138

ลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของเซลล์แสงอาทิตย์ $CuInSe_2$ / CdS ชนิดฟิล์มบาง

นาย สุคคเณศ ตุงคะสมิต

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชาฟิสิกส์
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พ.ศ. 2538

ISBN 974 - 632 - 866 - 2

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I16753719

Electrical Characterization of $CuInSe_2$ / CdS Thin Film Solar Cell Heterojunction

Mr. Sukkaneste Tungasmita

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Science

Department of Physics

Graduate School

Chulalongkorn University

1995

ISBN 974 - 632 - 866 - 2

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของเซลล์แสงอาทิตย์ $CuInSe_2$ / CdS ชนิดฟิล์มบาง
โดย	นาย สุคคเณศ ตุงคะสมิต
ภาควิชา	ฟิสิกส์
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ขจรยศ อยู่ดี

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. สันติ ถุงสุวรรณ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมพงศ์ ฉัตราภรณ์)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ยุทธ อัครมาส)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ประไพพรรณ ฉันธิกุล)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ขจรยศ อยู่ดี)

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

สุคคเณศ ตุงคะสมิต : ลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของเซลล์แสงอาทิตย์ $CuInSe_2/CdS$ ชนิดฟิล์มบาง (ELECTRICAL CHARACTERIZATION OF $CuInSe_2/CdS$ THIN FILM SOLAR CELL HETEROJUNCTION) อ.ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.ขจรยศ อยู่ดี. 135 หน้า. ISBN 974-632-866-2

ได้มีการเตรียมรอยต่อวิวิธพันธุ์ $CuInSe_2/CdS$ ขึ้น เพื่อทำการศึกษาลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าทั้งรอยต่อชนิดที่เตรียมขึ้นบนชิ้นผลึกเดี่ยวของ $CuInSe_2$ และรอยต่อชนิดฟิล์มบาง อีกทั้งได้จัดสร้างระบบวัดลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าของรอยต่อซึ่งควบคุมและบันทึกผลด้วยคอมพิวเตอร์ เพื่อช่วยในการวัดและศึกษารอยต่อที่เตรียมขึ้น

จากผลการศึกษา พบว่า รอยต่อที่เตรียมได้แสดงสมบัติการเรียงกระแสที่ดีในเชิงของการเป็นไดโอด โดยให้ค่าของตัวแปรอุดมคติประมาณ 2.0 ที่ค่ากระแสอิ่มตัวเท่ากับ 3.28×10^{-7} A สำหรับรอยต่อชนิดที่เตรียมบนชิ้นผลึกเดี่ยว และประมาณ 1.41×10^{-6} A สำหรับรอยต่อชนิดฟิล์มบาง และพบว่า รอยต่อที่เตรียมได้มีการตอบสนองต่อแสงในเชิงของการเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ได้พอสมควร โดยให้ค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงานประมาณ 1.24% ที่ค่ากระแสปิดวงจร 0.55 mA และที่ความต่างศักย์เปิดวงจร 215 mV

จากลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า-ความต่างศักย์ พบว่า ความต่างศักย์การแพร่มีค่าประมาณ 0.4-0.5 V และความเข้มข้นพาหะมีค่าประมาณ 10^{16} cm^{-1} ซึ่งใกล้เคียงกับค่าจากการวัดสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ อีกทั้งพบการปรากฏของสิ่งเจือระดับลึกในโครงสร้างรอยต่อ

จากการศึกษาลักษณะเฉพาะกระแส-ความต่างศักย์ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ในช่วง 115-273 K พบว่า กลไกการขนส่งระหว่างรอยต่อสอดคล้องกับแบบจำลองการทะลุผ่าน-รวมตัว

ภาควิชา ฟิสิกส์ ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา ฟิสิกส์ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2538 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

##C625440 : MAJOR PHYSICS
KEY WORD: HETEROJUCNTION / $CuInSe_2$ / CdS / SOLAR CELL
SUKKANESTE TUNGASMITA : ELECTRICAL CHARACTERIZATION OF $CuInSe_2$/CdS THIN FILM SOLAR CELL HETEROJUNCTION. THESIS ADVISOR : ASSI. PROF. KAJORNYOD YOODEE, Ph.D. 135 pp. ISBN 974-632-866-2

The $CuInse_2$/CdS heterojunctions were fabricated for the study of electrical characteristics, using both single crystals and thin films of $CuInSe_2$. The computerized electrical characteristic measurement system was set up to use in this heterojunction study.

