การวัดค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะ
ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน

นาย จักรพันธ์ จันทนา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-4180-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

MEASUREMENT OF MOBILITY-LIFETIME PRODUCTS OF

CARRIERS IN AMORPHOUS SILICON SOLAR CELLS

Mr. Jakapan Chantana

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2003

ISBN 974-17-4180-4

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวัดค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะ ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน
โดย	นาย จักรพันธ์ จันทนา
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	ศาสตราจารย์ ดร.ดุสิต เครืองาม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.... คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการสอบ

(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

.... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ศาสตราจารย์ ดร. ดุสิต เครืองาม)

.... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. มนตรี สวัสดิ์ศฤงฆาร)

.... กรรมการ

(ดร. ภาวัน สยามชัย)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จักรพันธ์ จันทนา : การวัดค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน(MEASUREMENT OF MOBILITY-LIFETIME PRODUCTS OF CARRIERS IN AMORPHOUS SILICON SOLAR CELLS) อ. ที่ปรึกษา : ศ. ดร. ดุสิต เครืองาม, จำนวนหน้า 96หน้า. ISBN 974-17-4180-4.

ความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะในสารกึ่งตัวนำเป็นตัวแปรที่สำคัญที่กำหนดค่าสภาพนำไฟฟ้าด้วยแสงของสารกึ่งตัวนำ โดยทั่วไปเซลล์แสงอาทิตย์ที่ดีควรมีค่าสภาพนำไฟฟ้าด้วยแสงมาก นั่นคือควรมีค่าความคล่องตัวและเวลาอายุมาก ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้มีการศึกษาเทคนิคการวัดค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะ $(\mu\tau)$ ของฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอนชนิดบริสุทธิ์ (i-a-Si:H) ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนรอยต่อ p-i-n เทคนิคในการวัดที่ใช้ศึกษามีข้อดีเด่นว่า สามารถวัดหาค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะทั้งชนิดอิเล็กตรอนและโฮลของฟิล์มบางซึ่งอยู่ภายในเซลล์แสงอาทิตย์ได้โดยตรงและใช้อุปกรณ์เครื่องมือที่ราคาไม่แพง การทดลองนั้นทำโดยการวัดสเปกตรัมผลตอบสนองทางแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ และนำค่าสเปกตรัมดังกล่าวไปคำนวณหาค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะ

ตัวอย่างผลการศึกษา พบว่า ในกรณีของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนที่มีประสิทธิภาพ 4.2 % ค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของอิเล็กตรอนและของโฮล มีค่าประมาณ 1×10^{-7} และ 5×10^{-8} (cm^2/V) ตามลำดับ นอกจากยังพบว่า ค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของอิเล็กตรอนและของโฮล จะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เพิ่มขึ้น

นอกจากนี้ ยังได้มีการนำเทคนิคดังกล่าวไปประยุกต์ใช้กับกรณีเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียม ($a\text{-}Si_{1-x}Ge_x:H$) ($x\approx0.1$) ซึ่งมีประสิทธิภาพประมาณ 3.7% และได้ผลค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของอิเล็กตรอนและโฮลเท่ากับ 8×10^{-9} และ 5×10^{-9} (cm^2/V) ตามลำดับ

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต ....
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ....
ปีการศึกษา 2546 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม -

4470691621 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING
KEY WORD : MOBILITY-LIFETIME PRODUCTS OF CARRIERS /AMORPHOUS SILICON SOLARCELL/AMORPHOUS SILICON GERMANIUM

JAKAPAN CHANTANA : MEASUREMENT OF MOBILITY-LIFETIME PRODUCTS OF CARRIERS IN AMORPHOUS SILICON SOLAR CELLS. THESIS ADVISOR : PROF. DUSIT KRUANGNAM,Dr.ENG.,96 PP. ISBN 974-17-4180-4

Mobility and lifetime of carriers of a semiconductor are important parameters that determine photo-conductivity of the semiconductor. A solar cell having high efficiency should have a high photo-conductivity, in other words, high mobility and long lifetime of carriers. In this thesis, a special technique for measuring mobility-lifetime products of carriers $(\mu\tau)$ of the i-layer in amorphous silicon solar cells having the p-i-n junctions has been studied. The technique used has several advantages, such that mobility-lifetime products of both electrons and holes can be directly measured in an amorphous solar cell and the technique uses only cheap components. The basic methodology of the technique is to measure spectrum responses of an amorphous solar cell, in the conditions of zero bias, forwarded bias and reversed bias, and then calculate the mobility-lifetime products based on the "variable minority carrier transport model".

Examples of the results of the study showed that the mobility-lifetime products of electrons and holes in the amorphous silicon solar cell having 4.2% efficiency are $1\text{x}10^{-7}$ and $5\text{x}10^{-8}$ (cm^2/V), respectively. It has been also found that as the efficiency of the solar cell increases, the mobility-lifetime products of both types of carriers increase.

The measurement technique has also been successfully applied to the case of amorphous silicon germanium solar cells. It has been shown that the mobility-lifetime products of electrons and holes for the a-$Si_{1-x}Ge_x$:H ($x \approx 0.1$) solar cell having 3.7% efficiency are $8\text{x}10^{-9}$ and $5\text{x}10^{-9}$ (cm^2/V), respectively

Department Electrical Engineering	Student's signature.
Field of study Electrical Engineering	Advisor's signature.
Academic year 2003	Co-advisor's signature - .

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ดำเนินการที่ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และได้รับการสนับสนุนจาก ทุนสนับสนุนงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาปีการศึกษา 2546 บัณฑิตศึกษา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผู้เขียนวิทยานิพนธ์ ขอขอบพระคุณ ศ. ดร. ดุสิต เครืองาม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้ความกรุณาให้คำแนะนำต่างๆ ตั้งแต่เริ่มต้นการทำวิทยานิพนธ์ จนวิทยานิพนธ์เสร็จสมบูรณ์

ผู้เขียนวิทยานิพนธ์ ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ได้แก่ ศ. ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว ศ. ดร.ดุสิต เครืองาม รศ. ดร. มนตรี สวัสดิ์ศฤงฆาร และ ดร.ภาวัน สยามชัย ที่ได้ให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็น ข้อวิจารณ์ต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ประจำห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่านที่ได้ให้คำแนะนำต่างๆ ที่มีค่า ได้แก่ ศ. ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว รศ. ดร.มนตรี สวัสดิ์ศฤงฆาร รศ. ดร.บรรยง โตประเสริฐพงศ์ รศ. ดร.ชุมพล อันตรเสน ศ. ดร.ดุสิต เครืองาม รศ. ดร.สมชัย รัตนธรรมพันธ์ ผศ. ดร. ทรงพล กาญจนชูชัย และ อ.ดร.ชนินทร์ ละลิ่ว

ผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณศุภโชค ไทยน้อย คุณบัณฑิตา รัฐวิเศษ คุณพรชัย ช่างม่วง ที่ได้ให้ความช่วยเหลือด้านเทคนิคต่างๆ

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ และนิสิตปริญญาเอก โท ตรีทุกท่าน ในห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่ได้ให้ความช่วยเหลือ และกำลังใจ และคำแนะนำต่างๆ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และบุคคลรอบข้างทุกท่านที่ให้ความห่วงใย และเป็นกำลังใจในการทำวิจัยและเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จนกระทั่งสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี คุณประโยชน์อันจะเกิดจากผลงานวิจัยในครั้งนี้ ผู้วิจัยขอมอบเป็นเครื่องบูชาพระคุณบูรพาจารย์ ตลอดจนคุณบิดามารดาที่ได้มีส่วนช่วยวางรากฐานการศึกษาแก่ผู้วิจัย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.. ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ... จ
กิตติกรรมประกาศ... ฉ
สารบัญ.. ช
สารบัญภาพ.. ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.. ฐ

บทที่

1. พื้นฐานและที่มาของวิทยานิพนธ์ 1
1.1 บทนำ...1
1.1.1 คุณสมบัติเด่นของวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดอะมอร์ฟัส...2
1.2 ความสำคัญและที่มาของหัวข้อวิทยานิพนธ์..2
1.3 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์...3
1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์...3
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ...4

2. โครงสร้างและหลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนและอะมอร์ฟัส ซิลิคอนเจอร์เมเนียม..6
2.1 บทนำ...6
2.2 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัส..6
2.2.1 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน 6
2.2.2 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียม.....................9
2.3 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน.....................................10
2.4 โครงสร้างของระบบ Glow Discharge Plasma CVD..11
2.5 สรุป...13

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ หน้า

3. แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาการวัดหาค่าผลคูณของความคล่องตัว
และเวลาอายุของพาหะในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัส..14
3.1 บทนำ...14
3.2 ความแตกต่างของสิ่งประดิษฐ์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนและชนิดผลึกซิลิคอน...............15
3.3 แบบจำลองที่อาศัยการเคลื่อนที่ของพาหะส่วนน้อยที่แปรตามตำแหน่ง
(Variable Minority Carrier Transport Model)...17
3.3.1 ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเนื่องจากการกระตุ้นของแสงในเซลล์แสงอาทิตย์
ชนิดอะมอร์ฟัส...22
3.3.2 ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเนื่องจากการฉีดของพาหะในเซลล์แสงอาทิตย์
ชนิดอะมอร์ฟัส...25
3.3.3 ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ารวมของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัส...........27
3.4 สรุป...30

4. วิธีการหาค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะในเซลล์แสงอาทิตย์
ชนิดอะมอร์ฟัส...31
4.1 บทนำ...31
4.2 การคำนวณหาสมการความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัส..32
4.3 การหาค่าผลคูณความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะ $(\mu\tau)$ ของเซลล์แสงอาทิตย์
ชนิดอะมอร์ฟัส...37
4.4 ผลการเขียนโปรแกรมคำนวณหาค่าผลคูณความคล่องตัวกับเวลาอายุของพาหะ
$(\mu\tau)$และค่าความเร็วของการรวมตัวที่ผิว (Surface Recombination Velocity)
ระหว่างชั้น p กับชั้น i (s_p) และ ระหว่างชั้น n กับชั้น i (s_n) 44
4.5 สรุป...48

5. ผลการวัดค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด
อะมอร์ฟัส..49
5.1 บทนำ...49

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ หน้า

5.2 ผลการวัดค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัส........49
5.2.1 การวัดสัมประสิทธิ์การดูกลืนแสงของอะมอร์ฟัส........51
5.2.2 การวัดค่า Built-In Potential ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัส........54
5.2.3 การวัดสเปกตรัมตอบสนองต่อแสงของเซลล์แสงอาทิตย์........58
5.2.4 การวัดค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะในเซลล์แสงอาทิตย์...62
5.3 ผลการหาค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนที่มีประสิทธิภาพค่าต่างๆ........63
5.4 ผลการหาค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียมที่มีประสิทธิภาพค่าต่างๆ........66
5.5 สรุป........71

6. สรุป........72

รายการอ้างอิง........73
ภาคผนวก........74
ภาคผนวก ก โปรแกรมการวัดค่าผลคูณความคล่องตัวและเวลาอายุพาหะของเซลล์แสงอาทิตย์ (MAT LAB)........75
ภาคผนวก ข สำเนาบทความซึ่งเผยแพร่ ณ การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 26 ณ โรงแรมโกลเด้นแซนด์ ชะอำ จ. เพชรบุรี (6-7 พฤศจิกายน 2546) หน้า 1400-1405........88
การเผยแพร่ผลงานวิจัย........95
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์........96

สารบัญภาพ

รูปที่ หน้า

1.1 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์..........5

2.1 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน (a-Si:H)..........6

2.2 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียม (a-SiGe:H)..........9

2.3 แถบพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์..........10

2.4 ภาพถ่ายระบบ Glow Discharge Plasma CVD..........11

2.5 โครงสร้างของระบบ Glow Discharge Plasma CVD..........12

3.1 แถบพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนที่ ชั้น i
ถูกแบบออกเป็น 2 ส่วนคือส่วน 1 และส่วน 2..........18

4.1 ตัวอย่างการจำลอง (simulate) [5] ฟังก์ชันของอัตราส่วนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า
ในเซลล์ฯชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนโดยที่กำหนดให้ $\mu_n \tau_n / \mu_p \tau_p$ =1..........39

4.2 ตัวอย่างการจำลอง (simulate) [5]ฟังก์ชัน ของอัตราส่วนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า
ในเซลล์ฯชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนโดยที่กำหนดให้ $\mu_n \tau_n / \mu_p \tau_p$ =1
และ $s_n \times s_p$ เปลี่ยนค่า 4 กรณี..........40

4.3 ตัวอย่างผลการจำลอง (simulate) [5]ฟังก์ชันของอัตราส่วนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า
ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนโดยที่กำหนดให้ $\mu_n \tau_n + \mu_p \tau_p$ =10^{-7}..........41

4.4 ตัวอย่างผลการจำลอง (simulate) [5]ฟังก์ชันของอัตราส่วนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า
ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนโดยที่กำหนดให้ $\mu_n \tau_n + \mu_p \tau_p$ =10^{-7}
และ s_n เปลี่ยนค่า 5 กรณี..........41

4.5 แผนภูมิสายงานแสดงขั้นตอนในการหา $\mu_n \tau_n$, $\mu_p \tau_p$, s_n และ s_p..........45

4.6 แผนภูมิสายงานสำหรับหาค่า X_C..........47

5.1 ขั้นตอนการวัดค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะใน
เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัส..........50

5.2 เครื่อง UV Spectrophotometer ตรา Shimadzu ซึ่งติดตั้งอยู่ที่ห้องปฏิบัติการวิจัย
สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย..........52

5.3 ตัวอย่างสเปกตรัมสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านแสงของ a:Si:H ที่ปลูกด้วย
วิธี Plasma CVD..........53

5.4 ตัวอย่างสเปกตรัมของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (α) ของฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอน..........53

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.5 ตัวอย่างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนที่ใช้ทดลองในวิทยานิพนธ์นี้……..………55
5.6 ระบบการวัดศักย์ไฟฟ้าภายใน (Built-In Potential) ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัส ด้วยวิธี Back Surface Reflected Electro-Absorption (BASREA)………………………55
5.7 ภาพถ่ายระบบการวัดศักย์ไฟฟ้าภายใน (Built-In Potential) ของเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิดอะมอร์ฟัสด้วยวิธี Back Surface Reflected Electro-Absorption (BASREA)……….56
5.8 ตัวอย่างผลการวัดสเปกตรัมของ BASREA (Δs) เซลล์แสงอาทิตย์…………………….....57
5.9 การกำหนดค่า Built-In Potential ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนโดย พล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของสัญญาณ ΔS และ V_{DC} ที่ป้อน สู่เข้าเซลล์แสงอาทิตย์ พารามิเตอร์ V_{PP} คือ แรงดันรูปคลื่นไซน์ ความถี่ 1 kHz………..57
5.10 ระบบการวัดสเปกตรัมผลตอบสนองต่อแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัส ……..…59
5.11 ภาพถ่ายระบบการวัดสเปกตรัมผลตอบสนองต่อแสงของเซลล์แสง อาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัส…………………………………………………………………..59
5.12 ผลการวัดสเปกตรัมผลตอบสนองต่อแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ กรณีไบแอสตาม 0.4 V ไบแอสย้อน –1 V และไม่ได้ไบแอส 0 V……………………………………………….……61
5.13 ผลการพล็อตกราฟสเปกตรัมผลตอบสนองต่อแสงจากรูปที่ 5.12 ในที่นี้ แสดงค่า $\frac{J_F(0.4V)}{J_{SC}(0)}$ และ $\frac{J_R(-1V)}{J_{SC}(0)}$ ……………………………………………………....61
5.14 แผนภูมิสายงานในการหา $\mu_n\tau_n$, $\mu_p\tau_p$, S_n และ s_p ………………...…………………....62
5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน และความหนาของชั้น i……………………………………………………………...……63
5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะ ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนและค่าประสิทธิภาพ ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนกับความหนาของชั้น i……………………..……64
5.17 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน เจอร์เมเนียม และความหนาของชั้น i……………………………………………………….66
5.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะ ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียมและค่าประสิทธิภาพ ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียมกับความหนาของชั้น i…………..67

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะทั้งอิเล็กตรอน
และโฮลของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H กับค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์.........69
5.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะทั้งอิเล็กตรอน
และโฮลของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-SiGe:H กับค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์.....69

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

Å	: Angstrom	(10^{-10}m)
α	: Absorption coefficient	(1/cm)
a-Si:H	: Hydrogenated Amorphous Silicon	
a-SiGe:H	: Hydrogenated Amorphous Silicon Germanium	
a-SiO:H	: Hydrogenated Amorphous Silicon Oxide	
a-SiC:H	: Hydrogenated Amorphous Silicon Carbide	
a-SiN:H	: Hydrogenated Amorphous Silicon Nitride	
mc-Si:H	: Hydrogenated Microcrystalline Silicon	
B_2H_6	: Diborane gas	
PH_3	: Phousphine gas	
CH_4	: Methane gas	
GeH_4	: Germane gas	
H_2	: Hydrogen gas	
N_2	: Nitrogen gas	
SiH_4	: Silane gas	
SnO_2	: Tin Oxide	
λ	: Wave length	(nm)
CO_2	: Carbondioxide gas	
ITO	: Indium tin oxide	
CVD	: Chemical Vapor Deposition	
E_C	: Conduction band	(eV)
E_V	: Valence band	(eV)
E_{opt}	: Optical energy	(eV)
$h\upsilon$	: Photon energy	(eV)
η	: Efficiency of solar cell	(%)
J_{SC}	: Short circuit current density of solar cell	(mA/cm^2)
V_{OC}	: Opent circuit voltage of solar cell	(V)
FF	: Fill factor of solar cell	(%)
DC	: Direct Current	

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

RF	: Radio Frequency	(MHz)
T	: Transmittance	(%)
$\mu_n \tau_n$	: Mobility-lifetime products of electron	(cm^2/V)
$\mu_p \tau_p$	: Mobility-lifetime products of hole	(cm^2/V)
S_n	: effective surface recombination rate at the p/i interface	(V/cm)
S_p	: effective surface recombination rate at the i/n interface	(V/cm)
σ_{ph}	: Photo-conductivity	(S/cm)
V_b	: built-in potential	(eV)
E	: Electric field	(V/cm)
δ_p	: Excess carrier density of hole	($1/cm^3$)
δ_n	: Excess carrier density of electron	($1/cm^3$)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

พื้นฐานและที่มาของวิทยานิพนธ์

1.1 บทนำ

แหล่งพลังงานที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันส่วนใหญ่ได้มาจากฟอสซิล ซึ่งได้แก่ น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ และถ่านหิน แต่เนื่องจากความต้องการใช้พลังงานที่มีเพิ่มมากขึ้น ทำให้แหล่งพลังงานที่ได้มาจากฟอสซิลดังกล่าวจะมีสำรองใช้ได้อีกไม่นาน นอกจากนี้การใช้พลังงานจากฟอสซิลยังก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตามมาอย่างมากอีกด้วย เช่น มลพิษทางอากาศ ฝนกรด และสภาวะเรือนกระจก ซึ่งมีผลกระทบต่อทั้งระบบนิเวศ และความเป็นอยู่ของมนุษย์ดังนั้นในปัจจุบันจึงมีความสนใจนำพลังงานในรูปแบบอื่นมาใช้เพิ่มมากขึ้น อาทิ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานชีวมวล พลังงานความร้อนใต้พิภพ หรือ รวมเรียกว่า พลังงานทดแทน พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานทดแทนชนิดหนึ่งที่น่าสนใจอย่างยิ่ง เนื่องจากกระบวนการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นกระบวนการที่สะอาดและไร้มลภาวะ และประการสำคัญ พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานที่มีความยั่งยืน และมีอยู่อย่างไม่จำกัด

วิทยานิพนธ์เรื่องนี้สนใจเซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตจาก “อะมอร์ฟัสซิลิคอน” (เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน) เนื่องจาก อะมอร์ฟัสซิลิคอนมีคุณสมบัติพิเศษหลายอย่างที่เหมาะในการนำมาประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ เช่น มีต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่าผลึกเดี่ยวซิลิคอน และผลึกโพลีคริสตัลไลน์ซิลิคอน และมีคุณสมบัติอื่นๆ ดังต่อไปนี้

- ช่องว่างพลังงานของอะมอร์ฟัสซิลิคอนมีค่าอยู่ระหว่าง 1.5 – 2.0 eV ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมกับสเปกตรัมของแสงอาทิตย์
- อะมอร์ฟัสซิลิคอนมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงสูงกว่ากรณีของผลึกซิลิคอนถึง 10 เท่า ทำให้สามารถประหยัดวัสดุลงมาก
- อะมอร์ฟัสซิลิคอนมีลักษณะเป็นฟิล์มบางที่สามารถปลูกติดบนแผ่นฐานได้หลายชนิด เช่น แผ่นกระจก แผ่นโลหะ แผ่นพลาสติก แผ่นพอลิเมอร์ และสามารถผลิตให้มีพื้นที่ขนาดใหญ่ได้ง่าย
- อะมอร์ฟัสซิลิคอนผลิตได้ด้วยวิธี Glow Discharge Plasma CVD และใช้อุณหภูมิเพียง 250 ^{o}C ทำให้สามารถลดพลังงานสิ้นเปลืองที่ใช้ในการผลิตได้มาก เมื่อเทียบกับการปลูกผลึกซิลิคอนซึ่งต้องใช้อุณหภูมิสูงถึง 1,420 ^{o}C

1.1.1 คุณสมบัติเด่นของวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดอะมอร์ฟัส

เนื่องจากวัสดุสารกึ่งตัวนำอะมอร์ฟัสมีโครงข่ายของอะตอมที่เรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบในระยะสั้น (ช่วงระยะของอะตอมสองสามอะตอม) จึงมีผลให้วัสดุสารกึ่งตัวนำอะมอร์ฟัสมีคุณสมบัติคล้ายผลึกที่เกิดจากธาตุเดียวกัน แต่เนื่องจากความไม่เป็นระเบียบในระยะยาว (ช่วงระยะของอะตอมหลายสิบอะตอม) วัสดุสารกึ่งตัวนำอะมอร์ฟัสจึงมีข้อเด่นหลายด้าน เช่น การผลิตเป็นฟิล์มบางได้ง่ายโดยใช้อุณหภูมิการผลิตต่ำ ใช้วัสดุน้อย ต้นทุนการผลิตต่ำ ผลิตเป็นพื้นที่ได้หลายขนาด และสามารถเคลือบบนแผ่นฐานชนิดใดก็ได้ [1] จากข้อดีเด่นดังกล่าวจึงได้มีการนำวัสดุอะมอร์ฟัสซิลิคอน (Hydrogenated Amorphous Silicon: a-Si:H) และอะมอร์ฟัสซิลิคอนอัลลอย เช่น อะมอร์ฟัสซิลิคอนคาร์ไบด์ (Hydrogenated Amorphous Silicon Carbide: a-SiC:H) อะมอร์ฟัสซิลิคอนไนไตรด์ (Hydrogenated Amorphous Silicon Nitride: a-SiN:H) อะมอร์ฟัสซิลิคอนออกไซด์ (Hydrogenated Amorphous Silicon Oxide: a-SiO:H) ไปใช้งานเป็นสิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์หลายชนิด เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ ไดโอดเปล่งแสงชนิดฟิล์มบาง [2-4] เซ็นเซอร์ตรวจวัดสีของแสง ทรานซิลเตอร์ชนิดฟิล์มบาง

1.2 ความสำคัญและที่มาของหัวข้อวิทยานิพนธ์

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน (a-Si:H) มีลักษณะเด่นคือ ใช้กระบวนการผลิตที่ง่ายและต้นทุนการผลิตที่ต่ำ สามารถผลิตเป็นพื้นที่ใหญ่ได้ง่าย ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์โดยทั่วไปขึ้นกับองค์ประกอบหลายส่วน เช่น โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ [1] คุณภาพของวัสดุอะมอร์ฟัสชั้นต่างๆ [1] คุณภาพของขั้วไฟฟ้าโปร่งใส [1] ความหนาของชั้นต่างๆ [1] ในจำนวนเหล่านี้ คุณภาพของชั้นวัสดุอะมอร์ฟัสซิลิคอนชนิดบริสุทธิ์ (ชนิด i) นับว่ามีความสำคัญมากที่สุด เพราะเป็นชั้นที่ทำหน้าที่ทั้งดูดกลืนแสงและผลิตพาหะด้วยแสง [1] การประเมินคุณภาพของชั้นอะมอร์ฟัสชนิดบริสุทธิ์ดังกล่าวอาจดูที่ค่าสภาพนำไฟฟ้าด้วยแสง (σ_{ph}) โดยค่านี้มีความสัมพันธ์กับความคล่องตัวของพาหะ (μ) และเวลาอายุของพาหะ (τ) ดังนี้ $\sigma_{ph} \propto \mu\tau$ [1] ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการประเมินคุณภาพของชั้นอะมอร์ฟัสชนิดบริสุทธิ์อาจดูที่ค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะ $(\mu\tau)$

โดยทั่วไป การวัดค่าความคล่องตัวของพาหะ (μ) อาจวัดได้หลายวิธี เช่น วิธี Hall Effect หรือ Time of Flight [1] ส่วนการวัดค่าเวลาอายุของพาหะ (τ) อาจใช้วิธี Pulse Light Generation [1] แล้วนำค่าทั้งสองมาคูณกันเพื่อให้ได้ค่า $(\mu\tau)$ แต่อย่างไรก็ตาม วิธีการวัดเหล่านี้จำเป็นต้องใช้

วัสดุที่มีความหนามากและโครงสร้างแตกต่างไปจากเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนั้นข้อมูลที่ได้จึงอาจจะมีความคลาดเคลื่อนไปจากกรณีโครงสร้างแบบเซลล์แสงอาทิตย์ได้

สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาเทคนิคการวัดค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะ $(\mu\tau)$ ของอะมอร์ฟัสซิลิคอน (a-Si:H) ที่อยู่ภายในของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน และการวัดค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะ $(\mu\tau)$ ของอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียม (a-SiGe:H) ที่อยู่ภายในของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียม อย่างแท้จริง ทั้งนี้ได้ประยุกต์ใช้แบบจำลอง Variable Minority Carrier Transport Model [5,6] ซึ่งได้รับการพัฒนาโดย ศาสตราจารย์ Dr. Hiroaki Okamoto ประเทศญี่ปุ่น โดยได้ใช้ข้อมูลของการวัดค่าสเปกตรัมตอบสนองทางแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ไปใช้คำนวณ ทำให้ได้ค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะ ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้เครื่องมือราคาไม่แพง

1.3 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. ศึกษาเทคนิคการวัดหาค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะ $(\mu\tau)$ ในวัสดุฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน (a-Si:H) และอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียม (a-SiGe:H) โดยการวัดสเปกตรัมผลตอบสนองต่อแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน และเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียม ตามลำดับ
2. ศึกษาเทคนิคการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าภายในของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน และเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียม
3. ศึกษาแนวทางในการนำผลการวัดค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะ$(\mu\tau)$ ไปใช้ประกอบการประเมินคุณภาพของฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอนสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์

1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

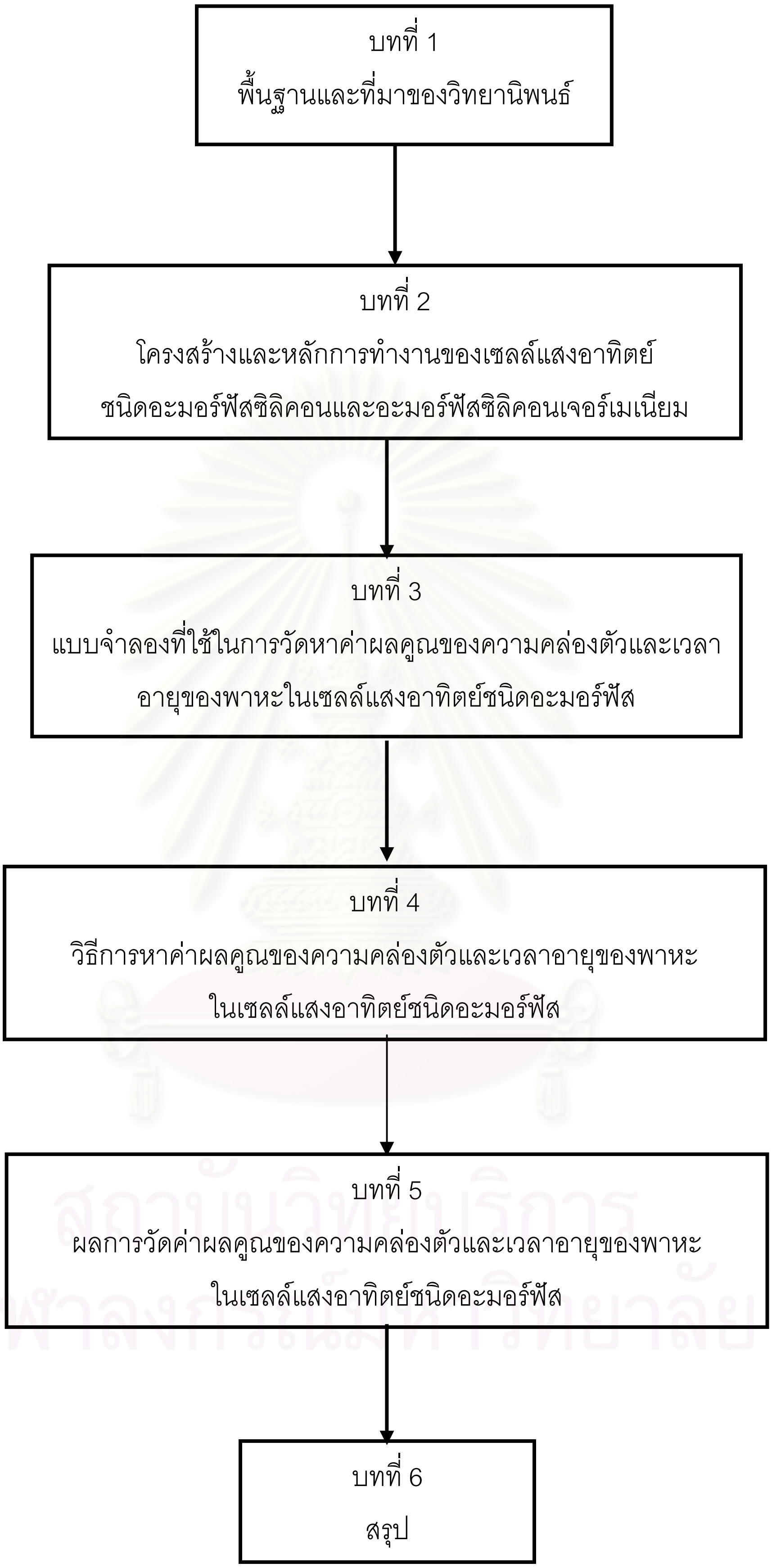
ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ได้แก่ การศึกษาแบบจำลอง Variable Minority Carrier Transport Model [5,6] ซึ่งได้รับการพัฒนาโดย Professor Dr. Hiroaki Okamoto ประเทศญี่ปุ่น และนำมาประยุกต์ เพื่อเขียนเป็นโปรแกรมที่ใช้ในการวัดค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะ $(\mu\tau)$ ภายในเซลล์แสงอาทิตย์ดังกล่าว และศึกษาเทคนิคการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าภายในของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน และเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียม และศึกษาแนวทางในการนำผลการวัดค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของ

พาหะ $(\mu\tau)$ ไปใช้ประกอบการประเมินคุณภาพของฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ โครงสร้างของวิทยานิพนธ์แสดงได้ในรูปที่ 1.1

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ทำให้เข้าใจกลไกในการเกิดกระแสภายในเซลล์แสงอาทิตย์ เนื่องจากโฮลและอิเล็กตรอน เช่น ค่าความคล่องตัวหรือเวลาอายุของพาหะของโฮลและอิเล็กตรอนว่ามีมากน้อยแค่ไหนซึ่งแน่นอนว่าถ้ากลไกข้างในดีแล้วประสิทธิภาพโดยรวมย่อมดีไปด้วย
2. ทำให้หาค่าผลคูณความคล่องตัวของพาหะกับเวลาอายุพาหะของเซลล์แสงอาทิตย์อะมอร์ฟัสได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 1.1 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

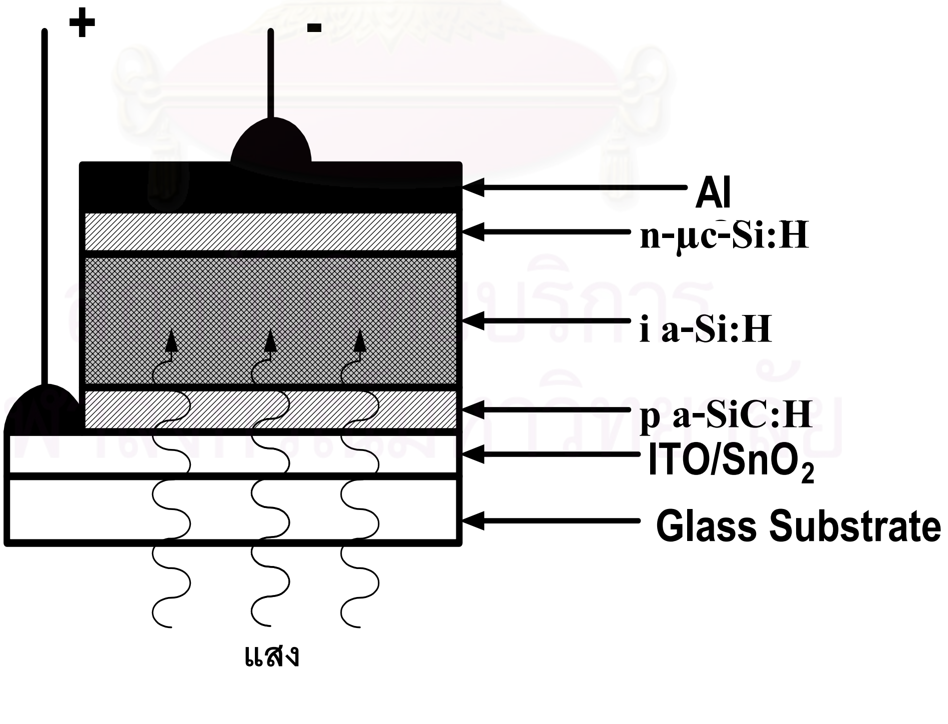
โครงสร้างและหลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน และอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียม

2.1 บทนำ

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้มีการวัดค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะ $(\mu\tau)$ ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัส เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ศึกษามี 2 ชนิดคือ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน (ชั้น i คือ a-Si:H) และเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียม (ชั้น i คือ a:SiGe:H) ในบทนี้จะขออธิบายโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสทั้ง 2 ชนิด และอธิบายหลักการทำงานพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสองชนิด และกล่าวถึงเครื่องมือที่ใช้ผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสองชนิดพอสังเขปดังนี้

2.2 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัส

2.2.1 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน (a-Si:H)

รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน (a-Si:H) โดยมีรายละเอียดดังนี้

1.) ขั้วไฟฟ้าโปร่งใส

โดยทั่วไป ถ้าวัสดุของแผ่นฐานเป็นแผ่นกระจกใส จะนิยมใช้วัสดุฟิล์มบางชนิดดีบุกออกไซด์ 2 ชั้น (SnO_2/ITO) เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใส เนื่องจากวัสดุ SnO_2 มีราคาถูก แต่มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสูงกว่า ITO ในขณะที่ วัสดุ ITO เป็นสารประกอบของ SnO_2 และ In_2O_3 โดยมีอัตราส่วนของ Sn:In เท่ากับ 5:95 [4] โดยประมาณ และ ITO มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำกว่า SnO_2 แต่ราคาแพงกว่า การที่ต้องใช้ขั้วไฟฟ้าโปร่งใสถึง 2 ชั้นเพราะ ถ้า SnO_2 มีความหนามากกว่า 20 nm [4] จะช่วยป้องกันไม่ให้อะตอมของ In ที่หลุดออกจาก ITO สามารถแพร่ซึมเข้าไปในชั้น a-Si:H ได้ ถ้า In แพร่ซึมเข้าสู่ชั้น a-Si:H จะทำให้เกิดผลเสียต่อเซลล์แสงอาทิตย์ เช่น จะทำให้ประสิทธิภาพลดลง และแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (V_{OC}) ลดลง นอกจากนี้ คุณสมบัติพื้นฐานที่สำคัญของขั้วไฟฟ้าโปร่งใส คือ ต้องโปร่งใสมากๆ และนำไฟฟ้าได้ดี และในขณะเดียวกันก็ควรเป็นชั้นป้องกันการสะท้องแสงด้วย (antireflection)

2.) ชั้น p

ชั้น p ทำหน้าที่เป็นชั้นสร้างศักย์ไฟฟ้าภายในเช่นเดียวกับชั้น n แต่มีค่าสภาพนำไฟฟ้าด้วยแสงที่ต่ำมาก จึงเปรียบเสมือนเป็นชั้นตาย (Dead Layer) ถ้าผลิตชั้น p จากวัสดุ a-Si:H ซึ่งโดปด้วยโบรอนและมีช่องว่างพลังงานแคบลง ควรออกแบบให้ชั้น p บางที่สุด แต่อย่างไรก็ตามถ้าชั้น p บางมากเกินไป ก็จะทำให้แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดลดลงด้วย

ในปัจจุบันนิยมใช้วัสดุอะมอร์ฟัสซิลิคอนคาร์ไบด์ (p-a-SiC:H) ที่มีช่องว่างพลังงานประมาณ 2.0 eV เป็นหน้าต่างกว้างรับแสง [4] ซึ่งจะช่วยเพิ่มทั้งกระแสไฟฟ้าลัดวงจร แรงดันวงจรเปิด

3.) ชั้น i

คุณสมบัติพื้นฐานของ a-Si:H ชนิด i (Undoped a-Si:H) นี้จะมีอิทธิพลและผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เป็นอย่างมาก เพราะพาหะเนื่องจากแสงจะเกิดที่ชั้น i เป็นส่วนใหญ่ ชั้น p และชั้น n เป็นชั้นตาย (Dead Layer) และอุณหภูมิแผ่นฐานที่ใช้ปลูกชั้น i ที่เหมาะสมคือประมาณ 200-250 ^{O}C [4]

แม้ว่าในกระบวนการผลิตชั้น i-a-Si:H จะไม่ได้โดป i-a-Si:H แต่ผลที่ได้คือ จะได้ฟิล์ม i-a-Si:H ที่มีคุณสมบัติเป็นชนิด n แบบอ่อนเสมอ [4] เพราะระดับพลังงานเฟร์มิของ i-a-Si:H ไม่ได้

อยู่กึ่งกลางช่องว่างพลังงาน แต่จะอยู่ในตำแหน่งที่ค่อนไปทางแถบคอนดักชัน การเติมโบรอนบ้างเล็กน้อย (เช่นประมาณ 1 ppm [4]) จะทำให้ระดับพลังงานเฟร์มีเคลื่อนมาอยู่ตรงกลางช่องว่างพลังงานพอดี และจะทำให้สนามไฟฟ้าในชั้น i มีค่าเพิ่มขึ้น

4.) ชั้น n

ชั้น n ทำหน้าที่เป็นชั้นสร้างศักย์ไฟฟ้าภายในเช่นเดียวกับชั้น p แต่มีค่าสภาพนำไฟฟ้าด้วยแสงที่ต่ำมาก จึงเปรียบเสมือนเป็นชั้นตาย (Dead Layer)

ในปัจจุบันบางครั้งในชั้น n เป็นไมโครคริสตัลไลน์ซิลิคอน (n-µc-Si:H) เพราะมีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการใช้งานเป็นชั้น n ดังต่อไปนี้

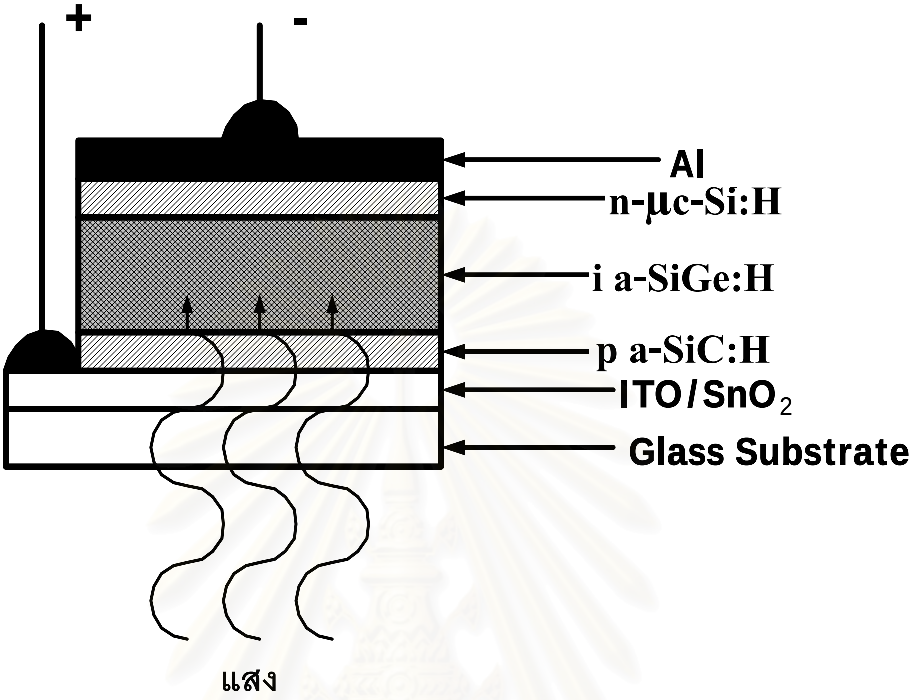
- ระดับพลังงานเฟร์มีของวัสดุชนิดนี้อยู่ใกล้แถบคอนดักชันมาก
- สภาพนำไฟฟ้าที่มีค่าสูงมาก
- ทำขั้วไฟฟ้าโอห์มิกได้ง่าย
- มีช่องว่างพลังงานกว้างจึงช่วยให้แสงที่สะท้อนจากขั้วไฟฟ้าด้านหลังเข้าสู่ชั้น i ได้มากขึ้น

5.) ชั้นอะลูมิเนียม (Al)

ชั้นอะลูมิเนียม (Al) ทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าและช่วยเป็นตัวสะท้องแสงกลับไปยังชั้น i-a-Si:H ขั้วอะลูมิเนียมของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ถูกสร้างให้เป็นวงกลมเล็กๆ เรียงแถวกันหลายๆ แถวจึงสามารถทำการวัดค่าต่างๆ ได้หลายจุด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2.2 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียม

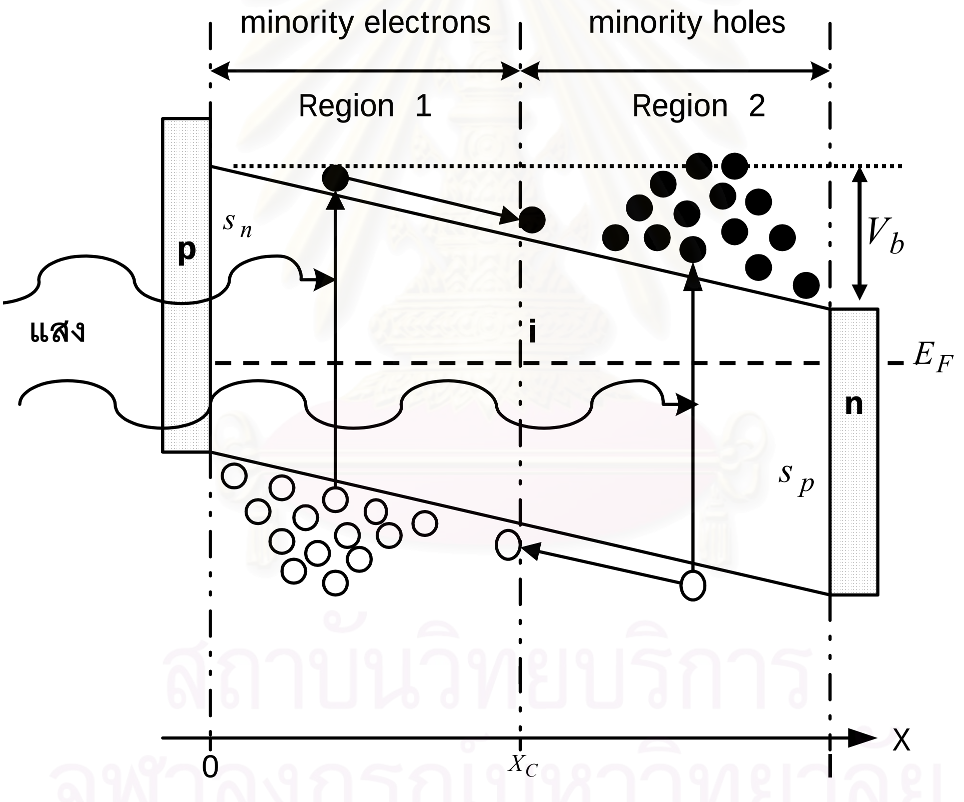


รูปที่ 2.2 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียม (a-SiGe:H)

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียม (a-SiGe:H) มีลักษณะเด่น คือ ชั้น i ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียมผลิตจากอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียม (a-SiGe:H) ซึ่งมีช่องว่างพลังงาน 1.5-1.6 eV ซึ่งแคบกว่ากรณีของอะมอร์ฟัสซิลิคอน จึงทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียมสามารถตอบสนองต่อแสงที่มีความยาวคลื่นยาวได้ดีกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน

2.3 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนและเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียมจะมีหลักการทำงาน คือ เมื่อมีแสงที่มีพลังงานโฟตอนมากกว่าช่องว่างพลังงานของชั้น i ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ อิเล็กตรอนในชั้น i จะดูดกลืนแสงและเปลี่ยนสถานะจากแถบเวเลนซ์ขึ้นไปอยู่ในแถบคอนดักชัน เกิดเป็นคู่พาหะอิเล็กตรอนและโฮลที่สามารถนำไฟฟ้าได้ขึ้นภายในชั้น i ของเซลล์แสงอาทิตย์ เนื่องจากภายในรอยต่อ p-i-n ได้รับการออกแบบให้มีสนามไฟฟ้าภายใน ดังนั้นคู่พาหะอิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดขึ้น จะถูกสนามไฟฟ้าภายในขับเคลื่อนให้ไหลไปทางชั้น n และ p ตามลำดับ ผลของการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโฮล ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลออกจากเซลล์แสงอาทิตย์ (เมื่อมีโหลด)

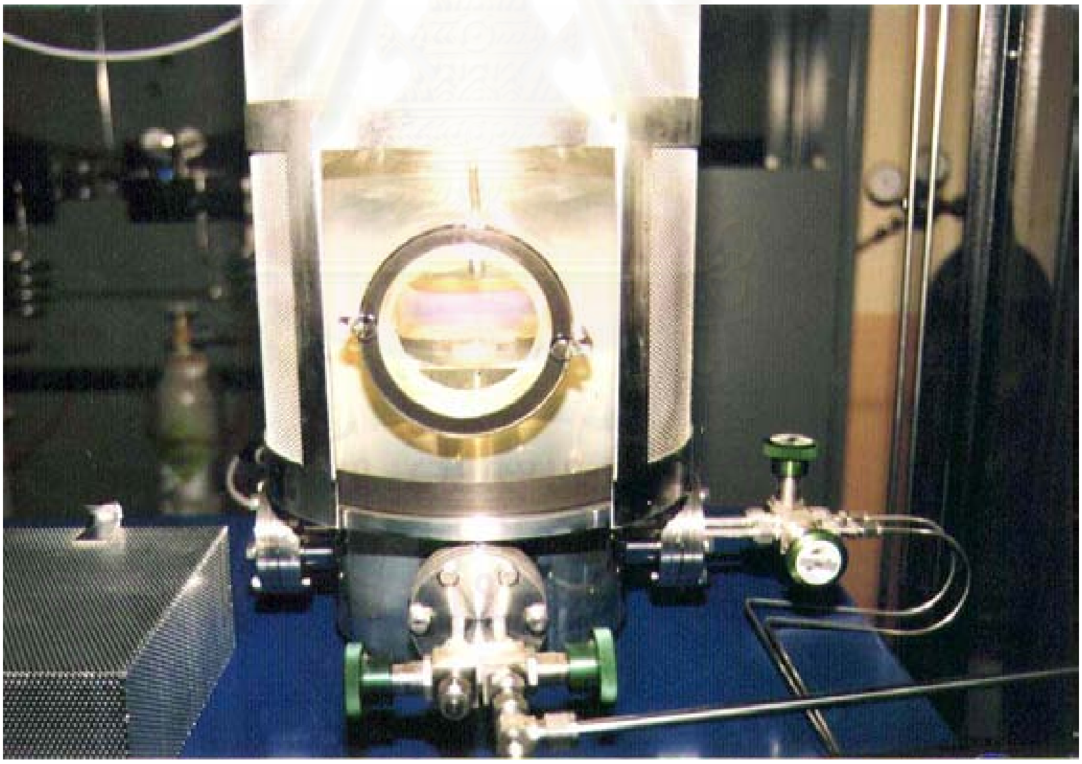


รูปที่ 2.3 แถบพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์

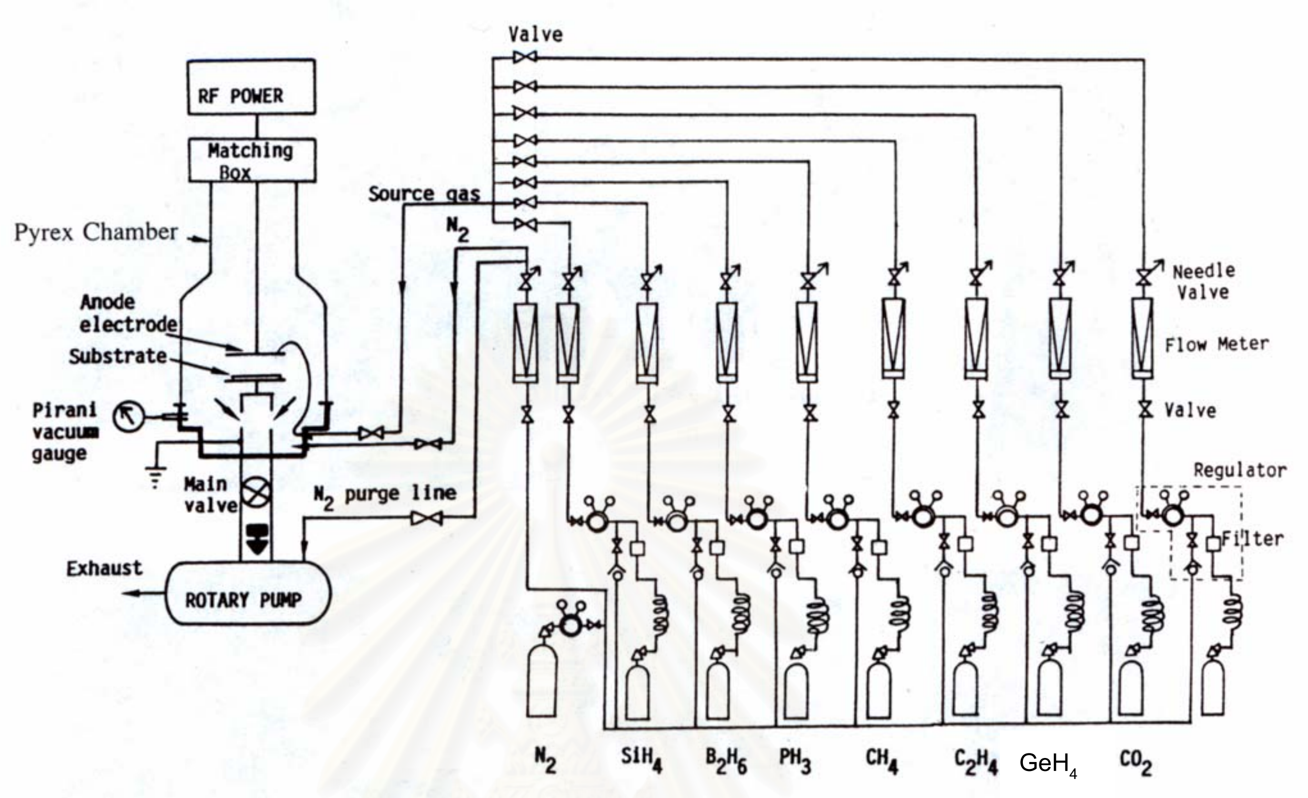
2.4 โครงสร้างของระบบ Glow Discharge Plasma CVD

ชั้นสารกึ่งตัวนำอะมอร์ฟัสที่ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ในงานวิจัย ซึ่งได้แก่ p-a-SiC:H, i-a-Si:H, n-μc-Si:H (กรณีของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน) และ p-a-Si:H, i-a-SiGe:H, n-μc-Si:H (กรณีของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียม) เตรียมด้วยวิธี Glow Discharge Plasma CVD (การแยกสลายก๊าซด้วยวิธีประจุเรืองแสงด้วยไฟฟ้า)

ระบบ Glow Discharge Plasma CVD (Chemical Vapor Deposition) ติดตั้งอยู่ที่ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วนคือ ระบบก๊าซ ระบบภาชนะสุญญากาศ และระบบไฟฟ้าความถี่วิทยุและรูปที่ 2.4 แสดงภาพถ่ายระบบ Glow Discharge Plasma CVD รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างของระบบ Glow Discharge Plasma CVD ดังกล่าว



รูปที่ 2.4 ภาพถ่ายระบบ Glow Discharge Plasma CVD



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของระบบ Glow Discharge Plasma CVD

1.) ระบบก๊าซ

ในระบบ Glow Discharge Plasma CVD ใช้ก๊าซเป็นวัสดุเริ่มต้น ในกรณีการปลูกฟิล์มอะมอร์ฟัส สำหรับการประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ ก๊าซที่ใช้มีดังนี้

ก๊าซไซเลน (SiH_4/H_2)	10%	ขนาดถังบรรจุ 40 ลิตร
ก๊าซเจอร์เมน (GeH_4/H_2)	10%	ขนาดถังบรรจุ 10 ลิตร
ก๊าซมีเทน (CH_4/H_2)	10%	ขนาดถังบรรจุ 40 ลิตร
ก๊าซไฮโดรเจน (H_2)	100%	ขนาดถังบรรจุ 10 ลิตร
ก๊าซฟอสฟีน (PH_3/H_2)	500 ppm	ขนาดถังบรรจุ 10 ลิตร
ก๊าซไดบอเรน (B_2H_6/H_2)	500 ppm	ขนาดถังบรรจุ 10 ลิตร

2.) ระบบภาชนะสุญญาศ

ระบบภาชนะสุญญากาศประกอบด้วยครอบแก้ว (Chamber) ทำจากแก้วไพเร็กซ์ มีรูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลางด้านล่าง 22 cm เส้นผ่านศูนย์กลางด้านบน 10 cm สูงประมาณ 40 cm ภายในมีฐานรอง (Susceptor) ทำหน้าที่เป็นฮีตเตอร์ให้ความร้อนแก่ชิ้นงาน ครอบแก้วจะสูบให้เป็นสุญญากาศด้วยเครื่องสูบสุญญากาศ (ชนิด Rotary Vacuum Pump)

3.) ระบบกำเนิดสนามไฟฟ้าความถี่วิทยุ

ระบบกำเนิดสนามไฟฟ้าความถี่วิทยุ (RF Generator) เป็นส่วนที่ทำหน้าที่กำเนิดสนามไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่ 13.56 MHz เพื่อกระตุ้นให้ก๊าซในครอบแก้วเกิดการแตกตัวเป็นพลาสมาสนามไฟฟ้าดังกล่าวถูกส่งผ่านสายเคเบิลแบบ Coaxial ไปสู่กล่อง Matching Box และขั้วโลหะไฟฟ้าที่วางอยู่ภายในภาชนะสุญญากาศ ก๊าซที่อยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองจะถูกกระตุ้นให้แตกตัวเป็นพลามา

ในวิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์ในการวัดค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะ $(\mu\tau)$ ภายในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสจึงขออธิบายระบบการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์พอสังเขปเท่านั้น

2.5 สรุป

ในบทนี้ ได้กล่าวถึงโครงสร้างและหลักการทำงานพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน และอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียม ช่องว่างพลังงานของ a-SiGe:H มีค่า 1.5-1.6 eV และช่องว่างพลังงานของ a-Si:H มีค่า 1.5-2.0 eV เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียมจะตอบสนองต่อแสงที่มีความยาวคลื่นยาวได้ดีกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน การวัดค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะ $(\mu\tau)$ ในงานวิจัยนี้จะใช้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน และเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียมซึ่งการวัดค่าดังกล่าวจะได้กล่าวในบทต่อไป

บทที่ 3

แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษาการวัดหาค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอฟัส -แบบจำลองที่อาศัยการเคลื่อนที่ของพาหะส่วนน้อยที่แปรตามตำแหน่ง-

(Variable Minority Carrier Transport Model)

3.1 บทนำ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้ใช้ แบบจำลองที่อาศัยการเคลื่อนที่ของพาหะส่วนน้อยที่แปรตามตำแหน่ง (Variable Minority Carrier Transport Model) เป็นเครื่องมือในการวัดค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะ ($\mu\tau$) ภายในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน แบบจำลองดังกล่าว ได้รับการพัฒนาขึ้นโดย Professor Dr. Hiroaki Okamoto [5, 6] มีลักษณะเด่น เช่น สามารถวัดหาค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะในเซลล์แสงอาทิตย์ได้โดยตรง และเครื่องมือที่ใช้ก็มีค่าใช้จ่ายน้อย

ในหัวข้อที่ 3.2 จะกล่าวถึงความแตกต่างของสิ่งประดิษฐ์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนและชนิดผลึกซิลิคอน ต่อจากนั้นในหัวข้อที่ 3.3 จะกล่าวถึงรายละเอียดของแบบจำลองที่อาศัยการเคลื่อนที่ของพาหะส่วนน้อยที่แปรตามตำแหน่ง โดยในหัวข้อที่ 3.3.1 จะกล่าวถึงสมการความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการกระตุ้นของแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัส และในหัวข้อที่ 3.3.2 จะกล่าวถึงสมการความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเนื่องจากการฉีดของพาหะในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัส และสุดท้าย ในหัวข้อที่ 3.3.3 กล่าวถึงผลรวมของสมการกระแสไฟฟ้ารวมที่ได้จากหัวข้อที่ 3.3.1 และ3.3.2

ในบทที่ 4 จะนำสมการที่เหล่านี้ ไปใช้ประยุกต์ในการหาค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะ ($\mu\tau$) ภายในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัส

โดยอาศัยแบบจำลองนี้ ทำให้เราสามารถอธิบายลักษณะทางสเปกตรัมของสิ่งประดิษฐ์โดยอาศัยตัวแปรต่าง ๆ โดยตัวแปรเหล่านี้ได้แก่ ผลคูณของค่าความคล่องตัว (Mobility) กับเวลาอายุ (Life Time) ของพาหะของทั้งโฮลและอิเล็กตรอน ค่าความเร็วของการรวมตัวพื้นผิว (Surface Recombination Velocity) ระหว่างชั้น p กับชั้น i และชั้น i กับชั้น n และแบบจำลองนี้ไม่เพียงแต่ใช้ในการทำนายหรืออธิบายแนวโน้มลักษณะสมบัติของสิ่งประดิษฐ์ได้เท่านั้น แต่ยังสามารถใช้ในการหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่กล่าวมาข้างต้นได้อีกด้วย ดังนั้นแบบจำลองนี้จะเป็นส่วนหนึ่งซึ่งทำให้เราสามารถที่จะเข้าใจและสามารถผลิตชิ้นงานที่มีลักษณะสมบัติต่าง ๆ ที่ดีตามต้องการได้

3.2 ความแตกต่างของสิ่งประดิษฐ์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนและชนิดผลึกซิลิคอน

คุณสมบัติของสิ่งประดิษฐ์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนกับสิ่งประดิษฐ์ชนิดผลึกซิลิคอนมีส่วนที่ต่างกัน โดยในสิ่งประดิษฐ์ชนิดผลึก ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดจากสมดุลความร้อน n_0, p_0 จะเป็นพาหะส่วนใหญ่มีจำนวนมากกว่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลส่วนเกิน δ_n , δ_p และยังมีจำนวนมากกว่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและของโฮลที่อยู่ในระดับพลังงานของช่องว่างพลังงาน n_1, p_1 และการรวมตัวของพาหะแบบ Shockley-Read แสดงได้ดังนี้

$$R = \frac{\delta_n \delta_p + n_0 \delta_p + p_0 \delta_n}{(\delta_n + n_1 + n_0)\tau_p + (\delta_p + p_1 + p_0)\tau_n} \tag{3.1}$$

โดยที่ δ_n : ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนส่วนเกิน

δ_p : ความหนาแน่นของโฮลส่วนเกิน

n_0 : ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่เกิดจากสมดุลความร้อน

p_0 : ความหนาแน่นของโฮลที่เกิดจากสมดุลความร้อน

n_1 : ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่อยู่ในระดับพลังงานช่องว่างพลังงาน

p_1 : ความหนาแน่นของโฮลที่อยู่ในระดับพลังงานช่องว่างพลังงาน

τ_p : เวลาอายุพาหะของโฮล

τ_n : เวลาอายุพาหะของอิเล็กตรอน

ในกรณีของสิ่งประดิษฐ์ชนิดผลึกนั้น $n_0 >> n_1, \delta_n$ และ $p_0 >> p_1, \delta_p$ ดังนั้น ค่าการรวมตัวของพาหะแบบ Shockley – Read (R) คือ

$$R \approx \frac{n_0 \delta_p + p_0 \delta_n}{n_0 \tau_p + p_0 \tau_n} \tag{3.2}$$

