

การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เจือด้วยพลวง
ซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ
ในแบบระยะประชิด

SOME PROPERTIES OF CdTe THIN FILMS DOPED WITH Sb
PREPARED BY CLOSE-SPACING THERMAL EVAPORATION IN VACUUM

พีรพร สิริบุตไธวรรณ
PEERAPORN SIRIBUDHAIWON

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
บัณฑิตวิทยาลัย
จดจำแนกเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2550

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เจือด้วยพลวง
ซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ
ในแบบระยะประชิด

SOME PROPERTIES OF CdTe THIN FILMS DOPED WITH Sb
PREPARED BY CLOSE-SPACING THERMAL EVAPORATION IN VACUUM

พีรพร สิริพุทไธวรรณ

PEERAPORN SIRIBUDHAIWON

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 74546
วัน,เดือน,ปี..... - 3 ต.ค. 2550

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2550

**SOME PROPERTIES OF CdTe THIN FILMS DOPED WITH Sb
PREPARED BY CLOSE-SPACING THERMAL EVAPORATION IN VACUUM**

PEERAPORN SIRIBUDHAIWON

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN APPLIED PHYSICS
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2007

COPYRIGHT 2007

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เจือด้วยพลวงซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิด
นักศึกษา	นายพีรพร สิริพิทุไชรธรรม
รหัสประจำตัว	48067301
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
พ.ศ.	2550
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.ฐิตินัย แก้วแดง

บทคัดย่อ

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มบาง $\text{CdTe}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) บนแผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีระเหยในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิดที่ความดันต่ำประมาณ 3.0×10^{-5} มิลลิบาร์ โดยกำหนดระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นกับฐานรองรับเท่ากับ 5 เซนติเมตร อุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 150°C จากการวิเคราะห์ด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง $\text{CdTe}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) พบว่ามีโครงสร้างแบบลูกบาศก์และมีการจัดเรียงตัวในระนาบ (111) หรือ (220) ทั้งนี้ขึ้นกับความเข้มข้นของปริมาณสารพลวงที่เจือ มีการศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง $\text{CdTe}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ด้วยเครื่อง ยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS spectrophotometer) ในช่วงความยาวคลื่น 300-1100 นาโนเมตร และได้มีการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง $\text{CdTe}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่ได้รับการแอนนัลด้วย CdCl_2 ในบรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนและในอากาศความดันปกติที่อุณหภูมิ 400°C จากการทดลองพบว่าฟิล์มบาง $\text{CdTe}_{1-x}\text{Sb}_x$ ที่มีองค์ประกอบ $x = 0.10$ และการแอนนัลด้วย CdCl_2 ในอากาศจะให้ผลเหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้เป็นชั้นดูดกลืนแสงในเซลล์แสงอาทิตย์

Thesis	Some Properties of CdTe Thin Films Doped with Sb Prepared by Close-Spacing Thermal Evaporation in Vacuum
Student	Mr.Peeraporn Siribudhaiwon
Student ID	48067301
Degree	Master of Science
Program	Applied Physics
Year	2007
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Thitinai Gaewdang

ABSTRACT

In this thesis, thin films of $\text{CdTe}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) have been deposited by close-spacing thermal evaporation method on glass substrate in vacuum chamber having low pressure about 3.0×10^{-5} mbar. Distance between source and substrate was 5 cm and substrate temperature was 150°C . According to XRD analysis, thin films of $\text{CdTe}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) are polycrystalline belonging to cubic structure with preferential orientation of (111) or (220) plane depending on the concentration of Sb content. The optical transmittance of thin films of $\text{CdTe}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) has been studied by UV-VIS spectrophotometer in the wavelength 300-1100 nm. The optical and electrical properties of the films after CdCl_2 treatment at 400°C in N_2 and in air were also investigated. From experimental data, $\text{CdTe}_{1-x}\text{Sb}_x$ thin films with $x = 0.10$ and annealed in air are probably suitable to be an absorber layer in solar cells.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาของ รองศาสตราจารย์ งามนิศย์ วงษ์เจริญ รองศาสตราจารย์ ดร. จิตินัย แก้วแดง รองศาสตราจารย์ ดร.ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ และอาจารย์ณัฐพร พรหมรส ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลองตลอดจนอุปการะทุนสนับสนุนและการให้คำแนะนำปรึกษาทางวิชาการที่ดีตลอดมา รวมไปถึงการปลูกฝังสิ่งที่ฝังใจให้กับลูกศิษย์ทุกคน

ขอขอบคุณ ดร.ชาญวิทย์ จิตยุทธการ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ ด้านทฤษฎี การออกแบบ และการสร้างเครื่องระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เพื่อใช้ในการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. วิสุทธิ์ จิตรุ่งเรือง หัวหน้าศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และคุณเจริญชัย เหลืองอ่อน ผู้ช่วยวิจัยสังกัดศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์นำปลอดประจุมารใช้ในการทดลอง

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ อนุพงศ์ สรงประภา ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องอิเล็กทรอนิกส์ในการวัดสภาพด้านทานไฟฟ้า และชุดวัดปรากฏการณ์ฮอลล์

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. อารีย์ วิเชียรฉาย ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องอัดเม็ดสาร

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ วิชาญ เตชิตธีระ หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์จัดสรรงบประมาณของภาควิชาเพื่อใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ วิชิต ศิริโชติ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความกรุณาเป็นประธานคณะกรรมการ ในการสอบวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

ขอขอบคุณ คุณปกรณ์ สิทธิเขตรกรณ์ คุณจิตติกร จรรยาธรรม คุณ ประธาน ประจวบโชค คุณอดุลย์ หาญวังม่วง นักศึกษาปริญญาโท ห้องปฏิบัติการวัสดุโฟโตนิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือแนะนำ ด้วยดีตลอดมา

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่เมตตาประสาทวิชาและอบรมสั่งสอนตั้งแต่วัยเยาว์ การศึกษาภาคบังคับถึงปัจจุบัน

สุดท้ายนี้กราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และญาติทุกท่าน ที่ให้ความสนับสนุนและส่งเสริม
ในการศึกษาทุกระดับชั้นด้วยดีมาตลอด อีกทั้งคอยเป็นกำลังใจพร้อมทั้งให้คำปรึกษาและคำแนะนำ
ที่ดีเสมอมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ	V
สารบัญตาราง	X
สารบัญรูป	XII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	4
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	5
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	7
2.1 วัสดุของแข็ง.....	7
2.2 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ.....	7
2.3 การระบุตำแหน่งของทิศทางและระนาบของผลึก	10
2.3.1 การระบุตำแหน่ง	10
2.3.2 การระบุทิศทาง.....	10
2.3.3 การระบุชื่อระนาบ.....	10
2.4 โครงสร้างผลึกของสารประกอบที่เกิดจากอะตอมของธาตุกลุ่ม II และกลุ่ม VI	12
2.4.1 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์.....	12
2.4.2 โครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซต์	13
2.5 ผลึกจริง	14
2.5.1 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบศูนย์มิติหรือแบบจุด	14
2.5.2 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบหนึ่งมิติหรือแบบเส้น	16
2.5.3 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบสองมิติหรือแบบระนาบ.....	17
2.5.3.1 เกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน	17
2.5.3.2 ทวินและขอบเขตรอยต่อของทวินหรือระนาบของทวิน	18

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.3.3 การจัดเรียงระนาบผิคลำดับ	18
2.6 พันธะเคมี	19
2.7 ผลึกแควมเมียมเทลลูไรด์	25
2.8 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	25
2.9 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	28
2.10 สมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ	33
2.10.1 ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงาน	33
2.10.2 การส่งผ่านแสง	36
2.10.3 การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ	38
2.10.4 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง	38
2.11 สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางแควมเมียมเทลลูไรด์	42
2.12 สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ	42
2.12.1 สมบัติการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ	42
2.12.1.1 สารกึ่งตัวนำประเภทอินทรีนซิกที่อุณหภูมิ 0 K	44
2.12.1.2 สารกึ่งตัวนำที่ประเภทเอ็กซ์ทรีนซิก	46
2.13 สภาพนำไฟฟ้า	50
2.13.1 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า	51
2.13.1.1 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง	51
2.13.1.2 การวัดความต้านทานจำเพาะ โดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น	52
2.13.1.3 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสี่ขั้วเชิงเส้น	54
2.13.2 ทฤษฎีการนำไฟฟ้าในช่วงอุณหภูมิต่างๆ	55
2.14 การเตรียมฟิล์มบาง	56
2.14.1 การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	56
2.14.1.1 อัตราการระเหยสาร	57
2.14.1.2 ความดันไอของธาตุ	57
2.14.1.3 การระเหยสารประกอบ	59
2.14.1.4 อิทธิพลของโครงสร้างเชิงเรขาคณิตต่อระบบการเตรียมฟิล์มบาง ด้วยวิธีการระเหยสาร	59

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.15 ระดับพลังงานแบบต่างๆที่ปรากฏในผลึก CdTe และ CdZnTe.....	62
2.16 ส่วนหางของแถบพลังงาน.....	64
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย.....	68
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัย	68
3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เพื่อใช้เตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$)	68
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมสารตั้งต้น CdTe.....	68
3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมสารตั้งต้น $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$).....	69
3.1.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระเหยประชิดโดยให้อุณหภูมิกับฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	69
3.1.5 เครื่องมือที่ใช้ในการการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระเหยประชิดโดยให้อุณหภูมิกับฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์.....	70
3.1.5.1 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค	70
3.1.5.2 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค	70
3.1.5.3 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางแสง	70
3.1.5.4 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้า	70
3.1.5.5 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาความต้านทานไฟฟ้าที่ขึ้นกับอุณหภูมิ.....	70
3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อน ในระบบสุญญากาศในแบบระเหยประชิดโดยให้อุณหภูมิกับฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์.....	71
3.2.1 การเตรียมและการทำความสะอาดแผ่นกระจกสไลด์เพื่อเป็นฐานรองรับ.....	71
3.2.2 การเตรียมสารตั้งต้น	71
3.2.2.1 การเตรียมสารตั้งต้น CdTe	71
3.2.2.2 การเตรียมสารตั้งต้น $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$).....	71

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.3 การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระเหยประชิด โดยให้อุณหภูมิกับฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์.....	72
3.2.4 การแอนนัลฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระเหย ประชิดโดยให้อุณหภูมิกับฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ด้วยแคดเมียม คลอไรด์ในบรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน.....	75
3.2.5 การแอนนัลฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระเหย ประชิดโดยให้อุณหภูมิกับฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ด้วยแคดเมียม คลอไรด์ในอากาศความดันปกติที่อุณหภูมิ $400^\circ C$	75
3.3 การศึกษาสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระเหย ประชิดโดยให้อุณหภูมิกับฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์.....	76
3.3.1 การศึกษา โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค	76
3.3.2 การศึกษา โครงสร้างผลึกเชิงมหภาค.....	76
3.3.3 การศึกษาสมบัติทางแสง	76
3.3.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า.....	76
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล	79
4.1 ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหย สารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระเหยประชิดโดยให้อุณหภูมิกับ ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	79
4.1.1 ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe$ ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อน ในระบบสุญญากาศในแบบระเหยประชิดโดยให้อุณหภูมิกับฐานรองรับที่เป็น กระจกสไลด์แตกต่างกัน	79

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.1.2	ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิด โดยให้อุณหภูมิกับฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ $150^\circ C$	80
4.2	ผลการศึกษสมบัติฟิสิกส์พื้นฐานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิด.....	81
4.2.1	ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe$	81
4.2.2	ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่ได้รับการแอนนัลด้วย $CdCl_2$ ในบรรยากาศแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์และในอากาศความดันปกติที่อุณหภูมิ $400^\circ C$	85
4.2.3	การศึกษาจากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$)	89
4.2.4	ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$)	93
4.2.5	ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$)	101
บทที่ 5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	110
	เอกสารอ้างอิง.....	114
	ภาคผนวก ก.....	117
	ภาคผนวก ข.....	120
	ประวัติผู้เขียน	124

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงพารามิเตอร์ของหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ	8
2.2 แสดงระบบผลึกทั้งเจ็ดแบบในระบบสามมิติ	9
2.3 แสดงความสัมพันธ์ของดัชนีมิลเลอร์และจุดตัดแกนผลึก	11
2.4 แสดงการกระจายประจุและความเป็นพันธะไอออนิกของสารประกอบหมู่ $A^{\text{II}}B^{\text{VI}}$	20
2.5 แสดงการจัดเรียงอิเล็กตรอนในอะตอมอิสระของธาตุที่มีอะตอมของธาตุสังกะสีอะตอม ของธาตุเทลลูเรียมและอะตอมของธาตุซีลีเนียมเป็นองค์ประกอบ	20
2.6 แสดงขนาดรัศมีของพันธะไอออนิกของแต่ละธาตุ	21
2.7 แสดงปฏิกิริยาการระเหยสารประกอบ	59
3.1 แสดงปริมาณน้ำหนักของสารตั้งต้นในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$)	72
4.1 แสดงคุณสมบัติทางโครงสร้างของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธี ระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระเหยประชิด โดยให้อุณหภูมิฐาน รองรับที่เป็นกระจกสไลด์	83
4.2 แสดงคุณสมบัติทางโครงสร้างของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระเหยประชิด โดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 150°C	84
4.3 แสดงคุณสมบัติทางโครงสร้างของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่แอนนัลด้วย $CdCl_2$ ในบรรยากาศแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 400°C ที่เตรียมได้ โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระเหยประชิด โดยให้อุณหภูมิ ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 150°C	86
4.4 แสดงคุณสมบัติทางโครงสร้างของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่แอนนัลด้วย $CdCl_2$ ในอากาศความดันปกติที่อุณหภูมิ 400°C ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหย สารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระเหยประชิด โดยให้อุณหภูมิฐานรองรับ ที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 150°C	88
4.5 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ที่ได้จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงและส่วนหางของ แถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วย ความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระเหยประชิด โดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็น กระจกสไลด์มีค่าแตกต่างกัน	99

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.6 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ที่ได้จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงและส่วนหางของแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิด โดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์มีค่า $150^\circ C$	100
4.7 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ที่ได้จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงและส่วนหางของแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่แอนนัลด้วย $CdCl_2$ ในอากาศความดันปกติที่อุณหภูมิ $400^\circ C$ เป็นเวลา 30 นาที ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิด โดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์มีค่าเท่ากับ $150^\circ C$	100
4.8 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ที่ได้จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงและส่วนหางของแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่แอนนัลด้วย $CdCl_2$ ในบรรยากาศแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ $400^\circ C$ เป็นเวลา 30 นาที ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิด โดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์มีค่าเท่ากับ $150^\circ C$	101
4.9 แสดงค่าพลังงานกระตุ้น (E_g) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe$ ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิด โดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์มีค่าแตกต่างกัน	106
4.10 แสดงค่าพลังงานกระตุ้น (E_g) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิด โดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์มีค่าเท่ากับ $150^\circ C$	107
4.11 แสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe$ ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิด โดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์มีค่าแตกต่างกัน	108
4.12 แสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิด โดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์มีค่า $150^\circ C$	108

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.13 แสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่แอนนัลด้วย CdCl_2 ในอากาศความดันปกติที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 30 นาที ที่เตรียม ได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิด โดยให้ อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์มีค่า 150°C 109	
4.14 แสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่แอนนัลด้วย CdCl_2 ในบรรยากาศแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 30 นาที ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะ ประชิด โดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์มีค่า 150°C 109	

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 แสดง โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CdTe/CdS	3
2.1 แสดงสภาพนำไฟฟ้าและสภาพต้านทานไฟฟ้าของฉนวน สารกึ่งตัวนำ และตัวนำ.....	7
2.2 แสดงหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ.....	8
2.3 แสดงหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ.....	11
2.4 แสดงพันธะที่หน้าหรือพันธะเดคระฮีครัล.....	12
2.5 แสดง โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์	13
2.6 แสดง โครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไฮท์.....	14
2.7 แสดงความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบศูนย์มิติหรือแบบจุด	
ก. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบแวนเคนซี.....	15
ข. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบเซลฟี่อินเตอร์สติเชียล.....	15
ค. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบอินเตอสติเชียลอิมเพียวริตี้อะตอม.....	15
ง. แสดงความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบซัพสติติวชันนัลอิมเพียวริตี้อะตอม	15
2.8 แสดงการเกิดความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบชอคคีย์และความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบเฟรนเกล.....	16
2.9 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบดิส โลเคชันแบบขอบ.....	17
2.10 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบดิสโลเคชันแบบสกรู.....	17
2.11 แสดงความไม่สมบูรณ์ของผลึกชนิดเกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน	18
2.12 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบทวินและระนาบของทวิน.....	18
2.13 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการจัดเรียงระนาบของอะตอมผิดลำดับ	19
2.14 แสดงสมมูลความดันไอรวม	24
2.15 แสดง โครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์ของผลึกแคดเมียมเทลลูไรด์	25
2.16 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากระนาบผลึก	26
2.17 แสดงวิธีการหา $\beta_{2\theta}$ เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์....	28
2.18 อัตรากิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับผิวของสารตัวอย่าง	29
2.19 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	29
2.20 แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานอย่างง่ายของ	
ก. ฉนวน.....	34
ข. สารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์.....	34

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ค. สารกึ่งตัวนำชนิดอื่น.....	34
ง. สารกึ่งตัวนำชนิดพี.....	34
จ. โลหะ.....	34
ฉ. สารกึ่งโลหะ.....	34
2.21 แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานและการย้ายสถานะของพลังงานอิเล็กตรอนของ สารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสมบูรณ์ ($T = 0\text{ K}$)	
ก. ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง	36
ข. ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง.....	36
2.22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงาน โฟตอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสมบูรณ์ ($T = 0\text{ K}$)	
ก. ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง	36
ข. ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงในกรณีที่เกิดกระบวนการสร้างโฟนอน.....	36
2.23 แสดงแผนภาพเมื่อแสงตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มบาง.....	37
2.24 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ การดูดกลืนแสงกับพลังงาน โฟตอน.....	39
2.25 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและค่าพลังงานโฟตอน หรือค่าความยาวคลื่นของพลังงาน โฟตอนของสารกึ่งตัวนำ	41
2.26 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของแคดเมียมเทลลูไรด์.....	41
2.27 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานความหนาแน่นสถานะฟังก์ชันการกระจายแบบเฟอร์มี-ดิแรก และความหนาแน่นพาหะของ	
ก. สารกึ่งตัวนำประเภทอินทรีนซิก.....	43
ข. สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น.....	43
ค. สารกึ่งตัวนำชนิดพี.....	43
2.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น กับส่วนกลับของอุณหภูมิ.....	47
2.29 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง.....	51
2.30 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น.....	52

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.31 แสดงการวัดความต้านทานแผ่นโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น	
ก. การวัดแบบสองขั้วโดยมีการเลื่อนระยะที่ขั้วหนึ่ง.....	53
ข. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับระยะทางที่ได้จากการวัดชนิดเลื่อนขั้วไฟฟ้า.....	53
2.32 แสดงการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีขั้วเชิงเส้น.....	54
2.33 กราฟแสดงค่าความดันไอของธาตุ โดยจุดต่างๆจะสัมพันธ์กับจุดหลอมเหลว.....	58
2.34 กราฟแสดงค่าความดันไอของธาตุในสารกึ่งตัวนำโดยจุดต่างๆจะสัมพันธ์กับจุดหลอมเหลว.....	58
2.35 แสดงรูปแบบการระเหยของสารตั้งต้น.....	60
2.36 แสดงระดับพลังงานต่างๆที่ปรากฏในผลึกของ CdTe และ CdZnTe.....	64
2.37 แสดงส่วนหางของแถบพลังงานซึ่งมีทั้งส่วนหางของแถบวาเลนซ์และส่วนหางของแถบนำ.....	65
2.38 แสดงกราฟเส้นตรงของความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \alpha$ กับพลังงาน (E) ที่อุณหภูมิต่างๆ โดยมีจุดคู่รวมที่ (E_0, α_0) ของผลึก InSe: Ho.....	66
3.1 แสดงอุปกรณ์การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิด โดยให้อุณหภูมิกับฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์.....	74
3.2 แสดงอุปกรณ์ภายในห้องสุญญากาศของระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิด โดยให้อุณหภูมิกับฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์.....	74
3.3 แสดงชุดอุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้า.....	77
3.4 แสดงชุดอุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าความต้านทานที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ.....	77
3.5 แสดงระบบเตาแอนนีส.....	78
4.1 แสดงฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิด โดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์มีค่าแตกต่างกัน.....	80
4.2 แสดงฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิด โดยให้อุณหภูมิกับฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ $150^\circ C$	81

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 แสดงพิกัดความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิด โดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์มีค่าแตกต่างกัน	82
4.4 แสดงขนาดของเกรนที่คำนวณจาก FWHM ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิด โดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์มีค่าแตกต่างกัน.....	82
4.5 แสดงพิกัดความเข้มของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิด โดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ $150^{\circ}C$	83
4.6 แสดงขนาดของเกรนที่คำนวณจาก FWHM ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิด โดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์มีค่าเท่ากับ $150^{\circ}C$	84
4.7 แสดงพิกัดความเข้มของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่แอนนัลด้วย $CdCl_2$ ในบรรยากาศแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ $400^{\circ}C$ ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิด โดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ $150^{\circ}C$	85
4.8 แสดงขนาดของเกรนที่คำนวณจาก FWHM ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่แอนนัลด้วย $CdCl_2$ ในบรรยากาศแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ $400^{\circ}C$ ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิด โดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์มีค่าเท่ากับ $150^{\circ}C$	86
4.9 แสดงพิกัดความเข้มของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่แอนนัลด้วย $CdCl_2$ ในอากาศความดันปกติที่อุณหภูมิ $400^{\circ}C$ ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิด โดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ $150^{\circ}C$	87
4.10 แสดงขนาดของเกรนที่คำนวณจาก FWHM ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่แอนนัลด้วย $CdCl_2$ ในอากาศความดันปกติที่อุณหภูมิ $400^{\circ}C$ ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิด โดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์มีค่าเท่ากับ $150^{\circ}C$	87

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 แสดงภาพถ่าย SEM ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระเหยประชิดโดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์มีค่าแตกต่างกัน	89
4.12 แสดงภาพถ่าย SEM ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารในระบบสุญญากาศในแบบระเหยประชิดโดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์มีค่าเท่ากับ $150^\circ C$	90
4.13 แสดงภาพถ่าย SEM ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่แอนนัลด้วย $CdCl_2$ ในบรรยากาศแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ $400^\circ C$ เป็นเวลา 30 นาที ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารในระบบสุญญากาศในแบบระเหยประชิดโดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์มีค่าเท่ากับ $150^\circ C$	91
4.14 แสดงภาพถ่าย SEM ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่แอนนัลด้วย $CdCl_2$ ในอากาศความดันปกติที่อุณหภูมิ $400^\circ C$ เป็นเวลา 30 นาที ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารในระบบสุญญากาศในแบบระเหยประชิดโดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์มีค่าเท่ากับ $150^\circ C$	92
4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระเหยประชิดโดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์มีค่าแตกต่างกัน	93
4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระเหยประชิดโดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์มีค่าเท่ากับ $150^\circ C$	93
4.17 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระเหยประชิดโดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์มีค่าแตกต่างกัน	94

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.18 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิด โดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์มีค่าเท่ากับ $150^\circ C$	95
4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่แอนนัลด้วย $CdCl_2$ ในอากาศ ความดันปกติที่อุณหภูมิ $400^\circ C$ เป็นเวลา 30 นาที ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิด โดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์มีค่าเท่ากับ $150^\circ C$	96
4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่แอนนัลด้วย $CdCl_2$ ในบรรยากาศแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ $400^\circ C$ เป็นเวลา 30 นาที ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิด โดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์มีค่าเท่ากับ $150^\circ C$	96
4.21 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่แอนนัลด้วย $CdCl_2$ ในอากาศ ความดันปกติที่อุณหภูมิ $400^\circ C$ เป็นเวลา 30 นาที ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิด โดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์มีค่าเท่ากับ $150^\circ C$	97
4.22 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่แอนนัลด้วย $CdCl_2$ ในบรรยากาศแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ $400^\circ C$ เป็นเวลา 30 นาที ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิด โดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์มีค่าเท่ากับ $150^\circ C$	98
4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{R_0}{R}\right)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe$ ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิด โดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์มีค่าแตกต่างกัน.....	102

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{R_0}{R}\right)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิด โดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์มีค่าเท่ากับ $150^\circ C$	103
4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{R_0}{R}\right)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่แอนนัลด้วย $CdCl_2$ ในอากาศความดันปกติที่อุณหภูมิ $400^\circ C$ เป็นเวลา 30 นาที ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิด โดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์มีค่าเท่ากับ $150^\circ C$	104
4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{R_0}{R}\right)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่แอนนัลด้วย $CdCl_2$ ในบรรยากาศแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ $400^\circ C$ เป็นเวลา 30 นาที ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิด โดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์มีค่าเท่ากับ $150^\circ C$	105

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย [1-4]

ในปัจจุบันอุปกรณ์เครื่องมือต่างๆที่อำนวยความสะดวกสบายความบันเทิงให้กับมนุษย์เช่น เครื่องมือสื่อสารโทรคมนาคม เครื่องมือทางการแพทย์ เครื่องใช้ในครัวเรือน เครื่องใช้ในสำนักงานมักจำเป็นต้องใช้พลังงานไฟฟ้าที่มีแหล่งกำเนิดมาจากพลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิง เช่น น้ำมัน ถ่านหิน และแก๊สธรรมชาติเป็นต้น อย่างไรก็ตามเชื้อเพลิงเหล่านี้ล้วนเป็นพลังงานสิ้นเปลืองอันจะหมดสิ้นไปในเวลาไม่นานเมื่อเทียบกับอายุขัยของโลกที่เหลืออยู่และก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของโลกในแง่ของปรากฏการณ์เรือนกระจก (ทำให้โลกร้อนขึ้น) ดังนั้นจึงเริ่มพิจารณาถึงแหล่งพลังงานอื่นๆที่สะอาด (ไม่เป็นพิษกับสิ่งแวดล้อม) ที่สามารถนำมาทดแทนพลังงานเชื้อเพลิงในการผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ และเป็นพลังงานใช้ไปได้นาน เช่น พลังงานลม พลังงานน้ำ (เช่นจากเขื่อน) พลังงานความร้อนใต้พิภพ พลังงานแสงอาทิตย์ และพลังงานที่ได้จากโรงงานไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ เป็นต้น

อย่างไรก็ตามสืบเนื่องจากความแปรปรวนของทั้งบรรยากาศโลกและตัวโลกเองทำให้การสร้างโรงไฟฟ้าจากพลังงานลม พลังงานน้ำ และพลังงานความร้อนใต้พิภพเองไม่สามารถกระทำได้โดยสะดวก เช่น การเปลี่ยนทิศของลมมรสุมเนื่องจากอุณหภูมิโลกที่เปลี่ยนไปและยังต้องเลือกบริเวณที่มีปริมาณลมเพียงพอต่อการผลิตพลังงานกระแสไฟฟ้า หรือการเลื่อนของเปลือกโลกที่ก่อให้เกิดแผ่นดินไหวอันจะทำความเสียหายต่อเขื่อนผลิตไฟฟ้าและยังทำลายสมดุลธรรมชาติ ส่วนพลังงานความร้อนใต้พิภพเมื่อเทียบกับพลังงานอื่น ๆ จัดอยู่ในสเกลที่นำมาใช้งานได้น้อยมากและยังขึ้นกับสภาวะภูมิประเทศเป็นหลัก ส่วนพลังงานจากโรงงานไฟฟ้านิวเคลียร์ก็ยังมีค่าใช้จ่ายในการลงทุนในการก่อสร้าง และถอดทิ้ง ทำลายเตาปฏิกรณ์สูงมาก และยังไม่สามารถสร้างความเชื่อมั่นในความปลอดภัย ที่ประชาชนทั่วไปยอมรับได้ ด้วยเหตุนี้พลังงานทดแทนที่จัดได้ว่าเป็นหัวใจสำคัญในทศวรรษนี้คือพลังงานแสงอาทิตย์เนื่องจากเป็นพลังงานที่สะอาดไร้มลภาวะเป็นพิษใด ๆ สาดส่องไปทุกที่ และดวงอาทิตย์ยังอยู่กับมนุษย์ไปอีกนาน และอายุการใช้งานของเซลล์แสงอาทิตย์ยาวนานกว่า 20 ปี เมื่อเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายทั้งในด้านการลงทุน เพื่อให้ได้มาซึ่งพลังงาน โดยรวมถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้วยแล้ว จะเห็นได้ว่าต้นทุนพลังงานที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์ มีราคาถูกกว่า แหล่งพลังงานประเภทอื่น เมื่อติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ในครั้งแรก ก็แทบจะไม่มีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นอีกต่อไป และประการสำคัญก็คือ พลังงานจากแสงอาทิตย์เป็นหนึ่งในพลังงานที่มีความยั่งยืน ไม่มีที่สิ้นสุด ปัจจุบันระบบพลังงานแสงอาทิตย์ถูกนำไปใช้

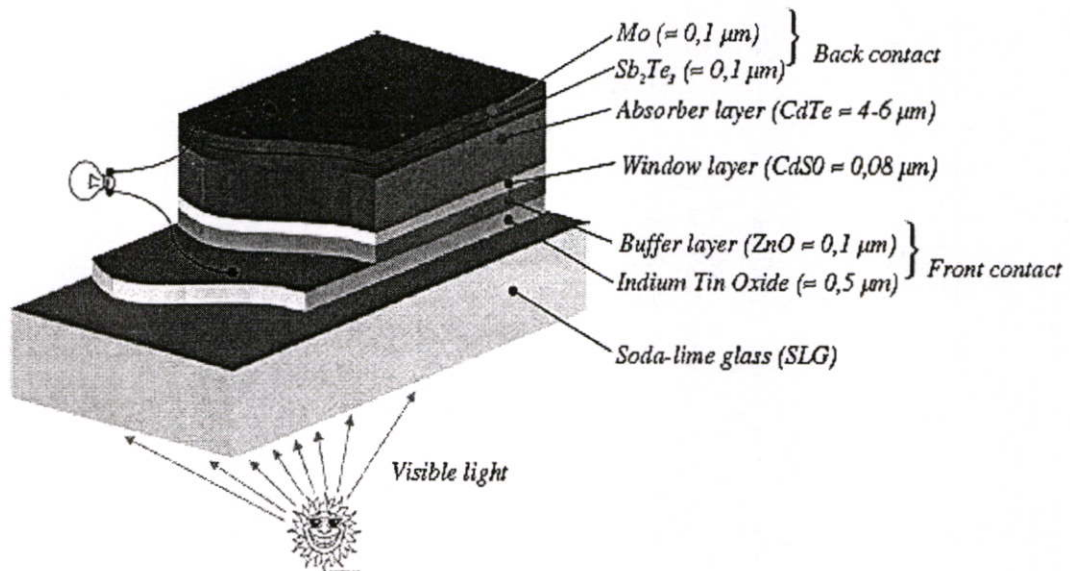
อย่างแพร่หลาย เช่น ผลิตไฟฟ้าเพื่อใช้ในอาคาร ระบบสูบน้ำ ระบบแสงสว่าง ระบบทำความร้อน ระบบทำความเย็น ประจุแบตเตอรี่และขายคืนให้กับสายส่ง เป็นต้น

เซลล์แสงอาทิตย์ (photovoltaic cell or solar cell) เป็นสิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำ สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ (หรือแสงจากหลอดแสงสว่าง) ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรง ทั้งนี้ที่มีพลังงานโฟตอนที่มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ($h\nu \geq E_g$) ตกกระทบที่ตรงบริเวณรอยต่อของเซลล์แสงอาทิตย์ตามปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก (photovoltaic effect) ซึ่งกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์นี้จะเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (direct current)

วัสดุที่ได้รับความสนใจ และพัฒนาอย่างไม่หยุดยั้ง สำหรับการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ เช่น ผลึกเดี่ยวซิลิคอน (single crystalline silicon: Si) อะมอร์ฟัสซิลิคอน (amorphous silicon: a-Si) แคดเมียมเทลลูไรด์ (cadmium telluride: CdTe) คอปเปอร์อินเดียมไดเซลิไนด์ (copper indium diselenide: CuInSe₂) และอื่นๆ การเลือกวัสดุสำหรับการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์นั้นขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพสูงสุดของวัสดุที่สามารถทำได้ ซึ่งวัสดุนั้นควรมีช่องว่างแถบพลังงานประมาณ 1.50 eV [2-3] พิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างแถบพลังงานแบบตรง (direct bandgap) เท่ากับ 1.50 eV [2-3] และมีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (absorption coefficient) สูงที่ความหนาของฟิล์มบางอยู่ในระดับไมโครเมตรสามารถดูดกลืนแสงอาทิตย์ได้มากกว่า 90% ดังนั้นฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์จึงเป็นวัสดุที่น่าสนใจสำหรับการวิจัยพัฒนาเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ แผนภาพโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CdTe/CdS ที่นิยมใช้กันในปัจจุบันแสดงไว้ดังรูปที่ 1 โดยตัวเซลล์จะประกอบขึ้นมาจากชั้นต่างๆดังนี้ [3]

- ชั้นฐานรองรับ (substrate) นิยมใช้กระจกโซดาไลม์ (soda-lime glass: SLG) หรือกระจกปลอดสารแอลคาไล (alkali-free glass) ข้อดีของกระจกชนิดนี้คือไม่มีการแพร่ของสิ่งสกปรกไปสู่เนื้อฟิล์มและสามารถทนอุณหภูมิได้สูง แต่ในทางกลับกันก็มีราคาแพง ดังนั้นการผลิตในปริมาณมากๆ ในเชิงอุตสาหกรรมจึงนิยมใช้กระจกโซดาไลม์มากกว่า อย่างไรก็ตามการใช้กระจกโซดาไลม์มักจะพบปัญหาการแพร่ของธาตุโซเดียม (หรือธาตุโปแตสเซียม) เข้าไปในเนื้อฟิล์มและไม่สามารถทนอุณหภูมิสูงๆ ได้
- ชั้นขั้วไฟฟ้าด้านหน้า (front-contact layer) จะเป็นชั้นตัวนำโปร่งแสง (TCO) เช่น ITO (indium tin oxide) และ FTO (fluorine doped tin oxide) เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วจะมีการเคลือบชั้นของบัพเฟอร์เอาไว้ด้านหลังของขั้วไฟฟ้าด้านหน้าเพื่อป้องกันการแพร่ของอะตอมของธาตุโซเดียมและธาตุโปแตสเซียม โดยชั้นบัพเฟอร์ดังกล่าวมักจะเป็นชั้น TO (tin oxide) บริสทุทซ์ ZnO (zinc oxide) หรือ Ga₂O₃ (gallium oxide) ซึ่งจะมีความหนาเพียง 50-200 นาโนเมตร สภาพต้านทานไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าด้านหน้านี้อาจมีค่าประมาณ

$10^2-10^5 \Omega\text{cm}$ ซึ่งจะช่วยป้องกันการเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้าอิมพัลส์ย้อนกลับ (J_0) ที่บริเวณรอยต่อ



รูปที่ 1.1 แสดงโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CdTe/CdS

- ชั้นรอยต่อชนิด n จะทำมาจากฟิล์มบาง CdS สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CdTe ที่มีประสิทธิภาพสูงๆนั้น จะทำการเคลือบชั้น CdS ด้วยวิธีระเหิดในระยะประชิด (close-space sublimation: CSS) หรือวิธีสปัตเตอร์ริง (sputtering) โดยทั่วไปแล้วชั้น CdS จะมีความหนาประมาณ 70-120 นาโนเมตร
- สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CdTe/CdS ที่ดีนั้น ชั้นของ CdTe มักจะนิยมเคลือบด้วยวิธีระเหิดในระยะประชิด โดยจะมีความหนาของฟิล์มบางประมาณ 4-7 ไมโครเมตร และวิธีนี้ยังเหมาะสำหรับนำมาใช้ผลิตในปริมาณมากๆเนื่องจากใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางไม่นาน (ประมาณ 1-2 นาที) และเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพดีที่สุดจึงมักเคลือบฟิล์มบางในระบบที่มีบรรยากาศของแก๊สออกซิเจน (oxidizing atmosphere) เล็กน้อย
- การปรับปรุงโครงสร้างของฟิล์มบางด้วยความร้อนก็เป็นสิ่งจำเป็น โดยทั่วไปแล้วนิยมใช้อุณหภูมิในช่วง 380-420 องศาเซลเซียส สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CdTe/CdS นิยมใช้ Cl_2 โดยที่ Cl_2 จะไปมีบทบาทในการปรับสภาพการเรียงตัวของเกรนใหม่ (re-crystallize) และลดข้อบกพร่องของผลึก (defects) ภายในเนื้อฟิล์มบาง
- ขั้วไฟฟ้าด้านหลัง (back-contact) ที่เหมาะสม จะได้จากการเคลือบ Sb_2Te_3 ด้วยวิธีสปัตเตอร์ริงให้มีความหนาประมาณ 100 นาโนเมตร ซึ่งจะเคลือบไว้ด้านบนของชั้น CdTe

จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้น จะเห็นได้ว่าฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์สามารถเตรียมได้หลากหลายวิธี วิธีที่น่าสนใจคือ วิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิด (close-spacing thermal evaporation method) ที่ความดันมีค่าประมาณ 3.0×10^{-5} มิลลิบาร์ เพราะมีอัตราการเคลือบต่ำทำให้ได้ขอบเขตของเกรน (grain boundary) ขนาดโต นอกจากนั้นยังใช้ต้นทุนต่ำและได้ประสิทธิภาพสูงสุดถึง 16.5% [4]

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการเตรียมและศึกษาสมบัติของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ (CdTe) เพื่อใช้เป็นชั้นดูดกลืนแสง (absorber) ในการประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ โดยฟิล์มบางที่ได้จะทำการเตรียมจากวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิดโดยให้ความร้อนกับฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ พบว่าฟิล์มบางที่ได้จากการเตรียมด้วยวิธีนี้จะมีความหนาสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่นและเนื้อฟิล์มมีคุณภาพดี และในงานวิจัยนี้ได้ทำการปรับปรุงสมบัติทางไฟฟ้าด้วยการเจือพลวง (Sb) เพื่อที่จะนำกระบวนการเหล่านี้ไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 ศึกษาวิธีการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ (CdTe) ที่ไม่มีการเจือและที่มีการเจือด้วยพลวง $\text{CdTe}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) บนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ด้วยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิดโดยให้อุณหภูมิกับฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์
- 1.2.2 ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคและ โครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของผิวหน้าของฟิล์มบาง CdTe และ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
- 1.2.3 ศึกษาสมบัติการส่งผ่านแสงและหาช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง CdTe และ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$)
- 1.2.4 ศึกษาสมบัติเชิงไฟฟ้าของฟิล์มบาง CdTe และ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Sb}_x$ โดยการวัดความต้านทานแผ่น วัดความต้านทานที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ เพื่อคำนวณหา ค่าพลังงานกระตุ้นของระดับพลังงานที่ปรากฏอยู่ในช่องว่างแถบพลังงาน
- 1.2.5 ทำการแอนนัลฟิล์มบาง CdTe และ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ด้วย CdCl_2 ในบรรยากาศแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์และในอากาศความดันปกติอุณหภูมิ 400°C
- 1.2.6 นำเอาฟิล์มบาง CdTe และ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Sb}_x$ ที่ได้รับการแอนนัลแล้วไปศึกษาสมบัติพื้นฐาน ดังข้อ 1.2.2-1.2.5

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- 1.3.1 ทำการเตรียมฟิล์มบาง CdTe และ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) บนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ด้วยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิดโดยให้อุณหภูมิกับฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ $100\text{-}250\text{ }^{\circ}\text{C}$
- 1.3.2 ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคและ โครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของผิวหน้าของฟิล์มบาง CdTe และ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Sb}_x$ โดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
- 1.3.3 ศึกษาสมบัติเชิงไฟฟ้าของฟิล์มบาง CdTe และ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Sb}_x$ โดยการวัดความต้านทานแผ่น วัดความต้านทานที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิเพื่อกำหนดค่าพลังงานกระตุ้นของระดับพลังงานที่ปรากฏอยู่ในช่องว่างแถบพลังงาน
- 1.3.4 ทำการแอนนัลฟิล์มบาง CdTe และ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ด้วย CdCl_2 ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์และในอากาศความดันปกติที่อุณหภูมิ $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ จากนั้นจึงนำเอาฟิล์มบางที่ได้รับการแอนนัลไปศึกษาสมบัติพื้นฐานต่างๆที่สำคัญ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ทำให้ทราบหลักการเตรียมฟิล์มบาง CdTe และ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิดโดยความคมอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ให้อยู่ในช่วง $100\text{-}250\text{ }^{\circ}\text{C}$
- 1.4.2 ทำให้ทราบถึงสมบัติพื้นฐานที่สำคัญของฟิล์มบาง CdTe ซึ่งได้แก่ โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค โครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของผิวหน้าของฟิล์มบาง สมบัติทางแสง และสมบัติทางไฟฟ้า
- 1.4.3 ทำให้ทราบถึงอิทธิพลของ Sb ที่เป็นสารเจือให้กับ CdTe ที่มีต่อโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค โครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของผิวหน้าของฟิล์มบาง สมบัติทางแสง และสมบัติทางไฟฟ้า
- 1.4.4 ทำให้ทราบถึงวิธีการแอนนัลฟิล์มบาง CdTe และ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ด้วย CdCl_2 ในบรรยากาศแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์และในอากาศความดันปกติที่อุณหภูมิ $400\text{ }^{\circ}\text{C}$
- 1.4.5 ทำให้ได้ข้อมูลทางด้านการเตรียมและสมบัติทางฟิสิกส์บางประการที่สำคัญของฟิล์มบาง CdTe และ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Sb}_x$ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์

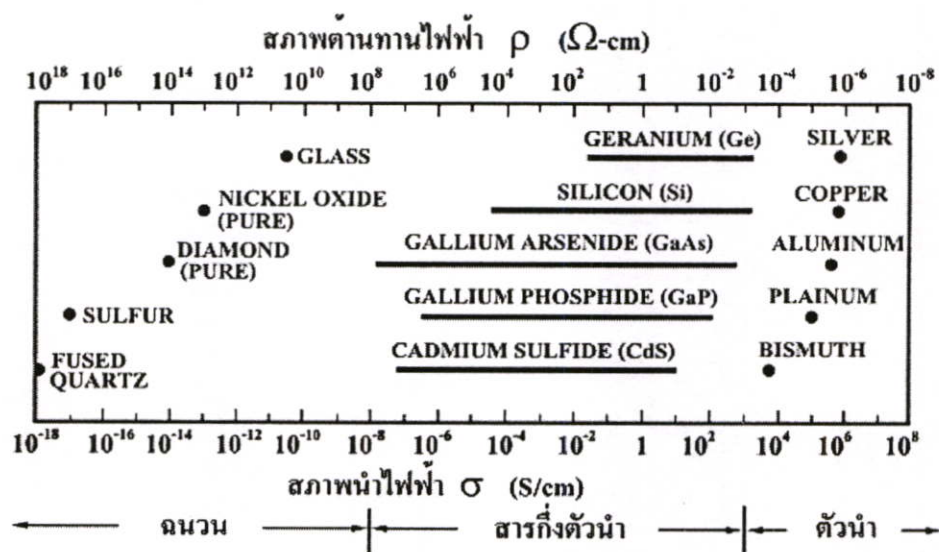
- 1.4.6 นำข้อมูลที่ได้จากการวิจัยไปเป็นแนวทางในการพัฒนาการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิด รอยต่อวิวิธพันธ์ (heterojunction) ของฟิล์มบาง n-CdS/p- CdTe_{1-x}Sb_x ต่อไปในอนาคต

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุของแข็ง [5-8]

วัสดุในสถานะของแข็งสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิดคือ ฉนวน สารกึ่งตัวนำและตัวนำ ในรูปที่ 2.1 แสดงสภาพนำไฟฟ้าของวัสดุที่สำคัญในแต่ละชนิด วัสดุที่เป็นฉนวนเช่น ผลึกควอตซ์ (fused quartz) และกระจกสไลด์ (slide glass) ที่เป็นอะมอร์ฟัส (amorphous) ซึ่งมีสภาพนำไฟฟ้าต่ำอยู่ในช่วง 10^{-18} - 10^{-8} S/cm และวัสดุที่เป็นตัวนำเช่นอะลูมิเนียมและเงินมีสภาพนำไฟฟ้าสูงในช่วง 10^4 - 10^6 S/cm. ส่วนวัสดุที่เป็นสารกึ่งตัวนำมีสภาพนำไฟฟ้าอยู่ระหว่างฉนวนและตัวนำซึ่งสภาพนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำจะตอบสนองต่ออุณหภูมิ การฉายแสง สนามแม่เหล็ก ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวมีความสำคัญกับการนำไปประยุกต์ใช้ในงานอิเล็กทรอนิกส์

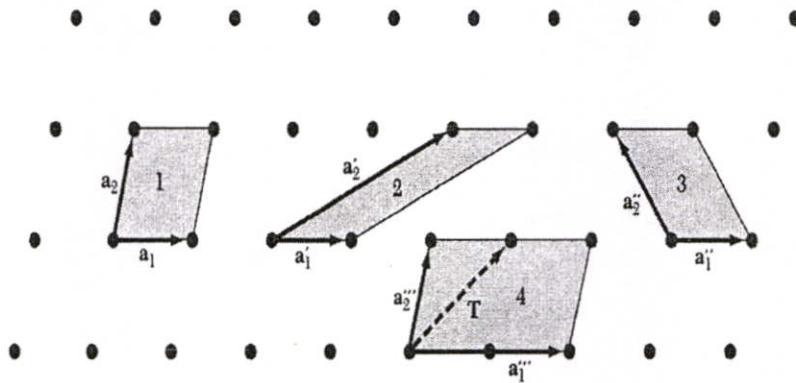


รูปที่ 2.1 แสดงสภาพนำไฟฟ้าและสภาพต้านทานไฟฟ้าของฉนวน สารกึ่งตัวนำ และตัวนำ

2.2 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ [6-13]

ผลึกประกอบด้วยอะตอมหรือกลุ่มของอะตอมที่เรียกว่า เบสิส (basis) ที่อยู่ในตำแหน่งต่างๆ ของโครงผลึกหรือที่เรียกว่า แลตทิซ (lattice) ซึ่งมีการจัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบซ้ำซ้อนกันหรือแบบเป็นคาบ (periodic) ในระบบสามมิติโดยที่เซลล์ที่มีปริมาตรเล็กที่สุดและอาจมีแลตทิซมากกว่าหรือเท่ากับหนึ่งแลตทิซนั้นเรียกว่า หน่วยเซลล์ (unit cell) ในทางทฤษฎีการกำหนดหน่วยเซลล์จะทำได้ไม่จำกัด แต่ตามปกติจะเลือกหน่วยเล็กที่สุดที่เป็นไปได้และมีสมมาตรค่อนข้างสูง ตัวอย่างการเลือกหน่วยเซลล์ในโครงผลึกสองมิติ ดังรูปที่ 2.2 ในระบบสองมิติค่าคงที่ของ

โครงผลึก ได้แก่ เวกเตอร์ \vec{a} และ \vec{b} และ มุมผลึก γ ซึ่งเป็นมุมระหว่าง เวกเตอร์ทั้งสอง ทั้งนี้ชนิดของโครงผลึกที่แตกต่างกันที่เป็นไปได้มีเพียงห้าแบบดังตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.2 แสดงหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ

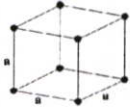
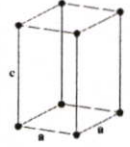

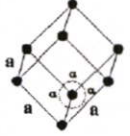
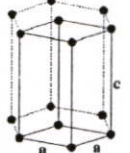
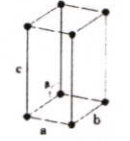
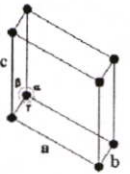
ตารางที่ 2.1 แสดงพารามิเตอร์ของหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ

ชนิดของ โครงผลึก	ค่าคงที่ของ โครงผลึก	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)	$a \neq b$	ไม่มี ข้อกำหนด

ในระบบสามมิติ ค่าคงที่ของโครงผลึก ได้แก่ ขนาดของเวกเตอร์ \vec{a} , \vec{b} และ \vec{c} และ มุมผลึก α , β และ γ ซึ่งเป็นมุมระหว่างเวกเตอร์ต่างๆ ทั้งนี้สามารถจัดแบ่งรูปแบบของโครงผลึกขึ้นมาโดยสามารถแบ่งออกได้เป็นสิบสี่แบบในระบบสามมิติ ซึ่งจัดได้เป็น 7 ระบบ ดังแสดงในตารางที่

2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงระบบผลึกทั้งเจ็ดแบบในระบบสามมิติ

ระบบผลึก	ค่าคงที่ของโครงผลึก และมุมผลึก	รูปทรงเรขาคณิต ของหน่วยเซลล์
<p>คิวบิก (cubic)</p>	$a = b = c,$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
<p>เตตระโกนัล (tetragonal)</p>	$a = b \neq c,$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
<p>ออร์โธโรมบิก (orthorhombic)</p>	$a \neq b \neq c,$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
<p>รอมโบฮีดรัล (rhombohedral)</p>	$a = b = c,$ $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	
<p>เฮกซะโกนัล (hexagonal)</p>	$a = b \neq c,$ $\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$	
<p>โมโนคลินิก (monoclinic)</p>	$a \neq b \neq c,$ $\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$	
<p>ไตรคลินิก (triclinic)</p>	$a \neq b \neq c,$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	

2.3 การระบุตำแหน่งของทิศทางและระนาบของผลึก [5-13]

เนื่องจากสมบัติทางฟิสิกส์ของผลึกขึ้นกับตำแหน่งของทิศทางและระนาบของผลึก ดังนั้นจึงต้องระบุแน่นอนว่ากำลังศึกษาลักษณะส่วนใดของผลึกอยู่ การระบุลักษณะที่ดังกล่าวจะบอกถึงตำแหน่งของทิศทางและระนาบของผลึกที่กำลังศึกษาอยู่นั้น มีหลักเกณฑ์พื้นฐานดังนี้

2.3.1 การระบุตำแหน่ง

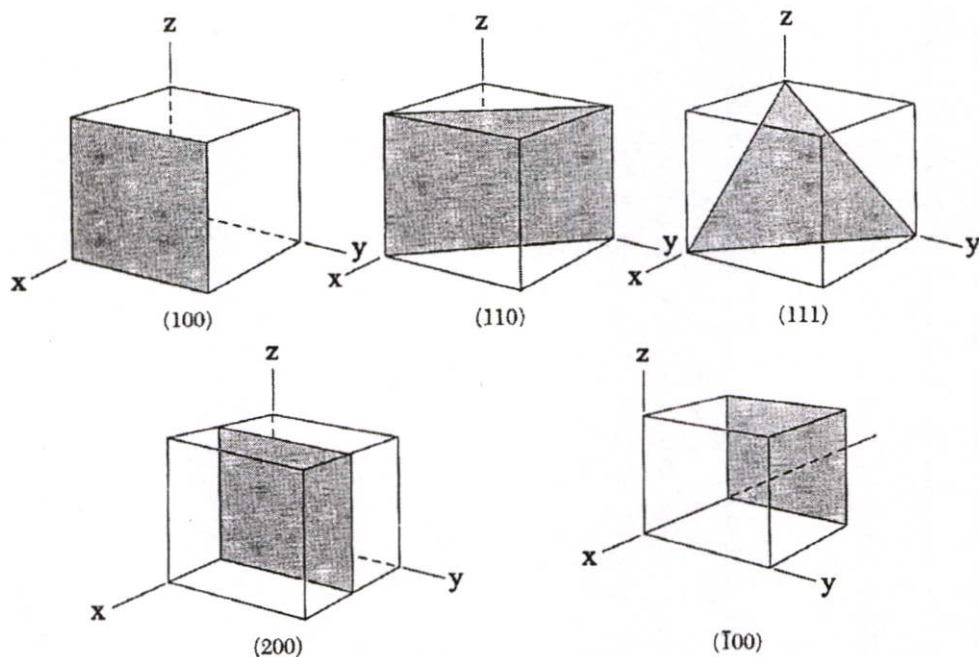
ในกรณีทั่วไปจะเขียนเป็น (x,y,z) โดยให้สังเกตเครื่องหมาย “,” ซึ่งคั่นอยู่ระหว่างค่าแต่ละค่า ตัวอย่างเช่นจุด $(1,2,3)$ หมายความว่า เป็นตำแหน่งอยู่ที่พิกัด $x=1, y=2$ และ $z=3$

2.3.2 การระบุทิศทาง

ในกรณีทั่วไปจะเขียนเป็น $[u v w]$ โดยให้สังเกตว่าใช้วงเล็บก้ามปู และไม่มีเครื่องหมาย “ , ” คั่นอยู่ระหว่างค่าแต่ละค่า ถ้าเป็นทิศทางที่เป็นลบก็จะใส่เครื่องหมาย “ - ” หรือ บาร์ (bar) ไว้บนตัวเลขนั้นๆ เช่น ทิศทาง $[\bar{1}2\bar{1}]$ แสดงว่าในแนวแกน z มีค่าเป็นลบ

2.3.3 การระบุชื่อระนาบ

การระบุชื่อระนาบแต่ละระนาบจะใช้อักษร (hkl) โดยให้สังเกตการใช้วงเล็บ และไม่มีเครื่องหมาย “ , ” คั่นอยู่ระหว่างค่าแต่ละค่า ค่า (hkl) เรียกว่า ดัชนีมิลเลอร์ (miller indices) ระนาบของผลึกเป็นสิ่งที่สำคัญที่สุดอีกประการหนึ่งในการศึกษาผลึก เพราะในแต่ละระนาบจะประกอบไปด้วยอะตอม ไอออน หรือ โมเลกุล เรียงตัวกันอยู่บนระนาบนั้น อาจกล่าวได้ว่าระนาบแต่ละระนาบจะมีความแตกต่างกันเช่นเดียวกับทิศทาง ค่าดัชนีมิลเลอร์มีวิธีการหาได้จากขั้นตอนดังต่อไปนี้คือ เริ่มต้นจากการกำหนดจุดที่ระนาบนั้นตัดแกนผลึกแต่ละแกนคือค่า (x,y,z) และจึงทำให้เป็นเศษส่วนกลับ ต่อจากนั้นให้หาผลคูณร่วมน้อย (ค.ร.น.) ของเศษส่วนกลับเหล่านั้น ก็จะได้พารามิเตอร์ (hkl) ตามลำดับ นอกจากนี้ระนาบใดขนานกับแกนใดให้ประมาณว่าระนาบนั้นตัดแกนนี้ที่ระยะอนันต์ ส่วนระนาบใดตัดแกนลบ ก็ให้ใส่เครื่องหมาย - บนค่าดัชนีมิลเลอร์ตัวนั้น เช่นระนาบ (010) จะตัดแกนผลึกที่ $(\infty,1,\infty)$ และระนาบ $(\bar{1}11)$ จะตัดแกนผลึกที่ $(-1,1,1)$ ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 2.3 และตารางที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ

ตารางที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ของดัชนีมิลเลอร์และจุดตัดแกนผลึก

จุดที่ระนาบตัดแกนผลึก (x,y,z)	ส่วนกลับของจุดที่ระนาบตัดแกนผลึก $\frac{1}{h}, \frac{1}{k}, \frac{1}{l}$	ดัชนีมิลเลอร์(hkl)หรือระนาบ
($\infty, 1, \infty$)	$\frac{1}{0}, \frac{1}{1}, \frac{1}{0}$	(010)
(-1, 1, 1)	$-\frac{1}{1}, \frac{1}{1}, \frac{1}{1}$	($\bar{1}$ 11)
(-1, -1, -1)	$-\frac{1}{1}, -\frac{1}{1}, -\frac{1}{1}$	($\bar{1}\bar{1}\bar{1}$)
($\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{4}$)	$\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{4}$	(224)
($\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0$)	$\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0$	(220)

มีข้อสังเกตที่ควรรู้เกี่ยวกับดัชนีมิลเลอร์เพิ่มเติมดังนี้

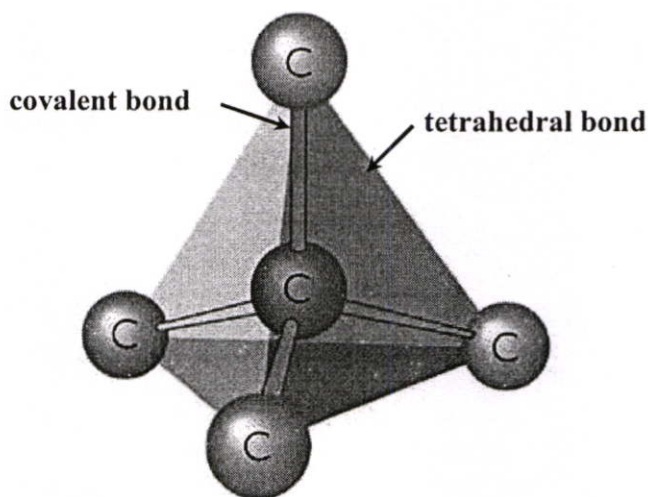
สำหรับ โครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลจะระบุดัชนีมิลเลอร์ที่ต่างไปเป็น (hkil) แต่เนื่องจากมีสมบัติความสมมาตรของแกนผลึกจึงกำหนดให้ดัชนีมิลเลอร์ตัวที่สาม (หรือ i) ซึ่งเพิ่มเข้ามานั้นจะมีความสัมพันธ์กับดัชนีมิลเลอร์สองตัวแรก (h และ k) ดังนี้

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

เช่น ในโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลระนาบ (110) จะเรียกว่า $(11\bar{2}0)$ นอกจากนี้มักพบว่าสำหรับโครงสร้างผลึกแบบคิวบิกเท่านั้นที่จะพบว่าทิศทาง $[hkl]$ จะตั้งฉากกับระนาบที่มีดัชนีมิลเลอร์เหมือนกันนั่นคือระนาบ (hkl) ตัวอย่างเช่น ทิศทาง $[102]$ จะตั้งฉากกับระนาบ (102)

2.4 โครงสร้างผลึกของสารประกอบที่เกิดจากอะตอมของธาตุกลุ่ม II และกลุ่ม VI [6-17]

ผลึกของสารประกอบที่เกิดจากการสร้างพันธะเคมีระหว่างอะตอมของธาตุกลุ่ม II (อะตอม A) และกลุ่ม VI (อะตอม B) ซึ่งมีอิเล็กตรอนวาเลนซ์ต่ออะตอมเท่ากับ 4 ในโครงสร้างผลึกแต่ละอะตอม A หรืออะตอม B จะมีอะตอม B หรืออะตอม A ที่อยู่ใกล้เคียงที่สุดล้อมรอบอยู่ 4 อะตอม ซึ่งมีการสร้างพันธะเคมีระหว่างอะตอมเป็นแบบพันธะโควาเลนต์ (covalent bond) และมีพันธะเคมีของโมเลกุลเป็นแบบพันธะสี่หน้าหรือพันธะเตตระฮีดรัล (tetrahedral bond) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 จากลักษณะการจัดเรียงอะตอมดังกล่าวทำให้สามารถแบ่งโครงสร้างผลึกได้ 2 แบบคือ โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ (zinc blende structure) และ โครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซต์ (wurtzite structure)

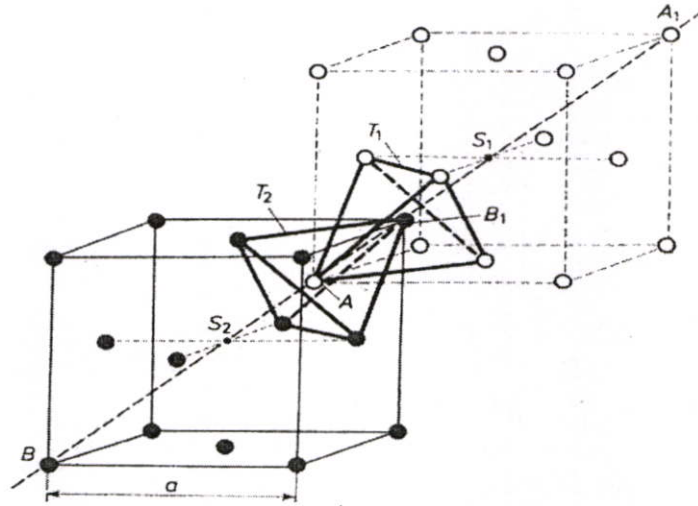


รูปที่ 2.4 แสดงพันธะสี่หน้าหรือพันธะเตตระฮีดรัล

2.4.1 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ (zinc blende structure)

โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ (zinc blende structure) เกิดจากการซ้อนเหลื่อมกันของโครงสร้างผลึกแบบเฟซเซนเตอร์คิวบิก (face centered cubic: fcc) 2 หน่วยเซลล์ ซึ่งมีค่าคงที่ของโครงสร้างเท่ากับ a และมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ s_1 (อะตอม A: สีขาว) และมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ s_2 (อะตอม B: สีดำ) และหน่วยเซลล์จัดเรียงไปตามแนว A_1B_1 ดังนั้นจะได้ระยะ $AB = \frac{1}{4}AA_1 = \frac{1}{4}BB_1$ ฐานของ

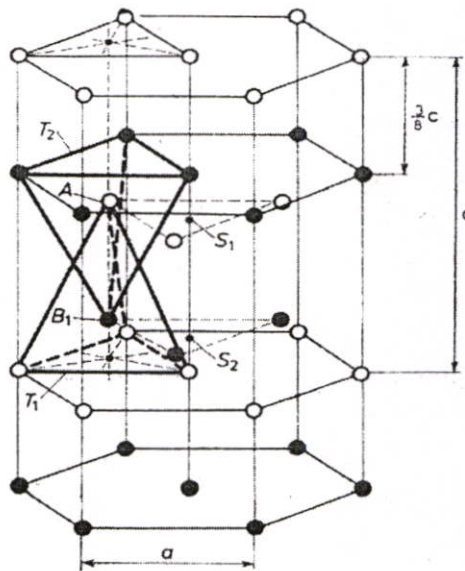
พันธะสี่หน้า T_1 และ T_2 ขนานกันและหมุนทำมุม 60° ออกจากแกน A_1B_1 ระยะระหว่างอะตอมกับอะตอมเพื่อนบ้านที่ใกล้ที่สุด (nearest neighbors) มีค่าเท่ากับ $d_{AB} = \frac{\sqrt{3}}{4}a$ ซึ่งลักษณะโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์แสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์

2.4.2 โครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซต์ (wurtzite structure)

โครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซต์เกิดจากการซ้อนเหลื่อมกันของโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล 2 หน่วยเซลล์ ซึ่งมีค่าคงที่ของโครงผลึกเท่ากับ a และ c มีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ s_1 และ s_2 หน่วยเซลล์จัดเรียงไปในแนวแกน c ระยะระหว่างอะตอมกับอะตอมเพื่อนบ้านที่ใกล้ที่สุดมีค่าเท่ากับ $d_{AB} = \frac{3}{8}c = \sqrt{\frac{3}{8}}a$ ฐานพันธะสี่หน้า T_1 และ T_2 ขนานกันและระยะระหว่างฐานมีค่าตามแนวแกน c ซึ่งลักษณะโครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซต์แสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดง โครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไฮท์

2.5 ผลึกจริง [9-13]

ที่ผ่านมาเราพิจารณาโครงสร้างผลึกในอุดมคติมาโดยตลอด แต่ในความเป็นจริงแล้วมักจะพบความไม่สมบูรณ์ของผลึกหรือข้อบกพร่องผลึก (defects) ที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างผลึกเสมอซึ่งเรียกว่าผลึกจริง (real crystal) หรือผลึกไม่สมบูรณ์ (imperfect crystal) โดยความไม่สมบูรณ์ของผลึกที่เกิดขึ้นเหล่านี้ มักจะมีผลทำให้สมบัติต่าง ๆ ของสารเปลี่ยนแปลงไปเราสามารถแบ่งความไม่สมบูรณ์ของผลึกตามรูปทรงเรขาคณิตและรูปร่างได้เป็น 3 แบบ ดังนี้คือ

2.5.1 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบศูนย์มิติหรือแบบจุด

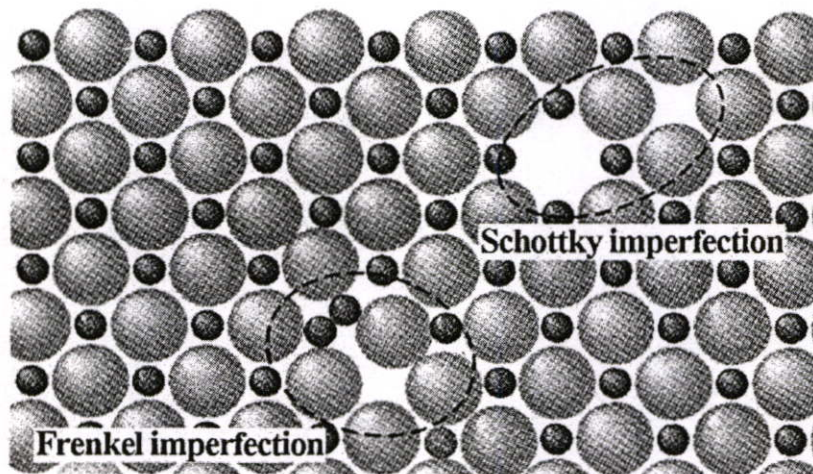
ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดสามารถเกิดได้หลายลักษณะซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.7 ดังนี้

ก. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบช่องว่างหรือเวแคนซี (vacancy defect) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการที่อะตอมหลุดหายไปจากตำแหน่งที่ควรจะมีอยู่ในโครงผลึกจึงทำให้เกิดเป็นช่องว่างเกิดขึ้น

ข. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบเซลฟี่อินเตอร์สติเชียล (self interstitial) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการที่อะตอมของเจ้าของบ้าน (host lattice) เข้าไปแทรกตัวอยู่ในตำแหน่งที่เป็นที่ว่างระหว่างอะตอม

ค. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบอินเตอร์สติเชียลอิมเพียวริตีอะตอม (interstitial impurity-atom) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุด ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการที่มีอะตอมของธาตุชนิดอื่นหรือ

ข. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบเฟรเนล (Frenkel imperfection) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดที่เกิดช่องว่างขึ้นเนื่องจากมีไอออนที่อยู่ภายใน โครงผลึกเคลื่อนย้ายไปยังบริเวณที่ตำแหน่งที่ควรจะเป็นที่ว่างของโครงผลึกหรืออาจเกิดขึ้นเนื่องจากไอออนบวกที่มีขนาดเล็กกว่าไม่ได้หลุดหายออกไปจากโครงผลึก แต่เข้าไปแทรกตัวอยู่ในบริเวณที่ควรจะเป็นที่ว่างที่อยู่ระหว่างไอออนลบกับไอออนบวกอีกตัวหนึ่งทำให้เกิดแวนแคนซีของไอออนบวก (cation vacancy)



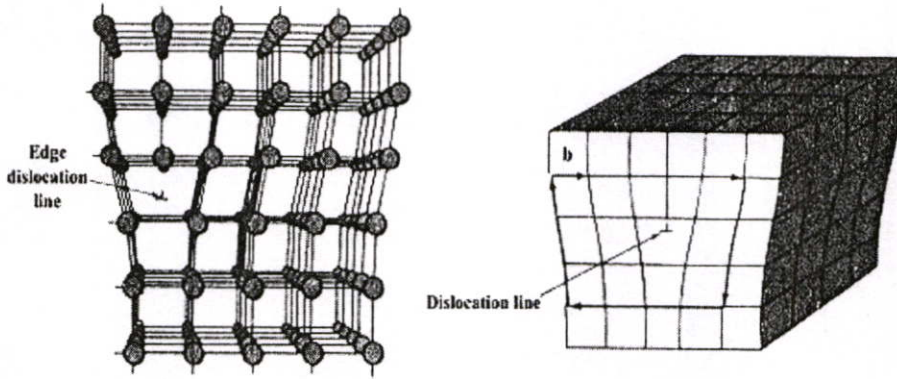
รูปที่ 2.8 แสดงการเกิดความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบชอตต์กีและความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบเฟรเนล

2.5.2 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบหนึ่งมิติหรือแบบเส้น

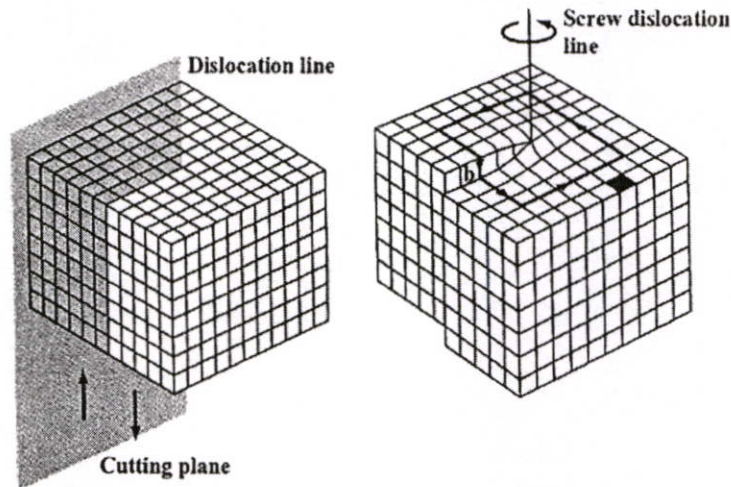
เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกในลักษณะเป็นเส้น (line imperfection) หรือสามารถเรียกได้อีกอย่างหนึ่งก็คือดิสโลเคชัน (dislocation) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกที่เกิดจากอะตอมของโครงผลึก ณ จุดต่างๆ อยู่ในแนวหรือแถวเดียวกันไม่อยู่ตามตำแหน่งที่ถูกต้อง ทำให้เกิดการบิดเบี้ยวของโครงผลึก (distortion) ขึ้น โดยมี 2 ลักษณะดังนี้

ก. ดิสโลเคชันแบบขอบ (edge dislocation) เกิดขึ้นเนื่องจากมีอะตอมในแถวใดแถวหนึ่งหายไปหรือแทรกเข้ามาอยู่ผิดปกติ ก็ทำให้บริเวณขอบของโครงผลึกถูกอัดเข้ามาหรือดันออกไปจากแนวปกติโดยมีระนาบของการเลื่อน (slip plane) ตั้งฉากกับทิศทางของการเลื่อน (slip direction or edge dislocation line) ซึ่งขนาดของการกระจัด (displacement) นั้นเรียกว่า เบอร์เกอร์เวกเตอร์ (burgers vector: \vec{b}) ดังแสดงในรูปที่ 2.9

ข. ดิสโลเคชันแบบสกรู (screw dislocation) เกิดขึ้นเนื่องจากมีอะตอมในแถวใดแถวหนึ่งของโครงผลึกผิดรูปไปแบบสกรูกล่าวคือระนาบที่การเลื่อนไป (slip plane) จะขนานกับทิศทางของการเลื่อน (slip direction or screw dislocation line) ซึ่งขนาดของการกระจัดนั้นเรียกว่าเบอร์เกอร์เวกเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบดิสโตเคชันแบบขอบ



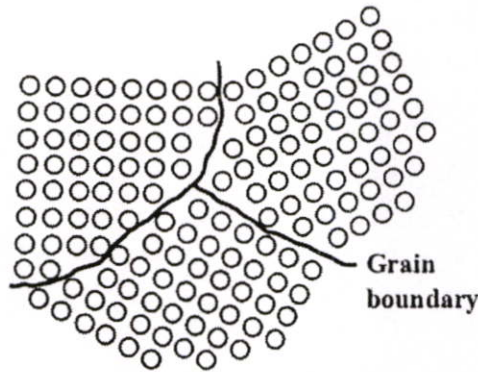
รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบดิสโตเคชันแบบสกรู

2.5.3 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบสองมิติหรือแบบระนาบ

ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบสองมิติหรือแบบระนาบนี้เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกบนพื้นผิว (surface imperfection) สามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ

2.5.3.1 เกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน (grain and grain boundary)

เกรนคือบริเวณเล็กๆที่โครงสร้างหรือหน่วยเซลล์มีการจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกันและตรงบริเวณขอบเขตรอยต่อระหว่างบริเวณที่โครงสร้างมีการจัดเรียงตัวในทิศทางแตกต่างกันนั้นเรียกว่าขอบเขตรอยต่อของเกรนดังแสดงในรูปที่ 2.11 โดยที่ผลึกที่มีมากกว่าหนึ่งเกรนนั้นเรียกว่าผลึกพหุพันธ์ (polycrystallines) ส่วนผลึกที่มีเพียงเกรนเดียวนั้นเรียกว่า ผลึกเอกพันธ์หรือผลึกเดี่ยว (single crystal)

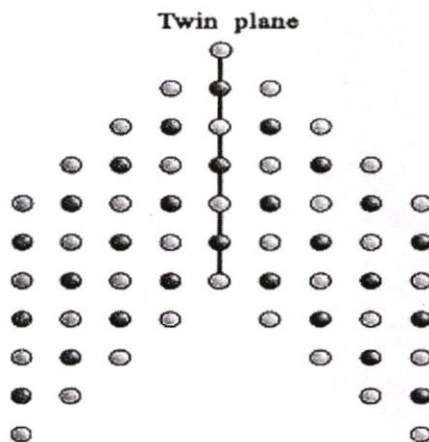


รูปที่ 2.11 แสดงความไม่สมบูรณ์ของผลึกชนิดเกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน

2.5.3.2 ทวินและขอบเขตรอยต่อของทวินหรือระนาบของทวิน

(twin and twin boundary or twinplane)

ทวินคือบริเวณที่โครงสร้างหรือหน่วยเซลล์มีการผิดรูปไปโดยมีสมมาตรแบบกระจกโดยที่โครงสร้างที่ผิดรูปจะกลายเป็นภาพสะท้อนของโครงสร้างที่ไม่ผิดรูปและตรงบริเวณขอบเขตรอยต่อระหว่างโครงสร้างที่ผิดรูปและโครงสร้างที่ไม่ผิดรูปนี้เรียกว่า ขอบเขตรอยต่อของทวินหรือระนาบของทวิน ดังแสดงในรูปที่ 2.12

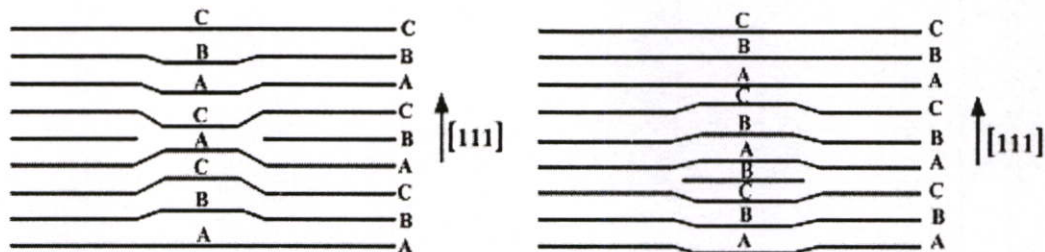


รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบทวินและระนาบของทวิน

2.5.3.3 การจัดเรียงระนาบผิคลำดับ (stacking faults)

เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกบนพื้นผิวที่เป็นผลมาจากการที่โครงสร้างมีการจัดเรียงระนาบของอะตอมแบบผิคลำดับ เช่น สำหรับโครงสร้างออคตาฮีดรอนแบบ fcc ที่มีการจัดเรียงระนาบของอะตอมที่ถูกต้องตามลำดับเป็น ABCABCABC... แต่ถ้าเป็นกรณีโครงสร้างที่ไม่สมบูรณ์จะมีการจัดเรียงระนาบของอะตอมเป็น ABCABABCA... การเกิดการจัดเรียงระนาบผิคลำดับจากตัวอย่างขึ้นอยู่กับระนาบ A ที่อยู่ถัดจากระนาบที่ 2 “B” และอาจจะอธิบายได้ว่าเป็นบริเวณที่มีระนาบที่อยู่ใน

โครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล โคลสแพค (hexagonal close packed: hcp) แทรกอยู่กับระนาบที่อยู่
 ในโครงสร้างผลึกแบบเฟซเซ็นเตอร์คิวบิก (face center cubic: fcc) ซึ่งอาจจะเกิดในระหว่างที่เกิด
 ผลึกและอาจเป็นผลจากการเกิดดิสโลเคชันย่อย (partial dislocation) สองส่วนดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการจัดเรียงระนาบของอะตอมผิกลำดับ

2.6 พันธะเคมี [12-17]

พันธะเคมีระหว่าง 2 อะตอมขึ้นอยู่กับธาตุที่อยู่ในตารางธาตุ พันธะเคมีพื้นฐานที่เกิดขึ้นมีอยู่ 3 ชนิดคือ พันธะไอออนิก พันธะโควาเลนต์ และพันธะโลหะ ทฤษฎีทางพันธะเคมีศึกษาโดย Pauling และ Slater ซึ่งอธิบายถึงปริมาณที่บ่งชี้ถึงความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติทางโครงสร้าง คุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมีของผลึก จากการทดลองระยะระหว่างอะตอมและฟังก์ชันของอะตอมรวมทั้งการกระจายความหนาแน่นของอิเล็กตรอนจากความเข้มของรังสีเอ็กซ์ แสดงให้เห็นถึงพันธะเคมีในผลึกสารประกอบกลุ่ม II-VI ทั้งโครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์และโครงสร้างแบบเวอร์ทไชท์ โดยส่วนมากจะแสดงทั้งพันธะไอออนิกและพันธะโควาเลนต์

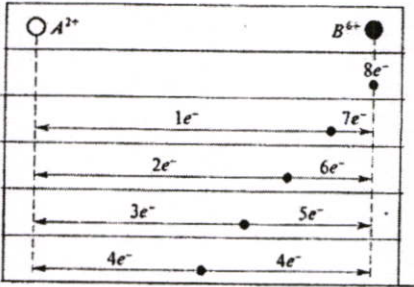
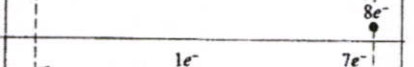
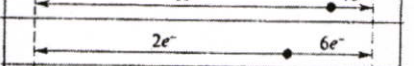
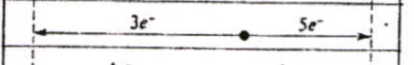

พันธะไอออนิกประกอบด้วยอันตรกิริยาคูลอมบ์ระหว่างไอออนบวกและไอออนลบผลที่ตามมาอิเล็กตรอนวาเลนซ์จะเคลื่อนย้ายจากธาตุโลหะไปยังธาตุอโลหะ ตัวอย่างเช่นการเคลื่อนย้ายของอิเล็กตรอนที่อยู่ในระดับชั้นของพลังงาน $4s^2$ จากอะตอมของธาตุสังกะสี (Zn) ไปยังระดับชั้นพลังงาน sp ของอะตอมของธาตุเทลลูเรียม (Te) ซึ่งทำให้เกิดไอออนของธาตุสังกะสี (Zn^{2+}) และไอออนของธาตุเทลลูเรียม (Te^{2-})

พันธะโควาเลนต์คือการสร้างคู่อิเล็กตรอนกับสปินตรงกันข้าม อิเล็กตรอนหนึ่งตัวของแต่ละอะตอมก็จะสร้างคู่อิเล็กตรอนด้วยกันทั้งสองอะตอมเป็นพันธะ ในกรณีวาเลนซ์อิเล็กตรอนวาเลนซ์เท่ากับ $8 (4s^2$ จากอะตอมของธาตุสังกะสีและ $5s^2p^4$ จากอะตอมของธาตุเทลลูเรียม) ก็จะถูกแบ่งเท่าๆกันระหว่างของธาตุสังกะสีและอะตอมของธาตุเทลลูเรียมและประจุสุทธิของแต่ละอะตอมเท่ากับ Zn^{2+} และ Te^{2-} ประจุสุทธินี้มีความสัมพันธ์กับผลึกที่เป็นพันธะไอออนิก

มูเซอร์ (Mooser) และเพียร์สัน (Pearson) ได้พิสูจน์เกี่ยวกับแนวความคิดของพันธะเคมี ซึ่งมีแนวความคิดที่แตกต่างกัน โดยแสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติของพันธะเคมีในสารประกอบกลุ่ม II-VI ดังตารางที่ 2.4 แสดงการกระจายของวาเลนซ์และความเป็นพันธะไอออนิกในสารประกอบกลุ่ม

II-VI ถ้าอิเล็กตรอนวาเลนซ์หลุดออกไปจากอะตอม A และอะตอม B เราจะได้ประจุเป็นบวก A^{2+} และ B^{6+} ประจุมรวมของวาเลนซ์คืออิเล็กตรอนที่หลุดออกไปรวมกันเท่ากับ $8e^-$ การส่งผ่านของประจุไปยังอะตอม B^{6+} ก็จะแทนด้วยไอออน B^{2-} นี่คือนิพจน์ไอออนิกที่มีประจุของอะตอมสุทธิ $A^{2+}B^{2-}$ สำหรับกรณีอิเล็กตรอนวาเลนซ์มีการเคลื่อนย้ายไปมาระหว่างสองอะตอมซึ่งในกรณีนี้การกระจายของอิเล็กตรอนวาเลนซ์มีค่าเท่ากัน ทำให้พันธะโควาเลนต์ที่มีประจุสุทธิของแต่ละอะตอมคือ A^+B^+ และศูนย์กลางการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนอยู่ที่กึ่งกลางระหว่างอะตอม A กับอะตอม B ซึ่งแทนด้วย d_{AB} เมื่อศูนย์กลางของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่อยู่ใกล้กับไอออน B^{6+} ตัวอย่างเช่นที่ระยะ $\frac{1}{4}d_{AB}$ เมื่อการกระจายอิเล็กตรอนวาเลนซ์คือ $2e^-$ และ $6e^-$ ในกรณีนี้สามารถแทนได้ด้วยโมเลกุล A^0B^0 ซึ่งมีประจุสุทธิของแต่ละอะตอมเท่ากับศูนย์ นี่คือนิพจน์ทางเคมีระหว่างอะตอมซึ่งทำให้เกิดพันธะไอออนิก

ตารางที่ 2.4 แสดงการกระจายประจุและความเป็นพันธะไอออนิกของสารประกอบหมู่ $A^{II}B^{VI}$

Effective charge of atoms in the molecule	Distribution of valency electron charge (●—centre of "bridge")	Bond ionicity (%)	
		formal	effective
$A^{2+}B^{2-}$		100	100
$A^{1+}B^{1-}$		75	50
A^0B^0		50	0
$A^{1-}B^{1+}$		25	
$A^{2-}B^{2+}$		0	

ตารางที่ 2.5 แสดงการจัดเรียงอิเล็กตรอนในอะตอมอิสระของธาตุที่มีอะตอมของธาตุสังกะสี อะตอมของธาตุเทลลูเรียมและอะตอมของธาตุซีลีเนียมเป็นองค์ประกอบ

Atomic number Z	Symbol of the element	Principal quantum number n																	
		1		2		3		4		5		6							
		1s	2s	2p	3s	3p	3d	4s	4p	4d	4f	5s	5p	5d	5f	6s	6p	6d	
Metals	30	Zn	2	2	6	2	6	10	2										
	48	Cd	2	2	6	2	6	10	2	6	10		2						
	80	Hg	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10	2			
Chalcogens	34	Se	2	2	6	2	6	10	2	4									
	52	Te	2	2	6	2	6	10	2	6	10		2	4					

ตารางที่ 2.6 แสดงขนาดรัศมีของพันธะไอออนิกของแต่ละธาตุ

ธาตุ เลขอะตอม (Z)	ค่าไอออนในเซชัน	รัศมีไอออนิก (Å)	ธาตุ เลขอะตอม (Z)	ค่าไอออนในเซชัน	รัศมีไอออนิก (Å)
Li 3	1 ⁺	0.68	Se 34	4 ⁺ 6 ⁺ 2 ⁻	0.69 0.35 1.98
B 5	3 ⁺	0.21	Br 35	7 ⁺ 1 ⁻	0.39 1.96
N 7	5 ⁺ 3 ⁻	0.15 1.48	Ag 47	1 ⁺	1.13
O 8	6 ⁺ 2 ⁻	0.09 1.36	Cd 48	2 ⁺	0.99
F 9	7 ⁺ 1 ⁻	0.07 1.33	In 49	1 ⁺ 3 ⁺	1.30 0.92
Na 11	1 ⁺	0.98	Sb 51	3 ⁺ 5 ⁺ 3 ⁻	0.90 0.62 2.08
Al 13	3 ⁺	0.57	Te 52	4 ⁺ 6 ⁺ 2 ⁻	0.89 0.56 2.22
P 15	5 ⁺ 3 ⁻	0.35 1.86	J 53	7 ⁺ 1 ⁻	0.50 2.20
S 16	6 ⁺ 2 ⁻	0.30 1.86	Au 79	1 ⁺ 3 ⁺	1.37 0.85
Cl 17	7 ⁺ 1 ⁻	0.26 1.81	Hg 80	2 ⁺	1.12
K 19	1 ⁺	1.33	Bi 83	3 ⁺ 5 ⁺	1.20 0.74
Ti 22	2 ⁺ 3 ⁺ 4 ⁺	0.78 0.69 0.64			

ตารางที่ 2.6 (ต่อ)

ธาตุ เลขอะตอม (Z)	ค่าไอออไนเซชัน	รัศมีไอออนิก (Å)	ธาตุ เลขอะตอม (Z)	ค่าไอออไนเซชัน	รัศมีไอออนิก (Å)
Mn 25	2 ⁺	0.91	Eu	2 ⁺	1.09
	3 ⁺	0.70	63	3 ⁺	0.96
	4 ⁺	0.52	Tb	3 ⁺	0.92
	7 ⁺	0.46	65	4 ⁺	0.84
Co 27	2 ⁺	0.80	Dy	3 ⁺	0.91
	3 ⁺	0.72	66		
Ni 28	2 ⁺	0.79	Ho	3 ⁺	0.89
	3 ⁺	0.72	67		
Cu 29	1 ⁺	0.98	Er 68	3 ⁺	0.87
	2 ⁺	0.80			
Zn 30	2 ⁺	0.83	Tm 69	3 ⁺	0.86
Ga 31	3 ⁺	0.62			
As 33	3 ⁺	0.69	Yb 70	3 ⁺	0.85
	5 ⁺	0.47			
	3 ⁻	1.91			

จากการคำนวณทางเทอร์โมไดนามิกส์รวมทั้งการทดลองจุลศาสตร์ของการระเหิดสารประกอบกลุ่ม II-VI สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้คือ



เมื่อ A คือ อะตอมของ Hg, Cd, หรือ Zn

B คือ อะตอมของ Te หรือ Se

s คือ สภาวะของแข็ง

g คือ สภาวะแก๊ส

ตามทฤษฎีจลน์การระเหิดรวมทั้งการแพร่ของอะตอม A และอะตอม B ที่ผิวหน้า ซึ่งอะตอม B จะรวมกันเป็น โมเลกุล B_2 ก่อนที่จะไปเป็นสภาวะแก๊ส

จากกฎการคงตัวของมวล (law of mass action) [14] พิจารณาภาวะสมดุลเชิงความร้อน (thermal equilibrium) เมื่อ

$$P\left(\frac{A}{AB}\right)P^{\frac{1}{2}}\left(\frac{B_2}{AB}\right) = K_p(T) \quad (2.3)$$

เมื่อ P คือ ความดัน

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

$$\log K_p(T) = -\frac{\Delta G(T)}{4.575T} \quad (2.4)$$

เมื่อ $\Delta G(T)$ คือ พลังงานอิสระของกิบส์ (Gibb's free energy)

ความดันรวมของสารประกอบ AB

$$P_t = P\left(\frac{A}{AB}\right) + P\left(\frac{B_2}{AB}\right) \quad (2.5)$$

เมื่อ P_t คือ ความดันรวม

ดังนั้นสามารถเปลี่ยนอัตราส่วนของความดันน้อยที่สุดเมื่อส่วนประกอบของความดันไอเป็นตามสัดส่วนทางเคมี

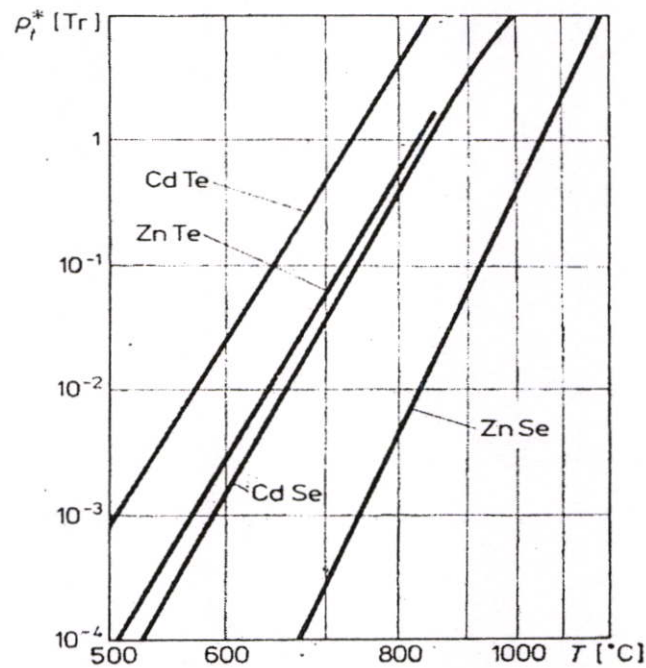
$$P\left(\frac{B_2}{AB}\right) = \frac{1}{2} P\left(\frac{A}{AB}\right) \quad (2.6)$$

ในกรณีความดันสมดุล สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้คือ

$$\log P_i^* = \frac{2}{3} \frac{\Delta G(T)}{4.575T} + \log 3 - \frac{2}{3} \log 2 \quad (2.7)$$

เมื่อ P_i^* ในหน่วยบาร์ (bar)

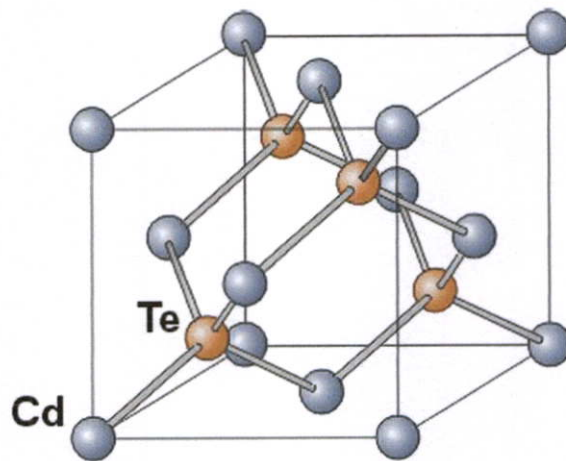
ความดันไอรวม P_i^* ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ จากสภาวะของแข็งของ ZnSe, CdTe, ZnTe ที่ความดันไอเป็นสัดส่วนทางเคมีแสดงดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แสดงสมดุลความดันไอรวม

2.7 ผลึกแคดเมียมเทลลูไรด์ [12, 14-17]

ผลึกแคดเมียมเทลลูไรด์เป็นสารประกอบกึ่งตัวนำหมู่ II-VI มีโครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์มีค่าคงตัวของโครงผลึกเท่ากับ 6.481 อังสตรอมและมีความหนาแน่น 6.2 g/cm^3 มีจุดหลอมเหลว 1040 องศาเซลเซียส เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีค่าช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 1.50 eV มีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงสูงในย่านความยาวคลื่นแสงที่ตามองเห็น สำหรับแคดเมียมเทลลูไรด์ที่มีความหนาในระดับไมครอนสามารถดูดกลืนพลังงานโฟตอนได้มากกว่า 90% สำหรับโฟตอนที่มีพลังงานมากกว่า 1.50 eV ผลึกแคดเมียมเทลลูไรด์เสถียรที่อุณหภูมิสูงกว่า 500 องศาเซลเซียส ดังนั้นผลึกแคดเมียมเทลลูไรด์จึงเหมาะกับการนำมาใช้เป็นชั้นดูดกลืนพลังงานโฟตอนในเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 2.15 แสดง โครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์ของผลึกแคดเมียมเทลลูไรด์

2.8 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ [6-13]

การศึกษาโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction) เป็นการศึกษาเพื่อยืนยันว่าฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้ มีโครงสร้างผลึกแบบใดเป็นไปตามที่ต้องการและเมื่อทราบผลแล้ว จึงจะนำฟิล์มบางที่ได้ไปตรวจสอบสมบัติทางฟิสิกส์อื่นๆ ต่อไป

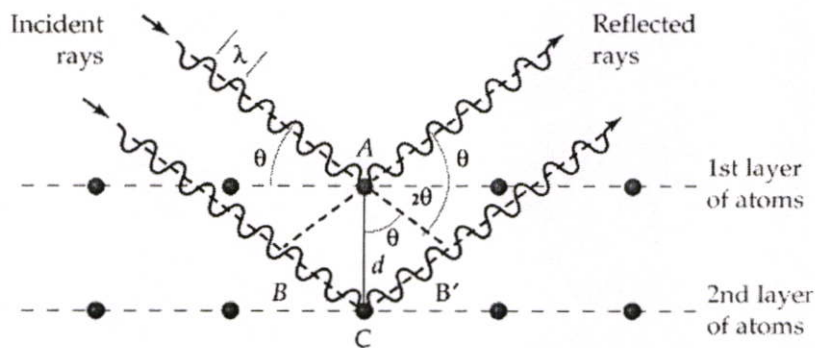
ในปี 1912 นักฟิสิกส์ชาวเยอรมันชื่อ มากซ์ ฟอน เลาเอ (Max Von Laue) ได้ค้นพบการจัดเรียงตัวของอะตอมในผลึก (มีระยะห่างระหว่างอะตอมประมาณ 10^{-10} เมตร) โดยการผ่านรังสีเอกซ์เข้าไปในผลึกแล้วศึกษาถึงวิธีการแทรกสอดของรังสีเอกซ์บนแผ่นฟิล์ม โดยสังเกตว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนที่เกิดขึ้นเกิดจากการที่รังสีเอกซ์ถูกกระเจิงด้วย อะตอมหรือโมเลกุลที่จัดเรียงตัวบนระนาบต่างๆ ของโครงผลึก

ต่อมาในปีเดียวกันนักวิทยาศาสตร์พ่อลูกตระกูลแบรกก์คือ วิลเลียม เฮนรี แบรกก์ และวิลเลียม ลอร์เรนซ์ แบรกก์ (William Henry Bragg and William Lawrence Bragg) ได้เสนอแนวคิดที่ว่าเรา

สามารถมองได้ว่าผลึกจัดเรียงตัวเป็นชั้น (layer) หรือ ระนาบ (plane) ของอะตอมซึ่งสามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบ โดยมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน และได้ตั้งกฎการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ไว้ว่า รังสีเอกซ์จะแทรกสอดเสริมกันมากที่สุด เมื่อมีการกระเจิงออกจากแต่ละระนาบด้วยระยะที่แตกต่างกันเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ และกฎนี้เรียกว่ากฎของแบรกก์ (Bragg's law) ดังสมการที่ (2.8)

$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda \quad (2.8)$$

เมื่อ	d_{hkl}	คือ	ระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอมในผลึกที่ขนานกัน
	θ	คือ	มุมตกกระทบและมุมสะท้อนของรังสีเอกซ์ที่ทำกับระนาบของผลึก
	2θ	คือ	มุมแบรกก์หรือมุมเลี้ยวเบนซึ่งเป็นมุมที่รังสีตกกระทบทำมุมกับรังสีสะท้อน
	n	คือ	ลำดับที่ของการเลี้ยวเบนมีค่าตั้งแต่ 1, 2, 3, ...
	λ	คือ	ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์



รูปที่ 2.16 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากระนาบผลึก

จากข้อมูลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เราสามารถนำมาหาค่าคงตัวของโครงผลึกได้ ในกรณีของผลึกที่มีโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ซึ่งจัดอยู่ในระบบคิวบิก ($a = b = c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$) มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (2.9)$$

จากสมการที่ (2.8) เมื่อ $n = 1$ แทนใส่ในสมการที่ (2.9) จะได้ความสัมพันธ์ที่ใช้หาค่าคงตัวของโครงผลึก (a) เมื่อทราบมุมแบรกก์ (θ) ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ (λ) และดัชนีมิลเลอร์ (hkl) ดังสมการ

$$\frac{4 \sin^2 \theta}{\lambda^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (2.10)$$

ส่วนผลึกที่มีโครงสร้างแบบซาลโคไพไรท์จัดอยู่ในระบบเตตระโกนัล ($a = b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$) มีความสัมพันธ์ดังนี้คือ

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad (2.11)$$

ในทำนองเดียวกันจากสมการที่ (2.8) เมื่อ $n = 1$ แทนใส่ในสมการที่ (2.11) จะได้ความสัมพันธ์ที่ใช้หาค่าคงที่ของโครงสร้าง (a, c) เมื่อเราทราบขนาดมุมแบรกก์ (θ) ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ (λ) และดัชนีมิลเลอร์ (h k l) ดังสมการ

$$\frac{4 \sin^2 \theta}{\lambda^2} = \frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad (2.12)$$

นอกจากนั้นเรายังสามารถนำข้อมูลที่ได้นำไปหาสัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบผลึก (texture coefficient) ของระนาบ (hkl) ขนาดของเกรน ความหนาแน่นของดิสโลเคชัน (dislocation density) ความเครียด (strain) และความน่าจะเป็นของสัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบผิวดัด (stacking fault probability) สัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบผลึกหาได้จากสมการ

$$TC(hkl) = \frac{\frac{I(hkl)}{I_0(hkl)}}{\frac{1}{N} \sum \frac{I(hkl)}{I_0(hkl)}} \quad (2.13)$$

เมื่อ	TC(h k l)	คือ	สัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบผลึก (h k l)
	I(h k l)	คือ	ความเข้มของพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางที่ปรากฏ
	I ₀ (h k l)	คือ	ความเข้มมาตรฐาน ASTM ของพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์
	N	คือ	จำนวนพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ปรากฏ

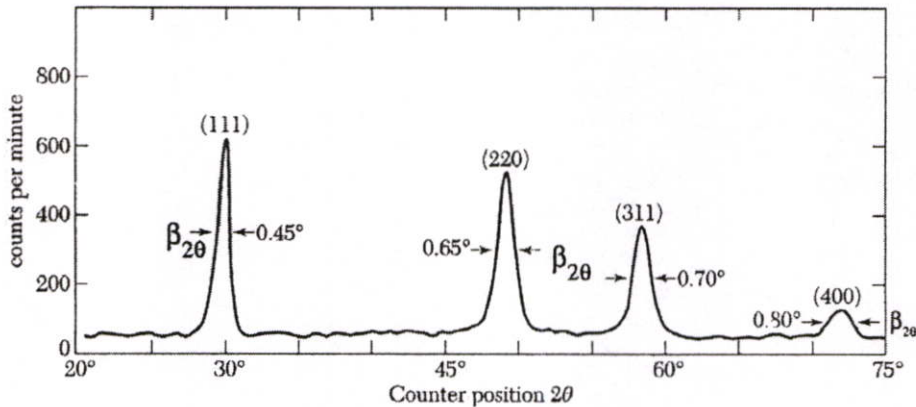
ขนาดของเกรน (D) และความเครียด (ϵ_s) เราสามารถหาได้จากสมการ

$$\beta = \frac{\lambda}{D \cos \theta} - \epsilon_s \tan \theta \quad (2.14)$$

ดังนั้น

$$\beta \cos \theta = \frac{\lambda}{D} - \epsilon_s \sin \theta \quad (2.15)$$

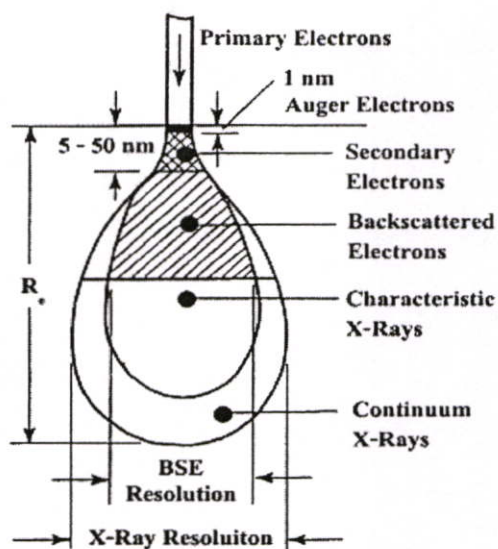
เมื่อ	D	คือ	ขนาดของเกรน
	β	คือ	ความกว้างของพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่มีความเข้มเป็นครึ่งหนึ่งของความเข้มสูงสุด (full width at half maximum: FWHM)
	θ	คือ	มุมตกกระทบและมุมสะท้อนของรังสีเอกซ์ที่ทำกับระนาบของผลึก
	ϵ_s	คือ	ความเครียด



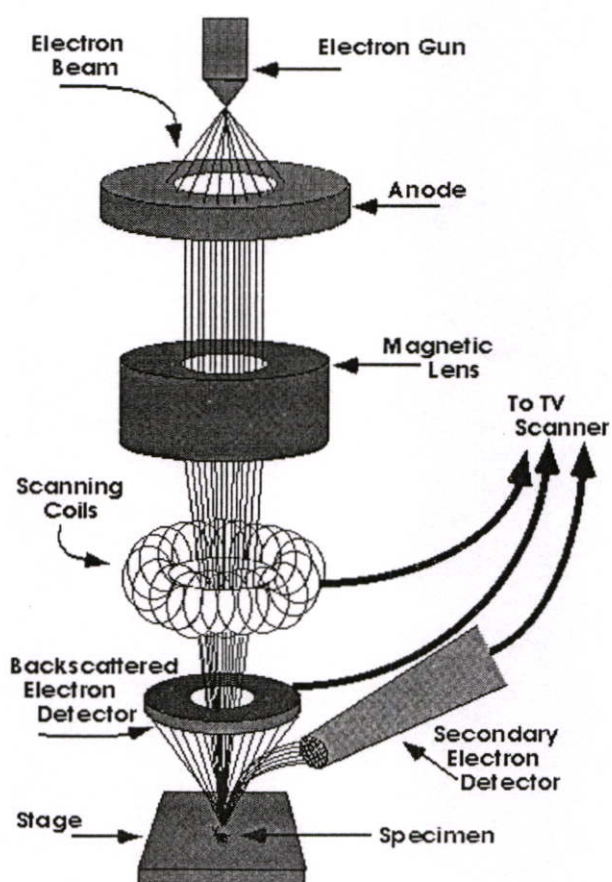
รูปที่ 2.17 แสดงวิธีการหา $\beta_{2\theta}$ เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

2.9 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [6, 9, 12-27]

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope: SEM) ถูกใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคมีหลักการทํางาน คือ ใช้ลำแสงอิเล็กตรอนฉายหรือส่องกราดไปบนผิวหน้าของสารตัวอย่างที่ต้องการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวทางกายภาพปรากฏเป็นภาพขยายที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ภาพที่เกิดจาก SEM มีลักษณะเป็นภาพสามมิติ SEM ถูกประดิษฐ์ขึ้นในช่วงปี พ.ศ. 2472-2474 แต่ไม่ได้รับความนิยมเนื่องจากอุปกรณ์ที่รวบรวมสัญญาณที่เกิดจากลำแสงอิเล็กตรอนกระทบผิวของตัวอย่างยังไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอ มีการแจกแจงรายละเอียดต่ำ (low resolution) ภาพที่ปรากฏที่จอภาพจึงมีลักษณะพร่ามัวขาดรายละเอียด ในปี พ.ศ. 2508 SEM ได้รับการปรับปรุงระบบเลนส์สนามแม่เหล็กและระบบภาพให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นทำให้นักวิทยาศาสตร์เริ่มสนใจและได้รับความนิยมตั้งแต่นั้นเป็นต้นมา



รูปที่ 2.18 อันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับผิวของสารตัวอย่าง



รูปที่ 2.19 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

หลักการการทำงานของ SEM เริ่มจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (primary electron) จากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ซึ่งกลุ่มอิเล็กตรอนถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าช่วง 1-40 kV ใช้เลนส์รวมแสง (condenser lens) เป็นตัวกำหนดทิศทางของกลุ่มอิเล็กตรอนและทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนเป็นลำ ใช้เลนส์วัตถุ (objective lens) เป็นตัวโฟกัสลำอิเล็กตรอนจะกราดไปยังพื้นผิวของสารตัวอย่าง โดยขดลวดสนามแม่เหล็ก (scanning coils) บนระนาบ x-y เพื่อทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron: SE) อิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกตรวจจับโดยเซนเซอร์ (sensor) และแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าแล้วนำไปขยายสัญญาณเพื่อส่งต่อให้ระบบสร้างภาพบนจอคาโทด (cathode ray tube: CRT)

ปัจจัยสำคัญสำหรับการใช้งาน SEM มีดังนี้

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

ปัจจัยทั้ง 3 มีความสำคัญต่อการศึกษาค้นคว้าโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วย SEM ซึ่งปัจจัยทั้ง 3 มีความสัมพันธ์กัน โดย d_p แปรผันตรงกับ i_p แต่แปรผันแบบผกผันกับ α_p ตัวอย่างเช่น เมื่อ d_p มีขนาดลดลง I_p จะมีค่าน้อยลงแต่ α_p จะมีค่ามากขึ้น

อันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับสารตัวอย่าง

อันตรกิริยาของลำอิเล็กตรอนที่ตกกระทบบนพื้นผิวของสารตัวอย่างจะกำเนิดสัญญาณต่างๆ ดังภาพที่ 2.12 ซึ่งสามารถแบ่งอันตรกิริยาของการชนเป็นสองลักษณะคือการชนแบบยืดหยุ่นและการชนแบบไม่ยืดหยุ่นซึ่งการชนทั้งสองลักษณะนี้จะให้ผลหรือสัญญาณที่แตกต่างกัน

การชนแบบยืดหยุ่น (elastic scattering)

ในกรณีการชนแบบยืดหยุ่นอิเล็กตรอนปฐมภูมิจะสูญเสียพลังงานบางส่วน (น้อยมาก) ให้กับอะตอมของตัวอย่างที่ตกกระทบและมีการเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ มีการกระเจิงกลับจากผิวของสารตัวอย่าง อิเล็กตรอนที่กระเจิงกลับส่วนนี้เรียกอิเล็กตรอนแบบกระเจิงกลับ (backscatter electron: BE) ภายในห้องใส่ตัวอย่างจะมีหัววัดสัญญาณ (detector) ติดตั้งไว้เพื่อนำสัญญาณ BE นี้ไปสร้างเป็นสัญญาณภาพแสดงผลบนจอ CRT

การชนแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic scattering)

ในกรณีการชนแบบไม่ยืดหยุ่นอิเล็กตรอนปฐมภูมิจะถ่ายโอนพลังงานจนทำให้กับอิเล็กตรอนของสารตัวอย่างและทำให้อะตอมของสารตัวอย่างที่อยู่ในระดับลึกจากผิวตัวอย่างได้รับอันตรกิริยาที่แตกต่างกันซึ่งหลังจากการชนชนิดนี้จะกำเนิดสัญญาณหลายชนิดหลังจากการชนชนิดนี้ เช่น อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electrons) ออเจิเล็กตรอน (Auger electrons) รังสีเอกซ์เฉพาะธาตุ

(characteristic X-ray) รังสีเอกซ์ชนิดต่อเนื่อง (continuum X-rays or Bremsstrahlung) การเรืองแสงคาโทด (cathode luminescence) เป็นต้น จะเห็นว่าการชนในลักษณะนี้จะเกิดสัญญาณหลายชนิด โดยแต่ละชนิดก็จะบ่งบอกองค์ประกอบของตัวอย่างที่แตกต่างออกไปทั้งลักษณะของภาพจากสัญญาณ SE จนถึงการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ (qualitative) และปริมาณ (quantitative) ของธาตุในสารตัวอย่างจากสัญญาณของรังสีเอกซ์อื่นจะทำให้ทราบชนิดและปริมาณของธาตุในตัวอย่างนั้น ๆ

อิเล็กตรอนทุติยภูมิ

การถ่ายโอนพลังงานจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิของสารตัวอย่างไปยังบริเวณชั้นอิเล็กตรอนหรืออิเล็กตรอนของสารตัวอย่างได้รับพลังงานสูงขึ้นกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอะตอม อิเล็กตรอนจึงหลุดออกจากอะตอมกลายเป็นอิเล็กตรอนทุติยภูมิ ซึ่งสัญญาณชนิดนี้มีความสำคัญมากในการศึกษา ลักษณะพื้นผิวของสารตัวอย่าง ซึ่งจะใช้ภาพของสัญญาณ SE เป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้โอกาสในการเกิดสัญญาณ SE ยังขึ้นอยู่กับความลึกที่อิเล็กตรอนปฐมภูมิจะสามารถเคลื่อนผ่านลงไปใ้ในเนื้อของสารตัวอย่าง ซึ่งถ้าความลึกของอิเล็กตรอนปฐมภูมิต่ำมากโอกาสที่จะเกิด SE นั้นก็จะน้อยลง หมายถึง สัญญาณ SE ที่หลุดออกมาจากสารตัวอย่างส่วนใหญ่จะออกมาจากบริเวณผิวของสารตัวอย่าง ทั้งนี้สามารถอธิบายได้จากสัญญาณ SE เป็นอิเล็กตรอนที่มีพลังงานต่ำ ดังนั้นเมื่ออิเล็กตรอนปฐมภูมิลงไปกระตุ้นอะตอมของตัวอย่างในบริเวณลึกจากผิวของสารตัวอย่าง โอกาสที่ SE จะหลุดออกมาจากชั้นที่อยู่ในระดับลึกนั้นมีน้อยเพราะสัญญาณ SE จะถูกดูดกลืนโดยอะตอมบนผิวก่อนที่จะเล็ดลอดออกมา

รังสีเอกซ์

รังสีเอกซ์ที่เกิดจากการกระตุ้น โดยอิเล็กตรอนปฐมภูมิแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ รังสีเอกซ์ชนิดต่อเนื่องและรังสีเอกซ์เฉพาะธาตุ

รังสีเอกซ์ชนิดต่อเนื่องเกิดจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิทำอันตรกิริยากับอะตอมที่บริเวณสนามคูโลมบ์ใกล้นิวเคลียสเกิดการเปลี่ยนทิศทางและสูญเสียพลังงานอย่างรวดเร็วจึงคายพลังงานออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งจะมีพลังงานตั้งแต่ค่าสูงสุดของพลังงานอิเล็กตรอนปฐมภูมิก่อนทำอันตรกิริยาถึงค่าพลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิล้างทำอันตรกิริยาสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ (กรณี $E_0 > E_1$)

$$E_0 - E_1 = \Delta E = hv \quad (2.16)$$

เมื่อ	E_0	คือ	พลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิก่อนทำอันตรกิริยา
	E_1	คือ	พลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิตั้งทำอันตรกิริยา
	h	คือ	ค่าคงตัวของพลังค์ (Planck constant) = 6.625×10^{-34} J.s
	ν	คือ	ความถี่ของรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้น

รังสีเอกซ์เฉพาะธาตุเกิดจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิทำอันตรกิริยากับอะตอมบริเวณชั้น โจรของอิเล็กตรอนของอะตอม ถ้าอิเล็กตรอนในชั้น โจรใดได้รับพลังงานสูงกว่าแรงยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในชั้น โจรนั้นก็หลุดออกจากวง โจร ทำให้เกิดช่องว่างขึ้นในอะตอม ดังนั้นอิเล็กตรอนในวง โจรถัดไปก็จะเข้ามาแทนที่ แต่เนื่องจากอิเล็กตรอนในวง โจรนอกจะมีพลังงานมากกว่า จึงต้องลดระดับพลังงานโดยคายพลังงานออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เช่นอิเล็กตรอนปฐมภูมิทำอันตรกิริยากับวง โจรชั้น K แล้วอิเล็กตรอนในชั้น L ก็เข้ามาแทนที่พร้อมทั้งคายพลังงานออกมา ซึ่งพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ ปลดปล่อยมานี้จะเป็นพลังงานเฉพาะระดับชั้น โจร (electron shell) ของอิเล็กตรอนจากธาตุนั้นจึงเรียกคลื่นแม่เหล็กชนิดนี้ว่ารังสีเอกซ์เฉพาะธาตุ

เนื่องจากระดับพลังงานในชั้น โจรของอิเล็กตรอนสำหรับแต่ละธาตุนั้นมีค่าไม่เท่ากันจึงสามารถนำความแตกต่างของระดับพลังงานเป็นตัวจำแนกชนิดของธาตุที่มีอยู่ในตัวอย่างซึ่งเป็นการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ และนอกจากนั้นความเข้มของรังสีเอกซ์บ่งบอกถึงปริมาณของธาตุในเนื้อตัวอย่างได้อีกด้วย ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ

ออเจิเล็กตรอน

ออเจิเล็กตรอนเกิดจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิตกกระทบตัวอย่างและเหนี่ยวนำให้เกิดรังสีเอกซ์เฉพาะธาตุของชั้น โจรใด ๆ รังสีเอกซ์ที่ปลดปล่อยจากอันตรกิริยานี้มีโอกาสดำยโอน พลังงานให้กับอิเล็กตรอนชั้น โจรถัดออกไปทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากวง โจร ซึ่งการวิเคราะห์พลังงานออเจิเล็กตรอนนี้มีประโยชน์ในการวิเคราะห์พื้นผิวของตัวอย่าง เช่น การวัดปริมาณของธาตุที่จับอยู่บนผิวที่บางมาก

การเรืองแสงคาโทด

เป็นลักษณะเรืองแสงจากสารตัวอย่างซึ่งแสงที่เรืองนี้เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงที่ตามองไม่เห็นเกิดจากอะตอมของตัวอย่างได้รับพลังงานจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิทำให้อิเล็กตรอนในวง โจรชั้นนอกถูกกระตุ้นและเมื่อกลับเข้าสู่ภาวะปกติอิเล็กตรอนจะคายพลังงานออกมาในลักษณะของคลื่นแม่เหล็ก ไฟฟ้าเนื่องจากสภาวะกระตุ้นสภาวะปกติมีช่วงพลังงานไม่ห่างกันมากเมื่อคายพลังงานออกมาแล้วทำให้ความถี่หรือความยาวคลื่นอยู่ในช่วงที่ตามองเห็นได้

การกำเนิดภาพของสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์

เมื่ออิเล็กตรอนจากขดลวดที่ถูกใช้เป็นไส้หลอด (filament) ถูกควบคุมให้เป็นลำอิเล็กตรอน และโฟกัสด้วยเลนส์แม่เหล็กลงบนผิวของตัวอย่างและลำอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมโดยชุดขดลวดสนามแม่เหล็กซึ่งเป็นขดลวดที่สร้างสนามแม่เหล็กเพื่อควบคุมการกราดของลำอิเล็กตรอน ไปบนผิวของสารตัวอย่าง ซึ่งการกราดบนผิวของสารตัวอย่างนี้จะทำให้ได้สัญญาณต่าง ๆ สัญญาณควบคุมการกราดบนพื้นผิวนี้อาจทำงานเข้าจังหวะกับชุดควบคุมการแสดงผลของจอภาพ CRT จุดต่อจุดและเส้นต่อเส้นในขณะเดียวกันสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์จะถูกนำไปควบคุมปริมาณความมืด-สว่างบนจอ CRT เกิดเป็นภาพขึ้นตามระนาบการกราดของอิเล็กตรอนใน SEM เนื่องจากพื้นที่แสดงจอภาพ CRT ใหญ่กว่าพื้นที่สแกนบนผิวของตัวอย่างโดยลำอิเล็กตรอนใน SEM ดังนั้นจึงสามารถหาความสัมพันธ์เพื่อหาค่าลักษณะของภาพได้ดังนี้

$$\text{กำลังขยาย} = \frac{\text{พื้นที่บน CRT}}{\text{พื้นที่ของการกราดบนสารตัวอย่างของลำอิเล็กตรอน}}$$

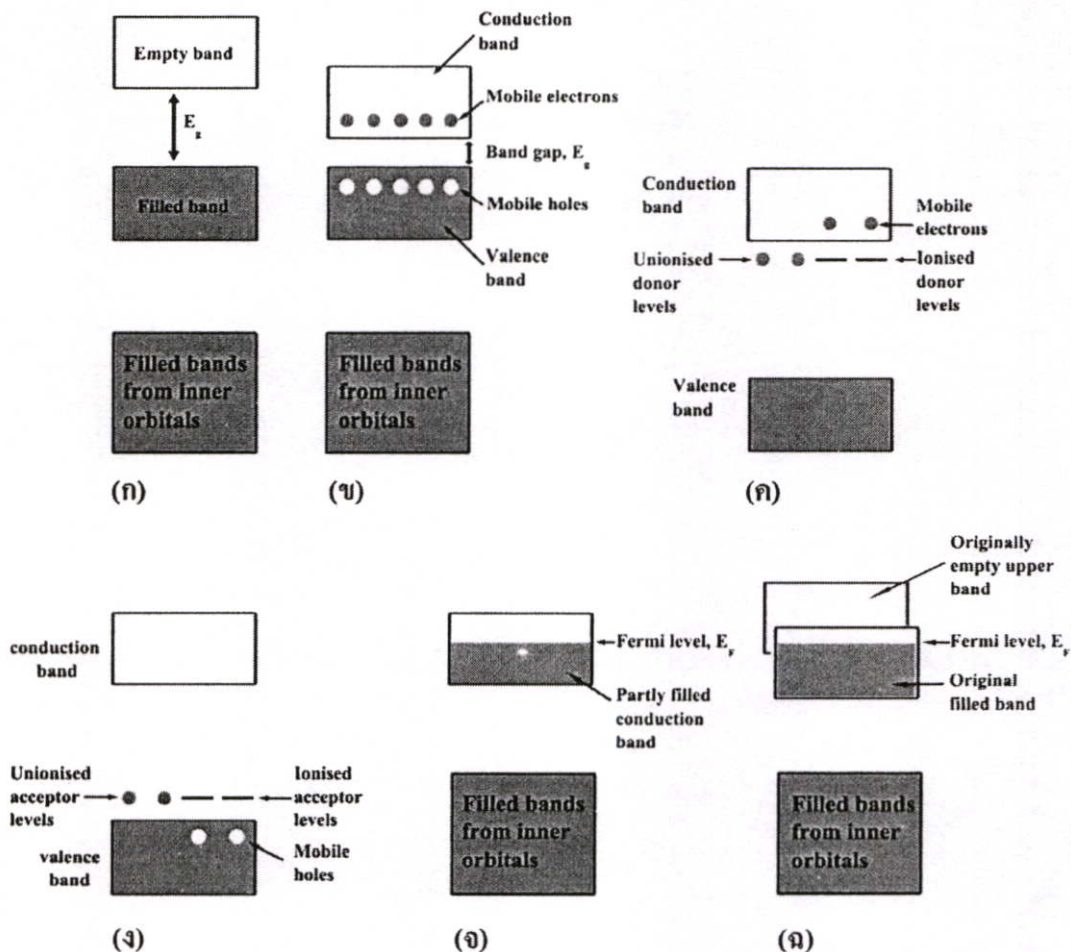
ชุดของขดลวดสนามแม่เหล็กเป็นตัวควบคุมพื้นที่ของการกราดบนตัวอย่างของลำอิเล็กตรอนและนอกจากควบคุมพื้นที่ในการกราดแล้วยังควบคุมความเร็วในการกราดอีกด้วย โดยที่ลักษณะของความเร็วในการกราดนี้จะทำให้ภาพออกมามีความละเอียดแตกต่างกัน ถ้าเราใช้ความเร็วในการกราดมีความเร็วสูงเราจะ ได้ภาพที่มีความละเอียดต่ำกว่าใช้ความเร็วในการกราดต่ำ

2.10 สมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ [6-13, 26]

เมื่อแสงตกกระทบกับสารกึ่งตัวนำพฤติกรรมทางแสงที่สังเกตได้ก็คือ การดูดกลืน การสะท้อน และการส่งผ่านของแสง จากผลของสมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ เราสามารถหาลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน (energy band) และขนาดช่องว่างแถบพลังงาน (energy gap: E_g) ของสารกึ่งตัวนำได้โดยจะกล่าวถึงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำการส่งผ่านแสงและการคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงานตามลำดับ

2.10.1 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน

ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานจะประกอบไปด้วยส่วนใหญ่ๆ 3 ส่วน คือ แถบนำ (conduction band) แถบวาเลนซ์ (valence band) และแถบพลังงานต้องห้าม (forbidden band or forbidden region or forbidden gap) และเรียกความกว้างของช่องว่างระหว่างแถบนำกับแถบวาเลนซ์นั้นว่า ช่องว่างแถบพลังงาน โดยเราสามารถที่จะแบ่งประเภทของวัสดุว่าเป็นฉนวน (insulator) โลหะหรือตัวนำ (metal or conductor) และสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) ได้โดยดูจากขนาดของช่องว่างแถบพลังงานที่แตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 2.20

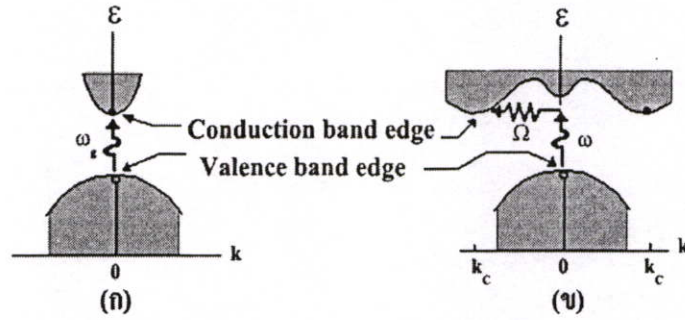


รูปที่ 2.20 แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานอย่างง่ายของ

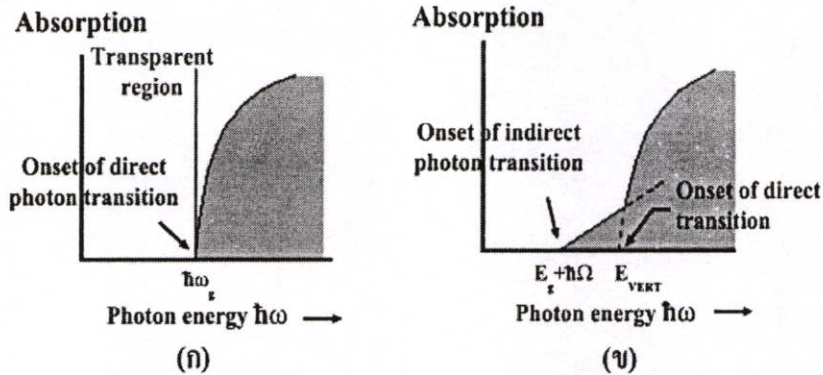
- ก. ฉนวน
- ข. สารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์
- ค. สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น
- ง. สารกึ่งตัวนำชนิดพี
- จ. โลหะ
- ฉ. สารกึ่งโลหะ

ในวัสดุที่เป็นฉนวนเมื่อดูจากแถบพลังงานจะเห็นได้ว่าขนาดช่องว่างแถบพลังงานจากขอบล่างสุดของแถบว่าง(แถบนำ)ถึงขอบบนสุดของแถบเต็ม(แถบวาเลนซ์)มีขนาดกว้างมากประมาณได้ว่า $E_g \gg kT$ หรือมากกว่า 3 eV ดังแสดงในรูปที่ 2.20 (ก) การที่จะทำให้วัสดุนี้นำไฟฟ้าได้ต้องใส่พลังงานที่สูงมากเพื่อที่จะทำให้อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปยังแถบนำได้ ถ้าช่องว่างแถบพลังงานระหว่างแถบนำกับแถบวาเลนซ์มีขนาดเล็กพอที่อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ เมื่อได้รับพลังงานความร้อนสามารถเคลื่อนย้ายขึ้นไปยังแถบนำ และทำให้วัสดุนี้นำไฟฟ้าได้เราจะเรียก

สารชนิดนี้ว่า สารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ (intrinsic semiconductors) ดังแสดงในรูปที่ 2.20 (ข) จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนย้ายขึ้นไปอยู่ในแถบนำแล้วจะเหลือที่ว่างไว้ในแถบวาเลนซ์ โดยจะมีสภาพทางไฟฟ้าเป็นบวก และจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงข้ามกับอิเล็กตรอนเมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า เราจะเรียกที่ว่างนี้ว่าโฮล และถ้าเราทำการเจืออะตอมของธาตุบางอย่าง ลงไปในสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์แล้ว อะตอมของสารเจือประพติดัวเป็นอะตอมผู้ให้ ก็จะทำให้เกิดระดับพลังงานผู้ให้ โดยให้อิเล็กตรอนกับแถบนำ เราจะเรียกสารนี้ว่าสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductors) ดังแสดงในรูปที่ 2.20 (ค) และถ้าอะตอมประพติดัวเป็นอะตอมผู้รับก็จะทำให้เกิดระดับพลังงานผู้รับ โดยทำการรับอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ เราจะเรียกสารนี้ว่าสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type semiconductors) ดังแสดงในรูปที่ 2.20 (ง) สำหรับแถบพลังงานของวัสดุที่เป็นโลหะหรือตัวนำจะพบว่าเมื่ออิเล็กตรอนเข้าไปอยู่ในแถบนำแล้วบางส่วนของรูปที่ 2.20 (จ) และเราบอกได้ว่าแถบวาเลนซ์กับแถบนำมีการซ้อนเหลื่อมกันอยู่ ทำให้สารสามารถนำไฟฟ้าได้ และในรูปที่ 2.20 (ฉ) ถ้าขอบล่างของแถบว่างที่ $(n+1)$ ซ้อนเหลื่อมกับขอบสูงสุดของแถบที่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่ที่ n และระดับเฟอร์มีอยู่ระหว่างแถบทั้งสอง อิเล็กตรอนก็จะสามารถไหลจากแถบเต็มไปยังด้านล่างของแถบว่างได้ เราจะเรียกสารที่มีโครงสร้างแถบพลังงานแบบนี้ว่าเป็นสารกึ่งโลหะ ลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง คือ อิเล็กตรอนได้รับพลังงานโฟตอนที่มีค่าเท่ากับขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ($\hbar\omega = E_g$) อิเล็กตรอนจะดูดกลืนพลังงานโฟตอนนั้นและอยู่ในสถานะถูกกระตุ้นจึงแทรนซิชัน (transition) จากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำกลายเป็นอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ โดยไม่มีการสูญเสียพลังงานให้แก่โครงสร้างผลึก คือ ไม่มีการสร้างหรือทำลายโฟนอน ดังแสดงในรูปที่ 2.21 (ก) และเมื่อเขียนกราฟระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนจะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 2.22 (ก) และลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงคือ โครงสร้างแถบพลังงานที่มีจุดต่ำสุดของแถบวาเลนซ์ไม่อยู่ที่ตำแหน่งเวกเตอร์คลื่นค่าเดียวกันหรืออยู่ที่ตำแหน่งโมเมนตัมของคลื่นไม่เท่ากัน ดังนั้นอิเล็กตรอนจะต้องได้รับพลังงานโฟนอนที่มีค่ามากกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ในกรณีนี้มีกระบวนการสร้างโฟนอนเกิดขึ้น ($\hbar\omega = E_g + \hbar\Omega$) เมื่อ Ω คือค่าความถี่เชิงมุมของพลังงานโฟนอนซึ่งมีค่าน้อยกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงานหรือในกรณีที่มีการทำลายล้างโฟนอน ($\hbar\omega = E_g - \hbar\Omega$) นั่นคือเมื่ออิเล็กตรอนที่อยู่ในสถานะถูกกระตุ้นการย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำจะมีการปล่อยโฟนอน (emitted phonon) ที่มีความถี่เชิงมุม Ω มีเวกเตอร์คลื่น $K \cong k_c$ ออกมา จึงเกิดการสร้างโฟนอน ($E_g = \hbar\Omega$) และการสร้างอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ (E_{VERT}) ขึ้นมาในกระบวนการนี้ ดังแสดงในรูปที่ 2.21 (ข) และเมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนจะได้ดังแสดงในรูปที่ 2.22 (ข)



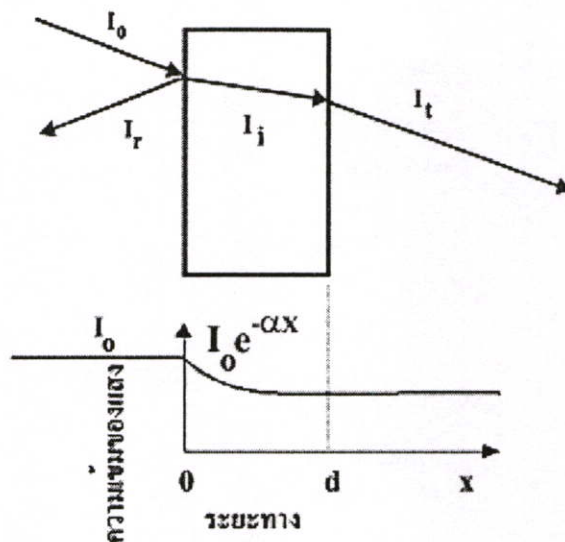
รูปที่ 2.21 แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานและการย้ายสถานะของพลังงานอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสมบูรณ์ ($T = 0 \text{ K}$)
 ก. ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง
 ข. ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง



รูปที่ 2.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสมบูรณ์ ($T = 0 \text{ K}$)
 ก. ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง
 ข. ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงในกรณีที่เกิดกระบวนการสร้างโฟนอน

2.10.2 การส่งผ่านแสง

การศึกษาวีธีวัดสเปกตรัมการสะท้อนและการส่งผ่านแสงนี้จะกล่าวถึงสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงและองค์ประกอบของการวัดสเปกตรัมการส่งผ่านแสง เมื่อแสงเดินทางไปกระทบฟิล์มบางแสงบางส่วนจะสะท้อนกลับที่ผิวของฟิล์มบาง บางส่วนของแสงจะเดินทางเข้าไปในแผ่นฟิล์มบางและถูกดูดกลืน ดังแสดงในรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 แสดงแผนภาพเมื่อแสงตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบาง

สัมประสิทธิ์การสะท้อนของแสงมีค่าเป็น

$$R = \frac{I_r}{I_0} \quad (2.17)$$

เมื่อ	I_0	คือ	ความเข้มแสงตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบาง
	I_r	คือ	ความเข้มแสงสะท้อนจากฟิล์มบาง
	I_t	คือ	ความเข้มแสงส่งผ่านออกมาจากฟิล์มบาง
	I_i	คือ	ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบาง
	R	คือ	สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง (reflectivity)
	T	คือ	สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (transmittance)
	α	คือ	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (absorption coefficient)
	d	คือ	ระยะทางที่แสงเดินทางในแผ่นฟิล์มบางหรือความหนาของฟิล์มบาง

เพราะฉะนั้น ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางมีค่า

$$I_i = I_0 - I_r = I_0 - RI_r = (1 - R)I_0 \quad (2.18)$$

เมื่อแสงนี้เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางจะถูกดูดกลืนทำให้ความเข้มแสงภายในแผ่นฟิล์มบางลดลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลตามระยะทาง ดังนั้นความเข้มแสงที่ส่งผ่านฟิล์มบางมีค่าเป็น

$$I_t = I_i \cdot e^{-\alpha d} = (1 - R)I_0 \cdot e^{-\alpha d} \quad (2.19)$$

ถ้าไม่มีการสะท้อนแสงที่ผิวด้านหลัง สัมประสิทธิ์การส่งผ่านของแสงจะมีค่าเท่ากับ

$$T = \frac{I_t}{I_0} = (1 - R)e^{-\alpha d} \quad (2.20)$$

2.10.3 การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ

เมื่อแสงตกกระทบสารกึ่งตัวนำ ด้วยความเข้ม I_0 แสงบางส่วนจะส่งผ่านออกไปบางส่วนถูกดูดกลืนและส่วนที่เหลือจะสะท้อนกลับมา ดังแสดงในรูปที่ 2.23 โดย

$$T + A + R = 1 \quad (2.21)$$

เมื่อ	T	คือ	สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง
	A	คือ	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง
	R	คือ	สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง

โดยที่

$$R = \frac{(n-1)^2 + K^2}{(n+1)^2 + K^2} \quad (2.22)$$

และค่าดัชนีหักเหของผลึก

$$n_c = n - iK \quad (2.23)$$

เมื่อ	n	คือ	จำนวนจริง
	K	คือ	จำนวนเชิงซ้อน เรียกว่า สัมประสิทธิ์การสูญเสี (extinction coefficient) โดยทั้ง n และ K เป็นฟังก์ชันของ λ

2.10.4 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง

การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ เกิดจากการที่อิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากแสงที่มีพลังงานโฟตอนเท่ากับหรือมากกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงาน จากนั้นจึงย้ายสถานะพลังงานจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปสู่ แถบนำ สเปกตรัมการดูดกลืนแสงบริเวณที่พลังงานโฟตอนมีค่าน้อยจะมีลักษณะเป็นขอบแสดงถึงการลดลงของการดูดกลืนแสงอย่างฉับพลันขอบลักษณะนี้เรียกว่าขอบการดูดกลืน

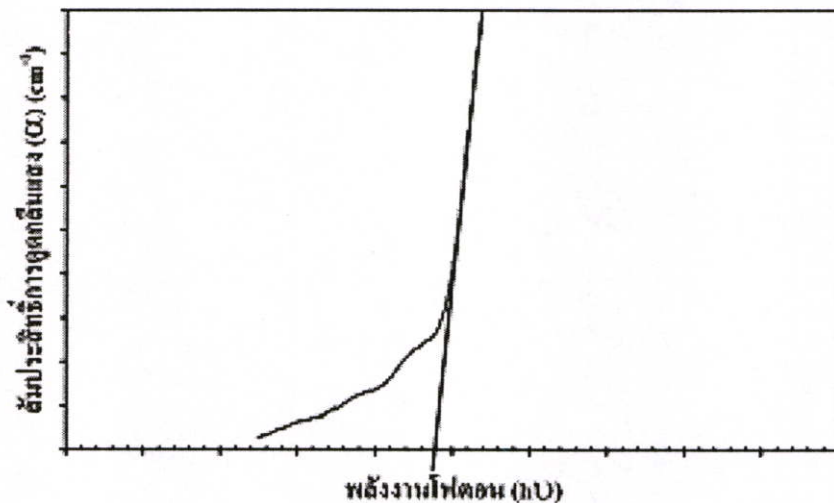
(absorption edge) หรือขอบการดูดกลืนมูลฐาน (fundamental edge) พลังงานโฟตอนที่ขอบการดูดกลืนแสง มีค่าเท่ากับผลต่างของค่าพลังงานที่วัดจากจุดต่ำสุดของแถบนำกับจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์จุดที่เส้นตรงตัดกับแกนในแนวนอน จะให้ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) วิธีการนี้เป็น การกำหนดค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่นิยมมากที่สุด

การหาค่าของช่องว่างแถบพลังงาน สามารถพิจารณาได้จากสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (α) ของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (T) จากรูปที่ 2.23 แสดงภาพจำลอง เมื่อแสงตกกระทบจากด้านซ้ายของฟิล์มบาง (I_0) ความเข้มแสงภายในฟิล์มบางจะลดลงแบบ เอ็กซ์โพเนนเชียลและมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงโดยทั่วไปการสะท้อน (R) มีค่าน้อยมาก และมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับความยาวคลื่นแสงที่ตกกระทบดังนั้น

$$T = e^{-\alpha d} \quad (2.24)$$

จะได้ว่า

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln\left(\frac{1}{T}\right) \quad (2.25)$$



รูปที่ 2.24 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับพลังงานโฟตอน

ที่กล่าวมาเป็นการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง จากสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงโดยไม่คิดถึงการสะท้อนของแสง สำหรับกรณีการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเนื่องจากการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอน ในกรณีที่อิเล็กตรอนย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำที่เวกเตอร์คลื่นค่าเดียวกัน เรียกการย้ายสถานะพลังงานแบบนี้ว่า

การย้ายสถานะพลังงานแบบตรง และการย้ายสถานะพลังงานแบบตรงนี้ยังแบ่งได้อีกสองชนิด คือ การย้ายสถานะพลังงานชนิดอินยอม และชนิดต้องห้าม โดยทั้งสองชนิดนี้ขึ้นกับค่าสมาชิกเมทริกซ์เชิงแสง (optical matrix element) ในการประมาณครั้งที่หนึ่งว่าเป็นศูนย์หรือไม่ คือ ถ้าเป็นศูนย์จะเป็นการย้ายสถานะพลังงานชนิดต้องห้าม และถ้าไม่เป็นศูนย์จะเป็นการย้ายสถานะพลังงานชนิดอินยอม เมื่อพิจารณาการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนในบริเวณตำแหน่งจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำ แสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับค่าช่องว่างแถบพลังงานซึ่งมีลักษณะเป็นพาราโบลา ช่องว่างแถบพลังงานของแผ่นฟิล์มบางประมาณได้โดยการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ซึ่งจะถูกดูดกลืนเมื่อแสงที่ตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบางมีค่าพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าของแถบพลังงานต้องห้าม ที่ขอบการดูดกลืนค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนจะมีค่าเป็น

สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานชนิดอินยอมแบบตรง

$$(\alpha_{hv}) = A(hv - E_g)^{\frac{1}{2}} \quad (2.26)$$

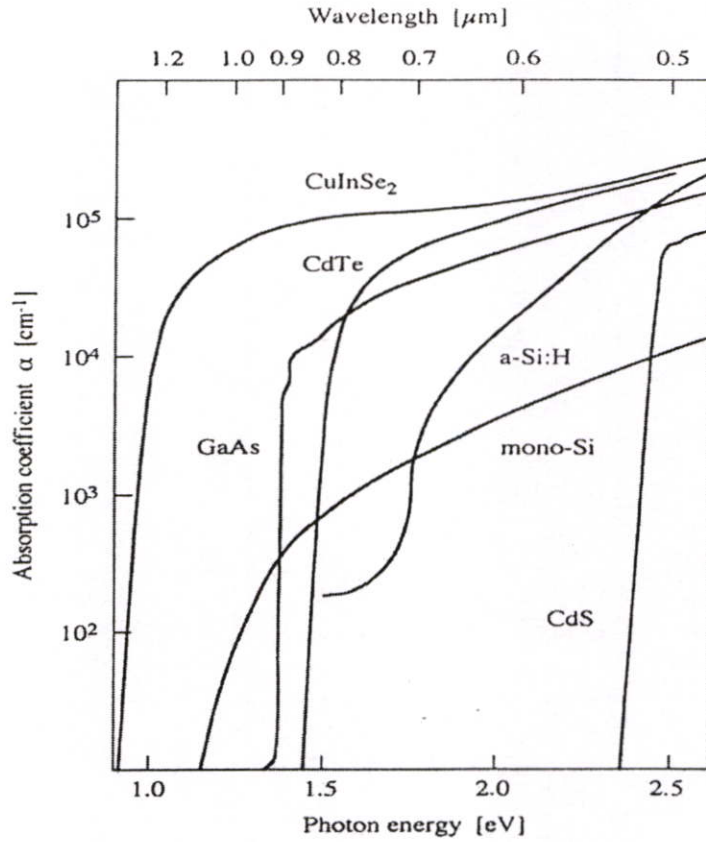
สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานชนิดอินยอมแบบเฉียง

$$(\alpha_{hv}) = B(hv - E_g)^2 \quad (2.27)$$

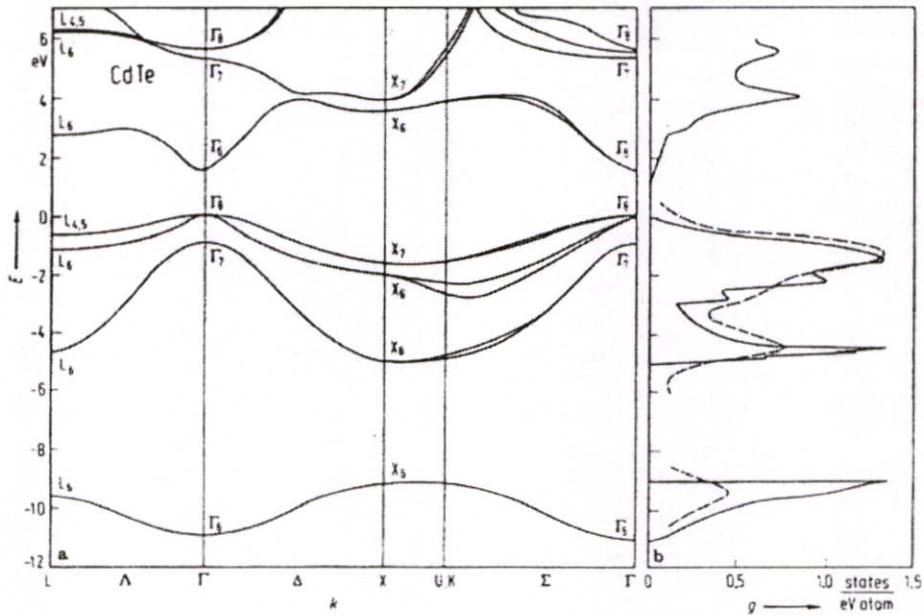
และสำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานชนิดต้องห้าม

$$(\alpha_{hv}) = C(hv - E_g)^{\frac{3}{2}} \quad (2.28)$$

เมื่อ	α	คือ	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง
	$h\nu$	คือ	พลังงานโฟตอน
A, B และ C		คือ	ค่าคงตัว



รูปที่ 2.25 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและค่าพลังงานโฟตอน หรือค่าความยาวคลื่นของพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 2.26 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของแคดเมียมเทลลูไรด์

2.11 สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ [13-16]

ที่อุณหภูมิ 300K ผลึกแคดเมียมเทลลูไรด์ชนิดเอ็นมีสภาพคล่องของอิเล็กตรอนประมาณ $800\text{-}900\text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ส่วนแคดเมียมเทลลูไรด์ชนิดพีมีสภาพคล่องของโฮลประมาณ $80\text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ความหนาแน่นของพาหะมีค่า 10^{16} cm^{-3} การแอนนihilแคดเมียมเทลลูไรด์ชนิดเอ็นในบรรยากาศของแคดเมียมเป็นการเพิ่มความหนาแน่นของอิเล็กตรอน ส่วนแคดเมียมเทลลูไรด์ชนิดพีซึ่งมีความต้านทานสูงเมื่อให้ความร้อนในบรรยากาศของเทลลูเรียมจะทำให้มีความต้านทานต่ำซึ่งแสดงถึงการเพิ่มสภาพต้านทาน การเพิ่มขึ้นของสภาพต้านทานเกิดขึ้นเนื่องจากเทลลูเรียมจะสร้างระดับพลังงานขึ้นภายในช่องว่างแถบพลังงานที่ 0.1 ถึง 0.28 eV ที่ระดับพลังงานสูงกว่าแถบวาเลนซ์ กลไกการนำไฟฟ้าของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ขึ้นกับคุณสมบัติของผลึก จากการศึกษาของบาโกซิเออนิต (Bagociunaite) และคณะ (1972) แสดงให้เห็นถึงขอบของเกรนมีบทบาทมากกับการนำไฟฟ้าของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ จากผลการทดลองส่วนใหญ่แสดงให้เห็นถึงฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์มีความหนาแน่นอิเล็กตรอนอิสระเท่ากับ $10^{16}\text{-}10^{17}\text{ cm}^{-3}$ และสภาพคล่องของอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ $5\text{-}50\text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$

2.12 สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ [5-13, 24-25]

จากทฤษฎีโครงสร้างแถบพลังงานสารกึ่งตัวนำประกอบไปด้วยแถบวาเลนซ์ แถบพลังงานต้องห้ามและแถบนำ สารกึ่งตัวนำซึ่งมีช่องว่างแถบพลังงานไม่เกิน 3 eV ที่อุณหภูมิห้องอิเล็กตรอนและโฮลจากภายในผลึกจะถูกกระตุ้นด้วยพลังงานจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบนำ จากนั้นจะเกิดโฮลในแถบวาเลนซ์ ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิใดๆ ของสารกึ่งตัวนำจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของพาหะ และสภาพคล่องของพาหะอิสระเหล่านี้

2.12.1 สมบัติการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ

สมบัติการนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำขึ้นอยู่กับจำนวนพาหะอิสระเป็นสำคัญ กล่าวคือ ถ้าจำนวนอิเล็กตรอนในแถบนำเพิ่มมากขึ้น สารกึ่งตัวนำนั้นจะนำไฟฟ้าได้ดียิ่งขึ้นปริมาณความหนาแน่นของพาหะอิสระในสารกึ่งตัวนำถูกกำหนดด้วยขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือ และอุณหภูมิเป็นสำคัญ ที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน การกระจายความหนาแน่นของพาหะอิสระตามระดับพลังงานของผลึกเป็นไปตามฟังก์ชันการกระจายแบบเฟอร์มี-ดิแรก (Fermi-Dirac distribution function) ดังสมการที่ (2.29)

$$f(E) = \frac{1}{\exp\left[\frac{E - E_F}{kT}\right] + 1} \quad (2.29)$$

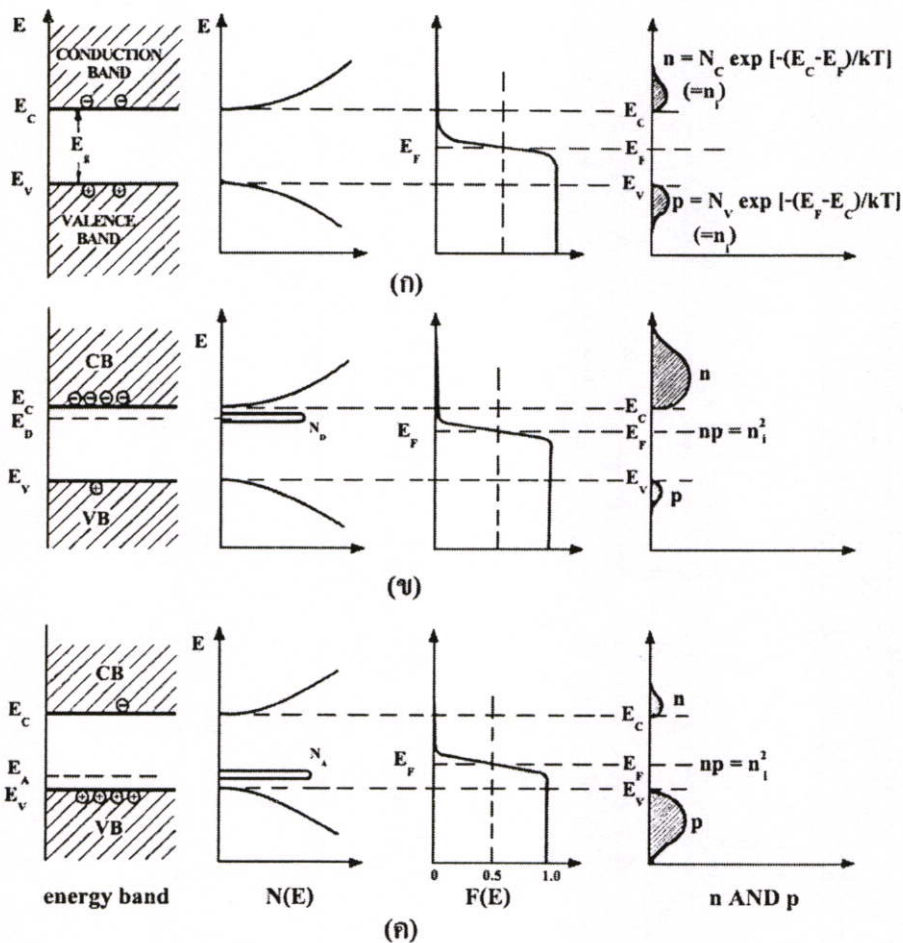
เมื่อ $f(E)$ คือ ฟังก์ชันการกระจายหรือความน่าจะเป็นที่จะพบอิเล็กตรอนในระดับพลังงาน E ที่อุณหภูมิ T ใดๆ

E_F คือ ระดับพลังงานเฟอร์มี (Fermi energy level)

k คือ ค่าคงตัวของโบลตซ์มันน์ (Boltzmann constant) $= 1.38 \times 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$

T คือ อุณหภูมิในหน่วยของเคลวิน

ในการพิจารณาความหนาแน่นพาหะอิสระในสภาวะสมดุลความร้อนสามารถแยกได้เป็น 2 กรณี คือ กรณีสารกึ่งตัวนำประเภทอินทรีนซิกที่อุณหภูมิ 0 K (intrinsic semiconductor) และกรณีที่สารกึ่งตัวนำประเภทเอ็กซ์ทรีนซิก (extrinsic semiconductor)



รูปที่ 2.27 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานความหนาแน่นสถานะฟังก์ชันการกระจายแบบเฟอร์มี-ดิแรกและความหนาแน่นพาหะของ
 ก. สารกึ่งตัวนำประเภทอินทรีนซิก
 ข. สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น
 ค. สารกึ่งตัวนำชนิดพี

2.12.1.1 สารกึ่งตัวนำประเภทอินทรินซิก (intrinsic semiconductor) ที่อุณหภูมิ 0 K

ในสารกึ่งตัวนำประเภทอินทรินซิกที่อุณหภูมิ 0 K อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นด้วยพลังงานความร้อน ขึ้นไปยังแถบนำและทิ้งโฮลจำนวนเท่ากันไว้ในแถบเวเลนซ์ ถ้ากำหนดให้ $N_C(E)dE$ เป็นจำนวนสถานะพลังงานในแถบนำต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรที่มีพลังงานอยู่ระหว่าง E และ $E+dE$ ดังนั้นความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำที่มีค่าพลังงานอยู่ระหว่าง E และ $E+dE$ ที่อุณหภูมิใดๆ คือ

$$n(E)dE = N_C(E)f(E)dE \quad (2.30)$$

เมื่อ N_C คือ ความหนาแน่นของสถานะพลังงาน (density of state) ในแถบนำซึ่งเมื่อพิจารณาจากกรณีที่แถบนำมีความสมมาตรในเชิงทรงกลมและมีจุดต่ำสุดเพียงจุดเดียวดังนั้น

$$N_C(E) = 2\pi \left(\frac{2m_e^*}{h} \right) E^{\frac{1}{2}} \quad (2.31)$$

เมื่อ m_e^* คือ มวลยังผล (effective mass) ของอิเล็กตรอนในแถบนำ

h คือ ค่าคงตัวของพลังค์ = 6.625×10^{-34} J.s

จากสมการที่ (2.31) พิจารณาโดยกำหนดให้ระดับพลังงานศูนย์อยู่ตรงขอบล่างของแถบนำนั้นคือ จะมีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในแถบนำทั้งหมดเท่ากับ

$$n_i = \int_0^{E_i} n(E)d(E) = \int_0^{E_i} N_C f(E)dE \quad (2.32)$$

เมื่อ E_i คือ ค่าพลังงานที่ขอบบนของแถบนำ

โดยทั่วไปพลังงานความร้อน (kT) ของผลึกมีค่าน้อยกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานของผลึกมาก กล่าวคือที่อุณหภูมิห้อง 300 K นั้นพลังงานความร้อน (kT) ของผลึกจะมีค่าประมาณ 3 eV ขณะที่ช่องว่างแถบพลังงานของผลึกที่อุณหภูมิห้องมีค่าไม่เกิน 3 eV จึงมั่นใจได้ว่าสถานะพลังงานของแถบนำอยู่ในสถานะที่ไม่ซ้อนสถานะ (non-degeneracy) และ $n(E)d(E)$ มีค่าใกล้ศูนย์ที่ค่าระดับพลังงานสูงๆ สมการที่ (2.41) จึงสามารถขยายขอบเขต E_i ออกไปจนถึงอนันต์และสามารถเขียนสมการที่ (2.32) ใหม่ได้เป็น

$$n_i = 4\pi \left[\frac{2m_e^*}{h^2} \right]^{\frac{3}{2}} \int_0^\infty \frac{E^{\frac{3}{2}}}{\exp\left[\frac{(E - E_F)}{kT}\right] + 1} dE \quad (2.33)$$

เนื่องจาก $\exp\left[\frac{(E - E_F)}{kT}\right] + 1 \gg 1$ นั่นคือ

$$n_i = N_C \exp\left[\frac{E_F}{kT}\right] \quad (2.34)$$

เมื่อ

$$N_C = 2 \left[\frac{2\pi m_e^* kT}{h^2} \right]^{\frac{3}{2}} \quad (2.35)$$

และทำนองเดียวกันเราจะได้ความหนาแน่นของโฮลในแถบวาเลนซ์ดังนี้

$$p_i = N_V \exp\left[-\frac{E_F + E_g}{kT}\right] \quad (2.36)$$

เมื่อ

$$N_V = 2 \left[\frac{2\pi m_h^*}{h^2} \right] \quad (2.37)$$

โดยที่ E_g คือ ค่าช่องว่างของแถบพลังงาน

m_h^* คือ มวลยังผลของโฮลในแถบวาเลนซ์

N_V คือ ความหนาแน่นของสถานะพลังงานในแถบวาเลนซ์

เนื่องจากในสารกึ่งตัวนำประเภทอินทรีนซิกที่อุณหภูมิ 0 K โฮลและอิเล็กตรอนมีจำนวนเท่ากันดังนั้นจากสมการที่ (2.32) และสมการที่ (2.34) จะได้

$$n_i p_i = n_i^2 = N_C N_V \exp\left[-\frac{E_g}{kT}\right] \quad (2.38)$$

และ

$$n_i = (N_C N_V)^{\frac{1}{2}} \exp\left[-\frac{E_g}{2kT}\right] \quad (2.39)$$

หรือ

$$n_i = p_i = 4.82 \times 10^{15} T^{\frac{3}{2}} \left(\frac{m_e^* m_h^*}{m^2} \right)^{\frac{3}{4}} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \quad (2.40)$$

จากสมการที่ (2.40) พาหะอิสระในสารกึ่งตัวนำประเภทอินทรีนสิกที่อุณหภูมิ 0 K จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในเทอมของเอ็กซ์โพเนนเชียล อุณหภูมิจึงมีบทบาทสำคัญกับสมบัติไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 K

2.12.1.2 สารกึ่งตัวนำที่ประเภทเอ็กซ์ทรีนสิก (extrinsic semiconductor)

เมื่อมีการเติมอะตอมของสารเจือปนลงในสารกึ่งตัวนำที่อาจมีได้ทั้งอะตอมผู้ให้ (donor) หรืออะตอมผู้รับ (acceptor) ในสถานะสมดุลความร้อนของผลึกความหนาแน่นพาหะอิสระทั้งอิเล็กตรอนและโฮลจะหาได้ทำนองเดียวกับสารกึ่งตัวนำประเภทอินทรีนสิก ที่อุณหภูมิ 0 K นั่นคือความหนาแน่นอิเล็กตรอนในแถบนำคือ

$$n = N_C \exp\left(\frac{E_F}{kT}\right) \quad (2.41)$$

และความหนาแน่นของโฮลในแถบเวเลนซ์คือ

$$p = N_V \exp\left[-\frac{E_F - E_g}{kT}\right] \quad (2.42)$$

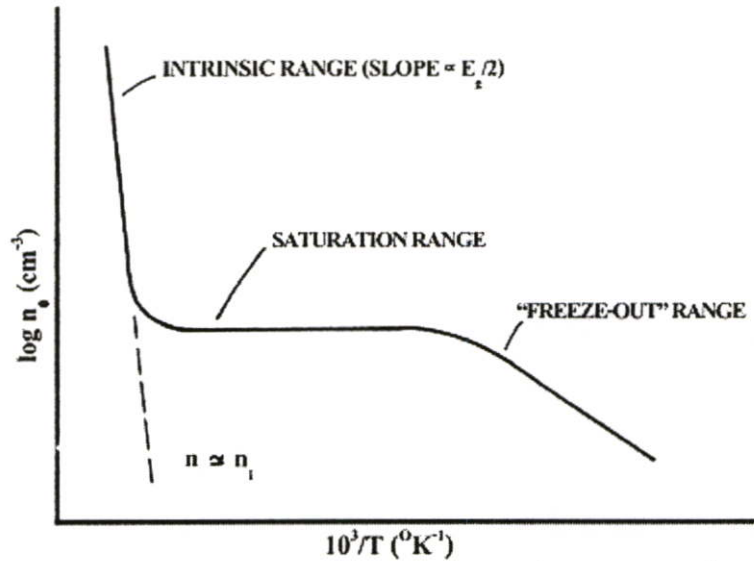
ภายใต้สถานะที่สถานะพลังงานไม่ถูกรบกวนจะยังคงมีความสัมพันธ์

$$np = n_i^2 = N_C N_V \exp\left[-\frac{E_g}{kT}\right] \quad (2.43)$$

พิจารณาสารกึ่งตัวชนิดเอ็น (n-type) ที่มีทั้งอะตอมผู้ให้ (N_d) ที่มีระดับพลังงานอยู่ต่ำกว่าขอบล่างของแถบนำเป็นสถานะพลังงานของอะตอมผู้ให้ (donor level: E_d) และอะตอมผู้รับ (N_a) ที่มีระดับพลังงานสูงกว่าขอบล่างของแถบเวเลนซ์เป็นสถานะพลังงานของอะตอมผู้รับ (acceptor level: E_a) จากเงื่อนไขความเป็นกลางทางไฟฟ้าของระบบจะได้

$$n + (N_a - n_a) = p + (N_d - n_d) \quad (2.44)$$

เมื่อ	n, p	คือ	ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ
	N_d, N_a	คือ	ความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้และผู้รับ
	n_i, n_a	คือ	ความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้และผู้รับที่ไม่ถูกไอออไนซ์



รูปที่ 2.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น กับส่วนกลับของอุณหภูมิ

จากรูปที่ 2.28 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของพาหะ (อิเล็กตรอน) ที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมินั้น เราสามารถพิจารณาได้เป็น 2 กรณี คือ

1. กรณีที่มีความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือมีน้อยหรือที่อุณหภูมิสูง

ในกรณีเช่นนี้อะตอมของสารเจือจะถูกไอออไนซ์จนหมดด้วยพลังงานเนื่องจากความร้อนพาหะอิสระเกิดจากสองส่วนคือ มาจากสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 K และมาจากอะตอมของสารเจือปนทั้งหมด จากเงื่อนไขความเป็นกลางทางไฟฟ้าสมการที่ (2.44) ลดรูปได้เป็น

$$n = p + (N_d - N_a) \tag{2.45}$$

จากสมการที่ (2.43) จะได้ว่า

$$n = \frac{1}{2} \left[(N_d - N_a) + \sqrt{(N_d - N_a)^2 + 4n_i^2} \right] \tag{2.46}$$

$$p = \frac{n_i^2}{n} \tag{2.47}$$

ในช่วงอุณหภูมิสูงมากจนกระทั่งความหนาแน่นพาหะส่วนใหญ่มาจากสารกึ่งตัวนำประเภทอินทรินสิก ที่อุณหภูมิ 0 K มากกว่าอะตอมของสารเจือปนมากๆ ($|N_d - N_a| \ll n_i$) ช่วงนี้จะมี การเพิ่มขึ้นของพาหะอิสระตามการเพิ่มของอุณหภูมิอย่างรวดเร็วแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลเรียกช่วง นี้ว่าเป็นบริเวณอินทรินซิก (intrinsic region) และสมการที่ (2.46) และ (2.47) จะกลายเป็น สมการในช่วงบริเวณอินทรินซิก

$$n = p = n_i \quad (2.48)$$

ในช่วงที่อุณหภูมิต่ำกว่าช่วงอินทรินซิก พาหะที่มาจากสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 K จะมีน้อยกว่าพาหะที่มาจากอะตอมของสารเจือปนมากๆ ($|N_d - N_a| \gg n_i$) พาหะข้างมากในช่วงนี้ จะมีค่าคงที่เรียกช่วงนี้ว่าบริเวณอิ่มตัว (saturation region) โดยสมการที่ (2.46) จะเปลี่ยนเป็น

$$n \cong N_d - N_a \quad (2.49)$$

2. กรณีความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือปนมีมากหรือที่อุณหภูมิต่ำ

ในกรณีนี้พลังงานเนื่องจากความร้อน ไม่สามารถไอออไนซ์อะตอมของสารเจือปนได้ทั้งหมด ดังนั้นจึงยังมีอะตอมผู้ให้ (n_d) บางส่วนเหลืออยู่ แต่โฮล (p) และอะตอมผู้รับ (n_a) จะมีค่าน้อยมาก ดังนั้นสมการที่ (2.44) จะเปลี่ยนเป็น

$$n = N_d - N_a - n_d \quad (2.50)$$

และ

$$n_d = N_d \left[\frac{1}{1 + \beta \exp\left\{ \frac{E_d + E_F}{kT} \right\}} \right] \quad (2.51)$$

เมื่อ β คือ แฟกเตอร์สภาพซ้อนสถานะ (degeneracy factor)

ที่สถานะพื้นฐานของอะตอมผู้ให้จากสมการที่ (2.41) (2.50) และ (2.51) สามารถเขียนได้ในรูปของ สมการที่ (2.52) ดังนี้

$$n^2 + n(N_a + N_c') - (N_d - N_a)N_c' = 0 \quad (2.52)$$

เมื่อ

$$N'_C = \beta N_C \exp\left(-\frac{E_d}{kT}\right) \quad (2.53)$$

และเมื่อ n อยู่ในรูปของสมการกำลังสองซึ่งมีรากของสมการคือ

$$n = -\frac{1}{2}(N_d - N'_C) + \frac{1}{2}\left[(N_d - N'_C)^2 + 4N'_C(N_d - N_a)\right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.54)$$

เมื่อ $E_d \gg kT$ และ N'_C จะมีค่าน้อย เราสามารถกระจายสมการที่ (2.54) เทอมที่สองด้านขวามือได้ด้วยอนุกรมทวินาม (binomial series) จะได้

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

$$n \cong \frac{N'_C(N_d - N_a)}{N_a + N'_C} \quad (2.55)$$

ถ้า $N_a \gg N'_C$ สมการที่ (2.55) จะกลายเป็น

$$n = \frac{N'_C(N_d - N_a)}{N_a} = \frac{(N_d - N_a)}{2N_a} \beta N_C \exp\left[-\frac{E_d}{kT}\right] \quad (2.56)$$

ถ้า N_a มีค่าน้อยมากนั่นคือ $N_d \gg N'_C \gg N_a$ จะทำให้สมการที่ (2.52) สามารถลดรูปได้เป็น

$$\frac{n^2}{N_d} - N'_C = 0 \quad (2.57)$$

หรือ

$$n \approx \sqrt{\beta N_d N_C} \exp\left(-\frac{E_d}{kT}\right) \quad (2.58)$$

จะเห็นได้ว่าความหนาแน่นของพาหะอิสระจะลดลงตามการลดลงของอุณหภูมิในแบบ เอ็คซ์โพเนนเชียล ซึ่งเรียกช่วงที่สองนี้ว่าบริเวณ ฟรีซเอาท์ (freeze-out region) โดยการลดลงจะเป็นไปตามสมการที่ (2.57) เมื่ออุณหภูมิต่ำลงจนกระทั่ง $N_a < n < N_d$ และลดลงตามสมการที่ (2.58) เมื่ออุณหภูมิต่ำลงจนกระทั่ง $n < N_a < N_d$

2.13 สภาพนำไฟฟ้า [5-13, 24-25]

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

$$J = \sigma E = e(\mu_n n + \mu_p p)E \quad (2.59)$$

เมื่อ μ_n, μ_p คือ สภาพคล่องของอิเล็กตรอนและโฮล ตามลำดับ

n คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

p คือ ความหนาแน่นของโฮล

ส่วนกลับของสภาพนำไฟฟ้า เรียกว่า สภาพต้านทานไฟฟ้า (resistivity: ρ) ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

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

ถ้ามีก้อนเนื้อสารกึ่งตัวนำซึ่งให้แรงดัน V และเกิดกระแส I แล้วจะได้ว่า

$$J = \frac{I}{A} \quad (2.61)$$

และ

$$E = \frac{V}{\ell} \quad (2.62)$$

สามารถเขียนสมการที่ (2.59) ใหม่ได้เป็น

$$\frac{I}{A} = \sigma \left(\frac{V}{\ell} \right) \quad (2.63)$$

หรือ

$$V = \left(\frac{\ell}{\sigma A} \right) I = \left(\frac{\rho \ell}{A} \right) I = IR \quad (2.64)$$

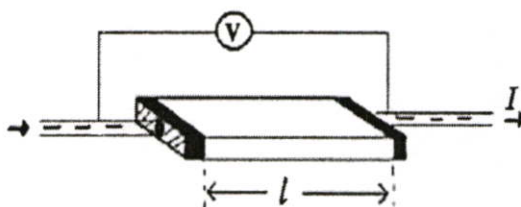
สมการที่ (2.64) คือ กฎของโอห์มสำหรับสารกึ่งตัวนำ ความต้านทานเป็นฟังก์ชันกับสภาพความต้านทานหรือสภาพนำไฟฟ้า และขึ้นกับมิติรูปทรงทางเรขาคณิตของสารกึ่งตัวนำ

2.13.1 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า [9, 11-13, 24-25]

วิธีการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำสามารถกระทำได้หลายวิธี ทั้งวิธีที่ใช้ส่วนของอุปกรณ์ต่อเข้าสัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่างและวิธีที่ไม่ต้องสัมผัสโดยตรง สำหรับวิธีที่จะกล่าวถึงในที่นี้เป็นวิธีที่ใช้การสัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่าง ซึ่งทำได้โดยการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในชิ้นสารตัวอย่างแล้ววัดความต่างศักย์ระหว่างจุดสองจุดบนชิ้นสารนั้น

2.13.1.1 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง (direct resistivity method)

โดยทั่วไปแล้วการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้ามักจะวัดความต้านทานก่อน ซึ่งเป็นวิธีวัดโดยตรงนี้ หมายถึง วัดค่าความต้านทานรวมของสสารจากนั้นมาหาค่าความยาว และพื้นที่หน้าตัดของสสารนั้น การวัดวิธีนี้จะต้องทำให้สสารที่ต้องการวัดมีรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอน เพื่อที่จะวัดค่าพื้นที่หน้าตัดและความยาวให้ได้แน่นอน เช่น แท่งกลมทรงกระบอก แท่งสี่เหลี่ยม เป็นต้น จากนั้นจึงให้กระแสไฟฟ้าเข้าไปที่ปลายด้านหนึ่ง และให้กระแสไหลออกผ่านสารตัวอย่างที่ปลายอีกด้านหนึ่ง ขณะเดียวกันก็วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จุดปลายทั้งสองนั้นพร้อม ๆ กัน จากที่ทราบค่ากระแสและศักย์ไฟฟ้านี้ สามารถนำมาคำนวณหาความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าได้ดังต่อไปนี้ เมื่อกำหนด R เป็นความต้านทานรวมจะมีความสัมพันธ์กับความต้านทานจำเพาะและพื้นที่หน้าตัด A บริเวณที่ปล่อยกระแสไหลเข้าไปและ ℓ เป็นระยะทางระหว่างขั้วศักย์ไฟฟ้าที่วัด



รูปที่ 2.29 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง

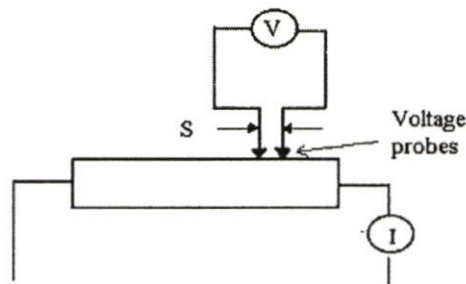
$$R = \rho \frac{\ell}{A} \quad (2.65)$$

$$\rho = R \times \frac{A}{\ell} = \left(\frac{V}{I} \right) \left(\frac{A}{\ell} \right) \quad (2.66)$$

จะเห็นว่าวิธีนี้เป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็ว แต่ค่าที่ได้เป็นค่าโดยประมาณซึ่งต้องคำนึงถึงองค์ประกอบอื่นๆ ด้วย ซึ่งความถูกต้องในการวัดโดยวิธีนี้ขึ้นอยู่กับบริเวณผิวสัมผัสที่กระแสไหลเข้าและออกนั้นมีลักษณะเป็น โอห์มมิกที่ดีหรือไม่ ถ้าไม่มีคุณสมบัติโอห์มมิกที่ดีแสดงว่ามีความต้านทานที่ผิวสัมผัสทั้งสองขั้วไฟฟ้าเกิดขึ้นด้วย ค่าความต้านทาน R ที่วัดได้จึงเป็นค่าความต้านทานรวมทั้งหมด ดังนั้น ค่าความต้านทานจริงของสารกึ่งตัวนำจะน้อยกว่าค่าที่วัดได้แน่นอน ความถูกต้องอีกส่วนหนึ่งขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างความต้านทานของสารที่ต้องการวัดและความต้านทานภายใน(impedance) ของโวลต์มิเตอร์ที่ใช้วัด หากความต้านทานนี้ใกล้เคียงกับความต่างศักย์ ไฟฟ้าที่วัดได้จะมีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง ซึ่งในทางปฏิบัติจะคำนึงถึงผิวสัมผัสโอห์มมิกมากกว่าความผิดพลาดของโวลต์มิเตอร์ เนื่องจากที่ผิวสัมผัสจะดีหรือไม่ (เป็น โอห์มมิกหรือไม่) นั้นตรวจสอบได้ยากมาก จึงแก้ไขด้วยการทำให้เกิดผิวสัมผัสบริเวณพื้นที่มากขึ้นเพื่อลดความต้านทานที่ผิวสัมผัสลง จากนั้นจึงวัดศักย์ไฟฟ้าด้วยโวลต์มิเตอร์ โดยเลือกโวลต์มิเตอร์ที่มีความต้านทานภายในสูงๆ เท่าที่จะหาได้เพื่อลดความผิดพลาด

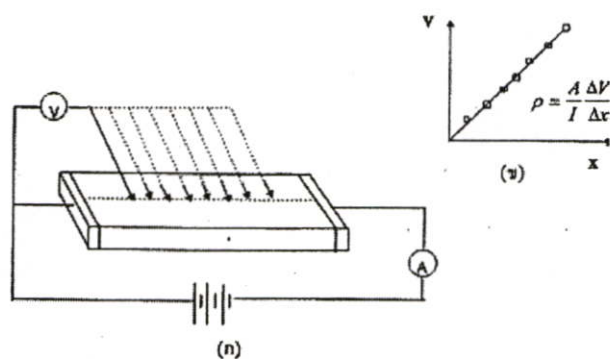
2.13.1.2 การวัดความต้านทานจำเพาะโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น (linear two point probes)

การวัดด้วยวิธีนี้มีลักษณะใกล้เคียงกับวิธีวัดโดยตรง แตกต่างที่ลักษณะของขั้วไฟฟ้าของการวัด ศักย์ไฟฟ้าจะวัดบนสารตัวอย่าง ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.30 วิธีการวัดชนิดนี้เป็นวิธีที่พัฒนาขึ้นจากแบบแรก เพื่อกำจัดศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อหัวท้ายของผิวสัมผัสให้น้อยลงและสามารถตรวจสอบความสกปรกบนพื้นผิวของชิ้นสารตัวอย่างได้ด้วย



รูปที่ 2.30 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น

ข้อจำกัดของการวัดด้วยวิธีนี้คือ จะต้องวัดบนสารตัวอย่างที่มีความหนาสม่ำเสมอและมีรูปทรงเรขาคณิตแน่นอน โดยพยายามให้กระแสผ่านเข้าไปในสารตัวอย่างมีค่าน้อยที่สุดเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความร้อนภายในสาร เพราะค่าความต่างศักย์ที่วัดได้อาจจะไม่ถูกต้อง อีกทั้งในการวัดทุกครั้งจะต้องใช้โวลต์มิเตอร์ที่มีค่าความต้านทานภายในสูง และจุดที่ต้องการวัดศักย์ไฟฟ้าควรจะต้องอยู่ห่างจากจุดที่ปล่อยกระแสเข้าและออกพอสมควร เพื่อป้องกันสารเจือเข้าไปทำการรวมตัวกันระหว่างจุดที่ทำการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า หากมีสารเจือเข้ามารวมตัวที่บริเวณที่วัดนี้จะมีผลทำให้เกิดการรวมกับพาหะข้างน้อย(minority carriers) บริเวณนั้น ทำให้การวัดค่าความต้านทานจำเพาะที่วัดได้สูงเกินความเป็นจริง นอกจากนี้ควรคำนึงถึงความสม่ำเสมอของเส้นสมศักย์(equi-potential lines) โดยการวัดที่บริเวณจุดที่คิดว่าเป็นเส้นสมศักย์นั้นสม่ำเสมอ (ตรงกลางของสารตัวอย่าง) สัดส่วนระหว่างระยะขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้าต่อพื้นที่ ตรงจุดที่ปล่อยกระแสเข้าและออกจะต้องมีค่ามากกว่าสามเท่า $\ell / A > 3$ เมื่อ ℓ คือ ระยะห่างระหว่างขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้า และ A คือ พื้นที่บริเวณให้กระแสไฟฟ้า ข้อควรคำนึงถึงอีกประการก็คือ สารที่นำมาวัดมีโครงสร้างผลึกชนิดใด เป็นรูปลูกบาศก์หรือไม่ ถ้าไม่ใช่จะต้องทราบทิศทางของการวัดว่าอยู่ในทิศทางหรือระนาบใดของผลึก การวัดควรใช้วิธีตรงที่ขั้วหนึ่งไว้และเลื่อนตำแหน่งอีกขั้วหนึ่งออกไปเป็นระยะๆ โดยมีมาตราส่วนบอกระยะและนำมาเขียนกราฟดังรูปที่ 2.31 (ก) และ (ข) ความชันที่ได้จะเป็นค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้า



รูปที่ 2.31 แสดงการวัดความต้านทานแผ่น โดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น

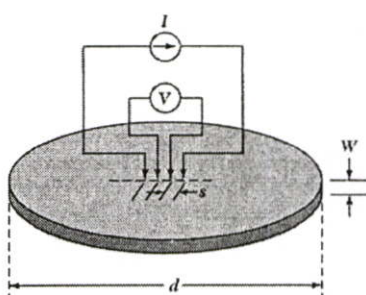
ก. การวัดแบบสองขั้วโดยมีการเลื่อนระยะที่ขั้วหนึ่ง

ข. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับระยะทางที่ได้จากการวัดชนิดเลื่อนขั้วไฟฟ้า

ข้อดีของการวัดแบบสองขั้วในหลายๆตำแหน่งนี้จะสามารถแยกสภาพต้านทานไฟฟ้าที่สภาพผิวระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำและความต้านทานจำเพาะภายในของสารกึ่งตัวนำได้

2.13.1.3 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสี่ขั้วเชิงเส้น (liner four point probes)

วิธีนี้มีหลักการวัดคือ สองขั้วนอกจ่ายกระแสไฟฟ้า สองขั้วในวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 2.32 วิธีนี้จะไม่มีปัญหาเรื่องความต้านทานของรอยต่อ และความต้านทานจะคำนวณได้จากกฎของโอห์มและถ้ารูขนาคของฟิล์ม ก็จะสามารถคำนวณหาสภาพต้านทานไฟฟ้าได้ โดยส่วนใหญ่ มักจะรายงานค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าอยู่ในเทอมของความต้านทานแผ่น(sheet resistance: R_{sh}) ซึ่งมีหน่วยเป็น Ω / sq



รูปที่ 2.32 แสดงการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสี่ขั้วเชิงเส้น

จากรูปที่ 2.32 เป็นการวัดความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มแบบสี่ขั้วเชิงเส้น โดยวัดที่ผิวหน้าของฟิล์มที่มีรูปแบบใดๆ ก็ได้ แต่ตำแหน่งของขั้วทั้งสองจะต้องวางเรียงอยู่ในแนวเดียวกัน โดยสองขั้วนอกวัดกระแสไฟฟ้าได้จากสมการดังนี้

$$\rho = \frac{2\pi \frac{V}{I}}{\left[\frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_3} - \frac{1}{S_1 + S_2} - \frac{1}{S_2 + S_3} \right]} \quad (2.67)$$

โดยที่ S คือช่องว่างระหว่างขั้วที่ติดกัน ในกรณีที่ $S_1 = S_2 = S_3$ สมการที่ (2.67) จะเขียนใหม่ได้เป็น

$$\rho = \frac{2\pi SV}{I} \quad (2.68)$$

2.13.2 ทฤษฎีการนำไฟฟ้าในช่วงอุณหภูมิต่างๆ [5, 9-10, 13, 24-27]

ในการศึกษากลไกการนำไฟฟ้าซึ่งเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมินั้นแบ่งออกเป็น 2 ช่วงอุณหภูมิด้วยกัน โดยในช่วงอุณหภูมิสูงการนำไฟฟ้าอธิบายได้โดยการประมาณของเซโตะ (Seto) ในแบบจำลองนี้ประจุจะถูกคักจับไว้ที่ขอบเขตของเกรน ทำให้เกิดเขตปลอดพาหะขึ้นในบริเวณเกรน ซึ่งเป็นเหตุผลที่ทำให้เกิดค่าแกงศักย์ที่ขอบเขตของเกรน หรือเกิดการขยายตัวของเขตปลอดพาหะหรือเพียงบางส่วน ซึ่งขึ้นกับขนาดของความหนาแน่นของระดับพลังงานของกัปกัประจุ ระดับพลังงานของสารเจือ ขนาดของเกรน และความยาวเดอร์บายน์ ซึ่งความสูงของค่าแกงศักย์ที่ขอบเขตของเกรนนี้จะขึ้นกับอุณหภูมิ พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าแกงศักย์จะลดลง และทำให้การนำไฟฟ้าเป็นแบบเทอร์มิโอนิกอิมิตชันซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\sigma = AT^2 \exp\left[\frac{-\Phi_b}{kT}\right] \quad (2.69)$$

เมื่อ	Φ_b	คือ	ค่าแกงศักย์
	A	คือ	ค่าคงตัว
	T	คือ	อุณหภูมิเป็นเคลวิน
	k	คือ	ค่าคงตัวของโบลตซ์ทมันน์ (Boltzmann) = 1.38×10^{-23} J/K

ส่วนในช่วงอุณหภูมิต่ำนั้นการนำไฟฟ้าอธิบายได้โดยการประมาณตามแบบจำลองของ Mott ซึ่งจำลองมาจากการนำไฟฟ้าในสารที่มีการจัดเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบ เช่น อะมอร์ฟัส เรียกการนำไฟฟ้าแบบการกระโดดเป็นช่วง ๆ (variable-range hopping) ซึ่งจะ โดดเด่นในช่วงที่สารกึ่งตัวนำมีอุณหภูมิต่ำ เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำสารกึ่งตัวนำมีลักษณะการจัดเรียงตัวของอะตอมแบบไม่เป็นระเบียบ โฟนอนมีพลังงานไม่เพียงพอในการเคลื่อนย้ายไปยังอะตอมข้างเคียง และพาหะจะเคลื่อนที่ลักษณะคล้ายการกระโดดจากอะตอมเดิมไปยังอะตอมข้างเคียงที่มีระดับพลังงานเดียวกัน ซึ่งในสารกึ่งตัวนำที่เป็นผลึกพหุพันธ์นั้นที่อุณหภูมิต่ำ พาหะไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านบริเวณขอบเขตของเกรนได้ด้วยกระบวนการเทอร์มิโอนิกอิมิตชัน ซึ่งที่ขอบเขตของเกรนนั้นมีลักษณะเป็นระดับพลังงานของกัปกัประจุซึ่งเกิดจากความไม่เป็นระเบียบของอะตอมหรือความไม่สมบูรณ์ของพันธะเคมี ซึ่งกระจายอยู่ในช่องว่างแถบพลังงานซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\sigma T^{1/2} = A \exp\left[-\left(\frac{T_0}{T}\right)^{1/4}\right] \quad (2.70)$$

เมื่อ T_0 คือ อุณหภูมิห้อง (300 K)

2.14 การเตรียมฟิล์มบาง [8, 12, 20]

เทคนิคการเตรียมฟิล์มบางในปัจจุบันมีหลายวิธีที่นิยมใช้กัน โดยเราสามารถแบ่งตามลักษณะการเตรียมได้ดังนี้

1. กระบวนการเตรียมฟิล์มบางในระบบสุญญากาศ (vacuum processes)
 - การระเหยสารในสุญญากาศ (evaporation, PVD, TE)
 - เทคนิคผนังร้อน (hot wall technique: HWT)
 - การระเหิดในระยะประชิด (close spaced sublimation: CSS)
 - สปีดเตอร์ (sputter deposition: SD)
2. กระบวนการเตรียมฟิล์มที่ได้จากปฏิกิริยาเคมีจากสถานะแก๊ส (processes with chemical reactions from the gas phase)
 - ซีวีดี (chemical vapor deposition: CVD)
 - พลาสมาซีวีดี (plasma enhanced CVD: PECVD)
 - เอ็ม โอซีวีดี (metal-organic CVD: MOCVD)
 - ซีเอสวีที (close spaced vapour transport: CSVT)
3. เทคนิคการเตรียมอื่น ๆ (other techniques)
 - การพ่นละอองสารเคมี (spray pyrolysis: SPL)
 - การอบสารละลายเคมี (chemical bath deposition: CBD)
 - การเตรียมโดยวิธีไฟฟ้าเคมี (electrodeposition: ED)
 - เตรียมฟิล์มโดยทำให้เป็นชั้นๆของสาร (stacked layer reaction: SLR)
 - วิธีการพิมพ์สกรีน (screen printing and sintering: SP)

ในงานวิจัยนี้เราเลือกใช้กระบวนการเตรียมฟิล์มบางในระบบสุญญากาศ โดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ (thermal evaporation method: TE) เนื่องจากฟิล์มที่เตรียมได้มีคุณภาพดี เหมาะสำหรับนำมาศึกษาสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบาง

2.14.1 การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ [12, 20]

เทคนิคการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศนั้น เป็นวิธีการเตรียมฟิล์มบางวิธีหนึ่งของการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการระเหยสาร ซึ่งต้องเตรียมในสุญญากาศที่ระดับความดันประมาณ 10^{-5} - 10^{-7} ทอร์ วัตถุประสงค์ของการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีนี้คือ การควบคุมการเคลื่อนย้ายอะตอมจากแหล่งกำเนิดความร้อนไปยังฐานรองรับที่ห่างออกไปแล้ว เกิดเป็นฟิล์มบาง

2.14.1.1 อัตราการระเหยสาร

จากการทดลองของเฮิร์ตซ์ (Hertz) และนูดเซน (Knudsen) พบว่าอัตราการไหลของอะตอมหรือโมเลกุล ในสุญญากาศ จากแหล่งกำเนิดความร้อน (heat source) คือ

$$\Phi_e = \frac{3.513 \cdot 10^{22}}{(MT)^{1/2}} P_e \quad \text{โมเลกุลต่อตารางเซนติเมตร-วินาที} \quad (2.71)$$

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

อัตราการระเหยมวลสาร (mass evaporation rate: Γ_e) สามารถหาได้จาก

$$\Gamma_e = 5.84 \cdot 10^{-2} (M/T)^{1/2} P_e \quad \text{กรัมต่อตารางเซนติเมตร-วินาที} \quad (2.72)$$

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

2.14.1.2 ความดันไอของธาตุ (vapor pressure of the elements)

ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความดันไอ แสดงได้ดังสมการ

$$\frac{dP}{dT} = \frac{\Delta H(T)}{T\Delta V} \quad (2.73)$$

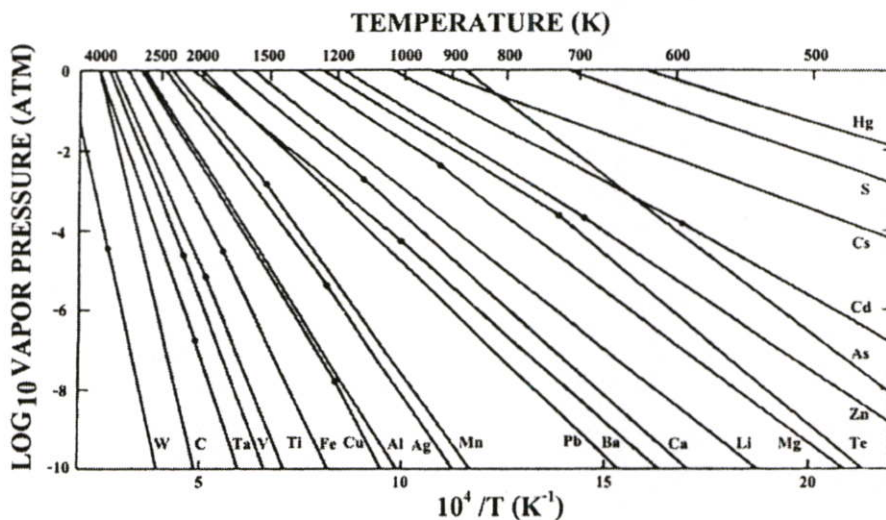
ถ้าให้ ΔV มีค่าเท่ากับปริมาตรของไอ (V_v) และเมื่อแก๊สนี้เป็นแก๊สในอุดมคติแล้ว V_v จะมีค่าเป็น RT/P ดังนั้น เขียนสมการที่ (2.73) ใหม่ได้เป็น

$$\frac{dP}{dT} = \frac{P\Delta H(T)}{RT^2} \quad (2.74)$$

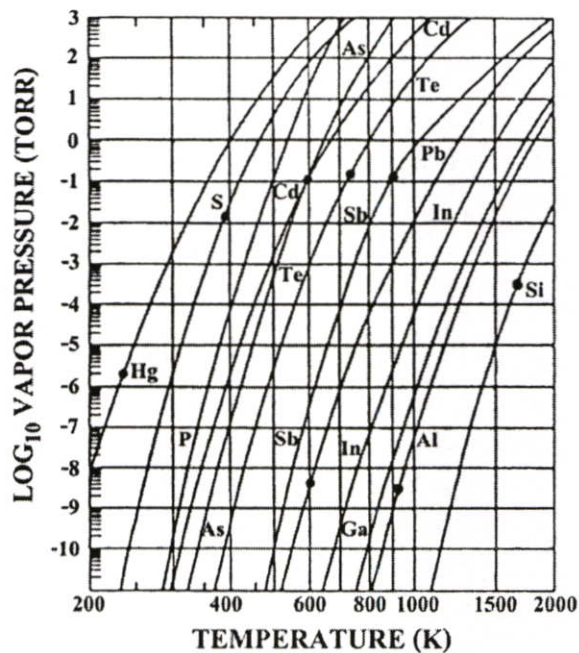
ถ้าประมาณให้ $\Delta H(T)$ มีค่าเท่ากับ ΔH_e (ความร้อนของสารในการระเหย) ในกรณีนี้ จะได้

$$\ln P \cong -\frac{\Delta H_c}{RT} + I \quad \text{หรือ} \quad P = P_0 \exp\left(-\frac{\Delta H_c}{RT}\right) \quad (2.75)$$

เมื่อ I (หรือ $P_0 = \exp I$) เป็นค่าคงที่ของการอินทิเกรต



รูปที่ 2.33 กราฟแสดงค่าความดันไอของธาตุ โดยจุดต่างๆจะสัมพันธ์กับ จุดหลอมเหลว



รูปที่ 2.34 กราฟแสดงค่าความดันไอของธาตุในสารกึ่งตัวนำ โดยจุดต่างๆจะสัมพันธ์กับ จุดหลอมเหลว

2.14.1.3 การระเหยสารประกอบ (evaporation of compound)

เนื่องจากสารประกอบจะมีไอออนขนาดใหญ่กว่าโลหะ ดังนั้นเมื่อสารประกอบระเหิดกลายเป็นไอแล้ว ส่วนประกอบของไอจะต่างไปจากสารตั้งต้นที่เป็นของแข็งหรือของเหลว ตัวอย่างเช่น การระเหยสารประกอบกึ่งตัวนำหมู่ II-VI ได้แก่ CdS, CdTe และ CdSe เป็นต้น เมื่อระเหยเป็นไอจะเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวออก (dissociation) ดังนี้ $MX_{(s)} \rightarrow M_{(g)} + \frac{1}{2} X_{2(g)}$ โดยที่ X คือ S, Te และ Se และเมื่อเกาะลงบนผิวของฐานรองรับแล้วจะทำการจัดรูปแบบใหม่เป็น $MX_{(s)}$ เหมือนเช่นเดียวกับสารตั้งต้นในการระเหย แสดงได้ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.7 แสดงปฏิกิริยาการระเหยสารประกอบ

ชนิดของปฏิกิริยา	ปฏิกิริยาทางเคมี	สารตัวอย่าง
การระเหยโดยไม่มีการแตกตัว	$MX(\text{หรือ}l) \rightarrow MX(g)$	SiO, GeO, SnO, AlN, CaF ₂ , MgF ₂
การแยกส่วนประกอบ	$MX(s) \rightarrow M(s) + 1/2 X_2(g)$ $MX(s) \rightarrow M(l) + 1/n X_n(g)$	Ag ₂ S, Ag ₂ Se สารกึ่งตัวนำกลุ่ม III-IV
การระเหยโดยการแตกตัว	$MX(s) \rightarrow M(g) + 1/2 X_2(g)$	
(ก) ซาลโคจีไนต์	X = S, Se, Te	CdS, CdTe, CdSe
(ข) ออกไซด์	$MO_2(s) \rightarrow MO(s) + 1/2 O_2(g)$	SiO ₂ , GeO ₂ , TiO ₂ , SnO ₂ , ZrO ₂

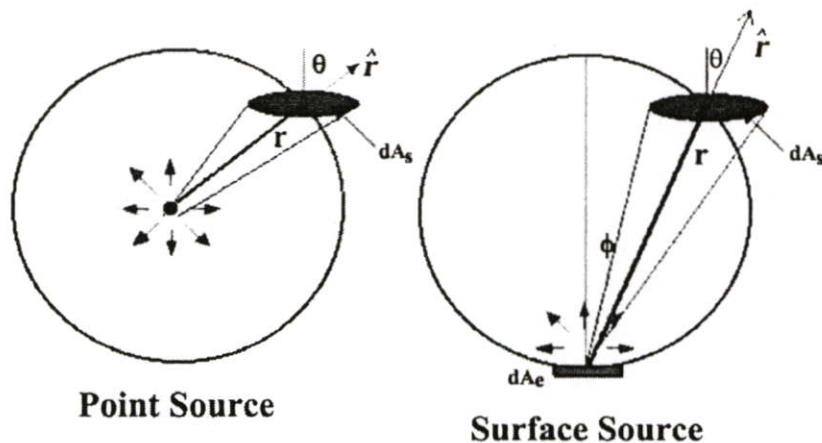
M = โลหะ X = อโลหะ

2.14.1.4 อิทธิพลของโครงสร้างเชิงเรขาคณิตต่อระบบการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการระเหยสาร (deposition geometry)

การเตรียมฟิล์มบางนั้นจะต้องพิจารณาประเภทของแหล่งกำเนิดสารที่ใช้ในการระเหยรวมถึงฐานรองรับที่อะตอมของสารจะมาตกกระทบด้วย สมมติว่าการระเหยสารเกิดขึ้นในระบบการไหลของโมเลกุล พิจารณาการระเหยสารจากแหล่งกำเนิดแบบจุด (point source) มวลรวมของสารจากการระเหย (total evaporation mass: \bar{M}_e) สามารถวัดได้จากน้ำหนักของสารก่อนและ

หลังระเหยแต่เมื่อพิจารณาแหล่งกำเนิดพื้นผิว (surface source) มวลรวมของสารจากการระเหยจะหาได้จาก

$$\bar{M}_c = \int_0^t \int_{A_c} \frac{M}{N_A} \Phi_c dA_c dt = \int_0^t \int_{A_c} \Gamma_c dA_c dt \quad (2.76)$$



รูปที่ 2.35 แสดงรูปแบบการระเหยของสารตั้งต้น

โดยที่ A_E คือ พื้นที่ผิวของสารที่ใช้ระเหย ปริมาณของมวล $d\bar{M}_s$ ที่ตกลงบนฐานรองเป็นพื้นที่ dA_s จากรูปที่ 2.34 dA_c คือ พื้นที่ผิวของทรงกลม จะได้ว่า $dA_c = dA_s \cos \theta$ ดังนั้น จะมีค่าเป็น

$$d\bar{M}_s = dA_s \left(\frac{\bar{M}_c \cos \theta}{4\pi^2} \right) \quad (2.77)$$

เมื่อ r คือ ระยะระหว่างแหล่งกำเนิดถึงฐานรอง

เมื่อพิจารณาการระเหยสารจากแหล่งกำเนิดที่มีผิวเรียบมวลตกกระทบบนพื้นที่เล็กน้อย dA_c โดยทำมุมกับพื้นผิวแหล่งกำเนิด ϕ และอยู่ห่างเป็นระยะ r จะได้

$$d\bar{M}_s(\phi, r) = (\cos \phi) d\bar{M}_s(0, r) dA_c$$

แฟกเตอร์ $\cos \phi$ เป็นฟังก์ชันของ ϕ เรียกว่า การกระจายของฟลักซ์แบบโคไซน์ (cosine flux distribution) เป็นผลมาจากระบบการไหลของโมเลกุลเพื่อประมาณค่า $\frac{d\bar{M}_s(\phi, r)}{dA_c}$ ทำการอินทิเกรตตลอดครึ่งทรงกลมรัศมี r จะได้

$$\bar{M}_e = \int_0^{\pi/2} \left(\frac{d\bar{M}_s(0,r)}{dA_c} \right) (\cos \phi) 2\pi (\sin \phi) r d\phi$$

จากการประมาณค่าอินทิเกรตข้างต้นจะพบว่า

$$\frac{d\bar{M}_s(0,r)}{dA_c} = \frac{\bar{M}_e}{\pi^2}$$

ดังนั้น

$$\frac{d\bar{M}_s(\phi,r)}{dA_c} = \frac{\bar{M}_e}{\pi^2} \cos \phi$$

จาก

$$dA_c = dA_s \cos \theta$$

จะได้

$$\frac{d\bar{M}_s(\phi,\theta,r)}{dA_s} = \frac{\bar{M}_e \cos \phi \cos \theta}{\pi^2} \quad (2.78)$$

และสามารถเขียนเป็นสมการทั่วไปได้ดังนี้ คือ

$$\frac{d\bar{M}_s(\phi,\theta,r)}{dA_s} = \bar{M}_e \frac{(n+1) \cos^n \phi \cos \theta}{2\pi^2} \quad (n \geq 0) \quad (2.79)$$

เมื่อ $n = 1$ สมการนี้จะเป็นการกระจายของฟลักซ์แบบโคซายน์ ถ้า $n > 1$ อธิบายได้ว่า มีทิศทางของฟลักซ์หลายทิศทาง (more forward directed) หรือถ้า $n < 1$ จะเกิดการกระจายแบบเดียวกัน (more uniform distribution) และสำหรับ $n = 0$ การกระจายของฟลักซ์จะเหมือนแหล่งกำเนิดแบบจุด

2.15 ระดับพลังงานแบบต่าง ๆ ที่ปรากฏในผลึก CdTe และ CdZnTe [28-30]

คาสทาลดีนี (Castaldini) และผู้ร่วมงาน [28] ได้ทำการศึกษาหาระดับพลังงานต่างๆ ที่ปรากฏอยู่ในผลึกเดี่ยวของ CdTe และ CdZnTe ด้วยวิธีสเปกโตรสโคปีช่วงขณะของระดับพลังงานลึก (DLTS) และวิธีสเปกโตรสโคปีของกระแสช่วงขณะที่เกิดจากการเหนี่ยวนำด้วยแสง (PICTS) และไว้ทำการจัดระดับพลังงานออกเป็นหมวดหมู่ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.36 ดังนี้คือ

1. ระดับพลังงาน A_0 เป็นระดับพลังงานที่อยู่เหนือขอบบนสุดของแถบวาเลนซ์เท่ากับ 0.12 eV หรือ $E_v+0.12$ eV ซึ่งเป็นระดับพลังงานที่ปรากฏอยู่ในผลึก CdTe ที่เจือด้วย Cl เท่านั้น โดยที่อะตอม Cl จะเข้าไปแทนที่ในตำแหน่งของอะตอม Te และเกิดการคับปลิงกับ V_{Cd} แล้วกลายเป็นข้อบกพร่องเชิงซ้อน (complex defects) $V_{Cd}-Cl_{Te}$ เช่น $(V_{Cd}^{2-}-Cl_{Te}^+)^-$ [29] และระดับ DX_2 ของ $(V_{Cd}^{2-}-Cl_{Te}^+)$ [29] ซึ่งมักจะเรียกระดับพลังงานนี้ว่าศูนย์กลาง A (A center) และแมทเทิว (Mathew) [30] ระบุว่าศูนย์กลาง A มีระดับอยู่เหนือขอบบนสุดของแถบวาเลนซ์ในช่วง 0.12-0.16 eV

2. ระดับพลังงาน A และ A_1 ระดับพลังงาน A จะปรากฏอยู่ที่ $E_v+0.14$ eV ซึ่งจะพบในผลึก CdTe และผลึก CdTe:Cl ที่ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อน ส่วนระดับพลังงาน A_1 จะอยู่ที่ $E_v+0.15$ eV ซึ่งจะพบอยู่ในผลึก CdTe:Cl และในผลึก CdZnTe แต่จุดกำเนิดของระดับพลังงานทั้ง A และ A_1 นี้ยังไม่แน่ชัดว่าเกิดจากอะไร แต่จากการศึกษาโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของ CdZnTe ทำให้เชื่อกันว่าระดับพลังงาน A และ A_1 จะเกี่ยวข้องกับ ข้อบกพร่องเชิงซ้อน V_{Cd} และ V_{Te} แต่สาเหตุอื่น ๆ เช่น สารเจือตกค้าง Li หรือ Cu อาจมีส่วนเกี่ยวข้องกับข้อบกพร่องเชิงซ้อน V_{Cd} และ V_{Te} นี้ในรูปแบบต่าง ๆ เช่น $(V_{Cd}^{2-}-Cu_i^+)^-$, $(2Cu_{Cd}^- - V_{Te}^+)^-$ หรือข้อบกพร่องเชิงซ้อนที่เกี่ยวข้องกับ V_{Cd}^{2-} หรือเกี่ยวกับ V_{Te}^+ [29] ระดับพลังงาน A และ A_1 นี้จะมีค่าใกล้เคียงกับระดับพลังงานของศูนย์กลาง A แต่จุดกำเนิดของระดับพลังงานเหล่านี้แตกต่างกัน

3. ระดับพลังงาน B เป็นกับดักโฮลที่มีพลังงานอยู่ที่ $E_v+0.2$ eV โดยปกติจะปรากฏในผลึก CdTe เสมอ ในแต่ละผลึกสารตัวอย่างที่เตรียมขึ้นนั้นอาจจะมีระดับพลังงานชนิดนี้แตกต่างกันบ้าง ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 อย่างคือ ปริมาณของสารเจือ (impurity content) และเทคนิคของการเตรียมผลึกของสารตัวอย่างซึ่งต้องใช้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน

4. ระดับพลังงาน C มีระดับพลังงานอยู่ที่ $E_v+0.25$ eV ซึ่งจะพบในผลึกของสารประกอบ $Cd_{0.8}Zn_{0.2}Te$ ส่วนผลึก $Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te$ จะมีระดับพลังงานอยู่ที่ $E_v+0.31$ eV ซึ่งระดับพลังงานเหล่านี้จะเกี่ยวข้องกับ V_{Zn}

5. ระดับพลังงาน D เป็นกับดักโฮลที่มีระดับพลังงานอยู่ที่ $E_v+0.32$ eV ซึ่งเป็นระดับพลังงานที่เกี่ยวข้องกับข้อบกพร่องเชิงซ้อนของ Te_{Cd}^- โดยจะเกิดขึ้นในขณะที่ทำการปลูกผลึก แต่ระดับพลังงานนี้มักจะถูกลบคั้งโดยระดับพลังงาน E ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันและผลึก CdTe:Cl ที่แอนนัลด้วยความร้อน ข้อบกพร่อง Te_{Cd}^- นี้จะเปลี่ยนไปเป็น V_{Cd}^{2-} และ Te_i

6. ระดับพลังงาน E มีระดับพลังงานอยู่ที่ $E_v+0.40$ eV ซึ่งจะปรากฏอยู่ในผลึก CdTe ที่ไม่มีสารเจือ ดังนั้นระดับพลังงานนี้จะเกิดจาก V_{Cd}^{2-} โดคเดี่ยว (isolated V_{Cd}) แต่สำหรับในผลึก CdTe:Cl ที่ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อน ข้อบกพร่องผลึก V_{Cd}^{2-} นี้จะจับปดกับ Cl_{Tc} กลายเป็นศูนย์กลาง A ดังนั้น V_{Cd}^{2-} ที่เหลือจะมีปริมาณน้อยแต่บางครั้งในผลึก CdTe:Cl ที่มีข้อบกพร่องชนิด Te_{Cd}^- ปรากฏรวมอยู่ด้วยเมื่อผลึก CdTe:Cl นี้ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อน ข้อบกพร่องผลึกชนิด Te_{Cd}^- จะเปลี่ยนแปลงไปเป็น V_{Cd}^{2-} และ Te_i ซึ่งข้อบกพร่อง V_{Cd}^{2-} จะยังกลับมาปรากฏ โดคเด่นอีกครั้งหนึ่ง

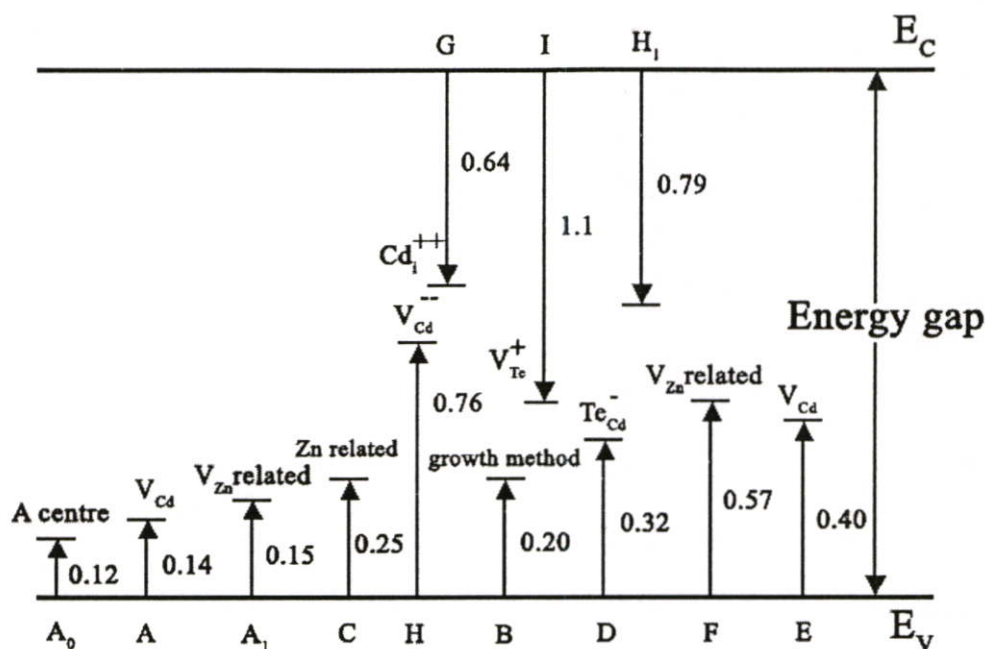
7. ระดับพลังงาน F เป็นระดับพลังงานลึก อยู่ที่ $E_v+0.57$ eV และปรากฏอยู่ในผลึก $Cd_{0.8}Zn_{0.2}Te$ แต่ไม่พบในผลึก CdTe และเชื่อว่าระดับพลังงานลึกนี้เป็นระดับพลังงานผู้รับที่มีค่าอยู่ในช่วง 0.55-0.65 eV และเกี่ยวข้องกับ V_{Zn}

8. ระดับพลังงาน G เป็นกับดักอิเล็กตรอนที่มีระดับพลังงานอยู่ที่ $E_c-0.64$ eV และจะพบเฉพาะในผลึก CdTe:Cl ทั้งก่อนและหลังที่ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อนซึ่งระดับพลังงานนี้มีจุดกำเนิดมาจาก Cd_i^{2+}

9. ระดับพลังงาน H เป็นระดับพลังงานผลึกอยู่ที่ $E_v+0.76$ eV ได้มีการศึกษาระดับพลังงานลึกนี้ทั้งสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติเชิงแสงไว้จำนวนมาก และเชื่อว่าระดับพลังงานนี้เป็นระดับพลังงานผู้รับที่เกิดจากข้อบกพร่องผลึกแบบเชิงซ้อนของ V_{Cd}^{2-} กับอะตอมสารเจือ ระดับพลังงานนี้จะอยู่ตรงกึ่งกลางของช่องว่างแถบพลังงานดังนั้นจึงเกี่ยวข้องกับกระบวนการตรึงระดับเฟอร์มิ (Fermi level pinning process) ในวัสดุกึ่งฉนวน เช่น CdTe:Cl และ $Cd_{0.8}Zn_{0.2}Te$ ส่วนในวัสดุสารกึ่งตัวนำ เช่น CdTe ระดับพลังงานลึกนี้จะอยู่ห่างจากระดับเฟอร์มิมากและจะไม่เกี่ยวข้องกับกระบวนการตรึงระดับเฟอร์มิ

10. ระดับพลังงาน H_1 เป็นกับดักอิเล็กตรอนระดับลึกอยู่ที่ $E_c-0.79$ eV ซึ่งจะพบในผลึก CdTe:Cl ทั้งก่อนและหลังได้รับการแอนนัลด้วยความร้อน สารเจือ Cl จะเหนี่ยวนำให้เกิด $(V_{Cd}^{2-} - 2Cl_{Tc}^+)^0$ ซึ่งก็ถือว่าเป็นศูนย์กลาง A ซึ่งจะมีพฤติกรรมหักล้างกับระดับผู้รับ V_{Cd}^{2-} ถึงแม้ว่า V_{Cd}^{2-} จะเป็นระดับพลังงานตื่นเกินไปที่จะก่อให้เกิดกระบวนการตรึงระดับเฟอร์มิที่ตรงบริเวณกึ่งกลางช่องว่างแถบพลังงานจากการเปรียบเทียบระดับพลังงาน H_1 กับระดับพลังงานต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในผลึกสารตัวอย่างทั้งหมดที่ได้ทำการศึกษา พบว่าระดับพลังงาน H_1 จะอยู่ตรงกึ่งกลางของช่องว่างแถบพลังงานและจะประพุดิตัวเป็นระดับพลังงานผู้ให้ ซึ่งจะหักล้างกับระดับพลังงานผู้รับในสารกึ่งฉนวน CdTe:Cl นอกจากนั้นระดับพลังงาน H_1 ยังมีปริมาณที่มากเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณของระดับพลังงาน H ดังนั้นระดับพลังงาน H_1 จะประพุดิตัวเป็นคู่แข่งกับระดับ H

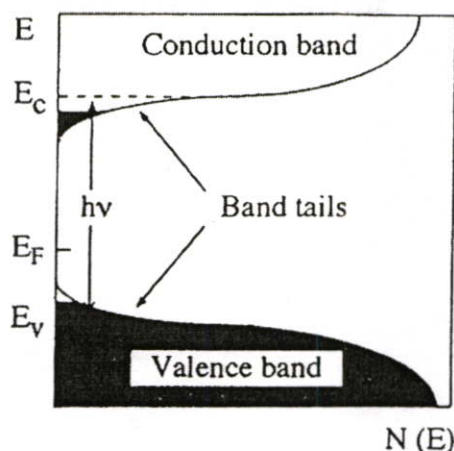
11. ระดับพลังงาน I เป็นระดับพลังงานอยู่ที่ $E_c-1.10$ eV ซึ่งตรวจวัดได้จากเทคนิค PICTS และ CL ระดับพลังงานของกับดักใน CdTe และ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ นี้มีค่าเท่ากับ 1.1 eV มีจุดกำเนิดมาจาก V_{Tc}^+ ซึ่งจะประพุดิตัวเป็นกับดักอิเล็กตรอน



รูปที่ 2.36 แสดงระดับพลังงานต่างๆที่ปรากฏในผลึกของ CdTe และ CdZnTe [28]

2.16 ส่วนหางของแถบพลังงาน [31-33]

วัสดุประเภทฟิล์มบางมักมีข้อบกพร่องของผลึกจำนวนมากระดับพลังงานของข้อบกพร่องของผลึกเหล่านี้จะมีอันตรกิริยาต่อกันส่งผลให้ระดับพลังงานเหล่านี้แผ่ขยายออกโดยจะไม่เป็นระดับพลังงานเฉพาะค่า (discrete level) อีกต่อไปบางครั้งก็แผ่ออกไปจรดขอบบนสุดของแถบวาเลนซ์หรือขอบล่างสุดของแถบนำซึ่งเสมือนกับว่าแถบวาเลนซ์หรือแถบนำมีความหนาแน่นของสถานะทางพลังงาน (energy density of state) ขึ้นเข้าไปในช่องว่างแถบพลังงานซึ่งนิยมเรียกส่วนที่ขึ้นเข้าไปในช่องว่างแถบพลังงานนี้ว่าส่วนหางของแถบพลังงาน (band tail) หรือส่วนหางของเออร์บัค (Urbach's tail) ดังแสดงดังรูปที่ 2.37

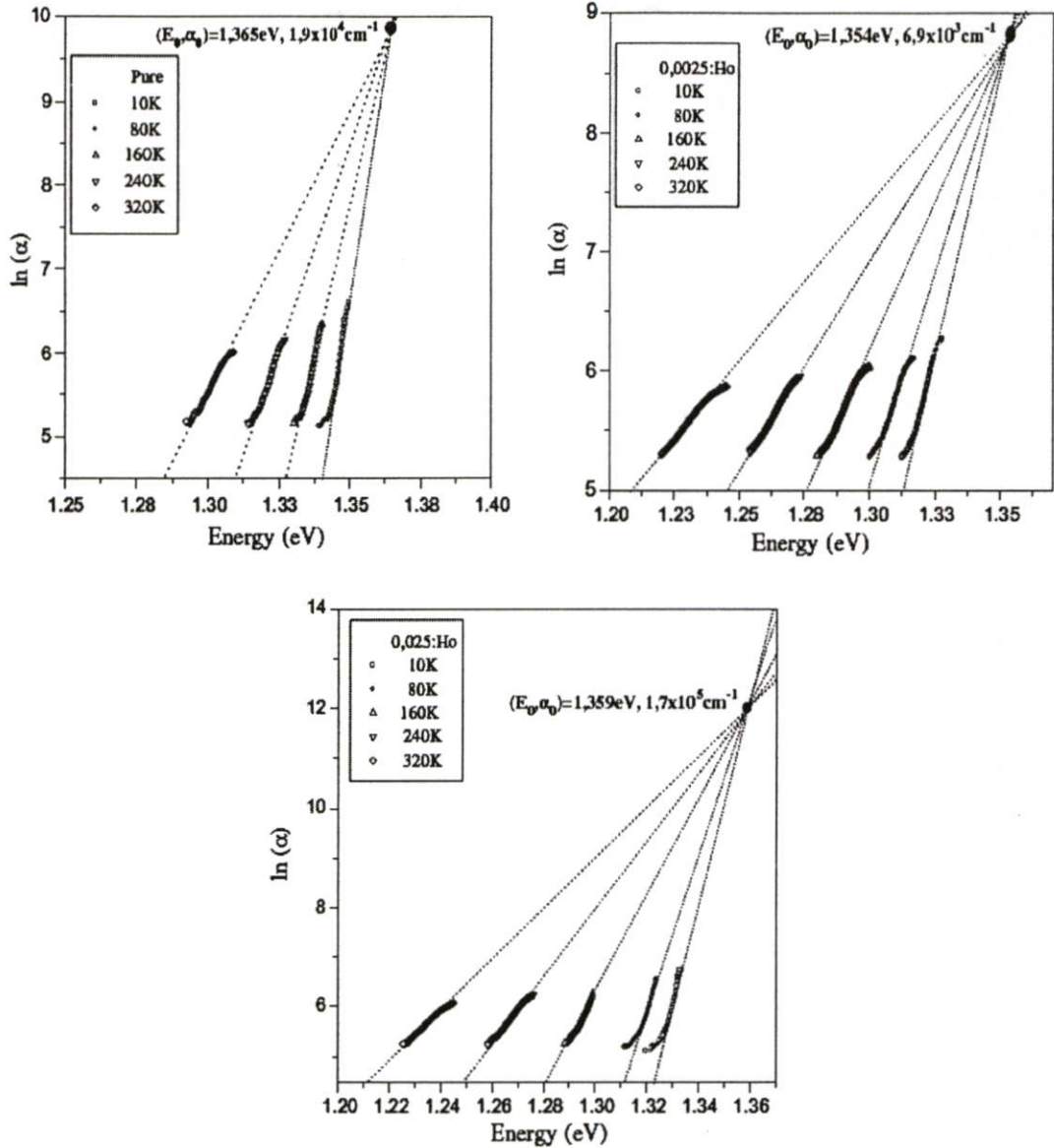


รูปที่ 2.37 แสดงส่วนหางของแถบพลังงานซึ่งมีทั้งส่วนหางของแถบวาเลนซ์และส่วนหางของแถบนำ

ในเชิงการทดลองส่วนหางของแถบพลังงานสามารถตรวจสอบได้จากการวัดขอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซึ่ง เออร์บัคได้แสดงให้เห็นว่าขอบการดูดกลืนของผลึกจะเพิ่มขึ้นแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลดังความสัมพันธ์

$$\alpha = \alpha_0 \exp\left[\frac{\sigma(E - E_0)}{k_B T}\right] \quad (2.80)$$

เมื่อ α_0 และ E_0 เป็นพารามิเตอร์ของผลึกแต่ละชนิด ส่วน k_B คือค่าคงตัวของโบลตซ์มันน์ T คืออุณหภูมิ (K) และ σ คือ ความชัน (steepness) ของขอบการดูดกลืนแสง จากสมการที่ (2.80) นี้บอกเป็นนัย ๆ ว่า กราฟของความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \alpha$ กับพลังงาน (E) จะเป็นเส้นตรงในช่วงพลังงานที่มีความต่ำกว่าขอบการดูดกลืนพื้นฐาน (หรือพิจารณาที่พลังงานต่ำกว่าช่องว่างแถบพลังงานนั่นเอง) การลากส่วนต่อของเส้นตรงที่วัดที่อุณหภูมิต่าง ๆ จะเข้าสู่จุด (E_0, α_0) ซึ่งเรียกจุดนี้ว่าจุดคู่รวม (converging point) ดังปรากฏในรูปที่ 2.38



รูปที่ 2.38 แสดงกราฟเส้นตรงของความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \alpha$ กับพลังงาน (E) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยมีจุดคู่ร่วมที่ (E_0, α_0) ของผลึก InSe: Ho

บิลกิน (Bilgin) และผู้ร่วมงาน [32] เสนอว่าที่อุณหภูมิห้องและในช่วงพลังงานที่ต่ำกว่า E_g สมการที่ (2.80) จะลดรูปลงเป็นสมการที่ (2.81) ดังนี้

$$\alpha(\nu) = \alpha_0 \exp\left(\frac{h\nu}{E_0}\right) \quad (2.81)$$

เมื่อ α_0 เป็นค่าคงตัว ส่วน E_0 เป็นความกว้างของส่วนหางของแถบพลังงานซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิไม่มากนัก ดังนั้น ค่า E_0 จะสามารถคำนวณได้จากความชันของเส้นตรงของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \alpha$ กับพลังงาน (E) ในช่วงพลังงานที่มีค่าต่ำกว่าช่องว่างแถบพลังงาน E_g

อิริบาร์เรน (Iribarren) และผู้ร่วมงาน [33] ได้เสนอว่าส่วนหางของแถบพลังงานของฟิล์มบางที่อุณหภูมิห้องจะสัมพันธ์กับขนาดของเกรน (R) ดังสมการ

$$E_0 = 21.18 + \frac{121.84}{R} \quad (2.82)$$

เมื่อ R คือ ขนาดของเกรนมีหน่วยเป็น μm และ E_0 มีหน่วยเป็น meV อย่างไรก็ตามการเกิด E_0 ในฟิล์มบางยังขึ้นกับปัจจัยต่างๆอีกอย่างน้อย 4 ชนิดคือขอบของเกรน อันตรกิริยาระหว่างพาหะอิสระกับสารเจือและระหว่างพาหะอิสระกับโฟนอน ข้อบกพร่องของเนื้อผลึก (bulk defects) และการจัดเรียงตัวใน โครงผลึกที่ไม่เป็นระเบียบ ดังนั้น E_0 จะเป็นผลรวมของส่วนหางของแถบพลังงานที่เกิดจากปัจจัยอย่างน้อย 4 ชนิดจะแสดงดังความสัมพันธ์

$$E_0 = E_{0I} + E_{0,GB} + E_{0,def} + E_{0Y} \quad (2.83)$$

- เมื่อ
- E_{0I} คือส่วนหางของแถบพลังงานที่เกิดจากอิทธิพลของอันตรกิริยาระหว่างพาหะอิสระกับสารเจือและระหว่างพาหะอิสระกับโฟนอน
 - $E_{0,GB}$ คือส่วนหางของแถบพลังงานที่เกิดจากอิทธิพลของขอบของเกรนในฟิล์มบาง
 - $E_{0,def}$ คือส่วนหางของแถบพลังงานที่เกิดจากอิทธิพลของข้อบกพร่องในเนื้อผลึก
 - E_{0Y} คือส่วนหางของแถบพลังงานที่เกิดจากอิทธิพลของการจัดเรียงตัวของอะตอมในโครงผลึกที่ไม่เป็นระเบียบ

บทที่ 3

การดำเนินการวิจัย

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัย

3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เพื่อใช้เตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$)

1. แผ่นกระจกสไลด์
2. บีกเกอร์ขนาด 200 มิลลิลิตร
3. เครื่องอัลตราโซนิกส์
4. เครื่องเป่าลมร้อน
5. นาฬิกาจับเวลา
6. ปากคีบ
7. เตาอบ
8. สารเคมี
 - น้ำยาล้างจาน
 - น้ำปลอดประจุ
 - อะซีโตน
 - เอทานอล

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมสารตั้งต้น CdTe

1. สารตั้งต้น CdTe บริสุทธิ์ 99.99%
2. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่งของยี่ห้อ satorious
3. อุปกรณ์ครกบดสารอะเกต (agate mortar)
4. ซ้อนตักสารเคมี
5. หลอดแก้วควอตซ์
6. เตาอบ
7. นาฬิกาจับเวลา
8. ภาชนะที่ใช้ใส่สารเคมีที่สามารถควบคุมความชื้นได้ (desiccator)

3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมสารตั้งต้น $\text{CdTe}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$)

1. สารตั้งต้น CdTe บริสุทธิ์ 99.99%
2. สารประกอบแอนติโมนีเทลลูไรด์ (Sb_2Te_3)
3. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่งของยี่ห้อ satorious
4. อุปกรณ์ครกบดสารอะเกต (agate mortar)
5. ซ้อนตักสารเคมี
6. หลอดแก้วควอตซ์
7. เตาอบ
8. นาฬิกาจับเวลา
9. ภาชนะที่ใช้ใส่สารเคมีที่สามารถควบคุมความชื้นได้ (desiccator)

3.1.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระเหยประชิดโดยให้อุณหภูมิกับฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

1. ระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ออกแบบและติดตั้งโดย ดร. ชาญวิทย์ จิตรบุษการ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2. สารตั้งต้น CdTe ทั้งที่มีและไม่มีสารเจือด้วยพลวง
3. เครื่องควบคุมอุณหภูมิของยี่ห้อ SHIMADEN รุ่น PID FP93
4. แผ่นนำความร้อน
5. เทอร์โมคัปเปิลชนิด K
6. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่งของ satorious
7. เมทธานอล
8. เครื่องเป่าลมร้อน
9. ปากคีบ
10. หน้ากากป้องกันไอสารเคมี
11. แวนตากรองแสง

3.1.5 เครื่องมือที่ใช้ในการการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิดโดยให้อุณหภูมิกับฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

3.1.5.1 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค

เอกซเรย์ดิฟแฟร็กโทรมิเตอร์ (XRD) ของยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ 1.5418 อังสตรอม โดยใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์ แรงดัน 30 กิโลโวลต์โดยวัดจากมุม 20–60 องศา

3.1.5.2 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope: SEM) ของยี่ห้อ LEO รุ่น LEO 1455VP โดยใช้แรงดัน 6 กิโลโวลต์ และกำลังแยกความละเอียดของภาพถ่าย 10,000 และ 20,000 เท่า

3.1.5.3 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางแสง

เครื่องยูวี-วิสทิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS spectrophotometer) ของยี่ห้อ thermo electron corporation รุ่น He ios โดยใช้ความยาวคลื่น 300-1,100 นาโนเมตร

3.1.5.4 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้า

- แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงของยี่ห้อ Keithley รุ่น 236
- อิเล็กโทรมิเตอร์ ของยี่ห้อ Keithley รุ่น 610 CR
- ขั้วไฟฟ้า
- กาวคาร์บอนนำไฟฟ้า (carbon paint)
- สายไฟ

3.1.5.5 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาความต้านทานไฟฟ้าที่ขึ้นกับอุณหภูมิ

- เครื่องควบคุมอุณหภูมิของยี่ห้อ SHINKO รุ่น MCD100 พร้อมเทอร์โมคัปเปิล ชนิด K
- แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงของยี่ห้อ Keithley รุ่น 236
- อิเล็กโทรมิเตอร์ ของยี่ห้อ Keithley รุ่น 610 CR
- เครื่องวัดอุณหภูมิของยี่ห้อ digicon รุ่น Dp-50A
- เตาให้ความร้อน
- ขั้วไฟฟ้า
- กาวคาร์บอนนำไฟฟ้า (carbon paint)

3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อน ในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิดโดยให้อุณหภูมิกับฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ [9, 12, 18-19, 22-23, 28-33]

3.2.1 การเตรียมและการทำความสะอาดแผ่นกระจกสไลด์เพื่อเป็นฐานรองรับ [9]

1. นำแผ่นกระจกสไลด์ขนาด 25×75 มม.² แช่ในน้ำที่ผสมน้ำยาล้างจานเป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อทำการล้างคราบไขมันและสิ่งสกปรก
2. ทำความสะอาดกระจกสไลด์ด้วยน้ำปอดประจุเป็นเวลา 10 นาที
3. ทำความสะอาดกระจกสไลด์ด้วยอะซิโตนเป็นเวลา 10 นาที
4. ทำความสะอาดกระจกสไลด์ด้วยเอทานอลเป็นเวลา 10 นาที
5. ทำความสะอาดกระจกสไลด์ด้วยน้ำปอดประจุ 3 ครั้งๆละ 10 นาที
6. ขั้นตอนในข้อ 2-5 นำบีกเกอร์ไปใส่ในเครื่องสั่นด้วยคลื่นอัลตราโซนิคส์
7. เป่าแห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน
8. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่เป่าแห้งแล้วไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 30 นาที

3.2.2 การเตรียมสารตั้งต้น

3.2.2.1 การเตรียมสารตั้งต้น CdTe

1. ชั่งสารตั้งต้น CdTe บริสุทธิ์ 99.99% ให้ได้น้ำหนักประมาณ 0.0500 กรัม
2. นำสารตั้งต้น CdTe ที่ชั่งแล้วมาบดในครกบดสารอะเกตเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
3. นำสารตั้งต้นที่ได้จากข้อ 2 ไปอบเพื่อไล่ความชื้นออกที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
4. นำสารตั้งต้น CdTe ที่ได้ไปเก็บในภาชนะที่ใช้ใส่สารเคมีที่สามารถควบคุมความชื้นได้หรือนำไปทำการทดลองต่อไป

3.2.2.2 การเตรียมสารตั้งต้น $\text{CdTe}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$)

สำหรับกรณีนี้จะทำการเตรียมสารตั้งต้น $\text{CdTe}_{1-x}\text{Sb}_x$ เมื่อมีอัตราส่วนผสมของ Sb ที่ (x) มีค่าต่างๆคือ 0.001, 0.01, 0.10, 0.20 และ 0.30 โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. ชั่ง CdTe และ Sb_2Te_3 ตามอัตราส่วนที่ได้คำนวณไว้ดังตารางที่ 3.1
2. นำสารตั้งต้นที่ชั่งแล้วมาผสมให้เข้ากันเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
3. นำสารตั้งต้นที่ได้จากข้อ 2 ไปอบเพื่อไล่ความชื้นออกที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

- นำสารตั้งต้นที่ได้ไปเก็บในภาชนะที่ใช้ใส่สารเคมีที่สามารถควบคุมความชื้นได้หรือนำไปทำการทดลองต่อไป

ตารางที่ 3.1 แสดงปริมาณน้ำหนักของสารตั้งต้นในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$)

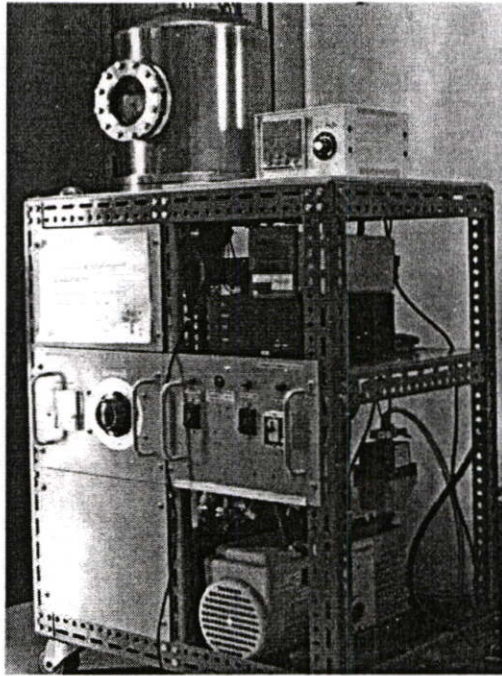
Composition (x) of Sb	Weight of Starting Materials (g)	
	CdTe	Sb_2Te_3
0.001	0.9990	0.0013
0.01	0.9896	0.0130
0.10	0.8965	0.1300
0.20	0.7938	0.2589
0.30	0.6919	0.3869

3.2.3 การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิดโดยให้อุณหภูมิกับฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

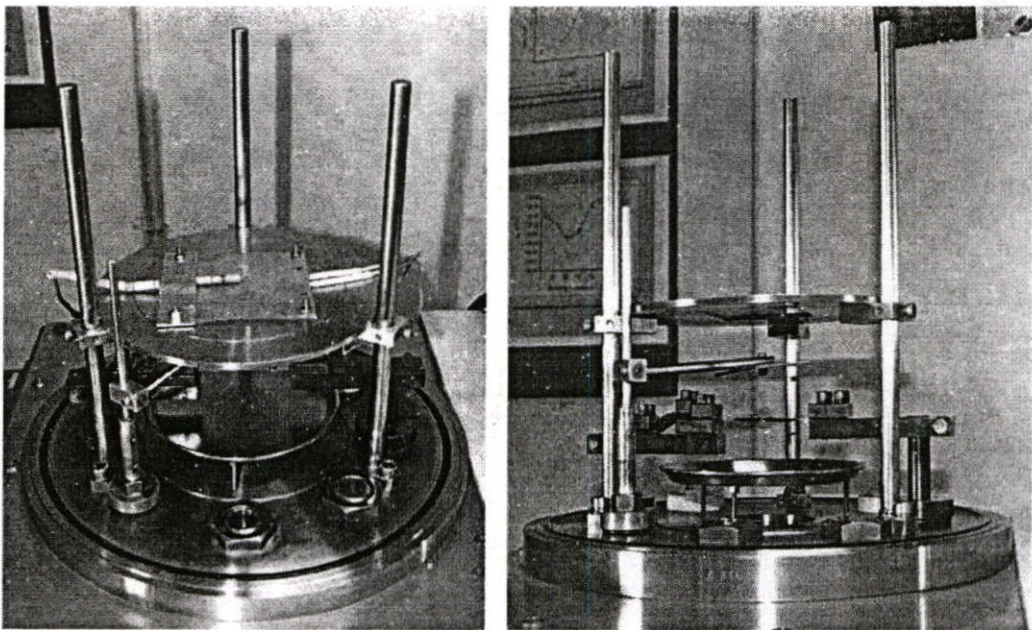
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิดโดยให้อุณหภูมิกับฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ มีวิธีการดังนี้

- ทำความสะอาดระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในสุญญากาศโดยทำการขจัดสิ่งปนเปื้อนต่าง ๆ เช่น คราบไขมันและผงฝุ่น ด้วยอะซิโตนและเอทานอล
- ทำการติดตั้งระบบต่าง ๆ ภายในระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในสุญญากาศให้ครบถ้วน
- ทำการชั่งสารตั้งต้น CdTe หรือสารตั้งต้น $\text{CdTe}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ให้ได้น้ำหนักประมาณ 0.0500 กรัม แล้วนำมาบรรจุลงภาชนะระเหยที่เป็นโลหะทังสเตน
- นำแผ่นกระจกสไลด์ที่ทำการเตรียมไว้แล้วมาวางลงบนหน้าฉากซึ่งทำมาจากโลหะสเตนเลส
- ปรับระยะระหว่างภาชนะระเหยและหน้าฉากให้ห่างกัน 5 เซนติเมตร
- วางแผ่นนำความร้อนไว้ด้านบนของแผ่นกระจกสไลด์ และทำการยึดด้วยสกรูให้แน่นพอประมาณ (หากยึดแน่นเกินไป เมื่อมีการให้อุณหภูมิจะทำให้แผ่นนำความร้อนขยายตัวไปดันแผ่นกระจกสไลด์ให้แตกได้)

7. นำเทอร์โมคัปเปิลชนิด K มายึดไว้ด้านบนแผ่นนำความร้อน โดยพยายามจัดให้ปลายของเทอร์โมคัปเปิลอยู่ตรงกลางของแผ่นนำความร้อน หลังจากนั้นปิดห้องสุญญากาศ (chamber) ให้เรียบร้อย
8. ตรวจสอบระบบระเหยสารเคมีว่าวาล์วสุบอากาศออกและวาล์วปล่อยอากาศเข้าให้อยู่ในตำแหน่งที่ปิดเรียบร้อยแล้ว
9. ทำการเปิดปั๊มพัลลโรตารีจากนั้นเปิดวาล์วสุบอากาศออกจนได้ความดันประมาณ 2×10^{-2} มิลลิบาร์ แล้วจึงเปิดปั๊มเทอร์โบจนได้ความดันตามต้องการในการทดลองนี้ ใช้ความดันประมาณ 3×10^{-5} มิลลิบาร์
10. ตั้งโปรแกรมให้อุณหภูมิกับฐานรองรับกระจกสไลด์จากอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิต่างๆ โดยในการทดลองนี้กำหนดให้อุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ในกรณีที่ใช้สารตั้งต้น CdTe ที่ไม่มีการเจือด้วยพลวงมีค่าเท่ากับ 100, 150, 200 และ 250 °C ตามลำดับ ส่วนกรณีที่ใช้สารตั้งต้น $\text{CdTe}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) จะทำการให้อุณหภูมิกับฐานรองรับกระจกสไลด์เท่ากับ 150 °C
11. เริ่มทำการระเหยสารเคมีโดยมีแผ่นกระจกสไลด์เป็นฐานรองรับ โดยการเปิดสวิทซ์เครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้า 10 V 200 A จากนั้นทำการปรับศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้า (variable transformer or variac) อย่างช้าๆ จนกระทั่งได้ค่ากระแสอยู่ที่ประมาณ 80-100 แอมแปร์ แล้วแต่กรณี เมื่อมวลของเม็ดสารตั้งต้นเริ่มลดลงแล้วเริ่มทำการเปิดแผ่นกั้นการระเหย (shutter)
12. เมื่อได้ความหนาของฟิล์มตามที่ต้องการแล้ว ให้ปิดชัตเตอร์ ปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิและทำการปิดแวนิแอก
13. ให้ระบบทำงานต่อไปอีกประมาณ 45 นาที เพื่อให้อุณหภูมิของห้องสุญญากาศลดลงแล้วปิดปั๊มเทอร์โบ จากนั้นให้ระบบทำงานต่อไปอีกประมาณ 1 ชั่วโมง แล้วเปิดวาล์วสุบอากาศและปั๊มพัลลโรตารี
14. รอจนอุณหภูมิกายในห้องสุญญากาศมีอุณหภูมิต่ำกว่าภายนอก จึงค่อยทำการเปิดวาล์วปล่อยอากาศเข้าภายในห้องสุญญากาศอย่างช้าๆ โดยใช้เวลาประมาณ 15 นาที
15. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบฟิล์มบางแล้วออกมาจากห้องสุญญากาศ นำไปตรวจสอบสภาพผิวหน้าของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์ หลังจากนั้นจึงนำไปเก็บในภาชนะที่ใช้ใส่สารเคมีที่สามารถควบคุมความชื้นได้



รูปที่ 3.1 แสดงอุปกรณ์การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิด โดยให้อุณหภูมิกับฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์



รูปที่ 3.2 แสดงอุปกรณ์ภายในห้องสุญญากาศของระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิด โดยให้อุณหภูมิกับฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

3.2.4 การแอนนีสฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิดโดยให้อุณหภูมิกับฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ด้วยแคดเมียมคลอไรด์ในบรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน

1. ชั่งสารตั้งต้นแคดเมียมคลอไรด์บริสุทธิ์ 99.99% ให้ได้น้ำหนักประมาณ 0.0500 กรัม แล้วนำมาบรรจุในกล่องแกรไฟต์ เขย่าเพื่อให้สารตั้งต้นกระจายเท่าๆกันปรับผิวหน้าให้เรียบโดยการใช้แท่งแก้วค่อยๆกดให้ผิวหน้าสม่ำเสมอ
2. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบาง $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ใส่ในกล่องแกรไฟต์
3. นำกล่องแกรไฟต์ไปใส่ในท่อแก้วในระบบเตาแอนนีส ทำการอีแวก-รีฟิล (evac-refill) โดยการดูดอากาศภายในท่อแก้วออกแล้วเติมแก๊สไนโตรเจนเข้าไปจนกระทั่งมีความดันเกือบเท่าความดันบรรยากาศ ทำการดูดเอาแก๊สไนโตรเจนออกจากท่อแก้ว ทำซ้ำอีก 3 ครั้งเพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีแก๊สออกซิเจนเหลืออยู่ แล้วปิดบีมพ์ดูดอากาศ เติมแก๊สไนโตรเจนเข้าไปในระบบด้วยความดันที่เหมาะสมจากนั้นปล่อยให้แก๊สไนโตรเจนออกจากระบบอย่างช้าๆ
4. ทำการแอนนีสที่อุณหภูมิ $400^{\circ}C$ เป็นเวลา 30 นาที
5. ปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิ รอจนถึงอุณหภูมิห้อง แล้วจึงนำฟิล์มบางออกจากระบบ และนำไปเก็บในภาชนะที่ใช้ใส่สารเคมีที่สามารถควบคุมความชื้นได้

3.2.5 การแอนนีสฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิดโดยให้อุณหภูมิกับฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ด้วยแคดเมียมคลอไรด์ในอากาศความดันปกติที่อุณหภูมิ $400^{\circ}C$

1. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบาง $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ใส่ในระบบเตาอบ (muffle furnace)
2. ทำการแอนนีสที่อุณหภูมิ $400^{\circ}C$ เป็นเวลา 30 นาที
3. ปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิ รอจนถึงอุณหภูมิห้อง แล้วจึงนำฟิล์มบางออกจากระบบ และนำไปเก็บในภาชนะที่ใช้ใส่สารเคมีที่สามารถควบคุมความชื้นได้

3.3 การศึกษาสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระเหยประชิด โดยให้อุณหภูมิกับฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

3.3.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค

นำฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จากเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทรมิเตอร์ของยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ 1.5418 อังสตรอม โดยใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์และความต่างศักย์ 30 กิโลโวลต์ โดยวัดจากมุม 20-60 องศา

3.3.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค

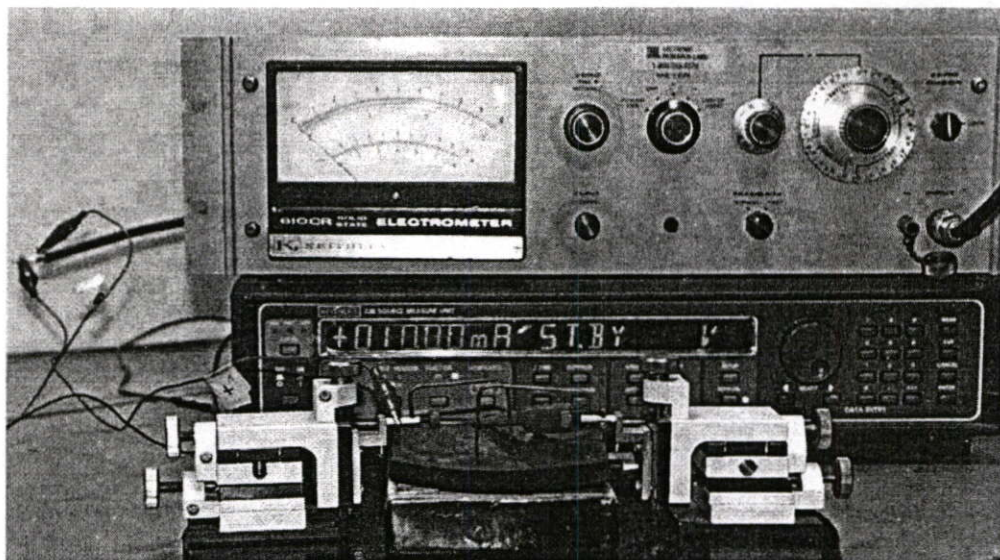
นำฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope: SEM) ของยี่ห้อ LEO รุ่น LEO 1455VP โดยใช้แรงดัน 6 กิโลโวลต์ และกำลังแยกความละเอียดของภาพถ่าย 10,000 และ 20,000 เท่า

3.3.3 การศึกษาสมบัติทางแสง

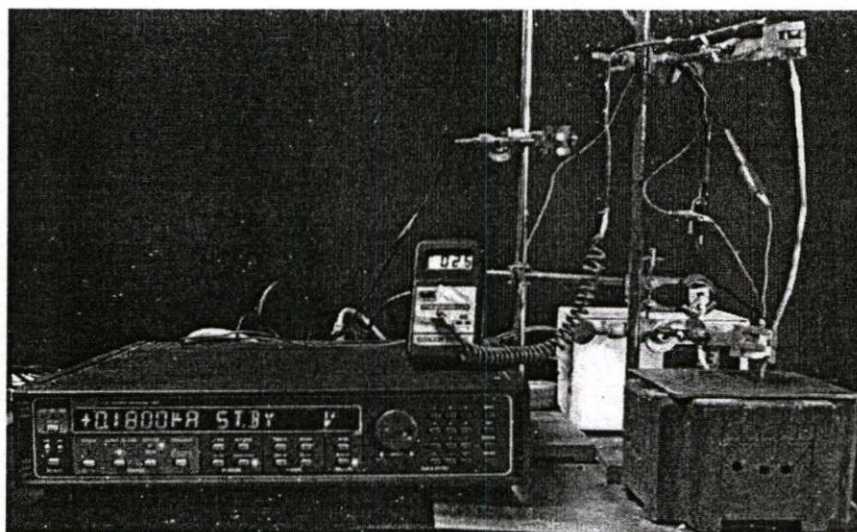
นำฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาสมบัติทางแสง ด้วยการวัดค่าการส่งผ่านแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS spectrophotometer) ของ thermo electron corporation รุ่น He ios โดยใช้ความยาวคลื่น 300 ถึง 1,100 นาโนเมตร เพื่อคำนวณหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและค่าช่องว่างแถบพลังงาน

3.3.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า

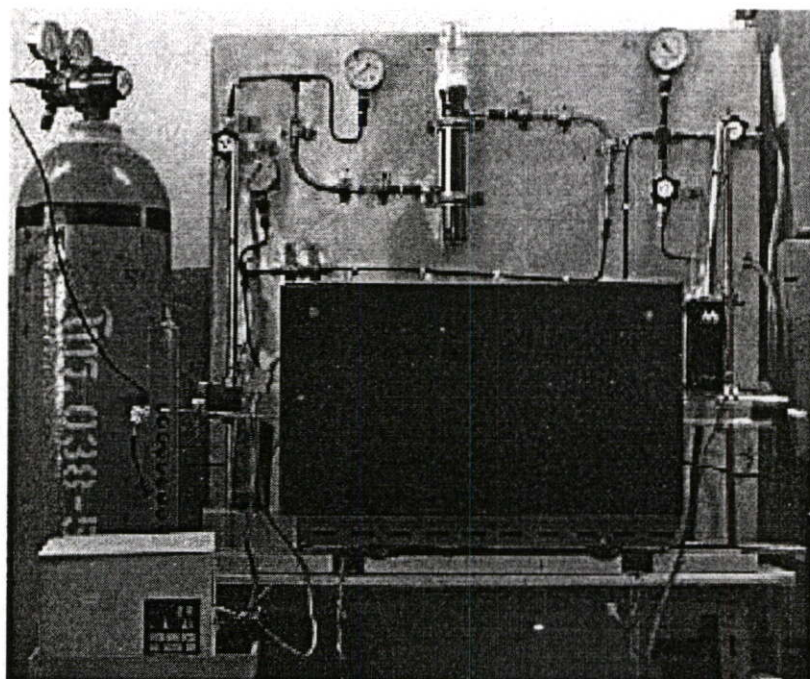
นำฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า โดยการวัดค่าความต้านทานแผ่นด้วยวิธีสองขั้วและวัดค่าพลังงานกระตุ้น โดยการศึกษาความต้านทานที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ



รูปที่ 3.3 แสดงชุดอุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้า



รูปที่ 3.4 แสดงชุดอุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าความต้านทานที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ



รูปที่ 3.5 แสดงระบบเตาแอนนีส

บทที่ 4

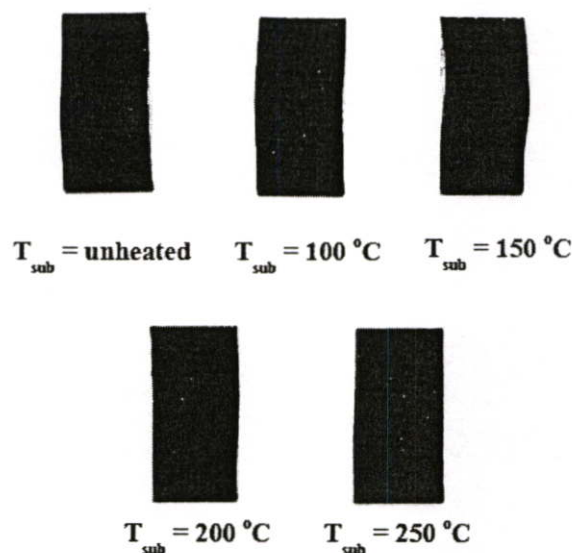
ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) บนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ด้วยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิด โดยใช้อุณหภูมิกับฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ที่ความดันต่ำระดับ 3.0×10^{-5} มิลลิบาร์ โดยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe$ ที่ไม่มีการเจือปนได้ทำการควบคุมอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ให้มีค่าเท่ากับ 100, 150, 200 และ $250^\circ C$ และฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ได้ควบคุมปริมาณสารเจือ (x) เท่ากับ 0.001, 0.01, 0.10, 0.20 และ 0.30 และนำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe$ และ $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) มาแอนนัลด้วย $CdCl_2$ ในบรรยากาศแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์และในอากาศความดันปกติที่อุณหภูมิ $400^\circ C$ จากนั้นนำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ทั้งหมดมาศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ศึกษาสมบัติทางแสงด้วยการวัดค่าการส่งผ่านแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางทั้งความต้านทานแผ่นด้วยวิธีสองขั้วเชิงเส้น และความต้านทานที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) เพื่อใช้เป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ต่อไป

4.1 ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิดโดยให้อุณหภูมิกับฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

4.1.1 ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe$ ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิดโดยให้อุณหภูมิกับฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน

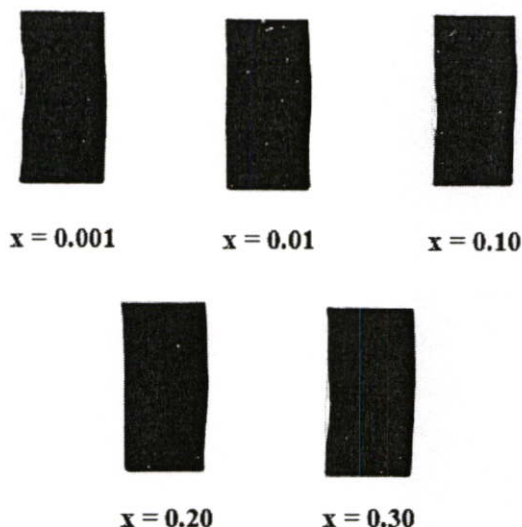
ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe$ ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิดโดยให้อุณหภูมิกับฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกันมีลักษณะเป็นสีน้ำตาลดำมีผิวหน้าเรียบสม่ำเสมอ เกาะติดบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ได้ก่อนข้างดีและมีรูพรุนน้อย ซึ่งลักษณะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe$ ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิดโดยให้อุณหภูมิกับฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกันได้แสดงไว้ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระเหยประชิดโดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์มีค่าแตกต่างกัน

4.1.2 ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระเหยประชิดโดยให้อุณหภูมิกับฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 150°C

ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระเหยประชิดโดยให้อุณหภูมิกับฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 150°C มีลักษณะเป็นสีน้ำตาลดำเช่นเดียวกับฟิล์มบาง CdTe ที่ไม่มีการเจือ มีผิวหน้าเรียบสม่ำเสมอ เกาะติดบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ได้ค่อนข้างดีและมีรูพรุนน้อย ซึ่งลักษณะของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระเหยประชิดโดยให้อุณหภูมิกับฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกันได้แสดงไว้ดังรูปที่ 4.2

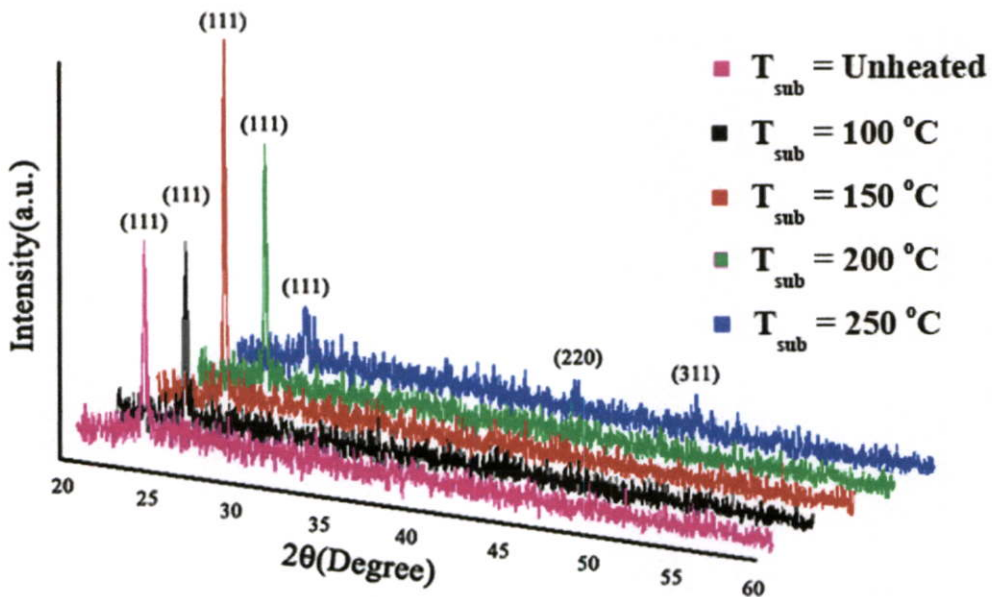


รูปที่ 4.2 แสดงฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระเหยประชิดโดยให้อุณหภูมิกับฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 150°C

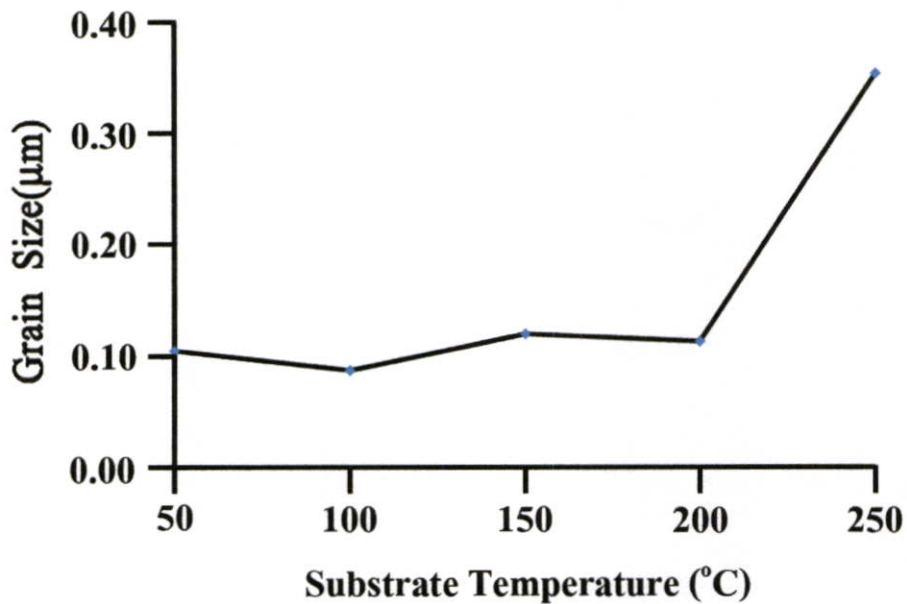
4.2 ผลการศึกษาสมบัติฟิสิกส์พื้นฐานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระเหยประชิด

4.2.1 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe

การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เป็นวิธีการที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe และ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) พบว่าฟิล์มบาง CdTe จะปรากฏระนาบการเลี้ยวเบน (111) ที่มุม $2\theta \approx 23^\circ$ โดยความเข้มของพีคของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จะมีค่ามากที่สุดเมื่อให้อุณหภูมิกับฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 150°C และเมื่ออุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เพิ่มขึ้นมากกว่า 150°C ความเข้มของพีคของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จะมีค่าลดลง ส่วนในกรณีฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) พบว่าเมื่อปริมาณสารเจือ (x) เพิ่มขึ้นจะทำให้ระนาบการเลี้ยวเบน (111) มีความเข้มของพีคลดลง และจะปรากฏระนาบการเลี้ยวเบน (220) เข้ามาแทนที่ โดยความเข้มของพีคของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ระนาบ (220) นี้จะมีค่ามากที่สุดเมื่อปริมาณสารเจือ (x) มีค่าเท่ากับ 0.20 และเมื่อปริมาณสารเจือเท่ากับ 0.30 ความเข้มของพีคของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ระนาบ (220) ก็ลดลง และระนาบการเลี้ยวเบน (111) จะกลับมาอีกครั้งหนึ่ง



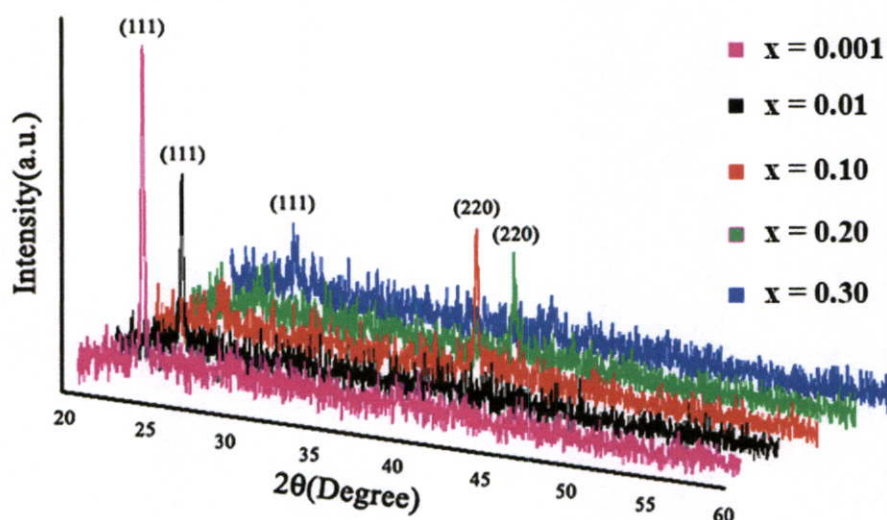
รูปที่ 4.3 แสดงพิกัดความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระเหยประชิด โดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์มีค่าแตกต่างกัน



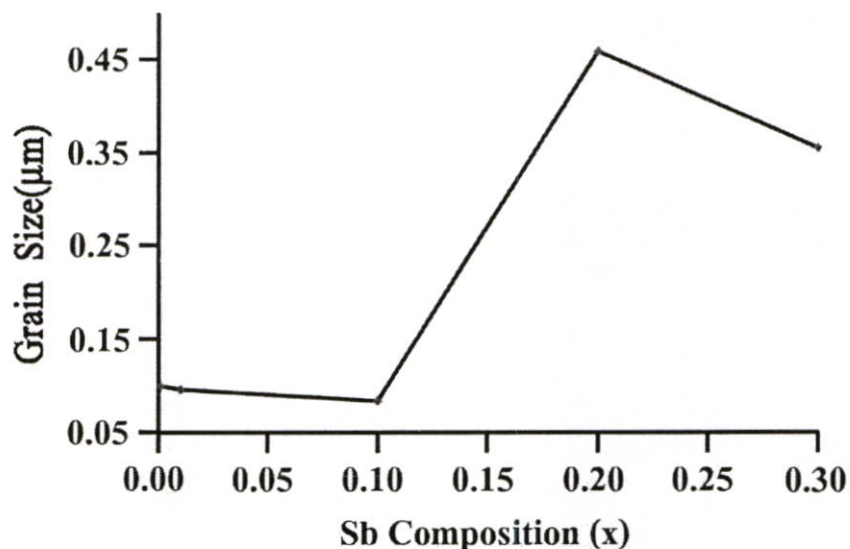
รูปที่ 4.4 แสดงขนาดของเกรนที่คำนวณจาก FWHM ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระเหยประชิด โดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์มีค่าแตกต่างกัน

ตารางที่ 4.1 แสดงคุณสมบัติทางโครงสร้างของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิดโดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

Substrate Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Grain Size from XRD (μm)	Lattice Constant ($^{\circ}\text{A}$)	Texture Coefficient of (111)
Unheated	0.105	6.457	2.029
100	0.087	6.444	1.912
150	0.120	6.464	2.337
200	0.113	6.457	2.180
250	0.354	6.457	1.145



รูปที่ 4.5 แสดงพีคความเข้มของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe_{1-x}Sb_x ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิดโดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 150°C



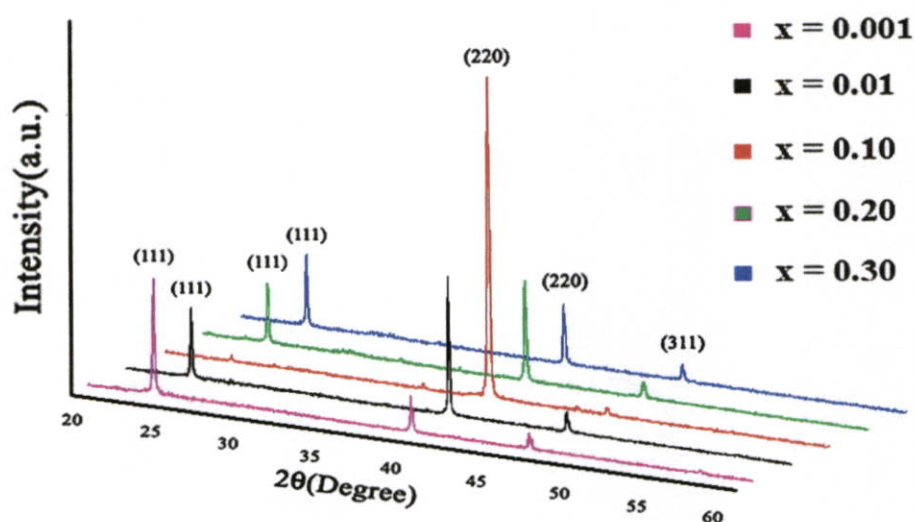
รูปที่ 4.6 แสดงขนาดของเกรนที่คำนวณจาก FWHM ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระเหยประชิดโดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์มีค่าเท่ากับ 150°C

ตารางที่ 4.2 แสดงคุณสมบัติทางโครงสร้างของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระเหยประชิดโดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 150°C

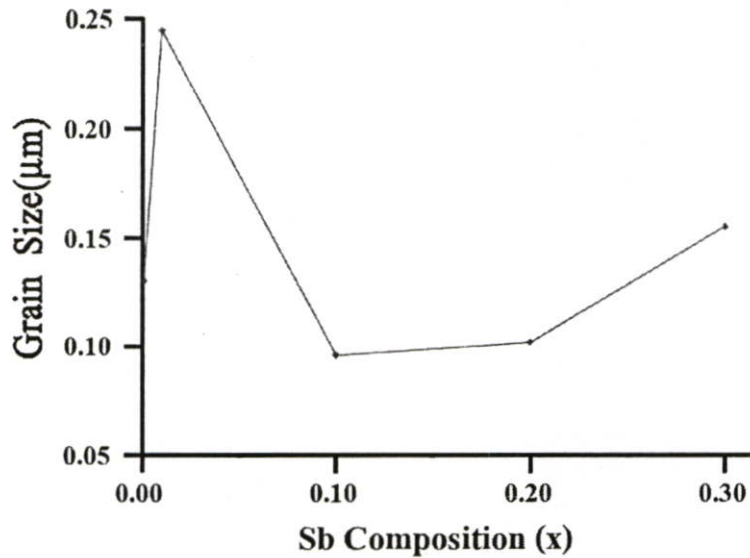
Composition (x) of Sb	Grain Size from XRD (μm)	Lattice Constant (°Å)	Texture Coefficient	
			(111)	(220)
0.001	0.100	6.450	2.156	-
0.01	0.096	6.433	1.724	-
0.10	0.084	6.457	-	1.753
0.20	0.458	6.471	-	1.545
0.30	0.354	6.490	1.190	-

4.2.2 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่ได้รับการแอนนัลด้วย $CdCl_2$ ในบรรยากาศแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์และในอากาศความดันปกติที่อุณหภูมิ $400^\circ C$

จากผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่แอนนัลด้วย $CdCl_2$ ในบรรยากาศแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ $400^\circ C$ พบว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) จะปรากฏระนาบการเลี้ยวเบน (111) ที่มุม $2\theta \approx 23^\circ$ เมื่ออัตราส่วนผสม (x) ของ Sb มีค่าน้อยๆ และเมื่ออัตราส่วนผสม (x) ของ Sb มีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ระนาบการเลี้ยวเบน (111) มีความเข้มของพีคลดลง และจะปรากฏระนาบการเลี้ยวเบน (220) เข้ามาแทนที่ โดยความเข้มของพีคของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ระนาบ (220) นี้จะมีค่ามากที่สุดเมื่ออัตราส่วนผสม (x) ของ Sb มีค่าเท่ากับ 0.10 และเมื่อปริมาณสารเจือเท่ากับ 0.30 ความเข้มของพีคของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ระนาบ (220) ก็จะลดลง และระนาบการเลี้ยวเบน (111) จะกลับมาโดดเด่นอีกครั้งหนึ่ง



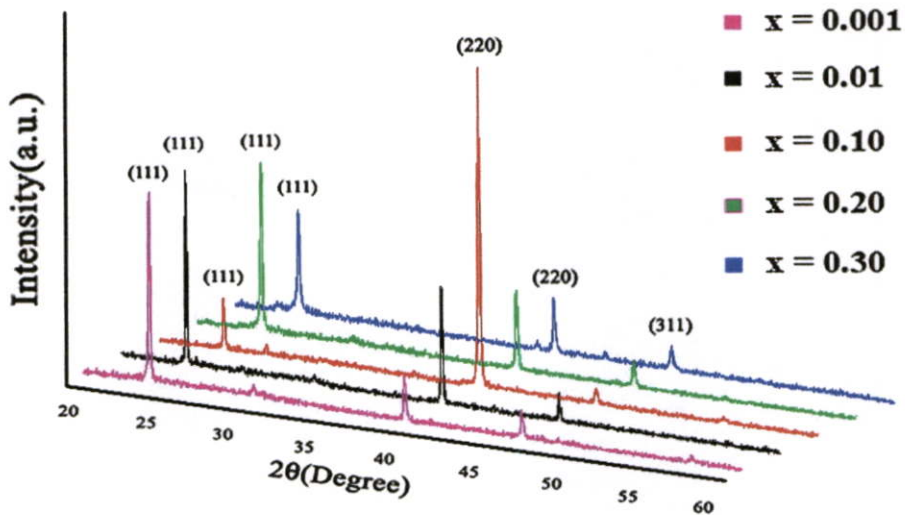
รูปที่ 4.7 แสดงพีคความเข้มของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่แอนนัลด้วย $CdCl_2$ ในบรรยากาศแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ $400^\circ C$ ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระเหยประชิดโดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ $150^\circ C$



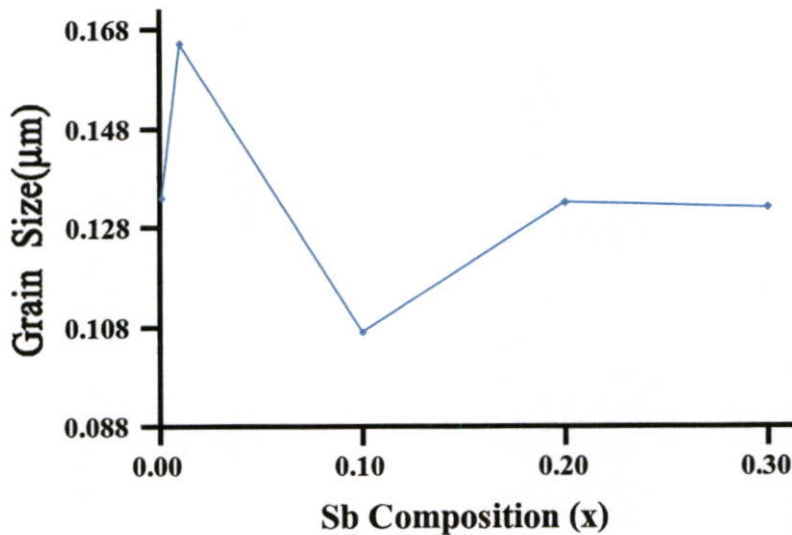
รูปที่ 4.8 แสดงขนาดของเกรนที่คำนวณจาก FWHM ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่แอนนัลด้วย $CdCl_2$ ในบรรยากาศแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ $400^\circ C$ ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิดโดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์มีค่าเท่ากับ $150^\circ C$

ตารางที่ 4.3 แสดงคุณสมบัติทางโครงสร้างของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่แอนนัลด้วย $CdCl_2$ ในบรรยากาศแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ $400^\circ C$ ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิดโดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ $150^\circ C$

Composition (x) of Sb	Grain Size from XRD (μm)	Lattice Constant (°A)	Texture Coefficient	
			(111)	(220)
0.001	0.130	6.466	1.850	-
0.01	0.245	6.473	-	1.900
0.10	0.096	6.451	-	2.870
0.20	0.102	6.472	-	1.779
0.30	0.155	6.465	1.248	-



รูปที่ 4.9 แสดงพีคความเข้มของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่แอนนัลด้วย CdCl_2 ในอากาศความดันปกติที่อุณหภูมิ 400°C ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระเหยประชิดโดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 150°C

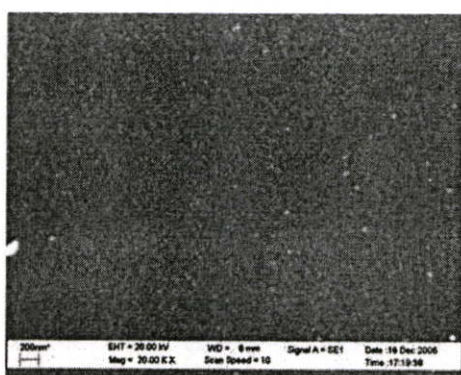


รูปที่ 4.10 แสดงขนาดของเกรนที่คำนวณจาก FWHM ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่แอนนัลด้วย CdCl_2 ในอากาศความดันปกติที่อุณหภูมิ 400°C ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระเหยประชิดโดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์มีค่าเท่ากับ 150°C

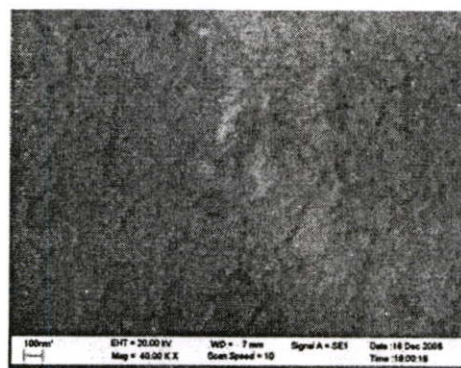
ตารางที่ 4.4 แสดงคุณสมบัติทางโครงสร้างของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่แอนนีสด้วย CdCl_2 ในอากาศความดันปกติที่อุณหภูมิ 400°C ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิดโดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 150°C

Composition (x) of Sb	Grain Size from XRD (μm)	Lattice Constant ($^\circ\text{A}$)	Texture Coefficient	
			(111)	(220)
0.001	0.134	6.456	1.925	-
0.01	0.165	6.464	1.509	-
0.10	0.107	6.469	-	2.485
0.20	0.133	6.471	1.628	-
0.30	0.132	6.476	1.479	-

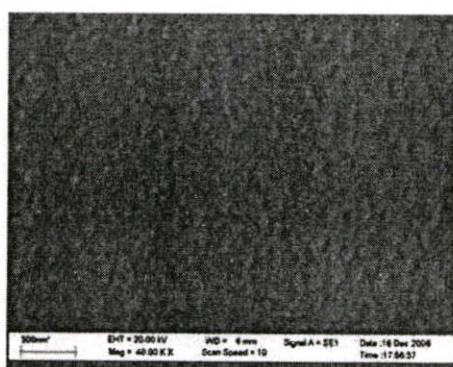
4.2.3 ผลการศึกษาจากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$)



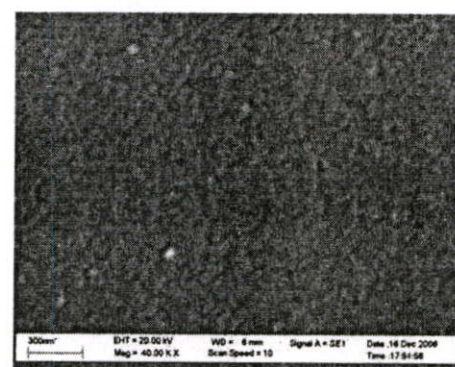
$T_{\text{sub}} = \text{Unheated}$



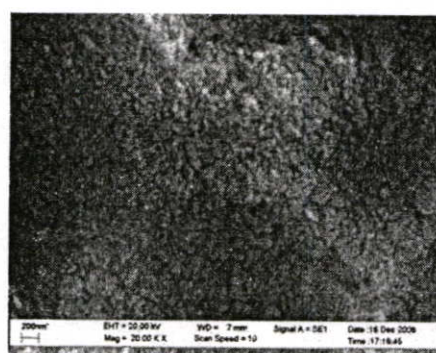
$T_{\text{sub}} = 100^\circ\text{C}$



$T_{\text{sub}} = 150^\circ\text{C}$

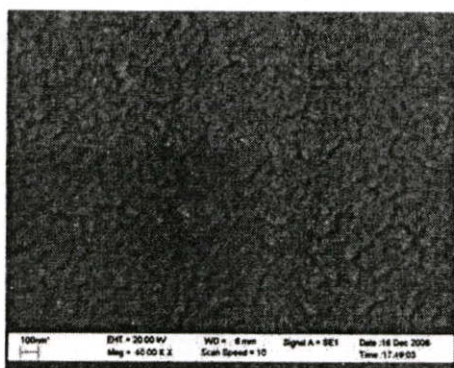


$T_{\text{sub}} = 200^\circ\text{C}$

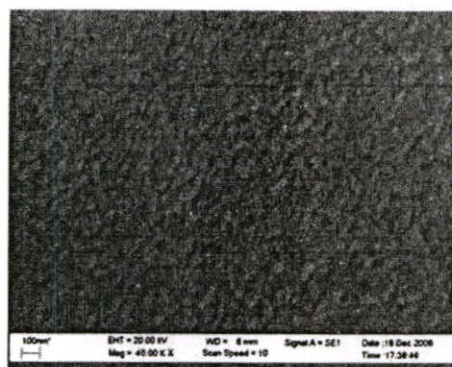


$T_{\text{sub}} = 250^\circ\text{C}$

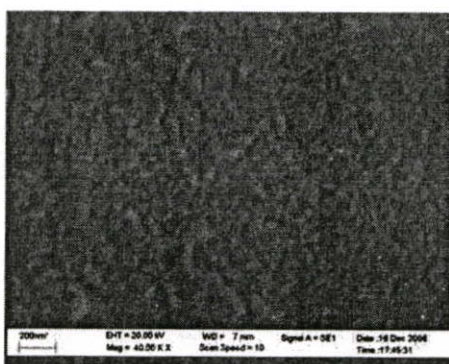
รูปที่ 4.11 แสดงภาพถ่าย SEM ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิดโดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์มีค่าแตกต่างกัน



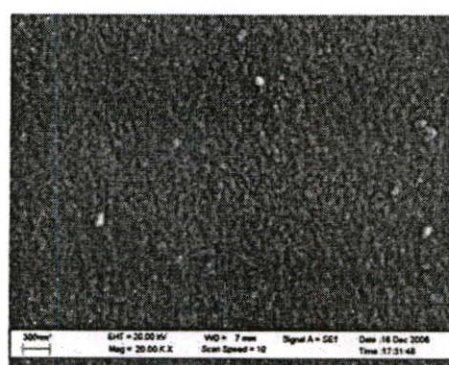
$x = 0.001$



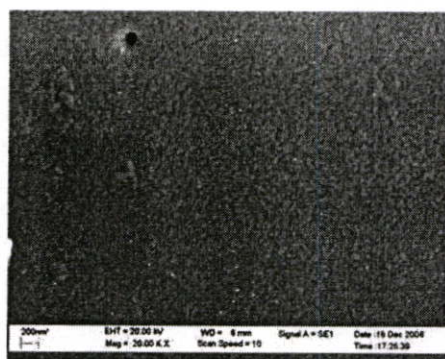
$x = 0.01$



$x = 0.10$

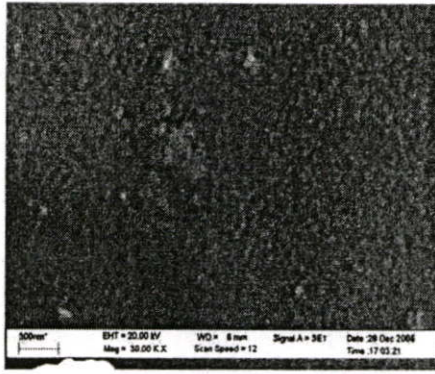


$x = 0.20$

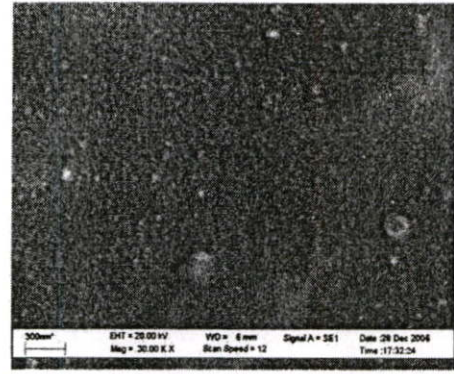


$x = 0.30$

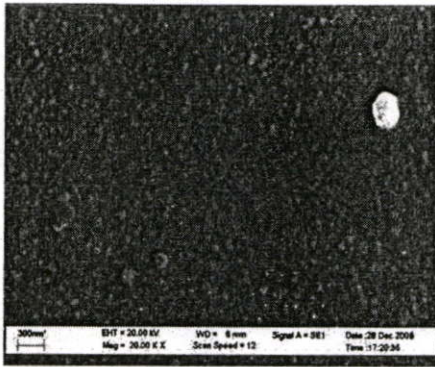
รูปที่ 4.12 แสดงภาพถ่าย SEM ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารในระบบสุญญากาศในแบบระเหยประชิดโดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์มีค่าเท่ากับ 150°C



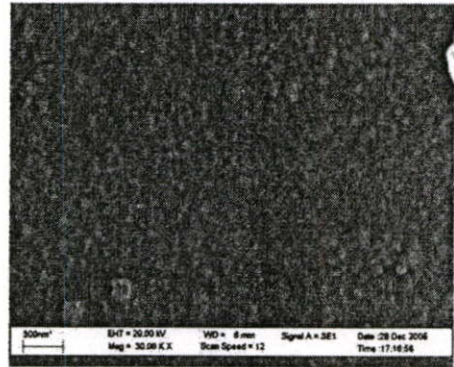
$x = 0.001$



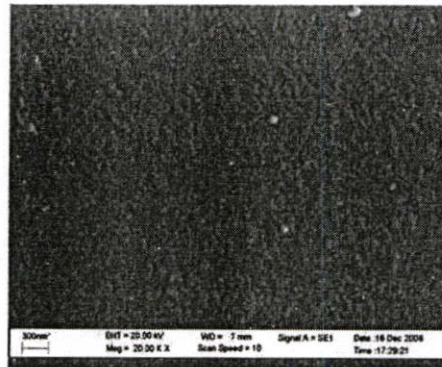
$x = 0.01$



$x = 0.10$

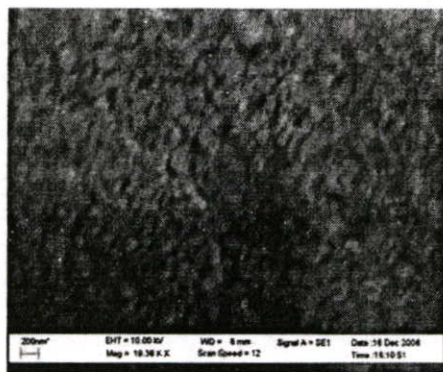


$x = 0.20$

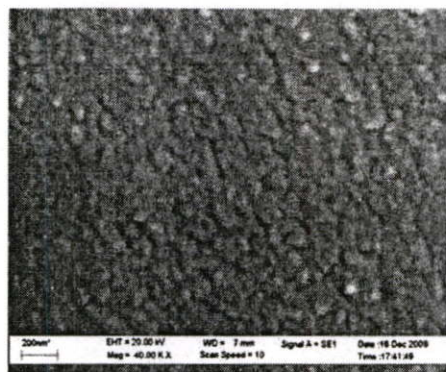


$x = 0.30$

รูปที่ 4.13 แสดงภาพถ่าย SEM ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่แอนนัลด้วย CdCl_2 ในบรรยากาศแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 30 นาที ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิด โดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์มีค่าเท่ากับ 150°C



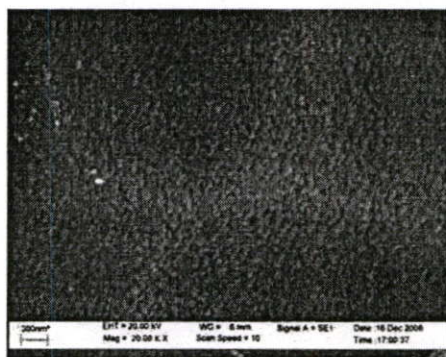
$x = 0.001$



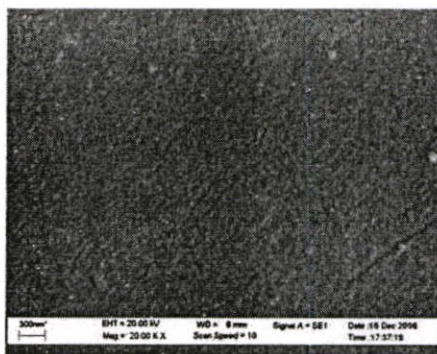
$x = 0.01$



$x = 0.10$



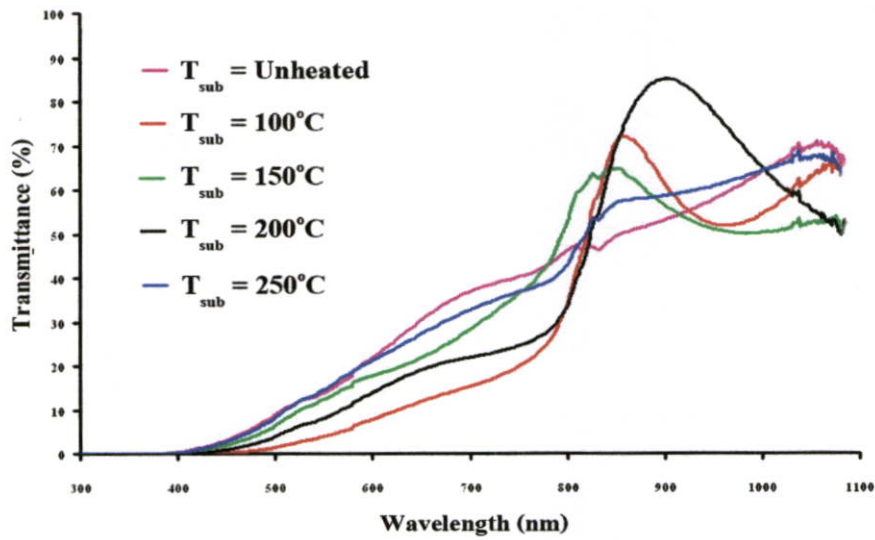
$x = 0.20$



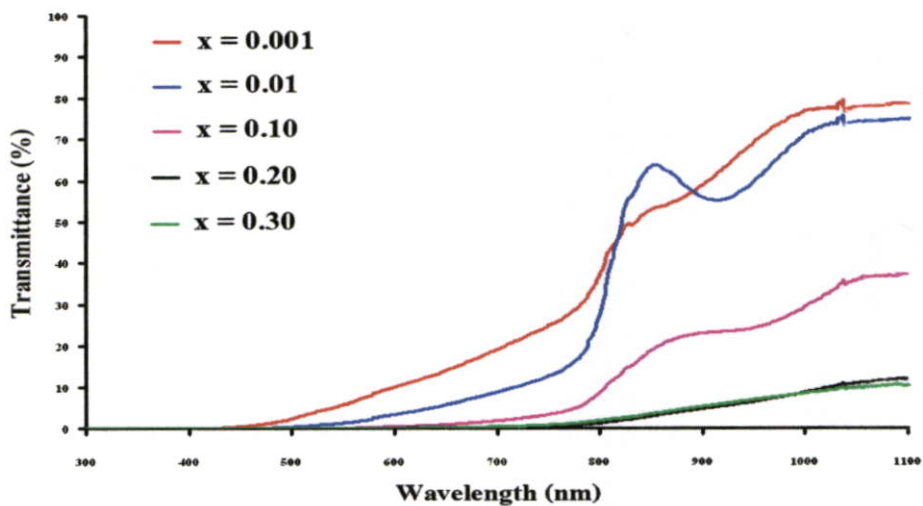
$x = 0.30$

รูปที่ 4.14 แสดงภาพถ่าย SEM ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่แอนนัลด้วย CdCl_2 ในอากาศความดันปกติที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 30 นาที ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารในระบบสุญญากาศในแบบระเหยประชิด โดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์มีค่าเท่ากับ 150°C

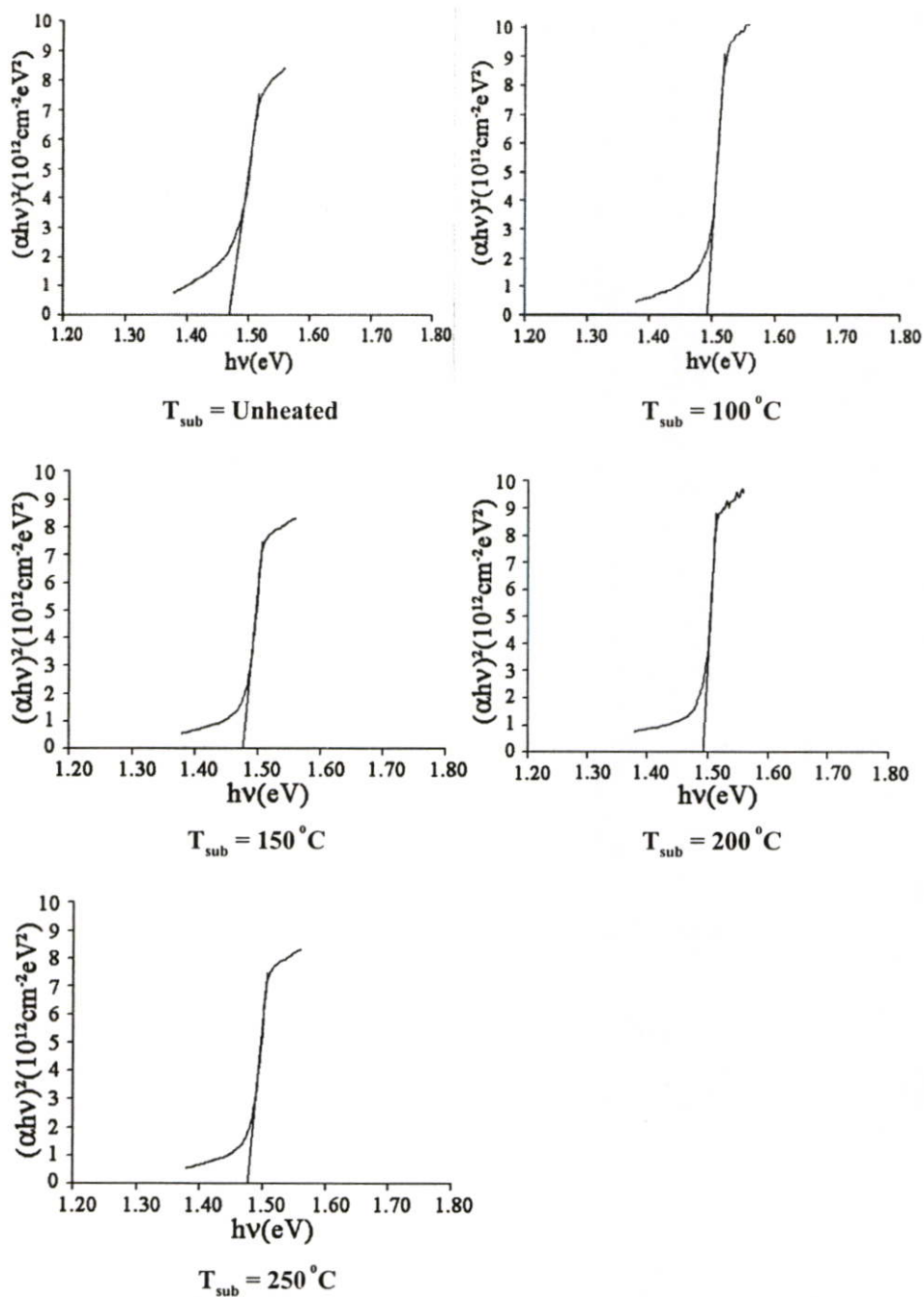
4.2.4 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$)



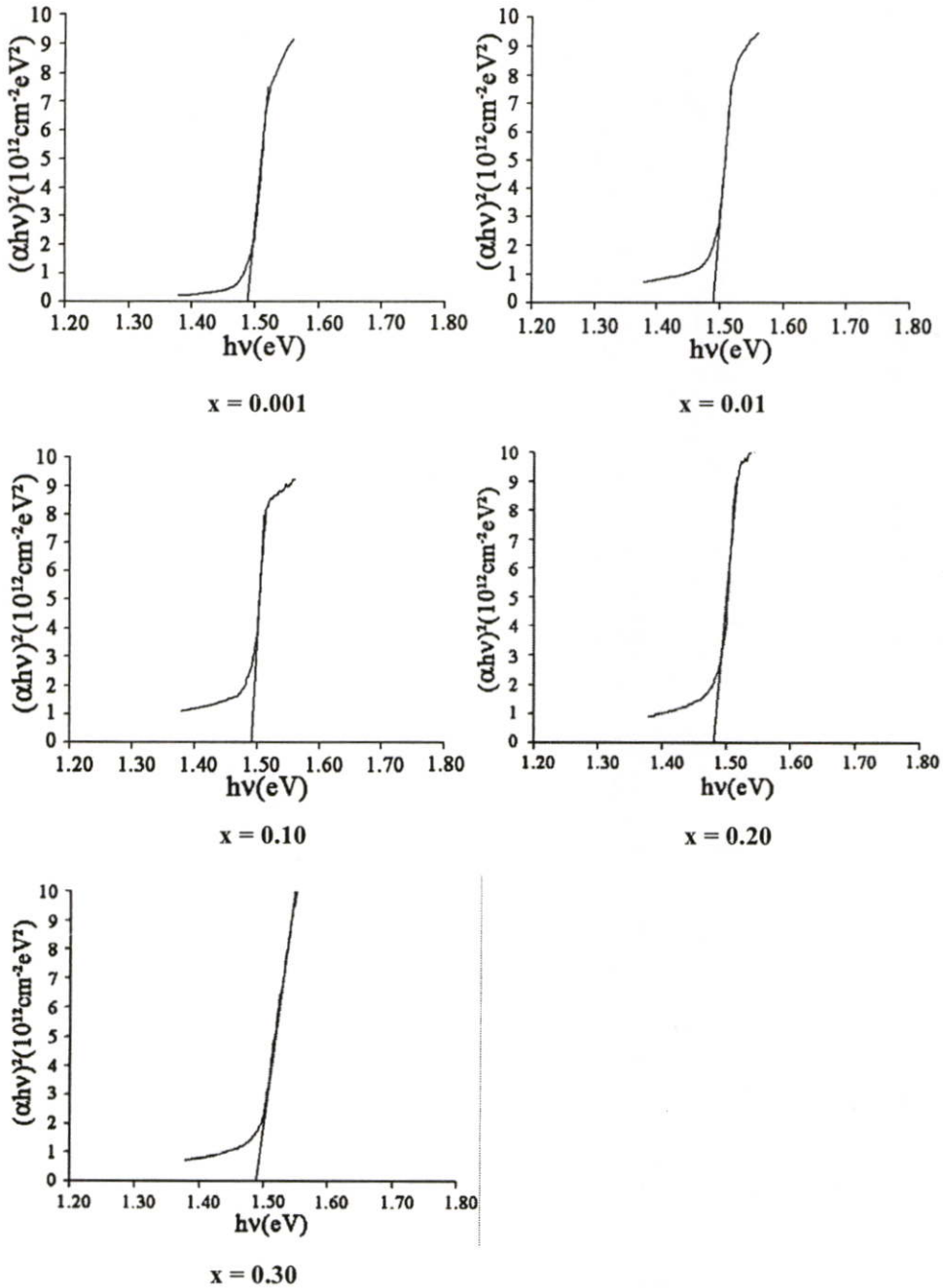
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิดโดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์มีค่าแตกต่างกัน



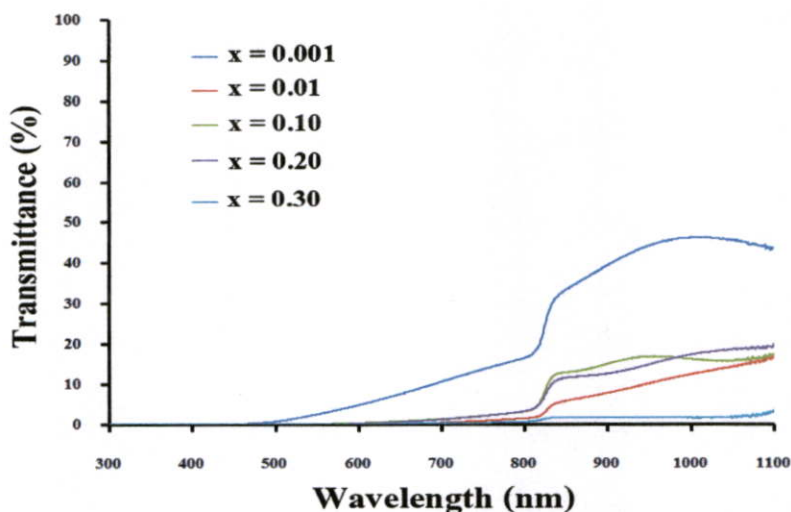
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิดโดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์มีค่าเท่ากับ 150°C



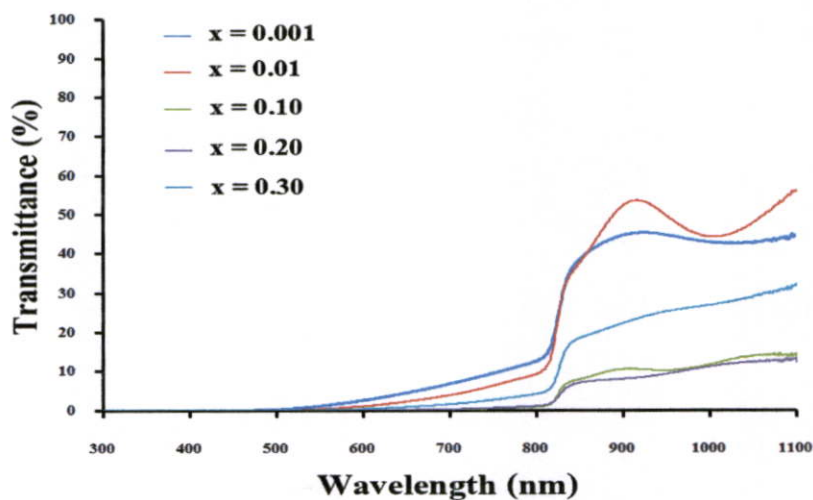
รูปที่ 4.17 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$ กับ hv ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิดโดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์มีค่าแตกต่างกัน



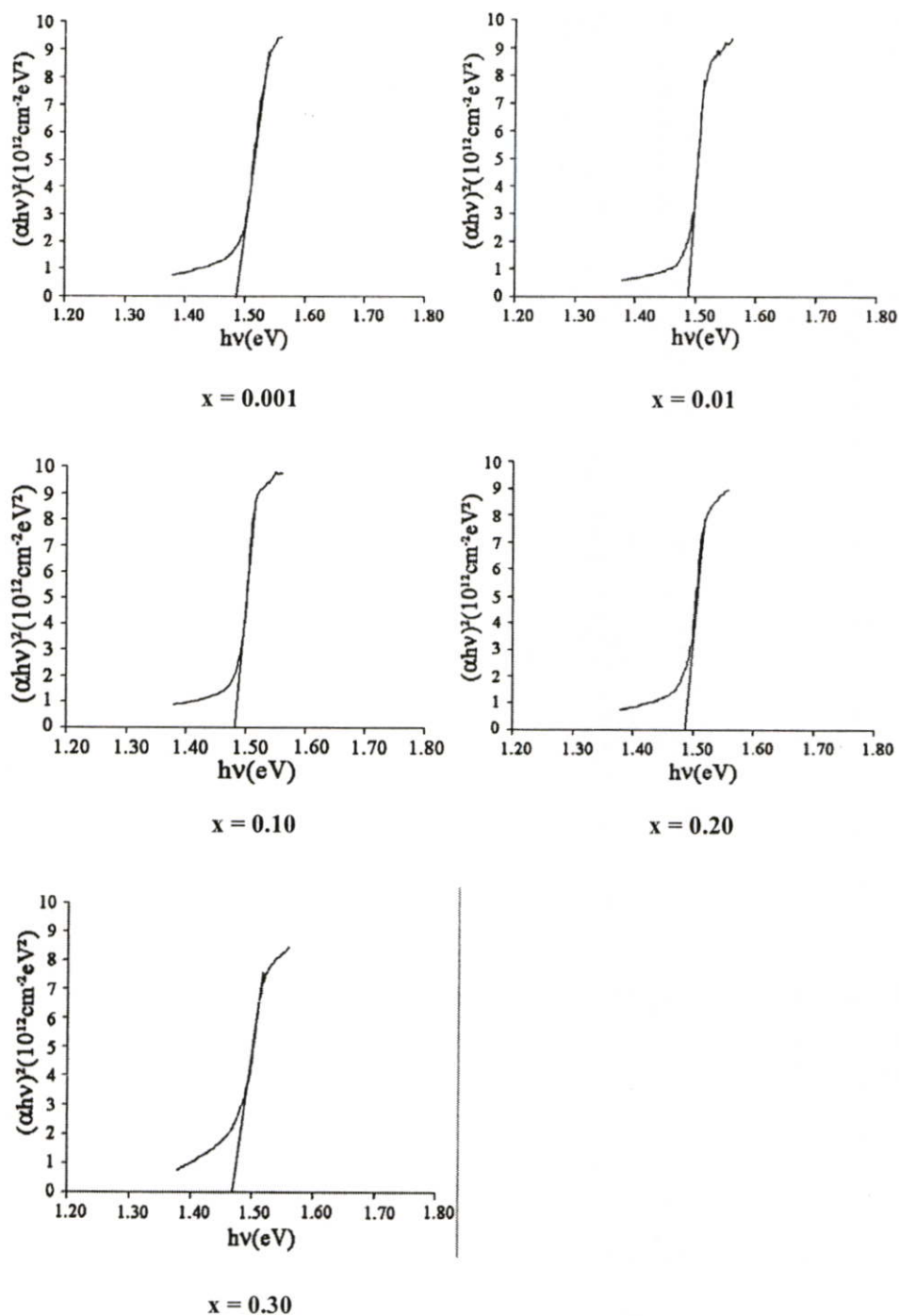
รูปที่ 4.18 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิดโดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์มีค่าเท่ากับ 150°C



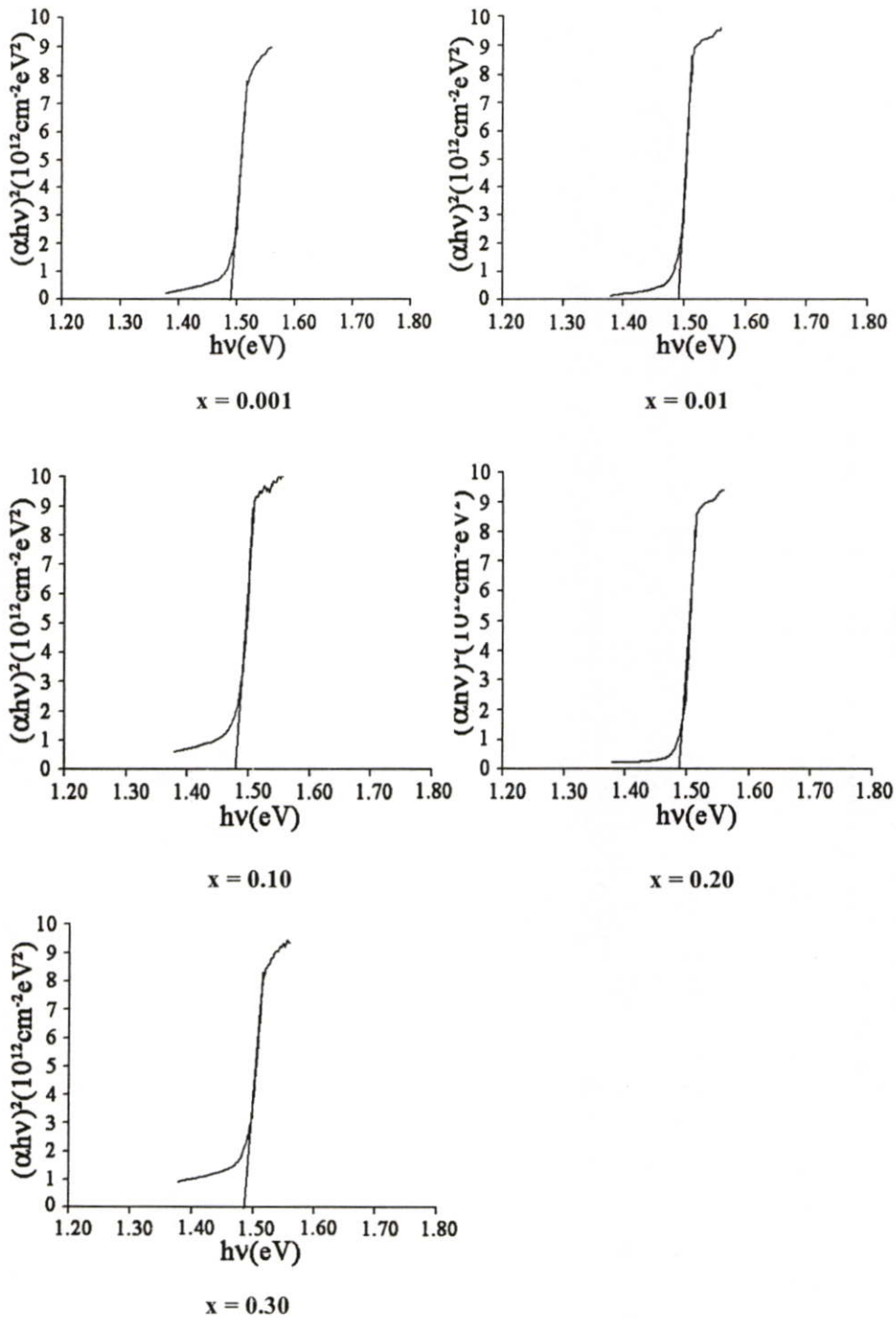
รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่แอนนีสด้วย CdCl_2 ในอากาศความดันปกติที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 30 นาที ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิดโดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์มีค่าเท่ากับ 150°C



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่แอนนีสด้วย CdCl_2 ในบรรยากาศแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 30 นาที ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิดโดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์มีค่าเท่ากับ 150°C



รูปที่ 4.21 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$ กับ hv ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่แอนนัลด้วย $CdCl_2$ ในอากาศความดันปกติที่อุณหภูมิ $400^\circ C$ เป็นเวลา 30 นาที ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิดโดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์มีค่าเท่ากับ $150^\circ C$



รูปที่ 4.22 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่แอนนัลด้วย CdCl_2 ในบรรยากาศแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 30 นาที ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิดโดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์มีค่าเท่ากับ 150°C

จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe และ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่เตรียมโดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระเหยประชิด โดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ และกรณีที่เป็นนี้ลด้วย CdCl_2 ในบรรยากาศของ แก๊สไฮโดรเจนและในอากาศความดันปกติที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 30 นาที พบว่ามีขอบการดูดกลืนแสงอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 830 นาโนเมตรและมีการส่งผ่านแสงประมาณ 30-80 เปอร์เซ็นต์ ข้อมูลที่ได้จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงสามารถคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงานโดยนำข้อมูลที่ได้วาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน $h\nu$ แล้วทำการลากเส้นการประมาณค่านอกช่วง (extrapolation) ของกราฟในส่วนที่เป็นเชิงเส้นไปตัดกับแกนพลังงานโฟตอนจุดที่ตัดแกนคือ ค่าช่องว่างแถบพลังงาน ซึ่งแสดงในตารางที่ 4.5-4.8

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ที่ได้จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงและส่วนหางของแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระเหยประชิด โดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์มีค่าแตกต่างกัน

Substrate Temperature ($^\circ\text{C}$)	Energy Gap (eV)	Band Tail (meV)
Unheated	1.45	587
100	1.50	93
150	1.50	136
200	1.48	68
250	1.47	116

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ที่ได้จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงและส่วนหางของแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิด โดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์มีค่า $150^\circ C$

Composition (x) of Sb	Energy Gap (eV)	Band Tail (meV)
0.001	1.49	135
0.01	1.48	63
0.10	1.47	193
0.20	1.47	348
0.30	1.45	442

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ที่ได้จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงและส่วนหางของแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่แอนนัลด้วย $CdCl_2$ ในอากาศความดันปกติที่อุณหภูมิ $400^\circ C$ เป็นเวลา 30 นาที ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิด โดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์มีค่าเท่ากับ $150^\circ C$

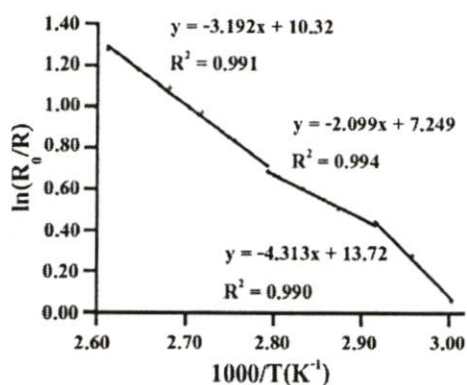
Composition (x) of Sb	Energy Gap (eV)	Band Tail (meV)
0.001	1.47	152
0.01	1.47	187
0.10	1.47	195
0.20	1.46	185
0.30	1.45	520

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ที่ได้จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงและส่วนหางของแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่แอนนัลด้วย $CdCl_2$ ในบรรยากาศแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ $400^\circ C$ เป็นเวลา 30 นาที ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิด โดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์มีค่าเท่ากับ $150^\circ C$

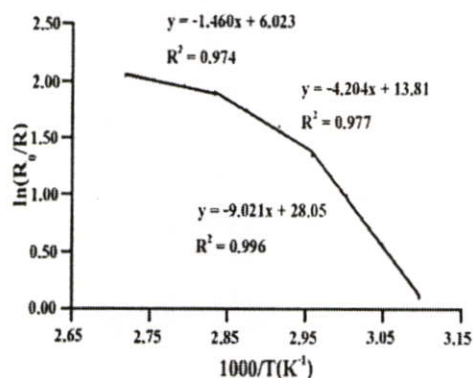
Composition (x) of Sb	Energy Gap (eV)	Band Tail (meV)
0.001	1.49	86
0.01	1.48	97
0.10	1.48	157
0.20	1.47	150
0.30	1.47	107

4.2.5 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$)

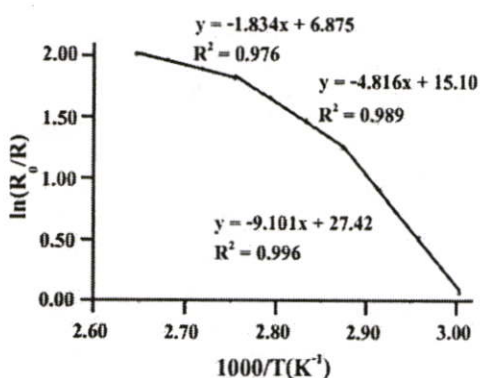
ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe$ และ $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิด โดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้มีความต้านทานสูง จึงวัดความต้านทานด้วยวิธีสองขั้ว ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe$ และ $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิดโดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ระเหิดในระยะประชิด เมื่ออุณหภูมิของฐานรองรับกระจกสไลด์สูงขึ้นความต้านทานแผ่นโดยไม่ฉายแสงมีแนวโน้มลดลง และในส่วนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่แอนนัลในบรรยากาศต่างๆพบว่า ค่าความต้านทานแผ่นโดยไม่ฉายแสงมีค่าต่ำในกรณีที่แอนนัลด้วย $CdCl_2$ ในบรรยากาศแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์และในอากาศความดันปกติที่อุณหภูมิ $400^\circ C$ เป็นเวลา 30 นาที ส่วนความต้านทานแผ่นในกรณีฉายแสงฟิล์มบางที่ผ่านการแอนนัลและไม่ผ่านการแอนนัลมีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลง



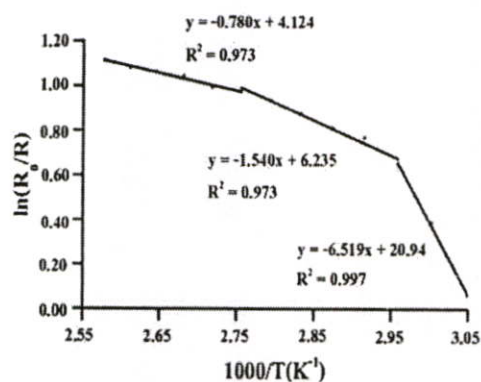
$T_{\text{sub}} = \text{Unheated}$



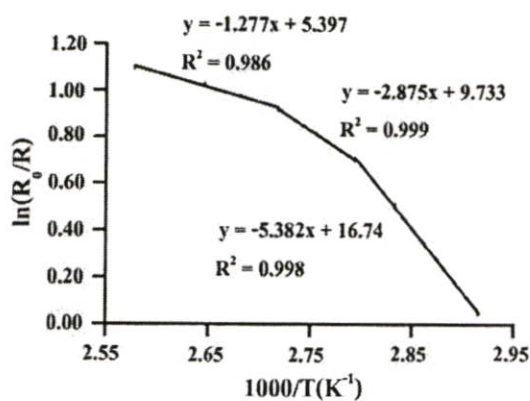
$T_{\text{sub}} = 100^{\circ}\text{C}$



$T_{\text{sub}} = 150^{\circ}\text{C}$

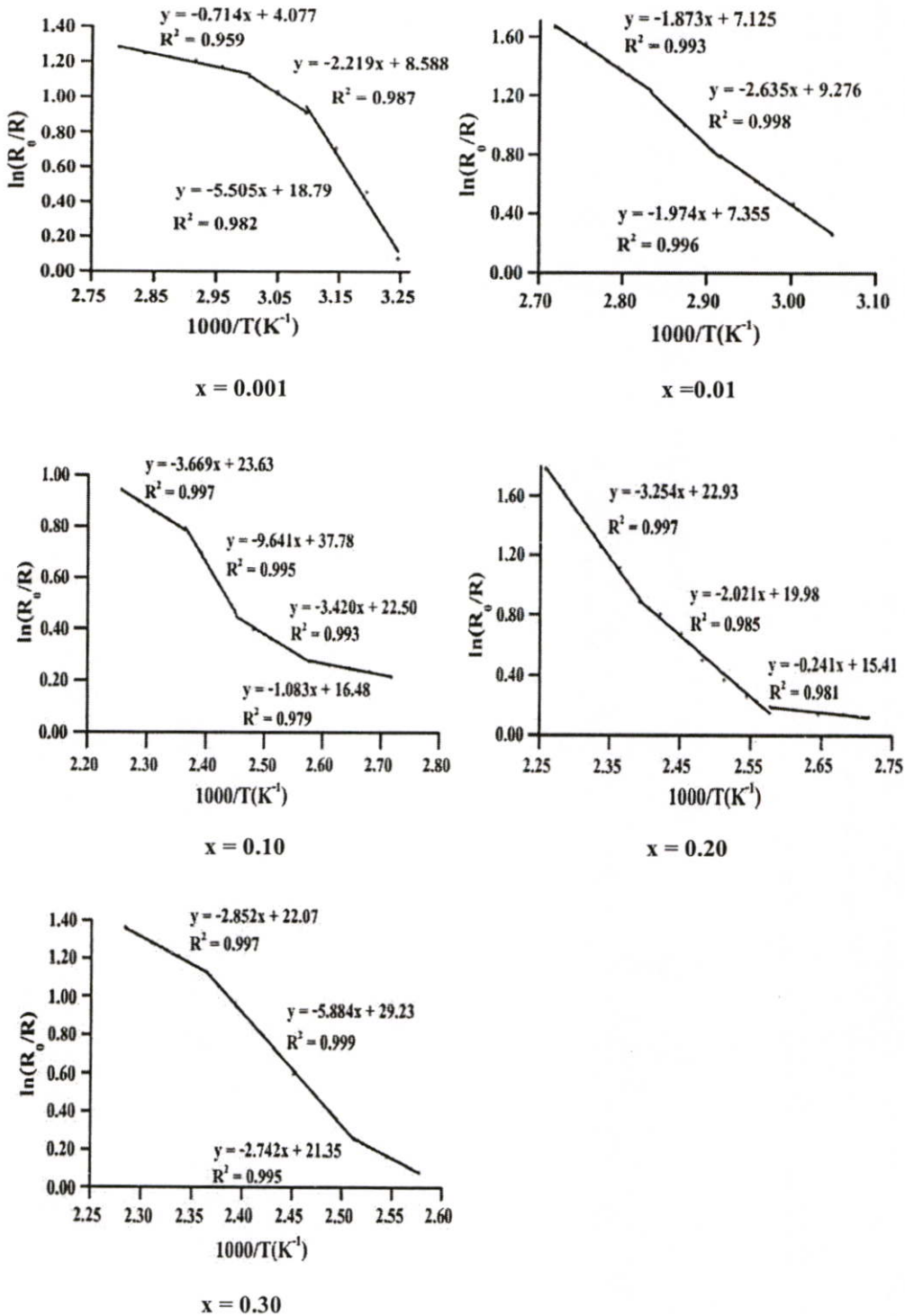


$T_{\text{sub}} = 200^{\circ}\text{C}$

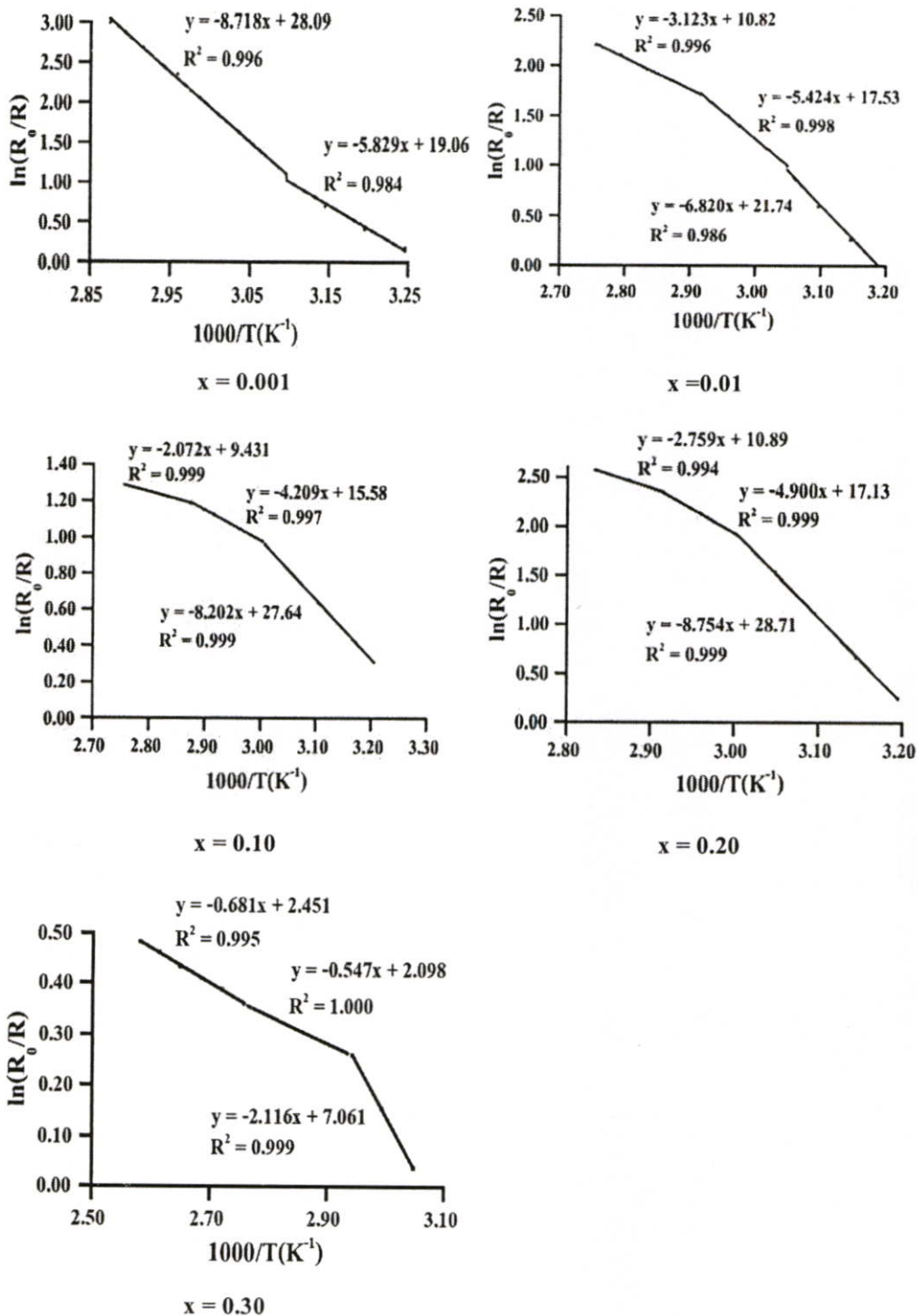


$T_{\text{sub}} = 250^{\circ}\text{C}$

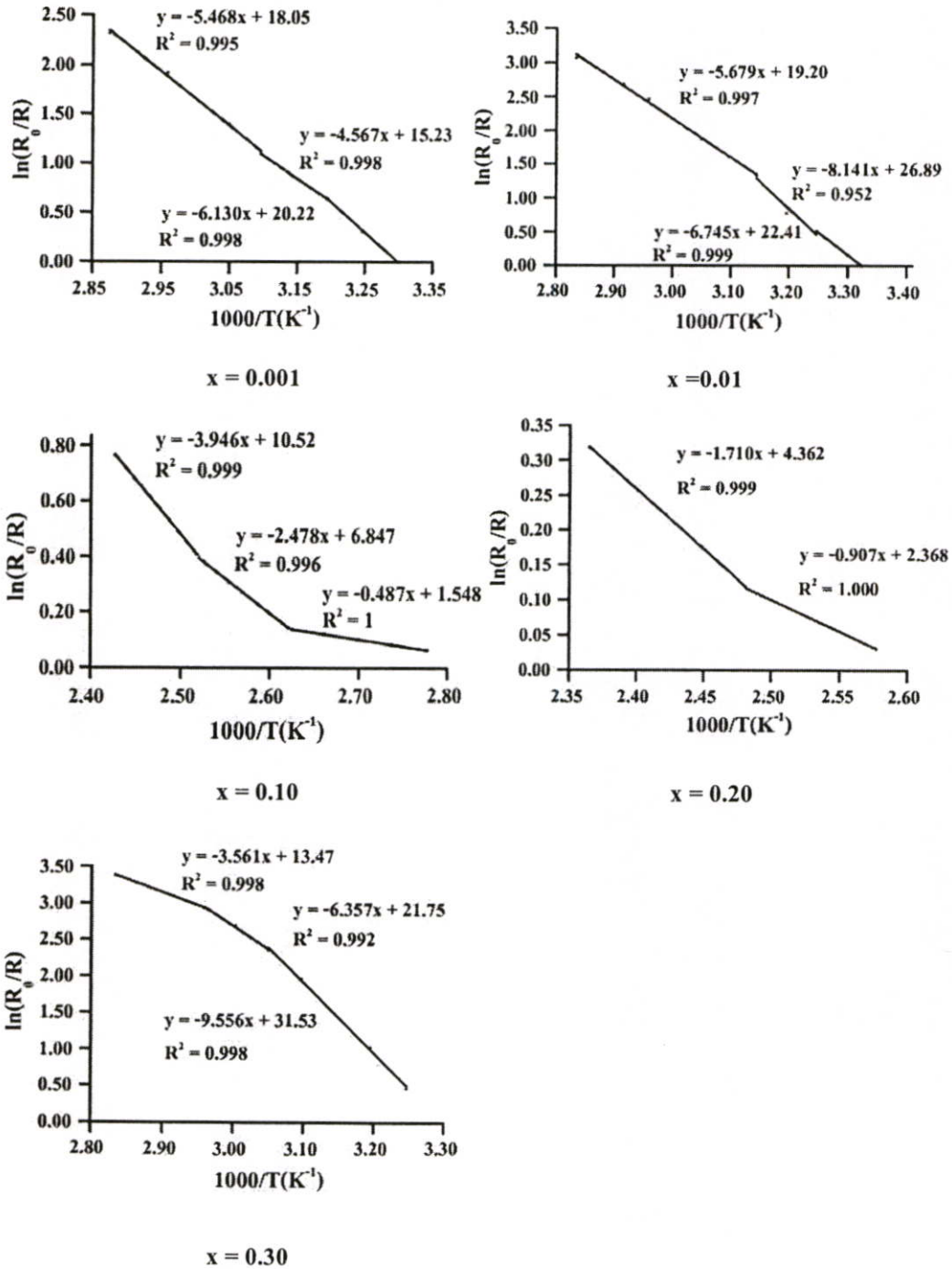
รูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{R_0}{R}\right)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิด โดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์มีค่าแตกต่างกัน



รูปที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{R_0}{R}\right)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารในระบบสุญญากาศในแบบระเหยประชิดโดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์มีค่าเท่ากับ $150^\circ C$



รูปที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{R_0}{R}\right)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่แอนนัลด้วย CdCl_2 ในอากาศความดันปกติที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 30 นาที ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิดโดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์มีค่าเท่ากับ 150°C



รูปที่ 4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{R_0}{R}\right)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่แอนนัลด้วย CdCl_2 ในบรรยากาศแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 30 นาที ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระเหยประชิด โดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์มีค่าเท่ากับ 150°C

การศึกษาพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) โดยการศึกษาความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆในการทดลองนี้ได้ทำการศึกษาความต้านทานไฟฟ้าในช่วงอุณหภูมิในช่วง $30-200^\circ\text{C}$ โดยทำการเก็บข้อมูลในทุกๆ 5°C จากข้อมูลที่ได้นำไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{R_0}{R}\right)$ กับ $\left(\frac{1000}{T}\right)$ ซึ่งความชันของกราฟสามารถนำมาคำนวณค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบางได้ดังแสดงในตารางที่ 4.9-4.10

ตารางที่ 4.9 แสดงค่าพลังงานกระตุ้น (E_g) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิดโดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์มีค่าแตกต่างกัน

Substrate Temperature ($^\circ\text{C}$)	Activation Energy (meV)					
	Level A ₀	Level A	Level B	Level E	Level G	Level H
Unheated	-	180	260	450	-	-
100	60		260	-	660	-
150	70	140	-	-	560	-
200	-	120	-	-	-	800
250	-	130	-	-	-	750

ตารางที่ 4.11 แสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิดโดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์มีค่าแตกต่างกัน

Substrate Temperature(°C)	Sheet Resistance (Ω/sq)	
	Darkness	Illumination
Unheated	4.64×10^{10}	0.93×10^{10}
100	4.11×10^{10}	1.64×10^{10}
150	5.00×10^{10}	2.00×10^{10}
200	0.96×10^{10}	1.92×10^{10}
250	4.17×10^{10}	1.04×10^{10}

ตารางที่ 4.12 แสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิดโดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์มีค่า 150°C

Composition (x) of Sb	Sheet Resistance (Ω/sq)	
	Darkness	Illumination
0.001	1.08×10^{10}	0.72×10^{10}
0.01	1.25×10^{10}	1.25×10^{10}
0.10	2.31×10^7	2.31×10^7
0.20	2.22×10^7	2.22×10^7
0.30	2.31×10^7	2.31×10^7

ตารางที่ 4.13 แสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่แอนนัลด้วย CdCl_2 ในอากาศความดันปกติที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 30 นาที ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิด โดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์มีค่า 150°C

Composition (x) of Sb	Sheet Resistance (Ω/sq)	
	Darkness	Illumination
0.001	3.70×10^9	2.7×10^9
0.01	3.30×10^9	2.5×10^9
0.10	8.3×10^9	1.85×10^9
0.20	18.2×10^9	3.64×10^9
0.30	2.11×10^7	2.11×10^7

ตารางที่ 4.14 แสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่แอนนัลด้วย CdCl_2 ในบรรยากาศแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 30 นาที ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระยะประชิด โดยให้อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์มีค่า 150°C

Composition (x) of Sb	Sheet Resistance (Ω/sq)	
	Darkness	Illumination
0.001	5.00×10^9	1.00×10^8
0.01	1.00×10^{10}	6.67×10^7
0.10	4.00×10^6	4.00×10^6
0.20	2.25×10^6	2.25×10^6
0.30	1.06×10^9	5.28×10^9

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้เป็นการสรุปการดำเนินงานวิจัยตั้งแต่ขั้นเริ่มเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระเหยโดยให้อุณหภูมิกับฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ตลอดจนการแอนนัลฟิล์มบางด้วย $CdCl_2$ ในอากาศแก๊สไนโตรเจนและในอากาศความดันปกติ จากนั้นจึงทำการศึกษาสมบัติพื้นฐานต่างๆของฟิล์มบางและวิเคราะห์ผลการทดลองพร้อมด้วยข้อเสนอแนะเพื่อเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ต่อไป

สรุปผลการศึกษาฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระเหยประชิดโดยให้อุณหภูมิกับฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe$ บนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ด้วยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศในแบบระเหยประชิด โดยควบคุมอุณหภูมิฐานรองรับกระจกสไลด์ให้มีค่าเท่ากับ 50, 100, 150, 200 และ 250°C ตามลำดับ จากการศึกษาโครงสร้างผลึกโดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์พบว่า สำหรับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe$ ที่เตรียมได้โดยไม่ให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับ จะปรากฏพีคของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของระนาบ (111) เพียงพีคเดียวเท่านั้น และความเข้มของพีคของระนาบ (111) จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของฐานรองรับเท่ากับ 150°C จากนั้น ความเข้มของพีคของระนาบ (111) จะลดลงเมื่ออุณหภูมิของฐานรองรับเพิ่มขึ้นอีกเมื่ออุณหภูมิของฐานรองรับเป็น 250°C พีคของระนาบ (220) และ (311) จะปรากฏขึ้นด้วย และสัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบผลึก (111) จะมีค่าสูงสุดเมื่ออุณหภูมิของฐานรองรับเท่ากับ 150°C ค่าคงที่โครงสร้างแกน a เท่ากับ 6.464 Å ซึ่งใกล้เคียงกับค่าคงที่โครงสร้างผลึกของผลึกเดี่ยว $CdTe$ ที่เป็นโครงสร้างซิงค์เบลนด์

ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) บนกระจกสไลด์โดยให้อุณหภูมิของฐานรองรับเท่ากับ 150°C จากศึกษาการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์พบว่า เมื่อปริมาณของสัดส่วนสารเจือ (x) เพิ่มขึ้น ความเข้มของพีคของระนาบ (111) ลดลง แต่เมื่อสัดส่วนสารเจือ (x) เท่ากับ 0.10 พีคของระนาบ (111) จะหายไป แต่จะปรากฏพีคของระนาบ (220) ขึ้นมาแทนที่ แต่เมื่อสัดส่วนสารเจือ (x) เพิ่มขึ้นเป็น 0.20 พีคของระนาบ (220) จะมีความเข้มลดลง และพีคของระนาบ (111) จะกลับคืนมาอีกครั้งหนึ่งเมื่อสัดส่วนของสารเจือ (x) เท่ากับ 0.30

จากการถ่ายภาพผิวหน้าผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดขนาดกำลังขยาย 20,000 เท่าพบว่า เมื่ออุณหภูมิของฐานรองรับเพิ่มขึ้นขนาดของแกนผลึกจะเพิ่มขึ้น แต่เมื่อสัดส่วนสารเจือ (x) ในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำมีค่าเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ขนาดของเกรนมีค่าลดลง และคุณภาพของผิวหน้าผลึกมีค่าลดลงด้วย

จากการศึกษาสมบัติการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe พบว่า เมื่ออุณหภูมิของฐานรองรับเท่ากับ 100 และ 150°C ช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe มีค่าเท่ากับ 1.50 eV ซึ่งสอดคล้องกับค่าที่ได้จากผลึกเดี่ยว CdTe แต่เมื่ออุณหภูมิของฐานรองรับเพิ่มขึ้น ช่องว่างแถบพลังงานจะมีค่าลดลง สำหรับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เตรียมโดยไม่ให้อุณหภูมิกับฐานรองรับ ส่วนทางของแถบพลังงานจะมีค่าสูงในระดับ 587 meV และจะมีค่าลดลงเป็น 93 meV เมื่ออุณหภูมิของฐานรองรับเท่ากับ 100°C แต่เมื่ออุณหภูมิของฐานรองรับเพิ่มขึ้นเป็น 200 และ 250°C ส่วนทางของแถบพลังงานจะมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงว่าอุณหภูมิของฐานรองรับสูงกว่า 150°C จะส่งผลให้การจัดเรียงตัวของอะตอมใน โครงสร้างผลึกมีความเป็นระเบียบน้อยลง และการไม่ให้อุณหภูมิกับฐานรองรับก็จะทำให้ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่ได้มีการจัดเรียงตัวของอะตอมใน โครงสร้างผลึกเป็นไปอย่างไม่สมบูรณ์ ซึ่งการจัดเรียงตัวของอะตอมใน โครงสร้างผลึกอย่างไม่เป็นระเบียบนี้ จะเป็นสาเหตุให้เกิดข้อบกพร่องผลึกได้หลายชนิด เช่น ชนิดเป็นจุด (point defects) ชนิดหนึ่งมิติ (line defects) ชนิดสองมิติ และชนิดสามมิติ เป็นต้น

สำหรับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) พบว่าส่วนทางของแถบพลังงานจะมีค่าลดลงเมื่อสัดส่วนเพิ่มจาก 0.001 เป็น 0.01 แต่เมื่อสัดส่วนสารเจือมากกว่า 0.01 ส่วนทางของแถบพลังงานจะมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นสัดส่วนสารเจือ (x) ที่เหมาะสมคือ $x = 0.10$ ซึ่งจะทำให้ส่วนทางของแถบพลังงานมีค่าต่ำอยู่ในระดับ 193 meV

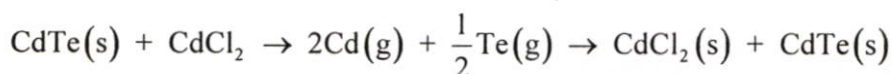
จากการวัดความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe พบว่า ความต้านทานแผ่นมีค่าสูงในระดับ $10^{10} \Omega/\text{sq}$ และอุณหภูมิของฐานรองรับไม่ส่งผลต่อความต้านทานแผ่นมากนัก แต่ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) นี้ตอบสนองต่อแสงบ้างเล็กน้อย กล่าวคือความต้านทานแผ่นมีค่าลดลงประมาณ 4 เท่า ภายใต้การฉายแสงด้วยหลอดไฟ ELH ส่วนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) มีความต้านทานลดลงจาก $10^{10} \Omega/\text{sq}$ เป็น $10^7 \Omega/\text{sq}$ เมื่อสัดส่วนสารเจือ (x) ตั้งแต่ 0.10 ขึ้นไป ดังนั้นสัดส่วนสารเจือที่เหมาะสมคือ $x = 0.10$ แต่อย่างไรก็ตามฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) จะไม่ตอบสนองต่อแสงเลยเมื่อสัดส่วนสารเจือตั้งแต่ 0.01 ขึ้นไป

จากการวัดความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่ไม่มีสารเจือพบว่า ค่าพลังงานกระตุ้นที่เกิดจากระดับพลังงาน A_0 จะปรากฏในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เตรียมโดยการให้อุณหภูมิของฐานรองรับเท่ากับ 100 และ 150°C ซึ่งระดับพลังงานนี้เป็นระดับพลังงานตื้น (shallow levels) ส่วนระดับพลังงาน A จะปรากฏอยู่ในฟิล์มบางที่เตรียมได้เกือบทุกอุณหภูมิที่

ให้กับฐานรองรับ แต่สำหรับฟิล์มบางที่เตรียมได้จากการให้อุณหภูมิของฐานรองรับเท่ากับ 250 และ 250°C จะปรากฏระดับพลังงาน H ขึ้น ซึ่งระดับพลังงานนี้เป็นระดับพลังงานลึก (deep levels) และระดับพลังงานลึกนี้มักจะประพฤติตัวเป็นศูนย์กลางของการรวมตัวของพาหะ (recombination center) ส่งผลให้ช่วงชีวิตของพาหะ (lifetime) สั้นลงมาก ไม่เหมาะที่จะนำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่มีระดับพลังงานลึกไปประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์

สำหรับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) เมื่อสัดส่วนสารเจือ (x) เพิ่มขึ้น พลังงานกระตุ้นของระดับพลังงาน A_0 มีค่าลดลง แต่ไม่ปรากฏว่ามีระดับพลังงาน A อยู่ มีผู้รายงานไว้ว่าค่าพลังงานกระตุ้นของสารเจือ Sb มีค่าระดับ 60 meV [34] ซึ่งในที่นี้มีค่าน้อยกว่าส่วนหางของแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เตรียมโดยให้อุณหภูมิของฐานรองรับเท่ากับ 150°C (ซึ่ง $E_g = 129$ meV) ดังนั้นระดับพลังงานของสารเจือ Sb จึงถูกบดบังโดยส่วนหางของแถบพลังงาน แต่อย่างไรก็ตาม คล้ายกับว่าสารเจือ Sb จะไปช่วยทำให้ระดับพลังงาน E_0 ของฟิล์มบาง CdTe มีค่าลดลง และระดับพลังงาน E_g นี้หายไปเมื่อสัดส่วนสารเจือ (x) มากกว่า 0.20

การแอนนัลฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ด้วย $CdCl_2$ ในบรรยากาศแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ ช่วยทำให้เกรนของผลึกมีขนาดเพิ่มขึ้น การจัดเรียงตัวของระนาบผลึกดีขึ้น ลดข้อบกพร่องของผลึกในที่ว่างระหว่างเกรน (intergrain) กลไกการจัดเรียงตัวของผลึก CdTe ภายใต้การแอนนัลด้วย $CdCl_2$ ในบรรยากาศก๊าซเฉื่อยเป็นดังความสับสน



การปรากฏไอของ Cl_2 จะช่วยทำให้เกรนที่มีขนาดเล็กหายไป แต่ปฏิกิริยาเคมีนี้จะขึ้นกับอุณหภูมิที่ใช้อย่างมาก แต่อุณหภูมิแอนนัลที่นิยมใช้คือ 420°C ส่วนการแอนนัล $CdCl_2$ ในบรรยากาศของแก๊ส O_2 จะช่วยให้ความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง CdTe มีค่าลดลง การแอนนัลรอยต่อ CdS/CdTe ด้วย $CdCl_2$ ในบรรยากาศของแก๊ส O_2 จะช่วยให้อะตอม Cl เข้าแทนที่ตำแหน่งของ Te ได้ง่ายขึ้น ดังนั้น Cl_{Te} จะมีปริมาณเพิ่มขึ้น รวมทั้งการเกิดชั้นบาง $CdTe(S,O)$ ตรงบริเวณรอยต่อระหว่าง CdS กับ CdTe ส่งผลให้ค่าฟิลแฟกเตอร์และประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเพิ่มขึ้น [3]

ปัญหาและข้อเสนอแนะ

1. ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe และ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0.30$) ที่เตรียมได้ควรนำไปเก็บไว้ในภาชนะที่ปิดมิดชิดเพื่อไม่ให้สัมผัสกับอากาศ และควรทำการศึกษาสมบัติพื้นฐานต่างๆ ในเวลาอันรวดเร็ว ไม่ควรปล่อยฟิล์มบางไว้นานเกินไป
2. การเจือ Sb ในปริมาณน้อยๆ ไม่ทำให้ความต้านทานแผ่นลดลงมากนัก แต่การเจือ Sb ในปริมาณมากกว่า 0.01 จะส่งผลต่อการจัดเรียงอะตอมในโครงสร้างผลึก ทำให้เกิดระดับพลังงานลึกในช่องว่างแถบพลังงาน ซึ่งไม่เหมาะที่จะนำเอาฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdTe}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($x > 0.10$) ไปประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนั้นเป็นที่น่าสนใจจะใช้สารเจือชนิดอื่น เช่น Na, Ag, Cu และ Bi เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

1. ยงยุทธ เหล่าศิริถาวร, รัตติกร ยิ้มนิรัญ. “ไอน์สไตน์กับพลังงานแสงอาทิตย์” วารสารฟิสิกส์ไทย: World Year of PHYSICS 2005. ปีที่ 22. ฉบับที่ 1. มีนาคม-พฤษภาคม 2548. หน้า 22-25.
2. Acevedo A.M. “Can We Improve the Record Efficiency of CdS/CdTe Solar Cells?” *Solar Energy Materials&Solar Cells*. Vol. 90. 2006. pp. 2213-2220.
3. Bosio A., Rome N., Mazzamuto S. and Canevari V. “Polycrystalline CdTe Thin Films for Photovoltaic Applications” *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*. Vol. 2006. pp. 247-279.
4. Wu X. “High-efficiency Polycrystalline CdTe Thin-film Solar Cells” *Solar Energy*. Vol. 77. 2004. pp. 803-814.
5. Sze S.M. *Semiconductor Devices Physics and Technology*. 2nd Ed. United States of America: John Wiley&Sons. 2002
6. จูตินัย แก้วแดง. “การเตรียมและศึกษาสมบัติของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2530.
7. งามนิตย์ วงษ์เจริญ. “การศึกษารอยต่อแบบโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ ของคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2530.
8. ปกรณ์ สิริขัตติวงษ์. “การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์ที่เตรียมได้จากกระบวนการซีลีเนียม” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2550.
9. งามนิตย์ แก้วแดง, จูตินัย แก้วแดง, ชัยสิงห์ ภูรักษาเกียรติ, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. “การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2545.
10. Kittel C. *Introduction to Solid State Physics*. 8th Ed. United States of America: John Wiley&Sons. 2005.
11. วีระชัย ลิภา. “การศึกษาสมบัติฟิล์มบาง CdS-ZnS ซึ่งเตรียมโดยวิธีออบสาลละลายเคมี” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2547.

12. สุกฤษฎ์ เกิดแสง. “การเตรียมและศึกษาสมบัติของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ CdTe” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2547.
13. จูติกร จรรยาธรรม. “การศึกษาเชิงเปรียบเทียบสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่เตรียมโดยเทคนิคที่ต่างกัน” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2550.
14. Ignatowicz S. and Kobendza A. **Semiconducting Thin Films of A^{II}B^{VI} Compounds.** Warsaw: PWN-POLISH SCIENTIFIC. 1990.
15. Abrikosov N.Kh, Bankina V.F., Poretskaya L.V., Shelimova L.E. and Skudnova E.V. **Semiconducting II-VI, IV-VI, and V-VI Compounds.** New York: PLENUM PRESS. 1969.
16. Ray B. **II-VI Compounds.** Oxford: PERGAMON PRESS. 1969.
17. Adachi S. **Properties of Group-IV, III-V and II-VI Semiconductors.** West Sussex: John Wiley&Sons. 2005.
18. Anthony T., Fahrenbruch A. and Bube R. “Growth of CdTe Films by Close-spaced Vapor Transport” **J.Vac.Sci.Technol.** Vol. 1984. pp. 1296-1302.
19. Perrier G., Philippe R. and Dodelet J.P. “Growth of Semiconductors by the Close-spaced Vapor Transport Technique: A Review” **J.Mater.Res.** 1988. pp. 1031-1042.
20. Ohring M. **Materials Science of Thin Films Deposition and Structure.** 2nd Ed. San Diego: ACADEMIC PRESS. 2002.
21. Fahrenbruch A.L. and Bube R.H. **Fundamentals of Solar Cells Photovoltaic Solar Energy Conversion.** New York: ACADEMIC PRESS. 1983.
22. Ferekides C.S., Marinsky D., Viswanathan V., Tetali B., Palekis V., Selvaraj P. and Morel D.L. “High Efficiency CSS CdTe Solar Cells” **Thin Solid Films.** 2000. pp. 520-526.
23. Seth A., Lush G.B., McClure J.C., Singh V.P. and Flood D. “Growth and Characterization of CdTe by Close Spaced Sublimation on Metal Substrates” **Solar Energy Materials&Solar cells.** Vol. 59. 1999. pp. 35-49.
24. May G.S. and Sze S.M. **Fundamentals of Semiconductor Fabrication.** United States of America: John Wiley&Sons. 2004.
25. Runyan W.R. **Semiconductor Measurement and Instrument.** 3rd Ed. New York: Mc Graw-Hill. 1975.

26. Moller H.J. **Semiconductors for Solar Cells**. Boston: Artech House. 1993.
27. Schroder D.K. **Semiconductor Material and Device Characterization**. New York: John Wiley&Sons. 1990.
28. Castaldini A., Cavallini A., Fraboni B., Fernandez P. and Piqueras J. "Deep Energy Level in CdTe and CdZnTe" **Journal of Applied Physics**. Vol. 183(4). 1998. pp. 2121-2126.
29. Komin V., Tetali B., Viswanathan V., Yu S., Morel D.L. and Ferekides C.S. "The Effect of the CdCl₂ Treatment on CdTe/CdS Thin Film Solar Cells Studied Using Deep Level Transient Spectroscopy" **Thin Solid Films**. 2003. pp. 143-147.
30. Mathew X. "Review Photo-induced Current Transient Spectroscopic Study of the Traps in CdTe" **Solar Energy Materials&Solar Cells**. Vol. 76. 2003. pp. 225-242.
31. Ates A., Yildirim M. and Gurbulak. "Absorption Measurement and Urbach's Rule in InSe and InSe:Ho_{0.0025} Single Crystals" **Optical Materials**. Vol. 28. 2006. pp.488-493.
32. Bilgin V., Kose S., Atay F. and Akyuz I. "The Effect of Substrate Temperature on the Structural and Some Physical Properties of Ultrasonically Sprayed CdS Films" **Materials Chemistry and Physics**. Vol. 94. 2005. pp.103-108.
33. Iribarren A., Castro-Rodriguez R., Caballero-Briones F. and Pena J.L. "Optical and Structural Evidence of the Grain-boundary Influence on the Disorder of Polycrystalline CdTe Films" **Applied Physics Letters**. Vol. 74(20). 1999. pp. 2957-2959.
34. Harper R.L., Jr., Hwang S., Giles N.C. and Schetzina J.F. "Arsenic-doped CdTe Epilayers Grown by Photoassisted Molecular Beam Epitaxy" **Applied Physics Letters**. Vol. 54(2). 1989. pp. 170-172.

ภาคผนวก ก.

ไฟล์มาตรฐานของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

<i>Pattern</i> : 10-207		<i>Radiation</i> = 1.540598		<i>Quality</i> : Deleted							
Cd Te		<i>2th</i>	<i>I</i>	<i>h</i>	<i>k</i>	<i>l</i>					
Cadmium Telluride		23.772	100	1	1	1					
		39.312	80	2	2	0					
		46.535	70	3	1	1					
<i>Lattice</i> : Face-center cubic		56.783	20	4	0	0					
<i>S.G.</i> : F-43m (216)		62.493	40	3	3	1					
<i>a</i> = 6.49000		71.154	50	4	2	2					
<i>Z</i> = 4		76.228	40	5	1	1					
		84.559	40	4	4	0					
		89.620	70								
		97.443	70	6	2	0					
		102.458	50								
DELETED AND REJECTED BY : Delete: Post parcel January 7, 1964 (for Set 15).											
*Private Communication, primary reference : Vaughan, D., Battelle Memorial Inst., Columbus, OH, USA. *Z. Phy. Chem., volume 124, page 277, (1926) unit cell data : Zachariasen											
<i>Radiation</i> : FeK α 1						<i>Filter</i> : Beta					
<i>Lambda</i> : 1.93600						<i>d-sp</i> : Not given					
<i>SS/FOM</i> : F9= 3(0.1880,14)											

Pattern : 71-393		Radiation = 1.540598		Quality : Calculated				
Sb ₂ Te ₃		<i>2th</i>	<i>I</i>	<i>h</i>	<i>k</i>	<i>l</i>		
Antimony Telluride		8.703	4	0	0	3		
		17.456	4	0	0	6		
		24.259	<1	1	0	1		
		24.789	<1	0	1	2		
		26.313	2	0	0	9		
		26.810	2	1	0	4		
		28.238	100	0	1	5		
		31.757	1	1	0	7		
		33.788	3	0	1	8		
		35.334	<1	0	0	12		
		38.275	32	1	0	10		
		40.695	3	0	1	11		
		42.361	31	1	1	0		
		43.331	<1	1	1	3		
		44.588	5	0	0	15		
		45.830	4	1	0	13		
		46.143	1	1	1	6		
		48.529	2	0	1	14		
		49.412	<1	0	2	1		
		49.701	<1	2	0	2		
		50.558	2	1	1	9		
		50.845	<1	0	2	4		
		51.690	15	2	0	5		
		53.899	<1	0	2	7		
		54.162	4	0	0	18		
		*54.162	4	1	0	16		
		55.248	1	2	0	8		
		56.309	<1	1	1	12		
		57.093	<1	0	1	17		
		58.401	8	0	2	10		
		60.191	1	2	0	11		
		63.186	8	1	0	19		
		*63.186	8	1	1	15		
		64.170	2	0	0	21		
		*64.170	2	0	2	13		
		66.342	2	0	1	20		
		*66.342	2	2	0	14		
		67.313	<1	1	2	2		
		68.263	<1	2	1	4		
		68.971	10	1	2	5		
		70.845	<1	2	1	7		
		71.067	4	1	1	18		
		*71.067	4	0	2	16		
		72.005	<1	1	2	8		
		72.913	<1	1	0	22		
		73.608	<1	2	0	17		
		74.759	6	0	0	24		
		*74.759	6	2	1	10		
		76.334	3	0	1	23		
		*76.334	3	1	2	11		
		77.481	4	3	0	0		
		78.156	<1	0	3	3		
		79.042	<1	0	2	19		
		79.934	2	1	1	21		
		*79.934	2	2	1	13		
Lattice : Rhombohedral S.G. : R-3m (166)		Mol. weight = 626.30 Volume [CD] = 479.59						
a = 4.26400 c = 30.45800	Z = 3	Dx = 6.506 I/Cor = 15.23						
ICSD COLLECTION CODE : 002084 REMARKS FROM ICSD : REM REF. TEMPERATURE FACTOR : ITF								
*Calculated from ICSD using POWD-12++, (1997) primary reference: *Acta Crystallogr., Sec. B, volume 30, page 1307, (1974) : Anderson, T.L., Krause, H.B.								
Radiation : CuKα1 Lambda : 1.54060	Filter : Not specified d-sp: Calculated spacings							

ภาคผนวก ข.

การคำนวณปริมาณสารเจือ

การคำนวณปริมาณสารเจือของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe

มวลโมเลกุลของธาตุ

$$\text{Cd} = 112.40 \text{ g/mol}$$

$$\text{Te} = 127.60 \text{ g/mol}$$

$$\text{Sb} = 121.75 \text{ g/mol}$$

1. $x = 0.001$: $\text{Cd}_{0.999}\text{Sb}_{0.001}\text{Te}$

$$\begin{aligned} \text{มวลโมเลกุลของ CdTe} &= 112.40 + 127.60 \\ &= 240.00 \text{ g/mol} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{มวลโมเลกุลของ Sb}_2\text{Te}_3 &= (2 \times 121.75) + (3 \times 127.60) \\ &= 626.30 \text{ g/mol} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{มวลโมเลกุลของ Cd}_{0.999}\text{Sb}_{0.001}\text{Te} &= (0.999 \times 112.40) + (0.001 \times 121.75) + 127.60 \\ &= 112.2876 + 0.12175 + 127.60 \\ &= 240.00935 \text{ g/mol} \end{aligned}$$

เพราะฉะนั้น ใน 1 mol ถ้าต้องการ $\text{Cd}_{0.999}\text{Sb}_{0.001}\text{Te} = 240.00935 \text{ g}$ จะต้องชั่ง

$$\text{CdTe} = (0.999 \times 240) = 239.76 \text{ g} \text{ และ}$$

$$\text{Sb}_2\text{Te}_3 = [(0.001/2) \times 626.30] = 0.31315 \text{ g}$$

แต่ในการทดลองต้องการ $\text{Cd}_{0.999}\text{Sb}_{0.001}\text{Te} = 1 \text{ g}$

$$\text{ดังนั้นจึงต้องชั่ง CdTe} = (239.76 \times 1) / 240.00935 = 0.9989 \text{ g}$$

$$\text{และ Sb}_2\text{Te}_3 = (0.31315 \times 1) / 240.00935 = 0.0013 \text{ g}$$

2. $x = 0.01$: $\text{Cd}_{0.99}\text{Sb}_{0.01}\text{Te}$

$$\begin{aligned} \text{มวลโมเลกุลของ Cd}_{0.99}\text{Sb}_{0.01}\text{Te} &= (0.99 \times 112.40) + (0.01 \times 121.75) + 127.60 \\ &= 111.276 + 1.2175 + 127.60 \\ &= 240.0935 \text{ g/mol} \end{aligned}$$

เพราะฉะนั้น ใน 1 mol ถ้าต้องการ $\text{Cd}_{0.99}\text{Sb}_{0.01}\text{Te} = 240.0935 \text{ g}$ จะต้องชั่ง

$$\text{CdTe} = (0.99 \times 240) = 237.6 \text{ g} \text{ และ}$$

$$\text{Sb}_2\text{Te}_3 = [(0.01/2) \times 626.30] = 3.1315 \text{ g}$$

แต่ในการทดลองต้องการ $\text{Cd}_{0.99}\text{Sb}_{0.01}\text{Te} = 1 \text{ g}$

ดังนั้นจึงต้องชั่ง $\text{CdTe} = (237.6 \times 1) / 240.0935 = 0.9896 \text{ g}$

และ $\text{Sb}_2\text{Te}_3 = (3.1315 \times 1) / 240.0935 = 0.0130 \text{ g}$

3. $x = 0.10$: $\text{Cd}_{0.9}\text{Sb}_{0.1}\text{Te}$

มวลโมเลกุลของ $\text{Cd}_{0.9}\text{Sb}_{0.1}\text{Te} = (0.9 \times 112.40) + (0.1 \times 121.75) + 127.60$

$= 101.16 + 12.175 + 127.60$

$= 240.935 \text{ g/mol}$

เพราะฉะนั้น ใน 1 mol ถ้าต้องการ $\text{Cd}_{0.9}\text{Sb}_{0.1}\text{Te} = 240.935 \text{ g}$ จะต้องชั่ง

$\text{CdTe} = (0.9 \times 240) = 216 \text{ g}$ และ

$\text{Sb}_2\text{Te}_3 = [(0.1/2) \times 626.30] = 31.315 \text{ g}$

แต่ในการทดลองต้องการ $\text{Cd}_{0.9}\text{Sb}_{0.1}\text{Te} = 1 \text{ g}$

ดังนั้นจึงต้องชั่ง $\text{CdTe} = (216 \times 1) / 240.935 = 0.8965 \text{ g}$

และ $\text{Sb}_2\text{Te}_3 = (31.315 \times 1) / 240.935 = 0.1300 \text{ g}$

4. $x = 0.20$: $\text{Cd}_{0.8}\text{Sb}_{0.2}\text{Te}$

มวลโมเลกุลของ $\text{Cd}_{0.8}\text{Sb}_{0.2}\text{Te} = (0.8 \times 112.40) + (0.2 \times 121.75) + 127.60$

$= 89.92 + 24.35 + 127.60$

$= 241.87 \text{ g/mol}$

เพราะฉะนั้น ใน 1 mol ถ้าต้องการ $\text{Cd}_{0.8}\text{Sb}_{0.2}\text{Te} = 241.87 \text{ g}$ จะต้องชั่ง

$\text{CdTe} = (0.8 \times 240) = 192 \text{ g}$ และ

$\text{Sb}_2\text{Te}_3 = [(0.2/2) \times 626.30] = 62.63 \text{ g}$

แต่ในการทดลองต้องการ $\text{Cd}_{0.8}\text{Sb}_{0.2}\text{Te} = 1 \text{ g}$

ดังนั้นจึงต้องชั่ง $\text{CdTe} = (192 \times 1) / 241.87 = 0.7938 \text{ g}$

และ $\text{Sb}_2\text{Te}_3 = (62.63 \times 1) / 241.87 = 0.2589 \text{ g}$

5. $x = 0.30$: $\text{Cd}_{0.7}\text{Sb}_{0.3}\text{Te}$

$$\begin{aligned} \text{มวลโมเลกุลของ } \text{Cd}_{0.7}\text{Sb}_{0.3}\text{Te} &= (0.7 \times 112.40) + (0.3 \times 121.75) + 127.60 \\ &= 78.68 + 36.525 + 127.60 \\ &= 242.805 \text{ g/mol} \end{aligned}$$

เพราะฉะนั้น ใน 1 mol ถ้าต้องการ $\text{Cd}_{0.7}\text{Sb}_{0.3}\text{Te} = 242.805 \text{ g}$ จะต้องชั่ง

$$\text{CdTe} = (0.7 \times 240) = 168 \text{ g} \text{ และ}$$

$$\text{Sb}_2\text{Te}_3 = [(0.3/2) \times 626.30] = 93.945 \text{ g}$$

แต่ในการทดลองต้องการ $\text{Cd}_{0.7}\text{Sb}_{0.3}\text{Te} = 1 \text{ g}$

$$\text{ดังนั้นจึงต้องชั่ง CdTe} = (168 \times 1) / 242.805 = 0.6919 \text{ g}$$

$$\text{และ Sb}_2\text{Te}_3 = (93.945 \times 1) / 242.805 = 0.3869 \text{ g}$$

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายพีรพร สิริพุดไชววรรณ
วัน เดือน ปีเกิด	22 กันยายน 2525
สถานที่เกิด	140/74 หมู่ 4 ถนนกาญจนวนิช ตำบลเขารูปช้าง อำเภอเมืองสงขลา จังหวัดสงขลา 90000
ที่อยู่ปัจจุบัน	100/29 หมู่บ้านรุ่งอรุณ ถนนฉลองกรุง แขวงลำปลาทิว เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
ประวัติการศึกษา	2533 ประถมศึกษา โรงเรียนอนุบาลสงขลา 2536 มัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนมหาวิทยาลัยราชวูธ 2542 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนมหาวิทยาลัยราชวูธ 2547 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ 2550 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติเจ้าคุณทหารลาดกระบัง