

การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ฟิล์มบาง CuInS_2 ด้วยเทคนิคสเปรย์

FABRICATION OF CuInS_2 THIN FILM SOLAR CELLS BY SPRAY TECHNIQUE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2557

KMITL-2014-EN-M-040-139

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FABRICATION OF CuInS_2 THIN FILM SOLAR CELLS BY SPRAY TECHNIQUE



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN MICROELECTRONICS ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2014

KMITL-2014-EN-M-040-139

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2014

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

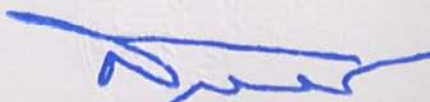
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ฟิล์มบาง CuInS_2 ด้วยเทคนิคสเปรย์
 Thesis Title Fabrication of CuInS_2 Thin Film Solar Cells by Spray Technique
 นักศึกษา นายจักรศ กาเลียง
 รหัสประจำตัว 54612402
 ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
 สาขาวิชา วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
 อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.สุรัชย์ ชัยสิทธิ์ศักดิ์
 หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2014-EN-M-040-139

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.วิสุทธิ์	ฐิติรุ่งเรือง	
รศ.ดร.เต็มพงษ์	เพ็ชรกุล	
ดร.กอบศักดิ์	ศรีประภา	
ผศ.ดร.สุรศักดิ์	นิยมเจริญ	
รศ.ดร.สุรัชย์	ชัยสิทธิ์ศักดิ์	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันจันทร์ที่ 3 มีนาคม พ.ศ. 2557 เวลา 13.00-15.00 น.
 สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ห้อง E12-404

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว


 (ศาสตราจารย์ ดร.สุชชีวีร์ สุวรรณสวัสดิ์)

ฉบับนี้ คณะวิศวกรรมศาสตร์
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้า
 วันที่ 3 มีนาคม พ.ศ. 2557
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ฟิล์มบาง CuInS_2 ด้วยเทคนิคสเปรย์
นักศึกษา	จักรเศศ กาเลี้ยง
รหัสประจำตัว	54612402
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
พ.ศ.	2557
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. สุธิชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ฟิล์มบาง คอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์ (CuInS_2 ; CIS) ที่ใช้ต้นทุนต่ำ เซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ CIS และทินออกไซด์ที่ถูกเจือด้วยฟลูออรีน (fluorine-doped tin oxide; FTO) ถูกสร้างขึ้นด้วยโครงสร้างที่แตกต่างกันได้แก่ Ag/CIS/FTO , $\text{Ag/CIS/TiO}_2/\text{FTO}$ และ $\text{Ag/CIS/CdS/TiO}_2/\text{FTO}$ ชั้นดูดกลืนแสง CIS ถูกเตรียมด้วยเทคนิคสเปรย์โดยใช้ CuCl_2 , InCl_3 และ NH_2CSNH_2 เป็นสารตั้งต้น ชั้น TiO_2 ถูกเตรียมด้วยเทคนิคพิมพ์สกรีนโดยใช้ TiO_2 P-25 ที่มีลักษณะเป็นแบบเพสต์ (paste) และชั้น CdS ถูกปลูกด้วยวิธีอบสารละลายเคมีโดยใช้สารละลาย $\text{CdSO}_4 - \text{NH}_2\text{CSNH}_2 - \text{ammonia}$ โครงสร้างผลึก สัณฐานวิทยาและองค์ประกอบของฟิล์ม CIS ที่ได้ถูกวิเคราะห์ด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD), กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และรามานสเปกโตรสโคปี ตามลำดับ

คุณลักษณะเฉพาะของกระแสและแรงดันภายใต้การฉายแสง (AM 1.5) บ่งชี้ว่าอุปกรณ์ที่ปราศจากชั้น TiO_2 (โครงสร้าง CIS/FTO) ไม่ตอบสนองต่อแสงเนื่องจากแสดงพฤติกรรมแบบโอห์มมิกที่เกิดจากรอยต่อของ CIS/FTO สำหรับการปรับปรุงเซลล์แสงอาทิตย์นั้น ได้นำชั้น TiO_2 มาแทรกระหว่างชั้น CIS และ FTO ประสิทธิภาพสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีโครงสร้าง $\text{Ag/CIS/TiO}_2/\text{FTO}$ คือ $2.3 \times 10^{-5} \%$ (V_{oc} 0.147V, J_{sc} $6.52 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$, FF 0.24) ที่ความหนาของชั้น TiO_2 ที่ $3 \mu\text{m}$ สาเหตุที่เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพต่ำเป็นเพราะเกิดปฏิกิริยารวมตัวของพาหะ เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพให้สูงขึ้น ชั้นฟิล์ม CdS จึงถูกนำมาใช้เป็นชั้นบัฟเฟอร์ในโครงสร้าง $\text{Ag/CuInS}_2/\text{CdS/TiO}_2/\text{FTO}$ ภายใต้เงื่อนไขการปลูกฟิล์ม CdS ที่เหมาะสม ประสิทธิภาพที่ได้เพิ่มขึ้นเป็น $3.67 \times 10^{-4} \%$ (V_{oc} 0.309 V, J_{sc} $6.01 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$, FF 0.198) การเพิ่มชั้นบัฟเฟอร์ CdS แสดงให้เห็นถึงการรวมตัวของพาหะที่ลดลง ซึ่งสังเกตได้จากค่าแรงดันวงจรมืด (V_{oc}) ที่เพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Fabrication of CuInS ₂ Thin Film Solar Cells by Spray Technique
Student	Mr. Jakaras Kaliang
Student ID.	54612402
Degree	Master of Engineering
Program	Microelectronics Engineering
Year	2014
Thesis advisor	Assoc. Prof. Dr. Sutichai Chaisitsak

ABSTRACT

This research focus on the fabrication of low-cost copper indium disulfide (CuInS₂; CIS) thin film solar cells. Solar cells based on CIS and fluorine-doped tin oxide (FTO) with different structures were fabricated; Ag/CIS/FTO, Ag/CIS/TiO₂/FTO and Ag/CIS/CdS/TiO₂/FTO. The CIS absorber layer was prepared by spray pyrolysis technique using CuCl₂, InCl₃ and NH₂CSNH₂ as reactants. The TiO₂ layer was prepared by screen printing technique using P25-TiO₂ paste and the CdS layer was deposited by chemical bath deposition using a CdSO₄-NH₂CSNH₂-ammonia aqueous solution. The crystalline structure, morphology and composition of the obtained CIS films were characterized by X-ray diffraction, scanning electron microscopy and raman spectroscopy, respectively.

The I-V characteristic under illumination (AM 1.5) indicated that the device without a TiO₂ layer (i.e CIS/FTO structure) did not respond to the light, due to ohmic behavior of the CIS/FTO junction. For the solar cell improvement, the TiO₂ layer was inserted between CIS and FTO layer. The maximum efficiency of device with a Ag/CIS/TiO₂/FTO structure was $2.30 \times 10^{-5} \%$ (V_{oc} 0.147V, J_{sc} 6.25×10^{-7} A/cm², FF 0.24) with a 3- μ m-thick TiO₂ layer. It was found that the low efficiency was obtained because of charge-carrier recombination. In order to increase the efficiency, the CdS film layer was added as a buffer layer for Ag/CuInS₂/CdS/TiO₂/FTO structure. Using the optimal conditions for CdS growth, the obtained efficiency of solar cell was improved to $3.67 \times 10^{-4} \%$ (V_{oc} 0.309V, J_{sc} 6.01×10^{-6} , FF 0.198). The added CdS buffer layer lead to decreasing charge-carrier recombination which was observed by the increasing V_{oc} value

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. สุรัชชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้คำปรึกษาและสนับสนุนตลอดระยะเวลาการทำงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่กรุณาให้คำแนะนำ ทำให้วิทยานิพนธ์มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ พระครูวินัยธรพชร ฐานกโร เจ้าอาวาสวัดประยงค์กิตติวนาราม ที่มอบทุนการศึกษาจำนวน 10,000 บาท และได้รับทุนสนับสนุนทำวิทยานิพนธ์จาก สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ขอขอบพระคุณ บริษัท เวสเทิร์น ดิจิตอล (ประเทศไทย) จำกัด ที่เอื้ออำนวยความสะดวก รามานสเปกโทรสโกปีสำหรับวิเคราะห์ผล

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัย Nano Electronic Materials and Devices (NEMD Lab) ที่ได้สนับสนุนเครื่องมือและวัสดุต่างๆ ที่ใช้ทำวิจัย

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในสาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกคนที่คอยให้คำแนะนำต่างๆ และเป็นกำลังใจให้เสมอมา

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ของข้าพเจ้าที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกๆ เรื่อง ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

จักรเรศ กาเลี้ยง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	X

บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 แลปพลังงาน.....	4
2.2 สารกึ่งตัวนำ.....	6
2.2.1 สารกึ่งตัวนำประเภทธาตุเดี่ยว.....	6
2.2.2 สารกึ่งตัวนำประเภทสารประกอบ.....	6
2.2.3 พาหะในสารกึ่งตัวนำ.....	6
2.2.4 วัสดุสารกึ่งตัวนำช่องแถบตรงและแถบไม่ตรง.....	7
2.2.5 สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์.....	9
2.2.6 สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์.....	9
2.1.7 สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น.....	9
2.2.8 สารกึ่งตัวนำชนิดพี.....	10
2.3 รอยต่อพี-เอ็น.....	10
2.3.1 รอยสัมผัสระหว่างสารกึ่งตัวนำต่างชนิด.....	11
2.3.2 รอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ.....	12
2.4 การกระตุ้นเชิงแสงบนพื้นฐานของรอยต่อ พี-เอ็น.....	12
2.4.1 หลักการทำงานพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์.....	13
2.4.2 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อ พี-เอ็น.....	14
2.4.3 ฟิลแพกเตอร์และประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์.....	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5 ค่ามวลอากาศ	17
2.6 การดูดกลืนแสง.....	18
2.7 การสูญเสียพลังงานในเซลล์แสงอาทิตย์.....	19
2.7.1 การรวมตัวของพาหะส่วนเกิน.....	20
2.7.1.1 การรวมตัวของอิเล็กตรอนและโฮลแบบ Band to band.....	21
2.7.1.2 การรวมตัวของอิเล็กตรอนและโฮลแบบ Auger	21
2.7.1.3 การรวมตัวของอิเล็กตรอนและโฮลแบบ Schottky-Reach-Hall (SRH).....	21
2.8 เทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์	21
2.8.1 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนผลึกเดี่ยว	22
2.8.2 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนพหุผลึก	23
2.8.3 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแกเลเลียมอาเซไนต์.....	24
2.8.4 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง	25
2.8.5 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนอสัณฐาน.....	26
2.8.6 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแคดเมียมเทลลูไรด์.....	26
2.8.7 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CIS	27
2.8.8 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Photoelectrochemical cell.....	28
2.9 สมบัติทางเคมีและภาวะพหุสัณฐานของฟิล์มบาง CuInS_2	29
2.10.การเคลือบฟิล์มบาง CuInS_2	30
2.10.1 การเคลือบฟิล์มบาง CuInS_2 ด้วยวิธีสปีดเตอร์.....	30
2.10.2 การเคลือบฟิล์มบาง CuInS_2 ด้วยวิธีระเหยสาร.....	31
2.10.3 การเคลือบฟิล์มบาง CuInS_2 ด้วยเทคนิคสเปรย์.....	33
2.11 การสร้างฟิล์ม TiO_2 ด้วยเทคนิคสกรีน	34
2.12 ปฏิกริยาการเกิดฟิล์ม CdS ด้วยวิธีอบสารละลายเคมี	35
2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	35
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	39
3.1 การเคลือบสเปรย์ชั้นฟิล์มบาง CuInS_2	39
3.1.1 สารเคมีที่ใช้และขั้นตอนการเตรียมสารละลาย	40
3.1.2 ฐานรองขั้นตอนการเตรียมฐานรอง.....	40
3.1.4 การควบคุมจังหวะสเปรย์ด้วยโปรแกรม Lab View.....	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้ถือว่าผิดกฎหมาย
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.5 ขั้นตอนการสเปรย์.....	42
3.2 การสร้างฟิล์มบาง TiO_2 ด้วยเทคนิคพิมพ์สกรีน	42
3.3 การสร้างฟิล์มบาง CdS ด้วยวิธีการอาบสารละลายเคมี (Chemical Bath Deposition)	43
3.3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้	43
3.3.2 ขั้นตอนการอาบสารละลายเคมี.....	44
3.4 ขั้นตอนการสร้างขั้วไฟฟ้า.....	45
3.5 แผนการดำเนินงานวิจัย.....	46
3.6 การวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มบางและการวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์.....	51
3.6.1 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction; XRD)	51
3.6.2 เทคนิครามานสเปกโตรสโกปี (Raman Spectroscopy)	53
3.6.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM).....	54
3.6.4 การวัดการทะลุผ่านของแสง (UV-Visible Spectroscopy)	55
3.6.5 การวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์	55
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	57
4.1 ผลของชั้นฟิล์มบาง CuInS_2 บนฐานรอง FTO โครงสร้าง $\text{CuInS}_2/\text{FTO}$ ต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์	57
4.1.1 ผลการวิเคราะห์ฟิล์มบาง CuInS_2 ในโครงสร้าง $\text{CuInS}_2/\text{FTO}$ ด้วยเทคนิค XRD.....	58
4.1.2 ผลการวิเคราะห์บาง CuInS_2 ในโครงสร้าง $\text{CuInS}_2/\text{FTO}$ ด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy.....	59
4.1.3 คุณลักษณะเฉพาะของกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ โครงสร้าง $\text{Ag}/\text{CuInS}_2/\text{FTO}$	59
4.2 ผลของชั้นฟิล์มบาง CuInS_2 บนฟิล์ม TiO_2 โครงสร้าง $\text{CuInS}_2/\text{TiO}_2/\text{FTO}$ ต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์	61
4.2.1 ผลการวิเคราะห์ฟิล์มบาง CuInS_2 ในโครงสร้าง $\text{CuInS}_2/\text{TiO}_2/\text{FTO}$ ด้วยเทคนิค XRD	62
4.2.2 ผลการวิเคราะห์ฟิล์มบาง CuInS_2 ในโครงสร้าง $\text{CuInS}_2/\text{TiO}_2/\text{FTO}$ ด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy.....	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.3 คุณสมบัติเฉพาะของของกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง Ag/CuInS ₂ /TiO ₂ /FTO	64
4.3 ผลของการควบคุมความหนาของชั้นฟิล์ม TiO ₂ ต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ โครงสร้าง CuInS ₂ /TiO ₂ /FTO	66
4.3.1 ผลความหนาฟิล์ม TiO ₂ ต่อการปรับเปลี่ยนเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ของผง TiO ₂	66
4.3.2 ผลการวิเคราะห์ฟิล์มบาง CuInS ₂ ต่อความหนาฟิล์ม TiO ₂ ในโครงสร้าง CuInS ₂ /TiO ₂ /FTO ด้วยเทคนิค XRD	67
4.3.3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกฟิล์มบาง CuInS ₂ ต่อความหนาของ TiO ₂ ในโครงสร้าง CuInS ₂ /TiO ₂ /FTO ด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy	68
4.3.4 คุณสมบัติเฉพาะของของกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ โครงสร้าง Ag/CuInS ₂ /TiO ₂ /FTO	70
4.4 ผลของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง CuInS ₂ /TiO ₂ /FTO ในเงื่อนไขความหนาของฟิล์ม บาง CuInS ₂	70
4.5 ผลของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง CuInS ₂ /TiO ₂ /FTO ในเงื่อนไขอัตราส่วน เชิงโมลของ ทองแดงและอินเดียม	72
4.6 ผลของชั้นบัฟเฟอร์ CdS ในเซลล์แสงอาทิตย์ฟิล์มบาง CuInS ₂ โครงสร้าง CuInS ₂ /CdS/TiO ₂ /FTO.....	73
4.6.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกฟิล์ม CdS ด้วยเทคนิค XRD	74
4.6.2 ผลการวิเคราะห์ความโปร่งแสงด้วยเทคนิค UV-Visible Spectroscopy	74
4.6.3 คุณสมบัติเฉพาะของของกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ โครงสร้างโครงสร้าง Ag/CuInS ₂ /CdS/TiO ₂ /FTO.....	75
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	78
เอกสารอ้างอิง.....	79
ภาคผนวก.....	84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่พิมพ์ขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต 85

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ข ข้อมูล JCPDS ของ CuInS_2 , TiO_2 , CdS และ SnO_2 ,.....	88
ภาคผนวก ค คุณลักษณะเฉพาะของกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิดซิลิคอน.....	92
ภาคผนวก ง งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....	93
ประวัติผู้เขียน.....	98



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 สถานภาพกำลังการผลิตของพลังงานทดแทนในปัจจุบันและเป้าหมายในปี 2564	1
2.1 ชิ้นงานวิจัยของ Ryan O'Hayre และคณะ.....	38
4.1 ค่าที่ได้จากการวัดรามานสเปกโตรสโคปีในโครงสร้าง $\text{CuInS}_2/\text{FTO}$	59
4.2 ค่าที่ได้จากการวัดรามานสเปกโตรสโคปีในโครงสร้าง $\text{CuInS}_2/\text{TiO}_2/\text{FTO}$	64
4.3 ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้เงื่อนไขจำนวนรอบ ของการสเปรย์ฟิล์ม CuInS_2	72



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 วงโคจรของอิเล็กตรอนขณะอะตอมอยู่ใกล้และมีปฏิกิริยาต่อกัน.....	4
2.2 แถบพลังงานของ (ก) โลหะ (ข) สารกึ่งตัวนำ (ค) ฉนวน.....	5
2.3 แผนภาพพลังงาน-เลขคลื่น (E-K diagram) ของ (ก) Ge (ข) Si (ค) GaAs.....	8
2.4 กลไกการเกิดและการรวมตัวของพาหะในสภาวะอุณหภูมิต่ำ.....	7
2.5 รอยต่อพี-เอ็นในภาวะสมดุล	11
2.6 รอยต่อพี-เอ็นของสารกึ่งตัวนำต่างชนิด.....	11
2.7 การเกิดกระแสไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์.....	14
2.8 คุณลักษณะเฉพาะของของกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์.....	14
2.9 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อพี-เอ็น	16
2.10 อิทธิพลของ (ก) ความต้านทานอนุกรม (ข) ความต้านทานขนาน ต่อสมบัติเอาท์พุทของ เซลล์แสงอาทิตย์.....	16
2.11 กำลังของรังสีดวงอาทิตย์ของ AM 0 และ AM 1.5 ที่ถูกดูดกลืนด้วยแก๊ส และแบบจำลองรังสี จากดวงอาทิตย์.....	18
2.12 การแผ่รังสีแบบ AM 1.5	18
2.13 สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของซิลิคอนและแกลเลียมอาเซไนด์	19
2.14 การสูญเสียพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์	20
2.15 กลไกการรวมตัวของเซลล์แสงอาทิตย์	20
2.16 ประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์	22
2.17 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนผลึกเดี่ยว (ก) โมดูลของเซลล์แสงอาทิตย์ (ข) โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนผลึกเดี่ยว	23
2.18 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนพหุผลึก (ก) โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนพหุผลึก (ข) กระบวนการสร้างแผ่นเวเนซิลิคอนพหุผลึก	24
2.19 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง (ก) โครงสร้างแบบซบสเตรท (Substrate) (ข) โครงสร้างแบบซูเปอร์สเตรท (Superstrate).....	25
2.20 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนอสัณฐาน (ก) โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนอสัณฐาน (ข) โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนอสัณฐาน.....	26
2.21 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด แคดเมียมเทลลูไรด์ (ก) โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CdTe (ข) โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CdTe.....	27
2.22 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CIS (ก) โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CIS (ข) โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CIS.....	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของแถบพลังงานของวัสดุกับประสิทธิภาพสูงสุด	28
2.24 แผนภาพวิภูภาคของระบบ Cu-In-S	29
2.25 โครงสร้างผลึก (ก) แบบคาลโคไพไรต์ (ข) แบบซิงก์เบลนด์ (Cu-Au Odering)	30
2.26 ลำดับกระบวนการสร้างฟิล์มบาง $CuInS_2$	31
2.27 การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีการระเหยสาร (ก) การให้ความร้อนแบบตัวต้านทาน (ข) การให้ความร้อนแบบลำอิเล็กตรอน	32
2.28 ฟิล์ม $CuInS_2$ ระเหยด้วยความร้อนแบบตัวต้านทาน	32
2.29 การสเปรย์ฟิล์มบาง $CuInS_2$ แบบไม่ต่อเนื่อง (ก) ขณะเปรี (ข) ขณะหยุดสเปรย์ (ค) เสร็จสิ้นการสเปรย์	33
2.30 กระบวนการพิมพ์สกรีน	34
3.1 ระบบการพ่นสเปรย์ของหัวสเปรย์ชนิด Stainless nozzle spray 39	
3.2 หัวสเปรย์ชนิด Stainless nozzle spray	41
3.3 หน้าต่างโปรแกรม Lab View ควบคุมการเปิดปิดของ โซลินอยด์วาล์ว	41
3.4 บล็อกพิมพ์สกรีนติดตั้งกับแท่นพิมพ์สกรีน	43
3.5 ปีกเกอร์สำหรับกระบวนการ CBD-CdS	45
3.6 เครื่องมือในการตม่น้ำสำหรับกระบวนการ CBD-CdS	45
3.7 (ก) ขวดกาวเงินที่ใช้ในการสร้างขั้วไฟฟ้า (ข) ลักษณะกาวเงิน (ของเหลว)	45
3.8 ชิ้นงานที่เสร็จสมบูรณ์ (ก) ชิ้นงานหลังจากกระบวนการเคลือบสเปรย์ (ข) ชิ้นงานหลังจากปลุกขั้วด้วยกาวเงิน	46
3.9 กระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ฟิล์มบาง $CuInS_2$ (การทดลองที่ 1)	47
3.10 กระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง $CuInS_2$ (การทดลองที่ 2)	48
3.11 กระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง $CuInS_2$ (การทดลองที่ 3)	49
3.12 กระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง $CuInS_2$ (การทดลองที่ 4)	50
3.13 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่เกิดจากการกระเจิงของรังสี	51
3.14 ตัวอย่างการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในโครงสร้าง $CuInS_2/TiO_2/FTO$	52
3.15 แสงที่กระเจิงออกมามีพลังงานเปลี่ยนแปลงไป เมื่อเทียบกับความยาวคลื่นเริ่มต้นของแสงที่ตกกระทบ	53
3.16 รามานสเปกตรัมของฟิล์มบาง $CuInS_2$ ในโครงสร้าง $CuInS_2/TiO_2/FTO$	54
3.17 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.18 เครื่อง UV-Visible spectroscope	55
3.19 ระบบวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ (ก) หน้าต่างโปรแกรมแสดงผล (ข) Keithley Sourcemeter (ค) ชุดกำเนิดแสงของเครื่อง solar simulator	56
4.1 ภาพถ่าย SEM फिल्म CuInS_2 ด้วยเทคนิคสเปร์ย์ลงบนฐานรอง FTO.....	57
4.2 ภาพตัดขวางของฟิล์ม CuInS_2 ด้วยเทคนิคสเปร์ย์ลงบนฐานรอง FTO.....	58
4.3 XRD ในโครงสร้าง $\text{CuInS}_2/\text{FTO}$	58
4.4 รามานสเปกตรัมของฟิล์มบาง CuInS_2 ในโครงสร้าง $\text{CuInS}_2/\text{FTO}$	59
4.5 คุณลักษณะเฉพาะของกระแสและแรงดันภายใต้ความเข้มแสงแสง 100 mW/cm^2 ในโครงสร้าง $\text{Ag}/\text{CuInS}_2/\text{FTO}$	60
4.6 แถบพลังงานของ (ก) แถบพลังงานของ FTO และ CuInS_2 ขณะไม่เกิดรอยต่อ (ข) แถบพลังงาน FTO และ CuInS_2 ในสภาพสมดุลเฟอร์มิและถูกฉายด้วยแสง	60
4.7 ภาพถ่าย SEM फिल्म TiO_2 ด้วยเทคนิคพิมพ์สกรีนลงบนฐานรอง FTO.....	61
4.8 ภาพถ่าย SEM फिल्म CuInS_2 ด้วยเทคนิคสเปร์ย์ลงบนฟิล์ม TiO_2	62
4.9 ภาพตัดขวางของฟิล์ม CuInS_2 ด้วยเทคนิคสเปร์ย์ลงบนฟิล์ม TiO_2	62
4.10 XRD ในโครงสร้าง $\text{CuInS}_2/\text{TiO}_2 (3\mu\text{m})/\text{FTO}$	63
4.11 รามานสเปกตรัมของฟิล์มบาง CuInS_2 ในโครงสร้าง $\text{CuInS}_2/\text{TiO}_2/\text{FTO}$	64
4.12 คุณลักษณะเฉพาะของกระแสและแรงดันภายใต้ความเข้มแสงแสง 100 mW/cm^2 ในโครงสร้าง $\text{Ag}/\text{CuInS}_2/\text{TiO}_2 (3\mu\text{m})/\text{FTO}$	65
4.13 แถบพลังงานของ (ก) แถบพลังงานของ FTO, TiO_2 , CuInS_2 ขณะไม่เกิดรอยต่อ (ข) แถบพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาพสมดุลเฟอร์มิและถูกฉายด้วยแสง.....	65
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ TiO_2 ใน paste กับความหนาของ TiO_2 หลังจากการสกรีน	66
4.15 ภาพถ่าย SEM ของฟิล์ม TiO_2 แสดงถึงอนุภาคของ TiO_2 ที่ครอบคลุมไม่เต็มผิวฐานรอง FTO (ก) 0.5 wt% (ข) 1 wt%.....	67
4.16 XRD ในโครงสร้าง $\text{CuInS}_2/\text{TiO}_2/\text{FTO}$ XRD ที่ความหนาของชั้นฟิล์ม TiO_2 (ก) $0.1\mu\text{m}$, (ข) $0.2\mu\text{m}$ และ (ค) $3.0\mu\text{m}$	68
4.17 รามานสเปกตรัมของฟิล์มบาง CuInS_2 ในโครงสร้าง $\text{CuInS}_2/\text{TiO}_2/\text{FTO}$ ที่ความหนาของ TiO_2 a) $0.1 \mu\text{m}$ b) $0.2 \mu\text{m}$ c) $3 \mu\text{m}$ d) $4 \mu\text{m}$ e) $4.9 \mu\text{m}$ f) $6.6 \mu\text{m}$	69
4.18 ตำแหน่งโหมด A1 ต่อความหนาของฟิล์ม TiO_2 ของฟิล์มบาง CuInS_2	69
4.19 FWHM จากรามานของฟิล์มบาง CuInS_2 ในโหมด A1 ต่อความหนาของฟิล์ม TiO_2	69
4.20 ความหนาของฟิล์ม TiO_2 ต่อประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์.....	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.21 ภาพถ่าย SEM โครงสร้าง $\text{CuInS}_2/\text{TiO}_2/\text{FTO}$ สเปร์ย์ 10 รอบ.....	71
4.22 ภาพถ่าย SEM โครงสร้าง $\text{CuInS}_2/\text{TiO}_2/\text{FTO}$ สเปร์ย์ 15 รอบ.....	71
4.23 ภาพถ่าย SEM โครงสร้าง $\text{CuInS}_2/\text{TiO}_2/\text{FTO}$ สเปร์ย์ 20 รอบ.....	71
4.24 อัตราส่วน [Cu]:[In] ต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์.....	73
4.25 XRD ของฟิล์ม CBD-CdS เวลา 10 นาที บนกระจก D263T	74
4.26 ผลการวัด %T ของฟิล์ม TiO_2 และ CdS.....	75
4.27 ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ในโครงสร้าง $\text{CuInS}_2/\text{CdS}/\text{TiO}_2/\text{FTO}$	76
4.28 สมบัติกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ในโครงสร้าง $\text{Ag}/\text{CuInS}_2/\text{CdS}/\text{TiO}_2/\text{FTO}$ ที่เวลาก่อนตัวของฟิล์ม CdS นาที.....	76
4.29 แถบพลังงานในโครงสร้าง $\text{CuInS}_2/\text{CdS}/\text{TiO}_2/\text{FTO}$ แถบพลังงานของ (ก) แถบพลังงานของ FTO , TiO_2 , CdS, CuInS_2 ขณะไม่เกิดรอยต่อ (ข) แถบพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาพสมดุลเฟอร์มิและถูกส่องผ่านด้วยแสง.....	77
ก.1 กล้อง USB Digital Microscope ยี่ห้อ vimicro.....	86
ก.2 แผ่นดัมมี่โดยสร้างพื้นที่จำลองไว้ขนาด $1 \times 1 \text{ cm}^2$	86
ก.3 ตัวอย่างเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต้องการวัดพื้นที่	86
ก.4 พื้นที่รูปดัมมี่	87
ก.5 เซลล์แสงอาทิตย์ที่ต้องการหาพื้นที่	87
ข.1 ข้อมูล JCPDS ของ กระจกนำไฟฟ้าโปร่งแสง FTO.....	88
ข.2 ข้อมูล JCPDS ของ Anatase Titanium Dioxide.....	89
ข.3 ข้อมูล JCPDS ของ Copper Indium Disulfide.....	90
ข.4 ข้อมูล JCPDS ของ CdS.....	91
ค.1 คุณสมบัติและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอน.....	92
ค.2 โมดูลของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนผลึกเดี่ยว.....	92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในแต่ละปีประเทศไทยต้องสูญเสียงบประมาณมหาศาลในการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศ เนื่องจากแหล่งพลังงานที่ผลิตภายในประเทศไม่เพียงพอต่อความต้องการ เพื่อใช้ในการพัฒนาประเทศ และมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นทุกปี ในปัจจุบันได้มีการพึ่งพาพลังงานแก๊สธรรมชาติในการผลิตไฟฟ้า เพื่อลดผลกระทบจากวิกฤตการณ์น้ำมัน แต่อย่างไรก็ตามแก๊สธรรมชาติหรือน้ำมันเป็นพลังงานที่ใช้แล้วหมดไปและมีอยู่อย่างจำกัด อีกทั้งผลที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ยังมีส่วนทำให้เกิดวิกฤตการณ์โลกร้อนจนทำให้ในหลายๆ ประเทศทั่วโลกตระหนักถึงการใช้พลังงานมากขึ้น

ในปัจจุบันการศึกษาค้นคว้าวิจัยและพัฒนาแหล่งพลังงานทดแทนมากขึ้นไม่ว่าจะเป็น พลังงานลม, พลังงานแสงอาทิตย์, พลังงานน้ำ, พลังงานชีวมวล, แก๊สชีวภาพ และขยะ โดยเฉพาะอย่างยิ่งพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งอยู่ในรูปของแสงแดดและเป็นพลังงานสะอาดที่ไม่มีวันหมด พลังงานแสงอาทิตย์สามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าด้วยอุปกรณ์ที่เรียกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cells) หรือ โฟโตโวลตาอิกส์ (Photovoltaics) พลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนพื้นโลกมีมากมายมหาศาล เนื่องจากแสงที่ตกกระทบลงบนพื้นที่ 1 ตารางเมตร มีความเข้มแสงอยู่ที่ประมาณ 1000 วัตต์ และศักยภาพของพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทยมีค่าเฉลี่ยที่ 5 kWh/m²/day [1] ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมกับการผลิตไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์มาก

ตารางที่ 1.1 สถานภาพกำลังการผลิตของพลังงานทดแทนในปัจจุบันและเป้าหมายในปี 2564 [2]

ประเภทของพลังงาน (ที่เปลี่ยนมาเป็น ไฟฟ้า)	หน่วย	ปริมาณกำลังผลิตปัจจุบัน	เป้าหมายปี 2564
พลังงานชีวมวล	MW	1751	3630
พลังงานแสงอาทิตย์	MW	75.48	2000
พลังงานน้ำ	MW	86.39	1608
พลังงานลม	MW	7.28	1200
กาชชีวภาพ	MW	137.57	600
ขยะ	MW	13.45	160

ตามแผนส่งเสริมพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก [2] รัฐบาลมีนโยบายวางเป้าหมายการใช้พลังงานทดแทนให้ได้ 25% (ตารางที่ 1.1) ของพลังงานทั้งหมดในประเทศภายใน 10 ปี จากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นเป็นประโยชน์ท่านกรรมาธิการไม่ว่ากรณิดังนี้ อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัจจุบัน (2556) มีการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน 11% และเป้าหมายที่จะทำได้ 18% ภายในปี 2560 และเพิ่มขึ้นเป็น 25% ในปี 2564 ตามลำดับถ้าดำเนินการได้ตามแผนจะสามารถลดงบประมาณการนำเข้าน้ำมันของประเทศประมาณปีละ 574,000 ล้านบาท และลดการปล่อยแก๊ส CO_2 ได้ 76 ล้านตันในปี 2564 [2] ซึ่งเป้าหมายในการผลิตพลังงานทดแทนจากแสงอาทิตย์สูงเป็นอันดับสองรองจาก พลังงานชีวมวล อย่างไรก็ตามการผลิตแผงเซลล์แสงอาทิตย์ภายในประเทศยังมีปริมาณน้อย เมื่อเทียบกับความต้องการ อีกทั้งยังมีราคาแพงเพราะเทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิตต้องใช้ระบบสุญญากาศซึ่งใช้ต้นทุนสูงและต้องนำเข้าจากต่างประเทศ

เซลล์แสงอาทิตย์ถูกแบ่งเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ 1) ชนิดบล็อค (Bulk solar cells) และ 2) ชนิดฟิล์มบาง (Thin film solar cells) [3] เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดบล็อค ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นบล็อคซิลิคอน จะมีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานที่สูง แต่ต้องใช้เครื่องจักรราคาสูงในกระบวนการผลิต และต้องใช้ปริมาณวัสดุจำนวนมาก ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดบล็อคซิลิคอนมีราคาสูง ในขณะที่เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางซึ่งสร้างจากฟิล์มบางๆของวัสดุอาทิเช่น ซิลิคอนอสัณฐาน (Amorphous silicon) และวัสดุที่ไม่ใช่ซิลิคอนเช่น CdTe , CuInSe_2 , Cu(InGa)Se_2 และ CuInS_2 เป็นวัสดุที่สามารถปลูกผลึกลงบนฐานรองที่มีราคาถูกเช่น กระจก ทำให้สามารถลดต้นทุนการผลิตได้มากเมื่อเปรียบเทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดบล็อคซิลิคอน

CuInS_2 จัดอยู่ในกลุ่มโครงสร้างผลึกชนิดคาลโคไพไรท์ (Chalcopyrite) เป็นหนึ่งในวัสดุทางเลือกที่สามารถนำมาสร้างเป็นชั้นดูดกลืนของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางได้ เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่สูงมากกว่า 10^4 cm^{-1} และยังเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดแถบพลังงานแบบตรง (Direct band-gap) มีความกว้างของแถบพลังงาน (Energy gap) 1.5 eV [4] ซึ่งเหมาะสมที่นำมาประยุกต์ใช้เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ ปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CuInS_2 มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูงสุด 12% [5] ด้วยวิธีการระเหยภายใต้สุญญากาศ ซึ่งยังคงต้องใช้ระบบสุญญากาศที่มีราคาสูง

วิธีการสเปรย์เป็นเทคนิคการสร้างฟิล์มบางที่ไม่ใช้ระบบสุญญากาศทำให้สามารถ ลดต้นทุนจากกระบวนการผลิตได้มาก มีคุณลักษณะเฉพาะของของการพ่นสเปรย์เป็นละอองฝอย ทำให้การก่อตัวของฟิล์มบางค่อนข้างสม่ำเสมอจึงเหมาะสมที่นำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ต้นทุนต่ำ [6]

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งศึกษา วิจัยและพัฒนาการสังเคราะห์ฟิล์มบางคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์ (CuInS_2) ด้วยวิธีการที่ไม่ใช้ระบบสุญญากาศเพื่อประยุกต์ใช้เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ต้นทุนต่ำ โดยมีวัตถุประสงค์หลัก 2 ประการ คือ

1.2.1 เพื่อศึกษาวิธีการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยวิธีการต้นทุนต่ำ

1.2.2 เพื่อศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 สังเคราะห์ฟิล์มบาง CuInS_2 ด้วยเทคนิคสเปรย์ (Spray Pyrolysis Technique)
- 1.3.2 วิเคราะห์คุณสมบัติของผลึก CuInS_2
- 1.3.3 การเตรียมฟิล์ม TiO_2 ด้วยเทคนิคพิมพ์สกรีน (Screen Printing Technique)
- 1.3.4 การเตรียมฟิล์ม CdS ด้วยเทคนิคการอบสารละลายเคมี (Chemical Bath Deposition Technique)
- 1.3.5 ศึกษาปัจจัยผลกระทบต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง $\text{CuInS}_2/\text{FTO}$, $\text{CuInS}_2/\text{TiO}_2/\text{FTO}$, และ $\text{CuInS}_2/\text{CdS}/\text{TiO}_2/\text{FTO}$ ภายใต้แสงมาตรฐาน (AM 1.5)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับทฤษฎีสารกึ่งตัวนำและหลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์
- 1.4.2 มีองค์ความรู้ในด้านการเตรียมชั้นฟิล์มบางวิธีต่างๆ
- 1.4.3 ทราบภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ฟิล์มบาง CuInS_2 ด้วยวิธีสเปรย์
- 1.4.4 แนวทางสำหรับการเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CuInS_2 ด้วยวิธีการต้นทุนต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แถบพลังงาน [7,8]

ในอะตอมอิเล็กตรอนมีพลังงานได้เพียงบางค่าไม่ต่อเนื่อง และระดับพลังงานถูกแยกเป็นชั้นอย่างชัดเจน แต่ในของแข็ง มีระดับพลังงานต่อเนื่องซึ่งมีขอบเขตเป็นช่วงๆเรียกว่า แถบพลังงาน (Energy Band) แถบพลังงานสามารถมีอิเล็กตรอนจำนวนมากมายอยู่ติดกัน โดยวงโคจรของอิเล็กตรอนวงนอกสุดอาจเหลื่อมล้ำทับซ้อนกัน ดังนั้น อิเล็กตรอนต้องปรับวงโคจรใหม่เพื่อไม่ให้เกิดการทับซ้อนกัน และจากหลักการห้ามซ้อนของเพาลี (Pauli exclusion principle) รูปที่ 2.1 อิเล็กตรอนที่มีวงโคจรไม่ซ้อนทับกันจะมีค่าใกล้เคียงกันมากจนทำให้ดูคล้ายว่าเป็นระดับพลังงานที่เรียงติดกันอย่างต่อเนื่อง เรียกว่าแถบยินยอม (Allowed band) แถบยินยอมที่อยู่ชั้นนอกสุดเรียกว่า แถบความนำ (Conduction band) และแถบยินยอมที่อยู่ถัดมาเรียกว่า แถบวาเลนซ์ (Valence band) ในแต่ละแถบยินยอมจะถูกคั่นด้วยแถบต้องห้าม (Forbidden band) คือช่วงของพลังงานที่ไม่มีอิเล็กตรอนซึ่งถูกเรียกว่า ช่องว่างพลังงาน (Energy gap) มีหน่วยเป็นอิเล็กตรอนโวลต์ (eV) มีค่าเท่ากับผลต่างระหว่างตำแหน่งต่ำสุดของแถบความนำและตำแหน่งสูงสุดของแถบวาเลนซ์

$$E_G = E_C - E_V \quad (2.1)$$

เมื่อ E_G คือ ช่องว่างของแถบพลังงาน

E_C คือ แถบความนำ

E_V คือ แถบวาเลนซ์



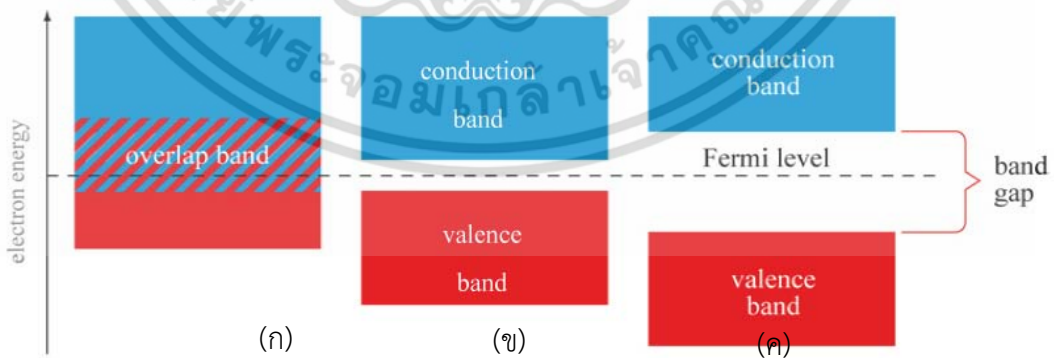
รูปที่ 2.1 วงโคจรของอิเล็กตรอนขณะอะตอมอยู่ใกล้และมีปฏิสัมพันธ์กัน [7]

ในทางปฏิบัติแถบพลังงานของวัสดุจะแสดงเฉพาะขอบบนสุดของแถบวาเลนซ์และขอบล่างสุดของแถบความนำ โดยที่วัสดุตัวนำซึ่งได้แก่ โลหะมีอิเล็กตรอนอิสระจำนวนมากกระจายตัวกันแสดงสถานะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานในแถบความนำ อิเล็กตรอนในตำแหน่งนี้จึงเปลี่ยนตำแหน่งและพลังงานโดยการตอบสนองจากพลังงานต่างๆได้ง่าย เช่นแสง ความร้อน และสนามไฟฟ้า แผนภาพแถบพลังงานของโลหะมี 2 ลักษณะ ลักษณะที่ 1) ขนาดของช่องว่างพลังงานจะมีค่าน้อยมากจนทำให้อิเล็กตรอนสามารถครอบครองสถานะพลังงานของแถบความนำได้บางส่วน และลักษณะที่ 2) เกิดขึ้นในโลหะบางชนิดซึ่งอาจไม่มีช่องว่างของแถบพลังงาน ทำให้แถบความนำและแถบวาเลนซ์ซ้อนทับกัน อิเล็กตรอนในแถบความนำ พร้อมทั้งจะเคลื่อนที่ได้ทันทีที่ได้รับพลังงานจากสนามไฟฟ้าภายนอกแสดงดังรูปที่ 2.2 (ก)

วัสดุฉนวน ในอุดมคติที่ไม่มีอิเล็กตรอนอิสระ ทำให้แถบวาเลนซ์ถูกครอบครองด้วยอิเล็กตรอนจนเต็ม ในขณะที่แถบความนำว่างเปล่า เนื่องจากมีช่องว่างของแถบพลังงานที่กว้างมาก แม้ได้รับพลังงานความร้อน ก็ยังไม่เพียงพอที่ทำให้อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์เคลื่อนที่มาสู่แถบความนำได้ ดังนั้นวัสดุประเภทนี้จึงไม่สามารถนำไฟฟ้าได้เลยแสดงดังรูปที่ 2.2 (ค)

วัสดุสารกึ่งตัวนำ เป็นวัสดุที่มีสมบัติทางไฟฟ้าอยู่ระหว่างตัวนำและฉนวน มีค่าสภาพนำไฟฟ้าน้อยกว่าตัวนำแต่มากกว่าฉนวน มีลักษณะของแถบวาเลนซ์จะถูกอิเล็กตรอนครอบครองและมีแถบความนำว่างเปล่าเช่นเดียวกับฉนวน แตกต่างกันที่สารกึ่งตัวนำมีช่องว่างของแถบพลังงานน้อยกว่าฉนวนมาก (รูปที่ 2.2 (ข)) ตัวอย่างเช่นที่อุณหภูมิต่ำ ซิลิคอน (Silicon; Si) ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำมีช่องว่างของแถบพลังงาน 1.12 eV และ ซิลิคอนไดออกไซด์ (Silicon dioxide ; SiO₂) ซึ่งเป็นฉนวนมีช่องว่างของแถบพลังงาน 9 eV สภาพนำไฟฟ้าซิลิคอนและซิลิคอนไดออกไซด์จึงต่างกันสิ้นเชิง เมื่ออิเล็กตรอนวาเลนซ์สะสมพลังงานจากการกระตุ้นได้สูงพอที่จะสามารถหลุดออกเป็นอิสระซึ่งในมุมมองของแผนภาพนี้เปรียบเสมือนการถ่ายโอนอิเล็กตรอนข้ามช่องว่างของแถบพลังงานจากแถบวาเลนซ์ ไปสู่แถบความนำ ทำให้วัสดุประเภทนี้สามารถนำไฟฟ้าได้ นอกจากนี้ยังพบว่าทุกครั้งที่อิเล็กตรอนวาเลนซ์ถูกกระตุ้นไปยังแถบความนำ จะเกิด โฮล (Hole) ขึ้นที่แถบวาเลนซ์ ซึ่งโฮลเป็นพาหะนำไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่มีประจุเท่ากับอิเล็กตรอนแต่เป็นชนิดบวก ในกรณีของโฮล สามารถนำไฟฟ้าได้เช่นเดียวกับอิเล็กตรอนอิสระ



รูปที่ 2.2 แถบพลังงานของ (ก) โลหะ (ข) สารกึ่งตัวนำ (ค) ฉนวน [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 สารกึ่งตัวนำ

2.2.1 สารกึ่งตัวนำประเภทธาตุเดี่ยว

สารกึ่งตัวนำประเภทธาตุเดี่ยวคือธาตุที่อยู่ในกลุ่ม IV ของตารางธาตุ ได้แก่ คาร์บอน (C) ซิลิคอน (Si) เจอร์เมเนียม (Ge) และดีบุก (Sn) ซึ่งอะตอมของธาตุแต่ละชนิดมีอิเล็กตรอนไม่เท่ากัน แต่ทุกธาตุมีอะตอมที่มีอิเล็กตรอนในระดับวาเลนซ์ (Valence) 4 อิเล็กตรอนเท่ากัน สำหรับอะตอมเหล่านี้ยังมีที่ว่างเหลืออีก 4 ที่สำหรับอิเล็กตรอนที่จะเข้ามาเพื่อให้อะตอมมีความเสถียร

2.2.2 สารกึ่งตัวนำประเภทสารประกอบ

สารกึ่งตัวนำประเภทนี้เกิดจากการสร้างสารประกอบของธาตุซึ่งจะนำไปให้มีสมบัติเด่นในทางด้านการดูดกลืนแสง และการปลดปล่อยแสง จึงมักที่จะนำมาสร้างเป็น วัสดุอิเล็กทรอนิกส์ทางแสง สารกึ่งตัวนำประเภทนี้สามารถแบ่งกลุ่มย่อยได้ตามหมู่ของธาตุในตารางธาตุ

สารกึ่งตัวนำกลุ่ม III-V ได้แก่ แกลเลียมอาร์เซไนด์ (Gallium Arsenide; GaAs) แกลเลียมฟอสไฟด์ (Gallium Phosphide; GaP) และ อินเดียมฟอสไฟด์ (Indium Phosphide; InP)

สารกึ่งตัวนำกลุ่ม II-VI ได้แก่ แคดเมียมซัลไฟด์ (Cadmium Sulphide; CdS) แคดเมียมซีลีไนด์ (Cadmium Selenide; CdSe) แคดเมียมเทลลูไรด์ (Cadmium Telluride; CdTe)

สารกึ่งตัวนำกลุ่ม IV-VI ได้แก่ ลีดซัลไฟด์ (Lead Sulphide; PbS) ลีดเทลลูไรด์ (Lead Telluride; PbTe) ทินซัลไฟด์ (Tin Sulphide; SnS)

สารกึ่งตัวนำกลุ่ม IV-IV ได้แก่ ซิลิคอนคาร์ไบด์ (Silicon Carbide; SiC) การเจือสารกึ่งตัวนำประเภทสารประกอบโดยใช้ GaAs เป็นสารตัวอย่างในการอธิบาย การเจือผลึก GaAs ให้เป็นชนิดเอ็น ทำได้โดยใช้อะตอมจากธาตุหมู่ VI เช่น S, Se หรือ Te ซึ่งมีอิเล็กตรอนวาเลนซ์ 6 อิเล็กตรอน เมื่อทำการเจือ อะตอมเหล่านี้จะเข้าไปแทนที่ As ในผลึก อิเล็กตรอนวาเลนซ์จะเข้าไปสร้างพันธะเพียง 5 อิเล็กตรอน ทำให้เหลืออิเล็กตรอนอิสระ 1 อิเล็กตรอน ส่วนการเจือ GaAs ให้เป็นชนิดพี ทำได้โดยใช้อะตอมจากธาตุหมู่ II เช่น Be, Sn หรือ Cd เมื่อทำการเจือ อะตอมเหล่านี้จะเข้าไปแทนที่ Ga ทำให้เกิดที่ว่างในพันธะโดยอะตอมเหล่านี้จะแย่งอิเล็กตรอนจากผลึกมา 1 อิเล็กตรอน ทำให้เกิดโฮลขึ้น

2.2.3 พาหะในสารกึ่งตัวนำ [7,8]

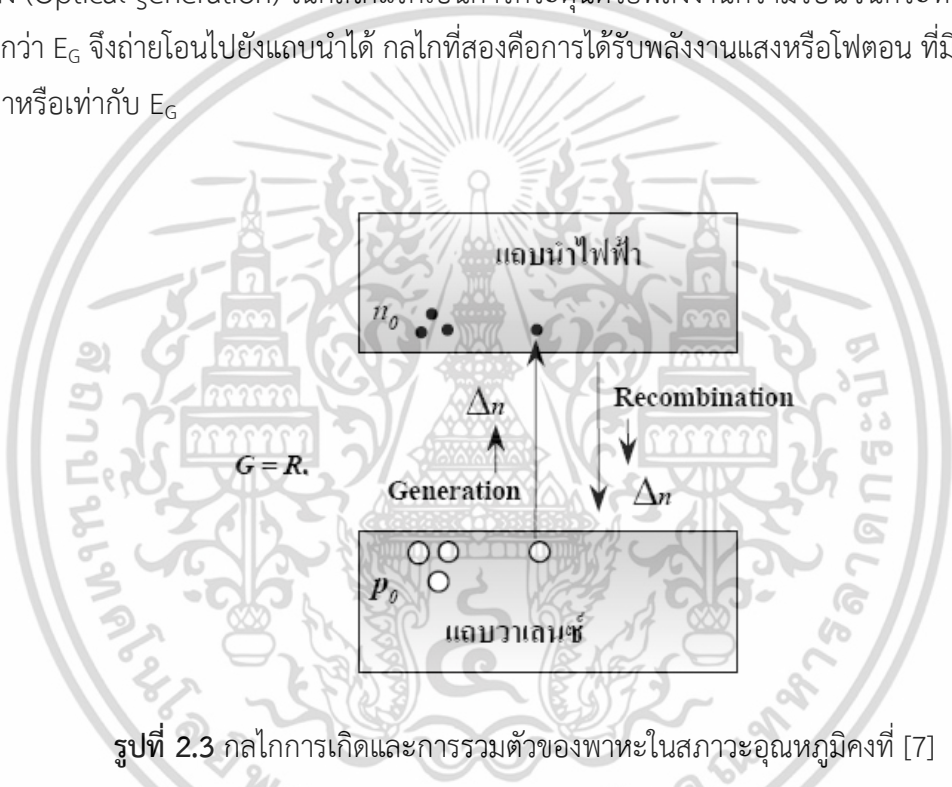
การนำสารกึ่งตัวนำมาใช้โดยสมบัติทางไฟฟ้า ซึ่งในสารกึ่งตัวนำมีพาหะนำไฟฟ้าสองชนิดคือ อิเล็กตรอน และโฮล อิเล็กตรอนเป็นอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าเป็นลบ มีขนาดเท่ากับ -1.602×10^{-19} คูโลมบ์ อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระในแถบนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ แต่ในแถบวาเลนซ์ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ในออร์บิทัลที่จำกัดไม่สามารถนำเคลื่อนที่ไปบริเวณอื่นๆของผลึกได้

สำหรับโฮลมีประจุไฟฟ้าเท่ากับอิเล็กตรอนแต่มีประจุเป็นบวก โฮลในแถบวาเลนซ์ เปรียบเสมือนกับว่าไม่มีตัวตนอยู่หรือเป็นช่องว่าง ซึ่งเป็นเพียงอนุภาคในจินตนาการใช้อ้างอิงถึง

สถานะว่างเปล่าในแถบวาเลนซ์เท่านั้น การทำความเข้าใจสำหรับสารกึ่งตัวนำพิจารณาที่อุณหภูมิ 0K เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แถบวาเลนซ์ซึ่งมีอิเล็กตรอนอยู่เต็มและแถบความนำที่ว่างเปล่าจึงไม่มีพาหะนำประจุ เมื่ออุณหภูมิตั้งขึ้นมากกว่า 0K อิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำบางตัวถูกกระตุ้นให้เป็นอิสระ ถูกถ่ายโอนจากแถบวาเลนซ์กลายเป็นอิเล็กตรอนในแถบความนำเรียกว่าการเกิดของคู่ประจุพาหะ (Generate) และเมื่อพลังงานความร้อนถูกปลดปล่อยหรือ อุณหภูมิต่ำลงอิเล็กตรอนในแถบความนำสามารถกลับกลายสภาพจากอิเล็กตรอนนำไปเป็นอิเล็กตรอนวาเลนซ์เรียกว่าการรวมตัวของประจุพาหะ (Recombination)

อิเล็กตรอนและโฮลมักจะเกิดเป็นคู่เรียกว่า คู่อิเล็กตรอน-โฮล (electron-hole pair) (รูปที่ 2.4) ซึ่งในสารกึ่งตัวนำเกิดจากสองกลไกหลักได้แก่ ความร้อน (Thermal generation) และแสง (Optical generation) ในกลไกแรกเป็นการกระตุ้นด้วยพลังงานความร้อนจนกระทั่งมีพลังงานสูงกว่า E_G จึงถ่ายโอนไปยังแถบนำได้ กลไกที่สองคือการได้รับพลังงานแสงหรือโฟตอน ที่มีพลังงานสูงกว่าหรือเท่ากับ E_G



รูปที่ 2.3 กลไกการเกิดและการรวมตัวของพาหะในสภาวะอุณหภูมิตั้งที่ [7]

2.2.4 วัสดุสารกึ่งตัวนำช่องแถบตรงและแถบไม่ตรง

ในความเป็นจริงแล้ว ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ จะมีความยุ่งยากและซับซ้อนมาก อธิบายได้จาก แผนภาพพลังงาน-เลขคลื่น (E-K diagram) สามารถแบ่งลักษณะโครงสร้างของแถบพลังงานได้ 2 ชนิด คือแถบพลังงานช่องตรง (Direct band gap) ซึ่งมีลักษณะจุดต่ำสุดของแถบความนำมีตำแหน่งตรงกับจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ และแถบพลังงานช่องไม่ตรง (Indirect band gap) ซึ่งมีลักษณะจุดต่ำสุดของแถบความนำมีตำแหน่งไม่ตรงกับจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ แสดงดังรูปที่ 2.3 ดังนั้นสมบัติบางประการของสารกึ่งตัวนำสองกลุ่มนี้จะต่างกันมาก เช่นสมบัติทางแสง อิเล็กตรอนวาเลนซ์ที่ได้รับพลังงานจากการดูดกลืนแสงหากพลังงานสูงกว่าช่องว่างของแถบพลังงานจะเท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

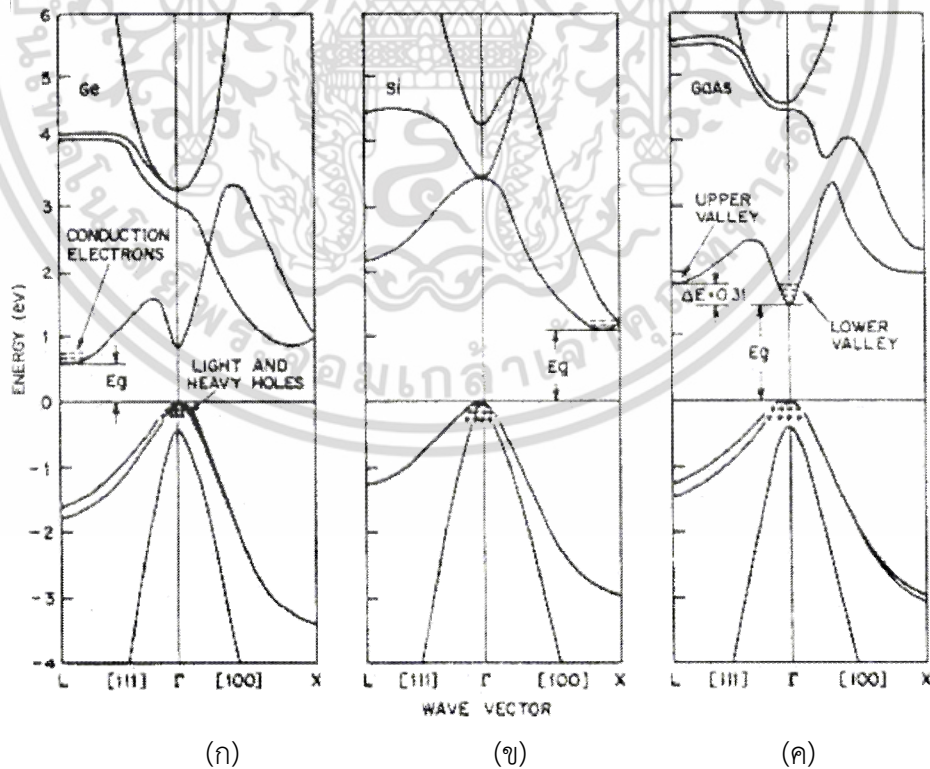
$$E = hv \geq E_g \quad (2.2)$$

E คือ พลังงานของโฟตอน

h คือ ค่าคงตัวของพลังค์ 6.624×10^{-34} Joule sec

v คือ ค่าความถี่ของคลื่นแสง

ในกรณีแถบพลังงานช่องตรง พลังงานของโฟตอนจากแสงซึ่งมีค่าเท่ากับ hv สามารถกระตุ้นให้อิเล็กตรอนจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ขึ้นไปถึงจุดต่ำสุดของแถบความนำได้โดยตรง และอิเล็กตรอนจากจุดต่ำสุดของแถบความนำสามารถที่จะตกลงมายังจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ โดยไม่ต้องมีการเปลี่ยนแปลงค่าโมเมนตัม และในกรณีนี้จะมีการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของแสงสี เนื่องจากการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอน ในกรณีของสารกึ่งตัวนำแบบช่องไม่ตรง จะต้องมีการเปลี่ยนแปลงพลังงานก่อนคือการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัม เพื่อให้ตรงกับจุดต่ำสุดของแถบความนำ พลังงานที่แสดงดังกล่าวเรียกว่าโฟนอน มักแสดงออกมาในรูปของความร้อน การดูดกลืนหรือคายพลังงานของสารกึ่งตัวนำกลุ่มนี้จึงเกิดขึ้นได้ไม่ดันทัก เพราะจะมีสมบัติทางด้านแสงด้อยกว่าสารกึ่งตัวนำแบบช่องตรง [7,8]



รูปที่ 2.4 แผนภาพพลังงาน-เลขคลื่น (E-K diagram) ของ (ก) Ge (ข) Si (ค) GaAs [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.5 สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ [7,8]

สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (Intrinsic semiconductor; I-Type Semiconductor) ในอุดมคติ หมายถึงสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ซึ่งไม่มีการเจือปนด้วยอะตอมแปลกปลอม ตัวอย่างเช่นซิลิคอนบริสุทธิ์หรือเจอร์เมเนียมบริสุทธิ์ การอธิบายสมบัติของสารกึ่งตัวนำโดยใช้แบบจำลองพันธะโควาเลนต์ในลักษณะสองมิติ ผลึกในสารกึ่งตัวนำจะมีอะตอมที่เรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบซึ่งเรียกว่าแลตทิซ (Lattice) ในกรณีอุณหภูมิ OK อิเล็กตรอนมีพลังงานต่ำมากเนื่องจากไม่ได้รับพลังงานภายนอกเพียงพอ ดังนั้นในแถบวาเลนซ์อิเล็กตรอนจึงถูกกักไว้ด้วยพันธะโควาเลนต์ ไม่เพียงพอที่ทำให้อิเล็กตรอนเปลี่ยนระดับพลังงานไปอยู่ในแถบความนำได้ ในกรณีที่อุณหภูมิต่ำมากๆ สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์จึงไม่สามารถนำไฟฟ้าได้

2.2.6 สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ [7,8]

สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ (Extrinsic semiconductor) คือสารกึ่งตัวนำที่มีอะตอมแปลกปลอมปะปนอยู่กับอะตอมมูลฐานของสารกึ่งตัวนำ อะตอมแปลกปลอมที่ปะปนอยู่ถูกเรียกว่า อะตอมสารเจือ (Impurity atom) ผลของการเติมอะตอมสารเจือสามารถควบคุมค่าความนำไฟฟ้าได้ การเลือกชนิดของอะตอมสารเจือสามารถกำหนดชนิดของพาหะที่นำไฟฟ้า ผลของการเจือมีสองแบบ คือ ทำให้เกิดประจุลบแก่ผลึก เรียกว่าการเจือแบบชนิดเอ็น (n-type doping) ทำให้มีอิเล็กตรอนนำพาเพิ่มขึ้นและมีความหนาแน่นมากกว่าโฮลมาก และแบบที่ทำให้ประจุบวกแก่ผลึกเรียกว่า การเจือแบบชนิดพี (p-type doping) ทำให้มีโฮลเพิ่มมากขึ้นและมีความหนาแน่นมากกว่าอิเล็กตรอนมาก ซึ่งตัวอย่างของสารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์โดยใช้ซิลิคอนสามารถเจือให้เป็นชนิดเอ็นหรือพี ได้ดังนี้

2.1.7 สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

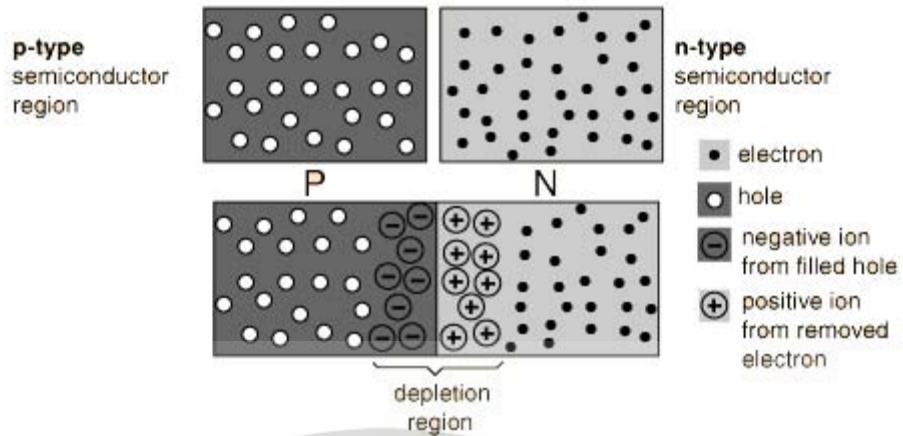
การเจือผลึกซิลิคอนให้เป็นชนิดเอ็นทำได้โดยอะตอมจากธาตุหมู่ V ของตารางธาตุ เช่น ฟอสฟอรัส (P), สารหนู (As) หรือ พลวง (Sb) อะตอมของธาตุเหล่านี้มีอิเล็กตรอนวาเลนซ์จำนวน 5 อิเล็กตรอน เมื่อถูกเติมลงในผลึกของซิลิคอนซึ่งมีอิเล็กตรอนวาเลนซ์ 4 อิเล็กตรอน จึงสร้างพันธะกับอะตอมรอบข้างได้เพียง 4 พันธะ เหลืออะตอมของสารเจือ 1 อิเล็กตรอนซึ่งมีสภาพเกือบเป็นอิสระ ซึ่งถูกยึดเหนี่ยวด้วยแรงเพียงเล็กน้อย ที่อุณหภูมิห้องอิเล็กตรอนจะได้รับพลังงานความร้อนเพียงพอที่จะเอาชนะแรงยึดเหนี่ยวและเคลื่อนที่ในผลึกได้อย่างอิสระ กลายเป็นอิเล็กตรอนนำไฟฟ้าได้อย่างสมบูรณ์ในแถบความนำ อะตอมของสารเจือจึงคล้ายกับเป็นผู้ให้อิเล็กตรอนนำไฟฟ้าเรียกว่า อะตอมผู้ให้ (Donor atom) โดยแต่ละอะตอมเมื่อให้อิเล็กตรอนไปแล้วจะกลายเป็นไอออนบวก แต่ละอะตอมผู้ให้จะให้อิเล็กตรอนนำไฟฟ้าโดยไม่มีโฮลเกิดขึ้น ดังนั้นสารกึ่งตัวนำที่ถูกเติมด้วยอะตอมผู้ให้จึงมีอิเล็กตรอนมากกว่าโฮล ทำให้สารกึ่งตัวนำชนิดนี้ถูกเรียกว่าสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductor)

2.2.8 สารกึ่งตัวนำชนิดพี

การเจือผลึกซิลิคอนให้เป็นชนิดพีทำได้โดยอะตอมจากธาตุหมู่ III ของตารางธาตุ โบรอน (B), อะลูมิเนียม (Al) หรือ แกลเลียม (Ga) อะตอมของธาตุเหล่านี้มีอิเล็กตรอนวาเลนซ์จำนวน 3 อิเล็กตรอน เมื่อถูกเติมลงในผลึกของซิลิคอนซึ่งมีอิเล็กตรอนวาเลนซ์ 4 อิเล็กตรอน จึงสร้างพันธะกับอะตอมรอบข้างได้เพียง 3 พันธะ อีกหนึ่งพันธะซึ่งไม่สมบูรณ์ซึ่งขาดไปหนึ่งอิเล็กตรอน ทำให้มีที่ว่าง 1 ที่ ซึ่งสามารถรับอิเล็กตรอนได้ 1 อิเล็กตรอน อะตอมเหล่านี้มีแนวโน้มที่จะรับอิเล็กตรอนจากซิลิคอนรอบข้าง ดังนั้นอะตอมสารเจือชนิดนี้ถูกเรียกว่า อะตอมผู้รับ (Acceptor atom) การรับอิเล็กตรอนซึ่งทำให้ได้โฮลนั้นอะตอมสารเจือจะกลายเป็นไอออนลบ แต่ละอะตอมของสารเจือจะทำให้โฮลเกิดขึ้น 1 โฮล โดยไม่มีอิเล็กตรอนนำไฟฟ้าเกิดขึ้น ดังนั้นสารกึ่งตัวนำที่ถูกเติมด้วยอะตอมผู้รับจึงมีโฮลมากกว่าอิเล็กตรอน ทำให้สารกึ่งตัวนำชนิดนี้ถูกเรียกว่าสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type semiconductor)

2.3 รอยต่อพี-เอ็น [8,11]

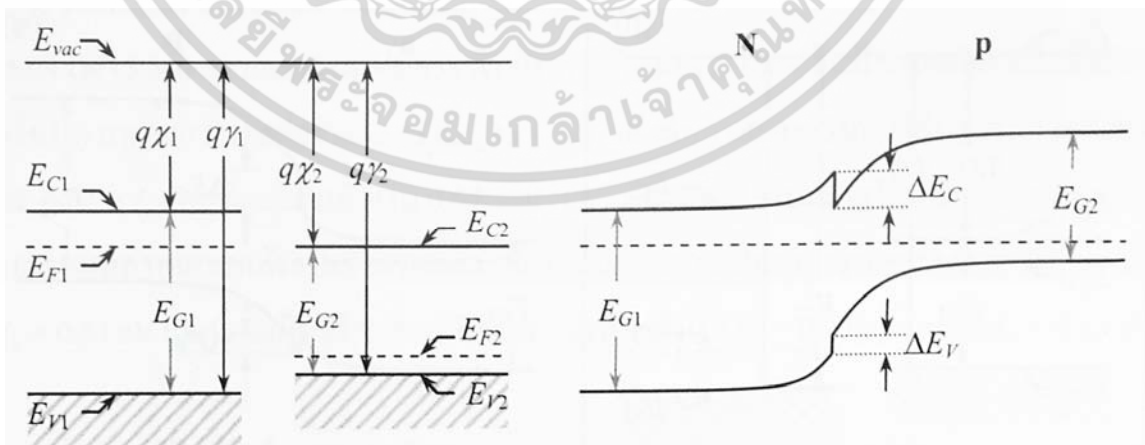
รอยต่อพี-เอ็นเป็นโครงสร้างพื้นฐานที่สำคัญโครงสร้างหนึ่งในสารกึ่งตัวนำ สามารถอธิบายได้ด้วยโครงสร้างของรอยต่อ ซึ่งจะมีอะตอมของสารเจือกระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอทั้งด้านพีและด้านเอ็น ในขณะที่สารกึ่งตัวนำด้านพีและด้านเอ็นยังไม่เกิดการสัมผัส โดยที่สารกึ่งตัวนำชนิดพีมีโฮลเป็นพาหะข้างมากมีอิเล็กตรอนเป็นพาหะข้างน้อย และสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นมีอิเล็กตรอนเป็นพาหะข้างมากมีโฮลเป็นพาหะข้างน้อย และจากรูปที่ 2.5 เมื่อรอยต่อ พี-เอ็น ถูกสร้างขึ้นวัสดุทั้งสองชนิดมีความหนาแน่นของพาหะไม่เท่ากันจึงทำให้เกิดแรงกระทำต่อพาหะทำให้พาหะเคลื่อนที่แพร่ไปยังด้านตรงข้าม อิเล็กตรอนจะแพร่จากด้านเอ็นไปด้านพี ซึ่งสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นเสียอิเล็กตรอนไปจะทำให้เกิดประจุบวกขึ้น และโฮลจะแพร่จากด้านพีไปด้านเอ็น ซึ่งสารกึ่งตัวนำชนิดพีเสียอิเล็กตรอนไปจะทำให้เกิดประจุลบขึ้น จากผลดังกล่าวจึงทำให้เกิดสนามไฟฟ้าภายในรอยต่อซึ่งเรียกว่าสนามไฟฟ้าภายใน (Build in electric field) สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะเริ่มต่อต้านการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโฮลไม่ให้เคลื่อนที่ไปยังด้านตรงข้ามและจะเพิ่มขึ้นจนถึงค่าของกระแสที่เกิดจากการแพร่ของพาหะ (diffusion current) เท่ากับกระแสแตริฟของพาหะ (Drift current) ที่เกิดจากสนามไฟฟ้าบริเวณรอยต่อซึ่งกระแสดังกล่าวทั้งสองมีทิศทางตรงกันข้ามกันจะหักล้างกันเป็นศูนย์ซึ่งเรียกภาวะนี้ว่า ภาวะสมดุล (Equilibrium) เนื่องจากอิทธิพลจากสนามไฟฟ้าบริเวณรอยต่อพัฒนาประจุออกจากบริเวณรอยต่อทำให้บริเวณนี้ไม่มีพาหะอยู่เลยดังนั้นบริเวณนี้จึงถูกเรียกว่า บริเวณปลอดพาหะ (Depletion region) การเกิดสนามไฟฟ้าบริเวณรอยต่อแสดงถึงความต่างศักย์ทางไฟฟ้าระหว่างสารกึ่งตัวนำชนิดพีและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นเรียกความต่างศักย์นี้ว่า ศักย์ภายใน (Build voltage)



รูปที่ 2.5 รอยต่อพี-เอ็นในภาวะสมดุล [12]

2.3.1 รอยสัมผัสระหว่างสารกึ่งตัวนำต่างชนิด

การเกิดศักย์สัมผัสในรอยต่อของสารกึ่งตัวนำต่างชนิด เกิดจากการนำวัสดุสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างของแถบพลังงานไม่เท่ากันมาสร้างรอยสัมผัสประกอบเป็นรอยต่อพี-เอ็น โดยรูปที่ 2.6 เปรียบเทียบด้วยค่าของสัมพรรคภาพอิเล็กตรอน (Electron affinity) χ หาได้จากความแตกต่างของระดับแถบความนำกับระดับสุญญากาศ และค่าฟังก์ชันงาน (Work function) คำนี้นหาได้จากความแตกต่างระหว่างระดับเฟอร์มี (Fermi level) กับระดับสุญญากาศ ตัวอย่างเช่น วัสดุชนิดเอ็น และ วัสดุชนิดพี ซึ่งเป็นวัสดุต่างชนิดกันจึงมีค่าฟังก์ชันงานไม่เท่ากัน เมื่อนำวัสดุทั้งสองชนิดมาสัมผัสเป็นเนื้อเดียวกัน เกิดการถ่ายโอนของพาหะโดยอิเล็กตรอนจะไหลจากวัสดุที่มีระดับเฟอร์มีสูงกว่าไปยังวัสดุที่มีระดับเฟอร์มีต่ำกว่า วัสดุทั้งสองชนิดจะถ่ายโอนพาหะจนเข้าสู่ระดับสมดุลทำให้มีค่าความต่างศักย์ภายในเกิดขึ้น



รูปที่ 2.6 รอยต่อพี-เอ็นของสารกึ่งตัวนำต่างชนิด [13]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 รอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ

รอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ เกิดจากการนำโลหะมาสัมผัสกับสารกึ่งตัวนำ ซึ่งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำทุกชนิดต้องทำงานร่วมกับอุปกรณ์อื่น และการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมดทั้งหมัดเป็นการเชื่อมต่อทางไฟฟ้าซึ่งมีโลหะเป็นสื่อ โลหะเป็นตัวนำที่สามารถผ่านกระแสไฟฟ้าได้ดีในทุกทิศทาง หากวัดคุณลักษณะเฉพาะของกระแสและแรงดัน (I-V characteristic) ของผิวสัมผัสรอยต่อโลหะและสารกึ่งตัวนำ จะได้กราฟซึ่งอธิบายได้ด้วยกฎของโอห์มจึงเรียกลักษณะดังกล่าวว่า สัมผัสแบบโอห์มมิก และบางชนิดสามารถเรียงกระแสได้ เช่นเดียวกับรอยต่อ พี-เอ็น ในตารางที่ 2.1 แสดงปัจจัยที่กำหนดว่ารอยต่อโลหะและสารกึ่งตัวนำจะสัมผัสแบบโอห์มมิกหรือสัมผัสเรียงกระแส ได้แก่

ฟังก์ชันงานของโลหะ $q\phi_m = E_{vac} - E_{Fm}$ เมื่อ E_{vac} คือระดับสุญญากาศซึ่งเป็นระดับพลังงานที่อิเล็กตรอนเป็นอิสระจากโลหะโดยสิ้นเชิง และ E_{Fm} คือระดับเฟอร์มิซึ่งเป็นระดับพลังงานนำในโลหะ

ฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ $q\phi_s = E_{vac} - E_{Fs}$

สัมพรรคภาพอิเล็กตรอน (Electron affinity) $q\chi = E_{vac} - E_C$ คือพลังงานที่สามารถกระตุ้นให้อิเล็กตรอนนำในผลึกของวัสดุถ่ายโอนไปยังระดับสุญญากาศเป็นอิสระจากผลึกได้ สมบัติและเงื่อนไขที่ทำให้รอยต่อโลหะและสารกึ่งตัวนำแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะดังตาราง 2.1

ตารางที่ 2.1 สมบัติของรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ

เงื่อนไข	สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น	สารกึ่งตัวนำชนิดพี
$q\phi_m > q\phi_s$	เรียงกระแส	โอห์มมิก
$q\phi_s > q\phi_m$	โอห์มมิก	เรียงกระแส

2.4 การกระตุ้นเชิงแสงบนพื้นฐานของรอยต่อ พี-เอ็น [8]

สมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ซึ่งมีโครงสร้างแบบรอยต่อพี-เอ็น เมื่ออุปกรณ์ดังกล่าวได้รับแสงที่มีพลังงานของโฟตอนสูงกว่าหรือเท่ากับช่องว่างของแถบพลังงาน ความเข้มข้นของพาหะในสารกึ่งตัวนำจะเพิ่มขึ้น ซึ่งคู่พาหะที่เกิดขึ้นใหม่จากการกระตุ้นด้วยแสงนี้ถูกเรียกว่า พาหะส่วนเกิน (Excess carrier) หมายถึงอิเล็กตรอนส่วนเกิน และโฮลส่วนเกินเพิ่มขึ้นมาจากพาหะสมดุล กลไกที่เป็นไปได้เมื่ออุปกรณ์ถูกกระตุ้นด้วยพาหะส่วนเกินมีดังนี้

1) โฟตอนที่เข้ามากระตุ้นมีพลังงานเท่ากับช่องว่างของแถบพลังงานเพียงพอที่จะทำลายพันธะให้อิเล็กตรอนของขอบบนที่แถบวาเลนซ์ถ่ายโอนข้ามช่องว่างของแถบพลังงานไปยังแถบความนำ

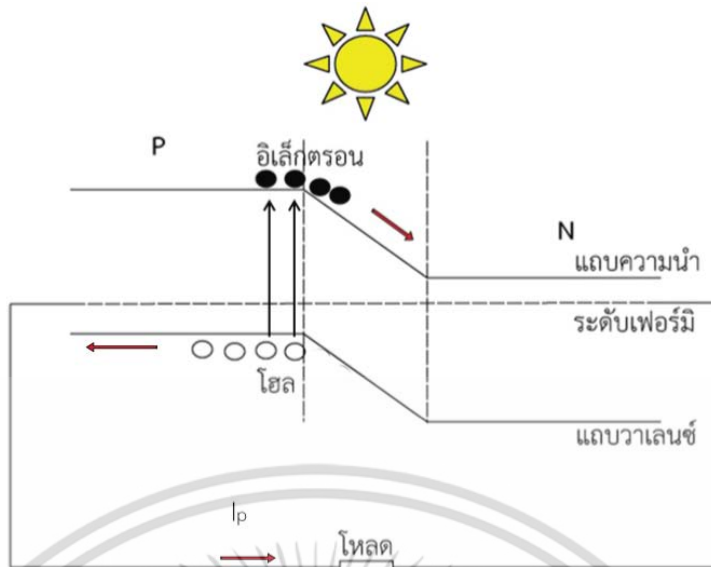
2) โฟตอนที่เข้ามากระตุ้นมีพลังงานสูงกว่าช่องว่างของแถบพลังงาน ในกรณีนี้อิเล็กตรอนจะถูกถ่ายโอนข้ามช่องว่างของแถบพลังงาน และข้ามขอบของแถบความนำอิเล็กตรอนดังกล่าว จะมีพลังงานจลสูงกว่าปกติและพยายามถ่ายโอนพลังงานส่วนเกินให้แก่อิเล็กตรอนตัวอื่นโดยการกระเจิง การถ่ายโอนพลังงานจะเกิดโมเมนตัมเป็นต่อเนื่องกระทั่งอิเล็กตรอนตัวดังกล่าวมีพลังงานเท่ากับอิเล็กตรอนตัวอื่นที่อยู่ภายใต้ภาวะสมดุลความร้อน

อิเล็กตรอนที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยแสงนี้เรียกว่า โฟโตอิเล็กตรอน (Photoelectron) โดยโฟโตอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะถูกพัดพาด้วยกระแสดริฟ (Drift current) ภายในรอยต่อ ทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปยังด้านเอ็นและโฮลเคลื่อนที่ไปยังด้านพี ทำให้เกิดการไหลของกระแสโดยเรียกกระแสนี้ว่ากระแสแสง (Photocurrent; I_p) เมื่ออุปกรณ์ดังกล่าวถูกต่อด้วยโหลดกระแสแสงที่ได้จะไหลครบวงจร ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า โฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic) อุปกรณ์ที่สร้างโดยอาศัยผลของโฟโตโวลตาอิกทำให้สามารถเปลี่ยนจากพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ เรียกว่า โฟโตโวลตาอิกเซลล์ (photocurrent; I_p) หรือเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell)

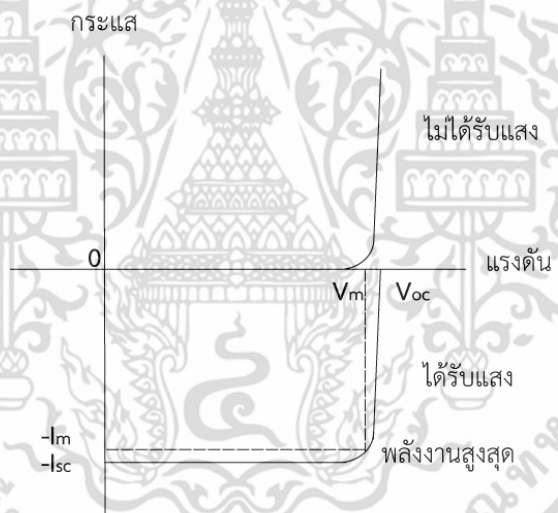
2.4.1 หลักการทำงานพื้นฐานของเซลล์แสงอาทิตย์ [14]

เซลล์แสงอาทิตย์มีโครงสร้างพื้นฐานมาจากรอยต่อแบบพี-เอ็น ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างเช่นเดียวกับไดโอด ดังนั้นขณะที่เซลล์แสงอาทิตย์ไม่ได้รับการกระตุ้นด้วยแสงจะส่งผลกระทบของกระแสและแรงดันเช่นเดียวกับไดโอดแสดงดังรูปที่ 2.8 เมื่อมีแสงส่องกระทบเซลล์พาหะส่วนเกินที่เกิดจากผลของการกระตุ้นจากแสง ซึ่งอัตราการเกิดของพาหะ (Generation rate : G) จะขึ้นอยู่กับ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ ความหนาของสารกึ่งตัวนำ พลังงานของโฟตอนและจำนวนโฟตอนที่ตกกระทบ เมื่อโฟตอนมีพลังงานมากกว่าหรือเท่ากับช่องว่างของแถบพลังงานมาตกกระทบ อิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นให้เคลื่อนไปสู่แถบความนำอิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดใหม่จะถูกพัดพาด้วยกระแสดริฟ โดยอิเล็กตรอนถูกพัดพาให้เคลื่อนที่ไปยังชั้นเอ็นเกิดการชาร์จประจุลบ และโฮลถูกพัดพาให้เคลื่อนที่ไปยังชั้นพีเกิดการชาร์จประจุบวก เมื่อเซลล์แสงอาทิตย์ถูกต่อด้วยโหลด (รูปที่2.7) อิเล็กตรอนที่เกิน จะเคลื่อนที่ผ่านโหลดจากด้านเอ็นไปยังด้านพีทำให้เกิดกระแสไหลในทิศทางตรงข้ามและมีแรงดันตกคร่อมที่โหลด เมื่อโหลดถูกถอดออกแรงดันที่เกิดจากการชาร์จประจุในเซลล์แสงอาทิตย์ ถูกเรียกว่า แรงดันเปิดวงจร (Open circuit voltage; V_{oc}) คือค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตได้สูงสุด จะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับช่องว่างของแถบพลังงาน หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งเซลล์แสงอาทิตย์จะมีแรงดันเปิดวงจรสูงสุดไม่เกินช่องว่างของแถบพลังงาน เมื่อแทนที่โหลดด้วยตัวนำไฟฟ้าวงจรจะเกิดการลัดวงจรทำให้กระแสไหลผ่านได้สูงสุดกระแสนี้ถูกเรียกว่า กระแสลัดวงจร (Shot circuit current; I_{sc}) กระแสไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่รับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ เพราะฉะนั้นกระแสที่ผลิตได้ด้วยเซลล์แสงอาทิตย์จะคิดเป็นความหนาแน่นกระแสต่อพื้นที่เสมอโดยใช้ตัวย่อว่า J_{sc} (A/m^2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 การเกิดกระแสไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 2.8 คุณลักษณะเฉพาะของของกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์

2.4.2 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อ พี-เอ็น [14]

เพื่อให้เข้าใจสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์จะพิจารณาจากวงจรสมมูลรูปที่ 2.9 เซลล์แสงอาทิตย์แทนด้วยแหล่งจ่ายกระแสให้มีค่าเป็น I_L ค่าความต้านทานอนุกรมให้มีค่าเป็น R_s ซึ่งเกิดจากความต้านทานของเนื้อสารกึ่งตัวนำ ความต้านทานของรอยสัมผัสโอห์มมิกและความต้านทานของเส้นลวดของขั้วไฟฟ้า ส่วนค่าความต้านทานขนานให้มีค่าเป็น R_{sh} เกิดจากความผิดปกติของผลึกจุดเสียและจุดบกพร่องในสารกึ่งตัวนำ ในทางอุดมคติได้ให้ค่า R_s เป็นศูนย์และให้ค่า R_{sh} เป็นอนันต์ เพื่อให้ค่ากระแสและแรงดันที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้ออกมาสูงสุดจึงไม่คิดค่า I_{sh} โดยให้ I_L มีค่าดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_L = I_D - I \quad (2.3)$$

$$I = I_D - I_L \quad (2.4)$$

เมื่อ I_D คือกระแสที่ได้จากสมการของไดโอด

$$I_D = I_0 [\exp(\frac{qV}{nkT}) - 1] \quad (2.5)$$

แทน I_D ลงในสมการ

$$I = I_0 [\exp(\frac{qV}{nkT}) - 1] - I_L \quad (2.6)$$

ค่า n (Ideality factor) คือค่า ในอุดมคติซึ่ง n มีค่าเท่ากับ 1 ดังนั้น

$$I = I_0 [\exp(\frac{qV}{kT}) - 1] - I_L \quad (2.7)$$

ในกรณีลัดวงจรด้าน R_L เพื่อหาค่ากระแสสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ (I_{sc}) จะได้ $V=0$

$$I = -I_L = I_{sc} \quad (2.8)$$

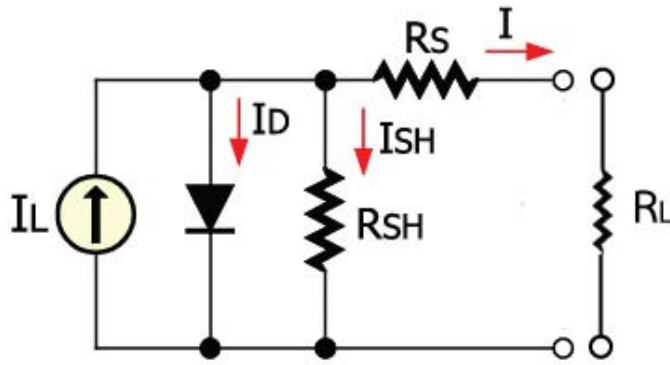
ในกรณีเปิดวงจรด้าน R_L เพื่อหาค่าแรงดันสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ (V_{oc}) จะได้ $I=0$

$$I_L = I_D \quad (2.9)$$

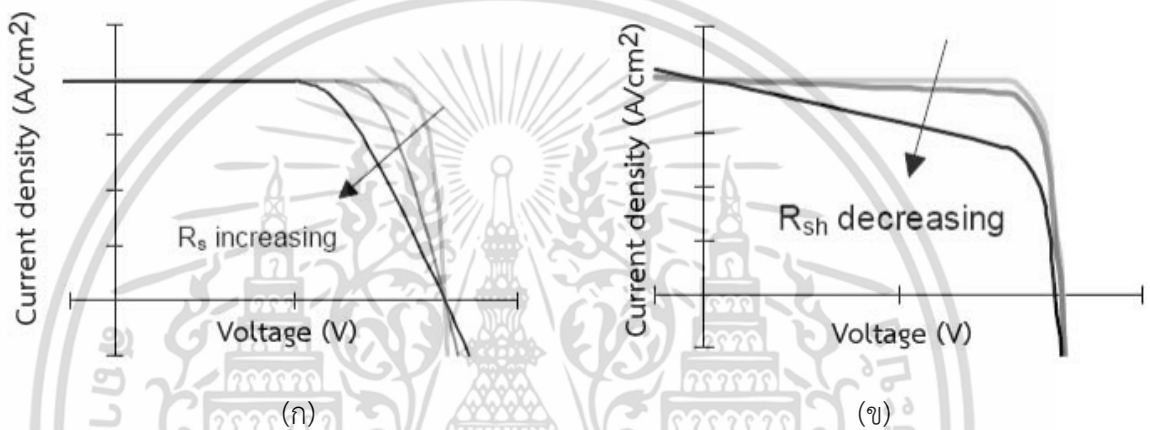
$$\frac{I_L}{I_0} = [\exp(\frac{qV_{oc}}{nkT}) - 1] \quad (2.10)$$

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln[\frac{I_L}{I_0} + 1] \quad (2.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อพี-เอ็น [15]



รูปที่ 2.10 อิทธิพลของ (ก) ความต้านทานอนุกรม (ข) ความต้านทานขนาน ต่อสมบัติเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์ [16]

ในเซลล์แสงอาทิตย์อุดมคติค่าของ R_{sh} จะมีค่าเป็นอนันต์และ R_s จะมีค่าเป็นศูนย์แต่ความเป็นจริงผลึกของสารกึ่งตัวนำที่ใช้มีจุดเสียเกิดขึ้น และความไม่สมบูรณ์ของรอยต่อโดยเฉพาะเซลล์ที่มีพื้นที่ขนาดใหญ่ย่อมมีความไม่สมบูรณ์ปรากฏจึงทำให้รอยต่อพี-เอ็นไม่สมบูรณ์ผลของดังนั้น R_s จึงไม่มีค่าเป็นศูนย์และ R_{sh} จึงไม่มีค่าเป็นอนันต์ รูปที่ 2.10 แสดงผลของ R_s และ R_{sh} ทำให้สมบัติของประสิทธิภาพเปลี่ยนแปลงไป เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีค่า R_s สูงจะทำให้กระแสลัดวงจรลดลงเป็นผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ลดน้อยลงไปมาก

2.4.3 ฟิลแฟกเตอร์และประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์

ค่าฟิลแฟกเตอร์ (Fill Factor) เขียนย่อด้วย FF ซึ่งนิยามได้ว่า อัตราส่วนระหว่างกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เซลล์แสงอาทิตย์สามารถจ่ายออกมาสู่วงจรภายนอกกับค่าของกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เซลล์แสงอาทิตย์สามารถผลิตได้คำนวณได้จากสมการ (2.13)

$$FF = \frac{I_{sc} \times V_{oc}}{I_{max} \times V_{max}} \quad (2.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าฟิลแฟกเตอร์ที่คำนวณได้มีค่าไม่เกิน 1 ซึ่งถ้าสามารถผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีค่าฟิลแฟกเตอร์ให้ใกล้เคียงกับ 1 ได้แสดงว่าเซลล์แสงอาทิตย์มีการจ่ายพลังงานที่ใกล้เคียงกับค่าอุดมคติมาก ค่าประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (Power Convert Efficiency) หรือ η คืออัตราส่วนระหว่างกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตได้กับกำลังของแสงที่ตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ (1kW/m^2 หรือ 100mW/cm^2) คำนวณได้จากสมการ (2.14 หรือ 2.15)

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \times 100\% \quad (2.13)$$

หรือ

$$\eta = \frac{J_{\text{sc}} \times V_{\text{oc}} \times \text{FF}}{P_{\text{in}}} \times 100\% \quad (2.14)$$

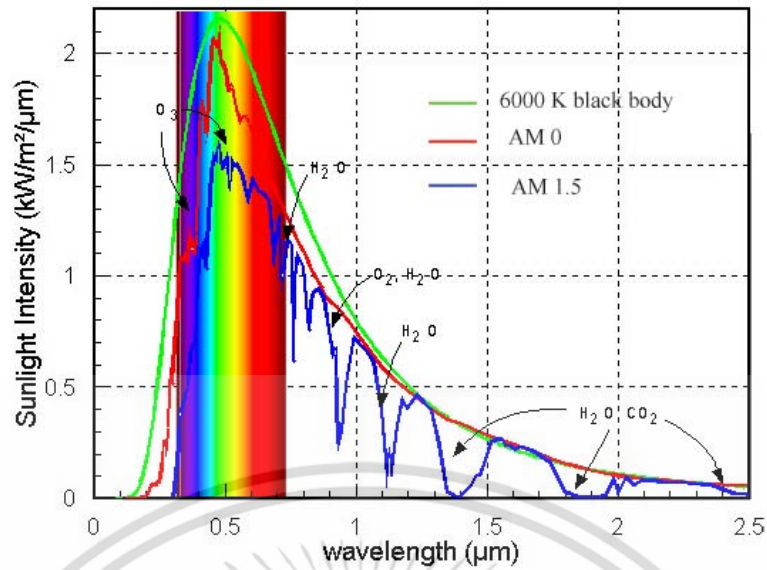
2.5 ค่ามวลอากาศ [17]

ค่ามวลอากาศ (Air mass) คือความหนาแน่นรังสีดวงอาทิตย์ที่ส่งผ่านชั้นบรรยากาศจากอวกาศ กำลังของรังสีดวงอาทิตย์นอกชั้นบรรยากาศมีค่าประมาณ $1,353 \text{ kW/m}^2$ ซึ่งค่ากำลังของรังสีดวงอาทิตย์ที่วัดได้ในอวกาศเรียกว่า Air Mass 0 (AM0) พื้นที่ที่แสงอาทิตย์ผ่านเข้ามาสู่ชั้นบรรยากาศ จากรูปที่ 2.11 แสดงถึงปัจจัยที่ทำให้รังสีของดวงอาทิตย์ลดลง ภายในชั้นบรรยากาศโลกขึ้นอยู่กับ การกระเจิงและการดูดซับของฝุ่นละอองและแก๊สต่างๆที่อยู่ในชั้นบรรยากาศไม่ว่าจะเป็น ออกซิเจน ไนโตรเจน โอโซน ไอน้ำ และ คาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น แก๊สเหล่านี้ทำให้ความเข้มของรังสีดวงอาทิตย์ลดลง และความเข้มของรังสีดวงอาทิตย์จะขึ้นอยู่กับระยะทางของรังสีดวงอาทิตย์ที่ส่งผ่านชั้นบรรยากาศ เช่นจากรูปที่ 2.12 เมื่อดวงอาทิตย์อยู่ตรงกับศีรษะระยะทางการเดินทางของรังสีดวงอาทิตย์จะน้อยสุด ซึ่งลักษณะนี้เรียกว่า Air Mass 1 (Air Mass 1) เมื่อดวงอาทิตย์เปลี่ยนมุมจากจุดเหนือศีรษะ Air Mass จะถูกกำหนดตามระยะทางที่รังสีผ่าน ซึ่งสามารถคำนวณได้ ดังสมการ (2.16)

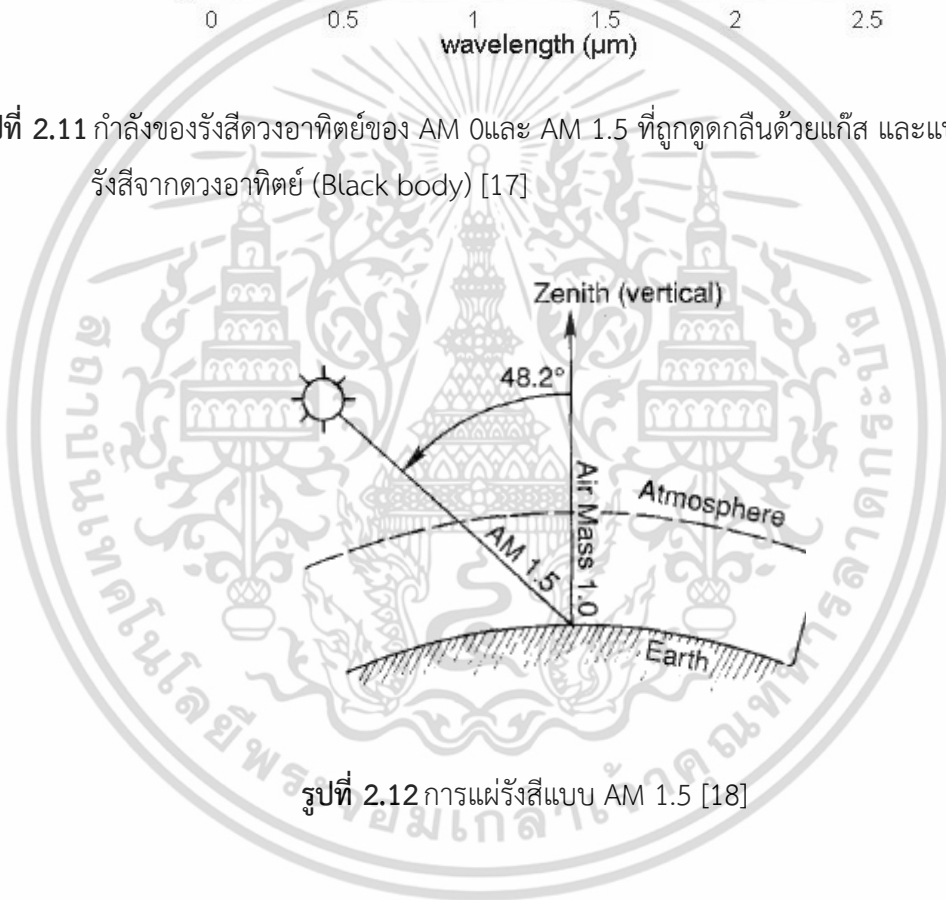
$$\text{Air mass} = \frac{1}{\cos \theta} \quad (2.16)$$

เมื่อ θ คือมุมของดวงอาทิตย์ที่เปลี่ยนจากมุมตั้งฉากเหนือศีรษะ

ซึ่งมาตรฐานในการทดสอบเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเท่ากับมุม 48.2° [18] มีกำลังของรังสีที่ตกกระทบบนเซลล์แสงอาทิตย์เท่ากับ $1000 \text{ วัตต์ต่อตารางเมตร}$ (1kW/m^2) ภายในอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (25°C) ซึ่งเรียกว่า Air Mass 1.5 Global (AM1.5G)



รูปที่ 2.11 กำลังของรังสีดวงอาทิตย์ของ AM 0 และ AM 1.5 ที่ถูกดูดกลืนด้วยแก๊ส และแบบจำลองรังสีจากดวงอาทิตย์ (Black body) [17]



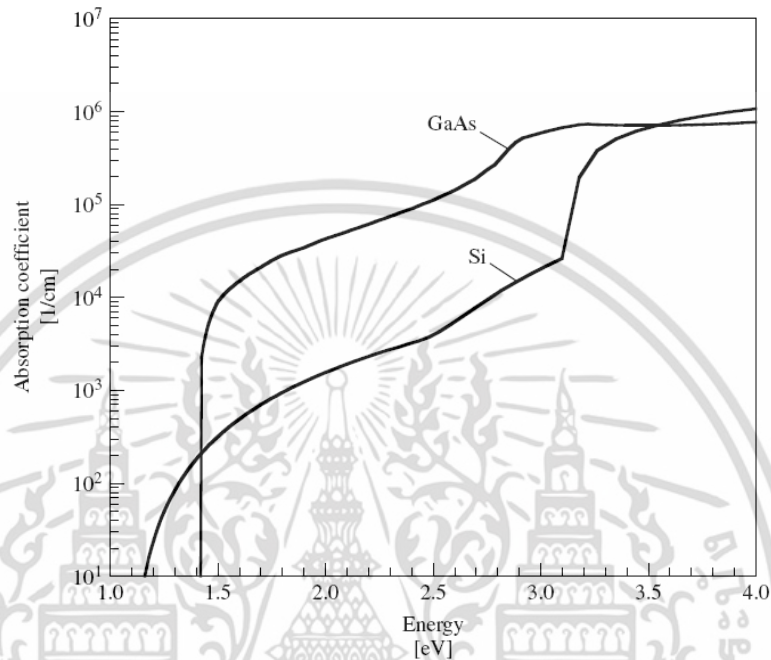
รูปที่ 2.12 การแผ่รังสีแบบ AM 1.5 [18]

2.6 การดูดกลืนแสง [8]

การดูดกลืนแสง (Absorption) เกิดจากอันตรกิริยาของแสงและสสารส่งผลให้แสงที่ตกกระทบมีความเข้มลดลงในขณะที่สสารมีการเปลี่ยนแปลงหลายอย่างเกิดขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงจะขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นและชนิดของสสารซึ่งถือว่าเป็นค่าที่สำคัญในการนำมาออกแบบเซลล์แสงอาทิตย์ สารกึ่งตัวนำแบบช่องตรงสามารถดูดกลืนแสงได้ดีกว่าสารกึ่งตัวนำแบบช่องไม่ตรง เช่นจากรูปที่ 2.13 แสดงให้เห็นถึงสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของซิลิคอนซึ่งมีลักษณะของแถบพลังงานแบบช่องไม่ตรงจะค่อยๆเพิ่มขึ้นเมื่อพลังงานของโฟตอนมีค่าสูงกว่า 1.12 eV ส่วนใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีของ GaAs ซึ่งมีลักษณะแถบพลังงานแบบช่องตรงเมื่อพลังงานของโฟตอนสูงกว่า 1.42 eV จะเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลัน จากข้อแตกต่างของวัสดุทั้งสองชนิดแสดงให้เห็นถึงค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของวัสดุสารกึ่งตัวนำแบบช่องตรงจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วบริเวณขอบของ E_g ส่วนวัสดุสารกึ่งตัวนำแบบช่องไม่ตรงจะเพิ่มขึ้นช้าเนื่องจากต้องอาศัยโฟนอน



รูปที่ 2.13 สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของซิลิคอนและแกลเลียมอาเซไนด์ [19]

2.7 การสูญเสียพลังงานในเซลล์แสงอาทิตย์ [20]

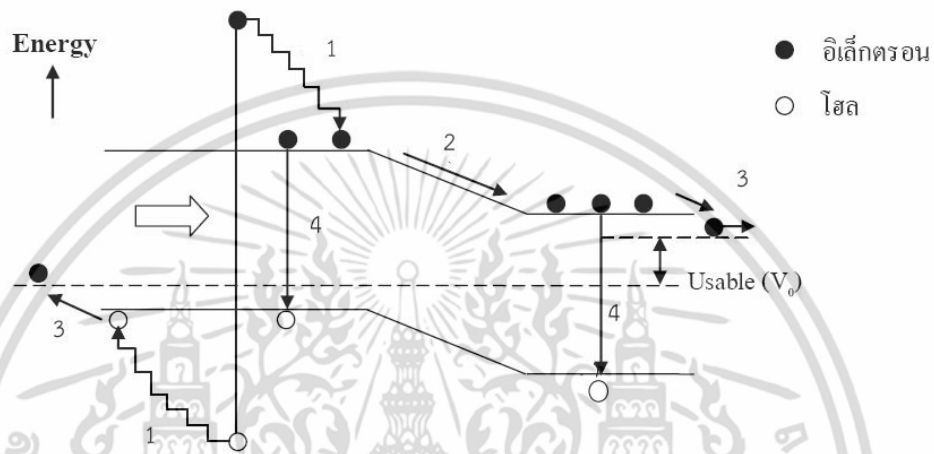
หลังจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับแสงที่ตกกระทบจนสามารถกระตุ้นให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลส่วนเกินขึ้นมาแล้ว พลังงานจากโฟตอนซึ่งมีค่าความยาวคลื่นที่ต่างกันเป็นจำนวนมากในแสงอาทิตย์ส่งผลให้คู่อิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดขึ้นใหม่ได้รับพลังงานไม่เท่ากัน ซึ่งทำให้เกิดอันตรกิริยาของคู่อิเล็กตรอนและโฮลภายในโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ รูปที่ 2.14 คือการสูญเสียพลังงานภายในเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งแบ่งได้เป็น 4 แบบดังนี้

1. การสูญเสียในเชิงความร้อน เกิดจากพลังงานของโฟตอนที่ถูกเซลล์แสงอาทิตย์ดูดกลืนเข้ามา นั้นมีค่ามากกว่า ช่องว่างของแถบพลังงานของวัสดุสารกึ่งตัวนำ ทำให้อิเล็กตรอนและโฮล ได้รับการกระตุ้นด้วยพลังงานที่สูงกว่าขอบของแถบความนำและแถบวาเลนซ์มาก อิเล็กตรอนและโฮลจะคายพลังงานเรียกว่า โฟนอน (Phonon) ซึ่งอยู่ในรูปของความร้อน แสดงกลไกในหมายเลข1
2. การสูญเสียบริเวณรอยต่อพี-เอ็น เนื่องจากการเคลื่อนที่ของประจุพาหะบริเวณรอยต่อถูกพัดพาด้วยกระแสรีฟ จึงเกิดการสูญเสียพาหะบางส่วนจากการจับ (Trap) เนื่องจากในทางปฏิบัติแล้ว อาจเกิดจุดบกพร่องบางส่วนของวัสดุบริเวณรอยต่อ แสดงกลไกในหมายเลข2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การสูญเสียแรงดันไฟฟ้าที่ชั้นโลหะสัมผัส เนื่องจากมีความต้านทานไฟฟ้าระหว่างขั้วโลหะและสารกึ่งตัวนำ ซึ่งสมบัติของขั้วไฟฟ้าที่ดีควรมีลักษณะรอยต่อเป็นแบบโอห์มมิกและมีความต้านทานต่ำ แสดงกลไกในหมายเลข3

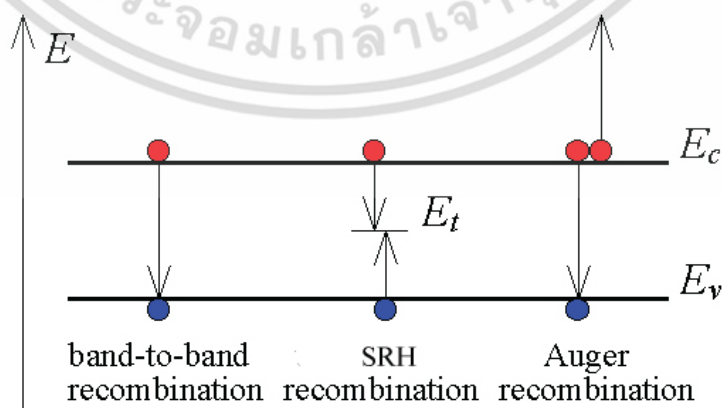
4. การสูญเสียจากการรวมตัวของอิเล็กตรอนและโฮล ที่ได้รับการกระตุ้นแต่ไม่เสถียรขณะเดินทางไปยังขั้วไฟฟ้าอิเล็กตรอนจึงตกกลับไปรวมตัวกับโฮล เรียกปฏิกิริยานี้ว่า การรวมตัวของประจุพาหะ (Carrier recombination) แสดงกลไกในหมายเลข4



รูปที่ 2.14 การสูญเสียพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ [20]

2.7.1 การรวมตัวของพาหะส่วนเกิน

การรวมตัวของพาหะการรวมตัวของพาหะในเซลล์แสงอาทิตย์มีโอกาสเกิดขึ้นหลังจากการกระตุ้นสิ้นสุดลง รูปที่ 2.15 แสดงถึงพาหะส่วนเกินในผลึกจะรวมตัวกันด้วยกลไกและอัตราที่ต่างกัน ในการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์การรวมตัวของอิเล็กตรอนและโฮลถือเป็นผลเสียเนื่องจากมีผลต่อประสิทธิภาพโดยตรง



รูปที่ 2.15 กลไกการรวมตัวของเซลล์แสงอาทิตย์ [21]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.1.1 การรวมตัวของอิเล็กตรอนและโฮลแบบ Band to band

การรวมตัวแบบ Band to band เกิดขึ้นจากอิเล็กตรอนจากแถบความนำเคลื่อนมารวมกับโฮลในแถบวาเลนซ์โดยไม่ส่งผลให้โมเมนตัมเปลี่ยนแปลง กล่าวคืออิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ลงมาโดยตรงผลจากการรวมตัวกันทำให้อิเล็กตรอนต้องคายพลังงานออกมาโดยการเปล่งแสงหรือความร้อน เมื่อการกระตุ้นสิ้นสุดลง การเกิดของประจุพาหะจะสิ้นสุดลงทันที แต่การรวมตัวของอิเล็กตรอนและโฮลอาจจะยังไม่เกิดขึ้น ซึ่งจะต้องมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องทำให้ในช่วงเวลาดังกล่าวอัตราการเกิดและการรวมตัวจะไม่เท่ากัน ในกรณีของเซลล์แสงอาทิตย์อิเล็กตรอนและโฮลจะถูกพัดพาด้วยกระแสไฟฟ้าให้เคลื่อนที่เพื่อแยกจากกันทำให้อิเล็กตรอนและโฮลส่วนเกินไม่ถูกรวมตัวกันทั้งหมด

2.7.1.2 การรวมตัวของอิเล็กตรอนและโฮลแบบ Auger

การรวมตัวของอิเล็กตรอนและโฮลแบบ Auger เกิดขึ้นในกรณีที่พลังงานของโฟตอนมีค่ามากกว่าค่าความกว้างของแถบพลังงานทำให้อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นจนมีสถานะสูงกว่าแถบความนำมากทำให้มีผลกระทบบางอย่างกับโฮลที่อยู่ใกล้เคียงถูกผลักดันสู่แถบวาเลนซ์และผลจากการคายพลังงานของอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นทำให้ต้องคายพลังงานออกมาในรูปของความร้อน

2.7.1.3 การรวมตัวของอิเล็กตรอนและโฮลแบบ Schottky-Reach-Hall (SRH)

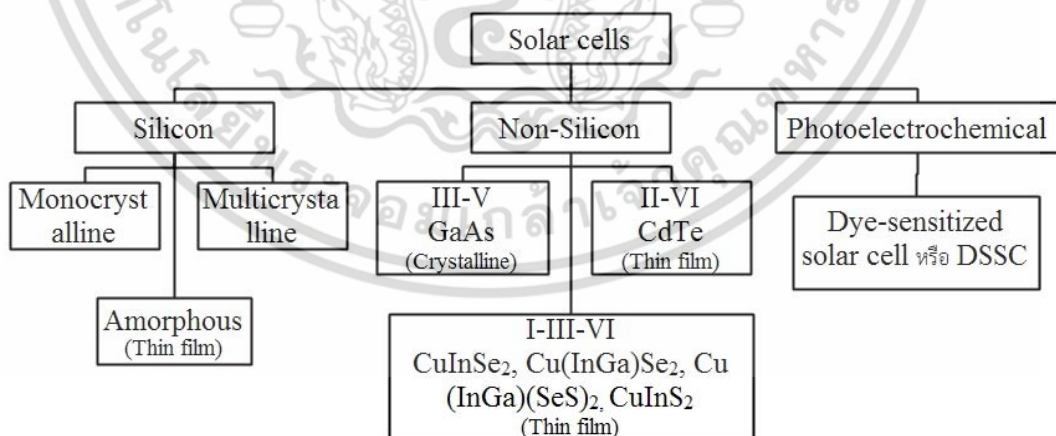
การรวมตัวของอิเล็กตรอนและโฮลแบบ Schottky-Reach-Hall เกิดจากข้อบกพร่องของผลึกหรือสิ่งเจือปนทำให้เกิดระดับของแถบพลังงานใหม่ในช่วงช่องว่างของแถบพลังงาน ซึ่งแถบพลังงานที่เกิดขึ้นใหม่ทำหน้าที่เป็นตัวจับอิเล็กตรอน โดยพฤติกรรมของอิเล็กตรอนในการรวมตัวชนิดนี้เกิดขึ้นได้ สองกรณี ในกรณีแรกอิเล็กตรอนส่วนเกินที่เกิดขึ้นถูกแถบพลังงานดักจับในตำแหน่งที่อยู่ใกล้กับแถบความนำสามารถเคลื่อนที่ขึ้นไปสู่แถบความนำได้ ในกรณีที่สองอิเล็กตรอนส่วนเกินที่เกิดขึ้นถูกแถบพลังงานดักจับในตำแหน่งที่อยู่ใกล้กับแถบวาเลนซ์ทำให้อิเล็กตรอนมีโอกาสเคลื่อนที่กลับมาสู่แถบวาเลนซ์ตามเดิม

2.8 เทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์ [17]

การค้นพบปรากฏการณ์เซลล์แสงอาทิตย์ ถูกค้นพบครั้งแรกโดยนักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศสชื่อ Edman Becquerel ในปี ค.ศ.1839 งานวิจัยที่ถูกตีพิมพ์ได้อธิบายถึงการทดลองแบตเตอรี่ชนิดเปียก ซึ่งเขาค้นพบว่าความต่างศักย์ของแบตเตอรี่เพิ่มขึ้นเมื่อได้รับแสงอาทิตย์ ในปี ค.ศ.1877 มีรายงานที่กล่าวถึงปรากฏการณ์ของเซลล์แสงอาทิตย์ ในสารชนิดของแข็งโดย Adams และ Day สองนักวิทยาศาสตร์แห่งมหาวิทยาลัยเคมบริดจ์ได้อธิบายถึงการค้นพบสมบัติทางไฟฟ้าของซีลีเนียม (selenium) เมื่อได้รับแสง ในปี ค.ศ. 1883 Chales Edgar Fritts ช่างไฟฟ้าชาวนิวยอร์ก ได้สร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซีลีเนียม ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนซึ่งมีลักษณะเวเฟอร์ซีลีเนียมบางๆถูกแบ่งเป็นเซลล์และใช้ลวดทองคำเป็นขั้ว และถูกปิดด้วยกระจก แต่เซลล์ยังมีประสิทธิภาพน้อยกว่า 1% จนกระทั่งในช่วงปี ค.ศ. 1950 การพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูงขึ้นเมื่อนักวิทยาศาสตร์สามคน Darryl Chapin, Calvin Fuller และ Gerrald Pearson แห่งห้องปฏิบัติการของ Bell Telephone ในรัฐ New Jersey ได้วิจัยผลกระทบของแสงในสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) เช่น Germanium และ Silicon ในปี ค.ศ. 1953 Chapin, Fuller และ Pearson ได้ทำวิจัยปรากฏการณ์ของเซลล์แสงอาทิตย์จากซิลิคอนและในปีถัดมาก็ประสบความสำเร็จในการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนเป็น 6% และ Bell lab ได้นำมาทดลองใช้ผลิตกำลังไฟฟ้าให้กับโทรศัพท์ในชนบท แต่ในช่วงเวลานั้นยังมีราคาสูงจึงไม่เหมาะสมในการนำมาประยุกต์ใช้ในทางธุรกิจในปี ค.ศ. 1958 เซลล์แสงอาทิตย์ถูกนำมาใช้ในการผลิตกำลังไฟฟ้าให้กับเครื่องส่งวิทยุขนาดเล็ก ในดาวเทียมและงานด้านอวกาศในไม่กี่ปีที่ผ่านมาการพัฒนาอย่างรวดเร็วในการเพิ่มประสิทธิภาพและลดต้นทุนในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ และมีการใช้อย่างแพร่หลายในพื้นที่ทั่วโลก ไม่ว่าจะเป็น การสื่อสาร การนำไปใช้กับเครื่องใช้ไฟฟ้าอื่นๆจนนำไปสู่การเพิ่มจำนวนการผลิตอย่างรวดเร็วเพื่อใช้ในเชิงพาณิชย์และอุตสาหกรรม ซึ่งสามารถผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ออกมามากมายตามความต้องการด้านไฟฟ้า การรวมปริมาณของเซลล์แสงอาทิตย์ทำได้มากขึ้นจนถึงขนาดหลายเมกะวัตต์

จากรูปที่ 2.16 สามารถแยกประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์ได้จากวัสดุที่นำมาสร้างเป็นหลัก โดยแบ่งจากวัสดุที่ทำมาจากซิลิคอน วัสดุที่ทำจากสารกึ่งตัวนำชนิดสารประกอบเพื่อสร้างเป็นชั้นดูดกลืนแสงโดยส่วนใหญ่เซลล์แสงอาทิตย์ในประเภทนี้จะสร้างให้มีรูปลักษณะเป็นแบบฟิล์มบาง เนื่องจากวัสดุสารกึ่งตัวนำประเภทสารประกอบมีสมบัติของช่องว่างแถบพลังงานแบบแถบตรงและมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่สูงเป็นส่วนใหญ่ และเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีหลักการทำงานจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี

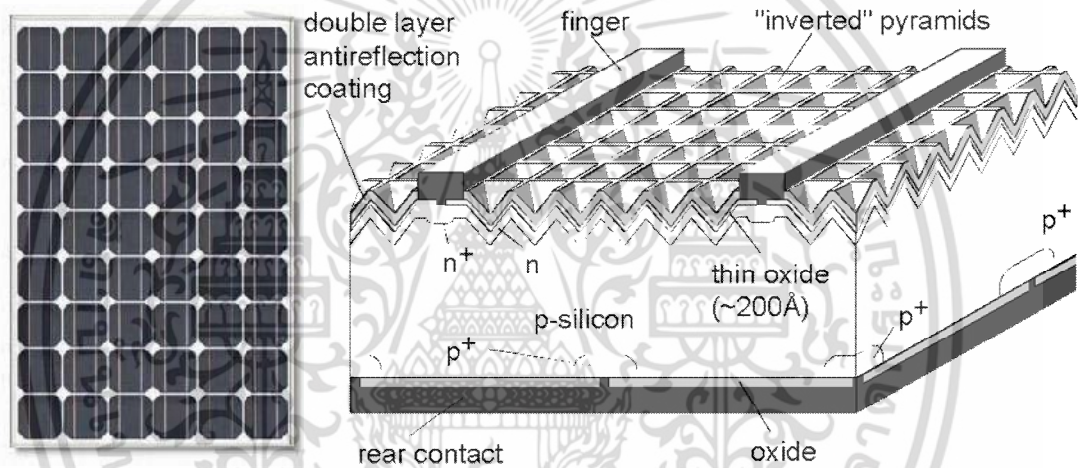


รูปที่ 2.16 ประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์

2.8.1 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนผลึกเดี่ยว

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนผลึกเดี่ยว (Monocrystalline Silicon; c-Si) ในโครงสร้างพื้นฐานของรอยต่อพี-เอ็น ใช้ซิลิคอนแว่นผลึกเป็นฐานมีความหนาประมาณ 200 – 400 μm ด้านที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รับแสงจะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดที่ตรงข้ามกับฐานรอง มีความหนาเพียง 0.2 – 1 μm เพราะต้องการให้แสงตกกระทบทะเลลึกลงรอยต่อพี-เอ็นให้ได้มากที่สุด ผิวด้านรับแสงยังประกอบไปด้วยชั้นต้านการสะท้อนแสง (Anti-Reflection Coating) อาจทำจาก ซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดกลืนแสง และซิลิโคนได้รับการออกแบบให้ใช้พื้นที่น้อยที่สุดและในขณะเดียวกันสามารถรวบรวมพาหะนำไฟฟ้าที่เกิดขึ้นได้มากที่สุด ส่วนขั้วด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์จะต้องเป็นผิวสัมผัสโอห์มมิกที่ตีซึ่งฉาบไว้เต็มด้านหลังแผ่น และเนื่องจากการนำแผ่นผลึกซิลิคอนที่ต้องมีความบริสุทธิ์สูงมาก ซึ่งได้จากกระบวนการโครทราสกี (Czochralski process) มาสร้างเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ ทำให้มีราคาค่อนข้างสูง รูปที่ 2.17 (ก) โมดูลของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนผลึกเดี่ยวที่ทำจากแผ่นแว่นซิลิคอน รูปที่ 2.17 (ข) แสดงโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึกเดี่ยวที่ให้ประสิทธิภาพสูงถึง 24.4% โดยผลิตจากห้องปฏิบัติการ Photovoltaics Special Research Centre [22]



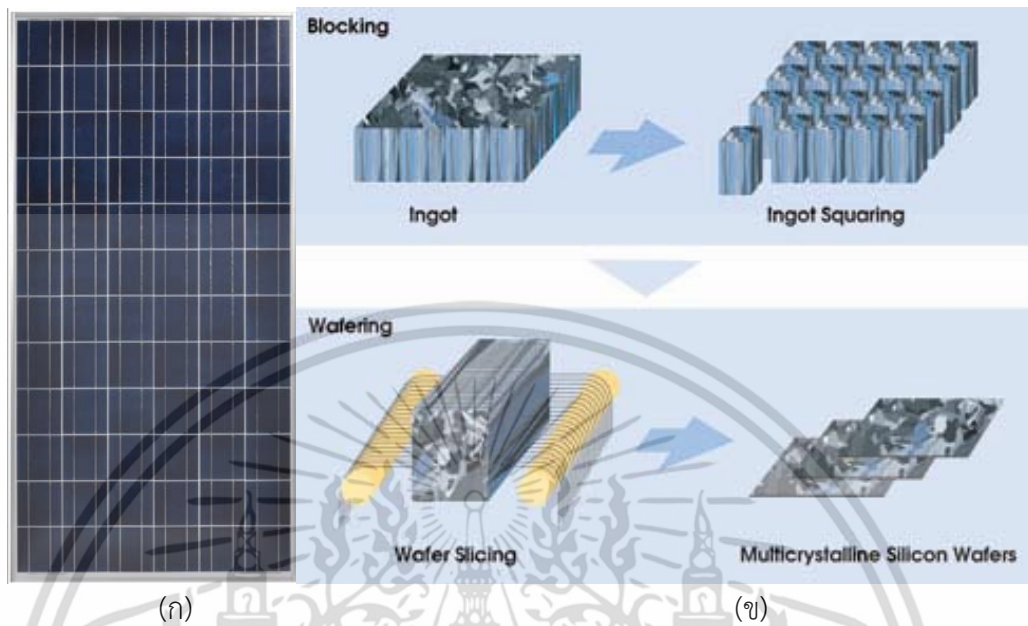
รูปที่ 2.17 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนผลึกเดี่ยว (ก) โมดูลของเซลล์แสงอาทิตย์ [23] (ข) โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนผลึกเดี่ยว [24]

2.8.2 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนพหุผลึก

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนพหุผลึก (Polycrystalline Silicon; poly-Si) ประกอบด้วยเกรน (Grain) ขนาดเล็กๆของซิลิคอนชนิดผลึกเดี่ยวเป็นหลัก มาจากการหล่อจากผลึกซิลิคอนหลายผลึกเข้าด้วยกันในแม่พิมพ์รูปทรงลูกบาศก์ และ ตัดด้วยเลื่อยชนิดสาย (Wire saw) ให้เป็นแผ่นแว่นผลึกรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสแสดงดัง รูปที่ 2.18 (ก และ ข) และอีกวิธีที่สามารถสร้างแผ่นซิลิคอนชนิดพหุผลึกมีลักษณะคล้ายรีบบ้างด้วยการหลอมให้ละลายเรียกวินี้ว่า Edage-Define-Film-Fed-Growth (EFG) เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนพหุผลึกมีกระบวนการสร้างที่ง่ายและถูกกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนผลึกเดี่ยว แต่ยังมีแนวโน้มของประสิทธิภาพที่น้อยกว่าเพราะมีอัตราการเกิดประจุพาหะที่เบาบางและเกิดการรวมตัวใหม่ (Recombination) ระหว่างขอบของเกรน (Boundary)

ภายในซิลิคอนชนิดพหุผลึกอย่างไรก็ตามสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์ได้จากกระบวนการสร้างเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุเช่น แนวทางการทำให้เกรนมีขนาดใหญ่ขึ้น การแทรกซึมของแสงภายในเกรน การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนพหุผลึก ประสิทธิภาพสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ มีค่าสูงสุด 20.4% [25]



รูปที่ 2.18 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนพหุผลึก (ก) โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนพหุผลึก [26]
(ข)กระบวนการสร้างแผ่นเวเนซิลิคอนพหุผลึก [17]

2.8.3 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแกเลียมอาเซไนด์

แกเลียมอาเซไนด์ (Gallium arsenide; GaAs) เป็นวัสดุชนิด สารประกอบกึ่งตัวนำ (Compound semiconductor) มีลักษณะโครงสร้างเป็นผลึกเช่นเดียวกับ ซิลิคอน ซึ่งโดยหลักการแล้วมีความเหมาะสมเป็นอย่างมากในการนำมาประยุกต์ใช้เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ เพราะมีค่าการสัมประสิทธิ์ดูดกลืนแสงที่สูง เพราะฉะนั้นจึงสามารถสร้างเป็นชั้นบางๆได้ GaAs มีความกว้างกับแถบพลังงาน (Band gap energy) มากกว่า ซิลิคอน และมีค่าใกล้เคียงอุดมคติมากสำหรับพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์ภายในโลก แม้ว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด GaAs จะมีประสิทธิภาพสูงเมื่อเทียบกับ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนผลึกเดี่ยว เช่นเดียวกับการทำงานที่เกี่ยวข้องกับความร้อนสูงจะมีความทนทานกว่า ซิลิคอนและสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นๆ นั้นแสดงให้เห็นว่า GaAs เหมาะสมมากที่จะใช้ในระบบเซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพสูงสุด 27.6% ภายใต้การทดสอบมาตรฐาน AM1.5 แต่อีกนัยหนึ่ง เซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำจาก GaAs มีราคาสูงมากเมื่อเทียบกับซิลิคอนเพราะสร้างด้วยเทคนิค Epitaxial GaAs และต้องเน้นเรื่องความปลอดภัยเป็นหลักเพราะแก๊ส As มีความเป็นพิษสูงมากส่วนมากใช้ในงานที่ต้องการประสิทธิภาพสูงเช่นงานด้านอวกาศ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.4 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง [27]

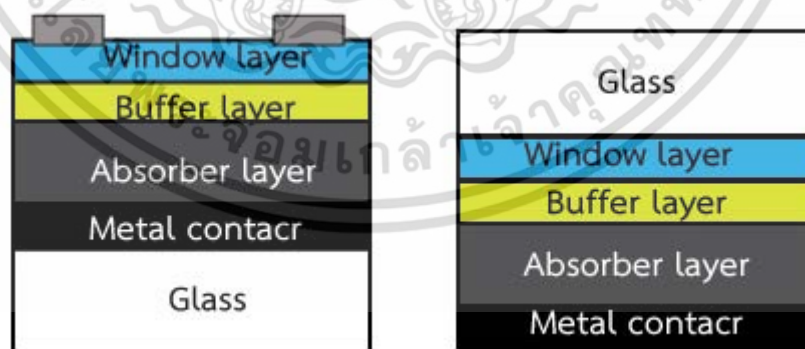
เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง (Thin film solar cells) ได้รับความสำเร็จในประสิทธิภาพ 15-20% เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางสามารถผลิตจากวัสดุได้หลายชนิดที่รู้จักส่วนมากเช่น ซิลิคอนอสัณฐาน (amorphous silicon; a-Si), คอปเปอร์อินเดียม (แกเลียม) ไดเซลิไนด์ (copper indium (gallium) diselenide; CIGS) และ แคดเมียมเทลลูไรด์ (cadmium telluride; CdTe) เป็นต้น ซึ่งชื่อของวัสดุดังกล่าวเป็นวัสดุที่ใช้เป็นชั้นดูดกลืนแสงในโครงสร้าง เนื่องด้วยสมบัติที่มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่สูงจึงทำให้สามารถสร้างฟิล์มที่มีความหนาเพียง 1-3 μm โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางมีสองลักษณะที่คล้ายกันคือ แบบ ซับสเตรท (รูปที่ 2.19 (ก)) และ แบบ ซุปเปอร์สเตรท (รูปที่ 2.19 (ข)) ประกอบไปด้วยฐานรองที่ทำด้วยกระจก

ชั้นหน้าต่างรับแสง (Window layer) สร้างจากวัสดุออกไซด์ของโลหะที่นำไฟฟ้าซึ่งมีชื่อเรียกว่า TCO (Transparent conducting oxide) ส่วนมากมักสร้างจาก ITO, FTO หรือ ZnO เป็นต้น มีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด n ที่มีช่องว่างของแถบพลังงานที่สูง และมีสมบัติโปร่งแสงและนำไฟฟ้าได้ดี

ชั้นบัฟเฟอร์ (Buffer layer) สร้างจากวัสดุที่มีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดอิน โดยหน้าที่หลักของชั้นนี้ทำหน้าที่เป็นรอยต่อระหว่างชั้นดูดกลืนแสง และเพื่อลำเลียงอิเล็กตรอนไปสู่ชั้นหน้าต่างรับแสงและช่วยป้องกันการแพร่กระจายของอิเล็กตรอนระหว่างชั้นหน้าต่างรับแสงและชั้นดูดกลืนแสง

ชั้นดูดกลืนแสง (Absorber layer) สร้างจากวัสดุที่มีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี มีความกว้างของแถบพลังงานอยู่ระหว่าง 1-2 eV ซึ่งเหมาะสมที่สุดในการนำมาสร้างเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ ทำหน้าที่ดูดกลืนแสงและเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า

ขั้วโลหะ (Metal contact) ทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าเพื่อลำเลียงพาหะออกสู่วงจรภายนอก



(ก)

(ข)

รูปที่ 2.19 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง [27] (ก) โครงสร้างแบบซับสเตรท (Substrate) (ข) โครงสร้างแบบซุปเปอร์สเตรท (Superstrate)

2.8.5 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนอสัณฐาน

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนอสัณฐาน (Amorphous silicon; a-Si) มีลักษณะแตกต่างจากชนิดรอยต่อ พี-เอ็น ซึ่งเป็นที่รู้จักแพร่หลายในรูปแบบรอยต่อ 'p - i - n' ประกอบด้วยชั้นที่บางมาก ๆ ในชั้นพีของ a-Si อยู่บนสุดและตามด้วยชั้นของ a-Si ที่หนากว่าด้านพี โดยปราศจากการเจือเป็น a-Si บริสุทธิ์ และชั้นเอ็นที่บางมากของ a-Si (รูปที่ 2.20) โดยทั่วไปแล้วการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนอสัณฐานคล้ายคลึงกับหลักการการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนแบบผลึกเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอนอสัณฐานถูกสร้างให้ประหยัดกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนแบบผลึก และมีค่าดูดซับแสงที่สูงกว่ามาก เพราะฉะนั้นจึงสามารถนำมาสร้างเป็นฟิล์มบางได้ ซึ่งประหยัดในเรื่องการลดปริมาณวัสดุกระบวนการสร้างที่ใช้ต้นทุนต่ำ ใช้พลังงานน้อยกว่าการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนแบบผลึก เหมาะสำหรับนำไปใช้ในทางพาณิชย์ แต่ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si ในปัจจุบันยังคงมีประสิทธิภาพน้อยกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนแบบผลึก ซึ่งประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด a-Si มีค่าประมาณ 10.09% ในระดับห้องปฏิบัติการ [28]

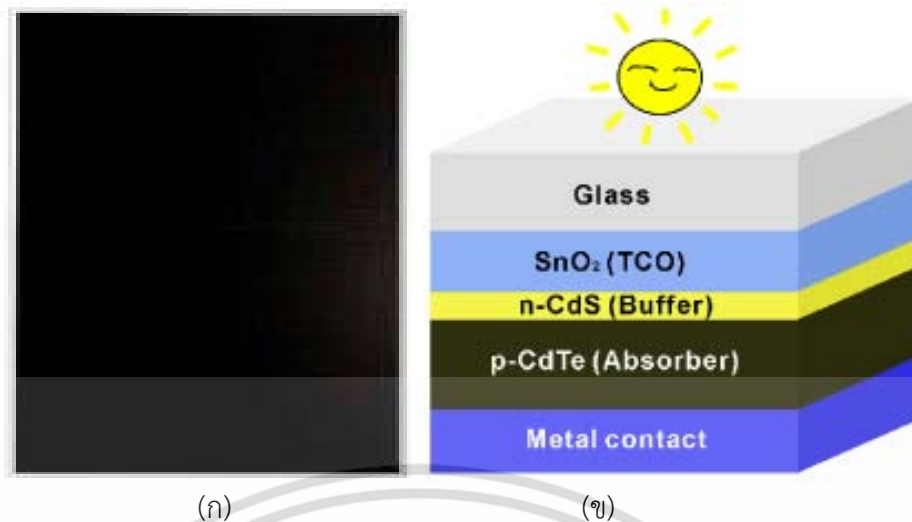


รูปที่ 2.20 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนอสัณฐาน (ก) โมเดลเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนอสัณฐาน [29]
(ข) โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนอสัณฐาน [30]

2.8.6 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแคดเมียมเทลลูไรด์

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแคดเมียมเทลลูไรด์ (Cadmium telluride; CdTe) เป็นฟิล์มบางที่ผลิตจาก แคดเมียม เทลลูไรด์ ถูกสร้างภายใต้จุดประสงค์ที่ทำงานและใช้ต้นทุนต่ำ โดยที่มีความกว้างของแถบพลังงานใกล้เคียงกับค่าอุดมคติและมีประสิทธิภาพสูงถึง 16.7% [31] อย่างไรก็ตาม CdTe ยังได้รับสารที่มีความเป็นพิษอย่าง แคดเมียม ซึ่งต้องระมัดระวังในระหว่างกระบวนการผลิต เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแคดเมียมเทลลูไรด์แสดงดังรูป 2.22

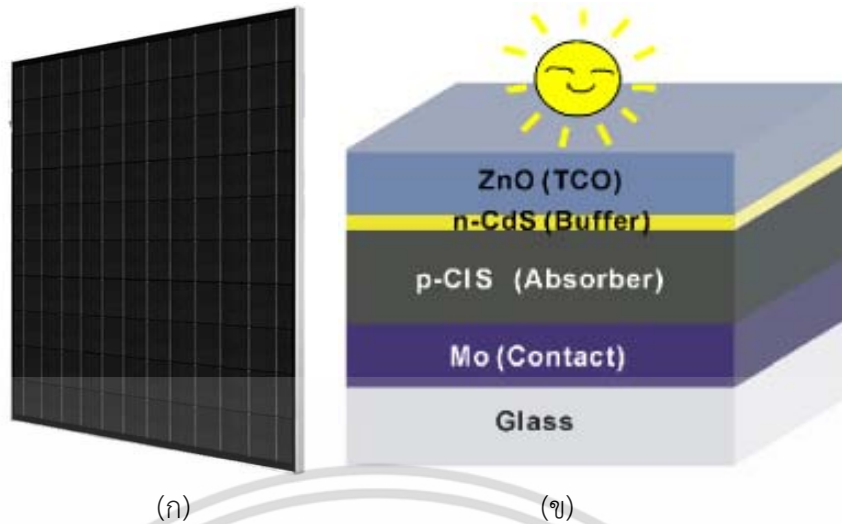
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



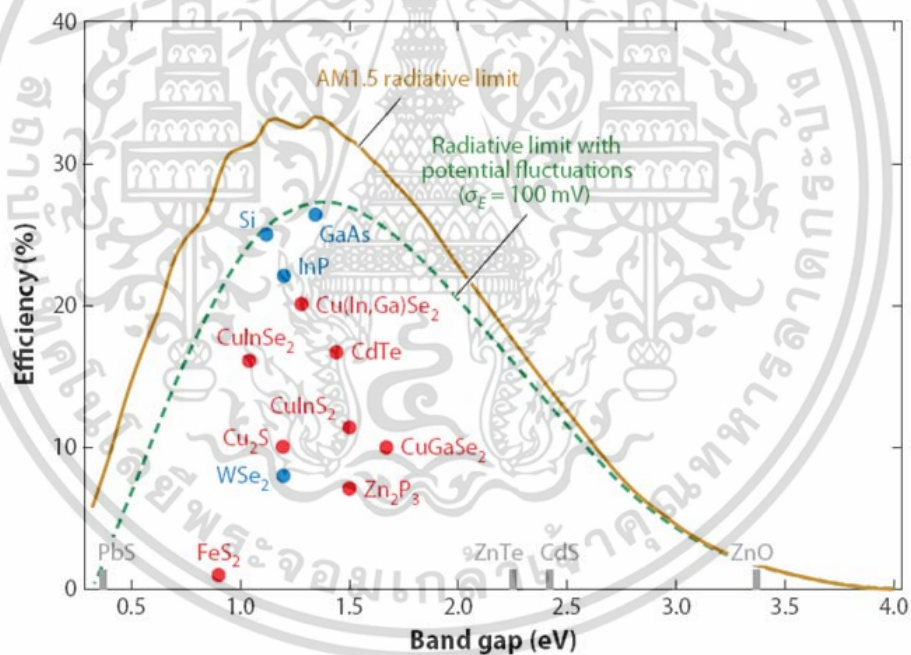
รูปที่ 2.21 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด แคดเมียมเทลลูไรด์ (ก) โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CdTe [32]
 (ข) โครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CdTe [30]

2.8.7 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CIS

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CIS สร้างจากสารกึ่งตัวนำชนิดสารประกอบจากธาตุหมู่ I-III-VI ประกอบไปด้วย ทองแดง, อินเดียม (แกลเลียม), ซีลีเนียม (ซัลเฟอร์) ได้ฟิล์มบางซึ่งมีลักษณะโครงสร้างผลึกชนิด คาลโคไพไรต์ โดยทำหน้าที่เป็นชั้นดูดกลืนแสงได้แก่ CuInSe_2 , Cu(InGa)Se_2 , Cu(InGa)(SeS)_2 , CuInS_2 ฟิล์มแต่ละตัวจะมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและความกว้างของแถบพลังงานที่ไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับ การปรับปริมาณสารสัมพันธ์ของสารตั้งต้น ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์ในกลุ่ม CIS ถูกพัฒนาขึ้นมาแทนเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแคดเมียมเทลลูไรด์ เนื่องจากมีความเป็นพิษน้อยกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแคดเมียมเทลลูไรด์จึงมีความปลอดภัยต่อผู้ผลิตและผู้ใช้ นอกจากนี้การพัฒนาในห้องปฏิบัติการยังมีประสิทธิภาพสูงถึง 18% และในเชิงพาณิชย์โดยบริษัทซีเมนสูงกว่า 10% ซึ่งอาจมองได้ว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CIS เป็นเซลล์แสงอาทิตย์แห่งอนาคต จากรูปที่ 2.23 เมื่อเทียบระหว่างค่าประสิทธิภาพในอุดมคติและแถบพลังงานยังพบว่าการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ยังสามารถทำให้ก้าวหน้ากว่าปัจจุบันได้อีกมาก โดยฟิล์มสารประกอบที่น่าสนใจในกลุ่มนี้คือ ฟิล์มบางคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์ (CuInS_2 ; CIS) ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่สูงกว่า 10^4 cm^{-1} มีความกว้างของแถบพลังงาน 1.5 eV ซึ่งใกล้เคียงกับค่าอุดมคติมากที่สุดเมื่อเทียบกับฟิล์มบางกลุ่มเดียวกัน (รูปที่ 2.23) และยังสามารถสร้างด้วยวิธีที่ไม่ใช่ระบบสุญญากาศซึ่งใช้ต้นทุนต่ำกว่าการสร้างด้วยฟิล์มชนิดอื่น อาทิเช่น วิธีสเปรย์ด้วยความร้อน (Spray pyrolysis method) วิธีหมุนเคลือบ (Spin coating method) และ วิธีคอลลอยด์ (Colloidal method)



รูปที่ 2.22 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CIS (ก) โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CIS [33] (ข) โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด CIS [30]



รูปที่ 2.23 ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของแถบพลังงานของวัสดุกับประสิทธิภาพสูงสุด

2.8.8 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิด Photoelectrochemical cell

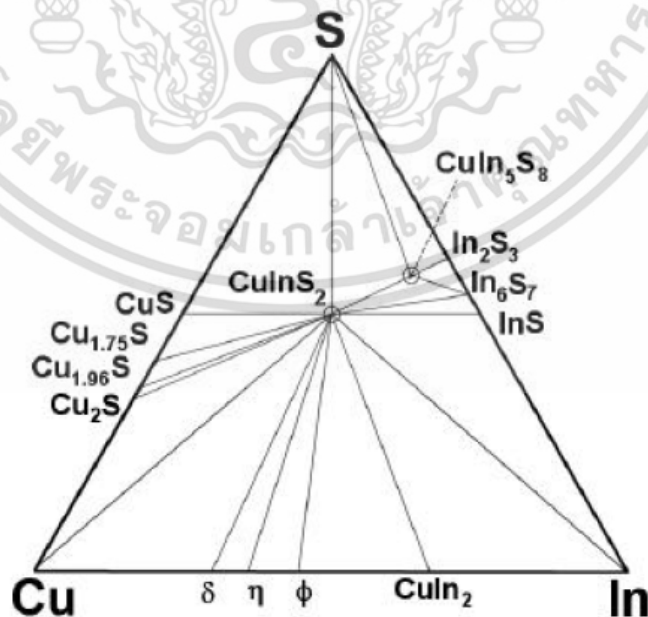
Photoelectrochemical cell เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ต้นทุ่นต่ำโดยใช้สารอิเล็กโทรไลต์ในรูปของเหลวหรือสารกึ่งเหลวถูกประกบด้วยกระจกเคลือบตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสงชนิดทินออกไซด์โดยที่ด้านหนึ่งมีชั้นไทเทเนียมไดออกไซด์ติดอยู่ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำและผิวมีลักษณะขรุขระที่โมเลกุลของสีย้อมไวแสงถูกส่งไปเกาะบน TiO₂ เมื่อโฟตอนถูกซึมซับในความยาวคลื่นที่เหมาะสมชั้นของสีย้อมไว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสงจะฉีดอิเล็กตรอนเข้าไปสู่แถบนำไฟฟ้าของ TiO_2 และเคลื่อนที่ผ่านกระจกนำไฟฟ้าโปร่งแสงไปสู่ วงจรภายนอกเพื่อผลิตเป็นกำลังไฟฟ้าและเคลื่อนที่กลับเข้าเซลล์อีกครั้งในชั่วอีกฝั่งเราเรียก กระบวนการนี้ว่า “รีดักชัน-ออกซิเดชัน (Reduction-Oxidation)” ซึ่งเกิดภายในสารอิเล็กโทรไลต์ และทำงานต่อเนื่องโดยการส่งอิเล็กตรอนคืนสู่ชั้นของสีย้อมไวแสง

2.9 สมบัติทางเคมีและภาวะพหุสัณฐานของฟิล์มบาง CuInS_2 [34]

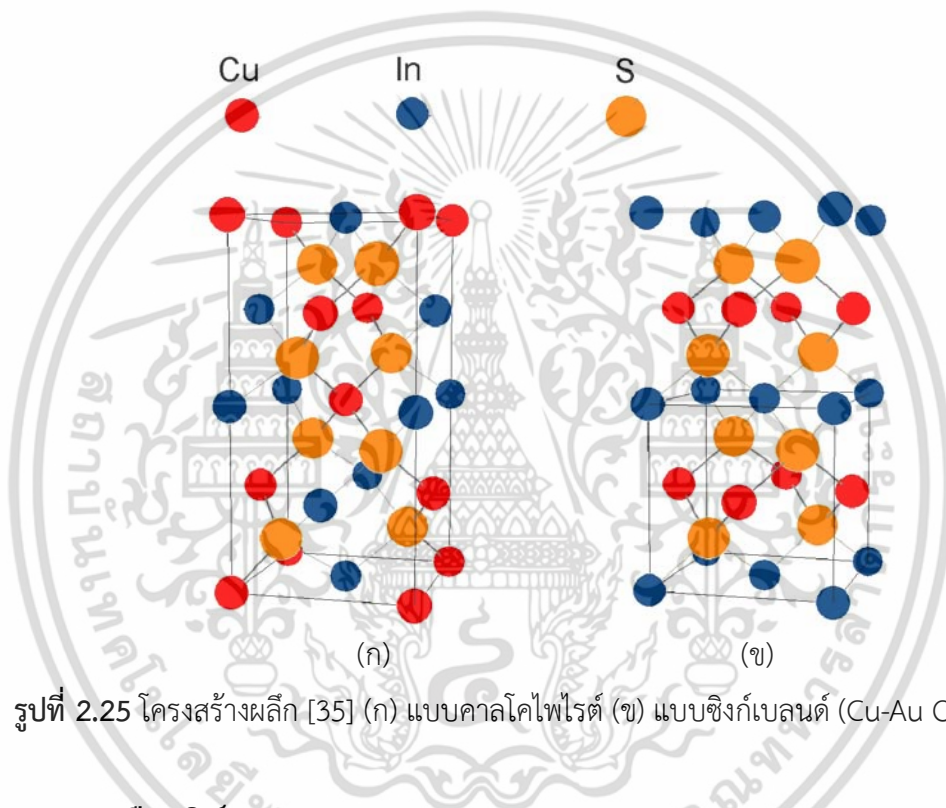
แผนภาพวิภูภาคของธาตุ 3 ชนิด เกี่ยวกับปริมาณสารสัมพันธ์ของสารซึ่งแสดงความสัมพันธ์ ระหว่าง องค์ประกอบและ วิภูภาค จากรูปที่ 2.24 แสดงแผนภาพวิภูภาคของระบบ Cu-In-S ที่คงรูป เสถียรในอุณหภูมิห้อง วิภูภาคที่เกิดระหว่าง Cu-S, In-S และ Cu-In ที่เกิดขึ้นในฟิล์ม CuInS_2 เช่น ช่วงการขึ้นรูปสารประกอบของทองแดงและ ซัลเฟอร์ดังแสดงตรงขอบของรูป 2.24 ในเส้น Cu-S มีความเสถียรในอุณหภูมิห้องพบสารประกอบของ CuS , $\text{Cu}_{1.75}\text{S}$, $\text{Cu}_{1.96}\text{S}$, Cu_2S และสารประกอบที่เกิดขึ้นระหว่าง In-S มี In_2S_3 , In_6S_7 , InS ในกรณีของ Cu-In เป็นสารประกอบระหว่างโลหะมี δ (Cu_7In_3), η ($\text{Cu}_{16}\text{In}_9$), ϕ ($\text{Cu}_{11}\text{In}_9$) และ CuIn_2 และความเสถียรของสารประกอบของ ธาตุทั้งสาม ชนิดที่อุณหภูมิห้องมีอยู่ในรูปของ Chalcopyrite CuInS_2 และ Cubic spinel CuIn_5S_8 นอกจากนี้ รูปแบบผลึกที่เกิดขึ้นจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับปริมาณสัมพันธ์ของวัสดุ การพิจารณาแบบ ผลึกของ CuInS_2 ซึ่งโดยทั่วไปมีโครงสร้างผลึกแบบ Tetragonal เมื่อได้รับอุณหภูมิสูงจนถึง 1,318 K จะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปแบบผลึก จากโครงสร้าง Tetragonal เป็นโครงสร้าง hexagonal และมี จุดหลอมเหลว CuInS_2 ที่อุณหภูมิ 1,364 K



รูปที่ 2.24 แผนภาพวิภูภาคของระบบ Cu-In-S [34]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยปกติแล้วในสารประกอบหมู่ I-II-VI จะเป็นผลึกชนิดโครงสร้างคาลโคไพไรต์ (Chalcopyrite) และมีข้อแตกต่างจากโครงสร้างผลึกอีกชนิดที่ได้รับความนิยมจากการเปลี่ยนลำดับการเรียงของอะตอม ในโครงสร้างคาลโคไพไรต์ ซึ่งอาจจะได้รับอะตอมของ Cu และ In เข้าไปเรียงตัวในโครงสร้างแบบซิงก์เบลนด์ (zincblend) ซึ่งนำไปสู่โครงสร้างเรียกว่า “Copper-gold” (Cu-Au) โครงสร้างผลึกคาลโคไพไรต์ และ โครงสร้างผลึก Cu-Au แสดงดังรูปที่ 2.25 คุณสมบัติเฉพาะของในโครงสร้างชนิดพหุผลึก CuInS_2 อาจจะไม่ตรงกันทั้งหมด ขึ้นอยู่กับการเบี่ยงเบนปริมาณสัมพันธ์ และอาจจะนำไปสู่โครงสร้างที่ซับซ้อนของรูปแบบ Cu-In-S ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ด้วยเทคนิค XRD และ รามาน



รูปที่ 2.25 โครงสร้างผลึก [35] (ก) แบบคาลโคไพไรต์ (ข) แบบซิงก์เบลนด์ (Cu-Au Odering)

2.10. การเคลือบฟิล์มบาง CuInS_2

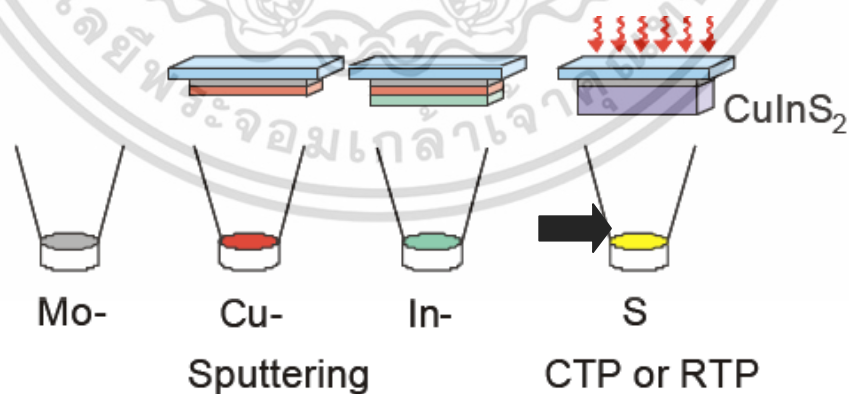
กระบวนการสร้างฟิล์มนั้นเริ่มตั้งแต่การเกิดปฏิกิริยาจากสารเคมีตั้งต้นให้เกิดการสะสมบนฐานรองจนกลายเป็นฟิล์มทำให้ได้ฟิล์มที่มีสมบัติตามต้องการ ลักษณะการเกิดฟิล์มบางถูกแบ่งเป็นสามส่วน คือเริ่มจากการเกิดนิวเคลียส (Nucleation) เป็นขั้นการเกิดอะตอมเป็นโมเลกุลบนฐานรองและส่วนถัดมาเริ่มเรียงกันเป็นส่วนเล็กๆ ใกล้เคียงกันและส่วนสุดท้ายเป็นการเกิดการเรียงจนเป็นผิวฟิล์มเดียวกันอย่างสมบูรณ์ กระบวนการเคลือบฟิล์มถูกแบ่งเป็นสองส่วนใหญ่ๆคือ กระบวนการทางฟิสิกส์และกระบวนการทางเคมี

2.10.1 การเคลือบฟิล์มบาง CuInS_2 ด้วยวิธีสปีเตอร์

การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปีเตอร์เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นในทางฟิสิกส์ โดยใช้อิออนที่มีพลังงานสูงเช่นไอออนที่มีพลังงานสูงจะถูกผลิตขึ้นอย่างต่อเนื่อง ไปปะทะกับสารตั้งต้นให้อะตอม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลุดออกจากผิวอย่างต่อเนื่องเพื่อให้กระบวนการเคลือบเกิดขึ้นเป็นฟิล์มบนผิวฐานรอง การสร้างอนุภาคที่มีพลังงานสูงสามารถทำได้หลายวิธีเช่น การใช้ลำอนุภาคจากปืนไอออน (Ion gun) ที่สามารถผลิตไอออนได้ในอัตราสูง หรือผลิตได้จากกระบวนการโกลวดิสชาร์จ (Glow discharge) ซึ่งนำไปใช้ในกระบวนการสร้างฟิล์มด้วยวิธี ดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ (DC Magnetron Sputtering) เป็นต้น กระบวนการโกลวดิสชาร์จคือกระบวนการคายประจุที่ประกอบไปด้วยแก๊ส ซึ่งในกระบวนการดังกล่าวจะมีการเรืองแสงของแก๊สเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลของแก๊สอยู่ในภาวะกระตุ้น กระบวนการสร้างฟิล์มด้วยวิธี ดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ เป็นระบบที่ใช้สนามแม่เหล็กเข้ามาช่วยในระบบดีซีไดโอดสปัตเตอร์ โดยสนามแม่เหล็กจะทำให้ไอเล็กตรอนเคลื่อนที่แบบไซโคลอยด์ในพลาสมา ก่อนเคลื่อนถึงแอโนด ซึ่งเพิ่มระยะเวลาการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในพลาสมา ทำให้อิเล็กตรอนมีโอกาสที่จะชนกันและเกิดการไอออนไนซ์มากขึ้น [36]

การสร้างฟิล์ม CuInS_2 ด้วยวิธี ดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ รูปที่ 2.26 เริ่มจากการสปัตเตอร์ด้วยทองแดงเป็นสารตั้งต้นก่อนจะนำไปสปัตเตอร์ด้วยอินเดียมอีกชั้นหนึ่งซึ่งการกำหนดอัตราส่วนระหว่างทองแดงและอินเดียมจะเกิดขึ้นในกระบวนการนี้ หลังจากนั้นนำฟิล์มไปเข้าสู่กระบวนการ Sulfurization คือการอบในบรรยากาศของซัลเฟอร์ซึ่งโดยทั่วไปมีสองลักษณะคือ การเพิ่มอุณหภูมิแบบปกติ (Conventional Thermal Processing; CPT) และการเพิ่มอุณหภูมิด้วยความรวดเร็ว (Rapid Thermal Processing; RTP) หลังจากผ่านกระบวนการนี้แล้วฟิล์มที่ได้จะเกิดการคงรูปผลึกเป็นฟิล์ม CuInS_2 จึงนำไปสร้างชั้นบัฟเฟอร์ด้วยฟิล์ม CdS โดยใช้วิธีอบสารละลายเคมี และหลังจากนั้นสร้างชั้นหน้าต่างรับแสงด้วยฟิล์ม ZnO และชั้นสุดท้ายสร้างขั้วด้วยอลูมิเนียมหรือนิกเกิล โดยประสิทธิภาพสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างฟิล์ม CuInS_2 ด้วยวิธี ดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ในโครงสร้าง $\text{Mo/CuInS}_2/\text{CdS/ZnO}$ มีค่าเท่ากับ 11.1% (V_{oc} 728 mV, J_{sc} 21.5 mA/cm^2 , FF 0.7) [37]



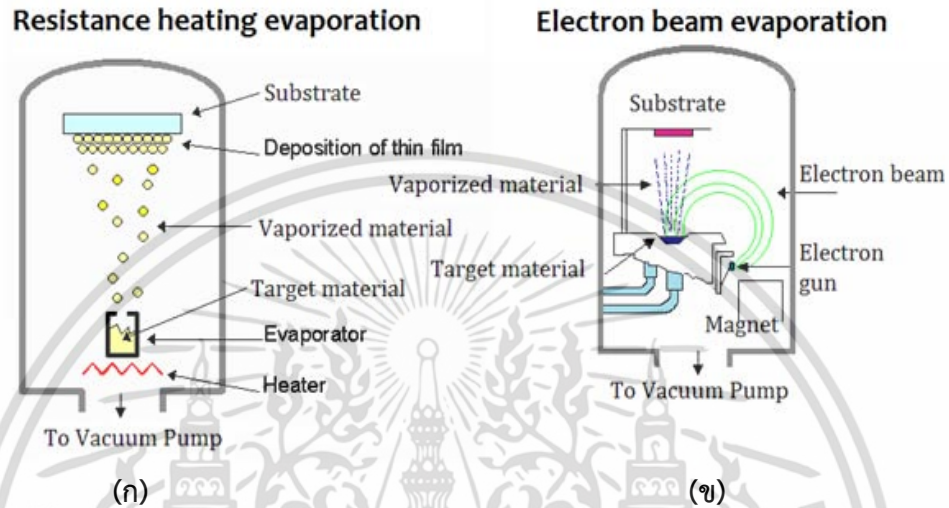
รูปที่ 2.26 ลำดับกระบวนการสร้างฟิล์มบาง CuInS_2 ด้วยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ [36]

2.10.2 การเคลือบฟิล์มบาง CuInS_2 ด้วยวิธีระเหยสาร

การระเหยคือการเคลือบวัสดุของแข็งบนฐานรองซึ่งต้องอยู่ในระบบสุญญากาศจัดอยู่ในกระบวนการเชิงฟิล์ม โดยให้ความร้อนกับสารตั้งต้นเพื่อให้ระเหยกลายเป็นไอไปตกสะสมบนผิวฐานรอง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

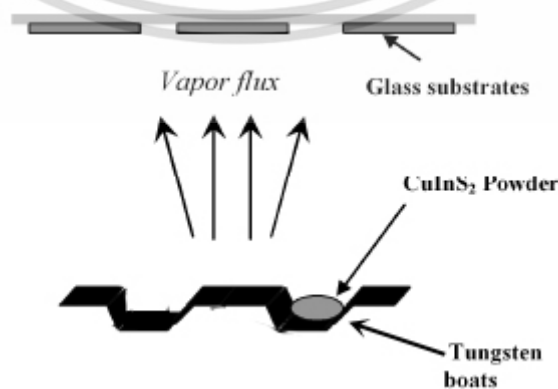
โดยเทคนิคการระเหยมีรูปแบบการให้ความร้อนแก่ตั้งต้นที่หลากหลายเช่น การให้ความร้อนแบบตัวต้านทาน การให้ความร้อนแบบลำอิเล็กตรอน เป็นต้น อย่างไรก็ตามการเคลือบด้วยวิธีนี้ไม่สามารถใช้กับสารตั้งต้นชนิดที่มีจุดหลอมเหลวสูงมาก

การให้ความร้อนแบบตัวต้านทาน โดยจะจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านขดลวด (Coil) หรือแผ่นให้ความร้อน (Hotplate) จนกระทั่งตั้งต้นหลอมเหลวแล้วระเหยเป็นไอดังรูปที่ 2.27 (ก)



รูปที่ 2.27 การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีการระเหยสาร [38] (ก) การให้ความร้อนแบบตัวต้านทาน (ข) การให้ความร้อนแบบลำอิเล็กตรอน

รูปที่ 2.27 (ข) แสดงการให้ความร้อนแบบลำอิเล็กตรอน เป็นเทคนิคให้ความร้อนโดยใช้ลำอิเล็กตรอนพลังงานสูงซึ่งใช้หลัก Thermionic จากปืนอิเล็กตรอนยิงไปบนสารตั้งต้น โดยใช้สนามแม่เหล็กควบคุมวิธีการแพร่ของลำอิเล็กตรอนวิธีนี้จะให้ความร้อนสูงมากจึงทำให้อัตราการระเหยเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว จากรูปที่ 2.28 ฟิล์มบาง CuInS_2 ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีระเหยจะใช้วิธีระเหยด้วยการให้ความร้อนแบบตัวต้านทานโดยจะใช้สารตั้งต้นที่มีลักษณะเป็นผงเนื่องจากสารตั้งต้นทั้งหมดมีจุดหลอมเหลวที่ไม่สูงมากนัก



รูปที่ 2.28 ฟิล์ม CuInS_2 ระเหยด้วยความร้อนแบบตัวต้านทาน [39]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10.3 การเคลือบฟิล์มบาง CuInS_2 ด้วยเทคนิคสเปรย์

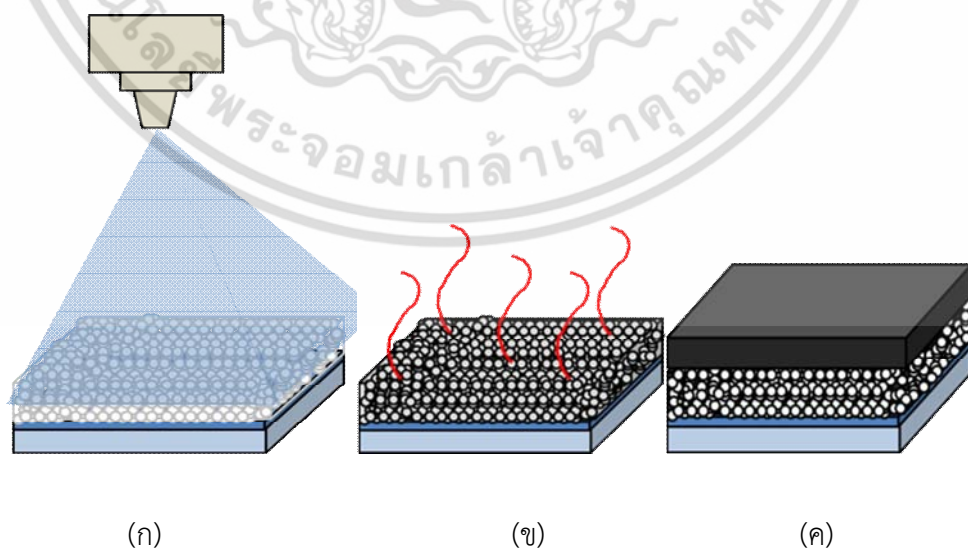
การเคลือบฟิล์มบาง CuInS_2 ด้วยวิธีเทคนิคสเปรย์เป็นวิธีที่ใช้กระบวนการทางเคมีในการฟิล์มซึ่งสามารถดำเนินการสังเคราะห์โดยไม่ต้องใช้ระบบสุญญากาศจึงเป็นเทคนิคที่ค่อนข้างได้รับความนิยมเป็นอย่างมากจากการรวบรวมงานวิจัยต่างๆพบว่า การเคลือบฟิล์มด้วยเทคนิคสเปรย์มีข้อดีดังนี้

สามารถสร้างฟิล์มได้ด้วยเครื่องมือที่ไม่ใช้ระบบสุญญากาศ

สังเคราะห์ฟิล์มที่มีพื้นที่ขนาดใหญ่

สามารถสังเคราะห์ฟิล์มด้วยใช้อุณหภูมิต่ำ ($300\text{-}500\text{ }^\circ\text{C}$)

หัวสเปรย์ที่นำมาใช้ต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพของโดยเน้นไปที่ ขนาดของละอองสารเคมี รัศมีการกระจายตัวของสารเคมี และการทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมีที่นำมาสเปรย์ซึ่งชนิดที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้สเปรย์คือชนิด Stainless nozzle spray ลักษณะการก่อตัวของฟิล์มบาง CuInS_2 ด้วยเทคนิคสเปรย์โดยจะยกตัวอย่างชิ้นงานที่มีความซับซ้อน (รูปที่ 2.29) จากรูพรุนของฟิล์ม TiO_2 ในกรณีนี้ลักษณะการพ่นสเปรย์ในความต่อเนื่องนานๆจะทำให้สารละลายไปเจือปนบนผิวหน้าของฟิล์ม TiO_2 ทำให้อุณหภูมิลดลงอย่างรวดเร็วจนทำให้ฐานรองเกิดรอยแตกร้าวจนเกิดความเสียหายกับเซลล์แสงอาทิตย์ การแก้ไขปัญหาดังกล่าวโดยการใช้เทคนิคการสเปรย์คือลักษณะการพ่นแบบไม่ต่อเนื่อง โดยการเว้นระยะช่วงพ่นสเปรย์และหยุดพ่นสเปรย์เพื่อรอให้สารละลายระเหยไปจนหมด การก่อตัวของฟิล์มบาง CuInS_2 จึงเกิดขึ้นระหว่างหยุดพ่นสเปรย์ โดยในระยะเริ่มแรกสารละลายจะแทรกตัวลงไประหว่างรูพรุนของฟิล์ม TiO_2 แล้วเกิดเป็นฟิล์มเคลือบบางๆจนกระทั่งจำนวนการพ่นสเปรย์สิ้นสุด การก่อตัวของฟิล์มที่มีลักษณะพอกพูนหนาจนเคลือบผิวฟิล์ม TiO_2 ทั้งหมด



รูปที่ 2.29 การสเปรย์ฟิล์มบาง CuInS_2 แบบไม่ต่อเนื่อง (ก) ขณะสเปรย์ (ข) ขณะหยุดสเปรย์

(ค) เสร็จสิ้นการสเปรย์

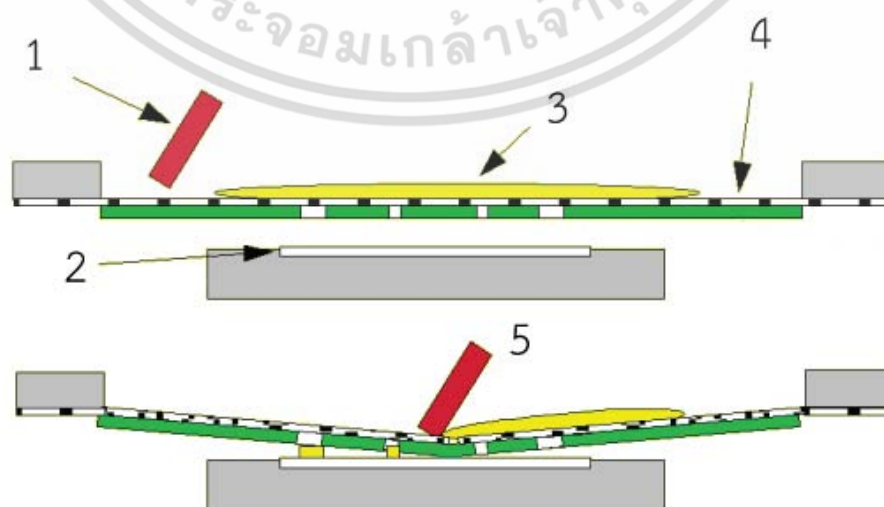
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.11 การสร้างฟิล์ม TiO₂ ด้วยเทคนิคสกรีน [40]

ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide; TiO₂) เป็นวัสดุที่มีสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และมีค่าความกว้างของแถบพลังงานประมาณ 3.2 eV มีลักษณะทางกายภาพเป็นอนุภาคเมื่อนำมาสร้างเป็นฟิล์มจึงทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสมากเนื่องจากการเรียงตัวของอนุภาคขนาดเล็กทำให้เกิดรูพรุนจึงเหมาะสมที่จะนำมาสร้างเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ อนุภาคของ TiO₂ มีลักษณะโครงสร้างผลึก 3 รูปแบบคือ 1) อะนาเทส (Anatase) 2) รูไทล์ (Rutile) 3) บรูไคท์ (Brookite) โดยส่วนใหญ่แล้วจะใช้ TiO₂ ที่มีโครงสร้างแบบ อะนาเทสหรือรูไทล์ หรือทั้งสองอย่างรวมกัน อย่างเช่น TiO₂ Degussa P-25 ที่ใช้ในงานวิจัยฉบับนี้ มีส่วนผสมของ TiO₂ ในอัตราส่วน อะนาเทส : รูไทล์ เท่ากับ 3:1 ผลึกของ TiO₂ ทั้งสองแบบในผง P-25 มีโครงสร้างแบบ Tetragonal โดยที่คุณสมบัติเด่นคือมีค่าการสะท้อนแสงต่ำ TiO₂ แบบรูไทล์มีค่าสูงกว่าแบบอะนาเทสเล็กน้อยซึ่งไม่มีผลมากนักเมื่อนำมาสร้างเป็นเซลล์แสงอาทิตย์สามารถส่งผ่านแสงได้ถึงชั้นดูดกลืนแสง

การสร้างฟิล์ม TiO₂ ด้วยเทคนิคพิมพ์สกรีน ได้ฟิล์มที่มีเอกลักษณ์ของผิวฟิล์มที่มีลักษณะเกาะกันอย่างหลวมๆ ซึ่งช่องว่างที่เกิดขึ้นมาจากการสลายตัวของสารอินทรีย์ ใน TiO₂ paste ที่ทำหน้าที่สร้างความหนืดเพื่อยึดเกาะระหว่างอนุภาคของ TiO₂ และผิวของฐานรองระหว่างพิมพ์สกรีน การพิมพ์สกรีนมีคุณลักษณะเฉพาะของตัว โดยการกดปาดเจลที่มีความหนืดพอเหมาะด้วยยางปาดผ่านผ้าสกรีน เพื่อให้เจลไหลผ่านรูผ้าในปริมาณที่เท่ากัน รูปที่ 2.30 ลักษณะและในการการพิมพ์สกรีนมีลำดับขั้นตอนดังนี้

1. ยางปาด
2. ฐานรอง
3. TiO₂ paste
4. ผ้าสกรีน (ทำจากผ้าซึ่งมีลักษณะใช้การอัดหรือฟิล์มเพื่อยทำให้เกิดลวดลาย)
5. ลักษณะการปาดเจลโดยจะปาดในทิศทางเดียวกันเพื่อป้องกันรอยย่นของฟิล์ม



รูปที่ 2.30 กระบวนการพิมพ์สกรีน [41]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกึ่งหนึ่งเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.12 ปฏิกริยาการเกิดฟิล์ม CdS ด้วยวิธีออบสารละลายเคมี [42-43]

วิธีการออบสารละลายเคมี (Chemical Bath Deposition) เป็นเทคนิคที่มีใช้กันมานานกว่า 130 ปี และในรอบสิบปีถึงยี่สิบปีที่ผ่านมาได้รับการฟื้นตัวอีกครั้ง ในส่วนมากวิธีออบสารละลายเคมีประสบความสำเร็จในการนำมาใช้สร้างฟิล์มเพื่อประยุกต์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง สามารถสร้างฟิล์มที่มีพื้นที่ขนาดใหญ่และใช้ต้นทุนต่ำ สารละลายที่พบมากในการสร้างฟิล์มมีหลากหลาย เช่น กลุ่มโครงสร้างผลึกชนิดแชลโคเจน(Chalcogenide) CdS, ZnS, PbS, CdSe เป็นต้น และกลุ่มโครงสร้างผลึก คาลโคไพไรต์ (Chacopyrite) CuInS_3 , CuInSe_2 เป็นต้น การบวนการออบสารละลายเคมี ถูกควบคุมโดยปฏิกิริยาทางเคมีในการทับถมเพื่อเป็นฟิล์มบางอย่างรวดเร็ว สารละลายประกอบด้วยเกลือและโลหะละลายน้ำเพื่อปล่อยไอออนบวก ในธาตุที่ไม่ใช่โลหะเตรียมจากสารประกอบที่ปล่อยไฮดรอกไซด์ ไอออน ซึ่งให้อิออนลบ การเกิดปฏิกิริยาสารประกอบได้ตะกอนไปเกาะบนผิวของชิ้นงาน ความหนาของฟิล์มจากวิธีออบสารละลายเคมีระหว่าง 50 ถึง 200 nm ซึ่งสามารถทำให้หนากว่าเพิ่มขึ้นได้โดยการจุ่มในกระบวนการเดียวกันอีกครั้ง อย่างไรก็ตามกระบวนการออบสารละลายเคมียังมีความเสี่ยง ในการเพิ่มโอกาสการหลุดของรูพรุนบนผิวชิ้นงาน

การเตรียมฟิล์มบาง CdS จะใช้ปฏิกิริยาของไอออนแอมโมเนียมและไทโอยูเรีย (NH_2CSNH_2) ในสารละลายแอมโมเนียดังสมการ (2.17-2.20)



ฟิล์ม CdS ที่ก่อตัวขึ้นสามารถเกิดขึ้นได้ 2 รูปแบบคือ 1) แบบ Homogeneous ซึ่งจะเกิดการรวมตัวของ CdS ในรูปของสารแขวงลอยในสารละลาย หรือ 2) ปฏิกริยาแบบ Heterogeneous ซึ่ง CdS จะก่อตัวเป็นฟิล์มบนผิวของฐานรอง ในการสร้างฟิล์ม CdS เพื่อใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์จะต้องควบคุมสารแขวงลอยที่เกิดขึ้น มิฉะนั้น CdS ที่เกิดขึ้นจะกลายเป็นตะกอนเสียเป็นส่วนใหญ่ทำให้การยึดเกาะของฟิล์ม CdS บนฐานรองไม่ดี

2.13 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CuInS_2 ด้วยเทคนิคสเปรย์ซึ่งมีขั้นตอนการผลิตที่ไม่ซับซ้อนตลอดกระบวนการ และที่สำคัญไม่ต้องใช้ระบบสุญญากาศจึงสามารถลดต้นทุนในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ได้มาก เอกสารที่เกี่ยวข้องกับการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ดังกล่าวสามารถสรุปได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

M.H. Valdés และคณะ (2010) [6] ได้ศึกษาการสร้างฟิล์มบาง CuInS_2 ด้วยวิธีการที่ใช้ ต้นทุนต่ำภายใต้โครงสร้าง Graphite/ CuInS_2 / TiO_2 / ZnO /TCO มีวิธีการสร้างเริ่มจากการนำ กระจก TCO ที่ทำจากกระจกถูกเคลือบด้วยฟิล์ม $\text{SnO}_2:\text{F}$ แล้วนำมาเคลือบฟิล์ม ZnO ด้วยวิธีการ เคลือบด้วยไฟฟ้า (Electro deposition) โดยมีเงื่อนไขในการสร้างฟิล์มคือทำให้ฟิล์ม ZnO มี ลักษณะเป็นอนุภาคที่เกาะกันหนาแน่น (Compact ZnO) และอีกหนึ่งเงื่อนไขคือสร้างฟิล์ม ZnO ให้มีลักษณะเป็นรูพรุน (Porous ZnO) เพื่อเพิ่มพื้นที่ของรอยต่อ หลังจากนั้นสร้างชั้นบัฟเฟอร์ ด้วยฟิล์ม TiO_2 ด้วยวิธีสเปรย์เป็นชั้นบางๆ และสุดท้ายสร้างฟิล์ม CuInS_2 ด้วยวิธีสเปรย์ไพโรไลซิส จากสารตั้งต้น CuCl_2 , InCl_3 และ Thiourea ผสมในน้ำปราศจากไอออน (DI water) ในอัตราส่วน เชิงโมล 1:1:5 สเปรย์แบบไม่ต่อเนื่องจำนวน 20 รอบ โดยพ่นสเปรย์ 30 วินาที หยุด 60 วินาที บนฐานรองที่ได้รับความร้อน 300°C และใช้กราไฟต์เป็นขั้วไฟฟ้า ผลจากการวิเคราะห์โครงสร้าง ผลึกด้วย XRD พบระนาบ (112), (204/220) และ (116/312) ตรงกับไฟล์ JCPD 27-0159 ผล จากการวิเคราะห์สมบัติกระแสและแรงดันภายใต้ความเข้มแสง 70 mW/cm^2 ประสิทธิภาพใน โครงสร้าง Graphite/ CuInS_2 / TiO_2 /compact- ZnO /TCO มีค่า 0.16% (V_{oc} 0.13V , J_{sc} 3.5 mA/cm^2 , FF 0.25) และ โครงสร้าง Graphite/ CuInS_2 / TiO_2 /porous- ZnO /compact- ZnO /TCO มีประสิทธิภาพ 0.66% (V_{oc} $0.0.235\text{V}$, J_{sc} 7.6 mA/cm^2 , FF 0.26) โครงสร้างของ porous ZnO ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์เนื่องจากมีผิวสัมผัสที่ใหญ่มากกว่าระหว่าง ZnO กับ CuInS_2 มีการสะท้อนให้เห็นถึงค่าที่เพิ่มขึ้นของ กระแสลัดวงจร (J_{sc}) และ แรงดันวงจรเปิด (V_{oc})

Marian Nanu และคณะ (2005) [44] ได้ศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CuInS_2 โดยมีแนวคิดจากการลดต้นทุนการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์จากวัสดุนาโนไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) และฟิล์มคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์ (CuInS_2) ด้วยวิธีสกรีนและวิธีสเปรย์ตามลำดับภายใต้ โครงสร้าง Gold/ CuInS_2 / In_2S_3 / TiO_2 /FTO โดยมีฟิล์มอินเดียมซัลไฟด์ (In_2S_3) เป็นชั้นบัฟเฟอร์และ ทองคำเป็นขั้ว ผลจากสมบัติกระแสและแรงดันภายใต้มาตรฐานความเข้มแสง A.M. 1.5 มีค่าแรง ดันวงจรเปิด (V_{oc}) 0.53V กระแสลัดวงจร (J_{sc}) 17mA ฟิลแฟกเตอร์ 0.55 และประสิทธิภาพ 5% นอกจากนี้ผู้เขียนยังได้เปรียบเทียบโครงสร้างที่มีชั้นรอยต่อบางๆระหว่าง CuInS_2 / In_2S_3 มีลักษณะ การรวมตัวของอิเล็กตรอนและโฮลบริเวณรอยต่อและภายในผลึกเป็นหลักเกิดจากสถานะที่ไม่ บริสุทธิ์ภายในช่องว่างของแถบพลังงาน อย่างไรก็ตามการรวมตัวของอิเล็กตรอนและโฮลสามารถ ลดได้ด้วยการควบคุมความบริสุทธิ์ของสารกึ่งตัวนำ

การควบคุมปริมาณสารสัมพันธ์ของฟิล์ม CuInS_2 จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีสเปรย์มีดังนี้ ในกรณีทองแดงมากกว่าอินเดียมที่อุณหภูมิ 370°C จะเกิดการทับถมของทองแดงที่ผิวของฟิล์ม ทำให้เกิดผลึกของ Cu_xS และมีลักษณะผลึกที่ค่อนข้างใหญ่กว่าในกรณีของอินเดียมมากกว่า ทองแดง ในกรณีที่ใช้ปริมาณซัลเฟอร์มากจะมีแนวโน้มที่ทำให้เกิดผลึกระนาบ (112) สูงขึ้น

ผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD และ รามาน พบว่าฟิล์ม CuInS_2 มีโครงสร้างผลึกชนิดคาลโคไพไรท์ (Chalcopyrite) และจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิครามานพบอีกโครงสร้างซึ่งเป็นจุดบกพร่องของผลึกคือ โครงสร้างแบบ Cu-Au mode

Ryan O'Hayre และคณะ (2007) [45] ได้ศึกษาลักษณะพิเศษของเซลล์แสงอาทิตย์ โครงสร้างจาก $\text{Au/CuInS}_2/\text{Dense TiO}_2/\text{In}_2\text{S}_3/\text{TiO}_2/\text{TCO}$ โดยมีเงื่อนไขใน 3 ตัวแปรดังนี้ (1) ความหนาของชั้นฟิล์ม TiO_2 (2) ขนาดอนุภาคของ TiO_2 (3) ความหนาของชั้นบัฟเฟอร์ In_2S_3 การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์เริ่มจากใช้กระจก TCO เป็นฐานรองแล้วสเปรย์ TiO_2 ให้มีความหนาประมาณ 150 nm หลังจากนั้นในเงื่อนไขที่ 1 เคลือบฟิล์ม TiO_2 ด้วยวิธีสกรีนโดยปรับความหนา 0, 150, 300 และ 1200 nm และนำฟิล์มที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 450 °C ในชั้นบรรยากาศเปิดเป็นเวลา 6 ชั่วโมง เงื่อนไขที่ 2 เคลือบฟิล์ม TiO_2 ด้วยวิธีสกรีนโดยปรับเปลี่ยนขนาดของอนุภาค 9, 50 และ 300 nm และนำฟิล์มที่ได้ไปอบเช่นเดียวกับเงื่อนไขที่ 1 และสุดท้ายในเงื่อนไขที่ (3) เคลือบฟิล์ม In_2S_3 ด้วยวิธีสเปรย์ควบคุมความหนาด้วยจำนวนรอบการสเปรย์ตั้งแต่ 0, 5, 15 และ 45 รอบได้ความหนาของฟิล์ม In_2S_3 0, 20, 60 และ 200 nm และสร้างฟิล์ม CuInS_2 ด้วยวิธีสเปรย์มีความหนาประมาณ 1 μm ชั้นสุดท้ายทำสร้างขั้วจากทองคำด้วยวิธีระเหยในสุญญากาศ แสดงดังตารางที่ 2.1

ผลจากการทดสอบสมบัติกระแสและแรงดันพบว่าในเงื่อนไขที่แรกได้ประสิทธิภาพสูงสุดที่ความหนาของฟิล์ม TiO_2 150 nm มีค่าเท่ากับ 2.5% เงื่อนไขที่สองมีประสิทธิภาพสูงสุดที่ขนาดอนุภาคของ TiO_2 200 nm มีค่าเท่ากับ 2.8% และเงื่อนไขที่สามมีประสิทธิภาพสูงสุดที่ความหนาของชั้นบัฟเฟอร์ In_2S_3 60 nm มีค่าเท่ากับ 3% ผลจากการปรับความหนาของชั้นฟิล์ม TiO_2 พบว่าในภาวะความมืดและภายใต้แสงมีค่าความต้านทานอนุกรมเพิ่มขึ้นตามความหนาของฟิล์ม TiO_2 ผลจากการปรับขนาดอนุภาคของ TiO_2 พบว่ากระแสลัดวงจรเพิ่มขึ้นเพราะค่าความต้านทานขนานเพิ่มขึ้นตามขนาดของอนุภาค TiO_2 ซึ่งจากการวิเคราะห์ด้วยภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนเห็นถึงการแทรกตัวของฟิล์ม CuInS_2 ภายในรูพรุนระหว่างอนุภาคขนาดใหญ่ได้ดีกว่าอนุภาคขนาดเล็กและพบว่าขนาดของอนุภาค TiO_2 ไม่มีส่งผลต่อกลไกการถ่ายโอนประจุซึ่งสังเกตได้จากแรงดันวงจรเปิด ผลจากการควบคุมความหนาของชั้นบัฟเฟอร์ In_2S_3 มีแนวโน้มของประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นจนถึงความหนา 60 nm และมีประสิทธิภาพลดลงเมื่อมีความหนาลงถึง 200 nm เป็นเพราะเมื่อความหนาของชั้นบัฟเฟอร์เพิ่มมากขึ้นจะมีพฤติกรรมดูดกลืนแสงบางส่วนทำให้ปริมาณโฟตอนส่องทะลุถึงรอยต่อลดลง

ตารางที่ 2.1 ชิ้นงานวิจัยของ Ryan O’Hayre และคณะ[45]

เงื่อนไข	ชิ้นงาน				J_{sc} (A/cm^2)	V_{oc} (V)	FF	η (%)
	โครงสร้าง	ความหนาของ TiO_2	ขนาดอนุภาคของ TiO_2	ความหนาของ In_2S_3				
1	Au/CuInS ₂ /In ₂ S ₃ /Dense-TiO ₂ /TCO	0	0	50	6.24	0.31	0.41	0.8
1	Au/CuInS ₂ /In ₂ S ₃ /TiO ₂ /Dense-TiO ₂ /TCO	150	300	50	14.0	0.45	0.40	2.5
1	Au/CuInS ₂ /In ₂ S ₃ /TiO ₂ /Dense-TiO ₂ /TCO	300	300	50	13.7	0.30	0.44	1.8
1	Au/CuInS ₂ /In ₂ S ₃ /TiO ₂ /Dense-TiO ₂ /TCO	1200	300	50	8.6	0.32	0.34	0.9
2	Au/CuInS ₂ /In ₂ S ₃ /TiO ₂ /Dense-TiO ₂ /TCO	200	9	50	1.7	0.41	0.30	0.2
2	Au/CuInS ₂ /In ₂ S ₃ /TiO ₂ /Dense-TiO ₂ /TCO	200	50	50	5.0	0.41	0.40	0.8
2	Au/CuInS ₂ /In ₂ S ₃ /TiO ₂ /Dense-TiO ₂ /TCO	200	300	50	13.2	0.46	0.46	2.8
3	Au/CuInS ₂ /TiO ₂ /Dense-TiO ₂ /TCO	200	300	0	0.05	0.02	0.25	2.5×10^{-4}
3	Au/CuInS ₂ /In ₂ S ₃ /TiO ₂ /Dense-TiO ₂ /TCO	200	300	20	9.70	0.22	0.38	0.8
3	Au/CuInS ₂ /In ₂ S ₃ /TiO ₂ /Dense-TiO ₂ /TCO	200	300	60	19.8	0.40	0.38	3.0
3	Au/CuInS ₂ /In ₂ S ₃ /TiO ₂ /Dense-TiO ₂ /TCO	200	300	200	7.8	0.40	0.36	1.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

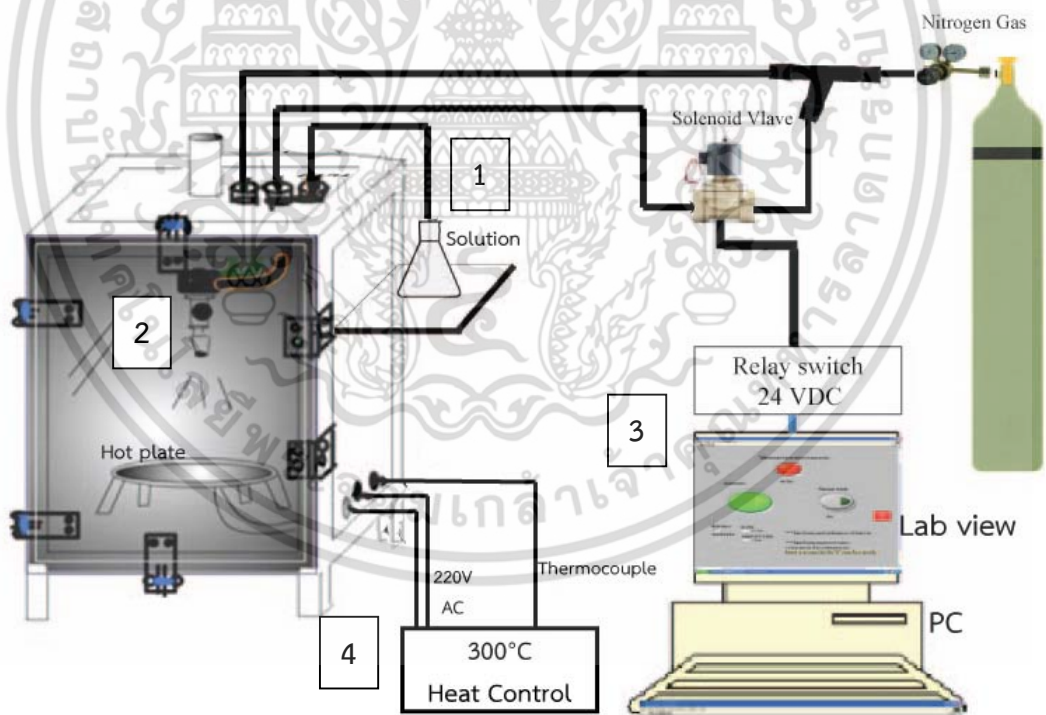
บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การเคลือบสเปรย์ชั้นฟิล์มบาง CuInS_2

การเคลือบฟิล์มนั้นจำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยภายนอก เช่น อากาศโดยรอบขณะสเปรย์ ปัจจัยทางด้านระบบ ความสม่ำเสมอของละอองสารเคมี และอัตราการฉีดพ่นของละอองสารเคมีเป็นต้น ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบระบบสเปรย์ให้เป็นระบบที่มีลักษณะกึ่งปิด (รูปที่ 3.1) ซึ่งระบบจะถูกปิดกันทุกทิศทาง จึงช่วยลดผลกระทบจากอากาศภายนอกได้ โดยระบบที่ใช้ประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลักคือ

1. สารละลาย
2. หัวสเปรย์ชนิด Stainless spray nozzle
3. ระบบควบคุมจังหวะการพ่นสเปรย์
4. ระบบควบคุมความร้อน (Heat control) แก่ฐานรอง



รูปที่ 3.1 ระบบพ่นสเปรย์ที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1 สารเคมีที่ใช้และขั้นตอนการเตรียมสารละลาย

ขั้นตอนการเตรียมสารละลายที่ใช้สำหรับสเปรย์

1. เตรียมสารเคมีที่ใช้สำหรับสเปรย์ ดังนี้
 - 1.1 คอปเปอร์คลอไรด์ (CuCl_2) ความบริสุทธิ์ 97.0% จากบริษัท Sigma-Aldrich Co., Ltd.
 - 1.2 อินเดียมคลอไรด์ (InCl_3) ความบริสุทธิ์ 98.0% จากบริษัท Sigma-Aldrich Co., Ltd.
 - 1.3 ไทโอยูเรีย (Thiourea: $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$) จากบริษัท Carlo Erba Reagents
 - 1.4 นำสารเคมีแต่ละชนิดมาละลายด้วยน้ำปราศจากไอออน (Deionization Water) เครื่องอัลตราโซนิก เป็นเวลา 20 นาที โดย CuCl_2 มีสีฟ้าอ่อนเมื่อถูกละลายด้วยน้ำปราศจากไอออน ส่วน InCl_3 และ NH_2CSNH_2 เมื่อละลายด้วยน้ำปราศจากไอออน จะไม่มีสี
2. นำสารละลายทั้งหมดมาผสมรวมกันด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 30 นาที โดยลักษณะของสารละลายหลังจากกระบวนการอัลตราโซนิกจะไม่มีสี และจะเปลี่ยนสภาพเป็นสีขาวเมื่อทิ้งไว้นานเกิน 60 นาที

3.1.2 ฐานรองขั้นตอนการเตรียมฐานรอง

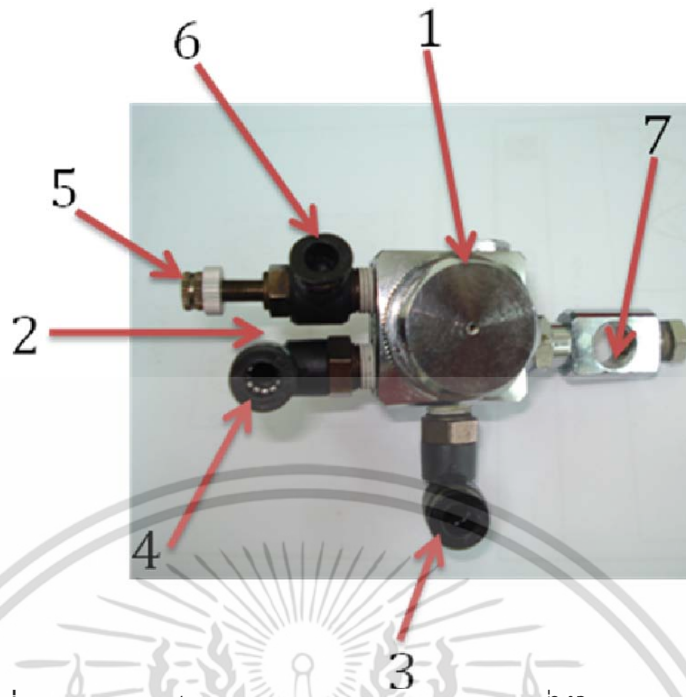
1. ตัดกระจก FTO (Fluorine doped Tin Oxide) ขนาด $1 \times 1.5 \text{ cm}^2$
2. ทำความสะอาดกระจกฐานรองด้วยเครื่องอัลตราโซนิกในอะซิโตน (Acetone) เป็นเวลา 20 นาที และตามด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl alcohol) 20 นาที
3. เป่าผิวชิ้นงานให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน (N_2)

3.1.3 หัวสเปรย์

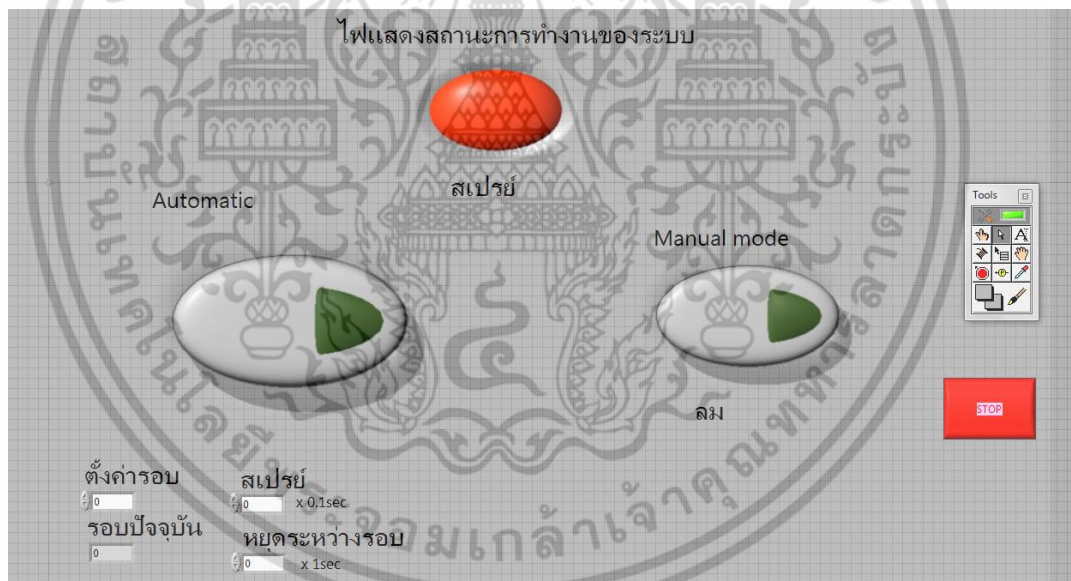
หัวสเปรย์เป็นอุปกรณ์สำคัญที่ทำให้เกิดละอองสารละลายขนาดเล็กไปสะสมบนฐานรอง ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้หัวสเปรย์ชนิด Stainless spray nozzle เนื่องจากมีรัศมีของละอองกว้าง ทนการกัดกร่อนสูงและความร้อนสูง โดยมีส่วนประกอบแสดงดังรูปที่ 3.2 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. ส่วนที่ใช้ในการหมุนเพื่อเพิ่มระยะชั้นลงของเข็มในการกำหนดปริมาณสารละลายที่ไหลผ่านหัวสเปรย์
2. จุดกำหนดจำนวนรอบ
3. ช่องสำหรับต่อสายแก๊ส ซึ่งจะทำหน้าที่ในการยกกระดืบหัวเข็ม
4. ช่องสำหรับต่อสายสารละลาย
5. ทำหน้าที่เป็น Regulator เพื่อทำหน้าที่ควบคุมแรงดันแก๊สนำพา
6. ช่องสำหรับต่อสายแก๊ส ซึ่งใช้เชื่อมต่อโซลินอยด์วาล์วที่ถูกควบคุมให้เปิด-ปิดด้วยโปรแกรม Lab View เพื่อกำหนดของจำนวนรอบสเปรย์
7. ที่ยึดสำหรับยึดตำแหน่งหัวสเปรย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 หัวสเปรย์ชนิด Stainless nozzle spray ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 3.3 หน้าต่างโปรแกรม Lab View ควบคุมการเปิดปิดของ โซลินอยด์วาล์ว

3.1.4 การควบคุมจังหวะสเปรย์ด้วยโปรแกรม Lab View

ระบบสเปรย์ถูกออกแบบให้สามารถพ่นออกเป็นช่วงคาบเวลาได้โดยใช้โปรแกรม Lab View (รูปที่ 3.3) ควบคุมการเปิด-ปิดของโซลินอยด์วาล์ว เพื่อควบคุมการไหลของแก๊สพาหะนำสารละลาย โดยหน้าต่างโปรแกรมจะมีปุ่มเลือกใช้งานสองโหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. โหมด manual สามารถควบคุมการไหลของแก๊สได้อย่างอิสระตลอดเวลา
2. โหมด auto สามารถควบคุมการไหลของแก๊สได้โดยการตั้งเวลาและจำนวนรอบ โดยมีหน้าตาการทำงานดังนี้
 - 2.1 กำหนดรอบการทำงานของระบบ โดยใส่จำนวนรอบของการพ่นสเปรย์ลงในช่อง “ตั้งค่ารอบ”
 - 2.2 กำหนดระยะเวลาพ่นสเปรย์ในแต่ละรอบ
 - 2.3 กำหนดระยะเวลาหน่วงหยุดระหว่างรอบ
 - 2.4 ปุ่ม automatic เปิดการทำงานของโซลินอยด์วาล์วตามที่ตั้งค่าไว้

3.1.5 ขั้นตอนการสเปรย์

หลังจากติดตั้งระบบสเปรย์ดังรูปที่ 3.1 และทำการเตรียมสารละลายและฐานรองแล้ว จึงเริ่มทำการสเปรย์โดยขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ปรับระดับโดยเพิ่มระยะชั้นลงของหัวเข็ม (แสดงดังรูป 3.2 หมายเลข 1) เพื่อปรับปริมาณสารละลายให้ออกมาตามต้องการโดยเพิ่มระยะชั้นลงของหัวเข็มและปรับ Regulator ให้สุด
2. นำหัวสเปรย์ติดตั้งในตู้ แล้วนำท่อแก๊สและท่อสารละลายต่อเข้ากับหัวสเปรย์ โดยมีโซลินอยด์วาล์วทำหน้าที่เปิด-ปิด อากาศตามจังหวะการพ่นของสเปรย์ที่ควบคุมด้วยโปรแกรม Lab view แสดงดังรูป 3.3
3. กำหนดอุณหภูมิแผ่นให้ความร้อน (Hot plate) ไว้ 300°C หลังจากนั้นวางชิ้นงานลงบนแผ่นให้ความร้อนแล้วรอ 30 นาที เพื่อให้อุณหภูมิของชิ้นงานเท่ากับอุณหภูมิของแผ่นให้ความร้อน
4. ทำการพ่นสเปรย์โดยป้อนคำสั่งในโปรแกรม Lab View ในโหมด Auto ตามความถี่จำนวนรอบที่กำหนดไว้

3.2 การสร้างฟิล์มบาง TiO_2 ด้วยเทคนิคพิมพ์สกรีน [39]

3.2.1 การเตรียม TiO_2 paste

1. ทำ TiO_2 -paste โดยผสม alpha terpineol 77 wt%, ethyl cellulose 9 wt%, TiO_2 14 wt% ลงในเอทิลแอลกอฮอล์ 15 ml และเปลี่ยนเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (wt%) ของ TiO_2 0.5-3.2 wt%
2. นำสารที่เตรียมจากข้อ 1 ไปอัลตราโซนิกจนกระทั่งเอทิลแอลกอฮอล์ระเหยไปจนหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 บล็อกพิมพ์สกรีนติดตั้งกับแท่นพิมพ์สกรีน

3.2.2 ขั้นตอนการพิมพ์สกรีน

1. นำกระจก FTO ที่ทำความสะอาดแล้ววางบนแท่นรองโดยให้อยู่ระหว่างบล็อกสกรีนกับแท่นรอง (รูปที่ 3.4)
2. ทาเจลลงบนบล็อกสกรีนแล้วสกรีนเจลให้ทั่วทั้งผิวหน้าของกระจก FTO อย่างสม่ำเสมอ
3. นำกระจกที่สกรีนแล้วไปอุ่นให้ร้อนที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 30 นาที
4. เพิ่มอุณหภูมิเป็น 450°C เป็นเวลา 30 นาทีเพื่อสลายสารประกอบพอลิเมอร์
5. ลดอุณหภูมิจนถึง 100°C จากนั้นเอาชิ้นงานออกจากเตาอบ

3.3 การสร้างฟิล์มบาง CdS ด้วยวิธีการอบสารละลายเคมี (Chemical Bath Deposition) [22-23]

3.3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้

1. สารเคมี

2.1 ไทโอยูเรีย	1.522 g (0.05M)
2.2 สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH ₄ OH)	21.03 g (1.5M)
2.3 แคดเมียมซัลเฟต (CdSO ₄)	0.125 g (0.0015M)
2. เตรียมบีกเกอร์ในการทดลองประกอบไปด้วย (รูปที่ 3.4)
 1. บีกเกอร์ขนาด 500 ml สำหรับอบสารละลายเคมี
 2. บีกเกอร์ขนาด 500 ml สำหรับล้างชิ้นงานในน้ำปราศจากไอออน
 3. บีกเกอร์ขนาด 100 ml สำหรับละลายแคดเมียมซัลเฟตในแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์
 4. บีกเกอร์ขนาด 100 ml สำหรับละลายไทโอยูเรีย

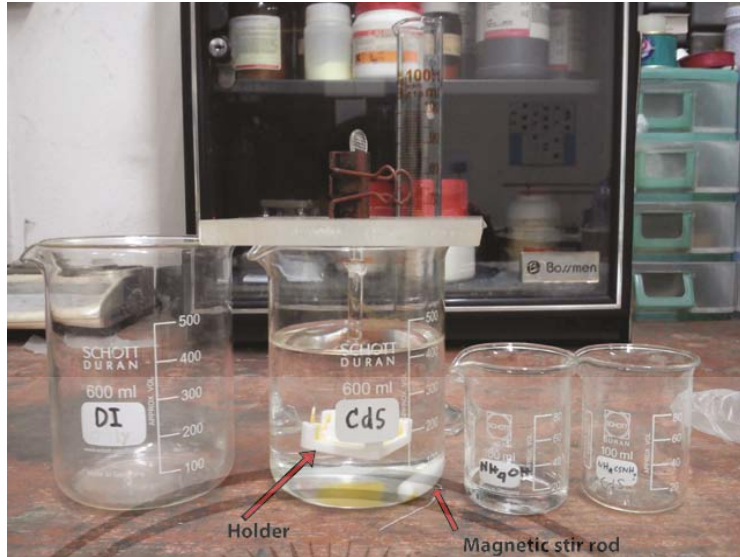
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ปีกเกอร์ตวงขนาด 100 ml
3. เครื่องมือที่ใช้
 1. เครื่อง Thermostatic water bath heat
 2. Stirring Hotplate
 3. แท่งแม่เหล็ก Stir rod
 4. Holder สำหรับติดตั้งชิ้นงาน

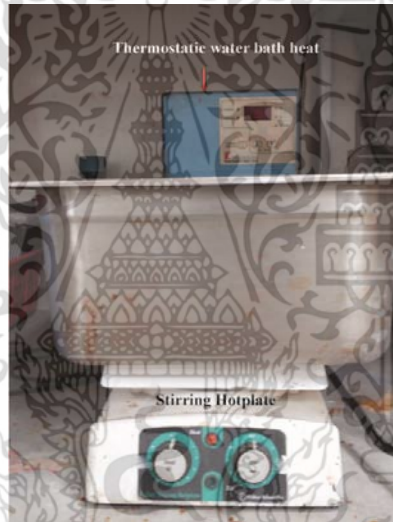
3.3.2 ขั้นตอนการอบสารละลายเคมี

1. จัดเตรียมระบบแสดงดังรูปที่ 3.5
2. ใส่น้ำประปาในอ่างให้ระดับน้ำอยู่สูงกว่าเซ็นเซอร์ระดับน้ำของเครื่อง Thermostatic water bath heat เล็กน้อย เปิดเครื่องให้ได้อุณหภูมิที่ต้องการ
3. ตวงน้ำปราศจากไอออน 350 ml ในปีกเกอร์สำหรับกระบวนการอบสารละลายเคมี
4. ตวงน้ำปราศจากไอออนในปีกเกอร์สำหรับล้างชิ้นงาน
5. ตวงน้ำปราศจากไอออน 50 ml ในปีกเกอร์สำหรับละลายไทโอยูเรีย
6. ละลายแคดเมียมซัลเฟตในแอมโมเนีย
7. ละลายไทโอยูเรียในน้ำปราศจากไอออนด้วยเครื่องอัลตราโซนิค
8. ตวงแอมโมเนียในปีกเกอร์ 21.03g (~26ml) หลังจากนั้นแบ่งแอมโมเนียที่ตวงแล้วใส่ปีกเกอร์ สำหรับทำ CdS โดยให้เหลือไว้เล็กน้อยเพื่อละลายแคดเมียมซัลเฟต
9. เริ่มกระบวนการโดยใส่แท่งแม่เหล็ก stir rod และ holder ที่ติดตั้งชิ้นงานแล้วลงในปีกเกอร์สำหรับทำ CdS ที่ผสมแอมโมเนียไว้เล็กน้อย
10. นำปีกเกอร์จุ่มลงในอ่างพร้อมกับเปิดโหมด Stir บนเครื่อง Stirring Hotplate จับเวลา 10 วินาที หลังจากนั้นเทไทโอยูเรียและแคดเมียมซัลเฟต ที่ละลายแล้วลงในปีกเกอร์
11. หลังจากครบเงื่อนไขทางเวลาแล้วนำ holder ติดตั้งชิ้นงานจุ่มในน้ำปราศจากไอออนหลายๆ รอบเพื่อล้างคอลลอยด์ของ CdS
12. นำชิ้นงานออกจาก holder เป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน แล้วอบที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้ฟิล์มแห้ง
13. การทำความสะอาดอุปกรณ์ นำสารเคมีที่เหลือจากการทดลองทิ้งในภาชนะสำหรับเก็บสารเคมีโดยเฉพาะ หลังจากนั้นนำอุปกรณ์ที่มีคราบสารเคมีติดอยู่มาล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCL) รอจนกว่าคราบสารเคมีจะหลุดหมดจึงนำไปเททิ้งในภาชนะสำหรับเก็บสารเคมีแล้วล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน หลายรอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

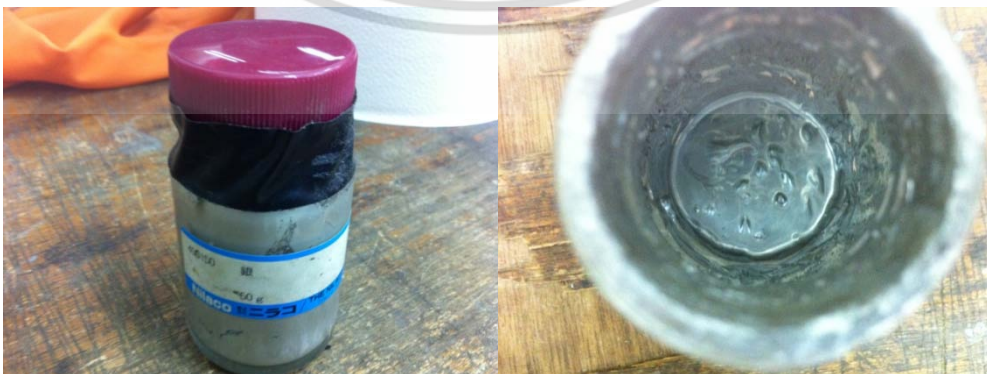


รูปที่ 3.5 ปีกเกอร์สำหรับกระบวนการ CBD-Cds



รูปที่ 3.6 เครื่องมือในการต้มน้ำสำหรับกระบวนการ CBD-Cds

3.4 ขั้นตอนการสร้างขั้วไฟฟ้า



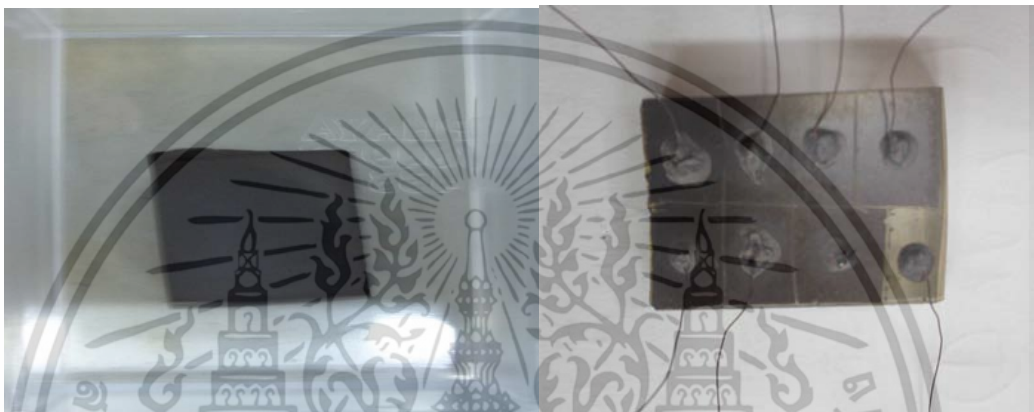
(ก)

(ข)

รูปที่ 3.7 (ก) ขวดกาวเงินที่ใช้ในการสร้างขั้วไฟฟ้า (ข) ลักษณะกาวเงิน (ของเหลว)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ในการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. หลังจากการเคลือบสเปรย์แล้ว (รูปที่ 3.8 (ก)) แบ่งเป็นเซลล์ โดยใช้มีดคัตเตอร์กรีดให้แยกออกจากกัน (รูปที่ 3.8 (ข))
2. เลือกช่องที่จะทำหน้าที่เป็น ขั้วลบ โดยใช้มีดคัตเตอร์ขูดชั้นฟิล์มจนหลุดเหลือเพียงชั้นของ FTO
3. นำกาวเงินสร้างขั้วบวกโดยหยดกาวเงินลงบนแต่ละเซลล์ของชิ้นงาน เป็นหยดเล็กน้อย พร้อมทั้งนำสายไฟขนาดเล็กกว้างบนกาวเงินแต่ละเซลล์
4. นำเซลล์แสงอาทิตย์ไปวัดประสิทธิภาพภายใต้แสงด้วยเครื่อง Solar Simulator



(ก)

(ข)

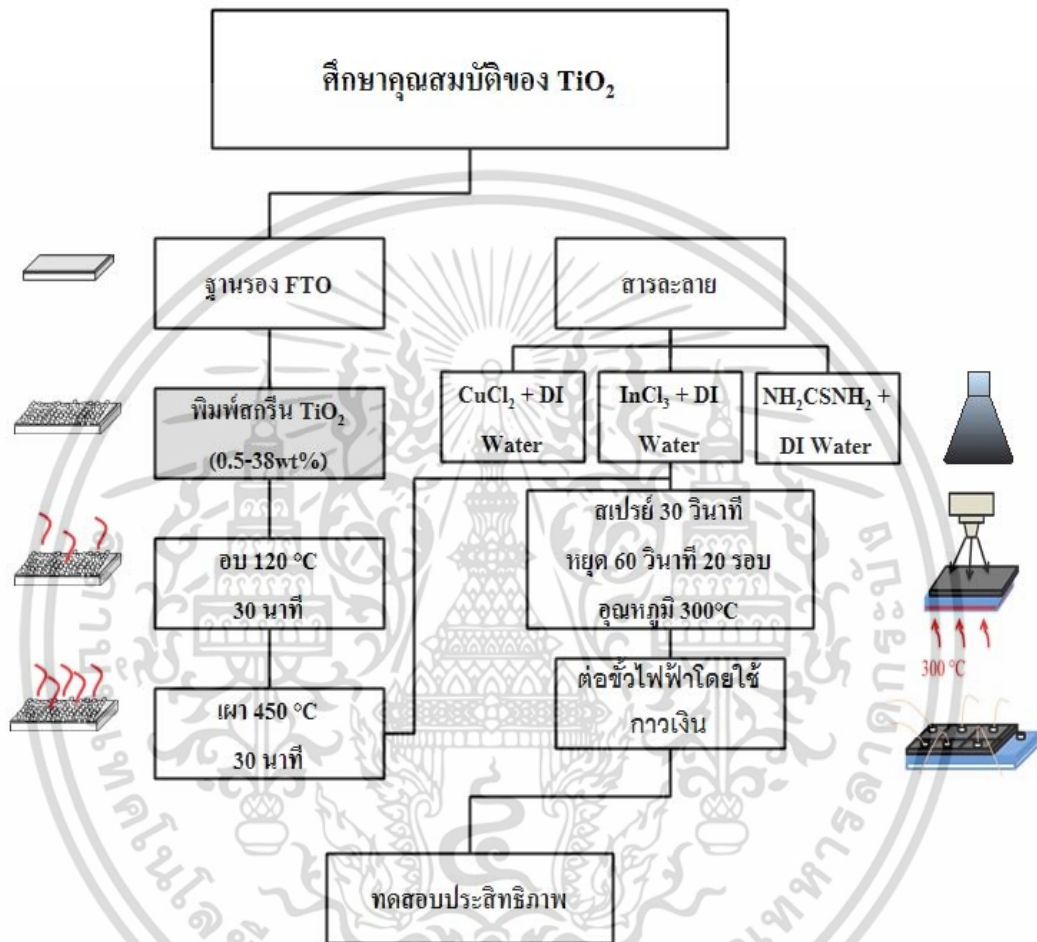
รูปที่ 3.8 ชิ้นงานที่เสร็จสมบูรณ์ (ก) ชิ้นงานหลังจากกระบวนการเคลือบสเปรย์ (ข) ชิ้นงานหลังจากปลุกขั้วด้วยกาวเงิน

3.5 แผนการดำเนินงานวิจัย

การทดลองศึกษาตัวแปรที่ส่งผลถึงประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยจะมุ่งเน้นไปที่การสร้างฟิล์มบาง CuInS_2 ด้วยวิธีสเปรย์ลงบนฐานรองที่สร้างจากวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น เพื่อศึกษาคุณสมบัติของโครงสร้างผลึกในฟิล์มบาง CuInS_2 คุณภาพของผลึก คุณลักษณะเฉพาะของกระแสและแรงดันภายใต้แสงและความมืด โดยเรียงลำดับอย่างเป็นขั้นเป็นตอนโดยเริ่มจากการสร้างฟิล์ม CuInS_2 บนฐานรอง FTO ในโครงสร้าง $\text{CuInS}_2/\text{FTO}$ แล้วจึงเพิ่มวัสดุนาโน TiO_2 เข้ามาอีกชั้นก่อนจะทำการสเปรย์ในโครงสร้าง $\text{CuInS}_2/\text{TiO}_2/\text{FTO}$ นอกจากนี้ในโครงสร้างดังกล่าวยังรวมไปถึงการหาผลกระทบจากความหนาของฟิล์มบาง CuInS_2 ต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ และปริมาณสารสัมพันธ์ระหว่างทองแดงและอินเดียม ต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ การทดลองสุดท้ายในงานวิจัยนี้ได้นำฟิล์ม CdS มาใช้ในโครงสร้าง $\text{CuInS}_2/\text{CdS}/\text{TiO}_2/\text{FTO}$ เพื่อประยุกต์ใช้เป็นชั้นบัฟเฟอร์ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CuInS_2 โดยใช้เงื่อนไขระยะเวลาในการอบสารละลายเคมีเป็นปัจจัยในการศึกษาผลกระทบต่อเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งการทดลองทั้งหมดมีแผนผังในการกำหนดลำดับขั้นตอนในการสร้างดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

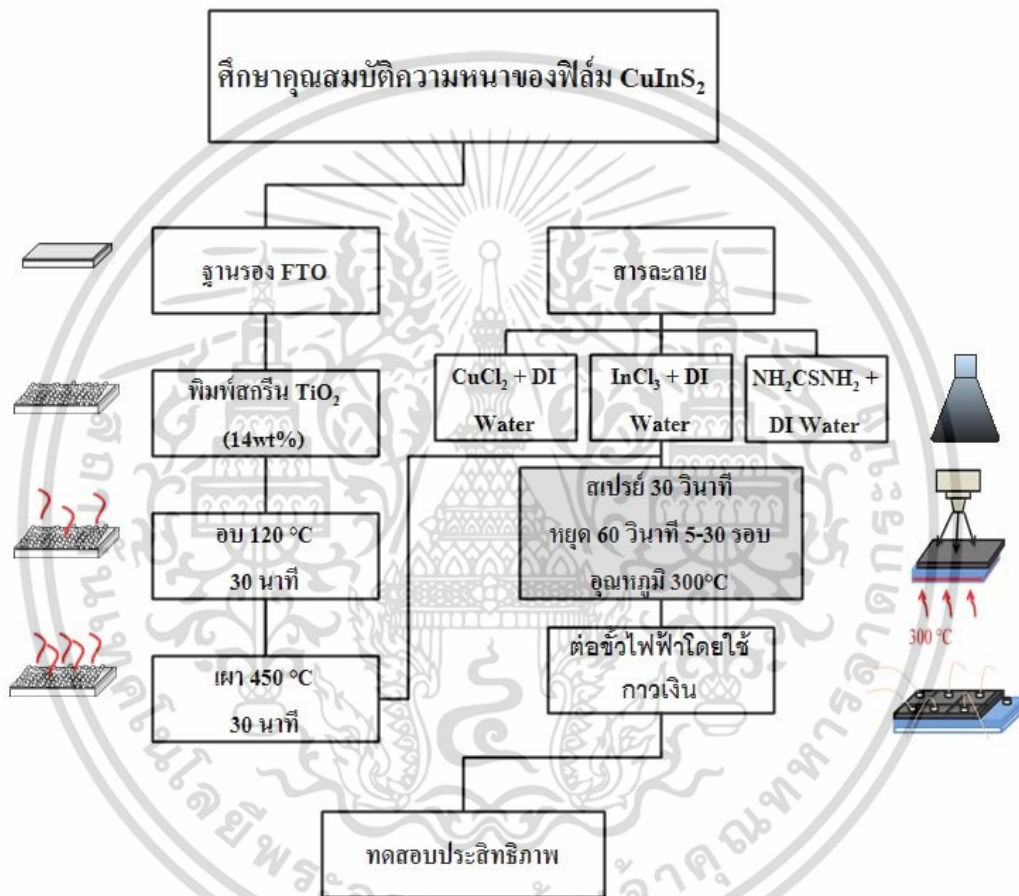
การทดลองที่ 1 ศึกษาสมบัติของ TiO_2 บนฐานรอง FTO โดยการปรับค่าเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของฟิล์ม TiO_2 ใน TiO_2 paste เพื่อศึกษาความหนาของฟิล์ม TiO_2 ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ฟิล์มบาง CuInS_2 โดยกระบวนการทดลองที่ 1 ทำในช่วงการสร้าง TiO_2 paste ก่อนนำไปสู่กระบวนการพิมพ์สกรีนเพื่อสร้างเป็นฟิล์ม TiO_2 แสดงดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 กระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ฟิล์มบาง CuInS_2 (การทดลองที่ 1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

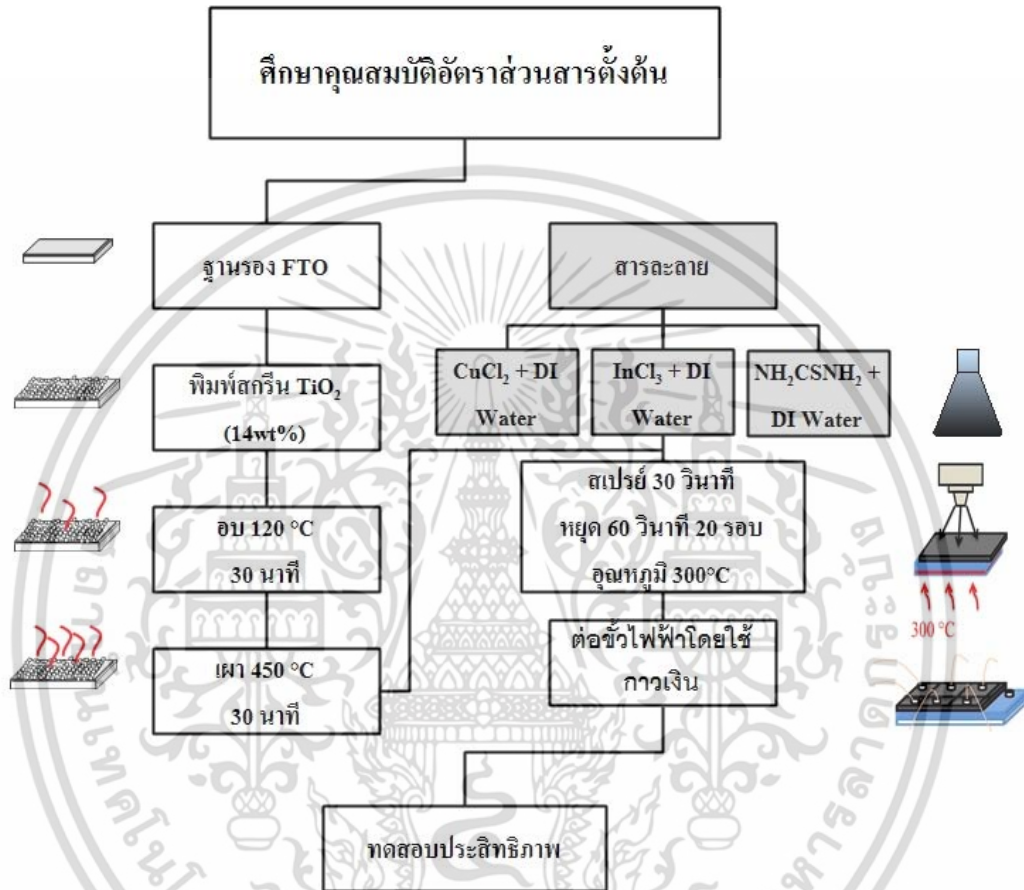
การทดลองที่ 2 ศึกษาสมบัติความหนาของฟิล์ม CuInS_2 โดยการกำหนดจำนวนรอบการพ่นสเปรย์ คือ 5, 10, 15, 20, 25, 30 รอบ โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 5 รอบ ความถี่การพ่น 30 วินาที หยุด 60 วินาที เพื่อสังเกตการก่อตัวของฟิล์ม CuInS_2 และศึกษาผลของความหนาฟิล์ม CuInS_2 ต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ รูปที่ 3.10 แสดงขั้นตอนการทดลองที่ 2 ทำในช่วงการพ่นสเปรย์ หลังจากที่มีผสมสารละลาย กำหนดจำนวนรอบด้วยโปรแกรม Lab view เพื่อควบคุมการเปิดปิดของโซลินอยด์วาล์ว (หัวข้อที่ 3.3)



รูปที่ 3.10 กระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CuInS_2 (การทดลองที่ 2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

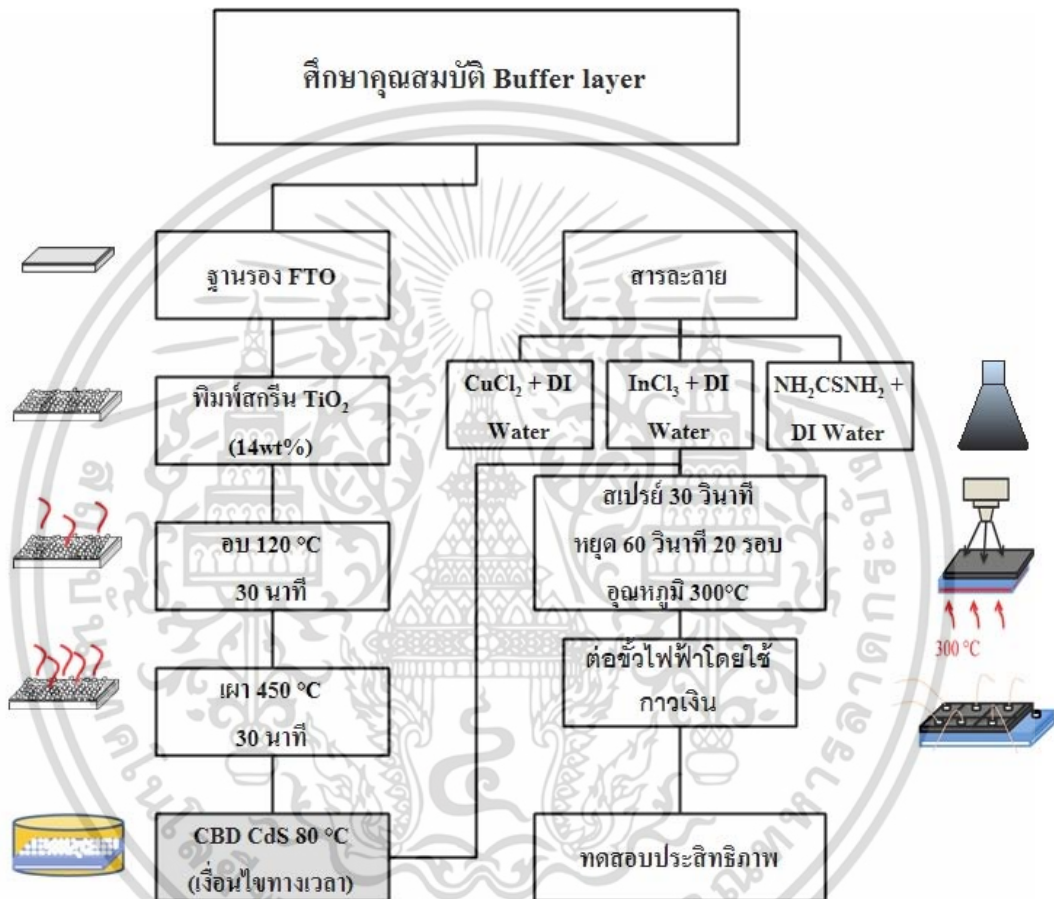
การทดลองที่ 3 ศึกษาอัตราส่วนของสารตั้งต้นด้วยการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนเชิงโมลของ $\text{CuCl}_2:\text{InCl}_3$ โดยกำหนดอัตราส่วนตั้งแต่ 0.7, 0.8, 0.9, และ 1.1 เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ รูปที่ 3.11 แสดงกระบวนการทดลองที่ 3 เกิดขึ้นในช่วงการผสมสารละลายโดยการเพิ่มน้ำหนักของ CuCl_2 ตามอัตราส่วนเชิงโมลที่กำหนดไว้



รูปที่ 3.11 กระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CuInS_2 (การทดลองที่ 3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองที่ 4 ศึกษาเวลาการเกิดปฏิกิริยาของชั้นฟิล์ม CdS ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ รูปที่ 3.12 กระบวนการสร้างฟิล์ม CdS ด้วยวิธีอบสารละลายเคมีที่ทำขึ้นหลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการสร้างฟิล์ม TiO₂ โดยมีวัตถุประสงค์ในการเคลือบฟิล์ม TiO₂ ด้วยชั้นฟิล์ม CdS เพื่อสร้างเป็นชั้นบัฟเฟอร์ในเซลล์แสงอาทิตย์ ในการทดลองใช้เงื่อนไขเวลาในการสะสมชั้นฟิล์ม CdS สำหรับกำหนดการกำหนดความหนาของฟิล์ม



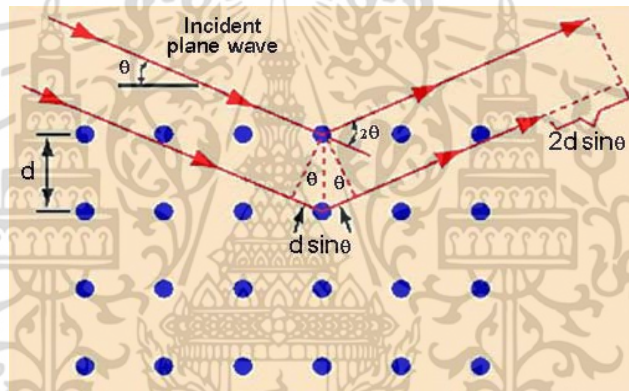
รูปที่ 3.12 กระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CuInS₂ (การทดลองที่ 4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 การวิเคราะห์คุณสมบัติของฟิล์มบางและการวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

3.6.1 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction; XRD)

รังสีเอกซ์ (X-ray) เป็นคลื่นแม่เหล็กที่มีพลังงานสูงมีความยาวคลื่นสั้น ในช่วงระหว่าง 0.2-2Å ไม่มีประจุ ไม่เบี่ยงเบนในสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า มีอันตรกิริยากับสารน้อยมากมีอำนาจทะลุทะลวงสูงจึงเหมาะสำหรับนำมาใช้ประโยชน์ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค คือ การพิจารณาในระดับการเรียงตัวของอะตอมในโครงสร้างผลึกการศึกษาโครงสร้างผลึกจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ใช้วิธี θ -2 θ ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ แสดงดังรูปที่ 3.13 (θ -2 θ Diffractometer Method) เทคนิคนี้ใช้รังสีเอกซ์ความยาวคลื่นเดียว (CuK α ; ความยาวคลื่น $\lambda = 1.542$ nm) ตกกระทบตัวอย่าง ซึ่งอาจจะเป็นผลึกเดี่ยวหรือพหุผลึกก็ได้ซึ่งตัวอย่างจะหมุนเป็นมุม θ (มุมตกกระทบ) ในขณะที่อุปกรณ์ตรวจจับรังสีเอกซ์ (X-ray detector) จะเคลื่อนไปเป็นมุม 2 θ (มุมเลี้ยวเบน) เพื่อให้หาเลี้ยวเบนสอดคล้องในกฎของแบรกก์



รูปที่ 3.13 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่เกิดจากการกระเจิงของรังสี [47]

$$n\lambda = 2d \sin\theta \quad (3.1)$$

โดย n คือ อันดับของการกระเจิงซึ่งเป็นจำนวนเต็ม

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบผลึก

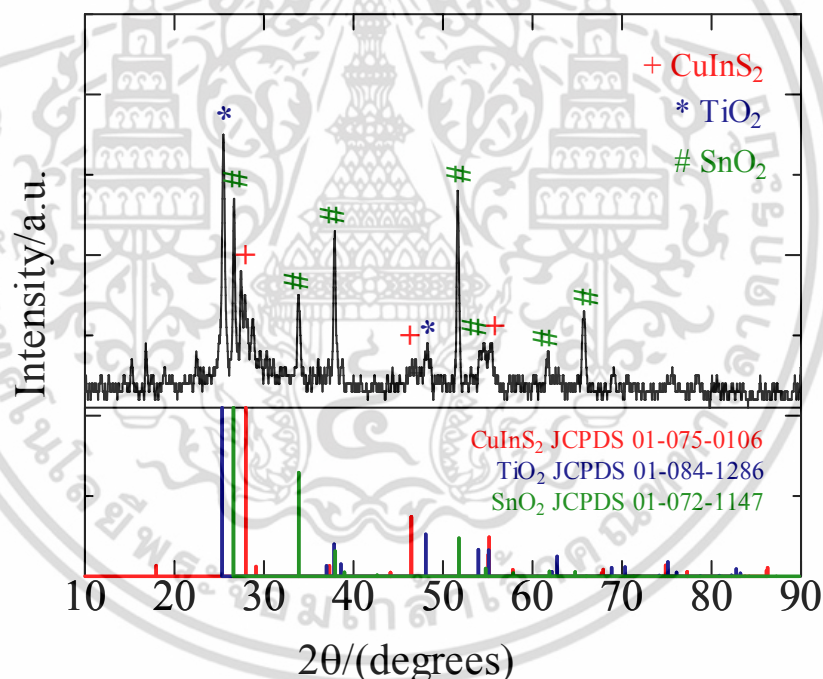
θ คือ มุมระหว่างรังสีตกกระทบกับระนาบผลึก

ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์และมุมเลี้ยวเบน เรียกว่า รูปแบบการเลี้ยวเบน (Diffraction pattern) ซึ่งสำหรับธาตุหรือสารประกอบก็จะมี Diffraction pattern ต่างกัน ซึ่งสังเกตได้จากยอด (peak) ใน Diffraction pattern สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกนั้น สามารถตรวจสอบข้อมูลที่ได้จาก Diffraction pattern กับ Powder Diffraction File (PDF) ซึ่งเป็น

ฐานข้อมูลเกี่ยวกับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของวัสดุที่ได้ จากการรวบรวมรายงานการศึกษา เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และวิเคราะห์วัสดุด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction) โดยข้อมูลส่วนใหญ่จะมาจากเอกสารทางวิชาการต่างๆ หรือ JCPDSs File เพื่อเป็นฐานข้อมูลสำหรับใช้อ้างอิง

จากรูปที่ 3.14 ตัวอย่างที่แนบมาเป็นรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในเซลล์แสงอาทิตย์ โครงสร้าง $\text{CuInS}_2/\text{TiO}_2/\text{FTO}$ ซึ่งพบจุดเลี้ยวเบนของระนาบผลึกที่สะท้อนรังสีเอกซ์ออกมาในมุมที่แตกต่างกันสามารถจำแนกวัสดุชนิดต่างๆ และยังสามารถบ่งบอกได้ถึงชนิดของผลึกในวัสดุตัวอย่าง ซึ่งข้อมูล JCPDSs File ที่นำมาอ้างอิงนั้นนำรายละเอียดมาเทียบกับจุดเลี้ยวเบนที่แสดงดังภาพตัวอย่าง ฟิล์มบาง CuInS_2 พบระนาบ (112), (204, 220), (312, 116) สะท้อนในมุม(2θ) 27.9, 46.4, 55.1 ตามลำดับ และจากข้อมูล JCPDS 01-075-0106 แสดงโครงสร้างผลึกชนิด Chalcopyrite ในชั้นฟิล์ม TiO_2 พบระนาบ (101), (200) สะท้อนในมุม(2θ) 25.3, 48.9 ตามลำดับ และจากข้อมูล JCPDS 01-084-1286 แสดงโครงสร้างผลึกชนิด Anatase และในชั้นฟิล์ม FTO ($\text{SnO}_2:\text{F}$) พบระนาบ (110), (101), (220), (211), (220), (310), (301) สะท้อนในมุม(2θ) 26.59, 33.8, 37.9, 51.7, 51.7, 54.7, 61.8, 65.9 ตามลำดับ และจากข้อมูล JCPDS 01-072-1147 แสดงโครงสร้างผลึกชนิด Cassiterite



รูปที่ 3.14 ตัวอย่างการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในโครงสร้าง $\text{CuInS}_2/\text{TiO}_2/\text{FTO}$

จากรูปตัวอย่างการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ นำข้อมูลพีการะนาบที่สูงที่สุดมาคำนวณขนาดผลึก ด้วยสมการของ Scherrer ดังนี้

$$D = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (3.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

D = ค่าเฉลี่ยของขนาดผลึก

λ = ความยาวคลื่น (1.540562×10^{-9} เมตร, เมื่อใช้ Cu K α)

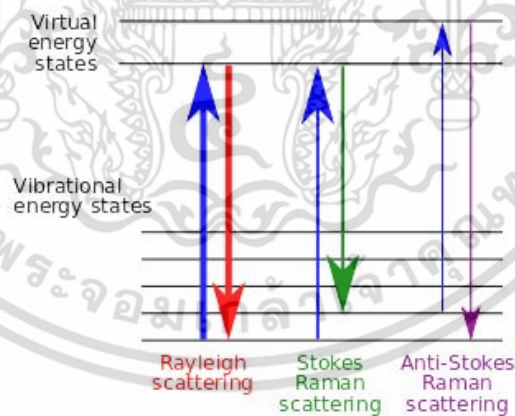
β = ความกว้างที่ครึ่งหนึ่งของความสูงของยอด (Full Width Half Maximum ; FWHM) ที่สูงที่สุด

ของฟิล์มบาง CuInS₂ (ยอด 112) ในหน่วยเรเดียน (radian), $\beta = \frac{FWHM}{180/\pi}$

θ = มุมการเลี้ยวเบนสำหรับพีค

3.6.2 เทคนิครามานสเปกโตรสโคปี (Raman Spectroscopy)

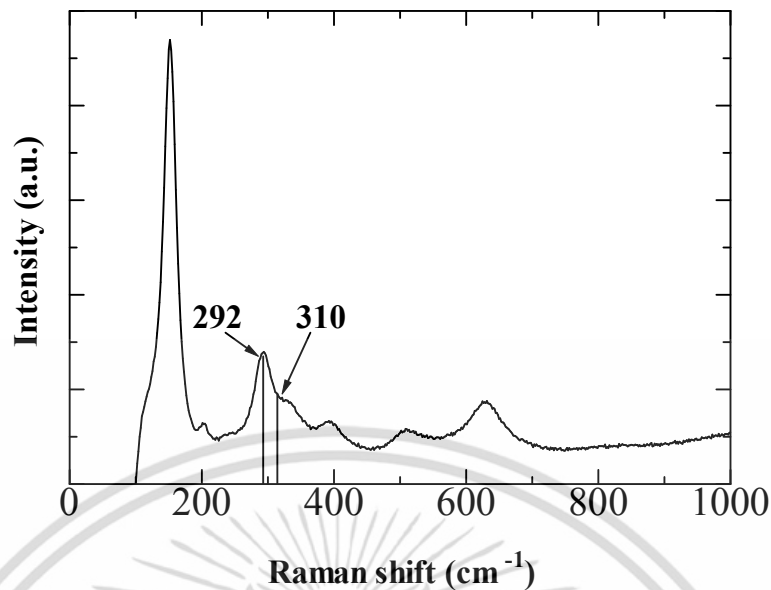
รามานเป็นปรากฏการณ์การกระเจิงแสงรูปแบบหนึ่งที่เกิดจากแสงตกกระทบวัตถุและส่งผลทำให้อิเล็กตรอนในโมเลกุลของสารถูกกระตุ้นให้อยู่ในสถานะเร้าและเมื่อถูกกระตุ้นพยายามที่จะกลับคืนสู่สภาวะปกติซึ่งมีพลังงานต่ำกว่าทำให้เกิดการกระเจิงแสงออกมา ซึ่งการกระเจิงแสงดังกล่าวมีทั้งการกระเจิงแสงแบบยืดหยุ่น (elastic process) คือแสงที่กระเจิงมีพลังงานคงที่ และการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic process) คือแสงที่กระเจิงออกมามีพลังงานหรือความยาวคลื่นเปลี่ยนแปลงไปแสดงดังรูปที่ 3.15 เมื่อเทียบกับความยาวคลื่นเริ่มต้นของแสงที่ตกกระทบ ส่วนใหญ่แล้วแสงที่ตกกระทบจะทำให้เกิดการกระเจิงแสงแบบยืดหยุ่น มีเพียงหนึ่งในล้านของแสงที่ตกกระทบเท่านั้นที่จะกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่นซึ่งพลังงานแสงที่เปลี่ยนแปลงไปนั้นอาจจะเพิ่มขึ้นเรียกว่า anti-stoke scatter หรือลดลงเรียกว่า stoke scatter แต่ส่วนใหญ่จะเกิดแบบลดลงง่ายกว่า ซึ่งผลต่างของพลังงานของแสงที่ตกกระทบกับพลังงานของแสงที่กระเจิงทำให้เกิด Raman Shift



รูปที่ 3.15 แสงที่กระเจิงออกมามีพลังงานเปลี่ยนแปลงไป เมื่อเทียบกับความยาวคลื่นเริ่มต้นของแสงที่ตกกระทบ [48]

จากรูปที่ 3.16 ตัวอย่างแสดงรามานสเปกตรัมของฟิล์มบาง CuInS₂ ในโครงสร้าง CuInS₂/TiO₂/FTO ใช้เลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 514 nm โดยสแกนในช่วง 10 – 1000 cm⁻¹ ตัวอย่างพบจุด raman shift ที่ 292 cm⁻¹ คือโครงสร้างผลึกของ chalcopyrite [34] นอกจากนี้สามารถพบ

โครงสร้างผลึกหัตถิยภูมิได้ที่จุด raman shift 310 cm⁻¹ ซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบ zinc blend [34] เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 รามานสเปกตรัมของฟิล์มบาง CuInS_2 ในโครงสร้าง $\text{CuInS}_2/\text{TiO}_2/\text{FTO}$

3.6.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)

แหล่งกำเนิดของอิเล็กตรอน (Electron gun) ซึ่งขั้วแคโทดมี 2 ชนิดคือ ทั้งสแตน และ Field emission จะทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอน และเร่งกลุ่มอิเล็กตรอนด้วยสนามไฟฟ้าในช่วง 1-40 kV และกลุ่มอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะถูกบีบให้เป็นลำอิเล็กตรอนโดย Condenser lens และปรับโฟกัสโดย Objective lens ซึ่งจะกวาดบนระนาบ x-y ทำให้เกิดสัญญาณขึ้นมาแล้วหัววัดจะวัดสัญญาณที่เกิดขึ้นแล้วถูกแปลงเป็นข้อมูลที่เราต้องการโดยชุดระบบทางอิเล็กทรอนิกส์เมื่อลำอิเล็กตรอนที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนโฟกัสลงบนผิวของตัวอย่าง จะทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนที่ถูกยิงลงมาและอะตอมของตัวอย่าง ผลของอันตรกิริยาดังกล่าวทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) ซึ่งเราสามารถนำใช้ศึกษาลักษณะของพื้นที่ผิว ขนาดของผลึกของตัวอย่างซึ่งเป็นฟิล์มบาง CuInS_2 ได้นอกจากนี้ยังสามารถวิเคราะห์สัดส่วนอะตอมด้วยฟังก์ชันของ Energy-dispersive spectrometers (EDS) ที่อยู่ในเครื่อง SEM ลักษณะการทำงานของ Energy-dispersive spectrometers (EDS) วิเคราะห์โดยใช้การเร่งอิเล็กตรอนให้มีพลังงานสูงพอเหมาะพุ่งเข้าชนชิ้นงานซึ่งประกอบไปด้วยอะตอมของธาตุที่อยู่ในสถานะพื้นจนทำให้อิเล็กตรอนในระดับชั้นพลังงานวงในได้รับพลังงานจากการชนจนหลุดออกไปจากอะตอม แล้วอิเล็กตรอนจากวงนอกจึงคายพลังงานออกมาบางส่วนพร้อมกับเปลี่ยนชั้นพลังงานเข้ามาแทนที่อิเล็กตรอนที่หลุดออกไป พลังงานที่อิเล็กตรอนคายออกมาจะอยู่ในรูปรังสีเอกซ์และมีค่าเฉพาะตามธาตุนั้น เมื่อวัดค่าพลังงานรังสีเอกซ์นี้ด้วย EDS จะสามารถวิเคราะห์ได้ว่าชิ้นงานประกอบด้วยธาตุชนิดใด



รูปที่ 3.17 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [49]

3.6.4 การวัดการทะลุผ่านของแสง (UV-Visible Spectroscopy)

UV-Visible Spectroscopy เป็นการวัดพลังงานที่ดูดกลืนเข้าไปเมื่ออิเล็กตรอนถูกกระตุ้นให้อยู่ในระดับชั้นพลังงานที่สูงขึ้น เนื่องจากปรากฏการณ์เร้าอิเล็กตรอนสามารถวัดได้จากสารตัวอย่างที่เป็นสารละลายหรือเป็นฟิล์มก็ได้ รูปที่ 3.18 เครื่องที่ใช้วัดโดยทั่วไปจะอยู่ในช่วง Near-Ultraviolet Region และ Visible Region โดยวัดแสงที่ความยาวคลื่นในช่วง 200-1100 nm ซึ่งสามารถวัดได้ในโหมดค่าส่องผ่านของแสง (Transmittance) ได้ตัวอย่างของผลการวัดค่าความส่องผ่านของแสงของฟิล์มบาง CuInS_2



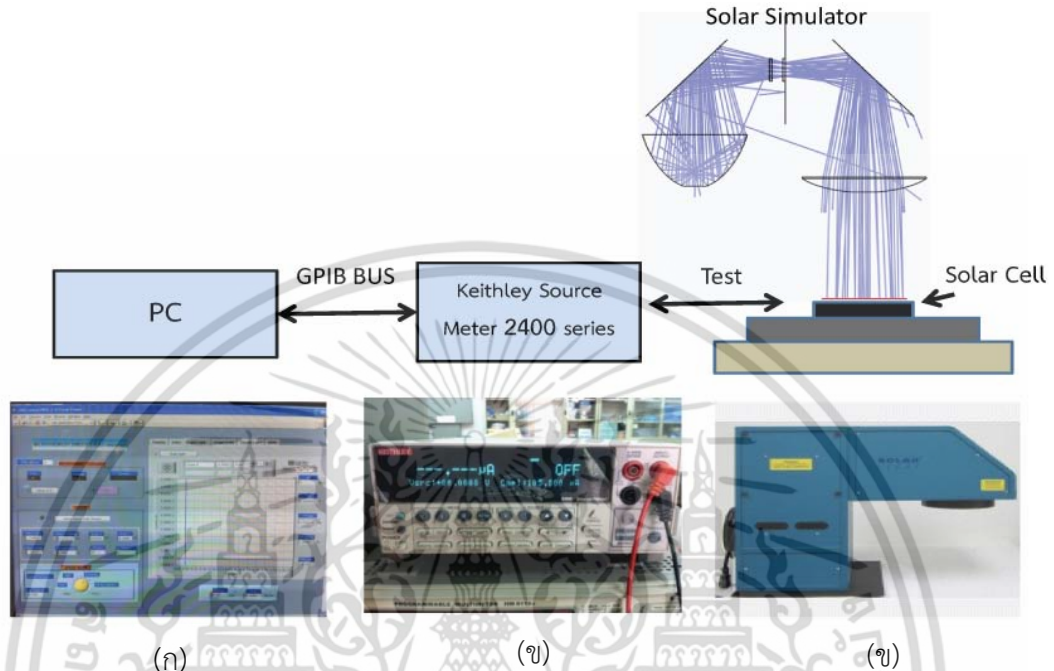
รูปที่ 3.18 เครื่อง UV-Visible spectroscope [50]

3.6.5 การวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

การวัดประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์โดยใช้แสงอาทิตย์จำลอง (Solar simulator) จากหลอด Xenon lamp (500W) สเปคตรัมของแสงที่ใช้คือ AM1.5 ก่อนทำการวัดต้องเทียบกำลังแสงที่ตกกระทบบนพื้นที่ 100 mW/cm^2 ที่อุณหภูมิห้องโดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนเป็นเซลล์อ้างอิง (ภาคผนวก ค) ซึ่งผ่านการวัดประสิทธิภาพจากศูนย์ทดสอบผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (PTEC)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดคุณสมบัติ I-V โดยการไบอัสแสงอาทิตย์และวัดกระแสของแสงอาทิตย์โดยใช้เครื่อง Keithley Sourcemeter 2400 series ต่อระบบอินเทอร์เฟซกับเครื่องคอมพิวเตอร์และควบคุมการทำงานผ่านโปรแกรมจำลอง Lab View แสดงดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 ระบบวัดประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ (ก) หน้าต่างโปรแกรมแสดงผล (ข) Keithley Sourcemeter (ค) ชุดกำเนิดแสงของเครื่อง solar simulator

บทที่ 4

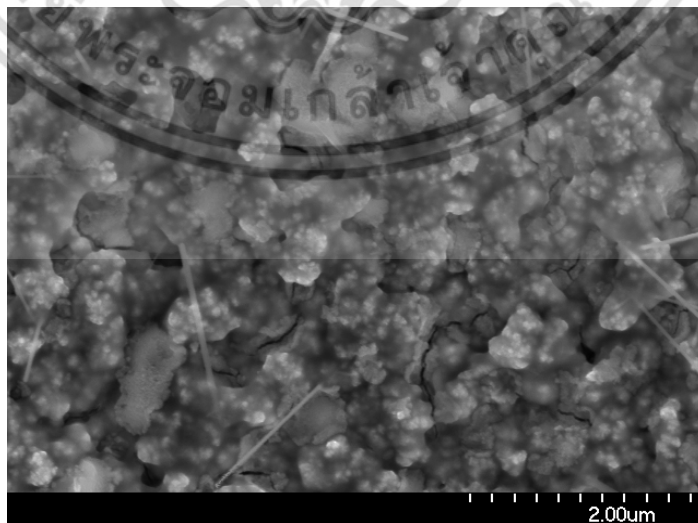
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลของชั้นฟิล์มบาง CuInS_2 บนฐานรอง FTO โครงสร้าง $\text{CuInS}_2/\text{FTO}$

ต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

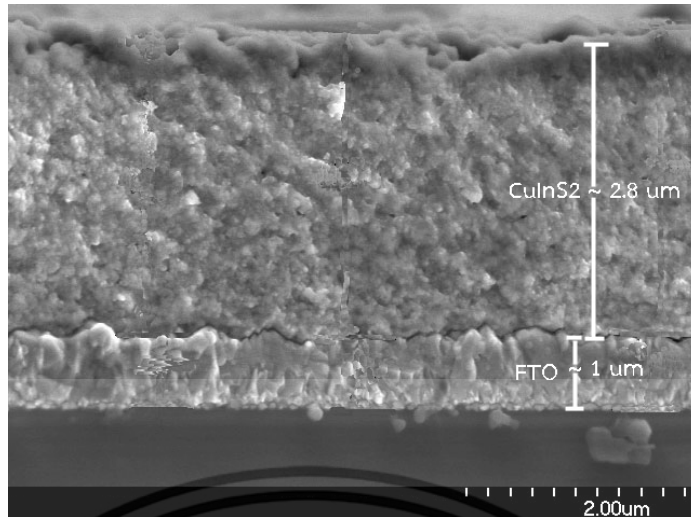
การศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CuInS_2 เริ่มต้นด้วยการสร้างฟิล์มด้วยเทคนิคสเปรย์ลงบนฐานรอง FTO ($\text{SnO}_2:\text{F}$)/Glass โดยใช้อัตราส่วนของตั้งต้น CuCl_2 0.028 M : InCl_3 0.039M : NH_2CSNH_2 0.0149M และใช้น้ำปราศจากไอออนเป็นตัวทำละลาย ระยะเวลาพ่นสารละลาย 30 วินาทีหยุด 60 วินาทีต่อรอบ บนฐานรองที่มีอุณหภูมิคงที่ 300°C จำนวนรอบในการพ่นสเปรย์ 20 รอบ เพื่อดูความสม่ำเสมอของการก่อตัวฟิล์ม CuInS_2 และเพื่อศึกษาสัณฐานวิทยาและความเป็นผลึกของฟิล์มที่ได้จากวิธีสเปรย์

หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการสเปรย์พบว่า การเกิดฟิล์มบนฐานรอง FTO ที่มีขนาดผลึกค่อนข้างใหญ่อย่าง Tin Oxide ในโครงสร้าง $\text{CuInS}_2/\text{FTO}$ สังเกตลักษณะผิวมีสีดำค่อนข้างสม่ำเสมอ การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนส่องกราดแบบสนาม (FE-SEM) จากรูปที่ 4.1 ลักษณะผิวของฟิล์มค่อนข้างหยาบเป็นเม็ดขรุขระสังเกตจากรูปมีขนาดประมาณ $0.5 \mu\text{m}$ และมีรอยร้าวเล็กน้อยเนื่องมาจากความแตกต่างของสัมประสิทธิ์การขยายตัวจากความร้อน (Coefficient of thermal expansion) ที่ไม่เท่ากันระหว่างฐานรอง FTO กับ ฟิล์มบาง CuInS_2 และความหนาของฟิล์มที่ได้หลังจากการสเปรย์มีความหนาประมาณ $2.8 \mu\text{m}$ (รูปที่ 4.2) ซึ่งเพียงพอต่อการนำไปประยุกต์ใช้เป็นชั้นดูดกลืนแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง



รูปที่ 4.1 ภาพถ่าย SEM ฟิล์ม CuInS_2 ด้วยเทคนิคสเปรย์ลงบนฐานรอง FTO

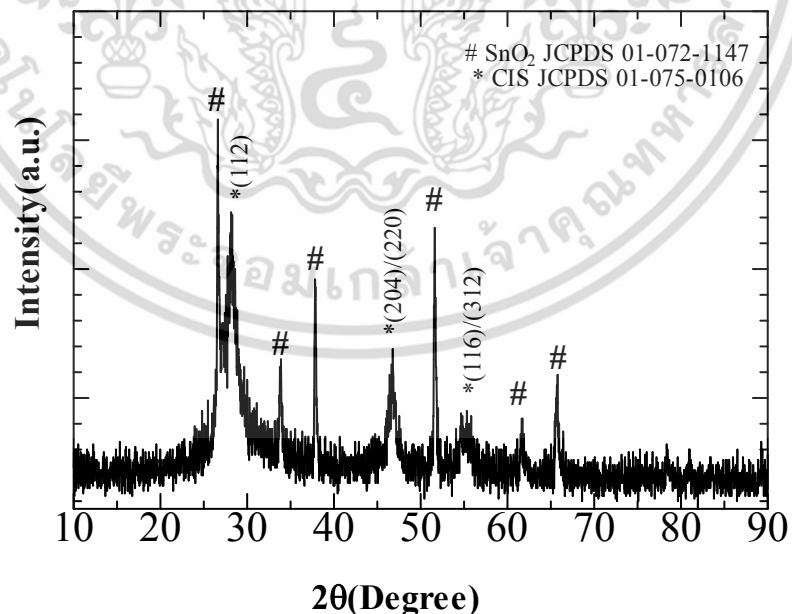
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ภาพตัดขวางของฟิล์ม CuInS_2 ด้วยเทคนิคสเปร์ย์ลงบนฐานรอง FTO

4.1.1 ผลการวิเคราะห์ฟิล์มบาง CuInS_2 ในโครงสร้าง CuInS_2 /FTO ด้วยเทคนิค XRD

การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วย X-Ray Diffraction ($\text{CuK}\alpha$) ค่าความต่างศักย์ 30 kV กระแสไฟฟ้า 15 mA วิเคราะห์ตั้งแต่ 10° ถึง 90° ของฟิล์มบาง CuInS_2 สเปร์ย์ลงบนฐานรอง FTO จากรูปที่ 4.3 พบพีกของฟิล์มบาง CuInS_2 สอดคล้องกับระนาบ (112), (204), (220), (312), (116) จากข้อมูล JCPDS 01-075-0106 ซึ่งบ่งบอกว่าฟิล์มที่ได้เป็นโครงสร้างผลึกแบบ Chalcopyrite เมื่อคำนวณหาขนาดผลึกของ CuInS_2 โดยใช้สมการของ Scherrer's (สมการที่ 3.2) ได้ผลึกขนาด 50 nm



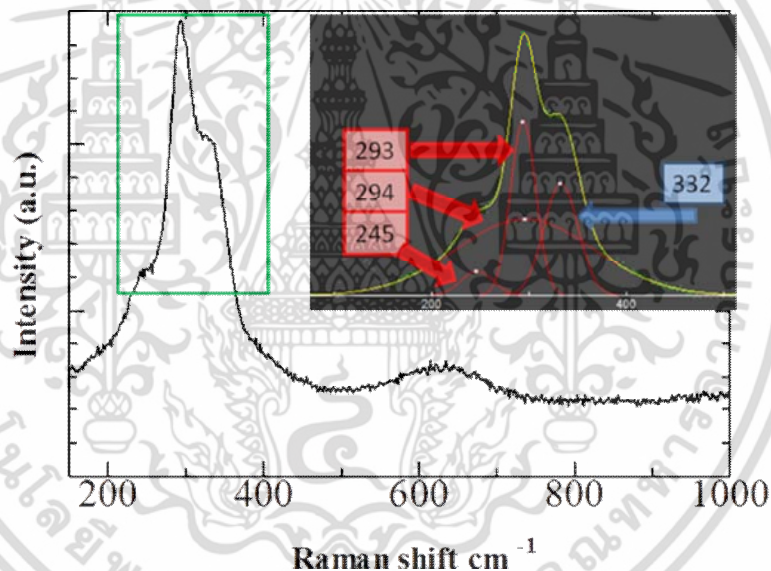
รูปที่ 4.3 XRD ในโครงสร้าง CuInS_2 /FTO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 ผลการวิเคราะห์บาง CuInS₂ ในโครงสร้าง CuInS₂ /FTO

ด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy

ผลการวิเคราะห์ฟิล์มบาง CuInS₂ ด้วยเครื่อง Raman Spectroscopy ใช้เลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 514 nm โดยสแกนในช่วง 10 – 1000 cm⁻¹ จากรูปที่ 4.4 ซึ่งพบว่าพีกของฟิล์มบาง CuInS₂ มีตำแหน่งประมาณ 245-294 cm⁻¹ ซึ่งอยู่ในกลุ่มโครงสร้างผลึก Chalcopyrite (Raman mode A1) [34] สอดคล้องกับการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วย XRD ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงคุณภาพของผลึกจาก FWHM พบว่าในช่วงตำแหน่งที่ 294 cm⁻¹ มีค่า FWHM เท่ากับ 167 cm⁻¹ ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่กว้าง บ่งบอกถึงฟิล์มที่ได้มีคุณภาพของผลึกค่อนข้างต่ำและในตำแหน่งที่ 293 cm⁻¹ มีค่า FWHM เท่ากับ 30 cm⁻¹ ซึ่งบ่งบอกว่าในฟิล์มมีผลึกคุณภาพดีปนอยู่ด้วย และนอกจากนี้ยังพบว่าฟิล์มที่ได้จากวิธีสเปร์รี่มีผลึกซ้อนซ้อนขึ้นมาอีก คือ AuCu mode มีโครงสร้างผลึกแบบซิงเกิลด์ และมีตำแหน่งประมาณ 332 cm⁻¹ [34] ซึ่งจากการวิเคราะห์ผลึกด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy (แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 4.1) สามารถบ่งฟิล์มบาง CuInS₂ ที่ได้มีผลึกที่มีโครงสร้างมากกว่า 1 ชนิดปนอยู่



รูปที่ 4.4 รามานสเปกตรัมของฟิล์มบาง CuInS₂ ในโครงสร้าง CuInS₂/FTO

ตารางที่ 4.1 ค่าที่ได้จากการวัดรามานสเปกโตรสโคปีในโครงสร้าง CuInS₂/FTO

Raman shift (cm ⁻¹)	293	294	245	332
FWHM (cm ⁻¹)	30	167	39	41

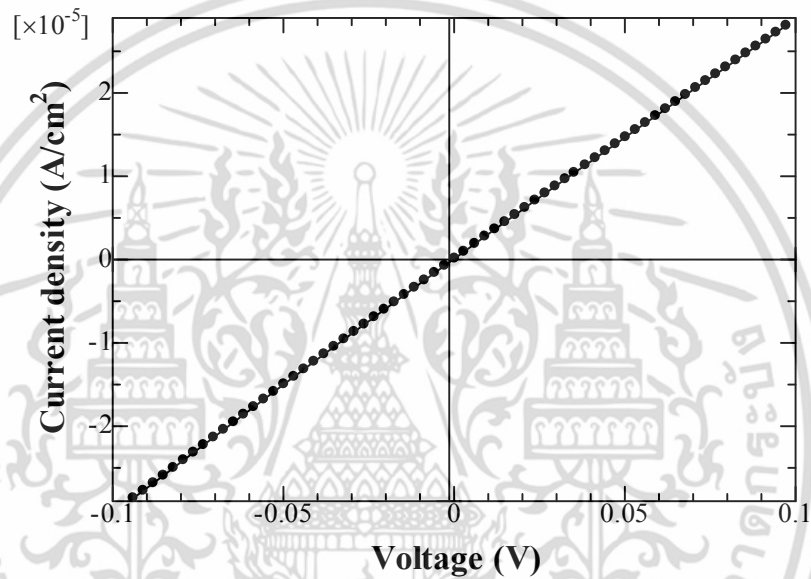
4.1.3 คุณสมบัติเฉพาะของกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์

โครงสร้าง Ag/CuInS₂/FTO

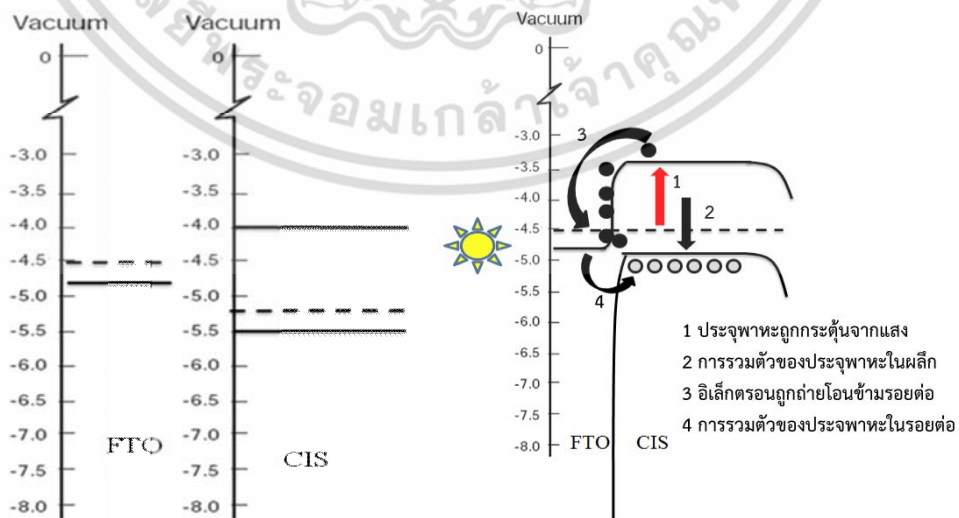
คุณสมบัติเฉพาะของกระแสและแรงดันภายใต้การฉายแสงมาตรฐาน AM 1.5 ความเข้มแสง 100 mW/cm² ที่อุณหภูมิห้อง พบว่าโครงสร้าง Ag/CuInS₂/FTO มีลักษณะเป็น โอม์มิค ดังแสดง

ในรูปที่ 4.5 เมื่อพิจารณาถึงโครงสร้างของแถบพลังงานของซึ่งมีคุณสมบัติเฉพาะของช่องว่าง
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่โดยหน่วยงานวิชาการ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แถบพลังงาน ฟังก์ชันงาน และค่าสัมพรรคภาพอิเล็กตรอนที่ต่างกัน ระหว่างฟิล์มบาง CuInS_2 ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี มีช่องว่างของแถบพลังงานประมาณ 1.5 eV และฐานรอง FTO ($\text{SnO}_2:\text{F}$) ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น มีช่องว่างของแถบพลังงานประมาณ 3.2 eV ในรูปที่ 4.6 (ก) เมื่อเกิดรอยต่อของวัสดุทั้งสองชนิดอยู่ในสภาวะสมดุล แถบวาเลนซ์ของฟิล์มบาง CuInS_2 จะถูกเลื่อนขึ้นมาในตำแหน่งใกล้เคียงกับแถบความนำของ FTO และเมื่อนำไปทดสอบประสิทธิภาพใต้แสง ทำให้เกิดกลไกรวมตัวของประจุพาหะขึ้นภายในวัสดุและภายในรอยต่อ ทำให้ไม่สามารถถ่ายโอนอิเล็กตรอนออกมาสู่วงจรภายนอกได้แสดงดังรูปที่ 4.6 ซึ่งข้อจำกัดนี้เป็นปัญหาหลักที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ที่มีโครงสร้างระหว่างชั้นดูดกลืนแสงติดกับชั้นหน้าต่างรับแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง



รูปที่ 4.5 คุณลักษณะเฉพาะของกระแสและแรงดันภายใต้ความเข้มแสงแสง 100 mW/cm^2 ในโครงสร้าง $\text{Ag/CuInS}_2/\text{FTO}$



รูปที่ 4.6 แถบพลังงานของ (ก) แถบพลังงานของ FTO และ CuInS_2 ขณะไม่เกิดรอยต่อ

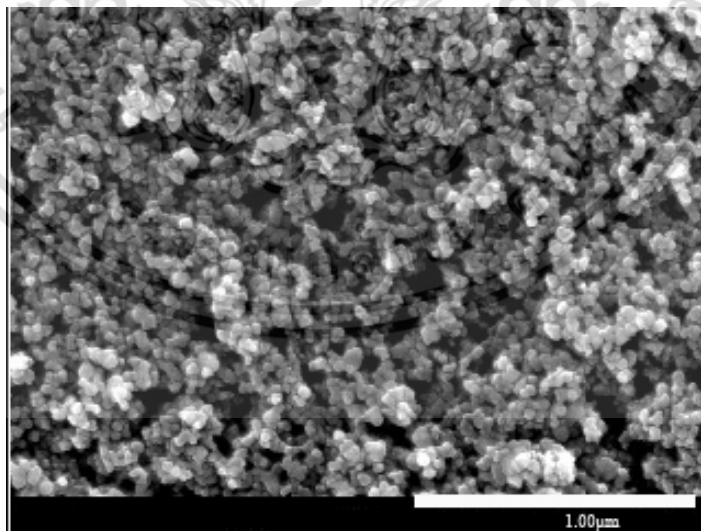
(ข) แถบพลังงานของ FTO และ CuInS_2 ในสภาวะสมดุลเฟอร์มิและถูกฉายด้วยแสง [51,52]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลของชั้นฟิล์มบาง CuInS_2 บนฟิล์ม TiO_2 โครงสร้าง $\text{CuInS}_2/\text{TiO}_2/\text{FTO}$

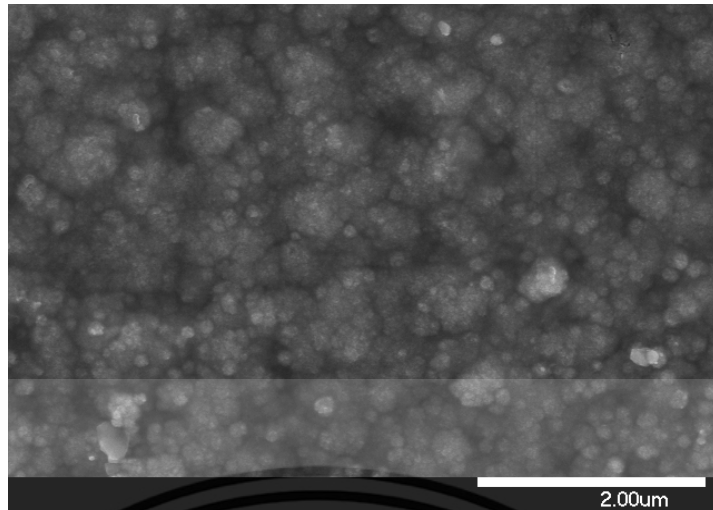
ต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

ผลของการศึกษาเซลล์แสงอาทิตย์ฟิล์มบาง CuInS_2 โดยใช้เงื่อนไขของสารละลาย และเทคนิคสเปรย์เช่นเดียวกับโครงสร้าง $\text{CuInS}_2/\text{FTO}$ โดยการนำฟิล์ม TiO_2 ที่ถูกเคลือบด้วยเทคนิคพิมพ์สกรีนลงบนฐานรอง FTO จาก TiO_2 paste (รายละเอียดการสร้างจากหัวข้อ 3.2) ซึ่งจะได้ฟิล์ม TiO_2 ที่มีความหนา $3 \mu\text{m}$ การนำ TiO_2 มาใช้โดยมีแนวคิดที่ TiO_2 เป็นสารกึ่งตัวนำชนิด เอ็น และมีลักษณะเป็นอนุภาคที่มีขนาดนาโนเมตรเมื่อนำมาสร้างเป็นฟิล์มจะมีลักษณะเป็นโครงข่ายที่มีรูพรุนและทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสสูงแสดงดังรูปที่ 4.7 สารละลายที่สเปรย์ลงบนฟิล์ม TiO_2 สามารถแทรกซึมลงไปในช่วงว่างระหว่างอนุภาคของ TiO_2 ทำให้ฟิล์มบาง CuInS_2 มีความหนาลดลงเมื่อเทียบกับโครงสร้าง $\text{CuInS}_2/\text{FTO}$ ฟิล์มบาง CuInS_2 ที่ได้มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี เมื่อสเปรย์เคลือบลงบนฟิล์ม TiO_2 ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น จะทำให้พื้นที่ของรอยต่อระหว่างชั้นพีและเอ็นเพิ่มขึ้น และเมื่อมีการกระตุ้นจากแสงจะทำให้มีอัตราการผลิต (Generation) ของประจุพาหะมาก จากการวิเคราะห์ด้วยภาพถ่าย SEM พบว่าลักษณะของผิวฟิล์ม CuInS_2 สังเคราะห์ด้วยเทคนิคสเปรย์ลงบนฟิล์ม TiO_2 (รูปที่ 4.8) ค่อนข้างเรียบเนียนกว่าฟิล์มที่สเปรย์ลงบนฐานรอง FTO นอกจากนี้รูปที่ 4.9 แสดงถึงรอยร้าวเกิดขึ้นเนื่องมาจากความแตกต่างของสัมประสิทธิ์การขยายตัวจากความร้อน (Coefficient of thermal expansion) ที่ไม่เท่ากันระหว่างฟิล์ม TiO_2 กับ ฟิล์ม CuInS_2

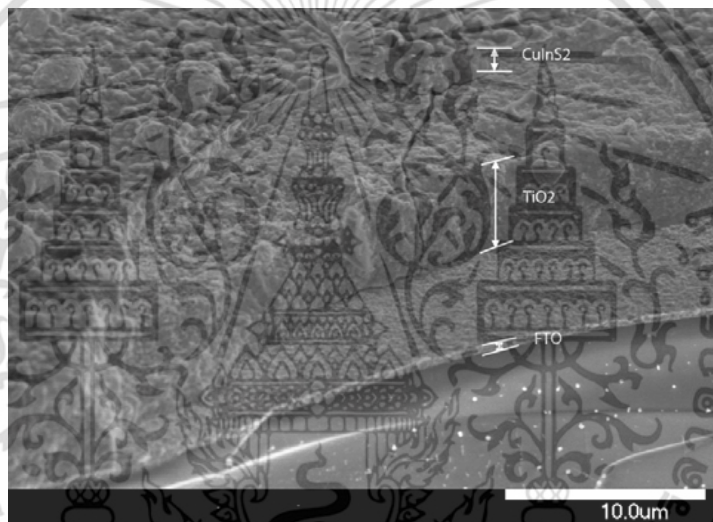


รูปที่ 4.7 ภาพถ่าย SEM ฟิล์ม TiO_2 ด้วยเทคนิคพิมพ์สกรีนลงบนฐานรอง FTO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 ภาพถ่าย SEM फिल्म CuInS₂ ด้วยเทคนิคสเปรย์ลงบนฟิล์ม TiO₂

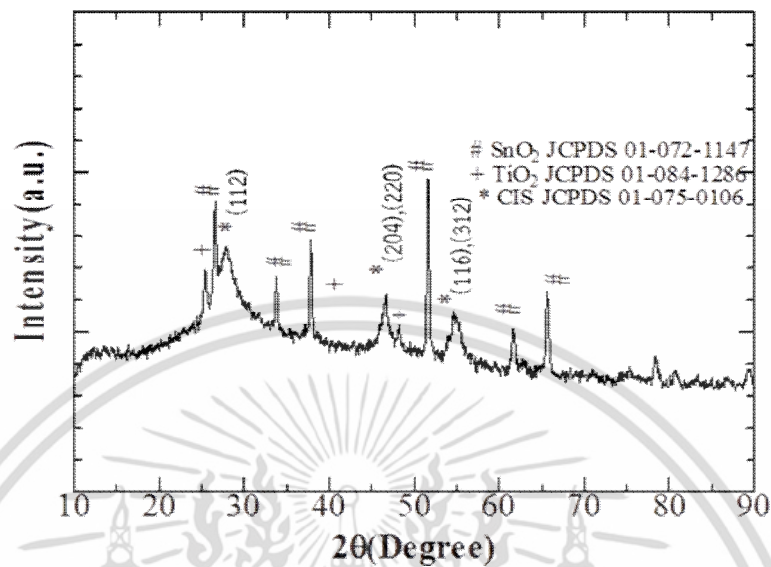


รูปที่ 4.9 ภาพตัดขวางของฟิล์ม CuInS₂ ด้วยเทคนิคสเปรย์ลงบนฟิล์ม TiO₂

4.2.1 ผลการวิเคราะห์ฟิล์มบาง CuInS₂ ในโครงสร้าง CuInS₂ /TiO₂/FTO ด้วยเทคนิค XRD

การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วย X-Ray Diffraction (CuK α) ค่าความต่างศักย์ 30 kV กระแสไฟฟ้า 15 mA วิเคราะห์ตั้งแต่ 10° ถึง 90° ของฟิล์มบาง CuInS₂ สเปรย์ลงบนฟิล์ม TiO₂ จากรูปที่ 4.10 พบพีกของฟิล์มบาง CuInS₂ ที่สอดคล้องกับระนาบ (112), (204, 220), (312, 116) ของข้อมูล JCPDS 01-075-0106 ซึ่งบ่งบอกว่าฟิล์มที่ได้มีโครงสร้างผลึกแบบ Chalcopyrite และเมื่อคำนวณหาขนาดผลึกของ CuInS₂ โดยใช้สมการของ Scherrer's (สมการที่ 3.2) ได้ขนาดผลึก 38 nm ซึ่งมีขนาดของผลึกที่เล็กลงเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดผลึกที่คำนวณได้จากโครงสร้าง CuInS₂/FTO จากการเปรียบเทียบขนาดผลึกทั้งสองโครงสร้าง (CuInS₂/FTO และ CuInS₂ /TiO₂/FTO) ทำให้สามารถสรุปได้ว่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

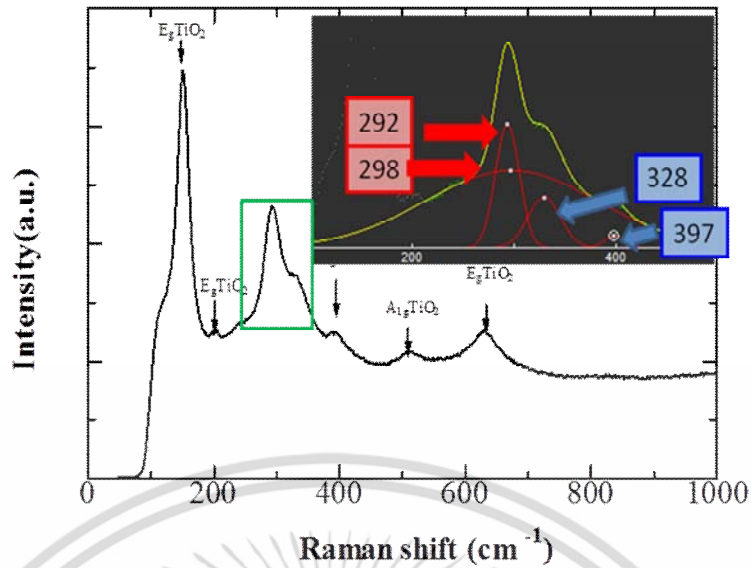
ขนาดผลึกของฟิล์มบาง CuInS_2 ที่สร้างขึ้นด้วยเทคนิคสเปร์รี่ขึ้นอยู่กับขนาดผลึกของฐานรองที่นำมาใช้



รูปที่ 4.10 XRD ในโครงสร้าง $\text{CuInS}_2/\text{TiO}_2$ (3µm)/FTO

4.2.2 ผลการวิเคราะห์ฟิล์มบาง CuInS_2 ในโครงสร้าง $\text{CuInS}_2/\text{TiO}_2/\text{FTO}$ ด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy

ผลการวิเคราะห์ฟิล์มบาง CuInS_2 ด้วย Raman Spectroscopy ใช้เลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 514 nm โดยสแกนในช่วง $10 - 1000 \text{ cm}^{-1}$ (แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 4.2) ซึ่งพบว่าพีกของฟิล์มบาง CuInS_2 มีตำแหน่งประมาณ $292-298 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งอยู่ในกลุ่มโครงสร้างผลึก Chalcopyrite (Raman mode A1) [34] สอดคล้องกับการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วย XRD จากรูปที่ 4.11 ตำแหน่งที่ 292 cm^{-1} มีจุดยอดสูงกว่าตำแหน่งที่ 298 cm^{-1} ซึ่งบ่งบอกว่าฟิล์มบาง CuInS_2 ที่ถูกสเปร์รี่ลงบนฟิล์ม TiO_2 มีคุณภาพของผลึกใกล้เคียงกับโครงสร้าง $\text{CuInS}_2/\text{FTO}$ และ พบว่าฟิล์มที่ได้ยังผลึกซ้อนแฝงอยู่เนื่องจากพบพีกของผลึกโครงสร้างแบบ AuCu mode ที่ตำแหน่งประมาณ $328-397 \text{ cm}^{-1}$ [34] ผลของผลึกซ้อนที่เกิดขึ้นอาจทำให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเกิดอุปสรรคมากขึ้นเพราะลักษณะฟิล์มที่มีโครงสร้างผลึกมากกว่าหนึ่งชนิดมักจะเกิดกระบวนการรวมตัวของพาหะบริเวณขอบของเกรนภายในฟิล์ม



รูปที่ 4.11 รามานสเปกตรัมของฟิล์มบาง CuInS₂ ในโครงสร้าง CuInS₂/TiO₂/FTO

ตารางที่ 4.2 ค่าที่ได้จากการวัดรามานสเปกโตรสโคปีในโครงสร้าง CuInS₂/TiO₂/FTO

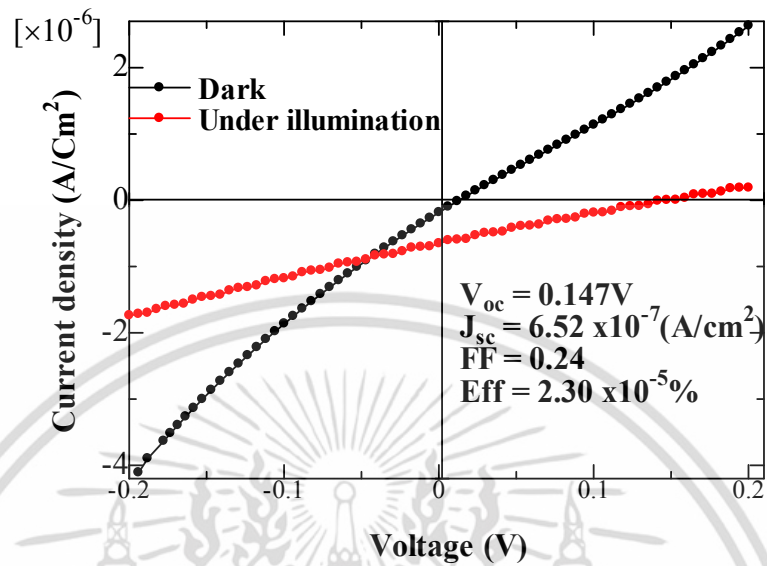
Raman shift (cm ⁻¹)	292	298	328	397
FWHM (cm ⁻¹)	27	210	36	21

4.2.3 คุณสมบัติเฉพาะของของกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง Ag/CuInS₂/TiO₂/FTO

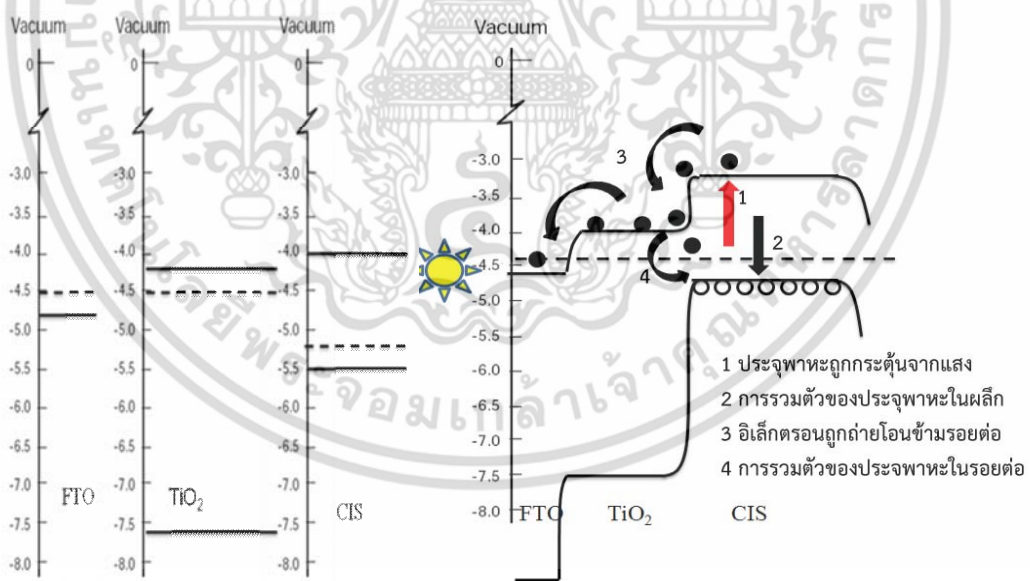
คุณสมบัติเฉพาะของของกระแสและแรงดันภายใต้การฉายแสงมาตรฐาน AM 1.5 ที่มีความเข้มแสง 100 mW/cm² ที่อุณหภูมิห้อง ในโครงสร้าง Ag/CuInS₂/TiO₂/FTO มีการตอบสนองของกระแสลัดวงจร (J_{sc}) และแรงดันวงจรเปิด (V_{oc}) เกิดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.12 โดยมีค่าประสิทธิภาพ (Efficiency) เท่ากับ $2.30 \times 10^{-5} \%$ แรงดันวงจรเปิด (V_{oc}) เท่ากับ 0.147V กระแสลัดวงจร (J_{sc}) เท่ากับ 6.52×10^{-7} A/cm² และค่าฟิลแฟกเตอร์ (FF) เท่ากับ 0.24

เมื่อพิจารณาจากแถบพลังงานของวัสดุ รอยต่อระหว่าง TiO₂ ซึ่งเป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และ CuInS₂ ซึ่งเป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดพี ทำให้แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดพีเลื่อนขึ้นมาจนถึงสถานะสมดุลเพียงพอที่จะสามารถถ่ายโอนอิเล็กตรอนส่วนเกินที่ถูกกระตุ้นจากแถบความนำของชั้นดูดกลืนแสง CuInS₂ ไปสู่แถบความนำของชั้น TiO₂ และเมื่อนำไปทดสอบภายใต้แสงเกิดคู่พาหะส่วนเกินขึ้น และอิเล็กตรอนจะถูกถ่ายโอนข้ามรอยต่อไปสู่ชั้น FTO และสามารถถ่ายโอนออกสู่วงจรภายนอกเกิดเป็นกระแสไฟฟ้า เรียกว่ากระแสแสง (Photo current) แต่สาเหตุที่โครงสร้างนี้ยังมีกระแสต่ำ เป็นเพราะคุณสมบัติของวัสดุ TiO₂ ที่มีลักษณะเป็นอนุภาคเล็กๆ (~21 nm) เมื่อนำมาสร้างเป็นฟิล์มเกิดการเรียงตัว

แบบโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบของอนุภาค ซึ่งมีผลต่อสภาพคล่อง (Mobility) ของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนผ่าน แต่ละอนุภาคจึงทำให้มีโอกาสเกิดการรวมตัวของประจุพาหะเกิดขึ้น



รูปที่ 4.12 คุณลักษณะเฉพาะของของกระแสและแรงดันภายใต้ความเข้มแสงแสง 100 mW/cm² ในโครงสร้าง Ag/CuInS₂/TiO₂ (3µm)/FTO



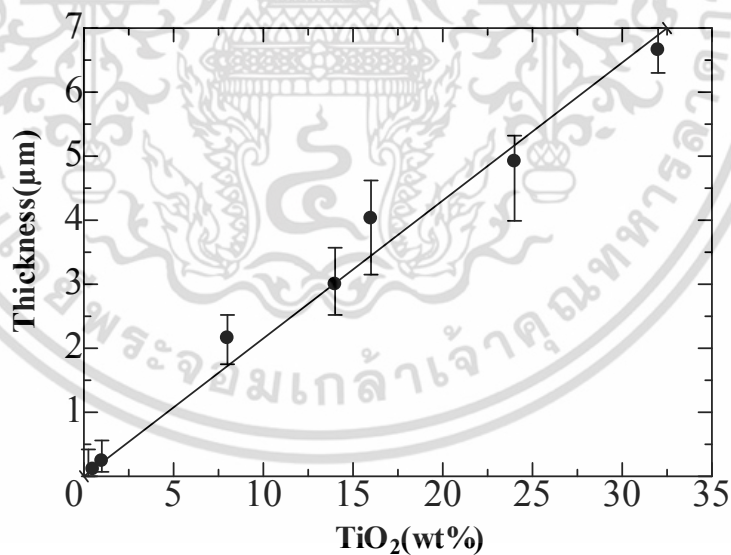
รูปที่ 4.13 แถบพลังงานของ (ก) แถบพลังงานของ FTO, TiO₂, CuInS₂ ขณะไม่เกิดรอยต่อ (ข) แถบพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาพสมดุลเฟอร์มีและถูกฉายด้วยแสง [51,52]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

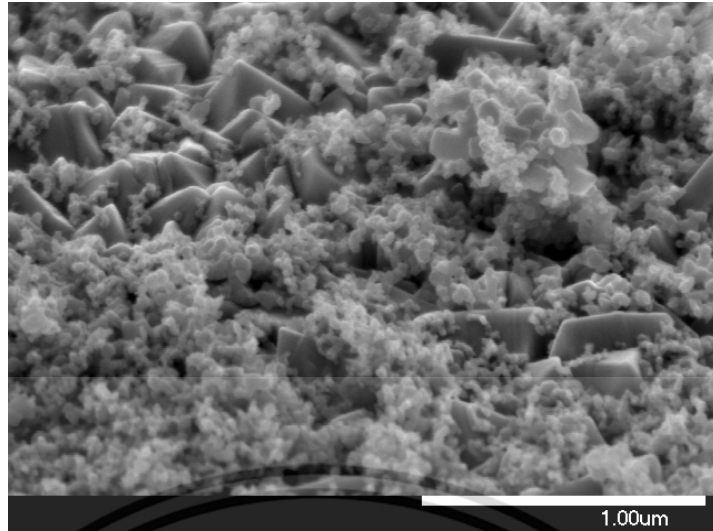
4.3 ผลของการควบคุมความหนาของชั้นฟิล์ม TiO_2 ต่อประสิทธิภาพของเซลล์ แสงอาทิตย์โครงสร้าง $\text{CuInS}_2 / \text{TiO}_2 / \text{FTO}$

4.3.1 ผลความหนาฟิล์ม TiO_2 ต่อการปรับเปลี่ยนเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของผง TiO_2

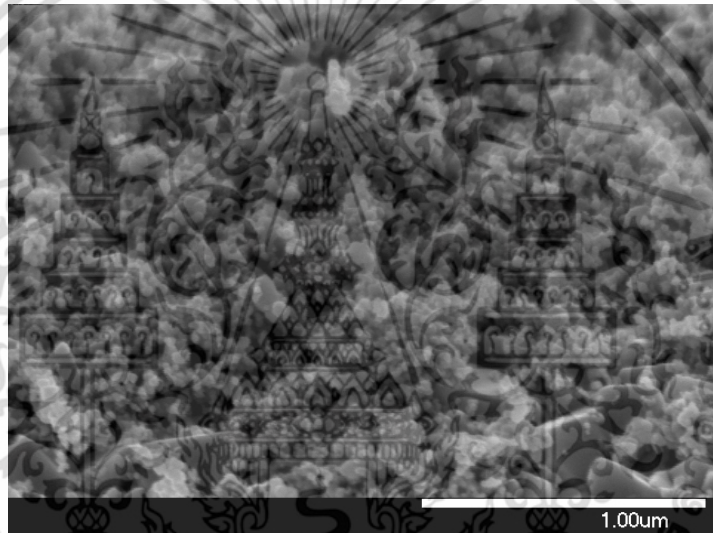
การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CuInS_2 มีความเป็นรูปธรรมที่ชัดเจนมากยิ่งขึ้นเมื่อนำคุณสมบัติของอนุภาคนาโน TiO_2 มาใช้ปรับโครงสร้างจนมีผลตอบสนองของความเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งจากโครงสร้างดังกล่าวได้นำไปสู่การทดลองที่ 1 การค้นหาความหนาของฟิล์ม TiO_2 ที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยการปรับเปลี่ยนความหนาของชั้นฟิล์ม TiO_2 ด้วยเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของผง TiO_2 ตั้งแต่ 0.5 wt.% ถึง 32 wt.% ใน TiO_2 paste การเคลือบฟิล์มด้วยวิธีพิมพ์สกรีน ผลการวิเคราะห์ความหนาในภาพตัดขวางด้วย FE-SEM พบว่าค่าเฉลี่ยของความหนาเพิ่มขึ้นตามเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักค่อนข้างเป็นเชิงเส้น (รูปที่ 4.14) และ สังเกตเห็นฟิล์ม TiO_2 ที่เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก 0.5 -1 wt% มีการเรียงตัวของอนุภาคไม่เต็มพื้นที่ของผิวหน้าฐานรอง FTO (รูปที่ 4.15 ก และ ข) ซึ่งส่งผลให้ในช่วงการสเปรย์สารละลายเพื่อสังเคราะห์เป็นฟิล์มบาง CuInS_2 เกิดการแทรกตัวของสารละลายลงไปสัมผัสกับกระจกนำไฟฟ้าโปร่งแสง FTO ทำให้เกิดรอยต่อระหว่าง $\text{CuInS}_2 / \text{FTO}$ ส่งผลให้เกิดกระแสรั่วไหล ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง ดังที่จะกล่าวต่อไป ในหัวข้อ 4.3.4



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ TiO_2 ใน paste กับความหนาของ TiO_2 หลังจากการสกรีน



(ก)



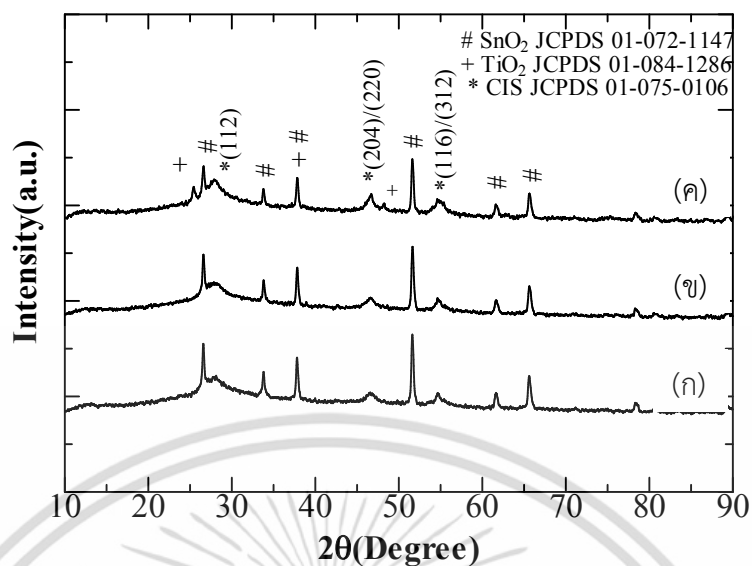
(ข)

รูปที่ 4.15 ภาพถ่าย SEM ของฟิล์ม TiO_2 แสดงถึงอนุภาคของ TiO_2 ที่ครอบคลุมไม่เต็มผิวฐานรอง FTO (ก) 0.5 wt% (ข) 1wt%

4.3.2 ผลการวิเคราะห์ฟิล์มบาง CuInS_2 ต่อความหนาฟิล์ม TiO_2 ในโครงสร้าง $\text{CuInS}_2/\text{TiO}_2/\text{FTO}$ ด้วยเทคนิค XRD

การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วย X-Ray Diffraction ($\text{CuK}\alpha$) ค่าความต่างศักย์ 30 kV กระแสไฟฟ้า 15 mA วิเคราะห์ตั้งแต่ 10° ถึง 90° ของฟิล์มบาง CuInS_2 สเปรย์ลงบนฟิล์ม TiO_2 จากรูปพบพีกของฟิล์มบาง CuInS_2 สอดคล้องกับระนาบ (112), (204, 220), (312, 116) จากข้อมูล JCPDS 01-075-0106 ซึ่งบ่งบอกว่าฟิล์มที่ได้บ่งบอกว่าเป็นโครงสร้างผลึกแบบ Chalcopyrite และสังเกตจากพีกในตำแหน่งระนาบ (112) พบว่าความเป็นผลึกเพิ่มขึ้นตามความหนาของ TiO_2 เมื่อคำนวณหาขนาดผลึกของ CuInS_2 โดยใช้สมการของ Scherrer's (สมการที่ 3.1) ได้ขนาดผลึก 24nm

ที่ความหนา 0.1 μm , 28nm และ 38nm ที่ความหนา 0.2 μm และ 3.0 μm ตามลำดับ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

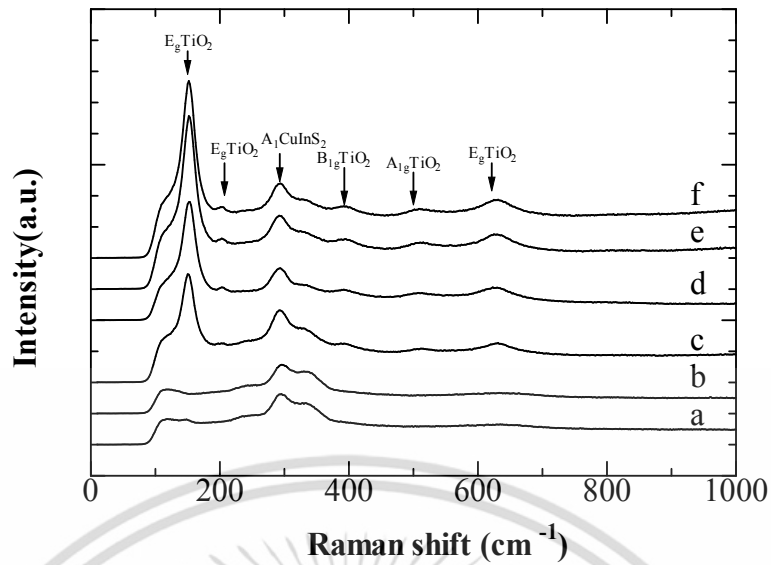


รูปที่ 4.16 XRD ในโครงสร้าง $\text{CuInS}_2/\text{TiO}_2/\text{FTO}$ XRD ที่ความหนาของชั้นฟิล์ม TiO_2 (ก) $0.1\mu\text{m}$, (ข) $0.2\mu\text{m}$ และ (ค) $3.0\mu\text{m}$

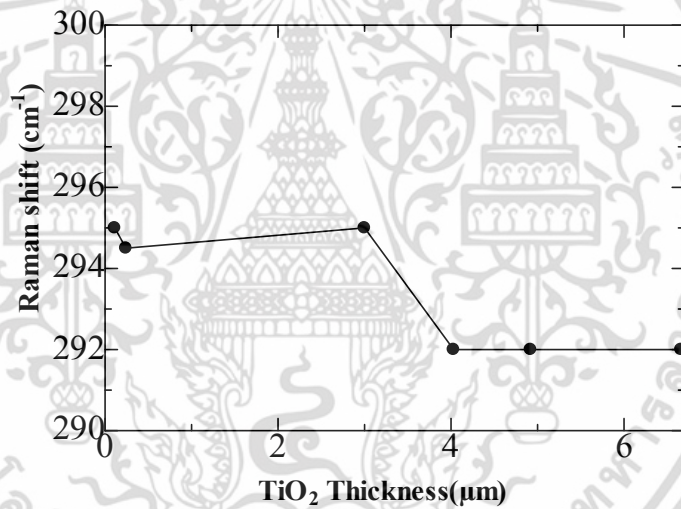
4.3.3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกฟิล์มบาง CuInS_2 ต่อความหนาของ TiO_2

ในโครงสร้าง $\text{CuInS}_2/\text{TiO}_2/\text{FTO}$ ด้วยเทคนิค Raman Spectroscopy

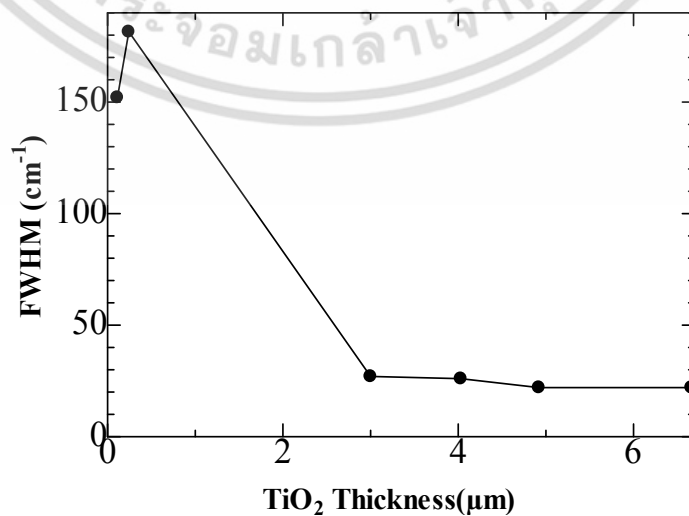
ผลการวิเคราะห์ฟิล์มบาง CuInS_2 ด้วย Raman Spectroscopy ใช้เลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 514 nm โดยสแกนในช่วง $10 - 1000\text{ cm}^{-1}$ รูปที่ 4.17 พบว่าพีกของฟิล์มบาง CuInS_2 มีตำแหน่งประมาณ $292-295\text{ cm}^{-1}$ อยู่ในกลุ่มโครงสร้างผลึก Chalcopyrite (Raman mode A1) ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วย XRD จากรูปที่ 4.18 พบว่าในโหมด A1 มีค่าตำแหน่งของพีกไม่คงที่ในความหนาของ TiO_2 ตั้งแต่ 0.1 ถึง $3\mu\text{m}$ และจะคงที่เมื่อมีความหนาของฟิล์ม TiO_2 มากขึ้น และค่า FWHM ในรูปที่ 4.19 พบว่าค่าที่ได้มีความคงที่เมื่อฟิล์ม TiO_2 มีความหนามากกว่า $3\mu\text{m}$ ขึ้นไป แสดงให้เห็นว่าฟิล์ม TiO_2 มีส่วนช่วยให้ฟิล์มบาง CuInS_2 ที่สังเคราะห์ด้วยเทคนิคสเปร์รี่มีความเป็นผลึกที่มีคุณภาพดี นอกจากนี้พบว่าฟิล์มที่ได้มีพีกซ้อนขึ้นมา คือ AuCu mode มีตำแหน่งประมาณ $309-317\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งบ่งบอกได้ละเอียดยิ่งขึ้นเมื่อมีโครงสร้างผลึกมากกว่าหนึ่งชนิดอยู่ในวัสดุเดียวกัน ผลของผลึกซ้อนที่เกิดขึ้นมาทำให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเกิดอุปสรรคมากขึ้นเพราะลักษณะฟิล์มที่มีโครงสร้างผลึกมากกว่าหนึ่งชนิดมักจะเกิดกระบวนการรวมตัวของพาหะบริเวณขอบของของเกรนภายในฟิล์ม



รูปที่ 4.17 รามานสเปกตรัมของฟิล์มบาง CuInS_2 ในโครงสร้าง $\text{CuInS}_2/\text{TiO}_2/\text{FTO}$ ที่ความหนาของ TiO_2 a) $0.1 \mu\text{m}$ b) $0.2 \mu\text{m}$ c) $3 \mu\text{m}$ d) $4 \mu\text{m}$ e) $4.9 \mu\text{m}$ f) $6.6 \mu\text{m}$



รูปที่ 4.18 ตำแหน่งโหมด A1 ต่อความหนาของฟิล์ม TiO_2 ของฟิล์มบาง CuInS_2



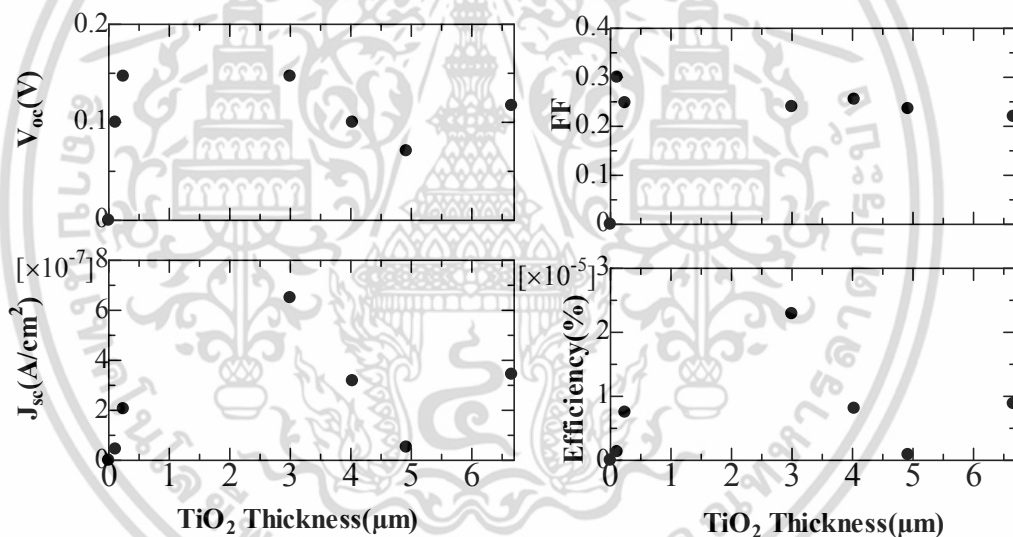
รูปที่ 4.19 FWHM จากรามานของฟิล์มบาง CuInS_2 ในโหมด A1 ต่อความหนาของฟิล์ม TiO_2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.4 คุณสมบัติเฉพาะของของกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์

โครงสร้าง Ag/CuInS₂/TiO₂/FTO

รูปที่ 4.20 แสดงคุณสมบัติเฉพาะของกระแสและแรงดันในโครงสร้าง Ag/CuInS₂/TiO₂/FTO เมื่อสังเกตแรงดันวงจรเปิด (V_{oc}) มีค่าสูงสุดที่ความหนาของฟิล์ม TiO₂ 0.2 μm และลดลงอาจเนื่องมาจากการเรียงตัวแบบโครงข่ายที่ไม่เป็นระเบียบของอนุภาค TiO₂ ที่เพิ่มมากขึ้นตามความหนาทำให้ประจุพาหะมีสภาพคล่องลดลงจึงทำให้มีโอกาสเกิดปฏิกิริยาการรวมตัวใหม่ภายในเซลล์แสงอาทิตย์ และช่วงความหนาของฟิล์ม TiO₂ ที่ 0.1-0.2 μm กระแสลัดวงจรมีค่าน้อย อาจเนื่องจากอนุภาคของ TiO₂ ไม่กระจายตัวเต็มทั้งผิวหน้าของฐานรอง FTO และชั้นฟิล์ม TiO₂ (0.1-0.2 μm) ทำให้ฟิล์มบาง CuInS₂ แทรกลงไปสัมผัสกับกระแสจนำไฟฟ้าไปตรงแสง FTO เกิดรอยต่อระหว่าง CuInS₂ / FTO ส่งผลให้เกิดกระแสรั่วไหลและเมื่อความหนาของ TiO₂ เพิ่มขึ้นทำให้พื้นที่สัมผัสระหว่างฟิล์มบาง CuInS₂ และ TiO₂ เพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลต่ออัตราการเกิดของประจุพาหะที่เพิ่มขึ้น โดยที่โครงสร้างของ CuInS₂ / TiO₂ (3 μm) มีกระแสลัดวงจรมากที่สุด โดยมีประสิทธิภาพเท่ากับ $2.30 \times 10^{-5} \%$ บนพื้นที่ประมาณ 0.2 cm^2

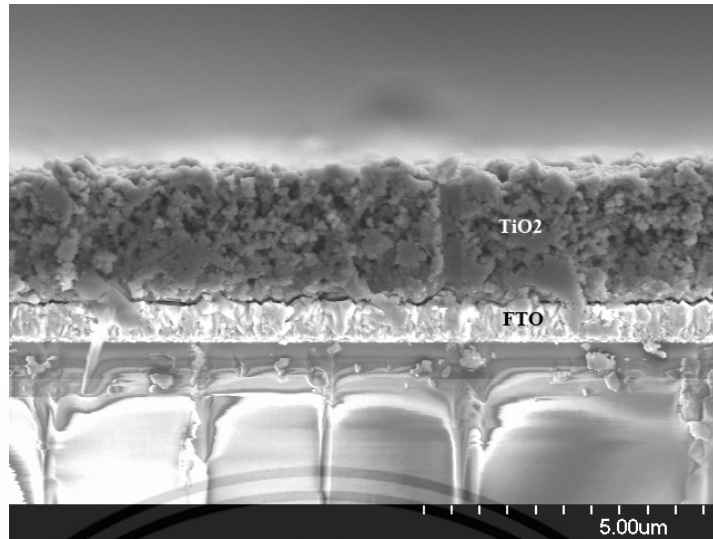


รูปที่ 4.20 ความหนาของฟิล์ม TiO₂ ต่อประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์

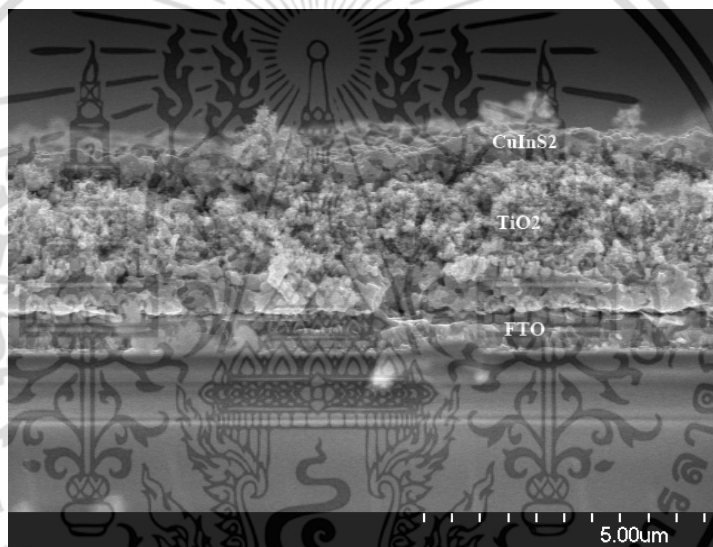
4.4 ผลของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง CuInS₂/TiO₂/FTO ในเงื่อนไขความหนาของฟิล์มบาง CuInS₂

ในการทดลองที่ 2 ได้ทำการควบคุมความหนาของฟิล์มบาง CuInS₂ โดยกำหนดจำนวนรอบในการสเปรย์บนฟิล์ม TiO₂ ที่มีความหนา 3 μm เพื่อศึกษาลักษณะการก่อตัวของฟิล์ม CuInS₂ และความหนาของฟิล์มที่เหมาะสมกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CuInS₂ โครงสร้าง CuInS₂/TiO₂/FTO โดยได้ศึกษาจำนวนรอบของการพ่นสเปรย์ตั้งแต่เริ่มก่อตัวเป็นฟิล์ม ที่ 10 รอบ และเพิ่มขึ้นทีละ 5 รอบ จนถึง 30 รอบ

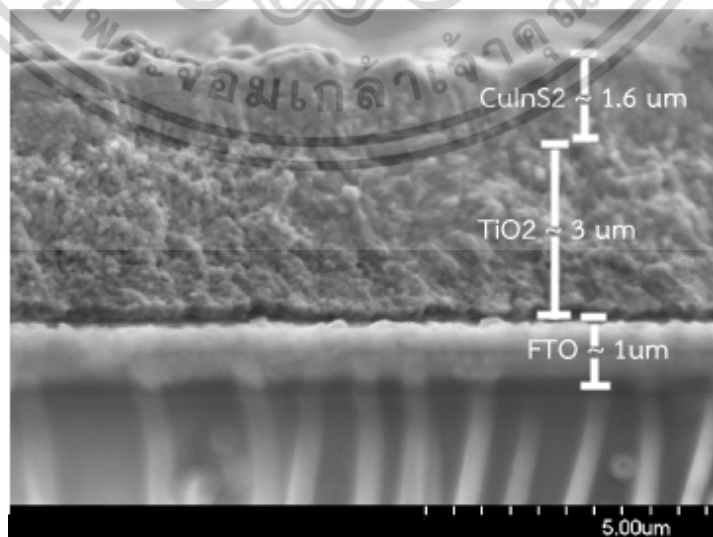
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 ภาพถ่าย SEM โครงสร้าง $\text{CuInS}_2/\text{TiO}_2/\text{FTO}$ สเปร์ย์ 10 รอบ



รูปที่ 4.22 ภาพถ่าย SEM โครงสร้าง $\text{CuInS}_2/\text{TiO}_2/\text{FTO}$ สเปร์ย์ 15 รอบ



รูปที่ 4.23 ภาพถ่าย SEM โครงสร้าง $\text{CuInS}_2/\text{TiO}_2/\text{FTO}$ สเปร์ย์ 20 รอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพตัดขวาง (รูปที่ 4.21-4.23) เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง $\text{CuInS}_2/\text{TiO}_2/\text{FTO}$ สเปรย์ในเวลา 30 วินาที หยุด 60 วินาที พบว่าการก่อตัวของชั้นฟิล์ม CuInS_2 จะเกิดขึ้นหลังจากสเปรย์ไปแล้ว 15 รอบ แต่เมื่อนำไปวัดประสิทธิภาพภายใต้แสงปรากฏว่าเซลล์ที่มีฟิล์ม CuInS_2 ที่ได้จากการพ่นสเปรย์ในจำนวนรอบที่น้อยกว่า 20 รอบไม่แสดงพารามิเตอร์ที่บ่งบอกว่าเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ออกมาและจะปรากฏพารามิเตอร์ดังกล่าวหลังจากสเปรย์สารละลายไปแล้ว 20 รอบขึ้นไปซึ่งแสดงค่ารายละเอียดดังตารางที่ 4.3 ประสิทธิภาพสูงสุดอยู่ที่จำนวนการพ่นสเปรย์ 20 รอบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความหนาที่น้อยเกินไปและมากเกินไปของฟิล์มมีผลต่อประสิทธิภาพ ในกรณีที่จำนวนรอบของการพ่นสเปรย์น้อย อาจจะไม่เกิดเป็นฟิล์มหรือฟิล์มบางเกินไป หรืออาจเกิดขึ้นเมื่อปลูกข้าวโดยใช้กาบเงิน ซึ่งมีลักษณะเป็นของเหลวทำให้เกิดการแทรกซึมจนไปสัมผัสกับวัสดุทั้งสองชนิด (CuInS_2 และ TiO_2) พร้อมกันจนเกิดการสั่นไหว จึงไม่มีการตอบสนองของความเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ ในกรณีที่ฟิล์มหนาเกินไปอาจทำให้มีผลต่อค่าความต้านทานภายในวัสดุสารประกอบ ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้จากปัจจัยหลายอย่างเช่น สิ่งแวดล้อมขณะเริ่มกระบวนการสเปรย์มีความสะอาดน้อย การควบคุมความชื้นบริเวณปฏิบัติงาน ซึ่งทำได้ค่อนข้างยาก เป็นต้น

ตารางที่ 4.3 ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้เงื่อนไขจำนวนรอบของการสเปรย์ฟิล์ม CuInS_2

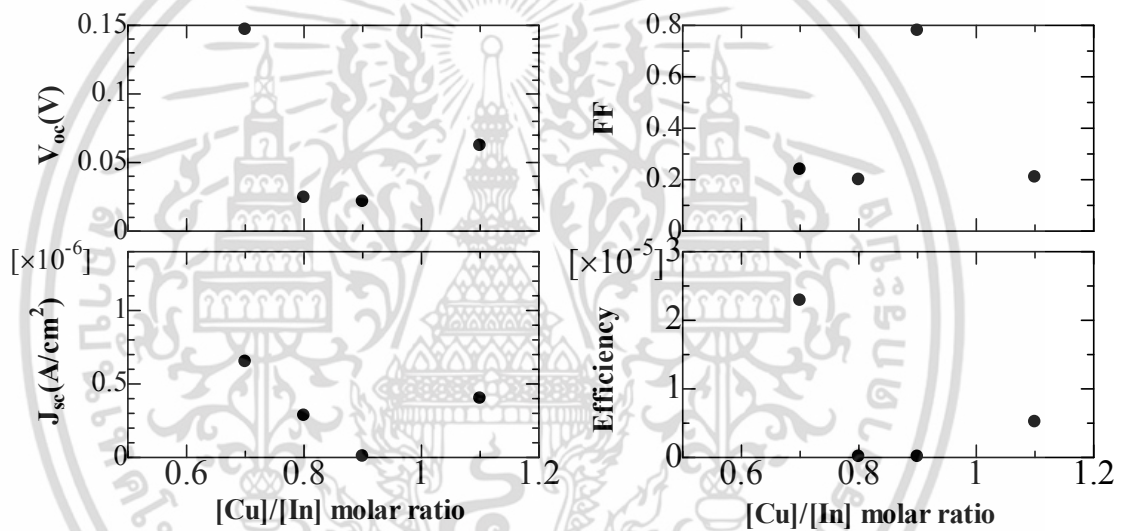
จำนวนรอบในการสเปรย์	V_{oc} (V)	J_{sc} (A/cm^2)	FF	Efficiency (%)
5	0	0	0	0
10	0	0	0	0
15	0	0	0	0
20	0.147	6.25×10^{-7}	0.24	2.30×10^{-5}
25	0.026	3.9×10^{-9}	0.19	3.69×10^{-9}
30	0.047	1.68×10^{-9}	0.25	1.97×10^{-8}

4.5 ผลของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง $\text{CuInS}_2/\text{TiO}_2/\text{FTO}$ ในเงื่อนไขอัตราส่วน

เชิงโมลของ ทองแดงและอินเดียม

ในการทดลองที่ 3 ได้นำอัตราส่วนของตั้งต้น ในการปรับปริมาณสารสัมพันธ์ระหว่างทองแดงและอินเดียม เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์บนฟิล์ม TiO_2 ที่มีความหนา $3\mu\text{m}$ โดยจำนวนรอบของการสเปรย์ 30 วินาที หยุด 60 วินาที จำนวน 20 รอบ โดยมีเงื่อนไขในการปรับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราส่วน ทองแดง (Cu) ต่อ อินเดียม (In) เพื่อดูแนวโน้มของประสิทธิภาพ โดยเงื่อนไขอัตราส่วนเชิงโมลที่ตั้งไว้คือ [Cu]:[In] 0.7, 0.8, 0.9, 1.1 พบว่าอัตราส่วนของทองแดงที่น้อยกว่าอินเดียมมีประสิทธิภาพสูงกว่าในเงื่อนไขปริมาณสารสัมพันธ์ของทองแดงใกล้เคียงกับอินเดียม และมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยที่อัตราส่วนทองแดงมากกว่าอินเดียม ทั้งนี้เพราะการสังเคราะห์ฟิล์มบาง CuInS_2 โดยใช้อุณหภูมิต่ำ ($\sim 300^\circ\text{C}$) มีผลต่อการเกิดผลึกของฟิล์ม ซึ่งในกรณีที่ปริมาณสัมพันธ์ของทองแดงมากกว่าอินเดียมจะเกิดวัฏภาคซ้อนขึ้นมาอีกชนิดคือ Cu_xS ซึ่งอยู่บริเวณผิวฟิล์ม [46] การเกิดผลึกต่างชนิดกันทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องของผลึกซึ่งมีผลต่อการถ่ายประจุพาหะที่ลดลง ในกรณีปริมาณสัมพันธ์ทองแดงน้อยกว่าอินเดียมเกิดวัฏภาคซ้อนขึ้นมาอีกชนิดซึ่งสังเกตได้จากการวิเคราะห์ด้วย Raman spectroscopy มีตำแหน่งเพิ่มขึ้นมาจาก A_1 mode คือ AuCu mode ซึ่งบ่งบอกว่า เป็นโครงสร้างผลึกชนิด Sphalerite (Zinc Blend)



รูปที่ 4.24 อัตราส่วน [Cu]:[In] ต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

4.6 ผลของชั้นบัฟเฟอร์ CdS ในเซลล์แสงอาทิตย์ฟิล์มบาง CuInS_2

โครงสร้าง $\text{CuInS}_2/\text{CdS}/\text{TiO}_2/\text{FTO}$

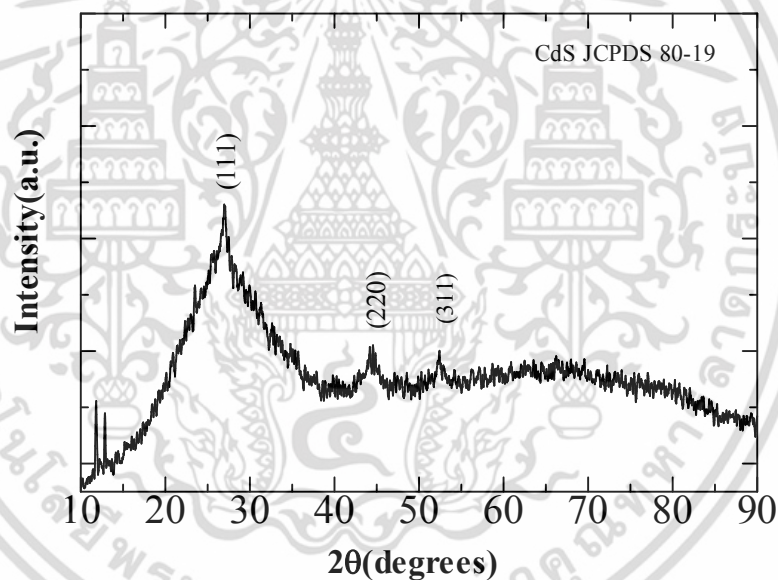
ในการทดลองที่ 4 ได้นำชั้นบัฟเฟอร์มาใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CuInS_2 ชั้นบัฟเฟอร์เป็นชั้นที่มีความจำเป็นอย่างมากเพื่อปรับโครงสร้างในทางฟิสิกส์และแถบพลังงานระหว่างรอยต่อของชั้นฟิล์ม CuInS_2 และชั้นฟิล์ม TiO_2 ทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นซึ่ง CdS มีคุณสมบัติเป็นชั้นบัฟเฟอร์ที่ดี เนื่องจากมีความกว้างของแถบพลังงานที่กว้าง (~ 2.4 eV) อีกทั้งการสังเคราะห์ฟิล์ม CdS ด้วยวิธีการอาบสารละลายเคมี (CBD) ซึ่งมีข้อดีคือเป็นวิธีการที่ไม่ยุ่งยากและใช้อุณหภูมิต่ำทำให้สามารถสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้วัฏประสงค์การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ต้นทุนต่ำได้และยังสามารถกำหนดความหนาได้ง่าย ในการทดลองนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ทำการสังเคราะห์ CdS ด้วยวิธีการอบสารละลายเคมีลงบนชั้น TiO_2 ที่มีความหนา $3\mu\text{m}$ แล้วนำไปสเปรย์สารละลาย CuInS_2 (เงื่อนไขการสเปรย์ทำเช่นเดียวกับหัวข้อ 4.1)

4.6.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกฟิล์ม CdS ด้วยเทคนิค XRD

การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วย X-Ray Diffraction ($\text{CuK}\alpha$) ค่าความต่างศักย์ 30 kV กระแสไฟฟ้า 15 mA วิเคราะห์ตั้งแต่ 10° ถึง 90° ของฟิล์มบาง CdS ด้วยวิธีอบสารละลายเคมี ที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 10 นาทีลงบนกระจก Thin Glass (D263T) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการศึกษาความเป็นผลึกของฟิล์ม CdS และเพื่อประยุกต์ใช้เป็นชั้นบัฟเฟอร์สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CuInS_2 จากรูปที่ 4.25 พบพีกของผลึกของฟิล์ม CdS สอดคล้องกับระนาบ (111), (220), (311) จากข้อมูล JCPDS 80-19 ซึ่งบ่งบอกว่าฟิล์มที่ได้มีโครงสร้างผลึกแบบ Cadmium Sulfide และเมื่อคำนวณหาขนาดผลึกของ CdS โดยใช้สมการของ Scherrer's (สมการที่ 3.1) จะได้ผลึกขนาดประมาณ 54 nm

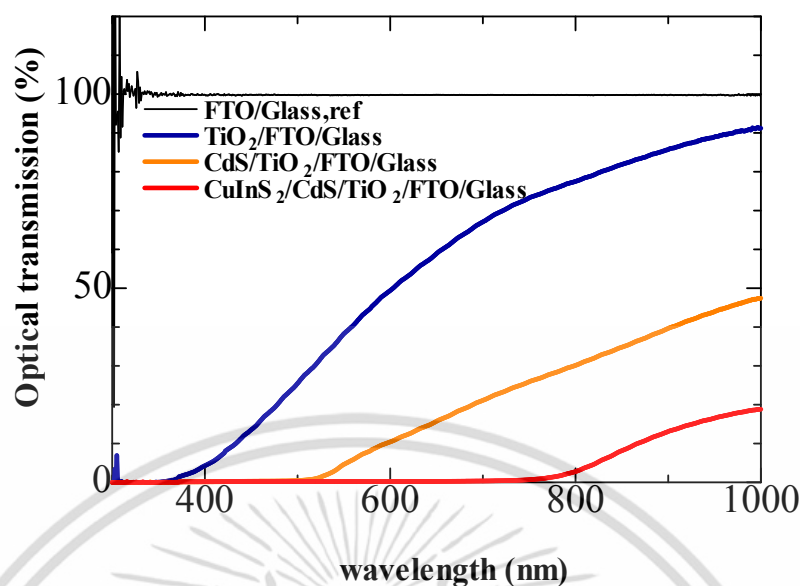


รูปที่ 4.25 XRD ของฟิล์ม CBD-CdS เวลา 10 นาที บนกระจก D263T

4.6.2 ผลการวิเคราะห์ความโปร่งแสงด้วยเทคนิค UV-Visible Spectroscopy

การวัดความโปร่งแสงย่านแสงสีขาวยุคความยาวคลื่น 0-1000 nm ด้วยเครื่อง UV-Visible Spectroscopy แสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติการทะลุผ่านของแสงของฟิล์ม TiO_2 ที่มีความหนา $3\mu\text{m}$ โดยเริ่มตั้งแต่ความยาวคลื่น 400 nm ไปจนถึง 1000 nm มีเปอร์เซ็นต์ความโปร่งแสงสูงสุด 91.2% และ CdS ที่ใช้เวลาเคลือบ 10 นาทีบนฟิล์ม TiO_2 ที่มีความหนา $3\mu\text{m}$ มีสมบัติความโปร่งแสงตั้งแต่ 535 nm ไปจนถึง 1000 nm มีเปอร์เซ็นต์ความโปร่งแสงสูงสุดที่ 46.5 % นั่นหมายความว่าแสงส่วนหนึ่ง (91%-46%) ถูกชั้นฟิล์ม CdS ดูดกลืนซึ่งทำให้แสงเข้าไปกระตุ้นให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลในชั้น CuInS_2 ลดลง แสดงดังรูปที่ 4.26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



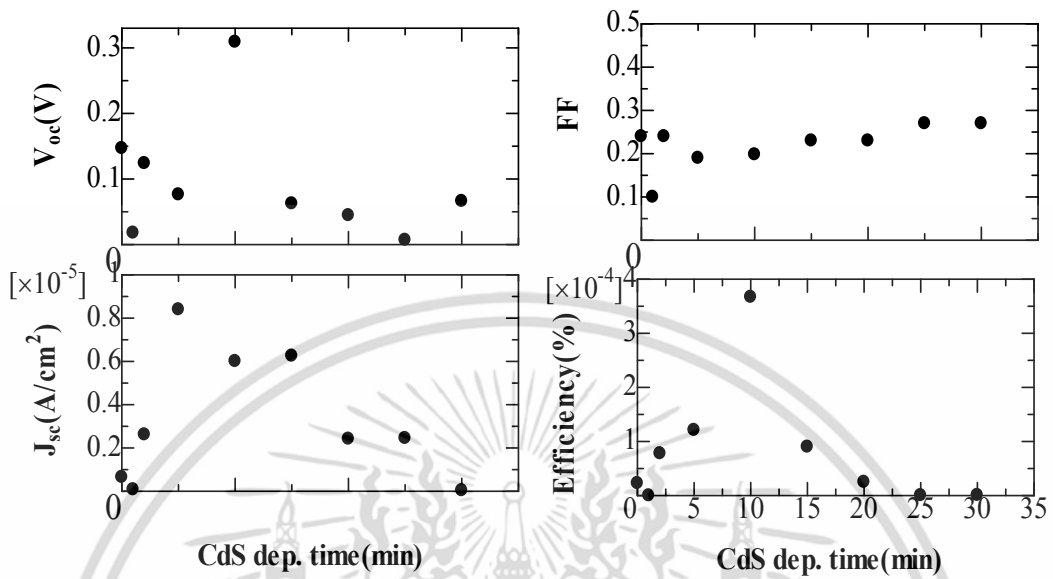
รูปที่ 4.26 ผลการวัด %T ของฟิล์ม TiO_2 และ CdS

4.6.3 คุณสมบัติเฉพาะของของกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง

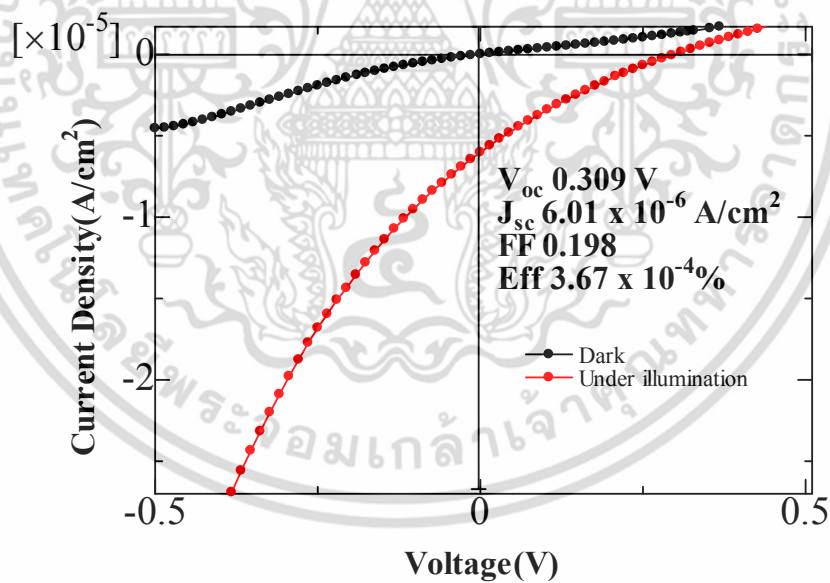
$\text{Ag/CuInS}_2/\text{CdS}/\text{TiO}_2/\text{FTO}$

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพภายใต้แสง (รูปที่ 4.27) สังเกตเห็น แรงดันวงจรเปิด (V_{oc}) เพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุดที่ 10 นาทีและลดลงซึ่งอาจเนื่องมาจากการก่อตัวเป็นผลึก CdS ยังไม่สมบูรณ์ทั่วทั้งผิวหน้าของชิ้นงานและก่อตัวจนมีสีเหลืองเข้มสม่ำเสมอทั่วทั้งผิวในเวลา 10 นาทีและมีลักษณะพอกพูนหนาขึ้นในเวลาที่ยาวนานกว่า 10 นาที จากรูปที่ 4.27 กระแสลัดวงจร (J_{sc}) มีค่ามากที่สุดในเวลา 5 นาทีของการก่อตัวของฟิล์ม CdS และมีแนวโน้มที่ลดลงจากความหนาของฟิล์ม CdS ที่เพิ่มมากขึ้น ค่าฟิลแฟกเตอร์ (FF) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และ ประสิทธิภาพ (Eff) มีแนวโน้มที่ได้รับอิทธิพลมาจากแรงดันวงจรเปิด (V_{oc}) เซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้มีประสิทธิภาพสูงสุดเกิดขึ้นที่เวลาการสะสมฟิล์ม CdS ที่ 10 นาที (รูปที่ 4.28) โดยมีค่าเท่ากับ $3.67 \times 10^{-4} \%$ (V_{oc} 0.309V, J_{sc} $6.01 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$, FF 0.198) เมื่อนำค่าประสิทธิภาพสูงสุดมาเปรียบเทียบกับโครงสร้างที่ไม่มีชั้นฟิล์ม CdS เห็นได้ว่าประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน และในรูปที่ 4.29 เมื่อพิจารณาแถบพลังงานในโครงสร้าง $\text{CuInS}_2/\text{CdS}/\text{TiO}_2/\text{FTO}$ พบว่า CdS ซึ่งมีความกว้างของแถบพลังงานประมาณ 2.4 eV ช่วยเพิ่มระยะห่างระหว่างแถบวาเลนซ์ของ CuInS_2 และแถบความนำของ TiO_2 ทำให้สามารถช่วยลดกระบวนการรวมตัวของอิเล็กตรอนและโฮลได้โดยสังเกตจากแรงดันวงจรเปิดที่เพิ่มขึ้นจากโครงสร้างที่ไม่ได้เติมชั้นฟิล์ม CdS แต่อย่างไรก็ตามเมื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพยังคงมีค่าน้อยและ เมื่อพิจารณาตามแนวคิดที่สามารถสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ได้ด้วยวิธีการที่

ไม่ใช้ระบบสุญญากาศซึ่งลดต้นทุนได้มาก ทำให้เห็นถึงแนวทางการพัฒนาด้านวัสดุได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น

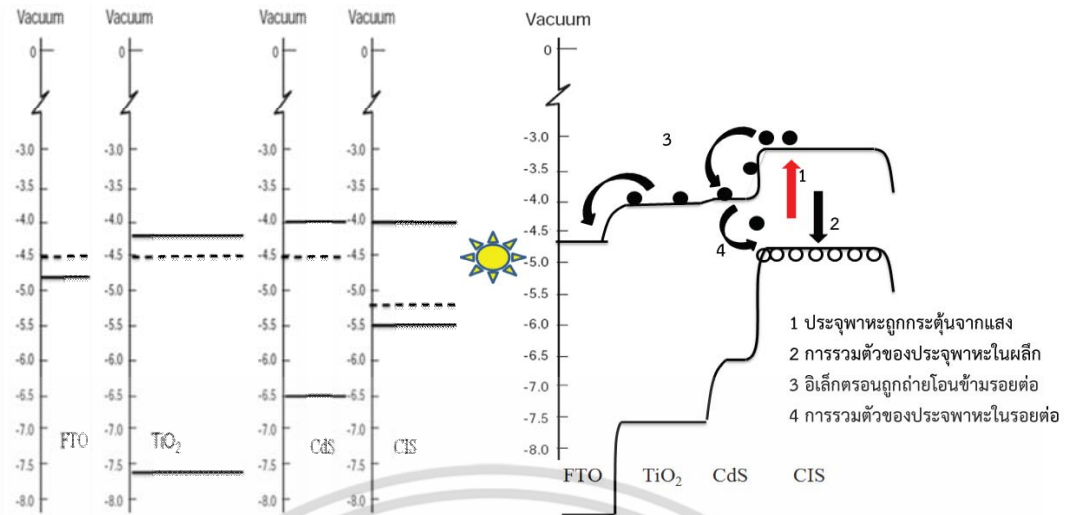


รูปที่ 4.27 ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ในโครงสร้าง $CuInS_2/CdS/TiO_2/FTO$



รูปที่ 4.28 คุณลักษณะเฉพาะกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ในโครงสร้าง $Ag/CuInS_2/CdS/TiO_2/FTO$ ที่เวลาก่อตัวของฟิล์ม CdS นานที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.29 แถบพลังงานในโครงสร้าง $\text{CuInS}_2/\text{CdS}/\text{TiO}_2/\text{FTO}$ แถบพลังงานของ (ก) แถบพลังงานของ FTO, TiO_2 , CdS, CuInS_2 ขณะไม่เกิดรอยต่อ (ข) แถบพลังงานเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาพสมดุลเฟอร์มิและถูกส่องผ่านด้วยแสง [51,52]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษากระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CuInS_2 ด้วยกรรมวิธีที่ใช้ต้นทุนต่ำโดยได้ทำการคัดสรรตั้งแต่การเลือกวัสดุ และกรรมวิธีหรือเทคนิคการสร้าง การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่ 1) การใช้เทคนิคสเปรย์เพื่อสร้างชั้นดูดกลืนแสงฟิล์มบาง CuInS_2 2) เทคนิคพิมพ์สกรีนเพื่อสร้างชั้นฟิล์ม TiO_2 และ 3) เทคนิคการสร้างฟิล์มด้วยวิธีการอบสารละลายเคมีเพื่อสร้างชั้นฟิล์ม CdS เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CuInS_2 ที่สร้างขึ้นมี 3 โครงสร้าง ได้แก่ (1) $\text{Ag/CuInS}_2/\text{FTO}$, (2) $\text{Ag/CuInS}_2/\text{TiO}_2/\text{FTO}$ และ (3) $\text{Ag/CuInS}_2/\text{CdS}/\text{TiO}_2/\text{FTO}$ จากผลการทดลองที่ได้สามารถนำมาสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

จากผลของคุณลักษณะเฉพาะของกระแสและแรงดันภายใต้แสงของเซลล์แสงอาทิตย์ในโครงสร้าง $\text{Ag/CuInS}_2/\text{FTO}$ พบว่ามีลักษณะเป็นโอห์มมิก ซึ่งอาจเป็นผลของกระบวนการรวมตัวของพาหะที่เกิดขึ้นที่รอยต่อระหว่าง $\text{CuInS}_2/\text{FTO}$ ภายในเซลล์ อย่างไรก็ตามการนำ TiO_2 ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น มีความกว้างของแถบพลังงานประมาณ 3.2 eV มาแทรกระหว่างชั้น CuInS_2 และชั้น FTO ในโครงสร้างที่ (2) $\text{Ag/CuInS}_2/\text{TiO}_2/\text{FTO}$ พบว่าให้ผลตอบสนองทางแสงโดยแสดงกระแสลัดวงจร (I_{sc}) และแรงดันวงจรเปิด (V_{oc}) ผลการปรับเปลี่ยนความหนาของ TiO_2 โดยการควบคุมความหนาแน่นของอนุภาค TiO_2 ใน paste พบว่าความหนาของชั้น TiO_2 มีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์เนื่องจากความเป็นรูพรุนของชั้น TiO_2 ซึ่งจากการทดลอง TiO_2 ที่ความหนา $3\mu\text{m}$ ให้ประสิทธิภาพสูงสุดที่ $2.30 \times 10^{-5} \%$ (V_{oc} 0.147V, J_{sc} $6.52 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$, FF 0.24) นอกจากนี้แล้วความหนาของฟิล์มบาง CuInS_2 ก็มีส่วนสำคัญต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เช่นกัน โดยความหนาของฟิล์มสามารถกำหนดได้ด้วยจำนวนรอบของการพ่นสเปรย์ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าจำนวนรอบที่ดีที่สุดอยู่ที่ 20 รอบ ซึ่งจะทำให้ CuInS_2 ที่มีความหนาอยู่ที่ $1.6\mu\text{m}$ นอกจากนี้ยังพบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่สร้างจากฟิล์มบาง CuInS_2 ที่มีทองแดงน้อย (Cu-Poor) จะมีประสิทธิภาพสูงกว่าที่สร้างจากฟิล์มที่มีทองแดงมาก (Cu-Rich) จากการสร้างชั้นฟิล์ม CdS ที่มาแทรกระหว่างชั้น CuInS_2 และชั้น TiO_2/FTO ในโครงสร้างที่ (3) $\text{Ag/CuInS}_2/\text{CdS}/\text{TiO}_2/\text{FTO}$ พบว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ให้สูงขึ้น อย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับโครงสร้างที่ไม่มีชั้น CdS ทั้งนี้เนื่องจากชั้น CdS ช่วยปรับแถบพลังงานบริเวณรอยต่อ $\text{CuInS}_2/\text{TiO}_2$ ในงานวิจัยนี้เซลล์แสงอาทิตย์โครงสร้าง Ag/CuInS_2 ($1.6\mu\text{m}$)/ CdS ($0.13\mu\text{m}$)/ TiO_2 ($3\mu\text{m}$)/ FTO มีประสิทธิภาพสูงสุด $3.67 \times 10^{-4} \%$ (V_{oc} 0.309V, J_{sc} $6.01 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$, FF 0.198)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานกระทรวงพลังงาน. “โครงการจัดทำแผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์จากข้อมูลดาวเทียมสำหรับประเทศไทย.” 2544
- [2] สำนักงานปลัดกระทรวงพลังงาน กระทรวงพลังงาน. **วารสาร Energy Plus**. Oct-Dec 2013
- [3] T. Unold and H.W. Schock. “Nonconventional (Non-Silicon-Based) Photovoltaic Materials.” **The Annual Review of Materials Research**. April 12, 2011. pp 297- 321
- [4] Tina Sebastian. “Automation of Chemical Spray Pyrolysis Unit and Fabrication of Sprayed $\text{CuInS}_2 / \text{In}_2\text{S}_3$ Solar Cell.” Ph.D thesis in the field of Thin Film Photovoltaics. 2009
- [5] T. Ohashi, Y. Hashimoto, K. Ito. “Solar cells with $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)\text{S}_2$ thin films prepared by sulfurization.” **Solar Energy Materials and Solar Cells**, 2001 vol. 67, pp. 225–230.
- [6] M.H. Valdés, M. Berruet , A. Goossens, M. Vázquez. “Spray deposition of CuInS_2 on electrodeposited ZnO for low-cost solar cells.” **Surface & Coatings Technology**, 2010, vol. 204, pp.3995-4000.
- [7] สมเกียรติ ศุภเดช. **เซมิคอนดักเตอร์ฟิล์ม**. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพมหานคร: ห้างหุ้นส่วนจำกัด วี.เจ.พรีนติ้ง. 2551.
- [8] ทรงพล กาญจนชูชัย. **อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: บริษัทวี.พรีนธ์ (1991) จำกัด. 2556.
- [9] Razumovsky Alexey S. **energy-band theory**. [online]. Available : <http://eng.thesaurus.rusnano.com/wiki/article853>
- [10] B.Van Zeghbroeck. **Semiconductor Fundamentals**. [online]. Available : <http://apachepersonal.miun.se/~gorthu/halvledare/Energy%20bands.htm>. 2004
- [11] สมเกียรติ ศุภเดช. **เซมิคอนดักเตอร์ดีไวซ์**. พิมพ์ครั้งที่ 2. 2547.
- [12] C.R.Nave. **P-N Junction**. [online]. Available : <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/solids/pnjon.html>. 2014
- [13] B.Van Zeghbroeck. **P-N Junctions**. [online]. Available : http://ecee.colorado.edu/~bart/book/book/chapter4/ch4_3.htm. 2011

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [14] ทวีวัฒน์ กระจ่างสังข์. **เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนแบบผิวหน้าไมโครกรูฟ**. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2548
- [15] **ประวัติโซลาร์เซลล์และหลักการทำงาน**. [online]. Available : http://www.inventor.in.th/home/ประวัติโซลาร์เซลล์และหลักการทำงาน/#.U3Knq4F_vRl
- [16] **Photovoltaic Cell I-V Characterization Theory and LabVIEW Analysis Code**. [online]. Available : <http://www.ni.com/white-paper/7230/en/>
- [17] Godfrey boyle. **Renewable Energy**. 2011,76-80.
- [18] C. Riordan and R. Hulstrom. “ What is Air Mass 1.5 Spectrum.” IEEE, 1990, pp. 1085-1088
- [19] Antonio Luque and Steven Hegedus. **Handbook of Photovoltaic Science and Engineering**. England : John Wiley & Sons Ltd. 2002
- [20] กรรณิกา ขุนชนะ. **การศึกษาฟิล์มบางนาโนซิลิคอนดอทในออกไซด์เมตริกซ์ด้วยวิธีโซล-เจล สำหรับประยุกต์ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์**. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 2555
- [21] B. Van Zeghbroeck. **Semiconductor Fundamentals**. [online]. Available : http://ecee.colorado.edu/~bart/book/book/chapter2/ch2_8.htm. 2011
- [22] Jianhua Zhao, Aihua Wang, and Martin A. Green. “19.8% efficient “honeycomb” textured multicrystalline and 24.4% monocrystalline silicon solar cells.” **APPLIED PHYSICS LETTERS**, 1997, Vol. 73, pp.1991-1993
- [23] Sharp Electronics Coporation. **multi-purpose 240 watt module from the world’s trusted source for solar**. [online]. Available : <http://www.builderssolar.com/Hoyt/builderssolar.com/ProductLiterature/Sharp%20NU-Q240F2.pdf>
- [24] Jianhua Zhao, Aihua Wang, Pietro P. Altermatt, Martin A. Green, Jean. P. Rakotoniaina, Otwin Breitenstein. “High Efficiency PERT Cells on n-type Silicon Substrates.” 2002, **IEEE**,pp.218-221
- [25] O. Schultz, S. W. Glunz and G. P. Willeke. “Multicrystalline Silicon SolarCells Exceeding 20% Efficiency.” **Progress in photovoltaics: research and applications**, 2004, Vol. 12, pp. 553-558

- [26] Sharp Electronics Coporation. **MULTI-PURPOSE 300 WATT MODULE FROM THE WORLD'S TRUSTED SOURCE FOR SOLAR.** [online]. Available : http://files.sharpusa.com/Downloads/Solar/Products/sol_dow_NDF4Q300.pdf
- [27] Steven S. Hegedus and William N. Shafarman. "Thin-Film Solar Cells: Device Measurements and Analysis." **Progress in photovoltaics: research and applications**, 2004, Vol. 12, pp. 155-176
- [28] S. Benagli, D. Borrello, E. Vallat-Sauvain, J. Meier, U. Kroll, J. Hoetzel, J. Bailat, J. Steinhauser, M. Marmelo, G. Monteduro and L. Castens. "High-Efficiency Amorphous Silicon Devices on LPCVD-ZNO TCO prepared in Industrial KAITM-M R&D Reactor." **24th European Photovoltaic Solar Energy Conference**, 21-25 September 2009. pp. 2293-2298
- [29] Sharp Electronics Coporation. **THIN FILM PHOTOVOLTAICS: THE NEXT EVOLUTION OF SOLAR TECHNOLOGY.** [online]. Available : http://www.nooutage.com/pdf/Sharp_NAV115H1-128H1.pdf
- [30] Yinghuan Kuang, Marcel Di Vece, Jatindra K Rath, Lourens van Dijk and Ruud E. I Schropp. "Elongated nanostructures for radial junction solar cells." **REPORTS ON PROGRESS IN PHYSICS**, 2013, Vol.76, pp. 1-30
- [31] X. Wu, R.G. Dhere, D.S. Albin, T.A. Gessert, C. DeHart, J.C. Keane, A. Duda, T.J. Coutts, S. Asher, D.H. Levi, H.R. Moutinho, Y. Yan, T. Moriarty, S. Johnston, K. Emery, and P. Sheldon. "High-Efficiency CTO/ZTO/CdS/CdTe Polycrystalline Thin-Film Solar Cells." **NCPV Program Review Meeting**, 14-17 October 2001
- [32] **Cadmium Tellurid Solarmodule / CdTe-Module.** [online]. Available : <http://www.solarstromerzeugung.de/photovoltaikanlage/komponenten/solar-module/cadmium-tellurid-module.html>
- [33] Zachary Shahan. **New Thin-Film Solar Module Efficiency Record Set** [online]. Available : <http://cleantechnica.com/2011/12/05/new-thin-film-solar-module-efficiency-record-set/>
- [34] Jacobo Álvarez García. "Characterisation of CuInS_2 films for solar cells applications by Raman Spectroscopy." Ph.D Program Engineer and Technology Electronics, 2002
- [35] Humberto Rodriguez Alvarez. "Growth mechanisms of CuInS_2 formed by the sulfurization of thin metallic Films." Ph.D Program Science, 2010

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [36] พัฒนา เทพชโลธร.การเคลือบฟิล์มบางอลูมิเนียมออกไซด์ด้วยวิธีแมตซ์ซีแมคนี้ตรอน สปีดเตอริงแบบรีแอคทีฟ. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา ฟิสิกส์. มหาวิทยาลัยศิลปากร. 2548
- [37] Eveline Rudigier. "Phase transformations and crystalline quality of CuInS₂ thin films." **Department of Physics, Phillip-University Marburg**, 2004
- [38] **Thin Film Deposition**. [online]. Available : <http://hivatec.ca/consulting-design/thin-film-deposition/>.
- [39] M. Ben Rabeh, M. Kanzari and B. Rezig. "Effect of Zinc Incorporation in CuInS₂ Thin Films Grown by Vacuum Evaporation Method." **ACTA PHYSICA POLONICA A**, 2009, Vol.115, pp. 699-703
- [40] จำนง บุญลอย. "การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง" วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2554
- [41] Alan Hobby. **Screen Printing for The Industrial User**. [online]. Available : http://www.gwent.org/gem_screen_printing.html. 1997
- [42] สุจิตชัย ชัยสิทธิศักดิ์. "การปลูกและการวิเคราะห์ฟิล์มบาง CdS ที่ปลูกโดยวิธีออบสารละลายเคมี" **วิศวกรรมลาดกระบัง**, ปีที่ 23, ฉบับที่4, ธันวาคม 2549, หน้า 42-48
- [43] เอกลักษณ์ ตลับนาค. "การเตรียม CdS วิธีออบสารละลายเคมีเพื่อประยุกต์ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CIGS". ปรินูญยานิพนธ์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2547.
- [44] M. Nanu, J. Schoonman, A. Goossens. "Solar-Energy Conversion in TiO₂/CuInS₂ nanocomposites", **Adv. Funct. Mater.**, 2005 vol. 15, No. 1, pp.95-100
- [45] Ryan O'Hayre¹, Marian Nanu, Joop Schoonman and Albert Goossens. "A parametric study of TiO₂/CuInS₂ nanocomposite solar cells: how cell thickness, buffer layer thickness, and TiO₂ particle size affect performance." 2007, **Nanotechnology**, vol. 18, pp1-7
- [46] J. A ´lvarez-García, A. Pérez-Rodríguez,a) A. Romano-Rodríguez, and J. R. Morante. "Microstructure and secondary phases in coevaporated CuInS₂ films: Dependence on growth temperature and chemical composition." 2001, **J. Vac. Sci. Technol.** pp-232-239
- [47] ศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. **X-ray Diffractometer (XRD)**. [online]. Available : http://www.kmitl.ac.th/sisc/XRD/GettingStratOf_XRD1.htm

- [48] จตุพร วุฒิกนกกาญจน์. **เทคนิครามานสเปกโตรสโกปี (Raman Spectroscopy)**. [online]. Available: <http://www.seem.kmutt.ac.th/research/pentec/download/MTT656-Chapter%20%20Polymer%20Spectroscopy.pdf>
- [49] ศูนย์วิจัยทางฟิสิกส์ของฟิล์มบาง. **Field Emission Scanning Electron Microscope JSM-7001F**. [online]. Available : <http://www.thep-center.org/src2/files/eq/fesem.pdf>
- [50] Jayant Dharma, Aniruddha Pisal, PerkinElmer. “Simple Method of Measuring the Band Gap Energy Value of TiO₂ in the Powder Form using a UV/Vis/NIR.” PerkinElmer, Inc.
- [51] Michael Grätzel. “Photoelectrochemical cells.” 2001. **Nature**. 414 : 338-344
- [52] Arici, E. Sariciftci, N. S. and Meissner, D. “Hybrid Solar Cells Based on Nanoparticles of CuInS₂ in Organic Matrices.” 2003. **Advanced Functional Materials**. 13(2) : 1-7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

วิธีการวัดพื้นที่ของเซลล์แสงอาทิตย์

อุปกรณ์ที่ใช้

1. กล้อง USB Digital Microscope ยี่ห้อ vimicro โดยมีกำลังขยายสูงสุด 300 เท่า
2. แผ่นดัมมี่โดยสร้างพื้นที่จำลองไว้ขนาด $1 \times 1 \text{ cm}^2$
3. เซลล์แสงอาทิตย์ที่ต้องการวัดพื้นที่

ขั้นตอนการวัดพื้นที่

1. ใช้กล้อง USB Digital Microscope ถ่ายรูปพื้นที่ของแผ่นดัมมี่โดยปรับระยะโฟกัสและล็อคให้แน่น
2. เปิดโปรแกรม Adobe Photoshop แล้วโหลดรูปที่ถ่ายไว้ ใช้คำสั่ง Quick selection tool (หมายเลข 1 ในรูป ก 4) เลือกพื้นที่แล้วระบายสีดำ
3. ใช้คำสั่ง Histogram ซึ่งอยู่ทางขวาบนของหน้าจอแล้วสังเกตเห็นจำนวนของ pixel และที่มุมซ้ายล่างของช่องคำสั่ง ถ้าปรากฏเครื่องหมายอัศเจรีย์ ให้คลิกที่รูปเครื่องหมาย refresh (หมายเลข 2 ในรูป ก 4) ค่า pixel ของภาพให้เป็นค่าปัจจุบันและเครื่องหมายอัศเจรีย์ก็จะหายไป ตัวอย่างเช่น ค่า pixel ของรูปดัมมี่ที่ระบายสีดำเท่ากับ 288202 เมื่อ refresh ค่า pixel จะเปลี่ยนเป็น 1151286
4. ถ่ายรูปเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต้องการหาพื้นที่แล้วทำเฉกเช่นเดียวกับรูปดัมมี่เพื่อหาค่า pixel ของเซลล์ จากรูปค่า pixel ของเซลล์แสงอาทิตย์เท่ากับ 890920
5. เมื่อได้ค่า pixel ของทั้งสองรูปแล้ว ให้นำค่า pixel ของเซลล์แสงอาทิตย์เป็นตัวตั้งแล้วหารด้วยค่า pixel ของรูปดัมมี่ เช่น $890920/1151286 = 0.773 \text{ cm}^2$



รูปที่ ก.1 กล้อง USB Digital Microscope ยี่ห้อ vimicro

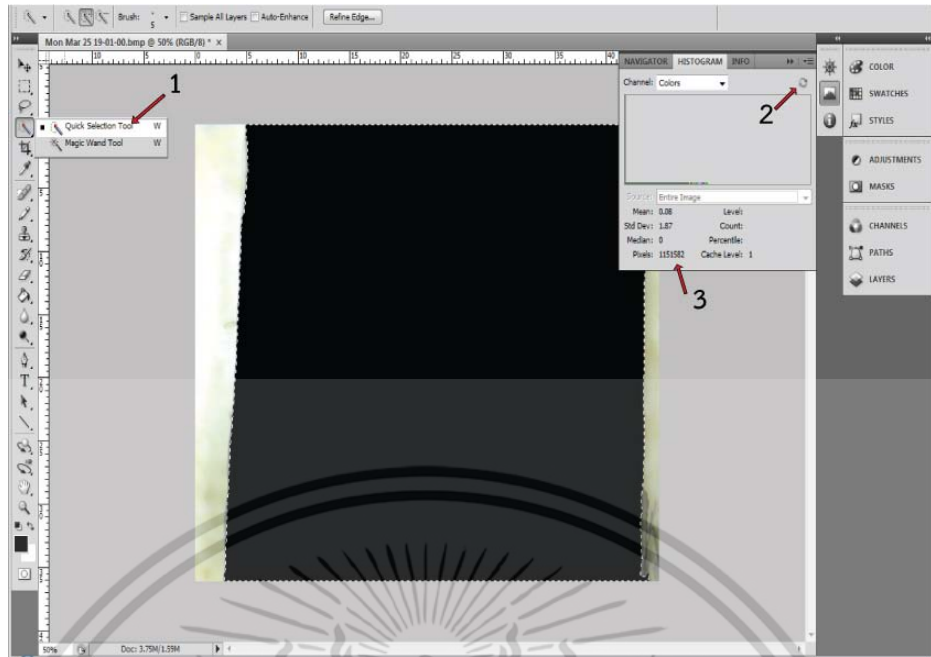


รูปที่ ก.2 แผ่นตมมีโดยสร้างพื้นที่จำลองไว้ขนาด $1 \times 1 \text{ cm}^2$

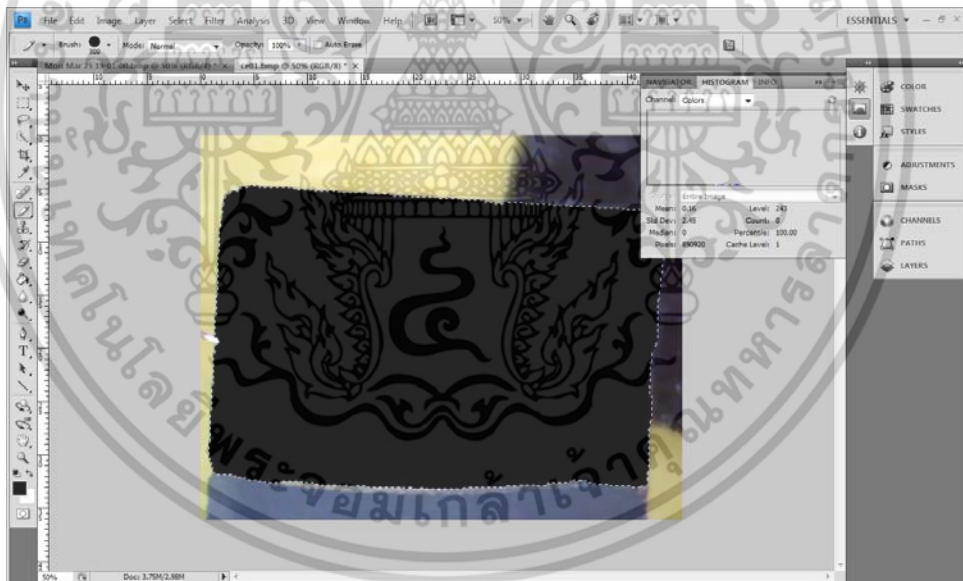


รูปที่ ก.3 ตัวอย่างเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต้องการวัดพื้นที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.4 พื้นที่รูปตัดมี



รูปที่ ก.5 เซลล์แสงอาทิตย์ที่ต้องการหาพื้นที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ข้อมูล JCPDS ของ CuInS_2 , TiO_2 , CdS และ SnO_2

Pattern : 01-072-1147		Radiation = 1.540600		Quality : Alternate		
<p>SnO_2</p> <p>Tin Oxide Cassiterite</p>		<p>2θ</p> <p>26.591 33.888 37.959 38.991 42.645 51.787 54.767 57.855 61.892 62.618 64.768 65.981 69.259 71.306 74.477 78.727 81.152 83.744 84.207 87.246 89.817</p>	<p>i</p> <p>999 615 149 24 7 226 46 19 29 1 26 31 1 9 1 9 3 5 1 2 4</p>	<p>h</p> <p>1 1 2 1 2 2 0 3 2 1 3 3 2 2 2 3 4 4 3 3</p>	<p>k</p> <p>1 0 0 1 1 1 2 0 1 2 1 0 0 2 1 2 2 1 3 3 1</p>	<p>l</p> <p>0 1 0 1 0 1 0 2 0 1 2 1 1 2 2 0 2 0 0 0 0 0</p>
<p>Lattice : Tetragonal</p> <p>S.G. : P42/mnm (136)</p> <p>a = 4.73700</p> <p>c = 3.18500</p> <p>Z = 2</p>	<p>Mol. weight = 150.69</p> <p>Volume [CD] = 71.47</p> <p>Dx = 7.002</p> <p>Dm = 7.000</p> <p>I/cor = 7.07</p>	<p>ICSD collection code: 016635 Remarks from ICSD/CSD: REM - REF. Test from ICSD: At least one TF missing Additional pattern: See PDF 88-0287. Temperature factor: ITF Sample source or locality: Specimen from Cornwall, England, UK. Data collection flag: Ambient.</p>				
<p>Baur, W.H., Acta Crystallogr., volume 9, page 515 (1956) Calculated from ICSD using POWD-12++</p>						
<p>Radiation : CuKα1</p> <p>Lambda : 1.54060</p> <p>SS/FOM : F21=1000(0.0000,22)</p>	<p>Filter : Not specified</p> <p>d-sp : Calculated spacings</p>					

รูปที่ ข.1 ข้อมูล JCPDS ของ กระจกนำไฟฟ้าโปร่งแสง FTO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern : 01-084-1286		Radiation = 1.540600		Quality : Calculated		
TiO ₂		2th	i	h	k	l
Titanium Oxide Anatase, syn		25.325	999	1	0	1
		36.989	62	1	0	3
		37.841	190	0	0	4
		38.601	72	1	1	2
		48.074	249	2	0	0
		53.952	158	1	0	5
		55.106	155	2	1	1
		62.165	27	2	1	3
		62.750	118	2	0	4
		68.842	51	1	1	6
		70.346	55	2	2	0
		74.155	5	1	0	7
		75.129	85	2	1	5
		76.100	23	3	0	1
		78.754	1	2	0	6
		80.860	4	0	0	8
		82.236	6	3	0	3
		82.759	43	2	2	4
		83.232	18	3	1	2
Lattice : Body-centered tetragonal		Mol. weight = 79.90				
S.G. : I41/amd (141)		Volume [CD] = 135.93				
a = 3.78220	Z = 4	Dx = 3.904				
c = 9.50230		I/Cor = 5.05				
ICSD collection code: 202243 Temperature factor: ATF Remarks from ICSD/CSD: REM TEM 15K. Remarks from ICSD/CSD: REM M PDF 21-1272. Test from ICSD: At least one TF implausible. Data collection flag: Non ambient temperature.						
Burdett, J.K., Hughbanks, T., Miller, G.J., Richardson, J.W., Smith, J.V., J. Am. Chem. Soc., volume 109, page 3639 (1987) Calculated from ICSD using POWD-12++ (1997)						
Radiation : CuKα1		Filter : Not specified				
Lambda : 1.54060		d-sp : Calculated spacings				
SS/FOM : F19=1000(0.0001,20)						

รูปที่ ข.2 ข้อมูล JCPDS ของ Anatase Titanium Dioxide

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern : 01-075-0106		Radiation = 1.540600		Quality : Calculated																																																																																																																																																																																																																								
CuInS ₂																																																																																																																																																																																																																												
Copper Indium Sulfide Roquesite, syn																																																																																																																																																																																																																												
Lattice : Body-centered tetragonal S.G. : I-42d (122) a = 5.51700 c = 11.06000 Z = 4		Mol. weight = 242.49 Volume [CD] = 336.64 Dx = 4.784 Dm = 4.710 I/ cor = 10.92		<table border="1"> <thead> <tr> <th>2θ</th> <th>i</th> <th>h</th> <th>k</th> <th>l</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>17.953</td><td>63</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>27.967</td><td>999</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td></tr> <tr><td>29.109</td><td>58</td><td>1</td><td>0</td><td>3</td></tr> <tr><td>32.430</td><td>154</td><td>2</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>36.367</td><td>1</td><td>2</td><td>0</td><td>2</td></tr> <tr><td>37.311</td><td>62</td><td>2</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>44.132</td><td>22</td><td>1</td><td>0</td><td>5</td></tr> <tr><td>*44.132</td><td>22</td><td>2</td><td>1</td><td>3</td></tr> <tr><td>46.463</td><td>353</td><td>2</td><td>0</td><td>4</td></tr> <tr><td>*46.463</td><td>353</td><td>2</td><td>2</td><td>0</td></tr> <tr><td>50.253</td><td>17</td><td>3</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>52.403</td><td>1</td><td>3</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>55.057</td><td>128</td><td>1</td><td>1</td><td>6</td></tr> <tr><td>55.159</td><td>232</td><td>3</td><td>1</td><td>2</td></tr> <tr><td>55.770</td><td>9</td><td>2</td><td>1</td><td>5</td></tr> <tr><td>*55.770</td><td>9</td><td>3</td><td>0</td><td>3</td></tr> <tr><td>57.801</td><td>39</td><td>2</td><td>2</td><td>4</td></tr> <tr><td>60.344</td><td>1</td><td>2</td><td>0</td><td>6</td></tr> <tr><td>60.946</td><td>2</td><td>1</td><td>0</td><td>7</td></tr> <tr><td>61.090</td><td>3</td><td>3</td><td>2</td><td>1</td></tr> <tr><td>62.943</td><td>1</td><td>3</td><td>1</td><td>4</td></tr> <tr><td>66.057</td><td>14</td><td>3</td><td>0</td><td>5</td></tr> <tr><td>*66.057</td><td>14</td><td>3</td><td>2</td><td>3</td></tr> <tr><td>67.722</td><td>20</td><td>0</td><td>0</td><td>8</td></tr> <tr><td>67.903</td><td>40</td><td>4</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>70.284</td><td>1</td><td>4</td><td>0</td><td>2</td></tr> <tr><td>70.751</td><td>7</td><td>2</td><td>1</td><td>7</td></tr> <tr><td>70.884</td><td>6</td><td>4</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>74.879</td><td>65</td><td>3</td><td>1</td><td>6</td></tr> <tr><td>75.487</td><td>14</td><td>3</td><td>2</td><td>5</td></tr> <tr><td>*75.487</td><td>14</td><td>4</td><td>1</td><td>3</td></tr> <tr><td>77.106</td><td>13</td><td>2</td><td>0</td><td>8</td></tr> <tr><td>77.278</td><td>26</td><td>4</td><td>0</td><td>4</td></tr> <tr><td>*77.278</td><td>26</td><td>4</td><td>2</td><td>0</td></tr> <tr><td>79.548</td><td>1</td><td>4</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>79.906</td><td>4</td><td>3</td><td>0</td><td>7</td></tr> <tr><td>84.569</td><td>5</td><td>4</td><td>1</td><td>5</td></tr> <tr><td>86.147</td><td>33</td><td>2</td><td>2</td><td>8</td></tr> <tr><td>86.274</td><td>51</td><td>4</td><td>2</td><td>4</td></tr> <tr><td>88.458</td><td>1</td><td>4</td><td>0</td><td>6</td></tr> <tr><td>88.898</td><td>4</td><td>2</td><td>1</td><td>9</td></tr> <tr><td>89.108</td><td>7</td><td>4</td><td>3</td><td>1</td></tr> </tbody> </table>		2 θ	i	h	k	l	17.953	63	1	0	1	27.967	999	1	1	2	29.109	58	1	0	3	32.430	154	2	0	0	36.367	1	2	0	2	37.311	62	2	1	1	44.132	22	1	0	5	*44.132	22	2	1	3	46.463	353	2	0	4	*46.463	353	2	2	0	50.253	17	3	0	1	52.403	1	3	1	0	55.057	128	1	1	6	55.159	232	3	1	2	55.770	9	2	1	5	*55.770	9	3	0	3	57.801	39	2	2	4	60.344	1	2	0	6	60.946	2	1	0	7	61.090	3	3	2	1	62.943	1	3	1	4	66.057	14	3	0	5	*66.057	14	3	2	3	67.722	20	0	0	8	67.903	40	4	0	0	70.284	1	4	0	2	70.751	7	2	1	7	70.884	6	4	1	1	74.879	65	3	1	6	75.487	14	3	2	5	*75.487	14	4	1	3	77.106	13	2	0	8	77.278	26	4	0	4	*77.278	26	4	2	0	79.548	1	4	2	2	79.906	4	3	0	7	84.569	5	4	1	5	86.147	33	2	2	8	86.274	51	4	2	4	88.458	1	4	0	6	88.898	4	2	1	9	89.108	7	4	3	1
2 θ	i	h	k	l																																																																																																																																																																																																																								
17.953	63	1	0	1																																																																																																																																																																																																																								
27.967	999	1	1	2																																																																																																																																																																																																																								
29.109	58	1	0	3																																																																																																																																																																																																																								
32.430	154	2	0	0																																																																																																																																																																																																																								
36.367	1	2	0	2																																																																																																																																																																																																																								
37.311	62	2	1	1																																																																																																																																																																																																																								
44.132	22	1	0	5																																																																																																																																																																																																																								
*44.132	22	2	1	3																																																																																																																																																																																																																								
46.463	353	2	0	4																																																																																																																																																																																																																								
*46.463	353	2	2	0																																																																																																																																																																																																																								
50.253	17	3	0	1																																																																																																																																																																																																																								
52.403	1	3	1	0																																																																																																																																																																																																																								
55.057	128	1	1	6																																																																																																																																																																																																																								
55.159	232	3	1	2																																																																																																																																																																																																																								
55.770	9	2	1	5																																																																																																																																																																																																																								
*55.770	9	3	0	3																																																																																																																																																																																																																								
57.801	39	2	2	4																																																																																																																																																																																																																								
60.344	1	2	0	6																																																																																																																																																																																																																								
60.946	2	1	0	7																																																																																																																																																																																																																								
61.090	3	3	2	1																																																																																																																																																																																																																								
62.943	1	3	1	4																																																																																																																																																																																																																								
66.057	14	3	0	5																																																																																																																																																																																																																								
*66.057	14	3	2	3																																																																																																																																																																																																																								
67.722	20	0	0	8																																																																																																																																																																																																																								
67.903	40	4	0	0																																																																																																																																																																																																																								
70.284	1	4	0	2																																																																																																																																																																																																																								
70.751	7	2	1	7																																																																																																																																																																																																																								
70.884	6	4	1	1																																																																																																																																																																																																																								
74.879	65	3	1	6																																																																																																																																																																																																																								
75.487	14	3	2	5																																																																																																																																																																																																																								
*75.487	14	4	1	3																																																																																																																																																																																																																								
77.106	13	2	0	8																																																																																																																																																																																																																								
77.278	26	4	0	4																																																																																																																																																																																																																								
*77.278	26	4	2	0																																																																																																																																																																																																																								
79.548	1	4	2	2																																																																																																																																																																																																																								
79.906	4	3	0	7																																																																																																																																																																																																																								
84.569	5	4	1	5																																																																																																																																																																																																																								
86.147	33	2	2	8																																																																																																																																																																																																																								
86.274	51	4	2	4																																																																																																																																																																																																																								
88.458	1	4	0	6																																																																																																																																																																																																																								
88.898	4	2	1	9																																																																																																																																																																																																																								
89.108	7	4	3	1																																																																																																																																																																																																																								
ICSD collection code : 028739 Test from ICSD : Calc. density unusual but tolerable. Test from ICSD : No R value given. Test from ICSD : At least one TF missing. Sample preparation : Prepared at 1173 K. Additional pattern : See PDF 27-159. Data collection flag : Ambient.																																																																																																																																																																																																																												
Hahn, H., Frank, G., Klingler, W., Meyer, A.D., Stoerger, G., Z. Anorg. Allg. Chem., volume 271, page 153 (1953) Calculated from ICSD using POWD-12++ (1997)																																																																																																																																																																																																																												
Radiation : CuK α 1 Lambda : 1.54060 SS/FOM : F30= 91(0.0084,39)		Filter : Not specified d-sp : Calculated spacings																																																																																																																																																																																																																										

รูปที่ ข.3 ข้อมูล JCPDS ของ Copper Indium Disulfide

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern : 80-19		Radiation = 1.540598		Quality : Calculated		
Cd S		2θ	I	h	k	l
Cadmium Sulfide		26.547	100	1	1	1
		30.748	22	2	0	0
		44.040	47	2	2	0
		52.163	33	3	1	1
		54.671	5	2	2	2
		64.043	6	4	0	0
		70.584	10	3	3	1
		72.715	4	4	2	0
		80.983	10	4	2	2
		87.069	6	5	1	1
Lattice : Face-centered cubic		Mol. weight = 144.47				
S.G. : F-43m (216)		Volume [CDJ] = 196.22				
a = 5.81100		Dx = 4.890				
Z = 4		V/cor = 14.06				
ICSD COLLECTION CODE : 067789 REMARKS FROM ICSD : REM THE. TEST FROM ICSD : No R value given. TEST FROM ICSD : At least one TF missing.						
*Calculated from ICSD using POWD-12++, (1997) primary reference :						
*Phys. Rev. B: Condens. Matter, volume 46, page 10086, (1992) : Yeh, C., Lu, Z.W., Froyen, S., Zunger, A.						
Radiation : CuK α 1		Filter : Not specified				
Lambda : 1.54060		d-sp : Calculated spacings				

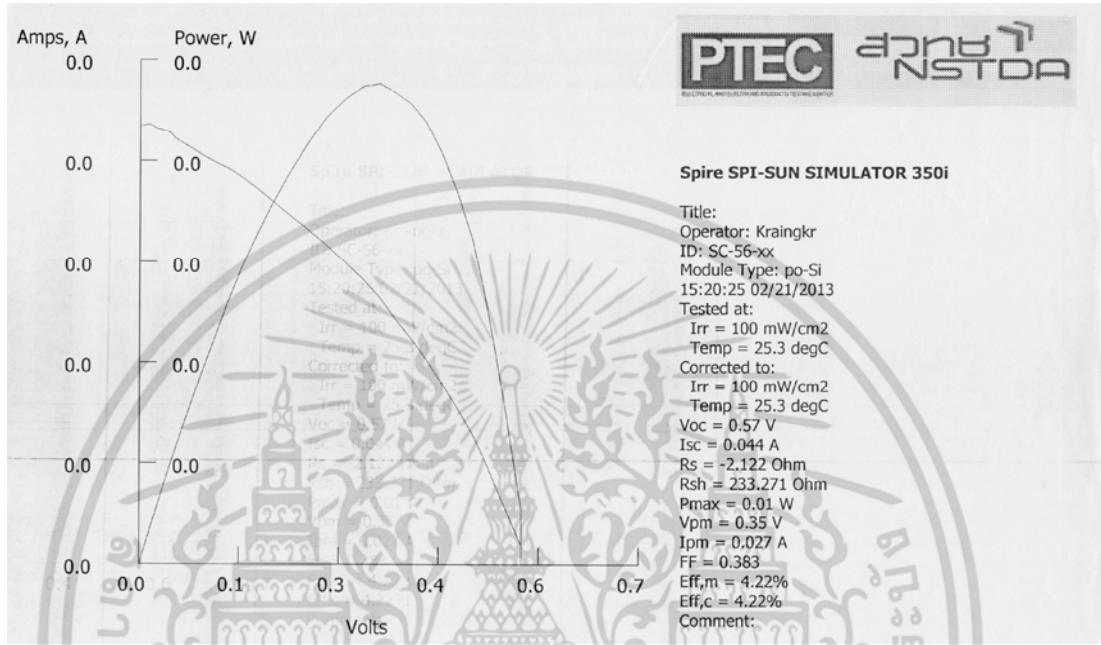
รูปที่ ข.4 ข้อมูล JCPDS ของ CdS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

คุณลักษณะเฉพาะกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด

ซิลิคอน



รูปที่ ค.1 สมบัติและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอน



รูปที่ ค.2 โมดูลของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนผลึกเดี่ยว

จากรูปที่ ค.1 และ ค.2 เป็นเซลล์มาตรฐานเพื่อสอบเทียบให้ได้กำลังแสงที่ตกกระทบเท่ากับ 100 mW/cm² โดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนผลึกเดี่ยวเป็นเซลล์อ้างอิง ซึ่งเซลล์อ้างอิงได้ผ่านการวัดประสิทธิภาพจากศูนย์ทดสอบผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (PTEC) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง
งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์



**The 8th Annual IEEE International Conference on
Nano/Micro Engineered and Molecular Systems
IEEE NEMS2013**
April 7-10, 2013 Suzhou, China

Copyright and Reprint Permission: Abstracting is permitted with credit to the source. Libraries are permitted to photocopy beyond the limit of U.S. copyright law for private use of patrons those articles in this volume that carry a code at the bottom of the first page, provided the per-copy fee indicated in the code is paid through Copyright Clearance Center, 222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923. For other copying, reprint or republication permission, write to IEEE Copyrights Manager, IEEE Operations Center, 445 Hoes Lane, Piscataway, NJ 08854. All rights reserved. Copyright © 2013 by IEEE.

IEEE Catalog Number: CFP13NME-ART
ISBN: 978-1-4673-6352-5

Welcome message
Committees
Organizers & Sponsors
Invited Speakers
Program Schedule
Author Index

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Spray Deposited CuInS₂/TiO₂ Thin Film Solar Cells

J.Kaliang, S.Chaisitsak*

Department of Electronics Engineering, Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Ladkrabang, 10520 Thailand

*Corresponding Author: kcsutich@kmitl.ac.th

Abstract — Copper indium sulfide (CIS) solar cells with Ag/CIS/TiO₂/FTO/glass structure were fabricated by non-vacuum methods. The nanoporous TiO₂ and nanocrystalline CIS films were prepared by screen-printing and spray pyrolysis techniques, respectively. The obtained films were examined using field-emission scanning electron microscopy and X-ray diffraction. The solar cell properties were characterized under AM 1.5. The porous nature of TiO₂ layer was found to cause the formation of nanocrystalline CIS with a very small grain size within the TiO₂ matrix. The photocurrent could not be observed in any devices without a TiO₂ layer (i.e. CIS/FTO), while it was detected for the devices consisting of TiO₂ layer (i.e. CIS/TiO₂/FTO). The thickness of TiO₂ layer was optimized for maximum efficiency. The highest efficiency obtained solar cells was 2.3×10^{-5} % (V_{oc} : 0.147 V, J_{sc} : 6.5×10^{-7} A/cm², FF: 0.24) with a 3- μ m-thick TiO₂.

Keywords - CuInS₂; solar cells; TiO₂; spray deposition; screen printing

II. MATERIALS AND METHOD

Copper indium sulfide (CIS) solar cells with a Ag/CIS/TiO₂/FTO/glass structure were fabricated. Commercially available F-doped tin oxide (FTO) glasses were used as a substrate. Before the deposition, the substrates were cleaned by ultrasonication in acetone and ethanol baths for 20 min, and then dried with nitrogen flow. The TiO₂ layers were prepared on the substrates by screen-printing TiO₂ paste, which consisted of TiO₂ powder (Degussa P25) and ethyl-cellulose in α -terpineol with ethanol. Here, the thickness of TiO₂ films was controlled by changing the weight ratio of TiO₂ powder. After drying, the films were then calcined at 450 °C for 30 min in air to remove organic compounds in the films. The CIS films were then deposited onto the TiO₂-coated substrates by spray pyrolysis from aqueous solutions of CuCl₂, InCl₃ and (NH₂)₂CS (thiourea) under an atmospheric pressure. The copper/indium/ sulfur molar ratio (Cu/In/S) in the solution was fixed at 0.9/1/5. An excess of thiourea was necessary in the final solution, since sulfur is very volatile during the growth. The concentration of Cu²⁺ in the source solution was 0.01 M. The source solution was sprayed by a nozzle (ϕ : 0.5mm) with compressed N₂ onto a heated substrate (a glass or a TiO₂-coated substrate). The temperature of the substrate was fixed at 300 °C. The number of spray pulses (30 sec spray and 60 sec pause) was fixed to 20 cycles, resulting in a ~2.8 μ m-thick CIS film on glass (~140 nm/cycle). Here, no post-deposition annealing was done. Finally, a silver electrode dot was formed on the back of the samples to complete the solar cells.

The surface morphology and cross-section view of the films were examined using field-emission scanning electron microscopy (FE-SEM). The crystalline structure was analyzed by X-ray diffraction (XRD) between 10° and 90° with a step size of 0.02° using CuK α monochromatic radiations, and the crystallite size was estimated by the Scherrer's equation [3]. The phases were identified using JCPDS files. To identify secondary phases in the CIS films, The current-voltage (IV) measurements were carried out using a Keithley 2400 source meter under 1-sun illumination (AM-1.5, 100 mW/cm²) from a solar simulator. The light intensity was calibrated using a poly-Si solar cell.

I. INTRODUCTION

Chalcopyrite compounds [1-6] are expected as one of the alternative materials to silicon solar cells, due to their high optical absorption efficiency ($\alpha > 10^4$ cm⁻¹), low light degradation, and high radiation resistance. Copper indium disulfide, CuInS₂ (CIS) is part of the I-III-VI group of semiconductors, with chalcopyrite structure. CIS is chemically stable, non-toxic and is a suitable material for high-efficiency solar cells because its bandgap (1.5 eV) [1-2] is close to the ideal energy gap, which is well matched with the solar spectrum [3]. The CIS based solar cells with conversion efficiency over 12% have already been reported by using the expensive vacuum evaporation technique [4]. Among the various deposition techniques, spray deposition is an attractive method for deposition of large-area films due to its simplicity and low cost [3]. However, this technology suffers from low efficiencies.

The purpose of the present work was to prepare CIS based solar cells by using a spray deposition technique, and to investigate the microstructures and photovoltaic properties for CIS/nano-porous TiO₂ structures. The crystalline structure and the morphology of the obtained films were examined using X-ray diffraction and field-emission scanning electron microscopy (FE-SEM). The solar cell properties were characterized under AM 1.5.

III. RESULTS AND DISCUSSION

A. Thickness control of nanoporous TiO_2

Firstly, the TiO_2 films were deposited onto FTO glasses substrate to investigate the film coverage, surface morphology and film thickness. In order to control the thickness of TiO_2 films, the P25 weight ratio of TiO_2 paste was varied in the range of 0.5~3.2 wt.%.

Fig. 1(a-c) shows the surface images of the TiO_2 coated with different P25 weight ratios; (a) 0.5wt.%, (b) 1.0wt.% and (c) 8.0 wt.%. The film thicknesses were estimated to be about 0.1 μm , 0.2 μm and 1.7 μm , respectively. It should be noticed that the particles of P25 consisting of small particles (anatase, ~20 nm) and large particles (rutile, ~40 nm). For the samples coated with a low P25 weight ratio (0.5wt.% (Fig. 1a) and 1.0wt.%(Fig. 1b)), the crystalline grain of the FTO under layers were observed on some surface areas (in the circle), showing incomplete coverage of the TiO_2 films. Such an incomplete coverage could be a cause of lowering the solar cell performance due to the ohmic contact of CIS/FTO junctions, as will be described later. However, when the weight ratio was increased to 8.0 wt.% and above, a complete coverage of TiO_2 particles on the FTO glasses could be obtained, as shown in Fig.1c

Fig. 1(d) shows the relationships between the TiO_2 powder (P25) weight ratio and the thickness of nanocrystalline TiO_2 films. The thickness of the films was measured using SEM, and the data were averaged over 3~4 different positions of the sample. The linear relationship between the P25 weight ratio and the thickness was confirmed. The thickness of one weight ratio percent was obtained as 0.214 μm . For all studied pastes, the peeling-up at the exterior were not observed. This result indicates that the nano-porous TiO_2 film can be formed on the rough surface of the FTO glass by a screen printing technique, and its thickness can be readily adjusted by varying the weight ratio of TiO_2 powder in the paste.

B. Effect of TiO_2 interlayer on crystalline structure of CIS thin film.

In order to investigate the effect of TiO_2 layer on the growth of CIS films, the CIS films were deposited on FTO glasses and TiO_2 -coated FTO glasses. Fig. 2 shows the typical surface and cross-section of as-deposited CIS films on the different types of substrates; (a) FTO/glass and (b) TiO_2 -coated FTO/glass substrates. Here, the CIS films were deposited under the same conditions as described in the experimental section, while the TiO_2 film was prepared using the paste containing 14 wt.% P25.

The obtained CIS films for both substrates had a good adherence to the substrate. In both cases, rough surfaces of the films were observed and were assumed to be formed by the aggregation of small crystallites to a dense structure. For the CIS on TiO_2 -coated FTO (Fig. 2b, left), however, a poorer surface coverage with no pinholes was observed, compared to

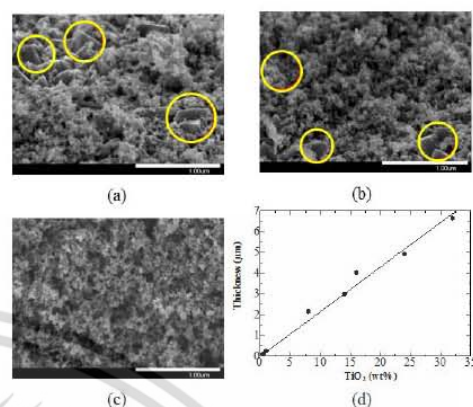


Fig. 1. (a-c) Surface and cross-section SEM images of TiO_2 deposited on FTO at different TiO_2 weight ratios; (a) 0.5wt.%, (b) 1.0wt.% and (c) 8.0 wt.%. The circles show the FTO grains without TiO_2 coverage, indicating the incomplete coverage of the TiO_2 on the substrates. (d) Film thickness of the TiO_2 films as a function of TiO_2 powder (P25) weight ratio.

those on FTO (Fig. 2a, left). From the cross-section SEM images, it appears that both films were uniform and the grains extended through the entire film thickness. The different interfaces were not discernible, but could be observed as shown in Fig. 2. The thickness of CIS film on FTO was found to be about ~2.8 μm , while that of CIS on TiO_2 -coated FTO was only ~1.6 μm . Since the screen-printed TiO_2 film consists of a mesoporous network of TiO_2 nanoparticles, the precursor solution may easily permeate into those pores during the deposition, resulting in the formation of nanocrystalline CIS within the TiO_2 layer.

Fig. 3 show the X-ray diffraction pattern of the CuInS_2 films deposited on the TiO_2 films with various film thicknesses; (b) 0.1 μm , (c) 0.2 μm and (d) 3 μm . Here, the CIS films were deposited under the same conditions. The XRD pattern of the film on FTO glass is also shown for comparison (Fig. 3a). For all deposited CIS films, major peaks corresponding to diffraction from (112), (220/204) and (312/116) planes of CIS, which are characteristic of the chalcopyrite structure (JCPDS No. 075-0106), were observed. The peaks were broad, showing that the obtained films were small-sized nanocrystalline CIS. The average crystalline size of CIS was estimated from XRD data using Scherrer's equation applied to the most intense diffraction lines. The narrow size distribution ranging from 4.4 nm to 5.8 nm was found for the CIS on the FTO substrate; however, the use of TiO_2 -coated FTO substrate decreased the crystalline size and the size distribution became broad (the calculated sizes were in the range of 2.8~7.6 nm, 2.6~8.7 nm and 3.7~8.1 nm for 0.1

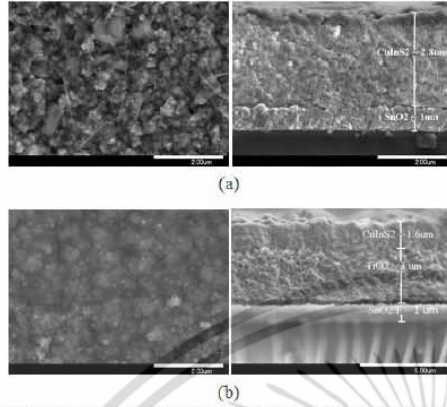


Fig. 2. SEM images of surface and cross-section of (a) CuInS₂/FTO/glass, (b) CuInS₂/TiO₂ (~3µm)/FTO/glass.

µm-thick, 0.2 µm-thick and 3 µm-thick TiO₂/FTO substrates, respectively). These results also confirm that the porous nature of TiO₂ layer may causes the formation of nanocrystalline CIS with a very small grain size within the TiO₂ matrix.

C. Effect of TiO₂ layer thickness on I-V characteristics of solar cells

The IV characteristics of the devices with CIS/FTO and CIS/TiO₂/FTO structures in the dark and under illumination were measured (Fig. 4). For the devices with CIS/FTO structure, ohmic behavior was observed [5]. As indicated from the IV curve in Fig. 4(a), clearly, no significant photocurrent was detected under illumination. This could be explained with the pinning of the Fermi level at the CIS/FTO contact due to large densities of deep defects at this interface, resulting in the large recombination between the holes in valence band of CIS and the electrons in conduction band of FTO [6]. However, by inserting a thin-layer of TiO₂ between CIS and FTO, the devices with CIS/TiO₂/FTO structure showed diode behavior as shown in Fig. 4 (b). A small photocurrent density of 3.18×10^{-7} A/cm² could be observed under illumination, resulting in power-conversion efficiency (η) of 8.1×10^{-6} %. Here, the thickness of the TiO₂ layer was approximately 4 µm. The performance enhancements in the CIS/TiO₂/FTO structure could be due to the reduction of CIS/FTO contacts by the TiO₂ interlayer as well as the nanostructured interface between the p-type CIS and the n-type TiO₂ [7].

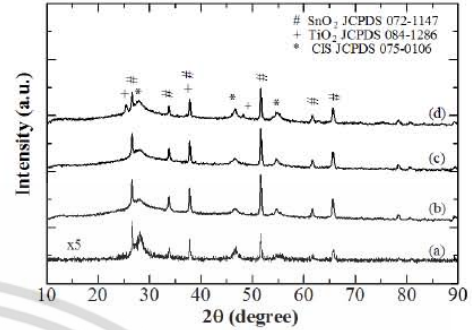


Fig. 3. XRD pattern of the spray-deposited CIS films on the bare FTO glass (a) and on the TiO₂ films with various film thicknesses (b-d); (b) ~0.1 µm, (c) ~0.2 µm and (d) ~3 µm.

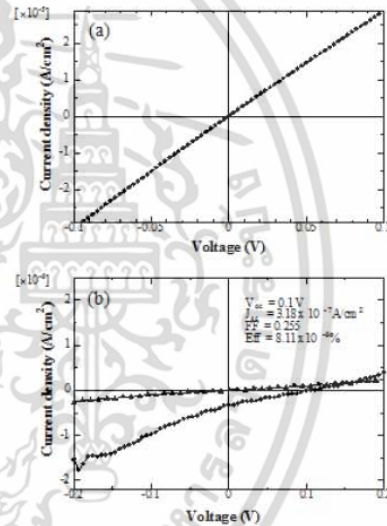


Fig. 4. Typical I-V characteristics measured in dark (D) and under illumination (L) for (a) Ag/CIS/FTO/glass and (b) Ag/CIS/TiO₂ (~4µm)/FTO/glass.

The thickness of TiO₂ layer in the solar cell with CIS/TiO₂/FTO structure was optimized for maximum efficiency. The thickness of TiO₂ was varied in the range of 0.1~ 6.6 μm, by changing the P25 weight ratio of TiO₂ paste.

Fig. 5 shows the variation of average open-circuit photo voltage (V_{oc}), short-circuit photocurrent density (J_{sc}), fill factor (FF) and power-conversion efficiency (η) as a function of nanocrystalline TiO₂-layer thickness. The IV characteristics of the fabricated solar cells were measured under 1-sun conditions. As shown previously in Fig. 4, the photocurrent could not be observed in any devices without a TiO₂ layer, while it was noticeably detected in the devices consisting of TiO₂ layer. The J_{sc} increased to about 6.5 × 10⁻⁷ A/cm² with increasing the films thickness to 3 μm. However, further increasing of the TiO₂ thickness negatively impacted the solar cell efficiency by decreasing the V_{oc} and the FF [8]. The highest efficiency obtained for heterojunctions p-CIS/n-TiO₂ solar cells was 2.3 × 10⁻⁵ % (V_{oc}: 0.147 V, J_{sc}: 6.5×10⁻⁷A/cm², FF: 0.24) with a 3-μm-thick TiO₂.

IV. CONCLUSIONS

Copper indium sulfide (CIS) solar cells with Ag/CIS/TiO₂/FTO/glass structure were fabricated by non-

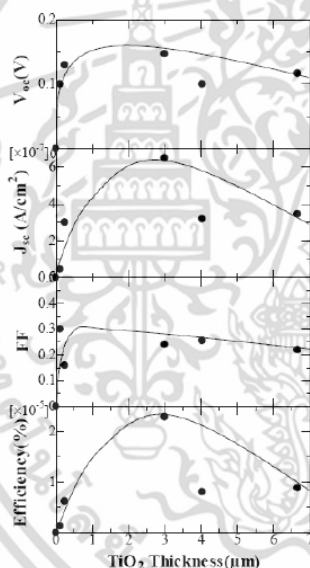


Fig. 5. V_{oc}, J_{sc}, FF and conversion efficiency (η) of the CIS/TiO₂/FTO solar cells as a function of TiO₂-layer thickness. The solid lines are drawn as a guideline for the eye.

vacuum methods. F-doped tin oxide (FTO) glasses were used as a substrate. The nanoporous TiO₂ films were prepared by screen-printing TiO₂ paste. The linear relationship between the weight ratio of TiO₂ powder in the paste and the thickness of the film was observed. The CIS films were deposited by spray pyrolysis from aqueous solutions of CuCl₂, InCl₃ and (NH₂)₂CS under an atmospheric pressure. SEM images indicated that the obtained CIS films were uniform and the grains extended through the entire film thickness. X-ray diffraction pattern measurements showed that the CIS films were nanocrystalline chalcopyrite. The porous nature of TiO₂ layer was found to cause the formation of nanocrystalline CIS with a very small grain size within the TiO₂ matrix. The solar cell properties were characterized under AM 1.5. The photocurrent could not be observed in any devices without a TiO₂ layer (i.e. CIS/FTO), while it was detected for the devices consisting of TiO₂ layer (i.e. CIS/TiO₂/FTO). The thickness of TiO₂ layer in the solar cell with CIS/TiO₂/FTO structure was optimized for maximum efficiency. The highest efficiency obtained solar cells was 2.3 × 10⁻⁵ % with a 3-μm-thick TiO₂.

ACKNOWLEDGMENT

S.C. would like to give special thanks to Prof. T. Nakada, Aoyama Gakuin University, for providing a solar simulator. The work has been supported, in part, by the King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Research Fund.

REFERENCES

- [1] N. N. Syrbua, R. V. Cretub, V. E. Tezleyanb, "Energy band structure of CuInS₂ crystals", *Cryst. Res. Technol.* Vol. 33, pp.135-144, 1998.
- [2] M. Nanu, J. Schoonman, A. Goossens, "Solar-Energy Conversion in TiO₂/CuInS₂ nanocomposites", *Adv. Funct. Mater.* vol. 15, No. 1, pp. 95-100, 2005.
- [3] M.H. Valdés, M. Bernst, A. Goossens, M. Vázquez, "Spray deposition of CuInS₂ on electrodeposited ZnO for low-cost solar cells", *Surface & Coatings Technology*, vol. 204, pp.3995-4000, 2010.
- [4] T. Ohashi, Y. Hashimoto, K. Ito, "Solar cells with Cu(In_{1-x}Ga_x)S₂ thin films prepared by sulfuration", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 67, pp. 225-230, 2001.
- [5] N. K. Allouche, T. B. Nasr, N. K. Turki and M. Castagne, "Characterization of heterojunctions based on airless spray deposited CuInS₂ thin films on different underlayers", *Energy Procedia*, vol. 2, pp. 91-101, 2010.
- [6] V. Palekis, "CdTe/CdS thin film solar cells fabricated on flexible substrates", University of South Florida, Ph.D Thesis, 2011.
- [7] R. Motoyoshi, T. Oku, A. Suzuki, K. Kikuchi, S. Kikuchi, B. Jeyadevan, J. Cuya, "Fabrication and characterization of copper system compound semiconductor solar cells", *Advances in Materials Science and Engineering*, Vol. 2010, 562842, 2010.
- [8] R. O'Hayre, M. Nanu, J. Schoonman, A. Goossens, "A parametric study of TiO₂/CuInS₂ nanocomposite solar cells: how cell thickness, buffer layer thickness, and TiO₂ particle size affect performance", *Nanotechnology*, vol.18, 055702, 2007.

ประวัติผู้เขียน

- ชื่อ - นามสกุล นายจักรศ กาเลียง
- วัน เดือน ปีเกิด 25 มกราคม 2530
- ที่อยู่ 143/4 หมู่ 4 ตำบล ท่าบอน อำเภอ ระโนด จังหวัด สงขลา 90140
- ประวัติการศึกษา - พ.ศ. 2543-2545 มัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนเบตง “วีระราษฎร์ประสาน”
 - พ.ศ. 2545-2548 วิทยาลัยเทคนิคยะลา
 - พ.ศ. 2548-2552 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และ
 โทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ วิทยาเขต เทคนิค
 กรุงเทพ
- ทุนการศึกษา - ทุนการศึกษาจากพระครูวินัยธรพร ฐานกรโ เจ้าอาวาสวัดประยงค์กิตติวงา
 ราม เขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร
 - ทุนวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- ประสบการณ์ นักศึกษาฝึกงาน Trainee
 Advance Information Technology Public Company Limited พ.ศ.
 2551
- ผลงานทางวิชาการ 1. J.Kaling, S. Chaisitsak. “Spray Deposited $\text{CuInS}_2/\text{TiO}_2$ Thin film
 Solar Cells.” IEEE International Conference on Nano/Micro
 Engineered and Molecular Systems (IEEE-NEMS 2013) , Apri 5 -
 Apri 7, 2013, Suzhou, China
 2. จักรศ กาเลียง และ สุธิชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์. “การสร้างเซลล์แสงอาทิตย์
 ชนิดฟิล์มบาง $\text{CuInS}_2/\text{TiO}_2$ ” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า
 ครั้งที่36 วันที่ 13-15 ธันวาคม 2556 ณ โรงแรมเฟลิกซ์ ริเวอร์แคว
 รีสอร์ท จังหวัดกาญจนบุรี หน้า 673-677

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้