และอัตราการรวมตัวของพาหะ (R) ในสิ่งประดิษฐ์ชนิดผลึกชนิด n นั้น $n_0 >> p_0$ ดังนั้นได้ R คือ

$$R \approx \frac{\delta_p}{\tau_p} \tag{3.3}$$

และอัตราการรวมตัวของพาหะ (R) ในสิ่งประดิษฐ์ชนิดผลึกชนิด p นั้น $p_0 \gg n_0$ ดังนั้นได้ R คือ

$$R \approx \frac{\delta_n}{\tau_n} \tag{3.4}$$

จากสมการ (3.3) และ (3.4) การรวมตัวของพาหะในสารกึ่งตัวนำชนิด p และ n ของสิ่งประดิษฐ์ชนิดผลึกซิลิคอนจะถูกกำหนดโดยค่าเวลาอายุและความหนาแน่นของพาหะส่วนเกินที่เป็นส่วนน้อย ส่วนสิ่งประดิษฐ์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนในชั้น i ที่เป็นชั้นทำงานซึ่งไม่ได้ทำการเจือสารอื่นปนจะมีพาหะส่วนเกิน δ_n, δ_p มากกว่าพาหะที่เกิดจากสมดุลความร้อน n_0, p_0 ทำให้ไม่สามารถประมาณอัตราการรวมตัวของพาหะแบบเดียวกับสิ่งประดิษฐ์ชนิดผลึกซิลิคอนได้

ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกซิลิคอน ผลรวมความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าสามารถเขียนได้ดังนี้

$$J(V_A) = J_L - J_0\left\{\exp\left(\frac{qV_A}{n\kappa_B T}\right) - 1\right\} \tag{3.5}$$

โดยที่

J_L	: ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเนื่องจากการกระตุ้นของแสง
พจน์ที่ 2	: ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเนื่องจากการฉีดพาหะ
J_0	: ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าอิ่มตัว
n	: ตัวปรับแก้ทางอุดมคติ
q	: ประจุของอิเล็กตรอน
κ_B	: ค่าคงที่ของ Boltzmann
T	: อุณหภูมิสัมบูรณ์
V_A	: แรงดันไบแอสเซลล์แสงอาทิตย์

ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัส J_L จะขึ้นกับ V_A ซึ่งต่อไปจะเป็นการอธิบายและจะหาผลรวมความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซึ่งจะเริ่มที่หัวข้อ 3.3 ดังนี้

3.3 แบบจำลองที่อาศัยการเคลื่อนที่ของพาหะส่วนน้อยที่แปรตามตำแหน่ง (Variable Minority Carrier Transport Model)

แบบจำลองที่อาศัยการเคลื่อนที่ของพาหะส่วนน้อย [5,6] มีจุดประสงค์ที่จะอธิบายคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่เกิดเนื่องจากแสงในสิ่งประดิษฐ์ที่ทำจากซิลิคอนชนิดอะมอร์ฟัสที่มีโครงสร้างเป็นชั้น p ชั้น i และชั้น n โดยในแบบจำลองนี้ ชั้น i ถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน โดยมีขอบเขตซึ่งแบ่งชั้น i นี้เป็น 2 ส่วนที่สามารถเปลี่ยนตำแหน่งได้ตามแรงดันไบแอสและการดูดกลืนของแสงที่ตกกระทบของชั้น i โดยแต่ละส่วนจะมีอิเล็กตรอนหรือโฮลประพฤติตัวเสมือนเป็นพาหะส่วนน้อย ทำให้อิเล็กตรอนหรือโฮลนั้นมีบทบาทสำคัญในการกำหนดอัตราการรวมตัวในบริเวณส่วน นั้นๆ

ชั้น i ซึ่งเป็นชั้นทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัสจะมี $\delta_n, \delta_p >> n_0, p_0, n_1, p_1$ ดังที่ได้กล่าวแล้วข้างต้น ดังนั้นอัตราเร็วในการรวมตัวของพาหะ R ในสมการ (3.1) ประมาณได้เป็น

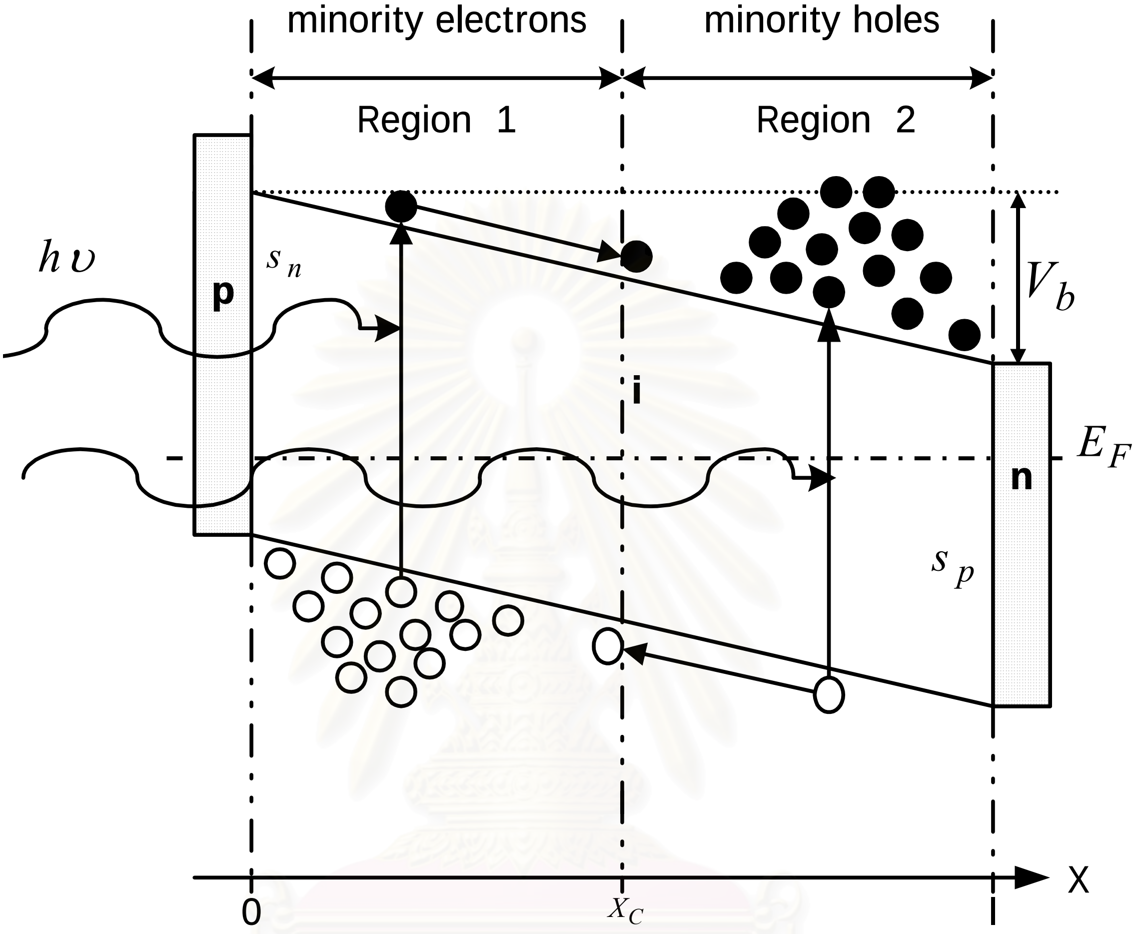
$$R \approx \frac{\delta_n \delta_p}{\delta_n \tau_p + \delta_p \tau_n} = \frac{\delta_n \delta_p}{\tau_p \tau_n \left(\dfrac{\delta_n}{\tau_n} + \dfrac{\delta_p}{\tau_p} \right)} \tag{3.6}$$

ในส่วน 1 ในรูปที่ 3.1 นั้นจะมีเงื่อนไข $\frac{\delta_p}{\tau_p} >> \frac{\delta_n}{\tau_n}$ ก็จะได้การรวมตัวพาหะ R จากสมการ (3.6) คือ

$$R \approx \frac{\delta_n}{\tau_n} \tag{3.7}$$

ขณะที่ใน ส่วน 2 ในรูปที่ 3.1 นั้นจะได้เงื่อนไข $\frac{\delta_n}{\tau_n} >> \frac{\delta_p}{\tau_p}$ ก็จะได้การรวมตัวพาหะ R จากสมการ (3.6) คือ

$$R \approx \frac{\delta_p}{\tau_p} \tag{3.8}$$



รูปที่ 3.1 แถบพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนที่ชั้น i ถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วน 1 และส่วน 2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เปรียบเทียบสมการ (3.7) และ (3.8) กับสมการ (3.3) และ (3.4) จะเห็นว่าในบริเวณชั้น iที่มี $\frac{\delta_n}{\tau_n} >> \frac{\delta_p}{\tau_p}$ อัตราการรวมตัวของพาหะจะถูกกำหนดด้วยค่าเวลาอายุและความหนาแน่นของโฮลส่วนเกิน เสมือนกับโฮลส่วนเกินในชั้น i เป็นโฮลส่วนเกินที่เป็นพาหะส่วนน้อยในสิ่งประดิษฐ์ชนิดผลึกชนิด n ทำนองเดียวกันในบริเวณชั้น i ที่มี $\frac{\delta_p}{\tau_p} >> \frac{\delta_n}{\tau_n}$ อัตราการรวมตัวของพาหะจะถูกกำหนด โดยค่าเวลาอายุและความหนาแน่นของอิเล็กตรอนส่วนเกินเสมือนกับอิเล็กตรอนส่วนเกินในชั้น i เป็น อิเล็กตรอนส่วนเกินที่เป็นพาหะส่วนน้อยในสิ่งประดิษฐ์ชนิดผลึกชนิด p หรืออาจกล่าวว่าในชั้น i ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสจะมีลักษณะการรวมตัว 2 แบบคือแบบการรวมตัวพาหะคล้ายกับสิ่งประดิษฐ์ชนิดผลึกทั้งชนิด n และชนิด p

พิจารณารูปที่ 3.1 ให้แกน X แสดงความหนาของชั้น p ชั้น i และชั้น n ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัส โดยมีพื้นที่หน้าตัดเป็นอนันต์อยู่ในระนาบ $Y-Z$ มีหน้าสัมผัสแบบโอห์มมิคทั้งสองด้านของเซลล์ฯ และชั้น i อยู่ระหว่าง $X=0$ ถึง $X=l$

ถ้าส่องแสงที่คงที่หรือให้แรงดันไบแอสตามแก่เซลล์ การกระจายตัวของพาหะที่เกิดขึ้นเนื่องจากแสงหรือจากการฉีดของพาหะมีลักษณะที่โฮลจะเพิ่มขึ้นเมื่อเข้าใกล้ชั้น p และอิเล็กตรอนจะเพิ่มขึ้นเมื่อเข้าใกล้ชั้น n ดังนั้น $\frac{\delta_p}{\tau_p} >> \frac{\delta_n}{\tau_n}$ ในส่วน 1 ทำให้สมการที่ (3.7) เป็นสมการที่กำหนดการรวมตัวของพาหะในส่วนที่ 1 และในทำนองเดียวกันในส่วน 2 นั้นมี $\frac{\delta n}{\tau_n} >> \frac{\delta p}{\tau_p}$ ทำให้สมการที่ (3.8) เป็นสมการที่กำหนดการรวมตัวของพาหะในส่วนที่ 2 และส่วน 1 กับส่วน 2 นี้ถูกแบ่งที่ตำแหน่ง $X=X_C$ ซึ่งจะหาได้จากสมการ ดังต่อไปนี้

$$\frac{\delta_p(X_C)}{\tau_p} = \frac{\delta_n(X_C)}{\tau_n} \qquad (3.9)$$

ตำแหน่งของ X_C จึงขึ้นกับปัจจัยภายนอก เช่น แรงดันไบแอส ลักษณะของแสงที่ใช้ทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้นนี้ เป็นแนวคิดของแบบจำลองโดยอาศัยการเคลื่อนที่ของพาหะส่วนน้อยที่แปรตามตำแหน่ง

ต่อไปจะอาศัยแนวคิดของแบบจำลองนี้ ในการหาสมการความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการกระตุ้นของแสงและที่เกิดขึ้นเนื่องจากการฉีดพาหะ โดยเริ่มแรกจะหาฟังก์ชันของการเคลื่อนที่ของพาหะส่วนเกิน $f_p^{\pm}(X;u)$ และ $f_n^{\pm}(X;u)$ โดยการแก้สมการอนุรักษ์กระแสที่มีแหล่งกำเนิดพาหะคงที่ ที่ตำแหน่ง $X = u$ [5,6] โดยได้ผลดังนี้

สำหรับโฮล

$$f_p^{\pm}(X;u) = \exp\left\{ \mp \int_u^X \frac{d\xi}{L_p^{\mp}(\xi)} \right\} \tag{3.10}$$

สำหรับอิเล็กตรอน

$$f_n^{\pm}(X;u) = \exp\left\{ \mp \int_u^X \frac{d\xi}{L_n^{\pm}(\xi)} \right\} \tag{3.11}$$

โดยที่

$$\left.\begin{aligned} L_p^{\pm}(X) &= [\{1+\gamma_p^2(X)\}^{\frac{1}{2}} \pm \gamma_p(X)]L_p \\ \gamma_p(X) &= \frac{qL_pE(X)}{2\kappa_B T} \\ L_p &= (D_p\tau_p)^{1/2} \end{aligned}\right\} \tag{3.12}$$

และ

$$\left.\begin{aligned} L_n^{\pm}(X) &= [\{1+\gamma_n^2(X)\}^{\frac{1}{2}} \pm \gamma_n(X)]L_n \\ \gamma_n(X) &= \frac{qL_nE(X)}{2\kappa_B T} \\ L_n &= (D_n\tau_n)^{1/2} \end{aligned}\right\} \tag{3.13}$$

โดยที่ $E(X)$:เป็นสนามไฟฟ้าภายในชั้น i ของเซลล์แสงอาทิตย์มีทิศลบ X

$L_p^{\pm}, L_n^{\pm}$:ระยะการแพร่ประสิทธิภาพของโฮล และอิเล็กตรอน(Effective Diffusion Lengths)

L_p, L_n :ระยะการแพร่ของโฮล และอิเล็กตรอน(Effective Diffusion Lengths)

τ_p, τ_n :อายุพาหะของโฮล และอิเล็กตรอน

T :อุณหภูมิ

q :ประจุของอิเล็กตรอน

D_p, D_n :ค่าคงตัวของการแพร่สำหรับโฮลและอิเล็กตรอน

$D_p\,(D_n)$ คือค่าคงตัวของการแพร่สำหรับโฮล (อิเล็กตรอน) โดยมีความสัมพันธ์กับ $\mu_p\,(\mu_n)$ ดังสมการที่ (3.14) ดังนี้

$$\left.\begin{aligned} D_p &= \frac{\kappa_B T \mu_p}{q} \\ D_n &= \frac{\kappa_B T \mu_n}{q} \end{aligned}\right\} \tag{3.14}$$

โดยที่ μ_p, μ_n :ค่าความคล่องตัวของโฮลและอิเล็กตรอน

κ_B :ค่าคงที่ Boltzmann

สมการที่ (3.10) และ (3.11) เป็นคำตอบของสมการอนุรักษ์กระแสที่มีแหล่งกำเนิดพาหะคงที่ ที่ตำแหน่ง $X = u$ เมื่อให้ $E(X)$ มีค่าคงที่ตลอดระนาบ $y - z$ นั้น ๆ แม้ว่าจะไม่เป็นจริงแต่ก็ใช้ประมาณได้ดีเมื่อ $E(X) >> \frac{2\kappa_B T}{ql}$

ต่อมาเมื่อกำหนดฟังก์ชัน $C_p^{\pm}(u)$ และ $C_n^{\pm}(u)$ ใด ๆ ซึ่งสามารถใช้แทนการกระจายตัวของพาหะส่วนเกินที่ ตำแหน่ง X ใด ๆ และนำมาหาผลรวมเชิงเส้น (Linear recombination) กับฟังก์ชัน $f_p^{\pm}(X;u)$ หรือ $f_n^{\pm}(X;u)$ เพื่อให้ได้ฟังก์ชัน $\delta_p(X;u)$ และ $\delta_n(X;u)$ ได้ดังนี้

$$\delta_p(X;u) = C_p^-(u) f_p^-(X;u) + C_p^+(u) f_p^+(X;u) \tag{3.15}$$

$$\delta_n(X;u) = C_n^-(u) f_n^-(X;u) + C_n^+(u) f_n^+(X;u) \tag{3.16}$$

โดยที่ $\delta_p(X;u)$:ความหนาแน่นของโฮลส่วนเกิน ที่เกิดขึ้นในช่วง $u < X < l$

$\delta_n(X;u)$:ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนส่วนเกิน ที่เกิดในช่วง $X_C < X < u$

ดังนั้นเราสามารถหาความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเนื่องจากโฮลและอิเล็กตรอน [5,6] ได้ดังนี้

$$J_p(X;u) = qD_p \left\{ \frac{C_p^-(u) f_p^-(X;u)}{L_p^-(X)} - \frac{C_p^+(u) f_p^+(X;u)}{L_p^+(X)} \right\} \tag{3.17}$$

$$J_n(X;u) = qD_n \left\{ \frac{C_n^+(u) f_n^+(X;u)}{L_n^-(X)} - \frac{C_n^-(u) f_n^-(X;u)}{L_n^+(X)} \right\} \tag{3.18}$$

โดยทิศของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ามีทิศเดียวกับ $E(X)$ คือมีทิศทางไปทางลบของแกน X

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3.1 ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเนื่องจากการกระตุ้นของแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัส

ในหัวข้อนี้เราจะใช้แบบจำลองที่อาศัยการเคลื่อนที่ของพาหะส่วนน้อยที่แปรตามตำแหน่ง (Variable Minority Carrier Transport Model) ในการหาสมการความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเนื่องจากการกระตุ้นของแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัส (กรณีพาหะส่วนเกินเกิดขึ้นเนื่องจากแสงเท่านั้น)

โดยจะพิจารณาในส่วนที่ 2 ในรูปที่ 3.1 ในส่วนนี้เวลาอายุและความหนาแน่นของโฮลซึ่งเป็นพาหะส่วนเกินที่เกิดขึ้นเนื่องจากการกระตุ้นของแสงจะเป็นตัวกำหนดอัตราการรวมตัวตามสมการที่ (3.8) ถ้าพาหะที่เกิดขึ้นจากการกระตุ้นของแสงที่เกิดที่ตำแหน่ง $u \le X \le u + \Delta u$ โดยมีอัตราการเกิดพาหะ $G(X)$ ซึ่งเขียนอยู่ในรูปของตัวกระจายตัวของความหนาแน่นโฟตอน $\phi(X,\lambda)$ กับความน่าจะเป็นในการเกิดของพาหะ $P_G(X;\lambda)$ ที่ตำแหน่งและความยาวของคลื่นแสงหนึ่ง ๆ ได้ดังนี้

$$G(X) = \int_0^{\infty} P_G(X,\lambda)\left\{\frac{-\partial\phi(X,\lambda)}{\partial X}\right\} d\lambda \qquad (3.19)$$

ถ้าให้ $\delta p_A(X;u)$ คือความหนาแน่นของโฮลส่วนเกินที่เกิดขึ้นใน $X_C \le X \le u$ และ $\delta p_B(X;u)$ คือความหนาแน่นของโฮลส่วนเกินที่เกิดขึ้นใน $u \le X \le l$ ดังนั้นจากสมการที่ (3.15) จะได้

$$\delta p_A(X;u) = C_{pA}^{-}(u) f_p^{-}(X;u) + C_{pA}^{+}(u) f_p^{+}(X;u) \qquad (3.20)$$

$$\delta p_B(X;u) = C_{pB}^{-}(u) f_p^{-}(X;u) + C_{pB}^{+}(u) f_p^{+}(X;u) \qquad (3.21)$$

ส่วนความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า $J_{pA}(X;u)$ และ $J_{pB}(X;u)$ สามารถหาได้ทำนองเดียวกันกับสมการที่ 3.17 เราสามารถหาฟังก์ชั่น $C_{pA}^{\pm}(u)$ และ $C_{pB}^{\pm}(u)$ ได้จากเงื่อนไขต่อไปนี้

$$\delta p_A(u;u) = \delta p_B(u;u) \qquad (3.22)$$

$$C_{pA}^{+}(u) = 0 \qquad (3.23)$$

$$S_{i-n}\delta p_B(l;u) = \frac{-J_{pB}(l;u)}{q} \tag{3.24}$$

$$G(u)\Delta u = \frac{J_{pA}(X_C;u)}{q} - \frac{J_{pB}(l;u)}{q} + \int_{X_C}^{u} \frac{\delta p_A(\xi;u)}{\tau_p} d\xi + \int_{u}^{l} \frac{\delta p_B(\xi;u)}{\tau_p} d\xi \tag{3.25}$$

- สมการที่ (3.22) แสดงถึงความต่อเนื่องของโฮลส่วนเกินในตำแหน่ง $X = u$
- สมการที่ (3.23) แสดงถึงสมมติฐานที่ว่าไม่มีการสะท้อนของโฮลเมื่อเดินทางถึงที่ตำแหน่ง $X = X_C$
- สมการที่ (3.24) แสดงเงื่อนไขที่ $X = l$ โดยใช้ความเร็วของการรวมตัวพื้นผิวที่รอยต่อของชั้นไอกับชั้นเอ็น S_{i-n}
- สมการที่ (3.25) แสดงถึงการอนุรักษ์ของโฮลที่เกิดขึ้นในตำแหน่ง $u \le X \le u + \Delta u$ แล้วกลายเป็นส่วนที่กระแสไฟฟ้ากับส่วนที่ถูกรวมตัวไปในส่วนที่ 2

จากสมการที่ (3.22) ถึง (3.25) ได้ความน่าจะเป็นของโฮลส่วนเกิน [5,6] ที่เกิดขึ้นในช่วง $u \le X \le u + \Delta u$ แล้วสามารถเคลื่อนที่ไปถึงตำแหน่ง $X = X_C$ ได้ดังนี้

$$P_p(X_C,u) = \frac{J_{pA}(X_C;u)}{qG(u)\Delta u} = \frac{L_p^+(X_C)}{L_p^+(X_C) + L_p^-(l)} \left\{1 - \Omega_p(l) f_p^-(u;l) f_p^+(l;u)\right\} f_p^-(X_C;u) \tag{3.26}$$

โดยที่ $P_p(X_C,u)$:ความน่าจะเป็นของโฮลส่วนเกิน (Carrier collection probability)

L_p^+, L_p^- :ระยะการแพร่ประสิทธิภาพของโฮล

$$\Omega_p(l) = \frac{S_{i-n} - \dfrac{D_p}{L_p^+(l)}}{S_{i-n} + \dfrac{D_p}{L_p^-(l)}} \tag{3.27}$$

โดยสมการที่ (3.26) จะถูกต้องก็ต่อเมื่อสนามไฟฟ้าภายในคงที่ตลอดชั้น i ซึ่งประมาณได้ถ้า $E(X) >> \frac{2\kappa_B T}{qL_p}$ จากสมการนี้ทำให้เราหาความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการกระตุ้นของแสงในส่วน 2 ได้เป็น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$J_{Lp}(X_C) = q\int_{X_C}^{l} P_p(X_C,u)G(u)du \tag{3.28}$$

จากความสัมพันธ์ $\delta p_A(X_C;u) = \dfrac{L_p^-(X_C)}{qD_p} J_{pA}(X;u)$ จะได้ความหนาแน่นของโฮลส่วนเกินที่ $X = X_C$ ดังนี้

$$\delta p(X_C) = \frac{L_p^-(X_C)}{qD_p}\int_{X_C}^{l} J_{pA}(X;u)du = \frac{\tau_p J_{Lp}(X_C)}{qL_p^+(X_C)} \tag{3.29}$$

ซึ่งสมการ (3.29) ใช้ความสัมพันธ์ $L_p^- L_p^+ = L_p{}^2 = D_p\tau_p$ ประกอบ

สำหรับส่วนที่ 1 เวลาอายุและความหนาแน่นของอิเล็กตรอนส่วนเกินจะเป็นตัวกำหนดอัตราการรวมตัวดังแสดงในสมการที่ 3.7 ทำนองเดียวกับส่วนที่ 2 จะได้ความสัมพันธ์ [5,6] ดังนี้

$$P_n(X_C,u) = \frac{L_n^+(X_C)}{L_n^+(X_C) + L_n^-(0)}\left\{1 - \Omega_n(l) f_n^-(u;0) f_n^+(0;u)\right\} f_p^-(X_C;u) \tag{3.30}$$

$$J_{Ln}(X_C) = q\int_{0}^{X_C} P_n(X_C,u)G(u)du \tag{3.31}$$

$$\delta_n(X_C) = \frac{\tau_n J_{Ln}(X_C)}{qL_n^+(X_C)} \tag{3.32}$$

โดย $\Omega_n(0)$ เขียนอยู่ในรูปของความเร็วในการรวมตัวของพาหะที่พื้นผิว S_{p-i} ที่ $X = 0$ ดังนี้

$$\Omega_n(0) = \frac{S_{p-i} - \dfrac{D_n}{L_n^+(0)}}{S_{p-i} + \dfrac{D_n}{L_n^-(0)}} \tag{3.33}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากสมการ (3.28) และสมการ (3.31) จะได้รับผลรวมความหนาแน่นกระแสเนื่องจากแสงทั้งหมดได้ดังนี้

$$J_L(X_c : V_A) = J_{Lp}(X_C) + J_{Ln}(X_C) \tag{3.34}$$

ถ้าพาหะส่วนเกินเกิดจากการกระตุ้นของแสงเพียงอย่างเดียวแล้ว X_C สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.9) (3.29) และ (3.32) ดังนี้

$$\frac{J_{Lp}(X_C)}{L_p^+(X_C)} = \frac{J_{Ln}(X_C)}{L_n^+(X_C)} \tag{3.35}$$

3.3.2 ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเนื่องจากการฉีดของพาหะในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัส

ในหัวข้อนี้เราจะใช้แบบจำลองที่อาศัยการเคลื่อนที่ของพาหะส่วนน้อยที่แปรตามตำแหน่ง (Variable Minority Carrier Transport Model) ในการหาความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเนื่องจากการฉีดของพาหะในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัส (กรณีพาหะส่วนเกินเกิดจากการไบแอสเท่านั้น)

โดยความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสอีกส่วนหนึ่งเกิดจากการฉีดพาหะจากปลายทั้งสองข้างของชั้น i (จากการไบแอสให้แก่เซลล์แสงอาทิตย์) จากรูปที่ 3.1 เราจะพิจารณาส่วนที่ 2 ก่อน

ความหนาแน่นของโฮลที่เกิดขึ้นเนื่องจากการฉีดพาหะ $\delta_p(X)$ ซึ่งจะกลายเป็นความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเนื่องจากการฉีด $J_{IP}(X)$ [5,6] ที่มีทิศทางบวกในทิศลบของแกน X สามารถเขียนอยู่ในรูปต่อไปนี้

$$\delta_p(X) = C_p^+(V_A) f_p^+(X; X_C) + C_p^-(V_A) f_p^-(X; X_C) \tag{3.36}$$

$$J_{IP}(X) = qD_p \left\{ \frac{C_p^-(V_A) f_p^-(X; X_C)}{L_p^-(X)} - \frac{C_p^+(V_A) f_p^+(X; X_C)}{L_p^+(X)} \right\} \tag{3.37}$$

โดยที่ V_A เป็นแรงดันไบแอส ($V_A >> \frac{\kappa_B T}{q}$)

$J_{IP}(X_C)$ หาได้โดยใช้เงื่อนไขดังต่อไปนี้

$$\delta_p(X_C) = p(V_A) \tag{3.38}$$

$$S_{i-n}\delta_p(l) = -\frac{J_{IP}(l)}{q} \tag{3.39}$$

สมการที่ (3.38) นิยาม $P(V_A)$ เป็นความหนาแน่นของโฮลส่วนเกินที่ตำแหน่ง X_C โดยขึ้นกับการไบแอส

สมการที่ (3.39) เป็นเงื่อนไขของขอบเขต $X = l$

ดังนั้นจากสมการ (3.37) (3.38) และ (3.39) จะได้

$$J_{IP}(X_C) = -\frac{qP(V_A)}{\tau_p}\frac{L_p^-(l)f_p^-(l;X_C) + \Omega_p(l)L_p^+(l)f_p^+(l;X_C)}{f_p^-(l;X_C) - \Omega_p(l)f_p^+(l;X_C)} \tag{3.40}$$

ทำนองเดียวกันกับอิเล็กตรอน $J_{In}(X_C)$ [5,6] ที่ถูกฉีดเข้าไปยังส่วน 1 จะเขียนได้ดังนี้

$$J_{In}(X_C) = -\frac{qN(V_A)}{\tau_n}\frac{L_n^-(0)f_p^+(0;X_C) + \Omega_n(0)L_n^+(0)f_n^-(0;X_C)}{f_n^+(0;X_C) - \Omega_n(0)f_n^-(0;X_C)} \tag{3.41}$$

โดยที่ $N(V_A) = \delta_n(X_C)$

การประมาณค่า $P(V_A)$ และ $N(V_A)$ ทำได้โดยให้คิดว่าโฮลและอิเล็คตรอนเป็นพาหะส่วนมากในส่วนที่ 1 และ 2 ตามลำดับ และถ้าให้ $\phi(u;V_A)$ เป็นความต่างศักย์ที่ $X = u$ เทียบกับ $X = X_C$ ภายใต้การไบแอสจะได้

$$P(V_A) = p_0(0)\exp\left\{\frac{q\phi(0;V_A)}{\kappa_B T}\right\} \tag{3.42}$$

$$N(V_A) = n_0(0)\exp\left\{\frac{q\phi(l;V_A)}{\kappa_B T}\right\} \tag{3.43}$$

โดยที่ $p_0(0)$ และ $n_0(l)$ เป็นความหนาแน่นของโฮลที่ $X = 0$ และของอิเล็คตรอนที่ $X = l$ ที่เกิดขึ้นเนื่องจากความสมดุลความร้อนซึ่งไม่ขึ้นกับแรงดันไบแอส อาจเขียน $p_0(0)$ และ $n_0(l)$ ได้ในรูปดังต่อไปนี้

$$p_0(0) = \frac{\sigma_p(0)}{q\mu_p} \tag{3.44}$$

$$n_0(0) = \frac{\sigma_n(l)}{q\mu_n} \tag{3.45}$$

ดังนั้นเราสามารถเขียนสมการของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการฉีดพาหะได้ดังนี้

$$J_I(X_C : V_A) = J_{IP}(X_C) + J_{In}(X_C) \tag{3.46}$$

และจากสมการที่ (3.9) ตำแหน่งของ X_C หาได้จากผลเฉลยของสมการต่อไปนี้

$$\frac{p(V_A)}{\tau_p} = \frac{N(V_A)}{\tau_n} \tag{3.47}$$

3.3.3 ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ารวมของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัส

เมื่อให้เซลล์แสงอาทิตย์ทำงานภายใต้การส่องสว่างและการไบแอสคงที่ (พาหะส่วนเกินเกิดจากแสง และการไบแอส) จากหัวข้อ 3.3.1 และ 3.3.2 ผลรวมความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ผ่านเซลล์ฯ จะเป็นผลรวมของทั้ง 2 กรณี คือความหนาแน่นกระแสเนื่องจากแสง $(J_L(X_C : V_A))$ ในหัวข้อที่ 3.3.1 และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการฉีดพาหะ $(J_I(X_C : V_A))$ ในหัวข้อที่ 3.3.2 ดังสมการ [5,6] ต่อไปนี้

$$J(X_C : V_A) = J_L(X_C : V_A) + J_I(X_C : V_A) \tag{3.48}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในกรณีนี้ตำแหน่ง X_C หาได้จากสมการ [5,6] ต่อไปนี้

$$\frac{J_{Lp}(X_C)}{L_p^+(X_C)} + \frac{P(V_A)}{\tau_p} = \frac{J_{Ln}(X_C)}{L_n^+(X_C)} + \frac{N(V_A)}{\tau_n} \tag{3.49}$$

เมื่อเราหาตำแหน่ง X_C ได้ เราก็สามารถหาผลรวมความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าได้จากสมการที่ (3.48) (จะกล่าวต่อไปในบทที่ 4) ซึ่งประกอบด้วยส่วนที่เกิดจากแสงและการฉีดพาหะ สมการที่ (3.49) แสดงถึงความสัมพันธ์กันของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าทั้งสองส่วนนี้

เนื่องจากการกระจายของสนามไฟฟ้าในชั้น i ของเซลล์ฯ สามารถประมาณว่ามีค่าคงที่ ดังนั้น

$$E(X) \approx E(V_A) = \frac{\partial \phi(X;V_A)}{\partial X} = \frac{V_b - V_A}{l} \tag{3.50}$$

โดยที่ V_b : Built-In Potential ซึ่งเท่ากับ $\phi(l;0) - \phi(0;0)$

V_A : แรงดันไบแอสเซลล์แสงอาทิตย์

l : ความหนาของชั้น i

สนามไฟฟ้านี้คิดในกรณีที่สมมุติว่าผลของพาหะที่อยู่ในชั้น i มีผลต่อสนามไฟฟ้าภายในน้อยมาก ซึ่งจะเป็นจริงได้เมื่อมีการฉีดของพาหะมีค่าต่ำ (การไบแอสที่แรงดันไฟฟ้าต่ำๆ)

สำหรับอัตราการเกิดของพาหะอันเนื่องมาจากการกระตุ้นของแสงที่มีสเปกตรัมหลายความถี่ $G(X)$ [5,6] สามารถแสดงได้ดังนี้

$$G(X) = \int_0^{\infty} I_0(\lambda) P_G(X,\lambda) \alpha(\lambda) \exp\{-\alpha(\lambda) l_p\} \times [\exp\{-\alpha(\lambda) X\} + r_n \exp\{\alpha(\lambda)(X - 2l) - 2\alpha_n(\lambda) I_n\}] d\lambda \tag{3.51}$$

โดยที่ เมื่อใช้ชั้น p เป็นชั้นรับแสง

$\alpha(\lambda)$: สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของชั้น i ชั้น p และชั้น n

$\alpha_p(\lambda)$: สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของชั้น p

$\alpha_n(\lambda)$: สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของชั้น n

l : ความหนาของชั้น i

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

l_p : ความหนาของชั้น p

l_n : ความหนาของชั้น n

r_n : อัตราส่วนการสะท้อนแสงจากด้านหลังของเซลล์ฯที่ $X = l + l_n$

I_0 : ฟลักซ์ของโฟตอนที่ตกกระทบเซลล์ฯที่ $X = -l_p$

$P_G(X, \lambda)$:ความน่าจะเป็นในการเกิดคู่พาหะจากโฟตอนความยาวคลื่นหนึ่ง ๆ ซึ่งประมาณได้เท่ากับ 1 สำหรับความยาวคลื่นที่มีพลังงานมากกว่าช่องว่างพลังงานของเซลล์

เมื่อพิจารณาสมการจากที่กล่าวมาทั้งหมดที่ใช้ในการหาความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัสจะเห็นว่าลักษณะสมบัติต่าง ๆ ของเซลล์ฯ จะถูกกำหนดโดยตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในสมการ ซึ่งได้แก่ ค่าผลคูณของความคล่องตัวของพาหะกับเวลาอายุของพาหะทั้งของโฮลและอิเล็คตรอน $\mu_p \tau_p , \mu_n \tau_n$ ค่าความเร็วในการรวมตัวที่รอยต่อระหว่าง p กับ i และ i กับ n ในรูปของผลหารกับค่าความคล่องตัว $S_{p-i} / \mu_n , S_{i-n} / \mu_p$ ซึ่งจะสามารถถูกนิยามเป็นตัวแปรใหม่ได้ดังต่อไปนี้ S_p , S_n ตามลำดับ และตัวแปรอื่น ๆ เช่น $\alpha(\lambda), V_b , V_A, l, l_n , l_p$ เป็นต้น

ดังนั้นเราจึงสามารถที่จะทำนายแนวโน้มของตัวแปรในแบบจำลองที่มีผลต่อลักษณะสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ นอกจากนั้นเรายังสามารถใช้แบบจำลองนี้ประกอบกับผลการทดลองในการหาค่าตัวแปรเหล่านี้ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสหนึ่ง ๆ ได้ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์แบบอะมอร์ฟัสต่อไปได้

ในบทนี้จะได้แนะนำให้รู้จักถึงหลักการสำคัญของแบบจำลองนี้ และสมการที่สำคัญที่จะนำไปประยุกต์ในการหาค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะ $(\mu\tau)$ ภายในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัส

ในบทต่อไปจะกล่าวถึงวิธีการใช้แบบจำลองนี้หาค่าตัวแปร $\mu_p \tau_p$, $\mu_n \tau_n$, S_p และ S_n ที่มีในแบบจำลองจากผลการทดลองของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัส

3.4 สรุป

ได้กล่าวถึงรายละเอียดของแบบจำลองที่อาศัยการเคลื่อนที่ของพาหะส่วนน้อยที่แปรตามตำแหน่ง (Variable Minority Carrier Transport Model) ผลการศึกษา ทำให้ได้รายละเอียดของสมการพื้นฐานหลายสมการ ได้แก่

- สมการความหนาแน่นกระแสเนื่องจากแสง $(J_L(X_C:V_A))$
- สมการความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการฉีดพาหะ $(J_I(X_C:V_A))$
- สมการความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ารวม $J(X_C:V_A)=J_L(X_C:V_A)+J_I(X_C:V_A)$ ซึ่งเป็นผลรวมของความหนาแน่นกระแสเนื่องจากแสง $(J_L(X_C:V_A))$ และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการฉีดพาหะ $(J_I(X_C:V_A))$

ในบทต่อไป จะกล่าวถึงผลการศึกษาการนำแบบจำลองที่อาศัยการเคลื่อนที่ของพาหะส่วนน้อยที่แปรตามตำแหน่งและสมการกระแสต่าง ๆ ที่ได้ในบทนี้ ไปใช้ในการคำนวณหาค่าผลคูณของความคล่องตัวกับเวลาอายุของพาหะทั้งของโฮลและอิเล็คตรอน $\mu_p\tau_p$, $\mu_n\tau_n$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

วิธีการหาค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะ ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัส

4.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการหาค่าของผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะ $(\mu\tau)$ ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน และเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียม โดยจะประยุกต์จากแบบจำลองที่อาศัยการเคลื่อนที่ของพาหะส่วนน้อยซึ่งแปรตามตำแหน่งดังที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 และนำแนวความคิดนี้มาแสดงเป็นขั้นตอนของโปรแกรม

เนื่องจากในแบบจำลองที่อาศัยการเคลื่อนที่ของพาหะส่วนน้อยซึ่งแปรตามตำแหน่ง ตัวแปรที่ไม่ทราบค่านอกจากค่าของผลคูณความคล่องตัวกับเวลาอายุของพาหะ $(\mu\tau)$ แล้ว ยังมีตัวแปรอีกสองตัวที่เราไม่ทราบค่านั้นก็คือ ค่าการรวมตัวพื้นผิว (Effective Surface Recombination) ที่รอยต่อของชั้น p กับชั้น i (S_n) และที่รอยต่อของชั้น i กับชั้น n (S_p) ทำให้ตัวแปรที่เราต้องการหามีทั้งหมด 4 ตัวแปร คือ $\mu_p\tau_p$, $\mu_n\tau_n$, S_p และ S_n ดังนั้นการหาค่าตัวแปรเหล่านี้จึงต้องอาศัยสมการทั้งหมด 4 สมการ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่าต้องหาความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 4 ค่าที่เงื่อนไขต่าง ๆ กัน จากสมการที่ (3.48) จะเห็นว่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนขึ้นกับ แรงดันไบแอส กับตำแหน่งของ x_C ซึ่งเป็นตำแหน่งที่แบ่งชั้น i ออกเป็นสองส่วน โดยตำแหน่ง x_C นี้จะขึ้นกับแรงดันไบแอสและลักษณะของแสงที่ให้แก่เซลล์ฯ อีกทีหนึ่งลักษณะของแสงที่ให้แก่เซลล์นี้จะอยู่ในรูปของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง $\alpha(\lambda)$ ในแบบจำลอง

ดังนั้นเราจะหาตัวแปรต่าง ๆ ข้างต้นโดยหาสมการทั้งสี่ หรือหาความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าทั้งสี่ค่าที่เงื่อนไขต่าง ๆ กันจากการทดลองกับเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต้องการได้โดยการเปลี่ยนค่าแรงดันไบแอสและลักษณะของแสงที่ให้แก่เซลล์แสงอาทิตย์

4.2 การคำนวณหาสมการความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัส

ก่อนที่จะหาค่าผลคูณความคล่องตัวกับเวลาอายุของพาหะ $(\mu\tau)$ เราจะหาสมการความหนาแน่นของกระแสสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิอะมอร์ฟัสก่อน โดยการหาสมการความหนาแน่นกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสนี้เพื่อความง่ายเราจะตั้งสมมติฐานในการหาสมการความหนาแน่นของกระแสดังนี้

1. ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเนื่องจากการฉีดพาหะมีค่าน้อยมากจนละเลยได้
2. ไม่มีการสะท้อนของแสงภายในเซลล์ฯ
3. สนามไฟฟ้าภายในชั้น i มีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับตำแหน่ง
4. การเกิดพาหะเนื่องจากการกระตุ้นของแสงเกิดในชั้น i เท่านั้น
5. โฟตอนหนึ่งตัวที่มีพลังงานมากกว่าช่องว่างพลังงานของเซลล์ฯ สามารถทำให้เกิดพาหะหนึ่งคู่ได้เสมอ

จากสมมติฐานในการหาสมการความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า ดังได้กล่าวไว้ข้างต้นเราสามารถหาสมการต่าง ๆ ที่ใช้ในการหาค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ความยาวคลื่นแสงต่าง ๆ ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสได้ดังนี้

จากบทที่ 3 สมการที่ (3.48) เนื่องจากไม่คิดผลของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเนื่องจากการฉีดพาหะ ดังนั้นผลรวมของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสรวม จึงเท่ากับความหนาแน่นกระแสเนื่องจากการกระตุ้นด้วยแสงเท่านั้นโดยแสดงให้เห็นดังสมการข้างล่างนี้

$$J(\alpha,V_A;X_C) = J_L(\alpha,V_A;X_C) = J_{Ln}(\alpha,V_A;X_C) + J_{Lp}(\alpha,V_A;X_C) \tag{4.1}$$

โดยที่

$J(\alpha,V_A;X_C)$: ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ารวมเซลล์แสงอาทิตย์

$J_L(\alpha,V_A;X_C)$: ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเนื่องจากการกระตุ้นด้วยแสง

$J_{Ln}(\alpha,V_A;X_C)$: ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเนื่องจากแสงที่เกิดจากอิเล็กตรอน

$J_{Lp}(\alpha,V_A;X_C)$: ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเนื่องจากแสงที่เกิดจากโฮล

α : สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของชั้น i ของเซลล์แสงอาทิตย์

V_A : แรงดันไบแอสเซลล์แสงอาทิตย์

เนื่องจากแสงที่ให้แก่เซลล์เป็นแสงที่มีความยาวคลื่นแสงเดียวทำให้อัตราการเกิดของคู่พาหะที่ความยาวคลื่นแสงใด ๆ เป็น

$$G(X,\lambda) = P_G(X,\lambda)\left\{-\frac{\partial\phi(X,\lambda)}{\partial X}\right\} \tag{4.2}$$

โดยที่

$G(X,\lambda)$: อัตราการเกิดคู่พาหะความยาวคลื่นแสงใด ๆ ที่ตำแหน่ง X

$P_G(X,\lambda)$: ความน่าจะเป็นของการเกิดคู่พาหะความยาวคลื่นแสงใด ๆ ที่ตำแหน่ง X

$\phi(X,\lambda)$: ความหนาแน่นของโฟตอนของความยาวคลื่นแสงใด ๆ ที่ตำแหน่ง X

จากข้อสมมติฐานข้างต้นจะได้

$$P_G(X,\lambda) = 1 \tag{4.3}$$

และ

$$\phi(X,\lambda) = \phi_0 \exp(-\alpha X) \tag{4.4}$$

โดยที่

$\phi_0 = \phi(0,\lambda)$

λ ต้องมีพลังงานมากกว่าช่องว่างพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ที่วัด

ดังนั้นจากสมการที่ (4.3) และ (4.4) จะเขียนสมการ (4.2) ได้ใหม่ดังนี้

$$G(X,\lambda) = \alpha\phi_0 \exp(-\alpha X) \tag{4.5}$$

จากสมการ (3.28) และ (3.31)ในบทที่ 3 และ สมการ (4.5) J_{Ln} และ J_{Lp} จะแสดงได้ดังนี้

$$J_{Ln}(\alpha, V_A; X_C) = q\Phi_0 \int_0^{X_C} P_n(X, V_a; X_C)\alpha e^{-\alpha X} dX \tag{4.6}$$

$$J_{Lp}(\alpha,V_A;X_C) = q\Phi_0 \int_{X_C}^{l} P_p\left(X,V_a;X_C\right)\alpha e^{-\alpha X}\,dX \qquad (4.7)$$

โดยที่ Φ_0 : ความหนาแน่นของโฟตอนความยาวคลื่นแสงใด ๆ

$P_n\left(X,V_A;X_C\right)$: ความน่าจะเป็นที่อิเล็กตรอนที่เกิดในตำแหน่ง X จะมีส่วนร่วมในการเกิดความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

$P_p\left(X,V_A;X_C\right)$: ความน่าจะเป็นที่โฮลที่เกิดในตำแหน่ง X จะมีส่วนร่วมในการเกิดความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

จากสมการ (3.26) (3.30) ได้

$$P_n(X,V_A;X_C) = \frac{L_n^+}{L_n^+ + L_n^-}\{1 - \Omega_n \exp[-\frac{qE(V_A)}{\kappa_B T}X]\} \exp[\frac{X - X_C}{L_n^+}] \qquad (4.8)$$

$$P_P(X,V_A;X_C) = \frac{L_p^+}{L_P^+ + L_P^-}\{1 - \Omega_P \exp[\frac{qE(V_A)}{\kappa_B T}(X - l)]\} \exp[\frac{X_C - X}{L_p^+}] \qquad (4.9)$$

เมื่อ κ_B : ค่าคงตัว Boltzmann

T : อุณหภูมิ

l : ความหนาของชั้น i

$E(V_A)$: สนามไฟฟ้าภายในชั้น i

q : ประจุของอิเล็กตรอน

$L_p^{\pm}, L_n^{\pm}$: ระยะการแพร่ประสิทธิภาพ (Effective Diffusion Lengths)

Ω_p, Ω_n : ประสิทธิภาพการรวมตัวที่ผิว (Effective Surface Recombination)

โดยที่

$$L_n^{\pm} = [\sqrt{1+\gamma_n^2} \pm \gamma_n]L_n \qquad (4.10)$$

$$\gamma_n = \frac{qL_n E(V_A)}{2\kappa_B T} \qquad (4.11)$$

$$L_n = \sqrt{\frac{\kappa_B T}{q} \mu_n \tau_n} \tag{4.12}$$

$$L_P^{\pm} = [\sqrt{1+\gamma_P^2} \pm \gamma_P] L_P \tag{4.13}$$

$$\gamma_P = \frac{q L_P E(V_A)}{2\kappa_B T} \tag{4.14}$$

$$L_P = \sqrt{\frac{\kappa_B T}{q} \mu_P \tau_P} \tag{4.15}$$

$$\Omega_n = \frac{S_n - \dfrac{\kappa_B T}{q L_n^+}}{S_n + \dfrac{\kappa_B T}{q L_n^-}} \tag{4.16}$$

$$\Omega_p = \frac{S_p - \dfrac{\kappa_B T}{q L_p^+}}{S_p + \dfrac{\kappa_B T}{q L_p^-}} \tag{4.17}$$

เนื่องจากเราคิดว่าสนามไฟฟ้าภายในคงที่ตลอดในชั้น i ดังนั้น

$$E(V_A) = \frac{V_b - V_A}{l} \tag{4.18}$$

โดยที่ V_b : ศักย์ไฟฟ้าภายในของเซลล์แสงอาทิตย์ (Built-In Potential)

V_A : แรงดันที่ไบแอสเซลล์แสงอาทิตย์

จากสมการ (4.6) ถึง (4.18) ข้างต้นจะเห็นว่าเราจะยังไม่สามารถคำนวณความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ได้เลย ถ้าเรายังไม่ทราบค่า x_C ดังนั้นเมื่อไม่คิดผลของการฉีดพาหะ ตำแหน่ง x_C จะหาได้จากสมการ (4.19)

$$\frac{J_{Ln}(\alpha,V_A;X_C)}{L_n^+} = \frac{J_{Lp}(\alpha,V_A;X_C)}{L_p^+} \tag{4.19}$$

ในกรณีอิเล็กตรอน เราจะแทนสมการที่ (4.8) ในสมการที่ (4.6) จะได้

$$J_{Ln}(\alpha,V_A;X_C) = q\Phi_0 \int_0^{X_C} \frac{L_n^+}{L_n^+ + L_n^-}[1-\Omega_n \ \exp(-\frac{qE(V_A)}{\kappa_B T}X)]\exp(\frac{X-X_C}{L_n^+})\alpha\exp(-\alpha X)dX$$

$$\therefore J_{Ln}(\alpha,V_A;X_C) = \frac{q\Phi_0 L_n^+\alpha}{L_n^+ + L_n^-}\left\{\begin{array}{l} \frac{1}{(\frac{1}{L_n^+}-\alpha)}[\exp(-\alpha X_C)-\exp(-\frac{X_C}{L_n^+})]+ \\ \frac{\Omega_n}{(\frac{qE(V_A)}{\kappa_B T}-\frac{1}{L_n^+}+\alpha)}[\exp((-\frac{qE(V_A)}{\kappa_B T}-\alpha)X_C)-\exp(-\frac{X_C}{L_n^+})] \end{array}\right\} \tag{4.20}$$

ในกรณีโฮลเราจะแทนสมการที่ (4.9) ในสมการที่ (4.7) จะได

$$J_{Lp}(\alpha,V_A;X_C) = q\Phi_0 \int_{X_C}^{l} \frac{L_p^+}{L_p^+ + L_p^-}[1-\Omega_p \ \exp(\frac{qE(V_A)}{\kappa_B T}(X-l))]\exp(\frac{X_C-X}{L_p^+})\alpha\exp(-\alpha X)dX$$

$$\therefore J_{Lp}(\alpha,V_A;X_C) = \frac{q\Phi_0 L_p^+\alpha}{L_p^+ + L_p^-}\left\{\begin{array}{l} -\frac{1}{(\frac{1}{L_p^+}+\alpha)}[\exp((-\alpha l)+(\frac{X_C-l}{L_p^+}))-\exp(-\alpha X_C)]- \\ \frac{\Omega_p \ \exp(-\frac{qE(V_A)l}{\kappa_B T})}{(\frac{qE(V_A)}{\kappa_B T}-\frac{1}{L_p^+}-\alpha)}[\exp((\frac{qE(V_A)}{\kappa_B T}-\alpha)l+(\frac{X_C-l}{L_p^+}))- \\ \exp((\frac{qE(V_A)}{\kappa_B T}-\alpha)X_C]] \end{array}\right\} \tag{4.21}$$

สุดท้ายเราได้สมการที่ (4.20) และ(4.21) ทำให้สามารถหาค่าในสมการที่ (4.1) ได้ซึ่งก็คือสมการความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสนั้นเอง

สมการที่จะนำไปประยุกต์ใช้ หลักในการหาค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะ $\mu_n\tau_n$, $\mu_p\tau_p$ และค่าการรวมตัวพื้นผิว S_n , S_p ในวิทยานิพนธ์คือสมการที่ (4.1), (4.19), (4.20) และ (4.21) นั้นเอง

4.3 การหาค่าผลคูณความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะ $(\mu\tau)$ ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัส

ในหัวข้อนี้จะเป็นการนำสมการ (4.1), (4.19), (4.20) และ (4.21) จากหัวข้อที่แล้วมาประยุกต์เพื่อนำไปหาวิธีการหาค่าผลคูณความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะ $(\mu\tau)$ ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัส

เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจเราจะเขียนสมการที่ (4.20) และ(4.21) ให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันเพื่อจะได้อยู่ในรูปที่มองได้ง่าย

$$J_{L_n} = \Phi_0 f(\alpha, V_A, X_c, \mu_n \tau_n, s_n, V_b) \tag{4.22}$$

สมการที่ (4.22) เป็นรูปฟังก์ชันของสมการที่ (4.20)

$$J_{L_p} = \Phi_0 f(\alpha, V_A, X_c, \mu_p \tau_p, s_p, V_b) \tag{4.23}$$

สมการที่ (4.23) เป็นรูปฟังก์ชันของสมการที่ (4.21)

จากสมการที่ (4.1) , (4.22) , (4.23) จะเขียนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ารวมในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัส $J(\alpha, V_A; X_C)$ เป็นฟังก์ชัน ดังแสดงในสมการที่ (4.24)คือ

$$J(\alpha, V_A, X_c) = \Phi_0 f(\alpha, V_A, X_c, \mu_n \tau_n, \mu_p \tau_p, s_n, s_p, V_b) \tag{4.24}$$

ดังนั้นสมการที่ (4.24) เป็นสมการหลักในการหาค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะ $(\mu\tau)$

ในทางปฏิบัติ เนื่องจากความหนาแน่นของโฟตอน (Φ_0) ที่ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ในแต่ละครั้งของการวัดสเปกตรัมผลตอบสนองต่อแสงอาจจะไม่เท่ากันเสมอไป ดังนั้นหากสามารถตัดตัวแปร Φ_0 ออกไป ก็จะทำให้การทดลองหรือการวัดง่ายขึ้น วิธีการตัดตัวแปร Φ_0 ออกจากสมการที่ (4.24) ทำได้โดยการหารสมการที่ (4.24) ด้วยค่ากระแสไฟฟ้าเมื่อแรงดันไบแอสเป็น 0V (V_A=0V) ดังนั้นจึงได้ว่า

$$\frac{J(\lambda,V_A)}{J_0(\lambda,0)}=\frac{\Phi_0 F(\alpha,V_A,X_c,\mu_n\tau_n,\mu_p\tau_p,s_n,s_p,V_b)}{\Phi_0 F(\alpha,0V,X_c,\mu_n\tau_n,\mu_p\tau_p,s_n,s_p,V_b)} \qquad (4.25)$$

สิ่งที่จะคำนวณได้ในสมการที่ (4.25) นั้นจะเรียกว่า ฟังก์ชันอัตราส่วนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในทางทฤษฎี $\frac{Jt\ (\lambda,V_A)}{Jt_0(\lambda,0)}$ และจากสมการที่ (4.25) ตัวแปรต่าง ๆ สามารถทราบได้ดังนี้คือ

- α ทราบได้จากการวัดค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของฟิล์มa-Si:Hหรือa-SiGe:H ที่ใช้เงื่อนไขเดียวกับที่ทำเซลล์แสงอาทิตย์
- V_A ทราบได้เพราะเป็นค่าแรงดันไบแอสที่ป้อนให้แก่เซลล์แสงอาทิตย์
- X_c ทราบได้จากสมการที่ (4.19)
- V_b ทราบได้จากการวัดค่า Built-In Potential (V_b) ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนโดยวิธี (BASREA)
- ค่า $\mu_n\tau_n$, $\mu_p\tau_p$, s_n, s_p เป็นค่าที่เรายังไม่ทราบ

วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์นี้ คือต้องการหาค่า $\mu_n\tau_n$, $\mu_p\tau_p$, s_n, s_p ซึ่งหาโดยเราจะสมมุติค่า $\mu_n\tau_n$, $\mu_p\tau_p$, s_n, s_p ทั้ง 4 ค่านี้ กับค่าตัวแปรที่วัดได้ α, V_A, X_c, V_b ทั้ง 4ค่า และแทนในสมการที่ (4.25) เพื่อค่าหาฟังก์ชันอัตราส่วนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในทฤษฎี $\frac{Jt\ (\lambda,V_A)}{Jt_0(\lambda,0)}$ และเอาค่านี้เทียบกับค่าฟังก์ชันอัตราส่วนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการวัด $\frac{J\ (\lambda,V_A)}{J_0(\lambda,0)}$ เพื่อหาค่าความผิดพลาด (Error)

$$\left|\frac{Jt\ (\lambda,V_A)}{Jt_0(\lambda,0)}-\frac{J(\lambda,V_A)}{J_0(\lambda,0)}\right| = Error \qquad (4.26)$$

ซึ่งจะสมมุติค่า $\mu_n\tau_n$, $\mu_p\tau_p$, s_n, s_p วนไปเรื่อย ๆ เพื่อหาค่า $\frac{Jt\ (\lambda,V_A)}{Jt_0(\lambda,0)}$ ที่ทำให้ค่า Error น้อยที่สุด และค่า $\mu_n\tau_n$, $\mu_p\tau_p$, s_n, s_p ที่สมมุติ จนได้ Error น้อยที่สุด ค่าชุดนั้นก็คือคำตอบนั้นเอง

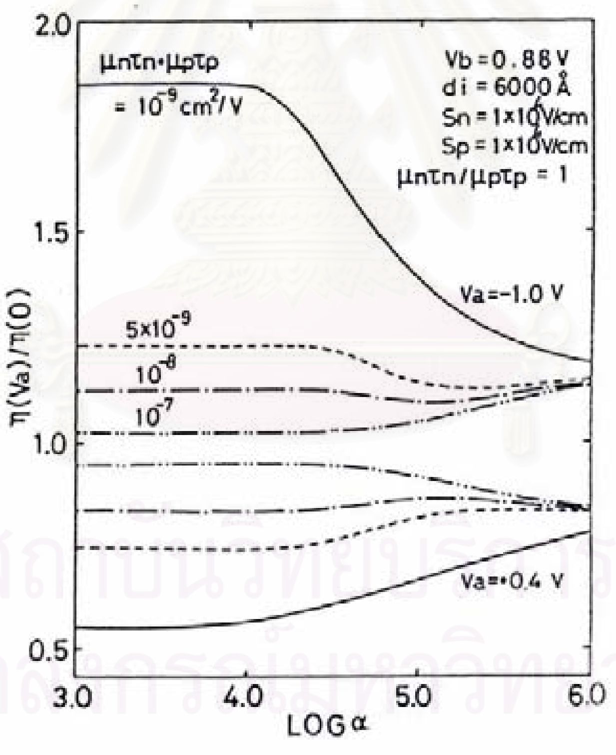
แต่การสมมุติค่า $\mu_n\tau_n$, $\mu_p\tau_p$, s_n, s_p ทั้ง 4 ค่านั้นถ้าสมมุติไม่ดีก็จะ ไม่ทำให้ Error น้อยลงก็เป็นได้ จึงต้องมีการดูต่อไปว่าจะสมมุติยังไงและตัวแปรไหนสำคัญกว่ากัน

ซึ่งต่อไปจะเป็นการหาว่า $\mu_n \tau_n , \mu_p \tau_p , s_n , s_p$ ค่าไหนสำคัญยิ่งกว่ากันหรือต้องสมมุติให้อยู่ในรูปไหนจึงจะดีกว่ากันเพื่อประโยชน์ในการสมมุติค่า $\mu_n \tau_n , \mu_p \tau_p , s_n , s_p$ แล้วทำให้ Error น้อยลง ในรูปที่ 4.1 , 4.2 , 4.3 และ 4.4 เป็นการแสดงผลการจำลอง (simulate) ฟังก์ชันของอัตราส่วนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในเซลล์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนเพื่อดูว่า $\mu_n \tau_n , \mu_p \tau_p , s_n , s_p$ ตัวแปรแต่ละตัวมีอิทธิพลอย่างไรบ้าง

โดยที่ $\eta(V_a)$:The collection efficiency spectra under the bias voltage of V_a

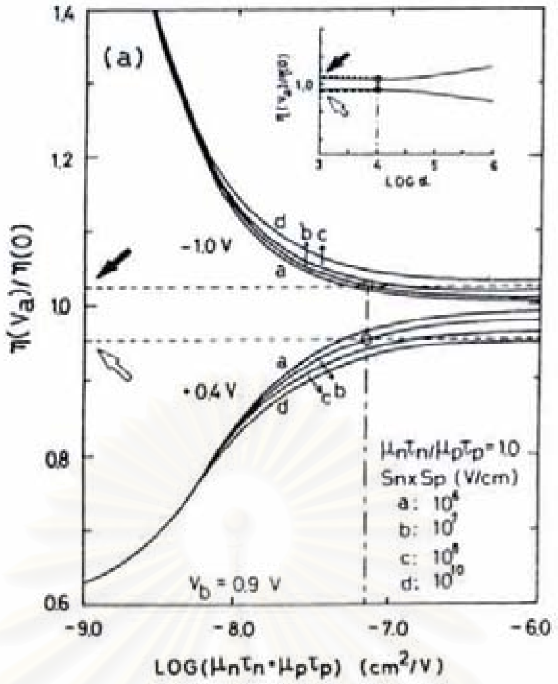
$\eta(0)$:The collection efficiency spectra under the short circuit condition

โดยที่ [5,6] $$\frac{\eta(V_a)}{\eta(0)} = \frac{J(\lambda, V_A)}{J_0(\lambda,0)} = \frac{J(V_A)}{J_0(0)}$$



รูปที่ 4.1 ตัวอย่างการจำลอง (simulate) [5] ฟังก์ชันของอัตราส่วนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในเซลล์ฯชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน โดยที่กำหนดให้ $\mu_n \tau_n / \mu_p \tau_p = 1$

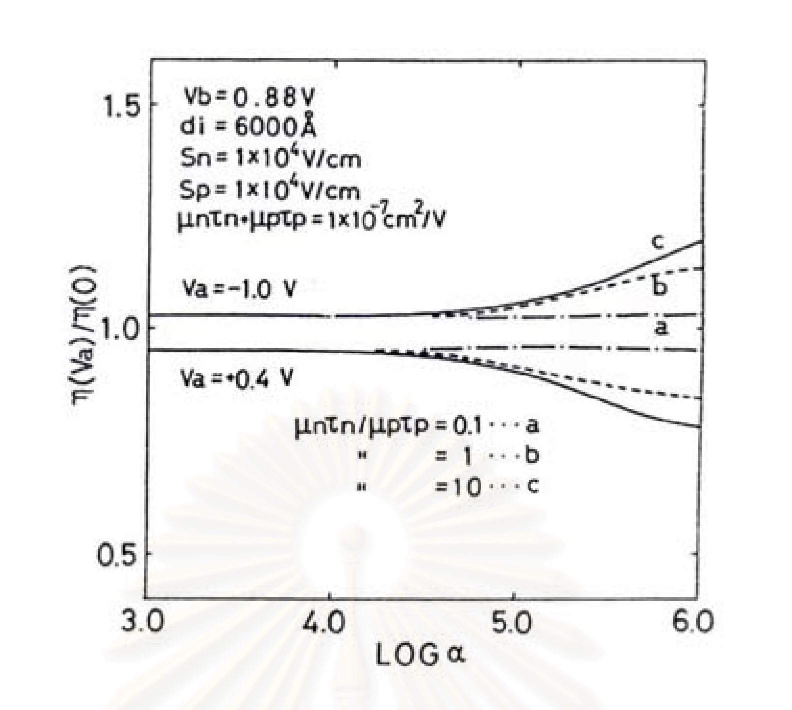
สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