From the results, the prepared heterojunctions showed a good diode rectification behavior with an ideality factor of about 2.0 and a saturated current of about 3.28×10^{-7} A and 1.41×10^{-6} A in the case of the single crystals and thin films, respectively. The junctions also showed response to light with a conversion efficiency of about 1.24° at 0.55 mA of shorted circuit current and 215 mV of open circuit voltage.

From the C-V measurement, it was found that the diffusion voltage was about 0.4-0.5 V and the carrier concentration was about 10^{16} cm^{-3} which are near the values obtained from the Hall mobility measurement. Deep-level impurities were also observed at the junction interface.

The I-V measurement at temperature range of about 115-273 K showed that the transport mechanism between the junctions was consistent with the tunneling-recombination model.

ภาควิชา ฟิสิกส์ ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา ฟิสิกส์ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2538 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ขจรยศ อยู่ดี และผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมพงศ์ ฉัตราภรณ์ ที่ได้ให้คำแนะนำ ติดตามและควบคุมการวิจัยอย่างใกล้ชิด ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กิรณันต์ รัตนธรรมพันธ์ อาจารย์พงษ์ ทรงพงษ์ ที่ได้ให้คำแนะนำต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ อาจารย์ ชาญวิทย์ จิตยุทธการ ในความช่วยเหลือด้านการเตรียมฟิล์มบาง $CuInSe_2$ และ อาจารย์ สมฤทธิ์ วงศ์มณีโรจน์ ที่ให้คำแนะนำในการสร้างระบบวัด ขอขอบคุณ คุณสิงหเดช แตงจวง ในความช่วยเหลือด้านการเตรียมฟิล์ม CdS และ คุณคำเผย ชัยวงส์ พร้อมทั้งคณะวิจัยฟิสิกส์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาฟิสิกส์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความช่วยเหลือด้านต่างๆ

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ยุทธ อัครมาส และ รองศาสตราจารย์ ดร. ประไพพรรณ ฉันธิกุล ที่ได้สละเวลาอันมีค่ามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบคุณ คุณสุนทร บัวเนตร์ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือด้านอุปกรณ์ และเครื่องมือ ต่างๆในการทำวิทยานิพนธ์นี้ รวมทั้งบุคลากรในหน่วยบริการทุกท่าน ในความช่วยเหลือด้านต่างๆ

ส่วนหนึ่งของงานวิจัยนี้ ได้รับการสนับสนุนจากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ในโครงการการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบาง ผู้เขียนจึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อและคุณแม่ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและสนับสนุนในด้านต่างๆ จนวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญตาราง ..... ญ

สารบัญรูป ..... ฎ

บทที่

1. บทนำ 1
2. รอยต่อวิวิธพันธุ์. 3
   - บทนำ 3
   - โครงสร้างแถบพลังงาน 3
   - แบบจำลองรอยต่อวิวิธพันธุ์ 8
     - 1. แบบจำลองการแพร่ 8
     - 2. แบบจำลองแบบปลดปล่อย 12
     - 3. แบบจำลองแบบปลดปล่อย - รวมตัว 15
     - 4. แบบจำลองการทะลุผ่าน 17
     - 5. แบบจำลองการทะลุผ่าน - รวมตัว 20
   - สารกึ่งตัวนำคู่วิวิธพันธุ์. 23
   - การศึกษาลักษณะความจุไฟฟ้าในรอยต่อวิวิธพันธุ์ 24
3. สมบัติเฉพาะทางไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์. 26
   - บทนำ 26
   - ลักษณะเฉพาะกระแส - ความต่างศักย์ 26

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ หน้า

3. (ต่อ)ลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า - ความต่างศักย์ 32

1. การวิเคราะห์ความเข้มข้นของการโดป 32

2. การวิเคราะห์สิ่งเจือระดับลึก 35

4. ทฤษฎีเซลล์แสงอาทิตย์เบื้องต้น 39

บทนำ 39

การแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์ 39

ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานเชิงอุดมคติ 41

ลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้า 46

ลักษณะเฉพาะของความสัมพันธ์กระแส - ความต่างศักย์ 50

เซลล์แบบรอยต่อวิวิธพันธุ์ 52

เซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบาง. 54

5. ระบบวัดลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้า 57

ภาคฮาร์ดแวร์ 57

1. ระบบวัดลักษณะเฉพาะกระแส - ความต่างศักย์ 57

2. ระบบวัดลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า - ความต่างศักย์ 62

ภาคซอฟแวร์ 62

การทดสอบระบบ 66

6. การทดลองและผลการทดลอง 67

รอยต่อวิวิธพันธุ์ $CuInSe_2$ / CdS บนชิ้นผลึกเดี่ยว $CuInSe_2$ 67

1. การเตรียมรอยต่อ 67

2. การทดลองวัดลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าของรอยต่อ 69

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ หน้า

6. (ต่อ)ลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิดฟิล์มบาง. 78

1. การเตรียมรอยต่อ 79

2. การทดลองวัดลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าของรอยต่อ 81

7. สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง 101

รายการอ้างอิง 104

ภาคผนวก 106

ประวัติผู้เขียน 119

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 แสดงค่าคงที่ต่างๆของรอยต่อวิวิธพันธุ์ GaAs-Ge ชนิด พี-เอ็น. 4

6.1 แสดงค่าตัวแปรอุดมคติและค่ากระแสอิ่มตัว ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ ที่อุณหภูมิต่างๆ 76

6.2 แสดงรายละเอียดโครงสร้างรอยต่อวิวิธพันธุ์ $CuInSe_2$ / CdS ชนิดฟิล์มบาง แบบต่างๆ 80

6.3 แสดงตัวแปรองค์ประกอบต่างๆ ที่คำนวณได้จากการวัด ลักษณะเฉพาะทางไฟฟ้าของรอยต่อชนิดฟิล์มบาง 96

6.4 แสดงค่าตัวแปรอุดมคติและค่ากระแสอิ่มตัวและค่าตัวแปร ความต่างศักย์ของรอยต่อชนิดฟิล์มบาง ที่อุณหภูมิต่างๆ 99

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 แสดงรอยต่อแบบฉับพลันและรอยต่อแบบเป็นขั้นตอน ในสภาวะสมดุลย์ความร้อน 4

2.2 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของ n-GaAs และ p-Ge ทั้งก่อน และ หลังการนำมาต่อเป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์. 5

2.3 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิด พี - เอ็น ของ GaAs - Ge เมื่อไม่มีความต่างศักย์จากภายนอกไบแอส และเมื่อมีความต่างศักย์แบบไบแอสตรง 7

2.4 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิดต่าง ทั้งขณะ ก่อนเชื่อมต่อและหลังจากนำมาเชื่อมต่อกันแล้ว 9

2.5 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อวิวิธพันธุ์แบบฉับพลัน ชนิด พี - เอ็น ภายใต้การไบแอสตรง 12

2.6 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อวิวิธพันธุ์ แบบฉับพลันชนิด พี - เอ็น ในลักษณะไม่สมดุลย์ 13

2.7 แสดงลักษณะเฉพาะ กระแส - ความต่างศักย์ของ รอยต่อวิวิธพันธุ์แบบฉับพลันชนิด พี - เอ็น. 15

2.8 แสดงถึงแบบจำลองแบบปลดปล่อย - รวมตัว สำหรับ รอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิด พี - เอ็น. 16

2.9 แสดงถึงแบบจำลองทะลุผ่านโดยอาศัยโครงสร้างแถบ พลังงานตามแบบของ Anderson 18

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

2.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ln I กับ V จากผลการทดลอง
สำหรับรอยต่อวิวิธพันธุ์ ชนิด พี - เอ็น ที่อุณหภูมิต่างๆ. 20
2.11 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิด
พี - เอ็น เมื่อไบแอสตรง และกระบวนการทะลุผ่าน -รวมตัว
ทั้งแบบขั้นตอนเดียว และหลายขั้นตอน 21
2.12 โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิด พี - เอ็น
ภายใต้การไบแอสกลับ ซึ่งแสดงกลไกการทะลุผ่าน 22
2.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความจุไฟฟ้า กับ ความต่างศักย์
ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ ชนิด เอ็น - พี Ge - GaAs 25
3.1 กราฟแสดงลักษณะสอกระแส - ศักย์ไฟฟ้า อุดมคติ 29
3.2 กราฟแสดงลักษณะสอกระแส - ศักย์ไฟฟ้าของไดโอดที่ทำจาก Si .. 30
3.3 แสดงลักษณะเฉพาะกระแส - ความต่างศักย์แบบไบแอสตรง
และรอยต่อวิวิธพันธุ์ p-Ge / n-GaAs ที่อุณหภูมิต่างๆ. 31
3.4 แสดงโครงสร้างของรอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิด พี - เอ็น
โดยมีสถานะพื้นผิวกระจายทั้งขอบเขตความกว้างและ
ทั้ง space - charge region ภายในบริเวณดีพลีชัน 34
3.5 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่มีสิ่งเจือระดับลึก
และกลไกการจับ - ปล่อยพาหะ 36

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.6 แสดงกราฟความสัมพันธุ์ของ C^{-2} และ V ซึ่งมี
การแปรไปกับเวลาที่อุณหภูมิ 506.2K และ 241.5K. 38

4.1 แสดงการแผ่รังสีสเปคตรัมสุริยะ ที่ค่ามวลอากาศต่างๆ 40

4.2 แสดงสเปคตรัมสุริยะเป็นฟังก์ชันกับพลังงานโฟตอน 41

4.3 แสดงวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์แบบอุดมคติ 42

4.4 แสดงความสัมพันธ์กระแส - ความต่างศักย์ภายใต้สภาพฉายแสง . 43

4.5 แสดงความสัมพันธุ์ของจำนวนโฟตอนในสเปคตรัมสุริยะ
กับพลังงานโฟตอน 46

4.6 อัตราการเกิดคู่อิเลคตรอน - โฮล เป็นฟังก์ชันของระยะทางจากผิวหน้า
ของสารกึ่งตัวนำสำหรับความยาวคลื่นแสงสั้นและยาว 47

4.7 แสดงผลกระทบของความต้านทานต่อลักษณะเฉพาะ I - V
และวงจรสมมูล 51

4.8 แผนภาพแถบพลังงานของรอยต่อวิวิธพันธุ์แบบซนิด
เอ็นบนพี ในขณะสมดุลย์ความร้อน 53

4.9 แผนภาพแสดงโครงสร้างแถบพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์
$CuInSe_2$- CdS แบบฟิล์มบาง 55

4.10 ภาพขยายภาคตัดขวางของรอยต่อระหว่าง $CuInSe_2$ / (Cd,Zn)S
ในเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบาง 56

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.1 แผนภาพแสดงระบบวัดลักษณะเฉพาะกระแส - ความต่างศักย์ ... 57

5.2 รูปถ่ายแสดงแผงวงจรเชื่อมโยง GPIB IEEE 488 58

5.3 รูปถ่ายแสดงการติดตั้งรอยต่อวิวิธพันธุ์ที่เตรียมได้ลงบนฐานรองรับ. 59

5.4 รูปถ่ายแสดงท่อรองรับรอยต่อสำหรับวัดที่อุณหภูมิต่ำ. 60

5.5 รูปถ่ายแสดงการติดตั้งรอยต่อที่เตรียมได้ลงบนแท่นรองรับ 60

5.6 แผนภาพแสดงส่วนประกอบของระบบวัดความสัมพันธ์
กระแส - ความต่างศักย์ ที่อุณหภูมิต่างๆ 61

5.7 แสดงวงจรควบคุมรีเลย์ผ่านทางพอร์ตสื่อสาร
แบบขนานของคอมพิวเตอร์ 61

5.8 แผนภาพแสดงส่วนประกอบของระบบวัด C - V 62

5.9 แสดงผังการทำงานของโปรแกรม IVCMS2.PAS 63

5.10 แสดงเมนูหลักของโปรแกรม IVCMS2.PAS 64

6.1 แสดงโครงสร้างชั้นรอยต่อวิวิธพันธุ์ $CuInSe_2$ / CdS
บนชิ้นผลึกเดี่ยว $CuInSe_2$ ที่เตรียมขึ้นได้ 68

6.2 ภาพถ่ายแสดงรอยต่อวิวิธพันธุ์ที่เตรียมขึ้นได้ 69

6.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส - ความต่างศักย์
และรอยต่อวิวิธพันธุ์ $CuInSe_2$ ที่เตรียมบนชิ้นผลึกเดี่ยว $CuInSe_2$ 70

6.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์กระแส - ความต่างศักย์ ในแบบกึ่งล็อก .. 71

6.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส - ความต่างศักย์ ของรอยต่อ
วิวิธพันธุ์ $CuInSe_2$ / CdS ทั้งในสภาวะที่ฉายแสง และสภาวะมืด .. 72

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

6.6 กราฟส่วนขยายของรูปที่ 6.6 ในบริเวณใกล้จุดกำเนิด 73

6.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1 / C^2$ กับ V 74

6.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์กระแส - ความต่างศักย์ที่อุณหภูมิต่างๆ .. 76

6.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าตัวแปรอุดมคติ
และค่ากระแสอิ่มตัวกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป 77

6.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอุดมคติกับอุณหภูมิ 78

6.11 แสดงโครงสร้างชั้นต่างๆของรอยต่อวิวิธพันธุ์ $CuInSe_2$ / CdS
ชนิดฟิล์มบางที่เตรียมได้. 80

6.12 กราฟแสดงลักษณะเฉพาะกระแส - ความต่างศักย์
ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิดฟิล์มบางแบบ AM. 81

6.13 กราฟแสดงลักษณะเฉพาะกระแส - ความต่างศักย์
กึ่งล็อกของรอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิดฟิล์มบางแบบ AM. 82

6.14 กราฟแสดงลักษณะเฉพาะกระแส - ความต่างศักย์ของ
รอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิดฟิล์มบางแบบ AM ในสภาวะฉายแสง. 82

6.15 กราฟแสดงลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า - ความต่างศักย์
ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิดฟิล์มบางแบบ AM 83

6.16 กราฟแสดงลักษณะเฉพาะกระแส - ความต่างศักย์
ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิดฟิล์มบางแบบ AN. 84

6.17 กราฟแสดงลักษณะเฉพาะกระแส - ความต่างศักย์
กึ่งล็อกของรอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิดฟิล์มบางแบบ AN. 84

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

6.18 กราฟแสดงลักษณะเฉพาะกระแส - ความต่างศักย์ของ
รอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิดฟิล์มบางแบบ AN ในสภาวะฉายแสง. 85

6.19 กราฟแสดงลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า - ความต่างศักย์
ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิดฟิล์มบางแบบ AN. 85

6.20 กราฟแสดงลักษณะเฉพาะกระแส - ความต่างศักย์
ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิดฟิล์มบางแบบ AO. 86

6.21 กราฟแสดงลักษณะเฉพาะกระแส - ความต่างศักย์
กึ่งล็อกของรอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิดฟิล์มบางแบบ AO. 87

6.22 กราฟแสดงลักษณะเฉพาะกระแส - ความต่างศักย์ของ
รอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิดฟิล์มบางแบบ AO ในสภาวะฉายแสง. 87

6.23 กราฟแสดงลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า - ความต่างศักย์
ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิดฟิล์มบางแบบ AO. 88

6.24 กราฟแสดงลักษณะเฉพาะกระแส - ความต่างศักย์
ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิดฟิล์มบางแบบ AP 89

6.25 กราฟแสดงลักษณะเฉพาะกระแส - ความต่างศักย์
กึ่งล็อกของรอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิดฟิล์มบางแบบ AP. 89

6.26 กราฟแสดงลักษณะเฉพาะกระแส - ความต่างศักย์ของ
รอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิดฟิล์มบางแบบ AP ในสภาวะฉายแสง. 90

6.27 กราฟแสดงลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า - ความต่างศักย์
ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิดฟิล์มบางแบบ AP 90

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

6.28 กราฟแสดงลักษณะเฉพาะกระแส - ความต่างศักย์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิดฟิล์มบางแบบ AQ. 91

6.29 กราฟแสดงลักษณะเฉพาะกระแส - ความต่างศักย์กึ่งล็อกของรอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิดฟิล์มบางแบบ AQ. 92

6.30 กราฟแสดงลักษณะเฉพาะกระแส - ความต่างศักย์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิดฟิล์มบางแบบ AQ ในสภาวะฉายแสง 92

6.31 กราฟแสดงลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า - ความต่างศักย์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิดฟิล์มบางแบบ AQ. 93

6.32 กราฟแสดงลักษณะเฉพาะกระแส - ความต่างศักย์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิดฟิล์มบางแบบ AR. 94

6.33 กราฟแสดงลักษณะเฉพาะกระแส - ความต่างศักย์กึ่งล็อกของรอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิดฟิล์มบางแบบ AR. 94

6.34 กราฟแสดงลักษณะเฉพาะกระแส - ความต่างศักย์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิดฟิล์มบางแบบ AR ในสภาวะฉายแสง. 95

6.35 กราฟแสดงลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า - ความต่างศักย์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิดฟิล์มบางแบบ AR. 95

6.36 กราฟแสดงลักษณะเฉพาะกระแส - ความต่างศักย์ของรอยต่อแบบฟิล์มบางกับการลดทอนพื้นที่รับแสง 98

6.37 กราฟแสดงลักษณะเฉพาะกระแส - ความต่างศักย์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ชนิดฟิล์มบางที่อุณหภูมิต่างๆ. 99

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า

6.38 กราฟแสดงค่าตัวแปรความต่างศักย์ที่แปรผันกับอุณหภูมิ 100

7.1 แสดงโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์แบบ ARCO 103