

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การปลูกผลึกฟิล์มบาง ZnS โดยใช้วิธีการอาบสารละลายเคมี
เพื่อใช้เป็นชั้นบัฟเฟอร์ใน โขลาร์เซลล์ฟิล์มบาง CIGS

DEPOSITION OF ZnS THIN FILM USING CHEMICAL BATH DEPOSITION
FOR USE AS A BUFFER LAYER IN CIGS THIN FILM SOLAR CELLS



โดย
นาย เปี่ยมศักดิ์ จันทน์แดง

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 61432
วัน,เดือน,ปี..... 17 ก.ค. 2549

b..... 11596247
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การปลูกผลึกฟิล์มบาง ZnS โดยใช้วิธีการอาบสารละลายเคมี
เพื่อใช้เป็นชั้นบัฟเฟอร์ในโซลาร์เซลล์ฟิล์มบาง CIGS

**Deposition of ZnS Thin Film Using Chemical Bath Deposition
For Use As A Buffer Layer in CIGS Thin Film Solar Cells**



ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ ปีการศึกษา 2547

ภาควิชา อิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การปลูกผลึกฟิล์มบาง ZnS โดยใช้วิธีการออบสารละลายเคมี

เพื่อใช้เป็นชั้นบัฟเฟอร์ใน โซลาร์เซลล์ฟิล์มบาง CIGS

ผู้จัดทำ

นาย เปี่ยมศักดิ์ จันทร์แดง เลขประจำตัว 45015240



อาจารย์ที่ปรึกษา

(.....)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

พลังงานเป็นสิ่งจำเป็นพื้นฐานของมนุษย์ กิจกรรมทุกระดับของมนุษย์ต้องใช้พลังงาน ทั้งสิ้นและยิ่งมนุษย์ต้องการความสะดวกสบายก็ต้องใช้พลังงานมากขึ้น รูปแบบของพลังงานที่ใช้ มากก็คือ ความร้อนและไฟฟ้า แหล่งกำเนิดพลังงานหลัก ๆ ในปัจจุบันคือ ถ่านหิน น้ำมัน และ ก๊าซธรรมชาติ พลังงานจากเชื้อเพลิงต่าง ๆ เหล่านี้ นอกจากจะมีจำกัดแล้วก็ยังสร้างปัญหามลพิษต่อ สิ่งแวดล้อม รวมถึงทำลายชั้นบรรยากาศของโลกด้วย

พลังงานแสงอาทิตย์ เป็นพลังงานที่สามารถนำมาใช้ทดแทนพลังงานจากเชื้อเพลิงได้ เป็นพลังงานธรรมชาติ เป็นแหล่งพลังงานที่ไม่มีวันหมด และยังเป็นพลังงานสะอาดไม่ก่อให้เกิด มลพิษอีกด้วย เหตุผลที่ใช้ในการพิจารณาระบบพลังงานแสงอาทิตย์ไปใช้ ดังเช่น นำไปใช้ใน ชนบทและที่อื่นๆที่ไม่มีไฟฟ้าใช้ เนื่องจากสายส่งการไฟฟ้าเข้าไม่ถึง แต่มีความต้องการใช้ไฟฟ้า ปัจจุบันสามารถเลือกใช้ระบบพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อบ้านพักอาศัยได้ มีการใช้ไฟฟ้าจากสายส่ง การไฟฟ้าแล้ว แต่ต้องการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานสะอาดใช้เองหรือกรณีที่ต้องการมีไฟฟ้าสำรองไว้ ใช้ขณะที่สายส่งการไฟฟ้าเกิดมีปัญหา เช่น ไฟฟ้าดับ และไฟตก เป็นต้น สามารถเลือกใช้ระบบ พลังงานแสงอาทิตย์ชนิดต่อเชื่อมระบบสายส่งได้

เนื่องจากประเทศไทยของเราไม่มีแหล่งพลังงานเป็นของตนเองเพียงพอ จึงจำเป็นต้องสั่ง นำเข้าจากต่างประเทศปีละมหาศาลและมีแนวโน้มในการสั่งนำเข้าเพิ่มขึ้นทุก ๆ ปี เพื่อการพัฒนา ของประเทศ เราจึงจำเป็นต้องมีการศึกษา และค้นคว้าแหล่งพลังงานทดแทน การใช้พลังงานจาก แสงอาทิตย์ซึ่งเป็นพลังงานที่มากมายมหาศาล ก็เป็นสิ่งหนึ่งที่จะช่วยลดปัญหาการขาดแคลน พลังงานได้

1.1 ความสำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cells)

เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cells) เป็นสิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างจากสารกึ่ง ตัวนำสามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรงทันทีที่มีแสงตกกระทบ (ปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก) และไฟฟ้าที่ได้นั้นจะเป็นไฟฟ้ากระแสตรง(DC current) ในปัจจุบัน ได้มีการนำเอาเซลล์แสงอาทิตย์ มาใช้เพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้า ในปริมาณขนาดเล็ก เช่น เป็นตัว จ่ายไฟให้กับอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าขนาดเล็กเช่น เครื่องคิดเลข นาฬิกา ในปริมาณขนาดใหญ่ เช่น เป็นโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์มีกำลังผลิตประมาณ 100MW เซลล์แสงอาทิตย์จึงเปรียบเสมือน เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานขนาดใหญ่ เพียงแค่ติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ไว้กลางแสงอาทิตย์ก็สามารถใช้ งานได้ทันทีและไม่มีที่สิ้นสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการเรื่อง (ภาษาไทย) การปลูกผลึกฟิล์มบาง ZnS โดยใช้วิธีการอบสารละลายเคมี
เพื่อใช้เป็นชั้นบัฟเฟอร์ในโซลาร์เซลล์ฟิล์มบาง CIGS

(ภาษาอังกฤษ) Deposition of ZnS Thin Film Using chemical bath deposition
for use as a buffer layer in CIGS Thin Film Solar Cells

นาย เปี่ยมศักดิ์ จันทน์แดง เลขประจำตัว 45015240

โครงการได้รับการตรวจสอบแล้ว พร้อมทั้งจะทำการสอบได้



.....
.....
อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การปลูกผลึกฟิล์มบาง ZnS โดยใช้วิธีการอบสารละลายเคมี
เพื่อใช้เป็นชั้นบัฟเฟอร์ใน โซลาร์เซลล์ฟิล์มบาง CIGS

นาย เปี่ยมศักดิ์ จันทน์แดง

ดร. สุทธิชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์ (อาจารย์ที่ปรึกษา)

ปีการศึกษา 2547

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการปลูกผลึกฟิล์มบาง ZnS ที่ปลูกบนกระจกสไลด์ด้วยวิธีการอบสารละลายเคมี (CBD) ซึ่งสารตั้งต้นประกอบด้วย $ZnSO_4$, $SC(NH_2)_2$, NH_4OH ทำการเตรียมด้วยปริมาณสารตั้งต้นต่าง ๆ ที่อุณหภูมิคงที่ เพื่อศึกษาหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเตรียมฟิล์มบาง ZnS และนำฟิล์มบางไปศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ AFM เพื่อศึกษาอัตราการเกิดฟิล์ม จากนั้นนำไปวัดค่าการส่งผ่านแสง วัดความหนา เพื่อนำไปคำนวณช่องว่างพลังงานของฟิล์ม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Deposition of ZnS Thin Film Using Chemical Bath Deposition
For Use As A Buffer Layer in CIGS Thin Film Solar Cells

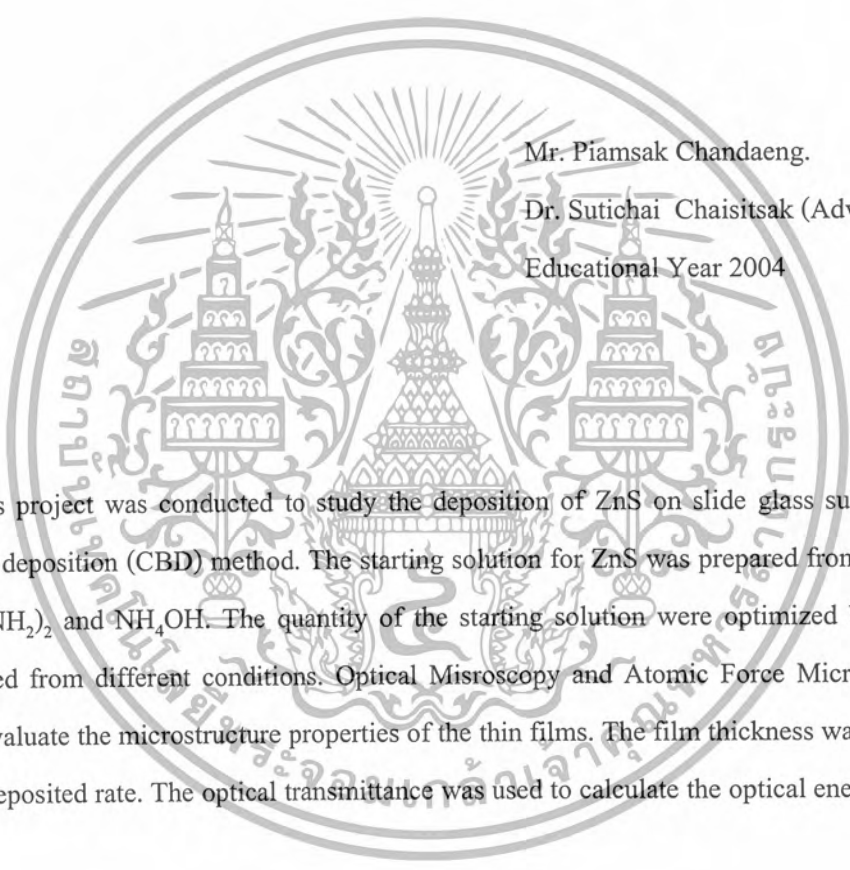
Mr. Piamsak Chandaeng.

Dr. Sutichai Chaisitsak (Advisor)

Educational Year 2004

Abstract

This project was conducted to study the deposition of ZnS on slide glass substrates using chemical bath deposition (CBD) method. The starting solution for ZnS was prepared from a mixture of $ZnSO_4$, $SC(NH_2)_2$ and NH_4OH . The quantity of the starting solution were optimized by comparing results obtained from different conditions. Optical Misroscopy and Atomic Force Microscope(AFM) was used to evaluate the microstructure properties of the thin films. The film thickness was measured to estimate the deposited rate. The optical transmittance was used to calculate the optical energy gap of the films.



สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ

ABSTRACT

สารบัญรูปภาพ

สารบัญตาราง

บทที่ 1 บทนำ

- 1.1 ความสำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cells) 1
- 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ 2
- 1.3 การดำเนินงาน 2

บทที่ 2 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CIGS

- 2.1 คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CIGS 5
 - 2.1.1 ลักษณะทางโครงสร้าง (Structure characteristic) 5
 - 2.1.2 คุณสมบัติทางแสง (Optical properties) 7
 - 2.1.3 โครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำและกระบวนการดูดกลืนแสงของ
อิลีคตรอน 8
- 2.2 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CIGS 10
 - 2.2.1 หน้าที่ของชั้นต่างๆในโครงสร้างของCIGS 13
- 2.3 หน้าที่ของชั้น Buffer Layer 13
- 2.4 หลักการทำงานของ โซลาร์เซลล์ชนิด CIGS 15

บทที่ 3 ทฤษฎีและหลักการวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มบาง

- 3.1 สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ 16
 - 3.1.1 สภาพนำไฟฟ้าและสภาพต้านทานไฟฟ้า 16
 - 3.1.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า 17
 - 3.1.3 วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสองขั้ว (Two points probe method) 17
 - 3.1.4 วิธีวัดด้วยปลายแหลมสี่ขั้วตามแนวเส้นตรง
(Linear Four-Point Probe method) 18
- 3.2 การวัดการทะลุผ่านของแสง 20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 4	การปลูกผลึกฟิล์มบาง ZnS ด้วยวิธีออบสารละลายเคมี	
4.1	กระบวนการเกิดปฏิกิริยาเคมี	21
4.2	การเกิดฟิล์มบาง ZnS บนแผ่นรองรับ	22
4.3	การทดลอง	23
4.3.1	อุปกรณ์ที่ใช้ในการปลูกผลึกฟิล์มบาง	23
4.3.2	วิธีการเตรียมแผ่นกระจกใส	24
4.3.3	ขั้นตอนการปลูกฟิล์มบาง ZnS ด้วยวิธีการออบสารละลายเคมี	24
บทที่ 5	ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์ฟิล์มบาง	
5.1	ผลของฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์ โดยเปลี่ยนเวลาต่างๆ	26
5.1.1	ลักษณะการเกิดฟิล์มบาง	26
5.1.2	ผลของการวัดการส่งผ่านแสง	27
5.2	ผลของปริมาณซิงค์ซัลเฟต($ZnSO_4$) ที่มีผลต่อการเกิดฟิล์มบาง	27
5.2.1	ลักษณะการเกิดฟิล์มบาง	28
5.2.2	ผลของการวัดการส่งผ่านแสง	29
5.2.3	ผลของการวัดความหนาฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์	31
5.2.4	ผลของการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า	31
5.3	ผลของปริมาณของไทโอยูเรีย($SC(NH_2)_2$) ที่มีผลต่อการเกิดฟิล์มบาง	32
5.3.1	ลักษณะการเกิดฟิล์มบาง	32
5.3.2	ผลของการวัดการส่งผ่านแสง	34
5.3.3	ผลของการวัดความหนาฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์	35
5.3.4	ผลของการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า	35
5.4	ผลของปริมาณของแอมโมเนีย(NH_4OH) ที่มีผลต่อการเกิดฟิล์มบาง	36
5.4.1	ลักษณะการเกิดฟิล์มบาง	36
5.4.2	ผลของการวัดการส่งผ่านแสง	38
5.4.3	ผลของการวัดความหนาฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์	39
5.4.4	ผลของการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า	39

บทที่ 6 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

กิตติกรรมประกาศ

บรรณานุกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 ค่าความหนาของฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์โดยการเปลี่ยนปริมาณ $ZnSO_4$ วัดโดยเครื่อง step-profile	31
ตารางที่ 2 ค่าความหนาของฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์โดยการเปลี่ยนปริมาณ $(SC(NH_2)_2$ วัดโดยเครื่อง step-profile	35
ตารางที่ 3 ค่าความหนาของฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์โดยการเปลี่ยนปริมาณ (NH_4OH) วัดโดยเครื่อง step-profile	39



สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางต่างๆ	5
รูปที่ 2.2 โครงสร้างผลึกแบบซาลโคไฟไรท์ (ซวา) โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ (ซ้าย)	6
รูปที่ 2.3 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ CuInSe ₂ และ CuGaSe ₂ เปรียบเทียบกับ สารกึ่งตัวนำที่นำมาใช้เป็นเซลล์แสงอาทิตย์อื่นๆ	7
รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่แลตทิซ (lattice constant) กับค่าช่องว่าง พลังงาน (bandgap) ของ CIS และสารประกอบที่เกี่ยวข้อง และ ประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบ single – bandgap	8
รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน และการย้ายสถานะพลังงานของ อิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำ	9
รูปที่ 2.6 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CIGS	10
รูปที่ 2.7 แผนภาพแถบพลังงานของรอยต่อเฮเทอโรแบบชนิดเอ็นบนพี	11
รูปที่ 2.8 แถบพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีโครงสร้างแบบITO/ZnS/CIGS(Cu(InGa)Se ₂)	12
รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ของค่าช่องว่างพลังงานกับค่าแลตทิซสำหรับวัสดุที่มีโครงสร้าง และวาเลนซ์เดียวกัน ซึ่งในที่นี้เป็นตัวอย่างของซาลโคไฟไรท์ I-III-VI	14
รูปที่ 2.10 ภาพวงจรเสมือนของโซลาร์เซลล์ชนิด CIGS	15
รูปที่ 3.1 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีวัดขั้วปลายแหลมสองขั้ว	17
รูปที่ 3.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีวัดขั้วปลายแหลมสี่ขั้วตามแนวเส้นตรง	18
รูปที่ 3.3 แสดงขนาดของฟิล์มยาว 1 กว้าง w หนา d	19
รูปที่ 4.1 กลไกการเกิดฟิล์มบางแบบต่างๆ	22
รูปที่ 4.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการปลูกผลึกฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์	23
รูปที่ 4.3 ลักษณะการวางบีกเกอร์ใน water bath	24
รูปที่ 5.1 ภาพถ่ายฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์โดยเปลี่ยนเวลาต่างๆ	26
รูปที่ 5.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นของฟิล์มบาง ซิงค์ซัลไฟด์ที่เตรียมได้ที่เวลาต่างๆ	27
รูปที่ 5.3 ภาพถ่ายฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์ที่เตรียมได้ที่ ZnSO ₄ = 0.05 mol/l	28
รูปที่ 5.4 ภาพถ่ายฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์ที่เตรียมได้ที่ ZnSO ₄ = 0.15 mol/l	28
รูปที่ 5.5 ภาพถ่ายฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์ที่เตรียมได้ที่ ZnSO ₄ = 0.25 mol/l	28
รูปที่ 5.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นของฟิล์มบาง	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารซิงค์ซัลไฟด์ที่มีการปรับเปลี่ยนปริมาณซิงค์ซัลไฟด์ (ZnSO₄) นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงยกกำลังสองกับพลังงานโฟตอนของฟิล์มบางที่ใช้ $ZnSO_4 = 0.05 \text{ mol/l}$	30
รูปที่ 5.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงยกกำลังสองกับพลังงานโฟตอนของฟิล์มบางที่ใช้ $ZnSO_4 = 0.15 \text{ mol/l}$	30
รูปที่ 5.9 กราฟวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์โดยวิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสองขั้ว	31
รูปที่ 5.10 ภาพถ่ายฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์ที่เตรียมได้โดยปริมาณ $(SC(NH_2)_2 = 0.5 \text{ mol/l}$	32
รูปที่ 5.11 ภาพถ่ายฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์ที่เตรียมได้โดยปริมาณ $(SC(NH_2)_2 = 0.6 \text{ mol/l}$	33
รูปที่ 5.12 ภาพถ่ายฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์ที่เตรียมได้โดยปริมาณ $(SC(NH_2)_2 = 0.7 \text{ mol/l}$	33
รูปที่ 5.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นของฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์ที่มีการเปลี่ยนปริมาณไทโอยูเรีย $(SC(NH_2)_2$	34
รูปที่ 5.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงยกกำลังสองกับพลังงานโฟตอนของฟิล์มบางที่ใช้ $(SC(NH_2)_2 = 0.6 \text{ mol/l}$	34
รูปที่ 5.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงยกกำลังสองกับพลังงานโฟตอนของฟิล์มบางที่ใช้ $(SC(NH_2)_2 = 0.7 \text{ mol/l}$	35
รูปที่ 5.16 ภาพถ่ายฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์ที่เตรียมได้โดยปริมาณ $NH_4OH = 6 \text{ mol/l}$	36
รูปที่ 5.17 ภาพถ่ายฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์ที่เตรียมได้โดยปริมาณ $NH_4OH = 8 \text{ mol/l}$	37
รูปที่ 5.18 ภาพถ่ายฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์ที่เตรียมได้โดยปริมาณ $NH_4OH = 10 \text{ mol/l}$	37
รูปที่ 5.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นของฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์ที่มีการเปลี่ยนปริมาณแอมโมเนีย (NH_4OH)	38
รูปที่ 5.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงยกกำลังสองกับพลังงานโฟตอนของฟิล์มบางที่ใช้แอมโมเนีย $(NH_4OH) = 8 \text{ mol/l}$	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์เป็นหนึ่งในการผลิตพลังงานทดแทนของประเทศไทย และเมื่อเปรียบเทียบกับพลังงานทดแทนอื่น ๆ ที่มีการค้นคว้าในประเทศ เช่น พลังงานลม พลังงานความร้อนใต้พิภพ ปรากฏเป็นที่เด่นชัดว่า เทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์ถูกนำมาใช้งานได้อย่างประสบความสำเร็จมากที่สุด

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. ศึกษาวิธีการสังเคราะห์ ZnS ด้วยวิธีการอาบสารละลายเคมี(CBD)
2. ศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้า คุณสมบัติของการส่งผ่านแสง และลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางที่เตรียม โดยวิธีการอาบสารละลายเคมี เพื่อนำมาใช้เป็นชั้นบัฟเฟอร์เลเยอร์ของโซลาร์เซลล์ชนิด CIGS

1.3 การดำเนินงาน

การดำเนินงานจะเริ่มจากการปลูกฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์ (ZnS) ด้วยวิธีการอาบสารละลายเคมี (Chemical Bath Deposition ; CBD) โดยการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขต่าง ๆ เช่น ปริมาณสารเคมี เวลาที่ใช้ในการเตรียม เป็นต้น เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการปลูกฟิล์มบาง จากนั้นทำการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของแสง ทางโครงสร้าง ด้วยวิธีการวิเคราะห์ต่าง ๆ เช่น การส่งผ่านแสง สภาพต้านทานไฟฟ้า เพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นชั้นบัฟเฟอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CIGS ต่อไป



บทที่ 2

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CIGS

เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell)

เซลล์แสงอาทิตย์ เป็นสิ่งประดิษฐ์ที่สร้างขึ้นเพื่อเป็นอุปกรณ์สำหรับการเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยการนำสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิคอน(Si)หรือแกเลียมอาเซไนด์(GaAs) มาผ่านกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ ผลิตให้เป็นโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ ในทันทีที่มีแสงตกกระทบบนแผ่นเซลล์ รังสีของแสงที่มีอนุภาคของพลังงานประกอบที่เรียกว่า โฟตอน จะถ่ายเทพลังงานให้กับ อิเล็กตรอน ในสารกึ่งตัวนำ จนมีพลังงานมากพอที่จะกระโดดออกมาจากแรงดึงดูดของอะตอมทำให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้ ทำให้เกิดไฟฟ้ากระแสตรงเกิดขึ้น

เซลล์แสงอาทิตย์แบ่งได้เป็น 2 ชนิดใหญ่ๆ คือ

1. เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากซิลิคอน แบ่งตามลักษณะของรูปผลึกได้เป็น 3 รูปแบบ คือ แบบผลึกเดี่ยว (Single Crystalline) แบบหลายผลึก (Polycrystalline) และแบบไม่มีรูปผลึก (Amorphous) ซึ่งบางครั้งอาจเรียกว่า เซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบาง (Thin Film Solar Cell)



Single Crystalline Silicon
Solar cell

Polycrystalline Silicon
Solar Cell

Amorphous Silicon
Solar cell

2. เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจากสารประกอบ เช่น สารประกอบแกเลียมอาเซไนด์(GaAs) แคดเมียมเทลลูไรด์(CdsTe) อินเดียมฟอสไฟด์(InP) คอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์(CuInSe₂) เป็นต้น เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้มีทั้งแบบผลึกเดี่ยวหลายผลึก และแบบไม่มีผลึก สารกึ่งตัวนำที่นำมาสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางเกิดจากสารประกอบ เช่น ซิลิคอน(Si), แกเลียมอาเซไนด์(GaAs), คอปเปอร์อินเดียมแกเลียมไดซัลไฟด์ (Cu(InGa)Se₂) ที่ก่อตัวบนฐานรอง(Substrate)ซึ่งอาจจะเป็นแก้ว พลาสติก กระเบื้องเคลือบโลหะ หรือ กราไฟท์ เป็นต้น การก่อตัวบนฐานรอง(Substrate)มีหลายวิธี เช่น เวปอร์โกรท (vapor growth) การระเหย(evaporation)หรือการชุบ(plating)

ข้อดีของเซลล์แบบชนิดฟิล์มบางคือ ต้นทุนต่ำ เนื่องจากกระบวนการผลิตไม่ยาก วัสดุก็มีราคาถูก ส่วนข้อเสียคือ ให้ประสิทธิภาพต่ำ เนื่องจากผลจากขอบเขตของเกรน (grain boundary) และส่วนหนึ่งจากวัสดุสารกึ่งตัวนำที่ก่อตัวบนฐานรอง (Substrate) มีคุณภาพไม่ดีพอ ปัจจุบันได้มีการวิจัยพัฒนา เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ ให้สูงขึ้น เช่น การเคลือบวัสดุลดการสะท้อนแสงที่ผิวหน้า การทำพื้นผิวของเซลล์แสงอาทิตย์ ให้ขรุขระเพื่อเพิ่มพื้นรับแสง เป็นต้น

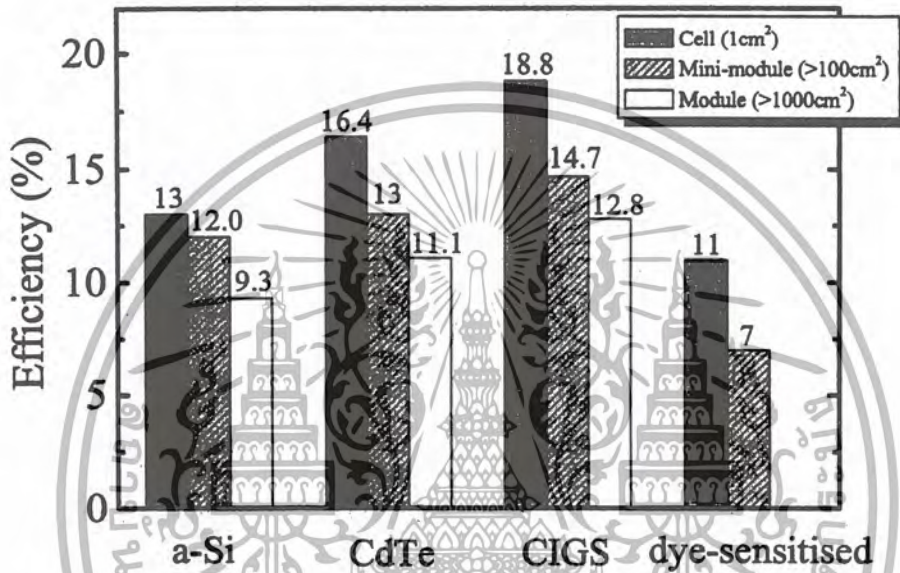
ปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางมีหลายชนิดจากข้อมูลที่ได้ทำการศึกษามาแล้วพบว่า สารกึ่งตัวนำที่ใช้เป็นชั้นดูดกลืนแสง (Absorber) แล้วให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ในระดับที่สูงมากมีหลายชนิด ได้แก่ ซิลิคอน (Si) แกลเลียมอาเซไนด์ (GaAs) อินเดียมฟอสไฟด์ (InP) แคดเมียมเทลลูไรด์ (CdTe) และสารประกอบเชิงสาม (Ternary compound) คือ คอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์ (CIGS) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางคอปเปอร์อินเดียมแกลเลียมไดซัลไฟด์ (Cu(InGa)Se₂) หรือที่เรียกย่อ ๆ ว่า CIGS ซึ่งเป็นฟิล์มบางที่ได้รับความสนใจจากนักวิทยาศาสตร์ทั่วโลก ทั้งนี้เนื่องจาก CIGS มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (Absorption coefficient) สูงมาก ๆ (10^5 cm^{-1}) เมื่อเทียบกับซิลิคอน (10^3 cm^{-1}) ดังนั้น CIGS ที่มีความหนาเพียง 1-2 μm ก็สามารถดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์ได้ทั้งหมด ยิ่งไปกว่านั้นประสิทธิภาพของ CIGS ก็ยังไม่เสื่อมถอยเมื่อใช้ไปนาน ๆ ดังเช่นเกิดขึ้นกับ amorphous-Si นอกจากนี้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CIGS ยังมีเสถียรภาพ ถึงแม้จะอยู่ในสถานะของรังสีหรือโฟตอนพลังงานสูงในอวกาศ ตามคุณสมบัติดังกล่าวทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางชนิด CIGS สามารถแทนที่เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดบิลต์ได้ในอนาคต

ในปี ค.ศ. 1973 ได้มีการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CuInSe₂ (CIS) ขึ้นเป็นครั้งแรกโดยกลุ่มนักวิจัยของ Salford University ที่ U.K. ในปีถัดมา ค.ศ. 1974 กลุ่มวิจัย Bell laboratories ได้เริ่มศึกษาและวิจัยเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกเดี่ยว (Single crystal) ของ CuInSe₂ (CIS) ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงสุดในระดับ 12% เมื่อมีการเคลือบชั้นลดการสะท้อนแสง (antireflection coating) ต่อมากลุ่มวิจัยนำโดย Kazmerski ได้เริ่มวิจัยและศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CIS เป็นกลุ่มแรกและได้มีอีกหลายกลุ่มที่ได้วิจัยตามมา ปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CIS ที่มีการรายงานผลต่ำสุดให้ประสิทธิภาพสูงสุด 15.4% ได้มีการศึกษาอีกพบว่า เมื่อเติมธาตุ Ga เข้าไปแทนที่อะตอมของ In ด้วยปริมาณ x ($x = \frac{\text{Ga}}{\text{In} + \text{Ga}}$) ได้ฟิล์มบาง Cu(In_{1-x}Ga_x)Se₂ เมื่อนำไปเตรียมเป็นเซลล์แสงอาทิตย์แล้ว จะได้ประสิทธิภาพสูงกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่เตรียมจาก CIS เนื่องจากปริมาณ x เป็นตัวปรับเปลี่ยนค่าช่องว่างพลังงาน (Energy gap) ของฟิล์มบาง CIGS ปัจจุบันประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่เตรียมด้วยฟิล์มบาง CIGS ที่มีการเคลือบชั้นลดการสะท้อนแสง ได้มีการรายงานไว้สูงสุดที่ 18.8% โดย US National Renewable Energy Laboratories ซึ่งมีประสิทธิภาพ

สูงที่สุดเมื่อเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางแบบอื่น ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 สมบัติที่สำคัญของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CIGS คือ มีค่าช่องว่างพลังงานอยู่ระหว่าง 1.04 – 1.7 eV โดยค่าช่องว่างพลังงานจะเปลี่ยนไปตามค่า x ทำให้สามารถปรับค่าช่องว่างพลังงานให้ใกล้เคียงกับย่านสเปกตรัมของรังสีจากดวงอาทิตย์ เมื่อเทียบกับ CIS ที่มีค่าช่องว่างพลังงาน 1.04 eV ซึ่งไม่สามารถปรับเปลี่ยนได้ ลักษณะแถบพลังงานเป็นแบบตรง (Direct band gap) สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (Absorption coefficient) สูง ค่าใช้จ่ายในการประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ไม่สูงนัก และสามารถเลือกได้ว่า จะได้ไปให้เป็นชนิดพีหรือชนิดเอ็นได้อีกด้วย



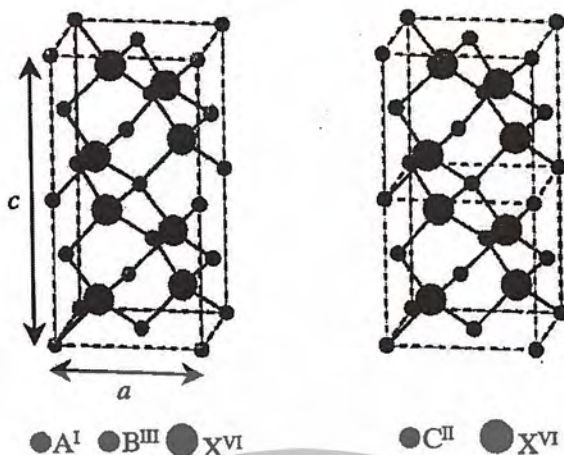
รูปที่ 2.1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางชนิดต่างๆ

2.1 คุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CIGS

2.1.1 ลักษณะทางโครงสร้าง (Structure characteristics)

CuInSe_2 และสารประกอบ I-III-VI₂ (ABX_2) อื่น ๆ มีโครงสร้างแบบซาลโคไพไรท์ (chalcopyrite structure) แลตทิซจะเป็นแบบ body centered tetragonal ประกอบด้วย 4 อะตอมต่อ 1 ยูนิทเซลล์ อะตอม A และอะตอม B แต่ละอะตอมต่อกับอะตอม X 4 อะตอมแบบพิกัดรูปทรงสี่หน้าร่วมกับ (tetrahedrally co-coordinated) ซึ่งอะตอม X แต่ละอะตอมจะต่อแบบพิกัดรูปทรงสี่หน้าร่วมกับ อะตอม A 2 อะตอม และอะตอม B 2 อะตอมตามลำดับ โครงสร้างแบบซาลโคไพไรท์ มีความสัมพันธ์โดยตรงกับโครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์ (zinc blende structure) โดยการขยายหน่วยเซลล์ของซิงค์เบลนด์ ออกเป็นสองเท่าตามแกน c ในทิศทาง z หนึ่งหน่วยเซลล์ของซาลโคไพไรท์ จึงเป็นสองเท่าของซิงค์เบลนด์ และมีสิบทหอะตอม ดังแสดงในรูปที่ 2.2 (ถ้าอะตอม A และอะตอม B ถูกกระจายแบบสุ่ม โครงสร้างจะเป็นแบบ sphalerite)

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 โครงสร้างผลึกแบบซาลโคไฟไรท์ (ขวา)

โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ (ซ้าย)

ความแตกต่างทางเคมีของอะตอมคอปเปอร์ (copper) และอะตอมอินเดียม (indium) มีผลทำให้พันธะระหว่างอะตอมเหล่านี้กับอะตอมข้างเคียงซีลีเนียมมีความยาวพันธะที่แตกต่างกัน

ความยาวของพันธะ (เช่น $R_{AX} \neq R_{BX}$) นี้จะมีผลต่อคุณสมบัติของสารประกอบที่มีโครงสร้างแบบซาลโคไฟไรท์ ดังนี้

1. แถบช่องว่างพลังงาน (bandgap energy) ของสารประกอบเล็กกว่าของโครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์ ปรากฏการณ์ผลของช่องว่างพลังงานนี้ เรียกว่า optical bowing
2. ตำแหน่งของ anion ถูกเลื่อนจากตำแหน่งที่ควรจะเป็นด้วยค่าน้อยๆ λ (ขอบเขตของพารามิเตอร์อิสระของโครงสร้างแบบซาลโคไฟไรท์)
3. อัตราส่วนของค่าคงที่แลตทิซ (lattice constant) ในโครงสร้างแบบซาลโคไฟไรท์, c/a แตกต่างจากค่า 2 ซึ่งเป็นค่าที่ควรจะเป็น ($c/a \neq 2$) ซึ่งถูกเรียกว่า tetragonal distortion

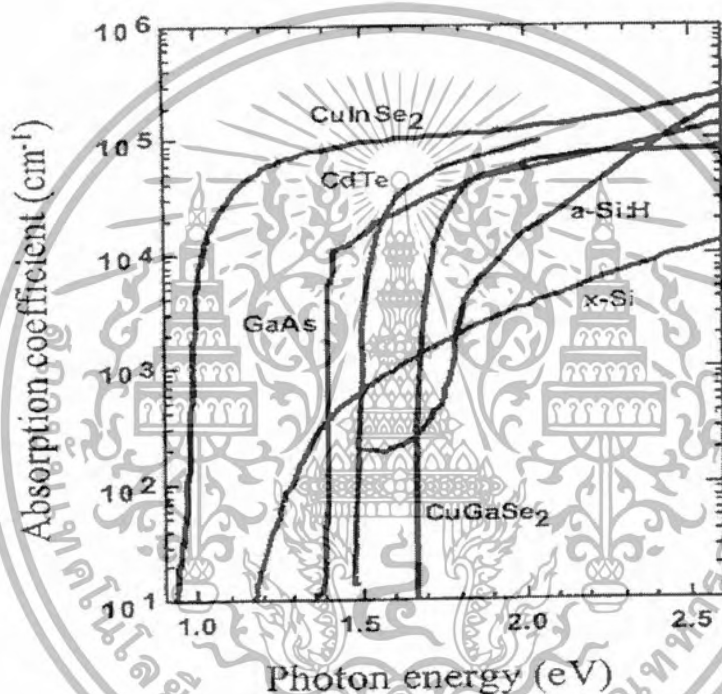
ค่าคงที่แลตทิซ (lattice constants) ของ CuInSe_2 คือ $a = 5.784 \text{ \AA}$, $c = 11.616 \text{ \AA}$

(ดังนั้น $c/a = 1.004$) , ในกรณีของ CuGaSe_2 ค่าคงที่แลตทิซ คือ $a = 5.612 \text{ \AA}$, $c = 11.032 \text{ \AA}$

(ดังนั้น $c/a = 0.965$)

2.1.2 คุณสมบัติทางแสง (Optical properties)

CIS และสารประกอบที่เกี่ยวข้อง จะเป็นแบบ direct bandgap transition และมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (optical absorption coefficient) สูงในสเปกตรัมของแสงอาทิตย์เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุอื่น ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ดังนั้น ความหนาเพียง 1-2 μm ของฟิล์ม CI(G)S ก็เพียงพอที่จะดูดซับโฟตอนได้ถึง 90% ในทางตรงกันข้าม ผลึกของซิลิคอนเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์ม CI(G)S จะมีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงต่ำกว่า และต้องการความหนามากกว่า ดังนั้น วัสดุพื้นฐาน CIS สามารถนำไปทำฟิล์มบางเซลล์แสงอาทิตย์ (thin film solar cells) และลดการใช้วัสดุได้

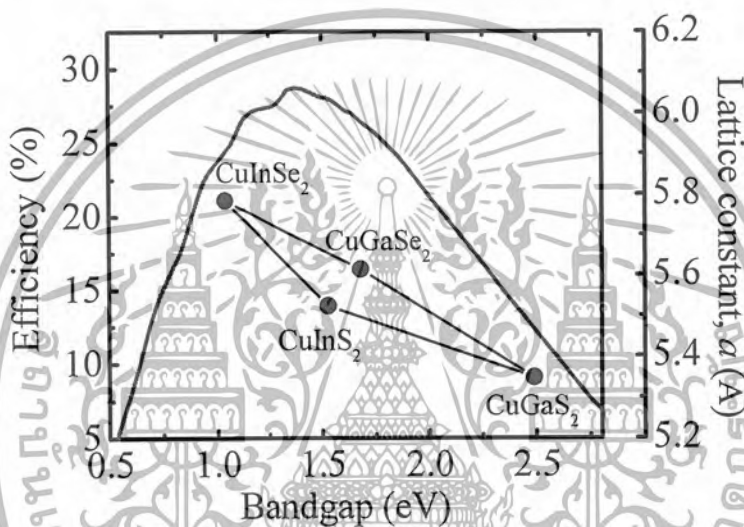


รูปที่ 2.3 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ CuInSe_2 และ CuGaSe_2 เปรียบเทียบกับสารกึ่งตัวนำที่นำมาใช้เป็นเซลล์แสงอาทิตย์อื่น ๆ

เนื่องจากค่าช่องว่างพลังงาน (bandgap) ของ CIS มีค่าน้อย ซึ่งประมาณ 1 eV ปัจจุบันมีการวิจัยการเพิ่มค่าช่องว่างพลังงานของ CIS ให้สูงขึ้น โดยการอัลลอยด์ด้วยแกเลียม (gallium) หรือซัลเฟอร์ (sulfur) รูปที่ 2.4 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่แลตทิซ กับค่าช่องว่างพลังงานของ CIS และสารประกอบที่เกี่ยวข้อง และประสิทธิภาพทางอุณหพลศาสตร์สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบ single-bandgap

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติทางแสงของสารประกอบเชิงซ้อน $\text{Cu}(\text{InGa})\text{Se}_2$ (CIGS) ได้มีความสนใจในปัจจุบัน ซึ่งสามารถให้ค่าช่องว่างพลังงานในช่วงกว้างจาก 1.04 eV สำหรับ CIS ถึง 1.68 eV สำหรับ CuGaSe_2 โดยการเปลี่ยนองค์ประกอบ Ga ไปแทนที่ In ดังแสดงในรูปที่ 2.4 การควบคุมค่าช่องว่างพลังงานเป็นสิ่งดึงดูดใจและมีความสำคัญสำหรับการออกแบบอุปกรณ์ได้อย่างเหมาะสม เช่น การปรับ E_g ให้ได้ค่าที่เหมาะสม เพื่อให้ match กับสเปกตรัมของแสงอาทิตย์ เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่สูงที่สุด (จากรูปที่ 2.4 % Efficiency สูงสุดที่ E_g ประมาณ 1.4 – 1.5 eV) การออกแบบ Bandgap engineering สำหรับลด loss และสามารถสร้างเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Tandem cells multi-bandgap ได้อีกด้วย



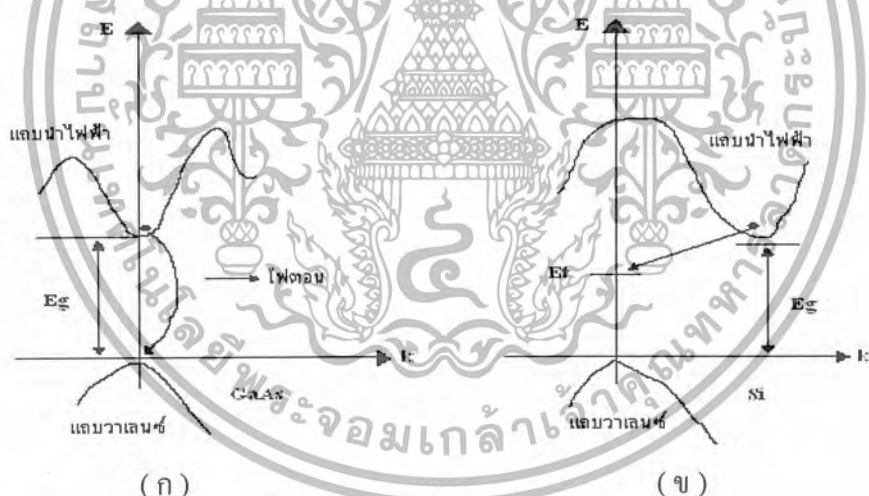
รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่แลตทิซ (lattice constant) กับค่าช่องว่างพลังงาน (bandgap) ของ CIS และสารประกอบที่เกี่ยวข้อง และประสิทธิภาพทางอุดมคติสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบ single-bandgap

2.1.3 โครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำและกระบวนการดูดกลืนแสงของอิเล็กทรอนิกส์

โดยทั่วไปโครงสร้างของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำจะจำแนกออกได้เป็น 2 แบบคือ แบบตรง (direct band gap) และแบบเฉียง (indirect band gap) เราจะพบว่าในสารกึ่งตัวนำบางชนิดมีโครงสร้างของแถบพลังงานแบบตรงก็คือ คือ โครงสร้างที่มีแถบพลังงานต่ำสุดของแถบนำตรงกับค่าสูงสุดของแถบวาเลนซ์ เช่น แกลเลียมอาร์เซไนด์ หรือสารกึ่งตัวนำประเภทสารประกอบอื่นๆ เช่น CdS , ZnS เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารกึ่งตัวนำแถบช่องตรงดังรูปที่ 2.5(ก) โดยปกติ จุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ จะปรากฏอยู่ที่ตำแหน่ง $k=0$ โดยถ้าอิเล็กตรอนได้รับพลังงานของโฟตอนจากแสงเท่ากับช่องว่างแถบพลังงาน ($h\nu = E_g$) อิเล็กตรอนจะดูดกลืนพลังงานของโฟตอน สามารถที่จะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าได้โดยตรง และอิเล็กตรอนที่จุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าก็สามารถที่จะตกลงมาโดยตรงยังจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ โดยไม่ต้องมีการเปลี่ยนแปลงค่าโมเมนตัมและจะมีการปลดปล่อยพลังงานออกมาซึ่งอาจอยู่ในรูปของแสงสีต่างๆได้ ทำให้สารกึ่งตัวนำกลุ่มนี้สามารถดูดกลืน หรือปลดปล่อยพลังงานแสงได้เป็นอย่างดี สารกึ่งตัวนำแถบช่องไม่ตรงดังรูปที่ 2.5(ข) จะเห็นว่าจุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า จะไม่อยู่ตำแหน่งนี้ หรือก็คืออยู่ไม่ตรงกัน และจุดทั้งสองนี้มีค่า k ที่ต่างกัน ซึ่งก็คือมีค่าโมเมนตัมที่ต่างกัน ในกรณีของสารกึ่งตัวนำแถบช่องไม่ตรง เช่น ซิลิกอน(Si) อิเล็กตรอนในแถบนำไฟฟ้า ไม่สามารถตกลงมายังแถบวาเลนซ์ได้โดยตรง เพราะจะต้องมีการเปลี่ยนพลังงานก่อนซึ่งก็คือ การเปลี่ยนแปลงโมเมนตัม เพื่อให้อยู่ที่จุดพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าก่อน แล้วจึงตกลงมาสู่แถบวาเลนซ์ได้ในที่สุด และพลังงานที่เปลี่ยนแปลงดังกล่าวมักแสดงออกมาในรูปของความร้อน จึงไม่มีโฟตอนเกิดขึ้น



รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงาน และการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำ

(ก) ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง

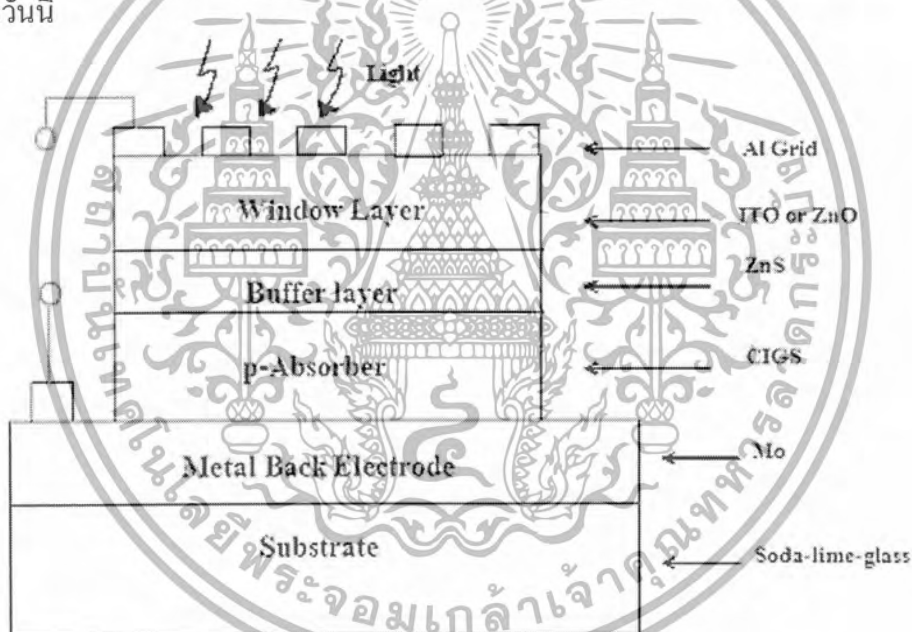
(ข) ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง

Cu(InGa)Se_2 (CIGS) เป็นสารกึ่งตัวนำประเภทสารประกอบจึง มีลักษณะของ โครงสร้างแถบพลังงานแบบตรงคือมีการย้าย(transition)สถานะพลังงานของอิเล็กตรอนจากตำแหน่งสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำจึงเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งที่น่ามาไว้ทำชั้นดูดซับแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

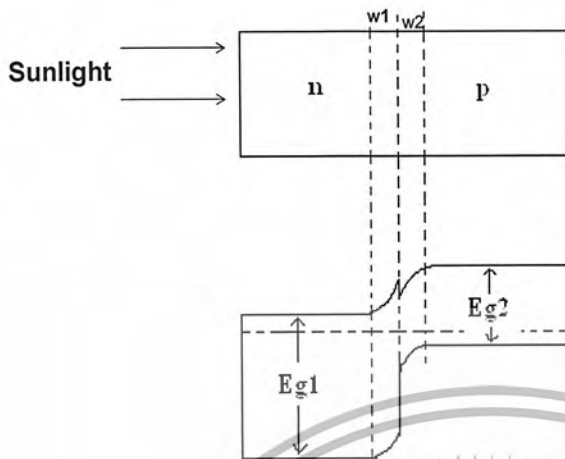
2.2 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CIGS

ลักษณะทางโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ที่จะทำการศึกษานชนิดฟิล์มบางประกอบด้วยกระจก โซดาไลม์(Soda-lime-glass) ชั้นฉนวนตัวนำ(Mo) ชั้นดูดกลืนแสง(CIGS) ชั้นกันชน(Buffer layer) ชั้นหน้าต่างรับแสง(ITO)หรือ(ZnO) และชั้นฉนวนตัวนำบน(Al) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง มีโครงสร้างพื้นฐานมาจากรอยต่อ p-n แบบเฮเทอโร (heterojunction) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งการเชื่อมต่อโดยตรงระหว่างชั้น ITO(n-type)บน CIGS(p-type)จะมีประสิทธิภาพต่ำ เนื่องจากผลของเฟสของสารประกอบของCuที่มีความต้านทานต่ำบริเวณผิวของฟิล์มบางซึ่งปัจจุบันนี้ฟิล์มที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดมีโครงสร้างแบบ n-ZnO/i- buffer layer/p- CIGS/Mo ฟิล์มบาง CdS และ ZnS ที่ปลูกผลึกได้ด้วยวิธีการอบสารละลายเคมี(CBD)ยังคงทำหน้าที่เป็นชั้นกันชนที่ดีที่สุดจนทุกวันนี้



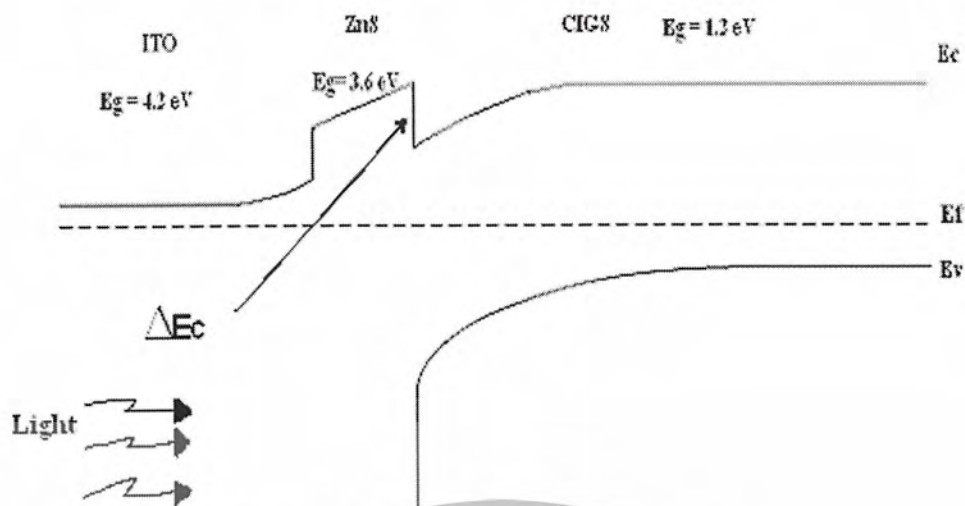
รูปที่ 2.6 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CIGS

ขั้วอิเล็กโทรด Al Grid จะใช้วิธีการระเหยสาร(Evaporation) ชั้นหน้าต่างรับแสง(Window layer) จะใช้วิธีสปัตเตอร์ริง(Sputtering) ชั้นกันชน(Buffer layer) จะใช้วิธีการอบสารละลายเคมี(CBD) ชั้นดูดกลืนแสง CIGS และขั้วอิเล็กโทรดMo ทำการปลูกฟิล์มบางโดยวิธีสปัตเตอร์ริง(Sputtering)



รูปที่ 2.7 แผนภาพแถบพลังงานของรอยต่อเฮเทอโรแบบชนิดเอ็นบนพี

แสงซึ่งมีพลังงานต่ำกว่า energy gap 1 (E_{g1}) แต่มีค่าสูงกว่า energy gap 2 (E_{g2}) จะผ่านสารกึ่งตัวนำตัวแรกซึ่งกลายเป็นหน้าต่างและถูกดูดกลืน โดยสารกึ่งตัวนำตัวที่สอง ถ้าแสงที่มีพลังงานสูงกว่า energy gap 1 (E_{g1}) จะถูกดูดกลืนในสารกึ่งตัวนำตัวแรก จุดเด่นของ โครงสร้างเซลล์แบบรอยต่อเฮเทอโร คือ แสงสามารถผ่านสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างพลังงานกว้างโดยไม่ถูกดูดกลืน และไปถูกดูดกลืนที่ฐานซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างพลังงานแคบ ซึ่งจะช่วยให้การตอบสนองเชิงสเปกตรัมสำหรับความยาวคลื่นต่ำ (พลังงานสูง) ซึ่งจะสามารถลอดผ่านหน้าต่างเข้าไปและถูกดูดกลืนใกล้รอยต่อได้มากที่สุดทำให้เซลล์มีประสิทธิภาพดีขึ้น



รูปที่ 2.8 แถบพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีโครงสร้างแบบITO/ZnS/CIGS(Cu(InGa)Se₂)

จากรูปที่ 2.8 เมื่อมีแสงอาทิตย์ซึ่งมีพลังงาน โฟตอนต่ำกว่า energy gap ของชั้น ITO $E_g=4.2\text{ eV}$ และ ชั้น Buffer layer ZnS $E_g=3.6\text{ eV}$ แต่มีค่าสูงกว่า energy gap ของชั้น CIGS $E_g=1.2\text{ eV}$ จะผ่านสารกึ่งตัวนำตัวแรกโดยผ่านชั้น ITO ซึ่งกลายเป็นหน้าต่าง และผ่านชั้น Buffer layer (n-type) โดยถูกดูดกลืนโดยสารกึ่งตัวนำชั้น CIGS (p-type) ซึ่งชั้นนี้จะทำหน้าที่ดูดซับแสงและจะสร้างพาหะคู่อิเล็กตรอน-โฮลเกิดขึ้น ทำให้เกิดไฟฟ้ากระแสตรงเกิดขึ้น

2.2.1 หน้าที่ของชั้นต่างๆในโครงสร้างของCIGS

Al Grid ทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าขั้วลบ อิเล็กตรอนจะไหลผ่านทางชั้นนี้

ITO(Indium Tin Oxide) or ZnO(Zinc Oxide) ชั้นหน้าต่างรับแสง(Window layer) สำหรับหน้าต่างรับแสง มีคุณสมบัติโปร่งใสและนำไฟฟ้าได้ดี ทำหน้าที่เป็นตัวป้องกันการสะท้อนกลับของแสงและมีช่องว่างพลังงาน(Energy gap)มาก แสงอาทิตย์จะส่องผ่านชั้นหน้าต่างรับแสง ที่มีช่องว่างพลังงานมาก โดยจะถูกดูดกลืนน้อยมาก มีอัตราการส่งผ่านแสงสูง

2.3 หน้าที่ของชั้น Buffer Layer

ZnS เป็นสารกึ่งตัวนำ(n-type)ชนิดสารประกอบมีโครงสร้างผลึกจะมี 2 แบบ ด้วยกันคือ โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ (zincblende) ซึ่งจัดอยู่ใน โครงสร้างผลึกแบบคิวบิกซิงค์ซัลไฟด์ (cubic zinc sulfide structure) และโครงสร้างผลึกแบบเวียร์ทไซด์ (wurtzite) ซึ่งจัดอยู่ใน โครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลซิงค์ซัลไฟด์ (hexagonal zinc sulfide structure) และมีลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรงคือมีการย้าย(transition)สถานะพลังงานของอิเล็กตรอนจากตำแหน่งสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำทำให้สารกึ่งตัวนำกลุ่มนี้สามารถดูดกลืน หรือปลดปล่อยพลังงานแสงได้เป็นอย่างดี ZnS มี $E_g=3.6$ eV จึงเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งที่น่ามาใช้ทำชั้น Buffer Layerของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อพิจารณาโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งเป็นรอยต่อเฮเทโรคือ ITO/ZnS/CIGSซึ่งชั้นหน้าต่างรับแสง(Window layer)จะต้องมีช่องว่างพลังงาน(Energy gap)มาก เพื่อให้ดูดซับแสงได้ในช่วงความยาวคลื่นกว้าง เพราะแสงอาทิตย์จะส่องผ่านชั้นITOที่มีช่องว่างพลังงานมากโดยจะถูกดูดกลืนน้อยมาก มีอัตราการส่งผ่านแสงสูงและมีสภาพความต้านทาน (Resistivity)ต่ำประมาณ $10^{-3} \Omega\text{-cm}$ ขณะที่ชั้นกันชน(Buffer layer)ซึ่งมีสภาพความต้านทานสูงจะแทรกอยู่ระหว่างรอยต่อ ซึ่งชั้นกันชนนี้มีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์ที่เตรียมได้เป็นอย่างมาก และยังมีผลต่อเสถียรภาพของเซลล์ในระยะยาวและผลของ light-soaking effect หน้าที่หลักอย่างหนึ่งของชั้นกันชนนี้ก็คือ ช่วยป้องกันการแพร่กระจายของอะตอมที่เกิดจากการเตรียมชั้นหน้าต่างรับแสงด้วยวิธีสปัตเตอร์ริงเข้าไปในชั้นดูดซับแสง(p-Absorb layer)ซึ่งมีผลทำให้บริเวณพื้นผิวของชั้นดูดซับแสงเสียหายได้ ชั้นกันชน(Buffer layer)CdSและZnSจึงเป็นชั้นกันชนที่ดีที่สุดในปัจจุบันนี้

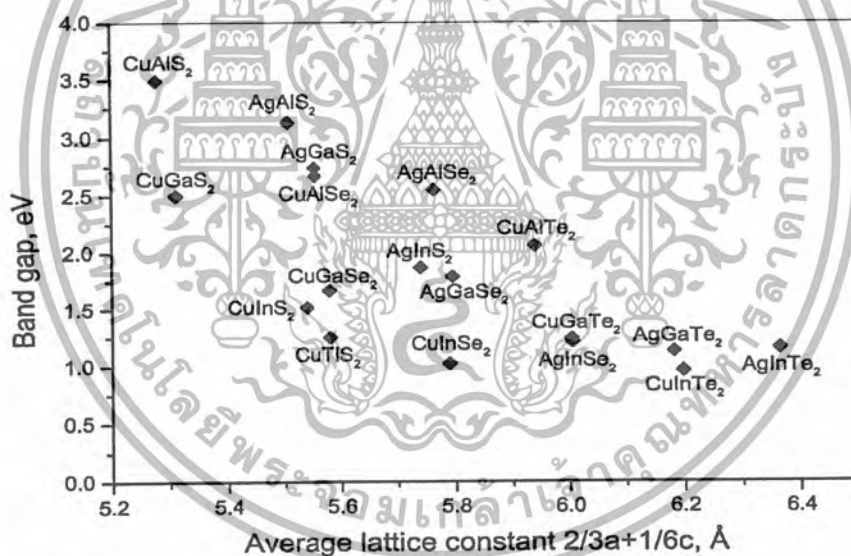
p-Absorber layer (CIGS) หน้าที่หลักขององค์ประกอบนี้คือ การดูดซับแสงและการเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้านำไปสู่พลังงานของคู่อิเล็กตรอน-โฮล วัสดุที่ต้องการจะต้องพิจารณาจาก

(1) The energy gap ของวัสดุควรอยู่ในขอบเขตของสเปกตรัมของแสงอาทิตย์ ซึ่งเซลล์สามารถทำงานได้ สำหรับหลักการคำนวณ E_g เบื้องต้นของวัสดุนั้น สามารถประมาณค่าได้จาก

ค่าคงที่แลตทิซ (lattice constant) ของวัสดุที่มีโครงสร้างเดียวกันและเฟสเดียวกัน ซึ่งตรวจสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวิเคราะห์ข้อมูลการแผ่รังสีเอ็กซ์ (X- ray) หรือจากการพิจารณาขนาดของอะตอมที่เป็นส่วนประกอบของวัสดุนั้น ๆ การจัดระเบียบของแถบพลังงานในผลึกจะพิจารณาจากหลักการแบ่งแยกของระดับพลังงานของอะตอมเนื่องจากการ interaction ระหว่างอะตอม ค่าคงที่แลตทิซ (lattice constant) ที่ใหญ่กว่าจะมีการ interaction ระหว่างอะตอมที่น้อยลง ซึ่งมีผลทำให้ E_g น้อยลงด้วย กฎนี้ถูกแสดงเป็นภาพสำหรับสารกึ่งตัวนำแบบซาลโคไพไรท์ (Chalcopyrite Semiconductors) ได้ดังในรูปที่ 2.9 จะเห็นว่ามีความจำเป็นที่จะต้องมีการเพิ่มของแถบช่องว่างพลังงานของซาลโคไพไรท์ CuInSe_2 จาก 1.0 eV (ค่าคงที่แลตทิซเฉลี่ยเป็น $2/3a + c/6 = 5.78 \text{ \AA}$) เป็น 1.4 – 1.5 eV โดยประมาณ สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์เดี่ยว อาจจะเลือก Chalcopyrite isovalent compound กับค่าคงที่แลตทิซ (lattice constant) ที่เล็กกว่า เช่น การใช้อะตอมซัลเฟอร์ที่เล็กกว่าแทนที่อะตอมซีลีเนียมที่ใหญ่กว่า เช่น ใน CuInS_2 ($E_g = 1.5 \text{ eV}$, $2/3a + c/6 = 5.54 \text{ \AA}$) หรืออะตอมของแกดเลียมที่เล็กกว่าแทนที่อะตอมของอินเดียมที่ใหญ่กว่า เช่น ใน CuGaSe_2 ($E_g = 1.7 \text{ eV}$, $2/3a + c/6 = 5.58 \text{ \AA}$) ค่าช่องว่างพลังงาน (Energy gap) สามารถวัดได้โดยการดูดกลืนแสง (optical absorption), Photoreflectance และ Photoluminescence



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ของค่าช่องว่างพลังงานกับค่าแลตทิซสำหรับวัสดุที่มีโครงสร้าง

และวาเลนซ์เดียวกัน ซึ่งในที่นี้เป็นตัวอย่างของซาลโคไพไรท์ I-III-VI

(2) สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของวัสดุที่เป็นตัวดูดซับแสงต้องสูง เพื่อดูดซับพลังงานการส่องสว่างของแสงมากที่สุด ในชั้นที่บาง สารกึ่งตัวนำแบบ Indirect ซึ่งมีค่าช่องว่างพลังงานสำหรับ Indirect Transitions น้อยกว่าค่าช่องว่างพลังงานสำหรับ Direct Transitions ปกติจะมีค่าการดูดกลืนแสง (optical absorption) ที่น้อย เพราะฉะนั้นจึงต้องการโครงสร้างที่ซับซ้อนในการเก็บกักแสง สารกึ่งตัวนำแบบซาลโคไพไรท์ (Chalcopyrite Semiconductors) สำหรับการประยุกต์ของเซลล์แสงอาทิตย์ เช่น CuInSe_2 และ CuInS_2 (CIS) เป็นสารกึ่งตัวนำแบบ Direct

ดังนั้นจะมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดซับที่สูง

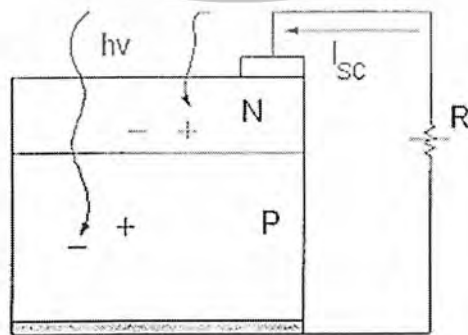
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(3) A large bulk lifetime ของพาหะส่วนน้อยและระยะเวลาแพร่ของพาหะมีค่ามาก จะทำให้เซลล์มีประสิทธิภาพสูง ถึงแม้ว่าความต้องการเหล่านี้จะไม่เข้มงวดสำหรับฟิล์มบาง (thin film) เมื่อเปรียบเทียบกับบัลค์ (bulk) ซึ่งมีระยะเวลาแพร่ของพาหะน้อยกว่า เพื่อให้ระยะเวลาแพร่ของพาหะมีค่ามาก จะต้องหลีกเลี่ยงผลึกที่มีความบกพร่อง (defects) และไม่บริสุทธิ์ (impurities) ซึ่งจะมีระดับการรวมตัวใหม่ใกล้เคียงกับกึ่งกลางของแถบช่องว่างพลังงานและอาจจะลดความไวในการเคลื่อนที่ของพาหะ (carrier mobility)

ในส่วน of ชั้น Metal black electrode (Mo) ทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าบวกซึ่งโพลจะไหลออกทางขั้ว Mo และ Substrate เป็นกระจกทำหน้าที่เป็นฐานรอง

2.4 หลักการทำงานของโซลาร์เซลล์ชนิด CIGS

เซลล์แสงอาทิตย์จะผลิตกระแสไฟฟ้าได้ก็ต่อเมื่อพลังงาน โฟตอนของแสงอาทิตย์จะมีค่ามากกว่า ($h\nu > E_G$) หรือเท่ากับ ($h\nu = E_G$) ช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ เมื่อมีแสงอาทิตย์ซึ่งมีพลังงาน โฟตอนต่ำกว่า energy gap ของชั้น ITO $E_g = 4.2\text{ eV}$ และชั้น Buffer layer ZnS $E_g = 3.6\text{ eV}$ แต่มีค่าสูงกว่า energy gap ของชั้น p-absorber จะผ่านสารกึ่งตัวนำตัวแรกโดยผ่านชั้น ITO ซึ่งคล้ายเป็นหน้าต่างและผ่านชั้น Buffer layer (n-type) โดยถูกดูดกลืนโดยสารกึ่งตัวนำชั้น absorber (p-type) ซึ่งชั้นนี้จะทำหน้าที่ดูดซับแสงและจะสร้างพาหะคู่ อิเล็กตรอน โพลเกิดขึ้น โครงสร้างรอยต่อพีเอ็นจะทำหน้าที่สร้างสนามไฟฟ้าภายในเซลล์ จะต่อต้านการเคลื่อนที่ของพาหะอิเล็กตรอนและโพลโดยพาหะจะถูกสนามไฟฟ้าพัดพาออกไปโดยจะแยกพาหะนำไฟฟ้าชนิดอิเล็กตรอนไปที่ขั้วลบ และพาหะนำไฟฟ้าชนิดโพลไปที่ขั้วบวก ที่ชั้น Absorber จะใช้สารกึ่งตัวนำชนิดพี ขั้วไฟฟ้าด้านหลังจึงเป็นขั้วบวก (Mo) ส่วนที่ชั้น ITO เป็นด้านรับแสงจะใช้สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ขั้วไฟฟ้าจึงเป็นขั้วลบ (Al) ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าแบบกระแสตรงที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสอง เมื่อต่อให้ครบวงจรจะเกิดกระแสไฟฟ้าไหลขึ้น



รูปที่ 2.10 ภาพวงจรเสมือนของโซลาร์เซลล์ชนิด CIGS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ทฤษฎีและหลักการวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มบาง

3.1 สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ

สมบัติการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำจะอธิบายได้โดยใช้ทฤษฎีแถบพลังงาน ในสารกึ่งตัวนำซึ่งประกอบไปด้วย แถบวาเลนซ์ แถบพลังงานต้องห้าม แถบคอนดักชัน ซึ่งการนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำจะเกิดจากทั้งอิเล็กตรอนและโฮล คือเมื่ออิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากแถบวาเลนซ์จะกระโดดขึ้นไปในแถบคอนดักชันแล้วก็จะเกิดโฮลในแถบวาเลนซ์ซึ่งเมื่อพิจารณาแล้วจะขึ้นกับความหนาแน่นและความคล่องตัวของอิเล็กตรอนในแถบคอนดักชันกับโฮลในแถบวาเลนซ์

3.1.1 สภาพนำไฟฟ้าและสภาพต้านทานไฟฟ้า

ในสารกึ่งตัวนำซึ่งมีพาหะอยู่สองชนิดคือ อิเล็กตรอนและโฮล เมื่อได้รับสนามไฟฟ้าจะเกิดมีแรงกระทำต่อพาหะทั้งสองและทำให้พาหะเคลื่อนที่ด้วยความเร็ววรีฟท์โดยอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ในทิศทางตรงข้ามกับสนามไฟฟ้า แต่โฮลเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกับสนามไฟฟ้า การเคลื่อนที่ของพาหะทำให้เกิดมีกระแสไฟฟ้าไหลขึ้น จากกฎของโอห์ม จะได้ว่าสภาพนำไฟฟ้า(electrical conductivity: σ) คืออัตราส่วนของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า(current density: J) ต่อสนามไฟฟ้า (electric field: E) ที่ป้อนเข้าไปจะได้ว่า

$$\sigma = J / E \quad (3.1)$$

โดยที่

$$J = nqVd = nq\mu E \quad (3.2)$$

เมื่อ n คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

q คือ ประจุของอิเล็กตรอน

Vd คือ ความเร็ววรีฟท์ของอิเล็กตรอน

จาก $\mu = Vd/E$ ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำเนื่องจากอิเล็กตรอนและโฮลในแถบวาเลนซ์คือ

$$\sigma = nq\mu_n + nq\mu_p \quad (3.3)$$

สภาพต้านทานไฟฟ้า หมายถึง ค่าส่วนกลับของสภาพนำไฟฟ้า

ดังนั้น สภาพต้านทานไฟฟ้า

$$\rho = 1/\sigma \quad \Omega\text{-cm} \quad (3.4)$$

ดังนั้น สภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่าตามสมการ

$$\rho = 1/q(n\mu_n + p\mu_p) \quad (3.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า(Resistivity)

วิธีวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำกระทำได้หลายวิธีทั้งวิธีที่ใช้ส่วนของอุปกรณ์เข้าสัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่างและวิธีที่ไม่ต้องสัมผัสโดยตรงในการทดลองนี้เราจะใช้วิธีการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าหลักๆ 2 วิธีด้วยกัน คือ วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสองขั้ว (Two points probe method) และ วิธีวัดด้วยปลายแหลมสี่ขั้วตามแนวเส้นตรง (Linear Four-Point Probe method)

3.1.3 วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสองขั้ว (Two points probe method)

วิธีนี้จะจัดปัญหาเรื่องความต้านทานที่รอยต่อออกไปได้ถ้าพื้นที่หน้าตัดของสารกึ่งตัวนำที่ใช้วัดมีค่าคงที่และกระแสไฟฟ้าที่ใช้มีค่าไม่สูงนัก เพื่อป้องกันไม่ให้สารกึ่งตัวนำร้อนขึ้นซึ่งจะเป็นเหตุให้สภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่าเปลี่ยนไป และโวลต์มิเตอร์ต้องมีค่าอิมพีแดนซ์สูง (High impedance) ดังปรากฏในรูปที่ 3.1

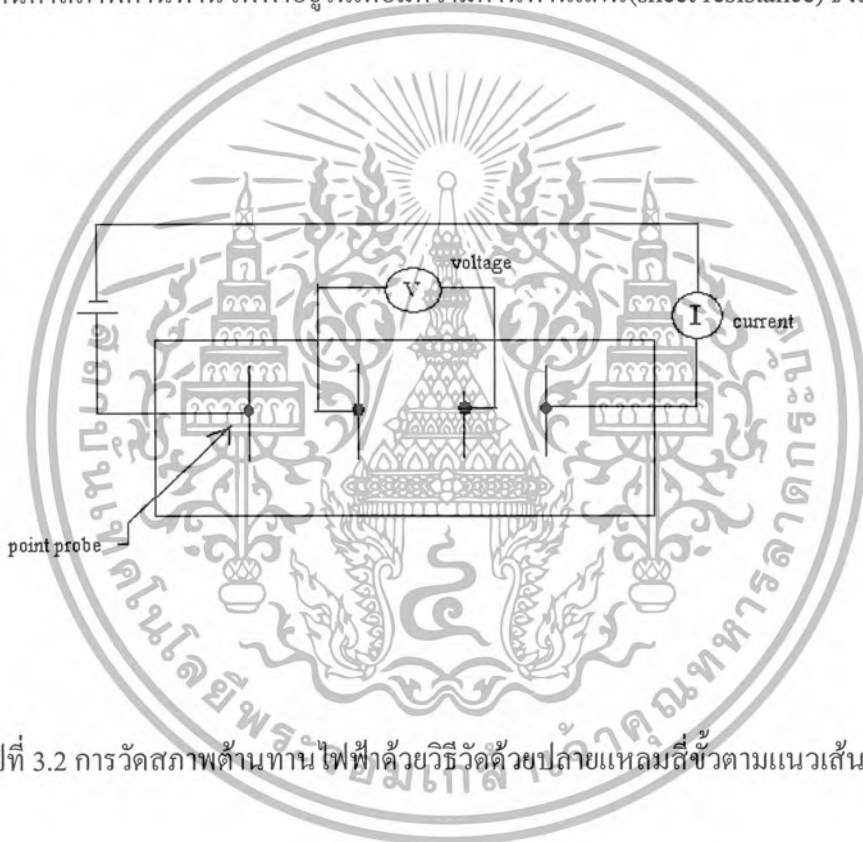


รูปที่ 3.1 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีขั้วปลายแหลมสองขั้ว

วิธีวัดจะกระทำโดยการวางขั้วสัมผัสจากโวลต์มิเตอร์ไปบนแท่งสารกึ่งตัวนำที่ตำแหน่งต่าง ๆ โดยให้ห่างจากรอยต่อของโลหะ (ที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้า) กับสารกึ่งตัวนำพอสมควร ถ้ารอยต่อมีสมบัติไม่คั่นเส้นสมศักย์ (Equipotential lines) จะบิดเบี้ยว (distorted) ณ ที่บริเวณปลายทั้งสองข้างของแท่งสารกึ่งตัวนำ เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าว จึงเพิ่มความยาวของแท่งสารกึ่งตัวนำให้มากกว่าสามเท่าของความยาวของด้านที่ยาวที่สุดที่ประกอบเป็นพื้นที่หน้าตัดของแท่งสารกึ่งตัวนำ

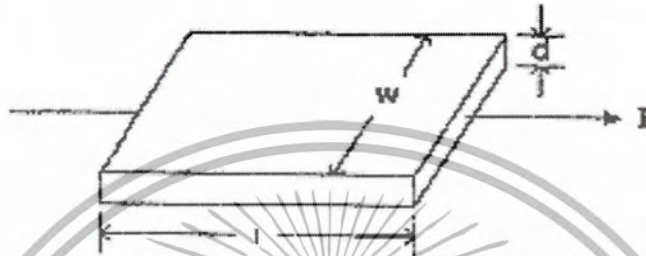
3.1.4 วิธีวัดด้วยปลายแหลมสี่ขั้วตามแนวเส้นตรง (Linear Four-Point Probe method)

วิธีนี้ใช้กันอย่างกว้างขวางในโรงงานอุตสาหกรรมสารกึ่งตัวนำเพราะเป็นวิธีที่ไม่ก่อให้เกิดความเสียหายให้กับชิ้นสารตัวอย่างที่นำมาวัด ยกเว้นกรณีออกแรงกดขั้วสัมผัสมากเกินไป อาจเป็นเหตุให้ผิวหน้าของสารตัวอย่างเสียหาย วิธีนี้ใช้ขั้วสัมผัสสี่ขั้ววางเรียงอยู่ในแนวเส้นตรงเส้นเดียวกัน ให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านขั้วสัมผัสคู่หนึ่ง ส่วนขั้วสัมผัสคู่ในทำหน้าที่วัดความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นแสดงดังรูปที่ 3.2 วิธีนี้จะไม่มีปัญหาเรื่องความต้านทานของรอยต่อ และความต้านทานจะคำนวณได้จากกฎของโอห์มและถ้ารู้ขนาดของฟิล์ม ก็จะสามารถคำนวณหาสภาพต้านทานไฟฟ้าได้ ส่วนใหญ่แล้วมักจะรายงานค่าสภาพต้านทาน ไฟฟ้าอยู่ในเทอมความต้านทานแผ่น(sheet resistance)ซึ่งมีหน่วยเป็น Ω/cm^2



รูปที่ 3.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีวัดด้วยปลายแหลมสี่ขั้วตามแนวเส้นตรง

เมื่อฟิล์มยาว l กว้าง w หนา d ตามรูปที่ 3.3 จะคำนวณหาความต้านทานฟิล์มได้ดังนี้



รูปที่ 3.3 แสดงขนาดของฟิล์มยาว l กว้าง w หนา d

$$R = V/I = \rho l/A = \rho l/wd \quad (3.6)$$

ในกรณีที่ฟิล์มเป็นรูปสี่เหลี่ยม ($l=w$) ดังนั้นสมการที่(3.7) เขียนได้ใหม่เป็น

$$\rho = Rwd/l \quad \Omega\text{-cm} \quad (3.7)$$

จากสมการที่(3.7) จะหาสภาพต้านทานแผ่น(sheet resistivity) ได้ดังนี้

$$\rho_s = \rho / d \quad \Omega / \square \quad (3.8)$$

ρ_s คือ สภาพต้านทานแผ่น(sheet resistivity)

ρ คือ สภาพต้านทานไฟฟ้า

3.2 การวัดการทะลุผ่านของแสง (UV-Visible Spectroscopy)

UV-Visible Spectroscopy เป็นการวัดพลังงานที่ดูดกลืนเข้าไปเมื่ออิเล็กตรอนถูกเลื่อนไปอยู่ในระดับชั้น

พลังงานที่สูงขึ้น (electronic transition) เนื่องจากเป็นปรากฏการณ์เร้าอิเล็กตรอน บางครั้งจึงเรียก UV Visible Spectroscopy ว่า Electronic Spectroscopy โดยปกติช่วง UV จะมีความยาวคลื่นประมาณ 10-380 nm แต่การวิเคราะห์โดย UV Spectrum จะใช้ความยาวคลื่นในช่วง 200-380 nm ซึ่งเรียกว่า “ Near-Ultraviolet Region ” ในช่วงความยาวคลื่นต่ำกว่า 200 nm อากาศจะดูดกลืนรังสีในช่วงนี้ จึงต้องวัด spectrum ภายใต้สุญญากาศ จึงเรียกความยาวคลื่นของ UV ในช่วงนี้ว่า “ Vacuum-Ultraviolet Region ” ส่วนความยาวคลื่นที่เราสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าหรือเรียกว่า “ Visible Region ” จะเป็น spectrum ของในช่วงประมาณ 380-780 nm ซึ่งจะปรากฏให้เห็นเป็นสีต่าง ๆ

เครื่อง UV-Visible Spectrophotometer ประกอบด้วยองค์ประกอบหลักดังนี้คือ

- แหล่งกำเนิดแสง ให้แสงช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสม เช่น ระหว่าง 190-1000 nm
- monochromator เป็นส่วนที่ใช้จัดการเกี่ยวกับแสงทำให้ผู้ใช้เลือกช่วงแสงที่จะนำมาวัดได้
- ช่องใส่ตัวอย่าง ใช้ใส่ตัวอย่างที่ต้องการวัด
- detector / amplifier ใช้วัดแสงที่เหลือจากการดูดกลืนของตัวอย่าง

การวัดค่าการส่งผ่านแสงนี้สามารถใช้เครื่อง Spectrophotometer UV/VIS 6405 โดยเลือกใช้ค่าความยาวคลื่นในช่วง 190 - 1100 nm โดยค่าการส่งผ่านแสงที่วัดได้นี้จะอยู่ในรูปเปอร์เซ็นต์ และนำค่าการส่งผ่านแสงและค่าความยาวคลื่นมาเขียนกราฟ จากกราฟการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง ทำให้สามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง แล้วนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงยกกำลังสองกับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) และจากกราฟดังกล่าวนำมาหาค่าช่องว่างพลังงาน (E_g) ได้ โดยในการหาค่าช่องว่างพลังงานนี้หาได้โดยลากเส้นตรงหาค่าคาดหมาย (extrapolation) ของส่วนของกราฟที่เป็นเชิงเส้นไปตัดแกนของพลังงานโฟตอน จุดตัดที่ได้จะเป็นค่าช่องว่างพลังงานของฟิล์มบาง

บทที่ 4

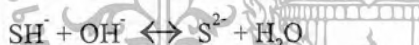
การปลูกฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์ด้วยวิธีออบสารละลายเคมี

การเตรียมฟิล์มบาง ZnS สามารถเตรียมได้หลายวิธี เช่นวิธีระเหยสาร(evaporation) วิธีไอเคมีวิธีสปัตเตอร์(sputtering)หรือวิธีออบสารละลายเคมี(chemical bath deposition:CBD)นี้เป็นวิธีที่ง่ายและประหยัดที่สุดวิธีหนึ่ง เนื่องจากใช้อุปกรณ์ที่ไม่ซับซ้อน อุณหภูมิที่ใช้ในเตรียมฟิล์มบางไม่สูงนักซึ่งทำให้ฟิล์มบางCIGSไม่เกิดการเสียหายต่อฟิล์มอันเนื่องมาจากการใช้อุณหภูมิที่สูง ไม่ต้องทำในสุญญากาศและฟิล์มบางที่ได้มีความยูนิฟอร์มที่ดี

การเตรียมฟิล์มบาง ZnS ด้วยวิธีออบสารละลายเคมี จะใช้สารละลายเคมีซึ่งประกอบไปด้วยแหล่งกำเนิดของไอออนซัลเฟอร์ (S^{2-})เช่นไทโอยูเรีย ($SC(NH_2)_2$) เป็นต้น แหล่งกำเนิดของZn เช่นเกลือของซิงค์ซัลเฟต ($ZnSO_4$) เป็นต้น

4.1 กระบวนการเกิดปฏิกิริยาเคมี

กลไกปฏิกิริยาพื้นฐานที่ก่อให้เกิดเป็นสารประกอบ ZnS จากเกลือของซิงค์ซัลเฟต ($ZnSO_4$) ในสารละลาย NH_3 อาจเขียนได้ดังนี้ คือ



ดังนั้น



แล้ว



เกลือ $ZnSO_4$ แยกตัวให้ Zn^{2+} กับ SO_4^{2-} จากนั้น Zn^{2+} จะรวมตัวกับ NH_3 กลายเป็นไอออนซิงค์เตตระแอมมีนเชิงซ้อน (zinc tetraammine complex ions) ตามสมการ (4.1) ส่วนไอออน S^{2-} จะถูกปล่อยออกมาจากไทโอยูเรียด้วยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ตามสมการ (4.2) ถ้าผลคูณของความหนาแน่นของไอออน S^{2-} กับ Zn^{2+} (ซึ่งได้จากการแยกตัวของ $Zn(NH_3)_4^{2+}$) เกินค่าความสามารถในการละลาย (solubility product, K_{sp}) ของ ZnS แล้วคอลลอยด์ (colloid) ของ ZnS จะปรากฏขึ้นในสารละลาย

โดยปกติมักจะให้ความเข้มข้นของ NH_3 มีค่ามาก เนื่องจาก NH_3 จะทำหน้าที่ควบคุมความเข้มข้นของไอออน Zn^{2+} โดยเปลี่ยนให้อยู่ในรูป $Zn(NH_3)_4^{2+}$ ดังสมการ (4.1) ถ้าหากความเข้มข้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของไฮดรอกไซด์ Zn กับความเข้มข้นของ S^{2-} มีค่าเกินค่าความสามารถในการละลายของ $Zn(OH)_2$ แล้ว จะปรากฏเป็นคอลลอยด์ของ $Zn(OH)_2$ แทนที่จะเป็น ZnS ดังสมการสมการ (4.4) ดังนั้นความเข้มข้นของ NH_3 จะเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการควบคุมอัตราการเกิดและคุณภาพของฟิล์มบาง



กลไกการตกผลึก ZnS ดังสมการ (4.1) – (4.3) เรียกว่าการตกผลึกแบบกลไกชนิดนี้ว่าการตกผลึกแบบกลุ่มก้อนต่อกัน (cluster by cluster precipitation)

4.2 การเกิดฟิล์มบาง ZnS บนแผ่นรองรับ

ในการตกผลึกของ ZnS จะเกิดกลไกได้ 2 แบบ ดังนี้

1. กลไกในการตกผลึกภายในเนื้อสารละลายเคมี โดยจะเรียกว่าการตกผลึกแบบกลุ่มก้อนต่อกัน (cluster by cluster precipitation) ซึ่งกลุ่มก้อนเหล่านี้จะมาจับตัวอยู่บนผิวหน้าของแผ่นรองรับ

2. กลไกในการตกผลึกที่เกิดขึ้นที่ผิวหน้าของแผ่นรองรับ เรียกว่า ไฮดรอกไซด์ต่อไฮดรอกไซด์ (ion by ion precipitation) ซึ่งตัว Zn^{2+} จะไปจับกับ OH^- กลายเป็น $Zn(OH)_2$ แล้วก็จะเกิดการแลกเปลี่ยนไฮดรอกไซด์ระหว่าง $Zn(OH)_2$ กับ $SC(NH_2)_2$

โดยทั่วไปแล้วการเกิดฟิล์มบาง ZnS บนแผ่นรองรับมักเกิดทั้งการตกผลึกแบบกลุ่มก้อนต่อกัน และในเวลาเดียวกัน เป็นการยากที่จะควบคุมไม่ให้กลไกใดกลไกหนึ่งปรากฏผล ดังนั้นฟิล์มบางจะเกิดจากกลไกทั้งสอง ดังรูปที่ 4.1 กลไกแบบกลุ่มก้อนต่อกัน (cluster by cluster precipitation) มักเกิดขึ้นมากในช่วงตอนท้ายของการเกิดฟิล์มบาง ส่งผลให้ฟิล์มบางที่ได้มีคุณภาพลดลง กล่าวคือ ฟิล์มมีความหนาไม่สม่ำเสมอ ผิวนอกหตุคร่อนง่าย

Cluster by Cluster Ion by Ion Mixed
Ion by Ion infiltrating on Cluster



รูปที่ 4.1 กลไกการเกิดฟิล์มบางแบบต่าง ๆ

เนื่องจากผลของความสามารถในการละลายของ ZnS มีค่าต่ำมาก ดังนั้น การควบคุมการตกผลึก สามารถทำได้โดยการควบคุมความเข้มข้นของไอออนอิสระ Zn^{2+} กล่าวคือ ต้องเลือกตัวแทนเชิงซ้อน (complexing agent) ที่เหมาะสมเพื่อที่จะปล่อยไอออน Zn^{2+} ในปริมาณความเข้มข้นน้อยมาก ซึ่งในที่นี้คือ NH_3 ซึ่งจะรวมตัวกับ Zn^{2+} กลายเป็นไอออนเชิงซ้อน (complex ions) ซึ่งจะเป็พารามิเตอร์สำคัญในการควบคุมอัตราการเกิดและคุณภาพของฟิล์มบาง

4.3 วิธีการทดลอง

ในการทดลองครั้งนี้ได้ศึกษาการเตรียมฟิล์มบาง ZnS ลงบนกระจกชนิด Super Frost ด้วยวิธีการสารละลายเคมี โดยจะทำการทดลองด้วยเงื่อนไขการเตรียมที่แตกต่างกัน เช่น ปริมาณสารเคมีที่ใช้ ระยะเวลาที่ใช้ในการเตรียม เป็นต้น และศึกษาคุณสมบัติทางฟิสิกส์ต่าง ๆ เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเตรียมฟิล์มบาง

4.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการปลูกผลึกฟิล์มบาง ZnS

1. แท่นยึดแผ่นรองรับทำด้วย เทฟลอน (taflon) สามารถยึดกระจกสไลด์ให้อยู่ในแนวตั้งได้ และถูกยึดด้วยแท่งแฉ้วตันที่ปลายอีกด้านหนึ่งของแท่งแฉ้วจะยึดกับแผ่นพลาสติกที่มีไว้
2. บีกเกอร์ภายในบีกเกอร์จะมีแท่งแม่เหล็ก (stir rod) ที่ให้สำหรับคนสารละลายในบีกเกอร์ให้เข้ากัน โดยมีเครื่องแมกเนติกสไตเรอร์ (magnetic stirrer) เป็นตัวควบคุมการหมุนอยู่ด้านล่าง ซึ่งสามารถปรับความเร็วรอบได้ บีกเกอร์จะถูกใส่ไว้ในอ่างน้ำที่สามารถปรับอุณหภูมิ



รูปที่ 4.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการปลูกผลึกฟิล์มบาง ZnS



รูปที่ 4.3 ลักษณะการวางบีกเกอร์ใน water bath

4.3.2 วิธีการเตรียมแผ่นกระจกสไลด์

ในการเตรียมแผ่นรองรับเพื่อให้เกิดฟิล์มบาง ZnS จะใช้แผ่นกระจกสไลด์นำมาตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดความกว้างประมาณ 25 mm และต้องทำความสะอาดกระจกสไลด์ก่อนที่จะนำไปใช้ทดลอง ซึ่งขั้นตอนการทำความสะอาดมีดังนี้

1. นำกระจกสไลด์ไปแช่ใน อะซิโตน ใส่ในเครื่องอัลตราโซนิก เป็นเวลาประมาณ 10 นาที
2. นำกระจกสไลด์ไปล้างด้วย เมททิล-อัลกอฮอล์ ใส่ในเครื่องอัลตราโซนิก เป็นเวลาประมาณ 10 นาที
3. นำกระจกสไลด์ไปล้างด้วย น้ำปอดประจุ (deionized water) ใส่ในเครื่องอัลตราโซนิก เป็นเวลาประมาณ 10 นาที
4. นำกระจกสไลด์ไปเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ จนได้กระจกสไลด์ที่สะอาดพร้อมที่จะนำไปทดลอง

4.3.3 ขั้นตอนการปลูกฟิล์มบาง ZnS ด้วยวิธีการอบสารละลายเคมี

1. เปิดสวิทซ์ water bath ตั้งอุณหภูมิที่ 80 °C
2. ตรวจสอบระดับน้ำในอ่าง เตรียมบีกเกอร์ CBDขนาด 600 ml ,บีกเกอร์สำหรับ น้ำ DI , บีกเกอร์NH₄OHขนาด100ml, ที่ยึดกระจกสไลด์(holder), บีกเกอร์สำหรับใส่ที่ยึดกระจกสไลด์ (holder) ขนาด 600 ml แล้วนำไปล้างด้วยน้ำปอดประจุให้สะอาดก่อนใช้
3. สารเคมีที่ใช้ประกอบด้วย

ZnSO₄ , Thiourea (SC(NH₂)₂) , NH₄OH , น้ำปอดประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. นำน้ำ DI ที่ตวงไว้ ให้เทใส่บีกเกอร์ CBD ขนาด 600 ml เพื่อละลาย Thiourea ($\text{SC}(\text{NH}_2)_2$) แล้วใส่ลงใน water bath และเปิดสวิทช์ magnetic stirrer ปรับไปที่เลข 5 จากนั้นนำ (NH_4OH) ที่ตวงไว้เทใส่ในบีกเกอร์ เพื่อละลาย ZnSO_4
5. เริ่มการปลูกผลึกโดยนำ กระจกสไลด์เรียบรื้อแล้ว ใส่ลงใน CBD บีกเกอร์ หลังจากนั้นนำแอมโมเนีย (NH_4OH) ใส่ลงใน CBD บีกเกอร์ พร้อมกับเริ่มจับเวลา
6. หลังจากการปลูกผลึกตามเวลาที่กำหนดแล้ว ให้นำกระจกสไลด์ใส่ลงในบีกเกอร์สำรอง แล้วล้างด้วยน้ำ DI จากนั้นให้ทำการเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
7. นำบีกเกอร์ที่ใช้ละลาย ZnSO_4 , CBD บีกเกอร์ , แท่งแม่เหล็ก (stir rod) , ที่ยึดกระจกสไลด์ (holder) ไปล้างด้วยกรด HCl ผสมกับ H_2O_2 ที่รอไว้จนกว่าปฏิกิริยาจะหมด จากนั้นให้ล้างด้วยน้ำ DI จนสะอาด น้ำเสียจากกรด HCl ให้เทใส่แกลลอนน้ำเสียของกรด HCl น้ำเสียจากปฏิกิริยา CBD ให้เทใส่แกลลอนน้ำเสียของ CdS



บทที่ 5

ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์ฟิล์มบาง

ในบทนี้เป็นผลการทดลอง โดยการปรับเปลี่ยนเงื่อนไขในการเตรียมต่างๆ แล้วทำการวิเคราะห์ ลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบาง การส่งผ่านแสง ความหนาของฟิล์มบาง ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า เป็นต้น

5.1 ผลของฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์โดยเปลี่ยนเวลาต่างๆ

การทดลองนี้จะทำการทดลองปลูกผลึกฟิล์มบาง ZnS ที่เวลาต่าง ๆ ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 80 °C คงที่ (อุณหภูมิของเครื่องทำความร้อน) จึงเลือกเงื่อนไขทางเวลาและทางสารเคมีที่เหมาะสมที่มีผลต่ออัตราการเกิดฟิล์มบาง ดังนี้

เวลา	ZnSO ₄ (0.15mol/l) (g)	SC(NH ₂) ₂ (0.6mol/l) (g)	NH ₄ OH (8 mol/l) (ml)	H ₂ O (ml)	รูปที่ 5.1
15	17.2524	18.2688	187.267	212.73	A
20	17.2524	18.2688	187.267	212.73	B
25	17.2524	18.2688	187.267	212.73	C
30	17.2524	18.2688	187.267	212.73	D

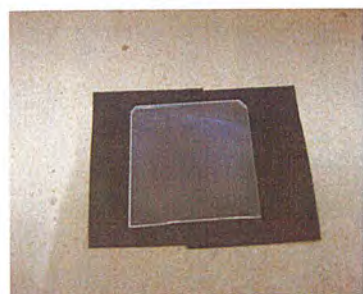
5.1.1 ลักษณะการเกิดฟิล์มบาง



รูป A



รูป B



รูป C

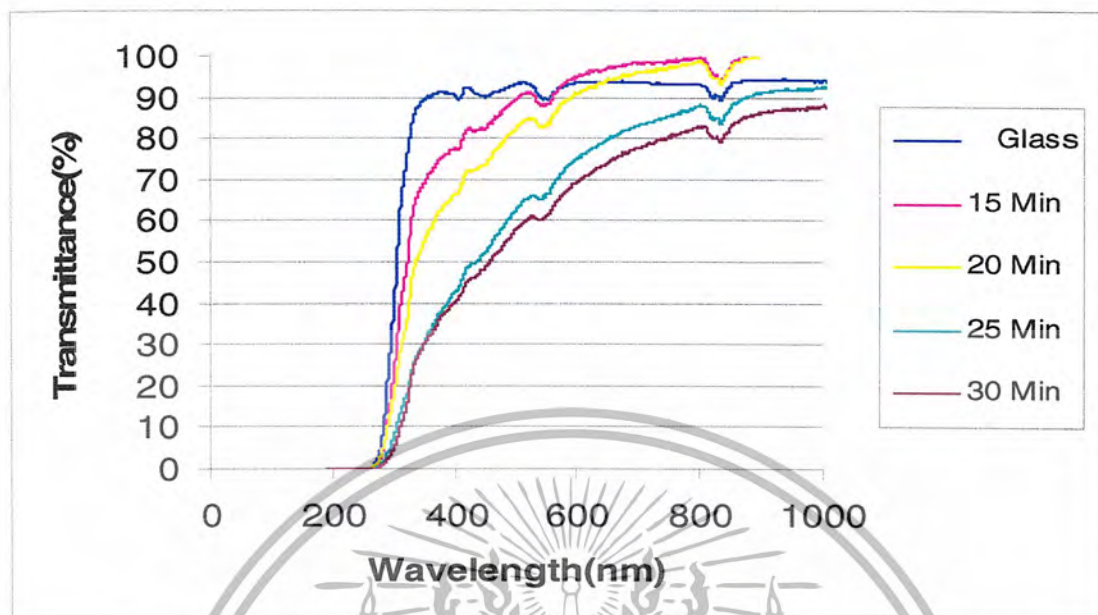


รูป D

รูปที่ 5.1 ภาพถ่ายฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์โดยเปลี่ยนเวลาต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.2 ผลของการวัดการส่งผ่านแสง



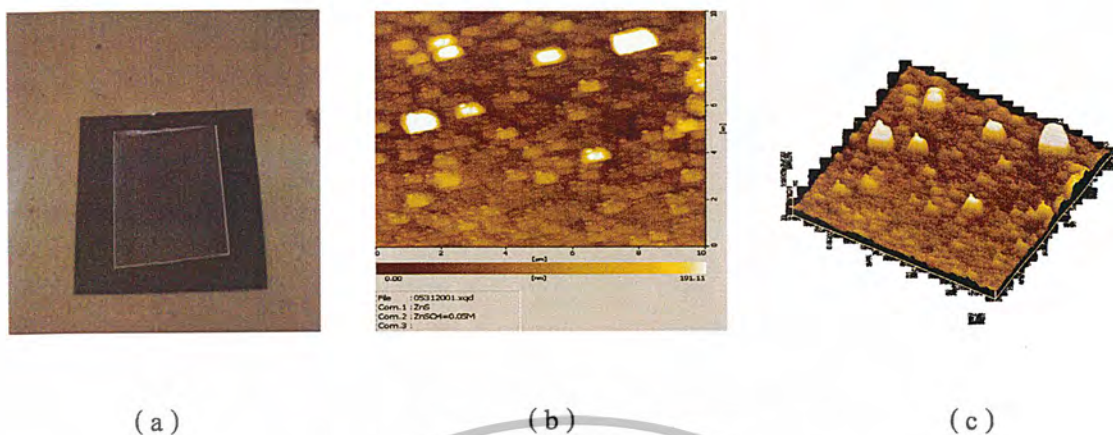
รูปที่ 5.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นของฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์ที่เตรียมได้ที่เวลาต่างๆ

5.2 ผลของปริมาณซิงค์ซัลเฟต ($ZnSO_4$) ที่มีผลต่อการเกิดฟิล์มบาง

เนื่องจากผลการทดลองสำหรับเงื่อนไขทางเวลาที่เหมาะสมที่สุดในการปลูกผลึกฟิล์มบางคือ 25 นาที อุณหภูมิคงที่ $80^{\circ}C$ เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด แต่มีการเปลี่ยนปริมาณซิงค์ซัลเฟตโดยที่ปริมาณสารเคมีที่ใช้เป็นดังนี้

ปริมาณของ $ZnSO_4$		ปริมาณสารตั้งต้น		
		$SC(NH_2)_2$ (0.6 mol/l)	NH_4OH (8 mol/l)	H_2O
(mol/l)	(g)	(g)	(ml)	(ml)
0.05	5.751	18.2688	187.267	212.73
0.15	17.2524			
0.25	28.754			

5.2.1 ลักษณะการเกิดฟิล์มบาง



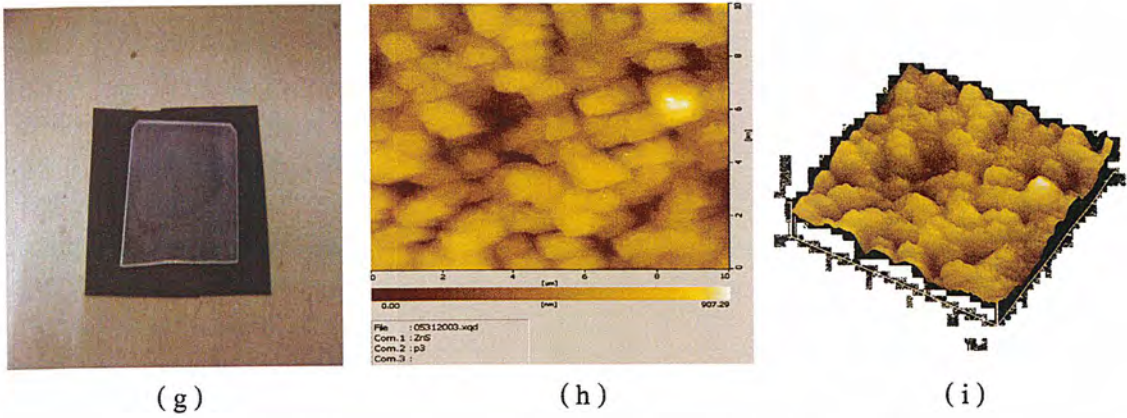
รูปที่ 5.3 ภาพถ่ายฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์ที่เตรียมได้โดยปริมาณ $\text{ZnSO}_4 = 0.05 \text{ mol/l}$

- (a) ภาพถ่ายฟิล์มบาง
- (b) ภาพถ่ายฟิล์มบางด้วยกล้อง AFM (atomic force microscope)
- (c) ภาพถ่ายฟิล์มบางด้วยกล้อง AFM แบบสามมิติ



รูปที่ 5.4 ภาพถ่ายฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์ที่เตรียมได้โดยปริมาณ $\text{ZnSO}_4 = 0.15 \text{ mol/l}$

- (d) ภาพถ่ายฟิล์มบาง
- (e) ภาพถ่ายฟิล์มบางด้วยกล้อง AFM (atomic force microscope)
- (f) ภาพถ่ายฟิล์มบางด้วยกล้อง AFM แบบสามมิติ



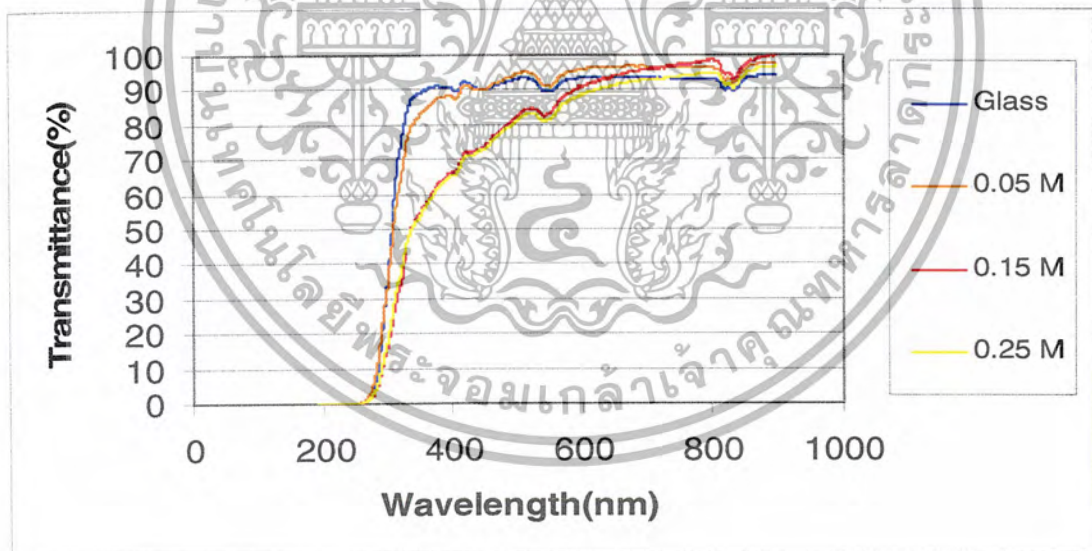
รูปที่ 5.5 ภาพถ่ายฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์ที่เตรียมได้โดยปริมาณ $\text{ZnSO}_4 = 0.25 \text{ mol/l}$

(g) ภาพถ่ายฟิล์มบาง

(h) ภาพถ่ายฟิล์มบางด้วยกล้อง AFM (atomic force microscope)

(i) ภาพถ่ายฟิล์มบางด้วยกล้อง AFM แบบสามมิติ

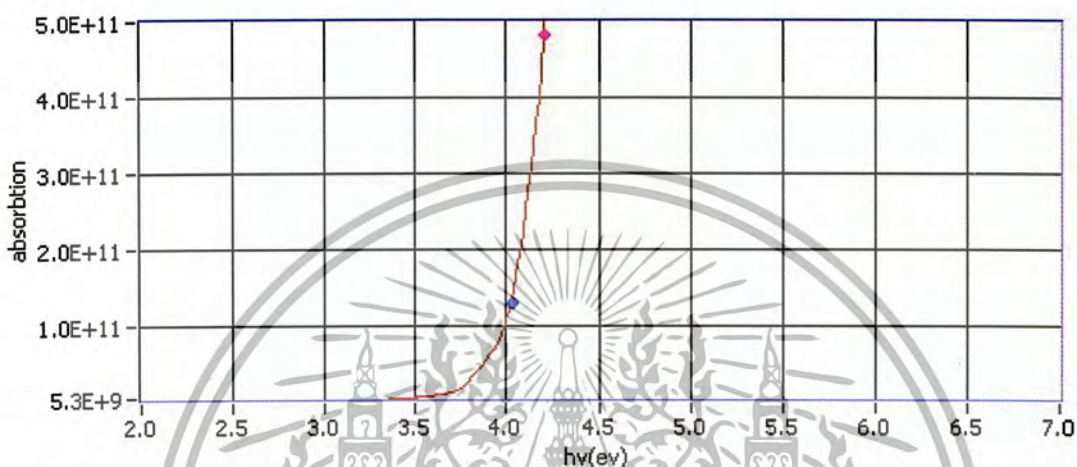
5.2.2 ผลของการวัดการส่งผ่านแสง



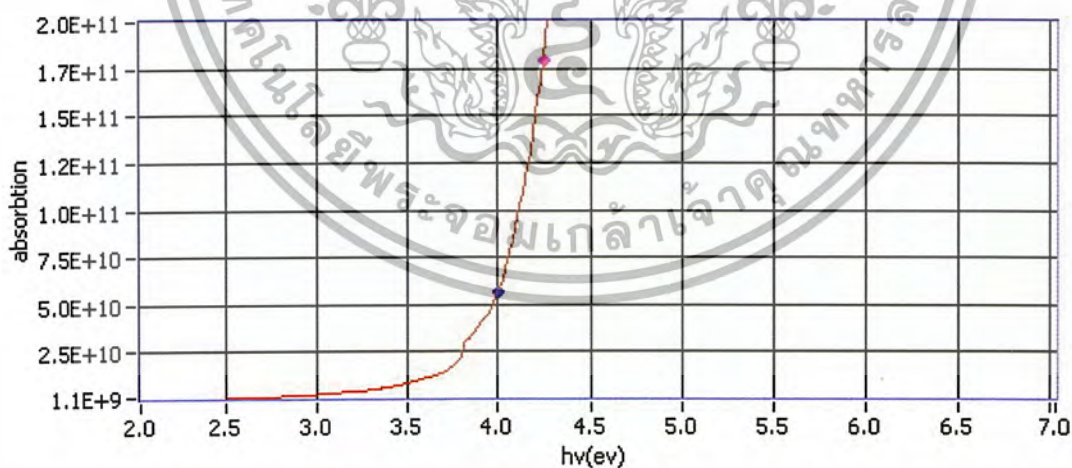
รูปที่ 5.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นของฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์ที่มีการเปลี่ยนปริมาณซิงค์ซัลเฟต (ZnSO_4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง ทำให้สามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (α) แล้วนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงยกกำลังสองกับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) และจากกราฟดังกล่าวนำมาหาค่าช่องว่างพลังงาน (E_g) ได้ โดยในการหาค่าช่องว่างพลังงานนี้ทำได้โดยลากเส้นตรงหาค่าคาดหมาย (extrapolation) ของส่วนของกราฟที่เป็นเชิงเส้นไปตัดแกนของพลังงานโฟตอน จุดตัดที่ได้จะเป็นค่าช่องว่างพลังงานของฟิล์มบาง



รูปที่ 5.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงยกกำลังสองกับพลังงานโฟตอนของฟิล์มบางที่ใช้ $ZnSO_4 = 0.05 \text{ mol/l}$



รูปที่ 5.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงยกกำลังสองกับพลังงานโฟตอนของฟิล์มบางที่ใช้ $ZnSO_4 = 0.15 \text{ mol/l}$

จากกราฟดังรูปที่ 5.7 และรูปที่ 5.8 นำมาหาค่าช่องว่างพลังงาน (E_g) ได้ดังนี้

$$\text{ปริมาณของ } ZnSO_4 = 0.05 \text{ mol/l} \quad E_g = 3.97 \text{ eV}$$

$$\text{ปริมาณของ } ZnSO_4 = 0.15 \text{ mol/l} \quad E_g = 3.90 \text{ eV}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.3 ผลของการวัดความหนาฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์

ปริมาณของ $ZnSO_4$ (mol/l)	ความหนาของฟิล์ม Å (อังสตรอม)
0.05	754
0.15	2159
0.25	ไม่สามารถวัดได้

ตารางที่ 1 ค่าความหนาของฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์โดยการเปลี่ยนปริมาณ $ZnSO_4$ วัดโดยเครื่อง step-profile

5.2.4 ผลของการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า

วิธีในการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางจะใช้วิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสองขั้ว(Two points probe method) ซึ่งจะใช้โปรแกรม lab view ในการวิเคราะห์ โดยวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าขณะไม่มีการฉายแสง โดยทำการวัดสามครั้งแล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า



รูปที่ 5.9 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์โดยวิธีวัดด้วยขั้วปลายแหลมสองขั้ว

จะได้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้างานี้

ปริมาณของ $ZnSO_4 = 0.05$ mol/l Resistivity(ρ)= 9.411 Ω -cm

ปริมาณของ $ZnSO_4 = 0.15$ mol/l Resistivity(ρ)= 26.85 Ω -cm

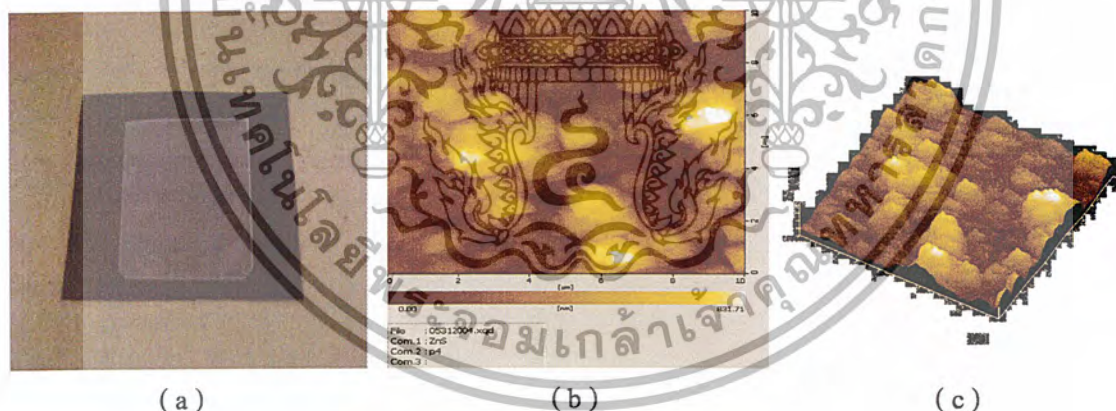
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 ผลของปริมาณของไทโอยูเรีย ($SC(NH_2)_2$) ที่มีผลต่อการเกิดฟิล์มบาง

เนื่องจากผลการทดลองที่เวลาที่เหมาะสมที่สุดในการปลูกผลึกฟิล์มบางคือ 25 นาที อุณหภูมิคงที่ $80^{\circ}C$ เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด แต่มีการเปลี่ยนปริมาณ และปริมาณไทโอยูเรีย โดยที่ปริมาณสารเคมีที่ใช้เป็นดังนี้

ปริมาณของ $SC(NH_2)_2$		ปริมาณสารตั้งต้น		
		$ZnSO_4$ (0.15mol/l)	NH_4OH (8 mol/l)	H_2O
(mol/l)	(g)	(g)	(ml)	(ml)
0.5	15.224			
0.6	18.2688	17.2524	187.267	212.73
0.7	21.313			

5.3.1 ลักษณะการเกิดฟิล์มบาง

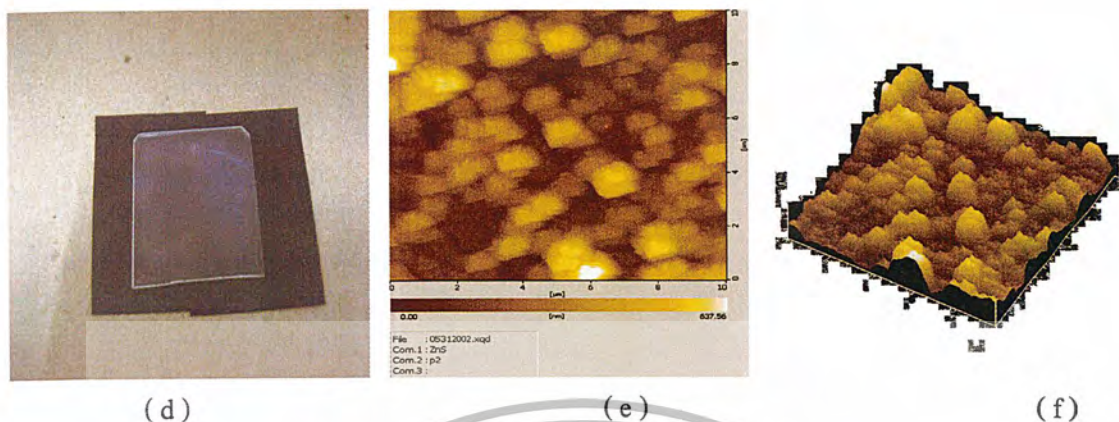


รูปที่ 5.10 ภาพถ่ายฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์ที่เตรียมได้โดยปริมาณ $(SC(NH_2)_2 = 0.5 \text{ mol/l}$

(a) ภาพถ่ายฟิล์มบาง

(b) ภาพถ่ายฟิล์มบางด้วยกล้อง AFM (atomic force microscope)

(c) ภาพถ่ายฟิล์มบางด้วยกล้อง AFM แบบสามมิติ

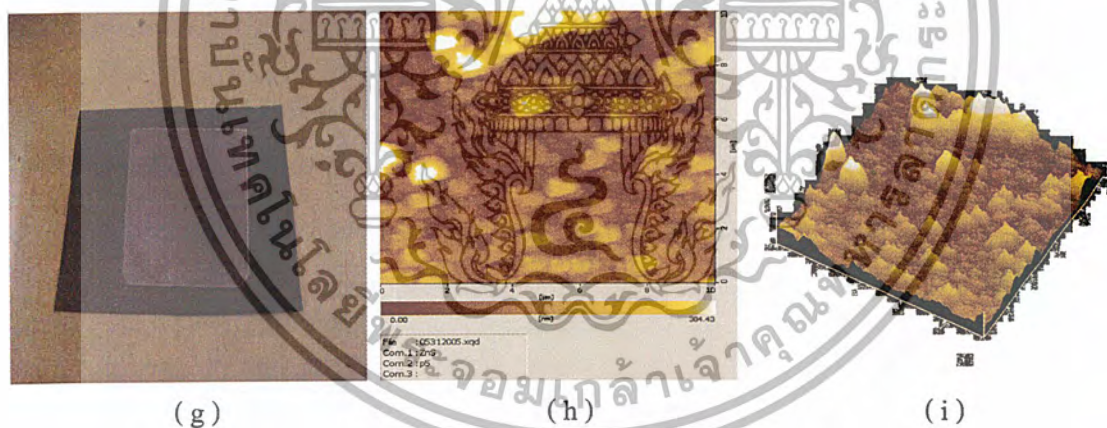


รูปที่ 5.11 ภาพถ่ายฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์ที่เตรียมได้โดยปริมาณ $(\text{SC}(\text{NH}_2)_2 = 0.6 \text{ mol/l}$

(d) ภาพถ่ายฟิล์มบาง

(e) ภาพถ่ายฟิล์มบางด้วยกล้อง AFM (atomic force microscope)

(f) ภาพถ่ายฟิล์มบางด้วยกล้อง AFM แบบสามมิติ



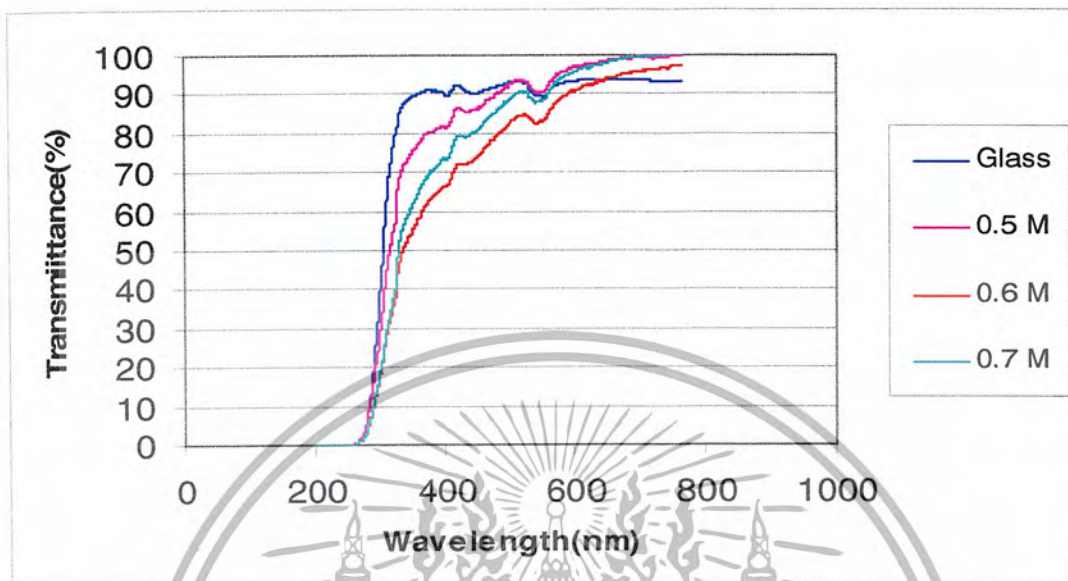
รูปที่ 5.12 ภาพถ่ายฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์ที่เตรียมได้โดยปริมาณ $(\text{SC}(\text{NH}_2)_2 = 0.7 \text{ mol/l}$

(g) ภาพถ่ายฟิล์มบาง

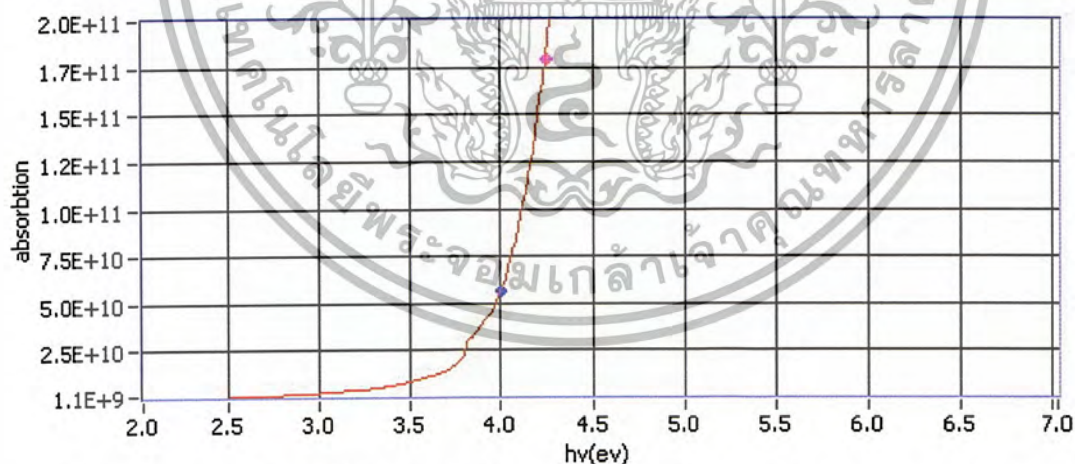
(h) ภาพถ่ายฟิล์มบางด้วยกล้อง AFM (atomic force microscope)

(i) ภาพถ่ายฟิล์มบางด้วยกล้อง AFM แบบสามมิติ

5.3.2 ผลของการวัดการส่งผ่านแสง

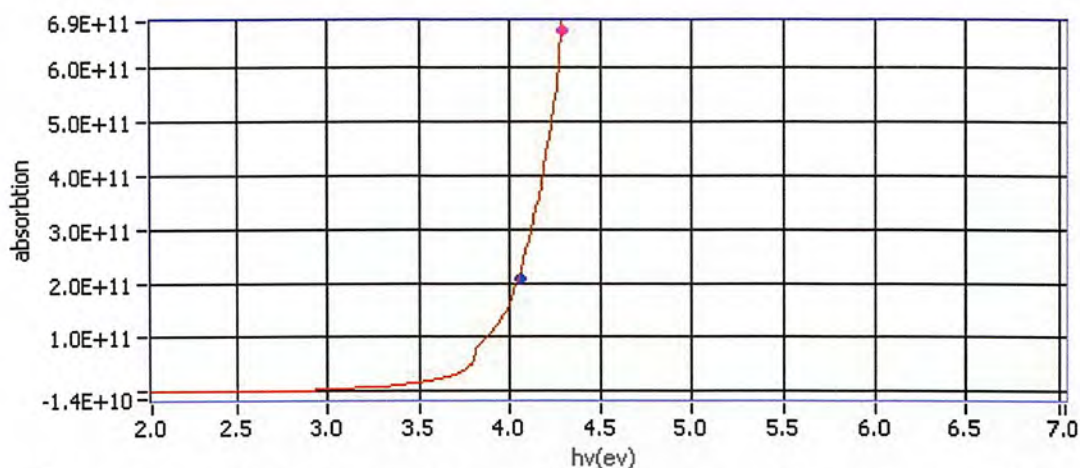


รูปที่ 5.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นของฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์ที่มีการเปลี่ยนปริมาณ ไทโอไซยูเรีย(SC(NH₂)₂)



รูปที่ 5.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงยกกำลังสองกับพลังงาน โฟตอนของฟิล์มบางที่ใช้(SC(NH₂)₂ = 0.6 mol/l

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงยกกำลังสองกับพลังงานโฟตอนของฟิล์มบางที่ใช้ $(\text{SC}(\text{NH}_2)_2 = 0.7 \text{ mol/l})$

จากกราฟดังรูปที่ 5.14 และรูปที่ 5.15 นำมาหาค่าช่องว่างพลังงาน (E_g) ได้ดังนี้

ปริมาณของ $(\text{SC}(\text{NH}_2)_2 = 0.6 \text{ mol/l}$ $E_g = 3.90 \text{ eV}$

ปริมาณของ $(\text{SC}(\text{NH}_2)_2 = 0.7 \text{ mol/l}$ $E_g = 3.95 \text{ eV}$

5.3.3 ผลของการวัดความหนาฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์

ปริมาณ $(\text{SC}(\text{NH}_2)_2$ (mol/l)	ความหนาของฟิล์ม Å (อังสตรอม)
0.6	2159
0.5	ไม่สามารถวัดได้
0.7	1247

ตารางที่ 2 ค่าความหนาของฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์โดยการเปลี่ยนปริมาณ $(\text{SC}(\text{NH}_2)_2$ วัดโดยเครื่อง step-profile

5.3.4 ผลของการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า

การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางจะทำการวัดเช่นเดียวกับ หัวข้อ 5.2.4 แต่มีการเปลี่ยนปริมาณของไทโอยูเรีย $(\text{SC}(\text{NH}_2)_2$ จากผลของการทดลองวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางจะได้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้างานี้

ปริมาณของ $(\text{SC}(\text{NH}_2)_2 = 0.6 \text{ mol/l}$ Resistivity(ρ)= 26.85 Ω -cm

ปริมาณของ $(\text{SC}(\text{NH}_2)_2 = 0.7 \text{ mol/l}$ Resistivity(ρ)= 15.612 Ω -cm

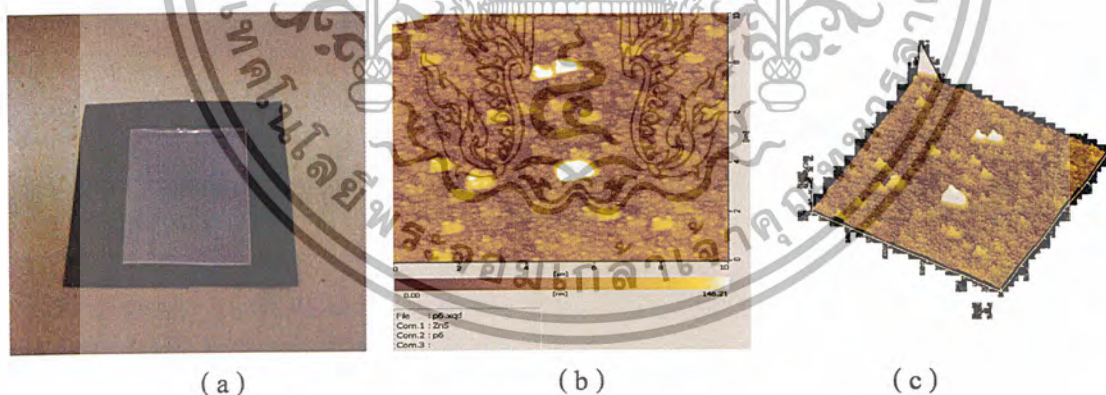
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 ผลของปริมาณของแอมโมเนียที่มีผลต่อการเกิดฟิล์มบาง

เนื่องจากผลการทดลองที่เวลาที่เหมาะสมที่สุดในการปลูกผลึกฟิล์มบางคือ 25 นาที อุณหภูมิคงที่ 80°C เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด แต่มีการเปลี่ยนปริมาณแอมโมเนีย และปริมาณสารเคมีที่ใช้เป็นดังนี้

ปริมาณของ NH_4OH		ปริมาณสารตั้งต้น		
		H_2O	$\text{ZnSO}_4(\text{g})$ (0.15mol/l)	$\text{SC}(\text{NH}_2)_2$ (0.6mol/l)
(mol/l)	(ml)	(ml)	(g)	(g)
6	140.450	259.55		
8	187.267	212.73	17.2524	18.2688
10	234.083	165.92		

5.4.1 ลักษณะการเกิดฟิล์มบาง



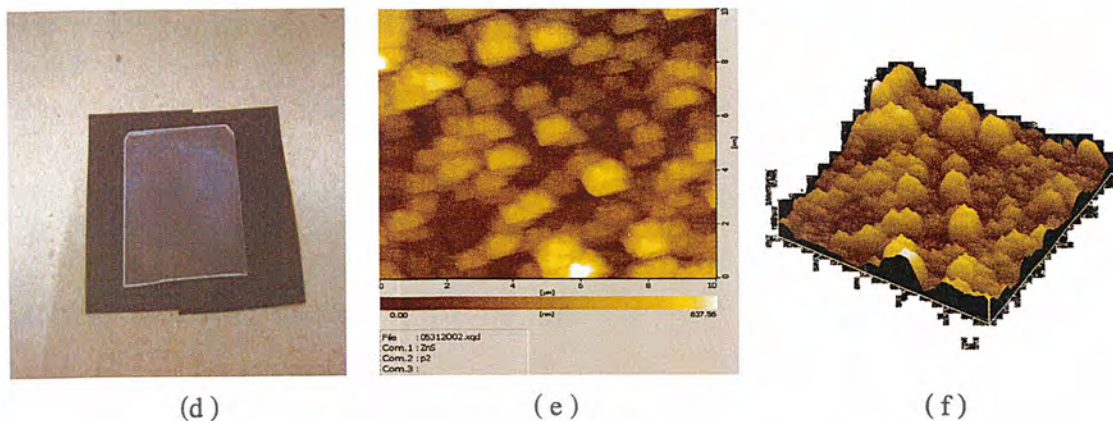
รูปที่ 5.16 ภาพถ่ายฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์ที่เตรียมได้โดยปริมาณ $\text{NH}_4\text{OH} = 6 \text{ mol/l}$

(a) ภาพถ่ายฟิล์มบาง

(b) ภาพถ่ายฟิล์มบางด้วยกล้อง AFM (atomic force microscope)

(c) ภาพถ่ายฟิล์มบางด้วยกล้อง AFM แบบสามมิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.17 ภาพถ่ายฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์ที่เตรียมได้โดยปริมาณ $\text{NH}_4\text{OH} = 8 \text{ mol/l}$

(d) ภาพถ่ายฟิล์มบาง

(e) ภาพถ่ายฟิล์มบางด้วยกล้อง AFM (atomic force microscope)

(f) ภาพถ่ายฟิล์มบางด้วยกล้อง AFM แบบสามมิติ



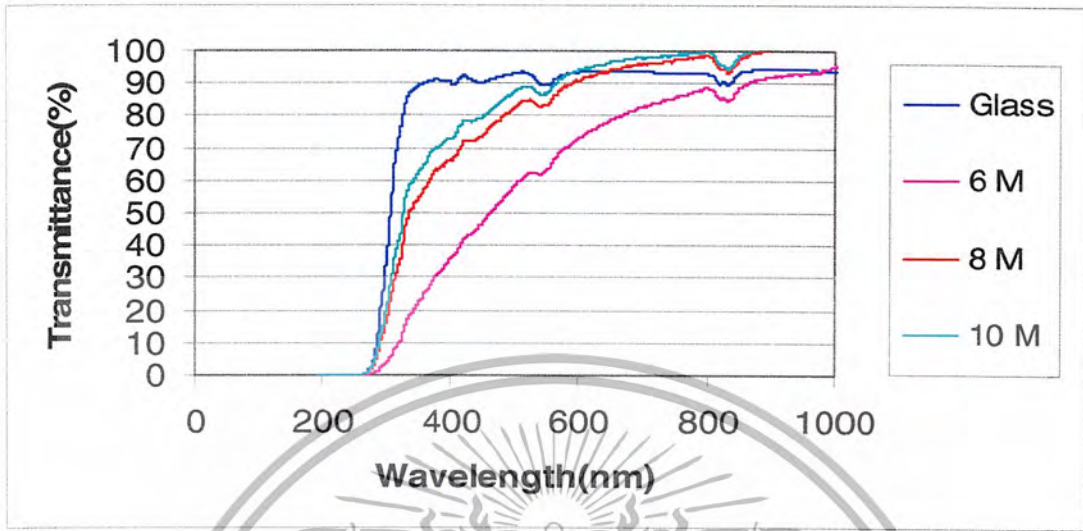
รูปที่ 5.18 ภาพถ่ายฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์ที่เตรียมได้โดยปริมาณ $\text{NH}_4\text{OH} = 10 \text{ mol/l}$

(g) ภาพถ่ายฟิล์มบาง

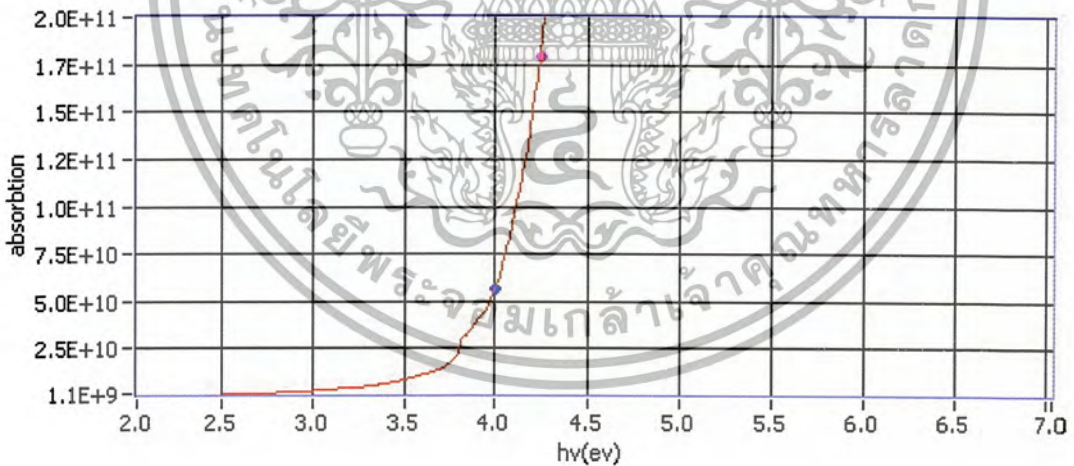
(h) ภาพถ่ายฟิล์มบางด้วยกล้อง AFM (atomic force microscope)

(i) ภาพถ่ายฟิล์มบางด้วยกล้อง AFM แบบสามมิติ

5.4.2 ผลของการการวัดการส่งผ่านแสง



รูปที่ 5.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่มีการเปลี่ยนปริมาณแอมโมเนีย (NH_4OH)



รูปที่ 5.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงยกกำลังสองกับพลังงานโฟตอนของฟิล์มบางที่ใช้แอมโมเนีย (NH_4OH) = 8 mol/l

จากกราฟดังรูปที่ 5.20 นำมาหาค่าช่องว่างพลังงาน (E_g) ได้ดังนี้

$$\text{ปริมาณ } (\text{NH}_4\text{OH}) = 8 \text{ mol/l} \quad E_g = 3.90 \text{ eV}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4.3 ผลของการวัดความหนาฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์

จากการทดลองสามารถวัดความหนาได้เฉพาะฟิล์มบางที่ ปริมาณ $(\text{NH}_4\text{OH}) = 8 \text{ mol/l}$ ซึ่งปริมาณของแอมโมเนีย (NH_4OH) ที่ 6 mol/l และ 10 mol/l ไม่สามารถวัดได้ อาจเกิดจากฟิล์มบางที่ได้ อัตราการเกิดฟิล์มนั้นบางเกินไป จากการทดลองสามารถวัดความหนาได้ดังนี้

ปริมาณ (NH_4OH) (mol/l)	ความหนาของฟิล์ม Å (เชิงศรอม)
6	ไม่สามารถวัดได้
8	2159
10	ไม่สามารถวัดได้

ตารางที่ 3 ค่าความหนาของฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์ โดยการเปลี่ยนปริมาณ (NH_4OH) วัดโดยเครื่อง step-profile

5.4.4 ผลของการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า

การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางจะทำการวัดเช่นเดียวกับ หัวข้อ 5.2.4 แต่มีการเปลี่ยนปริมาณของแอมโมเนีย (NH_4OH) จากการทดลองฟิล์มบางที่ได้จากการทดลองสามารถวัดความหนาได้ที่ฟิล์มบางที่มีการเปลี่ยนปริมาณของแอมโมเนีย $(\text{NH}_4\text{OH}) = 8 \text{ mol/l}$ ส่วนฟิล์มบางที่ปริมาณอื่นๆ ไม่สามารถวัดได้ จึงวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางเฉพาะฟิล์มบางที่มีการเปลี่ยนปริมาณของแอมโมเนีย $(\text{NH}_4\text{OH}) = 8 \text{ mol/l}$ จะได้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้างานี้

ปริมาณของแอมโมเนีย $(\text{NH}_4\text{OH}) = 8 \text{ mol/l}$

Resistivity (ρ) = $26.85 \text{ } \Omega\text{-cm}$

บทที่ 6

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

ในโครงการนี้เป็นการศึกษาการปลูกผลึกฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์ (ZnS) ด้วยวิธีการอาบสารละลายเคมี โดยใช้สารเคมีในการเตรียมประกอบด้วย $ZnSO_4$, $SC(NH_2)_2$, NH_4OH โดย NH_4OH ใช้เป็นตัวทำละลาย $ZnSO_4$ ส่วน $SC(NH_2)_2$ ละลายในน้ำปอดประจุ และทำการทดลองโดยเปลี่ยนปริมาณสารเคมี เวลาที่ใช้ในการเตรียม และทดลองที่อุณหภูมิ $80^\circ C$ และเลือกเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดมาใช้ในการทดลอง จากการทดลองเพื่อศึกษาอัตราการเกิดฟิล์มบาง โดยการเปลี่ยนเวลาที่ใช้ในการปลูกพบว่า ขณะเวลาผ่านไป 5 นาทีก็ยังไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ที่เวลา 15 นาทีสารละลายเริ่มมีสีขาวขุ่นจนมีสีขุ่นขึ้นเรื่อย ๆ ตามเวลาที่ใช้ในการปลูก ซึ่งเงื่อนไขทางเวลาที่เหมาะสมที่สุดคือ 25 นาที ที่เวลาน้อยเกินไปอัตราการเกิดฟิล์มบางจะน้อยและมีรอยดำ แต่ถ้าเวลามากกว่า 25 นาที คือ 30 นาทีอัตราการเกิดฟิล์มบางจะหนาขึ้นมีสีขาวขุ่น และจากการนำไปส่องด้วยกล้อง AFM เพื่อดูพื้นผิวของฟิล์มบางว่าเรียบสม่ำเสมอหรือไม่นั้น ทำให้ทราบได้ว่าปริมาณของแอมโมเนีย NH_4OH มีผลต่ออัตราการเกิดฟิล์มบาง ซึ่งจากการส่องด้วยกล้อง AFM ที่แอมโมเนีย NH_4OH ปริมาณน้อยๆ ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางมีลักษณะเรียบสม่ำเสมอ ส่วนปริมาณของไทโอยูเรีย $SC(NH_2)_2$ มากจะทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นช้าลง ส่งผลให้อัตราการเกิดฟิล์มบางลดลง และปริมาณของซิงค์ซัลเฟต $ZnSO_4$ ถ้าปริมาณเพิ่มขึ้นจะสังเกตได้ว่าลักษณะของฟิล์มจะเป็นรอยดำขาวๆ บางๆ โดยคาดว่าน่าจะเป็นผลล้นของ ZnS หรือ $Zn(OH)_2$ การวัดค่า pH ของสารละลายพบว่าค่า pH ของสารละลายอยู่ในช่วง 9-11 แต่ค่า pH ของสารละลายในบีกเกอร์มีค่าลดลงเรื่อยๆ ตามเวลาที่ใช้ในการปลูก เมื่อนำฟิล์มบางที่ได้ไปวัดการส่งผ่านแสงและมาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (α) แล้วนำมาเขียนกราฟและหาค่าช่องว่างพลังงาน (E_g) ของฟิล์มบาง จากการทดลองทำให้ทราบว่าค่าช่องว่างพลังงาน (E_g) ของฟิล์มบาง ZnS ที่ได้จากการทดลองมีค่าประมาณ 3.90 eV ซึ่งมากกว่าค่าของผลึก ZnS ที่มีค่าช่องว่างพลังงานที่ 3.6 eV ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากฟิล์มบางที่ได้จากการทดลอง อาจจะมีสารประกอบอื่นๆ เช่น $Zn(OH)_x$ ปะปนอยู่ในฟิล์มบาง ส่วนการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าในขณะที่ไม่มีการฉายแสงค่าที่ได้มีค่าประมาณ $22.070 \Omega\text{-cm}$

จากการทดลองทำให้ทราบว่าผลของปริมาณของสารเคมีมีส่วนต่ออัตราการเกิดฟิล์มบาง และลักษณะพื้นผิวต่อฟิล์มบางอย่างมาก นอกจากนี้เพื่อที่จะได้รับฟิล์มบางที่ดีควรมีการทำความสะอาดกระจกให้สะอาดโดยวิธีที่ถูกต้องที่สุด รวมทั้งขั้นตอนการเตรียมสารละลายก็มีส่วนสำคัญต่ออัตราการเกิดฟิล์มด้วยเช่นกัน

ประโยชน์ที่ได้รับจากโครงการ

1. ทำให้ทราบถึงคุณสมบัติของ ZnS ที่นำมาใช้ทำชั้น Buffer Layer ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CIGS
2. ทำให้ทราบถึงวิธีการในการปรับปรุงคุณภาพของฟิล์มบางให้ดีขึ้น
3. เพื่อเป็นประโยชน์ต่อแนวทางแก่การศึกษาและวิจัยเรื่องของ Buffer Layer ZnS เพื่อนำไปสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CIGS ต่อไป



กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาในด้านการแนะนำและสั่งสอนจาก ดร. สุทธิชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์ และจากความช่วยเหลือของพี่ๆและเพื่อนๆ ในบางโอกาสผู้จัดทำจึงขอขอบคุณทุกท่าน ที่มีส่วนเกี่ยวข้องในความสำเร็จครั้งนี้ด้วย

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และญาติพี่น้องที่คอยให้กำลังใจตลอดเวลามาจนโครงการนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

(นาย เปี่ยมศักดิ์ จันทร์แดง)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

1. หนังสือเซมิคอนดักเตอร์ดีไวซ์ ,ของรศ.ดร.สมเกียรติ สุภเดช
วศ.สจล.174 : ISBN:974-15-000-68
2. หนังสือเซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์, ของรศ.ดร.สมเกียรติ สุภเดช
วศ.สจล.157 : ISBN: 974
3. สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ฟิสิกส์ เทคโนโลยีและการใช้งาน เล่ม 1,
คู่มือ เครื่องาม
4. Material requirements for CIGS solar cells , www.sciencedirect.com