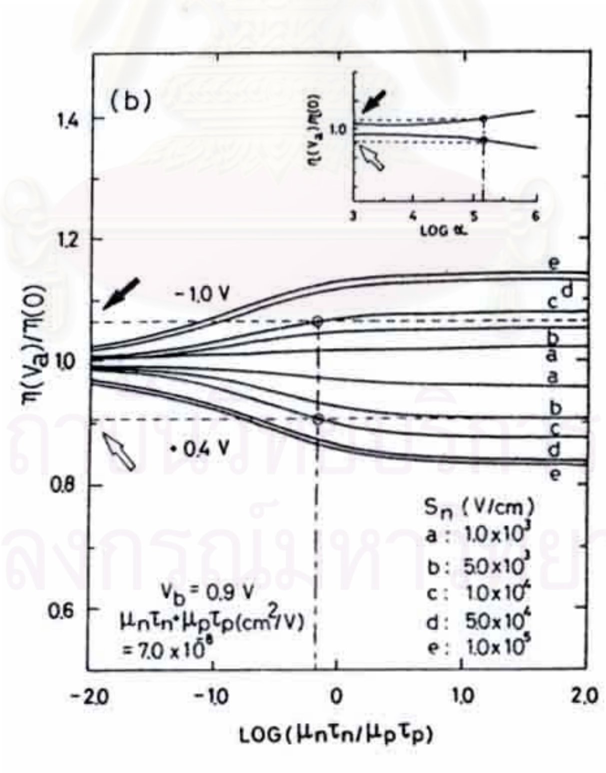
รูปที่ 4.2 ตัวอย่างผลการจำลอง (simulate) [5] ฟังก์ชันของอัตราส่วนความหนาแน่นกระแสในเซลล์ฯ ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน โดยที่กำหนดให้ $\mu_n\tau_n / \mu_p\tau_p = 1$ และ $s_n \times s_p$ เปลี่ยนค่า4กรณี

จากรูปที่ 4.1 [5] แสดงผลคำนวณฟังก์ชันของอัตราส่วนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในทฤษฎี $\frac{Jt\,(\lambda,V_A)}{Jt_0(\lambda,0)}$ ที่ได้จากสมการที่ (4.25) โดยเปลี่ยนแรงดันไบแอส $V_A = 0,-1V,0.4V$ ตามลำดับ และกำหนดให้ค่า $\frac{\mu_n\tau_n}{\mu_p\tau_p} = 1$ จากรูปที่ 4.1 พบว่าค่า $\mu_n\tau_n + \mu_p\tau_p$ ที่มีผลต่อ $\frac{Jt\,(\lambda,V_A)}{Jt_0(\lambda,0)}$ ที่บริเวณ λ ยาว ($\log\alpha \leq 4.5$) [5] อย่างมาก และจากรูปที่ 4.2 [5] พบว่าค่า $\mu_n\tau_n + \mu_p\tau_p$ จะเปลี่ยนแปลง เมื่อ $s_n \times s_p$ เปลี่ยนแปลง ดังนั้นในช่วงความยาวคลื่น (λ) ยาวหรือสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงมีค่าน้อย (ประมาณ $\log\alpha \leq 4.5$) [5] ค่า $\mu_n\tau_n + \mu_p\tau_p$ และ $s_n \times s_p$ จะมีผลต่อค่า $\frac{Jt\,(\lambda,V_A)}{Jt_0(\lambda,0)}$ อย่างมาก

ดังนั้นในการหาค่า Error ในสมการที่ (4.26) จะมีค่าน้อยลงในช่วงความยาวคลื่นยาว (λ) หรือสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงมีค่าน้อย เมื่อเราสมมุติค่า $\frac{\mu_n\tau_n}{\mu_p\tau_p} = 1$ คงที่ไว้ และเปลี่ยนค่า $\mu_n\tau_n + \mu_p\tau_p$ และ $s_n \times s_p$ ไปจนได้ค่า Error น้อยที่สุด และค่า $\mu_n\tau_n + \mu_p\tau_p$ และ $s_n \times s_p$ ที่ทำให้ Error น้อยสุดก็คือคำตอบที่คำนวณได้ในช่วงความยาวคลื่นยาว (λ) หรือสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงมีค่าน้อย ดังนั้นในช่วงสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงมีค่าน้อยจะเป็นการค่าหา $\mu_n\tau_n + \mu_p\tau_p$ และ $s_n \times s_p$



รูปที่ 4.3 ตัวอย่างผลการจำลอง (simulate) [5] ฟังก์ชันของอัตราส่วนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน โดยที่กำหนดให้ $\mu_n \tau_n + \mu_p \tau_p = 10^{-7}$



รูปที่ 4.4 ตัวอย่างผลการจำลอง (simulate) [5] ฟังก์ชันของอัตราส่วนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน โดยที่กำหนดให้

$\mu_n \tau_n + \mu_p \tau_p = 10^{-7}$ และ S_n เปลี่ยนค่า 5 กรณี

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากรูปที่ 4.3 [5] แสดงผลคำนวณฟังก์ชันของอัตราส่วนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในทฤษฎี $\frac{Jt(\lambda,V_A)}{Jt_0(\lambda,0)}$ ที่ได้จากสมการที่ (4.25) โดยเปลี่ยนแรงดันไบแอส $V_A = 0,-1V,0.4V$ ตามลำดับ และกำหนดให้ค่า $\mu_n\tau_n + \mu_p\tau_p =$ 1 x $10^{-7} cm^2/v$ คงที่ จากรูปที่ 4.3 พบว่าค่า $\frac{\mu_n\tau_n}{\mu_p\tau_p}$ จะมีผลต่อ $\frac{Jt(\lambda,V_A)}{Jt_0(\lambda,0)}$ ที่บริเวณ λ สั้น หรือ (logα $\geq$ 4.5) [5] และจากรูปที่ 4.4 [5] พบว่าค่า $\frac{\mu_n\tau_n}{\mu_p\tau_p}$ จะเปลี่ยนแปลงเมื่อค่าs_n หรือ s_p เปลี่ยนแปลง ดังนั้นในช่วงความยาวคลื่นสั้นหรือสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงมีค่ามาก (ประมาณ log $\geq$ 4.5) [5] ค่า $\frac{\mu_n\tau_n}{\mu_p\tau_p}$ และ (s_p หรือ s_n) จะมีผลต่อค่า $\frac{Jt(\lambda,V_A)}{Jt_0(\lambda,0)}$ อย่างมาก

ดังนั้นในการหาค่า Error ในสมการที่ (4.26) จะมีค่าน้อยลงในช่วงความยาวคลื่นสั้น (λ) หรือสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงมีค่ามาก เมื่อเราสมมุติ $\mu_n\tau_n + \mu_p\tau_p$ ให้เป็นค่าคงที่ และเปลี่ยนค่า $\frac{\mu_n\tau_n}{\mu_p\tau_p}$ และs_p ไปจนได้ค่า Error น้อยที่สุด และค่า $\frac{\mu_n\tau_n}{\mu_p\tau_p}$ และs_p ที่ทำให้ Error น้อยที่สุดก็คือคำตอบที่คำนวณได้ในช่วงความยาวคลื่นสั้น (λ) หรือสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงสูงมีค่ามากนั้นเอง ดังนั้นในช่วงสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงมีค่ามากจะเป็นการค่าหา $\frac{\mu_n\tau_n}{\mu_p\tau_p}$ และ (s_p หรือ s_n)

ดังนั้นการหาค่า $(\mu\tau)$ ในวิทยานิพนธ์นี้จึงแบ่งการหาออกเป็น 2 ช่วงคือ ฟังก์ชันอัตราส่วนของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าช่วงสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงมีค่ามาก $\frac{J(\alpha_{hi})}{J_0(\alpha_{hi})}$ และฟังก์ชันอัตราส่วนของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าช่วงสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงมีค่าน้อย $\frac{J(\alpha_{low})}{J_0(\alpha_{low})}$

และจากสมการที่ (4.25) ค่า $\frac{J(V_A)}{J_0(0)}$ ได้จากการวัดสเปกตรัมผลสนองต่อแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยในทางปฏิบัติ ได้ทำการไบแอส (V_A) 2 ค่าคือไบแอสตาม และไบแอสย้อนกลับ โดยถ้าV_A เป็นค่าไบแอสตามก็จะได้ $\frac{J_F(V_A)}{J_0(0)}$ และถ้า V_A เป็นค่าไบแอสย้อนกลับก็จะได้ $\frac{J_R(V_A)}{J_0(0)}$ เช่น $V_A = 0.4V,-1V$ ก็จะได้ค่า $\frac{J_F(0.4V)}{J_0(0)}$ และ $\frac{J_R(-1V)}{J_0(0)}$ ดังนั้นจากสมการที่ (4.25) ได้

$$\frac{J_F(0.4V)}{J_0(0)} = \frac{f(\alpha,0.4V,X_c,\mu_n\tau_n,\mu_p\tau_p,s_n,s_p,V_b)}{f(\alpha,0V,X_c,\mu_n\tau_n,\mu_p\tau_p,s_n,s_p,V_b)} \qquad (4.27)$$

และ

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$\frac{J_R(-1V)}{J_0(0)} = \frac{f(\alpha,-1V,X_c,\mu_n\tau_n,\mu_p\tau_p,s_n,s_p,V_b)}{f(\alpha,0V,X_c,\mu_n\tau_n,\mu_p\tau_p,s_n,s_p,V_b)} \tag{4.28}$$

ต่อไปจะกล่าวถึงหลักการคำนวณหาค่า $\mu_n\tau_n, \mu_p\tau_p, S_n, S_p$ จากสเปกตรัมตอบสนองต่อแสงที่วัดได้ในสมการที่ (4.27) และ (4.28) ดังต่อไปนี้

จากสมการที่ (4.27) และ (4.28) ค่า α, X_C, V_b เป็นค่าที่เราทราบเพราะเป็นค่าที่วัดได้โดยตรง แต่ยังคงมีตัวแปรที่ไม่ทราบค่าเหลืออยู่อีกจำนวน 4 ตัวคือ $\mu_n\tau_n, \mu_p\tau_p, S_n, S_p$ ดังนั้นจึงยังไม่สามารถแก้สมการเพื่อหาค่าตัวแปรทั้ง 4 ตัวที่เหลือได้

ดังนั้น จึงมีความจำเป็นต้องสร้างสมการสำรองขึ้นใหม่ดังนี้

1. บริเวณความยาวคลื่นแสงที่สัมประสิทธิ์การดูดแสงมีค่าน้อย กำหนดสมการสำรองดังนี้

$$a = S_n \times S_p, b = \mu_n\tau_n + \mu_p\tau_p \tag{4.29}$$

โดยที่กำหนดให้ $s_n = s_p$ และ $\mu_n\tau_n = \mu_p\tau_p$

ดังนั้นจาก สมการที่ (4.27), (4.28) และ (4.29) จึงสามารถคำนวณได้ค่า a, b

2. บริเวณความยาวคลื่นแสงที่สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงมีค่ามาก กำหนดสมการสำรองดังนี้

$$c = S_n, d = \frac{\mu_n\tau_n}{\mu_p\tau_p} \tag{4.30}$$

ดังนั้นจากสมการที่ (4.27), (4.28) และ (4.30) จึงสามารถคำนวณได้ค่า c, d

ดังนั้น จากสมการที่ (4.29) และ (4.30) จึงสามารถคำนวณหาค่า $\mu_n\tau_n, \mu_p\tau_p, S_n, S_p$ ได้นั่นเอง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.4 ผลการเขียนโปรแกรมคำนวณหาค่าผลคูณความคล่องตัวกับเวลาอายุของพาหะ $(\mu\tau)$ และค่าความเร็วของการรวมตัวที่ผิว (Surface Recombination Velocity) ระหว่างชั้น p กับชั้น i (s_p) และ ระหว่างชั้น n กับชั้น i (s_n)

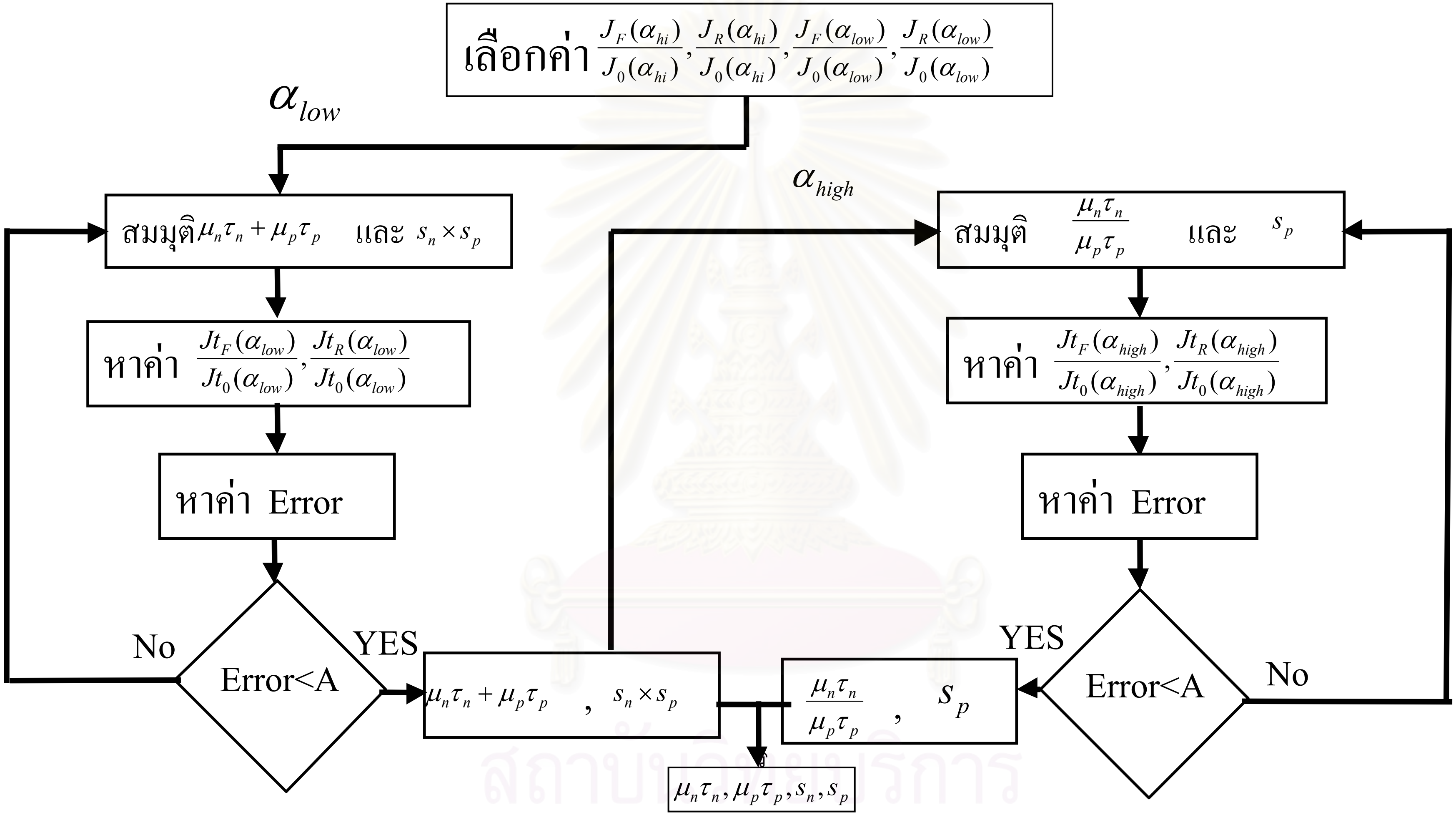
ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงผลการเขียนโปรแกรมสำหรับคำนวณหาค่าผลคูณความคล่องตัวกับเวลาอายุของพาหะ $(\mu\tau)$ และค่าความเร็วของการรวมตัวที่ผิว (Effective Surface Recombination Factors) ระหว่างชั้น p กับชั้น i (s_p) และ ระหว่างชั้น n กับชั้น i (s_n)

วิธีดำเนินการ ได้ใช้แนวคิดที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.3 กล่าวคือ ได้เขียนโปรแกรม MATLAB ขึ้นมา และใช้หลักการคำนวณดังที่แสดงในสมการที่ (4.27) และ (4.28) ดังจะได้กล่าวรายละเอียดต่อไปนี้

เนื่องจากในย่านที่สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงมีค่าน้อยค่าของ $\mu_n\tau_n + \mu_p\tau_p$ และ $s_n \times s_p$ จะมีอิทธิพลในย่านนี้อย่างมาก และทำนองเดียวกันในย่านที่มีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงมีค่ามากค่าของ $\frac{\mu_n\tau_n}{\mu_p\tau_p}$ และ s_p จะมีอิทธิพลในย่านนี้อย่างมาก

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ได้เขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการหาตัวแปร $\mu_n\tau_n$, $\mu_p\tau_p$, s_n และ s_p โดยจะแบ่งงานออกเป็น 2 ส่วน คือย่านการดูดกลืนแสงมีค่าน้อย และย่านการดูดกลืนแสงมีค่ามาก ดังแสดงในรูปที่ 4.5

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.5 แผนภูมิสายงานแสดงขั้นตอนในการหา $\mu_n\tau_n$, $\mu_p\tau_p$, s_n และ s_p

รูปที่ 4.5 แสดงแผนภูมิสายงานสำหรับหาค่า $\mu_n \tau_n , \mu_p \tau_p , s_n , s_p$ โดยมีรายละเอียดของขั้นตอนการทำงานดังต่อไปนี้

นำค่าฟังก์ชันอัตราส่วนของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการวัด $\frac{J(\lambda,V_A)}{J_0(\lambda,0)}$ และทำการเลือกผลการวัดย่านละหนึ่งคู่คือที่สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงมีค่ามาก และสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงมีค่าน้อย $\frac{J_F(\alpha_{hi})}{J_0(\alpha_{hi})}$, $\frac{J_R(\alpha_{hi})}{J_0(\alpha_{hi})}$, $\frac{J_F(\alpha_{low})}{J_0(\alpha_{low})}$, $\frac{J_R(\alpha_{low})}{J_0(\alpha_{low})}$ ตามลำดับ

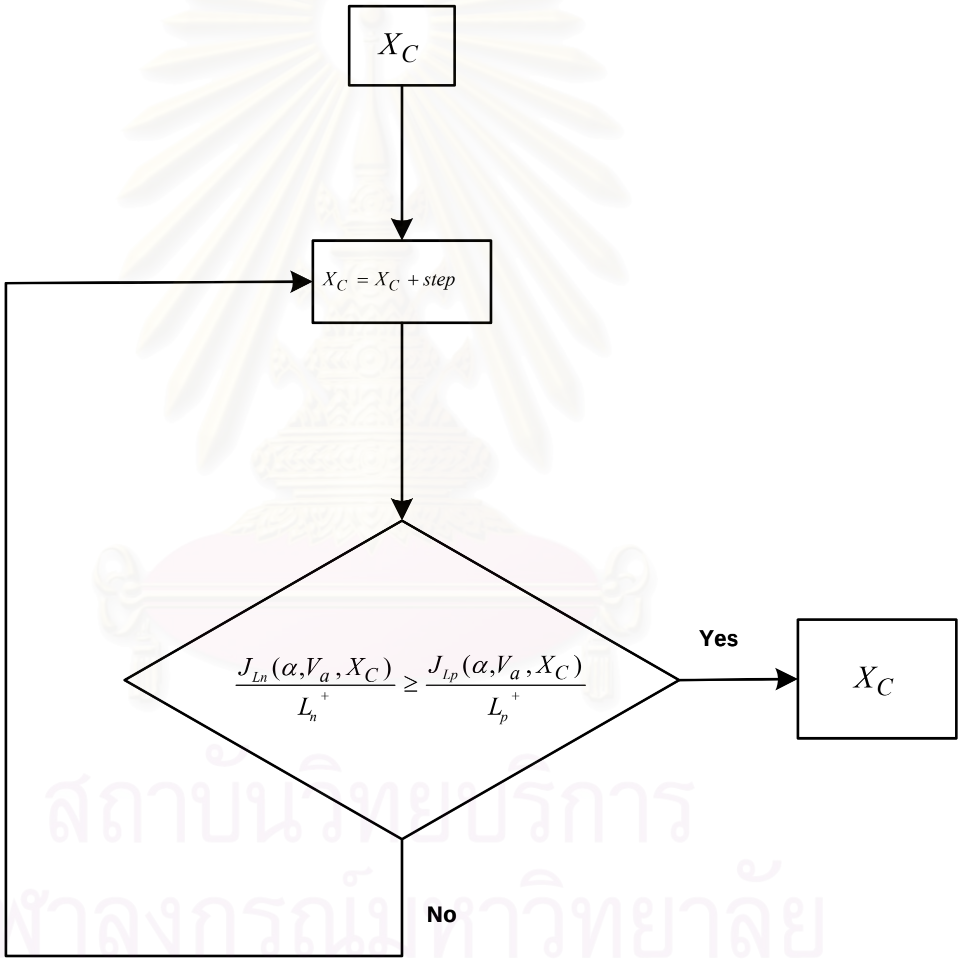
จากนั้นนำค่าฟังก์ชันอัตราส่วนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าย่านละหนึ่งคู่คือที่สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงสูง และสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงต่ำ $\frac{J_F(\alpha_{hi})}{J_0(\alpha_{hi})}, \frac{J_R(\alpha_{hi})}{J_0(\alpha_{hi})}, \frac{J_F(\alpha_{low})}{J_0(\alpha_{low})}, \frac{J_R(\alpha_{low})}{J_0(\alpha_{low})}$ มาหา Error ตามลำดับ

โดยเริ่มจากย่านสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงมีค่าน้อย (α_{low}) จะสมมุติค่า $\mu_n \tau_n + \mu_p \tau_p$ และ $s_n \times s_p$ เพื่อหาฟังก์ชันอัตราส่วนของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในทฤษฎี $\frac{Jt(\lambda,V_A)}{Jt_0(\lambda,0)}$ จากสมการที่ (4.25) และจากนั้นทำการเปรียบเทียบกับฟังก์ชันอัตราส่วนของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เลือกมาจากการวัด $\frac{J_F(\alpha_{low})}{J_0(\alpha_{low})}$, $\frac{J_R(\alpha_{low})}{J_0(\alpha_{low})}$ ตามลำดับ จะได้เป็น Error แล้วทำการสมมุติค่า $\mu_n \tau_n + \mu_p \tau_p$ และ $s_n \times s_p$ วนไปเลื่อย ๆ และค่าที่สมมุติ $\mu_n \tau_n + \mu_p \tau_p$ และ $s_n \times s_p$ แล้วทำให้ค่า Error น้อยที่สุดค่า $\mu_n \tau_n + \mu_p \tau_p$ และ $s_n \times s_p$ นี้ ก็คือคำตอบ

และทำนองเดียวกันในย่านสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงมีค่ามาก (α_{high}) นั้น จะสมมุติค่า $\frac{\mu_n \tau_n}{\mu_p \tau_p}$ และ s_p เพื่อหาฟังก์ชันอัตราส่วนของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในทฤษฎี $\frac{Jt(\lambda,V_A)}{Jt_0(\lambda,0)}$ จากสมการที่ (4.25) และทำการเปรียบเทียบกับฟังก์ชันอัตราส่วนของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เลือกมาจากการวัด $\frac{J_F(\alpha_{high})}{J_0(\alpha_{high})}$, $\frac{J_R(\alpha_{high})}{J_0(\alpha_{high})}$ ตามลำดับจะได้เป็นค่า Error แล้วทำการสมมุติค่า $\frac{\mu_n \tau_n}{\mu_p \tau_p}$ และ s_p วนไปเรื่อย ๆ ค่าที่สมมุติ $\frac{\mu_n \tau_n}{\mu_p \tau_p}$ และ s_p แล้วทำให้ค่า Error น้อยที่สุดค่า $\frac{\mu_n \tau_n}{\mu_p \tau_p}$ และ s_p นี้ก็คือคำตอบนั้นเอง

เมื่อเราได้ค่าของ $\mu_n \tau_n + \mu_p \tau_p$, $s_n \times s_p$ ในย่านสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงมีค่าน้อย (α_{low}) และค่า $\frac{\mu_n \tau_n}{\mu_p \tau_p}$ และ s_p ในย่านสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงมีค่ามาก (α_{high}) แล้วเราก็สามารถแก้หาค่าของ $\mu_n \tau_n , \mu_p \tau_p , s_n , s_p$ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสได้นั้นเอง

แต่การหาค่าฟังก์ชันอัตราส่วนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในทฤษฎี $\frac{Jt(\lambda,V_A)}{Jt_0(\lambda,0)}$ ในสมการที่ (4.25) นั้นจะต้องทราบตำแหน่งของ X_c (X_c คือจุดที่แบบชั้น i ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสออกเป็น 2 ส่วน) การหาตำแหน่ง X_c จะใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการหาจากสมการที่ (4.19) วิธีการสามารถทำได้หลายวิธี วิธีหนึ่งซึ่งง่ายต่อความเข้าใจจะแสดงได้แสดงแผนภูมิสายงานดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 แผนภูมิสายงานสำหรับหาค่า X_c

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากการหาตำแหน่ง X_c ดังกล่าวความถูกต้องขึ้นกับความละเอียดของ step เมื่อได้ตำแหน่ง X_c แล้ว การหาค่าจากสมการ (4.25) ก็ไม่ใช่เรื่องยากซึ่งตัวแปรอื่นๆ ที่ใช้นอกจาก X_c ได้แก่ แรงดันไบแอสตาม (V_A), สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (α), แรงดันไบแอสย้อน(V_A),V_b ,$\mu_n\tau_n$, $\mu_p\tau_p$, s_n และ s_p เมื่อหาฟังก์ชันอัตราส่วนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในทฤษฎี $\frac{Jt\left(\lambda,V_A\right)}{Jt_0(\lambda,0)}$ ได้แล้วก็สามารถนำมาใช้ในการหาความผิดพลาด (Error) ดังในสมการที่ (4.26) ที่ผิดไปจากการทดลอง $\frac{J\left(\lambda,V_A\right)}{J_0(\lambda,0)}$ได้ซึ่งค่าตัวแปรใดที่ทำให้ค่าความผิดพลาด (Error) นี้ต่ำที่สุดตัวแปรเหล่านั้นจะเป็นคำตอบที่ต้องการ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้ใช้แนวทางการทำงานดังกล่าวข้างต้นสำหรับเขียนโปรแกรมหาค่าตัวแปรในย่านสัมประสิทธิ์การดูดกลืนทั้งสอง รายละเอียดของโปรแกรมที่เขียนขึ้นแสดงในภาคผนวก

4.5 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงขั้นตอนการทำงานสำหรับหาผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสโดยใช้ “แบบจำลองที่อาศัยการเคลื่อนที่ของพาหะส่วนน้อยซึ่งแปรตามตำแหน่ง” โดยเริ่มจากการวัดสเปกตรัมสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน วัดค่า Built-In Potential ของเซลล์ฯ และวัดสเปกตรัมการตอบสนองต่อแสงของเซลล์ฯ จำนวน 3 กรณี กล่าวคือ กรณีไม่ไบแอส กรณีไบแอสตาม และกรณีไบแอสย้อนกลับ ต่อจากนั้น นำผลลัพธ์ที่วัดได้ไปคำนวณโดยการเขียนโปรแกรม MATLAB

ในบทถัดไป จะกล่าวถึงผลการทดลองจริงโดยใช้โปรแกรมที่เขียนขึ้นดังกล่าว

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

ผลการวัดค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัส

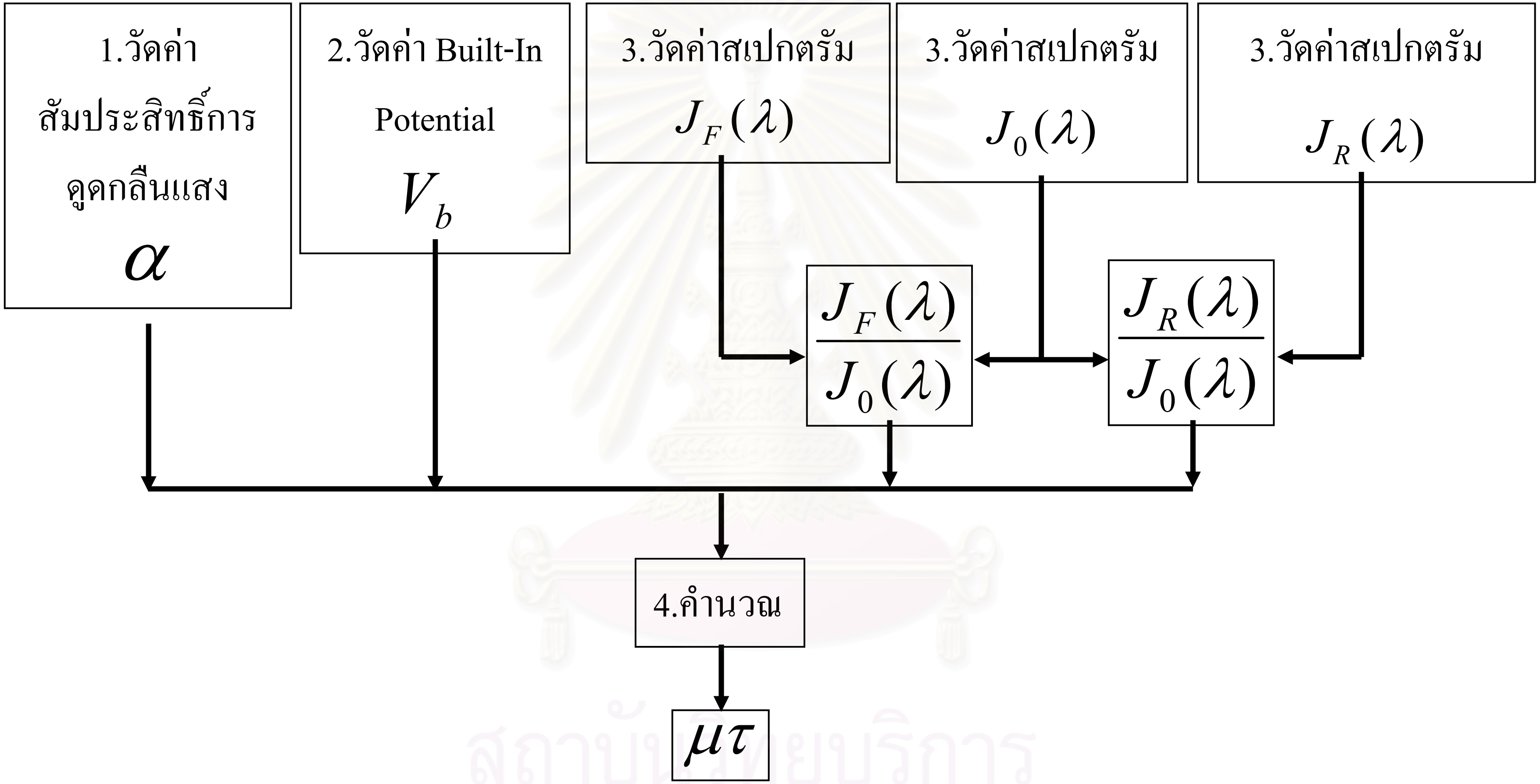
5.1 บทนำ

ในบทที่ 4 ได้กล่าวถึงวิธีการนำแบบจำลองที่อาศัยการเคลื่อนที่ของพาหะส่วนน้อยที่แปรตามตำแหน่ง (Variable Minority Carrier Transport Model) มาประยุกต์ใช้คำนวณหาค่าความหนาแน่นของกระไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัส (โปรดดูสมการที่ (4.1),(4.18),(4.19) และ (4.20)) และกล่าวถึงการนำสมการเหล่านี้ไปใช้คำนวณหาค่าผลคูณความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะ $(\mu\tau)$ ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัส โดยได้มีการเขียนโปรแกรม MATLAB ขึ้นมา ซึ่งเมื่อนำโปรแกรมดังกล่าวไปใช้งาน จะสามารถหาค่าผลคูณความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะ $(\mu\tau)$ ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสได้อย่างรวดเร็ว

ในบทนี้ จะกล่าวถึงผลการวัดค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัส และวิจารณ์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะและประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน และเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียม

5.2 ผลการวัดค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัส

ตามที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 4 ในการคำนวณสมการที่ (4.27) และ (4.28) มีความจำเป็นต้องทราบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ซึ่งได้แก่ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางอะมอร์ฟัส และค่า Built-In Potential ของเซลล์แสงอาทิตย์ และสเปกตรัมผลตอบสนองต่อแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ (เพื่อหาฟังก์ชันอัตราส่วนของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ฯ) รูปที่ 5.1 แสดงขั้นตอนการวัดหาค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุพาหะ โดยมีรายละเอียดต่อไปนี้



รูปที่ 5.1 ขั้นตอนการวัดค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัส

5.2.1 การวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของอะมอร์ฟัส

การวัดค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสนั่นจะเริ่มจากการวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของอะมอร์ฟัสคือ

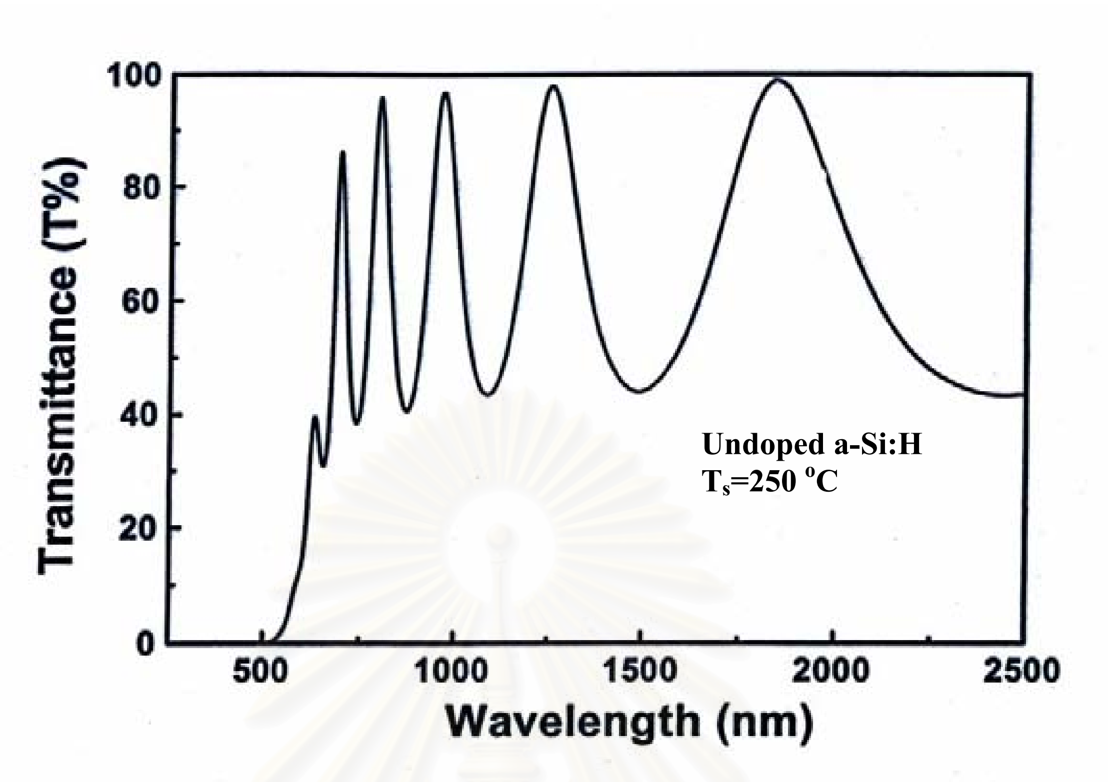
นำฟิล์ม a:Si:H ที่มีเงื่อนไขการปลูกเช่นเดียวกับชั้น i เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัส มาวัดสัมประสิทธ์การทะลุผ่านแสง (Transmittance T%) ด้วยเครื่อง UV Spectrophotometer ตรา Shimadzu ซึ่งติดตั้งอยู่ที่ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยดังแสดงในรูปที่ 5.2 และค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านแสงที่วัดได้สามารถนำไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของอะมอร์ฟัส [7]

รูปที่ 5.3 เป็นผลของการนำฟิล์ม a:Si:H ที่มีเงื่อนไขการปลูกเช่นเดียวกับชั้น i เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนมาวัดมาวัดสัมประสิทธ์การทะลุผ่านแสง (Transmittance T%) ซึ่งจากรูปพบว่าที่ความยาวคลื่นยาว (มากกว่า 500 nm) จะสามารถทะลุผ่านฟิล์ม a:Si:H ได้ เพราะในช่วงนี้มีพลังงานโฟตอนต่ำกว่าค่าช่องว่างพลังงาน (E_{opt})ของ a:Si:H และที่ความยาวคลื่นยาวจะมีรูปการทะลุผ่านคล้ายรูปฟังก์ชันcosine เพราะเกิดการแทรกสอดภายในเนื้อฟิล์มนั้นเอง

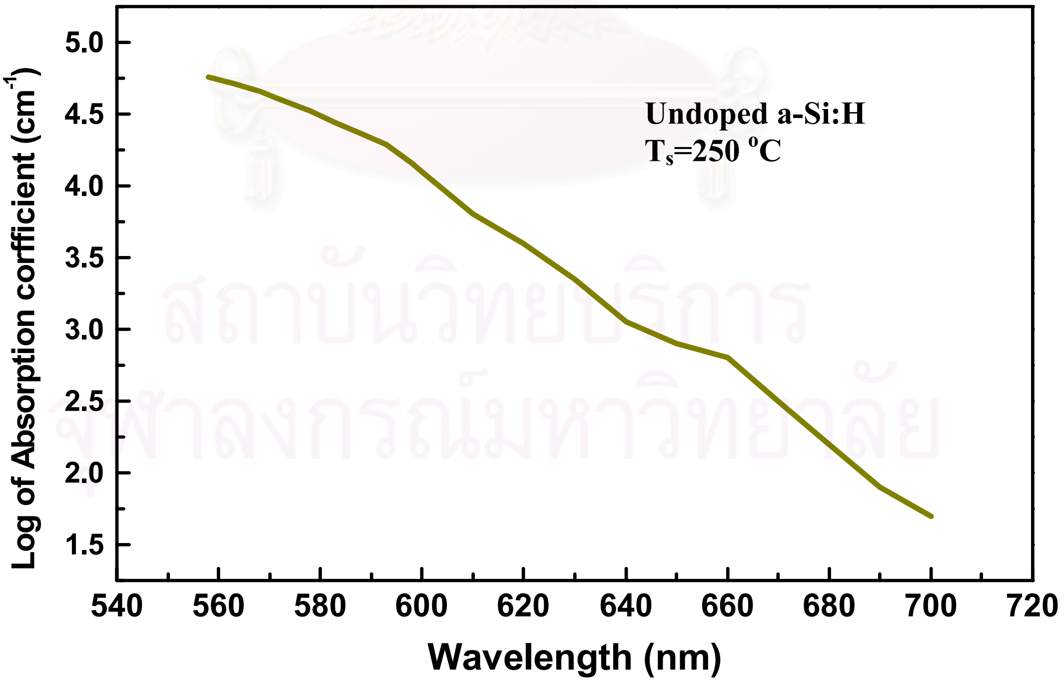
รูปที่ 5.4 เป็นผลของการวัดค่าสเปกตรัมของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (α) ของฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอน ซึ่งได้จากการนำค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านแสงในรูปที่ 5.3 มาคำนวณซึ่งจากรูปที่5.4 พบว่าที่ความยาวคลืนยาวจะมีพลังงานของโฟตอนมีค่าต่ำ จึงทำให้สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (α) ของฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอนมีค่าไม่สูง แต่ส่วนของความยาวคลืนสั้นนั้นพลังงานของโฟตอนมีค่าสูงจึงทำให้สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (α) ของฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอนมีค่าสูงด้วยนั้นเอง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 5.2 เครื่อง UV Spectrophotometer ตรา Shimadzu ซึ่งติดตั้งอยู่ที่ห้องปฏิบัติการวิจัย สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.3 ตัวอย่างสเปกตรัมสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านแสงของ a:Si:H ที่ปลูกด้วยวิธี Plasma CVD



รูปที่ 5.4 ตัวอย่างสเปกตรัมของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (α) ของฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.2.2 การวัดค่า Built-In Potential ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัส

เมื่อเราทราบค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของอะมอร์ฟัสแล้ว ขั้นต่อไปของการวัดค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัส นั่นคือจะทำการวัดค่า Built-In Potential ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสดังนี้

ในกรณีเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสได้มีการคิดค้นวิธีการวัดค่า Built-In Potential ที่เรียกว่า Back Surface Reflected Electro-absorption (BASREA) ซึ่งพัฒนาโดย Nonomure [8,9] ซึ่งเป็นเทคนิคการวัดสัญญาณแสงที่ถูกมอดูเลตโดยเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้วิธีการวัดดังนี้

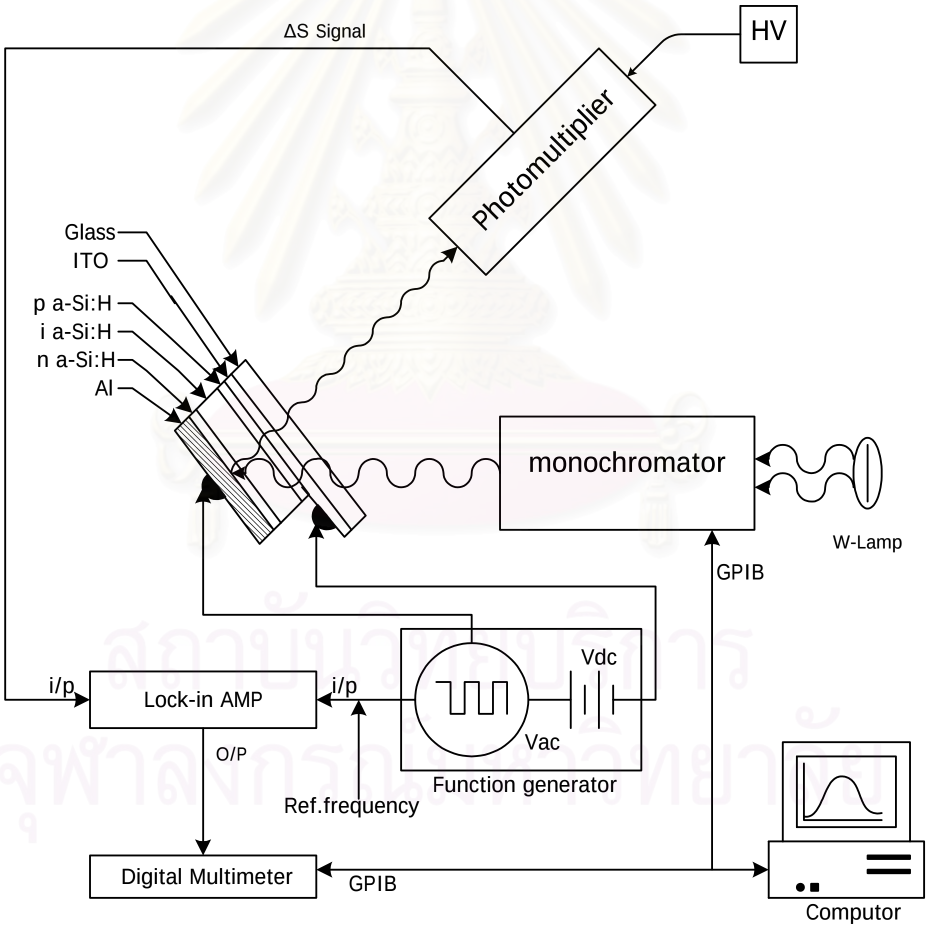
- ใช้สัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับคลื่นสี่เหลี่ยมความถี่ ประมาณ 1KHz และแรงดัน Vpp= 4V , 5V , 6V , 7V ป้อนเข้าสู่เซลล์แสงอาทิตย์ และขณะเดียวกัน ป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง V_{DC} แบบย้อนกลับพร้อม ๆ กัน
- ส่องแสงที่ผ่านการเลือกความยาวคลื่นแล้วเข้าสู่เซลล์แสงอาทิตย์
- วัดสัญญาณแสง (Δs) ที่สะท้อนออกจากเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งเป็นแสงสะท้อนที่ถูกทำมอดูเลตด้วยวิธี Electro-Absorption
- แอมพลิจูดของ Δs นี้จะแปรผันตรงกับ V_{DC} ที่ไบแอส ดังการพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Δs (แกนตั้ง) และ V_{DC} (แกนนอน) จะทำให้กราฟเป็นเส้นตรงและจุดตัดของกราฟในแกนนอนก็คือค่าศักย์ไฟฟ้าภายในนั้นเองซึ่งเป็นไปตามสมการ $\Delta S \propto V_{PP}(V_{DC} - V_b)$

เนื่องจากความเข้มของสัญญาณ ΔS มีค่าน้อยมาก ดังนั้นจึงต้องใช้โฟโตมัลติพลายเออร์เป็นอุปกรณ์ในการวัดแสงและใช้เทคนิคของ Lock-In Amplifier โดยมีความถี่ของสัญญาณคลื่นกระแสสลับสี่เหลี่ยมเป็นสัญญาณอ้างอิง

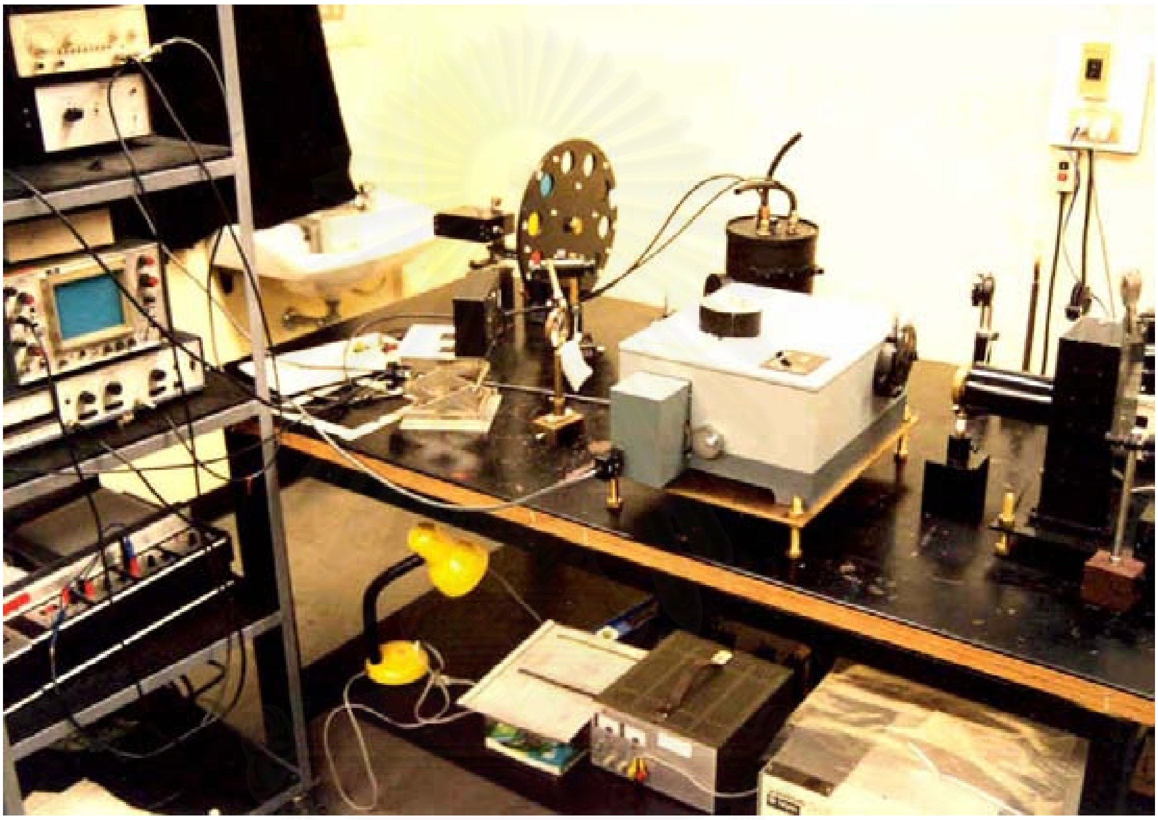
รูปที่ 5.5 แสดงรูปของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนที่ใช้เป็นตัวอย่างในการวัดค่า Built-In Potential ของเซลล์แสงอาทิตย์

รูปที่ 5.6 แสดงหลักการวัด BASREA และรูปที่ 5.7 แสดงภาพถ่ายของระบบที่สร้างขึ้นในวิทยานิพนธ์นี้

รูปที่ 5.5 ตัวอย่างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนที่ใช้ทดลองในวิทยานิพนธ์นี้

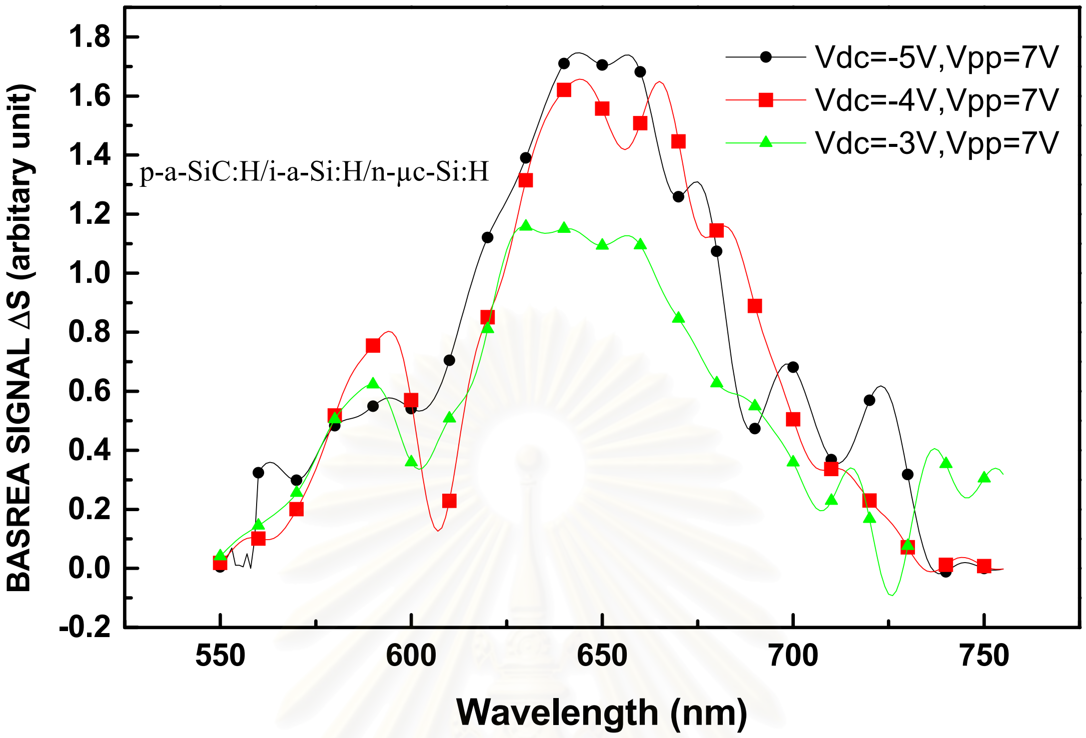


รูปที่ 5.6 ระบบการวัดศักย์ไฟฟ้าภายใน (Built-In Potential) ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสด้วยวิธี Back Surface Reflected Electro-Absorption (BASREA)

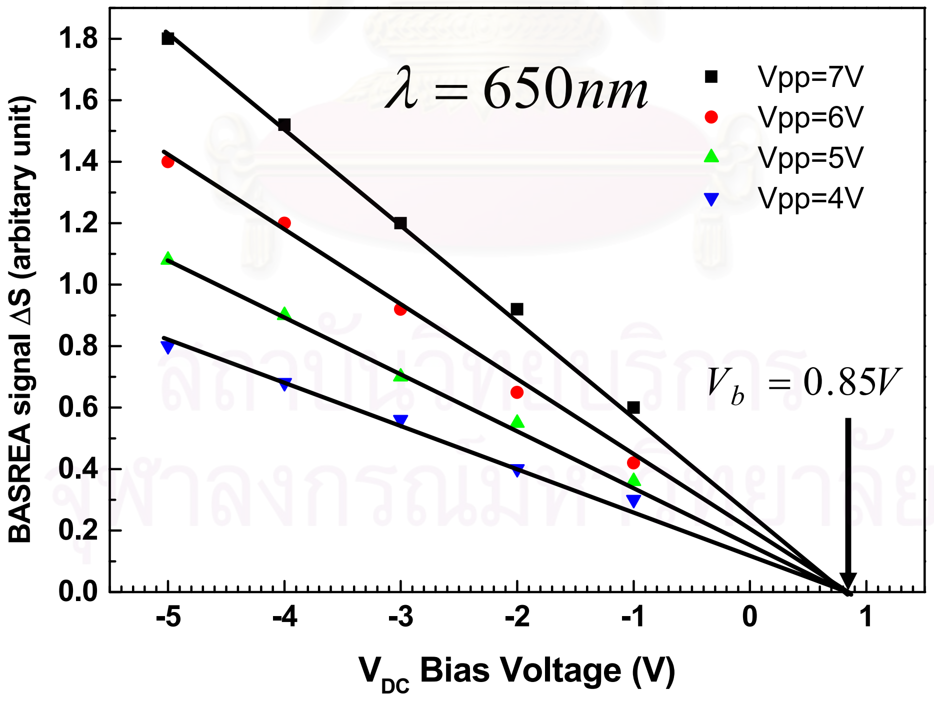


รูปที่ 5.7 ภาพถ่ายระบบการวัดศักย์ไฟฟ้าภายใน (Built-In Potential) ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสด้วยวิธี Back Surface Reflected Electro-Absorption (BASREA)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.8 ตัวอย่างผลการวัดสเปกตรัมของ BASREA (Δs) เซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 5.9 การกำหนดค่า Built-In Potential ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน โดยพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดของสัญญาณ ΔS และ V_{DC} ที่ป้อนเข้าสู่เซลล์แสงอาทิตย์ พารามิเตอร์ V_{PP} คือ แรงดันรูปคลื่นไซน์ ความถี่ 1 kHz

รูปที่ 5.8 แสดงสเปกตรัมผลการวัดสัญญาณ (ΔS) โดยใช้เงื่อนไขการวัดดังนี้ สัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับคลื่นสี่เหลี่ยมความถี่ ประมาณ 1KHz และแรงดัน Vpp= 4V , 5V , 6V , 7V ป้อนเข้าสู่เซลล์แสงอาทิตย์ และขณะเดียวกัน ป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง V_{DC} แบบย้อนกลับพร้อม ๆ กัน และยอดภูเขาจำนวนมากในรูปเกิดจากการแทรกสอดของสัญญาณแสง สเปกตรัมนี้มียอดที่แท้จริงอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 650 nm

รูปที่ 5.9 ถ้าเราเปลี่ยนค่าแรงดันไบแอสกลับ (V_{DC}) จะทำให้แอมพลิจูลของสัญญาณ (ΔS) เปลี่ยน โดยถ้าเพิ่มค่าแรงดันไบแอสกลับ (V_{DC}) แอมพลิจูลของสัญญาณ (ΔS) จะเพิ่มมากขึ้น และเมื่อนำค่าแอมพลิจูลของสัญญาณ (ΔS) และค่าแรงดันไบแอสกลับ (V_{DC}) มาพล็อตเป็นกราฟจะได้เป็นกราฟเส้นตรงดังแสดงในรูปที่ 5.9 โดยจากรูปนี้จุดตัดบนแกนนอนคือค่าศักย์ไฟฟ้าภายใน (Built-In Potential) ซึ่งได้ค่าประมาณ 0.85V $(\lambda = 650nm)$

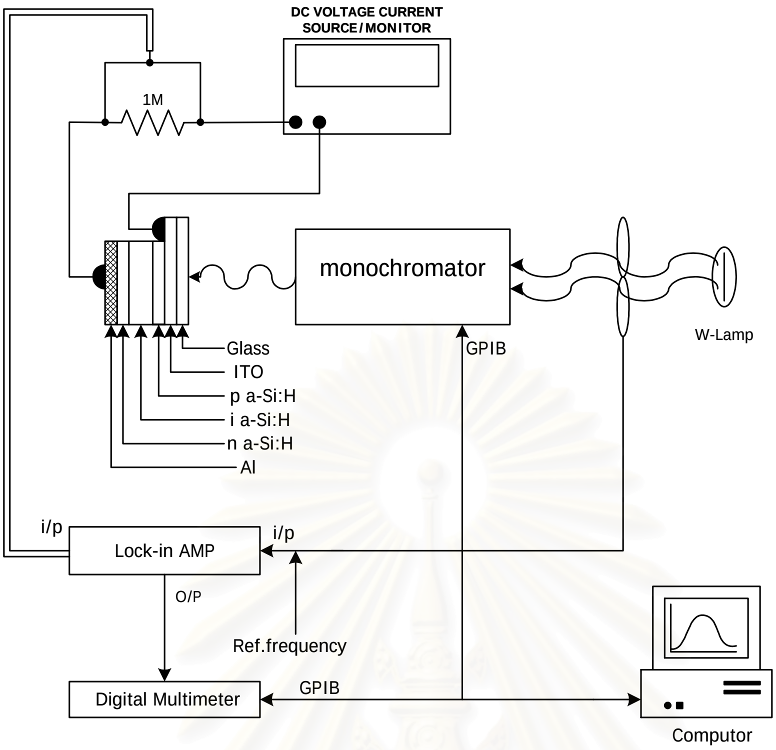
5.2.3 การวัดสเปกตรัมตอบสนองต่อแสงของเซลล์แสงอาทิตย์

จากหัวข้อที่ 5.2.1 และ 5.2.2 ที่ผ่านมาเราได้ทราบค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของฟิล์มอะมอร์ฟัส และค่าศักย์ไฟฟ้าภายใน (Built-In Potential) ของเซลล์แสงอาทิตย์แล้ว ขั้นต่อไปของการวัดค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัส นั่นคือจะทำการวัดสเปกตรัมตอบสนองต่อแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัส (เพื่อหาฟังก์ชันอัตราส่วนของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ฯ)

นำเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสดังแสดงในรูปที่ 5.5 มาวัดสเปกตรัมตอบสนองต่อแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสดังนี้

รูปที่ 5.10 แสดงวิธีการวัดสเปกตรัมผลตอบสนองต่อแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งขณะวัดสเปกตรัมได้ทำการป้อนแรงดันไฟฟ้าไบแอสเข้าสู่เซลล์แสงอาทิตย์ด้วย โดยทำการวัด 3 ครั้ง แต่ละครั้งไบแอสแบบตรง ไบแอสแบบย้อน และไม่ได้ไบแอส ตามลำดับ

รูปที่ 5.11 แสดงภาพถ่ายของระบบการวัดสเปกตรัมผลตอบสนองต่อแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสที่ใช้ในการวัดในวิทยานิพนธ์นี้



รูปที่ 5.10 ระบบการวัดสเปกตรัมผลตอบสนองต่อแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัส

รูปที่ 5.11 ภาพถ่ายระบบการวัดสเปกตรัมผลตอบสนองต่อแสง

ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัส

รูปที่ 5.12 แสดงผลการวัดสเปกตรัมผลตอบสนองต่อแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งใช้ค่าไบแอสตาม $V_F = 0.4V$ ไบแอสย้อน$V_R = -1V$ และไม่ได้ไบแอส $V_0 = 0V$ ตามลำดับ จากรูปนี้จะเห็นได้ว่าแรงดันที่ตกลงในช่วงความยาวคลื่นแสงยาว นั้นเกิดจากการที่ชั้น i ดูดกลืนแสงในช่วงนี้ได้ต่ำ และสังเกตเห็นว่าที่ความยาวคลื่นสั้นๆ แรงดันที่ได้จะมีค่าน้อย อาจเกิดจากการดูดกลืนของชั้น ITO มีมากในช่วงนี้ทำให้แสงที่ไปถึงชั้น i ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสได้น้อยลงนั้นเอง

จากรูปที่ 5.12 นำผลการวัดสเปกตรัมผลตอบสนองต่อแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ ไปหาค่าฟังก์ชันอัตราส่วนของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าระหว่างที่ให้ไบแอสตามและ ไบแอสย้อนกลับเทียบกับที่ไม่ได้ไบแอส $(\frac{J(\lambda,V_A)}{J_0(\lambda,0)})$

ส่วนผลการหาฟังก์ชันอัตราส่วนของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าระหว่างที่ให้ไบแอสตามและ ไบแอสย้อนกลับเทียบกับที่ไม่ได้ไบแอส โดยการวัดหา $\frac{J(\lambda,V_A)}{J_0(\lambda,0)}$ เราจะใช้การวัด $\frac{V(\lambda,V_A)}{V_0(\lambda,0)}$ แทนเพราะว่า

$$\frac{J(\lambda,V_A)}{J_0(\lambda,0)} = \frac{I(\lambda,V_A)/A}{I_0(\lambda,0)/A} = \frac{\frac{aV(\lambda,V_A)}{RA}}{\frac{aV_0(\lambda,0)}{RA}} = \frac{V(\lambda,V_A)}{V_0(\lambda,0)} \qquad (5.1)$$

โดยที่ I :กระแสไฟฟ้าที่ไบแอสต่าง ๆ

I_0 : กระแสไฟฟ้าที่ไบแอสเป็น 0 V

A : พื้นที่หน้าตัดของตัวความต้านทาน

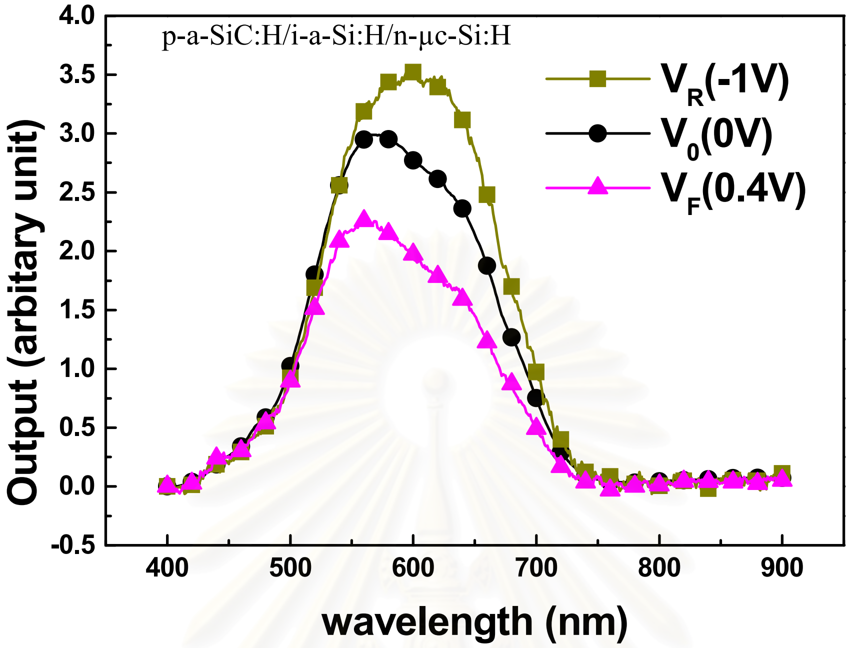
a :อัตราขยายของ Amplifier

R : ค่าความต้านทานที่วัดแรงดันตกคร่อม

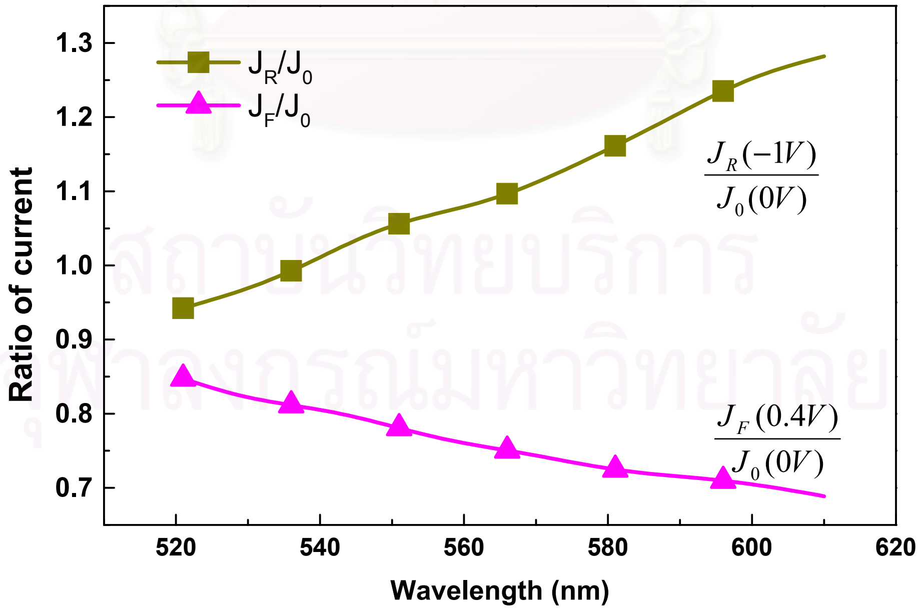
V : แรงดันที่ตกคร่อมความต้านทานที่ไบแอสต่าง ๆ

V_0 : แรงดันที่ตกคร่อมความต้านทานที่ไม่มีไบแอส

รูปที่ 5.13 แสดงผลการพล็อตกราฟสเปกตรัมผลตอบสนองต่อแสงจากรูปที่ 5.12 ในที่นี้แสดงค่า $\frac{J_F(0.4V)}{J_0(0)}$ และ $\frac{J_R(-1V)}{J_0(0)}$



รูปที่ 5.12 ผลการวัดสเปกตรัมผลตอบสนองต่อแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ กรณีไบแอสตาม 0.4 V ไบแอสย้อน –1 V และไม่ได้ไบแอส 0 V



รูปที่ 5.13 ผลการพล็อตกราฟสเปกตรัมผลตอบสนองต่อแสงจากรูปที่ 5.12 ในที่นี้แสดงค่า $\frac{J_F(0.4V)}{J_0(0)}$ และ $\frac{J_R(-1V)}{J_0(0)}$

5.2.4 การวัดค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะในเซลล์แสงอาทิตย์

ต่อจากนั้นนำค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของฟิล์มอะมอร์ฟัส และค่า Built-In Potential ของเซลล์แสงอาทิตย์ และสเปกตรัมผลตอบสนองต่อแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ที่วัดได้ทั้งหมดจากหัวข้อ 5.2.1 ถึง 5.2.3 ไปหาค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาของอายุพาหะต่อไป

ในการคำนวณหาค่า $\mu_n \tau_n$, $\mu_p \tau_p$, S_n และ s_p ได้ใช้โปรแกรม MATLAB ที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 4 (ตามแผนภูมิสายงานแบบง่ายที่แสดงในรูปที่ 5.14)

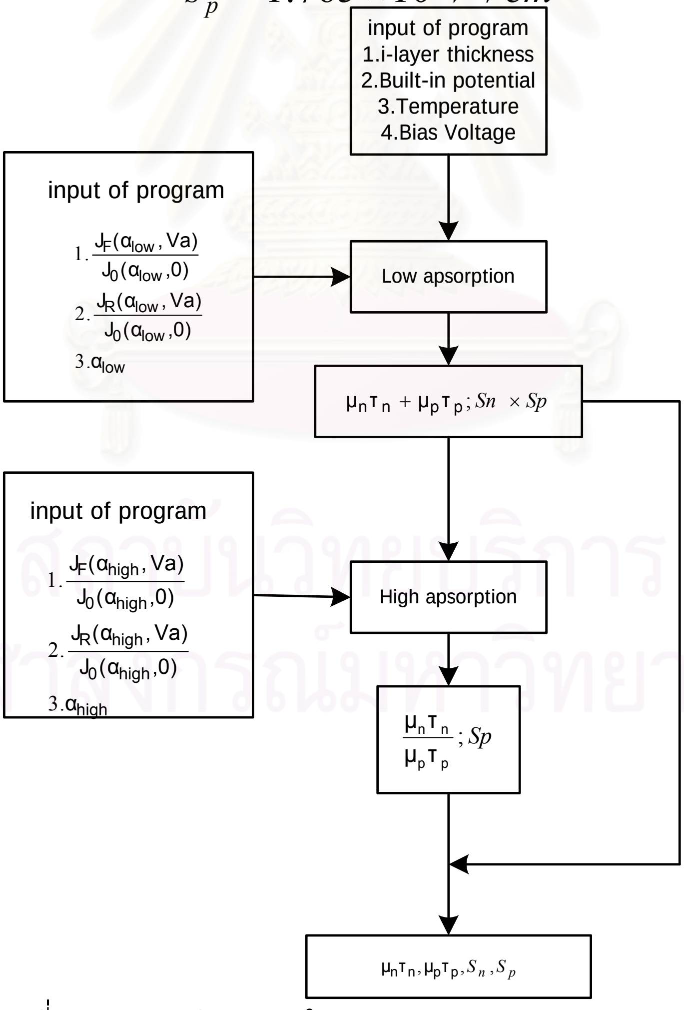
ตัวอย่างผลการคำนวณได้ดังนี้

$$\mu_n \tau_n = 1.057 \times 10^{-7} cm^2/V$$

$$\mu_p \tau_p = 5.148 \times 10^{-8} cm^2/V$$

$$s_n = 1.574 \times 10^4 V/cm$$

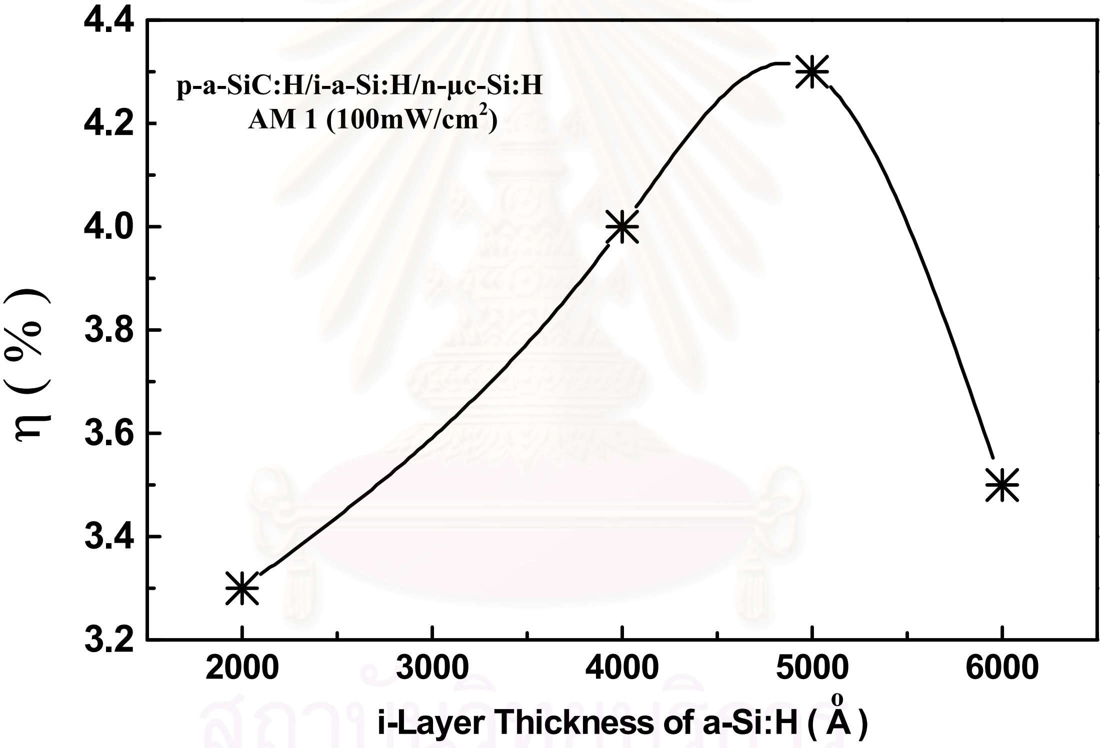
$$s_p = 1.765 \times 10^3 V/cm$$



รูปที่ 5.14 แผนภูมิสายงานในการหา $\mu_n \tau_n$, $\mu_p \tau_p$, S_n และ s_p

5.3 ผลการหาค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนที่มีประสิทธิภาพค่าต่าง ๆ

ในหัวข้อนี้จะนำค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนมาทำการเปรียบเทียบกับคุณภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีค่าประสิทธิภาพต่างๆเพื่อดูว่าค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สัมพันธ์กับค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนอย่างไร

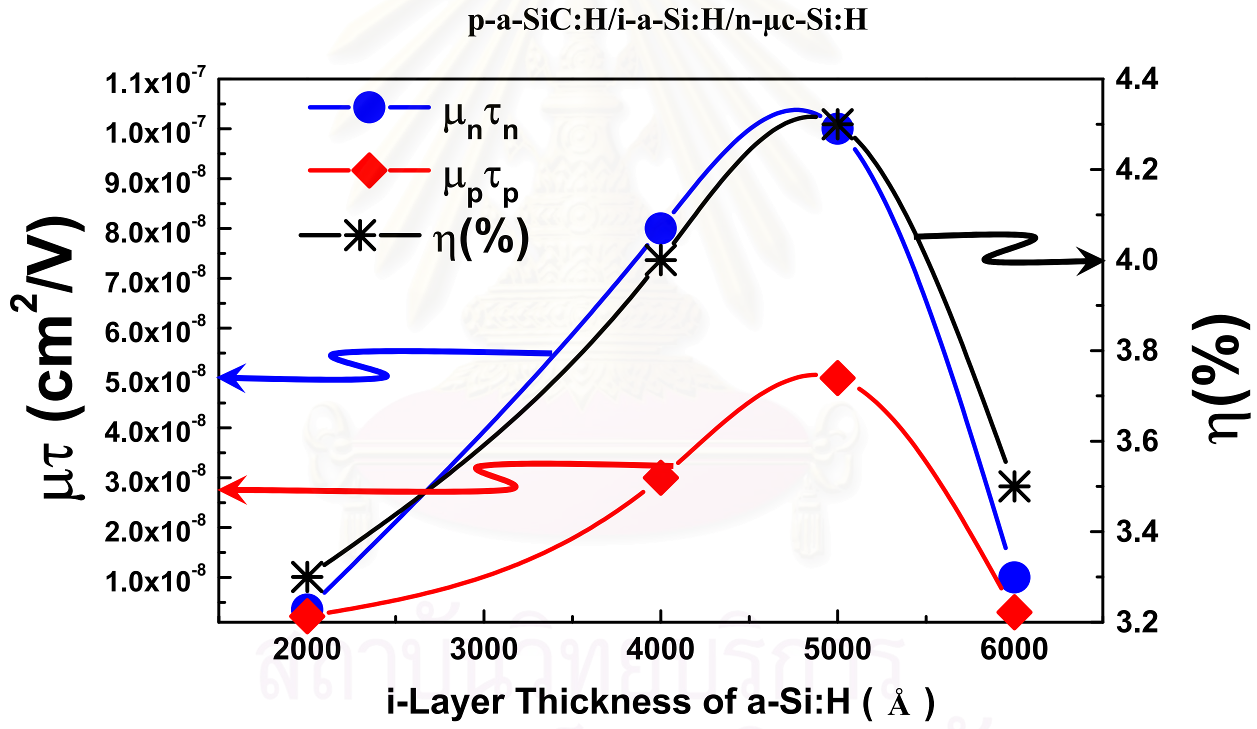


รูปที่ 5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน และความหนาของชั้น i

รูปที่ 5.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน และความหนาของชั้น i (โดยเซลล์แสงอาทิตย์ทุกตัวจะใช้เงื่อนไขในการผลิตเหมือนกันหมด ยกเว้นแต่จะทำการเปลี่ยนความหนาของชั้น i) จากรูปพบว่าเมื่อความหนาชั้น i เพิ่มขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนมีค่าสูงขึ้น เพราะว่าชั้น i ทำหน้าที่

ผลิตพาหะเนื่องจากแสง แต่เมื่อชั้น i หนาเกินไปจะทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนมีค่าลดลง เนื่องจากสนามไฟฟ้าในชั้น i น้อยลงจนไม่สามารถกวาดเอาพาหะที่เกิดขึ้นออกสู่ภายนอกได้หมด และจากรูปพบว่า ความหนาที่เหมาะของชั้น i ประมาณ 5000 Å

ต่อไปจะเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน และความหนาของชั้น i (โดยการหาค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนนั้นจะใช้หลักการวัดดังแสดงในหัวข้อ 5.2)



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะ
ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนและค่าประสิทธิภาพ
ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน กับความหนาของชั้น i

รูปที่ 5.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน และความหนาของชั้น i (โดยเซลล์แสงอาทิตย์ทุกตัวจะใช้เงื่อนไขในการผลิตเหมือนกันหมด ยกเว้นแต่จะทำการเปลี่ยนความหนาของชั้น i) และดูว่าค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนเปลี่ยนไปอย่างไร และจากรูปพบว่า

ที่ความหนาของชั้น i ที่มีค่าไม่มากนักค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะของทั้งอิเล็กตรอน $(\mu_n \tau_n)$ และโฮล $(\mu_p \tau_p)$ ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน มีค่าใกล้เคียงกัน และไม่สูง อาจเป็นเพราะในการปลูกชั้น i ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนขณะที่เริ่มปลูกนั้นเนื่องจากความหนาชั้น i ยังไม่มากทำให้มีอะตอมแปลกปลอมจากชั้น p เข้ามาในชั้น i ได้ ทำให้ชั้น i มีคุณภาพไม่ค่อยดีนัก ดังนั้นค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะของทั้งอิเล็กตรอน $(\mu_n \tau_n)$ และโฮล $(\mu_p \tau_p)$ ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนจึงมีค่าไม่ค่อยสูง

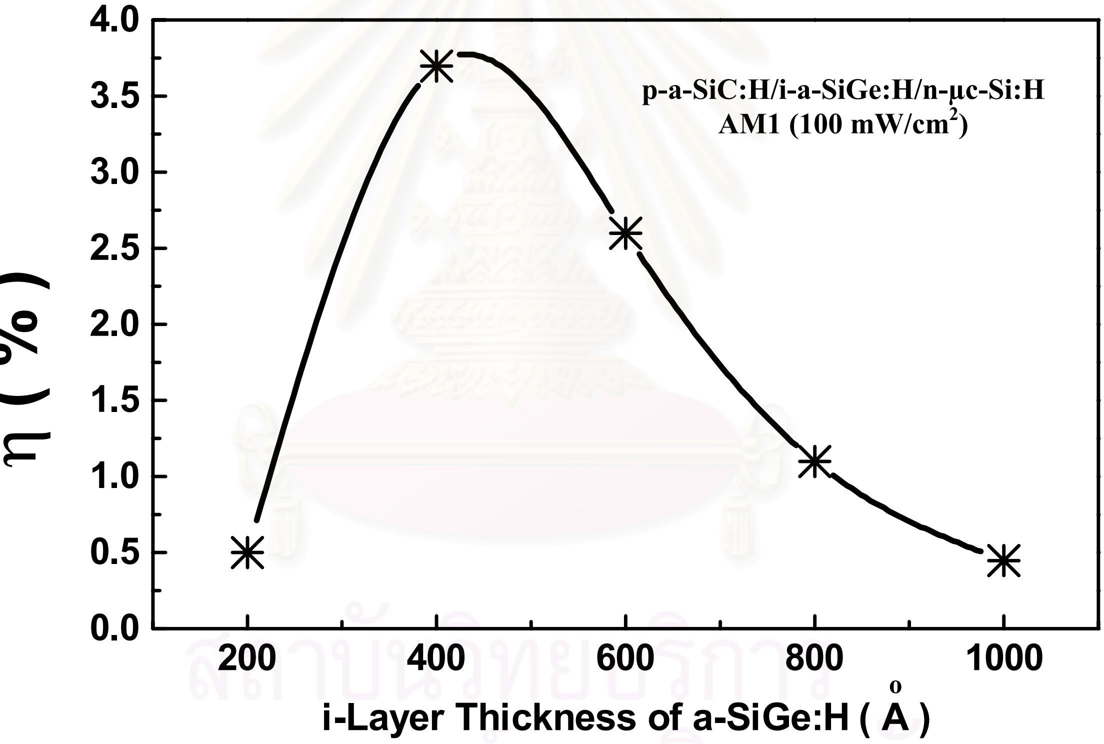
แต่เมื่อความหนาชั้น i มีค่ามากขึ้นจะทำให้อะตอมแปลกปลอมจากชั้น p เข้ามาในชั้น i ได้ยากขึ้นทำให้คุณภาพของชั้น i ดีขึ้นเมื่อชั้น i หนาขึ้นทำให้ค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะของทั้งอิเล็กตรอน $(\mu_n \tau_n)$ และโฮล $(\mu_p \tau_p)$ ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนมีค่าสูงขึ้นเมื่อชั้น i หนาขึ้น

แต่เมื่อชั้น i หนาเกินไปจะทำให้ค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะของทั้งอิเล็กตรอน $(\mu_n \tau_n)$ และโฮล $(\mu_p \tau_p)$ ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนมีค่าลดลงเนื่องจากสนามไฟฟ้าในชั้น i มีค่าลดลง [1] (ซึ่งเราทราบมาก่อนแล้วว่าค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนขึ้นกับสนามไฟฟ้าในชั้น i ด้วย) และจากรูปที่ 5.16 ความหนาที่เหมาะของชั้น i ประมาณ 5000 Å เพราะให้ค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะของทั้งอิเล็กตรอน $(\mu_n \tau_n)$ และโฮล $(\mu_p \tau_p)$ ที่มีค่าสูง

เมื่อปรียบเทียบผลการวัดความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน และความหนาของชั้น i กับผลการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน และความหนาของชั้น i ดังรูปที่ 5.16 นั้นพบว่าให้ผลที่สอดคล้องกันโดยค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน นั่นจะแสดงคุณภาพของเซลล์แสงอาทิตย์โดยรวม ส่วนค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน นั่นจะเป็นการแสดงคุณภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เจาะจงลงไปอีกโดยแสดงให้เห็นว่าคุณภาพของชั้น i เป็นอย่างไรเมื่อความหนาของชั้น i เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจะมีประโยชน์ในการวิเคราะห์เป็นอย่างมาก

5.4 ผลการหาค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียมที่มีประสิทธิภาพค่าต่าง ๆ

ในหัวข้อนี้จะนำค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียมมาทำการเปรียบเทียบกับคุณภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีค่าประสิทธิภาพต่างๆเพื่อดูว่าค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สัมพันธ์กับค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียมอย่างไร

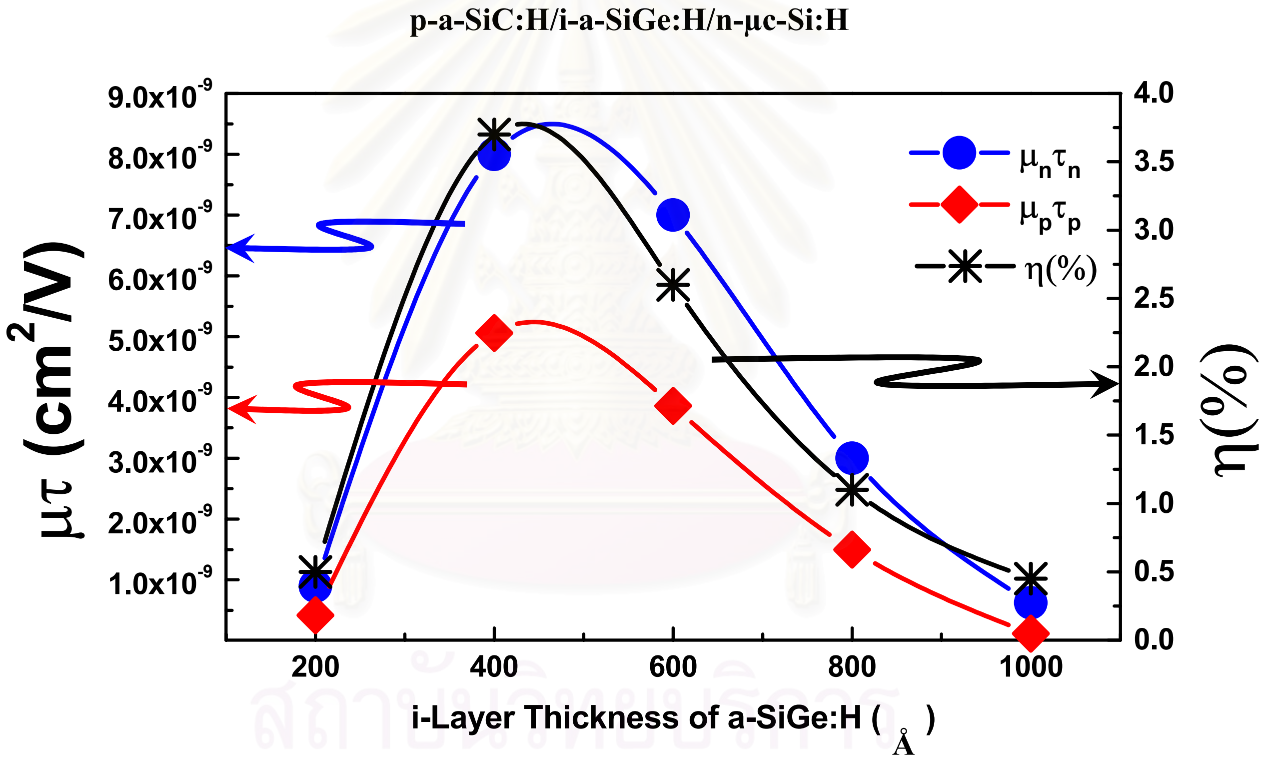


รูปที่ 5.17 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลอคอนเจอร์เมเนียม และความหนาของชั้น i

รูปที่ 5.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียม และความหนาของชั้น i (โดยเซลล์แสงอาทิตย์ทุกตัวจะใช้เงื่อนไขในการผลิตเหมือนกันหมด ยกเว้นแต่จะทำการเปลี่ยนความหนาของชั้น i) จากรูปพบว่าเมื่อความหนาชั้น i เพิ่มขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนมีค่าสูงขึ้น เพราะว่าชั้น i

ทำหน้าที่ผลิตพาหะเนื่องจากแสง แต่เมื่อชั้น i หนาเกินไปจะทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียมมีค่าลดลง เนื่องจากสนามไฟฟ้าในชั้น i น้อยลงจนไม่สามารถกวาดเอาพาหะที่เกิดขึ้นออกสู่ภายนอกได้หมด และจากรูปพบว่าที่ความหนาที่เหมาะของชั้น i ประมาณ 400 Å

ต่อไปจะเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียม และความหนาของชั้น i (โดยการหาค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียมนั่นจะใช้หลักการวัดดังแสดงในหัวข้อ 5.2)



รูปที่ 5.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียมและค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียม กับความหนาของชั้น i

รูปที่ 5.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียม และความหนาของชั้น i (โดยเซลล์

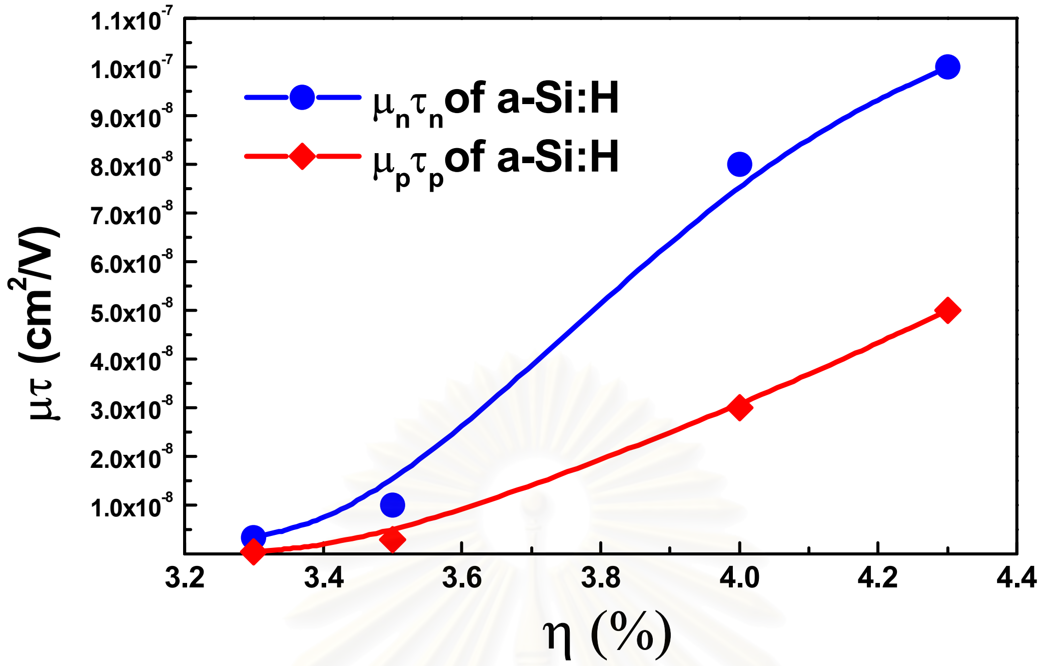
แสงอาทิตย์ทุกตัวจะใช้เงื่อนไขในการผลิตเหมือนกันหมด ยกเว้นแต่จะทำการเปลี่ยนความหนาของชั้น i) และดูว่าค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียม เปลี่ยนไปอย่างไร และจากรูปพบว่า

ที่ความหนาของชั้น i ที่มีค่าไม่มากนักค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะของทั้งอิเล็กตรอน $(\mu_n \tau_n)$ และโฮล $(\mu_p \tau_p)$ ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียมมีค่าใกล้เคียงกัน และไม่สูง อาจเป็นเพราะในการปลูกชั้น i ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียม ขณะที่เริ่มปลูกนั้นเนื่องจากความหนาชั้น i ยังไม่มากทำให้มีอะตอมแปลกปลอมจากชั้น p เข้ามาในชั้น i ได้ ทำให้ชั้น i มีคุณภาพไม่ค่อยดีนัก ดังนั้นค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะของทั้งอิเล็กตรอน $(\mu_n \tau_n)$ และโฮล $(\mu_p \tau_p)$ ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียมจึงมีค่าไม่ค่อยสูง

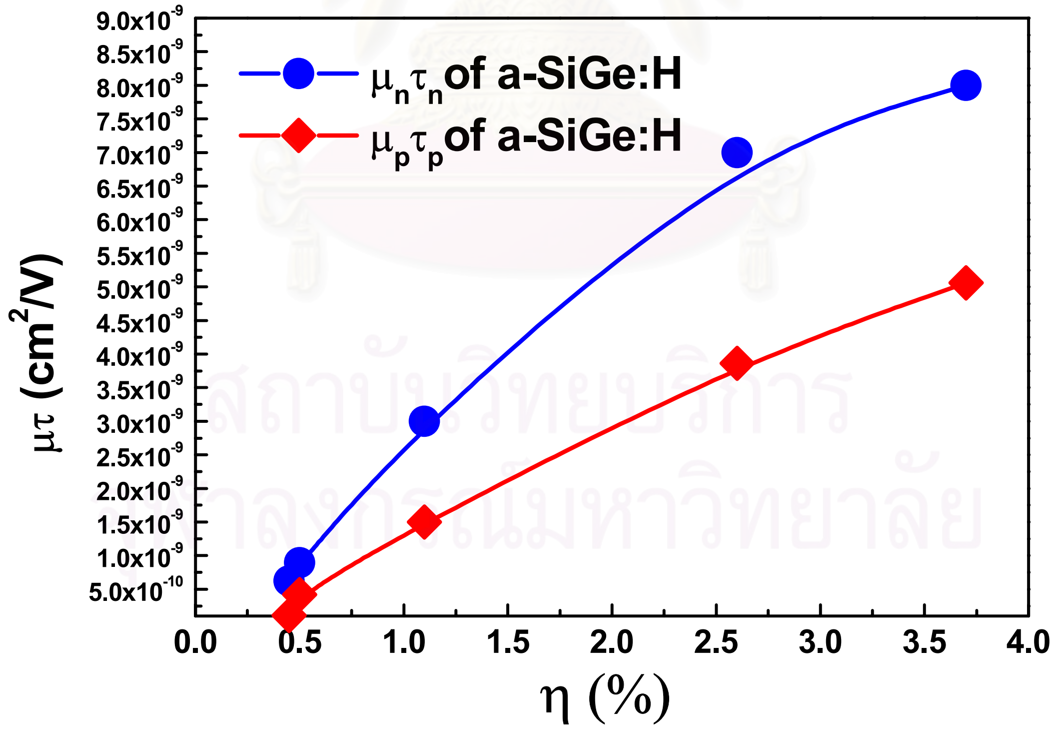
แต่เมื่อความหนาชั้น i มีค่ามากขึ้นจะทำให้อะตอมแปลกปลอมจากชั้น p เข้ามาในชั้น i ได้ยากขึ้นทำให้คุณภาพของชั้น i ดีขึ้นเมื่อชั้น i หนาขึ้นทำให้ค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะของทั้งอิเล็กตรอน $(\mu_n \tau_n)$ และโฮล $(\mu_p \tau_p)$ ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียมมีค่าสูงขึ้นเมื่อชั้น i หนาขึ้น

