



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมี
ในระยะประชิดเพื่อประยุกต์ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์

Characterization of CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) Thin Films Prepared by Close Spaced
Sublimation Method for Solar cell Application

นายฐิตินัย แก้วแดง

นางงามนิศย์ วงษ์เจริญ

นางทิพรัตน์ วงษ์เจริญ

นายชัยสิงห์ ภูรักษ์เกียรติ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัย

จากงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมี
ในระยะประชิดเพื่อประยุกต์ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์

Characterization of CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) Thin Films Prepared by Close Spaced
Sublimation Method for Solar cell Application

นายฐิตินัย แก้วแดง

นางงามนิตย์ วงษ์เจริญ

นางทิพรัตน์ วงษ์เจริญ

นายชัยสิงห์ ภูรักษ์เกียรติ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัย

จากงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมี
 ในระยะประชิดเพื่อประยุกต์ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์

แหล่งเงิน งบประมาณแผ่นดิน

ประจำปีงบประมาณ 2559 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 200,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2558 ถึง 30 กันยายน 2559

หัวหน้าโครงการวิจัย

นายฐิตินัย แก้วแดง ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
 ลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520, E-mail: thitinai.ga@kmitl.ac.th

ผู้ร่วมโครงการวิจัย

นางงามนิษฐ์ วงษ์เจริญ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
 ลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520, E-mail: ngamnit.wo@kmitl.ac.th

นางทิพรัตน์ วงษ์เจริญ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยกรุงเทพ, E-mail:
 tiparatana.w@bu.ac.th

นายชัยสิงห์ ภู่วัฒนเกียรติ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, E-mail:
 Chaisingh.P@chula.ac.th

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการประดิษฐ์ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) เติบโตลงบนแผ่น
 ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดในระบบสุญญากาศ
 สำหรับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe จะใช้อุณหภูมิของสารตั้งต้นและอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับ
 เท่ากับ 550 และ 450 องศาเซลเซียสตามลำดับ ส่วนฟิล์มที่มีองค์ประกอบอื่นๆ จะกำหนดให้อุณหภูมิ
 ของสารตั้งต้นและอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 700 และ 600 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ในกรณี
 สัดส่วนของโมลอะตอมของธาตุ S ต่ำกว่า 0.2 โครงสร้างผลึกจะเป็นแบบคิวบิก อย่างไรก็ตามกรณี
 สัดส่วนผสมของโมลอะตอมของธาตุ S อยู่ระหว่าง 0.2 ถึง 0.8 โครงสร้างผลึกจะเป็นแบบคิวบิกและแบบ
 เฮกซะโกนัลอยู่ร่วมกัน ในขณะที่ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS จะมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเฮกซะ
 โกนัลอย่างเดียว จากภาพถ่ายด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าเมื่อสัดส่วน โมลอะตอมของธาตุ
 S เพิ่มขึ้นจะทำให้ขนาดของเกรนลดลง ค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x}
 จะมีค่าเปลี่ยนจาก 1.48 อิเล็กตรอน โวลต์ (กรณีฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe) ไปเป็น 2.25 อิเล็กตรอน
 โวลต์ (กรณีฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS) จากการวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงชั่วขณะ พบว่าฟิล์มบางที่มี
 สัดส่วนผสมของโมลอะตอมของธาตุ S เท่ากับ 0.2 จะมีความไวสูงสุดประมาณ 60

คำสำคัญ: ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} วิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด XRD

SEM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Research Title: Characterization of $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) Thin Films Prepared by Close Spaced Sublimation Method for Solar cell Application

Researcher: Mr. Thitinai Gaewdang, Mrs. Ngamnit Wongcharoen, Mrs. Tiparatana Wongcharoen and Mr. Chaisingh Poo-Rakkiat

Faculty: Science **Department:** Physics

ABSTRACT

In this research, $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) 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 $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ thin films was cubic. However, for $0.2 \leq x \leq 0.8$ the films were grown in mixed phases between cubic and hexagonal structures whereas CdS thin films formed in a hexagonal phase. SEM micrographs show the grain size decreases when the S content increases. As the S content increases, the energy gap value of $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ thin films varies from 1.48 eV for CdTe thin films to 2.25 eV for CdS thin films. From the transient photoconductivity measurements, the highest sensitivity value about 60 was obtained for the composition $x = 0.2$.

Keywords: $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ thin films, Close-spaced sublimation method, XRD, SEM

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์คณะวิทยาศาสตร์ ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์และการแนะนำในการใช้เครื่อง ยูวี-วิสทิเบิล แบบดับเบิลบีม สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Thermo electron corporation รุ่น He λ ios α ที่ใช้ในการศึกษาคุณสมบัติเชิงแสงโดยการวัดการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางในช่วงความยาวคลื่นอัลตราไวโอเลตไปจนถึงย่านอินฟราเรด (ความยาวคลื่น 190 – 1100 nm) และเครื่องเอกซเรย์คิฟแฟรคโตรมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance ซึ่งรังสีเอกซ์มีความยาวคลื่นในย่าน $\text{Cu}_{K\alpha}$ 1.5406 Å ในการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM - 6400 ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบาง

ขอขอบคุณ นายพนัญช์ เศษะคำภู และนางสาวชนิภรณ์ จุไรสง นักศึกษาของห้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุโฟโตนิกส์ สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือในการเก็บข้อมูลของการทดลองและช่วยทำรูปเล่มรายงานจนเสร็จสมบูรณ์

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากเงินงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2559 จึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้

นายฐิตินัย แก้วแดง

นางงามนิษฐ์ วงษ์เจริญ

นางทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ

นายชัยสิงห์ ภูรักษาเกียรติ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VIII
สารบัญภาพ	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินการ	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเรื่องของลักษณะของโครงสร้างผลึก	6
2.1.1 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ	6
2.1.2 โครงสร้างผลึกแคดเมียมเทลลูไรด์	11
2.1.3 โครงสร้างผลึกแคดเมียมซัลไฟด์	12
2.1.3.1 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์	12
2.1.3.2 โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ตไซต์	13
2.2 การระเหิดในระยะประชิด	14
2.3 การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์	16
2.4 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	17
2.5 สมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ	18
2.5.1 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน	18
2.5.2 การส่งผ่านแสง	21
2.5.3 การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.4 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง	23
2.5.5 ส่วนหางของแถบพลังงาน	26
2.6 สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง	27
2.7 สภาพนำไฟฟ้า	28
2.8 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า	29
2.9 กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในฟิล์มบางที่อุณหภูมิต่างๆ	30
2.9.1 กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในฟิล์มบางในช่วงอุณหภูมิสูง	31
2.9.2 กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในฟิล์มบางในช่วงอุณหภูมี่ปานกลาง	33
2.9.3 การนำไฟฟ้าของพาหะแบบกระโดดในระยะไม่คงที่	35
2.10 สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง	38
2.10.1 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะในช่วงกระแสชาลง	45
2.10.2 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะในช่วงกระแสชาขึ้น	46
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	47
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	54
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัย	54
3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เพื่อใช้เตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	54
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	54
3.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค	55
3.1.4 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค	55
3.1.5 เครื่องมือที่ใช้ศึกษาสมบัติทางแสง	55
3.1.6 เครื่องมือที่ใช้ในการวัดสมบัติทางไฟฟ้า	55
3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	55
3.2.1 การเตรียมและทำความสะอาดแผ่นกระจกสไลด์เพื่อเป็นฐานรองรับ	55
3.2.2 การเตรียมและทำความสะอาดระบบระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	56

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.3 การเตรียมผลึกของสารตั้งต้น CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่มีองค์ประกอบต่างกัน	56
3.2.4 การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	59
3.2.4.1 การเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำแคดเมียมเทลลูไรด์โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด ใช้เวลาดั้งแต่ 1- 5 นาที เพื่อหาความต้านทานที่น้อยที่สุด	59
3.2.4.2 การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	60
3.3 การศึกษาสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	63
3.3.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค	63
3.3.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค	63
3.3.3 การศึกษาสมบัติทางแสง	63
3.3.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า	64
บทที่ 4 ผลการวิจัย	65
4.1 ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	65
4.2 ผลการศึกษาสมบัติฟิสิกส์พื้นฐานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	67
4.2.1 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	67
4.2.2 ผลการศึกษาภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบาง CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	70
4.2.3 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	74

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.4 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	78
4.2.4.1 ความต้านทานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($x = 0$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	78
4.2.4.2 ความต้านทานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	79
4.2.4.3 การศึกษาความต้านทานที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($x = 0.4, 0.6, 0.8$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	81
4.2.4.4 การศึกษาความต้านทานที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($x = 0.2$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	89
4.2.4.5 สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	90
4.2.4.6 สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $In_xW_{1-x}O_3$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	93
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	99
บทที่ 6 สรุปผลผลิตงานวิจัย	102
เอกสารอ้างอิง	121
ภาคผนวก	127
สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินงานโครงการวิจัย	130
ประวัติคณะผู้วิจัย	132

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 พารามิเตอร์ของหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ	7
2.2 ระบบผลึกทั้งเจ็ดแบบในระบบสามมิติ	8
2.3 ความสัมพันธ์ของคชนี้มีลเลอร์และจุดตัดแกนผลึก	10
3.1 ปริมาณสารตั้งต้นที่มีสัดส่วนผสมทางเคมีต่างๆของ CdTe และ CdS และอุณหภูมิที่ใช้ในการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	58
4.1 ค่าคงที่โครงผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	69
4.2 สัดส่วนโมลอะตอมของธาตุ S ที่ปรากฏในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยความสัมพันธ์ของวิการ์ด	69
4.3 แสดงองค์ประกอบของธาตุต่างๆ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการ ระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	73
4.5 ช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนใน ระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด สารเคมี 5 นาที	76
4.5 ค่าส่วนหางของแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	78
4.6 ค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมีต่างกัน	79
4.7 ค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	80
4.8 แสดงพารามิเตอร์ที่คำนวณได้จากแบบจำลองของซีโดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	88

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.9 พารามิเตอร์ที่คำนวณได้จากแบบการกระโดดในระบะไม่คงที่ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระบะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	88
4.10 ความไวในการตอบสนองต่อแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระบะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	93
4.11 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงคือ $r_{\text{อิน}}$ ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $In_xW_{1-x}O_3$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก ที่ได้จากการปรับผลการทดลองที่อุณหภูมิห้องให้เข้ากับฟังก์ชันมัลติเพิลเอ็กซ์โพเนนเชียล	97
4.12 ความหนาแน่นของประจุชนิดต่างๆ ที่ได้จากการวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงคือ $r_{\text{อิน}}$ ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $In_xW_{1-x}O_3$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจาก สารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	98

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 หน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ	6
2.2 การบอกชื่อระนาบต่างๆของผลึก	10
2.3 แสดงโครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์ของผลึกแคดเมียมเทลลูไรด์	11
2.4 การจัดเรียงตัวของอะตอมของผลึกแคดเมียมซัลไฟด์	12
2.5 โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ตไซท์ของผลึกแคดเมียมซัลไฟด์	13
2.6 แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ตไซท์กับแบบซิงค์เบลนด์	14
2.7 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์	17
2.8 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	18
2.9 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานอย่างง่ายของ	19
2.10 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานและการย้ายสถานะของพลังงานอิเล็กตรอนของสาร กึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์	21
2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนของ สารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์	21
2.12 แผนภาพเมื่อแสดงตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มบาง	22
2.13 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับพลังงานโฟตอน	24
2.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและค่าพลังงานโฟตอนหรือค่าความยาวคลื่นของพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำ	26
2.15 ส่วนหางของแถบพลังงานซึ่งมีทั้งส่วนหางของแถบวาเลนซ์และส่วนหางของแถบนำ	27
2.16 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง	29
2.17 แสดงแบบจำลองของฟิล์มบางตรงบริเวณรอยต่อขอบของเกรน	31
2.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \sigma$ กับ $\frac{1,000}{T}$ ของฟิล์มบาง CuO ที่อุณหภูมิในช่วง 125-365 เคลวิน	34
2.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \sigma T^{\frac{1}{2}}$ กับ $\frac{1,000}{T}$ ของฟิล์มบาง CuO	35
2.20 ระดับพลังงานของกัณฑ์พาหะชนิดจับอิเล็กตรอนและกัณฑ์พาหะชนิดจับโฮลที่ปรากฏในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ	38
2.21 กระแสขาขึ้นและกระแสขาลงการสพานำไฟฟ้าเชิงแสง	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I_p$ กับ t ของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงทั้งช่วงกระแสขาขึ้นและช่วงกระแสขาลง	42
2.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I_p$ กับ t เพื่อใช้คำนวณหาความหนาแน่นของกักพาหะในช่วงกระแสขาลง	45
2.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I_p$ กับ t เพื่อใช้คำนวณหาความหนาแน่นของกักพาหะในช่วงกระแสขาขึ้น	46
2.25 แสดงโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบาง CdS/CdTe	50
2.26 แสดงผิวหน้าของฟิล์มบาง CdTe ที่หนา 0.3 ไมโครเมตรที่ไม่ได้แอนนีกัล ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม	51
2.27 แสดงผิวหน้าของฟิล์มบาง CdTe ที่หนา 0.8 ไมโครเมตรที่ไม่ได้แอนนีกัล ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม	51
2.28 แสดงผิวหน้าของฟิล์มบาง CdTe ที่หนา 0.8 ไมโครเมตรและแอนนีกัลในบรรยากาศของไอระเหย CdCl ₂ เป็นเวลา 5 นาที ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม	52
2.29 แสดง GIXRD ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีฟิล์ม CdTe ความหนา 0.3 ไมโครเมตรและ แอนนีกัลในบรรยากาศของไอระเหย CdCl ₂ ที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส	52
2.30 แสดง GIXRD ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีฟิล์ม CdTe ความหนา 0.8 ไมโครเมตรและแอนนีกัลในบรรยากาศของไอระเหย CdCl ₂ ที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส	53
2.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงานกับอุณหภูมิของฟิล์ม CdTe ความหนา 0.3 และ 0.8 ไมโครเมตร	53
3.1 ผงผลึกของสารตั้งต้น CdS _x Te _{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่ผสมแล้วเพื่อจะใช้ในการทดลองทั้งแบบที่ปิดแฟลชและเปิดแฟลชของกล้องถ่ายภาพ	59
3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการประดิษฐ์ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS _x Te _{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	62
3.3 ระบบการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	63
4.1 ฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ CdS _x Te _{1-x} ($x = 0.0$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมีตั้งแต่ 1 – 5 นาที เรียงตามลำดับ	65

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.2 ภาพถ่ายของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	66
4.3 ผงผลึกของสารตั้งต้นสำหรับเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	66
4.4 พิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	67
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่โครงสร้างผลึกกับสัดส่วน โมลอะตอมของธาตุ S ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที กับสัดส่วน โมลอะตอมของธาตุ S	68
4.6 ภาพถ่าย SEM ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	70
4.7 แสดงสเปกตรัม EDS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียม โดย วิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	72
	74
4.9 การหาช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(ahv)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียม โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	75
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) กับสัดส่วน โมลอะตอมของธาตุ S ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	76

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \alpha$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	77
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแผ่นกับเวลาในการระเหิดสารเคมีของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด	79
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแผ่นกับสัดส่วน โมลอะตอมของธาตุ S ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	80
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 $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($x = 0.4$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 5 นาที	81
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 $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($x = 0.6$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 5 นาที	82
4.16 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 $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($x = 0.8$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 5 นาที ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะเวลาประชิด ที่ใช้เวลาในการระเหิด 5 นาที	83
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{R_0}{R}\right)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($x = 0.2$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 5 นาที	89
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโฟโตกับเวลาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับสัดส่วนโมลอะตอมของธาตุ S ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	90
4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดเมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	91
4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโฟโตกับเวลาของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $In_xW_{1-x}O_3$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	94
4.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง $ln I_p$ กับเวลาของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $In_xW_{1-x}O_3$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	95
4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสออร์มัลไลซ์กับเวลาของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $In_xW_{1-x}O_3$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจาก สารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก	
ก. กรณีขาขึ้น	
ข. กรณีขาลง	96

บทที่ 1

บทนำ

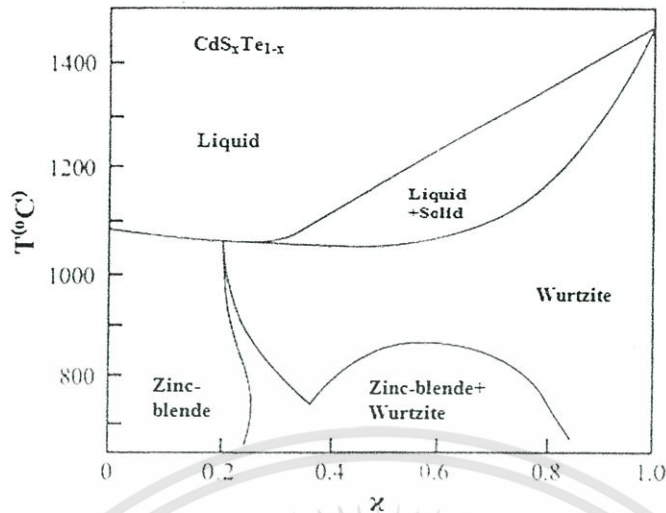
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พลังงานจากแสงอาทิตย์ก็เป็นทางเลือกอีกทางหนึ่ง เนื่องจากเป็นพลังงานทดแทนที่สะอาดไม่สร้างมลภาวะขณะใช้งานและยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์ชนิดหนึ่งที่สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง เซลล์แสงอาทิตย์มีอายุการใช้งานได้มากกว่า 20 ปี ดังนั้นเซลล์แสงอาทิตย์จึงเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่มีต้นทุนต่ำ ใช้ได้ในระยะยาว งานวิจัยและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์จากสารกึ่งตัวนำ ในกลุ่ม II-VI และ I-III-VI₂ เช่น CdTe, CdS, CuInSe₂ และ CuInGaSe₂ ได้มีการวิจัยกันอย่างกว้างขวางทั้งในประเทศสหรัฐอเมริกา ยุโรปและญี่ปุ่น เป็นต้น ปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ที่โดดเด่นและน่าสนใจมากคือเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหิวต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งประดิษฐ์ขึ้นเป็นครั้งแรกในปี พ.ศ. 2515 โดยบอนเนต (Bonnet) และราเบนฮอสต์ (Rabenhorst) ซึ่งมีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าประมาณ 5-6% (Bonnet et al., 1972; Moller, 1993) จากนั้นได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องมาจนถึงปัจจุบันซึ่งมีประสิทธิภาพสูงกว่า 20 % (Gessert et al., 2013; Green et al., 2015) ในกระบวนการประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบาง CdS/CdTe จะเริ่มจากการเตรียมฟิล์มบาง CdTe โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดให้เคลือบลงบนแผ่นรองรับที่เป็นฟิล์มบาง CdS ซึ่งได้ทำการเคลือบบนกระจก FTO ไว้ก่อนแล้ว โดยให้ภาชนะระเหิดสารตั้งต้นอยู่ใกล้กับแผ่นรองรับโดยไม่เกิน 1 ซม. สำหรับฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด (close spaced sublimation, CSS) นี้จะเลือกใช้อุณหภูมิของภาชนะระเหิดสารตั้งต้นประมาณ 500 °C และอุณหภูมิของแผ่นรองรับต่ำกว่าอุณหภูมิของภาชนะระเหิดสารประมาณ 100 °C และสำหรับแผ่นรองรับจะเป็นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบบนกระจก FTO โดยวิธีอาบสารละลายเคมี เนื่องจาก CdS เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างแถบพลังงานเป็นแบบตรงและมีขนาดกว้างถึง 2.42 eV และสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงมีค่าสูงในระดับ 10⁵ cm⁻¹

ในกระบวนการผลิตรอยต่อวิวิธพันธุ์ของเซลล์แสงอาทิตย์ CdS/CdTe อะตอม Te จะแพร่เข้าสู่ฟิล์มบาง CdS ส่งผลให้ช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง CdS ซึ่งทำหน้าที่เป็นชั้นหน้าต่างของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าลดลง ดังนั้นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้จะตอบสนองต่อแสงอาทิตย์ในช่วงความยาวคลื่นสั้นได้ไม่ดี (Wood, 1999) อีกทั้งอะตอม S ที่แพร่เข้าสู่ชั้นฟิล์มบาง CdTe จะทำให้ค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง CdTe มีค่าลดลง การตอบสนองต่อแสงอาทิตย์ของเซลล์ในช่วงอินฟราเรดจะมีค่าเพิ่มขึ้น ความหนาของชั้นอัลลอยด์ CdS_xTe_{1-x} นี้จะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการประดิษฐ์รอยต่อ เช่น อุณหภูมิและระยะเวลาของการเคลือบฟิล์มบาง CdTe ลงบน CdS รวมทั้งอุณหภูมิและช่วงเวลาในการอบด้วยไอของสาร CdCl₂ (Dhere et al., 2002) เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟิล์มบาง CdS_xTe_{1-x} สามารถเกิดเป็นสารละลายของแข็งตลอดช่วงของสัดส่วน โมล ($0 \leq x \leq 1$) เมื่อ $x < 0.2$ จะมีโครงสร้างผลึกแบบซิงเบลนด์ แต่เมื่อ $x > 0.8$ จะมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเวิร์ทไซท์ สำหรับ x ที่อยู่ระหว่าง 0.2 ถึง 0.8 จะมีโครงสร้างผลึกทั้งแบบซิงเบลนด์และแบบเวิร์ทไซท์ผสมกันอยู่ (Adachi, 2009; Murali and Palanisamy, 2010; Wood, 1998) แผนภูมิเฟสของสารประกอบ CdTe-CdS จะแสดงดังภาพที่ 1.1 และเกรนมีขนาดเล็กมากอยู่ในระดับไม่กี่สิบนานโนเมตร แต่ขนาดของเกรนสามารถเพิ่มขึ้นได้เมื่อมีการแอนนیلที่อุณหภูมิที่เหมาะสม ส่วนค่าช่องว่างแถบพลังงานจะสัมพันธ์กับสัดส่วน โมล (x) ในแบบสมการกำลังสอง (quadratic equation) (Wood et al., 1999; Adachi, 2009) กล่าวคือช่องว่างแถบพลังงานจะมีค่าต่ำสุดที่ $x \approx 0.2$ แต่เมื่อ $x > 0.2$ แล้วช่องว่างแถบพลังงานจะมีค่าเพิ่มขึ้น (Lane, 2006) และอุณหภูมิแอนนิลจะมีผลอย่างมากต่อโครงสร้างผลึกและสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบาง CdS_xTe_{1-x} ฟิล์มบาง CdS_xTe_{1-x} นี้สามารถเตรียมได้หลายวิธีเช่น วิธีเคลือบด้วยไฟฟ้าแบบใช้แรงดันไฟฟ้าเป็นพัลส์ (pulse plated method) (Murali et al., 2009; Kathalingam et al., 2010) วิธีอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง (Duenow et al., 2011) วิธีอบสารละลายเคมี (Pan et al., 2011) วิธีระเหยสารเคมีด้วยเลเซอร์แบบพัลส์ (Wei et al., 1999) วิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อน (Gordillo and Romero, 2005; Al-Shakarchi, 2010) วิธีพ่นละอองสารละลายเคมี (Ikhmayies and Ahmad-Bitar, 2012; Ikhmayies, 2016) และวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด (Jacome et al., 2001) เป็นต้น การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิดมีข้อดีคือ ระบบที่ใช้เตรียมฟิล์มบางมีโครงสร้างไม่ซับซ้อน เป็นระบบสุญญากาศความดันต่ำในระดับ 10^{-2} มิลลิบาร์ ใช้อุณหภูมิในการเตรียมฟิล์มบางไม่สูงนัก ใช้ปริมาณสารตั้งต้นน้อย สามารถควบคุมปริมาณสารเจือได้ง่าย และสามารถหลีกเลี่ยงการเกิดปฏิกิริยาเคมีกับอะตอมออกซิเจนได้ดี อีกทั้งระบบสุญญากาศเป็นอุปกรณ์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายอยู่แล้วในอุตสาหกรรมการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะทำการประดิษฐ์ฟิล์มบาง CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) โดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิดที่ความดันต่ำระดับ 5×10^{-2} มิลลิบาร์ โดยใช้สารตั้งต้นที่เป็นผลึก CdS และ CdTe ที่มีความบริสุทธิ์สูง 99.99% โดยเลือกอุณหภูมิของสารตั้งต้นและอุณหภูมิของแผ่นรองรับที่เหมาะสม ทำการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของฟิล์มบาง CdS_xTe_{1-x} ที่เตรียมได้ ด้วยวิธีเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ตรวจสอบผิวหน้าของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม และตรวจสอบองค์ประกอบของฟิล์มบางด้วยเทคนิค EDS ขั้นตอนไปศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบาง CdS_xTe_{1-x} ที่เตรียมได้โดยการวัดการส่งผ่านแสงเพื่อคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงานและศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดความต้านทานแผ่นขณะที่ไม่มีการฉายแสงและมีการฉายแสงจากหลอดฮาโลเจนที่มีสเปกตรัมคล้ายแสงอาทิตย์ เพื่อคำนวณค่าความไวแสง รวมทั้งวัดความต้านทานแผ่นที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิเพื่อคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้น ซึ่งจะสัมพันธ์กับระดับพลังงานของขอบพ่องผลึกที่ปรากฏอยู่ในช่องว่างแถบพลังงานได้



ภาพที่ 1.1 แสดงแผนภูมิเฟสของสารประกอบ CdTe- CdS (Adachi, 2005)

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เตรียมฟิล์มบาง CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) โดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิดเคลือบบนกระจกแชฟไฟร์ ให้มีความหนาประมาณ 500 นาโนเมตร จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก CdS และ CdTe ที่มีความบริสุทธิ์สูง โดยเลือกเงื่อนไขที่เหมาะสม
- 1.2.2 ศึกษาโครงสร้างผลึกโดยวิธีเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CdS_xTe_{1-x} ที่สัดส่วน โมล (x) ค่าต่าง ๆ
- 1.2.3 ตรวจสอบผิวหน้าของฟิล์มบาง โดยการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ของฟิล์มบาง CdS_xTe_{1-x} ที่สัดส่วน โมล (x) ค่าต่าง ๆ
- 1.2.4 ศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบาง CdS_xTe_{1-x} โดยการวัดการส่งผ่านแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์เพื่อนำไปคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน จากนั้นจะหาความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างแถบพลังงานกับสัดส่วน โมล (x) ค่าต่าง ๆ
- 1.2.5 ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดความต้านทานแผ่นขณะไม่มีการฉายแสงและภายใต้การฉายแสงจากหลอดฮาโลเจนเพื่อกำหนดหาค่าความไวแสง (photosensitivity) รวมทั้งวัดความต้านทานแผ่นที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิเพื่อที่จะกำหนดค่าพลังงานกระตุ้น (activation energy)

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 เคลือบฟิล์มบาง CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ลงบนกระจกแชฟไฟร์ โดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของ CdS และ CdTe ที่มีความบริสุทธิ์สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.3.2 ตรวจสอบโครงสร้างผลึกของฟิล์มบาง CdS_xTe_{1-x} ที่เตรียมได้โดยวิธีเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ตรวจสอบ ตรวจสอบผิวหน้าของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และตรวจสอบองค์ประกอบของฟิล์มบางด้วยเทคนิค EDS
- 1.3.3 ศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบาง CdS_xTe_{1-x} ที่เตรียมได้ โดยการวัดการส่งผ่านแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ในช่วงความยาวคลื่น 300- 1,000 นาโนเมตร เพื่อนำไปคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน
- 1.3.4 ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง CdS_xTe_{1-x} ที่เตรียมได้ โดยการวัดความต้านทานแผ่นขณะไม่มีการฉายแสงและภายใต้การฉายแสงจากหลอดไฟฮาโลเจน รวมทั้งวัดความต้านทานแผ่นที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ
- 1.3.5 ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเชิงแสงโดยการวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

- 1.4.1 สืบค้นข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมฟิล์มบาง CdS_xTe_{1-x} โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด สมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติทางแสงของฟิล์มบางนี้
- 1.4.2 พัฒนาระบบระเหิดสารเคมีในระยะประชิด ภายใต้สุญญากาศความดันต่ำให้เหมาะสมที่จะเตรียมฟิล์มบาง CdS_xTe_{1-x}
- 1.4.3 เคลือบฟิล์มบาง CdS_xTe_{1-x} ที่มีสัดส่วน โมล $x=0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ และ 1.0 ให้มีความหนาประมาณ 500 nm ลงบนกระจกแชฟไฟร์ โดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด จากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกของ CdS และ $CdTe$ ที่มีความบริสุทธิ์สูง 99.99% โดยควบคุมอุณหภูมิของสารตั้งต้นและอุณหภูมิของแผ่นรองรับให้เหมาะสม
- 1.4.4 ตรวจสอบผิวหน้าของฟิล์มบาง CdS_xTe_{1-x} ที่เตรียมได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) รวมทั้งตรวจสอบองค์ประกอบของฟิล์มบางด้วยเทคนิค EDS
- 1.4.5 ศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบาง CdS_xTe_{1-x} ที่เตรียมได้ โดยการวัดการส่งผ่านแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ในช่วงความยาวคลื่น 300- 1,000 นาโนเมตร เพื่อนำไปคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน
- 1.4.6 ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง CdS_xTe_{1-x} ที่เตรียมได้ โดยการวัดความต้านทานแผ่นขณะไม่มีการฉายแสงและภายใต้การฉายแสงจากหลอดไฟฮาโลเจนรวมทั้งวัดความต้านทานแผ่นที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิเพื่อกำหนดหาค่าพลังงานกระตุ้น
- 1.4.7 ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเชิงแสงโดยการวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา
- 1.4.8 วิเคราะห์และสรุปผล
- 1.4.9 เขียนรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ได้องค์ความรู้ใหม่ในการวิจัย
- 1.5.2 ได้ผลงานวิจัยที่สามารถนำเสนอในงานประชุมทางวิชาการระดับนานาชาติ และเผยแพร่ในวารสารนานาชาติที่อยู่ในฐานข้อมูล SCOPUS ได้
- 1.5.3 ได้พัฒนาการวิจัยของนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาของ คณะวิทยาศาสตร์ สจล. ที่ร่วมในโครงการ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

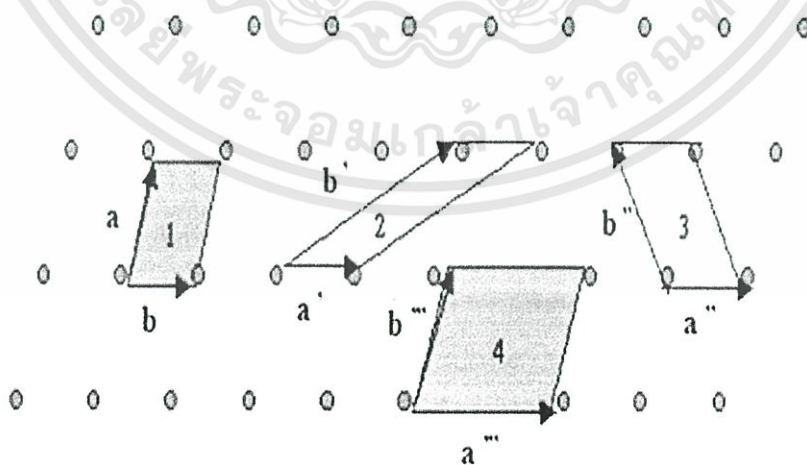
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเรื่องของลักษณะของโครงสร้างผลึก (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2531; งามนิตย์, 2545; จูตินัย, 2549; จูตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; จูตินัย, 2558)

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

2.1.1 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ

ผลึกของสารเกิดจากการที่อะตอมหรือ โมเลกุลของสสารชนิดนั้นมารวมกันอยู่เป็นจำนวนมากโดยระยะห่างระหว่างอะตอมมีค่าคงที่และมีการจัดเรียงตัวกันเป็นระบบแบบรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอนเป็นระเบียบอย่างต่อเนื่องภายในหนึ่งหน่วยเซลล์ของผลึกอาจประกอบด้วยอะตอมของธาตุเพียงอะตอมเดียวไปจนถึงหลายๆ อะตอมหรือหลายๆ โมเลกุล เซลล์ที่มีปริมาตรเล็กที่สุดที่สามารถใช้เป็นตัวแทนของผลึกนั้นเรียกว่า หน่วยเซลล์ (unit cell) กล่าวคือ ถ้าเอาหน่วยเซลล์นี้มาเรียงต่อกันก็จะได้ผลึกขึ้นมา และเรียกตำแหน่งต่างๆ ของอะตอมที่ระบบสามมิติว่า โครงผลึกหรือ แลตทิซ (lattice) ในทางทฤษฎีการกำหนดหน่วยเซลล์จะทำได้ไม่จำกัด แต่ตามปกติจะเลือกหน่วยเล็กที่สุดที่เป็นไปได้ และมีสมมาตรค่อนข้างสูง ตัวอย่างการเลือกหน่วยเซลล์ใน โครงผลึก 2 มิติ ดังภาพที่ 2.1 ในระบบสองมิติพารามิเตอร์ของ โครงผลึก ได้แก่ เวกเตอร์ a และ b และ มุม γ ซึ่งเป็นมุมระหว่าง เวกเตอร์ทั้งสอง ทั้งนี้ชนิดของ โครงผลึกที่แตกต่างกันที่เป็นไปได้อีกมีเพียงห้าแบบดังตารางที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 หน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ

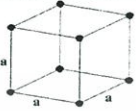
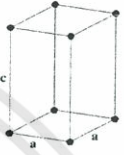
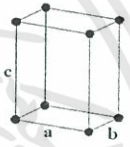


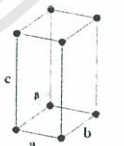
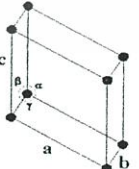
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์ของหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ

ชนิดของโครงผลึกสองมิติ	ค่าคงที่ของโครงผลึก	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 \vec{a} , \vec{b} และ \vec{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	ค่าคงที่ของโครงผลึกและมุมผลึก	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)	$a = b \neq c$ $\alpha = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$	
โมนอคลินิก (monoclinic)	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$	
ไตรคลินิก (triclinic)	$a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การระบุตำแหน่งทิศทางและระนาบของโครงสร้างผลึก

เนื่องจากผลึกมีสมบัติที่ขึ้นอยู่กับทิศทาง ดังนั้นจึงต้องระบุแน่นอนว่ากำลังศึกษาลักษณะส่วนใดของผลึกอยู่ซึ่งการระบุลักษณะที่ว่าจะกล่าวถึงตำแหน่ง, ทิศทางและระนาบของผลึกที่กำลังศึกษาอยู่นั้น

หลักเกณฑ์ในการระบุลักษณะพื้นฐานของผลึก

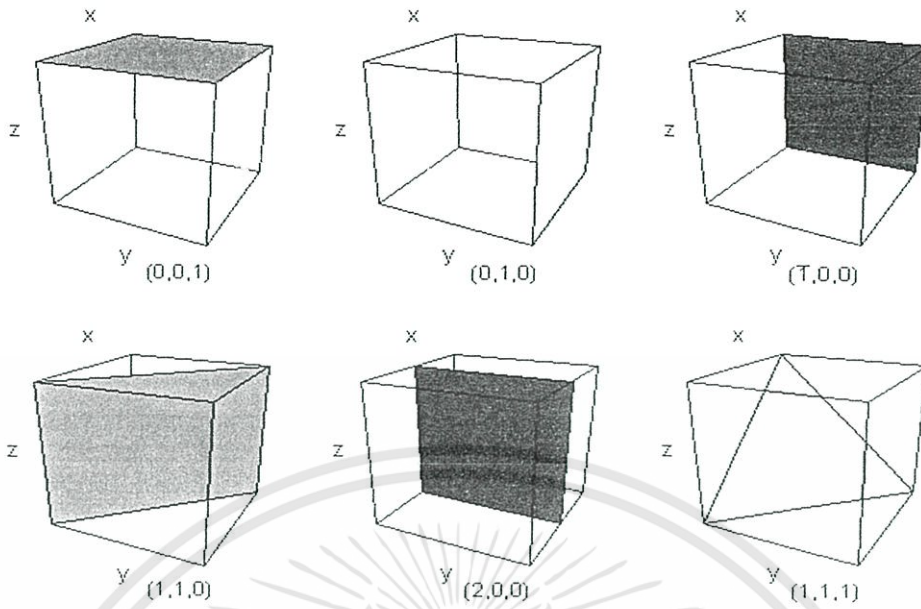
การระบุตำแหน่ง

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 และไม่มีเครื่องหมาย “,” คั่นโดยที่หากระนาบใดตัดแกนลบก็ให้ใส่เครื่องหมาย “-” หรือ บาร์ข้างบนตัวเลขดัชนีมิลเลอร์นั้น

ค่า hkl เรียกว่า ดัชนีมิลเลอร์ (miller indices) ชื่อระนาบของผลึกเป็นสิ่งที่สำคัญที่สุดอีกประการหนึ่งในการศึกษาผลึก เพราะในแต่ละระนาบจะประกอบไปด้วยอะตอม ไอออน หรือ โมเลกุล เรียงตัวกันอยู่บนระนาบนั้น อาจกล่าวได้ว่าระนาบแต่ละระนาบจะมีความแตกต่างกัน เช่นเดียวกับทิศทาง การบอกชื่อระนาบหรือดัชนีมิลเลอร์นั้นทำได้โดย

1. กำหนดจุดที่ระนาบนั้นตัดแกนพิกัดจากซ้ายมาเป็น (x,y,z) โดยที่หากระนาบตัดแกนใดให้ถือว่าระนาบนั้นตัดแกนนั้นที่ระยะอนันต์(∞) และหากระนาบใดตัดแกนลบ (-) ก็ให้ใส่เครื่องหมาย บาร์ (-) ข้างบนตัวเลขดัชนีนั้น
2. ทำค่าจุดตัดต่างๆที่ได้จากข้อ 1 ทั้งหมดให้เป็นเศษส่วนกลับ
3. ทำให้เป็นเลขจำนวนเต็มโดยการหาค่าผลคูณร่วมน้อย (ค.ร.น) ของค่าเศษส่วนที่ได้จาก ข้อ 2 ซึ่งก็จะได้ค่าตัวเลขดัชนีมิลเลอร์ (hkl) ตามลำดับ

ดังแสดงในภาพที่ 2.2 และ ตารางที่ 2.3 ซึ่งสรุปความสัมพันธ์ระหว่างระนาบต่างๆกับระยะตัดแกนอ้างอิง



ภาพที่ 2.2 การบอกระนาบต่างๆของผลึก

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

จุดตัดแกนผลึก (x,y,z)	ส่วนกลับของจุดตัดบน แกนผลึก	ระนาบหรือดัชนีมิลเลอร์ (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)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีข้อสังเกตที่ควรรู้เกี่ยวกับดัชนีมิลเลอร์ที่ใช้บอกชื่อระนาบของผลึกเพิ่มเติมดังนี้

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

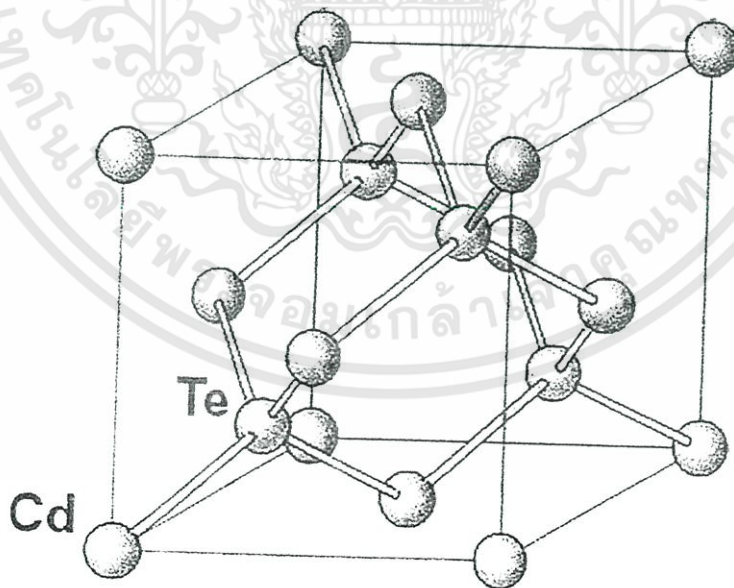
$$l = -(h+k) \quad (2.1)$$

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

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

2.1.2 โครงสร้างผลึกแคดเมียมเทลลูไรด์

ผลึกแคดเมียมเทลลูไรด์เป็นสารประกอบกึ่งตัวนำหมู่ II-VI มีโครงสร้างแบบซิงค์แบลนด์ มีค่าคงตัวของโครงสร้างผลึกเท่ากับ 6.481 อังสตรอม และมีค่าความหนา 6.2 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีจุดหลอมเหลว 1040 องศาเซลเซียส เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 1.50 อิเล็กตรอนโวลต์ มีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงในย่านความยาวคลื่นแสงที่ตามองเห็น สำหรับแคดเมียมเทลลูไรด์ที่มีความหนาในระดับไมครอนสามารถดูดกลืนพลังงานโฟตอนได้มากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ผลึกแคดเมียมเทลลูไรด์เสถียรที่อุณหภูมิสูงกว่า 500 องศาเซลเซียส ดังนั้นผลึกแคดเมียมเทลลูไรด์จึงเหมาะกับการนำมาใช้เป็นชั้นดูดกลืนพลังงานโฟตอนในเซลล์แสงอาทิตย์ ดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 แสดง โครงสร้างแบบซิงค์แบลนด์ของผลึกแคดเมียมเทลลูไรด์

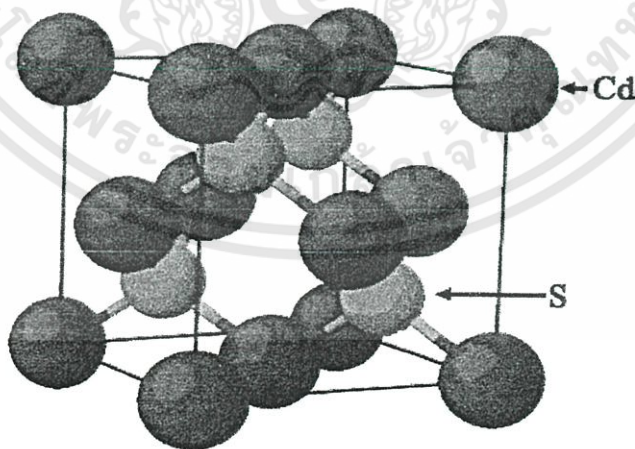
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 โครงสร้างผลึกแคดเมียมซัลไฟด์

โครงสร้างผลึก คือ ตำแหน่งที่เป็นอยู่ของเบสิส (basis) ในระบบ 3 มิติ ส่วนเบสิส คืออะตอมหรือกลุ่มของอะตอมที่อยู่ภายในโครงสร้างซึ่งจากการศึกษาพบว่าโครงสร้างผลึกของแคดเมียมซัลไฟด์จะมีลักษณะโครงสร้างอยู่ 2 แบบ คือ แบบซิงค์เบลนด์ (zincblende) และแบบเวิร์ทไซต์ (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

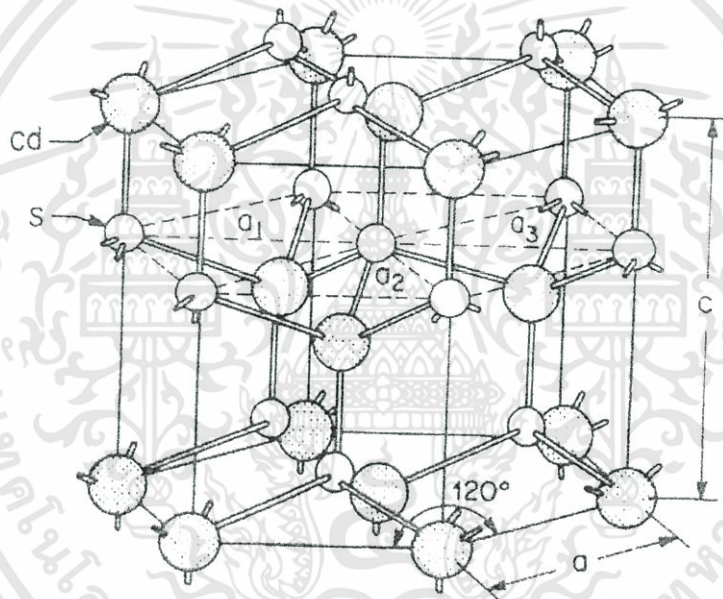


ภาพที่ 2.4 การจัดเรียงตัวของอะตอมของผลึกแคดเมียมซัลไฟด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

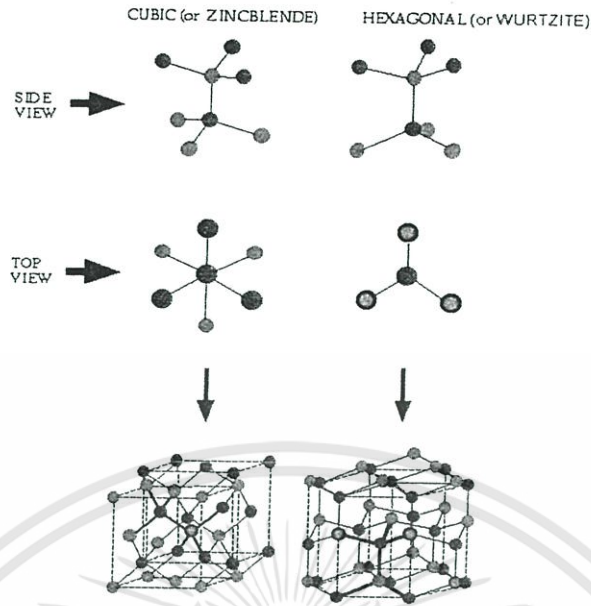
2.1.3.2 โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ตไซต์ (wurtzite Structure)

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



ภาพที่ 2.5 โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ตไซต์ของผลึกแคดเมียมซัลไฟด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.6 แสดงการเปรียบเทียบ โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์กับแบบซิงค์เบลนด์

2.2 การระเหิดในระยะประชิด (Close-Spaced Sublimation :CSS) (Ohring, 2002; Harris, 1989; Gaewdang et al., 2011; จูตินัย, 2552; จูตินัย, 2554)

การระเหิดในระยะประชิดเป็นกระบวนการเกิดก้อนเนื้อผลึก (bulk) หรือฟิล์มบางของสารตั้งต้น ที่กลายเป็นไอแล้วควบแน่นบนฐานรองรับที่วางอยู่บนสารตั้งต้นในระบบปิดในกระบวนการระเหิด ในระยะประชิดนี้สามารถให้อัตราการเคลือบต่ำ ในกระบวนการระเหิดในระยะประชิดนี้ พิจารณาสมดุลปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารตั้งต้นและฐานรองรับดังสมการ



จากกฎการคงตัวของมวล (law of mass action) พิจารณาสถานะสมดุลเชิงความร้อน

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

เมื่อ P คือ ความดัน

$K_p(T)$ คือ ค่าคงตัวของปฏิกิริยาที่สถานะสมดุลเชิงความร้อนที่อุณหภูมิใดๆ ซึ่งค่าคงตัวของปฏิกิริยาที่สถานะสมดุลเชิงความร้อน $K_p(T)$ มีความสัมพันธ์ตามสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เมื่อ $\Delta G(T)$ คือ พลังงานอิสระของกิบส์

สำหรับแคลเซียมเทลลูไรด์ $\Delta G_{\text{CdTe}} = +68.64 - 44.94 \times 10^{-3} T$ 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 และ โมเลกุลของแก๊ส Te_2 ระหว่างสารตั้งต้นและฐานรองรับ ซึ่งวางห่างกันเป็นระยะ 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

ซึ่งในกรณีนี้น้ำหนักโมเลกุลและขนาดของแก๊ส Te_2 มีค่ามากกว่า Cd ดังนั้นจะได้สัมประสิทธิ์การแพร่ $D_{\text{Cd},j} = 1.85 D_{\text{Te}_2,j}$ ในบรรยากาศของแก๊ส H_2, He หรือ Ar จากสมการการส่งผ่าน CdTe ที่อุณหภูมิของสารตั้งต้น (T_{so}) มีค่าต่างกัน $T_{\text{so}} - T_{\text{sub}} = 70$ องศาเซลเซียส จะได้ $P_{\text{Cd}}(T_{\text{so}}) \gg P_{\text{Cd}}(T_{\text{sub}})$ และ $P_{\text{Te}_2}(T_{\text{so}}) \gg P_{\text{Te}_2}(T_{\text{sub}})$ ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการใหม่ได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

หมายเหตุ ค่าอุดมคติอัตราส่วนเท่ากับ 1

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

$$GR \left(\frac{\mu\text{m}}{\text{min}} \right) = \frac{JxMx60x10^4}{\rho} \quad (2.10)$$

เมื่อ J คือ ฟลักซ์ของการแพร่

M คือ มวลโมเลกุลของ CdTe

ρ คือ ความหนาแน่นของ CdTe

2.3 การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิศย์, 2545; จูตินัย, 2552; จูตินัย, 2554; งามนิศย์, 2557; จูตินัย, 2558)

การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ด้วยเครื่องเอกซเรย์คิฟเฟอโรกราฟโตโรมิเตอร์ โดยใช้รังสีเอกซ์ความยาวคลื่นเดียวตกกระทบตัวอย่าง ซึ่งอาจเป็นผลึกเดี่ยวหรือผลึกพหุพันธ์ก็ได้สารตัวอย่างจะหมุนไปเป็นมุม θ ในขณะที่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ รังสีเอกซ์จะเคลื่อนที่ไปเป็นมุม 2θ เพื่อให้การเลี้ยวเบนสอดคล้องกับกฎของแบรกก์

ในปี พ.ศ. 2455 (ค.ศ. 1912) W.H. Bragg และ W.L. Bragg ได้เสนอแนวคิดที่เราสามารถมองได้ว่าผลึกจัดเรียงตัวเป็นชั้น (layer) หรือระนาบ (plane) ของอะตอมซึ่งสามารถสะท้อนคลื่น ที่ตกกระทบโดยมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน ทั้งนี้ลำคลื่นที่สะท้อนออกไปจากระนาบต่างๆดังกล่าวจะมีความเข้มสูงและแทรกสอดแบบเสริมกันถ้าหากความแตกต่างระหว่างทางเดิน ของคลื่นที่สะท้อนจากระนาบที่อยู่ข้างเคียง (path difference) มีค่าเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นที่ตกกระทบดังสมการ

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

เมื่อ d_{hkl} คือ ระยะระหว่างระนาบ

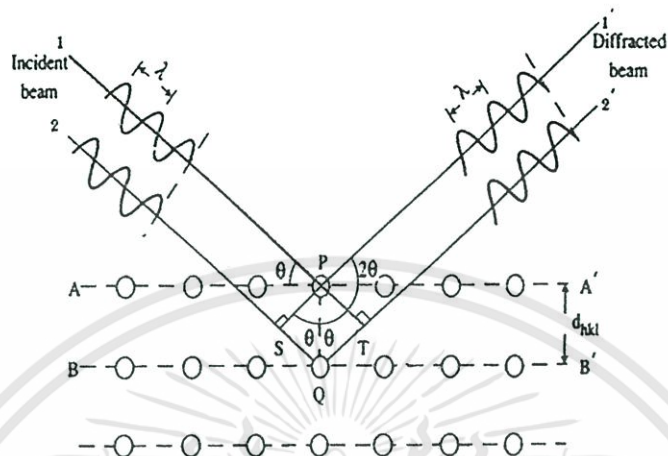
θ คือ มุมของรังสีสะท้อนจากระนาบแบรกก์ของรังสีเอกซ์ ซึ่งจะเท่ากับมุมของรังสีตกกระทบ

N คือ ลำดับของการเลี้ยวเบน มีค่าตั้งแต่ 1, 2, 3,

λ คือ ความยาวคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระนาบต่าง ๆ ของผลึกที่ก่อให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ต้องสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ เรียกว่า ระนาบแบรกก์ (Bragg plane) และมุมที่รังสีสะท้อนทำกับแนวที่ขนานกับรังสีตกกระทบเรียกว่ามุม เลี้ยวเบน (diffraction angle) ซึ่งมีค่าเป็นสองเท่าของมุมตกกระทบ (2θ) ดังภาพที่ 2.7



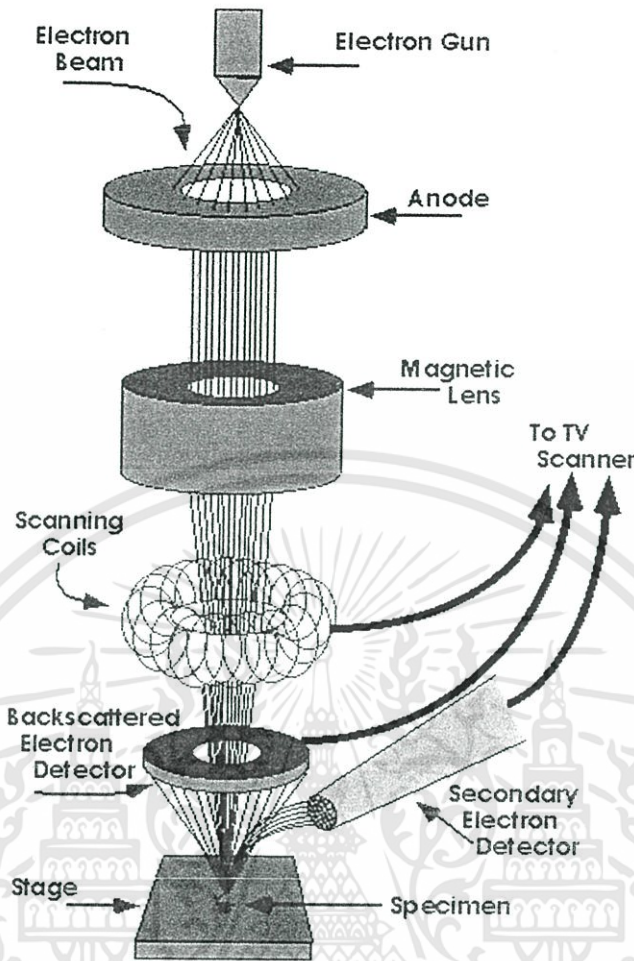
ภาพที่ 2.7 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์

2.4 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2545; จูตินัย, 2549; จูตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; จูตินัย, 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

การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดดังแสดงในภาพที่ 2.7 เริ่มจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ซึ่งมีหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนจากไส้หลอด กลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า พร้อมทั้งบังคับกลุ่มอิเล็กตรอนให้มีลักษณะเป็นลำ โดยลำอิเล็กตรอนจะกระดไปบนพื้นผิวของตัวอย่าง โดยขดลวดสนามแม่เหล็กบนระนาบเอกซ์-เวายเพื่อทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ อิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกตรวจจับโดยเซนเซอร์ และแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าเพื่อส่งต่อไปให้ระบบสร้างภาพต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.8 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

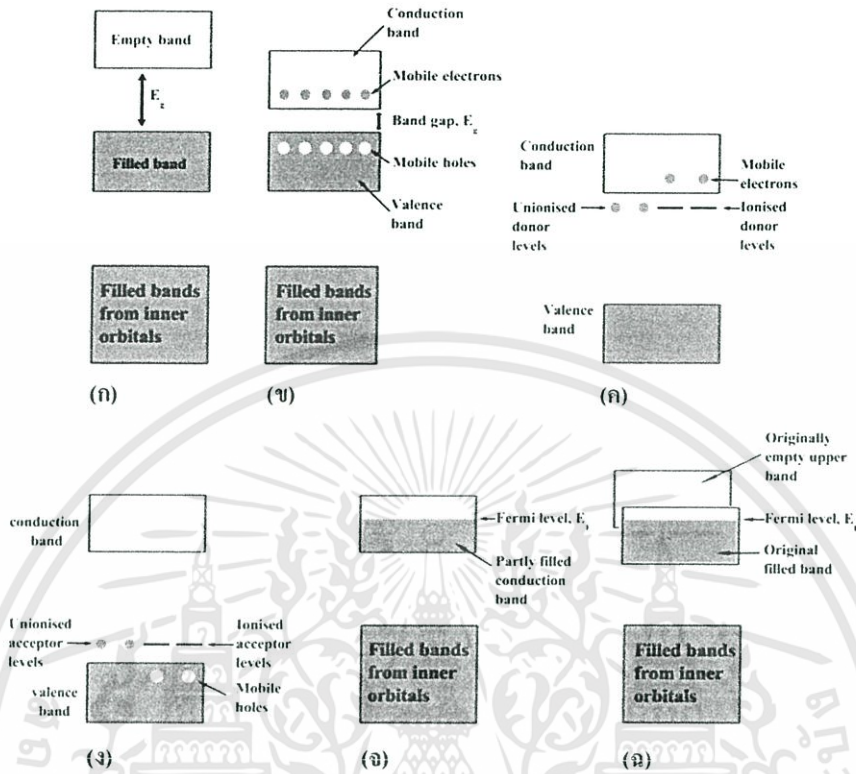
2.5 สมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ (Abelas, 1972; Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2545; จูตินัย, 2549; จูตินัย, 2554; งามนิตย์, 2557; จูตินัย, 2558)

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

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

ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานจะประกอบไปด้วยส่วนใหญ่ๆ 3 ส่วน คือ แถบนำ (conduction band) แถบวาเลนซ์ (valence band) และแถบพลังงานต้องห้าม (forbidden band หรือ forbidden region หรือ forbidden gap) และเรียกความกว้างของช่องว่างระหว่างแถบนำกับแถบวาเลนซ์นั้นว่า ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (energy gap) โดยเราสามารถที่จะแบ่งประเภทของวัสดุว่าเป็นฉนวน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(insulator) โลหะหรือตัวนำ (metal or conductor) และสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) ได้โดยดูจากขนาดของช่องว่างแถบพลังงานที่แตกต่างกันดังแสดงในภาพที่ 2.9



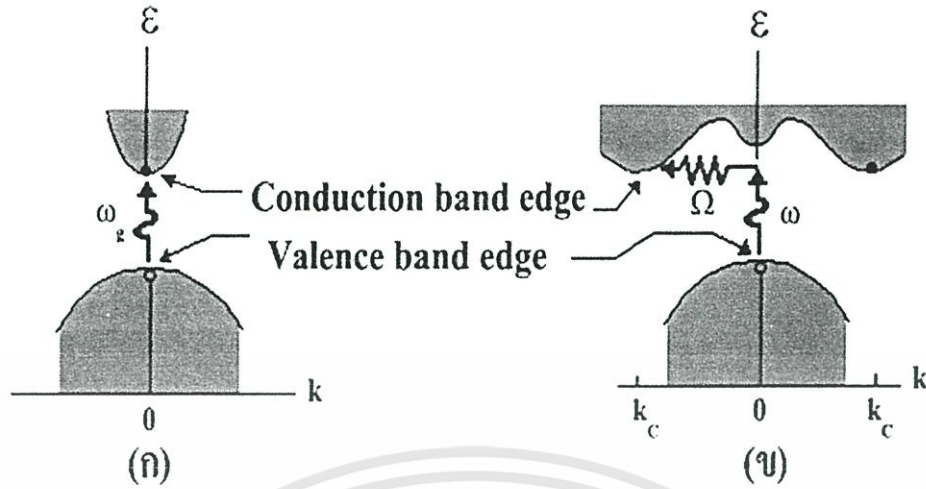
ภาพที่ 2.9 ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานอย่างง่ายของ

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

ในวัสดุที่เป็นฉนวนเมื่อดูจากแถบพลังงานจะเห็นได้ว่าขนาดช่องว่างแถบพลังงานจากขอบล่างสุดของแถบว่าง(แถบนำ)ถึงขอบบนสุดของแถบเต็ม(แถบวาเลนซ์)มีขนาดกว้างมากประมาณได้ว่า $E_g \gg kT$ หรือมากกว่า 3 อิเล็กตรอนโวลต์ดังแสดงในภาพที่ 2.9 (ก) การที่จะทำให้วัสดุนี้นำไฟฟ้าได้ต้องใส่พลังงานที่สูงมากเพื่อที่จะทำให้อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปยังแถบนำได้ถ้าช่องว่างแถบพลังงานระหว่างแถบนำกับแถบวาเลนซ์มีขนาดเล็กพอที่อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์เมื่อได้รับพลังงานความร้อนสามารถเคลื่อนย้ายขึ้นไปยังแถบนำ และทำให้วัสดุนี้นำไฟฟ้าได้เราจะเรียกสารชนิดนี้ว่า สารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ (intrinsic semiconductors) ดังแสดงในภาพที่ 2.9 (ข) จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนย้ายขึ้นไปอยู่ในแถบนำแล้วจะเหลือที่ว่างไว้ในแถบวาเลนซ์โดยจะมีสภาพทางไฟฟ้าเป็นบวก และจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงข้ามกับอิเล็กตรอนเมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า เราจะเรียกที่ว่างนี้ว่าโฮล และถ้าเราทำการเจืออะตอมของธาตุบางอย่าง ลงไปในสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์แล้ว อะตอมของสารเจือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประพจน์ตัวเป็นอะตอมผู้ให้ ก็จะทำให้เกิดระดับพลังงานผู้ให้ โดยให้อิเล็กตรอนกับแถบนำ เราจะเรียกสารนี้ว่าสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductors) ดังแสดงในภาพที่ 2.9 (ค) และถ้าอะตอมประพจน์ตัวเป็นอะตอมผู้รับก็จะทำให้เกิดระดับพลังงานผู้รับ โดยทำการรับอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ เราจะเรียกสารนี้ว่าสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type semiconductors) ดังแสดงในภาพที่ 2.9 (ง) สำหรับแถบพลังงานของวัสดุที่เป็นโลหะหรือตัวนำจะพบว่าอิเล็กตรอนเข้าไปอยู่ในแถบนำแล้วบางส่วนภาพที่ 2.9 (จ) และเราบอกได้ว่าแถบวาเลนซ์กับแถบนำมีการซ้อนเหลื่อมกันอยู่ ทำให้สารสามารถนำไฟฟ้าได้ และในภาพที่ 2.9 (ฉ) ถ้าขอบล่างของแถบว่างที่ $(n+1)$ ซ้อนเหลื่อมกับขอบสูงสุดของแถบที่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่ที่ n และระดับพลังงานเฟอร์มิอยู่ระหว่างแถบทั้งสอง อิเล็กตรอนก็จะสามารถไหลจากแถบเต็มไปยังด้านล่างของแถบว่างได้ เราจะเรียกสารที่มีโครงสร้างแถบพลังงานแบบนี้ว่าเป็นสารกึ่งโลหะ ลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง คือ อิเล็กตรอนได้รับพลังงานโฟตอนที่มีค่าเท่ากับขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ($E_g = h\nu$) อิเล็กตรอนจะดูดกลืนพลังงาน โฟตอนนั้นและอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นจึงย้ายสถานะพลังงานทรานซิชันจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำ กลายเป็นอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ โดยไม่มีการสูญเสียพลังงานให้แก่โครงสร้างผลึก คือไม่มีการสร้างหรือทำลายโฟนอน ดังแสดงในภาพที่ 2.10 (ก) และเมื่อเขียนกราฟระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนจะได้กราฟดังแสดงในภาพที่ 2.11(ก) และลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงคือ โครงสร้างแถบพลังงานที่มีจุดต่ำสุดของแถบวาเลนซ์ไม่อยู่ที่ตำแหน่งเวกเตอร์คลื่นค่าเดียวกัน หรืออยู่ที่ตำแหน่งโมเมนตัมของคลื่นไม่เท่ากัน ดังนั้นอิเล็กตรอนจะต้องได้รับพลังงาน โฟนอนที่มีค่ามากกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ในกรณีนี้มีกระบวนการสร้างโฟนอนเกิดขึ้น ($E_g + h\Omega = h\nu$) เมื่อ Ω คือค่าความถี่เชิงมุมของพลังงาน โฟนอน ซึ่งมีค่าน้อยกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงานหรือในกรณีที่มีการทำลายล้าง โฟนอน ($E_g + h\Omega = h\nu$) นั่นคือเมื่ออิเล็กตรอนที่อยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นการย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำจะมีการปล่อย โฟนอน (emitted phonon) ที่มีความถี่เชิงมุม Ω มีเวกเตอร์คลื่น $K \cong k_c$ ออกมา จึงเกิดการสร้างโฟนอน ($E_g + h\Omega = h\nu$) และเกิดการสร้างอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ (E_{VERT}) ขึ้นมาในกระบวนการนี้ ดังแสดงในภาพที่ 2.10 (ข) และเมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน โฟตอนกับพลังงาน โฟตอนจะได้ดังแสดงในภาพที่ 2.11(ข)

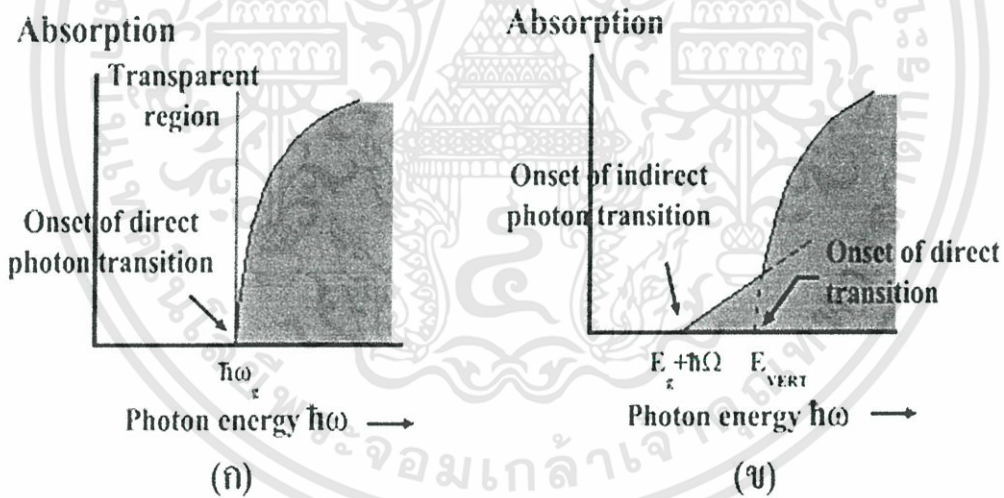


ภาพที่ 2.10 ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานและการย้ายสถานะของพลังงานอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำ

ที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ($T = 0$ เคลวิน)

ก. ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง

ข. ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง



ภาพที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงาน โฟตอนของสารกึ่ง

ตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ($T = 0$ เคลวิน)

ก. ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง

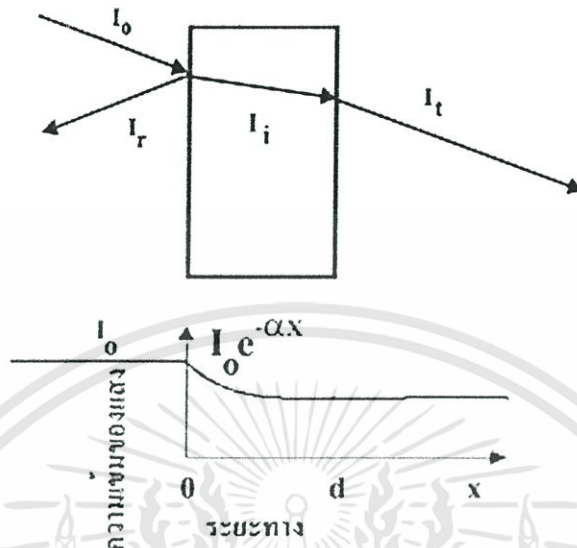
ข. ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงในกรณีที่เกิดกระบวนการสร้างโฟนอน

2.5.2 การส่งผ่านแสง (Kittel, 1971; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2552)

การศึกษาวิธีวัดสเปกตรัมการสะท้อนและการส่งผ่านแสงนี้จะกล่าวถึงสัมประสิทธิ์การ

ส่งผ่านแสงและองค์ประกอบของการวัดสเปกตรัมการส่งผ่านแสงเมื่อแสงเดินทางไปกระทบฟิล์มบาง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสงบางส่วนจะสะท้อนกลับที่ผิวของฟิล์มบาง บางส่วนของแสงจะเดินทางเข้าไปในแผ่นฟิล์มบางและถูกดูดกลืน ดังแสดงในภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 แผนภาพเมื่อแสงตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มบาง

สัมประสิทธิ์การสะท้อนของแสงมีค่าเป็น

$$R = \frac{I_r}{I_0} \tag{2.12}$$

- เมื่อ I_0 คือ ความเข้มแสงตกกระทบแผ่นฟิล์มบาง
- 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

$$I_i = I_0 - I_r = I_0 - RI_r = (1 - R)I_0 \tag{2.13}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 แสงบางส่วนจะส่งผ่านออกไปบางส่วน ถูกดูดกลืนและส่วนที่เหลือจะสะท้อนกลับมา ดังแสดงในภาพที่ 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 สัมประสิทธิ์การสูญเสียดัง (extinction coefficient)

โดยทั้ง n และ K เป็นฟังก์ชันของ λ

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

การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำเกิดจากการที่อิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากแสงที่มีพลังงานโฟตอนเท่ากับหรือมากกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานจากนั้นจึงย้ายสถานะพลังงานจากแถบวา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

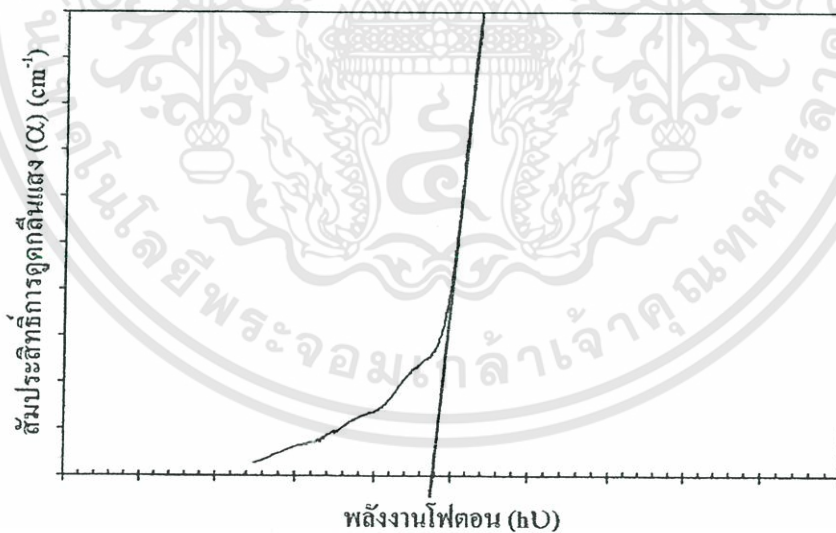
เลนซ์ขึ้น ไปสู่แถบนำสเปกตรัมการดูดกลืนแสงบริเวณที่พลังงานโฟตอนมีค่าน้อยจะมีลักษณะเป็น ขอบแสดงถึงการลดลงของการดูดกลืนแสงอย่างฉับพลันขอบลักษณะนี้เรียกว่าขอบการดูดกลืนแสง (absorption edge) หรือขอบการดูดกลืนหลัก (fundamental edge) พลังงานโฟตอนที่ขอบการดูดกลืน แสงมีค่าเท่ากับผลต่างของค่าพลังงานที่วัดจากจุดต่ำสุดของแถบนำกับจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์จุดที่ เส้นตรงตัดกับแกนในแนวนอน จะให้ค่าช่องว่างพลังงาน (E_g) วิธีการนี้เป็นการกำหนดค่าช่องว่าง แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่นิยมมากที่สุด

การหาค่าของช่องว่างพลังงาน สามารถพิจารณาได้จากสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (α) ของ สารกึ่งตัวนำ ซึ่งสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (T) จากภาพรูปที่ 2.12 แสดงภาพจำลอง เมื่อแสงตกกระทบบนจากด้านซ้ายของฟิล์มบาง (I_0) ความเข้มแสงภายในฟิล์มบางจะลดลงแบบเอกซ์ โปเนนเชียลและมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงโดยทั่วไปการสะท้อน (R) มีค่าน้อยมากและมี ค่าคงที่ไม่ขึ้นกับความยาวคลื่นแสงที่ตกกระทบบน

จะได้ว่า

$$T = e^{-\alpha d} \quad (2.19)$$

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln\left(\frac{I_0}{T}\right) \quad (2.20)$$



ภาพที่ 2.13 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง กับพลังงานโฟตอน

ที่กล่าวมาเป็นการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงจากสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงโดยไม่ คิดถึงการสะท้อนของแสง สำหรับกรณีการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเนื่องจากการย้าย สถานะพลังงานของอิเล็กตรอน ในกรณีที่อิเล็กตรอนย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบ วาเลนซ์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำที่เวกเตอร์คลื่นค่าเดียวกัน 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

$$(\alpha hv) = B(hv - E_g)^2 \quad (2.22)$$

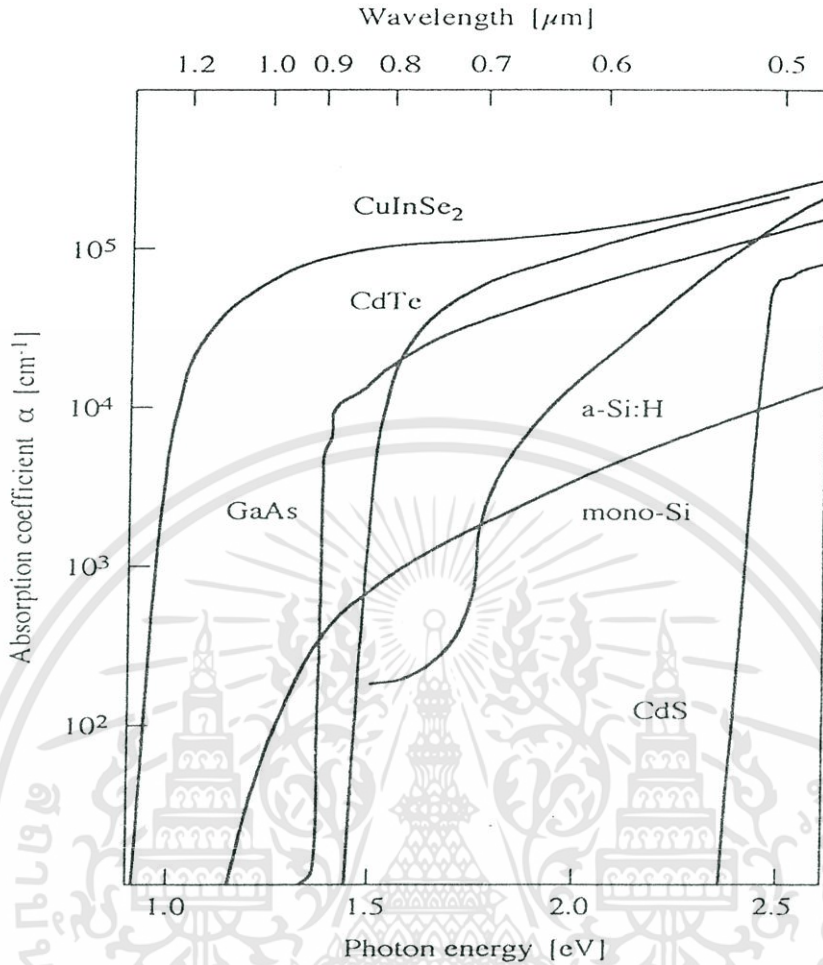
และสำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานชนิดต้องห้าม

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

เมื่อ α คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

hv คือ พลังงานโฟตอน

A, B และ C คือ ค่าคงตัว

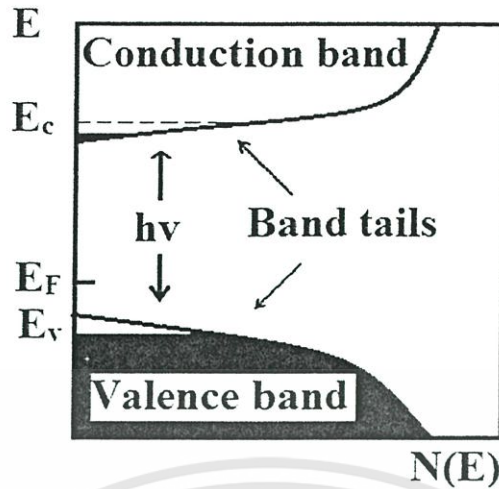


ภาพที่ 2.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและค่าพลังงานโฟตอนหรือค่าความยาวคลื่นของพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำ

2.5.5 ส่วนหางของแถบพลังงาน

วัสดุประเภทฟิล์มบางมักมีข้อบกพร่องของผลึกจำนวนมากระดับพลังงานของข้อบกพร่องของผลึกเหล่านี้จะมีอันตรกิริยาต่อกันส่งผลให้ระดับพลังงานเหล่านี้แผ่ขยายออกโดยจะไม่เป็นระดับพลังงานเฉพาะค่า (discrete level) อีกต่อไปบางครั้งก็แผ่ออกไปจรดขอบบนสุดของแถบวาเลนซ์หรือขอบล่างสุดของแถบนำซึ่งเสมือนกับว่าแถบวาเลนซ์หรือแถบนำนี้มีความหนาแน่นของสถานะทางพลังงาน (energy density of state) ยื่นเข้าไปในช่องว่างแถบพลังงานซึ่งนิยมนิยามส่วนที่ยื่นเข้าไปในช่องว่างแถบพลังงานนี้ส่วนหางของแถบพลังงาน (band tail หรือ Urbach's tail) ดังแสดงในภาพที่ 2.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.15 ส่วนหางของแถบพลังงานซึ่งมีทั้งส่วนหางของแถบวาเลนซ์และส่วนหางของแถบนำ

ในเชิงการทดลองส่วนหางของแถบพลังงานสามารถตรวจสอบได้จากการวัดขอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซึ่งเออร์บัค (Urbach) ได้แสดงให้เห็นว่าขอบการดูดกลืนของผลึกจะเพิ่มขึ้นแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลถึงความสัมพันธ์

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

เมื่อ α_0 และ E_0 เป็นพารามิเตอร์ของผลึกแต่ละชนิด ส่วน K_B คือค่าคงตัวของโบลต์ซมันน์ T คืออุณหภูมิ (เคลวิน) และ α คือความชัน (steepness) ของขอบการดูดกลืนแสง จากสมการที่ (2.33) นี้บอกเป็นนัยๆ ว่ากราฟของความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\alpha$ กับพลังงาน (E) จะเป็นเส้นตรงในช่วงพลังงานที่มีความต่ำกว่าขอบการดูดกลืนพื้นฐาน (หรือพิจารณาที่พลังงานต่ำกว่าช่องว่างแถบพลังงานนั่นเอง) การลาดส่วนต่อของเส้นตรงที่วัดที่อุณหภูมิต่างๆ จะถูกละจุด (E_0, α_0) ซึ่งเรียกจุดนี้ว่า จุดถูกรวม

2.6 สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง (Cullity, 1956; Garcia-Cuencu et al., 1987; Kittel, 1971; Runyan, 1975; งามนิศย์, 2545; จูตินัย, 2549; จูตินัย, 2550; งามนิศย์, 2551; จูตินัย, 2551)

จากทฤษฎีแถบพลังงานนั้น สารกึ่งตัวนำสามารถมีขนาดช่องว่างแถบพลังงานได้ใหญ่เกินกว่า 2 อิเล็กตรอนโวลต์ พลังงานความร้อนที่อุณหภูมิห้องไม่เพียงพอที่จะกระตุ้นให้เกิดพาหะอิสระได้ ดังนั้นพาหะอิสระของสารกึ่งตัวนำประเภทนี้จึงน้อยส่วนใหญ่มาจากระดับพลังงานที่ปรากฏในช่องว่างแถบพลังงานซึ่งจะเป็นทั้งระดับพลังงานผู้ให้และระดับพลังงานผู้รับหรือศูนย์กลางการรวมตัว (recombination center) ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำๆของสารกึ่งตัวนำจึงขึ้นกับความหนาแน่นของพาหะอิสระเหล่านี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 สภาพนำไฟฟ้า (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิศย์, 2545; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; งามนิศย์, 2551; ฐิตินัย, 2551)

เมื่อใส่สนามไฟฟ้าเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบนำจะตอบสนองต่อสนามไฟฟ้า เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนกลายเป็นกระแสไฟฟ้า 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

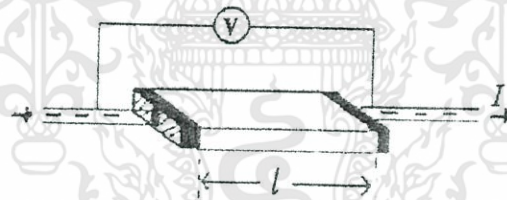
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า (Cullity, 1956; Gillmore, 2000; Gunal and Parlark, 1997; Kittel, 1971; Schroder, 1998; งามนิตย์, 2545; จูตินัย, 2549; จูตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; จูตินัย, 2551)

วิธีการวัดสภาพความต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำสามารถกระทำได้หลายวิธี ทั้งวิธีที่ใช้ส่วนของอุปกรณ์ต่อเข้าสัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่างและวิธีที่ไม่ต้องสัมผัสโดยตรง สำหรับวิธีที่จะกล่าวถึงในที่นี้เป็นวิธีที่ใช้การสัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่าง ซึ่งทำได้โดยการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในชิ้นสารตัวอย่างแล้ววัดความต่างศักย์ระหว่างจุดบนชิ้นสารนั้น

การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง (direct resistivity method)

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



ภาพที่ 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 ซึ่งความถูกต้องในการวัดโดยวิธีนี้ขึ้นอยู่กับบริเวณผิวสัมผัสที่กระแสไหลเข้าและออกนั้นมีลักษณะเป็น โอห์มมิกที่ดีหรือไม่ ถ้าไม่มีคุณสมบัติโอห์มมิกที่ดีแสดงว่ามีความต้านทานที่ผิวสัมผัสทั้งสองขั้วไฟฟ้าเกิดขึ้นด้วย ค่าความต้านทาน R ที่วัดได้จึงเป็นค่าความต้านทานรวมทั้งหมด ดังนั้น ค่าความต้านทานจริงของสารกึ่งตัวนำจะน้อยกว่าค่าที่วัดได้แน่นอน ความถูกต้องอีกส่วนหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

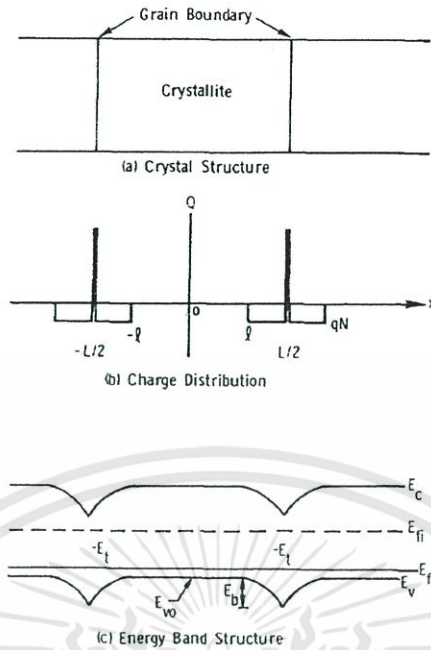
ขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างความต้านทานของสารที่ต้องการวัดและความต้านทานภายใน (impedance) ของโวลต์มิเตอร์ที่ใช้วัด หากความต้านทานนี้ใกล้เคียงกับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จะมีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง ซึ่งในทางปฏิบัติจะคำนึงถึงผิวสัมผัสโอห์มมิกมากกว่าความผิดพลาดของโวลต์มิเตอร์ เนื่องจากที่ผิวสัมผัสจะดีหรือไม่ (เป็น โอห์มมิกหรือไม่) นั้นตรวจสอบได้ยากมาก จึงแก้ไขด้วยการทำให้เกิดผิวสัมผัสบริเวณพื้นที่มากขึ้นเพื่อลดความต้านทานที่ผิวสัมผัสลง จากนั้นจึงวัดศักย์ไฟฟ้าด้วยโวลต์มิเตอร์ โดยเลือกโวลต์มิเตอร์ที่มีความต้านทานภายในสูงๆ เท่าที่จะหาได้เพื่อลดความผิดพลาด

2.9 กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในฟิล์มบางที่อุณหภูมิต่างๆ (Cullity, 1956; Kittel, 1971; Ramaiah, 1999; งามนิตย์, 2545; จูตินัย, 2549; จูตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; จูตินัย, 2551)

เซโต (Seto, 1975) ได้พัฒนาทฤษฎีที่ใช้อธิบายการเคลื่อนที่ของพาหะอิสระในวัสดุที่เป็นผลึกพหุพันธ์ (polycrystalline) เช่น ในฟิล์มบาง เป็นต้น โดยใช้แบบจำลองกับดักพาหะที่ขอบของเกรนรวมกับกลไกเทอร์มอลอิออนมิสชัน โดยตั้งสมมุติฐานดังนี้คือ

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

จากข้อสมมุติฐานดังกล่าวข้างต้น รวมกับการประมาณแบบรอยต่อขั้นบันได (abrupt junction approximation) แถบพลังงานของผลึกพหุพันธ์ตรงบริเวณรอยต่อสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2.17



ภาพที่ 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

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

เมื่อ
$$v_c = \left[\frac{kT}{2\pi m^*} \right]^{1/2} \tag{2.32}$$

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

สมการที่ (2.31) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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

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

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

โดยที่ E_a คือพลังงานกระตุ้น มีหน่วยเป็นอิเล็กตรอน โวลต์ ภาพที่ 2.18 แสดงตัวอย่างของกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \sigma T^{-1}$ กับ $\frac{1,000}{T}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่อุณหภูมิในช่วง 125- 365 เคลวิน (Scrin et al. 2011)

สำหรับความหนาแน่นของกักพาหะ (N_t) สามารถหาได้จากสมการที่ (2.31) เมื่อทราบขนาดของเกรน (L) แล้ว ซึ่งขนาดของเกรนสามารถคำนวณได้จากสมการของเซอร์เรอร์ดังสมการ

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

ส่วนความสูงของกำแพงศักย์ที่ขอบของเกรนจะแสดงได้ดังนี้ คือ

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

ส่วนระดับพลังงานของกักพาหะ (E_t) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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

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

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

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

ซึ่ง E_b 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

ภาพที่ 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) ดังนั้นประจุไฟฟ้าจะเข้าไปบรรจุอยู่ในกับดักพาหะทั้งหมดจนเต็ม ส่งผลให้กับดักพาหะไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ สำหรับความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ (N_a) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.48) รวมทั้งความยาวเดอบาย (L_D) จะคำนวณได้จากความสัมพันธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

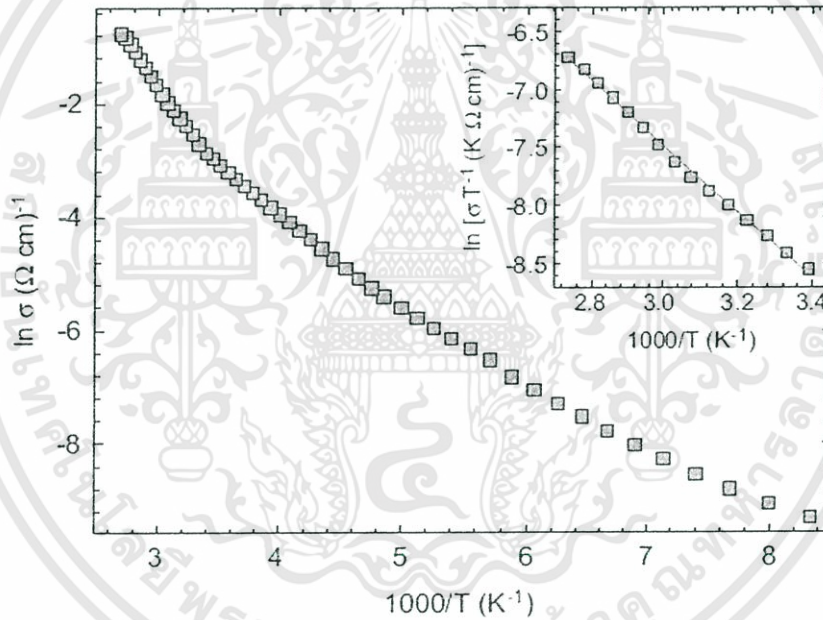
$$L_D = \left[\frac{kT\epsilon_s}{e^2 N_a} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.49)$$

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

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

ซึ่ง

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

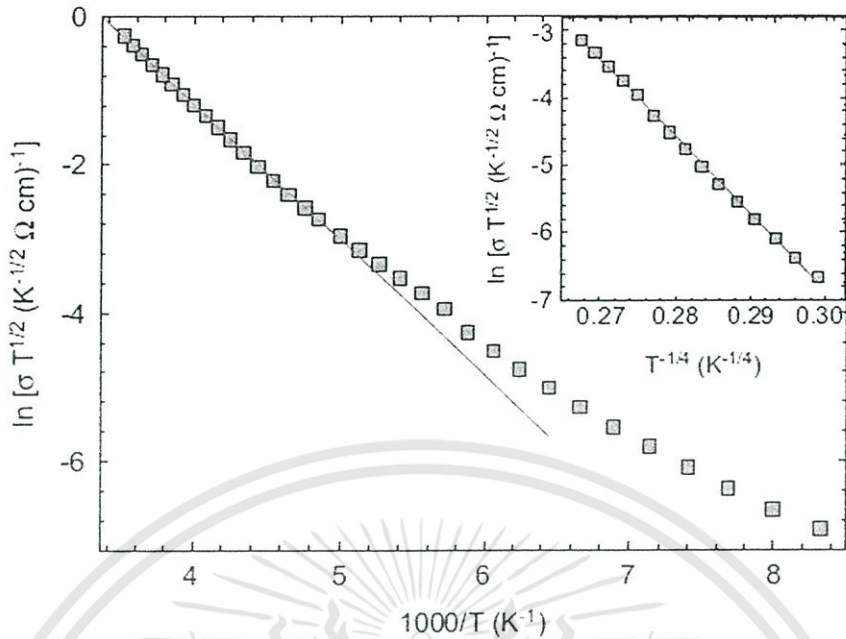


ภาพที่ 2.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \sigma$ กับ $\frac{1,000}{T}$ ของฟิล์มบาง CuO ที่อุณหภูมิในช่วง

125-365 เคลวิน สำหรับในรูปแทรก คือ กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \sigma T^{-1}$ กับ $\frac{1,000}{T}$

(Serin et al. 2011)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \sigma T^{\frac{1}{2}}$ กับ $\frac{1,000}{T}$ ของฟิล์มบาง CuO สำหรับในรูปแทรก

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; ฐิตินัย, 2556)

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

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ σ_0 คือ แฟกเตอร์หน้าพจน์เอกซ์โพเนนเชียล (pre-exponential factor)
 k คือ ค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.38×10^{-23} จูลต่อเคลวิน
 T คือ อุณหภูมิเคลวิน

เมื่อนำเอาสมการที่ (2.47) ไปเขียนกราฟจะได้กราฟเชิงเส้นโดยความชันของกราฟคือ $-(T_0)^{\frac{1}{4}}$ ส่วน $\ln \sigma_0$ คือจุดตัดแกน $\ln(\sigma T^{\frac{1}{2}})$ ที่จุด $T^{-\frac{1}{4}} = 0$ โดยที่

$$\sigma_0 = 3e^2 v \left[\frac{N(E_F)}{8\pi\alpha k} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.55)$$

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

- เมื่อ v คือ ความถี่ของโฟนอนที่อุณหภูมิเดอบาย (Debye temperature) จะมีค่าประมาณ 1×10^{13} เฮิรตซ์
 $N(E_F)$ 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} คูลอมบ์
 T_0 คือ องศาของความไม่เป็นระเบียบ (degree of disorder)

จากสมการที่ (2.55) ถ้ายกกำลังสองทางด้านซ้ายและขวามือของเครื่องหมายเท่ากับจะได้ว่า

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

เอาสมการที่ (2.57) คูณกับสมการที่ (2.56) จะได้

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

ถ้าแทนสมการที่ (2.61) ลงในสมการที่ (2.55) จะได้ว่า

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

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

ระยะทางเฉลี่ยของการกระโดด (average hopping distance: R) มีหน่วยเป็น เซนติเมตรและพลังงานเฉลี่ยของการกระโดด (average hopping energy: W) มีหน่วยเป็นอิเล็กตรอนโวลต์ 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

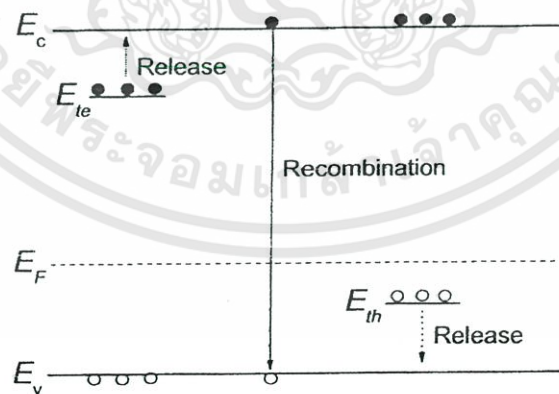
$$N(E_F) = \left(\frac{2\varepsilon_s}{e^2} \right) N_a^{\frac{2}{3}} \left(1 - \frac{N_d}{N_a} \right)^{\frac{4}{3}} \quad (2.66)$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10 สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง (งามนิตย์, 2556; ฐิตินัย, 2558)

ในสารกึ่งตัวนำมักมีข้อบกพร่องผลึกเสมอ ข้อบกพร่องผลึกมีหลายชนิด ข้อบกพร่องผลึกบางชนิดมีคุณสมบัติในการจับอิเล็กตรอนและ/หรือโฮลอิสระได้ จึงมักเรียกว่ากับดักพาหะ กับดักพาหะชนิดต่างๆ จะปรากฏเป็นระดับพลังงานในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ โดยในภาพที่ 2.20 มีทั้งระดับพลังงานของกับดักพาหะชนิดจับโฮล (E_{th}) และกับดักพาหะชนิดจับอิเล็กตรอน (E_{te}) (Jiang, 2012) คำว่าการปลดปล่อย (release) เป็นกลไกที่กับดักพาหะปล่อยอิเล็กตรอนให้กับแถบนำ และเป็นกับดักพาหะชนิดปล่อยโฮลให้กับแถบวาเลนซ์ ส่วนคำว่ากระบวนการรวมตัว (recombination) เป็นกลไกที่อิเล็กตรอนในแถบนำทรานซิชันลงมารวมตัวกับโฮลในแถบวาเลนซ์โดยไม่ผ่านกับดักพาหะ ขณะที่สารกึ่งตัวนำยังไม่ได้มีการฉายแสงกับดักพาหะจะมีการจับอิเล็กตรอนหรือจับโฮลอยู่ก่อนแล้ว ส่วนอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำและโฮลในแถบวาเลนซ์มีปริมาณน้อย สารกึ่งตัวนำจึงนำกระแสไฟฟ้าได้ไม่ดี กระแสมืด (dark current) จึงมีค่าน้อย แต่เมื่อมีการฉายแสงลงบนสารกึ่งตัวนำจะเกิดกระบวนการสร้างอิเล็กตรอนและโฮลอิสระขึ้นในแถบนำและแถบวาเลนซ์ตามลำดับ เนื่องจากการดูดกลืนโฟตอนที่มีพลังงานสูงเพียงพอ เมื่อไบแอสด้วยแรงดันไฟฟ้าให้กับสารกึ่งตัวนำ กระแสโฟตอนจะมีปริมาณเพิ่มขึ้น แต่เมื่อหยุดฉายแสงหรือหยุดการกระตุ้นด้วยแสง กระแสไฟฟ้าควรลดลงสู่ค่ากระแสมืดเหมือนในขณะที่ไม่มีการฉายแสง แต่บางครั้งพบว่า กับดักพาหะที่จับอิเล็กตรอนและ/หรือจับโฮล มีพฤติกรรมไม่ปล่อยอิเล็กตรอนหรือโฮลออกมาทันทีอย่างปกติธรรมดา นั่นคือยังมีประจุค้างอยู่ในกับดักพาหะ ดังนั้นอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำและ/หรือโฮลในแถบวาเลนซ์จึงยังคงปรากฏอยู่มากเพื่อทำหน้าที่ในการรักษาความเป็นกลางทางไฟฟ้า โดยปกติกลไกการปลดปล่อยจะใช้เวลานานกว่ากลไกการรวมตัวแต่เนื่องจากกับดักพาหะมีการปล่อยอิเล็กตรอนและ/หรือโฮลออกมาช้ามาก ส่งผลให้กลไกการรวมตัวใช้เวลายังนานขึ้นไปอีก จึงเป็นที่มาของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงคือรั้น (persistent photoconductivity)



ภาพที่ 2.20 ระดับพลังงานของกับดักพาหะชนิดจับอิเล็กตรอน (E_{te}) และกับดักพาหะชนิดจับโฮล (E_{th}) 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) เกิดมาจากกับดักพาหะ ดังนั้นความหนาแน่นของพาหะอิสระ (n) ที่สัมพันธ์กับกับดักพาหะชนิดที่ 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 ที่เกิดจากกับดักพาหะชนิด 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) ที่สัมพันธ์กับกับดักพาหะทุกชนิดจะเป็นดังนี้คือ

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

เมื่อ N_i คือ ความหนาแน่นของกับดักพาหะต่อปริมาตรชนิดที่ 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 แต่กัมมันตภาพมีหลายชนิด 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} คือ ความหนาแน่นของกัมมันตภาพต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ชนิดที่ 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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

เมื่อ

$$\text{ความชัน} = \frac{E_t}{(1,000)k}$$

ดังนั้น

$$E_t = \frac{(1,000)k(\text{ความชัน})}{q}$$

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

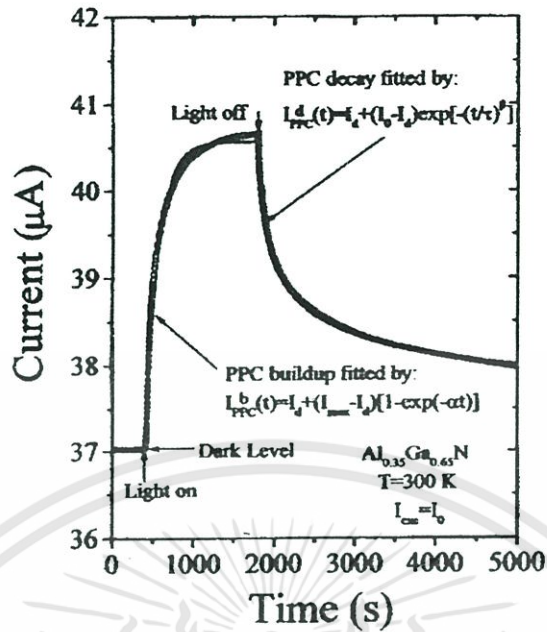
ในการศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงจะต้องมีการฉายแสงให้กับสารตัวอย่าง จะได้ว่ากระแสโฟโต (I_p) จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลา (t) ดังภาพที่ 2.21 ซึ่งจะเรียกว่าเป็นกระแสขาขึ้น (rise current) ดังความสัมพันธ์ (Ghosh, 2007)

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

เมื่อ I_o คือ กระแสเริ่มต้นของกระแสขาขึ้น (เมื่อ $t=0$) หลังจากหยุดการฉายแสง กระแสจะลดลงตามเวลา (t) ซึ่งจะเรียกว่าเป็นกระแสขาลง (decay current) จะแสดงถึงความสัมพันธ์ (Ghosh, 2007)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.21 กระแสขาขึ้นและกระแสขาตกลงการสภาวะนำไฟฟ้าเชิงแสง

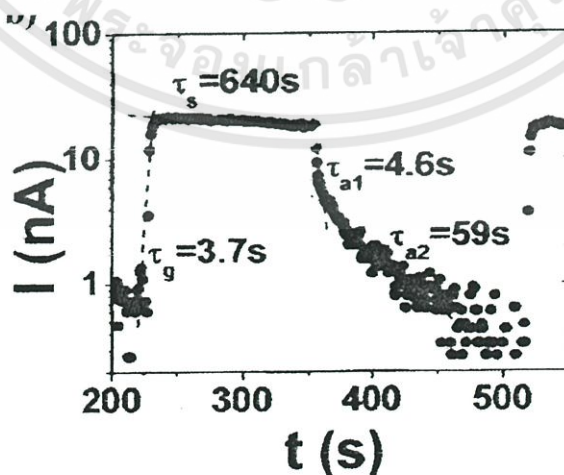
จากสมการที่ (2.79) สามารถเขียนใหม่ได้ว่า

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

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

$\ln I_p$ กับ t ในทำนองเดียวกันช่วงชีวิตขาขึ้นก็สามารถที่จะคำนวณได้จากความชันของกราฟ

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



ภาพที่ 2.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I_p$ กับ t ของสภาวะนำไฟฟ้าเชิงแสงทั้งช่วงกระแสขาขึ้นและช่วงกระแสขาลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางปฏิบัติช่วงชีวิตมีได้หลายค่า เนื่องจากกับดักพาหะมีหลายชนิด ดังนั้นกระแสโฟโตชาลงของฟิล์มบางที่ใช้หาค่าช่วงชีวิต 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) ให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันเกรตเอ็กซ์โพเนนเชียล(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

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

$$\sigma_{n2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{w} \right) \exp\left(t/\tau_{d2}\right) \quad (2.85)$$

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

$$\sigma_{n1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{w} \right) \quad (2.86)$$

และ

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

สมการที่ (2.83) สามารถที่จะทำออร์มัลไลเซชัน (normalization) ได้ดังนี้ คือ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ในกรณีกระแสไฟโตขาขึ้น (rise current) ก็สามารถที่จะพิจารณาให้อยู่ในรูปของฟังก์ชัน สเตรตเอ็กซ์โพเนนเชียลได้ด้วยเช่นกัน ดังสมการ

$$|I_p| = A_1 \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{r1}}\right) \right] + A_2 \left\{ 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau_{r1}}\right)^\beta\right] \right\} \quad (2.89)$$

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

$$|I_p| = e\mu \left(\frac{wd}{l} \right) V_a N_{n1} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{d1}}\right) + e\mu \left(\frac{wd}{l} \right) V_a N_{n2} \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau_{d2}}\right)^\beta\right] \quad (2.90)$$

จากสมการที่ (22) สามารถที่จะหาค่า

$$N_{n1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{wd} \right) \exp\left(\frac{t}{\tau_{d1}}\right) \quad (2.91)$$

$$N_{n2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{wd} \right) \exp\left(\frac{t}{\tau_{d2}}\right) \quad (2.92)$$

กับค่าพหุคูณทั้งสองชนิดนี้สามารถที่จะจับหรือปล่อยพาหะอิสระได้อย่างเป็นอิสระซึ่งกันและกัน ถ้า กำหนดให้ I_1 และ I_2 คือกระแสเริ่มต้น ($t=0$) ที่เกี่ยวกับกับค่าพหุคูณทั้งสองตามลำดับ เราจะได้ว่า

$$N_{n1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{wd} \right) \quad (2.93)$$

$$N_{n2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{wd} \right) \quad (2.94)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการที่ (2.90) สามารถที่จะทำนอร์มัลไลเซชัน (normalization) ได้ดังนี้คือ

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

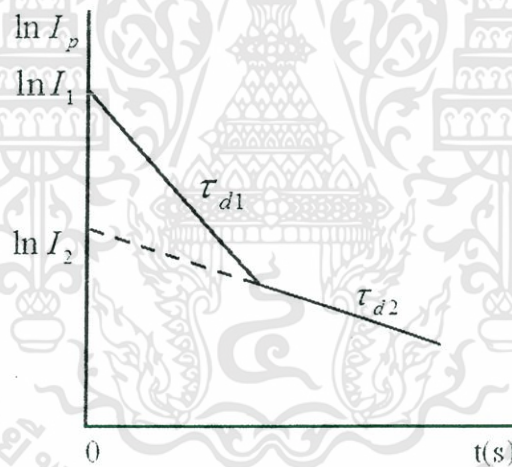
ซึ่ง A_1'' และ A_2'' สามารถหาได้จากการพิตกราฟของผลการทดลอง ในกรณีกระแสไฟโตขาขึ้น ก็ สามารถที่จะพิจารณาให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันสเตรตเอ็กซ์โพเนนเชียลได้ด้วยเช่นกันดังสมการ

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

2.10.1 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกักพาหะในช่วงกระแสขาลง

การหาค่าความหนาแน่นของกักพาหะในช่วงกระแสขาลงจะอาศัยกราฟ $\ln I_p$ กับ t

ดังรูปที่ 2.23



ภาพที่ 2.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I_p$ กับ t เพื่อใช้คำนวณหาความหนาแน่นของกักพาหะ ในช่วงกระแสขาลง

ค่า τ_{d1} หาได้จากความชันของกราฟ

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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

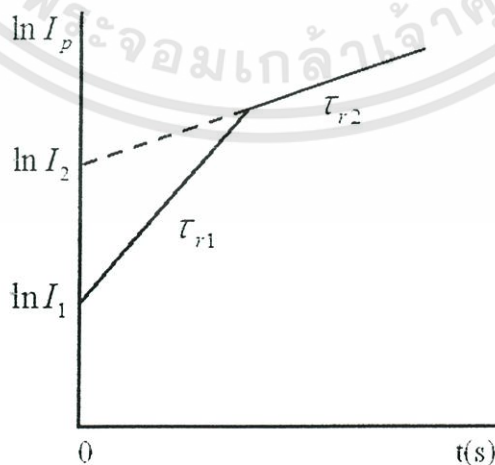
และ

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

2.10.2 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกัมมันตภาพรังสีในช่วงกระแสขาขึ้น

การหาค่าความหนาแน่นของกัมมันตภาพรังสีในช่วงกระแสขาขึ้น โดยอาศัยกราฟ $\ln I_p$ กับ t

ดังภาพที่ 2.24



ภาพที่ 2.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I_p$ กับ t เพื่อใช้คำนวณหาความหนาแน่นของกัมมันตภาพรังสี

ในช่วงกระแสขาขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสขาขึ้นอาจแสดงได้ดังสมการง่ายๆ ดังนี้คือ

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

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

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 การคำนวณหาค่าความหนาแน่นของกัมมันตภาพรังสีชนิดฟิล์มบางและเซรามิกจะใช้สมการที่ (2.98), (2.100), (2.101) และ (2.102) ได้เช่นเดียวกับกระแสขาลง

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Dhere et al., 2002)

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบาง CdS/CdTe ได้รับการพัฒนามาเป็นเวลากว่า 20 ปี โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้แสดงดังภาพที่ 2.26 ซึ่งประกอบไปด้วยชั้นหน้าด่างรับแสงซึ่งเป็นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่มีความหนา 80-100 นาโนเมตร เคลือบบนกระจก FTO โดยวิธีออบสารละลายเคมีที่อุณหภูมิ 90 เซลเซียส จากสารตั้งต้นแคดเมียมซัลเฟต ไทโอยูเรียและแอมโมเนีย ส่วนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาสั้นๆ ในบรรยากาศของก๊าซ O_2/He ที่ความดัน 16 ทอร์ อุณหภูมิของสารตั้งต้นเท่ากับ 580 องศาเซลเซียส ความหนาของฟิล์มบาง CdTe ประมาณ 0.3-0.8 ไมโครเมตร จากนั้นทำการแอนนัลในบรรยากาศของ ไอระเหย $CdCl_2$ เป็นเวลา 5 นาทีในช่วงอุณหภูมิ 400-450 องศาเซลเซียส ตรวจสอบโครงสร้างผลึกโดยวิธีเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์โดยใช้มุมยิงรังสีเอกซ์ขนาดเล็กมาก (GIXRD) ตรวจสอบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผิวหน้าของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ศึกษาสมบัติเชิงแสงโดยการวัดการส่งผ่านแสงและการสะท้อนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ และองค์ประกอบของฟิล์มบางหาได้จากโอเจิลิเล็กตรอนสเปกโตรสโคปี

จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เตรียมได้โดยไม่ได้แอนนัลในบรรยากาศของไอระเหย CdCl_2 พบว่าขนาดของเกรนโตขึ้นตามความหนาของฟิล์ม CdTe ที่เพิ่มขึ้น ในทำนองเดียวกันขนาดของเกรนเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิแอนนัลในบรรยากาศของไอระเหย CdCl_2 ที่เพิ่มขึ้น ภาพที่ 2.26 และ 2.27 แสดงผิวหน้าของฟิล์มบาง CdTe ที่หนา 0.3 และ 0.8 ไมโครเมตรที่ไม่ได้แอนนัล ส่วนภาพที่ 2.28 แสดงผิวหน้าของฟิล์มบาง CdTe ที่หนา 0.8 ไมโครเมตรและแอนนัลในบรรยากาศของไอระเหย CdCl_2 เป็นเวลา 5 นาที ขนาดของเกรนเพิ่มจาก 0.4 ไมโครเมตรเป็นมากกว่า 1 ไมโครเมตรเมื่ออุณหภูมิแอนนัลในบรรยากาศของไอระเหย CdCl_2 ที่เพิ่มขึ้น จาก 410 เป็น 450 องศาเซลเซียส

จากวิธีเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์โดยใช้มุมยั้งรังสีเอกซ์ขนาดเล็กมาก (GIXRD) สามารถใช้ศึกษาโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางที่ระยะความลึกค่าต่างๆ ได้ เช่นมุมยั้งรังสีเอกซ์ เพิ่มจาก 0.5, 1, 2 และ 5 องศา รังสีเอกซ์สามารถทะลุเข้าไปในเนื้อฟิล์มบาง ในระดับ 96, 240, 500 และ 1275 นาโนเมตร พบว่าฟิล์มบางทุกของสารตัวอย่างมีโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก

ภาพที่ 2.29 แสดง GIXRD ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีฟิล์ม CdTe หนา 0.3 ไมโครเมตรและแอนนัลในบรรยากาศของไอระเหย CdCl_2 ที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ตำแหน่งของพีค (111) ไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ แม้ว่าจะเพิ่มมุมยั้งรังสีเอกซ์แล้วก็ตาม การเพิ่มมุมยั้งรังสีเอกซ์จะช่วยให้รังสีเอกซ์ทะลุเข้าไปในฟิล์มบางได้มากขึ้น แต่ตำแหน่งพีคไม่เปลี่ยนแปลงแสดงว่าเกิดอัลลอยของ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ชนิดที่อุดมด้วยอะตอม Te ขึ้นในเนื้อฟิล์มบาง

สำหรับในระบบ CdS-CdTe ตำแหน่งของพีค (111) ของเฟสคิวบิกจะเลื่อนไปทางมุม 2θ ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าคงที่โครงผลึกของ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ มีขนาดเล็กลงในขณะที่เศษส่วนโมล (x) ของ S มีค่าเพิ่มขึ้น โอฮาตะและผู้ร่วมงาน (Ohata et al., 1973) ได้รายงานว่า อัลลอยของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ จะเป็นเฟสคิวบิกเมื่อ x อยู่ระหว่าง 0 ถึง 0.2 และค่าคงที่โครงผลึกจะเป็นไปตามความสัมพันธ์ดังนี้คือ

$$a_c = 6.477 - 0.657x \quad (2.105)$$

ค่าคงที่โครงผลึกของผิวหน้าฟิล์ม CdTe ที่มีความหนา 0.3 ไมโครเมตรและแอนนัลในบรรยากาศของไอระเหย CdCl_2 ที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียสมีค่าเท่ากับ 6.422 อังสตรอม ส่วนในเนื้อฟิล์มมีค่าเท่ากับ 6.44 อังสตรอม และความกว้างของพีค (FWHM) ของผิวหน้าฟิล์มใหญ่กว่าของเนื้อสารแสดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้เห็นว่าความสมบูรณ์ของผลึกที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางน้อยกว่าในเนื้อสาร ซึ่งเป็นการยืนยันการเกิดอัลลอยของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ที่ผิวหน้าของฟิล์มบาง CdTe เนื่องจากการแพร่ของอะตอม S

สำหรับฟิล์มบาง CdTe ความหนา 0.8 ไมโครเมตร ที่ได้รับการแอนนัลด้วยเงื่อนไขแบบเดียวกัน ผลการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์ม CdTe ที่หนา 0.8 ไมโครเมตรเป็นแบบเดียวกับฟิล์ม CdTe ที่หนา 0.3 ไมโครเมตร เพียงแต่มุม 2θ ของพีค (111) ของฟิล์ม CdTe ที่หนา 0.8 ไมโครเมตรจะเลื่อนไปน้อยกว่าของฟิล์ม CdTe ที่หนา 0.3 ไมโครเมตร แสดงว่าฟิล์ม CdTe ที่หนา 0.8 ไมโครเมตรมีปริมาณ S น้อยกว่าฟิล์ม CdTe ที่หนา 0.3 ไมโครเมตร พีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์ม CdTe ที่หนา 0.8 ไมโครเมตรและแอนนัลในบรรยากาศของไอระเหย $CdCl_2$ ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียสจะแสดงคิงภาพที่ 2.30 ค่าคิงที่โครงสร้างที่ผิวหน้าของฟิล์มหนา 0.8 ไมโครเมตรเท่ากับ 6.424 องศาและเพิ่มขึ้นเป็น 6.437 องศาสำหรับในเนื้อฟิล์มบาง

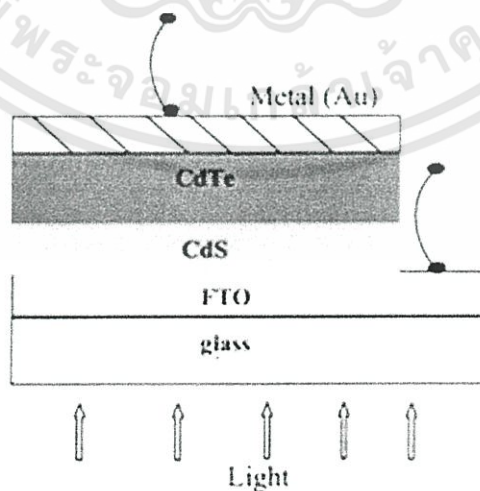
จากการหาขนาดของช่องว่างแถบพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ฟิล์มบาง CdTe ที่ไม่ได้แอนนัล พบว่าช่องว่างแถบพลังงานมีค่าเท่ากับ 1.49 อิเล็กตรอน โวลต์ ซึ่งมีค่าสอดคล้องกับฟิล์มบาง $SnO_2/CdTe$ ซึ่งได้มีการศึกษาไว้ก่อนหน้านี้แล้ว แสดงว่าอัลลอยของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} มีความหนาไม่มากพอที่จะแสดงผลต่อการดูดกลืนแสงได้ ดังนั้นฟิล์มบาง CdTe จึงแสดงผลต่อการดูดกลืนแสงอย่างโดดเด่น

โอฮาตะและผู้ร่วมงาน (Ohata et al., 1973) แสดงให้เห็นว่าช่องว่างแถบพลังงานของอัลลอยของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} มีค่าลดลงจนถึงค่าต่ำสุดที่เศษส่วน โมล (x) มีค่าเท่ากับ 0.25 สำหรับฟิล์ม CdTe ความหนา 0.3 ไมโครเมตรและแอนนัลในบรรยากาศของไอระเหย $CdCl_2$ ที่อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 นาที มีค่าช่องว่างแถบพลังงานต่ำสุดเท่ากับ 1.43 อิเล็กตรอน โวลต์ ส่วนฟิล์ม CdTe ความหนา 0.8 ไมโครเมตรและแอนนัลในบรรยากาศของไอระเหย $CdCl_2$ ที่อุณหภูมิ 440 องศาเซลเซียสเช่นเดียวกัน พบว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานจะลดลงน้อยกว่าของกรณีฟิล์มหนา 0.3 ไมโครเมตรแสดงว่าฟิล์มหนา 0.8 ไมโครเมตรเกิดเป็นอัลลอยได้น้อยกว่า

ภาพที่ 2.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงานกับอุณหภูมิแอนนัลในบรรยากาศของไอระเหย $CdCl_2$ ของฟิล์ม CdTe ความหนา 0.3 และ 0.8 ไมโครเมตรตามลำดับ เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิแอนนัลค่าใดค่าหนึ่งช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์ม CdTe ความหนา 0.3 ไมโครเมตรมีค่าต่ำกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์ม CdTe ความหนา 0.8 ไมโครเมตร แสดงว่าการแอนนัลในบรรยากาศของไอระเหย $CdCl_2$ ส่งผลต่อเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้น CdTe ความหนา 0.3 ไมโครเมตรมากกว่าฟิล์มที่มีความหนา 0.8 ไมโครเมตร อาจเนื่องจากอะตอม Cl สามารถส่งผ่านฟิล์มบาง 0.3 ไมโครเมตรไปถึงชั้น CdS ได้ง่ายกว่ากรณีฟิล์มหนา 0.8 ไมโครเมตร จากภาพที่ 4 ค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์ม CdTe ความหนา 0.3 ไมโครเมตรมีค่าลดลงมากกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์ม CdTe ความหนา 0.8 ไมโครเมตร เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

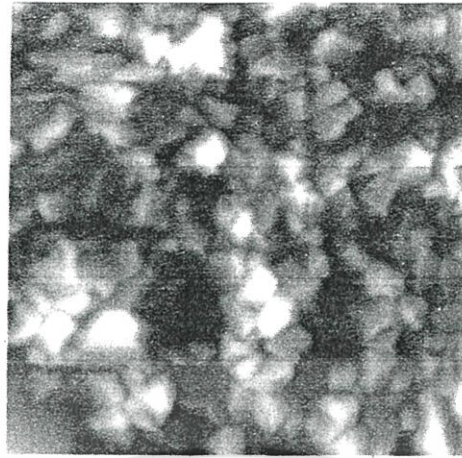
ไมโครเมตรแสดงว่า ฟิล์ม CdTe ความหนา 0.3 ไมโครเมตรเกิดเป็นอัลลอย CdS_xTe_{1-x} ที่มีปริมาณอะตอม S มากกว่ากรณีฟิล์ม CdTe ความหนา 0.8 ไมโครเมตร

องค์ประกอบของธาตุที่อยู่ในอัลลอย CdS_xTe_{1-x} สามารถคำนวณหาได้จากค่าคงที่โครงสร้างผลึกจากวิธีเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ และยังคำนวณหาได้จากค่าช่องว่างแถบพลังงานโดยการวัดการส่งผ่านแสง สำหรับฟิล์ม CdTe ความหนา 0.3 ไมโครเมตรและแอนนีกัลในบรรยากาศของไฮดรอกไซด์ $CdCl_2$ ที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส ค่าคงที่โครงสร้างผลึกมีค่า 6.422 อังสตรอมถึง 6.44 อังสตรอม ซึ่งสอดคล้องกับเศษส่วนโมล $x=0.07$ ถึง 0.09 ของอัลลอย CdS_xTe_{1-x} ตามสมการที่ (1) จากการวิเคราะห์ของไอฮาดะและผู้ร่วมงานพบว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานของเศษส่วนโมล $x=0.25$ ของอัลลอย CdS_xTe_{1-x} จะมีค่าลดลง 0.1 อิเล็กตรอนโวลต์เมื่อเทียบกับ CdTe สำหรับผลการทดลองของเราที่ค่าช่องว่างแถบพลังงานของ CdTe (ของสารตัวอย่าง $SnO_2/CdTe$) เท่ากับ 1.49 อิเล็กตรอนโวลต์ สำหรับฟิล์ม CdTe ความหนา 0.3 ไมโครเมตรและแอนนีกัลในบรรยากาศของไฮดรอกไซด์ $CdCl_2$ ที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียสมีค่าช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 1.435 อิเล็กตรอนโวลต์ โดยอาศัยสมการความสัมพันธ์ของไอฮาดะจะได้ว่าอัลลอยของเรามีปริมาณ S เท่ากับ 14 % สาเหตุที่ทำให้เศษส่วนโมลของ S ที่คำนวณได้มีค่าแตกต่างกันเนื่องจากสัญญาณ GIXRD ได้จากชั้นของอะตอมใกล้บริเวณผิวหน้าฟิล์มบางรวมทั้งคุณภาพของผลึกของเฟสดังกล่าว ส่วนการวัดการส่งผ่านแสงจะเกี่ยวข้องกับเฟสที่มีค่าช่องว่างแถบพลังงานต่ำสุดซึ่งต้องเป็นเฟสที่มีความหนาเพียงพอที่จะตอบสนองต่อการดูดกลืนแสงได้ เศษส่วนโมลที่ได้จาก GIXRD จะเกี่ยวข้องกับพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์เท่านั้น ซึ่งพีคก็มีการแผ่กว้างออกได้เนื่องจากการเกิดเป็นอัลลอย CdS_xTe_{1-x} ที่มีค่า x เป็นช่วงกว้าง โดยปริมาณของ S ที่ตรวจพบที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางความหนา 0.3 ไมโครเมตรคือ 9 % สำหรับการวัดการส่งผ่านแสงจะได้ปริมาณ S เท่ากับ 14 % ซึ่งเกิดจากเฟสในเนื้อฟิล์มบาง ดังนั้นจึงเชื่อว่าการวัดการส่งผ่านแสงน่าจะเป็นเครื่องมือในการตรวจวัดปริมาณของ S ได้ดีกว่า GIXRD

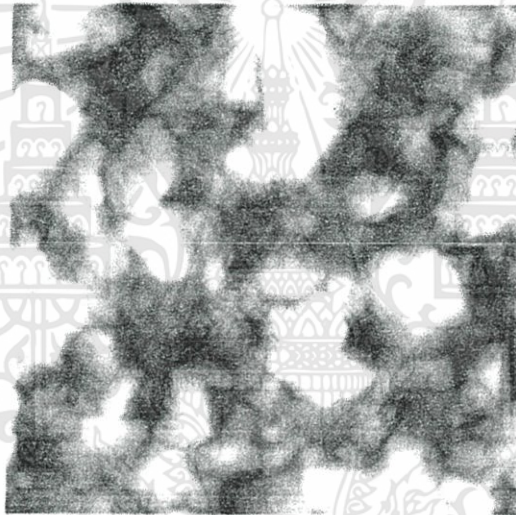


ภาพที่ 2.25 แสดง โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อวิธีพันธุของฟิล์มบาง CdS/CdTe

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

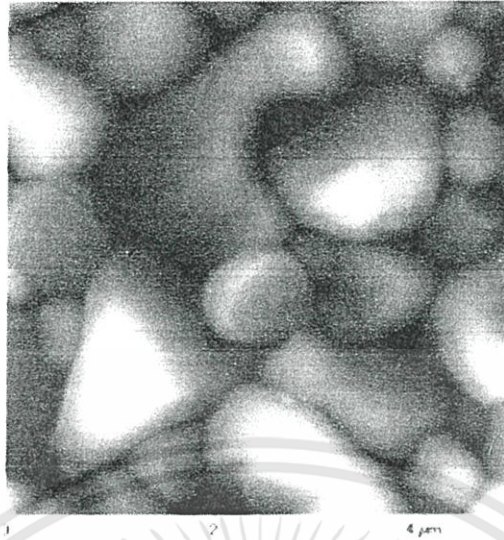


ภาพที่ 2.26 แสดงผิวหน้าของฟิล์มบาง CdTe ที่หนา 0.3 ไมโครเมตรที่ไม่ได้แอนนีกัล
ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม

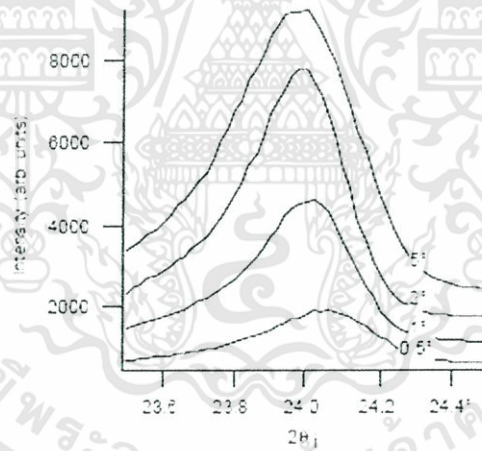


ภาพที่ 2.27 แสดงผิวหน้าของฟิล์มบาง CdTe ที่หนา 0.8 ไมโครเมตรที่ไม่ได้แอนนีกัล
ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

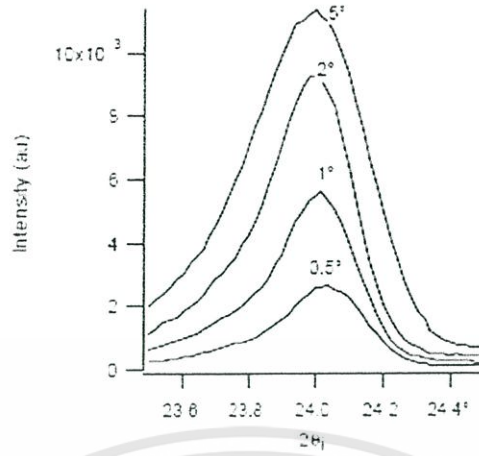


ภาพที่ 2.28 แสดงผิวหน้าของฟิล์มบาง CdTe ที่หนา 0.8 ไมโครเมตรและแอนนีกัลในบรรยากาศของไอระเหย CdCl_2 เป็นเวลา 5 นาที ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม

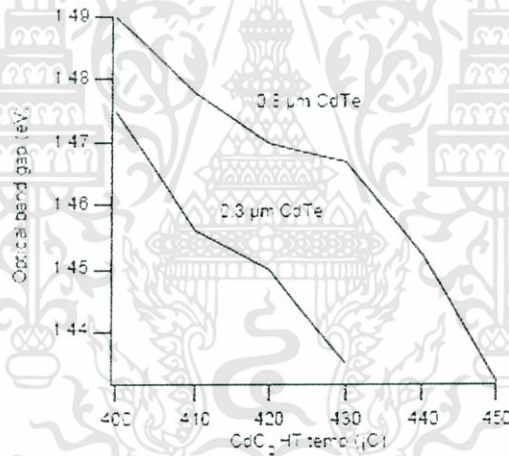


ภาพที่ 2.29 แสดง GIXRD ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีฟิล์ม CdTe ความหนา 0.3 ไมโครเมตรและแอนนีกัลในบรรยากาศของไอระเหย CdCl_2 ที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.30 แสดง GIXRD ของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีฟิล์ม CdTe ความหนา 0.8 ไมโครเมตรและแอนนัลในบรรยากาศของไฮโดรเจน CdCl_2 ที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 2.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงานกับอุณหภูมิของฟิล์ม CdTe ความหนา 0.3 และ 0.8 ไมโครเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัย (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิศย์, 2531; งามนิศย์, 2545; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; งามนิศย์, 2551; ฐิตินัย, 2551)

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

1. กระจกสไลด์
2. ที่ตัดกระจก
3. เครื่องอัลตราโซนิก
4. เครื่องเป่าลมร้อน
5. เต้าอบ
6. บีกเกอร์ขนาด 200 มิลลิลิตร
7. สารเคมี(น้ำยาล้างจาน น้ำปลอดประจุ อะซิโตนและ เอทานอล)
8. นาฬิกาจับเวลา

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

1. ระบบระเหิดสารเคมีในระยะประชิด
 - ท่อแก้วควอซปลายปิดหนึ่งด้าน
 - กล่องแกรไฟต์
 - เทอร์โมคัปเปิลชนิด K
 - เครื่องควบคุมอุณหภูมิหือ SHIMADEN รุ่น PID FP21
 - หลอดทั้งสแตน 1,500 วัตต์
2. ผงผลึกแคดเมียมซัลไฟด์และแคดเมียมเทลลูไรด์ บริสุทธ์ 99.9999 เปอร์เซ็นต์
3. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่งหือ Sartorius
4. เมทธานอล
5. ปากคีบ
6. หน้ากากป้องกันการไอระเหยของสารเคมี
7. แวนตากรองแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. ภาชนะที่ใช้สำหรับเก็บสารเคมีที่สามารถควบคุมความชื้นได้

9. ครกบดสาร

3.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค

เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (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 กิโลโวลต์ และกำลังแยกความละเอียดของภาพถ่าย 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} ($0 \leq x \leq 1$) โดยวิธีการระเหิด

สารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิศย์, 2531; งามนิศย์, 2545; จูตินัย, 2549; จูตินัย, 2550; งามนิศย์, 2551; จูตินัย, 2551)

3.2.1. การเตรียมและทำความสะอาดแผ่นกระจกสไลด์เพื่อเป็นฐานรองรับ

1. นำแผ่นกระจกสไลด์ตัดให้ได้ขนาด 25x50 ตารางมิลลิเมตร แช่ในน้ำที่ผสมน้ำยาล้างจานเป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อทำการล้างคราบไขมันและสิ่งสกปรก
2. ทำความสะอาดกระจกสไลด์ด้วยน้ำปอดคประจุเป็นเวลา 10 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ทำความสะอาดกระจกสไลด์ด้วยอะซิโตนเป็นเวลา 10 นาที
4. ทำความสะอาดกระจกสไลด์ด้วยเอทานอลเป็นเวลา 10 นาที
5. ทำความสะอาดกระจกสไลด์ด้วยน้ำปอดประจุ 3 ครั้งๆละ 10 นาที
6. ขั้นตอนในข้อ 2-5 นำบีกเกอร์ไปใส่ในเครื่องอัลตราโซนิก
7. เป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน
8. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่เป่าแห้งแล้วไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

3.2.2 การเตรียมและทำความสะอาดระบบระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

1. ทำความสะอาดกล่องแกรไฟต์ด้วยเมทานอล
2. นำกล่องแกรไฟต์เป่าให้แห้งด้วยเครื่องเป่าลมร้อน
3. นำกล่องแกรไฟต์ไปใส่ในท่อแก้วในระบบเตาแอลนิตทำการอีแวก-รีฟิล (evac-refill) โดยการดูดอากาศภายในท่อแก้วออกแล้วเติมแก๊สไนโตรเจนเข้าไป จนกระทั่งมีความดันเกือบเท่าความดันบรรยากาศ ทำการดูดแก๊สไนโตรเจนออกจากท่อแก้ว ทำซ้ำกันอีก 3 ครั้ง เพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีออกซิเจนหลงเหลืออยู่แล้ว
4. ทำการอบกล่องแกรไฟต์ที่ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
5. ปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิ รอจนถึงอุณหภูมิห้องแล้วนำกล่องแกรไฟต์ไปเก็บไว้ในภาชนะ ควบคุมความชื้น
6. ทำความสะอาดท่อแก้วควอซิปลาปิดหนึ่งด้านด้วยน้ำยาล้างจาน เช่าทำความสะอาดด้วยน้ำยาล้างจานจนกระทั่งไม่มีน้ำยาล้างจานเหลืออยู่ จากนั้นเช่าทำความสะอาดด้วยเอทานอล 1 ครั้งตามด้วยน้ำปอดประจุ 3 ครั้ง ทำการเป่าแห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน ปิดปากท่อเพื่อป้องกันสิ่งสกปรก
7. ทำความสะอาดชิ้นส่วนต่างๆด้วยเอทานอล
8. ทำความสะอาดขั้วไฟฟ้าด้วยแปรงทองเหลือง ขัดให้เรียบด้วยกระดาษทรายละเอียด ทำความสะอาดสิ่งสกปรกที่ตกค้างด้วยน้ำยาทำความสะอาดขั้วไฟฟ้า

3.2.3 การเตรียมผลึกของสารตั้งต้น CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่มีองค์ประกอบต่างกัน

สารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) สามารถเตรียมได้จากผลึกของสารตั้งต้น 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มวลโมเลกุลของสารตั้งต้น $\text{CdS} = 112.41 + 32.066 = 144.476$ กรัมต่อโมล

กรณี $x = 0.2$



มวลโมเลกุลของสารตั้งต้นจะได้เท่ากับ

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

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

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

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

กรณี $x = 0.4$



มวลโมเลกุลของสารตั้งต้นจะได้เท่ากับ

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

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

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

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

กรณี $x = 0.6$



มวลโมเลกุลของสารตั้งต้นจะได้เท่ากับ

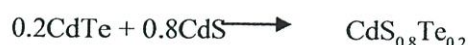
$$\text{CdS}_{0.6}\text{Te}_{0.4} = 112.41 + (0.6 \times 32.066) + (0.4 \times 127.60) = 182.6891 \text{ กรัมต่อโมล}$$

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

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

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

กรณี $x = 0.8$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มวลโมเลกุลของสารตั้งต้นจะได้เท่ากับ

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

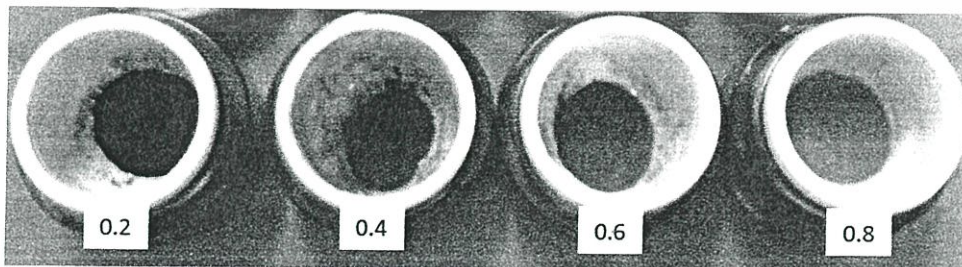
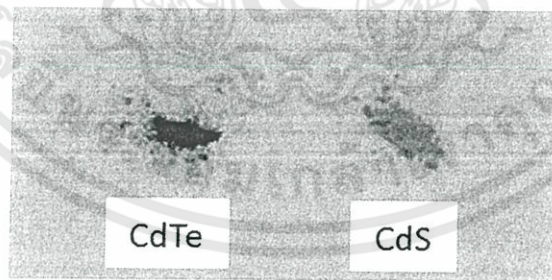
ถ้าต้องการใช้สารตั้งต้นจำนวน 1 กรัม จะต้องใช้สารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

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

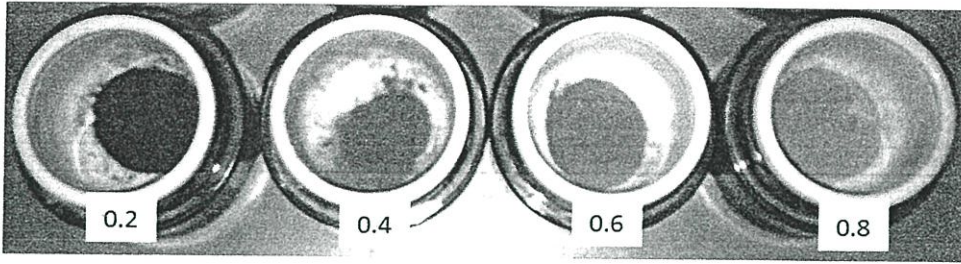
$$\text{ของสารตั้งต้น CdS} = \left(\frac{0.8 \times 144.476}{163.5828} \right) = 0.7066 \text{ กรัม}$$

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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.1 ผลผลิตของสารตั้งต้น CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่ผสมแล้วเพื่อจะใช้ในการทดลองทั้งแบบที่เปิดแฟลชและเปิดแฟลชของกล้องถ่ายภาพ

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

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิดซึ่งประกอบไปด้วยวิธีและขั้นตอนดังนี้

3.2.4.1 การเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำแคดเมียมเทลลูไรด์โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด ใช้เวลาตั้งแต่ 1- 5 นาที เพื่อหาความต้านทานที่น้อยที่สุด

1. ชั่งสารตั้งต้นแคดเมียมเทลลูไรด์บริสุทธิ์ 99.99 เปอร์เซ็นต์ ให้ได้น้ำหนัก 0.01 กรัมแล้วนำมาบรรจุในกล่องแกรไฟต์ เขย่าเพื่อให้สารตั้งต้นกระจายเท่าๆกัน ปรับผิวหน้าให้เรียบโดยใช้แท่งแก้วค่อยๆกดให้ผิวหน้าสม่ำเสมอ
2. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมไว้ใส่ในกล่องแกรไฟต์
3. ทำการติดตั้งระบบระเหิดสารเคมีในระยะประชิดให้ครบถ้วน
4. ตั้งโปรแกรมเครื่องควบคุมอุณหภูมิเพื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นจากอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 20 นาที ให้อุณหภูมิกงตัวที่ 550 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1-5 นาที ตามลำดับ แล้วลดอุณหภูมิลงมาถึงอุณหภูมิห้อง ใช้เวลา 5 นาที
5. นำอุณหภูมินิยมฟอยล์มาคลุม และจัดตำแหน่งอุณหภูมินิยมฟอยล์ทำการเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ฐานรองรับจากอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 20 นาที ให้อุณหภูมิกงตัวที่ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1-5 นาที ตามลำดับ แล้วลดอุณหภูมิมายังอุณหภูมิห้องใช้เวลา 5 นาที
6. เปิดปั๊มกลโรตารี แล้วเปิดวาล์วสูบอากาศออกจนได้ความดันประมาณ $5 \times 10^{-2} - 3 \times 10^{-2}$ มิลลิบาร์ แล้วเปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิสารตั้งต้นและแผ่นฐานรองรับ ตามข้อ 4

7. เมื่อปลูกฟิล์มบางเสร็จแล้ว รอจนกว่าอุณหภูมิของสารตั้งต้นและแผ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฐานรองรับลดลงต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส แล้วปิดวาล์วปั๊มกลโรตารี ความดันภายในระบบจะค่อยๆเพิ่มขึ้น

8. เมื่ออุณหภูมิของสารตั้งต้นและแผ่นฐานรองรับลดลงเท่ากับอุณหภูมิห้อง ค่อยๆเปิดวาล์วให้อากาศเข้าไปจนกระทั่งความดันภายในเท่ากับความดันภายนอก
9. สวมหน้ากากป้องกันไอระเหิดจากสารเคมี เปิดระบบเพื่อนำเอาแผ่นฐานรองรับออกจากแกรไฟต์
10. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่เป็นแผ่นฐานรองรับที่เคลือบด้วยฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ตรวจสอบผิวหน้าของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์ คุณภาพของฟิล์มบางที่ได้มีผิวหน้าที่สมบูรณ์ คือ ผิวหน้าสม่ำเสมอ ไม่มีรูพรุน จากนั้นก็นำฟิล์มบางไปเก็บในภาชนะควบคุมความชื้น

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

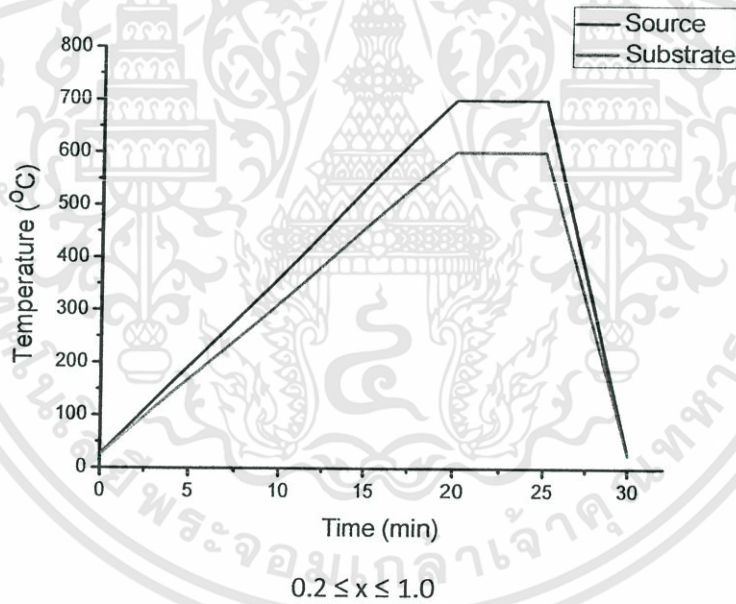
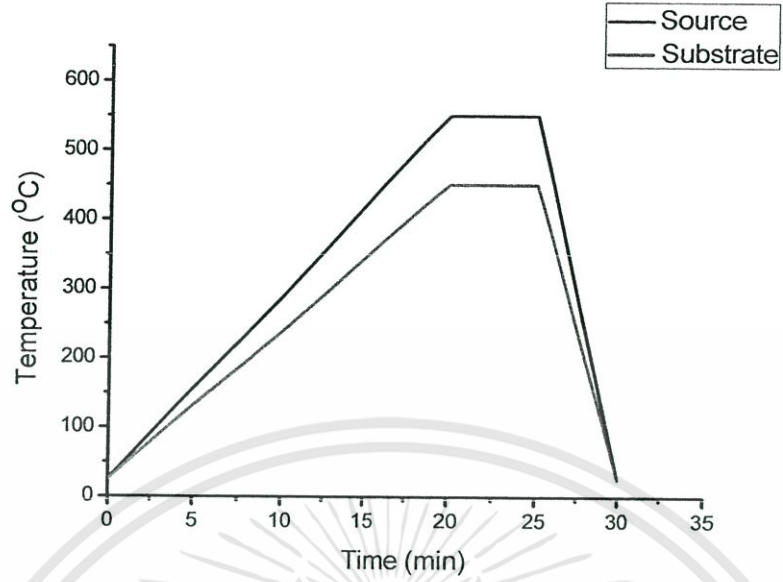
1. ชั่งสารตั้งต้น CdS_xTe_{1-x} ($x = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8,$ และ 1.0) ตามสัดส่วนผสมทางเคมีต่างๆที่ต้องการให้ ได้น้ำหนัก 0.01 กรัม แล้วนำมาบรรจุในกล่องแกรไฟต์ เซย่า เพื่อให้สารตั้งต้นกระจายเท่าๆกัน ปรับผิวหน้าให้เรียบโดยการ ใช้แท่งแก้วค่อยๆ กดให้ผิวหน้าสม่ำเสมอ
2. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมไว้ใส่ในกล่องแกรไฟต์
3. ทำการติดตั้งระบบระเหิดสารเคมีในระยะประชิดให้ครบถ้วน
4. ตั้งโปรแกรมเครื่องควบคุมอุณหภูมิเพื่อให้อุณหภูมิสารตั้งต้นจากอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 20 นาที ให้อุณหภูมิคงตัวที่ 700 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. เมื่อปลูกฟิล์มเสร็จแล้ว รอจนกว่าอุณหภูมิของสารตั้งต้นและแผ่นฐานรองรับลดลงต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส แล้วปิดวาล์วปั๊มกล โรตารี ความดันภายในระบบจะค่อยๆเพิ่มขึ้น
8. เมื่ออุณหภูมิของสารตั้งต้นและฐานรองรับลดลงเท่ากับอุณหภูมิห้อง ค่อยๆเปิดวาล์วให้อากาศเข้าไปจนกระทั่งความดันภายในเท่ากับความดันภายนอก
9. สวมหน้ากากป้องกันไอระเหยจากสารเคมี เปิดระบบเพื่อนำเอาแผ่นฐานรองรับออกจากแกรไฟต์
10. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่เป็นแผ่นฐานรองรับที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} มาตรวจสอบผิวหน้าของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์ คุณภาพของฟิล์มบางที่ได้มีผิวหน้าที่สมบูรณ์ คือ ผิวหน้าสม่ำเสมอไม่มีรูพรุนจากนั้นก็นำฟิล์มบางไปเก็บในภาชนะควบคุมความชื้น

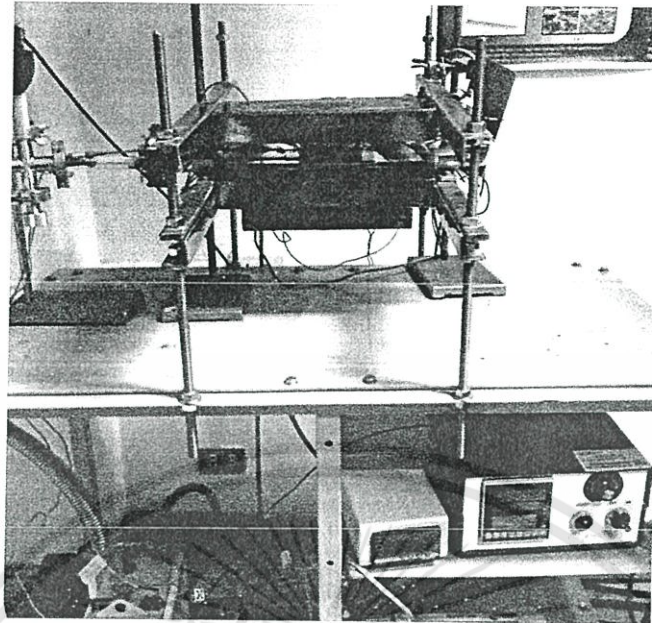


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.3 ระบบการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

3.3 การศึกษาสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธี

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

3.3.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ จากเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ของยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ 1.5418 อังสตรอม โดยใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์ และความต่างศักย์ 30 กิโลโวลต์ โดยวัดจากมุม 20–60 องศา

3.3.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) 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 (Santana-Aranda et al., 2000)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า (Sharma et al., 2012; Ramaiah, 1999)

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดค่าความต้านทานแผ่นด้วยวิธีสองขั้วและวัดค่าพลังงานกระตุ้น โดยการศึกษาความต้านทานที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

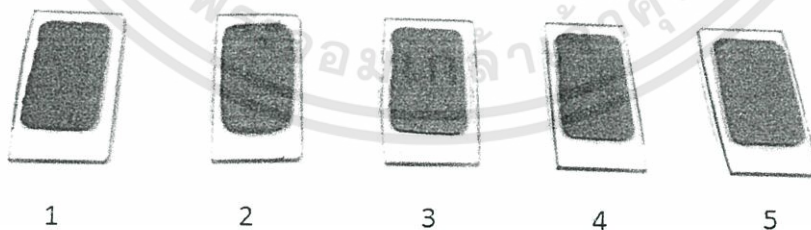
บทที่ 4

ผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ 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 และนำฟิล์มบางที่ได้ทั้งหมด ไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ศึกษาโครงสร้างเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ศึกษาสมบัติทางแสงด้วยการวัดค่าการส่งผ่านแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสลิเบิล สเปกโตร โฟโตมิเตอร์ ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางโดยการวัดความต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีสองขั้ว และความต้านทานไฟฟ้าที่ขึ้นกับอุณหภูมิ

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

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

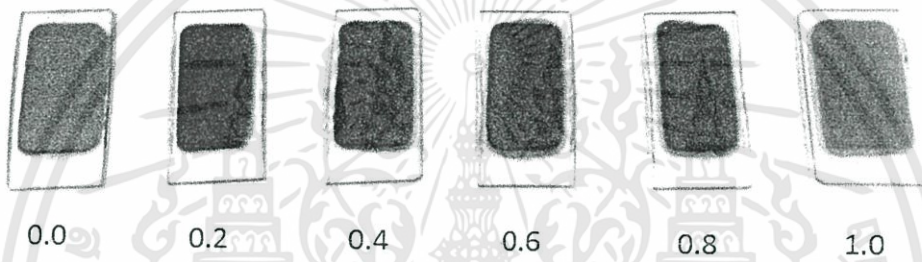


ภาพที่ 4.1 ฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($x = 0.0$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมีตั้งแต่ 1 – 5 นาที เรียงตามลำดับ

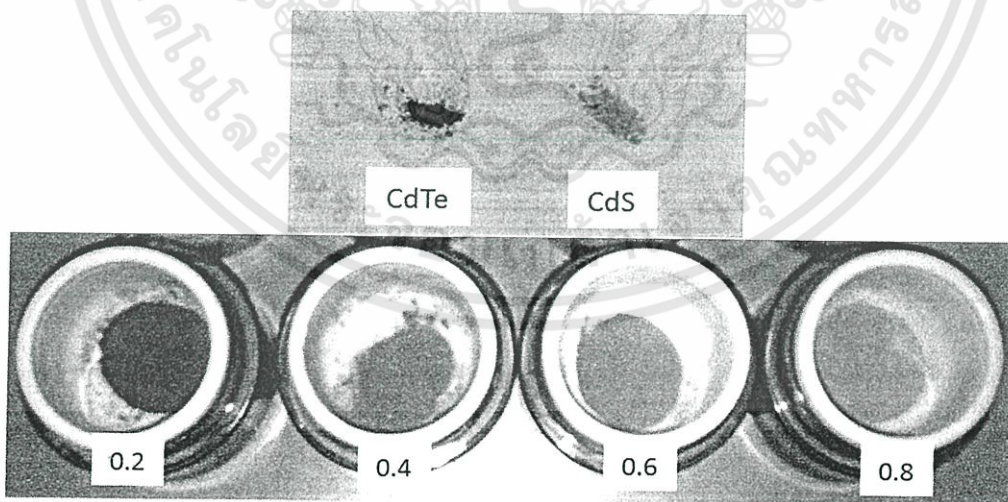
ที่สัดส่วนของโมลอะตอมของธาตุ S เท่ากับ 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 ฟิล์มบางมีลักษณะเป็นสีต่างไปจากสารตั้งต้นในรูปที่ 4.3 มีขอบสีส้ม มีผิวหน้าเรียบสม่ำเสมอ เกาะติดบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระจกใสได้ดี ไม่มีรูพรุนแต่จะหลุดร่อนได้ถ้าทิ้งไว้ในอากาศนานหลายสัปดาห์ ซึ่งฟิล์มบางที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดนี้เกิดจากการให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 700 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 600 องศาเซลเซียส เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 5 นาที จะแสดงดังภาพที่ 4.2

ที่สัดส่วนของโมลอะตอมของธาตุ S เท่ากับ 1.0 ฟิล์มบางมีลักษณะเป็นสีส้ม ผิวหน้าเรียบสม่ำเสมอ ไม่มีรูพรุน เกาะติดบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกใสได้ดี ซึ่งฟิล์มบางที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดนี้เกิดจากการให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 700 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 600 องศาเซลเซียส เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 5 นาที จะแสดงดังภาพที่ 4.2



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

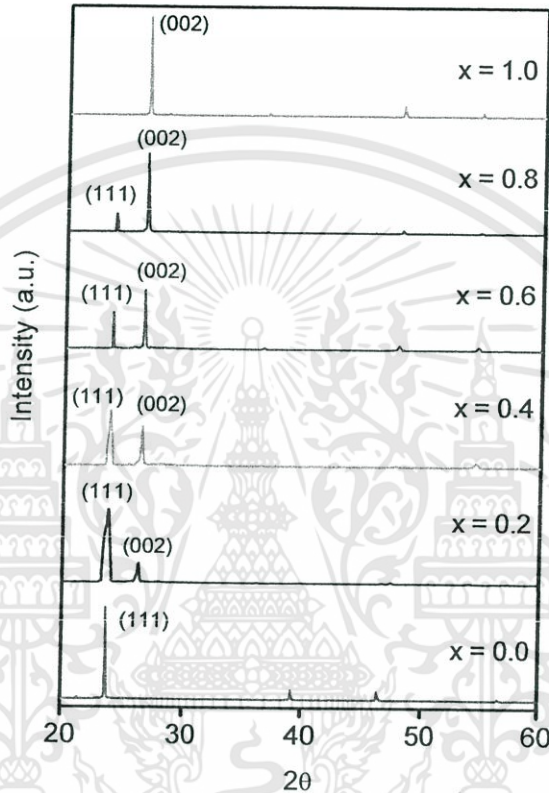


ภาพที่ 4.3 ผลึกของสารตั้งต้นสำหรับเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการศึกษาสมบัติฟิสิกส์พื้นฐานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$)
ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

4.2.1 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$
($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียม โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด



ภาพที่ 4.4 พิกการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด สารเคมี 5 นาที

ลักษณะ โครงสร้างผลึกแบบเฮกซะ โกนิต และลักษณะ โครงสร้างผลึกแบบคิวบิกมีความสัมพันธ์กัน
ดังนี้ (Ohata et al., 1973; Lee et al. 2003)

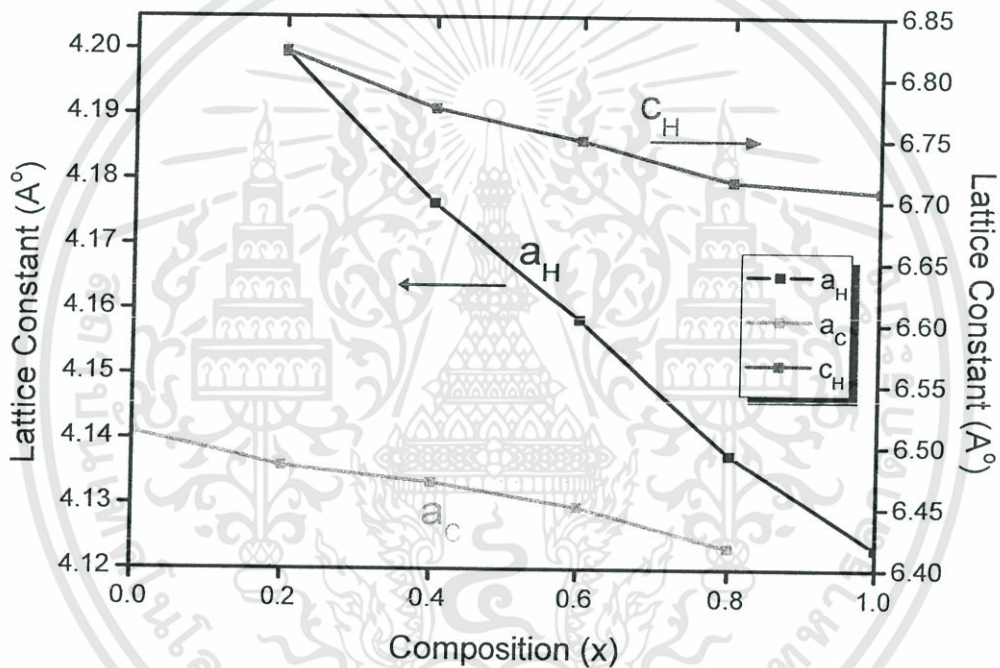
$$a_0 = \frac{a}{(2)^{1/2}} \quad (4.1)$$

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

เมื่อ a คือค่าคงที่ โครงผลึกแบบคิวบิก ส่วน a_0 และ c_0 คือค่าคงที่ โครงผลึกของเฮกซะ โกนิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



ภาพที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่โครงผลึกกับสัดส่วน โมลอะตอมของธาตุ S ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อน ในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

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

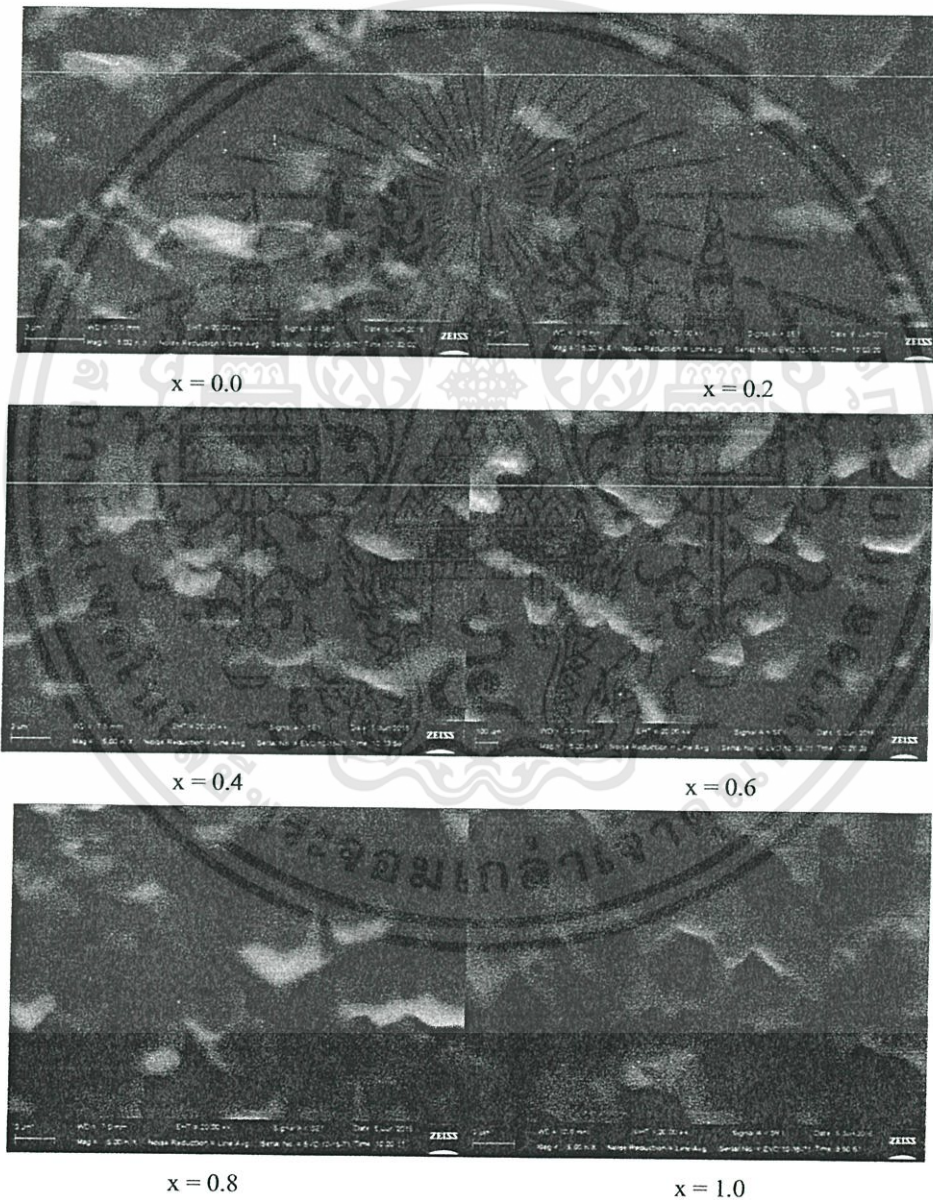
Composition (x)	Lattice Constant (Å)		
	Cubic	Hexagonal	
	(a_c)	(a_H)	(a_H)
0.0	6.5107	-	-
0.2	6.4837	4.1995	6.8216
0.4	6.4703	4.1763	6.7750
0.6	6.4502	4.1584	6.7490
0.8	6.4171	4.1375	6.7157
1.0	-	4.1232	6.7075

ตารางที่ 4.2 สัดส่วนโมลอะตอมของธาตุ S ที่ปรากฏในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยความสัมพันธ์ของวีการ์ด์ (Vegard's relation)

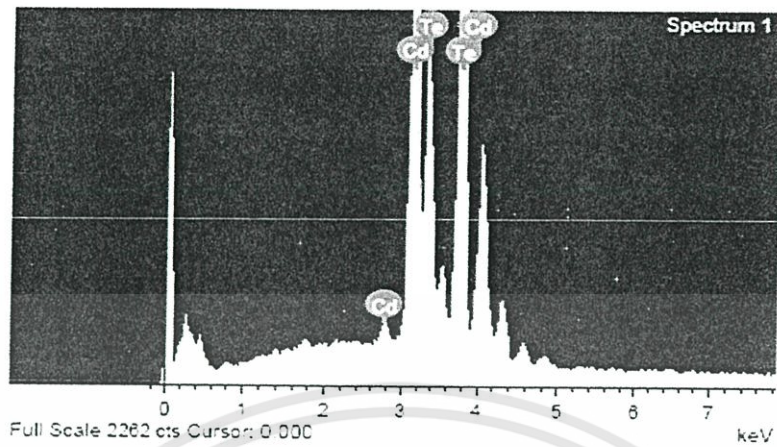
Starting Composition (x)	Film Composition (x)		
	Cubic (Å)	Hexagonal (Å)	
	(a_c)	(a_H)	(c_H)
	$y = -0.7040x + 0.64912$	$y = -0.04347x + 0.45685$	$y = -0.07995x + 0.75125$
0.0	0	-	-
0.2	0.01	0.84	0.86
0.4	0.02	0.90	0.92
0.6	0.05	0.94	0.95
0.8	0.10	0.99	0.99
1.0	-	1.00	1.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

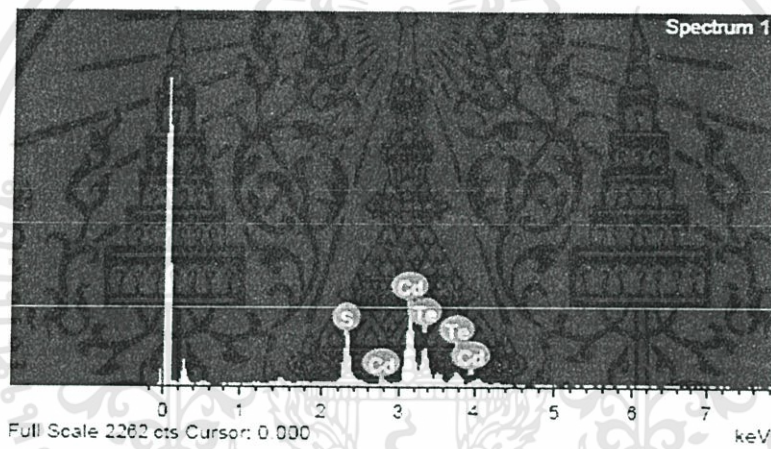
4.2.2 ผลการศึกษาภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบาง $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด การศึกษาโครงสร้างผลึกมหภาคของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด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



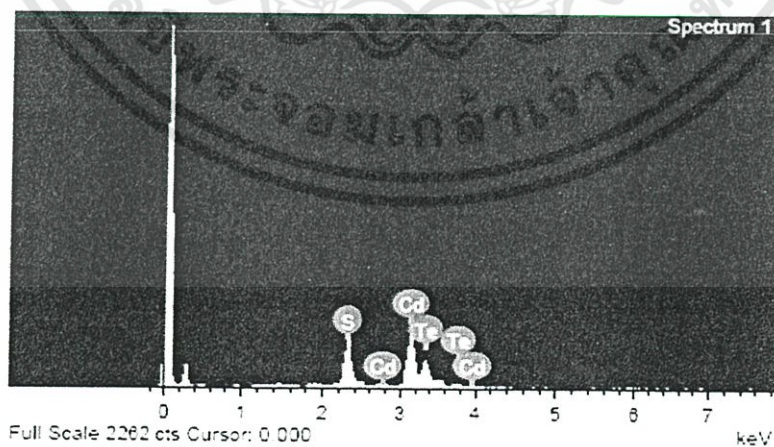
ภาพที่ 4.6 ภาพถ่าย SEM ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการ ระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



X=0

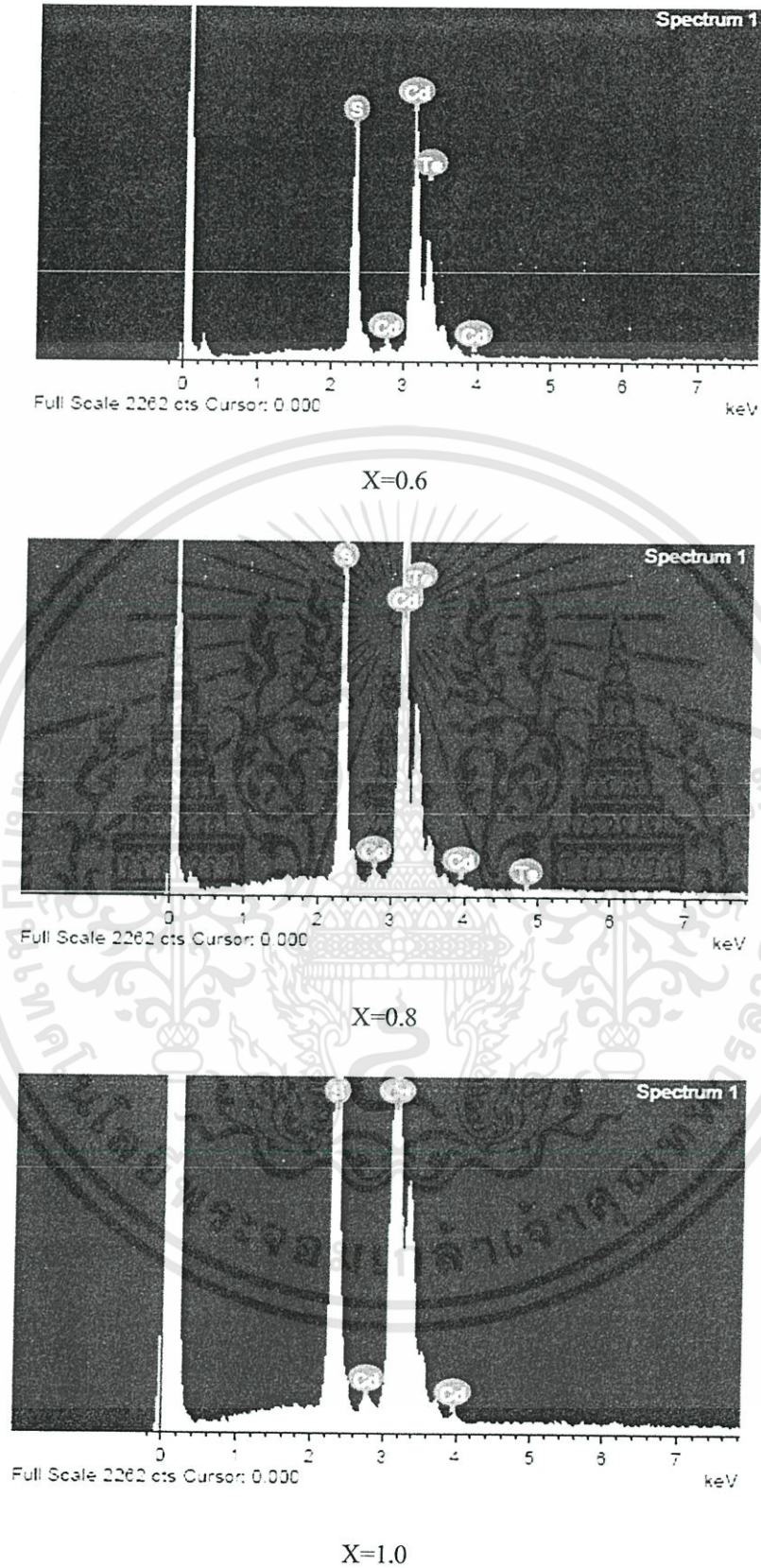


X=0.2



X=0.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.7 แสดงสเปกตรัม EDS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

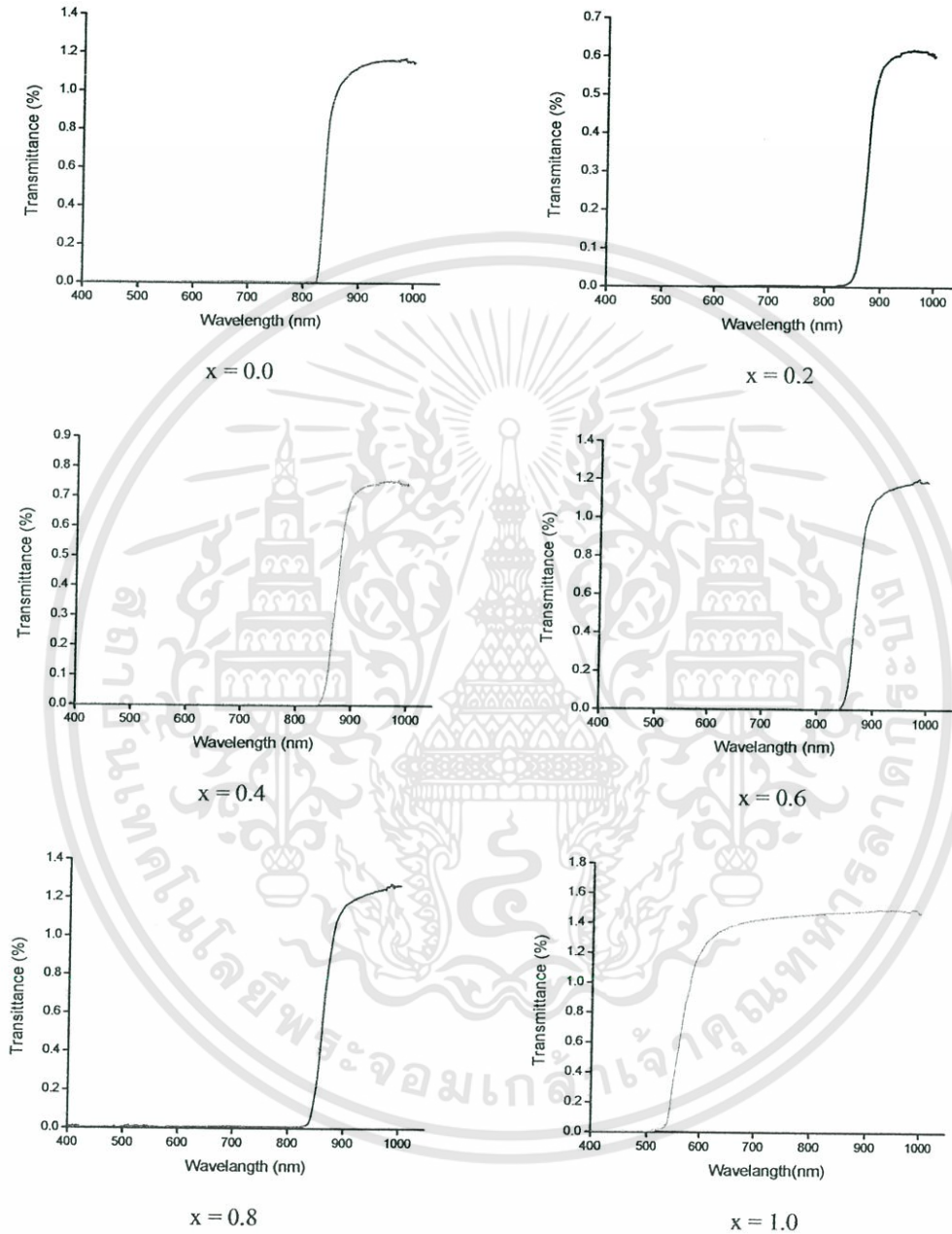
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แสดงองค์ประกอบของธาตุต่างๆ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

Composition (x)	EDS analysis					
	Weight			Atomic		
	Cd (%)	S (%)	Te (%)	Cd (%)	S (%)	Te (%)
0.0	47.74	-	52.26	50.91	-	49.09
0.2	69.68	13.29	17.02	53.08	35.50	11.42
0.4	75.54	18.30	6.15	52.05	44.21	3.73
0.6	77.18	21.83	0.99	49.92	49.51	0.56
0.8	77.47	21.06	1.46	50.77	48.39	0.84
1.0	78.72	21.28	-	51.34	48.66	-

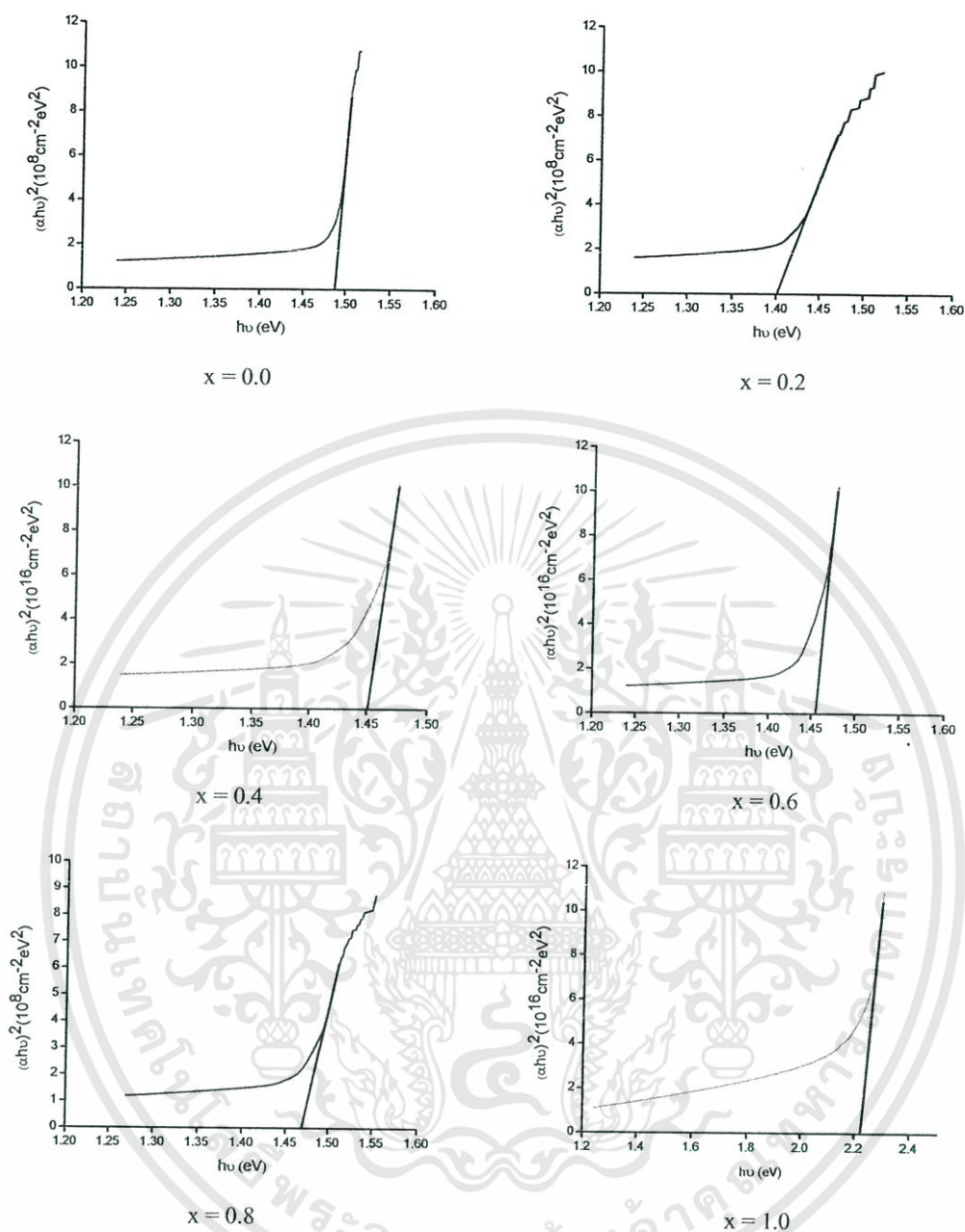
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



ภาพที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

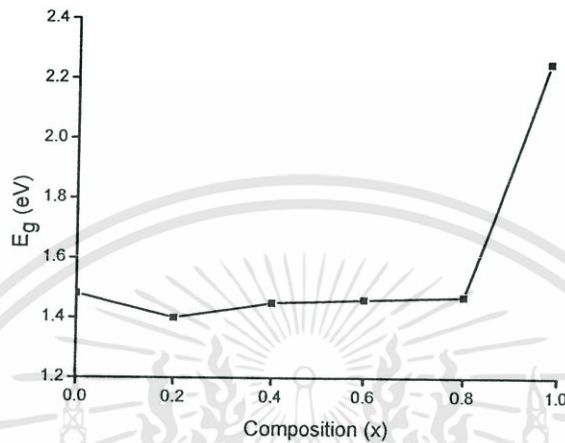
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.9 การหาช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ 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 นาที พบว่าขอบการดูดกลืนแสงอยู่ที่ความยาวคลื่นแสงประมาณ 530 นาโนเมตร ในกรณี $x = 0$ และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 830 นาโนเมตร ที่ $x = 1.0$ และสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงมีค่าประมาณ 0.6-1.4 เปอร์เซ็นต์ ข้อมูลที่ได้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงสามารถคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงานโดยนำข้อมูลที่ได้อไปวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน ($h\nu$) แล้วการลากเส้นตรงหาค่าคาดหมาย (extrapolation) ของกราฟในส่วนที่เป็นเชิงเส้นไปตัดกับแกนพลังงานโฟตอน จุดที่ตัดแกนพลังงานโฟตอนคือ ค่าช่องว่างแถบพลังงาน แสดงได้ในภาพที่ 4.9 และในตารางที่ 4.3

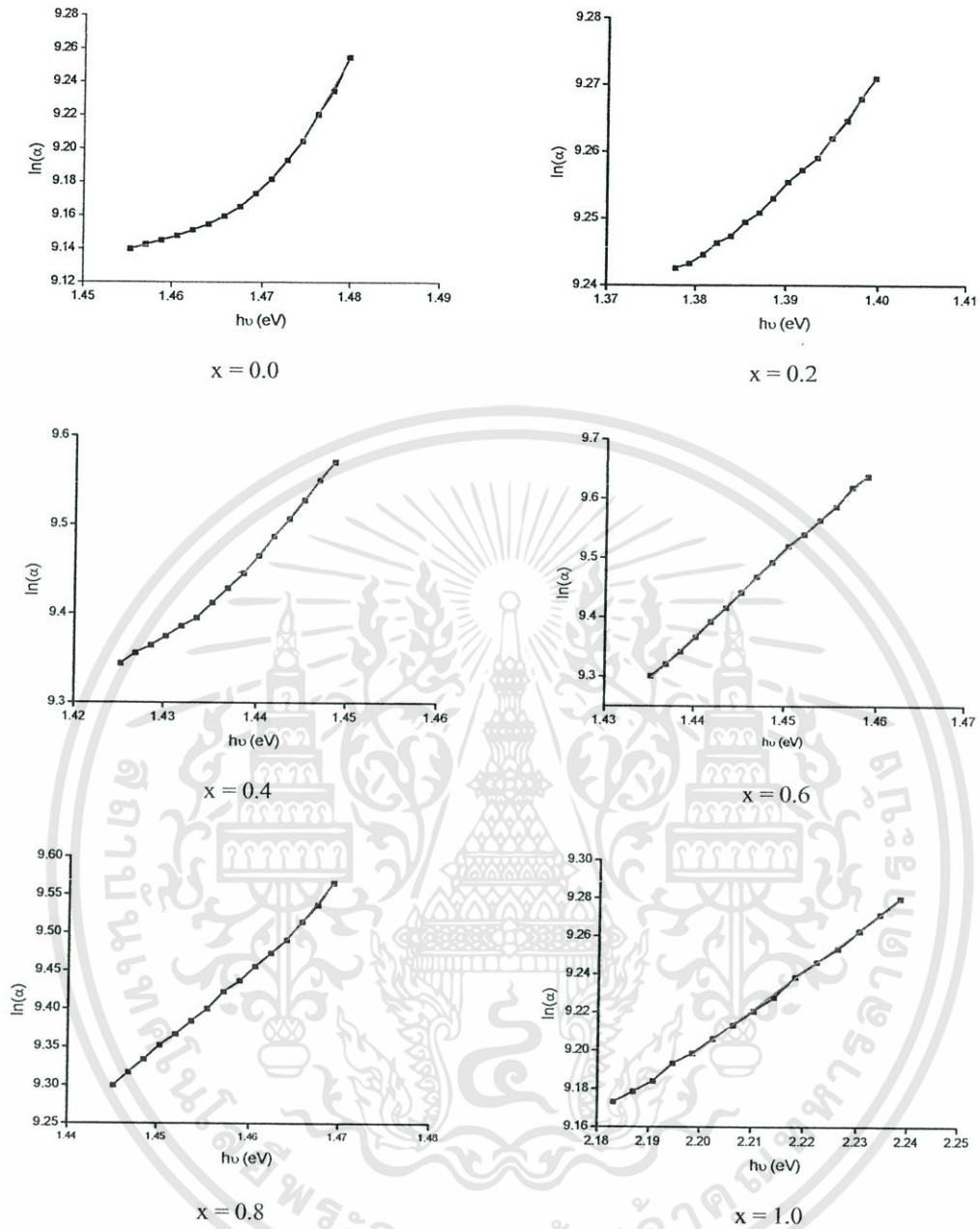


ภาพที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) กับสัดส่วนโมลอะตอมของธาตุ S ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

ตารางที่ 4.4 ช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \alpha$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาส่วนหางของแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที สามารถคำนวณได้จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง ซึ่งจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงสามารถนำไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \alpha$ กับ $h\nu$ ดังภาพที่ 4.11 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 4.5 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

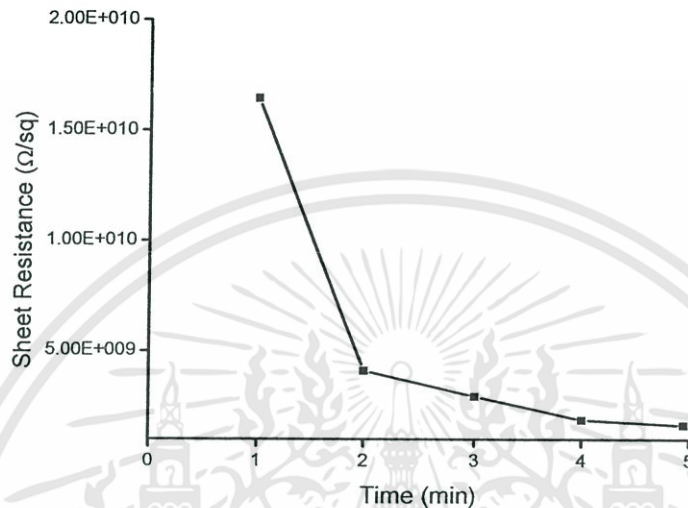
4.2.4 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

เนื่องจากความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด มีค่าความต้านทานสูงมาก ดังนั้นจึงวัดความต้านทานด้วยวิธีสองขั้ว

4.2.4.1 ความต้านทานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($x = 0$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe มีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาในการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดเพิ่มขึ้น ดังปรากฏในภาพที่ 4.12 แสดงว่าความหนาของฟิล์มที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความต้านทานแผ่นลดลง ขนาดของเกรนมีค่าเพิ่มขึ้น บริเวณขอบของเกรน (grain boundary) มีค่าลดลง



ภาพที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแผ่นกับเวลาในการระเหิดสารเคมีของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

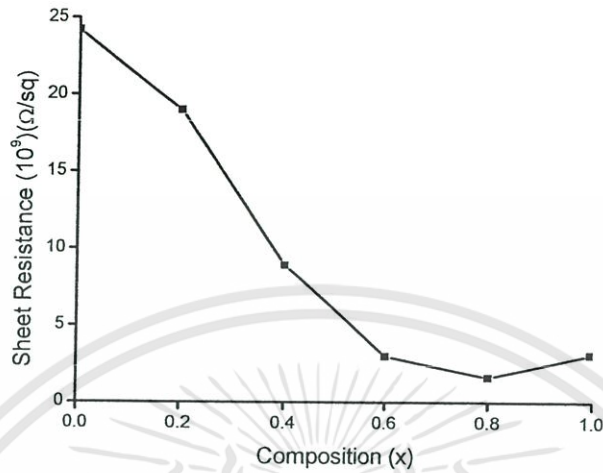
ตารางที่ 4.6 ค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมีต่างกัน

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

จากภาพที่ 4.11 พบว่าที่เวลาในการระเหิด 5 นาที ฟิล์มมีค่าความต้านทานต่ำสุด ดังนั้นในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) เราเลือกใช้เวลา 5 นาทีในการระเหิด

สารเคมี จากการทดลองพบว่าค่าความต้านทานจะลดลงตามปริมาณแคดเมียมซัลไฟด์ที่เพิ่มขึ้นและมีค่าความต้านทานแผ่นต่ำสุดที่ $x = 0.8$ ดังแสดงได้ในภาพที่ 4.13



ภาพที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแผ่นกับสัดส่วน โมลอะตอมของธาตุ S ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลา 5 นาที

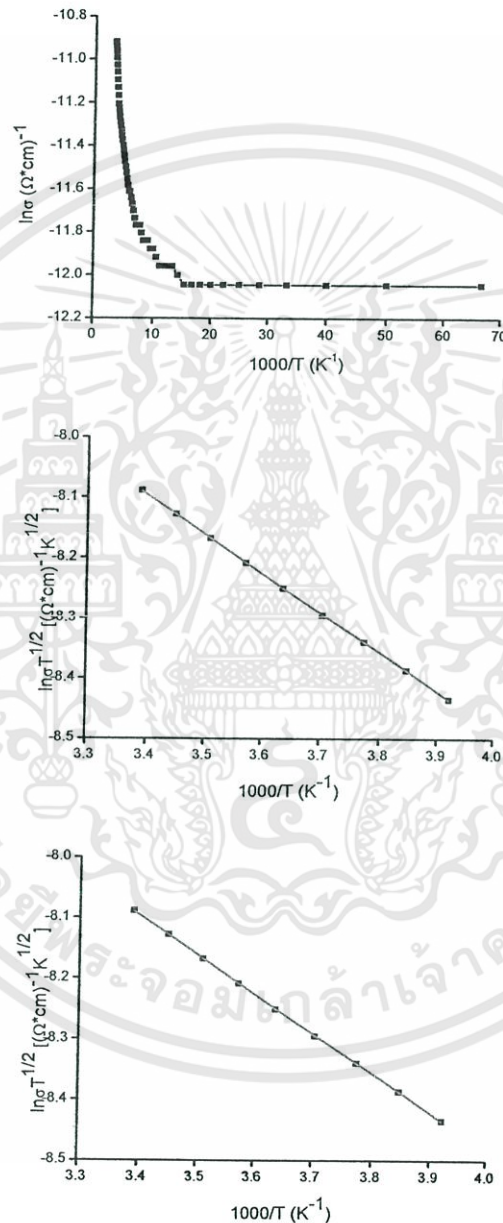
ตารางที่ 4.7 ค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลา 5 นาที

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

จากผลการทดลองในภาพที่ 4.12 และ 4.13 กับตารางที่ 4.6 และ 4.7 เราจึงเลือกนำเอาฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($x = 0.2$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลา 5 นาที ไปศึกษาการวัดความต้านทานที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง และนำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($x = 0.4, 0.6, 0.8$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อน

ในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 5 นาที ไปศึกษาการวัดความต้านทานที่อุณหภูมิต่ำกว่า อุณหภูมิห้อง ในหัวข้อต่อไป

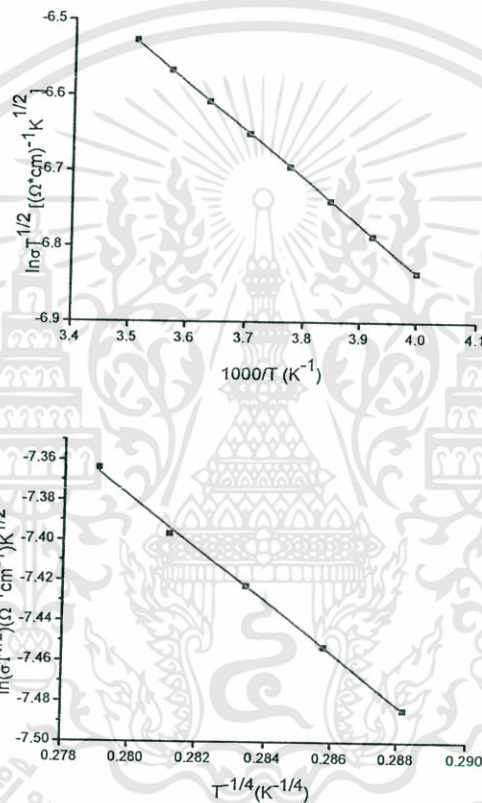
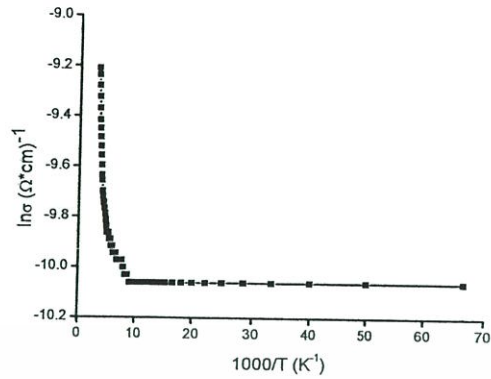
4.2.4.3 การศึกษาความต้านทานที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($x = 0.4, 0.6, 0.8$) ที่เตรียม โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด



ภาพที่ 4.14 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 $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($x = 0.4$) ที่เตรียม โดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 5 นาที

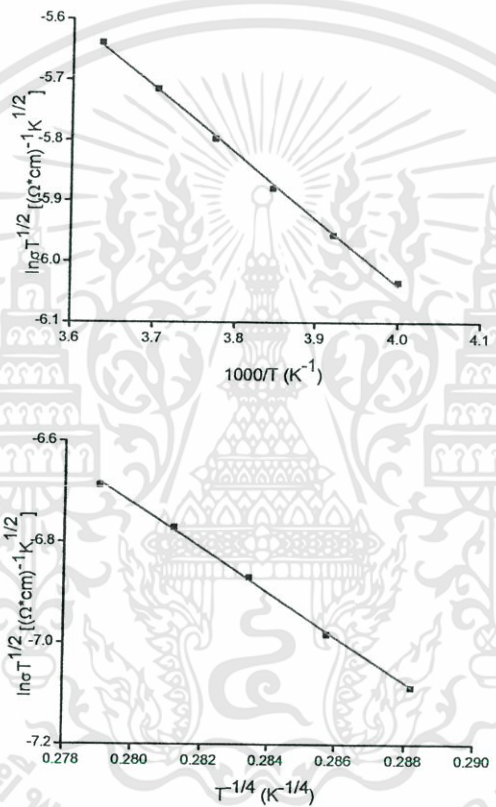
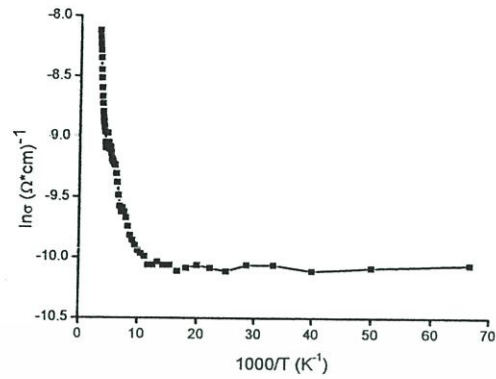
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 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 $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($x = 0.6$) ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมี ด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 5 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.16 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 $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($x = 0.8$) ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมี ด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 5 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าในที่นี้จะใช้ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($x = 0.8$) ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 5 นาที มาใช้ตัวเป็นตัวอย่างในการคำนวณ โดยเริ่มจากแบบจำลองอะตอมของซีโต ซึ่งสามารถที่จะคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \sigma T^{\frac{1}{2}}$ 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

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

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

-การหาค่าเฟอร์มิตติวิตี (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

$$N_a = \frac{8(8.30113 \times 10^{-13})(0.0942)(1.6 \times 10^{-19})}{(1.6 \times 10^{-19})^2 (3.2963 \times 10^{-6})^2}$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-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)

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

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

สามารถหาค่า v_c ได้จาก

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

แทนค่า

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถหาค่า N_v ได้จาก

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

แทนค่า

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

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

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

$N_i = 1.19 \times 10^{12}$ ต่อตารางเซนติเมตร

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

-การหาค่าองศาของความไม่เป็นระเบียบ (T_0) และแฟกเตอร์หน้าพจน์เอกซ์โพเนนเชียล (σ_0)

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

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

$$T_0 = 3865470.311 \text{ เคลวิน}$$

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

-การหาค่าความหนาแน่นของสถานะถูกจำกัดเฉพาะที่ระดับเฟอร์มิ ($N(E_F)$)

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

แทนค่า

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-การหาค่าระยะทางเฉลี่ยของการกระโดด (R)

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

สามารถหาค่าคงที่ของการสลายตัวของฟังก์ชันคลื่นของสถานะถูกจำกัดเฉพาะที่ที่ระดับเฟอร์มี (α) ได้จาก

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

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

แทนค่า $\alpha = 1.2362 \times 10^7$ 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

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

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

และ

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

$$\alpha R = 4.68$$

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่สามารถคำนวณได้ทั้งแบบจำลองของซีโต และแบบกระโดดในระยะไม่คงที่ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 5 นาที ได้แสดงในตารางที่ 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 แสดงพารามิเตอร์ที่คำนวณได้จากแบบจำลองของซีโตของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิดเมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

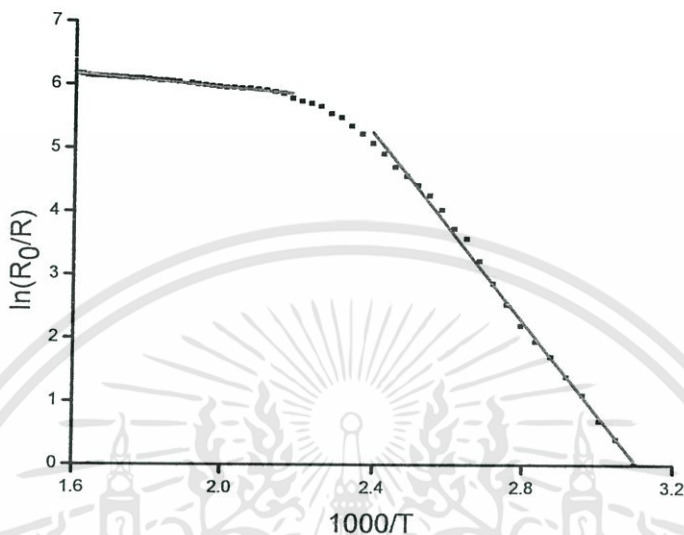
Composition (x)	Temperature (K)	ϵ_s (F/cm^2) (10^{-13})	Grain Size (L) (nm)	E_b (eV)	N_a (cm^{-3}) (10^{17})	E_i (eV)	N_i (cm^{-3}) (10^{11})	L_D (10^{-7})
0.0	-	-	-	-	-	-	-	-
0.2	-	-	-	-	-	-	-	-
0.4	275	8.30	30	0.056	2.48	0.67	7.60	7.04
0.6	275	8.30	31	0.054	2.39	0.67	7.20	7.17
0.8	275	8.30	32	0.094	3.59	0.64	11.8	5.85
1.0	-	-	-	-	-	-	-	-

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

Composition (x)	Temperature (K)	σ (300 K) ($\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) (10^{-5})	σ_0 ($\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	T_0 (K) (10^5)	$N(E_f)$ ($\text{cm}^{-3}(\text{eV})^{-1}$) (10^{19})	R (cm) (10^{-7})	W (eV) (10^{-2})	αR
0.0	-	-	-	-	-	-	-	-
0.2	-	-	-	-	-	-	-	-
0.4	165	1.81	212	2.93	1.03	6.66	0.078	8.26
0.6	165	9.87	256	2.83	1.79	5.86	0.068	4.20
0.8	165	29.63	296	38.65	10.20	3.76	0.044	4.6
1.0	-	-	-	-	-	-	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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



ภาพที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{R_0}{R}\right)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($x = 0.2$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 5 นาที

จากภาพที่ 4.17 เป็นผลความต้านทานไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($x = 0.2$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 5 นาที โดยวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 50-350 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองสามารถนำมาหาค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) ได้จากสมการ

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

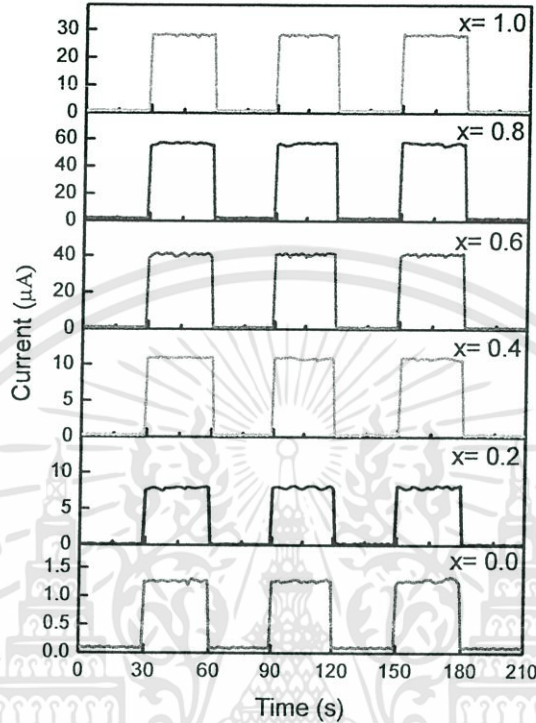
$$\begin{aligned} \ln\left(\frac{R_0}{R}\right) &= \frac{-E_a}{k} \left(\frac{1}{T}\right) \\ &= -\frac{1000E_a}{k} \left(\frac{1000}{T}\right) \end{aligned}$$

เมื่อ R_0 คือ ความต้านทานที่อุณหภูมิห้อง ส่วน E_a คือ พลังงานกระตุ้น

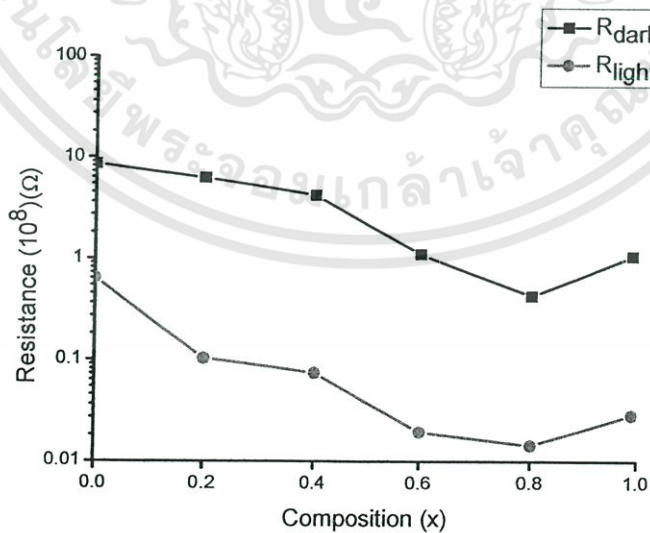
จากการทดลองพบว่ามีค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) เท่ากับ 46.87 และ 635.18 มิลลิอิเล็กตรอน โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

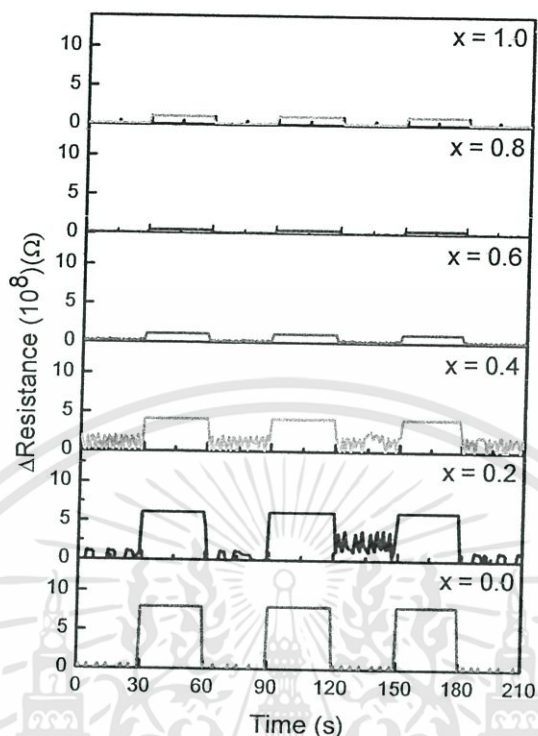


ภาพที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโฟโตกับเวลาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที



ภาพที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานกับสัดส่วน โมลอะตอมของธาตุ S ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาของฟิล์มบางของสารกึ่ง CdS_xTe_{1-x} (0 ≤ x ≤ 1) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระบะประชิดเมื่อใช้ เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

ภาพที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโฟโตของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} (0 ≤ x ≤ 1) ที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาขณะฉายแสงจากหลอดไฟฮาโลเจนที่มีความเข้มแสง 100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ภายใต้การไบอัสที่แรงดัน 80 โวลต์ พบว่าทุกสารตัวอย่างตอบสนองกับแสงสีขาวจากหลอดฮาโลเจนด้วยช่วงเวลาตอบสนองที่สั้นมากทั้งช่วง กระแสขาขึ้นและช่วงกระแสขาลง ถ้ากำหนดให้สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงขณะที่ความเข้มของแสงจากหลอดไฟมีค่าคงที่ (stationary photoconductivity) คือ $\Delta\sigma_s$ ซึ่งจะแสดงได้ดัง ความสัมพันธ์ (Pan, 2013)

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

เมื่อ α คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของฟิล์มบาง

β คือ สัมประสิทธิ์เชิงควอนตัมในการสร้างคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล (quantum yield)

I คือ กระแสโฟโต

μ_p คือ สภาพคล่องของพาหะ

τ_p คือ ค่าชีวิตของพาหะภายใต้การฉายแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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) ในที่นี้เรียกว่าเวลารับขึ้น (rise time) และเวลารับลง (decay time) ตามลำดับ

เวลารับขึ้นคือ เวลาขณะที่กระแสขาขึ้นมีค่าเท่ากับ $0.63\Delta\sigma_s$ ส่วนเวลารับลงคือ เวลาขณะที่กระแสขาลงมีค่าเท่ากับ $0.37\Delta\sigma_s$ เวลารับขึ้นและเวลารับลงของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) สามารถคำนวณได้จากกราฟของกระแส โฟโตที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาขณะที่มีการฉายแสงและหยุดฉายแสง (ดังภาพที่ 4.18) ตามลำดับ

ความไวในการตอบสนองต่อแสง (photosensitivity, S) ที่คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ จะนิยามดังนี้คือ

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

ซึ่งนิยามนี้นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในเชิงวิศวกรรมสิ่งประดิษฐ์การตรวจวัดแสง (photodetector) แต่มีนักวิทยาศาสตร์ส่วนหนึ่งนิยามความไวในการตอบสนองต่อแสง ดังนี้

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

ในทางปฏิบัติมักมีการป้อนแรงดันไบแอสด้วยค่าคงที่ทั้งขณะมีการฉายแสงและขณะไม่มีการฉายแสง 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 4.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 ความไวในการตอบสนองต่อแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด 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 สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{In}_x\text{W}_{1-x}\text{O}_3$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก 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

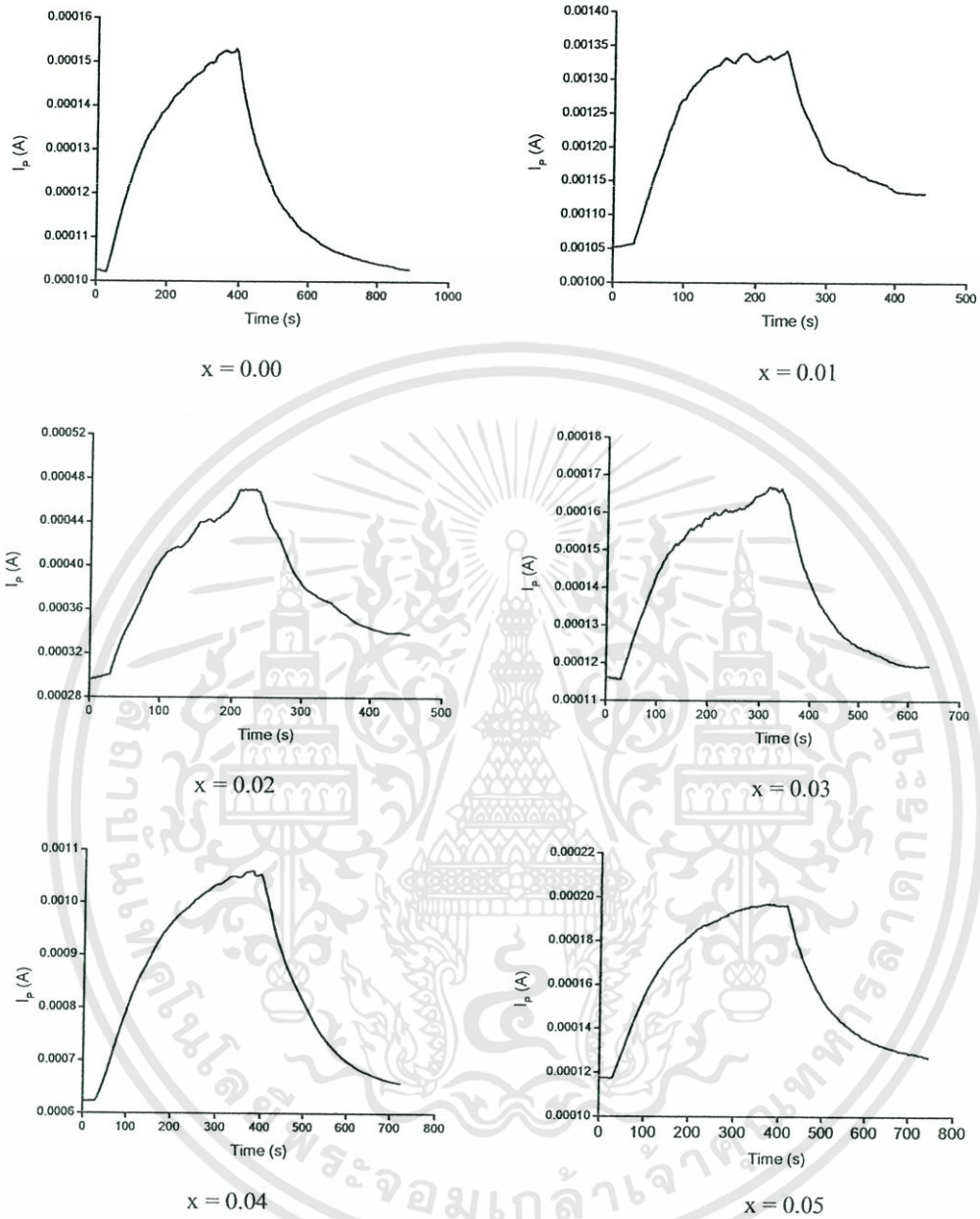
$$I = \sum_1^{n-1} A_{n-1} [1 - \exp(-t/\tau_{r(n-1)})] + A_n [1 - \exp(-(t/\tau_m)^\beta)] \quad (4.27)$$

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

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงที่อธิบายแสดงในตารางที่ 4.10 และสามารถหาค่าความหนาแน่นของประจุ ตามตารางที่ 4.11 จากสมการ

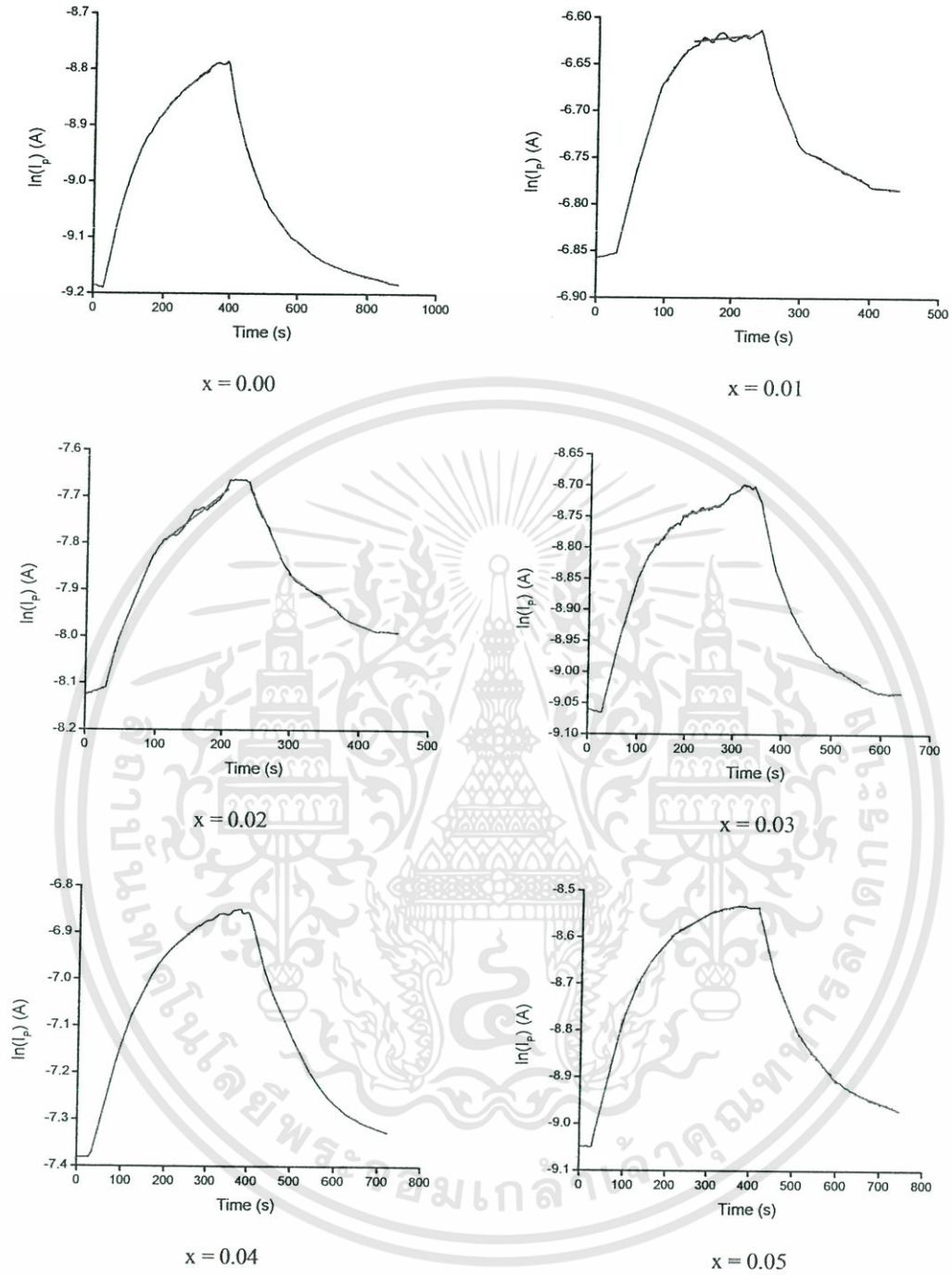
$$N_i = \frac{I_0}{q\mu V_a} \left(\frac{l}{wd} \right) \quad (4.29)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



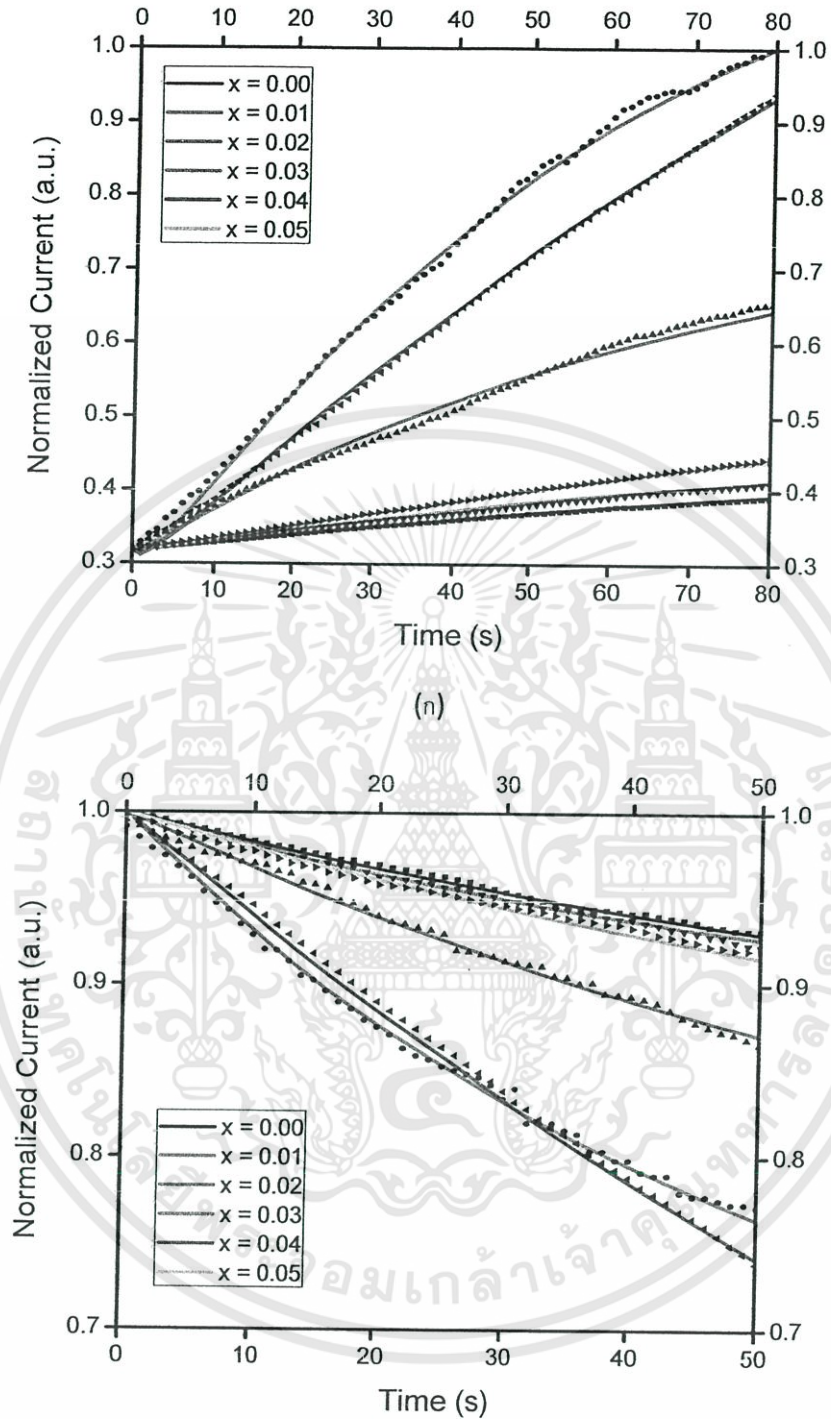
ภาพที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเวลาของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{In}_x\text{W}_{1-x}\text{O}_3$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I_p$ กับเวลาของเมดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{In}_x\text{W}_{1-x}\text{O}_3$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

ภาพที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสออร์มัล ไลซ์กับเวลาของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ

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

ก. กรณีขาขึ้น

ข. กรณีขาลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของสถานะพลาสมาไฟฟ้าเชิงแม่เหล็กของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{In}_x\text{W}_{1-x}\text{O}_3$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่ได้จากการปรับผลการทดลองที่อุณหภูมิห้องให้เข้ากับฟังก์ชันมัลติเพิลเด็คซ์โพเนนเชียล

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	$\tau_{r1} = 294.99$ $A_1 = -2385$	$\tau_{r2} = 364.963$ $A_2 = 6773$	$\tau_{r3} = 523.56$ $A_3 = -7279$	$\tau_{r4} = 1112.59$ $A_4 = 3819$	$\tau_{r5} = 4253.17$ $A_5 = 0.2514$ $\beta = 0.4899$	$\tau_{d1} = 284.9000000000$ $A_1 = 17.31$	$\tau_{d2} = 476.19$ $A_2 = -71.34$	$\tau_{d3} = 746.27$ $A_3 = 76.16$	$\tau_{d4} = 2045.60$ $A_4 = -23.37$	$\tau_{d5} = 3027.06$ $A_5 = 2.241$ $\beta = 0.7819$	-
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 4.12 ความหนาแน่นของประจุชนิดต่างๆ ที่ได้จากการวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงตัวของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{In}_x\text{W}_{1-x}\text{O}_3$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งจาก สารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

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_{it} (cm^{-3}) (10^{12})	I_0 (A) (10^{-4})	N_{it} (cm^{-3}) (10^{12})	I_0 (A) (10^{-4})	N_{it} (cm^{-3}) (10^{12})	I_0 (A) (10^{-4})	N_{it} (cm^{-3}) (10^{12})	I_0 (A) (10^{-4})	N_{it} (cm^{-3}) (10^{12})	I_0 (A) (10^{-4})	N_{it} (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

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

แรงดันไฟฟ้า (V_a) = 2 โวลต์

สภาพคล่องพาหะ (μ) ของ $\text{In}_x\text{W}_{1-x}\text{O}_3$ = 10 ตารางเซนติเมตรต่อ(โวลต์-วินาที)

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

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

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

ในโครงการวิจัยนี้ได้ทำการประดิษฐ์ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะเวลาประชิดในระบบสุญญากาศ จากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ CdS และ CdTe บริสุทธิ์ 99.9999 เปอร์เซ็นต์ สำหรับฟิล์มที่มีสัดส่วนโมลอะตอมของธาตุ S เท่ากับ $x = 0$ จะเลือกใช้อุณหภูมิของสารตั้งต้น (source) และอุณหภูมิของแผ่นรองรับเป็น 550 และ 450 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยใช้เวลาในการเตรียมฟิล์มบางตั้งแต่ 1 ถึง 5 นาที ตามลำดับ พบว่าฟิล์มบางที่ใช้เวลาในการเตรียม 5 นาที จะมีคุณสมบัติที่ดีที่สุด ความต้านทานแผ่นต่ำสุด และมีความหนามากที่สุด ส่วนกรณีฟิล์มบางที่มีสัดส่วนของ โมลอะตอมของธาตุ S มากกว่า $x = 0.2$ เราจะเลือกใช้อุณหภูมิของสารตั้งต้น และอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับเป็น 700 และ 600 องศาเซลเซียส ตามลำดับและใช้เวลาในการเตรียม 5 นาที ฟิล์มบางที่เตรียมได้มีความเรียบสม่ำเสมอ ยึดติดแน่นกับกระจกสไลด์ได้ดี ฟิล์มมีสีดำนกเว้นที่สัดส่วนของ โมลอะตอมของธาตุ S เท่ากับ $x = 1.0$ ฟิล์มที่เตรียมได้จะมีสีส้ม

จากการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่าฟิล์มบางที่มีสัดส่วนของ โมลอะตอมของธาตุ S เท่ากับ $x = 0$ จะมีโครงสร้างผลึกแบบคิวบิกหรือแบบซิงค์เบลนด์ โดยมีฟิสิกของระนาบ (111) ปรากฏอย่างโดดเด่น (preferential orientation) แต่เมื่อสัดส่วนของ โมลอะตอมของธาตุ S อยู่ระหว่าง $x = 0.2$ ถึง $x = 0.8$ โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} จะเกิดเป็นเฟสคิวบิกหรือซิงค์เบลนด์ และแบบเฮกซะ โกนัลหรือเวิร์ทไซท์อยู่ร่วมกัน สำหรับกรณีสัดส่วนของ โมลอะตอมของธาตุ S เท่ากับ $x = 1.0$ จะมีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะ โกนัลหรือเวิร์ทไซท์อย่างเดียว โดยมีฟิสิกของระนาบ (002) ปรากฏอย่างโดดเด่น มุม 2θ ของฟิสิกของระนาบ (002) จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของ โมลอะตอมของธาตุ S ที่เพิ่มขึ้น จากการคำนวณหาค่าคงที่โครงสร้างผลึก พบว่าค่าคงที่โครงสร้างผลึก a และ c มีแนวโน้มลดลงค่อนข้างเป็นเชิงเส้นตามปริมาณของสัดส่วนของ โมลอะตอมของธาตุ S ที่เพิ่มขึ้น

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

จากการศึกษาสมบัติการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง สามารถที่จะคำนวณค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด พบว่าเป็นแบบตรงและมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1.48 เป็น 2.25 อิเล็กตรอน โวลต์ เมื่อสัดส่วนของโมลอะตอมของธาตุ S ที่เพิ่มขึ้น จาก $x = 0$ เป็น $x = 1$

จากการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด 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 $In_xW_{1-x}O_3$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) พบว่ามีปรากฏการณ์สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงคือ ช่วงชีวิตของพาหะค่อนข้างยาว (ในระดับหลายร้อยวินาที) ซึ่งเป็นผลมาจากกับดักพาหะมีการจับและปล่อยพาหะค่อนข้างช้ามาก ค่าช่วงชีวิตพาหะสามารถหาได้จากการฟิตกราฟของผลการทดลอง โดยใช้มัลติเพิลเอ็กซ์โพเนนเชียลฟังก์ชัน

ปัญหาและข้อเสนอแนะ

1. การเตรียมฟิล์มบาง

- การที่ฟิล์มบางเคลือบไม่ติดบนแผ่นกระจกสไลด์ อาจเกิดจากกระจกสไลด์ไม่สะอาดเพียงพอ หรืออุณหภูมิในการระเหิดไม่สูงพอ
- ในขั้นตอนการสูบล้างอากาศออกจากระบบเพื่อให้ได้ความดันประมาณ 0.04 มิลลิบาร์อาจจะต้องใช้เวลาถึง 2 ชั่วโมงหรือมากกว่า อาจเกิดจากระบบมีรอยรั่ว หรือข้างในระบบมีความสกปรก หรือปั๊มเสื่อมคุณภาพ
- ในการทำความสะอาดผนังของระบบ ที่มีสารที่เราทำการระเหิดเกาะอยู่ อาจจะใช้เวลาในการทำ ความสะอาดมาก อาจจะใช้กรดไฮโดรคลอริกผสมกับน้ำในอัตราส่วน 1:10 แช่ไว้ก่อนประมาณ 10 นาที แล้วจึงเริ่มทำความสะอาด

2. การวัดค่าสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ

- ฟิล์มบางที่เตรียมได้ควรรับนำมาวัดค่าสมบัติต่างๆ ยิ่งเก็บไว้นาน ฟิล์มบางได้ที่อาจจะเกิดการหลุดร่อน
- การวัดความต้านทานแผ่น กระแสที่ไหลผ่านวงจรควรอยู่ในระดับต่ำกว่า 10^{-6} แอมแปร์ เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการยดต่อโอห์มมิคที่ไม่เหมาะสม ระหว่างขั้วไฟฟ้ากับสารกึ่งตัวนำ
- การวัดคุณสมบัติทางแสงและทางไฟฟ้า ควรรับทำให้เร็วที่สุดหลังจากเตรียมฟิล์มบางเรียบร้อยแล้ว เพื่อลดผลกระทบจากข้อบกพร่องผลึกที่ปรากฏบนผิวหน้าที่สัมผัสกับอากาศ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลผลิตงานวิจัย

สรุปรายชื่อและรายละเอียดผลผลิตงานวิจัยที่ผลิตได้

- 6.1 ชื่อบทความวิจัย “Structural, Optical and Photoconductive Properties of Thermally Evaporated CdS_xTe_{1-x} Thin Films” ส่งตีพิมพ์ในวารสาร Chiang Mai University Journal of Natural Science โดยมีรายละเอียดดังนี้คือ

Abstract: CdS_xTe_{1-x} thin films with composition $0 \leq x \leq 1$ were prepared by thermal evaporation method on glass substrate using powder of pure CdS and CdTe compounds pressed in pellet form as a source in vacuum 5.5×10^{-5} mbar. XRD revealed that the films exhibited the cubic zincblende structure with the preferred orientation of (111) plane when $x < 0.2$. However, when $x \geq 0.8$, they had the hexagonal wurtzite structure with the preferred orientation of (002) plane. For the composition $0.2 \leq x \leq 0.6$, the cubic and the hexagonal phases were found to coexist in the system and the films became less preferentially oriented. SEM and AFM were used to study morphological features of the samples. The transmission spectra of the films were studied using a double beam spectrophotometer in the wavelength range at 300-900 nm. Optical band gap value of the films was determined from the transmittance spectra. The variation of band gap (E_g) with composition (x) of the films was in good agreement with quadratic form giving the bowing parameter (b) = 1.85 eV. From the transient photoconductivity measurements, persistent photoconductivity (PPC) behavior was observed. The decay current data were better fitted with the multiple exponential functions resulting into five slow decay times. The longest carrier lifetime around 6,000 s was observed in the films with $x = 0.8$. Density of trap states corresponding to its decay time was also evaluated from the decay current data.

Keywords: CdS_xTe_{1-x} Thin films, Thermal evaporation, XRD, Persistent photoconductivity

INTRODUCTION

In the past years CdS/CdTe heterostructure has been regarded as one of the most promising structure for high efficiency and low cost solar cells. Theoretical calculations suggest a maximum efficiency around 30 % in CdTe based solar cell (Morales-Acevedo, 2006; Santana-Aranda and Melendez-Lira, 2000). An interdiffusion process taking place at the CdS-CdTe interface during the cell production has been pointed out as one of the efficiency limiting factors. Thus, it is important to have a full understanding of the properties of such ternary compound $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$. Optical measurements have repeatedly revealed a reduced response at short wavelength, combined with a slightly extended response at longer wavelength. This has been explained by the parabolic dependence of the band gap of $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ upon stoichiometry (Lane et al., 2000). The poor short wavelength response being a consequence of reduced CdS window efficiency caused by Te diffusion and the formation of a discrete homogeneous interfacial layer with a reduced band gap. The slightly extended long wavelength response was believed to be caused by S diffusion into the CdTe and the formation of a layer with a smaller band gap than CdTe. In this study, we prepared $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ thin films of the whole range of composition (x) by a single source thermal evaporation in vacuum. The structural, optical and electrical properties were investigated. The crystal structure of the films was analyzed by XRD. Surface morphology was observed by SEM. The optical transmission spectra were obtained with UV-VIS spectrophotometer in the wavelength range 300-900 nm. The band gap values of $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ films were been evaluated from the spectral transmission data. In addition, the transient photoconductivity measurements were also investigated using halogen lamp as a light source. We have studied these alloy films in order to improve the photovoltaic (PV) performance.

MATERIAL AND METHODS

$\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ thin films were deposited on slide glass substrate by a single source thermal evaporation in vacuum better than 5×10^{-5} mbar by keeping the substrate temperature at 100°C . CdS and CdTe starting materials with 99.999 % purity were purchased from Sigma-Aldrich. Calculated, mixed and ground starting materials together and then pressed in a pellet form with a pressure about 6 GPa was used as the precursors for thermal evaporation in vacuum. The glass slide substrates were

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

cleaned with detergent, degreased with trichloroethelene, acetone, ethanol and rinsed with deionized water in an ultrasonic cleaner and finally etched in a 10 % HF solution. The crystal structure of these films was checked by X-ray diffraction technique with a Brucker D 8 diffractometer using $\text{CuK}\alpha$ radiation. Surface morphology and grain size were revealed in accordance to SEM and AFM. Scanning Electron Microscope was carried out at acceleration 15kV. The films thickness about 500 nm was controlled using a crystal thickness monitor (Edwards type FTM6). Optical transmission measurements were performed with UV-VIS spectrophotometer in the wavelength range of 300-900 nm. The band gap (E_g) of the transparent films was determined by using the equation $(\alpha h\nu)^2 = A(h\nu - E_g)$ where α was the absorption coefficient, A was a constant and $h\nu$ was the photon energy. The photocurrent of $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ thin films was measured by two probe method using halogen lamp as a light source. Two silver electrodes with area 0.05 cm^2 was made on the sample surface. Photoconductivity value (σ) was calculated from the relation:

$$\sigma = \left(\frac{I_p}{V} \right) \left(\frac{l}{wd} \right) \quad (1)$$

where I_p is photocurrent time dependence, V is applied voltage, l is distance between two electrodes, w is the width of the films and d is thickness of the films. The sample was connected to the experimental setup and maintained in darkness under a constant applied bias of 10 V to stabilize the current. After the stabilization period, the current was recorded in the following sequences: 50 s in darkness, 100 s under illumination and, finally, 150 s in the darkness.

RESULTS

$\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ thin films were successfully obtained throughout the composition range ($0 \leq x \leq 1$). Figure 1 shows XRD patterns of $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ films with various compositions (x). Figure 2 shows the variation of lattice constant “a” and “c” of $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ films. The typical SEM images of $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ thin films are given in Figure 3. Figure 4 shows three dimensional (3D) AFM images of the films of different compositions.

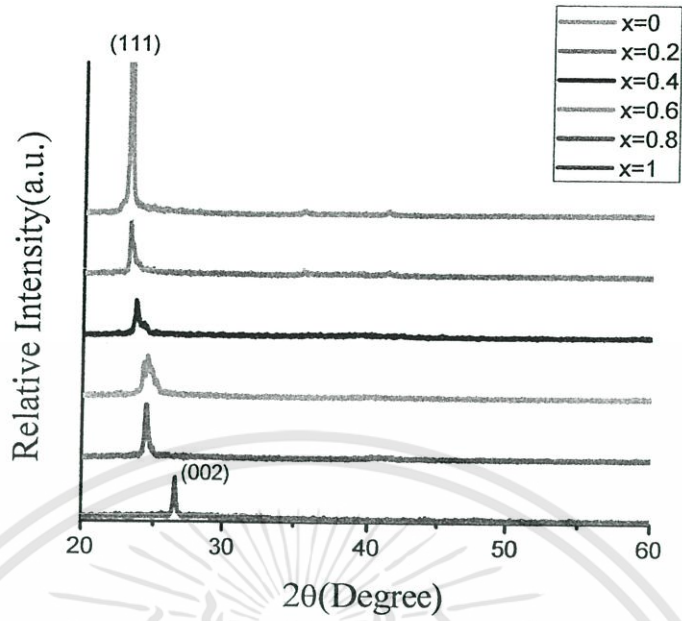


Figure 1. XRD patterns of $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ thin films.

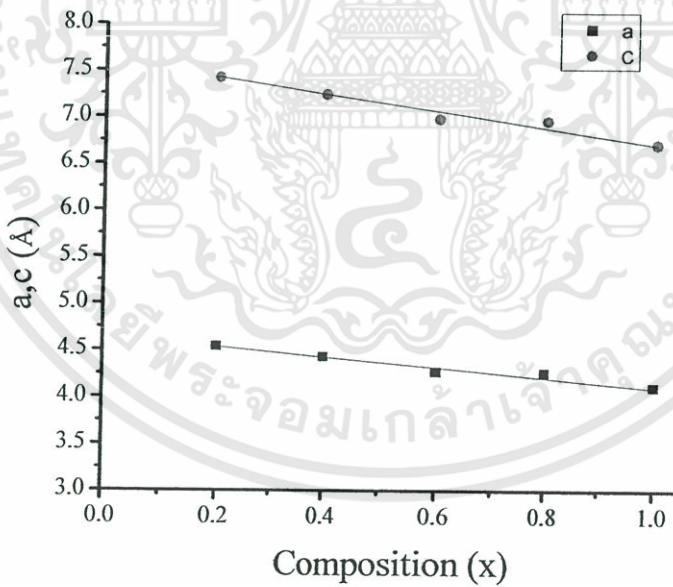


Figure 2. Variation of lattice constant a and c of $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0.2 \leq x \leq 1$) thin films.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

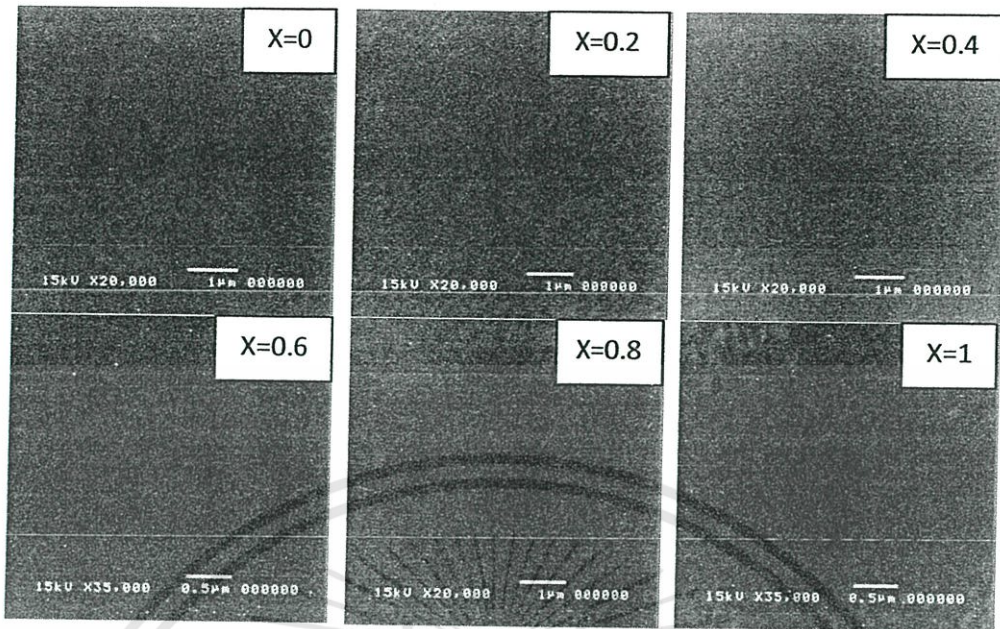


Figure 3. SEM images of $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ thin films.

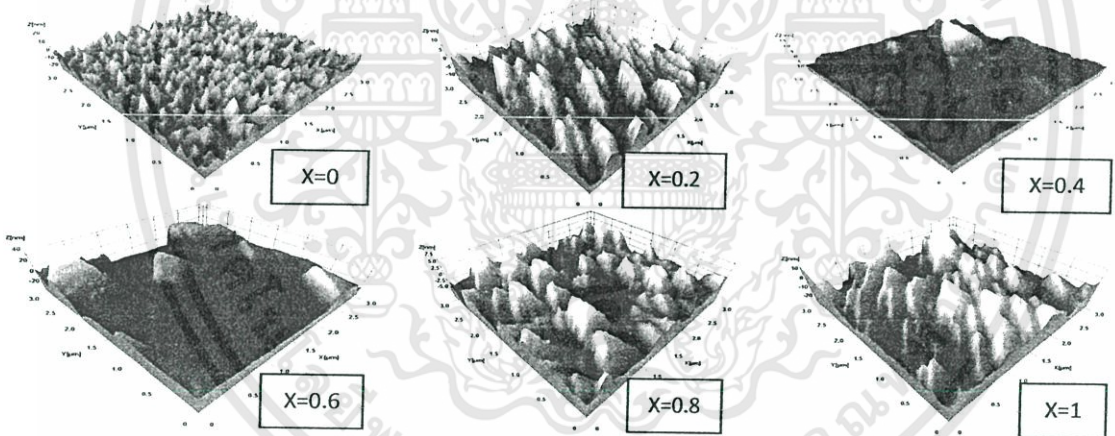


Figure 4. AFM images of $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ thin films.

The plot of percentage of transmittance as a function of the wavelength for $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ thin films with the whole compositions ($0 \leq x \leq 1$) is shown in Figure 5. The spectra showed good transparency and interference patterns. The absorption edge was gradually shifted to shorter wavelength when composition (x) increased. The plots of $(\alpha h\nu)^2 = A(h\nu - E_g)$ of the films with different compositions revealed the straight-line nature indicating that the optical transition in the films was direct allowed

transition and the $h\nu$ -axis interception resulting the band gap value. The band gap was found to

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

decrease from 1.50 eV (corresponding to CdTe) with an increase in S concentration, passing through a minimum of 1.45 eV for $x=0.4$ and then increasing to 2.40 eV (corresponding to CdS). Figure 6 shows the composition dependence of band gaps of the films.

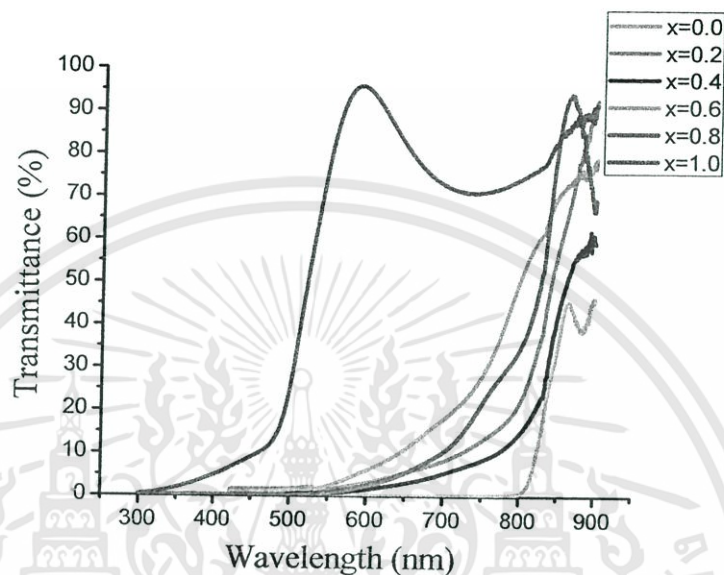


Figure 5. Transmittance of $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ thin films.

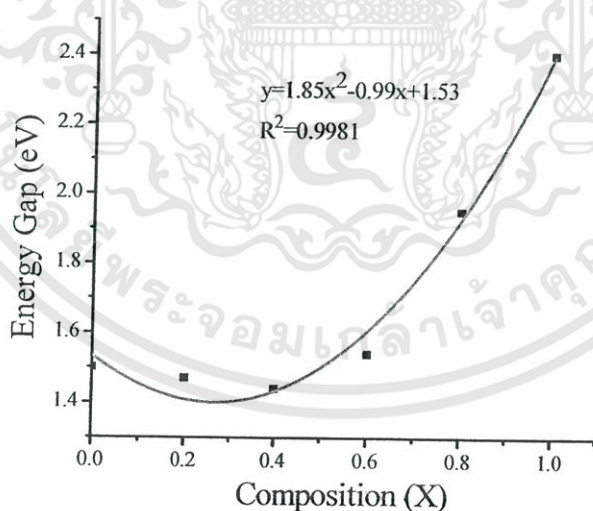


Figure 6. Variation of band gap of $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ thin films.

The photocurrent of $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ thin films for $x=0.8$ is shown in Figure 7. Under illumination, the current increased immediately because a lot of carriers were excited by light illumination. After the illumination period, the persistent photoconductivity (PPC) effect of the films for $x=0.8$ occurred in

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

darkness. The decay of PPC in Figure 7 can be described by multiple exponential functions (Jiang et al., 2011; Yadav et al., 2010) as

$$I_p = I_{\text{dark}} + (I_0 - I_{\text{dark}}) \sum_i \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \quad (2)$$

where I_{dark} is the current measured in darkness, I_0 is the PPC buildup level near the moment of light excitation being removed, τ is the PPC decay time. The normalized decay current in darkness as shown in Figure 8, which follows the illumination period, indicates the persistent of charge carrier traps in the films (Arslan et al., 2008). In Figure 8 the dash line is the measured data and the solid line is the least squares fit data by the multiple exponential functions as described above. According to the function of fitting curve in Figure 8 we calculated that the five τ values were 4.49, 24.60, 751.87, 1879.34 and 5963.02 s. Method for calculating the trap densities corresponding to the PPC decay constant was reported in the literatures (Huang and Lin, 2011; Gu et al., 2005; Studenikin et al., 1998). The corresponding trap densities were 7.68×10^{14} , 2.47×10^{14} , 1.68×10^{14} , 1.47×10^{14} and $1.41 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$.

Figure 9 shows the decay time of $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ thin films for $x=0.8$ performed at different temperatures. As $I_p/(I_0 - I_{\text{dark}}) = 1/e$, the corresponding t in equation (3) is equal to time constant (τ). The τ is dependent on temperature. This behavior can be explained as the probability of the thermal activation of the localized carriers to overcome the potential barrier increases by way of increasing temperature. The potential barrier can be estimated from the temperature dependence of the time constant (Arslan et al., 2008) as following relation

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right) \quad (3)$$

where τ_0 is the high temperature limit of the time constant and E_a is the activation energy for the thermal capture of an electron at its trap energy level. Figure 10 shows the plot of $\ln \tau$ versus $1000/T$ on the temperature dependence of PPC decay time. The linear fit in Figure 10 provides the activation energy of electron trapping center about 15 meV.

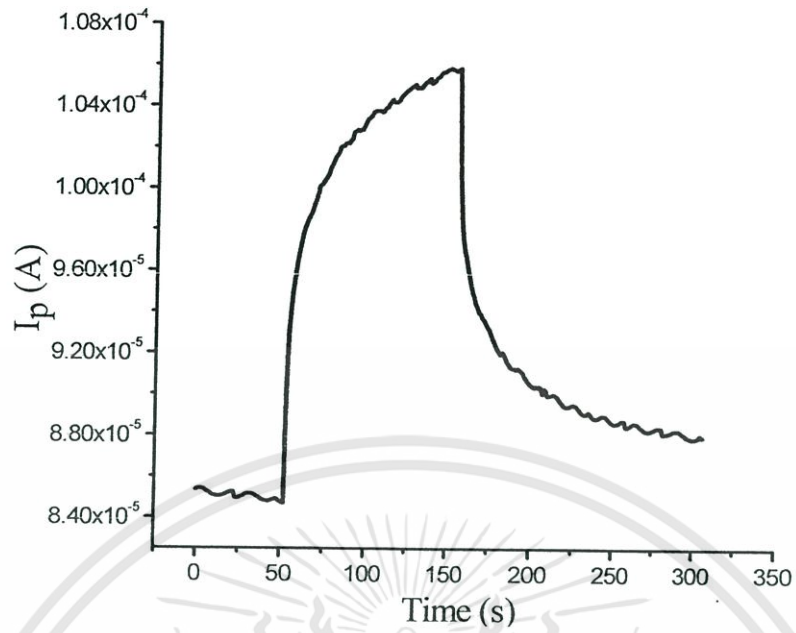


Figure 7. Photocurrent of $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ thin films for $x=0.8$.

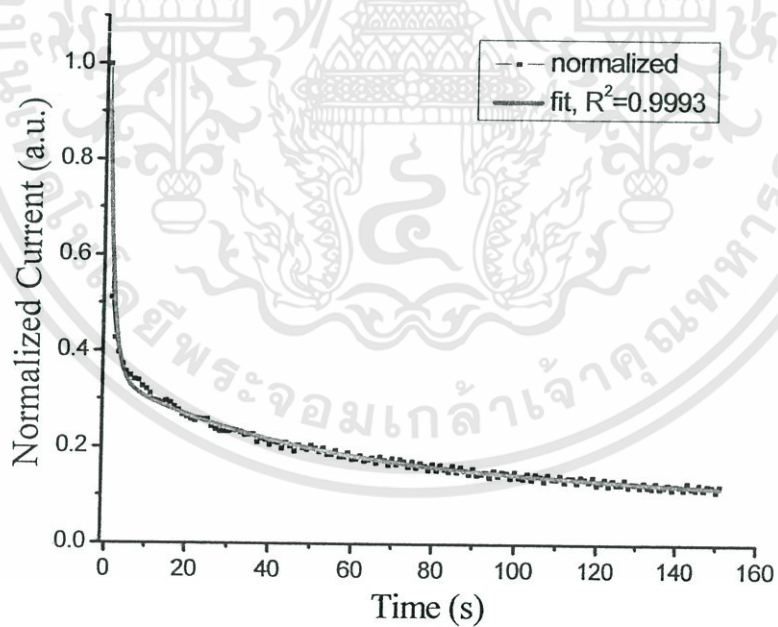


Figure 8. Normalized decay time of $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ thin films for $x=0.8$.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

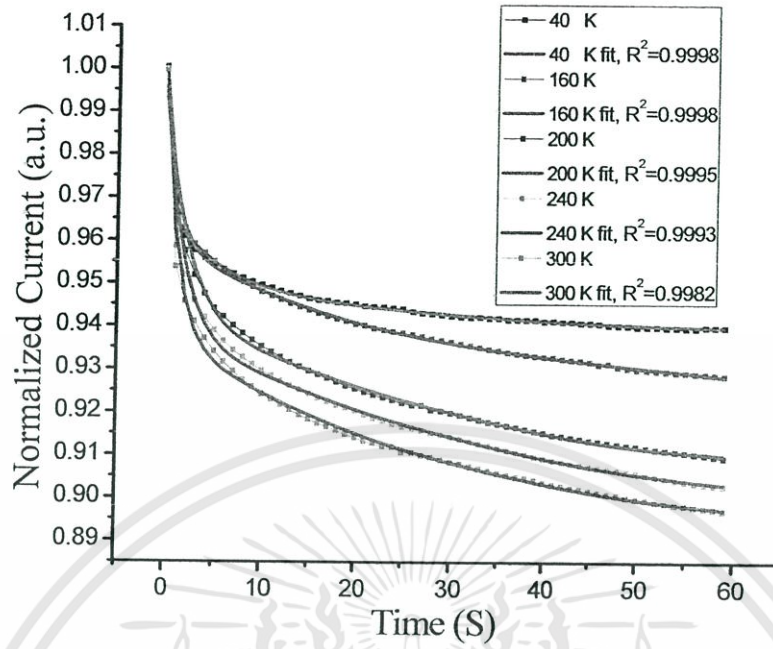


Figure 9. Temperature dependence decay time of $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ thin films for $x=0.8$.

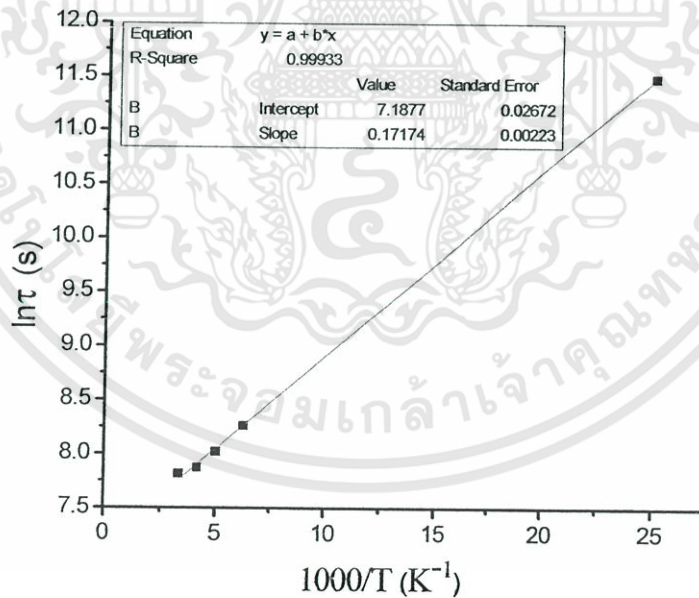


Figure 10. Arrhenius plot of decay time of $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ thin films for $x=0.8$.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DISCUSSION

For $x < 0.2$, XRD revealed that $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ thin films exhibited the cubic zincblende structure with the preferred orientation of (111) plane. However, for $x \geq 0.8$, they existed in the hexagonal wurtzite structure with the preferred orientation of (002) plane. For the composition $0.2 \leq x \leq 0.6$, the cubic and the hexagonal phases were found to coexist in the system and the films became less preferentially oriented. Coexistence of cubic phase and hexagonal phase often occurring in the films with composition (x) in the range 0.2-0.8 was reported (Al-Shakarchi, 2010; Wood et al., 1998; El-Nahaas et al., 2007). Increasing in composition (x), the strongest peak intensity shifted to a higher 2θ value. This is in fact due to the partial replacement of Te atom by S atoms indicating to reduce in lattice constant. Then, lattice constant “a” and “c” varies linearly in accordance with Vegard’s law corresponding to the earlier report (El-Nahaas et al., 2007).

From SEM micrographs, the average grain size of $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ thin films increased by increasing in composition (x). AFM image of the films with composition $x = 0$ showed the polycrystalline character with pyramidal shaped crystallites, typical of cubic crystallites oriented in (111) plane. The grain size increased from 100 nm to 250 nm as the value of x increased from 0 to 1. As composition (x) increased up to 0.4, the coexistence of flattening and pyramidal shaped crystallites was observed. It may be confirmed the mixed phases investigated by the XRD results. Then, a well-defined prism geometry was observed when $x=1$. The surface roughness was found to decrease from 5.25 nm (for $x = 0$) to 3.24 nm (for $x = 0.4$) and then, increased to 6.53 nm (for $x=1$). The variation of the direct band gap $E_g(x)$ with composition (x) of the films is expressed conventionally as a quadratic form (Hadrich et al., 2009; Adachi, 2009; Lane, 2006):

$$E_g(x) = E_g(\text{CdTe}) + (E_g(\text{CdS}) - E_g(\text{CdTe}) - b)x + bx^2 \quad (4)$$

where b is the direct band gap bowing parameter, E_g of CdS = 2.40 eV and E_g of CdTe = 1.50 eV, respectively, corresponding to bulk semiconductors. The bowing parameter $b=1.85$ indicates an

upwards bowing of the band gap, as in good agreement with the value reported elsewhere (Adachi, 2009; Lane, 2006).

The persistent photoconductivity (PPC) effect was observed in several materials such as SnS (Jiang et al., 2011), $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (Jiang et al., 2012), AlGaIn (Arslan et al., 2008) and ZnO (Yadev et al., 2010). The origin of PPC can be explained that the photo-excited carriers were trapped and spatially separated by local potential barriers which inhibited the recombination of free carriers. The holes captured in hole trap levels and the electron captured in electron trap levels cannot be released immediately, the excess carriers should stay in both conduction band and valence band in order to keep electric neutrality. The recombination excess carriers consists two processes: recombination via electron and/or hole traps (assigned to process A) and direct recombination between conduction band and valence band (assigned to process B). The recombination time of process B is very short and the time of process A is relatively long, so the direct recombination (process B) must undergo a long time. The long time existence of excess carriers gives rise to PPC effect.

The decay time of $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ thin films for $x=0.8$ performed at different temperatures leads to obtain time constant (τ) which is dependent on temperature. This behavior can be explained as the probability of the thermal activation of the localized carriers to overcome the potential barrier increases by way of increasing temperature. The activation energy of electron trapping center about 15 meV was obtained.

In conclusion, $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ thin films were successfully prepared by single source thermal evaporation method using powder of pure CdS and CdTe compounds pressed in pellet form. The single phase with composition $x < 0.2$ (CdTe-like) and $x \geq 0.8$ (CdS-like) were obtained. Sample with nominal composition different of the above mentioned range presented both cubic and hexagonal phases. The optical transition in $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ thin films was found to be allowed and direct transition. The variation of band gap (E_g) with composition (x) of the films is in good agreement with quadratic form giving the bowing parameter (b) = 1.85 eV. The decay current data were better fitted with the multiple exponential functions. Five slow decay times and five trap densities values were obtained. The activation energy of electron trapping center about 15 meV was observed.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The future directions for our research aim at clarifying the behavior of cubic and hexagonal coexistence phases in $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ thin films by TEM.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to thank Assoc.Prof.Dr. T. Wongcharoen and Asst. Prof. Dr. C. Poo-Rakkiat for valuable discussions. This work was supported by King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (grant number A118-59-038).

REFERENCES

- Adachi, S. 2009. Properties of semiconductor alloys group-IV, III-V and II-VI semiconductor pp. 210-211). John Wiley & Sons, New York.
- Al- Shakarchi, E.M. 2010. Phase transformation of a $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ thin films under an annealing process. Journal Korean Physics Society. 57: 1421-1425. DOI 10.3938/jkps.57.1421
- Arslan, E., S. Butun, S.B. Lisesivdin, M. Kasap, S. Ozelik, and E. Ozbay.2008. The persistent photoconductivity effect in AlGaIn/GaN heterostructures grown on sapphire and SiC substrate. Journal of Applied Physics. 103: 103701-7-103701-3. DOI 10.1063/1.2921832.
- El- Nahass, M.M., M.M. Sallam, M.A. Afifi, and I.T. Zedan. 2007. Structural and optical properties of polycrystalline $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$).Material Research Bulletin. 42: 371-384. DOI 10.1016/j.materresbull.2006.05. 022.
- Gu, G., G. Kane, J.E Doty, and A.H. Firester. 2005. Electron traps and hysteresis in pentacene- based organic thin film transistors. Applied Physics Letters. 87: 243512-1- 243512-3. DOI 10.1063/1.2146059.
- Hadrich, M., C. Kraft, H. Metzger, U. Reislohner, C. Loffler, and W. Witthuhn. 2009. Formation of $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ at the p-n junction of CdS-CdTe solar cells. Physica Status Solidi. 6(5): 1257-1260. DOI 10.1002/ pssc. 200881219.

- Huang, B.C. and Y.J. Lin. 2011. Effect of the induced electron traps by oxygen plasma treatment on transfer characteristics of organic thin film transistors. *Applied Physics Letters*. 99: 113301-1-113301-3. DOI 10.1063/1.3636411.
- Jiang, F., H. Shen, C. Gao, B. Liu, L. Lin, and Z. Shen. 2011. Preparation and properties of SnS films grown by two-stage process. *Applied of Surface Sciences*. 257: 4901-4905. DOI 10.1016/j.apsusc.2010.12.143.
- Jiang, F., H. Shen, and W. Wang. 2012. Optical and electrical properties of $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ films prepared by sulfurization method. *Journal of Electronic Materials*. 41: 2204-2209. DOI 10.1007/s11664-012-2112-8.
- Lane, D.W. 2006. A review of the optical band gap of thin films $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 90: 1169-1175. DOI 10.1016/j.solmat.2005.07.003.
- Lane, D.W., K.D. Roger, S.D. Painter, D.A. Wood, and M.G. Ozsan. 2000. Structural dynamics in CdS-CdTe thin films. *Thin Solid Films*. 361-362: 1-8. DOI 10.1016/S0040-6090(99)00827-5.
- Morales-Acevedo, A. 2006. Can you improve the record efficiency of CdS/CdTe solar cells? *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 90(15): 2213-2220. DOI 10.1016/j.solmat. 2006.02.019.
- Santana-Aranda, M.A. and M. Melendez-Lira. 2000. Structural and optical characterization of screen-printed $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ films. *Superficies y Vacio*. 10:36-39.
- Studenikin, S.A., N. Geleco, and M. Cocivera. 1998. Optical and electrical properties of undoped ZnO films grown by spray pyrolysis of zinc nitrate solution. *Journal of Applied Physics*. 83(4): 2104-2111. DOI 10.1063/1.366944.
- Wood, D.A., K.D. Roger, D.W. Lane, G.J. Conibeer, and D. Parton. 1998. A study of the CdS-CdTe pseudobinary system. *Journal of Material Science Letters*. 17: 1511-1514.
- Yadav, H.K., K. Sreenivas, and V. Gupta. 2010. Persistent photoconductivity due to trapping of induced charge in Sn/ZnO thin films based UV photodetector. *Applied Physics Letters*. 96: 223507-1- 223507-3. DOI 10.1063/1.3427417.

6.2 ข้อบทความวิจัยที่อยู่ระหว่างการดำเนินการ “Physical Properties of $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ Thin Films Prepared by Close Spaced Sublimation Method” ดังมีรายละเอียดดังนี้

Abstract. $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) thin films were prepared on clear quartz glass substrate by close spaced sublimation method using stoichiometric mixed powder of pure CdS and CdTe compounds. Crystal structure of $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ thin films was cubic structure with a preferential orientation of (111) plane when the S mole ratio less than 0.2. However, For the composition $0.2 \leq x \leq 0.8$, the cubic and the hexagonal phases were found to coexist in the system and the films became less preferentially oriented whereas CdS thin films formed in the hexagonal phase with a preferential orientation of (002) plane. SEM micrographs showed the grain size decreased when the S content increased. As the S content increased, the energy gap value of $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ thin films varied from 1.48 eV (for CdTe) to 2.25 eV (for CdS). Dark electrical sheet resistance of $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ thin films decreased as a function of S content to minimum value about $2.24 \times 10^7 \Omega/\text{sq}$ for $x=0.8$ and then slightly increased to $4.13 \times 10^7 \Omega/\text{sq}$ for $x=1.0$. From the transient photoconductivity measurements, the highest photosensitivity value about 60.0 was obtained for the films with $x = 0.8$.

Keywords: $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ thin films, close spaced sublimation, XRD, photosensitivity

Introduction

In the past years CdS/CdTe heterostructure has been regarded as one of the most promising structure for high efficiency and low cost solar cells. Theoretical calculations suggest a maximum efficiency around 30 % in CdTe based solar cell [1]. An inter-diffusion process taking place at the CdS-CdTe interface during the cell production has been pointed out as one of the efficiency limiting factors. Thus, it is important to have a full understanding of the properties of such ternary compound $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$. In this study, we prepared $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ thin films of the whole range of composition (x) by close spaced sublimation method. The structural, optical and electrical properties were investigated. In addition, photosensitivity of the films was evaluated from the transient photoconductivity measurements.

Material and Methods

CdS_xTe_{1-x} thin films were prepared on clear quartz glass substrate by close spaced sublimation method using a home-made apparatus. The reaction chamber consists of fused quartz tube with a flange, mounted on a based plate 44 mm in diameter and 500 mm in length. The growth assembly contained two graphite blocks 30×70×30 mm³, with the precursor and substrate sandwiched between the two blocks, separated by spacer. The pressure of the chamber about 2.0×10⁻² mbar was monitored by pirani gauge. The two graphite blocks were heated by radiation from two halogen lamps connected in parallel outside the chamber to give the maximum rate power output of 3 kW. For CdTe thin films growth condition, source temperature and quartz glass substrate temperature were 550 and 450°C, respectively. In all solid solution films and CdS thin films, source temperature and quartz glass substrate temperature were fixed at 700 and 600°C, respectively. The structural properties of the films were determined by X-ray diffraction using a Bruker D8 advance with CuK_α radiation. Grain size and surface morphology were revealed in accordance to scanning electron microscopy (SEM). The optical transmission spectra were measured with a UV-VIS spectrophotometer in the 400-1000 nm wavelength range. The energy gap value was deduced from the optical transmission spectra. The photocurrent of CdS_xTe_{1-x} thin films was measured by two probe method using halogen lamp as a light source. Photosensitivity (S) was calculated from the following relation:

$$S = \frac{I_L - I_D}{I_D}$$

where I_L is photocurrent and I_D is dark current. After the stabilization period, the current was recorded in darkness and under white light illumination with time interval fixed at 30 s.

Results and Discussion

Fig. 1 shows XRD patterns of CdS_xTe_{1-x} thin films with the whole compositions (x). For x < 0.2, XRD revealed that the films exhibited the cubic structure with the preferential orientation of (111) plane. However, for x > 0.8, they exhibited the hexagonal structure with a preferential orientation of (002) plane. For the composition 0.2 ≤ x ≤ 0.8, the cubic and the hexagonal structures were found to coexist in the system and the films became less preferentially oriented. Coexistence of the cubic phase and the hexagonal phase often occurring in the films with composition (x) in the range 0.2-0.8 was reported [2]. The diffraction angle of (111) plane shifted towards higher 2θ values with an increase in

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

S content. This behavior was also observed on the one of (002) plane which suggested that the lattice parameters of unit cell decreased. At compositions where both crystal structures are present, the basal plane spacing is the same for the hexagonal (002) and cubic (111) planes. The equivalent hexagonal lattice parameters could be defined for cubic type and a_H and c_H calculated for all compositions in the manner previously reported [3]. As the composition (x) increased, the lattice parameters of $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ films changed almost linearly from those of CdTe phase to those of CdS phase (as shown in Fig. 2). SEM micrographs of $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ thin films of different compositions are shown in Fig. 3. From the surface view, it can be seen that the grain size decreased as the composition (x) increased.

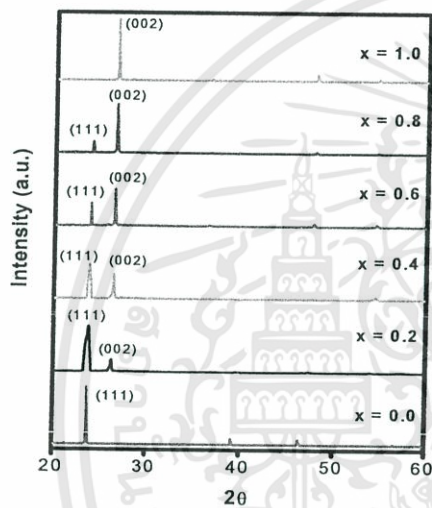


Fig. 1 XRD patterns of $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ films.

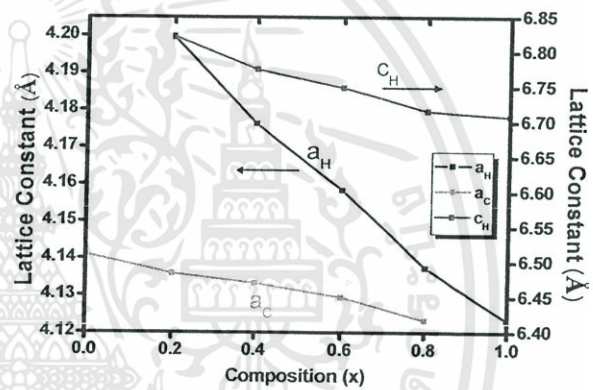


Fig. 2 Variation of lattice parameters of $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ films.

Transmission spectrum of the films for $x=0.8$, as shown in Fig. 4, revealed a sharp fall of the transmittance at band edge which was an indication of the good crystallinity of the films. From Fig. 5, the plot of $(\alpha h\nu)^2 = A(h\nu - E_g)$ of the films with $x=0.8$ revealed the straight-line nature indicating that the optical transition in the films was direct allowed transition and the $h\nu$ -axis interception resulting the band gap value about 1.47 eV. Fig. 6 shows the composition dependence of band gaps of $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ thin films. The band gap was found to decrease from 1.48 eV (corresponding to CdTe) with an increase in S concentration, passing through a minimum of 1.40 eV for $x=0.2$ and then increasing to 2.25 eV (corresponding to CdS). From Fig. 7, dark electrical sheet resistance of $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ thin films decreased as a function of S content to minimum value about $2.24 \times 10^7 \Omega/\text{sq}$ for $x=0.8$ and then slightly increased to $4.13 \times 10^7 \Omega/\text{sq}$ for $x=1.0$.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

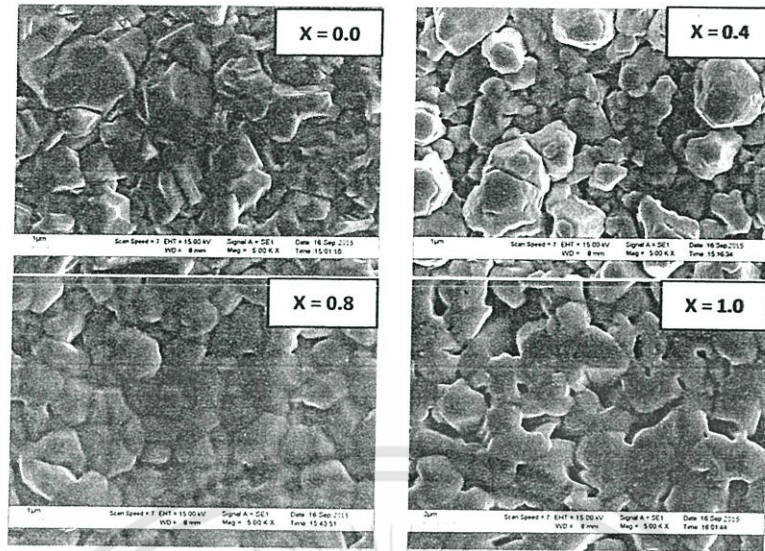


Fig. 3 SEM images of CdS_xTe_{1-x} films.

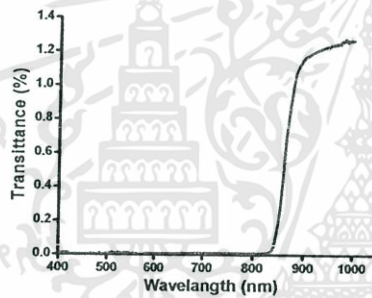


Fig. 4 Transmittance of CdS_xTe_{1-x} films for $x=0.8$.

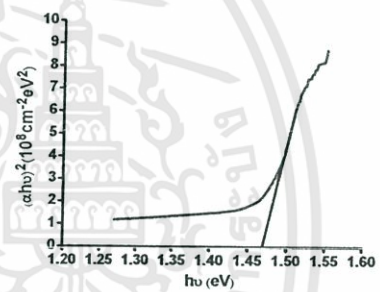


Fig. 5 Plot of $(\alpha hv)^2$ vs. $h\nu$ of CdS_xTe_{1-x} films for $x=0.8$.

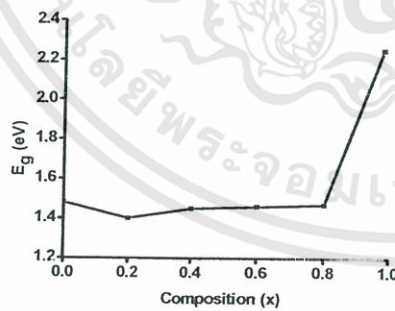


Fig. 6 Variation of band gap of CdS_xTe_{1-x} films.

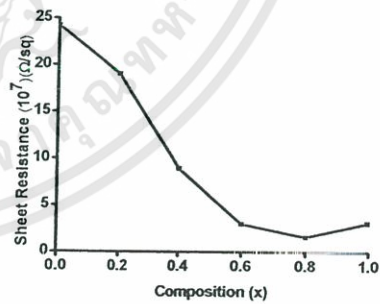


Fig. 7 Variation of sheet resistance of CdS_xTe_{1-x} films.

Photocurrent response of CdS_xTe_{1-x} thin films under multiple on/off white light illumination cycles was performed in ambient air. Three repeated cycles are shown in Fig. 8, in which the photocurrent was observed to be consistent and repeatable with the rising time and decay time are both approximately 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

s, indicating rapid photoresponse characteristics. Fig. 9 shows the photosensitivity of $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ thin films with different compositions. A maximum value about 60.0 was observed on the films for $x=0.8$.

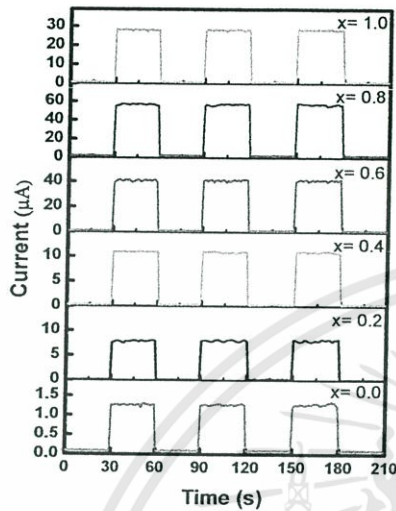


Fig. 8 Photocurrent response of $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ films.

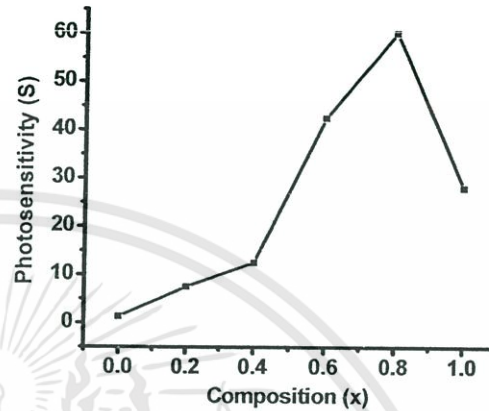


Fig. 9 Photosensitivity of $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ films.

Summary

$\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ thin films were prepared by close spaced sublimation method using stoichiometric mixed powder of pure CdS and CdTe compounds. Crystal structure and surface morphology were examined by XRD and SEM, respectively. The single phase with composition $x < 0.2$ (CdTe-like) and $x > 0.8$ (CdS-like) were obtained. Sample with nominal composition different of the above mentioned range presented both cubic and hexagonal phases. The optical transition in $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ thin films was found to be allowed and direct transition. A maximum photosensitivity value around 60.0 was observed in the films with $x=0.8$. Since the sheet resistance of $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ thin films in our work is high, it is necessary to reduce its value. So, Thermal treatments incorporated with CdCl_2 will be plan in the near future.

Acknowledgments

This work is supported by King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang under grant number A118-59-038.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

References

- [1] A. Morales-Acevedo: Sol. Energy & Sol. Cells Vol. 90(15) (2006), p. 2213.
- [2] M.M. El- Nahass, M.M. Sallam, M.A. Afifi, and I.T. Zedan: Mater. Res. Bull. Vol. 42 (2007), p.371.
- [3] J.H. Lee, W.C. Song, J.S. Yi, K.J. Yang, W.D. Han and J. Hwang: Thin Solid Films Vol. 431-432 (2003), p. 349.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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.
- Al-Shakarchi, E.K. 2010. Phase Transformation of a $\text{CdTe}_{1-x}\text{S}_x$ Thin Film under an Annealing Process. J. Korean Phys. Soc. 57(6): 1421-1425.
- Baccarani, G. and Ricco, B. 1978. Transport Properties of Polycrystalline Silicon Films. J. Appl. Phys. 49(11), 5565-5570.
- Bonnet, D. and Rabenhorst, H. 1972. New Results on the Development of a Thin Film p-CdTe-n-CdS Heterojunction Solar Cell. Proceedings of the 9th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Silver Springs, 1972, pp. 129-131.
- Cullity, B.D. 1956. Elements of X-rays Diffraction. Addison-Wesley Publishing Company Inc.; pp 9-14.
- Dhere, R., Wu, X., Albin, D., Perkins, C., Moutinho, H. and Gessert, T. 2002. Formation and Characterization of $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ Alloys Prepared From Thin Film Couples of CdS and CdTe. 29th IEEE PV Specialists Conf., May 20-24 2002, New Orleans, Louisiana, pp. 484-487.
- Duenow, J.N., Dhere, R.G., Moutinho, H.R., To, B., Pankow, J.W., Kuciauskas, D., Gessert, T.A. $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ Alloying in CdS/CdTe Solar Cells. In Proceedings of the 2011 Materials Research Society Spring Meeting, San Francisco, CA, USA, 25-29 April 2011: 1-6.
- 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 $\text{Cd}_{0.95}\text{Hg}_{0.05}\text{S}$ Thin Films. Mater. Chem. Phys. 58: 64-70.

- Gessert, T.A., Wei, S.H., Ma, J., Albin, D.S., Dhere, R.G., Duenow, J.N., Kuciauskas, D., Kanevce, A., Barnes, T.M., Burst, J.M., Rance, W.L., Reese, M.O., Moutinho, H.R. 2013. Research Strategies Toward Improving Thin-Film CdTe Photovoltaic Devices Beyond 20 % Conversion Efficiency. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 119: 149-155.
- 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.
- Gordillo, G. and Romero, E. 2005. Structural Characterization of Thin Films Based on II–VI Ternary Compounds Deposited by Evaporation. *Thin Solid Films.* 484: 352-357.
- Green, M.A., Emery, K. Hishikawa, Y., Warta, W. Dunlop, E.D. 2015. Solar Cell Efficiency Tables (Version 46). *Prog. Photovolt: Res. Appl.* 23: 805–812.
- Gu, G., Kane, M.G., Doty, J.E., Firester, A.H. 2005. Electron Traps and Hysteresis in Pentacene-Based Organic Thin Films Transistors. *Appl. Phys. Lett.* 87: 243512-1-243512-3.
- Gunal, 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 Layers. *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.
- Huang, B.C. and Lin, Y.J. 2011. Effect of The Induced Electron Traps By Oxygen Plasma Treatment on Transfer Characteristics of Organic Thin Film Transistors. *Appl. Phys. Lett.* 99: 113301-1-113301-3.
- Ikhmayies, S.J. and Ahmad-Bitar, R.N., 2012. CdS_{1-y}Te_y Thin Films: Production and Bandgap Investigation. *Solar Energy.* 86: 2613-2619.
- Ikhmayies, S.J. 2016. S-Rich CdS_{1-y}Te_y Thin Films Produced by the Spray Pyrolysis Technique. *Energies.* 9: 234-1-234-19.
- Jacome, C., Flrez, M., Gurevich, Y.G., Giraldo, J., Gordillo, G. 2001. Characterization of CdS_xTe_{1-x} Thin Films Through Thermoelectric Power Measurements. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 34: 1862-1867.
- Jiang, F., Shen, H. and Wang, W. 2012. Optical and Electrical Properties of Cu₂ZnSnS₄ Film Prepared by Sulfurization Method. *J. Elec. Matter.* 41(8): 2204-2209.

- 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.
- Kathalingam, A., Kim, M.R., Chae, Y.S., Rhee, J.K., Thanikaikarasan, S., Mahalingam, T. 2010. Study on Electrodeposited $\text{CdSe}_x\text{Te}_{1-x}$ Semiconducting Thin Films. *J. Alloys Comp.* 505: 758-761.
- 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 the Thin Film $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 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 $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ 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.
- Moller, H.J. *Semiconductors for Solar Cells*, Artech House, Inc. 1993.
- Murali, K.R. and Palanisamy, T. 2010. Electrical and Optical Properties of Pulse Plated $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ Films. *Ionics.* 16: 613-619.
- Murali, K.R., Thirumoorthy, P., Kannan, C., Sengodan, V. 2009. Pulse Plated $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ Films and Their Properties. *Solar Energy.* 83: 14-20.
- Ohata, K., Saraie, J. and Tanaka, T., 1973. Some Properties of $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ Alloys, *Jpn. 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.
- Pan, G.T., Shen, T.F.R., Lai, M.H., Juang, R.C., Yang, T.C.K. 2011. The Preparation and Characterization of $\text{CdS}_{1-x}\text{Te}_x$ Semiconductor Films for Hydrogen Production by the Chemical Bath Deposition Method. *Sol. Energy Mater. & Sol. Cells.* 95: 2524-2530.
- 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. New York: 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.
- Studenikin, S.A., Golego, N. and Cocivera, M. 1998. Optical and Electrical Properties of Undoped ZnO Films Grown By Spray Pyrolysis of Zinc Nitrate Solution. *J. Appl. Phys.* 83(4): 2104-2111.
- Wei, K.; Pollak, F.H., Freeouf, J. L., Shvydka, D., Compaan, A. D. 1999. Optical Properties of $CdS_{1-x}Te_x$ ($0 \leq x \leq 1$) Experimental and Modeling *J. Appl. Phys.* 85(10): 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.
- Wood, D.A., Rogers, K.D., Lane, D.W., Conibeer, G.J., Parton, D. A 1998. Study of the Phase Boundaries and Lattice Parameters of the CdS-CdTe Pseudobinary System. *J. Mater. Sci. Lett.* 17: 1511-1514.
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ. 2531. “การศึกษารอยต่อแบบโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ ของคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, จิตินัย แก้วแดง, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ. 2543. การเตรียมและศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์. รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, จิตินัย แก้วแดง และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2549. “การประดิษฐ์ฟิล์มบางคิงบุก ออกไซด์ที่เจือด้วยอะตอมฟลูออรีนสำหรับขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, จิตินัย แก้วแดง และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2551. “การเตรียมฟิล์มบาง CdTe โดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิดเพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ และจิตินัย แก้วแดง. 2553. “การประดิษฐ์ฟิล์มบาง CdO ที่เจือด้วย Al สำหรับขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, จิตินัย แก้วแดง และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2556. “ความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้าของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0.00 \leq x \leq 0.05$) และการประยุกต์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, จิตินัย แก้วแดง และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2558. “การประดิษฐ์ฟิล์มบางแคดเมียมซีสไนด์เจือด้วยอะตอมอินเดียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดเพื่อประยุกต์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- จิตินัย แก้วแดง. 2530. “การเตรียมและศึกษาสมบัติของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมไดซีสไนด์.” วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- จิตินัย แก้วแดง และงามนิตย์ วงษ์เจริญ. 2544. “เอกสารประกอบการสอนวิชา ฟิสิกส์และเทคโนโลยีของเซลล์แสงอาทิตย์.” ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- จิตินัย แก้วแดง. 2545. “เอกสารประกอบการสอนวิชา ฟิสิกส์ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ.” ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- จิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ. 2545. “การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ ที่มี Zn เพื่อประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- จิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ. 2546. “การประดิษฐ์ฟิล์มบาง $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ ที่มี Zn ในปริมาณสูงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิศย์ วงษ์เจริญ และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2547. “การเตรียมฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วย In โดยระเหยในระบบสุญญากาศ.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิศย์ วงษ์เจริญ และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2549. “การประดิษฐ์ฟิล์มบางคิบุกออกไซด์ที่เจือด้วยอะตอมฟลูออรีนสำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- งามนิศย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2550. “การประดิษฐ์ฟิล์มบาง CuAlO_2 เพื่อเป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- ฐิตินัย แก้วแดง และงามนิศย์ วงษ์เจริญ. 2551. “การเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธีออบสารละลายเคมีภายใต้คลื่นไมโครเวฟเพื่อประดิษฐ์เป็นหน้าต่างรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- ฐิตินัย แก้วแดง งามนิศย์ วงษ์เจริญ และ ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2552. “การพัฒนาขั้วไฟฟ้าด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CdS/CdTe.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิศย์ วงษ์เจริญ และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2554. “การประดิษฐ์ขั้วไฟฟ้าด้านหลังชนิดใหม่ที่เหมาะสมกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CdS/CdTe.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- ฐิตินัย แก้วแดง งามนิศย์ วงษ์เจริญ และ ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2557. “การประดิษฐ์และการศึกษาสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CuO.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิศย์ วงษ์เจริญ, ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ. 2558. “การเตรียมฟิล์มบาง CuO โดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีสเป็คเตอรริงเพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CuO.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ CdTe
ไฟล์มาตรฐาน JCPDS No.15-770

Pattern : 15-770		Radiation = 1.540600		Quality : Indexed		
Cd Te		2th	l	h	k	i
		23.759	100	1	1	1
		39.312	60	2	2	0
Cadmium Telluride		46.434	30	3	1	1
		56.821	6	4	0	0
		62.353	10	3	3	1
		71.216	10	4	2	2
		76.300	4	5	1	1
		84.469	2	4	4	0
		89.412	4	5	3	1
		97.443	4	6	2	0
		102.400	2	5	3	3
		110.837	1	4	4	4
		116.146	2	5	5	1
		125.593	4	6	4	2
		131.817	4	7	3	1
Lattice : Face-centered cubic	Mol. weight = 240.01					
S.G. : F-43m (216)	Volume [CD] = 272.22					
a = 6.48100	Dx = 5.856					
	Z = 4					
	I/cor = 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% Sr; 0.0001-0.001% each of Ba, Fe and Pb TEMP. OF DATA COLLECTION : Pattern taken at 25 C.</p>						
<p>CAS: 1306-25-8 *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				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลการเดี่ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ CdS
ไฟล์มาตรฐาน JCPDS No.77-2306

Pattern : 77-2306		Radiation = 1.540600		Quality : Calculated		
Cd S		2th	I	h	k	l
Cadmium Sulfide		24.837	63	1	0	0
		26.535	45	0	0	2
		28.216	100	1	0	1
		36.662	25	1	0	2
		43.738	43	1	1	0
		47.894	41	1	0	3
		50.949	6	2	0	0
Lattice : Hexagonal		51.890	31	1	1	2
S.G. : P63mc (186)		52.866	13	2	0	1
a = 4.13600		54.644	2	0	0	4
c = 6.71300		58.354	5	2	0	2
Z = 2		60.912	2	1	0	4
Mol. weight = 144.47		65.858	12	2	0	3
Volume [CD] = 99.45		69.359	8	2	1	0
Dx = 4.824		70.962	9	2	1	1
I/cor = 7.93		72.472	4	1	1	4
		75.572	8	1	0	5
		75.689	5	2	1	2
		77.956	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
ICSD COLLECTION CODE : 060629						
REMARKS FROM ICSD : REM F Determination based on model III of						
Fakinos, Steverson						
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 : CuKα1		Filter : Not specified				
Lambda : 1.54060		d-sp : Calculated spacings				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินงานโครงการวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาเลขที่ ..A118-59-038

“การศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียม โดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด เพื่อประยุกต์ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์”

รายงานสรุปการเงินในรอบ ..12.... เดือน

ชื่อหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน...รศ.ดร.ฐิตินัย แก้วแดง

รายงานในช่วงตั้งแต่วันที่...1 ตุลาคม 2558... ถึงวันที่...30 กันยายน 2559.....

รายจ่าย

หมวด (ตามสัญญา)	รายจ่ายสะสมจาก รายงานครั้งก่อน (1)	ค่าใช้จ่ายงวด ปัจจุบัน (2)	รวมรายจ่ายสะสม จนถึงงวดปัจจุบัน (3) = (1) + (2)	งบประมาณ ทั้งหมดที่ตั้งไว้ตาม สัญญา (4)	คงเหลือ (หรือเกิน) (5) = (4) - (3)
ก. ส่วนที่โครงการบริหาร					
1. ค่าตอบแทน	.....	.....	.....	.....	.....
2. ค่าจ้าง	.....	.....	.....	.....	.....
3. ค่าใช้สอย	.....4,710.....	.....14,650.....	.....19,360.....	.....30,000.....	.....10,640.....
4. ค่าวัสดุ	..84,715.72..	....96,131.61..	..180,847.33.....	....170,000.....	.....10,847.33....
5. ค่าครุภัณฑ์	.....	.....	.....	.....	.....
รวม	.....	.....	.....	.....	.....

จำนวนเงินที่ได้รับและจำนวนเงินคงเหลือ

จำนวนเงินที่ได้รับ	จำนวน	วันที่ได้รับ	ค่าใช้จ่าย	จำนวน
งวดที่ 1 (85%)	170,000..... บาท	.23../11../2558..	งวดที่ 1	89,425.72 บาท
งวดที่ 2 (15%)	30,000..... บาท	15../07../.2559..	งวดที่ 2	110,781.61บาท
ดอกเบี้ย ครั้งที่ 1	.55.04..... บาท	25../12../2558.....		
ดอกเบี้ย ครั้งที่ 2	.152.29..... บาท	25../06../.2559.....		
รวมเงินที่ได้รับ ^(A)	200,207.33 บาท		รวมรายจ่าย ^(B)	200,207.33บาท
คงเหลือเงินในบัญชีโครงการ (รวม ^(A) - รวม ^(B))			.....0.....บาท ^(C)	

.....


ลงนามหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการวิจัย

ชื่อ-นามสกุล นายจตุตินัย แก้วแดง

ตำแหน่งปัจจุบัน รองศาสตราจารย์ ระดับ 9

ประวัติการศึกษา

ปีที่จบการศึกษา	ระดับปริญญา	อักษรย่อปริญญา	สาขาวิชา	ชื่อสถาบันการศึกษา
2526	ปริญญาตรี	วท.บ.	ฟิสิกส์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ
2530	ปริญญาโท	วท.ม.	ฟิสิกส์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ
2536	ปริญญาเอก	Ph.D.	วัสดุศาสตร์	Bordeaux University I, France

สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา)

ฟิสิกส์ของแข็ง ฟิสิกส์สารกึ่งตัวนำ

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ)

1. T. Gaewdang and Ng. Wongcharoen “Heterojunction Properties of p-CuO/n-CdS Diode” Advanced Materials Research, Vol. 1098, 2015, pp. 1-5.
2. Ng. Wongcharoen and T. Gaewdang “Effect of Oxidation Temperature on the Properties of CuO Thin Films Prepared by Thermal Oxidation of Sputtered Cu Thin Films” Advanced Materials Research, Vol. 1098, 2015, pp. 6-11.
3. T. Gaewdang and Ng. Wongcharoen “Electrical Parameters and Conduction Mechanisms in CdS/CuO Thin Film Heterojunction” International Symposium on Fundamental and Applied Sciences (ISFAS) March, 2015, Osaka, Japan, Proceedings, pp. 858-865.
4. Ng. Wongcharoen and T. Gaewdang “Preparation and Characterization of Copper Oxide Thin Films Prepared by Oxidation of Thermally Evaporated Cu Thin Films” International Symposium on Fundamental and Applied Sciences (ISFAS) March, 2015, Osaka, Japan, Proceedings, pp. 866-873.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. T. Gaewdang and Ng. Wongcharoen "Electrical Conduction Mechanism in n-CdS/p-CuFeO₂ Heterojunction Diode" *Advanced Materials Research*, Vol. 931-932 , 2014, pp. 122-126.
6. Ng. Wongcharoen and T. Gaewdang "Influence of Na Doping on the Thermoelectric Properties of CuAlO₂ Delafossite" *Advanced Materials Research*, Vol. 931-932 , 2014, pp. 127-131.
7. Ng. Wongcharoen and T. Gaewdang "Electrical Characterization of n-CdS/p-CuCrO₂ Heterojunction" *Hong Kong International Conference on Engineering and Applied Science (HKICEAS) December 19-21, 2013, Hong Kong, Proceedings*, pp. 781-788.
8. T. Gaewdang and Ng. Wongcharoen "Influence of Annealing Temperature on Microstructure, Optical and Electrical Properties of Digenite Thin Films" *Hong Kong International Conference on Engineering and Applied Science (HKICEAS) December 19-21, 2013, Hong Kong, Proceedings*, pp. 774-780.
9. T. Gaewdang, Ng. Wongcharoen and T. Wongcharoen "Effect of Annealing Temperature on the Optical Parameters of CdS Thin Films Prepared by Thermal Evaporation Method" *Advanced Materials Research*, Vol. 747, 2013, pp. 329-332.
10. Ng. Wongcharoen, T. Gaewdang and T. Wongcharoen "Structural and Thermoelectric Properties of Zn-Doped Cuprous Aluminate Delafossite" *Advanced Materials Research*, Vol. 747, 2013, pp. 333-336.
11. Ng. Wongcharoen, T. Gaewdang and T. Wongcharoen "Determination of Gap State Density in n-CdS/p-CuAlO₂ Heterojunction" *Asian Conference on Civil, Material and Environmental Sciences (ACCMES) 2013, March 15-17, 2013, Tokyo, Japan, Proceedings*, pp. 2078-2088.
12. T. Gaewdang, Ng. Wongcharoen and T. Wongcharoen "Preparation and Characterization of CdS_xTe_{1-x} (0 ≤ x ≤ 1) Thin Films" *Asian Conference on Civil, Material and Environmental Sciences (ACCMES) 2013, March 15-17, 2013, Tokyo, Japan Proceedings*, pp. 2070-2077.
13. T. Gaewdang, Ng. Wongcharoen and T. Wongcharoen "Characterization of CdS/CdTe Heterojunction Solar Cell by Current- Voltage Measurements at Various Temperatures under Illumination", *Energy Procedia*, vol. 15, 2012, pp. 299-304.
14. Ng. Wongcharoen, T. Gaewdang and T. Wongcharoen "Electrical Properties of Al-Doped CdO films Prepared by Thermal Evaporation in Vacuum" *Energy Procedia*, vol. 15, 2012, pp. 361-370.

ผู้ร่วมวิจัย

ชื่อ-นามสกุล งามนิตย์ วงษ์เจริญ

ตำแหน่งปัจจุบัน รองศาสตราจารย์ ระดับ 9

ประวัติการศึกษา

ปีที่จบการศึกษา	ระดับปริญญา	อักษรย่อปริญญา	สาขาวิชา	ชื่อสถาบันการศึกษา
2526	ปริญญาตรี	วท.บ.	ฟิสิกส์	มหาวิทยาลัยศิลปากร จ.นครปฐม
2531	ปริญญาโท	วท.ม.	ฟิสิกส์ (ฟิสิกส์ของแข็ง)	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ

สาขาวิจัยที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา)

ฟิสิกส์ของแข็ง ฟิสิกส์ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ)

1. T. Gaewdang and Ng. Wongcharoen “Heterojunction Properties of p-CuO/n-CdS Diode” Advanced Materials Research, Vol. 1098, 2015, pp. 1-5.
2. Ng. Wongcharoen and T. Gaewdang “Effect of Oxidation Temperature on the Properties of CuO Thin Films Prepared by Thermal Oxidation of Sputtered Cu Thin Films” Advanced Materials Research, Vol. 1098, 2015, pp. 6-11.
3. T. Gaewdang and Ng. Wongcharoen “Electrical Parameters and Conduction Mechanisms in CdS/CuO Thin Film Heterojunction” International Symposium on Fundamental and Applied Sciences (ISFAS) March, 2015, Osaka, Japan, Proceedings, pp. 858-865.
4. Ng. Wongcharoen and T. Gaewdang “Preparation and Characterization of Copper Oxide Thin Films Prepared by Oxidation of Thermally Evaporated Cu Thin Films” International Symposium on Fundamental and Applied Sciences (ISFAS) March, 2015, Osaka, Japan, Proceedings, pp. 866-873.
5. Ng. Wongcharoen and T. Gaewdang “Influence of Na Doping on the Thermoelectric Properties of CuAlO₂ Delafossite” Advanced Materials Research, Vol. 931-932 , 2014, pp. 127-131

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. T. Gaewdang and Ng. Wongcharoen “Electrical Conduction Mechanism in n-CdS/p-CuFeO₂ Heterojunction Diode” *Advanced Materials Research*, Vol. 931-932 , 2014, pp. 122-126.
7. Ng. Wongcharoen and T. Gaewdang “Electrical Characterization of n-CdS/p-CuCrO₂ Heterojunction” *Hong Kong International Conference on Engineering and Applied Science (HKICEAS) December 19-21, 2013, Hong Kong, Proceedings*, pp. 781-788.
8. T. Gaewdang and Ng. Wongcharoen “Influence of Annealing Temperature on Microstructure, Optical and Electrical Properties of Digenite Thin Films” *Hong Kong International Conference on Engineering and Applied Science (HKICEAS) December 19-21, 2013, Hong Kong, Proceedings*, pp. 774-780.
9. T. Gaewdang, Ng. Wongcharoen and T. Wongcharoen “Effect of Annealing Temperature on the Optical Parameters of CdS Thin Films Prepared by Thermal Evaporation Method” *Advanced Materials Research*, Vol. 747, 2013, pp. 329-332.
10. Ng. Wongcharoen, T. Gaewdang and T. Wongcharoen “Structural and Thermoelectric Properties of Zn-Doped Cuprous Aluminate Delafossite” *Advanced Materials Research*, Vol. 747, 2013, pp. 333-336.
11. Ng. Wongcharoen, T. Gaewdang and T. Wongcharoen “Determination of Gap State Density in n-CdS/p-CuAlO₂ Heterojunction” *Asian Conference on Civil, Material and Environmental Sciences (ACCMES) 2013, March 15-17, 2013, Tokyo, Japan, Proceedings*, pp. 2078-2088.
12. T. Gaewdang, Ng. Wongcharoen and T. Wongcharoen “Preparation and Characterization of CdS_xTe_{1-x} (0 ≤ x ≤ 1) Thin Films” *Asian Conference on Civil, Material and Environmental Sciences (ACCMES) 2013, March 15-17, 2013, Tokyo, Japan Proceedings*, pp. 2070-2077.
13. T. Gaewdang, Ng. Wongcharoen and T. Wongcharoen “Characterization of CdS/CdTe Heterojunction Solar Cell by Current- Voltage Measurements at Various Temperatures under Illumination”, *Energy Procedia*, vol. 15, 2012, pp. 299-304.
14. Ng. Wongcharoen, T. Gaewdang and T. Wongcharoen “Electrical Properties of Al-Doped CdO films Prepared by Thermal Evaporation in Vacuum” *Energy Procedia*, vol. 15, 2012, pp. 361-370.
15. T. Gaewdang, Ng. Wongcharoen, A. Nopparuchikun, T. Wongcharoen and C. Poo-Rakkiat “Fabrication and Characterization of Heterojunction of CdS Thin Films and CuAlO₂ Ceramic Pill Substrate” *Journal of Metals, Materials and Minerals*, vol. 22(2), 2012, pp. 125-129.

16. Ng. Wongcharoen and T. Gaewdang, "Thermoelectric Properties of Ni-Doped CuAlO₂" Physics Procedia, vol.2, 2009, pp.101-106.
17. Wongcharoen, T. Gaewdang, P. Siripuddhaiwon and N. Promros "Influence of Substrate Temperature on Some Properties of Close-Spacing Thermal Evaporated CdTe Thin Films" Advanced Materials Research, Vol. 55-57, 2008, pp.881-884.
18. T. Gaewdang and Ng. Wongcharoen "Optical and Electrical Properties of Chemical Bath Co-Deposited CdS-ZnS Thin Films" ISES Solar World Congress 2007, September 18- 21, 2007, Beijing, China, Proceedings, pp.1299-1302.
19. Ng. Wongcharoen and T. Gaewdang "Co-existence of F and Sb Dopant in Transparent Conducting SnO₂ Thin Films Prepared by Ultrasonic Spray Pyrolysis Method" ISES Solar World Congress 2007, September 18- 21, 2007. Beijing, China, Proceedings, pp.1269-1274.
20. T. Gaewdang and Ng. Wongcharoen "Growth and Characterization of Co-Doped Fluorine and Antimony in Tin Oxide Thin Films Obtained by Ultrasonic Spray Pyrolysis" Journal of Solid Mechanics and Material Engineering, Vol. 1, No. 4, 2007, pp.592-601. (ผู้วิจัยหลัก)
21. T. Gaewdang "Investigations on Chemically Deposited Cd_{1-x}Zn_xS Thin Films With Low Zn Content" Materials Letters, Vol.59, 2005 pp. 3577- 3584.
22. Ng. Wongcharoen and T. Gaewdang "Comparative Studies of Thermally Evaporated Cd_{1-x}Zn_xS Thin Films Prepared by Using Different Precursors" Technical Digest of the International PVSEC-15, 10-15 October 2005, Shanghai, RPC. pp.694- 695.
23. T. Gaewdang and Ng. Wongcharoen "Optical and Electrical Properties of B-Doped Cd_{0.6}Zn_{0.4}S Thin Films Prepared by Chemical Bath Deposition Method" Technical Digest of the International PVSEC-15, 10-15 October 2005, Shanghai, RPC. pp.696- 697.
24. Ng. Gaewdang and T. Gaewdang "Thickness Dependence of Structural, Optical and Electrical Properties of CdS and CdS:In Films Prepared by Thermal Evaporation" Technical Digest of the International PVSEC-14, Bangkok, Thailand. 2004, pp.581-582.
25. Ng. Gaewdang, T. Gaewdang and W. Lipar "Some Characterization of Chemical Bath Co-Deposited CdS- ZnS Thin Films" Technical Digest of the International PVSEC-14, Bangkok, Thailand. 2004, pp.583-584.

ผู้ร่วมวิจัย

ชื่อ-นามสกุล นางทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ

ตำแหน่งปัจจุบัน รองศาสตราจารย์

ประวัติการศึกษา

ปีที่จบการศึกษา	ระดับปริญญา	อักษรย่อปริญญา	สาขาวิชา	ชื่อสถาบันการศึกษา
2526	ปริญญาตรี	วท.บ.	ฟิสิกส์	มหาวิทยาลัยศิลปากร จ.นครปฐม
2529	ปริญญาโท	วท.ม.	คณิตศาสตร์ ประยุกต์	มหาวิทยาลัยมหิดล กรุงเทพฯ
2538	ปริญญาเอก	Ph.D.	วิศวกรรมไฟฟ้า	City University London, U.K.

สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา)

ฟิสิกส์ของแข็ง ฟิสิกส์สารกึ่งตัวนำ

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ)

1. T. Gaewdang, Ng. Wongcharoen and T. Wongcharoen "Effect of Annealing Temperature on the Optical Parameters of CdS Thin Films Prepared by Thermal Evaporation Method" Advanced Materials Research, Vol. 747, 2013, pp. 329-332.
2. Ng. Wongcharoen, T. Gaewdang and T. Wongcharoen "Structural and Thermoelectric Properties of Zn-Doped Cuprous Aluminate Delafossite" Advanced Materials Research, Vol. 747, 2013, pp. 333-336.
3. Ng. Wongcharoen, T. Gaewdang and T. Wongcharoen "Determination of Gap State Density in n-CdS/p-CuAlO₂ Heterojunction" Asian Conference on Civil, Material and Environmental Sciences (ACCMES) 2013, March 15-17, 2013, Tokyo, Japan, Proceedings, pp. 2078-2088.
4. T. Gaewdang, Ng. Wongcharoen and T. Wongcharoen "Preparation and Characterization of CdS_xTe_{1-x} (0 ≤ x ≤ 1) Thin Films" Asian Conference on Civil, Material and Environmental Sciences (ACCMES) 2013, March 15-17, 2013, Tokyo, Japan, Proceedings, pp. 2070-2077.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. T. Gaewdang, Ng. Wongcharoen and T. Wongcharoen “Characterization of CdS/CdTe Heterojunction Solar Cell by Current- Voltage Measurements at Various Temperatures under Illumination”, Energy Procedia, vol. 15, 2012, pp. 299-304.
6. Ng. Wongcharoen, T. Gaewdang and T. Wongcharoen “Electrical Properties of Al-Doped CdO films Prepared by Thermal Evaporation in Vacuum” Energy Procedia, vol. 15, 2012, pp. 361-370.
7. Ng. Wongcharoen, T. Gaewdang, C. Thaisatuen, W. Bunkua, A. Ariyaratand and T. Woncharoen “Optical and Electrical Properties of CdTe Thin Films with Different Thicknesses” Proceeding of the 6th Annual Conference of The Thai Physics Society (SPC2011), March 23-26, 2011, Ambassador City Jomtien Hotel, Pataya, Thailand, pp. 352-356.
8. T. Gaewdang, Ng. Wongcharoen, W. Bunkua, C. Thaisatuen, T. Wongcharoen and C. Poo-Rakkiat “Effect of Ramp Time of Close Spaced Sublimation on Physical Properties of CdTe Thin Films” Proceeding of the 6th Annual Conference of The Thai Physics Society (SPC2011), March 23-26, 2011, Ambassador City Jomtien Hotel, Pataya, Thailand, pp. 349-351.
9. Ng. Wongcharoen, T. Wongcharoen, C. Poo-Rakkiat and T. Gaewdang “Structural and Optical Studies of Chemical Bath Deposited Cd_{1-x}Zn_xS Thin Films” The 27th Congress on Science and Technology of Thailand, Proceeding, 24-26 October 2001, pp. 200.
10. Ng. Wongcharoen, T. Wongcharoen and T. Gaewdang “Preparation and Characterization of Cadmium Sulfide Thin Films”, The 25th Congress on Science and Technology of Thailand, 1999, pp. 546-547.

ผู้ร่วมวิจัย

ชื่อ-นามสกุล นายชัยสิงห์ ภูร์เกษ์เกียรติ

ตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์

ประวัติการศึกษา

ปีที่ยับการศึกษา	ระดับปริญญา	อักษรย่อปริญญา	สาขาวิชา	ชื่อสถาบันการศึกษา
2522	ปริญญาตรี	วท.บ.	ฟิสิกส์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ
2525	ปริญญาโท	วท.ม.	ฟิสิกส์ (ทฤษฎี)	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ
2532	ปริญญาเอก	Ph.D.	ฟิสิกส์นิวเคลียร์	Notre Dame University, U.S.A.

สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา)

ฟิสิกส์ของแข็ง ฟิสิกส์สารกึ่งตัวนำ

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ)

1. T. Khantayaporn, Ng. Wongcharoen, T. Gaewdang and C. Poo-Rakkiat "Structural and Optical Properties of CdS_xTe_{1-x} Thin Films Prepared by Thermal Evaporation Method" The 40th Congress on Science and Technology of Thailand (STT40), December 2-4, 2014, Khon Kaen, Thailand, pp. 71-78. (ผู้ร่วมวิจัย)
2. Gaewdang, Ng. Wongcharoen, A. Nopparachikun, T. Wongcharoen and C. Poo-Rakkiat "Fabrication and Characterization of Heterojunction for CdS Thin Films and $CuAlO_2$ Ceramic Pill Substrate" Journal of Metals, Materials and Minerals, Vol. 22 No. 2, 2012, pp.125-129. (ผู้ร่วมวิจัย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. T. Gaewdang, Ng. Wongcharoen, W. Bunkua, C. Thaisatuen, T. Wongcharoen and C. Poo-Rakkiat "Effect of Ramp Time of Close Spaced Sublimation on Physical Properties of CdTe Thin Films" Proceeding of the 6th Annual Conference of The Thai Physics Society (SPC2011), March 23-26, 2011, Ambassador City Jomtien Hotel, Pataya, Thailand, pp. 349-351. (ผู้ร่วมวิจัย)
4. Ng. Wongcharoen, T. Gaewdang, J. Wattananurak and C. Poo-Rakkiat "Structural and Electrical Properties of Ni-Doped CuAlO₂" International Conference on Engineering, Applied Science and Technology (ICEAST 2007), November 21-23, 2007, Bangkok, Thailand, Proceedings, pp.885-888. (ผู้ร่วมวิจัย)
5. Ng. Gaewdang, T. Wongcharoen, C. Poo-Rakkiat and T. Gaewdang "Structural and Optical Studies of Chemical Bath Deposited Cd_{1-x}Zn_xS Thin Films" The 27th Congress on Science and Technology of Thailand, Proceeding, 24-26 October 2001, pp. 200. (ผู้ร่วมวิจัย)
6. Ng. Gaewdang, T. Wongcharoen, C. Poo-Rakkiat and T. Gaewdang, "Crystalline Bulk Growth of Cadmium Sulfide", The 23rd Congress on Science and Technology of Thailand. 1997, pp. 172-173. (ผู้ร่วมวิจัย).
7. Ng. Wongchareon, C. Poo-Rakkiat, T. Wongcharoen and T. Gaewdang "Influence of Germanium on Some Properties of Indium Oxide Compounds" The 22nd Congress on Science and Technology of Thailand, 1996, pp. 142-143. (ผู้ร่วมวิจัย)
8. Ng. Wongchareon, C. Poo-Rakkiat, T. Wongcharoen, and T. Gaewdang, "The Influence of Tin on the Electrical Resistivity of Indium Oxide Ceramic Samples" The 21st Congress on Science and Technology of Thailand, 25-27 October (1995), pp. 200-201 (ผู้ร่วมวิจัย)

