพท์ที่อยู่บนทางหลวง ปั๊มน้ำขึ้นภูเขา โทรศัพท์การศึกษา ตู้เย็นขนาดเล็กสำหรับแช่วัคซีน หรือแม้กระทั่งใช้ผลิตพลังงานไฟฟ้าเข้าข่ายวงจรไฟฟ้าของการไฟฟ้า โดยจุดประสงค์หลักของการใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ก็คือ ใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าทดแทนในท้องที่ซึ่งไม่สามารถหาพลังงานไฟฟ้าด้วยวิธีปกติธรรมดาได้

ในระยะหลังนี้ได้เกิดวิกฤตการณ์ทางน้ำมันขึ้น ทำให้ผู้ผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ได้พยายามเน้นเรื่องการผลิตต้นทุนของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยใช้วัสดุที่มีราคาถูก เซลล์แสงอาทิตย์ในยุคแรก ๆ ทำจากซิลิคอนผลึกเดี่ยว (single crystal silicon) เพื่อลดต้นทุนการผลิตก็ได้หันมาใช้โพลีคริสตัลไลน์ซิลิคอน (polycrystalline silicon) ซิลิคอนอสัณฐานแบบฟิล์มบาง (amorphous thin film silicon) และซิลิคอนริบบอน (silicon ribbon) แบบต่าง ๆ เช่น Dendritic web และ Edge-defined Film-fed Growth เป็นต้น [1], [2], [3] นอกจากนี้ยังหันมาใช้เทคโนโลยีการผลิตแบบง่าย ๆ และลดขั้นตอนการผลิตลงเพื่อให้ได้ dollars/peak watt ต่ำ [4] ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำได้ทำการศึกษเกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากโพลีคริสตัลไลน์ซิลิคอน [5] เป็นครั้งแรกในเมืองไทย และวัดประสิทธิภาพสูงสุดของตัวเซลล์ได้ 6 เปอร์เซ็นต์

เนื่องจากปัจจุบันนี้เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากโพลีคริสตัลไลน์ซิลิคอนได้มีจำหน่ายในท้องตลาดเมืองไทยแล้วหลายบริษัท ทางห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ จึงได้ดำเนินการวิจัยเพิ่มเติม เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์ โดยได้เน้นที่เทคนิคการเตรียมแผ่นผลึก การทำหัวต่อพี-เอ็น (p-n junction) ให้บางลงโดยใช้สารเคมีกัด (chemical etching) เพื่อลด dead layer และเพิ่ม collection efficiency [1] และการปรับปรุงเทคนิคการชุบตะกั่วบัดกรี

บทที่ 2

สรุปเกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์

ทฤษฎีเกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์ได้กล่าวไว้ค่อนข้างละเอียดในหนังสือของ Harold J. Hovel [1] หนังสือของ Martin A. Green [2] หนังสือของ S.M.Sze [6] หนังสือของ Charles E. Backus [7] และหนังสือของ A.G. Milnes [8] ดังนั้นในรายงานวิจัยฉบับนี้จะขอยกมากล่าวถึงอย่างย่อในหัวข้อที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยเท่านั้น

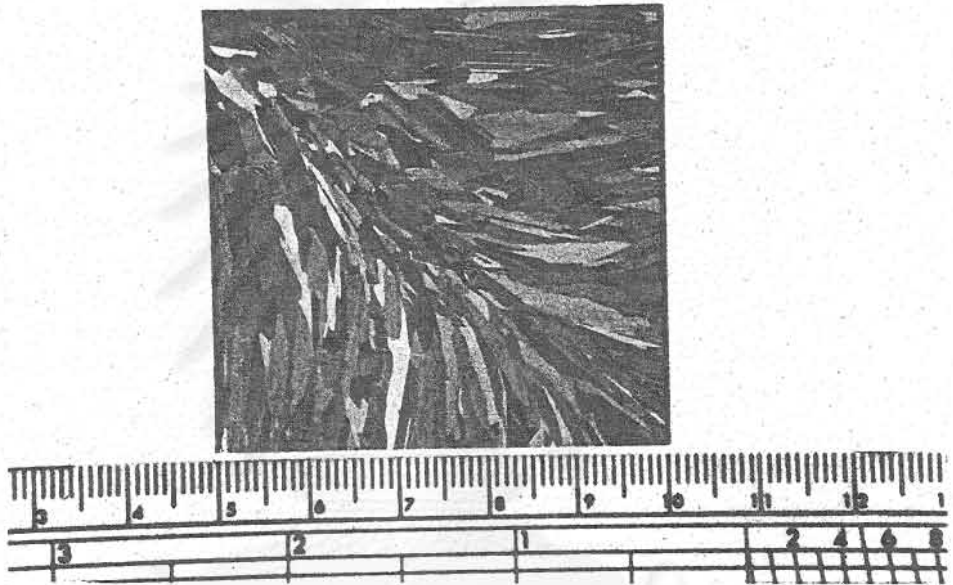
เซลล์แสงอาทิตย์แบ่งออกเป็นหลายชนิดขึ้นกับโครงสร้างและวัสดุที่ใช้ เช่น

- เซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกเดี่ยวทำจากซิลิคอน (single crystal silicon solar cell)
- เซลล์แสงอาทิตย์แบบโพลีคริสตัลไลน์ทำจากซิลิคอน (polycrystalline silicon solar cell)
- เซลล์แสงอาทิตย์อสัณฐานแบบฟิล์มบางทำจากซิลิคอน (amorphous thin film silicon solar cell)
- เซลล์แสงอาทิตย์ทำจากแกเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs solar cell)
- เซลล์แสงอาทิตย์ทำจากแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS solar cell)
- เซลล์แสงอาทิตย์แบบรวมแสง (concentrator solar cell)

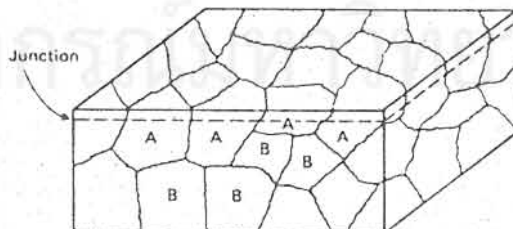
2.1 เซลล์แสงอาทิตย์แบบโพลีคริสตัลไลน์ซิลิคอน เทคนิคในการเตรียมโพลีคริสตัลไลน์ซิลิคอนค่อนข้างจะง่ายกว่าการเตรียมซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยว ส่วนใหญ่แล้วจะใช้วิธีการปลูกผลึกแบบหล่อ (casting) โพลีคริสตัลไลน์ซิลิคอนที่ปลูกได้มีชื่อแตกต่างกันขึ้นกับบริษัทผู้ผลิต เช่น ถ้าทำจากบริษัท Wacker-Chemitronic เรียก Silso silicon ถ้าทำจากบริษัท Crystal System เรียก HEM silicon หรือถ้าทำจากบริษัท Semix, Inc เรียกว่า UCP silicon เป็นต้น รูปที่ 2.1 แสดงให้เห็นภาพถ่ายของแว่นผลึก (wafer) ของโพลีคริสตัลไลน์ซิลิคอน แบบ Silso ของ Wacker-Chemitronic จะเห็นว่าแว่นผลึกจะประกอบด้วยเกรน (grain) เล็ก ๆ จำนวนมากมาย ซึ่งโครงสร้างของเกรนอาจเป็นแบบ random grain orientation ดังรูปที่ 2.2 หรือแบบ columnar orientation ดังรูปที่ 2.3 เกรนเล็ก ๆ เหล่านี้ถูกล้อมรอบด้วยเส้นแบ่งเขตเกรน (grain boundary) ที่เส้นแบ่งเขตเกรนจะมีกำแพงไฟฟ้าสถิต (electrostatic

barrier) ขึ้น ซึ่งทำให้เกิดผลที่ไม่ดีขึ้นหลายประการด้วยกัน เช่น

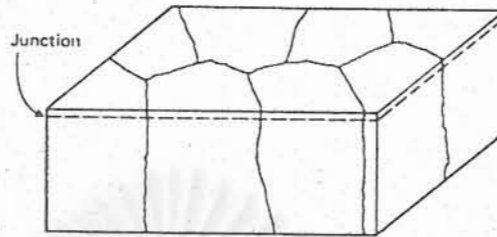
- เป็นกำแพงกั้นการไหลของพาหะข้างมาก (majority carrier)
- เป็น "sink" ของพาหะข้างน้อย (minority carrier)
- อาจเกิด shunting path ของกระแสที่ไหลผ่านหัวต่อพี-เอ็น



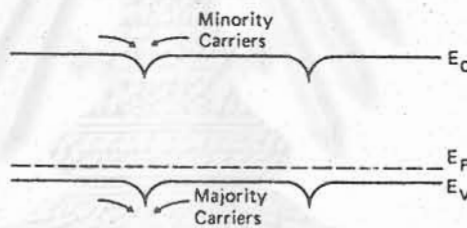
รูปที่ 2.1 แวนผลึกโพลีคริสตัลไลน์ซิลิคอนแบบ Silso ของ Wacker-Chemitronic



รูปที่ 2.2 ผลึกโพลีคริสตัลไลน์แบบ random grain orientation



รูปที่ 2.3 ผลึกโพลีคริสตัลไลน์แบบ columnar orientation



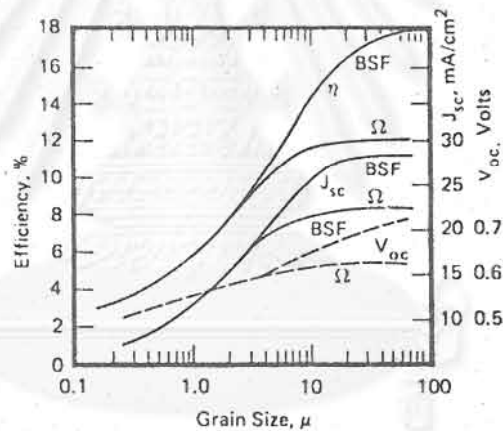
รูปที่ 2.4 ไคอะแกรมแถบพลังงานรอบ ๆ เส้นแบ่งเขตเกรน (grain boundary)

รูปที่ 2.4 เป็นไคอะแกรมแถบพลังงานรอบ ๆ เส้นแบ่งเขตเกรนเพื่อแสดงให้เห็นการเป็นกำแพงกั้นการไหลของพาหะข้างมาก และการทำหน้าที่เป็น sink ของพาหะข้างน้อย ผลึกที่มีเกรนเล็ก ๆ แบบ random grain orientation ดังรูปที่ 2.2 ถ้านำไปทำเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ เฉพาะเกรนส่วนบน (ส่วนที่เป็น A) เท่านั้นที่มีบทบาทต่อการสร้างกระแสเพราะเกรนส่วนใต้ลงไป (ส่วนที่เป็น B) จะถูกแยกออกจากหัวต่อที่-เอ็น โดยเส้นแบ่งเขตเกรนที่อยู่เหนือขึ้นไป ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้มีสมรรถนะต่ำ

เส้นแบ่งเขตเกรนเป็นความบกพร่อง (defect) แบบหนึ่งในผลึก ซึ่งก่อให้เกิดระดับพลังงานขึ้นในแถบพลังงานต้องห้าม (forbidden gap) ของสารกึ่งตัวนำ ระดับพลังงานนี้จะทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางการรวมตัวใหม่ (center of recombination)

ที่ใด หรืออาจกล่าวได้ว่าทำหน้าที่เป็น "sink" ของพาหะข้างน้อย พาหะที่ถูกสร้างขึ้นโดยโฟตอนของแสงในระยะห่างจากเส้นแบ่งเขตเกรนน้อยกว่าความยาวการแพร่ซึมของพาหะข้างน้อย (minority diffusion length) จะถูกดึงเข้าหาเส้นแบ่งเขตเกรนและรวมตัวกัน ทำให้กระแสโฟโตน้อยลง เพื่อลดอิทธิพลของเส้นแบ่งเขตเกรน จึงมักจะใช้ผลึกที่มีเกรนขนาดโตกว่าความยาวการแพร่ซึมของพาหะข้างน้อยมาก ๆ เช่น ใช้ผลึกที่มีขนาดของเกรนหลาย ๆ มิลลิเมตร เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากผลึกที่มีเกรนแบบ columnar พาหะที่เกิดขึ้นโดยโฟตอนของแสงในแต่ละ filament สามารถจะวิ่งไปหาหัวต่อ และเปลี่ยนไปเป็นกระแสโฟโตได้ จึงเปรียบเสมือนกับมีเซลล์ย่อย ๆ จำนวนมากต่อขนานกันอยู่

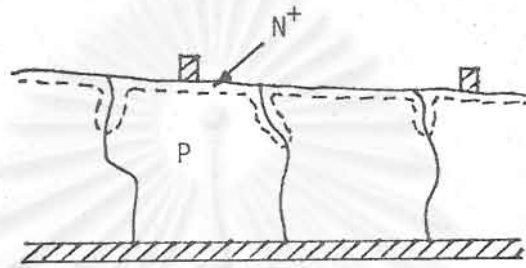
รูปที่ 2.5 แสดงให้เห็นอิทธิพลของขนาดของเกรนที่มีต่อค่ากระแสลัดวงจร (I_{sc}) แรงดันวงจรเปิด (V_{oc}) และค่าประสิทธิภาพของเซลล์ (η) โดยค่าในกราฟ



รูปที่ 2.5 อิทธิพลของขนาดของเกรนที่มีต่อพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์

แบบของซิลิคอนและคำนวณที่ AM1 จะเห็นว่าประสิทธิภาพลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อขนาดของเกรนมีค่าที่น้อยกว่า 10 ไมครอน สำหรับเกรนที่มีขนาด 3 ไมครอน จะได้ประสิทธิภาพสูงสุด 10% (คำนวณ) และเมื่อเกรนมีขนาดเล็กลงเหลือ 0.7 ไมครอน จะได้ประสิทธิภาพเพียง 5%

เนื่องจากเส้นแบ่งเขตเกรนเป็นบริเวณที่มี dislocation สูงกว่าที่อื่นในผลึก จึงเกิด preferential diffusion ขึ้นในระหว่างการแพร่ซึมสารเจือปนเพื่อสร้างหัวต่อ



รูปที่ 2.6 Preferential diffusion ของตัวโด๊ป (dopant) ตามแนวเส้นแบ่งเขตเกรนระหว่างกระบวนการทำการแพร่ซึม

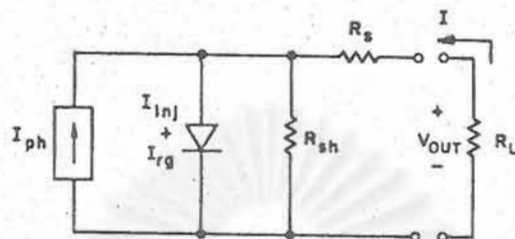
พี-เอ็น ดังแสดงในรูปที่ 2.6 คือสารเจือปนจะแพร่ซึมที่เส้นแบ่งเขตเกรนได้เร็วกว่าบริเวณอื่น ๆ จึงอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้ shunt resistance มีค่าต่ำ และหากหัวต่อที่เกิดขึ้นบริเวณเส้นแบ่งเขตเกรนทะลุถึงผิวอีกด้านหนึ่ง จะทำให้เกิดกระแสรั่วสูงมากได้

2.2 ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ โครงสร้างหลักของเซลล์แสงอาทิตย์เป็นแบบหัวต่อพี-เอ็น ซึ่งมีวงจรสมมูลดังรูปที่ 2.7 โดยมีแหล่งกำเนิดโฟกระแสตรงและไดโอดต่อขนานกันอยู่ พร้อมทั้งมีความต้านทานอนุกรมและความต้านทานขนานด้วย เมื่อต่อโหลดเข้ากับเซลล์แสงอาทิตย์จะมีกระแสไฟฟ้าไหล

$$I \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right) = I_{dark} + \frac{V_{out}}{R_{sh}} - I_{ph} \dots\dots\dots(2.1)$$

โดยที่ I_{dark} (กระแสมืด) คือกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อไม่มีแสง

$$I_{dark} = I_s \left(\exp \frac{qV}{nkT} - 1 \right) \dots\dots\dots(2.2)$$



รูปที่ 2-7 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์

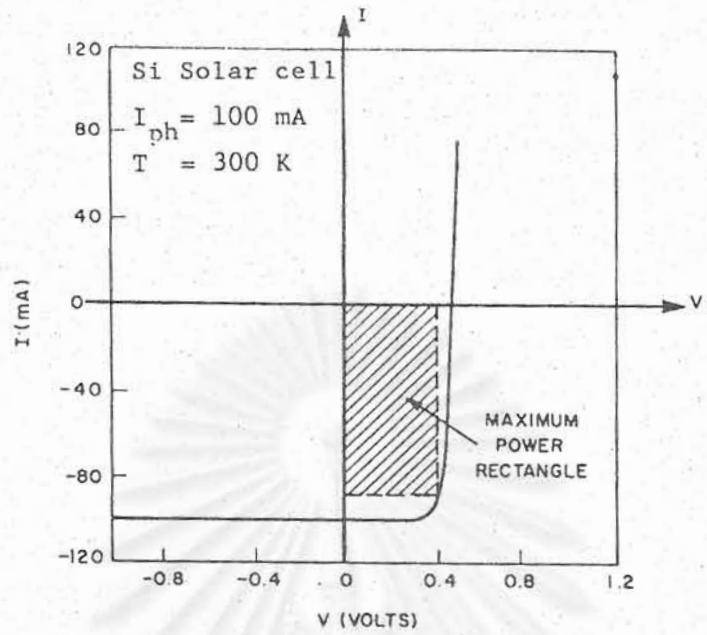
เมื่อ

- I = กระแสจ่ายไปที่โหลด
- I_S = กระแสอิ่มตัวย้อนกลับ
- n = ideality factor
- V = แรงดันไฟฟ้าคร่อมหัวต่อของเซลล์แสงอาทิตย์
- R_S = ความต้านทานอนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์
- R_{sh} = ความต้านทานขนานของเซลล์แสงอาทิตย์
- I_{ph} = กระแสโฟโต
- V_{out} = แรงดันออกที่ขั้วของเซลล์แสงอาทิตย์

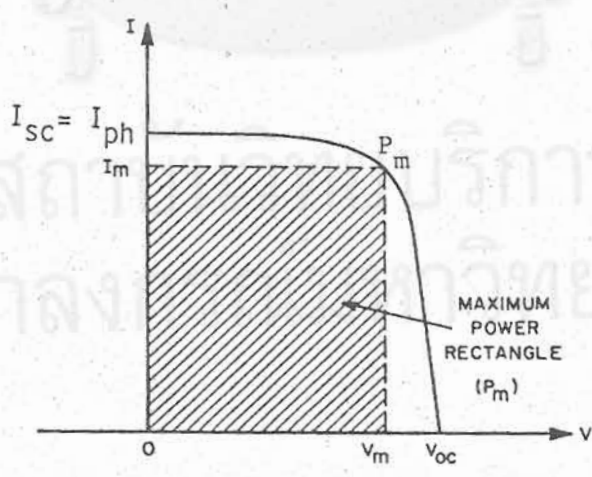
ในกรณีที่ R_S มีค่าน้อยมาก และ R_{sh} มีค่าโตมาก ๆ สมการ (2.1) จะกลายเป็น

$$I = I_S \left(\exp \frac{qV}{nKT} - 1 \right) - I_{ph} \dots\dots\dots(2.3)$$

ซึ่งมีลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันตามรูปที่ 2.8 แต่โดยทั่วไปลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันมักจะแสดงใน quadrant ที่ 1 ตามรูปที่ 2.9 ซึ่งเป็นการหมุนรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของ เซลล์แสงอาทิตย์เมื่อถูกฉายด้วยแสง



รูปที่ 2.9 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรูปที่ 2.8 เมื่อหมุนรอบแกน X ไปเป็นมุม 180°

รอบแกน X ไป 180° และในรูปแสดงจุดทำงานที่เซลล์แสงอาทิตย์ให้กำลังงานออกสูงสุด P_m ซึ่งที่จุดนี้กระแสมีค่า I_m และแรงดันมีค่า V_m

$$P_m = I_m V_m \quad \dots\dots\dots(2.4)$$

จากสมการที่ (2.3) สามารถหาแรงดันวงจรเปิด V_{oc} ได้

$$V_{oc} = \frac{\eta kT}{q} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \quad \dots\dots\dots(2.5)$$

และประสิทธิภาพสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่า

$$\eta = \frac{I_{sc} \cdot V_{oc}}{P_{in}} \times FF \times 100 \quad \dots\dots\dots(2.6)$$

ซึ่ง

I_{sc} = กระแสลัดวงจร

V_{oc} = แรงดันวงจรเปิด

P_{in} = กำลังงานของแสงอาทิตย์ที่ส่องไปที่เซลล์

FF = ฟิลล์แฟกเตอร์ (fill factor)

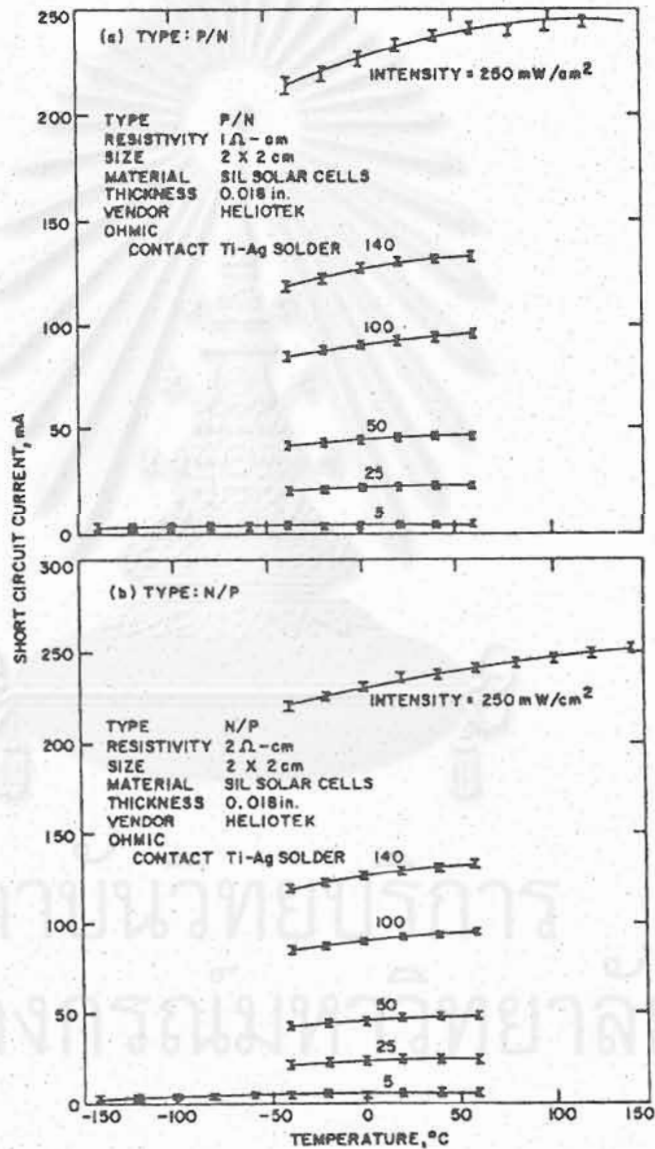
และฟิลล์แฟกเตอร์มีค่า

$$FF = \frac{V_m \cdot I_m}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad \dots\dots\dots(2.7)$$

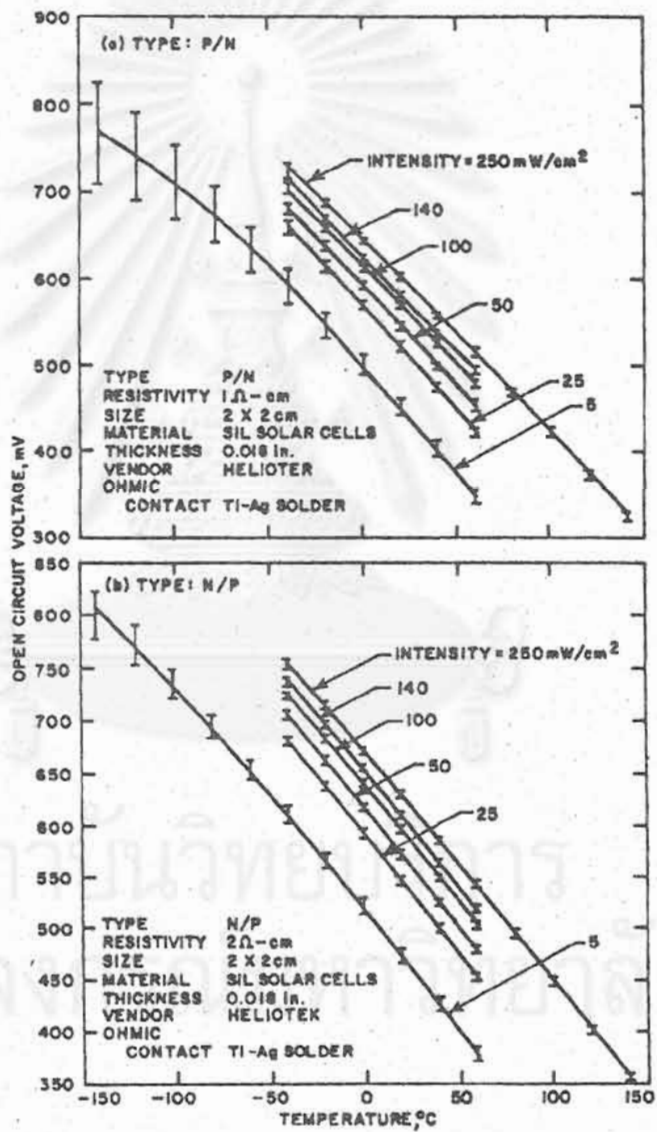
ค่าฟิลล์แฟกเตอร์เป็นตัวบอกว่าเซลล์แสงอาทิตย์จะมีลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันใกล้เคียงอุดมคติมากน้อยเพียงใด

2.3 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อเซลล์แสงอาทิตย์ [1] เมื่ออุณหภูมิทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์เปลี่ยนแปลง จะมีผลต่อตัวพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วย เช่น กระแสลัดวงจรจะสูงขึ้นเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.10 เนื่องจากความยาวการแพร่หิมจะเพิ่มขึ้นและ absorption edge เลื่อนมาทางด้านพลังงานต่ำลง แรงดันวงจรเปิดจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.11 เนื่องจากกระแสลัดสูงขึ้น ฟิลล์แฟกเตอร์

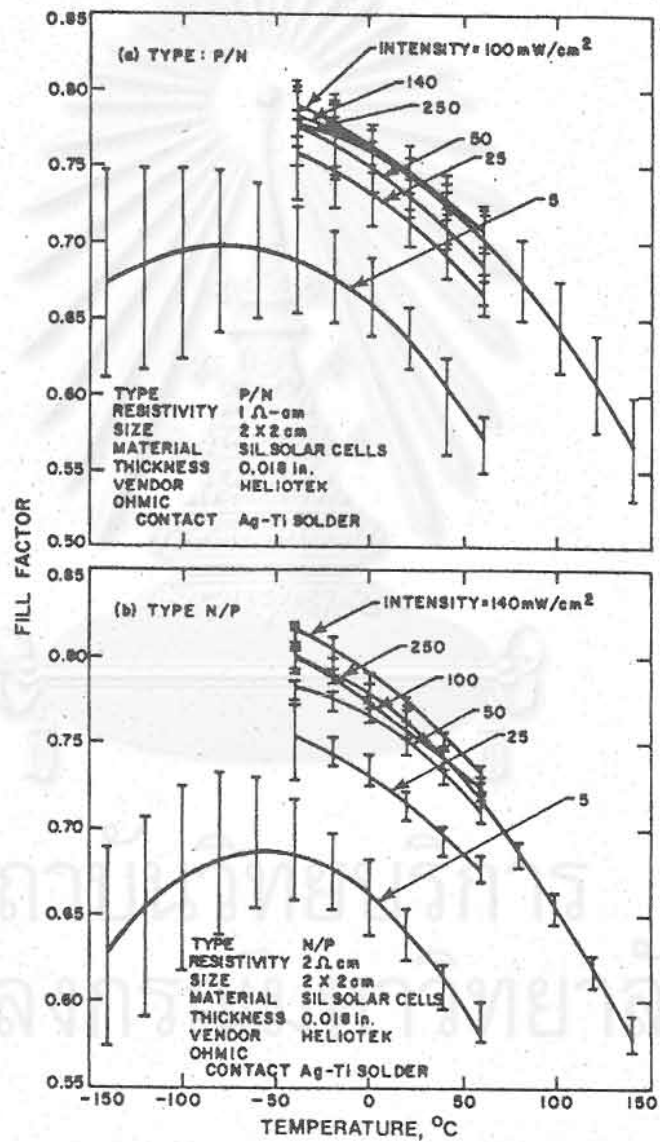
จะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 200° K ดังรูปที่ 2.12 เนื่องจากแรงดันวงจรเปิดลดลง และเนื่องจาก "Knee" ของลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันเพิ่มขึ้น จากผลของอุณหภูมิที่มีต่อ I_{sc} , V_{oc} และ FF ทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.13



