

รายงานการวิจัยพัฒนาและวิศวกรรมฉบับสมบูรณ์
ของศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ
โครงการหลัก: โครงการพัฒนาเทคโนโลยีวัสดุและชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์
โครงการย่อยเรื่อง

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน
Amorphous Silicon Solar Cell

คณะผู้วิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ดุสิต เครื่องงาม (หัวหน้าโครงการ)

รองศาสตราจารย์ ดร. ชุมพล อันตรเสน (ผู้ร่วมโครงการ)

และ รองศาสตราจารย์ ดร. บรรยง โตประเสริฐพงศ์ (ผู้ร่วมโครงการ)

ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กทม. 10330

รายงานการวิจัยพัฒนาและวิศวกรรมฉบับสมบูรณ์
ของศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ
โครงการหลัก: โครงการพัฒนาเทคโนโลยีวัสดุและชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์

โครงการย่อยเรื่อง

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน
Amorphous Silicon Solar Cell

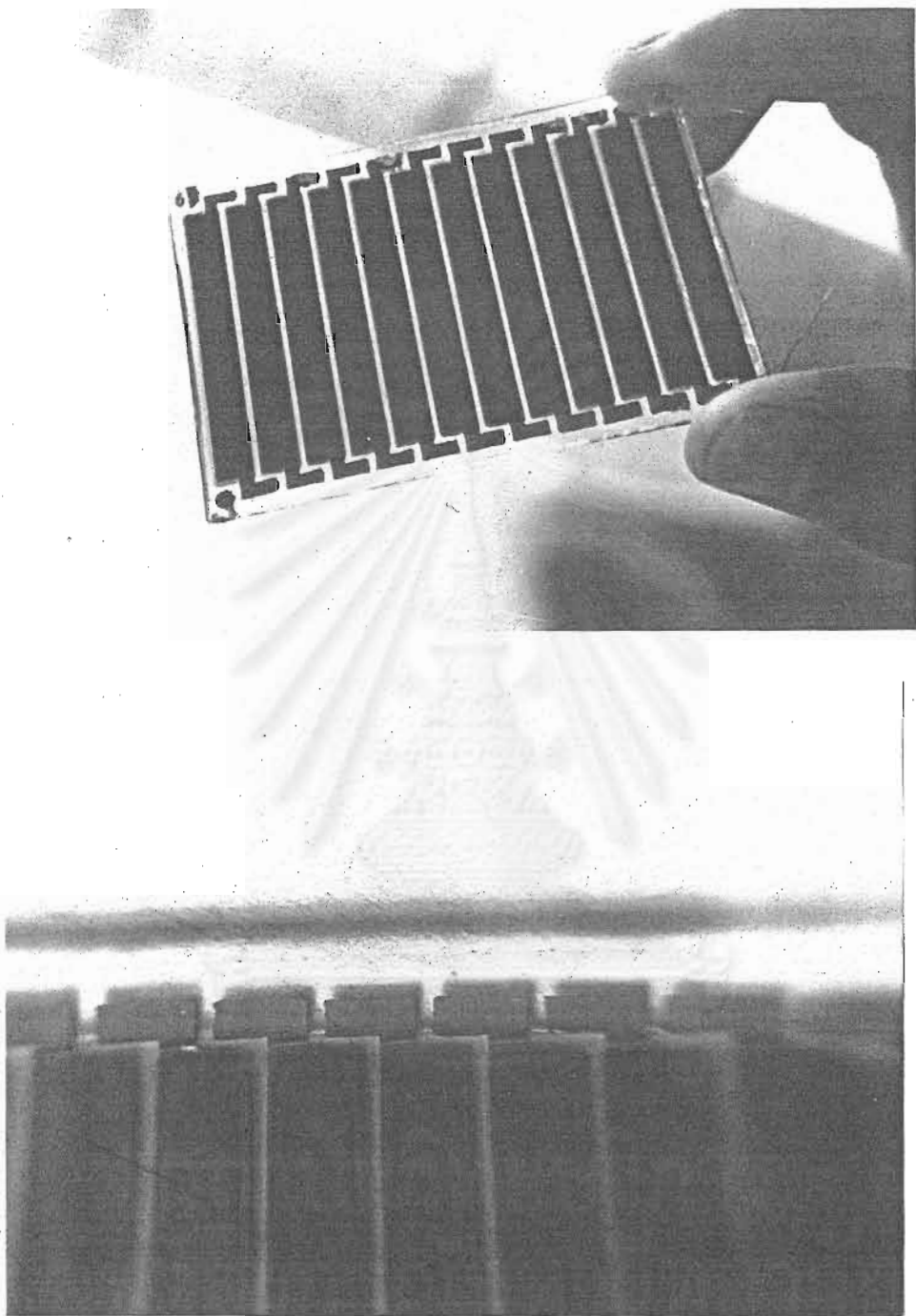


คณะผู้วิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ดุสิต เครืองาม (หัวหน้าโครงการ)
รองศาสตราจารย์ ดร. ชุมพล อันตรเสน (ผู้ร่วมโครงการ)
และ รองศาสตราจารย์ ดร. บรรยง โตประเสริฐพงศ์ (ผู้ร่วมโครงการ)

ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กทม. 10330



เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอนที่ผลิตได้ในงานวิจัย

บทคัดย่อ

ได้มีการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนเป็นผลสำเร็จ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนนี้มีลักษณะเด่นคือ ผลิตจากฟิล์มบางของวัสดุอะมอร์ฟัสซิลิคอน จึงประหยัดวัสดุ และทำให้ต้นทุนการผลิตต่ำกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอน ผลงานวิจัยเรื่องนี้จะเป็นประโยชน์ต่อประเทศในด้านการผลิตพลังงานทดแทนและส่งเสริมให้เกิดพื้นฐานทางด้านเทคโนโลยีของเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นในประเทศ

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนมีโครงสร้างประกอบด้วยแผ่นฐานกระจกและฟิล์มบางชั้นต่าง ๆ เคลือบเป็นชั้น ๆ คือ 1. ฟิล์มบางชั้นไฟฟ้าโปร่งแสง (ดีบุกออกไซด์) หนาประมาณ 2000 อังสตรอม 2. ฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอนหนาประมาณ 6000 อังสตรอม (รอยต่อ p-i-n) และ 3. ฟิล์มบางชั้นไฟฟ้าด้านหลัง (อะลูมิเนียม) หนาประมาณ 5000 อังสตรอม สำหรับฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอนนั้นผลิตด้วยวิธีการแยกสลายก๊าซด้วยสนามไฟฟ้า (glow discharge plasma CVD)

จากการทดลองหาเงื่อนไขการผลิตที่เหมาะสมและหาเงื่อนไขโครงสร้างความหนาที่เหมาะสมของฟิล์มบางชั้นต่าง ๆ ได้เซลล์ที่มีประสิทธิภาพสูงสุดประมาณ 6.7 %

ได้มีการทดลองประดิษฐ์ต้นแบบของชุดแผงเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับประจุไฟฟ้าเข้าแบตเตอรี่รถยนต์เป็นผลสำเร็จ ชุดแผงนี้ถูกบรรจุอยู่ในกรอบกระจกและอะลูมิเนียมอย่างสวยงาม ภายในมีเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนต่ออนุกรมกัน 36 ตัว ได้แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดสูงถึง 26 โวลต์ การต่ออนุกรมกันของเซลล์นี้ ได้ใช้วิธีพิเศษทางฟิล์มบางที่เสนอโดยผู้วิจัยเป็นครั้งแรก

ด้านการปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์ได้มีการเสนอการใช้โครงสร้าง multilayer (tandem) และการใช้ผลึกโพลีซิลิคอนเป็นแผ่นฐาน ผลการทดลองพบว่าการใช้ผลึกโพลีซิลิคอนเป็นแผ่นฐานได้ประสิทธิภาพสูงถึง 9.7 %

นอกจากนี้มีการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอนด้วยวิธีต่าง ๆ เช่น การดัดแปรพันธะของรังสีเอกซ์ การกระเจิงของรามแมน การดูดกลืนแสง การนำไฟฟ้า เป็นต้น

นอกจากนี้ได้ประสบความสำเร็จในการประยุกต์ใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์เป็น เซนเซอร์ตรวจวัดสีของแสงอีกด้วย

ABSTRACT

Hydrogenated amorphous silicon (a-Si:H) solar cells have been fabricated. One of the advantages of the a-Si:H solar cells is that they are made of low cost thin films. This leads to safe material and hence low production cost, as compared with conventional crystalline silicon solar cells. The research work would be useful for the development of alternative energy and the strengthening of the basic technology of solar cells in Thailand.

The a-Si:H solar cell has a basic structure of multi-layer thin films deposited on a sheet of glass. The thin films are 1) transparent SnO_2 electrode (2,000 Å), 2) p-i-n junction a-Si:H film (6,000 Å) and 3) back aluminum electrode (5,000 Å). The a-Si:H layers were fabricated by a glow discharge plasma CVD method.

According to the optimization of fabrication processes and thicknesses of each layers in the solar cell, the best conversion efficiency obtained is about 6.7 %.

A proto-type of a car battery charger has been developed and demonstrated. The car battery charger is composed of 36 a-Si:H solar cells connected in series. All of the solar cells are packed in a glass/aluminum frame. The open circuit voltage is as high as 26 volt. The connection of the solar cells is performed by a special thin film technology that is developed by the researchers for the first time.

The further improvements of the conversion efficiency have been done by using a multilayer (tandem) structure and a stacked a-Si:H/poly-Si structure. The efficiency of the latter structure is as high as 9.7 %.

The researchers also succeeded in the application of the solar cell to a color sensor.

สารบัญเรื่อง

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 สถานภาพและความสำคัญของ โครงการงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของ โครงการวิจัย	2
1.3 เป้าหมายของ โครงการที่จะ ได้รับเมื่อจบ โครงการ	2
1.4 ผลงานที่จะ ได้รับเมื่อจบ โครงการ	2
1.5 ขอบเขตของการวิจัยและพัฒนา	2
1.6 ผลกระทบทาง เศรษฐกิจและสังคม	2
บทที่ 2 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน	5
2.1 สถานภาพทางเทคโนโลยีเกี่ยวกับ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนใน ต่างประเทศ	5
2.2 สถานภาพทางเทคโนโลยีเกี่ยวกับ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน ใน ประเทศไทย	5
2.3 คุณสมบัติเด่นของ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน	5
2.4 ทฤษฎีพื้นฐานของ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน	9
2.4.1 คุณสมบัติทางกายภาพและ โครงสร้างของ เซลล์แสงอาทิตย์	9
2.4.2 ลักษณะสมบัติของ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน	11
บทที่ 3 การผลิต เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน	15
3.1 หลักการพิจารณาการออกแบบพื้นฐานของ เซลล์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน	15
3.2 วิธีการเตรียมและการศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มชั้น ีไฟฟ้า โปร่งใสชนิด ITO .	21
3.2.1 วิธีการปลูกฟิล์ม ITO	21
3.2.2 ผลการวัดคุณสมบัติทางแสงของฟิล์ม ITO	24
3.2.3 ผลการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์ม ITO	25
3.2.4 ผลการวัดคุณสมบัติทางโครงสร้างของฟิล์ม ITO	25
3.2.5 การวัด Hall Effect ในฟิล์ม ITO	25
3.2.5.1 ทฤษฎีพื้นฐานของ Hall Effect และเทคนิคของ Van der Pauw	27
3.2.5.2 การเตรียมชิ้นงานสำหรับวัด Hall Effect	33
3.2.5.3 โครงสร้างของระบบวัด Hall Effect	34
3.2.5.4 วิธีการวัด Hall Effect	40
3.2.5.5 การพัฒนาโปรแกรมซอฟต์แวร์วิเคราะห์ผล โดย คำนวณแบบ Van der Pauw	41

สารบัญเรื่อง (ต่อ)

	หน้า
3.2.5.6 ผลการวัด Hall Effect ในฟิล์ม ITO	46
3.3 วิธีการปลูกฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอน	46
3.3.1 ระบบ Glow Discharge Plasma CVD	50
3.3.2 ขั้นตอนการปลูกฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน	51
บทที่ 4 การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนประสิทธิภาพสูง	53
4.1 หลักการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยรอยต่อเฮตเตโรของ p a-SiC:H/i a-Si:H	53
4.2 การปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H รอยต่อเฮตเตโร ที่ใช่ p a-SiC:H เป็นชั้นหน้าต่างกว้างรับแสง	56
4.3 การวิเคราะห์เหตุผลของการเพิ่มของประสิทธิภาพด้วยรอยต่อเฮตเตโร p a-SiC:H/i a-Si:H	63
4.3.1 สเปกตรัมผลตอบสนองทางแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ a-Si:H .	64
บทที่ 5 การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แรงดันเอาท์พุทสูงด้วยโครงสร้าง Integrated Type และประยุกต์ใช้งานเป็น Battery Charger	66
บทหน้า	66
5.1 การออกแบบเซลล์แบบ Integrated Type	66
5.2 การผลิตเซลล์แบบ Integrated Type	70
5.3 ผลการผลิตเซลล์แบบ Integrated Type	70
5.4 สรุป	83
บทที่ 6 การพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนที่ให้แรงดันเอาท์พุทสูงด้วยโครง- สร้าง Tandem	87
บทหน้า	87
6.1 หลักการและการออกแบบที่เหมาะสมของเซลล์แบบ Tandem	89
6.1.1 การออกแบบที่เหมาะสมของเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Tandem ...	94
6.2 การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง Tandem	96
6.3 ผลการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง Tandem	99
บทที่ 7 การปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยรอยต่อเฮตเตโรของ $\mu\text{c-Si:H/poly-Si}$	101
บทหน้า	101
7.1 โครงสร้างและหลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเฮตเตโรของ n $\mu\text{c-Si:H/p poly-Si}$	101

สารบัญเรื่อง (ต่อ)

	หน้า
7.2 การผลิตและการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐาน $\mu\text{c-Si:H}$ ชนิด n	102
7.2.1 การวัดคุณสมบัติทางโครงสร้างของ $\mu\text{c-Si:H}$ ด้วย X-ray Diffraction และ Raman Scattering	108
7.2.1.1 ผลการวัด X-ray Diffraction	108
7.2.1.2 ผลการวัด Raman Scattering	110
7.3 ผลการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเฮเทอโรของ n $\mu\text{c-Si:H/p}$ poly-Si	114
7.4 สรุป	118
บทที่ 8 บทสรุป	119
เอกสารอ้างอิง	124
ภาคผนวก ก. งานตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานวิจัย	127
ข. ใ้ข้อมูลที่ประสานและข้อเสนอแนะในอนาคต	129
ค. กิตติกรรมประกาศ	130

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1	ต้นทุนการผลิต (จากการคำนวณ) ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิกอน และอะมอร์ฟัสซิลิกอน 8
ตารางที่ 2.2	เปรียบเทียบพารามิเตอร์ที่สำคัญของซิลิคอนผลึกเดี่ยวและอะมอร์ฟัสซิลิคอน 10
ตารางที่ 3.1	เงื่อนไขในการปลูกฟิล์ม a-Si:H ชั้นต่าง ๆ ในการผลิตเซลล์ฯ 18
ตารางที่ 3.2	เงื่อนไขการปลูกฟิล์มชั้น ITO ด้วยระบบ EB 23
ตารางที่ 3.3	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้ขดลวด และความเข้มของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น 37
ตารางที่ 3.4	ความหมายของตำแหน่งของสวิตช์ S_2 และ S_5 39
ตารางที่ 3.5	การวัดค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้า 40
ตารางที่ 3.6	การวัดค่าความคล่องตัวและความหนาแน่นของพาหะ 41
ตารางที่ 3.7	แผ่นฐานที่ใช้ปลูก a-Si:H ในงานวิจัย 51
ตารางที่ 3.8	เงื่อนไขโดยสรุปในการผลิตฟิล์ม a-Si:H 52
ตารางที่ 4.1	ผลการผลิตเซลล์ฯ ก่อน (No. 1) และหลัง (No. 2) การปรับปรุง เครื่องมือ 57
ตารางที่ 4.2	ผลการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H 63
ตารางที่ 5.1	เปรียบเทียบลักษณะสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Integrated Type รุ่นต่าง ๆ ที่ผลิตได้ 86
ตารางที่ 6.1	เงื่อนไขการผลิตฟิล์ม a-Si:H รอยต่อ p-i-n 98
ตารางที่ 6.2	ความหนาของชั้น p-i-n ในเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง Tandem 98
ตารางที่ 7.1	เงื่อนไขวิธีการเคลือบฟิล์ม ITO ด้วยวิธี EB 105
ตารางที่ 7.2	เงื่อนไขสำหรับผลิตชั้น n μ c-Si:H 116

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1	ตัวอย่างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟิซิลิคอนที่ผลิตโดยภาคอุตสาหกรรม .. 6
รูปที่ 2.2	การพัฒนาของประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H 8
รูปที่ 2.3	ก) โครงสร้างของเซลล์ชนิด a-Si:H ที่ใช้แผ่นแก้วเป็นแผ่นฐาน (ชนิด รอยต่อไฮโม) 9
	ข) โครงสร้างของเซลล์ชนิด a-Si:H ที่ใช้สแตนเลสเป็นแผ่นฐาน 9
รูปที่ 2.4	สเปกตรัมสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของ a-Si:H และของผลึก Si (6) . 10
รูปที่ 2.5	ความแตกต่างระหว่างรอยต่อ p-n และ p-i-n ของ a-Si:H 12
รูปที่ 2.6	เปรียบเทียบลักษณะสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอนผลึกเดี่ยวกับแบบ อะมอร์ฟิซิลิคอนที่ AM1, 100 mW/cm ² 12
รูปที่ 2.7	กลไกการเกิด photocurrent ขณะที่ไม่มีกระแสไบแอส
	ก) ในสภาวะลัดวงจร : สนามไฟฟ้าภายในมีค่าสูง, โวลต์ที่เกิดจากการกระ- ตุ้นด้วยแสง ส่วนใหญ่ไปถึงรอยต่อ p-i 13
	ข) ในสภาวะเปิดวงจร : เนื่องจากสนามไฟฟ้าภายในมีค่าน้อย โวลต์ที่เกิด จากการกระตุ้นด้วยแสงที่อยู่ถัดจากรอยต่อ p-i จะรวมตัวกับอิเล็กตรอน และหายไป 13
รูปที่ 2.8	ลักษณะสมบัติ J/V ของเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาวะมืด และเมื่อได้รับแสง ซึ่ง ได้รับผลจากการขึ้นกับการไบแอสของ photocurrent 14
รูปที่ 3.1	โครงสร้างพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟิซิลิคอนที่ผลิตในงานวิจัย 16
รูปที่ 3.2	แผนภูมิขั้นตอนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ 19
รูปที่ 3.3	ภาพถ่ายแผ่น Mask สแตนเลส สำหรับใช้เคลือบอะลูมิเนียมเป็นชั้นด้านหลัง เซลล์แสงอาทิตย์ 20
รูปที่ 3.4	ภาพถ่ายเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตได้ในขั้นตอนต่าง ๆ 20
รูปที่ 3.5	เม็ด pellet ของ Indium Tin Oxide (ITO) ที่ใช้ในการวิจัย 21
รูปที่ 3.6	ระบบ EB สำหรับปลูกฟิล์ม ITO 22
รูปที่ 3.7	ผลการวัดการทะลุผ่านของแสงของฟิล์ม ITO ที่ปลูกที่อุณหภูมิต่าง ๆ 24
รูปที่ 3.8	รูปตัวอย่างฟิล์ม ITO ปลูกที่อุณหภูมิแผ่นฐานต่าง ๆ กัน 25
รูปที่ 3.9	ค่าความต้านทานของฟิล์ม ITO ที่อุณหภูมิแผ่นฐานต่าง ๆ 26
รูปที่ 3.10	x-ray diffraction spectrum ของฟิล์ม ITO 26
รูปที่ 3.11	ลักษณะการเกิด Hall effect ในสารกึ่งตัวนำ (ชนิด n) 28
รูปที่ 3.12	ชิ้นงานสารกึ่งตัวนำสำหรับวัด Hall effect 30
รูปที่ 3.13	รูปทรงชิ้นงานสำหรับวัด Hall effect 31

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.14	โครงสร้างชั้นงานฟิล์ม ITO/แผ่นกระจกสำหรับวัด Hall effect 33
รูปที่ 3.15	โครงสร้างของระบบวัด Hall effect 35
รูปที่ 3.16	ภาพถ่ายระบบวัด Hall effect 35
รูปที่ 3.17	โครงสร้างของชุดกำเนิดสนามแม่เหล็กสำหรับวัด Hall effect 36
รูปที่ 3.18	Profile ของความเข้มของสนามแม่เหล็กของเครื่องมือที่ใช้งาน 36
รูปที่ 3.19	ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กและแรงดัน Hall ที่เกิดขึ้นในชั้นงาน อ้างอิงมาตรฐาน เมื่อฉีดกระแสไฟฟ้า $I_x = 1 \text{ mA}$ 37
รูปที่ 3.20	หน้าปัทม์กล่อง Controller สำหรับวัด Hall effect 39
รูปที่ 3.21	Flow chart การวัดค่าความผลการวัด Hall effect 43
รูปที่ 3.22	(ก) ความสัมพันธ์ระหว่างความคล่องตัวของพาหะใน ITO และอุณหภูมิของ แผ่นฐาน 44
รูปที่ 3.22	(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของพาหะอิสระใน ITO และ อุณหภูมิของแผ่นฐาน 45
รูปที่ 3.23	แผนผังระบบ glow discharge plasma CVD สำหรับปลูก a-Si:H ... 47
รูปที่ 3.24	ภาพถ่ายลักษณะการติดตั้งถังก๊าซและ regulator 47
รูปที่ 3.25	ครอบแก้วสุญญากาศ (quartz chamber) สำหรับปลูก a-Si:H 48
รูปที่ 3.26	ภาพถ่ายระบบ glow discharge plasma CVD ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ 48
รูปที่ 3.27	ขั้นตอนการผลิต a-Si:H 49
รูปที่ 4.1	โครงสร้างของเซลล์ฯ ชนิดรอยต่อเฮเทอโร (heterojunction) 54
รูปที่ 4.2	แผนภูมิแถบพลังงานของเซลล์ฯ ชนิดรอยต่อเฮเทอโร 55
รูปที่ 4.3	สเปกตรัมผลตอบสนอง (collection efficiency) ของเซลล์ฯ a-Si:H ชนิดรอยต่อไฮโม และชนิดรอยต่อเฮเทอโรจาก Y. Hamakawa 55
รูปที่ 4.4	เกียร์ทดขนาด 6:1 ที่ต่อเข้ากับมอเตอร์หมุนแท่นวางแผ่นฐาน 56
รูปที่ 4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะสมบัติ ไอพทของเซลล์ฯ กับความหนาของชั้น p a-SiC:H 59
รูปที่ 4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะสมบัติ ไอพทของเซลล์ฯ กับความหนาของชั้น i a-Si:H 60
รูปที่ 4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะสมบัติ ไอพทของเซลล์ฯ กับความหนาของชั้น n μ C-Si:H 61
รูปที่ 4.8	ลักษณะสมบัติ ไอพทของเซลล์แสงอาทิตย์ 3 รุ่น 62

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.9 ระบบการวัดสเปกตรัมผลตอบสนองทางแสง (collection efficiency) ของเซลล์แสงอาทิตย์	64
รูปที่ 4.10 ผลการวัดสเปกตรัมผลตอบสนองทางแสง (collection efficiency) ของเซลล์ฯ ชนิดรอยต่อไอโม และชนิดรอยต่อเฮตเตอร์	65
รูปที่ 5.1 ภาพ top view ของเซลล์ Integrated type รุ่นที่ 1 ในขั้นตอนการผลิต	67
รูปที่ 5.2 วงจรสมมูลของเซลล์แบบ integrated type	68
รูปที่ 5.3 ภาพ top view ของเซลล์ Integrated type รุ่นที่ 2 ในขั้นตอนการผลิต	69
รูปที่ 5.4 ภาพ top view ของเซลล์ Integrated type รุ่นที่ 3 ในขั้นตอนการผลิต	71
รูปที่ 5.5 กระบวนการกัด pattern ของแผ่นฐาน ITO	72
รูปที่ 5.6 ภาพถ่ายขั้นตอนการผลิตเซลล์แบบ Integrated type รุ่นที่ 1	74
รูปที่ 5.7 ภาพถ่ายขั้นตอนการผลิตเซลล์แบบ integrated type รุ่นที่ 2	75
รูปที่ 5.8 ภาพถ่ายขั้นตอนการผลิตเซลล์แบบ integrated type รุ่นที่ 3	76
รูปที่ 5.9 ผลการวัดลักษณะสมบัติเอากักของเซลล์ฯ รุ่นที่ 2 เปรียบเทียบกับเซลล์เดี่ยวขนาด 0.03 cm^2	77
รูปที่ 5.10 ผลการวัดลักษณะสมบัติเอากักของเซลล์ฯ แบบ integrated type รุ่นที่ 2 เปรียบเทียบเซลล์ฯ ในแผ่นเดียวกันที่ต่ออนุกรมกันตั้งแต่ 1 ตัว, 2 ตัว, 3 ตัว, 4 ตัว จนถึง 5 ตัว	78
รูปที่ 5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะสมบัติเอากักของเซลล์ฯ แบบ integrated type รุ่นที่ 2 กับจำนวนเซลล์ฯ ที่ต่ออนุกรมกันบนแผ่นฐานเดียวกัน	79
รูปที่ 5.12 ผลการวัดลักษณะสมบัติเอากักของเซลล์ฯ แบบ integrated type รุ่นที่ 3 ซึ่งเป็นเซลล์ฯ ที่ต่ออนุกรม 12 ตัวบนแผ่นฐานเดียวกัน	80
รูปที่ 5.13 ผลการวัดลักษณะสมบัติเอากักของเซลล์ฯ แบบ integrated type รุ่นที่ 3 เปรียบเทียบเซลล์ฯ ในแผ่นเดียวกันที่ต่ออนุกรมกันตั้งแต่ 1 ตัว, 3 ตัว, 6 ตัว, 9 ตัว จนถึง 12 ตัว	81
รูปที่ 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะสมบัติเอากักของเซลล์ฯ แบบ integrated type รุ่นที่ 3 กับจำนวนเซลล์ฯ ที่ต่ออนุกรมกันบนแผ่นฐานเดียวกัน	82
รูปที่ 5.15 ภาพถ่ายขั้นตอนการประกอบ case ให้แก่โมดูล	84
รูปที่ 5.16 ภาพถ่ายการใช้งานโมดูลเซลล์ฯ ที่ผลิตได้ ในการชาร์จแบตเตอรี่ขนาด 12 V.	84
รูปที่ 5.17 ภาพถ่ายการใช้งานโมดูลเซลล์ฯ ที่ผลิตได้ เป็นแหล่งจ่ายไฟให้แก่เครื่องคิดเลข	85

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 5.18 ภาพถ่ายภาพการใช้งานโมดูลเซลล์ฯ ที่ผลิตได้ในการชาร์จถ่าน NiCd ขนาด 2.4 V.	85
รูปที่ 6.1 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนรอยต่อ p-i-n โดยที่มี p-i-n จำนวน 1 ชุด (ก), 2 ชุด (ข), 3 ชุด (ค) และ 4 ชุด (ง) .	88
รูปที่ 6.2 การขึ้นกับความหนาของชั้น i ของลักษณะสมบัติเอากัณฑ์ของเซลล์แสงอาทิตย์ รอยต่อ p-i-n 1 ชุด	90
รูปที่ 6.3 การเปลี่ยนแปลงของค่า carrier collection factor ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H	91
รูปที่ 6.4 (ก) โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H รอยต่อ multilayer ต่ออนุกรมกัน	92
(ข) แถบพลังงานขณะไม่มีแสง	92
(ค) แถบพลังงานขณะมีแสง	92
(ง) วงจรสมมูล	92
รูปที่ 6.5 ลักษณะสมบัติ J-V ของ a-Si:H รอยต่อ p-i-n (วงกลมขาว) และรอยต่อ p-n (วงกลมดำ) F คือกรณี forward bias และ R คือกรณี reverse bias	93
รูปที่ 6.6 การเปลี่ยนแปลงของ Photon flux ของแสงที่วิ่งเข้าสู่เซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งลดลงอย่าง exponential	97
รูปที่ 6.7 ลักษณะสมบัติเอากัณฑ์ของเซลล์แสงอาทิตย์ a-Si:H รอยต่อ p-i-n อนุกรมจำนวน 1, 2, 3 และ 4 ชุด	100
รูปที่ 6.8 ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์เอากัณฑ์ของเซลล์แสงอาทิตย์ a-Si:H และจำนวนชุดของรอยต่อ p-i-n ที่ต่ออนุกรมกันแบบ multi-layer	100
รูปที่ 7.1 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเฮตเตโรของ n μ c-Si:H/p poly-Si	103
รูปที่ 7.2 แถบพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปแบบที่ 1	103
รูปที่ 7.3 ขั้นตอนการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเฮตเตโรของ n μ c-Si:H/p poly-Si	104
รูปที่ 7.4 ภาพผลการกัดผิวของ poly-Si แบบ mirror etching ตัวเลขในรูปคือระยะเวลา (วินาที) ของการกัด	105
รูปที่ 7.5 โครงสร้างของฟิล์มบางชนิด (a) poly crystalline Si และ (b) microcrystalline Si	106
รูปที่ 7.6 ตัวอย่างโครงสร้าง atomic network ของ microcrystalline Si ..	106

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 7.7 โครงสร้างของเครื่อง glow-discharge plasma-CVD สำหรับผลิต a-Si:H และ μ c-Si:H	107
รูปที่ 7.8 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้ามืดของฟิล์ม Si และ RF power ของเครื่อง glow-discharge	107
รูปที่ 7.9 สเปกตรัมของ X-ray diffraction ของ a-Si:H และ c-Si:H ซึ่งเตรียมที่ RF power ค่าต่าง ๆ	109
รูปที่ 7.10 แผนภูมิระบบการวัด Raman Scattering	111
รูปที่ 7.11 สเปกตรัมของ Raman Scattering ของ a-Si:H (a) และ μ c-Si:H (b)-(c)	112
รูปที่ 7.12 อิทธิพลของ RF power ที่มีต่อสภาพนำไฟฟ้ามืด, ขนาดเม็ดผลึกย่อย และ volume fraction ของฟิล์ม Si	113
รูปที่ 7.13 โมเดล percolation อธิบายการนำไฟฟ้าอย่างสูงเมื่อเม็ดผลึกย่อย (สีดำ) มีจำนวนมากจนเชื่อมติดกัน	113
รูปที่ 7.14 ภาพถ่ายของเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเฮตเตอโรของ n μ c-Si:H/p poly-Si จากซ้ายแผ่นฐาน poly-Si ถูกกัด แบบ mirror ด้วยเวลา 20, 40, 50 และ 60 วินาที	115
รูปที่ 7.15 ลักษณะสมบัติเอาก์พทของเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเฮตเตอโรที่ผลิตได้ พารามิเตอร์ในรูปคือเวลาการทำ mirror etching ให้กับ poly-Si	115
รูปที่ 7.16 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการทำ mirror etching ให้กับ poly-Si และพารามิเตอร์เอาก์พทของเซลล์แสงอาทิตย์	117
รูปที่ 7.17 สเปกตรัมผลตอบสนองต่อแสงของเซลล์ที่ผลิตได้	117
รูปที่ 8.1 ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนที่ผลิตได้ในงานในปีต่างๆ เปรียบเทียบกับข้อมูลที่ดีที่สุดจากหน่วยงานอื่นทั่วโลก	121
รูปที่ 8.2 ตัวอย่างการนำเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตได้ในงานวิจัยไปประยุกต์กระแสไฟฟ้าเข้าแบตเตอรี่รถยนต์ขณะจอดรถ เป็นการช่วยยืดอายุแบตเตอรี่ให้มากขึ้น	122
รูปที่ 8.3 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์กับโคมไฟที่กลางคืนสว่างได้เองอย่างอัตโนมัติ	123

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อที่ใช้

CVD	: Chemical Vapor Deposition
a-Si:H	: Hydrogenated amorphous silicon
a-SiC:H	: Hydrogenated amorphous silicon carbide
ITO	: Indium Tin Oxide
EB	: Electron Beam
SiH ₄	: Gas Silane
B ₂ H ₆	: Gas Diborane
PH ₃	: Gas Phosphine
CH ₄	: Gas Methane
a-SiN:H	: Hydrogenated silicon nitride
a-SiGe:H	: Hydrogenated silicon germanium
RF power	: Radio frequency power (13.56 MHz)
HF acid	: Hydrofluoric acid
IR	: Infrared
α	: สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (1/cm)
ω	: ความถี่เชิงมุม (1/sec)
m	: มวลของ Si ใน 1 mole (g.mol ⁻¹)
N _A	: ค่าคงที่อะโวกาโดร (mol ⁻¹)
N _s	: จำนวนคู่ของ Si-H ใน cm ⁻³
E _c	: conduction band edge (eV)
E _v	: Valence band edge (eV)
K	: wave number (1/cm)
N _c (E)	: Density of states ในแถบคอนดักชัน (eV ⁻¹ cm ⁻³)
N _v (E)	: Density of states ในแถบวาเลนซ์ (eV ⁻¹ cm ⁻³)
σ	: สภาพนำไฟฟ้า (S.cm ⁻¹)
n	: ดัชนีหักเหแสง
C	: ความเร็วแสง (m/sec)
E	: พลังงานโฟตอน (eV)
h	: ค่าคงที่ของ Planck (J.sec)
\hbar	: h/2 π
ESR	: Electron Spin Resonance

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อที่ใช้ (ต่อ)

β	: Bohr magneton (erg.G^{-1})
H	: Magnetic field (gauss)
n	: ความหนาแน่นพาหะ (cm^{-3})
e	: ประจุของอิเล็กตรอน (C)
μ	: ความคล่องตัว ($\text{cm}^2/\text{sec.V}$)
ΔE	: Activation energy (eV)
k	: ค่าคงที่โบลซ์มันน์ (J/K)
T	: อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)
σ_D	: Dark-conductivity (S.cm^{-1})
σ_{ph}	: Photo-conductivity (S.cm^{-1})
T_s	: Substrate temperature ($^{\circ}\text{C}$)
E_g	: ช่องว่างพลังงาน (eV)
AM	: Air mass
$h\nu$: พลังงานโฟตอน (eV)
J_{ph}	: Photocurrent density (A/cm^2)
V_{oc}	: Open circuit voltage (V)
J_{sc}	: Short circuit current density (A/cm^2)
FF	: Fill Factor (%)
mc-Si:H	: Hydrogenated microcrystalline silicon
V_b	: Built-in potential (eV)
ΔE_p	: Activation energy ของชั้น p (eV)
ΔE_n	: Activation energy ของชั้น n (eV)
δ_n	: Notch barrier ของแถบคอนดักชันที่รอยต่อ n/i (eV)
δ_p	: Notch barrier ของแถบวาเลนซ์ที่รอยต่อ p/i (eV)
d_i	: ความหนาของชั้น i (\AA)
τ	: เวลาอายุพาหะ (sec)
$\phi(\lambda)$: Photon flux density ($\text{cm}^{-2}/\text{sec}/\mu\text{m}$)
λ	: ความยาวคลื่นแสง (μm)
L_p	: Diffusion length ของโฮล (μm)
L_n	: Diffusion length ของอิเล็กตรอน (μm)
E	: สนามไฟฟ้า (V/cm)

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อที่ใช้ (ต่อ)

n_c	: carrier collection efficiency (%)
$h\omega$: พลังงานโฟตอน (eV)
ε	: พลังงานโฟตอน (eV)
$g(\varepsilon)$: gap state density ($\text{eV}^{-1} \text{cm}^{-3}$)
SnO_2	: Tin Oxide
η	: ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ (%)
c-Si	: Crystalline silicon
I_x	: Current density (A/m^2)
V_H	: Hall voltage (V)
E_x, E_y	: Electric field (V/cm)
H_z	: Magnetic field (Gauss)
R_H	: Hall coefficient
I_s	: Saturation current
n	: Diode quality
R	: Series resistance
R_{sh}	: Shunt resistance
m	: จำนวนของเซลล์แสงอาทิตย์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



บทที่ 1
บทนำ

1.1 สถานภาพและความสำคัญของโครงการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้รับเริ่มขึ้นมาด้วยมีเหตุจูงใจที่ต้องการจะตอบสนองนโยบายของรัฐบาลในการค้นคว้าหาพลังงานทดแทนมาใช้แทนเชื้อเพลิงสิ้นเปลืองพวกฟอสซิลต่าง ๆ เช่น น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ ซึ่งนับว่าราคาค่อย ๆ แพงขึ้น และปริมาณก็ลดลงอย่างรวดเร็วทุกปี การผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์นั้นจะเป็นคำตอบที่จะช่วยแก้สถานการณ์ในปัจจุบัน ได้ดีวิธีหนึ่งและสอดคล้องกับสถานการณ์ในปัจจุบันหลายประการ อาทิเช่น เป็นการผลิตไฟฟ้าที่สะอาดโดยปราศจากการสร้างมลภาวะเป็นพิษใด ๆ ทั้งสิ้น เงียบ ไม่มีเสียงรบกวน นำไปติดตั้งได้ทุกที่ทั่วประเทศทั้ง บนภูเขา บนเกาะ ที่ราบ ในเมือง นอกเมือง ลงทุนเพียงครั้งเดียวก็จะได้ไฟฟ้าใช้ไปตลอด

ในอดีต ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำของคณะผู้วิจัยเคยทำการค้นคว้าวิธีการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ตลอดจนการใช้งานมากกว่า 10 ปีแล้ว[1] แต่ปัญหาที่ประสบคือเซลล์แสงอาทิตย์นั้นยังไม่ได้รับความสนใจเท่าที่ควร เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนที่เคยผลิตนั้นยังมีราคาแพง มีต้นทุนการผลิตสูง การที่จะช่วยแก้ไขวิกฤตการณ์น้ำมันแพงได้นั้น สิ่งจำเป็นอย่างยิ่งคือพลังงานทดแทนนั้นจะต้องใช้งานได้ดีและราคาถูกด้วย ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงพยายามศึกษาหาวิธีการผลิตใหม่ ๆ ที่จะได้มาซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีคุณภาพดี และราคาถูกตลอดมา และในที่สุดจากความพยายามอย่างต่อเนื่องและมุ่งมั่น คณะผู้วิจัยก็ประสบผลสำเร็จในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีต้นทุนการผลิตต่ำ และใช้วัสดุดิบที่มีอยู่ทั่วไป นั่นคือ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน (ซิลิคอนเป็นธาตุที่มีมากที่สุดในโลก เช่น ในทราย)

ในปี พ.ศ. 2531-2533 โดยทุนสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ได้เริ่มทำการวิจัยวิธีการผลิตฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน[2] โดยใช้ระบบ glow discharge plasma CVD ซึ่งสร้างขึ้นเอง สามารถผลิตฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอนได้คุณภาพดีพอสมควร และมีการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานต่าง ๆ อย่างเป็นระบบ และได้ทดลองประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้างแบบ p-i-n บนแผ่นกระจกได้ประสิทธิภาพสูงสุดประมาณ 5 %

ในงานวิจัยฉบับนี้จะเน้นไปในการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์จากอะมอร์ฟัสซิลิคอนให้ได้ประสิทธิภาพสูงขึ้น และผลิตเป็นพื้นที่ใหญ่เพื่อให้ได้กระแสไฟฟ้ามากและต่ออนุกรมกันเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้าสูงขึ้น เพื่อไปใช้ป้อนไฟฟ้าให้กับผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าต่าง ๆ เช่น ประจุไฟฟ้าเข้าแบตเตอรี่ ใช้กับนาฬิกา เครื่องคิดเลข เป็นต้น

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อศึกษาเทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำอะมอร์ฟัสซิลิคอนที่เกี่ยวกับสิ่งประดิษฐ์ทางแสง เช่น เซลล์แสงอาทิตย์
2. หาวิธีการประยุกต์ใช้งานสิ่งประดิษฐ์ที่พัฒนาขึ้นให้เหมาะสม
3. เป็นคู่มือทางผลิต และตระเตรียมบุคลากรให้พร้อมต่อเทคโนโลยีในอนาคต

1.3 เป้าหมายของโครงการที่จะได้รับเมื่อจบโครงการ

1. เซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน
2. เซลล์แสงอาทิตย์ฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอนแบบวงจรรวม (Integrated Type) ที่ให้แรงดันไฟฟ้าสูง (ประมาณ 6~12 โวลท์)
3. ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตได้ในด้านพลังงานทดแทน

1.4 ผลงานที่จะได้รับเมื่อจบโครงการ

ได้สิ่งประดิษฐ์อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งมีคุณสมบัติตามข้อ 1.3 และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้

1.5 ขอบเขตของการวิจัยและพัฒนา

พัฒนาวิธีการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์จากวัสดุอะมอร์ฟัสซิลิคอนให้ได้ประสิทธิภาพสูง และผลิตให้เป็นแบบวงจรรวมต่อกันในตัวให้ได้แรงดันไฟฟ้าสูงพอที่จะจ่ายไฟฟ้าให้ผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าต่าง ๆ

1.6 ผลกระทบทางเศรษฐกิจและสังคม

ผลงานการวิจัยเรื่องนี้คาดว่าจะมีประโยชน์ต่อประเทศในด้านพลังงานโดยตรง และจะมีผลประโยชน์โดยอ้อมในหลาย ๆ ด้านดังนี้

ก. เมื่อยังไม่ได้ใช้ผลงานวิจัย

- มีหมู่บ้านชนบทห่างไกลหลายพันแห่งในประเทศที่ยังไม่มีไฟฟ้าใช้ เพราะสายไฟฟ้ายังเดินไปไม่ถึง ทำให้ชีวิตความเป็นอยู่ด้วยการพัฒนา และทุรกันดาร เช่น
- ไม่มีแสงไฟจากไฟฟ้าในตอนกลางคืน
- ไม่มีไฟฟ้าใช้ในการสูบน้ำ ทำให้ขาดแคลนน้ำ
- ไม่มีไฟฟ้าเพื่อประกอบกิจการส่งเสริมรายได้
- ไม่มีไฟฟ้าใช้กับตู้เย็นเพื่อเก็บรักษาอาหารและวัคซีนต่าง ๆ ฯลฯ

- การผลิตไฟฟ้าจากน้ำมัน ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ ฯลฯ ซึ่งต้องนำเข้าจากต่างประเทศเกือบทั้งหมด เป็นอันตรายต่อความมั่นคงของประเทศชาติเป็นอันมาก
- ยังไม่มีการผลิตสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นเองภายในประเทศ
- เซลล์แสงอาทิตย์ที่ต้องนำเข้าเข้านี้มีราคาแพงมาก (แพงกว่า 200 บาท/วัตต์สูงสุด) ทำให้เสียดุลย์การค้าไปหลายร้อยล้านบาท และชาวบ้านยากจนไม่มีความสามารถจะซื้อของแพงมาใช้
- ด้านวิชาการยังไม่เคยมีการศึกษาทดลองเกี่ยวกับวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดอะมอร์ฟัส ทั้ง ๆ ที่เป็นวัสดุที่มีความสำคัญมากในด้านอิเล็กทรอนิกส์

ข. ผลภายหลังจากที่ได้ใช้ผลงานวิจัย

ผลงานคิดค้นการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ราคาถูกราคาถูกชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนชั้นในในประเทศไทยครั้งนี้ จะมีผลกระทบทางด้านดีต่อประเทศชาติเป็นอย่างมาก ทั้งทางด้านเศรษฐกิจ สังคม ความมั่นคง และการพัฒนาประเทศ ผลงานนี้เป็นเครื่องชี้พิสูจน์ให้เห็นว่า เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีคุณภาพและราคาถูกราคาถูกก็สามารถผลิตได้โดยฝีมือของคนไทย ปัญหาที่ทำให้การใช้น้ำเซลล์แสงอาทิตย์ในอดีตไม่แพร่หลายเท่าที่ควร เพราะราคาของเซลล์แสงอาทิตย์รุ่นเก่า ๆ ที่ทำจากผลึกซิลิคอนนั้นมีราคาแพง แต่ต่อจากนั้นไป ถ้ามีการนำเอาเทคโนโลยีและผลงานคิดค้นชั้นนี้ไปขยายและผลิตในภาคอุตสาหกรรมก็จะทำให้ได้เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีราคาถูกราคาถูก และเมื่อนั้นผลกระทบด้านต่าง ๆ จะกว้างขวางมากขึ้น อาทิเช่น

- คนไทยได้มีโอกาสซื้อเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีราคาถูกราคาถูก ไม่ต้องนำเข้าให้เสียดุลย์การค้า
- การผลิตพลังงานทดแทนได้ภายในประเทศ ทำให้ประเทศมีความมั่นคงด้านการพลังงานสูงขึ้น
- เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้สามารถนำไปพัฒนาชีวิตความเป็นอยู่ของหมู่บ้านชนบทห่างไกลให้ดีขึ้นได้ เช่น จ่ายไฟฟ้าเพื่อแสงสว่าง สู้บน้ำ ประกอบอาชีพต่าง ๆ ที่ต้องใช้ไฟฟ้า เช่น เป่าลมลงสระน้ำเพื่อเลี้ยงสัตว์น้ำ ฯลฯ ช่วยส่งเสริมรายได้
- กระตุ้นให้เกิดโรงงานผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นภายในประเทศ
- กระตุ้นให้การใช้วัสดุที่มีในในประเทศถูกนำไปใช้งานให้คุ้มค่าทางเศรษฐกิจสูงขึ้น เช่น การถลุงเม็ดยางให้เป็นธาตุซิลิคอนและก๊าซไซเลน ซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้ผลิตเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้มากมายหลายชนิด

นอกจากนี้ยังมีผลต่อการพัฒนาประเทศในด้านการศึกษาวัสดุอิเล็กทรอนิกส์ชนิดใหม่และเป็นการปูพื้นฐานเทคโนโลยีอะมอร์ฟัสซิลิคอนให้เกิดขึ้นในประเทศไทยด้วย

ค. ตัวอย่างรายชื่อกิจการที่จะสามารถนำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์ได้

ผลงานวิจัยชิ้นนี้คือ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน ได้ทดลองนำไปจ่ายไฟฟ้าให้เครื่องใช้ไฟฟ้าต่าง ๆ ได้สำเร็จ อาทิเช่น เครื่องคิดเลข นาฬิกา และประจุไฟฟ้าเข้าแบตเตอรี่ แม้ว่าเซลล์ที่ประดิษฐ์ได้นั้นจะยังมีขนาดเล็กและจำนวนน้อย แต่มีศักยภาพที่จะสามารถถ่ายทอดนำเทคโนโลยีนี้ไปผลิตในภาคอุตสาหกรรมให้ได้ เซลล์แสงอาทิตย์ขนาดใหญ่และจำนวนมากได้ตลาดรองรับกันไม่เพียงแต่ภายในประเทศ แต่ยังสามารถส่งออกสู่ตลาดโลกได้ด้วย ผู้ใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์นั้นมีมากมาย อาทิเช่น

- ภาคเอกชน
- ใช้ผลิตไฟฟ้าในหมู่บ้าน โรงเรียน วัด ในชนบทห่างไกล ทำให้พวกเขาสามารถมีรายได้ดีขึ้น เช่น ใช้แสงไฟจากไฟฟ้าล้อสัตว์ตอนกลางคืน เปิดโรงเรียนตอนกลางคืน สู้หน้าใช้ในการกลั่นกรรมเลี้ยงสัตว์ ฯลฯ
 - ใช้ประจุไฟฟ้าให้แบตเตอรี่ของโทรศัพท์มือถือ
- ภาครัฐวิสาหกิจ
- ใช้ผลิตไฟฟ้าแทนน้ำมันของการไฟฟ้าฝ่ายผลิต
 - ใช้ในการสื่อสารบนภูเขาสูงห่างไกล ถ่ายทอดสัญญาณขององค์การโทรศัพท์ การสื่อสารแห่งประเทศไทย การรถไฟ การบีโตรเลียม ฯลฯ
- ภาครัฐบาล
- ใช้ในการทหาร ช่วยในการสื่อสารซึ่งมีผลต่อความมั่นคงของประเทศ
 - กรมโยธาธิการ กรมชลประทาน
 - กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน
 - โครงการศึกษานอกโรงเรียน กระทรวงศึกษาธิการ
 - ฯลฯ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน

2.1 สถานภาพทางเทคโนโลยีเกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนในต่างประเทศ

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน มีข้อดีเด่นกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนหลายประการ อาทิเช่น ผลิตจากวัสดุอะมอร์ฟัสซิลิคอนซึ่งมีราคาถูกกว่า เป็นฟิล์มบางจึงประหยัดวัสดุกว่า ผลิตเป็นพื้นที่ใหญ่ ๆ ได้ง่ายกว่า มีน้ำหนักเบา เป็นต้น

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนถูกผลิตครั้งแรกโดย Cralson และ Wronski จากบริษัท RCA เมื่อ ค.ศ. 1976 [3] โดยเริ่มต้นได้ประสิทธิภาพประมาณ 2.4 % หลังจากนั้นนักวิจัยจากหลายแห่งทั่วโลก ได้ให้ความสนใจปรับปรุงประสิทธิภาพให้ดีขึ้นเรื่อย ๆ จนปัจจุบันได้ระดับ 10% สำหรับเซลล์พื้นที่ขนาดเล็ก ๆ (cm^2) [4] ทางด้านภาคอุตสาหกรรมนั้น ค.ศ. 1979 บริษัท Sanyo ญี่ปุ่น เป็นบริษัทแรกที่ผลิตเซลล์ชนิดนี้ ขนาด $1 \times 4 cm^2$ เพื่อใช้กับเครื่องคิดเลขอิเล็กทรอนิกส์ได้สำเร็จ หลังจากนั้นได้มีบริษัทต่าง ๆ มากมาย เริ่มผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนนี้ ให้มีขนาดใหญ่ขึ้นหลายขนาดดังตัวอย่างในรูปที่ 2.1 [5] และใช้งานกว้างขวางขึ้นทั้งในการผลิตไฟฟ้าให้ผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าต่าง ๆ และระบบไฟฟ้ากำลัง

2.2 สถานภาพทางเทคโนโลยีเกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนในประเทศไทย

ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่ผู้วิจัยสังกัดอยู่นี้ ได้เริ่มทำการค้นคว้าวิจัยด้านการผลิตและใช้งาน เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอนมาตั้งแต่ ค.ศ. 1974 ซึ่งเป็นปีที่เกิดวิกฤตการณ์ทางน้ำมัน ต่อมาได้มีโรงงานอุตสาหกรรมประกอบแผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเกิดขึ้นในประเทศไทย 3 แห่ง โดยดำเนินการในลักษณะนำเข้า เซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตเสร็จแล้วมาประกอบเข้าภายในกรอบกระจกอลูมิเนียมหุ้มจนจบแล้วส่งออกขายภายในประเทศบางส่วนและต่างประเทศอีกบางส่วน (มีการติดตั้งใช้ภายในประเทศแล้วประมาณ 1 MW 2537 ปัจจุบัน)

ในปัจจุบันในประเทศไทยมี 2 หน่วยงานซึ่งมีความสามารถในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอน ได้แก่ ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ส่วนหน่วยงานที่สามารถผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนได้ปัจจุบัน (2537) มีเพียงแห่งเดียวคือ ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาฯ

2.3 คุณสมบัติเด่นของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน

ข้อดีเด่นหลายประการที่ทำให้อะมอร์ฟัสซิลิคอน ($a-Si:H$) เป็นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับการนำมาผลิตเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ คือ



รูปที่ 2.1 ตัวอย่างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนที่ผลิตโดยภาคอุตสาหกรรม [5]

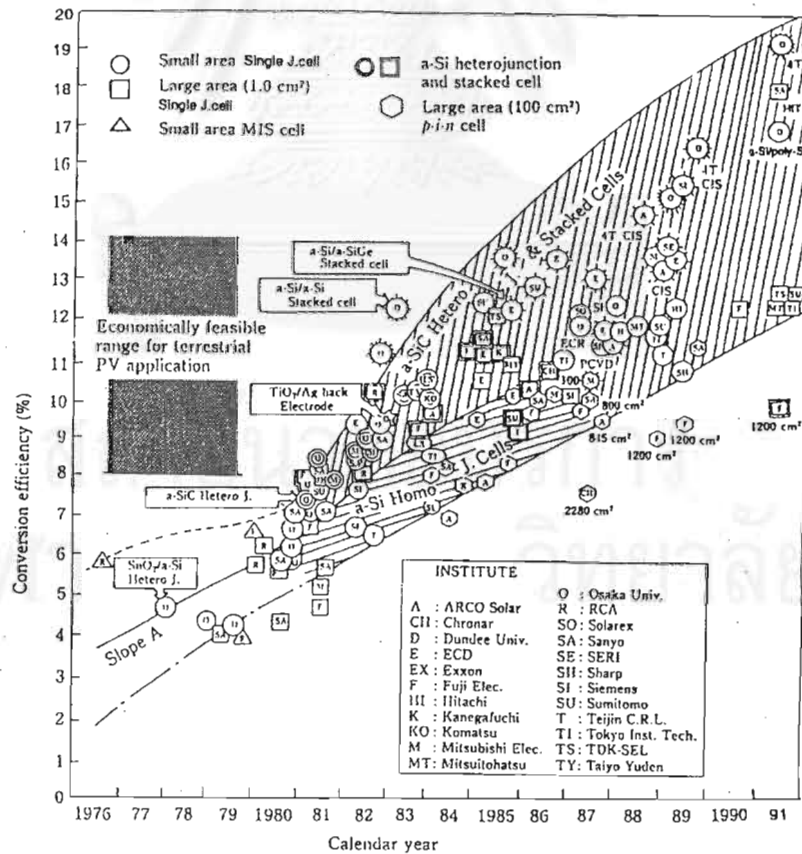
- มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงสูงมาก (สูงกว่า 10^5 cm^{-1}) ในย่าน peak ของสเปกตรัมของแสงอาทิตย์ ซึ่งทำให้ต้องการฟิล์มบางเพียง 0.1-0.5 μm เท่านั้นในการผลิตเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ นั่นคือต้นทุนในด้านวัสดุจะต่ำกว่าพอลิซิลิคอน
- กระบวนการผลิตใช้อุณหภูมิต่ำ ($\sim 200^\circ\text{C}$) และสามารถเคลือบเป็นพื้นที่กว้างอย่างสม่ำเสมอ ประหยัดพลังงานในการผลิต
- ช่องว่างพลังงานทางแสงมีค่า $\sim 1.7 \text{ eV}$ ซึ่งอยู่ใกล้กับช่วงพลังงานของแสงอาทิตย์ที่คาดว่าจะให้ประสิทธิภาพการแปรพลังงานสูง
- สามารถทำในลักษณะ integrated และเห็น monolithic ได้ง่าย ลดขั้นตอนในการตัดและติดซึ่งใช้ต้นทุนสูง
- ซิลิคอนและไฮโดรเจน เป็นวัตถุดิบที่มีปริมาณมากบนพื้นโลก
- สามารถได้อะมอร์ฟัสซิลิคอนให้เป็นชนิด n และชนิด p ได้ง่าย โดยใช้ฟอสฟอรัสหรือโบรอน
- วัสดุอะมอร์ฟัสซิลิคอน มีคุณสมบัติของการขนส่งพาหะ เช่น photoconductivity สูง ซึ่งจำเป็นต่อการผลิตเป็นเซลล์แสงอาทิตย์

ด้วยข้อดีเด่นเหล่านี้ ทำให้มีความดึงดูดใจ เพราะอาจมีโอกาทำเซลล์ฯ ที่มีประสิทธิภาพสูงและราคาถูกได้ และการผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ ควรมีราคาถูกพอที่จะแข่งขันกับการผลิตพลังงานด้วยวิธีปกติที่ใช้ฟอสซิลหรือนิวเคลียร์ ในตารางที่ 2.1 แสดงการเปรียบเทียบต้นทุนของการผลิตเซลล์ฯ ชนิดต่าง ๆ จากสายการผลิตขนาด 25 MW [6] ซึ่งชี้ให้เห็นว่าเซลล์ฯ ที่ทำจาก a-Si:H มีราคาของโมดูล ($\$/\text{วัตต์สูงสุด}$) ถูกที่สุดถึงแม้ว่าจะคิดให้ประสิทธิภาพของเซลล์ฯ ต่ำกว่าก็ตาม

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนถูกสร้างเป็นครั้งแรกโดย David E. Carlson ในปี ค.ศ. 1976 ที่ศูนย์การวิจัยของ RCA [3] เซลล์ฯ มีโครงสร้างเป็นรอยต่อ Schottky และ p-i-n และมีประสิทธิภาพ 2.4 % จากนั้นมา ก็ได้มีการปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์อะมอร์ฟัสให้สูงขึ้นเรื่อย ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 การพัฒนาที่สำคัญมากขั้นหนึ่งคือ การใช้โครงสร้างรอยต่อเฮเทอโร (heterojunction) ซึ่งใช้อัลลอยซิลิคอนคาร์ไบด์ชนิด p (p a-SiC:H) แทนที่ p a-Si:H ให้เป็นชั้นหน้าต่างกว้างรับแสง ทำให้เซลล์ฯ มีกระแสเอาต์พุตและแรงดันเอาต์พุตสูงขึ้น [7] ส่งผลให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพสูงกว่า 10 % ยิ่งไปกว่านี้ การใช้แผ่นฐานที่มีผิว texture ก็ช่วยเพิ่มการดูดกลืนแสงเข้าสู่เซลล์ฯ ทำให้ได้กระแสเอาต์พุตสูงขึ้น การพัฒนาในขั้นต่อมาคือการทำ graded bandgap เพื่อลดการสูญเสียเนื่องจากการรวมตัวที่รอยต่อ p/i เมื่อรวมแนวความคิดเหล่านี้ เข้ากับการออกแบบโครงสร้างเพื่อให้ใช้แสงอย่างคุ้มค่าที่สุดจะได้ประสิทธิภาพสูงถึง 12 % สำหรับเซลล์ฯ แบบรอยต่อ p-i-n

ตารางที่ 2.1 ต้นทุนการผลิต (จากการคำนวณ) ของเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิดผลึกซิลิกอนและอะมอร์ฟัสซิลิกอน [6]

Cell Type	Module Price (1985 \$/Peak Watt)
CRYSTALLINE SILICON	
Dendritic Web	1.23
Czochralski	1.90
500 X Concentrator	1.40
AMORPHOUS SILICON	
Single Junction	1.15
Tandem Alloy	1.03



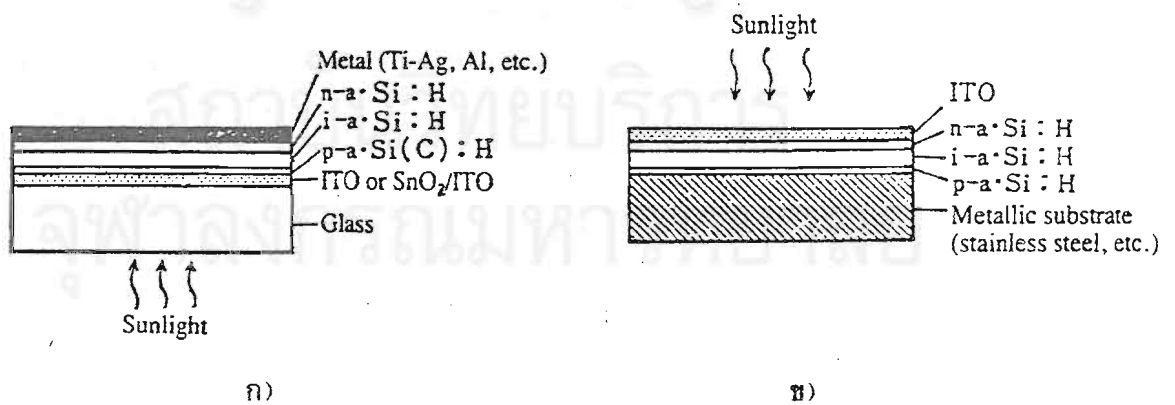
รูปที่ 2.2 การพัฒนาของประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H [7]

ถึงแม้ว่าถ้ามองกว้าง ๆ แล้ว เป็นความคิดมากที่จะพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์ฯ เดี่ยวก็ตาม ในปัจจุบันโครงการวิจัยของบริษัทอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นไปที่เซลล์ฯ แบบหลายชั้น (tandem type) ซึ่งคาดว่าจะให้ประสิทธิภาพที่สูงกว่า และปัญหาของการ degrade ของเซลล์ฯ เนื่องจากแสงก็ลดน้อยลง ทำให้ผู้ผลิตหันมาสนใจเซลล์ฯ แบบหลายชั้นกันมากขึ้น เพราะพบว่าเซลล์ฯ ชนิดนี้มีเสถียรภาพดีกว่ามาก ผลที่ติดตามมาคือ มีการวิจัยเกี่ยวกับอัลลอยของอะมอร์ฟัสซิลิคอนเพิ่มขึ้น เพื่อนำมาทำเป็นรอยต่อทั้งชนิดช่องว่างพลังงานกว้างและแคบ เช่น a-SiGe:H และ a-SiSn:H ถึงแม้ในปัจจุบันงานวิจัยเกี่ยวกับเซลล์ฯ หลายชั้น อาจยังอยู่ในระยะเริ่มแรกก็ตาม ก็ปรากฏผลน่าพอใจ คือสามารถผลิตเซลล์ฯ ที่มีประสิทธิภาพ 10-13 % ได้ [8]

2.4 ทฤษฎีพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน

2.4.1 คุณสมบัติทางกายภาพและ โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์

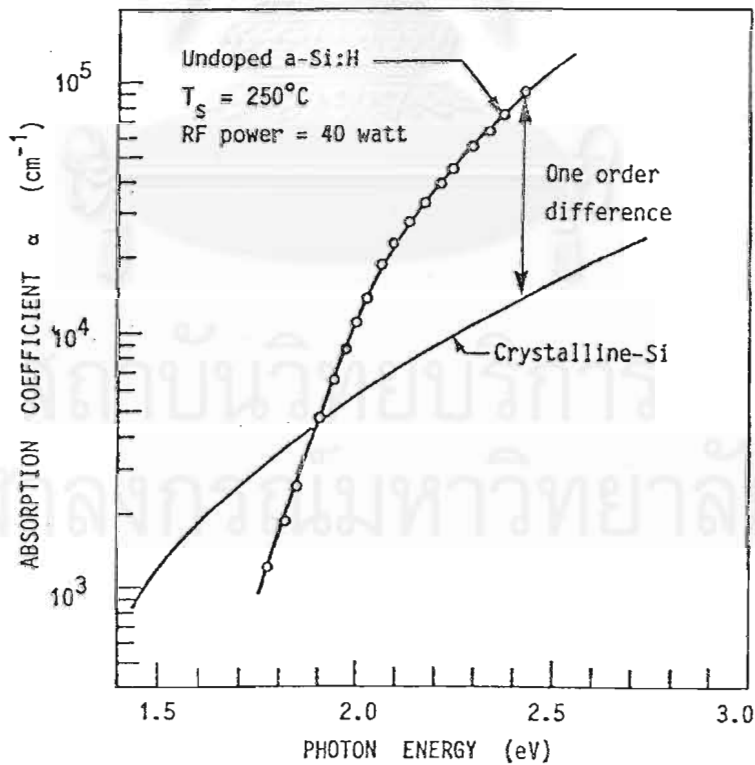
ในปัจจุบันคำว่า "เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน" โดยทั่วไปหมายถึงเซลล์ฯ ที่มีโครงสร้างรอยต่อแบบ p-i-n และมักนิยมใช้โครงสร้างแบบ glass/ITO/SnO₂/p-i-n/metal และแบบ ITO/n-i-p/metallic substrate ดังแสดงโครงสร้างในรูปที่ 2.3 (ก) และ (ข) ตารางที่ 2.2 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติพื้นฐานของผลึกเดี่ยวซิลิคอนและอะมอร์ฟัสซิลิคอน ที่จำเป็นต่อการออกแบบเซลล์แสงอาทิตย์ ช่องว่างพลังงานของ a-Si:H อยู่ในช่วง 1.6-1.8 eV แล้วแต่ปริมาณของไฮโดรเจน ส่วนช่องว่างพลังงานของซิลิคอนชนิดผลึกเดี่ยวมีค่า 1.1 eV ซิลิคอนผลึกเดี่ยวเป็นวัสดุที่เป็น indirect transition type และมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (α) ต่ำ (ดูได้จากรูปที่ 2.4 ซึ่งแสดงสเปกตรัมสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง) ส่วนอะมอร์ฟัสซิลิคอนมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (α) สูงมากเหมือนในกรณีของ



รูปที่ 2.3 ก) โครงสร้างของเซลล์ฯ ชนิด a-Si:H ที่ใช้แผ่นแก้วเป็นแผ่นฐาน (ชนิดรอยต่อไฮโม)
 ข) โครงสร้างของเซลล์ฯ ชนิด a-Si:H ที่ใช้สแตนเลสสตีลเป็นแผ่นฐาน

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบพารามิเตอร์ที่สำคัญของผลึกเดี่ยวซิลิคอนและอะมอร์ฟัสซิลิคอน [9]

Item	Monocrystalline Si	Amorphous Si
Atomic arrangement	regular	disordered
Forbidden bandgap (eV)	1.1	1.6-1.8
Absorption coefficient (visible spectrum)	small	large
Minority carrier diffusion length (μm)	10-100	0.1-2
Electron mobility ($\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$)	~ 1000	0.1-1
Conductivity (Scm^{-1})	$10^{-4}-10^4$	$10^{-13}-10^2$
p-n junction characteristics	rectifying	ohmic
p-i-n junction depletion layer width	1-10 μm	0.5-1 μm
Thickness of solar cell	$\sim 200 \mu\text{m}$	0.5-1 μm



รูปที่ 2.4 สเปกตรัมสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของ a-Si:H และของผลึก Si [10]

วัสดุ direct transition โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงบริเวณที่แสงมีพลังงานโฟตอน 2.0-2.5 eV ซึ่งเป็นช่วงที่ความเข้มข้นการแผ่รังสีของแสงอาทิตย์มีค่าสูงสุด ค่า α ของ a-Si:H มีค่าสูงกว่าของผลึก Si เกือบ 10 เท่า ในกรณีของซิลิคอนชนิดผลึกเดี่ยวจะต้องใช้วัสดุที่หนาประมาณ 200 μm เพื่อที่จะได้ดูดกลืนพลังงานแสงอาทิตย์มากเพียงพอ ในขณะที่อะมอร์ฟัสซิลิคอนต้องการความหนาเพียง 0.5-1 μm อย่างไรก็ตามค่าความยาวการแพร่ซึมของพาหะส่วนน้อย (ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งที่กำหนดประสิทธิภาพการกวาดเก็บพาหะที่เกิดจากแสง) ของอะมอร์ฟัสซิลิคอนมีค่าสั้นประมาณ 0.1-2 μm (เทียบกับผลึก 10-100 μm) แต่เนื่องจากชั้นที่เกี่ยวข้องกับการผลิตพาหะนั้นถูกออกแบบให้บางเพียง 0.5 μm ดังนั้นค่าความยาวการแพร่ซึมของพาหะส่วนน้อยซึ่งประมาณ 1-2 μm ก็สามารถทำให้เซลล์ชนิดอะมอร์ฟัสทำงานได้

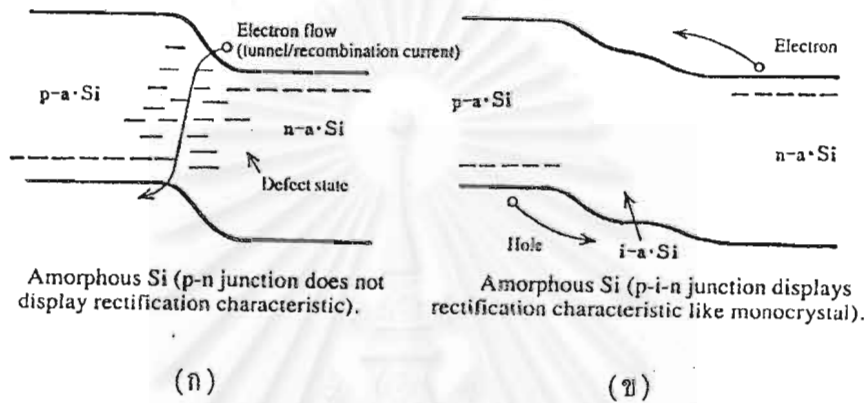
ค่าสภาพนำไฟฟ้าของอะมอร์ฟัสซิลิคอนชั้นต่ำ ทั้งแบบ p และ n โดยสูงที่สุดก็เพียง 10^{-2} Scm^{-1} เนื่องจากมีปริมาณ defect levels มาก ดังนั้นในการทำเป็นโครงสร้าง p-i-n ถ้าชั้น p และ n หนา (มากกว่าหลายร้อยอังสตรอม) ค่าความต้านทานอนุกรมของชั้นเหล่านี้ไม่สามารถถูกละเลยไปได้ การใช้ไมโครคริสตัลไลน์ซิลิคอน ($\mu\text{C-Si}$) ซึ่งมีสภาพนำไฟฟ้า $10-10^2 \text{ Scm}^{-1}$ เป็นวิธีหนึ่งที่จะช่วยลดความต้านทานอนุกรมได้

รอยต่อ p-n ของอะมอร์ฟัสซิลิคอน โดยปกติจะไม่มีคุณสมบัติเรียงกระแส (ไม่เป็นไดโอด) แต่จะแสดงคุณสมบัติเป็น Ohmic contact ไม่มากก็น้อย เป็นเพราะในชั้น p และ n นั้นมี defect Levels มาก จึงทำให้รอยต่อ p-n สูญเสียการเป็นไดโอดไปในรูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างแบบ p-i-n ที่มีชั้น intrinsic ซึ่งไม่ถูก dope อยู่ระหว่างชั้น p และ n ซึ่งใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ ชั้น i เกือบทั้งหมดจะกลายเป็นชั้นปลอดพาหะ (depletion layer) และจะขัดขวางไม่ให้เกิดกระแส tunnel current ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัส ชั้น i จะทำหน้าที่ผลิตพาหะด้วยแสง ส่วนชั้น p กับ n จะทำหน้าที่สร้าง built-in potential และถูกเรียกว่าเป็น "dead layer" เพราะชั้น p และ n ผลิตพาหะด้วยแสงไม่ได้

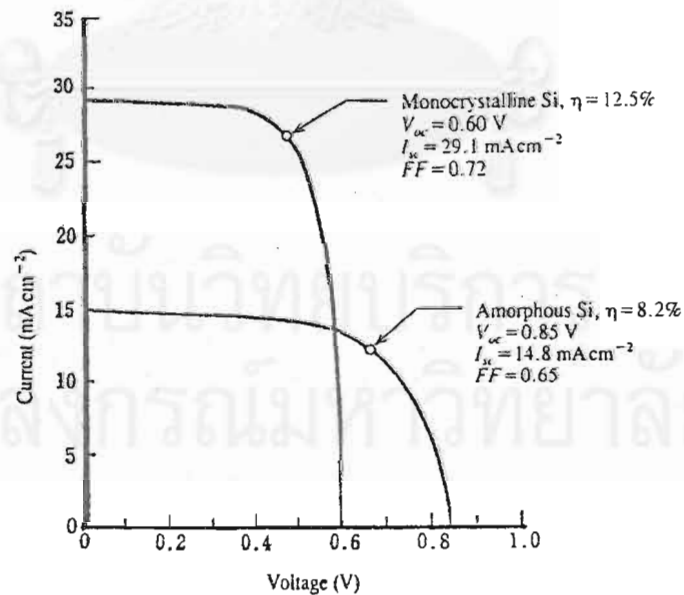
2.4.2 ลักษณะสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน

รูปที่ 2.6 แสดงตัวอย่างลักษณะสมบัติ J-V ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวและเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนที่วัดที่ความเข้มแสง AM 1 ค่ากระแสลัดวงจร ($\sim 15 \text{ mA/cm}^2$) ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน จะเป็นครึ่งหนึ่งของเซลล์ชนิดผลึกเดี่ยว แต่ค่าแรงดันวงจรเปิดของเซลล์ชนิดอะมอร์ฟัสมีค่ามากกว่าของเซลล์ชนิดผลึกเดี่ยว

โดยทั่วไปแล้ววัสดุที่มีช่องว่างพลังงานกว้างจะมีค่า intrinsic carrier density ($n_i \propto \exp(-E_g/2kT)$) ต่ำ ค่ากระแสลัดในเซลล์ที่ทำจากวัสดุเหล่านี้จะลดลง และค่าแรงดันวงจรเปิดจะสูงขึ้น และเนื่องจากปริมาณแสงที่ทะลุผ่านมีค่ามากขึ้น เมื่อช่องว่างพลังงานกว้างขึ้น จึงทำให้ค่ากระแสลัดวงจรลดลง ค่าแรงดันวงจรเปิดถูกกำหนดโดยค่า built-in potential ของรอยต่อ ในกรณีของอะมอร์ฟัสซิลิคอน ระดับพลังงานเฟอร์มิของชั้น p และ n



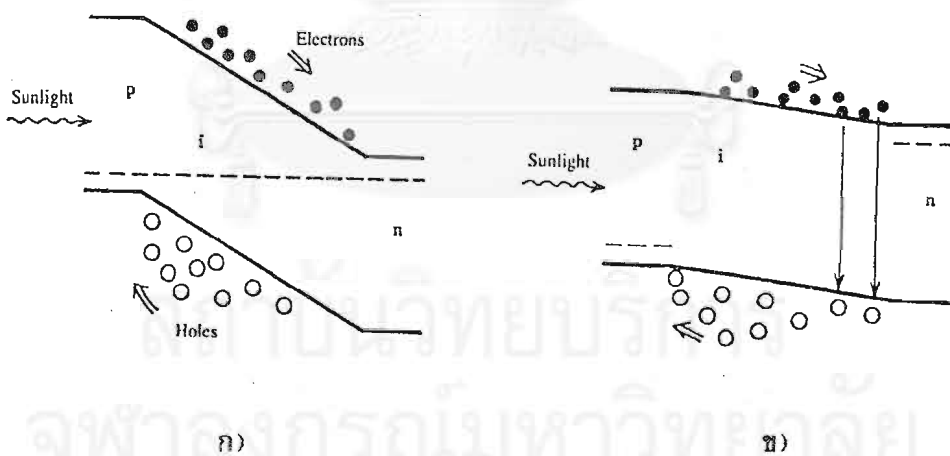
รูปที่ 2.5 ความแตกต่างระหว่างรอยต่อ p-n และ p-i-n ของ a-Si:H [1]



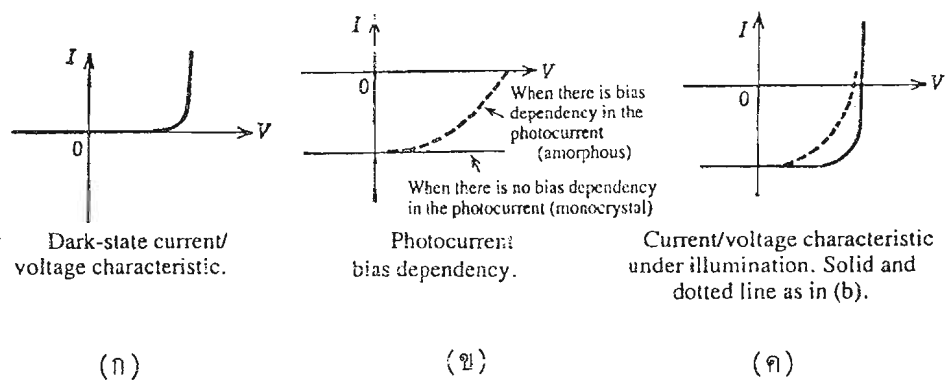
รูปที่ 2.6 เปรียบเทียบลักษณะสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มคอสซิลิกได้เกี่ยวกับแบบอะมอร์ฟัสซิลิคอนที่ AM1, 100 mW/cm² [12]

ประมาณ 0.2-0.3 eV และค่า built-in-potential จะมีค่าประมาณ 1.1-1.2 eV (10) ถ้ามีการออกแบบเพื่อให้ค่า built-in-potential (V_{oc}) มีค่ามากขึ้นแล้ว ค่า V_{oc} ก็จะเพิ่มขึ้นด้วย

ความแตกต่างอีกประการหนึ่งคือ เซลล์ชนิดผลึกเดี่ยว มีค่า fill factor $FF \sim 0.7-0.8$ ส่วนเซลล์ชนิดอะมอร์ฟัสจะมี $FF \sim 0.6-0.7$ ค่า fill factor นี้ได้รับอิทธิพลจาก parameter หลายตัวเช่น ความต้านทานภายในของเซลล์ และ diode factor แต่โดยพื้นฐานแล้ว ค่า FF ของเซลล์ชนิดอะมอร์ฟัสเกิดจากการขึ้นกับการไบแอสของ photo current สำหรับเซลล์ชนิดผลึกเดี่ยว ค่าความยาวการแพร่ซึมของพาหะส่วนน้อยมีค่ามาก และกระแส photocurrent เกิดจากพาหะซึ่งเกิดที่บริเวณเนื้อผลึกหรือเอ็น นอกเขตปลอดพาหะ (ที่สร้างสนามไฟฟ้า) ส่วนเซลล์ชนิดอะมอร์ฟัส ค่าความยาวการแพร่ซึมของพาหะส่วนน้อยสั้นและกระแส photocurrent ที่เกิดจากภายนอกเขตสนามไฟฟ้าจะมีน้อย กระแสส่วนใหญ่เกิดจากพาหะที่เกิดขึ้นในเขตปลอดพาหะ และถูกกวาดออกมาสู่ภายนอกด้วยสนามไฟฟ้า ดังนั้นถ้ามีการไบแอสตามสนามไฟฟ้าในชั้น i จะมีค่าน้อยลง และที่ปลอดพาหะจะแคบลง ทำให้กระแส photocurrent ลดลง กลไกในการสร้าง photocurrent ขณะที่มีการไบแอสตามแสดงในรูปที่ 2.7



- รูปที่ 2.7 กลไกการเกิด photocurrent ขณะที่มีการไบแอสและไม่มีมีการไบแอส
- ก) ในสภาวะลัดวงจร : สนามไฟฟ้าภายในมีค่าสูง, โวลต์ที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยแสง ส่วนใหญ่ไปถึงรอยต่อ p-i
 - ข) ในสภาวะวงจรเปิด : เนื่องจากสนามไฟฟ้าภายในมีค่าน้อย โวลต์ที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยแสงที่อยู่ถัดจากรอยต่อ p-i จะรวมตัวกับอิเล็กตรอนและหายไป



รูปที่ 2.8 ลักษณะสมบัติ J/V ของเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาวะมืด และเมื่อได้รับแสง ซึ่งได้รับผลจากการขึ้นกับการไบแอสของ photocurrent

รูปที่ 2.8 แสดงให้เห็นว่าลักษณะสมบัติ J-V ของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อได้รับแสงมาจากการรวมกันของลักษณะของสมบัติ J-V ในสภาวะมืด กับกระแส photocurrent เราจะเห็นได้ว่า fill factor จะลดน้อยลง ถ้า photocurrent แปรเปลี่ยนตามการไบแอสมากขึ้น นอกจากนี้แล้วค่า fill factor ของเซลล์ชนิดอะมอร์ฟัส ยังขึ้นอยู่กับสเปกตรัมของแสงที่ตกกระทบ และค่าความยาวของการแพร่ซึมของพาหะส่วนน้อย (คือ hole) เป็นอย่างมากด้วย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



บทที่ 3

การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน

บทนำ

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนที่ประดิษฐ์ในงานวิจัยนี้มี โครงสร้างดังแสดง ในรูปที่ 3.1 กล่าวคือ แผ่นฐานกระจก/ฟิล์ม ITO/ฟิล์มอะมอร์ฟัส p-i-n/ฟิล์ม Al ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการประดิษฐ์เซลล์ฯ โครงสร้างดังกล่าว โดยจะเริ่มจากหลักการการออกแบบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน หนึ่ง ข้อมูลผลการวิจัยเกี่ยวกับคุณสมบัติพื้นฐานของฟิล์ม a-Si:H ดูได้จากรายงานผลการวิจัยที่เสนอต่อสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ [2]

3.1 หลักการพิจารณาการออกแบบพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H ที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยแผ่นฐานแก้วและฟิล์มบางของชั้นต่าง ๆ หลายชั้นปลูกซ้อนทับกันคือ

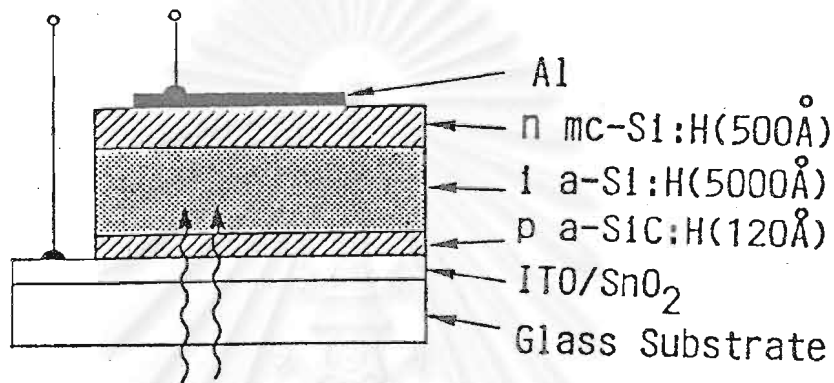
1. ชั้นโปร่งแสง
2. ชั้น p-, i- และ n-
3. ชั้นโลหะ

คุณสมบัติตลอดจนความหนาของชั้นต่าง ๆ นั้น มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพโดยรวมของเซลล์ฯมาก ดังจะได้อธิบายถึงหลักการพิจารณาการผลิตดังต่อไปนี้

1. ชั้นโปร่งแสง

ไม่ว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H จะมีแผ่นฐานเป็นแผ่นแก้วหรือแผ่นสแตนเลส ก็ย่อมจะต้องมีชั้นโปร่งแสงเสมอ

ในกรณีที่แผ่นแก้วเป็นแผ่นฐาน ตามปกติจะใช้ SnO_2/ITO เป็นชั้นโปร่งแสง SnO_2 มีราคาถูกแต่มีสภาพต้านทานสูงกว่า ITO ส่วน ITO นี้เป็นส่วนประกอบของ SnO_2 และ In_2O_3 โดยมีอัตราส่วนของ Sn:In เท่ากับ 5:95 โดยประมาณ ITO มีสภาพความต้านทานต่ำกว่า SnO_2 แต่ราคาแพง ลำดับการปลูกบนแผ่นแก้วคือ แก้ว/ITO/ SnO_2 /a-Si:H/Al การที่ต้องใช้ชั้นโปร่งแสงถึงสองชั้นเช่นนี้มีเหตุผลคือ ถ้า SnO_2 มีความหนามากกว่า 20 nm จะช่วยกันไม่ให้อะตอมของ In จาก ITO หลุดออกแล้วแพร่เข้าไปในชั้น a-Si:H เพราะการแพร่ของ In เข้าสู่ชั้น a-Si:H จะทำให้ประสิทธิภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง V_{oc} ลดลง คุณสมบัติพื้นฐานของชั้นโปร่งแสงเหล่านี้ที่จำเป็นคือ ควรโปร่งแสงมาก ๆ และนำไฟฟ้าได้ดี และในขณะเดียวกันก็ควรเป็นชั้นกันการสะท้อนแสงด้วย (antireflection) ในการใช้งานก็ต้องเลือกความหนาที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง เนื่องจากความสามารถสูงสุดในการผลิตและกวาดเก็บพาหะของเซลล์ฯ อยู่ในช่วง 500~550 nm ดังนั้นชั้นโปร่งแสงควรมีความหนาเป็น 1/4 หรือ 3/4 ของความยาวคลื่น คือ 70 nm หรือ 200 nm ตัวอย่างเช่นให้ SnO_2 หนา



รูปที่ 3.1 โครงสร้างพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนที่ผลิตในงานวิจัย

20 nm และ ITO หนา 50 nm ซึ่งจะให้ sheet resistance มีค่า 40~50 Ω/\square หรือถ้า SnO₂ หนา 20 nm และ ITO หนา 180 nm จะได้ sheet resistance น้อยกว่า 10 Ω/\square

ในปัจจุบันเนื่องจากมักนิยมใช้ชั้น p เป็น microcrystalline Si หรือ a-SiC:H ซึ่งชั้นนี้หักเหแสงมีค่าอยู่ระหว่าง ชั้นหักเหแสงของซิลิโคนโปร่งแสง และ a-Si:H พอดี ดังนั้นจึงช่วยลดการสะท้อนแสงที่ผิวของ i a-Si:H ได้ดี

นอกจากนี้การทำให้ผิวของแผ่นแก้วเป็นผิวขรุขระ (textured) ด้วยวิธีการเคมี และทำให้ผิวของ ITO/SnO₂ ขรุขระในขณะเคลือบ ก็จะช่วยทำให้เพิ่มประสิทธิภาพการกักแสง ให้เข้าสู่ชั้นอะมอร์ฟัสและเดินทางในชั้นอะมอร์ฟัสได้ไกลขึ้น ซึ่งจะช่วยเพิ่มกระแสไฟฟ้าให้สูงขึ้นได้

2. ชั้น p

ทำหน้าที่เป็นชั้นสร้าง built-in potential เช่นเดียวกับกับชั้น n และมีค่าสภาพนำไฟฟ้าด้วยแสงที่ต่ำ จึงเปรียบเสมือนเป็น dead layer ในทางปฏิบัติต้องเลือกความเหมาะสมของสภาพนำไฟฟ้า . ความหนา และขนาดของช่องว่างพลังงาน a-Si:H ที่ได้ปด้วย B จะมีค่าสภาพนำไฟฟ้าแสงต่ำ และช่องว่างพลังงานจะแคบลง ดังนั้นชั้น p a-Si:H จึงควรทำให้

บางที่สุด แต่อย่างไรก็ตามถ้าชั้น p บางมาก ๆ ก็จะทำให้แรงดันวงจรมีเปิดลดลงด้วย

ในปัจจุบันนิยมใช้ p a-SiC:H ที่มีช่องว่างพลังงาน 2 eV หรือ p micro crystalline Si:H เป็นหน้าต่างกว้างรับแสง ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มทั้งกระแสไฟฟ้าลัดวงจร แรงดันวงจรมีเปิด และฟิลล์แพคเตอร์ ตามปกติความหนาของ p a-SiC:H คือ 150 อังสตรอม

3. ชั้น i

คุณสมบัติพื้นฐานของ a-SiC:H ชนิด i (undoped) นี้จะมีอิทธิพลหรือผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์มาก จากประสบการณ์ที่ผ่านมา เงื่อนไขการผลิต i a-Si:H ที่มี gap states น้อยคือ ควรใช้ RF power ต่ำ ๆ และปล่อยก๊าซไฮโดรเจนมาก ๆ เพื่อให้ได้ deposition rate ประมาณ 1 ไมครอนต่อชั่วโมง ถ้า gap states มีค่าสูงจะทำให้ collection efficiency ลดลง เพราะถ้า gap states มีค่าสูงขึ้น จะทำให้ built-in potential ลดลง เป็นเหตุให้การ recombination ของพาหะมีค่ามากขึ้น จึงทำให้ photocurrent ลด และทำให้ความต้านทานอนุกรมเพิ่ม และฟิลล์แพคเตอร์ลด ดังนั้นก่อนปลูกเซลล์ฯ จึงควรต้องทดลองหาเงื่อนไขการผลิตฟิล์ม a-Si:H ที่มีสภาพนำไฟฟ้าด้วยแสงสูงสุด จากรายงานการวิจัยที่เคยส่งสภาวิจัย [1] พบว่า อุณหภูมิแผ่นฐานที่เหมาะสมที่สุดคือ 180-250 °C

โดยทั่วไป a-Si:H ที่ไม่ได้ได้แสดงคุณสมบัติเป็นชนิด n แบบอ่อนเพราะระดับพลังงานเฟอร์มิอยู่ค่อนข้างไปทางแถบคอนดักชัน การเติม B น้อย ๆ (ประมาณ 11 ppm) จะทำให้ระดับพลังงานเฟอร์มิเคลื่อนมาที่ตรงกลางช่องว่างพลังงานพอดี ซึ่งจะทำให้สนามไฟฟ้าในชั้น i มีค่าเพิ่มขึ้น

4. ชั้น n

การใช้ microcrystalline Si:H ชนิด n จะช่วยเพิ่ม built-in potential ให้มีค่าสูงขึ้น ระดับพลังงานเฟอร์มิของวัสดุชนิดนี้อยู่ใกล้แถบคอนดักชันมาก สภาพนำไฟฟ้าก็มีค่าสูงมาก ($1 \sim 10 \text{ S.cm}^{-1}$) จึงทำตัวเป็นโอห์มมิกติดได้ง่าย และช่องว่างพลังงานก็กว้างด้วย จึงอาจช่วยผ่านให้แสงที่สะท้อนจากชั้น โลหะด้านหลังกลับเข้าสู่ชั้น i ได้ดีขึ้น

สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตขึ้นในงานวิจัยนี้ มีโครงสร้างตามที่แสดงในรูปที่

3.1 อุปกรณ์หลักที่ใช้ในการผลิตฟิล์มชั้น a-Si:H คือเครื่อง glow discharge plasma CVD (รายละเอียดดูหัวข้อที่ 3.3) เงื่อนไขในการปลูกชั้น p, i, n แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขในการปลูกฟิล์ม a-Si:H ชั้นต่าง ๆ ในการผลิตเซลล์ฯ

ชั้น	ชนิด	ก๊าซ	RF W	T °C	ความหนา Å
p	a-Si:H	$B_2H_6/SiH_4 = 0.6 \%$ $B_2H_6 = 50$ sccm $SiH_4 = 40$ sccm	40	190	120
	หรือ a-SiC:H	$CH_4/SiH_4+CH_4 = 70.0 \%$ $B_2H_6/SiH_4+CH_4 = 0.6 \%$ $B_2H_6 = 60$ sccm $CH_4 = 35$ sccm $SiH_4 = 15$ sccm	40	190	150-220
i	a-Si:H	$SiH_4 = 40=60$ sccm	40	190	5000-7000
n	μ C-Si:H	$PH_3/SiH_4 = 2.6 \%$ $PH_3 = 80$ sccm $SiH_4 = 15$ sccm	148	190	200-1000

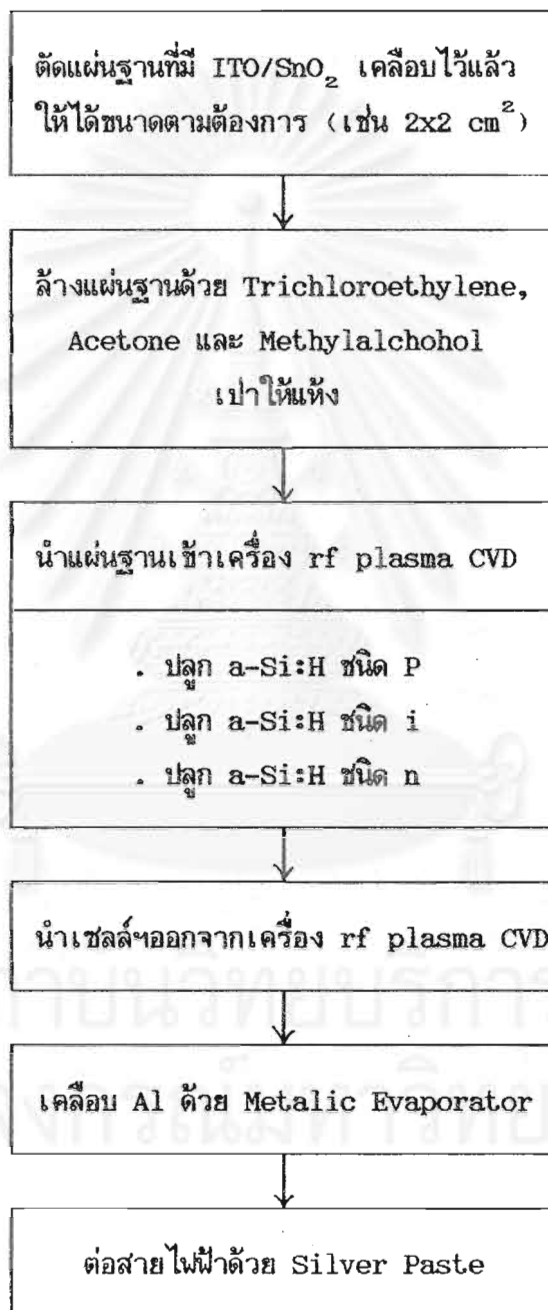
หมายเหตุ ถังก๊าซ B_2H_6 มี $B_2H_6/H_2 = 500$ ppm.

ถังก๊าซ PH_3 มี $PH_3/H_2 = 500$ ppm.

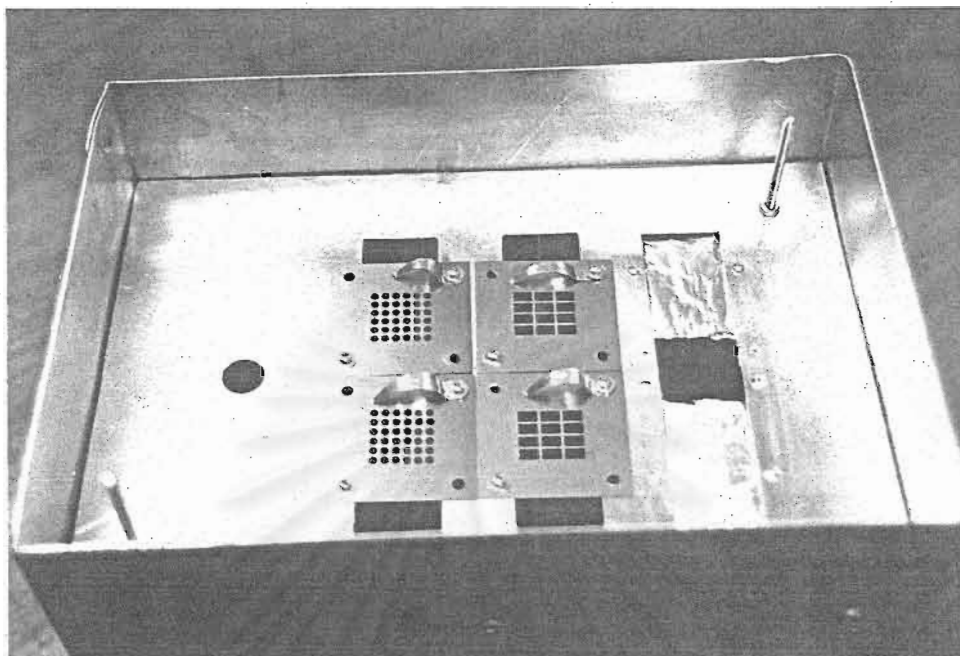
ถังก๊าซ SiH_4 มี $SiH_4/H_2 = 10 \%$

ถังก๊าซ CH_4 มี $CH_4/H_2 = 10 \%$

ขั้นตอนการผลิตเซลล์ฯ อธิบายได้ด้วยแผนภูมิรูปที่ 3.2 รูปที่ 3.3 แสดงรูปถ่ายแผ่น mask ที่ทำจากสแตนเลสสำหรับใช้เคลือบอะลูมิเนียมเป็นขั้วด้านหลังของเซลล์ฯ แต่ละช่องมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 mm ดังนั้นเซลล์ฯ 1 ตัวจะมี พ.ท. 0.03 cm^2 รูปที่ 3.4 แสดงรูปถ่ายเซลล์ฯ ที่ผลิตได้ ซึ่งเป็นเซลล์ฯ ชนิดรอยต่อโฮโม (homojunction)



รูปที่ 3.2 แผนภูมิขั้นตอนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 3.3 ภาพถ่ายแผ่น Mask สแตนเลส สำหรับใช้เคลือบอะลูมิเนียมเป็นชั้น
ด้านหลังเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 3.4 ภาพถ่ายเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตได้ในขั้นตอนต่าง ๆ

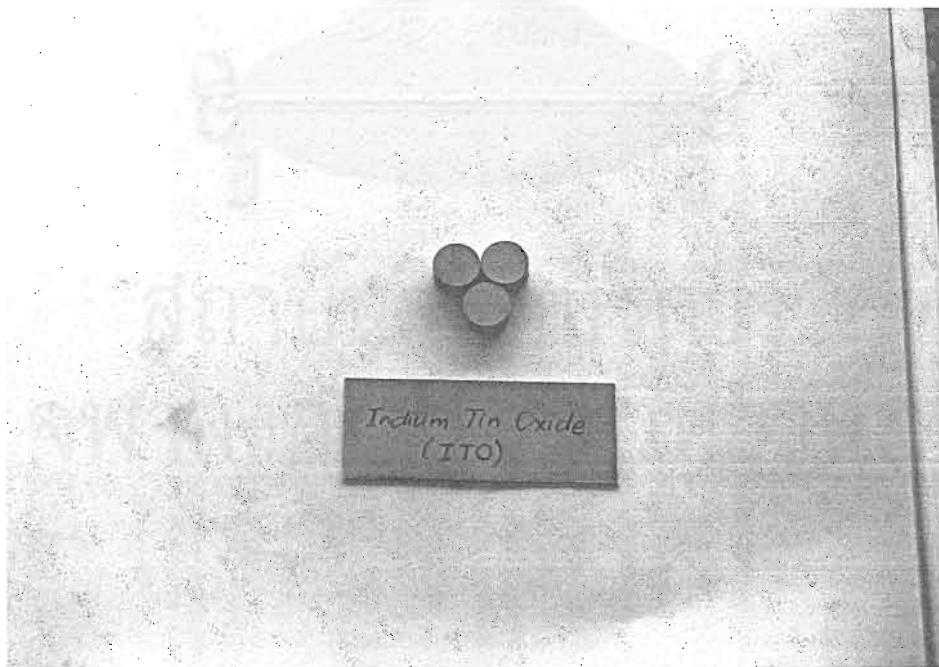
3.2 วิธีการเตรียมและการศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มทึวไฟฟ้าโปร่งใสชนิด ITO

ฟิล์ม ITO (Indium Tin Oxide) มีคุณสมบัตินำไฟฟ้าได้ดี และโปร่งแสงดี ในงานวิจัยนี้จึงได้ใช้ฟิล์ม ITO เป็นทึวไฟฟ้าด้านรับแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัส ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงวิธีการเตรียมฟิล์ม ITO และรายงานผลการศึกษาคงสมบัติทางแสง คุณสมบัติทางโครงสร้างและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์ม ITO ที่ปลูกได้ เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้มีการจัดซื้อครุภัณฑ์ชุดกำเนิดสนามแม่เหล็กสำหรับวัด Hall effect ดังนั้นตอนท้ายหัวข้อนี้จะได้รายงานรายละเอียดเกี่ยวกับการวัด Hall effect ในฟิล์ม ITO ด้วย

3.2.1 วิธีการปลูกฟิล์ม ITO

ทึวโปร่งแสง หรือ ITO (ย่อมาจากคำว่า Indium Tin Oxide) มีคุณสมบัตินำไฟฟ้าได้ดีและยอมให้แสงทะลุผ่านได้ดี จึงใช้งานเป็นทึวนำไฟฟ้าด้านแสงรังเข้าเซลล์แสงอาทิตย์ได้ดี ในหัวข้อย่อยนี้จะกล่าวถึงวิธีการปลูกฟิล์ม ITO ด้วยวิธี Electron Beam (EB)

วัสดุเริ่มต้นของ ITO คือ ผงผสมของ In_2O_3 และ SnO_2 เริ่มแรกนำผงของ Indium Oxide (In_2O_3) มาผสมผงของ SnO_2 ในอัตราส่วน 95:5 wt% ($In_2O_3 : SnO_2 = 95 : 5$ wt%) เมื่อผสมผงทั้งสองเข้ากันดีแล้วจึงนำไปอัดเป็นเม็ด pellet ภาพเม็ด pellet ของ Indium Tin Oxide แสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 เม็ด pellet ของ Indium Tin Oxide (ITO) ที่ใช้ในการวิจัย



รูปที่ 3.6 ภาพระบบ Electron Beam Evaporator สำหรับใช้ในการผลิตฟิล์มบาง
ของ ITO

สภานวทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การปลูกฟิล์มชั้น ITO ใช้ระบบ Electron Beam Evaporator ดังแสดงในรูปที่ 3.6 ซึ่งมีข้อดีคือเป็นกระบวนการที่สะอาด ไม่มีสารเจือปน มีพารามิเตอร์เงื่อนไขในการควบคุม-น้อย และสะดวกในการทำงาน ในการวิจัยนี้ ได้มีการหาอุณหภูมิที่เหมาะสมของแผ่นฐานที่จะทำให้ฟิล์มของชั้น โปร่งแสงมีคุณสมบัติที่ดีที่สุด จึงได้ทำการทดลองเปลี่ยนค่าอุณหภูมิแผ่นฐานค่าต่าง ๆ ดังนี้คือ 50, 100, 150, 200 250 และ 300 ° C ส่วนแผ่นฐานที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย

แผ่นแก้ว 7059 ของบริษัท corning

แผ่นแก้ว non alkaline alumino zincsilicate ของบริษัท ASAHI

แผ่นแก้ว sodalime ของบริษัท ASAHI

แผ่นแก้ว neutral ของบริษัท ASAHI

นำแผ่นฐานต่าง ๆ มาล้างให้สะอาดด้วยวิธี ultrasonic โดยล้างด้วย Tricholoe-ethylene, Actone และ methyl alcohol อย่างละ 15 นาที การที่จะผลิตฟิล์ม ITO ที่มีคุณสมบัติที่ดี จะต้องมียุณหภูมิที่คำนึงถึงในกระบวนการผลิตฟิล์ม เช่น อัตราการเติบโตของฟิล์ม ความดันของก๊าซออกซิเจนในระบบ EB และอุณหภูมิของแผ่นฐาน เป็นต้น

เมื่อติดตั้งแผ่นฐานกระจกที่จะเคลือบ ITO ลงในระบบ EB แล้วเปิด chamber และดูดอากาศภายใน chamber ให้มีค่าความดันประมาณ 10^{-6} torr. ต่อจากนั้นในขณะที่ทำการปลูกฟิล์ม ITO จะมีการปล่อยก๊าซออกซิเจนเข้าใน chamber ให้ความดันบรรยากาศมีค่าประมาณ 5×10^{-4} torr. ดังแสดงในตารางที่ 3.2

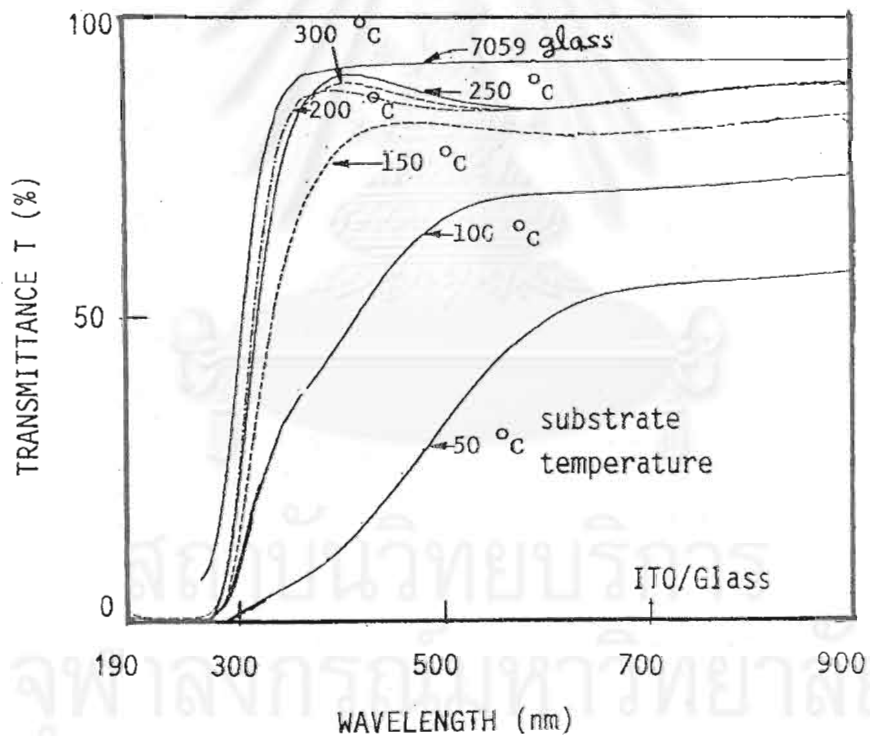
ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขการปลูกฟิล์มชั้น ITO ด้วยระบบ Electron Beam evaporator

Parameter	ข้อมูล
Back pressure	$<7 \times 10^{-6}$ torr.
Oxygen pressure	5×10^{-4} torr.
Substrate temperature	50-300 °C
Growth rate	1-2 Å/sec
Thickness	2000-3000 Å
Rotation speed	5 rpm.

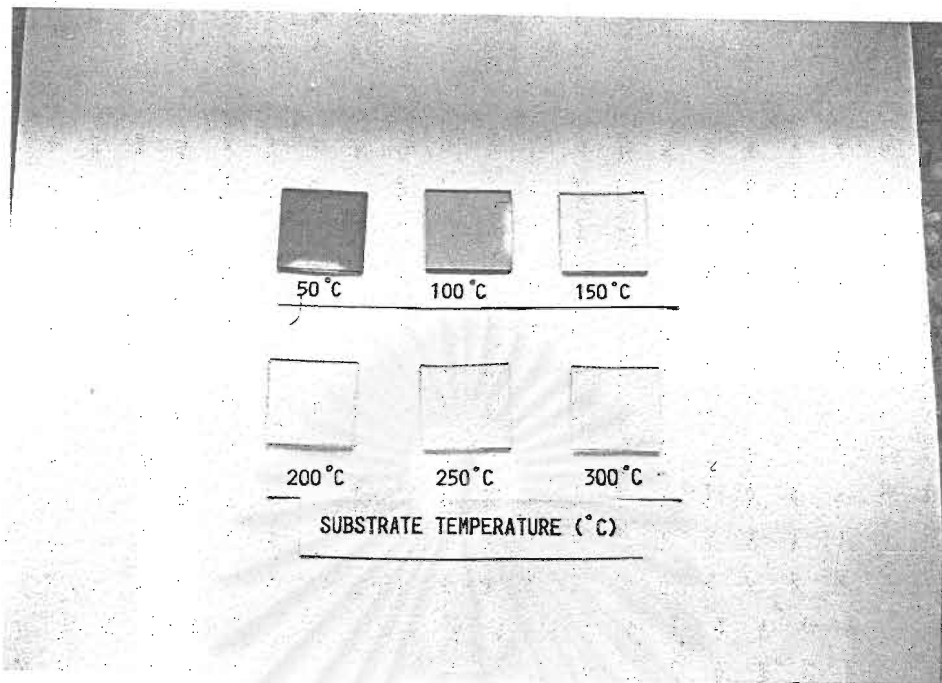
3.2.2 ผลการวัดคุณสมบัติทางแสงของฟิล์ม ITO

หลังจากที่ได้เคลือบฟิล์มบางของ ITO บนแผ่นกระจกแล้ว จึงนำไปวัดคุณสมบัติทางแสง คุณสมบัติทางโครงสร้าง และคุณสมบัติทางไฟฟ้า สำหรับการวัดคุณสมบัติทางแสงนั้นได้มีการวัดความสามารถในการทะลุผ่านของแสง (transmittance) (T%) แสงที่ใช้วัดมีความยาวคลื่นระหว่าง 190-900 nm. วัดด้วยเครื่อง Shimadzu UV 240 ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 3.7 พบว่าที่อุณหภูมิแผ่นฐาน 250 °C จะมีการทะลุผ่านของแสงดีที่สุด และที่อุณหภูมิแผ่นฐานต่ำ ๆ การทะลุผ่านของแสงมีค่าต่ำ เนื่องมาจากฟิล์มมีสีน้ำตาลอ่อน รูปที่ 3.8 แสดงตัวอย่างของฟิล์ม ITO ที่ปลูกได้ที่อุณหภูมิแผ่นฐานต่าง ๆ กัน

สัมประสิทธิ์การทะลุผ่านแสง (T%) ของฟิล์ม ITO ที่ติดย่านผ่านแสงมีค่าประมาณ 80-85% และค่า T% จะเริ่มลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อแสงมีความยาวคลื่นเข้าใกล้ 300 nm



รูปที่ 3.7 ผลการวัดการทะลุผ่านของแสงของฟิล์ม ITO ที่ปลูกที่อุณหภูมิต่าง ๆ



รูปที่ 3.8 รูปตัวอย่างฟิล์ม ITO ปลุกที่อุณหภูมิแผ่นฐานต่าง ๆ กัน

3.2.3 ผลการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์ม ITO

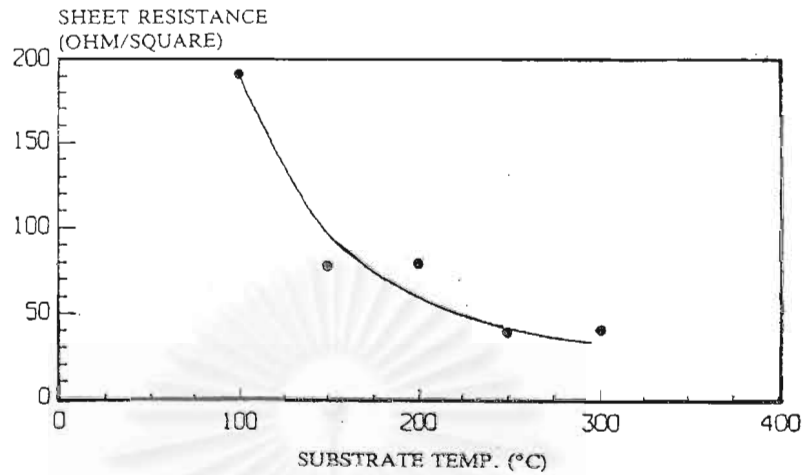
การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของชั้นโปร่งแสง ITO ใช้เครื่อง four point probe ยี่ห้อ Veeco ทำการวัดค่าความต้านทานของฟิล์ม ITO ค่าที่ได้เป็นค่า sheet resistance รูปที่ 3.9 แสดงค่าความต้านทานของฟิล์ม ITO ปลุกที่อุณหภูมิแผ่นฐานต่าง ๆ กัน พบว่า ITO ที่ปลุกที่อุณหภูมิแผ่นฐานต่ำจะมีความต้านทานสูง แต่เมื่ออุณหภูมิแผ่นฐานสูงขึ้นค่าความต้านทานเริ่มมีค่าลดน้อยลง ฟิล์ม ITO ที่ปลุกที่อุณหภูมิแผ่นฐานที่ค่าประมาณ 250 °C จะมีค่าความต้านทานต่ำที่สุด

3.2.4 ผลการวัดคุณสมบัติทางโครงสร้างของฟิล์ม ITO

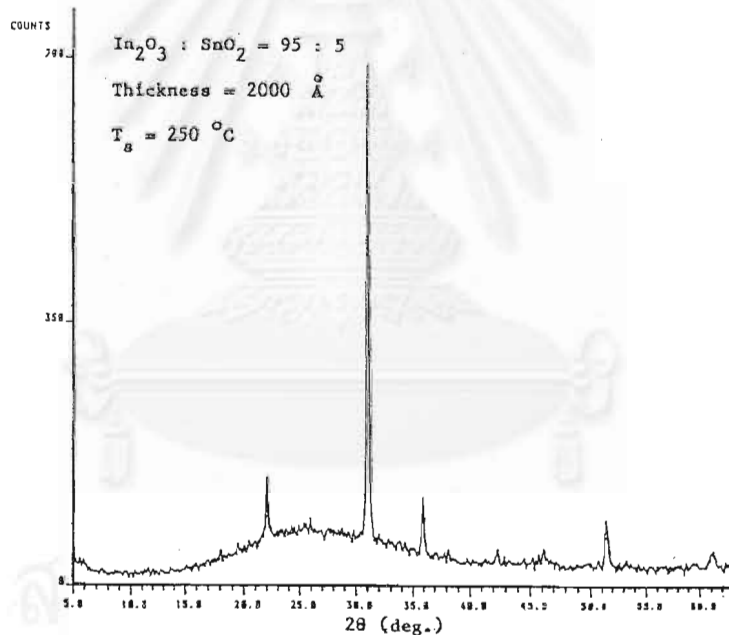
การวัดคุณสมบัติทางโครงสร้างของฟิล์ม ITO ทำโดยการวัด x-ray diffraction เพื่อตรวจดูว่าฟิล์ม ITO มีคุณสมบัติทางโครงสร้างเป็นอย่างไร รูปที่ 3.10 แสดง pattern x-ray diffraction ของฟิล์ม ITO พบว่าฟิล์ม ITO ที่ปลุกได้ในงานวิจัยนี้มีคุณสมบัติทางโครงสร้างเป็นผลึกหลายรูป (polycrystal)

3.2.5 การวัด Hall Effect ในฟิล์ม ITO

ในการทำวิจัยหรือพัฒนาสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ (รวมทั้งโลหะ) อย่างมีประสิทธิภาพ ควรที่จะต้องรู้ค่าคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุที่กำลังใช้งานอยู่ว่าเป็นอย่างไรบ้าง ทางด้านคุณสมบัติทางไฟฟ้านี้ผมพยามิเตอร์พื้นฐานที่สำคัญที่ควรจะต้องรู้ค่าได้แก่ ค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้า



รูปที่ 3.9 ค่าความต้านทานของฟิล์ม ITO ที่อุณหภูมิแผ่นฐานต่าง ๆ



รูปที่ 3.10 x-ray diffraction spectrum ของฟิล์ม ITO

(resistivity : ρ) หรือค่าสภาพนำไฟฟ้า (conductivity : σ) ค่าความคล่องตัว (mobility : μ) และความหนาแน่นของพาหะ (carrier concentration : n) ค่าพารามิเตอร์เหล่านี้มีวิธีวัดได้หลายวิธี ในจำนวนนี้วิธีการวัด Hall effect ซึ่งค้นพบโดย E.H. Hall ในค.ศ. 1879 เป็นวิธีที่นิยมมากที่สุดวิธีหนึ่ง แต่อย่างไรก็ตามในการวัด Hall effect ให้ได้ค่าตอนที่ถูกต้องกับความแม่นยำนั้นยังมีวิธีการและ know-how และข้อควรระวังอีกมากมาย อาทิเช่น การสร้างและขนาดของขั้วไฟฟ้า รูปทรงของชิ้นงาน ฯลฯ เทคนิคของ L.J. Van

der Pauw [2] เป็นที่ยอมรับกันทั่วไปว่าให้ ผลการวิเคราะห์ถูกต้อง เป็นที่น่าพอใจและยังใช้ วัดได้กับชิ้นงานรูปทรงแปลก ๆ ได้ดีอีกด้วย

ล่าสุดคณะผู้วิจัยได้ประสบความสำเร็จในการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน (hydrogenate amorphous silicon : ย่อว่า a-Si:H) ได้ประสิทธิภาพประมาณ 7% มีโครงสร้างคือ แผ่นแก้ว/ชั้นโปร่ง Indium Tin Oxide/อะมอร์ฟัสซิลิคอนชนิด p-i-n/อะลูมิเนียม เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้มีต้นทุนการผลิตราคาถูก จึงกำลังได้รับความสนใจกันอย่างมากในปัจจุบัน ในการที่จะพัฒนาปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นจำเป็นต้องทราบค่าพารามิเตอร์ของคุณสมบัติพื้นฐานต่าง ๆ ของฟิล์มชั้นต่าง ๆ ฟิล์มชั้น ITO มีความสำคัญมากต่อประสิทธิภาพของเซลล์ฯ ในงานวิจัยนี้จึง ได้พัฒนาระบบการวัด Hall effect ขึ้นมาเพื่อใช้วัดค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้า ความคล่องตัวและความหนาแน่นพาหะของฟิล์ม ITO มีการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการวิเคราะห์ผลการทดลองทำให้ได้ผลรวดเร็วและถูกต้องแม่นยำ

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงวิธีการวัด Hall effect ด้วยวิธี Van der Pauw และระบบการวัดที่พัฒนาสร้างขึ้น ตลอดจนผลการวัดและวิเคราะห์ผลการกระทบของกรรมวิธีการผลิตที่มีต่อคุณสมบัติของฟิล์ม ITO

3.2.5.1 ทฤษฎีพื้นฐานของ Hall Effect และเทคนิคของ Van der Pauw

ทฤษฎีพื้นฐานของ Hall effect

เริ่มแรกจะขอกล่าวถึงความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับ Hall effect [13]

ก่อนดังนี้

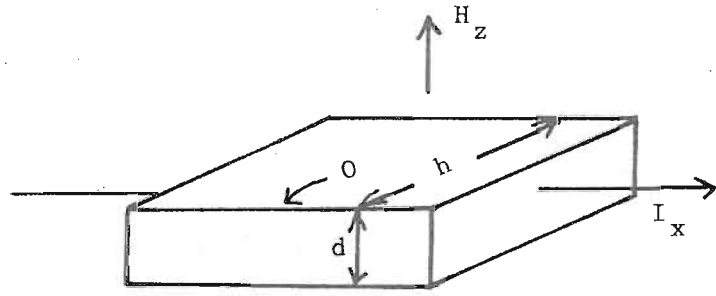
ถ้าชิ้นงานสารกึ่งตัวนำมีรูปทรงเป็นก้อนสี่เหลี่ยมดังแสดงในรูปที่

3.11 (ก) ถ้าฉีดกระแสไฟฟ้า I_x ให้ไหลในแนวแกน X และขณะเดียวกันป้อนสนามแม่เหล็ก H_z ในทิศทางตั้งฉากกับ I_x Hall พบว่าจะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าในแนวแกน y และตั้งชื่อแรงดันไฟฟ้านี้ว่า Hall voltage (V_H) การเกิดแรงดัน V_H นี้เกิดจากการที่พาหะได้รับแรงกระทำชนิด Lorentz จากสนามไฟฟ้าในแกน x และสนามแม่เหล็กในแกน y นั่นเอง

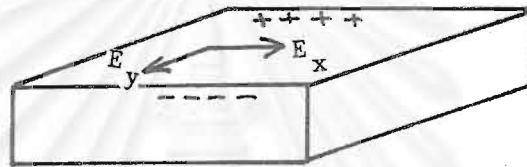
ในรูป (ก) อิเล็กตรอน (ประจุ $-e$) กำลังได้รับแรงจากสนามไฟฟ้า E_x ให้วิ่งไปทิศทาง $-x$ ด้วยความเร็ว v_x ถ้ามีสนามแม่เหล็ก H_z ในทิศทาง z มากจะทำให้ อิเล็กตรอนจะได้รับแรง Lorentz ให้ย้ายเบนไปในทิศทาง $-y$ แรง Lorentz นี้มีค่า

$$-e v_x H_z \quad (1)$$

จากการที่อิเล็กตรอนส่วนใหญ่เคลื่อนไปในทิศทาง $-y$ ทำให้เหลือประจุบวกที่ด้าน $+y$ ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นใหม่ในแกน y (E_y) สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นใหม่นี้จะ



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.11 ลักษณะการเกิด Hall effect ในสารกึ่งตัวนำ (ชนิด n)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ทำให้การไหลของอิเล็กตรอน (μE_y) สมดุลกับการไหลของอิเล็กตรอน ($\mu_H e v_x H_z$) อันเนื่องมาจากแรง Lorentz พอดี ดังนั้นกระแสไฟฟ้าในทิศทาง x จึงยังคงไหลได้ตามปกติ โดยที่ μ นี้คือความคล่องตัวของอิเล็กตรอน drift และ μ_H คือความคล่องตัวที่เกิดขึ้นในปรากฏการณ์ Hall มีค่าแตกต่างจาก μ เล็กน้อย แต่เพื่อความสะดวกในที่นี้ให้ $\mu = \mu_H$

ถ้าให้ชั้นงานมีความหนา d และกว้าง h ในสภาพสมดุลจะไม่มีอิเล็กตรอนไหลในทิศทาง y ดังนั้น

$$(-eV_H)\mu / h = (-eE_y)\mu = (-e v_x H_z)\mu_H \quad (2)$$

เนื่องจากกระแสไฟฟ้า I_x มีค่า

$$I_x = n(-e)v_x h d \quad (3)$$

ดังนั้นจากสมการที่ (2) และ (3) ได้

$$\begin{aligned} V_H &= (\mu_H I_x H_z) / [\mu n(-e)d] \\ &= R_H I_x H_z / d \end{aligned} \quad (4)$$

$$\text{โดยที่ } R_H = \mu_H / [\mu \cdot n(-e)] \text{ เรียกว่า Hall coefficient} \quad (5)$$

นอกจากนี้ $E_y/E_x = \tan \theta$ เนื่องจากโดยปกติ θ มีค่าน้อยมาก ดังนั้นเราจึงได้ค่าใกล้เคียง $E_y/E_x \approx \theta$

ถ้าพาหะในสารกึ่งตัวนำเป็นโฮล ก็คำนวณได้ทำนองเดียวกัน โดยให้ประจุเท่ากับ $+e$ การวัดขั้วบวกของแรงดัน V_H จะทำให้ทราบว่าสารกึ่งตัวนำเป็นชนิด n หรือ p

นอกจากนี้เนื่องจาก สภาพนำไฟฟ้า $\sigma = (\pm e) n \mu$ ดังนั้น

$$\mu_H = R_H = R_H / \rho \quad (6)$$

$$\text{โดยที่ } \rho : \text{สภาพความต้านทานไฟฟ้า} = 1/\sigma \quad (7)$$

จากทฤษฎีพื้นฐานที่กล่าวมานี้ จะเห็นได้ว่าการวัด Hall effect

ทำให้ทราบค่า

- 1) ความหนาแน่นของพาหะ
- 2) สภาพความต้านทานไฟฟ้า
- 3) ความคล่องตัว

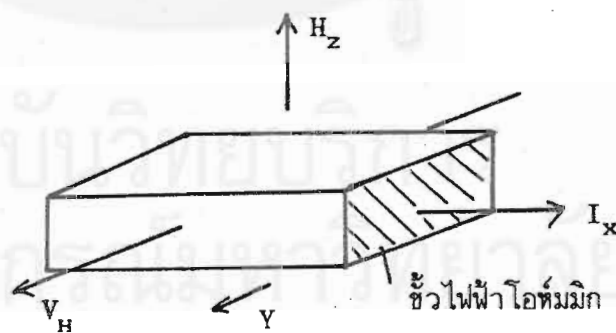
และ

ในทางปฏิบัติหน่วยของพารามิเตอร์ต่าง ๆ มีค่าดังนี้

$$R_H \text{ (cm}^3/\text{C)} = [10^8 V_H \text{ (V)}d \text{ (cm)}] / [I \text{ (A)}H \text{ (gauss)}] \quad (8)$$

$$\mu_H \text{ (cm}^2/\text{V}\cdot\text{s)} = (\text{ohm}^{-1}\text{cm}^{-1})R_H \text{ (cm}^3/\text{C)} \quad (9)$$

$$n \text{ (cm}^{-3}\text{)} = 6.25 \times 10^{18} / R_H \text{ (cm}^3/\text{C)} \quad (10)$$

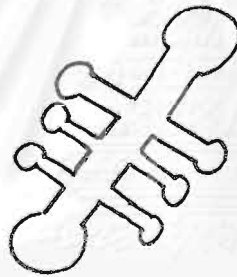


รูปที่ 3.12 ชิ้นงานสารกึ่งตัวนำสำหรับวัด Hall effect

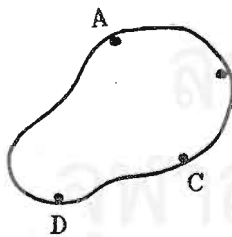
เทคนิคของ Van der Pauw

ปัญหาและอุปสรรค

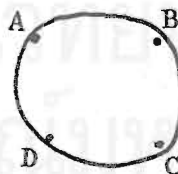
ในการวัด Hall effect โดยพื้นฐานแล้วควรผลิตให้ชิ้นงานมีรูปเป็นก้อนสี่เหลี่ยมดังแสดงในรูปที่ 3.12 ทั้งนี้ขั้วไฟฟ้าสำหรับวัดกระแสและวัดแรงดัน Hall จะต้องเป็นโอห์มมิกและมีขนาดสมมาตรกันอย่างดี แต่ในทางปฏิบัติ การต่อขั้วโอห์มมิกมักทำได้ยาก และการต่อขั้วที่ผนังด้านตัดขวางก็ทำได้ยากเช่นกัน เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาเหล่านี้ ต่อมาจึงได้มีการออกแบบชิ้นงานใหม่รูปดังแสดงในรูปที่ 3.13 (ก) เรียกว่า ทรง bridge ในรูปนี้สามารถต่อขั้วไฟฟ้าครอบคลุมผิวบนและผิวด้านข้างได้ แต่วิธีนี้ก็ยังมีปัญหาสำหรับผลึกบางชนิดซึ่งตัดให้เป็นรูปทรง bridge ได้ยาก (ชิ้นงานมักแตกหักก่อนตัดเสร็จ) ต่อมา L.P. Van der Pauw จึงคิดค้นทฤษฎีการวิเคราะห์ผลของ Hall effect โดยใช้ชิ้นงานรูปทรงอะไรก็ได้ง่าย ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.13 (ข)~(ง)



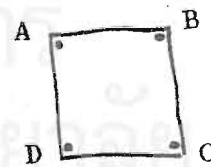
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 3.13 รูปทรงชิ้นงานสำหรับวัด Hall effect

ทฤษฎีของ Van der Pauw

นอกจากทฤษฎีของ Van der Pauw จะสามารถใช้วัดชิ้นงานรูปทรงใด ๆ ก็ได้แล้วยังเหมาะกับการใช้วัดชิ้นงานที่เตรียมโดยการปลูกผลึกฟิล์มบางแบบ epitaxy บาง ๆ ลงบนแผ่นฐานอีกด้วย ถ้าชั้นฟิล์มบางเป็นชนิด n ควรใช้แผ่นฐานชนิด semi-insulating หรือชนิด p ในวิธีของ Van der Pauw มีสิ่งที่ต้องปฏิบัติดังนี้

1. ขั้วไฟฟ้าต้องเป็นโอห์มมิกกับชิ้นงาน
2. ติดขั้วไฟฟ้าที่ผิวรอบวงนอกของชิ้นงาน 4 จุด และแต่ละขั้วควรมีพื้นที่เล็กที่สุด (เล็กกว่าชิ้นงานมาก ๆ)
3. ชิ้นงานมีความหนาสม่ำเสมอและไม่มีรูพรุน

เทคนิคของ Van der Pauw ปฏิบัติดังนี้

1. เริ่มแรกในสภาวะที่ยังไม่ป้อนสนามแม่เหล็ก ให้วัดกระแสไฟฟ้า I_{AB} ไหลจากขั้ว A ไป B และวัดแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้ว C และ D ให้ค่า V_{CD} ให้นิยามของความต้านทาน $R_{AB,CD}$ ดังนี้

$$R_{AB,CD} = V_{CD} / I_{AB} \quad (11)$$

- ต่อจากนั้น ให้วัดกระแสไฟฟ้า I_{BC} จากขั้ว B ไปขั้ว C และวัดแรงดันไฟฟ้าระหว่าง D และ A ให้ค่า V_{DA} ให้นิยามของความต้านทาน $R_{BC,DA}$ ดังนี้

$$R_{BC,DA} = V_{DA} / I_{BC} \quad (12)$$

2. คำนวณค่าสภาพความต้านทาน (resistivity) ρ ได้จากสูตร

$$\rho = [\pi d(\text{cm}) * (R_{AB,CD} + R_{BC,DA}) * f(R_{AB,CD} / R_{BC,DA})] / [2 \ln 2] \quad (13)$$

โดยที่ d คือความหนาของชั้นฟิล์มบาง epitaxy สำหรับ f คือตัวเลขที่ใช้คูณเพื่อแก้ไขความไม่สมมาตรหรือสม่ำเสมอของชิ้นงาน f เป็นฟังก์ชันของ $R_{AB,CD}$ และ $R_{BC,DA}$ ตามสมการดังนี้

$$\begin{aligned} & [R_{AB,CD} - R_{BC,DA}] / [R_{AB,CD} + R_{BC,DA}] \\ & = f * \text{arccosh}[\exp(\ln 2 / f) / 2] / \ln 2 \end{aligned} \quad (14)$$

การคำนวณแบบ numerical ด้วยคอมพิวเตอร์จะทำให้ทราบค่า f ได้ ตัวอย่างถ้า $R_{AB,CD} = R_{DC,DA}$ จะได้ $f = 1$ ถ้า $R_{AB,CD}/R_{BC,DA} = 2.5$ จะได้ $f = 0.9329$

3. ต่อไปป้อนสนามแม่เหล็ก H ในทิศทางตั้งฉากกับผิวชิ้นงาน วัดกระแสไฟฟ้า I_{AC} จากขั้ว A ไป C และวัดแรงดัน Hall V_{BD} และคำนวณ Hall coefficient R_H ได้ดังนี้

$$R_H = [V_{BD}(H) - V_{BD}(0)]d(\text{cm}) / I_{AC} H (\text{gauss}) \quad (15)$$

โดยที่ $V_{BD}(0)$ คือแรงดันตอนไม่มีสนามแม่เหล็ก

หมายเหตุ ในกรณีที่ตำแหน่งขั้วทั้ง 4 ไม่สมมาตรเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขอให้ดูหัวข้อที่

3.2.5.5

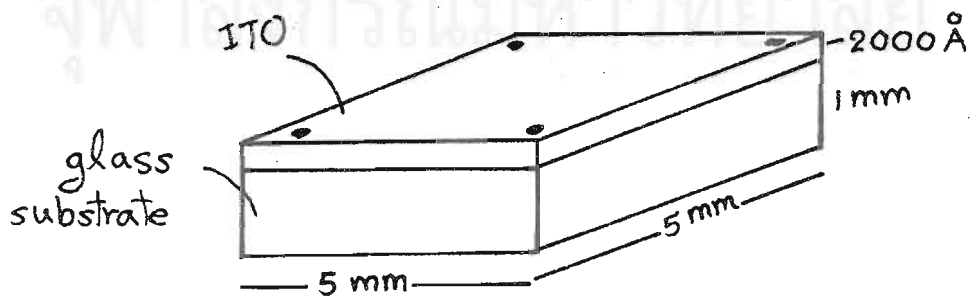
4. คำนวณค่าความคล่องตัว μ และความหนาแน่นพาหะ n ได้ดังนี้

$$\mu = R_H / \rho \quad (\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}) \quad (16)$$

$$n = 6.25 \times 10^{18} (\text{cm}^{-3}) \quad (17)$$

3.2.5.2 การเตรียมชิ้นงานสำหรับวัด Hall Effect

ชิ้นงานที่จะใช้วัด Hall effect ในงานวิจัยนี้มีลักษณะเป็นฟิล์มบาง ชั้น ITO ปลูกกับบนแผ่นฐานกระจกด้วยวิธี EB ความหนาของชั้น ITO มีค่าประมาณ 2000 อังสตรอม ตัดชิ้นงานด้วย scribe ให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยประมาณ ขาวด้านละประมาณ 5 mm ที่ผิวด้านบนทึบทั้ง 4 ด้าน บัดกรีโลหะ Indium ให้ติดด้วยหัวแร้งไฟฟ้าเป็นจุดเล็ก ๆ ไม่เกิน 1 mm^2 ระวังอย่าให้ In ไหลไปติดขอบด้านข้าง ต่อจากนั้นนำไป anneal ในสภาพบรรยากาศของก๊าซ Ar ที่อุณหภูมิประมาณ 200°C เป็นเวลาประมาณ 10 นาที เพื่อให้ In ประสานเป็นโอห์มมิกที่ดีกับ ITO รูปที่ 3.14 แสดงภาพโครงสร้างของชิ้นงาน



รูปที่ 3.14 โครงสร้างชิ้นงานฟิล์ม ITO/แผ่นกระจกสำหรับวัด Hall effect

3.2.5.3 โครงสร้างของระบบวัด Hall Effect

โครงสร้างของระบบวัด Hall effect ที่สร้างขึ้นแสดงในรูปแบบที่ 3.15 และ 3.16 ประกอบด้วยส่วนสำคัญดังนี้

1. ชุดกำเนิดสนามแม่เหล็ก (magnetic coil) สามารถควบคุมความเข้มของสนามแม่เหล็กด้วย DC current ปรับได้ 0-3000 gauss มีจานใส่ชิ้นงานและเข็ม (probe) ที่ปรับตำแหน่งได้อิสระ 4 เข็มสำหรับทดลองชนั่วไฟฟ้าที่ชิ้นงาน
2. กล้อง Controller ที่สร้างขึ้นเอง ภายในมีหน่วย constant current สูงสุด 1 mA มีปุ่มสวิตช์ควบคุมการฉีดกระแสและวัดแรงดันไปสู่อุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ บนชิ้นงาน
3. DC power supply 2 ตัว ตัวหนึ่งจ่าย 9 V ให้กล้อง Controller และอีกตัวจ่าย 0~40 V (0-7 A) ให้ magnetic coil
4. Pico Ammeter ใช้วัด constant current (KEITHLEY 485) ต่อ GP-IB ได้
5. Microvoltmeter (Hameg HM 8112-2) ต่อ GP-IB ได้

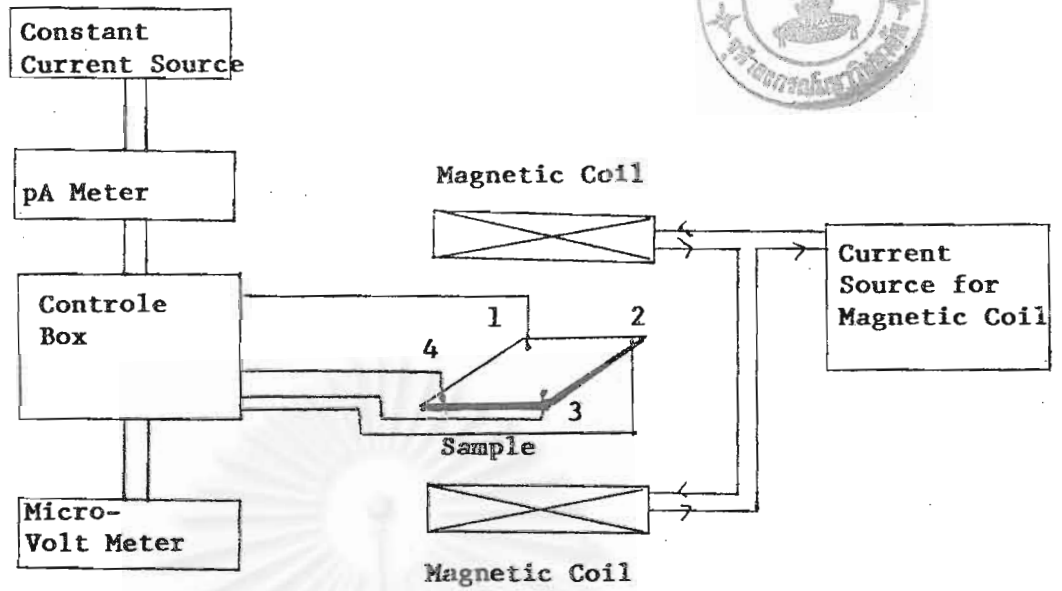
รายละเอียดของส่วนที่ 1 และ 2 มีดังนี้

1. ชุดกำเนิดสนามแม่เหล็ก

ชุดกำเนิดสนามแม่เหล็กมี magnetic coil เป็นตัวกำเนิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยการป้อนกระแสไฟฟ้าตรงเข้าสู่ขดลวด รูปที่ 3.17 แสดงลักษณะโครงสร้างของชุดนี้ ขดลวดไฟฟ้าเป็นชนิด Weiss-type ฝังอยู่ในแกนอน 2 ขด จึงทำให้สนามแม่เหล็กมีทิศทางในแนวตั้ง ชุดกำเนิดสนามแม่เหล็กนี้บรรจุอยู่ในกล่องโลหะเป็นการ shield ตัดการรบกวนจากภายนอก ที่ผนังของกล่อง shield มี connectors สำหรับต่อสัญญาณไฟฟ้าต่างๆ ไปสู่อุปกรณ์ไฟฟ้าภายนอก ระหว่างขดลวดไฟฟ้ามี manipulator ลักษณะเป็นแท่งติดลูกล้อเลื่อนเข้าออกได้สะดวกและมีงานทำด้วย teflon สำหรับวางชิ้นงานที่จะวัด ที่ขอบของ manipulator มี probe เข็ม 4 ตัว วางอยู่สามารถปรับตำแหน่ง x-y-z ให้ปลายเข็มไปแตะชิ้นไฟฟ้าได้ ในตำแหน่งที่ต้องการและแม่นยำ เข็มทำจากโลหะทั้งสี่เตมมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 25 ไมครอน

ขดลวดไฟฟ้าสามารถกำเนิดสนามแม่เหล็กได้ระดับ 0-3,000 gauss บริเวณที่สนามแม่เหล็กมีความสม่ำเสมอตลอดอยู่ในพื้นที่เส้นผ่าศูนย์กลาง 14 mm ที่บริเวณศูนย์กลางของขดลวดติดตั้งแสดงในรูปแบบที่ 3.18 gap ระหว่างขดลวดห่างกัน 27 mm ใช้อากาศเป็นตัวระบายความร้อน ตารางที่ 3.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน, กระแสไฟฟ้าและความเข้มของสนามแม่เหล็ก (gauss) ของชุดนี้

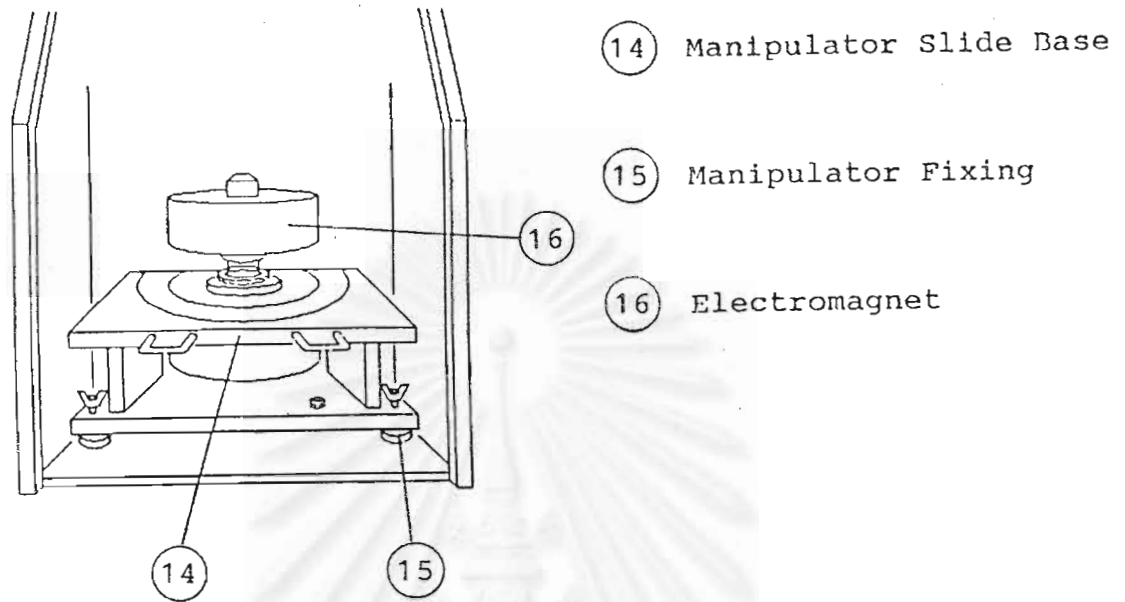
อนึ่งในงาน teflon นี้สามารถเติมไนโตรเจนเหลวได้ ดังนั้นระบบนี้จึงวัด Hall effect ได้ทันทีที่อุณหภูมิห้องและ 77 K



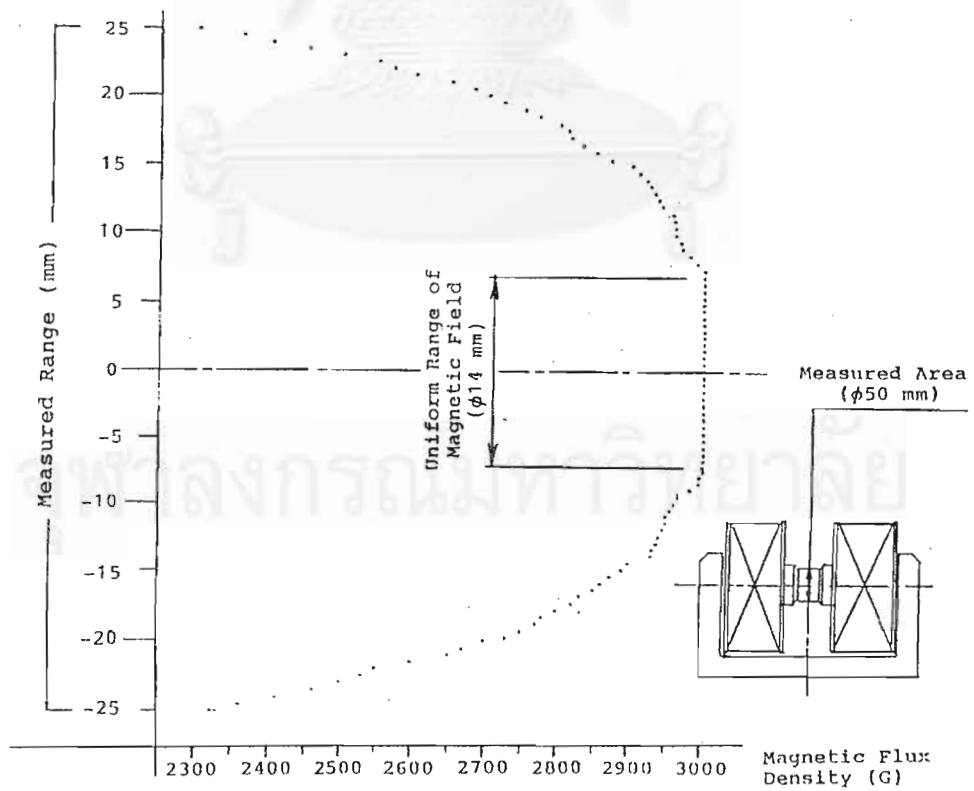
รูปที่ 3.15 โครงสร้างของระบบวัด Hall effect



รูปที่ 3.16 ภาพถ่ายระบบวัด Hall effect



รูปที่ 3.17 โครงสร้างของชุดกำเนิดสนามแม่เหล็กสำหรับวัด Hall effect

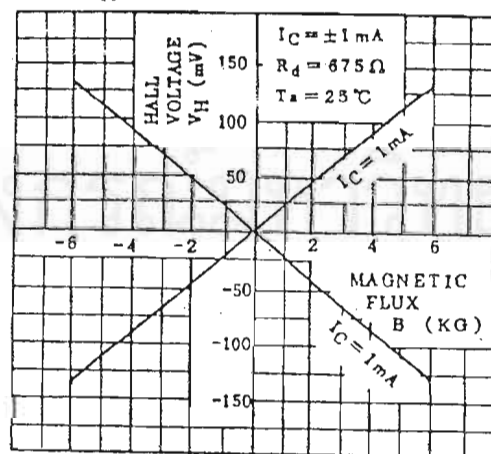


รูปที่ 3.18 Profile ของความเข้มของสนามแม่เหล็กของเครื่องมือที่ใช้งาน

ตารางที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าที่ป้อน ให้ขดลวด และความเข้มของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น

Magnetic Flux Density (G)	Exciter Voltage (V)	Exciter Current (A)
3,000	32.8	2.3
2,750	28.0	2.1
2,500	25.0	1.8
2,250	22.5	1.6
2,000	19.6	1.4
1,750	17.0	1.3
1,500	14.5	1.1
1,250	12.0	0.9
1,000	9.2	0.7
750	6.9	0.6
500	4.2	0.3
250	1.5	0.2

$V_H - B$ CHARACTERISTICS



รูปที่ 3.19 ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กและแรงดัน Hall ที่เกิดขึ้นในชิ้นงานอ้างอิงมาตรฐาน เมื่อฉีดกระแสไฟฟ้า $I_x = 1 mA$

ในระบบขดลวดไฟฟ้านี้ ได้ติดตั้งชิ้นงานมาตรฐานซึ่งเรียกว่า Hall sensor ไว้ในตัวแล้ว ดังนั้นการจะวัดว่าขดลวดไฟฟ้ากำเนิดสนามแม่เหล็กเท่าไร ก็ดูได้จากแรงดัน Hall (V_H) เอาท์พุทของ Hall sensor ตัวนี้ รูปที่ 3.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็ก (gauss) และแรงดัน Hall โดยที่ฉีดกระแสไฟฟ้าไว้ 1 mA

2. กล้อง Controller

เพื่อให้การวัด Hall effect ทำได้สะดวกรวดเร็ว จึงได้สร้างวงจรกำเนิด constant current และสวิตช์สำหรับควบคุมปรับทิศทางการฉีดกระแสไฟฟ้าเข้าชิ้นงานและสวิตช์สำหรับกำหนดตำแหน่งการวัดแรงดัน Hall ให้ทั้งหมดบรรจุอยู่ในกล่องเดียวกัน และตั้งชื่อให้ว่ากล่อง controller หลังจากต่อเชื่อมอุปกรณ์ทั้งหมดเข้าด้วยกันดังแสดงในรูปที่ 3.16 แล้ว จะสามารถใช้กล่อง controller นี้ทำงานได้ดังนี้ (ดูรูปที่ 3.20 ซึ่งแสดงหน้าปัทม์ของกล่อง)

สวิตช์ S_1 : ใช้ on/off ตัวกล่อง controller

S_2 : ใช้กำหนดทิศทางการฉีดกระแสไฟฟ้า ใช้คู่กับ S_5 เช่น ถ้า S_5 อยู่ที่เลข 1 ถ้ากด S_2 ไปที่ I_+ หมายความว่าฉีดกระแสไฟฟ้าจากขั้ว 1 ไปขั้ว 2 แต่ถ้ากด S_2 ไปที่ I_- หมายความว่าฉีดกระแสไฟฟ้าจากขั้ว 2 ไปขั้ว 1

S_3 : ถ้ากดไปที่ Calibrate จะเป็นการวัด Hall sensor เพื่อใช้กำหนดสนามแม่เหล็ก
ถ้ากดไปที่ measure จะเป็นการวัดชิ้นงาน

S_4 : ตำแหน่งต่าง ๆ จะได้ค่า constant current ค่าต่าง ๆ

S_5 : ใช้กำหนดตำแหน่งที่จะฉีดกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ขั้วไฟฟ้าที่ชิ้นงาน และกำหนดขั้วไฟฟ้าที่จะวัดแรงดัน

ตารางที่ 3.4 ความหมายของตำแหน่งของสวิทช์ S_2 และ S_5

กรณีวัด ρ	ตำแหน่งของ S_5	ตำแหน่งของ $S_2 : I_+$	วัดแรงดัน V_H
$B = 0$	1	ฉีดกระแสจากขั้ว 1 \rightarrow 2	จากขั้ว 3 \rightarrow 4
	2	ฉีดกระแสจากขั้ว 2 \rightarrow 3	จากขั้ว 4 \rightarrow 1
	3	ฉีดกระแสจากขั้ว 3 \rightarrow 4	จากขั้ว 1 \rightarrow 2
	4	ฉีดกระแสจากขั้ว 4 \rightarrow 1	จากขั้ว 2 \rightarrow 3
กรณีวัด μ $B \neq 0$	5	ฉีดกระแสจากขั้ว 1 \rightarrow 3	จากขั้ว 4 \rightarrow 2
	6	ฉีดกระแสจากขั้ว 2 \rightarrow 4	จากขั้ว 3 \rightarrow 1

ถ้ากด $S_2 : I_-$ ลูกศรจะกลับทิศกับตาราง



รูปที่ 3.20 หน้าปัทม์กล่อง Controller สำหรับวัด Hall effect

3.2.5.4 วิธีการวัด Hall Effect

เมื่อเตรียมชิ้นงานเสร็จแล้วตั้งได้กล่าวในหัวข้อที่ 3.2.5.2 ต่อจากนั้นนำชิ้นงานมาวางบนจาน teflon ในระบบกำเนิดสนามแม่เหล็ก กด probe ลงบนขั้วไฟฟ้า ปิดฝากล่อง shield และดำเนินการวัดดังนี้

1. การวัดค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้า (ρ)

ในกรณีนี้ไม่ต้องกำเนิดสนามแม่เหล็ก ในการวัดจะฉีดกระแสไฟฟ้า เข้าสู่ขั้วไฟฟ้าด้านเดียวกัน และวัดแรงดันที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าด้านตรงข้าม เพื่อให้เข้าใจง่ายให้กรอกข้อมูลลงในตารางที่ 3.5

สมมติให้กระแสฉีด $I = 1 \text{ mA}$ (กด S_4 ไปที่หมายเลข 6)

ตารางที่ 3.5 การวัดค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้า

		$S_2 : I_+$	อ่านแรงดัน (V)	$S_2 : I_-$	อ่านแรงดัน (V)
S_5	1.	1 \rightarrow 2		2 \rightarrow 1	
	2.	2 \rightarrow 3		3 \rightarrow 2	
	3.	3 \rightarrow 4		4 \rightarrow 3	
	4.	4 \rightarrow 1		1 \rightarrow 4	

2. การวัดค่าความคล่องตัวและความหนาแน่นพาหะ

ในกรณีนี้ต้อง on/off สนามแม่เหล็กตามตารางที่ 3.6 สมมติตั้งให้สนามแม่เหล็กมีค่า $2,800 \text{ gauss}$ ต่อจากนั้นนำข้อมูลที่ได้อ่านค่า โดยใช้ออมมิเตอร์ตั้งจะได้กล่าวในหัวข้อที่ 3.2.5.5

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.6 การวัดค่าความคล่องตัวและความหนาแน่นของพาหะ

		อ่านค่า V_H (ที่ 0 gauss)	อ่านค่า V_H (ที่ +2800 gauss)	อ่านค่า V_H (ที่ -2800 gauss)
S_{σ}	5	$S_2 : I_+$ 1 → 3		
	5	$S_2 : I_-$ 3 → 1		
	6	$S_2 : I_+$ 3 → 4		
	6	$S_2 : I_-$ 4 → 2		

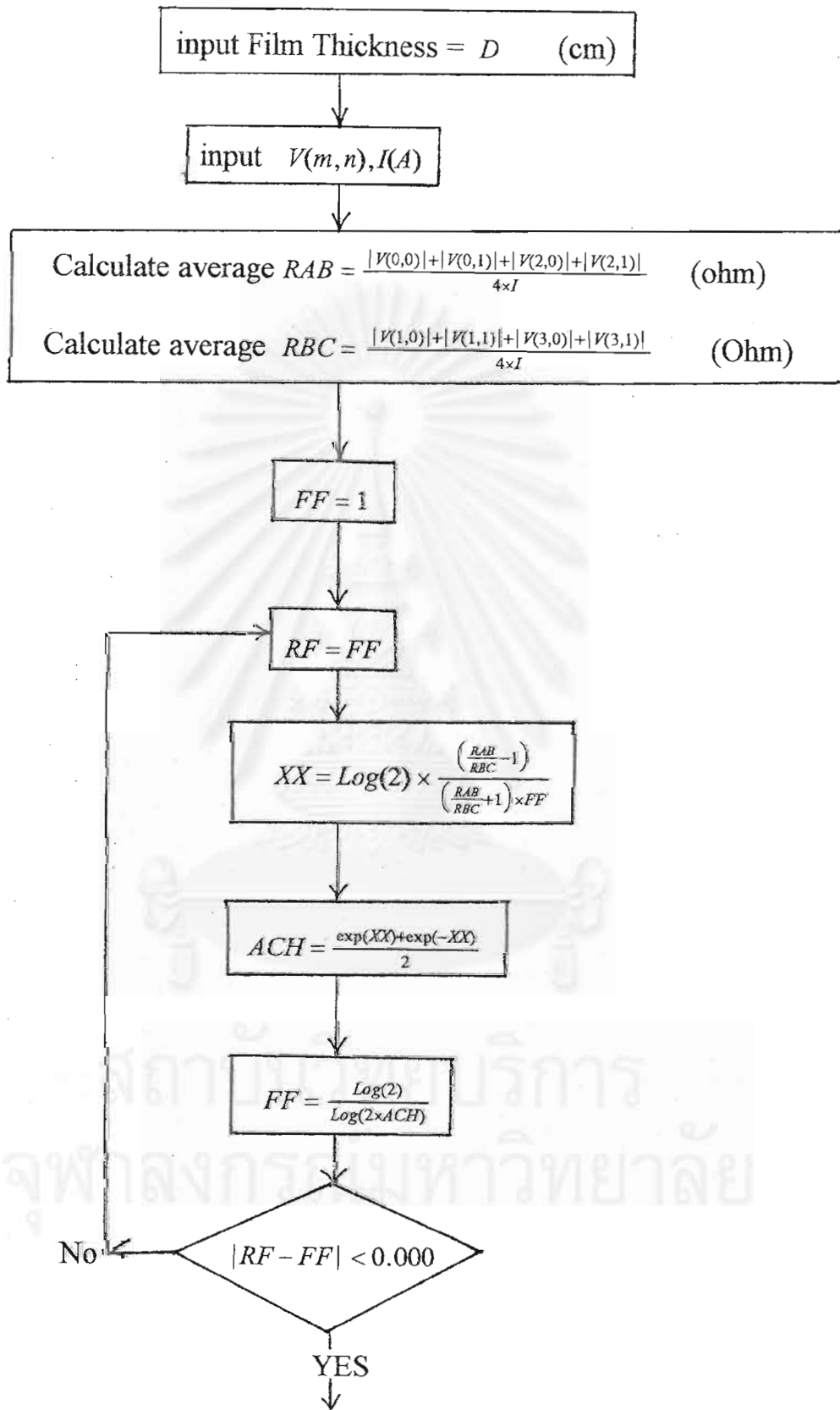
3.2.5.5 การพัฒนาโปรแกรมซอฟต์แวร์วิเคราะห์ผลโดยคำนวณแบบ Van der Pauw

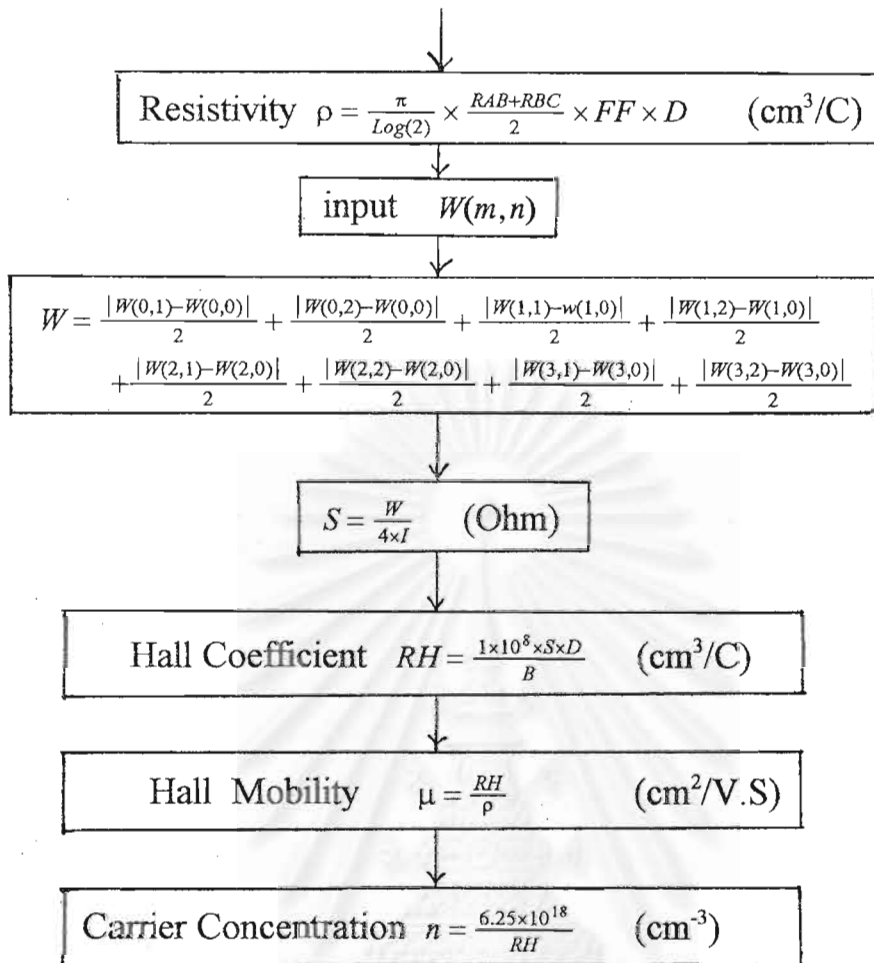
เหตุผลสำคัญที่ต้องใช้คอมพิวเตอร์ช่วยคำนวณในงานวิจัยนี้คือ

1. ในการคำนวณค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้า (ρ) ต้องหาค่าเฉลี่ยแรงดันที่เกิดจากการฉีดกระแสไฟฟ้าจากขั้วหนึ่ง ๆ ไปสู่อีกขั้วหนึ่ง ๆ จะกำหนดผลการวัดแรงดัน $V(m,n)$ หน่วย (v) ดังนี้

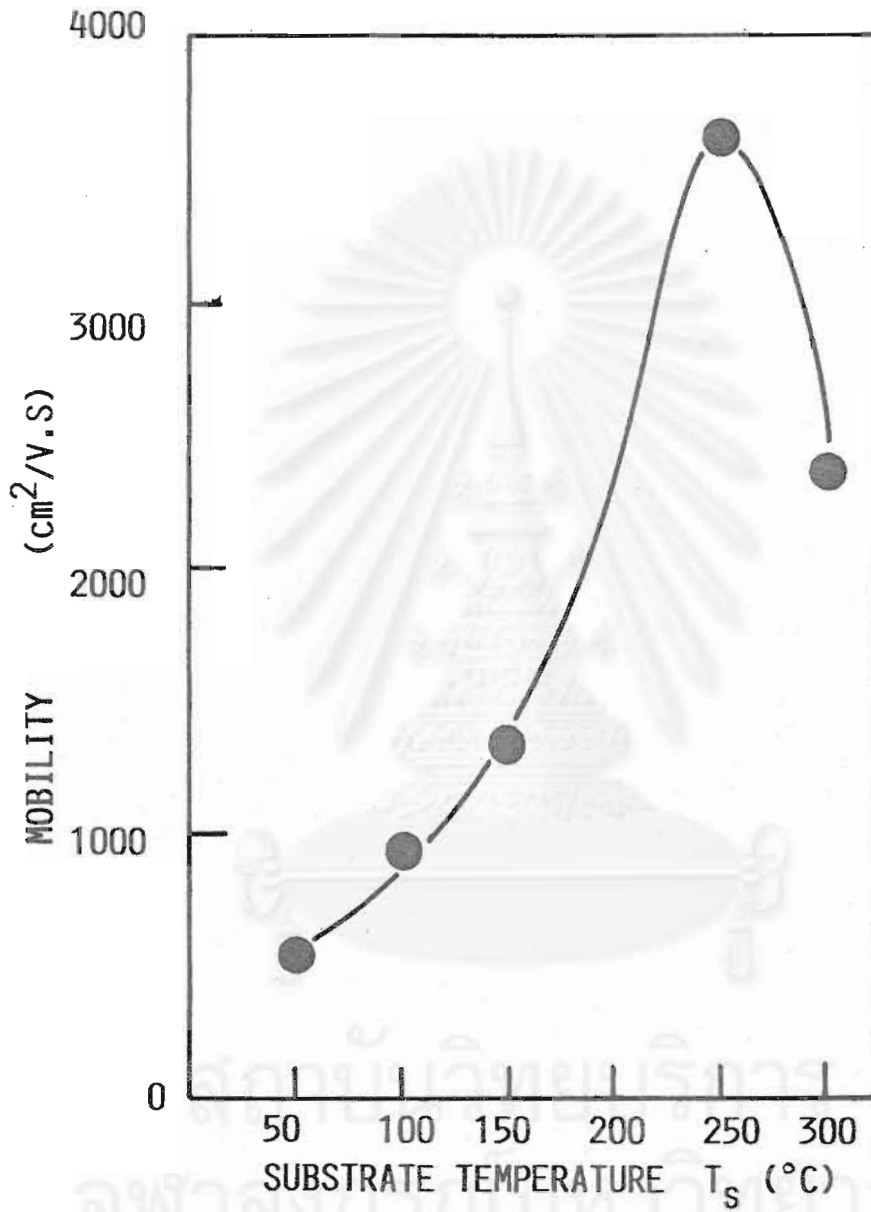
ฉีดกระแสไฟฟ้าขั้ว	วัดแรงดันขั้ว	$V(m,n)$	ฉีดกระแสไฟฟ้าขั้ว	วัดแรงดันขั้ว	$V(m,n)$
1 → 2	3 → 4	$V(0,0)$	2 → 1	3 → 4	$-V(0,1)$
2 → 3	4 → 1	$V(1,0)$	3 → 2	4 → 1	$-V(1,1)$
3 → 4	1 → 2	$V(2,0)$	4 → 3	1 → 2	$-V(2,1)$
4 → 1	2 → 3	$V(3,0)$	1 → 4	2 → 3	$-V(3,1)$

2. คำนวณค่า f-factor ด้วยวิธี numerical ตามสมการที่ (14) และคำนวณค่าสภาพความต้านทานตามสมการที่ (13) ซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นนี้ทำงานตาม Flow Chart ในรูปที่ 3.21

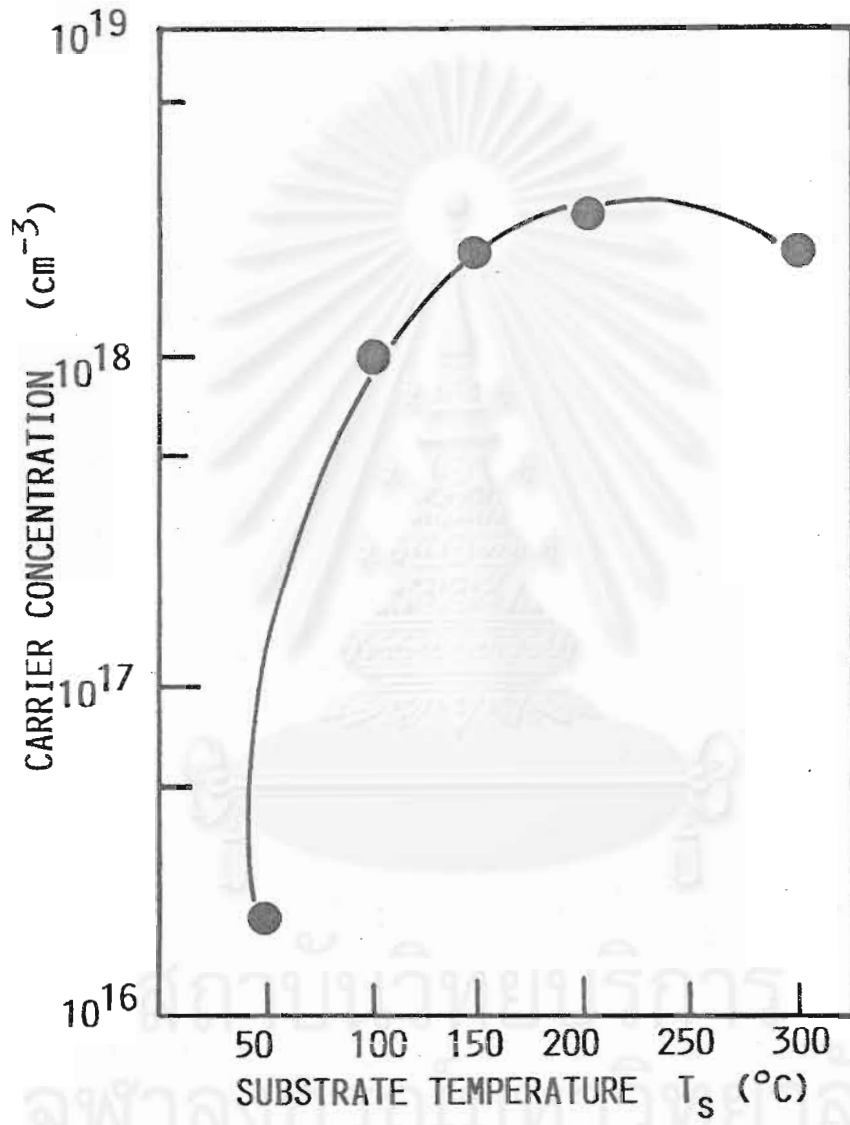




รูปที่ 3.21 Flow chart การวัดคำนวณผลการวัด Hall effect



รูปที่ 3.22 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างความคล่องตัวของพาหะใน ITO และอุณหภูมิของแผ่นฐาน



รูปที่ 3.22 (ข) ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของพาหะอิสระใน ITO และอุณหภูมิของแผ่นฐาน

3. ในการคำนวณค่าความคล่องตัวและความหนาแน่นพาหะ ต้องหาค่าเฉลี่ยแรงดัน Hall จะกำหนดผลการวัดแรงดัน Hall $W(m,n)$ (หน่วย V) ดังนี้

ชนิดกระแสไฟฟ้า	สนามแม่เหล็ก $H = 0$	$+H$ (gauss)	$-H$ (gauss)
1 → 3	$W(0,0)$	$W(0,1)$	$W(0,2)$
3 → 1	$W(1,0)$	$W(1,1)$	$W(1,2)$
2 → 4	$W(2,0)$	$W(2,1)$	$W(2,2)$
4 → 2	$W(3,0)$	$W(3,1)$	$W(3,2)$

3.2.5.6 ผลการวัด Hall Effect ในฟิล์ม ITO

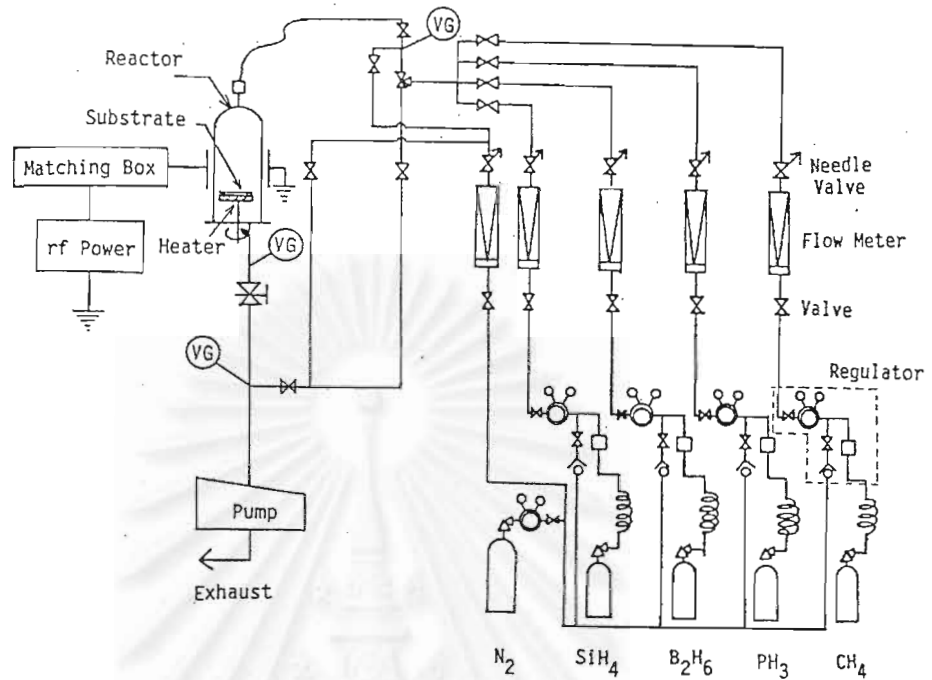
รูปที่ 3.22 (ก) และ (ข) แสดงข้อมูลผลการวัด Hall effect ใน ITO ที่ปลูกในงานวิจัย จากรูปที่ 3.22 (ก) พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของแผ่นฐานให้สูงขึ้นจาก 50°C ถึง 250°C จะทำให้ความคล่องตัวของพาหะอิเล็กตรอนอิสระ (μ) มีค่าสูงขึ้น และเมื่ออุณหภูมิแผ่นฐานสูงกว่า 250°C จะทำให้ μ เริ่มลดลง ค่า μ สูงสุดที่วัดได้คือประมาณ $3600 \text{ (cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec)}$

รูปที่ 3.22 (ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของพาหะอิเล็กตรอนอิสระ (n) และอุณหภูมิแผ่นฐาน จากรูปนี้พบว่า n มีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิแผ่นฐานประมาณ $200-250^{\circ}\text{C}$

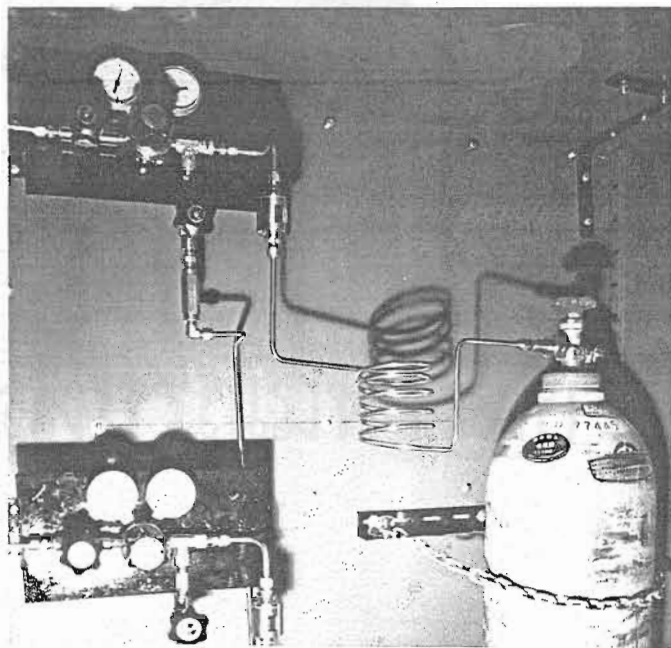
โดยสรุปแล้วเมื่อประมวลผลการทดลองหาเงื่อนไขการผลิตฟิล์มบาง ITO ที่ดีที่สุดจากรูปที่ 3.7, 3.8, 3.9 และ 3.22 พบว่าอุณหภูมิของแผ่นฐานที่ดีที่สุดในระบบ EB สำหรับปลูกฟิล์ม ITO คือมีค่าประมาณ $200-250^{\circ}\text{C}$

3.3 วิธีการปลูกฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอน

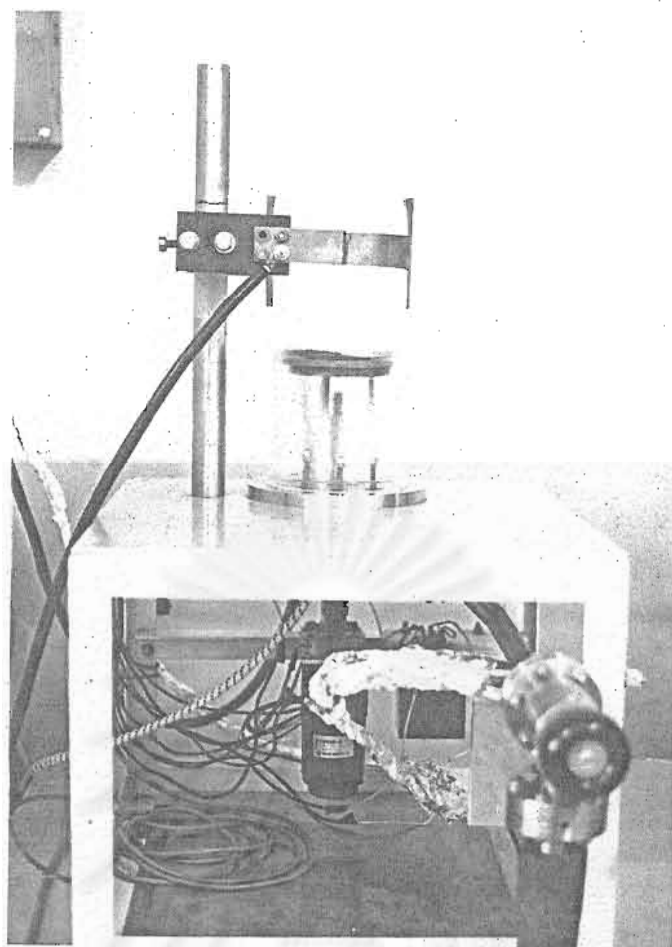
ฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอนสามารถผลิตได้หลายวิธี ทั้งจากวัตถุดิบที่เป็นของแข็งและก๊าซ ในอดีตอะมอร์ฟัสซิลิคอนเคยถูกผลิตด้วยวิธี Thermal Evaporation และ Sputtering จากวัตถุดิบของแข็ง แต่ในปัจจุบันวิธี Glow Discharge (แยกสลายด้วยประจุเรืองแสง) ซึ่งเป็นวิธี Plasma Chemical Vapour Deposition ชนิดหนึ่ง เป็นวิธีที่ใช้กันแพร่หลายมากที่สุด เพราะสามารถผลิตอะมอร์ฟัสซิลิคอนจากวัตถุดิบที่เป็นก๊าซ ให้มีคุณสมบัติทางไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์ดี จนสามารถนำไปประยุกต์เป็นสิ่งประดิษฐ์ต่าง ๆ ได้ เช่น เซลล์แสงอาทิตย์, ทรานซิสเตอร์ ฯลฯ ในงานวิจัยนี้ได้มีการติดตั้งระบบ Glow Discharge ได้สำเร็จ ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงวิธีการผลิต a-Si:H ด้วยวิธี Glow Discharge



รูปที่ 3.23 แผนผังระบบ glow discharge plasma CVD สำหรับปลูก a-Si:H



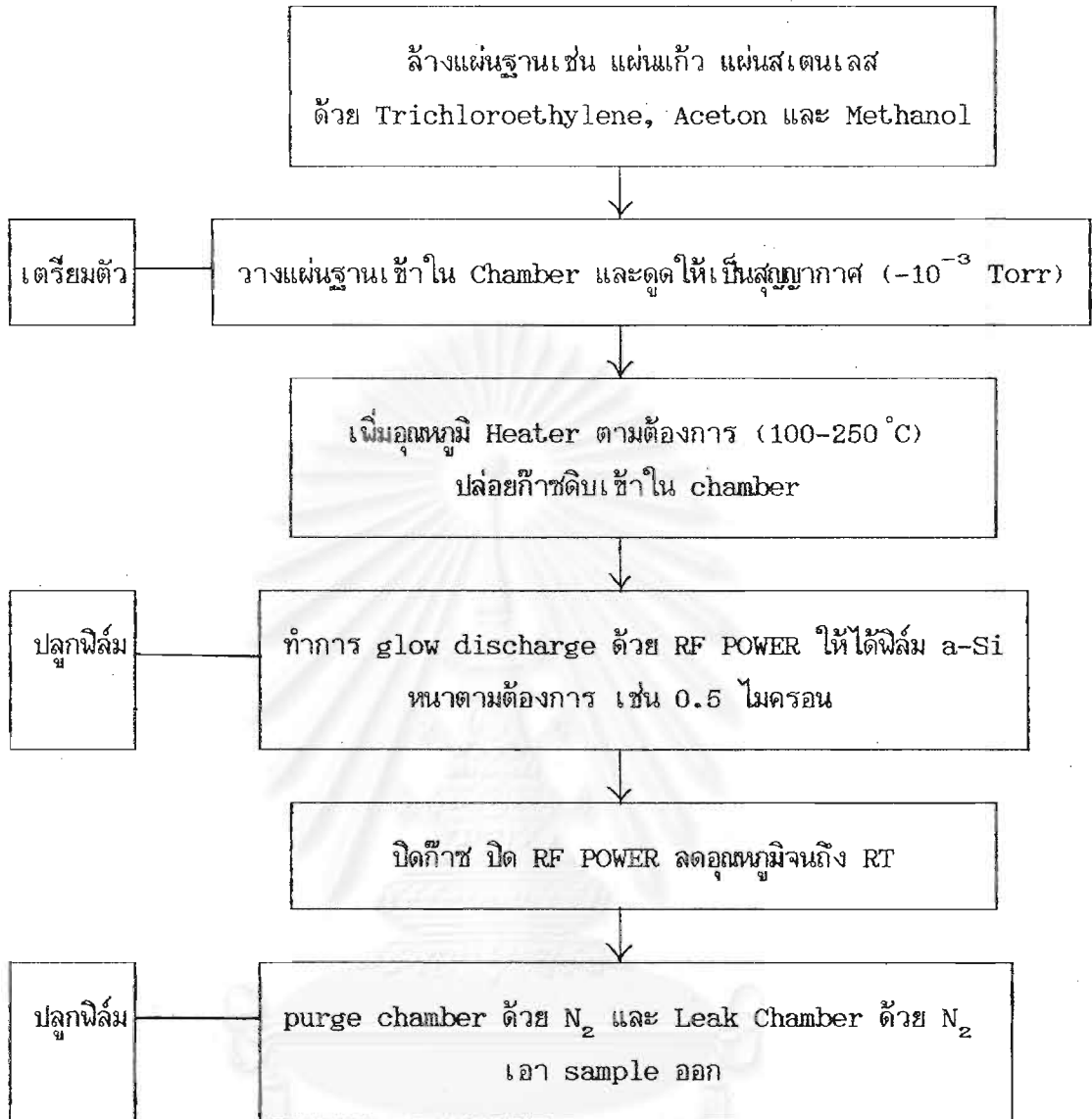
รูปที่ 3.24 ภาพถ่ายลักษณะการติดตั้งถังก๊าซและ regulator



รูปที่ 3.25 ครอนแก้วสุญญากาศ (quartz chamber) สำหรับปลูก a-Si:H



รูปที่ 3.26 ภาพถ่ายระบบ glow discharge plasma CVD ที่ใช้ในงานวิจัยนี้



รูปที่ 3.27 ขั้นตอนการผลิต a-Si:H

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3.1 ระบบ Glow Discharge Plasma CVD

ในระบบนี้ก๊าซดิบของซิลิคอนคือ ก๊าซซิลิโคน (SiH_4) จะถูกปล่อยเข้าไปในหลอดสุญญากาศ และจะถูกกระตุ้นให้แยกสลายตัวเป็นพลาสมา ด้วยสนามไฟฟ้าความถี่คลื่นวิทยุ (13.56 MHz) อะตอมของซิลิคอนที่ถูกแยกออกมาจะไปเกาะติดบนแผ่นฐานที่วางไว้ในกรอบแก้วสุญญากาศ สำหรับแผนผังของระบบ Glow Discharge Plasma CVD แสดงอยู่ในรูปที่ 3.23 ส่วนประกอบของระบบมีดังนี้

1. ระบบก๊าซ ประกอบด้วย

- ก๊าซซิลิโคน (SiH_4) ผสมในไฮโดรเจน (H_2) ด้วยอัตราส่วน SiH_4/H_2 เท่ากับ 10 %
- ก๊าซไดโบเรน (B_2H_6) ผสมในไฮโดรเจนด้วยอัตราส่วน $\text{B}_2\text{H}_6/\text{H}_2$ เท่ากับ 500 ppm ใช้สำหรับการเติมให้สารกึ่งตัวนำ a-Si:H เป็นชนิดพี
- ก๊าซฟอสฟีน (PH_3) ผสมในไฮโดรเจนด้วยอัตราส่วน PH_3/H_2 เท่ากับ 500 ppm ใช้สำหรับการเติมให้สารกึ่งตัวนำ a-Si:H เป็นชนิดเอ็น
- ก๊าซมีเทน (CH_4) ผสมในไฮโดรเจนด้วยอัตราส่วน CH_4/H_2 เท่ากับ 10 % ใช้สำหรับผลิต a-SiC:H

ก๊าซเหล่านี้ถูกอัดอยู่ในถังก๊าซด้วยความดันประมาณ 120 kg/cm^2 จากถังก๊าซจะต่อท่อสแตนเลสผ่านวาล์วเตอร่ากรองฝุ่นขนาด 50 ไมครอน แล้วต่อเข้ากับ gas regulator ซึ่งเป็นตัวลดความดันก๊าซจาก 120 kg/cm^2 ให้เหลือ $1-2 \text{ kg/cm}^2$ จากนั้นจะมีวาล์ว (valve) เปิดปิด และ gas flow meter วัดอัตราการไหลของก๊าซ (0-100 cc/min) โดยอัตราการไหลของก๊าซนี้จะถูกควบคุมด้วย needle controller valve ก๊าซต่าง ๆ จะไหลไปรวมกันที่วาล์วสามทาง และไปสู่หลอดสุญญากาศหรือลงไปสู่ปั๊มสุญญากาศ เนื่องจากก๊าซดิบเหล่านี้เป็นก๊าซติดไฟและอันตราย การใช้งานจึงต้องระมัดระวังเป็นพิเศษว่าต้องไม่มีการรั่วออกสู่ภายนอก รูปที่ 3.24 แสดงลักษณะการติดตั้งถังก๊าซและ regulator ได้มีการทดสอบว่าก๊าซไม่รั่วทั้งด้วยวิธีสุญญากาศและวิธีการเพิ่มแรงดัน

2. ระบบกรอบแก้วสุญญากาศ (Vacuum Reactor Chamber)

เป็นส่วนที่จะทำให้เป็นสุญญากาศแล้วฉีดก๊าซดิบเข้าไป เรียกลักษณะนี้ว่า Chamber ซึ่งทำจากหลอด quartz ทรงกระบอกสูง 30 ซม. เส้นผ่าศูนย์กลาง 11 ซม. หนา 5 มม. ดังแสดงในรูปที่ 3.25 ภายใน Chamber มีแท่นรอง (susceptor) ที่ทำจากผลึกโพสิซิลิคอนคาร์ไบด์วางอยู่บน heater ที่ปรับอุณหภูมิได้จากอุณหภูมิห้องถึงประมาณ 350°C แผ่นฐานของอะมอร์ฟัสซิลิคอน จะถูกวางบน susceptor นี้ และ susceptor จะสามารถหมุนรอบตัวเองได้ เพื่อให้ฟิล์ม a-Si:H มีความหนาสม่ำเสมอ ภายใน chamber ถูกทำให้เป็นสุญญากาศด้วย rotary pump ได้ถึง 10^{-3} torr ส่วนในขณะปลูกฟิล์มจะปรับความดันให้เป็น 1 torr

3. ระบบไฟฟ้าความถี่วิทยุเพื่อทำการ Glow Discharge

ภายนอก chamber มีแผ่นทองแดงรูปทรงกระบอกครึ่งวงกลม 2 แผ่น วางประกบอยู่ทางด้านข้าง chamber เพื่อทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าแบบ capacitive ที่จะกระตุ้นก๊าซใน chamber ให้เกิด glow discharge โดยรับสัญญาณความถี่คลื่นวิทยุ (13.56 Hz) จาก RF power source ระหว่าง RF power source กับขั้ว จะมี matching box สำหรับปรับเอาท์พุทอิมพีแดนซ์ให้เข้ากับอิมพีแดนซ์ของโหลด (คือ chamber)

ลักษณะเด่นของระบบ

1. เนื่องจากขั้วไฟฟ้า discharge อยู่ภายนอก chamber จึงปราศจากการมี contamination ของสารเจือปนจากขั้วไฟฟ้าเข้าสู่ a-Si:H
2. สนามไฟฟ้า RF มีทิศทางขนานกับแผ่นฐานจึงลดการ bombardment หรือกระแทกทางกลศาสตร์จากพลาสมาที่มีต่อฟิล์มที่กำลังปลูก
3. สามารถปรับระยะความสูงจากแผ่นฐานถึงขั้ว discharge ได้ จึงสามารถเลื่อนให้พลาสมาห่างจากแผ่นฐานได้ตามความเหมาะสม ทำให้ได้ฟิล์ม a-Si:H ที่มีคุณภาพสูง ภาพถ่ายระบบ glow discharge plasma CVD อยู่ในรูปที่ 3.26

3.3.2 ขั้นตอนการปลูกฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน

ขั้นตอนการผลิตด้วยวิธี glow discharge แบ่งได้เป็นส่วนใหญ่ ๆ 3 ขั้นตอนตามรูปที่ 3.27

สำหรับแผ่นฐานที่จะใช้ปลูก a-Si:H ที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงดังในตาราง 3.7

ตารางที่ 3.7 แผ่นฐานที่ใช้ปลูก a-Si:H ในงานวิจัย

แผ่นฐาน	วัตถุประสงค์เพื่อวัดคุณสมบัติของ
Corning glass# 7059 (2 cm x 2 cm x 1 mm)	<ul style="list-style-type: none"> . สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (α) . สภาพหน้าไฟฟ้า (σ)
quartz (2 cm x 2 cm x 0.5 mm)	<ul style="list-style-type: none"> . ESR
glass/ITO/SnO ₂ (2 cm x 2 cm x 1 mm)	<ul style="list-style-type: none"> . เซลล์แสงอาทิตย์

ก่อนใช้งาน แผ่นฐานเหล่านี้จะถูกล้างให้สะอาดด้วยกระบวนการดังนี้

- Trichloroethylene Ultrasound 20 นาที
- Acetone Ultrasound 20 นาที
- Methyl alcohol Ultrasound 20 นาที

เงื่อนไขการผลิต a-Si:H เป็นดังตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.8 เงื่อนไขโดยสรุปในการผลิตฟิล์ม a-Si:H

การทำ discharge	แบบ capacitive ที่ความถี่ RF 13.56 MHz
อุณหภูมิแผ่นฐาน	100-300 °C
กำลังไฟฟ้า RF	30-250 watt
ความดันขณะปลูกฟิล์ม	1 torr
ความสูงของขั้ว	10 cm
ปริมาณการไหลของก๊าซแต่ละชนิด	15-80 cc/min
ชนิดของก๊าซในถัง	SiH ₄ /H ₂ = 10 % B ₂ H ₆ /H ₂ = 500 ppm PH ₃ /H ₂ = 500 ppm

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนประสิทธิภาพสูง

บทนำ

ดังได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 แล้วว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนมีหลักการทำงาน โดยเริ่มจากการรับแสง การดูดกลืนแสงในชั้น i การผลิตพาหะ (photogenerated carrier) ในชั้น i และการดึงพาหะที่เกิดขึ้นให้ไหลออกสู่ภายนอก จากผลของการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิดรอยต่อโฮโมโนในเบื้องต้นได้ประสิทธิภาพประมาณ 4 % การเพิ่มประสิทธิภาพให้สูงขึ้นเป็นปัจจัย สำคัญอย่างหนึ่งในการนำเซลล์แสงอาทิตย์ไปใช้งาน และก็เป็นหัวข้อสำคัญหัวข้อหนึ่งในงานวิจัยนี้ โดยทั่วไปการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์ฯ อาจทำได้หลายวิธี อาทิเช่น การหาวิธีเพิ่มปริมาณแสง ให้เข้าสู่ชั้น i ให้ได้มากขึ้น การเพิ่มคุณภาพของฟิล์มชั้นต่าง ๆ ตลอดจนการหาค่าความหนาที่ เหมาะสมของชั้นต่าง ๆ

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการปรับปรุงประสิทธิภาพโดยการให้โครงสร้างรอยต่อเฮตเตโร ซึ่งมีส่วน p a-SiC:H เป็นชั้นหน้าต่างกว้างรับแสงแทน p a-Si:H ซึ่งจะเห็นผลให้แสงที่มีความ ยาวคลื่นสั้นวิ่งเข้าสู่ชั้น i ได้ดีขึ้น นอกจากนี้ จะรายงานผลการหาค่าความหนาที่เหมาะสมของชั้น p , i และ n ด้วย

4.1 หลักการการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ ด้วยรอยต่อเฮตเตโรของ p a-SiC:H/ i a-Si:H

เซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัสซิลิคอนธรรมดา มีประสิทธิภาพต่ำ เนื่องจากชั้น p นี้มี คุณสมบัติเป็น "dead layer" กล่าวคือไม่มีการผลิตกระแสไฟฟ้าในชั้น p เมื่อได้รับแสง เพราะ มีค่า photoconductivity ต่ำ และมี defect levels อยู่มาก เราจึงไม่ต้องการให้แสง ถูกดูดกลืนเสียเปล่าในชั้น p นี้ และถึงแม้เราจะทำให้ชั้น p บางถึง 100 Å ก็ตาม ก็ยังคงมีการ ดูดกลืนแสงอยู่ แต่ถ้าเราทำให้ชั้น p บางเกินไปก็จะมีผลเสียคือ

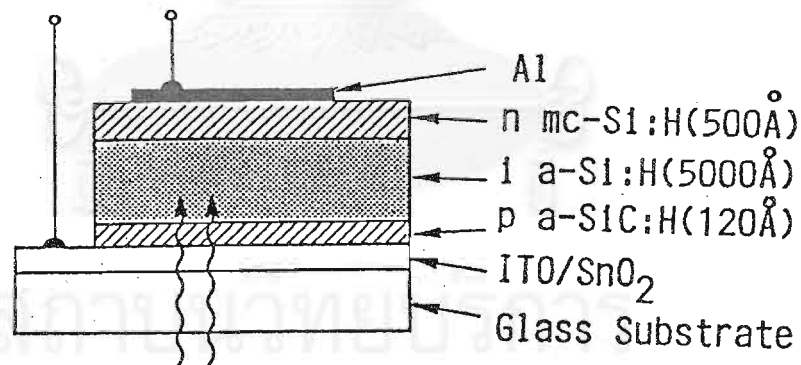
1. ชั้น p จะกลายเป็นชั้นปลดพาหะและให้ค่า built-in potential (V_b) ต่ำ
2. ฟิล์มชั้น p อาจจะไม่ติดในบางบริเวณ ทำให้มีจุดที่ชั้น i สัมผัสกับขั้วโปรงแสงโดยตรง ทำให้ V_b ต่ำเช่นกัน

ดังนั้นวิธีการที่จะเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์โดยชั้น p คือการทำให้ชั้น p มีความโปรงแสงมากขึ้น กล่าวคือมีค่าช่องว่างพลังงานกว้างขึ้น เพื่อให้แสงอาทิตย์ในช่วงความยาว คลื่นที่เหมาะสมผ่านเข้าสู่ชั้น i ได้มากขึ้น

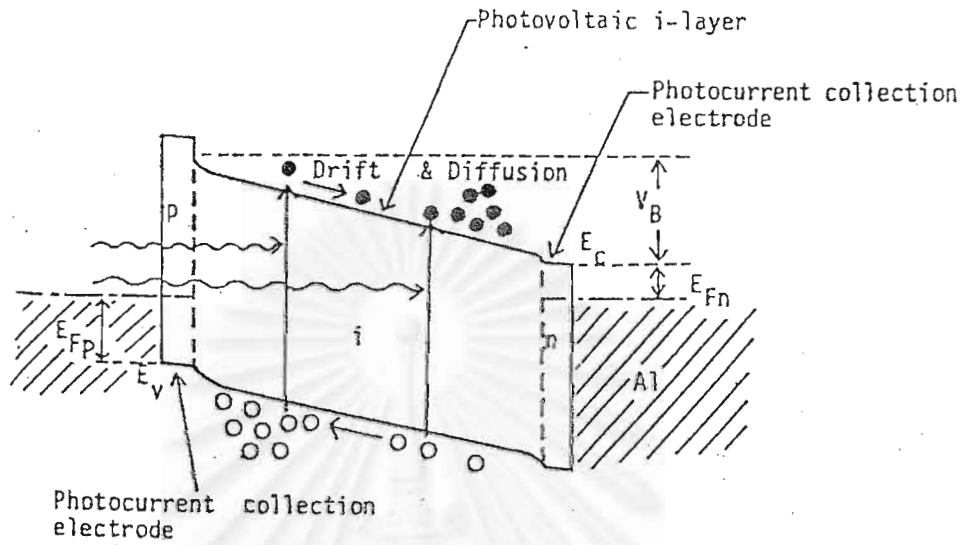
การใช้อะมอร์ฟัสซิลิคอนคาร์ไบด์ a-SiC:H มาทำเป็นชั้นหน้าต่างกว้างชนิด p จะได้ เซลล์ฯ ที่มีลักษณะโครงสร้างดังรูปที่ 4.1 รูปที่ 4.2 แสดงลักษณะแผนภูมิแถบพลังงานของเซลล์ฯ จากรูปที่ 4.3 ซึ่งแสดงผลการวัดสเปกตรัมของผลตอบสนองทางแสง (collection efficiency

ของเซลล์ชนิดรอยต่อโฮโม (homojunction) และรอยต่อเฮเทอโร (heterojunction) โดย Y. Hamakawa และคณะ [4] ซึ่งให้เห็นว่า การใช้ p a-SiC:H มาทำเป็นชั้น p ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อเฮเทอโรนั้น จะทำให้ sensitivity ของผลตอบสนองทางแสงในช่วงคลื่นสั้นมีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับเซลล์ชนิดรอยต่อโฮโมธรรมดา การใช้ p a-SiC:H เป็นชั้น p จะทำให้แสงความยาวคลื่นสั้นเข้าไปสู่ชั้น i ได้เพิ่มมากขึ้น ทำให้การผลิตพาหะเนื่องจากแสงดีจึงส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์สูงขึ้น โดยทั่วไปจะใช้ a-SiC:H ที่มีช่องว่างพลังงาน ~ 2.0 eV เพราะถ้าใช้ a-SiC:H ที่มีช่องว่างพลังงานสูงกว่านี้ จะมีความต้านทานสูง เป็นเหตุให้ fill factor ลดลงได้

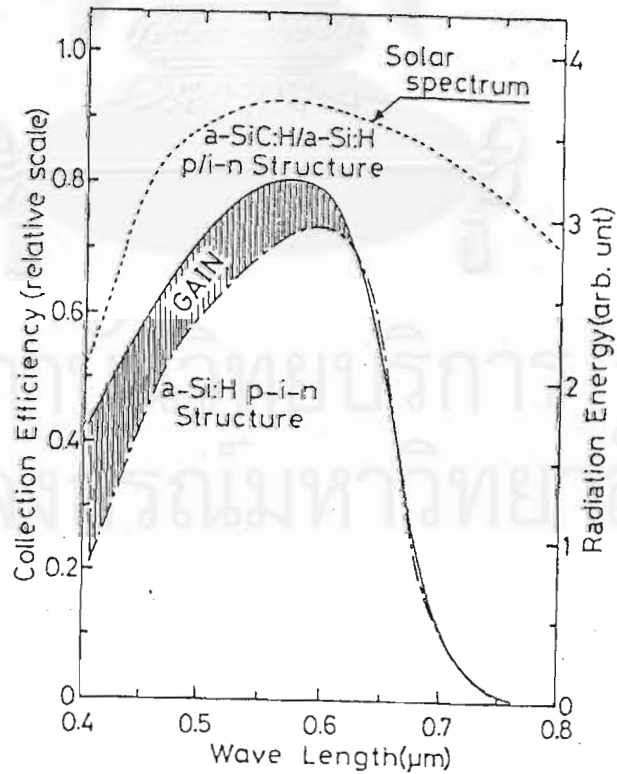
นอกจากนี้ การใช้ a-SiC:H อย่างเหมาะสมจะทำให้ V_{oc} และ FF มีค่าสูงขึ้นด้วย การที่ V_{oc} มีค่าสูงขึ้นก็เพราะ V_b (built-in potential) สูงขึ้น ถ้าดูจากรูปที่ 4.2 จะเห็นว่าอิเล็กตรอนที่ถูกฉีดกลับไปที่ชั้น p จะน้อยลง และสนามไฟฟ้าในชั้น i ก็จะมีเพิ่มขึ้น การที่ค่า fill factor ของเซลล์ที่ใช้ a-SiC:H ดีขึ้น เนื่องจากเหตุผล 2 ประการคือ



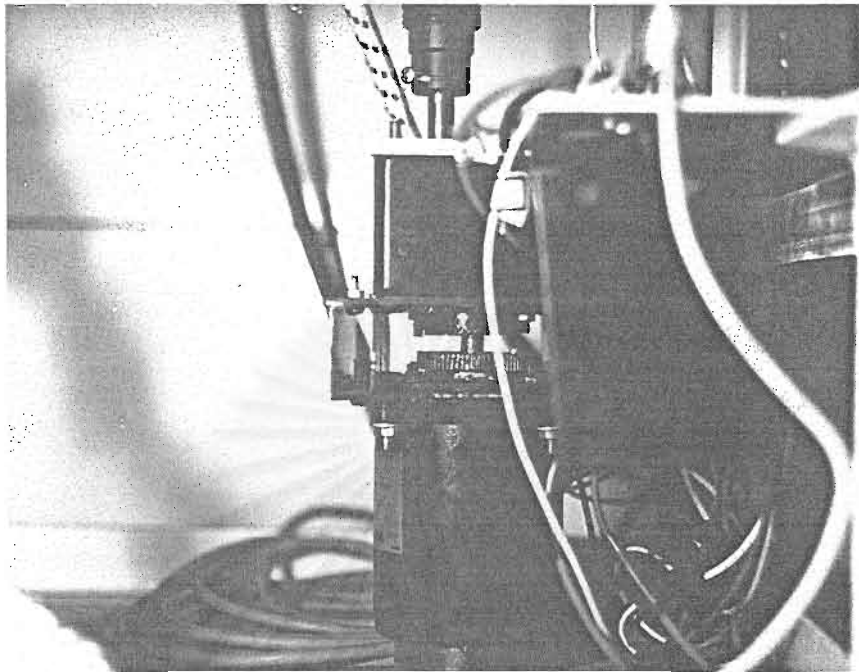
รูปที่ 4.1 โครงสร้างของเซลล์ชนิดรอยต่อเฮเทอโร (heterojunction)



รูปที่ 4.2 แผนภูมิแถบพลังงานของเซลล์ชนิดรอยต่อเฮตเตอโร



รูปที่ 4.3 สเปกตรัมผลตอบสนอง (collection efficiency) ของเซลล์ชนิด a-Si:H ชนิดรอยต่อไฮโม และชนิดรอยต่อเฮตเตอโรจาก Y. Hamakawa [14]



รูปที่ 4.4 ภาพเกียร์ทดขนาด 6:1 ที่ต่อเข้ากับมอเตอร์หมุนแทนวางแผ่นฐาน

1. แม้มีการไบแอสตาม แต่การลดลงของ photocurrent มีค่าน้อย เพราะ collection efficiency ในช่วงแสงคลื่นสั้นเพิ่มขึ้น เนื่องจากช่องว่างพลังงานที่กว้างขึ้น และโฟตอนในย่านคลื่นสั้นจะถูกดูดกลืนทันทีในบริเวณใกล้ ๆ รอยต่อ p-i
2. เนื่องจากช่องว่างพลังงานของชั้น p มีขนาดกว้าง ในขณะที่ไบแอสตาม กำแพงศักย์ จึงกั้นไม่ให้อิเล็กตรอนไหลเข้าสู่ชั้น p แต่จะผลักอิเล็กตรอนกลับเข้าสู่ชั้น i และไหลออกสู่ภายนอก

4.2 การปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H รอยต่อเฮเทอโรวัตใช้ p a-SiC:H เป็นชั้นหน้าต่างกว้างรับแสง

ในการทำเซลล์แสงอาทิตย์แบบ a-Si:H ไม่ว่าจะป็นชนิดรอยต่อโฮโมหรือชนิดรอยต่อเฮเทอโรก็ก็ตาม ถ้าจะให้ได้ประสิทธิภาพของเซลล์ฯ ที่ดีแล้ว คุณภาพของฟิล์มที่ปลูกจะต้องดีด้วย ในงานวิจัยนี้ได้ปรับปรุงเครื่องมือที่ใช้ในการผลิต คือ ระบบ glow discharge plasma CVD เพื่อให้ได้ฟิล์มที่มีคุณภาพดียิ่งขึ้น ได้แก่

1. Holder rotation speed ได้ทำการปรับรอบการหมุนต่ำสุดของแท่นวางแผ่นฐาน จาก 18 รอบ/นาที เป็น 3 รอบ/นาที โดยการใช้ gear 6:1 ทดรอบมอเตอร์ที่หมุนแทนให้ช้าลง ดังแสดงในรูปที่ 4.4 สาเหตุที่ต้องลดความเร็วของการหมุนให้ช้าลงเพราะที่ 18 รอบ/นาที แท่นวางจะหมุนเร็วเกินไปทำให้การไหลของก๊าซถูกรบกวน และทำให้ plasma ที่เกิดขึ้นไม่ค่อยมีเสถียรภาพ ทำให้ฟิล์มที่ได้มีคุณภาพไม่ค่อยดี

2. ความดันภายในครอบแก้ว (chamber) ได้ทำการเปลี่ยนปั๊มสุญญากาศชนิดโรตารีใหม่ขนาดใหญ่ขึ้น มีอัตราการดูดเร็วขึ้น ทำให้สามารถลดความดัน ภายในครอบแก้วลงใกล้ 1 Torr ได้เร็วขึ้นทำให้เกิดการ deposit. फिल्म ได้ดีและเร็วขึ้น

นอกจากนี้ยังได้ทดลองเปลี่ยนเงื่อนไขในการผลิต คือ อุณหภูมิของแผ่นฐานขณะปลูกฟิล์มให้ลดลงเล็กน้อยจาก 200 °C เป็น 190 °C การลดอุณหภูมิลงนี้ก็เพื่อลดการ reduction ของ SnO₂ เป็น Sn โดย plasma ซึ่งทำให้ข้อโปร่งแสงพุ่งลง และช่วยลดการแพร่ของ reduced Sn เข้าสู่รอยต่อบริเวณ SnO₂ และชั้น p

เมื่อใช้เงื่อนไขใหม่รวมทั้งระบบ glow discharge CVD ที่ได้ปรับปรุงใหม่ทำเซลล์พบว่าได้เซลล์ ที่มีคุณภาพดีขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการผลิตเซลล์ฯ ก่อน (No.1) และหลัง (No.2) การปรับปรุงเครื่องมือ

No.	ชั้น	เงื่อนไขในการผลิต			ความหนา Å	ลักษณะสมบัติเอาท์พุท			
		T _{sub} °C	RF W	Rot* rpm		J _{sc} mA/cm ²	V _{oc} V	ff %	η %
1	p a-SiC:H	200	2.5	18	220	11.4	.83	54.6	5.15
	i a-Si:H		1.0		5000				
	n μC-Si:H		2.7		500				
2	p a-SiC:H	190	1.8	3	220	11.48	.84	56.7	5.43
	i a-Si:H		1.0		5000				
	n μC-Si:H		1.9		500				

*Rot. = holder rotation speed

ปัจจัยอีกประการหนึ่งที่มีผลต่อคุณภาพของเซลล์ฯ คือความหนาที่เหมาะสมของชั้น p-, i- และ n- ในงานวิจัยนี้ได้ทำการหาค่าความหนาที่เหมาะสมของชั้น p a-SiC:H, ชั้น i a-Si:H และชั้น n μC-Si:H ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อเฮเทอโรซึ่งมีชั้น p a-SiC:H เป็นชั้นหน้าต่างกว้างรับแสง ในการทดลองเรากำหนดให้ ชั้น p a-SiC:H มีอัตราส่วนของ flow rate ของ SiH₄:CH₄ เป็น 3:7 ซึ่งจะทำให้ได้ค่าช่องว่างพลังงาน E_g = 2.0 eV และใช้อัตราการเติม B₂H₆/(CH₄+SiH₄) = 0.6 %, ชั้น n เป็น μC-Si:H ซึ่งมีอัตราการ

โพลี $\text{PH}_4/\text{SiH}_4 = 2.67\%$ และใช้ระบบ glow discharge plasma CVD ที่ปรับปรุงใหม่
รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้น p a-SiC:H กับลักษณะสมบัติ
เอาท์พุทของเซลล์ฯ โดยที่ความหนาของชั้น i a-Si:H และ n $\mu\text{c-Si:H}$ คงที่เท่ากับ 5000 Å
และ 500 Å ตามลำดับ จากกราฟ กระแสไฟฟ้าลัดวงจร J_{sc} และ fill factor FF มีค่า
ลดลงเมื่อชั้น p หนาขึ้น เป็นเพราะค่าความต้านทานอนุกรมมากขึ้น และชั้น p ที่หนาขึ้นจะกั้นแสง
ที่เข้าสู่ชั้น i ให้น้อยลง ส่วนค่า V_{oc} จะลดลงเมื่อชั้น p บางลง เนื่องจากชั้น p กลายเป็น
depletion layer (ชั้นปลอดพาหะ) ทำให้ไม่สามารถสร้าง built-in-potential ได้สูง
เพียงพอ และอาจมีบริเวณที่ชั้น p ไม่ติดเลยก็ได้ เพราะฉะนั้น ค่าความหนาของชั้น p ที่เหมาะ-
สมในการทดลองนี้คือ 200 Å ซึ่งให้ค่า V_{oc} และประสิทธิภาพสูงสุด

รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้น i a-Si:H กับลักษณะสมบัติ
เอาท์พุทของเซลล์ฯ โดยให้ความหนาของชั้น p a-SiC:H และ n $\mu\text{c-Si}$ คงที่เท่ากับ 200 Å
และ 500 Å ตามลำดับ จากกราฟ กระแสไฟฟ้า J_{sc} จะเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาของชั้น i เพิ่มขึ้น
เพราะว่าชั้น i ทำหน้าที่ผลิตพาหะจากแสง แต่เมื่อชั้น i หนาเกินไป J_{sc} จะลดลง เนื่องจาก
สนามไฟฟ้าในชั้น i น้อยลงจนไม่สามารถกวาดเอาพาหะที่เกิดขึ้นออกมาสู่ภายนอกได้หมด ผลที่
ตามาคือ FF และ V_{oc} จะเริ่มลดลง ดังนั้นค่าความหนาที่เหมาะสมของชั้น i จากรูป คือ
6500 Å ซึ่งให้ค่า V_{oc} , J_{sc} และประสิทธิภาพสูงสุด

สำหรับผลการทดลองการหาความหนาที่เหมาะสมของชั้น n อยู่ในรูปที่ 4.7 ซึ่งแสดง
ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้น n $\mu\text{c-Si:H}$ กับลักษณะสมบัติเอาท์พุทของเซลล์ฯ โดยที่
ความหนาของชั้น p a-SiC:H และ i a-Si:H คงที่เท่ากับ 150 Å และ 5000 Å ตามลำดับ
จากกราฟค่ากระแสไฟฟ้า J_{sc} จะลดลงเมื่อชั้น n หนาขึ้น เนื่องจากเมื่อชั้น n หนาขึ้น จะทำ
ให้แสงที่สะท้อนจากผิวโลหะด้านหลังของเซลล์ฯ ไม่สามารถทะลุผ่านชั้น n ไปถึงชั้น i ที่ทำหน้าที่
ผลิตพาหะได้ และการที่ชั้น n หนาขึ้น ก็ทำให้ค่าความต้านทานอนุกรมมีค่ามากขึ้นด้วย ส่วนค่า
 V_{oc} และ FF ที่ลดลงก็เป็นผลมาจากความต้านทานในชั้น n ที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่เมื่อชั้น n บาง
ลงค่า V_{oc} และ FF ก็ลดลง เนื่องจากถ้าชั้น n บางเกินไปจะไม่สามารถสร้างสนามไฟฟ้าได้
เพียงพอ ดังนั้นค่าความหนาของชั้น n ที่เหมาะสมจากรูปคือ 500 Å ซึ่งจะทำให้ได้ V_{oc} , FF
และประสิทธิภาพของเซลล์ฯ สูงที่สุด

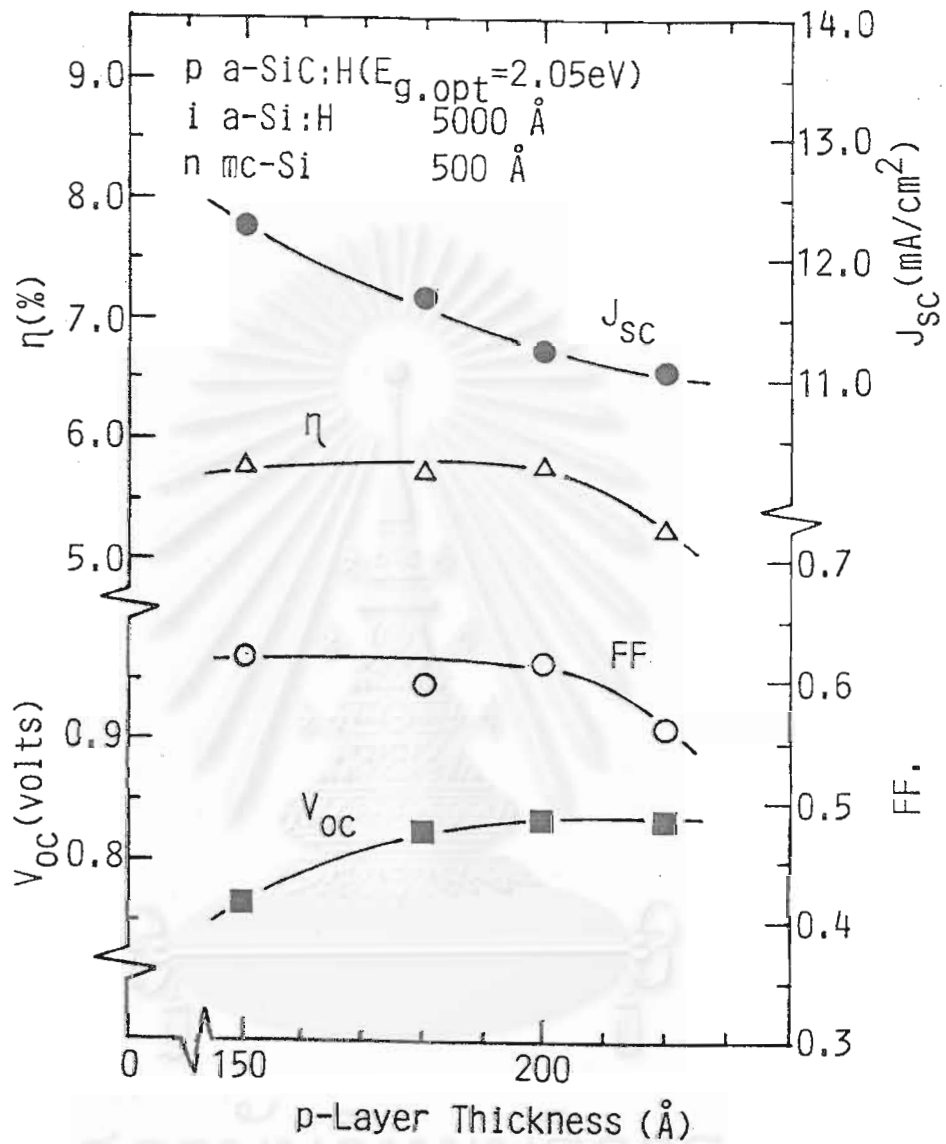
จากการปรับปรุงระบบ glow discharge และการหาเงื่อนไขของความหนาที่เหมาะสม-
สมของชั้นต่าง ๆ เราได้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H ที่ใช้ชั้น p a-SiC:H เป็นชั้นหน้าต่าง
กว้างรับแสง ที่มีลักษณะสมบัติเอาท์พุทที่ดีที่สุดดังนี้

$$J_{sc} = 12.55 \text{ mA/cm}^2$$

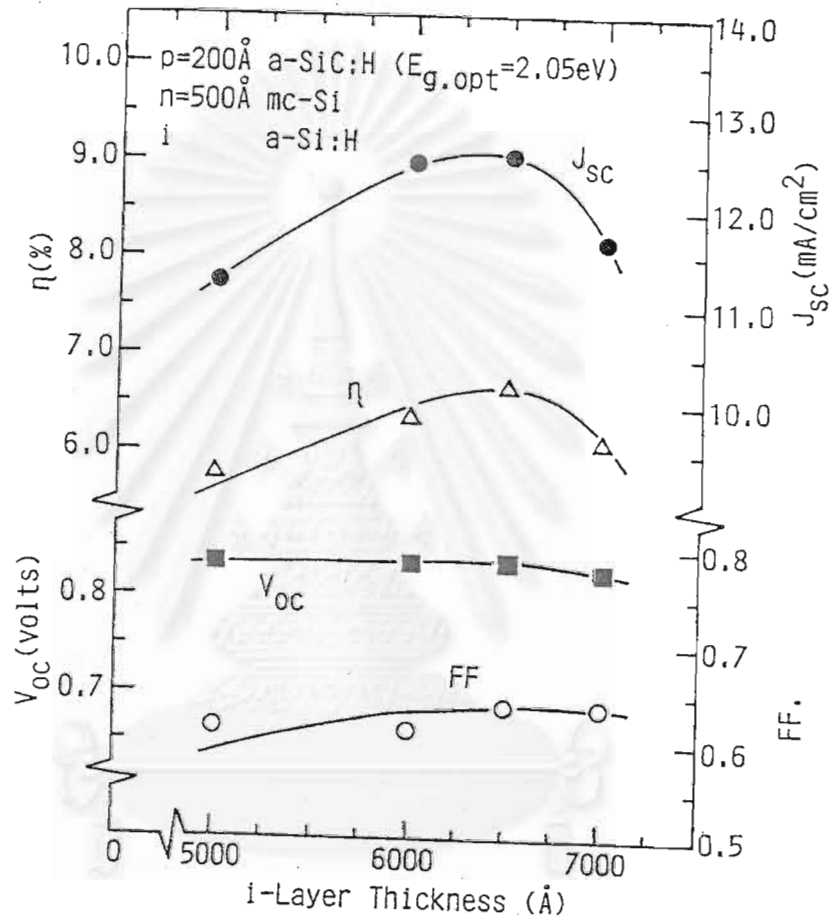
$$V_{oc} = 0.84 \text{ V}$$

$$FF = 63.67\%$$

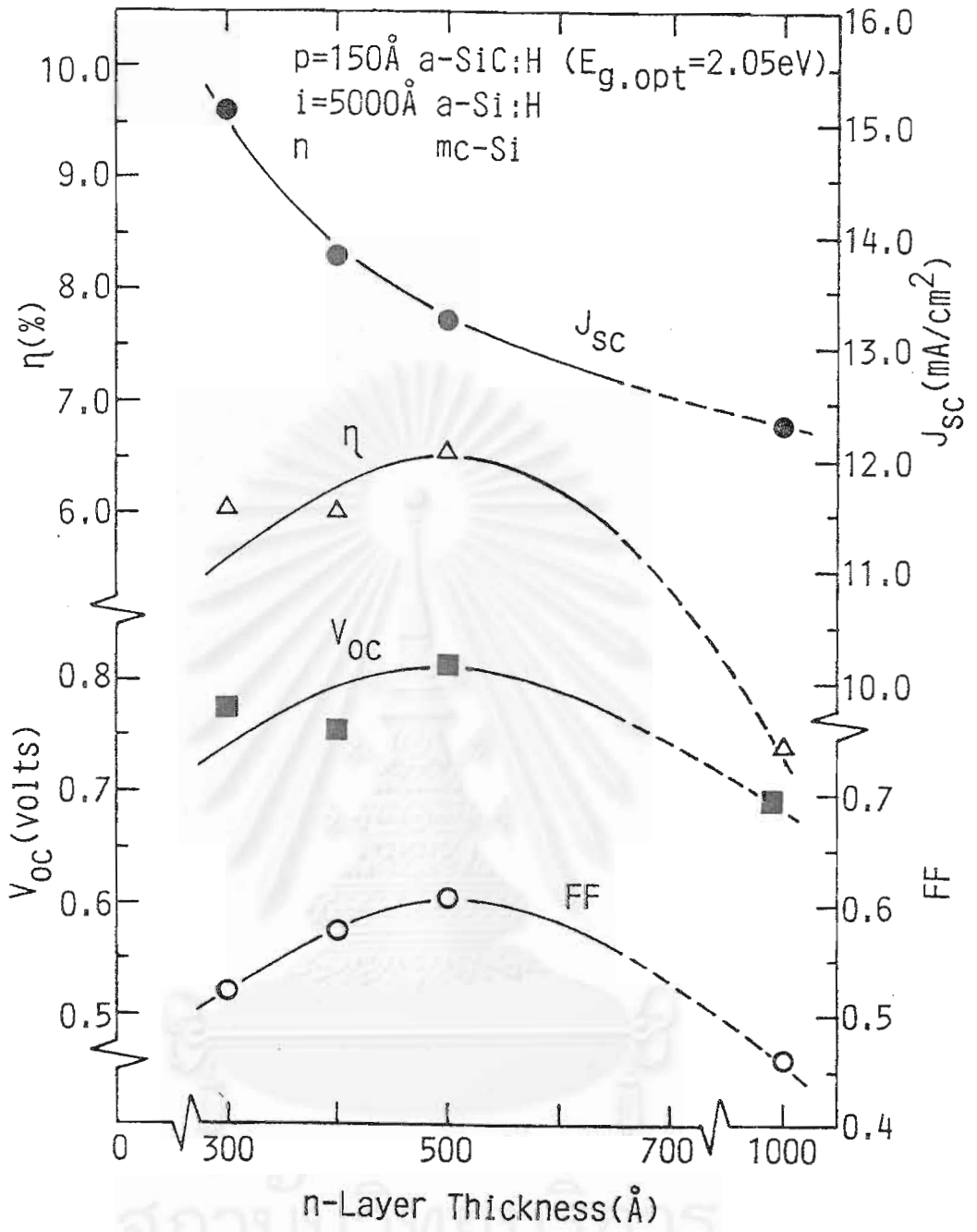
$$\eta = 6.67\%$$



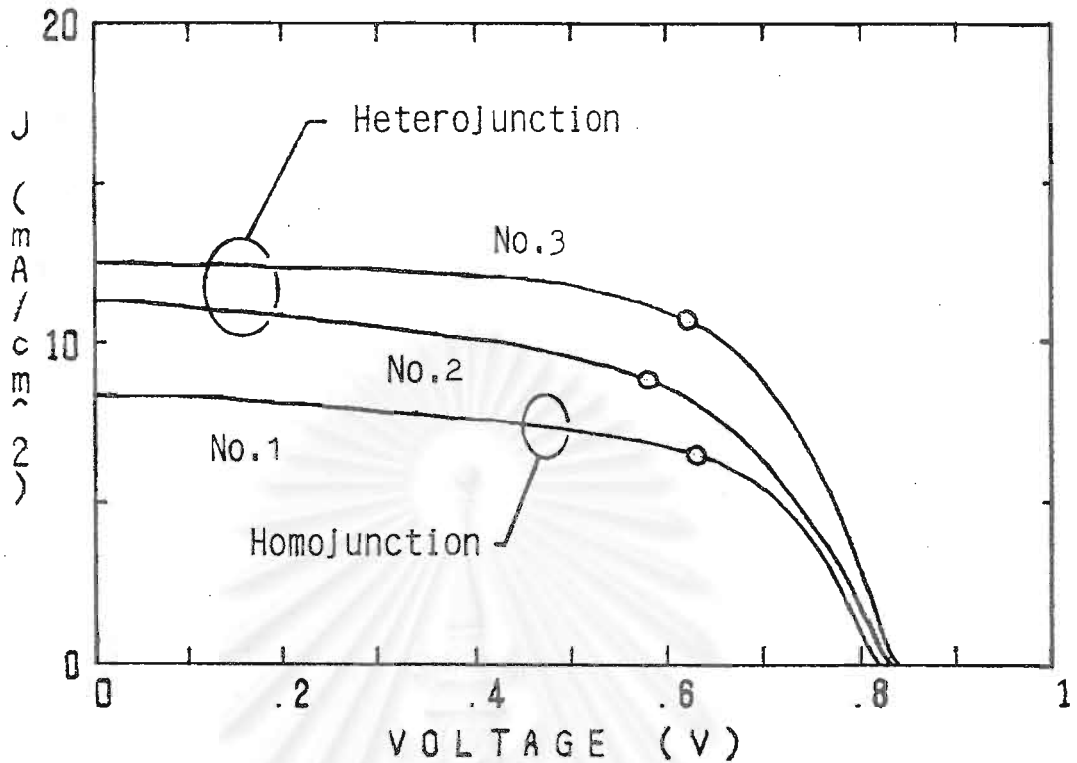
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะสมบัติเอาก์พของเซลล์ฯ กับความหนาของชั้น p a-SiC:H



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะสมบัติเอาท์พุทของเซลล์ฯ กับความหนาของชั้น i a-Si:H



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะสมบัติเอาต์พุตของเซลล์ฯ กับความหนาของชั้น n $\mu\text{c-Si:H}$



รูปที่ 4.8 ลักษณะสมบัติเอาต์พุทของเซลล์แสงอาทิตย์ 3 รุ่น

ตารางที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H 3 รุ่น โดยตัวแรกคือเซลล์ชนิดรอยต่อโฮโม (Homojunction) ตัวที่สองคือเซลล์ชนิดรอยต่อเฮเทโร (Heterojunction) ที่ผลิตขึ้นก่อนการปรับปรุงระบบ glow discharge plasma CVD ตัวที่สามคือเซลล์ชนิดรอยต่อเฮเทโรที่ผลิตขึ้นหลังการปรับปรุงระบบ glow discharge plasma CVD



ตารางที่ 4.2 ผลการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H

No.	ชั้น	เงื่อนไขในการผลิต			ความหนา	ลักษณะสมบัติเอาก์พุท			
		T_{sub} °C	Press. Torr	Rot* rpm		\AA	J_{sc} mA/cm ²	V_{oc} V	ff %
1	p a-SiC:H	200	40	18	120	8.5	.82	59.8	4.12
	i a-Si:H		40		5000				
	n μ c-Si:H		148		500				
2	p a-SiC:H	190	40	18	220	11.4	.83	54.6	5.15
	i a-Si:H		40		5000				
	n μ c-Si:H		148		500				
3	p a-SiC:H	190	40	3	220	12.55	.84	63.7	6.67
	i a-Si:H		40		6500				
	n μ c-Si:H		148		500				

*Rot. = holder rotation speed

รูปที่ 4.8 แสดงลักษณะสมบัติเอาก์พุทของเซลล์ฯ ทั้ง 3 ตัวเปรียบเทียบกัน จากรูปจะเห็นได้ว่าหลังทำการปรับปรุงระบบ glow discharge CVD และหาเงื่อนไขความหนาที่เหมาะสมของชั้นต่าง ๆ แล้ว ทั้ง J_{sc} , V_{oc} , FF และประสิทธิภาพมีค่าสูงขึ้น

4.3 การวิเคราะห์เหตุผลของการเพิ่มของประสิทธิภาพด้วยรอยต่อเฮตเตโร p a-SiC:H/i a-Si:H

จากการใช้ p a-SiC:H เป็นหน้าต่างกว้างรับแสงแทน p a-Si:H ทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์ฯเพิ่มขึ้นจาก 4.12 % เป็น 6.67 % จากกราฟลักษณะสมบัติเอาก์พุทพบว่าประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นนี้สืบเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้าลัดวงจร J_{sc} และแรงดันวงจรเปิด V_{oc} เป็นหลัก การวิเคราะห์ต่อไปถึงสาเหตุของการเพิ่มขึ้นของ J_{sc} และ V_{oc} เป็นสิ่งที่น่าสนใจในงานวิจัย เนื่องจากหลักการในการออกแบบให้เซลล์ฯมีรอยต่อเฮตเตโรไว้หนึ่งเพื่อต้องการให้แสงที่มี

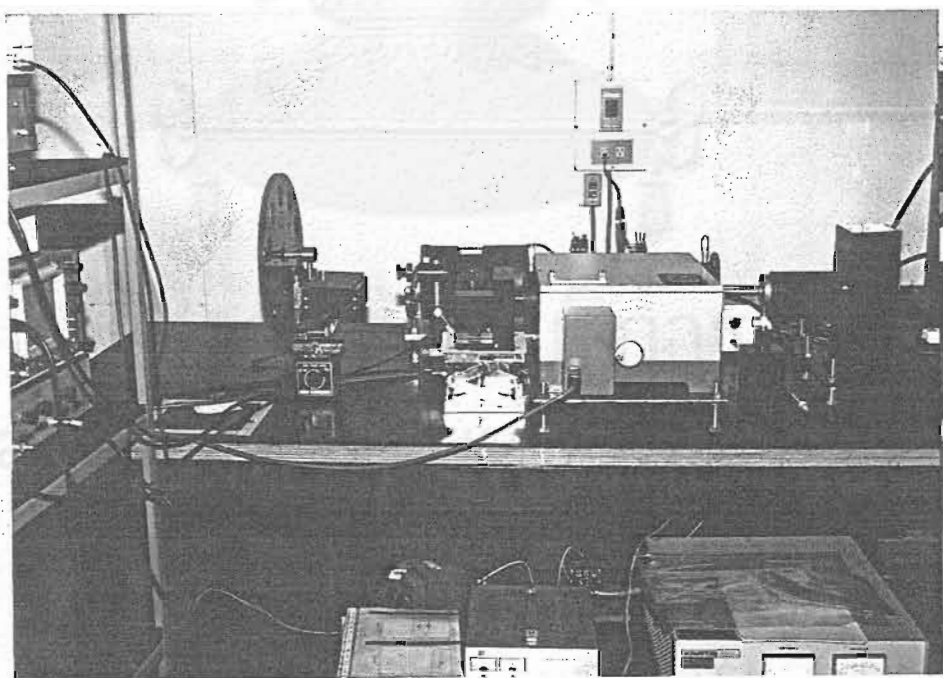
ความยาวคลื่นสั้นวิ่งเข้าสู่ชั้น i ได้ดีขึ้น ดังนั้นการตรวจวัดสเปกตรัมผลตอบสนองทางแสงของเซลล์ฯ จึงเป็นสิ่งที่ขาดไม่ได้ สำหรับการเพิ่มขึ้นของ V_{oc} นั้น น่าจะมีสิ่งเกี่ยวข้องกับการเพิ่มขึ้นของศักย์ไฟฟ้าภายใน (built-in potential) โดยตรง ดังมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.3.1 สเปกตรัมผลตอบสนองทางแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ $a\text{-Si:H}$

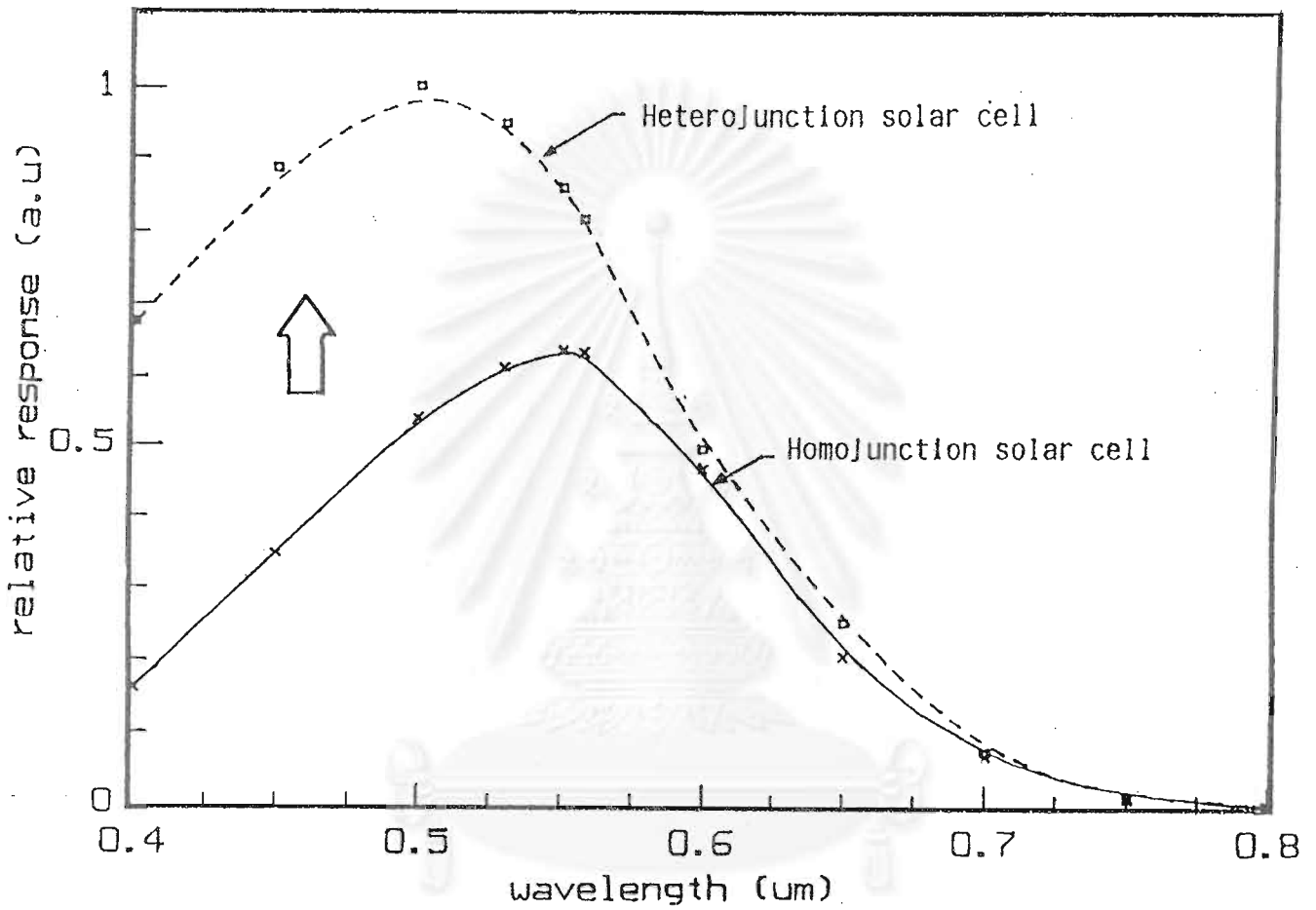
เพื่อเป็นการตรวจสอบว่า การใช้ $p\text{-}a\text{-SiC:H}$ เป็นหน้าต่างแทน $p\text{-}a\text{-Si:H}$ แล้วทำให้ผลตอบสนองทางแสงด้านความยาวคลื่นสั้นดีขึ้นจริง จึงได้ทำการวัดสเปกตรัมผลตอบสนองทางแสงของเซลล์ฯ ทั้ง 2 ชนิด เปรียบเทียบกัน

รูปที่ 4.9 แสดงภาพถ่ายระบบการวัด โดยใช้เทคนิคของ lock-in amplifier และใช้ optical light chopper เป็นตัวป้อนสัญญาณ reference เข้าสู่ lock-in amplifier ใช้ Tungsten lamp เป็น light source (6A, DC 20 V)

รูปที่ 4.10 แสดงผลการวัดสเปกตรัมของกระแสไฟฟ้า J_{sc} เอาท์พุทของเซลล์ฯ ชนิดรอยต่อโฮโม และชนิดรอยต่อเฮเทโร จากรูปจะเห็นได้ว่าผลตอบสนองทางแสงในช่วงคลื่นสั้นของเซลล์ฯ ที่มี $p\text{-}a\text{-SiC:H}$ เป็นหน้าต่างกว้าง ดีกว่าเซลล์ฯ ที่มี $p\text{-}a\text{-Si:H}$ เป็นหน้าต่าง ทั้งนี้เพราะว่าช่องว่างพลังงานของ $p\text{-}a\text{-SiC:H}$ (2.0 eV) กว้างกว่าของ $p\text{-}a\text{-Si:H}$ (1.80 eV) จึงทำให้แสงที่มีความยาวคลื่นสั้นผ่านเข้าสู่ชั้น i ได้ดีขึ้น ทำให้ J_{sc} ของเซลล์ฯ ดีขึ้น และประสิทธิภาพดีขึ้นด้วย



รูปที่ 4.9 ระบบการวัดสเปกตรัมผลตอบสนองทางแสง (collection efficiency) ของเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 4.10 ผลการวัดสเปกตรัมผลตอบสนองทางแสง (collection efficiency) ของเซลล์ชนิดรอยต่อโฮโม และชนิดรอยต่อเฮเทอโร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แรงดันเอาต์พุตสูงด้วยโครงสร้าง Integrated Type
และประยุกต์ใช้งานเป็น Battery Chargerบทนำ

เซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัสซิลิคอน มีข้อได้เปรียบกว่าเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกเดี่ยว คือ มีแรงดันเปิดวงจรที่สูงประมาณ 0.7-0.8 V และมีลักษณะเป็นฟิล์มบาง สามารถผลิตให้ต่ออนุกรมกันบนแผ่นฐานแก้วแผ่นเดียวกันได้โดยตรง โดยไม่ต้องใช้สายไฟฟ้าต่อเชื่อมเลย จึงทำให้ลดขั้นตอนการผลิต ลดต้นทุน และมีความสวยงาม กระทัดรัด ในที่นี้จะขอเรียกเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่ออนุกรมกันด้วยเทคโนโลยีฟิล์มบางบนแผ่นฐานแผ่นเดียวกันว่า "Integrated Type Solar Cell" เซลล์แสงอาทิตย์แบบ Integrated Type นี้ ให้แรงดันวงจรเปิดสูงตามจำนวนของเซลล์ที่ต่ออนุกรมกัน มีประโยชน์ในการใช้งานหลายอย่าง อาทิเช่น ใช้ชาร์จถ่านไฟฉาย ชาร์จแบตเตอรี่หรือใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟให้กับเครื่องใช้ไฟฟ้าต่าง ๆ เช่น นาฬิกา เครื่องคิดเลข โทรศัพท์ ไฟฉาย ฯลฯ เซลล์แบบนี้ถูกเสนอเป็นครั้งแรก โดยบริษัท Sanyo [5]

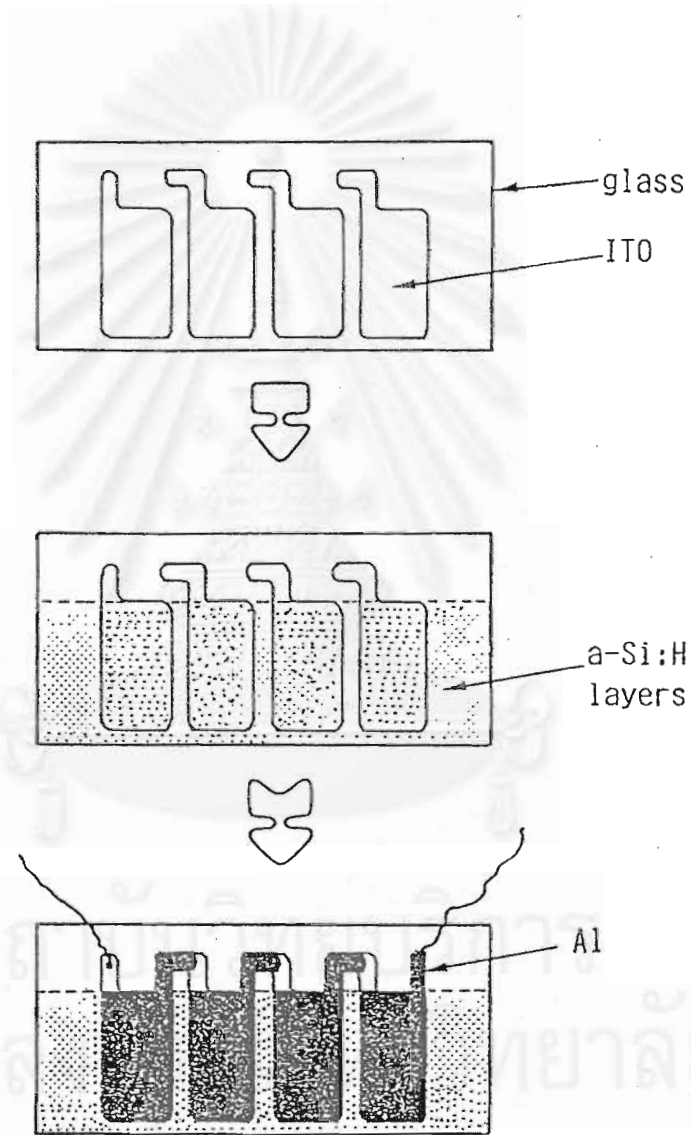
ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการวิจัย ออกแบบและผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H ให้เป็นแบบ Integrated Type ให้มีเซลล์ต่ออนุกรมกันตั้งแต่ 4 ตัว 5 ตัว จนถึง 12 ตัว และนำไปทดลองใช้งาน ป้อนไฟฟ้าให้กับผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ รวมทั้งการชาร์จแบตเตอรี่ขนาด 12 V ด้วย

5.1 การออกแบบเซลล์แบบ Integrated Type

เซลล์แบบ Integrated รุ่นแรกที่เคยทำขึ้นในงานวิจัยเพื่อเสนอต่อสภาวิจัย [1] มีเป้าหมายเพื่อใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้เครื่องคิดเลข หรือนาฬิกาดิจิตอลขนาดเล็ก โครงสร้างของเซลล์ แต่ละตัวคือ glass/ITO/SnO₂/p a-SiC:H/i a-Si:H/n a-Si:H/Al เซลล์แต่ละตัวมีพื้นที่ 1x2 cm² และต่ออนุกรมกัน 4 ตัว เซลล์ทั้ง 4 ตัวจะออกแบบให้อยู่บนแผ่นฐานแก้วแผ่นเดียวกันขนาด 3x8 cm² แต่ละเซลล์ มีระยะห่างจากกัน 2.5 mm. การต่ออนุกรมกันทำได้โดยใช้ pattern ของขี้ว ITO และขี้ว Al ที่เหมาะสม โดยให้ขี้ว Al ของเซลล์ตัวแรกต่อกับขี้ว ITO ของเซลล์ตัวถัดไป นั่นคือ

(ITO/PIN/Al)-(ITO/PIN/Al)-(ITO/PIN/Al)-(ITO/PIN/Al)

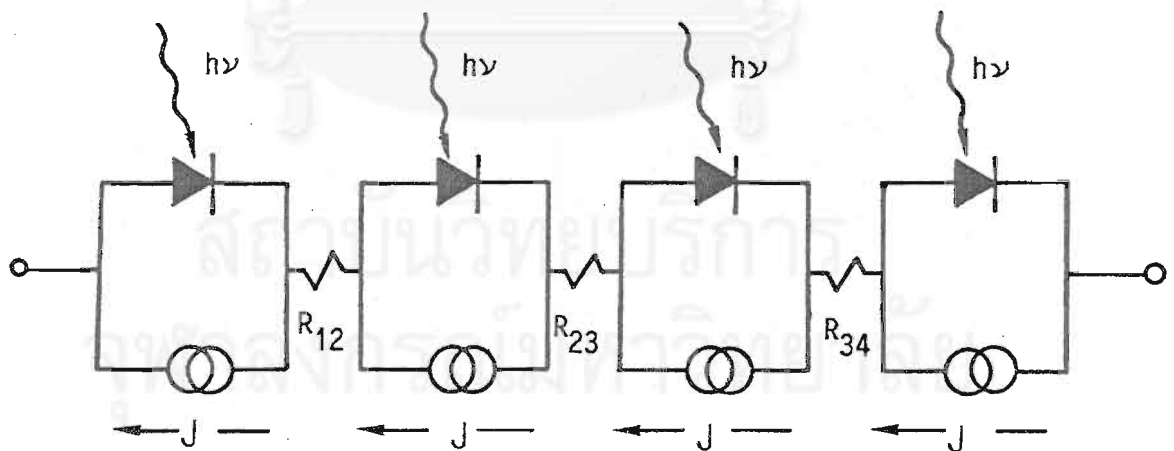
รูปที่ 5.1 แสดงภาพ Top View ของเซลล์ จะสังเกตเห็นว่า ชั้นของ a-Si:H จะถูกปลูกต่อเนื่องกันตลอดทั้งแผ่น การที่เซลล์ต่ออนุกรมกันได้โดยไม่ short ระหว่างเซลล์ ก็เพราะความต้านทานทาง lateral (แนวระนาบ) ของ a-Si:H มีค่าสูงมาก การปลูกเซลล์



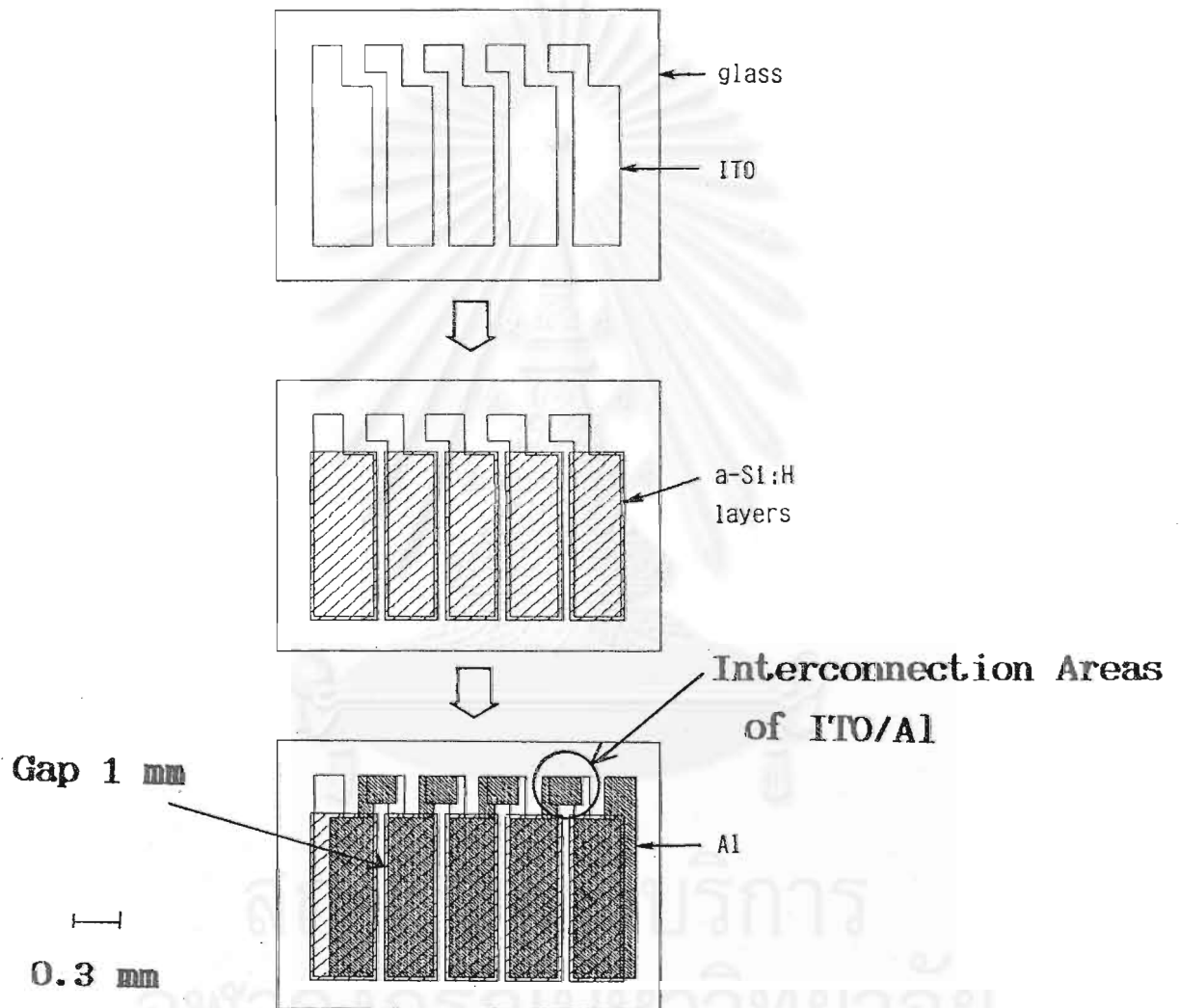
รูปที่ 5.1 ภาพ top view ของเซลล์ Integrated type รุ่นที่ 1 ในขั้นตอนการผลิตต่าง ๆ

วิธีนี้มีข้อดีคือขั้นตอนการผลิตง่ายไม่ยุ่งยาก แต่ข้อเสียคือชั้น n จะต้องเป็น a-Si:H เท่านั้น จะเป็น $\mu\text{c-Si:H}$ ไม่ได้เพราะว่า $\mu\text{c-Si:H}$ มีค่าสภาพนำไฟฟ้าสูง จะทำให้เซลล์ short ถึงกันหมด เซลล์ลักษณะนี้เหมาะสำหรับงานที่ใช้ power น้อย แรงดันไฟฟ้าต่ำ รูปที่ 5.2 แสดงภาพวงจรสมมูลของเซลล์แบบ integrated type จะเห็นได้ว่าแรงดันไฟฟ้าเป็นผลรวมของแรงดันไฟฟ้าของแต่ละเซลล์ แต่กระแสไฟฟ้าจะถูกกำหนดด้วยกระแสไฟฟ้าของเซลล์ ตัวที่น้อยที่สุด

เซลล์แบบ Integrated รุ่นที่สองในงานวิจัยนี้ ทำขึ้นเพื่อทดลองความเป็นไปได้ในการสร้างโมดูลของเซลล์ที่มีโครงสร้างเป็น $\text{glass/ITO/SnO}_2/\text{p a-SiC:H/i a-Si:H/n } \mu\text{c-Si:H/Al}$ คือใช้ชั้น n ที่เป็น MC-Si:H เพื่อให้เซลล์มีประสิทธิภาพสูงขึ้น และทดลองทำเซลล์ที่เรียงค่อนข้างชิดกันซึ่งจะทำให้สามารถผลิตเซลล์ได้หลายตัวบนแผ่นฐานอันหนึ่ง ๆ ระยะห่างของเซลล์แต่ละตัวเท่ากับ 1 mm. เซลล์แต่ละตัวมีพื้นที่ $0.3 \times 1.1 \text{ cm}^2$ ต่ออนุกรมกัน 5 ตัว บนแผ่นฐานแก้วขนาด $2 \times 2.5 \text{ cm}^2$ รูปที่ 5.3 แสดงภาพ Top View ของเซลล์รุ่นที่ 2 ในขั้นตอนการผลิตต่าง ๆ จะเห็นได้ว่า ชั้นของ a-Si:H จะถูกปลูกแยกอิสระจากกัน เพื่อตัดปัญหาเรื่องการช้อตระหว่างเซลล์



รูปที่ 5.2 วงจรสมมูลของเซลล์แบบ integrated type



รูปที่ 5.3 ภาพ top view ของเซลล์ Integrated type รุ่นที่ 2 ในขั้นตอนการผลิตต่าง ๆ

เซลล์ แบบ Integrated รุ่นที่สามในงานวิจัยนี้ เซลล์แต่ละตัวจะมีโครงสร้าง เหมือนกับเซลล์รุ่นที่สอง ระยะห่างของเซลล์แต่ละตัวก็เท่ากันคือ 1 mm. แต่เซลล์รุ่นนี้จะมีพื้นที่ของเซลล์แต่ละตัวใหญ่กว่าคือ $0.4 \times 4 \text{ cm}^2$ และมีเซลล์ย่อย 12 ตัวต่ออนุกรมกัน บนแผ่นฐานแก้วขนาด $5 \times 7.5 \text{ cm}^2$ รูปที่ 5.4 แสดงภาพ Top View ของเซลล์ ซึ่งจะเห็นว่า pattern ของขั้ว ITO และขั้ว Al จะมีส่วนยื่นออกมาทั้งสองปลาย เป็นการต่ออนุกรมกันของเซลล์ด้วยปลายทั้ง 2 ด้านของแต่ละเซลล์ เป็นการช่วยลดการสูญเสีย (loss) ใน ITO ได้ดีกว่าการต่ออนุกรมด้วยปลายเพียงด้านเดียว

5.2 การผลิตเซลล์แบบ Integrated Type

ขั้นตอนในการผลิตเซลล์แบบ Integrated Type ทั้งสามรุ่น สามารถแบ่งได้เป็นขั้น ๆ ดังนี้

1. ขั้นเตรียมแผ่นฐาน จะต้องกัด ITO ให้ได้ pattern ตามต้องการ การกัดใช้วิธีทาง photolithography รูปที่ 5.5 แสดงกระบวนการกัด ITO ให้ได้รูปแบบ pattern ที่ต้องการ

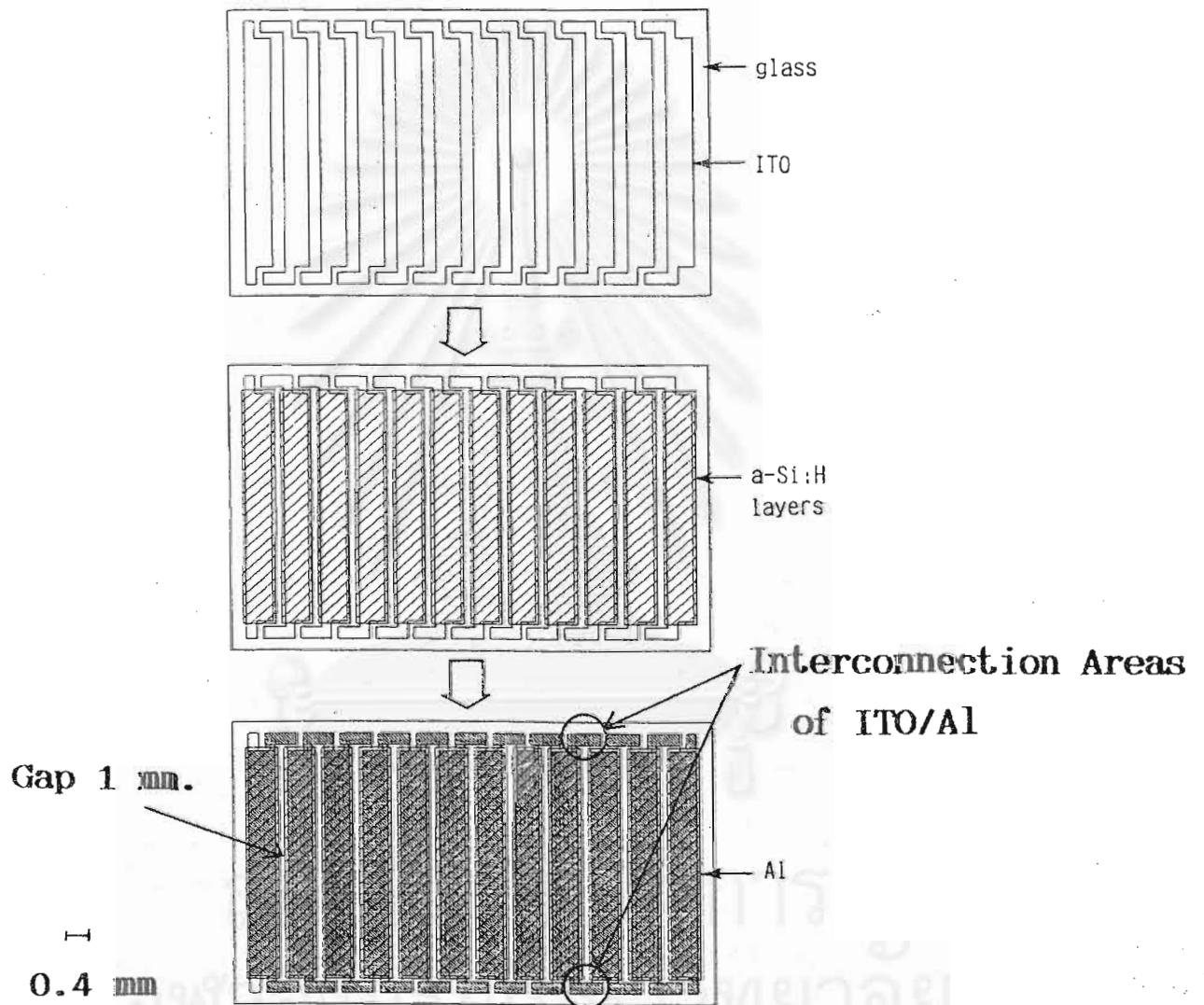
2. ขั้นตอนการปลูกเซลล์ สำหรับรุ่นที่ 1 จะประกอบด้วย ชั้น p a-SiC:H (220 Å) / i a-Si:H (5000 Å) / n a-Si:H (300 Å) ปลูกโดยใช้วิธี rf plasma CVD จะทำการปลูกฟิล์มตลอดทั่วทั้งแผ่นฐาน ยกเว้นบริเวณที่เป็นขั้วต่อรูปตะขอกของ ITO

สำหรับรุ่นที่ 2 และรุ่นที่ 3 จะประกอบด้วย ชั้น p a-SiC:H (200 Å) / i a-Si:H (6500 Å) / n a-Si:H (500 Å) ในการปลูกฟิล์ม จะต้องใช้ Mask ที่ทำจากอะลูมิเนียมหนา 1 mm. มาวางบนแผ่นฐานเพื่อปลูกฟิล์มชั้นอะมอร์ฟัสให้ได้รูปร่างตามต้องการการยึดแผ่น Mask เข้ากับแผ่นฐานทำได้โดยการใช้ Silver paste แต้มตรงมุมของแผ่น Mask แล้วประกบเข้ากับแผ่นฐาน ในการสร้างแผ่น Mask นั้นใช้วิธีเจาะ pattern ด้วยเลื่อยฉลุ ซึ่งถ้าจะให้ได้ชั้นฟิล์มที่มี uniformity ดียิ่งขึ้นกว่านี้ ควรใช้ Mask ที่ทำจาก stainless steel อย่างบางและกัดเป็น pattern ด้วยกรด HCl

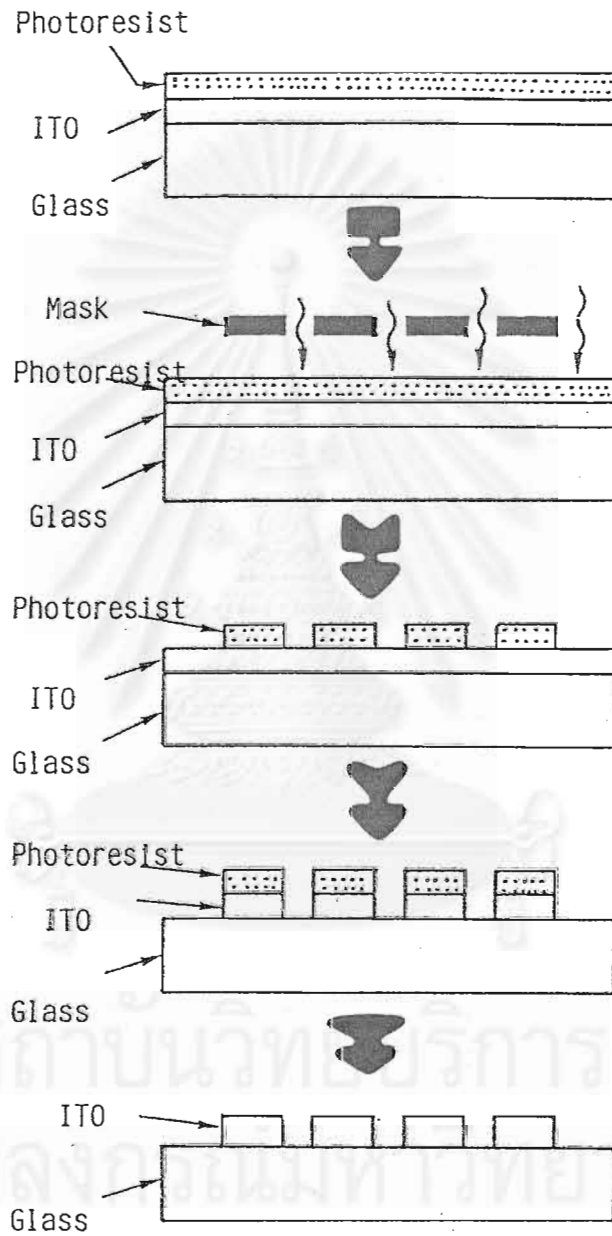
3. ขั้นตอนการเคลือบ Al back electrode ความหนาประมาณ 6000 Å ไปเชื่อมกับ ITO ของเซลล์ ที่อยู่ถัดไป Mask สำหรับการเคลือบอะลูมิเนียมนี้ ทำจากแผ่นอะลูมิเนียมหรือแผ่นสแตนเลสอย่างบางเช่นเดียวกับ Mask ของการปลูกชั้น a-Si:H รูปที่ 5.6, 5.7 และ 5.8 แสดงภาพถ่ายขั้นตอน การผลิตเซลล์ รุ่นที่ 1, รุ่นที่ 2 และรุ่นที่ 3 ตามลำดับ

5.3 ผลการผลิตเซลล์แบบ Integrated Type

ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะผลของเซลล์ ที่ผลิตขึ้นในงานวิจัยนี้ คือรุ่นที่ 2 และรุ่นที่ 3 รูปที่ 5.9 แสดงผลการวัดลักษณะสมบัติเอาท์พุท J/V ของเซลล์ รุ่นที่ 2 ที่มีเซลล์ ต่ออนุกรมกัน 5 ตัว เปรียบเทียบกับเซลล์ เดี่ยวขนาด 0.033 cm^2 ที่ผลิตพร้อมกัน สำหรับเซลล์แบบ



รูปที่ 5.4 ภาพ top view ของเซลล์ Integrated type รุ่นที่ 3 ในขั้นตอนการผลิต



รูปที่ 5.5 กระบวนการกัด pattern ของแผ่นฐาน ITO

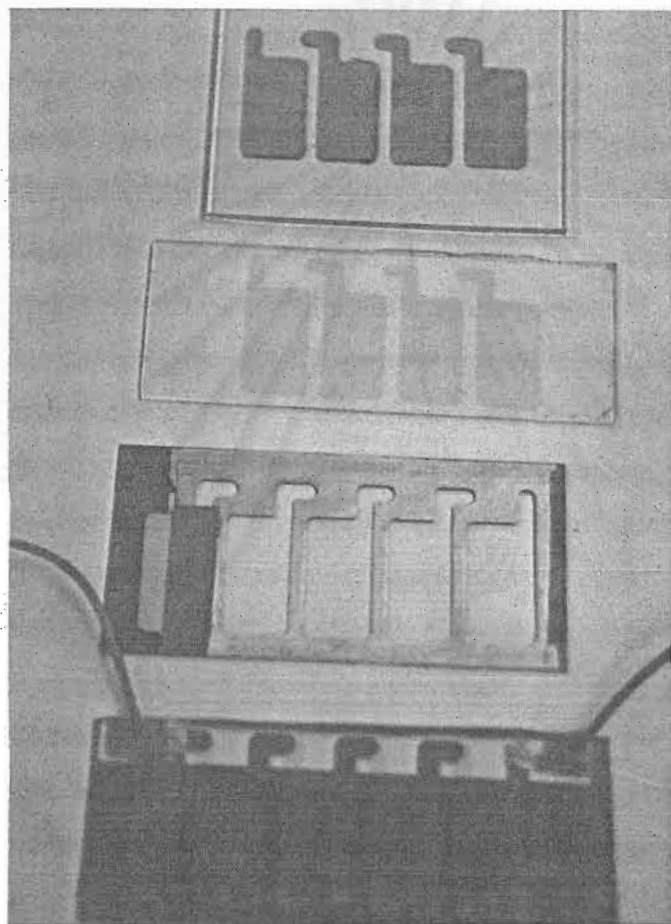
Integrated Type รุ่นที่ 2 นี้ แต่ละเซลล์ย่อยมีพื้นที่ 0.33 cm^2 จึงมีพื้นที่รับแสงประสิทธิภาพรวมเป็น 1.65 cm^2 , แรงดันวงจรเปิด 3.975 V กระแสไฟฟ้าลัดวงจร 2.63 mA/cm^2 , ฟิลล์-แพกเตอร์ 47.74% และมีประสิทธิภาพ 4.99% โดยวัดภายใต้แสงอาทิตย์ AM1 สำหรับเซลล์เดี่ยวที่ใช้อ้างอิงมีพื้นที่ 0.033 cm^2 , แรงดันวงจรเปิด 0.825 V , กระแสไฟฟ้าลัดวงจร 11.67 mA/cm^2 , ฟิลล์แพกเตอร์ 63.67% และมีประสิทธิภาพ 6.13% ที่ AM1 เช่นเดียวกัน

เพื่อเป็นการศึกษาว่าการต่ออนุกรมกันของเซลล์ มีผลทำให้ลักษณะสมบัติเอาท์พุทของเซลล์โดยรวมเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร จึงได้ทำการวัดลักษณะสมบัติเอาท์พุทของเซลล์ ที่อยู่บนแผ่นฐานเดียวกัน โดยเริ่มจากเซลล์ย่อย 1 ตัว, เซลล์ย่อย 2 ตัวที่ต่ออนุกรมอยู่ติดกัน, เซลล์ย่อย 3 ตัวที่ต่ออนุกรมอยู่ติดกัน จนถึงเซลล์ย่อย 5 ตัวต่ออนุกรมกัน คือทั้งแผ่นนั่นเอง สำหรับเซลล์ ที่นำมาวัดนี้ เป็นเซลล์ ที่มีคุณภาพต่ำ เพราะเซลล์ ตัวที่มีคุณภาพดีถูกนำไปใช้งานและถูก seal เพื่อป้องกันการชุดขีดแล้วจึงไม่สามารถนำมาวัดได้ ผลการวัดลักษณะสมบัติเอาท์พุทดังกล่าว อยู่ในรูปที่ 5.10 และรูปที่ 5.11 เป็นการ plot ระหว่างพารามิเตอร์ลักษณะสมบัติเอาท์พุทที่ได้จากรูปที่ 5.10 กับจำนวนเซลล์ ที่ต่ออนุกรมกัน จากรูปพบว่าเมื่อเซลล์ต่ออนุกรมกันมากขึ้น กระแสไฟฟ้าลัดวงจร และฟิลล์แพกเตอร์จะมีค่าลดลง สามารถอธิบายได้ว่าเนื่องมาจากกระแสไฟฟ้าเอาท์พุทของ โมดูล จะเท่ากับกระแสเอาท์พุทของเซลล์ ตัวที่น้อยที่สุด และยังมีผลมาจากความต้านทานอนุกรมที่เพิ่มขึ้นอีกด้วย ส่วนแรงดันวงจรเปิดจะเพิ่มขึ้นตามจำนวนของเซลล์ แต่จะเพิ่มมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับแรงดันวงจรเปิดของเซลล์แต่ละตัว

ในรุ่นที่ 3 ซึ่งเป็นเซลล์ ต่ออนุกรมกัน 12 ตัว เซลล์แต่ละตัวมีพื้นที่ 1.6 cm^2 มีพื้นที่รับแสงประสิทธิภาพทั้งสิ้น 19.2 cm^2 ผลการวัดลักษณะสมบัติเอาท์พุท J/V ที่ AM1 (100 mW/cm^2) โดยใช้ curve tracer แสดงในรูปที่ 5.12 a) ถึง i) จะสังเกตเห็นว่าโมดูลบางตัวมีแรงดันวงจรเปิดน้อย เนื่องจากมีเซลล์ บางตัวทะเลและลัดวงจร และทางโมดูลมีกระแสลัดวงจร และฟิลล์แพกเตอร์ไม่ดี เนื่องจากมีความต้านทานภายในสูง อาจเนื่องจาก contact ระหว่างเซลล์ ไม่ดีหรือเซลล์บางตัวมีคุณภาพไม่ดี

นอกจากนี้ ได้ทำการทดลองวัดลักษณะสมบัติเอาท์พุทของเซลล์ ย่อยของรุ่นที่ 3 ที่อยู่บนแผ่นฐานแผ่นเดียวกัน โดยเลือกเอาโมดูล No. 8 มาทำการวัด เปรียบเทียบกันระหว่างเซลล์ 1 ตัว, 3 ตัว, 6 ตัว, 9 ตัว และ 12 ตัวต่ออนุกรมกัน โดยวัดที่ AM1 40 mW/cm^2 ได้ผลดังที่แสดงในรูปที่ 5.13 กับจำนวนเซลล์ ที่ต่ออนุกรมกัน จากผลการวัดนี้จะเห็นได้ว่ากระแสลัดวงจรจะลดลงเมื่อจำนวนเซลล์ ที่ต่ออนุกรมเพิ่มขึ้น และแรงดันวงจรเปิดจะเพิ่มขึ้นตามจำนวนเซลล์ เช่นเดียวกับเซลล์ในรุ่นที่ 2 (สาเหตุที่วัดที่แสง 40 mW/cm^2 เพราะถูกจำกัดด้วยเครื่องวัดกระแสไฟฟ้า)

สำหรับเซลล์ โมดูลที่ดีที่สุด在这一รุ่นนี้ (No. 7) มีลักษณะสมบัติเอาท์พุทดังต่อไปนี้คือ แรงดันเปิดวงจร 10.1 V , กระแสลัดวงจร 0.81 mA/cm^2 , ฟิลล์แพกเตอร์ 55.6% , และประสิทธิภาพ 4.54% ที่ AM 1 (100 mW/cm^2)



Mask สำหรับ photoresist
ในการกัด pattern ITO

ขั้ว ITO ที่ถูกกัดเป็น
pattern แล้ว

Mask สำหรับการเคลือบ Al

เซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตได้

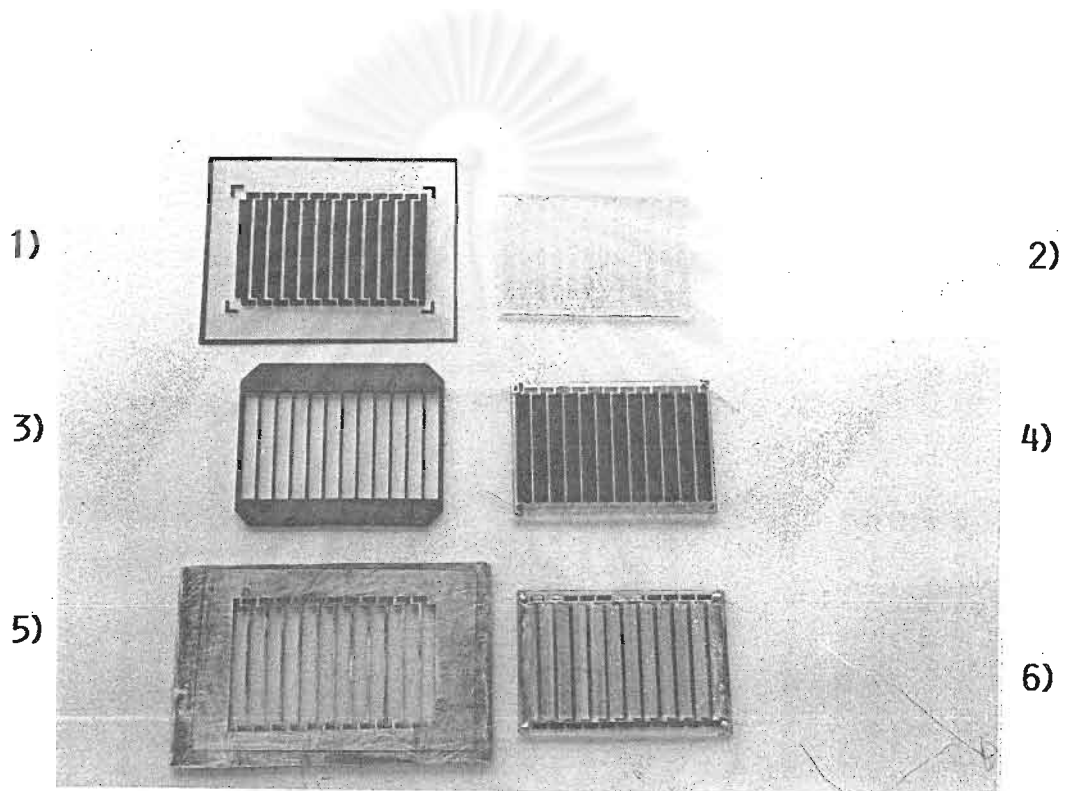
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 5.6 ภาพถ่ายขั้นตอนการผลิตเซลล์แบบ Integrated type รุ่นที่ 1



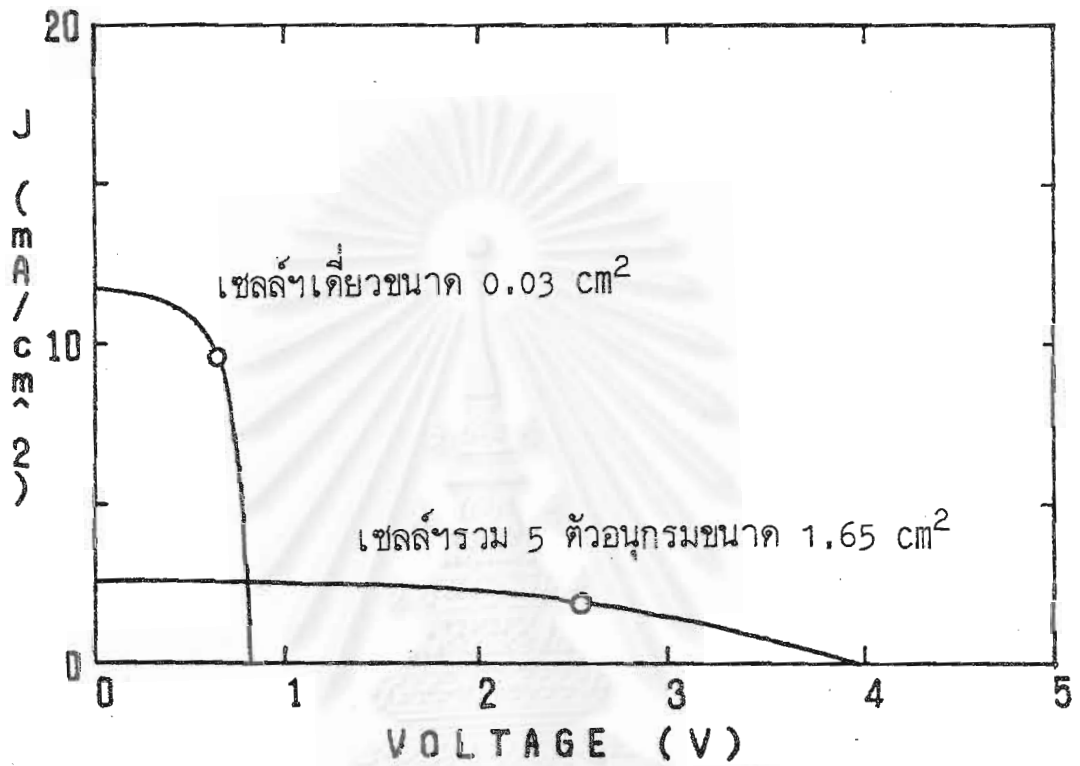
- 1) Mask สำหรับ photoresist ในการกัด pattern ITO
- 2) ชีว ITO ที่ถูกกัดเป็น pattern แล้ว
- 3) Mask สำหรับการปลูก a-Si:H
- 4) แผ่นฐานหลังจากปลูก a-Si:H แล้ว
- 5) Mask สำหรับการเคลือบ Al
- 6) เซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตได้

รูปที่ 5.7 ภาพถ่ายขั้นตอนการผลิตเซลล์แบบ integrated type รุ่นที่ 2



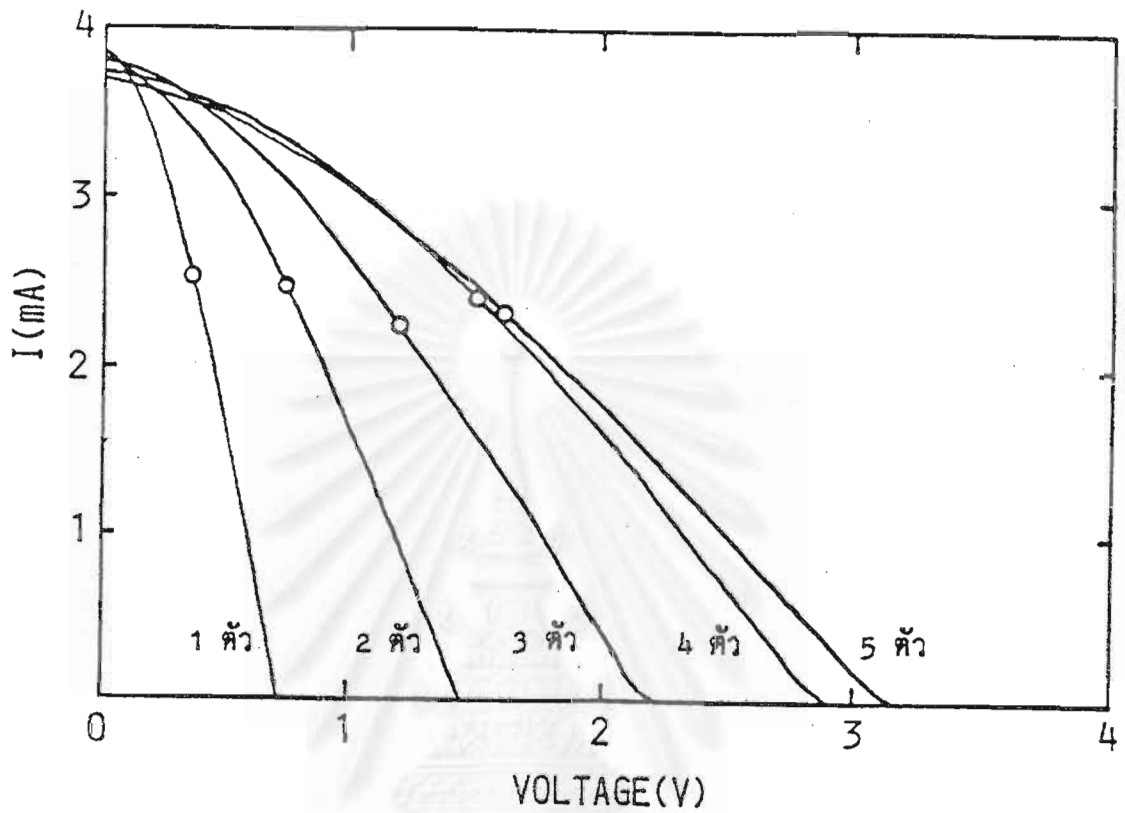
- 1) Mask สำหรับ photoresist ในการกัด pattern ITO
- 2) ชิ้น ITO ที่ถูกกัดเป็น pattern แล้ว
- 3) Mask สำหรับการปลูก a-Si:H
- 4) แผ่นฐานหลังจากปลูก a-Si:H แล้ว
- 5) Mask สำหรับการเคลือบ Al
- 6) เซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตได้

รูปที่ 5.8 ภาพถ่ายขั้นตอนการผลิตเซลล์แบบ integrated type รุ่นที่ 3



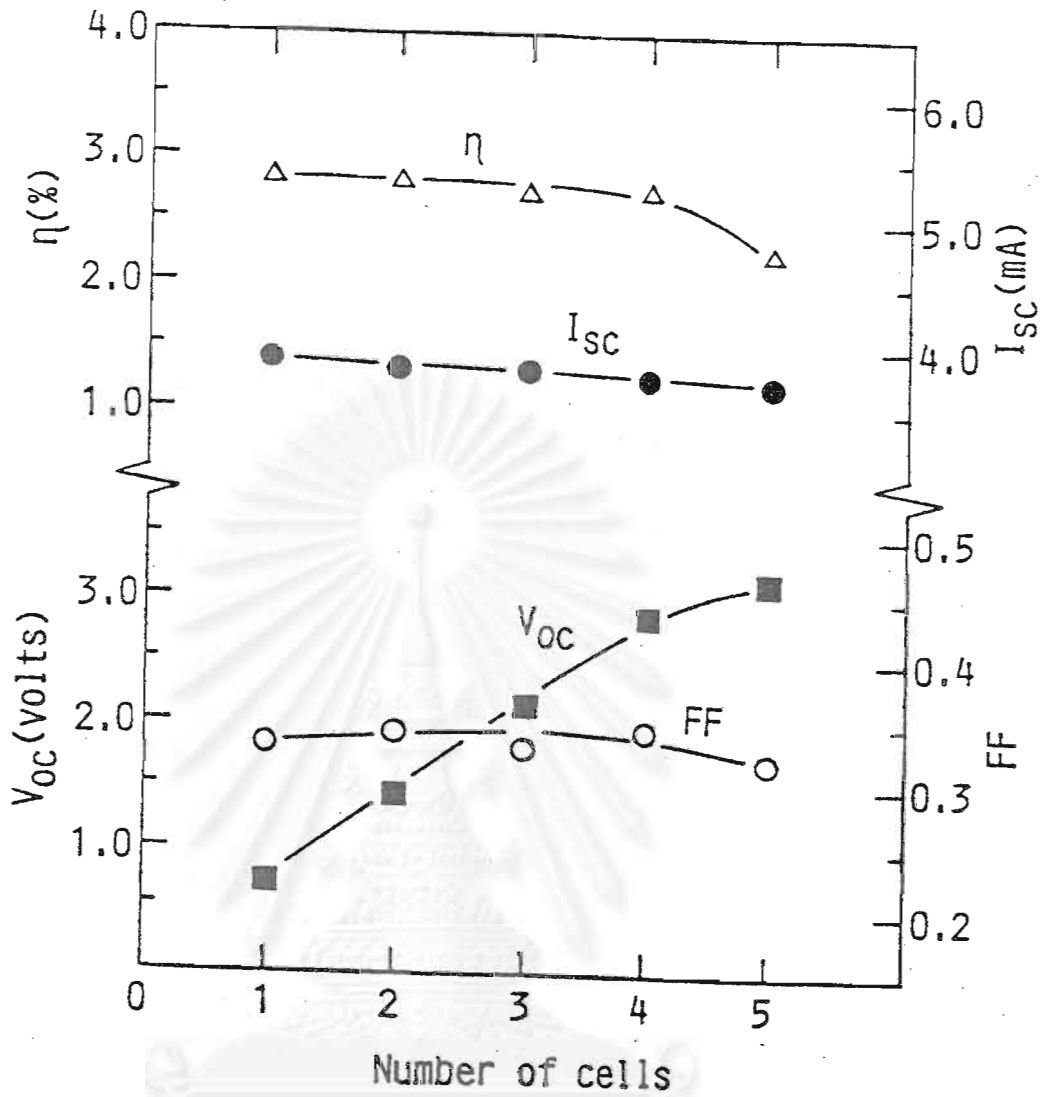
รูปที่ 5.9 ผลการวัดลักษณะสมบัติเอ๊าท์พุทของเซลล์ รุ่นที่ 2 เปรียบเทียบ
กับเซลล์เดี่ยวขนาด 0.03 cm^2 (วัดที่แสง 100 mW/cm^2)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



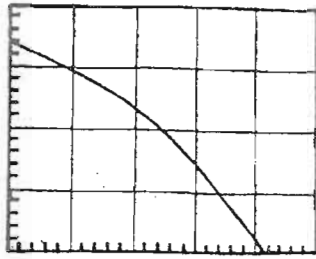
รูปที่ 5.10 ผลการวัดลักษณะสมบัติเอาท์พุทของเซลล์ฯ แบบ integrated type รุ่นที่ 2 เปรียบเทียบเซลล์ฯ โฉมแผ่นเดียวกันที่ต่ออนุกรมกันตั้งแต่ 1 ตัว, 2 ตัว, 3 ตัว, 4 ตัว จนถึง 5 ตัว (วัดที่แสง 100 mW/cm^2)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

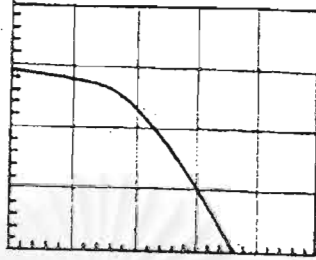


รูปที่ 5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะสมบัติเอาต์พุทของเซลล์ฯ แบบ integrated type รุ่นที่ 2 กับจำนวนเซลล์ฯ ที่ต่ออนุกรมกันบนแผ่นฐานเดียวกัน (วัดที่แสง 100 mW/cm²)

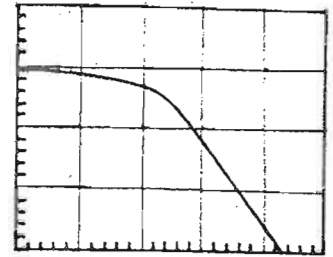
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



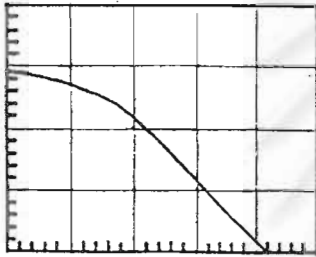
a) No.1



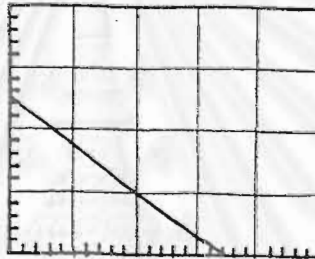
b) No.2



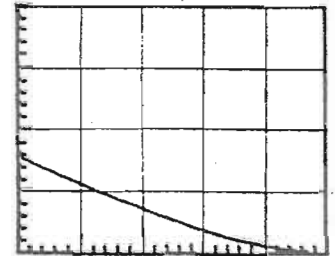
c) No.3



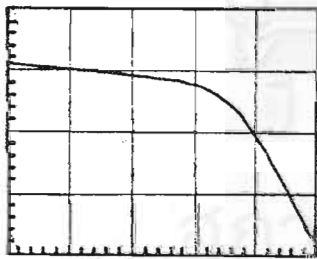
d) No.4



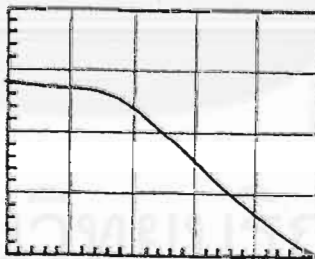
e) No.5



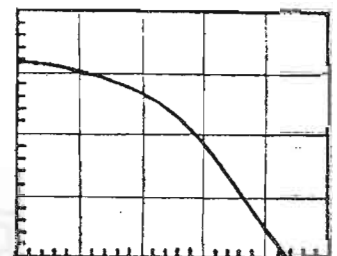
f) No.6



g) No.7



h) No.8

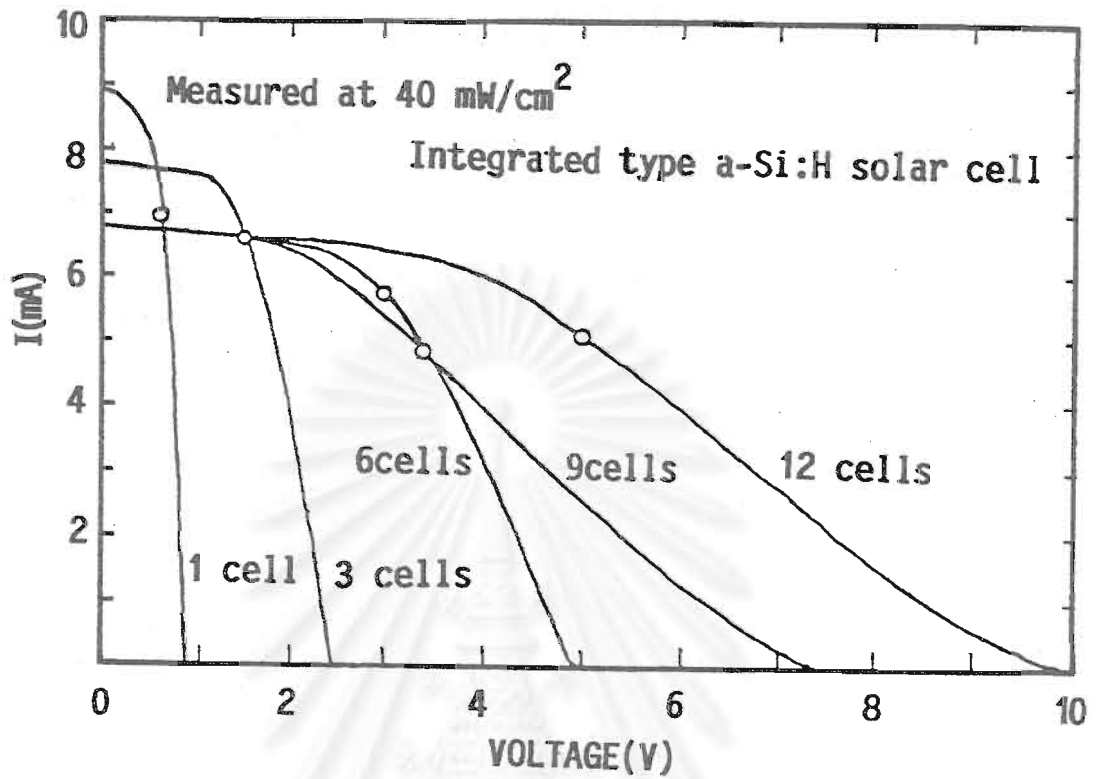


i) No.9

at AM 1 Vertical scale : 5 mA/div

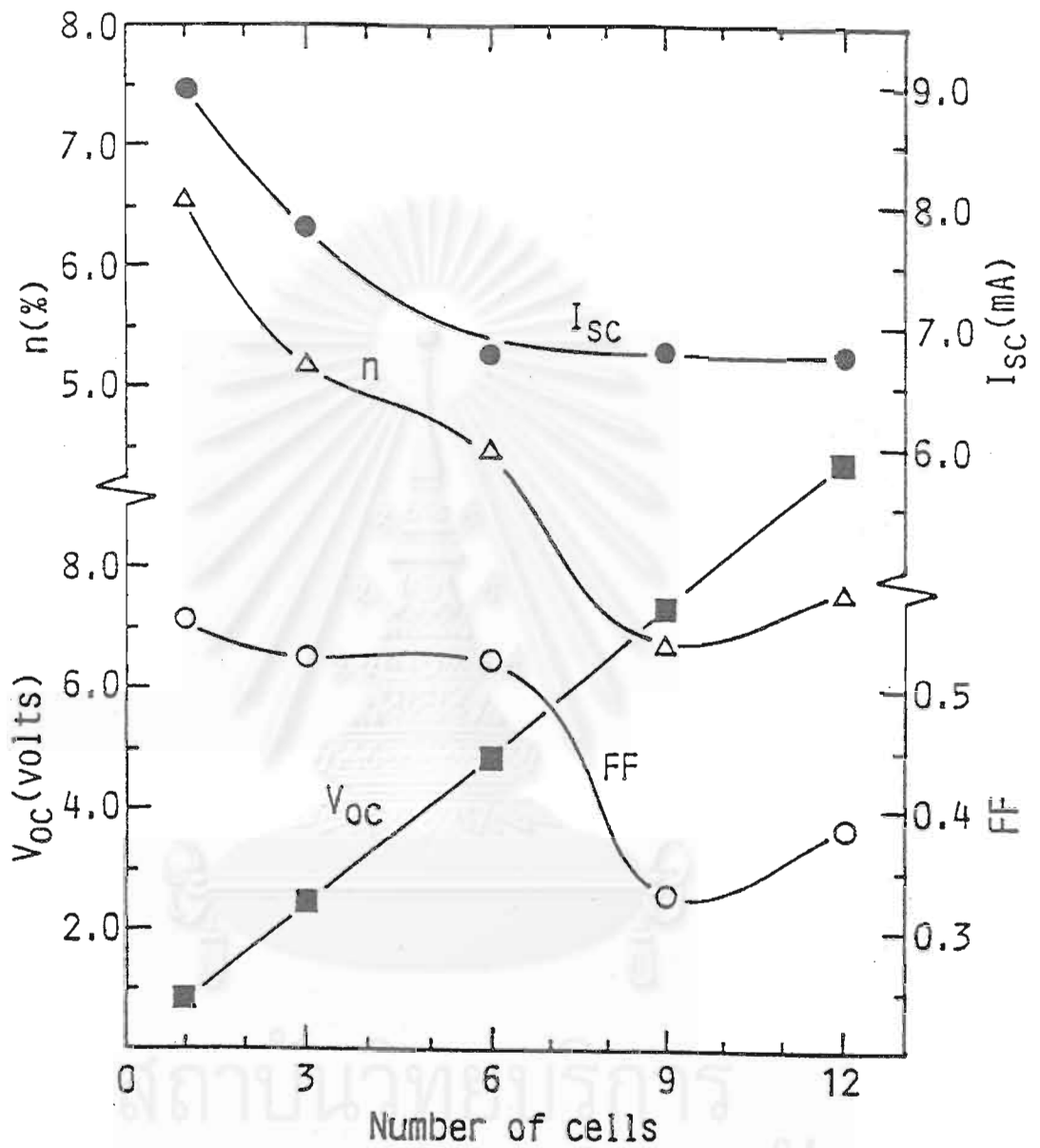
Horizontal scale : 2 V/div

รูปที่ 5.12 ผลการวัดลักษณะสมบัติเอาท์พุทของเซลล์ฯ แบบ integrated type รุ่นที่ 3 ซึ่งเป็นเซลล์ฯ ที่ต่ออนุกรม 12 ตัวบนแผ่นฐานเดียวกัน (วัดที่แสง 100 mW/cm^2)



รูปที่ 5.13 ผลการวัดพารามิเตอร์ลักษณะสมบัติเอาท์พุทของเซลล์ฯ แบบ integrated type รุ่นที่ 3 เปรียบเทียบเซลล์ฯ ในแผ่นเดียวกันที่ต่ออนุกรมกันตั้งแต่ 1 ตัว, 3 ตัว, 6 ตัว, 9 ตัว จนถึง 12 ตัว (วัดที่แสง 40 mW/cm^2)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะสมบัติเอาต์พุทของเซลล์ฯ แบบ integrated type รุ่นที่ 3 กับจำนวนเซลล์ฯ ที่ต่ออนุกรมกันบนแผ่นฐานเดียวกัน

เพื่อให้ได้ไมดูลที่มีแรงดันไฟฟ้าสูงพอที่จะชาร์จแบตเตอรี่ขนาด 12 V ได้ ผู้วิจัยได้ทำการคัดเลือกเซลล์ฯ มา 3 ตัวคือ No. 3, No. 7, และ No. 9 นำมาต่ออนุกรมพร้อมกับทำกรอบ case เพื่อให้มีความแข็งแรง และป้องกันความชื้นและฝุ่นละออง และเพื่อความสวยงาม และสามารถนำไปใช้งานจริงได้ ขั้นตอนการผลิต case ให้แก่ไมดูลมีดังนี้

1. ตัดไมดูลย่อยเข้ากับแผ่นกระจกด้านหน้า ต่อสายระหว่างเซลล์ฯและสายสู่ภายนอก
2. วางชั้น EVA และ TEDLAR (เป็นแผ่นพลาสติกที่ใช้ในการทำไมดูลเซลล์ฯในอุตสาหกรรม)
3. ปิดด้านหลังด้วยแผ่น BAKELITE
4. ตัดกรอบ Aluminum และซีลด้วยซิลิโคน
5. ใส่ Blocking Diode

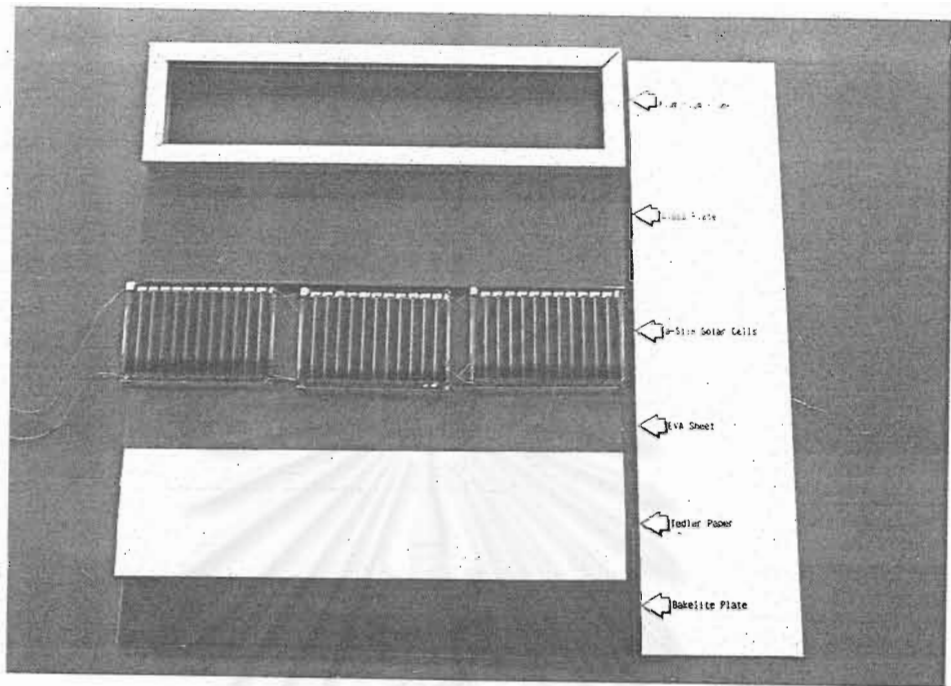
รูปที่ 5.15 แสดงภาพขั้นตอนของการผลิต case ให้แก่ไมดูล

เมื่อได้ไมดูลที่มี case เรียบร้อยแล้ว นำมาทดสอบการใช้งาน โดยต่อกับแบตเตอรี่ขนาด 12 V ดังรูปที่ 5.16 สำหรับแสงอาทิตย์ในเวลาเที่ยง จะได้กระแสทำงานประมาณ 11 mA และแรงดันทำงานประมาณ 12 V ในขณะที่แรงดันวงจรเปิดประมาณ 26 V ซึ่งก็ประสบผลสำเร็จตามที่ได้ตั้งจุดมุ่งหมายเอาไว้

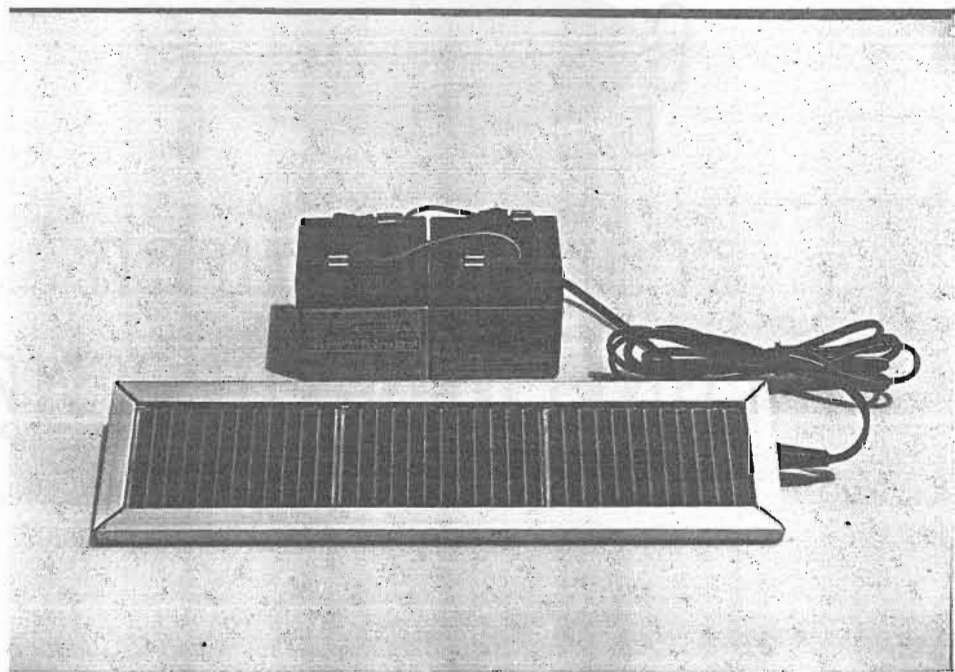
สำหรับการใช้งานของเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Integrated Type ที่ผลิตได้ ในลักษณะอื่น ๆ นอกเหนือไปจากการใช้ชาร์จแบตเตอรี่ ได้แก่ การใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟสำหรับเครื่องคิดเลข และการใช้ชาร์จถ่านไฟฉาย NiCd ขนาด 2.4 V ดังแสดงในรูปที่ 5.17 และ 5.18 ตามลำดับ

5.4 สรุป

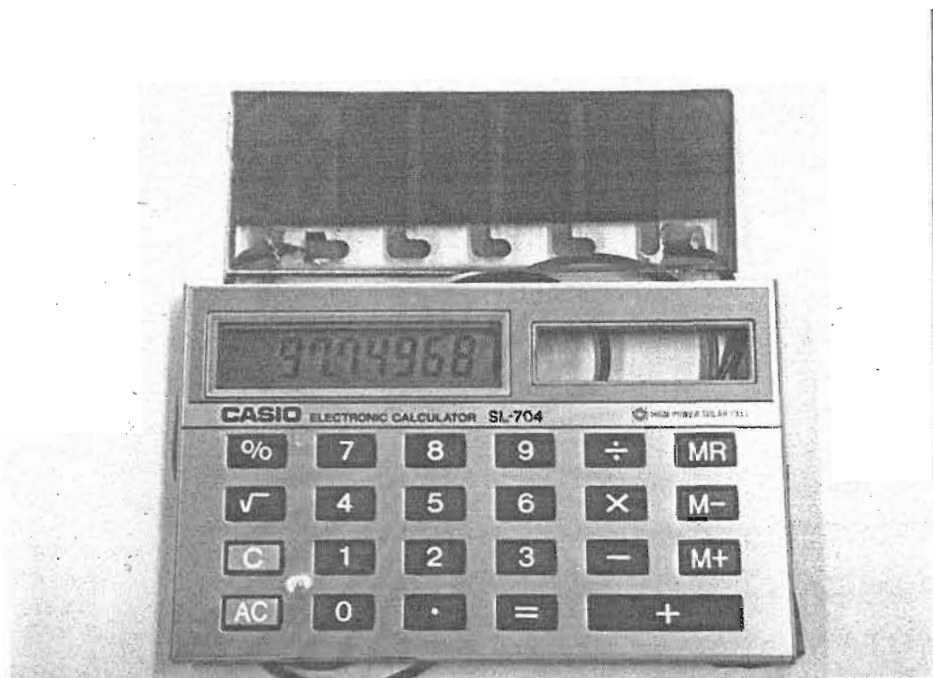
ได้ประสบความสำเร็จในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Integrated Type ซึ่งมีเซลล์ฯ ต่ออนุกรมกันหลายตัวบนแผ่นฐานแก้วแผ่นเดียวกัน แรงดันเอาต์พุทของแผงเซลล์ฯ จะมีค่ามากขึ้นตามจำนวนเซลล์ฯที่ต่ออนุกรมกัน ส่วนกระแสเอาต์พุทจะมีค่าที่ถูกลำดับด้วยพื้นที่ของเซลล์ย่อยแต่ละตัว ผู้วิจัยได้ทดลองผลิตเซลล์ฯแบบ Integrated Type หลายรุ่น ตามตารางที่ 5.1



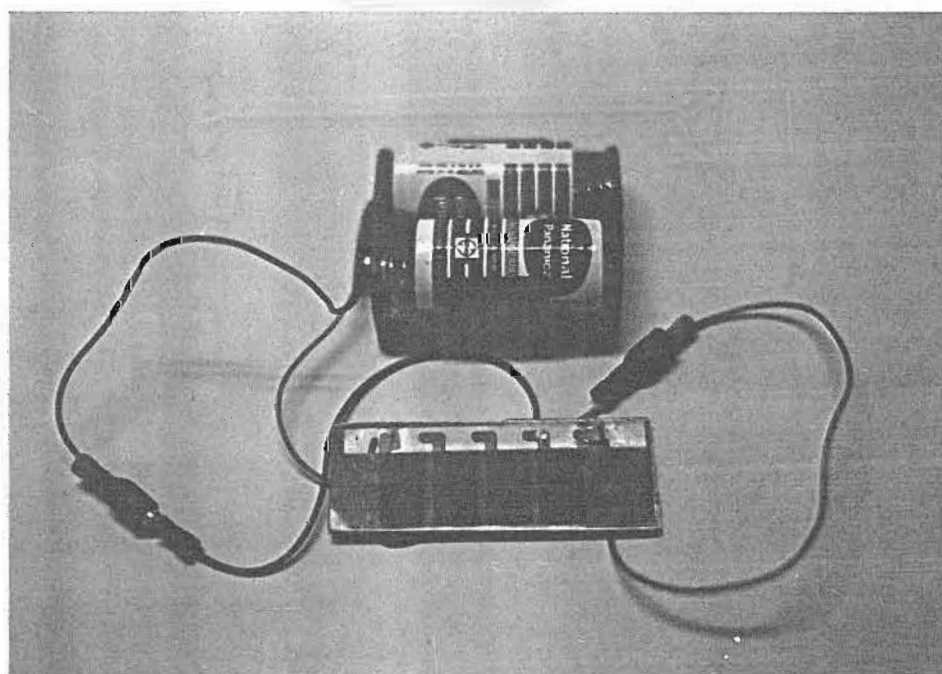
รูปที่ 5.15 ภาพถ่ายขั้นตอนการประกอบ case ให้แก่มอดูล



รูปที่ 5.16 ภาพถ่ายการใช้งานโมดูลเซลล์ที่ผลิตได้ในการชาร์จแบตเตอรี่ขนาด 12 V



รูปที่ 5.17 ภาพถ่ายการใช้งานโมดูลเซลล์ฯ ที่ผลิตได้เป็นแหล่งจ่ายไฟให้แก่เครื่องคิดเลข



รูปที่ 5.18 ภาพถ่ายการใช้งานโมดูลเซลล์ฯ ที่ผลิตได้ในการชาร์จถ่าน NiCd ขนาด 2.4 V.

ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบลักษณะสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Integrated Type รุ่นต่าง ๆ ที่ผลิตได้

รุ่น ที่	พ.ท. ของเซลล์ ย่อยแต่ละตัว (cm ²)	จำนวนเซลล์ที่ต่อ อนุกรม (ตัว)	พ.ท. รวม (cm ²)	J _{sc} (mA/cm ²)	V _{oc} (Volt)	FF (%)	η (%)
1	2.0	4	8.0	1.26	3.15	44.1	1.75
2	0.33	5	1.65	2.63	3.98	47.7	4.99
3	1.6	12	19.2	0.81	10.10	55.6	4.54

จากผลการทดลองที่ผ่านมา ผู้วิจัยประสบความยากลำบากในการพัฒนา microelec-
tronic technology มาใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนแบบ Integrated Type
อาทิเช่น ความแม่นยำในการจัด pattern alignment ของฟิล์มชั้นต่าง ๆ ซึ่งใช้เพียงมือและ
สายตาเท่านั้น จากประสบการณ์ถ้ากำหนดให้เงื่อนไขกระบวนการผลิตเหมือนกันหมด คุณภาพของ
แผ่นเซลล์จะดีหรือไม่ดีนั้น ตอนข้างจะต้องอาศัยความชำนาญ (skill) ของผู้ผลิตเป็นอย่างมาก
ดังนั้น ในการพัฒนาเพื่อให้สามารถผลิตแผงเซลล์ฯ ได้คุณภาพที่ดีอย่างสม่ำเสมอ (มี reproduci-
bility) จำเป็นที่จะต้องสร้างเครื่องมือช่วยด้านการ alignment และติด mask ในการปลูก
ฟิล์มชั้นต่าง ๆ เพื่อช่วยลดความผิดพลาดที่อาจเกิดจากผู้ผลิตลง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



บทที่ 6

การนิยามเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนที่ให้แรงดันเอาต์พุตด้วย โครงสร้าง Tandem

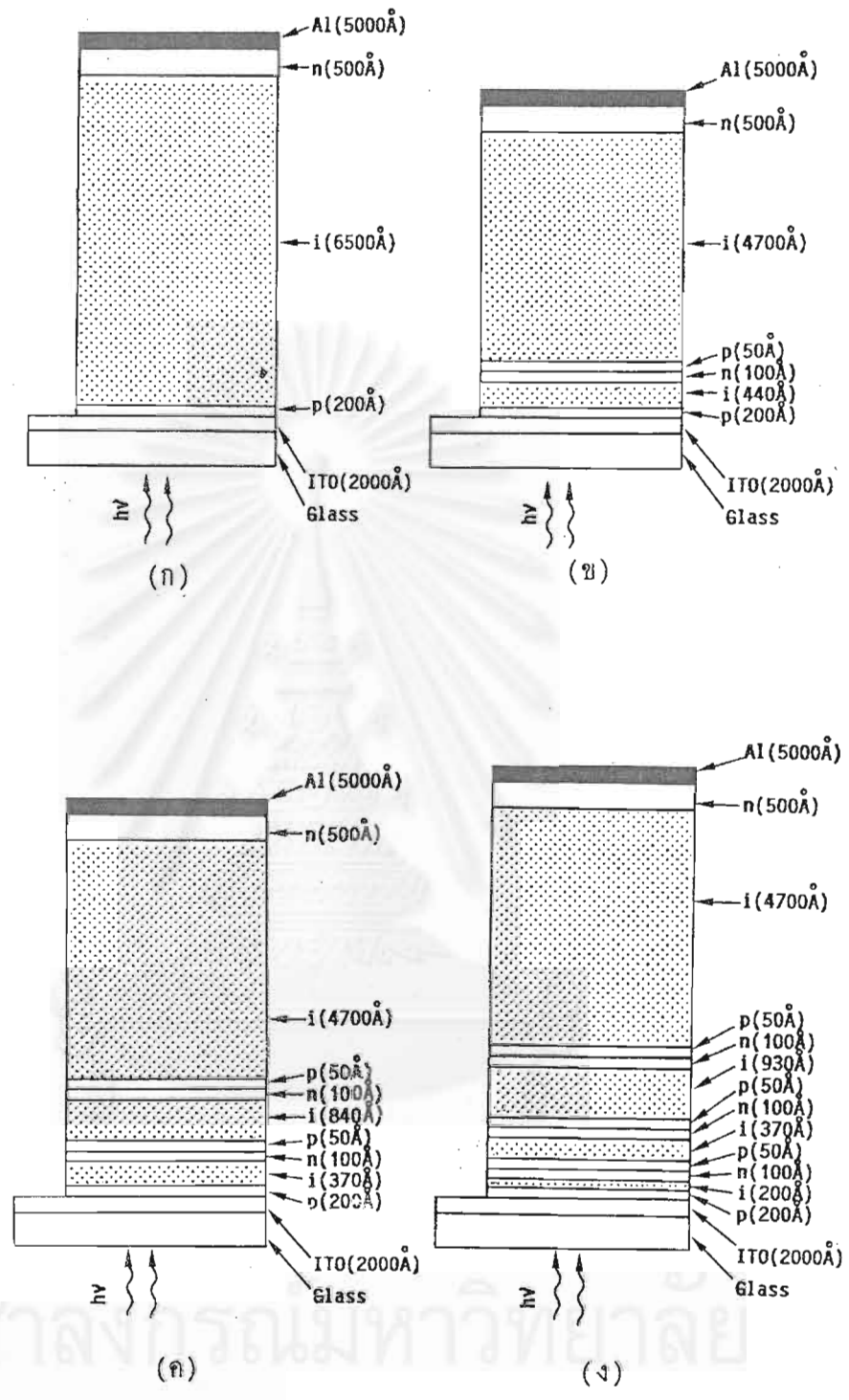
บทนำ

ข้อดีเด่นของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน (a-Si:H) ได้แก่การผลิตเป็นพื้นที่ใหญ่ได้ง่าย และมีราคาต้นทุนถูกกว่าเซลล์ชนิดผลึกเดี่ยวและผลึกโพลีซิลิคอน โครงสร้างโดยทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H คือรอยต่อ glass/ITO/p-i-n a-Si:H/Al โดยที่ชั้น i เป็นชั้นผลิตพาหะ (photo-generated carriers) และชั้น p และ n ทำหน้าที่สร้าง built-in potential เพื่อขับ (drift) พาหะให้ไหลออกสู่วงจรภายนอก โดยทั่วไปเซลล์ชนิด a-Si:H 1 ตัว (p-i-n 1 ชุด) จะให้แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (V_{oc}) ประมาณ 0.8-0.9 V ซึ่งมีค่าสูงกว่าของกรณีเซลล์ชนิดผลึก Si ($V_{oc} = 0.5-0.6 V$) ในการที่จะผลิตให้เซลล์แสงอาทิตย์มีแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดมีค่าสูงมาก ๆ เช่น เพื่อใช้ชาร์จแบตเตอรี่นั้น อาจทำได้หลายวิธีอาทิเช่น

1. เลือกใช้วัสดุสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างพลังงานกว้าง
2. ต่อเซลล์ให้ต่ออนุกรมกันในแนวระนาบ ซึ่งอาจต่อด้วยสายไฟฟ้าหรือใช้เทคนิคฟิล์มบาง
3. ต่อเซลล์ให้ต่ออนุกรมกันในแนวตั้งซ้อน ๆ กันหลาย ๆ ชั้น

ในกรณีที่ 1 นั้น a-Si:H มีช่องว่างพลังงาน 1.8 eV ซึ่งกว้างพอสมควรแล้ว ในกรณีที่ 2 นั้น ผู้วิจัยได้เคยผลิตเซลล์ให้ต่ออนุกรมกันด้วยเทคนิคฟิล์มบางในแนวระนาบและให้ชื่อว่าเซลล์แบบวงจรรวมไปแล้วดังที่กล่าวในบทที่ 5 [16]

ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบและผลการผลิตเซลล์ให้เคลือบซ้อนทับกันหลาย ๆ ชั้นในแนวตั้งโดยมีโครงสร้าง glass/ITO/a-Si:H p-i-n-p-i-n-.../Al ดังแสดงในรูปที่ 6.1 ซึ่งจะทำให้ได้ V_{oc} สูง และเรียกเซลล์โครงสร้างเช่นนี้ว่า tandem เซลล์ชนิดนี้ผลิตได้ง่าย เพราะเพียงแต่ใช้ process แยกก๊าซด้วยวิธี glow-discharge plasma CVD เป็นชั้น p-i-n ให้ซ้ำ ๆ กัน หลาย ๆ ครั้ง และเนื่องจากเป็นวัสดุอะมอร์ฟัสจึงปลูกเป็นฟิล์มได้ง่ายแบบ non-epitaxy



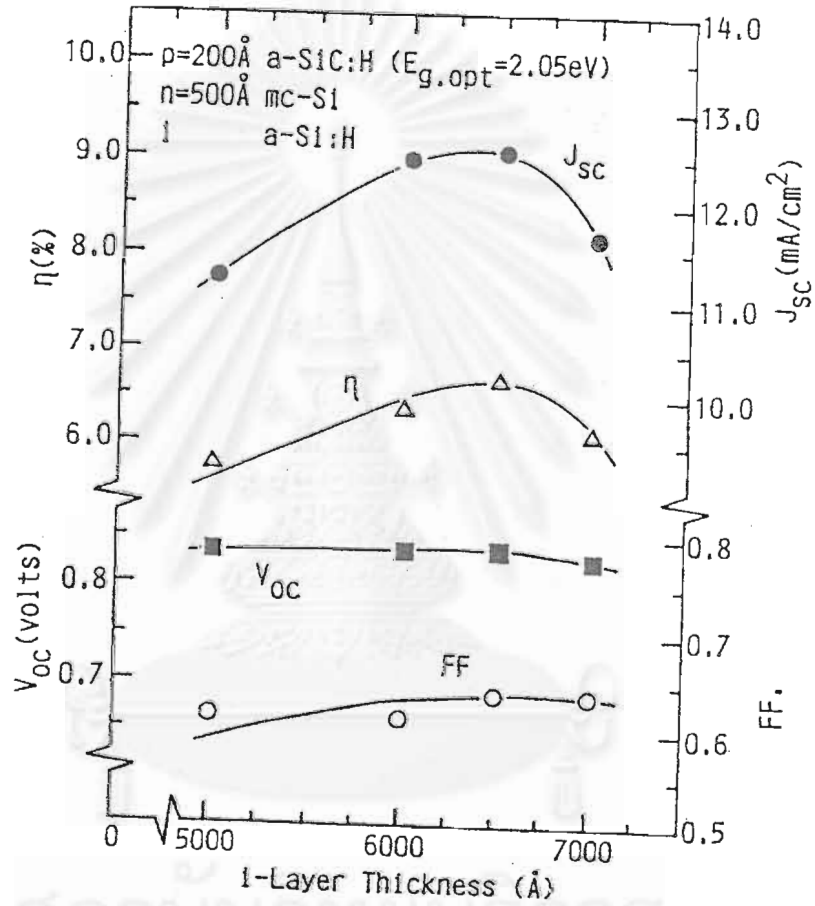
รูปที่ 6.1 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนรอยต่อ p-i-n โดยมี p-i-n จำนวน 1 ชั้น (ก), 2 ชั้น (ข), 3 ชั้น (ค) และ 4 ชั้น (ง)

6.1 หลักการและการออกแบบที่เหมาะสมของเซลล์แบบ Tandem

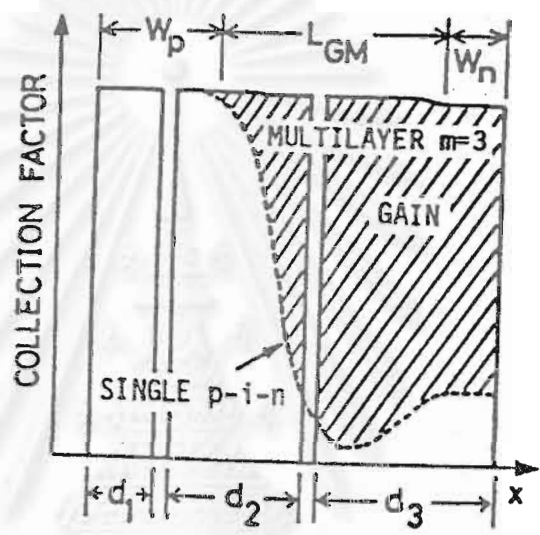
ลักษณะสมบัติเอากัณฑ์ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H p-i-n ขึ้นกับความหนาของชั้น p, i และ n มาก รูปที่ 6.2 แสดงผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของชั้น i และพารามิเตอร์เอากัณฑ์ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H [17] จากรูปนี้พบว่า ความหนาที่เหมาะสมที่สุดของชั้น i อยู่ในช่วง 5,000-7,000 Å ซึ่งค่อนข้างจะบางมาก เมื่อเปรียบเทียบกับความหนาหลายไมครอนของชั้น depletion ในรอยต่อ p-n ของเซลล์ชนิดผลึก Si ความหนาที่เหมาะสมของชั้น i เพียง 5,000-7,000 Å นี้มีสาเหตุมาจากการที่ระยะทางแพร่ซึม (diffusion length) ของพาหะโดยเฉพาะอย่างยิ่งของโฮลมีค่าสั้น และย่านที่สนามไฟฟ้ามีค่าสูงในชั้น i มีค่าสั้น [2] สาเหตุเหล่านี้ทำให้ค่า carrier collection factor ของเซลล์ลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อชั้น i มีความหนาขึ้นมาก ๆ ดังแสดงด้วยเส้นโค้งในรูปที่ 6.3 สนามไฟฟ้าในชั้น i ที่บริเวณใกล้รอยต่อ p/i (w_p) และ i/n (w_n) มีค่าสูงกว่าตรงกลางของชั้น i ด้วยเหตุนี้ถ้าเราแบ่งชั้น i ออกเป็นเซลล์ p-i-n ย่อย ๆ หลายชุด เช่น 3 ชุดดังแสดงในรูปที่ 6.3 (มีชุด d_1 , d_2 และ d_3) ก็คาดว่า carrier collection factor จะมีค่าสูงสม่ำเสมอตลอดความหนาทั้งหมด ซึ่งจะทำให้โฟตอนที่ถูกดูดกลืนจะสร้าง photocurrent ได้ดี และทำให้ fill factor (FF) ในเซลล์แบบ tandem มีค่าดีกว่าเซลล์แบบ p-i-n เพียงชุดเดียว

เซลล์แบบ tandem ที่กำลังเสนอในบทนี้มีรอยต่อ glass/ITO/a-Si:H p-i-n-p-i-n-.../Al ดังแสดงในรูปที่ 6.4 (ก) รูปที่ 6.4 (ข) แสดงลักษณะแถบพลังงานของเซลล์ขณะยังไม่ถูกแสง และรูปที่ 6.4 (ค) แสดงลักษณะแถบพลังงานของเซลล์ขณะถูกแสง และรูปที่ 6.4 (ง) แสดงวงจรสมมูลย์ เซลล์ย่อยทั้ง 3 ชุดนี้ เมื่อถูกแสงก็จะผลิต photocurrent ซึ่งจะมีค่ามากน้อยขึ้นกับ photon flux ที่เซลล์แต่ละตัวดูดกลืน จากวงจรสมมูลย์ในรูป (ง) แรงดันไฟฟ้าเอากัณฑ์ทั้งหมดจะเท่ากับผลบวกของแรงดันไฟฟ้าเอากัณฑ์ของเซลล์ย่อยแต่ละตัว และกระแสไฟฟ้าเอากัณฑ์จะมีค่าเท่ากับกระแสไฟฟ้าเอากัณฑ์ที่มีค่าต่ำสุดของเซลล์ย่อยแต่ละตัว [18]

รูปที่ 6.5 แสดงตัวอย่างผลการวัดลักษณะสมบัติของไดโอดที่มีโครงสร้าง a-Si:H p-i-n และเปรียบเทียบกับ a-Si:H p-n จากรูปนี้พบว่ารอยต่อ a-Si:H p-i-n จะเป็นไดโอดที่ดี แต่รอยต่อ a-Si:H p-n จะไม่เป็นไดโอด เพราะกระแสไฟฟ้าไบแอสตามและย้อนมีค่าใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นรอยต่อ p-n ของ a-Si:H จึงทำหน้าที่เปรียบเสมือนรอยต่อไอทรมิคด้วยเหตุนี้ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด tandem ของ p-i-n-p-i-n-... จึงไม่มี built-in potential เกิดขึ้นที่รอยต่อ n-p แต่จะมี built-in-potential เกิดขึ้นที่รอยต่อ p-i-n เท่านั้น และรอยต่อ n-p ทำหน้าที่เปรียบเสมือนตัวต้านทานเชื่อมเซลล์แสงอาทิตย์ข้างเคียงให้ต่ออนุกรมกันนั่นเอง

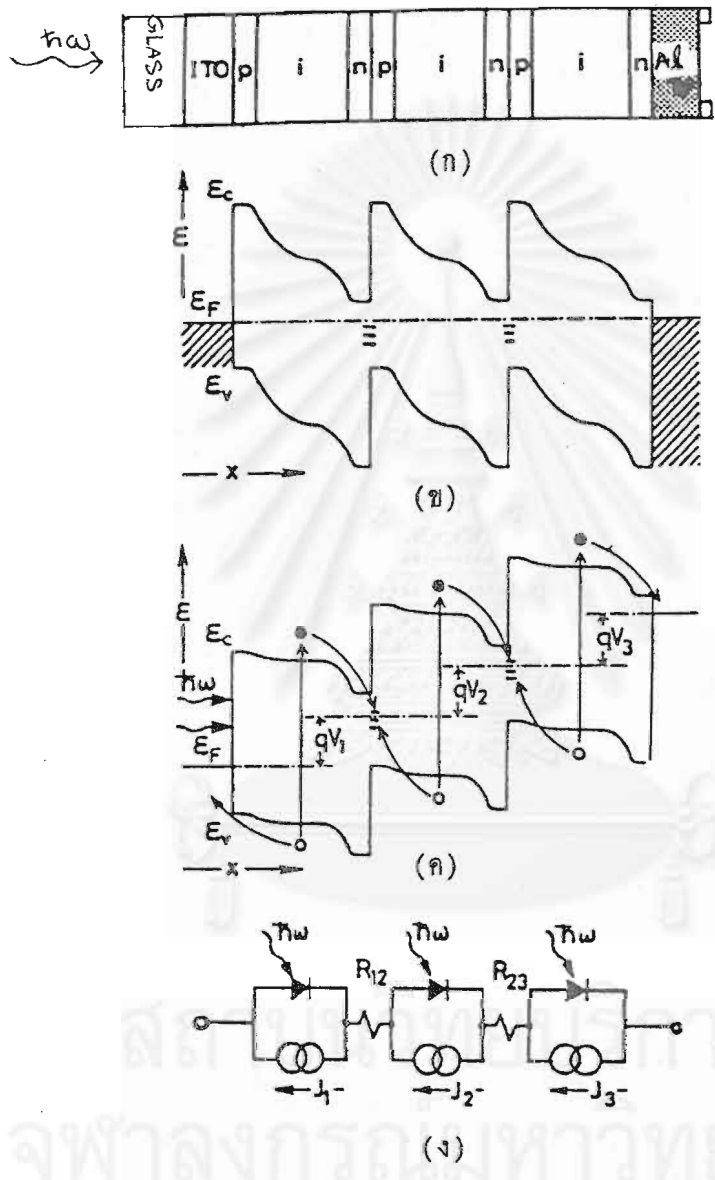


รูปที่ 6.2 การขึ้นกับความหนาของชั้น i ของลักษณะสมบัติเอาก์พุกของ
 เซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อ p-i-n 1 ชุด

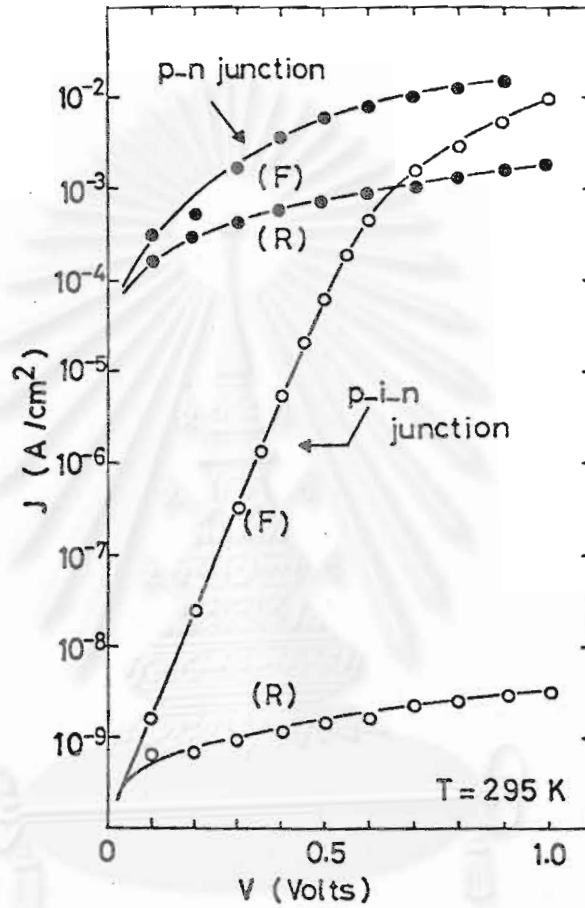


รูปที่ 6.3 การเปลี่ยนแปลงของค่า carrier collection factor ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 6.4 (ก) โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H รอยต่อ multi-layer ต่ออนุกรมกัน
 (ข) แถบพลังงานขณะไม่มีแสง
 (ค) แถบพลังงานขณะมีแสง
 (ง) วงจรสมมูล



รูปที่ 6.5 ลักษณะสมบัติ J-V ของ a-Si:H รอยต่อ p-i-n (วงกลมขาว) และรอยต่อ p-n (วงกลมดำ) F คือกรณี forward bias และ R คือกรณี reverse bias

6.1.1 การออกแบบที่เหมาะสมของเซลล์แสงอาทิตย์แบบ Tandem

1) การคำนวณค่าแรงดันเอาต์พุต

ในเซลล์แสงอาทิตย์ทั่ว ๆ ไป ลักษณะสมบัติเอาต์พุตแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดัน (I-V) มีรูปร่างดัง [19]

$$I = I_s \left(\exp\left[q \frac{(V+IR)}{nKT} \right] - 1 \right) + \frac{V+IR}{R_{sh}} - I_L \quad (1)$$

โดยที่ I : กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต

V : แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต

I_L : photocurrent ที่เกิดในเซลล์

I_s : saturation current

n : diode quality

R : series resistance

R_{sh} : shunt resistance

ถ้าสมมติให้ R_{sh} มีค่าสูงมากใกล้อนันต์ สมการที่ (1) จะเขียนได้ใหม่ว่า

$$V+IR = \frac{nKT}{q} \cdot \ln \left[\frac{I_L + I_s - I}{I_s} \right] \quad (2)$$

ดังนั้นในการมีเซลล์แสงอาทิตย์ โครงสร้าง Tandem ตามที่แสดงในรูปที่ 6.4 จึงแสดงได้ว่า [18]

$$V+IR = \frac{nKT}{q} \cdot \ln \left[\prod_{i=1}^m \left\{ \frac{I_{L_i} + I_s - I}{I_s} \right\} \right] \quad (3)$$

โดยที่ I_{L_i} : photocurrent ที่เกิดขึ้นในเซลล์แต่ละตัว

m : จำนวนของเซลล์แสงอาทิตย์ (จำนวนของชุด p-i-n)

R : series resistance ทั้งหมด

V : แรงดันเอาต์พุตทั้งหมด

จากการคำนวณทางพีชคณิตในสมการที่ (3) จะได้ว่าแรงดันวงจรมืด V_{oc} และกระแสลัดวงจร I_{sc} จะมีค่าสูงสุด เมื่อ photocurrent I_{L_i} มีค่าเท่ากับ $1/m$ ของ I_L ถ้า $I_L = \sum_{i=1}^m I_{L_i}$ ดังนั้นค่า V_{oc} และ I_{sc} สูงสุดจะมีค่าดังนี้ [18]

$$V_{oc} = m \left(\frac{nkT}{q} \right) \left[\ln \left(\frac{I_L}{I_s} \right) - \ln(m) \right] \quad (4)$$

โดยที่ $I_L \gg I_s$

และ

$$I_{sc} = \frac{I_L}{m} \quad (5)$$

โดยที่ $I_{sc} \ll \left(\frac{mnkT}{qR} \right) \ln \left(\frac{I_L}{mI_s} \right)$

ดังนั้นจากสมการที่ (4) และ (5) นี้จึงทำให้เราทราบอย่างกว้าง ๆ ได้ว่า V_{oc} แปรผันตรงกับจำนวนของเซลล์ (m) แต่ I_{sc} แปรผกผันกับจำนวนของเซลล์ (m) นอกจากนี้ สมการที่ (3) สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} V + IR &= \frac{nkT}{q} \ln \left[\frac{\frac{I_L}{m} + I_s - I}{I_s} \right] \\ &= m \frac{nkT}{q} \ln \left[\frac{I_L + mI_s - mI}{mI_s} \right] \\ \frac{V}{m} + mI \frac{R}{m^2} &= \frac{nkT}{q} \ln \left[\frac{I_L + mI_s - mI}{mI_s} \right] \\ \bar{V} + \bar{I} R_{eff} &= \frac{nkT}{q} \ln \left[\frac{I_L + \bar{I}_s - \bar{I}}{\bar{I}_s} \right] \quad (6) \end{aligned}$$

โดยที่ $\bar{V} = V/m$, $\bar{I} = mI$, $\bar{I}_s = mI_s$ และ

$$R_{eff} = \frac{R}{m^2} \quad (7)$$

จากสมการที่ (6) และ (7) นี้ ทำให้เราทราบว่า แม้ว่าการเพิ่มจำนวนเซลล์ (m) จะทำให้ค่า series resistance (R) เพิ่มขึ้น แต่โดยภาพรวมแล้ว ค่า effective series resistance (R_{eff}) จะลดน้อยลงตามแฟกเตอร์ $1/m^2$ ดังนั้นเราจึงคาดหวังได้ว่าการเพิ่มจำนวนเซลล์หลาย ๆ ชิ้นจะทำให้ fill factor (FF) ของเซลล์แสงอาทิตย์ดีขึ้นด้วย ดังจะได้พบเห็นในผลการทดลองหัวข้อที่ 6.3

2) การออกแบบความหนาของชั้น i a-Si:H ในเซลล์แต่ละตัว

ความหนา (d_i) ของชั้น i a-Si:H ในเซลล์แต่ละตัวมีบทบาทต่อค่า photocurrent (I_{Li}) รวมทั้งประสิทธิภาพของเซลล์โดยรวมเป็นอย่างมาก ในหัวข้อนี้จะอธิบายแนวทางการออกแบบความหนาของชั้น i ในเซลล์แต่ละตัวว่าควรเป็นอย่างไร

ค่าความหนา d_i ที่เหมาะสม เริ่มแรกควรจะต้องคล้องกับเงื่อนไขที่ทำให้

$$I_{Li} = \frac{I_L}{m} \quad (i = 1, \dots, m) \quad (8)$$

กล่าวคือเนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลในเซลล์ทุกตัวจะมีค่าถูกกำหนดโดยเซลล์ตัวที่ให้กระแสไฟฟ้าเอาที่น้อยที่สุด และเนื่องจากเซลล์ชั้นที่ 1 จะได้รับแสงเข้มมากที่สุด ในขณะที่เซลล์ที่อยู่ลึกเข้าไปด้านหลังจะได้รับแสงเข้มน้อยลงอย่าง exponential ดังนั้นเราจึงคาดคะเนได้ว่าความหนาของชั้น d_i นั้นควรจะหนาขึ้นเมื่อเซลล์อยู่ลึกเข้าไปดังแสดงในรูปที่ 6.6 นั่นคือ $d_1 < d_2 < d_3 < \dots < d_m$ ถ้าให้ $\phi(\hbar\omega, x)$ คือโฟตอนฟลักของแสง ϕ ที่ ตำแหน่ง x ในเซลล์แสงอาทิตย์ และ E_g คือขนาดช่องว่างพลังงานของ a-Si:H (ปกติ $E_g = 1.7-1.8$ eV) เราจะได้ค่า I_{Li} ดังนี้ [18]

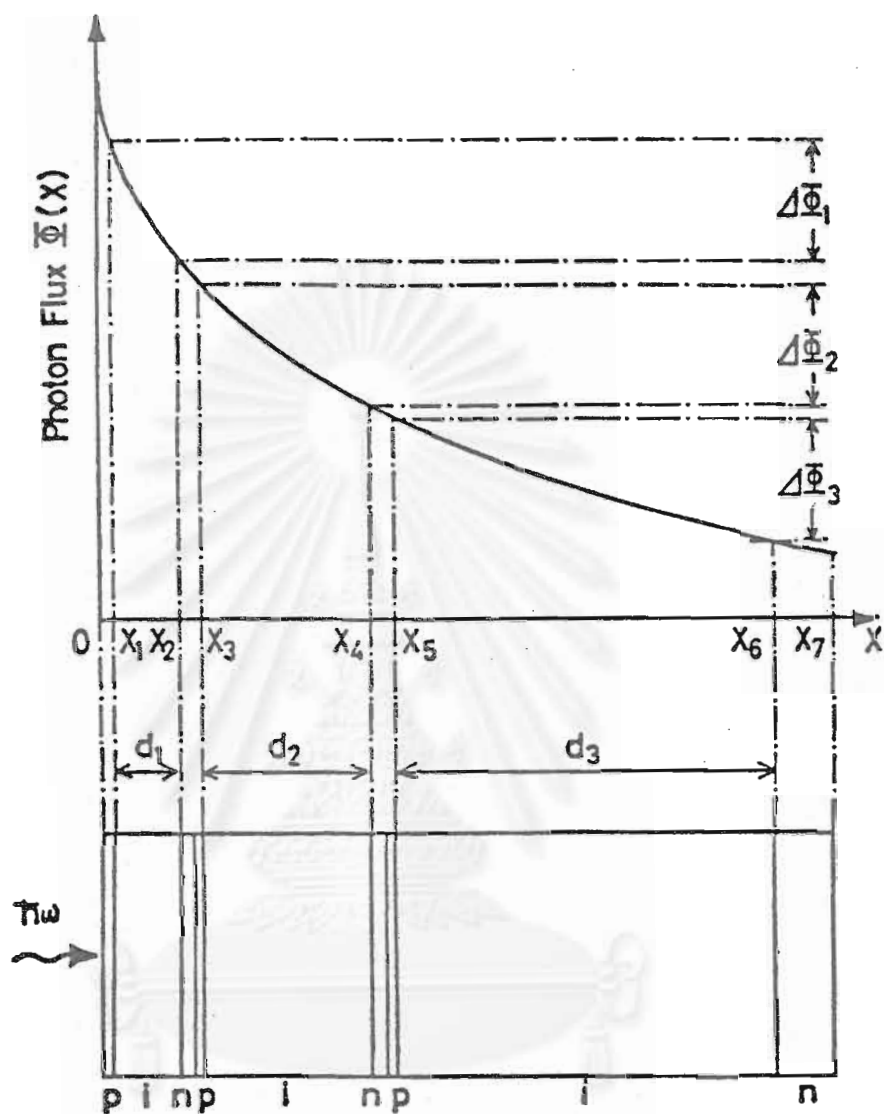
$$\begin{aligned} I_{Li} &= q \int_{E_g}^{\infty} [\phi(\hbar\omega, x_{2i}) - \phi(\hbar\omega, x_{2i-1})] d(\hbar\omega) \\ &= q [\phi(x_{2i}) - \phi(x_{2i-1})] = q \Delta\phi_i \end{aligned} \quad (9)$$

โดยที่ $d_i = x_{2i} - x_{2i-1}$

และ $\phi(x) = \int_{E_g}^{\infty} \phi(\hbar\omega, x) d(\hbar\omega)$

6.2 การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง Tandem

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H โครงสร้าง tandem (ดูรูปที่ 6.1) ผลิตด้วยวิธี glow-discharge plasma CVD ดังได้กล่าวมาแล้วในบทต้นๆ เซลล์แต่ละตัวมีโครงสร้าง p-i-n โดยที่ในงาหน้าใช้ a-SiC:H เป็นชั้นหน้าต่างกว้างชนิด p ($E_g = 2.0$ eV) ก๊าซสำหรับชั้น p คือ $\text{SiH}_4 + \text{CH}_4 + \text{B}_2\text{H}_6$ ก๊าซสำหรับชั้น i คือ SiH_4 และก๊าซสำหรับชั้น n คือ $\text{SiH}_4 + \text{PH}_3$ แผ่นฐานคือ glass/ITO ตารางที่ 6.1 แสดงเงื่อนไขการผลิตฟิล์ม a-Si:H รอยต่อ p-i-n ใช้อุณหภูมิแผ่นฐานเท่ากับ 190°C



รูปที่ 6.6 การเปลี่ยนแปลงของ Photon flux ของแสงที่วิ่งเข้าสู่ เซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งลดลงอย่าง exponential

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 6.1 เงื่อนไขการผลิตฟิล์ม a-Si:H รอยต่อ p-i-n

RF Frequency	13.56 Hz
Substrate Temperature	190 °C
Pressure	1 Torr
Gas Source : Si-source	SiH ₄ /H ₂ = 10 %
C -source	CH ₄ /H ₂ = 10 %
p-type impurity-source	B ₂ H ₆ /H ₂ = 500 ppm
n-type impurity-source	PH ₃ /H ₂ = 500 ppm

ในงานวิจัยนี้ได้ทดลองผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ Tandem 4 รุ่นด้วยกัน ได้แก่ รุ่นเซลล์ 1 ชั้น, 2 ชั้น, 3 ชั้น และ 4 ชั้น ดังแสดงในรูปที่ 6.1 (ก)-(ง) รายละเอียดความหนาของฟิล์ม p-i-n ชั้นต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 6.2 สิ่งที่น่าสนใจก็คือ ความหนาของชั้น i จะหนาขึ้นเมื่อเซลล์อยู่ลึกเข้าไป ตามที่ออกแบบไว้ในหัวข้อที่ 2) เช่นในกรณีเซลล์ 4 ชั้น ความหนาของชั้น i ทั้ง 4 เซลล์คือ (เรียงจากด้านรับแสง) 200, 370, 930 และ 4700 Å ตามลำดับ

ตารางที่ 6.2 ความหนาของชั้น p-i-n ในเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง Tandem

หมายเลขเซลล์	จำนวนเซลล์ที่ซ้อนทับกัน (m)	เซลล์ตัวที่ 1			เซลล์ตัวที่ 2			เซลล์ตัวที่ 3			เซลล์ตัวที่ 4		
		(Å)			(Å)			(Å)			(Å)		
		p	i	n	p	i	n	p	i	n	p	i	n
a	1	200	<u>6500</u>	500									
b	2	200	<u>440</u>	100	50	<u>4700</u>	500						
c	3	200	<u>370</u>	100	50	<u>840</u>	100	50	<u>4700</u>	500			
d	4	200	<u>200</u>	100	50	<u>370</u>	100	50	<u>930</u>	100	50	<u>4700</u>	500

สำหรับความหนาของชั้น p และ n นั้น ได้ออกแบบให้มีความหนาน้อยที่สุดและพอเหมาะที่จะเป็น contact ที่ดี และไม่ดูดกลืนแสงมาก

ความหนาของชั้น i ที่น้อยที่สุดควรมีค่าไม่ต่ำกว่า 200 Å และหนาที่สุดไม่ควรเกิน 7000 Å เพื่อที่จะได้รอยต่อ p-i-n ที่ดี และได้ค่า collection efficiency ที่ดี

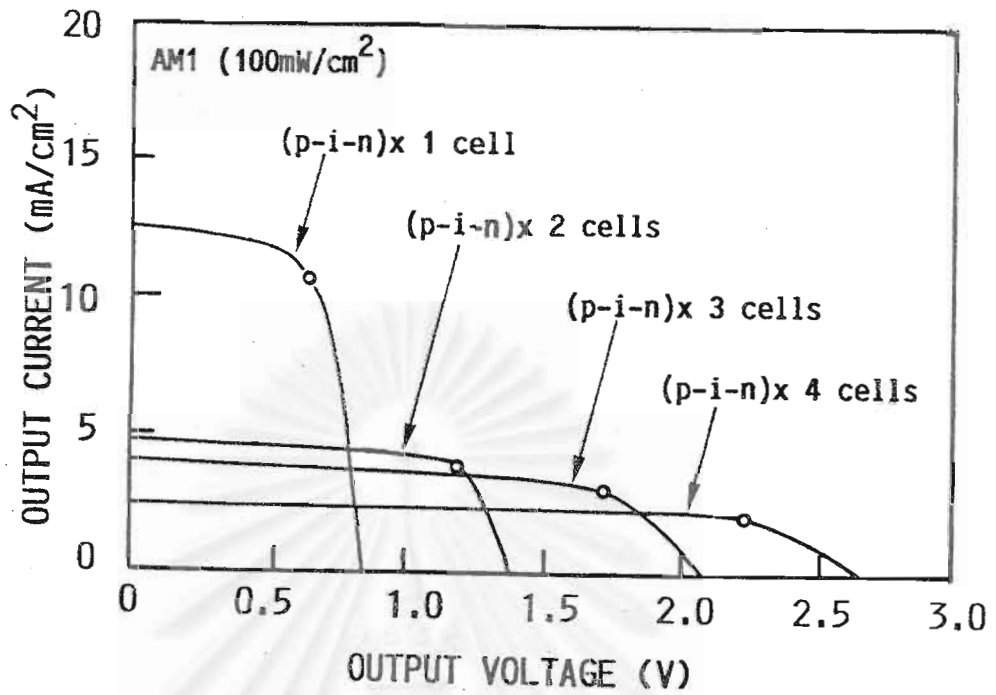
6.3 ผลการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง Tandem

ผลการผลิตเซลล์ทั้ง 4 รุ่น แสดงในรูปที่ 6.7-6.8 โดยรูปที่ 6.7 แสดง curve J-V ของลักษณะสมบัติเอาต์พุทของเซลล์ที่วัดด้วยแสงอาทิตย์เทียม (solar simulator) ความเข้ม AM1 (100 mW/cm^2) และรูปที่ 6.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์เอาต์พุทและจำนวนเซลล์ที่ซ้อนทับกัน (m) จากรูปเหล่านี้พบว่า เมื่อ m มีค่ามากขึ้นจาก 1 ถึง 4 จะทำให้แรงดันวงจรเปิด (V_{oc}) เพิ่มขึ้นจาก 0.83 V เป็น 2.63 V และกระแสไฟฟ้าลัดวงจร (J_{sc}) ลดลงจาก 12.42 mA/cm^2 เป็น 2.37 mA/cm^2 ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของทั้ง V_{oc} และ J_{sc} นี้สอดคล้องกับการคาดคะเนในหัวข้อที่ 6.1.1 และ fill factor ก็เพิ่มเล็กน้อยและสอดคล้องกับผลการคาดคะเนเช่นกัน

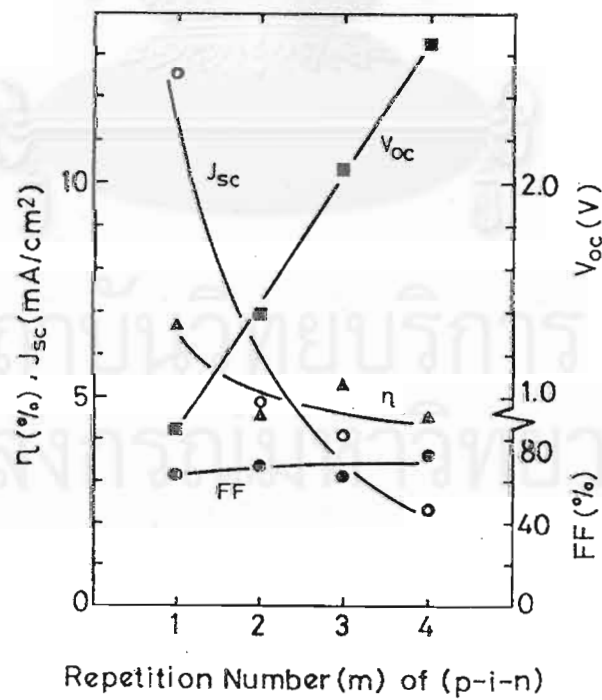
อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่ $m = 1$ ได้ $V_{oc} = 0.8 \text{ V}$ ดังนั้น ถ้า $m = 4$ ก็ควรจะ ได้ $V_{oc} = 4 \times 0.8 \text{ V} = 3.2 \text{ V}$ แต่ผลการทดลองได้ V_{oc} เพียง 2.63 V และประสิทธิภาพก็ลดลงจากประมาณ 6.6 % ลงไปที่ประมาณ 4.5 % เมื่อ m มีค่า 1-4 สาเหตุของข้อสงสัยนี้อาจมีสาเหตุมาจากการที่มีแสงบางส่วนถูกดูดกลืนในชั้น p และ n ด้วย เนื่องจากชั้น p และ n มีค่า photoconductivity ที่เร็วมาก ดังนั้นจึงไม่มี photocurrent เกิดขึ้นในชั้น p และ n ดังนั้นการดูดกลืนแสงด้วยชั้น p และ n จึงอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้ผลการทดลองคลาดเคลื่อนไปจากการคาดคะเนได้บ้าง

ลักษณะเด่นของเซลล์ Tandem เช่นนี้ ได้แก่การที่มีแรงดันเอาต์พุทสูง ดังนั้นถ้าผลิตให้มีพื้นที่ใหญ่พอเหมาะจึงคาดว่าจะมีประโยชน์ในการใช้ป้อนไฟฟ้าให้ผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์บางชนิด เช่น เครื่องคิดเลข นาฬิกาได้บ้าง

อนึ่ง ในงานวิจัยนี้ ได้กำหนดให้ช่องว่างพลังงานของชั้น i ซึ่งเป็นชั้นกำเนิด photocurrent มีค่า 1.7-1.8 eV คงที่ตลอด ดังนั้นลักษณะสเปกตรัมผลตอบสนองแสงของเซลล์ทุกชั้นจึงเหมือนกันหมด ทำให้ไม่สามารถดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นยาว ๆ ได้เลย แต่ถ้าในอนาคตมีการใช้วัสดุชั้น i ที่มีช่องว่างพลังงานแคบลง เช่น $a\text{-Si}_{1-x}\text{Ge}_x\text{:H}$ เป็นชั้น i ในเซลล์ชั้นที่ 2, 3, 4... โดยควบคุมให้ช่องว่างพลังงานแคบลงจาก 1.7 eV ลงไปถึง 1.1 eV ก็คาดว่าจะสามารถทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Tandem นี้สูงขึ้นได้



รูปที่ 6.7 ลักษณะสมบัติเอาต์พุทของเซลล์แสงอาทิตย์ a-Si:H รอยต่อ p-i-n อนุกรม จำนวน 1, 2, 3 และ 4 ชุด



รูปที่ 6.8 ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์เอาต์พุทของเซลล์แสงอาทิตย์ a-Si:H และ จำนวนชุดของรอยต่อ p-i-n ที่ต่ออนุกรมกันแบบ multi-layer

บทที่ 7

การปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยรอยต่อ
เฮตเตโรของ $\mu\text{c-Si:H/poly-Si}$

บทนำ

ฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน (a-Si:H) ที่ผลิตด้วยวิธี glow discharge plasma CVD กำลังได้รับความสนใจ เพราะสามารถนำไปผลิตให้เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ราคาถูกลงได้ ข้อดีอีกด้านหนึ่งของอะมอร์ฟัสซิลิคอนคือ สามารถปลูกเคลือบทับวัสดุชนิดต่าง ๆ ได้โดยไม่ต้องทำให้เป็นรอยต่อแบบ epitaxy จากผลงานวิจัยในบทที่ 1-6 คณะผู้วิจัยสามารถผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนบนแผ่นกระจกได้ประสิทธิภาพประมาณ 6.7 %

ในบทนี้จะรายงานผลการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากรอยต่อของวัสดุฟิล์มบางซิลิคอนชนิด n และ โพลีคริสตัลไลน์ซิลิคอน (poly-Si) ชนิด p และ เพื่อให้ได้รอยต่อที่ดีที่สุด ในกระบวนการผลิต ได้พยายามหาเงื่อนไขให้ได้ฟิล์มบางมีคุณสมบัติเป็นไมโครคริสตัลไลน์ซิลิคอน (microcrystalline Si) ชื่อว่า $\mu\text{c-Si:H}$ ชนิด n ซึ่งมีค่าสภาพนำไฟฟ้าสูงถึงระดับ 10^0 S/cm สูงกว่าค่าสภาพนำไฟฟ้าของ a-Si:H ชนิด p, n ซึ่งมีค่าระดับ 10^{-8} - 10^{-4} S/cm ดังนั้นเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้จึงเป็นรอยต่อเฮตเตโรของ n $\mu\text{c-Si:H}$ ($E_g = 1.8$ eV)/p poly-Si ($E_g = 1.1$ eV)

ลักษณะเด่นของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้คือ

1. ใช้ p poly-Si เป็นแผ่นฐานที่มีราคาถูกกว่าผลึกเดี่ยว Si
2. ใช้ n $\mu\text{c-Si:H}$ เป็นรอยต่อซึ่งสิ้นเปลืองพลังงานในการผลิตน้อยกว่าการแพร่ซึมสารเจือปนชนิด n ลงสู่ p poly-Si
3. มีผลตอบสนองต่อแสงความยาวคลื่นยาวได้ดี ซึ่งอาจนำไปใช้เป็นโฟโตไดโอด หรือ color sensor ย่นความยาวคลื่นยาวได้อีกด้วย

ในบทนี้จะรายงานผลการศึกษาคูสมบัตินี้บนฐานของฟิล์ม $\mu\text{c-Si:H}$ เช่น การวัดคุณสมบัติด้านโครงสร้างด้วยวิธี X-ray diffraction และ Raman scattering คุณสมบัติด้านไฟฟ้า และรายงานผลการนำไปผลิตเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งได้ประสิทธิภาพสูงถึง 9.7 %.

7.1 โครงสร้างและหลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเฮตเตโรของ n $\mu\text{c-Si:H/p}$ poly-Si

เซลล์แสงอาทิตย์ที่ออกแบบและผลิตในงานวิจัยนี้มีโครงสร้างคือ ขั้วโปร่งแสง ITO/n $\mu\text{c-Si:H/p}$ poly-Si/ขั้ว Al ดังแสดงในรูปที่ 7.1 ลักษณะแผนภูมิแถบพลังงานของเซลล์แสดงในรูปที่ 7.2 ในการใช้งานจะส่องแสงเข้าทางด้านขั้วโปร่งแสง ITO (Indium Tin Oxide) ซึ่งหนาประมาณ 2000 Å เนื่องจากชั้น n $\mu\text{c-Si:H}$ ถูกออกแบบให้บางเพียง 500 Å ดังนั้น

แสงส่วนใหญ่จะถูกดูดกลืนในชั้น p poly-Si และ photo-generated carrier จึงเกิดในชั้น p poly-Si ส่วนชั้น n $\mu\text{c-Si:H}$ ทำหน้าที่เป็นตัวสร้างรอยต่อ np และสร้าง built-in potential เพื่อให้อิเล็กทรอนิกส์ไหลออกภายนอกทางด้านชั้น n $\mu\text{c-Si:H}$ และไหลไหลออกทางด้าน p poly-Si

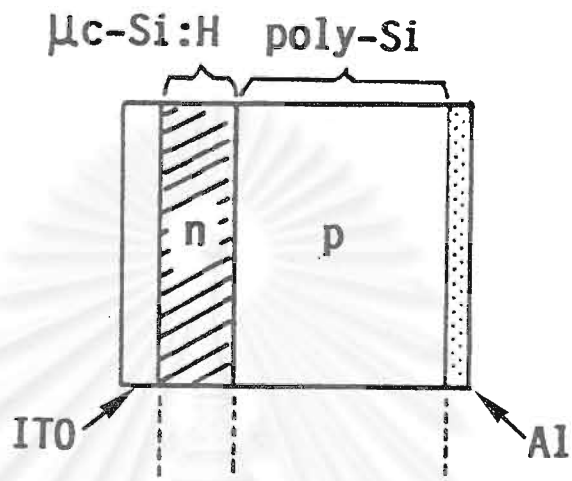
ขั้นตอนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้แสดงสรุปในรูปที่ 7.3 เริ่มแรก แผ่นฐาน p poly-Si (หนา 200 μm , $\rho = 5 \Omega\text{cm}$) จะถูกกัดให้ผิวเป็น mirror ด้วยน้ำยาผสมของ $\text{HF:HNO}_3:\text{CH}_3\text{COOH} = 2:1:2$ และต้องควบคุมเวลาการกัดให้เหมาะสม รูปที่ 7.4 แสดงภาพผลการกัดแบบ mirror ด้วยเวลาตั้งแต่ 0-60 วินาที จากรูปพบว่าการใช้เวลากัดประมาณ 40-50 วินาทีจะได้ผิว mirror ดีที่สุด ถ้าเวลายาวเกินไปผิวจะยังคงหยาบ หรือถ้าเวลานานเกินไปแผ่นฐานจะบางมาก แตกหักง่ายและมี grain เห็นชัด

เมื่อกัดผิว p poly-Si ให้เป็น mirror และล้างสะอาดแล้ว จึงนำไปเคลือบด้านหลังด้วย Al และด้านหน้าเคลือบฟิล์ม $\mu\text{c-Si:H}$ ชนิด n ด้วยวิธี glow discharge plasma (ดูรายละเอียดหัวข้อที่ 7.2) ให้มีความหนาประมาณ 500 \AA ต่อจากนั้นเคลือบฟิล์มชั้นโปร่งแสงวัสดุ ITO (Indium Tin Oxide) ด้วยวิธี Electron Beam Evaporator (EB) ให้มีความหนาประมาณ 2000 \AA เงื่อนไขวิธีการเคลือบฟิล์ม ITO ด้วยวิธี EB แสดงสรุปในตารางที่ 7.1 ฟิล์ม ITO ที่ได้มีค่า sheet resistance ประมาณ 40 Ω/\square มีความโปร่งแสงดีมาก ประมาณ 90 % ในช่วงแสงความยาวคลื่น 0.35-1.5 μm เมื่อเคลือบ ITO เสร็จแล้ว จึงนำเซลล์ไปตรวจสอบวัดลักษณะสมบัติเอาท์พุทต่าง ๆ

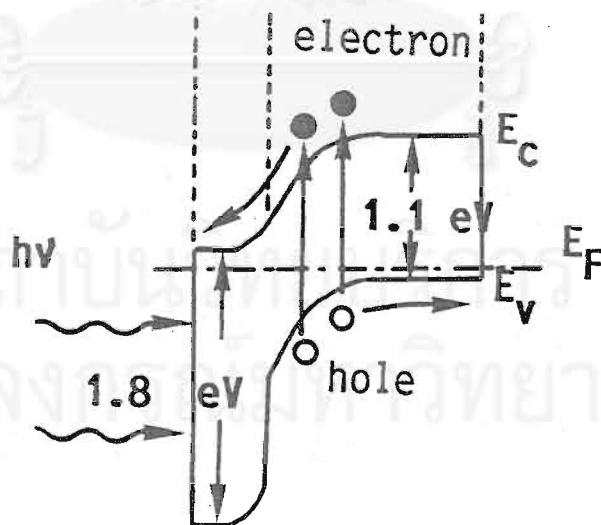
ในหัวข้อที่ 7.2 จะรายงานรายละเอียดเกี่ยวกับการผลิตและคุณสมบัติพื้นฐานของ $\mu\text{c-Si:H}$ ชนิด n

7.2 การผลิตและการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของ $\mu\text{c-Si:H}$ ชนิด n

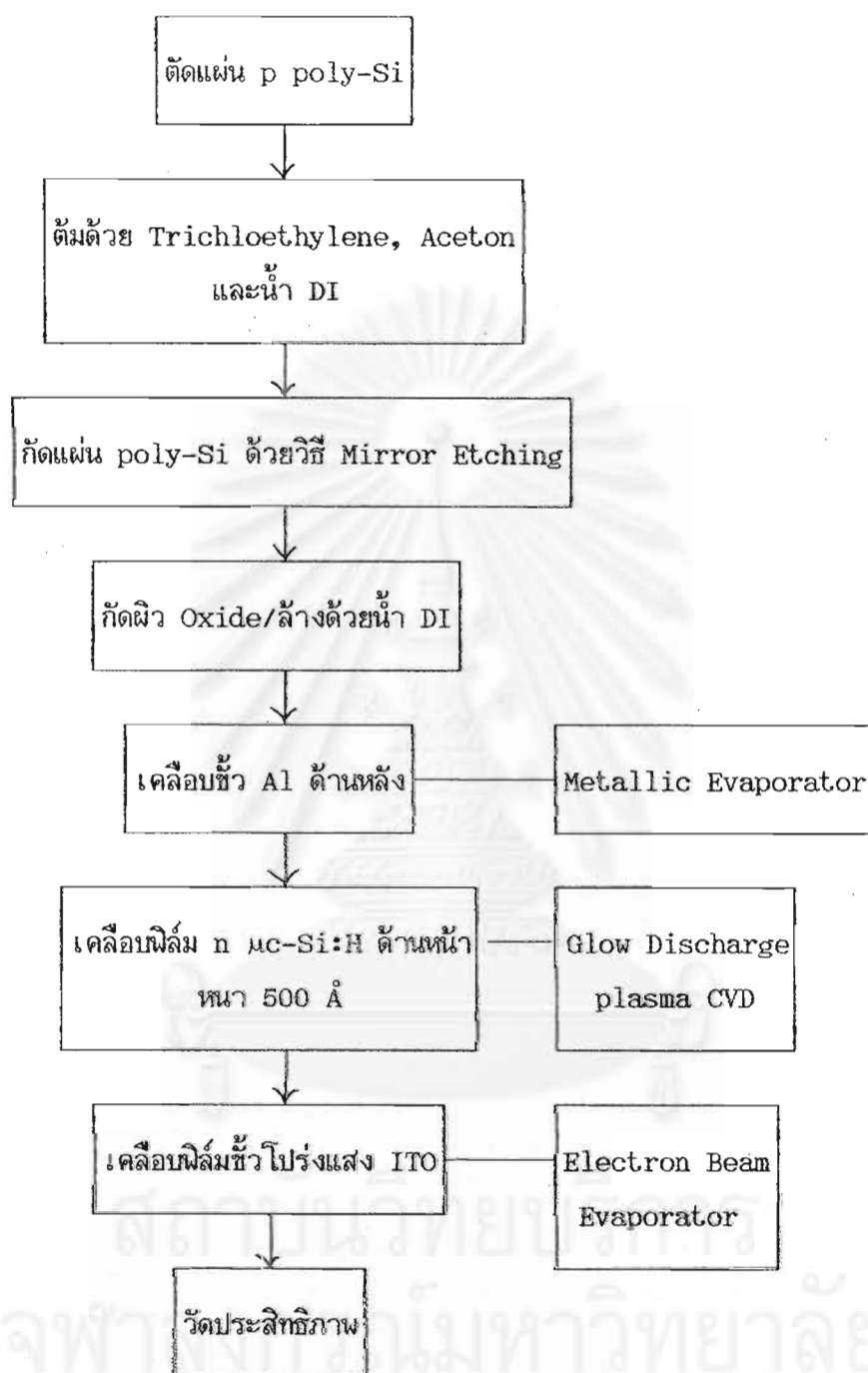
วัสดุ hydrogenated microcrystalline Si ($\mu\text{c-Si:H}$) คือ วัสดุที่มี grain ของเม็ดผลึกย่อย ๆ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางระดับ 50-300 \AA จำนวนมากผสมอยู่ใน network ของ amorphous Si (a-Si:H) ดังแสดงการอธิบายโมเดลคร่าว ๆ ในรูปที่ 7.5 และ 7.6 $\mu\text{c-Si:H}$ ในงานวิจัยนี้ผลิตด้วยวิธี glow discharge plasma CVD จากก๊าซไซเลน (SiH_4 10 % + H_2 90 %) ดังแสดงในรูปที่ 7.7 ออกฤทธิ์ที่แผ่นฐานเท่ากับ 190 $^{\circ}\text{C}$ ความกดดันใน chamber เท่ากับ 1.0 torr การผลิตฟิล์มให้เปลี่ยนสภาพจาก a-Si:H ไปเป็น $\mu\text{c-Si:H}$ ทำได้โดยการเพิ่ม RF power (Radio Frequency power) กล่าวคือ กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการแยกก๊าซจาก 35 watt ไปสู่ 100-150 watt ในการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของ $\mu\text{c-Si:H}$ ใช้แผ่นแก้ว CORNING NO. 7059 เป็นแผ่นฐาน และปลูกฟิล์ม $\mu\text{c-Si:H}$ หนาประมาณ 1-2 μm การโด๊ปให้เป็นชนิด n ทำได้ด้วยการผสมก๊าซฟอสฟีน (PH_3 500 ppm in H_2) ให้มีค่า $\text{PH}_3/\text{SiH}_4 = 0.1 \%$



รูปที่ 7.1 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเฮเทอโรของ n $\mu\text{c-Si:H/p poly-Si}$

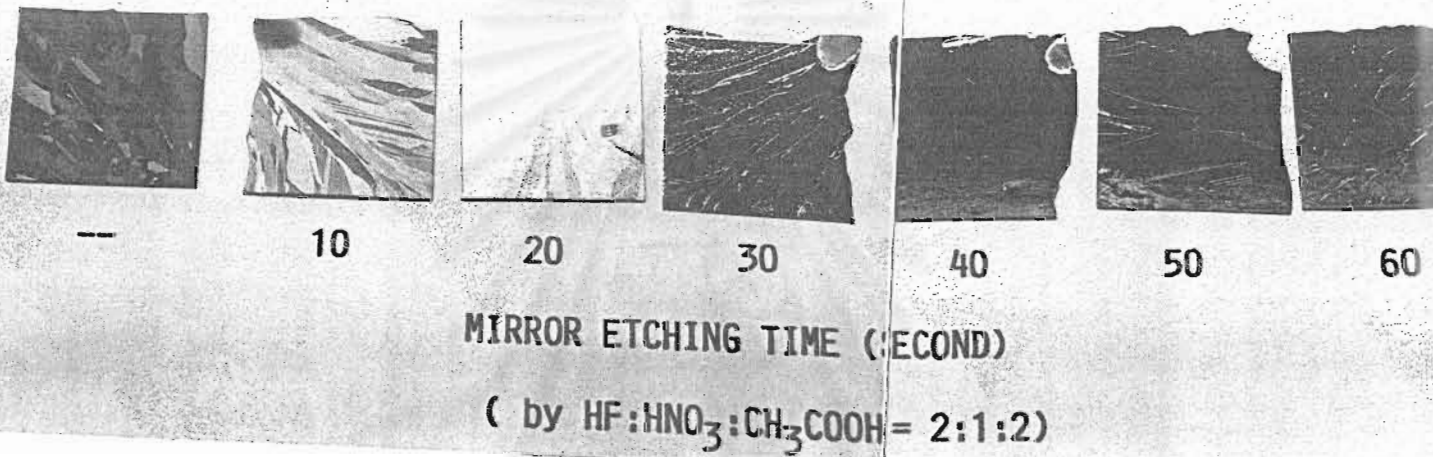


รูปที่ 7.2 แถบพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ในรูปที่ 7.1



รูปที่ 7.3 ขั้นตอนการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเฮเทอโรของ $n \mu\text{-Si:H/p poly-Si}$

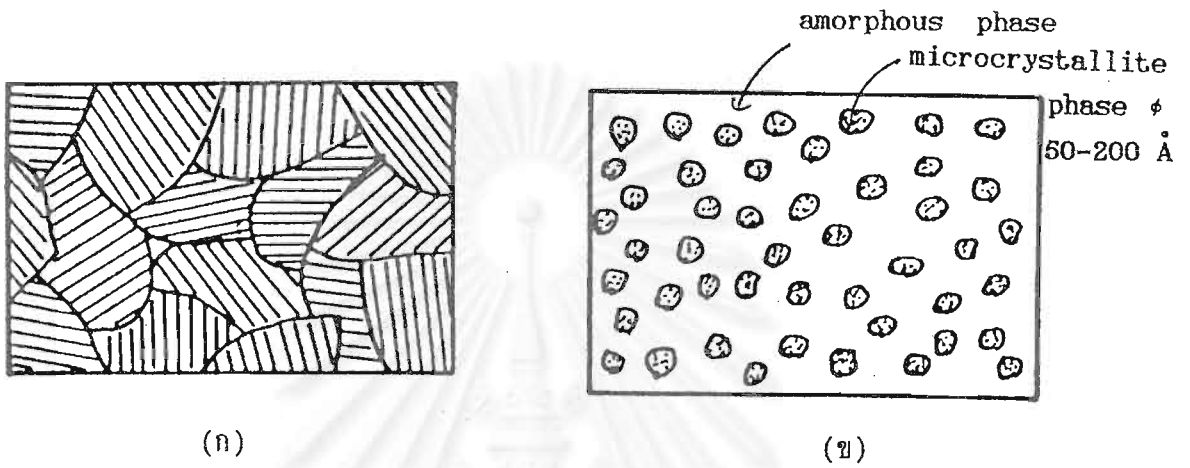
p-type polycrystalline Si



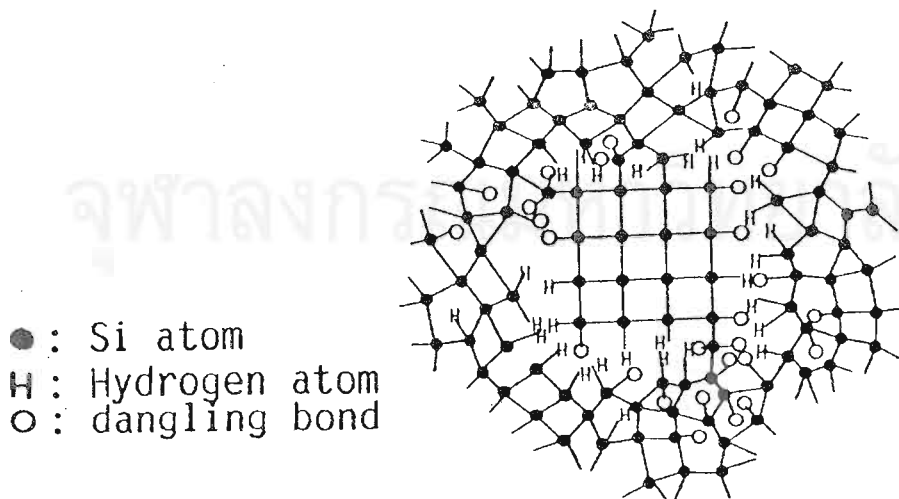
รูปที่ 7.4 ภาพผลการกัดผิวของ poly-Si แบบ mirror etching
ตัวเลขในรูปคือ ระยะเวลา (วินาที) ของการกัด

ตารางที่ 7.1 เงื่อนไขวิธีการเคลือบฟิล์ม ITO ด้วยวิธี EB

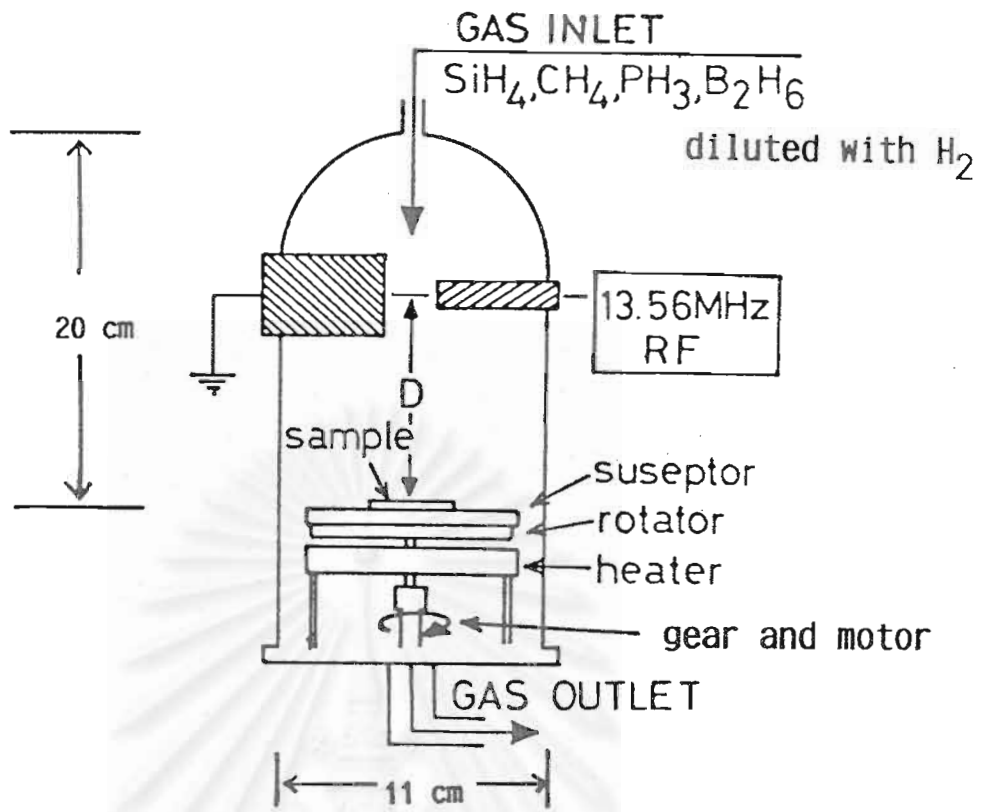
Target source	In ₂ O ₃ :SnO ₂ = 95:5 wt. %	Growth Rate	1-2 Å/sec
Oxygen Pressure	5x10 ⁻⁴ torr	Thickness	2000 Å
Substrate temperature	250 °C		



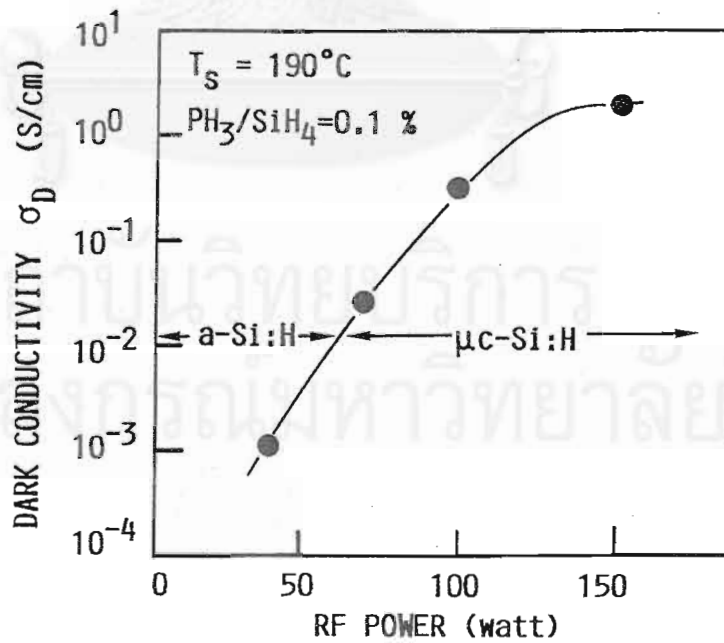
รูปที่ 7.5 โครงสร้างของฟิล์มบางชนิด (ก) poly crystalline Si และ (ข) microcrystalline Si



รูปที่ 7.6 ตัวอย่างโครงสร้าง atomic network ของ microcrystalline Si



รูปที่ 7.7 โครงสร้างของเครื่อง glow-discharge plasma-CVD สำหรับผลิต a-Si:H และ μ c-Si:H



รูปที่ 7.8 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้ามืดของฟิล์ม Si และ RF power ของเครื่อง glow-discharge

รูปที่ 7.8 แสดงผลการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า (สภาพนำไฟฟ้ามีด : σ_D) ของ $\mu\text{c-Si:H}$ ชนิด n เมื่อเพิ่ม RF power จาก 35 ถึง 150 watt จะทำให้ค่าสภาพนำไฟฟ้ามีดเพิ่มจากระดับ 10^{-4} S/cm ขึ้นไปถึง 10^0 S/cm และจากผลการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง σ_D และส่วนกลับของอุณหภูมิ ($1/T$) ได้ค่า activation energy (Fermi level : E_F) ของ n $\mu\text{c-Si:H}$ ซึ่งลดลงจาก 0.3 ไปที่ 0.01 eV เมื่อ RF power เพิ่มจาก 35 ไปที่ 150 watt ข้อมูลนี้แสดงว่าการปลูก n $\mu\text{c-Si:H}$ ที่ RF power สูง ๆ จะทำให้รอยต่อ n $\mu\text{c-Si:H/p poly-Si}$ มีค่า built-in potential สูงกว่ารอยต่อ n a-Si:H/p poly-Si

7.2.1 การวัดคุณสมบัติทางโครงสร้างของ $\mu\text{c-Si:H}$ ด้วย X-ray Diffraction และ Raman Scattering

7.2.1.1 ผลการวัด X-ray Diffraction

รูปที่ 7.9 แสดงผลการวัด X-ray Diffraction ของ a-Si:H และ $\mu\text{c-Si:H}$ ที่ปลูกที่ RF power ค่าต่าง ๆ จากรูปที่เห็นว่าเป็นฟิล์มที่ปลูกที่ RF power 35-40 watt จะมีคุณสมบัติเป็นอะมอร์ฟัสซิลิคอน (a-Si:H) ทั้งนี้เพราะไม่มี peak แหวมในสเปกตรัม ส่วนกรณีฟิล์มที่ปลูกที่ RF power สูงกว่า 100 W จะมีคุณสมบัติเป็น microcrystalline Si ($\mu\text{c-Si:H}$) ทั้งนี้เพราะในสเปกตรัมของ X-ray diffraction มี peak แหวมปรากฏขึ้นมา peak แหวมที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่ปรากฏที่มุม 2θ ประมาณที่ 28° , 47° และ 56° เนื่องจากผลึกซิลิคอนมีโครงสร้างเป็น face centered cubic ดังนั้นจากกฎของ Bragg ใช้สูตร

$$a^2 = \frac{\lambda^2 (h^2 + k^2 + l^2)}{4 \sin^2 \theta} \quad (1)$$

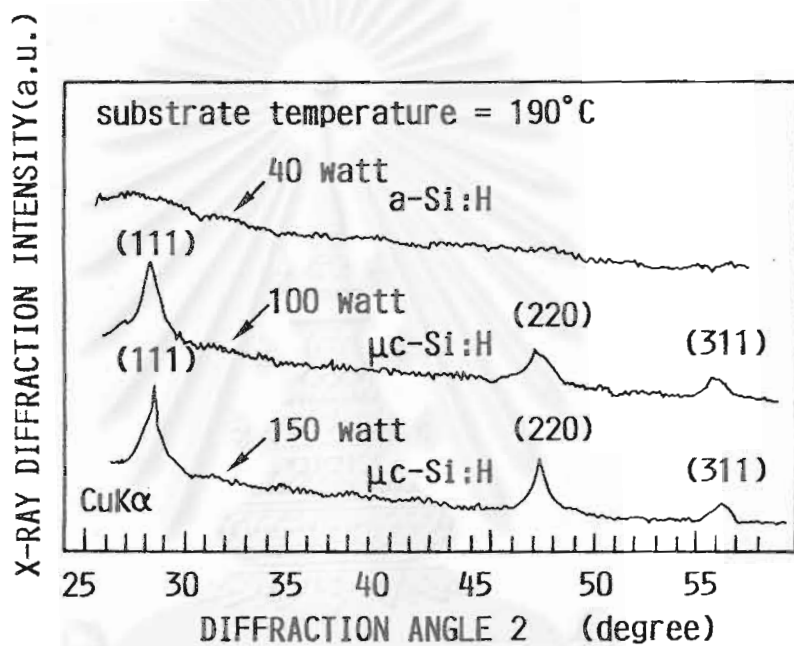
โดยที่ a : lattice constant ของซิลิคอน = 5.43089 Å

λ : ความยาวคลื่นของ X-ray = 1.54178 Å

ดังนั้นเมื่อแทนค่า 2θ ลงในสมการนี้ จึงทำให้ทราบผลว่า peak แหวม ที่ปรากฏในรูปที่ 7.9 เกิดจากระนาบ (hkl) ของ (111), (220) และ (311)

จากความกว้างของ peak ในสเปกตรัมในรูปที่ 7.9 เราสามารถคำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเม็ดผลึกย่อย ๆ ใน $\mu\text{c-Si:H}$ ได้จากสูตรของ Scherrer ดังนี้

$$s(\text{Å}) = \frac{\lambda(\text{Å})}{B \cos \theta} \quad (2)$$



รูปที่ 7.9 สเปกตรัมของ X-ray diffraction ของ $a\text{-Si:H}$ และ $\mu\text{c-Si:H}$ ซึ่งเตรียมที่ RF power ค่าต่าง ๆ

- โดยที่ δ : ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเม็ดผลึกย่อย
 θ : ตำแหน่งองศาของ peak
 B : FWHM ของ peak (หน่วย radian)
 λ : ความยาวคลื่นของ X-ray ในกรณีนี้ $\lambda = 1.54178 \text{ \AA}$
 (Cuka X-ray source)

จากรูปที่ 7.9 และสมการที่ (2) จากกรณีระนาบ (111) ค่าขนาดของเม็ดผลึกย่อยได้ประมาณ 80-250 \AA โดยที่เมื่อเพิ่ม RF power จะทำให้เม็ดผลึกย่อยมีขนาดโตขึ้น ทั้งนี้เพราะว่าการเพิ่ม RF power เป็นการทำให้ก๊าซถูกแยกตัวให้สลายตัวมากขึ้นและทำให้ปริมาณอะตอมไฮโดรเจนในฟิล์มลดน้อยลง จึงทำให้เม็ดผลึกย่อยมีขนาดโตขึ้น

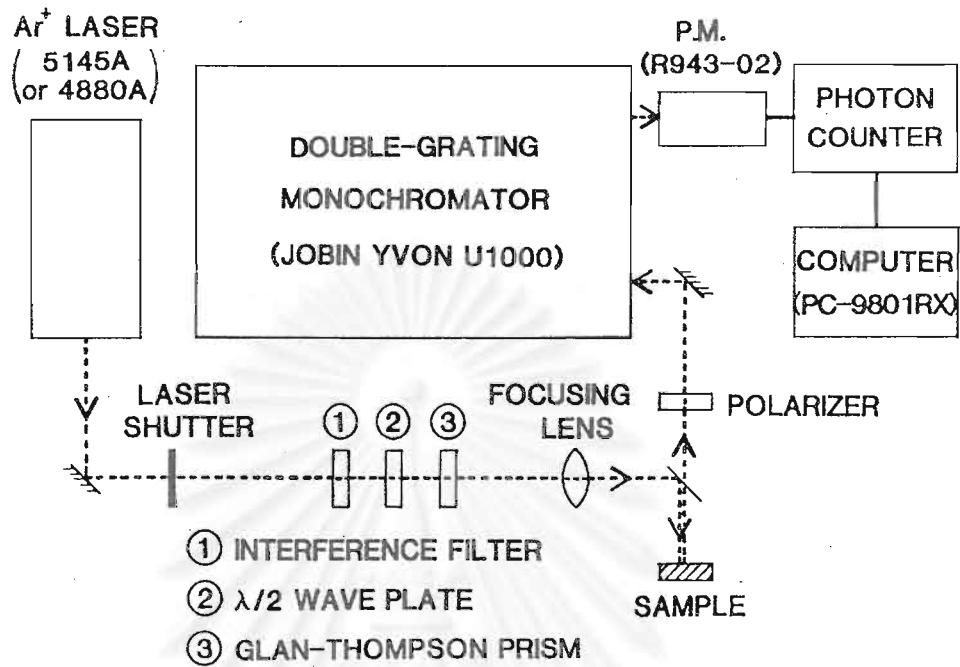
7.2.1.2 ผลการวัด Raman Scattering

การวัด Raman Scattering จะเป็นวิธีตรวจสอบคุณสมบัติทางโครงสร้างของฟิล์มได้ผลดีอีกวิธีหนึ่ง [20] รูปที่ 7.10 แสดงแผนภูมิวิธีการวัด Raman Scattering ต้นกำเนิดแสงใช้ Ar^+ ion laser ความยาวคลื่น 5145 \AA การ scanning วัดแสง Raman scattering ใช้ double-grating monochromator ผลการวัด Raman scattering ของฟิล์มที่ปลูกแสดงในรูปที่ 7.11 โดยแกนในแนวนอนคือ ค่า Raman shift (cm^{-1}) ซึ่งเปรียบเสมือนความแตกต่างของความถี่ของแสง scattered เอาท์พุทและความถี่ของแสงเลเซอร์อินพุทนั่นเอง

ในกรณีที่ RF power มีค่าต่ำ 35-40 watt ดังแสดงในรูปที่ 7.11 (ก) สเปกตรัมมีลักษณะ broad band รอบ ๆ 480 cm^{-1} ซึ่งแสดงว่าฟิล์มเป็น a-Si:H ทั้งหมด แต่เมื่อเพิ่ม RF power ให้สูงกว่า 100 watt ดังแสดงในรูปที่ 7.11 (ข) และ (ค) จะเริ่มมี peak ใหม่แหลม ๆ เกิดขึ้นที่บริเวณใกล้ ๆ 520 cm^{-1} ซึ่งแสดงว่าเริ่มมี microcrystalline Si เกิดขึ้นในฟิล์ม peak กว้าง ๆ ที่ 480 cm^{-1} เกิดจากการสั่นแบบ TO-phonon mode (Transverse Optical mode) ของอะมอร์ฟัสซิลิคอน และ peak แหลม ๆ ที่ 520 cm^{-1} เกิดจากการสั่นแบบ TO-phonon mode ของเม็ดผลึกซิลิคอน [20]

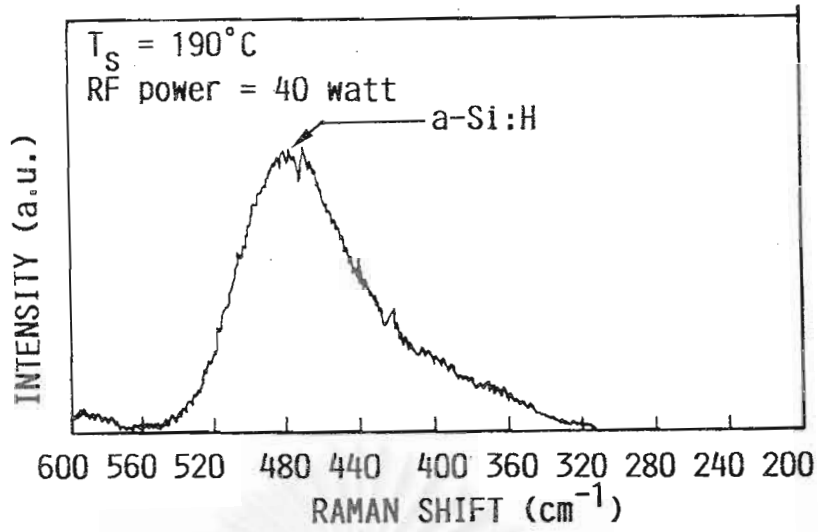
ข้อมูลที่น่าสนใจที่สามารถคำนวณได้จากสเปกตรัมของ Raman scattering นี้คือ volume fraction (F_c) ของเม็ดผลึกย่อยที่ผสมอยู่ใน amorphous network คำว่า volume fraction (F_c) หมายถึงอัตราส่วนของปริมาตรของ crystalline phase ต่อปริมาตรของ amorphous phase และมีหน่วยเป็น %

การวัดและคำนวณค่า volume fraction ของเม็ดผลึกย่อยทำได้โดยการแบ่ง(assign) เส้น curve ในรูปที่ 7.11 ให้แยกออกเป็น curve ของ gaussian ที่มี peak ที่ 480 cm^{-1} และ 520 cm^{-1} ดังแสดงด้วยเส้นไขว้ปลาในรูปที่ 7.11 (ข) และ

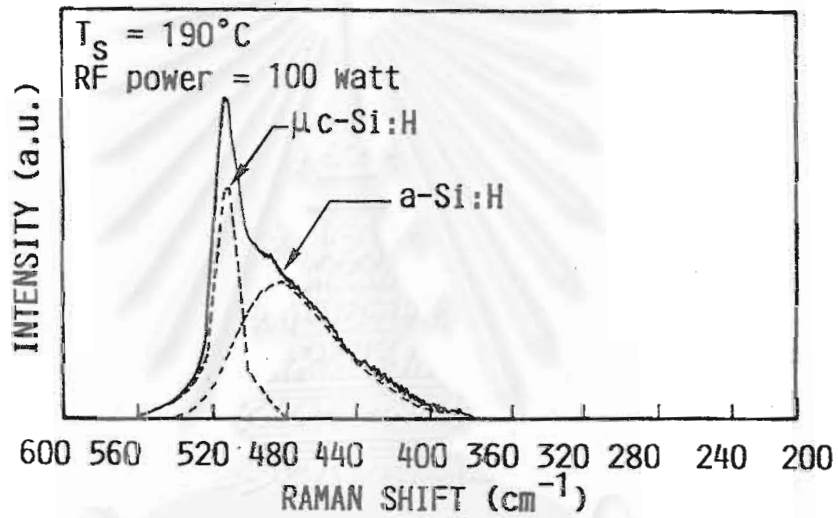


รูปที่ 7.10 แผนภูมิระบบการวัด Raman Scattering

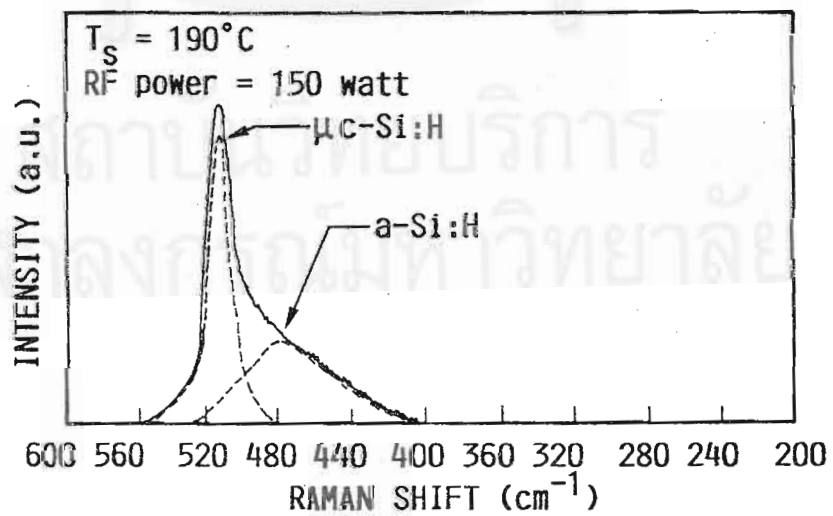
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก)

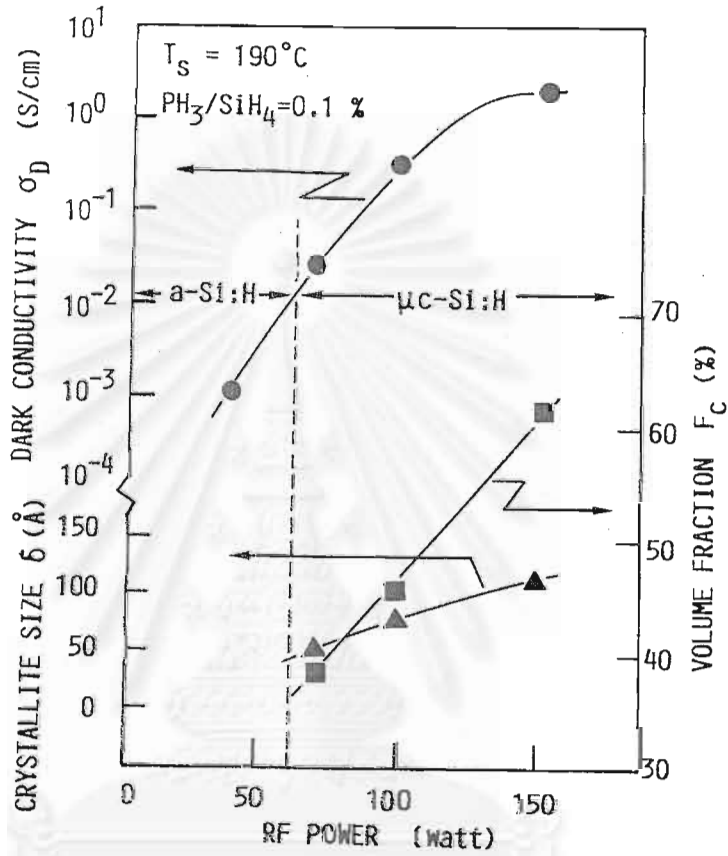


(ข)

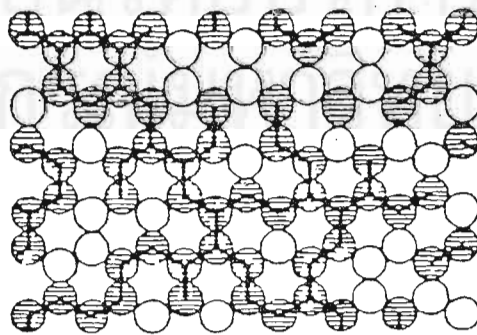


(ค)

รูปที่ 7.11 สเปกตรัมของ Raman Scattering ของ a-Si:H (ก) และ $\mu\text{c-Si:H}$ (ข)-(ค)



รูปที่ 7.12 อิทธิพลของ RF power ที่มีต่อสภาพนำไฟฟ้ามืด, ขนาดเม็ดผลึกย่อย และ volume fraction ของฟิล์ม Si



รูปที่ 7.13 โมเดล percolation อธิบายการนำไฟฟ้าอย่างสูงเมื่อเม็ดผลึกย่อย (สีดำ) มีจำนวนมากจนเชื่อมติดกัน

(ค) ต่อจากนั้นคำนวณหาค่าพื้นที่ใต้ curve ทั้ง 2 ถ้าให้ I_a คือพื้นที่ใต้ curve ของอะมอร์ฟัสและให้ I_c คือพื้นที่ใต้ curve ของผลึกย่อย ให้นิยาม F'_c มีค่า [21]

$$F'_c = I_c / (I_c + I_a) \quad (3)$$

ดังนั้น volume fraction F_c ที่ต้องการคือ

$$F_c = F'_c / (F'_c + y(1 - F'_c)) \quad (4)$$

โดยที่ y : ค่า calibration สำหรับความแตกต่างของความสามารถในการ scattering แสงของอะมอร์ฟัสและผลึก โดยทั่วไปใช้ $y = 0.88$ [21]

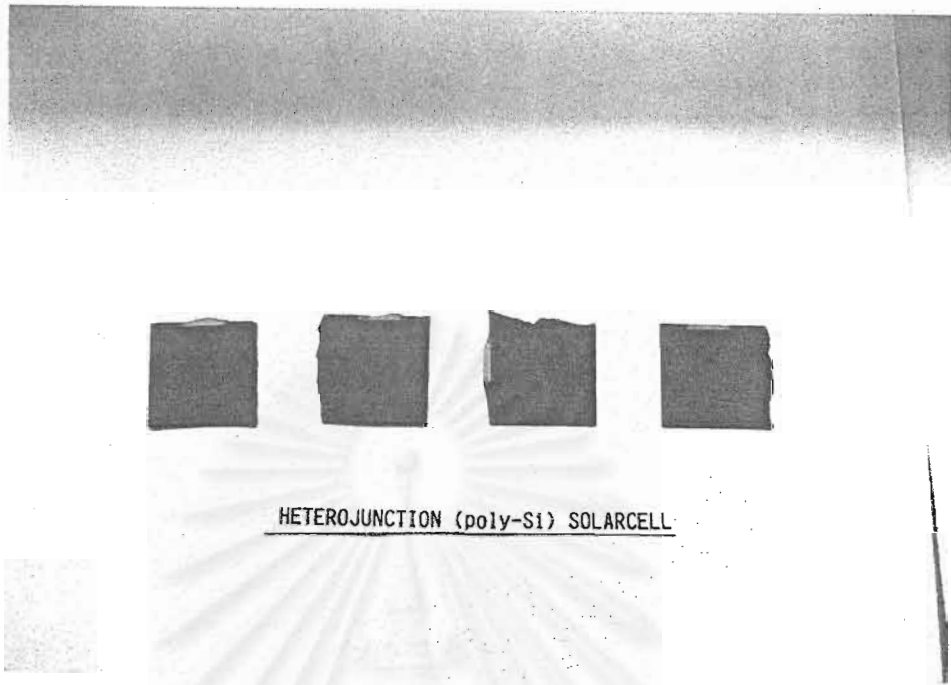
รูปที่ 7.12 แสดงผลสรุปความสัมพันธ์ระหว่าง RF power และ สภาพนำไฟฟ้ามืด (σ_D), ขนาด grain (δ) ของเม็ดผลึกย่อย และ volume fraction (F_c) ของเม็ดผลึกย่อย จากรูปนี้พบว่าเมื่อเพิ่ม RF power จาก 100 watt ไปถึง 150 watt ทำให้ volume fraction เพิ่มจากประมาณ 50 % ไปถึงประมาณ 70 % และ grain size เพิ่มจากประมาณ 80 ไปถึง 250 Å การเพิ่มขึ้นของสภาพนำไฟฟ้ามืด (σ_D) สอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของ volume fraction และ grain size

เมื่อ F_c มีค่าสูงกว่าค่า critical ค่าหนึ่ง เช่น 40 %-50 % จะทำให้สภาพนำไฟฟ้า σ_D เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ปรากฏการณ์เช่นนี้ อาจสามารถอธิบายได้ด้วย โมเดล percolation ของ Scher และ Zallen [22] ดังแสดงในรูปที่ 7.13 เนื่องจาก σ_D ของ crystalline phase มีค่าสูงกว่าของ amorphous phase ดังนั้นถ้าเม็ดผลึกย่อย มีจำนวนและขนาดมากพอก็จะทำให้ร่างแหของ crystalline phase เชื่อมติดกันตลอด และพาหะสามารถวิ่งผ่านเม็ดผลึกย่อยได้อย่างต่อเนื่องตลอด จึงทำให้ σ_D มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อ F_c มีค่ามากพอ

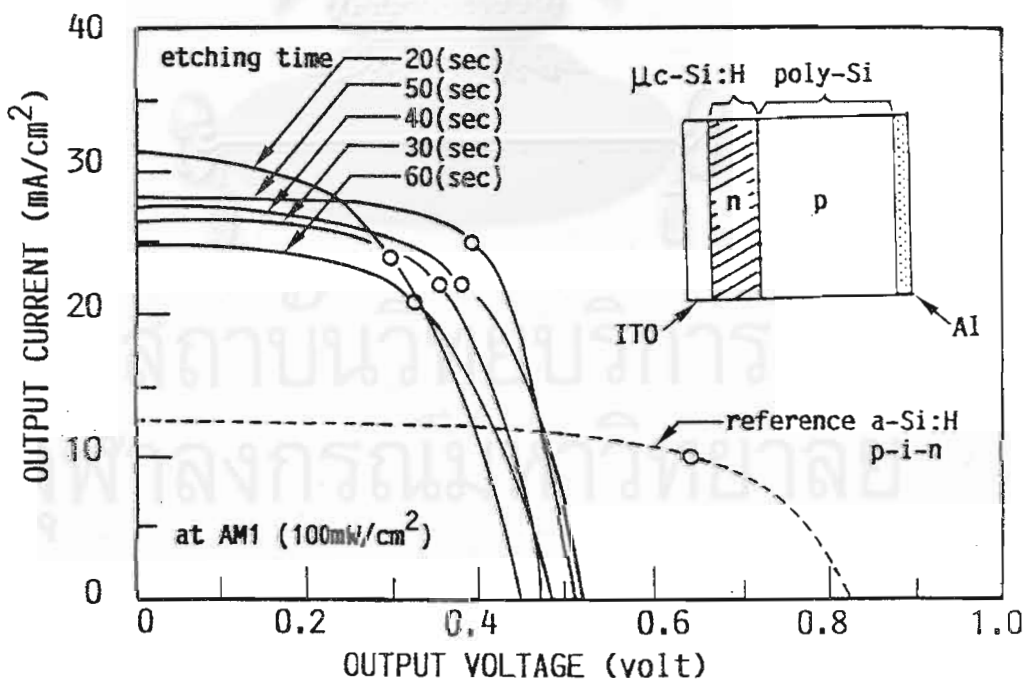
โดยสรุปแล้ว ในหัวข้อนี้ได้ข้อมูลที่สำคัญคือ เงื่อนไขที่จะทำให้ได้ค่า σ_D ของ n $\mu\text{c-Si:H}$ มีค่าสูงสุดคือ RF power ควรมีค่าประมาณ 100-150 watt ซึ่งจะได้ใช้เงื่อนไขไปผลิตชั้น n $\mu\text{c-Si:H}$ ในเซลล์แสงอาทิตย์ในหัวข้อต่อไป

7.3 ผลการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเฮเทอโรของ n $\mu\text{c-Si:H/p poly-Si}$

รูปที่ 7.14 แสดงภาพถ่ายของเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเฮเทอโร ITO/n $\mu\text{c-Si:H}$ ($E_g = 1.8 \text{ eV}$)/p poly-Si ($E_g = 1.1 \text{ eV}$)/Al ที่ผลิตได้ โดยมีโครงสร้างตามที่แสดงในรูปที่ 7.1 พารามิเตอร์ในรูปนี้คือเวลาที่ใช้ในการกัด (mirror etching) ของแผ่นฐาน p



รูปที่ 7.14 ภาพถ่ายของเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเฮตเตอร์ของ n $\mu\text{c-Si:H/p poly-Si}$ จากชั้นแผ่นฐาน poly-Si ถูกกัด แบบ mirror ด้วยเวลา 20, 40, 50 และ 60 วินาที



รูปที่ 7.15 ลักษณะสมบัติเอาท์พุทของเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเฮตเตอร์ที่ผลิตได้ พารามิเตอร์ในรูปคือเวลาการทำ mirror etching ให้กับ poly-Si

poly-Si ซึ่งในรูปจากซ้ายใช้เวลา 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 วินาที ตามลำดับ สำหรับเงื่อนไขที่ใช้ผลิตชั้น n $\mu\text{c-Si:H}$ แสดงในตารางที่ 7.2

ตารางที่ 7.2 เงื่อนไขสำหรับผลิตชั้น n $\mu\text{c-Si:H}$

RF power (watt)	Substrate temp. ($^{\circ}\text{C}$)	SiH_4 (sccm)	PH_3 (sccm)	grow rate $\text{\AA}/\text{sec}$	Thickness \AA
150	190	60	60	1	500

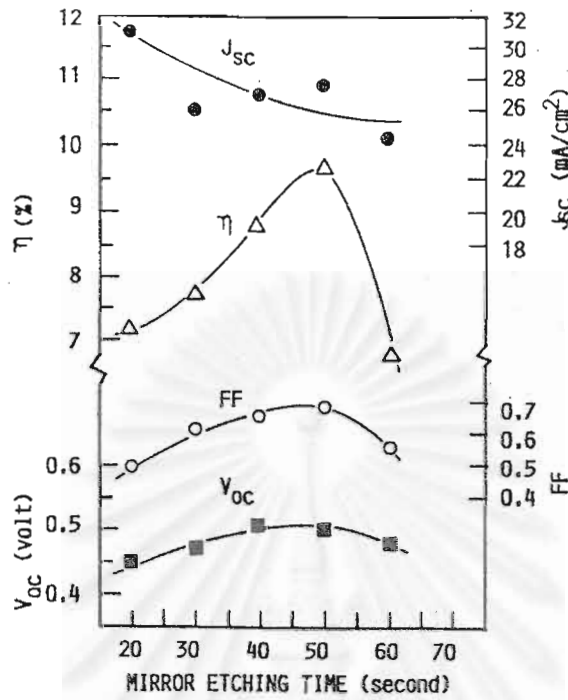
เงื่อนไขเวลาที่ใช้กัดแบบ mirror etching ให้แผ่นฐาน p poly-Si มีความสำคัญต่อลักษณะสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์มาก รูปที่ 7.15 แสดงลักษณะสมบัติเอ๊าท์พุท (J-V) ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตได้ ค่ากระแสไฟฟ้าเอ๊าท์พุทลวดวงจร (J_{sc}) มีค่าอยู่ในช่วง 20-30 mA/cm^2 และแรงดันไฟฟ้าเอ๊าท์พุทวงจรถัด (V_{oc}) มีค่าอยู่ในช่วง 0.4-0.5 V ซึ่งค่าเหล่านี้มีค่าใกล้เคียงกับกรณีเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวและผลึกโพลี ดังนั้นข้อมูลเหล่านี้จึงเป็นการแสดงว่า photogenerated carrier นั้นส่วนใหญ่เกิดขึ้นในชั้น p poly-Si

(หมายเหตุ ในกรณีถ้า photogenerated carrier เกิดในเซลล์ชนิด a-Si:H จะได้ J_{sc} ประมาณ 10-15 mA/cm^2 และ V_{oc} ประมาณ 0.7-0.9 eV)

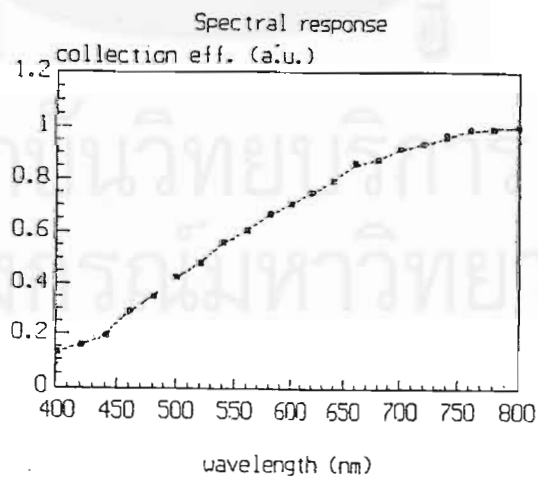
รูปที่ 7.16 แสดงสรุปความสัมพันธ์ระหว่าง J_{sc} , V_{oc} , FF, ประสิทธิภาพ และ เวลาทำ mirror etching จากรูปนี้ได้ข้อมูลว่า ประสิทธิภาพสูงสุดของเซลล์ที่ผลิตได้มีค่าประมาณ 9.7 % เมื่อ mirror etching ใช้เวลาประมาณ 50 วินาที และได้ $J_{sc} = 27.8 \text{ mA}/\text{cm}^2$, $V_{oc} = 0.5 \text{ V}$, $\text{FF} = 68.9 \%$

รูปที่ 7.17 แสดงลักษณะผลตอบสนองทางสเปกตรัมของเซลล์แสงอาทิตย์เอ็ดเตโรที่ผลิตขึ้น มี peak อยู่ในย่านก่อนข้างความยาวคลื่นยาวประมาณ 8000 \AA ส่วนในกรณีสเปกตรัมของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H p-i-n มี peak อยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 6800 \AA

จากข้อมูลในรูปที่ 7.15-7.17 ทำให้เราทราบว่าในเซลล์แสงอาทิตย์เอ็ดเตโรของ n $\mu\text{c-Si:H}/\text{p poly-Si}$ ที่พัฒนาขึ้นนั้น ชั้น n $\mu\text{c-Si:H}$ ทำหน้าที่เป็นชั้น window รับแสง และสร้าง contact ส่วนชั้น p poly-Si ทำหน้าที่ผลิต photogenerated carrier



รูปที่ 7.16 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาการทำ mirror etching ให้กับ poly-Si และพารามิเตอร์เอากันทุกของเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 7.17 สเปกตรัมผลตอบสนองต่อแสงของเซลล์ที่ผลิตได้

7.4 สรุป

ประสบความสำเร็จในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเฮเทอโรของ $n \mu\text{-Si:H/p poly-Si}$ ได้ประสิทธิภาพดีที่สุดประมาณ 9.7 % ในการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของ $n \mu\text{-Si:H}$ พบว่าในฟิล์ม $\mu\text{-Si:H}$ นี้มีเม็ดผลึกย่อย ๆ ขนาดประมาณ 80–250 Å ผสมอยู่ และ volume fraction ของเม็ดผลึกย่อยมีค่าประมาณ 50%–70% เซลล์แสงอาทิตย์ที่พัฒนาขึ้นในงานนี้มีราคาถูกและตอบสนองต่อแสงได้ดีที่ความยาวคลื่นช่วงยาวประมาณ 0.8–1 μm เพื่อที่จะให้เซลล์แสงอาทิตย์สามารถดูดกลืนแสงอาทิตย์ได้ช่วงกว้างกว่านี้ จึงมีความคิดที่จะเสนอโครงสร้างซึ่งเป็นการสร้างเซลล์ชนิด $a\text{-Si:H p-i-n}$ ขึ้นกับเซลล์ชนิด $n \mu\text{-Si:H/p poly-Si}$ ดังนั้นแสงอาทิตย์ความยาวคลื่นสั้นจะถูกดูดกลืนด้วยเซลล์ $a\text{-Si:H p-i-n}$ ($E_g = 1.8 \text{ eV}$) ชั้นแรก และแสงความยาวคลื่นยาวจะถูกดูดกลืนด้วยเซลล์ $\mu\text{-Si:H/poly-Si}$ ($E_g = 1.1 \text{ eV}$) ชั้นที่สอง ซึ่งจะได้นำเสนอในโอกาสต่อไป

การผลิตฟิล์มบางเคลือบกับวัสดุผลึกเช่นนี้หลังจากจะน่าสนใจในแง่เชิงวิชาการแล้ว ในแง่วิศวกรรมและเทคโนโลยีก็น่าสนใจด้วย เพราะอาจจะส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์ดีขึ้น และอาจก่อให้เกิดแนวความคิดที่จะผลิตเป็นสิ่งประดิษฐ์ทางออปโตอิเล็กทรอนิกส์แปลก ๆ ใหม่ ๆ ได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 8

บทสรุป

การวิจัยและพัฒนาประดิษฐ์ "เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน" ในงานวิจัยนี้ได้ประสบความสำเร็จเป็นที่น่าพอใจตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ โดยมีข้อมูลทางเทคนิคสรุปเป็นข้อ ๆ ได้ดังนี้

1. ได้มีการปรับปรุงเครื่องมือระบบ glow discharge plasma CVD สำหรับปลูกฟิล์ม a-Si:H ให้มีคุณภาพสูงขึ้น เช่น การควบคุมระบบมอเตอร์หมุนแผ่นฐานของเซลล์ฯ ให้ช้าลง และเปลี่ยนปริมาณสุญญากาศให้ใหญ่ขึ้น

2. จากการทดลองผลิตเซลล์รอยต่อ p-, i- และ n ที่แต่ละชั้นมีความหนาต่าง ๆ พบว่าความหนาที่เหมาะสมของชั้น p-, i- และ n คือ 200 Å, 6500 Å และ 500 Å ตามลำดับ และได้ลักษณะสมบัติเอากัณฑ์ที่ดีที่สุดดังนี้

$$J_{sc} = 12.55 \text{ mA/cm}^2$$

$$V_{oc} = 0.84 \text{ volt}$$

$$FF = 63.7 \%$$

$$\text{Efficiency} = 6.67 \%$$

โดยที่ชั้น p นั้นใช้วัสดุ p type a-SiC:H

3. ได้มีการทดลองปลูกฟิล์มชั้นไฟฟ้าโปร่งแสงจากวัสดุ Indium Tin Oxide (ITO) ด้วยวิธี Electron Beam evaporator เป็นผลสำเร็จ และพบเงื่อนไขการผลิตที่เหมาะสม เช่น อุณหภูมิแผ่นฐานควรประมาณ 250 °C ได้ฟิล์ม ITO โปร่งแสงย่าน visible ดีถึง 85 % และ sheet resistance ต่ำเพียง 25 Ω/□

4. ได้มีการสร้างระบบการวัด Hall effect ความละเอียดสูงและทำงานด้วยคอมพิวเตอร์เป็นผลสำเร็จ มีการนำไปใช้วัดกับฟิล์ม ITO เพื่อวิเคราะห์หาค่า mobility และ carrier concentration

5. ได้ประสบความสำเร็จในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์แรงดันเอากัณฑ์สูงเป็นผลสำเร็จด้วยโครงสร้าง Integrated Type ที่ออกแบบขึ้นเอง โดยมีลักษณะให้เซลล์หลาย ๆ ตัวต่ออนุกรมกันบนกระจกแผ่นเดียวกันด้วยการทำให้ฟิล์ม ITO และฟิล์ม Al ของเซลล์ข้างเคียงกันต่ออนุกรมกัน เป็นโครงสร้างที่ช่วยประหยัดต้นทุนการผลิตและไม่ต้องอาศัยความละเอียด และได้เผยแพร่ผลงานส่วนนี้ในที่ประชุมนานาชาติ (PVSEC-7) ด้วย

6. ตัวอย่างลักษณะสมบัติเอาท์พุทของเซลล์ Integrated Type ในข้อ 5. ได้แก่

มีเซลล์จำนวน	= 12 ตัว, แต่ละตัวมีพื้นที่	= $0.4 \times 4 \text{ cm}^2$
ขนาดแผ่นกระจก		= $5 \times 7.5 \text{ cm}^2$
เซลล์แต่ละตัวห่างกัน		= 1 mm.
V_{oc}		= 10.1 V
J_{sc}		= 0.81 mA/cm ²
FF		= 55.6 %
Efficiency		= 4.54 % (ที่ AM 1)

7. ได้ประสบความสำเร็จในการสร้าง car battery charger ด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ที่ประดิษฐ์ได้ในงานวิจัย car battery charger นี้สร้างจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน (ในข้อ 6) ที่ต่ออนุกรมกันจำนวน 36 ตัว ได้แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดสูงถึง 26 V และกระแสไฟฟ้าลัดวงจร 12 mA สามารถนำไปใช้ประจุกระแสไฟฟ้าเข้าแบตเตอรี่รถยนต์เพื่อชดเชยกระแสไฟฟ้ารั่วขณะจอดรถยนต์ได้เป็นอย่างดี เป็นการช่วยยืดอายุของแบตเตอรี่ได้อีกด้วย

8. ได้ประสบความสำเร็จในการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนที่ให้แรงดันเอาท์พุทสูงด้วยโครงสร้าง Tandem กล่าวคือ เซลล์ๆ จำนวนหลายตัวถูกปลูกให้วางซ้อนทับกันในแนวตั้งแบบแซนด์วิช ตัวอย่างถ้ามีเซลล์ซ้อนทับกัน 4 ตัว จะได้ V_{oc} ประมาณ 2.6 V ลักษณะเด่นของเซลล์ชนิดนี้คือ การให้แรงดันเอาท์พุทสูงกว่าเซลล์แบบธรรมดา (1 ตัว)

9. ด้านการปรับปรุงประสิทธิภาพ ได้ทดลองใช้แผ่นผลึก poly-Si เป็นแผ่นฐานชนิด p และเคลือบฟิล์มไมโครคริสตัลไลน์ซิลิคอนชนิด n ได้เซลล์ที่มีประสิทธิภาพสูงถึง 9.7 % เซลล์ชนิดรอยต่อเฮเทอโรของอะมอร์ฟัสและผลึกโพลี มีลักษณะเด่นที่มีประสิทธิภาพสูง ใช้วัสดุ poly-Si ที่มีราคาถูกกว่าผลึกเดี่ยว และตอบสนองต่อแสงได้ดีในช่วงความยาวคลื่นยาว

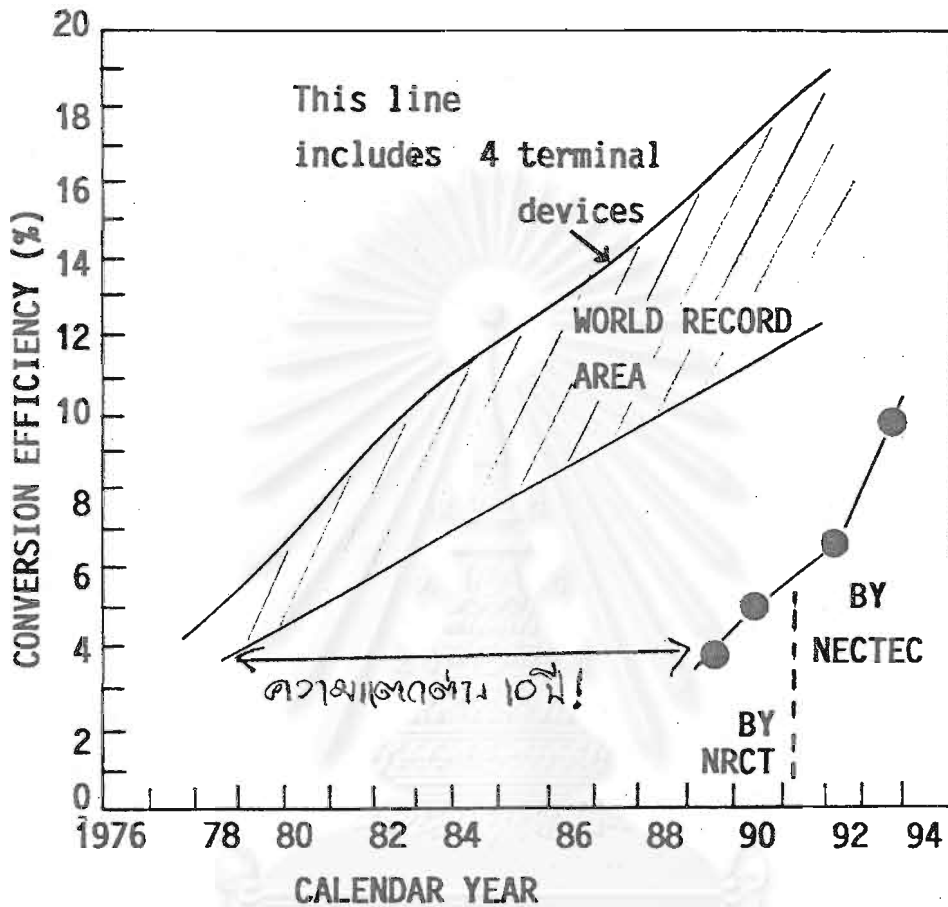
เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนรุ่นต่าง ๆ ที่ผลิตได้ในงานวิจัยมีลักษณะเด่นที่แตกต่างกันไปแต่ละรุ่น อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีและ know how ต่าง ๆ ที่ได้จากการวิจัย สามารถถ่ายทอดไปสู่ภาคอุตสาหกรรมได้ คณะผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าในอนาคตคงจะมีโรงงานผลิตเซลล์แสงอาทิตย์เกิดขึ้นในประเทศไทย

โดยภาพรวมแล้วในงานวิจัยนี้สามารถผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าในงานวิจัยที่เคยเสนอสภาวิจัยในปี 2533 ดังแสดงข้อมูลในกราฟรูปที่ 8.1

รูปที่ 8.2 แสดงตัวอย่างการนำเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตได้ในงานวิจัยไปใช้งานชาร์จกระแสไฟฟ้าเข้าแบตเตอรี่รถยนต์ขณะที่จอดรถทิ้งไว้ การจอดรถไว้เฉยๆ มักจะทำให้มีการรั่วของกระแสไฟฟ้าออกจากแบตเตอรี่ ดังนั้นการใช้เซลล์แสงอาทิตย์ชาร์จกระแสไฟฟ้าผ่านปลั๊กจุดบุหรี่ก็จะช่วยชาร์จให้แบตเตอรี่เต็มตลอดเวลา เป็นการช่วยยืดอายุของแบตเตอรี่ให้ยาวนานขึ้นได้ด้วย

รูปที่ 8.3 แสดงตัวอย่างโคมไฟไฟฟ้าเปิดปิดอัตโนมัติด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ๆ

นอกจากนี้ในงานวิจัยยังประสบความสำเร็จในการประยุกต์ใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสเป็นเซนเซอร์ตรวจวัดสีของแสงดังปรากฏรายละเอียดในเอกสารตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานวิจัยหมายเลข 7-9

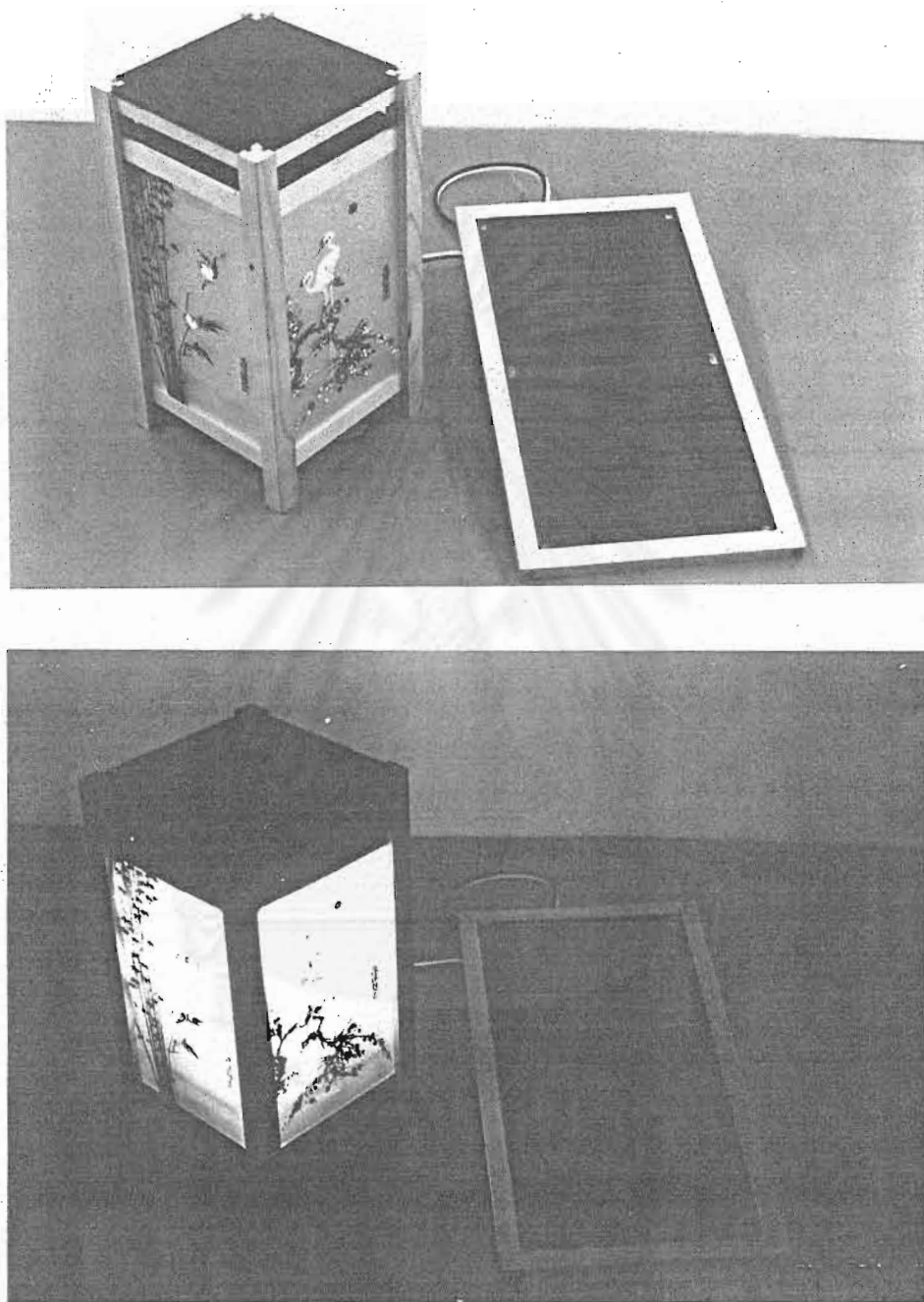


Remarks: The first a-Si:H solar cell was developed in U.S.A. in 1977, while the first a-Si:H solar cell in Thailand was developed in 1988.

รูปที่ 8.1 ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนที่ผลิตได้ในงานวิจัยของคณะผู้วิจัยในปีต่าง ๆ เปรียบเทียบกับข้อมูลที่ดีที่สุด จากหน่วยงานอื่นทั่วโลก



รูปที่ 8.2 ตัวอย่างการนำเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตได้ในงานวิจัยไปประยุกต์กระแสไฟฟ้า
เข้าแบตเตอรี่รถยนต์ขณะจอดรถ เป็นการช่วยยืดอายุแบตเตอรี่ให้ยาวนานขึ้น



รูปที่ 8.3 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานเซลล์แสงอาทิตย์กับโคมไฟที่กลางคืนสว่าง
ได้เองอย่างอัตโนมัติ

เอกสารอ้างอิง

1. เอกสารแนะนำห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2535.
2. ดุสิต เครื่องงาม และคณะฯ รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์เรื่อง "การประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ ราคาลดแบบฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน" เสนอสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ 2533 ความหนา 181 หน้า.
3. D.E. Carlson and C.R. Wronski : Appl. Phys. Lett. 28, (1976) 671.
4. A. Catalano, Chapter 2 in Amorphous and Microcrystalline Semiconductor Devices : Optoelectronic Devices, Edited by J. Kanicki (Artech House), (1991) 9.
5. ตัวอย่าง Catalogue ของ บ. Sanyo.
6. เหมือนเอกสาร 4 หน้า 11.
7. Y. Tawada and Y. Hamakawa : Solar Energy Materials 6 (1982) 299.
8. Y. Hattori, D. Kruangam et al : Extended Abstracts of Int. PVSEC-3, Tokyo, Japan, Nov., (1987) 171.
9. K. Takahashi and M. Konagai : Amorphous Silicon Solar Cells (London : North Oxford Academic, (1986) 97.
10. เหมือนเอกสาร 2 หน้า 66.
11. เหมือนเอกสาร 9 หน้า 132.
12. เหมือนเอกสาร 9 หน้า 134.
13. D. K. Schroder : Semiconductor Material And Device Characterization (John Wiley & Sons. Inc.) (1990) 73.
14. Y. Hamakawa and Y. Tawada : Int. J. Solar Energy, 1 (1982) 125.
15. Y. Kuwano et al : Jap. J. App. Phys. 20 (1981) Supplement 20-2, 213.
16. D. Kruangam et al : Extended Abstracts of Int. PVSEC-7, Nagoya, Japan, Nov. (1993) 217.
17. ดุสิต เครื่องงาม และคณะฯ : การประชุมวิชาการของ NECTEC, ครั้งที่ 4 โรงแรมอิน-มา กทม. ต.ค. (1992) 190.
18. Y. Hamakawa, chapter 3 in Current Topics in Photovoltaics, edited by T.H. Coutt (Academic Press) (1985) 111.

19. Solar cell Survey Specialist Committee edition, Solar Cell Handbook, (Electrical Society of Japan Publishing) (1985) 11.
20. Z. Iqbal, S. Veprek, A.P. Webb and P. Capezzuto : Solid State Communication, vol. 37, (1981), 993.
21. R. Tsu, J. Gonzalez-Hernandez, S.S. Chao, Sc. Lee and Tanaka : Applied physics Letter, vol. 40, No. 6, (1982), 534.
22. H. Scher and R. Zallen : J. Chem. Phys. vol. 53, (1970), 3759.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ก. งานตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานวิจัย

1. Dusit Kruangam, Pavan Siamchai, Wirote Boonkosum and Somsak Panya-keow. "Integrated Type a-Si:H Solar Cells Having Simple Configurations", presented at 7th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-7), Nagoya, Japan, November 22-26, 1993, page 217-218. (2 pages).
2. ดุสิต เครื่องงาม, บรรยง โตประเสริฐวงศ์ และชุมพล อันตรเสน. "เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิกอน (I)" เสนอในการประชุมวิชาการของศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ครั้งที่ 4 ณ โรงแรมอโนมา กทม. วันที่ 21-22 ตุลาคม 2535 : 12 หน้า. (ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่ในหนังสือรวมเล่มการประชุมวิชาการของศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ, 2535 : หน้า 190-201)
3. ดุสิต เครื่องงาม, ชุมพล อันตรเสน และบรรยง โตประเสริฐวงศ์, "เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิกอน (II)" เสนอในการประชุมวิชาการของศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ครั้งที่ 5 ณ โรงแรมอโนมา สวิสไฮเต็ล กทม. วันที่ 19-20 พฤศจิกายน 2536 : 15 หน้า. (ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่ในหนังสือรวมเล่มการประชุมวิชาการของ NECTEC, 2536 : หน้า 181 ถึง 196).
4. ดุสิต เครื่องงาม, ภาวัน สยามชัย, วิโรจน์ บุญโกสัมภ์ และอัจฉริยะ โสโน. "การศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของไมโครคริสตัลไลน์ซิลิกอนและการประยุกต์ในเซลล์แสงอาทิตย์รอยต่อเฮเทอโรของ microcrystalline Si:H/poly-Si", เสนอในการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 16 ณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กทม. วันที่ 25-26 พฤศจิกายน 2536: 6 หน้า. (ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่ในหนังสือรวมเล่มการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 16: (หน้า 476-481).
5. ดุสิต เครื่องงาม, วิโรจน์ บุญโกสัมภ์ และ ภาวัน สยามชัย. "การพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิกอนโครงสร้าง p-i-n Multilayer ที่ให้แรงดันเอาต์พุตสูง" เสนอในการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 16 ณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กทม. วันที่ 25-26 พฤศจิกายน 2536: 6 หน้า. (ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่ในหนังสือรวมเล่มการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 16 : หน้า 482-487).
6. Mana Sriyudthsak, Dusit Kruangam, Tara Cholapranee, Choompol Antarasena, Banyong Toprasertpong, Montri Sawadsaringkarn and Somsak

Panyakeow. "R&D on Sensors Activities at SDRL, Chulalongkorn University" presented at ASEAN Workshop on Sensor Materials & Device Technology, ASEAN-Subcommittee on Microelectronics and Information Technology, Tawana Ramada Hotel, Bangkok, Thailand, 26-28 April 1993. (4 pages).

7. ดุสิต เครื่องงาม, ภาวัน สยามชัย และสมศักดิ์ ปัญญาแก้ว. "การประดิษฐ์เซนเซอร์ตรวจวัดสีของแสง" เสนอในการประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทยครั้งที่ 17 ณ หอประชุมศูนย์วิทยาศาสตร์สุภาพ มหาวิทยาลัยขอนแก่น วันที่ 24-26 ตุลาคม 2535 : 2 หน้า (ผลงานนี้ตีพิมพ์เผยแพร่ในหนังสือรวมเล่มการประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทยครั้งที่ 17 : หน้า 240-241)
8. ภาวัน สยามชัย, นันทิต อุดมพรวิรัตน์, ดุสิต เครื่องงาม และ สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว. "การประดิษฐ์เซนเซอร์ตรวจวัดสีของแสง" เสนอในการประชุมทางวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า (วสท.) ประจำปี 2534 (Electrotechnology' 91) ณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย วันที่ 23-26 พฤษภาคม 2534:11 หน้า. (ผลงานนี้ตีพิมพ์เผยแพร่ในหนังสือรวมเล่มการประชุมทางวิชาการวิศวกรรมไฟฟ้า (วสท.) ปี 2534 : หน้า 206-216).
9. ภาวัน สยามชัย, ดุสิต เครื่องงาม และสมศักดิ์ ปัญญาแก้ว. "การประดิษฐ์เซนเซอร์ตรวจวัดสีของแสง" เสนอในการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 14 ณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ หาดใหญ่ วันที่ 7-8 พฤศจิกายน 2534 : 7 หน้า. (ผลงานนี้ตีพิมพ์เผยแพร่ในหนังสือรวมเล่มการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 14 : หน้า 2-27 ถึง 2-33).

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข. ปัญหาที่ประสบและข้อเสนอแนะในอนาคต

ส่วนใหญ่การทำงานวิจัยเรื่องนี้เป็นไปได้ราบรื่นดี ประสิทธิภาพสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟิซิลิคอนที่ผลิตได้คือ ประมาณ 6.7 % เซลล์แบบเดียวกันที่มีการผลิตขายในท้องตลาดก็มีประสิทธิภาพอยู่ระหว่าง 6-8 % สำหรับประสิทธิภาพสูงสุดในงานวิจัยทั่วโลกอยู่ในระดับ 10-12 %

คณะผู้วิจัยคาดว่า ถ้ามีการปรับปรุงแก้ไขเพิ่มเติมก็คาดว่าประสิทธิภาพของเซลล์อาจสูงขึ้นได้ อาทิเช่น

- ติดตั้งระบบ diffusion pump หรือ turbo molecular pump ในระบบการผลิตฟิล์ม a-Si:H เพื่อลดปริมาณก๊าซ N_2 และ O_2 ใน Chamber ให้น้อยลง
- ศึกษาหาความหนาที่เหมาะสมของฟิล์ม ITO ตลอดจนทดลองหาฟิล์มฉนวนไฟฟ้าโปร่งแสงชนิดวัสดุอื่น อาทิเช่น ZnO เป็นต้น

นอกจากนี้ เนื่องจากระบบก๊าซที่ใช้เช่น ก๊าซ SiH_4 , B_2H_6 , PH_3 ล้วนเป็นก๊าซพิษและติดไฟได้ง่าย เป็นก๊าซอันตราย จึงควรมีระบบตรวจเช็คก๊าซรั่วอย่างอัตโนมัติ และมีระบบความปลอดภัยต่าง ๆ ซึ่งต้องใช้งบประมาณหลายแสนบาท



ค. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) ปีงบประมาณ 2534-2535 รวมเป็นเงิน 1.7 ล้านบาท

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้อำนวยความสะดวกเรื่องสถานที่ทำการวิจัย

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความร่วมมือในการวัดสเปกตรัมของ UV transmittans, IR absorption และ X-ray diffraction ขอขอบคุณ ผศ. อัจฉริยะ โสโน มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ได้ให้ความร่วมมือวัด Raman Scattering ที่ Prof. Dr. Konagai Lab. ใน Tokyo Institute of Technology

ผู้วิจัยขอขอบคุณ รศ.ดร. กรกฎ วัฒนวิเชียร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ได้ให้คำแนะนำที่มีค่าตลอดงานวิจัย

ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ร่วมงานทุกคนในห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ศ. ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว ที่ได้ให้คำแนะนำและวิเคราะห์ข้อมูลที่มีค่ามากมาย ขอขอบคุณ คุณบัณฑิตา รัฐวิเศษ คุณศุภโชค ไทยน้อย คุณอนุศักดิ์ เกตุสำราญ และคุณปรีชา บุญอ่ำไผ่ ที่ได้ให้ความร่วมมือช่วยวิจัย ขอขอบคุณ คุณขวัญเรือน ไทยน้อย ที่ได้พิมพ์รายงานวิจัย และบทความทั้งหมด และขอขอบคุณนิสิตในห้องปฏิบัติการที่ได้ช่วยทำการทดลองและวิจัยเป็นอย่างดี โดยเฉพาะอย่างยิ่ง คุณภาวัน สยามชัย คุณวิโรจน์ บุญโกสมัมภ์ และคุณสุวัฒน์ โสภิตพันธ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย