

กลไกการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x}
ELECTRICAL CONDUCTION MECHANISM OF CdS_xTe_{1-x} THIN FILMS
AT LOW TEMPERATURE



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2557

กลไกการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x}
ELECTRICAL CONDUCTION MECHANISM OF CdS_xTe_{1-x} THIN FILMS
AT LOW TEMPERATURE



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ELECTRICAL CONDUCTION MECHANISM OF $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ THIN FILMS
AT LOW TEMPERATURE



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE
IN APPLIED PHYSICS
DEPARTMENT OF PHYSICS
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

กลไกการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ
 CdS_xTe_{1-x}
ELECTRICAL CONDUCTION MECHANISM OF CdS_xTe_{1-x}
THIN FILMS AT LOW TEMPERATURE

ชื่อนักศึกษา

นางสาว ขวัญกมล สุวรรณเทศ รหัสนักศึกษา 54050488

ปริญญา

วิทยาศาสตร์บัณฑิต ฟิสิกส์ประยุกต์

ภาควิชา

ฟิสิกส์

ปีการศึกษา

2557

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร. รุติฉินัย แก้วแดง

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ฟิสิกส์ประยุกต์
ประจำปีการศึกษา 2557

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ	
อ.ภารุจ บัณฑิตาวิทย	
ผศ.ดร.ชัยสิงห์ ภูริกษ์เกียรติ	
รศ.ดร.รุติฉินัย แก้วแดง	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ กลไกการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x}
ชื่อนักศึกษา นางสาว ขวัญกมล สุวรรณเทศ รหัสนักศึกษา 54050488
ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต ฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชา ฟิสิกส์
ปีการศึกษา 2557
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. จูตินัย แก้วแดง

บทคัดย่อ

ในโครงการพิเศษนี้ ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศเคลือบบนกระจกสไลด์จากผงผลึกของสารตั้งต้นที่เป็นสารประกอบของ CdS และ CdTe ที่มีความบริสุทธิ์สูง จากสเปกตรัมของพีคความเข้มการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์พบว่าโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางที่มีเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของธาตุ S ต่ำกว่า 0.2 จะเป็นแบบคิวบิก ที่มีพีคการเลี้ยวเบนของระนาบ (111) โดดเด่นที่สุด อย่างไรก็ตามในกรณีเศษส่วนโดยโมลอะตอมของธาตุ S มีค่าตั้งแต่ 0.8 ขึ้นไป จะมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเฮกซะโกนัลที่มีพีคความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ระนาบ (002) โดดเด่นที่สุด สำหรับกรณีที่มีเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของธาตุ S อยู่ระหว่าง 0.2 ถึง 0.8 โครงสร้างผลึกจะเป็นแบบคิวบิกและเฮกซะโกนัลอยู่ร่วมกัน ลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) สามารถตรวจสอบโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ค่าช่องว่างแถบพลังงานสามารถคำนวณได้จากสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง ทำการวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 100 - 300 เคลวิน พบว่าค่าสภาพนำไฟฟ้าสามารถแบ่งได้เป็น 2 ช่วง กล่าวคือ เป็นช่วงอุณหภูมิสูงกับช่วงอุณหภูมิต่ำ กลไกการนำไฟฟ้าในช่วงอุณหภูมิสูงสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองของซีโต ส่วนกลไกการนำไฟฟ้าในช่วงอุณหภูมิต่ำจะอธิบายด้วยกลไกการกระโดดในระยะไม่คงที่ตามแบบจำลองของมอดด์ จากนั้นจึงคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆของแต่ละแบบจำลอง ค่าพารามิเตอร์เหล่านี้จำเป็นต่อการประยุกต์ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) เป็นเซลล์แสงอาทิตย์

คำสำคัญ : ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$), การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์, แบบจำลองซีโต, แบบจำลองการกระโดดในระยะไม่คงที่

Title	ELECTRICAL CONDUCTION MECHANISM OF CdS _x Te _{1-x} THIN FILMS AT LOW TEMPERATURE
Students	Miss. Kwankamol Suvarnadesa Student ID 54050488
Degree	Bachelor of Science In Applied Physics
Department	Physics
Academic Year	2014
Advisor	Assoc. Prof. Dr. Thitinai Gaewdang

Abstract

In this special project, CdS_xTe_{1-x} thin films ($0 \leq x \leq 1$) were prepared by thermal evaporation method on glass substrate using the mixed powder of pure CdS and CdTe compounds. XRD reveals that the films exhibits the cubic structure with the preferred orientation of (111) plane when $x < 0.2$. However, when $x \geq 0.8$, they have the hexagonal structure with the preferred orientation of (002) plane. For the composition $0.2 \leq x \leq 0.8$, the cubic and hexagonal phases have been found to coexist in the system and the films become less preferentially orientated. SEM was used to study morphological features of the samples. Optical energy gap value of the films was determined from the transmission spectra. Electrical conductivity measurements were performed at low temperature in the range 100 – 300 K. The temperature dependence of electrical conductivity can be divided experimentally in two regions. At high temperature region, the conductivity mechanism was interpreted in terms of Seto's model. The conductivity at low temperature region is well described by Mott's variable range hopping (VRH). Various parameters of each model were extracted from the conductivity data. These parameters might be useful for solar cell application.

Keywords: CdS_xTe_{1-x} thin films, XRD, Seto's model, VRH model.

กิตติกรรมประกาศ

รายงานฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาของรองศาสตราจารย์ ดร.ฐิตินัย แก้วแดง รองศาสตราจารย์ งามนิตย์ วงษ์เจริญ รองศาสตราจารย์ ดร. ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ ที่คอยอบรมและสอนวิชาความรู้ต่างๆ และคอยช่วยเหลือในทุกๆด้านตลอดมา จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์ และการแนะนำในการใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกโตรมิเตอร์ ในการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค

ขอขอบคุณ คุณทศพร ชันทยาภรณ์ คุณชนิภรณ์ จุไรสง และ คุณนพณัฐ เดชะคำภู นักศึกษาปริญญาโทในห้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุโพโตนิคส์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่คอยให้คำแนะนำและให้ความช่วยเหลือในการทำงานเสมอมา

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่าน ที่เมตตาประสิทธิ์ประสาท วิชาความรู้ตั้งแต่ การศึกษาภาคบังคับจนถึงปัจจุบัน ตลอดจนกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และผู้มีพระคุณทุกท่าน ที่ให้การอุปการะทุนในการศึกษาเล่าเรียน และเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา

นางสาว ขวัญกมล สุวรรณเทศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 วัสดุของแข็งสารกึ่งตัวนำ	4
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเรื่องของลักษณะของโครงสร้างผลึก	5
2.2.1 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ	5
2.2.2 การระบุตำแหน่ง ทิศทางและระนาบของโครงสร้างผลึก	8
2.2.3 โครงสร้างผลึกที่สำคัญของสารกึ่งตัวนำ	10
2.2.3.1 โครงสร้างผลึกแคดเมียมเทลลูไรด์	10
2.2.3.2 โครงสร้างผลึกแคดเมียมซัลไฟด์	11
2.2.3.3 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์	11
2.2.3.4 โครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซต์	12
2.3 ผลึกจริง	13
2.3.1 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบศูนย์มิติหรือแบบจุด	13
2.3.2 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบหนึ่งมิติหรือแบบเชิงเส้น	15
2.3.3 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบสองมิติหรือแบบระนาบ	17
2.3.3.1 เกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน	17
2.3.3.2 ผลึกแฝดและขอบเขตรอยต่อของผลึกแฝด	17
2.3.3.3 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการจัดเรียงระนาบของอะตอมผิดพลาด	18
ลำดับ	18
2.4 การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์	19
2.4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก	20
2.4.2 การหาขนาดของเกรน	21
2.5 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6 สมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ	23
2.6.1 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน	23
2.6.2 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ	25
2.6.3 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ	27
2.6.4 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ	27
2.6.5 ส่วนทางของแถบพลังงาน	30
2.7 สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง	31
2.7.1 สภาพนำไฟฟ้า	31
2.7.2 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง	32
2.7.3 ปรากฏการณ์ฮอลล์	33
2.7.4 การศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์	37
2.7.5 กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในฟิล์มบางที่อุณหภูมิต่างๆ	40
2.7.5.1 กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในฟิล์มบางในช่วงอุณหภูมิสูง	41
2.7.5.2 กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในฟิล์มบางในช่วงอุณหภูมี่ปานกลาง	42
2.7.5.3 การนำไฟฟ้าของพาหะแบบกระโดดในระยะไม่คงที่	45
2.8 การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	47
2.8.1 อัตราการระเหยสาร	47
2.8.2 แหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้ในการระเหยสารด้วยไฟฟ้า	47
2.8.2.1 แหล่งกำเนิดความร้อนที่ทำด้วยสารทังสเตน	48
2.8.2.2 แหล่งกำเนิดความร้อนชนิดแผ่นโลหะทรงรูป	48
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	49
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	52
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์งานวิจัย	52
3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ เพื่อใช้เคลือบฟิล์มบาง CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	52
3.1.2 ระบบการเคลือบฟิล์มบางโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	52
3.2 ขั้นตอนการเคลือบฟิล์มบาง CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.1. การเตรียมและทำความสะอาดแผ่นกระจกสไลด์เพื่อเป็นฐานรองรับ	53
3.3 การเตรียมสารตั้งต้นที่ใช้สำหรับการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	53
3.3.1 การเตรียมผงผลึกของสารตั้งต้นที่เป็นสารประกอบ CdS และ $CdTe$ เพื่อใช้ในการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	54
3.4 การเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	56
3.5 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์บางประการของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	57
3.5.1 การตรวจสอบลักษณะของโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD)	57
3.5.2 การตรวจสอบลักษณะของโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)	57
3.5.3 การศึกษาสมบัติทางแสง	57
3.5.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า	58
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	59
4.1 ผลการศึกษาฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนیل	59
4.2 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนิล	59
4.3 ผลการวิเคราะห์ลักษณะของโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนิล	62

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4 ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	63
4.5 ผลการวิเคราะห์ภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	65
4.6 ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	66
4.7 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-150 องศาเซลเซียส เพื่อหาค่าพลังงานกระตุ้น ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	69
4.8 ผลการศึกษาศมบัติทางไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 300-100 เคลวิน ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	72
4.8.1 ผลการศึกษาค่าความต้านทานไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 300-100 เคลวิน ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	72
4.9 ผลการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	83
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	86
5.1 สรุปผลการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	86

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2 สรุปผลการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อที่ไม่มีการแอนนیل	86
5.3 ข้อเสนอแนะ	88
1. การเตรียมฟิล์มบาง	88
2. การวัดสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ	89
เอกสารอ้างอิง	90
ภาคผนวก	93



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงพารามิเตอร์ของหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ	6
2.2 แสดงระบบผลึกทั้ง 7 แบบในระบบ 3 มิติ	7
2.3 แสดงความสัมพันธ์ของดัชนีมิลเลอร์ (h k l) และจุดตัดแกนผลึก (x,y,z)	9
2.4 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่คำนวณได้จากแบบจำลองของซีโตของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดเมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	50
2.5 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่คำนวณได้จากแบบการกระโดดในระยะไม่คงที่ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที	50
3.1 แสดงค่าปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	55
4.1 แสดงองค์ประกอบของธาตุที่ได้จากการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	64
4.2 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	68
4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าพลังงานกระตุ้น กับ ค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของธาตุ S เมื่อทำการวัดค่าความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิสูงในช่วง 25-150 องศาเซลเซียสของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	71
4.4 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่คำนวณได้จากแบบจำลองของซีโต ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	82
4.5 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้จากแบบการกระโดดในระยะไม่คงที่ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	78
4.6 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่คำนวณได้จากผลการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	85

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงสภาพหน้าไฟฟ้าและสภาพต้านทานไฟฟ้าของฉนวน สารกึ่งตัวนำ และสารตัวนำ	4
2.2 แสดงหน่วยเซลล์ในระบบ 2 มิติ	5
2.3 แสดงการบอกชื่อระนาบต่างๆของผลึก	8
2.4 แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ของสารกึ่งตัวนำแคดเมียมเทลลูไรด์	10
2.5 แสดงการจัดเรียงตัวของอะตอมในโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ ของสารกึ่งตัวนำแคดเมียมซัลไฟด์	11
2.6 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซด์ ของสารกึ่งตัวนำแคดเมียมซัลไฟด์	12
2.7 แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซด์กับแบบซิงค์เบลนด์ ของสารกึ่งตัวนำแคดเมียมซัลไฟด์	13
2.8 แสดงความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบคูนยัมิตีหรือแบบจุด	14
2.9 แสดงการเกิดความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบชอตต์กี และความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบเฟรนเคิล	15
2.10 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการเคลื่อนที่ของโครงผลึกแบบขอบ	16
2.11 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการเคลื่อนที่ของโครงผลึกแบบสกรู	16
2.12 แสดงความไม่สมบูรณ์ของผลึกชนิดเกรนและบริเวณขอบเขตรอยต่อของเกรน	17
2.13 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแฝดและระนาบของผลึกแฝดหรือบริเวณขอบเขตรอยต่อของผลึกแฝด	18
2.14 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการจัดเรียงระนาบของอะตอมผิดพลาด	18
2.15 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์	19
2.16 แสดงตัวอย่างของสเปกตรัมที่ได้จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	20
2.17 แสดงค่า β_{20} เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	21
2.18 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	22
2.19 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานอย่างง่าย	23
2.20 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานและการย้ายสถานะของพลังงานอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ($T = 0$ เคลวิน)	25
2.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ($T = 0$ เคลวิน)	25
2.22 แสดงแผนภาพการศึกษาสมบัติเชิงแสงของฟิล์มบาง	26
2.23 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับพลังงานโฟตอน	28
2.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง และ ค่าพลังงานโฟตอนหรือค่าความยาวคลื่นของพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำ	29

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.25 แสดงส่วนหางของแถบพลังงานซึ่งมีส่วนหางของแถบวาเลนซ์และส่วนหางของแถบนำ	30
2.26 แสดงการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง	32
2.27 แสดงแผนภาพแสดงปรากฏการณ์ฮอลล์บนแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิดพี	34
2.28 แสดงการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์บนสารตัวอย่างที่เป็นแผ่นบางที่มีรูปทรงใดๆ	38
2.29 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของสารตัวอย่าง	39
2.30 แสดงแบบจำลองการเกิดบริเวณพร่องพาหะและโครงสร้างแถบพลังงานตรงบริเวณขอบรอยต่อของเกรนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ	40
2.31 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln\sigma$ กับ $\frac{1,000}{T}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่อุณหภูมิในช่วง 125-365 เคลวิน สำหรับในรูปแทรกคือกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln\sigma T^{-1}$ กับ $\frac{1,000}{T}$	44
2.32 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln\sigma T^{\frac{1}{2}}$ กับ $\frac{1,000}{T}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO สำหรับในรูปแทรก คือกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln\sigma T^{\frac{1}{2}}$ กับ $T^{-\frac{1}{4}}$	44
2.33 แสดงแหล่งกำเนิดความร้อนที่ทำด้วยสารทั้งสแตนท์ที่มีขนาดต่างๆ	48
2.34 แสดงแหล่งกำเนิดความร้อนที่มีรูปทรงเรขาคณิตแบบต่างๆที่ใช้ระเหยสารเคมีด้วยไฟฟ้า	48
2.35 แสดงแผนภาพลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของผลึกพหุพันธ์ในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่มีชนิดในการนำไฟฟ้าเป็นแบบเอ็น	51
2.36 แสดงระดับพลังงานของกัปดักพาหะชนิดเดียวที่อยู่ในช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่มีชนิดในการนำไฟฟ้าเป็นแบบเอ็น	51
3.1 แสดงผลึกของสารตั้งต้นที่เป็นสารประกอบ CdS และ CdTe ที่ผสมเพื่อใช้ในการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	56
4.1 แสดงฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนัล	59
4.2 แสดงพืดความเข้มข้นการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนัล	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่โครงผลึก a_0 และ c_0 กับค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของธาตุ S ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	61
4.4 แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	62
4.5 แสดงสเปกตรัมที่ได้จากการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	63
4.6 แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	65
4.7 แสดงสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	66
4.8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(\alpha h\nu)^2$ กับ ค่า $h\nu$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	67
4.9 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าช่องว่างแถบพลังงาน กับ ค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของธาตุ S ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	68
4.10 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1000/T$ กับ ค่า $\ln(R_0/R)$ เมื่อทำการวัดค่าความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-150 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	70
4.11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln \sigma$ กับ ค่า $1000/T$, ค่า $\ln \sigma T^{1/2}$ กับ ค่า $1000/T$, ค่า $\ln \sigma T^{1/2}$ กับ ค่า $T^{(-1/4)}$ ตามลำดับ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} เมื่อ ($x=0.0$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	72

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln \sigma$ กับ ค่า $1000/T$,ค่า $\ln \sigma T^{1/2}$ กับ ค่า $1000/T$, ค่า $\ln \sigma T^{1/2}$ กับ ค่า $T^{-1/4}$ ตามลำดับ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} เมื่อ ($x=0.2$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนیل	73
4.13 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln \sigma$ กับ ค่า $1000/T$,ค่า $\ln \sigma T^{1/2}$ กับ ค่า $1000/T$, ค่า $\ln \sigma T^{1/2}$ กับ ค่า $T^{-1/4}$ ตามลำดับ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} เมื่อ ($x=0.4$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนิล	74
4.14 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln \sigma$ กับ ค่า $1000/T$,ค่า $\ln \sigma T^{1/2}$ กับ ค่า $1000/T$, ค่า $\ln \sigma T^{1/2}$ กับ ค่า $T^{-1/4}$ ตามลำดับ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} เมื่อ ($x=0.6$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนิล	75
4.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln \sigma$ กับ ค่า $1000/T$,ค่า $\ln \sigma T^{1/2}$ กับ ค่า $1000/T$ ค่า $\ln \sigma T^{1/2}$ กับ ค่า $T^{-1/4}$ ตามลำดับ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} เมื่อ ($x=0.8$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนิล	76
4.16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln \sigma$ กับ ค่า $1000/T$,ค่า $\ln \sigma T^{1/2}$ กับ ค่า $1000/T$ ค่า $\ln \sigma T^{1/2}$ กับ ค่า $T^{-1/4}$ ตามลำดับ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} เมื่อ ($x=1.0$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนิล	77
4.17 แสดงกราฟการหาความต้านทาน R_1 ที่ได้จากการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} เมื่อ ($x = 0.8$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนิล	83
4.18 แสดงกราฟการหาความต้านทาน R_2 ที่ได้จากการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} เมื่อ ($x = 0.8$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนิล	83
4.19 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ (V_{24}) กับ ค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็ก ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} เมื่อ ($x = 0.8$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนิล	84

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

4.20 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ (V_H) กับ ค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็ก ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} เมื่อ ($x = 0.8$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนิล

84



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันมนุษย์มีความต้องการในการใช้พลังงานเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้พลังงานที่มีอยู่ในธรรมชาติ เช่น น้ำมัน ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ ไม่เพียงพอต่อความต้องการของมนุษย์ มนุษย์จึงพยายามคิดค้นและพัฒนาเพื่อค้นหาแหล่งพลังงานใหม่ๆ มาทดแทนและตอบสนองความต้องการของมนุษย์เพื่อลดการพึ่งพาการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศ ซึ่งพลังงานนั้นคือ พลังงานแสงอาทิตย์ เป็นพลังงานจากธรรมชาติที่มีความสะอาดปราศจากมลพิษ สามารถนำมาใช้อย่างไม่หมดและยังช่วยลดปัญหาโลกร้อนได้อีกทางหนึ่งด้วย

พลังงานแสงอาทิตย์สามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าจากปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก (photovoltaic effect) ได้มีการวิจัยและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์จากฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ในกลุ่ม II-VI และ III-VI₂ เช่น CdTe, CdS, CuInSe₂ และ CuInGaSe₂ อย่างกว้างขวาง ซึ่งในปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ที่โดดเด่นและน่าสนใจมากเป็นพิเศษคือ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งมีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าประมาณ 5-6 เปอร์เซ็นต์และให้ประสิทธิภาพสูงถึง 16.5 เปอร์เซ็นต์ (Tuttle, 2000)

ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่มีการนำไฟฟ้าเป็นชนิดเอ็น (n-type) มีลักษณะโครงสร้างพลังงานแบบตรง (direct band gap) มีช่องว่างแถบพลังงาน (energy gap) ที่อุณหภูมิห้องเท่ากับ 2.42 อิเล็กตรอนโวลต์ เป็นฟิล์มที่ได้รับการยอมรับว่าเหมาะกับการสร้างเป็นชั้นหน้าต่างของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อทำเป็นรอยต่อระหว่างหัวต่อพี-เอ็น (เมื่อฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS มีความหนา 0.1 ไมโครเมตร จะดูดกลืนพลังงานที่สูงกว่า 2.42 อิเล็กตรอนโวลต์ ได้ถึง 36 เปอร์เซ็นต์) แต่ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS มีช่องว่างแถบพลังงานไม่กว้างนัก จึงต้องเพิ่มช่องว่างแถบพลังงานให้กว้างขึ้น โดยการผสมเข้ากับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe กลายเป็นสารประกอบกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} (0 ≤ x ≤ 1) โดยโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำจะมี 2 แบบ คือซิงค์เบลนด์ (zincblend) ซึ่งจัดอยู่ในระบบคิวบิก (cubic) หรือเวิร์ทไซท์ (wurtzite) ฟิล์มบางของสารประกอบกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} (0 ≤ x ≤ 1) ยังช่วยให้สามารถดูดกลืนแสงในช่วงพลังงานที่กว้างขึ้นอีกด้วย ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนโมลของสารที่เจือแต่ละสาร (Gacia-Cuencu, 1987; Ramaiah, 1999; Gunal, 1997; Gilmore, 2000)

ในโครงการพิเศษนี้ได้ทำการศึกษากลไกการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 100-300 เคลวิน ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} (0 ≤ x ≤ 1) โดยที่มีค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของธาตุ S เท่ากับ 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 ตามลำดับ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ จากนั้นได้ทำการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} (0 ≤ x ≤ 1) ด้วยวิธีเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ตรวจสอบผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ขั้นต่อไปคือศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) โดยการวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง เพื่อคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน และศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) โดยการวัดสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 100-300 เคลวิน เพื่อศึกษากลไกการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษากลไกการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) โดยที่มีค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของธาตุ S เท่ากับ 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 ตามลำดับ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ
2. เพื่อศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD)
3. เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคโดยการถ่ายภาพผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และถ่ายภาพลักษณะของเกรนที่ผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM)
4. เพื่อศึกษาค่าสัมประสิทธิ์ส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) และคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน
5. เพื่อศึกษาสมบัติการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) โดยการวัดสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 100-300 เคลวิน เพื่อศึกษากลไกการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$)

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ทำการศึกษาการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ
2. ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้โดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD)
3. ทำการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM)
4. ทำการศึกษาสมบัติการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้ เพื่อหาขนาดของช่องว่างแถบพลังงานด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) โดยการวัดสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 100-300 เคลวิน เพื่อศึกษากลไกการนำไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) นอกจากนี้ยังทำการวัดความต้านทานแผ่นในช่วงอุณหภูมิ 25-150 องศาเซลเซียส เพื่อหาค่าพลังงานกระตุ้น (activation energy)

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาและค้นคว้าหาข้อมูลเกี่ยวกับกลไกการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ
2. ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้โดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD)
3. ศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM)
4. ศึกษาสมบัติการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้ เพื่อหาขนาดของช่องว่างแถบพลังงานด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์
5. ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) โดยการวัดสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 100-300 เคลวิน เพื่อศึกษากลไกการนำไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) นอกจากนี้ยังทำการวัดความต้านทานแผ่นในช่วงอุณหภูมิ 25-150 องศาเซลเซียส เพื่อหาค่าพลังงานกระตุ้น (activation energy)
6. สรุปและวิเคราะห์ผล

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้ทราบถึงกลไกการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ
2. ทำให้ทราบว่าอิทธิพลของอะตอมของธาตุ S ที่เข้าแทนที่อะตอมของธาตุ Te ในโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่มีต่อสมบัติทางแสงและทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$)
3. ทำให้ทราบสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ว่ามีความเหมาะสมมากน้อยเพียงใด ในการนำไปประยุกต์ทำเป็นเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

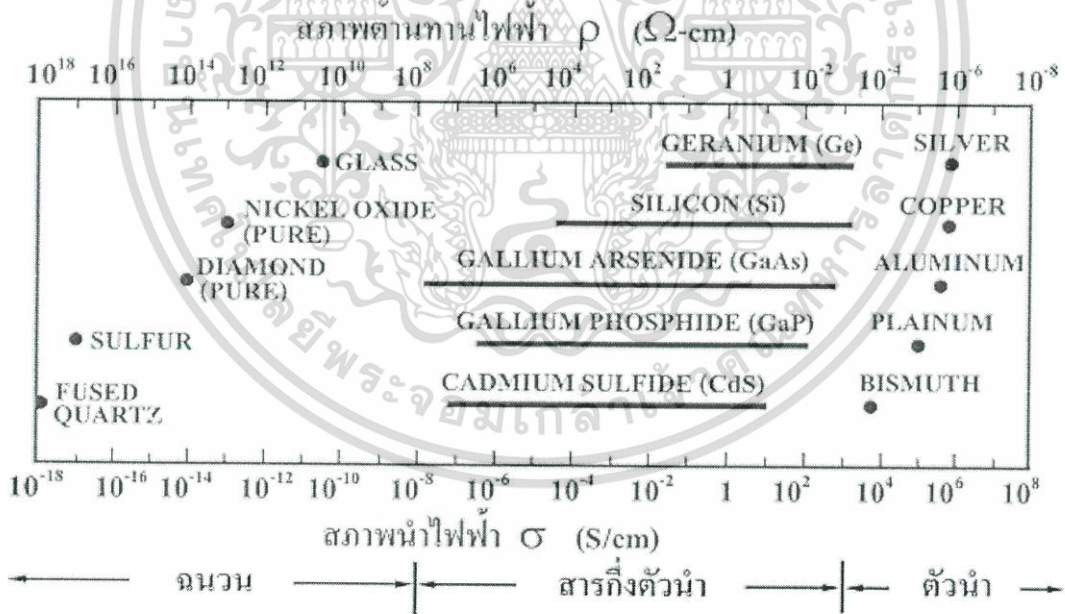
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สมบัติทางฟิสิกส์พื้นฐานและการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของผลึกหรือฟิล์มบางนั้นจะขึ้นกับลักษณะของโครงสร้างผลึก และความไม่สมบูรณ์ของผลึก ในบทนี้จึงจะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องต่างๆ เทคนิคการเตรียมผลึกของฟิล์มบางและเทคนิคการวัดสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆต่อไป

2.1 วัสดุของแข็งสารกึ่งตัวนำ (งามนิตย, 2531; งามนิตย, 2551; ฐิตินัย, 2530; ฐิตินัย, 2545)

วัสดุในสถานะของแข็งสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทคือ ฉนวน สารกึ่งตัวนำ และตัวนำ ดังรูปที่ 2.1 แสดงสภาพนำไฟฟ้าของวัสดุที่สำคัญในแต่ละชนิด วัสดุที่เป็นฉนวนเช่น ผลึกควอตซ์ (fused quartz) และกระจกสไลด์ (slide glass) ที่เป็นอะมอร์ฟัส มีสภาพนำไฟฟ้าต่ำในช่วง 10^{-18} - 10^{-8} ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ส่วนวัสดุที่เป็นตัวนำเช่นอะลูมิเนียมและเงิน มีสภาพนำไฟฟ้าสูงในช่วง 10^4 - 10^6 ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ส่วนวัสดุที่เป็นสารกึ่งตัวนำจะตอบสนองต่ออุณหภูมิ การฉายแสง สนามแม่เหล็ก ซึ่งสมบัติดังกล่าวมีความสำคัญกับการนำไปประยุกต์ใช้ในงานอิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 2.1 แสดงสภาพนำไฟฟ้าและสภาพต้านทานไฟฟ้าของ ฉนวน สารกึ่งตัวนำ และสารตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเรื่องของลักษณะของโครงสร้างผลึก (Cullity,1956; Kittel,1971; งามนิตย์,2531; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย,2549; ฐิตินัย,2550; งามนิตย์,2551; ฐิตินัย, 2551)

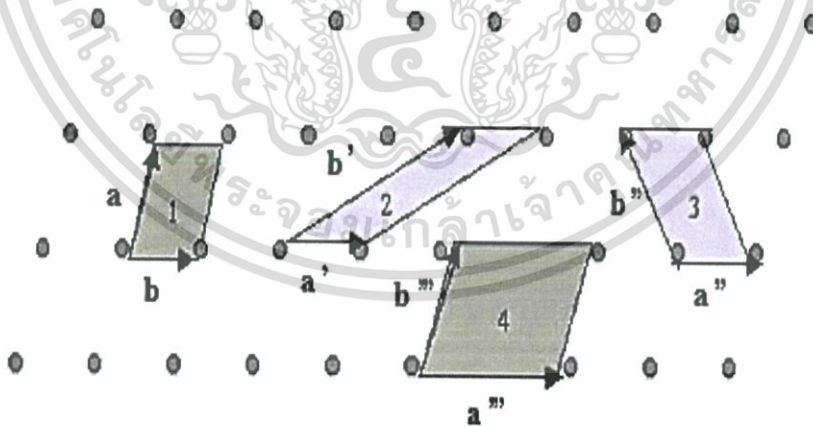
ในทางผลึกวิทยาสามารถแบ่งสสารและวัสดุที่อยู่ในสภาพของแข็งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ ตามการจัดเรียงตัวของอะตอม ได้แก่ วัสดุที่เป็นผลึก (crystalline materials) และวัสดุที่เป็นอสัณฐาน (amorphous materials) ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงวัสดุที่เป็นผลึกเท่านั้น

2.2.1 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ

ผลึกเกิดจากการที่อะตอมหรือโมเลกุลของสสารชนิดนั้นมารวมกันอยู่เป็นจำนวนมาก โดยระยะห่างระหว่างอะตอมมีค่าคงที่และมีการจัดเรียงตัวกันเป็นระบบแบบรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอน เป็นระเบียบอย่างต่อเนื่อง ภายในหนึ่งหน่วยเซลล์ของผลึกอาจประกอบด้วยอะตอมของธาตุเพียงอะตอมเดียวไปจนถึงหลายๆอะตอมหรือหลายๆโมเลกุล เซลล์ที่มีปริมาตรเล็กที่สุดที่สามารถใช้เป็นตัวแทนของผลึกนั้นเรียกว่า หน่วยเซลล์ (unit cell) กล่าวคือ ถ้าเอาหน่วยเซลล์นี้มาเรียงต่อกันก็จะได้ผลึกขึ้นมา และเรียกตำแหน่งต่างๆ ของอะตอมที่ระบบ 3 มิติว่าโครงผลึก (lattice)

ในทางทฤษฎีการกำหนดหน่วยเซลล์จะทำได้ไม่จำกัด แต่ตามปกติจะเลือกหน่วยเล็กที่สุดที่เป็นไปได้ และมีสมมาตรค่อนข้างสูง ตัวอย่างการเลือกหน่วยเซลล์ในโครงผลึก 2 มิติ ดังรูปที่ 2.2

ในระบบ 2 มิติ ค่าคงที่ของโครงผลึก ได้แก่ เวกเตอร์ \vec{a} และ \vec{b} และ มุม γ ซึ่งเป็นมุมระหว่างเวกเตอร์ทั้งสอง ทั้งนี้ชนิดของโครงผลึกที่แตกต่างกันที่เป็นไปได้มีเพียง 5 แบบ ดังตารางที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงหน่วยเซลล์ในระบบ 2 มิติ

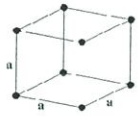
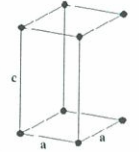
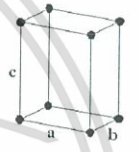

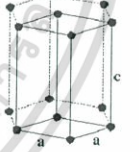
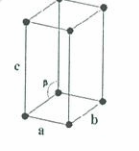
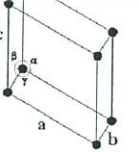
ตารางที่ 2.1 แสดงพารามิเตอร์ของหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ

ชนิดของโครงผลึก 2 มิติ	ค่าคงที่ของโครงผลึก	มุมผลึก
สี่เหลี่ยมจัตุรัส (square)	$a=b$	$\gamma = 90^\circ$
สี่เหลี่ยมผืนผ้า (rectangle)	$a \neq b$	$\gamma = 90^\circ$
สี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบบอดีเซนเตอร์ (body-centered rectangle)	$a \neq b$	$\gamma = 90^\circ$
สี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน 60° (60° rhombus)	$a=b$	$\gamma = 90^\circ$
สี่เหลี่ยมด้านขนานทั่วไป (general parallelogram)	$a \neq b$	ไม่มีข้อกำหนด

ในระบบ 3 มิติ ค่าคงที่ของโครงผลึก ได้แก่ ขนาดของเวกเตอร์ \vec{a} , \vec{b} และ \vec{c} และ มุม α, β และ γ ซึ่งเป็นมุมระหว่างเวกเตอร์ต่างๆ ดังตัวอย่างในตารางที่ 2.2 ทั้งนี้สามารถจัดแบ่งรูปแบบของโครงสร้างผลึกขึ้นมาโดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 14 แบบ ใน 3 มิติ ซึ่งจัดได้เป็น 7 กลุ่ม คือ ไตรคลินิก (triclinic) โมโนคลินิก (monoclinic) ออร์โธโรมบิก (orthorhombic) เตตระโกนัล (tetragonal) คิวบิก (cubic) รอมโบฮีดรัล (rhombohedral) และเฮกซะโกนัล (hexagonal)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 แสดงระบบผลึกทั้ง 7 แบบในระบบ 3 มิติ

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)	$a=b \neq c$ $\alpha=\beta=90^\circ, \gamma=120^\circ$	
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 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

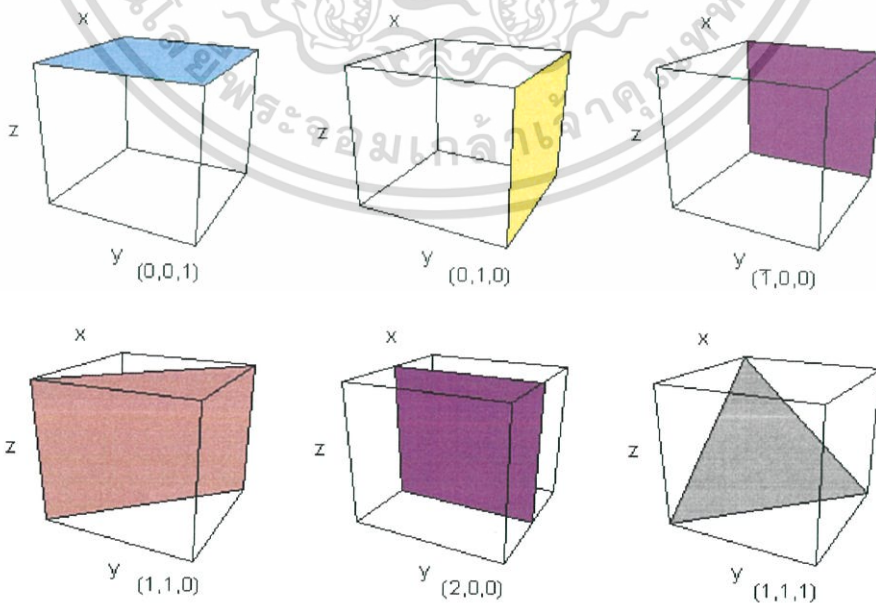
2.2.2 การระบุตำแหน่ง ทิศทางและระนาบของโครงผลึก

เนื่องจากผลึกมีสมบัติที่ขึ้นอยู่กับทิศทาง ดังนั้นจึงต้องระบุแน่นอนว่ากำลังศึกษาลักษณะส่วนใดของผลึกอยู่ ซึ่งการระบุลักษณะที่ว่า จะกล่าวถึง ตำแหน่ง ทิศทางและระนาบของผลึกที่กำลังศึกษาอยู่นั้น

หลักเกณฑ์ในการระบุลักษณะพื้นฐานของผลึก

1. การระบุตำแหน่ง ในกรณีทั่วไปจะเขียนเป็น x,y,z (ให้สังเกตเครื่องหมาย “,” ซึ่งคั่นแต่ละค่า) ตัวอย่างจุด 1,2,3 หมายความว่า เป็นตำแหน่งอยู่ที่พิกัด $x = 1, y = 2$ และ $z = 3$ การบอกตำแหน่ง
2. การระบุทิศทาง ในกรณีทั่วไปจะเขียนเป็น $[u \ v \ w]$ (ให้สังเกตว่าใช้วงเล็บก้ามปู และไม่มีเครื่องหมาย “,” คั่นระหว่างค่าแต่ละค่า) ถ้าเป็นทิศทางที่เป็นลบก็จะใส่เครื่องหมาย “-” หรือ บาร์ (bar) ไว้บนตัวเลขนั้นๆ เช่น ทิศทาง $[1 \ \bar{2} \ 1]$ แสดงว่าในแนวแกน z มีค่าเป็นลบ
3. การระบุชื่อระนาบ จะใช้อักษร $(h \ k \ l)$ (ให้สังเกตการใช้วงเล็บ และไม่มีเครื่องหมาย “,” คั่น)

ค่า h,k,l เรียกว่า ดัชนีมิลเลอร์ (miller indices) ระนาบของผลึกเป็นสิ่งสำคัญที่สุดอีกประการหนึ่งในการศึกษาผลึก เพราะในแต่ละระนาบจะประกอบไปด้วยอะตอม ไอออน หรือ โมเลกุล เรียงตัวกันอยู่บนระนาบนั้น อาจกล่าวได้ว่าระนาบแต่ละระนาบจะมีความแตกต่างกันเช่นเดียวกับทิศทาง จุดที่ระนาบหนึ่งๆ ตัดแกนผลึกจะได้มาจากค่าส่วนกลับของดัชนีมิลเลอร์ เช่น ระนาบ (010) จะตัดแกน $x \ y \ z$ ที่จุด $1/0, 1/1, 1/0$ หรือ จุด $\infty, 1, \infty$ นั่นเอง (ระยะอนันต์หมายถึงไม่ตัดกับแกนนั้น) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 และตารางที่ 2.3 ซึ่งสรุปหาความสัมพันธ์ระหว่างระนาบต่างๆ กับระยะตัดแกนอ้างอิง



รูปที่ 2.3 แสดงการบอกชื่อระนาบต่างๆของผลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ของดัชนีมิลเลอร์ (h k l) และจุดตัดแกนผลึก (x,y,z)

ระนาบของผลึก	ดัชนีมิลเลอร์ h, k, l	ระยะตัดแกนผลึก x, y, z	ส่วนกลับของดัชนีมิลเลอร์ $\frac{1}{h}, \frac{1}{k}, \frac{1}{l}$
(010)	0,1,0	$\infty, 1, \infty$	$\frac{1}{0}, \frac{1}{1}, \frac{1}{0}$
($\bar{1}11$)	-1,1,1	-1,1,1	$\frac{1}{-1}, \frac{1}{1}, \frac{1}{1}$
($\bar{1}\bar{1}\bar{1}$)	-1,-1,-1	-1,-1,-1	$\frac{1}{-1}, \frac{1}{-1}, \frac{1}{-1}$
(224)	2,2,4	0.5,0.5,0.25	$\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{4}$
(220)	2,2,0	0.5,0.5, ∞	$\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{0}$

ข้อสังเกตที่เกี่ยวกับดัชนีมิลเลอร์ที่ใช้บอกชื่อระนาบของผลึก คือ

- สำหรับระบบผลึกที่มีลักษณะของโครงสร้างผลึกเป็นแบบเฮกซะโกนัลจะระบุดัชนีมิลเลอร์ที่ใช้บอกชื่อระนาบที่ต่างไปเป็น (h,k,l) โดยที่มีกฎเกณฑ์ว่าดัชนีตัวที่ 3 (หรือ i) ซึ่งเพิ่มเข้ามานั้นจะมีความสัมพันธ์กับดัชนี 2 ตัวแรก (h และ k) ดังนี้

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

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

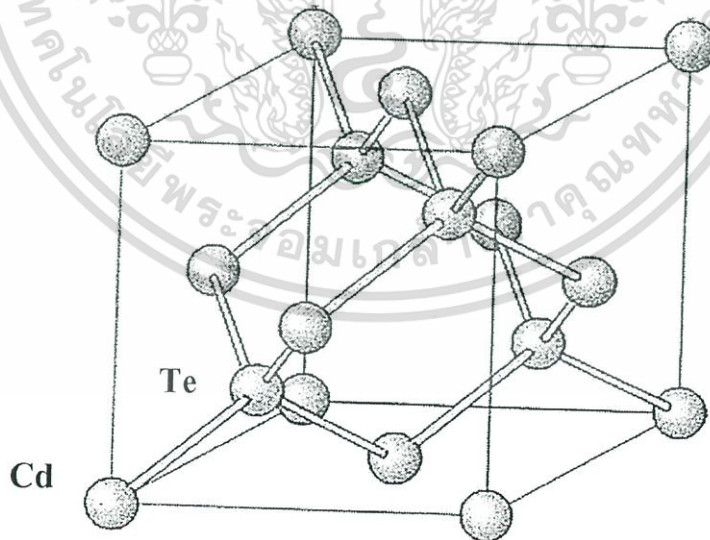
- เฉพาะระบบลูกบาศก์เท่านั้นที่จะพบว่าทิศทาง [hkl] จะตั้งฉากกับระนาบที่มีค่าตัวเลขดัชนีเหมือนกัน นั่นคือ ระนาบ (hkl) ตัวอย่างเช่น ทิศทาง [102] จะตั้งฉากกับระนาบ (102)

2.2.3 โครงสร้างผลึกที่สำคัญของสารกึ่งตัวนำ (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2545; จูตินัย, 2549; จูตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; จูตินัย, 2551)

โครงสร้างแถบพลังงานของสาร ขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของสารนั้นๆ เรียกว่า โครงสร้างผลึก (crystal structure) ซึ่งเกิดจากการเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบของอะตอมในของแข็ง โครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำกลุ่มนี้จะมีลักษณะคล้ายกัน คือมีการจัดเรียงตัวของอะตอมในหน่วยเซลล์ของผลึกคล้ายโครงสร้างผลึกของเพชร ซึ่งมีพันธะเคมีของโมเลกุลแบบพันธะเตตระฮีดรัน

2.2.3.1 โครงสร้างผลึกแคดเมียมเทลลูไรด์ (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2545; จูตินัย, 2549; จูตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; จูตินัย, 2551)

สารกึ่งตัวนำแคดเมียมเทลลูไรด์ เป็นสารประกอบกึ่งตัวนำหมู่ II-VI มีโครงสร้างแบบซิงค์แบลนด์ที่มีค่าคงตัวของโครงสร้างผลึกเท่ากับ 6.481 อังสตรอม มีค่าความหนา 6.2 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และมีจุดหลอมเหลว 1040 องศาเซลเซียส เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 1.50 อิเล็กตรอนโวลต์ มีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงในย่านความยาวคลื่นแสงที่ตามองเห็นสำหรับสารกึ่งตัวนำแคดเมียมเทลลูไรด์ ที่มีความหนาในระดับไมครอนทำให้ดูดกลืนพลังงานโฟตอนได้มากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ สารกึ่งตัวนำแคดเมียมเทลลูไรด์ มีความเสถียรที่อุณหภูมิสูงกว่า 500 องศาเซลเซียส ดังนั้นสารกึ่งตัวนำแคดเมียมเทลลูไรด์จึงเหมาะกับการนำมาใช้เป็นชั้นดูดกลืนพลังงานโฟตอนในเซลล์แสงอาทิตย์ ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์แบลนด์ของสารกึ่งตัวนำแคดเมียมเทลลูไรด์

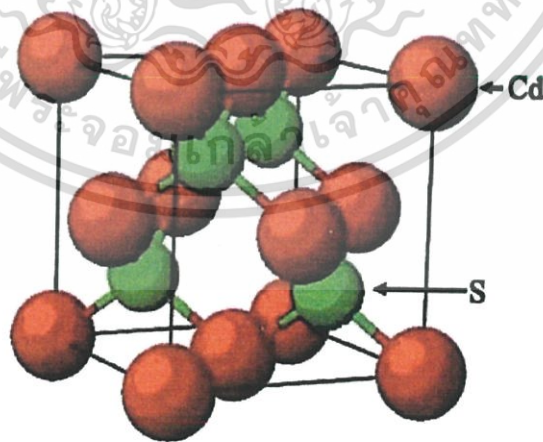
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3.2 โครงสร้างผลึกแคดเมียมซัลไฟด์ (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; ฐิตินัย, 2551)

โครงสร้างผลึก คือ ตำแหน่งที่เป็นอยู่ของเบสิส (basis) ในระบบ 3 มิติ ส่วนเบสิส คืออะตอมหรือกลุ่มของอะตอมที่อยู่ภายในโครงสร้างซึ่งจากการศึกษาพบว่าโครงสร้างสารกึ่งตัวนำแคดเมียมซัลไฟด์ จะมีลักษณะโครงสร้างอยู่ 2 แบบ คือ แบบซิงค์เบลนด์ (zincblende) และแบบเวียร์ทไซต์ (wurtzite)

2.2.3.3 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ (zincblende structure)

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

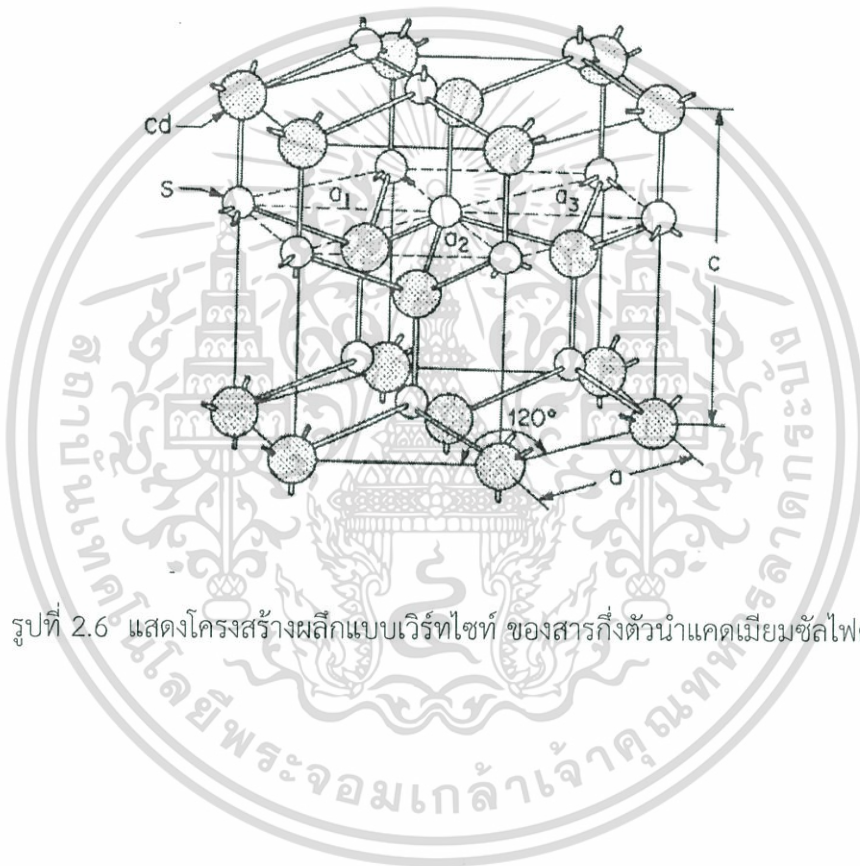


รูปที่ 2.5 แสดงการจัดเรียงตัวของอะตอมในโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ ของสารกึ่งตัวนำแคดเมียมซัลไฟด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

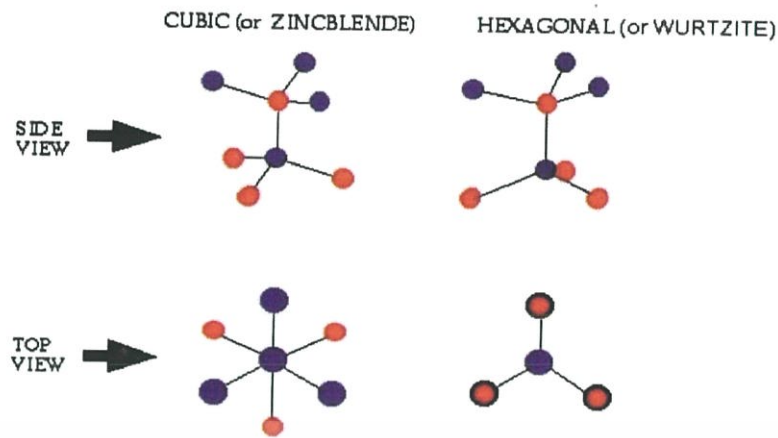
2.2.3.4 โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซด์ (wurtzite structure)

โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซด์จัดอยู่ในระบบโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลเกิดจากการนำโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลที่มีอะตอมของธาตุต่างๆอยู่ 2 ชนิดวางซ้อนเหลื่อมกันเป็นระยะ $5/8$ ตามแนวแกน c (c -axis) หนึ่งหน่วยเซลล์จะมี 8 อะตอม มีอะตอมเพื่อนบ้านอยู่ 4 อะตอมมีพันธะเคมีของโมเลกุลเป็นแบบพันธะเตตระฮีดรัน และมีพันธะเคมีระหว่างอะตอมเป็นแบบโควาเลนต์ ดังนั้นจึงมีการจัดเรียงระนาบของอะตอมคล้ายกับโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์แต่จะมีความแตกต่างกัน คือ ในโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซด์จะมีการจัดเรียงระนาบของพันธะเตตระฮีดรัน เป็นแบบ ABAB... หรือ 0101... ส่วนในโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์จะมีการจัดเรียงระนาบของพันธะเตตระฮีดรันแบบ ABCABC... หรือ 012012... สารที่มีโครงสร้างผลึกแบบนี้ได้แก่ สารกึ่งตัวนำ CdS และ ZnS เป็นต้น



รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซด์ ของสารกึ่งตัวนำแคดเมียมซัลไฟด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ตไซต์กับแบบซิงค์เบลนด์ ของสารกึ่งตัวนำแคดเมียมซัลไฟด์

2.3 ผลึกจริง

ที่ผ่านมาพิจารณาโครงสร้างผลึกในอุดมคติมาโดยตลอด แต่ในความเป็นจริงแล้วมักจะพบความไม่สมบูรณ์หรือข้อบกพร่อง (defects) ที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างผลึกเสมอซึ่งเรียกว่าผลึกจริง (real crystal) หรือผลึกไม่สมบูรณ์ (imperfect crystal) โดยความไม่สมบูรณ์ของผลึกที่เกิดขึ้นเหล่านี้ มักจะมีผลทำให้สมบัติต่างๆ ของสารเปลี่ยนแปลงไปสามารถแบ่งความไม่สมบูรณ์ของผลึกตามรูปร่างเรขาคณิตและรูปร่างได้เป็น 3 แบบ ดังนี้คือ

2.3.1 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบศูนย์มิติหรือแบบจุด (Kittel, 1971; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; ฐิตินัย, 2551)

ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดสามารถเกิดได้หลายลักษณะซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.8 ดังนี้

ก. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบตำแหน่งของแลททิสที่ว่างอยู่หรือแวนแคนซี (vacancy defect) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการที่อะตอมหลุดหายไปจากตำแหน่งที่ควรจะมีอยู่ในโครงผลึกจึงทำให้เกิดเป็นช่องว่างเกิดขึ้น

ข. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบที่อะตอมของธาตุที่เป็นเจ้าของบ้านแทรกอยู่ (self interstitial) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการที่อะตอมของธาตุที่เป็นเจ้าของบ้าน (host lattice) เข้าไปแทรกตัวอยู่ในตำแหน่งที่เป็นที่ว่างระหว่างอะตอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่ไปเผยแพร่ภายนอกโดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบอะตอมของธาตุที่เป็นสารเจือแทรก (interstitial impurity-atom) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุด ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการที่มีอะตอมของธาตุชนิดอื่นหรืออะตอมของธาตุที่เป็นสารเจือ (impurity atom) เข้าไปแทรกตัวอยู่ในตำแหน่งที่เป็นที่ว่างระหว่างอะตอมของโครงผลึกเจ้าของบ้าน

ง. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบอะตอมของธาตุที่เป็นสารเจือเข้าแทนที่ (substitutional impurityatom) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการที่มีอะตอมของธาตุชนิดอื่นที่เป็นสารเจือ เข้าไปแทนที่ตำแหน่งของอะตอมของธาตุที่เป็นเจ้าของบ้าน



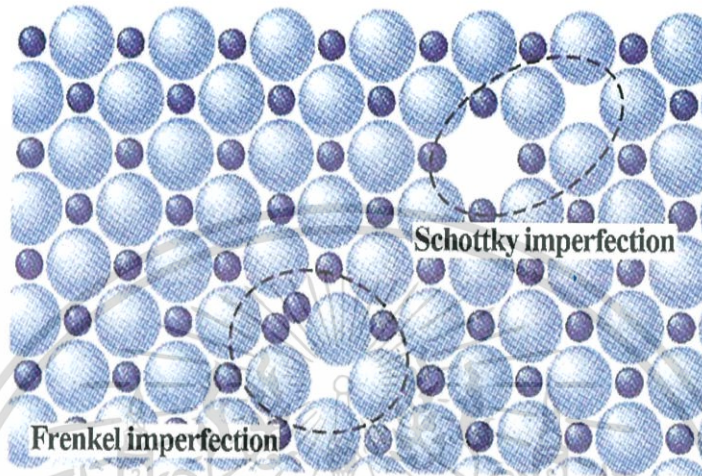
รูปที่ 2.8 แสดงความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบศูนย์มิติหรือแบบจุด
 ก. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบตำแหน่งของแลททิซที่ว่างอยู่
 ข. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบที่อะตอมของธาตุที่เป็นเจ้าของบ้านแทรกอยู่
 ค. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบอะตอมของธาตุที่เป็นสารเจือแทรก
 ง. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบอะตอมของธาตุที่เป็นสารเจือเข้าแทนที่

นอกจากที่กล่าวข้างต้นแล้วความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดยังอาจเกิดขึ้นได้ในโครงสร้างผลึกแบบไอออนิก ซึ่งจะพบว่าเกิดได้ 2 ลักษณะ ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ดังนี้

ก. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบชอตต์กี (Schottky imperfection) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดที่เกิดขึ้นเนื่องจากมีไอออนที่อยู่ภายในโครงผลึกเคลื่อนย้ายไปยังบริเวณผิวหน้าของโครงผลึกหรืออาจเกิดขึ้นเนื่องจากทั้งไอออนบวกและไอออนลบหลุดออกไปจากโครงผลึกเพื่อรักษาประจุของโครงผลึกให้เป็นกลางอยู่เสมอ ทำให้เกิดแวนแคนซี 2 ช่อง ของไอออนบวก-ไอออนลบ (cation-anion divacancy)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบเฟรนเคิล (Frenkel imperfection) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดที่เกิดช่องว่างขึ้นเนื่องจากมีไอออนที่อยู่ภายในโครงผลึกเคลื่อนย้ายไปยังบริเวณที่ตำแหน่งที่ควรจะเป็นที่ว่างของโครงผลึกหรืออาจเกิดขึ้นเนื่องจากไอออนบวกที่มีขนาดเล็กกว่าไม่ได้หลุดหายออกไปจากโครงผลึก แต่เข้าไปแทรกตัวอยู่ในบริเวณที่ควรจะเป็นที่ว่างที่อยู่ระหว่างไอออนลบกับไอออนบวกอีกตัวหนึ่งทำให้เกิดตำแหน่งว่างของไอออนบวก (cation vacancy)

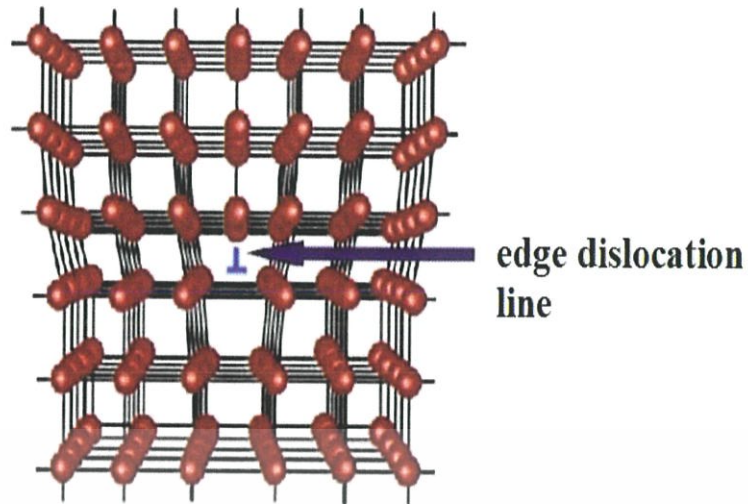


รูปที่ 2.9 แสดงการเกิดความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบขอดตักิและความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบเฟรนเคิล

2.3.2 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบหนึ่งมิติหรือแบบเชิงเส้น (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; ฐิตินัย, 2551)

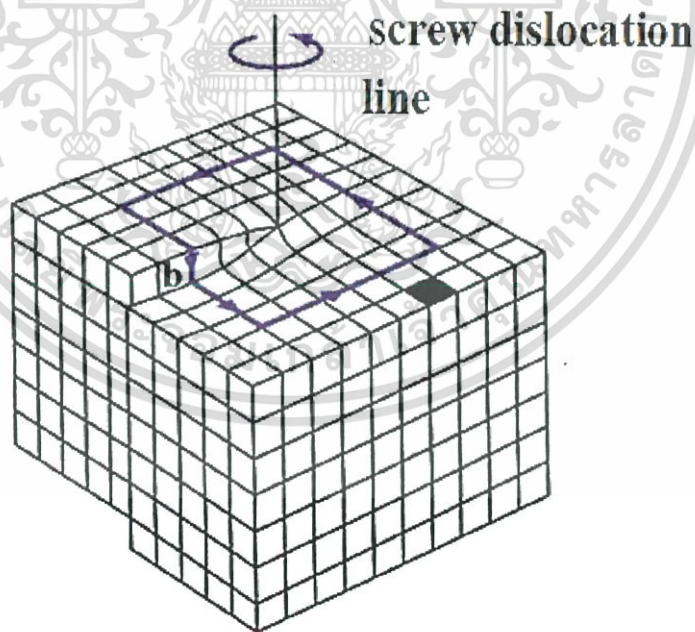
เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกในลักษณะเป็นเชิงเส้น (line imperfection) หรือสามารถเรียกได้อีกอย่างหนึ่งคือ การเคลื่อนที่ของโครงผลึก (dislocation) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกที่เกิดจากการที่แถวของอะตอมเกิดการบิดเบี้ยว (distortion) หรือผิดรูปไป โดยมี 2 ลักษณะดังนี้

ก. การเคลื่อนที่ของโครงผลึกแบบขอบ (edge dislocation) เกิดขึ้นเนื่องจากมีอะตอมในแถวใดแถวหนึ่งหายไปหรือแทรกเข้ามาอยู่ผิดปกติ ก็ทำให้บริเวณขอบของโครงผลึกถูกอัดเข้ามาหรือดันออกไปจากแนวปกติโดยมีระนาบเลื่อนไถล (slip plane) ตั้งฉากกับทิศทางการเลื่อนไถล (slip direction or edge dislocation line) ซึ่งขนาดของการกระจัด (displacement) นั้นเรียกว่า เบบอร์เกอร์เวกเตอร์ (burgers vector : \vec{b}) ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการเคลื่อนที่ของโครงผลึกแบบขอบ

ข. การเคลื่อนที่ของโครงผลึกแบบสกรู (screw dislocation) เกิดขึ้นเนื่องจากมีอะตอมในแถวใดแถวหนึ่งของโครงผลึกผิดรูปไปแบบสกรู กล่าวคือระนาบที่การเลื่อนไถล (slip plane) จะขนานกับทิศทางของการเลื่อนไถล (slip direction or screw dislocation line) ซึ่งขนาดของการกระจัดนั้นเรียกว่าเบอร์เกอร์เวกเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการเคลื่อนที่ของโครงผลึกแบบสกรู

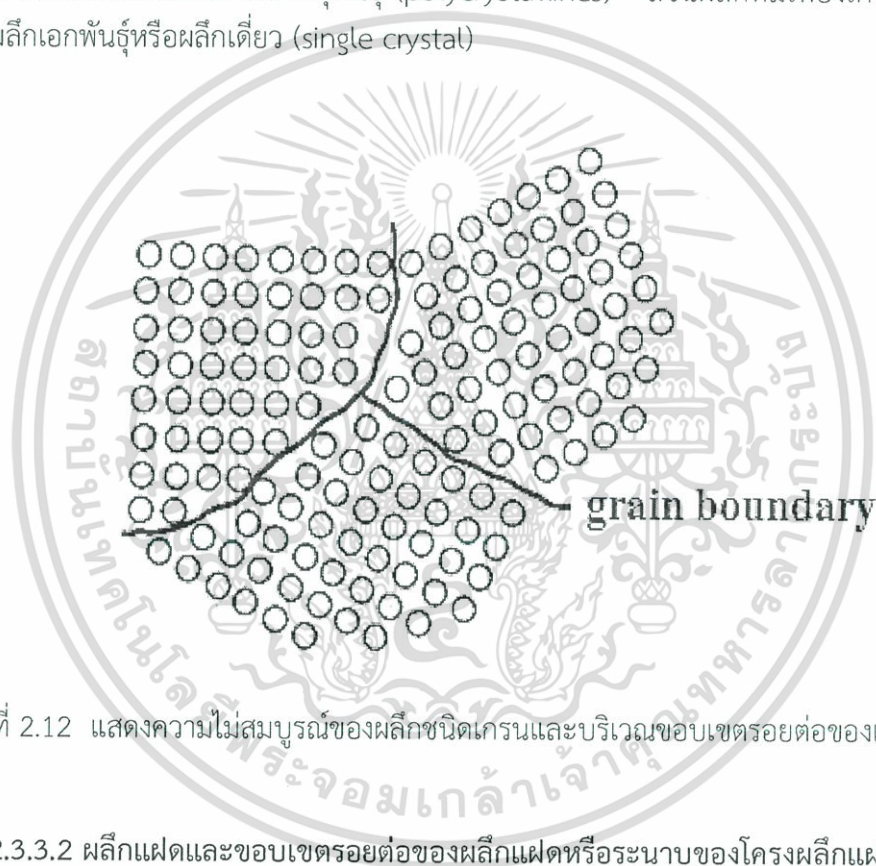
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบสองมิติหรือแบบระนาบ (Cullity,1956; Kittel,1971; งามนิิตย์, 2545;ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; งามนิิตย์, 2551; ฐิตินัย, 2551)

ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบสองมิติหรือแบบระนาบนี้เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกที่มักเกิดขึ้นเป็นพื้นผิว (surface - imperfection) ของผลึกสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ

2.3.3.1 เกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน

เกรน (grain) คือบริเวณเล็กๆที่โครงสร้างผลึกหรือหน่วยเซลล์มีการจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกัน และตรงบริเวณขอบเขตรอยต่อระหว่างบริเวณที่โครงสร้างผลึกมีการจัดเรียงตัวในทิศทางแตกต่างกันนั้น เรียกว่า บริเวณขอบเขตรอยต่อของเกรน (grain boundary) ดังแสดงในรูปที่ 2.12 โดยที่ผลึกที่มีมากกว่าหนึ่งเกรนนั้นเรียกว่า ผลึกพหุพันธุ์ (polycrystallines) ส่วนผลึกที่มีเพียงเกรนเดียวนั้น เรียกว่า ผลึกเอกพันธุ์หรือผลึกเดี่ยว (single crystal)

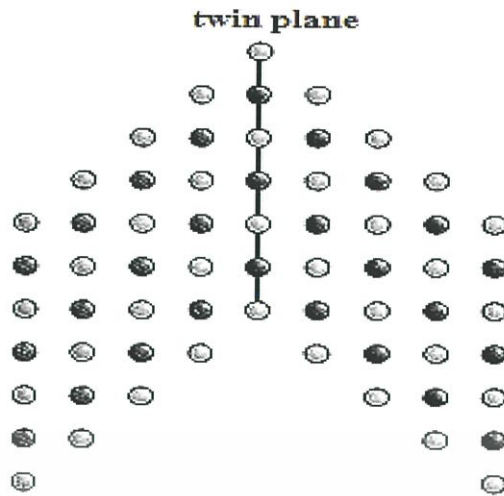


รูปที่ 2.12 แสดงความไม่สมบูรณ์ของผลึกชนิดเกรนและบริเวณขอบเขตรอยต่อของเกรน

2.3.3.2 ผลึกแฝดและขอบเขตรอยต่อของผลึกแฝดหรือระนาบของโครงสร้างผลึกแฝด

ผลึกแฝด (twin) คือบริเวณที่โครงสร้างผลึกหรือหน่วยเซลล์มีการผิดรูปไปโดยมีสมมาตรแบบกระจกโดยที่โครงสร้างผลึกที่ผิดรูปจะกลายเป็นภาพสะท้อนของโครงสร้างผลึกที่ไม่ผิดรูปและตรงบริเวณขอบเขตรอยต่อระหว่างโครงสร้างผลึกที่ผิดรูปและโครงสร้างผลึกที่ไม่ผิดรูปนี้เรียกว่า บริเวณขอบเขตรอยต่อของผลึกแฝดหรือระนาบของผลึกแฝด (twin boundary or twin plane) ดังแสดงในรูปที่ 2.13

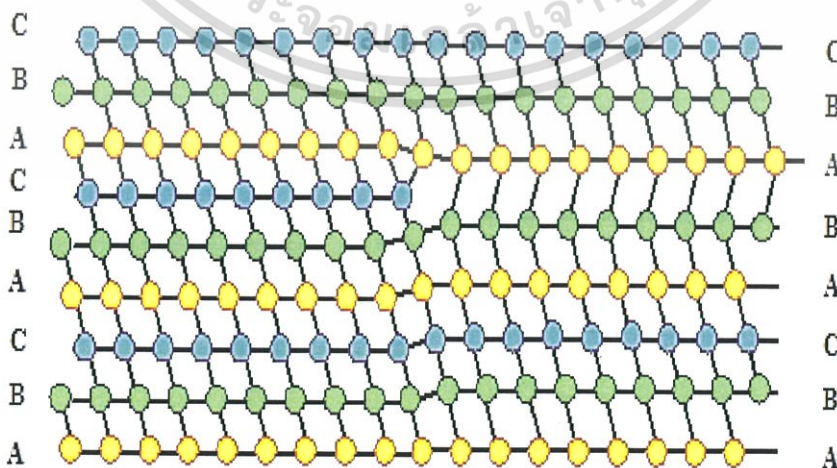
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแฝดและระนาบของผลึกแฝดหรือบริเวณขอบเขตรอยต่อของผลึกแฝด

2.3.3.3 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการจัดเรียงระนาบของอะตอมผิดพลาด (stacking faults)

เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกบนพื้นผิวที่เป็นผลมาจากการที่โครงผลึกมีการจัดเรียงระนาบของอะตอมแบบผิดพลาด เช่น สำหรับโครงผลึกออคตาฮีดรัลแบบ fcc ที่มีการจัดเรียงระนาบของอะตอมที่ถูกต้องตามลำดับเป็น ABCABCABC... แต่ถ้าเป็นกรณีโครงผลึกที่ไม่สมบูรณ์จะมีการจัดเรียงระนาบของอะตอมเป็น ABCABABCA... การเกิดการจัดเรียงระนาบผิดพลาดจากตัวอย่างขึ้นอยู่กับระนาบ A ที่อยู่ถัดจากระนาบที่ 2 “B” และอาจจะอธิบายได้ว่าเป็นบริเวณที่มีระนาบที่อยู่ในโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลไคลสแพค (hexagonal close packed : hcp) แทรกอยู่กับระนาบที่อยู่ในโครงสร้างผลึกแบบเฟสเซนเตอร์คิวบิก (fcc) ซึ่งอาจเกิดในระหว่างที่เกิดผลึกและอาจเป็นผลจากการเคลื่อนที่ของโครงผลึกแบบย่อย (partial dislocation) สองส่วนดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการจัดเรียงระนาบของอะตอมผิดพลาด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปบนเว็บไซต์สาธารณะ การนำออกจากรายการนี้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิทย์, 2545; จูตินัย, 2549; จูตินัย, 2550; งามนิทย์, 2551; จูตินัย, 2551)

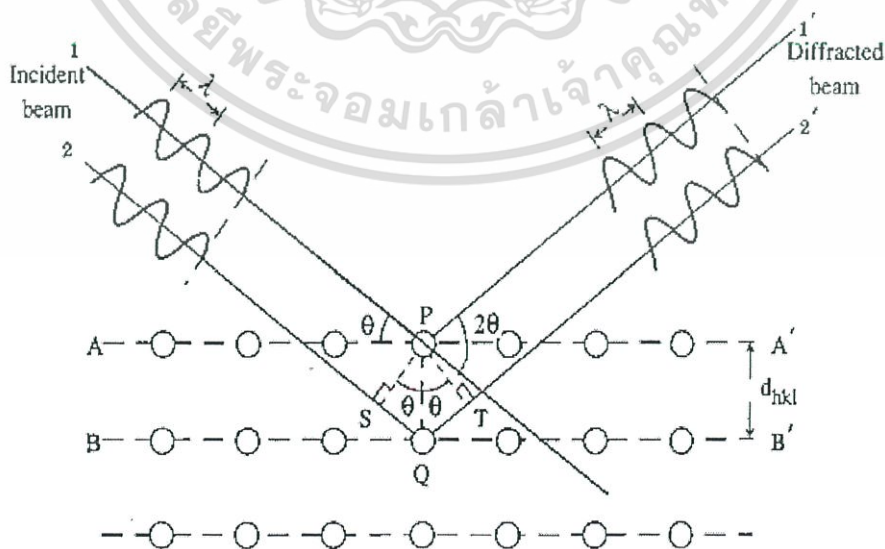
การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟร็กโทรมิเตอร์ โดยใช้รังสีเอกซ์ความยาวคลื่นเดี่ยวตกกระทบตัวอย่าง ซึ่งอาจเป็นผลึกเดี่ยวหรือผลึกพหุพันธ์ก็ได้ สารตัวอย่างจะหมุนไปเป็นมุม θ ในขณะที่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณรังสีเอกซ์จะเคลื่อนที่ไปเป็นมุม 2θ เพื่อให้การเลี้ยวเบนสอดคล้องกับกฎของแบรกก์

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

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

- เมื่อ d_{hkl} คือระยะระหว่างระนาบ
 θ คือมุมของรังสีสะท้อนจากระนาบแบรกก์ของรังสีเอกซ์ ซึ่งจะเท่ากับมุมของรังสีตกกระทบ
 n คือลำดับของการเลี้ยวเบน มีค่าตั้งแต่ 1, 2, 3, ...
 λ คือความยาวคลื่น

ระนาบต่างๆ ของผลึกที่ก่อให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ต้องสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ เรียกว่าระนาบแบรกก์ (Bragg plane) และมุมที่รังสีสะท้อนทำกับแนวที่ขนานกับรังสีตกกระทบ เรียกว่ามุมเลี้ยวเบน (diffraction angle) ซึ่งมีค่าเป็นสองเท่าของมุมตกกระทบ (2θ) ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

ข้อมูลที่ได้จากกราฟร้าวการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ดังในรูปที่ 2.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์และมุมเลี้ยวเบน เรียกว่า รูปแบบการเลี้ยวเบน (diffraction pattern) ซึ่งสำหรับแต่ละธาตุหรือสารประกอบต่างชนิดกันก็จะมีรูปแบบการเลี้ยวเบนแตกต่างกันซึ่งสามารถสังเกตได้จากพีก (peak) ของการเลี้ยวเบน จากกราฟร้าวการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์สามารถทำการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกได้โดยการคำนวณหาค่าคงที่ของโครงผลึก ขนาดของเกรนและความเครียดในระดับจุลภาคได้

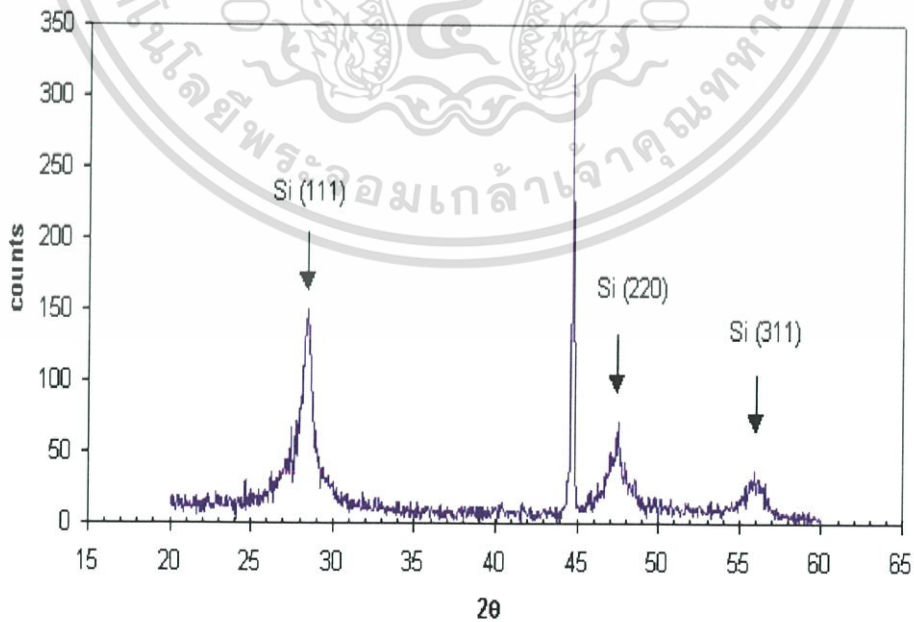
สมการสำหรับหาค่าคงที่ของโครงผลึก (lattice constant) สำหรับโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์สามารถหาได้จากสมการที่ (2.3)

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (2.3)$$

และสำหรับโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลหาได้จากสมการที่ (2.4)

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{4}{3} \left[\frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right] + \frac{l^2}{c^2} \quad (2.4)$$

เมื่อ a, c คือ ค่าคงที่ของโครงผลึก
h, k, l คือ ดัชนีมิลเลอร์ที่ใช้บอกชื่อระนาบของผลึก



รูปที่ 2.16 แสดงตัวอย่างของสเปกตรัมที่ได้จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

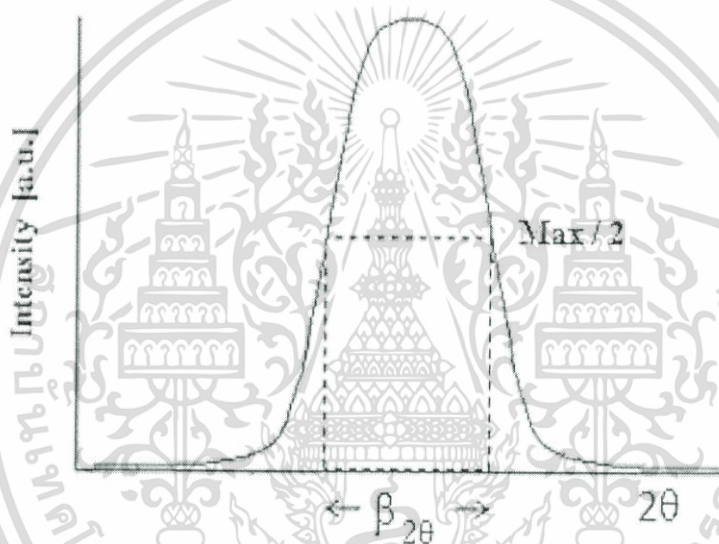
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 การหาขนาดของเกรน

การหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์สามารถหาโดยเลือกพีคที่มีความเข้มสูงสุด ดังในรูปที่ 2.17 และใช้สมการของเชอร์เรอร์ (Scherer) คำนวณหาขนาดของเกรน ดังนี้

$$D = \frac{k\lambda}{\beta_{2\theta} \cos\theta} \quad (2.5)$$

เมื่อ	D	คือ	ขนาดของเกรน
	K	คือ	ค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับขนาดและรูปร่างของเกรน
	$\beta_{2\theta}$	คือ	ระยะความกว้างของพีคที่ความเข้มที่ค่าเป็นครึ่งหนึ่งของความเข้มสูงสุด



รูปที่ 2.17 แสดงค่า $\beta_{2\theta}$ เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

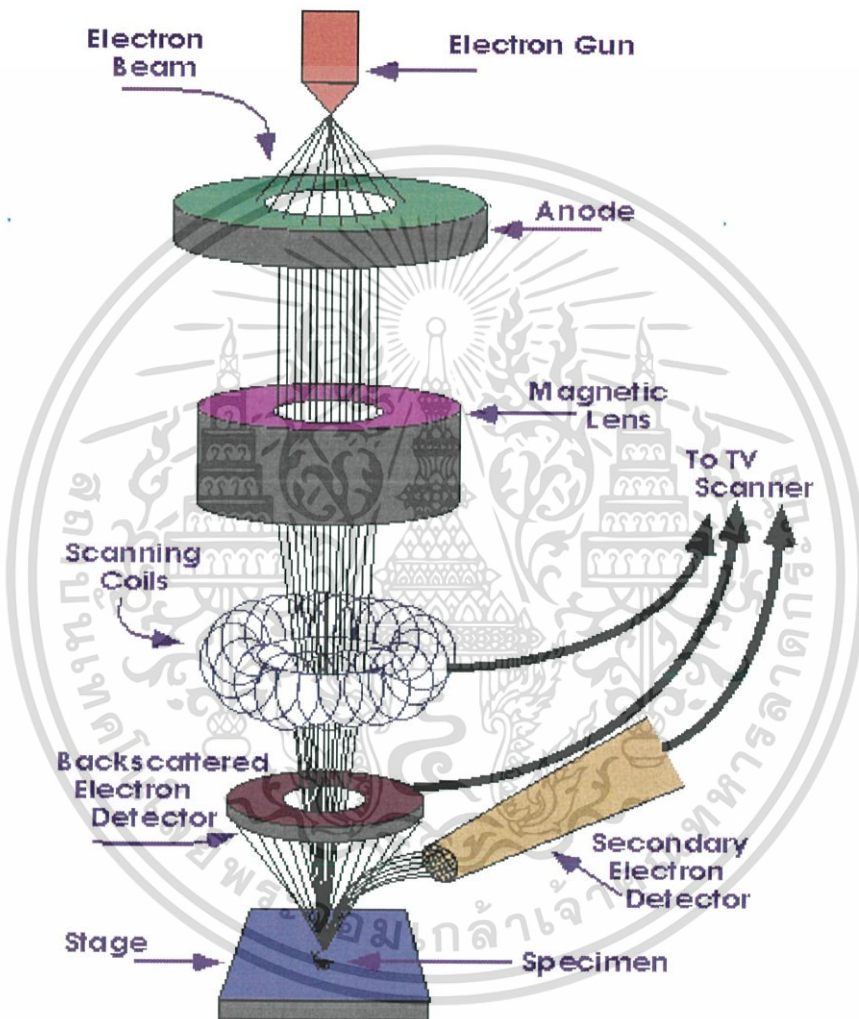
2.5 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

(Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย, 2545; จิตินัย, 2549; จิตินัย, 2550; งามนิตย, 2551; จิตินัย, 2551)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงในรูปที่ 2.18 เริ่มจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ซึ่งมีหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนจากไส้หลอด กลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า พร้อมทั้งบังคับกลุ่มอิเล็กตรอนให้มีลักษณะเป็นลำ โดยลำอิเล็กตรอนจะกราดไปบนพื้นผิวของตัวอย่างโดยขดลวดสนามแม่เหล็กบนระนาบเอกซ์-วาย เพื่อทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ อิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกตรวจจับโดยเซนเซอร์ และแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าเพื่อส่งต่อไปให้ระบบสร้างภาพต่อไป



รูปที่ 2.18 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

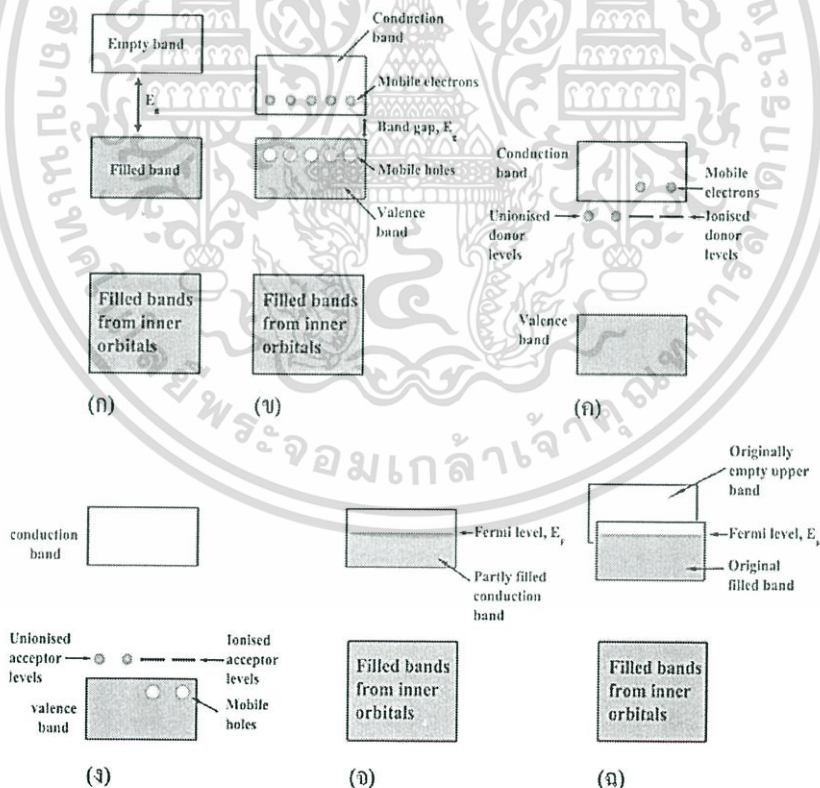
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 สมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2545; จิตินัย, 2549; จิตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; จิตินัย, 2551)

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

2.6.1 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน (Kittel, 1971; งามนิตย์, 2545; จิตินัย, 2550)

ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานจะประกอบไปด้วยส่วนใหญ่อันหนึ่ง 3 ส่วน คือ แถบนำ (conduction band) แถบวาเลนซ์ (valence band) และแถบพลังงานต้องห้าม (forbidden band หรือ forbidden region หรือ forbidden gap) และเรียกความกว้างของช่องว่างระหว่างแถบนำกับ แถบวาเลนซ์นั้นว่า ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (energy gap) โดยเราสามารถที่จะแบ่งประเภทของวัสดุว่าเป็นฉนวน (insulator) โลหะหรือตัวนำ (metal or conductor) และสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) ได้โดยดูจากขนาดของช่องว่างแถบพลังงานที่แตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 2.19



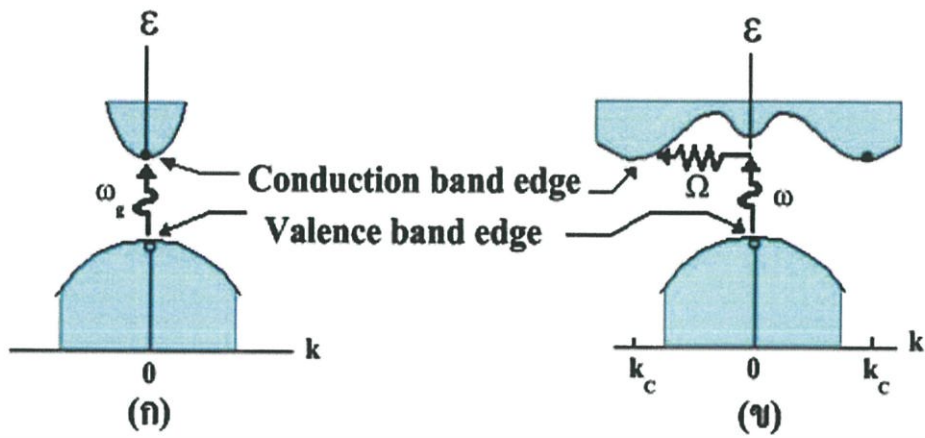
รูปที่ 2.19 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานอย่างง่ายของ

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

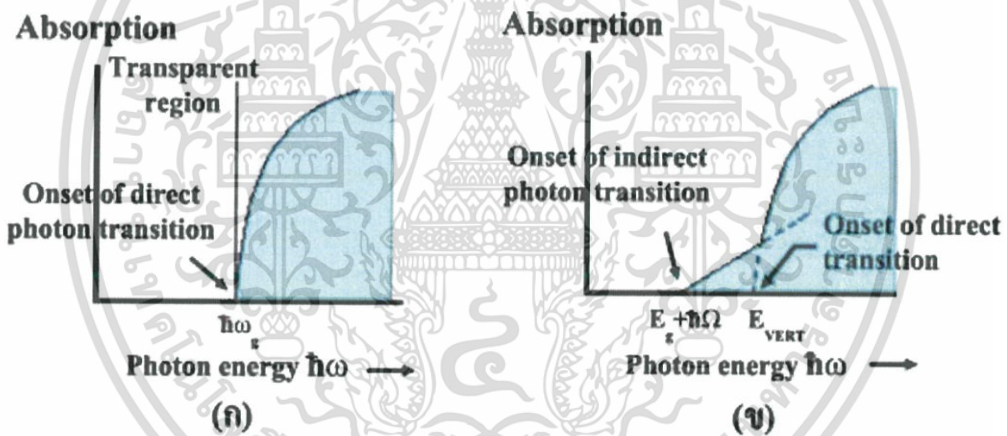
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในที่สุดที่เป็นฉนวนเมื่อดูจากแถบพลังงานจะเห็นได้ว่าขนาดช่องว่างแถบพลังงานจากขอบล่างสุดของแถบว่าง (แถบนำ) ถึงขอบบนสุดของแถบเต็ม (แถบวาเลนซ์) มีขนาดกว้างมาก ประมาณได้ว่า $E_g \gg kT$ หรือมากกว่า 3 อิเล็กตรอนโวลต์ดังแสดงในรูปที่ 2.19 (ก) การที่จะทำให้วัสดุนี้นำไฟฟ้าได้ต้องใส่พลังงานที่สูงมากเพื่อที่จะทำให้อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปยังแถบนำได้ ถ้าช่องว่างแถบพลังงานระหว่างแถบนำกับแถบวาเลนซ์มีขนาดเล็กพอที่อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์เมื่อได้รับพลังงานความร้อนสามารถเคลื่อนย้ายขึ้นไปยังแถบนำ และทำให้วัสดุนี้นำไฟฟ้าได้เราจะเรียกลักษณะชนิดนี้ว่า สารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ (intrinsic semiconductors) ดังแสดงในรูปที่ 2.19 (ข) จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนย้ายขึ้นไปอยู่ในแถบนำแล้วจะเหลือที่ว่างไว้ในแถบวาเลนซ์โดยจะมีสภาพทางไฟฟ้าเป็นบวก และจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงข้ามกับอิเล็กตรอนเมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า เราจะเรียกที่ว่างนี้ว่า โฮล และถ้าเราทำการเจืออะตอมของธาตุบางอย่าง ลงไปในสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์แล้ว อะตอมของสารเจือประพจน์ตัวเป็นอะตอมผู้ให้ ก็จะทำให้เกิดระดับพลังงานผู้ให้ โดยให้อิเล็กตรอนกับแถบนำ เราจะเรียกลักษณะนี้ว่าสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductors) ดังแสดงในรูปที่ 2.19 (ค) และถ้าอะตอมประพจน์ตัวเป็นอะตอมผู้รับก็จะทำให้เกิดระดับพลังงานผู้รับ โดยทำการรับอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์เราจะเรียกลักษณะนี้ว่าสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type semiconductors) ดังแสดงในรูปที่ 2.19 (ง) สำหรับแถบพลังงานของวัสดุที่เป็นโลหะหรือตัวนำจะพบว่าไม่มีอิเล็กตรอนเข้าไปอยู่ในแถบนำแล้วบางส่วนของรูปที่ 2.19 (จ) และเราบอกได้ว่าแถบวาเลนซ์กับแถบนำมีการซ้อนเหลื่อมกันอยู่ ทำให้สารสามารถนำไฟฟ้าได้และในรูปที่ 2.19 (ฉ) ถ้าขอบล่างของแถบว่างที่ $(n+1)$ ซ้อนเหลื่อมกับขอบสูงสุดของแถบที่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่ที่ n และระดับพลังงานเฟอร์มิอยู่ระหว่างแถบทั้งสอง อิเล็กตรอนก็จะสามารถไหลจากแถบเต็มไปยังด้านล่างของแถบว่างได้ เราจะเรียกลักษณะที่มีโครงสร้างแถบพลังงานแบบนี้ว่าเป็นสารกึ่งโลหะ ลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง คือ อิเล็กตรอนได้รับพลังงานโฟตอนที่มีค่าเท่ากับขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ($\hbar\omega = E_g$) อิเล็กตรอนจะดูดกลืนพลังงานโฟตอนนั้นและอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นจึงย้ายสถานะพลังงานทรานซิชันจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำกลายเป็นอิเล็กตรอนและโฮลอิสระโดยไม่มีการสูญเสียพลังงานให้แก่โครงสร้างผลึก คือไม่มีการสร้างหรือทำลายโฟนอน ดังแสดงในรูปที่ 2.20 (ก) และเมื่อเขียนกราฟระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนจะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 2.21 (ก) และลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงคือ โครงสร้างแถบพลังงานที่มีจุดต่ำสุดของแถบวาเลนซ์ไม่อยู่ที่ตำแหน่งเวกเตอร์คลื่นค่าเดียวกันหรืออยู่ที่ตำแหน่งโมเมนตัมของคลื่นไม่เท่ากัน ดังนั้นอิเล็กตรอนจะต้องได้รับพลังงานโฟนอนที่มีค่ามากกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ในกรณีนี้มีกระบวนการสร้างโฟนอนเกิดขึ้น ($\hbar\omega = E_g + \hbar\Omega$) เมื่อ Ω คือค่าความถี่เชิงมุมของพลังงานโฟนอน ซึ่งมีค่าน้อยกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงานหรือในกรณีที่มีการทำลายล้างโฟนอน ($\hbar\omega = E_g - \hbar\Omega$) นั่นคือเมื่ออิเล็กตรอนที่อยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นการย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำจะมีการปล่อยโฟนอน (emitted phonon) ที่มีความถี่เชิงมุม Ω มีเวกเตอร์คลื่น $k \cong k_c$ ออกมา จึงเกิดการสร้างโฟนอน ($E_g = \hbar\Omega$) และการสร้างอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ (E_{VERT}) ขึ้นมาในกระบวนการนี้ ดังแสดงในรูปที่ 2.20 (ข) และเมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนจะได้ดังแสดงในรูปที่ 2.21 (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานและการย้ายสถานะของพลังงานอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ($T = 0$ เคลวิน)
 ก. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง
 ข. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง

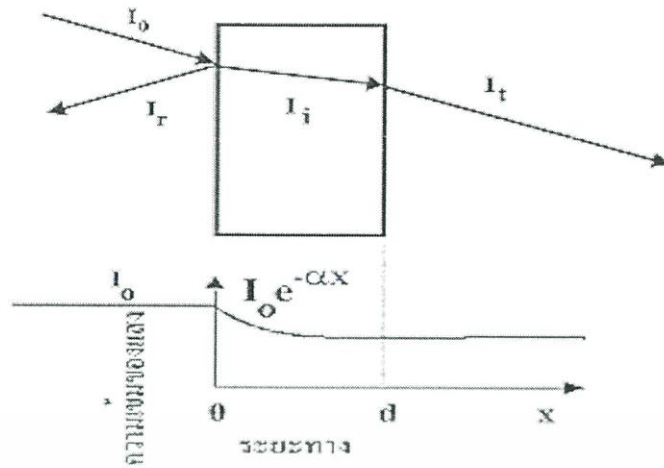


รูปที่ 2.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ($T = 0$ เคลวิน)
 ก. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง
 ข. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงกรณีที่เกิดกระบวนการสร้างโฟนอน

2.6.2 ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ (Kittel, 1971; งามนิตย, 2545; จูตินัย, 2550)

การศึกษาวีวัตสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงนี้ จะกล่าวถึงค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงและองค์ประกอบของการวัดสเปกตรัมการส่งผ่านแสงเมื่อแสงเดินทางไปกระทบฟิล์มบางแสงบางส่วนจะสะท้อนกลับที่ผิวของฟิล์มบาง บางส่วนของแสงจะเดินทางเข้าไปในแผ่นฟิล์มบางและถูกดูดกลืน ดังแสดงในรูปที่ 2.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.22 แสดงแผนภาพการศึกษาสมบัติเชิงแสงของฟิล์มบาง

สัมประสิทธิ์การสะท้อนของแสงมีค่าเป็น

$$R = \frac{I_r}{I_0} \quad (2.6)$$

เมื่อ

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

เพราะฉะนั้น ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางมีค่า

$$I_i = I_0 - I_r = I_0 - RI_r = (1 - R)I_0 \quad (2.7)$$

เมื่อแสงนี้เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางจะถูกดูดกลืนทำให้ความเข้มแสงภายในแผ่นฟิล์มบางลดลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลตามระยะทาง ดังนั้นความเข้มแสงที่ส่งผ่านฟิล์มบางมีค่าเป็น

$$I_t = I_i \cdot e^{-\alpha d} = (1 - R)I_0 \cdot e^{-\alpha d} \quad (2.8)$$

ถ้าไม่มีการสะท้อนแสงที่ผิวด้านหลัง ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของแสงจะมีค่าเท่ากับ

$$T = \frac{I_t}{I_0} = (1 - R) \cdot e^{-\alpha d} \quad (2.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.3 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ (งามนิตย์, 2543; จูตินัย, 2550; Kittel, 1971)

เมื่อแสงตกกระทบสารกึ่งตัวนำ ด้วยความเข้ม I_0 แสงบางส่วนจะส่งผ่านออกไปบางส่วนถูกดูดกลืนและส่วนที่เหลือจะสะท้อนกลับมา ดังแสดงในรูปที่ 2.22 โดย

$$T + A + R = 1 \quad (2.10)$$

เมื่อ T คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง
A คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง
R คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง

โดยที่
$$R = \frac{(n-1)^2 + K^2}{(n+1)^2 + K^2} \quad (2.11)$$

และค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ

$$n_c = n - iK \quad (2.12)$$

เมื่อ n คือ จำนวนจริงของค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ
K คือ จำนวนจินตภาพ เรียกว่า ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย (extinction coefficient) โดยทั้ง n และ K เป็นฟังก์ชันของ λ

2.6.4 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ (งามนิตย์, 2543; จูตินัย, 2550; Kittel, 1971)

การดูดกลืนแสงในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำเกิดจากการที่อิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากแสงที่มีพลังงาน โฟตอนเท่ากับหรือมากกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานจากนั้นจึงย้ายสถานะพลังงานจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปสู่แถบนำสเปกตรัมการดูดกลืนแสงบริเวณที่พลังงานโฟตอนมีค่าน้อยจะมีลักษณะเป็นขอบแสดงถึงการลดลงของการดูดกลืนแสงอย่างฉับพลันขอลักษณะนี้เรียกว่าขอบการดูดกลืนแสง (absorption edge) หรือขอบการดูดกลืนหลัก (fundamental edge) ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 2.23 พลังงานโฟตอนที่ขอบการดูดกลืนแสงมีค่าเท่ากับผลต่างของค่าพลังงานที่วัดจากจุดต่ำสุดของแถบนำกับจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์จุดที่เส้นตรงตัดกับแกนในแนวนอน จะให้ค่าช่องว่างพลังงาน (E_g) วิธีการนี้เป็นการกำหนดค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่นิยมมากที่สุด

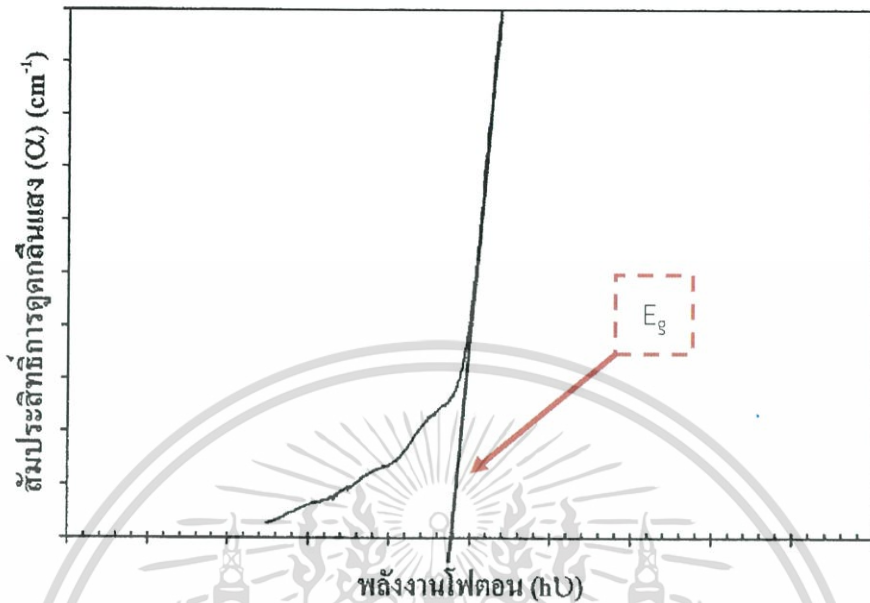
การหาค่าของช่องว่างพลังงาน สามารถพิจารณาได้จากค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (α) ของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (T) จากรูปที่ 2.22 แสดงภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบจากด้านซ้ายของฟิล์มบาง (I_0) จะทำให้ความเข้มแสงภายในฟิล์มบางจะลดลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลและมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงโดยทั่วไปค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (R) มีค่าน้อยมาก และมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับความยาวคลื่นแสงที่ตกกระทบดังนั้น

$$T = e^{-\alpha d} \quad (2.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้ว่า

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln\left(\frac{1}{T}\right) \quad (2.14)$$



รูปที่ 2.23 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับพลังงานโฟตอน

ที่กล่าวมาเป็นการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงจากสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงโดยไม่คิดถึงการสะท้อนของแสง สำหรับกรณีการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเนื่องจากการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอน ในกรณีที่อิเล็กตรอนย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำที่เวกเตอร์คลื่นค่าเดียวกัน เรียกการย้ายสถานะพลังงานแบบนี้ว่า การย้ายสถานะพลังงานแบบตรง และการย้ายสถานะพลังงานแบบตรงนี้ยังแบ่งได้อีกสองชนิด คือการย้ายสถานะพลังงานชนิดนิยมนและชนิดต้องห้าม โดยทั้งสองชนิดนี้ขึ้นกับค่าสมาชิกเมทริกซ์เชิงแสง (optical matrix element) ในการประมาณครั้งที่หนึ่งว่าเป็นศูนย์หรือไม่ คือ ถ้าเป็นศูนย์จะเป็นการย้ายสถานะพลังงานชนิดต้องห้ามและถ้าไม่เป็นศูนย์จะเป็นการย้ายสถานะพลังงานชนิดนิยมน เมื่อพิจารณาการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนในบริเวณตำแหน่งจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับค่าช่องว่างพลังงานซึ่งมีลักษณะเป็นพาราโบลา ช่องว่างแถบพลังงานของแผ่นฟิล์มบางประมาณได้โดยการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ซึ่งจะถูกดูดกลืนเมื่อแสงที่ตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบางมีค่าพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าของพลังงานต้องห้าม ที่ขอบการดูดกลืนค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนจะมีค่าเป็น

สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานชนิดนิยมนแบบตรง

$$(\alpha h\nu) = A(h\nu - E_g)^{\frac{1}{2}} \quad (2.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานชนิดยูนีแอมแบบเฉียง

$$(\alpha h\nu) = B(h\nu - E_g)^2 \quad (2.16)$$

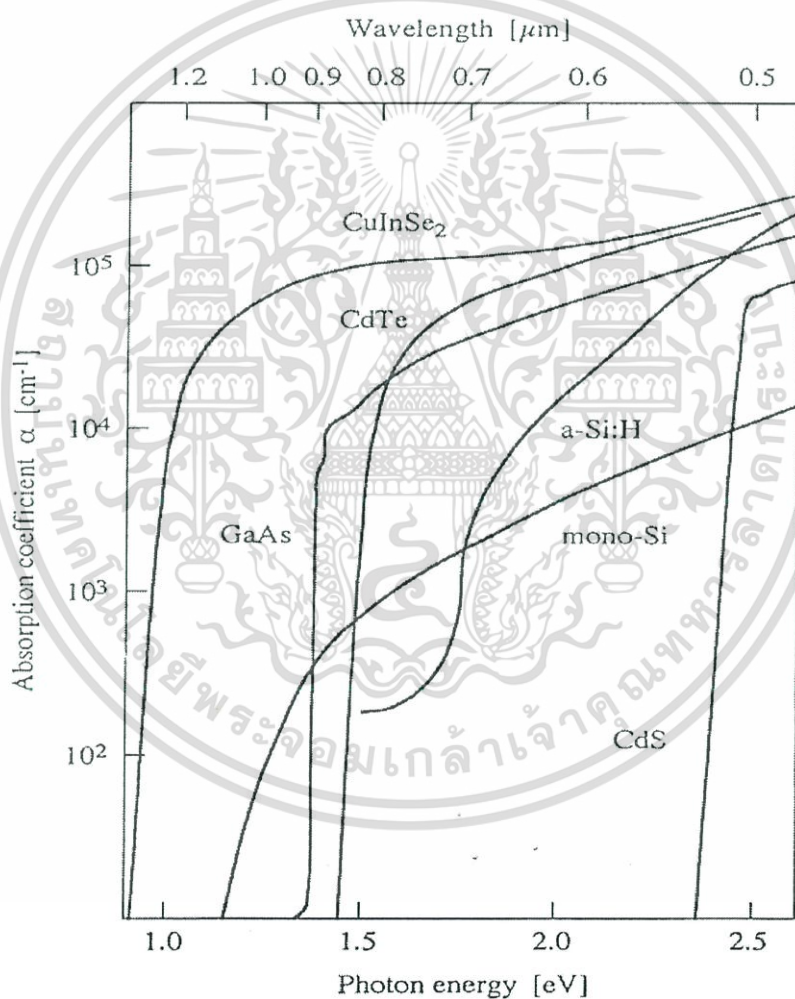
และสำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานชนิดต้องห้าม

$$(\alpha h\nu) = C(h\nu - E_g)^3 \quad (2.17)$$

เมื่อ α คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

$h\nu$ คือ พลังงานโฟตอน

A, B และ C คือ ค่าคงตัว

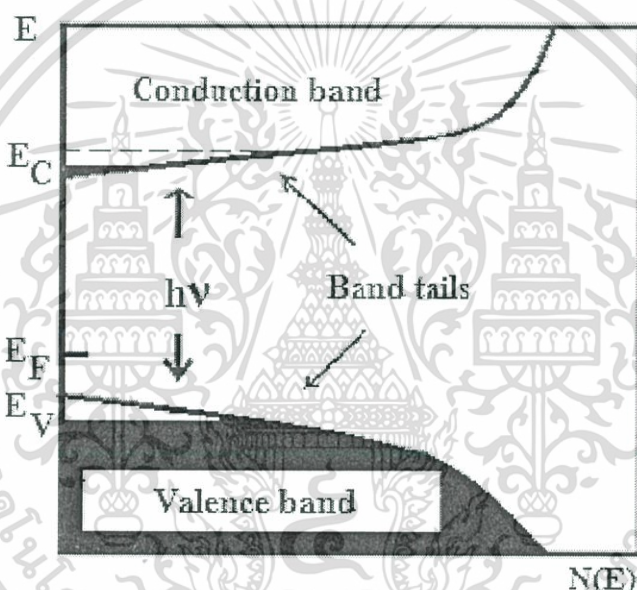


รูปที่ 2.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง และ ค่าพลังงานโฟตอน หรือค่าความยาวคลื่นของพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.5 ส่วนหางของแถบพลังงาน (Kittel, 2005; งามนิตย์, 2530; ฐิตินัย, 2531; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2552; Runyan, 1975; สุกฤษฎ์, 2547; สมเกียรติ, 2542; ฐิตินัย, 2552; วีรัชย์, 2547; ดุสิต, 2535)

วัสดุประเภทฟิล์มบางมักมีข้อบกพร่องของผลึกจำนวนมากระดับพลังงานของข้อบกพร่องของผลึกเหล่านี้จะมีอันตรกิริยาต่อกันส่งผลให้ระดับพลังงานเหล่านี้แผ่ขยายออกโดยจะไม่เป็นระดับพลังงานเฉพาะค่า (discrete level) อีกต่อไปบางครั้งก็แผ่ออกไปจรดขอบบนสุดของแถบวาเลนซ์หรือขอบล่างสุดของแถบนำซึ่งเหมือนกับว่าแถบวาเลนซ์หรือแถบนำนี้มีความหนาแน่นของสถานะทางพลังงาน (energy density of state) ยื่นเข้าไปในช่องว่างแถบพลังงานซึ่งนิยมเรียกส่วนที่ยื่นเข้าไปในแถบช่องว่างแถบพลังงานนี้ว่าส่วนหางของแถบพลังงานหรือส่วนหางของแถบพลังงานของเออร์บัค (band tail หรือ Urbach's tail) ดังแสดงดังรูป 2.25



รูปที่ 2.25 แสดงส่วนหางของแถบพลังงานซึ่งมีส่วนหางของแถบวาเลนซ์และส่วนหางของแถบนำ

ในเชิงการทดลองส่วนหางของแถบพลังงานสามารถตรวจสอบได้จากการวัดขอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซึ่งเออร์บัค (Urbach) ได้แสดงให้เห็นว่าขอบการดูดกลืนของผลึกจะเพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โพเนนเชียลดังความสัมพันธ์

$$\alpha = \alpha_0 \exp \left[\frac{\sigma(E - E_0)}{k_B T} \right] \tag{2.18}$$

- เมื่อ α_0 และ E_0 คือ พารามิเตอร์ของผลึกแต่ละชนิด
- k_B คือ ค่าของที่ของโบลต์ซมันน์ = 1.38×10^{-23} จูลต่อเคลวิน
- T คือ อุณหภูมิ (เคลวิน)
- σ คือ ความชัน (steepness) ของขอบการดูดกลืนแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่ให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง (Kittel, 2005; งามนิตย์, 2530; ฐิตินัย, 2531; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2552; Runyan, 1975; สุกฤษฎี, 2547; สมเกียรติ, 2542; วีรัชย์, 2547; คูสิต, 2535)

จากทฤษฎีแถบพลังงานนั้น สารกึ่งตัวนำที่มีขนาดช่องว่างแถบพลังงานที่มีค่าใหญ่เกินกว่า 2 อิเล็กตรอนโวลต์ พลังงานความร้อนที่อุณหภูมิห้องไม่เพียงพอที่จะกระตุ้นให้เกิดพาหะอิสระได้ ดังนั้นพาหะอิสระของสารกึ่งตัวนำประเภทนี้จึงน้อยส่วนใหญ่มาจากระดับพลังงานที่ปรากฏในช่องว่างแถบพลังงาน ซึ่งจะเป็นทั้งระดับพลังงานผู้ให้และระดับพลังงานผู้รับหรือศูนย์กลางการรวมตัว (recombination center) ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิใดๆของสารกึ่งตัวนำจึงขึ้นกับความหนาแน่นของพาหะอิสระเหล่านี้

2.7.1 สภาพนำไฟฟ้า

เมื่อใส่สนามไฟฟ้าเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบนำจะตอบสนองต่อค่าสนามไฟฟ้าเกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนกลายเป็นกระแสไฟฟ้า จากกฎของโอห์ม (Ohm's law) ค่าสภาพนำไฟฟ้า (electrical conductivity : σ) คืออัตราส่วนของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (current density : J) ต่อค่าสนามไฟฟ้า (electric field : E) ที่ใส่เข้าไปสมการ

$$J = \sigma E = e(\mu_n n + \mu_p p)E \quad (2.19)$$

เมื่อ μ_n, μ_p คือ สภาพคล่องของอิเล็กตรอนและโฮล ตามลำดับ

n คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

p คือ ความหนาแน่นของโฮล

ส่วนกลับของค่าสภาพนำไฟฟ้า เรียกว่า ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (resistivity : ρ)

ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{e(\mu_n n + \mu_p p)} \quad (2.20)$$

ถ้ามีก้อนเนื้อสารกึ่งตัวนำซึ่งให้แรงดันไฟฟ้า V และเกิดกระแสไฟฟ้า I แล้วจะได้ว่า

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

สามารถเขียนสมการข้างต้นใหม่ได้เป็น

$$\frac{I}{A} = \sigma \left(\frac{V}{l} \right) \quad (2.21)$$

หรือ
$$V = \left(\frac{l}{\sigma A} \right) I = \left(\frac{\rho l}{A} \right) I = IR \quad (2.22)$$

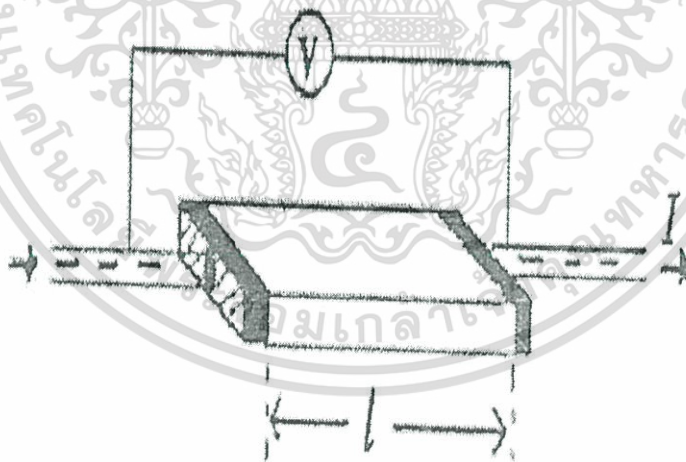
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการข้างต้น คือกฎของโอห์มสำหรับสารกึ่งตัวนำ ความต้านทานไฟฟ้าเป็นฟังก์ชันกับค่าสภาพความต้านทานหรือค่าสภาพนำไฟฟ้าและขึ้นกับมิติรูปทรงเรขาคณิตของสารกึ่งตัวนำ

2.7.2 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง (direct resistivity method)

วิธีการวัดค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำสามารถกระทำได้หลายวิธี ทั้งวิธีที่ใช้ส่วนของอุปกรณ์ต่อเข้าสัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่างและวิธีที่ไม่ต้องสัมผัสโดยตรง สำหรับวิธีที่จะกล่าวถึงในที่นี้เป็นวิธีที่ใช้การสัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่าง ซึ่งทำได้โดยการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในชิ้นสารตัวอย่างแล้ววัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างจุดบนชิ้นสารนั้น

โดยทั่วไปแล้วการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามักจะวัดความต้านทานก่อน ซึ่งเป็นวิธีวัดโดยตรงนี้หมายถึง วัดค่าความต้านทานรวมของสสารจากนั้นมาหาค่าความยาว และพื้นที่หน้าตัดของสสารนั้น การวัดวิธีนี้จะต้องทำให้สสารที่ต้องการวัดมีรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอน เพื่อที่จะวัดค่าพื้นที่หน้าตัดและความยาวให้ได้แน่นอน เช่นแท่งกลมทรงกระบอก แท่งสี่เหลี่ยม เป็นต้น จากนั้นจึงให้กระแสไฟฟ้าเข้าไปที่ปลายด้านหนึ่งและให้กระแสไฟฟ้าไหลออกผ่านสารตัวอย่างที่ปลายอีกด้านหนึ่ง ขณะเดียวกันก็วัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จุดปลายทั้งสองนั้นพร้อมๆกัน จากที่ทราบค่ากระแสไฟฟ้า และค่าศักย์ไฟฟ้านี้ สามารถนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าได้ดังต่อไปนี้ เมื่อกำหนด R เป็นค่าความต้านทานรวมจะมีความสัมพันธ์กับค่าความต้านทานจำเพาะและพื้นที่หน้าตัด A บริเวณที่ปล่อยกระแสไหลเข้าไปและ l เป็นระยะทางระหว่างขั้วศักย์ไฟฟ้าที่วัด



รูปที่ 2.26 แสดงการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.23)$$

$$\rho = \frac{RA}{l} = \left(\frac{V}{I} \right) \left(\frac{A}{l} \right) \quad (2.24)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นว่าวิธีนี้เป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็ว แต่ค่าที่ได้เป็นค่าโดยประมาณซึ่งต้องคำนึงถึงองค์ประกอบอื่นๆด้วย ซึ่งความถูกต้องในการวัดโดยวิธีนี้ขึ้นอยู่กับบริเวณผิวสัมผัสที่กระแสไฟฟ้าไหลเข้าและออกนั้นมีลักษณะเป็นโอห์มมิกที่ดีหรือไม่ ถ้าไม่มีสมบัติโอห์มมิกที่ดีแสดงว่ามีความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวสัมผัสทั้งสองขั้วไฟฟ้าเกิดขึ้นด้วย ค่าความต้านทานไฟฟ้า R ที่วัดได้จึงเป็นค่าความต้านทานรวมทั้งหมด ดังนั้น ค่าความต้านทานไฟฟ้าจริงของสารกึ่งตัวนำจะน้อยกว่าค่าที่วัดได้แน่นอน ความถูกต้องอีกส่วนหนึ่งขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้าของสารที่ต้องการวัดและค่าความต้านทานภายใน (impedance) ของโวลต์มิเตอร์ที่ใช้วัด หากค่าความต้านทานนี้ใกล้เคียงกัน ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จะมีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง ซึ่งในทางปฏิบัติจะคำนึงถึงผิวสัมผัสโอห์มมิกมากกว่าความผิดพลาดของโวลต์มิเตอร์ เนื่องจากที่ผิวสัมผัสจะดีหรือไม่ (เป็นโอห์มมิกหรือไม่) นั้นตรวจสอบได้ยากมากจึงแก้ไขด้วยการทำให้เกิดผิวสัมผัสบริเวณพื้นที่มากขึ้นเพื่อลดความต้านทานไฟฟ้าที่ผิวสัมผัสลง จากนั้นจึงวัดค่าศักย์ไฟฟ้าด้วยโวลต์มิเตอร์ โดยเลือกโวลต์มิเตอร์ที่มีค่าความต้านทานภายในสูงๆ เท่าที่จะหาได้เพื่อลดค่าความผิดพลาด

2.7.3 ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Kittel, 2005; งามนิตย์, 2530; ฐิตินัย, 2531; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2552; Runyan, 1975; สุกฤษฎ์, 2547; สมเกียรติ, 2542; วีรัชย์, 2547; ดุสิต, 2535)

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถเขียนในเทอมของค่าสภาพคล่องของพาหะได้และค่าความหนาแน่นพาหะอิสระด้วยความสัมพันธ์

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากอิเล็กตรอน

$$\rho = \frac{1}{ne\mu_e} \quad (2.25)$$

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากโฮล

$$\rho = \frac{1}{pe\mu_p} \quad (2.26)$$

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากพาหะสองชนิดคืออิเล็กตรอนและโฮลซึ่งมีปริมาณใกล้เคียงกันค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่แท้จริงคือ

$$\rho = \frac{1}{e(n\mu_e + p\mu_p)} \quad (2.27)$$

เมื่อ n คือ ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระ

p คือ ค่าความหนาแน่นของโฮลอิสระ

μ_e และ μ_p คือ ค่าสภาพคล่องของอิเล็กตรอน และค่าสภาพคล่องของโฮล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั่นคือหากทราบค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า และค่าสภาพคล่องของพาหะจะทำให้สามารถคำนวณ ค่าความหนาแน่นของพาหะข้างมากได้จากสมการที่ (2.28) และ (2.29) คือ

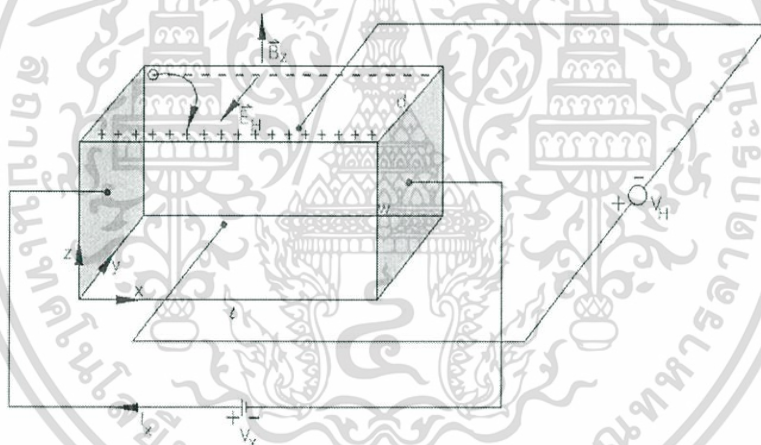
กรณีเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

$$\text{ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอน} \quad n = \frac{1}{e\rho\mu_e} \quad (2.28)$$

กรณีเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี

$$\text{ค่าความหนาแน่นของโฮล} \quad p = \frac{1}{e\rho\mu_p} \quad (2.29)$$

เราสามารถคำนวณค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ค่าสภาพคล่องของพาหะได้หลายวิธีวิธีที่สะดวกและมักนิยมใช้กันอย่างกว้างขวางคือ การคำนวณจากการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ ปรากฏการณ์ฮอลล์ ได้ถูกค้นพบในปี พ.ศ. 2422 โดย เอ็ดวิน เฮอร์เบิร์ต ฮอลล์ (Edwin Herbert Hall)



รูปที่ 2.27 แสดงแผนภาพแสดงปรากฏการณ์ฮอลล์บนแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิดพี

พิจารณาชิ้นสารกึ่งตัวนำชนิดพี ที่เป็นรูปทรงดังแสดงในรูปที่ 2.27 ซึ่งมีกระแสไฟฟ้า I ไหลผ่านในแนว x หรืออาจมองว่ามีประจุบวกเคลื่อนที่ไปในทิศ x ด้วยความเร็วลอยเลื่อน v_x เกิดเป็นกระแสไฟฟ้าในแนวทิศทาง x คือ I_x ดังสมการที่ (2.30)

$$\text{จาก} \quad I = nqvA \quad (2.30)$$

$$\text{ดังนั้น} \quad I_x = qnv_x(wd) \quad (2.31)$$

$$\text{จากกฎของโอห์ม} \quad V = IR \quad (2.32)$$

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (2.33)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.26

$$A = wd \quad (2.34)$$

ถ้าทราบค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (V_x) ระหว่างปลายทั้งสองของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น สามารถหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าได้จากสมการที่ (2.32) และ (2.33) และ (2.34)

$$\rho = \frac{V_x}{I_x} \cdot \frac{A}{L} = \frac{V_x}{I_x} \cdot \frac{wd}{L} \quad (2.35)$$

ปรากฏการณ์ฮอลล์เกิดขึ้นเมื่อมีสนามแม่เหล็ก (B_z) ที่กระทำกับชิ้นสารในทิศ z อย่างสม่ำเสมอ อันตรกริยาจากสนามแม่เหล็กมีผลทำให้แนวกระแสของโฮลเบี่ยงเบนไปในทิศ $-y$ สอดคล้องในบริเวณขอบด้านนอก ($y=0$) และเหนี่ยวนำให้เกิดอิเล็กตรอนขึ้นที่ขอบด้านใน (y) ทำให้เกิดค่าสนามไฟฟ้าฮอลล์ในทิศ $-y$ (Hall field: E_y หรือ E_H) และเกิดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ หรือเกิดค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าฮอลล์ในทิศ y (Hall voltage: V_H) ขึ้น ทำให้กลุ่มโฮลเคลื่อนที่ไปด้วยแรงลอเรนตซ์ (Lorentz's force)

$$F = q(v_x \times B_z) + qE_y \quad (2.36)$$

เมื่อแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่กระทำต่อโฮลมีค่าเท่ากันจะเกิดสภาวะสมดุลเชิงความร้อน หรือสภาวะคงตัว (steady state) ทำให้โฮลเคลื่อนที่ในทิศ x ดังเดิม เพราะฉะนั้นจะทำให้ได้ว่า

$$E_y = v_x B_z = \frac{1}{qn} \cdot \frac{I_x}{wd} \cdot B_z \quad (2.37)$$

หากพิจารณาสมการที่ (2.40) จะเห็นว่าค่าสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดขึ้นเป็นปฏิภาคกับค่าความหนาแน่นกระแส และค่าสนามแม่เหล็ก สามารถเขียนได้ในรูปของ

$$E_y = R_H J_x B_z \quad (2.38)$$

เมื่อ
$$J_x = \frac{I_x}{wd} \quad (2.39)$$

แล้ว
$$R_H = \frac{E_y}{J_x B_z} = \frac{1}{qn} \quad (2.40)$$

เรียก R_H ว่าเป็นค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์หรือค่าคงตัวฮอลล์ (Hall coefficient) ซึ่งนิยามว่าเป็นค่าสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดจากค่าความหนาแน่นกระแสของพาหะที่มีขนาด 1 หน่วย ไหลผ่านภายใต้สนามแม่เหล็กขนาด 1 หน่วย เราอาจทราบค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากค่าสนามไฟฟ้าฮอลล์ โดยอินทิเกรตค่าสนามไฟฟ้าฮอลล์ ตลอดความกว้าง (w) ของแผ่นสารและเรียกความต่างศักย์นี้ว่าค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) นั่นคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_H = \int_0^w E_y dy = \int_0^w \frac{1}{qn} \cdot \frac{I_x B_z}{wd} dy \quad (2.41)$$

$$= \frac{1}{qn} \cdot \frac{I B_z}{d} \quad (2.42)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์ที่ได้จากการวัด คือ

$$R_H = \frac{V_H}{I_x} \cdot \frac{d}{B_z} \quad (2.43)$$

ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนตามนิยาม คือ

$$n = \frac{1}{qR_H} = \frac{I_x}{V_H} \cdot \frac{B_z}{qd} \quad (2.44)$$

โดยทั่วไปพาหะอิสระที่เคลื่อนที่ในสารกึ่งตัวนำมักประสบกับกลไกการกระเจิงหลายชนิด กลไกการกระเจิงของพาหะในสารกึ่งตัวนำจะเป็นกลไกที่ขึ้นอยู่กับพลังงานของพาหะโดยที่ช่วงเวลาปลอดการกระเจิง (τ) จะแสดงได้ดังนี้

$$\tau = \tau(E) \quad (2.45)$$

เมื่อคิดผลรวมจากการกระเจิงที่ขึ้นกับพลังงานของพาหะ ค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

ค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

$$R_H = \frac{r}{nq} \quad (2.46)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดพี

$$R_H = \frac{r}{pq} \quad (2.47)$$

เมื่อ r คือ แฟกเตอร์การกระเจิง (scattering factor) ของพาหะในปรากฏการณ์ฮอลล์ซึ่งสามารถนิยามค่า r ได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$r = \frac{\langle \tau \rangle^2}{\langle \tau^2 \rangle} \quad (2.48)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

r มีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ขึ้นอยู่กับกลไกการกระเจิงของพาหะ เช่น การกระเจิงเนื่องจากโครงสร้างผลึกหรือการกระเจิงเนื่องจากอะตอมของสารเจือปนที่ถูกไอออนไนซ์ ค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์แปรค่าตามค่าสนามแม่เหล็กและค่าอุณหภูมิ ซึ่งจะมีค่าใกล้ 1 เมื่อขึ้นสารอยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กที่มีความเข้มสูงมาก ดังนั้นเราทราบค่าของ r จากการทดลองด้วยความสัมพันธ์

$$r = \frac{R_H(B)}{R_H(B = \infty)} \quad (2.49)$$

ในทางปฏิบัติสนามแม่เหล็กที่ใช้วัดโดยทั่วไปมีค่าอยู่ระหว่าง 5 ถึง 10000 เกาส์ ซึ่งค่า r ในช่วงนี้มีการเปลี่ยนแปลงไม่มาก ดังนั้นอาจประมาณได้ว่าค่าคงที่

จากสมการที่ (2.45) และ (2.46) สามารถนิยามค่าสภาพคล่องฮอลล์ (μ_H) ได้เป็น

$$\mu_H = \left| \frac{R_H}{\rho} \right| = r \mu \quad (2.50)$$

หรือ จากสมการที่ (2.45) และ (2.51)

$$\mu_H = \frac{V_H}{I_x} \cdot \frac{d}{B_z} \cdot \frac{1}{\rho} \quad (2.51)$$

ค่าสภาพคล่องฮอลล์แตกต่างจากค่าสภาพคล่องที่ได้จากการนำไฟฟ้าด้วยอัตราส่วนของ r ซึ่งมีค่ามากกว่า 1 โดยทั่วไปเพื่อลดความซับซ้อนเมื่อคำนวณค่าความหนาแน่นของพาหะจึงมักประมาณว่า r มีค่าเท่ากับ 1 ค่าความหนาแน่นของพาหะที่คำนวณจากปรากฏการณ์ฮอลล์ จึงอาจสูงกว่าค่าความหนาแน่นของพาหะที่แท้จริงถึง 30 เปอร์เซ็นต์

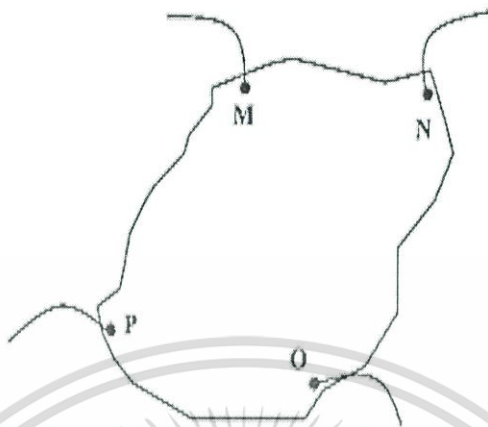
2.7.4 การศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ (Kittel, 2005; งามนิตย์, 2530; รุติณัย, 2531; งามนิตย์, 2545; รุติณัย, 2550; Runyan, 1975; สุกฤษฎ์, 2547; สมเกียรติ, 2542; รุติณัย, 2552; วีรัชย์, 2547; คณิต, 2535)

เทคนิคนี้ได้รับการพัฒนาขึ้นมาจากพื้นฐานของวิชาคณิตศาสตร์ คอนฟอร์มอลแมปปิง (conformal mapping) โดยนักวิทยาศาสตร์ชื่อ แวนเดอร์เพาว์ (van der Pauw) สำคัญของเทคนิคนี้อยู่ที่การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของแผ่นสารตัวอย่างรูปทรงใดๆ ซึ่งสามารถทำได้อย่างแม่นยำโดยไม่จำเป็นต้องทราบลักษณะของรูปแบบการกระจายของเส้นทางเดินกระแสที่ไหลภายในแผ่นสาร ถ้าสารตัวอย่างประพฤติตามเงื่อนไขต่อไปนี้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาชิ้นสารรูปทรงเป็นแผ่นบางใดๆ และมีขั้วสัมผัสเล็กๆ M, N, O และ P กระจายอยู่ที่บริเวณขอบของแผ่นซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขข้างต้น



รูปที่ 2.28 แสดงการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์บนสารตัวอย่างที่เป็นแผ่นบางที่มีรูปทรงใดๆ

ในการวัดค่าสภาพคล่องฮอลล์ หากกระบวนกรวัดกระทำภายใต้สนามแม่เหล็กที่มีค่าความเข้ม B ที่กระทำตั้งฉากกับระนาบแผ่นสาร กระแสไฟฟ้าจ่ายเข้าในแนวทะแยงมุมขั้ว M, O และวัดความต่างศักย์จากขั้ว N, P

นิยาม

$$R_{MNOP} = \frac{V_{NP}}{I_{MO}} \quad (2.52)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์จากเทคนิคของแวนเดอร์เพาว์ คือ

$$R_H = \left(\frac{V_H}{I} \right) \left(\frac{d}{B} \right) \quad (2.53)$$

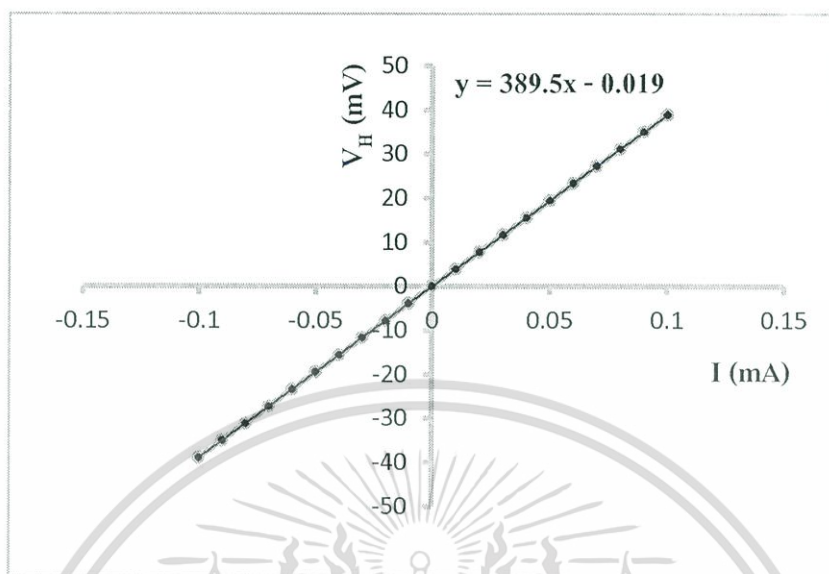
- เมื่อ
- V_H คือ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์หรือผลต่างระหว่างค่า V_{NP} ในขณะที่มีสนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็ก
 - d คือ ค่าความหนาของชิ้นสารตัวอย่าง
 - B คือ ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก

จากสมการที่ (2.53) จะได้ว่า

$$R_H = \frac{V_H}{I} \left(\frac{d}{B} \right) \quad (2.54)$$

เมื่อทำการเขียนกราฟระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ที่ได้จากกราฟทดลองเราจะได้ลักษณะกราฟดังรูปที่ 2.29 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ค่าความชันของกราฟที่ได้จะเป็นค่า $\frac{V_H}{I}$



รูปที่ 2.29 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) กับ ค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของสารตัวอย่าง

ค่าสภาพคล่องฮอลล์สามารถคำนวณได้จาก

$$\mu_H = \frac{R_H}{\rho} \quad (2.55)$$

และสามารถคำนวณหา ค่าระยะทางเฉลี่ยที่ปลดการกระเจิง ได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$l = \left(\frac{h}{2e} \right) \left(\frac{3n}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \mu_H \quad (2.56)$$

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

ในทางปฏิบัติการเตรียมชิ้นสารให้มีรูปทรงตามเงื่อนไขทั้ง 4 ข้อดังกล่าวอาจเป็นไปได้ยาก โดยเฉพาะขนาดและตำแหน่งของขั้วสัมผัสซึ่งมักไม่เป็นจุดและไม่อยู่ที่ขอบของชิ้นสารตามทฤษฎี จึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของผลการวัด

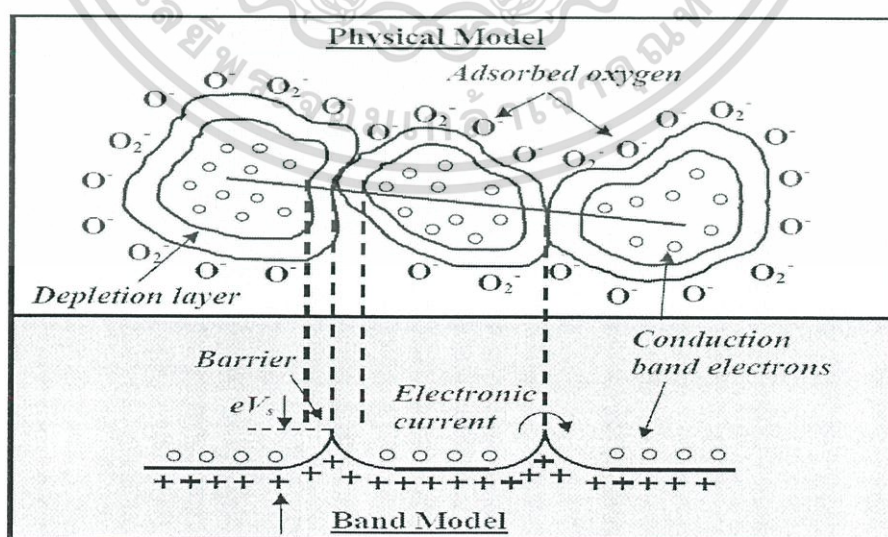
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.5 กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในฟิล์มบางที่อุณหภูมิต่างๆ (Kittel, 2005; งามนิตย์, 2530; ฐิตินัย, 2531; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2552; Runyan, 1975; สุกฤษฎ์, 2547; นพณัฐ, 2556; วีระชัย, 2547; คุสิต, 2535)

ซีโต (Seto, 1975) ได้พัฒนาทฤษฎีที่ใช้อธิบายการเคลื่อนที่ของพาหะอิสระในวัสดุที่เป็นผลึกพหุพันธ์ (polycrystalline) เช่น ในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ เป็นต้น โดยใช้แบบจำลองกับดักประจุที่ขอบของเกรนรวมกับกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน โดยตั้งสมมุติฐานดังนี้คือ

1. ผลึกพหุพันธ์ประกอบไปด้วยเกรนขนาดเล็กที่มีคุณสมบัติเหมือนกัน มีรูปร่างเป็นลูกบาศก์ แต่ละด้านยาว L ซึ่งในความเป็นจริงเกรนจะมีรูปร่างไม่คงที่ (irregular shaped grains)
2. กลไกการนำไฟฟ้าคิดเป็น 1 มิติ
3. โครงสร้างแถบพลังงานของผลึกเดี่ยว สามารถประยุกต์ใช้ในเนื้อเกรนได้
4. ความหนาของขอบเกรนมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับขนาดของเกรน
5. ขอบกพร่องผลึกถือว่าเป็นกับดักประจุที่ปรากฏอยู่ที่ขอบของเกรน เมื่อเริ่มต้นกับดักประจุจะเป็นกลางทางไฟฟ้า แต่เมื่อจับอิเล็กตรอน (จับโฮล) แล้วกับดักประจุกลายเป็นประจุลบ (ประจุบวก) ความหนาแน่นของกับดักประจุมีหน่วยเป็น ต่อตารางเซนติเมตร
6. ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น กับดักประจุจะเป็นผู้รับ (acceptor) ส่วนสารกึ่งตัวนำชนิดพี กับดักประจุจะเป็นผู้ให้ (donor)
7. ระดับพลังงานของกับดักประจุ (E_t) จะอยู่บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างแถบพลังงาน
8. ความเข้มข้นของสารเจือจะกระจายอย่างสม่ำเสมอตลอดเนื้อสารและอะตอมสารเจือจะถูกไอออไนซ์ทั้งหมด

จากข้อสมมุติฐานข้างต้น ร่วมกับการประมาณแบบรอยต่อชั้นบันได (abrupt junction approximation) แถบพลังงานของผลึกพหุพันธ์ตรงบริเวณรอยต่อสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.30 แสดงแบบจำลองการเกิดบริเวณพร่องพาหะและโครงสร้างแถบพลังงานตรงบริเวณ

ขอบรอยต่อของเกรนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

2.7.5.1. กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในฟิล์มบางในช่วงอุณหภูมิสูง

จากแบบจำลองที่พัฒนาโดย เบ็คคารินี (Baccarini et al., 1978) เมื่อ $N_a < N_a^*$ ในเนื้อเกรนจะเป็นบริเวณพร่องพาหะทั้งหมด ซึ่งจะเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิสูง ระดับพลังงานเฟอร์มิ (E_F) จะอยู่ระดับเดียวกับ E_c สภาพนำไฟฟ้าจะแสดงได้ด้วยสมการ

$$\sigma = \left[\frac{L^2 e^2 N_v N_a v_c}{2kT(N_t - LN_a)} \right] \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (2.57)$$

เมื่อ

$$v_c = \left[\frac{kT}{2\pi m^*} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.58)$$

และ

$$N_v = 2 \left[\frac{2\pi m^* kT}{h^2} \right]^{\frac{3}{2}} \quad (2.59)$$

สมการที่ (2.57) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\sigma T^{-1} = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (2.60)$$

$$\ln(\sigma T^{-1}) = -\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T}\right) + \ln \sigma_0 \quad (2.61)$$

$$\ln(\sigma T^{-1}) = -\frac{E_a}{1000k} \left(\frac{1000}{T}\right) + \ln \sigma_0 \quad (2.62)$$

$$\text{ความชัน} = -\frac{E_a}{1000k} \quad (2.63)$$

$$E_a = -\frac{1000k(\text{ความชัน})}{1.6 \times 10^{-19}} \quad (2.64)$$

โดยที่ E_a คือพลังงานกระตุ้น มีหน่วยเป็นอิเล็กตรอนโวลต์ รูปที่ 2.31 แสดงตัวอย่างของกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln \sigma T^{-1}$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่อุณหภูมิในช่วง 125 - 365 เคลวิน (Serin et al. 2011)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับค่าความหนาแน่นของกักตักประจุ (N_t) สามารถหาได้ เมื่อทราบขนาดของเกรน (L) แล้ว ซึ่งขนาดของเกรนสามารถคำนวณได้จากสมการของเซอร์เรอร์ดังสมการ

$$L = \frac{0.94\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (2.65)$$

ส่วนค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่ขอบของเกรนจะแสดงได้ดังนี้ คือ

$$E_b = \frac{e^2 L^2 N_a}{8\epsilon_S} \quad (2.66)$$

ส่วนค่าระดับพลังงานของกักตักประจุ (E_t) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$E_a = \frac{1}{2} E_g - E_t \quad (2.67)$$

2.7.5.2. กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในฟิล์มบางในช่วงอุณหภูมิปานกลาง

เมื่ออุณหภูมิไม่สูงมากนักในเนื้อเกรนจะเป็นบริเวณพร่องพาหะเพียงบางส่วนยิ่งจะสอดคล้องกับเงื่อนไข $N_a > N_a^*$ สำหรับเงื่อนไขแรกคือ $E_f - E_t - E_b \gg kT$ ค่าสภาพนำไฟฟ้าจะสัมพันธ์กับอุณหภูมิ คือ

$$\sigma = \left[\frac{Le^2 n v_e}{kT} \right] \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (2.68)$$

เมื่อ n คือ ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระในบริเวณที่เป็นกลางทางไฟฟ้า สมการที่ (2.68) สามารถเขียนใหม่ได้เป็นดังนี้ คือ

$$\frac{1}{\sigma T^2} = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (2.69)$$

$$\ln\left(\frac{1}{\sigma T^2}\right) = -\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T}\right) + \ln \sigma_0 \quad (2.70)$$

$$\ln\left(\frac{1}{\sigma T^2}\right) = -\frac{E_a}{1000k} \left(\frac{1000}{T}\right) + \ln \sigma_0 \quad (2.71)$$

$$\text{ความชัน} = -\frac{E_a}{1000k} \quad (2.72)$$

$$E_a = -\frac{1000k(\text{ความชัน})}{1.6 \times 10^{-19}} \quad (2.73)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่ง E_a ในที่นี้ คือ ค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่ขอบของเกรน (E_b) โดยที่

$$E_b = \frac{e^2 L^2 N_a}{8 \epsilon_S} \quad (2.74)$$

เมื่อ ϵ_S คือ ค่าเพอร์มิตติวิตี (permittivity) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ

รูปที่ 2.30 แสดงตัวอย่างของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln \sigma T^{\frac{1}{2}}$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่อุณหภูมิในช่วง 125-365 เคลวิน (Serin et al. 2011) จากสมการที่ (2.74) จะเห็นได้ว่าค่า E_b จะไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ เนื่องจากเงื่อนไขที่ระดับพลังงานเฟอร์มิ (E_F) อยู่สูงกว่าระดับกับดักประจุ (E_t) ดังนั้นประจุไฟฟ้าจะเข้าไปบรรจุอยู่ในกับดักประจุทั้งหมดจนเต็ม ส่งผลให้กับดักประจุไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ สำหรับค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ (N_a) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.74) และค่าความยาวเดอบาย (L_D) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$L_D = \left[\frac{kT \epsilon_S}{e^2 N_a} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.75)$$

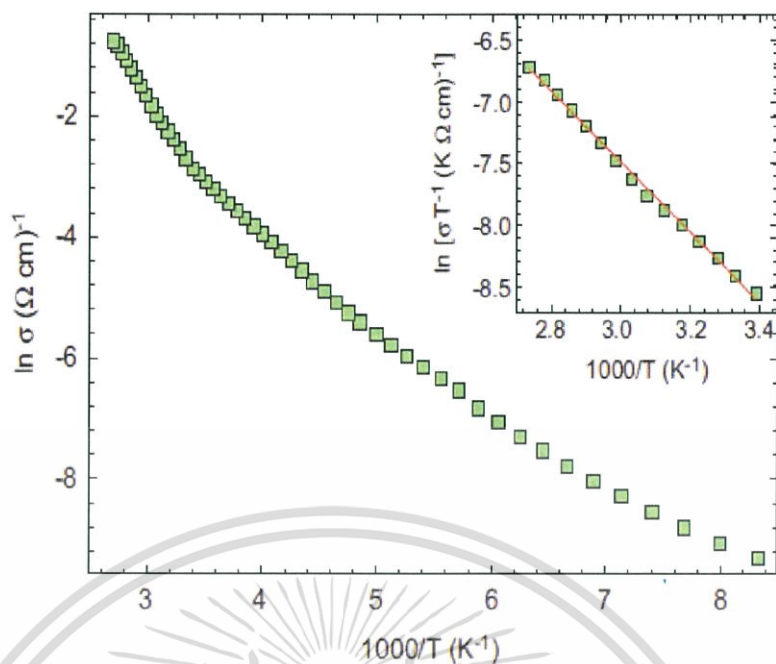
สำหรับเงื่อนไขที่สอง คือ $E_t + E_b - E_F \gg kT$ เป็นเงื่อนไขที่ระดับกับดักประจุ (E_t) อยู่สูงกว่าระดับพลังงานเฟอร์มิ (E_F) แสดงว่ากับดักประจุบางส่วนเท่านั้นที่ถูกครอบครองโดยประจุไฟฟ้า ดังนั้นค่าสภาพนำไฟฟ้าจะสัมพันธ์กับค่าอุณหภูมิดังนี้ คือ

$$\sigma = e N_c^2 L_D \left(2 \epsilon_S N_d^{-1} E_b \right)^{\frac{1}{2}} (k T N_t)^{-1} \exp \left(- \frac{E_a}{k T} \right) \quad (2.76)$$

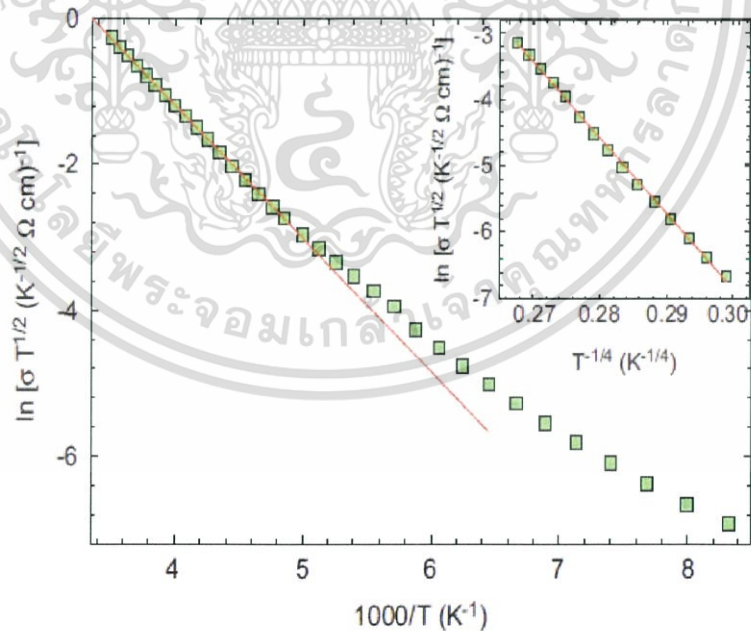
ซึ่ง

$$E_a = \frac{1}{2} E_g - E_t \quad (2.77)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.31 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln \sigma$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่อุณหภูมิในช่วง 125-365 เคลวิน สำหรับในรูปแทรกคือกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln \sigma T^{-1}$ กับ $\frac{1000}{T}$ (serin et al. 2011)



รูปที่ 2.32 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln \sigma T^{\frac{1}{2}}$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ CuO สำหรับในรูปแทรก คือกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln \sigma T^{\frac{1}{2}}$ กับ $T^{-\frac{1}{4}}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.5.3. การนำไฟฟ้าของพาหะแบบกระโดดในระยะไม่คงที่ (Variable Range Hopping Conduction: VRH) (งามนิตย์,2556;ฐิตินัย,2556)

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

$$\sigma_{hop} = \sigma = \frac{\sigma_0}{T^{\frac{1}{2}}} \exp\left[-\frac{T_0}{T}\right]^{\frac{1}{4}} \quad (2.78)$$

$$\sigma T^{\frac{1}{2}} = \sigma_0 \exp\left[-\frac{T_0}{T}\right]^{\frac{1}{4}} \quad (2.79)$$

$$\ln\left(\sigma T^{\frac{1}{2}}\right) = -\left(\frac{T_0}{T}\right)^{\frac{1}{4}} + \ln\sigma_0 \quad (2.80)$$

เมื่อ σ_0 คือ แฟกเตอร์หน้าพจน์เอ็กซ์โพเนนเชียล (pre - exponential factor)

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

T คือ อุณหภูมิเคลวิน

เมื่อนำเอาสมการที่ (2.73) ไปเขียนกราฟจะได้กราฟเชิงเส้นโดยค่าความชันของกราฟ คือ

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

$$\sigma_0 = 3e^2 v \left[\frac{N(E_F)}{8\pi\alpha k} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.81)$$

$$T_0 = \frac{18\alpha^3}{kN(E_F)} \quad (2.82)$$

เมื่อ v คือ ค่าความถี่ของโฟนอนที่อุณหภูมิเดออบาย (Debye temperature) จะมีค่าประมาณ 1×10^{13} เฮิรตซ์

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

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

e คือ ค่าประจุอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ 1.6×10^{-19} คูลอมบ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

T_0 คือ ค่าองศาของความไม่เป็นระเบียบ (degree of disorder)

จากสมการที่ (2.78) ถ้ายกกำลังสองทางด้านซ้ายและขวามือของเครื่องหมายเท่ากับจะได้ว่า

$$\sigma_0^2 = 9e^4 v^2 \left[\frac{N(E_F)}{8\pi\alpha k} \right] \quad (2.83)$$

เอาสมการที่ (2.83) คูณกับสมการที่ (2.82) จะได้

$$\sigma_0^2 T_0 = \frac{81\alpha^2 e^4 v^2}{4\pi k^2} \quad (2.84)$$

$$\alpha^2 = \left[\frac{4\pi k^2}{81e^4 v^2} \right] \sigma_0^2 T_0 \quad (2.85)$$

$$\alpha = \left[\frac{2\sqrt{\pi} k}{9e^2 v} \right] \sigma_0 T_0^{\frac{1}{2}} \quad (2.86)$$

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

$$\alpha = 21.23 \sigma_0 T_0^{\frac{1}{2}} \quad (2.87)$$

ถ้าแทนสมการที่ (2.87) ลงในสมการที่ (2.81) จะได้ว่า

$$N(E_F) = \left[\frac{16\pi^2 k^2}{81e^6 v^3} \right] \sigma_0^3 T_0^{\frac{1}{2}} \quad (2.88)$$

$$= (2.0 \times 10^9) \sigma_0^3 T_0^{\frac{1}{2}} \quad (2.89)$$

ค่าระยะทางเฉลี่ยของการกระโดด (average hopping distance: R) มีหน่วยเป็นเซนติเมตรและค่าพลังงานเฉลี่ยของการกระโดด (average hopping energy: W) มีหน่วยเป็นอิเล็กตรอนโวลต์ จะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$R = \left[\frac{9}{8\pi\alpha k T N(E_F)} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (2.90)$$

$$W = \frac{3}{4\pi k^3 N(E_F)} \quad (2.91)$$

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

$$N(E_F) = \left(\frac{2\varepsilon_S}{e^2} \right) N_a^{\frac{2}{3}} \left(1 - \frac{N_d}{N_a} \right)^{\frac{4}{3}} \quad (2.92)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

2.8 การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ (ฐิตินัย, 2556)

เทคนิคการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศนั้น เป็นวิธีการเตรียมฟิล์มบางวิธีหนึ่งของการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการระเหยสารซึ่งต้องเตรียมในสุญญากาศที่ระดับความดันประมาณ $10^{-5} - 10^{-7}$ ทอร์ วัตถุประสงค์ของการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีนี้คือการควบคุมการเคลื่อนย้ายอะตอมจากแหล่งกำเนิดความร้อนไปยังฐานรองรับที่ห่างออกไปแล้วเกิดเป็นฟิล์มบาง

2.8.1 อัตราการระเหยสาร

จากการทดลองของเฮิร์ตซ์ (Hertz) และนูดเซน (Knudsen) พบว่าอัตราการไหลของอะตอมหรือโมเลกุลในสุญญากาศจากแหล่งกำเนิดความร้อน (heat source) คือ

$$\Phi_e = \frac{3.513 \cdot 10^{22}}{(MT)^{1/2}} P_e \quad \text{โมเลกุลต่อตารางเซนติเมตร - วินาที} \quad (2.93)$$

เมื่อ Φ_e	คือ	ฟลักซ์ของจำนวนอะตอมหรือโมเลกุลของสารที่ระเหยต่อหน่วยพื้นที่ต่อเวลา
P_e	คือ	ความดันสมดุล (equilibrium pressure) มีหน่วยเป็นทอร์
M	คือ	มวลโมเลกุล
T	คือ	อุณหภูมิในหน่วยเคลวิน

ค่าอัตราการระเหยมวลสาร (mass evaporation rate: Γ_e) สามารถหาได้จาก

$$\Gamma_e = 5.84 \cdot 10^{-2} (M/T)^{1/2} P_e \quad \text{กรัมต่อตารางเซนติเมตร - วินาที} \quad (2.94)$$

ที่ความดัน 10^{-2} ทอร์ ค่าของ Γ_e ในธาตุจำนวนมากจะมีค่าประมาณ 10^{-4} กรัมต่อตารางเซนติเมตร - วินาที ดังนั้นสิ่งที่มีอิทธิพลต่ออัตราการระเหยสารคือ อุณหภูมิ เพราะมีผลกระทบอย่างมากต่อความดันสมดุล

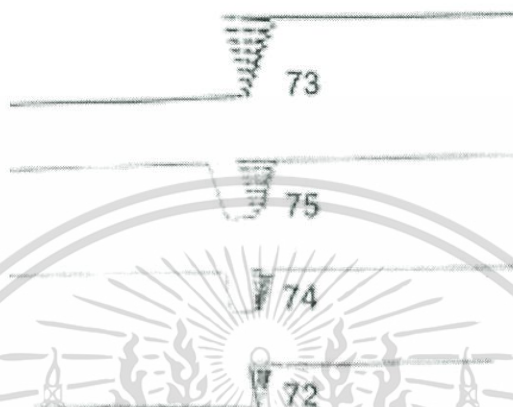
2.8.2 แหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้ในการระเหยสารด้วยไฟฟ้า

ในการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการระเหยด้วยความร้อนจะต้องให้ความร้อนแก่สารกึ่งตัวนำที่ต้องการนำมาเคลือบบนผิวหน้าแผ่นฐานรองโดยทั่วไปแล้วจะใช้ตัวต้านทานไฟฟ้าหรือขดลวดเหนี่ยวนำไฟฟ้า เป็นแหล่งกำเนิดความร้อนโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่ตัวต้านทานหรือขดลวดเหนี่ยวนำได้ แหล่งกำเนิดความร้อนมีหลายชนิด แบ่งออกได้ดังนี้

เอกสารเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.2.1 แหล่งกำเนิดความร้อนที่ทำด้วยสารทังสเตน

แหล่งกำเนิดความร้อนนี้จะอยู่ในรูปพันรอบเดียวหรือหลายรอบเป็นเกลียวทรงกระบอกหรือรูปโคน โดยขดลวดทรงกระบอกจะใช้สำหรับโลหะที่หลอมละลายได้เร็ว ส่วนขดลวดรูปโคนจะใช้ได้กับโลหะที่หลอมละลายช้า ขดลวดทังสเตนสามารถทำงานได้จนกระทั่งอุณหภูมิ 2,200 เคลวิน เกินกว่านี้ประสิทธิภาพจะลดลง

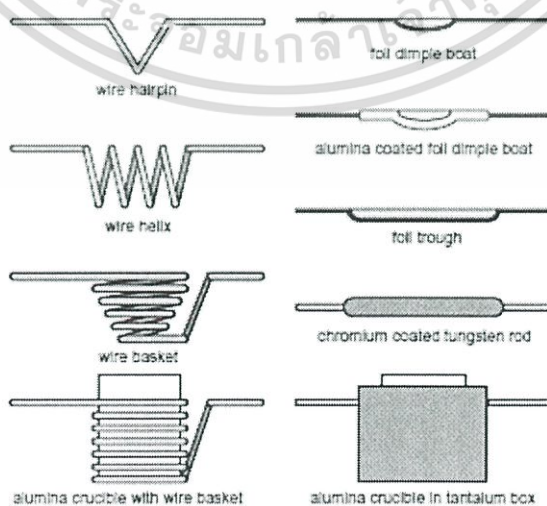


รูปที่ 2.33 แสดงแหล่งกำเนิดความร้อนที่ทำด้วยสารทังสเตนที่มีขนาดต่างๆ

2.8.2.2 แหล่งกำเนิดความร้อนชนิดแผ่นโลหะคงรูป

แหล่งกำเนิดความร้อนชนิดแผ่นโลหะคงรูป เช่น ทังสเตน แทนทาลัม และโมลิบดีนัมจะเหมือนกับอุปกรณ์ที่เป็นขดลวดคือ มีความต้านทานในตัวเองและให้ความร้อนที่ค่าแรงดันต่ำแต่กระแสสูง แหล่งกำเนิดเหล่านี้จะถูกสร้างขึ้นในรูปแบบต่างๆ

Resistance Heated Evaporation Sources



รูปที่ 2.34 แสดงแหล่งกำเนิดความร้อนที่มีรูปทรงเรขาคณิตแบบต่างๆที่ใช้ระเหยสารเคมีด้วยไฟฟ้า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (นพณัฐ, 2556, จิตินัย, 2556)

ได้มีการศึกษาค่าสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ ที่อุณหภูมิในช่วง 275-250 เคลวิน กลไกการนำไฟฟ้าสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองของซีโต ดังสมการ

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

ค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) คือค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่ขอบของเกรนรวมทั้งยังสามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ (N_a) ค่าระดับพลังงานของกัปดักพาหะ (E_t) ค่าความหนาแน่นของกัปดักพาหะ (N_t) และค่าความยาวเดอบาย (L_D) เป็นต้น ซึ่งค่าพารามิเตอร์เหล่านี้จะแสดงดังตารางที่ 2.4

สำหรับอุณหภูมิในช่วง 165-145 เคลวิน กลไกการนำไฟฟ้าสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองการกระโดดระหว่างสถานะพลังงานท้องถิ่นในระยะไม่คงที่ (VRH) ดังสมการ

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

โดยที่ T_0 คือ องศาของความไม่เป็นระเบียบ (degree of disorder) ส่วน σ_0 คือ แฟกเตอร์หน้าพจน์เอ็กซ์โพเนนเชียล (pre-exponential factor)

นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ค่าความหนาแน่นของสถานะถูกจำกัดเฉพาะที่ที่ระดับ $[N(E_F)]$ ค่าระยะทางเฉลี่ยของการกระโดด (R) และค่าพลังงานเฉลี่ยของการกระโดด (average hopping energy) เป็นต้น ซึ่งค่าพารามิเตอร์เหล่านี้จะแสดงดังตารางที่ 2.5 ส่วนรูปที่ 2.35 แสดงแผนภาพแถบพลังงานของพอลิเมอร์ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่มีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นแบบเอ็นซึ่งแสดงถึงการเกิดกำแพงศักย์ที่บริเวณขอบของเกรนเนื่องจากมีกัปดักพาหะปรากฏอยู่ที่ขอบรอยต่อของเกรน แผนภาพแถบพลังงานนี้เป็นแบบจำลองซีโต ส่วนรูปที่ 2.36 แสดงระดับพลังงานของกัปดักพาหะชนิดเดี่ยวที่อยู่ในช่องว่างแถบพลังงาน เพื่อใช้อธิบายกลไกการนำไฟฟ้าด้วยแบบจำลองการกระโดดระหว่างสถานะพลังงานท้องถิ่นในระยะไม่คงที่ (VRH)

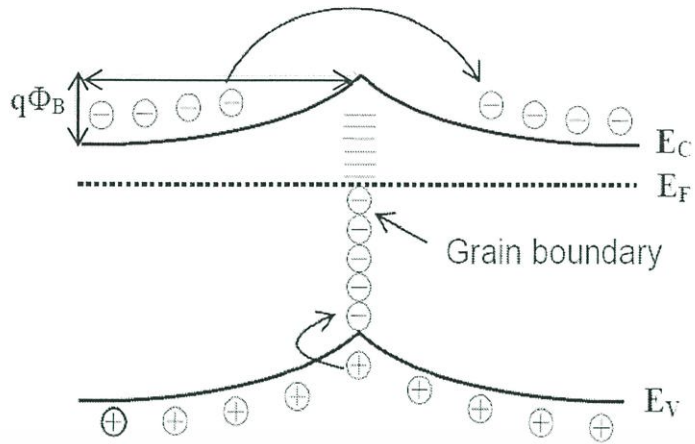
ตารางที่ 2.4 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่คำนวณได้จากแบบจำลองของซีโตนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

Composition (x)	Temperature (K)	ϵ_s (F/cm^2) (10^{-13})	Grain Size (L) (nm)	E_b (eV)	N_a (cm^{-3}) (10^{17})	E_t (eV)	N_t (cm^{-3}) (10^{11})	L_D (10^{-17})
0.0	-	-	-	-	-	-	-	-
0.2	-	-	-	-	-	-	-	-
0.4	275	8.30	30	0.056	2.48	0.67	7.6	7.04
0.6	275	8.30	31	0.054	2.39	0.67	7.2	7.17
0.8	275	8.30	32	0.054	3.59	0.64	11.8	5.85
1.0	-	-	-	-	-	-	-	-

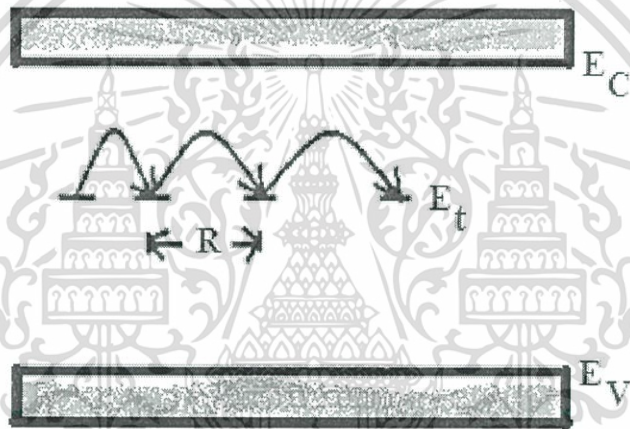
ตารางที่ 2.5 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่คำนวณได้จากแบบการกระโดดในระยะไม่คงที่ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 5 นาที

Composition (x)	Temperature (K)	σ (300 K) ($S \cdot cm^{-1}$) (10^{-5})	σ_0 ($S \cdot cm^{-1}$)	T_0 (K) (10^5)	$N(E_F)$ ($cm^{-3}(eV)^{-1}$) (10^{19})	R (cm) (10^{-7})	W (eV) (10^{-2})	αR
0.0	-	-	-	-	-	-	-	-
0.2	165	1.81	212	2.93	1.03	6.66	0.078	8.26
0.4	165	9.87	256	2.83	1.79	5.86	0.068	4.20
0.6	165	29.63	296	38.65	10.20	3.76	0.044	4.60
0.8	-	-	-	-	-	-	-	-
1.0	-	-	-	-	-	-	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.35 แสดงแผนภาพลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของผลึกพหุพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่มีชนิดในการนำไฟฟ้าเป็นแบบเอ็น



รูปที่ 2.36 แสดงระดับพลังงานของกับดักพาหะชนิดเดียวที่อยู่ในช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่มีชนิดในการนำไฟฟ้าเป็นแบบเอ็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์งานวิจัย (ฐิตินัย,2557;ฐิตินัย,2556;ฐิตินัย,2547;งามนิตย์,2543)

3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เพื่อใช้เคลือบฟิล์มบาง CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

1. แผ่นกระจกสไลด์
2. ที่ตัดกระจก
3. อ่างอัลตราโซนิก
4. เครื่องเป่าลมร้อน
5. เตอบ
6. ปีกเกอร์ขนาด 200 มิลลิลิตร
7. สารเคมี (น้ำยาล้างจาน น้ำปลอดประจุ อะซีโตน และเอทานอล)
8. นาฬิกาจับเวลา

3.1.2 ระบบการเคลือบฟิล์มบางโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางโดยการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ สิ่งที่สำคัญที่สุดก็คือระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ โดยองค์ประกอบของระบบการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศประกอบด้วย

1. ภาชนะสุญญากาศทำหน้าที่เป็นห้องสุญญากาศให้แก่ระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ
2. เบ้าหลอมสาร ทำหน้าที่รองรับและให้ความร้อนแก่อะตอมของสารเคมีที่ใช้ในการระเหย
3. แผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ทำหน้าที่รองรับไอระเหยของสารเคมีที่ระเหยขึ้นมาเกาะติดเป็นฟิล์มบาง
4. ชัตเตอร์ ทำหน้าที่ปิดกั้นไอระเหยของสารเคมี
5. หม้อแปลงโวลต์ต่ำกระแสสูง ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายไฟให้แก่เบ้าหลอม เพื่อใช้ในการระเหยซึ่งเป็นแบบที่ให้เอาท์พุทเป็นแรงดันต่ำแต่ให้กระแสสูง
6. แวร์แอก ทำหน้าที่ควบคุมกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงโวลต์ต่ำกระแสสูง
7. เกจวัดความดัน ทำหน้าที่วัดความดันในระบบสุญญากาศ
8. ปัมมกลโรตารี ทำหน้าที่ลดความดันในระบบขั้นต้นสามารถลดความดันได้ต่ำสุดประมาณ 10^{-2} ถึง 10^{-5} มิลลิบาร์
9. ปัมมดิฟฟิวชัน ทำหน้าที่ลดความดันในภาชนะ โดยทำงานร่วมกับปัมมกลโรตารีสามารถลดความดันได้ต่ำสุดประมาณ 10^{-5} มิลลิบาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. เครื่องทำความเย็น ทำหน้าที่ให้ความเย็นแก่บีมดิฟฟิวชันเพื่อระบายความร้อนให้กับไอน้ำมัน

3.2 ขั้นตอนการเคลือบฟิล์มบาง CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ (ฐิตินัย, 2547 ; ฐิตินัย, 2556)

3.2.1. การเตรียมและทำความสะอาดแผ่นกระจกสไลด์เพื่อใช้เป็นแผ่นฐานรองรับ

1. ทำความสะอาดแผ่นกระจกสไลด์ด้วยน้ำยาล้างจาน
2. ทำความสะอาดแผ่นกระจกสไลด์ด้วยน้ำปอดตประจุเป็นเวลา 10 นาที 3 ครั้ง
3. ทำความสะอาดแผ่นกระจกสไลด์ด้วยอะซิโตนเป็นเวลา 10 นาที
4. ทำความสะอาดแผ่นกระจกสไลด์ด้วยเอทานอลเป็นเวลา 10 นาที
5. ทำความสะอาดแผ่นกระจกสไลด์ด้วยน้ำปอดตประจุอีก 3 ครั้ง ครั้งละ 10 นาที
6. ขั้นตอนในข้อ 2 - 5 นำปิกเกอร์ไปใส่ในอ่างอัลตราโซนิก
7. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน
8. บรรจุแผ่นกระจกสไลด์ในถุงเพื่อนำไปใช้สำหรับการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

3.3 การเตรียมสารตั้งต้นที่ใช้สำหรับเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ (ฐิตินัย, 2547 ; ฐิตินัย, 2556)

ในการเตรียมสารตั้งต้นที่ใช้สำหรับเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ต้องเตรียมสารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ CdS และ $CdTe$ ที่มีความบริสุทธิ์สูง 99.999 เปอร์เซ็นต์ โดยมีขั้นตอนปฏิบัติดังนี้

1. ทำการบดผงผลึกของสารประกอบ CdS และสารประกอบ $CdTe$ ให้ละเอียด นำไปชั่งน้ำหนักตามอัตราส่วนที่คำนวณไว้ดังตารางที่ 3.1
2. นำผงผลึกของสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางที่บดแล้วไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
3. เมื่ออุณหภูมิของสารตั้งต้นเย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้องแล้วจึงนำเข้าไปใส่ไว้ในภาชนะระเหยสารเคมี (boat) ที่อยู่ในระบบสุญญากาศต่อไป

3.3.1 การเตรียมผงผลึกของสารตั้งต้นที่เป็นสารประกอบ CdS และ CdTe เพื่อใช้ในการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ สารตั้งต้นสามารถเตรียมได้จากผงผลึกของสารประกอบ CdTe และ CdS ดังสมการ



มวลอะตอมของธาตุ Cd, S และ Te มีค่าเท่ากับ 112.41, 32.066 และ 127.60 กรัมต่อโมลตามลำดับ ดังนั้นจะได้ว่า

$$\text{มวลโมเลกุลของสารประกอบ CdTe} = 112.41 + 127.60 = 240.010 \text{ กรัมต่อโมล}$$

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

กรณี $x = 0.2$



มวลโมเลกุลของสารตั้งต้นจะได้เท่ากับ

$$\begin{aligned} CdS_{0.2}Te_{0.8} &= 112.41 + (0.2 \times 32.066) + (0.8 \times 127.60) \\ &= 220.9032 \text{ กรัมต่อโมล} \end{aligned}$$

ถ้าต้องการใช้สารประกอบ $CdS_{0.2}Te_{0.8}$ จำนวน 1 กรัม จะต้องใช้สารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ

$$\text{ของสารประกอบ CdTe} = \frac{0.8 \times 240.01}{220.9032} = 0.8692 \text{ กรัม}$$

$$\text{ของสารประกอบ CdS} = \frac{0.2 \times 144.476}{220.9032} = 0.1308 \text{ กรัม}$$

กรณี $x = 0.4$



มวลโมเลกุลของสารตั้งต้นจะได้เท่ากับ

$$\begin{aligned} CdS_{0.4}Te_{0.6} &= 112.41 + (0.4 \times 32.066) + (0.6 \times 127.60) \\ &= 201.9764 \text{ กรัมต่อโมล} \end{aligned}$$

ถ้าต้องการใช้สารประกอบ $CdS_{0.4}Te_{0.6}$ จำนวน 1 กรัม จะต้องใช้สารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ

$$\text{ของสารประกอบ CdTe} = \frac{0.6 \times 240.01}{221.9764} = 0.7136 \text{ กรัม}$$

$$\text{ของสารประกอบ CdS} = \frac{0.4 \times 144.476}{221.9764} = 0.2864 \text{ กรัม}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณี $x = 0.6$



มวลโมเลกุลของสารตั้งต้นจะได้เท่ากับ

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

ถ้าต้องการใช้สารประกอบ $\text{CdS}_{0.6}\text{Te}_{0.4}$ จำนวน 1 กรัม จะต้องใช้สารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ

$$\text{ของสารประกอบ CdTe} = \frac{0.8 \times 240.01}{182.6891} = 0.5255 \text{ กรัม}$$

$$\text{ของสารประกอบ CdS} = \frac{0.2 \times 144.476}{182.6891} = 0.4745 \text{ กรัม}$$

กรณี $x = 0.8$



มวลโมเลกุลของสารตั้งต้นจะได้เท่ากับ

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

ถ้าต้องการใช้สารประกอบ $\text{CdS}_{0.8}\text{Te}_{0.2}$ จำนวน 1 กรัม จะต้องใช้สารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ

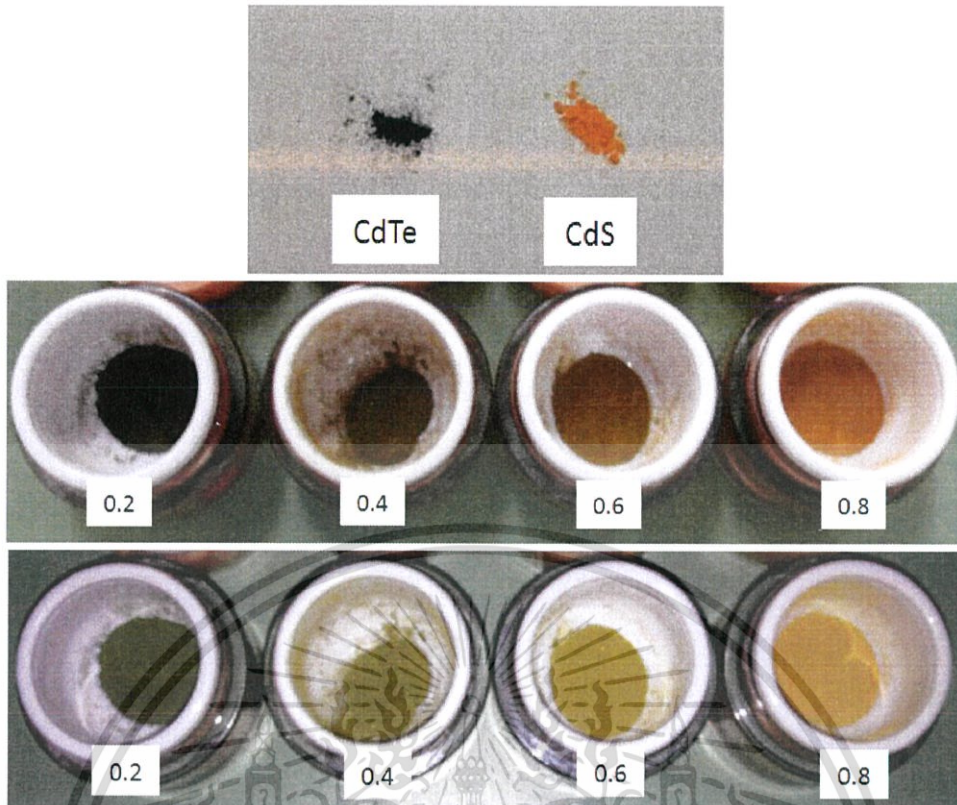
$$\text{ของสารประกอบ CdTe} = \frac{0.8 \times 240.01}{163.5828} = 0.2931 \text{ กรัม}$$

$$\text{ของสารประกอบ CdS} = \frac{0.2 \times 144.476}{163.5828} = 0.7066 \text{ กรัม}$$

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

เศษส่วนโดยโมล อะตอมของ (x)	ปริมาณสารตั้งต้น (ทั้งหมด 1 กรัม)	
	CdS (กรัม)	CdTe (กรัม)
0.0	-	1.0000
0.2	0.1308	0.8692
0.4	0.2864	0.7136
0.6	0.4745	0.5255
0.8	0.7066	0.2931
1.0	1.0000	-

หมายเหตุ : การนำสารตั้งต้นเข้าไปในระบบสุญญากาศไม่ควรมีความชื้น
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 แสดงผลผลิตของสารตั้งต้นที่เป็นสารประกอบ CdS และ CdTe ที่ผสมเพื่อใช้ในการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

3.4 การเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ (ฐิตินัย, 2547 ; ฐิตินัย, 2545; ฐิตินัย, 2555; ฐิตินัย, 2556; ฐิตินัย, 2557)

ระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศแสดงในรูปที่ 3.1 โดยมีขั้นตอนในการเคลือบฟิล์มบาง ดังนี้

1. ทำความสะอาดระบบสุญญากาศโดยการกำจัดฝุ่นและสิ่งสกปรกต่างๆและคราบไขมันด้วยอะซิโตน
2. ทำการติดตั้งระบบต่างๆภายในระบบสุญญากาศให้เสร็จสมบูรณ์
3. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมเอาไว้แล้ว วางลงบนหน้าฉากซึ่งทำมาจากแผ่นอลูมิเนียมเจาะเป็นช่องตามแบบและขนาดที่ต้องการ
4. นำผลผลิตของสารตั้งต้นใส่ลงในภาชนะระเหยสารซึ่งเป็นโลหะทั้งสแตนเลสหลังจากนั้นปิดฝาห้องสุญญากาศให้เรียบร้อย
5. เปิด TC POWER ON ที่หน้าปัดควบคุม
6. เปิด ROTARY ON และเปิด ROTARY PUMP
7. โยกคันโยกไปตำแหน่ง BACKING รอประมาณ 5 นาที จึงโยกมาที่ตำแหน่ง ROUGHING

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. รอความดันลดลงจนถึงประมาณ 2.8×10^{-2} มิลลิบาร์ จึงเปิด WATER PUMP ON
9. เปิด DIFFSTAK รอน้ำมันเดือดประมาณ 15 นาที
10. โยกคันโยกมาที่ตำแหน่ง BACKING
11. โยกคันโยก BUTTERFLY ไปด้านหลัง
12. รอความดันลดลงจนถึงประมาณ 2.8×10^{-5} มิลลิบาร์
13. จ่ายแรงดันให้กับระบบ 100 + 150 โวลต์ รอจนอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์อยู่ที่ 90 - 95 องศาเซลเซียส
14. เริ่มจ่ายกระแสให้กับสารตั้งต้นประมาณ 95 - 12 แอมแปร์
15. เมื่อทำการระเหยเสร็จจึงค่อยๆ ปรับกระแสลงอย่างช้าๆ
16. รออุณหภูมิลดลงจนถึงประมาณ 70 องศาเซลเซียส แล้วจึงปิด DIFFSTAK
17. รอ 15 นาทีแล้วโยก BUTTERFLY เข้าหาตัวโยก BACKING มาตำแหน่งตรงกลาง
18. ปิด ROTARY PUMP และ ROTARY OFF
19. ปิด WATER PUMP ON และปิด COMPRESSOR ON

3.5 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์บางประการของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ (ฐิตินัย, 2547; ฐิตินัย, 2555; ฐิตินัย, 2556; ฐิตินัย, 2557)

3.5.1 การตรวจสอบลักษณะของโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD)

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ จากเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโทรมิเตอร์ของยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ 1.5406 อังสตรอมโดยใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์ และความต่างศักย์ 30 กิโลโวลต์ โดยวัดจากมุม 20 - 60 องศา

3.5.2 การตรวจสอบลักษณะของโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

ในการศึกษาลักษณะของโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) ของยี่ห้อ LEO รุ่น LEO 1455 VP ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส

3.5.3 การศึกษาสมบัติทางแสง

ทำการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางที่เตรียมได้ โดยด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Thermo electron corporation ($He \lambda$ ions) โดยใช้ความยาวคลื่น 190 ถึง 1100 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดค่าความต้านทานแผ่นด้วยวิธีสองขั้วเชิงเส้นและวัดค่าพลังงานกระตุ้นโดยการศึกษาค่าความต้านทานแผ่นที่เป็นฟังก์ชันกับค่าอุณหภูมิ ในช่วงอุณหภูมิ 25-150 องศาเซลเซียส รวมทั้งวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 100-300 เคลวิน เพื่อศึกษากลไกการนำไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองที่ได้ทำการเตรียมและศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส

4.1 ผลการศึกษาฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส

ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส ยึดติดแน่นดีกับแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ในกรณีเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของธาตุ S มีค่าเท่ากับ 0.0 ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe จะมีสีดำ แต่เมื่อเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของธาตุ S มีค่าเพิ่มขึ้นสีก็จะจางลงจนกลายเป็นสีเหลือง เมื่อเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) มีค่าเท่ากับ 1.0

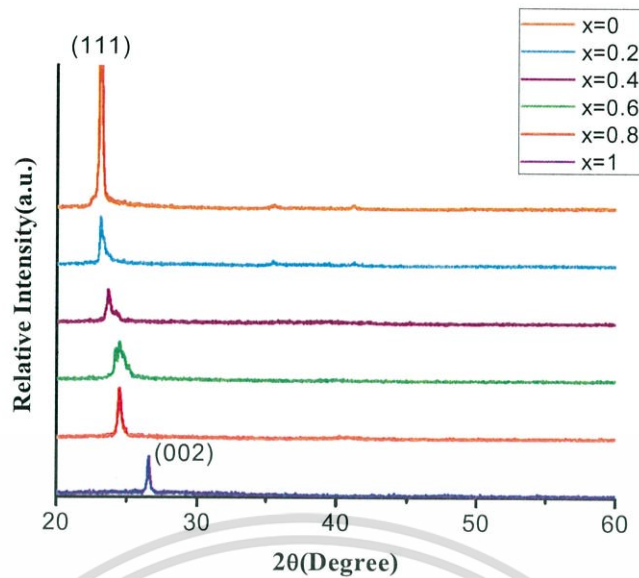


รูปที่ 4.1 แสดงฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส

4.2 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส

เนื่องจากเราต้องการทราบลักษณะโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส และต้องการทราบถึงลักษณะโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำว่ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างไรบ้าง ดังนั้นเราจึงนำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้ไปทำการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เพื่อดูลักษณะของพีคความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ปรากฏขึ้นและนำมาเปรียบเทียบกับพีคความเข้มมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 แสดงพีคความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนัล

ลักษณะของโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล และลักษณะของโครงสร้างผลึกแบบคิวบิกมีความสัมพันธ์กัน ดังนี้

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

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

จากการศึกษาลักษณะของโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนัล พบว่าเมื่อเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ≤ 0.2 ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำจะมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบคิวบิกและเมื่อ ($0.2 \leq x \leq 1.0$) ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำจะมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเวิร์ทไซด์ที่จะแสดงให้เห็นว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่เตรียมส่วนใหญ่มีโครงสร้างแบบเวิร์ทไซด์

จากการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จะพบว่ามีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่แสดงให้เห็นดังรูปข้างต้น ถ้าเป็นโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซด์ จะสอดคล้องกับระนาบ (002) ถ้าเป็นโครงสร้างผลึกแบบคิวบิกจะสอดคล้องกับระนาบ (111)

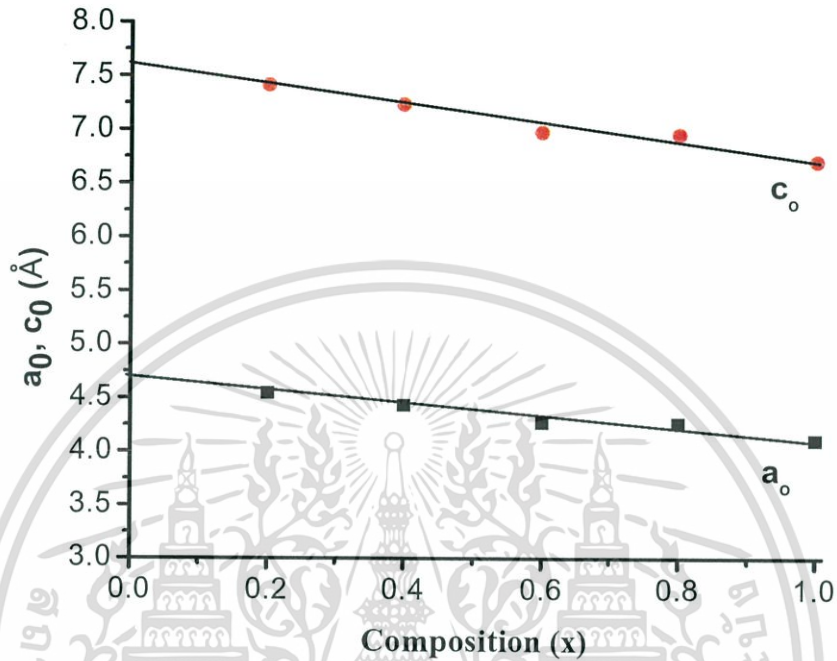
เมื่อพิจารณาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า a_0 , c_0 กับค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของธาตุ S โดยเริ่มจากการพิจารณาว่าเป็นระนาบ (111) ของโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก

$$\text{จาก} \quad 2d \sin \theta = n\lambda \quad \text{เมื่อ } n=1,2,3,\dots \quad (4.3)$$

$$\text{และ} \quad \frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (4.4)$$

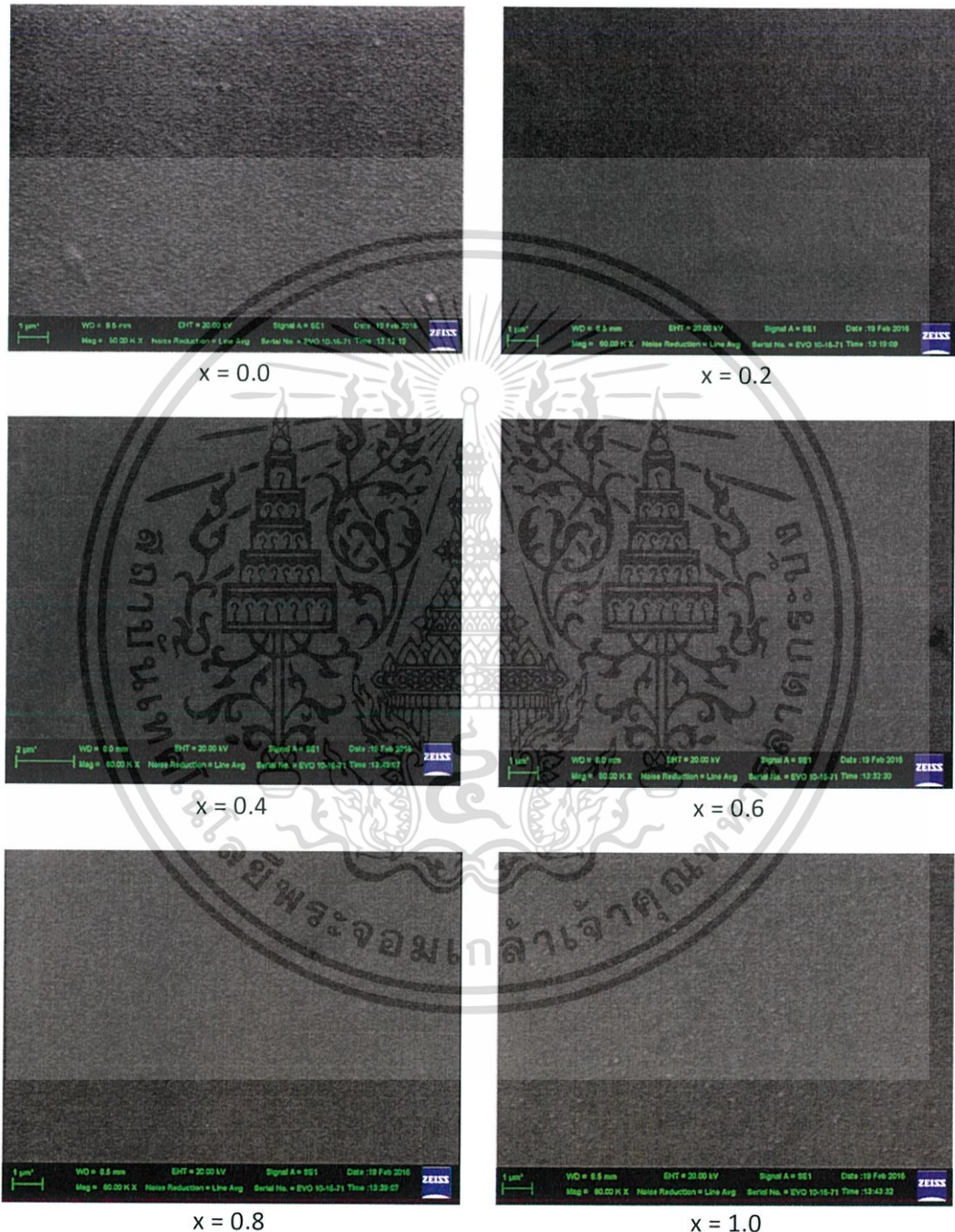
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างผลึกแบบคิวบิกที่สอดคล้องกับระนาบ (111) แสดงว่า $h=1, k=1, l=1$ ค่าคงที่ของโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล (a_0, c_0) สามารถเขียนได้ในรูปของค่าคงที่ของโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก (a) แทนได้



รูปที่ 4.3 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่โครงสร้างผลึก a_0 และ c_0 กับค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของธาตุ S ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนیل

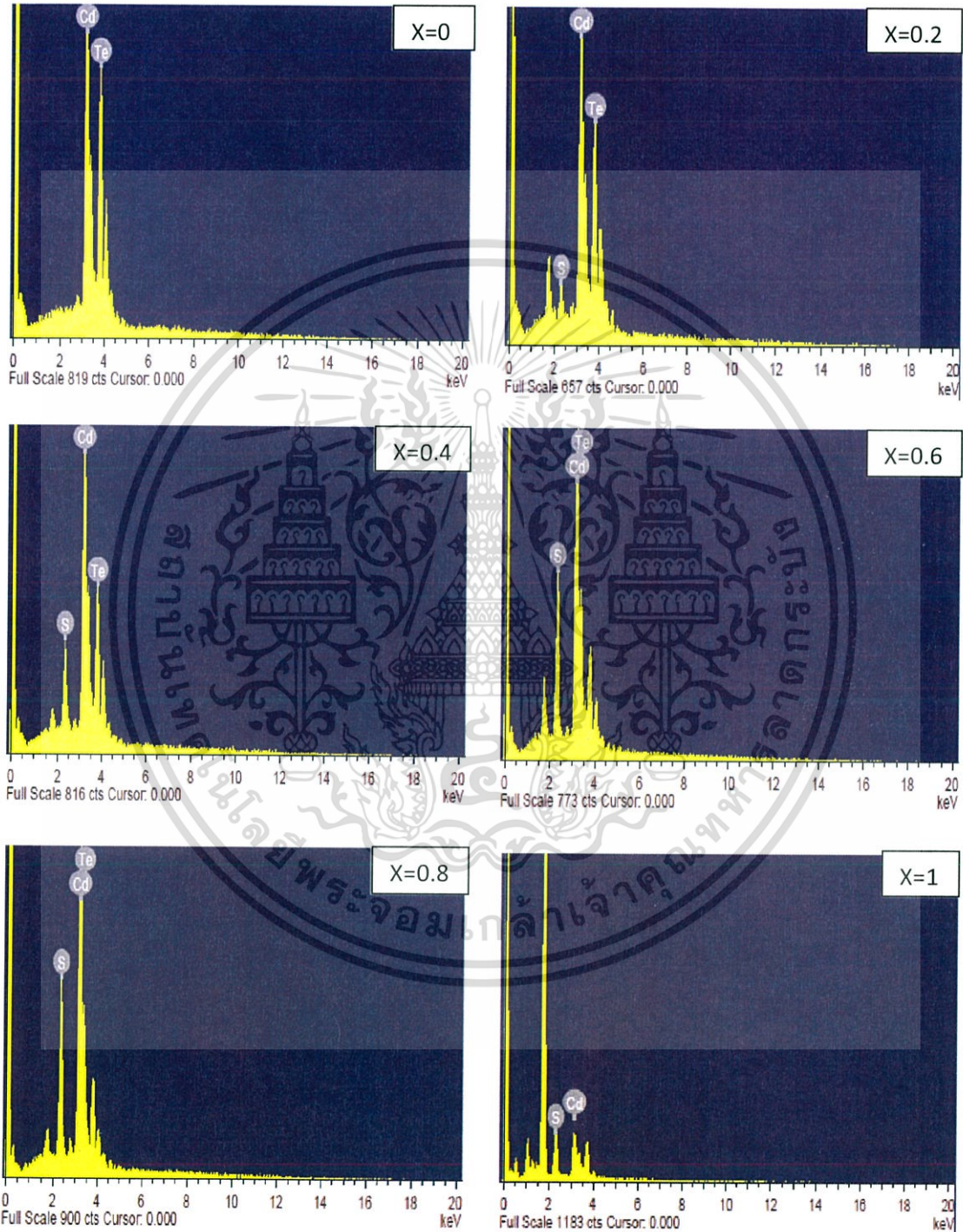
4.3 ผลการวิเคราะห์ลักษณะของโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนیل



รูปที่ 4.4 แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนัล



รูปที่ 4.5 แสดงสเปกตรัมที่ได้จากการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนัล

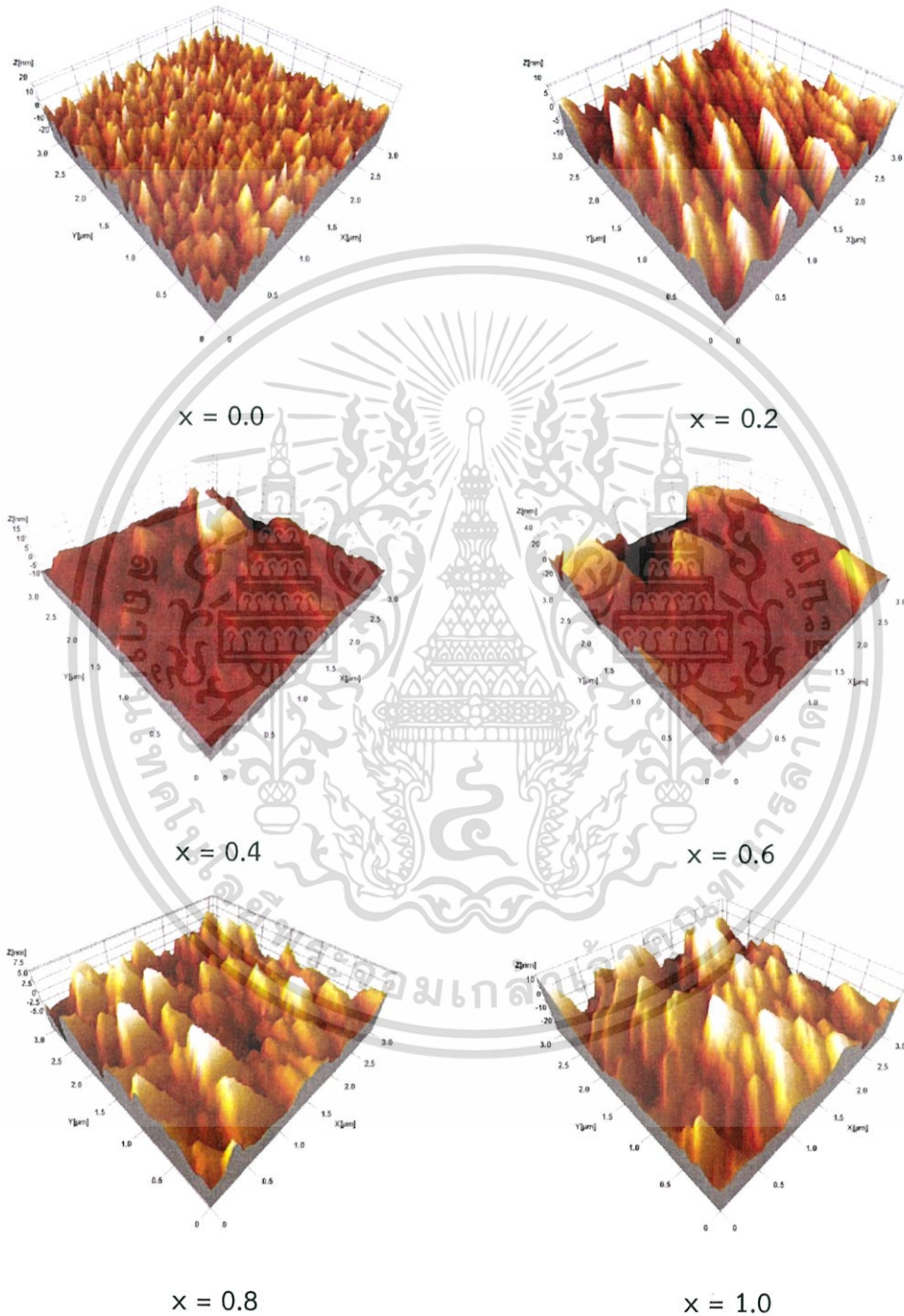
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แสดงองค์ประกอบของธาตุที่ได้จากการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีก

Composition (x) of CdS_xTe_{1-x}	Elements					
	Cd		S		Te	
	wt.%	at.%	wt.%	at.%	wt.%	at.%
0.0	45.16	48.31	-	-	54.84	51.69
0.2	48.82	49.26	1.98	7.02	49.19	43.72
0.4	53.34	48.92	5.56	17.88	41.10	33.20
0.6	59.72	48.23	10.90	30.87	29.38	20.90
0.8	62.34	49.05	12.03	33.18	25.63	17.77
1.0	75.93	47.37	24.93	52.63	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

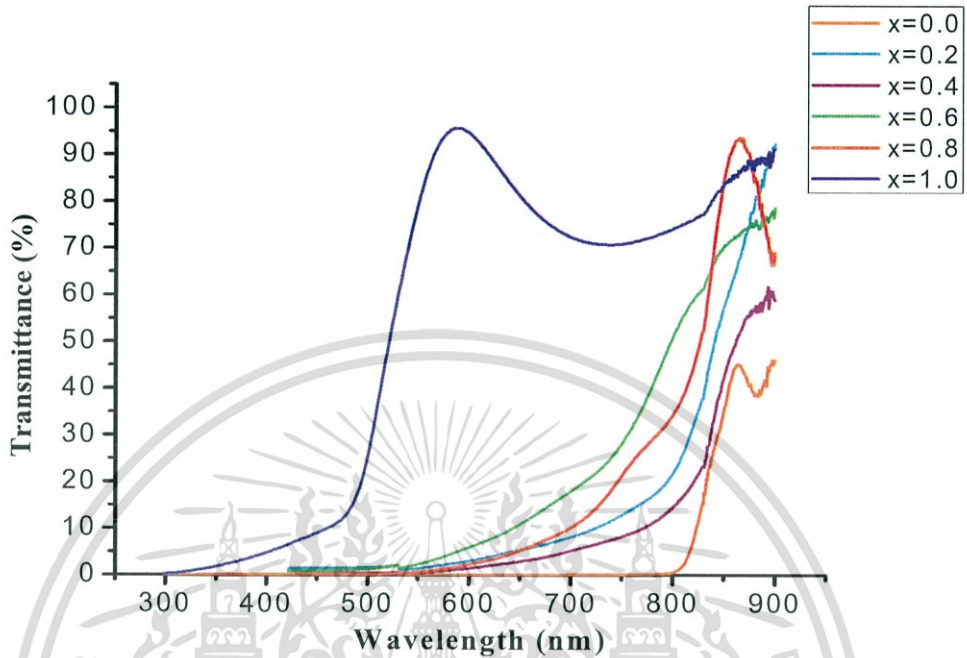
4.5 ผลการวิเคราะห์ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีสล



รูปที่ 4.6 แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีสล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

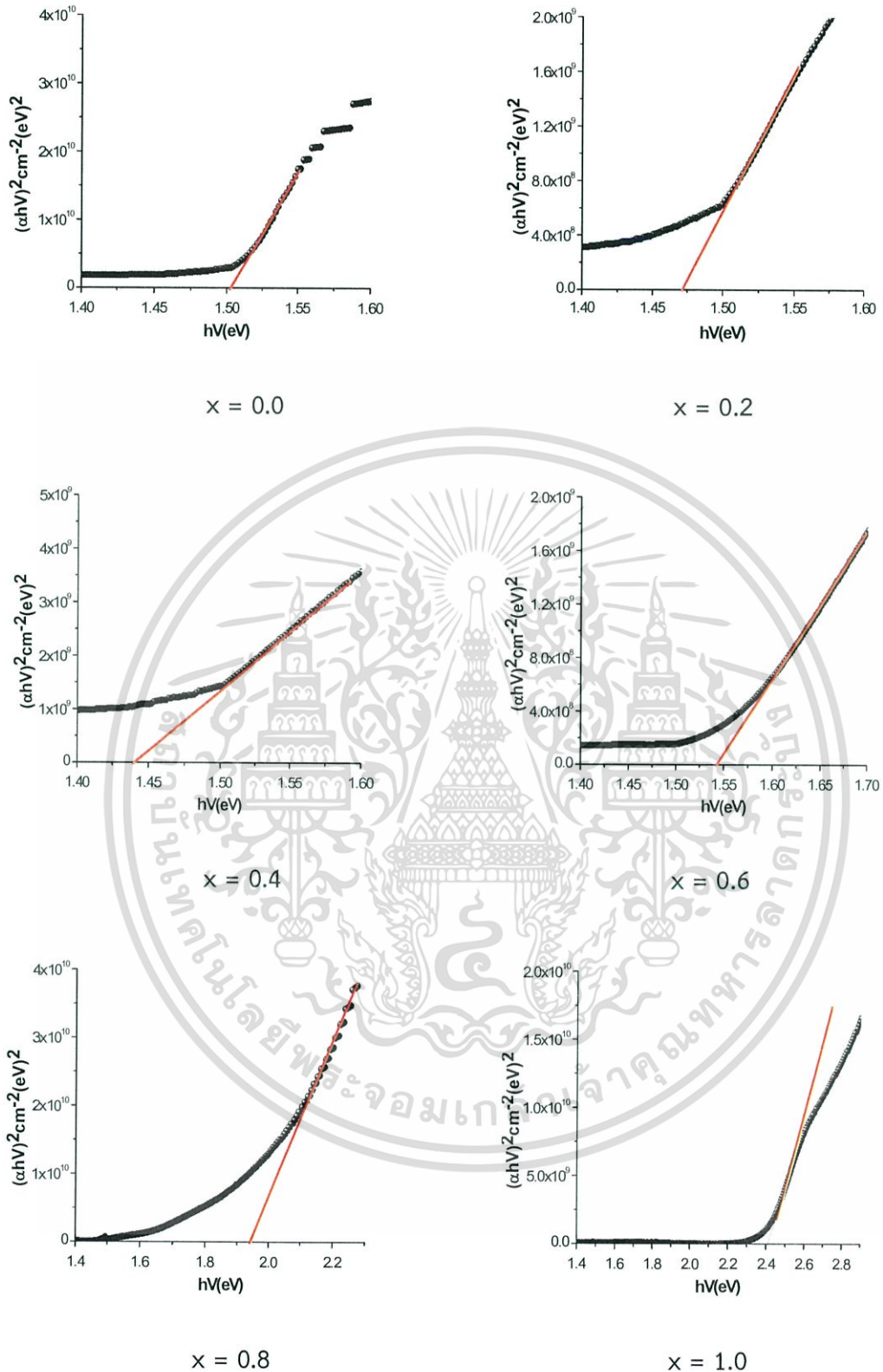
4.6 ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนیل



รูปที่ 4.7 แสดงสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนิล

รูปที่ 4.7 แสดงสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนิล พบว่าขอบของการดูดกลืนแสงเลื่อนไปทางความยาวคลื่นที่สั้นกว่า ซึ่งหมายความว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานมีค่าสูงขึ้น เมื่อความเข้มข้นของอะตอมของธาตุ S ที่อยู่ในผลึกของสารตั้งต้นที่เป็นสารประกอบ CdS ที่มีความบริสุทธิ์สูง 99.999 เปอร์เซ็นต์เพิ่มขึ้น

เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $(\alpha h\nu)^2$ กับ ค่า $h\nu$ เพื่อหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ พบว่าเมื่อเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของธาตุ S มีค่าเพิ่มขึ้น ค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ จะมีค่ามากขึ้น

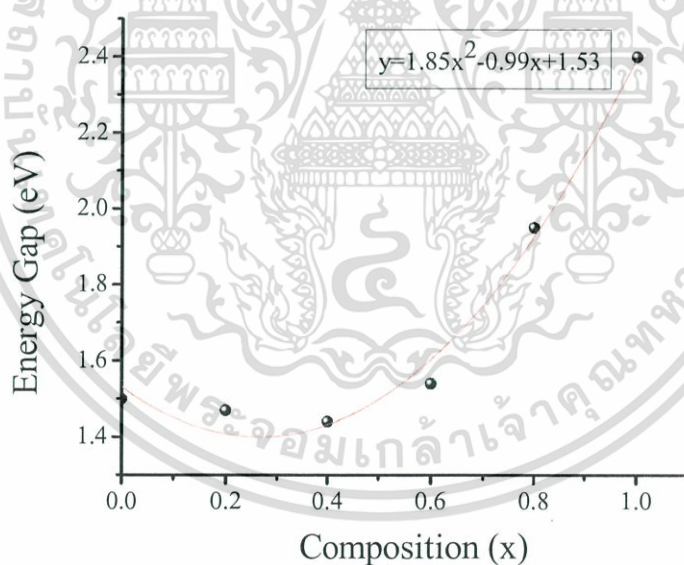


รูปที่ 4.8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(\alpha h\nu)^2$ กับ ค่า $h\nu$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส

Composition (x) of $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$	Energy Gap (eV)
0.0	1.51
0.2	1.47
0.4	1.44
0.6	1.54
0.8	1.94
1.0	2.40



รูปที่ 4.9 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าช่องว่างแถบพลังงาน กับ ค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของธาตุ S ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส

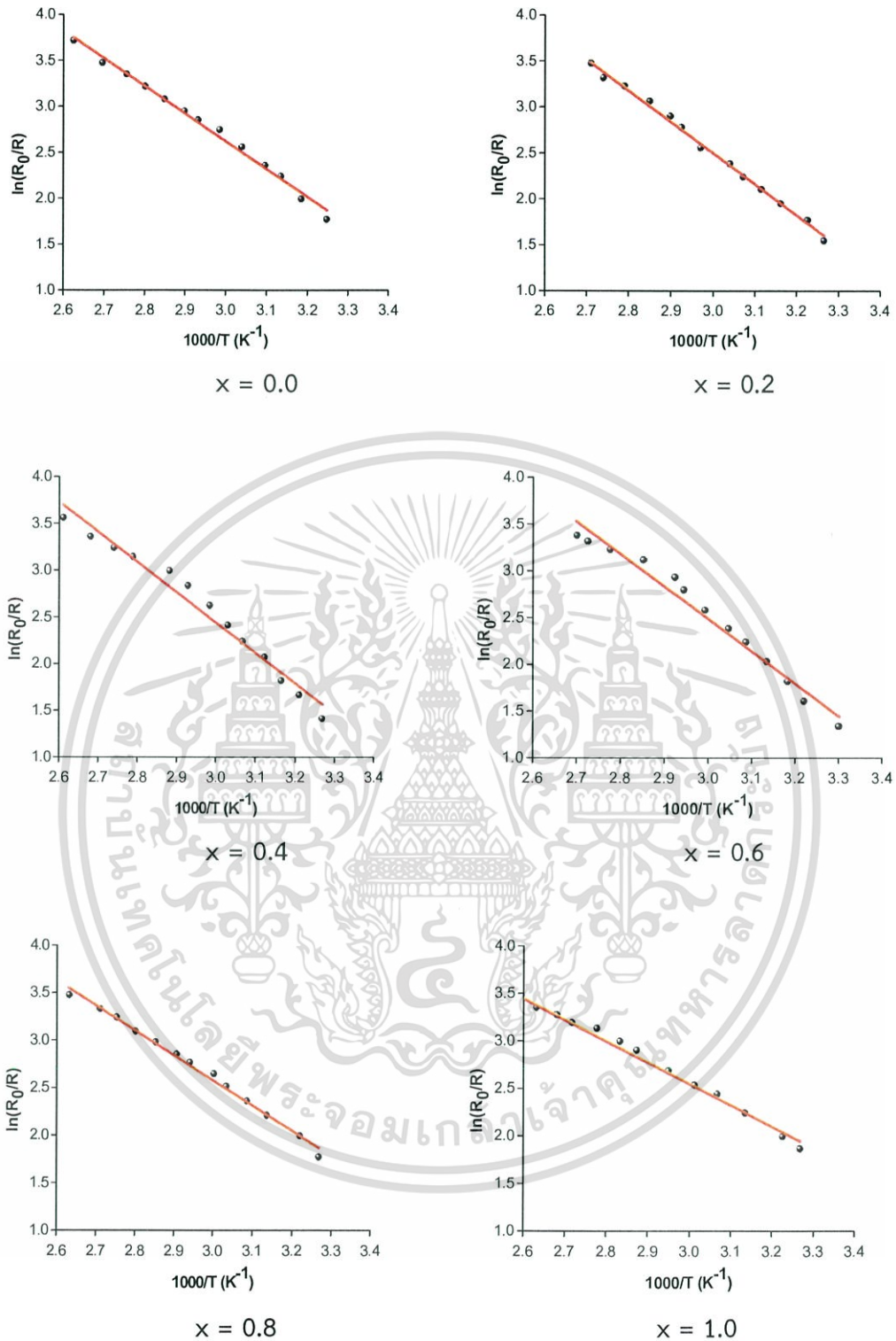
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-150 องศาเซลเซียส เพื่อหาค่าพลังงานกระตุ้น ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีสล

จากรูปที่ 4.10 และ จากตารางที่ 4.2 เป็นผลการวัดความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-150 องศาเซลเซียส เพื่อหาค่าพลังงานกระตุ้น (activation energy : E_a) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีสล พบว่าค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) จะมีเพียงค่าเดียวซึ่งจะเป็นค่ากำแพงศักย์ที่บริเวณขอบรอยต่อของเกรน โดยเกรนมีขนาดเล็กลง ค่าของกำแพงศักย์จะมีค่าเพิ่มขึ้นสอดคล้องกับค่าความต้านทานไฟฟ้า ซึ่งอธิบายได้จากสมการ

$$\sigma = AT^{\frac{1}{2}} \exp \left[\frac{-\phi_b}{kT} \right]$$

จากสมการข้างต้นจะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิมิค่าเพิ่มขึ้น กำแพงศักย์จะมีค่าลดลงส่งผลให้ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ จะนำไฟฟ้าได้ดีขึ้น



รูปที่ 4.10 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1000/T$ กับ ค่า $\ln(R_0/R)$ เมื่อทำการวัดค่าความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-150 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

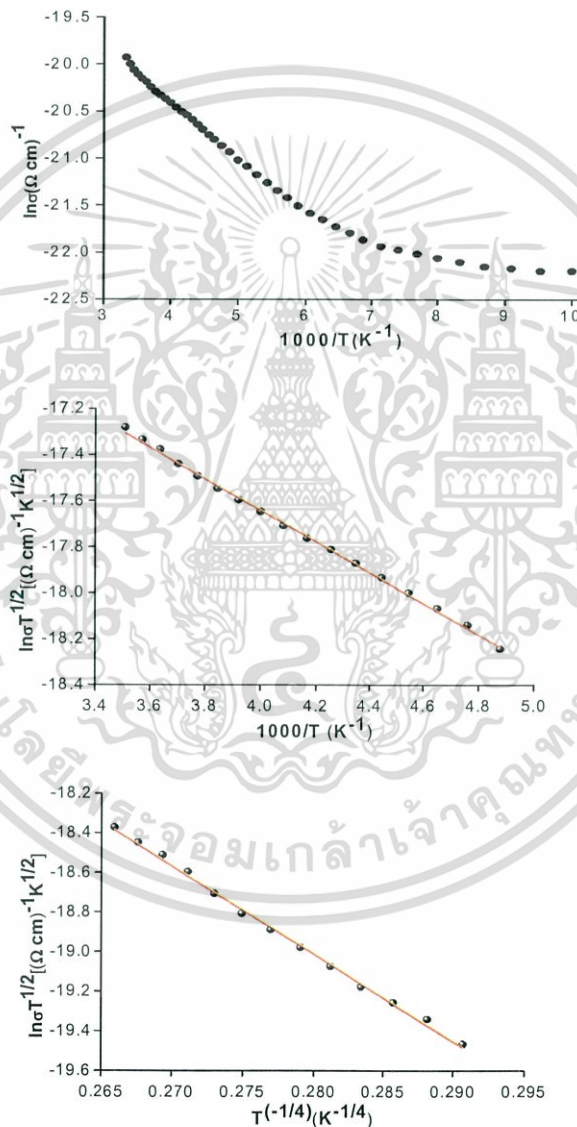
ตารางที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าพลังงานกระตุ้น กับ ค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของ ธาตุ S เมื่อทำการวัดค่าความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-150 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีสล

Composition (x) of CdS_xTe_{1-x}	Activation Energy (meV)
	As-deposited
0.0	260
0.2	293
0.4	280
0.6	301
0.8	228
1.0	194

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

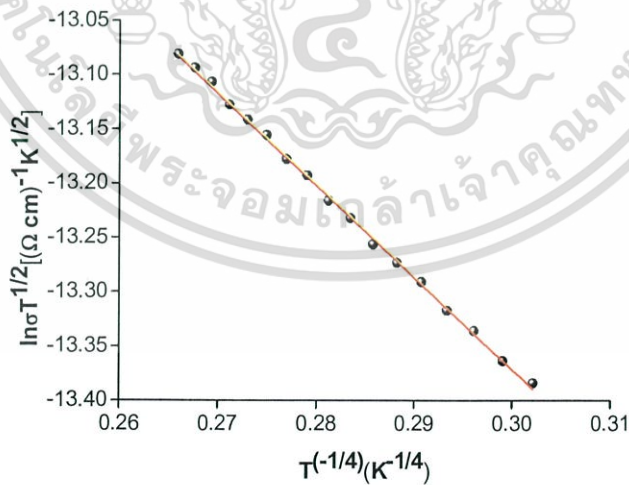
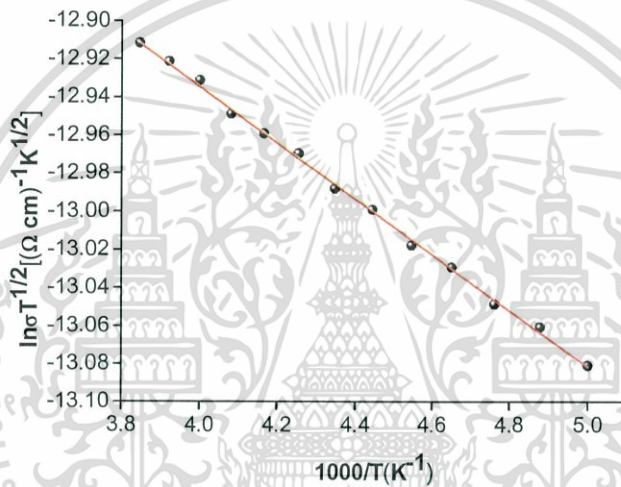
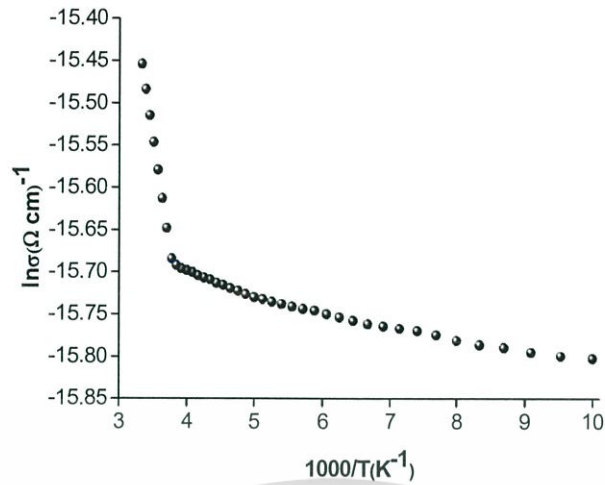
4.8 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 300-100 เคลวิน ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส

4.8.1 ผลการศึกษาค่าความต้านทานไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 300-100 เคลวิน ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส



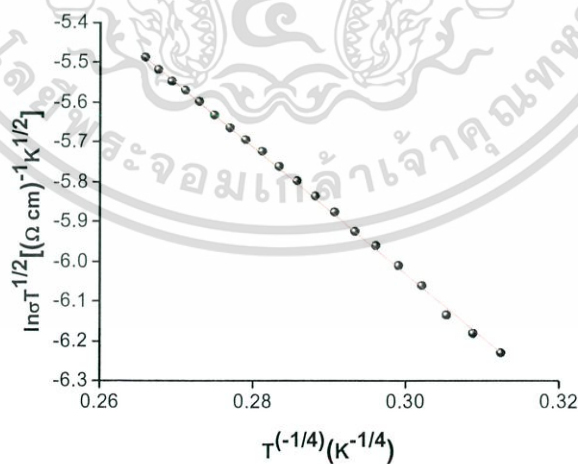
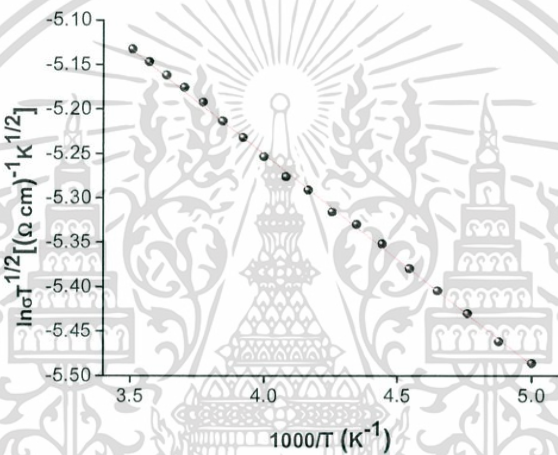
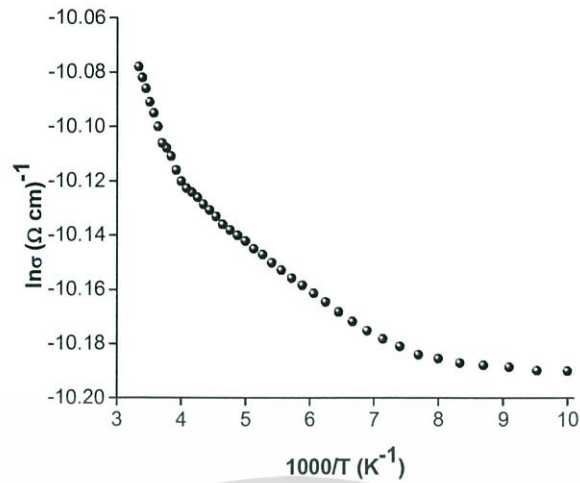
รูปที่ 4.11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln \sigma$ กับ ค่า $1000/T$,ค่า $\ln \sigma T^{1/2}$ กับ ค่า $1000/T$,ค่า $\ln \sigma T^{1/2}$ กับ ค่า $T^{-1/4}$ ตามลำดับ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} เมื่อ ($x=0.0$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือใช้ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



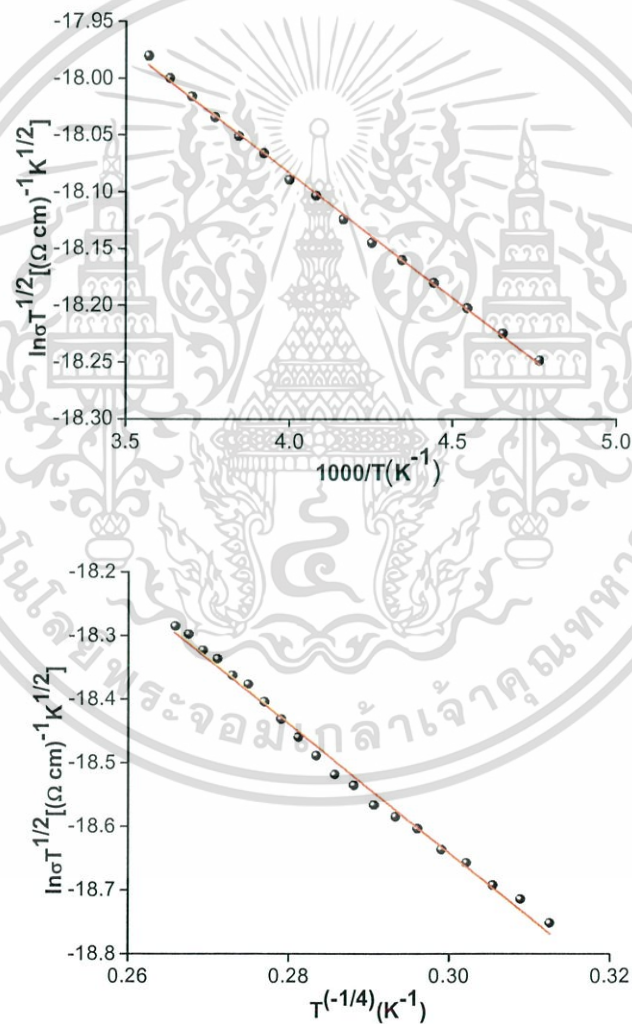
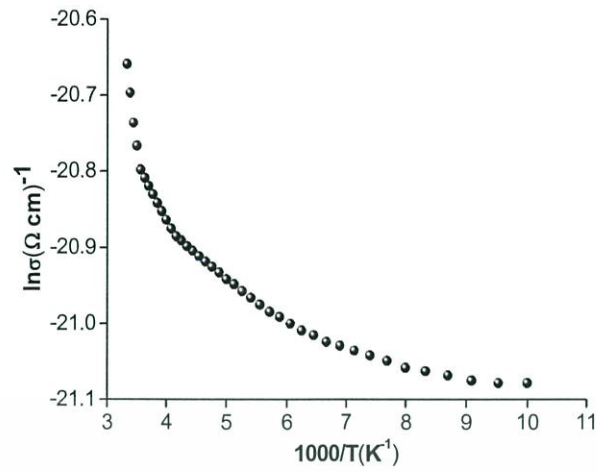
รูปที่ 4.12 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln\sigma$ กับ ค่า $1000/T$,ค่า $\ln\sigma T^{1/2}$ กับ ค่า $1000/T$,ค่า $\ln\sigma T^{1/2}$ กับ ค่า $T^{-1/4}$ ตามลำดับ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ เมื่อ $(x=0.2)$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



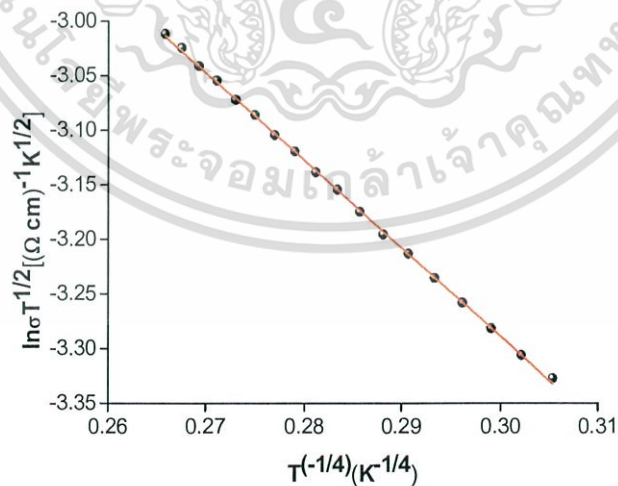
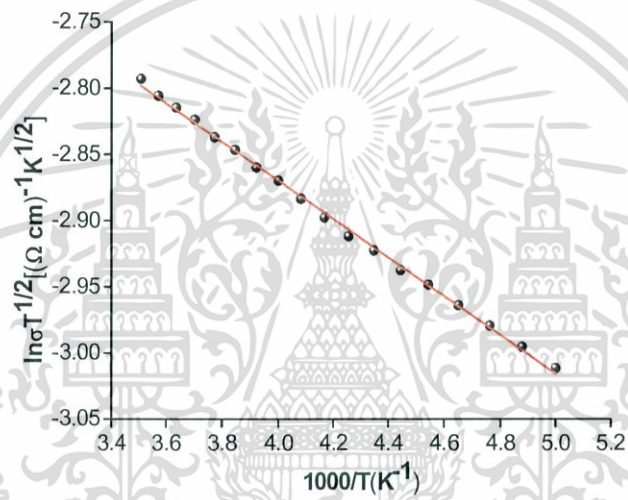
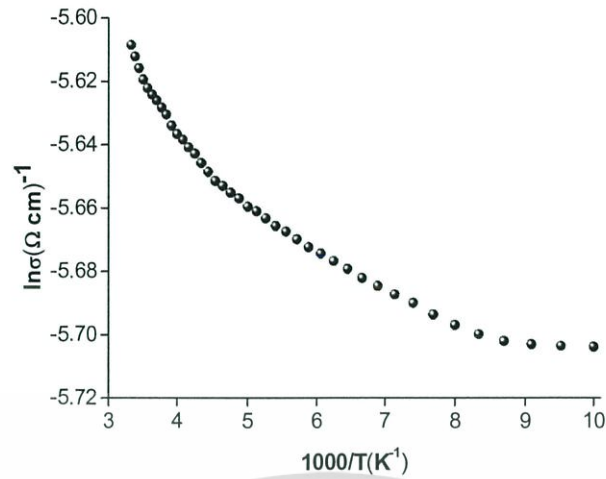
รูปที่ 4.13 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln \sigma$ กับ ค่า $1000/T$,ค่า $\ln \sigma T^{1/2}$ กับ ค่า $1000/T$,ค่า $\ln \sigma T^{1/2}$ กับ ค่า $T^{-1/4}$ ตามลำดับ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ เมื่อ $(x=0.4)$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขอแจ้งว่ากรุณา
ไม่ว่ากรณใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



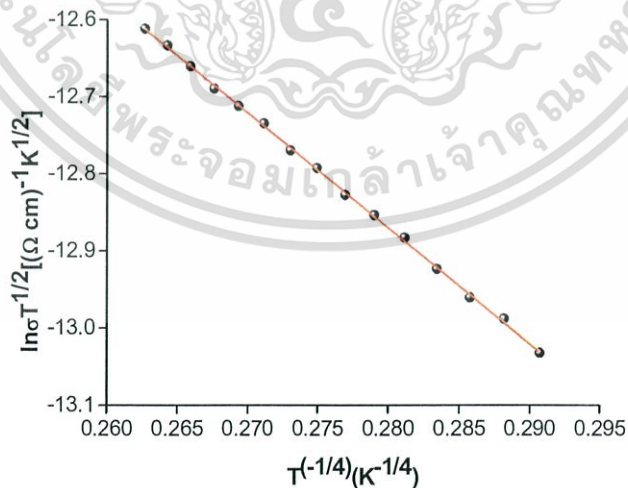
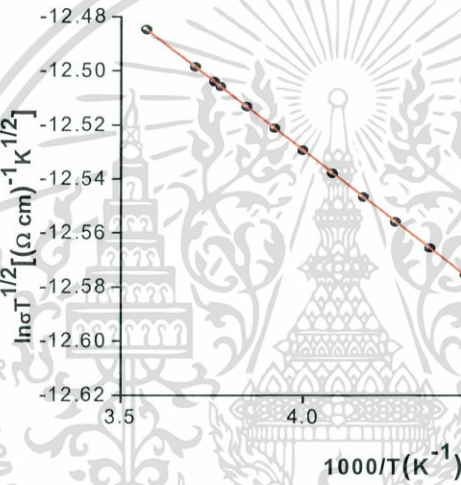
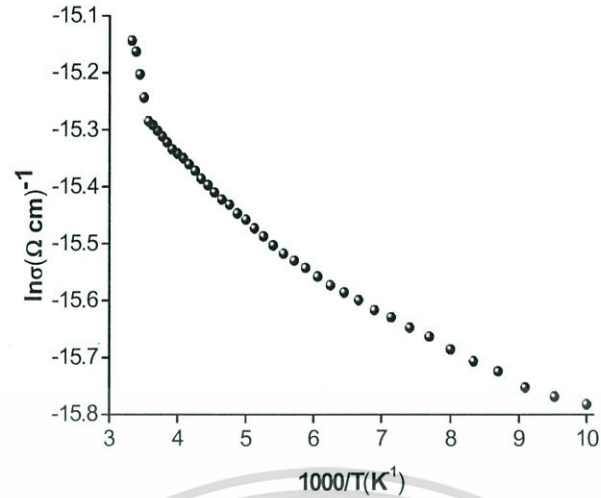
รูปที่ 4.14 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln \sigma$ กับ ค่า $1000/T$, ค่า $\ln \sigma T^{1/2}$ กับ ค่า $1000/T$, ค่า $\ln \sigma T^{1/2}$ กับ ค่า $T^{-1/4}$ ตามลำดับ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ เมื่อ $(x=0.6)$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln \sigma$ กับ ค่า $1000/T$, ค่า $\ln \sigma T^{1/2}$ กับ ค่า $1000/T$, ค่า $\ln \sigma T^{1/2}$ กับ ค่า $T^{-1/4}$ ตามลำดับ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ เมื่อ $(x=0.8)$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิได้อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln\sigma$ กับ ค่า $1000/T$,ค่า $\ln\sigma T^{1/2}$ กับ ค่า $1000/T$,ค่า $\ln\sigma T^{1/2}$ กับ ค่า $T^{-1/4}$ ตามลำดับ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ เมื่อ $(x=1.0)$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่อยู่ใต้เงื่อนไขใบอนุญาตด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าในที่นี่จะใช้ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} เมื่อ ($x = 0$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส นนำมาใช้เป็นตัวอย่างในการคำนวณ โดยเริ่มจากแบบจำลองอะตอมของซีไต ซึ่งสามารถที่จะคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln \sigma T^{1/2}$ กับ ค่า $1000/T$

-การหาค่าพลังงานกระตุ้น (E_a)

$$\sigma T^{\frac{1}{2}} = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (4.5)$$

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

$$\ln\left(\sigma T^{\frac{1}{2}}\right) = -\frac{E_a}{1000k}\left(\frac{1000}{T}\right) + \ln \sigma_0 \quad (4.6)$$

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

แทนค่า

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

$$E_a = \frac{(1000)(1.38 \times 10^{-23})(0.6789)}{1.6 \times 10^{-19}} = 0.059 \text{ อิลีกตรอนโวลต์}$$

-การหาค่าเพอร์มิตติวิตี (ϵ_s)

$$\epsilon_s = \epsilon_r \epsilon_0 \quad (4.7)$$

แทนค่า

$$\epsilon_s = (9.38)(8.85 \times 10^{-14})$$

$$\epsilon_s = 8.3013 \times 10^{-13} \text{ ฟารัดต่อตารางเซนติเมตร}$$

-การหาค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ (N_a)

$$E_b = \frac{e^2 L^2 N_a}{8 \epsilon_s} \quad (4.8)$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่า $N_a = \frac{8(8.3013 \times 10^{-13})(0.0586)(1.6 \times 10^{-19})}{(1.6 \times 10^{-19})^2 (77.7 \times 10^{-7})^2} = 4.03 \times 10^{16}$ ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

-การหาค่าความยาวเดอบาย (L_D)

$$L_D = \left[\frac{kT\epsilon_s}{e^2 N_a} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.9)$$

แทนค่า $L_D = \left[\frac{(1.38 \times 10^{-23})(260)(8.3013 \times 10^{-13})}{(1.6 \times 10^{-19})^2 (4.03 \times 10^{16})} \right]^{\frac{1}{2}} = 1.70 \times 10^{-6}$ เซนติเมตร

-การหาค่าระดับพลังงานของกึ่งตัวนำ (E_t)

$$E_a = \frac{1}{2} E_g - E_t \quad (4.10)$$

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

แทนค่า $E_t = \frac{1}{2}(1.47) - 0.0586 = 0.68$ อิเล็กตรอนโวลต์

-การหาค่าความหนาแน่นของกึ่งตัวนำ (N_t)

$$\sigma = \left[\frac{L^2 e^2 N_v N_a v_c}{2kT(N_t - LN_a)} \right] \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (4.11)$$

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

สามารถหาค่าความเร็วเฉลี่ยของพาหะ (v_c) ได้จาก

$$v_c = \left[\frac{kT}{2\pi m^*} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.12)$$

แทนค่า $v_c = \left[\frac{(1.38 \times 10^{-23})(260)}{2\pi(0.165 \times 9.1 \times 10^{-31})} \right]^{\frac{1}{2}} = 6.1670 \times 10^4$ เซนติเมตรต่อวินาที

สามารถหาค่าผลลัพธ์ของความหนาแน่นของสถานะทางพลังงานที่แถบวาเลนซ์ (N_v) ได้จาก

$$N_v = 2 \left[\frac{2\pi m^* kT}{h^2} \right]^{\frac{3}{2}} \quad (4.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$N_v = 1.3515 \times 10^{24} \text{ ต่อตารางเซนติเมตร}$$

ดังนั้นจากสมการที่ (4.12) และ สมการที่ (4.13)

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

จะได้ว่า

$$\begin{aligned} N_t &= \left[\frac{(77.7 \times 10^{-7})^2 (1.6 \times 10^{-19})^2 (1.3515 \times 10^{24}) (4.03 \times 10^{16}) (6.1670 \times 10^4)}{2 \left(\frac{1.38 \times 10^{-23}}{1.6 \times 10^{-19}} \right) (260) (1.4857 \times 10^{-9})} \right] \times \\ &\quad \exp\left(-\frac{0.0586 \times 1.6 \times 10^{-19}}{1.38 \times 10^{-23} \times 260}\right) + (77.7 \times 10^{-7} \times 4.03 \times 10^{16}) \\ &= \left(\frac{5.19 \times 10^{-3}}{6.66 \times 10^{-11}} \right) (0.0733) + (3.13 \times 10^{11}) \\ &= 3.13 \times 10^{11} \text{ ต่อตารางเซนติเมตร} \end{aligned}$$

สำหรับแบบจำลองอะตอมแบบการกระโดดระหว่างสถานะพลังงานท้องถิ่นในระยะไม่คงที่ ค่าพารามิเตอร์ต่างๆสามารถคำนวณได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln \sigma T^{1/2}$ กับ ค่า $T^{(-1/4)}$ จาก ค่าความชันของกราฟเส้นตรง

$$y = mx + c$$

$$\ln(\sigma T^{1/2}) = -\left(\frac{T_0}{T}\right)^{1/4} + \ln \sigma_0 \quad (4.14)$$

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

-การหาค่าองศาของความไม่เป็นระเบียบ (T_0) และ ค่าแฟกเตอร์หน้าพจน์เอ็กซ์โพเนนเชียล (σ_0)

$$m = -T_0^{(1/4)} = -44.3729$$

$$T_0 = (44.3729)^4 = 3.88 \times 10^6 \text{ เคลวิน}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$c = \ln \sigma_0 = -6.5184$$

$$\sigma_0 = e^{-6.5184} = 1.48 \times 10^{-3} \text{ ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร}$$

-การหาค่าความหนาแน่นของสถานะถูกจำกัดเฉพาะที่ที่ระดับพลังงานเฟอร์มิ $[N(E_F)]$

โดยที่ $T_0 = \frac{18\alpha^3}{kN(E_F)}$ เมื่อ $\alpha = 1.24 \times 10^7$ ต่อเซนติเมตร

$$N(E_F) = \frac{18\alpha^3}{kT_0} \quad (4.15)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{18\alpha^3}{kT_0} = \frac{18(1.24 \times 10^7)^3}{1.38 \times 10^{-23} T_0} = \frac{(18)(1.24 \times 10^7)^3}{1.6 \times 10^{-19} T_0} = \frac{8.625 \times 10^{-5} T_0}{1.6 \times 10^{-19} T_0} \\ N(E_F) &= \frac{3.98 \times 10^{26}}{T_0} \\ &= \frac{3.98 \times 10^{26}}{3.88 \times 10^6} \\ &= 1.03 \times 10^{20} \text{ ต่ออิเล็กตรอนโวลต์} \end{aligned}$$

-การหาค่าระยะทางเฉลี่ยของการกระโดด (R)

โดยที่ $R = \frac{0.135}{(TN(E_F))^{1/4}}$ เมื่อ $T = 200$ เคลวิน (4.16)

$$\begin{aligned} &= \frac{0.135}{(200 \times 1.03 \times 10^{20})^{1/4}} \\ &= 3.57 \times 10^{-7} \text{ เซนติเมตร} \end{aligned}$$

-การหาค่าพลังงานเฉลี่ยของการก้าวกระโดด (W)

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

$$\begin{aligned} &= \frac{3}{4\pi (3.57 \times 10^{-7})^3 \times (1.03 \times 10^{20})} \\ &= 5.13 \times 10^{-2} \text{ อิเล็กตรอนโวลต์} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่คำนวณได้จากแบบจำลองของซีโด ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส

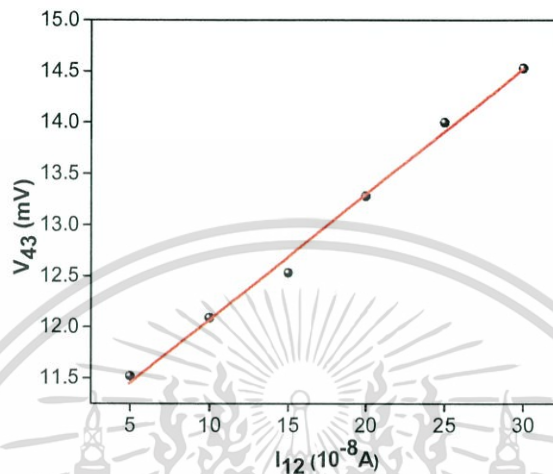
Composition (x) of CdS_xTe_{1-x}	Temperature (K)	ϵ_s (F/cm^2) (10^{-13})	Grain Size (L) (nm)	E_b (eV)	N_a (cm^{-3}) (10^{17})	E_t (eV)	N_t (cm^{-3}) (10^{11})	L_D (m)
0.0	260	8.3	77.7	0.0586	0.403	0.68	3.13	1.70×10^{-6}
0.2	260	8.3	39.9	0.0127	0.331	0.72	1.32	1.87×10^{-6}
0.4	260	8.3	15.1	0.0201	3.659	0.71	5.53	5.64×10^{-7}
0.6	260	8.3	3.4	0.0191	68.4	0.71	23.26	1.30×10^{-7}
0.8	260	8.3	5.9	0.0126	15	0.86	8.85	2.78×10^{-7}
1.0	260	8.3	34.2	0.0090	0.318	1.18	1.03	1.91×10^{-6}

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่คำนวณได้จากแบบการกระโดดในระยะไม่คงที่ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส

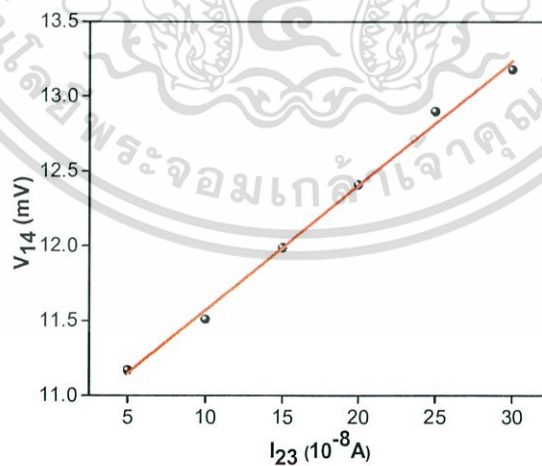
Composition (x) of CdS_xTe_{1-x}	Temperature (K)	σ_0 ($S \cdot cm^{-1}$)	T_0 (K) (10^3)	$N(E_F)$ ($cm^{-3}(eV)^{-1}$)	R (cm) (10^{-7})	W (eV) (10^{-2})
0.0	200	1.48×10^{-3}	3.88×10^3	1.03×10^{20}	3.57	5.130
0.2	200	2.00×10^{-5}	5.21	7.64×10^{22}	0.683	0.982
0.4	200	0.28	63.21×10^3	6.30×10^{21}	1.274	1.833
0.6	200	1.71×10^{-7}	10.80	3.69×10^{22}	0.819	1.180
0.8	200	0.42	4.25	9.38×10^{22}	0.649	0.930
1.0	200	1.68×10^{-4}	49.55	8.03×10^{21}	1.200	1.170

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.9 ผลการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส

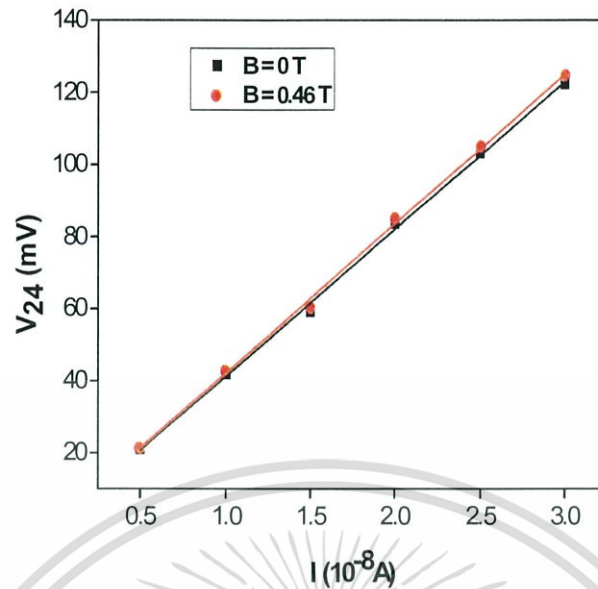


รูปที่ 4.17 แสดงกราฟการหาความต้านทาน R_1 ที่ได้จากการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ เมื่อ ($x = 0.8$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส

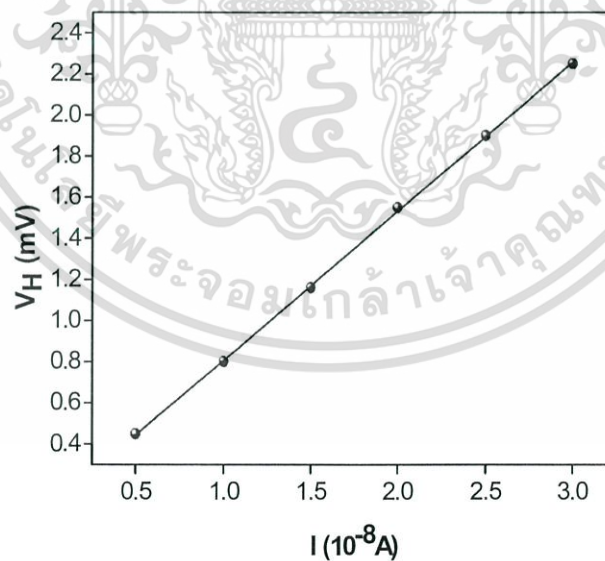


รูปที่ 4.18 แสดงกราฟการหาความต้านทาน R_2 ที่ได้จากการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ เมื่อ ($x = 0.8$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_{24}) กับ ค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็ก ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} เมื่อ ($x = 0.8$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนیل



รูปที่ 4.20 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_H) กับ ค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็ก ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} เมื่อ ($x = 0.8$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนیل

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่คำนวณได้จากผลการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนัล

Composition (x) of $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$	Resistivity ($\Omega \cdot \text{cm}$)	Hall Coefficient (R_H) (cm^3/C)	Electron Concentration (cm^{-3})	Hall Mobility ($\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$)
0.8	250	4.25×10^4	1.47×10^{14}	1.70×10^2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้เป็นการสรุปการดำเนินงานโครงการพิเศษ เพื่อศึกษากลไกการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 100-300 เคลวิน ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบน แผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส จากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ CdS และ CdTe ที่มีความบริสุทธิ์สูงถึง 99.999 เปอร์เซ็นต์ ถึงขั้นการวิเคราะห์ผลสุดท้าย พร้อมด้วยข้อเสนอแนะเพื่อเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ทำเป็นเซลล์แสงอาทิตย์

5.1 สรุปผลการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส

ในโครงการพิเศษนี้ เป็นการศึกษากลไกการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ จากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ CdS และ CdTe ที่มีความบริสุทธิ์สูงถึง 99.999 เปอร์เซ็นต์ โดยทำการชั่งสารตั้งต้นให้เป็นไปตามมวลที่ได้คำนวณไว้ จากนั้นจึงนำไปอบด้วยความร้อน 100 องศาเซลเซียส เพื่อให้สารตั้งต้นมีความชื้นน้อยที่สุด ซึ่งเหมาะสมที่จะนำไประเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ผลที่ได้คือฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้ยึดติดกับแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ได้ดี มีความเรียบสม่ำเสมอ มีสีดำเข้มไม่โปร่งแสงและจะมีสีอ่อนจางลง เมื่อเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของธาตุ S มีค่าเพิ่มขึ้น สำหรับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS จะมีสีเหลืองส้ม

5.2 สรุปผลการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส

จากการศึกษาลักษณะของโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ จากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ CdS และ CdTe ที่มีความบริสุทธิ์สูงถึง 99.999 เปอร์เซ็นต์ เมื่อไม่มีการแอนนีส จากการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์พบว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบคิวบิกเมื่อเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของธาตุ S มีค่าน้อยกว่า 0.2 แต่สำหรับกรณีเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของธาตุ S มีค่าตั้งแต่ 0.8 ขึ้นไป ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำจะมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเฮกซะโกนัล ส่วนกรณีเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของธาตุ S มีค่าอยู่ระหว่าง 0.2 ถึง 0.8 ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้จะมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบคิวบิกและแบบเฮกซะโกนัลอยู่ร่วมกัน จากผลการทดลองยังพบว่าพีคของระนาบการเลี้ยวเบนที่โดดเด่นจะเลื่อนไปทางมุม 2θ ที่เพิ่มขึ้น เมื่อเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของธาตุ S มีค่าเพิ่มขึ้น

การศึกษาลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) โดยการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำมีความเรียบสม่ำเสมอ ไม่มีรอยแตกขนาดเล็กให้เห็น จากภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) จะเห็นได้ชัดว่าเกรนมีขนาดโตขึ้นตามเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของธาตุ S ที่เพิ่มขึ้น

ค่าช่องว่างแถบพลังงานสามารถคำนวณได้จากค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง พบว่ามีค่าลดลงจาก 1.50 อิเล็กตรอนโวลต์ จนต่ำสุดที่ 1.44 อิเล็กตรอนโวลต์ เมื่อเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของธาตุ S เพิ่มจาก 0 เป็น 0.4 แต่เมื่อเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของธาตุ S เพิ่มจาก 0.4 เป็น 1.0 ค่าช่องว่างแถบพลังงานจะเพิ่มจาก 1.44 เป็น 2.40 อิเล็กตรอนโวลต์

พลังงานกระตุ้น (E_g) สามารถคำนวณหาได้จากการวัดความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) รอยต่อในช่วงอุณหภูมิ 25-150 องศาเซลเซียส ซึ่งค่าพลังงานกระตุ้นนี้คือค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่บริเวณขอบรอยต่อของเกรน เป็นที่น่าสังเกตว่าในกรณีเฟสเดี่ยว ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS มีเกรนโตกว่า ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe$ แต่ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS มีค่ากำแพงศักย์ต่ำกว่าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe$ ส่วนกรณีเฟสผสมของคิวบิกกับเฮกซะโกนัล ซึ่งเป็นกรณีเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของธาตุ S อยู่ระหว่าง 0.2 ถึง 0.8 ค่าความสูงของกำแพงศักย์จะมีค่าสูงกว่ากรณีเฟสเดี่ยว ดังเช่นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS และ ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe$

ได้ทำการศึกษาค่าสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่อุณหภูมิในช่วง 300-200 เคลวิน กลไกการนำไฟฟ้าสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองของซีโตดิงความสัมพันธ์

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยสามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่ขอบของเกรน ค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ ค่าระดับพลังงานของกัณฑ์พาหะ ค่าความหนาแน่นของกัณฑ์พาหะ และค่าความยาวเดออบาย เป็นต้น สำหรับในช่วงอุณหภูมิ 200-100 เคลวิน กลไกการนำไฟฟ้าสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองการกระโดดระหว่างสถานะพลังงานท้องถิ่นในระยะไม่คงที่ดังความสัมพันธ์

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

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ค่าความหนาแน่นของสถานะถูกจำกัดเฉพาะที่ที่ระดับพลังงานเฟอร์มิ $[N(E_F)]$ ค่าระยะทางเฉลี่ยของการกระโดด และค่าพลังงานเฉลี่ยของการกระโดดสามารถคำนวณได้เช่นเดียวกัน ข้อสังเกตจะเห็นได้ว่ากลไกการนำกระแสไฟฟ้าตามแบบจำลองของซีโตจะเกี่ยวข้องกับขอบเขตรอยต่อของเกรนซึ่งมีกัณฑ์พาหะ และค่าความสูงของกำแพงศักย์ปรากฏอยู่ แต่สำหรับกลไกการนำกระแสไฟฟ้าตามแบบจำลองการกระโดดระหว่างสถานะพลังงานท้องถิ่นในระยะไม่คงที่จะมุ่งเน้นไปที่กัณฑ์พาหะที่อยู่ในเนื้อเกรน (bulk) ซึ่งกลไกการนำกระแสตามแบบจำลองการกระโดดระหว่างสถานะพลังงานท้องถิ่นในระยะไม่คงที่นี้ จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่ากลไกการนำกระแสไฟฟ้าตามแบบจำลองของซีโตเสมอ

5.3 ข้อเสนอแนะ

1. การเตรียมฟิล์มบาง

- แผ่นกระจกสไลด์ที่ใช้มีขนาดไม่เท่ากันเมื่อนำไปใส่ในหน้ากาก เพื่อใช้เตรียมสาร สารที่เตรียมได้จึงมีลักษณะบิดเบี้ยวไปบ้าง
- การระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ควรนำสารตั้งต้นที่บดแล้วไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสก่อน เพื่อไม่ให้สารตั้งต้นจับเป็นก้อนและง่ายต่อการระเหย
- การทำงานในระบบสุญญากาศควรสวมถุงมือเพื่อป้องกันสิ่งสกปรกต่างๆ จากผู้ทดลอง สู่อุปกรณ์สุญญากาศได้
- ก่อนทำการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ควรตรวจสอบความสะอาดของเครื่องมือ และเช็คสภาพเครื่องก่อนทุกครั้ง
- ก่อนทำการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ควรศึกษาวิธีการใช้เครื่องมือก่อนทุกครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การวัดสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ

- การถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) นั้น ถ้าไม่เห็นเกรนให้นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำไปเคลือบด้วยทองคำก่อนเพื่อให้นำไฟฟ้าได้ดี แล้วนำกลับมาถ่ายภาพอีกครั้ง
- การทำการทดลองวัดสมบัติทางไฟฟ้าควรทำให้เร็วที่สุดหลังจากเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำได้ เพื่อลดผลกระทบจากข้อบกพร่องผลึกที่ปรากฏบนผิวหน้า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

งามนิตย์ วงษ์เจริญ. 2531. “การศึกษารอยต่อแบบโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำของคอปเปอร์-อินเดียม ไดซีลีไนด์.” วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ. 2543. “การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ. 2545. “การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง และณัฐพร พรหมรส. 2551. “การเตรียมฟิล์มบาง CdTe โดยการระเหิดในระยะประชิดเพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2556. “ความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้าของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) และการประยุกต์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฐิตินัย แก้วแดง. 2530. “การเตรียมและการศึกษาสมบัติของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมไดซีลีไนด์.” วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ. 2545. “การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี Zn เพื่อประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2547. “การเตรียมฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วย In โดยระเหยในระบบสุญญากาศ.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2549. “การประดิษฐ์ฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่เจือด้วยอะตอมฟลูออรีนสำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2550. “การประดิษฐ์ฟิล์มหนา $CuAlO_2$ เพื่อเป็นชั้นดูดกลืนของเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และณัฐพร พรหมรส. 2551. “การเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธีออบสารละลายเคมีภายใต้คลื่นไมโครเวฟเพื่อประดิษฐ์เป็นหน้าต่างรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ญัฐพร พรหมรส และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2552. “การพัฒนา
ชีวไฟฟ้าด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ของฟิล์มบางของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ CdS/CuO.” รายงาน
วิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ และชัยสิทธิ์ ภูริรักษ์เกียรติ. 2556. “การ
ประดิษฐ์ฟิล์มบางCdS_xTe_{1-x} เพื่อประยุกต์ใช้เป็นเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะ
วิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2557. “การประดิษฐ์และการศึกษา
สมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางรอยต่ออวิวิธพันธุ์ CdS/CuO.” รายงานวิจัยเสนอต่อ
คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ดุสิต เครื่องาม. 2535. โอลิมปิกฟิล์ม. กรุงเทพมหานคร: ซีเอ็ดดูเคชั่น

นพณัฐ เดชะคำภู. 2556. “การประดิษฐ์ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} โดยวิธีการระเหิด
สารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด.” ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

วีรชัย ลิภา. 2547. “การศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง CdS-ZnS ซึ่งเตรียมโดยวิธีอบสารละลายเคมี.”
วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

สมเกียรติ ศุภเดช. 2542. เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์. แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบัน
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

สุกฤษฎี เกิดแสง. 2547. “การเตรียมและศึกษาสมบัติของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำสำหรับเซลล์
แสงอาทิตย์ CdTe.” วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

Cullity, B.D. 1956. Elements of X-rays Diffraction. Addison-Wesley Publishing
Company Inc.; pp 9-14.

Gacia-Cuencu, M.V. Morenza, J.L. Bertran, E. and Lousa, A. 1987. “Electrical Condition
in Polycrystalline CdS Films: II. Comparison of Theory and Experiment.” J. Phys.
D: Appl. Phys. 20 :958-962.

Gilmore, A.S. 2000. “Studies of the Basic Electronic Properties of CdTe and CdS Thin
Films and CdTe/CdS Solar Cells.” Thesis Proposal Colorado School of Mines.

Gunal, I. and Parlak, M. 1997. “Current Transport Mechanisms in Low Resistive CdS
Thin Films.” J. Mater. Sci. Mater. Elec. 8 :9-13.

Kittel, C. 1971. Introduction of Solid State Physics. 4th ed. New York: John Wiley &
Sons Inc.; pp 4-32, 49-48, 56-60, 364-365, 540-552, 611-612.

Kittel C. 2005. Introduction to Solid State Physics. 8th Edition. United States of
America : John Wiley&Sons Inc.

Ramaiah, K.S. 1999. “Electrical Properties of in Doped CdS Thin Films.” J. Mater. Sci.
Mater. Elec. 10 :291-294

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Runyan, W.R. 1975. **Semiconductor Measurement and Instrument**. New York: McGrawHill: Bombay.
- Serin, T. Yildiz, A. Sahin, S.H. and Serin, N. 2011. "Extraction of Important Electrical Parameters of CuO." *Physica B*, 406, 575-578.
- Tuttle, J.R., Szalaj, A. and Keane, J. 2000. "A 15.2% AMO/1433 W/kg Thin Films Cu(In,Ga)Se₂ Solar Cell for Space Application." **28th IEEE Photovoltaic Specialists Conference**. September 15-22.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ CdS และ CdTe ที่ได้จากไฟล์ข้อมูลมาตรฐาน JCPDS (The Joint Committee on Powder Diffraction Standards)

Pattern : 77-2306		Radiation = 1.540600		Quality : Calculated		
Cd S		2 θ	l	h	k	i
Cadmium Sulfide		24.837	63	1	0	0
		26.535	45	0	0	2
		28.216	100	1	0	1
		36.662	25	1	0	2
		43.738	43	1	1	0
		47.894	41	1	0	3
		50.949	6	2	0	0
		51.890	31	1	1	2
Lattice : Hexagonal		52.866	13	2	0	1
Mol. weight = 144.47		54.644	2	0	0	4
S.G. : P63mc (186)		58.354	5	2	0	2
Volume [CD] = 99.45		60.912	2	1	0	4
a = 4.13600		66.858	12	2	0	3
Dx = 4.824		69.359	8	2	1	0
		70.952	9	2	1	1
		72.472	4	1	1	4
c = 6.71300		75.572	8	1	0	5
Z = 2		75.689	5	2	1	2
I/cor = 7.93		77.956	1	2	0	4
		80.366	4	3	0	0
		83.387	10	2	1	3
		86.434	4	3	0	2
		87.021	1	0	0	6
ICSD COLLECTION CODE : 060629						
REMARKS FROM ICSD : REM F Determination based on model III of Fakiess, Stevenco						
REMARKS FROM ICSD : REM Barnea Aust. J. Phys. 1982,35 415 424.						
TEST FROM ICSD : At least one TF missing.						
*Calculated from ICSD using POWD-12++ (1997) primary reference :						
*Acta Crystallogr., Sec. B: Structural Science, volume 40, page 521, (1984) :						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern : 75-1546

Radiation = 1.540600

Quality : Calculated

Cd S		2th	l	h	k	l
		28.505	100	1	1	1
		30.699	22	2	0	0
Cadmium Sulfide		43.969	47	2	2	0
		52.076	33	3	1	1
		54.579	5	2	2	2
		63.932	6	4	0	0
		70.468	11	3	3	1
		72.585	5	4	2	0
Lattice : Face-centered cubic		80.842	10	4	2	2
Mol. weight = 144.47		86.902	7	5	1	1
S.G. : F-43m (216)		Volume [CD] = 197.14				
a = 5.82000		Dx = 4.868				

Z = 4

V_{cor} = 14.05

ICSD COLLECTION CODE : 031075
 TEST FROM ICSD : No R value given
 TEST FROM ICSD : At least one TF missing.

*Calculated from ICSD using POWD-12+, (1997) primary reference :

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 *Z. Kristalloid., Kristalloidom., Kristallohvs., Kristalchem., volume 62, page 260, (1925) ;
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern : 10-207		Raduatuib = 1.540598					Quality : Deleted		
Cd Te		2 θ	I	h	k	l			
Cadmium Tellurium		23.772	100	1	1	1			
		39.312	80	2	2	0			
		46.535	70	3	1	1			
		56.783	20	4	0	0			
		62.493	40	3	3	1			
		71.154	50	4	2	2			
		76.228	40	5	1	1			
		84.559	40	4	4	0			
Lattice : Face-centered cubic		Mol. Weight = 240.01	89.620	70					
S.G. : F-43m (216)		Volume [CD] = 273.36	97.443	70	6	2	0		
a = 6.49000		Dx = 5.832	102.458	50					
Z = 4									
DELETED AND REJECTED BY : Delete : Post parcel January 7,1964 (for Set 15).									
*Private Communication, Primary reference : Vaughan, D., Battelle Memorial Inst., Coulmbus, OH, USA. *Z.Phys. Chem., volume 124, page 277, (1926) unit cell aste : Zachariassen.									
Radiation : FeK α 1		Filter : Beta							
Lambda : 1.93600		d-sp : Not given							
SS/FOM : F9= 3(0.1880,14)									

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน	นางสาวขวัญกมล สุวรรณเทศ
เกิดเมื่อ	วันที่ 21 พฤศจิกายน 2535
ที่อยู่ปัจจุบัน	68/2 หมู่ 4 ตำบล ไผ่ลิง อำเภอ พระนครศรีอยุธยา จังหวัด พระนครศรีอยุธยา 13000
ประวัติการศึกษา	2554 ปริญญาตรี ภาควิชาฟิสิกส์ สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้