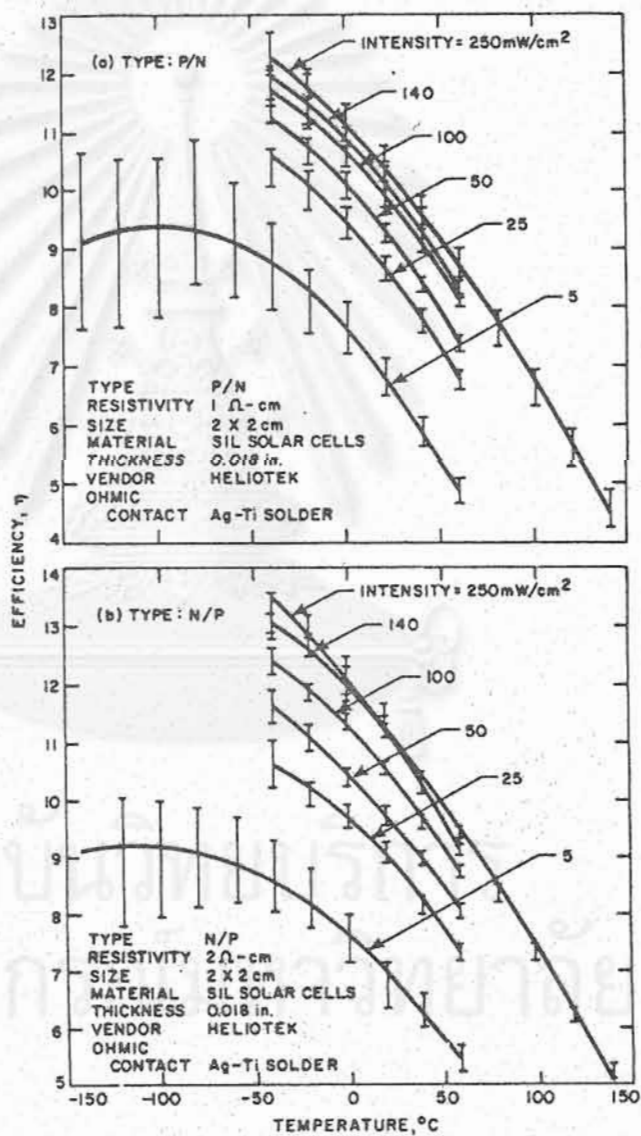
รูปที่ 2.10 กระแสลัดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิคอนขนาด 2x2 ซม² ในฟังก์ชันของอุณหภูมิและความเข้มแสง



รูปที่ 2.11 แรงดันวงจรเปิดของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิคอนในฟังก์ชันของอุณหภูมิและความเข้มแสง



รูปที่ 2.12 ฟิิลล์แฟกเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิคอนในฟังก์ชันของอุณหภูมิและความเข้มแสง



รูปที่ 2.13 ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิคอนในฟังก์ชันของอุณหภูมิและความเข้มแสง

บทที่ 3

การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบโพลีคริสตัลไลน์ซิลิคอน

การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แบบโพลีคริสตัลไลน์ซิลิคอนใช้เทคโนโลยีซิลิคอนแบบผลานาร์ ซึ่งมีรายละเอียดแตกต่างไปจากผลิตเซลล์แสงอาทิตย์จากผลึกเดี่ยวพอประมาณ จุดมุ่งหมายหลักคือ ต้องการให้เซลล์ที่ผลิตได้มีประสิทธิภาพ 8-10% ผู้วิจัยจึงได้เน้นใน 3 ขั้นตอนการผลิตคือ

- เทคนิคการเตรียมแว่นผลึก (หัวข้อ 3.1)
- เทคนิคการทำให้หัวต่อบางลง (หัวข้อ 3.4)
- เทคนิคการชุบตะกั่วบัดกรี (หัวข้อ 3.7)

รายละเอียดคร่าว ๆ ของขั้นตอนการผลิตทั้งหมดมีดังต่อไปนี้

3.1 การเตรียมแว่นผลึก วัสดุเริ่มต้นเป็นแว่นผลึก (wafer) แบบโพลีคริสตัลไลน์ซิลิคอนของบริษัท Wacker-chemitronic ซึ่งมีชื่อทางการค้าว่า "SILSO" จำนวน 10 แผ่น รายละเอียดทางเทคนิคของแว่นผลึกมีดังนี้

- | | |
|--------------------|-----------------------|
| - วัสดุ | SILSO-polycrystalline |
| - โครงสร้าง | columnar |
| - ขนาด | 25x25 มม ² |
| - ความหนา | 400 ไมครอน |
| - ความต้านทานแผ่น | 80 Ω/□ |
| - สภาพต้านทานไฟฟ้า | 2 โอห์ม-เซนติเมตร |
| - ชนิดการนำไฟฟ้า | พี |
| - ตัวโค้ป | โบรอน |

การเตรียมผิวแว่นผลึกใช้น้ำยาเคมี เพื่อจะลดความบกพร่อง (defects) ที่ผิวหน้าอันจะทำให้กระแสรั่วไหลที่ผลึกน้อยลง ซึ่งจะนำไปสู่ประสิทธิภาพของเซลล์ที่ผลิตได้สูงขึ้น น้ำยาเคมีที่ใช้ทั้งที่มีสภาพความเป็นกรดและมีสภาพความเป็นด่างขึ้นกับเทคนิคของแต่ละบุคคล ในงานวิจัยนี้ใช้น้ำยาเคมีที่มีสภาพความเป็นกรด โดยได้ดัดแปลงมาจากการเตรียมผิวแว่นผลึกของการทำไอซีซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ล้างฝุ่นและคราบไขมัน

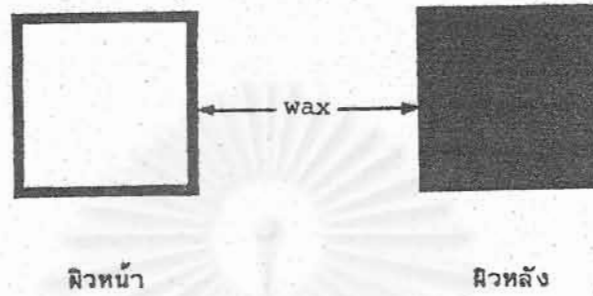
- แช่ใน Trichloro-ethylene ใน Ultrasonic cleaner
- แช่ใน Acetone ใน Ultrasonic cleaner
- แช่ในน้ำปลอดคลอรีน (DI) ใน Ultrasonic cleaner
- จุ่มในน้ำ DI เย็น
- ต้มใน Acetone 5 นาที
- ต้มใน Trichloro-ethylene 5 นาที
- ต้มใน Acetone 5 นาที
- จุ่มในน้ำ DI เย็น 2 นาที
- ต้มในน้ำ DI 3 บีกเกอร์ติดต่อกัน
- จุ่มในน้ำ DI เย็น ที่ไหลรินจนสะอาด
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

การกัดผิว (etching) เพื่อกำจัดความสกปรก

- ต้มในกรด HNO_3 70% 10 นาที
- ต้มในน้ำ DI 5 นาที
- จุ่มในน้ำ DI เย็นที่ไหลรินจนสะอาด
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- จุ่มในกรด HF 50% ที่อุณหภูมิห้อง 2 นาที
- จุ่มในน้ำ DI เย็นที่ไหลรินจนสะอาด
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

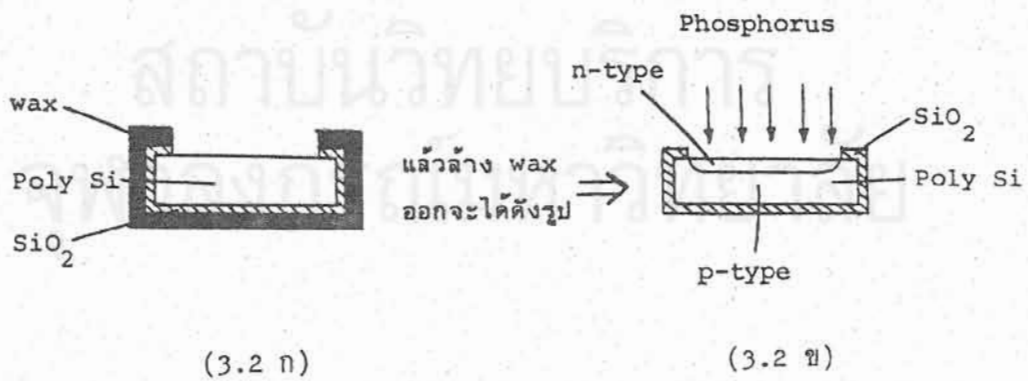
3.2 การปลุกชั้นออกไซด์ด้วยความร้อน กระทำในเตาเปิดเป็นการปลุกออกไซด์แบบเปียก (wet oxydation) โดยผ่านก๊าซออกซิเจนเข้าไปในน้ำ DI อุณหภูมิ 95 ° ซ แล้วเลยเข้าไปในท่อควอทซ์ของเตา อุณหภูมิของเตา 1000 ° ซ นำแว่นผลึกไว้ในเตา 2 ชั่วโมง 3 นาที จะได้ออกไซด์ของซิลิคอน (SiO_2) หนาประมาณ 4500 Å สีม่วงออกไซด์ที่ได้จะเคลือบผิวทั้งสองด้านของแว่นผลึก ทำการกัดออกไซด์ที่ด้านหน้าออกยกเว้นบริเวณขอบเพื่อให้เป็นบริเวณที่ต้องการสร้างหัวต่อพี-เอ็นดังนี้

ผิวด้านหน้าทา Apizon wax เฉพาะที่ขอบ ส่วนผิวด้านหลังทา Apizon wax ทั้งหน้ารวมทั้งทา Apizon wax ที่สันของแว่นผลึกด้วยดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1

หลังจากนั้นนำไปลอยในน้ำยา buffer HF โดยคว่ำผิวหน้าลง ออกไซด์ บริเวณที่ไม่มี Apizon wax เคลือบจะถูกกัดออกเป็นดังรูปที่ 3.2 (ก)



รูปที่ 3.2

3.3 การแพร่ซึมฟอสฟอรัส เพื่อสร้างชั้นเอ็นบนซึบสเตรตชนิดพีให้เป็นหัวต่อพี-เอ็น โดยกระทำในเตาเปิดที่อุณหภูมิ 1000°C ใช้ POCl_3 เป็นแหล่งกำเนิดสารเจือปน แต่ POCl_3 ในน้ำที่อุณหภูมิห้อง ผ่านก๊าซไนโตรเจน 0.12 ลิตร/นาที เข้าไป bubble POCl_3 เข้าเตา 15 นาที ระหว่างนั้นผ่านก๊าซผสม $\text{O}_2 + \text{N}_2$ เข้าเตาด้วย (O_2 มี อัตราไหล 1.8 ลิตร/นาที และ N_2 มีอัตราไหล 1.5 ลิตร/นาที) ชั้นตอนนี้เป็นการ predeposition หลังจากนั้นปิดวาล์ว POCl_3 ให้มีเฉพาะก๊าซผสม $\text{O}_2 + \text{N}_2$ ผ่านเตา ปลดแวนผลึกไว้ในเตาอีก 10 นาที เพื่อเป็นการ drive-in นำเอาแวนผลึกออกจากเตา ถัดออกไซด์ที่คลุมอยู่ออกด้วยน้ำยา buffer HF จะได้ชั้นตัวอย่างที่มีโครงสร้างดังรูปที่ 3.2 (ข)

3.4 การกัดผิวหน้าของซิลิคอน ในชั้นตอนนี้ใช้น้ำยาเคมีซึ่งมีส่วนผสมของ HNO_3 70% 2 ส่วน HF 50% 1 ส่วน และ CH_3COOH glacial 1 ส่วนโดยปริมาตร กัดผิวหน้าของซิลิคอนด้วยเวลาต่าง ๆ กัน เพื่อให้หัวตอลง เพื่อลดชั้น dead layer ซึ่งมีอัตราการรวมตัวกันใหม่ (recombination rate) สูง ความลึกของหัวต่อสามารถบอกได้ด้วยค่าความต้านทานแผ่น (R_s , sheet resistance) คือถ้าความต้านทานแผ่นน้อย ความลึกของหัวต่อจะมาก และถ้าความต้านทานแผ่นมากความลึกของหัวต่อจะน้อย โดยความต้านทานแผ่นเฉลี่ยของชั้นแพร่ซึมมีค่า [10]

$$R_s = \frac{1}{q \int_0^{x_j} \mu N(x) dx} \quad \Omega/\square \quad \dots\dots\dots(3.1)$$

เมื่อ x_j = ความลึกของหัวต่อ
 μ = ความคล่องตัวของพาหะ
 $N(x)$ = การกระจายของสารเจือปนกับระยะทาง x

ถ้าการกระจายของสารเจือปนกับระยะทางมีค่าคงที่จะได้

$$R_s = \frac{1}{q\mu N x_j} \quad \dots\dots\dots(3.2)$$

หรือ $R_s = \frac{\rho}{x_j} \quad \dots\dots\dots(3.3)$

เมื่อ
$$\rho = \frac{1}{q\mu N} \dots\dots\dots(3-4)$$

ความต้านทานแผ่นของเว็นผลึกที่ผ่านการแพร่ซึมและกัดด้วยสารเคมี 10 แผ่น แสดงในตารางที่ 3.1 การวัดความต้านทานแผ่นใช้ 4-point probe วัดหลาย ๆ ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่ 3.1

หมายเลขเว็นผลึก	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ความต้านทานแผ่น R_s (Ω/\square)	สกปรก ไม่ทำต่อ	5.54	10.47	14.14	15.23	18.79	20.52	22.98	26.97	33.96

3.5 การทำชั้นด้านการสะท้อนแสง กระทำในเตาเปิด โดยการปลูกชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ โดยใช้ไอน้ำเค็ลคเป็นเวลา 7 นาที โดยเตามีอุณหภูมิ 1000°C ได้ออกไซด์หนาประมาณ 1000 Å ด้านหน้าที่ถูกโค้บด้วยฟอสฟอรัสซึ่งมีความเข้มข้นสูงจะเป็นสีฟ้า ส่วนด้านหลังซึ่งเป็นซึบสเตรตชนิดพีมีความเข้มข้นของพาหะต่ำจะเป็นสีน้ำเงิน

3.6 การทำซึ่วอิเล็กโทรด เอาชิ้นตัวอย่างที่ผ่านขั้นตอนที่ 3.5 มาเคลือบด้วย photoresist แบบบวก โดยการหยดลงบนผิวด้านหน้าของซิลิคอนแล้วปล่อยให้ค่อย ๆ แผ่กระจายออกเต็มผิวหน้า เพื่อให้ได้ชั้น photoresist ค่อนข้างหนา เพราะผิวของโพลีคริสตัลไลน์ซิลิคอนหยาบ ถ้าบางจะเคลือบไม่ตลอดผิว หลังจากนั้นนำไปทำ soft bake ที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 30 นาที แล้วนำไปฉายแสงอุลตราไวโอเล็ตผ่านหน้ากากที่มี pattern ของอิเล็กโทรดเป็นเวลา 2 นาที นำไป develop เป็นเวลา 1 นาที แล้วนำไปทำ hard bake ที่อุณหภูมิ 120°C เป็นเวลา 30 นาที

แล้วนำไปจุ่มในน้ำยา buffer HF เพื่อกัดออกไซด์ด้านหน้าที่ไม่มี photoresist คลุมอยู่ออก ส่วนด้านหลังไม่มี photoresist คลุม ออกไซด์จะถูกกัดออกทั้งหมด

3.6.1 การทำอิเล็กโทรดด้านหลัง นำเอาชิ้นตัวอย่างไปจาบด้วยไออะลูมิเนียมในสุญญากาศ ซึ่งมีความดันประมาณ 3×10^{-7} Torr ชั้นอะลูมิเนียมหนา 3500 \AA

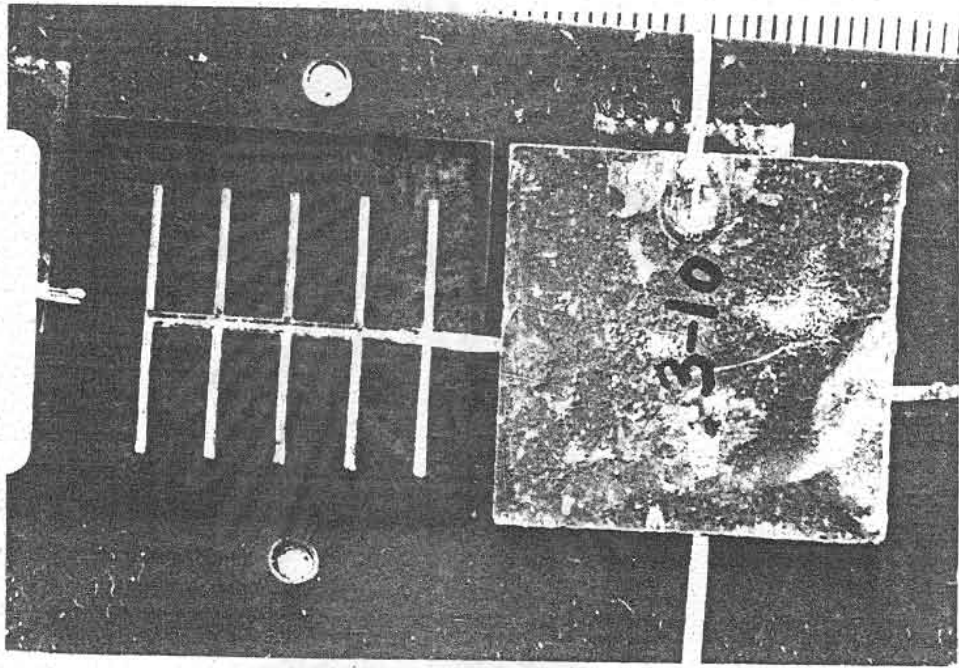
3.6.2 การทำอิเล็กโทรดด้านหน้า หลังจากจาบด้วยไออะลูมิเนียมที่ด้านหลังแล้วนำไปชุบนิกเกิลแบบไร้ไฟฟ้า [9] เป็นเวลา 5 นาที นิกเกิลจะติดตาม pattern ด้านหน้าที่ออกไซด์ถูกกัดออก และติบนอะลูมิเนียมที่ด้านหลังด้วย หลังจากนั้นล้าง pattern ของ photoresist ด้านหน้าออกด้วย Acetone ล้างด้วยน้ำ DI

3.7 การชุบตะกั่วบักกรี นำเอาตะกั่วบักกรีมาใส่ในถ้วยสะเตนเลสขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 นิ้ว ต้มให้ร้อนพอหลอมเหลวโดยการควบคุมอุณหภูมิให้สูงกว่าจุดหลอมเหลวเล็กน้อย เอาชิ้นตัวอย่างมาจาบด้วยฟลักซ์ที่ด้านหน้า แล้วนำไปลอยบนตะกั่วบักกรีเหลวโดยคว่ำหน้าลงเป็นเวลาประมาณ 5-10 วินาที ตะกั่วบักกรีจะเกาะติดเฉพาะบนนิกเกิลที่เป็น pattern แล้วนำมาจาบฟลักซ์ที่ด้านหลัง นำไปลอยในตะกั่วบักกรีเหลวอีกโดยคว่ำด้านหลังลงเป็นเวลาประมาณ 5-10 วินาที ตะกั่วบักกรีจะเคลือบผิวด้านหลังทั้งหมด หลังจากนั้นนำเอาแถบทองแดงเล็ก ๆ ไปบักกรีติดบนตะกั่วบักกรีทั้งสองหน้าเพื่อให้เป็นขั้ววัด นำไปล้างฟลักซ์ออกด้วย Trichloro-ethylene ตามด้วย Acetone และน้ำ DI รูปที่ 3.3 แสดงถึงเครื่องมือที่ใช้ในการชุบตะกั่วบักกรี รูปที่ 3.4 แสดงให้เห็นเซลล์แสง



รูปที่ 3.3 แสดงถึงเครื่องมือที่ใช้ในการชุบตะกั่วบักกรี ชิ้นตัวอย่างที่ถูกชุบลอยอยู่ตรงกลางด้วยสะเตนเลส

อาทิตย์ที่ขุบตะกั่วบักกรีและบักกรีแถบทองแดง เรียบร้อยพร้อมสำหรับการทดสอบ ส่วนขั้นตอนของกระบวนการผลิตโดยสรุปและรูปขนาดเท่าของจริงแสดงในตารางที่ 3-2

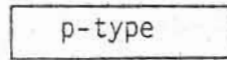


รูปที่ 3.4 แสดงให้เห็นด้านหน้าและด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์แบบโพลีคริสตัลไลน์ซิลิคอนที่ผ่านการขุบตะกั่วบักกรีและบักกรีซิวอิเล็คโทรด พร้อมสำหรับการทดสอบ

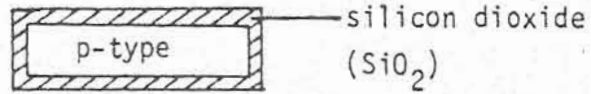
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.2 กระบวนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์โดยสรุป

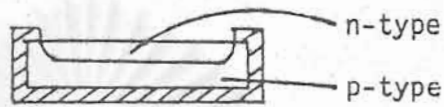
แผ่นผลึกซิลิคอนแบบ
โพลีคริสตัลไลน์



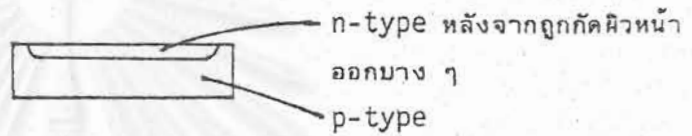
ออกซิเดชันด้วยความร้อน



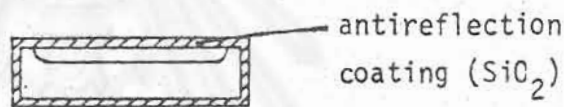
แพร่ซึมฟอสฟอรัส



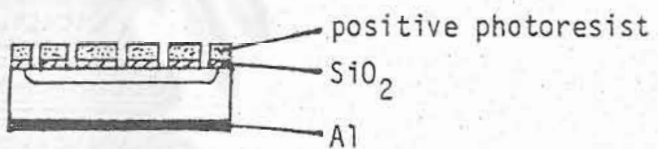
กัด SiO₂ ออกหมดและกัด
ผิวหน้าชั้นเอ็นเพื่อกำจัด
dead layer



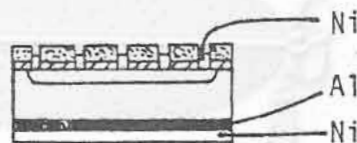
ทำชั้นด้านการสะท้อนแสง



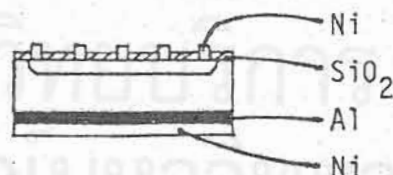
ใช้โฟโตลิโทกราฟีทำ
pattern ด้านหน้าและกัด
SiO₂ ออก แล้วฉาบโอ Al
ในสุญญากาศ



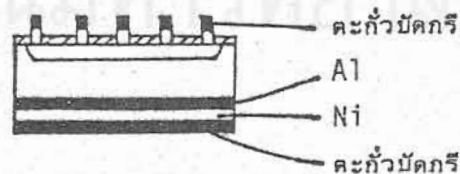
ชุบนิเกิลแบบไร้ไฟฟ้า



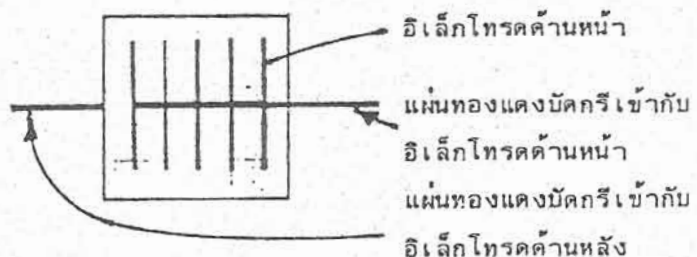
ล้าง photoresist
ออกด้วย Acetone



ชุบตะกั่วบัตกรีในด้วย
สะเตนเลส



ภาพขนาดเท่าของจริง
ของ เซลล์แสงอาทิตย์
แบบซิลิคอนโพลีคริสตัลไลน์



บทที่ 4

การทดสอบและการวิเคราะห์ผล

4.1 วิธีการทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยทำการวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้แสงอาทิตย์ระหว่างเวลา 12.04-15.10 น. โดยอาศัยออสซิลโลสโคปคู่กับ curve tracer เพื่อคุณลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวเซลล์แสงอาทิตย์ จากกราฟของคุณลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน สามารถหาแรงดันวงจรเปิด (V_{OC} , open circuit voltage) กระแสลัดวงจร (I_{SC} , short circuit current) และจุดทำงานที่ตัวเซลล์แสงอาทิตย์สามารถให้กำลังงานออกสูงสุดได้ (maximum power point) พลังงานแสงขาเข้าของตัวเซลล์แสงอาทิตย์วัดโดยใช้เซลล์มาตรฐานที่ได้ปรับเทียบแล้ว การทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ตอน โดยให้อุณหภูมิของตัวเซลล์ต่างกันคือ

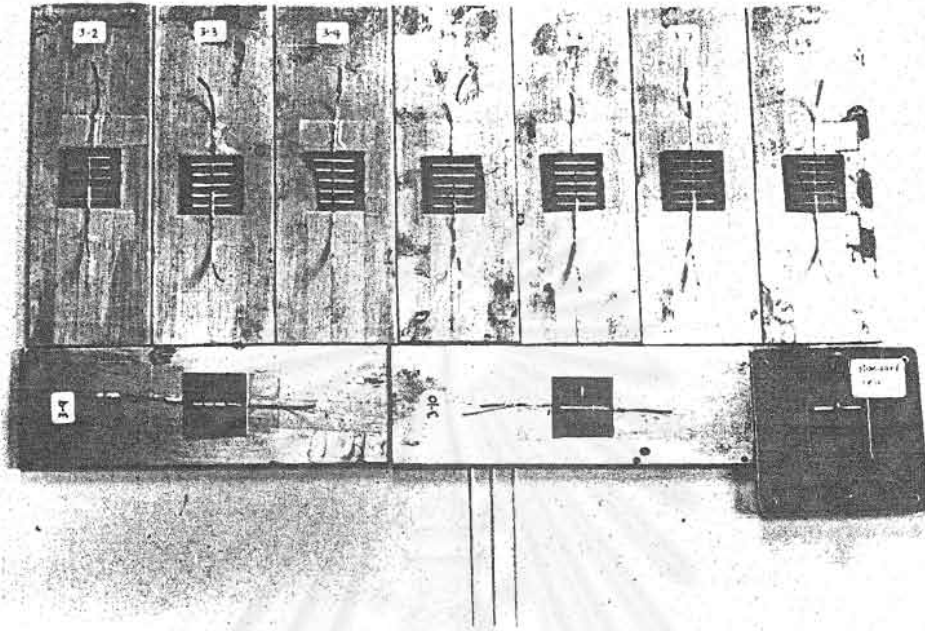
(ก) วัดโดยใช้แสงอาทิตย์ โดยอุณหภูมิเฉลี่ยของตัวเซลล์ประมาณ 41°C

(ข) วัดโดยใช้แสงอาทิตย์ และควบคุมอุณหภูมิของตัวเซลล์ โดยวางตัวเซลล์บนแผ่นทองแดงซึ่งจุ่มอยู่ในน้ำเย็น ควบคุมอุณหภูมิของตัวเซลล์ให้อยู่ที่ 22°C การวัดอุณหภูมิใช้หัววัดอุณหภูมิของ Fluke

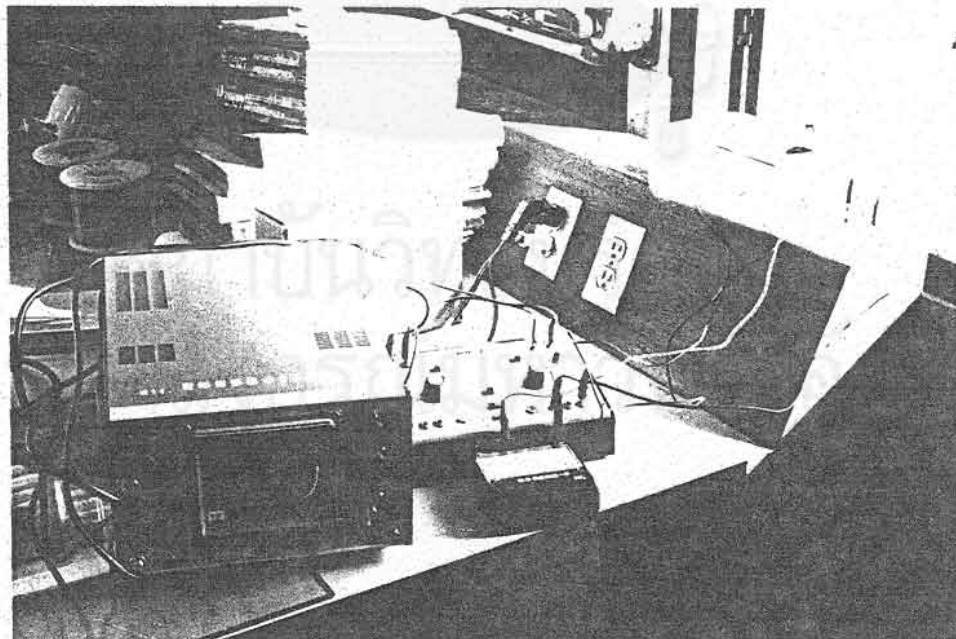
การคุณลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวเซลล์ทำหลาย ๆ ครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ย รูปที่ 4.1 แสดงภาพถ่ายของกลุ่มเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดบนแผ่นทองแดงเพื่อให้ช่วยระบายความร้อนโดยมีเซลล์มาตรฐานวางเปรียบเทียบด้วย รูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นเครื่องมือที่ใช้ในการหาคุณลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวเซลล์แสงอาทิตย์ ส่วนรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นการควบคุมอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตขึ้น และของเซลล์มาตรฐานโดยใช้น้ำหล่อเย็นในระหว่างการวัด

4.2 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลของเซลล์แสงอาทิตย์ [11]

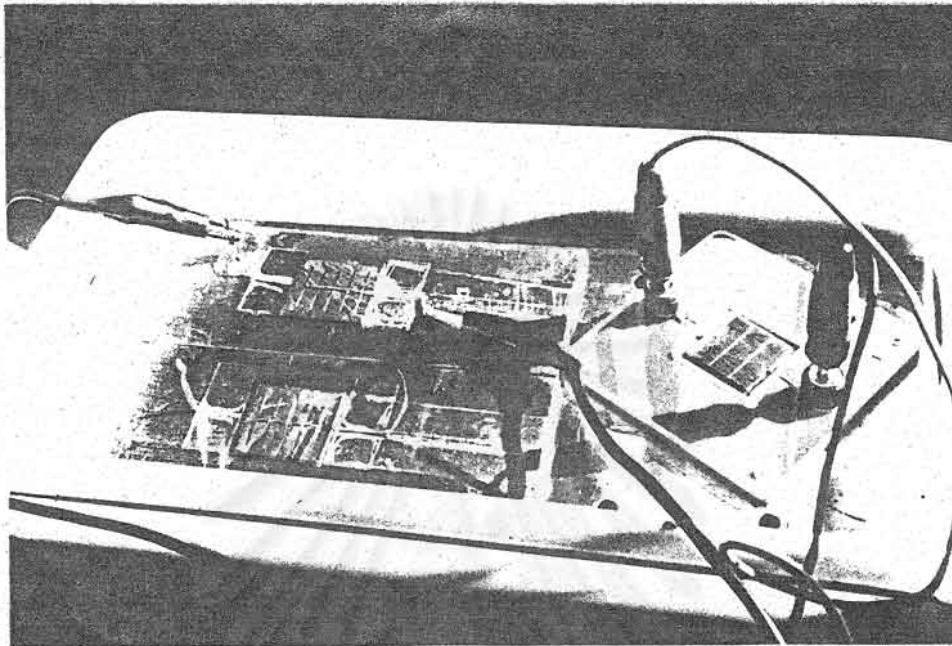
4.2.1 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันเมื่อไม่มีการหล่อเย็น อุณหภูมิของตัวเซลล์ขณะวัดภายใต้แสงอาทิตย์ระหว่างเวลา 14.10-15.10 มีค่าประมาณ 41°C ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์ทั้ง 9 ตัว (ตัวแรกสกริปไม่ได้ทำต่อ) แสดงในรูปที่ 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, 4.10, 4.11 และ 4.12 ตามลำดับ



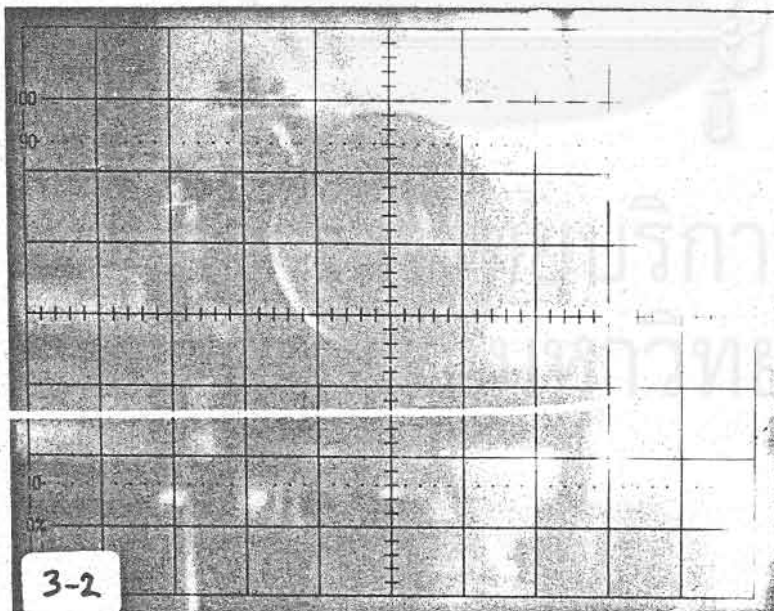
รูปที่ 4.1 กลุ่มของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตขึ้น และเซลล์มาตรฐาน



รูปที่ 4.2 เครื่องมือที่ใช้ในการหาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์



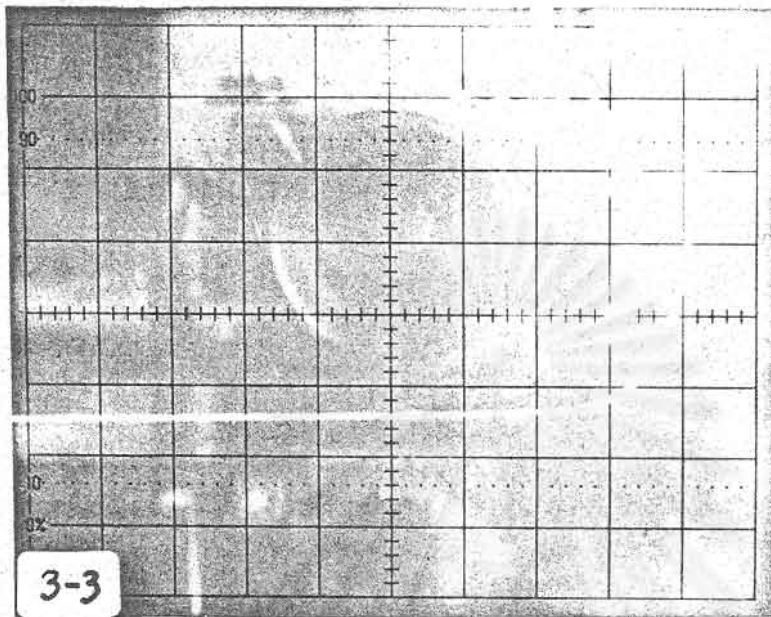
รูปที่ 4.3 การหล่อเย็นเพื่อควบคุมอุณหภูมิเซลล์แสงอาทิตย์ระหว่างการวัด เซลล์ขวามือ เป็นเซลล์มาตรฐานเพื่อใช้วัดความเข้มแสง



ประสิทธิภาพ 4.64 %

รูปที่ 4.4 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์หมายเลข 2 ซึ่งมี

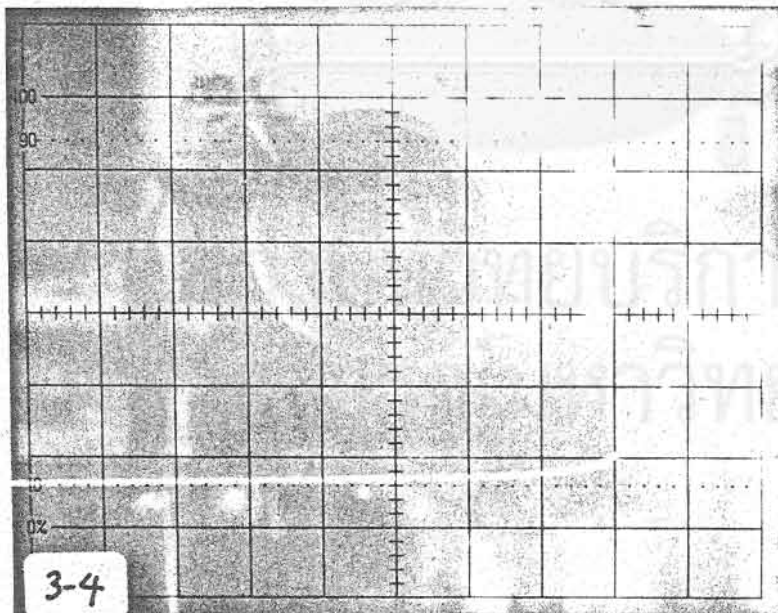
$$R_S = 5.54 \text{ } \Omega/\square \text{ อุณหภูมิของเซลล์ } 41^\circ \text{ C}$$



ประสิทธิภาพ 6.67 %

รูปที่ 4.5 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์หมายเลข 3 ซึ่งมี

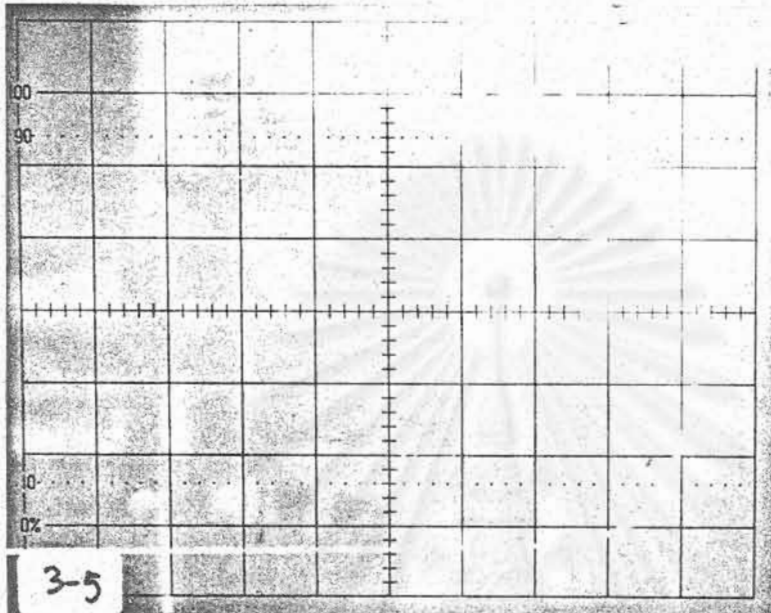
$$R_S = 10.47 \Omega/\square \quad \text{อุณหภูมิของเซลล์ } 41^\circ \text{ C}$$