แต่เมื่อชั้น i หนาเกินไปจะทำให้ค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะของทั้งอิเล็กตรอน $(\mu_n \tau_n)$ และโฮล $(\mu_p \tau_p)$ ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียมมีค่าลดลง เนื่องจากสนามไฟฟ้าในชั้น i มีค่าลดลง [1] (ซึ่งเราทราบมาก่อนแล้วว่าค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียมขึ้นกับสนามไฟฟ้าในชั้น i ด้วย) และจากรูปที่ 5.18 ความหนาที่เหมาะของชั้น i ประมาณ 400 Å เพราะให้ค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะของทั้งอิเล็กตรอน $(\mu_n \tau_n)$ และโฮล $(\mu_p \tau_p)$ มีค่าสูง

เมื่อปรียบเทียบผลการวัดความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียม และความหนาของชั้น i กับผลการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียมและความหนาของชั้น i ดังรูปที่ 5.18 นั่นพบว่าให้ผลที่สอดคล้องกันโดยค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียม นั่นจะแสดงคุณภาพของเซลล์แสงอาทิตย์โดยรวม ส่วนค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียมในรูปที่ 5.18 นั่นจะเป็นการแสดงคุณภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เจาะจงลงไปอีกโดยแสดงให้เห็นว่าคุณภาพของชั้น i เป็นอย่างไรเมื่อความหนาของชั้น i เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจะมีประโยชน์ในการวิเคราะห์เป็นอย่างมาก



รูปที่ 5.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะทั้ง อิเล็กตรอนและโฮล ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H กับค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 5.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะทั้ง อิเล็กตรอนและโฮล ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-SiGe:H กับค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 5.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะทั้งอิเล็กตรอน $(\mu_n \tau_n)$ และโฮล $(\mu_p \tau_p)$ ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H กับค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งประสิทธิภาพของเซลล์ฯแต่ละตัวเปลี่ยนแปลงโดยการเปลี่ยนความหนาของชั้น i ของเซลล์ฯ และจากรูปพบว่าค่า $(\mu_n \tau_n)$ และ $(\mu_p \tau_p)$ จะมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าต่ำ และในทางกลับกัน ค่า $(\mu_n \tau_n)$ และ $(\mu_p \tau_p)$ จะมีค่าห่างกันเมื่อเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าประสิทธิภาพสูงขึ้น เนื่องจากเมื่อเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีค่าประสิทธิภาพต่ำนั้นคุณภาพของชั้น i มีค่าไม่ค่อยสูง ดังนั้นค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะทั้งอิเล็กตรอน $(\mu_n \tau_n)$ และโฮล $(\mu_p \tau_p)$ ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H มีค่าไม่แตกต่างนัก และค่า $(\mu_n \tau_n)$ และ $(\mu_p \tau_p)$ จะมีค่าแตกต่างกันเมื่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เริ่มมีค่าสูงเนื่องจากเมื่อเซลล์แสงอาทิตย์ที่เริ่มมีค่าประสิทธิภาพสูงนั้นคุณภาพของชั้น i มีค่าค่อนข้างดี ดังนั้นค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะทั้งอิเล็กตรอน $(\mu_n \tau_n)$ และโฮล $(\mu_p \tau_p)$ ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H มีความแตกต่าง

รูปที่ 5.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะทั้งอิเล็กตรอน $(\mu_n \tau_n)$ และโฮล $(\mu_p \tau_p)$ ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-SiGe:H กับค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งประสิทธิภาพของเซลล์ฯแต่ละตัวเปลี่ยนแปลงโดยการเปลี่ยนความหนาของชั้น i ของเซลล์ฯ จากรูปพบว่าค่า $(\mu_n \tau_n)$ และ $(\mu_p \tau_p)$ จะมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าต่ำ และในทางกลับกัน ค่า $(\mu_n \tau_n)$ และ $(\mu_p \tau_p)$ จะมีค่าห่างกันเมื่อเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าประสิทธิภาพสูงขึ้น

และจากรูปที่ 5.19 และ 5.20 ยังพบอีกว่าค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะของทั้งอิเล็กตรอน $(\mu_n \tau_n)$ และโฮล $(\mu_p \tau_p)$ ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนมีค่าสูงกว่าในกรณีเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียม เนื่องจากว่าในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ซิลิคอนจะมีชั้น i ที่มีความบริสุทธิ์มากกว่าชั้น i ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียม (ชั้น i ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียมจะมีเจอร์เมเนียมผสมอยู่ด้วย) ทำให้พาหะเคลื่อนที่ได้ช้าในกรณีของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียมเป็นผลให้ค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะของทั้งอิเล็กตรอน $(\mu_n \tau_n)$ และโฮล $(\mu_p \tau_p)$ ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียมต่ำกว่าในกรณีเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน

5.5 สรุป

ประสบความสำเร็จในการวัดค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะในกรณีของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน และในกรณีของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียม

และพบว่าค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนกับค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนเป็นค่าที่สอดคล้องกันโดยถ้าค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าสูงหรือต่ำ แล้วค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะของเซลล์แสงอาทิตย์ก็จะมีค่าสูงหรือต่ำตามไปด้วย แต่ค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะของเซลล์แสงอาทิตย์จะแสดงคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ลึกกว่าค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

ยิ่งกว่านั้นยังพบว่าค่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียมกับค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียมเป็นค่าที่สอดคล้องกัน

ค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนมีค่าสูงกว่าค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียมเพราะว่าชั้น i ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอนเจอร์เมเนียมมีอะตอมเจอร์เมเนียมผสมอยู่นั้นเองในขณะที่ชั้น i ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน ไม่มีนั้นเอง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

สรุป

ผลการวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ได้ศึกษาเทคนิคการวัดหาค่า $\mu\tau$ ด้วย แบบจำลอง "Variable Minority Transport Model" และเขียนโปรแกรม MATLAB ที่สามารถคำนวณได้อย่างรวดเร็ว
2. ได้ศึกษาและวัดหาค่าตัวแปรเบื้องต้น ได้แก่ สเปกตรัมสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของฟิล์มอะมอร์ฟัสซิลิคอน ค่า Built-In Potentail และสเปกตรัมผลตอบสนองต่อแสงของเซลล์แสงอาทิตย์
3. ได้วัดหาค่า $\mu_n\tau_n$ และ $\mu_p\tau_p$ ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si:H และ a-SiGe:H
4. ผลการศึกษาพบว่า เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูง จะมีค่า $\mu_n\tau_n$ และ $\mu_p\tau_p$ ที่มีค่าสูง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

1. ดุสิต เครืองาม. สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ เล่ม 2. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
2. Kruangam, D., T. Sujaridchai, K. Chirakawikul, B. Ratwises and S. Panyakeow. Novel Amorphous Silicon Alloy Optoelectronic Integrated Circuits. Journal of Non-Crystalline Solids 227-230 (1998): 1146-1150.
3. Boonkosum, W., D. Kruangam and S.Panyakeow. Amorphous Visible-Light Thin Film Light-Emitting Diode Having a-SiN:H as a Luminescent Layer. Japanese Journal of Applied Physics 32 (1993): 1534-1538.
4. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว, ดุสิต เครืองาม, มนตรี สวัสดิ์ศฤงฆาร, ธารา ชลปราณี, Toyosaka Moriizumi. การประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ราคาถูกแบบฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอน รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ เสนอสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ,2533
5. H.OKAMOTO, H.KIDA, S.NONOMURA and Y.HAMAKAWA. Variable Minority Carrier Transport Model For Amorphous Silicon Solar Cells. Solar Cells 4 (1983) : 317-336.
6. H.OKAMOTO, H.KIDA, S.NONOMURA , K.FUKUMOTO and Y.HAMAKAWA. Mobility-Lifetime Product and Interface Property in Amorphous Silicon Solar Cells. Journal of Applied Physics 6 (1983): 3236-3243.
7. Lufty,W. and S.Tsuso. Hydrogenated Amorphous Silicon Alloy Deposition Process, New York:Marcel Dekker, 1993.
8. ดุสิต เครืองาม. การวัด Built-in Potential ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 14 ณ คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, หาดใหญ่, วันที่ 7-8 พฤศจิกายน 2534, หน้า 251-256
9. S.Nonomura, H.Okamoto and Y.Hamakawa. Determination of the Built-in Potential in a-Si:H Solar Cell by Electroabsorption Method. Japanese Journal of Applied Physics 8 (1982): L464-L466.

ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

โปรแกรมการวัดค่าผลคูณความคล่องตัวและเวลาอายุพาหะของเซลล์แสงอาทิตย์ (MAT LAB)

```
%Program by Jakapan Chantana
clc
clear
fprintf('                Program find UTn,UTp\n')
fprintf(' \n')
W0=0.434294;%แทนค่าLog e
AC=1E-08;
JR=100;
fprintf('--------------------ใส่ค่าเริ่มต้นในการคำนวณ------------------------\n')
%------------------ใส่ค่าเริ่มต้นในการคำณวน--------------------
%SMM=input('Name of your sample=');
L0=input('Depth of i-layer(A)=');%ความหนาชั้นi
VB=input('Internal voltage(V)=');%แรงดันภายใน
T=input('Temperature(C)=');%T ขณะปลูก
%IL=input('What layer which exposure by ligth(P=0/N=1)=');
V(1)=input('Forward bias voltage(V)=');%แรงดันforward cell
V(3)=input('Reverse bias voltage(V)=');%แรงดันreverse cell
V(2)=0;%ค่าที่ป้อนแรงดัน 0V แก่ cell
disp('*******************Low asorbtion************************');
QE(1,1)=input('Log of absortion coefficiency=');
QY0(1)=input('Ratio of current at forward=');
QZ0(1)=input('Ratio of current at reverse=');
disp('******************High absorbtion**********************');
QE(1,2)=input('Log of absortion coefficiency=');
QY0(2)=input('Ratio of current at forward=');
QZ0(2)=input('Ratio of current at reverse=');
fprintf('---------------------จบการใส่ค่าเริ่มต้น-------------------------\n')
fprintf(' \n')
fprintf('******************Result from calculation***************\n')
M=1;
```

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```
IL=0;
K=1;%ค่าUTn/UTp
G6=1;
QY00=QY0(1);%ค่าที่วัดJf/Jscที่low asorbtion
QZ00=QZ0(1);%ค่าที่วัดJr/Jscที่low asorbtion
%IXC=-7;
%ISS=2;
%JSS=0.25;
GMIN=2;
GMAX=10;
V1=V(1);
V3=V(3);
V2=V(2);
QE11=QE(1,1);
QE12=QE(1,2);
SSG=0;
RT=10^SSG;
G1=1;
GXX=0;
SG=GXX;
%clc
[GXX,SSG]=MINI(W0,M,K,G6,GMIN,GMAX,RT,SG,L0,VB,T,IL,V1,V3,V2,QE11,QY00,QZ00,QE12);%
        หาค่าlog(Sn*Sp),log(UTn+UTp)
QY00=QY0(2);%ค่าที่วัดJf/Jscที่high asorbtion
QZ00=QZ0(2);%ค่าที่วัดJf/Jscที่high asorbtion
RT=10^SSG;
A=SSG;
B=GXX;
SG=GXX;
GMAX=7;
GMIN=2;
G6=1;
M=2;
%clc
```

```
[GXX,SSG]=MINI(W0,M,K,G6,GMIN,GMAX,RT,SG,L0,VB,T,IL,V1,V3,V2,QE11,QY00,QZ00,QE12);%
        หาค่าlog(Sp),log(UTn/UTp)
C=SSG;
D=GXX;
AA=10^A;%ค่าUTn+UTp
BB=10^B;%ค่าSn*Sp
CC=10^C;%ค่าUTn/UTp
DD=10^D;%ค่าSp
UTp=AA/(CC+1);
UTn=AA-UTp;
Sp=DD;
Sn=BB/Sp;
fprintf('UTp=%ecm^2/V        UTn=%ecm^2/V\n',UTp,UTn)
fprintf('Sp=%eV/cm          Sn=%eV/cm\n',Sp,Sn)
fprintf('******************The END of calculation***************\n')

function[GXX,SSG]=MINI(W0,M,K,G6,GMIN,GMAX,RT,SG,L0,VB,T,IL,V1,V3,V2,QE11,QY00,QZ00,QE
        12)
G6=1;
G1=1;
GXX=GMIN;
if M==1
   [GYY,QXCC,I5]=GMODE1(G6,G1,GXX,W0,K,RT,SG,L0,VB,T,IL,V1,V3,V2,QY00,QZ00,QE11);
   QXC(I5)=QXCC;
else
   [GYY,QXCC,I5]=GMODE2(G6,G1,GXX,W0,K,RT,SG,L0,VB,T,IL,V1,V3,V2,QY00,QZ00,QE12);
   QXC(I5)=QXCC;
end
GY(1)=GYY;
GX(1)=GXX;
G1=4;
GXX=GMAX;
if M==2
   G6=1;
end
```

```
if M==1
   [GYY,QXCC,I5]=GMODE1(G6,G1,GXX,W0,K,RT,SG,L0,VB,T,IL,V1,V3,V2,QY00,QZ00,QE11);
   QXC(I5)=QXCC;
else
   [GYY,QXCC,I5]=GMODE2(G6,G1,GXX,W0,K,RT,SG,L0,VB,T,IL,V1,V3,V2,QY00,QZ00,QE12);
   QXC(I5)=QXCC;
end
GY(4)=GYY;
GX(4)=GXX;
v=2;
for G1=2:3
   if v==2
      GX(G1)=(G1-1)/3*(GMAX-GMIN)+GMIN;
      GXX=GX(G1);
      if M==1
         [GYY,QXCC,I5]=GMODE1(G6,G1,GXX,W0,K,RT,SG,L0,VB,T,IL,V1,V3,V2,QY00,QZ00,QE11);
         QXC(I5)=QXCC;
      else
         [GYY,QXCC,I5]=GMODE2(G6,G1,GXX,W0,K,RT,SG,L0,VB,T,IL,V1,V3,V2,QY00,QZ00,QE12);
         QXC(I5)=QXCC;
      end
   end
      GY(G1)=GYY;
      if GY(G1-1)<GY(G1)
         v=1;
         GMINI=1;
         GMAXI=G1;
         break
      end
end
if v==2
   GMINI=2;
   GMAXI=4;
end
%for G7=1:21
```

```
 %   for G8=1:3
  %      QR(G7,G8,1)=QR(G7,G8,GMINI);
   %     QR(G7,G8,4)=QR(G7,G8,GMAXI);
   %end
   %end
%for G7=1:21
 %   for G8=1:3
  %      for G9=2:3
   %          QR(G7,G8,G9)=0;
   %    end
   % end
   %end
GMAX=GX(GMAXI);
GMIN=GX(GMINI);
GY(1)=GY(GMINI);
GY(4)=GY(GMAXI);
GX(1)=GMIN;
GX(4)=GMAX;
GY1=GY(1);
GY4=GY(4);
GX1=GX(1);
GX4=GX(4);
%zzz=0;
while ~(GMAX-GMIN<=.05)
    %zzz=zzz+1
    %DG=GMAX-GMIN
    v=2;
for G1=2:3
    if v==2
        GX(G1)=(G1-1)/3*(GMAX-GMIN)+GMIN;
        GXX=GX(G1);
        if M==1
            [GYY,QXCC,I5]=GMODE1(G6,G1,GXX,W0,K,RT,SG,L0,VB,T,IL,V1,V3,V2,QY00,QZ00,QE11);
            QXC(I5)=QXCC;
        else
```

```
          [GYY,QXCC,I5]=GMODE2(G6,G1,GXX,W0,K,RT,SG,L0,VB,T,IL,V1,V3,V2,QY00,QZ00,QE12
          QXC(I5)=QXCC;
        end
    end
        GY(G1)=GYY;
        if GY(G1-1)<GY(G1)
          v=1;
          GMINI=1;
          GMAXI=G1;
          break
        end
end
if v==2
    GMINI=2;
    GMAXI=4;
end
%for G7=1:21
 %   for G8=1:3
  %      QR(G7,G8,1)=QR(G7,G8,GMINI);
   %     QR(G7,G8,4)=QR(G7,G8,GMAXI);
   %end
   %end
%for G7=1:21
 %   for G8=1:3
  %      for G9=2:3
   %         QR(G7,G8,G9)=0;
   %    end
   % end
   %end
GMAX=GX(GMAXI);
GMIN=GX(GMINI);
GY(1)=GY(GMINI);
GY(4)=GY(GMAXI);
GX(1)=GMIN;
GX(4)=GMAX;
```

```
end
%DG=GMAX-GMIN
GXX=(GMAX+GMIN)*.5;%ค่าlog(Sn*Sp)ในLow absorbtionหรือlog(Sp)ในHigh absorbtion
if M==1
   [GYY,QXCC,I5]=GMODE1(G6,G1,GXX,W0,K,RT,SG,L0,VB,T,IL,V1,V3,V2,QY00,QZ00,QE11);
   QXC(I5)=QXCC;
else
   [GYY,QXCC,I5]=GMODE2(G6,G1,GXX,W0,K,RT,SG,L0,VB,T,IL,V1,V3,V2,QY00,QZ00,QE12);
   QXC(I5)=QXCC;
end
SSG=QXC(I5);%ค่าlog(UTn+UTp)ในLow absorbtionหรือlog(UTn/UTp)ในHigh absorbtion
for G7=1:21
   for G8=1:3
      for G9=1:3
         QR(G7,G8,G9)=0;
      end
   end
end
if M==1
   fprintf('log(Sn*Sp)=%f            log(UTn+UTp)=%f\n',GXX,SSG)
else
   fprintf('log(Sp)=%f            log(UTn/UTp)=%f\n',GXX,SSG)
end
pause

function[GYY,QXCC,I5]=GMODE1(G6,G1,GXX,W0,K,RT,SG,L0,VB,T,IL,V1,V3,V2,QY00,QZ00,QE11)
QE(1,1)=QE11;
V(1)=V1;%Vforward
V(3)=V3;%Vreverse
V(2)=V2;%Vsc
L=L0*1e-8;%เปลี่ยนหน่วยชั้น i-layer เป็น cm
QXY=0;
QXZ=0;
SP=sqrt(10^GXX);%ค่าSp
SN=SP;%ค่าSn
```

```
I5=G1;
QXC(I5)=0;
QXCC=QXC(I5);
A=10^QE11;%ค่า ส.ป.ส การดูดกลืน
z=0;
for I=G6:21
  if z==0
     RT=1e-9*10^((I-1)*.2);%ค่า UTn+UTp ที่กำหนด
     RP=RT/(1+K);%ค่าUTp
     RN=RT-RP;%ค่าUTn
     for N0=1:3
        VA=V(N0);
        E=(VB-VA)/L;
        [Q1]=CAL(E,RN,RP,T,SN,SP,IL,L,A);%หาค่ากระแสที่แรงดันไบอัสต่างๆ
        Q(1)=Q1;%ค่ากระแสที่คำนวณได้
        Q(N0+3)=Q(1);
     end
     Q(7)=Q(4)/Q(5);%ค่า Q(4)=Jft ,Q(5)=Jsct ,Q(7)=Jft/Jsct
     Q(8)=Q(6)/Q(5);%ค่า Q(6)=Jrt ,Q(5)=Jsct ,Q(7)=Jrt/Jsct
     QR(I,1,I5)=RT;%ค่า UTn+UTp ที่กำหนด
     QR(I,2,I5)=Q(7);
     QR(I,3,I5)=Q(8);
    if I==G6
      ppppp=1;
    elseif (QR(I,2,I5)-QY00)*(QR(I-1,2,I5)-QY00)<=0%เปรียบเทียงค่าทางคำนวณกับค่าที่วัดได้
      QXY=(QY00-QR(I-1,2,I5))*(W0*log(QR(I,1,I5))-W0*log(QR(I-1,1,I5)))/(QR(I,2,I5)-QR(I-
       1,2,I5))+W0*log(QR(I-1,1,I5));
    elseif (QR(I,3,I5)-QZ00)*(QR(I-1,3,I5)-QZ00)<=0%เปรียบเทียงค่าทางคำนวณกับค่าที่วัดได้
      QXZ=(QZ00-QR(I-1,3,I5))*(W0*log(QR(I,1,I5))-W0*log(QR(I-1,1,I5)))/(QR(I,3,I5)-QR(I-
       1,3,I5))+W0*log(QR(I-1,1,I5));
    else
      if (QXY~=0)&(QXZ~=0)
         QXC(I5)=(QXY+QXZ)*.5;
         QXCC=QXC(I5);%หาค่าออกมาเป็นUTp+UTn
      end
```

```
            if (QXY+QXZ)~=0&(G6==1)
                G6=I-1;
            end
        end
        if QXC(I5)~=0
            z=1;
            break
        end
    end
end
if z==1
    RT=10^QXC(I5);%ค่า UTn+UTp ที่คำนวณ
    RP=RT/(1+K);%ค่าUTp
    RN=RT-RP;%ค่าUTn
    for N0=1:3
        VA=V(N0);
        E=(VB-VA)/L;
        [Q1]=CAL(E,RN,RP,T,SN,SP,IL,L,A);%หาค่ากระแสที่แรงดันไบอัสต่างๆ
        Q(1)=Q1;
        Q(N0+3)=Q(1);
    end
    GYY=abs(Q(4)/Q(5)-QY00)+abs(Q(6)/Q(5)-QZ00);%ค่าError
    QXCC=QXC(I5);%หาค่าออกมาเป็นUTp+UTn
else
    GYY=999;%ค่าError
    QXCC=QXC(I5);%หาค่าออกมาเป็นUTp+UTn
End

function[GYY,QXCC,I5]=GMODE2(G6,G1,GXX,W0,K,RT,SG,L0,VB,T,IL,V1,V3,V2,QY00,QZ00,QE12)
V(1)=V1;%Vforward
V(3)=V3;%Vreverse
V(2)=V2;%Vsc
QE(1,2)=QE12;
L=L0*1e-8;%เปลี่ยนหน่วยชั้น i-layer เป็น cm
QXY=0;
```

```
QXZ=0;
A=10^QE(1,2);%ค่า ส.ป.ส การดูดกลืน
SN=10^(SG-GXX);%ค่าSn
SP=10^GXX;%ค่าSp
I5=G1;
QXC(I5)=0;
QXCC=QXC(I5);
z=0;
for I=G6:21
  if z==0
    K=.01*10^((I-1)*.2);%ค่า UTn/UTp ที่กำหนด
    RP=RT/(1+K);%ค่าUTp
    RN=RT-RP;%ค่าUTn
    for N0=1:3
      VA=V(N0);
      E=(VB-VA)/L;
      [Q1]=CAL(E,RN,RP,T,SN,SP,IL,L,A);%หาค่ากระแสที่แรงดันไบอัสต่างๆ
      Q(1)=Q1;%ค่ากระแสที่คำนวณได้
      Q(N0+3)=Q(1);
    end
    Q(7)=Q(4)/Q(5);%ค่า Q(4)=Jft ,Q(5)=Jsct ,Q(7)=Jft/Jsct
    Q(8)=Q(6)/Q(5);%ค่า Q(6)=Jrt ,Q(5)=Jsct ,Q(7)=Jrt/Jsct
    QR(I,1,I5)=K;%ค่า UTn/UTp ที่กำหนด
    QR(I,2,I5)=Q(7);
    QR(I,3,I5)=Q(8);
   if I==G6
      ppppp=1;
   elseif (QR(I,2,I5)-QY00)*(QR(I-1,2,I5)-QY00)<=0%เปรียบเทียงค่าทางคำนวณกับค่าที่วัดได้
      QXY=(QY00-QR(I-1,2,I5))*(W0*log(QR(I,1,I5))-W0*log(QR(I-1,1,I5)))/(QR(I,2,I5)-QR(I-
       1,2,I5))+W0*log(QR(I-1,1,I5));
   elseif (QR(I,3,I5)-QZ00)*(QR(I-1,3,I5)-QZ00)<=0%เปรียบเทียงค่าทางคำนวณกับค่าที่วัดได้
      QXZ=(QZ00-QR(I-1,3,I5))*(W0*log(QR(I,1,I5))-W0*log(QR(I-1,1,I5)))/(QR(I,3,I5)-QR(I-
       1,3,I5))+W0*log(QR(I-1,1,I5));
   else
      if (QXY~=0)&(QXZ~=0)
```

```
            QXC(I5)=(QXY+QXZ)*.5;
            QXCC=QXC(I5);%หาค่าออกมาเป็นUTp/UTn
         end
         if (QXY+QXZ)~=0&(G6==1)
            G6=I-1;
         end
      end
      if QXC(I5)~=0
         z=1;
         break
      end
   end
end
if z==1
   K=10^QXC(I5);%ค่า UTn/UTp ที่คำนวณ
   RP=RT/(1+K);%ค่าUTp
   RN=RT-RP;%ค่าUTn
   for N0=1:3
      VA=V(N0);
      E=(VB-VA)/L;
      [Q1]=CAL(E,RN,RP,T,SN,SP,IL,L,A);%หาค่ากระแสที่แรงดันไบอัสต่างๆ
      Q(1)=Q1;
      Q(N0+3)=Q(1);
   end
   GYY=abs(Q(4)/Q(5)-QY00)+abs(Q(6)/Q(5)-QZ00);%ค่าError
   QXCC=QXC(I5);%หาค่าออกมาเป็นUTp/UTn
else
   GYY=999;%ค่าError
   QXCC=QXC(I5);%หาค่าออกมาเป็นUTp/UTn
End
function [Q1]=CAL(E,RN,RP,T,SN,SP,IL,L,A)%หาค่ากระแสทางการคำนวณ
I0=1;
X1=0;
X2=L;
```

```
[QK,LN1,LN2,OMN,LP1,LP2,OMP]=CALU1(RN,T,E,RP,SN,SP);%หาค่า
      LN1,LN2,OMN,LP1,LP2,OMP,QK
[AIR2]=AIRCAL(L,LN1,LN2,A,OMN,QK,E,T,LP1,LP2,OMP,IL);%หาค่าXc
[QQ]=NANCAL(A,AIR2,LN1,LN2,OMN,QK,E,T,L,LP1,LP2,OMP);%หาค่ากระแส
Q1=QQ;
Function[QK,LN1,LN2,OMN,LP1,LP2,OMP]=CALU1(RN,T,E,RP,SN,SP)%หาค่า
      LN1,LN2,OMN,LP1,LP2,OMP,QK
%------------------หาค่า Ln,Lp--------------
QK=11604.85418;
LN=sqrt((273+T)*RN/QK);
GAN=QK/(273+T)*LN*E*0.5;
LP=sqrt((273+T)*RP/QK);
GAP=QK/(273+T)*LP*E*0.5;
GAN2=sqrt(1+GAN*GAN);
GAP2=sqrt(1+GAP*GAP);
LN1=(GAN2+GAN)*LN;
LN2=(GAN2-GAN)*LN;
OMN=(SN-(273+T)/QK/LN1)/(SN+(273+T)/QK/LN2);
LP1=(GAP2+GAP)*LP;
LP2=(GAP2-GAP)*LP;
OMP=(SP-(273+T)/QK/LP1)/(SP+(273+T)/QK/LP2);

function [AIR2]=AIRCAL(L,LN1,LN2,A,OMN,QK,E,T,LP1,LP2,OMP,IL)%โปรแกรมหาค่า Xc
AIR=1800;
%AIR=L/1e-12;
AIR2=0;
for AIR1=1:AIR
    %AIR2=AIR2+(1e-09)*(AIR1-1);
    AIR2=AIR2+(1e-09);
    %AIR2=5e-05;
    J1=(1/(LN1+LN2))*((1/(1/LN1-A))*(exp(-A*AIR2)-exp(-AIR2/LN1))-(OMN/(1/LN1-(QK*E/(T+273))-
      A))*(exp(-AIR2*(QK*E/(T+273)+A))-exp(-AIR2/LN1)));
    NA21=(exp(-A*L+(AIR2-L)/LP1)-exp(-A*AIR2))/(1/LP1+A);
    NA22=(OMP*exp(-QK*E*L/(T+273))*(exp((QK*E/(T+273)-A)*L+(AIR2-L)/LP1)-
      exp((QK*E/(T+273)-A)*AIR2)))/(QK*E/(T+273)-1/LP1-A);
```

```
    J2=(1/(LP1+LP2))*(-NA21-NA22);
    %J2=(1/(LP1+LP2))*((1/(1/LP1+A))*(exp(-A*AIR2)-exp(-A*L-(AIR2-L)/LP1))-
      (OMP/(QK*E/(T+273)-1/LP1-A))*(exp(AIR2/LP1-L*(A+1/LP1))-exp(AIR2*(QK*E/(T+273)-A)-
      QK*E*L/(T+273))));
  %if IL==0
    if J1>=J2
      break
    end
    %end
  %IL=0;
end

function [QQ]=NANCAL(A,AIR2,LN1,LN2,OMN,QK,E,T,L,LP1,LP2,OMP)%โปรแกรมหาค่ากระแส
NAN11=(exp(-A*AIR2)-exp(-AIR2/LN1))/(1/LN1-A);
NAN12=OMN*(exp(-AIR2*(QK*E/(T+273)+A))-exp(-AIR2/LN1))/(1/LN1-QK*E/(T+273)-A);
NAN21=(exp(-A*L+(AIR2-L)/LP1)-exp(-A*AIR2))/(1/LP1+A);
NAN22=(OMP*exp(-QK*E*L/(T+273))*(exp((QK*E/(T+273)-A)*L+(AIR2-L)/LP1)-exp((QK*E/(T+273)-
      A)*AIR2)))/(QK*E/(T+273)-1/LP1-A);
NAN1=(LN1/(LN1+LN2))*(NAN11-NAN12);
NAN2=(LP1/(LP1+LP2))*(NAN21+NAN22);
QQ=NAN1-NAN2;%QQคือค่ากระแสที่คำนวณได้
```

ภาคผนวก ข

สำเนาบทความซึ่งเผยแพร่ ณ การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 26
ณ โรงแรมโกลเด้นแซนด์ ชะอำ จ. เพชรบุรี
(6-7 พฤศจิกายน 2546) หน้า 1400-1405

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การเผยแพร่ผลงานวิจัย

1. จักรพันธ์ จันทนา และ ดุสิต เครืองาม. การวัดค่าผลคูณของความคล่องตัวและเวลาอายุของพาหะในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 26 ณ โรงแรมโกลเด้นแซนด์ ชะอำ จ. เพชรบุรี (6-7 พฤศจิกายน 2546) : 1400-1405

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย จักรพันธ์ จันทนา เกิดเมื่อวันที่ 24 กรกฎาคม พ.ศ. 2521 ที่ตำบลตลาด อำเภอเมือง จังหวัดสุราษฎร์ธานี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีเมื่อ พ.ศ. 2544 วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ต่อจากนั้นเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต ที่ห้องปฏิบัติการวิจัยสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2544

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย