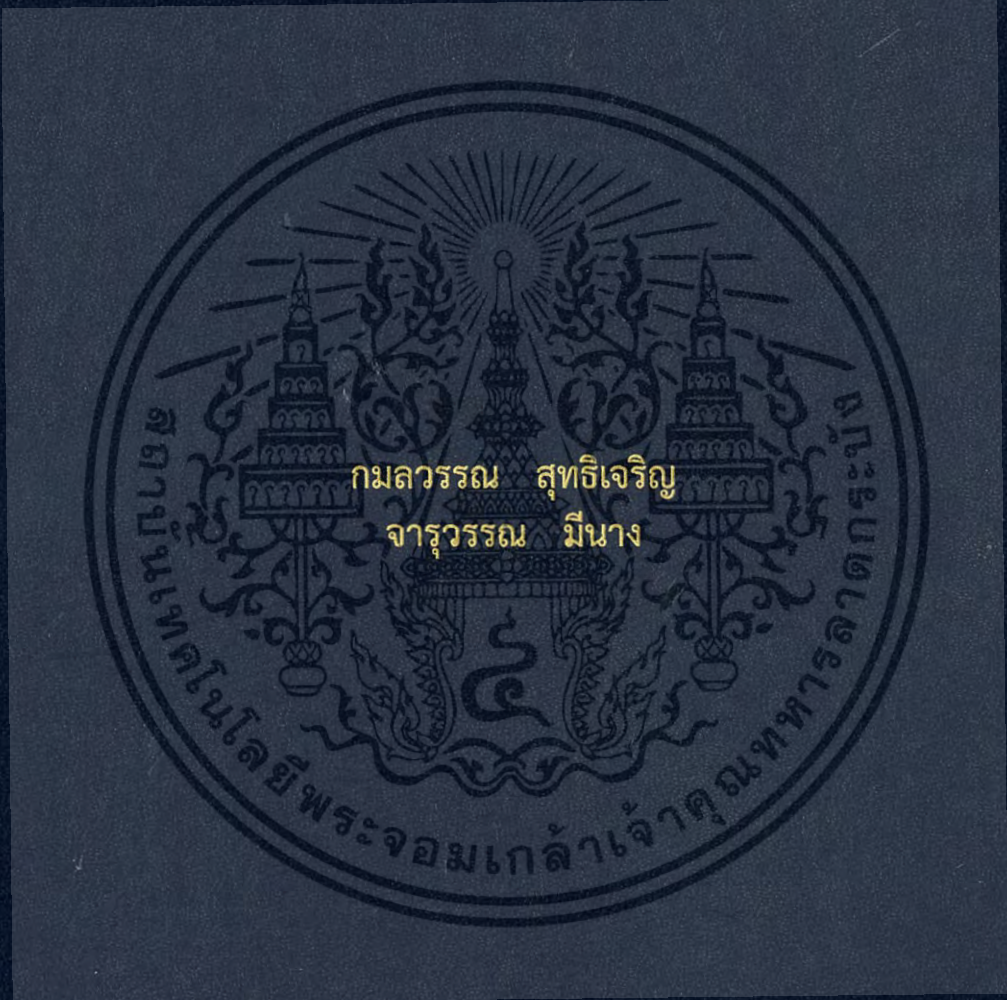


การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$
ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด
CHARACTERIZATION OF $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ THIN FILMS
PREPARED BY CLOSE SPACED SUBLIMATION



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$
ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด
CHARACTERIZATION OF $CdTe_{1-x}Se_x$ THIN FILMS
PREPARED BY CLOSE SPACED SUBLIMATION



T149251



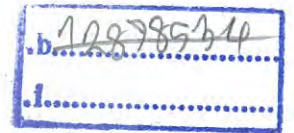
๒๖๗

ก 139 ก

เลขหมู่ 2558

เลขทะเบียน 149251

รับเดือนปี 30 ส.ค. 2561



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูงาน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CHARACTERIZATION OF CdTe_{1-x}Se_x THIN FILMS
PREPARED BY CLOSE SPACED SUBLIMATION



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (APPLIED PHYSICS)
DEPARTMENT OF PHYSICS, FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2015





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาระดับปริญญาตรีเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด
 Characterization of $CdTe_{1-x}Se_x$ Thin Films Prepared by Close Spaced Sublimation

ชื่อนักศึกษา นางสาวกมลวรรณ สุทธิเจริญ รหัสนักศึกษา 55051442
 นางสาวจารุวรรณ มีนาง รหัสนักศึกษา 55051466

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์)
 ภาควิชา ฟิสิกส์
 ปีการศึกษา 2558
 อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์) ประจำปีการศึกษา 2558

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.ฐิตินัย แก้วแดง ประธานกรรมการ	
อ.ภารุจ บัณฑิตาวิทย์ กรรมการ	
ผศ.ดร.ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ กรรมการ	
รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด
ชื่อนักศึกษา	นางสาวกมลวรรณ สุทธิเจริญ รหัสนักศึกษา 55051442 นางสาวจาวรวรรณ มีนาง รหัสนักศึกษา 55051466
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิสิกส์
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง(สจล.)
ปีการศึกษา	2558
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ

บทคัดย่อ

ในโครงการพิเศษนี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกใสโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิของสารตั้งต้นและอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 650 และ 550 องศาเซลเซียสตามลำดับ ในกรณีที่มีเศษส่วนโมลอะตอม (x) ต่ำกว่า 0.4 โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำจะเป็นแบบซิงค์เบลนด์ อย่างไรก็ตามในกรณีที่มีเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) อยู่ระหว่าง 0.2 ถึง 0.8 โครงสร้างผลึกจะเป็นแบบซิงค์เบลนด์ และแบบเวิร์ทไซท์อยู่ร่วมกัน ในขณะที่ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdSe$ จะมีโครงสร้างแบบเวิร์ทไซท์อย่างเดียว จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าเมื่อเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) เพิ่มขึ้นจะทำให้ขนาดเกรนลดลง ค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ สามารถคำนวณได้จากสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงโดยมีค่าเปลี่ยนจาก 1.47 อิเล็กตรอนโวลต์ (กรณีฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe$) ไปเป็น 1.72 อิเล็กตรอนโวลต์ (กรณีฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdSe$) จากการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำโดยการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ และวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ สภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำลดลงจาก 5.93×10^2 เป็น 54.2 โอห์ม·เซนติเมตร ตามสัดส่วนโดยโมลอะตอม (x) ที่เพิ่มขึ้นจาก $x=0.0$ ถึง $x=1.0$ สำหรับสภาพคล่องฮอลล์ในช่วงแรกจะมีค่าลดลงตามเศษส่วนโดยโมลอะตอมที่ (x) ที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าต่ำสุดที่ $x=0.6$ หลังจากนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ที่เพิ่มขึ้น ส่วนความหนาแน่นของพาหะมีค่าเพิ่มขึ้น ตามเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ที่เพิ่มขึ้น จากนั้นได้ทำการวัดสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 20-300 เคลวิน สภาพนำไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{0.2}Se_{0.8}$ ในช่วง 220 และ 280 สามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองของซีโต สภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำกว่า 125-200 เคลวิน จะอธิบายด้วยแบบจำลองของการกระโดดระหว่างสถานะพลังงานท้องถิ่นในระยะไม่คงที่ ส่วนสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำกว่า 125 เคลวิน จะอธิบายด้วยแบบจำลองกลไกการกระโดดแบบเอพโรส-ชลอฟกี

คำสำคัญ : ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ($CdTe_{1-x}Se_x$) วิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะ

ประชิด ปรากฏการณ์ฮอลล์ กลไกการกระโดดระหว่างสถานะพลังงานท้องถิ่นในระยะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อใดๆ

ไม่คงที่ กลไกการกระโดดแบบเอพโรส-ชลอฟกี

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Characterization of CdTe _{1-x} Se _x Thin Films Prepared by Close Spaced Sublimation
Students	Miss. Kamonwan Suttijalern Student ID 55051442 Miss. Jaruwan Meenang Student ID 55051466
Degree	Bachelor of Science(Applied Physics)
Department	Physics
Faculty	Science
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang(KMITL)
Academic Year	2015
Advisor	Assoc.Prof.Ngamnit Wongcharoen

Abstract

In this special project, CdTe_{1-x}Se_x (0≤x≤1) 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 550°C, respectively. When the Se mole ratio less than 0.2 the crystal structure of CdTe_{1-x}Se_x thin films was cubic system. However, for 0.2≤x≤0.8 the films were grown in mixed phase between cubic and hexagonal system whereas CdSe thin films formed in a hexagonal system. SEM micrographs show the grain size decreases when the Se content increases. As the Se content increases, the energy gap value of CdTe_{1-x}Se_x thin films determined from the transmission spectra varies from 1.47 eV (for CdTe thin films) to 1.72 eV (for CdSe thin films). Electrical properties of the films were evaluated by Hall Effect and resistivity measurements in the van der pauw configuration. Resistivity of the films decreases from 5.93×10² to 54.2 Ω.cm with the mole fraction increasing from 0.0 to 1.0. Minimum value of Hall Mobility at x = 0.6 is 0.07 cm²V⁻¹s⁻¹ and then increases with an increase in mole fraction x. Electrical conductivity measurements were performed at low temperature in the range 20-300 K. The temperature dependence of electrical conductivity in CdTe_{0.2}Se_{0.8} thin films between 220 and 280 K was interpreted in terms of Seto's model. The conductivity at temperature between 125 and 200 K was described by Mott's variable range hopping model (VHR). The conductivity at low temperature (<125 K) is well described by ES-VHR model.

Keywords : CdTe_{1-x}Se_x thin films, close space sublimation method, Hall effect, VRH model, ES-VRH model.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาของ รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ รศ.ดร.ฐิตินัย แก้วแดง และ ผศ.ดร.ชัยสิทธิ์ ภูริรักษ์เกียรติ ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ อุปกรณ์ในการทดลองและอุปการะทุนในการสนับสนุน ตลอดจนการให้คำปรึกษาทางวิชาการที่ดี ตลอดมา รวมถึงการปลูกฝังสิ่งที่ดีงามให้กับลูกศิษย์

ขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่กรุณาความอนุเคราะห์ และแนะนำในการใช้เครื่องมือ เพื่อศึกษาลักษณะต่างๆของชิ้นงาน จนสามารถนำไปประยุกต์ใช้ต่อไป

ขอขอบคุณนักศึกษาปริญญาโทในห้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุโฟโตนิกส์ สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำโครงการพิเศษ แนะนำการใช้อุปกรณ์ต่างๆ ตลอดจนให้คำแนะนำในการใช้โปรแกรมเพื่อวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลอง

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่เมตตาประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และการอบรมสั่งสอนสิ่งต่างๆตลอดมา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ พ่อ แม่ และญาติพี่น้องทุกท่านที่ให้ความอุปการะทุนการศึกษา การอบรมสั่งสอน รวมถึงกำลังใจโดยตลอดมา

กมลวรรณ สุทธิเจริญ
จารุวรรณ มีนาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ฎ
คำย่อและสัญลักษณ์	ต
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน	3
1.4.1 ขั้นตอนการวิจัย	3
1.4.2 วิธีการดำเนินงาน	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเรื่องของลักษณะของโครงสร้างผลึก	5
2.1.1 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ	5
2.1.2 โครงสร้างผลึกแบบเวอริทไซท์	10
2.1.3 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์	11
2.1.4 ข้อบกพร่องผลึก	11
2.1.4.1 ข้อบกพร่องผลึกแบบจุด	12
2.1.4.2 ข้อบกพร่องผลึกแบบเชิงเส้น	12
2.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์	14
2.3 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	15
2.4 สมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ	16
2.4.1 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน	16
2.4.2 สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง	20
2.4.3 การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ	21
2.4.4 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง	22
2.4.5 ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี	24
2.5 สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.5.1 สมบัติการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ	28
2.5.1.1 สารกึ่งตัวนำอินทรีนสิก	29
2.5.1.2 สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็กซ์ทรีนสิก	31
2.6 สภาพนำไฟฟ้า	35
2.7 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า	36
2.7.1 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง	36
2.7.2 การวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิค แวนเดอร์เพาว์	38
2.8 ปรากฎการณ์ฮอลล์	39
2.8.1 การศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์	44
2.9 กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในฟิล์มบางที่อุณหภูมิต่างๆ	47
2.9.1 กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในฟิล์มบางในช่วงอุณหภูมิสูง	48
2.9.2 กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในฟิล์มบางในช่วงอุณหภูมิต่ำปานกลาง	50
2.9.3 การนำไฟฟ้าของพาหะแบบกระโดดในระยยะไม่คงที่	53
2.10 สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงดื้อรั้น	55
2.10.1 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะในช่วงกระแสไฟโตชาลง	63
2.10.2 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะในช่วงกระแสไฟโตชาขึ้น	64
2.11 การระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิด	65
2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	68
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	73
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัย	73
3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เพื่อใช้ เตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบ อยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการ ระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิด	73
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่ เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิด	73
3.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค	74
3.1.4 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค	74
3.1.5 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางแสง	74
3.1.6 เครื่องมือที่ใช้ในการวัดสมบัติทางไฟฟ้า	74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิด	74
3.2.1 การเตรียมและทำความสะอาดแผ่นกระจกสไลด์เพื่อเป็นฐานรองรับ	74
3.2.2 การเตรียมและทำความสะอาดระบบระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิด	75
3.2.3 การเตรียมสารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่มีองค์ประกอบต่างกัน	75
3.2.4 การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิด	78
3.3 การศึกษาสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิด	80
3.3.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค	80
3.3.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค	80
3.3.3 การศึกษาสมบัติทางแสง	80
3.3.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า	80
3.3.4.1 การวัดค่าความต้านทานแผ่นด้วยวิธีสองขั้ว	80
3.3.4.2 การศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์	81
3.3.4.3 ศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์	83
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	86
4.1 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยสมบัติทางความร้อนของผลึกของสารกึ่งตัวนำ CdTe และ CdSe ที่ได้มาจากการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	86
4.2 ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิด	88
4.3 ผลการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์พื้นฐานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิด	89

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.3.1 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	89
4.3.2 ผลการศึกษาภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	93
4.3.3 ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ของบริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	96
4.3.4 ผลการศึกษาสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	98
4.3.5 ผลการศึกษาฟูเรียร์แทรนส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	101
4.3.6 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	104
4.3.6.1 ผลการคำนวณหาค่าความต้านทาน ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	104
4.3.6.2 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าและปรากฏการณ์ฮอลล์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	105
4.3.6.3 ผลการศึกษาค่าความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdSe$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	109

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.3.6.4 ผลการศึกษาค่าความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	126
4.3.6.5 ผลการศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงที่ร้อนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	129
4.3.6.6 ผลการศึกษสมบัติทางไฟฟ้า และ ปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS_xSe_{1-x})_{0.99}(In_2S_3)_{0.01}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	135
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	138
5.1 สรุปผลการวิจัย	138
5.2 ข้อเสนอแนะ	140
เอกสารอ้างอิง	
ภาคผนวก	
ประวัติผู้เขียน	

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ช่วงระยะเวลาในการดำเนินงาน	4
2.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ของหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ	6
2.2 แสดงระบบผลึกทั้งเจ็ดแบบในระบบสามมิติ	7
2.3 แสดงความสัมพันธ์ของดัชนีมิลเลอร์ (hkl) และจุดตัดแกนผลึก (x,y,z)	9
2.4 แสดงค่าเลขคลื่นต่างๆ ของพลังงานที่ได้จากการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของ หมู่ฟังก์ชันต่างๆ	26
3.1 แสดงปริมาณสารตั้งต้นของผลึกของสารประกอบ CdTe และ CdSe และอุณหภูมิ ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่น ฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนใน ระยะประชิด	77
4.1 แสดงค่าคงที่โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิด สารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที	90
4.2 แสดงขนาดเกรนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบ อยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วย ความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที	95
4.3 แสดงองค์ประกอบของธาตุต่างๆ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดย วิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด สารเคมี 10 นาที	97
4.4 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดย วิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด สารเคมี 10 นาที	100
4.5 แสดงค่าเลขคลื่นของการส่งผ่านรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ของฟิล์มบาง ของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่น กระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้ เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที	102
4.6 แสดงค่าเลขคลื่นของการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ของฟิล์มบาง ของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่น กระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้ เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที	103
4.7 แสดงค่าความต้านทานแผ่นของ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐาน รองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนใน ระยะประชิดเมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที	104

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.8 แสดงการศึกษา ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า และ ปรากฏการณ์ฮอลล์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที	107
4.9 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คำนวณได้จากแบบจำลองของซีโต ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที	114
4.10 แสดงค่าพารามิเตอร์ของกลไกการกระโดดของอิเล็กตรอนระหว่างระดับผู้ให้ที่อยู่ติดกัน (NNH) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดเมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที	117
4.11 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คำนวณได้จากแบบจำลองการกระโดดในระยะไม่คงที่ของมอตต์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที	121
4.12 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คำนวณได้จากแบบจำลองการกระโดดในระยะไม่คงที่ของเอฟโรส-ชลอฟสกี ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที	124
4.13 แสดงค่าพลังงานกระตุ้นของ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที	128
4.14 แสดงความไวในการตอบสนองต่อแสง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดเมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที	131
4.15 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่สำคัญที่ได้จากการศึกษาปรากฏการณ์เชิงแสงดื้อรั้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที	134
4.16 แสดงการศึกษา ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า และ ปรากฏการณ์ฮอลล์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS_xSe_{1-x})_{0.99}(In_2S_3)_{0.01}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที	137

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ	5
2.2 แสดงการบอกชื่อระนาบต่างๆของผลึก	9
2.3 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์ของผลึกแคดเมียมซีลีไนด์	10
2.4 แสดงโครงสร้างแบบซิงค์แบลนด์ของผลึกแคดเมียมเทลลูไรด์	11
2.5 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบจุดชนิดต่างๆ	12
2.6 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชันแบบขอบและดิสโลเคชันแบบสกรู	13
2.7 แสดงเกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน	13
2.8 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์	14
2.9 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	15
2.10 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานอย่างง่าย	17
2.11 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานและการย้ายสถานะของพลังงาน	19
2.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงาน	19
2.13 แสดงแผนภาพเมื่อแสงตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มบาง	20
2.14 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง กับ พลังงานโฟตอน	22
2.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง กับ ค่าพลังงานโฟตอนหรือค่าความยาวคลื่นของพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำ	24
2.16 แสดงสเปกตรัมอินฟราเรด สเปกตรัมของ 2-pentanone	25
2.17 แสดงรูปแบบการสั่นของพันธะเคมีระหว่างไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้าของสารอินทรีย์	26
2.18 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นกับส่วนกลับของอุณหภูมิ	32
2.19 แสดงการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง	37
2.20 แสดงตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชิ้นสารตัวอย่างเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์	38
2.21 แสดงการต่อขั้วเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์	38
2.22 แสดงแผนภาพการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์บนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำชนิดพี	41
2.23 แสดงการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์บนสารตัวอย่างที่เป็นแผ่นบางที่มีรูปทรงใดๆ	45
2.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H)กับค่ากระแสไฟฟ้า (I)	46
2.25 แสดงแบบจำลองของฟิล์มบางตรงบริเวณขอบรอยต่อของเกรน	48
2.26 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln \sigma$ กับ $1000/T$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่อุณหภูมิในช่วง 125-365 เคลวิน	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.27 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln \sigma T^{1/2}$ กับ $1000/T$ ของฟิล์มบางของสาร กึ่งตัวนำ CuO สำหรับในรูปแทรกกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln \sigma T^{1/2}$ กับ $T^{-1/4}$	52
2.28 แสดงระดับพลังงานของกึ่งตัวนำชนิดจันอิลีกตรอน (E_{te}) และกึ่งตัวนำชนิดจันโฮล (E_{th}) ที่ปรากฏในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ จุดทึบและจุดโปร่งจะแสดงถึงอิลีกตรอนและโฮลตามลำดับ	56
2.29 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสโฟโตขาขึ้น กับ ค่ากระแสโฟโตขาลงของค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงที่ร้อน	59
2.30 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ t ของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงที่ร้อนทั้งช่วงกระแสโฟโตขาขึ้นและช่วงกระแสโฟโตขาลง	60
2.31 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ t เพื่อใช้คำนวณหา ค่าความหนาแน่นของกึ่งตัวนำในช่วงกระแสโฟโตขาลง	63
2.32 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ t เพื่อใช้คำนวณหาค่าความหนาแน่นของกึ่งตัวนำในช่วงกระแสโฟโตขาขึ้น	64
2.33 แสดงพิกัดความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของการฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:Sb ($x=0\%, 0.5\%, 1\%, 2.5\%$)	68
2.34 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Sb	69
2.35 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Sb	69
2.36 แสดงสเปกตรัม FTIR ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Sb	70
2.37 แสดงสเปกตรัม FTIR ของผลึกนาโนของสารกึ่งตัวนำ CdSe	71
2.38 แสดงลักษณะสัญญาณของฟิล์มบาง CdSe เมื่ออุณหภูมิแผ่นฐานรองรับแตกต่างกัน (a) $T_s = 473$ K, $l = 3.2$ μm ; (c) $T_s = 873$ K, $l = 5.8$ μm และ ภาพตัดขวาง (b,d)	71
2.39 แสดงสเปกตรัม FTIR ของฟิล์มบาง CdSe	72
3.1 ผงผลึกของสารตั้งต้น $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่ผสมแล้วเพื่อจะใช้ในการทดลองทั้งแบบที่ปิดแฟลช และ เปิดแฟลชของกล้องถ่ายภาพ	77
3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการประดิษฐ์ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดเมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที	79
3.3 ระบบการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด	79
3.4 แสดงวิธีทำขั้วไฟฟ้าสำหรับการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพอร์	81
3.5 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า (I_{12}) กับ ศักย์ไฟฟ้า (V_{43}) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ	82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า (I_{23}) กับ ศักย์ไฟฟ้า (V_{14}) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ	82
3.7 แสดงวิธีการต่อขั้วไฟฟ้าเพื่อศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์	83
3.8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าศักย์ไฟฟ้า (V_H) กับ กระแสไฟฟ้า (I) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ	84
4.1 แสดงน้ำหนักโดยใช้เครื่องเทอร์โมกราวิเมตรริกอะนาไลเซอร์ ของผงผลึกของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่ลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น	87
4.2 แสดงน้ำหนักโดยใช้เครื่องเทอร์โมกราวิเมตรริกอะนาไลเซอร์ ของผงผลึกของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่ลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น	87
4.3 แสดงผลึกของสารตั้งต้นที่ใช้สำหรับเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที	88
4.4 แสดงภาพถ่ายของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที	88
4.5 แสดงพืดความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที	89
4.6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าคงที่โครงผลึก a และ c กับ เศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที	92
4.7 แสดงภาพถ่าย SEM ของบริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที	94
4.8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าขนาดของเกรน กับ เศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที	95

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 แสดงสเปกตรัม EDS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที	96
4.10 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง กับ ความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที	98
4.11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน กับ ความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที	98
4.12 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $(ahv)^2$ ของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง กับ ค่าพลังงานโฟตอน (hv) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที	99
4.13 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $(ahv)^2$ ของค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน กับ ค่าพลังงานโฟตอน (hv) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที	99
4.14 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) กับ เศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที	101
4.15 แสดงสเปกตรัม FTIR ในช่วงเลขคลื่น 400-4000 ต่อเซนติเมตร ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	102
4.16 แสดงสเปกตรัม FTIR ในช่วงเลขคลื่น 400-4000 ต่อเซนติเมตร ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	103

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต้านทานแผ่น กับ เศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของฟิล์ม บางของสารกึ่งตัวนำ CdTe _{1-x} Se _x (0 ≤ x ≤ 1) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที	105
4.18 แสดงการหา ค่าความต้านทานไฟฟ้า (R ₁) ด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe _{1-x} Se _x เมื่อ x=1.0 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที	106
4.19 แสดงการหา ค่าความต้านทานไฟฟ้า (R ₂) ด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe _{1-x} Se _x (0 ≤ x ≤ 1) เมื่อ x=1.0 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที	106
4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (V ₂₄) และ (V' ₂₄) กับ ค่ากระแสไฟฟ้า (I ₁₃) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe _{1-x} Se _x (0 ≤ x ≤ 1) เมื่อ x=1.0 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที	106
4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์(V _H)กับ ค่ากระแสไฟฟ้า (I ₁₃) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe _{1-x} Se _x (0 ≤ x ≤ 1) เมื่อ x=0.0 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที	107
4.22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอน และ ค่าสภาพคล่องของพาหะ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe _{1-x} Se _x (0 ≤ x ≤ 1) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที	108
4.23 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า ln σ กับ $\frac{1000}{T}$, ค่า ln σT ^{1/2} กับ $\frac{1000}{T}$, ค่า ln σT ^{3/2} กับ T ^{-1/2} และ ln σT กับ T ^{1/2} ตามลำดับ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe _{1-x} Se _x เมื่อ x = 0.8 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที	109
4.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า ln σ กับ $\frac{1000}{T}$, ค่า ln σT ^{1/2} กับ $\frac{1000}{T}$, ค่า ln σT ^{3/2} กับ T ^{-1/2} และ ln σT กับ T ^{1/2} ตามลำดับ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe _{1-x} Se _x เมื่อ x = 1.0 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียม โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที	110

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.25 แสดงความหนาแน่นของสถานะพลังงานของข้อบกพร่องผลึกสามชนิดที่ปรากฏในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ	125
4.26 แสดงแผนภาพกลไกการนำไฟฟ้าชนิดต่างๆ ที่อุณหภูมิต่ำที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น	125
4.27 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln\left(\frac{R_0}{R}\right)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที	128
4.28 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าพลังงานกระตุ้น กับ เศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของฟิล์มบาง ของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ เมื่อ $x = 0.0-1.0$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดเมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที	128
4.29 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟโต กับ เวลา ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdSe$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที	129
4.30 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ เวลา ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ เมื่อมีค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x)= 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 ตามลำดับที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดเมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที	132
4.31 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสออร์มอไลซ์ขาลง กับ เวลา ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ เมื่อมีค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x)= 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 ตามลำดับที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที	133
4.32 แสดงการหา ค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_1) ด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS_xSe_{1-x})_{0.99}(In_2S_3)_{0.01}$ เมื่อ $x=0.0$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที	135
4.33 แสดงการหา ค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_2) ด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS_xSe_{1-x})_{0.99}(In_2S_3)_{0.01}$ เมื่อ $x=0.0$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที	135

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (V_{24}) และ (V'_{24}) กับ ค่ากระแสไฟฟ้า (I_{13}) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ (CdS_xSe_{1-x}) _{0.99} (In_2Se_3) _{0.01} เมื่อ $x=0.0$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที	136
4.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) กับ ค่ากระแสไฟฟ้า (I_{13}) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ (CdS_xSe_{1-x}) _{0.99} (In_2Se_3) _{0.01} เมื่อ $x=0.0$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมี ด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที	136



คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
CdSe	แคดเมียมซีลีไนด์
CdTe	แคดเมียมเทลลูไรด์
TGA	เทอร์โมกราวิเมตริกอะนาไลเซอร์
SEM	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
XRD	การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์
EDS	เอ็นเนอร์ยีดีสเพอร์ซีฟสเปกโทรสโกปี
FT-IR	ฟูเรียร์แทรนส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี
LED	ไดโอดเปล่งแสง
E_g	ช่องว่างของแถบพลังงาน
E_t	ระดับพลังงานของกักตักพาหะ
E_F	ระดับพลังงานเฟอร์มิ
E_a	พลังงานกระตุ้น
V_H	ความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์
hkl	ดัชนีมิลเลอร์
h	ค่าคงตัวของพลังค์
k	ค่าคงตัวของโบลตซ์มันน์
m^*	มวลประสิทธิผล
∞	ค่าอนันต์
ϵ_s	เพอร์มิตติวิตี
β	แฟกเตอร์สถานะพลังงานซ้อนทับ
σ	สภาพนำไฟฟ้า
ρ	สภาพต้านทานไฟฟ้า
μ	สภาพคล่องของพาหะ
λ	ความยาวคลื่น
K	เคลวิน
$^{\circ}\text{C}$	อาศาเซลเซียส
Ω	โอห์ม
nm	นาโนเมตร
cm	เซนติเมตร
H_2	ไฮโดรเจน
\AA	อังสตรอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ฟิล์มบางแคดเมียมเซลีไนด์ (CdSe) เป็นสารกึ่งตัวนำหมู่ II-VI มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่มีค่าช่องว่างแถบพลังงานอยู่ระหว่าง 1-3 อิเล็กตรอนโวลต์ มีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านทางแสงอยู่ในย่านตามองเห็นได้ และเป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำที่นิยมนำมาใช้ในสิ่งประดิษฐ์จำพวกเซลล์แสงอาทิตย์ ทรานซิสเตอร์ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่มีประสิทธิภาพสูง และสิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ไดโอดเปล่งแสง (LED) เป็นต้น

ในปัจจุบันพลังงานทดแทนมีบทบาทมากขึ้น ในการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยเซลล์แสงอาทิตย์เป็นรูปแบบหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจมากในการศึกษาและพัฒนา เนื่องจากเป็นพลังงานสะอาดไม่ก่อมลพิษในขณะที่ผลิตกระแสไฟฟ้า แต่สิ่งประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์นั้นยังมีต้นทุนสูงในการผลิต และประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ไปเป็นพลังงานไฟฟ้านั้นยังไม่สูงมากนัก ดังนั้นจึงเป็นที่สนใจในการพัฒนาสิ่งประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นในอนาคต

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีสมบัติเฉพาะคือ สามารถเปลี่ยนพลังงานโฟตอนไปเป็นพลังงานไฟฟ้า เมื่อมีพลังงานโฟตอนที่มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับขนาดช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำมาตกกระทบจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นที่บริเวณรอยต่อของเซลล์แสงอาทิตย์ ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า ปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก (photovoltaic effect) (งามนิตย์, 2534; Kittel, 1971)

งานวิจัยและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์จากสารกึ่งตัวนำในกลุ่ม II-VI เช่น CdTe, CdSe ได้ดำเนินไปอย่างกว้างขวางทั้งในประเทศสหรัฐอเมริกา ยุโรป และญี่ปุ่น เป็นต้น ปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ที่โดดเด่นและน่าสนใจมากที่สุดคือ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหิวต่อวิวิธพันธุ์ (heterojunction solar cell) ของสารกึ่งตัวนำ CdSe/CdTe ซึ่งปัจจุบันมีประสิทธิภาพสูงถึง 16.5% ในระดับห้องปฏิบัติการ และโมดูลขนาดใหญ่มีประสิทธิภาพสูงกว่า 10% และมีแนวโน้มที่จะนำออกสู่ตลาดได้ในอนาคตอันใกล้

ในโครงการพิเศษนี้ได้ศึกษาการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ จากสารตั้งต้นเป็นผลึกของสารประกอบ CdSe และ CdTe ซึ่งฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิดในระบบสุญญากาศ ผลการศึกษาได้แก่ ลักษณะของโครงสร้างผลึกทั้งเชิงจุลภาคและมหภาค ผลการศึกษาสมบัติทางแสง ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 20-300 เคลวิน และวัดค่าความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิสูงในช่วง 303-473 เคลวิน เพื่อนำไปคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้นของข้อบกพร่องผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$)

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาวิธีการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) จากสารตั้งต้นเป็นผลึกของสารประกอบ CdTe , CdSe ที่มีความบริสุทธิ์สูงถึง 99.999 เปอร์เซ็นต์ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดในระบบสุญญากาศ
2. เพื่อศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้
3. เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยการสังเกตผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้ และขนาดของเกรน
4. เพื่อศึกษาการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ของผิวหน้าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้
5. เพื่อศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้ ลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงาน และคำนวณหาช่องว่างแถบพลังงาน
6. เพื่อศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้ โดยการวัดค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำด้วยวิธีสองขั้วที่อุณหภูมิห้องในขณะที่ไม่มีการฉายแสง และศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ นอกจากนี้ยังทำการวัดค่าความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 20-300 เคลวิน และวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วง 303-473 เคลวิน เพื่อหาค่าพลังงานกระตุ้น (activation energy)
7. เพื่อศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงที่ร้อนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำโดยการฉายแสงตก $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) กระทั่งแผ่นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ แล้ววัดค่ากระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาและค้นคว้าหาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้
2. ทำการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ CdTe , CdSe ที่มีความบริสุทธิ์สูงถึง 99.999 เปอร์เซ็นต์ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดในระบบสุญญากาศ
3. ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้
4. ศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้
5. ศึกษาการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ของผิวหน้าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้
6. ศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้ เพื่อหาขนาดของช่องว่างแถบพลังงานด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นเข้าเบี่ยงเบนไปจากวัตถุประสงค์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้ โดยการวัดค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำด้วยวิธีสองขั้วที่อุณหภูมิห้อง ในขณะที่ไม่มีการฉายแสง วัดปรากฏการณ์ฮอลล์ นอกจากนี้ยังทำการวัดค่าความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน และวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วง 303-473 เคลวิน เพื่อหาค่าพลังงานกระตุ้น
8. ศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงคือรีนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) โดยวิธีการฉายแสงตกกระทบแผ่นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ แล้ววัดค่ากระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา
9. สรุปและวิเคราะห์ผลจากการศึกษาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้

1.4 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

1.4.1. ขั้นตอนการวิจัย

1. ศึกษาและค้นคว้าหาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด
2. ทำการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ เมื่อ ($0 \leq x \leq 1$) โดยที่มีค่าสัดส่วนผสมของโมลอะตอม (x) = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 ตามลำดับ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด จากสารตั้งต้นเป็นผงผลึกของสารประกอบ CdTe และ CdSe ที่มีความบริสุทธิ์สูงถึง 99.999 เปอร์เซ็นต์
3. ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางที่เตรียมได้โดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์
4. ศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
5. ศึกษาสมบัติการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางที่เตรียมได้ เพื่อหาขนาดของช่องว่างแถบพลังงานด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์
6. ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางที่เตรียมได้ โดยการวัดความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางด้วยวิธีสองขั้วที่อุณหภูมิห้อง ทั้งในขณะที่ไม่มีการฉายแสงและมีการฉายแสง นอกจากนี้ยังทำการวัดความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 20-300 องศาเซลเซียส เพื่อหาค่าพลังงานกระตุ้น (activation energy)
7. สรุปและวิเคราะห์ผลจากการศึกษาของฟิล์มบางที่เตรียมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4.2. วิธีการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 ช่วงระยะเวลาในการดำเนินงาน

ช่วงระยะเวลา	การดำเนินงาน
สิงหาคม – พฤศจิกายน พ.ศ. 2558	-ทำการเตรียมฟิล์มบาง $CdTe_{1-x}Se_x$ -วัดสภาพต้านทานไฟฟ้า และปรากฏการณ์ฮอลล์ที่อุณหภูมิห้อง
พฤศจิกายน – กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2559	-ศึกษาสมบัติทางแสง และสมบัติทางไฟฟ้า
ธันวาคม – มีนาคม พ.ศ. 2559	-ศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ -ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วย SEM -คำนวณค่าต่างๆที่วัดได้
กุมภาพันธ์ – พฤษภาคม พ.ศ. 2559	-วิเคราะห์ผลการศึกษาสมบัติฟิสิกส์พื้นฐานของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ -สรุปและอภิปรายผลการทดลอง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้ทราบถึงวิธีการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) จากสารตั้งต้นเป็นผงผลึกของสารประกอบ CdTe, CdSe ที่มีความบริสุทธิ์สูงถึง 99.999 เปอร์เซ็นต์ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกใสที่ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดในระบบสุญญากาศ
2. ทำให้ทราบสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้ ว่ามีความเหมาะสมมากน้อยเพียงใด ในการประยุกต์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ
3. มีความรู้ความเข้าใจสมบัติทางแสง และสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) รวมถึงลักษณะโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้
4. มีความรู้ความเข้าใจในการใช้เครื่องมือที่ใช้งานวิจัยนี้ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานในรูปแบบอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

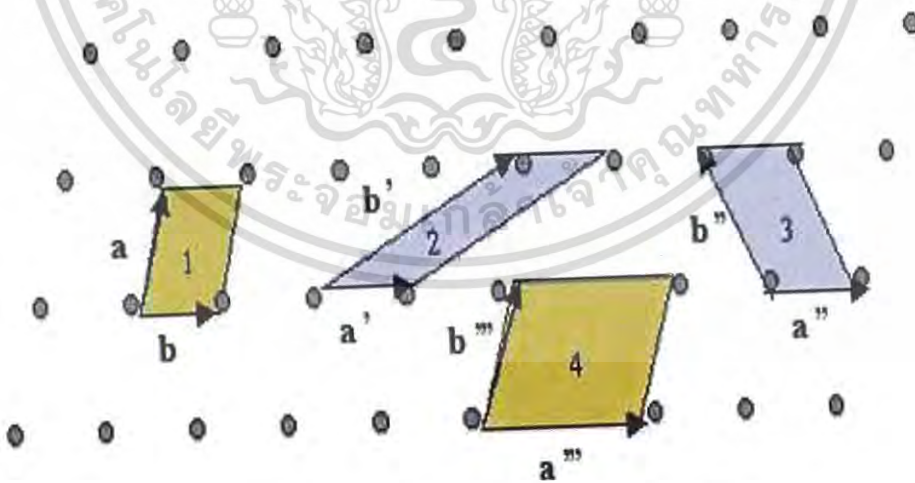
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเรื่องของลักษณะของโครงสร้างผลึก (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิิตย์, 2531; งามนิิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; งามนิิตย์, 2551; ฐิตินัย, 2551)

ในทางผลึกวิทยาสามารถแบ่งสสารและวัสดุที่อยู่ในสภาพของแข็งออกได้เป็น 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 ของอะตอมในระบบสามมิติว่าโครงผลึกหรือแลตทิซ (lattice) ในทางทฤษฎีการกำหนดหน่วยเซลล์จะทำได้ไม่จำกัด แต่ตามปกติจะเลือกหน่วยเล็กที่สุด ที่เป็นไปได้ และมีสมมาตรค่อนข้างสูง ตัวอย่างการเลือกหน่วยเซลล์ในโครงผลึก 2 มิติ ดังรูปที่ 2.1 ในระบบสองมิติพารามิเตอร์ของโครงผลึก ได้แก่ เวกเตอร์ \vec{a} และ \vec{b} และ มุม γ ซึ่งเป็นมุมระหว่าง เวกเตอร์ทั้งสอง ทั้งนี้ชนิดของโครงผลึกที่แตกต่างกันที่เป็นไปได้มีเพียงห้าแบบ ดังตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ



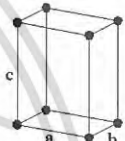

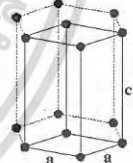
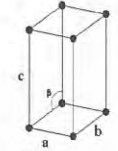
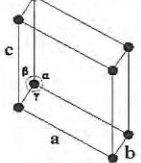
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 α, β และ γ ซึ่งเป็นมุมระหว่างเวกเตอร์ต่างๆ ดังตัวอย่างในตารางที่ 2.2 ทั้งนี้ สามารถจัดแบ่งรูปแบบของโครงสร้างผลึกขึ้นมาโดยสามารถแบ่งออกได้เป็นสิบสี่แบบในสามมิติ ซึ่งจัดได้เป็นเจ็ดกลุ่มคือ 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
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การระบุตำแหน่งทิศทางและระนาบของโครงผลึก (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิทย์, 2545; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; งามนิทย์, 2551; ฐิตินัย, 2551)

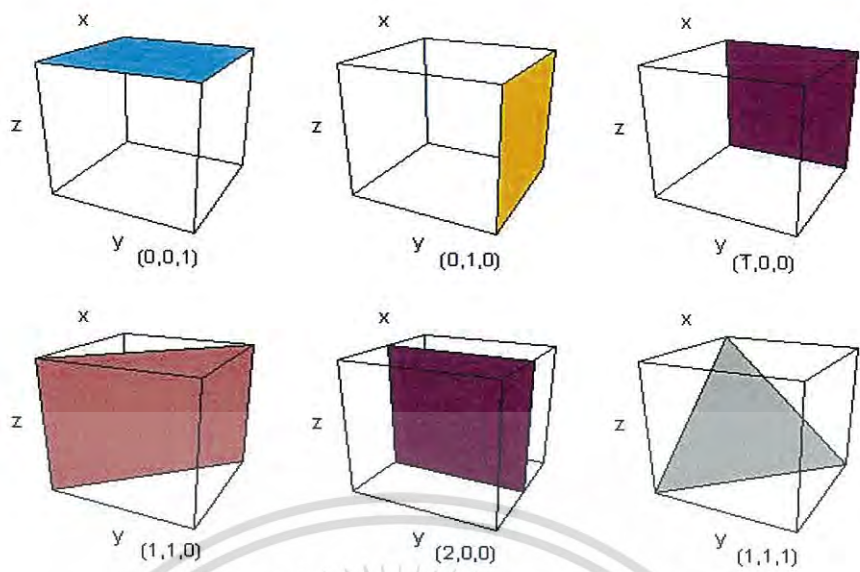
เนื่องจากผลึกมีสมบัติที่ขึ้นอยู่กับทิศทาง ดังนั้นจึงต้องระบุแน่นอนว่ากำลังศึกษาลักษณะส่วนใดของผลึกอยู่ซึ่งการระบุลักษณะที่ว่าจะกล่าวถึงตำแหน่ง, ทิศทางและระนาบของผลึกที่กำลังศึกษาอยู่นั้น

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 ถ้าเป็นทิศทางที่เป็นลบก็จะใส่เครื่องหมาย “ - ” หรือบาร์ (bar) ไว้บนตัวเลขนั้นๆ เช่น ทิศทาง $[\bar{1}2\bar{1}]$ แสดงว่าในแนวแกน z มีค่าเป็นลบ
3. การระบุชื่อระนาบของผลึกจะใช้อักษร (hkl) ให้สังเกตการใช้วงเล็บ และไม่มีเครื่องหมาย “ , ” คั่นโดยที่หากระนาบใดตัดแกนลบก็ใส่เครื่องหมาย “ - ” หรือบาร์ข้างบนตัวเลขดัชนีมิลเลอร์ค่า hkl เรียกว่า ดัชนีมิลเลอร์ (miller indices) ชื่อระนาบของผลึกเป็นสิ่งที่สำคัญที่สุดอีกประการหนึ่งในการศึกษาผลึก เพราะในแต่ละระนาบจะประกอบไปด้วยอะตอม ไอออนหรือโมเลกุลเรียงตัวกันอยู่บนระนาบนั้น อาจกล่าวได้ว่าระนาบแต่ละระนาบจะมีความแตกต่างกัน เช่นเดียวกับทิศทาง การบอกชื่อระนาบหรือดัชนีมิลเลอร์นั้นทำได้โดย
 - 3.1 กำหนดจุดที่ระนาบนั้นตัดแกนพิกัดฉากขึ้นมาเป็น (x,y,z) โดยที่หากระนาบตัดแกนใดให้ถือว่าระนาบนั้นตัดแกนนั้นที่ระยะอนันต์ (∞) และหากระนาบใดตัดแกนลบ (-) ก็ใส่เครื่องหมายบาร์ (-) ข้างบนตัวเลขดัชนีนั้น
 - 3.2 ทำค่าจุดตัดต่างๆที่ได้จากข้อ 1 ทั้งหมดให้เป็นเศษส่วนกลับ
 - 3.3 ทำให้เป็นเลขจำนวนเต็มโดยการหาค่าผลคูณร่วมน้อย (ค.ร.น) ของค่าเศษส่วนที่ได้จากข้อ 2 ซึ่งก็จะได้ค่าตัวเลขดัชนีมิลเลอร์ (hkl) ตามลำดับ

ดังแสดงในรูปที่ 2.2 และ ตารางที่ 2.3 ซึ่งสรุปความสัมพันธ์ระหว่างระนาบต่างๆกับระยะตัดแกนอ้างอิง



รูปที่ 2.2 แสดงการบอกชื่อระนาบต่างๆของผลึก

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, ∞	$\frac{1}{0.5}, \frac{1}{0.5}, \frac{1}{\infty}$	(220)

มีข้อสังเกตที่ควรรู้เกี่ยวกับดัชนีมิลเลอร์ที่ใช้บอกชื่อระนาบของผลึกเพิ่มเติมดังนี้

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

$$l = -(h+k) \tag{2.1}$$

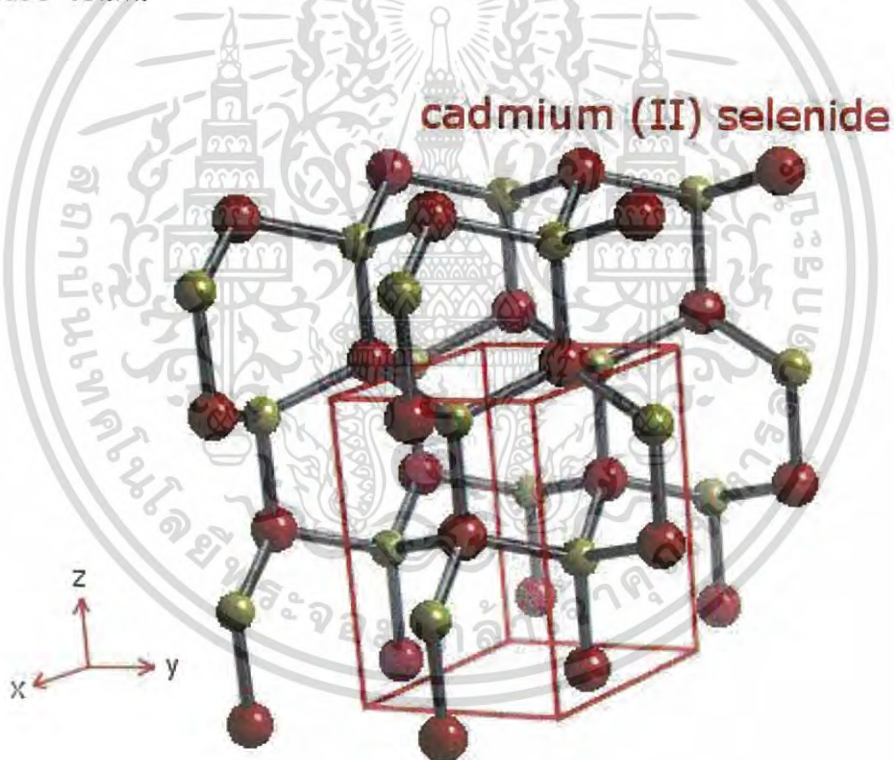
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

2.1.2 โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์ (wurtzite structure)

โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์จัดอยู่ในระบบโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลเกิดจากการนำโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลที่มีอะตอมของธาตุต่างๆอยู่สองชนิดวางซ้อนเหลื่อมกันเป็นระยะ 5/8 ตามแนวแกน c (c-axis) หนึ่งหน่วยเซลล์จะมี 8 อะตอม มีอะตอมเพื่อนบ้านอยู่ 4 อะตอมมีพันธะเคมีของโมเลกุลเป็นแบบพันธะเตตระฮีดรอน และมีพันธะเคมีระหว่างอะตอมเป็นแบบโควาเลนต์ ดังนั้นจึงมีการจัดเรียงของอะตอมคล้ายกับโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์แต่จะมีความแตกต่างกัน คือ ในโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์จะมีการจัดเรียงระนาบของพันธะเตตระฮีดรอนเป็นแบบ ABAB...หรือ 0101... ส่วนโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์จะมีการจัดเรียงระนาบของพันธะเตตระฮีดรอนแบบ ABCABC... หรือ 012012... สารที่มีโครงสร้างผลึกแบบนี้ได้แก่ สารกึ่งตัวนำ CdS, ZnS, CdSe เป็นต้น



รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์ของผลึกแคดเมียมซีลีไนด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ (zinc blend structure)

ผลึกแคดเมียมเทลลูไรด์เป็นสารประกอบกึ่งตัวนำหมู่ 2-6 มีโครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์ มีค่าคงตัวของโครงสร้างผลึกเท่ากับ 6.481 อังสตรอม และมีค่าความหนา 6.2 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีจุดหลอมเหลว 1040 องศาเซลเซียส เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีแถบช่องว่างพลังงานเท่ากับ 1.50 อิเล็กตรอนโวลต์ มีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงในย่านความยาวคลื่นแสงที่ตามองเห็น สำหรับแคดเมียมเทลลูไรด์ที่มีความหนาในระดับไมครอนสามารถดูดกลืนพลังงานโฟตอนได้มากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ผลึกแคดเมียมเทลลูไรด์เสถียรที่อุณหภูมิสูงกว่า 500 องศาเซลเซียส ดังนั้นผลึกแคดเมียมเทลลูไรด์จึงเหมาะกับการนำมาใช้เป็นชั้นดูดกลืนพลังงานโฟตอนในเซลล์แสงอาทิตย์ ดังรูปที่



รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์ของผลึกแคดเมียมเทลลูไรด์

2.1.4 ข้อบกพร่องผลึก (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2545; จูตินัย, 2549; จูตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; จูตินัย, 2551)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

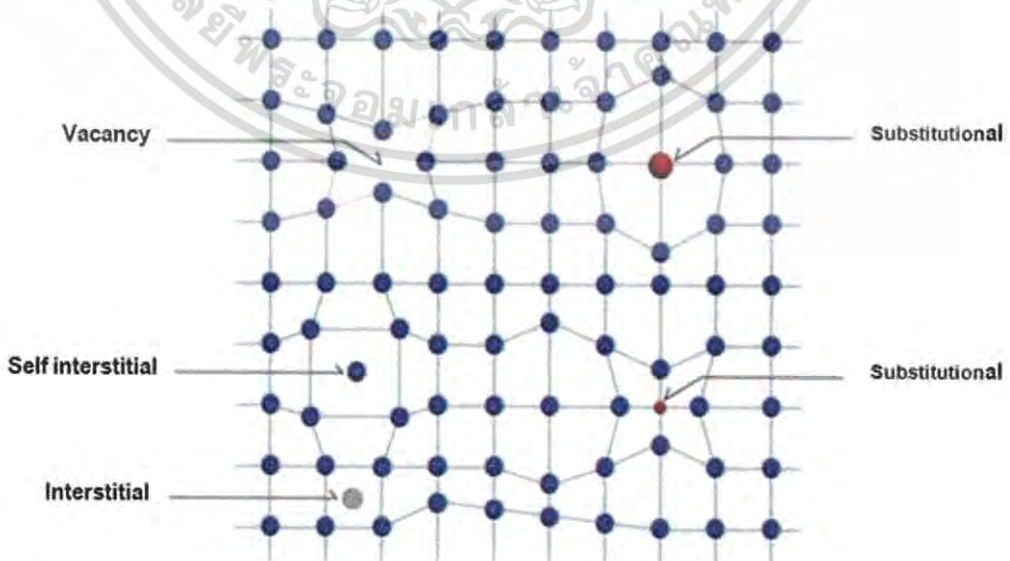
2.1.4.1 ข้อบกพร่องผลึกแบบจุด (point defect)

ข้อบกพร่องของผลึกแบบจุดจะเกี่ยวข้องกับการพิจารณาอะตอมที่ผิดเพี้ยนไปจากตำแหน่งเดิมในโครงสร้างผลึก

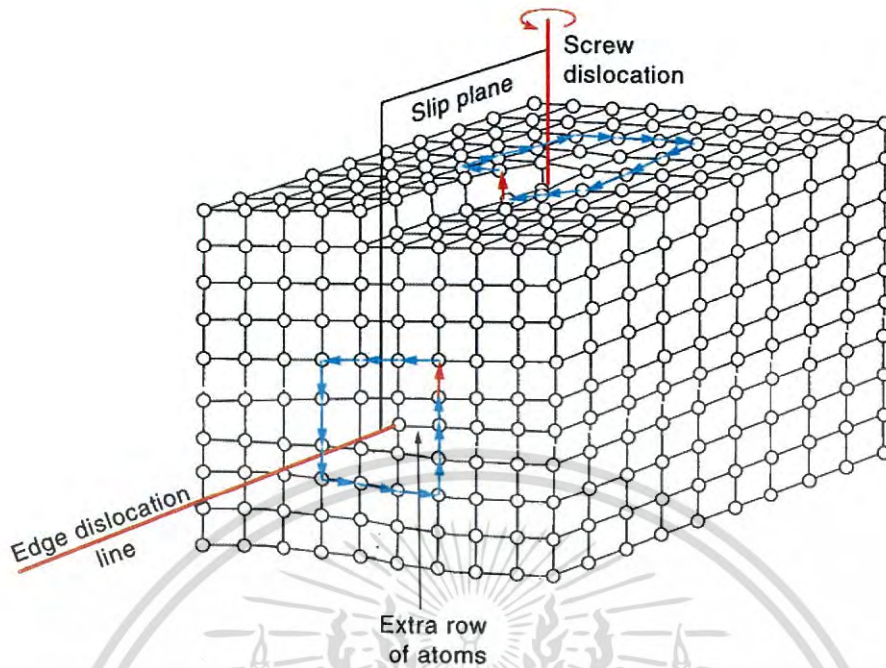
1. ข้อบกพร่องผลึกแบบแวนแคนซี (vacancy defect) ซึ่งมีลักษณะที่อะตอมหรือไอออนหลุดหายไป โดยที่ถ้าหากเป็นกรณีที่เกิดจากการที่มีอะตอมหรือไอออนหลุดหายไปจากตำแหน่งของโครงผลึกที่อยู่ภายในย้ายขึ้นไปอยู่ที่บริเวณผิวหน้าของสารจะเรียกว่า ข้อบกพร่องผลึกแบบชอตต์กี (schottky defect)
2. ข้อบกพร่องผลึกแบบอินเตอร์สติเชียล (interstitial defect) ซึ่งเป็นลักษณะที่อะตอมบางอะตอมหรือไอออนที่ไม่อยู่ที่ตำแหน่งของโครงผลึก แต่จะเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างตำแหน่งที่เป็นที่ว่างของโครงผลึก โดยทั่วไปแล้วรัศมีอะตอมที่เข้าไปแทรกอยู่จะเท่าหรือน้อยกว่ารัศมีของอะตอมหลัก
3. ข้อบกพร่องผลึกแบบเฟรเนล (frenkel defect) คือเกิดจากการที่มีอะตอมหรือไอออนหลุดหายไปจากตำแหน่งของโครงผลึกที่อยู่ภายในย้ายไปแทรกอยู่ที่ตำแหน่งที่ควรเป็นที่ว่างของโครงผลึก
4. การผิดรูปของโครงผลึกแบบแอนติสตรัคเจอร์ (antistructure disorder) เป็นลักษณะของอะตอมตั้งแต่ 2 อะตอมขึ้นไป เข้าไปอยู่ในตำแหน่งของโครงผลึกทำให้ลักษณะของโครงผลึกไม่เป็นระเบียบ

2.1.4.2 ข้อบกพร่องผลึกแบบเชิงเส้น (line defect)

ข้อบกพร่องผลึกแบบเชิงเส้นอาจจะแยกได้อีกอย่างว่า ดิสโลเคชัน เกิดจากความผิดปกติแบบจุดโครงผลึกตั้งแต่ 2 จุดขึ้นไปซึ่งอาจขาดหายหรือเพิ่มขึ้นมาซึ่งมีผลทำให้เกิดการผิดปกติของโครงผลึกแบบเชิงเส้น การเกิดดิสโลเคชันอาจจะแบ่งออกได้ตามลักษณะรูปร่างที่สังเกตเห็นคือ ดิสโลเคชันแบบขอบ (edge dislocations) และดิสโลเคชันแบบสกรู (screw dislocations) ดังรูปที่ 2.5

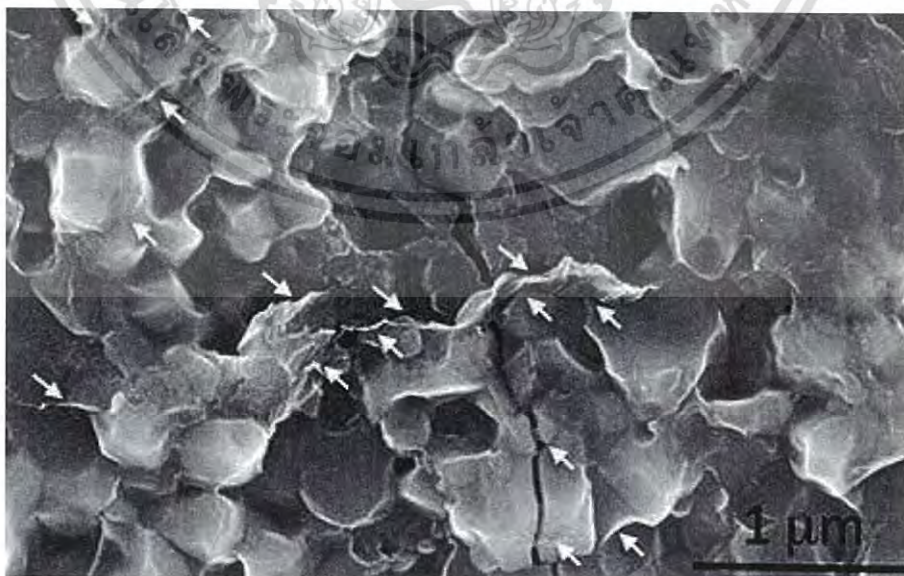


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 2.5 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบจุดชนิดต่างๆ ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชันแบบขอบและดิสโลเคชันแบบสกรู

ข้อบกพร่องผลึกชนิดนี้มักเกิดขึ้นในผลึกพหุพันธ์ (polycrystalline) ที่มีหลายเกรน ดังรูปที่ 2.6 ซึ่งในแต่ละเกรนจะมีการจัดเรียงตัวของผลึกในทิศทางเดียวกัน และมีแนวแบ่งระหว่างแต่ละเกรนที่มีการจัดเรียงตัวของผลึกในทิศทางต่างกัน เรียกว่า ขอบเขตรอยต่อของเกรน ซึ่งเกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน จะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางฟิสิกส์แตกต่างไปจากผลึกในอุดมคติ



รูปที่ 2.7 แสดงเกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ โดยใช้รังสีเอกซ์ความยาวคลื่นเดี่ยวตกกระทบตัวอย่าง ซึ่งอาจเป็นผลึกเดี่ยวหรือผลึกพหุพันธ์ก็ได้ สารตัวอย่างจะหมุนไปเป็นมุม θ ในขณะที่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ รังสีเอกซ์จะเคลื่อนที่ไปเป็นมุม θ เพื่อให้การเลี้ยวเบนสอดคล้องกับกฎของแบรกก์

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

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

เมื่อ d_{hkl}	คือ	ระยะระหว่างระนาบ
θ	คือ	มุมของรังสีสะท้อนจากระนาบแบรกก์ของรังสีเอกซ์ ซึ่งจะเท่ากับมุมของรังสีตกกระทบ
n	คือ	ลำดับของการเลี้ยวเบน มีค่าตั้งแต่ 1, 2, 3,
λ	คือ	ความยาวคลื่น

ระนาบต่าง ๆ ของผลึกที่ก่อให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ต้องสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ เรียกว่า ระนาบแบรกก์ (Bragg plane) และมุมที่รังสีสะท้อนทำกับแนวที่ขนานกับรังสีตกกระทบเรียกว่ามุมเลี้ยวเบน (diffraction angle) ซึ่งมีค่าเป็นสองเท่าของมุมตกกระทบ 2θ ดังรูปที่ 2.7

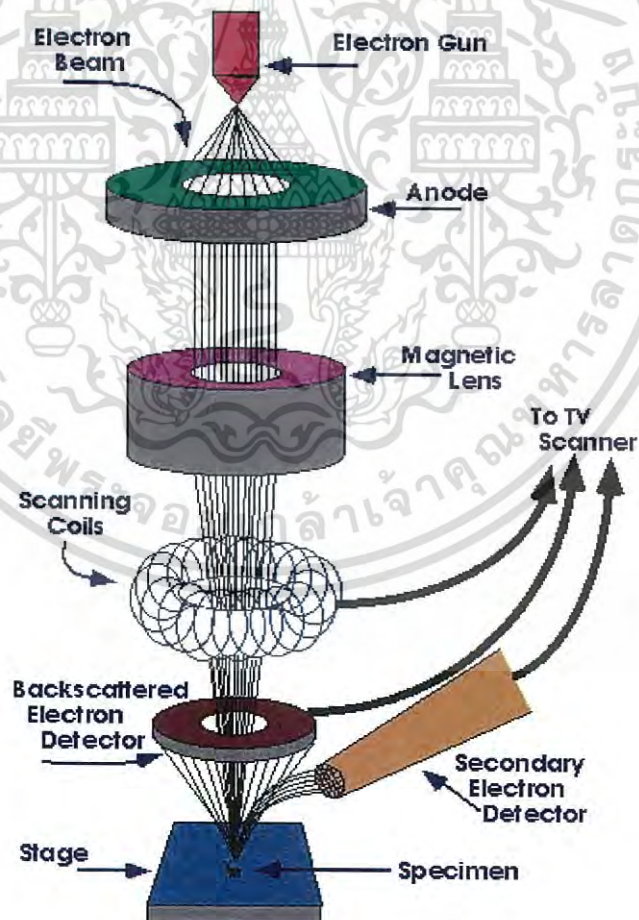


เอกสารนี้เป็นรูปที่ 2.8 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์ ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; ฐิตินัย, 2551)

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

การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังแสดงในรูปที่ 2.8 เริ่มจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ซึ่งมีหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนจากไส้หลอด กลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า พร้อมทั้งบังคับกลุ่มอิเล็กตรอนให้มีลักษณะเป็นลำ โดยลำอิเล็กตรอนจะกราดไปบนพื้นผิวของตัวอย่างโดยขดลวดสนามแม่เหล็กบนระนาบเอกซ์-เวาย เพื่อทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ อิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกตรวจจับโดยเซนเซอร์ และแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าเพื่อส่งต่อไปให้ระบบสร้างภาพต่อไป



รูปที่ 2.9 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัจจัยสำคัญสำหรับการใช้งาน SEM

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

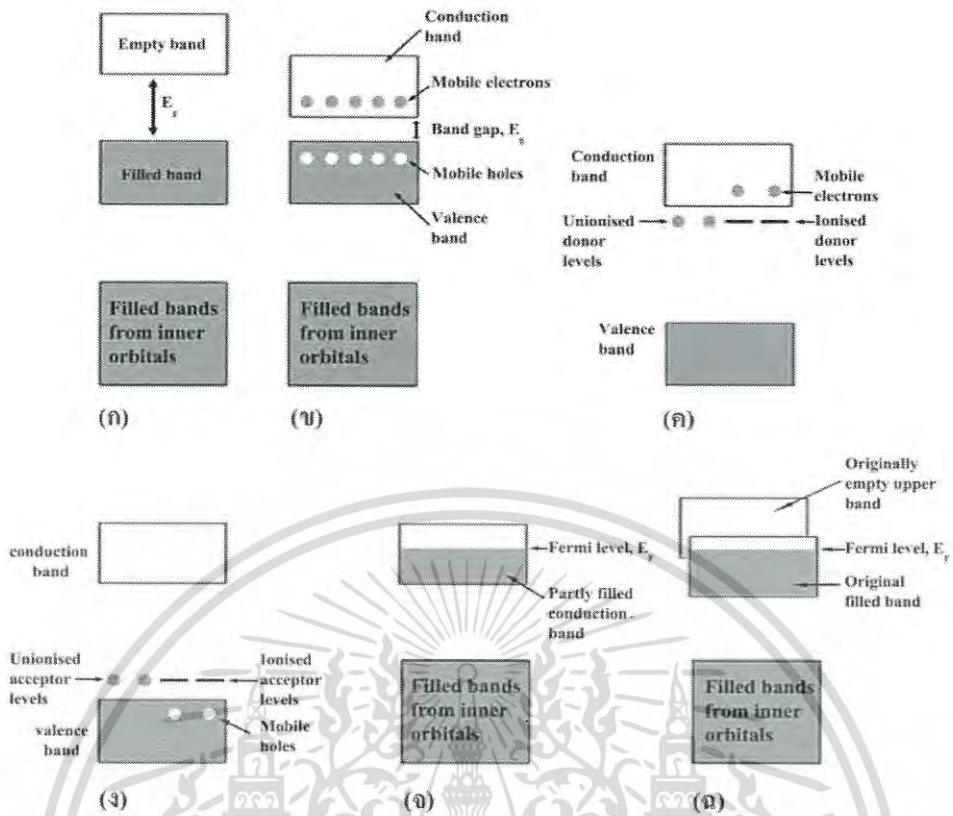
ปัจจัยทั้ง 3 มีความสำคัญต่อการศึกษาคross-section โครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วย SEM ซึ่งปัจจัยทั้ง 3 มีความสัมพันธ์กันโดย d_p แปรผันตรงกับ i_p แต่แปรผันแบบผกผันกับ α_p ตัวอย่างเช่น เมื่อ d_p มีขนาดลดลง i_p จะมีค่าน้อยลงแต่ α_p จะมีค่ามากขึ้น

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

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

2.4.1 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน (Kittel, 1971; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2550)

ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานจะประกอบไปด้วยส่วนใหญ่อัน 3 ส่วน คือ แถบนำ (conduction band) แถบวาเลนซ์ (valence band) และ แถบพลังงานต้องห้าม (forbidden band หรือ forbidden region หรือ forbidden gap) และ เรียกค่าความกว้างของช่องว่างระหว่างแถบนำกับแถบวาเลนซ์นั้นว่า ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (energy gap) โดยจากขนาดของช่องว่างแถบพลังงานนี้สามารถที่จะแบ่งประเภทของวัสดุว่าเป็นฉนวน (insulator) โลหะหรือตัวนำ (metal or conductor) และ สารกึ่งตัวนำ (semiconductor) ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานอย่างง่ายของ

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

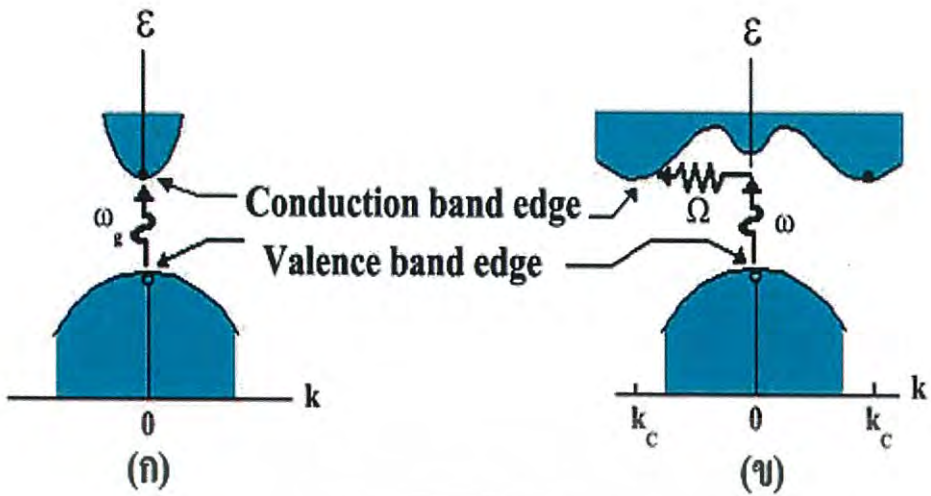
ในวัสดุที่เป็นฉนวนเมื่อดูจากแถบพลังงานจะเห็นว่าขนาดช่องว่างแถบพลังงานจากขอบล่างสุดแถบว่าง(แถบนำ)ถึงขอบบนสุดของแถบเต็ม(แถบวาเลนซ์)มีขนาดกว้างมากประมาณ ได้ว่า $E_g \gg kT$ หรือมากกว่า 3 อิเล็กตรอนโวลต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.9 (ก) การที่จะทำให้อิเล็กตรอนนี้ นำไฟฟ้าได้ ต้องใส่พลังงานที่สูงมากเพื่อที่จะทำให้อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปยังแถบนำได้ถ้าช่องว่างแถบพลังงานระหว่างแถบนำกับแถบวาเลนซ์มีขนาดเล็กพอที่อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ เมื่อได้รับพลังงานความร้อนสามารถเคลื่อนย้ายขึ้นไปยังแถบนำ และทำให้อิเล็กตรอนนี้ นำไฟฟ้าได้เราจะเรียกสารชนิดนี้ว่า สารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ (intrinsic semiconductors) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 (ข) จากรูปจะเห็นได้ว่า เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนย้ายขึ้นไปอยู่ในแถบนำแล้วจะเหลือที่ว่างไว้ในแถบวาเลนซ์โดยจะมีสภาพทางไฟฟ้าเป็นบวก และจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงข้ามกับอิเล็กตรอนเมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า เรา จะเรียกที่ว่างนี้ว่า โฮล และถ้าเราทำการเจืออะตอมของธาตุบางอย่าง ลงไปในสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ แล้ว อะตอมของสารเจือประพหุติตัวเป็นอะตอมผู้ให้ ก็จะทำให้เกิดระดับพลังงานผู้ให้ โดยให้อิเล็กตรอนกับแถบนำ เราจะเรียกรูปนี้ว่าสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductors) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 (ค) และถ้าอะตอมประพหุติตัวเป็นอะตอมผู้รับก็จะทำให้เกิดระดับพลังงานผู้รับ โดยทำการรับอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์เราจะเรียกรูปนี้ว่าสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type semiconductors) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 (ง) สำหรับแถบพลังงานของวัสดุที่เป็นโลหะหรือตัวนำ

เอกส semiconductors) วน ดังแสดงในรูปที่ 2.9 (ง) สำหรับแถบพลังงานของวัสดุที่เป็นโลหะหรือตัวนำ

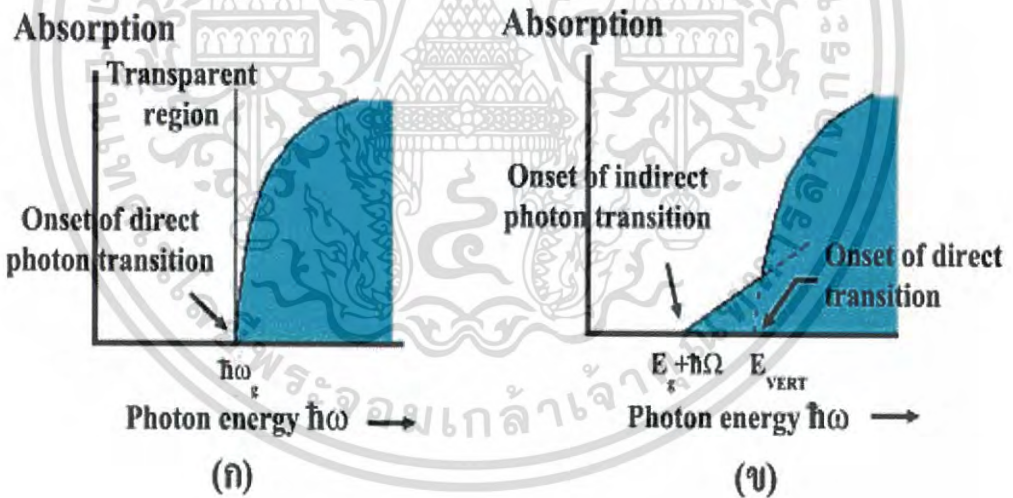
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะพบว่าอิเล็กตรอนเข้าไปอยู่ในแถบนำแล้วบางส่วนรูปที่ 2.9 (จ) และเรบอกได้ว่าแถบวาเลนซ์กับแถบนำมีการซ้อนเหลื่อมกันอยู่ ทำให้สารสามารถนำไฟฟ้าได้และในรูปที่ 2.9 (ฉ) ถ้าขอบล่างของแถบว่างที่ $(n+1)$ ซ้อนเหลื่อมกับขอบสูงสุดของแถบที่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่ที่ n และระดับพลังงานเฟอร์มิอยู่ระหว่างแถบทั้งสอง อิเล็กตรอนก็จะสามารถไหลจากแถบเต็มไปยังด้านล่างของแถบว่างได้ เราจะเรียกสารที่มีโครงสร้างแถบพลังงานแบบนี้ว่าเป็นสารกึ่งโลหะ ลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง คือ อิเล็กตรอนได้รับพลังงานโฟตอนที่มีค่าเท่ากับขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ($E = h\nu$) อิเล็กตรอนจะดูดกลืนพลังงานโฟตอนนั้นและอยู่ในสถานะถูกกระตุ้นจึงย้ายสถานะ

พลังงานทรานซิชันจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำกลายเป็นอิเล็กตรอนและโฮลอิสระโดยไม่มีการสูญเสียพลังงานให้แก่โครงสร้างผลึก คือไม่มีการสร้างหรือทำลายโฟนอน ดังแสดงในรูปที่ 2.10 (ก) และเมื่อเขียนกราฟระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนจะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 2.11 (ก) และลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงคือโครงสร้างแถบพลังงานที่มีจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไม่อยู่ที่ตำแหน่งเวกเตอร์คลื่นค่าเดียวกันหรืออยู่ที่ตำแหน่งโมเมนตัมของคลื่นไม่เท่ากัน ดังนั้นอิเล็กตรอนจะต้องได้รับพลังงานโฟนอนที่มีค่ามากกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ในกรณีนี้มีกระบวนการสร้างโฟนอนเกิดขึ้น ($E_g + h\Omega = h\nu$) เมื่อ Ω คือค่าความถี่เชิงมุมของพลังงานโฟนอน ซึ่งมีค่าน้อยกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงานหรือในกรณีที่มีการทำลายล้างโฟนอน ($E_g + h\Omega = h\nu$) นั่นคือเมื่ออิเล็กตรอนที่อยู่ในสถานะถูกกระตุ้นการย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำจะมีการปล่อย โฟนอน (emitted phonon) ที่มีความถี่เชิงมุม Ω มีเวกเตอร์คลื่น $K \cong k_c$ ออกมา จึงเกิดการสร้างโฟนอน ($E_g + h\Omega = h\nu$) และเกิดการสร้างอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ (E_{VERT}) ขึ้นมาในกระบวนการนี้ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 (ข) และเมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนจะได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 (ข)



รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานและการย้ายสถานะของพลังงานอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ($T = 0$ เคลวิน)
 ก. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง
 ข. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง

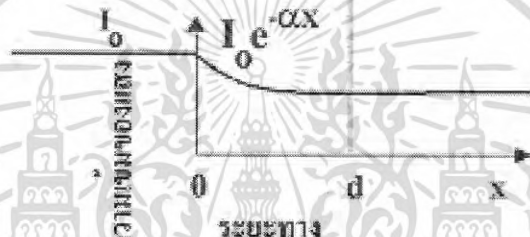


รูปที่ 2.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ($T = 0$ เคลวิน)
 ก. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง
 ข. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงในกรณีที่เกิดกระบวนการสร้างโฟนอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

พิจารณาการศึกษาวีวัตค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงเมื่อแสงเดินทางไปกระทบฟิล์มบาง แสงบางส่วนจะสะท้อนกลับที่ผิวของฟิล์มบาง บางส่วนของแสงจะเดินทางเข้าไปในแผ่นฟิล์มบางและถูกดูดกลืน ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.13 แสดงแผนภาพเมื่อแสงตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มบาง

สัมประสิทธิ์การสะท้อนของแสงมีค่าเป็น

$$R = \frac{I_r}{I_0} \quad (2.3)$$

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

เพราะฉะนั้น ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางมีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_i = I_0 - I_r = I_0 - RI_0 = (1-R) I_0 \quad (2.4)$$

เมื่อแสงนี้เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางจะถูกดูดกลืนทำให้ความเข้มแสงภายในแผ่นฟิล์มบางลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลตามระยะทาง ดังนั้นความเข้มแสงที่ส่งผ่านฟิล์มบางมีค่าเป็น

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

ถ้าไม่มีการสะท้อนแสงที่ผิวด้านหลัง สัมประสิทธิ์การส่งผ่านของแสงจะมีค่าเท่ากับ

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

2.4.3 การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ (งามนิตย, 2543; ฐิตินัย, 2550; Kittel, 1971)

เมื่อแสงตกกระทบบสารกึ่งตัวนำ ด้วยความเข้ม I_0 แสงบางส่วนจะส่งผ่านออกไปบางส่วน ถูกดูดกลืนและส่วนที่เหลือจะสะท้อนกลับมา ดังแสดงในรูปที่ 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 สัมประสิทธิ์การสูญเสี (extinction coefficient)
 โดยทั้ง n และ K เป็นฟังก์ชันของ λ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

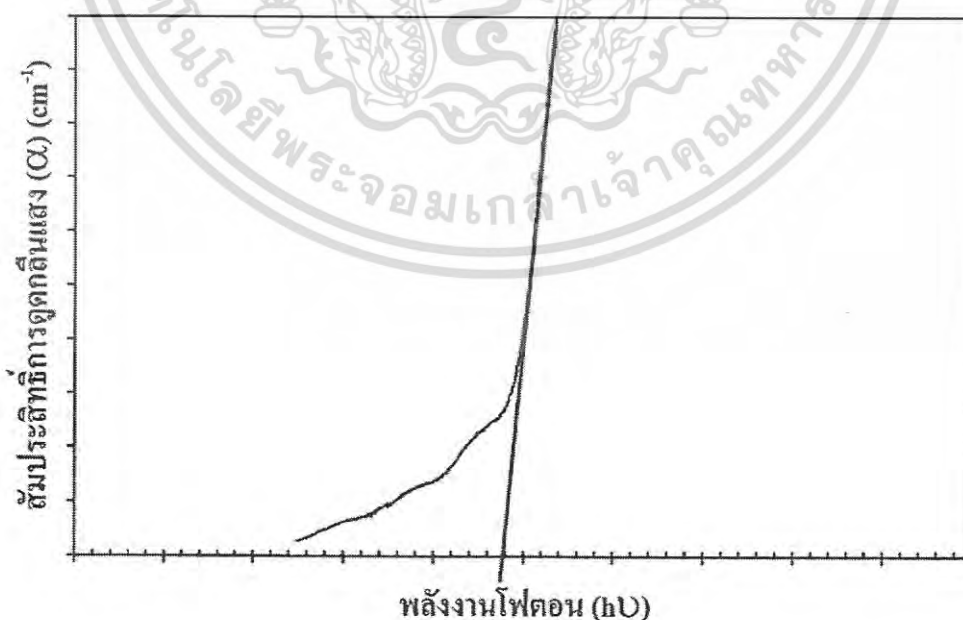
2.4.4 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (งามนิตย์, 2543; จูตินัย, 2550; Kittel, 1971)

การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำเกิดจากการที่อิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากแสงที่มีพลังงานโฟตอนเท่ากับหรือมากกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานจากนั้นจึงย้ายสถานะพลังงานจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปสู่แถบนำสเปกตรัมการดูดกลืนแสงบริเวณที่พลังงานโฟตอนมีค่าน้อยจะมีลักษณะเป็นขอบแสดงถึงการลดลงของการดูดกลืนแสงอย่างฉับพลันขอบลักษณะนี้เรียกว่า ขอบการดูดกลืนแสง (absorption edge) หรือขอบการดูดกลืนหลัก (fundamental edge) พลังงานโฟตอนที่ขอบการดูดกลืนแสงมีค่าเท่ากับผลต่างของค่าพลังงานที่วัดจากจุดต่ำสุดของแถบนำกับจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์จุดที่เส้นตรงตัดกับแกนในแนวนอน จะให้ค่าช่องว่างพลังงาน (E_g) วิธีการนี้เป็นการกำหนดค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่นิยมมากที่สุด การหาค่าของช่องว่างพลังงาน สามารถพิจารณาได้จากสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (α) ของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (T) จากรูปที่ 2.13 แสดงภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบจากด้านซ้ายของฟิล์มบาง (I_0) ความเข้มแสงภายในฟิล์มบางจะลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลและมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงโดยทั่วไปการสะท้อน (R) มีค่าน้อยมากและมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับความยาวคลื่นแสงที่ตกกระทบดังนั้น

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

จะได้ว่า

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



รูปที่ 2.14 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง

ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง กับ พลังงานโฟตอน
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้เพื่อใช้ประโยชน์ในการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำออกเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่กล่าวมาเป็นการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงจากสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงโดยไม่คิดถึงการสะท้อนของแสง สำหรับกรณีการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเนื่องจากการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอน ในกรณีที่อิเล็กตรอนย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำที่เวกเตอร์คลื่นค่าเดียวกัน เรียกการย้ายสถานะพลังงานแบบนี้ว่า การย้ายสถานะพลังงานแบบตรง และการย้ายสถานะพลังงานแบบตรงนี้ยังแบ่งได้อีกสองชนิด คือการย้ายสถานะพลังงานชนิดยินยอม และชนิดต้องห้ามโดยทั้งสองชนิดนี้ขึ้นกับค่าสมาชิกเมทริกซ์เชิงแสง (optical matrix element) ในการประมาณครั้งที่หนึ่งว่าเป็นศูนย์หรือไม่ คือ ถ้าเป็นศูนย์จะเป็นการย้ายสถานะพลังงานชนิดต้องห้าม และถ้าไม่เป็นศูนย์จะเป็นการย้ายสถานะพลังงานชนิดยินยอม เมื่อพิจารณาการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนในบริเวณตำแหน่งจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับค่าช่องว่างพลังงานซึ่งมีลักษณะเป็นพาราโบลา ช่องว่างแถบพลังงานของแผ่นฟิล์มบางประมาณได้โดยการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ซึ่งจะถูกลดทอนเมื่อแสงที่ตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบางมีค่าพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าของพลังงานต้องห้ามที่ขอบการดูดกลืนค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนจะมีค่าเป็น

สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานชนิดยินยอมแบบตรง

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

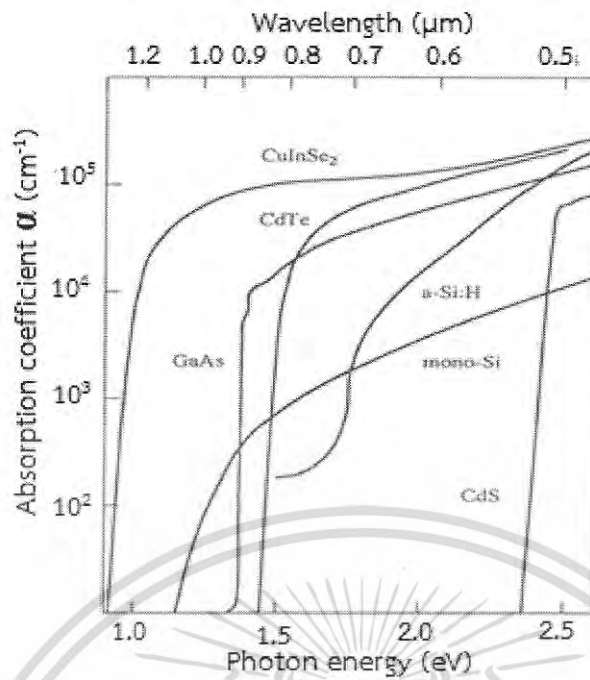
สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานชนิดยินยอมแบบเฉียง

$$(\alpha hv) = B(hv - E_g)^2 \quad (2.13)$$

และสำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานชนิดต้องห้าม

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

เมื่อ α คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง
 hv คือ พลังงานโฟตอน
 A, B และ C คือ ค่าคงที่



รูปที่ 2.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง กับ ค่าพลังงาน โฟตอนหรือค่าความยาวคลื่นของพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำ

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

อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีเป็นเทคนิคที่รวดเร็วและมีประสิทธิภาพในการหาหมู่ฟังก์ชันใน โมเลกุลของสารประกอบอินทรีย์ สเปกตรัมของรังสีอินฟราเรดที่มีประโยชน์ต่อนักเคมีอินทรีย์คือใน ย่านเลขคลื่น (k) 4000-650 ต่อเซนติเมตร ถ้าคิดเป็นความยาวคลื่น (λ) จะอยู่ในช่วง 2.5-15 ไมโครเมตร สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความยาวคลื่น และ เลขคลื่น คือ

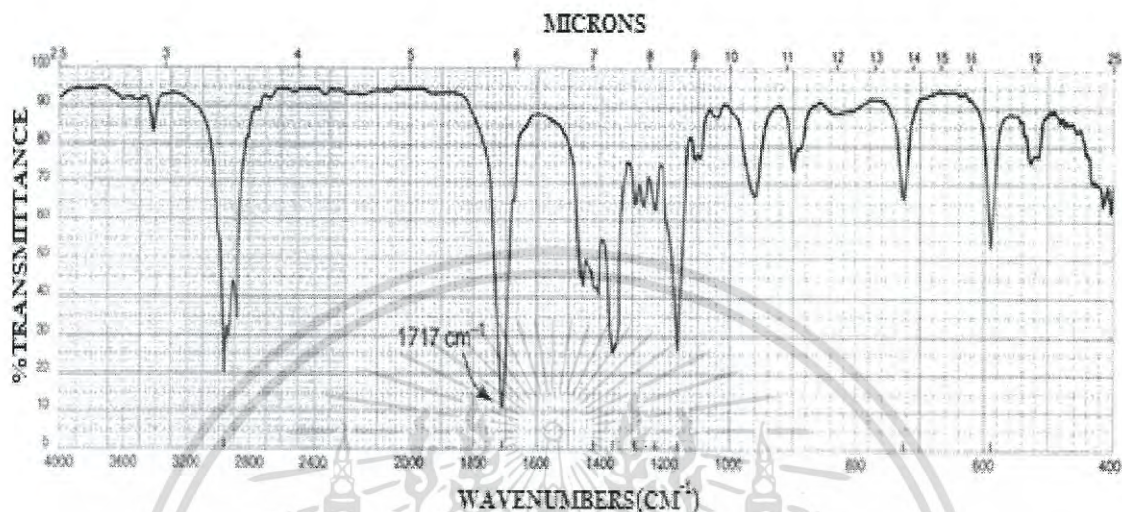
$$\text{ความยาว คลื่น } (\mu\text{m}) = \frac{10,000}{\text{เลขคลื่น } (\text{cm}^{-1})} \quad (2.16)$$

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

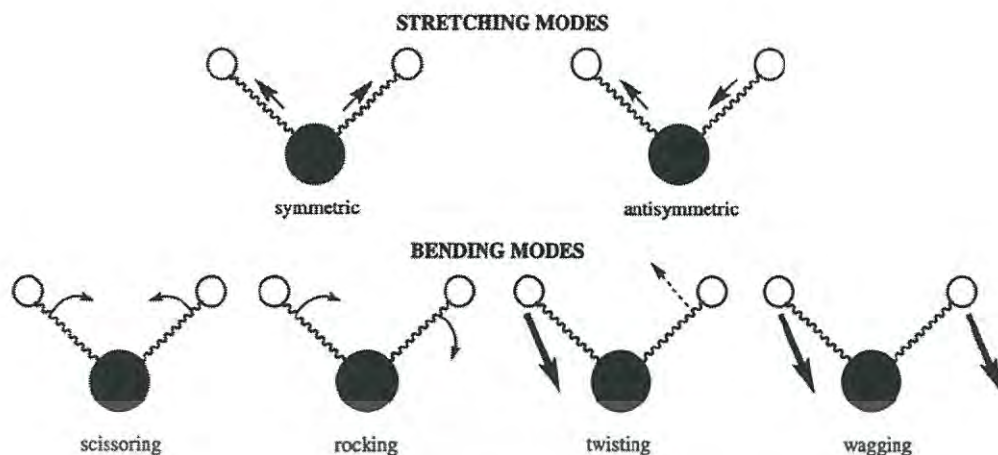
- เมื่อ T คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง
 I คือ ความเข้มของรังสีที่ผ่านสารตัวอย่าง
 I_0 คือ ความเข้มของรังสีที่ตกกระทบสารตัวอย่าง



รูปที่ 2.16 แสดงสเปกตรัมอินฟราเรด สเปกตรัมของ 2-pentanone

การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดตรงกับพลังงานในช่วง 2-10 กิโลแคลอรีต่อโมล พลังงานของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านนี้ก่อให้เกิดการสั่นแบบยืด (stretching) และแบบงอ (bending) ของพันธะในโมเลกุลของสาร การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดเป็นแบบไม่ต่อเนื่อง (quantized) กล่าวคือสารจะดูดกลืนรังสีอินฟราเรดนั้น ความถี่ของรังสีที่ถูกดูดกลืนจะต้องตรงกับความถี่ของการสั่นของพันธะนั้น นั่น นอกจากนี้ การสั่นของพันธะทุกประเภทในโมเลกุลมิได้ให้พีคใน สเปกตรัมอินฟราเรดเสมอไป การสั่นของพันธะที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้า (electrical dipole moment) เท่านั้นที่จะมีพีคปรากฏใน สเปกตรัมอินฟราเรดตัวอย่างเช่น การสั่นของพันธะระหว่างไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้าของสารประกอบ $C=C$ ใน $RCH=CHR$ ไม่มีพีคใน สเปกตรัมอินฟราเรด ส่วนการสั่นของพันธะ $C=O$ ในสารประกอบคาร์บอนิลเกิดพีคที่มีความเข้มสูงใน สเปกตรัมอินฟราเรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 แสดงรูปแบบการสั่นของพันธะเคมีระหว่างไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้าของสารอินทรีย์

โดยทั่วไป แถบพลังงานที่เกิดใน สเปกตรัมอินฟราเรด เกิดจากการสั่นแบบพื้นฐาน ได้แก่ การยืดและการงอ ยังมีแถบพลังงานที่มีความเข้มต่ำเกิดที่ความถี่ 2 เท่า 3 เท่า หรือ 4 เท่าของความถี่แบบพื้นฐาน แถบพลังงานเหล่านี้ เรียกว่า โอเวอร์โทน ซึ่งเกิดเมื่อความถี่พื้นฐานมีความเข้มสูง บางครั้ง อาจมีแถบพลังงานเกิดที่ความถี่ที่เป็นผลบวกหรือผลต่างของความถี่แบบพื้นฐาน แถบเหล่านี้ เรียกว่า แถบพลังงานรวม (combination bands) ถ้าโอเวอร์โทน หรือ แถบพลังงานรวม เกิดใกล้กับ แถบพลังงานพื้นฐาน ผลก็คือ ทำให้ความเข้มของแถบพลังงานพื้นฐานลดลง แต่ไปเพิ่มความเข้มของ โอเวอร์โทน หรือแถบพลังงานรวม ปรากฏการณ์นี้ คือเกิด เฟอร์มิ เรโซแนนซ์ (Fermi resonance) และพีกทั้งคู่บางครั้งเรียกว่า เฟอร์มิดับเบิ้ล็ต (Fermi doublet) รูปที่ 2.17 แสดงการสั่นแบบพื้นฐานของหมู่ CH_2

ตารางที่ 2.4 แสดงค่าเลขคลื่นต่างๆของพลังงานที่ได้จากการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ

เลขคลื่น (ต่อเซนติเมตร)	หมู่ฟังก์ชัน	รายละเอียด
3600-3400	O-H stretching	3650-3590 cm^{-1} (sh, w) แอลกอฮอล์อิสระ 3400-3200 cm^{-1} (b) แอลกอฮอล์ที่เกิดพันธะไฮโดรเจน 3400-2400 cm^{-1} (vs, vb) กรดคาร์บอกซิลิก
3500-3200	N-H stretching	3200-3400 cm^{-1} (m) 1° เอมีนและเอมีด มี 2 แถบ 3200-3400 cm^{-1} (w) 2° เอมีนและเอมีด มี 1 แถบ
3300 (vs)	=C-H stretching	3300 cm^{-1} อัลไคน์ที่มี =C-H ที่ปลายโซ่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 (ต่อ) แสดงค่าเลขคลื่นต่างๆของพลังงานที่ได้จากการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ

เลขคลื่น (ต่อเซนติเมตร)	หมู่ฟังก์ชัน	รายละเอียด
3100-3000 (w, sh)	=C-H stretching	อัลคีนและเบนซีน (อาจมีหลายพีค)
3000-2800	C-H stretching	หมู่ CH ₃ , CH ₂ และ CH ของอัลเคน
2850-2780	C-H stretching	แอลดีไฮด์
2250-2225	C=N stretching	ไนทริล (m)
2260-2100	C=C stretching	อัลคีน (w) โมเลกุลที่สมมาตรจะไม่มีแถบนี้ปรากฏ
1820-1760 (s)	C=O stretching	แอนไฮไดรด์ (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 ₂ bending	สารประกอบไนโตร
1465-1450	C-H bending	หมู่ CH ₂
1450-1375	C-H bending	หมู่ CH ₃
1400-1000	C-F stretching	สารประกอบฟลูออไรด์
1300-1150	CH ₂ -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 ₂)

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 (ต่อ) แสดงค่าเลขคลื่นต่างๆของพลังงานที่ได้จากการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ

เลขคลื่น (ต่อเซนติเมตร)	หมู่ฟังก์ชัน	รายละเอียด
970	C-H (OOP bending)	อัลคีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่, trans)
890	C-H (OOP bending)	อัลคีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่, R ₂ C=CH ₂)
815	C-H (OOP bending)	อัลคีน (หมู่แทนที่ 3 หมู่, R ₂ 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 หมู่ แบบ ออโท)
780 และ 700	C-H (OOP bending)	เบนซีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่ แบบ เมตา)
825-800	C-H (OOP bending)	เบนซีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่ แบบ พารา)
800-600	C-Cl	สารประกอบคลอไรด์
600-500	C-Br	สารประกอบโบรมൈด์
~ 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; รุติณัย, 2549; รุติณัย, 2550; งามนิตย์, 2551; รุติณัย, 2551)

จากทฤษฎีแถบพลังงานนั้นสารกึ่งตัวนำสามารถมีขนาดช่องว่างแถบพลังงานได้ใหญ่เกินกว่า 2 อิเล็กตรอนโวลต์ พลังงานความร้อนที่อุณหภูมิห้องไม่เพียงพอที่จะกระตุ้นให้เกิดพาหะอิสระได้ ดังนั้นพาหะอิสระของสารกึ่งตัวนำประเภทนี้จึงน้อยส่วนใหญ่มาจากระดับพลังงานผู้รับหรือศูนย์กลางการรวมตัว (recombination center) ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิใดๆของสารกึ่งตัวนำจึงขึ้นกับความหนาแน่นของพาหะอิสระเหล่านี้

2.5.1 สมบัติการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ

สมบัติการนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำขึ้นอยู่กับจำนวนพาหะอิสระเป็นสำคัญ กล่าวคือ ถ้าจำนวนอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์เพิ่มมากขึ้น สารกึ่งตัวนำนั้นจะนำไฟฟ้าได้ดียิ่งขึ้นปริมาณความหนาแน่นของพาหะอิสระในสารกึ่งตัวนำถูกกำหนดด้วยขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือ และอุณหภูมิเป็นสำคัญ ที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน การกระจาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของพาหะอิสระตามระดับพลังงานของผลึกเป็นตามฟังก์ชันการกระจายแบบเฟอร์มี-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) = 1.38×10^{-23} จูลต่อเคลวิน
T	คือ	อุณหภูมิในหน่วยของเคลวิน

ในการพิจารณาความหนาแน่นพาหะอิสระในสภาวะสมดุลเชิงความร้อนสามารถแยกได้เป็น 2 กรณีคือกรณีสารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีนสิกซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน (intrinsic semiconductor) และกรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอกซ์ทรีนสิกเป็นสารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ (extrinsic semiconductor)

2.5.1.1 สารกึ่งตัวนำอินทรีนสิก

สารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีนสิกซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 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

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

เมื่อ m_e^* คือ มวลยังผลของอิเล็กตรอนในแถบนำ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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) ของผลึกมีค่าน้อยกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานของผลึกมากๆ จนกระทั่งมั่นใจได้ว่าสถานะพลังงานของแถบนำอยู่ในสถานะที่เป็นระดับพลังงานซ้อน (non-degeneracy) และ $n(E)dE$ มีค่าใกล้ศูนย์ที่ค่าระดับพลังงานสูงๆ สมการที่ (2.21) จึงสามารถขยายของเขต E 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

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

และทำนองเดียวกันเราจะได้ความหนาแน่นของโฮลในแถบวาเลนซ์ดังนี้

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

โดย

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

เมื่อ E_g คือ ค่าช่องว่างของแถบพลังงาน

m_h^* คือ มวลยังผลของโฮลในแถบวาเลนซ์

N_v คือ ความหนาแน่นของสถานะพลังงานในแถบวาเลนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนักศึกษาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในเทอมของเอกซ์โพเนนเชียล อุณหภูมิจึงมีบทบาทสำคัญกับสมบัติไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน

2.5.1.2 สารกึ่งตัวนำชนิดเอกซ์ทรินสิก

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

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

และความหนาแน่นของโฮลในแถบวาเลนซ์คือ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

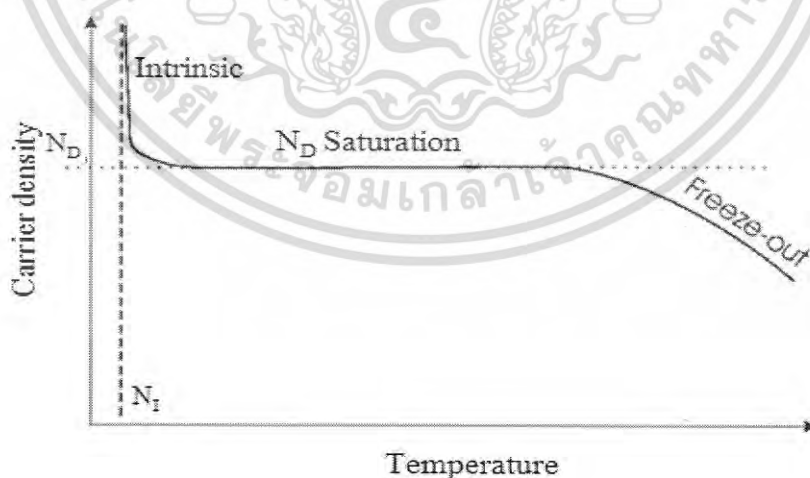
$$n + (N_a - n_a) = p + (N_d - n_d) \quad (2.33)$$

เมื่อ n, p คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ

N_d, N_a คือ ความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้และผู้รับ

n_d, n_a คือ ความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้และผู้รับที่ไม่ถูกไอออไนซ์

เราสามารถแยกพิจารณาลักษณะการแปรผันตามอุณหภูมิของพาหะได้เป็น 2 กรณีดังแสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นกับส่วนกลับของอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 ($|N_d - N_a| \ll n_i$) ช่วงนี้จะมีการเพิ่มขึ้นของพาหะอิสระตามการเพิ่มของอุณหภูมิอย่างรวดเร็วแบบเอกซ์โพเนนเชียล เรียกช่วงนี้ว่าเป็นบริเวณย่านอินทรินสิก (intrinsic region) และสมการที่ (2.33) และ (2.34) จะกลายเป็นสมการของบริเวณย่านอินทรินสิก

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 β 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) เทอมที่สองด้านขวามือ

ได้ด้วยอนุกรมทวินาม (binomial series) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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

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

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

จะเห็นว่าความหนาแน่นของพาหะอิสระจะลดลงตามการลดลงของอุณหภูมิในแบบเอกซ์โพเนนเชียล 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 : σ) 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 μ_n, μ_p คือ สภาพคล่องของอิเล็กตรอนและโฮล ตามลำดับ

n คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

p คือ ความหนาแน่นของโฮล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าส่วนกลับของสภาพนำไฟฟ้า เรียกว่า ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (resistivity: ρ) ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

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

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

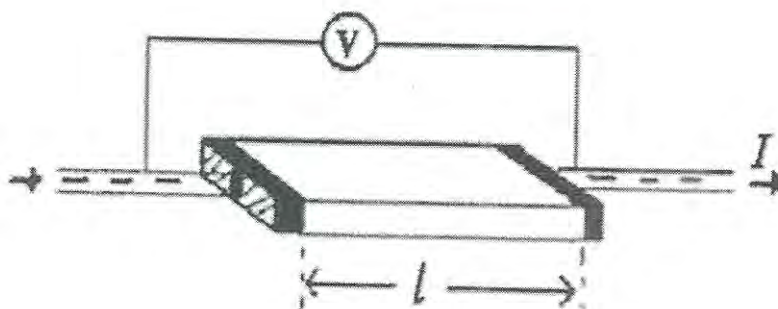
2.7 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิศย์, 2545; จูตินัย, 2549; จูตินัย, 2550; งามนิศย์, 2551; จูตินัย, 2551)

วิธีการวัดสภาพความต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำสามารถกระทำได้หลายวิธี ทั้งวิธีที่ใช้ส่วนของอุปกรณ์ต่อเข้าสัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่างและวิธีที่ไม่ต้องสัมผัสโดยตรงสำหรับวิธีที่จะกล่าวถึงในที่นี้เป็นวิธีที่ใช้การสัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่าง ซึ่งทำได้โดยการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในชิ้นสารตัวอย่าง แล้ววัดความต่างศักย์ระหว่างจุดบนชิ้นสารนั้น

2.7.1 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง (direct resistivity method)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 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 หากความต้านทานนี้ใกล้เคียงกับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ จะมีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง ซึ่งในทางปฏิบัติจะคำนึงถึงผิวสัมผัสโอห์มมิกมากกว่าความผิดพลาดของโวลต์มิเตอร์ เนื่องจากที่ผิวสัมผัสจะดีหรือไม่ (เป็นโอห์มมิกหรือไม่) นั้นตรวจสอบได้ยากมาก จึงแก้ไขด้วยการทำให้เกิดผิวสัมผัสบริเวณพื้นที่มากขึ้นเพื่อลดความต้านทานที่ผิวสัมผัสลง จากนั้นจึงวัดศักย์ไฟฟ้าด้วยโวลต์มิเตอร์ โดยเลือกโวลต์มิเตอร์ที่มีความต้านทานภายในสูงๆ เท่าที่จะหาได้เพื่อลดความผิดพลาด

2.7.2 การวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์

(ฐิตินัย, 2550; Runyan, 1975; Elangovan, 2003; Fahrenbruch, 1983; van der pauw, 1958)

วิธีการวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ดังแสดงในรูปที่ 2.20 และ 2.21 เป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับสำหรับการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของชิ้นสารตัวอย่างที่เป็นฟิล์มบางที่มีความหนาสม่ำเสมอและมีรูปร่างไม่แน่นอน โดยขั้วสัมผัสจะอยู่บริเวณขอบของชิ้นสารตัวอย่าง รอยต่อระหว่างขั้วสัมผัสที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะต้องไม่ขัดขวางการไหลของกระแส



รูปที่ 2.20 แสดงตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชิ้นสารตัวอย่างเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์

รูปที่ 2.21 แสดงการต่อขั้วเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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; Elandovan, 2003)

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถเขียนในเทอมของสภาพคล่องของพาหะได้และความหนาแน่นพาหะด้วยความสัมพันธ์

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากอิเล็กตรอน

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

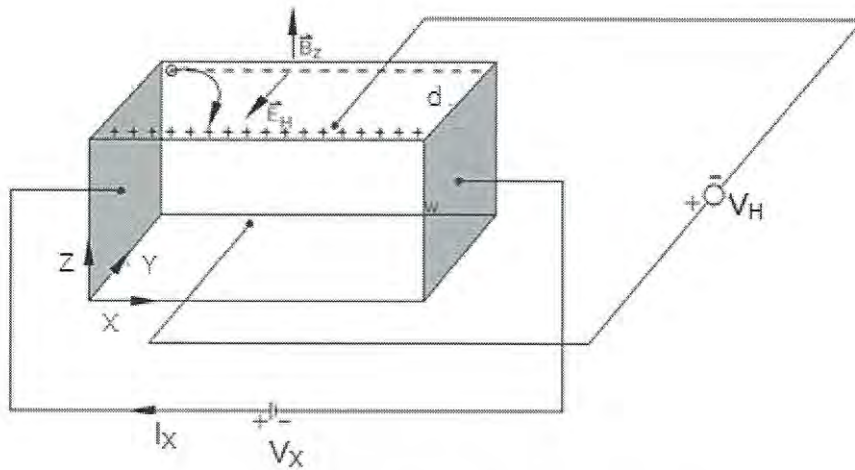
นั่นคือหากทราบสภาพต้านทานไฟฟ้า และสภาพคล่องของพาหะจะทำให้สามารถคำนวณค่าความหนาแน่นของพาหะข้างมากได้จากสมการที่ (2.61) และ (2.62) คือกรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.22 แสดงแผนภาพการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์บนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำชนิดพี

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

จาก
$$I = nqvA \quad (2.63)$$

ดังนั้น
$$I_x = qnv_x (wd) \quad (2.64)$$

จากกฎของโอห์ม
$$V = IR \quad (2.65)$$

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

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

ถ้าทราบความต่างศักย์ (V_x) ระหว่างปลายทั้งสองของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น สามารถหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าได้จากสมการที่ (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 $-y$ สะสมในบริเวณขอบด้านนอก ($y=0$) และเหนี่ยวนำให้เกิดอิเล็กตรอนขึ้นที่ขอบด้านใน (y) ทำให้เกิดไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนามไฟฟ้าฮอลล์ในทิศ $-y$ (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 $-z$ ดังเดิม เพราะฉะนั้นจะทำให้ได้ว่า

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

หากพิจารณาสมการที่ (2.70) จะเห็นว่าสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดขึ้นเป็นปฏิภาคกับความหนาแน่นกระแสและสนามแม่เหล็ก สามารถเขียนได้ในรูปของ

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

เมื่อ

$$J_x = \frac{I_x}{wd} \quad (2.72)$$

แล้ว

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

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

เราอาจทราบศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากสนามไฟฟ้าฮอลล์ โดยอินทิเกรตสนามไฟฟ้าฮอลล์ตลอดความกว้าง (w) ของแผ่นสารและเรียกความต่างศักย์นี้ว่า ความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) นั่นคือ

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

สัมประสิทธิ์ฮอลล์ที่ได้จากการวัด คือ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนตามนิยาม คือ

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

โดยทั่วไปพาหะอิสระที่เคลื่อนที่ในสารกึ่งตัวนำ มักประสบกับกลไกการกระเจิงหลายๆ ชนิด กลไกการกระเจิงของพาหะในสารกึ่งตัวนำจะเป็นกลไกที่ขึ้นอยู่กับพลังงานของพาหะ โดยที่ช่วงเวลาการปลดปล่อยการกระเจิง (τ) จะแสดงได้ดังนี้

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

เมื่อคิดผลรวมจากการกระเจิงที่ขึ้นกับพลังงานของพาหะ สัมประสิทธิ์ฮอลล์สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

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

กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดพี $R_H = \frac{r}{pq}$ (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 การกระเจิงเนื่องจากโครงผลึกหรือการกระเจิงเนื่องจากอะตอมของสารเจือปนที่ถูกไอออนไนซ์สัมประสิทธิ์ฮอลล์แปรค่าตามสนามแม่เหล็กและอุณหภูมิ ซึ่งจะมีค่าใกล้ 1 เมื่อขึ้นสารอยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กความเข้มสูงมาก ดังนั้นเราทราบค่าของ r จากการทดลองด้วยความสัมพันธ์

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

ในทางปฏิบัติสนามแม่เหล็กที่ใช้วัดโดยทั่วไปมีค่าอยู่ระหว่าง 5 – 10000 เกาส์ ซึ่งค่า r ในช่วงนี้มีการเปลี่ยนแปลงไม่มาก ดังนั้นอาจประมาณได้ว่าเป็นค่าคงที่

จากสมการที่ (2.76) และ (2.77) สามารถนิยามค่าสภาพคล่องฮอลล์ (μ_H) ได้เป็น

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

หรือจากสมการที่ (2.74) และ (2.79)

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

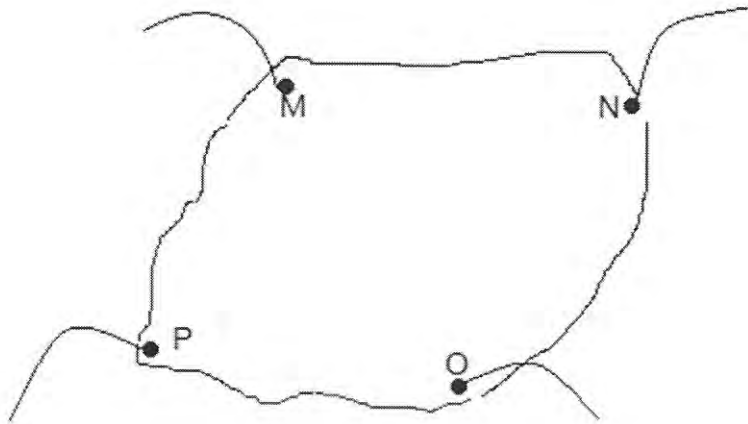
ค่าสภาพคล่องฮอลล์แตกต่างจากค่าสภาพคล่องที่ได้จากการนำไฟฟ้าด้วยอัตราส่วนของ r ซึ่งมีค่ามากกว่า 1 โดยทั่วไปเพื่อลดความซับซ้อนเมื่อคำนวณความหนาแน่นของพาหะจึงมักประมาณว่า r มีค่าเท่ากับ 1 ความหนาแน่นของพาหะที่คำนวณจากปรากฏการณ์ของฮอลล์ จึงอาจสูงกว่าความหนาแน่นของพาหะที่แท้จริงถึง 30 เปอร์เซ็นต์

2.8.1 การศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ (ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; วีรชัย, 2547; อุบลัมภ์, 2548; สุกฤษณ์, 2547; Marquardt, 2006; Dieter, 1998; Elangovan, 2003; Fahrenbruch, 1993; van der pauw, 1958; Tilley, 2004; Caballero, 2003)

เทคนิคนี้ได้รับการพัฒนาขึ้นมาจากพื้นฐานของวิชาคณิตศาสตร์ คือ คอนฟอร์มอลแมปปิง (conformal mapping) โดยนักวิทยาศาสตร์ชื่อ แวนเดอร์เพาว์ (van der pauw) สารสำคัญของเทคนิคนี้อยู่ที่การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของแผ่นสารตัวอย่างรูปทรงใดๆ ซึ่งสามารถทำได้อย่างแม่นยำโดยไม่จำเป็นต้องทราบ ลักษณะของรูปแบบการกระจายของเส้นทางเดินกระแสที่ไหลภายในแผ่นสาร ถ้าสารตัวอย่างประพฤติตามเงื่อนไขต่อไปนี้

1. ขั้วสัมผัสวางอยู่ที่ขอบของชิ้นสาร
2. ขนาดของขั้วสัมผัสต้องมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับเส้นรอบรูปของชิ้นสาร
3. สารตัวอย่างต้องมีความหนาแน่นเท่ากันตลอด
4. เนื้อสารตัวอย่างต้องไม่มีรูหรือรอยแยกใดๆ

พิจารณาชิ้นสารรูปทรงเป็นแผ่นบางใดๆ และมีขั้วสัมผัสเล็กๆ M, N, O และ P กระจายอยู่ที่บริเวณขอบของแผ่นซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขข้างต้น



รูปที่ 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

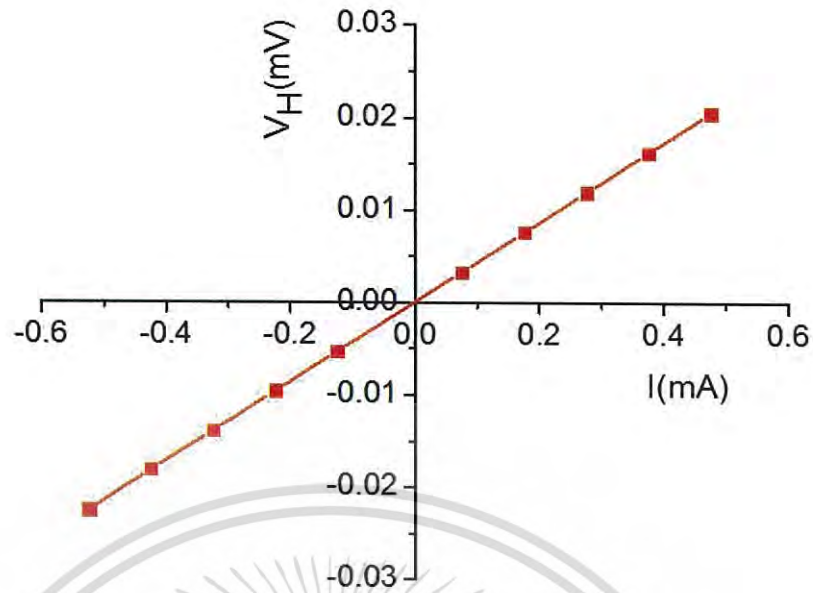
$$R_H = \left(\frac{V_H}{I} \right) \left(\frac{d}{B} \right) \quad (2.85)$$

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 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I)

เมื่อทำการเขียนกราฟระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) กับ ค่ากระแสไฟฟ้า (I) ที่ได้จากการทดลองเราจะได้ลักษณะกราฟดังรูปที่ 2.24 โดยที่ความชันของกราฟที่ได้จะมีค่าเป็น $\frac{V_H}{I}$ สภาวะคล่องพาหะของฮอลล์สามารถคำนวณได้จาก

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

และสามารถคำนวณหาระยะทางเฉลี่ยที่ปลอดภัยกระเจิงได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

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

เมื่อ h คือ ค่าคงตัวของพลังค์ 6.625×10^{-34} จูล-วินาที

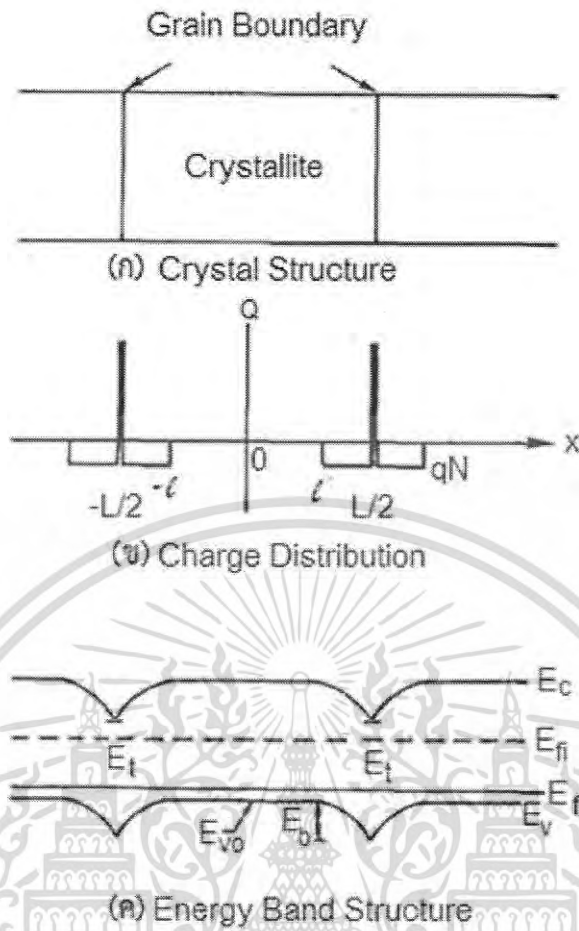
ในทางปฏิบัติการเตรียมสารให้มีรูปทรงตามเงื่อนไขทั้ง 4 ข้อดังกล่าวอาจเป็นไปได้ยาก โดยเฉพาะขนาดและตำแหน่งของขั้วสัมผัสซึ่งมักไม่เป็นจุดและไม่อยู่ที่ขอบของชิ้นสารตามทฤษฎีจึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของผลการวัด

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 โดยใช้แบบจำลองกับดักพาหะที่ขอบของเกรนรวมกับกลไกเทอร์มิโอนิกอิมิสชัน โดยตั้งสมมุติฐานดังนี้คือ

1. ผลึกพหุพันธ์ประกอบไปด้วยเกรนขนาดเล็กที่มีคุณสมบัติเหมือนกัน มีรูปร่างเป็นลูกบาศก์ แต่ลดด้านยาว 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 และโดยการประมาณแบบรอยต่อชั้นบันได (abrupt junction approximation) แถบพลังงานของผลึกพหุพันธ์ตรงบริเวณรอยต่อสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 แสดงแบบจำลองของฟิล์มบางตรงบริเวณขอบรอยต่อของเกรนดังนี้ คือ

ก. ลักษณะของเกรนในผลึกพหุพันธ์

ข. การกระจายของประจุในเนื้อเกรนและที่ขอบของเกรน

ค. โครงสร้างแถบพลังงานของผลึกพหุพันธ์ในเนื้อเกรนและที่ขอบของเกรน

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

2.9.1 กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในฟิล์มบางในช่วงอุณหภูมิสูง

จากแบบจำลองที่พัฒนาโดยเบ็คคารินี (Baccarini et al., 1978) เมื่อ $N_a < N_a^*$ ในเนื้อเกรนจะเป็นบริเวณพร่องพาหะทั้งหมด ซึ่งจะเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิสูงระดับเฟอร์มิ (E_F) จะอยู่ระดับเดียวกับ E_t สภาพนำไฟฟ้าจะแสดงได้ด้วยสมการ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น 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 รูปที่ 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_v สามารถหาได้จากสมการที่ (2.88) เมื่อทราบขนาดของเกรน (L) แล้ว ซึ่งขนาดของเกรนสามารถคำนวณได้จากสมการของเซอร์เรอร์ดังสมการ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่ขอบของเกรนจะแสดงได้ดังนี้ คือ

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

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 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น 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 ϵ_s คือ เพอร์มิตติวิตี (permittivity) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ

รูปที่ 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) จะเห็นได้ว่าค่า E_b จะไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ เนื่องจากเงื่อนไขที่ระดับเฟอร์มิ (E_F) อยู่สูงกว่าระดับกับดักพาหะ (E_t) ดังนั้นประจุไฟฟ้าจะเข้าไปบรรจุอยู่ในกับดักพาหะทั้งหมดจนเต็ม ส่งผลให้กับดักพาหะไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ สำหรับความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ (N_a) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.105) รวมทั้งความยาวเดอบาย (L_D) จะคำนวณได้จากความสัมพันธ์

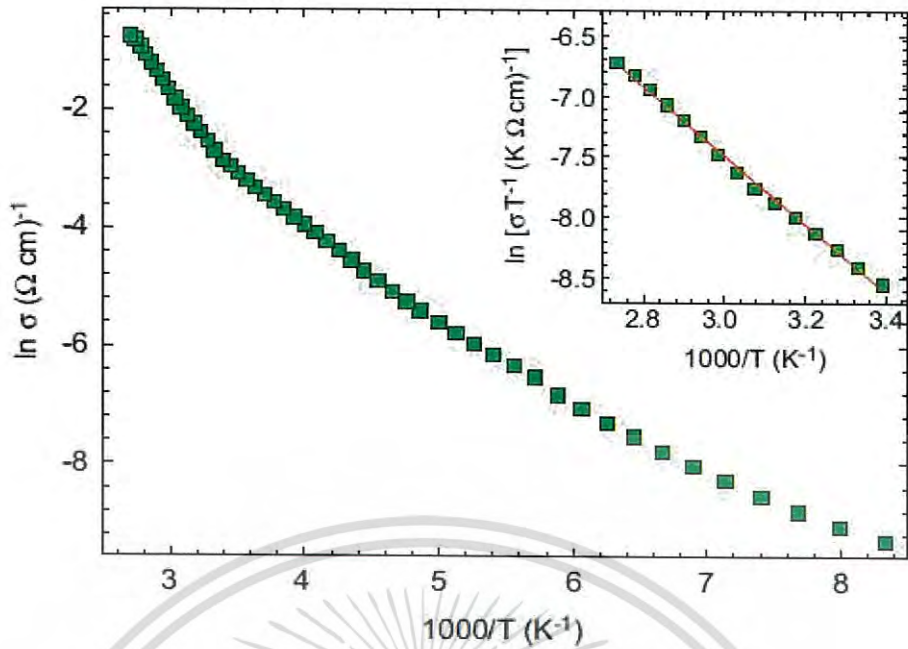
$$L_D = \left[\frac{kT\epsilon_s}{e^2 N_a} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.107)$$

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

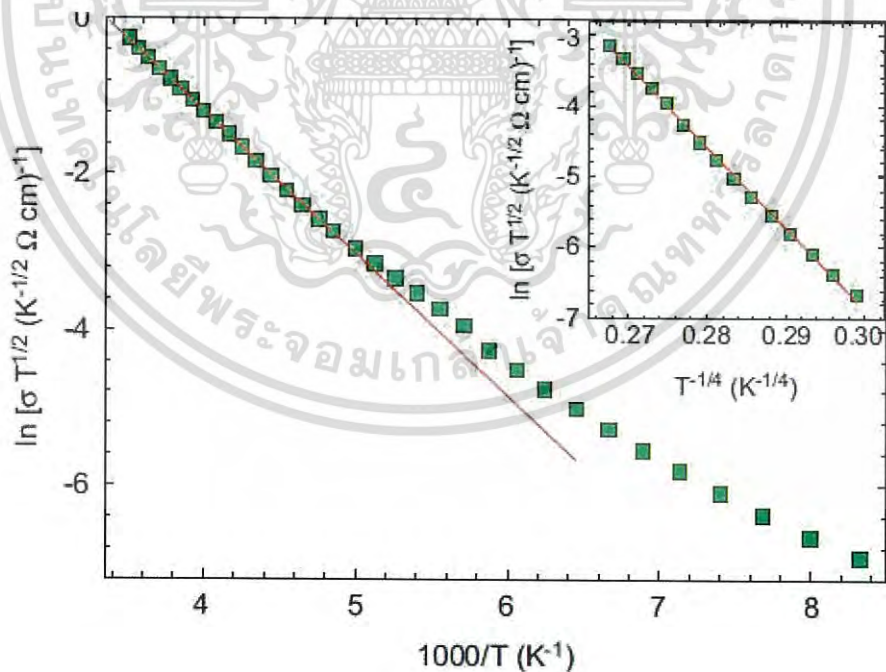
$$\sigma = eN_c^2 L v_c (2\epsilon_s N_a^{-1} E_b)^{\frac{1}{2}} (kT N_t)^{-1} \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (2.108)$$

ซึ่ง

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



รูปที่ 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)



รูปที่ 2.27 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln \sigma T^{1/2}$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ

CuO สำหรับในรูปแทรกกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln \sigma T^{1/2}$ กับ $T^{-1/4}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9.3 การนำไฟฟ้าของพาหะแบบกระโดดในระยะไม่คงที่ (Variable Range Hopping Conduction: VRH) (งามนิตย, 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 σ_0 คือ แฟกเตอร์หน้าพจน์เอกซ์โพเนนเชียล (pre-exponential factor)

k คือ ค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.38×10^{-23} จูลต่อเคลวิน

T คือ อุณหภูมิเคลวิน

เมื่อนำเอาสมการที่ (2.111) ไปเขียนกราฟจะได้กราฟเชิงเส้นโดยที่ค่าความชันของกราฟคือ

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ ν คือ	ความถี่ของโฟนอนที่อุณหภูมิเดอบาย (debye temperature) จะมีค่าประมาณ 1×10^{13} เฮิร์ตซ์
$N(E_F)$ คือ	ความหนาแน่นของสถานะถูกจำกัดเฉพาะที่ระดับเฟอร์มี (density of localized states at Fermi level)
α คือ	ค่าคงที่ของการสลายตัวของฟังก์ชันคลื่นของสถานะถูกจำกัดเฉพาะที่ระดับเฟอร์มี (decay constant of the wave function at the localized state near Fermi level)
e คือ	ประจุอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ 1.6×10^{-19} คูลอมบ์
T_0 คือ	องศาของความไม่เป็นระเบียบ (degree of disorder)

จากสมการที่ (2.113) ถ้ายกกำลังสองทางด้านซ้ายและขวามือของเครื่องหมายเท่ากับจะได้

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

เอาสมการที่ (2.114) คูณกับสมการที่ (2.115) จะได้

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

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

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

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

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

ถ้าแทนสมการที่ (2.118) ลงในสมการที่ (2.117) จะได้ว่า

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าระยะทางเฉลี่ยของการกระโดด (average hopping distance: R) มีหน่วยเป็น เซนติเมตรและค่าพลังงานเฉลี่ยของการกระโดด (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

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

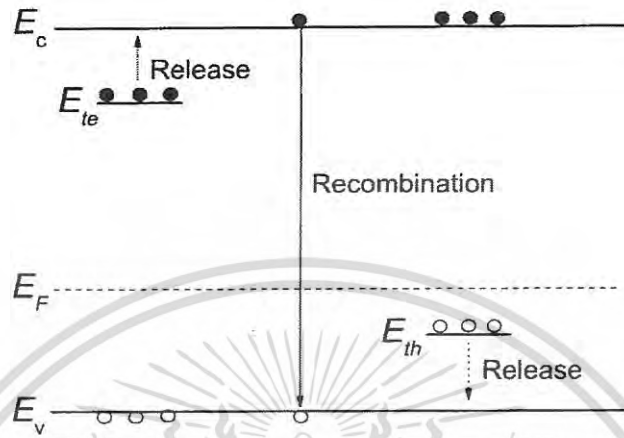
โดยที่ N_d คือ ค่าความหนาแน่นของอะตอมสารเจือชนิดผู้ให้ ซึ่งเป็นพาหะข้างน้อยของสารกึ่งตัวนำชนิดพี โดยอัตราส่วน $\frac{N_d}{N_a} = k$ และ $k < 1$ เสมอ

2.10 สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงที่อ้วน (งามนิตย, 2556; ฐิตินัย, 2556)

ในสารกึ่งตัวนำมักมีข้อบกพร่องผลึกเสมอ ข้อบกพร่องผลึกมีหลายชนิด ข้อบกพร่องผลึกบางชนิดมีคุณสมบัติในการจับอิเล็กตรอนและ/หรือโฮลอิสระได้ จึงมักเรียกว่ากับดักพาหะ กับดักพาหะชนิดต่างๆ จะปรากฏเป็นระดับพลังงานในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ โดยในรูปที่ 2.28 มีทั้งระดับพลังงานของกับดักพาหะชนิดจับโฮล (E_H) และกับดักพาหะชนิดจับอิเล็กตรอน (E_{Te}) (Jiang, 2012) คำว่าการปลดปล่อย (release) เป็นกลไกที่กับดักพาหะปล่อยอิเล็กตรอนให้กับแถบนำ และเป็นกับดักพาหะชนิดปล่อยโฮลให้กับแถบวาเลนซ์ ส่วนคำว่ากระบวนการรวมตัว (recombination) เป็นกลไกที่อิเล็กตรอนในแถบนำทรานซิชันลงมารวมตัวกับโฮลในแถบวาเลนซ์โดยไม่ผ่านกับดักพาหะ ขณะที่สารกึ่งตัวนำยังไม่ได้มีการฉายแสงกับดักพาหะจะมีการจับอิเล็กตรอนหรือจับโฮลอยู่ก่อนแล้ว ส่วนอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำและโฮลในแถบวาเลนซ์มีปริมาณน้อย สารกึ่งตัวนำจึงนำกระแสไฟฟ้าได้ไม่ดี กระแสมืด (dark current) จึงมีค่าน้อย แต่เมื่อมีการฉายแสงลงบนสารกึ่งตัวนำจะเกิดกระบวนการสร้างอิเล็กตรอนและโฮลอิสระขึ้นในแถบนำและแถบวาเลนซ์ตามลำดับ เนื่องจากการดูดกลืนโฟตอนที่พลังงานสูงเพียงพอ เมื่อไบแอสด้วยแรงดันไฟฟ้าให้กับสารกึ่งตัวนำ กระแสไฟฟ้าตอนจะมีปริมาณเพิ่มขึ้น แต่เมื่อหยุดฉายแสงหรือหยุดการกระตุ้นด้วยแสง กระแสไฟฟ้าควรลดลงสู่ค่ากระแสมืดเหมือนในกรณีที่ไม่มีการฉายแสง แต่บางครั้งพบว่า กับดักพาหะที่จับอิเล็กตรอนและ/หรือจับโฮล มีพฤติกรรมไม่ปล่อยอิเล็กตรอนหรือโฮลออกมาทันทีอย่างปกติธรรมดา นั่นคือยังมีประจุค้างอยู่ในกับดักพาหะ ดังนั้นอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำและ/หรือโฮลในแถบวาเลนซ์จึงยังคง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ที่จะใช้เอกสารนี้ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปรากฏอยู่มาก เพื่อทำหน้าที่ในการรักษาความเป็นกลางทางไฟฟ้าโดยปกติกลไกการปลดปล่อยจะใช้เวลานานกว่ากลไกการรวมตัว แต่เนื่องจากกับดักพาหะมีการปล่อยอิเล็กตรอนและ/หรือโฮลออกมาช้ามาก ส่งผลให้กลไกการรวมตัวใช้เวลายังนานขึ้นไปอีก จึงเป็นที่มาของ ค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงดื้อรั้น (persistent photoconductivity)



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

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

$$I = envA \quad (2.125)$$

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

$$v = \frac{\mu V_a}{l} \quad (2.126)$$

แทนสมการที่ (2.124) ลงในสมการที่ (2.125) จะได้

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น 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 ที่เกิดจากกัณฑ์กักพาหะชนิด 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) ที่สัมพันธ์กับกัณฑ์กักพาหะทุกชนิดจะเป็นดังนี้คือ

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

เมื่อ N_{ii} คือ ความหนาแน่นของกัณฑ์กักพาหะต่อปริมาตรชนิดที่ 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 σ_i คือ ความหนาแน่นของกัณฑ์กักพาหะต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ แต่ถ้ากัณฑ์กักพาหะมีหลายชนิด กระแสรวม (I) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่สัมพันธ์กับกัณฑ์กักพาหะทุกชนิดจะเป็นดังนี้ 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 σ_{ii} คือความหนาแน่นของกัณฑ์กักพาหะต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ชนิดที่ i ซึ่งสามารถหาได้จากความสัมพันธ์

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

V_a	คือ	แรงดันไบแอสที่ป้อนให้กับสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีหน่วยเป็นโวลต์
μ	คือ	สภาพคล่องของพาหะมีหน่วยเป็น ตารางเซนติเมตรต่อ(โวลต์-วินาที)
w	คือ	ความกว้างของสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีหน่วยเป็น เซนติเมตร
l	คือ	ความยาวของสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีหน่วยเป็น เซนติเมตร
d	คือ	ความหนาของสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีหน่วยเป็น เซนติเมตร
I	คือ	กระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากการทดลองที่เวลา t ใดๆ
τ_r	คือ	ช่วงชีวิตขาลง (decay time)
N_{ii}	คือ	ค่าความหนาแน่นของกักพาหะในชั้นสารตัวอย่างมีหน่วยเป็น ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
σ_{ii}	คือ	ค่าความหนาแน่นของกักพาหะในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำมีหน่วยเป็น ต่อตารางเซนติเมตร

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

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

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

เมื่อ

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

ดังนั้น

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

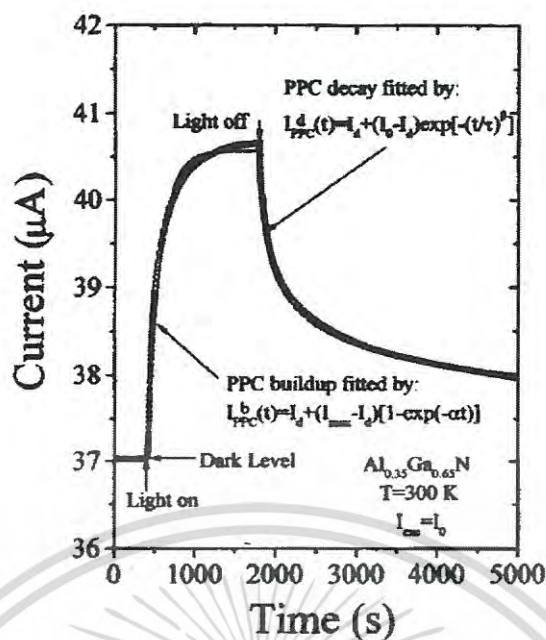
ในการศึกษาพลาสมาไฟฟ้าเชิงแสงต้องมีการฉายแสงให้กับสารตัวอย่าง จะได้ว่ากระแสโฟโต (I_p) จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลา (t) ดังรูปที่ 2.29 ซึ่งจะเรียกว่าเป็นกระแสโฟโตขาขึ้น (rise current) ดังความสัมพันธ์ (Ghosh, 2007)

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

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

$$I_p = I_o \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_d}\right) \quad (2.138)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



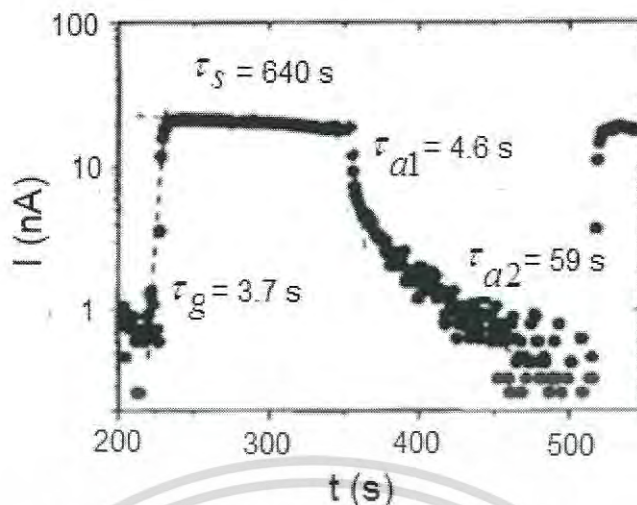
รูปที่ 2.29 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสโฟโตขาขึ้น กับ ค่ากระแสโฟโตขาลงของ ค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงคือ

จากสมการที่ (2.136) สามารถเขียนใหม่ได้ว่า

$$\ln I_p = \ln I_0' - \frac{t}{\tau_d} \quad (2.139)$$

ความชันของกราฟคือ $\frac{1}{\tau_d}$ ดังนั้น ช่วงชีวิตขาลงจะคำนวณได้จากส่วนกลับของความชันของกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ t ในทำนองเดียวกันช่วงชีวิตขาขึ้นก็สามารถที่จะคำนวณได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ t (ดังรูปที่ 2.30) ได้ด้วยเช่นเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.30 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ t ของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงตั้งรับทั้งช่วง กระแสโฟโตชาขึ้นและช่วงกระแสโฟโตชาลง

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

$$|I_p| = e\mu \left(\frac{w}{l} \right) V_a \sigma_{i1} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{d1}}\right) + e\mu \left(\frac{w}{l} \right) V_a \sigma_{i2} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{d2}}\right) \quad (2.140)$$

เพื่อให้ τ_{d1} และ τ_{d2} มีค่าถูกต้องมากขึ้น อาจดัดแปลงสมการที่ (2.139) ให้อยู่ในรูปของฟังก์ชัน สเตรตเอกซ์โพเนนเชียล (stretched exponential function) ดังนี้คือ (Ghaffarzadeh, 2010; Luo, 2013; Guo, 2013)

$$|I_p| = e\mu \left(\frac{w}{l} \right) V_a \sigma_{i1} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{d1}}\right) + e\mu \left(\frac{w}{l} \right) V_a \sigma_{i2} \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau_{d2}}\right)^\beta\right] \quad (2.141)$$

จากสมการที่ (2.140) สามารถที่จะหาค่า σ_{i1} และ σ_{i2} ได้ในรูปแบบเดียวกับสมการที่ (2.141) ดังนี้คือ

$$\sigma_{i1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{w} \right) \exp\left(\frac{t}{\tau_{d1}}\right) \quad (2.142)$$

$$\sigma_{i2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{w} \right) \exp\left(\frac{t}{\tau_{d2}}\right) \quad (2.143)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ตามการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$\sigma_{i1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{w} \right) \quad (2.144)$$

และ

$$\sigma_{i2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{w} \right) \quad (2.145)$$

สมการที่ (2.140) สามารถที่จะทำนอร์มัลไลเซชัน (normalization) ได้ดังนี้ คือ

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

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 β มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1

ในกรณีกระแสโตะขาขึ้น (rise current) ก็สามารถที่จะพิจารณาให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันสเตรตเอกซ์โพเนนเชียลได้ด้วยเช่นกัน ดังสมการ

$$|I_p| = A'_1 \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{r1}}\right) \right] + A'_2 \left\{ 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau_{r1}}\right)^\beta\right] \right\} \quad (2.147)$$

ส่วนกรณีของขึ้นสารที่เป็นเม็ดเซรามิก กระแสโตะขณะขาลงสามารถจะเขียนใหม่โดยอาศัยสมการที่ (2.128) และ (2.140) ได้ดังนี้คือ

$$|I_p| = e\mu \left(\frac{wd}{l} \right) V_a N_{i1} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{d1}}\right) + e\mu \left(\frac{wd}{l} \right) V_a N_{i2} \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau_{d2}}\right)^\beta\right] \quad (2.148)$$

จากสมการที่ (2.147) สามารถที่จะหาค่า

$$N_{i1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{wd} \right) \exp\left(\frac{t}{\tau_{d1}}\right) \quad (2.149)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$N_{t2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{wd} \right) \exp\left(-t/\tau_{d2} \right) \quad (2.150)$$

กับศักยพหะทั้งสองชนิดนี้สามารถที่จะจับหรือปล่อยพาหะอิสระได้อย่างเป็นอิสระซึ่งกันและกัน ถ้ากำหนดให้ I_1 และ I_2 คือกระแสเริ่มต้น ($t=0$) ที่เกี่ยวกับกับศักยพหะทั้งสองตามลำดับจะได้ว่า

$$N_{t1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{wd} \right) \quad (2.151)$$

$$N_{t2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{wd} \right) \quad (2.152)$$

สมการที่ (2.147) สามารถที่จะทำนอร์มัลไลเซชัน (normalization) ได้ดังนี้คือ

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

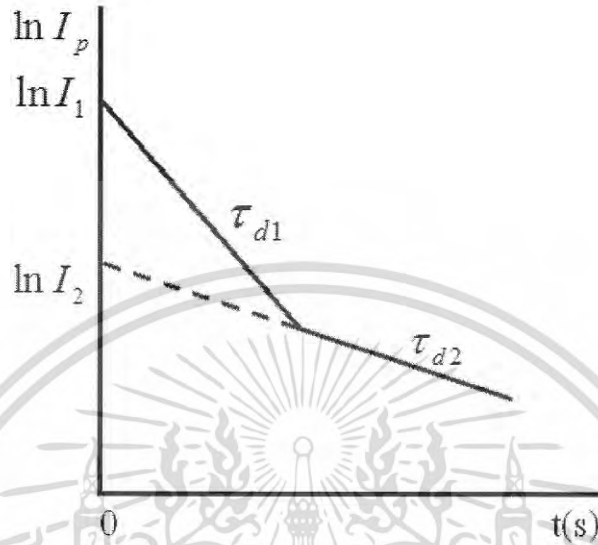
ซึ่ง A_1'' และ A_2'' สามารถหาได้จากการพิตรกราฟของผลการทดลอง ในกรณีกระแสไฟโตขาขึ้นก็สามารถที่จะพิจารณาให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันสเตรตเอกซ์โพเนนเชียลได้ด้วยเช่นกันดังสมการ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10.1 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกัณฑ์พาหะในช่วงกระแสโฟโตชาลง

การหาค่าความหนาแน่นของกัณฑ์พาหะในช่วงกระแสโฟโตชาลงจะอาศัยกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ t ดังรูปที่ 2.31



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

ค่า τ_{d1} หาได้จากความชันของกราฟ

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

เราสามารถหาค่า I_1 ได้จากจุดตัดแกน y (คือ $\ln I_1$) และสามารถคำนวณหา ค่าความหนาแน่นของกัณฑ์พาหะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำได้ดังนี้ คือ

$$\sigma_{e1} = \frac{\ln I_1}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{w} \right) \quad (2.156)$$

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

สำหรับกรณีของความหนาแน่นพาหะของชั้นสารเช่นในเม็ดเซรามิก ก็สามารถใช้สูตร

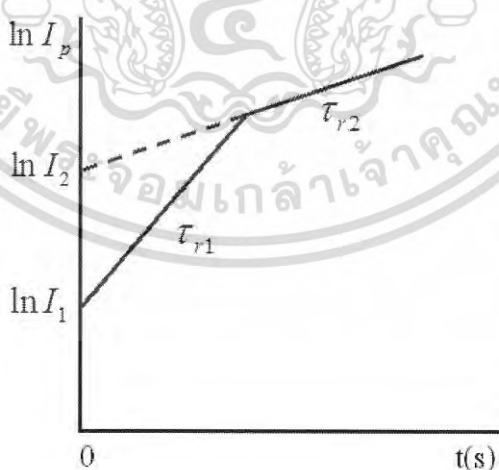
$$N_{i1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{wd} \right) \quad (2.159)$$

และ

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

2.10.2 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะในช่วงกระแสโฟโตชาขึ้น

การหาค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะในช่วงกระแสโฟโตชาขึ้น โดยอาศัยกราฟ $\ln I_p$ กับ t ดังรูปที่ 2.32



รูปที่ 2.32 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ t เพื่อใช้คำนวณหาค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะในช่วงกระแสโฟโตชาขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสขาขึ้นอาจแสดงได้ดังสมการง่ายๆ ดังนี้คือ

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

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

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

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

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

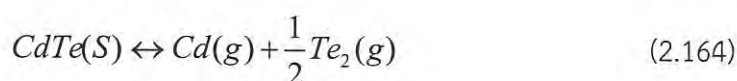
ถ้า $\frac{I}{I_{\max}} \ll 1$ สมการที่ (2.162) จะประมาณได้ว่าเป็น

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

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

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

การระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดเป็นกระบวนการเกิดก้อนเนื้อผลึก (bulk) หรือฟิล์มบางของสารตั้งต้น ที่กลายเป็นไอแล้วควบแน่นลงบนแผ่นฐานรองรับที่วางอยู่บนสารตั้งต้นในระบบปิดในกระบวนการระเหิดในระยะประชิดนี้สามารถให้อัตราการเคลือบต่ำ ในกระบวนการระเหิดในระยะประชิดนี้ พิจารณาสมดุลปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารตั้งต้นและแผ่นฐานรองรับดังสมการ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกฎการคงตัวของมวล (law of mass action) พิจารณาที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน

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

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)

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $J_{Cd,j}$	คือ	ฟลักซ์ของการแพร่ของอะตอมของธาตุ Cd ในแก๊ส j
$J_{Te_2,j}$	คือ	ฟลักซ์ของการแพร่ของโมเลกุลของแก๊ส Te_2 ในแก๊ส j
J	คือ	ฟลักซ์ของการแพร่
D_{ij}	คือ	สัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมของธาตุ i ในแก๊ส j

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

$$\frac{P_{Cd}(T_{so})}{P_{Te_2}(T_{so})} = \frac{2D_{Te_2,j}}{D_{Cd,j}} = 1.1 \quad (2.171)$$

หมายเหตุ ค่าอุดมคติอัตราส่วนเท่ากับ 1

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

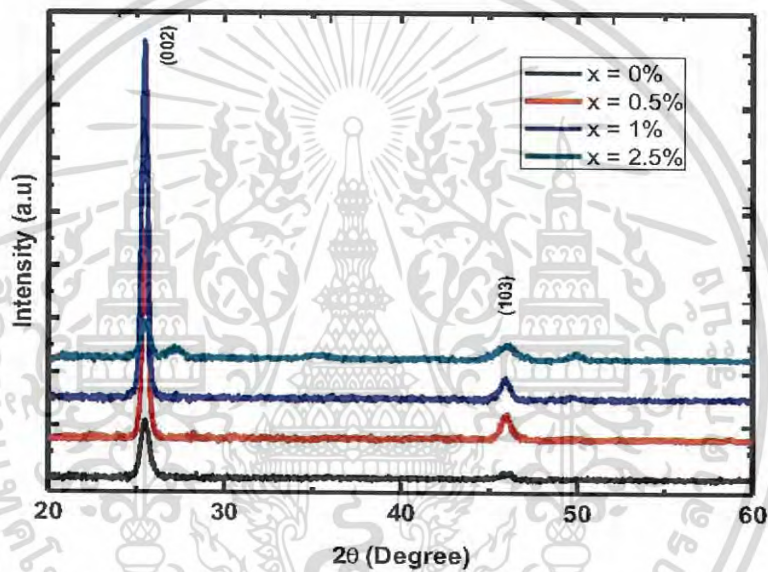
$$GR \left(\frac{\mu m}{min} \right) = \frac{JxMx60x10^4}{\rho} \quad (2.172)$$

เมื่อ J	คือ	ฟลักซ์ของการแพร่
M	คือ	มวลโมเลกุลของ $CdTe$
ρ	คือ	ความหนาแน่นของ $CdTe$

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Mazhar, 2013; Acharya, 2010; Ivashehenko, 2015)

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe พบงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

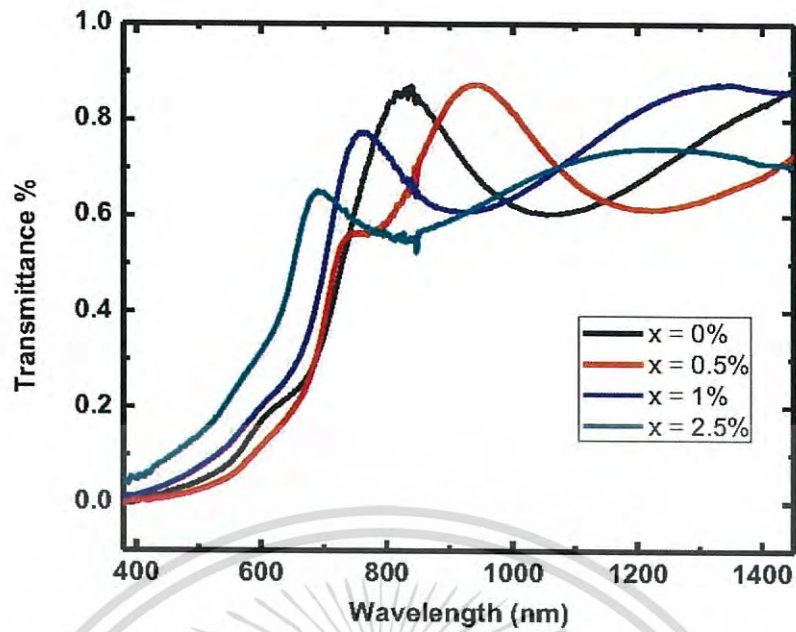
มาซาร์และคณะ (Mazhar, 2013) ได้วิจัยเรื่องสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่ถูกเจือด้วยอะตอมของธาตุ Sb โดยเทคนิคการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ ได้ผลการศึกษา XRD แสดงลักษณะสเปกตรัมที่ความเข้มสูงสุดที่มุม 2θ ตรงกับระนาบผลึก (002) ปรากฏอย่างโดดเด่น (preferential orientation) และเมื่อเปอร์เซ็นต์การเจือด้วยอะตอมของธาตุ Sb เพิ่มขึ้นเป็น 0, 0.5 และ 1 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ พีคความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของระนาบ (002) มีลักษณะโตขึ้น และหลังจากนั้นพีคความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ระนาบ (002) จะลดลง ดังรูปที่ 2.33



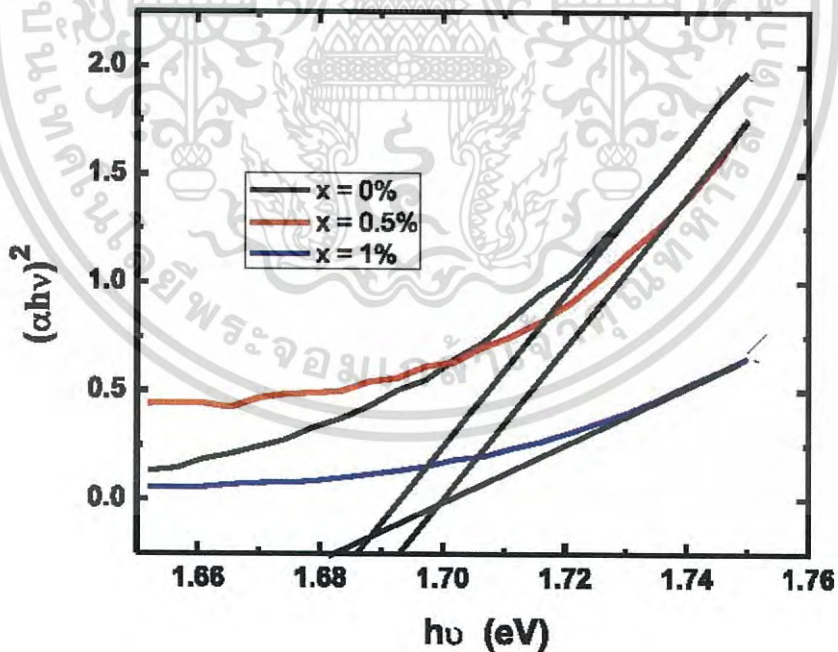
รูปที่ 2.33 แสดงพีคความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของการฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:Sb ($x=0\%$, 0.5% , 1% , 2.5%)

และได้ทำการศึกษาสมบัติทางแสงซึ่งสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe:Sb ดังแสดงในรูปที่ 2.34 พบขอบการดูดกลืนแสงเลื่อนไปที่ความยาวคลื่นสั้นลงและการส่งผ่านทางแสงลดลงตามเปอร์เซ็นต์การเจือด้วยอะตอมของธาตุ Sb เพิ่มขึ้น ข้อมูลที่ได้จากค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านทางแสงสามารถคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงานโดยการวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(\alpha h\nu)^2$ กับ พลังงานโฟตอน ($h\nu$) แล้วทำการลากเส้นตรงหาค่าคาดหมาย (extrapolation) ของกราฟในส่วนที่เป็นเชิงเส้นไปตัดกับแกนพลังงานโฟตอน จุดที่ตัดแกนพลังงานโฟตอนคือ ค่าช่องว่างแถบพลังงาน แสดงได้ในรูปที่ 2.35 พบว่ามีค่าช่องว่างแถบพลังงานเป็น 1.685, 1.695 และ 1.680 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามเปอร์เซ็นต์การเจือด้วยอะตอมของธาตุ Sb ที่เพิ่มขึ้น 0, 0.5 และ 1 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และพบว่า การส่งผ่านทางแสงของฟิล์มบางเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของค่าช่องว่างแถบพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



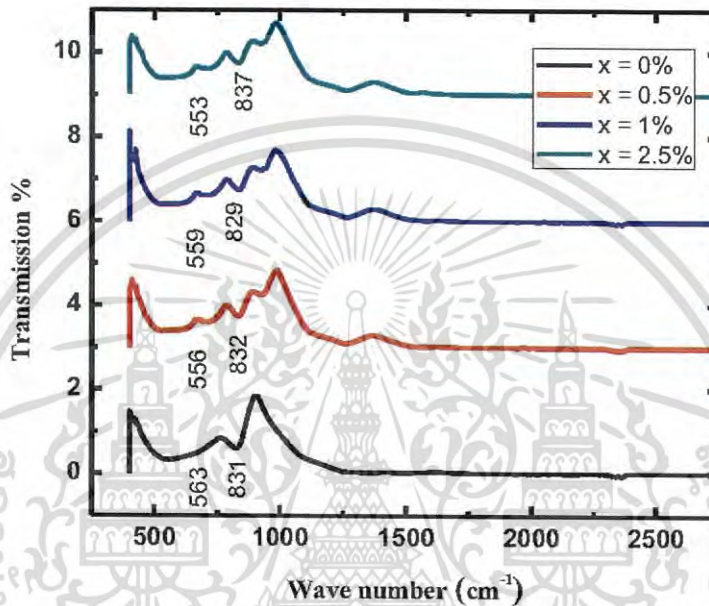
รูปที่ 2.34 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Sb



รูปที่ 2.35 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Sb

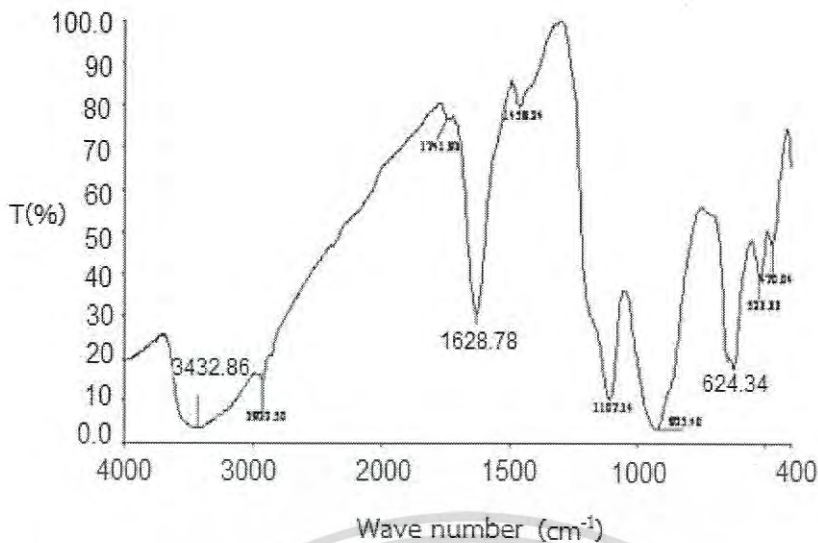
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษา FTIR ดังรูปที่ 2.36 แสดงสเปกตรัม FTIR ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Sb โดยวาดกราฟระหว่าง เปอร์เซ็นต์ของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านทางแสง กับ เลขคลื่นอยู่ในช่วง 250-2750 ต่อเซนติเมตร ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงปรากฏที่ค่าเลขคลื่นเท่ากับ 563 ต่อเซนติเมตร ถูกยืนยันการมีอยู่ของการสั่นของพันธะระหว่างไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้าของสารประกอบโมเลกุล CdSe ซึ่งโหมดการสั่นอยู่ในช่วงค่าเลขคลื่น 400-700 ต่อเซนติเมตร



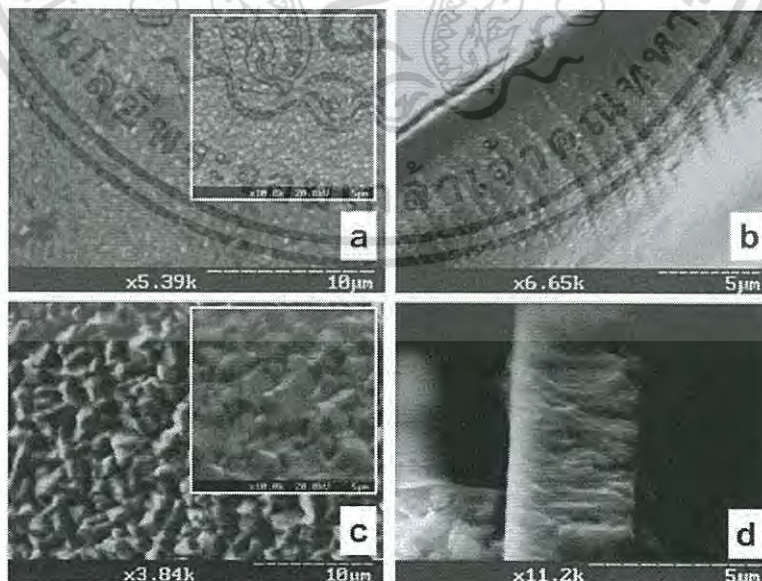
รูปที่ 2.36 แสดงสเปกตรัม FTIR ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Sb

อะชาเยและคณะ (Acharya, 2010) ได้ศึกษาสเปกตรัม FTIR ที่มีค่าเลขคลื่นอยู่ในช่วง 400-4000 ต่อเซนติเมตร ของผลึกนาโนของสารกึ่งตัวนำ CdSe โดยการสังเคราะห์จากสารละลายเคมี เกิดพีคค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงที่ค่าเลขคลื่นเท่ากับ 624.34 ต่อเซนติเมตร เนื่องมาจากความถี่ในโหมดของการยืดของพันธะ Cd-Se อีกทั้งได้แสดงพีคค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงที่ค่าเลขคลื่นเท่ากับ 3432.86 ต่อเซนติเมตร และ ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงค่าเลขคลื่นเท่ากับ 1628.78 ต่อเซนติเมตร ซึ่งมาจากโหมดการยืดของ O-H และการงอของ O-H ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.37



รูปที่ 2.37 แสดงสเปกตรัม FTIR ของผลึกนาโนของสารกึ่งตัวนำ CdSe

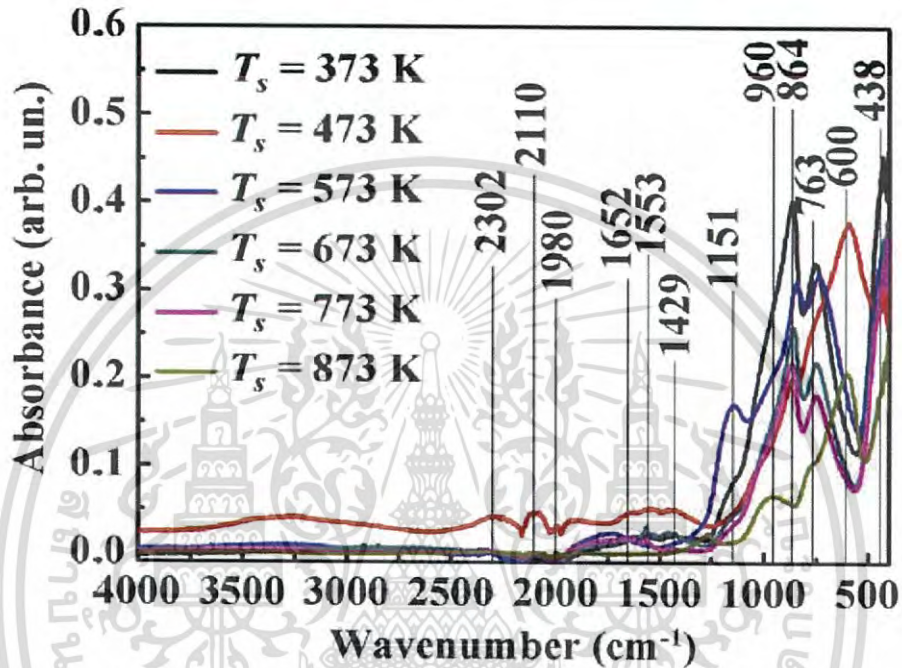
ละวาเชนโกและคณะ (Ivashchenko, 2015) ได้ศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง CdSe ซึ่งเตรียมโดยการระเหิดสารเคมีในระยะประชิดในระบบสุญญากาศ ที่อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับแตกต่างกัน ได้ผลการศึกษา ลักษณะสัณฐานของฟิล์ม จากเครื่อง SEM พบว่า ขนาดของเกรน (crystalline) ที่เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับเพิ่มขึ้น ส่วนในช่วงอุณหภูมิที่ต่ำกว่า ($T_s < 673\text{K}$) การปลูกฟิล์มจะเปลี่ยนไปเป็นลักษณะคอลัมน์ และที่อุณหภูมิสูงจะเป็นลักษณะแบบพีระมิดอย่างชัดเจน ดังนั้น ที่ช่วงอุณหภูมิต่ำขนาดของเกรนจะไม่ขึ้นอยู่กับความหนาของฟิล์ม และ อุณหภูมิของแผ่นรองรับจะแปรปรวน ซึ่งตรงกันข้าม ที่ช่วงอุณหภูมิสูงขนาดของเกรนจะเพิ่มขึ้น และขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับและความหนาของฟิล์มบาง ดังแสดงในรูปที่ 2.39



รูปที่ 2.38 แสดงลักษณะสัณฐานของฟิล์มบาง CdSe: เมื่ออุณหภูมิแผ่นฐานรองรับแตกต่างกัน

(a) $T_s = 473\text{ K}$, $l = 3.2\ \mu\text{m}$; (c) $T_s = 873\text{ K}$, $l = 5.8\ \mu\text{m}$ และ ภาพตัดขวาง (b, d). เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการวิจัยเท่านั้น เมื่อเผยแพร่ให้ใช้ประโยชน์การค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษา FTIR ของฟิล์มบาง CdSe พบว่าที่เลขคลื่น 436-438, 600-601 และ 758-763 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นตามยาวของ Cd-O และ Cd-Se และพีคที่สังเกตได้ทั้งหมดของฟิล์มบาง CdSe เมื่อ $\nu = (1000-2000) cm^{-1}$ ได้แก่ 864, 960, 1151, 1459, 1553, 1652, 1980, 2110 และ 2302 cm^{-1} เกิดขึ้นเนื่องจากการสั่นของ O-H และ CH₂ อาจมีสาเหตุมาจากความไม่เป็นเอกพันธ์ของตัวอย่างลดลง เนื่องจากกระบวนการออกซิเดชัน ดังรูปที่ 2.40



รูปที่ 2.39 แสดงสเปกตรัม FTIR ของฟิล์มบาง CdSe

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในโครงการพิเศษนี้ได้ทำการเตรียมและศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีใน ระยะประชิดในระบบสุญญากาศ ที่อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับ 530-593 องศาเซลเซียส

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

3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เพื่อใช้เตรียมฟิล์มบางของ สารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่น กระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

1. แผ่นกระจกสไลด์
2. ที่ตัดกระจก
3. เครื่องอัลตราโซนิก
4. เครื่องเป่าลมร้อน
5. เตาอบ
6. ปีกเกอร์ขนาด 200 มิลลิลิตร
7. สารเคมี (น้ำยาล้างจาน น้ำปลอตประจุ อะซีโตนและ เอทานอล)
8. นาฬิกาจับเวลา

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่ เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิด สารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

1. ระบบระเหิดสารเคมีในระยะประชิด
 - ท่อแก้วควอตซ์ปลายปิดหนึ่งด้าน
 - กล่องแกรไฟต์
 - เครื่องควบคุมอุณหภูมิหือ SHIMADEN รุ่น PID FP21
 - หลอดทิ้งสแตน 1,000 วัตต์
2. ผงผลึกแคดเมียมเซลีนไนด์และแคดเมียมเทลลูไรด์บริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์
3. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่งยี่ห้อ Sartorius
4. ปากคืบ
5. หน้ากากป้องกันไอระเหยของสารเคมี
6. แวนตากรองแสง
7. ภาชนะที่ใช้สำหรับเก็บสารเคมีสามารถควบคุมความชื้นได้
8. ครกบดสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค

เอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตรมิเตอร์ (XRD) ของยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ 1.5406 อังสตรอม ใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์ แรงดันไฟฟ้า 30 กิโลโวลต์ โดยที่จะวัดจากมุม 20-70 องศา

3.1.4 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) ของยี่ห้อ LEO รุ่น LEO 1455VP โดยใช้แรงดัน 20 กิโลโวลต์ และกำลังขยายของภาพถ่าย 5000 เท่า

3.1.5 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางแสง

เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (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. กาวเงิน
6. สายไฟ
7. คอมพิวเตอร์

3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2531; งามนิตย์, 2545; จิตินัย, 2549; จิตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; จิตินัย, 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 นำปิกเจอร์ไปใส่ในเครื่องอัลตราโซนิก
6. เป่าให้แห้งด้วยเครื่องเป่าลมร้อน
7. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่เป่าแห้งแล้วไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที
8. เก็บแผ่นกระจกสไลด์ในถุงพลาสติกซิปล็อก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 การเตรียมและทำความสะอาดระบบประเห็ดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิด

1. ทำความสะอาดกล่องแกรไฟต์ด้วยอะซีโตน
2. นำกล่องแกรไฟต์เป่าให้แห้งด้วยเครื่องเป่าลมร้อน
3. นำกล่องแกรไฟต์ไปใส่ในท่อแก้วแล้วเปิดปั๊มดูดอากาศออกจนกระทั่งมีความดันประมาณ 3.0×10^{-2} มิลลิบาร์
4. ทำความสะอาดท่อแก้วควอตซ์ปลายปิดหนึ่งด้านด้วยน้ำยาล้างจาน เขย่าทำความสะอาดด้วยน้ำยาล้างจานจนกระทั่งไม่มีน้ำยาล้างจานเหลืออยู่ แล้วเป่าให้แห้งด้วยเครื่องเป่าลมร้อน
5. ทำความสะอาดชิ้นส่วนต่างๆ ด้วยอะซีโตน

3.2.3 การเตรียมสารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่มีองค์ประกอบต่างกัน

สารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) สามารถเตรียมได้จากผลึกของสารประกอบ CdTe และ CdSe



มวลอะตอมของธาตุ Cd, Se และ Te มีค่าเท่ากับ 112.40, 78.96 และ 127.60 กรัมต่อโมลตามลำดับ ดังนั้นจะได้ว่า

มวลโมเลกุลของสารประกอบ CdTe = $112.40 + 127.60 = 240.00$ กรัมต่อโมล

มวลโมเลกุลของสารประกอบ CdSe = $112.40 + 78.96 = 191.36$ กรัมต่อโมล

กรณี $x=0.2$



มวลโมเลกุลของสารประกอบจะได้เท่ากับ

$$\begin{aligned} CdTe_{0.8}Se_{0.2} &= 112.40 + (0.8 \times 127.60) + (0.2 \times 78.96) \\ &= 230.272 \text{ กรัมต่อโมล} \end{aligned}$$

ถ้าต้องการใช้สารตั้งต้น $CdTe_{0.8}Se_{0.2}$ จำนวน 1 กรัม จะต้องใช้สารตั้งต้นที่เป็นผลึก

$$\text{ของสารประกอบ CdTe} = \left(\frac{0.8 \times 240}{230.272} \right) = 0.8338 \text{ กรัม}$$

$$\text{ของสารประกอบ CdSe} = \left(\frac{0.2 \times 191.136}{230.272} \right) = 0.1660 \text{ กรัม}$$

กรณี $x=0.4$



มวลโมเลกุลของสารประกอบจะได้เท่ากับ

$$\begin{aligned} CdTe_{0.6}Se_{0.4} &= 112.40 + (0.6 \times 127.60) + (0.4 \times 78.96) \\ &= 220.5440 \text{ กรัมต่อโมล} \end{aligned}$$

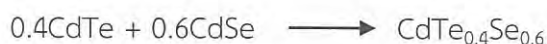
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าต้องการใช้สารตั้งต้น $\text{CdTe}_{0.6}\text{Se}_{0.4}$ จำนวน 1 กรัม จะต้องใช้สารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

$$\text{ของสารประกอบ CdTe} = \left(\frac{0.6 \times 240}{220.544} \right) = 0.6529 \text{ กรัม}$$

$$\text{ของสารประกอบ CdSe} = \left(\frac{0.4 \times 191.136}{220.544} \right) = 0.3467 \text{ กรัม}$$

กรณี x=0.6



มวลโมเลกุลของสารประกอบจะได้เท่ากับ

$$\begin{aligned} \text{CdTe}_{0.4}\text{Se}_{0.6} &= 112.40 + (0.4 \times 127.60) + (0.6 \times 78.96) \\ &= 210.816 \text{ กรัมต่อโมล} \end{aligned}$$

ถ้าต้องการใช้สารตั้งต้น $\text{CdTe}_{0.4}\text{Se}_{0.6}$ จำนวน 1 กรัม จะต้องใช้สารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

$$\text{ของสารประกอบ CdTe} = \left(\frac{0.4 \times 240}{210.816} \right) = 0.4554 \text{ กรัม}$$

$$\text{ของสารประกอบ CdSe} = \left(\frac{0.6 \times 191.136}{210.816} \right) = 0.5440 \text{ กรัม}$$

กรณี x=0.8



มวลโมเลกุลของสารประกอบจะได้เท่ากับ

$$\begin{aligned} \text{CdTe}_{0.2}\text{Se}_{0.8} &= 112.40 + (0.2 \times 127.60) + (0.8 \times 78.96) \\ &= 201.0880 \text{ กรัมต่อโมล} \end{aligned}$$

ถ้าต้องการใช้สารตั้งต้น $\text{CdTe}_{0.2}\text{Se}_{0.8}$ จำนวน 1 กรัม จะต้องใช้สารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก

$$\text{ของสารประกอบ CdTe} = \left(\frac{0.2 \times 240}{201.088} \right) = 0.2387 \text{ กรัม}$$

$$\text{ของสารประกอบ CdSe} = \left(\frac{0.8 \times 191.136}{201.088} \right) = 0.7604 \text{ กรัม}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 แสดงปริมาณสารตั้งต้นของผงผลึกของสารประกอบ CdTe และ CdSe และ อุณหภูมิ ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการ ระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

Molar Ratio (x)	Starting Material Content (g)		Source Temperature (°C)	Substrate Temperature (°C)
	CdTe	CdSe		
0.0	1.0000	-	668	593
0.2	0.8338	0.1660	645	530
0.4	0.6529	0.3467	649	559
0.6	0.4554	0.5440	655	555
0.8	0.2387	0.7604	645	530
1.0	-	1.0000	650	571



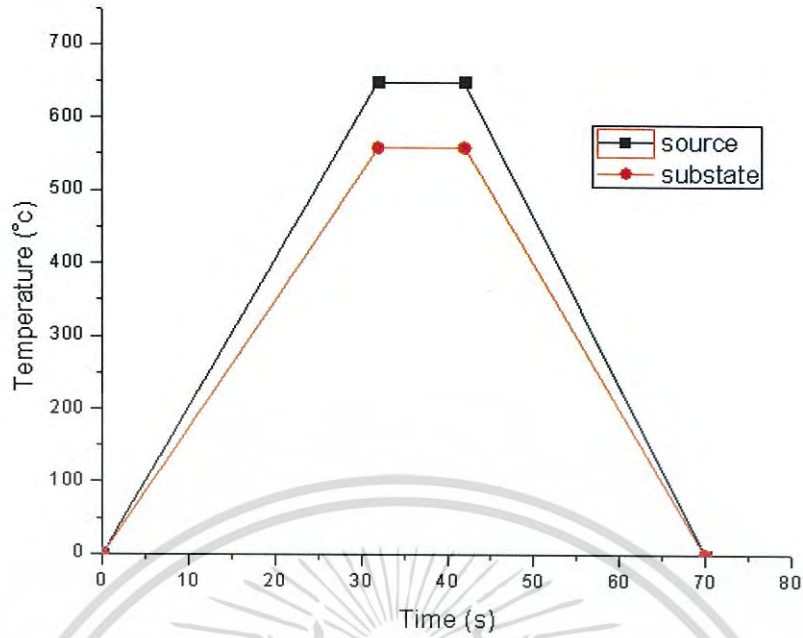
รูปที่ 3.1 ผงผลึกของสารตั้งต้น $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่ผสมแล้วเพื่อจะใช้ในการทดลองทั้งแบบที่ปิดแฟลชและเปิดแฟลชของกล้องถ่ายภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

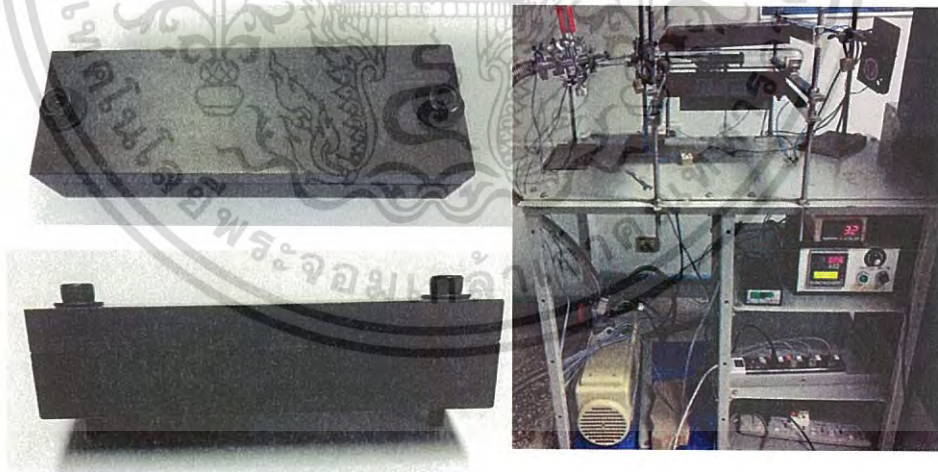
3.2.4 การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) จากสารตั้งต้นเป็นผงผลึกของสารประกอบ $CdTe$ และ $CdSe$ ที่มีความบริสุทธิ์สูงถึง 99.999 เปอร์เซ็นต์ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิดในระบบสุญญากาศ ซึ่งประกอบด้วยวิธีและขั้นตอนดังนี้

1. ชั่งสารตั้งต้น $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่ต้องการให้ได้น้ำหนัก 0.01 กรัม แล้วนำมาบรรจุในกล่องแกรไฟต์ เขย่าเพื่อให้สารตั้งต้นกระจายเท่าๆกัน ปรับผิวหน้าให้เรียบโดยใช้แท่งแก้วค่อยๆกดให้ผิวหน้าสม่ำเสมอ
2. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมไว้ใส่ในกล่องแกรไฟต์
3. ทำการติดตั้งระบบระเหิดสารเคมีในระยะเวลาประชิดให้ครบถ้วน
4. ตั้งโปรแกรมเครื่องควบคุมอุณหภูมิเพื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นจากอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 30 นาที ให้อุณหภูมิคงตัวที่ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที ตามลำดับ แล้วลดอุณหภูมิลงมาถึงอุณหภูมิห้อง ใช้เวลา 30 นาที
5. นำอลูมิเนียมฟอยล์มาคลุม และจัดตำแหน่งอลูมิเนียมฟอยล์ทำการเพิ่มอุณหภูมิให้แก่ฐานรองรับจากอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ให้อุณหภูมิคงตัวที่ 650 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที ตามลำดับ แล้วลดอุณหภูมิลงมาถึงอุณหภูมิห้อง ใช้เวลา 30 นาที
6. เปิดปั๊มกลโรตารี แล้วเปิดวาล์วสูบอากาศออกจนได้ความดันประมาณ 3.0×10^{-2} มิลลิบาร์ แล้วเปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิสารตั้งต้นและแผ่นฐานรองรับ ตามข้อ 4
7. เมื่อปลูกฟิล์มบางเสร็จแล้ว รอจนกว่าอุณหภูมิของสารตั้งต้นและแผ่นฐานรองรับลดลงต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส แล้วปิดวาล์วปั๊มกลโรตารี ความดันภายในระบบจะค่อยๆเพิ่มขึ้น
8. เมื่ออุณหภูมิของสารตั้งต้นและแผ่นฐานรองรับลดลงเท่ากับอุณหภูมิห้อง ค่อยๆเปิดวาล์วให้อากาศเข้าไปจนกระทั่งความดันภายในเท่ากับความดันภายนอก
9. สวมหน้ากากป้องกันไอระเหิดจากสารเคมี เปิดระบบเพื่อนำเอาแผ่นฐานรองรับออกจากแกรไฟต์
10. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่เป็นแผ่นฐานรองรับที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) มาตรวจสอบผิวหน้าของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์ คุณภาพของฟิล์มบางที่ได้มีผิวหน้าสมบูรณ์ คือ ผิวหน้าสม่ำเสมอไม่มีรูพรุน จากนั้นก็นำฟิล์มบางไปเก็บในภาชนะควบคุมความชื้น



รูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการประดิษฐ์ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที



รูปที่ 3.3 ระบบการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การศึกษาสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยาะประชิด (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2531; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; ฐิตินัย, 2551)

3.3.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ จากเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโทรมิเตอร์ของยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ 1.5402 อังสตรอม โดยใช้กระแส 30 มิลลิแอมแปร์ และความต่างศักย์ 30 กิโลโวลต์ โดยวัดจากมุม 20-70 องศา

3.3.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค

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

3.3.3 การศึกษาสมบัติทางแสง

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาสมบัติทางแสงด้วยการส่งผ่านแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ยี่ห้อ thermo electron corporation รุ่น He ios โดยใช้ความยาวคลื่น 300 ถึง 1100 นาโนเมตร เพื่อคำนวณหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและค่าช่องว่างแถบพลังงาน

3.3.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมไปทั้งหมดไปศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดค่าความต้านทานแผ่นด้วยวิธีสองขั้ว ศึกษาค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ ศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ ศึกษาการวัดความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 20 – 300 เคลวิน และค่าอุณหภูมิสูงในช่วง 303 – 473 เคลวิน และค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงที่อื่น

3.3.4.1 การวัดค่าความต้านทานแผ่นด้วยวิธีสองขั้ว

ทำขั้วไฟฟ้าด้วยวิธีสองขั้ว ตรวจสอบขั้วไฟฟ้าว่าติดกับตัวอย่างเรียบร้อยแล้ว

1. ต่อบริเวณและใช้โปรแกรมร่วมด้วย โดยป้อนแรงดันและวัดกระแสที่ได้
2. เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า I กับ V แล้วคำนวณหาค่าความชันของกราฟ

3. คำนวณหาค่าความต้านทานแผ่น (R_{sh}) จากสูตร

$$R_{sh} = R \left(\frac{w}{l} \right)$$

เมื่อ R คือ ค่าความชันกราฟ

w คือ ความกว้างของฟิล์มบาง

l คือ ระยะห่างระหว่างขั้วทั้งสอง

3.3.4.2 การศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพอร์

จากหลักการแวนเดอร์เพอร์ เพื่อความสะดวกในการวัดขั้วไฟฟ้าทั้ง 4 วางอยู่ที่มุมสี่เหลี่ยมจัตุรัสดังรูปข้างล่างนี้

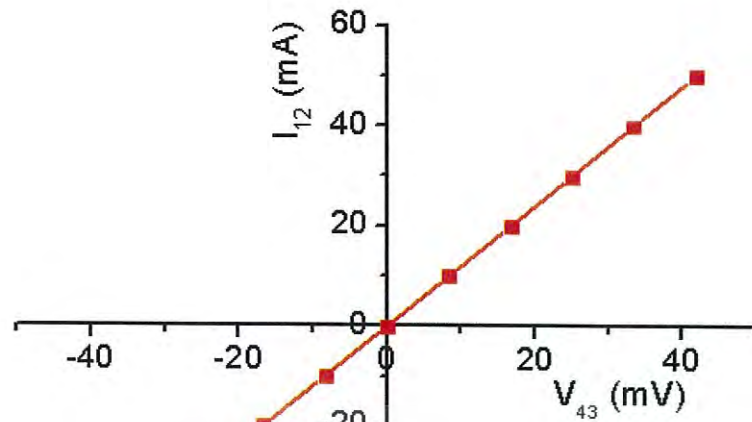


รูปที่ 3.4 แสดงวิธีทำขั้วไฟฟ้าสำหรับการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพอร์

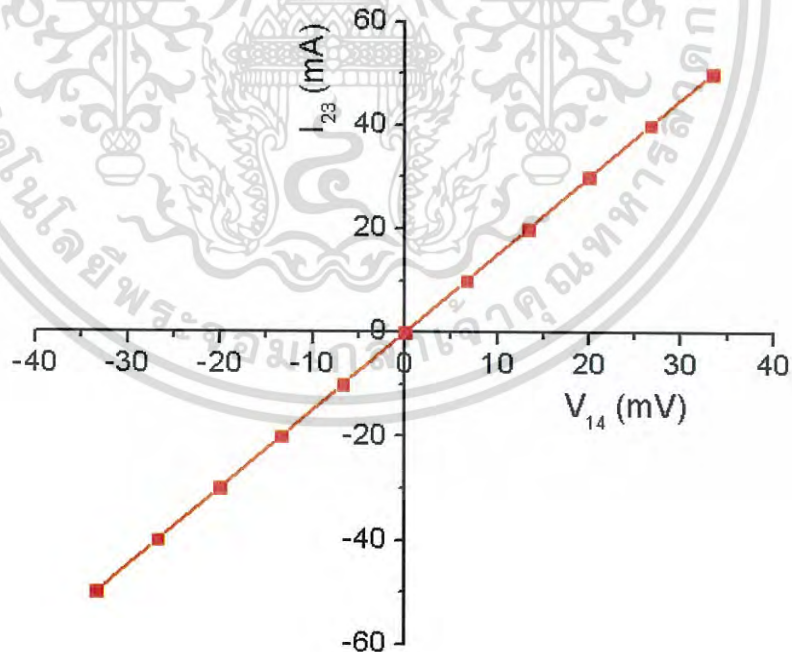
ตรวจสอบขั้วไฟฟ้าว่าติดกับตัวอย่างเรียบร้อยแล้วโดยการวัดค่าความต้านทานด้วยโอห์มมิเตอร์จากนั้นเริ่มตามขั้นตอนดังนี้

1. จ่ายกระแสทางขั้ว 1 และออกทางขั้ว 2 โดย ทำการวัดความต่างศักย์ V_{43} ให้ได้ เครื่องหมายเป็นบวก แต่ถ้าเครื่องหมายเป็นลบ ต้องเปลี่ยนให้กระแสไหลเข้าทางขั้วอื่นแทน โดยการเปลี่ยนตำแหน่งขั้ว อาจเปลี่ยนไปตามเข็มนาฬิกา แล้วจ่ายกระแสตั้งแต่ -0.6 ถึง 0.6 มิลลิแอมแปร์
2. ทำตามข้อ 1 แต่เปลี่ยนเป็นจ่ายกระแสทางขั้ว 2 และออกทางขั้ว 3 โดย ทำการวัดค่าความต่างศักย์ V_{14} แทน
3. เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า (I_{12}) กับ (V_{43}) และเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า (I_{23}) กับ (V_{14}) แล้วคำนวณหาค่าความชันของทั้ง 2 กราฟจะได้ R_1 และ R_2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



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



รูปที่ 3.6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า (I_{23}) กับ ศักย์ไฟฟ้า (V_{14}) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. คำนวณหาค่าความต้านทานแผ่น (R_{sh}) จากสูตร

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

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

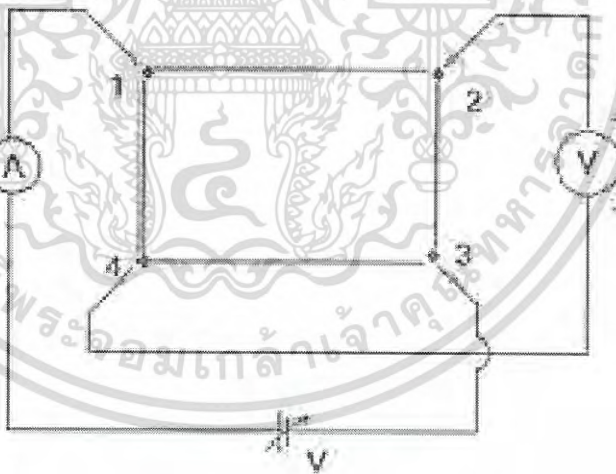
5. คำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (ρ) จากสูตร

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

เมื่อ d คือ ความหนาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำมีค่าประมาณ 5×10^{-5} เซนติเมตร

3.3.4.3 ศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์

ทำขั้วไฟฟ้าและอุปกรณ์ในการวัดดังรูปข้างล่าง และเริ่มทำการทดลองดังนี้

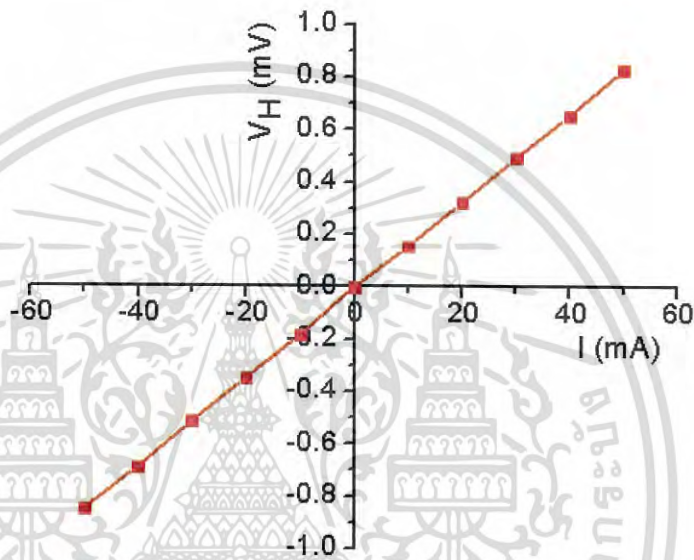


รูปที่ 3.7 แสดงวิธีการต่อขั้วไฟฟ้าเพื่อศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์

1. ขณะที่ยังไม่มีสนามแม่เหล็ก ($B=0$) และสารกึ่งตัวนำมีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นชนิดเอ็น (n -type) จะกำหนดให้กระแสไฟฟ้าไหลเข้าทางขั้ว 1 และไหลออกทางขั้ว 3 ทำการวัดค่าความต่างศักย์ V_{24} ให้ได้เครื่องหมายเป็นบวก แต่ถ้าเครื่องหมายเป็นลบ ต้องเปลี่ยนให้กระแสไหลเข้าทางขั้วอื่นแทน โดยการเปลี่ยนตำแหน่งขั้ว อาจเปลี่ยนไปตามนาฬิกาแล้วจ่ายกระแสตั้งแต่ -0.6 ถึง 0.6 มิลลิแอมแปร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- นำตัวอย่างไปวางในสนามแม่เหล็ก ($B \neq 0$) ความต่างศักย์ V_{24} ควรมีค่าเพิ่มขึ้นที่ กระแสค่าเดิมในที่นี้เรียกว่า V'_{24} เนื่องจากมีผลจากความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ V_H เข้ามาเกี่ยวข้องจ่ายกระแส ($I = -0.6$ ถึง 0.6 มิลลิแอมแปร์) แล้วทำการวัดค่า ความต่างศักย์ V'_{24}
- ความต่างศักย์ฮอลล์ $V_H = V'_{24} - V_{24}$ เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า I กับ V โดยแกน y เป็น V_H และแกน x เป็น I แล้วคำนวณหาค่าความชันของ กราฟ



รูปที่ 3.8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าศักย์ไฟฟ้า (V_H) กับ กระแสไฟฟ้า (I) ของฟิล์มบาง ของสารกึ่งตัวนำ

- คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ จากสูตร

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

เมื่อ $\left(\frac{V_H}{I} \right)$ คือ ค่าความชันของกราฟ

B คือ สนามแม่เหล็ก มีค่า 4600 เกาส์

d คือ ความหนาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำมีค่า 5×10^{-5} เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. คำนวณหาค่าความหนาแน่นของพาหะ (n) จากสูตร

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

เมื่อ q คือ ประจุของอิเล็กตรอนมีค่า 1.6×10^{-19} คูลอมบ์

6. คำนวณหาค่าสภาพคล่องของฮอลล์ (μ_H) จากสูตร

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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

ในโครงการพิเศษนี้ได้ทำการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารเคมี ด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศที่ความดันต่ำระดับ 3.0×10^{-2} มิลลิบาร์ โดยที่มีค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 ตามลำดับ จะให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 640-660 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เท่ากับ 540-560 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการระเหิด 10 นาทีและ 5 นาที จากนั้นนำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่ได้ทั้งหมดไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ศึกษาสมบัติทางแสงด้วยการวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ศึกษาสมบัติไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำโดยการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีสองขั้ว ศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ ศึกษาการวัดความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน และวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วง 303-473 เคลวิน และ ศึกษาการวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงต่อชั้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$)

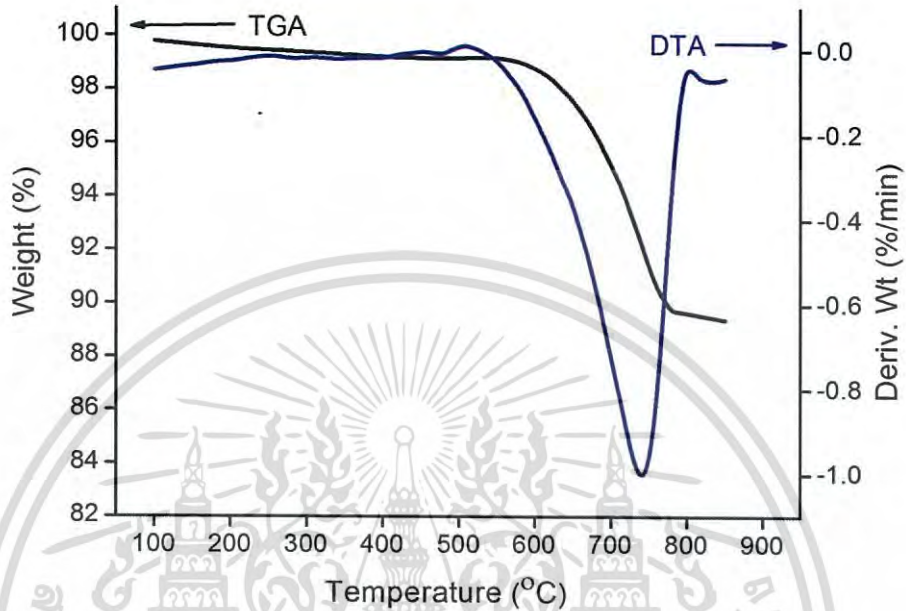
4.1 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยสมบัติทางความร้อนของผลึกของสารกึ่งตัวนำ CdTe และ CdSe ที่ได้มาจากการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริก อะนาไลเซอร์ (TGA) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยสมบัติทางความร้อน ภายใต้บรรยากาศก๊าซของออกซิเจน โดยใช้อุณหภูมิตั้งแต่ 0-800 องศาเซลเซียส ซึ่งจะใช้บ่งบอกว่าสารตัวอย่าง มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักและการเปลี่ยนสถานะเนื่องจากเกิดการสลายตัวของสารด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) หรือปฏิกิริยาสลายความชื้น (dehydration) โดยใช้สารตั้งต้น 0.01 มิลลิกรัม

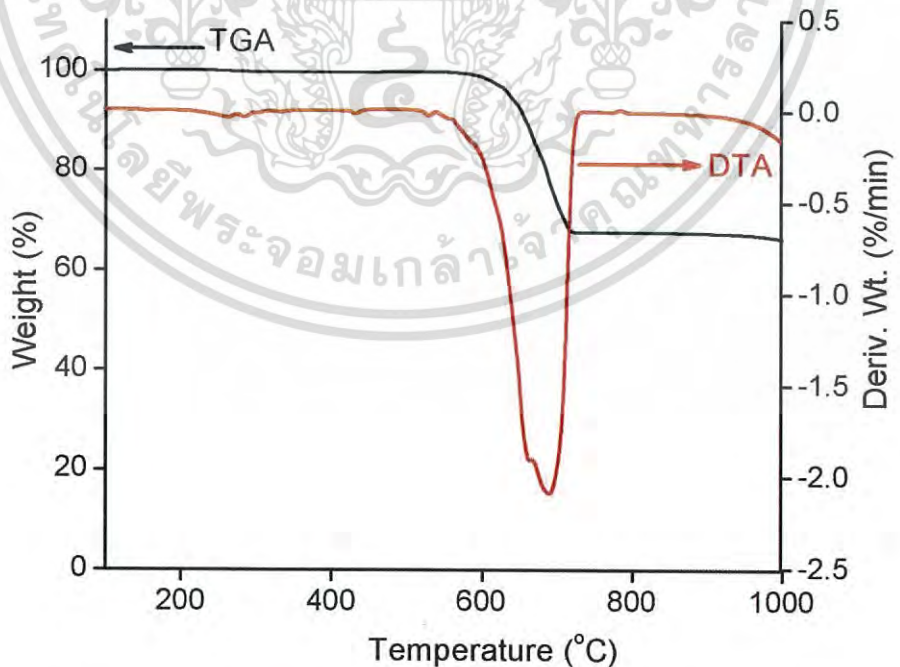
จากรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าเมื่อให้ความร้อนแก่ผลึกของสารกึ่งตัวนำ CdTe ปริมาณของผลึกของสารกึ่งตัวนำ CdTe จะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 650-740 องศาเซลเซียส มีการสูญเสียน้ำหนักของผลึกของสารกึ่งตัวนำ CdTe ไป 16 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากการระเหิดของผลึกของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เป็นของแข็ง CdTe(s) เปลี่ยนเฟสไปเป็นก๊าซ CdTe(g) ดังนั้นอุณหภูมิในช่วง 650-740 องศาเซลเซียส จึงถูกเลือกเป็นอุณหภูมิของสารตั้งต้น และจากรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าเมื่อให้ความร้อนแก่ผลึกของสารกึ่งตัวนำ CdSe ปริมาณของผลึกของสารกึ่งตัวนำ CdSe จะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 630-690 องศาเซลเซียส มีการสูญเสียน้ำหนักของผลึกของสารกึ่งตัวนำ CdSe ไป 80 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากการระเหิดของผลึกของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เป็นของแข็ง CdSe(s) เปลี่ยนเฟสไปเป็นก๊าซ CdSe(g) ดังนั้นอุณหภูมิในช่วง 630-690 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จึงถูกเลือกเป็นอนุหภูมิของสารตั้งต้น ซึ่งอนุหภูมิของสารตั้งต้นที่ถูกเลือกจะอิทธิพลต่อองค์ประกอบทางเคมี โครงสร้างผลึกทั้งเชิงจุลภาค อิทธิพลต่อองค์ประกอบทางเคมี โครงสร้างผลึกทั้งเชิงจุลภาค และเชิงมหภาคลักษณะพื้นผิวและค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$)



รูปที่ 4.1 แสดงน้ำหนักโดยใช้เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกอะนาไลเซอร์ของผงผลึกของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่ลดลงตามอนุหภูมิที่เพิ่มขึ้น

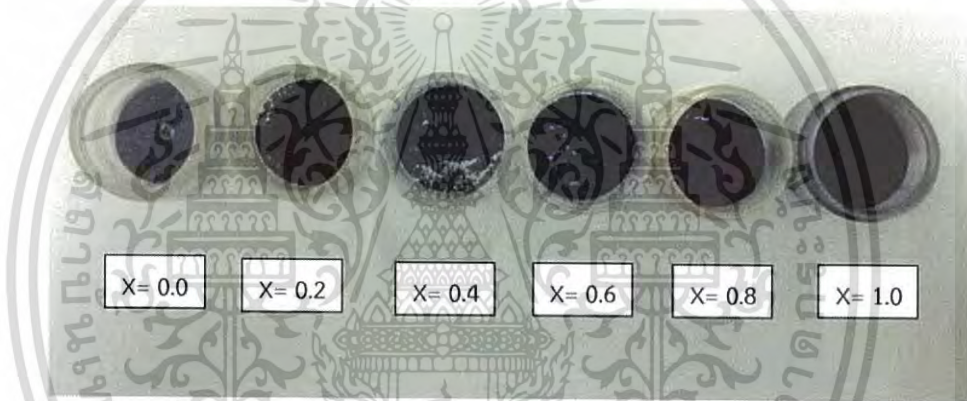


รูปที่ 4.2 แสดงน้ำหนักโดยใช้เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกอะนาไลเซอร์ของผงผลึกของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่ลดลงตามอนุหภูมิที่เพิ่มขึ้น

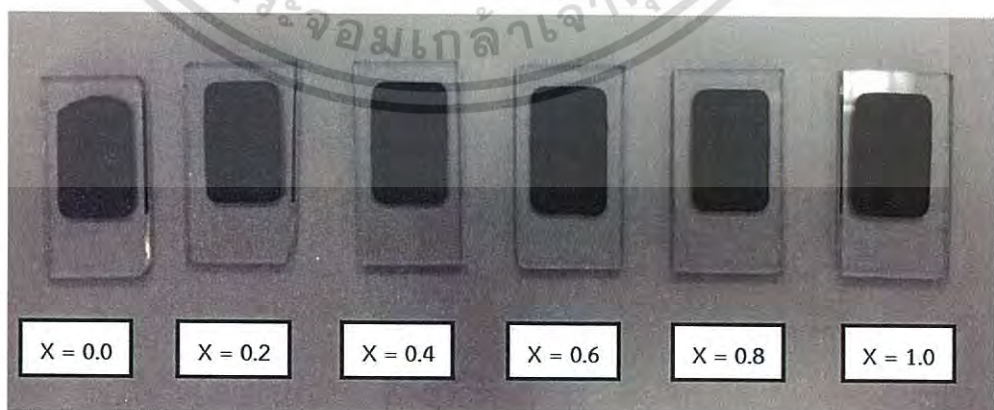
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 พิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

ที่เศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) = 0 พิล์มบางของสารกึ่งตัวนำมีลักษณะเป็นสีเทา มีผิวหน้าเรียบสม่ำเสมอ เกาะติดบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ได้ดีโดยไม่หลุดร่อนง่ายและไม่มีรูพรุน และที่เศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 พิล์มบางของสารกึ่งตัวนำมีลักษณะเป็นสีดำซึ่งแตกต่างไปจากสารตั้งต้น มีผิวหน้าเรียบสม่ำเสมอ เกาะติดบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ได้ดีไม่มีรูพรุนแต่หลุดร่อนได้ถ้าทิ้งไว้ในอากาศนานหลายสัปดาห์ ซึ่งพิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดนี้เกิดจากการให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 640-660 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เท่ากับ 550 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการระเหิด 10 นาที จะแสดงดังรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.3 แสดงผลผลิตของสารตั้งต้นที่ใช้สำหรับเตรียมพิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที

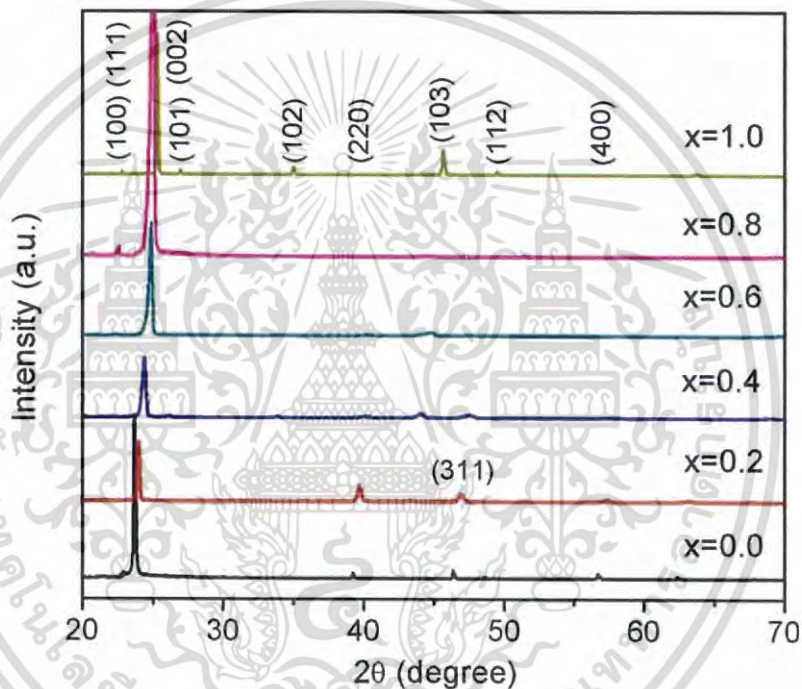


รูปที่ 4.4 แสดงภาพถ่ายของพิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดเมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที

4.3 ผลการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์พื้นฐานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

4.3.1 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เป็นวิธีการที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของสารกึ่งตัวนำและสามารถหาขนาดของเกรนได้ด้วย



รูปที่ 4.5 แสดงพีคความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที

จากรูปที่ 4.4 เป็นการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด กรณีที่ไม่ได้เจือด้วยสารประกอบ CdSe จะแสดงลักษณะสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่มีพีคความเข้มสูงสุดที่มุม 2θ เท่ากับ 23.724 องศา ตรงกับระนาบผลึก (111) สำหรับกรณีที่ได้เจือด้วยสารประกอบ CdSe พบว่าเฟสมีการเลื่อนไปทางขวาซึ่งก็คือพีคความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เลื่อนไปทิศทางค่ามุมเลี้ยวเบน 2θ ที่โตขึ้น และในกรณีที่ไม่ได้เจือด้วยสารประกอบ CdTe จะแสดงลักษณะสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ที่มีพีคความเข้มสูงสุดที่มุม 2θ เท่ากับ 25.302 องศา ตรงกับระนาบผลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าคงที่โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดเมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที

Composition (x)	Phase	2θ	(h,k,l)	Lattice Constant (Å)		
				a_c	a_H	c_H
0.0	C(single)	23.724	(111)	6.488	-	-
		39.225	(220)			
		46.375	(311)			
		56.725	(400)			
		62.350	(331)			
0.2	C(major)	24.004	(111)	6.409	-	-
		39.705	(220)			
		46.909	(311)			
		57.425	(400)			
	H(minor)	63.200	(331)	-	4.661	7.612
0.4	C(major)	24.426	(111)	6.338	-	-
		40.100	(220)			
		47.575	(311)			
	H(minor)	26.200	(101)	-	4.583	7.484
		33.875	(102)			
0.6	C(major)	24.878	(111)	6.307	-	-
		40.225	(220)			
		47.725	(311)			
H(minor)	44.875	(103)	-	4.513	7.370	
0.8	H(single)	25.009	(002)	-	4.357*	7.115*
1.0	H(single)	22.825	(100)	-	4.356	6.978
		25.302	(002)			
		26.975	(101)			
		35.041	(102)			
		45.652	(103)			
		49.500	(112)			
63.600	(203)					

หมายเหตุ * คำนวณจากความสัมพันธ์ $a_H = \frac{a_c}{\sqrt{2}}$ และ $c_H = \frac{2a_c}{\sqrt{3}}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะของโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล และลักษณะของโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก มีความสัมพันธ์กัน ดังนี้

$$a_H = \frac{a_C}{\sqrt{2}}$$

$$c_H = \frac{2a_C}{\sqrt{3}}$$

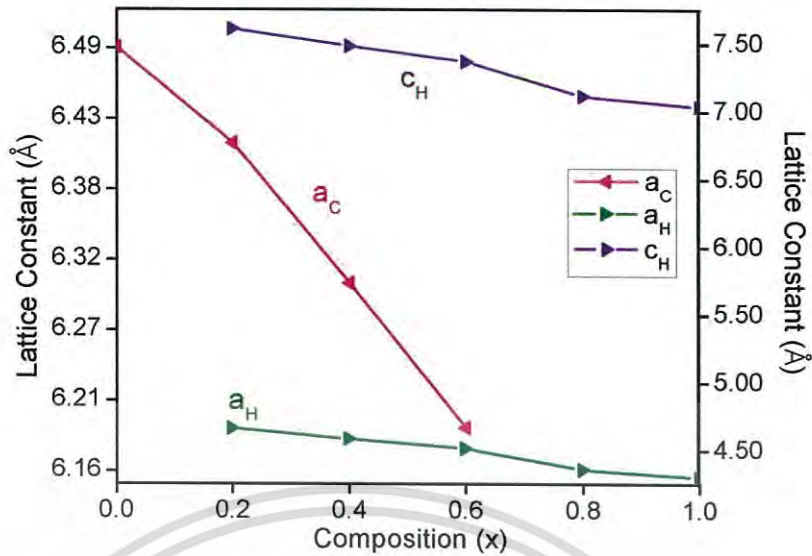
จากการศึกษาลักษณะของโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีในระยะประชิด พบว่าเมื่อเศษส่วนโดยโมลอะตอมของ (x) ≤ 0.2 ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำจะมีลักษณะโครงสร้างผลึกเป็นแบบคิวบิก และเมื่อเศษส่วนโดยโมลอะตอม $0.2 \leq x \leq 1.0$ ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำจะมีลักษณะโครงสร้างผลึกเป็นแบบเวิร์ทไซด์
ระนาบที่โดดเด่นของโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซด์ คือระนาบ (002) ส่วนระนาบที่โดดเด่นของโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก คือระนาบ (111) ค่าคงที่โครงผลึก (a_c) ของโครงผลึกแบบคิวบิกสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad \text{เมื่อ } n = 1, 2, 3, \dots$$

และ

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

ส่วนค่าคงที่โครงผลึก (a_c) ของโครงผลึกคิวบิกสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของค่าคงที่โครงผลึก a_H และ c_H ของโครงผลึกแบบเฮกซะโกนัล โดยอาศัยสมการที่ (4.1) และ (4.2) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่โครงผลึก a_c , a_H และ c_H กับเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีในระยะประชิด แสดงไว้ดังรูปที่ (4.6)



รูปที่ 4.6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าคงที่โครงสร้างผลึก a และ c กับ เศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที

สำหรับกรณีของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่ไม่ได้เจือด้วยสารประกอบ CdTe สามารถหาค่าขนาดของเกรนได้จากสมการ

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

$$D = \frac{(1)(0.154 \times 10^{-9})}{0.00168 \times \cos\left(\frac{25.302}{2}\right)}$$

$$D = 83.51 \text{ นาโนเมตร}$$

จากการศึกษาค่าขนาดของเกรนสามารถหาค่าได้จากพีคของความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยใช้วิธีวิลเลียมสัน-ฮอลล์ (Williamson-Hall method) ซึ่งเป็นวิธีที่นำอิทธิพลที่เกิดจากค่าความเครียดของสารตัวอย่างมาคำนวณด้วยซึ่งสมการคือ

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เมื่อ D คือ ค่าขนาดของเกรน

k คือ ค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับขนาดและรูปร่างของเกรน

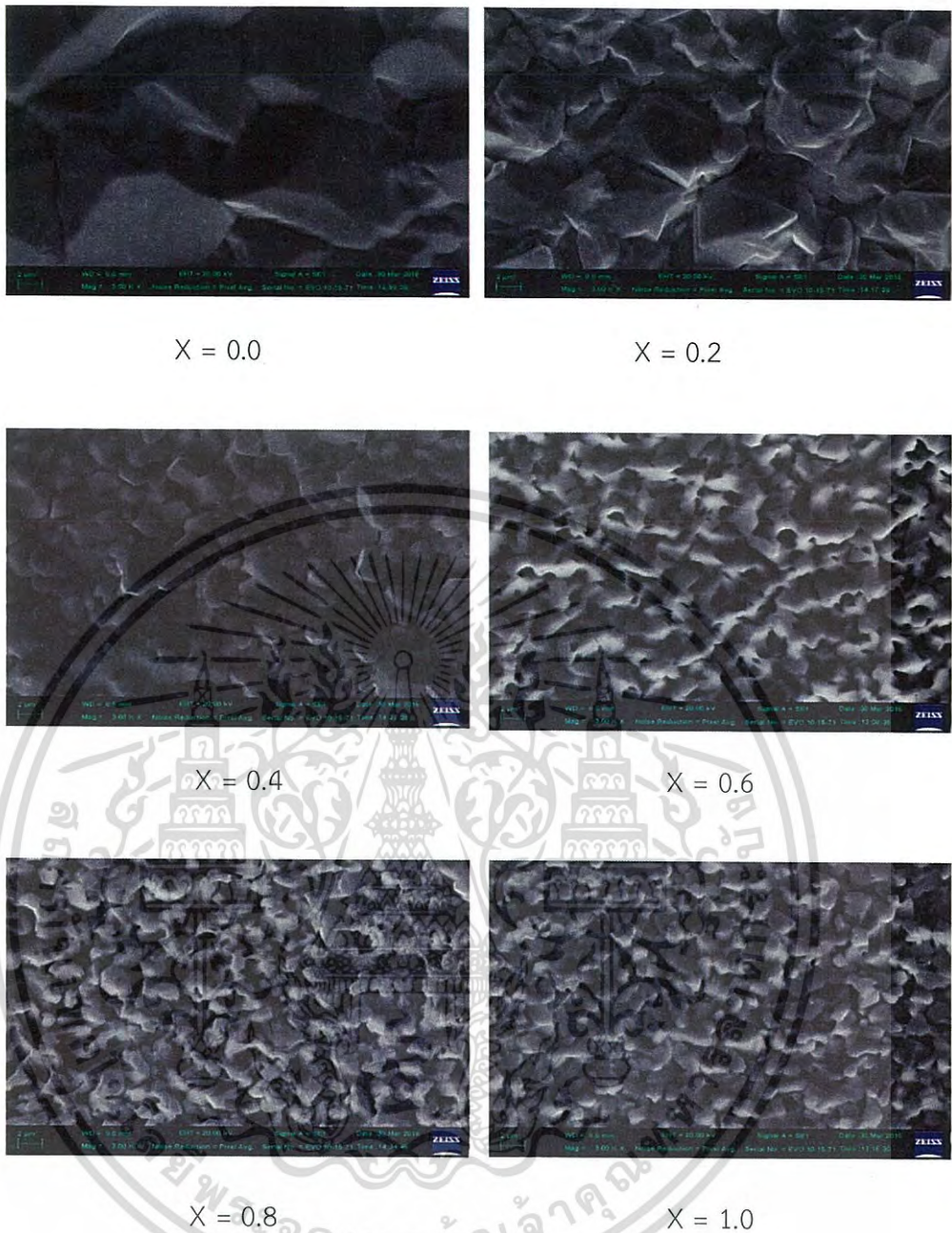
β คือ ระยะความกว้างของพีคที่ความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ที่ค่าเป็นครึ่งหนึ่งของความเข้มสูงสุด (full width at half-maximum of the diffraction peak)

ε คือ ค่าความเครียด

จะได้ว่าสามารถหาค่าขนาดของเกรนได้จากจุดตัดแกน y และหาค่าความเครียดได้จากค่าความชันของกราฟซึ่งแสดงค่าในตารางที่ 4.1

4.3.2 ผลการศึกษาภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางของสาร กึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

การศึกษาโครงสร้างผลึกมหภาคของบริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นการศึกษาถึงลักษณะของสภาพพื้นผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ และจากภาพถ่าย SEM ยังสามารถบอกถึงค่าขนาดของเกรนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำได้ ภาพถ่าย SEM ที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.6

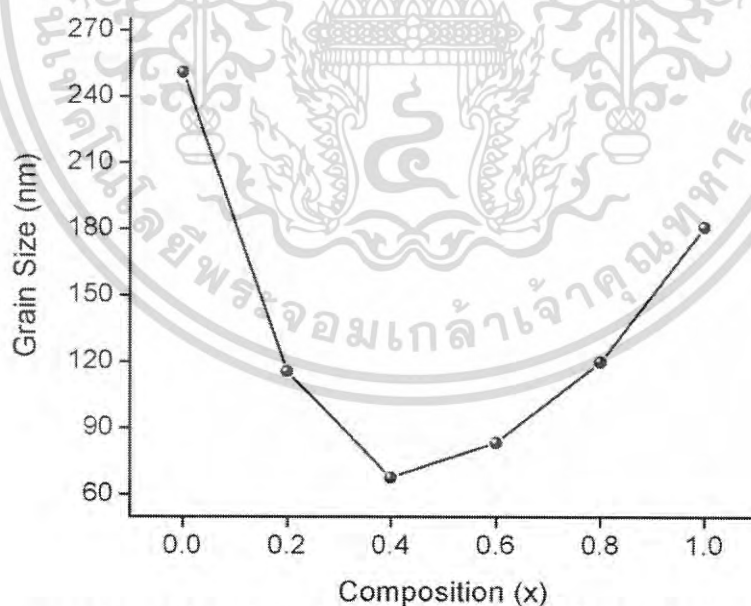


รูปที่ 4.7 แสดงภาพถ่าย SEM ของบริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการ ระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แสดงขนาดเกรน ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที

Composition (x)	Texture Coefficient	Grain size (nm) from XRD	Dislocation density (line/m^2)	Strain (ϵ)
0.0	2.9073	120.22	6.91×10^{13}	1.5583×10^{-3}
0.2	1.5709	54.02	3.42×10^{14}	3.4275×10^{-3}
		32.46	9.49×10^{14}	3.4921×10^{-3}
		28.12	1.26×10^{15}	3.4392×10^{-3}
0.4	2.2819	31.56	1.00×10^{15}	5.7560×10^{-3}
0.6	2.7254	38.78	6.64×10^{14}	4.6090×10^{-3}
0.8	2.9674	55.74	3.21×10^{14}	3.1901×10^{-3}
1.0	2.3202	83.51	1.43×10^{14}	2.1050×10^{-3}
		54.74	3.33×10^{14}	2.3361×10^{-3}
		45.53	4.82×10^{14}	2.1799×10^{-3}

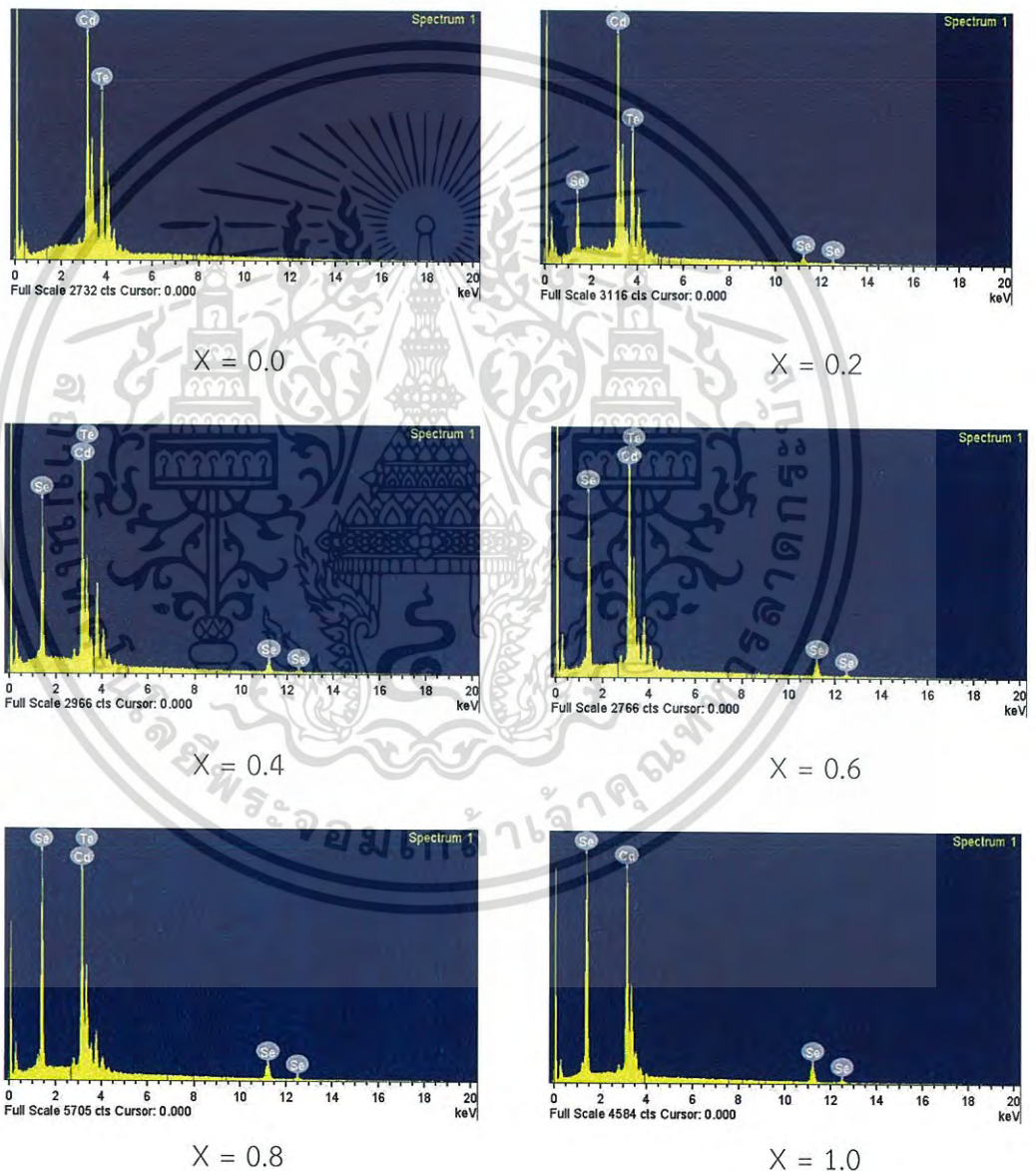


รูปที่ 4.8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าขนาดของเกรน กับ เศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่น กระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ของบริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

การศึกษาการวิเคราะห์ธาตุของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดด้วย EDS (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) เพื่อเป็นการระบุชนิด และ ปริมาตรของธาตุที่อยู่ในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 4.9 แสดงสเปกตรัม EDS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที

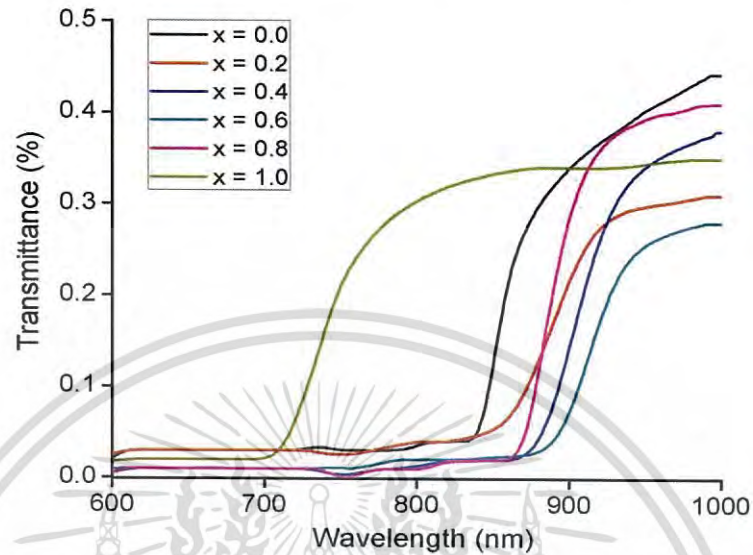
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แสดงองค์ประกอบของธาตุต่างๆ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมี ด้วยความร้อนในระยยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที

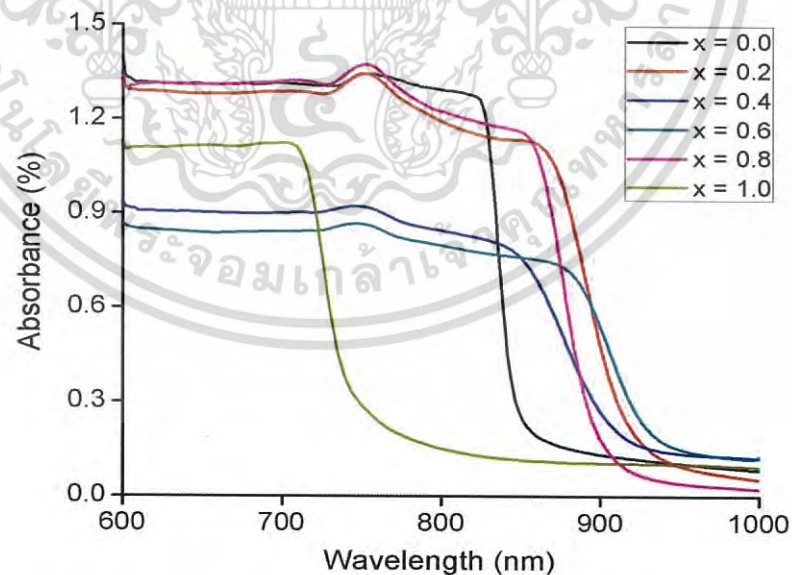
Composition (x)	EDS analysis					
	Weight			Atomic		
	Cd (%)	Te (%)	Se (%)	Cd (%)	Te (%)	Se (%)
0.0	47.2	52.8	-	50.4	49.6	-
0.2	48.8	40.7	10.5	49.0	36.0	14.9
0.4	49.1	25.9	24.9	45.7	21.3	33.1
0.6	53.2	18.5	28.3	48.49	14.9	36.7
0.8	53.1	12.5	34.4	46.9	9.7	43.3
1.0	58.1	-	41.9	49.4	-	50.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.4 ผลการศึกษาสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

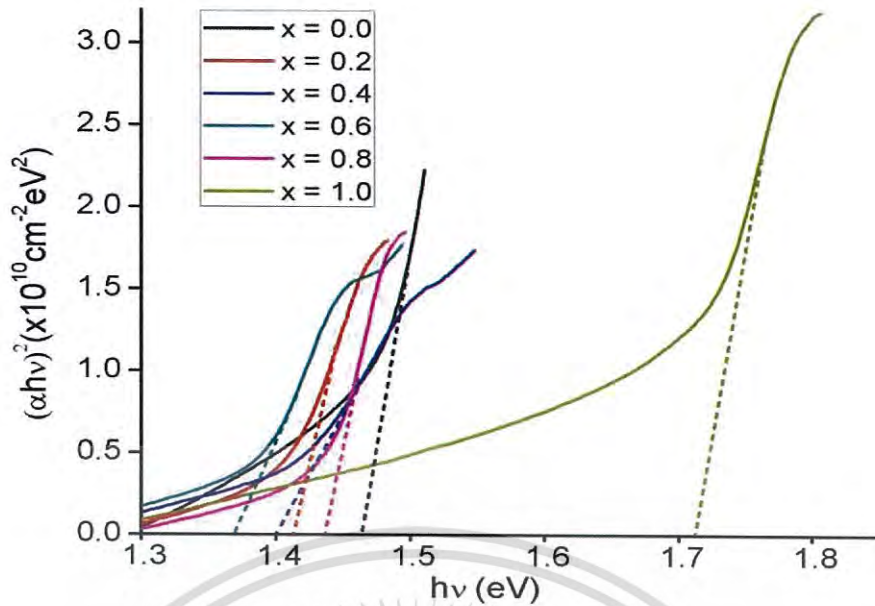


รูปที่ 4.10 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง กับ ความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่น กระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที

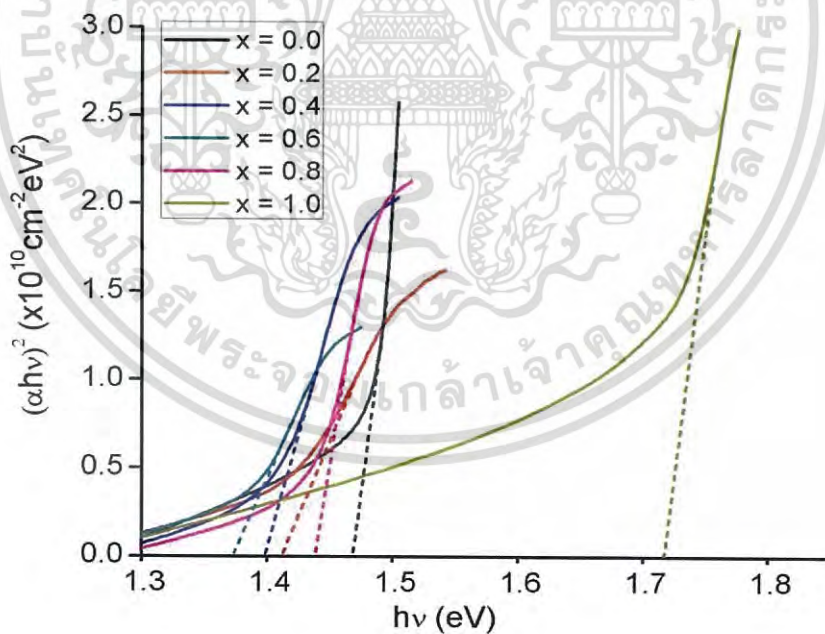


รูปที่ 4.11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน กับ ความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่น กระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $(\alpha hv)^2$ ของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง กับ ค่าพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที



รูปที่ 4.13 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $(\alpha hv)^2$ ของค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน กับ ค่าพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที

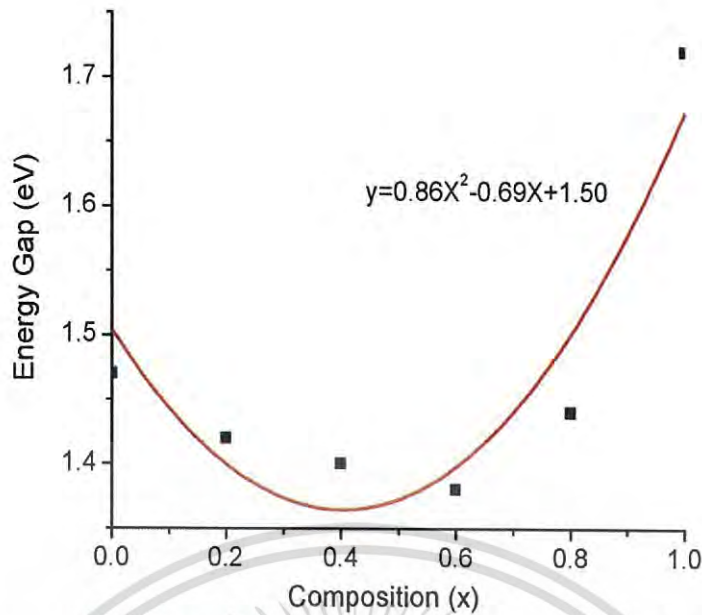
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมี ด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที พบว่าขอบการดูดกลืนแสง อยู่ที่ความยาวคลื่นแสงประมาณ 843, 873, 885, 898, 861 และ 720 นาโนเมตร ของกรณีเศษส่วน โดยโมลอะตอม (x) = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 ตามลำดับ และสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงมี ค่าประมาณ 0.1-0.5 เปอร์เซ็นต์ ข้อมูลที่ได้จากสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงสามารถ คำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน โดยนำข้อมูลที่ได้ไปวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $(ah\nu)^2$ กับ พลังงานโฟตอน ($h\nu$) แล้วทำการลากเส้นตรงหาค่าคาดหมาย (extrapolation) ของกราฟใน ส่วนที่เป็นเชิงเส้นไปตัดกับแกนค่าพลังงานโฟตอน จุดที่ตัดแกนพลังงานโฟตอนคือ ค่าช่องว่าง แถบพลังงาน แสดงได้ในรูปที่ 4.10 รูปที่ 4.11 และ ในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมี ด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที

Composition (x)	Energy Gap (eV)
0.0	1.47
0.2	1.42
0.4	1.40
0.6	1.38
0.8	1.44
1.0	1.72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

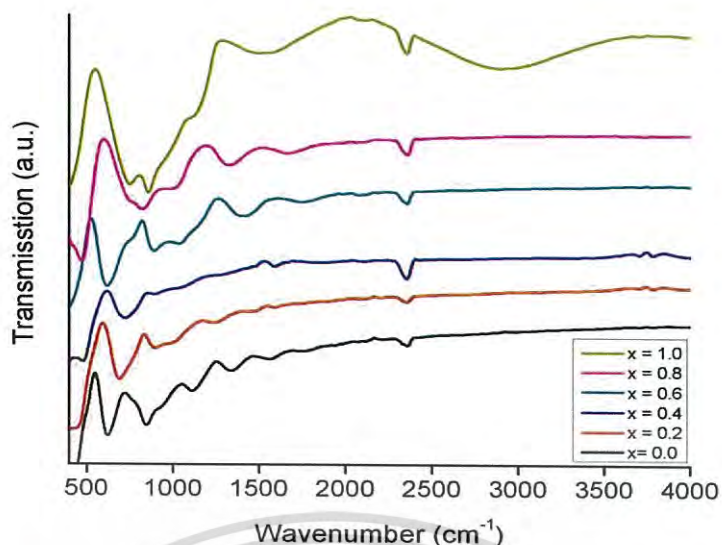


รูปที่ 4.14 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) กับ เศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที

4.3.5 ผลการศึกษาฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

จากรูปที่ 4.14-4.16 แสดงสเปกตรัม FTIR ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที สามารถอธิบายได้โดยการที่สารดูดกลืนรังสีอินฟราเรดนั้น ความถี่ของรังสีที่ถูกดูดกลืนจะต้องตรงกับความถี่ของการสั่นพันธะระหว่างไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้าของสารประกอบเท่านั้น จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ของสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน กับเลขคลื่นในช่วงเลขคลื่น 400-4000 ต่อเซนติเมตร กรณี $x = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ และ 1.0 ปรากฏแถบการสั่นแบบยืดของพันธะระหว่างไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้าของสารประกอบ Cd-O ที่ค่าเลขคลื่นเท่ากับ 403-470 และเกิดแถบการสั่นแบบยืดของพันธะระหว่างไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้าของสารประกอบ Cd-Se ที่ค่าเลขคลื่นเท่ากับ 617-896 นอกจากนี้ยังพบการสั่นแบบยืดของพันธะระหว่างไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้าของสารประกอบ O-H, N-C และ C-H เป็นต้น ซึ่งเลขคลื่นที่ปรากฏทั้งหมดสอดคล้องกับคณะผู้วิจัยของ Ivashchenko (2015), Muthusamy (2012) และ Brahim (2015)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

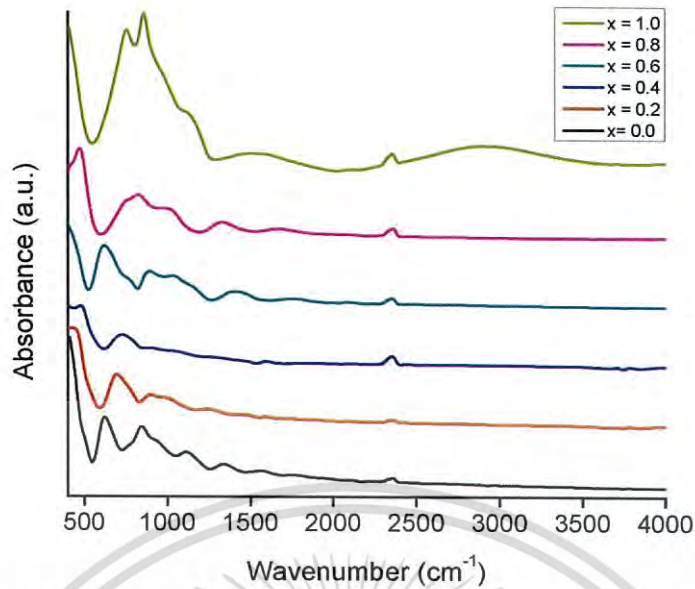


รูปที่ 4.15 แสดงสเปกตรัม FTIR ในช่วงเลขคลื่น 400-4000 ต่อเซนติเมตร ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าเลขคลื่นของการสั่นรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที

FTIR Peaks						Assignments	References
Composition (x)							
0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0		
-	-	-	-	470	-	Cd-O bending	Ivashchenko et al, 2015
617	724	689	617	-	751	Cd-Se bond stretching	Brahim, 2015; Muthusamy, 2011
847	-	896	892	819	857	Cd-Se bond stretching	Muthusamy, 2012
1344	-	-	-	1325	-	N-C stretch	Muthusamy, 2012
-	-	-	1409	-	1491	C-H stretching mode	Brahim, 2015
-	1592	-	-	1653	-	O-H bending mode	Brahim, 2015
2359	2354	2352	2356	2356	2356	NO+ nitriles	Ivashchenko et al, 2015
-	-	-	-	-	2897	C-H stretching mode	Brahim, 2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 แสดงสเปกตรัม FTIR ในช่วงเลขคลื่น 400-4000 ต่อเซนติเมตร ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าเลขคลื่นของการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที

FTIR Peaks						Assignments	References
Composition (x)							
0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0		
-	477	-	-	470	403	Cd-O bending	Ivashchenko et al, 2015
620	-	689	617	-	-	Cd-Se stretch	Ivashchenko et al, 2015
-	724	-	-	-	751	Cd-Se stretch	Ivashchenko et al, 2015
845	-	896	892	819	857	-H=H mode	Ivashchenko et al, 2015
-	-	-	1409	1325	1491	N-C stretch	Ivashchenko et al, 2015
-	2353	-	2356	2356	2356	NO+ nitriles	Ivashchenko et al, 2015
-	-	-	-	-	2897	C-H stretching mode	Brahim, 2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.6 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิด

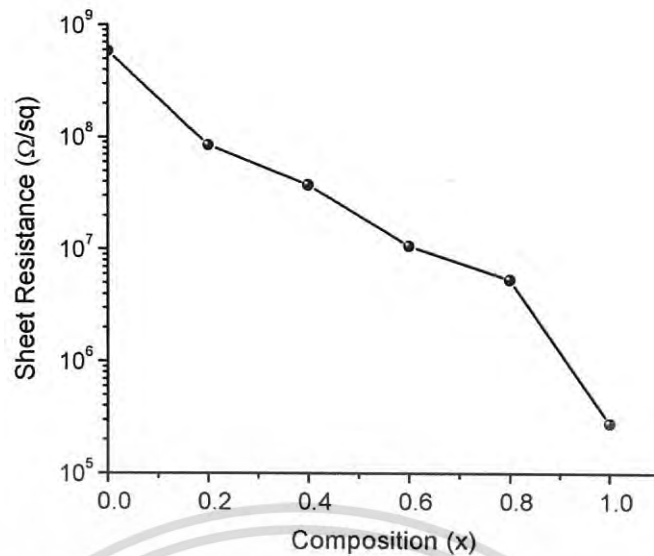
4.3.6.1 ผลการคำนวณหาค่าความต้านทาน ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิด

ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) โดยการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิด จากการทดลองพบว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่ไม่ได้เจือด้วยสารประกอบ CdSe จะมีค่าความต้านทานแผ่นสูงมากระดับ 5.86×10^8 โอห์มต่อตารางหน่วย แต่เมื่อเจือด้วยสารประกอบ CdSe ในปริมาณเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) มีค่าเพิ่มขึ้น ความต้านทานแผ่นจะลดลงต่ำสุดเป็น 2.80×10^5 โอห์มต่อตารางหน่วย ดังแสดงในรูปที่ 4.3

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าความต้านทานแผ่นของ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที

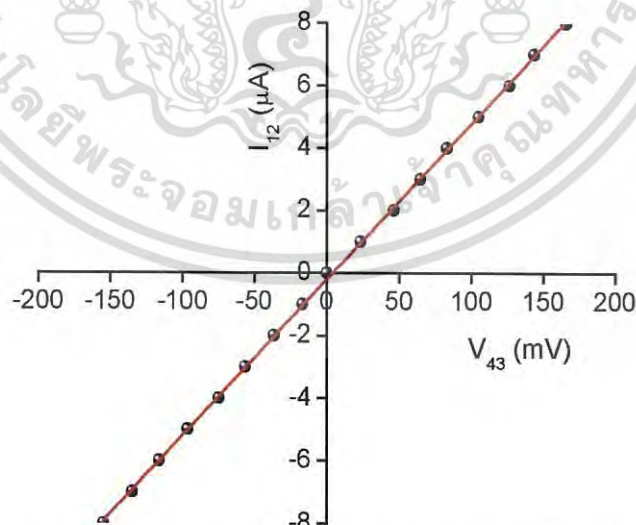
Composition (x)	Sheet Resistance (Ω /sq)
0.0	5.86×10^8
0.2	8.48×10^7
0.4	3.74×10^7
0.6	1.08×10^7
0.8	5.36×10^6
1.0	2.80×10^5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



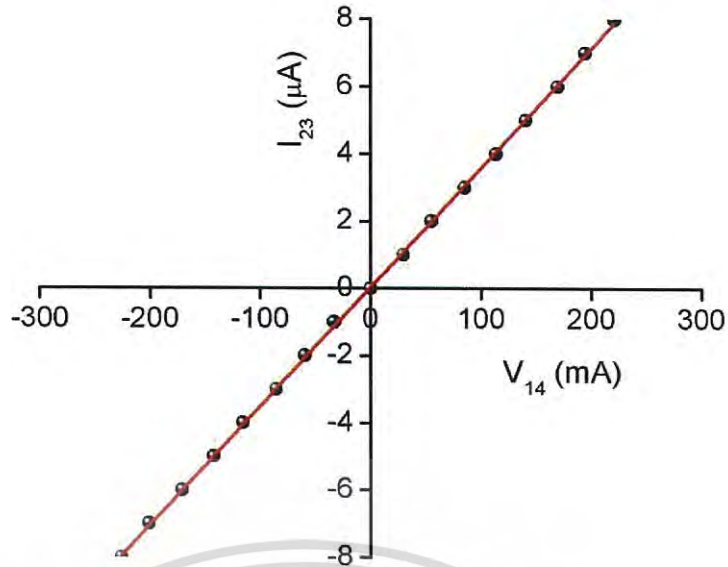
รูปที่ 4.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต้านทานแผ่น กับ เศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด ใช้เวลาในการระเหิด 10 นาที

4.3.6.2 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า และปรากฏการณ์ฮอลล์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่น กระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

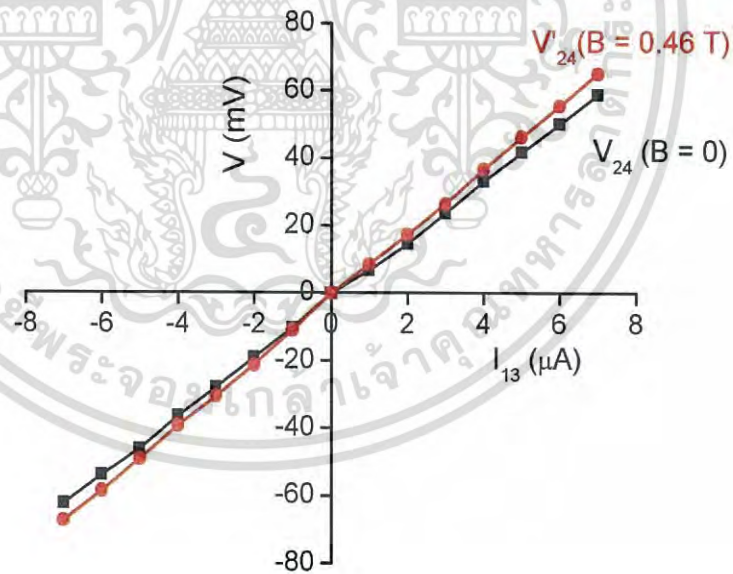


รูปที่ 4.18 แสดงการหา ค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_1) ด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ เมื่อ $x=1.0$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 10 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

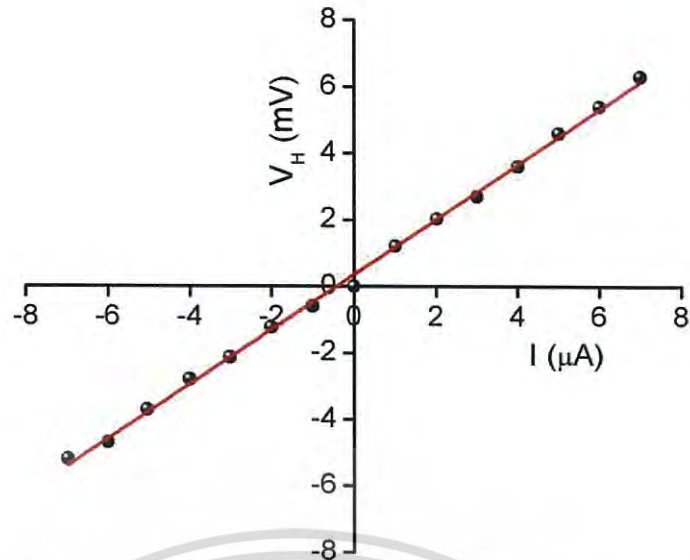


รูปที่ 4.19 แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_2) ด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ เมื่อ $x=1.0$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที



รูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (V_{24}) และ (V'_{24}) กับ ค่ากระแสไฟฟ้า (I_{13}) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ เมื่อ $x=1.0$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

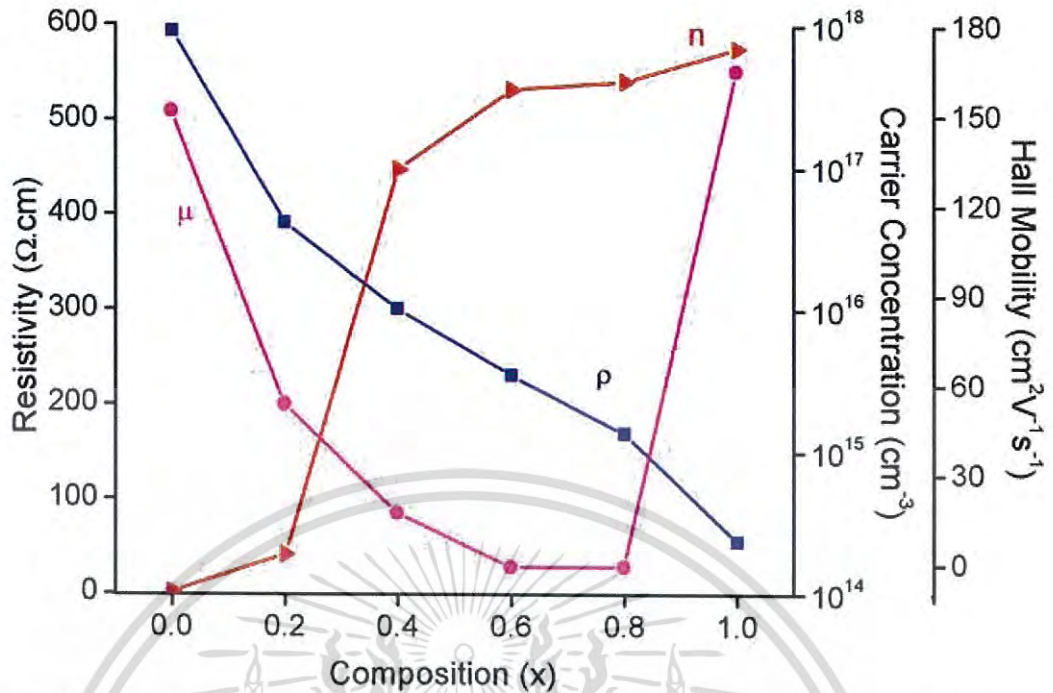


รูปที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) กับ ค่ากระแสไฟฟ้า (I_{13}) ของฟิล์มบาง ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) เมื่อ $x=0.0$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับ ที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนใน ระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที

ตารางที่ 4.8 แสดงการศึกษา ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าและปรากฏการณ์ฮอลล์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดเมื่อใช้เวลาในการระเหิด 10 นาที

Composition of (x) ($\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$)	Resistivity ($\Omega\text{-cm}$)	Hall Coefficient (cm^2/C)	Carrier Concentration (cm^{-3})	Hall Mobility ($\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$)	Type
0.0	5.93×10^2	5.96×10^4	1.05×10^{14}	152.48	p
0.2	3.91×10^2	3.24×10^4	1.93×10^{14}	54.63	p
0.4	3.00×10^2	6.30×10^1	9.91×10^{16}	18.17	p
0.6	2.30×10^2	1.53×10^1	3.59×10^{17}	0.07	n
0.8	1.68×10^2	1.74×10^1	4.08×10^{17}	0.10	n
1.0	5.42×10^1	8.98×10^3	6.96×10^{17}	165.77	n

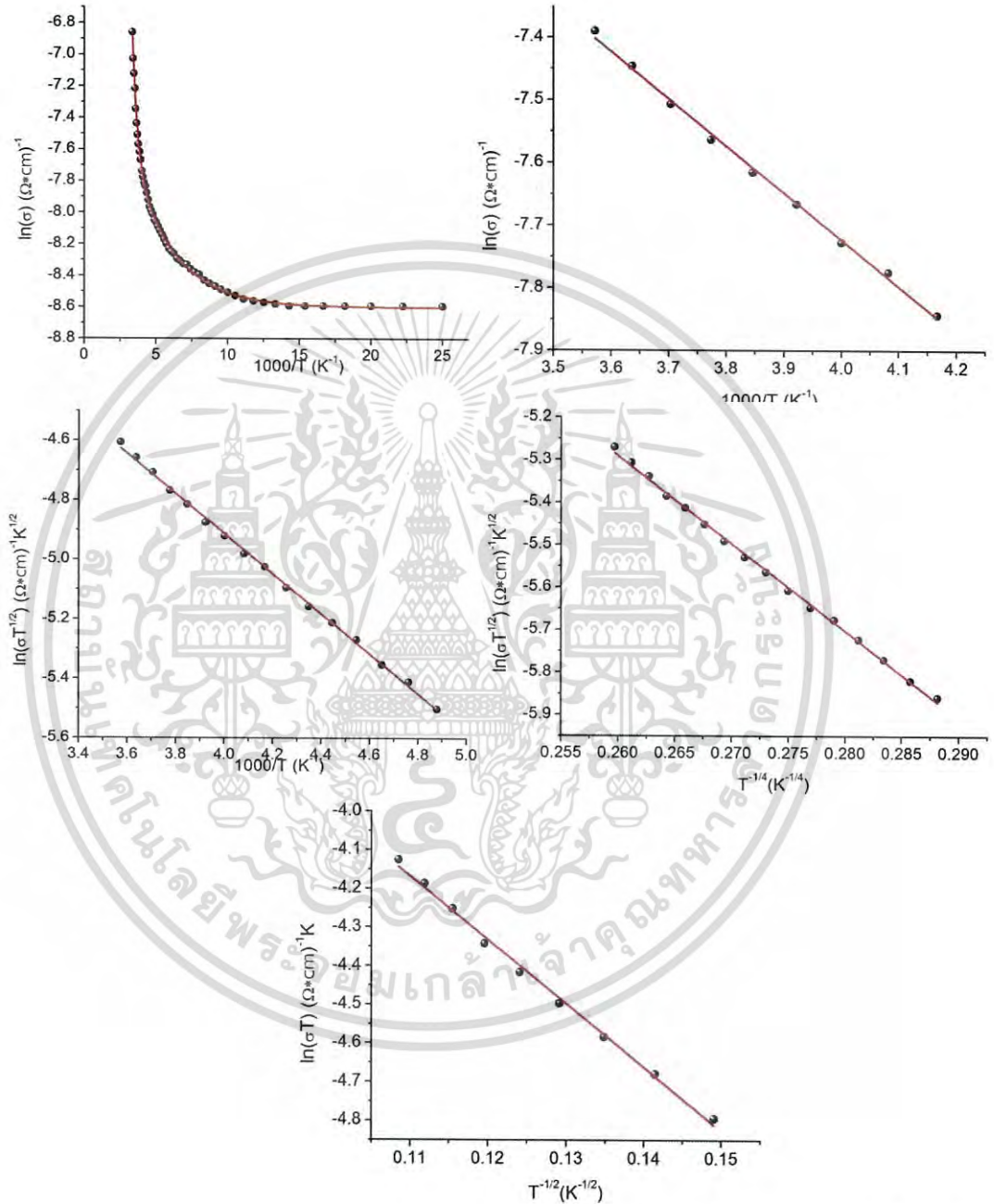
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอน และ ค่าสภาพคล่องของพาหะ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่ เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมี ด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.6.3 ผลการศึกษาค่าความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

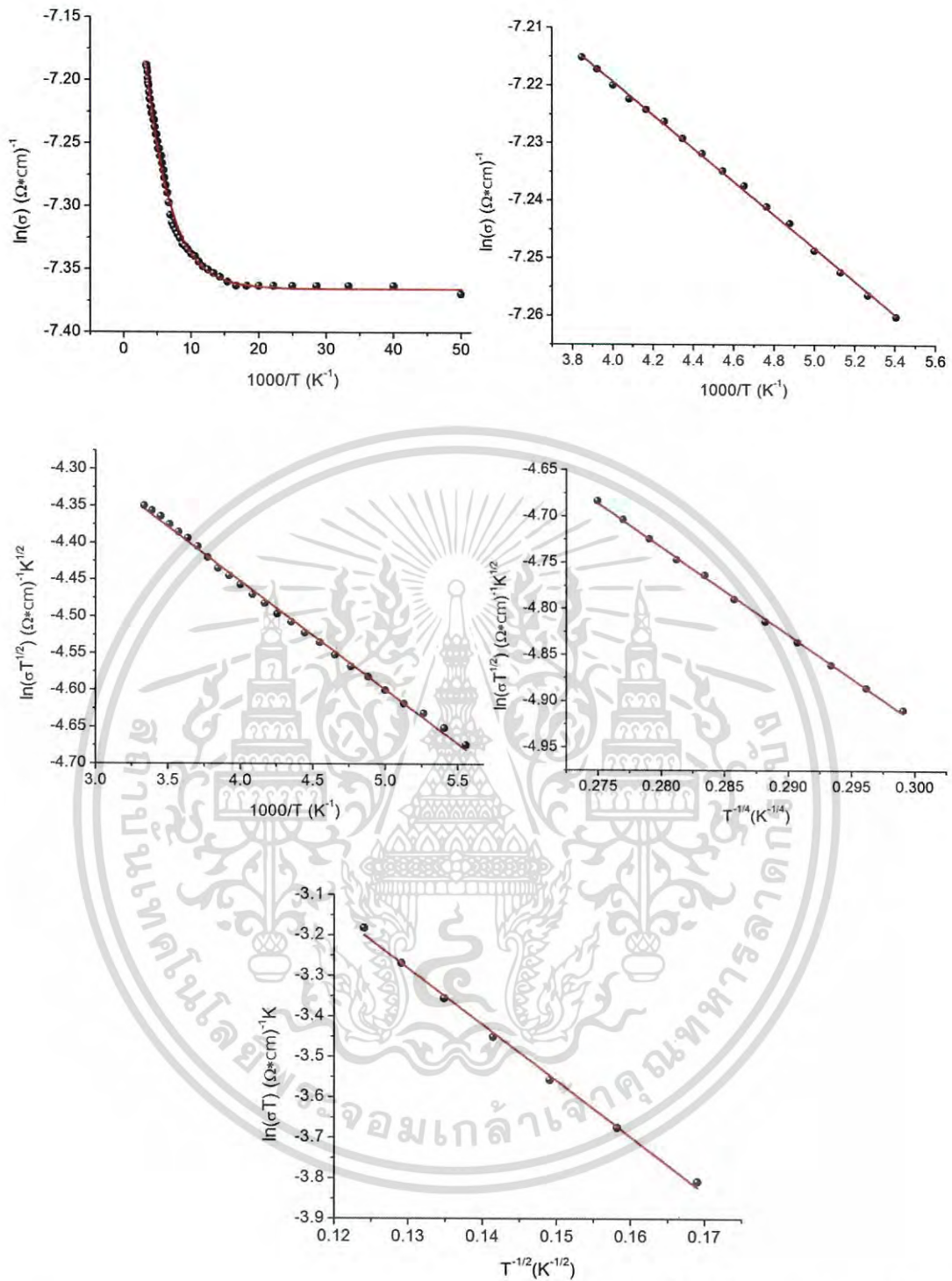


รูปที่ 4.23 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \sigma$ กับ $\frac{1000}{T}$, $\ln(\sigma T^{\frac{1}{2}})$ กับ $\frac{1000}{T}$, $\ln(\sigma T^{\frac{1}{2}})$

กับ $T^{-\frac{1}{4}}$ และ $\ln(\sigma T)$ กับ $T^{-\frac{1}{2}}$ ตามลำดับ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ เมื่อ $x=0.8$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียม โดยวิธีการระเหิด

สารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญตให้มาใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \sigma$ กับ $\frac{1000}{T}$, $\ln \left(\sigma T^{\frac{1}{2}} \right)$ กับ $\frac{1000}{T}$, $\ln \left(\sigma T^{\frac{1}{2}} \right)$

กับ $T^{-\frac{1}{4}}$ และ $\ln(\sigma T)$ กับ $T^{-\frac{1}{2}}$ ตามลำดับ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ เมื่อ $x=1.0$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียม โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

- การหาค่าพลังงานกระตุ้น (E_a)

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

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

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

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

แทนค่า

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

$$E_a = \frac{1000k(1.38 \times 10^{-23})(-0.6769)}{1.6 \times 10^{-19}}$$

$$E_a = 0.0584 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

- การหาค่าเพอร์มิตติวิตี (ϵ_s)

$$\epsilon_s = \epsilon_r \epsilon_0$$

$$\epsilon_s = (10.16)(8.85 \times 10^{-14})$$

$$\epsilon_s = 8.99 \times 10^{-13} \text{ ฟารัดต่อตารางเซนติเมตร}$$

- 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

$$N_a = \frac{8(8.99 \times 10^{-13})(0.0584)(1.6 \times 10^{-19})}{(1.6 \times 10^{-19})^2 (55.74 \times 10^{-7})^2}$$

$$N_a = 8.4506 \times 10^{16} \text{ ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร}$$

- การหาค่าความยาวเดอบาย (L_D)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$L_D = \left(\frac{(1.38 \times 10^{-23})(280)(8.99)}{(1.6 \times 10^{-19})^2 (8.4506 \times 10^{16})} \right)^{1/2}$$

$$L_D = 1.2673 \times 10^{-6} \text{ เซนติเมตร}$$

- การหาค่าระดับพลังงานของกึ่งตัวนำ (E_i)

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

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

$$E_i = \frac{1}{2} (1.4250) - 0.0584$$

$$E_i = 0.6541 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

- การหาค่าความหนาแน่นของกึ่งตัวนำ (N_i)

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

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

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

แทนค่า $v_c = \left[\frac{(1.38 \times 10^{-23})(280)}{2\pi(0.15 \times 9.1 \times 10^{-31})} \right]^{1/2}$

$$v_c = 6.7122 \times 10^4 \text{ เซนติเมตรต่อวินาที}$$

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

แทนค่า $N_v = 2 \left[\frac{2\pi(0.15 \times 9.1 \times 10^{-31})(1.38 \times 10^{-23})(280)}{(6.63 \times 10^{-34})^2} \right]^{3/2}$

$$N_v = 1.3029 \times 10^{24} \text{ ต่อตารางเซนติเมตร}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น

$$N_t = \left[\frac{(55.74 \times 10^{-7})^2 (1.6 \times 10^{-19}) (1.3092 \times 10^{24}) (8.4506 \times 10^{16}) (6.7122 \times 10^4)}{2 \left(\frac{1.38 \times 10^{-23}}{1.6 \times 10^{-19}} \right) (280) (6.5 \times 10^{-4})} \right] \times$$

$$\exp \left(- \frac{0.0584 \times 1.6 \times 10^{-19}}{1.38 \times 10^{-23} \times 280} \right) + (55.74 \times 10^{-7} \times 8.4506 \times 10^{16})$$

$N_t = 4.7104 \times 10^{11}$ ต่อตารางเซนติเมตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Composition (x) of CdTe _{1-x} Se _x	Temperature range (K)	σ_{RR} (S/cm) (10 ⁻⁴)	ϵ_s (F/cm ²) (10 ⁻¹³)	Grain Size (L) (nm)	E_b (eV)	N_d (cm ⁻³) (10 ¹⁵)	E_i (eV)	N_i (cm ⁻³) (10 ¹⁰)	L_D (cm)
0.8	280-220	6.5	8.99	55.74	0.0584	84.506	0.65	47.10 (@280K)	1.27x10 ⁻⁶
1.0	300-180	7.6	8.99	83.51	0.0129	8.312	0.85	6.95 (@300K)	4.18x10 ⁻⁶

ตารางที่ 4.9 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คำนวณได้จากแบบจำลองของซีโต ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe_{1-x}Se_x (0 ≤ x ≤ 1) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที

เมื่ออุณหภูมิลดต่ำลง พลังงานความร้อนไม่สูงพอที่จะกระตุ้นอิเล็กตรอนให้หลุดออกจากระดับพลังงานผู้ให้ (donor level) (ในกรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น) ไปยังแถบนำ เพื่อกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำที่จะไหลข้ามกำแพงศักย์ที่ขอบของเกรนได้ ดังนั้นอิเล็กตรอนของระดับพลังงานผู้ให้จะกระโดดไปยังระดับพลังงานผู้ให้ที่อยู่ติดกัน (nearest-neighbour donors) ซึ่งระดับพลังงานผู้ให้เหล่านี้จะก่อตัวเป็นแถบพลังงาน (impurity band) ซึ่งจะเกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำชนิดคอมแพนเซตอย่างแรง (highly compensated semiconductor) นั่นคือเมื่ออุณหภูมิต่ำลง การนำไฟฟ้าจะเกิดจากกลไกการกระโดดของอิเล็กตรอนระหว่างระดับผู้ให้ที่อยู่ติดกัน (nearest neighbor hopping conduction; NNH) สภาพนำไฟฟ้าสามารถเขียนได้ตั้งความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln \sigma$ กับ $\frac{1000}{T}$ ดังสมการ

$$\sigma = \sigma_{0,NNH} \exp\left(-\frac{E_{0,NNH}}{kT}\right)$$

$$\ln \sigma = -\frac{E_{NNH}}{1000k} \left(\frac{1000}{T}\right) + \ln \sigma_{0,NNH}$$

ความชัน = $-\frac{E_{NNH}}{1000k}$

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

$$E_{NNH} = \frac{1000k(1.38 \times 10^{-23})(-0.6769)}{1.6 \times 10^{-19}}$$

$$E_{NNH} = 0.06457 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

โดยที่ $E_{0,NNH} = \frac{0.99e^2 N_d^{1/3}}{4\pi\epsilon_s}$

$$N_d = \left[\frac{E_{0,NNH} 4\pi\epsilon_s}{0.99e^2} \right]^3$$

$$N_d = \left[\frac{(4\pi)(8.9916 \times 10^{-13})(0.0646)(1.6 \times 10^{-19})}{0.99(1.6 \times 10^{-19})^2} \right]^3$$

$$N_d = 9.79 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$$

เมื่อ $\rho_{0,NNH}$ คือ ค่าคงที่

N_d คือ ความเข้มข้นของสารเจือชนิดผู้ให้ (donor concentration)

E_{NNH} คือ พลังงานกระตุ้นให้อิเล็กตรอนกระโดด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิของการทรานซิสชันจากกลไกการกระโดดในระยะไม่คงที่ของมอตต์ (Mott VRH) จะเป็นไปตามความสัมพันธ์

$$T_{Cl} = \frac{e^2 N_d^{7/3} \xi_{Mott}}{4\pi\epsilon_s k_B}$$

สมการที่ (3) จะใช้ได้ก็ต่อเมื่อ $k > 0.5$ ค่า k นี้คือ อัตราส่วนของ $\frac{N_a}{N_d}$ (กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น)

นิยามดังนี้ คือ

$$k = \frac{N_a}{N_d} = 1 - \left(\frac{N_0(E_F)e^2}{2\epsilon_s} \right)^{3/4} \left(\frac{1}{N_d} \right)^{1/2}$$

เมื่อ N_a คือ ความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ (acceptor concentration)

จากการทดลองสามารถคำนวณหาค่า N_d ได้จากค่า E_{NNH} จากนั้นจะนำมาคำนวณหาค่า k ได้จากค่า $N_0(E_F)$ และ N_d เมื่อรู้ค่า k แล้วก็จะคำนวณหาค่า N_a ได้

สำหรับค่าอุณหภูมิทรานซิสชัน (T_{Cl}) จากกลไก NNH ไปเป็น Mott-VRH จะคำนวณได้เมื่อรู้ค่า ξ_{Mott}, N_d และ ϵ_s ตามลำดับ

จากสมการ
$$\sigma = \sigma_{0,NNH} \exp\left(-\frac{E_{NNH}}{kT}\right)$$

$$\ln \sigma = -\frac{E_{NNH}}{1000k} \left(\frac{1000}{T} \right) + \ln \sigma_{0,NNH}$$

ความชัน คือ $\frac{E_{NNH}}{1000k}$ ส่วนจุดตัดแกน y คือ $\ln \sigma_{0,NNH}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 แสดงค่าพารามิเตอร์ของกลไกการกระโดดของอิเล็กตรอนระหว่างระดับผู้ให้ที่อยู่ติดกัน (NNH) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็น แผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนใน ระยะเวลาประชิด

Composition (x) of $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$	Temperature range (K)	$\sigma_{0,NNH}$ (S/cm) (10^3)	E_{NNH} (meV)	T_{C1} (K)	N_d (cm^{-3})	N_a (cm^{-3})	k
0.8	260-220	8.84	64.57	281.42	9.79×10^{19}	9.79×10^{19}	1
1.0	260-185	0.82	2.49	0.42	5.62×10^{15}	5.62×10^{15}	1

เมื่ออุณหภูมิต่ำลงอีก กลไกการนำไฟฟ้าจะเป็นแบบการกระโดดระหว่างระดับพลังงานในระยะไม่คงที่ (Variable Range Hopping; VRH) ซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์

$$\sigma = \sigma_0(T) \exp\left[\left(-\frac{T_0}{T}\right)^s\right]$$

$$\sigma_0(T) = \sigma_0(T)^{-2s}$$

ในกรณีที่พาหะสามารถกระโดดได้ใน 3 มิติ และ 2 มิติ แล้ว $s = \frac{1}{4}$ และ $\frac{1}{3}$ ตามลำดับ ซึ่งจะเป็นกลไกการนำไฟฟ้าแบบกระโดดในระยะไม่คงที่ของมอตต์ (Mott VRH) ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อคิดว่าความหนาแน่นของสถานะพลังงานท้องถิ่น (density of localized states) ที่ระดับเฟอร์มีมีค่าคงที่ แต่เมื่อพิจารณาถึงอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนในสถานะพลังงานท้องถิ่นด้วยกันเอง ส่งผลให้ความหนาแน่นของสถานะพลังงานที่ระดับเฟอร์มีแยกออกจากกันกลายเป็นช่องว่างซึ่งเรียกว่า ช่องว่างของคูลอมบ์ (Coulomb gap) ซึ่งกลไกการนำไฟฟ้าจะเป็นแบบกระโดดในระยะไม่คงที่ของเอฟรอส-ชลอฟสกี (efros-shklovskii VRH; ES-VRH) ซึ่งจะได้ว่า $s = \frac{1}{2}$

สำหรับกลไกการนำไฟฟ้าแบบกระโดดในระยะไม่คงที่ของมอตต์ (Mott VRH) จะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$\sigma T^{1/2} = \sigma_{0,Mott} \exp \left[- \left(\frac{T_{0,Mott}}{T} \right)^{1/4} \right]$$

$$\ln(\sigma T^{1/2}) = - \left(\frac{T_{0,Mott}}{T} \right)^{1/4} + \ln \sigma_{0,Mott}$$

โดยที่องศาของความไม่เป็นระเบียบ ($T_{0,Mott}$) คือ

$$T_{0,Mott} = \frac{18.1}{k_B \xi_{Mott} N_0(E_F)}$$

ความชันของสมการที่ (10) คือ $T^{1/4}_{0,Mott}$

ส่วน $\sigma_{0,Mott}$ คือสัมประสิทธิ์หน้าพจน์เอกซ์โพเนนเชียล (pre-exponential) จะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$\sigma_{0,Mott} = 3e^2 v \left[\frac{N_0(E_F) \xi_{Mott}}{8\pi k_B} \right]^{1/2}$$

$$T_{0,Mott} = 1.7910 \times 10^5 \text{ เคลวิน}$$

$$\sigma_{0,Mott} = 1.0598 \text{ ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร}$$

ส่วนระยะโลคัลไลเซชัน (localization length; ξ_{Mott}) ซึ่งแสดงถึงโอกาสที่จะเกิดการกระโดดระหว่างสถานะพลังงานท้องถิ่น คือ

$$\xi_{Mott} = \frac{1}{21.23 \sigma_{0,Mott} T_{0,Mott}^{1/2}}$$

$$\xi_{Mott} = \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{1.24 \times 10^7} = 0.80645 \text{ nm}$$

ส่วนความหนาแน่นของสถานะถูกจำกัดเฉพาะที่ (density of localized state; $N_0(E_F)$) ที่ระดับเฟอร์มี คือ

$$N_0(E_F) = 2.0 \times 10^9 \sigma_{0,Mott}^3 T_{0,Mott}^{1/2}$$

หรือ

$$N_0(E_F) = \frac{18\alpha^3}{k_B T_{0,Mott} q}$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$q = 1.6 \times 10^{-19}$ คูโลมบ์

$$N_0(E_F) = \frac{18\alpha^3}{\frac{k_B}{q} T_{0,Mott}} = 2.2217 \times 10^{21} \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

ส่วนระยะทางเฉลี่ยของการกระโดด หรือ ($R_{hop,Mott}$) คือ

$$\frac{R_{hop,Mott}}{\xi_{Mott}} = \frac{3}{8} \left(\frac{T_{0,Mott}}{T} \right)^{1/4}$$

$$\frac{R_{hop,Mott}}{\xi_{Mott}} = \frac{3}{8} \left(\frac{1.791 \times 10^5}{200} \right)^{1/4}$$

$$\frac{R_{hop,Mott}}{\xi_{Mott}} = 2.05$$

หรือ

$$R_{hop,Mott} = \left(\frac{9\xi_{Mott}^4}{8\pi k_B T N_0(E_F)} \right)^{1/4}$$

เมื่อ

$\alpha = 1.24 \times 10^7$ ต่อตารางเมตร

แทนค่า

$$R_{hop,Mott} = \left[\frac{9(8.0645 \times 10^{-8})}{8\pi(1.24 \times 10^7) \left(\frac{1.38 \times 10^{-23}}{1.6 \times 10^{-19}} \right) (200)(2.22 \times 10^{21})} \right]^{1/4}$$

$$R_{hop,Mott} = 1.66 \times 10^{-7} \text{ cm}$$

สำหรับพลังงานเฉลี่ยของการกระโดด ($W_{hop,Mott}$) คือ

$$W_{hop,Mott} = \frac{k_B T}{4} \left(\frac{T_{0,Mott}}{T} \right)^{1/4}$$

หรือ

$$W_{hop,Mott} = \frac{3}{4\pi R_{hop,Mott}^3 N_0(E_F)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$W_{hop,Mott} = \frac{3}{4\pi(1.6568 \times 10^{-7})^3 (2.2217 \times 10^{21})}$$

$$W_{hop,Mott} = 0.0236 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

และ

$$\alpha R_{hop,Mott} = (1.24 \times 10^7) (1.6568 \times 10^{-7})$$

$$\alpha R_{hop,Mott} = 2.0544$$

และ

$$\frac{R_{hop,Mott}}{\xi_{Mott}} > 1$$

อุณหภูมิตransition จากกลไก Mott-VRH ไปเป็น ES-VRH จะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$T_{C2} = 16 \left(\frac{T_{0,ES}^2}{T_{0,Mott}} \right)$$

$$T_{C2} = 16 \left(\frac{(2.7044 \times 10^2)^2}{1.791 \times 10^5} \right)$$

$$T_{C2} = 6.5338 \text{ เคลวิน}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Composition (x) of CdTe _{1-x} Se _x	Temperature range (K)	$\sigma_{0,Mott}$ (S/cm ⁻¹)	$T_{0,Mott}$ (K) (10 ³)	ξ_{Mott} (nm)	$N_0(E_F)$ (cm ⁻³ ·eV ⁻¹)	T_{C1} (K)	$W_{hop,Mott}$ (meV)	$R_{hop,Mott}$ (nm)	$R_{hop,Mott} / \xi_{mott}$
0.8	200-125	1.06	179.10	0.81	2.22×10 ²¹	281.42	23.60 (@200 K)	1.66	2.05
1.0	175-125	0.12	7.84	0.81	5.08×10 ²²	0.42	9.78 (@175 K)	0.78	0.97

ตารางที่ 4.11 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คำนวณได้จากแบบจำลองการกระโดดในระยะไม่คงที่ของมอตต์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe_{1-x}Se_x (0 ≤ x ≤ 1) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที

ในกรณีที่อุณหภูมิลดลงต่ำสุด กลไกการนำไฟฟ้าจะเป็นแบบกระโดดในระยะไม่คงที่ของเอพรอส-ชอลอฟสกี (ES-VRH) ซึ่งจะแสดงดังความสัมพันธ์

$$\sigma = \sigma_{0,ES} T^{-1} \exp \left[- \left(\frac{T_{0,ES}}{T} \right)^{1/2} \right]$$

$$\ln(\sigma T) = - \left(\frac{T_{0,ES}}{T} \right)^{1/2} + \ln \sigma_{0,ES}$$

โดยที่องค์ความไม่เป็นระเบียบของ ES ($T_{0,ES}$) คือ

$$T_{0,ES} = \frac{2.8e^2}{k_B \xi_{ES} \epsilon_s}$$

$$T_{0,ES} = \frac{2.8e^2}{k_B \xi_{ES} \epsilon_s}$$

$$\xi_{ES} = \frac{2.8e^2}{k_B T_{0,ES} \epsilon_s}$$

$$\xi_{ES} = \frac{2.8(1.6 \times 10^{-19})^2}{(1.38 \times 10^{-23})(2.7044 \times 10^2)(8.9916 \times 10^{-13})}$$

$$\xi_{ES} = 213.63 \text{ nm}$$

ค่า $T_{0,ES}$ สามารถหาได้จากความชันของสมการที่ (23)

$$T_{0,ES} = (-16.445)^2 = 2.7044 \times 10^2 \text{ เคลวิน}$$

ส่วนค่า $\sigma_{0,ES}$ สามารถหาได้จากจุดตัดแกน y ดังนั้น ξ_{ES} สามารถหาได้จากสมการที่ (24) ส่วนระยะทางเฉลี่ยของการกระโดด ($R_{hop,ES}$) จะแสดงดังความสัมพันธ์

$$\frac{R_{hop,ES}}{\xi_{ES}} = \frac{1}{4} \left(\frac{T_{0,ES}}{T} \right)^{1/2}$$

$$\frac{R_{hop,ES}}{\xi_{ES}} = \frac{1}{4} \left(\frac{2.7044 \times 10^2}{85} \right)^{1/2}$$

$$\frac{R_{hop,ES}}{\xi_{ES}} = 0.45$$

สำหรับพลังงานเฉลี่ยของการกระโดด ($W_{hop,ES}$) คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$W_{hop,ES} = \frac{1}{2} k_B T \left(\frac{T_{0,ES}}{T} \right)^{1/2}$$

$$W_{hop,ES} = \frac{1}{2} (1.38 \times 10^{-23}) (85) \left(\frac{2.7044 \times 10^2}{85} \right)^{1/2}$$

$$W_{hop,ES} = 6.54 meV$$

เนื่องจากที่ระดับอุณหภูมิต่ำมากนี้อิเล็กตรอนในสถานะพลังงานท้องถิ่นมีอันตรกิริยาต่อกัน ส่งผลให้ความหนาแน่นของสถานะพลังงานที่ระดับเฟอร์มิแยกออกจากกันกลายเป็นช่องว่าง เรียกว่า ช่องว่างของคูลอมบ์ (Coulomb gap) จะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$\Delta_C = \frac{e^2 N_0^{1/2} (E_F)}{\epsilon_s^{3/2}}$$

หรือ

$$\Delta_C = k_B \left(\frac{T_{0,ES}}{T_{0,Mott}} \right)^{1/2}$$

$$\Delta_C = \left(\frac{1.38 \times 10^{-23}}{1.6 \times 10^{-19}} \right) \left(\frac{2.7044 \times 10^2}{1.791 \times 10^5} \right)^{1/2}$$

$$\Delta_C = 3.35 \times 10^{-6} eV$$

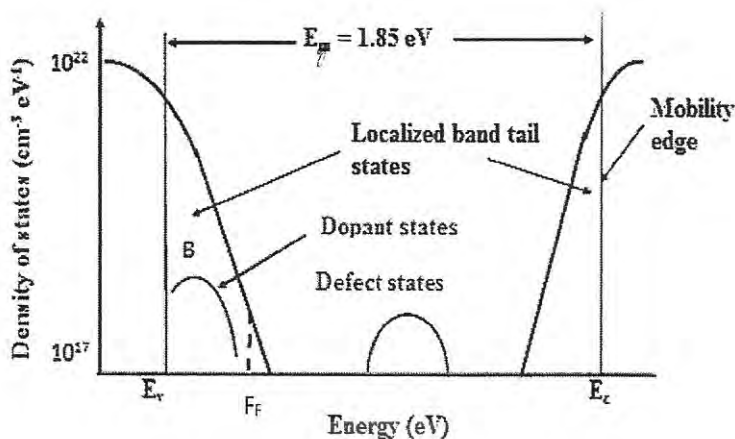
การตรวจสอบว่ากลไกการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำเป็นแบบใดให้พิจารณาจากค่า s ของสมการที่ (7) ซึ่งค่า s นี้ จะได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ $\ln W(T) = \ln(T)$

เมื่อ

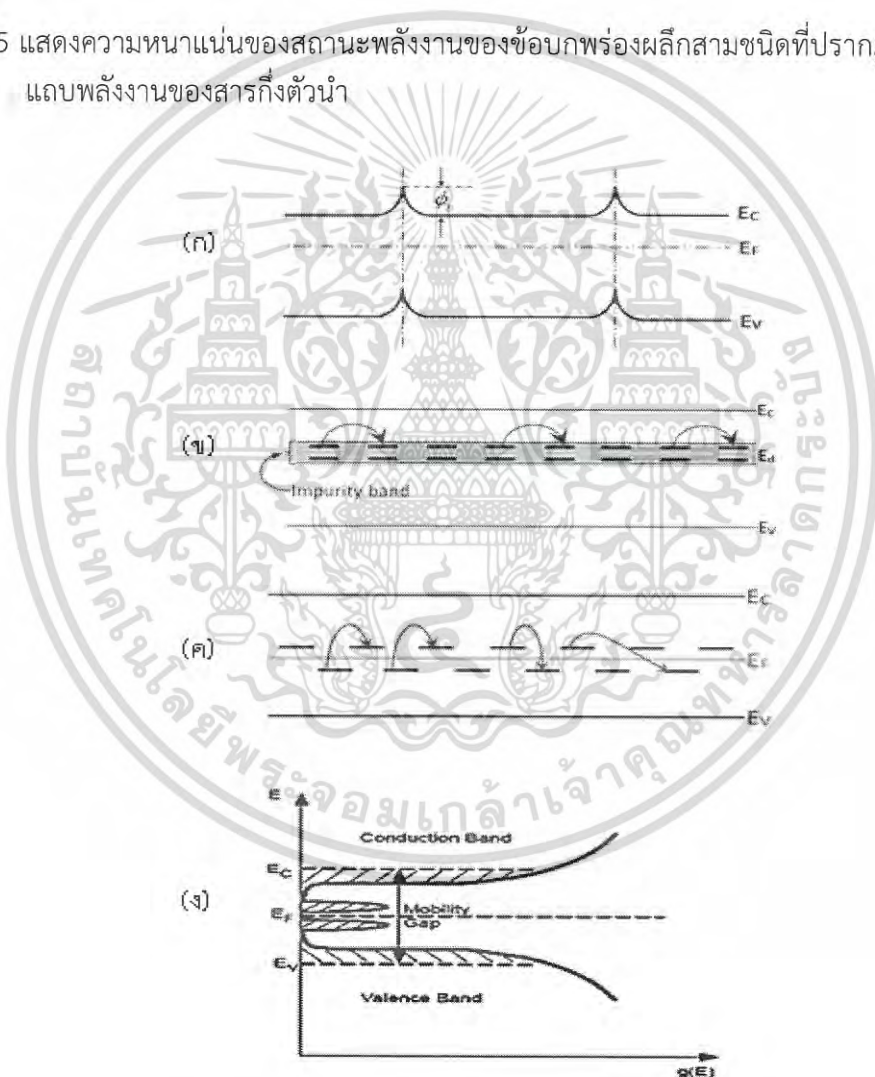
$$W(T) = \frac{d[\ln(\sigma T)]}{d[\ln(\sigma)]}$$

Composition (x) of $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$	Temperature range (K)	$\sigma_{0,ES}$ (S/cm^{-1})	$T_{0,ES}$ (K) (10^2)	ξ_{ES} (nm)	T_{C2} (K)	$W_{hop,ES}$ (meV)	Δc (eV)	$R_{hop,ES} / \xi_{ES}$
0.8	85-45	0.10	2.70	213.63	6.53	6.54 (@85 K)	3.35×10^{-6}	0.45
1.0	65-35	0.23	1.92	301.61	74.89	4.81 (@65 K)	1.35×10^{-5}	0.43

ตารางที่ 4.12 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คำนวณได้จากแบบจำลองการกระโดดในระยะไม่คงที่ของเฮฟโรส-ชล็อฟสกี ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่ เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที



รูปที่ 4.25 แสดงความหนาแน่นของสถานะพลังงานของข้อบกพร่องผลึกสามชนิดที่ปรากฏในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ

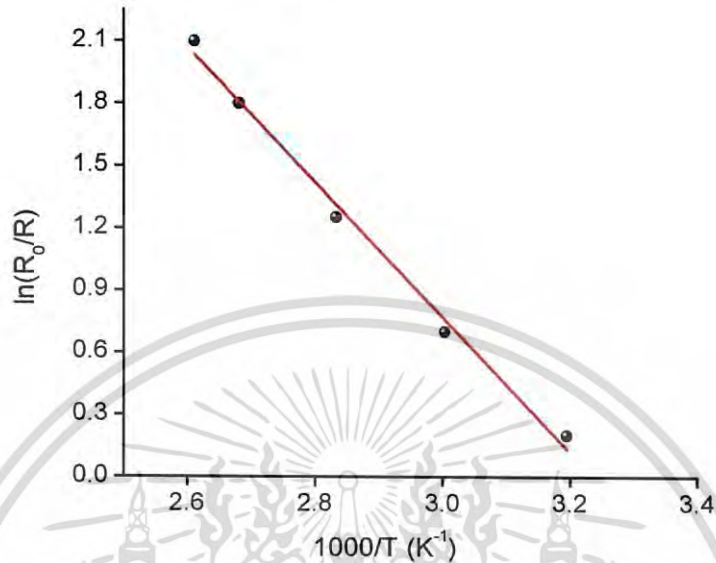


รูปที่ 4.26 แสดงแผนภาพกลไกการนำไฟฟ้าชนิดต่างๆที่อุณหภูมิต่ำที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

- ก.แบบจำลองอะตอมของซีโด
- ข.กลไกการกระโดดของอิเล็กตรอนระหว่างระดับผู้ให้ที่อยู่ติดกัน
- ค.กลไกการนำไฟฟ้าแบบกระโดดในระยะไม่คงที่ของมอดด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.6.4 ผลการศึกษาค่าความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด



รูปที่ 4.27 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln\left(\frac{R_0}{R}\right)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที

จากรูปที่ 4.23 เป็นผลของค่าความต้านทานไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิด 10 นาที โดยวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 303-400 เคลวิน จากผลการทดลองสามารถนำมาหาค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) ได้จาก

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

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

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่า

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

$$E_a = -\frac{1,000(k)(-3.2537)}{(1.6 \times 10^{-19})}$$

$$E_a = 0.229 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

เมื่อ R_0 คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง

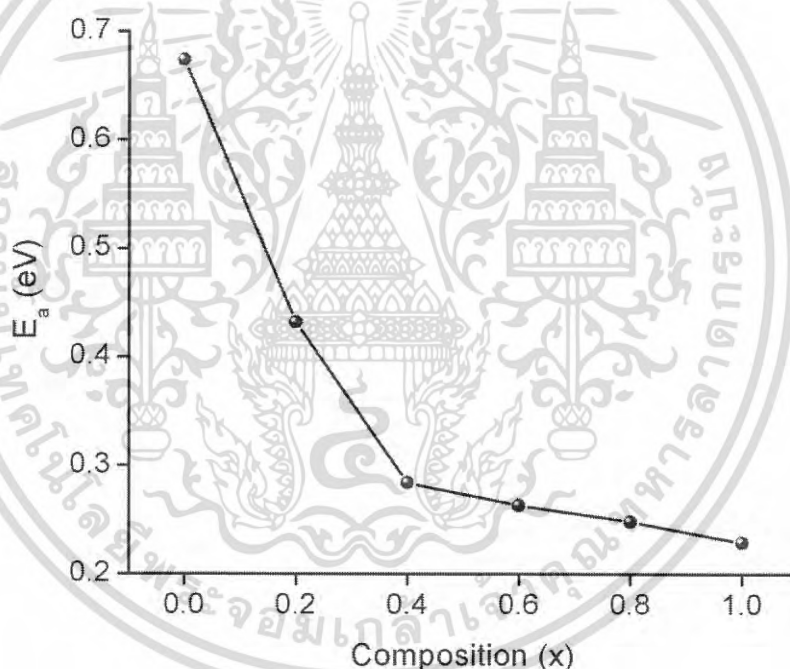
E_a คือ ค่าพลังงานกระตุ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.13 แสดงค่าพลังงานกระตุ้น ของ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดเมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที

Composition (x)	Activation Energy (eV)
0.0	0.674
0.2	0.432
0.4	0.284
0.6	0.263
0.8	0.248
1.0	0.229

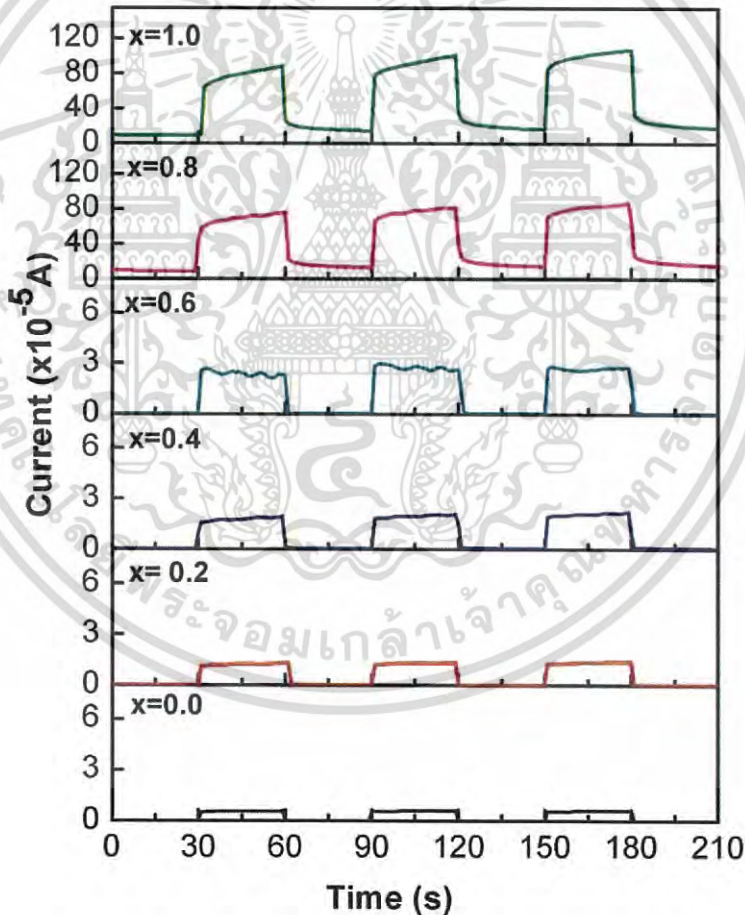


รูปที่ 4.28 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าพลังงานกระตุ้น กับ เศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) เมื่อ $x = 0.0-1.0$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.6.5 ผลการศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงตั้งร้อนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจก สไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

ในการศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงตั้งร้อนจะต้องมีการฉายแสงให้กับสารตัวอย่าง แล้วทำการบันทึกกระแสโฟโตจะลดลงตามเวลาซึ่งจะเรียกว่ากระแสโฟโตขาขึ้น แต่เมื่อหยุดการฉายแสงกระแสโฟโตจะลดลงตามเวลาซึ่งจะเรียกว่า กระแสโฟโตขาลง ซึ่งจากการศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงตั้งร้อนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe พบว่าช่วงเวลาตอบสนองสั้นมากที่ช่วงกระแสโฟโตขาขึ้น โดยเวลาขาขึ้นสามารถคำนวณได้จากกราฟของกระแสโฟโตที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาขณะที่มีการฉายแสง ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.29 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสโฟโต กับ เวลา ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความไวในการตอบสนองต่อแสง (photosensitivity, S) ที่คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ จะนิยามดังนี้คือ

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

ซึ่งนิยามนี้นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในเชิงวิศวกรรมสิ่งประดิษฐ์การตรวจวัดแสง (photodetector) แต่มีนักวิทยาศาสตร์ส่วนหนึ่ง นิยามความไวในการตอบสนองต่อแสง ดังนี้

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

ในทางปฏิบัติมักมีการป้อนแรงดันไบแอสด้วยค่าคงที่ทั้งขณะมีการฉายแสงและขณะไม่มีการฉายแสง ดังนั้น ความไวในการตอบสนองต่อแสงสามารถคำนวณได้ง่ายๆ จากความสัมพันธ์

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

และผลการทดลองของกระแสโฟโตชาขึ้นของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงดีอาร์นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่อุณหภูมิต้องจะรายงานไว้ดังตารางที่ 4.7

จาก

$$R = VI$$

$$R_{dark} = \frac{10V}{8.84 \times 10^{-5} A} = 1.13 \times 10^5 \Omega$$

$$R_{light} = \frac{10V}{7.87 \times 10^{-4} A} = 1.27 \times 10^4 \Omega$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.14 แสดงความไวในการตอบสนองต่อแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระนาบประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที

Composition (x)	Photosensitivity (S)	
	$S = \left(\frac{\Delta R}{R_{drak}} \right) \times 100\%$	$S = \frac{R_{drak}}{R_{light}}$
0.0	98.58	70.55
0.2	98.39	62.27
0.4	97.80	45.53
0.6	98.46	65.08
0.8	87.34	7.90
1.0	88.77	8.90

สำหรับช่วงกระแสโฟโตชาลลงจะเป็นไปตามสมการ

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

จากการศึกษาพบว่าเวลาชาลลง (decay time) มีได้มากกว่าหนึ่งค่า โดยจะเขียนอยู่ในรูปฟังก์ชันมัลติเพิลเอ็กซ์โพเนนเชียล ดังสมการ

$$I = \sum_{n=1}^n A_n \left[\exp(-t/\tau_{dn}) + A_n \left[\exp((-t/\tau_{dn})^\beta) \right] \right]$$

จากผลการทดลองสามารถเขียนได้ดังนี้

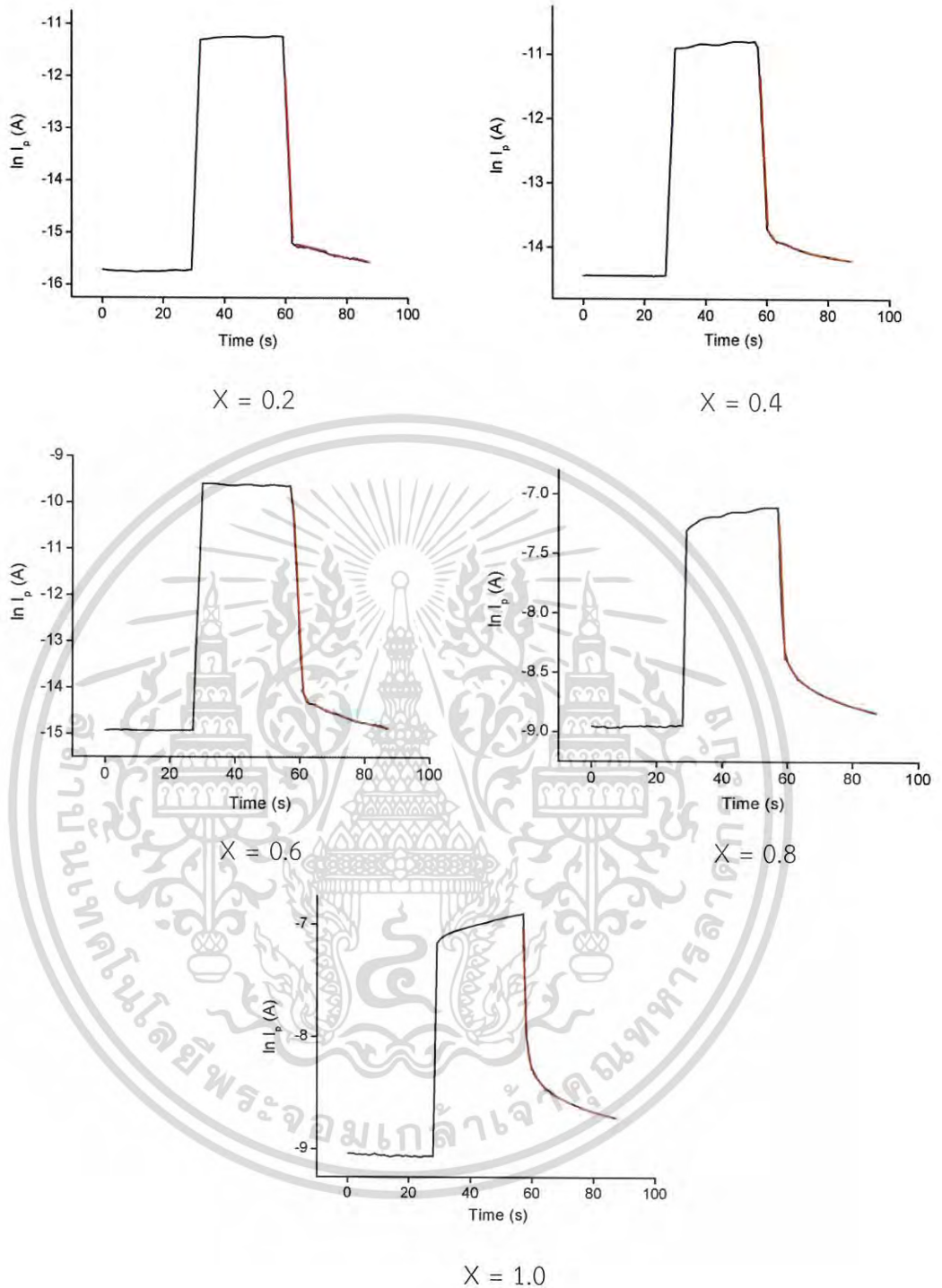
$$I = A_1 [\exp(-t/1.1043)] + A_2 [\exp(-t/41.8235)] + A_3 [\exp(-t/90.4977)^\beta]$$

และสามารถคำนวณหา ค่าความหนาแน่นของกักประจุได้จากสมการ

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

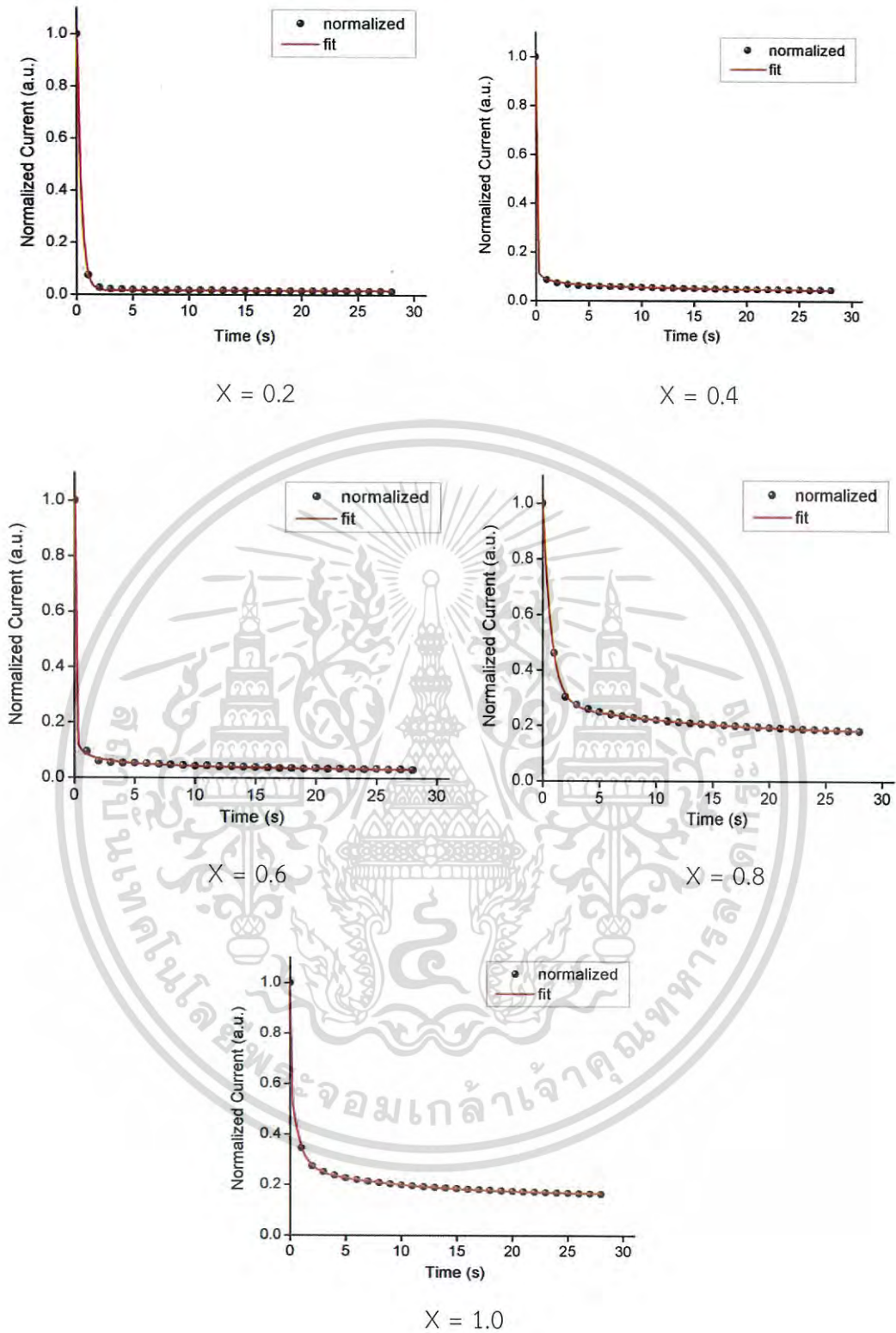
และผลการทดลองของกระแสโฟโตชาลลงของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงที่อุณหภูมิห้องของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Se}_x$ เมื่อ มีค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 ตามลำดับ จะรายงานไว้ดังตารางที่ 4.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.30 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ เวลา ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe_{1-x}Se_x เมื่อมีค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 ตามลำดับ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดเมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.31 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสจอร์มอไลซ์ขาลง กับ เวลา ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe_{1-x}Se_x เมื่อ มีค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 ตามลำดับ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที

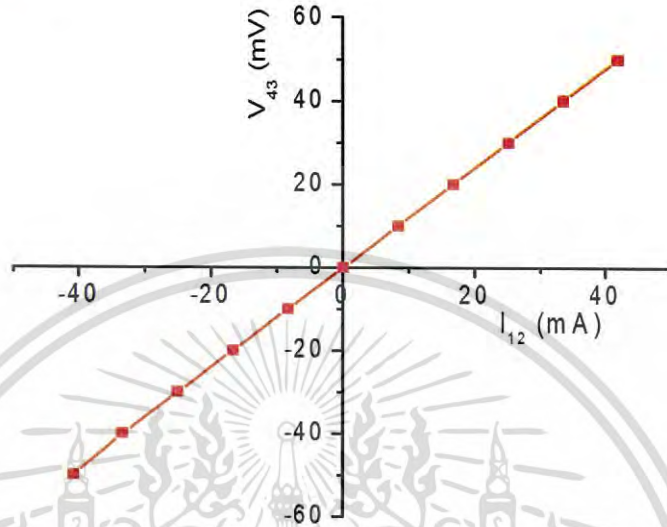
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นาเบ้ใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.15 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่สำคัญที่ได้จากการศึกษาปรากฏการณ์เชิงแสงดื้อรั้น ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ เมื่อมีค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 ตามลำดับที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 10 นาที

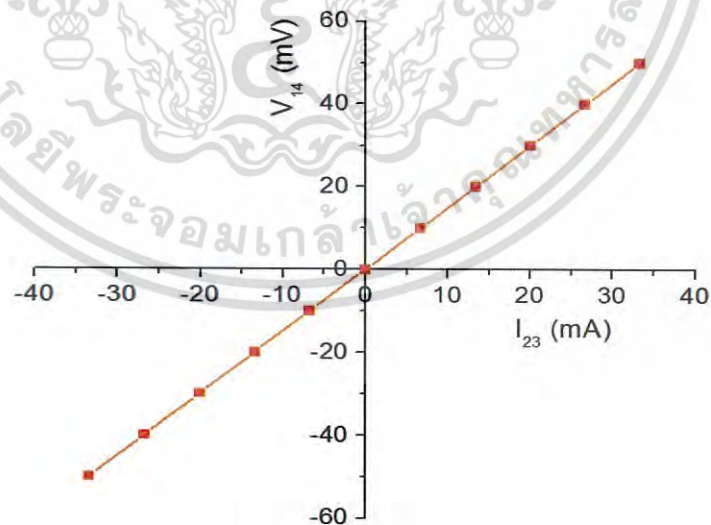
Decay						
Composition (X)	1 st Term	2 nd Term	3 rd Term	4 th Term	5 th Term	6 th Term
0.2	$\tau_{d1} = 0.076$ $A_1 = 0.8704$	$\tau_{d2} = 1.27$ $A_2 = 0.1127$	$\tau_{d3} = 6.92$ $A_3 = 0.01692$ $\beta = 0.06759$	-	-	-
	$\sigma_1 = 6.81 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ $I_1 = 1.34 \times 10^{-3} \text{ A}$	$\sigma_2 = 8.64 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ $I_2 = 1.70 \times 10^{-3} \text{ A}$	$\sigma_3 = 1.53 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ $I_3 = 3.00 \times 10^{-3} \text{ A}$	-	-	-
0.4	$\tau_{d1} = 0.47$ $A_1 = 0.8609$	$\tau_{d2} = 7.62$ $A_2 = 0.08879$	$\tau_{d3} = 55.88$ $A_3 = 1.621$	$\tau_{d4} = 60.67$ $A_4 = -18.37$	$\tau_{d5} = 60.47$ $A_5 = -0.9115$ $\beta = 0.9771$	-
	$\sigma_1 = 2.31 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ $I_1 = 1.51 \times 10^{-5} \text{ A}$	$\sigma_2 = 3.36 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ $I_2 = 2.20 \times 10^{-6} \text{ A}$	$\sigma_3 = 2.14 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ $I_3 = 1.40 \times 10^{-6} \text{ A}$	$\sigma_4 = 1.53 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ $I_4 = 1.00 \times 10^{-6} \text{ A}$	$\sigma_5 = 9.17 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ $I_5 = 6.00 \times 10^{-7} \text{ A}$	-
0.6	$\tau_{d1} = 0.57$ $A_1 = 0.5681$	$\tau_{d2} = 6.35$ $A_2 = 0.2803$	$\tau_{d3} = 10.33$ $A_3 = 0.2392$	$\tau_{d4} = 39.72$ $A_4 = -54.45$	$\tau_{d5} = 35.00$ $A_5 = -0.9943$ $\beta = 0.8721$	-
	$\sigma_1 = 4.44 \times 10^1 \text{ cm}^{-2}$ $I_1 = 1.12 \times 10^{-5} \text{ A}$	$\sigma_2 = 1.23 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ $I_2 = 3.10 \times 10^{-6} \text{ A}$	$\sigma_3 = 3.97 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ $I_3 = 1.00 \times 10^{-6} \text{ A}$	$\sigma_4 = 2.78 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ $I_4 = 7.00 \times 10^{-7} \text{ A}$	$\sigma_5 = 1.19 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ $I_5 = 3.00 \times 10^{-7} \text{ A}$	-
0.8	$\tau_{d1} = 1.80$ $A_1 = 0.6751$	$\tau_{d2} = 50.67$ $A_2 = -0.4834$	$\tau_{d3} = 74.65$ $A_3 = 6.603$	$\tau_{d4} = 89.89$ $A_4 = -8.641$	$\tau_{d5} = 127.85$ $A_5 = -0.3151$ $\beta = 0.8443$	-
	$\sigma_1 = 2.27 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ $I_1 = 8.16 \times 10^{-4} \text{ A}$	$\sigma_2 = 1.13 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ $I_2 = 4.05 \times 10^{-4} \text{ A}$	$\sigma_3 = 7.78 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ $I_3 = 2.80 \times 10^{-4} \text{ A}$	$\sigma_4 = 6.39 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ $I_4 = 2.30 \times 10^{-4} \text{ A}$	$\sigma_5 = 5.42 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ $I_5 = 1.95 \times 10^{-4} \text{ A}$	-
1.0	$\tau_{d1} = 1.83$ $A_1 = 0.6132$	$\tau_{d2} = 32.11$ $A_2 = -1.73$	$\tau_{d3} = 40.57$ $A_3 = 5.829$	$\tau_{d4} = 76.90$ $A_4 = -62.74$	$\tau_{d5} = 84.70$ $A_5 = 68.44$	$\tau_{d6} = 115.00$ $A_6 = -9.608$ $\beta = 0.9629$
	$\sigma_1 = 1.68 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ $I_1 = 1.00 \times 10^{-5} \text{ A}$	$\sigma_2 = 9.47 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ $I_2 = 5.65 \times 10^{-4} \text{ A}$	$\sigma_3 = 5.78 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ $I_3 = 3.45 \times 10^{-4} \text{ A}$	$\sigma_4 = 4.52 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ $I_4 = 2.70 \times 10^{-4} \text{ A}$	$\sigma_5 = 4.02 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ $I_5 = 2.40 \times 10^{-4} \text{ A}$	$\sigma_6 = 3.44 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ $I_6 = 2.05 \times 10^{-4} \text{ A}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.6.6 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า และปรากฏการณ์ฮอลล์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด

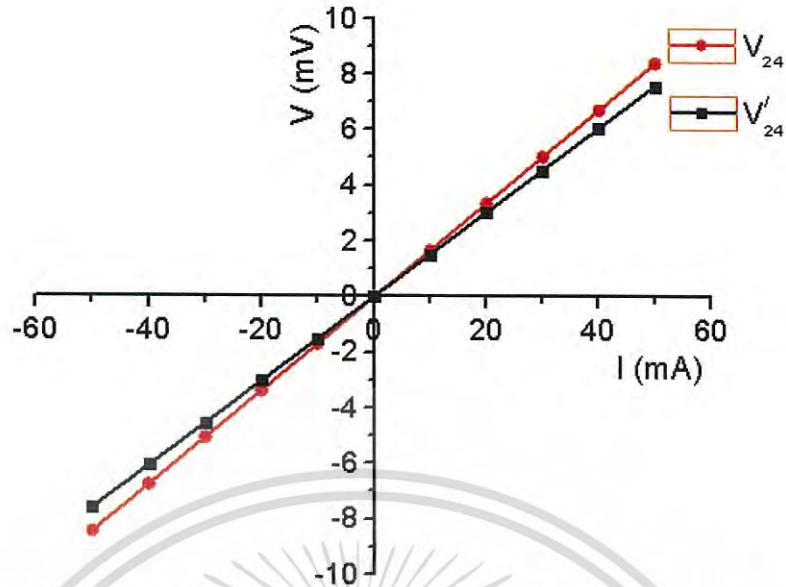


รูปที่ 4.32 แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_1) ด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$ เมื่อ $x=0.0$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที

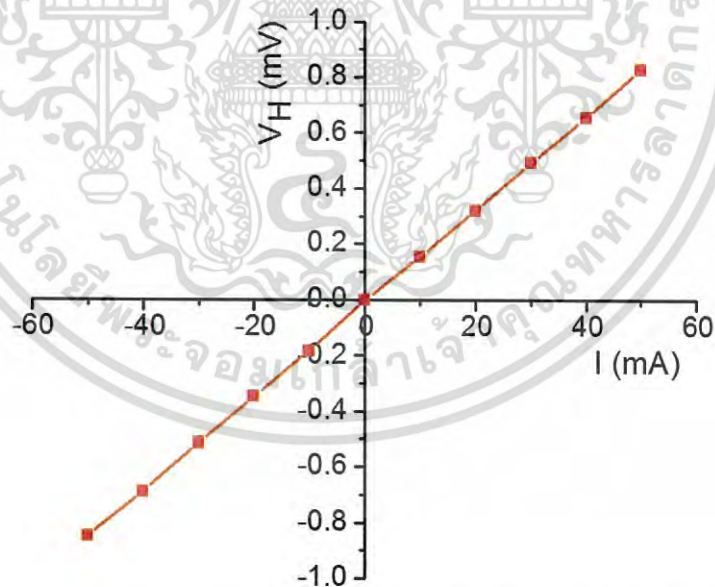


รูปที่ 4.33 แสดงการหาค่าความต้านทานไฟฟ้า (R_2) ด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$ เมื่อ $x=0.0$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (V_{24}) และ (V'_{24}) กับ ค่ากระแสไฟฟ้า (I_{13}) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ($\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x}$)_{0.99}(In_2S_3)_{0.01} เมื่อ $x=0.0$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที



รูปที่ 4.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) กับ ค่ากระแสไฟฟ้า (I_{13}) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ($\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x}$)_{0.99}(In_2S_3)_{0.01} เมื่อ $x=0.0$ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.16 แสดงการศึกษา ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า และ ปรากฏการณ์ฮอลล์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิดเมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที

Composition of (x) $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})_{0.99}(\text{In}_2\text{S}_3)_{0.01}$	Resistivity ($\Omega \cdot \text{cm}$)	Hall Coefficient (cm^2/C)	Electron Concentration (cm^{-3})	Hall Mobility ($\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$)
0.0	1.6913×10^{-4}	1.83×10^2	3.4153×10^{20}	108.20

จากการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางของอัลลอย ของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x})$ ที่เจือด้วย In_2S_3 ในปริมาณ 1 เปอร์เซ็นต์โดยโมล ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิด ในเบื้องต้น พบว่า สภาพต้านทานไฟฟ้าลดลงอย่างมาก คืออยู่ในระดับ 10^{-4} โอห์ม-เซนติเมตร ซึ่งน่าสนใจที่จะศึกษาสมบัติของฟิล์มบางของอัลลอย ของสารกึ่งตัวนำชนิดนี้ต่อไป โดยต้องพัฒนาระบบระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิดของเราให้สามารถเตรียมฟิล์มบางที่ต้องการให้สูงกว่า 650 องศาเซลเซียส ในอนาคตต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในโครงการพิเศษนี้ได้ทำการประดิษฐ์ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดในระบบสุญญากาศ จากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ CdTe และ CdSe ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์ โดยเลือกใช้อุณหภูมิของสารตั้งต้น และอุณหภูมิแผ่นฐานรองรับเป็น 650 และ 550 องศาเซลเซียส ตามลำดับ โดยเวลาในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ 10 นาที พบว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำกรณีที่ไม่เจือด้วย CdSe ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้จะมีสีเทา ส่วนกรณีที่ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่เจือด้วย CdSe ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้จะมีสีดำ ซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณการเจือของสารกึ่งตัวนำ CdSe

จากการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่มีเศษส่วนโมลอะตอม (x) ต่ำกว่า 0.4 โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำจะเป็นแบบซิงค์เบลน อย่างไรก็ตามในกรณีที่มีเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) อยู่ระหว่าง 0.2 ถึง 0.8 โครงสร้างผลึกจะเป็นแบบซิงค์เบลน และแบบเวิร์ทไซท์อยู่ร่วมกัน ในขณะที่ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe จะมีโครงสร้างแบบเวิร์ทไซท์อย่างเดียว

จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดในระบบสุญญากาศ พบว่าเมื่อเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) เพิ่มขึ้นจะทำให้ขนาดเกรนลดลง

จากการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงสามารถที่จะคำนวณค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดในระบบสุญญากาศ พบว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานมีค่าลดลงจาก 1.47 ถึง 1.39 eV ตามเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ที่เพิ่มขึ้นจาก $x=0.0$ ถึง $x=0.6$ และค่าช่องว่างแถบพลังงานมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึง 1.72 eV ตั้งแต่เศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ที่เพิ่มขึ้น $x=0.8$ ถึง $x=1.0$

จากการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดในระบบสุญญากาศ โดยการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ และ วัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ พบว่าค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำลดลงจาก 3.91×10^2 เป็น 54.2 โอห์ม•เซนติเมตร ตามสัดส่วนโดยโมลอะตอม (x) ที่เพิ่มขึ้นจาก $x=0.0$ ถึง $x=1.0$ สำหรับสภาพคล่องฮอลล์ในช่วงแรกจะมีค่าลดลงตามเศษส่วนโดยโมลอะตอมที่ (x) ที่เพิ่มขึ้น มีค่าต่ำสุดที่ $x=0.6$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามเศษส่วนโดยโมลอะตอม(x) ที่เพิ่มขึ้น ส่วนความหนาแน่นของพาหะมีค่าเพิ่มขึ้น ตามเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ที่เพิ่มขึ้น จากนั้นได้ทำการวัดสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 20-300 เคลวิน ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับแบบจำลองของซีโต แบบจำลองการกระโดดของอิเล็กตรอนระหว่างระดับผู้ให้ที่อยู่ติดกัน แบบจำลองการกระโดดในระยะไม่คงที่ของมอตต์ และแบบจำลองการกระโดดในระยะไม่คงที่ของเอพรอส-ชโลฟสกี

จากการวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงชั่วขณะ (transient photoconductivity) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดในระบบสุญญากาศ พบว่าช่วงกระแสโฟโตชาขึ้นมีชีวิตสั้นสั้นมาก ซึ่งค่าความไวแสงมีค่าเป็น 98.58 เปอร์เซ็นต์ ส่วนกระแสโฟโตชาลง พบว่าเกิดปรากฏการณ์สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงคือรีน กล่าวคือ ค่าช่วงชีวิตของพาหะค่อนข้างยาว ซึ่งเป็นผลมาจากกับดักพาหะมีการจับและปล่อยพาหะค่อนข้างช้ามาก ค่าช่วงชีวิตพาหะสามารถหาได้จากการพิตกราฟของผลการทดลอง โดยใช้ฟังก์ชันมัลติเพิลเอ็กซ์โพเนนเชียล



5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การเตรียมแผ่นกระจกสไลด์ถ้ามีความสะอาดไม่เพียงพอจะเป็นสาเหตุทำให้เคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำไม่ติด
2. สำหรับการติดตั้งระบบ ผู้ติดตั้งควรศึกษาอย่างละเอียด และฝึกให้ชำนาญ ก่อนจะเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ
3. ขณะเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำควรระวังไม่ให้กล่องแกรไฟต์พลิกซึ่งสาเหตุอาจเกิดจากความร้อนความดันภายใน และเทอร์โมคัปเปิลที่ใช้ ไม่มีคุณสมบัติยืดหยุ่น
4. ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้ควรรับนำมาวัดสมบัติฟิสิกส์ต่างๆ เพื่อป้องกันฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำหลุดร่อน
5. ในขณะทำขั้วไฟฟ้ากับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำควรระวังมือห้ามสัมผัสกับผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้ และทำขั้วไฟฟ้าให้มีลักษณะเล็ก เรียว และคมให้มากที่สุด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

งามนิตย์ วงษ์เจริญ.2531. “การศึกษารอยต่อแบบโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ ของคอปเปอร์อินเดียม ไดซีลีไนด์.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

งามนิตย์ วงษ์เจริญ, จูตินัย แก้วแดง, ชัยสิงห์ ภูริกษ์เกียรติ และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2543. “การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

งามนิตย์ วงษ์เจริญ, จูตินัย แก้วแดง และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2549. “การประดิษฐ์ฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่เจือด้วยอะตอมฟลูออรีนสำหรับขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

งามนิตย์ วงษ์เจริญ, จูตินัย แก้วแดง และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2550. “การประดิษฐ์ฟิล์มหนา $CuAlO_2$ เพื่อเป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

งามนิตย์ วงษ์เจริญ, จูตินัย แก้วแดง และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2551. “การเตรียมฟิล์มบาง CdTe โดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิดเพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

งามนิตย์ วงษ์เจริญ และจูตินัย แก้วแดง. 2553. “การประดิษฐ์ฟิล์มบาง CdO ที่เจือด้วย Al สำหรับขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

งามนิตย์ วงษ์เจริญ, จูตินัย แก้วแดง และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2556. “ความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้าของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ Ln_xWO_3 ($0.00 \leq x \leq 0.05$) และการประยุกต์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

งามนิตย์ วงษ์เจริญ, จูตินัย แก้วแดง และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2558. “การประดิษฐ์ฟิล์มบางแคดเมียมซีลีไนด์เจือด้วยอะตอมอินเดียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดเพื่อประยุกต์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์”. รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ชนิภรณ์ จุไรสง และภริญา โชติชนันท์. 2556. “การศึกษาสมบัติของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบาง CdS/CuO .” โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

จูตินัย แก้วแดง. 2530. “การเตรียมและศึกษาสมบัติของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมไดซีลีไนด์.” วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

จูตินัย แก้วแดง และงามนิตย์ วงษ์เจริญ. 2544. “เอกสารประกอบการสอนวิชา ฟิสิกส์และเทคโนโลยีของเซลล์แสงอาทิตย์.” ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

จูตินัย แก้วแดง. 2545. “เอกสารประกอบการสอนวิชา ฟิสิกส์ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ.” ภาควิชา

เอกสารนี้เป็น ฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ขอสงวนสิทธิ์ใน

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิത്യ วงษ์เจริญ, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ. 2545. “การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี Zn เพื่อประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิത്യ วงษ์เจริญ, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ. 2546. “การประดิษฐ์ฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี Zn ในปริมาณสูงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิത്യ วงษ์เจริญ และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2547. “การเตรียมฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วย In โดยระเหยในระบบสุญญากาศ.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิത്യ วงษ์เจริญ และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2549. “การประดิษฐ์ฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่เจือด้วยอะตอมฟลูออรีนสำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ฐิตินัย แก้วแดง และงามนิത്യ วงษ์เจริญ. 2551. “การเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธีอบสารละลายเคมีภายใต้คลื่นไมโครเวฟเพื่อประดิษฐ์เป็นหน้าต่างรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ฐิตินัย แก้วแดง งามนิത്യ วงษ์เจริญ และ ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2552. “การพัฒนาขั้วไฟฟ้าด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CdS/CdTe.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิത്യ วงษ์เจริญ และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2554. “การประดิษฐ์ขั้วไฟฟ้าด้านหลัง ชนิดใหม่ที่เหมาะสมกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CdS/CdTe.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- ฐิตินัย แก้วแดง งามนิത്യ วงษ์เจริญ และ ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2557. “การประดิษฐ์และการศึกษาสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางรอยต่ออวิวิพพันธุ์ CdS/CuO.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิത്യ วงษ์เจริญ, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ. 2558. “การเตรียมฟิล์ม บาง CuO โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีสปีดเตอริงเพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่ออวิวิพพันธุ์ CdS/CuO.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- นพณัฐ เดชะคำภู. 2556. “การประดิษฐ์ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Se_x$ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด.” โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ราตรี ภูรอด และสุนิสา อุดมมาลี. 2557. “การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdSe ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด.” โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- วีรชัย ลิภา. 2547. “การศึกษาสมบัติฟิล์มบาง CdS-ZnS ซึ่งเตรียมโดยวิธีออบสารละลายเคมี.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- วุฒิไกร คำอ่อน, ศตพล ศิวายพราหมณ์ และศุภฤกษ์ จันทะโบราณ. 2556. “สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ $Cu_{1-x}Cd_xO$.” โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- สุกฤษฏี เกิดแสง. 2547. “การเตรียมและศึกษาสมบัติเชิงฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ CdTe.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- อดุลย์ หาญวังม่วง. 2550. “การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิด.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- 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.
- Brahim, N.B. Mohamed, N.B.H. Echabaane, M. Haouari, M. Chabane, R.B. Neqerie, M. and Ouada, H.B. 2015. “Thioglycerol-functionalized CdSe quantum dots detecting cadmium ions.” *Sensors and Actuators B: Chemical.* 220 : 1346-1353.
- Cullity, B.D. 1956. *Elements of X-ray Diffraction.* Addison-Wesley Publishing Company Inc. : pp 9-14.
- Dieter K.S. 1998. *Semiconductor Material and Device Characterization.* 2nd ed. New York : John Wiley & Sons Inc.
- Elangovan E. and Ramamurthi K. 2003. “Optoelectronic Properties of spray deposition $SnO_2:F$ Thin Film For Windows Materials in Solar Cell.” *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, 2007. “Electrical and Ultraviolet Photoresponse Properties of Quasialigned ZnO Nanowires/p-Si Heterojunction.” *App. Phys. Lett.* 87, 243512-1-243512-3.
- Gu. 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 In_2S_3 Nanorods in Sucrose Ester Water-in-Oil Microemulsion.” *Journal of Nanomaterials.* 815709-6.
- Huang. 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.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ลงวันไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Ivashchenko, M.M. Opanasyuk, A.S. Perekrestov, V.I. Kosyak, V.V. Gnatenko, Yu.P. and Kolomiets, V.M. 2015. "Morphological, structural, compositional properties and IR-spectroscopy of CdSe films deposited by close-spaced vacuum sublimation." *Vacuum*. 119 : 81-87.
- Jiang, F. 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. 1996. "Metastability and Persistent Photoconductivity in Mg-Doped p-Type GaN." *Appl. Phys. Lett.* 68(13) :1808-1810.
- Kittel, C. 1971. *Introduction to Solid State Physics*. 4th ed. New York : John Wiley & Sons Inc.
- Lin, J.H. 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.
- 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.
- Muthukumar, S. and Muthusamy, M. 2012. "Structural, optical, FTIR and photoluminescence studies of $\text{CdS}_{1-x}\text{Se}_x$ thin films by chemical bath deposition method." *J mater Sci: Mater Electron*. 23 : 1648-1656.
- Ren 2012. "Slow-Rise and Fast Drop Current Feature of Ultraviolet Response Spectra For ZnO-Nanowire Film Modulated By Water Molecules." *Chin. Phys.* 21(13), 038104-1-038140-7.
- Runyan, W.R. 1975. *Semiconductor Measurement and Instrument*. 3rd ed. New York : Mc Graw-Hill.
- Syudenikin. 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 Pavn L.J. 1958. "A Method of Measuring Specific Resistivity and Hall Effect of Discs of Arbitrary Shape." *Philips Res. Repts*. 13 : 1-9.
- 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.



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ CdTe
ไฟล์มาตรฐาน JCPDS No.15-770

Pattern : 15-770		Radiation = 1.540600		Quality : Indexed		
CdTe		2 θ	<i>l</i>	<i>h</i>	<i>k</i>	<i>l</i>
		23.759	100	1	1	1
		39.312	50	2	2	0
Cadmium Telluride		46.434	30	3	1	1
		56.821	6	4	0	0
		62.353	10	3	3	1
		71.216	10	4	2	2
		76.300	4	5	1	1
		84.469	2	4	4	0
Lattice : Face-centered cubic		89.412	4	5	3	1
Mol. weight = 240.01		97.443	4	6	2	0
S.G. : F-43m (216)		102.400	2	5	3	3
Volume [CD] = 272.22		110.837	1	4	4	4
a = 6.48100		116.146	2	5	5	1
Dx = 5.856		125.593	4	6	4	2
Z = 4		131.817	4	7	3	1
i/cor = 6.50						
<p>COLOR : Black SAMPLE SOURCE OR LOCALITY : Sample was obtained from Sem-Elements inc., Saxonburg, Pennsylvania, USA ANALYSIS : Spectrographic analysis: 0.01-0.1% Si, 0.0001-0.001% each of Ba, Fe, and Pb TEMP. OF DATA COLLECTION : Pattern taken at 25 C.</p>						
<p>CAS: 1306-25-8 *Nat'l. Bur. Stand. (U.S.) Monogr. 25, volume 3, page 21, (1964) primary reference.</p>						
Radiation : CuK α 1		Filter : Beta				
Lambda : 1.54050		d-sp : Not given				
SS/FOM : F15= 31(0.0230,21)		Internal standard : W				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ CdSe

ไฟล์มาตรฐาน JCPDS No.8-459

Pattern : 8-459		Radiation = 1.540600	Quality : Indexed																																																																																																																																																																																																			
<p>Cd Se</p> <p>Cadmioselite, syn / Cadmium Selenide</p>		<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>2θ</th> <th>I</th> <th>h</th> <th>k</th> <th>l</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>23.901</td><td>100</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>25.354</td><td>70</td><td>0</td><td>0</td><td>2</td></tr> <tr><td>27.081</td><td>75</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>35.108</td><td>35</td><td>1</td><td>0</td><td>2</td></tr> <tr><td>41.969</td><td>85</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>45.790</td><td>70</td><td>1</td><td>0</td><td>3</td></tr> <tr><td>48.846</td><td>12</td><td>2</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>49.671</td><td>50</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>50.674</td><td>12</td><td>2</td><td>0</td><td>2</td></tr> <tr><td>55.944</td><td>5</td><td>2</td><td>0</td><td>2</td></tr> <tr><td>63.853</td><td>20</td><td>2</td><td>0</td><td>3</td></tr> <tr><td>66.388</td><td>5</td><td>2</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>67.661</td><td>8</td><td>2</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>71.305</td><td>14</td><td>1</td><td>0</td><td>5</td></tr> <tr><td>72.294</td><td>6</td><td>2</td><td>1</td><td>2</td></tr> <tr><td>75.729</td><td>10</td><td>3</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>79.169</td><td>1</td><td>3</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>79.433</td><td>18</td><td>2</td><td>1</td><td>3</td></tr> <tr><td>82.352</td><td>8</td><td>3</td><td>0</td><td>2</td></tr> <tr><td>86.698</td><td>5</td><td>2</td><td>0</td><td>5</td></tr> <tr><td>87.454</td><td>2</td><td>1</td><td>0</td><td>6</td></tr> <tr><td>91.564</td><td>6</td><td>2</td><td>2</td><td>0</td></tr> <tr><td>95.474</td><td>4</td><td>3</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>97.189</td><td>6</td><td>2</td><td>2</td><td>1</td></tr> <tr><td>97.227</td><td>4</td><td>1</td><td>1</td><td>5</td></tr> <tr><td>97.840</td><td>2</td><td>3</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>101.714</td><td>10</td><td>2</td><td>1</td><td>3</td></tr> <tr><td>102.084</td><td>6</td><td>3</td><td>1</td><td>2</td></tr> <tr><td>109.269</td><td>6</td><td>3</td><td>1</td><td>3</td></tr> <tr><td>111.718</td><td>1</td><td>4</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>113.216</td><td>1</td><td>4</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>117.865</td><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>6</td></tr> <tr><td>121.702</td><td>1</td><td>2</td><td>0</td><td>7</td></tr> <tr><td>123.101</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>8</td></tr> <tr><td>125.929</td><td>4</td><td>4</td><td>0</td><td>3</td></tr> <tr><td>128.786</td><td>2</td><td>3</td><td>2</td><td>0</td></tr> <tr><td>129.750</td><td>2</td><td>3</td><td>0</td><td>6</td></tr> <tr><td>135.794</td><td>6</td><td>3</td><td>1</td><td>5</td></tr> </tbody> </table>	2 θ	I	h	k	l	23.901	100	1	0	0	25.354	70	0	0	2	27.081	75	1	0	1	35.108	35	1	0	2	41.969	85	1	1	0	45.790	70	1	0	3	48.846	12	2	0	0	49.671	50	1	1	1	50.674	12	2	0	2	55.944	5	2	0	2	63.853	20	2	0	3	66.388	5	2	1	0	67.661	8	2	1	1	71.305	14	1	0	5	72.294	6	2	1	2	75.729	10	3	0	0	79.169	1	3	0	1	79.433	18	2	1	3	82.352	8	3	0	2	86.698	5	2	0	5	87.454	2	1	0	6	91.564	6	2	2	0	95.474	4	3	1	0	97.189	6	2	2	1	97.227	4	1	1	5	97.840	2	3	1	1	101.714	10	2	1	3	102.084	6	3	1	2	109.269	6	3	1	3	111.718	1	4	0	0	113.216	1	4	0	1	117.865	2	2	1	6	121.702	1	2	0	7	123.101	1	0	0	8	125.929	4	4	0	3	128.786	2	3	2	0	129.750	2	3	0	6	135.794	6	3	1	5	<p>Lattice : Hexagonal</p> <p>S.G. : P63mc (186)</p> <p>a = 4.29900</p> <p>c = 7.01000</p> <p style="text-align: center;">z = 2</p> <p>Mol. weight = 191.37</p> <p>Volume [CD] = 112.20</p> <p>Dx = 5.655</p> <p>COLOR : Black</p> <p>SAMPLE SOURCE OR LOCALITY : Sample from the Mallinckrodt Chemical Works, New York, USA</p> <p>ANALYSIS : Spectrographic analysis showed <0.01% Ca, Cu, Fe, Mn, <0.001% Al, Mg, Ni, Pb, Si, Sr.</p> <p>TEMP. OF DATA COLLECTION : Pattern taken at 25 C.</p> <p>SAMPLE PREPARATION : Pattern was annealed at 200 C in argon atmosphere</p> <p>*Natl. Bur. Stand (U.S.), Circ. 539, volume 7, page 12, (1957) primary reference</p>
2 θ	I	h	k	l																																																																																																																																																																																																		
23.901	100	1	0	0																																																																																																																																																																																																		
25.354	70	0	0	2																																																																																																																																																																																																		
27.081	75	1	0	1																																																																																																																																																																																																		
35.108	35	1	0	2																																																																																																																																																																																																		
41.969	85	1	1	0																																																																																																																																																																																																		
45.790	70	1	0	3																																																																																																																																																																																																		
48.846	12	2	0	0																																																																																																																																																																																																		
49.671	50	1	1	1																																																																																																																																																																																																		
50.674	12	2	0	2																																																																																																																																																																																																		
55.944	5	2	0	2																																																																																																																																																																																																		
63.853	20	2	0	3																																																																																																																																																																																																		
66.388	5	2	1	0																																																																																																																																																																																																		
67.661	8	2	1	1																																																																																																																																																																																																		
71.305	14	1	0	5																																																																																																																																																																																																		
72.294	6	2	1	2																																																																																																																																																																																																		
75.729	10	3	0	0																																																																																																																																																																																																		
79.169	1	3	0	1																																																																																																																																																																																																		
79.433	18	2	1	3																																																																																																																																																																																																		
82.352	8	3	0	2																																																																																																																																																																																																		
86.698	5	2	0	5																																																																																																																																																																																																		
87.454	2	1	0	6																																																																																																																																																																																																		
91.564	6	2	2	0																																																																																																																																																																																																		
95.474	4	3	1	0																																																																																																																																																																																																		
97.189	6	2	2	1																																																																																																																																																																																																		
97.227	4	1	1	5																																																																																																																																																																																																		
97.840	2	3	1	1																																																																																																																																																																																																		
101.714	10	2	1	3																																																																																																																																																																																																		
102.084	6	3	1	2																																																																																																																																																																																																		
109.269	6	3	1	3																																																																																																																																																																																																		
111.718	1	4	0	0																																																																																																																																																																																																		
113.216	1	4	0	1																																																																																																																																																																																																		
117.865	2	2	1	6																																																																																																																																																																																																		
121.702	1	2	0	7																																																																																																																																																																																																		
123.101	1	0	0	8																																																																																																																																																																																																		
125.929	4	4	0	3																																																																																																																																																																																																		
128.786	2	3	2	0																																																																																																																																																																																																		
129.750	2	3	0	6																																																																																																																																																																																																		
135.794	6	3	1	5																																																																																																																																																																																																		
<p>Radiation : CuKα1</p> <p>Lambda : 1.54056</p> <p>SS/FOM : F30= 38(0.0210,40)</p>		<p>Filter : Beta</p> <p>d-sp : Not given</p>																																																																																																																																																																																																				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการคำนวณ

-วิธีการคำนวณสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส กับ แรงดันที่อุณหภูมิห้อง ที่ $x=0.0$

$$\text{ความชัน} = 3.8369 \times 10^{-9}$$

$$\text{ความชัน} = \frac{1}{R}$$

$$R = \frac{1}{\text{slope}} = \frac{1}{3.8369 \times 10^{-9}} = 260.63 \times 10^6 \Omega$$

$$R_{sh} = R \left(\frac{w}{l} \right) \quad \text{เมื่อ } w = 0.9 \text{ cm}, l = 0.4 \text{ cm}$$

$$R_{sh} = (260.63 \times 10^6) \left(\frac{0.9 \text{ cm}}{0.4 \text{ cm}} \right)$$

$$R_{sh} = 5.86 \times 10^8 \Omega / sq$$

$$\rho = R_{sh} d \quad \text{เมื่อ } d = 5 \times 10^{-5} \text{ cm}$$

$$\rho = (5.86 \times 10^8) (5 \times 10^{-5})$$

$$\rho = 29.32 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$$

-วิธีการคำนวณความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส กับ แรงดัน ที่ $x=0.0$

$$\text{ความชันที่ 1} = 3.0696 \times 10^{-6}$$

$$R_1 = \frac{1}{3.0696 \times 10^{-6}} = 3.2578 \times 10^5 \Omega$$

$$\text{ความชันที่ 2} = 8.1288 \times 10^{-6}$$

$$R_2 = \frac{1}{8.1288 \times 10^{-6}} = 12.3016 \times 10^5 \Omega$$

เมื่อ f คือ แฟกเตอร์ค่าแก้ของแวนเดอร์เพาว์ (Van der pauw correction factor)

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

$$f = 1 - \left(\frac{\ln 2}{2} \right) \left(\frac{3.2578 \times 10^5 - 12.3016 \times 10^5}{3.2578 \times 10^5 + 12.3016 \times 10^5} \right)^2$$

$$f = 0.8829$$

เมื่อได้ค่า R_1 และ R_2 มาแล้วสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานแผ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ภายใต้การบังคับของกฎหมายลิขสิทธิ์ เมื่อผู้จัดทำนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$R_{sh} = 0.8829\left(\frac{\pi}{\ln 2}\right)\left(\frac{3.2578 \times 10^5 + 12.3016 \times 10^5}{2}\right)$$

$$R_{sh} = 31.1318 \times 10^5 \Omega / sq$$

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถคำนวณได้ดังนี้

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

$$\rho = (31.1318 \times 10^5)(5 \times 10^{-5})$$

$$\rho = 155.66 \Omega \cdot cm$$

-วิธีการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างของปรากฏการณ์ฮอลล์
การหาค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์

$$R_H = (10^6) \frac{V_H I_x}{I_x B_z} \cdot \frac{d}{B_z} \quad \text{เมื่อ } V_H = V'_{24} - V_{24}$$

$$R_H = (10^6) \left(5.4813 \times \frac{10^{-3}}{10^{-9}} \right) \left(\frac{5 \times 10^{-5}}{4600} \right)$$

$$R_H = 5.96 \times 10^4 \Omega \cdot cm$$

การหาค่าความหนาแน่นของพาหะ

$$n = \frac{1}{q R_H} \quad \text{เมื่อ } q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ คุลมอมป์}$$

$$n = \frac{1}{(5.96 \times 10^4) (1.6 \times 10^{-19})}$$

$$n = 1.049 \times 10^{14} cm^{-3}$$

-วิธีการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงและค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน

การส่งผ่านแสง จากสมการ
$$\alpha = \frac{1 \times 10^5}{5} \left(\ln \left(\frac{100}{\tau} \right) \right)$$

เมื่อ $\tau = 0.07$; $\lambda = 843 nm$ จะได้
$$h\nu = \frac{1240}{843 nm} = 1.47 eV$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\alpha = \frac{1 \times 10^5}{5} \left(\ln \left(\frac{100}{0.07} \right) \right)$$

$$\alpha = 1.4529 \times 10^5$$

$$(\alpha h \nu)^2 = 4.5672 \times 10^{10}$$

การสะท้อน จากสมการ $\alpha = \frac{1}{d} (2.303A)$

เมื่อ $A = 3.1472; \lambda = 843 \text{ nm}$ จะได้ $h \nu = \frac{1240}{843 \text{ nm}} = 1.47 \text{ eV}$

$$\alpha = \frac{2.303 \times 3.1472 \times 10^5}{5}$$

$$\alpha = 1.4496 \times 10^5$$

$$(\alpha h \nu)^2 = 4.5466 \times 10^{10}$$

-วิธีการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง

โดยเริ่มจากแบบจำลองอะตอมของซีโด ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) ได้จาก

กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln \sigma T^{1/2}$ กับ $\frac{1000}{T}$

- การหาค่าพลังงานกระตุ้น (E_a)

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

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

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

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

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

$$E_a = -\frac{1000k(1.38 \times 10^{-23})(-0.6769)}{1.6 \times 10^{-19}}$$

$$E_a = 0.0584 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การหาค่าเพอร์มิตติวิตี (ϵ_s)

$$\epsilon_s = \epsilon_r \epsilon_0$$

$$\epsilon_s = (10.16)(8.85 \times 10^{-14})$$

$$\epsilon_s = 8.99 \times 10^{-13} \text{ ฟารัดต่อตารางเซนติเมตร}$$

- 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

$$N_a = \frac{8(8.99 \times 10^{-13})(0.0584)(1.6 \times 10^{-19})}{(1.6 \times 10^{-19})^2 (55.74 \times 10^{-7})^2}$$

$$N_a = 8.4506 \times 10^{16} \text{ ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร}$$

- การหาค่าความยาวเดอบาย (L_D)

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

$$L_D = \left(\frac{(1.38 \times 10^{-23})(280)(8.99)}{(1.6 \times 10^{-19})^2 (8.4506 \times 10^{16})} \right)^{1/2}$$

$$L_D = 1.2673 \times 10^{-6} \text{ เซนติเมตร}$$

- การหาค่าระดับพลังงานของกึ่งตัวนำ (E_t)

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

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

$$E_t = \frac{1}{2} (1.4250) - 0.0584$$

$$E_t = 0.6541 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การหาค่าความหนาแน่นของกัณฑ์พาหะ (N_t)

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

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

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

แทนค่า $v_c = \left[\frac{(1.38 \times 10^{-23})(280)}{2\pi(0.15 \times 9.1 \times 10^{-31})} \right]^{1/2}$

$v_c = 6.7122 \times 10^4$ เซนติเมตรต่อวินาที

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

แทนค่า $N_v = 2 \left[\frac{2\pi(0.15 \times 9.1 \times 10^{-31})(1.38 \times 10^{-23})(280)}{(6.63 \times 10^{-34})^2} \right]^{3/2}$

$N_v = 1.3029 \times 10^{24}$ ต่อตารางเซนติเมตร

$$N_t = \left[\frac{(55.74 \times 10^{-7})^2 (1.6 \times 10^{-19}) (1.3092 \times 10^{24}) (8.4506 \times 10^{16}) (6.7122 \times 10^4)}{2 \left(\frac{1.38 \times 10^{-23}}{1.6 \times 10^{-19}} \right) (280) (6.5 \times 10^{-4})} \right] \times \exp\left(-\frac{0.0584 \times 1.6 \times 10^{-19}}{1.38 \times 10^{-23} \times 280}\right) + (55.74 \times 10^{-7} \times 8.4506 \times 10^{16})$$

$N_t = 4.7104 \times 10^{11}$ ต่อตารางเซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่ออุณหภูมิต่ำลง การนำไฟฟ้าจะเกิดจากกลไกการกระโดดของอิเล็กตรอนระหว่างระดับผู้ให้ที่อยู่ติดกัน (nearest neighbor hopping conduction; NNH) สภาพนำไฟฟ้าสามารถเขียนได้ดังความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln \sigma$ กับ $\frac{1000}{T}$

$$\sigma = \sigma_{0,NNH} \exp\left(-\frac{E_{0,NNH}}{kT}\right)$$

$$\ln \sigma = -\frac{E_{NNH}}{1000k} \left(\frac{1000}{T}\right) + \ln \sigma_{0,NNH}$$

$$\text{ความชัน} = -\frac{E_{NNH}}{1000k}$$

แทนค่า

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

$$E_{NNH} = -\frac{1000k(1.38 \times 10^{-23})(-0.6769)}{1.6 \times 10^{-19}}$$

$$E_{NNH} = 0.06457 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

โดยที่

$$E_{0,NNH} = \frac{0.99e^2 N_d^{1/2}}{4\pi\epsilon_s}$$

$$N_d = \left[\frac{E_{0,NNH} 4\pi\epsilon_s}{0.99e^2} \right]^3$$

$$N_d = \left[\frac{(4\pi)(8.9916 \times 10^{-13})(0.0646)(1.6 \times 10^{-19})}{0.99(1.6 \times 10^{-19})^2} \right]^3$$

$$N_d = 9.79 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$$

อุณหภูมิของการทรานซิชันจากกลไกการกระโดดในระยะไม่คงที่ของมอตต์ (Mott VRH) จะเป็นไปตามความสัมพันธ์

$$T_{C1} = \frac{e^2 N_d^{2/3} \xi_{Mott}}{4\pi\epsilon_s k_B}$$

$$T_{C1} = \frac{(1.6 \times 10^{-19})^2 (9.785 \times 10^{19})^{2/3} (8.0645 \times 10^{-8})}{4\pi(1.38 \times 10^{-23})(8.9916 \times 10^{-13})}$$

$$T_{C1} = 281.42 \quad \text{เคลวิน}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับแบบจำลองอะตอมแบบการกระโดดระหว่างสถานะพลังงานท้องถิ่นในระยยะไม่คงที่ พารามิเตอร์ต่างๆสามารถคำนวณได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \sigma T^{1/2}$ กับ $T^{-1/4}$

- การหาค่าองศาของความไม่เป็นระเบียบ (T_0) และแฟกเตอร์หน้าพจน์เอ็กซ์โพเนนเชียล (σ_0)

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

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

$$T_{0,Mott} = 1.7910 \times 10^5 \text{ เคลวิน}$$

$$\sigma_{0,Mott} = 1.0598 \text{ ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร}$$

ส่วนระยะโลคัลไลเซชัน (localization length; ξ_{Mott}) ซึ่งแสดงถึงโอกาสที่จะเกิดการกระโดดระหว่างสถานะพลังงานท้องถิ่น คือ

$$\xi_{Mott} = \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{1.24 \times 10^7} = 0.80645 \text{ nm}$$

ส่วนความหนาแน่นของสถานะถูกจำกัดเฉพาะที่ (density of localized state; $N_0(E_F)$) ที่ระดับเฟอร์มิ คือ

$$\text{จาก } T_{0,Mott} = \frac{18\alpha^3}{k_B N_0(E_F)}$$

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

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

$$q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ คูลอมป์}$$

$$N_0(E_F) = \frac{18\alpha^3}{\frac{k_B}{q} T_{0,Mott}} = 2.2217 \times 10^{21} \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนระยะทางเฉลี่ยของการกระโดด หรือ ($R_{hop,Mott}$) คือ

$$\frac{R_{hop,Mott}}{\xi_{Mott}} = \frac{3}{8} \left(\frac{T_{0,Mott}}{T} \right)^{1/4}$$

$$\frac{R_{hop,Mott}}{\xi_{Mott}} = \frac{3}{8} \left(\frac{1.791 \times 10^5}{200} \right)^{1/4}$$

$$\frac{R_{hop,Mott}}{\xi_{Mott}} = 2.05$$

$$R_{hop,Mott} = \left(\frac{9\xi_{Mott}}{8\pi k_B T N_0(E_F)} \right)^{1/4}$$

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

แทนค่า

$$R_{hop,Mott} = \left[\frac{9(8.0645 \times 10^{-8})}{8\pi(1.24 \times 10^7) \left(\frac{1.38 \times 10^{-23}}{1.6 \times 10^{-19}} \right) (200)(2.22 \times 10^{21})} \right]^{1/4}$$

$$R_{hop,Mott} = 1.66 \times 10^{-7} \text{ cm}$$

สำหรับพลังงานเฉลี่ยของการกระโดด ($W_{hop,Mott}$) คือ

$$W_{hop,Mott} = \frac{3}{4\pi R_{hop,Mott}^3 N_0(E_F)}$$

$$W_{hop,Mott} = \frac{3}{4\pi(1.6568 \times 10^{-7})^3 (2.2217 \times 10^{21})}$$

$$W_{hop,Mott} = 0.0236 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

และ

$$\alpha R_{hop,Mott} = (1.24 \times 10^7)(1.6568 \times 10^{-7})$$

$$\alpha R_{hop,Mott} = 2.0544$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิทรานซิชันจากกลไก Mott-VRH ไปเป็น ES-VRH จะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$T_{C2} = 16 \left(\frac{T_{0,ES}^2}{T_{0,Mott}} \right)$$

$$T_{C2} = 16 \left(\frac{(2.7044 \times 10^2)^2}{1.791 \times 10^5} \right)$$

$$T_{C2} = 6.5338 \text{ เคลวิน}$$

ในกรณีที่อุณหภูมิลดลงต่ำสุด กลไกการนำไฟฟ้าจะเป็นแบบกระโดดในระยะไม่คงที่ของเอพโรส-ชลอพสกี (ES-VRH) ซึ่งจะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$\sigma = \sigma_{0,ES} T^{-1} \exp \left[- \left(\frac{T_{0,ES}}{T} \right)^{1/2} \right]$$

$$\ln(\sigma T) = - \left(\frac{T_{0,ES}}{T} \right)^{1/2} + \ln \sigma_{0,ES}$$

โดยที่องค์ความไม่เป็นระเบียบของ ES-VRH ($T_{0,ES}$) คือ

$$T_{0,ES} = \frac{2.8e^2}{k_B \xi_{ES} \varepsilon_s}$$

$$\xi_{ES} = \frac{2.8e^2}{k_B T_{0,ES} \varepsilon_s}$$

$$\xi_{ES} = \frac{2.8(1.6 \times 10^{-19})^2}{(1.38 \times 10^{-23})(2.7044 \times 10^2)(8.9916 \times 10^{-13})}$$

$$\xi_{ES} = 213.63 \text{ nm}$$

ค่า $T_{0,ES}$ สามารถหาได้จากความชัน

$$T_{0,ES} = (-16.445)^2 = 2.7044 \times 10^2 \text{ เคลวิน}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนค่า $\sigma_{0,ES}$ สามารถหาได้จากจุดตัดแกน y ส่วนระยะทางเฉลี่ยของการกระโดด ($R_{hop,ES}$) จะแสดงดังความสัมพันธ์

$$\frac{R_{hop,ES}}{\xi_{ES}} = \frac{1}{4} \left(\frac{T_{0,Mott}}{T} \right)^{1/2}$$

$$\frac{R_{hop,ES}}{\xi_{ES}} = \frac{1}{4} \left(\frac{2.7044 \times 10^2}{85} \right)^{1/2}$$

$$\frac{R_{hop,ES}}{\xi_{ES}} = 0.45$$

สำหรับพลังงานเฉลี่ยของการกระโดด ($W_{hop,ES}$) คือ

$$W_{hop,ES} = \frac{1}{2} k_B T \left(\frac{T_{0,ES}}{T} \right)^{1/2}$$

$$W_{hop,ES} = \frac{1}{2} (1.38 \times 10^{-23}) (85) \left(\frac{2.7044 \times 10^2}{85} \right)^{1/2}$$

$$W_{hop,ES} = 6.54 meV$$

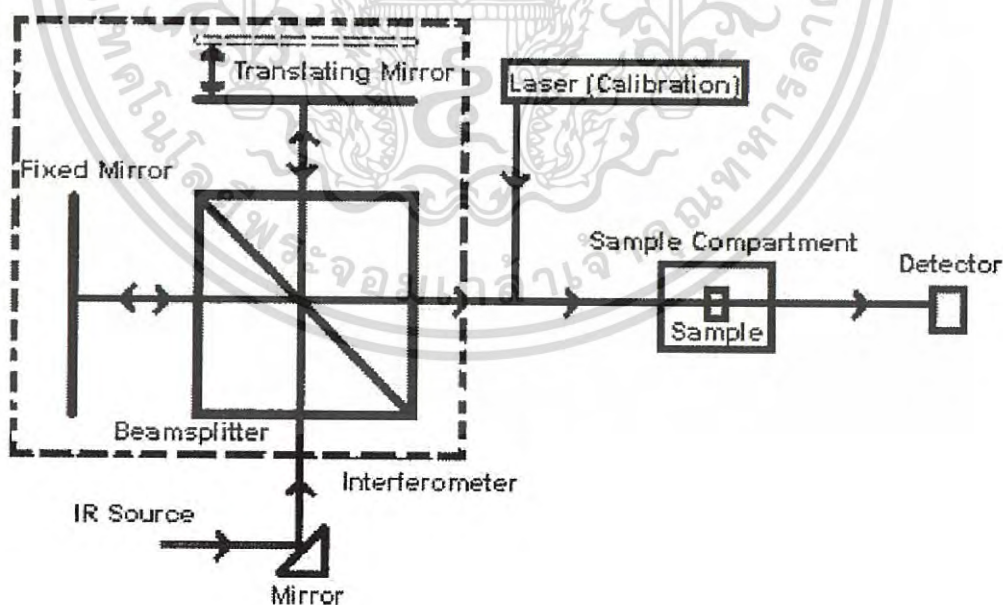
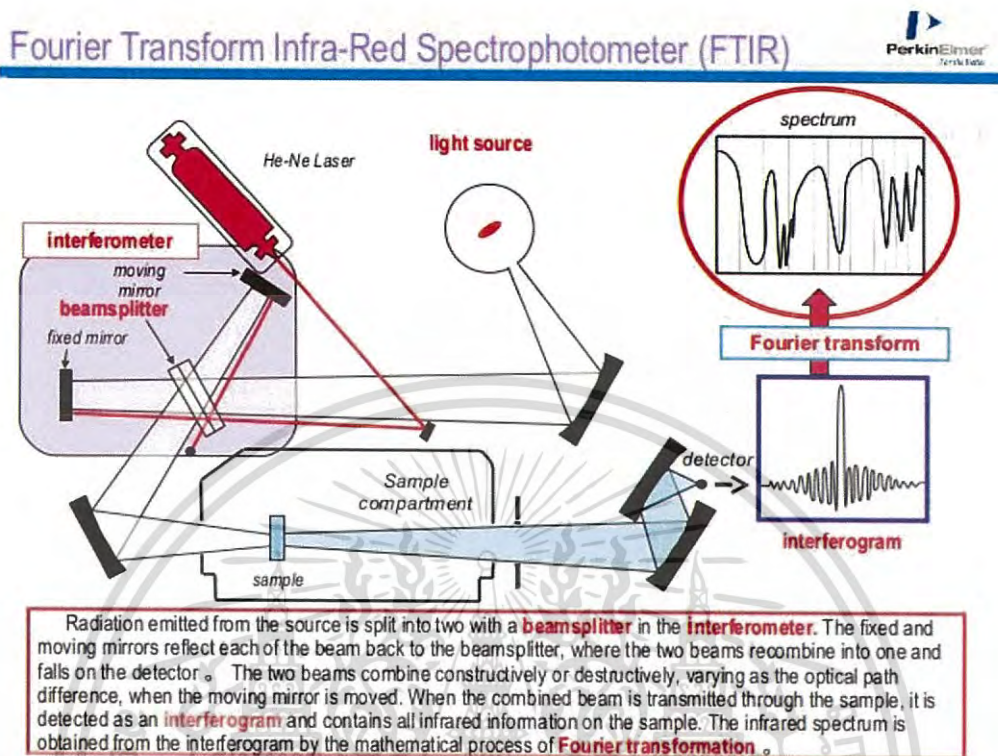
เนื่องจากที่ระดับอุณหภูมิต่ำมากนี้ อิเล็กตรอนในสถานะพลังงานท้องถิ่นมีอันตรกิริยาต่อกัน ส่งผลให้ความหนาแน่นของสถานะพลังงานที่ระดับเฟอร์มิแยกออกจากกันกลายเป็นช่องว่าง เรียกว่า ช่องว่างของคูลอมบ์ (Coulomb gap) จะแสดงดังความสัมพันธ์

$$\Delta_C = k_B \left(\frac{T_{0,ES}}{T_{0,Mott}} \right)^{1/2}$$

$$\Delta_C = \left(\frac{1.38 \times 10^{-23}}{1.6 \times 10^{-19}} \right) \left(\frac{2.7044 \times 10^2}{1.791 \times 10^5} \right)^{1/2}$$

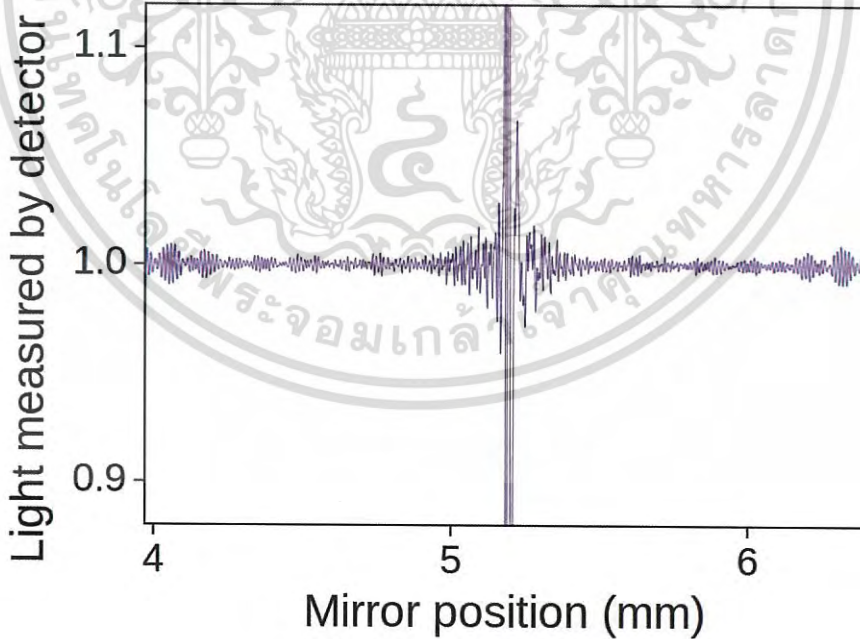
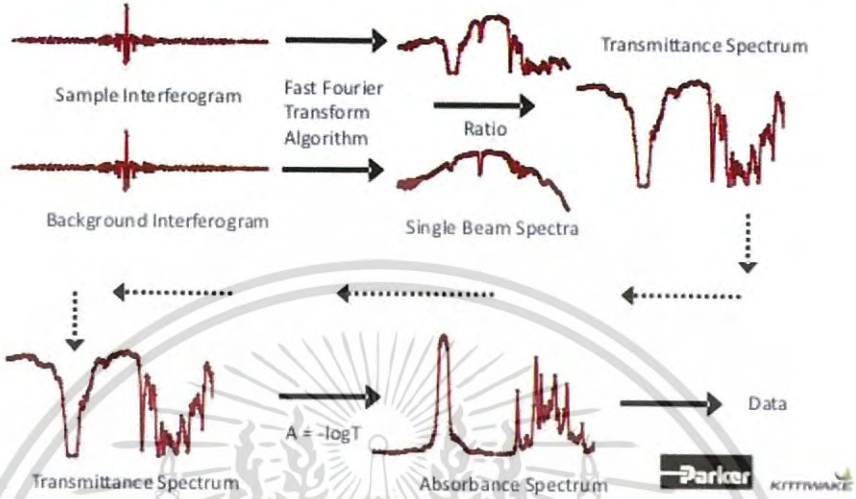
$$\Delta_C = 3.35 \times 10^{-6} eV$$

แผนภาพแสดงหลักการทำงานของ FTIR



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Principle of FTIR Spectroscopy



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน

นางสาวกมลวรรณ สุทธิเจริญ

เกิดเมื่อ

วันที่ 30 มีนาคม 2536

ภูมิลำเนา

จังหวัดนครสวรรค์

ประวัติการศึกษา

ระดับประถมศึกษา โรงเรียนวัดศรีอุทุมพร จังหวัดนครสวรรค์
ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนโพธิสารศึกษา จังหวัดนครสวรรค์
ระดับอุดมศึกษา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
คณะวิทยาศาสตร์ สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

ชื่อผู้เขียน

นางสาวจารุวรรณ มีนาง

เกิดเมื่อ

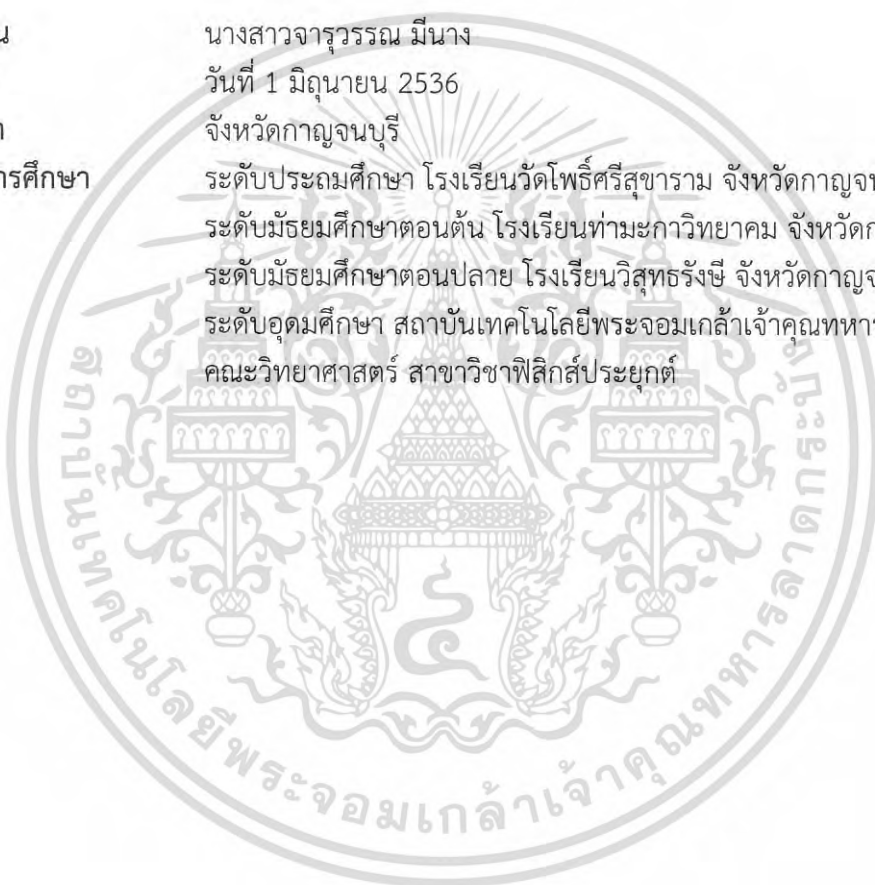
วันที่ 1 มิถุนายน 2536

ภูมิลำเนา

จังหวัดกาญจนบุรี

ประวัติการศึกษา

ระดับประถมศึกษา โรงเรียนวัดโพธิ์ศรีสุขาราม จังหวัดกาญจนบุรี
ระดับมัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนท่ามะกาวิทยาคม จังหวัดกาญจนบุรี
ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนวิสุทธิรังษี จังหวัดกาญจนบุรี
ระดับอุดมศึกษา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
คณะวิทยาศาสตร์ สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้