ประสิทธิภาพ 5.82 %

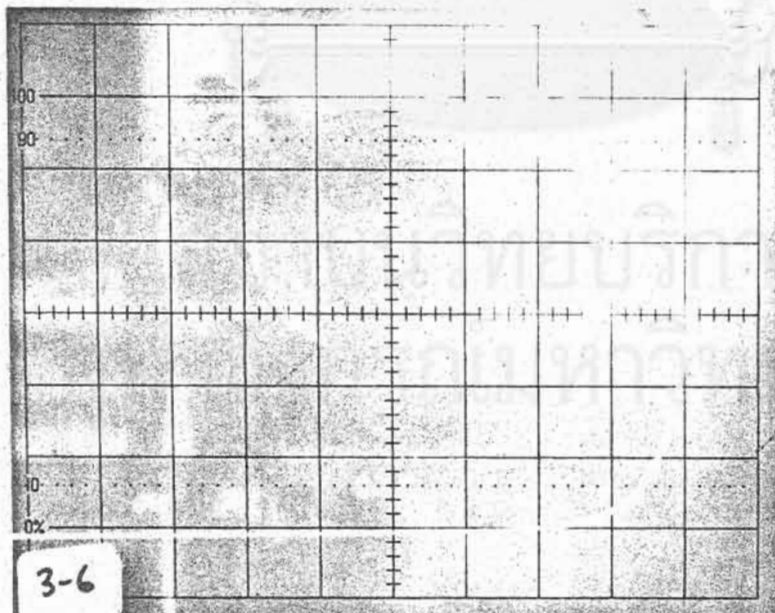
รูปที่ 4.6 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์หมายเลข 4 ซึ่งมี

$$R_S = 14.14 \Omega/\square \quad \text{อุณหภูมิของเซลล์ } 41^\circ \text{ C}$$



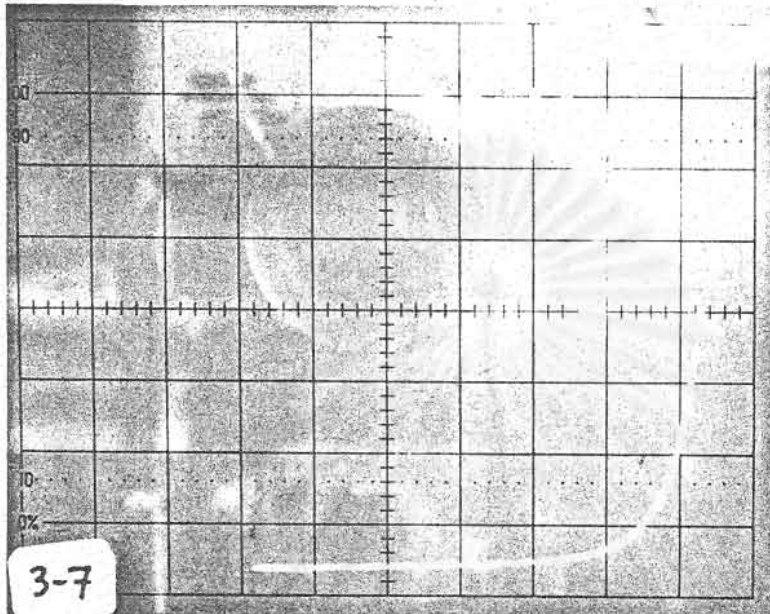
ประสิทธิภาพ 6.29 %

รูปที่ 4.7 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์หมายเลข 5 ซึ่งมี
 $R_S = 15.23 \text{ } \Omega/\square$ อุณหภูมิของเซลล์ 41° C



ประสิทธิภาพ 7.33 %

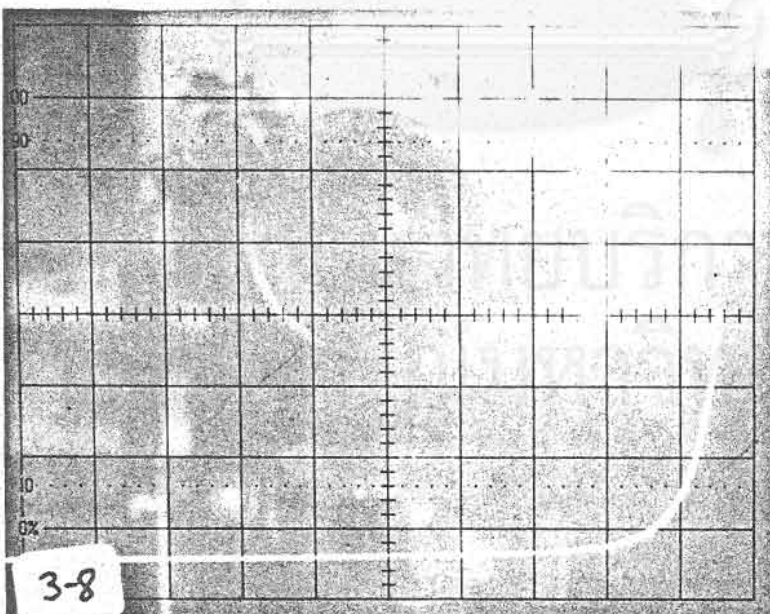
รูปที่ 4.8 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์หมายเลข 6 ซึ่งมี
 $R_S = 18.79 \text{ } \Omega/\square$ อุณหภูมิของเซลล์ 41° C



ประสิทธิภาพ 7.60 %

รูปที่ 4.9 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์หมายเลข 7 ซึ่งมี

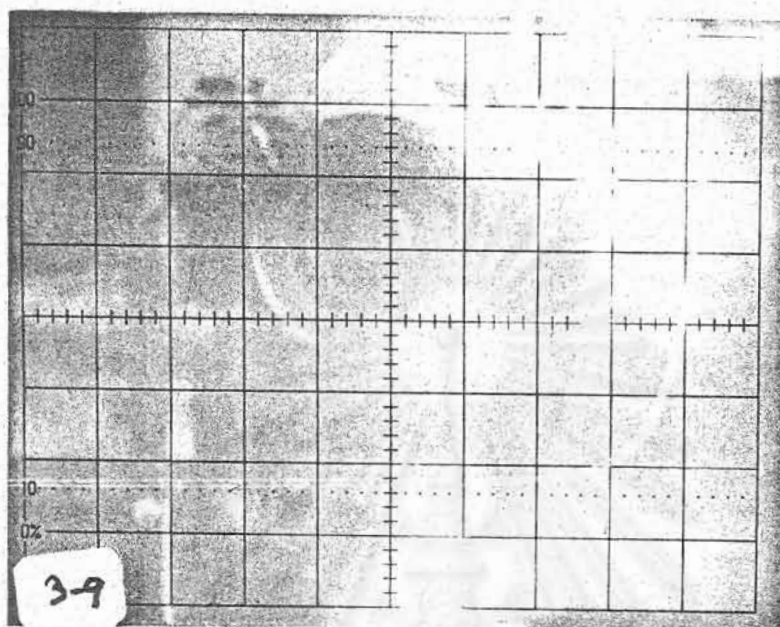
$$R_S = 20.52 \Omega/\square \quad \text{อุณหภูมิของเซลล์ } 41^\circ \text{ C}$$



ประสิทธิภาพ 7.26 %

รูปที่ 4.10 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์หมายเลข 8 ซึ่งมี

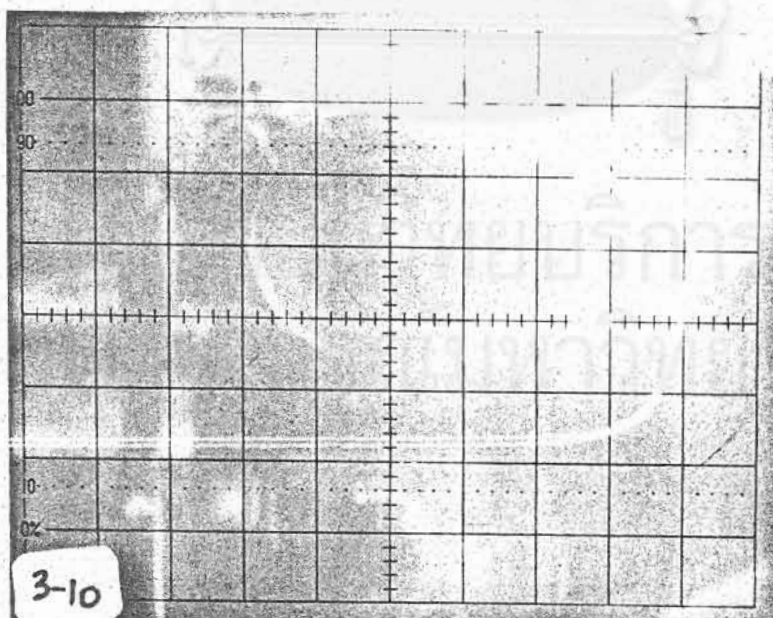
$$R_S = 22.98 \Omega/\square \quad \text{อุณหภูมิของเซลล์ } 41^\circ \text{ C}$$



ประสิทธิภาพ 8.09 %

รูปที่ 4.11 ลักษณะสมบัติการสะท้อน-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์หมายเลข 9 ซึ่งมี

$$R_S = 26.97 \Omega/\square \quad \text{อุณหภูมิของเซลล์ } 41^\circ \text{ ซ}$$

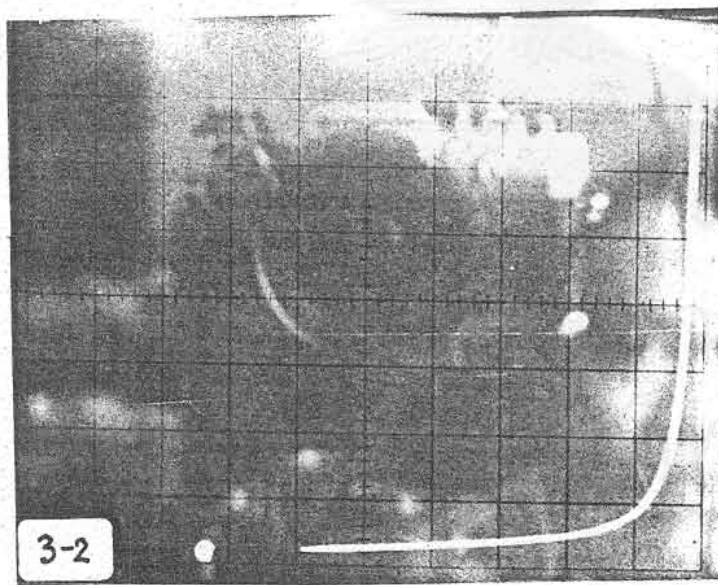


ประสิทธิภาพ 8.62 %

รูปที่ 4.12 ลักษณะสมบัติการสะท้อน-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์หมายเลข 10 ซึ่งมี

$$R_S = 33.96 \Omega/\square \quad \text{อุณหภูมิของเซลล์ } 41^\circ \text{ ซ}$$

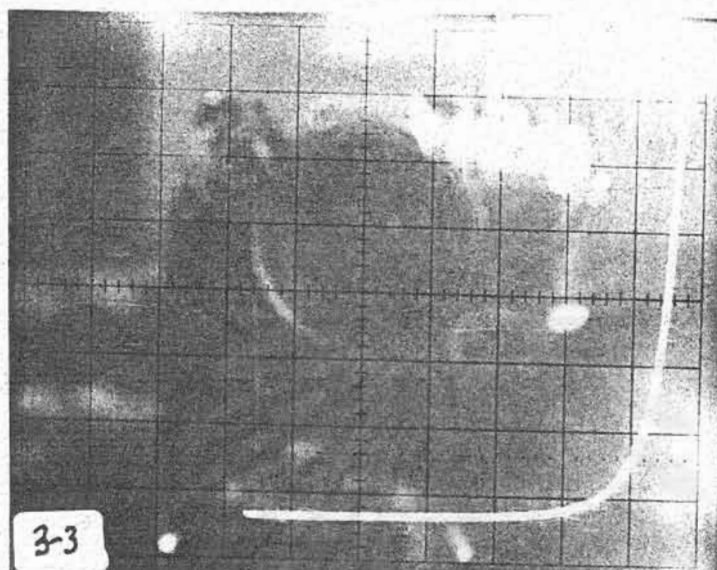
4.2.2 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันเมื่อหล่อเย็น ทำการวัดระหว่างเวลา 12.04-13.01 น. โดยควบคุมอุณหภูมิของตัวเซลล์ให้มีค่า 22°C ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์ทั้ง 9 ตัว แสดงในรูปที่ 4.13, 4.14, 4.15, 4.16, 4.17, 4.18, 4.19, 4.20 และ 4.21 ตามลำดับ



ประสิทธิภาพ 5.04 %

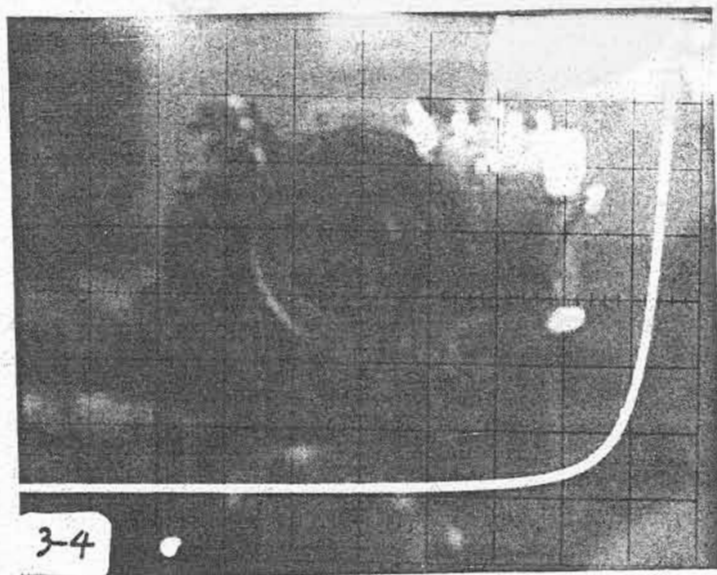
รูปที่ 4.13 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์หมายเลข 2 ซึ่งมี

$$R_s = 5.54 \text{ } \Omega/\square \text{ อุณหภูมิของเซลล์ } 22^{\circ}\text{C}$$



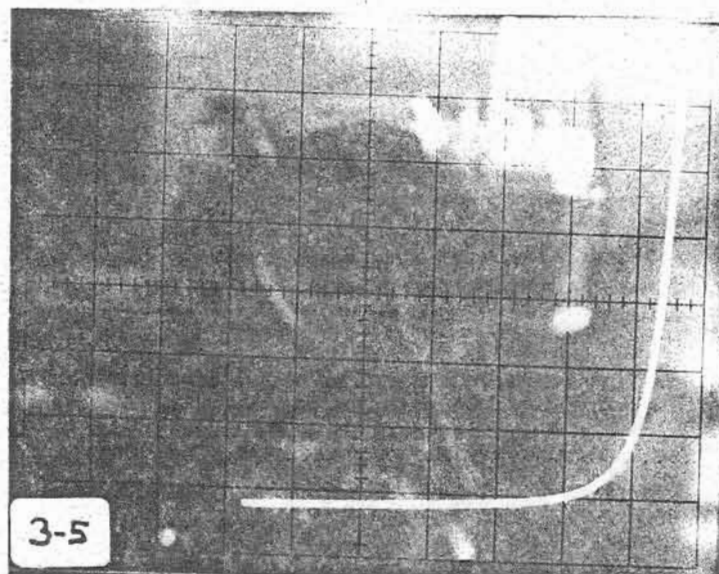
ประสิทธิภาพ 7.66 %

รูปที่ 4.14 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์หมายเลข 3 ซึ่งมี
 $R_S = 10.47 \Omega/\square$ จุดมุมมิของเซลล์ 22° ซ



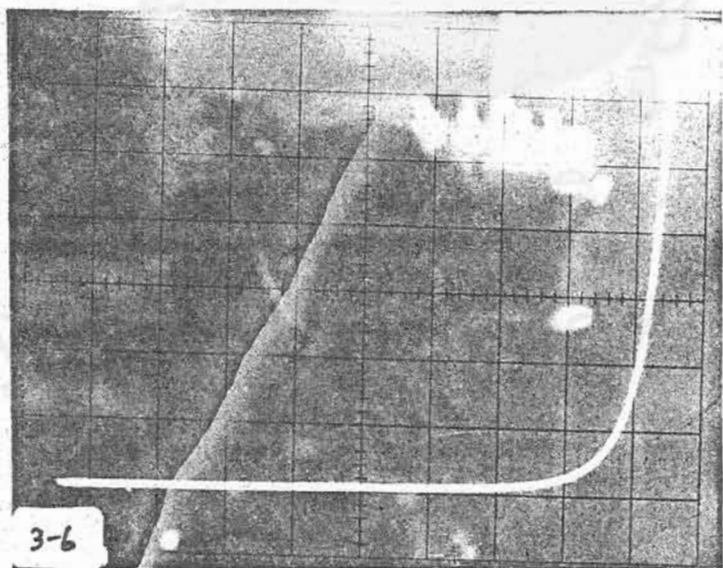
ประสิทธิภาพ 7.52 %

รูปที่ 4.15 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์หมายเลข 4 ซึ่งมี
 $R_S = 14.14 \Omega/\square$ จุดมุมมิของเซลล์ 22° ซ



ประสิทธิภาพ 8.03 %

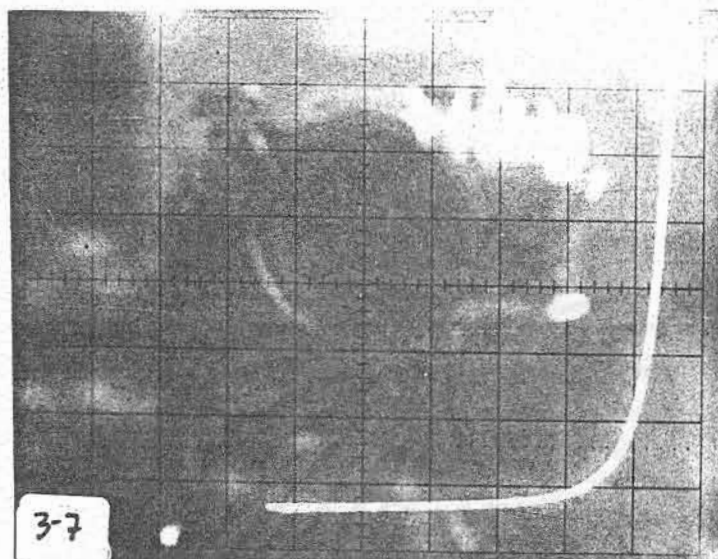
รูปที่ 4.16 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์หมายเลข 5 ซึ่งมี
 $R_s = 15.23 \Omega/\square$ อุณหภูมิของเซลล์ 22°C



ประสิทธิภาพ 8.53 %

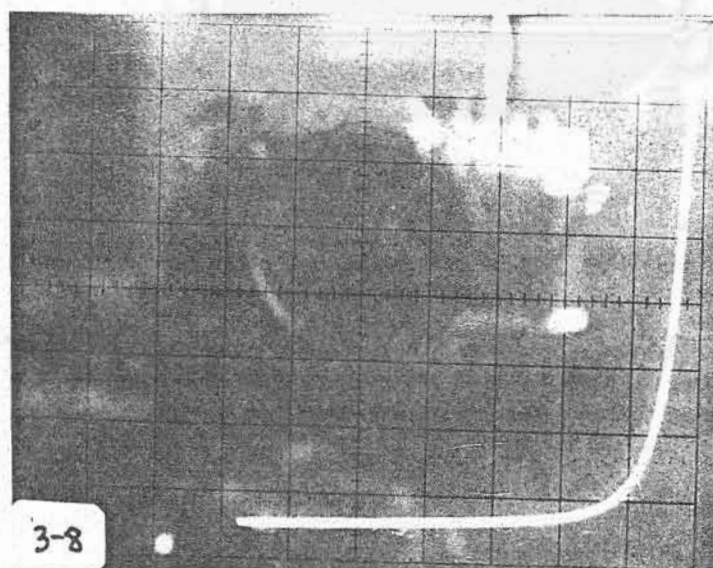
รูปที่ 4.17 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์หมายเลข 6 ซึ่งมี
 $R_s = 18.79 \Omega/\square$ อุณหภูมิของเซลล์ 22°C

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



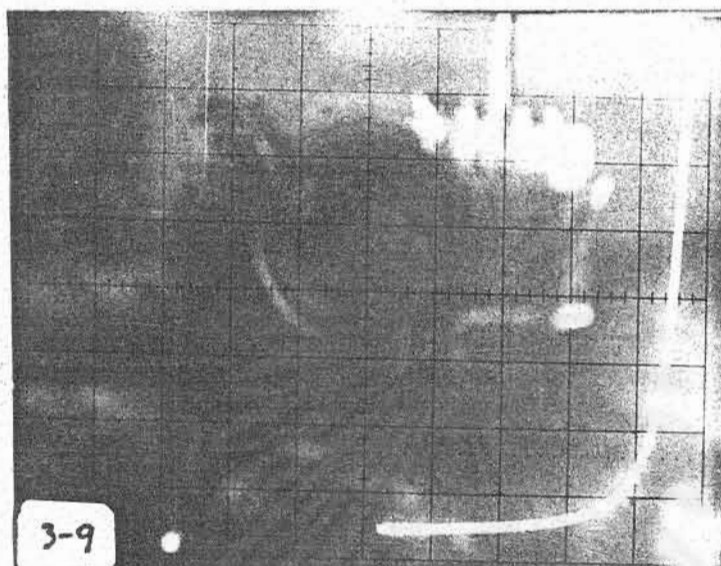
ประสิทธิภาพ 8.59 %

รูปที่ 4.18 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์หมายเลข 7 ซึ่งมี
 $R_S = 20.52 \text{ } \Omega/\square$ อุณหภูมิของเซลล์ 22° C



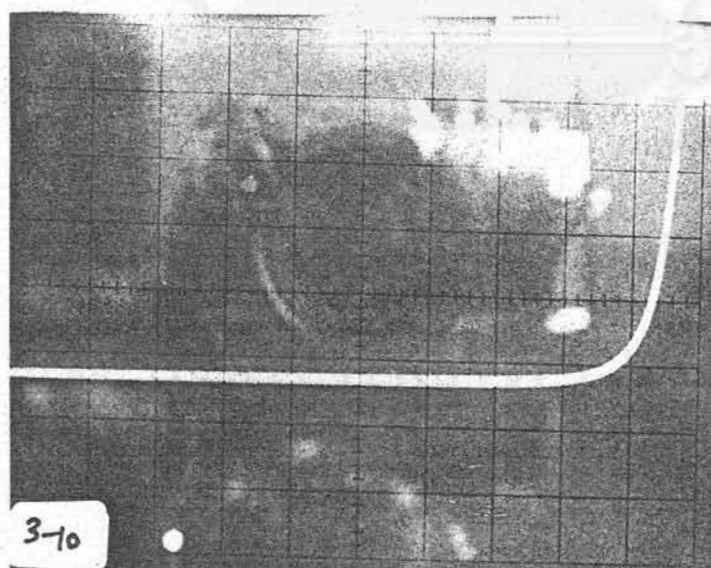
ประสิทธิภาพ 9.10 %

รูปที่ 4.19 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์หมายเลข 8 ซึ่งมี
 $R_S = 22.98 \text{ } \Omega/\square$ อุณหภูมิของเซลล์ 22° C



ประสิทธิภาพ 9.97 %

รูปที่ 4.20 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์หมายเลข 9 ซึ่งมี
 $R_S = 26.97 \text{ } \Omega/\square$ อุณหภูมิของเซลล์ 22° C



ประสิทธิภาพ 9.92 %

รูปที่ 4.21 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์หมายเลข 10 ซึ่งมี
 $R_S = 33.96 \text{ } \Omega/\square$ อุณหภูมิของเซลล์ 22° C

จากกราฟรูปที่ 4.4 ถึง 4.21 จะเห็นว่าลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันคล้าย ๆ กัน คือ มีค่าฟิลล์แฟกเตอร์ (fill factor) ค่อนข้างสูง กระแสรั่วมีค่าน้อย กระแสรั่วนี้เกิดจากกระแสรั่วที่ผิวและกระแสรั่วที่บริเวณหัวต่อ กระแสรั่วที่ผิวถูกทำให้มีค่าน้อยโดยการเตรียมแผ่นผลึกอย่างระมัดระวัง ส่วนกระแสรั่วที่บริเวณหัวต่อถูกทำให้มีค่าน้อยโดยการควบคุมขั้นตอนการผลิต และปรับปรุงเทคนิคการชุบตะกั่วบัดกรี นำเอาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ตัวต่าง ๆ มาคำนวณหาแรงดันวงจรมืด (open circuit voltage) กระแสลัดวงจร (short circuit current) ฟิลล์แฟกเตอร์ (fill factor) ประสิทธิภาพของเซลล์ (cell efficiency) และค่าอื่น ๆ ค่าต่าง ๆ เหล่านี้สรุปไว้ในตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2 เมื่ออุณหภูมิของตัวเซลล์ขณะวัดมีค่า 41°C และ 22°C ตามลำดับ ส่วนการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ในฟังก์ชันของความลึกของหัวต่อ (แสดงด้วยความต้านทานแผ่น) แสดงในกราฟรูปที่ 4.22

ตารางที่ 4.1 ผลการวัดเซลล์แสงอาทิตย์แบบโพลีคริสตัลไลน์ซิลิคอน เมื่ออุณหภูมิของเซลล์เท่ากับ 41°C ค่าในตารางเป็นค่าเฉลี่ยจากการวัดหลาย ๆ ครั้ง

เซลล์แสงอาทิตย์ หมายเลข	ความต้านทานแผ่น R_s (Ω/cm)	ความเข้มแสงอาทิตย์ P_{in} (mW/cm^2)	V_{oc} (volt)	J_{sc} ที่ AM1 (mA/cm^2)	V_m (Volt)	J_m (mA/cm^2)	F.F.	ประสิทธิภาพ (%)
2	5.54	45.00	0.420	15.32	0.348	6.00	0.721	4.64
3	10.47	56.21	0.427	22.50	0.345	10.87	0.694	6.67
4	14.14	50.95	0.412	21.33	0.312	9.51	0.663	5.82
5	15.23	49.25	0.408	24.59	0.315	9.84	0.672	6.29
6	18.79	50.10	0.426	25.31	0.326	11.27	0.680	7.33
7	20.52	44.12	0.412	27.02	0.315	10.64	0.682	7.60
8	22.98	51.38	0.426	24.75	0.342	10.64	0.689	7.26
9	26.97	49.25	0.450	25.46	0.360	11.06	0.706	8.09
10	33.96	45.43	0.424	28.97	0.344	11.38	0.702	8.62

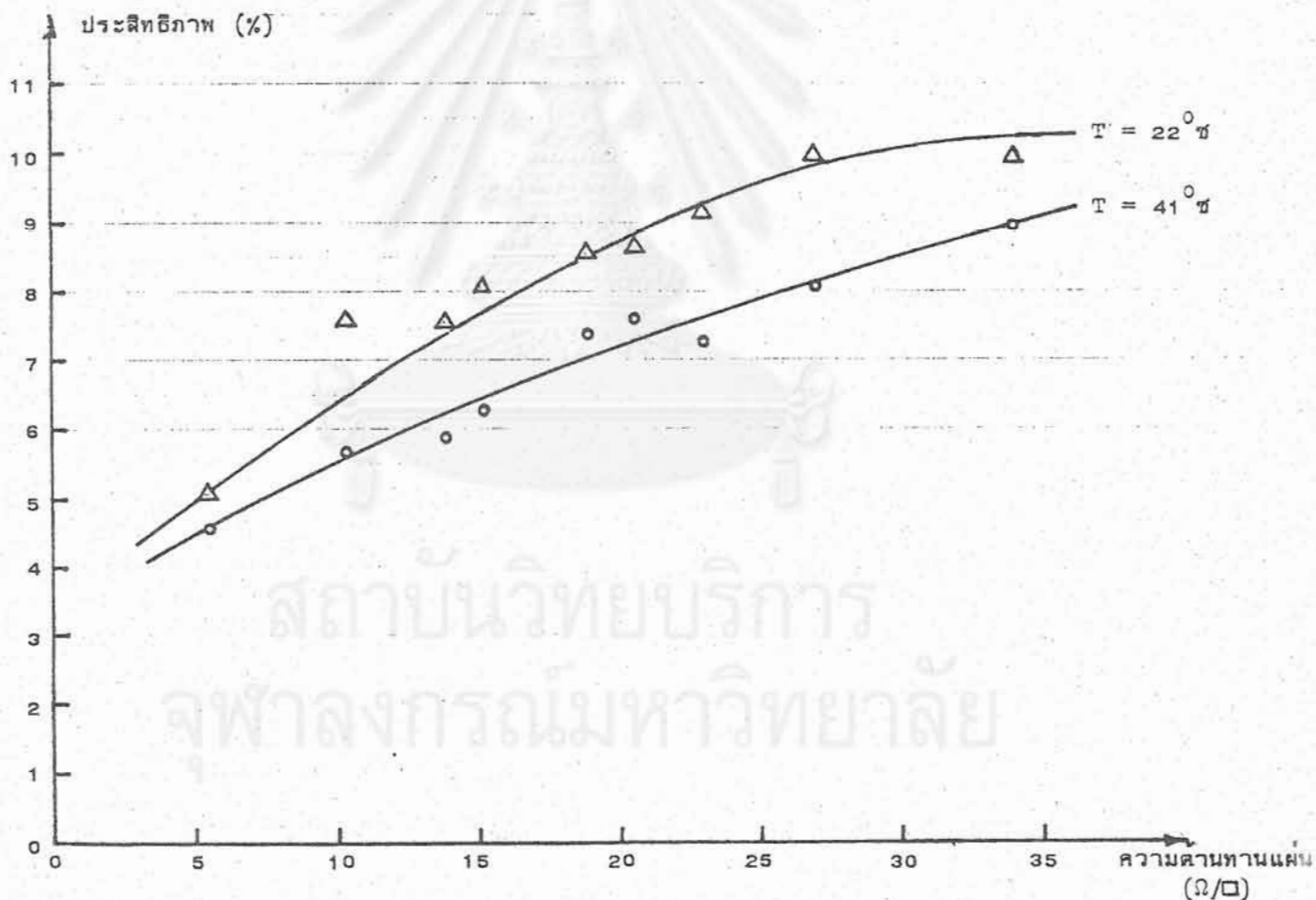
ตารางที่ 4.2 ผลการวัดเซลล์แสงอาทิตย์แบบโพลีคริสตัลไลน์ซิลิคอน เมื่ออุณหภูมิของเซลล์เท่ากับ 22° C ค่าในตารางเป็นค่าเฉลี่ยจากการวัดหลาย ๆ ครั้ง

เซลล์แสงอาทิตย์ หมายเลข	ความต้านทานแผ่น R_s (Ω/\square)	ความเข้มแสงอาทิตย์ P_{in} (mW/cm^2)	V_{oc} (volt)	J_{sc} ที่ AM1 (mA/cm^2)	V_m (volt)	J_m (mA/cm^2)	F.F.	ประสิทธิภาพ (%)
2	5.54	69.50	0.470	13.87	0.398	7.68	0.767	5.04
3	10.47	71.35	0.484	20.42	0.414	13.30	0.776	7.66
4	14.14	67.94	0.452	22.66	0.376	11.74	0.734	7.52
5	15.23	53.88	0.450	24.44	0.375	10.12	0.730	8.03
6	18.79	68.72	0.468	25.12	0.378	13.70	0.725	8.53
7	20.52	52.71	0.460	25.05	0.380	10.48	0.746	8.59
8	22.98	53.88	0.474	25.62	0.395	10.89	0.749	9.10
9	26.97	50.76	0.490	27.24	0.415	10.69	0.747	9.97
10	33.96	70.28	0.502	27.28	0.400	15.37	0.724	9.92

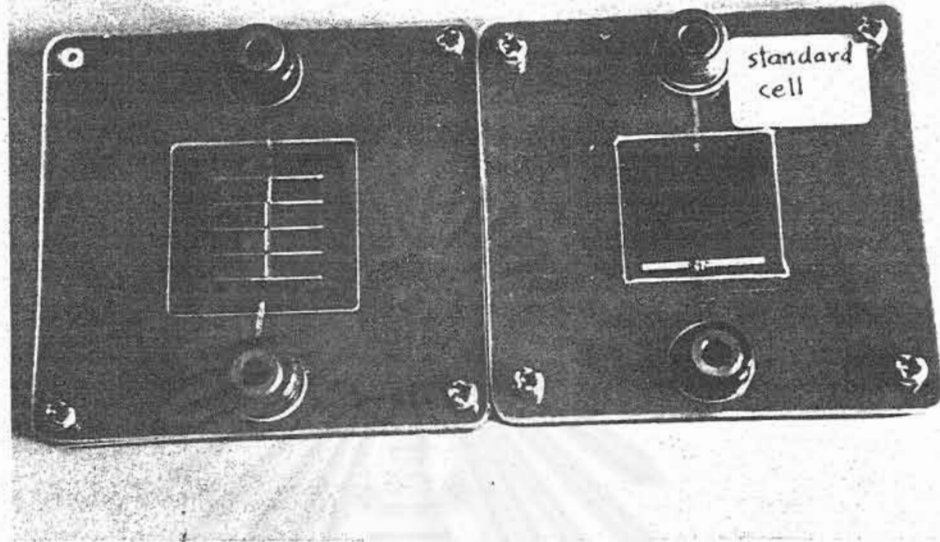
พิจารณาตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2 จะเห็นว่าเมื่อหัวต่อสั้นขึ้น (ความต้านทานแผ่นมากขึ้น) กระแสลัดวงจร (กระแสโฟโต) และประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์จะมากขึ้น และมีค่า 9.97% เมื่อ $R_s = 26.97 \Omega/\square$ และอุณหภูมิของเซลล์เท่ากับ 22° C ทั้งนี้อธิบายได้ว่าการที่หัวต่อสั้นขึ้นนั้น เกิดจากการใช้สารเคมีกัดผิวหน้าของชั้นแพร์ซิม (ชั้นเอ็น) ออกซึ่งมีผลสองประการคือ หนึ่งผิวหน้าของชั้นแพร์ซิมซึ่งมีความเข้มข้นของพาหะ (อิเล็กตรอน) สูง เป็นบริเวณที่มีอัตราการรวมตัวใหม่ของพาหะสูงมากเรียกว่า dead layer อิเล็กตรอนและโฮลที่ถูกกระตุ้นให้เกิดขึ้นโดยโฟตอนของแสงอาทิตย์จะรวมตัวกันใหม่ได้เร็วมาก ส่วนที่สามารถรวมตัวกันได้จะไม่กลายเป็นกระแสโฟโต และผลประการที่สองคือ โฟตอนส่วนมากจะถูกดูดกลืนในบริเวณชั้น ๆ จากผิวหน้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ถ้าหัวต่ออยู่ต้นปริมาณของโฟตอนที่ถูกดูดกลืนบริเวณหัวต่อจะสูง อิเล็กตรอนและโฮลที่ถูกสร้างขึ้นโดยโฟตอนก็จะสูงตามไปด้วย อิเล็กตรอนและโฮลในบริเวณหัวต่อนี้มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนไปเป็นกระแสโฟโตได้ดีกว่าบริเวณนอกหัวต่อ ทำให้กระแสโฟโตสูงและประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงแดดไปเป็นพลังงานไฟฟ้าสูงขึ้นด้วย

เมื่อพิจารณากราฟรูปที่ 4.22 จะเห็นว่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์จะต่ำลง เมื่ออุณหภูมิของการทำงานสูงขึ้น โดยจะลดลง 1-2% เมื่ออุณหภูมิของเซลล์เพิ่มจาก 22°C ไปเป็น 41°C ทั้งนี้เนื่องจากแรงดันวงจรเปิดและค่าฟิลล์แฟกเตอร์ลดลง เมื่ออุณหภูมิของเซลล์เพิ่มขึ้น [1] และเมื่อพิจารณากราฟของเซลล์ที่อุณหภูมิ 22°C พบว่าการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพของเซลล์ (ซึ่งในที่นี้ก็คือการเพิ่มขึ้นของกระแสลัดวงจร) จะเริ่มอิ่มตัวเมื่อความต้านทานแผ่นสูง ๆ หรือหัวต่อสั้นมาก ๆ ทั้งนี้เนื่องจากว่าเมื่อหัวต่อสั้นมาก ๆ ชั้นที่ถูกรังสีจะมี ความต้านทานต่อการวิ่งของพาหะสูง

ผู้วิจัยได้พยายามทำการทดลองเพิ่มเติม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเซลล์โดยการใช้สารเคมีกัดผิวหน้าของชั้นแพร์ซิมานชั้นมากกว่าของเซลล์หมายเลข 10 พบว่าการ



รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ในฟังก์ชันของความต้านทานแผ่น



รูปที่ 4.23 เซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตขึ้นและ package แล้วเพื่อป้องกันการแตกหักในการใช้งานภาคสนาม เปรียบเทียบกับเซลล์มาตรฐาน

จะควบคุมให้ยังคงมีหัวต่ออยู่โดยให้หัวต่อบาง ๆ ทำได้ยากมาก ส่วนใหญ่แล้วหัวต่อจะถูกสารเคมีกัดจนทะลุถึงเนื้อซิลิโคน และจากกราฟรูปที่ 4.22 ก็พอจะสรุปได้ว่าการทำให้หัวต่อบางลงอีก ไม่น่าจะเกิดประโยชน์เพราะกราฟของประสิทธิภาพเริ่มอิ่มตัวแล้ว

เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำการทดสอบแล้ว ถูกนำมาประกอบเข้ากับที่ยึด (package) เพื่อไม่ให้แตกหักง่าย และพร้อมในการใช้งานในภาคสนาม ดังรูปที่ 4.23

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

สรุปผล จากการวิจัยเกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากโพลีคริสตัลไลน์ซิลิคอนนี้พอจะสรุปผลได้เป็นข้อ ๆ ดังนี้

- สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ โดยการทำให้หัวต่อพี-เอ็นตัน ๆ (ความต้านทานแผ่นสูง) ด้วยการใส่สารเคมีกัดผิว แต่ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์จะเริ่มอึดตัวถ้าหัวต่อตันมาก ๆ สำหรับโครงสร้างชนิดหนึ่ง ๆ ทั้งนี้เพราะมีความต้านทานต่อการไหลของพาหะสูงขึ้น
- เทคนิคการเตรียมแผ่นผลึกอย่างระมัดระวัง และเทคนิคการชุบตะกั่วที่ดีมีส่วนช่วยให้กระแสรั่วของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าต่ำ อันนำไปสู่ค่าฟิลล์แฟกเตอร์ที่สูง ทำให้ได้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สูงขึ้น
- ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์จะต่ำลงถ้าอุณหภูมิของเซลล์สูงขึ้น ดังนั้นการเอาเซลล์แสงอาทิตย์ไปใช้งาน จึงควรยึดตัวเซลล์ไว้กับวัสดุที่นำความร้อนได้ดี
- สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์หัวต่อพี-เอ็นที่มีโครงสร้างแบบที่ทำวิจัยนี้ มีประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 9.97% และฟิลล์แฟกเตอร์สูงสุดมีค่า 0.776 เมื่ออุณหภูมิของตัวเซลล์ขณะทำงานเท่ากับ 22 ° ซ

ข้อเสนอแนะ ถึงแม้ว่าการพยายามลดความลึกของหัวต่อพี-เอ็นลง เพื่อให้ปริมาณโฟตอนถูกดูดกลืนในบริเวณหัวต่อพี-เอ็นมากขึ้น จะทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้นได้ แต่การเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพก็มีขีดจำกัด คือมีการอึดตัว ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อหัวต่อตัน ๆ หรือชั้นแพร์ซิมบาง ๆ จะทำให้มีความต้านทานต่อการไหลของพาหะสูง วิธีที่จะทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์อึดตัวช้าลง เมื่อหัวต่อตันขึ้นก็คือ หาวิธีที่จะให้พาหะที่ถูกสร้างขึ้นโดยโฟตอนบริเวณหัวต่อวิ่งไปหาอิเล็กโทรดได้เร็วที่สุด และเจอความต้านทานน้อยที่สุด ซึ่งทำได้ดังนี้

- ทำ pattern ของอิเล็กโทรดให้แคบลงและละเอียดขึ้น เพื่อให้เส้นทางการวิ่งของพาหะไปหาอิเล็กโทรดสั้นที่สุด
- ทำชั้นด้านการสะท้อนแสงที่นำไฟฟ้าได้แทนชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ซึ่งเป็น

ฉนวนไฟฟ้า เช่น ทำชั้นต้านการสะท้อนแสงด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) หรือ Indium-Tin-Oxide (ITO) อันจะทำให้เส้นทางการวิ่งของพาหะมีความต้านทานน้อยลง พาหะไปถึงอิเล็กโทรดได้มากขึ้น นั่นก็คือเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์นั่นเอง



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เอกสารอ้างอิง

1. Hovel, H.J., SEMICONDUCTORS AND SEMIMETALS VOLUME 11, SOLAR CELLS, Edited by Willardson, R.K. and Beer, A.C., Academic Press, New York, 1975.
2. Green, M.A., SOLAR CELLS: OPERATING PRINCIPLES, TECHNOLOGY, AND SYSTEM APPLICATIONS, Prentice-Hall, New Jersey, 1982.
3. KONAGAI, M., MATSUSHITA, T., et al, "Effect of Diborane Profile on the Photovoltaic Performance of A-Si:H Solar Cells Prepared by Glow Discharge of Disilane", Seventeenth IEEE photovoltaic specialists conference, 1984.
4. Michel, J. and Martin, B.G., "An Improved Silicon Solar-Cell Processing", 15th IEEE photovoltaic specialists conference, 1981.
5. มนตรี สวัสดิ์ศฤงฆาร, สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว, "เซลล์แสงอาทิตย์แบบโพลีคริสตัล-ไลน์ซิลิคอน" การประชุมทางวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า 8 สถาบัน ครั้งที่ 7, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าวิทยาเขตธนบุรี, 6-7 ธันวาคม 2527.
6. Sze, S.M., PHYSICS OF SEMICONDUCTOR DEVICES, 2nd edition, บทที่ 14, John Wiley & Son, New York, 1981.
7. Backus, Charles E., SOLAR CELLS, IEEE Press, New York, 1976.
8. Milnes, A.G., SEMICONDUCTOR DEVICES AND INTEGRATED ELECTRONICS, บทที่ 12, Van Nostrand Reinhold, 1980.
9. บรรยง โทประเสริฐพงษ์, สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว, "การทำผิวสัมผัส Ni/n-Si ให้เป็นแบบโอห์มมิกโดยเทคนิคการชุบนิเกิลแบบไร้ไฟฟ้า", การประชุมทางวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า 8 สถาบัน ครั้งที่ 4, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง, 27-28 สิงหาคม 2524.
10. Tsai, J.C.C., VLSI TECHNOLOGY, Edited by Sze, McGraw-Hill, pp. 184-186, 1983.

11. บรรยง โตประเสริฐพงศ์, "การเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบโพลี-คริสตัลไลน์ซิลิคอนโดยการทำให้หัวต่อสั้น," การประชุมทางวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า 8 สถาบัน ครั้งที่ 10, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 24-25 พฤศจิกายน 2530.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย