



## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การประดิษฐ์ฟิล์มบางแคดเมียมซีลีไนด์เจือด้วยอะตอมอินเดียมโดยวิธีระเหิดสารเคมี  
ด้วยความร้อนในระยะประชิดเพื่อประยุกต์ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์

Preparation of In Doped- CdSe Thin Films by Close Spaced  
Sublimation Method for Solar Cell Application

นางงามนิตย์ วงษ์เจริญ

นายฐิตินัย แก้วแดง

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัย

จากงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การประดิษฐ์ฟิล์มบางแคดเมียมซีลีไนด์เจือด้วยอะตอมอินเดียมโดยวิธีระเหิดสารเคมี  
ด้วยความร้อนในระยะประชิดเพื่อประยุกต์ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์

Preparation of In Doped- CdSe Thin Films by Close Spaced  
Sublimation Method for Solar Cell Application

นางงามนิത്യ วงษ์เจริญ

นายจตุตินัย แก้วแดง

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัย

จากงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2559

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สาขา.....

เลขทะเบียน 145203

วันเดือนปี 31 ส.ค. 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การประดิษฐ์ฟิล์มบางแคดเมียมซีลีไนด์เจือด้วยอะตอมอินเดียมโดยวิธีระเหิด  
สารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดเพื่อประยุกต์ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์

แหล่งเงิน งบประมาณเงินรายได้

ประจำปีงบประมาณ 2559 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 50,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2558 ถึง 30 กันยายน 2559

หัวหน้าโครงการวิจัย

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

ผู้ร่วมโครงการวิจัย

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

### บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิของสารตั้งต้นและอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 650 และ 590 องศาเซลเซียสตามลำดับ โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำทุกค่าของเศษส่วนโดยโมลอะตอม ( $x$ ) เป็นแบบเฮกซะโกนัล จากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงขนาดเกรนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำมีลักษณะโตขึ้นตามเศษส่วนโดยโมลอะตอม ( $x$ ) ที่เพิ่มขึ้น ขนาดของช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางเพิ่มขึ้นจาก 1.71 เป็น 1.78 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามเศษส่วนโดยโมลอะตอม ( $x$ ) ที่เพิ่มขึ้นจาก  $x=0$  ถึง  $x=0.05$  จากการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำโดยการวัดปรากฏการณ์ของฮอลล์ และวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพอร์ สภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำลดลงจาก  $2.88 \times 10^3$  เป็น  $1.50 \times 10^3$  โอห์ม-เซนติเมตร ตามสัดส่วนโดยโมลอะตอม ( $x$ ) ที่เพิ่มขึ้นจาก  $x=0$  ถึง  $x=0.05$  สำหรับสภาพคล่องฮอลล์มีค่ามากที่สุดที่  $x=0.01$  หลังจากนั้นจะมีค่าลดลงตามเศษส่วนโดยโมลอะตอม ( $x$ ) ที่เพิ่มขึ้น ส่วนความหนาแน่นของพาหะในช่วงแรกมีค่าเพิ่มขึ้นตามเศษส่วนโดยโมลอะตอม ( $x$ ) ที่เพิ่มขึ้นโดยมีค่าสูงสุดที่  $x=0.04$  และหลังจากนั้นจะมีค่าลดลงตามเศษส่วนโดยโมลอะตอม ( $x$ ) ที่เพิ่มขึ้น สภาพนำไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CdSe}$  ในช่วง 190 และ 300 เคลวิน สามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองของซีโต ส่วนสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำกว่า 190 เคลวิน จะอธิบายด้วยแบบจำลองของการกระโดดระหว่างสถานะพลังงานท้องถิ่นในระยะไม่คงที่

**คำสำคัญ:** ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  วิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด กลไกการกระโดดระหว่างสถานะพลังงานท้องถิ่นในระยะไม่คงที่ ปรากฏการณ์ของฮอลล์

**Research Title:** Preparation of In doped- CdSe Thin Films by Close Spaced Sublimation Method for Solar Cell Application

**Researcher:** Mr. Thitinai Gaewdang and Mrs. Ngamnit Wongcharoen

**Faculty:** Science **Department:** Physics

### ABSTRACT

In this research,  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) thin films have been prepared on slide glass substrate by close spaced sublimation method. The source and glass substrate temperatures were fixed at 650 and 590°C, respectively. The crystal structure of the whole compositions is belong to hexagonal system. From SEM micrographs, grain size of the thin films increases with increasing mole fraction  $x$  values. A blue shift in the energy gap of the thin films has been observed. The energy gap widens from 1.71 to 1.78 eV with the mole fraction  $x$  increases from  $x=0$  to  $x=0.05$ . Electrical properties of the thin films were evaluated by Hall effect and resistivity measurements in the van der Pauw configuration. Resistivity of the films decreases from  $2.88 \times 10^3$  to  $1.50 \times 10^3 \Omega\text{-cm}$  with the mole fraction  $x$  increasing from 0 to 0.05. Maximum value of Hall mobility at  $x=0.01$  is  $531.22 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$  and then decreases with an increase in mole fraction  $x$ . The temperature dependence of electrical conductivity in CdSe thin films between 190 and 300 K was interpreted in terms of Seto's model. The conductivity at lower temperature ( $< 190 \text{ K}$ ) is well described by Mott's variable range hopping model (VRH).

**Keywords:**  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  thin films, Close spaced sublimation method, Hall effect, VRH model

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์คณะวิทยาศาสตร์ ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์และการแนะนำในการใช้เครื่อง ยูวี-วิสซิเบิล แบบดับเบิลบีม สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Thermo electron corporation รุ่น Helios  $\alpha$  ที่ใช้ในการศึกษาคุณสมบัติเชิงแสงโดยการวัดการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางในช่วงความยาวคลื่นอัลตราไวโอเล็ตไปจนถึงย่านอินฟราเรด (ความยาวคลื่น 190 – 1100 nm) และเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟร็กโทรมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance ซึ่งรังสีเอ็กซ์มีความยาวคลื่นในย่าน  $\text{Cu}_{K\alpha}$  1.5406 Å ในการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคและกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM - 6400 ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบาง

ขอขอบคุณ นางสาวราตรี ภู่ออด นางสาวสุนิสา อุดมมาลี นายณพนธ์ เดชะคำภู และนางสาว ชนิภรณ์ จุไรสง นักศึกษาของห้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุโฟโตนิกส์ สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือในการเก็บข้อมูลของการทดลองและช่วยทำรูปเล่มรายงานจนเสร็จสมบูรณ์

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากเงินงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2559 จึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้

นางงามนิตย์ วงษ์เจริญ  
นายฐิตินัย แก้วแดง

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเรื่องของลักษณะของโครงสร้างผลึก	5
2.1.1 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ	5
2.1.2 โครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซต์	9
2.1.3 ข้อบกพร่องผลึก	10
2.1.3.1 ข้อบกพร่องผลึกแบบจุด	10
2.1.3.2 ข้อบกพร่องผลึกแบบเชิงเส้น	11
2.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์	12
2.3 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	13
2.4 สมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ	14
2.4.1 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน	15
2.4.2 สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง	18
2.4.3 การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ	19
2.4.4 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง	19
2.4.5 ส่วนหางของแถบพลังงาน	22
2.4.6 ฟูเรียร์แทรนส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี	23
2.5 สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง	26
2.5.1 สมบัติการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ	27
2.5.1.1 สารกึ่งตัวนำอินทรีนสิก	27
2.5.1.2 สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็กซ์ทรีนสิก	29
2.6 สภาพนำไฟฟ้า	33
2.7 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า	34
2.7.1 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง	34

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7.2 การวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิค แวนเดอร์เพาว์	35
2.8 ปราบกฎการณัฮอลล์	37
2.8.1 การศึกษาปราบกฎการณัฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์	41
2.9 กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในฟิล์มบางที่อุณหภูมิต่างๆ	44
2.9.1 กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในฟิล์มบางในช่วงอุณหภูมิสูง	45
2.9.2 กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในฟิล์มบางในช่วงอุณหภูมิต่ำปานกลาง	47
2.9.3 การนำไฟฟ้าของพาหะแบบกระโดดในระยะไม่คงที่	50
2.10 สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงคือร้อน	52
2.10.1 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะในช่วงกระแสโฟโตชาลง	59
2.10.2 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะในช่วงกระแสขาขึ้น	60
2.11 การระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	61
2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	63
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	70
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัย	70
3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เพื่อใช้ เตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่ เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการ ระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	70
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	70
3.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค	71
3.1.4 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค	71
3.1.5 เครื่องมือที่ใช้ศึกษาสมบัติทางแสง	71
3.1.6 เครื่องมือที่ใช้ในการวัดสมบัติทางไฟฟ้า.	71
3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการ ระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	71
3.2.1 การเตรียมและทำความสะอาดแผ่นกระจกสไลด์เพื่อเป็นฐานรองรับ	71
3.2.2 การเตรียมและทำความสะอาดระบบระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนใน ระยะประชิด	72
3.2.3 การเตรียมสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่มีองค์ประกอบต่างกัน	72

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.4 การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	74
3.3 การศึกษาสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบางของสารกึ่ง $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	76
3.3.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค	76
3.3.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค	76
3.3.3 การศึกษาสมบัติทางแสง	76
3.3.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า	77
3.3.4.1 การวัดค่าความต้านทานแผ่นด้วยวิธีสองขั้ว	77
3.3.4.2 การศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์	78
3.3.4.3 การศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์	80
บทที่ 4 ผลการวิจัย	81
4.1 ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	81
4.2 ผลการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์พื้นฐานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	83
4.2.1 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	83
4.2.2 ผลการศึกษาภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	88
4.2.3 ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ของบริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)$ เมื่อ $x = 0.05$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	89

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.4 ผลการศึกษาสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	91
4.2.4.1 ผลการศึกษาฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	96
4.2.5 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	100
4.2.5.1 ผลการคำนวณหาค่าความต้านทานไฟฟ้า ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	100
4.2.5.2 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า และ ปฏิกิริยาการสลายตัวของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	101
4.2.5.3 ผลการศึกษาค่าความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdSe}$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	104
4.2.5.4 การศึกษาค่าความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้องของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdSe}$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	110
4.2.5.5 ผลการศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงที่ร้อนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdSe}$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	111

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	115
5.1 สรุปผลการวิจัย	115
5.2 ข้อเสนอแนะ	116
บทที่ 6 สรุปผลผลิตงานวิจัย	117
6.1 สรุปรายชื่อและรายละเอียดผลผลิตงานวิจัยที่ผลิตได้	117
6.2 ชื่อบทความวิจัยที่อยู่ระหว่างการดำเนินการ	133
เอกสารอ้างอิง	143
ภาคผนวก	148
ภาคผนวก ก	149
สรุปค่าจ่ายการดำเนินงานโครงการวิจัย	150
ข้อมูลประวัติคณະนักวิจัย	152



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงพารามิเตอร์ของหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ	6
2.2 แสดงระบบผลึกทั้งเจ็ดแบบในระบบสามมิติ	7
2.3 แสดงความสัมพันธ์ของดัชนีมิลเลอร์ (hkl) และจุดตัดแกนผลึก (x,y,z)	9
2.4 แสดงค่าเลขคลื่นต่างๆของพลังงานที่ได้จากการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ	25
3.1 แสดงปริมาณสารตั้งต้นของผลึกของสารประกอบ CdSe และ $\text{In}_2\text{S}_3$ และ อุณหภูมิที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdSe}_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	74
4.1 แสดงค่าคงที่โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdSe}_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	84
4.2 แสดงองค์ประกอบของธาตุต่างๆ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ เมื่อ $x = 0.05$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	91
4.3 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	93
4.4 แสดงค่าส่วนหางของแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	95
4.5 แสดงค่าเลขคลื่นของการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	99
4.6 แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	100

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.7 แสดงการศึกษา ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า และ ปรากฏการณ์ฮอลล์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	103
4.8 แสดงความไวในการตอบสนองต่อแสง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	112
4.9 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่สำคัญที่ได้จากการศึกษาปรากฏการณ์เชิงแสงดื้อรั้น ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	114



## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 แสดงแผนภาพแถบพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง TC/CdSe/ZnTe/Cu	2
2.1 แสดงหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ	5
2.2 แสดงการบอกชื่อระนาบต่างๆของผลึก	8
2.3 แสดงโครงสร้างแบบเวอร์ทไซท์ของผลึกแคดเมียมซีลีไนด์	10
2.4 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบจุดชนิดต่างๆ	11
2.5 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชันแบบขอบและดิสโลเคชันแบบสกรู	11
2.6 แสดงเกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน	12
2.7 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์	13
2.8 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	14
2.9 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานอย่างง่าย	15
ก. ฉนวน	ง. สารกึ่งตัวนำชนิดพี
ข. สารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์	จ. โลหะ
ค. สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น	ฉ. สารกึ่งโลหะ
2.10 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานและการย้ายสถานะของพลังงานอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ( $T = 0$ เคลวิน)	17
ก. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง	
ข. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง	
2.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ( $T = 0$ เคลวิน)	17
ก. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง	
ข. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงในกรณีที่เกิดกระบวนการสร้างโฟนอน	
2.12 แสดงแผนภาพเมื่อแสงตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มบาง	18
2.13 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง กับ พลังงานโฟตอน	20
2.14 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง กับ ค่าพลังงานโฟตอนหรือค่าความยาวคลื่นของพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำ	21
2.15 แสดงส่วนหางของแถบพลังงานซึ่งมีทั้งส่วนหางของแถบวาเลนซ์และส่วนหางของแถบนำ	22
2.16 แสดงสเปกตรัมอินฟราเรด สเปกตรัมของ 2-pentanone	23
2.17 แสดงรูปแบบการสั่นของพันธะเคมีระหว่างไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้าของสารอินทรีย์	24
2.18 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นกับส่วนกลับของอุณหภูมิ	30
2.19 แสดงการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง	35
2.20 แสดงตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชั้นสารตัวอย่างเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์	36

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.21 แสดงการต่อขั้วเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์	36
2.22 แสดงแผนภาพการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์บนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำชนิดพี	38
2.23 แสดงการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์บนสารตัวอย่างที่เป็นแผ่นบางที่มีรูปทรงใดๆ	42
2.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ ( $V_H$ ) กับ ค่ากระแสไฟฟ้า ( $I$ )	43
2.25 แสดงแบบจำลองของฟิล์มบางตรงบริเวณรอยต่อขอบของเกรนดังนี้ คือ ก. ลักษณะของเกรนในผลึกพหุพันธ์ ข. การกระจายของประจุในเนื้อเกรนและที่ขอบของเกรน ค. โครงสร้างแถบพลังงานของผลึกพหุพันธ์ในเนื้อเกรนและที่ขอบของเกรน	45
2.26 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln \sigma$ กับ $\frac{1,000}{T}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่อุณหภูมิในช่วง 125-365 เคลวิน สำหรับในรูปแทรกคือกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln \sigma T^{-1}$ กับ $\frac{1,000}{T}$	49
2.27 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln \sigma T^{\frac{1}{2}}$ กับ $\frac{1,000}{T}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO สำหรับในรูปแทรกกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln \sigma T^{\frac{1}{2}}$ กับ $\frac{1}{T^{\frac{1}{4}}}$	49
2.28 แสดงระดับพลังงานของกักตักพาหะชนิดจับอิเล็กตรอน ( $E_c$ ) และ กักตักพาหะชนิดจับโฮล ( $E_h$ ) ที่ปรากฏในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ จุดที่บและจุดปริงจะแสดงถึงอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ	53
2.29 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสโฟโตชาขึ้น กับ ค่ากระแสโฟโตชาลงของค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง दौरान	56
2.30 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ $t$ ของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง दौरान ทั้งช่วงกระแสโฟโตชาขึ้นและช่วงกระแสโฟโตชาลง	56
2.31 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ $t$ เพื่อใช้คำนวณหา ค่าความหนาแน่นของกักตักพาหะในช่วงกระแสโฟโตชาลง	59
2.32 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ $t$ เพื่อใช้คำนวณหา ค่าความหนาแน่นของกักตักพาหะในช่วงกระแสโฟโตชาขึ้น	60
2.33 แสดงพีคความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของการฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:Sb (x=0%, 0.5%, 1%, 2.5%)	64
2.34 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Sb	64

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
2.35 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Sb	65
2.36 แสดงสเปกตรัม FTIR ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Sb	65
2.37 แสดงสเปกตรัม FTIR ของผลึกนาโนของสารกึ่งตัวนำ CdSe	66
2.38 แสดงสเปกตรัมของพีคความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับค่าต่างๆ	67
2.39 แสดงภาพถ่ายที่บริเวณผิวหน้าด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับค่าต่างๆ	67
2.40 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับค่าต่างๆ	68
2.41 แสดงค่าสภาพคล่องของพาหะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe ที่อุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับค่าต่างๆ	68
2.42 แสดงค่าความเข้มข้นของพาหะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe ที่อุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับค่าต่างๆ	69
3.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าอุณหภูมิ กับ เวลาที่ใช้ ในการประดิษฐ์ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	75
3.2 แสดงระบบการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	76
3.3 แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า (I) และ ศักย์ไฟฟ้า (V) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ	77
3.4 แสดงวิธีทำขั้วไฟฟ้าสำหรับการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์	78
3.5 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า ( $I_{12}$ ) กับ ศักย์ไฟฟ้า ( $V_{43}$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ	78
3.6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า ( $I_{23}$ ) กับ ศักย์ไฟฟ้า ( $V_{14}$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ	79
3.7 แสดงวิธีการต่อขั้วไฟฟ้าเพื่อศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์	80
3.8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ศักย์ไฟฟ้า ค่าศักย์ไฟฟ้า ( $V_H$ ) กับ กระแสไฟฟ้า (I) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ	80
4.1 แสดงผลึกของสารตั้งต้นที่ใช้สำหรับเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	82

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.2 แสดงภาพถ่ายของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	83
4.3 แสดงพีคความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	83
4.4 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าคงที่โครงสร้าง $a$ และ $c$ กับ เศษส่วนโดยโมลอะตอม ( $x$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	85
4.5 แสดงกราฟที่ใช้คำนวณหา ค่าขนาดเกรน กับ ค่าความเครียด ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ( $0.01 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	86
4.6 แสดงภาพถ่าย SEM ของบริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	88
4.7 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าขนาดเกรน กับ เศษส่วนโดยโมลอะตอม ( $x$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	89
4.8 แสดงภาพถ่าย SEM ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ เมื่อ $x = 0.05$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	90
4.9 แสดงสเปกตรัม EDS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ เมื่อ $x = 0.05$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	90
4.10 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง กับ ความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	91

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.11 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $(\alpha hv)^2$ กับ $hv$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdSe)_{1-x}(In_2S_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	92
4.12 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) กับ เศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdSe)_{1-x}(In_2S_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	93
4.13 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln \alpha$ กับ $hv$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdSe)_{1-x}(In_2S_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	94
4.14 แสดงสเปกตรัม FTIR ในช่วงเลขคลื่น 400-700 ต่อเซนติเมตร ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdSe)_{1-x}(In_2S_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	96
4.15 แสดงสเปกตรัม FTIR ในช่วงเลขคลื่น 700-900 ต่อเซนติเมตร ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdSe)_{1-x}(In_2S_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	97
4.16 แสดงสเปกตรัม FTIR ในช่วงเลขคลื่น 2000-3500 ต่อเซนติเมตร ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdSe)_{1-x}(In_2S_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	98
4.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต้านทานแผ่น กับ เศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdSe)_{1-x}(In_2S_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	101
4.18 แสดงการหา ค่าความต้านทานไฟฟ้า ( $R_1$ ) ด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdSe)_{1-x}(In_2S_3)_x$ เมื่อ $x=0.03$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	101
4.19 แสดงการหา ค่าความต้านทานไฟฟ้า ( $R_2$ ) ด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdSe)_{1-x}(In_2S_3)_x$ เมื่อ $x=0.03$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	102

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.20 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ ( $V_H$ ) กับ ค่ากระแสไฟฟ้า ( $I_{13}$ ) ของฟิล์มบางสารของกึ่งตัวนำ $(CdSe)_{1-x}(In_2S_3)_x$ เมื่อ $x=0.03$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	102
4.21 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอน และ ค่าสภาพคล่องของพาหะ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdSe)_{1-x}(In_2S_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	103
4.22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln \sigma$ กับ $\frac{1000}{T}$ , ค่า $\ln \sigma T^{\frac{1}{2}}$ กับ $\frac{1000}{T}$ และ ค่า $\ln \sigma T^{\frac{1}{2}}$ กับ $T^{-\frac{1}{4}}$ ตามลำดับ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	104
4.23 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln \left( \frac{R_0}{R} \right)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	110
4.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสโฟโต กับ เวลา ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	111
4.25 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ เวลา ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	113
4.26 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสฮอลล์มีลไลซ์ซาลง กับ เวลา ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	114

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

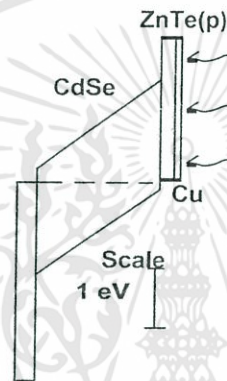
เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยอาศัยปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก ซึ่งค้นพบครั้งแรกโดยเบคเคอเรล ในปี ค.ศ. 1839 (Moller, 1993) จากการศึกษาสมบัติของของแข็งที่อยู่ภายในสารละลายอิเล็กโตรไลต์ขณะมีการฉายแสงอาทิตย์ลงบนตัวเซลล์จะปรากฏมีความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าขึ้นที่ขั้วไฟฟ้า พลังงานจากแสงอาทิตย์ก็เป็นทางเลือกอีกทางหนึ่ง เนื่องจากเป็นพลังงานทดแทนที่สะอาดไม่สร้างมลภาวะขณะใช้งานและยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์ชนิดหนึ่งที่สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง เซลล์แสงอาทิตย์มีอายุการใช้งานมากกว่า 20 ปี ดังนั้นเซลล์แสงอาทิตย์จึงเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่มีต้นทุนต่ำ ใช้ได้ในระยะยาวนาน งานวิจัยและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์จากสารกึ่งตัวนำในกลุ่ม II-VI และ I-III-V<sub>2</sub> เช่น CdTe, CdS, CuInSe<sub>2</sub> และ CuInGaSe<sub>2</sub> ได้มีการวิจัยกันอย่างกว้างขวางทั้งในประเทศสหรัฐอเมริกา ยุโรป และ ญี่ปุ่น เป็นต้น

สารกึ่งตัวนำ CdSe เป็นสารประกอบในกลุ่ม II-VI จะมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบคิวบิก หรือเฮกซะโกนัลขึ้นอยู่กับการเตรียมผลึก โดยส่วนใหญ่ชนิดการนำไฟฟ้าเป็นชนิดเอ็น (n-type) แต่บางครั้งก็พบว่าเป็นชนิดพี (p-type) การเจือด้วยอะตอมธาตุหมู่ III เช่น Al, B, Ga และ In จะช่วยให้สภาพการนำไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นและ/หรือทำให้ช่องว่างแถบพลังงานมีค่าเพิ่มขึ้น ดังเช่นฟิล์มบาง ZnO และ Zn<sub>1-x</sub>Mg<sub>x</sub>O ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Al ช่องว่างแถบพลังงานจะเพิ่มขึ้นจาก 3.30 เป็น 3.70 อิเล็กตรอนโวลต์ (Lu et al., 2007; Kim et al., 2010; Ziabari and Rozati, 2012; Lu et al., 2006) ซึ่งสามารถที่จะประดิษฐ์เป็นแอลอีดีย่านแสงอัลตราไวโอเล็ต โดยการแปลงแสงจากเอ็กซิตอนที่อุณหภูมิห้อง ดังนั้นจึงน่าสนใจที่จะประดิษฐ์ฟิล์มบาง CdSe เจือด้วยอะตอมของธาตุ In เพื่อให้มีสภาพนำไฟฟ้าสูงขึ้นและช่องว่างแถบพลังงานกว้างขึ้นซึ่งจะช่วยให้ฟิล์มบาง CdSe โปร่งแสงมากยิ่งขึ้นซึ่งเหมาะสมที่จะนำไปประดิษฐ์เป็นสิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์

เมื่อไม่นานมานี้ ได้มีการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe กันอย่างกว้างขวาง เนื่องจาก CdSe เป็นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับประดิษฐ์เป็นสิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเคมีไฟฟ้า-แสง (photo-electrochemical solar cells) ตัวตรวจจับแสง (photo-detector) ตัวตรวจจับแก๊ส (gas detectors) ทรานซิสเตอร์ชนิดฟิล์มบาง (thin film transistors) ตัวตรวจจับรังสีแกมมา (gamma ray detector) และแอลอีดี (Gnatenko et al., 2014; Velumani et al., 2004) เป็นต้น อีกทั้งฟิล์มบาง CdSe ยังสามารถประยุกต์เป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแทนเด็ม (Gnatenko et al., 2014; Mahawela et al., 2003; Mahawela et al., 2005) เนื่องจาก CdSe มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงสูง และมีช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 1.7 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งเหมาะสมที่จะนำไปประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงได้

จากการจำลองแบบในเชิงทฤษฎีพบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดแทนเด็มที่มีโครงสร้างแบบฟิล์มบางสี่ขั้ว (four terminal thin film tandem structures) สามารถที่จะประดิษฐ์ให้มีประสิทธิภาพได้สูงถึงระดับ 25-30 % โดยให้ชั้นล่าง (bottom cells) เป็นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuInGaSe<sub>2</sub> ซึ่งมีช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 1.0 อิเล็กตรอนโวลต์ ส่วนเซลล์บน (top cell) เป็น CdSe ซึ่งมีช่องว่างแถบพลังงาน 1.7 อิเล็กตรอนโวลต์ (Gnatenko et al., 2014; Mahawela et al., 2005) เมื่อไม่นานมานี้ Mahawela

และเพื่อนร่วมงาน (Mahawela et al., 2005) ได้นำเสนอสิ่งประดิษฐ์ที่มีโครงสร้างแถบพลังงานดังภาพที่ 1.1 โดยโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้จะมีชั้นไฟฟ้าเป็นแบบโปร่งแสงทั้งด้านบนและด้านล่าง ความหนาของฟิล์มบาง CdS, ZnTe และ Cu จะมีค่าเท่ากับ 2 ไมโครเมตร, 20 นาโนเมตร และ 10 นาโนเมตร ตามลำดับ ชั้น TC ในที่นี้คือฟิล์มบางของ FTO ( $\text{SnO}_2:\text{F}$ ) ที่เคลือบอยู่บนกระจกสไลด์ และใช้ฟิล์มบาง Cu เป็นชั้นไฟฟ้าสำหรับฟิล์มบาง ZnTe ซึ่ง ZnTe มีชนิดการนำไฟฟ้าแบบพี (p-type) เซลล์แสงอาทิตย์ต้นแบบให้แรงดันวงจรเปิด ( $V_{oc}$ ) เท่ากับ 0.475 โวลต์ และกระแสลัดวงจร ( $I_{sc}$ ) เท่ากับ 17 มิลลิแอมแปร์/ตารางเซนติเมตร เพื่อที่จะให้ได้ประสิทธิภาพสูงถึง 16-18% ค่า  $V_{oc}$  ควรจะต้องสูงถึงระดับ 1 โวลต์ซึ่งต้องพัฒนาชั้นไฟฟ้าโปร่งแสงทั้งด้านบนและด้านล่างให้มีคุณภาพดีขึ้นโดยค่าความเร็วในการรวมตัวที่ผิวหน้า (surface recombination velocity) ให้มีค่าต่ำสุด



ภาพที่ 1.1 แสดงแผนภาพแถบพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง TC/CdSe/ZnTe/Cu

สิ่งสำคัญที่สุดต่อการประยุกต์ใช้ฟิล์มบาง CdSe ให้เป็นสิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ คือฟิล์มบาง CdSe ต้องมีสมบัติโปร่งแสงเพื่อให้การเปล่งแสงที่เกิดจากเอ็กซิตอน (excitonic emission) ในชั้นแอ็คทีฟลอดออกมาสู่ภายนอกได้ จากการทดลองพบว่าฟิล์มบาง CdSe ที่เคลือบบนแผ่นรองรับที่เป็นซิลิคอน (Si), ไทเทเนียม (Ti) และ แกลเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs) สามารถเปล่งแสงได้ดี แต่สำหรับฟิล์มบาง CdSe ที่เคลือบบนแผ่นรองรับแก้วควอทซ์หรือกระจกสไลด์จะไม่เปล่งแสงที่เกิดจากการเอ็กซิตอน [6] ล่าสุด Gnatenko และ เพื่อนร่วมงาน [6,8] ได้ทำการเตรียมฟิล์มบาง CdSe เคลือบลงบนกระจกสไลด์โดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด สิ่งประดิษฐ์นี้สามารถเปล่งแสงได้ แสดงว่าฟิล์มบาง CdSe ที่เตรียมได้โดยวิธีนี้เป็นผลึกที่มีคุณภาพดี เกรนมีขนาดใหญ่ ข้อบกพร่องของผลึกน้อย

การสังเคราะห์ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ให้มีโครงสร้างในระดับไมโครเมตร หรือในระดับนาโนเมตร สามารถสังเคราะห์ได้หลากหลายวิธีทั้งทางเคมี และทางฟิสิกส์ เช่น วิธีการระเหิดด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ (vacuum evaporation) วิธีระเหิดด้วยลำไอเล็กตรอน และวิธีเคลือบด้วยไฟฟ้าในสารละลายเคมี วิธีพาไอระเหยสารเคมี (chemical vapor deposition) การพ่นเคลือบโดยละอองสารเคมี (spray pyrolysis) และวิธีสปัตเตอริง (sputtering) เป็นต้น แต่ละวิธีจะมีข้อเด่นและข้อด้อยแตกต่างกันไป การเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดเหมาะสำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีความดันไอสูงโดยเฉพาะสารกึ่งตัวนำซาลโคจีไนด์ ข้อดีของวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดนี้คืออัตราการเคลือบสูง ดังนั้นจึงใช้ระยะเวลาสั้นสำหรับการเตรียมฟิล์มบางฟิล์มบางแต่ละครั้ง สามารถควบคุมพารามิเตอร์ต่างๆ ในการเตรียมฟิล์มบางได้ดี อุณหภูมิในการเคลือบฟิล์มบางไม่สูงนัก ดังนั้นข้อบกพร่องผลึกจึงมีน้อย ฟิล์มบางที่เตรียมได้มีความเรียบสม่ำเสมอ ยึดติดแน่นกับแผ่นรองรับ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ดี และสามารถที่จะพัฒนาให้ฟิล์มบางมีขนาดใหญ่ได้ ด้วยเหตุนี้จึงเป็นที่น่าสนใจที่จะประดิษฐ์ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ In โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิดโดยการเลือกอุณหภูมิของสารตั้งต้นและอุณหภูมิแผ่นรองรับให้เหมาะสม จากนั้นจึงนำเอาฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปศึกษาโครงสร้างผลึกโดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ศึกษาลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบางโดยการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ศึกษาสมบัติทางแสงโดยวัดสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงที่ความยาวคลื่น 200 – 1000 นาโนเมตร ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าและปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยวิธี แวน เดอ เพาว์เพื่อให้ได้ฟิล์มบาง CdSe ที่มีสมบัติเหมาะสมที่จะประยุกต์ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เจือด้วยอะตอมของ ธาตุ In โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิด
- 1.2.2 เพื่อศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคและมหภาคของฟิล์มบางที่เตรียมได้
- 1.2.3 เพื่อศึกษาสมบัติทางแสงโดยวัดสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงเพื่อนำมาคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน
- 1.2.4 เพื่อศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางที่เตรียมได้โดยการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าและปรากฏการณ์ฮอลล์
- 1.2.5 เพื่อศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเชิงแสงของฟิล์มบางโดยการวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิดโดยทำการเจือด้วยอะตอมของ ธาตุ In ปริมาณ 1-5% โดยโมล
- 1.3.2 ตรวจสอบโครงสร้างผลึกโดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์
- 1.3.3 ถ่ายภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
- 1.3.4 ศึกษาสมบัติทางแสงโดยการวัดสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงเพื่อกำหนดหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน
- 1.3.5 ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าและปรากฏการณ์ฮอลล์
- 1.3.6 ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเชิงแสงโดยการวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา

## 1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

- 1.4.1 สืบค้นข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมฟิล์มบาง CdSe โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิด สมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติทางแสงของฟิล์มบางนี้
- 1.4.2 ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิดโดยทำการเจือด้วยอะตอมของ ธาตุ In ปริมาณ 1-5% โดยโมล
- 1.4.3 ตรวจสอบโครงสร้างผลึกโดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์
- 1.4.4 ศึกษาโครงสร้างผลึกของฟิล์มบาง CuO โดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์
- 1.4.5 ถ่ายภาพพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
- 1.4.6 ศึกษาสมบัติทางแสงโดยการวัดสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงเพื่อกำหนดหาค่าช่องว่าง

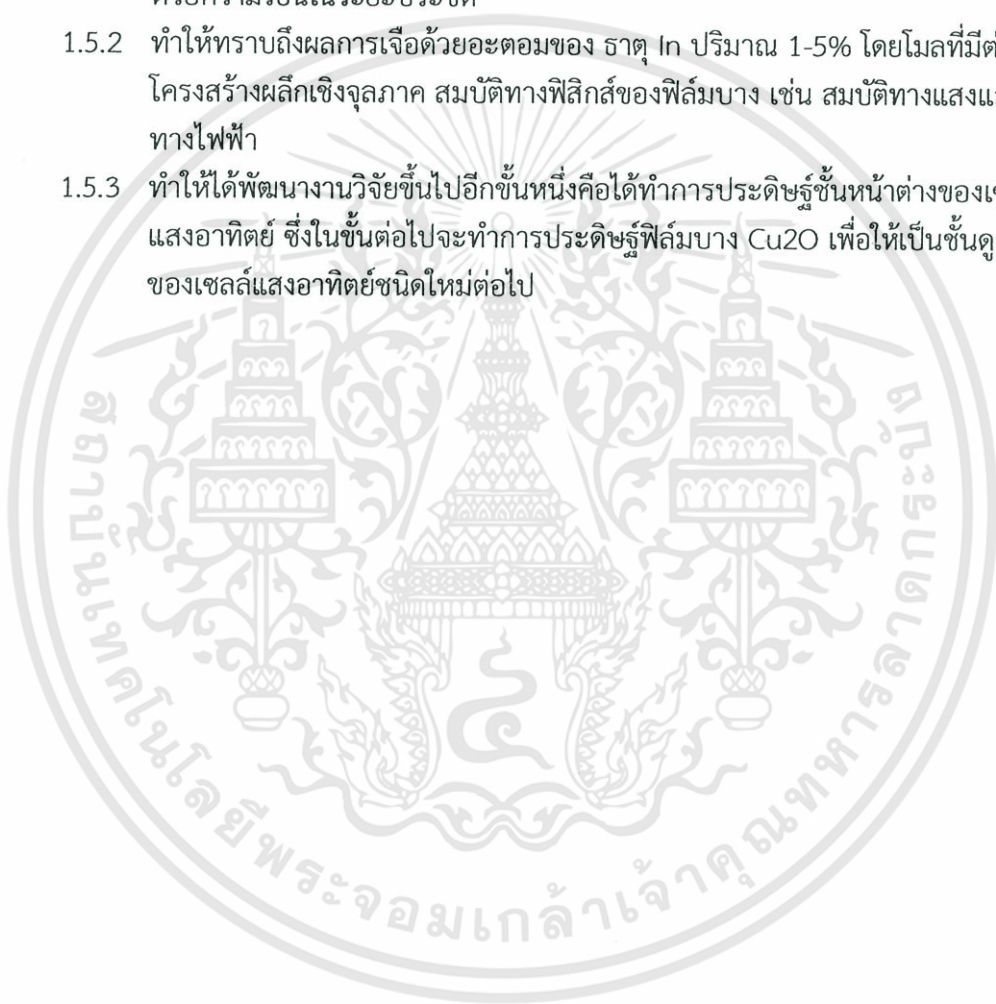
แถบพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.4.7 ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางที่เตรียมได้โดยการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าและปรากฏการณ์ฮอลล์
- 1.4.8 ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเชิงแสงโดยการวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา
- 1.4.9 วิเคราะห์และสรุปผล
- 1.4.10 เขียนรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ทำให้ทราบถึงวิธีการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด
- 1.5.2 ทำให้ทราบถึงผลการเจือด้วยอะตอมของ ธาตุ In ปริมาณ 1-5% โดยโมลที่มีต่อโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค สมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบาง เช่น สมบัติทางแสงและสมบัติทางไฟฟ้า
- 1.5.3 ทำให้ได้พัฒนางานวิจัยขึ้นไปอีกขั้นหนึ่งคือได้ทำการประดิษฐ์ชั้นหน้าต่างของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งในขั้นต่อไปจะทำการประดิษฐ์ฟิล์มบาง Cu<sub>2</sub>O เพื่อให้เป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดใหม่ต่อไป



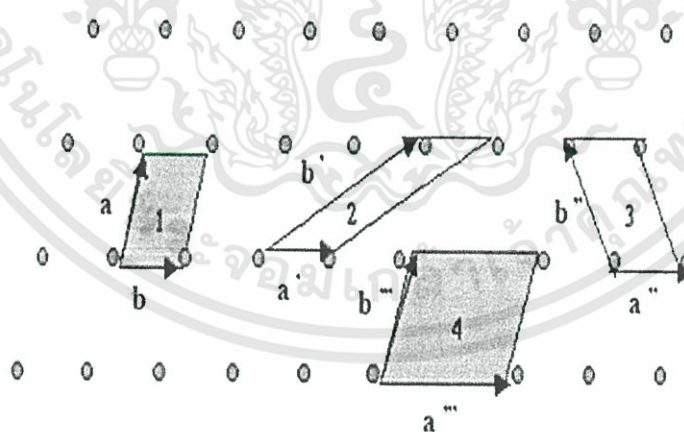
## บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

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

ในทางผลึกวิทยาสามารถแบ่งสารและวัสดุที่อยู่ในสภาพของแข็งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ ตามการจัดเรียงตัวของอะตอม ได้แก่ วัสดุที่เป็นผลึก (crystalline materials) และวัสดุที่เป็นอะมอร์ฟัส (amorphous materials) ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงวัสดุที่เป็นผลึกเท่านั้น

### 2.1.1 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ

ผลึกของสารเกิดจากการที่อะตอมหรือโมเลกุลของสารชนิดนั้นมารวมกันอยู่เป็นจำนวนมากโดยระยะห่างระหว่างอะตอมมีค่าคงที่และมีการจัดเรียงตัวกันเป็นระบบแบบรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอนเป็นระเบียบอย่างต่อเนื่องภายในหนึ่งหน่วยเซลล์ของผลึกอาจประกอบด้วยอะตอมของธาตุเพียงอะตอมเดียวไปจนถึงหลายๆ อะตอมหรือหลายๆ โมเลกุล เซลล์ที่มีปริมาตรเล็กที่สุดที่สามารถใช้เป็นตัวแทนของผลึกนั้นเรียกว่า หน่วยเซลล์ (unit cell) กล่าวคือ ถ้าเอาหน่วยเซลล์นี้มาเรียงต่อกันก็จะได้ผลึกขึ้นมา และเรียกตำแหน่งต่างๆ ของอะตอมที่ระบบสามมิติว่าโครงผลึกหรือแลตทิซ (lattice) ในทางทฤษฎีการกำหนดหน่วยเซลล์จะทำได้ไม่จำกัด แต่ตามปกติจะเลือกหน่วยเล็กที่สุด ที่เป็นไปได้ และมีสมมาตรค่อนข้างสูง ตัวอย่างการเลือกหน่วยเซลล์ในโครงผลึก 2 มิติ ดังภาพที่ 2.1 ในระบบสองมิติพารามิเตอร์ของโครงผลึก ได้แก่ เวกเตอร์  $\vec{a}$  และ  $\vec{b}$  และ มุม  $\gamma$  ซึ่งเป็นมุมระหว่าง เวกเตอร์ทั้งสอง ทั้งนี้ชนิดของโครงผลึกที่แตกต่างกันที่เป็นไปได้มีเพียงห้าแบบดังตารางที่ 2.1



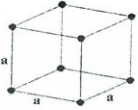
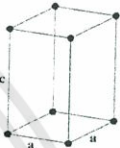
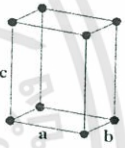
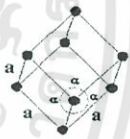
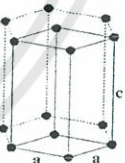
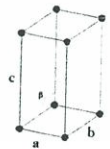
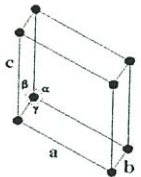
ภาพที่ 2.1 แสดงหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ของหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ

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  $\bar{a}$ ,  $\bar{b}$  และ  $\bar{c}$  และ มุม  $\alpha$ ,  $\beta$  และ  $\gamma$  ซึ่งเป็นมุมระหว่างเวกเตอร์ต่างๆ ดังตัวอย่างในตารางที่ 2.2 ทั้งนี้ สามารถจัดแบ่งรูปแบบของโครงสร้างผลึกขึ้นมาโดยสามารถแบ่งออกได้เป็นสิบสี่แบบในสามมิติ ซึ่งจัดได้เป็นเจ็ดกลุ่ม คือ ไตรคลินิก (triclinic), โมโนคลินิก (monoclinic), ออร์โธโรมบิก (orthorhombic), เตตระโกนัล (tetragonal), คิวบิก (cubic), รอมโบฮีดรัล (rhombohedral) และเฮกซะโกนัล (hexagonal)

ตารางที่ 2.2 แสดงระบบผลึกทั้งเจ็ดแบบในระบบสามมิติ

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 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

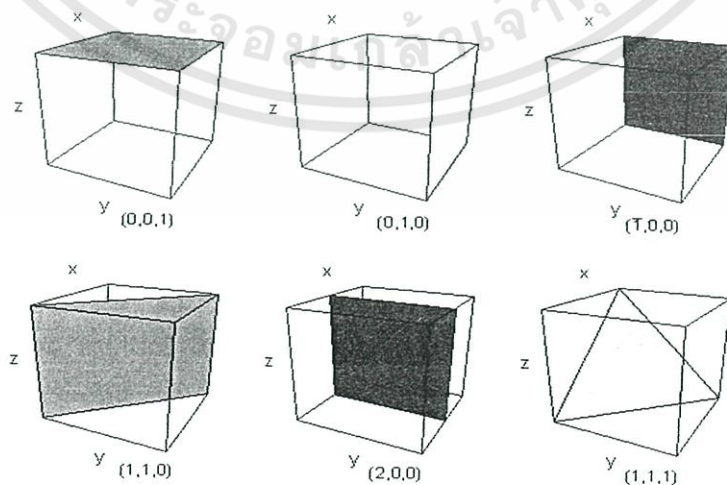
การระบุตำแหน่งทิศทางและระนาบของโครงผลึก

เนื่องจากผลึกมีสมบัติที่ขึ้นอยู่กับทิศทาง ดังนั้นจึงต้องระบุแน่นอนว่ากำลังศึกษาลักษณะส่วนใดของผลึกอยู่ซึ่งการระบุลักษณะที่ว่าจะกล่าวถึงตำแหน่ง, ทิศทางและระนาบของผลึกที่กำลังศึกษาอยู่นั้น หลักเกณฑ์ในการระบุลักษณะพื้นฐานของผลึก

การระบุตำแหน่ง

1. กรณีทั่วไปจะเขียนเป็น  $(x,y,z)$  ให้สังเกตเครื่องหมาย “ , ” ซึ่งคั่นแต่ละค่าตัวอย่างจุด  $(1,2,3)$  หมายความว่า เป็นตำแหน่งอยู่ที่พิกัด  $x=1, y=2$  และ  $z=3$  การบอกตำแหน่ง
2. การระบุทิศทางในกรณีทั่วไปจะเขียนเป็น  $[uvw]$  ให้สังเกตว่าใช้วงเล็บก้ามปู และไม่มีเครื่องหมาย “ , ” คั่นระหว่างค่าแต่ละค่า ถ้าเป็นทิศทางที่เป็นลบก็ใส่เครื่องหมาย “ - ” หรือบาร์ (bar) ไว้บนตัวเลขนั้นๆ เช่น ทิศทาง  $[\bar{1}2\bar{1}]$  แสดงว่าในแนวแกน  $z$  มีค่าเป็นลบ
3. การระบุชื่อระนาบของผลึกจะใช้อักษร  $(hkl)$  ให้สังเกตการใช้วงเล็บ และไม่มีเครื่องหมาย “ , ” คั่นโดยที่หากระนาบใดตัดแกนลบก็ให้ใส่เครื่องหมาย “ - ” หรือบาร์ข้างบนตัวเลขดัชนีมิลเลอร์ ค่า  $hkl$  เรียกว่า ดัชนีมิลเลอร์ (miller indices) ชื่อระนาบของผลึกเป็นสิ่งที่สำคัญที่สุดอีก ประการหนึ่งในการศึกษาผลึก เพราะในแต่ละระนาบจะประกอบไปด้วยอะตอม ไอออนหรือโมเลกุลเรียงตัวกันอยู่บนระนาบนั้น อาจกล่าวได้ว่าระนาบแต่ละระนาบจะมีความแตกต่างกันเช่นเดียวกับทิศทาง การบอกชื่อระนาบหรือดัชนีมิลเลอร์นั้นทำได้โดย
  - 3.1 กำหนดจุดที่ระนาบนั้นตัดแกนพิกัดฉากขึ้นมาเป็น  $(x,y,z)$  โดยที่หากระนาบตัดแกนใดให้ถือว่าระนาบนั้นตัดแกนนั้นที่ระยะอนันต์ ( $\infty$ ) และหากระนาบใดตัดแกนลบ (-) ก็ให้ใส่เครื่องหมายบาร์ (-) ข้างบนตัวเลขดัชนีนั้น
  - 3.2 ทำค่าจุดตัดต่างๆที่ได้จากข้อ 1 ทั้งหมดให้เป็นเศษส่วนกลับ
  - 3.3 ทำให้เป็นเลขจำนวนเต็มโดยการหาค่าผลคูณร่วมน้อย (ค.ร.น) ของค่าเศษส่วนที่ได้จาก ข้อ 2 ซึ่งก็จะได้ค่าตัวเลขดัชนีมิลเลอร์  $(hkl)$  ตามลำดับ

ดังแสดงในภาพที่ 2.2 และ ตารางที่ 2.3 ซึ่งสรุปความสัมพันธ์ระหว่างระนาบต่างๆกับระยะตัดแกนอ้างอิง



ภาพที่ 2.2 แสดงการบอกชื่อระนาบต่างๆของผลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการวิจัยเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ที่เห็นใบใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

มีข้อสังเกตที่ควรรู้เกี่ยวกับดัชนีมิลเลอร์ที่ใช้บอกชื่อระนาบของผลึกเพิ่มเติมดังนี้

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

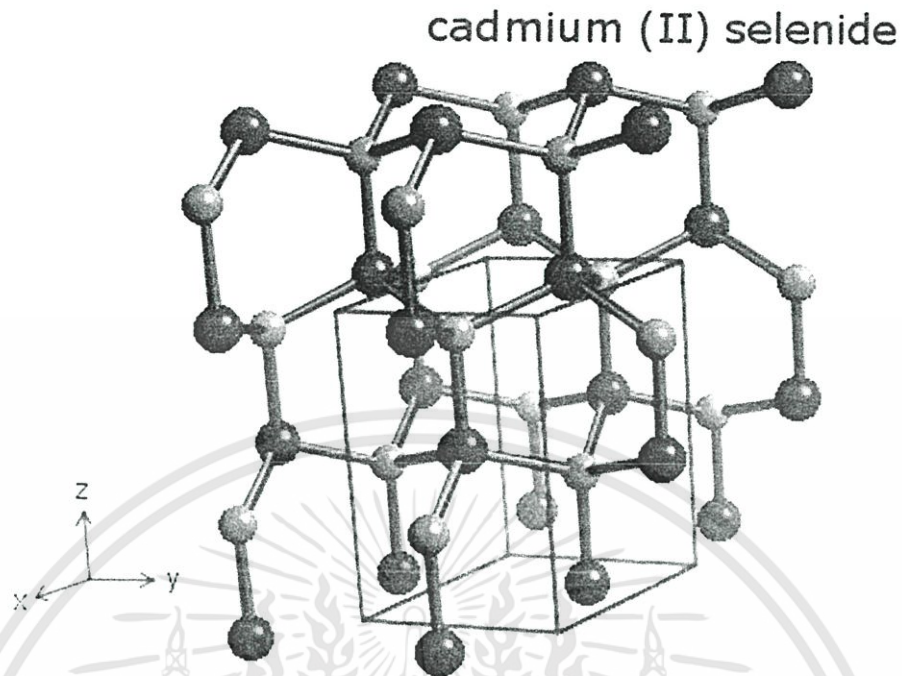
$$i = -(h + k) \quad (2.1)$$

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

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

### 2.1.2 โครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไฮท์ (wurtzite structure)

โครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไฮท์จัดอยู่ในระบบโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลเกิดจากการนำโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลที่มีอะตอมของธาตุต่าง ๆ อยู่สองชนิดวางซ้อนเหลื่อมกันเป็นระยะ 5/8 ตามแนวแกน c (c-axis) หนึ่งหน่วยเซลล์จะมี 8 อะตอม มีอะตอมเพื่อนบ้านอยู่ 4 อะตอมมีพันธะเคมีของโมเลกุลเป็นแบบพันธะเตตระฮีดรอน และมีพันธะเคมีระหว่างอะตอมเป็นแบบโควาเลนต์ ดังนั้นจึงมีการจัดเรียงระนาบของอะตอมคล้ายกับโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์แต่จะมีความแตกต่างกัน คือ ในโครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไฮท์จะมีการจัดเรียงระนาบของพันธะเตตระฮีดรอน เป็นแบบ ABAB... หรือ 0101... ส่วนในโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์จะมีการจัดเรียงระนาบของพันธะเตตระฮีดรอนแบบ ABCABC... หรือ 012012 ... สารที่มีโครงสร้างผลึกแบบนี้ได้แก่ สารกึ่งตัวนำ CdS, ZnS, CdSe เป็นต้น



ภาพที่ 2.3 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเวอริทไซต์ของผลึกแคดเมียมซีลีไนด์

2.1.3 ข้อบกพร่องผลึก (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; ฐิตินัย, 2551)

ในความเป็นจริงแล้วโครงสร้างผลึกจะมีลักษณะไม่สมบูรณ์แบบตามโครงสร้างผลึกในอุดมคติทั้งหมดโดยเฉพาะโครงสร้างผลึกในฟิล์มบาง นอกจากจะทำให้ผลึกขาดความสม่ำเสมอแล้ว ความไม่สมบูรณ์ของผลึกยังมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบาง ได้แก่สมบัติทางไฟฟ้า สมบัติในการทำปฏิกิริยาเคมี และพฤติกรรมในการเกิดกระบวนการต่างๆ ซึ่งตัวอย่างของข้อบกพร่องผลึกเหล่านี้คือ ข้อบกพร่องผลึกแบบแวนแคนซี (vacancy defect) (ดังภาพที่ 2.4) ข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชัน (dislocation) ตลอดจนเกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน (grain and grain boundaries)

#### 2.1.3.1 ข้อบกพร่องผลึกแบบจุด (point defect)

ข้อบกพร่องของผลึกแบบจุดจะเกี่ยวข้องกับการพิจารณาอะตอมที่ผิดเพี้ยนไปจากตำแหน่งเดิมในโครงสร้างผลึก

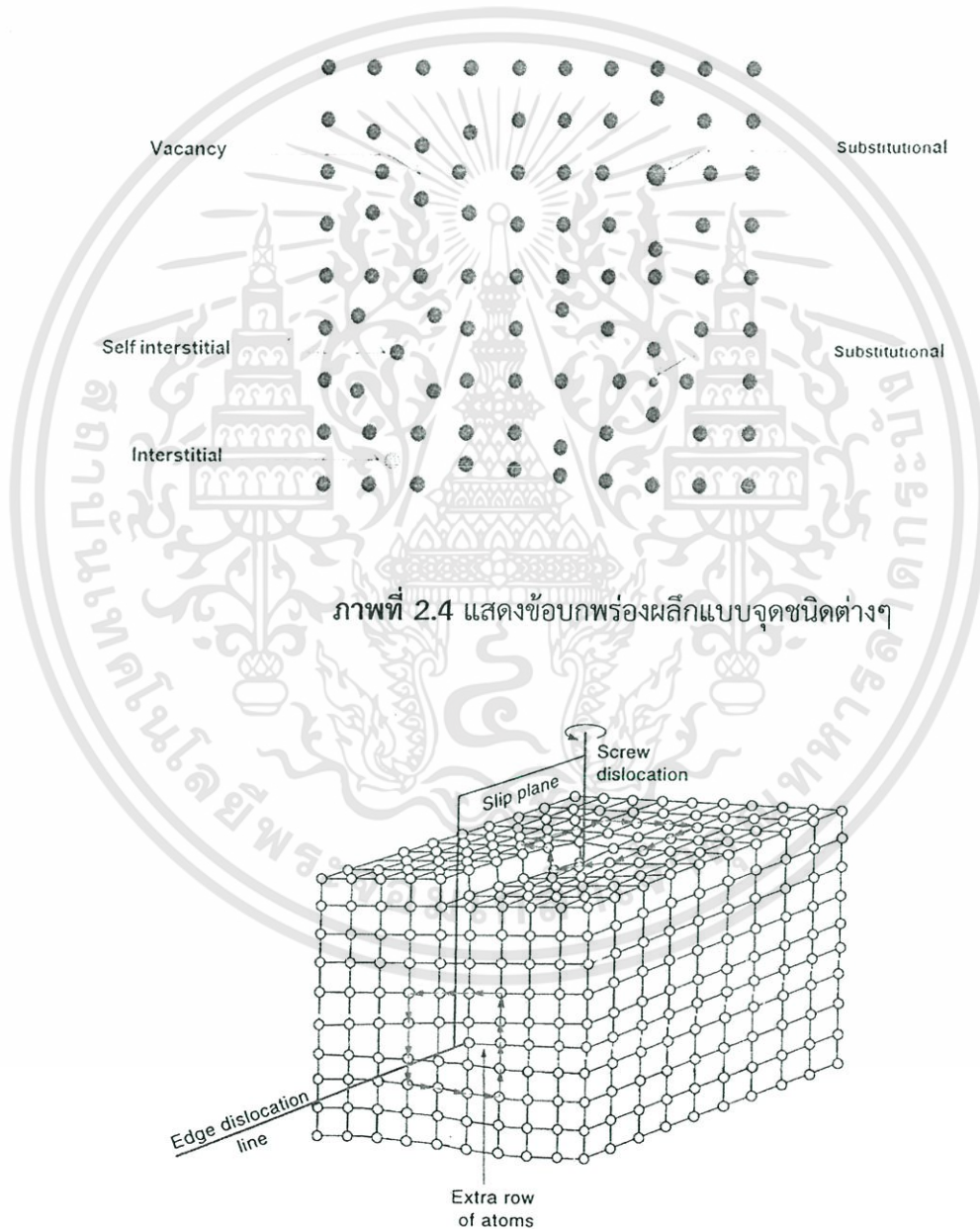
1. ข้อบกพร่องผลึกแบบแวนแคนซี (vacancy defect) ซึ่งมีลักษณะที่อะตอมหรือไอออนหลุดหายไป โดยที่ถ้าหากเป็นกรณีที่เกิดจากการที่มีอะตอมหรือไอออนหลุดหายไปจากตำแหน่งของโครงผลึกที่อยู่ภายในย้ายขึ้นไปอยู่ที่บริเวณผิวหน้าของสารจะเรียกว่า ข้อบกพร่องผลึกแบบชอตต์กี (Schottky defect)
2. ข้อบกพร่องผลึกแบบอินเตอร์สติเชียล (interstitial defect) ซึ่งเป็นลักษณะที่อะตอมบางอะตอมหรือไอออนที่ไม่อยู่ที่ตำแหน่งของโครงผลึก แต่จะเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างตำแหน่งที่เป็นที่ว่างของโครงผลึกโดยทั่วไปแล้วรัศมีอะตอมที่เข้าไปแทรกอยู่จะเท่าหรือน้อยกว่ารัศมีของอะตอมหลัก
3. ข้อบกพร่องผลึกแบบเฟรเนล (Frenkel defect) คือเกิดจากการที่มีอะตอมหรือไอออนหลุดหายไปจากตำแหน่งของโครงผลึกที่อยู่ภายในย้ายไปแทรกอยู่ที่ตำแหน่งที่ควรเป็นที่ว่างของโครงผลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

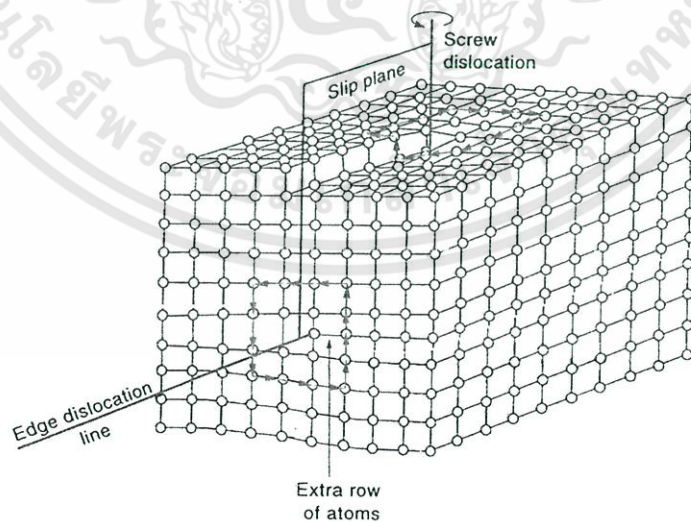
4. การผิดรูปของโครงผลึกแบบแอนติสตรัคเจอร์ (antistructure disorder) เป็นลักษณะของอะตอมตั้งแต่ 2 อะตอมขึ้นไป เข้าไปอยู่ในตำแหน่งของโครงผลึกทำให้ลักษณะของโครงผลึกไม่เป็นระเบียบ

#### 2.1.3.2 ข้อบกพร่องผลึกแบบเชิงเส้น (line defect)

ข้อบกพร่องผลึกแบบเชิงเส้นอาจจะแยกได้อีกอย่างว่า ดิสโลเคชัน เกิดจากความผิดปกติแบบจุดโครงผลึกตั้งแต่ 2 จุดขึ้นไปซึ่งอาจขาดหายหรือเพิ่มขึ้นมาซึ่งมีผลทำให้เกิดการผิดรูปของโครงผลึกแบบเชิงเส้น การเกิดดิสโลเคชันอาจจะแบ่งออกได้ตามลักษณะรูปร่างที่สังเกตเห็นคือ ดิสโลเคชันแบบขอบ (edge dislocations) และดิสโลเคชันแบบสกรู (screw dislocations) ดังภาพที่ 2.5

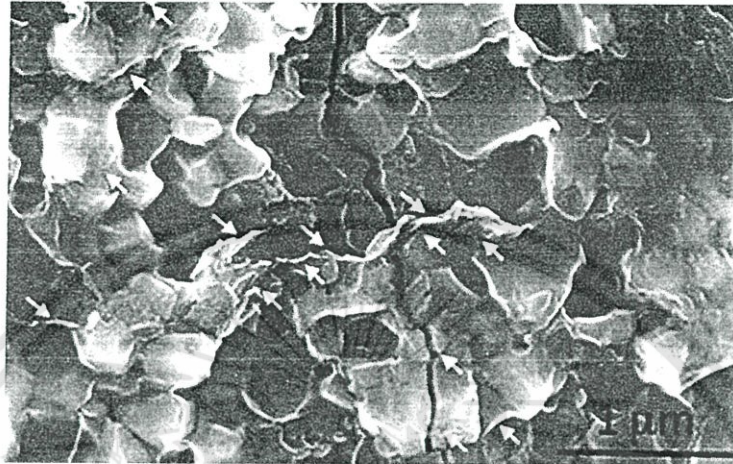


ภาพที่ 2.4 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบจุดชนิดต่างๆ



ภาพที่ 2.5 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชันแบบขอบและดิสโลเคชันแบบสกรู

ข้อบกพร่องผลึกชนิดนี้มักจะเกิดขึ้นในผลึกพหุพันธ์ (polycrystalline) ที่มีหลายเกรน ดังภาพที่ 2.6 ซึ่งในแต่ละเกรนจะมีการจัดเรียงตัวของผลึกในทิศทางเดียวกัน และมีแนวแบ่งระหว่างแต่ละเกรนที่มีการจัดเรียงตัวของผลึกในทิศทางต่างกัน เรียกว่า ขอบเขตรอยต่อของเกรน ซึ่งเกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน จะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางฟิสิกส์แตกต่างไปจากผลึกในอุดมคติ



ภาพที่ 2.6 แสดงเกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน

## 2.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2545; จูตินัย, 2549; จูตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; จูตินัย, 2551)

การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟร็กโทรมิเตอร์ โดยใช้รังสีเอกซ์ความยาวคลื่นเดี่ยวตกกระทบตัวอย่าง ซึ่งอาจเป็นผลึกเดี่ยวหรือผลึกพหุพันธ์ก็ได้ สารตัวอย่างจะหมุนไปเป็นมุม  $\theta$  ในขณะที่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ รังสีเอกซ์จะเคลื่อนที่ไปเป็นมุม  $\theta$  เพื่อให้การเลี้ยวเบนสอดคล้องกับกฎของแบรกก์

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

$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda \quad (2.2)$$

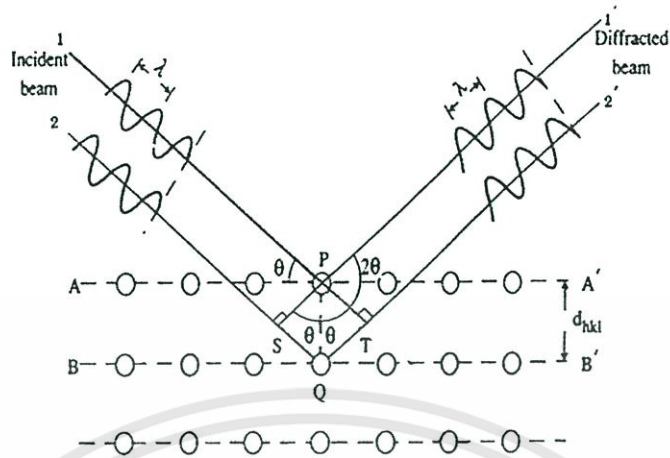
เมื่อ  $d_{hkl}$  คือ ระยะระหว่างระนาบ

$\theta$  คือ มุมของรังสีสะท้อนจากระนาบแบรกก์ของรังสีเอกซ์ ซึ่งจะเท่ากับมุมของรังสีตกกระทบ

$n$  คือ ลำดับของการเลี้ยวเบน มีค่าตั้งแต่ 1, 2, 3 ,....

$\lambda$  คือ ความยาวคลื่น

ระนาบต่าง ๆ ของผลึกที่ก่อให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ต้องสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ เรียกว่า ระนาบแบรกก์ (Bragg plane) และมุมที่รังสีสะท้อนทำกับแนวที่ขนานกับรังสีตกกระทบเรียกว่ามุมเลี้ยวเบน (diffraction angle) ซึ่งมีค่าเป็นสองเท่าของมุมตกกระทบ  $2\theta$  ดังภาพที่ 2.7

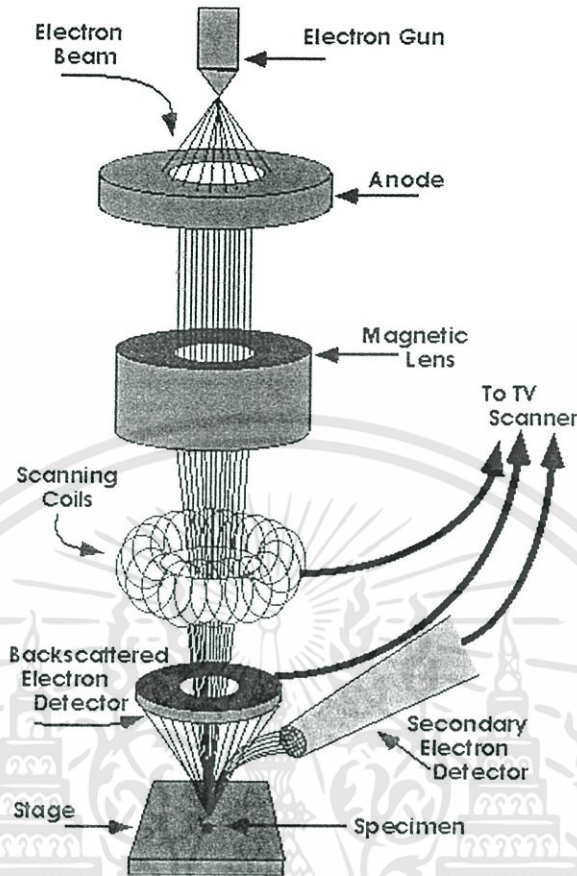


ภาพที่ 2.7 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์

### 2.3 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 ชาร์ลส์วิลเลียมแอ็ทลีย์ (Charles William Oatley) และทีมงานจากเคมบริดจ์ได้สร้างกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีความละเอียดสูงถึง 250 อังสตรอม

การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดดังแสดงในภาพที่ 2.8 เริ่มจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ซึ่งมีหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนจากไส้หลอด กลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า พร้อมทั้งบังคับกลุ่มอิเล็กตรอนให้มีลักษณะเป็นลำ โดยลำอิเล็กตรอนจะกราดไปบนพื้นผิวของตัวอย่างโดยขดลวดสนามแม่เหล็กบนระนาบเอกซ์-วายเพื่อทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ อิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกตรวจจับโดยเซนเซอร์ และแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าเพื่อส่งต่อไปให้ระบบสร้างภาพต่อไป



ภาพที่ 2.8 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ปัจจัยสำคัญสำหรับการใช้งาน SEM

1. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางปลายลำอิเล็กตรอน (electron probe diameter :  $d_p$  )
2. กระแสของลำอิเล็กตรอน (electron probe current :  $i_p$  )
3. มุมการกระเจิงของลำอิเล็กตรอน (electron probe convergence :  $\alpha_p$  )

ปัจจัยทั้ง 3 มีความสำคัญต่อการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วย SEM ซึ่งปัจจัยทั้ง 3 มีความสัมพันธ์กันโดย  $d_p$  แปรผันตรงกับ  $i_p$  แต่แปรผันแบบผกผันกับ  $\alpha_p$  ตัวอย่างเช่น เมื่อ  $d_p$  มีขนาดลดลง  $i_p$  จะมีค่าน้อยลงแต่  $\alpha_p$  จะมีค่ามากขึ้น

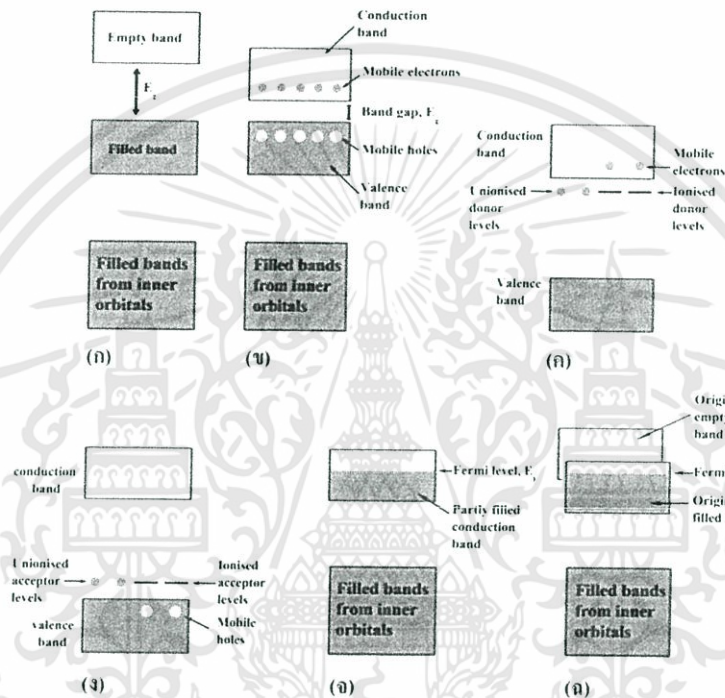
#### 2.4 สมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2545; จูตินัย, 2549; จูตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; จูตินัย, 2551)

เมื่อแสงตกกระทบกับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำพฤติกรรมทางแสงที่สังเกตได้ก็คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง ทำให้สามารถนำมาหาลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน (energy band) และหาขนาดค่าช่องว่างแถบพลังงาน (energy gap:  $E_g$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.1 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน (Kittel, 1971; งามนิิตย์, 2545; จูตินัย, 2550)

ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานจะประกอบไปด้วยส่วนใหญ่ๆ 3 ส่วน คือ แถบนำ (conduction band) แถบวาเลนซ์ (valence band) และ แถบพลังงานต้องห้าม (forbidden band หรือ forbidden region หรือ forbidden gap) และ เรียกค่าความกว้างของช่องว่างระหว่างแถบนำกับแถบวาเลนซ์นั้นว่า ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (energy gap) โดยจากขนาดของช่องว่างแถบ พลังงานนี้สามารถที่จะแบ่งประเภทของวัสดุว่าเป็นฉนวน (insulator) โลหะหรือตัวนำ (metal or conductor) และ สารกึ่งตัวนำ (semiconductor) ดังแสดงในภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานอย่างง่ายของ

ก. ฉนวน

ง. สารกึ่งตัวนำชนิดพี

ข. สารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์

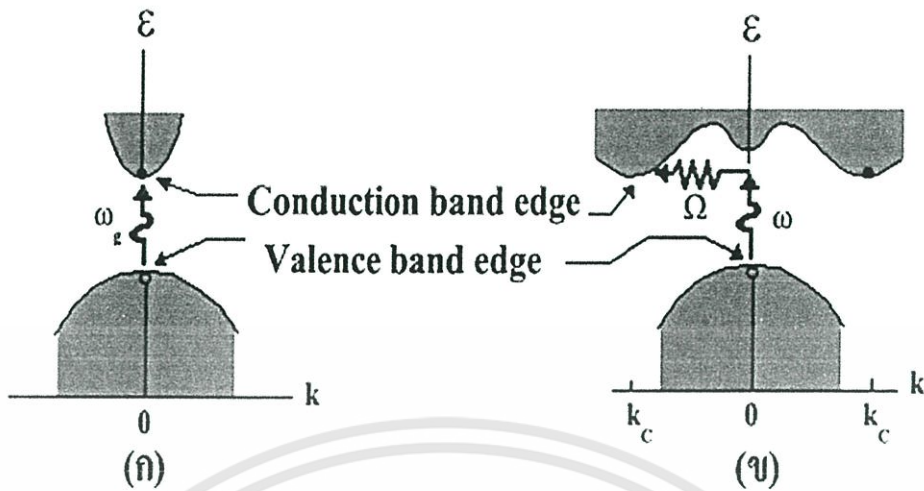
จ. โลหะ

ค. สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

ฉ. สารกึ่งโลหะ

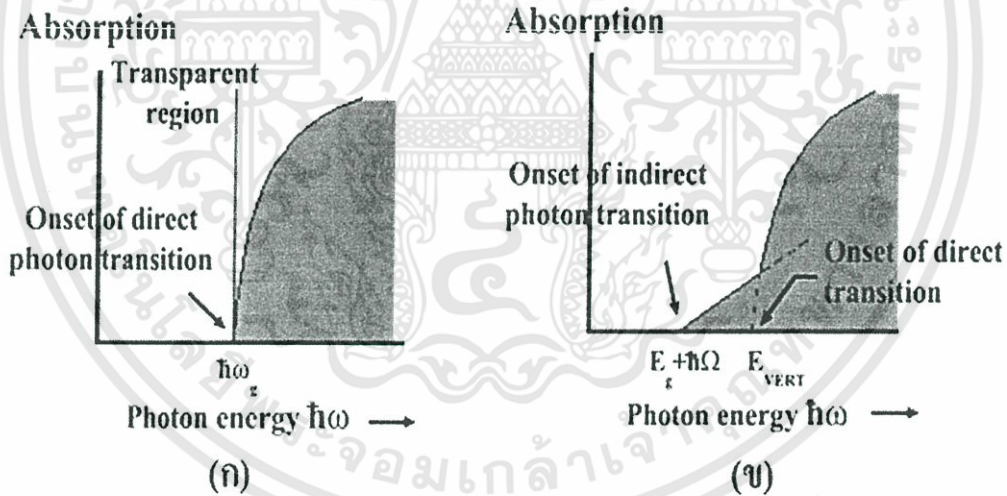
ในวัสดุที่เป็นฉนวนเมื่อดูจากแถบพลังงานจะเห็นได้ว่าขนาดช่องว่างแถบพลังงานจากขอบล่างสุด แถบนำ(แถบนำ)ถึงขอบบนสุดของแถบเต็ม(แถบวาเลนซ์)มีขนาดกว้างมากประมาณ ได้ว่า  $E_g \gg kT$  หรือมากกว่า 3 อิเล็กตรอนโวลต์ดังแสดงในภาพที่ 2.9 (ก) การที่จะทำให้วัสดุนี้ นำไฟฟ้าได้ ต้องใส่พลังงานที่สูงมากเพื่อที่จะทำให้อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปยังแถบนำได้ถ้าช่องว่างแถบพลังงานระหว่างแถบนำกับแถบวาเลนซ์มีขนาดเล็กพอที่อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์เมื่อได้รับพลังงานความร้อนสามารถเคลื่อนย้ายขึ้นไปยังแถบนำ และทำให้วัสดุนี้นำไฟฟ้าได้เราจะเรียกสารชนิดนี้ว่า สารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ (intrinsic semiconductors) ดังแสดงในภาพที่ 2.9 (ข) จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนย้ายขึ้นไปอยู่ในแถบนำแล้วจะเหลือที่ว่างไว้ในแถบวาเลนซ์โดยจะมีสภาพทางไฟฟ้าเป็นบวก และจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงข้ามกับอิเล็กตรอนเมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า เราจะเรียกที่ว่างนี้ว่าโฮล และถ้าเราทำการเจืออะตอมของธาตุบางอย่าง ลงไปในสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์แล้ว อะตอมของสารเจือประพฤติตัวเป็นอะตอมเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผู้ให้ ก็จะทำให้เกิดระดับพลังงานผู้ให้ โดยให้อิเล็กตรอนกับแถบนำ เราจะเรียกสารนี้ว่าสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductors) ดังแสดงในภาพที่ 2.9 (ค) และถ้าอะตอมประพฤติตัวเป็นอะตอมผู้รับก็จะทำให้เกิดระดับพลังงานผู้รับโดยทำการรับอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์เราจะเรียกสารนี้ว่าสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type semiconductors) ดังแสดงในภาพที่ 2.9 (ง) สำหรับแถบพลังงานของวัสดุที่เป็นโลหะหรือตัวนำจะพบว่าไม่มีอิเล็กตรอนเข้าไปอยู่ในแถบนำแล้วบางส่วนของภาพที่ 2.9 (จ) และเราบอกได้ว่าแถบวาเลนซ์กับแถบนำมีการซ้อนเหลื่อมกันอยู่ ทำให้สารสามารถนำไฟฟ้าได้และในภาพที่ 2.9 (ฉ) ถ้าขอบล่างของแถบว่างที่  $(n+1)$  ซ้อนเหลื่อมกับขอบสูงสุดของแถบที่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่ที่  $n$  และระดับพลังงานเฟอร์มิอยู่ระหว่างแถบทั้งสอง อิเล็กตรอนก็จะสามารถไหลจากแถบเต็มไปยังด้านล่างของแถบว่างได้ เราจะเรียกสารที่มีโครงสร้างแถบพลังงานแบบนี้ว่าเป็นสารกึ่งโลหะ ลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง คืออิเล็กตรอนได้รับพลังงานโฟตอนที่มีค่าเท่ากับขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g = hv$ ) อิเล็กตรอนจะดูดกลืนพลังงานโฟตอนนั้นและอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นจึงย้ายสถานะพลังงานทรานซิชั่นจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำกลายเป็นอิเล็กตรอนและโฮลอิสระโดยไม่มีการสูญเสียพลังงานให้แก่โครงสร้างผลึก คือไม่มีการสร้างหรือทำลายโฟนอน ดังแสดงในภาพที่ 2.10 (ก) และเมื่อเขียนกราฟระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนจะได้กราฟดังแสดงในภาพที่ 2.11 (ก) และลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงคือ โครงสร้างแถบพลังงานที่มีจุดต่ำสุดของแถบวาเลนซ์ไม่อยู่ที่ตำแหน่งเวกเตอร์คลื่นค่าเดียวกันหรืออยู่ที่ตำแหน่งโมเมนตัมของคลื่นไม่เท่ากัน ดังนั้นอิเล็กตรอนจะต้องได้รับพลังงานโฟนอนที่มีค่ามากกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ในกรณีนี้มีกระบวนการสร้างโฟนอนเกิดขึ้น ( $E_g + h\Omega = hv$ ) เมื่อ  $\Omega$  คือค่าความถี่เชิงมุมของพลังงานโฟนอน ซึ่งมีค่าน้อยกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงานหรือในกรณีที่มีการทำลายล้างโฟนอน ( $E_g + h\Omega = hv$ ) นั่นคือเมื่ออิเล็กตรอนที่อยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นการย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำจะมีการปล่อย โฟนอน (emitted phonon) ที่มีความถี่เชิงมุม  $\Omega$  มีเวกเตอร์คลื่น  $K \cong k_c$  ออกมา จึงเกิดการสร้างโฟนอน ( $E_g + h\Omega = hv$ ) และเกิดการสร้างอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ ( $E_{VERT}$ ) ขึ้นมาในกระบวนการนี้ ดังแสดงในภาพที่ 2.10 (ข) และเมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนจะได้ดังแสดงในภาพที่ 2.11 (ข)



ภาพที่ 2.10 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานและการย้ายสถานะของพลังงานอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ( $T = 0$  เคลวิน)

- ก. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง
- ข. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง



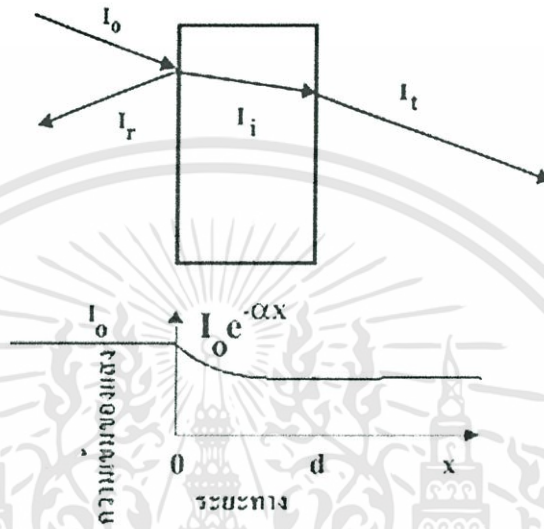
ภาพที่ 2.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ( $T = 0$  เคลวิน)

- ก. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง
- ข. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงในกรณีที่เกิดกระบวนการสร้างโฟนอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (Kittel, 1971; งามนิตย์, 2545; จูตินัย, 2550)

พิจารณาการศึกษาชีวิตค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง เมื่อแสงเดินทางไปกระทบฟิล์มบาง แสงบางส่วนจะสะท้อนกลับที่ผิวของฟิล์มบาง บางส่วนของแสงจะเดินทางเข้าไปในแผ่นฟิล์มบางและถูกดูดกลืน ดังแสดงในภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 แสดงแผนภาพเมื่อแสงตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มบาง

สัมประสิทธิ์การสะท้อนของแสงมีค่าเป็น

$$R = \frac{I_r}{I_0} \tag{2.3}$$

- เมื่อ  $I_0$  คือ ความเข้มแสงตกกระทบแผ่นฟิล์มบาง
- $I_r$  คือ ความเข้มแสงสะท้อนจากฟิล์มบาง
- $I_t$  คือ ความเข้มแสงส่งผ่านออกมาจากฟิล์มบาง
- $I_i$  คือ ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบาง
- $R$  คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง
- $T$  คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง
- $\alpha$  คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง
- $d$  คือ ระยะทางที่แสงเดินทางในแผ่นฟิล์มบางหรือความหนาของฟิล์มบาง

เพราะฉะนั้น ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางมีค่า

$$I_i = I_0 - I_r = I_0 - RI_r = (1-R) I_0 \tag{2.4}$$

เมื่อแสงนี้เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางจะถูกดูดกลืนทำให้ความเข้มแสงภายในแผ่นฟิล์มบางลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลตามระยะทาง ดังนั้นความเข้มแสงที่ส่งผ่านฟิล์มบางมีค่าเป็น  $I_t = I_i e^{-\alpha d}$  จากที่นำไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณค่าการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามการคำนวณค่าการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางที่หนาพอที่จะใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณค่าการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามการคำนวณค่าการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางที่หนาพอที่จะใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณค่าการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางได้เป็นอย่างดี

$$I_t = I_i \cdot e^{-\alpha d} = (1 - R)I_0 \cdot e^{-\alpha d} \quad (2.5)$$

ถ้าไม่มีการสะท้อนแสงที่ผิวด้านหลัง สัมประสิทธิ์การส่งผ่านของแสงจะมีค่าเท่ากับ

$$T = \frac{I_t}{I_0} = (1 - R)e^{-\alpha d} \quad (2.6)$$

#### 2.4.3 การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ (งามนิตย์, 2543; ฐิตินัย, 2550; Kittel, 1971)

เมื่อแสงตกกระทบสารกึ่งตัวนำ ด้วยความเข้ม  $I_0$  แสงบางส่วนจะส่งผ่านออกไป บางส่วนถูกดูดกลืนและส่วนที่เหลือจะสะท้อนกลับมา ดังแสดงในภาพที่ 2.12 โดย

$$T + A + R = 1 \quad (2.7)$$

เมื่อ  $T$  คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง  
 $A$  คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง  
 $R$  คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง

โดยที่

$$R = \frac{(n-1)^2 + K^2}{(n+1)^2 + K^2} \quad (2.8)$$

และค่าดัชนีหักเหของผลึก

$$n_c = n - iK \quad (2.9)$$

เมื่อ  $n$  คือ จำนวนจริง  
 $K$  คือ จำนวนเชิงซ้อน เรียกว่า สัมประสิทธิ์การสูญเสีย (extinction coefficient)  
 โดยทั้ง  $n$  และ  $K$  เป็นฟังก์ชันของ  $\lambda$

#### 2.4.4 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (งามนิตย์, 2543; ฐิตินัย, 2550; Kittel, 1971)

การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำเกิดจากการที่อิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากแสงที่มีพลังงานโฟตอนเท่ากับหรือมากกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานจากนั้นจึงย้ายสถานะพลังงานจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปสู่แถบนำสเปกตรัมการดูดกลืนแสงบริเวณที่พลังงานโฟตอนมีค่าน้อยจะมีลักษณะเป็นขอบแสดงถึงการลดลงของการดูดกลืนแสงอย่างฉับพลันขอบลักษณะนี้เรียกว่าขอบการดูดกลืนแสง (absorption edge) หรือขอบการดูดกลืนหลัก (fundamental edge) พลังงานโฟตอนที่ขอบการดูดกลืนแสงมีค่าเท่ากับผลต่างของค่าพลังงานที่วัดจากจุดต่ำสุดของแถบนำกับจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์จุดที่เส้นตรงตัดกับแกนใน

เอกลีกรีนเป็นเอกลีกรีนที่ส่งเสริมให้เด็กไทยเก่งภาษาอังกฤษได้เร็วขึ้นโดยไม่ต้องใช้วิธีอื่นใดในการศึกษา

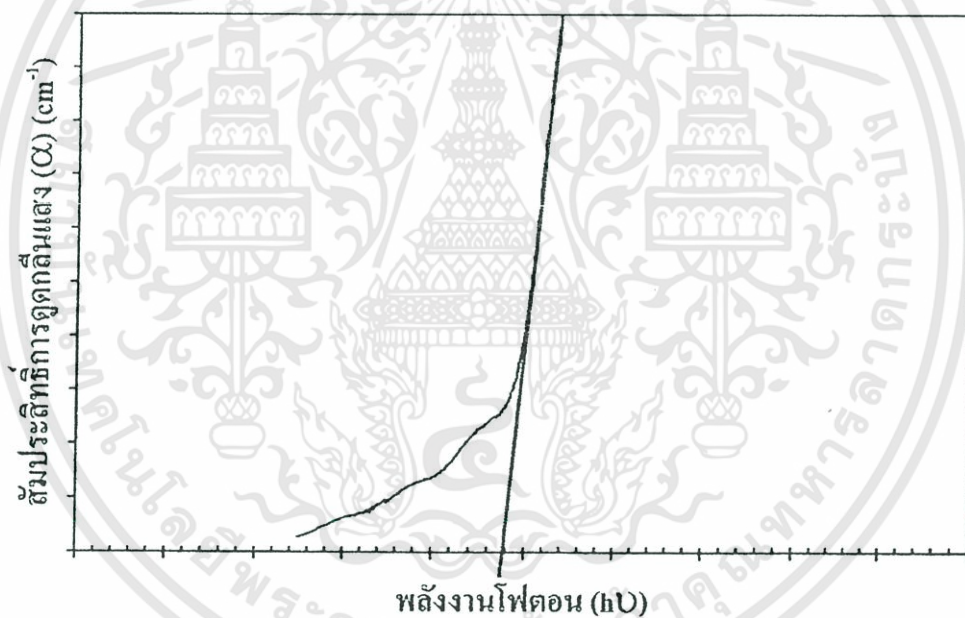
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แวนอน จะให้ค่าช่องว่างพลังงาน ( $E_g$ ) วิธีการนี้เป็นการกำหนดค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่นิยมมากที่สุด การหาค่าของช่องว่างพลังงาน สามารถพิจารณาได้จากสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ( $\alpha$ ) ของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง ( $T$ ) จากภาพที่ 2.13 แสดงภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบจากด้านซ้ายของฟิล์มบาง ( $I_0$ ) ความเข้มแสงภายในฟิล์มบางจะลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียล และมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงโดยทั่วไปการสะท้อน ( $R$ ) มีค่าน้อยมากและมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับความยาวคลื่นแสงที่ตกกระทบดังนั้น

$$T = e^{-\alpha d} \quad (2.10)$$

จะได้ว่า

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln\left(\frac{I_0}{I}\right) \quad (2.11)$$



ภาพที่ 2.13 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง กับ พลังงานโฟตอน

ที่กล่าวมาเป็นการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงจากสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงโดยไม่คิดถึง การสะท้อนของแสง สำหรับกรณีการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเนื่องจากการย้ายสถานะพลังงาน ของอิเล็กตรอน ในกรณีที่อิเล็กตรอนย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบ นำที่เวกเตอร์คลื่นค่าเดียวกัน เรียกการย้ายสถานะพลังงานแบบนี้ว่า การย้ายสถานะพลังงานแบบตรง และการ ย้ายสถานะพลังงานแบบตรงนี้ยังแบ่งได้อีกสองชนิด คือการย้ายสถานะพลังงานชนิดอินยอุม และชนิด ต้องห้ามโดยทั้งสองชนิดนี้ขึ้นกับค่าสมาชิกเมทริกซ์เชิงแสง (optical matrix element) ในการประมาณ ครั้งหนึ่งที่หนึ่งว่าเป็นศูนย์หรือไม่ คือ ถ้าเป็นศูนย์จะเป็นการย้ายสถานะพลังงานชนิดต้องห้าม และถ้าไม่เป็น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศูนย์จะเป็นการย้ายสถานะพลังงานชนิดนิยอม เมื่อพิจารณาการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนในบริเวณตำแหน่งจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับค่าช่องว่างพลังงานซึ่งมีลักษณะเป็นพาราโบลา ช่องว่างแถบพลังงานของแผ่นฟิล์มบางประมาณได้โดยการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ซึ่งจะถูกดูดกลืนเมื่อแสงที่ตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบางมีค่าพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าของพลังงานต้องห้ามที่ขอบการดูดกลืนค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน จะมีค่าเป็น

สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานชนิดนิยอมแบบตรง

$$(ahv) = A(hv - E_g)^{\frac{1}{2}} \tag{2.12}$$

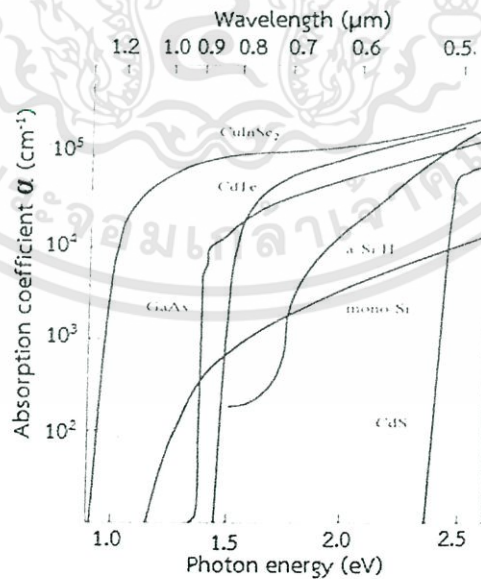
สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานชนิดนิยอมแบบเฉียง

$$(ahv) = B(hv - E_g)^2 \tag{2.13}$$

และสำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานชนิดต้องห้าม

$$(ahv) = C(hv - E_g)^{\frac{3}{2}} \tag{2.14}$$

เมื่อ  $\alpha$  คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง  
 $h\nu$  คือ พลังงานโฟตอน  
 $A, B$  และ  $C$  คือ ค่าคงที่

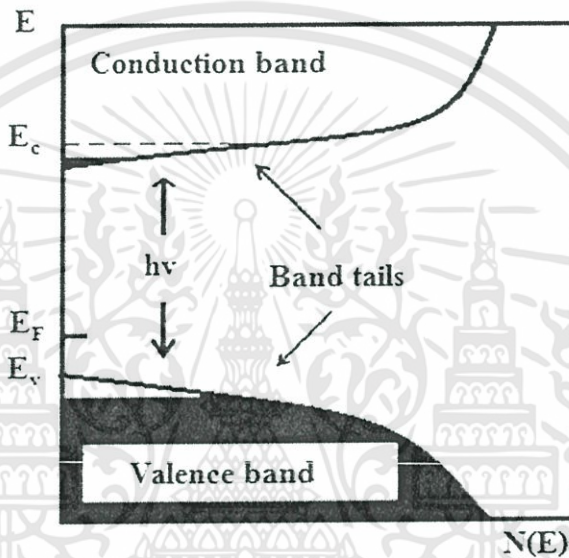


ภาพที่ 2.14 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง กับ ค่าพลังงานโฟตอนหรือค่าความยาวคลื่นของพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.4.5 ส่วนหางของแถบพลังงาน (งามนิตย์, 2543; ฐิตินัย, 2550; Kittel, 1971)

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



ภาพที่ 2.15 แสดงส่วนหางของแถบพลังงานซึ่งมีทั้งส่วนหางของแถบวาเลนซ์และส่วนหางของแถบนำ

ในเชิงการทดลองส่วนหางของแถบพลังงานสามารถตรวจสอบได้จากการวัดขอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มบาง ซึ่งเออร์บัค (Urbach) ได้แสดงให้เห็นว่าขอบการดูดกลืนผลึกจะเพิ่มขึ้นแบบ เอ็กซีโพเนนเชียลดังความสัมพันธ์

$$\alpha = \alpha_0 \exp\left[\frac{\sigma(E - E_0)}{k_B T}\right] \quad (2.15)$$

เมื่อ  $\alpha_0$  และ  $E_0$  เป็นพารามิเตอร์ของผลึกแต่ละชนิด ส่วน  $k_B$  คือค่าคงตัวของโบลตซ์มันน์  $T$  คือ อุณหภูมิ (เคลวิน) และ  $\alpha$  คือค่าความชัน (steepness) ของขอบการดูดกลืนจากสมการที่ (2.15) นี้บอกเป็นนัยๆ ว่ากราฟของความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\ln \alpha$  กับ พลังงาน ( $E$ ) จะเป็นเส้นตรงในช่วงพลังงานที่มีความต่ำกว่าขอบการดูดกลืนพื้นฐาน (หรือพิจารณาที่พลังงานต่ำกว่าช่องว่างแถบพลังงานนั่นเอง) การลากส่วนต่อของบริเวณที่เป็นเส้นตรงที่วัดที่อุณหภูมิต่างๆ จะลู่ออกสู่จุด  $(E_0, \alpha_0)$  ซึ่งเรียกจุดนี้ว่า จุดลู่ออก

#### 2.4.6 ฟูเรียร์แทรนส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy) (งามนิตย์, 2543; ฐิตินัย, 2550; Kittel, 1971)

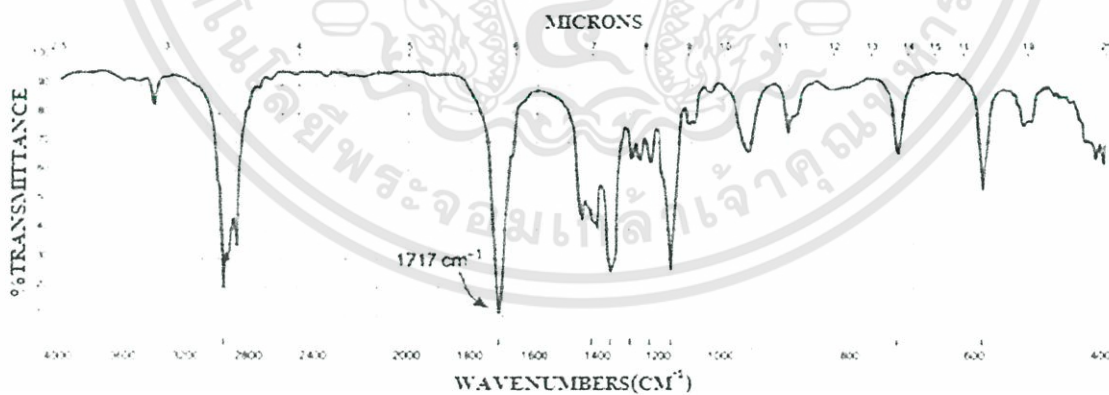
อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีเป็นเทคนิคที่รวดเร็วและมีประสิทธิภาพในการหาหมู่ฟังก์ชันในโมเลกุลของสารประกอบอินทรีย์ สเปกตรัมของรังสีอินฟราเรดที่มีประโยชน์ต่อนักเคมีอินทรีย์คือในย่านเลขคลื่น ( $k$ ) 4000-650 ต่อเซนติเมตร ถ้าคิดเป็นความยาวคลื่น ( $\lambda$ ) จะอยู่ในช่วง 2.5-15 ไมโครเมตร สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความยาวคลื่น และ เลขคลื่น คือ

$$\text{ความยาวคลื่น } (\mu\text{m}) = 10,000/\text{เลขคลื่น } (\text{cm}^{-1}) \quad (2.16)$$

สเปกตรัมอินฟราเรด เป็นการพล็อตระหว่างค่าความถี่ (เลขคลื่น, ต่อเซนติเมตร) หรือความยาวคลื่น (ไมโครเมตร) กับ ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง ( $T$ ) (รูปที่ 2.16) นิยามของสัมประสิทธิ์ การส่งผ่านแสง คือ อัตราส่วนระหว่างความเข้มของรังสีที่ผ่านฟิล์มบางของสารตัวอย่างกับความเข้มของรังสีที่ตกกระทบสารตัวอย่าง สมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความเข้มของรังสีที่ผ่านสารตัวอย่าง กับ ค่าความเข้มของรังสีที่ตกกระทบสารตัวอย่าง คือ

$$T = \frac{I}{I_0} \quad (2.17)$$

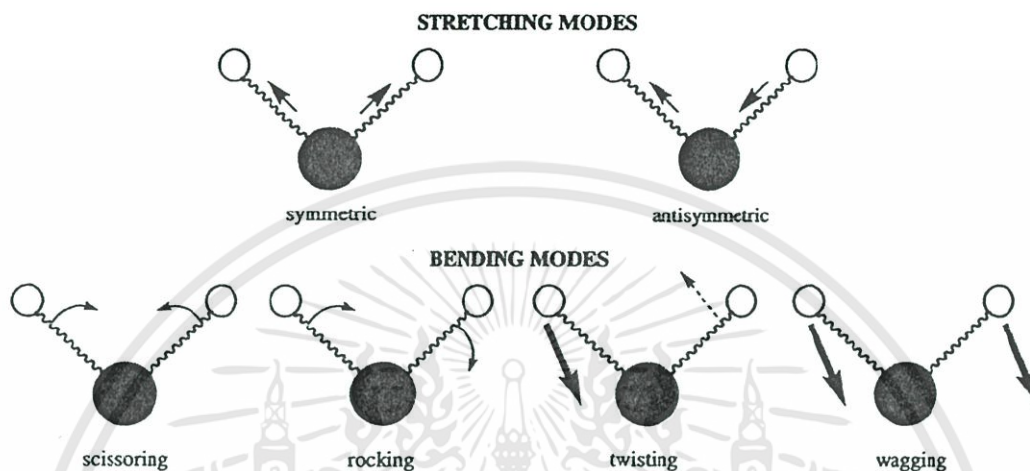
เมื่อ  $T$  คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง  
 $I$  คือ ความเข้มของรังสีที่ผ่านสารตัวอย่าง  
 $I_0$  คือ ความเข้มของรังสีที่ตกกระทบสารตัวอย่าง



ภาพที่ 2.16 แสดงสเปกตรัมอินฟราเรด สเปกตรัมของ 2-pentanone

การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดตรงกับพลังงานในช่วง 2-10 กิโลแคลอรีต่อโมล พลังงานของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านนี้ก่อให้เกิดการสั่นแบบยืด (stretching) และแบบงอ (bending) ของพันธะในโมเลกุลของสาร การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดเป็นแบบไม่ต่อเนื่อง (quantized) กล่าวคือมีการที่สารจะดูดกลืนรังสีอินฟราเรดนั้น ความถี่ของรังสีที่ถูกดูดกลืนจะต้องตรงกับความถี่ของการสั่นของพันธะนั้นั้น นอกจากนี้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์ ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสั่นของพันธะทุกประเภทในโมเลกุลมิได้ให้พีคใน สเปกตรัมอินฟราเรดเสมอไป การสั่นของพันธะที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้า (electrical dipole moment) เท่านั้นที่จะมีพีคปรากฏใน สเปกตรัมอินฟราเรดตัวอย่างเช่น การสั่นของพันธะระหว่าง ไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้าของสารประกอบ C=C ใน RCH=CHR ไม่มีพีคใน สเปกตรัมอินฟราเรด ส่วนการสั่นของพันธะ C=O ในสารประกอบคาร์บอนิลเกิดพีคที่มีความเข้มสูงใน สเปกตรัมอินฟราเรด



ภาพที่ 2.17 แสดงรูปแบบการสั่นของพันธะเคมีระหว่างไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้าของสารอินทรีย์

โดยทั่วไป แลบพลังงานที่เกิดใน สเปกตรัมอินฟราเรด เกิดจากการสั่นแบบพื้นฐาน ได้แก่ การยืดและการงอ ยังมีแลบพลังงานที่มีความเข้มต่ำเกิดที่ความถี่ 2 เท่า 3 เท่า หรือ 4 เท่าของความถี่พื้นฐาน แลบพลังงานเหล่านี้ เรียกว่า โอเวอร์โทน ซึ่งเกิดเมื่อความถี่พื้นฐานมีความเข้มสูงบางครั้ง อาจมีแลบพลังงานเกิดที่ความถี่ที่เป็นผลบวกหรือผลต่างของความถี่พื้นฐาน แลบเหล่านี้เรียกว่า แลบพลังงานรวม (combination bands) ถ้าโอเวอร์โทน หรือ แลบพลังงานรวม เกิดใกล้กับความถี่พื้นฐาน ผลก็คือ ทำให้ความเข้มของแลบพลังงานพื้นฐานลดลง แต่ไปเพิ่มความเข้มของ โอเวอร์โทน หรือ แลบพลังงานรวม ปรากฏการณ์นี้ คือเกิด เฟอร์มิ เรโซแนนซ์ (Fermi resonance) และพีคทั้งคู่บางครั้ง เรียกว่า เฟอร์มิดับเบิล (Fermi doublet) ภาพที่ 2.17 แสดงการสั่นแบบพื้นฐานของหมู่ CH<sub>2</sub>

ตารางที่ 2.4 แสดงค่าเลขคลื่นต่างๆของพลังงานที่ได้จากการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชัน ต่างๆ

เลขคลื่น (ต่อเซนติเมตร)	หมู่ฟังก์ชัน	รายละเอียด
3600-3400	O-H stretching	3650-3590 $\text{cm}^{-1}$ (sh, w) แอลกอฮอล์อิสระ 3400-3200 $\text{cm}^{-1}$ (b) แอลกอฮอล์ที่เกิดพันธะไฮโดรเจน 3400-2400 $\text{cm}^{-1}$ (vs, vb) กรดคาร์บอกซิลิก
3500-3200	N-H stretching	3200-3400 $\text{cm}^{-1}$ (m) 1° เอมีนและเอมีด มี 2 แถบ 3200-3400 $\text{cm}^{-1}$ (w) 2° เอมีนและเอมีด มี 1 แถบ
3300 (vs)	=C-H stretching	3300 $\text{cm}^{-1}$ อัลไคน์ที่มี =C-H ที่ปลายโซ่
3100-3000 (w, sh)	=C-H stretching	อัลคีนและเบนซีน (อาจมีหลายพีค)
3000-2800	C-H stretching	หมู่ CH <sub>3</sub> , CH <sub>2</sub> และ CH ของอัลเคน
2850-2780	C-H stretching	แอลดีไฮด์
2250-2225	C=N stretching	ไนทริล (m)
2260-2100	C=C stretching	อัลไคน์ (w) โมเลกุลที่สมมาตรจะไม่มีแถบนี้ปรากฏ
1820-1760 (s)	C=O stretching	แอนไฮไดรต์ (s) มี 2 แถบ
1800 (s)	C=O stretching	กรดคลอไรด์
1770 (s)	C=O stretching	แกมมา-แลกโตน
1735 (s)	C=O stretching	เอสเทอร์
1725 (s)	C=O stretching	แอลดีไฮด์
1715 (s)	C=O stretching	คีโตน
1710 (s)	C=O stretching	กรดคาร์บอกซิลิก
1690-1650 (s)	C=O stretching	เอไมด์
1650-1600 (w)	C=C stretching	อัลคีน
1650-1590 (s-m)	N-H bending	1° เอมีน
1650-1550 (w)	N-H bending	2° เอมีน
1620-1590 (s)	N-H bending	1° เอมีน
1550-1510 (s)	N-H bending	2° เอมีน
1600, 1580, 1500 และ 1450	C=C stretching	เบนซีนและเบนซีนที่มีหมู่แทนที่ ความเข้มข้นแน่นอ่อน อาจมี 2, 3 หรือมีทั้ง 4 แถบ
1520 (s) และ 1350 (s)	NO <sub>2</sub> bending	สารประกอบไนโตร
1465-1450	C-H bending	หมู่ CH <sub>2</sub>
1450-1375	C-H bending	หมู่ CH <sub>3</sub>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้วยการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 (ต่อ) แสดงค่าเลขคลื่นต่างๆของพลังงานที่ได้จากการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ

เลขคลื่น (ต่อเซนติเมตร)	หมู่ฟังก์ชัน	รายละเอียด
1400-1000	C-F stretching	สารประกอบฟลูออไรด์
1300-1150	CH <sub>2</sub> -X	สารประกอบเฮโลเจน
1300-1000	C-O stretching	อีเธอร์และเอสเทอร์
1220	C-O stretching	ฟีนอล
1150	C-O stretching	3° แอลกอฮอล์
1100	C-O stretching	2° แอลกอฮอล์
1050	C-O stretching	1° แอลกอฮอล์
990 และ 910	C-H (OOP bending)	อัลคีน (หมู่แทนที่ 1 หมู่, RCH=CH <sub>2</sub> )
970	C-H (OOP bending)	อัลคีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่, trans)
890	C-H (OOP bending)	อัลคีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่, R <sub>2</sub> C=CH <sub>2</sub> )
815	C-H (OOP bending)	อัลคีน (หมู่แทนที่ 3 หมู่, R <sub>2</sub> C=CHR)
700-690	C-H (OOP bending)	อัลคีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่, cis)
750 และ 690	C-H (OOP bending)	เบนซีน (หมู่แทนที่ 1 หมู่)
750	C-H (OOP bending)	เบนซีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่แบบ ออโท)
780 และ 700	C-H (OOP bending)	เบนซีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่แบบ เมตา)
825-800	C-H (OOP bending)	เบนซีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่แบบ พารา)
800-600	C-Cl	สารประกอบคลอไรด์
600-500	C-Br	สารประกอบโบรมाइด์
~ 500	C-I	สารประกอบไอโอดีน

คำย่อ : s = ความเข้มสูง, vs = ความเข้มสูงมาก, m = ความเข้มปานกลาง, w = ความเข้มต่ำ, vw = ความเข้มต่ำมาก, sh แหลมคม, b = กว้าง, vb = กว้างมาก, OOP = out - of - plane (การสั่นออกนอกระนาบ)

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

จากทฤษฎีแถบพลังงานนั้นสารกึ่งตัวนำสามารถมีขนาดช่องว่างแถบพลังงานที่ใหญ่เกินกว่า 2 อิเล็กตรอนโวลต์ พลังงานความร้อนที่อุณหภูมิห้องไม่เพียงพอที่จะกระตุ้นให้เกิดพาหะอิสระได้ ดังนั้นพาหะอิสระของสารกึ่งตัวนำประเภทนี้จึงน้อยส่วนใหญ่มาจากระดับพลังงานผู้รับหรือศูนย์กลางการรวมตัว (recombination center) ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิใดๆของสารกึ่งตัวนำจึงขึ้นกับความหนาแน่นของพาหะอิสระเหล่านี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.1 สมบัติการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ

สมบัติการนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำขึ้นอยู่กับจำนวนพาหะอิสระเป็นสำคัญ กล่าวคือ ถ้าจำนวนอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์เพิ่มมากขึ้น สารกึ่งตัวนำนั้นจะนำไฟฟ้าได้ดียิ่งขึ้น ปริมาณความหนาแน่นของพาหะอิสระในสารกึ่งตัวนำถูกกำหนดด้วยขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน, ความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือ และอุณหภูมิเป็นสำคัญ ที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน การกระจายของพาหะอิสระตามระดับพลังงานของผลึกเป็นตามฟังก์ชันการกระจายแบบเฟอร์มี-ดิเรก (Fermi-Dirac distribution) ดังสมการที่ (2.18)

$$f(E) = \frac{1}{\exp[(E - E_F)/kT] + 1} \quad (2.18)$$

เมื่อ $f(E)$	คือ	ฟังก์ชันการกระจายแบบเฟอร์มีหรือความน่าจะเป็นที่จะพบอิเล็กตรอนในระดับพลังงาน $E$ ที่อุณหภูมิ $T$ ใดๆ
$E_F$	คือ	ระดับพลังงานเฟอร์มี (Fermi energy level)
$k$	คือ	ค่าคงตัวของโบลต์ซมันน์ (Boltzmann's constant) = $1.38 \times 10^{-23}$ จูลต่อเคลวิน
$T$	คือ	อุณหภูมิในหน่วยของเคลวิน

ในการพิจารณาความหนาแน่นพาหะอิสระในสภาวะสมดุลเชิงความร้อนสามารถแยกได้เป็น 2 กรณี คือ กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดอินทรินสิกซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน (intrinsic semiconductor) และกรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอกซ์ทริกสิกเป็นสารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ (extrinsic semiconductor)

#### 2.5.1.1 สารกึ่งตัวนำอินทรินสิก

สารกึ่งตัวนำชนิดอินทรินสิกซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นด้วยพลังงานความร้อนขึ้นไปยังแถบนำและทิ้งโฮลจำนวนเท่ากันไว้ในแถบวาเลนซ์ ถ้ากำหนดให้  $N_c(E)dE$  เป็นจำนวนสถานะในแถบนำต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรที่มีพลังงานอยู่ระหว่าง  $E$  และ  $E + dE$  ดังนั้นความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำที่มีค่าพลังงานอยู่ระหว่าง  $E$  และ  $E + dE$  ที่อุณหภูมิใดๆคือ

$$n(E)dE = N_c(E)f(E)dE \quad (2.19)$$

เมื่อ  $N_c$  คือ ความหนาแน่นของสถานะพลังงาน (density of state) ในแถบนำซึ่งเมื่อพิจารณาจากกรณีที่แถบนำมีความสมมาตรในเชิงทรงกลมและมีจุดต่ำสุดเพียงจุดเดียวดังนั้น

$$N_c(E) = 2\pi \left( \frac{2m_e^*}{h} \right)^{3/2} E^{1/2} \quad (2.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $m_e^*$  คือ มวลยังผลของอิเล็กตรอนในแถบนำ

$h$  คือ ค่าคงตัวของพลังค์ (Planck's constant) =  $6.625 \times 10^{-34}$  จูล-วินาที

จากสมการที่ (2.20) พิจารณาโดยกำหนดให้ระดับพลังงานศูนย์อยู่ตรงขอบล่างของแถบนำนั้นคือจะมีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในแถบนำทั้งหมดเท่ากับ

$$n_i = \int_0^{E_f} n(E)dE = \int_0^{E_f} N_c(E)f(E)dE \quad (2.21)$$

เมื่อ  $E_f$  คือ ค่าพลังงานที่ขอบบนของแถบนำ

โดยทั่วไปพลังงานความร้อน ( $kT$ ) ของผลึกมีค่าน้อยกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานของผลึกมาก ๆ จนกระทั่งมั่นใจได้ว่าสถานะพลังงานของแถบนำอยู่ในสภาวะที่เป็นระดับพลังงานซ้อน (non-degeneracy) และ  $n(E)dE$  มีค่าใกล้ศูนย์ที่ค่าระดับพลังงานสูง ๆ สมการที่ (2.21) จึงสามารถขยายของเขต  $E_f$  ออกไปจนถึงอนันต์ และสามารถเขียนสมการที่ (2.21) ใหม่ได้เป็น

$$n_i = 4\pi \left[ \frac{2m_e^*}{h^2} \right]^{3/2} \int_0^{\infty} \frac{E^{3/2}}{\exp[(E - E_F)/kT] + 1} dE \quad (2.22)$$

เนื่องจาก  $\exp[(E - E_F)/kT] + 1 \gg 1$  นั่นคือ

$$n_i = N_c \exp\left[\frac{E_F}{kT}\right] \quad (2.23)$$

เมื่อ

$$N_c = 2 \left[ \frac{2\pi m_e^* kT}{h^2} \right]^{3/2} \quad (2.24)$$

และทำนองเดียวกันเราจะได้ความหนาแน่นของโฮลในแถบลวาเลนซ์ดังนี้

$$p_i = N_v \exp\left[-\frac{E_F + E_g}{kT}\right] \quad (2.25)$$

โดย

$$N_v = 2 \left[ \frac{2\pi m_h^*}{h^2} \right]^{3/2} \quad (2.26)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $E_g$  คือ ค่าช่องว่างของแถบพลังงาน

$m_h^*$  คือ มวลยังผลของโฮลในแถบวาเลนซ์

$N_v$  คือ ความหนาแน่นของสถานะพลังงานในแถบวาเลนซ์

เนื่องจากในสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน โฮลและอิเล็กตรอนมีจำนวนเท่ากัน ดังนั้นจากสมการที่ (2.24) และสมการที่ (2.25) จะได้

$$n_i p_i = n_i^2 = N_c N_v \exp\left[-\frac{E_g}{kT}\right] \quad (2.27)$$

และ 
$$n_i = (N_c N_v)^{1/2} \exp\left[-\frac{E_g}{kT}\right] \quad (2.28)$$

หรือ 
$$n_i = p_i = 4.82 \times 10^{15} T^{3/2} \left(\frac{m_e^* m_h^*}{m^2}\right) \exp\left[-\frac{E_g}{kT}\right] \quad (2.29)$$

จากสมการที่ (2.28) พาหะอิสระในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในเทอมของเอ็กซ์โพเนนเชียล อุณหภูมิจึงมีบทบาทสำคัญกับสมบัติไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน

#### 2.5.1.2 สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็กซ์ทรินสิค

สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็กซ์ทรินสิคเป็นสารกึ่งตัวนำที่ไม่บริสุทธิ์ เมื่อมีการเติมอะตอมของสารเจือลงในสารกึ่งตัวนำที่อาจมีได้ทั้งอะตอมผู้ให้ (donor) และอะตอมผู้รับ (acceptor) ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อนของผลึก ความหนาแน่นอิสระทั้งอิเล็กตรอนและโฮลจะหาได้ทำนองเดียวกับสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน นั่นคือความหนาแน่นอิเล็กตรอนในแถบนำคือ

$$n = N_c \exp\left[\frac{E_F}{kT}\right] \quad (2.30)$$

และความหนาแน่นของโฮลในแถบวาเลนซ์คือ

$$p = N_v \exp\left[-\frac{E_F + E_g}{kT}\right] \quad (2.31)$$

จะได้กฎการคงตัวของมวลดังสมการ

$$np = n_i^2 = N_c N_v \exp\left[-\frac{E_g}{kT}\right] \quad (2.32)$$

พิจารณาสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type) ที่มีทั้งอะตอมผู้ให้ ( $N_d$ ) ที่มีระดับพลังงานลึกจากขอบล่างของแถบนำเป็นสถานะระดับพลังงานของอะตอมผู้ให้ (donor level:  $E_d$ ) และ อะตอมผู้รับ ( $N_a$ ) ที่มีระดับพลังงานสูงกว่าขอบล่างของแถบวาเลนซ์เป็นสถานะพลังงานของอะตอมผู้รับ (acceptor level:  $E_a$ ) จากเงื่อนไขความเป็นกลางทางไฟฟ้าของระบบจะได้

$$n + (N_a - n_a) = p + (N_d - n_d) \quad (2.33)$$

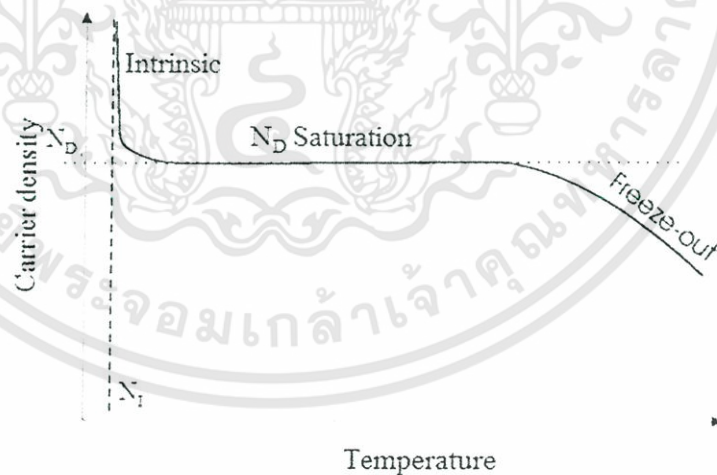
เมื่อ  $n, p$  คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ

$N_d, N_a$  คือ ความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้และผู้รับ

$n_d, n_a$  คือ ความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้และผู้รับที่ไม่ถูกไอออไนซ์

เราสามารถแยกพิจารณาลักษณะการแปรผันตามอุณหภูมิของพาหะได้เป็น 2 กรณีดังแสดงในรูปที่

2.18



ภาพที่ 2.18 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นกับส่วนกลับของอุณหภูมิ

1. กรณีความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือมีค่าน้อยหรือที่อุณหภูมิสูง

ในกรณีเช่นอะตอมของสารเจือจะถูกไอออไนซ์จนหมดด้วยพลังงานความร้อน พาหะอิสระเกิดจากสองส่วนคือ มาจากสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน และมาจากอะตอมของสารเจือทั้งหมด จากเงื่อนไขเป็นกลางทางไฟฟ้าสมการที่ (2.33) ลดรูปได้เป็น

$$n = p + (N_d - N_a) \quad (2.34)$$

จากสมการที่ (2.34) จะได้ว่า

$$n = \frac{1}{2} \left[ (N_d - N_a) + \sqrt{(N_d - N_a)^2 + 4n_i^2} \right] \quad (2.35)$$

$$p = \frac{n_i^2}{n} \quad (2.36)$$

ในช่วงอุณหภูมิสูงมากจนกระทั่งความหนาแน่นพาหะส่วนใหญ่มาจากสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน มากกว่าอะตอมของสารเจือมากๆ ( $|N_d - N_a| \ll n_i$ ) ช่วงนี้จะมีการเพิ่มขึ้นของพาหะอิสระตามการเพิ่มของอุณหภูมิอย่างรวดเร็วแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล เรียกช่วงนี้ว่าเป็นบริเวณย่านอินทรินสิก (intrinsic region) และสมการที่ (2.33) และ (2.34) จะกลายเป็นสมการของบริเวณย่านอินทรินสิก

$$n = p = n_i \quad (2.37)$$

ในช่วงที่อุณหภูมิต่ำกว่าช่วงอินทรินสิก พาหะที่มาจากสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน จะมีค่าน้อยกว่าพาหะที่มาจากอะตอมของสารเจือมากๆ ( $|N_d - N_a| \gg n_i$ ) พาหะข้อ่งมากในช่วงนี้จะมีค่าคงที่เรียกช่วงนี้ว่าบริเวณย่านอิ่มตัว (saturation region) โดยสมการที่ (2.34) จะเปลี่ยนเป็น

$$n \cong N_d - N_a \quad (2.38)$$

2. กรณีความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือมีมากหรือที่อุณหภูมิต่ำ

ในกรณีนี้พลังงานเนื่องจากความร้อนไม่สามารถไอออไนซ์อะตอมของสารเจือได้ทั้งหมด ดังนั้นจึงยังมีอะตอมผู้ให้ที่ไม่ถูกไอออไนซ์ ( $n_d$ ) บางส่วนเหลืออยู่ แต่โฮล ( $p$ ) และ อะตอมผู้รับที่ไม่ถูกไอออไนซ์ ( $n_a$ ) จะมีค่าน้อยมาก ดังนั้นสมการที่ (2.38) จะเปลี่ยนเป็น

$$n = N_d - N_a - n_d \quad (2.39)$$

และ

$$n_d = N_d \left[ \frac{1}{1 + \beta \exp\left\{\frac{E_d + E_F}{kT}\right\}} \right] \quad (2.40)$$

เมื่อ  $\beta$  คือ แฟกเตอร์สถานะพลังงานซ้อนทับ (degeneracy factor)

ที่สถานะพื้นฐานของอะตอมผู้ให้ จากสมการที่ (2.37), (2.38) และ (2.39) สามารถเขียนได้ในรูปของสมการที่ (2.40) ดังนี้

$$n^2 + n(N_a + N'_c) - (N_d - N_a)N'_c = 0 \quad (2.41)$$

เมื่อ

$$N'_c = \beta N_c \exp\left(-\frac{E_d}{kT}\right) \quad (2.42)$$

$n$  อยู่ในรูปของสมการควอดราติกซึ่งมีรากของสมการคือ

$$n = -\frac{1}{2}(N_d + N'_c) + \frac{1}{2}\left[(N_d + N'_c)^2 + 4N'_c(N_d - N_a)\right]^{1/2} \quad (2.43)$$

เมื่อ  $E_d \gg kT$  และ  $N'_c$  จะมีค่าน้อย เราสามารถกระจายสมการที่ (2.43) เทอมที่สองด้านขวามือได้ด้วยอนุกรมทวินาม (binomial series) จะได้

$$n = -\left(\frac{N_a + N_c'}{2}\right) + \frac{1}{2}\left(N_a + N_c'\right) + \frac{N_c'(N_d - N_a)}{N_a + N_c'} + \dots$$

$$n \cong \frac{N_c'(N_d - N_a)}{N_a + N_c'} \quad (2.44)$$

ถ้า  $N_a \gg N_c'$  สมการที่ (2.44) จะกลายเป็น

$$\frac{n^2}{N_d} - N_c' = 0 \quad (2.45)$$

หรือ

$$n \approx \sqrt{\beta N_d N_c'} \exp\left[-\frac{E_d}{2kT}\right] \quad (2.46)$$

จะเห็นได้ว่าความหนาแน่นของพาหะอิสระจะลดลงตามการลดลงของอุณหภูมิในแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล ซึ่งเรียกช่วงทั้งสองนี้ว่าย่าน ฟรีซเอาท์ (freeze-out region) โดยการลดลงจะเป็นไปตามสมการที่ (2.44) เมื่ออุณหภูมิต่ำลง จนกระทั่ง  $N_a < n < N_d$  และลดลงตามสมการที่ (2.46) เมื่ออุณหภูมิลดลงจนกระทั่ง  $n < N_a < N_d$

2.6 สภาพนำไฟฟ้า (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; ฐิตินัย, 2551)

เมื่อใส่สนามไฟฟ้าเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบนำจะตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าเกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนกลายเป็นกระแสไฟฟ้า จากกฎของโอห์ม (Ohm's law) สภาพนำไฟฟ้า (electrical conductivity:  $\sigma$ ) คืออัตราส่วนของ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (current density:  $J$ ) ต่อ ค่าสนามไฟฟ้า (electric field:  $E$ ) ที่ใส่เข้าไปสมการ

$$J = \sigma E = e(\mu_n n + \mu_p p)E \quad (2.47)$$

เมื่อ  $\mu_n, \mu_p$  คือ สภาพคล่องของอิเล็กตรอนและโฮล ตามลำดับ

$n$  คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

$p$  คือ ความหนาแน่นของโฮล

ค่าส่วนกลับของสภาพนำไฟฟ้า เรียกว่า ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (resistivity:  $\rho$ ) ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น  $\rho = 1/\sigma$  แม้ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{e(\mu_n n + \mu_p p)} \quad (2.48)$$

ถ้ามีก้อนเนื้อสารกึ่งตัวนำซึ่งให้แรงดัน  $V$  และเกิดกระแส  $I$  แล้วจะได้ว่า  $J = \frac{I}{A}$  และ  $E = \frac{V}{l}$  สามารถเขียนสมการข้างต้นใหม่ได้เป็น

$$\frac{I}{A} = \sigma \left( \frac{V}{l} \right) \quad (2.49)$$

$$V = \left( \frac{l}{\sigma A} \right) I = \left( \frac{\rho l}{A} \right) I = IR \quad (2.50)$$

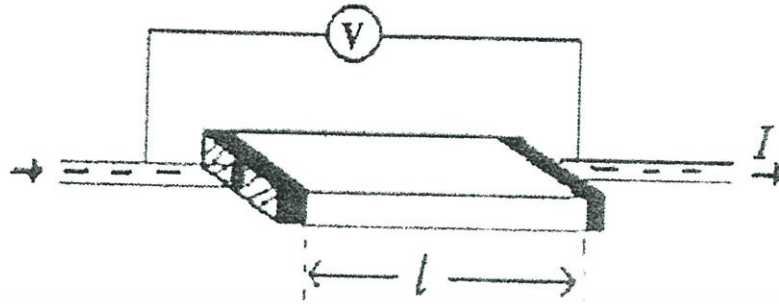
สมการข้างต้น คือกฎของโอห์มสำหรับสารกึ่งตัวนำ ความต้านทานเป็นฟังก์ชันกับสภาพความต้านทานหรือสภาพนำไฟฟ้า และขึ้นกับมิติรูปทรงเรขาคณิตของสารกึ่งตัวนำ

## 2.7 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; ฐิตินัย, 2551)

วิธีการวัดสภาพความต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำสามารถกระทำได้หลายวิธี ทั้งวิธีที่ใช้ส่วนของอุปกรณ์ต่อเข้าสัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่างและวิธีที่ไม่ต้องสัมผัสโดยตรงสำหรับวิธีที่จะกล่าวถึงในที่นี้เป็นวิธีที่ใช้การสัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่าง ซึ่งทำได้โดยการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในชิ้นสารตัวอย่างแล้ววัดความต่างศักย์ระหว่างจุดบนชิ้นสารนั้น

### 2.7.1 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง (direct resistivity method)

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



ภาพที่ 2.19 แสดงการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.51)$$

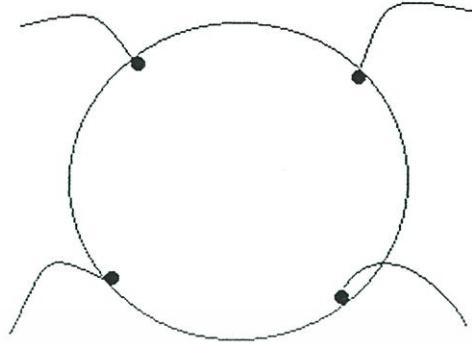
$$\rho = R \times \frac{A}{l} = \left( \frac{V}{I} \right) \left( \frac{A}{l} \right) \quad (2.52)$$

จะเห็นว่าวิธีนี้เป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็ว แต่ค่าที่ได้เป็นค่าโดยประมาณซึ่งต้องคำนึงถึงองค์ประกอบอื่นๆด้วย ซึ่งความถูกต้องในการวัดโดยวิธีนี้ขึ้นอยู่กับบริเวณผิวสัมผัสที่กระแสไหลเข้าและออกนั้นมีลักษณะเป็นโอห์มมิกที่ดีหรือไม่ ถ้าไม่มีคุณสมบัติโอห์มมิกที่ดีแสดงว่ามีความต้านทานที่ผิวสัมผัสทั้งสองขั้วไฟฟ้าเกิดขึ้นด้วย ค่าความต้านทาน  $R$  ที่วัดได้จึงเป็นค่าความต้านทานรวมทั้งหมด ดังนั้น ค่าความต้านทานจริงของสารกึ่งตัวนำจะน้อยกว่าค่าที่วัดได้แน่นอน ความถูกต้องอีกส่วนหนึ่งขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างความต้านทานของสารที่ต้องการวัดและความต้านทานภายใน (impedance) ของโวลต์มิเตอร์ที่ใช้วัด หากความต้านทานนี้ใกล้เคียงกับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จะมีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง ซึ่งในทางปฏิบัติจะคำนึงถึงผิวสัมผัสโอห์มมิกมากกว่าความผิดพลาดของโวลต์มิเตอร์ เนื่องจากที่ผิวสัมผัสจะดีหรือไม่ (เป็นโอห์มมิกหรือไม่) นั้นตรวจสอบได้ยากมาก จึงแก้ไขด้วยการทำให้เกิดผิวสัมผัสบริเวณพื้นที่มากขึ้นเพื่อลดความต้านทานที่ผิวสัมผัสลง จากนั้นจึงวัดศักย์ไฟฟ้าด้วยโวลต์มิเตอร์ โดยเลือกโวลต์มิเตอร์ที่มีความต้านทานภายในสูงๆ เท่าที่จะหาได้เพื่อลดความผิดพลาด

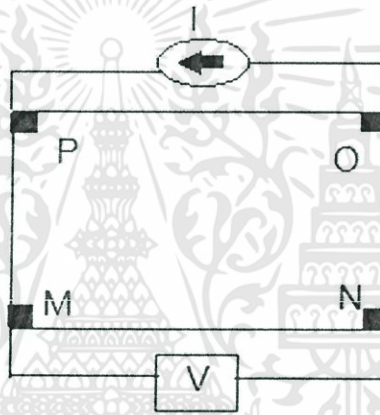
#### 2.7.2 การวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์

(จูตินัย, 2550; Runyan, 1975; Elançovan, 2003; Fahrenbruch, 1983; Dieter, 1998)

วิธีการวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ดังแสดงในภาพที่ 2.20 และ 2.21 เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมสำหรับการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของชิ้นสารตัวอย่างที่เป็นฟิล์มบางที่มีความหนาสม่ำเสมอและมีรูปร่างไม่แน่นอน โดยขั้วสัมผัสจะอยู่บริเวณขอบของชิ้นสารตัวอย่าง รอยต่อระหว่างขั้วสัมผัสที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะต้องไม่ขัดขวางการไหลของกระแส



ภาพที่ 2.20 แสดงตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชิ้นสารตัวอย่างเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์



ภาพที่ 2.21 แสดงการต่อขั้วเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์

การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถทำได้โดยจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าขั้ว P-O ทำการวัดความต่างศักย์ตกคร่อมขั้ว M-N จะทำให้ได้ค่า  $R_1$  จากสมการที่ (2.53)

$$R_1 = \frac{V_{MN}}{I_{PO}} \quad (2.53)$$

หลังจากนั้นทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าที่ขั้ว P-M แล้วทำการวัดความต่างศักย์ตกคร่อมขั้ว O-N จะได้ค่า  $R_2$  จากสมการที่ (2.54)

$$R_2 = \frac{V_{ON}}{I_{PM}} \quad (2.54)$$

เมื่อได้ค่า  $R_1$  และ  $R_2$  มาแล้วสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานแผ่นได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_{sh} = f \left( \frac{\pi}{\ln 2} \right) \left( \frac{R_1 + R_2}{2} \right) \quad (2.55)$$

เมื่อ  $f$  คือ แฟกเตอร์ค่าแก้ของแวนเดอร์เพาว์ (van der Pauw correction factor)

โดย

$$f = 1 - \left( \frac{\ln 2}{2} \right) \left( \frac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2} \right)^2 \quad (2.56)$$

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\rho = R_{sh} d \quad (2.57)$$

2.8 ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect) (ฐิตินัย, 2545; ฐิตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; Kittel, 1971; Runyan, 1957; Elangovan, 2003; Tilley, 2004)

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถเขียนในเทอมของสภาพคล่องของพาหะได้และความหนาแน่นพาหะด้วยความสัมพันธ์  
กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากอิเล็กตรอน

$$\rho = \frac{1}{ne\mu_e} \quad (2.58)$$

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากโฮล

$$\rho = \frac{1}{pe\mu_p} \quad (2.59)$$

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากพาหะสองชนิดคืออิเล็กตรอน และ โฮลซึ่งมีปริมาณใกล้เคียงกันสภาพต้านทานไฟฟ้าที่แท้จริงคือ

$$\rho = \frac{1}{e(n\mu_e + p\mu_p)} \quad (2.60)$$

เมื่อ  $n$  คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระ  
 $p$  คือ ความหนาแน่นของโฮล  
 $n_e$  และ  $n_p$  คือ สภาพคล่องของอิเล็กตรอนและโฮล

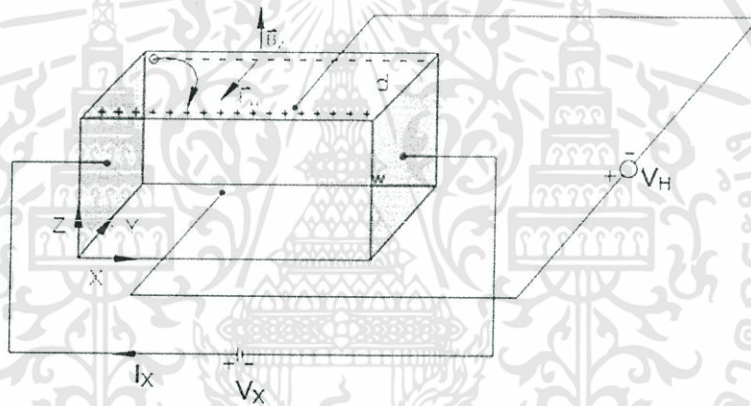
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั่นคือหากทราบสภาพต้านทานไฟฟ้า และสภาพคล่องของพาหะจะทำให้สามารถคำนวณค่าความหนาแน่นของพาหะข้างมากได้จากสมการที่ (2.61) และ (2.62) คือ

$$\text{ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอน} \quad n = \frac{1}{e\rho\mu_e} \quad (2.61)$$

$$\text{กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดพี} \quad p = \frac{1}{e\rho\mu_p} \quad (2.62)$$

เราสามารถคำนวณหา ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ค่าสภาพคล่องของพาหะ ได้หลายวิธี วิธีที่สะดวกและมักนิยมใช้กันอย่างกว้างขวางคือ การคำนวณจากการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ ปรากฏการณ์ฮอลล์ถูกค้นพบในปี พ.ศ.2422 โดย เอ็ดวิน เฮอร์เบิร์ต (Edwin Herbert Hall)



ภาพที่ 2.22 แสดงแผนภาพการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์บนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำชนิดพี

พิจารณาชิ้นสารกึ่งตัวนำชนิดพีที่เป็นรูปทรงดังแสดงในภาพที่ 2.22 ซึ่งมีกระแสไฟฟ้า  $I$  ไหลผ่านในแนว  $x$  หรืออาจมองว่ามีประจุบวกเคลื่อนที่ไปในทิศ  $x$  ด้วยความเร็วลอยเลื่อน  $v_x$  เกิดเป็นกระแสไฟฟ้าในแนวทิศทาง  $x$  คือ  $I_x$  ดังสมการที่ (2.63)

$$\text{จาก} \quad I = nqvA \quad (2.63)$$

$$\text{ดังนั้น} \quad I_x = qnv_x(wd) \quad (2.64)$$

$$\text{จากกฎของโอห์ม} \quad V = IR \quad (2.65)$$

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (2.66)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.22  $A = w \cdot d$  (2.67)

ถ้าทราบความต่างศักย์ ( $V_x$ ) ระหว่างปลายทั้งสองของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น สามารถหาค่า สภาพต้านทานไฟฟ้าได้จากสมการที่ (2.64) และ (2.65) และ (2.67)

$$\rho = \frac{V_x}{I_x} \cdot \frac{A}{L} = \frac{V_x}{I_x} \cdot \frac{wd}{L} \quad (2.68)$$

ปรากฏการณ์ฮอลล์เกิดขึ้นเมื่อสนามแม่เหล็ก ( $B_z$ ) ที่กระทำกับชิ้นสารในทิศ  $z$  อย่างสม่ำเสมอ อันตรกิริยาจากสนามแม่เหล็กมีผลทำให้แนวกระแสของอิเล็กตรอนเบี่ยงเบนไปในทิศ  $-y$  สอดคล้องในบริเวณขอบด้านนอก ( $y=0$ ) และเหนี่ยวนำให้เกิดอิเล็กตรอนขึ้นที่ขอบด้านใน ( $y$ ) ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าฮอลล์ในทิศ  $-y$  (Hall field:  $E_y$  หรือ  $E_H$ ) และเกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์หรือ เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าฮอลล์ในทิศ  $y$  (Hall Voltage :  $V_H$ ) ขึ้น ทำให้กลุ่มโฮลเคลื่อนที่ไปด้วย แรงลอเรนซ์ (Lorentz's force)

$$F = q(v_x \times B_z) + qE_y \quad (2.69)$$

เมื่อแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่กระทำต่อโฮลมีค่าเท่ากันจะเกิดสภาวะสมดุลเชิงความร้อน หรือสภาวะคงตัว (steady state) ทำให้โฮลเคลื่อนที่ในทิศ  $-z$  ดังเดิมเพราะฉะนั้นจะทำให้ได้ว่า

$$E_y = v_x B_z = \frac{1}{qn} \cdot \frac{I_x}{wd} \cdot B_z \quad (2.70)$$

หากพิจารณาสมการที่ (2.70) จะเห็นว่าสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดขึ้นเป็นปฏิภาคกับความหนาแน่นกระแสและสนามแม่เหล็ก สามารถเขียนได้ในรูปของ

$$E_y = R_H \cdot J_x \cdot B_z \quad (2.71)$$

เมื่อ  $J_x = \frac{I_x}{wd}$  (2.72)

แล้ว  $R_H = \frac{E_y}{J_x B_z} = \frac{1}{qn}$  (2.73)

เรียก  $R_H$  ว่าเป็นสัมประสิทธิ์ฮอลล์หรือค่าคงตัวฮอลล์ (Hall coefficient) ซึ่งนิยามว่าเป็นสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดจากความหนาแน่นกระแสของพาหะขนาด 1 หน่วยไหลผ่านภายใต้สนามแม่เหล็กขนาด 1 หน่วย

เราอาจทราบศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากสนามไฟฟ้าฮอลล์ โดยอินทิเกรตสนามไฟฟ้าฮอลล์ ตลอดความกว้าง ( $w$ ) ของแผ่นสารและเรียกความต่างศักย์นี้ว่า ความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ ( $V_H$ ) นั่นคือ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_H = \int_0^w E_y dy = \int_0^w \frac{1}{qn} \cdot \frac{I_x B_z}{wd} dy = \frac{1}{qn} \cdot \frac{I_x B_z}{d} \quad (2.74)$$

สัมประสิทธิ์ฮอลล์ที่ได้จากการวัด คือ

$$R_H = \frac{V_H}{I_x} \cdot \frac{d}{B_z} \quad (2.75)$$

ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนตามนิยาม คือ

$$n = \frac{1}{qR_H} = \frac{I_x}{V_H} \cdot \frac{B_z}{qd} \quad (2.76)$$

โดยทั่วไปพาหะอิสระที่เคลื่อนที่ในสารกึ่งตัวนำ มักประสบกับกลไกการกระเจิงหลายๆ ชนิด กลไกการกระเจิงของพาหะในสารกึ่งตัวนำจะเป็นกลไกที่ขึ้นอยู่กับพลังงานของพาหะ โดยที่ช่วงเวลาการปลอดการกระเจิง ( $\tau$ ) จะแสดงได้ดังนี้

$$\tau = \tau(E) \quad (2.77)$$

เมื่อคิดผลรวมจากการกระเจิงที่ขึ้นกับพลังงานของพาหะ สัมประสิทธิ์ฮอลล์สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น 
$$R_H = \frac{r}{nq} \quad (2.78)$$

กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดพี 
$$R_H = \frac{r}{pq} \quad (2.79)$$

เมื่อ  $r$  คือ แฟกเตอร์การกระเจิง (scattering factor) ของพาหะในปรากฏการณ์ฮอลล์ ซึ่งสามารถนิยาม ค่า  $r$  ได้จากความสัมพันธ์ดัง

$$r = \frac{\langle \tau \rangle^2}{\langle \tau^2 \rangle} \quad (2.80)$$

$r$  มีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ขึ้นอยู่กับกลไกการกระเจิงของพาหะเช่น การกระเจิงเนื่องจากโครงผลึกหรือการกระเจิงเนื่องจากอะตอมของสารเจือปนที่ถูกไอออนในซึ่มประสิทธิ์ฮอลล์แปรค่าตามสนามแม่เหล็กและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิ ซึ่งจะมีค่าใกล้ 1 เมื่อชั้นสารอยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กความเข้มสูงมาก ดังนั้นเราทราบค่าของ  $r$  จากการทดลองด้วยความสัมพันธ์

$$r = \frac{R_H(B)}{R_H(B = \infty)} \quad (2.81)$$

ในทางปฏิบัติสนามแม่เหล็กที่ใช้วัดโดยทั่วไปมีค่าอยู่ระหว่าง 5 - 10,000 เกาส์ ซึ่งค่า  $r$  ในช่วงนี้มีการเปลี่ยนแปลงไม่มาก ดังนั้นอาจประมาณได้ว่าเป็นค่าคงที่ จากสมการที่ (2.76) และ (2.77) สามารถนิยามค่าสภาพคล่องฮอลล์ ( $\mu_H$ ) ได้เป็น

$$\mu_H = \left| \frac{R_H}{\rho} \right| = r_\mu \quad (2.82)$$

หรือจากสมการที่ (2.74) และ (2.79)

$$\mu_H = \frac{V_H}{I_H} \cdot \frac{d}{B_z} \cdot \frac{1}{\rho} \quad (2.83)$$

ค่าสภาพคล่องฮอลล์แตกต่างจากค่าสภาพคล่องที่ได้จากการนำไฟฟ้าด้วยอัตราส่วนของ  $r$  ซึ่งมีค่ามากกว่า 1 โดยทั่วไปเพื่อลดความซับซ้อนเมื่อกำหนดความหนาแน่นของพาหะจึงมักประมาณว่า  $r$  มีค่าเท่ากับ 1 ความหนาแน่นของพาหะที่คำนวณจากปรากฏการณ์ของฮอลล์ จึงอาจสูงกว่าความหนาแน่นของพาหะที่แท้จริงถึง 30 เปอร์เซ็นต์

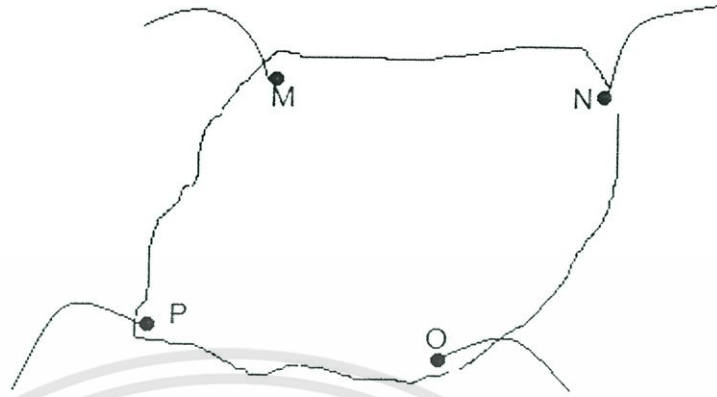
2.8.1 การศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ (จูตินัย, 2549; จูตินัย, 2550; Dieter, 1998; Elangovan, 2003; Fahrenbruch, 1993; Caballero, 2003)

เทคนิคนี้ได้รับการพัฒนาขึ้นมาจากพื้นฐานของวิชาคณิตศาสตร์ คือ คอนฟอร์มอลแมปปิง (conformal mapping) โดยนักวิทยาศาสตร์ชื่อ แวนเดอร์เพาว์ (van der Pauw) สำคัญของเทคนิคนี้อยู่ที่การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของแผ่นสารตัวอย่างรูปร่างใดๆ ซึ่งสามารถทำได้อย่างแม่นยำโดยไม่จำเป็นต้องทราบ ลักษณะของรูปแบบการกระจายของ เส้นทางเดินกระแสที่ไหลภายในแผ่นสาร ถ้าสารตัวอย่างประพฤติตามเงื่อนไขต่อไปนี้

1. ขั้วสัมผัสวางอยู่ที่ขอบของชั้นสาร
2. ขนาดของขั้วสัมผัสต้องมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับเส้นรอบรูปของชั้นสาร
3. สารตัวอย่างต้องมีความหนาแน่นเท่ากันตลอด
4. เนื้อสารตัวอย่างต้องไม่มีรูหรือรอยแยกใดๆ

พิจารณาชั้นสารรูปร่างเป็นแผ่นบางใดๆ และมีขั้วสัมผัสเล็กๆ M, N, O และ P กระจายอยู่ที่บริเวณขอบของแผ่นซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขข้างต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.23 แสดงการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพอร์บนสารตัวอย่างที่เป็นแผ่นบางที่มีรูปทรงใดๆ

ในการวัดสภาพคล่องฮอลล์ หากกระบวนการวัดกระทำภายใต้สนามแม่เหล็ก ความเข้ม  $B$  ที่กระทำตั้งฉากกับระนาบแผ่นสาร กระแสไฟฟ้าจ่ายเข้าในแนวทแยงมุมชี้  $M, O$  และวัดความต่างศักย์จากชี้  $N, P$

นิยาม 
$$R_{MNO P} = \frac{V_{NP}}{I_{MO}} \quad (2.84)$$

สัมประสิทธิ์ฮอลล์จากเทคนิคของแวนเดอร์เพอร์ คือ

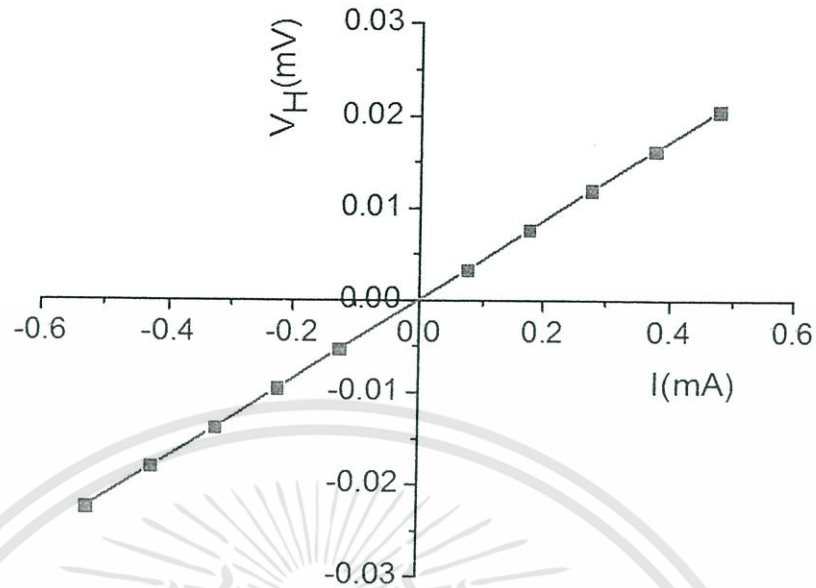
$$R_H = \left( \frac{V_H}{I} \right) \left( \frac{d}{B} \right) \quad (2.85)$$

- เมื่อ  $V_H$  คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์หรือผลต่างระหว่างค่า  $V_{NP}$  ในขณะที่มีสนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็ก
- $d$  คือ ความหนาของชิ้นสารตัวอย่าง
- $B$  คือ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก

จากสมการที่ (2.84) จะได้ว่า

$$R_H = \frac{V_H}{I} \left( \frac{d}{B} \right) \quad (2.86)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ ( $V_H$ ) กับ ค่ากระแสไฟฟ้า ( $I$ )

เมื่อทำการเขียนกราฟระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ ( $V_H$ ) กับ ค่ากระแสไฟฟ้า ( $I$ ) ที่ได้จากการทดลอง เราจะได้ลักษณะกราฟดังภาพที่ 2.24 โดยที่ความชันของกราฟที่ได้จะมีค่าเป็น  $\frac{V_H}{I}$  สภาพคล่องพาหะของฮอลล์สามารถคำนวณได้จาก

$$\mu_H = \frac{R_H}{\rho} \quad (2.87)$$

และสามารถคำนวณหาระยะทางเฉลี่ยที่ปลดการกระเจิงได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$I = \left( \frac{h}{2e} \right) \left( \frac{3n}{\pi} \right)^{1/3} \mu_H \quad (2.88)$$

เมื่อ  $h$  คือ ค่าคงตัวของพลังค์  $6.625 \times 10^{-34}$  จูล-วินาที

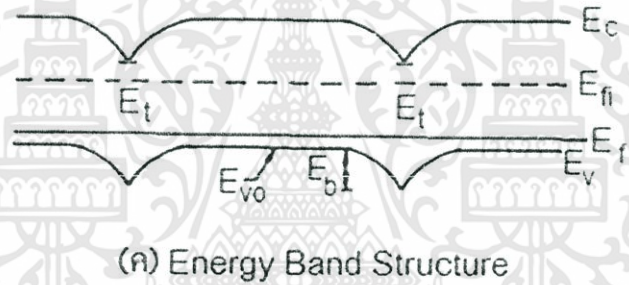
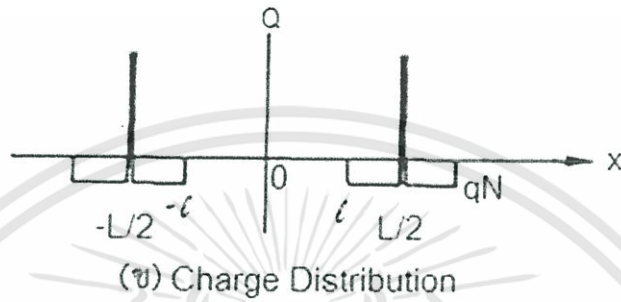
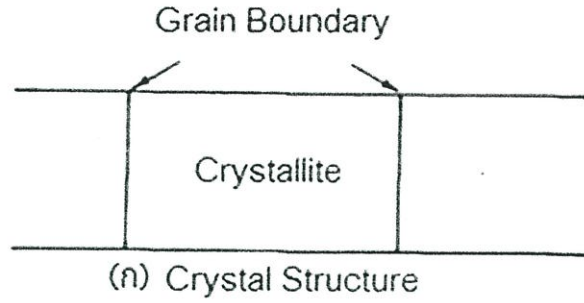
ในทางปฏิบัติการเตรียมสารให้มีรูปทรงตามเงื่อนไขทั้ง 4 ข้อดังกล่าวอาจเป็นไปได้ยาก โดยเฉพาะขนาดและตำแหน่งของขั้วสัมผัสซึ่งมักไม่เป็นจุดและไม่อยู่ที่ขอบของชิ้นสารตามทฤษฎีจึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของผลการวัด

2.9 กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในฟิล์มบางที่อุณหภูมิต่างๆ (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; ฐิตินัย, 2551)

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

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

จากข้อสมมุติฐานดังกล่าวข้างต้น และโดยการประมาณแบบรอยต่อชันบันได (abrupt junction approximation) แถบพลังงานของผลึกพหุพันธ์ตรงบริเวณรอยต่อสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2.25



ภาพที่ 2.25 แสดงแบบจำลองของฟิล์มบางตรงบริเวณขอบรอยต่อของเกรนดังนี้ คือ

ก. ลักษณะของเกรนในผลึกพหุพันธ์

ข. การกระจายของประจุในเนื้อเกรนและที่ขอบของเกรน

ค. โครงสร้างแถบพลังงานของผลึกพหุพันธ์ในเนื้อเกรนและที่ขอบของเกรน

สภาพนำไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิจะขึ้นกับเนื้อเกรนว่าจะเป็นบริเวณพร่องพาหะทั้งหมดหรือเป็นบริเวณพร่องพาหะบางส่วน (partially depleted of carriers) ซึ่งจะอาศัยค่าวิกฤตของความหนาแน่นของสารเจือ ( $N_a^*$ ) ดังรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 2.9.1 กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในฟิล์มบางในช่วงอุณหภูมิสูง

จากแบบจำลองที่พัฒนาโดยแบ็คคาร์นินิ (Baccarini, 1978) เมื่อ  $N_a < N_a^*$  ในเนื้อเกรนจะเป็นบริเวณพร่องพาหะทั้งหมด ซึ่งจะเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิสูงระดับเฟอร์มิ ( $E_f$ ) จะอยู่ระดับเดียวกับ  $E_t$  สภาพนำไฟฟ้าจะแสดงได้ด้วยสมการ

$$\sigma = \left[ \frac{L^2 e^2 N_v N_a v_c}{2kT(N_t - LN_a)} \right] \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (2.89)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ 
$$v_c = \left[ \frac{kT}{2\pi m^*} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.90)$$

และ 
$$N_v = 2 \left[ \frac{2\pi m^* kT}{h^2} \right]^{\frac{3}{2}} \quad (2.91)$$

สมการที่ (2.90) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\sigma T^{-1} = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (2.92)$$

$$\ln \sigma T^{-1} = -\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T}\right) + \ln \sigma_0 \quad (2.93)$$

$$\ln \sigma T^{-1} = -\frac{E_a}{1,000k} \left(\frac{1,000}{T}\right) + \ln \sigma_0 \quad (2.94)$$

$$\text{ความชัน} = -\frac{E_a}{1,000k} \quad (2.95)$$

$$E_a = \frac{(1,000)(k)(\text{ความชัน})}{1.8 \times 10^{-19}} \quad (2.96)$$

โดยที่  $E_a$  คือ ค่าพลังงานกระตุ้น มีหน่วยเป็นอิเล็กตรอนโวลต์ ภาพที่ 2.26 แสดงตัวอย่างของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\ln \sigma T^{-1}$  กับ  $\frac{1,000}{T}$  ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่อุณหภูมิในช่วง 125-365 เคลวิน (Serin et al. 2011) สำหรับ ค่าความหนาแน่นของกักตักพาหะ  $N_i$  สามารถหาได้จากสมการที่ (2.88) เมื่อทราบขนาดของเกรน ( $L$ ) แล้ว ซึ่งขนาดของเกรนสามารถคำนวณได้จากสมการของเซอร์เรอร์ดังสมการ

$$L = \frac{0.94\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (2.97)$$

ส่วนค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่ขอบของเกรนจะแสดงได้ดังนี้ คือ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_b = \frac{e^2 L^2 N_a}{8\epsilon_s} \quad (2.98)$$

ส่วนระดับพลังงานของกัณฑ์พาหะ( $E_t$ ) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$E_a = \frac{1}{2} E_g - E_t \quad (2.99)$$

### 2.9.2 กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในฟิล์มบางในช่วงอุณหภูมิปานกลาง

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

$$\sigma = \left[ \frac{Le^2 n v_c}{kT} \right] \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (2.100)$$

เมื่อ  $n$  คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระในบริเวณที่เป็นกลางทางไฟฟ้าสมการที่ (2.100) สามารถเขียนใหม่ได้เป็นดังนี้ คือ

$$\sigma T^{\frac{1}{2}} = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (2.101)$$

$$\ln \sigma T^{\frac{1}{2}} = -\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T}\right) + \ln \sigma_0 \quad (2.102)$$

$$\ln \sigma T^{\frac{1}{2}} = -\frac{E_a}{1,000k} \left(\frac{1,000}{T}\right) + \ln \sigma_0 \quad (2.103)$$

$$\text{ความชัน} = -\frac{E_a}{1,000k} \quad (2.104)$$

$$E_a = -\frac{1,000(k)(\text{ความชัน})}{(1.6 \times 10^{-19})} \quad (2.105)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่ง  $E_a$  ในที่นี้ คือ ความสูงของกำแพงศักย์ที่ขอบของเกรน ( $E_b$ ) โดยที่

$$E_b = \frac{e^2 L^2 N_a}{8\epsilon_s} \quad (2.106)$$

เมื่อ  $\epsilon_s$  คือ เพอร์มิตติวิตี (permittivity) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ

ภาพที่ 2.27 แสดงตัวอย่างของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\ln \sigma T^{\frac{1}{2}}$  กับ  $\frac{1000}{T}$  ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่อุณหภูมิในช่วง 125- 365 เคลวิน (Serin et al. 2011) จากสมการที่ (2.105) จะเห็นได้ว่า ค่า  $E_b$  จะไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ เนื่องจากเงื่อนไขที่ระดับเฟอร์มิ ( $E_F$ ) อยู่สูงกว่าระดับกับดักพาหะ ( $E_t$ ) ดังนั้นประจุไฟฟ้าจะเข้าไปบรรจุอยู่ในกับดักพาหะทั้งหมดจนเต็ม ส่งผลให้กับดักพาหะไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ สำหรับความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ ( $N_a$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.105) รวมทั้งความยาวเดอบาย ( $L_D$ ) จะคำนวณได้จากความสัมพันธ์

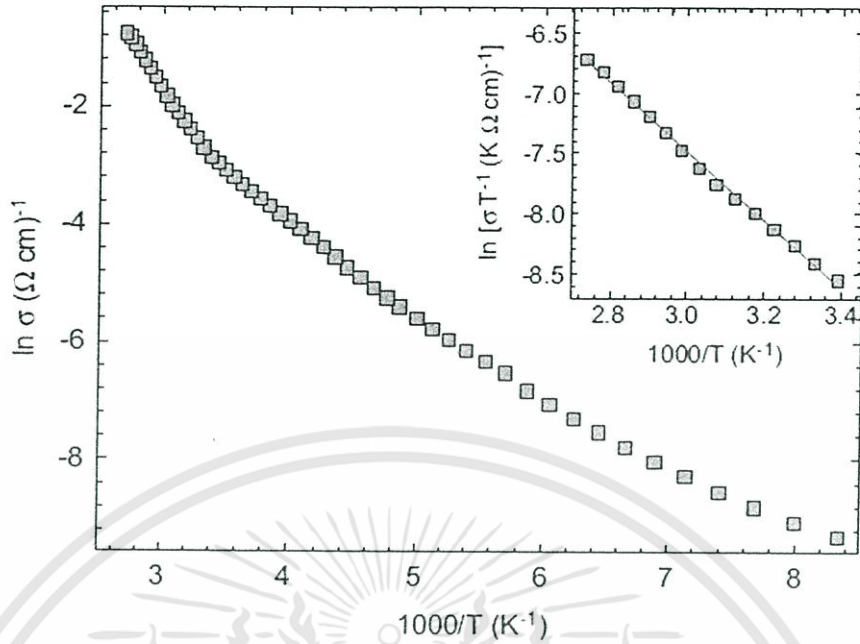
$$L_D = \left[ \frac{kT\epsilon_s}{e^2 N_a} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.107)$$

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

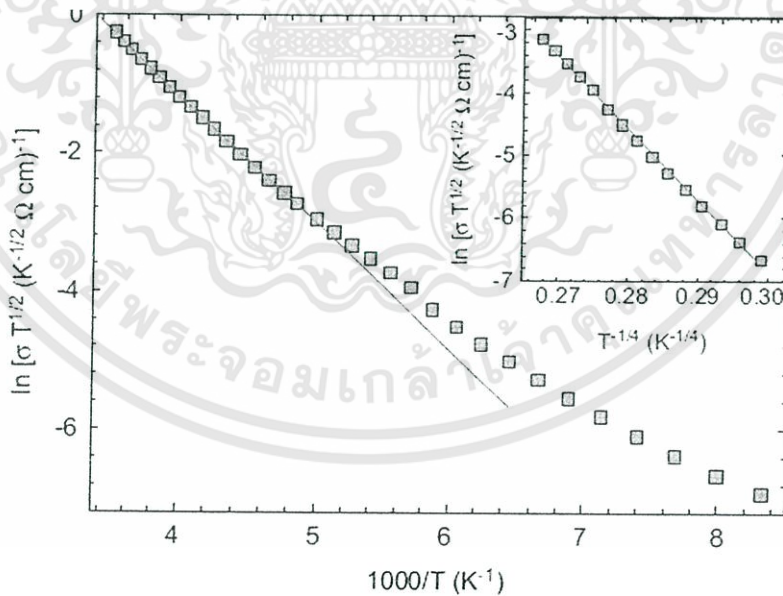
$$\sigma = eN_c^2 L v_c (2\epsilon_s N_d^{-1} E_b)^{\frac{1}{2}} (kTN_i)^{-1} \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (2.108)$$

ซึ่ง

$$E_a = \frac{1}{2} E_g - E_t \quad (2.109)$$



ภาพที่ 2.26 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\ln \sigma$  กับ  $\frac{1000}{T}$  ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่อุณหภูมิในช่วง 125-365 เคลวิน สำหรับในรูปแทรกคือกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\ln \sigma T^{-1}$  กับ  $\frac{1000}{T}$  (serin et al. 2011)



ภาพที่ 2.27 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\ln \sigma T^{\frac{1}{2}}$  กับ  $\frac{1000}{T}$  ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO สำหรับในรูปแทรกกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\ln \sigma T^{\frac{1}{2}}$  กับ  $T^{\frac{-1}{4}}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

การนำไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิต่ำมาก จะเกี่ยวกับการนำไฟฟ้าของพาหะแบบอยู่ในช่องว่างแถบพลังงาน สถานะถูกจำกัดเฉพาะที่เวลานี้มีระยะทางไม่คงที่ ดังนั้นจึงเรียกการนำไฟฟ้าชนิดนี้ว่าการนำไฟฟ้าของพาหะแบบกระโดดในระยะไม่คงที่ (VRH) และจะปรากฏเด่นชัดที่อุณหภูมิต่ำมากซึ่งในกรณี 3 มิติ จะแสดงได้โดยความสัมพันธ์ดังนี้

$$\sigma_{hop} = \sigma = \frac{\sigma_0}{T^2} \exp\left[-\frac{T_0}{T}\right]^{\frac{1}{4}} \quad (2.110)$$

$$\sigma T^{\frac{1}{2}} = \sigma_0 \exp\left[-\frac{T_0}{T}\right]^{\frac{1}{4}} \quad (2.111)$$

$$\ln\left(\sigma T^{\frac{1}{2}}\right) = -\left(\frac{T_0}{T}\right)^{\frac{1}{4}} + \ln \sigma_0 \quad (2.112)$$

เมื่อ  $\sigma_0$  คือ แฟกเตอร์หน้าพจน์เอ็กซ์โพเนนเชียล (pre-exponential factor)  
 $k$  คือ ค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $1.38 \times 10^{-23}$  จูลต่อเคลวิน  
 $T$  คือ อุณหภูมิเคลวิน

เมื่อนำเอาสมการที่ (2.111) ไปเขียนกราฟจะได้กราฟเชิงเส้นโดยที่ค่าความชันของกราฟคือ  $-\left(T_0\right)^{\frac{1}{4}}$  ส่วนค่า  $\ln \sigma_0$  คือจุดตัดแกน  $\ln\left(\sigma T^{\frac{1}{2}}\right)$  ที่จุด  $T^{-\frac{1}{4}} = 0$  โดยที่

$$\sigma_0 = 3e^2 v \left[ \frac{N(E_F)}{8\pi a k} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.113)$$

$$T_0 = \frac{18a^3}{kN(E_F)} \quad (2.114)$$

เมื่อ  $\nu$  คือ ความถี่ของโฟนอนที่อุณหภูมิเดอบาย (Debye temperature) จะมีค่าประมาณ  $1 \times 10^{13}$  เฮิร์ตซ์

$N(E_F)$  คือ ความหนาแน่นของสถานะถูกจำกัดเฉพาะที่ที่ระดับเฟอร์มิ (density of

- localized states at Fermi level)
- $\alpha$  คือ ค่าคงที่ของการสลายตัวของฟังก์ชันคลื่นของสถานะถูกจำกัดเฉพาะที่ระดับเฟอร์มี (decay constant of the wave function at the localized state near Fermi level )
- $e$  คือ ประจุอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ  $1.6 \times 10^{-19}$  คูลอมบ์
- $T_0$  คือ องศาของความไม่เป็นระเบียบ (Degree of disorder)

จากสมการที่ (2.122) ถ้ายกกำลังสองทางด้านซ้ายและขวามือของเครื่องหมายเท่ากับจะได้

$$\sigma_0^2 = 9e^4 v^2 \left[ \frac{N(E_F)}{8\pi\alpha k} \right] \quad (2.115)$$

เอาสมการที่ (2.122) คูณกับสมการที่ (2.124) จะได้

$$\sigma_0^2 T_0 = \frac{81\alpha^2 e^4 v^2}{4\pi k^2} \quad (2.116)$$

$$\alpha^2 = \left[ \frac{4\pi k^2}{81e^4 v^2} \right] \sigma_0^2 T_0 \quad (2.117)$$

$$\alpha = \left[ \frac{2\sqrt{\pi} k}{9e^2 v} \right] \sigma_0 T_0^{\frac{1}{2}} \quad (2.118)$$

เมื่อค่าความถี่โฟนอน  $\nu = 1 \times 10^{13}$  เฮิร์ตซ์ดังนั้นก็จะได้ว่า

$$\alpha = 21.23 \sigma_0 T_0^{\frac{1}{2}} \quad (2.119)$$

ถ้าแทนสมการที่ (2.118) ลงในสมการที่ (2.117) จะได้ว่า

$$N(E_F) = \left[ \frac{16\pi^{\frac{3}{2}} k^2}{81e^6 v^3} \right] \sigma_0^3 T_0^{\frac{1}{2}} \quad (2.120)$$

$$N(E_F) = (2.0 \times 10^9) \sigma_0^3 T_0^{\frac{1}{2}} \quad (2.121)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าระยะทางเฉลี่ยของการกระโดด (average hopping distance:  $R$ ) มีหน่วยเป็น เซนติเมตร และ ค่าพลังงานเฉลี่ยของการกระโดด (average hopping energy:  $W$ ) มีหน่วยเป็นอิเล็กตรอนโวลต์ จะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$R = \left[ \frac{9}{8\pi\alpha k T N(E_F)} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (2.122)$$

$$W = \frac{3}{4\pi R^3 N(E_F)} \quad (2.123)$$

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

$$N(E_F) = \left( \frac{2\epsilon_S}{e^2} \right) N_a^{\frac{2}{3}} \left( 1 - \frac{N_d}{N_a} \right)^{\frac{4}{3}} \quad (2.124)$$

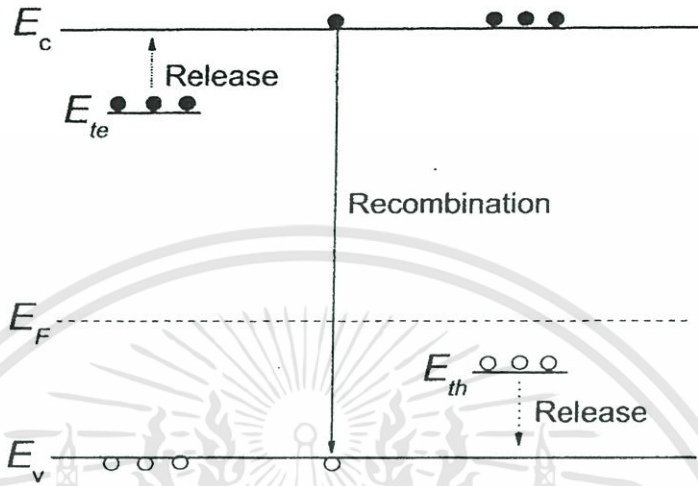
โดยที่  $N_d$  คือ ค่าความหนาแน่นของอะตอมสารเจือชนิดผู้ให้ ซึ่งเป็นพาหะข้างน้อยของสารกึ่งตัวนำชนิดพี โดยอัตราส่วน  $\frac{N_d}{N_a} = k$  และ  $k < 1$  เสมอ

## 2.10 สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงดอร์ัน (จามนิตย์, 2556; ฐิตินัย, 2556)

ในสารกึ่งตัวนำมักมีข้อบกพร่องผลึกเสมอ ข้อบกพร่องผลึกมีหลายชนิด ข้อบกพร่องผลึกบางชนิดมีคุณสมบัติในการจับอิเล็กตรอนและ/หรือโฮลอิสระได้ จึงมักเรียกว่ากับดักพาหะ กับดักพาหะชนิดต่างๆ จะปรากฏเป็นระดับพลังงานในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ โดยในภาพที่ 2.28 มีทั้งระดับพลังงานของกับดักพาหะชนิดจับโฮล ( $E_{\text{tr}}$ ) และกับดักพาหะชนิดจับอิเล็กตรอน ( $E_{\text{e}}$ ) (Jiang, 2012) คำว่าการปลดปล่อย (release) เป็นกลไกที่กับดักพาหะปล่อยอิเล็กตรอนให้กับแถบนำ และเป็นกับดักพาหะชนิดปล่อยโฮลให้กับแถบวาเลนซ์ ส่วนคำว่าการรวมตัว (recombination) เป็นกลไกที่อิเล็กตรอนในแถบนำพาหะรวมตัวกับโฮลในแถบวาเลนซ์โดยไม่ผ่านกับดักพาหะ ขณะที่สารกึ่งตัวนำยังไม่ได้มีการฉายแสงกับดักพาหะจะมีการจับอิเล็กตรอนหรือจับโฮลอยู่ก่อนแล้ว ส่วนอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำและโฮลในแถบวาเลนซ์มีปริมาณน้อย สารกึ่งตัวนำจึงนำกระแสไฟฟ้าได้ไม่ดี กระแสมืด (dark current) จึงมีค่าน้อย แต่เมื่อมีการฉายแสงลงบนสารกึ่งตัวนำจะเกิดกระบวนการสร้างอิเล็กตรอนและโฮลอิสระขึ้นในแถบนำและแถบวาเลนซ์ตามลำดับ เนื่องจากการดูดกลืนโฟตอนที่ มีพลังงานสูงเพียงพอ เมื่อไบแอสด้วยแรงดันไฟฟ้าให้กับสารกึ่งตัวนำ กระแสโฟตอนจะมีปริมาณเพิ่มขึ้น แต่เมื่อหยุดฉายแสงหรือหยุดการกระตุ้นด้วยแสง กระแสไฟฟ้าควรลดลงสู่ค่ากระแสมืดเหมือนในขณะที่ไม่มีการฉายแสง แต่บางครั้งพบว่า กับดักพาหะที่จับอิเล็กตรอนและ/หรือจับโฮล มีพฤติกรรมไม่ปล่อยอิเล็กตรอนหรือโฮลออกมาทันทีอย่างปกติธรรมดา นั่นคือยังมีประจุค้างอยู่ในกับดักพาหะ ดังนั้นอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำและ/หรือโฮลในแถบวาเลนซ์จึงยังคงปรากฏอยู่มากเพื่อทำหน้าที่ในการรักษาความเป็นกลางทางไฟฟ้าโดยปกติกลไกการปลดปล่อยจะใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารทสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นใบเขียวระเอียดนี้ในการใช้ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลานานกว่ากลไกการรวมตัวแต่เนื่องจากกับดักพาหะมีการปล่อยอิเล็กตรอนและ/หรือโฮลออกมาซ้ำมาก ส่งผลให้กลไกการรวมตัวใช้เวลายังนานขึ้นไปอีก จึงเป็นที่มาของ ค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงดื้อรั้น (persistent photoconductivity)



ภาพที่ 2.28 แสดงระดับพลังงานของกับดักพาหะชนิดจับอิเล็กตรอน ( $E_{te}$ ) และ กับดักพาหะชนิดจับโฮล ( $E_{th}$ ) ที่ปรากฏในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ จุดทึบและจุดโปร่งจะแสดงถึงอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ

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

$$I = envA \tag{2.125}$$

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

$$v = \frac{\mu V_a}{l} \tag{2.126}$$

แทนสมการที่ (2.124) ลงในสมการที่ (2.125) จะได้

$$I = en\mu n_a \left( \frac{wd}{l} \right) \tag{2.127}$$

แต่เนื่องจากความหนาแน่นของพาหะอิสระ ( $n$ ) เกิดมาจากกับดักพาหะ ดังนั้นความหนาแน่นของพาหะอิสระ ( $n$ ) ที่สัมพันธ์กับกับดักพาหะชนิดที่  $i$  ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา จะแสดงได้ดังนี้คือ (Studenikin, 1998)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$n = N_{ii} \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \quad (2.128)$$

แทนสมการที่ (2.126) ลงในสมการที่ (2.127) จะได้ว่า กระแสไฟฟ้า  $I_i$  ที่เกิดจากกับดักพาหะชนิด  $i$  คือ

$$I_i = e\mu N_{ii} V_a \left(\frac{wd}{l}\right) \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \quad (2.129)$$

กระแสไฟฟ้าทั้งหมด ( $I$ ) ที่สัมพันธ์กับกับดักพาหะทุกชนิดจะเป็นดังนี้คือ

$$I = e\mu \left(\frac{wd}{l}\right) V_a \sum_i \left( N_{ii} \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \right) \quad (2.130)$$

เมื่อ  $N_{ii}$  คือ ความหนาแน่นของกับดักพาหะต่อปริมาตรชนิดที่  $i$  ซึ่งสามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$N_{ii} = \frac{I}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{wd}\right) \exp\left(\frac{t}{\tau_i}\right) \quad (2.131)$$

สำหรับกรณีฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ จะประมาณว่า ความหนา  $d$  มีค่าน้อยมาก ดังนั้น จากสมการที่ (2.134) จะเขียนใหม่ได้ว่า (Gu, 2005; Huang, 2011)

$$I = e\mu \left(\frac{w}{l}\right) (nd) V_a = e\mu \left(\frac{w}{l}\right) \sigma_i V_a \quad (2.132)$$

เมื่อ  $\sigma_i$  คือ ความหนาแน่นของกับดักพาหะต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ แต่ถ้ากับดักพาหะมีหลายชนิด กระแสรวม ( $I$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่สัมพันธ์กับกับดักพาหะทุกชนิดจะเป็นดังนี้ คือ

$$I = e\mu \left(\frac{w}{l}\right) V_a \sum_i \left( \sigma_{ii} \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \right) \quad (2.133)$$

เมื่อ  $\sigma_{ii}$  คือความหนาแน่นของกับดักพาหะต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ชนิดที่  $i$  ซึ่งสามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$\sigma_{ii} = \frac{I}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{w}\right) \exp\left(\frac{t}{\tau_i}\right) \quad (2.134)$$

โดยที่

- $V_a$  คือ แรงดันไบแอสที่ป้อนให้กับสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีหน่วยเป็นโวลต์  
 $\mu$  คือ สภาพคล่องของพาหะมีหน่วยเป็น ตารางเซนติเมตรต่อ(โวลต์-วินาที)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$w$	คือ	ความกว้างของสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีหน่วยเป็น เซนติเมตร
$l$	คือ	ความยาวของสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีหน่วยเป็น เซนติเมตร
$d$	คือ	ของสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีหน่วยเป็น เซนติเมตร
$I$	คือ	กระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากการทดลองที่เวลา $t$ ใดๆ
$\tau_r$	คือ	ช่วงชีวิตขาลง (decay time)
$N_{ii}$	คือ	ค่าความหนาแน่นของกัมมันตภาพหะในชั้นสารตัวอย่างมีหน่วยเป็นต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
$\sigma_{ii}$	คือ	ค่าความหนาแน่นของกัมมันตภาพหะในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำมีหน่วยเป็น ต่อตารางเซนติเมตร

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

$$\tau_r = \tau_{r0} \exp\left(\frac{E_t}{kT}\right) \quad (2.135)$$

$$\ln \tau_r = \ln \tau_{r0} + \left(\frac{E_t}{k}\right)\left(\frac{1}{T}\right) = \ln \tau_{r0} + \frac{E_t}{(1,000k)}\left(\frac{1,000}{T}\right)$$

เมื่อ

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

ดังนั้น

$$E_t = \frac{(1,000)k(\text{ความชัน})}{q} = (0.086)(\text{ความชัน}) \text{ อิเล็กตรอนโวลต์} \quad (2.136)$$

ในการศึกษาพลาสมาไฟฟ้าเชิงแสงคือร้อนจะต้องมีการฉายแสงให้กับสารตัวอย่าง จะได้ว่ากระแสโฟโต ( $I_p$ ) จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลา ( $t$ ) ดังภาพที่ 2.29 ซึ่งจะเรียกว่าเป็นกระแสโฟโตขาขึ้น (rise current) ดังความสัมพันธ์ (Ghosh, 2007)

$$I_p = I_o \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_r}\right) \right] \quad (2.137)$$

เมื่อ  $I_o$  คือกระแสเริ่มต้นของกระแสโฟโตขาขึ้น (เมื่อ  $t=0$ ) หลังจากหยุดการฉายแสง กระแสโฟโตจะลดลงตามเวลา ( $t$ ) ซึ่งจะเรียกว่าเป็นกระแสโฟโตขาลง (decay current) จะแสดงดังความสัมพันธ์ (Ghosh, 2007)

$$I_p = I_o' \exp\left(-\frac{t}{\tau_d}\right) \quad (2.138)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{I}{I_{\max}} = 1 - \exp\left(-t/\tau_r\right)$$

$$1 - \frac{I}{I_{\max}} = \exp\left(-t/\tau_r\right)$$

$$\ln\left[1 - \frac{I}{I_{\max}}\right] = -t/\tau_r \quad (2.162)$$

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

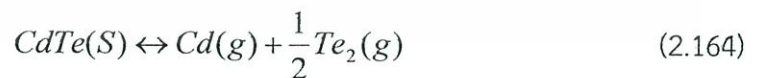
ถ้า  $\frac{I}{I_{\max}} \ll 1$  สมการที่ (2.162) จะประมาณได้ว่าเป็น

$$\frac{I}{I_{\max}} = t/\tau_r \quad (2.163)$$

ข้อสังเกตคือสมการที่ (2.162) จะใช้ได้จริงเมื่อ  $\frac{I}{I_{\max}} \ll 1$  ก็คือช่วงแรกๆ ของกราฟกระแสขาขึ้น ส่วนช่วงท้ายๆ ของกราฟความถูกต้องจะลดลง การคำนวณหาค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะทั้งชนิดฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำและเซรามิกจะใช้สมการที่ (2.156), (2.158), (2.159) และ (2.160) ได้เช่นเดียวกับกระแสขาลง

### 2.11 การระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด (Close-Spaced Sublimation: CSS) (ฐิตินัย, 2556)

การระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดเป็นกระบวนการเกิดก้อนเนื้อผลึก (bulk) หรือฟิล์มบางของสารตั้งต้น ที่กลายเป็นไอแล้วควบแน่นลงบนแผ่นฐานรองรับที่วางอยู่บนสารตั้งต้นในระบบปิดในกระบวนการระเหิดในระยะประชิดนี้สามารถให้อัตราการเคลื่อนต่ำ ในกระบวนการระเหิดในระยะประชิดนี้ พิจารณาสมดุลปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารตั้งต้นและแผ่นฐานรองรับดังสมการ



จากกฎการคงตัวของมวล (law of mass action) พิจารณาที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน

$$P\left(\frac{Cd}{CdTe}\right)P^{\frac{1}{2}}\left(\frac{Te_2}{CdTe}\right) = K_p(T) \quad (2.165)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $P$  คือ ความดัน

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

$$K_p(T) = \exp\left[\frac{-\Delta G}{RT}\right] \quad (2.166)$$

เมื่อ  $\Delta G(T)$  คือ พลังงานอิสระของกิบส์

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

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

$$K_p(T_{SO}) = P\left(\frac{Cd}{CdTe}\right)(T_{SO}) P^{\frac{1}{2}}\left(\frac{Te_2}{CdTe}\right)(T_{SO}) = \exp\left[\frac{-\Delta G}{RT_{SO}}\right] \quad (2.167)$$

$$K_p(T_{sub}) = P\left(\frac{Cd}{CdTe}\right)(T_{sub}) P^{\frac{1}{2}}\left(\frac{Te_2}{CdTe}\right)(T_{sub}) = \exp\left[\frac{-\Delta G}{RT_{sub}}\right] \quad (2.168)$$

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

$$J_{Cd,j} = \frac{D_{Cd,j}}{Rd} \left( \frac{P_{Cd}(T_{SO})}{T_{SO}} - \frac{P_{Cd}(T_{sub})}{T_{sub}} \right) \equiv J \quad (2.169)$$

$$J_{Te_2,j} = \frac{D_{Te_2,j}}{Rd} \left( \frac{P_{Te_2}(T_{SO})}{T_{SO}} - \frac{P_{Te_2}(T_{sub})}{T_{sub}} \right) \equiv \frac{J}{2} \quad (2.170)$$

เมื่อ  $J_{Cd,j}$  คือ พลັกซ์ของการแพร่ของอะตอมของธาตุ  $Cd$  ในแก๊ส  $j$

$J_{Te_2,j}$  คือ พลັกซ์ของการแพร่ของโมเลกุลของแก๊ส  $Te_2$  ในแก๊ส  $j$

$J$  คือ พลັกซ์ของการแพร่

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

ซึ่งในกรณีนี้ค่าโมเลกุลและขนาดของแก๊ส  $Te_2$  มีค่ามากกว่าอะตอมของธาตุ  $Cd$  ดังนั้นจะได้สัมประสิทธิ์การแพร่  $D_{Cd,j} = 1.85 D_{Te_2,j}$  ในบรรยากาศของแก๊ส  $H_2$ ,  $He$  หรือ  $Ar$  จากสมการการส่งผ่านโมเลกุลของ  $CdTe$  ที่อุณหภูมิของสารตั้งต้น ( $T_{SO}$ ) มีค่าต่างกัน  $T_{SO} - T_{sub} = 70$  องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซลล์เซียง จะได้  $P_{Cd}(T_{SO}) \gg P_{Cd}(T_{sub})$  และ  $P_{Te_2}(T_{SO}) \gg P_{Te_2}(T_{sub})$  ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$\frac{P_{Cd}(T_{SO})}{P_{Te_2}(T_{SO})} = \frac{2D_{Te_2j}}{D_{Cdj}} = 1.1 \quad (2.171)$$

หมายเหตุ ค่าอุดมคติอัตราส่วนเท่ากับ 1

ดังนั้นจากสมการที่ (2.166), (2.167), (2.168), (2.169), (2.170) สามารถคำนวณหา  $J$  และอัตราการปลูกฟิล์มบาง (growth rate) ซึ่งมีความสัมพันธ์ตามสมการ

$$GR \left( \frac{\mu m}{min} \right) = \frac{JxMx60x10^4}{\rho} \quad (2.172)$$

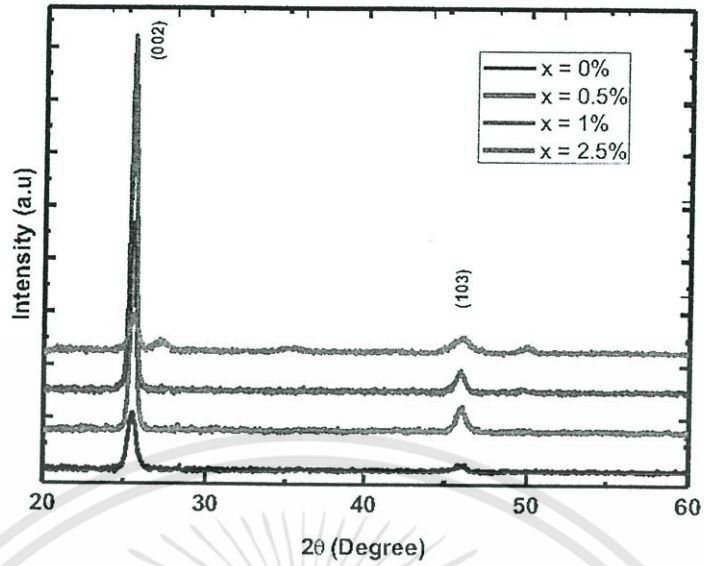
เมื่อ  $J$  คือ ฟลักซ์ของการแพร่  
 $M$  คือ มวลโมเลกุลของ CdTe  
 $\rho$  คือ ความหนาแน่นของ CdTe

## 2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Mazhar, 2013; Acharya, 2010; Vishwakarma, 2013)

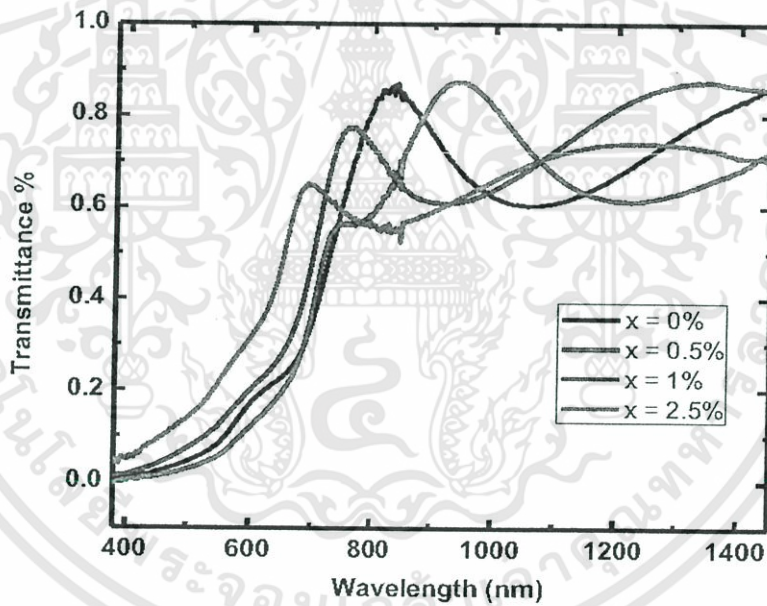
จากการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe พบงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

มาซาร์และคณะ (Mazhar, 2013) ได้วิจัยเรื่องสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่ถูกเจือด้วยอะตอมของธาตุ Sb โดยเทคนิคการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศได้ผลการศึกษา XRD แสดงลักษณะสเปกตรัมที่ความเข้มสูงสุดที่มุม  $2\theta$  ตรงกับระนาบผลึก (002) ปรากฏอย่างโดดเด่น (preferential orientation) และเมื่อเปอร์เซ็นต์การเจือด้วยอะตอมของธาตุ Sb เพิ่มขึ้นเป็น 0, 0.5 และ 1 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ พิกความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของระนาบ (002) มีลักษณะโตขึ้น และหลังจากนั้นพิกความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ระนาบ (002) จะลดลง ดังภาพที่ 2.33 และได้ทำการศึกษาสมบัติทางแสงซึ่งสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:Sb ดังแสดงในภาพที่ 2.34 พบขอบการดูดกลืนแสงเลื่อนไปที่ความยาวคลื่นสั้นลงและการส่งผ่านทางแสงลดลงตามเปอร์เซ็นต์การเจือด้วยอะตอมของธาตุ Sb เพิ่มขึ้น ข้อมูลที่ได้จากค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านทางแสงสามารถคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงานโดยการวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $(ahv)^2$  กับ พลังงานโฟตอน  $(hv)$  แล้วทำการลากเส้นตรงหาค่าคาดหมาย (extrapolation) ของกราฟในส่วนที่เป็นเชิงเส้นไปตัดกับแกนพลังงานโฟตอน จุดที่ตัดแกนพลังงานโฟตอนคือ ค่าช่องว่างแถบพลังงาน แสดงได้ในภาพที่ 2.35 พบว่ามีค่าช่องว่างแถบพลังงานเป็น 1.685, 1.695 และ 1.680 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามเปอร์เซ็นต์การเจือด้วยอะตอมของธาตุ Sb ที่เพิ่มขึ้น 0, 0.5 และ 1 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และพบว่าการส่งผ่านทางแสงของฟิล์มบางเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของค่าช่องว่างแถบพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

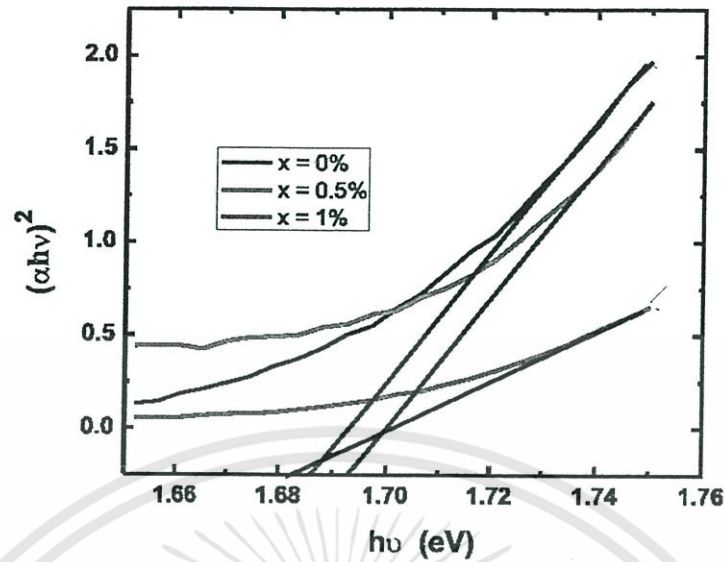


ภาพที่ 2.33 แสดงพิกัดความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของการฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:Sb ( $x=0\%$ ,  $0.5\%$ ,  $1\%$ ,  $2.5\%$ )



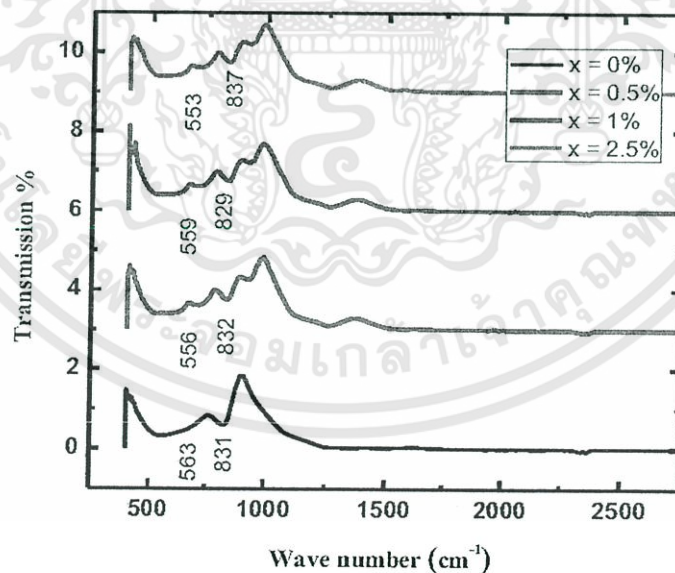
ภาพที่ 2.34 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เจือด้วย อะตอมของธาตุ Sb

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



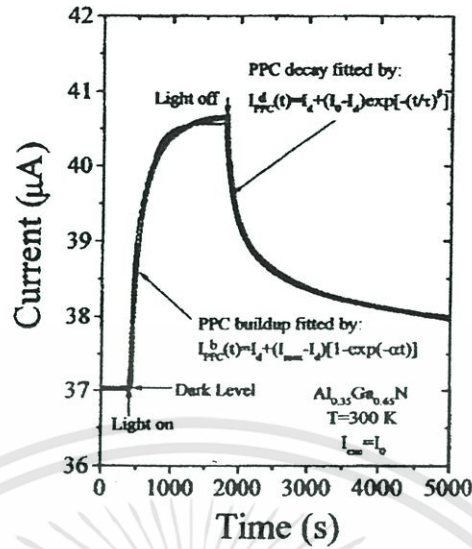
ภาพที่ 2.35 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Sb

นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษา FTIR ดังภาพที่ 2.36 แสดงสเปกตรัม FTIR ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Sb โดยวาดกราฟระหว่าง เปอร์เซ็นต์ของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง กับ เลขคลื่นในช่วง 250-2750 ต่อเซนติเมตร ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงปรากฏที่ค่าเลขคลื่นเท่ากับ 563 ต่อเซนติเมตร ถูกยืนยันการมีอยู่ของการสั่นของพันธะระหว่างไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้าของสารประกอบโมเลกุล CdSe ซึ่งโหมดการสั่นอยู่ในช่วงค่าเลขคลื่น 400-700 ต่อเซนติเมตร



ภาพที่ 2.36 แสดงสเปกตรัม FTIR ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Sb

อะชายะและคณะ (Acharya, 2010) ได้ศึกษาสเปกตรัม FTIR ที่มีค่าเลขคลื่นอยู่ในช่วง 400-4,000 ต่อเซนติเมตร ของผลึกนาโนของสารกึ่งตัวนำ CdSe โดยการสังเคราะห์จากสารละลายเคมี เกิดพีคค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงที่ค่าเลขคลื่นเท่ากับ 624.34 ต่อเซนติเมตร เนื่องมาจากความถี่ในโหมดของการเอกซอร์นี้เป็นเอกซอร์ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

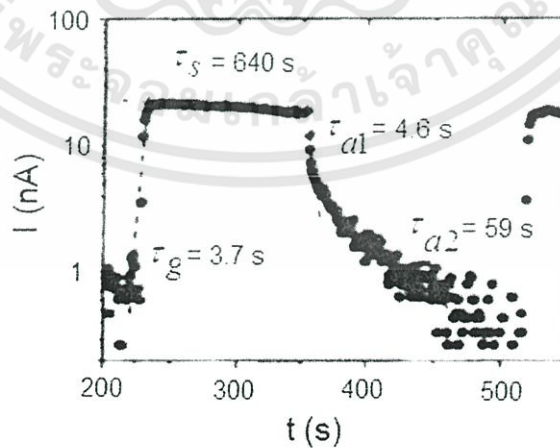


ภาพที่ 2.29 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสโฟโตชาขึ้น กับ ค่ากระแสโฟโตชาลง ของค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงดอร์ัน

จากสมการที่ (2.136) สามารถเขียนใหม่ได้ว่า

$$\ln I_p = \ln I_o - \frac{t}{\tau_d} \quad (2.139)$$

ความชันของกราฟคือ  $\frac{1}{\tau_d}$  ดังนั้น ช่วงชีวิตขาลงจะคำนวณได้จากส่วนกลับของความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\ln I_p$  กับ  $t$  ในทำนองเดียวกันช่วงชีวิตขาขึ้นก็สามารถที่จะคำนวณได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\ln I_p$  กับ  $t$  (ดังภาพที่ 2.30) ได้ด้วยเช่นเดียวกัน



ภาพที่ 2.30 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\ln I_p$  กับ  $t$  ของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงดอร์ัน ทั้งช่วงกระแสโฟโตชาขึ้นและช่วงกระแสโฟโตชาลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางปฏิบัติช่วงชีวิตมีได้หลายค่า เนื่องจากกับดักพาหะมีหลายชนิด ดังนั้นกระแสโฟโตชาลงของฟิล์มบางที่ใช้หาค่าช่วงชีวิต 2 ค่า สามารถที่จะเขียนใหม่ได้โดยอาศัยสมการที่ (2.132) และสมการที่ (2.136) ดังนี้ คือ (Huang, 2011; Gu, 2005)

$$|I_p| = e\mu\left(\frac{w}{l}\right)V_a\sigma_{n1}\exp\left(-t/\tau_{d1}\right) + e\mu\left(\frac{w}{l}\right)V_a\sigma_{n2}\exp\left(-t/\tau_{d2}\right) \quad (2.140)$$

เพื่อให้  $\tau_{d1}$  และ  $\tau_{d2}$  มีค่าถูกต้องมากขึ้น อาจดัดแปลงสมการที่ (2.139) ให้อยู่ในรูปของฟังก์ชัน สเตรตเอ็กซ์โพเนนเชียล (stretched exponential function) ดังนี้คือ (Ghaffarzadeh, 2010; Luo, 2013; Guo, 2013)

$$|I_p| = e\mu\left(\frac{w}{l}\right)V_a\sigma_{n1}\exp\left(-t/\tau_{d1}\right) + e\mu\left(\frac{w}{l}\right)V_a\sigma_{n2}\exp\left[-\left(t/\tau_{d2}\right)^\beta\right] \quad (2.141)$$

จากสมการที่ (2.140) สามารถที่จะหาค่า  $\sigma_{n1}$  และ  $\sigma_{n2}$  ได้ในรูปแบบเดียวกับสมการที่ (2.141) ดังนี้คือ

$$\sigma_{n1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{w}\right) \exp\left(t/\tau_{d1}\right) \quad (2.142)$$

$$\sigma_{n2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{w}\right) \exp\left(t/\tau_{d2}\right) \quad (2.143)$$

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

$$\sigma_{n1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{w}\right) \quad (2.144)$$

และ

$$\sigma_{n2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{w}\right) \quad (2.145)$$

สมการที่ (2.140) สามารถที่จะทำนอร์มัลไลเซชัน (normalization) ได้ดังนี้ คือ

$$|I_p| = A_1 \exp\left(-t/\tau_{d1}\right) + A_2 \exp\left[-\left(t/\tau_{d1}\right)^\beta\right] \quad (2.146)$$

เมื่อ  $A_1$  และ  $A_2$  คือ ค่าแฟกเตอร์ถ่วงน้ำหนัก (weighting factor) โดยที่  $A_1 + A_2 = 1$  (Lin, 2013; Lin, 2012; Ren, 2012) ซึ่งค่า  $A_1$  และ  $A_2$  สามารถหาได้จากการฟิตกราฟ (fit graph) ของผลการทดลอง และ  $\beta$  มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1

ในกรณีกระแสไฟโตขาขึ้น (rise current) ก็สามารถที่จะพิจารณาให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันสเตรตเอ็กซ์โพเนนเชียลได้ด้วยเช่นกัน ดังสมการ

$$|I_p| = A_1' \left[ 1 - \exp\left(-t/\tau_{r1}\right) \right] + A_2' \left\{ 1 - \exp\left[-\left(t/\tau_{r1}\right)^\beta\right] \right\} \quad (2.147)$$

ส่วนกรณีของขึ้นสารที่เป็นเม็ดเซรามิก กระแสไฟโตขณะขาหลังสามารถจะเขียนใหม่โดยอาศัยสมการที่ (2.128) และ (2.140) ได้ดังนี้คือ

$$|I_p| = e\mu \left( \frac{wd}{l} \right) V_a N_{r1} \exp\left(-t/\tau_{d1}\right) + e\mu \left( \frac{wd}{l} \right) V_a N_{r2} \exp\left[-\left(t/\tau_{d2}\right)^\beta\right] \quad (2.148)$$

จากสมการที่ (2.147) สามารถที่จะหาค่า

$$N_{r1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left( \frac{l}{wd} \right) \exp\left(t/\tau_{d1}\right) \quad (2.149)$$

$$N_{r2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left( \frac{l}{wd} \right) \exp\left(t/\tau_{d2}\right) \quad (2.150)$$

กับดักพาหะทั้งสองชนิดนี้สามารถที่จะจับหรือปล่อยพาหะอิสระได้อย่างเป็นอิสระซึ่งกันและกัน ถ้ากำหนดให้  $I_1$  และ  $I_2$  คือกระแสเริ่มต้น ( $t=0$ ) ที่เกี่ยวกับกับดักพาหะทั้งสองตามลำดับจะได้ว่า

$$N_{r1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left( \frac{l}{wd} \right) \quad (2.151)$$

$$N_{r2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left( \frac{l}{wd} \right) \quad (2.152)$$

สมการที่ (2.147) สามารถที่จะทำนอร์มัลไลเซชัน (normalization) ได้ดังนี้คือ

$$|I_p| = A_1'' \exp\left(-t/\tau_{d1}\right) + A_2'' \exp\left[-\left(t/\tau_{d2}\right)^\beta\right] \quad (2.153)$$

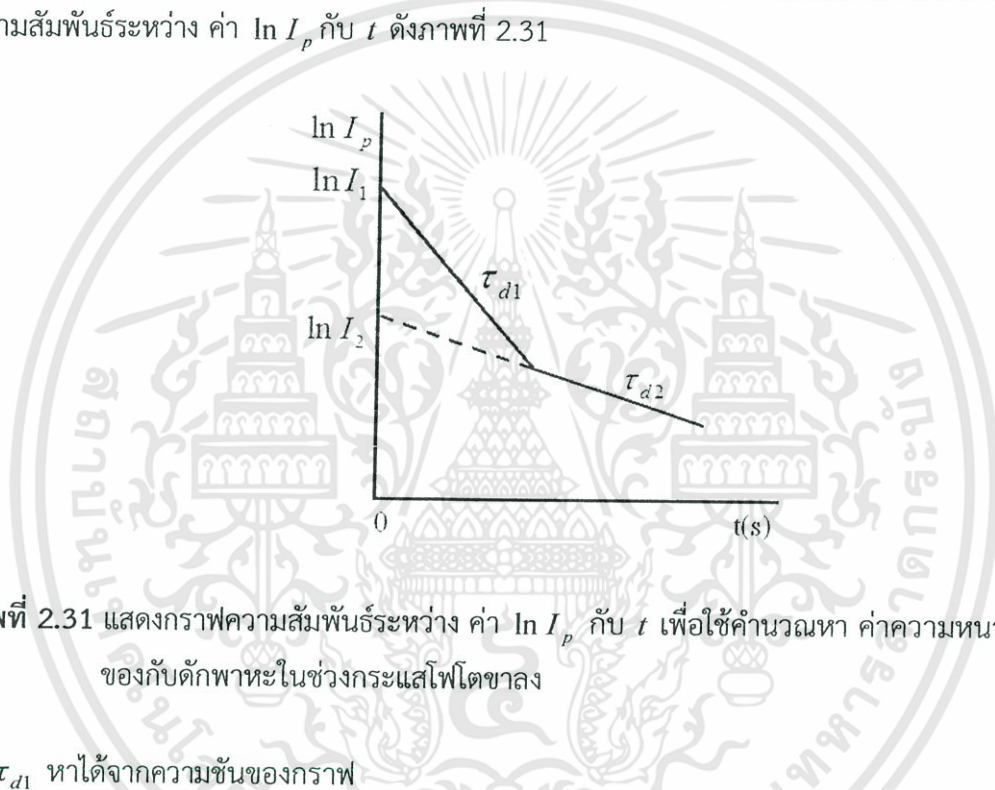
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่ง  $A_1''$  และ  $A_2''$  สามารถหาได้จากการพล็อตกราฟของผลการทดลอง ในกรณีกระแสโฟโตชาขึ้นก็สามารถที่จะพิจารณาให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันสเตรตเอ็กซ์โพเนนเชียลได้ด้วยเช่นกันดังสมการ

$$|I_p| = A_1'' \left[ 1 - \exp\left(-t/\tau_{d1}\right) \right] + A_2'' \left\{ 1 - \exp\left[-\left(t/\tau_{d2}\right)^\beta\right] \right\} \quad (2.154)$$

### 2.10.1 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกัณฑ์พาหะในช่วงกระแสโฟโตชาลง

การหาค่าความหนาแน่นของกัณฑ์พาหะในช่วงกระแสโฟโตชาลงจะอาศัยกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\ln I_p$  กับ  $t$  ดังภาพที่ 2.31



ภาพที่ 2.31 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\ln I_p$  กับ  $t$  เพื่อใช้คำนวณหา ค่าความหนาแน่นของกัณฑ์พาหะในช่วงกระแสโฟโตชาลง

ค่า  $\tau_{d1}$  หาได้จากความชันของกราฟ

$$\ln I_p = -\frac{t}{\tau_{d1}} + \ln I_1 \quad (2.155)$$

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

$$\sigma_{n1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left( \frac{l}{w} \right) \quad (2.156)$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\ln I_p = -t/\tau_{d2} + \ln I_2 \quad (2.157)$$

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

$$\sigma_{i2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left( \frac{l}{w} \right) \quad (2.158)$$

สำหรับกรณีของความหนาแน่นพาหะของชั้นสารเช่นในเม็ดเซรามิก ก็สามารถใช้สูตร

$$N_{i1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left( \frac{l}{wd} \right) \quad (2.159)$$

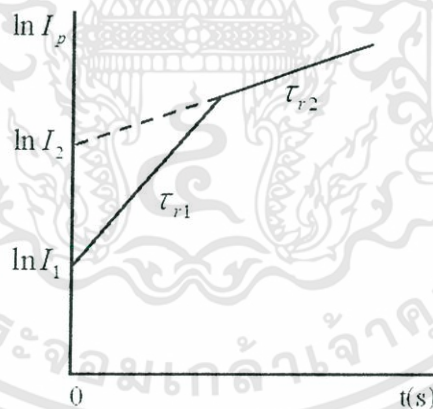
และ

$$N_{i2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left( \frac{l}{wd} \right) \quad (2.160)$$

### 2.10.2 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกักตักพาหะในช่วงกระแสไฟโตชาขึ้น

การหาค่าความหนาแน่นของกักตักพาหะในช่วงกระแสไฟโตชาขึ้น โดยอาศัยกราฟ

$\ln I_p$  กับ  $t$  ดังภาพที่ 2.32



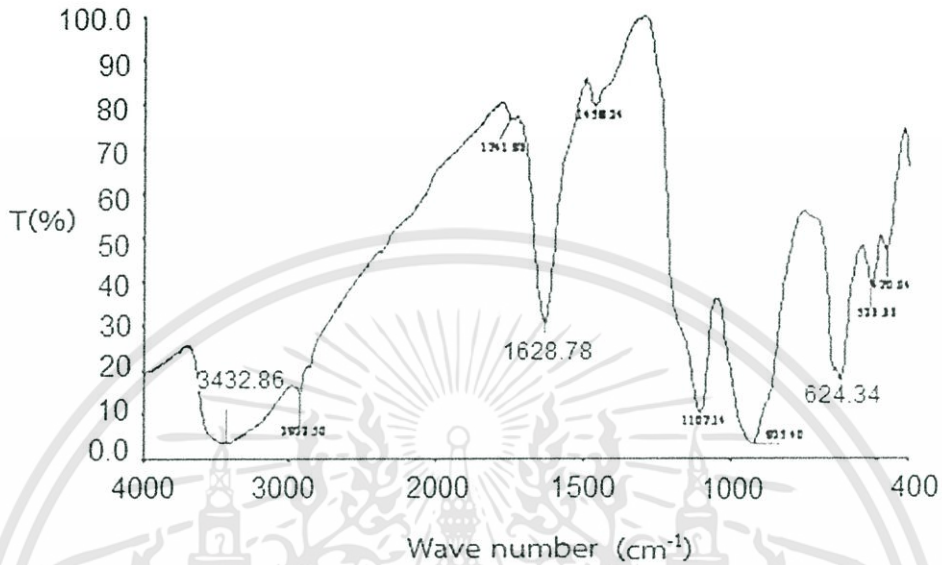
ภาพที่ 2.32 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\ln I_p$  กับ  $t$  เพื่อใช้คำนวณหาค่าความหนาแน่นของกักตักพาหะในช่วงกระแสไฟโตชาขึ้น

กระแสชาขึ้นอาจแสดงได้ดังสมการง่ายๆ ดังนี้คือ

$$I = I_{\max} \left[ 1 - \exp\left(-t/\tau\right) \right] \quad (2.161)$$

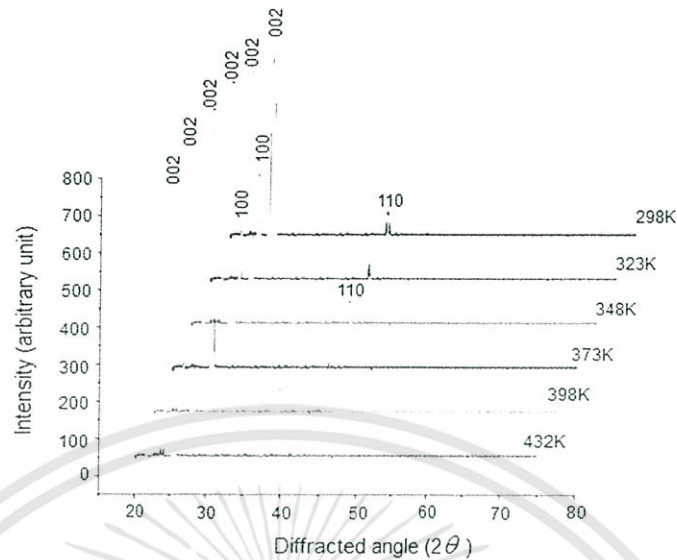
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยืดของพันธะ Cd-Se อีกทั้งได้แสดงพีคค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงที่ค่าเลขคลื่นเท่ากับ 3,432.86 ต่อเซนติเมตร และ ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงค่าเลขคลื่นเท่ากับ 1,628.78 ต่อเซนติเมตร ซึ่งมาจากโหมดการยืดของ O-H และ การงอของ O-H ตามลำดับ ดังแสดงใน ภาพที่ 2.37



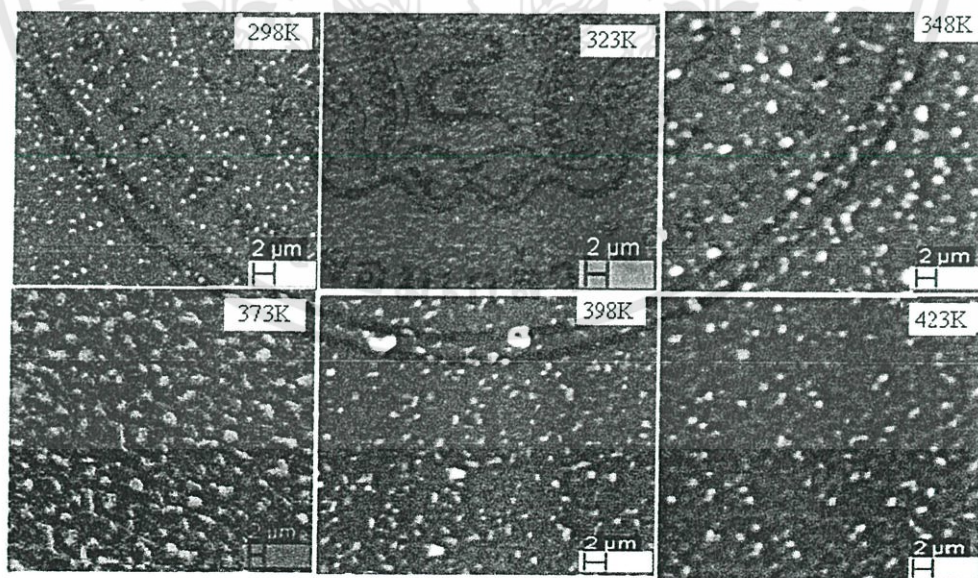
ภาพที่ 2.37 แสดงสเปกตรัม FTIR ของผลึกนาโนของสารกึ่งตัวนำ CdSe

วิชาคารมา และผู้ร่วมงาน (Vishwakarma, 2013) ได้ทำการสังเคราะห์และศึกษาสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่อุณหภูมิต่างๆ ภาพที่ 2.38 แสดงพีคความเข้มสูงสุดของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์อยู่ที่ระนาบ (002) ส่วนพีคความเข้มของระนาบ (100) และ (110) มีค่าต่ำ พีคความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เหล่านี้สอดคล้องดีกับโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล โดยความเข้มพีคของระนาบ (002) เพิ่มขึ้นแต่ความเข้มพีคของระนาบ (100) และ (110) จะลดลง ตามอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับที่เพิ่มขึ้นจนถึง 348 เคลวิน จากการสังเกตฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำทั้งหมดบ่งบอกว่าระนาบ (002) ปรากฏอย่างโดดเด่น (preferential orientation)



ภาพที่ 2.38 แสดงสเปกตรัมของพีคความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับค่าต่างๆ

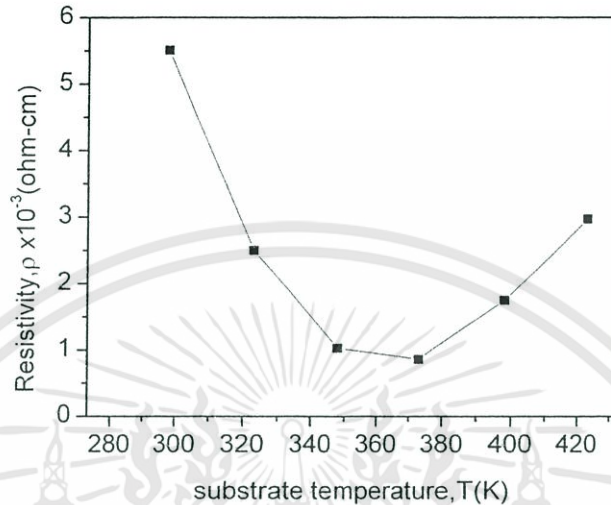
ภาพถ่าย SEM ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่มีชนิดการนำไฟฟ้าแบบเอ็น (n-type) ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่อุณหภูมิในช่วง 298-437 เคลวิน จะแสดงในภาพที่ 2.39 พบว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe เคลือบติดบนแผ่นฐานรองรับได้ดี ผิวหน้าเรียบเสมอ มีความเป็นเนื้อเดียวกันปราศจากข้อบกพร่องผลึก เช่น หลุมเล็กๆ และรอยแตก ขนาดเกรนของผลึกจะโตขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับ



ภาพที่ 2.39 แสดงภาพถ่ายที่บริเวณผิวหน้าด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับค่าต่างๆ

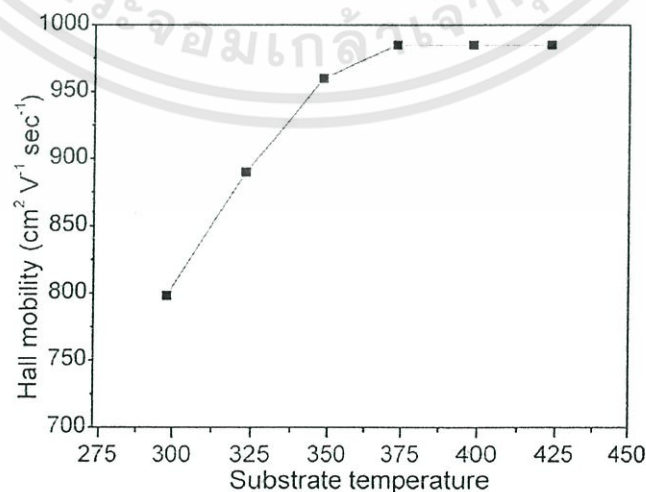
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe แสดงดังภาพที่ 2.40 ค่าสภาพต้านทานลดลงอย่างรวดเร็วจาก  $5.5 \times 10^{-3}$  เป็น  $0.86 \times 10^{-3}$  โอห์ม·เซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 373 เคลวิน หลังจากนั้นค่าสภาพต้านทานจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 2.40 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับค่าต่างๆ

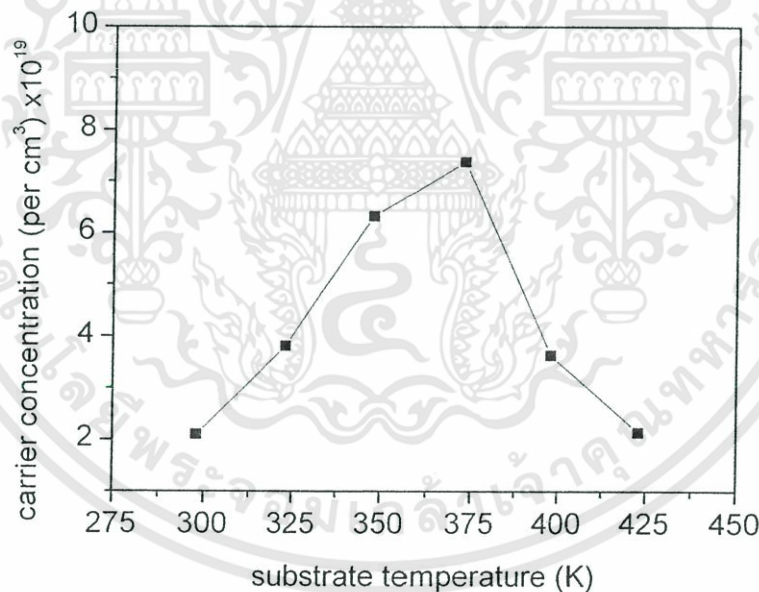
การลดลงของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 298– 373 เคลวิน เนื่องจากการเพิ่มขึ้นเล็กน้อยของค่าความหนาแน่นของพาหะและการเพิ่มขึ้นของค่าสภาพคล่องฮอลล์ของประจุพาหะ หมายถึง เกรนมีขนาดใหญ่ขึ้น ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำมีค่าเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิ 398-423 เคลวิน เนื่องจากการลดลงของนอน-สโตยดิโอเตดริ (non-stoichiometry) ในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe แสดงการนำไฟฟ้าชนิด n-type เนื่องจากการเกิดนอน-สโตยดิโอเตดริ คือ เกิดอะตอมของ Se หายไป ( Se vacancies ) ในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 2.41 แสดงค่าสภาพคล่องของพาหะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe ที่อุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับค่าต่างๆ

การเปลี่ยนแปลงของสภาพคล่องฮอลล์ตามอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับค่าต่างๆ แสดงดังภาพที่ 2.41 ค่าสภาพคล่องของพาหะเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิ 373 เคลวิน และหลังจากนั้นจะเกิดการอิ่มตัว การเพิ่มขึ้นของค่าสภาพคล่องของพาหะ เนื่องจากการลดลงของการกระเจิงที่บริเวณขอบของเกรน (grain boundary-scattering) การกระเจิงที่บริเวณขอบของเกรนของประจุพาหะขึ้นอยู่กับขนาดผลึกของเกรน กล่าวคือ การกระเจิงที่บริเวณขอบของเกรนสูง (high grain boundary-scattering) เกิดจากขนาดผลึกที่มีขนาดเล็ก ส่วนการกระเจิงที่บริเวณขอบของเกรนต่ำ (low grain boundary-scattering) เกิดจากขนาดผลึกที่มีขนาดใหญ่ ความสัมพันธ์ของค่าความเข้มข้นของพาหะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe แสดงดังภาพที่ 2.42 พบว่าความเข้มข้นของพาหะเพิ่มขึ้นจาก  $2.10 \times 10^{19}$  เป็น  $7.38 \times 10^{19}$  ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิฐานรองรับ และหลังจากนั้นความเข้มข้นของพาหะจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นอีก การเพิ่มขึ้นของค่าความเข้มข้นของพาหะเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความไม่เป็นอน-สโตยดิโอเมตรี (non-stoichiometry) ในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ซึ่งเกิดขึ้นในขณะที่ทำการเคลือบฟิล์มบาง



ภาพที่ 2.42 แสดงค่าความเข้มข้นของพาหะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdSe ที่อุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับค่าต่างๆ

### บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

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

3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เพื่อใช้เตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดแผ่นกระจกสไลด์

1. ที่ตัดกระจก
2. เครื่องอัลตราโซนิก
3. เครื่องเป่าลมร้อน
4. เตาอบ
5. ปีกเกอร์ขนาด 200 มิลลิลิตร
6. สารเคมี (น้ำยาล้างจาน น้ำปลอดประจุ อะซิโตนและ เอทานอล)
7. นาฬิกาจับเวลา

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

1. ระบบระเหิดสารเคมีในระยะประชิด
  - ท่อแก้วควอตซ์ปลายปิดหนึ่งด้าน
  - กล้องแกรไฟต์
  - เครื่องควบคุมอุณหภูมิห้อง SHIMADEN รุ่น PID FP21
  - หลอดทั้งสแตน 1,000 วัตต์
2. ผงผลึกแคดเมียมซีลีไนด์และอินเดียมซัลไฟด์ บริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์
3. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่งยี่ห้อ Sartorius
4. ปากคืบ
5. หน้ากากป้องกันการไอระเหยของสารเคมี
6. แวนตากรองแสง
7. ภาชนะที่ใช้สำหรับเก็บสารเคมีที่สามารถควบคุมความชื้นได้
8. ครกบดสาร

- 3.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคเอกซ์เรย์ดิฟแฟร็กโทรมิเตอร์ (XRD) ของยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 advance ความยาวคลื่น รังสีเอกซ์ 1.5406 อังสตรอม ใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์ แรงไฟฟ้าต้น 30 กิโลวัตต์ โดยที่จะวัดจากมุม 20-70 องศา
- 3.1.4 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) ของยี่ห้อ LEO รุ่น LEO 1455VP โดยใช้แรงดัน 20 กิโลวัตต์ และกำลังขยายของภาพถ่าย 5000 เท่า
- 3.1.5 เครื่องมือที่ใช้ศึกษาสมบัติทางแสง เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS spectrophotometer) ยี่ห้อ thermo electron corporation รุ่น He ios โดยใช้ความยาวคลื่น 200-1000 นาโนเมตร
- 3.1.6 เครื่องมือที่ใช้ในการวัดสมบัติทางไฟฟ้า
1. อิเล็กโตรมิเตอร์ของยี่ห้อ Keithley รุ่น 610 CR
  2. แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงของยี่ห้อ Keithley รุ่น 236
  3. เครื่องควบคุมอุณหภูมิยี่ห้อ SHINKO รุ่น MCD100
  4. เครื่องวัดอุณหภูมิของยี่ห้อ Digicon รุ่น Dp-50A
  5. กาวเงินนำไฟฟ้า
  6. สายไฟ
  7. คอมพิวเตอร์
- 3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2531; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; ฐิตินัย, 2551)
- 3.2.1. การเตรียมและทำความสะอาดแผ่นกระจกสไลด์เพื่อเป็นฐานรองรับ
1. นำแผ่นกระจกสไลด์ตัดให้ได้ขนาด 12x25 ตารางมิลลิเมตร แช่ในน้ำที่ผสมน้ำยาล้างจานเป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อทำการล้างคราบไขมันและสิ่งสกปรก
  2. ทำความสะอาดแผ่นกระจกสไลด์ด้วยอะซิโตนเป็นเวลา 10 นาที
  3. ทำความสะอาดแผ่นกระจกสไลด์ด้วยเอทานอลเป็นเวลา 10 นาที
  4. ทำความสะอาดแผ่นกระจกสไลด์ด้วยน้ำปอดประจุ 3 ครั้งๆละ 10 นาที
  5. ขั้นตอนในข้อ 2-5 นำบีกเกอร์ไปใส่ในเครื่องอัลตราโซนิก
  6. เป่าให้แห้งด้วยเครื่องเป่าลมร้อน
  7. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่เป่าแห้งแล้วไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที
  8. เก็บแผ่นกระจกสไลด์ในถุงพลาสติกซิปล็อก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2 การเตรียมและทำความสะอาดระบบระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

1. ทำความสะอาดกล่องแกรไฟต์ด้วยอะซิโตน
2. นำกล่องแกรไฟต์เป่าให้แห้งด้วยเครื่องเป่าลมร้อน
3. นำกล่องแกรไฟต์ไปใส่ในท่อแก้วแล้วเปิดปั๊มดูดอากาศออกจนกระทั่งมีความดันประมาณ  $5 \times 10^{-2}$  มิลลิบาร์
4. ทำความสะอาดท่อแก้วควอตซ์ปลายปิดหนึ่งด้านด้วยน้ำยาล้างจาน เชย่ำทำความสะอาดด้วยน้ำยาล้างจานจนกระทั่งไม่มีน้ำยาล้างจานเหลืออยู่ แล้วเป่าให้แห้งด้วยเครื่องเป่าลมร้อน
5. ทำความสะอาดชิ้นส่วนต่างๆด้วยอะซิโตน

### 3.2.3 การเตรียมสารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่มีองค์ประกอบต่างกัน

สารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) สามารถเตรียมได้จากผลึกของสารประกอบ CdSe และ  $\text{In}_2\text{S}_3$  ดังสมการ



มวลอะตอมของธาตุ Cd, Se, In และ S มีค่าเท่ากับ 112.41, 78.96, 114.82 และ 32.06 กรัมต่อโมล ตามลำดับ ดังนั้นจะได้ว่า

$$\text{มวลโมเลกุลของสารประกอบ CdSe} = 112.41 + 78.96 = 191.37 \text{ กรัมต่อโมล}$$

$$\text{มวลโมเลกุลของสารประกอบ In}_2\text{S}_3 = (2 \times 114.82) + (3 \times 32.06) = 325.82 \text{ กรัมต่อโมล}$$

กรณี  $x = 0.01$



มวลโมเลกุลของสารประกอบจะได้เท่ากับ

$$\begin{aligned} (\text{CdSe})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01} &= [0.99 \times (112.41 + 78.96)] + [0.01 \times ((2 \times 114.82) + (3 \times 32.06))] \\ &= 192.7145 \text{ กรัมต่อโมล} \end{aligned}$$

ถ้าต้องการใช้สารตั้งต้น  $(\text{CdSe})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  จำนวน 1 กรัม จะต้องใช้สารตั้งต้นที่เป็นผลึก

$$\text{ของสารประกอบ CdSe} = \left( \frac{0.99 \times 191.37}{192.7145} \right) = 0.9831 \text{ กรัม}$$

$$\text{ของสารประกอบ In}_2\text{S}_3 = \left( \frac{0.01 \times 325.82}{192.7145} \right) = 0.0169 \text{ กรัม}$$

กรณี  $x = 0.02$



มวลโมเลกุลของสารประกอบได้เท่ากับ

$$\begin{aligned} (\text{CdSe})_{0.98}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.02} &= [0.98 \times (112.41 + 78.96)] + [0.02 \times ((2 \times 114.82) + (3 \times 32.06))] \\ &= 194.0590 \text{ กรัมต่อโมล} \end{aligned}$$

ถ้าต้องการใช้สารตั้งต้น  $(\text{CdSe})_{0.98}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.02}$  จำนวน 1 กรัม จะต้องใช้สารตั้งต้นที่เป็นผลึก

$$\text{ของสารประกอบ CdSe} = \left( \frac{0.98 \times 191.37}{194.0590} \right) = 0.9664 \text{ กรัม}$$

$$\text{ของสารประกอบ In}_2\text{S}_3 = \left( \frac{0.98 \times 325.82}{194.0590} \right) = 0.0334 \text{ กรัม}$$

กรณี  $x = 0.03$



มวลโมเลกุลของสารประกอบจะได้เท่ากับ

$$\begin{aligned} (\text{CdSe})_{0.97}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.03} &= [0.97 \times (112.41 + 78.96)] + [0.03 \times ((2 \times 114.82) + (3 \times 32.06))] \\ &= 195.4035 \text{ กรัมต่อโมล} \end{aligned}$$

ถ้าต้องการใช้สารตั้งต้น  $(\text{CdSe})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  จำนวน 1 กรัม จะต้องใช้สารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

$$\text{ของสารประกอบ CdSe} = \left( \frac{0.03 \times 191.37}{195.4035} \right) = 0.9499 \text{ กรัม}$$

$$\text{ของสารประกอบ In}_2\text{S}_3 = \left( \frac{0.97 \times 325.82}{195.4035} \right) = 0.0500 \text{ กรัม}$$

กรณี  $x = 0.04$



มวลโมเลกุลของสารประกอบจะได้เท่ากับ

$$\begin{aligned} (\text{CdSe})_{0.96}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.04} &= [0.96 \times (112.41 + 78.96)] + [0.04 \times ((2 \times 114.82) + (3 \times 32.06))] \\ &= 196.7480 \text{ กรัมต่อโมล} \end{aligned}$$

ถ้าต้องการใช้สารตั้งต้น  $(\text{CdSe})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  จำนวน 1 กรัม จะต้องใช้สารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

$$\text{ของสารประกอบ CdSe} = \left( \frac{0.96 \times 191.37}{196.748} \right) = 0.9338 \text{ กรัม}$$

$$\text{ของสารประกอบ In}_2\text{S}_3 = \left( \frac{0.04 \times 325.82}{196.748} \right) = 0.0662 \text{ กรัม}$$

กรณี  $x = 0.05$



มวลโมเลกุลของสารประกอบจะได้เท่ากับ

$$\begin{aligned} (\text{CdSe})_{0.95}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.05} &= [0.95 \times (112.41 + 78.96)] + [0.05 \times ((2 \times 114.82) + (3 \times 32.06))] \\ &= 198.0925 \text{ กรัมต่อโมล} \end{aligned}$$

ถ้าต้องการใช้สารตั้งต้น  $(\text{CdSe})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$  จำนวน 1 กรัม จะต้องใช้สารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

$$\text{ของสารประกอบ CdSe} = \left( \frac{0.96 \times 191.37}{198.0925} \right) = 0.9178 \text{ กรัม}$$

$$\text{ของสารประกอบ In}_2\text{S}_3 = \left( \frac{0.04 \times 325.82}{198.0925} \right) = 0.0822 \text{ กรัม}$$

ตารางที่ 3.1 แสดงปริมาณสารตั้งต้นของผงผลึกของสารประกอบ CdSe และ  $\text{In}_2\text{S}_3$  และอุณหภูมิ ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

Mole Fraction (x)	Starting Material Content (g)		Source Temperature (°C)	Substrate Temperature (°C)
	$\text{In}_2\text{S}_3$	CdSe		
0.00	-	1.0000	650	590
0.01	0.0169	0.9831	650	590
0.02	0.0336	0.9664	650	590
0.03	0.0500	0.9499	650	590
0.04	0.0662	0.9338	650	590
0.05	0.0822	0.9178	650	590

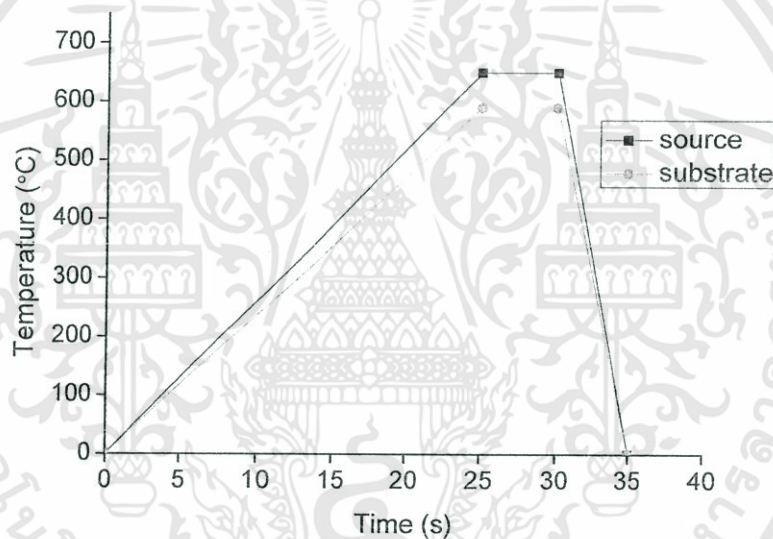
3.2.4 การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) จากสารตั้งต้นเป็นผงผลึกของสารประกอบ CdSe และ  $\text{In}_2\text{S}_3$  ที่มีความบริสุทธิ์สูงถึง 99.999 เปอร์เซ็นต์ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดในระบบสุญญากาศ ซึ่งประกอบไปด้วยวิธีและขั้นตอนดังนี้

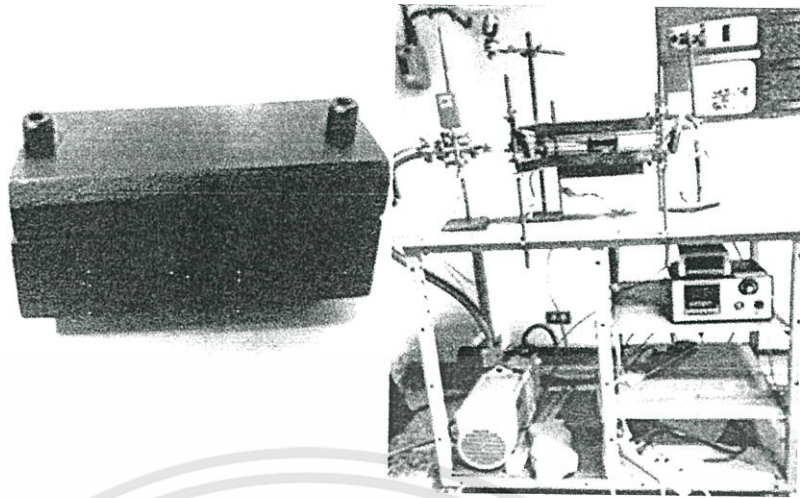
1. ชั่งสารตั้งต้น  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่ต้องการให้ได้น้ำหนัก 0.01 กรัม แล้วนำมาบรรจุในกล่องแกรไฟต์ เขย่าเพื่อให้สารตั้งต้นกระจายเท่าๆกัน ปรับผิวหน้าให้เรียบโดยการใช้แท่งแก้วค่อยๆกดให้ผิวหน้าสม่ำเสมอ
2. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมไว้ใส่ในกล่องแกรไฟต์
3. ทำการติดตั้งระบบระเหิดสารเคมีในระยะประชิดให้ครบถ้วน
4. ตั้งโปรแกรมเครื่องควบคุมอุณหภูมิเพื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นจากอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 3 นาที ให้อุณหภูมิคงตัวที่ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 นาที ตามลำดับ แล้วลดอุณหภูมิลงมาถึงอุณหภูมิห้อง ใช้เวลา 3 นาที
5. นำแผ่นอลูมิเนียมฟอยล์มาคลุม และจัดตำแหน่งแผ่นอลูมิเนียมฟอยล์ทำการเพิ่มอุณหภูมิให้แก่แผ่นฐานรองรับจากอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 25 นาที ให้อุณหภูมิคงตัวที่ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที ตามลำดับ แล้วลดอุณหภูมิลงมาถึงอุณหภูมิห้อง ใช้เวลา 5 นาที
6. เปิดปั๊มกลโรตารี แล้วเปิดวาล์วสูบบอกอากาศออก จนได้ความดันประมาณ  $5 \times 10^{-2}$  มิลลิบาร์ แล้วเปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิสารตั้งต้นและฐานรองรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. เมื่อเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำเสร็จแล้ว รอจนกว่าอุณหภูมิของสารตั้งต้นและแผ่นฐานรองรับลดลงมาต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส แล้วปิดวาล์วบีบกลโรตารี ความดันภายในระบบจะค่อยๆเพิ่มขึ้น
8. เมื่ออุณหภูมิของสารตั้งต้นและฐานรองรับลดลงเท่ากับอุณหภูมิห้อง ค่อยๆเปิดวาล์วให้อากาศเข้าไปจนกระทั่งความดันภายในเท่ากับความดันภายนอก
9. สวมหน้ากากป้องกันไอระเหยจากสารเคมี เปิดระบบเพื่อนำเอาแผ่นฐานรองรับออกจากห้องแกรไฟต์
10. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่เป็นแผ่นฐานรองรับที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) มาตรวจสอบผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำด้วยกล้องจุลทรรศน์ คุณภาพของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่ได้มีผิวหน้าที่สมบูรณ์ คือ ผิวหน้าสม่ำเสมอไม่มีรูพรุนจากนั้นก็นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำไปเก็บในหม้อตุ๋นความชื้น



ภาพที่ 3.1 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าอุณหภูมิ กับ เวลาที่ใช้ ในการประดิษฐ์ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที



ภาพที่ 3.2 แสดงระบบการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

3.3 การศึกษาสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2531; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; ฐิตินัย, 2551)

#### 3.3.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกโตรมิเตอร์ของยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ 1.5406 อังสตรอมโดยใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์ และความต่างศักย์ 30 กิโลโวลต์ โดยวัดจากมุม 20–70 องศา

#### 3.3.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของยี่ห้อ LEO รุ่น LEO 1455VP โดยใช้แรงดัน 20 กิโลโวลต์และกำลังแยกความละเอียดของภาพถ่าย 5000 เท่า

#### 3.3.3 การศึกษาสมบัติทางแสง

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาสมบัติทางแสงด้วยการวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ของยี่ห้อ thermo electron corporation รุ่น He ios โดยใช้ความยาวคลื่น 200 ถึง 1000 นาโนเมตร เพื่อคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและค่าช่องว่างแถบพลังงาน

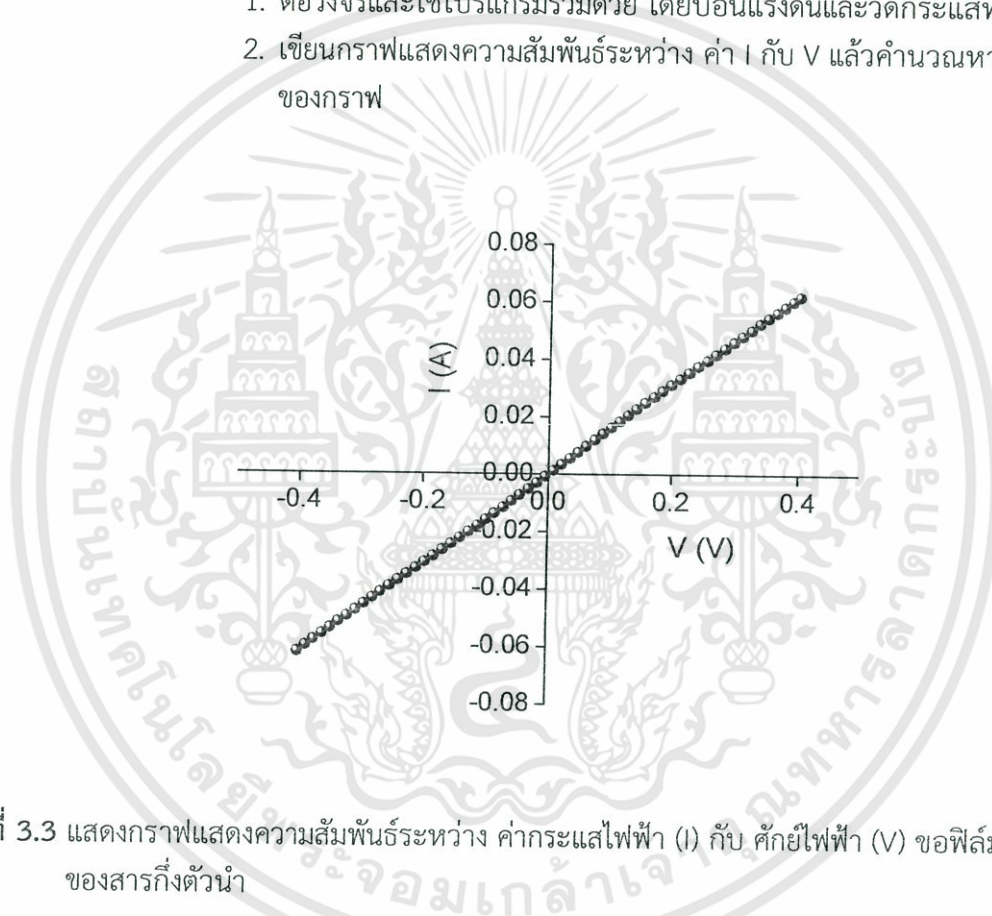
### 3.3.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดค่าความต้านทานแผ่นด้วยวิธีสองขั้ว ศึกษาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ ศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ ศึกษาวัดค่าความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 20-300 เคลวิน และค่าอุณหภูมิสูงในช่วง 303-473 เคลวิน และค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงด้วยวิธีอื่น

#### 3.3.4.1 การวัดค่าความต้านทานแผ่นด้วยวิธีสองขั้ว

ทำขั้วไฟฟ้าด้วยวิธีสองขั้ว ตรวจสอบขั้วไฟฟ้าว่าติดกับตัวอย่างอย่างเรียบร้อย

1. ต่อวงจรและใช้โปรแกรมร่วมกับวัด โดยป้อนแรงดันและวัดกระแสที่ได้
2. เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $I$  กับ  $V$  แล้วคำนวณหาค่าความชันของกราฟ



ภาพที่ 3.3 แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า ( $I$ ) กับ ศักย์ไฟฟ้า ( $V$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ

#### 3. คำนวณหาค่าความต้านทานแผ่น ( $R_{sh}$ ) จากสูตร

$$R_{sh} = R \frac{w}{l}$$

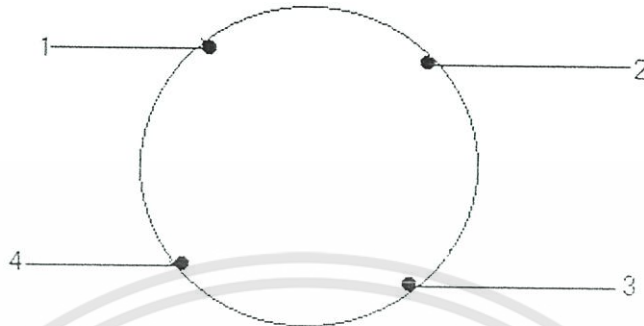
เมื่อ  $R$  คือ ค่าความชันกราฟ

$w$  คือ ความกว้างของฟิล์มบาง

$l$  คือ ระยะห่างระหว่างขั้วทั้งสอง

### 3.3.4.2 การศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์

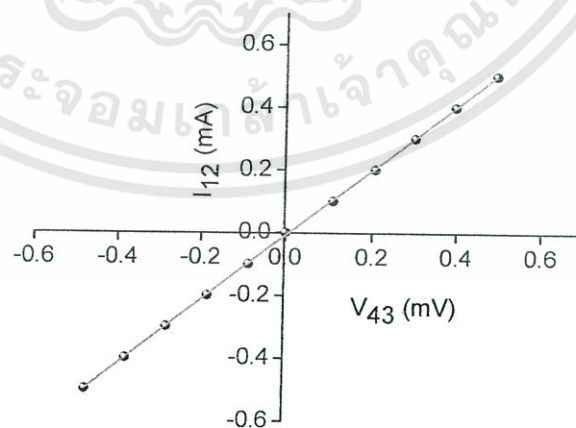
จากหลักการแวนเดอร์เพาว์ เพื่อความสะดวกในการวัดขั้วไฟฟ้าทั้ง 4 วางอยู่ที่มุมสี่เหลี่ยมจัตุรัสดังรูปข้างล่างนี้



ภาพที่ 3.4 แสดงวิธีทำขั้วไฟฟ้าสำหรับการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์

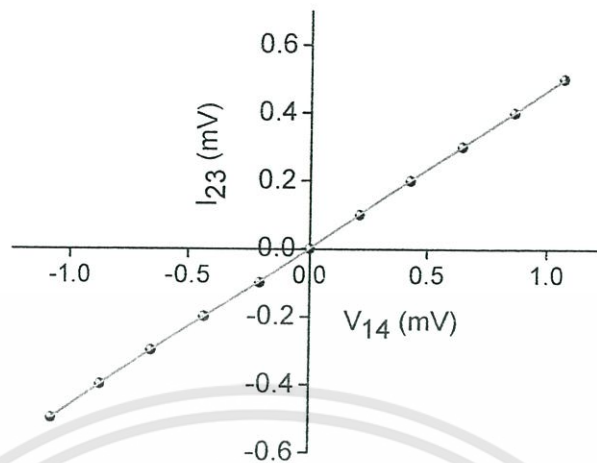
ตรวจสอบขั้วไฟฟ้าว่าติดกับตัวอย่างอย่างเรียบร้อยโดยการวัดค่าความต้านทานด้วยโอห์มมิเตอร์ จากนั้นเริ่มตามขั้นตอนดังนี้

1. จ่ายกระแสทางขั้ว 1 และออกทางขั้ว 2 โดย ทำการวัดความต่างศักย์  $V_{43}$  ให้ได้เครื่องหมายเป็นบวก แต่ถ้าเครื่องหมายเป็นลบ ต้องเปลี่ยนให้กระแสไหลเข้าทางขั้วอื่นแทน โดยการเปลี่ยนตำแหน่งขั้ว อาจเปลี่ยนไปตามเข็มนาฬิกา แล้วจ่ายกระแสตั้งแต่ -0.6 ถึง 0.6 มิลลิแอมแปร์
2. ทำตามข้อ 1 แต่เปลี่ยนเป็นจ่ายกระแสทางขั้ว 2 และออกทางขั้ว 3 โดย ทำการวัดค่าความต่างศักย์  $V_{14}$  แทน
3. เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $I_{12}$  กับ  $V_{43}$  และเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $I_{23}$  กับ  $V_{14}$  แล้วคำนวณหาค่าความชันของทั้ง 2 กราฟจะได้  $R_1$  และ  $R_2$



ภาพที่ 3.5 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า ( $I_{12}$ ) กับ ศักย์ไฟฟ้า ( $V_{43}$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า ( $I_{23}$ ) กับ ศักย์ไฟฟ้า ( $V_{14}$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ

4. คำนวณหาค่าความต้านทานแผ่น ( $R_{sh}$ ) จากสูตร

$$R_{sh} = f \left( \frac{\pi}{\ln 2} \right) \left( \frac{R_1 + R_2}{2} \right)$$

เมื่อ

$$f = 1 - \left( \frac{\ln 2}{2} \right) \left( \frac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2} \right)^2$$

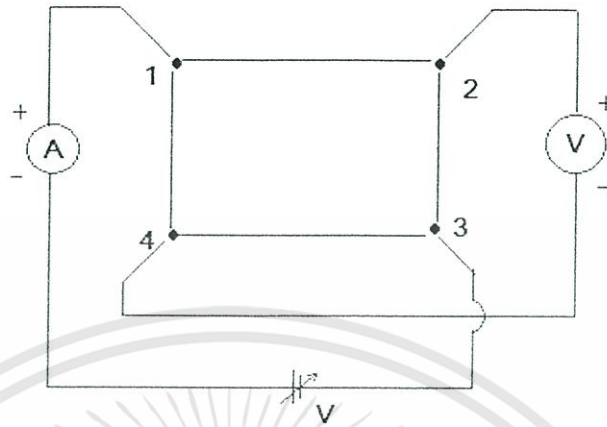
5. คำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ( $\rho$ ) จากสูตร

$$\rho = R_{sh} d$$

เมื่อ  $d$  คือ ความหนาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำมีค่าประมาณ  $5 \times 10^{-5}$  เซนติเมตร

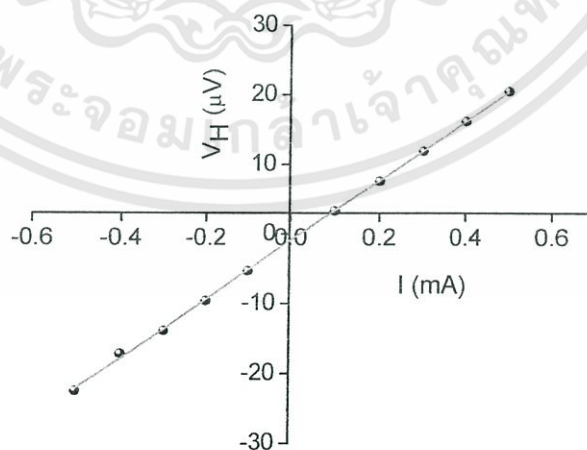
## 3.3.4.3 การศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์

ทำขั้วไฟฟ้าและอุปกรณ์ในการวัดดังรูปข้างล่าง และเริ่มทำการทดลองดังนี้



ภาพที่ 3.7 แสดงวิธีการต่อขั้วไฟฟ้าเพื่อศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์

1. ขณะที่ยังไม่มีสนามแม่เหล็ก ( $B=0$ ) และสารกึ่งตัวนำมีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นชนิดเอ็น (n-type) จะกำหนดให้กระแสไฟฟ้าไหลเข้าทางขั้ว 1 และไหลออกทางขั้ว 3 ทำการวัดค่าความต่างศักย์  $V_{24}$  ให้ได้เครื่องหมายเป็นบวก แต่ถ้าเครื่องหมายเป็นลบ ต้องเปลี่ยนให้กระแสไหลเข้าทางขั้วอื่นแทน โดยการเปลี่ยนตำแหน่งขั้ว อาจเปลี่ยนไปตามเข็มนาฬิกา แล้วจ่ายกระแสตั้งแต่  $-0.6$  ถึง  $0.6$  มิลลิแอมแปร์
2. นำตัวอย่างไปวางในสนามแม่เหล็ก ( $B \neq 0$ ) ความต่างศักย์  $V_{24}$  ควรมีค่าเพิ่มขึ้นที่กระแสค่าเดิมในที่นี้จะเรียกว่า  $V'_{24}$  เนื่องจากมีผลจากความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์  $V_H$  เข้ามาเกี่ยวข้อง จ่ายกระแส ( $I = -0.6$  ถึง  $0.6$  มิลลิแอมแปร์) แล้วทำการวัดค่าความต่างศักย์  $V'_{24}$
3. ความต่างศักย์ฮอลล์  $V_H = V'_{24} - V_{24}$  เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $I$  กับ  $V$  โดยแกน  $y$  เป็น  $V_H$  และแกน  $x$  เป็น  $I$  แล้วคำนวณหาค่าความชันของกราฟ



ภาพที่ 3.8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าศักย์ไฟฟ้า ( $V_H$ ) กับ กระแสไฟฟ้า ( $I$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ จากสูตร

$$R_H = 10^8 \left( \frac{V_H}{I} \right) \left( \frac{d}{B} \right)$$

เมื่อ  $\frac{V_H}{I}$  คือ ค่าความชันของกราฟ

$B$  คือ สนามแม่เหล็ก มีค่า 4600 เกาส์

$d$  คือ ความหนาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำมีค่า  $5 \times 10^{-5}$  เซนติเมตร

5. คำนวณหาค่าความหนาแน่นของพาหะ ( $n$ ) จากสูตร

$$n = \frac{1}{qR_H}$$

เมื่อ  $q$  คือ ประจุของอิเล็กตรอนมีค่า  $1.6 \times 10^{-19}$  คูลอมป์

6. คำนวณหาค่าสภาพคล่องของฮอลล์ ( $\mu_H$ ) จากสูตร

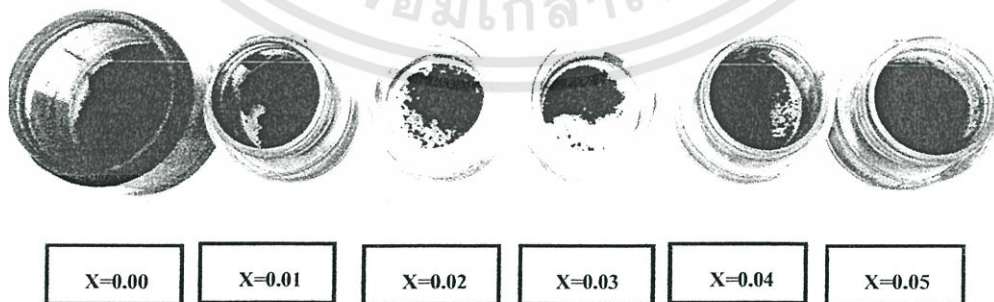
$$\mu_H = \frac{R_H}{\rho}$$

## บทที่ 4 ผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนใน ระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศที่ความดันต่ำระดับ  $3.5 \times 10^{-2}$  มิลลิบาร์ โดยมีค่าเศษส่วนโดยโมล อะตอม ( $x$ ) = 0, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 และ 0.05 ตามลำดับ จะให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 650 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เท่ากับ 590 องศาเซลเซียส ใช้เวลา ในการระเหิด 5 นาที และนำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่ได้ทั้งหมดไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วย วิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ศึกษาโครงสร้างเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ศึกษาสมบัติทางแสงด้วยการวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำโดยการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีสองขั้ว ศึกษา ปรากฏการณ์ฮอลล์ ศึกษาการวัดค่าความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20 – 300 เคลวิน และ วัดที่อุณหภูมิสูงในช่วง 303-473 เคลวิน และ ศึกษาการวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงต่อชั้นของฟิล์มบางของ สารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ )

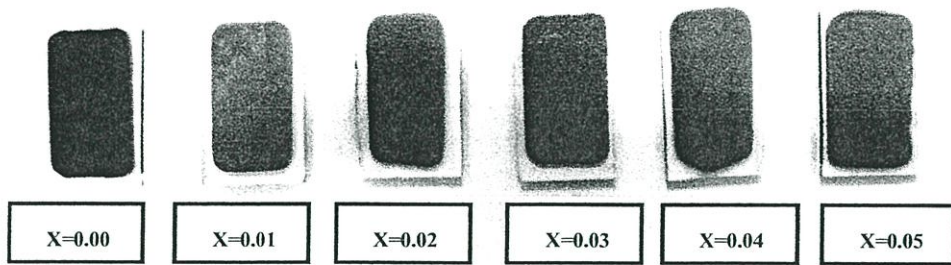
### 4.1 ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่น ฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะ ประชิด

ที่เศษส่วนโดยโมลอะตอม ( $x$ ) = 0 ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำมีลักษณะเป็นสีดำ มีผิวหน้าเรียบ สม่ำเสมอ เกาะติดบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ได้ดีโดยไม่หลุดร่อนง่ายและไม่มีรูพรุน และที่ เศษส่วนโดยโมลอะตอม ( $x$ ) = 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 และ 0.05 ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำมีลักษณะเป็น สีเทาซึ่งแตกต่างไปจากสารตั้งต้น มีผิวหน้าเรียบสม่ำเสมอ เกาะติดบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่น กระจกสไลด์ได้ดีไม่มีรูพรุนแต่จะหลุดร่อนได้ถ้าทิ้งไว้ในอากาศนานหลายสัปดาห์ ซึ่งฟิล์มบางของสารกึ่ง ตัวนำที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดนี้เกิดจากการให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้น เท่ากับ 650 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 590 องศาเซลเซียส เมื่อใช้เวลาในการ ระเหิดสารเคมี 5 นาที จะแสดงดังภาพที่ 4.1 และภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.1 แสดงผลึกของสารตั้งต้นที่ใช้สำหรับเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการ ระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

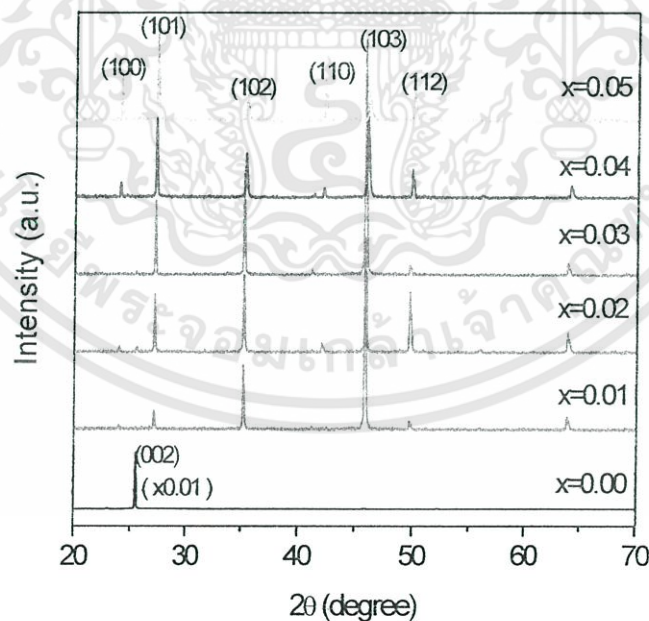
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.2 แสดงภาพถ่ายของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

#### 4.2 ผลการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์พื้นฐานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด

##### 4.2.1 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด

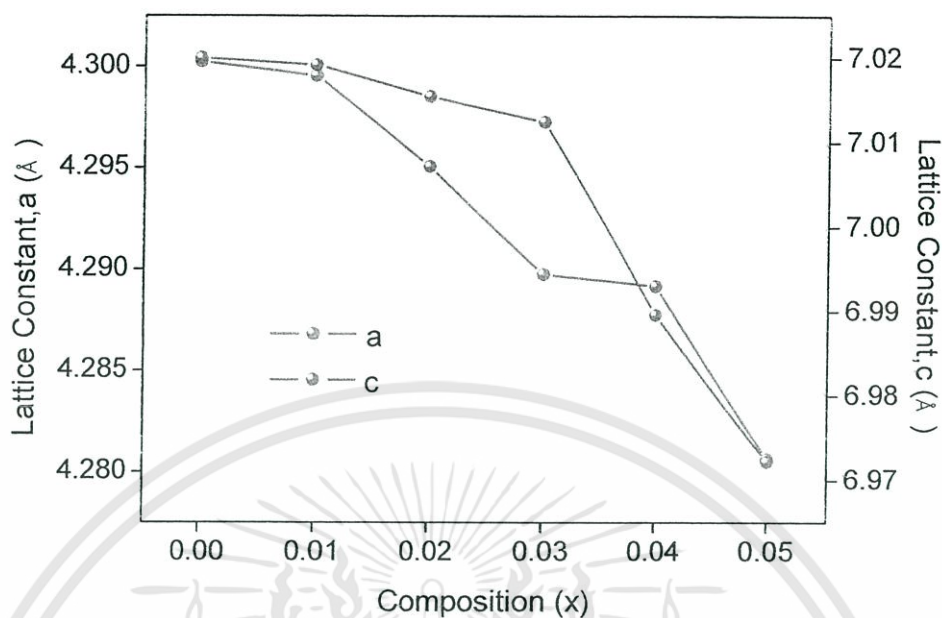


ภาพที่ 4.3 แสดงพีคความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เป็นวิธีการที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงคุณภาพของสารกึ่งตัวนำและสามารถหาขนาดของเกรนได้ด้วย จากภาพที่ 4.3 เป็นการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงคุณภาพด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด กรณีที่ไม่ได้เจือด้วยสารประกอบ  $\text{In}_2\text{S}_3$  จะแสดงลักษณะสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่มีพีคความเข้มสูงสุดที่มุม  $2\theta$  เท่ากับ 25.50 องศา ตรงกับระนาบผลึก (002) สำหรับกรณีที่ได้เจือด้วยสารประกอบ  $\text{In}_2\text{S}_3$  พบว่าพีคมีการเลื่อนไปทางขวาซึ่งก็คือพีคความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เลื่อนไปทิศทางค่ามุมเลี้ยวเบน  $2\theta$  ที่โตขึ้น

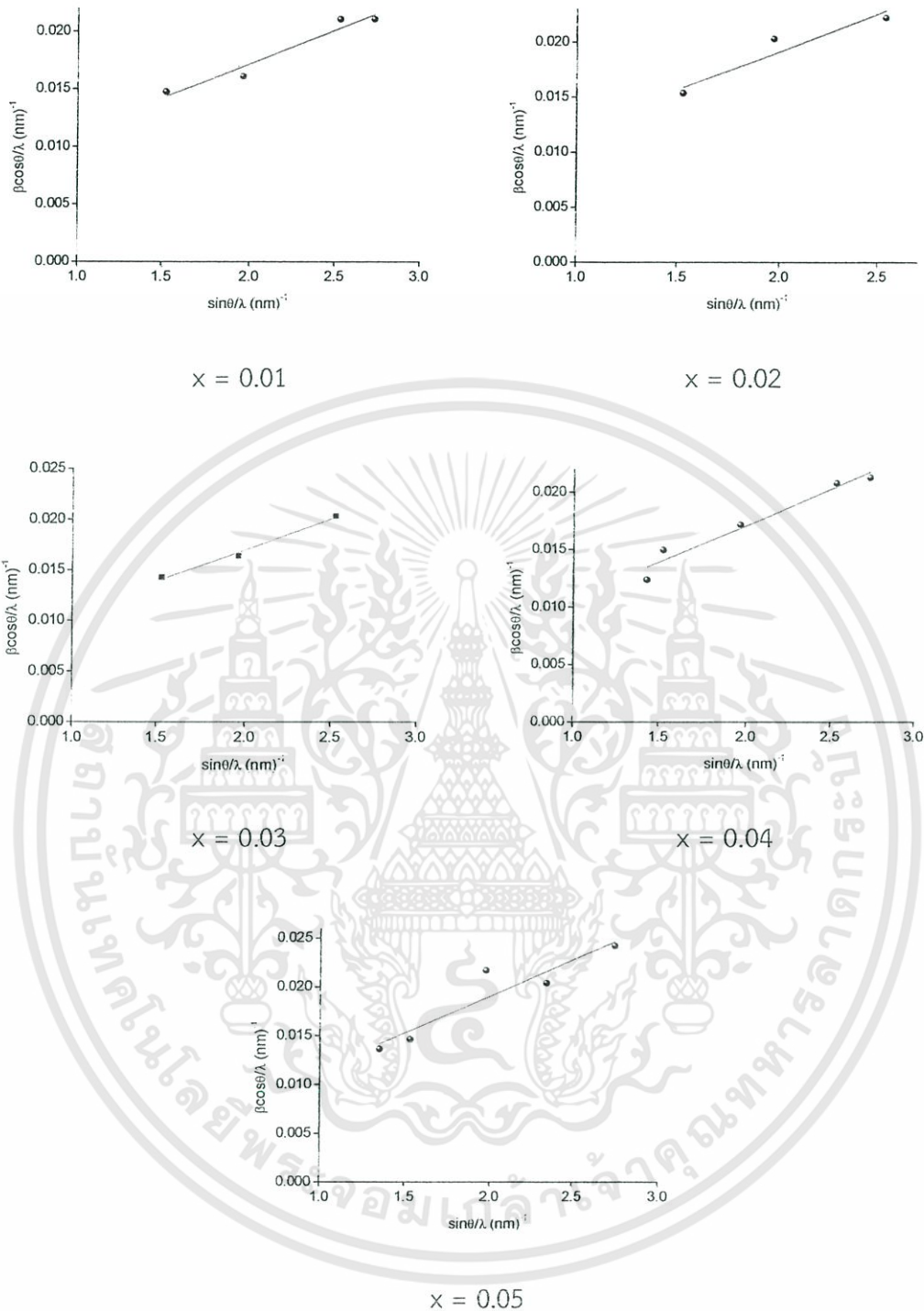
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าคงที่โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

Composition (x)	Lattice Constant (Å)		Grain size (nm) from XRD	Strain
	a	c		
0.00	4.300	7.019	94.02	-
0.01	4.299	7.019	185.19	$15 \times 10^{-4}$
0.02	4.295	7.015	188.68	$16 \times 10^{-4}$
0.03	4.289	7.012	208.33	$17 \times 10^{-4}$
0.04	4.289	6.989	232.59	$17 \times 10^{-4}$
0.05	4.281	6.972	250.00	$19 \times 10^{-4}$



ภาพที่ 4.4 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าคงที่โครงผลึก a และ c กับ เศษส่วนโดยโมลอะตอม(x) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

ค่าคงที่โครงผลึกสามารถอธิบายได้ด้วยรัศมีไอออนของธาตุ  $\text{In}^{3+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Se}^{2-}$  และ  $\text{S}^{2-}$  มีค่าเท่ากับ 0.80, 0.78, 1.98 และ 1.84 อังสตรอม ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่าค่าคงที่โครงผลึกมีแนวโน้มลดลง ซึ่งเมื่อเทียบเปอร์เซ็นต์ของผลต่างรัศมีไอออนของธาตุ  $\text{Cd}^{2+}$  กับ  $\text{In}^{3+}$  และ  $\text{Se}^{2-}$  กับ  $\text{S}^{2-}$  มีค่าเป็น 2.50 และ 7.07 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่ารัศมีไอออนของธาตุ  $\text{S}^{2-}$  มีอิทธิพลมากกว่ารัศมีไอออนของธาตุ  $\text{In}^{3+}$



ภาพที่ 4.5 แสดงกราฟที่ใช้คำนวณหา ค่าขนาดของเกรน กับ ค่าความเครียด ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0.01 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

สำหรับกรณีของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่ไม่ได้เจือด้วยสารประกอบ  $\text{In}_2\text{S}_3$  สามารถหาค่าขนาดของเกรนได้จากสมการ

$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta}$$

$$D = \frac{(1)(0.154 \times 10^{-9})}{0.00168 \cos(0.22254)}$$

$$D = 94.02 \text{ นาโนเมตร}$$

จากการศึกษาค่าขนาดของเกรนสามารถหาค่าได้จากพีคของความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยใช้วิธีวิลเลียมสัน-ฮอลล์ (Williamson-Hall method) ซึ่งเป็นวิธีที่นำอิทธิพลที่เกิดจากค่าความเครียดของสารตัวอย่างมาคำนวณด้วยซึ่งสมการคือ

$$\beta = \beta_D + \beta_s$$

$$\beta = \left( \frac{k\lambda}{D \cos \theta} \right) + (4\varepsilon \tan \theta)$$

$$\beta \cos \theta = \left( \frac{k\lambda}{D} \right) + (4\varepsilon \sin \theta)$$

$$\frac{\beta \cos \theta}{\lambda} = \left( \frac{k}{D} \right) + \left( \frac{4\varepsilon \sin \theta}{\lambda} \right)$$

เมื่อ  $D$  คือ ค่าขนาดของเกรน

$k$  คือ ค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับขนาดและรูปร่างของเกรน

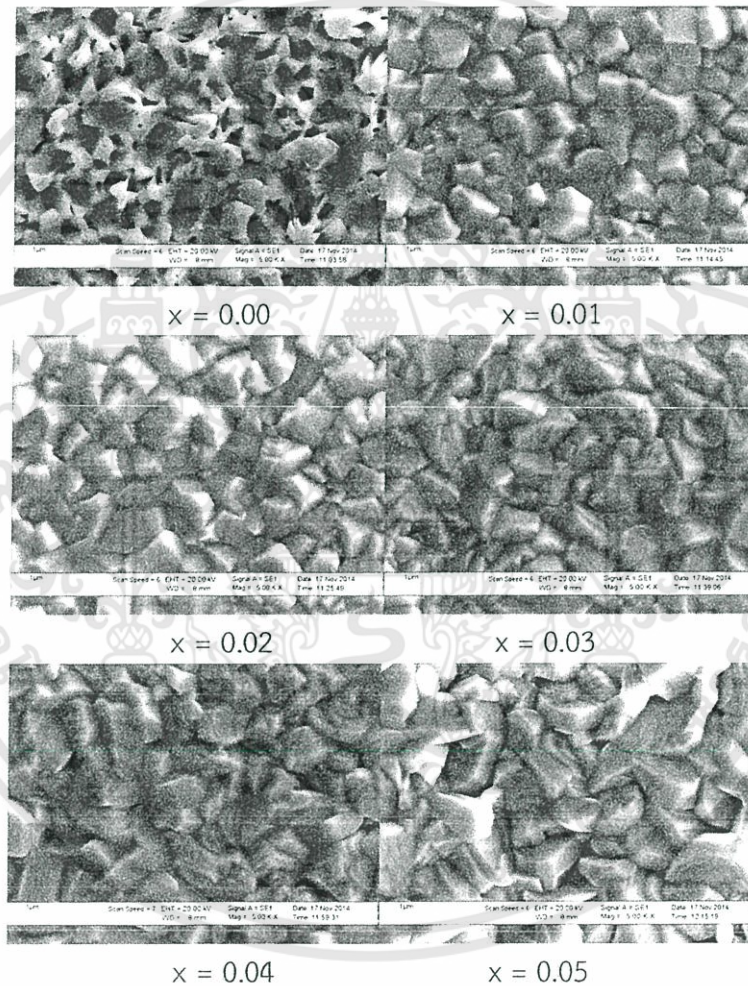
$\beta$  คือ ระยะความกว้างของพีคที่ความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ที่ค่าเป็นครึ่งหนึ่งของความเข้มสูงสุด (full width at half-maximum of the diffraction peak)

$\varepsilon$  คือ ค่าความเครียด

จะได้ว่าสามารถหาค่าขนาดของเกรนได้จากจุดตัดแกน  $y$  และหาค่าความเครียดได้จากค่าความชันของกราฟซึ่งแสดงค่าในตารางที่ 4.1

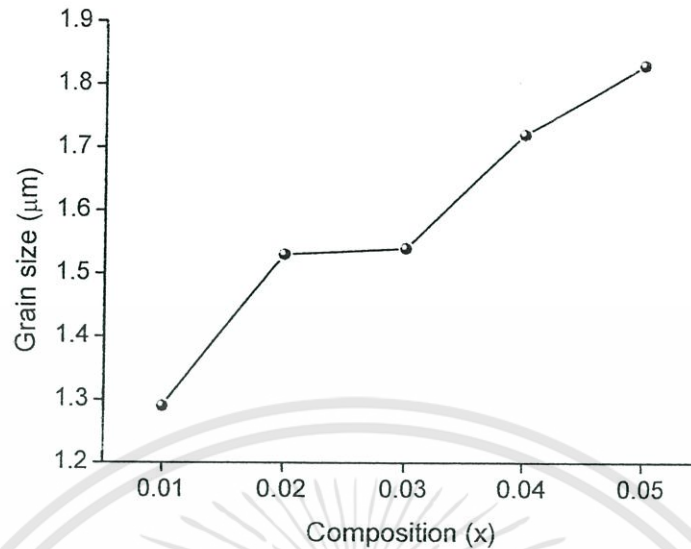
4.2.2 ผลการศึกษาภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิด

การศึกษาโครงสร้างผลึกมหภาคของบริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นการศึกษาถึงลักษณะของสภาพพื้นผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ และจากภาพถ่าย SEM ยังสามารถบอกถึงค่าขนาดของเกรนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำได้ ภาพถ่าย SEM ที่ได้แสดงดังภาพที่ 4.6



ภาพที่ 4.6 แสดงภาพถ่าย SEM ของบริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

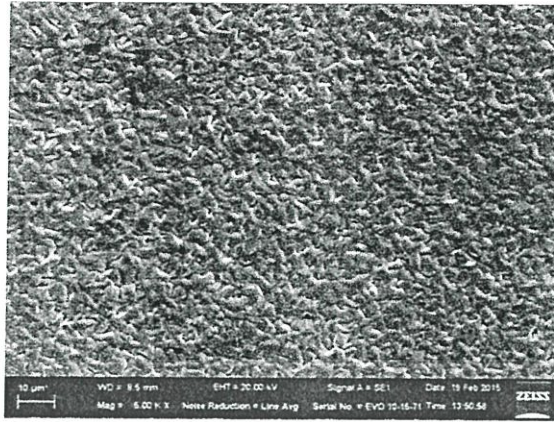
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



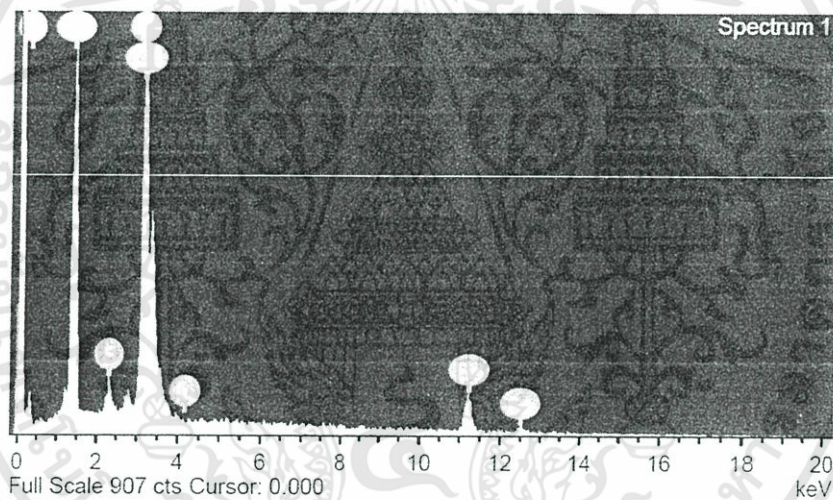
ภาพที่ 4.7 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าขนาดของเกรน กับ เศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

#### 4.2.3 ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ของบริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$ เมื่อ $x = 0.05$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

การศึกษาการวิเคราะห์ธาตุของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  เมื่อ  $x = 0.05$  ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดด้วย EDS (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) เพื่อเป็นการระบุชนิดและปริมาณของธาตุที่อยู่ในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ



ภาพที่ 4.8 แสดงภาพถ่าย SEM ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  เมื่อ  $x = 0.05$  ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที



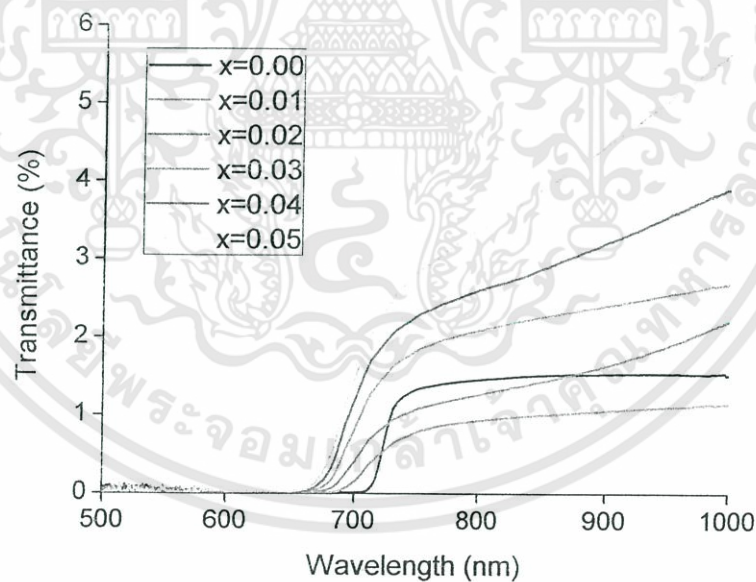
ภาพที่ 4.9 แสดงสเปกตรัม EDS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  เมื่อ  $x = 0.05$  ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

จากสเปกตรัมภาพที่ 4.9 แสดงสเปกตรัม EDS ขององค์ประกอบของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำประกอบไปด้วย อะตอมของธาตุ In, Cd, Se, S และ C โดยสเปกตรัมข้างต้นแสดงถึงการยืนยันธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารประกอบของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่เตรียมขึ้นได้

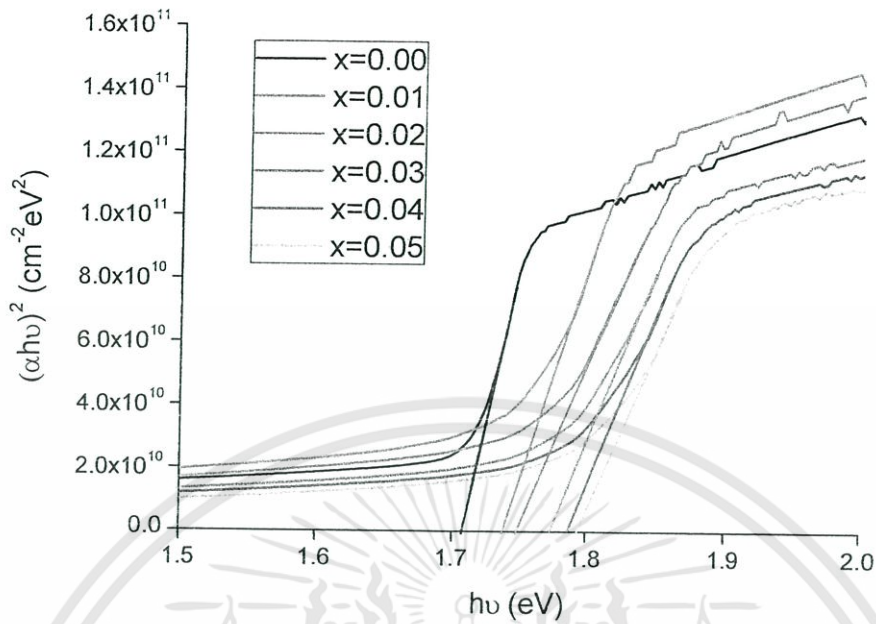
ตารางที่ 4.2 แสดงองค์ประกอบของธาตุต่างๆ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  เมื่อ  $x = 0.05$  ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

Element Normalized	Wt (%)	At (%)
S	2.17	6.32
Se	35.99	42.47
Cd	59.22	49.09
In	2.62	2.12
Total	100.00	100.00

4.2.4 ผลการศึกษาสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด



ภาพที่ 4.10 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง กับ ความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

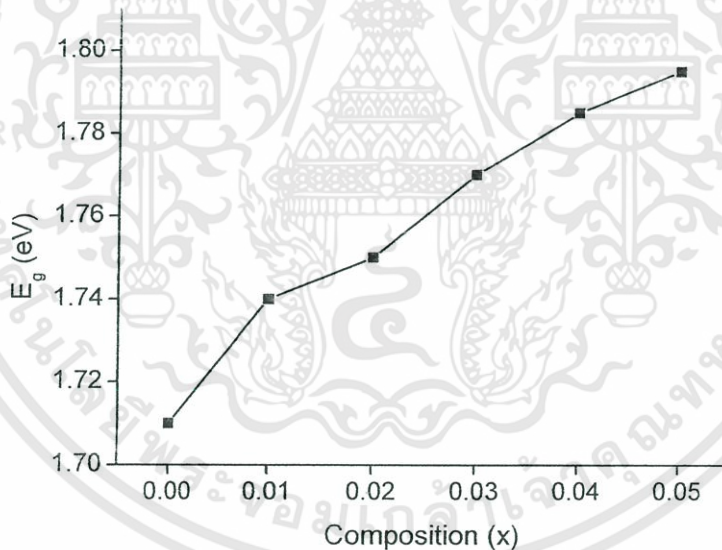


ภาพที่ 4.11 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $(\alpha hv)^2$  กับ  $hv$  ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(CdSe)_{1-x}(In_2S_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

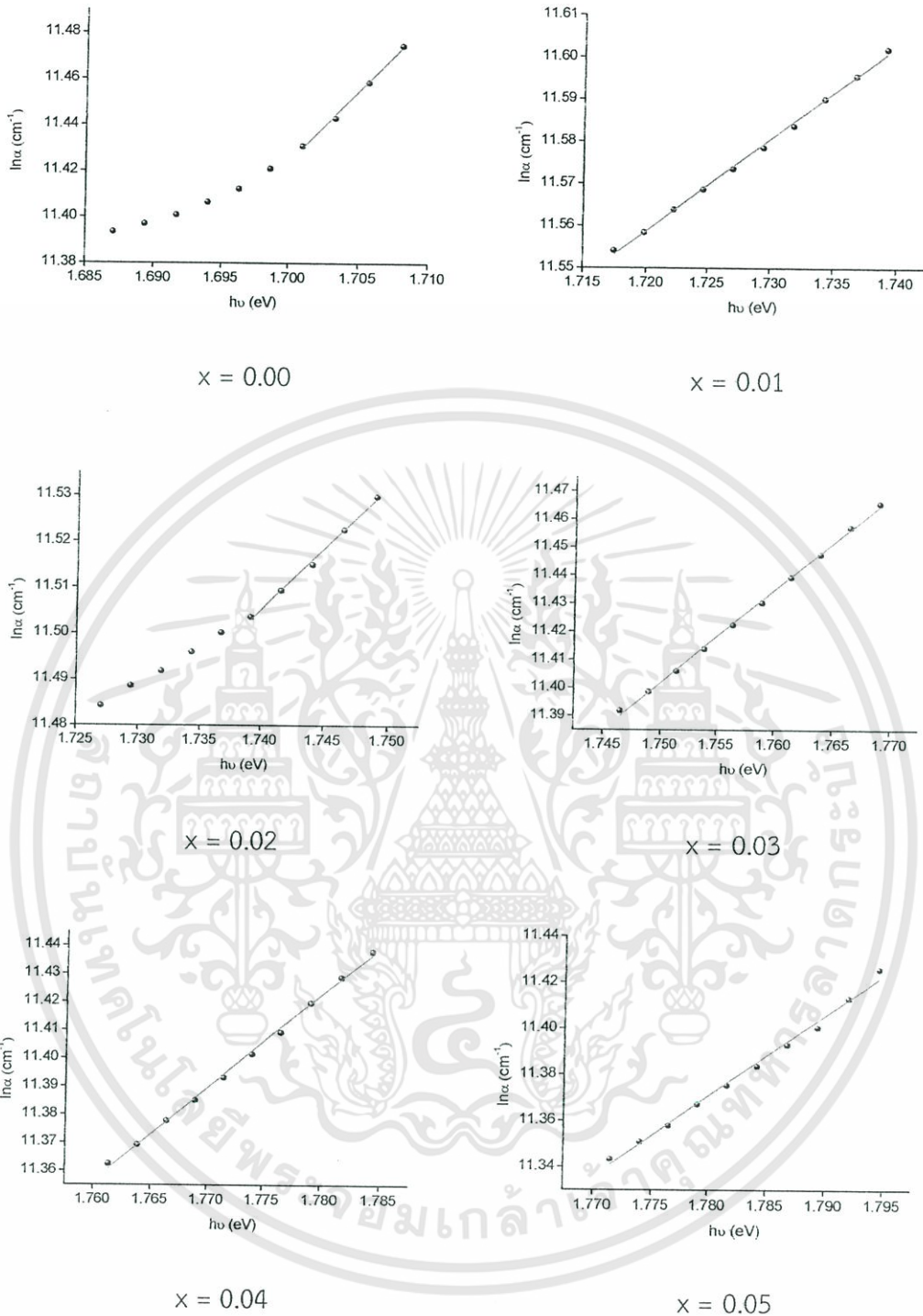
จากสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(CdSe)_{1-x}(In_2S_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที พบว่า ขอบการดูดกลืนแสงอยู่ที่ความยาวคลื่นแสงประมาณ 710, 690, 680, 675, 670 และ 665 นาโนเมตร ของกรณีเศษส่วนโดยโมลอะตอม ( $x$ ) = 0, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 และ 0.05 ตามลำดับ และสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงมีค่าประมาณ 1-6 เปอร์เซ็นต์ ข้อมูลที่ได้จากสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงสามารถคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน โดยนำข้อมูลที่ได้ไปวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $(\alpha hv)^2$  กับ ค่าพลังงานโฟตอน ( $hv$ ) แล้วทำการลากเส้นตรงหาค่าคาตัดหมาย (extrapolation) ของกราฟในส่วนที่เป็นเชิงเส้นไปตัดกับแกนค่าพลังงานโฟตอน จุดที่ตัดแกนพลังงานโฟตอนคือ ค่าช่องว่างแถบพลังงาน แสดงได้ในภาพที่ 4.10 ภาพที่ 4.11 และ ในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

Composition (x)	Energy Gap ( $E_g$ ) (eV)
0.00	1.710
0.01	1.740
0.02	1.750
0.03	1.770
0.04	1.785
0.05	1.795



ภาพที่ 4.12 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) กับ เศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที



ภาพที่ 4.13 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\ln \alpha$  กับ  $h\nu$  ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาส่วนหางของแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที โดยส่วนหางของแถบพลังงานสามารถตรวจสอบได้จากการวัดขอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งขอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำจะเพิ่มขึ้นแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลดังความสัมพันธ์

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

สำหรับที่อุณหภูมิห้องและในช่วงพลังงานที่ต่ำกว่า  $E_g$  จะสามารถสรุปสมการเป็นดังนี้

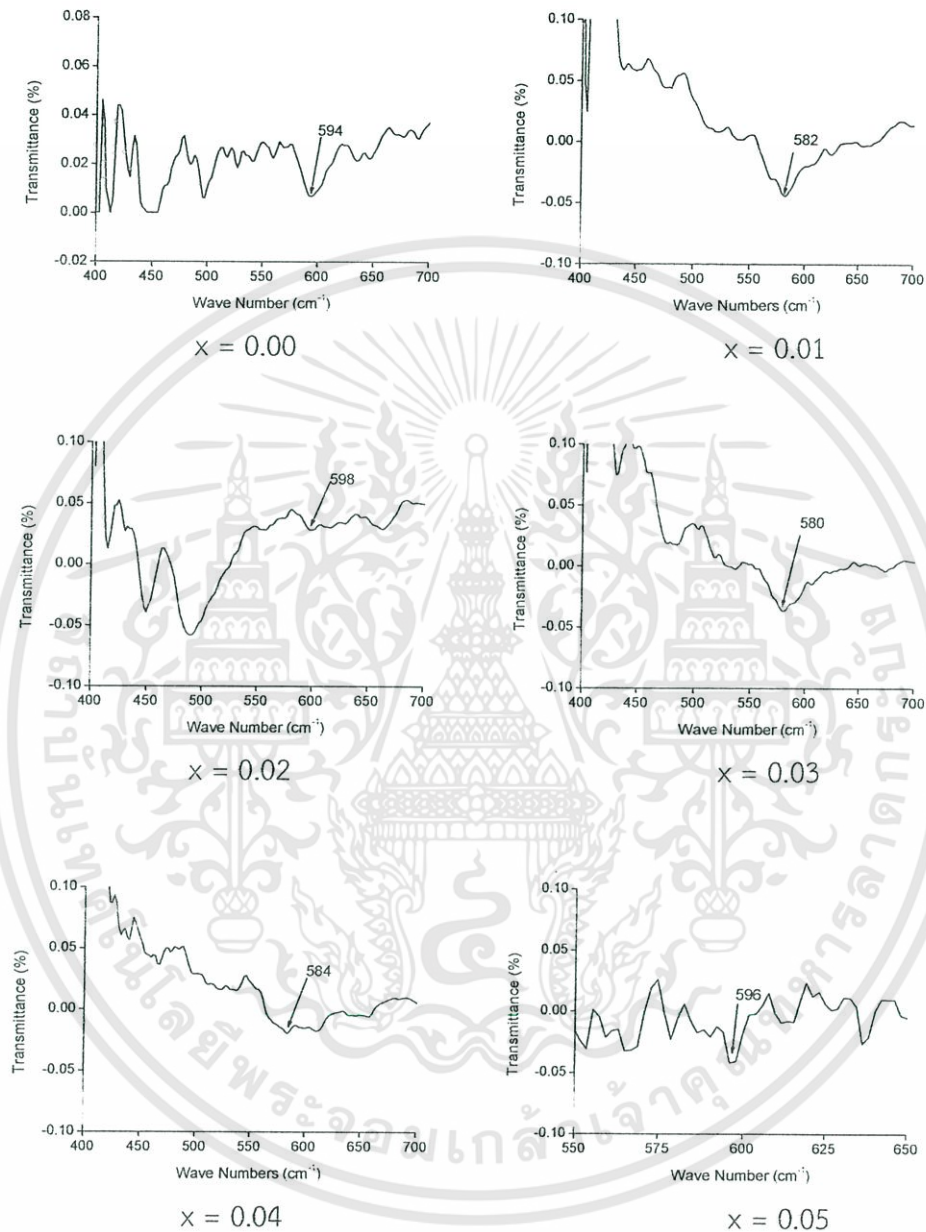
$$\alpha(\nu) = \alpha_0 \exp\left(\frac{h\nu}{E_0}\right)$$

เมื่อ  $\alpha_0$  เป็นค่าคงที่ ส่วน  $E_0$  เป็นค่าความกว้างของส่วนหางของแถบพลังงานซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิไม่มากนัก ดังนั้น ค่า  $E_0$  จะสามารถคำนวณได้จากความชันของเส้นตรงของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln \alpha$  กับ  $h\nu$  ในช่วงพลังงานที่มีค่าต่ำกว่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) นำค่าความชันของกราฟมาหาค่าส่วนหางของแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด ได้ตารางที่ 4.4

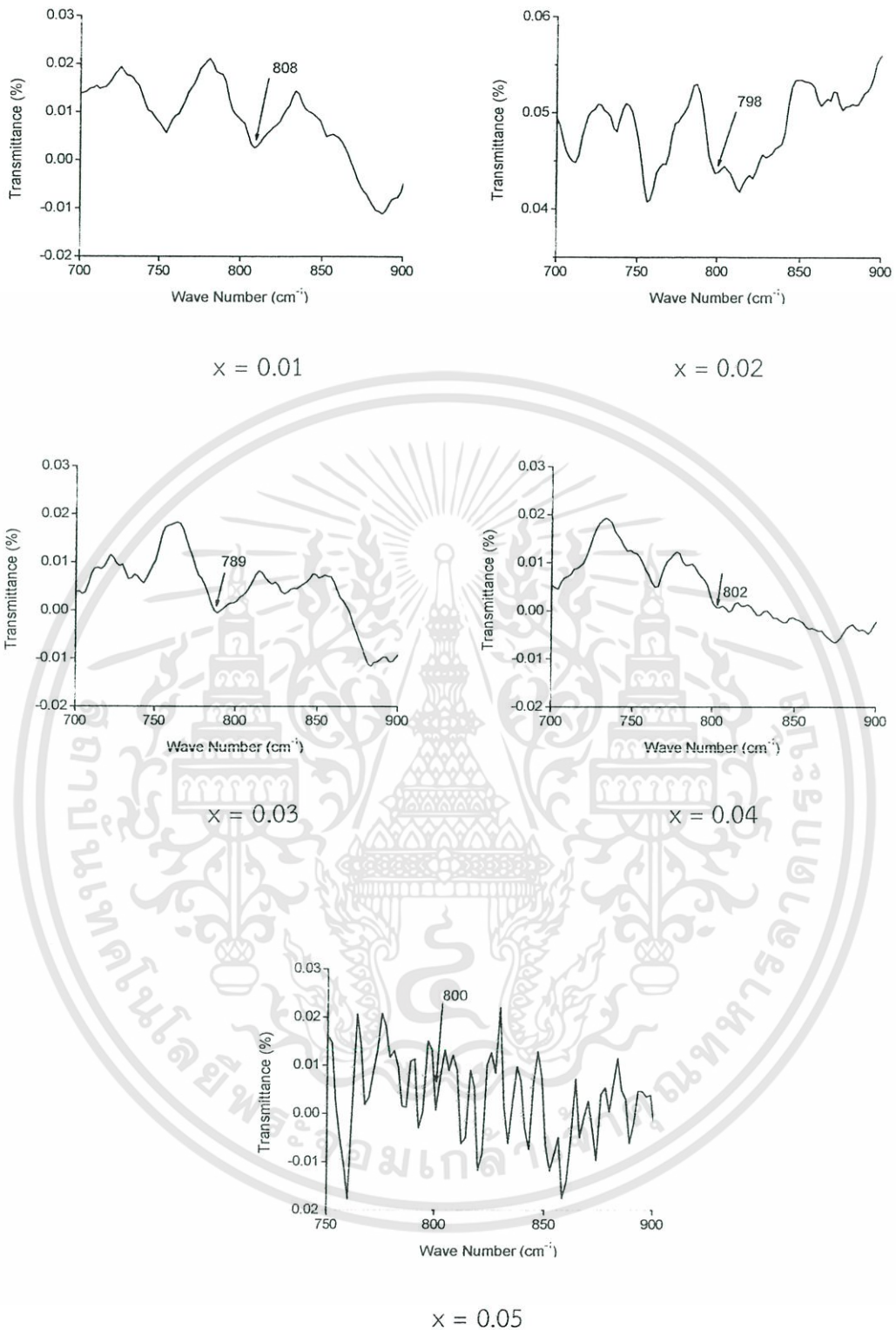
ตารางที่ 4.4 แสดงค่าส่วนหางของแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

Composition (x)	Band Tail (meV)
0.00	159.71
0.01	455.42
0.02	373.75
0.03	300.83
0.04	301.61
0.05	286.51

4.2.4.1 ผลการศึกษาฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

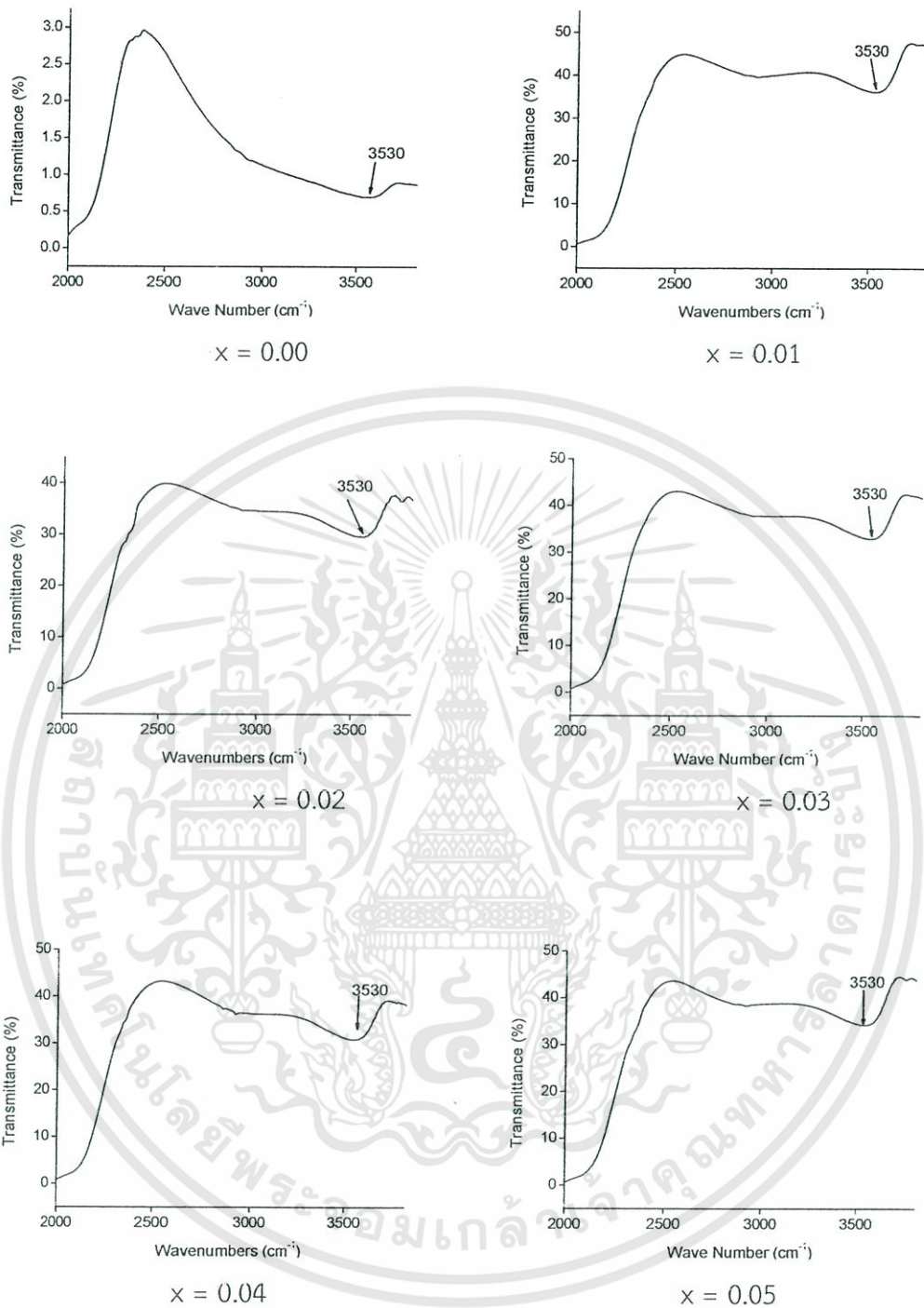


ภาพที่ 4.14 แสดงสเปกตรัม FTIR ในช่วงเลขคลื่น 400-700 ต่อเซนติเมตร ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที



ภาพที่ 4.15 แสดงสเปกตรัม FTIR ในช่วงเลขคลื่น 700-900 ต่อเซนติเมตร ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0.01 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.16 แสดงสเปกตรัม FTIR ในช่วงเลขคลื่น 2000-3500 ต่อเซนติเมตร ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

จากภาพที่ 4.14-4.16 แสดงสเปกตรัม FTIR ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที สามารถอธิบายได้โดยการที่สารจะดูดกลืนรังสีอินฟราเรดนั้น ความถี่ของรังสีที่ถูกดูดกลืนจะต้องตรงกับค่าของการสั่นพันธะระหว่างไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้าของสารประกอบเท่านั้น จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง กับ เลขคลื่นในช่วงเลขคลื่น 400-4000 ต่อเซนติเมตร กรณี  $x = 0, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04$  และ  $0.05$  ปรากฏแถบการสั่นแบบยืดของพันธะระหว่างไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้าของสารประกอบ Cd-Se ที่ค่าเลขคลื่นเท่ากับ 594, 582, 598, 580, 584 และ 596 ต่อเซนติเมตร ตามลำดับ และเกิดแถบการสั่นแบบยืดของพันธะระหว่างไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้าของสารประกอบ In-S ที่ค่าเลขคลื่นเท่ากับ 808, 798, 789, 802 และ 800 ต่อเซนติเมตร ตามเศษส่วนโดยโมลอะตอม ( $x$ ) ที่เพิ่มขึ้นจาก  $x=0.01$  ถึง  $x=0.05$  นอกจากนี้ยังพบการสั่นแบบยืดของพันธะระหว่างไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้าของสารประกอบ O-H อีกด้วย ซึ่งสอดคล้องกับคณะผู้วิจัยของ Mazhar Ali (2013), S.R. Vishwakarma (2013) และ N. M. Huang (2011)

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าเลขคลื่นของการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

Composition (x)	ค่าเลขคลื่น ( $\text{cm}^{-1}$ ) ของการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ		
	Cd-Se bond	In-S bond	O-H bond
0.00	594	-	3530
0.01	582	808	3530
0.02	598	798	3530
0.03	580	789	3530
0.04	584	802	3530
0.05	596	800	3530

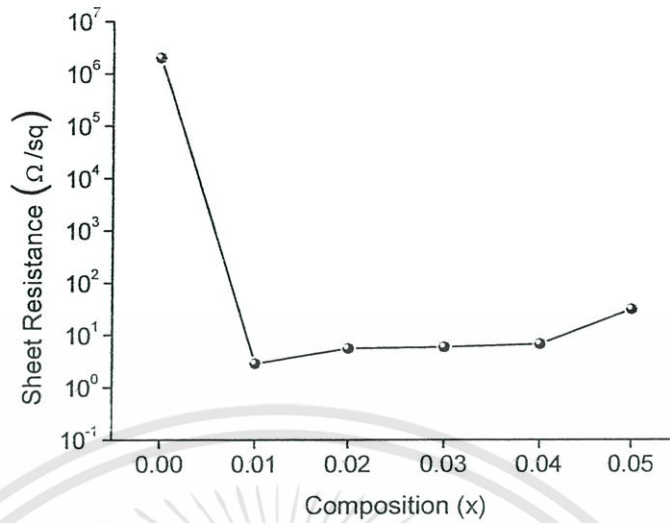
4.2.5 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิด

4.2.5.1 ผลการคำนวณหาค่าความต้านทานไฟฟ้า ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิด

ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) โดยการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิด จากการทดลองพบว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่ไม่ได้เจือด้วยสารประกอบ  $\text{In}_2\text{S}_3$  จะมีค่าความต้านทานแผ่นสูงมากระดับ  $2.00 \times 10^6$  โอห์มต่อตารางหน่วย แต่เมื่อเจือด้วยสารประกอบ  $\text{In}_2\text{S}_3$  ในปริมาณเศษส่วนโดยโมลอะตอม ( $x$ ) = 0.01 ค่าความต้านทานแผ่นจะลดลงต่ำสุดที่ 2.85 โอห์มต่อตารางหน่วย เมื่อเศษส่วนโดยโมลอะตอม ( $x$ ) มีค่าเพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานแผ่นจะมีค่าสูงขึ้นจนเป็น 30.98 โอห์มต่อตารางหน่วย เมื่อ  $x = 0.05$  ดังแสดงในภาพที่ 4.17

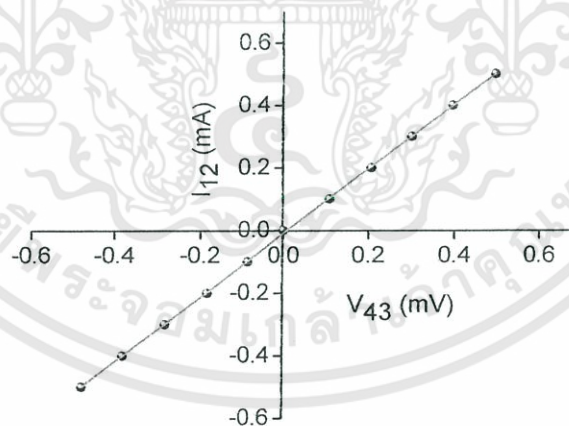
ตารางที่ 4.6 แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

Composition (x)	Sheet Resistance ( $\Omega/\text{sq}$ )
0.00	$2.00 \times 10^6$
0.01	2.85
0.02	5.53
0.03	5.92
0.04	6.72
0.05	30.98

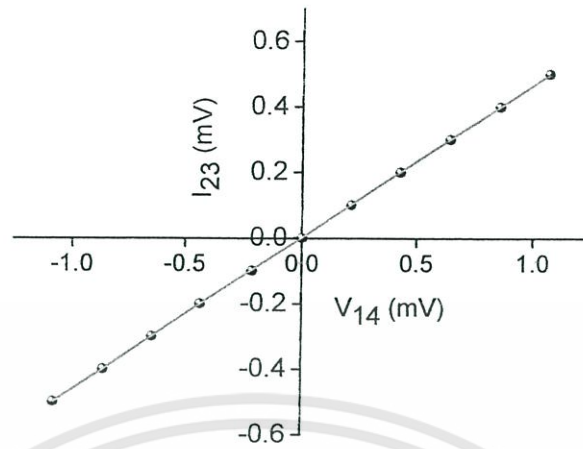


ภาพที่ 4.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต้านทานแผ่น กับ เศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

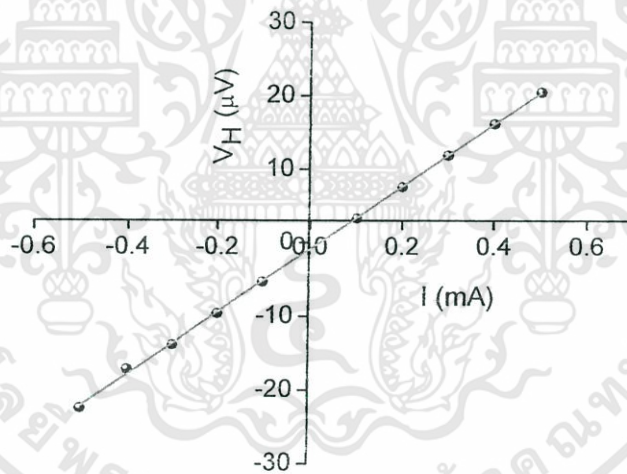
4.2.5.2 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า และ ปรากฏการณ์ฮอลล์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด



ภาพที่ 4.18 แสดงการหา ค่าความต้านทานไฟฟ้า ( $R_1$ ) ด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  เมื่อ  $x=0.03$  ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที



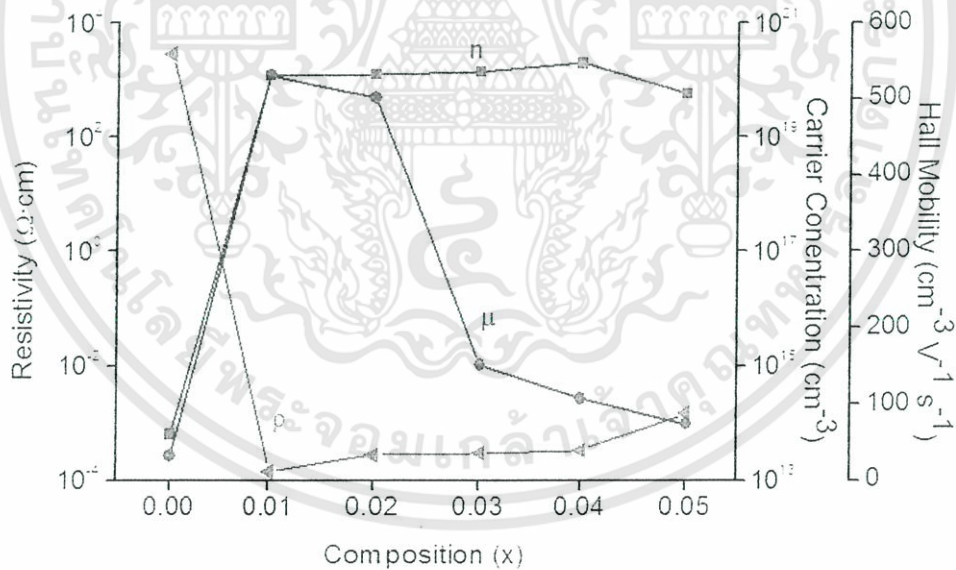
ภาพที่ 4.19 แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า ( $R_2$ ) ด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  เมื่อ  $x=0.03$  ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที



ภาพที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ ( $V_H$ ) กับ ค่ากระแสไฟฟ้า ( $I_{13}$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  เมื่อ  $x=0.03$  ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

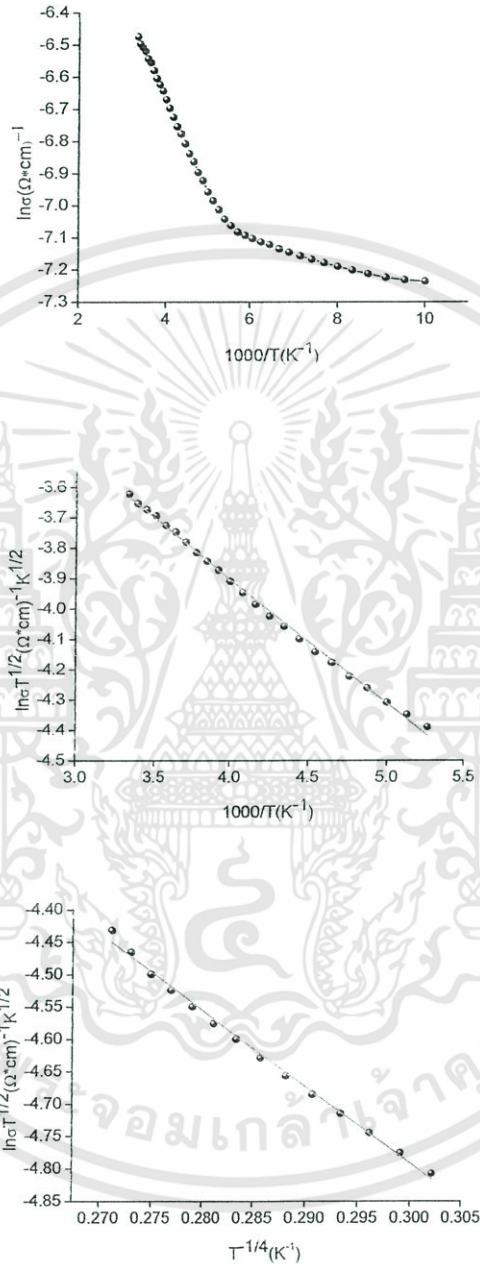
ตารางที่ 4.7 แสดงการศึกษา ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า และ ปรากฏการณ์ฮอลล์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

Composition of (x) $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$	Resistivity ( $\Omega\cdot\text{cm}$ )	Hall Coefficient ( $\text{cm}^2/\text{C}$ )	Electron Concentration ( $\text{cm}^{-3}$ )	Hall Mobility ( $\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ )
0.00	$2.88 \times 10^3$	$9.78 \times 10^4$	$6.38 \times 10^{13}$	34.01
0.01	$1.43 \times 10^{-4}$	$5.32 \times 10^{-2}$	$1.18 \times 10^{20}$	531.22
0.02	$2.77 \times 10^{-4}$	$1.40 \times 10^{-1}$	$1.25 \times 10^{20}$	501.88
0.03	$2.96 \times 10^{-4}$	$4.60 \times 10^{-3}$	$1.37 \times 10^{20}$	151.81
0.04	$3.36 \times 10^{-4}$	$3.17 \times 10^{-2}$	$1.94 \times 10^{20}$	108.69
0.05	$15.00 \times 10^{-4}$	$1.12 \times 10^{-1}$	$5.59 \times 10^{19}$	74.49



ภาพที่ 4.21 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนและค่าสภาพคล่องของพาหะ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

4.2.5.3 ผลการศึกษาค่าความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด



ภาพที่ 4.22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\ln \sigma$  กับ  $\frac{1000}{T}$ , ค่า  $\ln \sigma T^{\frac{1}{2}}$  กับ  $\frac{1000}{T}$  และ ค่า

$\ln \sigma T^{\frac{1}{4}}$  กับ  $T^{-\frac{1}{4}}$  ตามลำดับ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าในที่นี้จะใช้ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด โดยเริ่มจากแบบจำลองอะตอมของซีโต ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้น ( $E_a$ ) ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\ln \sigma T^{\frac{1}{2}}$  กับ  $\frac{1000}{T}$

- การหาค่าพลังงานกระตุ้น ( $E_a$ )

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

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

$$\ln(\sigma T^{\frac{1}{2}}) = -\frac{E_a}{1000k} \left(\frac{1000}{T}\right) + \ln \sigma_0$$

$$\text{ความชัน} = -\frac{E_a}{1000k}$$

$$\text{แทนค่า } E_a = -\frac{1000k(\text{ความชัน})}{1.6 \times 10^{-19}}$$

$$E_a = -\frac{1000(1.38 \times 10^{-23})(-0.4073)}{1.6 \times 10^{-19}}$$

$$E_a = 0.035 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

- การหาค่าเพอร์มิตติวิตี ( $\epsilon_s$ )

$$\epsilon_s = \epsilon_r \epsilon_0$$

$$\epsilon_s = (9.30)(8.85 \times 10^{-14})$$

$$\epsilon_s = 8.23 \times 10^{-13} \text{ ฟารัดต่อตารางเซนติเมตร}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การหาค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ ( $N_a$ )

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

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

แทนค่า 
$$N_a = \frac{8(8.23 \times 10^{-13})(0.035)(1.6 \times 10^{-19})}{(1.6 \times 10^{-19})^2 (94.02 \times 10^{-7})^2}$$

$$N_a = 1.63 \times 10^{16} \text{ ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร}$$

- การหาค่าความยาวเดอบาย ( $L_D$ )

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

$$L_D = \left( \frac{(1.38 \times 10^{-23})(260)(8.2305 \times 10^{-13})}{(1.6 \times 10^{-19})^2 (1.6354 \times 10^{16})} \right)^{1/2}$$

$$L_D = 2.65 \times 10^{-6} \text{ เซนติเมตร}$$

- การหาค่าระดับพลังงานของกึ่งตัวนำ ( $E_i$ )

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

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

$$E_i = \frac{1}{2} (1.74) - 0.03513$$

$$E_i = 0.834 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

- การหาค่าความหนาแน่นของกึ่งตัวนำ ( $N_t$ )

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

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

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

แทนค่า  $v_c = \left[ \frac{(1.38 \times 10^{-23})(260)}{2\pi(0.165 \times 9.1 \times 10^{-31})} \right]^{1/2}$

$v_c = 6.16 \times 10^4$  เซนติเมตรต่อวินาที

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

แทนค่า  $N_v = 2 \left[ \frac{2\pi(0.165 \times 9.1 \times 10^{-31})(1.38 \times 10^{-23})(260)}{(6.63 \times 10^{-34})^2} \right]^{3/2}$

$N_v = 1.35 \times 10^{24}$  ต่อตารางเซนติเมตร

ดังนั้น

$$N_t = \left[ \frac{(94.02094 \times 10^{-7})(1.6 \times 10^{-19})^2 (1.3515 \times 10^{24})(1.6354 \times 10^{16})(6.1670 \times 10^4)}{2 \left( \frac{1.38 \times 10^{-23}}{1.6 \times 10^{-19}} \right) (260)(1.4857 \times 10^{-9})} \right] \times \exp\left(-\frac{0.03513 \times 1.6 \times 10^{-19}}{1.38 \times 10^{-7} \times 260}\right) + (94.02094 \times 10^{-7} \times 1.6354 \times 10^{16})$$

$$N_t = (4.9236 \times 10^{12})(1) + (1.53731 \times 10^{11})$$

$N_t = 5.07 \times 10^{12}$  ต่อตารางเซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

- การหาค่าองศาของความไม่เป็นระเบียบ ( $T_0$ ) และ แฟกเตอร์หน้าพจน์เอ็กซ์โพเนนเชียล ( $\sigma_0$ )

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

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

$$T_0 = 19473.36 \text{ เคลวิน}$$

$$\sigma_0 = 0.2872 \text{ ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร}$$

- การหาค่าความหนาแน่นของสถานะถูกจำกัดเฉพาะที่ระดับเฟอร์มิ ( $N(E_F)$ )

จาก 
$$T_0 = \frac{18\alpha^5}{kN(E_F)}$$

เมื่อ  $\alpha = 1.24 \times 10^7$  ต่อตารางเซนติเมตร

$k = 1.38 \times 10^{-23}$  จูลต่อเคลวิน

$q = 1.6 \times 10^{-19}$  คูลอมป์

$$N(E_F) = \frac{18\alpha^5}{k \frac{T_0}{q}} = 2.0433 \times 10^{22} \text{ ต่ออิเล็กตรอนโวลต์}$$

- การหาค่าระยะทางเฉลี่ยของการกระโดด ( $R$ )

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

สามารถหาค่าคงที่ของการสลายตัวของฟังก์ชันคลื่นของสถานะถูกจำกัดเฉพาะที่ระดับเฟอร์มิ ( $\alpha$ ) ได้จาก

$$\alpha = 1.24 \times 10^7 \text{ ต่อเซนติเมตร}$$

แทนค่า

$$R = \left[ \frac{0.135}{[(150)(2.0433 \times 10^{22})^{1/4}]} \right]$$

$$R = 1.020 \times 10^{-7} \text{ เซนติเมตร}$$

- การหาค่าพลังงานเฉลี่ยของการก้าวกระโดด

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

$$W = \frac{3}{4\pi (1.0203 \times 10^{-7})^3 (2.0433 \times 10^{22})}$$

$$W = 0.011 \text{ อีเล็กตรอนโวลต์}$$

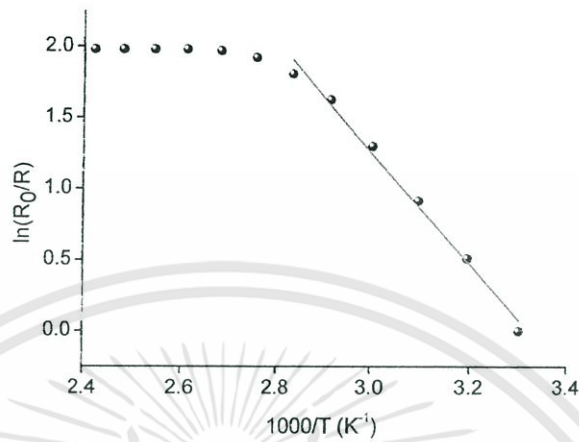
และ

$$\alpha R = 1.24 \times 10^7 \times 1.0203 \times 10^{-7}$$

$$\alpha R = 1.265$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.5.4 ผลการศึกษาค่าความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด



ภาพที่ 4.23 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\ln\left(\frac{R_0}{R}\right)$  กับ  $\frac{1000}{T}$  ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

จากภาพที่ 4.23 เป็นผลของค่าความต้านทานไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 5 นาที โดยวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 303-400 เคลวิน จากผลการทดลองสามารถนำมาหาค่าพลังงานกระตุ้น ( $E_a$ ) ได้จากสมการ

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

$$\ln\left(\frac{R_0}{R}\right) = -\frac{E_a}{1000k} \left(\frac{1000}{T}\right)$$

$$\text{ความชัน} = -\frac{E_a}{1000k}$$

$$\text{แทนค่า} \quad E_a = -\frac{1000k(\text{ความชัน})}{1.6 \times 10^{-19}}$$

$$E_a = -\frac{1000(1.38 \times 10^{-23})(-3.9193)}{1.6 \times 10^{-19}}$$

$$E_a = 0.3380 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

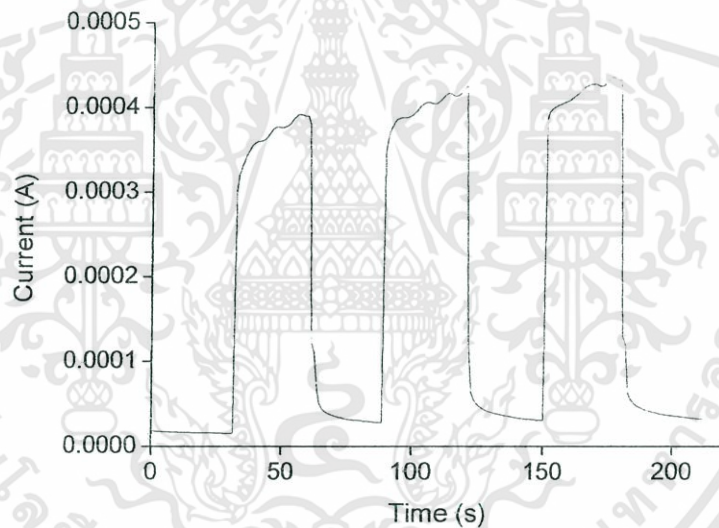
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $R_0$  คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง

$E_g$  คือ ค่าพลังงานกระตุ้น

#### 4.2.5.5 ผลการศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงต่อร้อนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

ในการศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงต่อร้อนจะต้องมีการฉายแสงให้กับสารตัวอย่าง แล้วทำการบันทึกกระแสไฟโตที่เพิ่มขึ้นตามเวลาซึ่งจะเรียกว่าเป็นกระแสไฟโตขาขึ้น แต่เมื่อหยุดการฉายแสงกระแสไฟโตจะลดลงตามเวลาซึ่งจะเรียกว่ากระแสไฟโตขาลง ซึ่งจากการศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงต่อร้อนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe พบว่าช่วงเวลาตอบสนองสั้นมากที่ช่วงกระแสไฟโตขาขึ้น โดยเวลาขาขึ้นสามารถคำนวณได้จากกราฟของกระแสไฟโตที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาขณะที่มีการฉายแสง ดังภาพที่ 4.24



ภาพที่ 4.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟโต กับ เวลา ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

ความไวในการตอบสนองต่อแสง (photosensitivity,  $S$ ) ที่คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ จะนิยามดังนี้ คือ

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

ซึ่งนิยามนี้นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในเชิงวิศวกรรมสิ่งประดิษฐ์การตรวจวัดแสง (photodetector) แต่มีนักวิทยาศาสตร์ส่วนหนึ่ง นิยามความไวในการตอบสนองต่อแสง ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$S = \frac{R_{dark}}{R_{light}}$$

ในทางปฏิบัติมักมีการป้อนแรงดันไบแอสด้วยค่าคงที่ทั้งขณะมีการฉายแสงและขณะไม่มีการฉายแสง ดังนั้น ความไวในการตอบสนองต่อแสงสามารถคำนวณได้ง่ายๆ จากความสัมพันธ์

$$S = \frac{I_{light}}{I_{dark}}$$

และผลการทดลองของกระแสโฟโตชาขึ้นของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงที่ออร์ันของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่อุณหภูมิห้องจะรายงานไว้ดังตารางที่ 4.8

จาก

$$R = \frac{V}{I}$$

$$R_{dark} = \frac{30V}{1.53 \times 10^{-5} A} = 1.96 \times 10^6 \Omega$$

$$R_{light} = \frac{30V}{3.69 \times 10^{-4} A} = 8.13 \times 10^4 \Omega$$

ตารางที่ 4.8 แสดงความไวในการตอบสนองต่อแสง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

Photosensitivity (S)	
$S = \left( \frac{\Delta R}{R_{dark}} \right) \times 100\%$	$S = \frac{R_{dark}}{R_{light}}$
$S = 95.85$	$S = 24.11$

สำหรับช่วงกระแสโฟโตชาลงจะเป็นตามสมการ

$$I = I_0 e^{-t/\tau_d}$$

จากการศึกษาพบว่าเวลาขาลง (decay time) มีได้มากกว่าหนึ่งค่า โดยจะเขียนอยู่ในรูปฟังก์ชันมัลติเพิล เอ็กซ์โพเนนเชียล ดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I = \sum_2^n A_{n-1} [\exp(-t/\tau_{d(n-1)})] + A_n [\exp((-t/\tau_{dn})^\beta)]$$

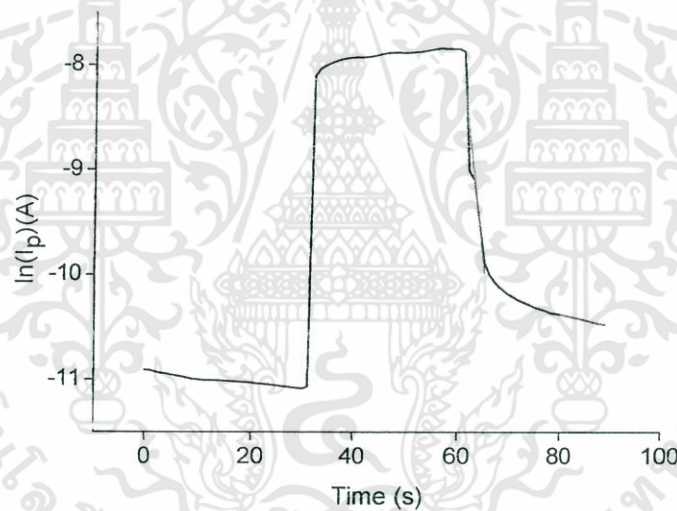
จากผลการทดลองสามารถเขียนได้ดังนี้

$$I = A_1 [\exp(-t/1.1043)] + A_2 [\exp(-t/41.8235)] + A_3 [\exp(-t/90.4977)^\beta]$$

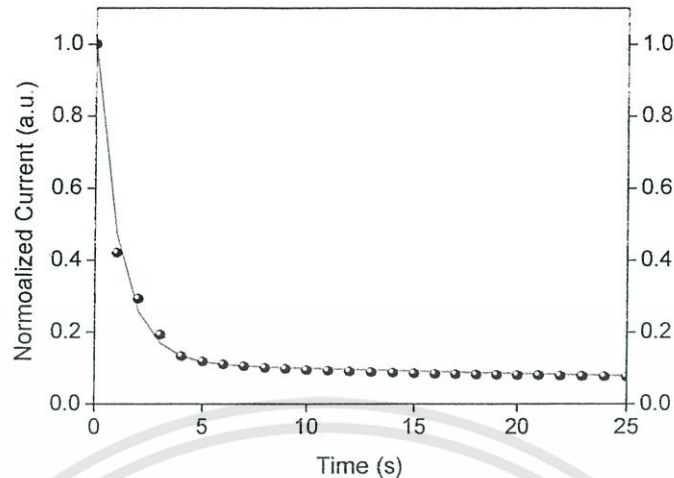
และสามารถคำนวณหา ค่าความหนาแน่นของกักประจุได้จากสมการ

$$\sigma_t = \frac{I_n}{q\mu V_a} \left( \frac{l}{w} \right)$$

และผลการทดลองของกระแสโฟโตชาลงของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงที่อุณหภูมิห้องของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe จะรายงานไว้ดังตารางที่ 4.9



ภาพที่ 4.25 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $\ln I_p$  กับ เวลา ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระบะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที



ภาพที่ 4.26 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสอร์มัลไลซ์ขาด กับ เวลา ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

ตารางที่ 4.9 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่สำคัญที่ได้จากการศึกษาปรากฏการณ์เชิงแสงดีอาร์น ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

	1 <sup>st</sup> Term	2 <sup>rd</sup> Term	3 <sup>rd</sup> Term
Decay Time (s)	$\tau_{d1} = 1.1043$ $A_1 = 3.22 \times 10^{-4}$	$\tau_{d2} = 41.8253$ $A_2 = 2.87 \times 10^{-5}$	$\tau_{d3} = 90.4977$ $A_3 = 1.39 \times 10^{-5}$ $\beta = 0.2377$
Decay Component	$I_1 = 0.38 \text{ mA}$ $\sigma_{i1} = 4.67 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$	$I_2 = 0.29 \text{ mA}$ $\sigma_{i2} = 2.45 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$	$I_3 = 0.08 \text{ mA}$ $\sigma_{i3} = 9.79 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$

หมายเหตุ  $\sigma_i$  หาได้จากความสัมพันธ์  $\sigma_i = \frac{I_0}{q\mu V_a} \left( \frac{l}{w} \right)$

ค่าแรงดันไฟฟ้า ( $V_a$ )	= 30	โวลต์
ค่าสภาพคล่องพาหะ ( $\mu$ ) ของ CdSe	= 34.02	ตารางเซนติเมตรต่อ(โวลต์-วินาที)
ค่าความกว้างของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ	= 1	เซนติเมตร
ค่าความยาวของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ	= 0.5	เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการประดิษฐ์ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิดในระบบสุญญากาศ จากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ CdSe และ  $\text{In}_2\text{S}_3$  ความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์ โดยเลือกใช้อุณหภูมิของสารตั้งต้น (source) และ อุณหภูมิของแผ่นรองรับเป็น 650 และ 550 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยใช้เวลาในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ 5 นาที พบว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำกรณีที่ไม่เจือด้วยสารประกอบ  $\text{In}_2\text{S}_3$  ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้จะมีสีดำ ส่วนกรณีที่ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่เจือด้วยสารประกอบ  $\text{In}_2\text{S}_3$  ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้จะมีสีเทา

จากการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด มีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล โดยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่มีเศษส่วนโดยโมลอะตอม ( $x$ ) = 0 พิกของระนาบ (002) จะปรากฏอย่างโดดเด่น (preferential orientation) แต่เมื่อเศษส่วนโดยโมลอะตอม ( $x$ ) มีค่าตั้งแต่ 0.01 ถึง 0.05 พบว่าพิกความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เลื่อนไปทิศทางที่มุม  $2\theta$  ที่โตขึ้นตามเศษส่วนโดยโมลอะตอม ( $x$ ) ที่เพิ่มขึ้น จากการคำนวณหาค่าคงที่โครงสร้างผลึก พบว่าค่าคงที่โครงสร้างผลึก  $a$  และ  $c$  มีแนวโน้มลดลงตามเศษส่วนโดยโมลอะตอม ( $x$ ) ที่เพิ่มขึ้น

จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด พบว่าเกรนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำมีขนาดโตขึ้นตามเศษส่วนโดยโมลอะตอม ( $x$ ) ที่เพิ่มขึ้น

จากการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงสามารถที่จะคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด พบว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1.71 เป็น 1.78 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามเศษส่วนโดยโมลอะตอม ( $x$ ) ที่เพิ่มขึ้นจาก  $x=0$  ถึง  $x=0.05$

จากการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด โดยการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ และ วัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ พบว่าค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำลดลงตามเศษส่วนโดยโมลอะตอม ( $x$ ) ที่เพิ่มขึ้นจาก  $x=0$  ถึง  $x=0.05$  สำหรับค่าสภาพคล่องฮอลล์มีค่ามากที่สุดที่  $x=0.01$  หลังจากนั้นจะมีค่าลดลงตามเศษส่วนโดยโมลอะตอม ( $x$ ) ที่เพิ่มขึ้น ส่วนค่าความหนาแน่นของพาหะในช่วงแรกมีค่าเพิ่มขึ้นตามเศษส่วนโดยโมลอะตอม ( $x$ ) ที่เพิ่มขึ้นโดยมีค่าสูงสุดที่  $x=0.04$  และหลังจากนั้นจะมีค่าลดลงตามเศษส่วนโดยโมลอะตอม ( $x$ ) ที่เพิ่มขึ้น และได้ทำการวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 20-300 เคลวิน ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับแบบจำลองของซีตและแบบจำลองของการกระโดดระหว่างสถานะพลังงานท้องถิ่นในระยะไม่คงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงชั่วขณะ (transient photoconductivity) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe พบว่าในช่วงกระแสโฟโตชาขึ้นชีวิตของพาหะนั้นสั้นมาก ซึ่งค่าความไวแสงมีค่าเป็น 95.85 เปอร์เซ็นต์ ส่วนกระแสโฟโตชาลงพบว่าเกิดปรากฏการณ์สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงดื้อรั้น กล่าวคือ ค่าช่วงชีวิตของพาหะค่อนข้างยาว ซึ่งเป็นผลมาจากกับดักพาหะมีการจับและปล่อยพาหะค่อนข้างช้ามาก ค่าช่วงชีวิตพาหะสามารถหาได้จากการพิตกราฟของผลการทดลอง โดยใช้ฟังก์ชันมัลติเพิลเอ็กซ์โพเนนเชียล

#### ข้อเสนอแนะ

1. การเตรียมแผ่นกระจกสไลด์ถ้ามีความสะอาดไม่เพียงพอจะเป็นสาเหตุทำให้เคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำไม่ติด
2. สำหรับการติดตั้งระบบผู้ติดตั้งควรศึกษาอย่างละเอียด และฝึกให้ชำนาญ ก่อนจะเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ
3. ขณะเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำควรระวังไม่ให้กล่องแกรไฟต์พลิกซึ่งสาเหตุอาจเกิดจากความร้อน ความดันภายใน และเทอร์โมคัปเปิลที่ใช้ไม่มีคุณสมบัติยืดหยุ่น
4. ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้ควรรับวัสดุสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ เพื่อป้องกันฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำหลุดร่อน
5. ในขณะที่ทำซ้ำไฟฟ้ากับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำควรระวังมือห้ามสัมผัสกับผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้ และทำซ้ำไฟฟ้าให้มีลักษณะเล็ก เรียว และคมให้มากที่สุด

## บทที่ 6

### สรุปผลผลิตงานวิจัย

#### สรุปรายชื่อและรายละเอียดผลผลิตงานวิจัยที่ผลิตได้

6.1 ชื่อบทความวิจัย “Structural, Optical and Electrical Properties of  $Cd_{1-x}Zn_xSe$  Thin Films Prepared by Closed Space Sublimation Method” ตีพิมพ์ใน Proceeding in The 41<sup>st</sup> Congress on Science and Technology of Thailand (STT41), November 6-8, 2015, Suranaree University of Technology, Nakhon Rachasima, Thailand. โดยมีรายละเอียดดังนี้คือ

**Abstract:**  $Cd_{1-x}Zn_xSe$  thin films within composition  $0 \leq x \leq 1$  were deposited on glass substrate by close spaced sublimation method (CSS) using mixed powders of pure CdSe and ZnSe compounds as the precursor. For CdSe thin films growth condition, source temperature and glass substrate temperature were 650 and 550 °C, respectively. In all solid solution films and ZnSe thin films, source temperature and glass substrate temperature were fixed at 780 and 680 °C, respectively. XRD reveals that CdSe films exhibits the hexagonal wurtzite structure with the preferred orientation of (002) plane. In contrast, ZnSe thin films were formed in cubic zincblende structure with the preferred orientation of (111) plane. However, for the solid solution composition ( $0.2 \leq x \leq 0.8$ ), the cubic and hexagonal phases have been found to coexist in the system and the films become less preferentially oriented. SEM and EDS were used to study the surface morphology and elemental compositions of the samples. The transmission spectra of the films were studied using a double beam spectrophotometer in the wavelength range at 300-900 nm. The energy gap value of  $Cd_{1-x}Zn_xSe$  thin films increases from 1.68 to 2.62 eV as Zn composition (x) increases from 0 to 1. The FTIR transmission spectra reveal the presence of vibrational mode of  $Cd_{1-x}Zn_xSe$  thin films in the range 500- 4000  $cm^{-1}$ . The incorporation of Zn into the Cd-Se lattice is confirmed by the change of lattice parameter and energy gap values. From the current-voltage characteristics, the electron trap density and depth of the trapping level of  $Cd_{1-x}Zn_xSe$  thin films were elucidated.

**Introduction:** The II-VI semiconductors with energy gap values in the visible spectral range are promising candidates for solar cells, photo detectors and opto-electronic devices such as non-linear optics, visible-light emitting diodes and lasers<sup>1,2,3</sup>. CdSe and ZnSe are well-known II-VI binary semiconductors widely used as photoconductors in various electronic devices and as an n-type layer in CdTe and Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> based

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

heterojunction solar cells. In recent years, there has been intense interest in II-VI ternary alloy semiconductors because of the characteristics of the alloy materials can be modulated as the composition changed<sup>4,5</sup>. Among the various ternary II-VI alloy semiconductors,  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Se}$  ternary compounds are most promising materials since its lattice constant and energy gap values can be tuned systematically by incorporating various Zn composition (x).  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Se}$  ternary compounds can form a continuous series of solid solutions, allowing systematic variation in the energy gap of  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Se}$  from 1.72eV for CdSe to 2.72 eV for ZnSe by adjusting the composition (x). The deposition techniques for II-VI ternary alloy semiconductor thin films in a variety of ways such as thermal evaporation, electron beam deposition, close spaced sublimation, SILAR, spray pyrolysis, spin coating, screen printing, etc<sup>6,7,8</sup>. In this paper is concerned with the thermal growth of  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Se}$  thin films on glass substrates by close spaced sublimation (CSS) method. The CSS technique is a simple, short time and inexpensive growth technique at low pressure. The XRD, SEM, EDS, optical transmittance, FTIR and current-voltage characteristics of  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Se}$  thin films have been studied.

**Methodology:** The  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Se}$  thin films with different compositions ( $0 \leq x \leq 1$ ) were deposited on glass substrates by close spaced sublimation method. The vacuum was  $4 \times 10^{-2}$  Torr during deposition of the films. High purity of CdSe and ZnSe powders with different composition (x) were weighed and well mixed together by mechanical mixing with pestle and mortar for 30 min to get uniformly mixed powders. The powders of solid solutions  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Se}$  were then stored in vacuum desiccators. For CdSe (x=0.0) thin film growth condition, source temperature and glass substrate temperature were 680 and 580 °C, respectively. In all solid solutions thin films and ZnSe thin films (x=0.2 to x=1), temperature and glass substrate temperature were 780 and 680 °C, respectively. The time taken for  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Se}$  thin films deposition was 5 min. The structural properties were analyzed from X-ray diffraction (XRD) by Bruker D 8 diffractometer using  $\text{CuK}\alpha$  radiation. The scanning electron microscopy (SEM) images and the elemental composition were investigated using an energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS) attached with the EVO-MA10 instrument. The optical measurements were made using UV-Vis spectrophotometer by Thermo Electron-Helios Alpha. The bond vibrating mode measurements were made by Thermo Scientific-Nicolet 6700 FT-IR in the range 500-4000  $\text{cm}^{-1}$ . The current-voltage characteristic measurements were made by using a computer interfaced Keithley-236 current/voltage source.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Results and Discussion:** The XRD patterns for the  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Se}$  thin films are shown in Figure 1. For  $x=0$ , the strongest peak corresponding to (002) plane and the other peaks are weak intensities corresponding to (101), (102) and (103) planes of CdSe hexagonal wurtzite structure. Similar behavior is also observed in  $x= 1.0$ . The strongest peak corresponding to (111) plane and the other peaks are weak intensities corresponding to (220) and (311) planes of ZnSe cubic zincblende structure. However, for solid solution composition ( $0.2 \leq x \leq 0.8$ ), the films were grown in mixed phases between cubic zincblende and hexagonal wurtzite structures. Coexistence of cubic phase and hexagonal phase often occurring in the II-VI ternary alloy thin films with composition ( $x$ ) in the range 0.2-0.8 was reported<sup>9,10,11</sup>. Increasing in composition ( $x$ ), the strongest peak intensity shifts to a higher  $2\theta$  value. This is in fact due to the partial replacement of Cd atom by Zn atom indicating to reduction in lattice parameters.

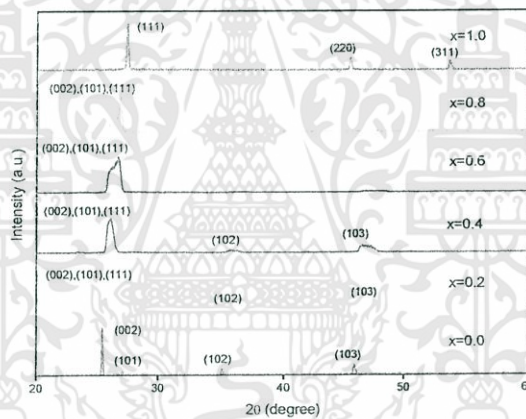


Figure 1. XRD patterns of the  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Se}$  thin films.

Figure 2 shows the fitting curves for XRD analysis with angle ranging from  $25.0^\circ$  to  $27.5^\circ$  of  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Se}$  thin films ( $x=0.2$  to  $x=0.8$ ). In the XRD curves present the peak of (002), (101) and (111) planes. The peaks can be fitted by Gaussian functions, in MATLAB software. Gaussian functions are commonly used for deconvolution of XRD spectra<sup>12,13,14,15</sup>. The XRD peaks are statistical distribution having the line shape taken on the bell curve or Gaussian profile. The deconvolution by fitting to superposition of Gaussian functions to determine the integrated peak areas and refinement of the peak positions. As the Zn content increases, the (002), (101) and (111) peak position is observed to shift towards higher  $2\theta$  shown in Table 1. This observation is in good agreement with the earlier reports<sup>16,17,18,19</sup>.

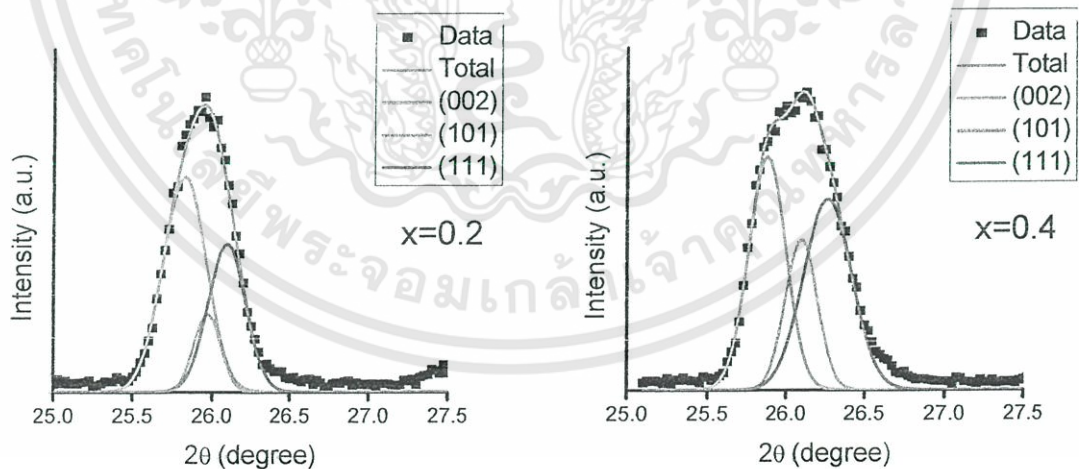
Lattice parameters ‘a’ and ‘c’ values for CdSe and ‘a’ values for ZnSe are taken from the JCPDS data (JCPDS 77-2307 for hexagonal wurtzite structure of CdSe and JCPDS 05-0552 for cubic zincblende structure of ZnSe). The lattice parameters “a” and “c” were calculated using for hexagonal structure by using the following relation;

$$\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \left( \frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right) + \frac{l^2}{c^2} \quad (1)$$

Whereas, for cubic structure, the following equation was used to calculate the lattice parameter “a”

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (2)$$

The lattice parameters  $a_H$ ,  $c_H$  for hexagonal wurtzite structure and  $a_C$  for cubic zincblende structure of  $Cd_{1-x}Zn_xSe$  thin were shown in Table 1. The lattice parameter values decrease in linear form both the hexagonal structure and cubic structure (Figure 3). A linear variation of lattice parameters of the  $Cd_{1-x}Zn_xSe$  thin films indicates that Vegard’s law is obeyed<sup>20</sup>. The  $c_H/a_H$  ratio (hexagonal structure) was between 1.58 to 1.60 (Table 1). These results indicate the lattice parameters decrease towards higher  $2\theta$  are helps confirm to the Zn substitution on Cd site.



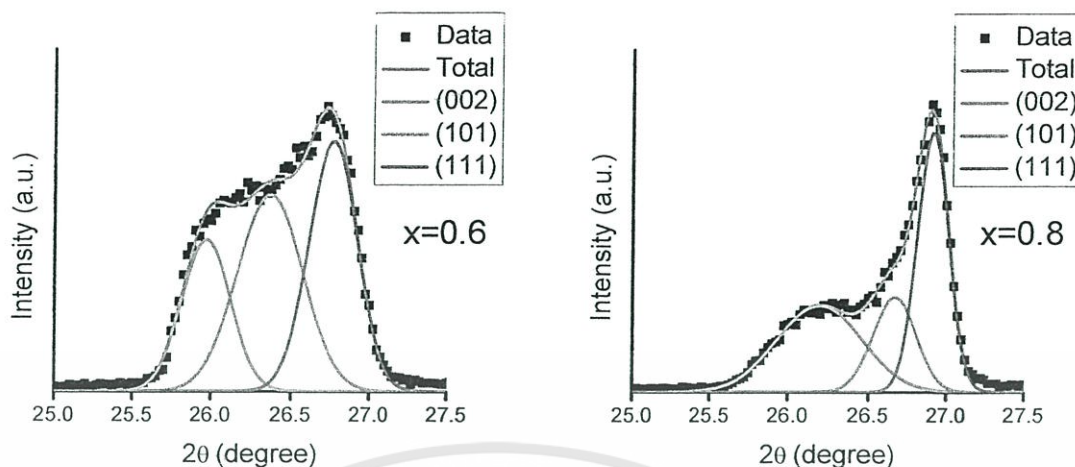


Figure 2. Fitting XRD curves of  $Cd_{1-x}Zn_xSe$  thin films.

In figure 2, the grain size can be calculated using the Scherrer relation<sup>6,7,8</sup>:

$$D = \frac{0.94\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (3)$$

where  $D$  is the grain size,  $\lambda$  is 0.154 nm,  $\beta$  is the line broadening at half the maximum intensity (FWHM) and  $\theta$  is the Bragg angle. The grain size of  $Cd_{1-x}Zn_xSe$  thin films with composition ( $x$ ), by considering to (002) plane is shown in Table 1.

Figure 4 shows SEM images of  $Cd_{1-x}Zn_xSe$  thin films with different Zn composition ( $x$ ). Grain size of CdSe thin films (about 1.2  $\mu m$ ) is bigger than the one of ZnSe thin films (about 0.3  $\mu m$ ). However,  $Cd_{1-x}Zn_xSe$  thin films with composition  $0.2 \leq x \leq 0.8$  have larger grain size than the one of CdSe and ZnSe films. When Zn composition increases, the surface roughness of  $Cd_{1-x}Zn_xSe$  ( $0.2 \leq x \leq 0.8$ ) thin films decreases dramatically (as shown in Figure 4). The evolution of grain size of  $Cd_{1-x}Zn_xSe$  thin films in Figure 4 is quite similar with the one obtained from XRD by the Scherrer relation.

**Table 1.** The planes, angle  $2\theta$  obtained from fitted XRD curves and lattice parameters of the  $Cd_{1-x}Zn_xSe$  thin films.

Composition	(hkl)	$2\theta$ (deg)	Lattice Parameters (nm)		Grain Size (Scherrer)
			Hexagonal	Cubic	

(x)			$a_H$	$c_H$	$c_H/a_H$	$a_C$	(nm)
0.0	(002)	25.425	0.4347	0.6959	1.60	-	205
	(101)	27.125					-
0.2	(002)	25.825	0.4332	0.6855	1.58	0.5925	450
	(101)	25.975					-
	(111)	26.100					-
0.4	(002)	25.875	0.4319	0.6839	1.58	0.5876	320
	(101)	26.100					-
	(111)	26.275					-
0.6	(002)	26.050	0.4297	0.6814	1.59	0.5818	250
	(101)	26.375					-
	(111)	26.775					-
0.8	(002)	26.200	0.4265	0.6773	1.59	0.5763	210
	(101)	26.675					-
	(111)	26.900					-
1.0	(111)	27.450	-	-	-	0.5651	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

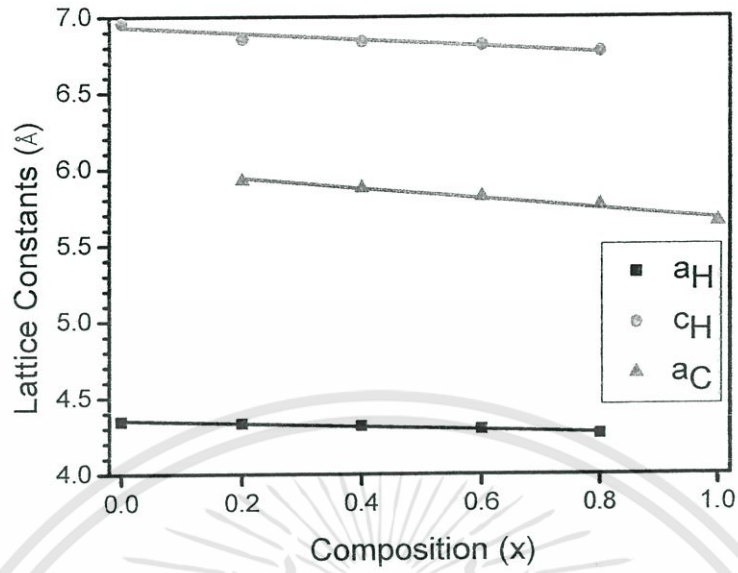
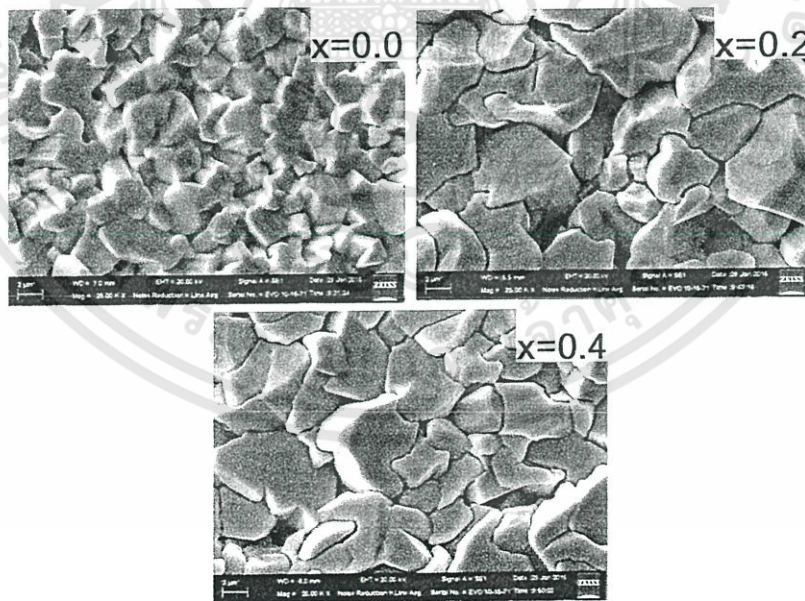


Figure 3. Variation of lattice parameters with Zn composition (x).



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

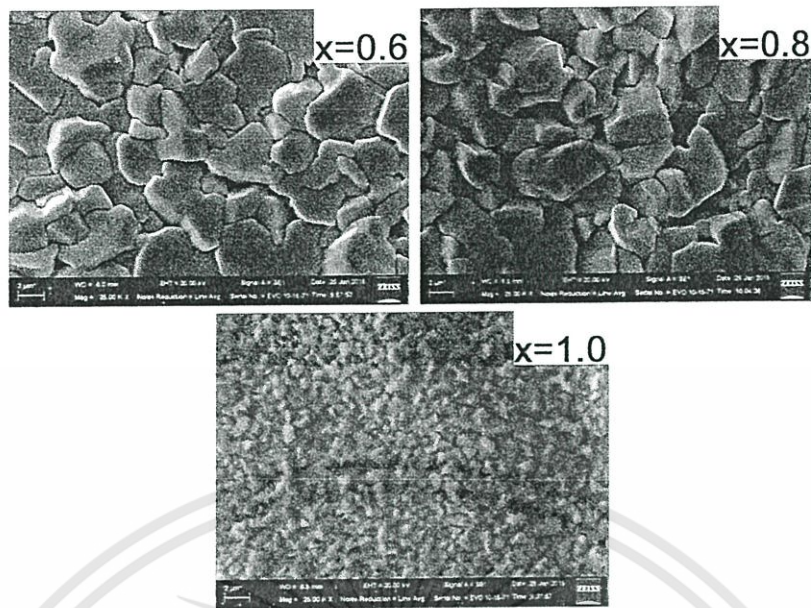


Figure 4. SEM images of  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Se}$  thin films.

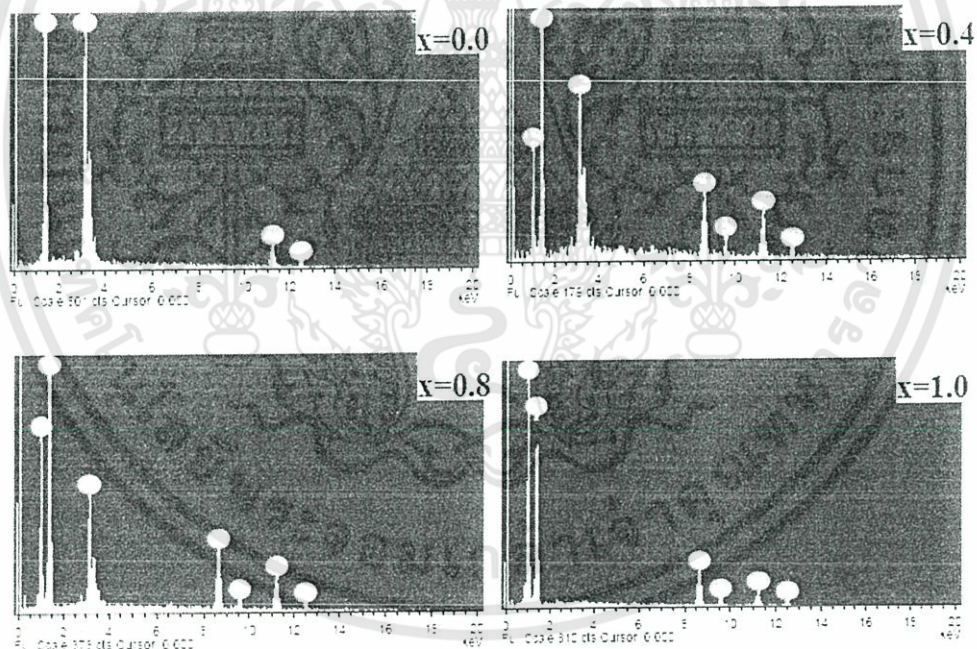


Figure 5. EDS curves of  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Se}$  thin films.

The EDS curves of  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Se}$  thin films for  $x = 0, 0.4, 0.8$  and  $1.0$  are shown in Figure 5. The EDS analysis for composition of  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Se}$  thin films both weight analysis and atomic analysis are shown in Table 2. It clearly shows that the amount of Zn increases as the 'x' value increases from 0 to 1 in the  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Se}$  thin films. The EDS analysis confirms the presence of Cd, Zn and Se in the  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Se}$  thin films which is เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

almost equal to their nominal stoichiometry within the experimental error as tabulated in Table 2. This result confirms the solid solutions in mixing of ZnSe and CdSe phases.

**Table 2.** Elemental Compositions extracted from The EDS analysis and energy gap of  $Cd_{1-x}Zn_xSe$  thin films.

Composition (x)	EDS analysis						Energy Gap (eV)
	Weight			Atomic			
	Cd (%)	Zn (%)	Se (%)	Cd (%)	Zn (%)	Se (%)	
0.0	58.6	-	41.4	49.9	-	50.1	1.68
0.2	45.7	10.8	43.5	36.2	14.7	49.1	1.71
0.4	34.7	19.4	45.9	26.1	24.9	49.0	1.73
0.6	33.3	26.9	39.8	24.5	33.9	41.6	1.75
0.8	25.3	28.5	46.2	18.1	34.9	47.0	1.76
1.0	-	42.7	57.3	-	47.4	52.6	2.62

Optical transmittance measurements were made on the  $Cd_{1-x}Zn_xSe$  thin films deposited on glass substrates at room temperature. The energy gap can be determined using the Tauc relation:

$$(\alpha h\nu)^2 = A(h\nu - E_g) \quad (4)$$

where  $\alpha$  is the absorption coefficient,  $h\nu$  is the photon energy and A is a constant. The value of  $\alpha$  is given by the equation<sup>21</sup>:

$$\alpha = \frac{1}{l} \ln\left(\frac{1}{T}\right) \quad (5)$$

where  $l$  is the film thickness and  $T$  is the transmittance. Thus, the energy gap can be obtained by extrapolating the linear portion of the  $(\alpha h\nu)^2$  versus photon energy ( $h\nu$ ) plot to the energy axis are shown in Figure 6.

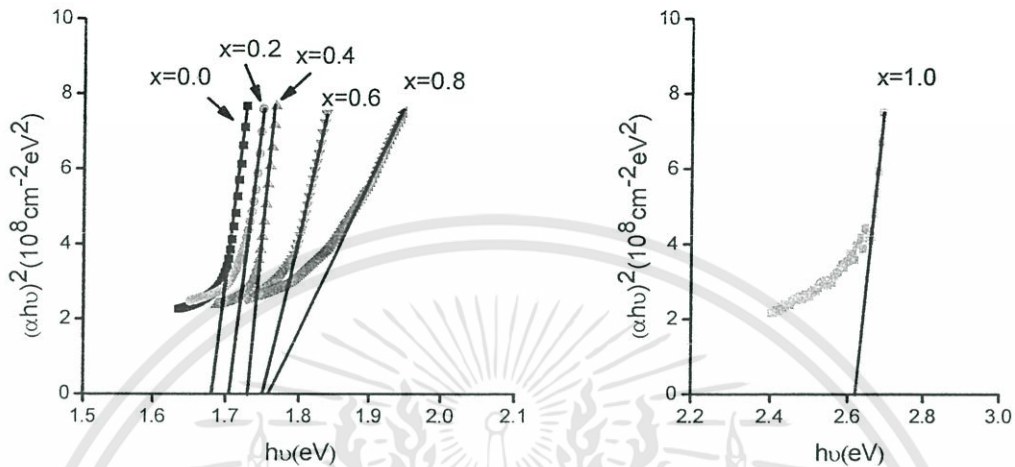


Figure 6.  $(\alpha h\nu)^2$  vs. photon energy ( $h\nu$ ) of  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Se}$  thin films.

The energy gap of  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Se}$  thin films increases from 1.69 eV to 2.64 eV as the composition of Zn increases. Table 2 shows the energy gap values of  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Se}$  thin films. An increase in energy gap is attributed to the mixing of higher energy gap (ZnSe) with smaller energy gap (CdSe) materials. The observed blue shift in the energy gap is due to the substitution of Zn ion into the CdSe lattice<sup>22,23</sup>.

The Fourier transform infrared (FTIR) transmission spectra of  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Se}$  thin films on glass substrates at room temperature in the range  $400\text{ cm}^{-1}$  to  $4000\text{ cm}^{-1}$  are shown in Figure 7. In Figure 8 shows the FTIR transmission spectra of  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Se}$  thin films for  $x=0.6$ . FTIR characteristics of Cd-Se bond stretching-vibrating mode at  $543$  to  $580\text{ cm}^{-1}$  and Zn-Se bond stretching-vibrating mode at  $642$  to  $684\text{ cm}^{-1}$ <sup>21,24</sup> are shown in Figure 8b. The peaks at  $1928$  to  $1963\text{ cm}^{-1}$  and  $2850$  to  $2863\text{ cm}^{-1}$  (Figure 8c) correspond to C-H stretching-vibrating mode. C-C stretching-vibrating mode around  $2080$  to  $2092\text{ cm}^{-1}$  and O-H stretching-vibrating mode of  $\text{H}_2\text{O}$  in films around  $3506$  to  $3554\text{ cm}^{-1}$ <sup>21,24,25</sup>. The carbon bond represents the specific features of close spaced sublimation technique. Table 3 shows the FTIR peaks of  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Se}$  thin films on glass substrates at room temperature.

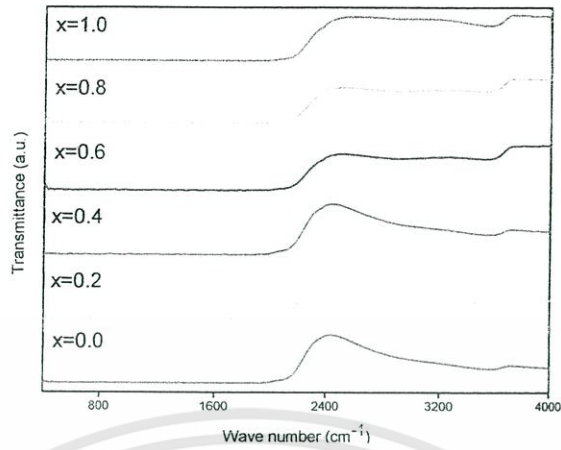


Figure 7. FTIR spectra of  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Se}$  thin films.

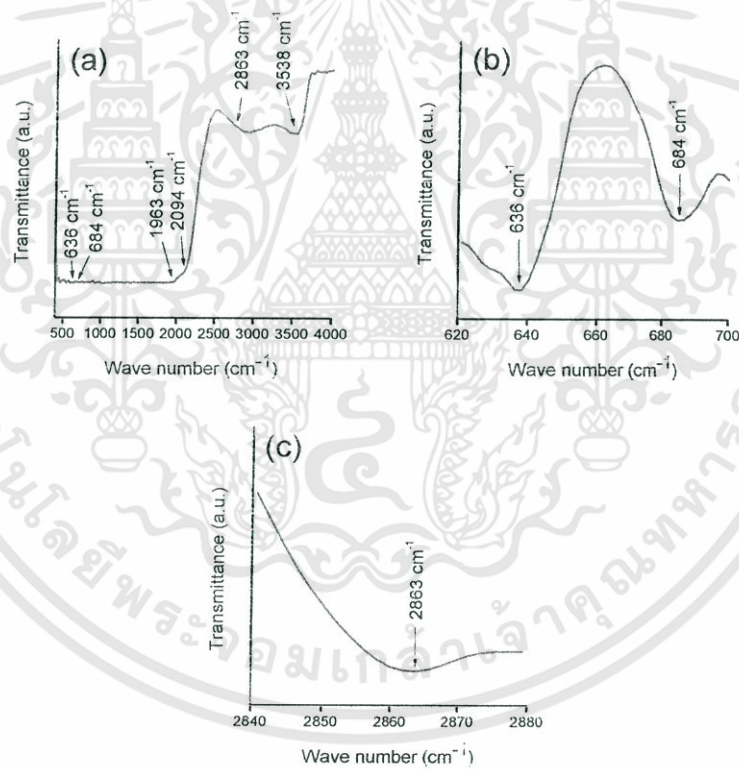


Figure 8. FTIR spectra of  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Se}$  thin films for  $x=0.6$  in the range:  $400\text{-}4000\text{ cm}^{-1}$  (a),  $620\text{-}700\text{ cm}^{-1}$  (b), and  $2840\text{-}3880\text{ cm}^{-1}$  (c).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 3. FTIR peaks of Cd<sub>1-x</sub>Zn<sub>x</sub>Se thin films.

Composition (x)	Wave number (cm <sup>-1</sup> )					
	Cd-Se stretching mode	Zn-Se stretching mode	C-C stretching mode	C-H stretching mode	O-H stretching mode	
0.0	557	-	2088	1951	2861	3554
0.2	580	642	2092	1953	2854	3552
0.4	553	665	2080	1959	2858	3554
0.6	543	684	2092	1963	2863	3538
0.8	549	680	2080	1928	2858	3506
1.0	-	665	2080	1963	2850	3533

The current-voltage characteristics of Cd<sub>1-x</sub>Zn<sub>x</sub>Se thin films (x=0.2 to 0.8) are shown in Figure 9. In the first region the conduction is obey in Ohmic law ( $I \propto V$ ). In the second region a trap square law dependence is observed ( $I \propto V^2$ )<sup>26</sup>. In the third region the conduction is a space charge limited current (SCLC). The increase of current in the third region after the second region suggests that the dominant trapping levels lie above the Fermi level.

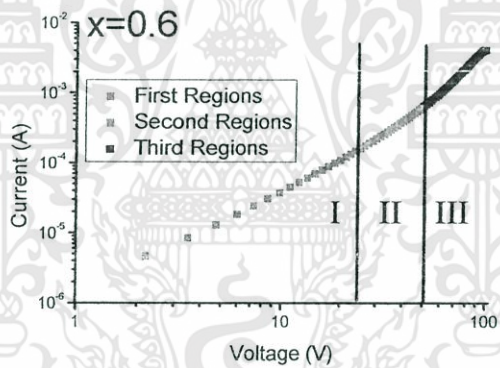
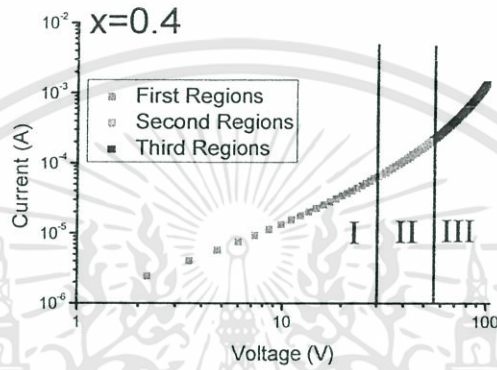
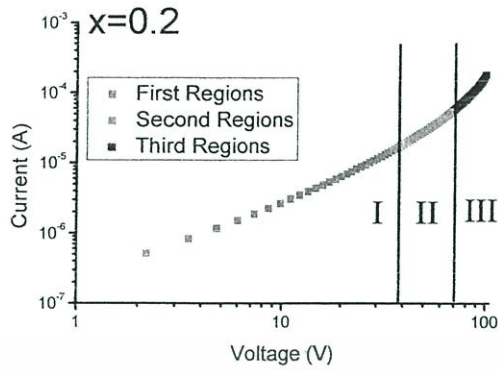


Figure 9. The current-voltage characteristics of  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Se}$  thin films.

The equation describing of I-V characteristics in the Ohmic region is given by the equation:

$$J = n_0 q \mu_0 \frac{V}{l} \quad (6)$$

where  $\mu_0$  is the free electron mobility (for n-type),  $l$  is the film thickness and  $n_0$  is the concentration of free electron in conduction band is given by the equation:

$$n_0 = N_C \exp\left(\frac{-E_F}{kT}\right) \quad (7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

where  $E_F$  is the position of the Fermi level below the conduction band and  $N_c$  is the effective density of states in conduction band. Substituting Eq.7 in Eq.6, we obtained:

$$J = N_c q \mu_0 \frac{V}{l} \exp\left(\frac{-E_F}{kT}\right) \quad (8)$$

The Fermi level and free electron mobility were calculated from the  $\log(I)$  vs.  $1000/T$  plot. At higher voltage, the slope of the  $\log(I)$  vs.  $\log(V)$  are about 2.0 and more, which leads us to understand that the forward biased current is the space charge limited current (SCLC) controlled by a trap level. The SCLC density is given by the equation<sup>26</sup>:

$$J = \frac{9}{8} \mu_0 \varepsilon' \varepsilon_0 \theta \frac{V^2}{l^3} \quad (9)$$

where  $\varepsilon'$  is the dielectric constant of material,  $\varepsilon_0$  is the permittivity in free space, and  $\theta$  is the Lampert's parameter. The trap level ( $E_t$ ) is given by the equation<sup>26</sup>:

$$\theta = \left(\frac{N_c}{N_t}\right) \exp\left(\frac{-E_t}{kT}\right) \quad (10)$$

where  $N_t$  is concentration of traps positioned at an energy  $E_t$  below the conduction band,  $T$  is the absolute temperature,  $k$  is the Boltzmann constant and  $N_c$  is the effective density of states in conduction band. The value of  $N_t$  is given by the equation<sup>26</sup>:

$$V_{TFL} = \frac{q N_t l^2}{2 \varepsilon' \varepsilon_0} \quad (11)$$

where  $q$  is the electronic charge and  $V_{TFL}$  is the trap filled limit voltage.

The value of  $\theta$  is the ratio between the free electrons ( $n_0$ ) in the conduction band to the total electron density ( $n_0 + n_1$ ):

$$\theta = \left(\frac{n_0}{n_0 + n_1}\right) \quad (12)$$

where  $n_1$  is the density of trapped electrons.

The equilibrium concentration of charge carrier in the conduction band is calculated given by the equation<sup>27</sup>:

$$n_0 = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \theta}{ql^2} V_{TR} \quad (13)$$

where  $V_{TR}$  is the transition voltage between Ohmic conduction and SCLC<sup>27</sup>.

From the equation (5), (7), (8) and (9) are used to calculate values of free electron mobility ( $\mu_0$ ), concentration of traps ( $N_t$ ) positioned at an energy  $E_t$  below the conduction band, free electrons in the conduction band ( $n_0$ ) and density of trapped electrons ( $n_1$ ). Important parameters extracted from I-V characteristics are shown in Table 4.

Table 4. Electrical parameters from I-V characteristics of  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Se}$  thin films.

Composition (x)	$V_{TR}$ (V)	$V_{TFL}$ (V)	$\mu_0$ ( $\text{m}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ )	$N_t$ ( $\text{m}^{-3}$ ) ( $\times 10^{23}$ )	$n_0$ ( $\text{m}^{-3}$ ) ( $\times 10^{23}$ )	$n_1$ ( $\text{m}^{-3}$ ) ( $\times 10^{22}$ )
0.0	89.84	98.73	$2.03 \times 10^{-12}$	4.43	1.69	3.28
0.2	39.04	68.25	$1.14 \times 10^{-12}$	2.83	0.26	5.49
0.4	30.15	54.28	$7.20 \times 10^{-12}$	2.25	0.19	4.32
0.6	25.07	49.20	$3.07 \times 10^{-11}$	2.04	0.14	3.84

**Conclusion:**  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Se}$  thin films with different composition (x) were deposited on glass substrates by close spaced sublimation (CSS) method. Crystal structure and surface morphology were examined by XRD and SEM, respectively. For binary compounds, CdSe thin films are belong to hexagonal wurtzite structure with the preferred orientation of (002) plane whereas ZnSe thin films are formed in cubic zincblende structure with the preferred orientation (111) plane. In all solid solutions with composition  $0.2 \leq x \leq 0.8$ , the

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

films were grown in mixed phases between cubic zincblende and hexagonal wurtzite structures. The lattice constants of both structures linearly decrease as the Zn concentration increases in accordance with Vegard's law. The EDS analysis confirms the non-stoichiometry of  $Cd_{1-x}Zn_xSe$  thin films. The band gap value increases from 1.68 eV to 2.62 eV as the composition changes from CdSe to ZnSe side. The  $Cd_{1-x}Zn_xSe$  thin films present the stretching-vibrating mode of Cd-Se, Zn-Se, C-C, C-H and O-H. The current-voltage characteristics of  $Cd_{1-x}Zn_xSe$  thin films exhibit three different voltage regions corresponding to Ohmic conduction, trap square law and space charge limited current (SCLC), respectively.

## References

- [1] Gu Y, Kwak ES, Lensch JL, Aller JE, Odom TW, Lauhon LJ. *Appl. Phys. Lett.* 2005;87:043111:1-3.
- [2] Pan A, Yang H, Yu R, Zou B. *Nanotechnology.* 2006;17:1083-1086.
- [3] Armstrong S, Datta PK, Mile RW. *Thin Solid Films.* 2002;403-404:126-129.
- [4] Wang D, Zheng W, Hao C, Penga Q, Li Y. *Chem Commun.* 2008;22:2556-8.
- [5] Shadia J Ikhmayies. *Advances in the II-VI Compounds Suitable for Solar Cell Applications.* 2014;chapter1:1-24.
- [6] Emam-Ismail M, El-Hagary M, Shaaband ER, Al-Hedeibe AM. *Journal of Alloys and Compounds.* 2012;532:16– 24.
- [7] Kathalingam A, Kim MR, Chae YS, Rhee JK, Thanikaikarasan S, Mahalingam T. *Journal of Alloys and Compounds.* 2010;505:758–761.
- [8] Ibrahim Y, Erdogan. *Journal of Alloys and Compounds.* 2010;502:445–450.
- [9] Al- Shakarchi EM. *J. Korean Phys. Soc.* 2010;57:1421-1425.
- [10] Wood DA, Roger KD, Lane DW, Conibeer GJ, Parton D. *J. Mater. Sci. Lett.* 1998; 17:1511-1514.
- [11] El- Nahass MM, Sallam MM, Afifi MA, Zedan IT. *Mater. Res. Bull.* 2007; 42:371-384.
- [12] Lei C, Ye ZG. *J.Phys.:Condens. Matter.* 2008;20:232201;1-4.
- [13] Stone HJ, Peet MJ, Bhadeshia HKDH, Withers PJ, Babu SS, Specht ED. *Proc. R. Soc. A.* 2008;464:1009-1027.
- [14] Wageh S, Anwer A. Higazy, Mohammed AA. *Journal of Modern Physics.* 2011;2: 913-921.

- [15] Fewster PF. Rep. Prog. Phys. 1996;59:1339–1407.
- [16] Mahmood W, Shah N. Optical Materials. 2014;36:1449–1453.
- [17] Zakriaa M, Mahmood A, Shah A, Raza Q, Khan TM, Ahmed E. Progress in Natural Science: Materials International. 2012;22(4):281–287.
- [18] Kiran GS, Patil KR, Mahamuni S. Journal of Luminescence. 2013;135:154–159.
- [19] Rayapati V, Lin PI, Chen YT. J. Phys. Chem. B. 2006;110: 11691-11696.
- [20] Urte H, Christoph R, Michael B. Solid State Sciences. 2003;5:1259-1262.
- [21] Arslan M, Maqsood A, Mahmood A, Iqbal A. Materials Science in Semiconductor Processing. 2013;16:1797–1803.
- [22] Shan CX, Fan XW, Zhang JY, Zhang ZZ, Lu YM, Liu YC, Shen DZ. Thin Solid Films. 2001;401:225–228.
- [23] Mohapatra J. International Nano Letters. 2013;3:31-40.
- [24] Muthukumaran S, Muthusamy M. J Mater Sci: Mater Electron. 2002;23:1647–1656.
- [25] Punita S, Singh K. Adv. Mat. Lett. 2012;3(4):340-344.
- [26] Ivashchenko MM, Buryk IP, Opanasyuk AS, Nam D, Cheong H, Vaziev JG, Bibyk WV. Materials Science in Semiconductor Processing 2015;36:13–19.
- [27] Venkatachalam S, Soundararajan D, Peranantham P, Mangalaraj D, Narayandass S, Velumani S, Schabes-Retchkiman P. Materials Characterization. 2007;58:715–720.

6.2 ซ็อบทความวิจัยที่อยู่ระหว่างการดำเนินการ “Optical and Electrical Properties of  $\text{In}_2\text{S}_3$ -Doped CdSe Thin Films Deposited by Close Spaced Sublimation Method” ดั่งมีรายละเอียดดังนี้

**Abstract**

In this work,  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) thin films have been deposited on borosilicate glass substrate by close spaced sublimation method. The source and glass substrate temperatures were fixed at 650 and 590°C, respectively. The crystal structure of the whole compositions is belonging to hexagonal system. From SEM micrographs, grain size of the thin films increases with increasing mole fraction (x) value. A blue shift in the energy gap of the thin films has been observed. The energy gap widens from 1.71 to 1.78 eV with the mole fraction (x) increases from x=0 to x=0.05. Electrical properties of the thin films were evaluated by Hall effect and resistivity measurements in the van der Pauw configuration. Resistivity of the films decreases from  $2.88 \times 10^3$  to  $1.50 \times 10^3$   $\Omega\cdot\text{cm}$  with the mole fraction (x) increasing from 0 to 0.05. Maximum value of Hall mobility at x=0.01 is  $531.22 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$  and then decreases with an increase in mole fraction (x).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Keywords :**  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  thin films, close spaced sublimation method, Hall effect

## 1. Background/Objectives and Goals

CdSe is a promising material II-VI compound semiconductors and used in thin films devices due to its large absorption coefficient, optical band gap and high photo sensitivity (Purohit et al., 2015; Ali et al., 2013; Kotb et al., 2012). CdSe is crystallized in zincblende or wurtzite structure. CdSe thin films have potential application in fabrication of the solar cells, lasers, photo-detectors, transistors, LED, electrophotography, optical waveguides and gas sensors (Purohit et al., 2015; Ali et al., 2013; Mahawela et al., 2005). CdSe thin films may be prepared by a number of deposition techniques such as thermal evaporation (Purohit et al., 2015; Kotb et al., 2012; Ali et al., 2013; Kaur & Tripathi, 2015), sputtering (Khalaf et al., 2016), chemical bath deposition (Deshpande et al., 2013), pulsed laser deposition (Yang et al., 2016), spray pyrolysis (Yadev et al., 2010), successive ionic layer adsorption reaction method (SILAR) (Pathan & Lokhande, 2004) and close spaced sublimation method (Larramendi et al., 2010; Gnatenko et al., 2014; Melo et al., 1999). Close spaced sublimation method is very useful owing to low consumption of material, high deposition rate and low cost of operation. In recent years, major attention has been given to investigate the optoelectronic properties of doped CdSe thin films in order to find new applications. The Pb-doped CdSe semiconductor material can find applications in photovoltaic cells and photo electrochemical solar cells (Kaur & Tripathi, 2015). The Sb-doped CdSe thin films were also investigated in order to evaluate the performance of optoelectronic devices (Ali et al., 2013). The research on Zn-doped CdSe nanostructures is getting attention due to its potential use as inorganic sensitized metal oxide solar cells (Wahab et al., 2012). In-doped CdSe thin films prepared on ITO glass substrate by electro-deposition technique were reported (Mahalingam et al., 2010). The energy gap is found to decrease from 1.70 to 1.63 eV for non-doped and In-doped CdSe thin films, respectively. In the present work, thin films of  $\text{In}_2\text{S}_3$ -doped CdSe were deposited on glass substrate by close spaced sublimation method in vacuum atmosphere. The effect of  $\text{In}_2\text{S}_3$  content on the structural, morphological, optical and electrical properties of CdSe thin films were investigated. The study will be useful to identify the  $\text{In}^{3+}$  and  $\text{S}^{2-}$  co-dopants induced changes in physical properties of CdSe thin films for optoelectronic applications.

## 2. Methods

$(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  thin films were prepared on borosilicate glass substrate by close spaced sublimation method using a home-made apparatus. CdSe and  $\text{In}_2\text{S}_3$  starting materials with 99.999% purity were purchased from Sigma-Aldrich. The reaction chamber consists of

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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  $30 \times 70 \times 30 \text{ mm}^3$ , with the precursor and substrate sandwiched between the two blocks, separated by spacer. The system provided the mixed gases, and depositions could be done in a controlled ambient at atmospheric pressure or under low vacuum. The pressure of the chamber about  $2.0 \times 10^{-2}$  mbar was monitored by pirani gauge. Heating was provided by halogen lamps facing the graphite blocks outside the chamber. 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. The temperature of graphite blocks was monitored by K-type thermocouples, one each for the precursor and the other for the substrate, and controlled by two individual temperature controllers. The material was transferred from the precursor to the substrate by providing a temperature difference between the two graphite blocks. This temperature difference enabled a diffusion-controlled transport mechanism. During this work, the temperature of the precursor and the substrate were 650 and 590 °C respectively. The structural properties of the films were determined by X-ray diffraction using a Bruker D8 advance with  $\text{CuK}\alpha$  radiation. Grain size, surface morphology and EDS were revealed in accordance to scanning electron microscopy (SEM). The optical transmission spectra were measured with a UV-VIS spectrophotometer in the 300-1000 nm wavelength range at room temperature. The energy gap value was deduced from the optical transmission spectra. Electrical properties of the films were evaluated by Hall effect and resistivity measurements in the van der Pauw configuration at room temperature.

### 3. Results

Fig. 1 shows XRD patterns of  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) thin films prepared by close spaced sublimation method. The XRD spectrum of non-doped CdSe thin films consists of (002) plane belonging to the hexagonal phase of wurtzite structure. The sharp (002) peak of pure CdSe thin films implies preferential growth along c axis. After doping of  $\text{In}_2\text{S}_3$  in CdSe host lattice, several planes such as (100), (101), (102), (110), (103) and (112) were emerged. The appearance of several new planes suggests that  $\text{In}^{3+}$  and  $\text{S}^{2-}$  ions start to substitute the  $\text{Cd}^{2+}$  and  $\text{Se}^{2-}$  sites, respectively. Intensity of peak corresponding to (103) plane of  $\text{In}_2\text{S}_3$ -doped CdSe thin films increases as the increase of the mole fraction (x) while the intensity of (002) plane decreases sharply. This implies that the growth along (103) plane is favored until mole fraction (x) reaches 0.03. When the mole fraction beyond 0.03, (101) plane is dominant. The lattice constant a and c of the prepared films are calculated which is well agreed with standard data file JCPDS 77-2307. The decrease in both a and c values was observed in Fig. 2. In the view of ionic radii,  $\text{In}^{3+}$  (0.80 Å) is

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

bigger than  $\text{Cd}^{2+}$  (0.78 Å), but  $\text{S}^{2-}$  (1.84 Å) is smaller than  $\text{Se}^{2-}$  (1.98 Å) (Shannon & Prewitt, 1969). The decrease in both  $a$  and  $c$  values is probably due to the replacement of  $\text{S}^{2-}$  in  $\text{Se}^{2-}$  site is more effective than  $\text{In}^{3+}$  in  $\text{Cd}^{2+}$  site. SEM micrographs with magnification 5000 of  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) thin films are shown in Fig. 3. The grain size is found to increase from 1 to 5  $\mu\text{m}$  when the mole fraction ( $x$ ) increases from 0 to 0.05. The elemental composition of the  $\text{In}_2\text{S}_3$ -doped  $\text{CdSe}$  thin films has been analyzed using EDX spectrum and shown in Fig. 4. The emission lines of Cd, Se, In and S in the investigated energy range confirm the doping of  $\text{In}_2\text{S}_3$  in  $\text{CdSe}$  lattice.

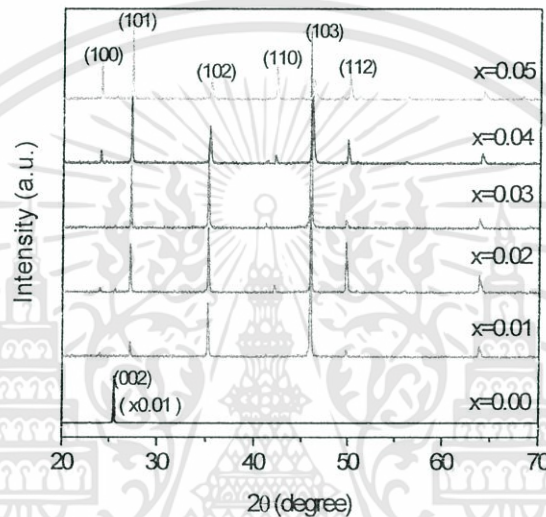


Fig.1 XRD patterns of the CSS- $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  thin films.

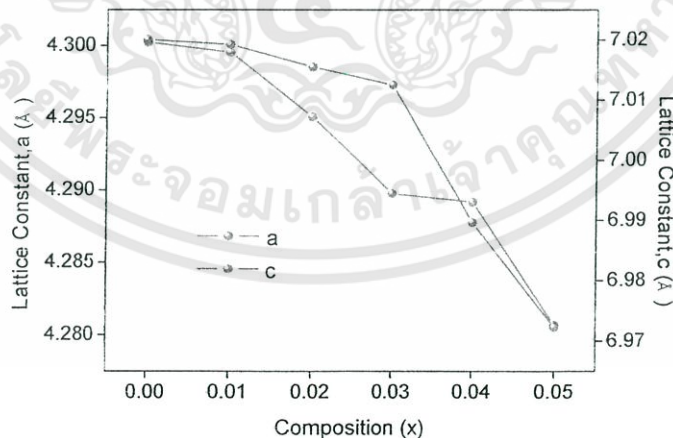


Fig. 2 Variation of lattice constant  $a$  and  $c$  of the CSS- $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  thin films.

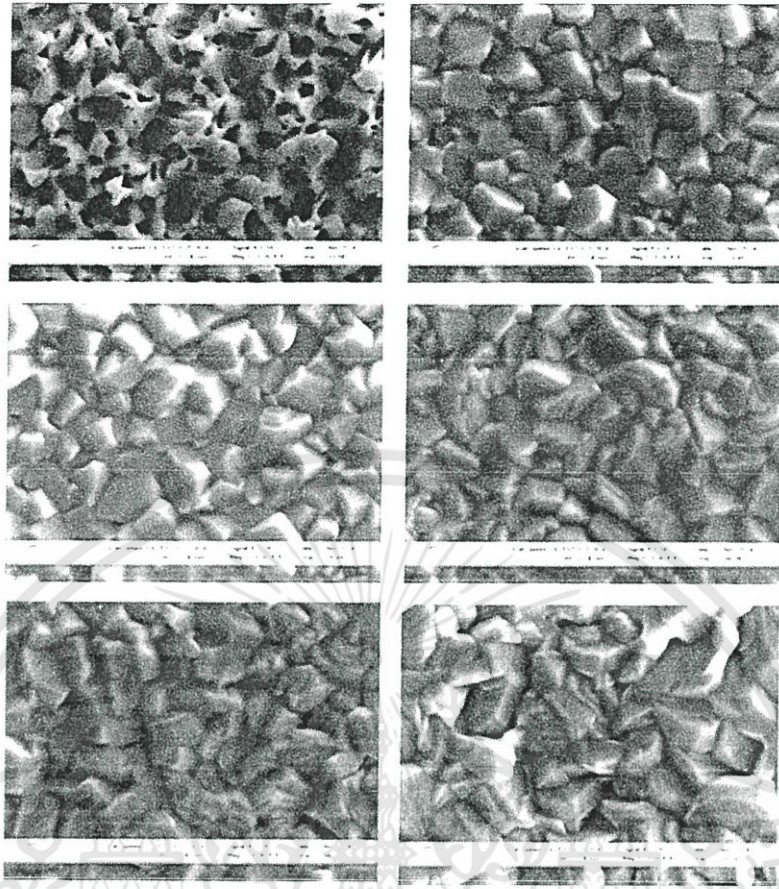


Fig. 3 SEM micrographs of the CSS-(CdSe)<sub>1-x</sub>(In<sub>2</sub>S<sub>3</sub>)<sub>x</sub> thin films.

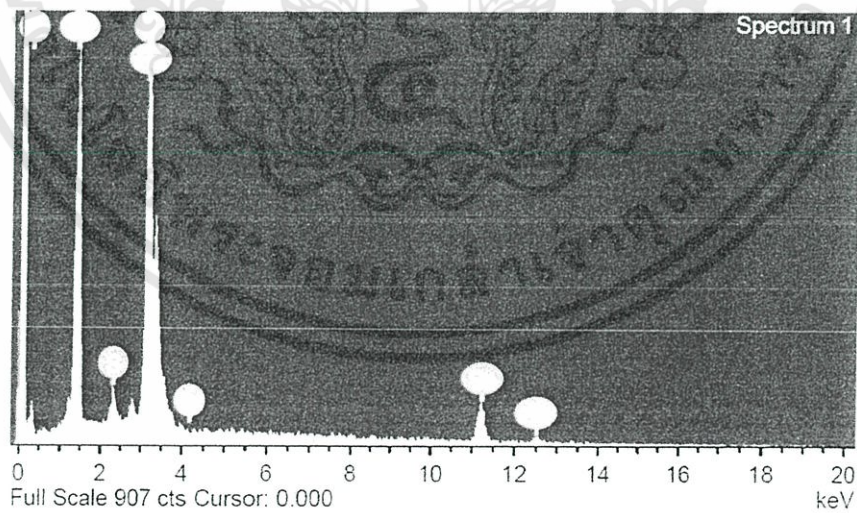


Fig. 4 EDS spectrum of the CSS-(CdSe)<sub>1-x</sub>(In<sub>2</sub>S<sub>3</sub>)<sub>x</sub> (x = 0.05) thin films.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The transmittance spectra for  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  ( $0 \leq x \leq 0.05$ ) thin films on borosilicate glass substrate is shown in Fig. 5. From the transmittance spectra we have also calculated energy gap of the films with different mole fraction ( $x$ ). The absorption coefficient ( $\alpha$ ) is calculated using the equation (Kaur & Tripathi, 2015):

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

where  $T$  is transmittance and  $d$  is film thickness. The absorption coefficient ( $\alpha$ ) and the incident photon energy ( $h\nu$ ) related by the following equation

$$(\alpha h\nu)^2 = A(h\nu - E_g) \quad (2)$$

where  $A$  and  $E_g$  are constant and energy gap, respectively. The  $E_g$  can be determined by extrapolation of the linear portion of the curve to the photon energy axis. Fig. 6 shows the curves of  $(\alpha h\nu)^2$  vs. photon energy ( $h\nu$ ) of the films. Energy gap value is found to be increased with the increase of  $\text{In}_2\text{S}_3$  doping content and shown in Fig. 7. Single dopant such as  $\text{In}$  atom introduced into  $\text{CdSe}$  lattice gave rise to the reduction of  $E_g$  (Mahalingam et al., 2010). In our results, dual dopants of  $\text{In}$  and  $\text{S}$  atoms make the enhancement of  $E_g$ . This implies that the replacement of  $\text{S}$  atom in  $\text{Se}$  site is more effective than  $\text{In}$  atom in  $\text{Cd}$  site. Substitution of  $\text{S}$  in  $\text{Se}$  site in  $\text{CdSe}$  lattice causes enlargement of  $E_g$  has already observed in  $\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x}$  thin films (Kevin et al., 2015).

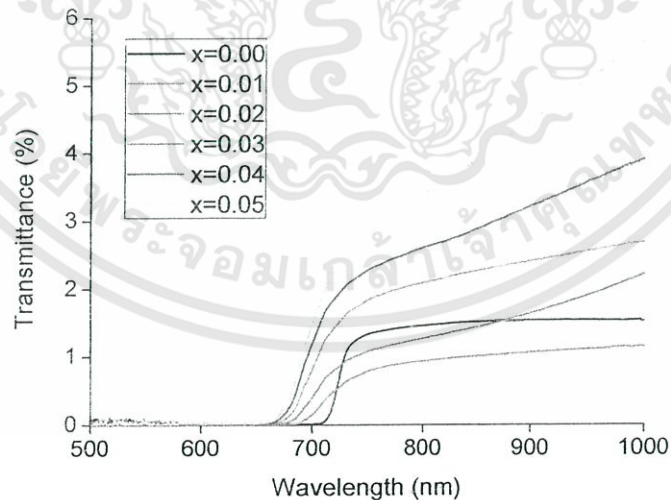


Fig. 5 Transmission spectra of the CSS- $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  thin films.

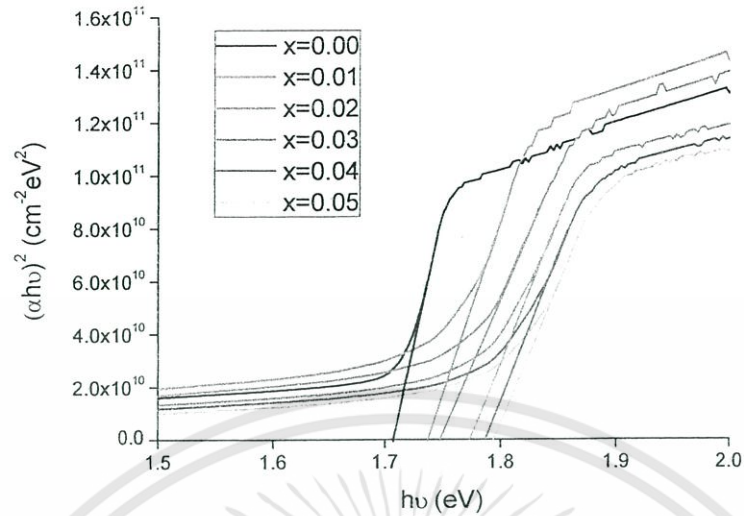


Fig. 6 Plots of  $(\alpha h\nu)^2$  versus  $h\nu$  of the  $\text{CSS}-(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  thin films.

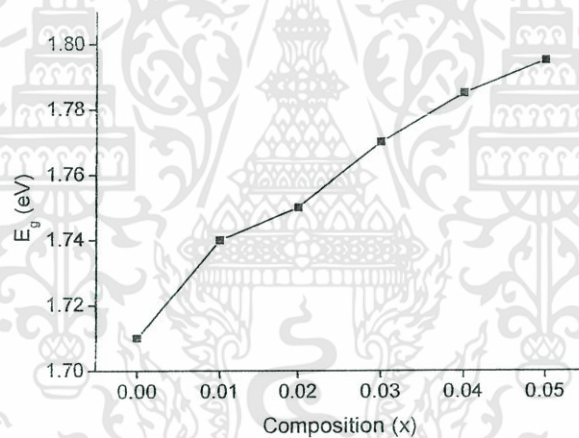


Fig. 7 Variation of  $E_g$  of the  $\text{CSS}-(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  thin films.

Electrical properties of the films were evaluated by Hall effect and resistivity measurements in the van der Pauw configuration. Resistivity, Hall mobility and carrier concentration values were tabulated in Table 1. We found that all studied films are exhibited n-type conductivity. The variations of the Hall mobility, carrier concentration and resistivity against the mole fraction (x) are shown in Fig. 8. The minimum resistivity value around  $1.43 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$  and maximum mobility value about  $531.22 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$  were observed on the films with  $x = 0.01$ . In contrast, the maximum carrier concentration value about  $1.94 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  was observed in the films with  $x = 0.04$ . In atom plays a role as donor atom when it substitutes in Cd site. Then, excess electrons will be generated and this

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

leads to increase in the conductivity. However, S and Se atoms are isoelectronic charge. The replacement of S atom in Se site will give not any influence on electrical properties of CdSe films.

Table 1 Resistivity, Hall mobility and carrier concentration values obtained from

Hall effect measurements in the van der Pauw configuration.

Mole Fraction (x)	Resistivity ( $\Omega\cdot\text{cm}$ )	Hall Coefficient ( $\text{cm}^2/\text{C}$ )	Electron Concentration ( $\text{cm}^{-3}$ )	Hall Mobility ( $\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ )
0	$2.88 \times 10^3$	$9.78 \times 10^4$	$6.38 \times 10^{13}$	34.01
0.01	$1.43 \times 10^{-4}$	$5.32 \times 10^{-2}$	$1.18 \times 10^{20}$	531.22
0.02	$2.77 \times 10^{-4}$	$1.40 \times 10^{-1}$	$1.25 \times 10^{20}$	501.88
0.03	$2.96 \times 10^{-4}$	$4.60 \times 10^{-3}$	$1.37 \times 10^{20}$	151.81
0.04	$3.36 \times 10^{-4}$	$3.17 \times 10^{-2}$	$1.94 \times 10^{20}$	108.69
0.05	$15.00 \times 10^{-4}$	$1.12 \times 10^{-1}$	$5.59 \times 10^{19}$	74.49

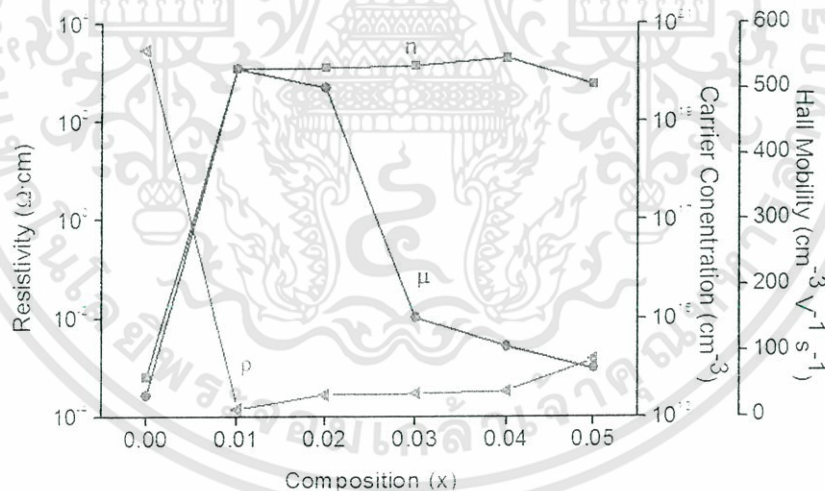


Fig. 8 Resistivity, Hall mobility and carrier concentration values as a function of mole fraction (x) of the  $\text{CSS}-(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  thin films.

#### 4. Conclusions

We have prepared  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  thin films by close spaced sublimation method on borosilicate glass substrate with different mole fraction of  $\text{In}_2\text{S}_3$ . From XRD analysis, all as-prepared  $(\text{CdSe})_{1-x}(\text{In}_2\text{S}_3)_x$  thin films were crystallized in wurtzite structure. The strongest peak intensity of (002) plane was observed in the non-doped films due to preferential growth along c axis. In the films doped with different mole fractions of  $\text{In}_2\text{S}_3$ , the growth

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

along (103) plane is favored until mole fraction (x) reaches 0.03. When the mole fraction (x) beyond 0.03, (101) plane is dominant. From SEM micrographs, grain size of the CSS-(CdSe)<sub>1-x</sub>(In<sub>2</sub>S<sub>3</sub>)<sub>x</sub> thin films increases as the increase of mole fraction (x). Monotonic increasing in E<sub>g</sub> from 1.71 to 1.78 eV with the increase of mole fraction (x) from 0 to 0.05 was obtained. From Hall effect measurements, composition x=0.01 shows excellent results due to lowest resistivity and highest mobility value. Thus, (CdSe)<sub>1-x</sub>(In<sub>2</sub>S<sub>3</sub>)<sub>x</sub> with x=0.01 can be a good candidate for using as transparent semiconductor thin films.

### Acknowledgments

The authors would like to thank Assoc.Prof.Dr. T. Wongcharoen and Asst. Prof. Dr. C. Poo-Rakkiat for valuable discussions. This work is supported by King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang under grant number 2559-01-05-037.

### 5. References

- Ali, M., Syed, W. A. A., Zubair, M., Shah, N. A. & Mehmood, A.(2013). Physical properties of Sb-doped CdSe thin films by thermal evaporation method. *Applied Surface Science*, 284, 482-488. doi:10.1016/j.apsusc.2013.07.122
- Deshpande, M. P., Garg, N., Bhatt, S. V., Sakariya, P., & Chaki, S. H.(2013). Spectroscopy and structural study on CdSe thin films deposited by chemical bath deposition. *Advanced Materials Letters*, 4(11), 869-874. doi:10.5185/amlett.2013.4467
- Gnatenko, Y. P., Bukivskij, P. M., Faryna, I. O., & Ivashchenko, M. M.(2014). Photoluminescence of high optical quality CdSe thin films deposited by close-spaced vacuum sublimation. *Journal of Luminescence*, 146, 174-177. doi:10.1016/j.jlumin.2013.09.070
- Gnatenko, Y. P., Opanasyuk, A. S., Ivashchenko, M. M., Bukivskij, P. M. & Faryna, I. O.(2014). Study of the correlation between structural and photoluminescence properties of CdSe thin films deposited by close spaced vacuum sublimation. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 26, 663-668. doi:10.1016/j.mssp.2014.06.013
- Kaur, J., & Tripathi, S. K.(2015). Pb dopant induced changes in structural, optical and electrical properties of CdSe thin films. *Journal of Alloys and Compounds*, 622, 953-959. doi:10.1016/j.jallcom.2014.11.015
- Kevin, P., Alghamdi, Y. G., Lewis, D. J., & Malik, M. A.(2015). Morphology and band gap controlled AACVD of CdSe and CdS<sub>x</sub>Se<sub>1-x</sub> thin films using novel single source precursors: Bis(diethyldithio/diselenocarbamate/cadmium (II)). *Materials Science in Semiconductor Processing*, 40, 848-854. doi:10.1016/j.mssp.2015.07.076
- Khalaf, M. K., Alhilli, B. A. M., Khudiar, A. I. & Alzahra, A. A.(2016). Influence of nanocrystalline size on optical band gap in CdSe thin films prepared by dc

- sputtering. *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Application*, 18, 59-66. doi:10.1016/j.photonics.2016.01.001
- Kotb, H. M., Dabban, M. A. Abdel-latif, A. Y. & Hafiz, M. M.(2012). Annealing temperature dependence of the optical and structural properties of selenium-rich CdSe thin films. *Journal of Alloys and Compounds*, 512, 115-120. doi:10.1016/j.jallcom.2011.09.034
- Larramendi, E. M., Gutierrez Z-B, K., Melo, O., Woggon, U., Shikora, D. & Lischka, K.(2010). On the isothermal closed space sublimation growth of CdSe using a mixed source for selenium. *Journal of Crystal Growth*, 312, 1807-1812. doi:10.1016/j.jcrysgro.2010.03.002
- Mahalingam, T., Mariappan, R., Dhanasekaran, V., Mohan, S. M., Ravi, G., & Chu, J. P.(2010). Characterization of electrodeposited indium doped CdSe thin films. *Chalcogenide Letters*, 7(2), 669-677.
- Mahawela, P., Jeedigunta, S., Vakkalanka, S., Ferekides, C. S., & Morel, D. L.(2005). Transparent high performance CdSe thin film solar cells. *Thin Solid Films*, 480-481, 46-470. doi:10.1016/j.tsf.2004.11.066
- Melo, O., Sanchez, E., Rodriguez, H., Roux, S., Rabago-Bernal, F., & Ruiz-Garcia, J.(1999). Low temperature growth of epitaxial CdSe thin films by an isothermal closed space sublimation technique using two elemental sources. *Material Chemistry and Physics*, 59, 120-124. doi:10.1016/S0254-0584(98)00243-0
- Pathan, H. M., & Lokhande, C.(2004). Deposition of metal chalcogenide thin films by successive ionic layer adsorption and reaction (SILAR) method. *Bulletin Materials Science*, 27(2), 85-111. doi:10.1007/BF02708491
- Purohit, A., Chander, S., Nehra, S. P., & Dhaka, M. S.(2015). Effect of air annealing on structural, optical, morphological and electrical properties of thermally evaporated CdSe thin films. *Physica E*, 69, 342-348. doi:10.1016/j.physe.2015.01.028
- Shannon, R. D., & Prewitt, C. T.(1969). Effective Ionic Radii in Oxides and Fluorides. *Acta Crystallographica B*, 25, 925-946. doi:10.1107/S0567740869003220
- Wahab, L. A., Zayed, H. A. & Abd El-Galil, A. A.(2012). Study of structural and optical properties of Cd<sub>1-x</sub>Zn<sub>x</sub>Se thin films. *Thin Solid Films*, 520, 5195-5199. doi:10.1016/j.tsf.2012.03.119
- Yadev, A. A., Barote, M. A., & Masumdar, E. U.(2010). Studies on cadmium selenide(CdSe) thin films deposited by spray pyrolysis. *Materials Chemistry and Physics*, 121(1-2), 53-57. doi:10.1016/j.matchemphys.2009.12.039
- Yang, X., Bao, Z., Luo, R., Liu, B., Tang, P., Li, B., Zhang, J., Li, W., Wu, L. & Feng, L.(2016). Preparation and characterization of pulsed laser deposited CdS/CdSe bi-layer films for CdTe solar cell application. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 48, 27-32. doi:10.1016/j.mssp.2016.03.009

## เอกสารอ้างอิง

- Acharya, A., Mishra, R. and Ryo, G.S. 2010. "Comparative Study of Performance of CdS, CdSe Thin Film CdS-PTh, CdSe-PTh Nanocomposite Thin Films Using SEM-EDXA (Scanning Electron Microscope) and FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy)." *Lat. Am. J. Phys. Educ.* 4(3): 603-609.
- Caballero, R. and Guillen, C. 2003. "Optical and Electrical Properties of  $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$  Thin Films Obtained by Selenization of Sequentially Evaporated Metallic Layers." *Thin Solid Films.* 431-432: 200-204.
- Cullity, B.D. 1956. *Elements of X-rays Diffraction*. Addison-Wesley Publishing Company Inc.: pp 9-14.
- Dieter, K.S. 1998. *Semiconductor Material and Device Characterization*. 2<sup>nd</sup> ed., John Wiley & Sons Inc., New York.
- Elangovan, E. and Ramamurthi, K. 2003. "Optoelectronic Properties of spray deposition  $\text{SnO}_2:\text{F}$  Thin Film For Windows Materials in Solar Cells." *J. Optoelect. Adv. Mat.* 5: 45-54.
- Fahrenbruch, A.L. and Bube, R.H. 1983. *Fundamentals of Solar Cells Photovoltaic Solar Energy Conversion*. New York: Academic Press Inc.: 44.
- Ghosh, R. and Basak, D. 2007. "Electrical and Ultraviolet Photoresponse Properties of Quasialigned ZnO Nanowires/p-Si Heterojunction." *App. Phys. Lett.* 87: 243512-1-243512-3.
- Gnatenko, Y.P., Bukivskij, P.M., Faryna, I.O., Opanasyuk, A.S., Ivashchenko, M.M. 2014. "Photoluminescence of High Optical Quality CdSe Thin Films Deposited by Close-Spaced Vacuum Sublimation" *J. Lumin.* 146: 174-177.
- Gnatenko, Y.P., Opanasyuk, A.S., Ivashchenko, M.M., Bukivskij, P.M., and Faryna, I.O. 2014. "Studies of the Correlation Between Structural and Photoluminescence Properties of CdSe Thin Films Deposited by Close-Spaced Vacuum Deposition" *Mater. Sci. Semi Processing.* 26: 663-668.
- 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.
- Huang N. M. 2011. "Synthesis and Characterization of  $\text{In}_2\text{S}_3$  Nanorods in Sucrose Ester Water-in-Oil Microemulsion." *Journal of Nanomaterials.* 815709-6.
- 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.

- Jiang, F., Shen, H. and Wang, W. 2012. "Optical and Electrical Properties of  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$  Film Prepared by Sulfurization Method." *J. Elec. Matter.* 41(8): 2204-2209.
- Johnson, C., Lin, J.Y., Jiang, H.X., Khan, M.A. and Sun, C.J. 1996. "Metastability and Persistent Photoconductivity in Mg-Doped p-Type GaN." *Appl. Phys. Lett.* 68(13): 1808-1810.
- Kim, Y., Lee, W., Jung, D.R., Kim, J., Nam, S., Kim, H., and Park B. 2010. "Optical and Electronic Properties of Post-Annealed ZnO:Al Thin Films" *Appl. Phys. Lett.* 96: 171902-1-171902-3.
- Kittel, C. 1971. *Introduction to Solid State Physics*. 4<sup>th</sup> ed. John Wiley & Sons Inc., New York.
- 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.
- Lu, J.G., Fujita, S., Kawaharamura, T., Nishinaka, H., Kamada, Y. and Ohshima, T. 2006. "Carrier Concentration Induced Band-Gap Shift in Al-Doped  $\text{Zn}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}$  Thin Films" *Appl. Phys. Lett.* 89: 262107-1-262107-3.
- Lu, J.G., Fujita, S., Kawaharamura, T., Nishinaka, H., Kamada, Y., Ohshima, T., Ye, Z.Z., Zeng, Y.J., Zhang, Y.Z., Zhu, L.P., He, H.P. and Zhao, B.H. 2007. "Carrier Concentration Dependence of Band Gap Shift in n-Type ZnO:Al Films" *J. Appl. Phys.* 101: 083705-1-083705-3.
- Mahawela, P., Jeedigunta, S., Ferekides, C.S. and Morel, D.L. 2003. "Analysis of Carrier Transport Phenomena in High Band Gap II-VI -Based MIS Photovoltaic Devices" *Thin Solid Films.* 431-432: 461-464.
- Mahawela, P., Jeedigunta, S., Vakkalanka, S. Ferekides, C.S. and Morel, D.L. 2005. "Transparent High Performance CdSe Thin Films Solar Cells" *Thin Solid Films.* 480-481: 466-470.
- Marquardt, M.A. Ashmore, N.A. and Cann, D.P. 2006. "Crystal Chemistry and Electrical Properties of The Delafossite Structure." *Thin Solid Films.* 496: 146-156.
- Mazhar, A. Waqar, A.A. Syed, Zubair, M. Nazar, A. Shah and Mehmood, A. 2013. "Physical Properties of Sb-doped CdSe Thin Films By Thermal Evaporation method." *Applied Surface Science.* 284: 482- 488.
- Moller, H.J. *Semiconductors for Solar Cells*, Artech House, Inc. 1993.
- Ren, S.T., Wang, Q., Feng, Z., Zhao, F and Qu, S.L. 2012. "Slow-Rise and Fast Drop Current Feature of Ultraviolet Response Spectra For ZnO-Nanowire Film Modulated By Water Molecules." *Chin. Phys.* 21(3): 038104-1-038140-7.

- Runyan, W.R. 1975. *Semiconductor Measurement and Instrument*. 3<sup>rd</sup> ed. New York : Mc Graw-Hill.
- Syudenikin, 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.
- Tilley, R.J.D. 2004. *Understanding Solids : The Science of Materials*. Chichester: John Wiley & Sons.
- Van der Pawn L.J. 1958. "A Method of Measuring Specific Resistivity and Hall Effect of Discs of Arbitrary Shape." *Philips Res. Repts.* 13: 1-9.
- Velumani, S., Narayandass, S.K., Mangalaraj, D., Sebastian, P.J. and Mathew, X. 2004. "Dielectric and Conduction Studies on Hot-Wall Deposited CdSe Films" *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 81: 323-338.
- Vishwakarma, S.R. Kumar, A. Prasada, S. and Tripathi, R.S.N. 2013. "Synthesis and Characterization of n-CdSe Thin Films Deposited at Different Substrate Temperatures." *Chalcogenide Letters.* 10(10): 393 – 402.
- Ziabari, A.A. and Rozati, S. 2012. "Carrier Transport and Band Gap Shift in n-Type Degenerate ZnO Thin Films: The Effect of Band Edge Nonparabolicity" *Physica B.* 407: 4512-4517.
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ. 2531. "การศึกษารอยต่อแบบโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำของคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์." *วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.*
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, จิตินัย แก้วแดง, ชัยสิทธิ์ ภูริกษ์เกียรติ และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2543. "การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง  $Cd_{1-x}Zn_xS$  เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์." *รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.*
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, จิตินัย แก้วแดง และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2549. "การประดิษฐ์ฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่เจือด้วยอะตอมฟลูออรีนสำหรับขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์." *รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.*
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, จิตินัย แก้วแดง และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2550. "การประดิษฐ์ฟิล์มหนา  $CuAlO_2$  เพื่อเป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์." *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, จูตินัย แก้วแดง และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2556. “ความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้าของ เซรามิกของสารกึ่งตัวนำ  $\ln_x\text{WO}_3$  ( $0.00 \leq x \leq 0.05$ ) และการประยุกต์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะ วิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, จูตินัย แก้วแดง และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2558. “การประดิษฐ์ฟิล์มบางแคดเมียมซีลีไนด์เจือด้วยอะตอมอินเดียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดเพื่อประยุกต์เป็น เซลล์แสงอาทิตย์”. รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ ทหารลาดกระบัง.
- จูตินัย แก้วแดง. 2530. “การเตรียมและศึกษาสมบัติของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมไดซีลีไนด์.” วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- จูตินัย แก้วแดง และงามนิตย์ วงษ์เจริญ. 2544. “เอกสารประกอบการสอนวิชา ฟิสิกส์และเทคโนโลยีของ เซลล์แสงอาทิตย์.” ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง.
- จูตินัย แก้วแดง. 2545. “เอกสารประกอบการสอนวิชา ฟิสิกส์ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ.” ภาควิชา ฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- จูตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิทธิ์ ภูริกษ์เกียรติ. 2545. “การเตรียม และการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$  ที่มี Zn เพื่อประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์.” รายงาน วิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- จูตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิทธิ์ ภูริกษ์เกียรติ. 2546. “การประดิษฐ์ ฟิล์มบาง  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$  ที่มี Zn ในปริมาณสูงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะ วิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- จูตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2547. “การเตรียมฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วย In โดยระเหยในระบบสุญญากาศ.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระ จอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- จูตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2549. “การประดิษฐ์ฟิล์มบางตีบุกออกไซด์ที่ เจือด้วยอะตอมฟลูออรีนสำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- จูตินัย แก้วแดง และงามนิตย์ วงษ์เจริญ. 2551. “การเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธีอบสารละลายเคมี ภายใต้คลื่นไมโครเวฟเพื่อประดิษฐ์เป็นหน้าต่างรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- จูตินัย แก้วแดง งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2552. “การพัฒนาขั้วไฟฟ้าด้านหลังของเซลล์ แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง  $\text{CdS}/\text{CdTe}$ .” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- จูตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2554. “การประดิษฐ์ขั้วไฟฟ้าด้านหลังชนิด ใหม่ที่เหมาะสมกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง  $\text{CdS}/\text{CdTe}$ .” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะ วิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- จูตินัย แก้วแดง งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2557. “การประดิษฐ์และการศึกษา สมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางรอยต่อวิวิธพันธุ์  $\text{CdS}/\text{CuO}$ .” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะ วิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียนติ. 2558. “การเตรียมฟิล์มบาง  $\text{CuO}$  โดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีสเป็คเตอริงเพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อวิวิธพันธุ์  $\text{CdS/CuO}$ .” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียนติ. 2559. “การศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง  $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิดเพื่อประยุกต์ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.





ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

Pattern : 77-2307

Radiation = 1.540600

Quality : Calculated

Case	2 $\theta$	I	h	k	l
	23.582	100	1	0	0
	25.391	59	0	0	2
	27.097	76	1	0	1
	35.136	34	1	0	2
	41.999	72	1	1	0
	45.810	66	1	0	3
	48.868	11	2	0	0
	49.718	42	1	1	2
	50.699	10	2	0	1
	52.150	1	0	0	4
	55.879	7	2	0	2
	58.130	1	1	0	4
	63.884	19	2	0	3
	66.579	13	2	1	0
	67.380	7	2	1	1
	69.058	1	1	1	4
	71.802	13	1	0	5
	72.756	5	2	1	2
	74.268	4	2	0	4
	75.735	7	3	0	0
	79.435	17	2	1	3
	82.365	6	3	0	2
	82.496	2	0	0	6
	87.018	3	2	0	5
	87.422	1	1	0	5
	89.181	4	2	1	4

ICSD COLLECTION CODE: 060530

REMARKS FROM ICSD: REM: F: Determination based on model of Fakineos, Stevenco

REMARKS FROM ICSD: REM: Barnea Aust J Phys 1982 35 415 424

TEST FROM ICSD: At least one TF missing

Z = 2

I/col = 5.78

\*Calculated from ICSD using POWD-12 (1997) primary reference

\*Acta Crystallogr. Sec. B: Structural Science, volume 40, page 530 (1984) Stevenco, A.W., Barnea, Z.

Radiation : CuK $\alpha$ 1

Filter : Not specified

Lambda : 1.54060

d-sp : Calculated spacings

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาเลขที่ ..2559-01-05-37

“การประดิษฐ์ฟิล์มบางแคดเมียมซีลีไนต์เจือด้วยอะตอมอินเดียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะ  
ประชิดเพื่อประยุกต์ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์”

รายงานสรุปการเงินในรอบ ..12... เดือน

ชื่อหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน...รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ.....

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)
<b>ก. ส่วนที่โครงการบริหาร</b>					
1. ค่าตอบแทน	.....	.....	.....	.....	.....
2. ค่าจ้าง	.....	.....	.....	.....	.....
3. ค่าใช้สอย	.....	10,120.....	...10,120.....	.....15,000.....	.....4,880.....
4. ค่าวัสดุ	21,216.52	.. 18,700.83..	.. 39,917.35..	.....35,000.....	.....4,917.35....
5. ค่าครุภัณฑ์	.....	.....	.....	.....	.....
รวม	.....	.....	.....	.....	.....
<b>ข. ส่วนที่บริหารโดย กองทุนวิจัย</b>					
6. ค่าครุภัณฑ์	.....	.....	.....	.....	.....
7. ค่าใช้จ่ายอื่นๆ	.....	.....	.....	.....	.....
รวม	.....	.....	.....	.....	.....
รวมทั้งสิ้น	.....	.....	.....	.....	.....

จำนวนเงินที่ได้รับและจำนวนเงินคงเหลือ

จำนวนเงินที่ได้รับ	จำนวน	วันที่ได้รับ	ค่าใช้จ่าย	จำนวน
งวดที่ 1 (85%)	42,500..... บาท	.08../01../2559..	งวดที่ 1	21,216.57 บาท
งวดที่ 2 (15%)	7,500..... บาท	14../07../2559..	งวดที่ 2	28,820.83 บาท
ดอกเบี้ย ครั้งที่ 1	.049..... บาท	25../12../2558.....		
ดอกเบี้ย ครั้งที่ 2	.36.86..... บาท	25../06../2559.....		
รวมเงินที่ได้รับ <sup>(A)</sup>	50,307.35 บาท		รวมรายจ่าย <sup>(B)</sup>	50,037.35 บาท
คงเหลือเงินในบัญชีโครงการ (รวม <sup>(A)</sup> - รวม <sup>(B)</sup> )			.....0.....บาท <sup>(C)</sup>	

.....

ลงนามหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

### หัวหน้าโครงการวิจัย

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 CuAlO<sub>2</sub> Delafossite" Advanced Materials Research, Vol. 931-932, 2014, pp. 127-131

6. T. Gaewdang and Ng. Wongcharoen “Electrical Conduction Mechanism in n-CdS/p-CuFeO<sub>2</sub> Heterojunction Diode” *Advanced Materials Research*, Vol. 931-932 , 2014, pp. 122-126.
7. Ng. Wongcharoen and T. Gaewdang “Electrical Characterization of n-CdS/p-CuCrO<sub>2</sub> 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-CuAlO<sub>2</sub> 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<sub>x</sub>Te<sub>1-x</sub> (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 CuAlO<sub>2</sub> 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  $\text{CuAlO}_2$ " 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  $\text{SnO}_2$  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  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$  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  $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$  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  $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{S}$  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 นายฐิตินัย 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 (แตกต่างจากวุฒิมการศึกษ)

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.
5. T. Gaewdang and Ng. Wongcharoen "Electrical Conduction Mechanism in n-CdS/p-CuFeO<sub>2</sub> 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 CuAlO<sub>2</sub> Delafossite" Advanced Materials Research, Vol. 931-932, 2014, pp. 127-131.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. Ng. Wongcharoen and T. Gaewdang “Electrical Characterization of n-CdS/p-CuCrO<sub>2</sub> 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-CuAlO<sub>2</sub> 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<sub>x</sub>Te<sub>1-x</sub> (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.

