

การประดิษฐ์ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdS \cdot Te_{1-x}$ โดยวิธีระเหยใกล้สุญญากาศ
ด้วยกระบวนการในอวกาศแคบ
FABRICATION OF $CdS \cdot Te_{1-x}$ THIN FILMS BY CLOSE SPACE
SUBLIMATION METHOD

นายพนพัตต์ เจริญกิจ

โครงการที่เสนอแนะสำหรับงานของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

สาขาวิชาเคมีประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

ฉบับนี้พิมพ์ในโอกาสที่ทรงฉลองครบห้าปี คณะวิทยาศาสตร์

ปีการศึกษา 2550

การประดิษฐ์ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} โดยวิธีการระเหิดสารเคมี
ด้วยความร้อนในระยะประชิด

FABRICATION OF CdS_xTe_{1-x} THIN FILMS BY CLOSE SPACE
SUBLIMATION METHOD

นายพนัญญ์ เดชะคำภู

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาฟิสิกส์ประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

**FABRICATION OF $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ THIN FILMS BY CLOSE SPACE
SUBLIMATION METHOD**





Mr. NUPPANUT DAYCHACOMEPU

**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIRMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OR SCIENCE
IN APPLIED PHYSICS
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2013**

หัวข้อโครงการพิเศษ การประดิษฐ์ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} โดยวิธีการระเหิด
สารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด
FABRICATION OF CdS_xTe_{1-x} THIN FILMS BY CLOSE SPACE
SUBLIMATION METHOD

ชื่อนักศึกษา นาย นพณัฐ เดชะคำภู
ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต
สาขาวิชา ฟิสิกส์
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.จิตินัย แก้วแดง

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชา
ฟิสิกส์ประยุกต์ ประจำปีการศึกษา 2556

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.จิตินัย แก้วแดง	
รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ	
อ.ภารุจ บัณฑิตธาตวิทย์	
ผศ.ดร.ชัยสิงห์ ภูร์กษ์เกียรติ	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	การประดิษฐ์ฟิล์มบาง CdS_xTe_{1-x} โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อน ในระยยะประชิด
ชื่อนักศึกษา	นาย นพณัฐ เดชะคำภู
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์
ปีการศึกษา	2556
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. จูตินัย แก้วแดง

บทคัดย่อ

ในโครงการพิเศษนี้ ได้ทำการประดิษฐ์ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิดในระบบสุญญากาศ สำหรับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe$ จะใช้อุณหภูมิของสารตั้งต้นและอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 550 และ 450 องศาเซลเซียสตามลำดับ ส่วนฟิล์มที่มีองค์ประกอบอื่นๆ จะกำหนดให้อุณหภูมิของสารตั้งต้นและอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 700 และ 600 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ในกรณีสัดส่วนของโมลอะตอมของธาตุ S ต่ำกว่า 0.2 โครงสร้างผลึกจะเป็นแบบคิวบิกหรือแบบซิงค์เบลนด์ อย่างไรก็ตามกรณีสัดส่วนผสมของโมลอะตอมของธาตุ S อยู่ระหว่าง 0.2 ถึง 0.8 โครงสร้างผลึกจะเป็นแบบคิวบิกหรือแบบซิงค์เบลนด์และแบบเฮกซะโกนัลหรือเวิร์ทไซท์อยู่ร่วมกัน ในขณะที่ของสารกึ่งตัวนำ CdS จะมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเฮกซะโกนัลหรือเวิร์ทไซท์อย่างเดียว จากภาพถ่ายด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าเมื่อสัดส่วน โมลอะตอมของธาตุ S เพิ่มขึ้นจะทำให้ขนาดของเกรนลดลง ค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} จะมีค่าเปลี่ยนจาก 1.48 อิเล็กตรอน โวลต์ (กรณีฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe$) ไปเป็น 2.25 อิเล็กตรอน โวลต์ (กรณีฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS) สำหรับความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิห้องของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} จะมีค่าลดลงตามสัดส่วนผสมของโมลอะตอมของธาตุ S ที่เพิ่มขึ้น จากการวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงชั่วขณะ พบว่าฟิล์มบางที่มีสัดส่วนผสมของโมลอะตอมของธาตุ S เท่ากับ 0.2 จะมีความไวสูงสุดประมาณ 60 จากการวัดสภาพนำไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิต่ำมากของฟิล์มบางที่มีสัดส่วนผสมของโมลอะตอมของธาตุ S เท่ากับ 0.4, 0.6, 0.8 สอดคล้องกับแบบจำลองของซีโตและแบบจำลองการกระโดดระหว่างสถานะพลังงานท้องถิ่นในระยยะไม่คงที่

คำสำคัญ : ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} วิธีการระเหิดสารเคมีในระยยะประชิด

Title	Fabrication of CdS _x Te _{1-x} Thin Film by Close Space Sublimation Method
Students	MR. Nuppanut Daychacomepu
Degree	Bachelor of Science
Major Program	Physics
Academic Year	2013
Advisor	Assoc.Prof.Dr. Thitinai Gaewdang

ABSTRACT

In this special project, CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) thin films have been prepared on slide glass substrate by close spaced sublimation method. For CdTe thin films growth condition, source temperature and glass substrate temperature were 550 and 450 °C, respectively. In all solid solution films and CdS thin films, source temperature and glass substrate temperature were fixed at 700 and 600 °C, respectively. When the S mole ratio less than 0.2, the crystal structure of CdS_xTe_{1-x} thin films was cubic or zinblende. However, for $0.2 \leq x \leq 0.8$ the films were grown in mixed phases between cubic or zinblende and hexagonal or wurtzite structures whereas CdS thin films formed in a hexagonal or wurtzite phase. SEM micrographs show the grain size decreases when the S content increases. As the S content increases, the energy gap value of CdS_xTe_{1-x} thin films varies from 1.48 eV for CdTe thin films to 2.25 eV for CdS thin films. Electrical sheet resistance at room temperature of the as-deposited CdS_xTe_{1-x} thin film decreases as a function of S content. From the transient photoconductivity measurements, the highest sensitivity value about 60 was obtained for the composition $x = 0.2$.

Keywords : CdS_xTe_{1-x} thin films, Close-spaced sublimation method

กิตติกรรมประกาศ

รายงานฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาของรองศาสตราจารย์งานนิตย์ วงษ์เจริญ รองศาสตราจารย์ ดร.ฐิตินัย แก้วแดง รองศาสตราจารย์ ดร.ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยสิงห์ ภูรักษาเกียรติ ที่คอยอบรมและสอนวิชาความรู้ต่างๆ และคอยช่วยเหลือในทุกๆด้านตลอดมา จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ คุณจักรพงษ์ สวิตติวงศ์ และคุณทศพร ชันตยาการณ์ นักศึกษาปริญญาโทใน ห้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุโตนิกส์ สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่คอยให้คำแนะนำและให้ความช่วยเหลือในการทำงานเสมอ

สุดท้ายขอกราบขอบคุณ อาจารย์ทุกท่าน ที่เมตตาประสิทธิ์ประสาท วิชาความรู้ตั้งแต่ การศึกษาภาคบังคับจนถึงปัจจุบัน ตลอดจนกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และผู้มีพระคุณทุกท่าน ที่ให้การอุปการะทุนในการศึกษาเล่าเรียน และเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา

นายพนัญญ์ เฉชะคำภู

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญรูป	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินการ	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเรื่องของลักษณะของโครงสร้างผลึก	5
2.1.1 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ	5
2.1.2 โครงสร้างผลึกแคดเมียมเทลลูไรด์	10
2.1.3 โครงสร้างผลึกแคดเมียมซัลไฟด์	11
2.1.3.1 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์	11
2.1.3.2 โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์	12
2.2 การระเหิดในระยะประชิด	13
2.3 การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์	15
2.4 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	16
2.5 สมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ	17
2.5.1 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน	18
2.5.2 การส่งผ่านแสง	21
2.5.3 การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ	22

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.5.4 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง	23
2.5.5 ส่วนหางของแถบพลังงาน	25
2.6 สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง	26
2.7 สภาพนำไฟฟ้า	27
2.8 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า	28
2.9 กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในฟิล์มบางที่อุณหภูมิต่างๆ	29
2.9.1 กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในฟิล์มบางในช่วงอุณหภูมิสูง	30
2.9.2 กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในฟิล์มบางในช่วงอุณหภูมิปานกลาง	32
2.9.3 การนำไฟฟ้าของพาหะแบบกระโดดในระยะไม่คงที่	34
2.10 สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง	37
2.10.1 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกักพาหะในช่วงกระแสขาลง	44
2.10.2 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกักพาหะในช่วงกระแสขาขึ้น	45
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย	47
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัย	47
3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เพื่อใช้เตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	47
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	47
3.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค	48
3.1.4 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค	48
3.1.5 เครื่องมือที่ใช้ศึกษาสมบัติทางแสง	48
3.1.6 เครื่องมือที่ใช้ในการวัดสมบัติทางไฟฟ้า	48
3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	49
3.2.1 การเตรียมและทำความสะอาดแผ่นกระจกสไลด์เพื่อเป็นฐานรองรับ	49
3.2.2 การเตรียมและทำความสะอาดระบบระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	49

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.2.3 การเตรียมผลึกของสารตั้งต้น CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่มีองค์ประกอบต่างกัน	50
3.2.4 การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	52
3.2.4.1 การเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำแคดเมียมเทลลูไรด์โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด ใช้เวลาตั้งแต่ 1- 5 นาที เพื่อหาความต้านทานที่น้อยที่สุด	52
3.2.4.2 การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	53
3.3 การศึกษาสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	56
3.3.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค	56
3.3.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค	56
3.3.3 การศึกษาสมบัติทางแสง	57
3.3.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า	57
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	58
4.1 ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	58
4.2 ผลการศึกษาสมบัติฟิสิกส์พื้นฐานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	60
4.2.1 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	60
4.2.2 ผลการศึกษาภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบาง CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	63
4.2.3 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	64

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.2.4 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	69
4.2.4.1 ความต้านทานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($x = 0$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	69
4.2.4.2 ความต้านทานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	70
4.2.4.3 การศึกษาความต้านทานที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($x = 0.4, 0.6, 0.8$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	72
4.2.4.4 การศึกษาความต้านทานที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($x = 0.2$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	80
4.2.4.5 สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	81
4.2.4.6 สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงของเซรามิกของเม็ดสารกึ่งตัวนำ $In_xW_{1-x}O_3$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผลผลึก	86
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	92
เอกสารอ้างอิง	95
ภาคผนวก	99
ประวัติผู้เขียน	102

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 พารามิเตอร์ของหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ	6
2.2 ระบบผลึกทั้งเจ็ดแบบในระบบสามมิติ	7
2.3 ความสัมพันธ์ของดัชนีมิลเลอร์และจุดตัดแกนผลึก	9
3.1 ปริมาณสารตั้งต้นที่มีสัดส่วนผสมทางเคมีต่างๆของ CdTe และ CdS และอุณหภูมิที่ใช้ในการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	51
4.1 ค่าคงที่โครงผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	62
4.2 สัดส่วนโมลอะตอมของธาตุ S ที่ปรากฏในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยความสัมพันธ์ของวีการ์ด	62
4.3 ช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด สารเคมี 5 นาที	66
4.4 ค่าส่วนหางของแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	68
4.5 ค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เตรียม โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมีต่างกัน	70
4.6 ค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	71
4.7 แสดงพารามิเตอร์ที่คำนวณ ได้จากแบบจำลองของซีโตของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	79

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.9 ความไวในการตอบสนองต่อแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	85
4.10 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงคือรีนของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $In_xW_{1-x}O_3$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผลผลึก ที่ได้จากการปรับผลการทดลองที่อุณหภูมิห้อง ให้เข้ากับฟังก์ชันมัลติเพิลเอ็กซ์โพเนนเชียล	90
4.11 ความหนาแน่นของประจุชนิดต่างๆ ที่ได้จากการวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงคือรีนของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $In_xW_{1-x}O_3$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจาก สารตั้งต้นที่เป็นผลผลึก	91

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 หน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ	5
2.2 การบอกชื่อระนาบต่างๆของผลึก	9
2.3 แสดงโครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์ของผลึกแคดเมียมเทลลูไรด์	10
2.4 การจัดเรียงตัวของอะตอมของผลึกแคดเมียมซัลไฟด์	11
2.5 โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไฮท์ของผลึกแคดเมียมซัลไฟด์	12
2.6 แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไฮท์กับแบบซิงค์เบลนด์	13
2.7 การเลื่อนเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์	16
2.8 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	17
2.9 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานอย่างง่ายของ	18
2.10 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานและการย้ายสถานะของพลังงานอิเล็กตรอนของสาร กึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์	20
2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนของสาร กึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์	20
2.12 แผนภาพเมื่อแสงตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มบาง	21
2.13 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การ ดูดกลืนแสงกับพลังงานโฟตอน	23
2.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและค่าพลังงานโฟตอนหรือ ค่าความยาวคลื่นของพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำ	25
2.15 ส่วนหางของแถบพลังงานซึ่งมีทั้งส่วนหางของแถบวาเลนซ์และส่วนหางของแถบนำ	26
2.16 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง	28
2.17 แสดงแบบจำลองของฟิล์มบางตรงบริเวณรอยต่อขอบของเกรน	30
2.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \sigma$ กับ $\frac{1,000}{T}$ ของฟิล์มบาง CuO ที่อุณหภูมิในช่วง 125-365 เคลวิน	33
2.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \sigma T^{\frac{1}{2}}$ กับ $\frac{1,000}{T}$ ของฟิล์มบาง CuO	34
2.20 ระดับพลังงานของกัปดักพาหะชนิดจับอิเล็กตรอนและกัปดักพาหะชนิดจับโฮลที่ ปรากฏในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ	37
2.21 กระแสขาขึ้นและกระแสขาลงการสภานำไฟฟ้าเชิงแสง	41

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I_p$ กับ t ของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงทั้งช่วงกระแสขาขึ้น และช่วงกระแสขาลง	41
2.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I_p$ กับ t เพื่อใช้กำหนดหาความหนาแน่นของกักพาหะในช่วงกระแสขาลง	44
2.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I_p$ กับ t เพื่อใช้กำหนดหาความหนาแน่นของกักพาหะในช่วงกระแสขาขึ้น	45
3.1 ผลึกของสารตั้งต้น CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่ผสมแล้วเพื่อจะใช้ในการทดลองทั้งแบบที่เปิดแฟลชและเปิดแฟลชของกล้องถ่ายภาพ	52
3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการประดิษฐ์ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	55
3.3 ระบบการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	56
4.1 ฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($x = 0.0$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมีตั้งแต่ 1 – 5 นาที เรียงตามลำดับ	58
4.2 ภาพถ่ายของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	59
4.3 ผลึกของสารตั้งต้นสำหรับเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	59
4.4 พิเคราะห์เลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	60
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่โครงสร้างกับสัดส่วนโมลอะตอมของธาตุ S ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที กับสัดส่วนโมลอะตอมของธาตุ S	61

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 ภาพถ่าย SEM ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	63
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	64
4.8 การหาช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	65
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) กับสัดส่วนโมลอะตอมของธาตุ S ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	66
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \alpha$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	67
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแผ่นกับเวลาในการระเหิดสารเคมีของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	69
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแผ่นกับสัดส่วนโมลอะตอมของธาตุ S ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	70
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \sigma$ กับ $\frac{1000}{T}$, $\ln \sigma T^{\frac{1}{2}}$ กับ $\frac{1000}{T}$ และ $\ln \sigma T^{\frac{1}{2}}$ กับ $T^{-\frac{1}{4}}$ ตามลำดับ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($x = 0.4$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 5 นาที	72
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \sigma$ กับ $\frac{1000}{T}$, $\ln \sigma T^{\frac{1}{2}}$ กับ $\frac{1000}{T}$ และ $\ln \sigma T^{\frac{1}{2}}$ กับ $T^{-\frac{1}{4}}$ ตามลำดับ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($x = 0.6$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 5 นาที	73

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \sigma$ กับ $\frac{1000}{T}$, $\ln \sigma T^{\frac{1}{2}}$ กับ $\frac{1000}{T}$ และ $\ln \sigma T^{\frac{1}{2}}$ กับ $T^{-\frac{1}{4}}$ ตามลำดับ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($x = 0.8$) ที่เตรียมโดยวิธีระเหิด สารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 5 นาที ที่เตรียมโดย วิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด ที่ใช้เวลาในการระเหิด 5 นาที	74
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{R_0}{R}\right)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($x = 0.2$) ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อ ใช้เวลาในการระเหิด 5 นาที	80
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโฟโตกับเวลาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้ เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	81
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับสัดส่วน โมลอะตอมของธาตุ S ของฟิล์มบาง ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความ ร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	82
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของฟิล์มบางของสารกึ่ง $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะ ประชิดเมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	82
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโฟโตกับเวลาของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{In}_x\text{W}_{1-x}\text{O}_3$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจาก สารตั้งต้นที่เป็นผลผลึก	87
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I_p$ กับเวลาของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{In}_x\text{W}_{1-x}\text{O}_3$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้น ที่เป็นผลผลึก	88
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสออร์มัลไลซ์กับเวลาของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{In}_x\text{W}_{1-x}\text{O}_3$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจาก สารตั้งต้นที่เป็นผลผลึก ก. กรณีขาขึ้น ข. กรณีขาลง	89

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ปัจจุบันมนุษย์มีความต้องการในการใช้พลังงานเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้พลังงานที่มีอยู่ในธรรมชาติ เช่น น้ำมัน ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ ไม่เพียงพอต่อความต้องการของมนุษย์ มนุษย์จึงพยายามคิดค้นและพัฒนา เพื่อค้นหาแหล่งพลังงานใหม่ๆ มาทดแทนและตอบสนองความต้องการซึ่งพลังงานนั้นคือ พลังงานแสงอาทิตย์ เป็นพลังงานที่สามารถใช้ได้ในทุกๆ ที่เป็นพลังงานที่สะอาดและไม่เป็นผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมในธรรมชาติ

งานวิจัยและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์จากสารกึ่งตัวนำ ในกลุ่ม II-VI และ I-III-VI₂ เช่น CdTe, CdS, CuInSe₂ และ CuInGaSe₂ ได้มีการวิจัยกันอย่างกว้างขวางทั้งในประเทศสหรัฐอเมริกา ยุโรป และ ญี่ปุ่น เป็นต้น ปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ที่โดดเด่นและน่าสนใจมากคือเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหัวต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งประดิษฐ์ขึ้นเป็นครั้งแรกในปี พ.ศ.2515 โดยบอนเนต (Bonnet) และราเบนโฮสต์ (Rabenhorst) ซึ่งมีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าประมาณ 5-6 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องมาจนถึงปัจจุบันซึ่งประสิทธิภาพสูงถึง 16.5 เปอร์เซ็นต์ ในกระบวนการประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe อะตอมของธาตุ S จะแพร่เข้าสู่ชั้นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่บริเวณรอยต่อและอะตอมธาตุ Te จะแพร่เข้าสู่ชั้นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ด้วยเหมือนกัน จนกระทั่งเกิดเป็นชั้นต่างๆ ของอัลลอยด์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ขึ้นที่บริเวณรอยต่อ อัลลอยด์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} นี้จะเป็นปัจจัยที่สำคัญอีกอันหนึ่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ความหนาของชั้นอัลลอยด์นี้จะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการประดิษฐ์รอยต่อ

ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} สามารถเกิดเป็นสารละลายของแข็งตลอดช่วงของสัดส่วนโมล ($0 \leq x \leq 1$) เมื่อ $x < 0.2$ จะมีโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ แต่เมื่อ $x > 0.8$ จะมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเวริทไซต์ สำหรับ x ที่อยู่ระหว่าง 0.2 ถึง 0.8 จะมีโครงสร้างผลึกทั้งแบบซิงค์เบลนด์และแบบเวริทไซต์ผสมกันอยู่ (ฐิตินัย, 2556; Adachi, 2005-2009) และเกรนมีขนาดเล็กมากอยู่ในระดับไม่กี่สิบนานาเมตร แต่ขนาดของเกรนสามารถเพิ่มขึ้นได้เมื่อมีการแอนนیلที่อุณหภูมิที่เหมาะสม ส่วนค่าช่องว่างแถบพลังงานจะสัมพันธ์กับสัดส่วนโมล (x) ในแบบสมการกำลังสอง (quadratic equation) กล่าวคือช่องว่างแถบพลังงานจะมีค่าต่ำสุดที่ $x \approx 0.2$ แต่เมื่อ $x > 0.2$ แล้วช่องว่างแถบพลังงานจะมีค่าเพิ่มขึ้น และอุณหภูมิแอนนิลจะมีผลอย่างมากต่อโครงสร้างผลึกและสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} สามารถเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่ง

ตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ได้หลายวิธีเช่น การอบสารละลายเคมี การเตรียมด้วยเลเซอร์แบบพัลส์ การเตรียมด้วยการระเหยสารด้วยความร้อน และการเตรียมด้วยลำอิเล็กตรอน เป็นต้น การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศมีข้อดีคือ สามารถควบคุมอัตราการเคลือบฟิล์มบางได้ดี สามารถควบคุมปริมาณสารตั้งต้นให้สิ้นเปลืองน้อยที่สุดได้ง่าย สามารถควบคุมปริมาณสารเจือได้ง่าย และสามารถหลีกเลี่ยงการเกิดปฏิกิริยาเคมีกับอะตอมออกซิเจนได้ดี อีกทั้งระบบสุญญากาศเป็นอุปกรณ์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายอยู่แล้วในอุตสาหกรรมการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ (ฐิตินัย, 2556)

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะทำการประดิษฐ์ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) โดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด โดยใช้สารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก CdS และ CdTe ที่มีความบริสุทธิ์สูง 99.99 เปอร์เซ็นต์ โดยเลือกอุณหภูมิของสารตั้งต้นและอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับที่เหมาะสม ตรวจสอบโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ด้วยวิธีเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ตรวจสอบผิวหน้าของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดขั้นต่อไปคือศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบาง CdS_xTe_{1-x} โดยการวัดการส่งผ่านแสงเพื่อคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงานและศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดความต้านทานแผ่นขณะที่ไม่มีการฉายแสงและมีการฉายแสงจากหลอดฮาโลเจนที่มีสเปกตรัมคล้ายแสงอาทิตย์ เพื่อคำนวณค่าการตอบสนองต่อแสงอาทิตย์ (photosensitivity) รวมทั้งวัดความต้านทานแผ่นที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิเพื่อหาค่าพลังงานกระตุ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาวิธีการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} เมื่อ ($0 \leq x \leq 1.0$) โดยที่มีค่าสัดส่วนผสมของโมลอะตอม (x) = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 ตามลำดับ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดในระบบสุญญากาศ จากสารตั้งต้นเป็นผงผลึกของสารประกอบ CdS และ CdTe ที่มีความบริสุทธิ์สูงถึง 99.9999 เปอร์เซ็นต์
2. เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคโดยการสังเกตผิวหน้าของฟิล์มบางและขนาดของเกรนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
3. เพื่อศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางที่เตรียมได้ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์
4. เพื่อศึกษาสมบัติการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานและคำนวณหาช่องว่างแถบพลังงาน
5. เพื่อศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางที่เตรียมได้ โดยการวัดความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางด้วยวิธีสองขั้วที่อุณหภูมิห้องทั้งในขณะที่ไม่มีการฉายแสงและมีการฉายแสง นอกจากนี้ยังทำ

การวัดความต้านทานที่อุณหภูมิสูงในช่วง 50 – 350 องศาเซลเซียส เพื่อหาค่าพลังงานกระตุ้น (activation energy)

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} เมื่อ $(0 \leq x \leq 1.0)$ โดยที่มีค่าสัดส่วนผสมของโมลอะตอม $(x) = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ และ 1.0 ตามลำดับ ลงบนแผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดในระบบสุญญากาศจากสารตั้งต้นที่เป็นผงของสารประกอบ CdS และ $CdTe$ ที่มีความบริสุทธิ์สูงถึง 99.999 เปอร์เซ็นต์ แล้วนำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่เตรียมไปศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ ได้แก่ การศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค ตลอดจนศึกษาสมบัติการส่งผ่านแสงและสมบัติเชิงไฟฟ้า เพื่อนำไปประยุกต์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ การศึกษาและวิจัยจะดำเนินการศึกษาวิจัยที่ห้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุโฟโตนิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ระยะเวลาในการศึกษาวิจัย 10 เดือน เริ่มตั้งแต่ พฤษภาคม พ.ศ.2556 จนถึง กุมภาพันธ์ พ.ศ.2557

1.4 ขั้นตอนการดำเนินการ

1. ศึกษาและค้นคว้าหาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด
2. ทำการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} เมื่อ $(0 \leq x \leq 1.0)$ โดยที่มีค่าสัดส่วนผสมของโมลอะตอม $(x) = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ และ 1.0 ตามลำดับ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด จากสารตั้งต้นเป็นผงผลึกของสารประกอบ CdS และ $CdTe$ ที่มีความบริสุทธิ์สูงถึง 99.999 เปอร์เซ็นต์
3. ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางที่เตรียมได้ โดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์
4. ศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
5. ศึกษาสมบัติการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางที่เตรียมได้เพื่อหาขนาดของช่องว่างแถบพลังงานด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์
6. ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางที่เตรียมได้ โดยการวัดความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางด้วยวิธีสองขั้วที่อุณหภูมิห้อง ทั้งในขณะที่ไม่มีการฉายแสงและมีการฉายแสง นอกจากนี้ยังทำการวัดความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 50 – 350 องศาเซลเซียส เพื่อหาค่าพลังงานกระตุ้น (activation energy)

7. สรุปและวิเคราะห์ผลจากการศึกษาของฟิล์มบางที่เตรียมได้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้ทราบถึงวิธีการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} เมื่อ $(0 \leq x \leq 1)$ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด
2. ทำให้ทราบถึงอิทธิพลของอะตอมของธาตุ S ที่เข้าแทนที่อะตอมของธาตุ Te ในโครงผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่มีต่อสมบัติทางแสงและทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} เมื่อ $(0 \leq x \leq 1)$
3. ทำให้ทราบสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} เมื่อ $(0 \leq x \leq 1)$ ว่ามีความเหมาะสมมากน้อยเพียงใด ในการนำไปประยุกต์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์

บทที่ 2

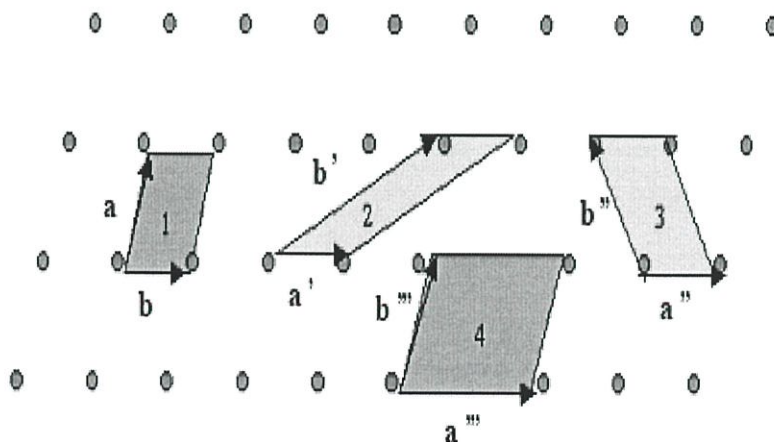
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเรื่องของลักษณะของโครงสร้างผลึก (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2531; งามนิตย์, 2545; จูตินัย, 2549; จูตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; จูตินัย, 2551)

ในทางผลึกวิทยาสามารถแบ่งสสารและวัสดุที่อยู่ในสภาพของแข็งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ ตามการจัดเรียงตัวของอะตอม ได้แก่ วัสดุที่เป็นผลึก (crystalline materials) และวัสดุที่เป็อะมอร์ฟัส (amorphous materials) ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงวัสดุที่เป็นผลึกเท่านั้น

2.1.1 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ

ผลึกของสารเกิดจากการที่อะตอมหรือโมเลกุลของสารชนิดนั้นมารวมกันอยู่เป็นจำนวนมากโดยระยะห่างระหว่างอะตอมมีค่าคงที่และมีการจัดเรียงตัวกันเป็นระบบแบบรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอนเป็นระเบียบอย่างต่อเนื่องภายในหนึ่งหน่วยเซลล์ของผลึกอาจประกอบด้วยอะตอมของธาตุเพียงอะตอมเดียวไปจนถึงหลายๆ อะตอมหรือหลายๆ โมเลกุล เซลล์ที่มีปริมาตรเล็กที่สุดที่สามารถใช้เป็นตัวแทนของผลึกนั้นเรียกว่า หน่วยเซลล์ (unit cell) กล่าวคือถ้าเอาหน่วยเซลล์นี้มาเรียงต่อกันก็จะได้ผลึกขึ้นมา และเรียกตำแหน่งต่างๆ ของอะตอมในระบบสามมิติว่า โครงสร้างผลึกหรือ แลตทิซ (lattice) ในทางทฤษฎีการกำหนดหน่วยเซลล์จะทำได้ไม่จำกัดแต่ตามปกติจะเลือกหน่วยเล็กที่สุด ที่เป็นไปได้ และมีสมมาตรค่อนข้างสูง ตัวอย่างการเลือกหน่วยเซลล์ใน โครงสร้างผลึก 2 มิติ ดังรูปที่ 2.1 ในระบบสองมิติพารามิเตอร์ของโครงสร้างผลึก ได้แก่ เวกเตอร์ \vec{a} และ \vec{b} และ มุม γ ซึ่งเป็นมุมระหว่าง เวกเตอร์ทั้งสอง ทั้งนี้ชนิดของโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกันที่เป็นไปได้มีเพียงห้าแบบดังตารางที่ 2.1



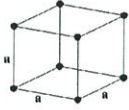
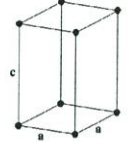
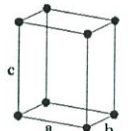
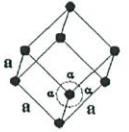
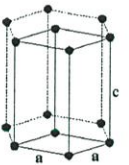
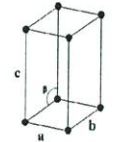
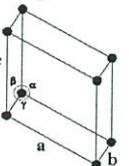
รูปที่ 2.1 หน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ

ตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์ของหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ

ชนิดของโครงผลึกสองมิติ	ค่าคงที่ของ โครงผลึก	มุม (องศา)
สี่เหลี่ยมจัตุรัส (square)	$a=b$	$\gamma=90$
สี่เหลี่ยมผืนผ้า (rectangle)	$a \neq b$	$\gamma=90$
สี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบบอดีเซนเตอร์ (body-centered rectangle)	$a \neq b$	$\gamma=90$
สี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน 60 องศา (60° rhombus)	$a=b$	$\gamma=90$
สี่เหลี่ยมด้านขนานทั่วไป (general parallelogram)	$a \neq b$	ไม่มีข้อกำหนด

ในระบบ 3 มิติพารามิเตอร์ของโครงผลึก ได้แก่ ขนาดของเวกเตอร์ a , b และ c และ มุม α , β และ γ ซึ่งเป็นมุมระหว่างเวกเตอร์ต่างๆ ดังตัวอย่างในตารางที่ 2.2 ทั้งนี้สามารถจัดแบ่งรูปแบบของโครงสร้างผลึกขึ้นมาโดยสามารถแบ่งออกได้เป็นสิบสี่แบบในสามมิติ ซึ่งจัดได้เป็นเจ็ดกลุ่ม คือ ไตรคลินิก (triclinic) , โมโนคลินิก (monoclinic) , ออร์โธโรมบิก (orthorhombic) , เตตระโกนัล (tetragonal) , คิวบิก (cubic) , รอมโบฮีดรัล (rhombohedral) และเฮกซะโกนัล (hexagonal)

ตารางที่ 2.2 ระบบผลึกทั้งเจ็ดแบบในระบบสามมิติ

ระบบผลึก	ค่าคงที่ของ โครงผลึกและมุมผลึก	รูปทรงเรขาคณิตของหน่วยเซลล์
คิวบิก (cubic)	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
เตตระโกนัล (tetragonal)	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
ออร์โธโรมบิก (orthorhombic)	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
รอมโบฮีดรัล (rhombohedral)	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	
เฮกซะโกนัล (hexagonal)	$a = b \neq c$ $\alpha = \gamma = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$	
โมนอคลินิก (monoclinic)	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$	
ไตรคลินิก (triclinic)	$a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	

การระบุตำแหน่งทิศทางและระนาบของโครงสร้างผลึก

เนื่องจากผลึกมีสมบัติที่ขึ้นอยู่กับทิศทาง ดังนั้นจึงต้องระบุแน่นอนว่ากำลังศึกษาลักษณะ ส่วนใดของผลึกอยู่ซึ่งการระบุลักษณะที่ว่าจะกล่าวถึงตำแหน่ง, ทิศทางและระนาบของผลึกที่กำลังศึกษาอยู่นั้น

หลักเกณฑ์ในการระบุลักษณะพื้นฐานของผลึก

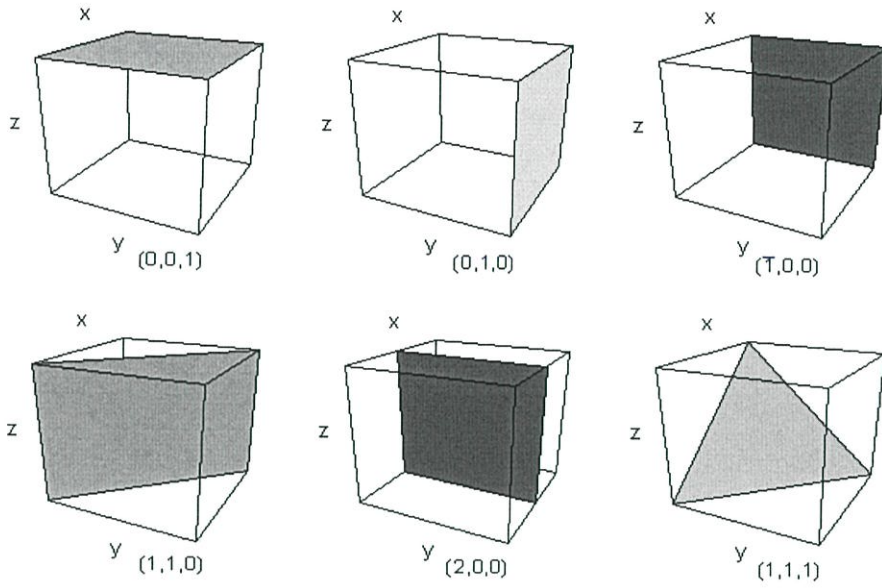
การระบุตำแหน่ง

1. ในกรณีทั่วไปจะเขียนเป็น (x,y,z) ให้สังเกตเครื่องหมาย “ , ” ซึ่งคั่นแต่ละค่าตัวอย่างจุด $(1,2,3)$ หมายความว่า เป็นตำแหน่งอยู่ที่พิกัด $x=1, y=2$ และ $z=3$ การบอกตำแหน่ง
2. การระบุทิศทางในกรณีทั่วไปจะเขียนเป็น $[u \ v \ w]$ ให้สังเกตว่าใช้วงเล็บก้ามปู และไม่มีเครื่องหมาย “ , ” คั่นระหว่างค่าแต่ละค่า ถ้าเป็นทิศทางที่เป็นลบก็จะใส่เครื่องหมาย “ - ” หรือ บาร์(bar) ไว้บนตัวเลขนั้นๆ เช่น ทิศทาง $[\bar{1}2\bar{1}]$ แสดงว่าในแนวแกน z มีค่าเป็นลบ
3. การระบุชื่อระนาบของผลึกจะใช้อักษร $(h \ k \ l)$ ให้สังเกตการใช้วงเล็บ และจะไม่มีชื่อ 2 ซึ่งเครื่องหมาย “ , ” คั่นโดยที่หากระนาบใดตัดแกนลบก็ให้ใส่เครื่องหมาย “ - ” หรือบาร์ข้างบนตัวเลขดัชนีมิลเลอร์นั้น

ค่า hkl เรียกว่า ดัชนีมิลเลอร์ (miller indices) ชื่อระนาบของผลึกเป็นสิ่งที่สำคัญที่สุดอีกประการหนึ่งในการศึกษาผลึก เพราะในแต่ละระนาบจะประกอบไปด้วยอะตอม ไอออน หรือ โมเลกุล เรียงตัวกันอยู่บนระนาบนั้น อาจกล่าวได้ว่าระนาบแต่ละระนาบจะมีความแตกต่างกันเช่นเดียวกับทิศทางการบอกชื่อระนาบหรือดัชนีมิลเลอร์นั้นทำได้โดย

1. กำหนดจุดที่ระนาบนั้นตัดแกนพิกัดฉากขึ้นมาเป็น (x,y,z) โดยที่หากระนาบตัดแกนใดให้ถือว่าระนาบนั้นตัดแกนนั้นที่ระยะอนันต์(∞) และหากระนาบใดตัดแกนลบ (-) ก็ให้ใส่เครื่องหมายบาร์ (-) ข้างบนตัวเลขดัชนีนั้น
2. ทำค่าจุดตัดต่างๆที่ได้จากข้อ 1 ทั้งหมดให้เป็นเศษส่วนกลับ
3. ทำให้เป็นเลขจำนวนเต็มโดยการหาค่าผลคูณร่วมน้อย (ค.ร.น) ของค่าเศษส่วนที่ได้จากข้อ 2 ซึ่งก็จะได้ค่าตัวเลขดัชนีมิลเลอร์ (hkl) ตามลำดับ

ดังแสดงในรูปที่ 2.2 และ ตารางที่ 2.3 ซึ่งสรุปความสัมพันธ์ระหว่างระนาบต่างๆกับระยะตัดแกนอ้างอิง



รูปที่ 2.2 การบอกชื่อระนาบต่างๆของผลึก

ตารางที่ 2.3 ความสัมพันธ์ของดัชนีมิลเลอร์ (hkl) และจุดตัดแกนผลึก (x,y,z)

จุดตัดแกนผลึก (x,y,z)	ส่วนกลับของจุดตัดบน แกนผลึก $\frac{1}{x}, \frac{1}{y}, \frac{1}{z}$	ชื่อระนาบหรือดัชนีมิลเลอร์ (hkl)
$\infty, 1, \infty$	$\frac{1}{\infty}, \frac{1}{1}, \frac{1}{\infty}$	(010)
-1, 1, 1	$\frac{1}{-1}, \frac{1}{1}, \frac{1}{1}$	($\bar{1}$ 11)
-1, -1, -1	$\frac{1}{-1}, \frac{1}{-1}, \frac{1}{-1}$	($\bar{1}\bar{1}\bar{1}$)
0.5, 0.5, 0.25	$\frac{1}{0.5}, \frac{1}{0.5}, \frac{1}{0.25}$	(224)
0.5, 0.5, ∞	$\frac{1}{0.5}, \frac{1}{0.5}, \frac{1}{\infty}$	(220)

มีข้อสังเกตที่ควรรู้เกี่ยวกับดัชนีมิลเลอร์ที่ใช้บอกชื่อระนาบของผลึกเพิ่มเติมดังนี้

สำหรับระบบเฮกซะโกนัลจะระบุดัชนีมิลเลอร์ที่ใช้บอกชื่อระนาบที่ต่างไปเป็น (hkl) โดยที่มีกฎเกณฑ์ว่าดัชนีตัวที่สาม (หรือ i) ซึ่งเพิ่มเข้ามานั้นจะมีความสัมพันธ์กับดัชนีสองตัวแรก (h และ k) ดังนี้

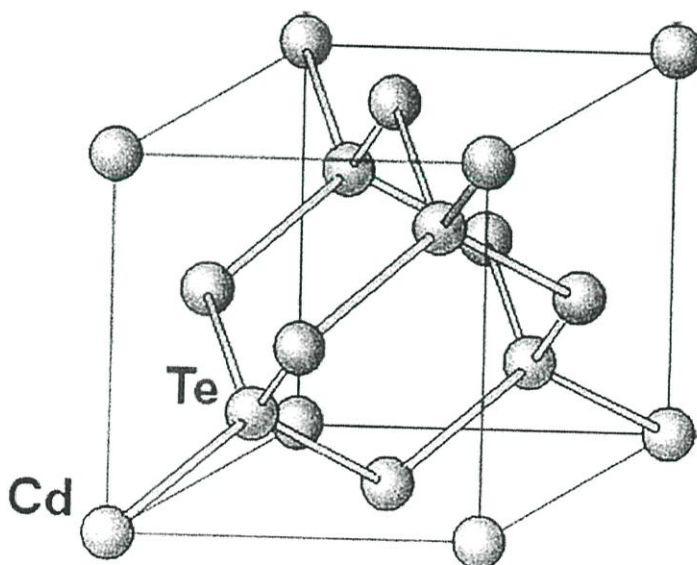
$$l = -(h+k) \quad (2.1)$$

เช่น ระนาบ (110) จะเรียกว่า $(11\bar{2}0)$ ในระบบเฮกซะโกนัล

เฉพาะระบบลูกบาศก์เท่านั้นที่จะพบว่าทิศทาง $[hkl]$ จะตั้งฉากกับระนาบที่มีค่าตัวเลขดัชนีเหมือนกันนั่นคือ ระนาบ (hkl) ตัวอย่างเช่น ทิศทาง $[102]$ จะตั้งฉากกับระนาบ (102)

2.1.2 โครงสร้างผลึกแคดเมียมเทลลูไรด์

ผลึกแคดเมียมเทลลูไรด์เป็นสารประกอบกึ่งตัวนำหมู่ 2-6 มีโครงสร้างแบบซิงค์แบลนด์มีค่าคงตัวของโครงสร้างผลึกเท่ากับ 6.481 อังสตรอม และมีค่าความหนา 6.2 กรัมต่อลูกบาศเซนติเมตร มีจุดหลอมเหลว 1040 องศาเซลเซียส เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 1.50 อิเล็กตรอนโวลต์ มีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงในย่านความยาวคลื่นแสงที่ตามองเห็น สำหรับแคดเมียมเทลลูไรด์ที่มีความหนาในระดับไมครอนสามารถดูดกลืนพลังงานโฟตอนได้มากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ผลึกแคดเมียมเทลลูไรด์เสถียรที่อุณหภูมิสูงกว่า 500 องศาเซลเซียส ดังนั้นผลึกแคดเมียมเทลลูไรด์จึงเหมาะกับการนำมาใช้เป็นชั้นดูดกลืนพลังงานโฟตอนในเซลล์แสงอาทิตย์ ดังรูปที่ 2.3



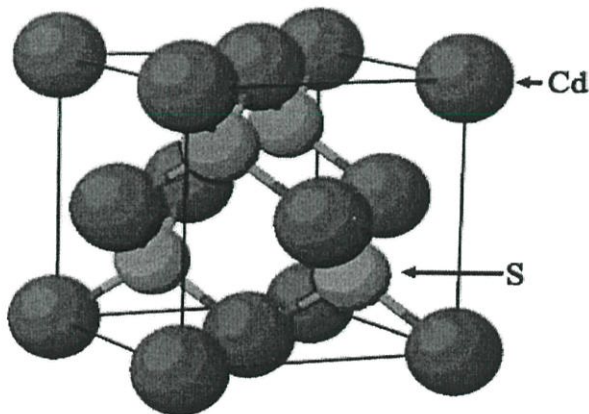
รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างแบบซิงค์แบลนด์ของผลึกแคดเมียมเทลลูไรด์

2.1.3 โครงสร้างผลึกแคะเมียมซัลไฟด์

โครงสร้างผลึก คือ ตำแหน่งที่เป็นอยู่ของเบสิส (basis) ในระบบ 3 มิติ ส่วนเบสิส คืออะตอมหรือกลุ่มของอะตอมที่อยู่ภายใน โครงสร้างผลึกซึ่งจากการศึกษาพบว่าโครงสร้างผลึกของแคะเมียมซัลไฟด์จะมีลักษณะโครงสร้างอยู่ 2 แบบ คือ แบบซิงค์เบลนด์ (zincblende) และแบบเวิร์ทไซท์ (wurtzite)

2.1.3.1 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ (zincblende structure)

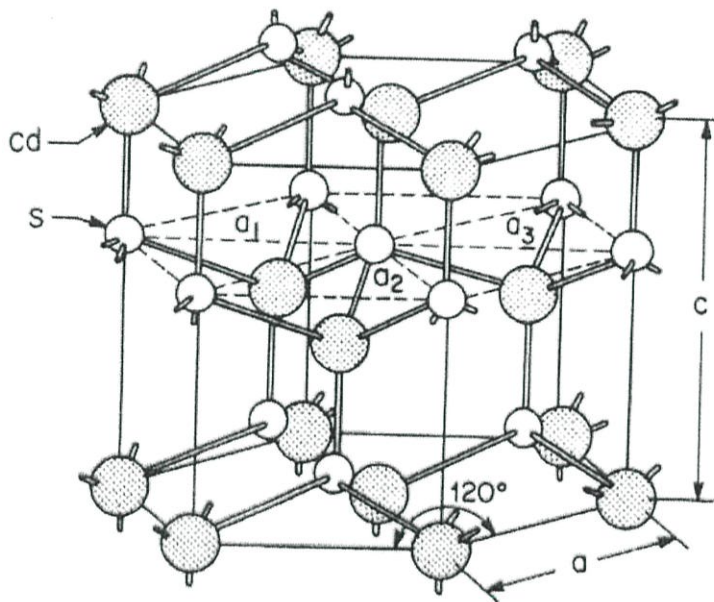
โครงสร้างผลึกแบบนี้มักพบในสารกึ่งตัวนำที่ประกอบด้วยอะตอมของธาตุสองชนิดหรือเรียกว่าเป็นสารประกอบกึ่งตัวนำเชิงคู่ (binary compound semiconductor) ได้แก่ สารประกอบสารกึ่งตัวนำในกลุ่ม 3-5 เช่น GaAs และ InSb และสารประกอบกึ่งตัวนำในกลุ่ม 2-6 เช่น ZnSe, ZnS เป็นต้น โครงสร้างแบบนี้มีลักษณะคล้ายโครงสร้างผลึกแบบเพชร คือ อาจพิจารณาว่าเป็นโครงสร้างผลึกแบบเฟซเซนเตอร์คิวบิกสองโครงซ้อนกันอยู่แต่โครงหนึ่งเป็นธาตุหนึ่ง เป็นธาตุหมู่ 2-6 (หรือ 3-5) ในหนึ่งหน่วยเซลล์ประกอบด้วยอะตอมสองชนิดแต่ละชนิดมี 4 อะตอม เช่น ในสารกึ่งตัวนำ CdS อะตอมของธาตุ Cd จะอยู่ที่ตำแหน่ง (000) , $(0\frac{1}{2}\frac{1}{2})$, $(\frac{1}{2}0\frac{1}{2})$ และ $(\frac{1}{2}\frac{1}{2}0)$ ส่วนตำแหน่งของอะตอมของธาตุ S จะอยู่ที่ $(\frac{1}{4}\frac{1}{4}\frac{1}{4})$, $(\frac{1}{4}\frac{3}{4}\frac{3}{4})$, $(\frac{3}{4}\frac{1}{4}\frac{3}{4})$ และ $(\frac{3}{4}\frac{3}{4}\frac{1}{4})$ สารที่มีโครงสร้างผลึกแบบนี้ ได้แก่ ZnS, CuCl, AgI, CuF, SiC และ CdS เป็นต้น ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีความสำคัญสำหรับนำมาประยุกต์เพื่อประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เชิงแสง



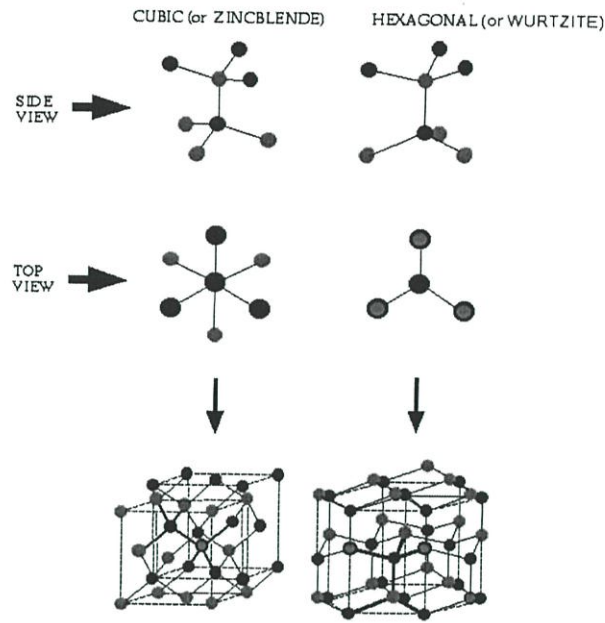
รูปที่ 2.4 การจัดเรียงตัวของอะตอมของผลึกแคะเมียมซัลไฟด์

2.1.3.2 โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ตไซต์ (wurtzite Structure)

โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ตไซต์จัดอยู่ในระบบโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลเกิดจากการนำโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลที่มีอะตอมของธาตุต่างๆอยู่สองชนิดวางซ้อนเหลื่อมกันเป็นระยะ $5/8$ ตามแนวแกน c (c -axis) หนึ่งหน่วยเซลล์จะมี 8 อะตอม มีอะตอมเพื่อนบ้านอยู่ 4 อะตอมมีพันธะเคมีของโมเลกุลเป็นแบบพันธะเตตระฮีดรอน และมีพันธะเคมีระหว่างอะตอมเป็นแบบโควาเลนต์ ดังนั้นจึงมีการจัดเรียงระนาบของอะตอมคล้ายกับโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์แต่จะมีความแตกต่างกัน คือ ในโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ตไซต์จะมีการจัดเรียงระนาบของพันธะเตตระฮีดรอน เป็นแบบ ABAB... หรือ 0101... ส่วนในโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์จะมีการจัดเรียงระนาบของพันธะเตตระฮีดรอนแบบ ABCABC... หรือ 012012 ... สารที่มีโครงสร้างผลึกแบบนี้ได้แก่ CdS, ZnS เป็นต้น



รูปที่ 2.5 โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ตไซต์ของผลึกแคดเมียมซัลไฟด์



รูปที่ 2.6 แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์กับแบบซิงค์เบลนด์

2.2 การระเหิดในระยะประชิด (Close-Spaced Sublimation :CSS) (ฐิตินัย, 2556)

การระเหิดในระยะประชิดเป็นกระบวนการเกิดก้อนเนื้อผลึก (bulk) หรือฟิล์มบางของสารตั้งต้น ที่กลายเป็นไอแล้วควบแน่นบนฐานรองรับที่วางอยู่บนสารตั้งต้นในระบบปิดในกระบวนการระเหิดในระยะประชิดนี้สามารถให้อัตราการเคลือบต่ำ ในกระบวนการระเหิดในระยะประชิดนี้พิจารณาสมดุลปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารตั้งต้นและฐานรองรับดังสมการ



จากกฎการคงตัวของมวล (law of mass action) พิจารณาภาวะสมดุลเชิงความร้อน

$$P\left(\frac{\text{Cd}}{\text{CdTe}}\right) P^{\frac{1}{2}}\left(\frac{\text{Te}_2}{\text{CdTe}}\right) = K_p(T) \quad (2.3)$$

เมื่อ P คือ ความดัน

$K_p(T)$ คือ ค่าคงตัวของปฏิกิริยาที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อนที่อุณหภูมิใดๆ ซึ่งค่าคงตัวของปฏิกิริยาที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน $K_p(T)$ มีความสัมพันธ์ตามสมการ

$$K_p(T) = \exp\left[\frac{-\Delta G}{RT}\right] \quad (2.4)$$

เมื่อ $\Delta G(T)$ คือ พลังงานอิสระของกิบส์

สำหรับแคดเมียมเทลลูไรด์ $\Delta G_{\text{CdTe}} = +68.64 - 44.94 \times 10^{-3} T$ กิโลแคลอรีต่อโมล

เมื่อพิจารณาค่าคงตัวของปฏิกิริยาที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน $K_p(T)$ ของสารตั้งต้นที่มีอุณหภูมิ (T_{SO}) และฐานรองรับที่มีอุณหภูมิ (T_{sub}) มีความสัมพันธ์ตามสมการ

$$K_p(T_{\text{SO}}) = P\left(\frac{\text{Cd}}{\text{CdTe}}\right)(T_{\text{SO}}) P^{\frac{1}{2}}\left(\frac{\text{Te}_2}{\text{CdTe}}\right)(T_{\text{SO}}) = \exp\left[\frac{-\Delta G}{RT_{\text{SO}}}\right] \quad (2.5)$$

$$K_p(T_{\text{sub}}) = P\left(\frac{\text{Cd}}{\text{CdTe}}\right)(T_{\text{sub}}) P^{\frac{1}{2}}\left(\frac{\text{Te}_2}{\text{CdTe}}\right)(T_{\text{sub}}) = \exp\left[\frac{-\Delta G}{RT_{\text{Sub}}}\right] \quad (2.6)$$

ฟลักซ์ของการแพร่ของอะตอมของธาตุ Cd และโมเลกุลของแก๊ส Te_2 ระหว่างสารตั้งต้นและฐานรองรับซึ่งวางห่างกันเป็นระยะ d ซึ่งอธิบายได้ด้วยกฎข้อ 1 ของ Fick (Fick's first law)

$$J_{\text{Cd},j} = \frac{D_{\text{Cd},j}}{Rd} \left(\frac{P_{\text{Cd}}(T_{\text{SO}})}{T_{\text{SO}}} - \frac{P_{\text{Cd}}(T_{\text{sub}})}{T_{\text{sub}}} \right) \equiv J \quad (2.7)$$

$$J_{\text{Te}_2,j} = \frac{D_{\text{Te}_2,j}}{Rd} \left(\frac{P_{\text{Te}_2}(T_{\text{SO}})}{T_{\text{SO}}} - \frac{P_{\text{Te}_2}(T_{\text{sub}})}{T_{\text{sub}}} \right) \equiv \frac{J}{2} \quad (2.8)$$

เมื่อ $J_{\text{Cd},j}$ คือ ฟลักซ์ของการแพร่ของอะตอมของธาตุ Cd ในแก๊ส j

$J_{\text{Te}_2,j}$ คือ ฟลักซ์ของการแพร่ของโมเลกุลของแก๊ส Te_2 ในแก๊ส j

J คือ ฟลักซ์ของการแพร่

$D_{i,j}$ คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมของธาตุ i ในแก๊ส j

ซึ่งในกรณีนี้หากโมเลกุลและขนาดของแก๊ส Te_2 มีค่ามากกว่า Cd ดังนั้นจะได้สัมประสิทธิ์การแพร่ $D_{Cd,j} = 1.85 D_{Te_2,j}$ ในบรรยากาศของแก๊ส H_2, He หรือ Ar) จากสมการการส่งผ่าน CdTe ที่อุณหภูมิของสารตั้งต้น (T_{SO}) มีค่าต่างกัน $T_{SO} - T_{sub} = 70$ องศาเซลเซียส จะได้ $P_{Cd}(T_{SO}) \gg P_{Cd}(T_{sub})$ และ $P_{Te_2}(T_{SO}) \gg P_{Te_2}(T_{sub})$ ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$\frac{P_{Cd}(T_{SO})}{P_{Te_2}(T_{SO})} = \frac{2D_{Te_2,j}}{D_{Cd,j}} = 1.1 \quad (2.9)$$

หมายเหตุ ค่าอุดมคติอัตราส่วนเท่ากับ 1

ดังนั้นจากสมการ (2.5),(2.6),(2.7),(2.8),(2.9) สามารถคำนวณหา J และอัตราการปลูกฟิล์มบาง (growth rate) ซึ่งมีความสัมพันธ์ตามสมการ

$$GR \left(\frac{\mu m}{min} \right) = \frac{JxMx 60 x 10^4}{\rho} \quad (2.10)$$

เมื่อ J คือ ฟลักซ์ของการแพร่

M คือ มวลโมเลกุลของ CdTe

ρ คือ ความหนาแน่นของ CdTe

2.3 การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (Cullity, 1956; Kittel, 1971;

งามนิตย์, 2545; จูตินัย, 2549; จูตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; จูตินัย, 2551)

การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ โดยใช้รังสีเอกซ์ความยาวคลื่นเดี่ยวตกกระทบตัวอย่าง ซึ่งอาจเป็นผลึกเดี่ยวหรือผลึกพหุพันธ์ก็ได้ สารตัวอย่างจะหมุนไปเป็นมุม θ ในขณะที่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ รังสีเอกซ์จะเคลื่อนที่ไปเป็นมุม 2θ เพื่อให้การเลี้ยวเบนสอดคล้องกับกฎของแบรกก์

ในปี พ.ศ. 2455 (ค.ศ. 1912) W.H. Bragg และ W.L. Bragg ได้เสนอแนวคิดที่เราสามารถมองได้ว่าผลึกจัดเรียงตัวเป็นชั้น (layer) หรือระนาบ (plane) ของอะตอมซึ่งสามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบโดยมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน ทั้งนี้ลำคลื่นที่สะท้อนออกไปจากระนาบต่างๆดังกล่าว จะมีความเข้มสูงและแทรกสอดแบบเสริมกันถ้าหากความแตกต่างระหว่างทางเดิน ของคลื่นที่สะท้อนจากระนาบที่อยู่ข้างเคียง (path difference) มีค่าเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นที่ตกกระทบดังสมการ

$$2d_{hkl}\sin\theta = n\lambda \quad (2.11)$$

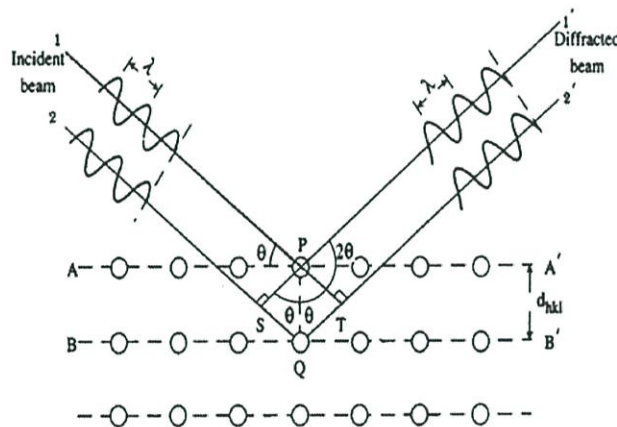
เมื่อ d_{hkl} คือ ระยะระหว่างระนาบ

θ คือ มุมของรังสีสะท้อนจากระนาบแบรกก์ของรังสีเอกซ์ ซึ่งจะเท่ากับมุมของรังสีตกกระทบ

N คือ ลำดับของการเลี้ยวเบน มีค่าตั้งแต่ 1, 2, 3,

λ คือ ความยาวคลื่น

ระนาบต่าง ๆ ของผลึกที่ก่อให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ต้องสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ เรียกว่าระนาบแบรกก์ (Bragg plane) และมุมที่รังสีสะท้อนทำกับแนวที่ขนานกับรังสีตกกระทบ เรียกว่ามุมเลี้ยวเบน (diffraction angle) ซึ่งมีค่าเป็นสองเท่าของมุมตกกระทบ (2θ) ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์

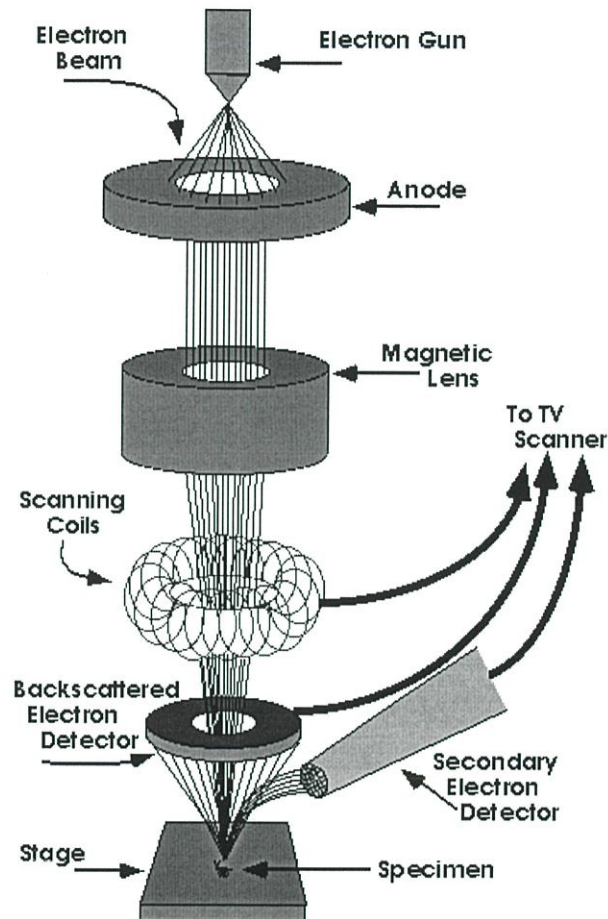
2.4 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Cullity,

1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; ฐิตินัย, 2551)

ในปี พ.ศ. 2478 แมก นอลล์ (Max Knoll) ได้คิดค้นหลักการ และวิธีการในการประดิษฐ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดขึ้น และต่อมาแมนเฟรด วอน อาเดนเน (Manfred Von Ardenne) ได้ประดิษฐ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเครื่องแรกสำเร็จในปี พ.ศ. 2481 โดยเครื่องมือที่ประดิษฐ์ได้นั้นยังมีกำลังขยายไม่สูงมากนัก ต่อมาในปี พ.ศ. 2498 ชาร์ลส์วิลเลียมเอ็ทลีย์ (Charles William Oatley) และทีมงานจากเคมบริดจ์ได้สร้างกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีความละเอียดสูงถึง 250 อังสตรอม

การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดดังแสดงในรูปที่ 2.7 เริ่มจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ซึ่งมีหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนจากไส้หลอด กลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จะถูกร่งด้วย

สนามไฟฟ้า พร้อมทั้งบังคับกลุ่มอิเล็กตรอนให้มีลักษณะเป็นลำ โดยลำอิเล็กตรอนจะกราดไปบนพื้นผิวของตัวอย่างโดยขดลวดสนามแม่เหล็กบนระนาบเอกซ์-วายเพื่อทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ อิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกตรวจจับ โดยเซนเซอร์ และแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าเพื่อส่งต่อไปให้ระบบสร้างภาพต่อไป



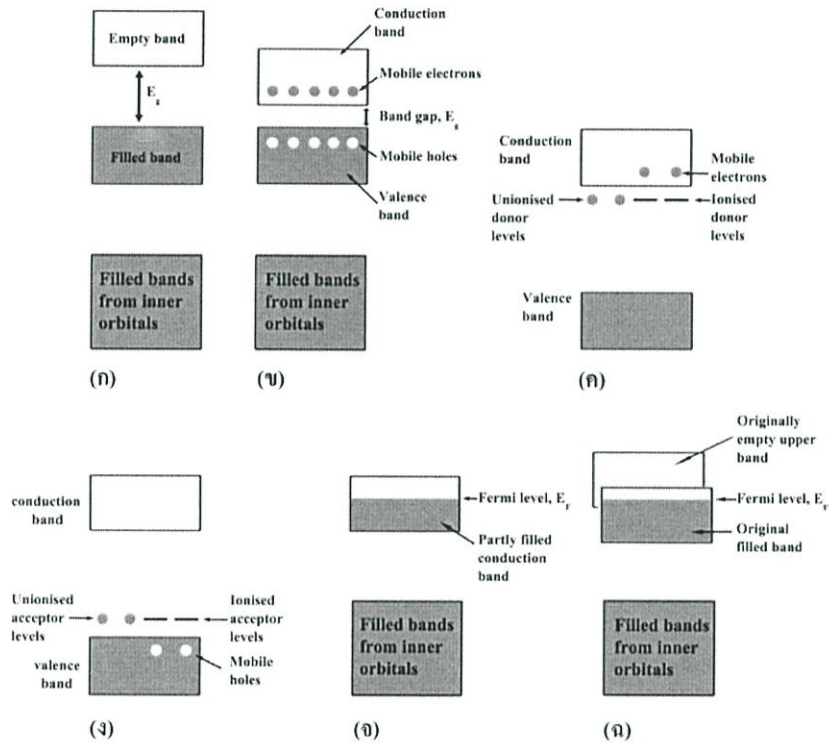
รูปที่ 2.8 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

2.5 สมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิศย์, 2545; จูตินัย, 2549; จูตินัย, 2550; งามนิศย์, 2551; จูตินัย, 2551)

เมื่อแสงตกกระทบกับสารกึ่งตัวนำพฤติกรรมทางแสงที่สังเกตได้ก็คือ การดูดกลืนการสะท้อน และการส่งผ่านของแสง จากผลของสมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ เราสามารถหาลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน (energy band) และขนาดค่าช่องว่างแถบพลังงาน (energy gap : E_g) ของสารกึ่งตัวนำได้โดยจะกล่าวถึงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำการส่งผ่านแสงและการคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงานตามลำดับ

2.5.1 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน (Kittel, 1971; งามนิทย์, 2545; จูตินัย, 2550)

ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานจะประกอบไปด้วยส่วนใหญ่ๆ 3 ส่วน คือ แถบนำ (conduction band) แถบวาเลนซ์ (valence band) และแถบพลังงานต้องห้าม (forbidden band หรือ forbidden region หรือ forbidden gap) และเรียกความกว้างของช่องว่างระหว่างแถบนำกับ แถบวาเลนซ์นั้นว่า ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (energy gap) โดยเราสามารถที่จะแบ่งประเภทของ วัสดุว่าเป็นฉนวน (insulator) โลหะหรือตัวนำ (metal or conductor) และสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) ได้โดยดูจากขนาดของช่องว่างแถบพลังงานที่แตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 2.6



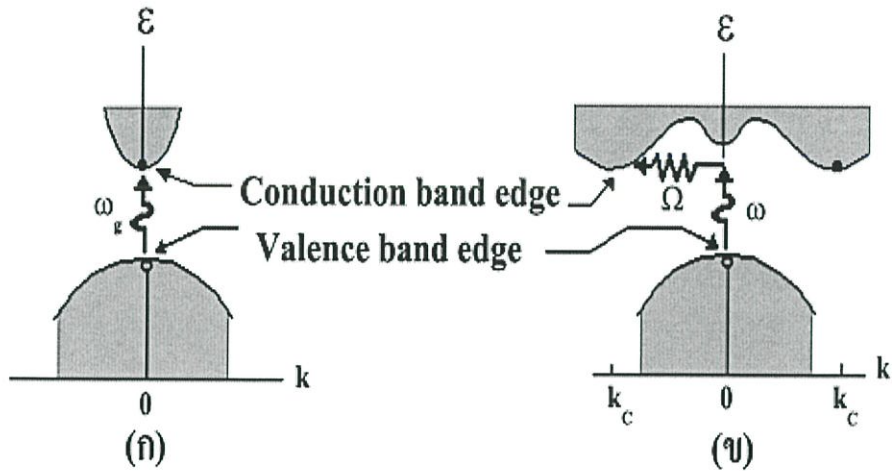
รูปที่ 2.9 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานอย่างง่ายของ

- ก. ฉนวน
- ข. สารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์
- ค. สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น
- ง. สารกึ่งตัวนำชนิดพี
- จ. โลหะ
- ฉ. สารกึ่งโลหะ

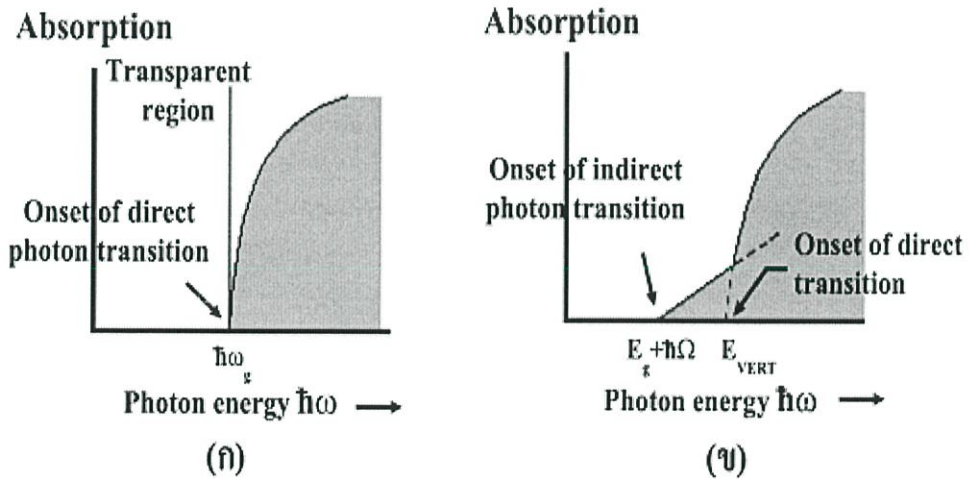
ในวัสดุที่เป็นฉนวนเมื่อดูจากแถบพลังงานจะเห็นได้ว่าขนาดช่องว่างแถบพลังงานจากขอบล่างสุดของแถบบาง(แถบนำ)ถึงขอบบนสุดของแถบเต็ม(แถบวาเลนซ์)มีขนาดกว้างมาก ประมาณได้ว่า $E_g \gg kT$ หรือมากกว่า 3 อิเล็กตรอน โวลต์ดังแสดงในรูปที่ 2.9(ก) การที่จะทำให้ วัสดุนำไฟฟ้าได้ต้องใส่พลังงานที่สูงมากเพื่อที่จะทำให้อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปยัง แถบนำได้ถ้าช่องว่างแถบพลังงานระหว่างแถบนำกับแถบวาเลนซ์มีขนาดเล็กพอที่อิเล็กตรอน

ในแถบวาเลนซ์เมื่อได้รับพลังงานความร้อนสามารถเคลื่อนย้ายขึ้นไปยังแถบนำ และทำให้วัสดุนี้ นำไฟฟ้าได้ เราจะเรียกสารชนิดนี้ว่า สารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ (intrinsic semiconductors) ดังแสดงในรูปที่ 2.9(ข) จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนย้ายขึ้นไปอยู่ในแถบนำแล้วจะเหลือที่ว่างไว้ ในแถบวาเลนซ์โดยจะมีสภาพทางไฟฟ้าเป็นบวก และจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงข้ามกับอิเล็กตรอนเมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า เราจะเรียกที่ว่างนี้ว่า โฮล และถ้าเราทำการเจืออะตอมของธาตุบางอย่าง ลงไปในสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์แล้ว อะตอมของสารเจือประพุดิตัวเป็นอะตอมผู้ให้ ก็จะทำให้เกิดระดับพลังงานผู้ให้ โดยให้อิเล็กตรอนกับแถบนำ เราจะเรียกลักษณะนี้ว่า สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductors) ดังแสดงในรูปที่ 2.9(ค) และถ้าอะตอมประพุดิตัวเป็นอะตอมผู้รับก็จะทำให้เกิดระดับพลังงานผู้รับ โดยทำการรับอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ เราจะเรียกลักษณะนี้ว่า สารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type semiconductors) ดังแสดงในรูปที่ 2.9(ง) สำหรับแถบพลังงานของวัสดุที่เป็นโลหะหรือตัวนำจะพบว่า มีอิเล็กตรอนเข้าไปอยู่ในแถบนำแล้ว บางส่วนรูปที่ 2.9(จ) และเรารู้ได้ว่า แถบวาเลนซ์กับแถบนำมีการซ้อนเหลื่อมกันอยู่ ทำให้สามารถนำไฟฟ้าได้ และในรูปที่ 2.9(ฉ) ถ้าขอบล่างของแถบว่างที่ $(n+1)$ ซ้อนเหลื่อมกับขอบสูงสุดของแถบที่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่ที่ n และระดับพลังงานเฟอร์มิอยู่ระหว่างแถบทั้งสอง อิเล็กตรอนก็จะสามารถไหลจากแถบเต็มไปยังด้านล่างของแถบว่างได้ เราจะเรียกลักษณะที่มีโครงสร้างแถบพลังงานแบบนี้ว่าเป็นสารกึ่งโลหะ ลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรงคือ อิเล็กตรอนได้รับพลังงานโฟตอนที่มีค่าเท่ากับขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ($E_g = h\nu$) อิเล็กตรอนจะดูดกลืนพลังงานโฟตอนนั้นและอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นจึงย้ายสถานะพลังงานทรานซิชั่นจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำกลายเป็นอิเล็กตรอนและโฮลอิสระโดยไม่มีการสูญเสียพลังงานให้แก่โครงสร้างผลึก คือ ไม่มีการสร้างหรือทำลายโฟนอน ดังแสดงในรูปที่ 2.10(ก) และเมื่อเขียนกราฟระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนจะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 2.11(ก) และลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงคือ โครงสร้างแถบพลังงานที่มีจุดต่ำสุดของแถบวาเลนซ์ไม่อยู่ที่ตำแหน่งเวกเตอร์คลื่นค่าเดียวกันหรืออยู่ที่ตำแหน่งโมเมนตัมของคลื่นไม่เท่ากัน ดังนั้นอิเล็กตรอนจะต้องได้รับพลังงานโฟนอนที่มีค่ามากกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ในกรณีนี้มีกระบวนการสร้างโฟนอนเกิดขึ้น ($E_g + h\Omega = h\nu$) เมื่อ Ω คือค่าความถี่เชิงมุมของพลังงานโฟนอน ซึ่งมีค่าน้อยกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงานหรือในกรณีที่มีการทำลายล้างโฟนอน ($E_g + h\Omega = h\nu$) นั่นคือเมื่ออิเล็กตรอนที่อยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นการย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำจะมีการปล่อยโฟนอน (emitted phonon) ที่มีความถี่เชิงมุม Ω มีเวกเตอร์คลื่น $K \cong k_c$ ออกมา จึงเกิดการสร้างโฟนอน ($E_g + h\Omega = h\nu$) และเกิดการสร้างอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ (E_{VERT}) ขึ้นมาในกระบวนการนี้ ดังแสดงในรูปที่ 2.10(ข) และเมื่อ

เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนจะได้ดังแสดงในรูปที่ 2.11(ข)



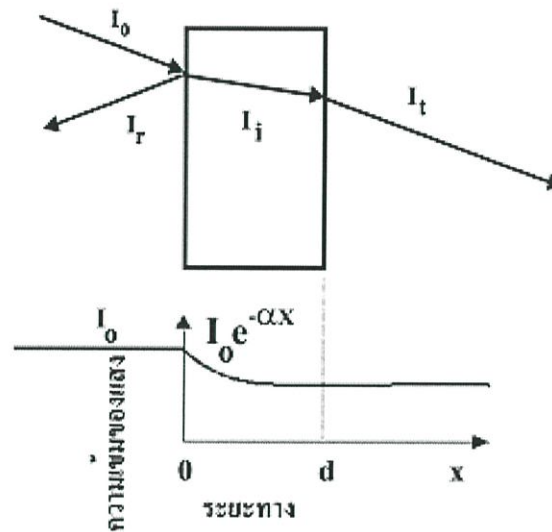
รูปที่ 2.10 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานและการย้ายสถานะของพลังงานอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ($T = 0$ เคลวิน)
 ก. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง
 ข. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ($T = 0$ เคลวิน)
 ก. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง
 ข. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงในกรณีที่เกิดกระบวนการสร้างโฟนอน

2.5.2 การส่งผ่านแสง (Kittel, 1971; งามนิศย์, 2545; จูตินัย, 2550)

การศึกษาวิธีวัดสเปกตรัมการสะท้อนและการส่งผ่านแสงนี้จะกล่าวถึงสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงและองค์ประกอบของการวัดสเปกตรัมการส่งผ่านแสงเมื่อแสงเดินทางไปกระทบฟิล์มบางแสงบางส่วนจะสะท้อนกลับที่ผิวของฟิล์มบาง บางส่วนของแสงจะเดินทางเข้าไปในแผ่นฟิล์มบางและถูกดูดกลืน ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.12 แผนภาพเมื่อแสงตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบาง

สัมประสิทธิ์การสะท้อนของแสงมีค่าเป็น

$$R = \frac{I_r}{I_0} \quad (2.12)$$

เมื่อ I_0	คือ	ความเข้มแสงตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบาง
I_r	คือ	ความเข้มแสงสะท้อนจากฟิล์มบาง
I_t	คือ	ความเข้มแสงส่งผ่านออกมาจากฟิล์มบาง
I_i	คือ	ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบาง
R	คือ	สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง
T	คือ	สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง
α	คือ	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง
d	คือ	ระยะทางที่แสงเดินทางในแผ่นฟิล์มบางหรือความหนาของฟิล์มบาง

เพราะฉะนั้น ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางมีค่า

$$I_i = I_0 - I_r = I_0 - RI_r = (1 - R)I_0 \quad (2.13)$$

เมื่อแสงนี้เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางจะถูกดูดกลืนทำให้ความเข้มแสงภายในแผ่นฟิล์มบางลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลตามระยะทาง ดังนั้นความเข้มแสงที่ส่งผ่านฟิล์มบางมีค่าเป็น

$$I_t = I_i \cdot e^{-\alpha d} = (1 - R)I_0 \cdot e^{-\alpha d} \quad (2.14)$$

ถ้าไม่มีการสะท้อนแสงที่ผิวด้านหลัง สัมประสิทธิ์การส่งผ่านของแสงจะมีค่าเท่ากับ

$$T = \frac{I_t}{I_0} = (1 - R)e^{-\alpha d} \quad (2.15)$$

2.5.3 การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ (งามนิตย์, 2543; จูตินัย, 2550; Kittel, 1971)

เมื่อแสงตกกระทบสารกึ่งตัวนำ ด้วยความเข้ม I_0 แสงบางส่วนจะส่งผ่านออกไปบางส่วนถูกดูดกลืนและส่วนที่เหลือจะสะท้อนกลับมา ดังแสดงในรูปที่ 2.12 โดย

$$T + A + R = 1 \quad (2.16)$$

เมื่อ T	คือ	สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง
A	คือ	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง
R	คือ	สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง

โดยที่
$$R = \frac{(n-1)^2 + K^2}{(n+1)^2 + K^2} \quad (2.17)$$

และค่าดัชนีหักเหของผลึก
$$n_c = n - iK \quad (2.18)$$

เมื่อ n	คือ	จำนวนจริง
K	คือ	จำนวนเชิงซ้อน เรียกว่า สัมประสิทธิ์การสูญเสียดังกล่าว (extinction coefficient)

โดยทั้ง n และ K เป็นฟังก์ชันของ λ

2.5.4 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง (งามนิษฐ์, 2543; จูตินัย, 2550; Kittel, 1971)

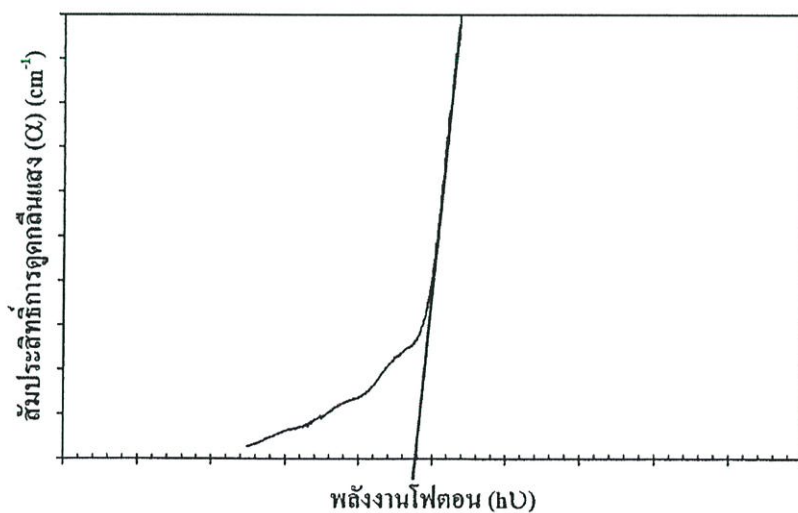
การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำเกิดจากการที่อิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากแสงที่มีพลังงานโฟตอนเท่ากับหรือมากกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานจากนั้นจึงย้ายสถานะพลังงานจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปสู่แถบนำสเปกตรัมการดูดกลืนแสงบริเวณที่พลังงานโฟตอนมีค่าน้อยจะมีลักษณะเป็นขอบแสดงถึงการลดลงของการดูดกลืนแสงอย่างฉับพลันขอบลักษณะนี้เรียกว่าขอบการดูดกลืนแสง (absorption edge) หรือขอบการดูดกลืนหลัก (fundamental edge) พลังงานโฟตอนที่ขอบการดูดกลืนแสงมีค่าเท่ากับผลต่างของค่าพลังงานที่วัดจากจุดต่ำสุดของแถบนำกับจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์จุดที่เส้นตรงตัดกับแกนในแนวนอน จะให้ค่าช่องว่างพลังงาน (E_g) วิธีการนี้เป็นการกำหนดค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่นิยมมากที่สุด

การหาค่าของช่องว่างพลังงาน สามารถพิจารณาได้จากสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (α) ของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (T) จากรูปที่ 2.21 แสดงภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบจากด้านซ้ายของฟิล์มบาง (I_0) ความเข้มแสงภายในฟิล์มบางจะลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลและมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงโดยทั่วไปการสะท้อน (R) มีค่าน้อยมากและมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับความยาวคลื่นแสงที่ตกกระทบดังนั้น

$$T = e^{-\alpha d} \tag{2.19}$$

จะได้ว่า

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln\left(\frac{1}{T}\right) \tag{2.20}$$



รูปที่ 2.13 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับพลังงานโฟตอน

ที่กล่าวมาเป็นการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงจากสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง โดยไม่คิดถึงการสะท้อนของแสง สำหรับกรณีการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเนื่องจากการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอน ในกรณีที่อิเล็กตรอนย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำที่เวกเตอร์คลื่นค่าเดียวกัน เรียกการย้ายสถานะพลังงานแบบนี้ว่า การย้ายสถานะพลังงานแบบตรง และการย้ายสถานะพลังงานแบบตรงนี้ยังแบ่งได้อีกสองชนิด คือการย้ายสถานะพลังงานชนิดยินยอม และชนิดต้องห้าม โดยทั้งสองชนิดนี้ขึ้นกับค่าสมาชิกเมทริกซ์เชิงแสง (optical matrix element) ในการประมาณครั้งที่หนึ่งว่าเป็นศูนย์หรือไม่ คือ ถ้าเป็นศูนย์จะเป็นการย้ายสถานะพลังงานชนิดต้องห้าม และถ้าไม่เป็นศูนย์จะเป็นการย้ายสถานะพลังงานชนิดยินยอม เมื่อพิจารณาการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนในบริเวณตำแหน่งจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับค่าช่องว่างพลังงานซึ่งมีลักษณะเป็นพาราโบลา ช่องว่างแถบพลังงานของแผ่นฟิล์มบางประมาณได้โดยการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ซึ่งจะถูกดูดกลืนเมื่อแสงที่ตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบางมีค่าพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าของพลังงานต้องห้าม ที่ขอบการดูดกลืนค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนจะมีค่าเป็น

สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานชนิดยินยอมแบบตรง

$$(\alpha_{hv}) = A(hv - E_g)^{\frac{1}{2}} \quad (2.21)$$

สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานชนิดยินยอมแบบเฉียง

$$(\alpha_{hv}) = B(hv - E_g)^2 \quad (2.22)$$

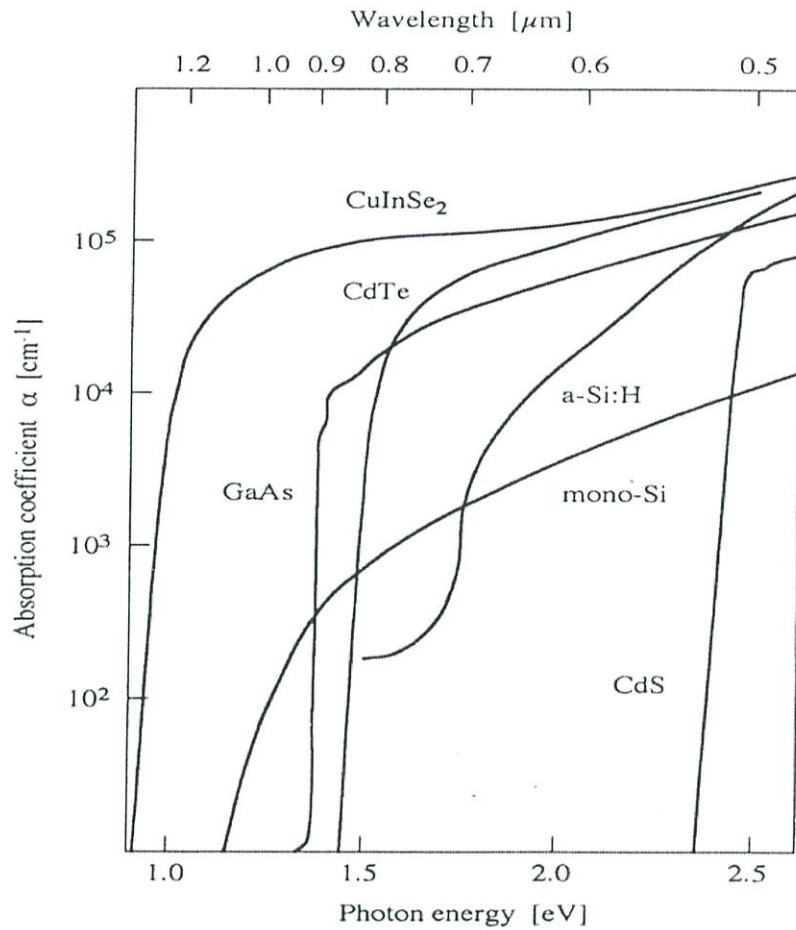
และสำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานชนิดต้องห้าม

$$(\alpha_{hv}) = C(hv - E_g)^{\frac{3}{2}} \quad (2.23)$$

เมื่อ α คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

$h\nu$ คือ พลังงานโฟตอน

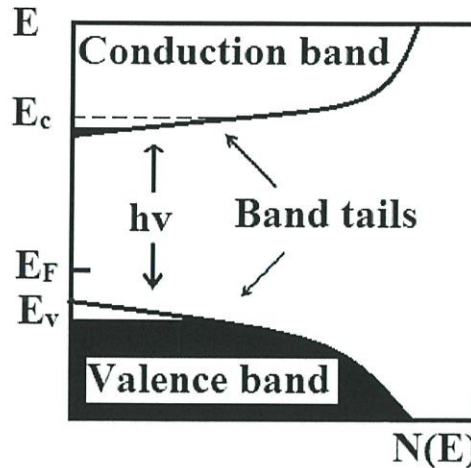
A, B และ C คือ ค่าคงตัว



รูปที่ 2.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและค่าพลังงานโฟตอนหรือค่าความยาวคลื่นของพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำ

2.5.5 ส่วนหางของแถบพลังงาน

วัสดุประเภทฟิล์มบางมักมีข้อบกพร่องของผลึกจำนวนมากระดับพลังงานของข้อบกพร่องของผลึกเหล่านี้จะมีอันตรกิริยาต่อกันส่งผลให้ระดับพลังงานเหล่านี้แผ่ขยายออกโดยจะไม่เป็นระดับพลังงานเฉพาะค่า (discrete level) อีกต่อไปบางครั้งก็แผ่ออกไปจรดขอบบนสุดของแถบวาเลนซ์หรือขอบล่างสุดของแถบนำซึ่งเหมือนกับว่าแถบวาเลนซ์หรือแถบนำนี้มีความหนาแน่นของสถานะทางพลังงาน (energy density of state) ยื่นเข้าไปในช่องว่างแถบพลังงานซึ่งนิยมเรียกส่วนที่ยื่นเข้าไปในช่องว่างแถบพลังงานนี้ส่วนหางของแถบพลังงาน (band tail หรือ Urbach's tail) ดังแสดงในรูป 2.15



รูปที่ 2.15 ส่วนหางของแถบพลังงานซึ่งมีทั้งส่วนหางของแถบวาเลนซ์และส่วนหางของแถบนำ

ในเชิงการทดลองส่วนหางของแถบพลังงานสามารถตรวจสอบได้จากการวัดขอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซึ่งเออร์บัค (Urbach) ได้แสดงให้เห็นว่าขอบการดูดกลืนของผลึกจะเพิ่มขึ้นแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลดังความสัมพันธ์

$$\alpha = \alpha_0 \exp \left[\frac{\sigma(E - E_0)}{K_B T} \right] \quad (2.24)$$

เมื่อ α_0 และ E_0 เป็นพารามิเตอร์ของผลึกแต่ละชนิด ส่วน K_B คือค่าคงตัวของโบลตซ์มันน์ T คือ อุณหภูมิ (เคลวิน) และ α คือความชัน (steepness) ของขอบการดูดกลืนแสง จากสมการที่ (2.33) นี้บอกเป็นนัยๆ ว่ากราฟของความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \alpha$ กับพลังงาน (E) จะเป็นเส้นตรงในช่วงพลังงานที่มีความต่ำกว่าขอบการดูดกลืนพื้นฐาน (หรือพิจารณาที่พลังงานต่ำกว่าช่องว่างแถบพลังงานนั่นเอง) การลาดส่วนต่อของเส้นตรงที่วัดที่อุณหภูมิต่างๆ จะลู่ออกสู่จุด (E_0, α_0) ซึ่งเรียกจุดนี้ว่า จุดคู่รวม

2.6 สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2545; จูตินัย, 2549; จูตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; จูตินัย, 2551)

จากทฤษฎีแถบพลังงานนั้น สารกึ่งตัวนำสามารถมีขนาดช่องว่างแถบพลังงานได้ใหญ่เกินกว่า 2 อิเล็กตรอนโวลต์ พลังงานความร้อนที่อุณหภูมิห้องไม่เพียงพอที่จะกระตุ้นให้เกิดพาหะอิสระได้ ดังนั้นพาหะอิสระของสารกึ่งตัวนำประเภทนี้จึงน้อยส่วนใหญ่มาจากระดับพลังงานที่ปรากฏในช่องว่างแถบพลังงาน ซึ่งจะเป็นทั้งระดับพลังงานผู้ให้และระดับพลังงานผู้รับหรือศูนย์กลางการ

รวมตัว (recombination center) ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำๆของสารกึ่งตัวนำจึงขึ้นกับความหนาแน่นของพาหะอิสระเหล่านี้

2.7 สภาพนำไฟฟ้า (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2545; จูตินัย, 2549; จูตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; จูตินัย, 2551)

เมื่อใส่สนามไฟฟ้าเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบนำจะตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าเกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนกลายเป็นกระแสไฟฟ้า จากกฎของโอห์ม (Ohm's law) สภาพนำไฟฟ้า (electrical conductivity: σ) คืออัตราส่วนของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (current density: J) ต่อสนามไฟฟ้า (electric field: E) ที่ใส่เข้าไปสมการ

$$J = \sigma E = e(\mu_n n + \mu_p p) E \quad (2.25)$$

เมื่อ μ_n, μ_p คือ สภาพคล่องของอิเล็กตรอนและโฮล ตามลำดับ

n คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

p คือ ความหนาแน่นของโฮล

ส่วนกลับของสภาพนำไฟฟ้า เรียกว่า สภาพต้านทานไฟฟ้า (resistivity: ρ) ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{e(\mu_n n + \mu_p p)} \quad (2.26)$$

ถ้ามีก้อนเนื้อสารกึ่งตัวนำซึ่งให้แรงดัน V และเกิดกระแส I แล้วจะได้ว่า

$$J = \frac{I}{A} \quad \text{และ} \quad E = \frac{V}{l}$$

สามารถเขียนสมการข้างต้นใหม่ได้เป็น

$$\frac{I}{A} = \sigma \left(\frac{V}{l} \right) \quad (2.27)$$

หรือ

$$V = \left(\frac{l}{\sigma A} \right) I = \left(\frac{\rho l}{A} \right) I = IR \quad (2.28)$$

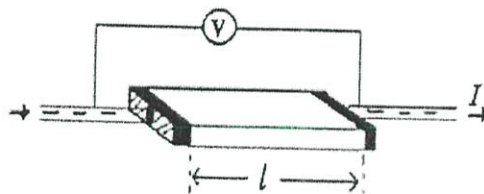
สมการข้างต้น คือกฎของโอห์มสำหรับสารกึ่งตัวนำ ความต้านทานเป็นฟังก์ชันกับสภาพความต้านทานหรือสภาพนำไฟฟ้า และขึ้นกับมิติรูปทรงเรขาคณิตของสารกึ่งตัวนำ

2.8 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิศย์, 2545; จูตินัย, 2549; จูตินัย, 2550; งามนิศย์, 2551; จูตินัย, 2551)

วิธีการวัดสภาพความต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำสามารถทำได้หลายวิธี ทั้งวิธีที่ใช้ส่วนของอุปกรณ์ต่อเข้าสัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่างและวิธีที่ไม่ต้องสัมผัสโดยตรง สำหรับวิธีที่จะกล่าวถึงในที่นี้เป็นวิธีที่ใช้การสัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่าง ซึ่งทำได้โดยการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในชิ้นสารตัวอย่างแล้ววัดความต่างศักย์ระหว่างจุดบนชิ้นสารนั้น

การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง (direct resistivity method)

โดยทั่วไปแล้วการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้ามักจะวัดความต้านทานก่อน ซึ่งเป็นวิธีวัดโดยตรงนี้หมายถึง วัดค่าความต้านทานรวมของสสารจากนั้นมาหาค่าความยาว และพื้นที่หน้าตัดของสสารนั้น การวัดวิธีนี้จะต้องทำให้สสารที่ต้องการวัดมีรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอน เพื่อที่จะวัดค่าพื้นที่หน้าตัดและความยาวให้ได้แน่นอน เช่นแท่งกลมทรงกระบอก แท่งสี่เหลี่ยม เป็นต้น จากนั้นจึงให้กระแสไฟฟ้าเข้าไปที่ปลายด้านหนึ่ง และให้กระแสไหลออกผ่านสารตัวอย่างที่ปลายอีกด้านหนึ่ง ขณะเดียวกันก็วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จุดปลายทั้งสองนั้นพร้อมๆกัน จากที่ทราบค่ากระแสและศักย์ไฟฟ้านี้ สามารถนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าได้ดังต่อไปนี้ เมื่อกำหนด R เป็นความต้านทานรวมจะมีความสัมพันธ์กับความต้านทานจำเพาะและพื้นที่หน้าตัด A บริเวณที่ปล่อยกระแสไหลเข้าไปและ l เป็นระยะทางระหว่างขั้วศักย์ไฟฟ้าที่วัด



รูปที่ 2.16 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.29)$$

$$\rho = R \times \frac{A}{l} = \left(\frac{V}{I} \right) \left(\frac{A}{l} \right) \quad (2.30)$$

จะเห็นว่าวิธีนี้เป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็ว แต่ค่าที่ได้เป็นค่าโดยประมาณซึ่งต้องคำนึงถึงองค์ประกอบอื่นๆด้วย ซึ่งความถูกต้องในการวัดโดยวิธีนี้ขึ้นอยู่กับบริเวณผิวสัมผัสที่กระแสไหลเข้าและออกนั้นมีลักษณะเป็นโอห์มมิกที่ดีหรือไม่ ถ้าไม่มีคุณสมบัติโอห์มมิกที่ดีแสดงว่ามีความ

ต้านทานที่ผิวสัมผัสทั้งสองขั้วไฟฟ้าเกิดขึ้นด้วย ค่าความต้านทาน R ที่วัดได้จึงเป็นค่าความต้านทานรวมทั้งหมด ดังนั้น ค่าความต้านทานจริงของสารกึ่งตัวนำจะน้อยกว่าค่าที่วัดได้แน่นอน ความถูกต้องอีกส่วนหนึ่งขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างความต้านทานของสารที่ต้องการวัดและความต้านทานภายใน (impedance) ของโวลต์มิเตอร์ที่ใช้วัด หากความต้านทานนี้ใกล้เคียงกับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จะมีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง ซึ่งในทางปฏิบัติจะคำนึงถึงผิวสัมผัสโอห์มมิกมากกว่าความผิดพลาดของโวลต์มิเตอร์ เนื่องจากที่ผิวสัมผัสจะดีหรือไม่ (เป็นโอห์มมิกหรือไม่) นั้นตรวจสอบได้ยากมาก จึงแก้ไขด้วยการทำให้เกิดผิวสัมผัสบริเวณพื้นที่มากขึ้นเพื่อลดความต้านทานที่ผิวสัมผัสลง จากนั้นจึงวัดศักย์ไฟฟ้าด้วยโวลต์มิเตอร์ โดยเลือกโวลต์มิเตอร์ที่มีความต้านทานภายในสูงๆ เท่าที่จะหาได้เพื่อลดความผิดพลาด

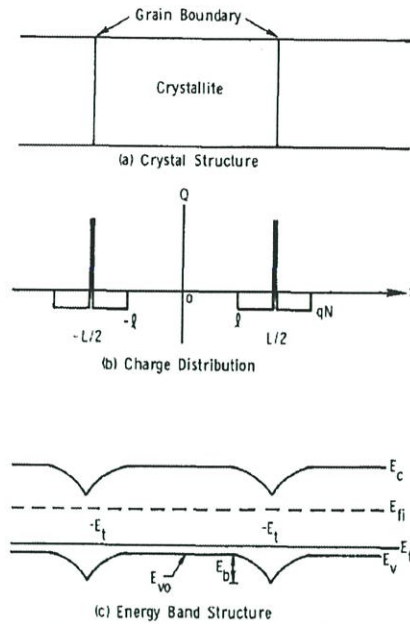
2.9 กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในฟิล์มบางที่อุณหภูมิต่างๆ (Cullity, 1956; Kittel, 1971;

งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; ฐิตินัย, 2551)

ซีโต (Seto, 1975) ได้พัฒนาทฤษฎีที่ใช้อธิบายการเคลื่อนที่ของพาหะอิสระในวัสดุที่เป็นผลึกพหุพันธ์ (polycrystalline) เช่น ในฟิล์มบาง เป็นต้น โดยใช้แบบจำลองกับดักพาหะที่ขอบของเกรนร่วมกับกลไกเทอร์มออิเล็กทริก โดยตั้งสมมุติฐานดังนี้คือ

1. ผลึกพหุพันธ์ประกอบไปด้วยเกรนขนาดเล็กที่มีคุณสมบัติเหมือนกัน มีรูปร่างเป็นลูกบาศก์ แต่ละด้านยาว L ซึ่งในความเป็นจริงเกรนจะมีรูปร่างไม่คงที่ (irregular shaped grains)
2. กลไกการนำไฟฟ้าคิดเป็น 1 มิติ
3. โครงสร้างแถบพลังงานของผลึกเดี่ยว สามารถประยุกต์ใช้ในเนื้อเกรนได้
4. ความหนาของขอบเกรนมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับขนาดของเกรน
5. ขอบกพร่องผลึกถือว่าเป็นกับดักพาหะที่ปรากฏอยู่ที่ขอบของเกรน เมื่อเริ่มต้นกับดักพาหะจะเป็นกลางทางไฟฟ้า แต่เมื่อจับอิเล็กตรอน (จับโฮล) แล้ว กับดักพาหะกลายเป็นประจุลบ (ประจุบวก) ความหนาแน่นของกับดักพาหะมีหน่วยเป็น ต่อตารางเซนติเมตร
6. ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น กับดักพาหะจะเป็นผู้รับ (acceptor) ส่วนสารกึ่งตัวนำชนิดพี กับดักพาหะจะเป็นผู้ให้ (donor)
7. ระดับพลังงานของกับดักพาหะ (E_c) จะอยู่ที่บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างแถบพลังงาน
8. ความเข้มข้นของสารเจือจะกระจายอย่างสม่ำเสมอตลอดเนื้อสารและอะตอมสารเจือจะถูกไอออไนซ์ทั้งหมด

จากข้อสมมุติฐานดังกล่าวข้างต้น รวมกับการประมาณแบบรอยต่อชันบันได (abrupt junction approximation) แถบพลังงานของผลึกพหุพันธ์ตรงบริเวณรอยต่อสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 แสดงแบบจำลองของฟิล์มบางตรงบริเวณรอยต่อขอบของเกรนดังนี้ คือ

- ก. ลักษณะของเกรนในผลึกพหุพันธ์
- ข. การกระจายของประจุในเนื้อเกรนและที่ขอบของเกรน
- ค. โครงสร้างแถบพลังงานของผลึกพหุพันธ์ในเนื้อเกรนและที่ขอบของเกรน

สภาพนำไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิจะขึ้นกับเนื้อเกรนว่าจะเป็นบริเวณพร่องพาหะทั้งหมด หรือเป็นบริเวณพร่องพาหะบางส่วน (partially depleted of carriers) ซึ่งจะอาศัยค่าวิกฤตของความหนาแน่นของสารเจือ (N_a^*) ดังรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.9.1 กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในฟิล์มบางในช่วงอุณหภูมิสูง

จากแบบจำลองที่พัฒนาโดยเบ็คคารินี (Baccarini et al., 1978) เมื่อ $N_a < N_a^*$ ในเนื้อเกรนจะเป็นบริเวณพร่องพาหะทั้งหมด ซึ่งจะเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิสูง ระดับเฟอร์มี (E_f) จะอยู่ระดับเดียวกับ E_i สภาพนำไฟฟ้าจะแสดงได้ด้วยสมการ

$$\sigma = \left[\frac{L^2 e^2 N_v N_a \nu_c}{2kT(N_i - LN_a)} \right] \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (2.31)$$

เมื่อ
$$\nu_c = \left[\frac{kT}{2\pi m^*} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.32)$$

และ
$$N_v = 2 \left[\frac{2\pi m^* kT}{h^2} \right]^{\frac{3}{2}} \quad (2.33)$$

สมการที่ (2.31) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\sigma T^{-1} = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (2.34)$$

$$\ln(\sigma T^{-1}) = -\frac{E_a}{k}\left(\frac{1}{T}\right) + \ln \sigma_0 \quad (2.35)$$

$$\ln(\sigma T^{-1}) = -\frac{E_a}{1,000k}\left(\frac{1,000}{T}\right) + \ln \sigma_0 \quad (2.36)$$

$$slope = -\frac{E_a}{1,000k} \quad (2.37)$$

$$E_a = \frac{(1,000)(k)(slope)}{1.8 \times 10^{-19}} \quad (2.38)$$

โดยที่ E_a คือพลังงานกระตุ้น มีหน่วยเป็นอิเล็กตรอนโวลต์ รูปที่ 2.18 แสดงตัวอย่างของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \sigma T^{-1}$ กับ $\frac{1,000}{T}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่อุณหภูมิในช่วง 125- 365 เคลวิน (Serin et al. 2011)

สำหรับความหนาแน่นของกัณฑ์พาหะ (N_a) สามารถหาได้จากสมการที่ (2.31) เมื่อทราบขนาดของเกรน (L) แล้ว ซึ่งขนาดของเกรนสามารถคำนวณได้จากสมการของเซอร์เรอร์ดังสมการ

$$L = \frac{0.94\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (2.39)$$

ส่วนความสูงของกัณฑ์พาหะที่ขอบของเกรนจะแสดงได้ดังนี้ คือ

$$E_b = \frac{e^2 L^2 N_a}{8\epsilon_s} \quad (2.40)$$

ส่วนระดับพลังงานของกัณฑ์พาหะ (E_g) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$E_a = \frac{1}{2} E_g - E_t \quad (2.41)$$

2.9.2 กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในฟิล์มบางในช่วงอุณหภูมิปานกลาง

เมื่ออุณหภูมิไม่สูงมากนัก ในเนื้อเกรนจะเป็นบริเวณพร่องพาหะเพียงบางส่วน ยิ่งจะสอดคล้องกับเงื่อนไข $N_a > N_a^*$ สำหรับเงื่อนไขแรกคือ $E_F - E_c - E_b \gg kT$ สภาพนำไฟฟ้าจะสัมพันธ์กับอุณหภูมิ คือ

$$\sigma = \left[\frac{Le^2 n v_c}{kT} \right] \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (2.42)$$

เมื่อ n คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระในบริเวณที่เป็นกลางทางไฟฟ้า สมการที่ (2.42) สามารถเขียนใหม่ได้เป็นดังนี้ คือ

$$\sigma T^{\frac{1}{2}} = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (2.43)$$

$$\ln(\sigma T^{\frac{1}{2}}) = -\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T}\right) + \ln \sigma_0 \quad (2.44)$$

$$\ln(\sigma T^{\frac{1}{2}}) = -\frac{E_a}{1,000k} \left(\frac{1,000}{T}\right) + \ln \sigma_0 \quad (2.45)$$

$$slope = -\frac{E_a}{1,000k} \quad (2.46)$$

$$E_a = -\frac{1,000(k)(slope)}{(1.6 \times 10^{-19})} \quad (2.47)$$

ซึ่ง E_a ในที่นี้ คือ ความสูงของกำแพงศักย์ที่ขอบของเกรน (E_b) โดยที่

$$E_b = \frac{e^2 L^2 N_a}{8\epsilon_s} \quad (2.48)$$

ϵ_s คือ เพอร์มิตติวิตี (permittivity) ของฟิล์มบาง

รูปที่ 2.18 แสดงตัวอย่างของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \sigma T^{\frac{1}{2}}$ กับ $\frac{1,000}{T}$ ของฟิล์มบาง CuO ที่อุณหภูมิในช่วง 125- 365 เคลวิน (Serin et al. 2011) จากสมการที่ (2.48) จะเห็นได้ว่าค่า E_b จะไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ เนื่องจากเงื่อนไขที่ระดับเฟอร์มิ (E_F) อยู่สูงกว่าระดับกับดักพาหะ (E_c) ดังนั้นประจุไฟฟ้าจะเข้าไปบรรจุอยู่กับดักพาหะทั้งหมดจนเต็ม ส่งผลให้กับดักพาหะไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ สำหรับความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ (N_a) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.48) รวมทั้งความยาวเดอบาย (L_D) จะคำนวณได้จากความสัมพันธ์

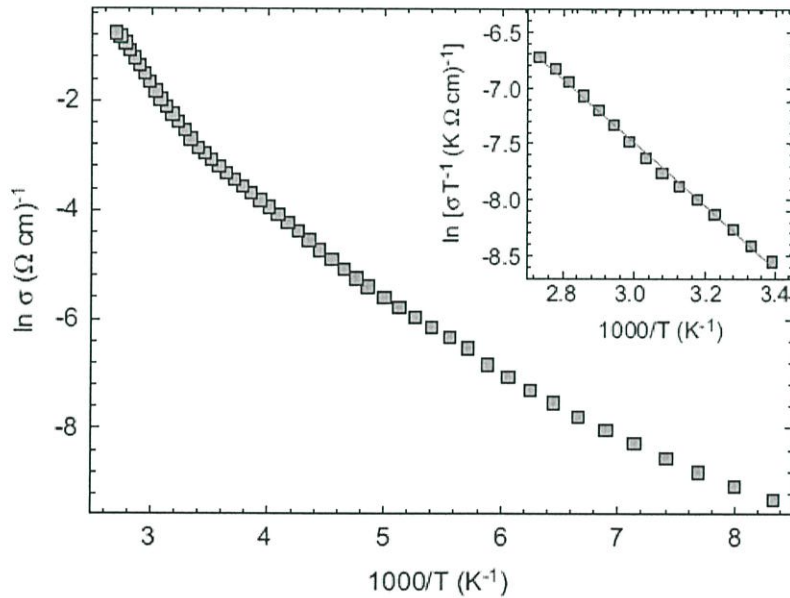
$$L_D = \left[\frac{kT\epsilon_s}{e^2 N_a} \right]^{1/2} \quad (2.49)$$

สำหรับเงื่อนไขที่สอง คือ $E_t + E_b - E_f \gg kT$ เป็นเงื่อนไขที่ระดับกับดักประจุ (E_t) อยู่สูงกว่าระดับเฟอร์มิ (E_f) แสดงว่ากับดักพาหะบางส่วนเท่านั้นที่ถูกครอบครองโดยประจุไฟฟ้า ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าจะสัมพันธ์กับอุณหภูมิดังนี้ คือ

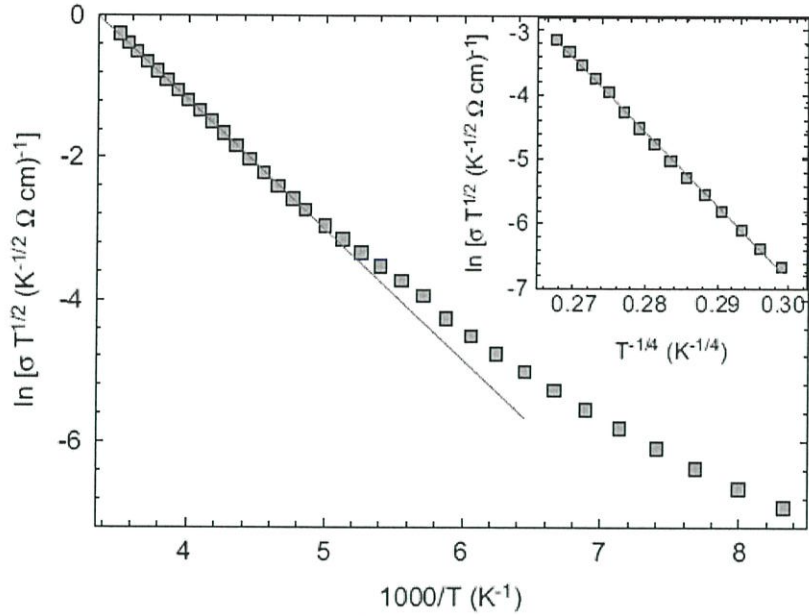
$$\sigma = eN_c^2 L v_c (2\epsilon_s N_a^{-1} E_b)^{1/2} (kTN_t)^{-1} \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (2.50)$$

ซึ่ง

$$E_a = \frac{1}{2} E_g - E_t \quad (2.51)$$



รูปที่ 2.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \sigma$ กับ $\frac{1,000}{T}$ ของฟิล์มบาง CuO ที่อุณหภูมิในช่วง 125-365 เคลวิน สำหรับในรูปแทรก คือ กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \sigma T^{-1}$ กับ $\frac{1,000}{T}$ (serin et al. 2011)



รูปที่ 2.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \sigma T^{\frac{1}{2}}$ กับ $\frac{1,000}{T}$ ของฟิล์มบาง CuO สำหรับในรูปแทรก
คือ กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \sigma T^{\frac{1}{2}}$ กับ $T^{-\frac{1}{4}}$

2.9.3 การนำไฟฟ้าของพาหะแบบกระโดดในระยะไม่คงที่ (Variable Range Hopping Conduction: VRH) (งามนิตย์, 2555; ฐิตินัย, 2556)

การนำไฟฟ้าของฟิล์มบางที่อุณหภูมิต่ำมาก จะเกี่ยวกับการนำไฟฟ้าของพาหะแบบกระโดดระหว่างสถานะถูกจำกัดเฉพาะที่ (localized state) ซึ่งเป็นสถานะพลังงานที่ปรากฏอยู่ในช่องว่างแถบพลังงาน สถานะถูกจำกัดเฉพาะที่เวลานี้มีระยะทางไม่คงที่ ดังนั้นจึงเรียกการนำไฟฟ้าชนิดนี้ว่าการนำไฟฟ้าของพาหะแบบกระโดดในระยะไม่คงที่ (VRH) และจะปรากฏเด่นชัดที่อุณหภูมิต่ำมากซึ่งในกรณี 3 มิติ จะแสดงได้โดยความสัมพันธ์ดังนี้ คือ

$$\sigma_{hop} = \sigma = \frac{\sigma_0}{T^{\frac{1}{2}}} \exp\left[-\frac{T_0}{T}\right]^{\frac{1}{4}} \quad (2.52)$$

$$\sigma T^{\frac{1}{2}} = \sigma_0 \exp\left[-\frac{T_0}{T}\right]^{\frac{1}{4}} \quad (2.53)$$

$$\ln\left(\sigma T^{\frac{1}{2}}\right) = -\left(\frac{T_0}{T}\right)^{\frac{1}{4}} + \ln \sigma_0 \quad (2.54)$$

เมื่อ σ_0 คือ แฟกเตอร์หน้าพจน์เอกซ์โพเนนเชียล (pre-exponential factor)

k คือ ค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.38×10^{-23} J/K

T คือ อุณหภูมิเคลวิน

เมื่อนำเอาสมการที่ (2.47) ไปเขียนกราฟจะได้กราฟเชิงเส้นโดยความชันของกราฟคือ

$-(T_0)^{-1/4}$ ส่วน $\ln \sigma_0$ คือจุดตัดแกน $\ln \left(\sigma T^2 \right)$ ที่จุด $T^{-1/4} = 0$ โดยที่

$$\sigma_0 = 3e^2 v \left[\frac{N(E_F)}{8\pi\alpha k} \right]^2 \quad (2.55)$$

$$T_0 = \frac{18\alpha^3}{kN(E_F)} \quad (2.56)$$

เมื่อ v คือ ความถี่ของโฟนอนที่อุณหภูมิเดบาย (Debye temperature) จะมีค่าประมาณ 1×10^{13} เฮิร์ตซ์

$N(E_F)$ คือ ความหนาแน่นของสถานะถูกจำกัดเฉพาะที่ที่ระดับเฟอร์มี (density of localized states at Fermi level)

α คือ ค่าคงที่ของการสลายตัวของฟังก์ชันคลื่นของสถานะถูกจำกัดเฉพาะที่ที่ระดับเฟอร์มี (decay constant of the wave function at the localized state near Fermi level)

e คือ ประจุอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ 1.6×10^{-19} คูอมบ์

T_0 คือ องศาของความไม่เป็นระเบียบ (degree of disorder)

จากสมการที่ (2.55) ถ้ายกกำลังสองทางด้านซ้ายและขวามือของเครื่องหมายเท่ากับจะได้ว่า

$$\sigma_0^2 = 9e^4 v^2 \left[\frac{N(E_F)}{8\pi\alpha k} \right]^2 \quad (2.57)$$

เอาสมการที่ (2.57) คูณกับสมการที่ (2.56) จะได้

$$\sigma_0^2 T_0 = \frac{81\alpha^2 e^4 v^2}{4\pi k^2} \quad (2.58)$$

$$\alpha^2 = \left[\frac{4\pi k^2}{81e^4 v^2} \right] \sigma_0^2 T_0 \quad (2.59)$$

$$\alpha = \left[\frac{2\sqrt{\pi} k}{9e^2 v} \right] \sigma_0 T_0^{1/2} \quad (2.60)$$

เมื่อความถี่โฟนอน $\nu = 1 \times 10^{13}$ เฮิร์ตซ์ ดังนั้นจะได้ว่า

$$\alpha = 21.23 \sigma_0 T_0^{\frac{1}{2}} \quad (2.61)$$

ถ้าแทนสมการที่ (2.61) ลงในสมการที่ (2.55) จะได้ว่า

$$N(E_F) = \left[\frac{16\pi^{\frac{3}{2}} k^2}{81e^6 \nu^3} \right] \sigma_0^3 T_0^{\frac{1}{2}} \quad (2.62)$$

$$= (2.0 \times 10^9) \sigma_0^3 T_0^{\frac{1}{2}} \quad (2.63)$$

ระยะทางเฉลี่ยของการกระโดด (average hopping distance: R) มีหน่วยเป็น เซนติเมตรและพลังงานเฉลี่ยของการกระโดด (average hopping energy: W) มีหน่วยเป็นอิเล็กตรอน โวลต์ จะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$R = \left[\frac{9}{8\pi\alpha k T N(E_F)} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (2.64)$$

$$W = \frac{3}{4\pi R^3 N(E_F)} \quad (2.65)$$

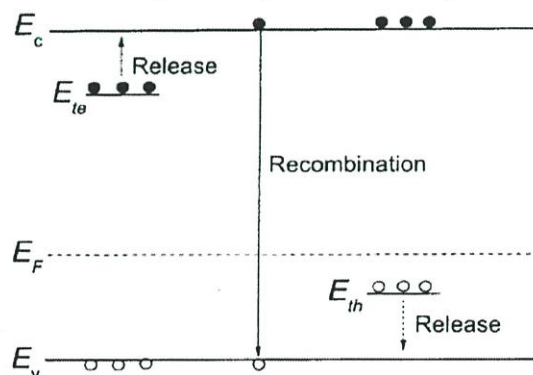
เมื่อทราบค่า $N(E_F)$ และ N_a เราสามารถที่จะคำนวณหาค่า N_d ได้จากความสัมพันธ์

$$N(E_F) = \left(\frac{2\varepsilon_s}{e^2} \right) N_a^{\frac{2}{3}} \left(1 - \frac{N_d}{N_a} \right)^{\frac{4}{3}} \quad (2.66)$$

โดยที่ N_d คือ ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือชนิดผู้ให้ ซึ่งเป็นพาหะข้างน้อยของสารกึ่งตัวนำชนิดพี โดยอัตราส่วน $\frac{N_d}{N_a} = k$ และ $k < 1$ เสมอ

2.10 สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง (งามนิตย์, 2556; จูตินัย, 2556)

ในสารกึ่งตัวนำมักมีข้อบกพร่องผลึกเสมอ ข้อบกพร่องผลึกมีหลายชนิด ข้อบกพร่องผลึกบางชนิดมีคุณสมบัติในการจับอิเล็กตรอนและ/หรือโฮลอิสระได้ จึงมักเรียกว่ากับดักพาหะ กับดักพาหะชนิดต่างๆ จะปรากฏเป็นระดับพลังงานในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ โดยในรูปที่ 1 มีทั้งระดับพลังงานของกับดักพาหะชนิดจับโฮล (E_h) และกับดักพาหะชนิดจับอิเล็กตรอน (E_e) (Jiang, 2012) คำว่าการปลดปล่อย (release) เป็นกลไกที่กับดักพาหะปล่อยอิเล็กตรอนให้กับแถบนำ และเป็นกับดักพาหะชนิดปล่อยโฮลให้กับแถบวาเลนซ์ ส่วนคำว่า การรวมตัว (recombination) เป็นกลไกที่อิเล็กตรอนในแถบนำทรานซิชันลงมารวมตัวกับโฮลในแถบวาเลนซ์โดยไม่ผ่านกับดักพาหะ ขณะที่สารกึ่งตัวนำยังไม่ได้มีการฉายแสงกับดักพาหะจะมีการจับอิเล็กตรอนหรือจับโฮลอยู่ก่อนแล้ว ส่วนอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำและโฮลในแถบวาเลนซ์มีปริมาณน้อย สารกึ่งตัวนำจึงนำกระแสไฟฟ้าได้ไม่ดี กระแสมืด (dark current) จึงมีค่าน้อย แต่เมื่อมีการฉายแสงลงบนสารกึ่งตัวนำจะเกิดกระบวนการสร้างอิเล็กตรอนและโฮลอิสระขึ้นในแถบนำและแถบวาเลนซ์ตามลำดับ เนื่องจากการดูดกลืนโฟตอนที่มีความถี่สูงเพียงพอ เมื่อไบแอสด้วยแรงดันไฟฟ้าให้กับสารกึ่งตัวนำ กระแสโฟตอนจะมีปริมาณเพิ่มขึ้น แต่เมื่อหยุดฉายแสงหรือหยุดการกระตุ้นด้วยแสง กระแสไฟฟ้าควรลดลงสู่ค่ากระแสมืดเหมือนในขณะที่ไม่มีการฉายแสง แต่บางครั้งพบว่า กับดักพาหะที่จับอิเล็กตรอนและ/หรือจับโฮล มีพฤติกรรมไม่ปล่อยอิเล็กตรอนหรือโฮลออกมาทันทีอย่างปกติธรรมดา นั่นคือยังมีประจุค้างอยู่ในกับดักพาหะ ดังนั้นอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำและ/หรือโฮลในแถบวาเลนซ์จึงยังคงปรากฏอยู่มากเพื่อทำหน้าที่ในการรักษาความเป็นกลางทางไฟฟ้า โดยปกติกลไกการปลดปล่อยจะใช้เวลานานกว่ากลไกการรวมตัวแต่เนื่องจากกับดักพาหะมีการปล่อยอิเล็กตรอนและ/หรือโฮลออกมาช้ามาก ส่งผลให้กลไกการรวมตัวใช้เวลายังนานขึ้นไปอีก จึงเป็นที่มาของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงคือรั้น (persistent photoconductivity)



รูปที่ 2.20 ระดับพลังงานของกับดักพาหะชนิดจับอิเล็กตรอน (E_e) และกับดักพาหะชนิดจับโฮล (E_h) ที่ปรากฏในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ จุดทึบและจุดโปร่งจะแสดงแทนอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ

กำหนดให้ชั้นสารมีความกว้าง w ความหนา d และยาว l ให้กระแสไฟฟ้า I ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัด wd กระแสไฟฟ้า I จะเป็นดังสมการ

$$I = envA \quad (2.67)$$

และจากความสัมพันธ์ $\mu = v/\xi$ และ $\xi = V_a/l$ ดังนั้นจะได้ว่า

$$v = \frac{\mu V_a}{l} \quad (2.68)$$

แทนสมการที่ (2.68) ลงใน (2.67) จะได้

$$I = en\mu V_a \left(\frac{wd}{l} \right) \quad (2.69)$$

แต่เนื่องจากความหนาแน่นของพาหะอิสระ (n) เกิดมาจากกักตักพาหะ ดังนั้นความหนาแน่นของพาหะอิสระ (n) ที่สัมพันธ์กับกักตักพาหะชนิดที่ i ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา จะแสดงได้ดังนี้คือ (Studenikin, 1998)

$$n = N_{ii} \exp\left(-t/\tau_i\right) \quad (2.70)$$

แทนสมการที่ (2.70) ลงใน (2.69) จะได้ว่า กระแส I_i ที่เกิดจากกักตักพาหะชนิด i คือ

$$I_i = e\mu N_{ii} V_a \left(\frac{wd}{l} \right) \exp\left(-t/\tau_i\right) \quad (2.71)$$

กระแสรวมทั้งหมด (I) ที่สัมพันธ์กับกักตักพาหะทุกชนิดจะเป็นดังนี้คือ

$$I = e\mu \left(\frac{wd}{l} \right) V_a \sum_i \left(N_{ii} \exp\left(-t/\tau_i\right) \right) \quad (2.72)$$

เมื่อ N_{ii} คือ ความหนาแน่นของกักตักพาหะต่อปริมาตรชนิดที่ i ซึ่งสามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$N_{ii} = \frac{I}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{wd} \right) \exp\left(\frac{t}{\tau_i} \right) \quad (2.73)$$

สำหรับกรณีฟิล์มบาง จะประมาณว่า ความหนา d มีค่าน้อยมาก ดังนั้น จากสมการที่ (2.69) จะเขียนใหม่ได้ว่า (Gu, 2005; Huang, 2011)

$$\begin{aligned} I &= e\mu \left(\frac{w}{l} \right) (nd) V_a \\ &= e\mu \left(\frac{w}{l} \right) \sigma_i V_a \end{aligned} \quad (2.74)$$

เมื่อ σ_i คือ ความหนาแน่นของกัมมันตภาพต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ แต่ถ้ากัมมันตภาพมีหลายชนิด กระแสรวม (I) ของฟิล์มบางที่สัมพันธ์กับกัมมันตภาพทุกชนิดจะเป็นดังนี้ คือ

$$I = e\mu \left(\frac{w}{l} \right) V_a \sum_i \left(\sigma_{ii} \exp\left(-\frac{t}{\tau_i} \right) \right) \quad (2.75)$$

เมื่อ σ_{ii} คือความหนาแน่นของกัมมันตภาพต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ชนิดที่ i ซึ่งสามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$\sigma_{ii} = \frac{I}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{w} \right) \exp\left(\frac{t}{\tau_i} \right) \quad (2.76)$$

โดยที่

- V_a คือ แรงดันไบแอสที่ป้อนให้กับสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีหน่วยเป็น โวลต์
- μ คือ สภาพคล่องของพาหะมีหน่วยเป็น ตารางเซนติเมตรต่อ(โวลต์-วินาที)
- w คือ ความกว้างของสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีหน่วยเป็น เซนติเมตร
- l คือ ความยาวของสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีหน่วยเป็น เซนติเมตร
- d คือ ของสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีหน่วยเป็น เซนติเมตร
- I คือ กระแสที่วัดได้จากการทดลองที่เวลา t ใดๆ
- τ_r คือ ช่วงชีวิตขาลง (decay time)
- N_{ii} คือ ความหนาแน่นของกัมมันตภาพในชั้นสารตัวอย่างมีหน่วยเป็นต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
- σ_{ii} คือ ความหนาแน่นของกัมมันตภาพในฟิล์มบางมีหน่วยเป็นต่อตารางเซนติเมตร

ช่วงชีวิตขาลงจะมีค่าสั้นลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีโฟนอนเข้าร่วมด้วยในกระบวนการทรานซิชันระหว่างระดับพลังงานต่างๆ ดังความสัมพันธ์ (Studenikin, 1998; Johnson, 1996)

$$\tau_r = \tau_{ro} \exp\left(\frac{E_i}{kT}\right) \quad (2.77)$$

$$\begin{aligned} \ln \tau_r &= \ln \tau_{ro} + \left(\frac{E_i}{k}\right)\left(\frac{1}{T}\right) \\ &= \ln \tau_{ro} + \frac{E_i}{(1,000k)}\left(\frac{1,000}{T}\right) \end{aligned}$$

เมื่อ

$$slope = \frac{E_i}{(1,000)k}$$

ดังนั้น

$$E_i = \frac{(1,000)k(slope)}{q}$$

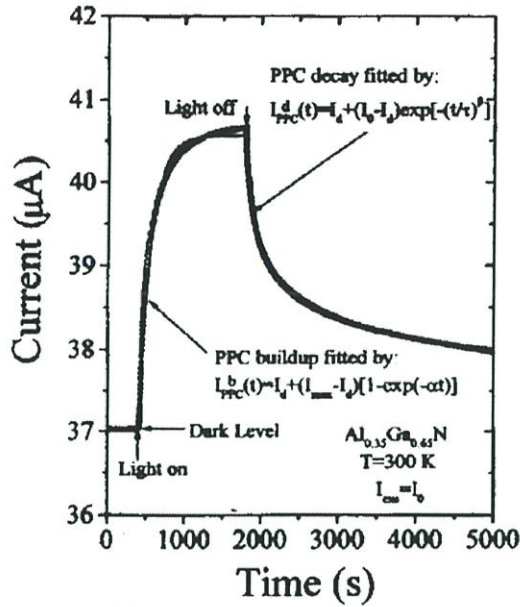
$$= (0.086)(slope) \text{ อิเล็กตรอนโวลต์} \quad (2.78)$$

ในการศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงจะต้องมีการฉายแสงให้กับสารตัวอย่าง จะได้ว่ากระแสโฟโต (I_p) จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลา (t) ดังรูปที่ 2.21 ซึ่งจะเรียกว่าเป็นกระแสขาขึ้น (rise current) ดังความสัมพันธ์ (Ghosh, 2007)

$$I_p = I_o \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_r}\right) \right] \quad (2.79)$$

เมื่อ I_o คือกระแสเริ่มต้นของกระแสขาขึ้น (เมื่อ $t=0$) หลังจากหยุดการฉายแสง กระแสจะลดลงตามเวลา (t) ซึ่งจะเรียกว่าเป็นกระแสขาลง (decay current) จะแสดงดังความสัมพันธ์ (Ghosh, 2007)

$$I_p = I_o \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_d}\right) \quad (2.80)$$



รูปที่ 2.21 กระแสขาขึ้นและกระแสลงการสภาวะนำไฟฟ้าเชิงแสง

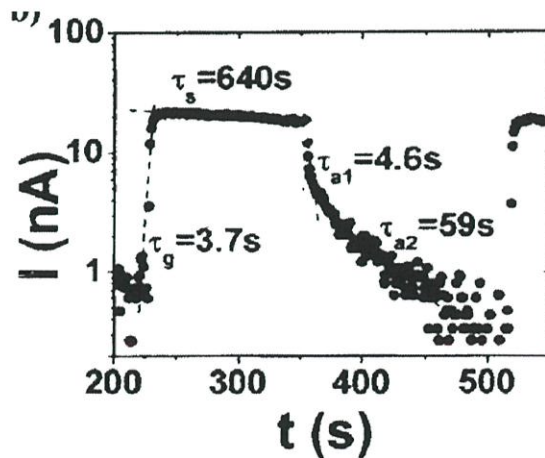
จากสมการที่ (2.79) สามารถเขียนใหม่ได้ว่า

$$\ln I_p = \ln I_{o'} - \frac{t}{\tau_d} \tag{2.81}$$

ความชันของกราฟคือ $\frac{1}{\tau_d}$ ดังนั้น ช่วงชีวิตขาลงจะคำนวณได้จากส่วนกลับของความชันของกราฟ

$\ln I_p$ กับ t ในทำนองเดียวกันช่วงชีวิตขาขึ้นก็สามารถที่จะคำนวณได้จากความชันของกราฟ

$\ln I_p$ กับ t (ดังรูปที่ 2.22) ได้ด้วยเช่นเดียวกัน



รูปที่ 2.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I_p$ กับ t ของสภาวะนำไฟฟ้าเชิงแสงทั้งช่วงกระแสขาขึ้นและช่วงกระแสขาลง

ในทางปฏิบัติช่วงชีวิตมีได้หลายค่า เนื่องจากกับดักพาหะมีหลายชนิด ดังนั้นกระแสโฟโตขาลงของฟิล์มบางที่ใช้หาค่าช่วงชีวิต 2 ค่า สามารถที่จะเขียนใหม่ได้โดยอาศัยสมการที่ (2.75) และสมการที่ (2.79) ดังนี้ คือ (Huang, 2011; Gu, 2005)

$$|I_p| = e\mu\left(\frac{w}{l}\right)V_a\sigma_{n1}\exp\left(-t/\tau_{d1}\right) + e\mu\left(\frac{w}{l}\right)V_a\sigma_{n2}\exp\left(-t/\tau_{d2}\right) \quad (2.82)$$

เพื่อให้ τ_{d1} และ τ_{d2} มีค่าถูกต้องมากขึ้น อาจดัดแปลงสมการที่ (2.82) ให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันเทรตเอ็กซ์โพเนนเชียล(stretched exponential function) ดังนี้คือ (Ghaffarzadeh, 2010; Luo, 2013; Guo, 2013)

$$|I_p| = e\mu\left(\frac{w}{l}\right)V_a\sigma_{n1}\exp\left(-t/\tau_{d1}\right) + e\mu\left(\frac{w}{l}\right)V_a\sigma_{n2}\exp\left[-\left(t/\tau_{d2}\right)^\beta\right] \quad (2.83)$$

จากสมการที่ (2.83) สามารถที่จะหาค่า σ_{n1} และ σ_{n2} ได้ในรูปแบบเดียวกับสมการที่ (2.76) ดังนี้คือ

$$\sigma_{n1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{w}\right) \exp\left(t/\tau_{d1}\right) \quad (2.84)$$

$$\sigma_{n2} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{w}\right) \exp\left(t/\tau_{d2}\right) \quad (2.85)$$

กับดักพาหะทั้งสองชนิดนี้สามารถที่จะจับหรือปล่อยพาหะอิสระได้อย่างซึ่งกันและกัน ถ้ากำหนดให้ I_1 และ I_2 คือกระแสค่าเริ่มต้น ($t=0$) ที่เกี่ยวกับกับดักพาหะทั้งสองตามลำดับ เราจะได้ว่า

$$\sigma_{n1} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{w}\right) \quad (2.86)$$

และ

$$\sigma_{n2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{w}\right) \quad (2.87)$$

สมการที่ (2.83) สามารถที่จะทำนอร์มัลไลเซชัน (normalization) ได้ดังนี้ คือ

$$|I_p| = A_1 \exp\left(-t/\tau_{d1}\right) + A_2 \exp\left[-\left(t/\tau_{d1}\right)^\beta\right] \quad (2.88)$$

เมื่อ A_1 และ A_2 คือ แฟกเตอร์ถ่วงน้ำหนัก (weighting factor) โดยที่ $A_1 + A_2 = 1$ (Lin, 2013; Lin, 2012; Ren, 2012) ซึ่งค่า A_1 และ A_2 สามารถหาได้จากการฟิตกราฟ (fit graph) ของผลการทดลองและ β มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1

ในกรณีกระแสไฟโตขาขึ้น (rise current) ก็สามารที่จะพิจารณาให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันสเตรตเอ็กซ์โพเนนเชียลได้ด้วยเช่นกัน ดังสมการ

$$|I_p| = A_1' \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{r1}}\right) \right] + A_2' \left\{ 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau_{r1}}\right)^\beta\right] \right\} \quad (2.89)$$

ส่วนกรณีของชั้นสาร เช่น เซรามิก กระแสไฟโตขณะขาลงสามารถจะเขียนใหม่โดยอาศัยสมการที่ (2.71) และ (2.83) ได้ดังนี้คือ

$$|I_p| = e\mu \left(\frac{wd}{l}\right) V_a N_{r1} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{d1}}\right) + e\mu \left(\frac{wd}{l}\right) V_a N_{r2} \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau_{d2}}\right)^\beta\right] \quad (2.90)$$

จากสมการที่ (22) สามารถที่จะหาค่า

$$N_{r1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{wd}\right) \exp\left(\frac{t}{\tau_{d1}}\right) \quad (2.91)$$

$$N_{r2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{wd}\right) \exp\left(\frac{t}{\tau_{d2}}\right) \quad (2.92)$$

กับศักพาหะทั้งสองชนิดนี้สามารถที่จะจับหรือปล่อยพาหะอิสระได้อย่างเป็นอิสระซึ่งกันและกัน ถ้ากำหนดให้ I_1 และ I_2 คือกระแสเริ่มต้น ($t=0$) ที่เกี่ยวกับกับศักพาหะทั้งสองตามลำดับเราจะได้ว่า

$$N_{r1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{wd}\right) \quad (2.93)$$

$$N_{r2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{wd}\right) \quad (2.94)$$

สมการที่ (2.90) สามารถที่จะทำนอร์มัลไลเซชัน (normalization) ได้ดังนี้คือ

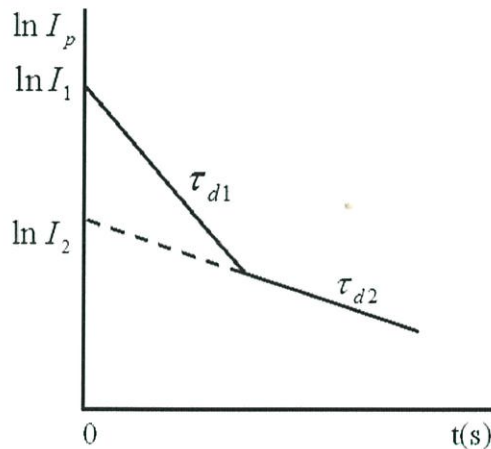
$$|I_p| = A_1'' \exp\left(-t/\tau_{d1}\right) + A_2'' \exp\left[-\left(t/\tau_{d2}\right)^\beta\right] \quad (2.95)$$

ซึ่ง A_1'' และ A_2'' สามารถหาได้จากการพล็อตกราฟของผลการทดลอง ในกรณีกระแสโฟโตขาขึ้น ก็ สามารถที่จะพิจารณาให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันสเตรตเอ็กซ์โพเนนเชียลได้ด้วยเช่นกันดังสมการ

$$|I_p| = A_1''' \left[1 - \exp\left(-t/\tau_{d1}\right)\right] + A_2''' \left\{1 - \exp\left[-\left(t/\tau_{d2}\right)^\beta\right]\right\} \quad (2.96)$$

2.10.1 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกัมมันตภาพในช่วงกระแสขาลง

การหาค่าความหนาแน่นของกัมมันตภาพในช่วงกระแสขาลงจะอาศัยกราฟ $\ln I_p$ กับ t ดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I_p$ กับ t เพื่อใช้คำนวณหาความหนาแน่นของกัมมันตภาพในช่วงกระแสขาลง

ค่า τ_{d1} หาได้จากความชันของกราฟ

$$\ln I_p = -t/\tau_{d1} + \ln I_1 \quad (2.97)$$

เราสามารถหาค่า I_1 ได้จากจุดตัดแกน y (คือ $\ln I_1$) และสามารถคำนวณหาค่าความหนาแน่นของกัมมันตภาพของฟิล์มบางได้ดังนี้ คือ

$$\sigma_{r1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{w} \right) \quad (2.98)$$

บางครั้งมีการเลือกใช้กราฟ $\log I_p$ แทน $\ln I_p$ โดยที่ $\ln I_p = 2.3 \log I_p$ ในทำนองเดียวกัน τ_{d2} สามารถหาได้จากความชันของกราฟ

$$\ln I_p = -t/\tau_{d2} + \ln I_2 \quad (2.99)$$

เราสามารถหาค่า I_2 ได้จากจุดตัดแกน y (คือ $\ln I_2$) และสามารถคำนวณหาค่าความหนาแน่นของกัมมันตภาพรังสีได้ดังนี้ คือ

$$\sigma_{r2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{w} \right) \quad (2.100)$$

สำหรับกรณีของความหนาแน่นของชั้นสารเช่นในเซรามิก ก็สามารถใช้สูตร

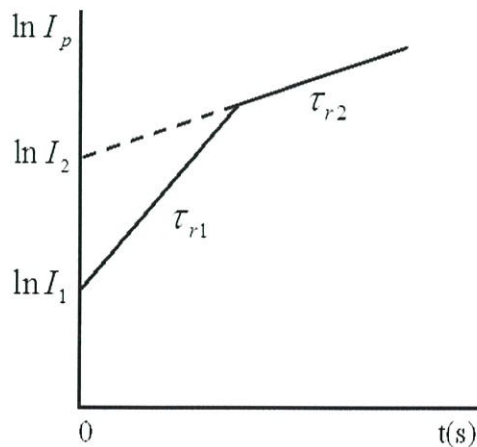
$$N_{r1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{wd} \right) \quad (2.101)$$

และ

$$N_{r2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{wd} \right) \quad (2.102)$$

2.10.2 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกัมมันตภาพรังสีในช่วงกระแสขาขึ้น

การหาค่าความหนาแน่นของกัมมันตภาพรังสีในช่วงกระแสขาขึ้น โดยอาศัยกราฟ $\ln I_p$ กับ t ดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I_p$ กับ t เพื่อใช้คำนวณหาความหนาแน่นของกัมมันตภาพรังสีในช่วงกระแสขาขึ้น

กระแสขาขึ้นอาจแสดงได้ดังสมการง่ายๆ ดังนี้คือ

$$I = I_{\max} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right] \quad (2.102)$$

$$\begin{aligned} \frac{I}{I_{\max}} &= 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_r}\right) \\ 1 - \frac{I}{I_{\max}} &= \exp\left(-\frac{t}{\tau_r}\right) \\ \ln\left[1 - \frac{I}{I_{\max}}\right] &= -\frac{t}{\tau_r} \end{aligned} \quad (2.103)$$

จากสูตร $\ln(1-x) = -x - \frac{x^2}{2} - \frac{x^3}{3} - \frac{x^4}{4} + \dots$

ถ้า $\frac{I}{I_{\max}} \ll 1$ สมการที่ (2.103) จะประมาณได้ว่าเป็น

$$\frac{I}{I_{\max}} = \frac{t}{\tau_r} \quad (2.104)$$

ข้อสังเกตคือสมการที่ (2.104) จะใช้ได้จริงเมื่อ $\frac{I}{I_{\max}} \ll 1$ ก็คือช่วงแรกๆ ของกราฟกระแสขาขึ้น ส่วนช่วงท้ายๆ ของกราฟความถูกต้องจะลดลง การคำนวณหาค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะทั้งชนิดฟิล์มบางและเซรามิกจะใช้สมการที่ (2.98), (2.100), (2.101) และ (2.102) ได้เช่นเดียวกับกระแสขาลง

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัย (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2531; งามนิตย์, 2545; จูตินัย, 2549; จูตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; จูตินัย, 2551)

3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เพื่อใช้เตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

1. กระจกสไลด์
2. ที่ตัดกระจก
3. เครื่องอัลตราโซนิก
4. เครื่องเป่าลมร้อน
5. เตาอบ
6. บีกเกอร์ขนาด 200 มิลลิลิตร
8. สารเคมี(น้ำยาล้างงาน น้ำปลอดประจุ อะซีโตนและ เอทานอล)
9. นาฬิกาจับเวลา

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

1. ระบบระเหิดสารเคมีในระยะประชิด
 - ท่อแก้วควอซปิดปลายปิดหนึ่งด้าน
 - กล่องแกรไฟต์
 - เทอร์โมคัปเปิลชนิด K
 - เครื่องควบคุมอุณหภูมิหือ SHIMADEN รุ่น PID FP21
 - หลอดทังสเตน 1,000 วัตต์
2. ผงผลึกแคดเมียมซัลไฟด์และแคดเมียมเทลลูไรด์ บริสุทธ์ 99.9999 เปอร์เซนต์
3. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่งหือ Sartorius
4. เมทธานอล
5. ปากคืบ
6. หน้ากากป้องกันการไอระเหยของสารเคมี
7. แวนตากรองแสง

8. ภาชนะที่ใช้สำหรับเก็บสารเคมีที่สามารถควบคุมความชื้นได้

9. ครอบบดสาร

3.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค

เอกซ์เรดิฟแฟร็กโทรมิเตอร์(XRD) ของยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ 1.5418 อังสตรอม ใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์ แรงไฟฟ้าดัน 30 กิโลโวลต์ โดยที่จะวัดจากมุม 20-60 องศา

3.1.4 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope : SEM) ของยี่ห้อ LEO รุ่น LEO 1455VP โดยใช้แรงดัน 6 กิโลโวลต์และกำลังแยกความละเอียดของภาพถ่าย 1,000, 3,000 และ 5,000 เท่า

3.1.5 เครื่องมือที่ใช้ศึกษาสมบัติทางแสง

เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS spectrophotometer) ยี่ห้อ thermo electron corporation รุ่น He ios โดยใช้ความยาวคลื่น 300-1100 นาโนเมตร

3.1.6 เครื่องมือที่ใช้ในการวัดสมบัติทางไฟฟ้า

1. อิเล็กโตรมิเตอร์ของยี่ห้อ Keithley รุ่น 610 CR
2. แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงของยี่ห้อ Keithley รุ่น 236
3. เครื่องควบคุมอุณหภูมิยี่ห้อ SHINKO รุ่น MCD100 พร้อมเทอร์โมคัปเปิลชนิด K
4. เครื่องวัดอุณหภูมิของยี่ห้อ Digicon รุ่น Dp-50A
5. เต้าให้ความร้อน
6. กาวเงินนำไฟฟ้า
7. สายไฟ
8. คอมพิวเตอร์

3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2531; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; ฐิตินัย, 2551)

3.2.1. การเตรียมและทำความสะอาดแผ่นกระจกสไลด์เพื่อเป็นฐานรองรับ

1. นำแผ่นกระจกสไลด์ตัดให้ได้ขนาด 25x50 ตารางมิลลิเมตร แช่ในน้ำที่ผสมน้ำยาล้างจานเป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อทำการล้างคราบไขมันและสิ่งสกปรก
2. ทำความสะอาดกระจกสไลด์ด้วยน้ำปอดคประจุเป็นเวลา 10 นาที
3. ทำความสะอาดกระจกสไลด์ด้วยอะซิโตนเป็นเวลา 10 นาที
4. ทำความสะอาดกระจกสไลด์ด้วยเอทานอลเป็นเวลา 10 นาที
5. ทำความสะอาดกระจกสไลด์ด้วยน้ำปอดคประจุ 3 ครั้งๆละ 10 นาที
6. ขั้นตอนในข้อ 2-5 นำปิกเกอร์ไปใส่ในเครื่องอัลตราโซนิก
7. เป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน
8. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่เป่าแห้งแล้วไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

3.2.2 การเตรียมและทำความสะอาดระบบระเหยสารเคมีในระยะประชิด

1. ทำความสะอาดกล่องแกรไฟต์ด้วยเมทานอล
2. นำกล่องแกรไฟต์เป่าให้แห้งด้วยเครื่องเป่าลมร้อน
3. นำกล่องแกรไฟต์ไปใส่ในท่อแก้วในระบบเตาแอลนิตทำการอีแวก-รีฟิล (evac-refill) โดยการดูดอากาศภายในท่อแก้วออกแล้วเติมแก๊สไนโตรเจนเข้าไปจนกระทั่งมีความดันเกือบเท่าความดันบรรยากาศ ทำการดูดแก๊สไนโตรเจนออกจากท่อแก้ว ทำซ้ำกันอีก 3 ครั้ง เพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีออกซิเจนหลงเหลืออยู่แล้ว
4. ทำการอบกล่องแกรไฟต์ที่ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
5. ปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิ รอจนถึงอุณหภูมิห้องแล้วนำกล่องแกรไฟต์ไปเก็บไว้ในภาชนะ ควบคุมความชื้น
6. ทำความสะอาดท่อแก้วควอซปลายปิดหนึ่งด้านด้วยน้ำยาล้างจาน เขย่าทำความสะอาดด้วยน้ำยาล้างจานจนกระทั่งไม่มีน้ำยาล้างจานเหลืออยู่ จากนั้นเขย่าทำความสะอาดด้วยเอทานอล 1 ครั้งตามด้วยน้ำปอดคประจุ 3 ครั้ง ทำการเป่าแห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน ปิดปากท่อเพื่อป้องกันสิ่งสกปรก
7. ทำความสะอาดชิ้นส่วนต่างๆด้วยเอทานอล

8. ทำความสะอาดขั้วไฟฟ้าด้วยแปรงทองเหลือง ขัดให้เรียบด้วยกระดาษทรายละเอียด ทำความสะอาดสิ่งสกปรกที่ตกค้างด้วยน้ำยาทำความสะอาดขั้วไฟฟ้า

3.2.3 การเตรียมผงผลึกของสารตั้งต้น $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่มีองค์ประกอบต่างกัน

สารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) สามารถเตรียมได้จากผงผลึกของสารตั้งต้น CdTe และ CdS ดังสมการ

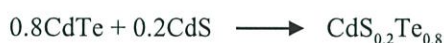


มวลอะตอมของธาตุ Cd, S และ Te มีค่าเท่ากับ 112.41, 32.066 และ 127.60 กรัมต่อโมล ตามลำดับ ดังนั้นจะได้ว่า

มวลโมเลกุลของสารตั้งต้น CdTe = $112.41 + 127.60 = 240.010$ กรัมต่อโมล

มวลโมเลกุลของสารตั้งต้น CdS = $112.41 + 32.066 = 144.476$ กรัมต่อโมล

กรณี $x = 0.2$



มวลโมเลกุลของสารตั้งต้นจะได้เท่ากับ

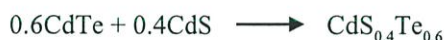
$\text{CdS}_{0.2}\text{Te}_{0.8} = 112.41 + (0.2 \times 32.066) + (0.8 \times 127.60) = 220.9032$ กรัมต่อโมล

ถ้าต้องการใช้สารตั้งต้น $\text{CdS}_{0.2}\text{Te}_{0.8}$ จำนวน 1 กรัม จะต้องใช้สารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

ของสารตั้งต้น CdTe = $\left(\frac{0.8 \times 240.01}{220.9032} \right) = 0.8692$ กรัม

ของสารตั้งต้น CdS = $\left(\frac{0.2 \times 144.476}{220.9032} \right) = 0.1308$ กรัม

กรณี $x = 0.4$



มวลโมเลกุลของสารตั้งต้นจะได้เท่ากับ

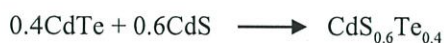
$\text{CdS}_{0.4}\text{Te}_{0.6} = 112.41 + (0.4 \times 32.066) + (0.6 \times 127.60) = 201.9764$ กรัมต่อโมล

ถ้าต้องการใช้สารตั้งต้น $\text{CdS}_{0.4}\text{Te}_{0.6}$ จำนวน 1 กรัม จะต้องใช้สารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

ของสารตั้งต้น CdTe = $\left(\frac{0.6 \times 240.01}{201.9764} \right) = 0.7136$ กรัม

ของสารตั้งต้น CdS = $\left(\frac{0.4 \times 144.476}{201.9764} \right) = 0.2864$ กรัม

กรณี $x = 0.6$



มวลโมเลกุลของสารตั้งต้นจะได้เท่ากับ

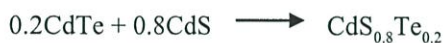
$$\text{CdS}_{0.6}\text{Te}_{0.4} = 112.41 + (0.6 \times 32.066) + (0.4 \times 127.60) = 182.6891 \text{ กรัมต่อโมล}$$

ถ้าต้องการใช้สารตั้งต้น $\text{CdS}_{0.6}\text{Te}_{0.4}$ จำนวน 1 กรัม จะต้องใช้สารตั้งต้นที่เป็นผลึก

$$\text{ของสารตั้งต้น CdTe} = \left(\frac{0.4 \times 240.01}{182.6891} \right) = 0.5255 \text{ กรัม}$$

$$\text{ของสารตั้งต้น CdS} = \left(\frac{0.6 \times 144.476}{182.6891} \right) = 0.4745 \text{ กรัม}$$

กรณี $x = 0.8$



มวลโมเลกุลของสารตั้งต้นจะได้เท่ากับ

$$\text{CdS}_{0.8}\text{Te}_{0.2} = 112.41 + (0.8 \times 32.066) + (0.2 \times 127.60) = 163.5828 \text{ กรัมต่อโมล}$$

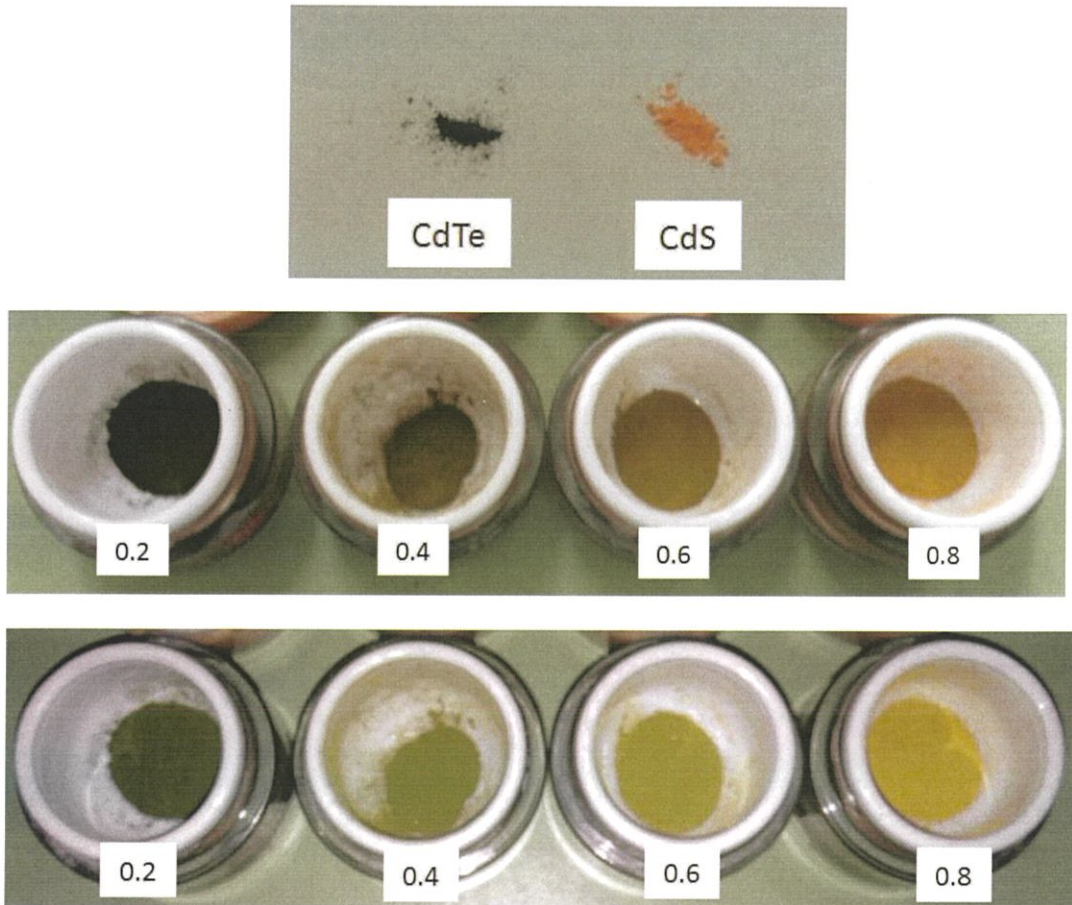
ถ้าต้องการใช้สารตั้งต้น $\text{CdS}_{0.8}\text{Te}_{0.2}$ จำนวน 1 กรัม จะต้องใช้สารตั้งต้นที่เป็นผลึก

$$\text{ของสารตั้งต้น CdTe} = \left(\frac{0.2 \times 240.01}{163.5828} \right) = 0.2931 \text{ กรัม}$$

$$\text{ของสารตั้งต้น CdS} = \left(\frac{0.8 \times 144.476}{163.5828} \right) = 0.7066 \text{ กรัม}$$

ตารางที่ 3.1 ปริมาณสารตั้งต้นที่มีสัดส่วนผสมทางเคมีต่างๆของ CdTe และ CdS และอุณหภูมิที่ใช้ในการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

Mole Fraction (x)	Starting Material Content (g)		Source Temperature (°C)	Substrate Temperature (°C)
	CdS	CdTe		
0.0	-	1.0000	550	450
0.2	0.1308	0.8692	700	600
0.4	0.2864	0.7136	700	600
0.6	0.4745	0.5255	700	600
0.8	0.7066	0.2934	700	600
1.0	1.0000	-	700	600



รูปที่ 3.1 ผลผลิตของสารตั้งต้น CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่ผสมแล้วเพื่อจะใช้ในการทดลองทั้งแบบที่ เปิดเฟลชและเปิดเฟลชของกล้องถ่ายภาพ

3.2.4 การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิดซึ่งประกอบไปด้วยวิธีและขั้นตอนดังนี้

3.2.4.1 การเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำแคดเมียมเทลลูไรด์โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด ใช้เวลาดั้งแต่ 1-5 นาที เพื่อหาความต้านทานที่น้อยที่สุด

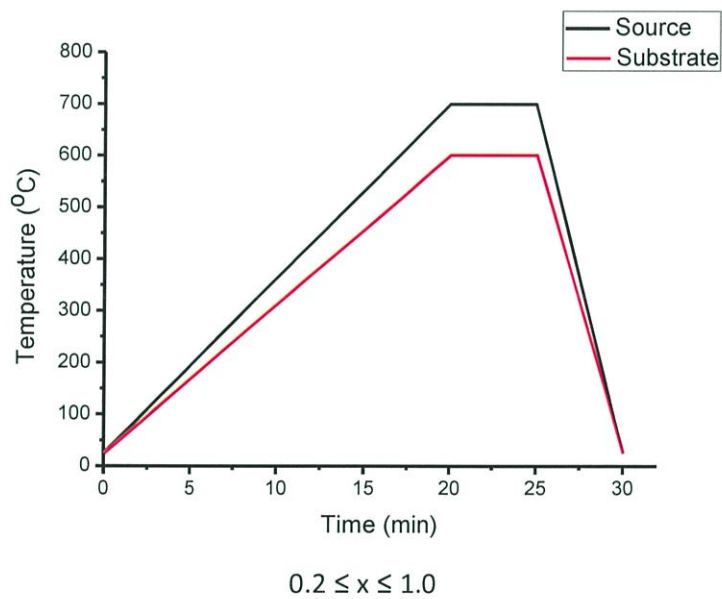
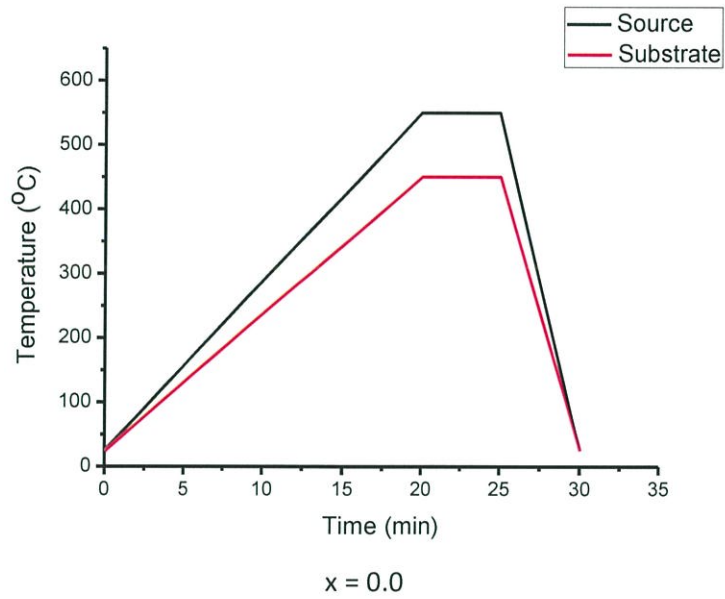
1. ชั่งสารตั้งต้นแคดเมียมเทลลูไรด์บริสุทธิ์ 99.99 เปอร์เซ็นต์ ให้ได้น้ำหนัก 0.01 กรัม แล้วนำมาบรรจุในกล่องแกรไฟต์ เขย่าเพื่อให้สารตั้งต้นกระจายเท่าๆกัน ปรับผิวหน้าให้เรียบโดยใช้แท่งแก้วค่อยๆกดให้ผิวหน้าสม่ำเสมอ
2. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมไว้ใส่ในกล่องแกรไฟต์

3. ทำการติดตั้งระบบระเหิดสารเคมีในระยะประชิดให้ครบถ้วน
4. ตั้งโปรแกรมเครื่องควบคุมอุณหภูมิเพื่อให้อุณหภูมิแก๊สเริ่มต้นจากอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 20 นาที ให้อุณหภูมิกงตัวที่ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1-5 นาที ตามลำดับ แล้วลดอุณหภูมิลงมาถึงอุณหภูมิห้อง ใช้เวลา 5 นาที
5. นำอลูมิเนียมฟอยล์มาคลุม และจัดตำแหน่งอลูมิเนียมฟอยล์ทำการเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ฐานรองรับจากอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 20 นาที ให้อุณหภูมิกงตัวที่ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1-5 นาที ตามลำดับ แล้วลดอุณหภูมิมายังอุณหภูมิห้องใช้เวลา 5 นาที
6. เปิดปั๊มกลโรตารี แล้วเปิดวาล์วสูบบอกาสออกจนได้ความดันประมาณ $5 \times 10^{-2} - 3 \times 10^{-2}$ มิลลิบาร์ แล้วเปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิสารตั้งต้นและแผ่นฐานรองรับ ตามข้อ 4
7. เมื่อปลุกฟิล์มบางเสร็จแล้ว รอจนกว่าอุณหภูมิจากสารตั้งต้นและแผ่นฐานรองรับ ลดลงต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส แล้วปิดวาล์วปั๊มกลโรตารี ความดันภายในระบบ จะค่อยๆเพิ่มขึ้น
8. เมื่ออุณหภูมิจากสารตั้งต้นและแผ่นฐานรองรับลดลงเท่ากับอุณหภูมิห้อง ค่อยๆเปิดวาล์วให้อากาศเข้าไปจนกระทั่งความดันภายในเท่ากับความดันภายนอก
9. สวมหน้ากากป้องกันไอระเหยจากสารเคมี เปิดระบบเพื่อนำเอาแผ่นฐานรองรับออกจากแกรไฟต์
10. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่เป็นแผ่นฐานรองรับที่เคลือบด้วยฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ มาตรวจสอบผิวหน้าของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์ คุณภาพของฟิล์มบางที่ได้มีผิวหน้าที่สมบูรณ์ คือ ผิวหน้าสม่ำเสมอไม่มีรูพรุน จากนั้นก็นำฟิล์มบางไปเก็บในภาชนะควบคุมความชื้น

3.2.4.2 การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

1. ชั่งสารตั้งต้น CdS_xTe_{1-x} ($x = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8,$ และ 1.0) ตามสัดส่วนผสมทางเคมีต่างๆที่ต้องการให้ได้น้ำหนัก 0.01 กรัม แล้วนำมาบรรจุในกล่องแกรไฟต์ เขย่าเพื่อให้สารตั้งต้นกระจายเท่าๆกัน ปรับผิวหน้าให้เรียบโดยการใช้แท่งแก้วค่อยๆกดให้ผิวหน้าสม่ำเสมอ
2. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมไว้ใส่ในกล่องแกรไฟต์
3. ทำการติดตั้งระบบระเหิดสารเคมีในระยะประชิดให้ครบถ้วน

4. ตั้งโปรแกรมเครื่องควบคุมอุณหภูมิเพื่อให้อุณหภูมิสารตั้งต้นจากอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 20 นาที ให้อุณหภูมิคงตัวที่ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที ตามลำดับ แล้วลดอุณหภูมิลงมาถึงอุณหภูมิห้อง ใช้เวลา 5 นาที
5. นำแผ่นอลูมิเนียมฟอยล์มาคลุม และจัดตำแหน่งแผ่นอลูมิเนียมฟอยล์ทำการเพิ่มอุณหภูมิให้แก่แผ่นฐานรองรับจากอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 20 นาที ให้อุณหภูมิคงตัวที่ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที ตามลำดับ แล้วลดอุณหภูมิลงมาถึงอุณหภูมิห้อง ใช้เวลา 5 นาที
6. เปิดปั๊มกลโรตารี แล้วเปิดวาล์วสูบอากาศออก จนได้ความดันประมาณ $5 \times 10^{-2} - 3 \times 10^{-2}$ มิลลิบาร์ แล้วเปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิสารตั้งต้นและฐานรองรับ
7. เมื่อปลูกฟิล์มเสร็จแล้ว รอจนกว่าอุณหภูมิของสารตั้งต้นและแผ่นฐานรองรับลดลงต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส แล้วปิดวาล์วปั๊มกลโรตารี ความดันภายในระบบจะค่อยๆเพิ่มขึ้น
8. เมื่ออุณหภูมิของสารตั้งต้นและฐานรองรับลดลงเท่ากับอุณหภูมิห้อง ค่อยๆเปิดวาล์วให้อากาศเข้าไปจนกระทั่งความดันภายในเท่ากับความดันภายนอก
9. สวมหน้ากากป้องกันไอระเหยจากสารเคมี เปิดระบบเพื่อนำเอาแผ่นฐานรองรับออกจากแกรไฟต์
10. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่เป็นแผ่นฐานรองรับที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} มาตรวจสอบผิวหน้าของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์ คุณภาพของฟิล์มบางที่ได้มีผิวหน้าที่สมบูรณ์ คือ ผิวหน้าสม่ำเสมอไม่มีรูพรุนจากนั้นก็นำฟิล์มบางไปเก็บในภาชนะควบคุมความชื้น



รูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการประดิษฐ์ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด ใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที



รูปที่ 3.3 ระบบการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

3.3 การศึกษาสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2531; งามนิตย์, 2545; จูตินัย, 2549; จูตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; จูตินัย, 2551)

3.3.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ จากเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ของยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ 1.5418 อังสตรอมโดยใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์ และความต่างศักย์ 30 กิโลโวลต์ โดยวัดจากมุม 20–60 องศา

3.3.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope: SEM) ของยี่ห้อ LED รุ่น LEO 1455VP โดยใช้แรงดัน 6 กิโลโวลต์และกำลังแยกความละเอียดของภาพถ่าย 1,000, 3,000 และ 5,000 เท่า

3.3.3 การศึกษาสมบัติทางแสง

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาสมบัติทางแสงด้วยการวัดค่าการส่งผ่านแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS spectrophotometer) ของยี่ห้อ thermo electron corporation รุ่น He ios โดยใช้ความยาวคลื่น 300 ถึง 1100 นาโนเมตร เพื่อคำนวณหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและค่าช่องว่างแถบพลังงาน

3.3.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดค่าความต้านทานแผ่นด้วยวิธีสองขั้วและวัดค่าพลังงานกระตุ้นโดยการศึกษาความต้านทานที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ

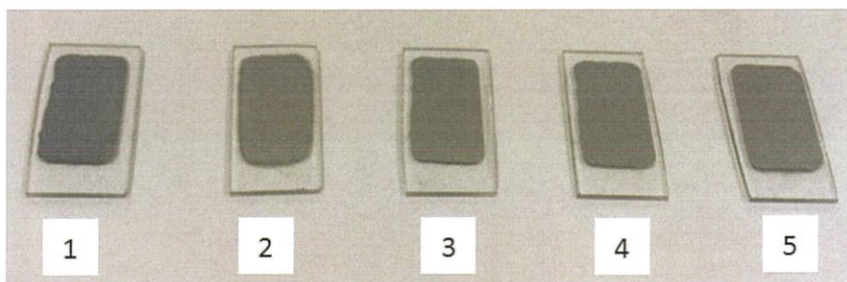
บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ในโครงการพิเศษนี้ ได้ทำการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ ที่ความดันต่ำระดับ 3.5×10^{-2} มิลลิบาร์ เมื่อค่า $x = 0.0$ โดยที่ x คือ สัดส่วนของโมลอะตอมของธาตุ S จะให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการระเหิดตั้งแต่ 1-5 นาที แต่เมื่อค่า $x = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ และ 1.0 จะให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 700 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 600 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการระเหิด 5 นาที และนำฟิล์มบางที่ได้ทั้งหมดไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ศึกษาโครงสร้างเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ศึกษาสมบัติทางแสงด้วยการวัดค่าการส่งผ่านแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางโดยการวัดความต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีสองขั้ว และความต้านทานไฟฟ้าที่ขึ้นกับอุณหภูมิ

4.1. ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

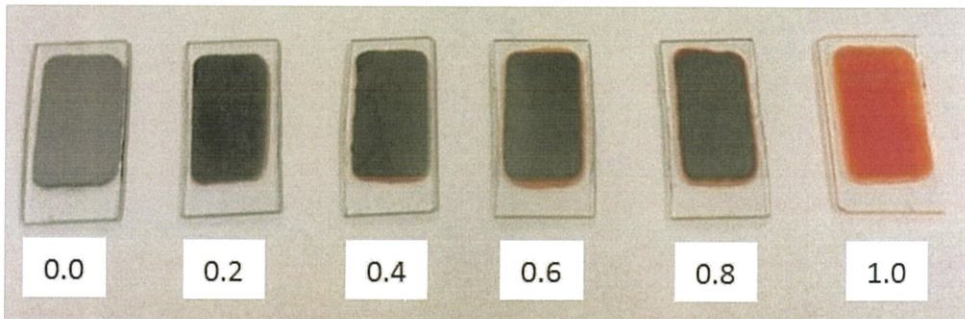
ที่สัดส่วนของโมลอะตอมของธาตุ S เท่ากับ $x = 0.0$ ฟิล์มมีลักษณะเป็นสีดำ มีผิวหน้าเรียบสม่ำเสมอ เกาะติดบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ได้ดี โดยไม่หลุดร่อนง่ายและไม่มีรูพรุน ซึ่งลักษณะของฟิล์มบางที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 450 องศาเซลเซียส เมื่อใช้เวลาในการระเหิดตั้งแต่ 1-5 นาที จะแสดงดังรูปที่ 4.1



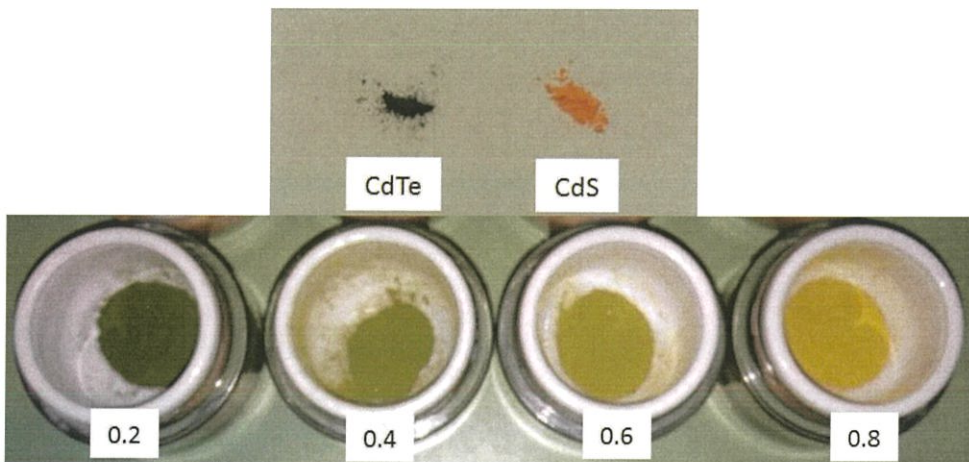
รูปที่ 4.1 ฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($x = 0.0$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมีตั้งแต่ 1 – 5 นาที เรียงตามลำดับ

ที่สัดส่วนของโมลอะตอมของธาตุ S เท่ากับ 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 พิล์มบางมีลักษณะเป็นสีดำ แตกต่างไปจากสารตั้งต้นในรูปที่ 4.3 มีขอบสีส้ม มีผิวหน้าเรียบสม่ำเสมอ เกาะติดบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ได้ดี ไม่มีรูพรุนแต่จะหลุดร่อนได้ถ้าทิ้งไว้ในอากาศนานหลาย สัปดาห์ ซึ่งฟิล์มบางที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดนี้เกิดจากการให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 700 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 600 องศาเซลเซียส เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 5 นาที จะแสดงดังรูป ที่ 4.2

ที่สัดส่วนของโมลอะตอมของธาตุ S เท่ากับ 1.0 พิล์มบางมีลักษณะเป็นสีส้ม ผิวหน้าเรียบสม่ำเสมอ ไม่มีรูพรุน เกาะติดบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ได้ดี ซึ่งฟิล์มบางที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดนี้เกิดจากการให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 700 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 600 องศาเซลเซียส เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 5 นาที จะแสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที



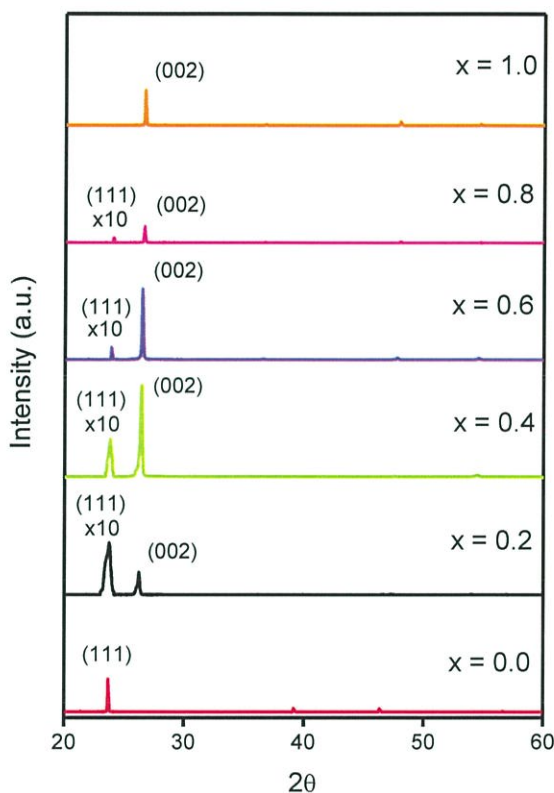
รูปที่ 4.3 ผลึกของสารตั้งต้นสำหรับเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

4.2 ผลการศึกษาสมบัติฟิสิกส์พื้นฐานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$

($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

4.2.1 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$

($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด



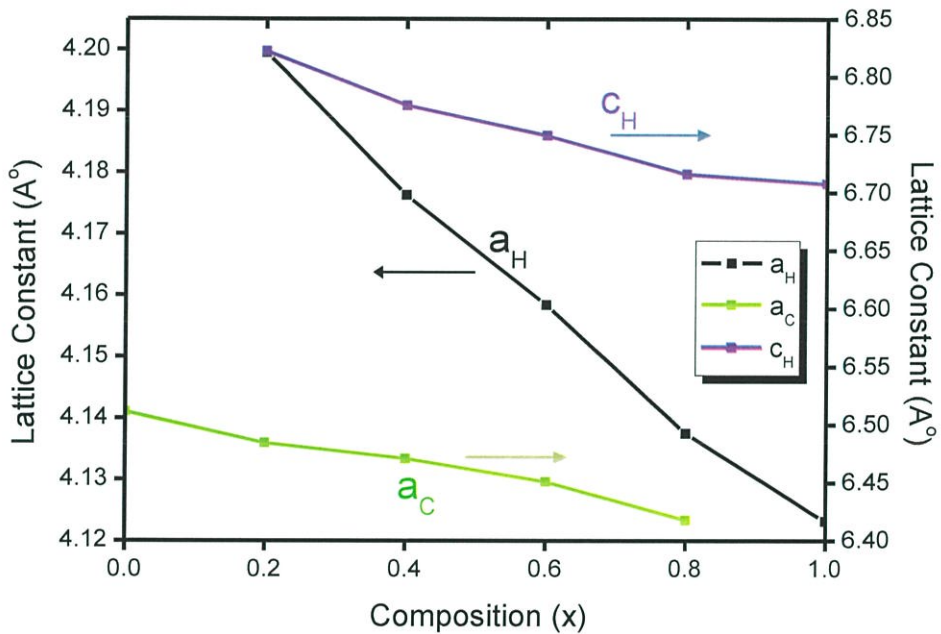
รูปที่ 4.4 พิกัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

ลักษณะโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล และลักษณะโครงสร้างผลึกแบบคิวบิกมีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$a_0 = \frac{a}{(2)^{1/2}} \quad (4.1)$$

$$c_0 = \frac{2a}{(3)^{1/2}} \quad (4.2)$$

ลักษณะโครงสร้างผลึกจากการศึกษาด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที พบว่าเมื่อมีค่าสัดส่วนของโมลอะตอมของธาตุ S น้อยกว่า 0.2 ($x < 0.2$) ฟิล์มบางจะมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบคิวบิก โดยมีระนาบ (111) ที่โดดเด่น แต่เมื่อมีค่าสัดส่วนของโมลอะตอมของธาตุ S อยู่ในช่วง $0.2 \leq x \leq 0.8$ ฟิล์มบางจะมีโครงสร้างผลึกทั้งแบบคิวบิกและเวอร์ทไซต์ที่อยู่ร่วมกัน กล่าวคือ มีทั้งระบบ (111) ของโครงผลึกแบบคิวบิกและระนาบ (002) ของโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล เกิดขึ้นร่วมกัน ดังปรากฏในรูปที่ 4.4 และเมื่อมีค่าสัดส่วนของโมลอะตอมของธาตุ S สูงกว่า 0.8 ($x > 0.8$) จะโครงสร้างแบบเฮกซะโกนัล โดยมีระนาบ (002) ที่โดดเด่น (Wood, 1999)



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่โครงผลึกกับสัดส่วนโมลอะตอมของธาตุ S ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

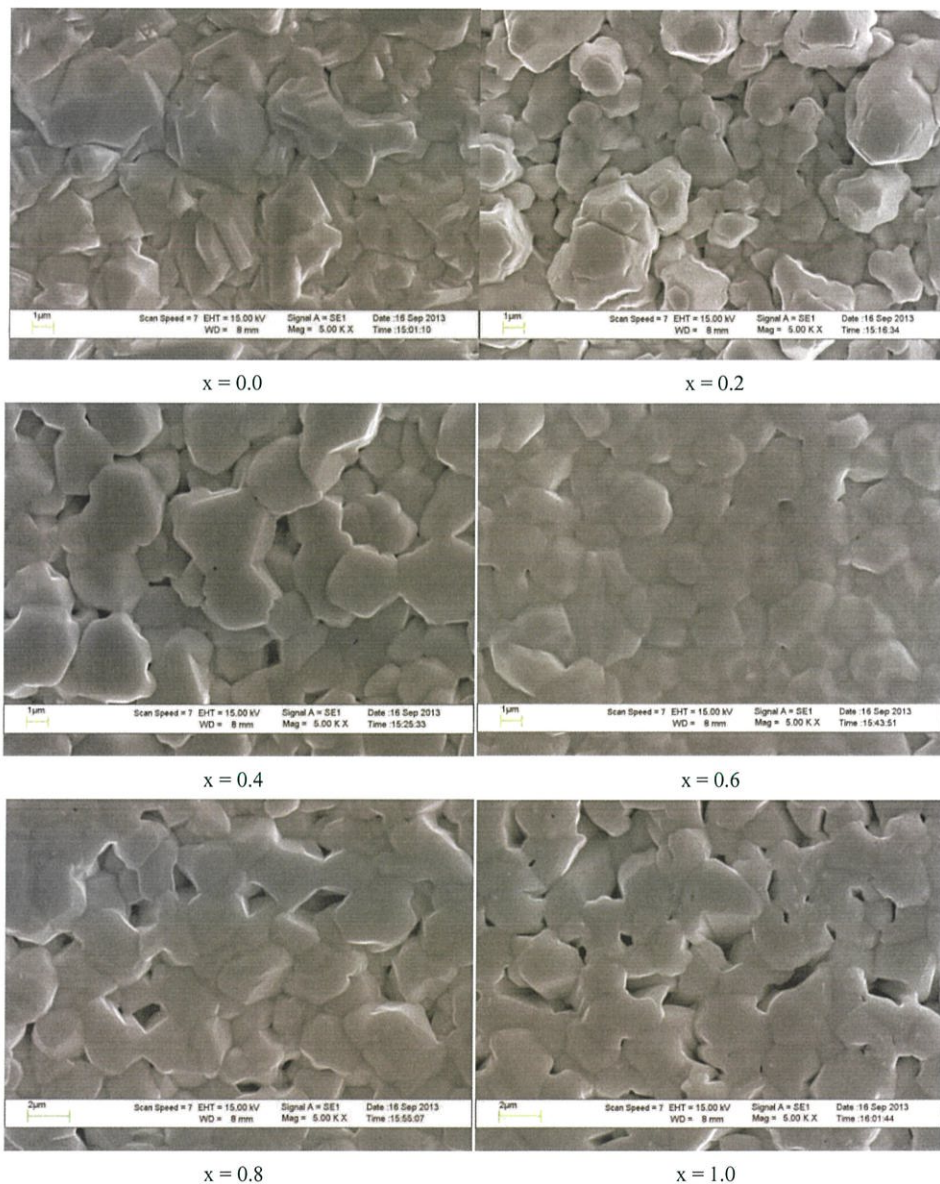
ตารางที่ 4.1 ค่าคงที่โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

Composition (x)	Lattice Constant (Å)		
	Cubic	Hexagonal	
	(a_c)	(a_H)	(a_H)
0.0	6.5107	-	-
0.2	6.4837	4.1995	6.8216
0.4	6.4703	4.1763	6.7750
0.6	6.4502	4.1584	6.7490
0.8	6.4171	4.1375	6.7157
1.0	-	4.1232	6.7075

ตารางที่ 4.2 สัดส่วนโมลอะตอมของธาตุ S ที่ปรากฏในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยความสัมพันธ์ของวิการ์ด

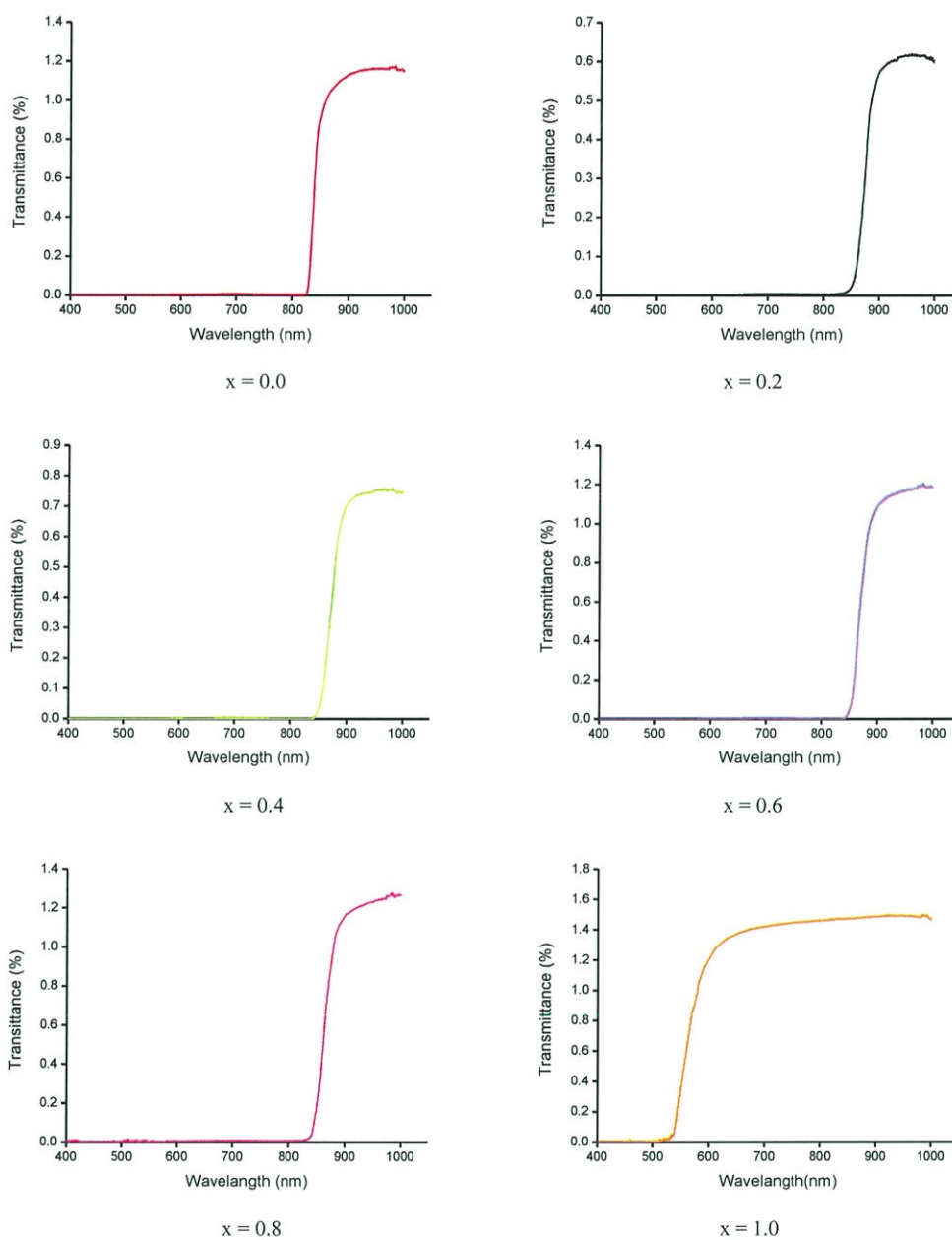
Starting Composition (x)	Film Composition (x)		
	Cubic (Å)	Hexagonal (Å)	
	(a_c) $y=-0.7040x+0.64912$	(a_H) $y=-0.04347x+0.45685$	(c_H) $y=-0.07995x+0.75125$
0.0	0	-	-
0.2	0.01	0.84	0.86
0.4	0.02	0.90	0.92
0.6	0.05	0.94	0.95
0.8	0.10	0.99	0.99
1.0	-	1.00	1.00

4.2.2 ผลการศึกษาภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบาง $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด การศึกษาโครงสร้างผลึกมหภาคของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นการศึกษาถึงลักษณะของสภาพพื้นผิวหน้าของฟิล์มบางและจากภาพถ่าย SEM ยังสามารถบอกถึงขนาดของเกรนของฟิล์มบางได้ ภาพถ่าย SEM ที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.6

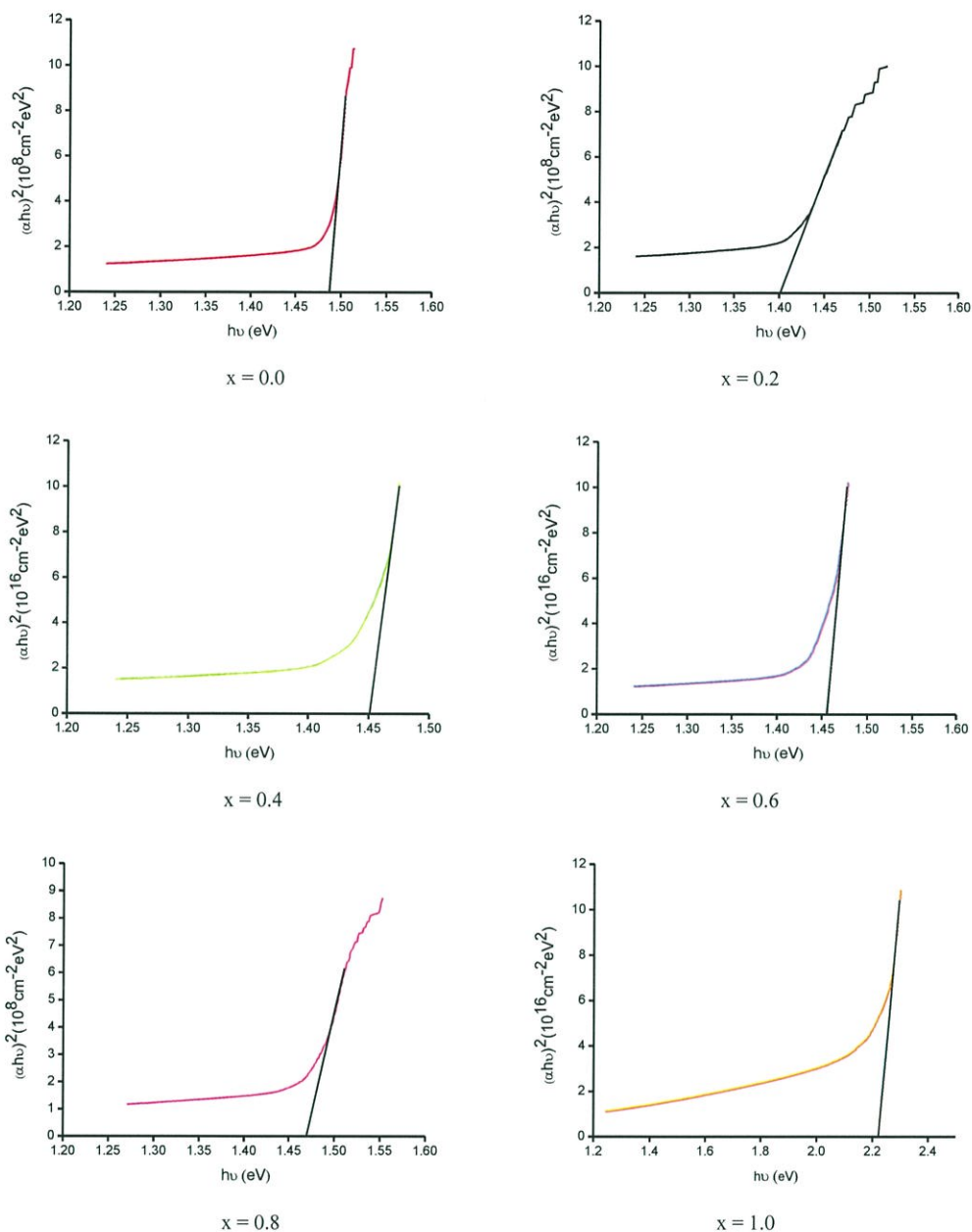


รูปที่ 4.6 ภาพถ่าย SEM ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

4.2.3 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด



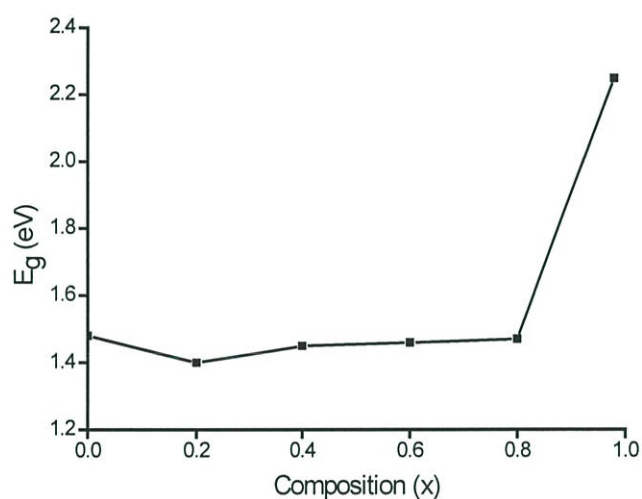
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหยสารเคมี 5 นาที



รูปที่ 4.8 การหาช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาทีพบว่าขอบการดูดกลืนแสงอยู่ที่ความยาวคลื่นแสงประมาณ 530 นาโนเมตร ในกรณี $x = 0$ และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 830 นาโนเมตร ที่ $x = 1.0$ และสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงมีค่าประมาณ 0.6-

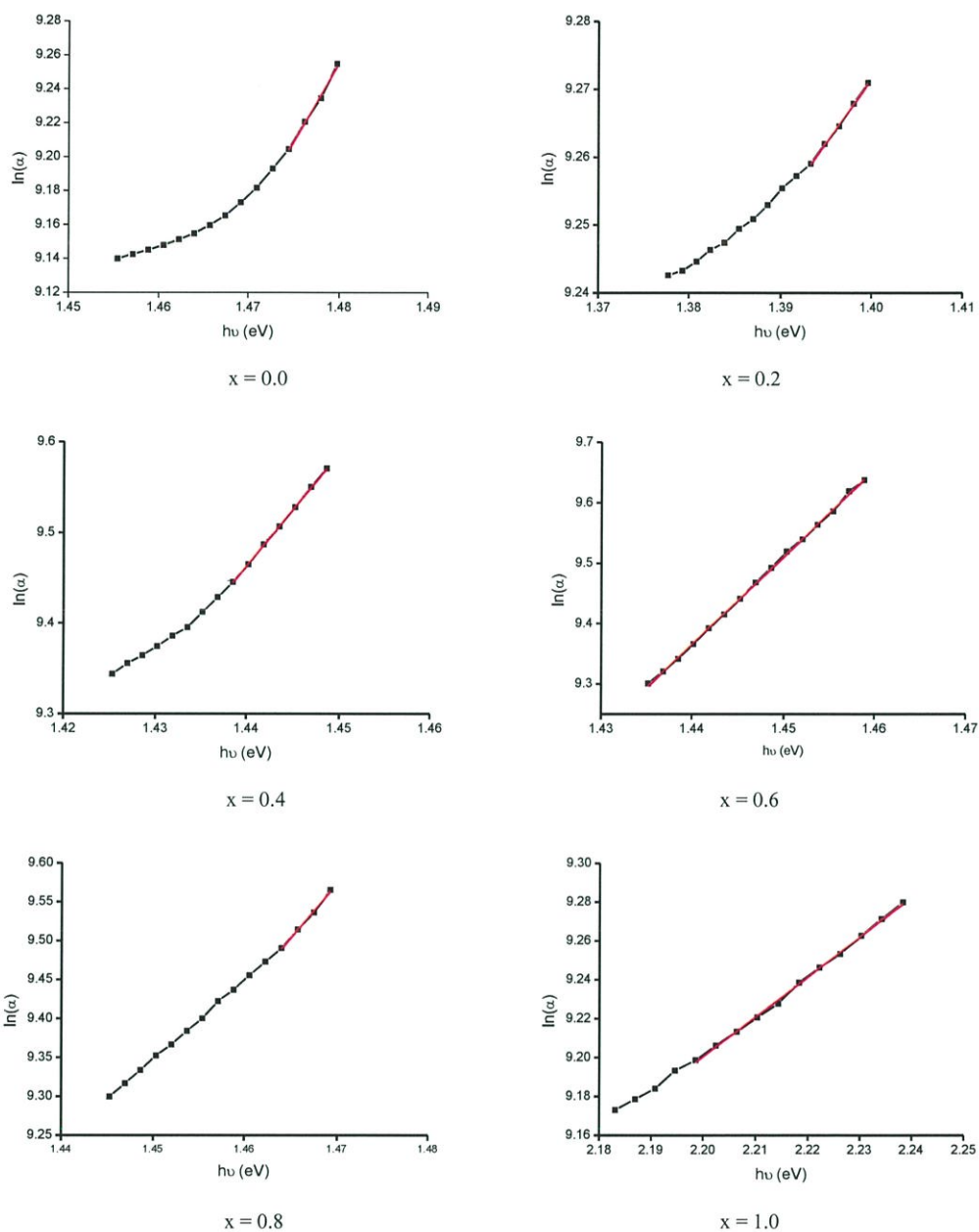
1.4 เปอร์เซนต์ ข้อมูลที่ได้จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงสามารถคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน โดยนำข้อมูลที่นำไปวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) แล้วทำการลากเส้นตรงหาค่าคาดหมาย (Extrapolation) ของกราฟในส่วนที่เป็นเชิงเส้น ไปตัดกับแกนพลังงานโฟตอน จุดที่ตัดแกนพลังงานโฟตอนคือ ค่าช่องว่างแถบพลังงาน แสดงได้ในรูปที่ 4.7, 4.8 และในตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) กับสัดส่วนโมลอะตอมของธาตุ S ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

ตารางที่ 4.3 ช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

Composition (x)	Energy Gap (E_g) (eV)
0.0	1.48
0.2	1.40
0.4	1.45
0.6	1.46
0.8	1.47
1.0	2.25



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\alpha$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

การศึกษาส่วนหางของแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที สามารถคำนวณได้จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง ซึ่งจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงสามารถนำไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \alpha$ กับ $h\nu$ ดังรูปที่ 4.10 ตามสมการ

$$\alpha = \alpha_0 \exp\left[\frac{\sigma(E - E_0)}{k_B T}\right] \quad (4.3)$$

ซึ่งความชันของกราฟสามารถนำมาหาค่าส่วนหางของแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที ได้ตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าส่วนหางของแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

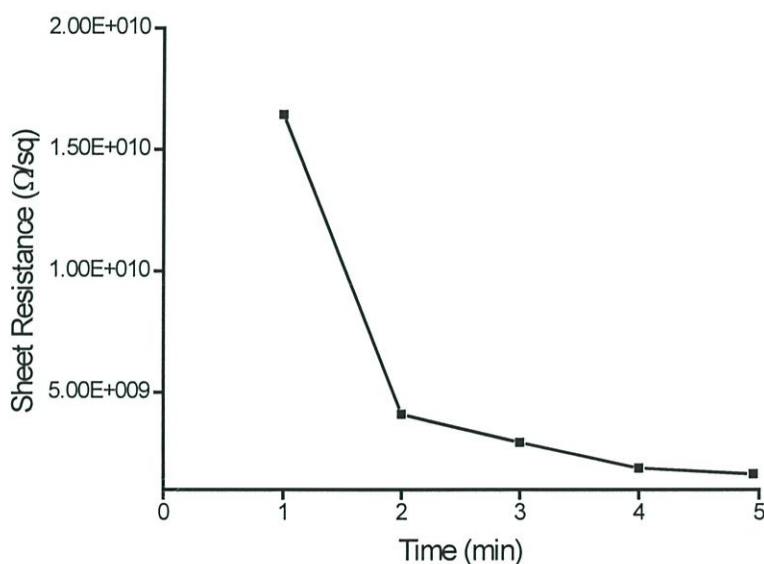
Composition (x)	Band Tail (meV)
0.0	106.72
0.2	529.10
0.4	80.19
0.6	68.92
0.8	70.13
1.0	485.44

4.2.4 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

เนื่องจากความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด มีค่าความต้านทานสูงมาก ดังนั้นจึงวัดความต้านทานด้วยวิธีสองขั้ว

4.2.4.1 ความต้านทานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($x = 0$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

ความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe มีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาในการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดเพิ่มขึ้น ดังปรากฏในรูปที่ 4.11 แสดงว่าความหนาของฟิล์มที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความต้านทานแผ่นลดลง ขนาดของเกรนมีค่าเพิ่มขึ้น บริเวณขอบของเกรน (grain boundary) มีค่าลดลง



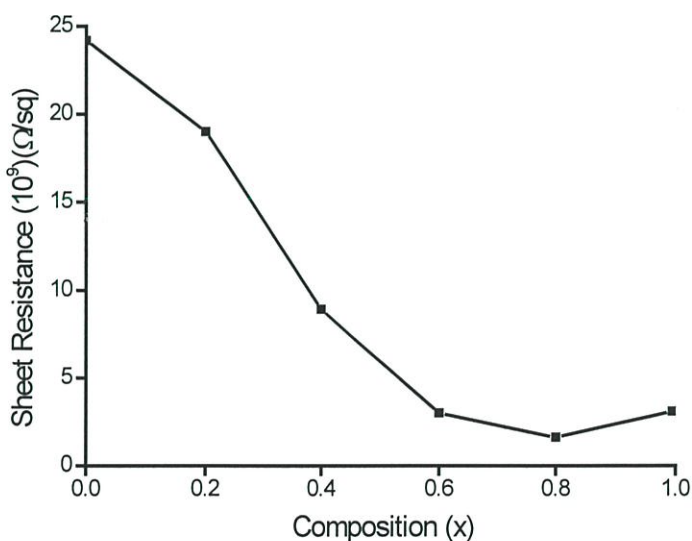
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแผ่นกับเวลาในการระเหยสารเคมีของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

ตารางที่ 4.5 ค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมีต่างกัน

Time (min)	Sheet Resistance (10^9)(Ohm/sq)
1	16.44
2	4.09
3	2.93
4	1.87
5	1.64

4.2.4.2 ความต้านทานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

จากรูปที่ 4.11 พบว่าที่เวลาในการระเหิด 5 นาที ฟิล์มมีค่าความต้านทานต่ำสุด ดังนั้นในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) เราเลือกใช้เวลา 5 นาทีในการระเหิดสารเคมี จากการทดลองพบว่าค่าความต้านทานจะลดลงตามปริมาณแคดเมียมซัลไฟด์ที่เพิ่มขึ้นและมีค่าความต้านทานแผ่นต่ำสุดที่ $x = 0.8$ ดังแสดงได้ในรูปที่ 4.12



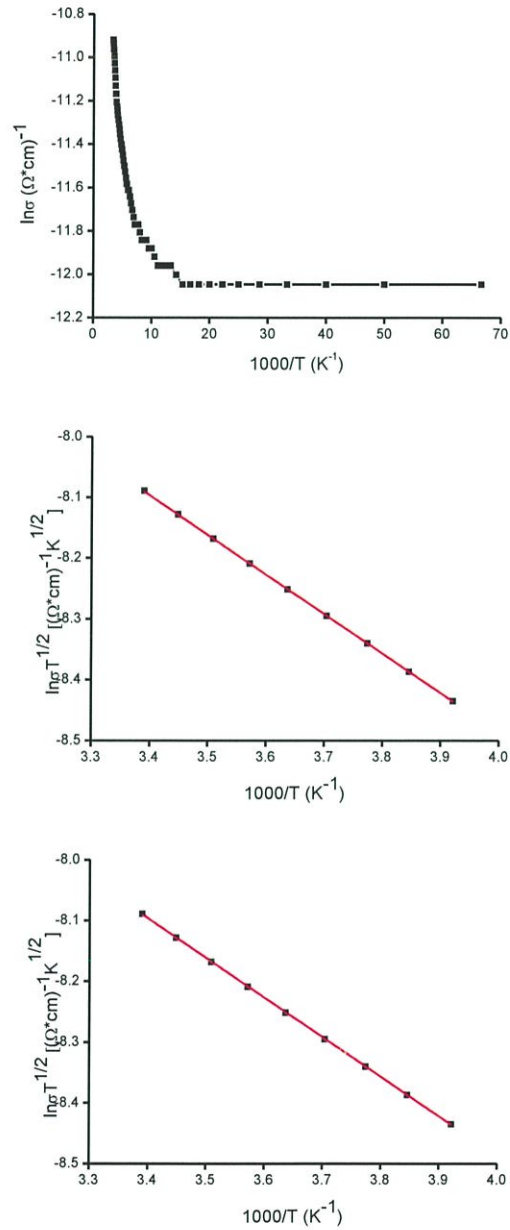
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแผ่นกับสัดส่วนโมลอะตอมของธาตุ S ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

ตารางที่ 4.6 ค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

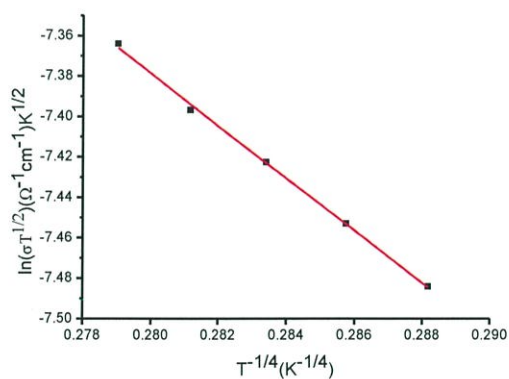
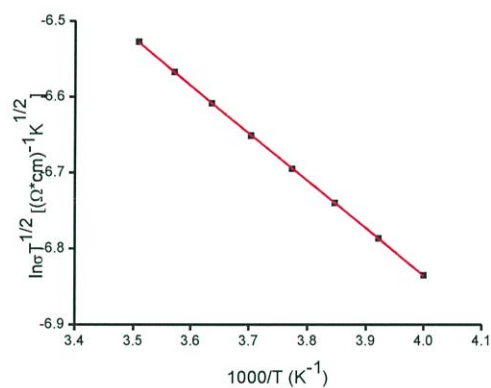
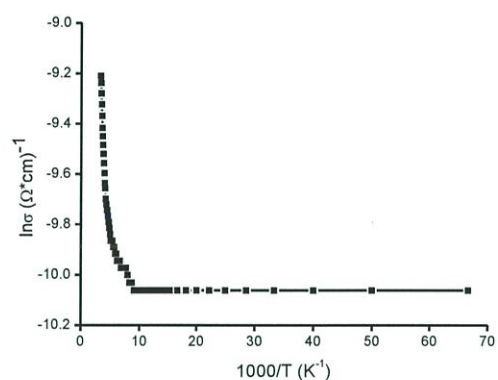
Composition (x)	Sheet Resistance (10^7)(ohm/sq)
0.0	163.66
0.2	14.06
0.4	12.15
0.6	4.66
0.8	2.24
1.0	4.13

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.11 และ 4.12 กับตารางที่ 4.5 และ 4.6 เราจึงเลือกนำเอาฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($x = 0.2$) ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 5 นาที ไปศึกษาการวัดความต้านทานที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง และนำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($x = 0.4, 0.6, 0.8$) ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 5 นาที ไปศึกษาการวัดความต้านทานที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ในหัวข้อต่อไป

4.2.4.3 การศึกษาความต้านทานที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($x = 0.4, 0.6, 0.8$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

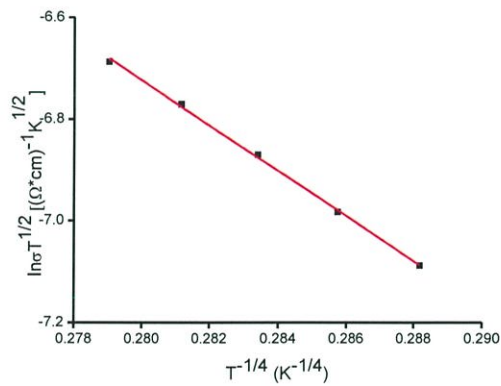
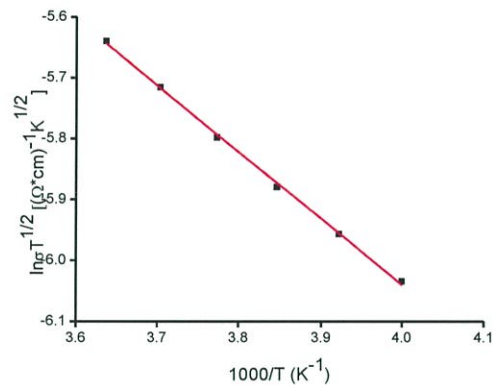
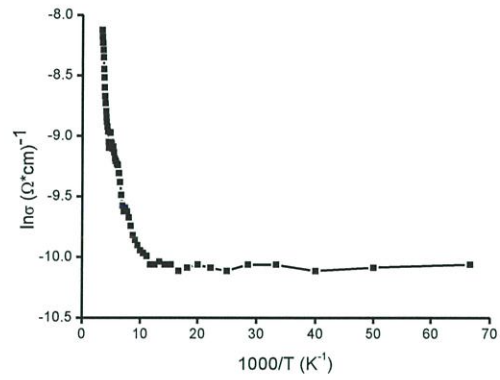


รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \sigma$ กับ $\frac{1000}{T}$, $\ln \sigma T^{1/2}$ กับ $\frac{1000}{T}$ และ $\ln \sigma T^{1/2}$ กับ $T^{-1/4}$ ตามลำดับ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($x = 0.4$) ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 5 นาที



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \sigma$ กับ $\frac{1000}{T}$, $\ln \sigma T^{\frac{1}{2}}$ กับ $\frac{1000}{T}$ และ $\ln \sigma T^{\frac{1}{2}}$ กับ $T^{-\frac{1}{4}}$

ตามลำดับ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($x = 0.6$) ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 5 นาที



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\sigma$ กับ $\frac{1000}{T}$, $\ln\sigma T^{\frac{1}{2}}$ กับ $\frac{1000}{T}$ และ $\ln\sigma T^{\frac{1}{2}}$ กับ $T^{-\frac{1}{4}}$ ตามลำดับ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($x = 0.8$) ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 5 นาที

วิธีการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าในที่นี้จะใช้ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($x = 0.8$) ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระบะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 5 นาที มาใช้ตัวเป็นตัวอย่างในการคำนวณ โดยเริ่มจากแบบจำลองอะตอมของซีโต ซึ่งสามารถที่จะคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง

$$\ln \sigma T^{\frac{1}{2}} \text{ กับ } \frac{1000}{T}$$

-การหาค่าพลังงานกระตุ้น (E_a)

$$\sigma T^{-1} = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (4.4)$$

$$\ln(\sigma T^{-1}) = -\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T}\right) + \ln \sigma_0$$

$$\ln(\sigma T^{-1}) = -\frac{E_a}{1,000k} \left(\frac{1,000}{T}\right) + \ln \sigma_0 \quad (4.5)$$

$$\text{ความชัน} = -\frac{E_a}{1,000k}$$

$$E_a = \frac{(1,000)(k)(\text{ความชัน})}{1.8 \times 10^{-19}}$$

แทนค่า

$$E_a = \frac{1000(1.38 \times 10^{-23})(1.09182)}{(1.6 \times 10^{-19})}$$

$$E_a = 0.0942 \text{ อิเล็กตรอน โวลต์}$$

-การหาค่าเพอร์มิตติวิตี (ϵ_s)

$$\epsilon_s = \epsilon_r \epsilon_0 \quad (4.6)$$

แทนค่า

$$\epsilon_s = (9.38)(8.8 \times 10^{-14})$$

$$\epsilon_s = 8.30113 \times 10^{-13} \text{ ฟารัดต่อตารางเซนติเมตร}$$

-การหาค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ (N_a)

$$E_b = \frac{e^2 L^2 N_a}{8 \epsilon_s} \quad (4.7)$$

$$N_a = \frac{8 \epsilon_s E_b}{e^2 L^2}$$

แทนค่า

$$N_a = \frac{8(8.3013 \times 10^{-13})(0.0942)(1.6 \times 10^{-19})}{(1.6 \times 10^{-19})^2 (3.2963 \times 10^{-6})^2}$$

$$N_a = 3.5972 \times 10^{17} \text{ ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร}$$

-การหาค่าความยาวเดอบาย (L_D)

$$L_D = \left[\frac{kT\epsilon_s}{e^2 N_a} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.8)$$

แทนค่า

$$L_D = \left[\frac{(1.38 \times 10^{-23})(275)(8.3013 \times 10^{-13})}{(1.6 \times 10^{-19})^2 (3.5972 \times 10^{17})} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$L_D = 5.84891 \times 10^{-7} \text{ เซนติเมตร}$$

-การหาค่าระดับพลังงานของกึ่งตัวนำ (E_i)

$$E_a = \frac{1}{2} E_g - E_i \quad (4.9)$$

$$E_i = \frac{1}{2} E_g - E_a$$

แทนค่า

$$E_i = \frac{1}{2} (1.47) - 0.0942$$

$$E_i = 0.64 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

-การหาค่าความหนาแน่นของกึ่งตัวนำ (N_i)

$$\sigma = \left[\frac{L^2 e^2 N_v N_a \nu_c}{2kT(N_i - LN_a)} \right] \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (4.10)$$

$$N_i = \left[\frac{L^2 e^2 N_v N_a \nu_c}{2kT\sigma} \right] \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) + LN_a$$

สามารถหาค่า ν_c ได้จาก

$$\nu_c = \left[\frac{kT}{2\pi m^*} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.11)$$

แทนค่า

$$\nu_c = \left[\frac{(1.38 \times 10^{-23})(275)}{2(3.14)(0.165 \times 9.1 \times 10^{-31})} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\nu_c = 6.34 \times 10^4 \text{ เซนติเมตรต่อวินาที}$$

สามารถหาค่า N_v ได้จาก

$$N_v = 2 \left[\frac{2\pi m^* kT}{h^2} \right]^{\frac{3}{2}} \quad (4.12)$$

แทนค่า

$$N_v = 2 \left[\frac{2 \times 3.14 \times 0.165 \times 9.1 \times 10^{-31} \times 1.38 \times 10^{-23} \times 275}{(6.63 \times 10^{-34})^2} \right]^{\frac{3}{2}}$$

$$N_v = 1.46 \times 10^{24}$$

$$N_t = \left[\frac{9.3249 \times 10^{-3}}{1.0171 \times 10^{-5}} \right] \exp \left(- \frac{0.0942 \times 1.6 \times 10^{-19}}{(1.38 \times 10^{-23}) (275)} \right) + ((32 \times 10^{-7}) (3.59 \times 10^{12}))$$

$$N_t = 1.19 \times 10^{12} \text{ ต่อตารางเซนติเมตร}$$

สำหรับแบบจำลองอะตอมแบบการกระโดดระหว่างสถานะพลังงานท้องถิ่นในระยะไม่คงที่ พารามิเตอร์ต่างๆสามารถคำนวณได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \sigma T^{\frac{1}{2}}$ กับ $T^{-\frac{1}{4}}$

-การหาค่าองศาของความไม่เป็นระเบียบ (T_0) และแฟกเตอร์หน้าพจน์เอกซ์โพเนนเชียล (σ_0)

$$\sigma T^{\frac{1}{2}} = \sigma_0 \exp \left[- \frac{T_0}{T} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (4.13)$$

$$\ln \left(\sigma T^{\frac{1}{2}} \right) = - \left(\frac{T_0}{T} \right)^{\frac{1}{4}} + \ln \sigma_0$$

$$T_0 = 3865470.311 K$$

$$\sigma_0 = 296.16 \text{ ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร}$$

-การหาค่าความหนาแน่นของสถานะถูกจำกัดเฉพาะที่ที่ระดับเฟอร์มี ($N(E_F)$)

$$N(E_F) = (2.0 \times 10^9) \sigma_0^3 T_0^{\frac{1}{2}} \quad (4.14)$$

แทนค่า

$$N(E_F) = (2.0 \times 10^9) (296.16)^3 (3865470.331)^{\frac{1}{2}}$$

$$N(E_F) = 1.02 \times 10^{20} \text{ ต่ออิเล็กทรอนิกส์อนโวลต์}$$

-การหาค่าระยะทางเฉลี่ยของการกระโดด (R)

$$R = \left[\frac{9}{8\pi\alpha kTN(E_F)} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (4.15)$$

สามารถหาค่าคงที่ของการสลายตัวของฟังก์ชันคลื่นของสถานะถูกจำกัดเฉพาะที่ที่ระดับเฟอร์มี (α) ได้จาก

$$\alpha = 21.23\sigma_0 T_0^{\frac{1}{2}} \quad (4.16)$$

แทนค่า $\alpha = 21.23(296.16)(3865470.331)^{\frac{1}{2}}$

$$\alpha = 1.2362 \times 10^7 \text{ ต่อเซนติเมตร}$$

แทนค่า

$$R = \left[\frac{9}{8(3.14)(1.2362 \times 10^7)(1.38 \times 10^{-23})(165)(1.0214 \times 10^{20})} \right]^{\frac{1}{4}}$$

$$R = 3.76 \times 10^{-7} \text{ เซนติเมตร}$$

-การหาค่าพลังงานเฉลี่ยของการก้าวกระโดด

$$W = \frac{3}{4\pi R^3 N(E_F)} \quad (4.17)$$

แทนค่า $W = \frac{3}{4(3.14)(3.76 \times 10^{-7})^3 (1.0214 \times 10^{20})}$

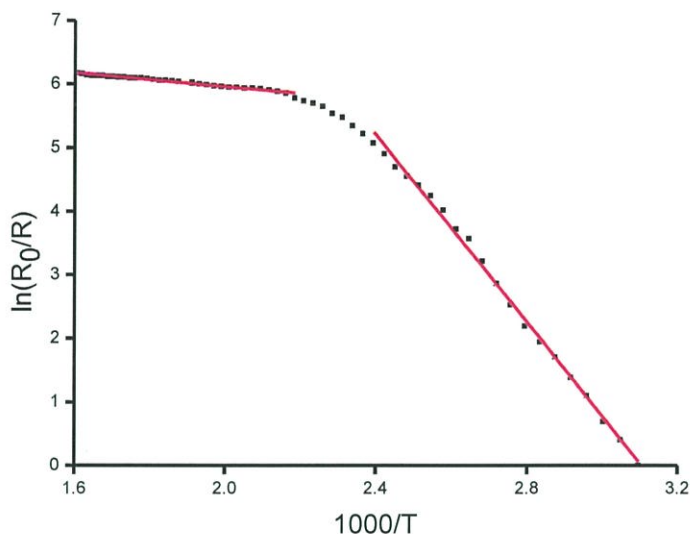
$$W = 4.41 \times 10^{-2} \text{ eV}$$

และ $\alpha R = 1.2362 \times 10^7 \times 3.76 \times 10^{-7}$

$$\alpha R = 4.68$$

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่สามารถคำนวณได้ทั้งแบบจำลองของซีโด และแบบกระโดดในระยะไม่คงที่ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 5 นาที ได้แสดงในตารางที่ 4.7 และ 4.8 ตามลำดับ

4.2.4.4 การศึกษาความต้านทานที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($x = 0.2$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{R_0}{R}\right)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($x = 0.2$) ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 5 นาที

จากรูปที่ 4.16 เป็นผลความต้านทานไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($x = 0.2$) ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 5 นาที โดยวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 50-350 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองสามารถนำมาหาค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) ได้จากสมการ

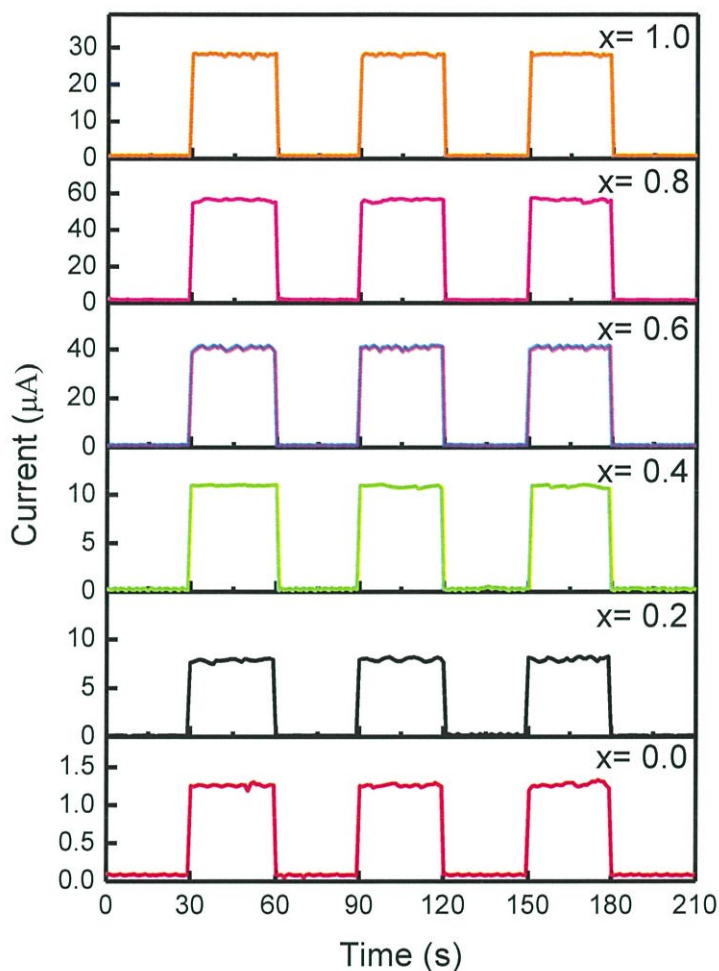
$$R = R_0 \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right) \quad (4.18)$$

$$\begin{aligned} \ln\left(\frac{R_0}{R}\right) &= \frac{-E_a}{k} \left(\frac{1}{T}\right) \\ &= -\frac{1000E_a}{k} \left(\frac{1000}{T}\right) \end{aligned}$$

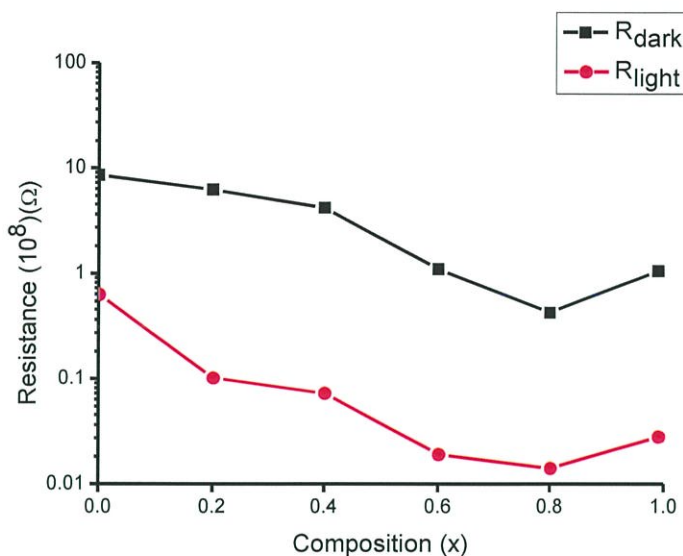
เมื่อ R_0 คือ ความต้านทานที่อุณหภูมิห้อง ส่วน E_a คือ พลังงานกระตุ้น

จากการทดลองพบว่ามีค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) เท่ากับ 46.87 และ 635.18 อิเล็กตรอนโวลต์

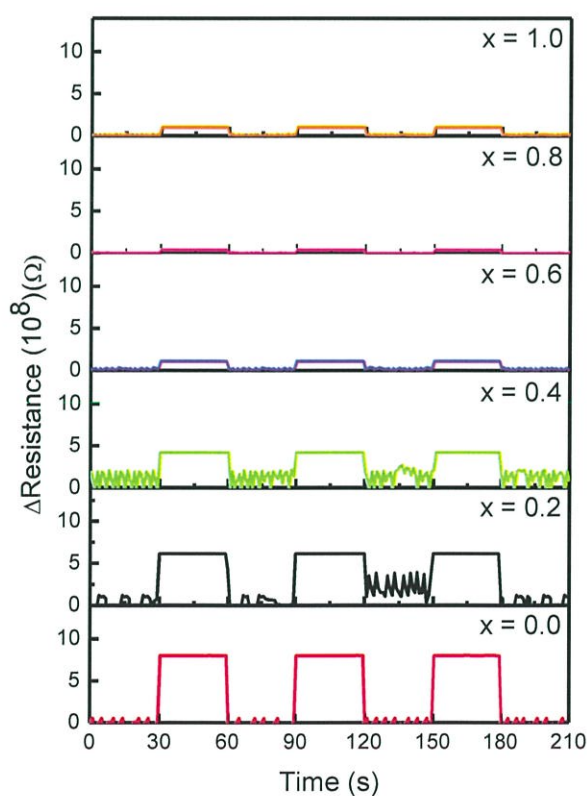
4.2.4.5 สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโฟโตกับเวลาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหยสารเคมี 5 นาที



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับสัดส่วน โมลอะตอมของธาตุ S ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระบะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระบะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโฟโตของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาขณะฉายแสงจากหลอดไฟฮาโลเจนที่มีความเข้มแสง 100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ภายใต้การไบอัสที่แรงดัน 80 โวลต์ พบว่าทุกสารตัวอย่างตอบสนองกับแสงสีขาวจากหลอดฮาโลเจนด้วยช่วงเวลาตอบสนองที่สั้นมากทั้งช่วงกระแสขาขึ้นและช่วงกระแสขาลง ถ้ากำหนดให้สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงขณะที่ความเข้มของแสงจากหลอดไฟมีค่าคงที่ (stationary photoconductivity) คือ $\Delta\sigma_s$ ซึ่งจะแสดงได้ดังความสัมพันธ์ (Pan, 2013)

$$\Delta\sigma_s = q\alpha\beta I\mu_p\tau_p \quad (4.19)$$

เมื่อ α คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของฟิล์มบาง

β คือ สัมประสิทธิ์เชิงควอนตัมในการสร้างคู่อิเล็กตรอน-โฮล (quantum yield)

I คือ กระแสโฟโต

μ_p คือ สภาพคล่องของพาหะ

τ_p คือ ค่าชีวิตของพาหะภายใต้การฉายแสง

กระแสขาขึ้นจะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาดังความสัมพันธ์

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma_s [1 - \exp(-t/\tau)] \quad (4.20)$$

ส่วนกระแสขาลงจะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาดังความสัมพันธ์

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma_s [\exp(-t/\tau)] \quad (4.21)$$

ดังนั้น ค่าคงตัวของเวลา (time constant) ของกระแสขาขึ้น (rise current) และค่าคงตัวของเวลาของกระแสขาลง (decay current) ในที่นี้จะเรียกสั้นๆว่าเวลาขาขึ้น (rise time) และเวลาขาลง (decay time) ตามลำดับ

เวลาขาขึ้นคือ เวลาขณะที่กระแสขาขึ้นมีค่าเท่ากับ $0.63\Delta\sigma_S$ ส่วนเวลาขาลงคือ เวลาขณะที่กระแสขาลงมีค่าเท่ากับ $0.37\Delta\sigma_S$ เวลาขาขึ้นและเวลาขาลงของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) สามารถคำนวณได้จากกราฟของกระแสโฟโตที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาขณะที่มีการฉายแสงและหยุดฉายแสง (ดังรูปที่ 4.17) ตามลำดับ

ความไวในการตอบสนองต่อแสง (photosensitivity, S) ที่คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ จะนิยามดังนี้ คือ

$$S = \left(\frac{R_{dark} - R_{light}}{R_{dark}} \right) \times 100\% = \left(\frac{\Delta R}{R_{dark}} \right) \times 100\% \quad (4.22)$$

ซึ่งนิยามนี้นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในเชิงวิศวกรรมสิ่งประดิษฐ์การตรวจวัดแสง (photodetector) แต่มีนักวิทยาศาสตร์ส่วนหนึ่งนิยามความไวในการตอบสนองต่อแสงดังนี้

$$S = \frac{R_{dark}}{R_{light}} \quad (4.23)$$

ในทางปฏิบัติก็มีการป้อนแรงดันไบแอสด้วยค่าคงที่ทั้งขณะมีการฉายแสงและขณะไม่มีการฉายแสง ดังนั้น ความไวในการตอบสนองต่อแสงสามารถคำนวณได้ง่ายๆ จากความสัมพันธ์

$$S = \frac{I_{light}}{I_{dark}} \quad (4.24)$$

และผลการทดลองที่เกี่ยวกับสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่อุณหภูมิห้องจะรายงานไว้ดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ความไวในการตอบสนองต่อแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียม โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

Composition (x)	Photosensitivity (S)	
	$S = \left(\frac{\Delta R}{R_{dark}} \right) \times 100\%$	$S = \frac{R_{dark}}{R_{light}}$
0.0	92.59	13.61
0.2	98.36	60.85
0.4	98.25	57.05
0.6	98.24	56.90
0.8	96.66	29.97
1.0	97.29	37.23

4.2.4.6 สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงของเซรามิกของเม็ดสารกึ่งตัวนำ $\text{In}_x\text{W}_{1-x}\text{O}_3$ ($0 \leq x \leq 0.05$)

ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผลผลึก

ในการศึกษาสภาพไฟฟ้าเชิงแสงจะต้องมีการฉายแสงให้กับสารตัวอย่าง แล้วทำการบันทึกกระแสโฟโตที่เพิ่มขึ้นตามเวลา ซึ่งจะเรียกว่าเป็นกระแสขาขึ้น แต่เมื่อหยุดการฉายแสงกระแสจะลดลงตามเวลาซึ่งจะเรียกว่ากระแสขาลง ทั้งกระแสขาขึ้นและกระแสขาลงจะเป็นไปดังสมการ

$$I = I_0(1 - e^{-t/\tau_r}) \quad (4.25)$$

$$I = I_0 e^{-t/\tau_d} \quad (4.26)$$

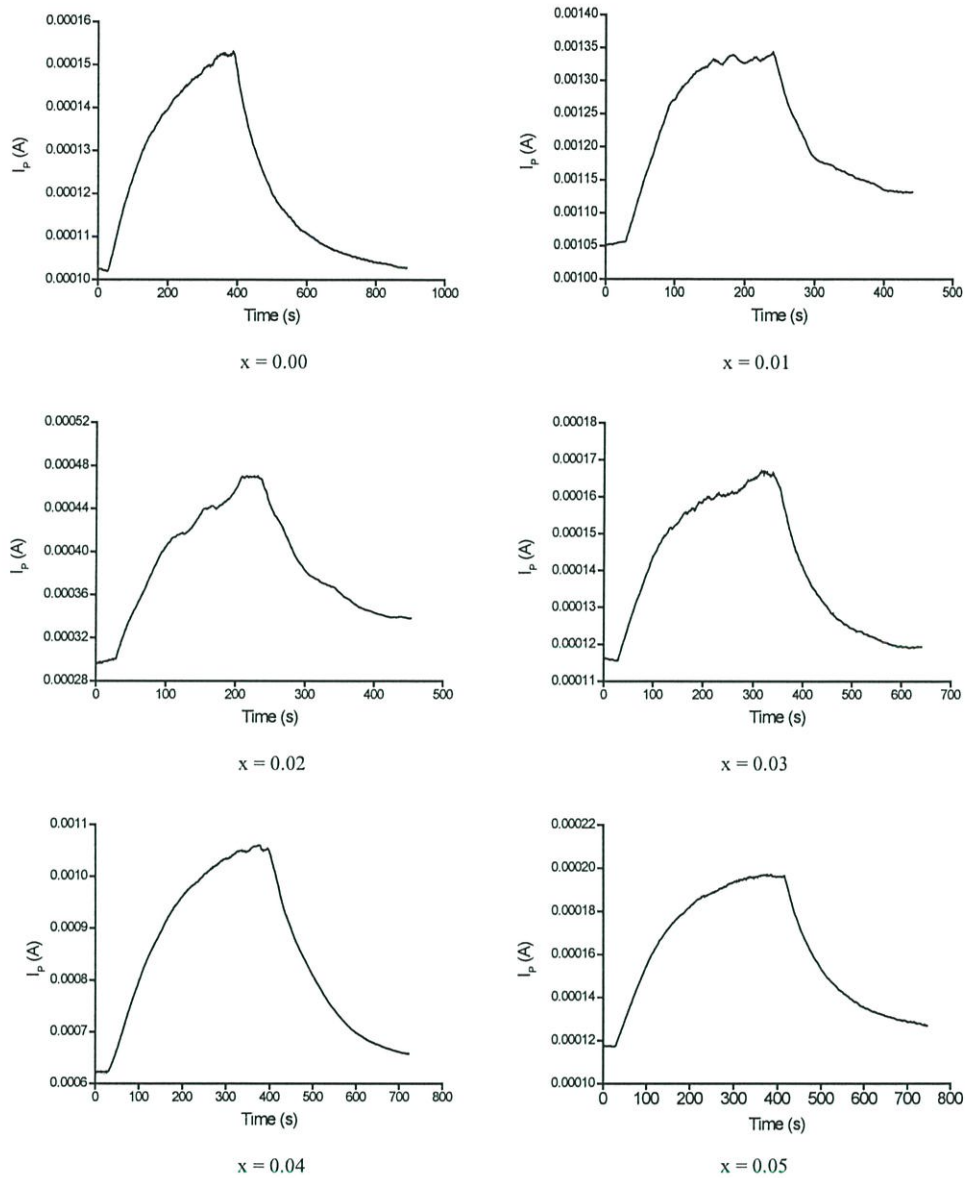
ส่วนใหญ่พบว่าเวลาขาขึ้น (rise time) และเวลาขาลง (decay time) มีได้มากกว่าหนึ่งค่า กระแสขาขึ้นและกระแสขาลงจะเขียนอยู่ในรูปมัลติเพิลเอ็กซ์โพเนนเชียลฟังก์ชัน ดังสมการ

$$I = \sum_1^{n-1} A_{n-1} [1 - \exp(-t/\tau_{r(n-1)})] + A_n [1 - \exp(-(t/\tau_m)^\beta)] \quad (4.27)$$

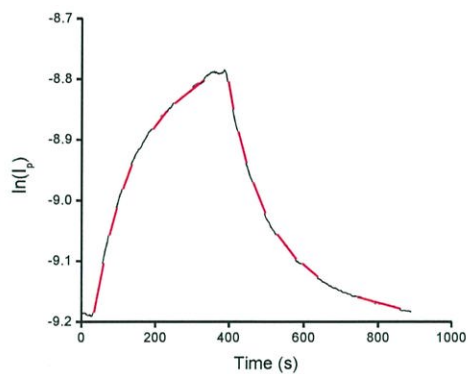
$$I = \sum_1^{n-1} A_{n-1} [\exp(-t/\tau_{d(n-1)})] + A_n [\exp(-(t/\tau_{dn})^\beta)] \quad (4.28)$$

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงคือรั้นแสดงในตารางที่ 4.10 และสามารถหาค่าความหนาแน่นของประจุ ตามตารางที่ 4.11 จากสมการ

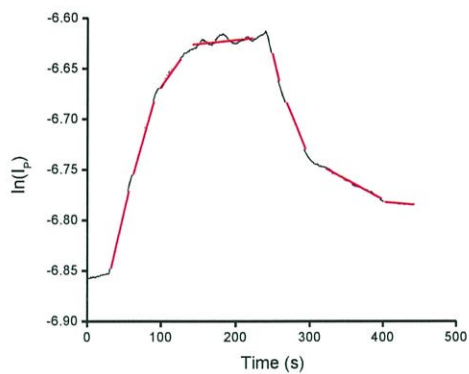
$$N_t = \frac{I_0}{q\mu V_a} \left(\frac{l}{wd} \right) \quad (4.29)$$



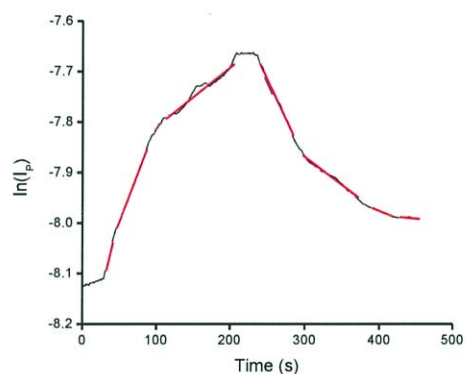
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟโตกับเวลาของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{In}_x\text{W}_{1-x}\text{O}_3$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผลผลึก



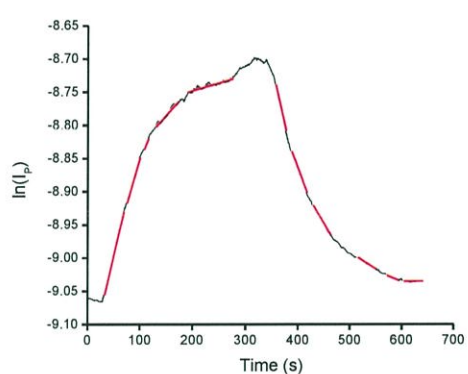
$x = 0.00$



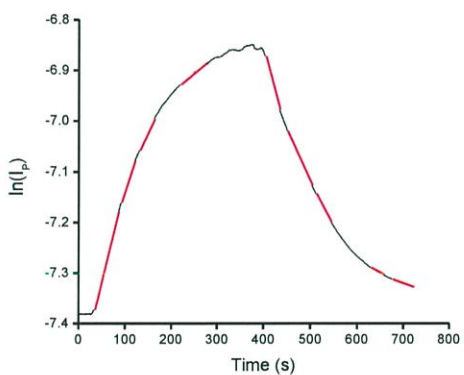
$x = 0.01$



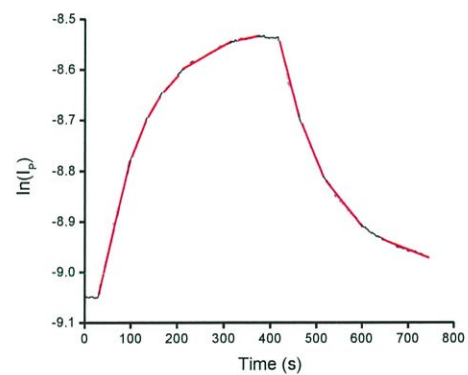
$x = 0.02$



$x = 0.03$

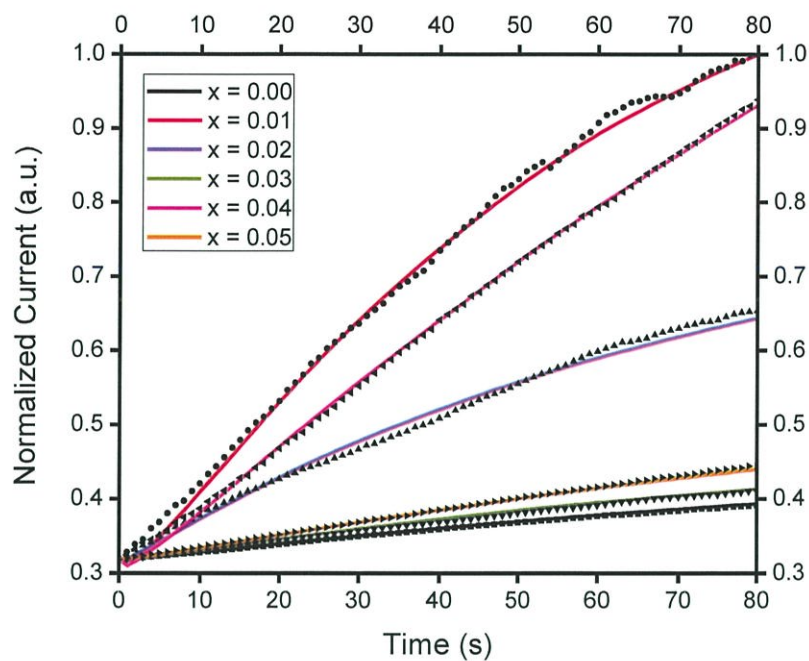


$x = 0.04$

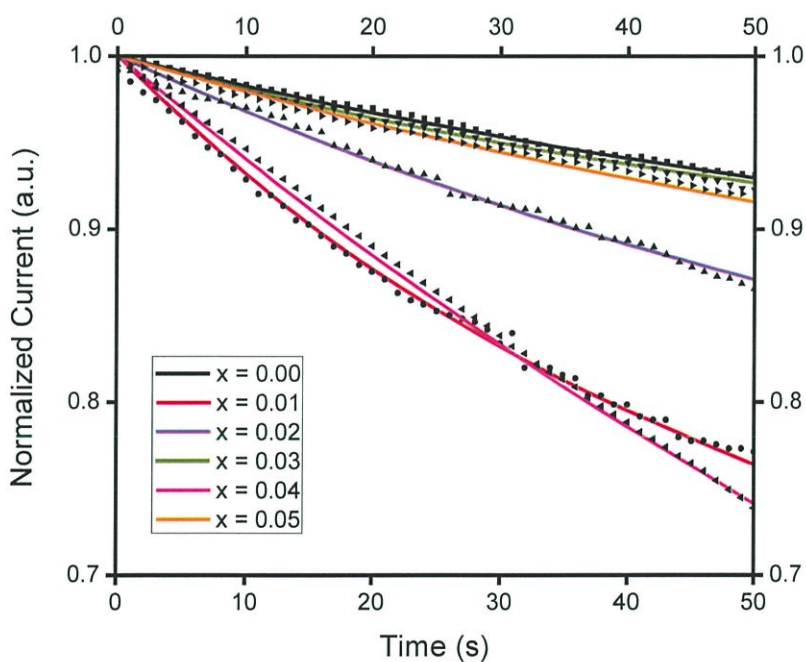


$x = 0.05$

รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I_p$ กับเวลาของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{In}_x\text{W}_{1-x}\text{O}_3$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผลพลึก



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสออร์มัลไลซ์กับเวลาของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ

$\text{In}_x\text{W}_{1-x}\text{O}_3$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผลผลึก

ก. กรณีขาขึ้น

ข. กรณีขาลง

Composition (x)	Rise Time (s)					Decay Time (s)					
	1 st Term	2 nd Term	3 rd Term	4 th Term	5 th Term	1 st Term	2 nd Term	3 rd Term	4 th Term	5 th Term	6 th Term
0.00	$\tau_{r1} = 256.41$ $A_1 = 45.47$	$\tau_{r2} = 321.54$ $A_2 = -162.3$	$\tau_{r3} = 598.80$ $A_3 = 168.2$	$\tau_{r4} = 1233.19$ $A_4 = -60.81$	$\tau_{r5} = 2075.24$ $A_5 = -0.1162$ $\beta = 0.4717$	$\tau_{d1} = 281.69$ $A_1 = 41.28$	$\tau_{d2} = 425.53$ $A_2 = -321.4$	$\tau_{d3} = 649.35$ $A_3 = 467.5$	$\tau_{d4} = 1225.51$ $A_4 = -224.9$	$\tau_{d5} = 1924.07$ $A_5 = 38.34$	$\tau_{d6} = 057.56$ $A_6 = 0.1512$ $\beta = 0.4296$
0.01	$\tau_{r1} = 312.50$ $A_1 = 18.15$	$\tau_{r2} = 386.10$ $A_2 = -20.18$	$\tau_{r3} = 943.39$ $A_3 = -1.084$ $\beta = 0.7780$	-	-	$\tau_{d1} = 328.95$ $A_1 = 66.78$	$\tau_{d2} = 480.77$ $A_2 = 871.4$	$\tau_{d3} = 510.20$ $A_3 = -910.6$	$\tau_{d4} = 2515.29$ $A_4 = -47.38$	$\tau_{d5} = 13518.48$ $A_5 = 20.76$ $\beta = 0.8237$	-
0.02	$\tau_{r1} = 161.03$ $A_1 = 10.54$	$\tau_{r2} = 261.09$ $A_2 = -30.1$	$\tau_{r3} = 454.55$ $A_3 = 26.45$	$\tau_{r4} = 862.07$ $A_4 = -1.744$ $\beta = 0.8284$	-	$\tau_{d1} = 314.47$ $A_1 = -0.8862$	$\tau_{d2} = 892.86$ $A_2 = 18.54$	$\tau_{d3} =$ 1682.03 $A_3 = -35.64$	$\tau_{d4} = 7592.89$ $A_4 = 19.01$ $\beta = 0.8106$	-	-
0.03	$\tau_{r1} = 294.99$ $A_1 = -2385$	$\tau_{r2} =$ 364.963 $A_2 = 6773$	$\tau_{r3} = 523.56$ $A_3 = -7279$	$\tau_{r4} = 1112.59$ $A_4 = 3819$	$\tau_{r5} = 4253.17$ $A_5 = 0.2514$ $\beta = 0.4899$	$\tau_{d1} =$ 284.900000000 $A_1 = 17.31$	$\tau_{d2} = 476.19$ $A_2 = -71.34$	$\tau_{d3} = 746.27$ $A_3 = 76.16$	$\tau_{d4} = 2045.60$ $A_4 = -23.37$	$\tau_{d5} = 3027.06$ $A_5 = 2.241$ $\beta = 0.7819$	-
0.04	$\tau_{r1} = 263.16$ $A_1 = 10.17$	$\tau_{r2} = 352.11$ $A_2 = -20.34$	$\tau_{r3} = 520.83$ $A_3 = 14.5$	$\tau_{r4} = 1321.31$ $A_4 = -5.151$ $\beta = 0.8950$	-	$\tau_{d1} = 285.71$ $A_1 = -0.3151$	$\tau_{d2} = 497.51$ $A_2 = 19.46$	$\tau_{d3} = 568.18$ $A_3 = -21.32$	$\tau_{d4} = 2016.47$ $A_4 = 0.6897$	$\tau_{d5} = 3045.90$ $A_5 = 2.489$ $\beta = 0.7427$	-
0.05	$\tau_{r1} = 256.41$ $A_1 = -50.44$	$\tau_{r2} = 427.35$ $A_2 = 491.7$	$\tau_{r3} = 641.03$ $A_3 = -1125$	$\tau_{r4} = 970.87$ $A_4 = 780.9$	$\tau_{r5} = 1898.20$ $A_5 = -0.2733$ $\beta = 0.6255$	$\tau_{d1} = 240.38$ $A_1 = 41.28$	$\tau_{d2} = 363.63$ $A_2 = -321.4$	$\tau_{d3} = 462.96$ $A_3 = 467.5$	$\tau_{d4} = 719.42$ $A_4 = -224.9$	$\tau_{d5} = 2084.63$ $A_5 = 38.34$	$\tau_{d6} = 149.66$ $A_6 = 0.1512$ $\beta = 0.4296$

ตารางที่ 4.10 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงคือรีนของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{In}_x\text{W}_{1-x}\text{O}_3$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผลผลึก ที่ได้จากการปรับผลการทดลองที่อุณหภูมิห้องให้เข้ากับฟังก์ชันมัลติเพิลเอ็กซ์โพเนนเชียล

Composition (x)	Decay Component											
	1 st Term		2 nd Term		3 rd Term		4 th Term		5 th Term		6 th Term	
	I ₀ (A) (10 ⁻⁴)	N _{ti} (cm ⁻³) (10 ¹²)	I ₀ (A) (10 ⁻⁴)	N _{ti} (cm ⁻³) (10 ¹²)	I ₀ (A) (10 ⁻⁴)	N _{ti} (cm ⁻³) (10 ¹²)	I ₀ (A) (10 ⁻⁴)	N _{ti} (cm ⁻³) (10 ¹²)	I ₀ (A) (10 ⁻⁴)	N _{ti} (cm ⁻³) (10 ¹²)	I ₀ (A) (10 ⁻⁴)	N _{ti} (cm ⁻³) (10 ¹²)
0.00	1.50	11.95	1.47	11.73	1.41	11.22	1.30	10.34	1.23	9.81	1.11	8.86
0.01	13.30	105.90	13.12	104.45	13.10	104.34	12.08	96.19	11.45	91.12	-	-
0.02	4.59	36.56	4.09	32.57	3.78	30.09	3.84	27.71	-	-	-	-
0.03	1.60	12.77	1.54	12.30	1.47	11.72	1.34	10.63	1.29	10.28	-	-
0.04	10.36	82.51	9.80	78.03	9.55	76.04	7.63	60.77	7.29	58.06	-	-
0.05	1.91	15.23	1.86	14.85	1.81	14.41	1.69	13.79	1.47	11.67	1.41	11.21

ตารางที่ 4.11 ความหนาแน่นของประจุชนิดต่างๆ ที่ได้จากการวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงคือรั้นของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{In}_x\text{W}_{1-x}\text{O}_3$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจาก สารตั้งต้นที่เป็นผลผลึก

***หมายเหตุ N_t สามารถหาได้จากความสัมพันธ์
$$N_t = \frac{I_0}{q\mu V_a} \left(\frac{l}{wd} \right)$$

แรงดันไฟฟ้า (V_a) = 2V

สภาพคล่องพาหะ(μ) ของ $\text{In}_x\text{W}_{1-x}\text{O}_3 = 10 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$

พื้นที่หน้าตัด(wd) = $\pi r^2 = \pi(0.5)^2$

ความหนาของเม็ดเซรามิก = 0.2 cm

บทที่ 5

สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะเป็นการสรุปผลการดำเนินงานวิจัย เริ่มตั้งแต่ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) โดยมีค่าสัดส่วน โมลอะตอมของธาตุ S ที่ $x = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ และ 1.0 ตามลำดับ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด และศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆของฟิล์มบาง การวิเคราะห์ผล พร้อมทั้งปัญหาที่พบและข้อเสนอแนะเพื่อนเป็นแนวทางในการทำการวิจัยขั้นต่อไป

ในโครงการพิเศษนี้ได้ทำการประดิษฐ์ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิดในระบบสุญญากาศ

จากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ CdS และ CdTe บริสุทธิ์ 99.9999 เปอร์เซ็นต์ สำหรับฟิล์มที่มีสัดส่วน โมลอะตอมของธาตุ S เท่ากับ $x = 0$ จะเลือกใช้อุณหภูมิของสารตั้งต้น (source) และอุณหภูมิของแผ่นรองรับเป็น 550 และ 450 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยใช้เวลาในการเตรียมฟิล์มบางตั้งแต่ 1 ถึง 5 นาที ตามลำดับ พบว่าฟิล์มบางที่ใช้เวลาในการเตรียม 5 นาที จะมีคุณสมบัติที่ดีที่สุด ความต้านทานแผ่นต่ำสุด และมีความหนามากที่สุด ส่วนกรณีฟิล์มบางที่มีสัดส่วนของโมลอะตอมของธาตุ S มากกว่า $x = 0.2$ เราจะเลือกใช้อุณหภูมิของสารตั้งต้น และอุณหภูมิของแผ่นรองรับเป็น 700 และ 600 องศาเซลเซียส ตามลำดับและใช้เวลาในการเตรียม 5 นาที ฟิล์มบางที่เตรียมได้มีความเรียบสม่ำเสมอ ยึดติดแน่นกับกระจกสไลด์ได้ดี ฟิล์มมีสีด้ายกเว้นที่สัดส่วนของโมลอะตอมของธาตุ S เท่ากับ $x = 1.0$ ฟิล์มที่เตรียมได้จะมีสีส้ม

จากการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่าฟิล์มบางที่มีสัดส่วนของโมลอะตอมของธาตุ S เท่ากับ $x = 0$ จะมีโครงสร้างผลึกแบบคิวบิกหรือแบบซิงค์เบลนด์ โดยมีฟีกของระนาบ (111) ปรากฏอย่างโดดเด่น (preferential orientation) แต่เมื่อสัดส่วนของโมลอะตอมของธาตุ S อยู่ระหว่าง $x = 0.2$ ถึง $x = 0.8$ โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} จะเกิดเป็นเฟสคิวบิกหรือซิงค์เบลนด์และแบบเฮกซะโกนัลหรือเวิร์ทไชท์ที่อยู่ร่วมกัน สำหรับกรณีสัดส่วนของโมลอะตอมของธาตุ S เท่ากับ $x = 1.0$ จะมีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลหรือเวิร์ทไชท์อย่างเดียว โดยมีฟีกของระนาบ (002) ปรากฏอย่างโดดเด่น มุม 2θ ของฟีกของระนาบ (002) จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของโมลอะตอมของธาตุ S ที่เพิ่มขึ้น จากการคำนวณหาค่าคงที่โครงสร้างผลึก พบว่าค่าคงที่โครงสร้างผลึก a และ c มีแนวโน้มลดลงค่อนข้างเป็นเชิงเส้นตามปริมาณของสัดส่วนของโมลอะตอมของธาตุ S ที่เพิ่มขึ้น

จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด พบว่าเกรนของฟิล์มบางมีขนาดลดลงตามปริมาณสัดส่วนของโมลอะตอมของธาตุ S ที่เพิ่มขึ้น

จากการศึกษาสมบัติการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง สามารถที่จะคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด พบว่าเป็นแบบตรงและมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1.48 เป็น 2.25 อิเล็กตรอนโวลต์ เมื่อสัดส่วนของโมลอะตอมของธาตุ S ที่เพิ่มขึ้น จาก $x = 0$ เป็น $x = 1$

จากการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด พบว่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางจะมีค่าลดลงตามสัดส่วนของโมลอะตอมของธาตุ S ที่เพิ่มขึ้น และมีค่าต่ำที่สุดที่ $x = 0.8$ ส่วนกรณี $x = 1.0$ จะมีความต้านทานแผ่นสูงขึ้นอีกเล็กน้อย

จากการวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงชั่วขณะ (transient photoconductivity) พบว่าช่วงชีวิตของพาหะนั้นสั้นมาก (< 1 วินาที) ส่วนค่าความไวแสงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ตามปริมาณสัดส่วนของโมลอะตอมของธาตุ S ที่ลดลง และมีค่าสูงสุดที่ $x = 0.2$

นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงชั่วขณะของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $In_xW_{1-x}O_3$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) พบว่ามีปรากฏการณ์สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงดีอาร์ กล่าวคือ ช่วงชีวิตของพาหะค่อนข้างยาว (ในระดับหลายร้อยวินาที) ซึ่งเป็นผลมาจากกับดักพาหะมีการจับและปล่อยพาหะค่อนข้างช้ามาก ค่าช่วงชีวิตพาหะสามารถหาได้จากการฟิตกราฟของผลการทดลอง โดยใช้มัลติเพิลเอ็กซ์โพเนนเชียลฟังก์ชัน

ปัญหาและข้อเสนอนแนะ

1. การเตรียมฟิล์มบาง

- การที่ฟิล์มบางเคลือบไม่ติดบนแผ่นกระจกสไลด์ อาจเกิดจากกระจกสไลด์ไม่สะอาด เพียงพอ หรืออุณหภูมิในการระเหิดไม่สูงพอ
- ในขั้นตอนการสูบอากาศออกจากระบบเพื่อให้ได้ความดันประมาณ 0.04 มิลลิบาร์อาจจะต้องใช้เวลาถึง 2 ชั่วโมงหรือมากกว่า อาจเกิดจากระบบมีรอยรั่ว หรือข้างในระบบมีความสกปรก หรือปั๊มเสื่อมคุณภาพ
- ในการทำความสะอาดผนังของระบบ ที่มีสารที่เราทำการระเหิดเกาะอยู่ อาจจะใช้เวลาในการทำความสะอาดมาก อาจจะใช้กรดไฮโดรคลอริกผสมกับน้ำในอัตราส่วน 1:10 แช่ไว้ก่อนประมาณ 10 นาที แล้วจึงเริ่มทำความสะอาด

2. การวัดค่าสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ

- ฟิล์มบางที่เตรียมได้ควรรับนำมาวัดค่าสมบัติต่างๆ ยิ่งเก็บไว้นาน ฟิล์มบางได้ที่อาจเกิดการหลุดร่อน
- การวัดความต้านทานแผ่น กระแสที่ไหลผ่านวงจรควรอยู่ในระดับต่ำกว่า 10^{-6} แอมแปร์ เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการรอยต่อโอห์มมิกที่ไม่เหมาะสม ระหว่างขั้วไฟฟ้ากับสารกึ่งตัวนำ
- การวัดคุณสมบัติทางแสงและทางไฟฟ้า ควรรีบทำให้เร็วที่สุดหลังจากเตรียมฟิล์มบางเรียบร้อยแล้ว เพื่อลดผลกระทบจากข้อบกพร่องผลึกที่ปรากฏบนผิวหน้าที่สัมผัสกับอากาศ

เอกสารอ้างอิง

- Abelas, F. 1972. Optical of Solids pp. 23-44. North-Holland, London.
- Adachi, S. 2005. Properties of Group IV, III-V and II-VI Semiconducting, John Wiley & Sons, Ltd.
- Adachi, S. 2009. Properties of Semiconducting Alloys Group IV, III-V and II-VI Semiconducting, John Wiley & Sons, Ltd.
- Baccarani, G. and Ricco, B. 1978. Transport Properties of Polycrystalline Silicon Films. J. Appl. Phys. 49(11), 5565-5570.
- Cullity, B.D. 1956. Elements of X-rays Diffraction. Addison-Wesley Publishing Company Inc.; pp 9-14.
- Gacia-Cuencu, M.V.; Morenza, J.L. and Codina, J.M. 1978. Electrical condition in polycrystalline CdS films: I. theory. J. Phys.D : Apple. Phys. 20 : 951-957.
- Gacia-Cuencu, M.V.; Morenza, J.L, Bertran, E. and Lousa, A. 1987. Electrical condition in polycrystalline CdS films: II. Comparison of theory and experiment, J. Phys. D: Apple. Phys. 20 :958-962
- Gaewdang, T., Wongcharoen, Ng., Bunkua, W., Thaisatuen, Wongcharoen, T.,and Poo-Rakkiat, C. 2011. Effect of ramp time of close spaced sublimation on physical properties of CdTe thin films. Siam Physics Congress SPC. Ambassador City Jomtien Hotel, Pattaya, 23 March 23-26.
- Garadkar, K.M. ; Hankare, P.P. and Patil R.K. 1999. Effect of indium doping on structural, optical and electrical properties of $Cd_{0.95}Hg_{0.05}S$ thin films. Mater. Chem.Phys. 58:64-70.
- Gillmore, A.S. 2000. Studies of the basic electronic properties of CdTe and CdS thin films and CdTe/CdS solar cells. Thesis Proposal Colorado School of Mines.
- Gunat, I. and Parlark, M. 1997. Current transport mechanisms in low resistive CdS thin films. J. Mater. Sci. Master. Elec. 8 :9-13.
- Guo, L., Wang, X., Feng, L. Zheng, X. and Chen, G. 2013. Temperature Sensitive Photoconductivity Observed in InN Lays. Appl. Phys. Lett.102, 072103-1- 072103-3.
- Harris, N.S. 1989. Modern Vacuum Practice. London: Mc Graw-Hill.; pp.71-73, 76-77, 114, 118-120.

- Johnson, C., Lin, J.Y. and Jiang, H.X. 1996. Metastability and Persistent Photoconductivity in Mg-Doped p-Type GaN. *Appl. Phys. Lett.* 68(13), 1808-1810.
- Kittel, C. 1971. *Introduction of Solid State Physics*. 4th ed. New York: Jon Wiley & Sons Inc.; pp 4-32, 46-48, 56-60, 364-365, 540-552, 611-612.
- Lane, D.W. 2006. A review of the optical band gap of thin films, *sol. Energy Mater. Sol. Cell*, 90 : 1169-1175.
- Lin, J.H., Zeng, J.J., Su, Y.C. and Lin, Y.J. 2012. Current Transport Mechanism of Heterojunction Diodes Based on the Reduced Graphene Oxide-Based Polymer Composite and n-Type Si. *Appl. Phys. Lett.* 100, 153509-1- 153509-4.
- Lee, J.H.; Song, W.C.; Yi, J.S.; Yang, K.J.; Han, W.D. and Hwang, J. 2003. Growth and properties of the Cd_{1-x}Zn_xS thin films for solar cells applications. *Thin Solid Films*. 431-432:349-353.
- McGuire, G.E. 1988. *Semiconductor Materials and Process Technology Handbook*. Park Ridge, NJ: Noyes: pp.340-343, 349.
- Murali, K.R. and Palanisamy, T., 2010. Electrical and optical properties of pulse plated CdS_xTe_{1-x} films, *Ionics*, 16 : 613-619.
- Ohata, K., Saraie, J. and Tanaka, T., 1973. Some properties of CdS_xTe_{1-x} alloys, *Jap. J. Appl. Phys.* 12 : 1198-1202.
- Ohring, M. 2002. *Materials Science of Thin Films Deposition and Structure*. 2nd ed. Sandiego, CA: Academic Press: pp. 58-69, 71, 97-101, 106-109, 118-121.
- Ramaiah, K.S. 1999. Electrical properties of in doped CdS thin films. *J. Mater. Sci. Mater. Elec.* 10 : 291-294.
- Ren, S.T., Zhao, F. and Chen Q. 2012. Slow-Rise and Fast Drop Current Feature of Ultraviolet Response Spectra for ZnO-Nanowire Film Modulated by Water Molecules. *Chin. Phys. B*, 21(3), 038104-1- 038140-7.
- Runyan, W.R. 1975. *Semiconductor Measurement and Instrument*. New York: Mc-GrawHill: Bombay.
- Santana-Aranda, M.A., Melendez-Lira, M. and Escobar-Alarcon, L., 2000. Structural and optical characterization of screen-printed CdS_xTe_{1-x} films, *Superficies y Vacio*, 10 : 36-39.
- Schroder D.K., 1998. *Semiconductor Material and Characterization*, 2nd ed. Newyork : John Wiley & Sons Inc.

- Serin, T. Yildiz, A. Sahin, S.H. and Serin, N. 2011. Extraction of Important Electrical Parameters of CuO. *Physica B*, 406, 575-578.
- Seto, J.Y.W. 1975. The Electrical Properties of Polycrystalline Silicon Films. *J. Appl. Phys.* 46(12), 5247-5254.
- Sharma, K. Al-Kabbi, A.S. and Saini, G.S.S. 2012. Electrical Conduction Mechanism in Nanocrystalline CdTe (nc-CdTe) Thin Films. *Appl. Phys. A*. 180, 911-920.
- Wei, K and Polla, F.H.,1999. Optical properties of CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$): experiment and modeling, *J. appl. Phys.*, 85 : 7418-7425
- Wood, D.A., Lane, D.W., Rogers, K.D. and Coath, J.A.,1999. Optical Properties of CdS_xTe_{1-x} Polycrystalline Thin Films, *J.Electron. Mater.*, 28(12) : 1403-1408.
- งามนิศย์ แก้วแดง, จูตินัย แก้วแดง, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และชัยสิงห์ ภูริภักดิ์เกียรติ. 2543. การเตรียมและศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์. รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- งามนิศย์ วงษ์เจริญ, จูตินัย แก้วแดง และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2556. ความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้าของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0.00 \leq x \leq 0.05$) และการประยุกต์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- ชัยวิทย์ ศิลาวัณนาไฉย. 2526. ฟิสิกส์และเทคโนโลยีระบบสุญญากาศ. กรุงเทพฯ:สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น); หน้า 9-15, 25-26.
- จูตินัย แก้วแดง, งามนิศย์ แก้วแดง, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2547. การเตรียมฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วย In โดยระเหยในระบบสุญญากาศ. รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- จูตินัย แก้วแดง, งามนิศย์ แก้วแดง, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และชัยสิงห์ ภูริภักดิ์เกียรติ. 2546. การประดิษฐ์ฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี Zn ในปริมาณสูง สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์. รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- จูตินัย แก้วแดง, งามนิศย์ วงษ์เจริญ, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และชัยสิงห์ ภูริภักดิ์เกียรติ. 2556. การประดิษฐ์ฟิล์มบาง CdS_xTe_{1-x} เพื่อประยุกต์ใช้เป็นเซลล์แสงอาทิตย์. รายงานวิจัยต่อเสนอคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- จูตินัย แก้วแดง, งามนิศย์ วงษ์เจริญ และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2556. การประดิษฐ์และการศึกษาสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS/CuO , รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

- บัญชา ธนบุญสมบัติ. 2544. การศึกษาวัสดุโดยเทคนิคดีฟแฟรกชัน. ครั้งที่1. กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น) : หน้า 9, 12-15, 25.
- วีรัชย์ ลิภา. 2546. การศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง CdS-ZnS ซึ่งเตรียมโดยวิธีอบสารละลายเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- สิงหนเดช แดงจวง. 2539. การเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ โดยเทคนิคการเคลือบแบบอบสารละลายเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อารีย์ วิเชียรฉาย. 2543. เครื่องมือวัดและการวัดทางฟิสิกส์ของสารกึ่งตัวนำ. เอกสารประกอบการเรียน. คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ภาคผนวก

ข้อมูลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ CdS
ไฟล์มาตรฐาน JCPDS No.77-2306

Pattern: 77-2306		Radiation = 1.54060		Quality: Calculated		
CdS		2 θ	I	h	k	l
Cadmium Sulfide		24.837	63	1	0	0
		26.835	45	0	0	2
		28.216	100	1	0	1
		36.682	25	1	0	2
		43.736	43	1	1	0
		47.894	41	1	0	3
		50.949	6	2	0	0
		51.890	31	1	1	2
		52.866	13	2	0	1
		54.644	2	0	0	4
		58.354	5	2	0	2
		60.912	2	1	0	4
		66.858	12	2	0	3
		69.359	8	2	1	0
		70.962	9	2	1	1
		72.472	4	1	1	4
		75.572	6	1	0	5
		75.669	5	2	1	2
		77.966	1	2	0	4
		80.356	4	3	0	0
		83.367	10	2	1	3
		86.434	4	3	0	2
		87.021	1	0	0	6
Lattice: Hexagonal S.G.: P63mc (186) a = 4.13600 c = 6.71300 Z = 2 Mol. weight = 144.47 Volume [CD] = 99.45 Dx = 4.824 I/cor = 7.93		ICSD COLLECTION CODE : 060629 REMARKS FROM ICSD : REM F Determination based on model III of Fakiinos, Stevenso REMARKS FROM ICSD : REM Barnea Aust. J. Phys. 1982,35,415-424. TEST FROM ICSD : At least one TF missing.				
Calculated from ICSD using POWD-12+, (1997) primary reference : *Acta Crystallogr., Sec. B: Structural Science, volume 40, page 521, (1984) Stevenson, A.W., Milanko, M., Barnea, Z.		Radiation : CuK α 1 Filter : Not specified Lambda : 1.54060 d-sp : Calculated spacings				

ข้อมูลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ CdTe
ไฟล์มาตรฐาน JCPDS No.15-770

Pattern: 15-770		Radiation = 1.540600		Quality: Indexed	
CdTe		2th	h	k	l
		23.758	100	1	1
		39.312	60	2	2
Cadmium Telluride		46.434	30	3	1
		56.821	6	4	0
		62.353	10	3	3
		71.216	10	4	2
		76.300	4	5	1
		84.469	2	4	4
		89.412	4	5	3
		97.443	4	6	2
		102.400	2	5	3
		110.837	1	4	4
		116.148	2	5	5
		125.593	4	6	4
		131.817	4	7	3
Lattice: Face-centered cubic		Mol. weight = 240.01			
S.G.: F-43m (216)		Volume [CC] = 272.22			
a = 5.48100		Dx = 5.856			
Z = 4		I/ccr = 6.50			
<p>COLOR: Black SAMPLE SOURCE OR LOCALITY: Sample was obtained from Semi-Elements Inc., Saxonburg, Pennsylvania, USA. ANALYSIS: Spectrographic analysis: 0.01-0.1% Si, 0.0001-0.001% each of Ba, Fe, and Pb. TEMP. OF DATA COLLECTION: Pattern taken at 25 C.</p>					
<p>CAS: 1306-26-8 *Nat. Bur. Stand. (U.S.) Monogr. 25, volume 3, page 21, (1964) primary reference:</p>					
Radiation: CuK α 1		Filter: Beta			
Lambda: 1.54050		d-sp: Not given			
SS/FOM: F15=31(0.0230,21)		Internal standard: W			

ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน	นายณพลรัฐ เดชะคำภู
เกิดเมื่อ	วันที่ 4 ตุลาคม พ.ศ.2534
ภูมิลำเนา	สกลนคร
ประวัติการศึกษา	ระดับประถมศึกษา โรงเรียนอนุบาลสกลนคร ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนสกลราชวิทยานุกูล ระดับอุดมศึกษา สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง