

การศึกษาลักษณะสมบัติของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์
ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดในระยะประชิด

CHARACTERIZATION OF CdTe THIN FILMS
DEPOSITED BY CLOSE-SPACED SUBLIMATION METHOD

อดุลย์ ชาญวังม่วง
ADUL HARNWUNGMOUNG

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาทางหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์
ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดในระยะประชิด

CHARACTERIZATION OF CdTe THIN FILMS
DEPOSITED BY CLOSE-SPACED SUBLIMATION METHOD



อศุลย์ หาญวังม่วง

ADUL HARNWUNGGMOUNG

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 74513
วัน,เดือน,ปี..... - 2 ต.ค. 2550

b.....
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2550

**CHARACTERIZATION OF CdTe THIN FILMS
DEPOSITED BY CLOSE-SPACED SUBLIMATION METHOD**

ADUL HARNWUNGGMOUNG

**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

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียม โดยวิธีระเหิดในระยะประชิด
Characterization of CdTe Thin Films Deposited by Close-Spaced Sublimation
Method





ชื่อนักศึกษา นายอดุลย์ หาญวังม่วง

รหัสประจำตัว 48067306

ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.ปรีชา	ยุพาพิน	
รศ.งามนิตย์	วงษ์เจริญ	
รศ.ดร.ฐิตินัย	แก้วแดง	
ผศ.ดร.ชัยสิงห์	ภูริรักษ์เกียรติ	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 18 พฤษภาคม 2550 เวลา 10.00 น. เป็นต้นไป
สถานที่สอบ ณ อาคารจุฬารามณวลัยลักษณ์ 1 ห้อง 307


บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(รศ.ดร.จาร์วัตร เจริญสุข)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดในระยะประชิด
นักศึกษา	นายอคุลย์ หาญวังม่วง
รหัสประจำตัว	48067306
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
พ.ศ.	2550
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ

บทคัดย่อ

ในวิทยานิพนธ์นี้ ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ให้เคลือบบนกระจกสไลด์โดยวิธีระเหิดในระยะประชิดภายในห้องสุญญากาศความดันต่ำระดับ 2.0×10^{-2} มิลลิบาร์ที่อุณหภูมิสารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกเท่ากับ 375 , 400 , 425 , 450 และ 475 องศาเซลเซียส ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจก 4 , 6 และ 8 มิลลิเมตร จากการวิเคราะห์ด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์มีโครงสร้างแบบลูกบาศก์และมีการจัดเรียงตัวในระนาบ (111) ซึ่งมีค่าความเข้มของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์สูงสุด มีการศึกษาลักษณะของพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ด้วยเครื่อง ยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS spectrophotometer) ในช่วงความยาวคลื่น 300-1100 นาโนเมตร ได้ทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า เช่น ความต้านทานแผ่น ความต้านทานที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ และมีการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่ผ่านการแอนนัลในบรรยากาศแคดเมียมคลอไรด์ เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมกับความเหมาะสมกับการเตรียมฟิล์มบางสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์

Thesis	Characterization of CdTe Thin Films Deposited by Close-Spaced Sublimation Method
Student	Mr.Adul Harnwunggmoung
Student ID	48067306
Degree	Master of Science
Program	Applied Physics
Year	2007
Thesis Advisor	Assoc.Prof. Ngamnit Wongcharoen

ABSTRACT

In this thesis, CdTe thin films have been deposited by close-spaced sublimation (CSS) method on glass substrate in reaction chamber having a low pressure about 2.0×10^{-2} mbar. Source temperature was 550°C and glass substrate temperatures were $375, 400, 425, 450$ and 475°C with source-substrate spacers 4 , 6 and 8 mm. From XRD analysis, CdTe thin films are polycrystalline belonging to cubic structure with a preferential orientation of (111) plane and strongest peak intensity. The surface morphology have been studied by scanning electron microscope(SEM). The optical transmittance of CdTe thin films have been studied by UV-VIS spectrophotometer with the wavelength in the range 300-1100 nm. The electrical properties of the as-deposited films and the films treated in CdCl_2 atmosphere were also investigated.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาของ รองศาสตราจารย์ งามนิตย์ วงษ์เจริญ รองศาสตราจารย์ ดร.จิตินัย แก้วแดง รองศาสตราจารย์ ดร.ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยสิงห์ ภูรักษาเกียรติ และอาจารย์ฉัตรพร พรหมรส ที่อำนวยความสะดวกในการใช้อุปกรณ์เครื่องมือและสร้างระบบระเหิดสารในระยะประชิดตลอดจนอุปการะทุนสนับสนุน และการให้ความรู้และคำแนะนำปรึกษาทางวิชาการที่ติดต่อมา รวมไปถึงการปลูกฝังสิ่งที่ตั้งใจให้ กับลูกศิษย์ทุกคน

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.วิสุทธิ์ จิตรุ่งเรือง หัวหน้าศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ และคุณเจริญชัย เหลืองอ่อน ผู้ช่วยวิจัยสังกัดศูนย์เทคโนโลยีโลหะ และวัสดุแห่งชาติ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์นำปลอดประจมาใช้ในการทดลอง

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ วิชาญ เตชิตธีระ หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ จัดสรรงบประมาณของภาควิชาเพื่อใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา ยูพาพิน ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความกรุณาเป็นประธานคณะกรรมการ สอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ วิทยาเขตนนทบุรี ที่สนับสนุนทุน การศึกษาต่อ

ขอขอบคุณ คุณปกรณ์ สิทธิเขตรกรณ์ คุณจิตติกร จรรยาธรรม คุณประธาน ประจวบโชค คุณพีรพร สิริพุทธไชรธรรม นักศึกษาปริญญาโทห้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุโฟโตนิกส์ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ให้ความช่วยเหลือด้วยดีตลอดมา

ขอขอบคุณ คุณเสาวลักษณ์ หงษ์สำเร็จ ภรรยาของข้าพเจ้าที่คอยเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา ขอขอบคุณ ครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดวิชาความรู้และประสบการณ์ให้แก่ข้าพเจ้า สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อโท หาญวังม่วง คุณแม่ยุ่น หาญวังม่วง คุณพ่อปราโมทย์ หงษ์สำเร็จ คุณแม่สมจิตต์ หงษ์สำเร็จ คุณสมชาย หาญวังม่วง คุณวิญญู เหมสุวรรณ และญาติ ทุกท่านที่ให้ความสนับสนุนและส่งเสริมในการศึกษาทุกระดับชั้นด้วยดีมาตลอด อีกทั้งคอยเป็นกำลังใจพร้อมทั้งให้คำปรึกษาและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์เสมอมา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	XII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 วัตถุประสงค์ของแจ้งสารกิ่งตัวนำ.....	5
2.2 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ.....	5
2.3 การระบุตำแหน่งของทิศทางและชื่อระนาบของผลึก.....	8
2.3.1 การระบุตำแหน่ง.....	8
2.3.2 การระบุทิศทาง.....	8
2.3.3 การระบุชื่อระนาบ.....	8
2.4 โครงสร้างผลึกของสารประกอบที่เกิดจากอะตอมของธาตุกลุ่ม II และกลุ่ม VI....	10
2.4.1 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์.....	10
2.4.2 โครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซต์.....	11
2.5 ผลึกจริง.....	12
2.5.1 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบศูนย์มิติหรือแบบจุด.....	12
2.5.2 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบหนึ่งมิติหรือแบบเส้น.....	14
2.5.3 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบสองมิติหรือแบบระนาบ.....	15
2.5.3.1 เกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน.....	15
2.5.3.2 ทวินและขอบเขตรอยต่อของทวินหรือระนาบของทวิน.....	16

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.5.3.3 การจัดเรียงระนาบผิวดำดับ.....	16
2.6 พันระเคมี.....	17
2.7 ผลึกแคดเมียมเทลลูไรด์.....	21
2.8 การระเหิดในระยะประชิด.....	22
2.9 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....	24
2.10 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	27
2.11 สมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ.....	32
2.11.1 ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงาน.....	32
2.11.2 การส่งผ่านแสง.....	35
2.11.3 การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ.....	37
2.11.4 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง.....	37
2.12 สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์.....	41
2.13 สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ.....	41
2.13.1 สมบัติการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ.....	41
2.13.1.1 สารกึ่งตัวนำประเภทอินทรินซิกที่อุณหภูมิ 0 K.....	43
2.13.1.2 สารกึ่งตัวนำที่ประเภทเอ็กซ์ทรินซิก.....	45
2.14 สภาพนำไฟฟ้า.....	49
2.14.1 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า.....	50
2.14.1.1 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง.....	50
2.14.1.2 การวัดความต้านทานจำเพาะ โดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น.....	51
2.14.1.3 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสี่ขั้วเชิงเส้น.....	52
2.14.2 ทฤษฎีการนำไฟฟ้าในช่วงอุณหภูมิต่างๆ.....	53
2.15 ระดับพลังงานแบบต่าง ๆ ที่ปรากฏในผลึก CdTe และ CdZnTe.....	54
2.16 ส่วนหางของแถบพลังงาน.....	57

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่3 การดำเนินการวิจัย.....	60
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัย.....	60
3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เพื่อใช้เตรียมฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์โดยวิธีการระเหิดสาร ในระยะประชิด.....	60
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ โดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด.....	60
3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการแอนนัลฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ ในบรรยากาศแคดเมียมคลอไรด์ในระบบสุญญากาศ.....	61
3.1.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการแอนนัลฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ ในบรรยากาศแคดเมียมคลอไรด์ในบรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน.....	61
3.1.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการแอนนัลฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ในอากาศ.....	61
3.1.6 อุปกรณ์ที่ใช้ในการแอนนัลฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ ในบรรยากาศแคดเมียมคลอไรด์ในระบบระเหิดสารในระยะประชิด.....	61
3.1.7 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค.....	62
3.1.8 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค.....	62
3.1.9 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางแสง.....	62
3.1.10 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า.....	62
3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด....	63
3.2.1 การเตรียมและการทำความสะอาดแผ่นกระจกสไลด์เพื่อเป็นฐานรองรับ.....	63
3.2.2 การเตรียมและการทำความสะอาดระบบระเหิดสารในระยะประชิด.....	63
3.2.3 การเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด.....	64
3.2.4 การแอนนัลฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ในบรรยากาศแคดเมียมคลอไรด์ ในระบบสุญญากาศ.....	65
3.2.5 การแอนนัลฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ในบรรยากาศแคดเมียมคลอไรด์ ในบรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน.....	66
3.2.6 การแอนนัลฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ในอากาศ.....	67

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.2.7 การแอนนีสฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ในบรรยากาศแคดเมียมคลอไรด์ ในระบบระเหิด สารในระยะประชิด.....	67
3.3 การศึกษาสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมโดย วิธีระเหิดสาร ในระยะประชิด.....	67
3.3.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค.....	67
3.3.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค.....	68
3.3.3 การศึกษาสมบัติทางแสง.....	68
3.3.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า.....	68
บทที่4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล.....	69
4.1 ฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด โดยให้ อุณหภูมิกับฐานรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน.....	69
4.2 ผลการศึกษาสมบัติฟิสิกส์พื้นฐานของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมได้ โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด.....	71
4.2.1 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์.....	71
4.2.2 ผลการศึกษาจากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์.....	82
4.2.3 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์.....	97
4.2.4 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์.....	110
บทที่5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	138
เอกสารอ้างอิง.....	144
ภาคผนวก.....	147
ประวัติผู้เขียน.....	150

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงพารามิเตอร์ของหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ.....	6
2.2 แสดงระบบผลึกทั้งเจ็ดระบบในระบบสามมิติ.....	7
2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีมิลเลอร์และจุดตัดแกนผลึก.....	9
2.4 แสดงการกระจายประจุและความเป็นพันธะไอออนิกของสารประกอบหมู่ $A^II B^VI$	18
2.5 แสดงการจัดเรียงอิเล็กตรอนในอะตอมอิสระของธาตุที่มีอะตอมของธาตุสังกะสี อะตอมของธาตุเทลลูเรียมและอะตอมของธาตุซีลีเนียมเป็นองค์ประกอบ.....	18
2.6 แสดงขนาดรัศมีของพันธะไอออนิกของแต่ละธาตุ.....	19
4.1 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ที่ได้จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดในระยะประชิด.....	109
4.2 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ที่ได้จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนัลในบรรยากาศของแคดเมียมคลอไรด์ในบรรยากาศต่างๆ.....	109
4.3 แสดงค่าความชันที่ได้จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด.....	110
4.4 แสดงค่าความชันที่ได้จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนัล ในบรรยากาศของแคดเมียมคลอไรด์ในบรรยากาศต่างๆ.....	110
4.5 แสดงค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสาร ในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ $550^\circ C$ และให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับ ที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับ ที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที.....	119
4.6 แสดงค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสาร ในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ $550^\circ C$ และให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับ ที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับ ที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที.....	121
4.7 แสดงค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสาร ในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ $550^\circ C$ และให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับ ที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับ ที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที.....	123

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.8 แสดงค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) ของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนیلในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10 นาทีที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400°C โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที.....	125
4.9 แสดงค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) ของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนیلในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10 นาทีที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400°C โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที.....	127
4.10 แสดงค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) ของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนیلในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10 นาทีที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400°C โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที.....	129
4.11 แสดงส่วนหางของแถบพลังงานที่คำนวณจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C และให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที.....	131
4.12 แสดงส่วนหางของแถบพลังงานที่คำนวณจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C และให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที.....	131

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.13 แสดงส่วนหางของแถบพลังงาน ที่คำนวณจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที.....	132
4.14 แสดงส่วนหางของแถบพลังงาน ที่คำนวณจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนัลในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 10 นาที ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400°C โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที.....	132
4.15 แสดงส่วนหางของแถบพลังงาน ที่คำนวณจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนัลในบรรยากาศแตกต่างกัน ที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 10 นาที ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400 °C โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที.....	133
4.16 แสดงส่วนหางของแถบพลังงาน ที่คำนวณจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนัลในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 10 นาที ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400 °C โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที.....	133
4.17 แสดงส่วนหางของแถบพลังงาน ที่คำนวณจากขนาดของเกรนของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C และให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที.....	134

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.18 แสดงส่วนหางของแถบพลังงาน ที่คำนวณจากขนาดของเกรนของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และให้อุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที.....	134
4.19 แสดงส่วนหางของแถบพลังงาน ที่คำนวณจากขนาดของเกรนของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และให้อุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที.....	135
4.20 แสดงส่วนหางของแถบพลังงาน ที่คำนวณจากขนาดของเกรนของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนیلในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 10 นาทีที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400 °C โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที.....	135
4.21 แสดงส่วนหางของแถบพลังงานที่คำนวณจากขนาดของเกรนของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนیلในบรรยากาศแตกต่างกัน ที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 10 นาทีที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400 °C โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที.....	136
4.22 แสดงส่วนหางของแถบพลังงานที่คำนวณจากขนาดของเกรนของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนیلในบรรยากาศแตกต่างกัน ที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 10 นาทีที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400 °C โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที.....	136

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงสภาพนำไฟฟ้าและสภาพต้านทานไฟฟ้าของฉนวน สารกึ่งตัวนำ และตัวนำ.....	5
2.2 แสดงหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ.....	6
2.3 แสดงการบอกชื่อระนาบต่างๆของผลึก.....	9
2.4 แสดงพันธะที่หน้าหรือพันธะเดคระฮ์ดรอน.....	10
2.5 แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์.....	11
2.6 แสดง โครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซต์.....	11
2.7 แสดงความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบศูนย์มิติหรือแบบจุด	
ก. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบแวนแวนซี.....	13
ข. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบเซลล์ฟีนเตอร์สติเชี่ยล.....	13
ค. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบอินเตอสติเชี่ยลิมเพียวริตี้อะตอม.....	13
ง. แสดงความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบซัพสติติวชันนัลอิมเพียวริตี้อะตอม.....	13
2.8 แสดงการเกิดความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบขอบคดกึ่งและความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบเฟรนเคิล.....	14
2.9 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบดิสโลเคชันแบบขอบ.....	15
2.10 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบดิสโลเคชันแบบสกรู.....	15
2.11 แสดงความไม่สมบูรณ์ของผลึกชนิดเกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน.....	16
2.12 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบทวินและระนาบของทวิน.....	16
2.13 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการจัดเรียงระนาบของอะตอมผิดลำดับ.....	17
2.14 แสดงสมมูลความดันไอรวม.....	21
2.15 แสดง โครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์ของผลึกแคดเมียมเทลลูไรด์.....	22
2.16 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากระนาบผลึก.....	25
2.17 แสดงวิธีการหา $\beta_{2\theta}$ เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์.....	27
2.18 อันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับผิวของสารตัวอย่าง.....	27
2.19 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	28

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.20 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานอย่างง่ายของ	
ก. ฉนวน.....	33
ข. สารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์.....	33
ค. สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น.....	33
ง. สารกึ่งตัวนำชนิดพี.....	33
จ. โลหะ.....	33
ฉ. สารกึ่งโลหะ.....	33
2.21 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานและการย้ายสถานะของพลังงานอิเล็กตรอนของ สารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสมบูรณ์ ($T = 0\text{ K}$)	
ก. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง.....	35
ข. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง.....	35
2.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงาน โฟตอนของ สารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสมบูรณ์ ($T = 0\text{ K}$)	
ก. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง.....	35
ข. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงในกรณีที่เกิดกระบวนการสร้างโฟนอน.....	35
2.23 แสดงแผนภาพเมื่อแสงตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบาง.....	36
2.24 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ การดูดกลืนแสงกับพลังงาน โฟตอน.....	38
2.25 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและค่าพลังงาน โฟตอน หรือค่าความยาวคลื่นของพลังงาน โฟตอนของสารกึ่งตัวนำ.....	40
2.26 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของแคดเมียมเทลลูไรด์.....	40
2.27 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานความหนาแน่นสถานะฟังก์ชันการกระจาย แบบเฟอร์มี-ดิแรกและความหนาแน่นพาหะของ	
ก. สารกึ่งตัวนำประเภทอินทรีนซิก.....	42
ข. สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น.....	42
ค. สารกึ่งตัวนำชนิดพี.....	42
2.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น กับส่วนกลับของอุณหภูมิ.....	46

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.29 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง.....	50
2.30 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น.....	51
2.31 แสดงการวัดความต้านทานแผ่น โดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น	
ก. การวัดแบบสองขั้วโดยมีการเลื่อนระยะที่ขั้วหนึ่ง.....	52
ข. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับระยะทางที่ได้จากการวัด ชนิดเลื่อนขั้วไฟฟ้า.....	52
2.32 แสดงการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสี่ขั้วเชิงเส้น.....	52
2.33 แสดงระดับพลังงานต่างๆที่ปรากฏในผลึกของ CdTe และ CdZnTe.....	56
2.34 แสดงส่วนหางของแถบพลังงานซึ่งมีทั้งส่วนหางของแถบวาเลนซ์และ ส่วนหางของแถบนำ.....	57
2.35 แสดงกราฟเส้นตรงของความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \alpha$ กับพลังงาน (E) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยมีจุดคู่รวมที่ (E_0, α_0) ของผลึก InSe : Ho.....	58
3.1 แสดงระบบบรรทัดสารในระยะประชิด.....	65
3.2 แสดงการตั้งโปรแกรมควบคุมอุณหภูมิในการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์.....	65
3.3 แสดงระบบเตาแอนนีส.....	68
4.1 แสดงฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด ที่มีระยะห่างระหว่าง สารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกันเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C อุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 375 °C และใช้เวลาในการเคลือบ ฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที.....	70
4.2 แสดงฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด ที่มีระยะห่างระหว่าง สารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกันเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C อุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400 °C และใช้เวลาในการเคลือบ ฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที.....	70
4.3 แสดงฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด ที่มีระยะห่างระหว่าง สารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกันเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C อุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 425 °C และใช้เวลาในการเคลือบ ฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที.....	70

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 แสดงฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด ที่มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกันเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C อุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 450°C และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที.....	71
4.5 แสดงฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด ที่มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกันเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C อุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 475°C และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที.....	71
4.6 แสดงพิกความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด เมื่อให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยที่กำหนดให้มี ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที.....	72
4.7 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบผลึก (hkl) ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด เมื่อให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที.....	73
4.8 แสดงขนาดของเกรนที่คำนวณจาก FWHM ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด เมื่อให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที.....	73
4.9 แสดงพิกความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด เมื่อให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยที่กำหนดให้มี ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที.....	74
4.10 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบผลึก (hkl) ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด เมื่อให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที.....	74

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 แสดงขนาดของเกรนที่คำนวณจาก FWHM ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด เมื่อให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยที่ กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที.....	75
4.12 แสดงพิกัดความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด เมื่อให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยที่กำหนดให้มี ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที.....	75
4.13 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การจذبรังสี (hkl) ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด เมื่อให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที.....	76
4.14 แสดงขนาดของเกรนที่คำนวณจาก FWHM ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด เมื่อให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยที่ กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที.....	76
4.15 แสดงพิกัดความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนีสลในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 10 นาทีที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400 °C โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที.....	77
4.16 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การจذبรังสี (hkl) ของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนีสลในบรรยากาศแตกต่างกัน ที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 10 นาทีที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400 °C โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที.....	77

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่

หน้า

- 4.17 แสดงขนาดของเกรนที่คำนวณจาก FWHM ของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนัลในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 10 นาทีที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400 °C โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... 78
- 4.18 แสดงพิกัดความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนัลในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 10 นาทีที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400 °C โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... 78
- 4.19 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบผลึก (hkl) ของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนัลในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 10 นาทีที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400 °C โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... 79
- 4.20 แสดงขนาดของเกรนที่คำนวณจาก FWHM ของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนัลในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 10 นาทีที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400 °C โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... 79
- 4.21 แสดงพิกัดความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนัลในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 10 นาทีที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400 °C โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... 80

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.22	กราฟแสดงการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบผลึก (hkl) ของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนिलในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 10 นาทีที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400 °C โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... 80
4.23	แสดงขนาดของเกรนที่คำนวณจาก FWHM ของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนिलในบรรยากาศแตกต่างกันที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400 °C โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... 81
4.24	แสดงค่าคงตัวของโครงสร้างของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดที่มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกันเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C อุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 375 - 475 °C และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... 81
4.25	แสดงค่าคงตัวของโครงสร้างของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนिलในบรรยากาศแตกต่างกันที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400 °C โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... 82
4.26	แสดงภาพถ่าย SEM ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะ ประชิด เมื่อให้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกันโดยให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และอุณหภูมิของฐานรองรับเท่ากับ 375 °C และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... 83

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.34	แสดงภาพถ่าย SEM ที่บริเวณภาคตัดขวางของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด เมื่อให้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C และอุณหภูมิของฐานรองรับเท่ากับ 400°C และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 2 นาที.....90
4.35	แสดงภาพถ่าย SEM ที่บริเวณภาคตัดขวางของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C และอุณหภูมิของฐานรองรับเท่ากับ 400°C และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที.....91
4.36	แสดงภาพถ่าย SEM ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบาง CdTe ที่แอนนัลในบรรยากาศของแคดเมียมคลอไรด์ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10 นาทีภายในระบบระเหิดสารในระยะประชิดที่มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน..... 93
4.37	แสดงภาพถ่าย SEM ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบาง CdTe ที่แอนนัลในบรรยากาศของแคดเมียมคลอไรด์ภายใต้ระบบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10 นาทีภายในระบบระเหิดสารในระยะประชิด ที่มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน..... 94
4.38	แสดงภาพถ่าย SEM ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบาง CdTe ที่แอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10 นาทีภายในระบบระเหิดสารในระยะประชิดที่มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน.....95
4.39	แสดงภาพถ่าย SEM ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบาง CdTe ที่แอนนัลในบรรยากาศของแคดเมียมคลอไรด์ที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10 นาทีภายในระบบระเหิดสารในระยะประชิดที่มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน..... 96
4.40	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C และให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... 97

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.41 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C และให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที.....	98
4.42 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C และให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที.....	99
4.43 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C และให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที.....	100
4.44 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C และให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที.....	101
4.45 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C และให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที.....	102

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.46	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางCdTeที่ผ่านการแอนนिलในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10 นาทีโดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... 103
4.47	แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนिलในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10 นาทีโดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... 104
4.48	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนिलในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10 นาทีโดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... 105
4.49	แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนिलในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10 นาทีโดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... 106
4.50	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนिलในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10 นาทีโดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที 107
4.51	แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ฟิล์มบาง CdTeที่ผ่านการแอนนिलในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 10 นาทีโดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... 108

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.52	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแผ่นโดยไม่ฉายแสงกับอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะ ประชิด เมื่อให้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกันและใช้ เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... 111
4.53	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแผ่นทั้งฉายแสงและไม่ฉายแสงกับการแอนนีส ในบรรยากาศต่างๆที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10 นาทีของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดย วิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจก สไลด์แตกต่างกันและใช้ เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... 112
4.54	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{R_0}{R}\right)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดย วิธีระเหิดสารในระยะประชิด เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C และ ให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกันโดยกำหนดให้มีระยะห่าง ระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาใน การเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... 113
4.55	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{R_0}{R}\right)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดย วิธีระเหิดสารในระยะประชิด เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C และ ให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกันโดยกำหนดให้มีระยะห่าง ระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm และใช้เวลาใน การเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... 114
4.56	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{R_0}{R}\right)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดย วิธีระเหิดสารในระยะประชิด เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C และ ให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกันโดยกำหนดให้มีระยะห่าง ระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm และใช้เวลาใน การเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที..... 115

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.57 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{R_0}{R}\right)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนัลในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 10 นาที โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที.....	116
4.58 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{R_0}{R}\right)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนัลในบรรยากาศแตกต่างกัน ที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 10 นาทีโดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที.....	117
4.59 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{R_0}{R}\right)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนัลในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 10 นาทีโดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที.....	118
4.60 แสดงการหาส่วนหางของแถบพลังงานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\alpha$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกันโดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที.....	137

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ในปัจจุบันอุปกรณ์เครื่องมือต่างๆที่อำนวยความสะดวกสบายความบันเทิงให้กับมนุษย์เช่น เครื่องมือสื่อสาร โทรคมนาคม เครื่องมือทางการแพทย์ เครื่องใช้ในครัวเรือน เครื่องใช้ในสำนักงานมักจำเป็นต้องใช้พลังงานไฟฟ้าที่มีแหล่งกำเนิดมาจากพลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิง เช่น น้ำมัน ถ่านหิน และแก๊สธรรมชาติเป็นต้น อย่างไรก็ตามเชื้อเพลิงเหล่านี้ล้วนเป็นพลังงานสิ้นเปลืองอันจะหมดสิ้นไปในเวลาไม่นานเมื่อเทียบกับอายุขัยของโลกที่เหลืออยู่และก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของโลกในแง่ของปรากฏการณ์เรือนกระจก (ทำให้โลกร้อนขึ้น) ดังนั้นจึงเริ่มพิจารณาถึงแหล่งพลังงานอื่น ๆ ที่สะอาด (ไม่เป็นพิษกับสิ่งแวดล้อม) ที่สามารถนำมาทดแทนพลังงานเชื้อเพลิงในการผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ และ เป็นพลังงานใช้ไปได้ยาวนาน เช่น พลังงานลม พลังงานน้ำ (เช่นจากเขื่อน) พลังงานความร้อนใต้พิภพ พลังงานแสงอาทิตย์ และพลังที่ได้จากโรงงานไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ เป็นต้น

อย่างไรก็ตามสืบเนื่องจากความแปรปรวนของทั้งบรรยากาศโลกและตัวโลกเองทำให้การสร้างโรงไฟฟ้าจากพลังงานลม พลังงานน้ำ และพลังงานความร้อนใต้พิภพเองไม่สามารถกระทำได้โดยสะดวก เช่น การเปลี่ยนทิศของลมมรสุมเนื่องจากอุณหภูมิโลกที่เปลี่ยนไปและยังต้องเลือกบริเวณที่มีปริมาณลมเพียงพอต่อการผลิตพลังงานกระแสไฟฟ้า หรือการเลื่อนของเปลือกโลกที่ก่อให้เกิดแผ่นดินไหวอันจะทำความเสียหายต่อเขื่อนผลิตไฟฟ้าและยังทำลายสมดุลธรรมชาติ ส่วนพลังงานความร้อนใต้พิภพเมื่อเทียบกับพลังงานอื่น ๆ จัดอยู่ในสเกลที่นำมาใช้งานได้น้อยมากและยังขึ้นกับสถานะภูมิประเทศเป็นหลัก ส่วนพลังงานจากโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ก็ยังมีค่าใช้จ่ายในการลงทุนในการก่อสร้างและถอดทิ้ง ทำลายความปลอดภัยสูงมาก และยังไม่สามารถสร้างความเชื่อมั่นในความปลอดภัย ที่ประชาชนทั่วไปยอมรับได้ ด้วยเหตุนี้พลังงานทดแทนที่จัดได้ว่าเป็นหัวใจสำคัญในทศวรรษนี้คือพลังงานแสงอาทิตย์เนื่องจากเป็นพลังงานที่สะอาด ไร้มลภาวะเป็นพิษใด ๆ สาดส่องไปทุกที่ และดวงอาทิตย์ยังอยู่กับมนุษย์ไปอีกนาน และอายุการใช้งานของเซลล์แสงอาทิตย์ยาวนานกว่า 20 ปี เมื่อเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายทั้งในด้านการลงทุน เพื่อให้ได้มาซึ่งพลังงาน โดยรวมถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้วยแล้ว จะเห็นได้ว่าต้นทุนพลังงานที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์มีราคาถูกกว่าแหล่งพลังงานประเภทอื่น เมื่อติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ในครั้งแรก ก็แทบจะไม่มีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นอีกต่อไป และประการสำคัญก็คือ พลังงานจากแสงอาทิตย์เป็นหนึ่งในพลังงานที่มีความยั่งยืน ไม่มีที่สิ้นสุด ปัจจุบันระบบพลังงานแสงอาทิตย์ถูกนำไปอย่างแพร่หลาย เช่น ผลิตไฟฟ้าเพื่อ

ใช้ในอาคาร, ระบบสูบน้ำ, ระบบแสงสว่าง, ระบบทำความร้อน, ระบบทำความเย็น, ประจุแบตเตอรี่ และขายคืนให้กับสายส่ง เป็นต้น[1]

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

วัสดุที่ได้รับความสนใจ และพัฒนาอย่างไม่หยุดยั้ง สำหรับการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ เช่น ผลึกเดี่ยวซิลิกอน (single crystalline silicon) อะมอร์ฟัสซิลิกอน (amorphous silicon) แคดเมียมเทลลูไรด์ (cadmium telluride) คอปเปอร์อินเดียมไดเซเลไนด์ (copper indium diselenide) และอื่นๆ การเลือกวัสดุสำหรับการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์นั้นขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพสูงสุดของวัสดุที่สามารถทำได้ ซึ่งวัสดุนั้นควรมีช่องว่างแถบพลังงานประมาณ 1.50 eV[2-3] ฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างแถบพลังงานแบบตรง (direct bandgap) เท่ากับ 1.50 eV[2-3] และมีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (absorption coefficient) สูงที่มีความหนาในระดับไมโครเมตรสามารถดูดกลืนแสงอาทิตย์ได้มากกว่า 90% ดังนั้นฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์จึงเป็นวัสดุที่น่าสนใจสำหรับการวิจัยพัฒนาเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์สามารถเตรียมได้หลากหลายวิธี วิธีที่น่าสนใจ คือวิธีระเหิดสารในระยะประชิด (close-spaced sublimation : CSS) ที่ความดันมีค่าประมาณ 2.0×10^{-2} มิลลิบาร์ เพราะมีอัตราการเคลือบต่ำทำให้ได้ขอบเขตของเกรน (grain boundary) ขนาดโคนนอกจากนี้ยังใช้ต้นทุนต่ำและได้ประสิทธิภาพสูงสุดถึง 16.5% [4]

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการปลูกฟิล์มบางและศึกษาสมบัติของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดในระยะประชิดเพื่อใช้เป็นชั้นดูดกลืนแสงในการประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งพบว่าการปลูกฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์โดยวิธีนี้มีผิวหน้าและขนาดของเกรนที่สม่ำเสมอ และในงานวิจัยนี้ได้ทำการปรับปรุงสมบัติทางไฟฟ้าโดยการแอนนัลฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ด้วยแคดเมียมคลอไรด์ (cadmium chloride : $CdCl_2$) ภายใต้ระบบสุญญากาศ ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน และภายในระบบระเหิดสารในระยะประชิด ตลอดจนทำการแอนนัลในอากาศ เพื่อที่จะนำกระบวนการเหล่านี้ไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 ศึกษาวิธีการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์บนฐานรองรับที่เป็นกระจกด้วยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดในระบบสุญญากาศ
- 1.2.2 ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์
- 1.2.3 ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
- 1.2.4 ศึกษาสมบัติการส่งผ่านทางแสงและหาค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์
- 1.2.5 ศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ด้วยวิธีสองขั้วเชิงเส้น
- 1.2.6 ศึกษาความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่ขึ้นกับอุณหภูมิ

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- 1.3.1 ทำการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์บนฐานรองรับที่เป็นกระจกด้วยวิธีระเหิดในระยะประชิดในระบบสุญญากาศ
- 1.3.2 นำฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์
- 1.3.3 นำฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
- 1.3.4 นำฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ไปศึกษาการส่งผ่านทางแสงและหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน
- 1.3.5 นำฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ไปศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีสองขั้วเชิงเส้น
- 1.3.6 นำฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ไปศึกษาความต้านทานไฟฟ้าที่ขึ้นกับอุณหภูมิ
- 1.3.7 นำฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ไปแอนนัลในบรรยากาศของแคดเมียมคลอไรด์ภายใต้ระบบสุญญากาศ ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน และภายในระบบระเหิดสารในระยะประชิดตลอดจนทำการแอนนัลในอากาศ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

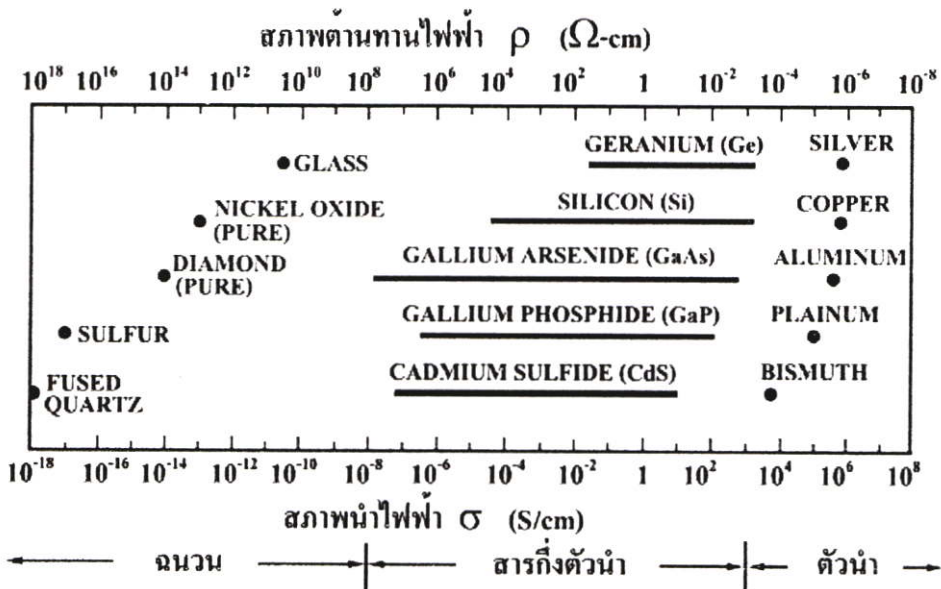
- 1.4.1 ทำให้ทราบถึงหลักการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด
- 1.4.2 ทำให้ทราบถึงสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ ได้แก่ โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค โครงสร้างผลึกเชิงมหภาค สมบัติทางแสงและสมบัติทางไฟฟ้า
- 1.4.3 ทำให้ได้ข้อมูลในการเตรียมและสมบัติทางฟิสิกส์บางประการที่สำคัญของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์และเพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์
- 1.4.4 นำข้อมูลที่ได้จากการวิจัย เป็นแนวทางในการพัฒนาการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่ออิวิวิพันธ์ (heterojunction) ของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ / แคดเมียมเทลลูไรด์ (CdS/CdTe) ต่อไป

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุของแข็งสารกึ่งตัวนำ [5-13]

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

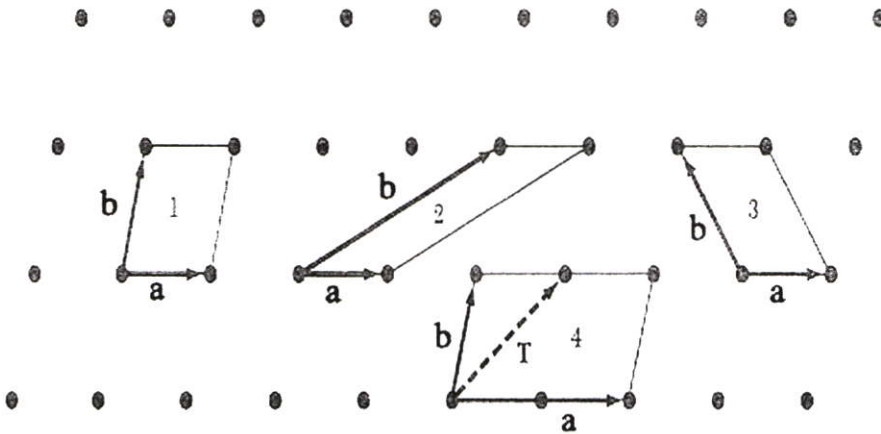


รูปที่ 2.1 แสดงสภาพนำไฟฟ้าและสภาพต้านทานไฟฟ้าของฉนวน สารกึ่งตัวนำ และตัวนำ

2.2 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ [5-13]

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

โครงสร้างได้แก่ เวกเตอร์ \vec{a} และ \vec{b} และ มุมผลึก γ ซึ่งเป็นมุมระหว่าง เวกเตอร์ทั้งสอง ทั้งนี้ชนิดของโครงสร้างที่แตกต่างกันที่เป็นไปได้มีเพียงห้าแบบดังตารางที่ 2.1



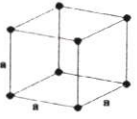
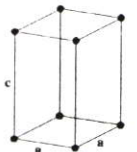
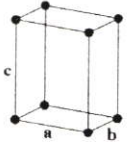
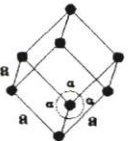
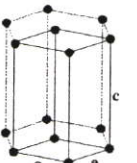
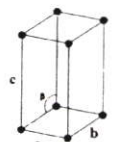
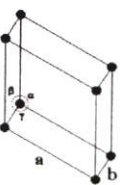
รูปที่ 2.2 แสดงหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ

ตารางที่ 2.1 แสดงพารามิเตอร์ของหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ

ชนิดของ โครงผลึก	ค่าคงตัวของ 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)	$a \neq b$	ไม่มีข้อ กำหนด

ในระบบสามมิติ ค่าคงตัวของโครงสร้างได้แก่ ขนาดของเวกเตอร์ \vec{a} , \vec{b} และ \vec{c} และ มุมผลึก α , β และ γ ซึ่งเป็นมุมระหว่างเวกเตอร์ต่างๆ ทั้งนี้สามารถจัดแบ่งรูปแบบของโครงสร้างขึ้นมา โดยสามารถแบ่งออกได้เป็นสิบสี่แบบในระบบสามมิติ ซึ่งจัดได้เป็น 7 ระบบดังแสดงในตารางที่

ตารางที่ 2.2 แสดงระบบผลึกทั้งเจ็ดระบบในระบบสามมิติ

ระบบผลึก (System)	ค่าคงตัวของโครงผลึก และมุมผลึก	รูปทรงเรขาคณิต ของหน่วยเซลล์
คิวบิก (cubic)	$a = b = c,$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
เตตระโกนัล (tetragonal)	$a = b \neq c,$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
ออร์โธโรมบิก (orthorhombic)	$a \neq b \neq c,$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
รอมโบฮีดรัล (rhombohedral)	$a = b = c,$ $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	
เฮกซะโกนัล (hexagonal)	$a = b \neq c,$ $\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$	
โมนอคลินิก (monoclinic)	$a \neq b \neq c,$ $\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$	
ไตรคลินิก (triclinic)	$a \neq b \neq c,$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	

2.3 การระบุตำแหน่งของทิศทางและชื่อระนาบของผลึก [5-13]

เนื่องจากสมบัติทางฟิสิกส์ของผลึกขึ้นกับตำแหน่งของทิศทางและระนาบของผลึก ดังนั้นจึงต้องระบุแน่นอนว่ากำลังศึกษาลักษณะส่วนใดของผลึกอยู่ การระบุลักษณะที่ดังกล่าวจะบอกถึงตำแหน่งของทิศทางและระนาบของผลึกที่กำลังศึกษาอยู่นั้น มีหลักเกณฑ์พื้นฐานดังนี้

2.3.1 การระบุตำแหน่ง

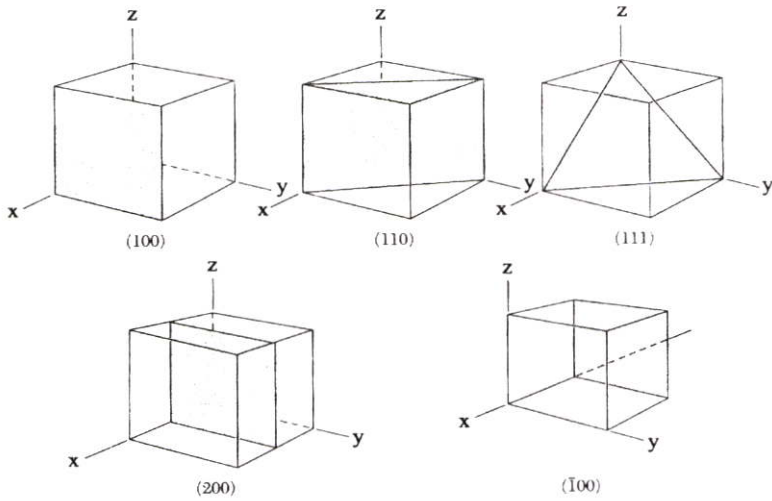
ในกรณีทั่วไปจะเขียนเป็น (x,y,z) โดยให้สังเกตเครื่องหมาย “,” ซึ่งคั่นอยู่ระหว่างค่าแต่ละค่า ตัวอย่างเช่นจุด $(1,2,3)$ หมายความว่า เป็นตำแหน่งอยู่ที่พิกัด $x=1, y=2$ และ $z=3$

2.3.2 การระบุทิศทาง

ในกรณีทั่วไปจะเขียนเป็น $[u\ v\ w]$ โดยให้สังเกตว่าใช้วงเล็บก้ามปู และไม่มีเครื่องหมาย “,” คั่นอยู่ระหว่างค่าแต่ละค่า ถ้าเป็นทิศทางที่เป็นลบก็จะใส่เครื่องหมาย “-” หรือ บาร์(bar) ไว้บนตัวเลขนั้นๆ เช่น ทิศทาง $[\bar{2}\bar{1}]$ 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 เช่น ระนาบ (010) จะตัดแกนผลึกที่ $(\infty,1,\infty)$ และระนาบ $(\bar{1}11)$ จะตัดแกนผลึกที่ $(-1,1,1)$ ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 2.3 และตารางที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงการบอกชื่อระนาบต่างๆของผลึก

ตารางที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีมิลเลอร์และจุดตัดแกนผลึก

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 (hki) แต่เนื่องจากมีสมบัติความสมมาตรของแกนผลึกจึงกำหนดให้ดัชนีมิลเลอร์ตัวที่สาม (หรือ i) ซึ่งเพิ่มเข้ามานั้นจะมีความสัมพันธ์กับดัชนีมิลเลอร์สองตัวแรก (h และ k) ดังนี้

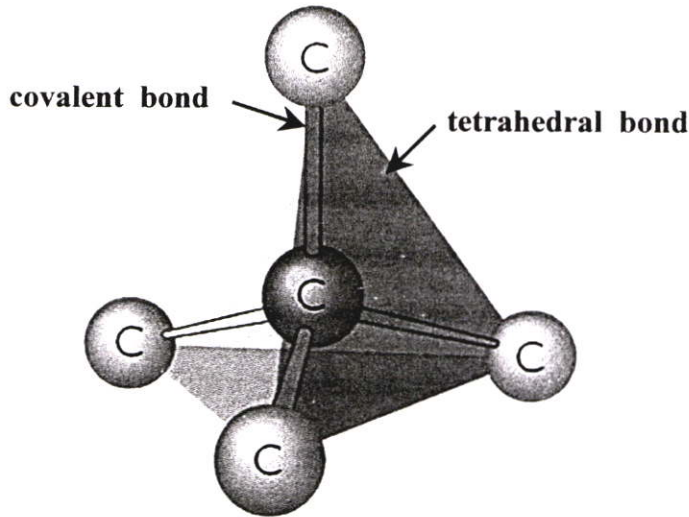
$$i = -(h + k) \quad (2.1)$$

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]

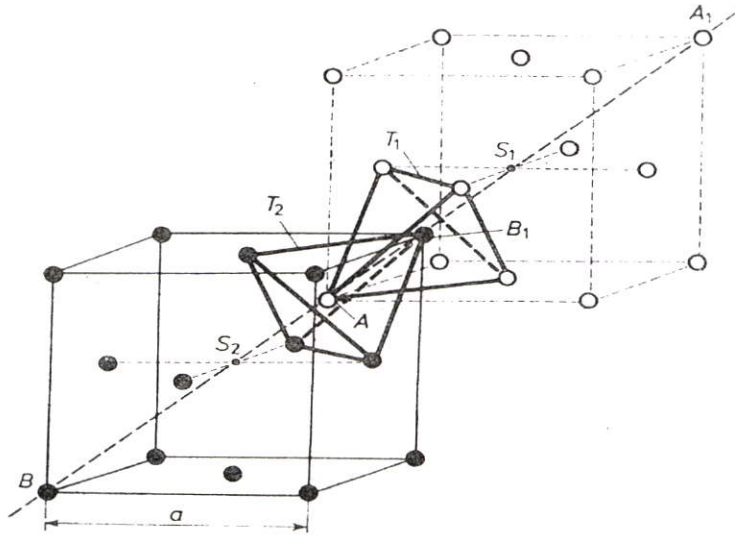
ผลึกของสารประกอบที่เกิดจากการสร้างพันธะเคมีระหว่างอะตอมของธาตุกลุ่ม II (อะตอม A) และกลุ่ม VI (อะตอม B) ซึ่งมีอิเล็กตรอนวาเลนซ์ต่ออะตอมเท่ากับ 4 ในโครงผลึกแต่ละอะตอม A หรืออะตอม B จะมีอะตอม B หรืออะตอม A ที่อยู่ใกล้เคียงที่สุดล้อมรอบอยู่ 4 อะตอม ซึ่งมีการสร้างพันธะเคมีระหว่างอะตอมเป็นแบบพันธะโควาเลนต์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



รูปที่ 2.4 แสดงพันธะสี่หน้าหรือพันธะเตตระฮีดรัล

2.4.1 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ (zinc blende structure)

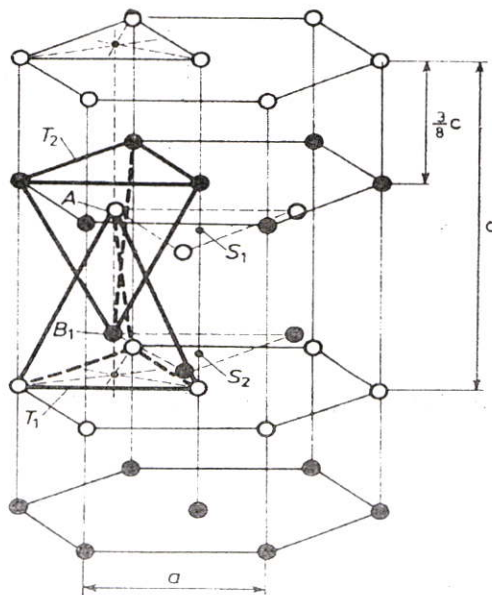
โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ (zinc blende structure) เกิดจากการซ้อนเหลื่อมกันของโครงสร้างผลึกแบบเฟสเซนเตอร์คิวบิก (face centered cubic : fcc) 2 หน่วยเซลล์ ซึ่งมีค่าคงตัวของโครงผลึกเท่ากับ a และมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ s_1 (อะตอม A : สีขาว) และมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ s_2 (อะตอม B : สีดำ) และหน่วยเซลล์จัดเรียงไปตามแนว A_1B_1 ดังนั้นจะได้ระยะ $AB = \frac{1}{4}AA_1 = \frac{1}{4}BB_1$ ฐานของพันธะสี่หน้า T_1 และ T_2 ขนานกันและหมุนทำมุม 60 องศารอบแกน A_1B_1 ระยะระหว่างอะตอมกับอะตอมเพื่อนบ้านที่ใกล้ที่สุด (nearest neighbors) มีค่าเท่ากับ $d_{AB} = \frac{\sqrt{3}}{4}a$ ซึ่งลักษณะโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์แสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์

2.4.2 โครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซด์ (wurtzite structure)

โครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซด์เกิดจากการซ้อนเหลื่อมกันของโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล 2 หน่วยเซลล์ ซึ่งมีค่าคงตัวของโครงผลึกเท่ากับ a และ c มีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ s_1 และ s_2 หน่วยเซลล์จัดเรียงไปในแนวแกน c ระยะระหว่างอะตอมกับอะตอมเพื่อนบ้านที่ใกล้ที่สุดมีค่าเท่ากับ $d_{AB} = \frac{3}{8}c = \sqrt{\frac{3}{8}}a$ ฐานพีระมิดสี่หน้า T_1 และ T_2 ขนานกันและระยะระหว่างฐานมีค่าตามแนวแกน c ซึ่งลักษณะโครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซด์แสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซด์

2.5 ผลึกจริง [9-13]

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

2.5.1 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบศูนย์มิติหรือแบบจุด

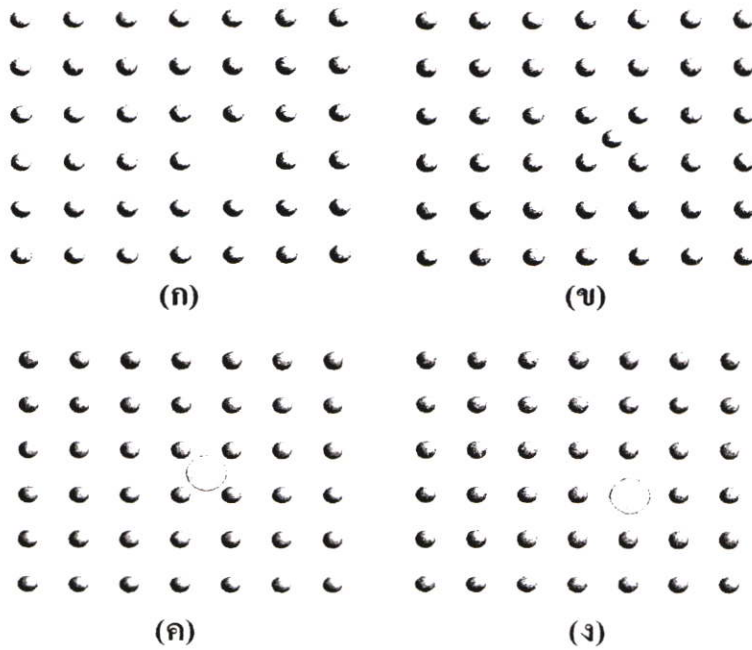
ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดสามารถเกิดได้หลายลักษณะซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.7 ดังนี้

ก. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบช่องว่างหรือแวนเคนซี(vacancy defect) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการที่อะตอมหลุดหายไปจากตำแหน่งที่ควรจะมีอยู่ใน โครงผลึกจึงทำให้เกิดเป็นช่องว่างเกิดขึ้น

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

ค. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบอินเตอร์สติเชียลอิมพิวริตีอะตอม(interstitial impurity atom) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุด ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการที่มีอะตอมของธาตุชนิดอื่นหรืออะตอมของสารเจือ (impurity atom)เข้าไปแทรกตัวอยู่ในตำแหน่งที่เป็นที่ว่างระหว่างอะตอมของ โครงผลึกเจ้าของบ้าน

ง. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบซับสติติวชันนัลอิมพิวริตีอะตอม (substitutional impurity-atom) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการที่มีอะตอมของธาตุชนิดอื่น เข้าไปแทนที่ตำแหน่งของอะตอมเดิม



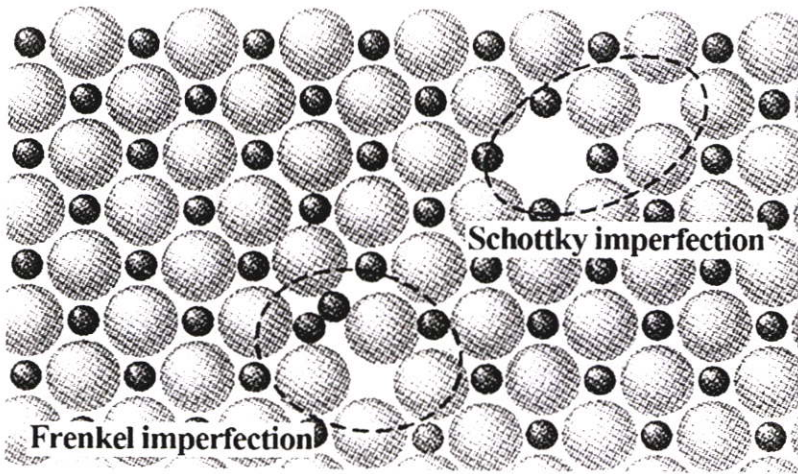
○ อะตอมของสารเจือ ◐ อะตอมของธาตุที่เป็นเจ้าของบ้าน
รูปที่ 2.7 แสดงความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบศูนย์มิติหรือแบบจุด

- ก. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบแวแคนซี
- ข. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบเซตฟีอินเตอร์สติเชียล
- ค. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบอินเตอสติเชียลอิมเพียวริตีอะตอม
- ง. แสดงความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบซัพสติติวชันนัลอิมเพียวริตีอะตอม

นอกจากที่กล่าวข้างต้นแล้ว ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดยังอาจเกิดขึ้นได้ใน โครงสร้างผลึกแบบไอออนิก ซึ่งพบว่าเกิดได้ 2 ลักษณะ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ดังนี้

ก. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบชอตต์กี (Schottky imperfection) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดที่เกิดขึ้นเนื่องจากมีไอออนที่อยู่ภายใน โครงผลึกเคลื่อนย้ายไปยังบริเวณผิวหน้าของโครงผลึกหรืออาจเกิดขึ้นเนื่องจากทั้งไอออนบวกและไอออนลบหลุดออกไปจากโครงผลึกเพื่อรักษาประจุของโครงผลึกให้เป็นกลางอยู่เสมอ ทำให้เกิดแวแคนซี 2 ช่องของไอออนบวก – ไอออนลบ (cation–anion divacancy)

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



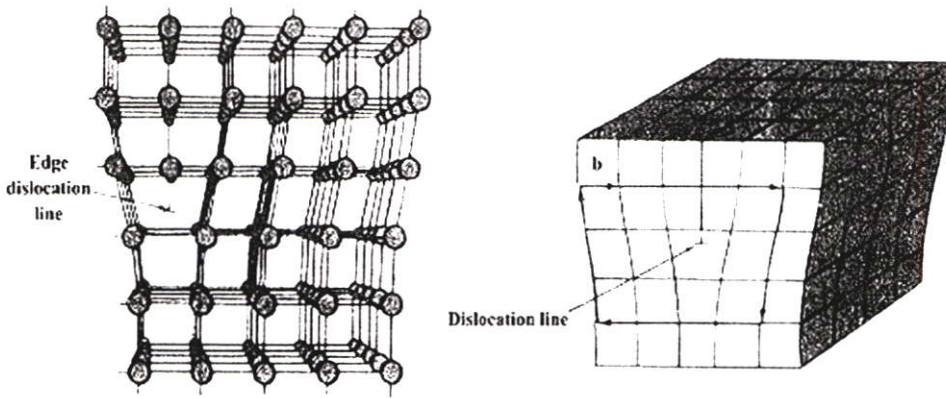
รูปที่ 2.8 แสดงการเกิดความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบชอตต์กีและความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบเฟรนเคิล

2.5.2 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบหนึ่งมิติหรือแบบเส้น

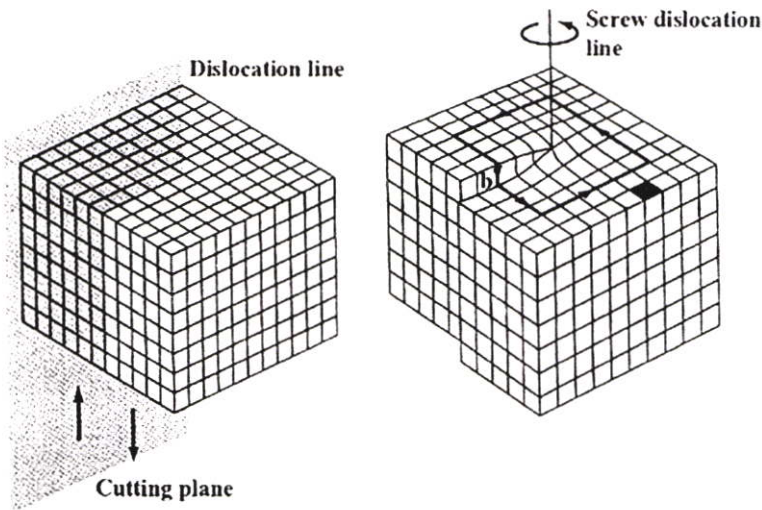
เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกในลักษณะเป็นเส้น (line imperfection) หรือสามารถเรียกได้อีกอย่างหนึ่งคือดิสโลเคชัน (dislocation) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกที่เกิดจากอะตอมของโครงผลึก ณ จุดต่างๆ อยู่ในแนวหรือแถวเดียวกันไม่อยู่ตามตำแหน่งที่ถูกต้อง ทำให้เกิดการบิดเบี้ยวของโครงผลึก (distortion) ขึ้น โดยมี 2 ลักษณะดังนี้

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

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



รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบดิสโลเคชันแบบขอบ



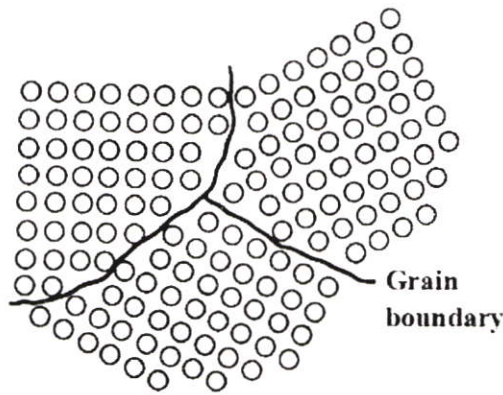
รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบดิสโลเคชันแบบสกรู

2.5.3 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบสองมิติหรือแบบระนาบ

ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบสองมิติหรือแบบระนาบนี้เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกบนพื้นผิว (surface- imperfection) สามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ

2.5.3.1 เกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน (grain and grain boundary)

เกรนคือบริเวณเล็กๆที่โครงสร้างหรือหน่วยเซลล์มีการจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกันและตรงบริเวณขอบเขตรอยต่อระหว่างบริเวณที่โครงสร้างมีการจัดเรียงตัวในทิศทางแตกต่างกันนั้นเรียกว่าขอบเขตรอยต่อของเกรนดังแสดงในรูปที่ 2.11 โดยที่ผลึกที่มีมากกว่าหนึ่งเกรนนั้นเรียกว่า ผลึกพหุพันธ์ (polycrystallines) ส่วนผลึกที่มีเพียงเกรนเดียวนั้นเรียกว่า ผลึกเอกพันธ์หรือผลึกเดี่ยว (single crystal)

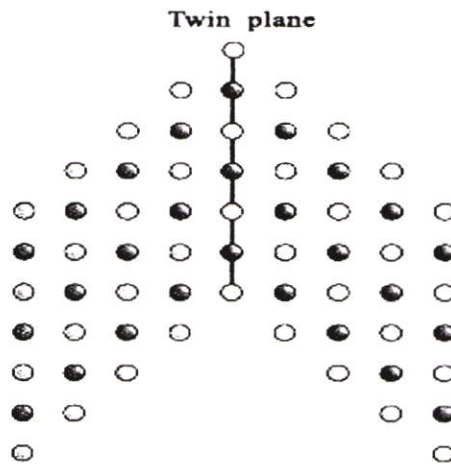


รูปที่ 2.11 แสดงความไม่สมบูรณ์ของผลึกชนิดเกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน

2.5.3.2 ทวินและขอบเขตรอยต่อของทวินหรือระนาบของทวิน

(twin and twin boundary or twinplane)

ทวินคือบริเวณที่โครงสร้างหรือหน่วยเซลล์มีการผิดรูปไปโดยมีสมมาตรแบบกระจกโดยที่โครงสร้างที่ผิดรูปจะกลายเป็นภาพสะท้อนของโครงสร้างที่ไม่ผิดรูปและตรงบริเวณขอบเขตรอยต่อระหว่างโครงสร้างที่ผิดรูปและโครงสร้างที่ไม่ผิดรูปนี้เรียกว่า ขอบเขตรอยต่อของทวินหรือระนาบของทวิน ดังแสดงในรูปที่ 2.12

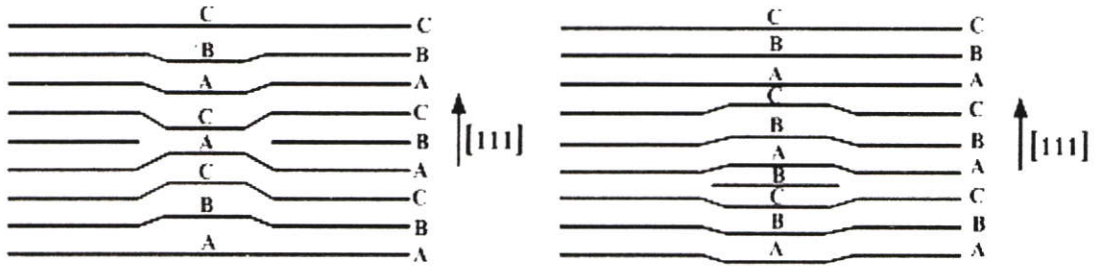


รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบทวินและระนาบของทวิน

2.5.3.3 การจัดเรียงระนาบผิดลำดับ (stacking faults)

เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกบนพื้นผิวที่เป็นผลมาจากการที่โครงสร้างมีการจัดเรียงระนาบของอะตอมแบบผิดลำดับ เช่น สำหรับโครงสร้างออคตาฮีดรอนแบบ fcc ที่มีการจัดเรียงระนาบของอะตอมที่ถูกต้องตามลำดับเป็น ABCABCABC... แต่ถ้าเป็นกรณีโครงสร้างที่ไม่สมบูรณ์จะมีการจัดเรียงระนาบของอะตอมเป็น ABCABABCA... การเกิดการจัดเรียงระนาบผิดลำดับจากตัวอย่างขึ้นอยู่กับระนาบ A ที่อยู่ถัดจากระนาบที่ 2 "B" และอาจจะอธิบายได้ว่าเป็นบริเวณที่มีระนาบที่อยู่ในโครง

สร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล โคลสแพค (hexagonal close packed : hcp) แทรกอยู่กับระนาบที่อยู่
โครงสร้างผลึกแบบเฟสเซ็นเตอร์คิวบิก (face center cubic : fcc) ซึ่งอาจจะเกิดในระหว่างที่เกิดผลึก
และอาจเป็นผลจากการเกิดดิสโลเคชันย่อย (partial dislocation) สองส่วนดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการจัดเรียงระนาบของอะตอมผลึกลำดับ

2.6 พันธะเคมี [9,12-17]

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

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

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

Mooser และ Pearson ได้พิสูจน์เกี่ยวกับแนวความคิดของพันธะเคมี ซึ่งมีแนวความคิดที่แตกต่างกัน โดยแสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติของพันธะเคมีในสารประกอบกลุ่ม II-VI ดังตารางที่ 2.4 แสดงการกระจายของวาเลนซ์และความเป็นพันธะไอออนิกในสารประกอบกลุ่ม II-VI ถ้า

อิเล็กตรอนวาเลนซ์ที่หลุดออกไปจากอะตอม A และอะตอม B เราจะได้ประจุเป็นบวก A^{2+} และ B^{6+} ประจุมรวมของวาเลนซ์อิเล็กตรอนที่หลุดออกไปรวมกันเท่ากับ $8e^-$ การส่งผ่านของประจุไปยังอะตอม B^{6+} ก็จะแทนด้วยไอออน B^{2-} นี่คือนิพจน์ไอออนิกที่มีประจุของอะตอมสุทธิ $A^{2+}B^{2-}$ สำหรับกรณีอิเล็กตรอนวาเลนซ์ที่มีการเคลื่อนย้ายไปมาระหว่างสองอะตอมซึ่งในกรณีนี้การกระจายของอิเล็กตรอนวาเลนซ์ที่มีค่าเท่ากัน ทำให้พันธะโควาเลนต์นี้มีประจุสุทธิของแต่ละอะตอมคือ $A^{2-}B^{2+}$ และศูนย์กลางการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนอยู่กึ่งกลางระหว่างอะตอม A กับอะตอม B ซึ่งแทนด้วย d_{AB} เมื่อศูนย์กลางของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่อยู่ที่ใกล้กับไอออน 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	

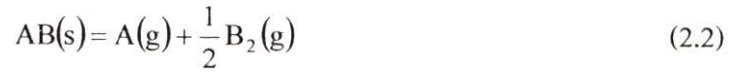
ตารางที่ 2.5 แสดงการจัดเรียงอิเล็กตรอนในอะตอมอิสระของธาตุที่มีอะตอมของธาตุสังกะสี อะตอมของธาตุเทลลูเรียมและอะตอมของธาตุซีลีเนียมเป็นองค์ประกอบ

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

จากการคำนวณทางเทอร์โมไดนามิกส์รวมทั้งการทดลองจลศาสตร์ของการระเหิดสารประกอบกลุ่ม 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] พิจารณาสภาวะสมดุลเชิงความร้อน (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

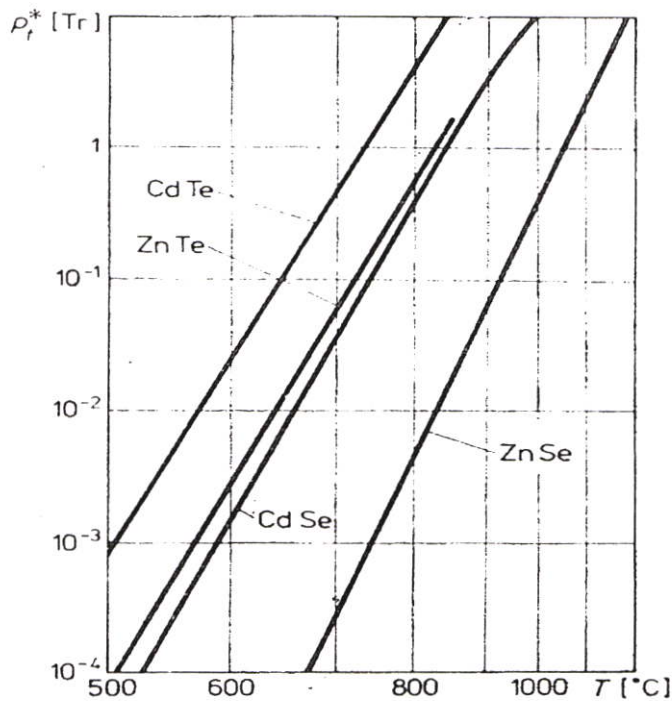
$$P\left(\frac{B_2}{AB}\right) = \frac{1}{2}P\left(\frac{A}{AB}\right) \quad (2.6)$$

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 จากสถานะของแข็งของ ZnSe, CdTe, ZnTe ที่ความดันไอเป็นสัดส่วนทางเคมีแสดงดังรูปที่ 2.14

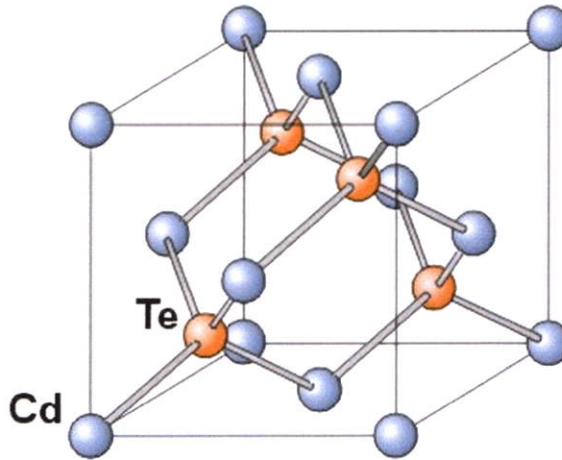


รูปที่ 2.14 แสดงสมดุลความดันไอรวม

2.7 ผลึกแคดเมียมเทลลูไรด์ [12-17]

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

กว่า 1.50 eV ผลึกแคดเมียมเทลลูไรด์เสถียรที่อุณหภูมิสูงกว่า 500 องศาเซลเซียส ดังนั้นผลึกแคดเมียมเทลลูไรด์จึงเหมาะกับการนำมาใช้เป็นชั้นดูดกลืนพลังงานโฟตอนในเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 2.15 แสดงโครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์ของผลึกแคดเมียมเทลลูไรด์

2.8 การระเหิดในระยะประชิด (close-spaced sublimation : CSS) [18-23]

การระเหิดในระยะประชิดเป็นกระบวนการเกิดก้อนเนื้อผลึก(bulk)หรือฟิล์มบางของสารตั้งต้นที่กลายเป็นไอแล้วควบแน่นบนฐานรองรับที่วางอยู่บนสารตั้งต้นในระบบปิดในกระบวนการระเหิดในระยะประชิดนี้สามารถให้อัตราการเคลือบต่ำ ในกระบวนการระเหิดในระยะประชิดนี้พิจารณาสมดุลปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารตั้งต้นและฐานรองรับดังสมการ



จากกฎการคงตัวของมวล (law of mass action) พิจารณาภาวะสมดุลเชิงความร้อน

$$P\left(\frac{\text{Cd}}{\text{CdTe}}\right)P^{\frac{1}{2}}\left(\frac{\text{Te}_2}{\text{CdTe}}\right) = K_p(T) \quad (2.9)$$

เมื่อ P คือ ความดัน

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

$$K_p(T) = \exp\left[\frac{-\Delta G}{RT}\right] \quad (2.10)$$

เมื่อ $\Delta G(T)$ คือ พลังงานอิสระของกิบส์

$$\text{สำหรับแคดเมียมเทลลูไรด์ } \Delta G_{\text{CdTe}} = +68.64 - 44.94 \times 10^{-3} T \frac{\text{kcal}}{\text{mol}}$$

เมื่อพิจารณาค่าคงตัวของปฏิกิริยาที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน $K_p(T)$

ของสารตั้งต้นที่มีอุณหภูมิ(T_{so})และฐานรองรับที่มีอุณหภูมิ(T_{sub}) มีความสัมพันธ์ตามสมการ

$$K_p(T_{\text{so}}) = P\left(\frac{\text{Cd}}{\text{CdTe}}\right)(T_{\text{so}}) P^{\frac{1}{2}}\left(\frac{\text{Te}_2}{\text{CdTe}}\right)(T_{\text{so}}) = \exp\left[\frac{-\Delta G}{RT_{\text{so}}}\right] \quad (2.11)$$

$$K_p(T_{\text{sub}}) = P\left(\frac{\text{Cd}}{\text{CdTe}}\right)(T_{\text{sub}}) P^{\frac{1}{2}}\left(\frac{\text{Te}_2}{\text{CdTe}}\right)(T_{\text{sub}}) = \exp\left[\frac{-\Delta G}{RT_{\text{sub}}}\right] \quad (2.12)$$

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

$$J_{\text{Cd},j} = \frac{D_{\text{Cd},j}}{Rd} \left(\frac{P_{\text{Cd}}(T_{\text{so}})}{T_{\text{so}}} - \frac{P_{\text{Cd}}(T_{\text{sub}})}{T_{\text{sub}}} \right) \equiv J \quad (2.13)$$

$$J_{\text{Te}_2,j} = \frac{D_{\text{Te}_2,j}}{Rd} \left(\frac{P_{\text{Te}_2}(T_{\text{so}})}{T_{\text{so}}} - \frac{P_{\text{Te}_2}(T_{\text{sub}})}{T_{\text{sub}}} \right) \equiv \frac{J}{2} \quad (2.14)$$

เมื่อ $J_{\text{Cd},j}$ คือ ฟลักซ์ของการแพร่ของอะตอมของธาตุ Cd ในแก๊ส j

$J_{\text{Te}_2,j}$ คือ ฟลักซ์ของการแพร่ของโมเลกุลของแก๊ส Te_2 ในแก๊ส j

J คือ ฟลักซ์ของการแพร่

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

ซึ่งในกรณีนี้น้ำหนักโมเลกุลและขนาดของแก๊ส Te_2 มีค่ามากกว่า Cd ดังนั้นจะได้สัมประสิทธิ์การแพร่

$D_{\text{Cd},j} = 1.85 D_{\text{Te}_2,j}$ (ในบรรยากาศของแก๊ส H_2, He หรือ Ar) จากสมการการส่งผ่าน CdTe ที่อุณหภูมิของสารตั้งต้น (T_{so}) และฐานรองรับ (T_{sub}) มีค่าต่างกัน $T_{\text{so}} - T_{\text{sub}} = 70^\circ\text{C}$ จะได้ $P_{\text{Cd}}(T_{\text{so}}) \gg P_{\text{Cd}}(T_{\text{sub}})$ และ $P_{\text{Te}_2}(T_{\text{so}}) \gg P_{\text{Te}_2}(T_{\text{sub}})$ ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$\frac{P_{\text{Cd}}(T_{\text{so}})}{P_{\text{Te}_2}(T_{\text{so}})} = \frac{2D_{\text{Te}_2,j}}{D_{\text{Cd},j}} = 1.1 \quad (2.15)$$

หมายเหตุ ค่าอุดมคติอัตราส่วนเท่ากับ 1

ดังนั้นจากสมการ (2.11),(2.12),(2.13),(2.14),(2.15) สามารถคำนวณหา J และอัตราการปลูกฟิล์มบาง (growth rate) ซึ่งมีความสัมพันธ์ตามสมการ

$$GR\left(\frac{\mu\text{m}}{\text{min}}\right) = \frac{J \times M \times 60 \times 10^4}{\rho} \quad (2.16)$$

เมื่อ J คือ ฟลักซ์ของการแพร่

M คือ มวลโมเลกุลของ CdTe

ρ คือ ความหนาแน่นของ CdTe

2.9 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ [6-13]

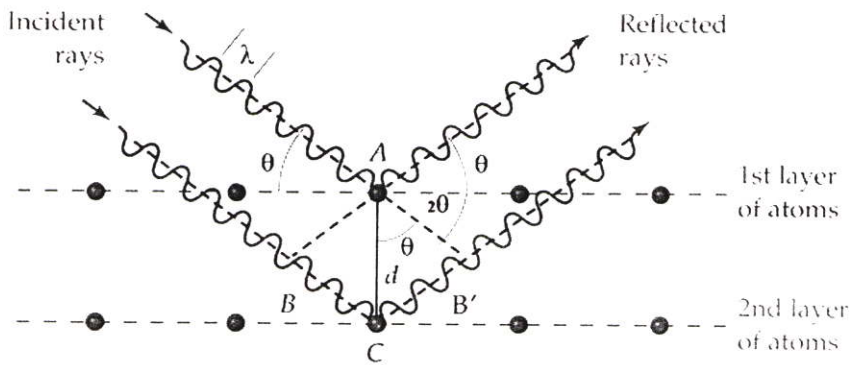
การศึกษาโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction) เป็นการศึกษาเพื่อยืนยันว่าฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้ มีโครงสร้างผลึกแบบใดเป็นไปตามที่ต้องการและเมื่อทราบผลแล้ว จึงจะนำฟิล์มบางที่ได้ไปตรวจสอบสมบัติทางฟิสิกส์อื่นๆ ต่อไป

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) ได้เสนอแนวคิดที่เราสามารถมองได้ว่าผลึกจัดเรียงตัวเป็นชั้น (layer) หรือ ระนาบ (plane) ของอะตอมซึ่งสามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบ โดยมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน และได้ตั้งกฎการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ไว้ว่า รังสีเอกซ์จะแทรกสอดเสริมกันมากที่สุด เมื่อมีการกระเจิงออกจากแต่ละระนาบด้วยระยะที่แตกต่างกันเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ และกฎนี้เรียกว่ากฎของแบรกก์ (Bragg's law) ดังสมการที่ (2.17)

$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda \quad (2.17)$$

เมื่อ	d_{hkl}	คือ	ระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอมในผลึกที่ขนานกัน
	θ	คือ	มุมตกกระทบและมุมสะท้อนของรังสีเอกซ์ที่ทำกับระนาบของผลึก
	2θ	คือ	มุมแบรคหรือมุมเลี้ยวเบนซึ่งเป็นมุมที่รังสีตกกระทบทำมุมกับรังสีสะท้อน
	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

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (2.18)$$

จากสมการที่ (2.17) เมื่อ $n = 1$ แทนใส่ในสมการที่ (2.18) จะได้ความสัมพันธ์ที่ใช้หาค่าคงตัวของโครงผลึก (a) เมื่อทราบมุมแบรค (θ) ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ (λ) และคิซนิมิเตอร์ (hkl) ดังสมการ

$$\frac{4 \sin^2 \theta}{\lambda^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (2.19)$$

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

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad (2.20)$$

ในทำนองเดียวกันจากสมการที่ (2.17) เมื่อ $n = 1$ แทนใส่ในสมการที่ (2.20) จะได้ความสัมพันธ์ที่ใช้หาค่าคงที่ของ โครงผลึก (a, c) เมื่อเราทราบขนาดมุมแบรกก์ (θ) ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ (λ) และดัชนีมิลเลอร์ ($h k l$) ดังสมการ

$$\frac{4 \sin^2 \theta}{\lambda^2} = \frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad (2.21)$$

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

$$TC(h k l) = \frac{\frac{I(hkl)}{I_0(hkl)}}{\frac{1}{N} \sum_N \frac{I(hkl)}{I_0(hkl)}} \quad (2.22)$$

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

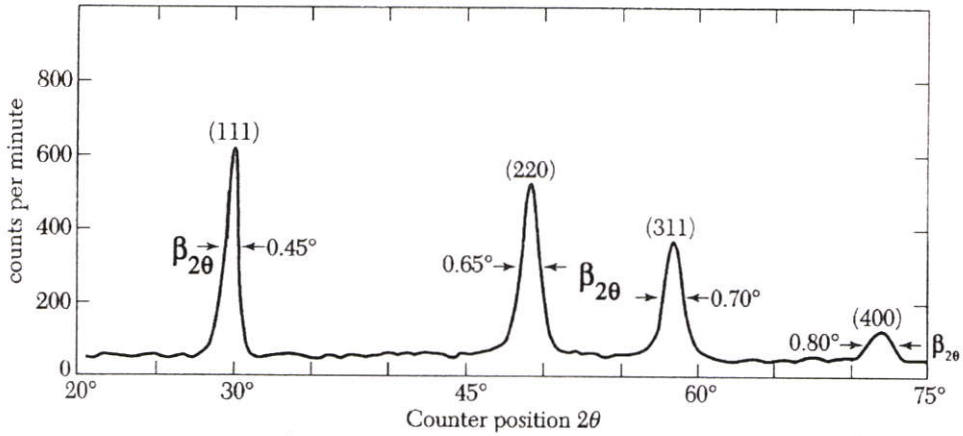
ขนาดของเกรน (D) และความเครียด (ϵ_s) เราสามารถหาได้จากสมการ

$$\beta = \frac{\lambda}{D \cos \theta} - \epsilon_s \tan \theta \quad (2.23)$$

ดังนั้น

$$\beta \cos \theta = \frac{\lambda}{D} - \epsilon_s \sin \theta \quad (2.24)$$

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

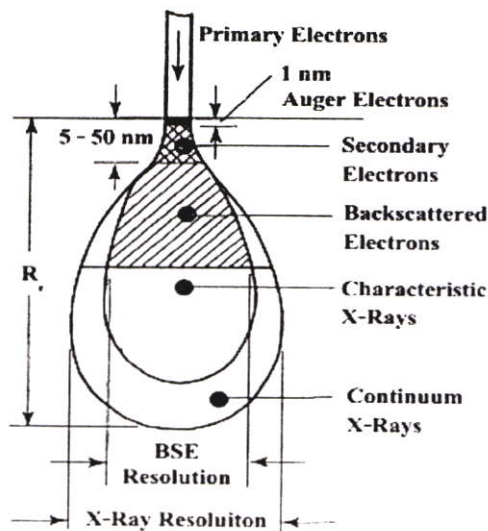


รูปที่ 2.17 แสดงวิธีการหา $\beta_{2\theta}$ เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

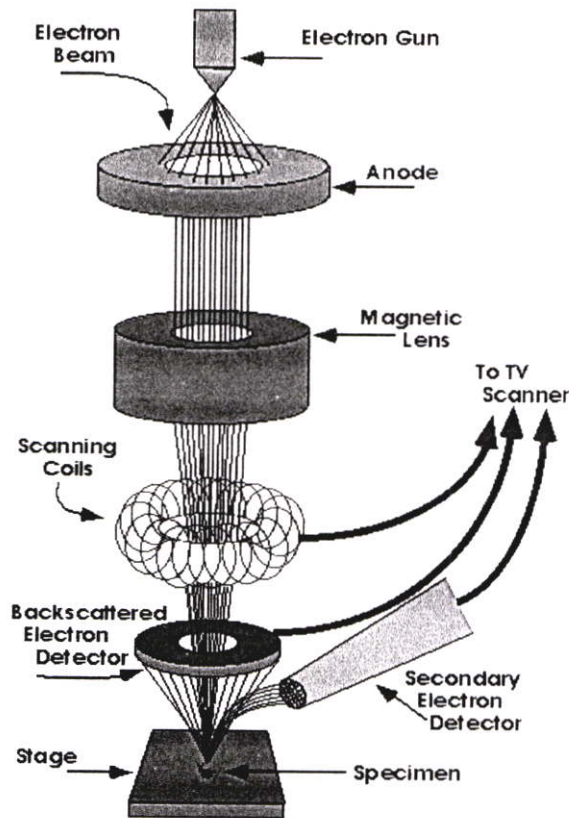
2.10 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

[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) เป็นตัวโฟกัสลำอิเล็กตรอนจะกระาดไปยังพื้นผิวของสารตัวอย่าง 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 มีความสำคัญต่อการศึกษาคြွสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วย 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) ให้กับอะตอมของตัวอย่างที่ตกกระทบและมีการเปลี่ยนทิศทางเคลื่อนที่ มีการกระเจิงกลับจากผิวของสารตัวอย่าง อิเล็กตรอนที่กระเจิงกลับส่วนนี้เรียกอิเล็กตรอนแบบกระเจิงกลับ (backscatter electron : BE) ภายในห้องใส่ตัวอย่างจะมีหัววัดสัญญาณ (detector) ติดตั้งไว้เพื่อนำสัญญาณ BE นี้ไปสร้างเป็นสัญญาณภาพแสดงผลบนจอ CRT

การชนแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic scattering)

ในกรณีการชนแบบไม่ยืดหยุ่นอิเล็กตรอนปฐมภูมิจะถ่ายโอนพลังงานจลน์ให้กับอิเล็กตรอนของสารตัวอย่างและทำให้อะตอมของสารตัวอย่างที่อยู่ในระดับลึกจากผิวตัวอย่างได้รับอันตรกิริยาที่แตกต่างกันซึ่งหลังจากการชนชนิดนี้จะกำเนิดสัญญาณหลายชนิดหลังจากการชนชนิดนี้ เช่น อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electrons) ออเจอิเล็กตรอน (Auger electrons) รังสีเอกซ์เฉพาะธาตุ (characteristic X-ray) รังสีเอกซ์ชนิดต่อเนื่อง (continuum X-rays or Bremsstrahlung) การเรืองแสงคาโทด (Cathodo luminescence) เป็นต้น จะเห็นว่าการชนในลักษณะนี้จะเกิดสัญญาณหลายชนิด โดยแต่ละชนิดก็จะบ่งบอกองค์ประกอบของตัวอย่างที่แตกต่างออกไปทั้งลักษณะของภาพจากสัญญาณ SE จนถึงการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ (qualitative) และปริมาณ (quantitative) ของธาตุในสารตัวอย่างจากสัญญาณของรังสีเอกซ์อันจะทำให้ทราบชนิดและปริมาณของธาตุในตัวอย่างนั้น 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 จะหลุด

ออกมาจากชั้นที่อยู่ในระดับลึกนั้นมีน้อยเพราะสัญญาณ SE จะถูกดูดกลืนโดยอะตอมบนผิวก่อนที่จะเล็ดลอดออกมา

รังสีเอกซ์

รังสีเอกซ์ที่เกิดจากการกระตุ้น โดยอิเล็กตรอนปฐมภูมิแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ รังสีเอกซ์ชนิดต่อเนื่องและรังสีเอกซ์เฉพาะธาตุ

รังสีเอกซ์ชนิดต่อเนื่องเกิดจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิทำอันตรกิริยากับอะตอมที่บริเวณสนามคูลอมบ์ใกล้นิวเคลียสเกิดการเปลี่ยนทิศทางและสูญเสียพลังงานอย่างรวดเร็วจึงคายพลังงานออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic field) ซึ่งจะมีพลังงานตั้งแต่ค่าสูงสุดของพลังงานอิเล็กตรอนปฐมภูมิก่อนทำอันตรกิริยาถึงค่าพลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิลังทำอันตรกิริยาสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ (กรณี $E_0 > E_1$)

$$E_0 - E_1 = \Delta E = h\nu \quad (2.25)$$

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

รังสีเอกซ์เฉพาะธาตุเกิดจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิทำอันตรกิริยากับอะตอมบริเวณชั้นโคจรของอิเล็กตรอนของอะตอม ถ้าอิเล็กตรอนในชั้นโคจรใดได้รับพลังงานสูงกว่าแรงยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในชั้นโคจรนั้นก็หลุดออกจากวงโคจร ทำให้เกิดช่องว่างขึ้นในอะตอม ดังนั้นอิเล็กตรอนในวงโคจรถัดไปก็จะเข้ามาแทนที่ แต่เนื่องจากอิเล็กตรอนในวงโคจรนอกจะมีพลังงานมากกว่า จึงต้องลดระดับพลังงาน โดยคายพลังงานออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เช่นอิเล็กตรอนปฐมภูมิทำอันตรกิริยากับวงโคจรชั้น K แล้วอิเล็กตรอนในชั้น L ก็เข้ามาแทนที่พร้อมทั้งคายพลังงานออกมา ซึ่งพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปลดปล่อยมานี้จะเป็นพลังงานเฉพาะระดับชั้นโคจร (electron shell) ของอิเล็กตรอนจากธาตุนั้นจึงเรียกคลื่นแม่เหล็กชนิดนี้ว่ารังสีเอกซ์เฉพาะธาตุ

เนื่องจากระดับพลังงานในชั้นโคจรของอิเล็กตรอนสำหรับแต่ละธาตุนั้นมีค่าไม่เท่ากันจึงสามารถนำความแตกต่างของระดับพลังงานเป็นตัวจำแนกชนิดของธาตุที่มีอยู่ในตัวอย่างซึ่งเป็นการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ และนอกจากนั้นความเข้มของรังสีเอกซ์บ่งบอกถึงปริมาณของธาตุในเนื้อตัวอย่าง ได้อีกด้วย ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ

ออเจ็ล็กตรอน

ออเจ็ล็กตรอนเกิดจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิตกกระทบตัวอย่างและเหนี่ยวนำให้เกิดรังสีเอกซ์เฉพาะธาตุของชั้นโคจรใด ๆ รังสีเอกซ์ที่ปลดปล่อยจากอันตรกิริยานี้มีโอกาสถ่ายโอนพลังงานให้กับอิเล็กตรอนชั้นโคจรถัดออกไปทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากวงโคจร ซึ่งการวิเคราะห์พลังงานออเจ็ล็กตรอนนี้มีประโยชน์ในการวิเคราะห์พื้นผิวของตัวอย่าง เช่น การวัดปริมาณของธาตุที่ฉาบอยู่บนผิวที่บางมาก

การเรืองแสงคาโทด

เป็นลักษณะเรืองแสงจากสารตัวอย่างซึ่งแสงที่เรืองนี้เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงที่ตามองไม่เห็นเกิดจากอะตอมของตัวอย่างได้รับพลังงานจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิทำให้อิเล็กตรอนในวงโคจรชั้นนอกถูกกระตุ้นและเมื่อกลับเข้าสู่ภาวะปกติอิเล็กตรอนจะคายพลังงานออกมาในลักษณะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเนื่องจากสภาวะกระตุ้นสภาวะปกติมีช่วงพลังงานไม่ห่างกันมากเมื่อคายพลังงานออกมาแล้วทำให้ความถี่หรือความยาวคลื่นอยู่ในช่วงที่ตามองเห็นได้

การกำเนิดภาพของสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิ

เมื่ออิเล็กตรอนจากขดลวดที่ถูกใช้เป็นไส้หลอด (filament) ถูกควบคุมให้เป็นลำอิเล็กตรอนและโฟกัสด้วยเลนส์แม่เหล็กลงบนผิวของตัวอย่างและลำอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมโดยชุดขดลวดสนามแม่เหล็กซึ่งเป็นขดลวดที่สร้างสนามแม่เหล็กเพื่อควบคุมการกราดของลำอิเล็กตรอน ไปบนผิวของสารตัวอย่าง ซึ่งการกราดบนผิวของสารตัวอย่างนี้จะทำให้ได้สัญญาณต่าง ๆ สัญญาณควบคุมการกราดบนพื้นผิวนี้อาจทำงานเข้าจังหวะกับชุดควบคุมการแสดงผลการสแกนของจอภาพ CRT จุดต่อจุดและเส้นต่อเส้นในขณะที่เดียวกันสัญญาณอิเล็กตรอนจะถูกนำไปควบคุมปริมาณความมืด-สว่างบนจอ CRT เกิดเป็นภาพขึ้นตามระนาบการกราดของอิเล็กตรอนใน SEM เนื่องจากพื้นที่ที่แสดงจอภาพ CRT ใหญ่กว่าพื้นที่สแกนบนผิวของตัวอย่าง โดยลำอิเล็กตรอนใน SEM ดังนั้นจึงสามารถหาความสัมพันธ์เพื่อหาค่าลึกลงของภาพได้ดังนี้

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

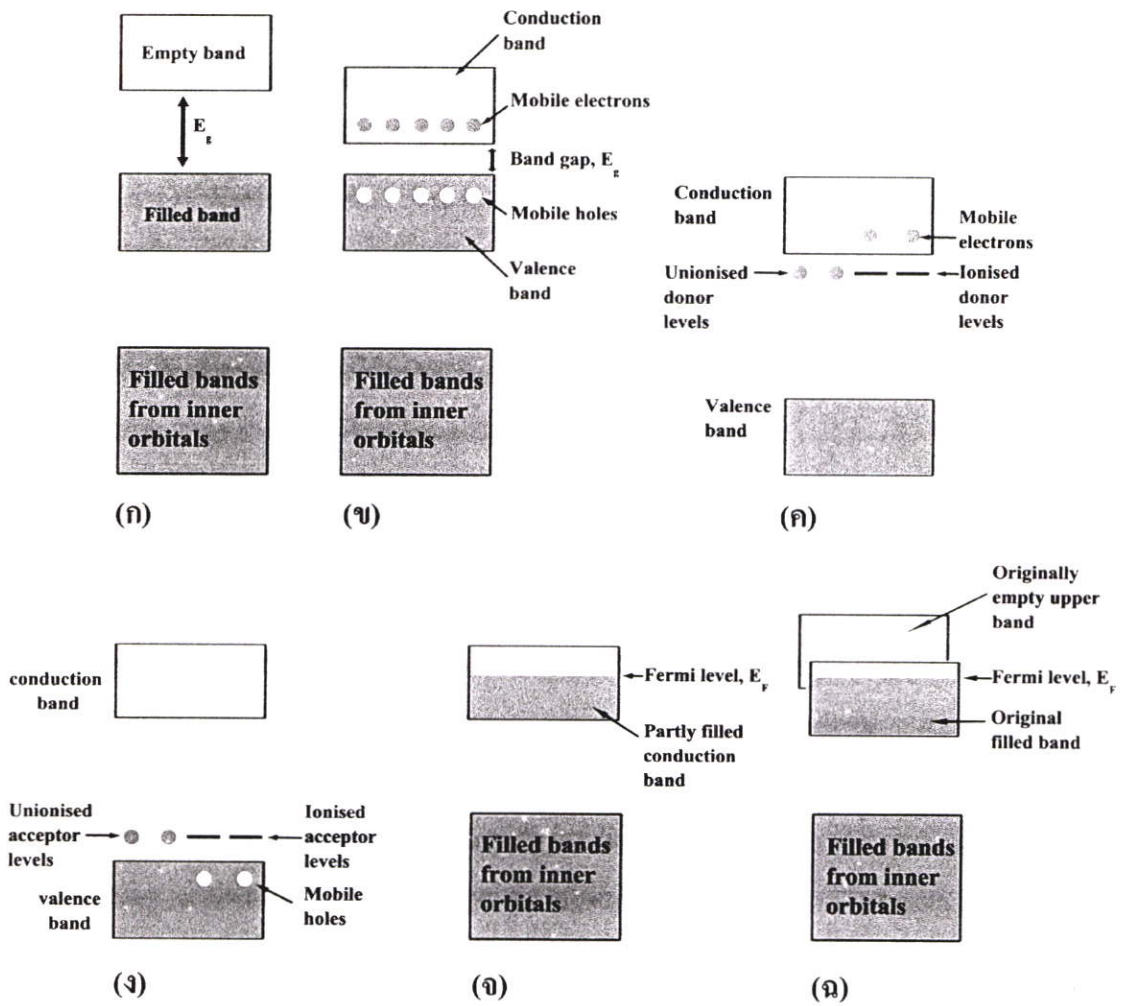
ชุดของขดลวดสนามแม่เหล็กเป็นตัวควบคุมพื้นที่ของการกราดบนตัวอย่างของลำอิเล็กตรอนและนอกจากควบคุมพื้นที่ในการกราดแล้วยังควบคุมความเร็วในการกราดอีกด้วย โดยที่ลักษณะของความเร็วในการกราดนี้จะทำให้ภาพออกมามีความละเอียดแตกต่างกัน ถ้าเราใช้ความเร็วในการกราดมีความเร็วสูงเราจะได้ภาพที่มีความละเอียดต่ำกว่าใช้ความเร็วในการกราดต่ำ

2.11 สมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ [6-10,26]

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

2.11.1 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน

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

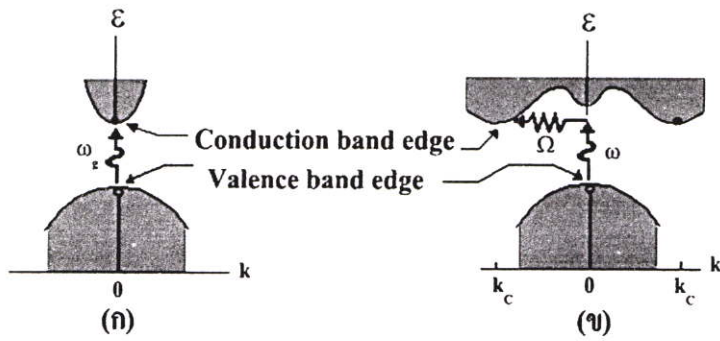


รูปที่ 2.20 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานอย่างง่ายของ

- 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 และทำให้วัสดุนี้นำไฟฟ้าได้เราจะเรียกสารชนิด

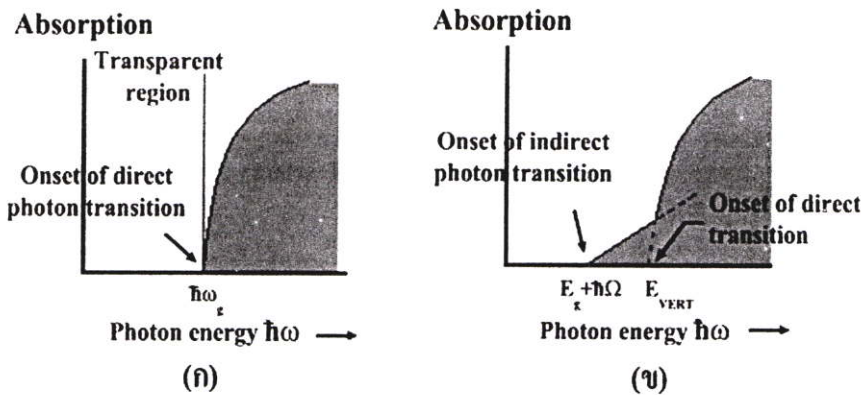
นี้ว่า สารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ (intrinsic semiconductors) ดังแสดงในรูปที่ 2.20 (ข) จากรูปจะเห็นว่าเมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนย้ายขึ้นไปอยู่ในแถบนำแล้วจะเหลือที่ว่างไว้ในแถบวาเลนซ์ โดยจะมีสภาพทางไฟฟ้าเป็นบวก และจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงข้ามกับอิเล็กตรอนเมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า เราจะเรียกที่ว่างนี้ว่าโฮล และถ้าเราทำการเจืออะตอมของธาตุบางอย่าง ลงไปในสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์แล้ว อะตอมของสารเจือประพติดัวเป็นอะตอมผู้ให้ ก็จะทำให้เกิดระดับพลังงานผู้ให้ โดยให้อิเล็กตรอนกับแถบนำ เราจะเรียกสารนี้ว่าสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductors) ดังแสดงในรูปที่ 2.20 (ค) และถ้าอะตอมประพติดัวเป็นอะตอมผู้รับก็จะทำให้เกิดระดับพลังงานผู้รับ โดยทำการรับอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ เราจะเรียกสารนี้ว่าสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type semiconductors) ดังแสดงในรูปที่ 2.20 (ง) สำหรับแถบพลังงานของวัสดุที่เป็น โลหะหรือตัวนำจะพบว่าอิเล็กตรอนเข้าไปอยู่ในแถบนำแล้วบางส่วนรูปที่ 2.20(จ) และเรารู้ได้ว่าแถบวาเลนซ์กับแถบนำมีการซ้อนเหลื่อมกันอยู่ ทำให้สารสามารถนำไฟฟ้าได้ และในรูปที่ 2.20 (ฉ) ถ้าขอบล่างของแถบว่างที่ $(n+1)$ ซ้อนเหลื่อมกับขอบสูงสุดของแถบที่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่ที่ n และระดับเฟอร์มิอยู่ระหว่างแถบทั้งสอง อิเล็กตรอนก็จะสามารถไหลจากแถบเต็มไปยังด้านล่างของแถบว่างได้ เราจะเรียกสารที่มีโครงสร้างแถบพลังงานแบบนี้ว่าเป็นสารกึ่งโลหะ ลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง คือ อิเล็กตรอนได้รับพลังงาน โฟตอนที่มีค่าเท่ากับขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ($\hbar\omega = E_g$) อิเล็กตรอนจะดูดกลืนพลังงาน โฟตอนนั้นและอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นจึงย้ายสถานะพลังงานแตรนซิชันจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำกลายเป็นอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ โดยไม่มีการสูญเสียพลังงานให้แก่โครงสร้างผลึก คือ ไม่มีการสร้างหรือทำลายโฟนอน ดังแสดงในรูปที่ 2.21 (ก) และเมื่อเขียนกราฟระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงาน โฟตอนจะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 2.22 (ก) และลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงคือ โครงสร้างแถบพลังงานที่มีจุดต่ำสุดของแถบวาเลนซ์ไม่อยู่ที่ตำแหน่งเวกเตอร์คลื่นค่าเดียวกันหรืออยู่ที่ตำแหน่งโมเมนตัมของคลื่นไม่เท่ากัน ดังนั้นอิเล็กตรอนจะต้องได้รับพลังงาน โฟนอนที่มีค่ามากกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ในกรณีนี้มีกระบวนการสร้างโฟนอนเกิดขึ้น ($\hbar\omega = E_g + \hbar\Omega$) เมื่อ Ω คือค่าความถี่เชิงมุมของพลังงาน โฟนอน ซึ่งมีค่าน้อยกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงานหรือในกรณีที่มีการทำลายล้างโฟนอน ($\hbar\omega = E_g - \hbar\Omega$) นั่นคือเมื่ออิเล็กตรอนที่อยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นการย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำจะมีการปล่อยโฟนอน (emitted phonon) ที่มีความถี่เชิงมุม Ω มีเวกเตอร์คลื่น $K \cong k_c$ ออกมา จึงเกิดการสร้างโฟนอน ($E_g = \hbar\Omega$) และการสร้างอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ (E_{VERT}) ขึ้นมาในกระบวนการนี้ ดังแสดงในรูปที่ 2.21 (ข) และเมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงาน โฟตอนจะได้ดังแสดงในรูปที่ 2.22 (ข)



รูปที่ 2.21 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานและการย้ายสถานะของพลังงานอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสมบูรณ์ ($T = 0 \text{ K}$)

ก. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง

ข. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง



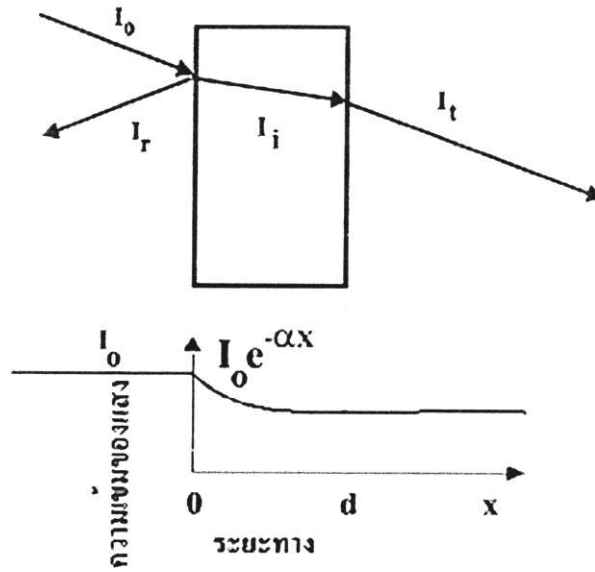
รูปที่ 2.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสมบูรณ์ ($T = 0 \text{ K}$)

ก. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง

ข. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงในกรณีที่เกิดกระบวนการสร้างโฟนอน

2.11.2 การส่งผ่านแสง

การศึกษาวิธีวัดสเปกตรัมการสะท้อนและการส่งผ่านแสงนี้จะกล่าวถึงสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงและองค์ประกอบของการวัดสเปกตรัมการส่งผ่านแสง เมื่อแสงเดินทางไปกระทบฟิล์มบางแสงบางส่วนจะสะท้อนกลับที่ผิวของฟิล์มบาง บางส่วนของแสงจะเดินทางเข้าไปในแผ่นฟิล์มบางและถูกดูดกลืน ดังแสดงในรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 แสดงแผนภาพเมื่อแสงตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบาง

สัมประสิทธิ์การสะท้อนของแสงมีค่าเป็น

$$R = \frac{I_r}{I_0} \quad (2.26)$$

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

เพราะฉะนั้น ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางมีค่า

$$I_i = I_0 - I_r = I_0 - RI_r = (1 - R)I_0 \quad (2.27)$$

เมื่อแสงนี้เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางจะถูกดูดกลืนทำให้ความเข้มแสงภายในแผ่นฟิล์มบางลดลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลตามระยะทาง ดังนั้นความเข้มแสงที่ส่งผ่านฟิล์มบางมีค่าเป็น

$$I_t = I_i \cdot e^{-\alpha d} = (1 - R)I_0 \cdot e^{-\alpha d} \quad (2.28)$$

ถ้าไม่มีการสะท้อนแสงที่ผิวด้านหลัง สัมประสิทธิ์การส่งผ่านของแสงจะมีค่าเท่ากับ

$$T = \frac{I_t}{I_0} = (1 - R)e^{-\alpha d} \quad (2.29)$$

2.11.3 การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ

เมื่อแสงตกกระทบสารกึ่งตัวนำ ด้วยความเข้ม I_0 แสงบางส่วนจะส่งผ่านออกไปบางส่วนถูกดูดกลืนและส่วนที่เหลือจะสะท้อนกลับมา ดังแสดงในรูปที่ 2.23 โดย

$$T + A + R = 1 \quad (2.30)$$

เมื่อ	T	คือ	สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง
	A	คือ	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง
	R	คือ	สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง

โดยที่

$$R = \frac{(n-1)^2 + K^2}{(n+1)^2 + K^2} \quad (2.31)$$

และค่าดัชนีหักเหของผลึก

$$n_c = n - iK \quad (2.32)$$

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

2.11.4 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง

การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ เกิดจากการที่อิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากแสงที่มีพลังงานโฟตอนเท่ากับหรือมากกว่าค่าช่องว่างพลังงาน จากนั้นจึงย้ายสถานะพลังงานจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปสู่ แถบนำ สเปกตรัมการดูดกลืนแสงบริเวณที่พลังงานโฟตอนมีค่าน้อยจะมีลักษณะเป็นขอบแสดงถึงการลดลงของการดูดกลืนแสงอย่างฉับพลันขอบลักษณะนี้เรียกว่าขอบการดูดกลืน

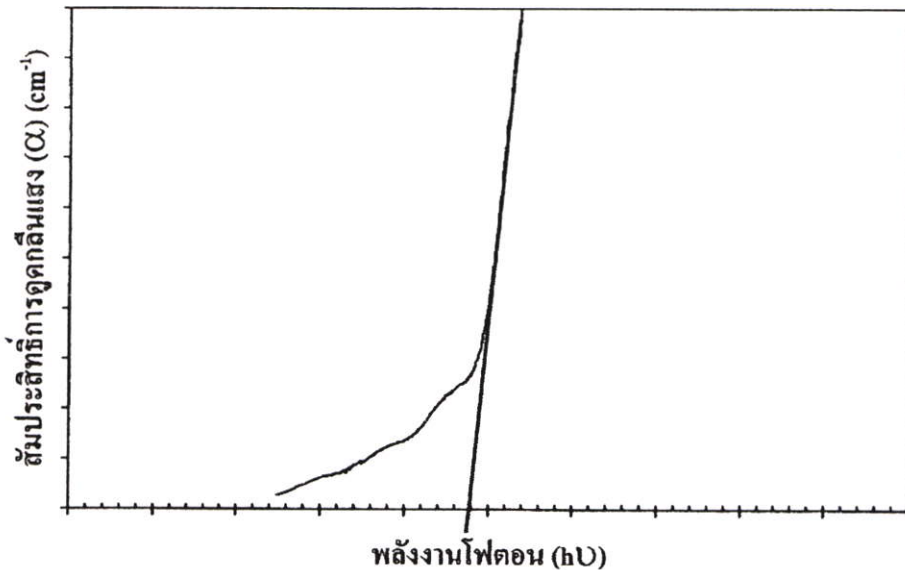
แสง (absorption edge) หรือขอบการดูดกลืนพื้นฐาน (fundamental edge) พลังงานโฟตอนที่ขอบการดูดกลืนแสง มีค่าเท่ากับผลต่างของค่าพลังงานที่วัดจากจุดต่ำสุดของแถบนำกับจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์จุดที่เส้นตรงตัดกับแกนในแนวนอน จะให้ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) วิธีการนี้เป็น การกำหนดค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่นิยมมากที่สุด

การหาค่าของช่องว่างแถบพลังงาน สามารถพิจารณาได้จากสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (α) ของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (T) จากรูปที่ 2.23 แสดงภาพจำลอง เมื่อแสงตกกระทบบนด้านซ้ายของฟิล์มบาง (I_0) ความเข้มแสงภายในฟิล์มบางจะลดลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลและมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงโดยทั่วไปการสะท้อน (R) มีค่าน้อยมาก และมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับความยาวคลื่นแสงที่ตกกระทบบังนั้น

$$T = e^{-\alpha d} \quad (2.33)$$

จะได้ว่า

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln\left(\frac{1}{T}\right) \quad (2.34)$$



รูปที่ 2.24 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับพลังงาน โฟตอน

ที่กล่าวมาเป็นการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง จากสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงโดยไม่คิดถึงการสะท้อนของแสง สำหรับกรณีการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเนื่องจากการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอน ในกรณีที่อิเล็กตรอนย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำที่เวกเตอร์คลื่นค่าเดียวกัน เรียกการย้ายสถานะพลังงานแบบนี้ว่า

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

สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานชนิดยินยอมแบบตรง

$$(\alpha_{hv}) = A(hv - E_g)^{\frac{1}{2}} \quad (2.35)$$

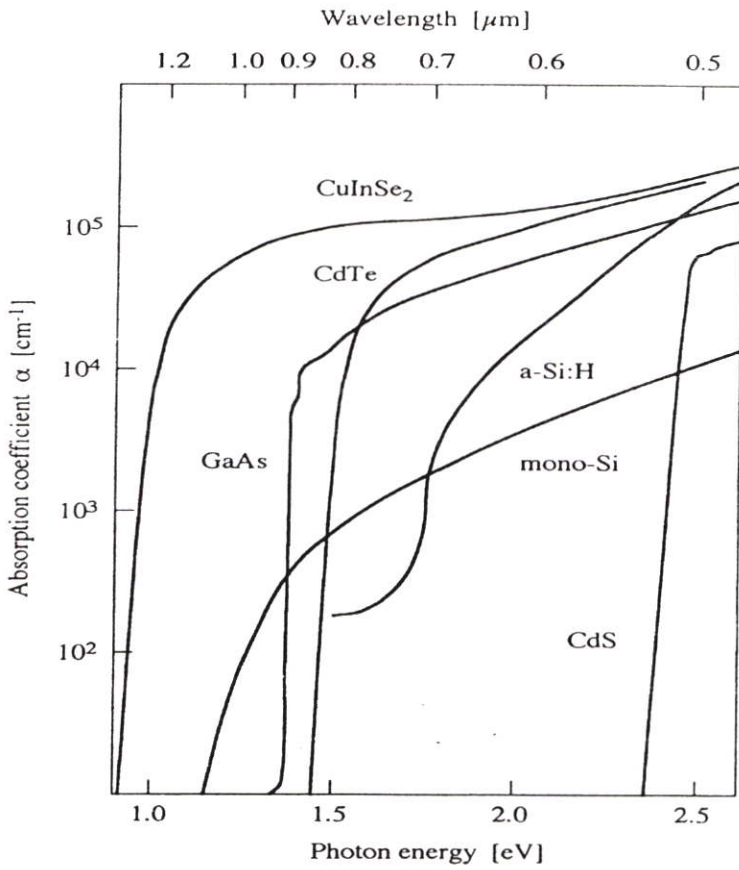
สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานชนิดยินยอมแบบเฉียง

$$(\alpha_{hv}) = B(hv - E_g)^2 \quad (2.36)$$

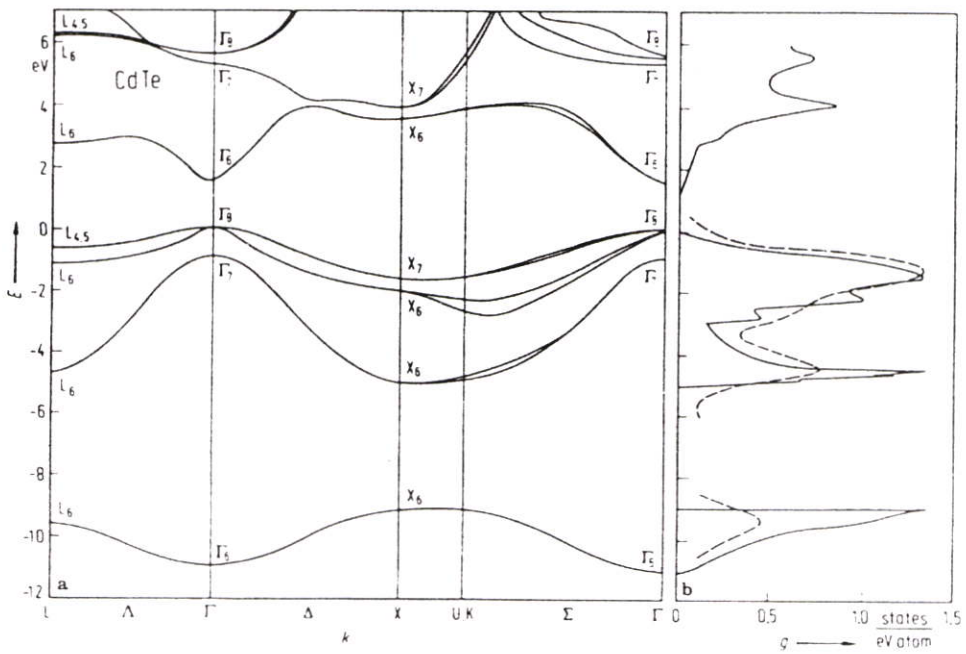
และสำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานชนิดต้องห้าม

$$(\alpha_{hv}) = C(hv - E_g)^{\frac{3}{2}} \quad (2.37)$$

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



รูปที่ 2.25 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและค่าพลังงานโฟตอน หรือค่าความยาวคลื่นของพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 2.26 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของแคดเมียมเทลลูไรด์

2.12 สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ [13-16]

ที่อุณหภูมิ 300K ผลึกแคดเมียมเทลลูไรด์ชนิดเอ็นมีสภาพคล่องของอิเล็กตรอนประมาณ $800-900 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ส่วนแคดเมียมเทลลูไรด์ชนิดพีมีสภาพคล่องของโฮลประมาณ $80 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ความหนาแน่นของพาหะมีค่า 10^{16} cm^{-3} การแอนนัลแคดเมียมเทลลูไรด์ชนิดเอ็นในบรรยากาศของแคดเมียมเป็นการเพิ่มความหนาแน่นของอิเล็กตรอน ส่วนแคดเมียมเทลลูไรด์ชนิดพีซึ่งมีความต้านทานสูงเมื่อให้ความร้อนในบรรยากาศของเทลลูเลียมจะทำให้มีความต้านทานต่ำซึ่งแสดงถึงการเพิ่มสภาพต้านทาน การเพิ่มขึ้นของสภาพต้านทานเกิดขึ้นเนื่องจากเทลลูเลียมจะสร้างระดับพลังงานขึ้นภายในช่องว่างแถบพลังงานที่ 0.1 ถึง 0.28 eV ที่ระดับพลังงานสูงกว่าแถบวาเลนซ์กลไกการนำไฟฟ้าของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ขึ้นกับคุณสมบัติของผลึก จากการศึกษาของบาโกซิวนา (Bagociunaitė) และคณะ(1972) แสดงให้เห็นถึงขอบของเกรนมีบทบาทมากกับการนำไฟฟ้าของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ จากผลการทดลองส่วนใหญ่แสดงให้เห็นถึงฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์มีความหนาแน่นอิเล็กตรอนอิสระเท่ากับ $10^{16} - 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ และสภาพคล่องของอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ $5-50 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$

2.13 สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ [9-13,24-25]

จากทฤษฎีโครงสร้างแถบพลังงานสารกึ่งตัวนำประกอบไปด้วยแถบวาเลนซ์ แถบพลังงานต้องห้ามและแถบนำ สารกึ่งตัวนำซึ่งมีช่องว่างแถบพลังงานไม่เกิน 3 eV ที่อุณหภูมิห้องอิเล็กตรอนและโฮลจากภายในผลึกจะถูกกระตุ้นด้วยพลังงานจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบนำ จากนั้นจะเกิดโฮลในแถบวาเลนซ์ ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิใดๆ ของสารกึ่งตัวนำจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของพาหะ และสภาพคล่องของพาหะอิสระเหล่านี้

2.13.1 สมบัติการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ

สมบัติการนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำขึ้นอยู่กับจำนวนพาหะอิสระเป็นสำคัญ กล่าวคือ ถ้าจำนวนอิเล็กตรอนในแถบนำเพิ่มมากขึ้น สารกึ่งตัวนำนั้นจะนำไฟฟ้าได้ดียิ่งขึ้นปริมาณความหนาแน่นของพาหะอิสระในสารกึ่งตัวนำถูกกำหนดด้วยขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือ และอุณหภูมิเป็นสำคัญ ที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน การกระจายความหนาแน่นของพาหะอิสระตามระดับพลังงานของผลึกเป็นไปตามฟังก์ชันการกระจายแบบเฟอร์มี-ดิแรก (Fermi-Dirac distribution function) ดังสมการที่ (2.17)

$$f(E) = \frac{1}{\exp\left[\frac{E - E_F}{kT}\right] + 1} \quad (2.38)$$

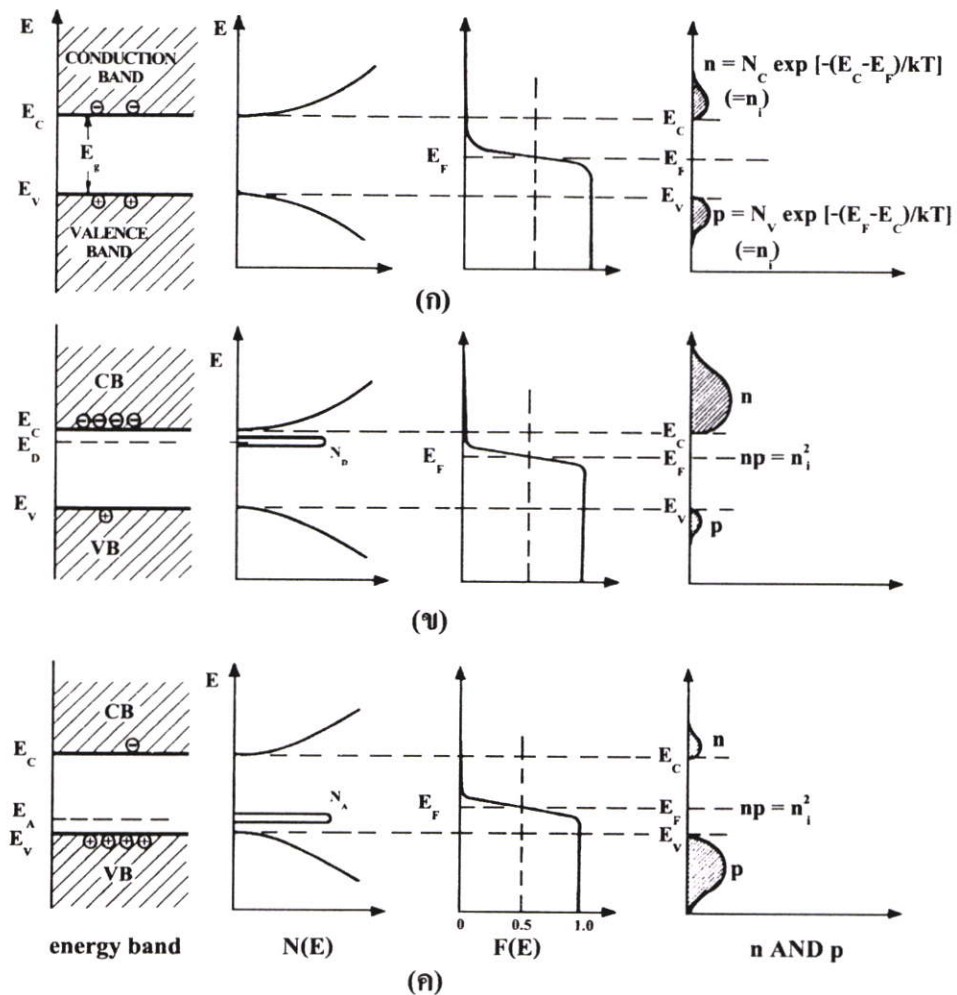
เมื่อ $f(E)$ คือ ฟังก์ชันการกระจายหรือความน่าจะเป็นที่จะพบอิเล็กตรอนในระดับพลังงาน E ที่อุณหภูมิ T ใดๆ

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 กรณีสารกึ่งตัวนำประเภทอินทรินซิกที่อุณหภูมิ 0 K (intrinsic semiconductor) และกรณีที่สารกึ่งตัวนำประเภทเอ็กซ์ทรินซิก (extrinsic semiconductor)



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

2.13.1.1 สารกึ่งตัวนำประเภทอินทรินซิก (intrinsic semiconductor) ที่อุณหภูมิ 0 K

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

$$n(E)dE = N_C(E)f(E)dE \quad (2.39)$$

เมื่อ N_C คือ ความหนาแน่นของสถานะพลังงาน (density of state) ในแถบนำซึ่งเมื่อพิจารณาจากกรณีที่แถบนำมีความสมมาตรในเชิงทรงกลมและมีจุดต่ำสุดเพียงจุดเดียวดังนั้น

$$N_C(E) = 2\pi \left(\frac{2m_e^*}{h} \right)^3 E^{\frac{1}{2}} \quad (2.40)$$

เมื่อ m_e^* คือ มวลยังผลของอิเล็กตรอน (effective mass of electron) ในแถบนำ

h คือ ค่าคงตัวของพลังค์ $= 6.625 \times 10^{-34}$ J.s

จากสมการที่ (2.40) พิจารณาโดยกำหนดให้ระดับพลังงานศูนย์อยู่ตรงขอบล่างของแถบนำนั้นคือ จะมีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในแถบนำทั้งหมดเท่ากับ

$$n_i = \int_0^{E_i} n(E)d(E) = \int_0^{E_i} N_C f(E)dE \quad (2.41)$$

เมื่อ E_i คือ ค่าพลังงานที่ขอบบนของแถบนำ

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

$$n_i = 4\pi \left[\frac{2m_e^*}{h^2} \right]^{\frac{3}{2}} \int_0^{\infty} \frac{E^{\frac{3}{2}}}{\exp\left[\frac{(E - E_F)}{kT}\right] + 1} dE \quad (2.42)$$

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

$$n_i = N_C \exp\left[\frac{E_F}{kT}\right] \quad (2.43)$$

เมื่อ

$$N_C = 2 \left[\frac{2\pi m_c^* kT}{h^2} \right]^{\frac{3}{2}} \quad (2.44)$$

และทำนองเดียวกันเราจะได้ความหนาแน่นของโฮลในแถบวาเลนซ์ดังนี้

$$p_i = N_V \exp\left[-\frac{E_F + E_g}{kT}\right] \quad (2.45)$$

เมื่อ

$$N_V = 2 \left[\frac{2\pi m_h^*}{h^2} \right] \quad (2.46)$$

โดยที่ E_g คือ ค่าช่องว่างของแถบพลังงาน

m_h^* คือ มวลข้งผลของโฮลในแถบวาเลนซ์

N_V คือ ความหนาแน่นของสถานะพลังงานในแถบวาเลนซ์

เนื่องจากในสารกึ่งตัวนำประเภทอินทรีนซิกที่อุณหภูมิ 0 K โฮลและอิเล็กตรอนมีจำนวนเท่ากัน ดังนั้นจากสมการที่ (2.43) และสมการที่ (2.45) จะได้

$$n_i p_i = n_i^2 = N_C N_V \exp\left[-\frac{E_g}{kT}\right] \quad (2.47)$$

และ

$$n_i = (N_C N_V)^{\frac{1}{2}} \exp\left[-\frac{E_g}{2kT}\right] \quad (2.48)$$

หรือ

$$n_i = p_i = 4.82 \times 10^{15} T^{\frac{3}{2}} \left(\frac{m_c^* m_h^*}{m^2} \right)^{\frac{3}{4}} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \quad (2.49)$$

จากสมการที่ (2.49) พาหะอิสระในสารกึ่งตัวนำประเภทอินทรีนซิกที่อุณหภูมิ 0 K จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในเทอมของเอ็กซ์โพเนนเชียล อุณหภูมิจึงมีบทบาทสำคัญกับสมบัติไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 K

2.13.1.2 สารกึ่งตัวนำที่ประเภทเอ็กซ์ทรีนซิก (extrinsic semiconductor)

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

$$n = N_C \exp \frac{E_F}{kT} \quad (2.50)$$

และความหนาแน่นของโฮลในแถบวาเลนซ์คือ

$$p = N_V \exp \left[-\frac{E_F - E_g}{kT} \right] \quad (2.51)$$

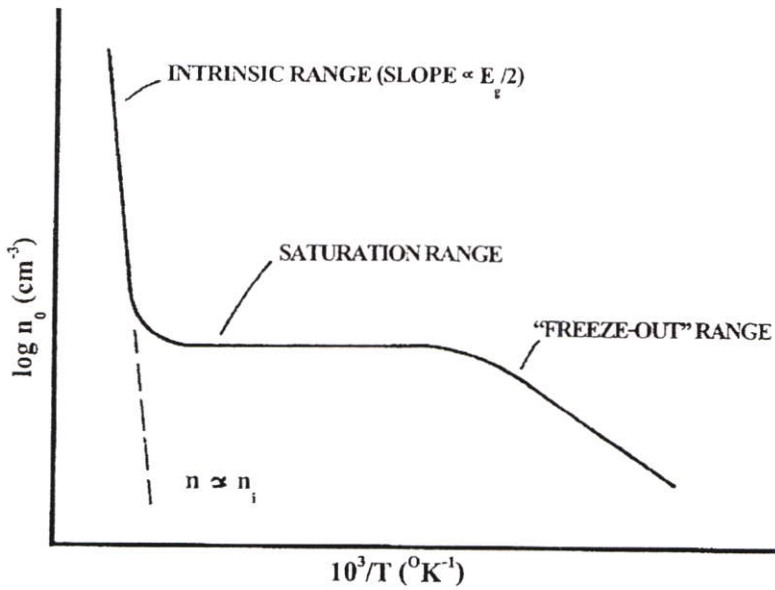
ภายใต้สภาวะที่สถานะพลังงานไม่ซ้อนสถานะจะยังคงมีความสัมพันธ์

$$np = n_i^2 = N_C N_V \exp \left[-\frac{E_g}{kT} \right] \quad (2.52)$$

พิจารณาสารกึ่งตัวชนิดเอ็น (n-type) ที่มีทั้งอะตอมผู้ให้ (N_D) ที่มีระดับพลังงานอยู่ต่ำกว่าขอบล่างของแถบนำเป็นสถานะพลังงานของอะตอมผู้ให้ (donor level: E_D) และอะตอมผู้รับ (N_A) ที่มีระดับพลังงานสูงกว่าขอบล่างของแถบวาเลนซ์เป็นสถานะพลังงานของอะตอมผู้รับ (acceptor level: E_A) จากเงื่อนไขความเป็นกลางทางไฟฟ้าของระบบจะได้

$$n + (N_A - n_A) = p + (N_D - n_D) \quad (2.53)$$

เมื่อ	n, p	คือ	ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ
	N_D, N_A	คือ	ความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้และผู้รับ
	n_D, 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 (2.53) สดรูปได้เป็น

$$n = p + (N_d - N_a) \quad (2.54)$$

จากสมการที่ (2.52) จะได้ว่า

$$n = \frac{1}{2} \left[(N_d - N_a) + \sqrt{(N_d - N_a)^2 + 4n_i^2} \right] \quad (2.55)$$

$$p = \frac{n_i^2}{n} \quad (2.56)$$

ในช่วงอุณหภูมิสูงมากจนกระทั่งความหนาแน่นพาหะส่วนใหญ่มาจากสารกึ่งตัวนำประเภทอินทรีนสิก ที่อุณหภูมิ 0 K มากกว่าอะตอมของสารเจือปนมากๆ ($|N_d - N_a| \ll n_i$) ช่วงนี้จะมีการเพิ่มขึ้นของพาหะอิสระตามการเพิ่มของอุณหภูมಿಯ่างรวดเร็วแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลเรียกช่วง

นี้ว่าเป็นบริเวณอินทรินซิก (intrinsic region) และสมการที่ (2.55) และ (2.56) จะกลายเป็นสมการในช่วงบริเวณอินทรินซิก

$$n = p = n_i \quad (2.57)$$

ในช่วงที่อุณหภูมิต่ำกว่าช่วงอินทรินซิก พาหะที่มาจากสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 K จะมีน้อยกว่าพาหะที่มากจากอะตอมของสารเจือปนมากๆ ($|N_d - N_a| \gg n_i$) พาหะข้างมากในช่วงนี้จะมีค่าคงที่เรียกช่วงนี้ว่าบริเวณอิ่มตัว (saturation region) โดยสมการที่ (2.55) จะเปลี่ยนเป็น

$$n \cong N_d - N_a \quad (2.58)$$

2. กรณีความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือปนมีมากหรือที่อุณหภูมิต่ำ

ในกรณีนี้พลังงานเนื่องจากความร้อนไม่สามารถไอออไนซ์อะตอมของสารเจือปนได้ทั้งหมด ดังนั้นจึงยังมีอะตอมผู้ให้ (n_d) บางส่วนเหลืออยู่ แต่โฮล (p) และอะตอมผู้รับ (n_a) จะมีค่าน้อยมาก ดังนั้นสมการที่ (2.53) จะเปลี่ยนเป็น

$$n = N_d - N_a - n_d \quad (2.59)$$

และ

$$n_d = N_d \left[\frac{1}{1 + \beta \exp\left\{ \frac{E_d + E_F}{kT} \right\}} \right] \quad (2.60)$$

เมื่อ β คือ แฟกเตอร์สภาพซ้อนสถานะ (degeneracy factor)

ที่สถานะพื้นฐานของอะตอมผู้ให้จากสมการที่ (2.50) (2.59) และ (2.60) สามารถเขียนได้ในรูปของสมการที่ (2.61) ดังนี้

$$n^2 + n(N_a + N'_c) - (N_d - N_a)N'_c = 0 \quad (2.61)$$

เมื่อ

$$N'_c = \beta N_c \exp\left(-\frac{E_d}{kT}\right) \quad (2.62)$$

และเมื่อ n อยู่ในรูปของสมการกำลังสองซึ่งมีรากของสมการคือ

$$n = -\frac{1}{2}(N_d - N'_C) + \frac{1}{2} \left[(N_d - N'_C)^2 + 4N'_C(N_d - N_a) \right]^{1/2} \quad (2.63)$$

เมื่อ $E_d \gg kT$ และ N'_C จะมีค่าน้อย เราสามารถกระจายสมการที่ (2.63) เทอมที่สองด้านขวา
มือได้ด้วยอนุกรมทวินาม (binomial series) จะได้

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

$$n \cong \frac{N'_C(N_d - N_a)}{N_a + N'_C} \quad (2.64)$$

ถ้า $N_a \gg N'_C$ สมการที่ (2.64) จะกลายเป็น

$$n = \frac{N'_C(N_d - N_a)}{N_a} = \frac{(N_d - N_a)}{2N_a} \beta N'_C \exp\left[-\frac{E_d}{kT}\right] \quad (2.65)$$

ถ้า N_a มีค่าน้อยมากนั่นคือ $N_d \gg N'_C \gg N_a$ จะทำให้สมการที่ (2.61) สามารถลดรูปได้เป็น

$$\frac{n^2}{N_d} - N'_C = 0 \quad (2.66)$$

หรือ

$$n \approx \sqrt{\beta N_d N'_C} \exp\left(-\frac{E_d}{kT}\right) \quad (2.67)$$

จะเห็นได้ว่าความหนาแน่นของพาหะอิสระจะลดลงตามการลดลงของอุณหภูมิในแบบ
เฮ็คซ์โพเนนเชียล ซึ่งเรียกช่วงที่สองนี้ว่าบริเวณ ฟรีซเอาท์ (freeze-out region) โดยการลดลงจะ
เป็นไปตามสมการที่ (2.66) เมื่ออุณหภูมิต่ำลงจนกระทั่ง $N_a < n < N_d$ และลดลงตามสมการที่
(2.67) เมื่ออุณหภูมิต่ำลงจนกระทั่ง $n < N_a < N_d$

2.14 สภาพนำไฟฟ้า [9-13,24-25]

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

$$J = \sigma E = e(\mu_n n + \mu_p p)E \quad (2.68)$$

เมื่อ μ_n, μ_p คือ สภาพคล่องของอิเล็กตรอนและโฮล ตามลำดับ

n คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

p คือ ความหนาแน่นของโฮล

ส่วนกลับของสภาพนำไฟฟ้า เรียกว่า สภาพต้านทานไฟฟ้า (resistivity : ρ) ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{e(\mu_n n + \mu_p p)} \quad (2.69)$$

ถ้ามีก้อนเนื้อสารกึ่งตัวนำซึ่งให้แรงดัน V และเกิดกระแส I แล้วจะได้ว่า

$$J = \frac{I}{A} \quad (2.70)$$

และ

$$E = \frac{V}{\ell} \quad (2.71)$$

สามารถเขียนสมการที่ (2.68) ใหม่ได้เป็น

$$\frac{I}{A} = \sigma \left(\frac{V}{\ell} \right) \quad (2.72)$$

หรือ

$$V = \left(\frac{\ell}{\sigma A} \right) I = \left(\frac{\rho \ell}{A} \right) I = IR \quad (2.73)$$

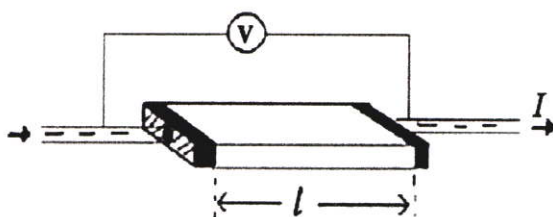
สมการที่ (2.73) คือ กฎของโอห์มสำหรับสารกึ่งตัวนำ ความต้านทานเป็นฟังก์ชันกับสภาพความต้านทานหรือสภาพนำไฟฟ้า และขึ้นกับมิติรูปทรงทางเรขาคณิตของสารกึ่งตัวนำ

2.14.1 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า [8-13,24-25]

วิธีการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำสามารถกระทำได้หลายวิธี ทั้งวิธีที่ใช้ส่วนของอุปกรณ์ต่อเข้าสัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่างและวิธีที่ไม่ต้องสัมผัสโดยตรง สำหรับวิธีที่จะกล่าวถึงในที่นี้เป็นวิธีที่ใช้การสัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่าง ซึ่งทำได้โดยการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในชิ้นสารตัวอย่างแล้ววัดความต่างศักย์ระหว่างจุดสองจุดบนชิ้นสารนั้น

2.14.1.1 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง (direct resistivity method)

โดยทั่วไปแล้วการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้ามักจะวัดความต้านทานก่อน ซึ่งเป็นวิธีวัดโดยตรงนี้หมายถึง วัดค่าความต้านทานรวมของสสารจากนั้นมาหาค่าความยาว และพื้นที่หน้าตัดของสสารนั้น การวัดวิธีนี้จะต้องทำให้สสารที่ต้องการวัดมีรูปร่างเรขาคณิตที่แน่นอน เพื่อที่จะวัดค่าพื้นที่หน้าตัดและความยาวให้ได้แน่นอน เช่น แท่งกลมทรงกระบอก แท่งสี่เหลี่ยม เป็นต้น จากนั้นจึงให้กระแสไฟฟ้าเข้าไปที่ปลายด้านหนึ่ง และให้กระแสไหลออกผ่านสารตัวอย่างที่ปลายอีกด้านหนึ่ง ขณะเดียวกันก็วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จุดปลายทั้งสองนั้นพร้อม ๆ กัน จากที่ทราบค่ากระแสและศักย์ไฟฟ้านี้ สามารถนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าได้ดังต่อไปนี้ เมื่อ กำหนด R เป็นความต้านทานรวมจะมีความสัมพันธ์กับความต้านทานจำเพาะและพื้นที่หน้าตัด A บริเวณที่ปล่อยกระแสไหลเข้าไปและ l เป็นระยะทางระหว่างขั้วศักย์ไฟฟ้าที่วัด



รูปที่ 2.29 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.74)$$

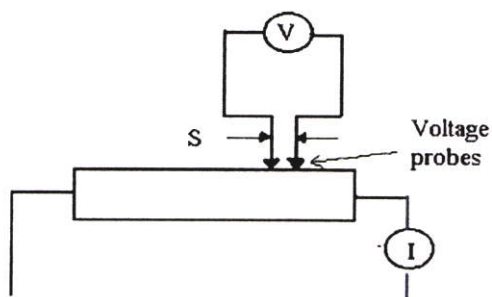
$$\rho = R \times \frac{A}{l} = \left(\frac{V}{I} \right) \left(\frac{A}{l} \right) \quad (2.75)$$

จะเห็นว่าวิธีนี้เป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็ว แต่ค่าที่ได้เป็นค่าโดยประมาณซึ่งต้องคำนึงถึงองค์ประกอบอื่นๆ ด้วย ซึ่งความถูกต้องในการวัดโดยวิธีนี้ขึ้นอยู่กับบริเวณผิวสัมผัสที่กระแสไหลเข้าและออกนั้นมีลักษณะเป็น โอห์มมิกที่ดีหรือไม่ ถ้าไม่มีคุณสมบัติโอห์มมิกที่ดีแสดงว่ามีความต้านทานที่ผิวสัมผัสทั้งสองขั้วไฟฟ้าเกิดขึ้นด้วย ค่าความต้านทาน R ที่วัดได้จึงเป็นค่าความต้านทานรวมทั้งหมด ดังนั้น ค่าความต้านทานจริงของสารกึ่งตัวนำจะน้อยกว่าค่าที่วัดได้แน่นอน ความถูกต้องอีก

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

2.14.1.2 การวัดความต้านทานจำเพาะโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น (linear two point probes)

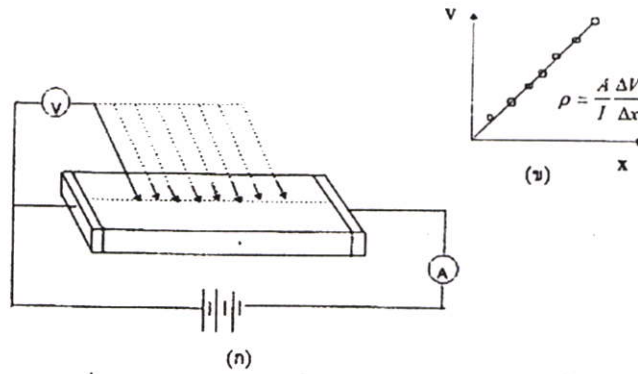
การวัดด้วยวิธีนี้มีลักษณะใกล้เคียงกับวิธีวัดโดยตรง แตกต่างที่ลักษณะของขั้วไฟฟ้าของการวัด ศักย์ไฟฟ้าจะวัดบนสารตัวอย่าง ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.30 วิธีการวัดชนิดนี้เป็นวิธีที่พัฒนาขึ้นจากแบบแรก เพื่อกำจัดศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อหัวท้ายของผิวสัมผัสให้ลดลงและสามารถตรวจสอบความสกปรกบนพื้นผิวของชิ้นสารตัวอย่างได้ด้วย



รูปที่ 2.30 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น

ข้อจำกัดของการวัดด้วยวิธีนี้คือ จะต้องวัดบนสารตัวอย่างที่มีความหนาสม่ำเสมอและมีรูปทรงเรขาคณิตแน่นอน โดยพยายามให้กระแสผ่านเข้าไปในสารตัวอย่างมีค่าน้อยที่สุดเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความร้อนภายในสาร เพราะค่าความต่างศักย์ที่วัดได้อาจจะไม่ถูกต้อง อีกทั้งในการวัดทุกครั้งจะต้องใช้โวลต์มิเตอร์ที่มีค่าความต้านทานภายในสูง และจุดที่ต้องการวัดศักย์ไฟฟ้าควรจะอยู่ห่างจากจุดที่ปล่อยกระแสเข้าและออกพอสมควร เพื่อป้องกันสารเจือเข้าไปทำการรวมตัวกันระหว่างจุดที่ทำการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า หากมีสารเจือเข้ามารวมตัวที่บริเวณที่วัดนี้จะมีผลทำให้เกิดการรวมกับพาหะข้างน้อย(minority carriers) บริเวณนั้น ทำให้การวัดค่าความต้านทานจำเพาะที่วัดได้สูงเกินความเป็นจริง นอกจากนี้ควรคำนึงถึงความสม่ำเสมอของเส้นสมศักย์(equi-potential lines) โดยการวัดที่บริเวณจุดที่คิดว่าเป็นเส้นสมศักย์นั้นสม่ำเสมอ (ตรงกลางของสารตัวอย่าง) สัดส่วนระหว่างระยะขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้าต่อพื้นที่ ตรงจุดที่ปล่อยกระแสเข้าและออกจะต้องมีค่ามากกว่าสามเท่า $l/A > 3$ เมื่อ l คือ ระยะห่างระหว่างขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้า และ A คือ พื้นที่บริเวณให้กระแสไฟ

ฟ้า ข้อควรคำนึงถึงอีกประการก็คือ สารที่นำมาวัดมีโครงสร้างผลึกชนิดใด เป็นรูปลูกบาศก์หรือไม่ ถ้าไม่ใช่จะต้องทราบทิศทางของการวัดว่าอยู่ในทิศทางหรือระนาบใดของผลึก การวัดควรใช้วิธีตรงที่ขั้วหนึ่งไว้และเลื่อนตำแหน่งอีกขั้วหนึ่งออกไปเป็นระยะๆ โดยมีมาตราส่วนบอกระยะและนำมาเขียนกราฟดังรูปที่ 2.31 (ก) และ (ข) ความชันที่ได้จะเป็นค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้า



รูปที่ 2.31 แสดงการวัดความต้านทานแผ่น โดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น

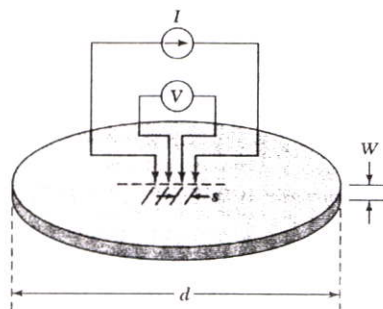
ก. การวัดแบบสองขั้วโดยมีการเลื่อนระยะที่ขั้วหนึ่ง

ข. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับระยะทางที่ได้จากการวัดชนิดเลื่อนขั้วไฟฟ้า

ข้อดีของการวัดแบบสองขั้วในหลาย ๆ ตำแหน่งนี้จะสามารถแยกสภาพต้านทานไฟฟ้าที่สภาพผิวระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำและความต้านทานจำเพาะภายในของสารกึ่งตัวนำได้

2.14.1.3 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสี่ขั้วเชิงเส้น (liner four point probes)

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



รูปที่ 2.32 แสดงการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสี่ขั้วเชิงเส้น

จากรูปที่ 2.32 เป็นการวัดความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มแบบสี่ขั้วเชิงเส้น โดยวัดที่ผิวหน้าของฟิล์มที่มีรูปแบบใดๆ ก็ได้ แต่ตำแหน่งของขั้วทั้งสองจะต้องวางเรียงอยู่ในแนวเดียวกัน โดยสองขั้วนอกวัดกระแสไฟฟ้าได้จากสมการดังนี้

$$\rho = \frac{2\pi \frac{V}{I}}{\left[\frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_3} - \frac{1}{S_1 + S_2} - \frac{1}{S_2 + S_3} \right]} \quad (2.76)$$

โดยที่ S คือช่องว่างระหว่างขั้วที่ติดกัน ในกรณีที่ $S_1 = S_2 = S_3$ สมการที่ (2.76) จะเขียนใหม่ได้เป็น

$$\rho = \frac{2\pi SV}{I} \quad (2.77)$$

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

ในการศึกษากลไกการนำไฟฟ้าซึ่งเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมินั้นแบ่งออกเป็น 2 ช่วงอุณหภูมิด้วยกัน โดยในช่วงอุณหภูมิสูงการนำไฟฟ้าอธิบายได้โดยการประมาณของ Seto ในแบบจำลองนี้ ประจุจะถูกดักจับไว้ที่ขอบเขตของเกรน ทำให้เกิดเขตปลอดพาหะขึ้นในบริเวณเกรนซึ่งเป็นเหตุผลที่ทำให้เกิดค่าแกงศักย์ที่ขอบเขตของเกรน หรือเกิดการขยายตัวของเขตปลอดพาหะหรือเพียงบางส่วน ซึ่งขึ้นกับขนาดของความหนาแน่นของระดับพลังงานของกับดักประจุ ระดับพลังงานของสารเจือ ขนาดของเกรน และความยาวเดอรับายน์ ซึ่งความสูงของค่าแกงศักย์ที่ขอบเขตของเกรนนี้จะขึ้นกับอุณหภูมิ พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าแกงศักย์จะลดลง และทำให้การนำไฟฟ้าเป็นแบบเทอร์มิโอนิกอิมิตชันซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\sigma = AT^2 \exp\left[\frac{-\Phi_b}{kT}\right] \quad (2.78)$$

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

ส่วนในช่วงอุณหภูมิต่ำนั้นการนำไฟฟ้าอธิบายได้โดยการประมาณตามแบบจำลองของ Mott ซึ่งจำลองมาจากการนำไฟฟ้าในสารที่มีการจัดเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบ เช่น อะมอร์ฟัส เรียกการนำไฟฟ้าแบบการกระโดดเป็นช่วง ๆ (variable-range hopping) ซึ่งจะโคจรเด่นในช่วงที่สารกึ่งตัวนำ

มีอุณหภูมิต่ำ เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำสารกึ่งตัวนำมีลักษณะการจัดเรียงตัวของอะตอมแบบไม่เป็นระเบียบ โฟนอนมีพลังงานไม่เพียงพอในการเคลื่อนย้ายไปยังอะตอมข้างเคียง และพาหะจะเคลื่อนที่ลักษณะคล้ายการกระโดดจากอะตอมเดิมไปยังอะตอมข้างเคียงที่มีระดับพลังงานเดียวกัน ซึ่งในสารกึ่งตัวนำที่เป็นผลึกพหุพันธ์นั้นที่อุณหภูมิต่ำ พาหะไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านบริเวณขอบเขตของเกรนได้ด้วยกระบวนการเทอร์มิโอนิกส์อิมิสชัน ซึ่งที่ขอบเขตของเกรนนั้นมีลักษณะเป็นระดับพลังงานของกักขังประจุซึ่งเกิดจากความไม่เป็นระเบียบของอะตอมหรือความไม่สมบูรณ์ของพันธะเคมี ซึ่งกระจายอยู่ในช่องว่างแถบพลังงานซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ

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

เมื่อ T_0 คือ อุณหภูมิห้อง(300 K)

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

แคสตาลดีน (Castaldini) และผู้ร่วมงาน [28] ได้ทำการศึกษาระดับพลังงานต่าง ๆ ที่ปรากฏอยู่ในผลึกเดี่ยวของ CdTe และ CdZnTe ด้วยวิธี สเปกโตรสโคปีช่วงชะงะของระดับพลังงานลึก (DLTS) และวิธี สเปกโตรสโคปีของกระแสช่วงชะงะที่เกิดจากการเหนี่ยวนำด้วยแสง (PICTS) และไว้ทำการจัด ระดับพลังงานออกเป็นหมวดหมู่ดังนี้คือ

1. ระดับพลังงาน A_0 เป็นระดับพลังงานที่อยู่เหนือขอบบนสุดของแถบวาเลนซ์เท่ากับ 0.12 eV หรือ $E_v + 0.12$ eV ซึ่งเป็นระดับพลังงานที่ปรากฏอยู่ในผลึก CdTe ที่เจือด้วย Cl เท่านั้น โดยที่อะตอม Cl จะเข้าไปแทนที่ในตำแหน่งของอะตอม Te และเกิดการคัปปลิงกับ V_{Cd} แล้วกลายเป็นข้อบกพร่องผลึกเชิงซ้อน (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) และแมททิว (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 ข้อบกพร่องผลึกเชิงซ้อน V_{Cd} และ V_{Te} แต่สาเหตุอื่น ๆ เช่น สารเจือตกค้าง Li หรือ Cu อาจมีส่วนเกี่ยวข้องกับข้อบกพร่องผลึกเชิงซ้อน V_{Cd} และ V_{Te} นี้

ในรูปแบบต่าง ๆ เช่น $(V_{Cd}^{2-} - Cu_i^+)^-$, $(2Cu_{Cd}^- - V_{Te}^+)^-$ หรือข้อบกพร่องผลึกเชิงซ้อนที่เกี่ยวข้องกับ 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 อย่างคือปริมาณของสารเจือ (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 ซึ่งเป็นระดับพลังงานที่เกี่ยวข้องกับข้อบกพร่องผลึกเชิงซ้อนของ 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-} โคลดเดี่ยว (isolated V_{Cd}) แต่สำหรับในผลึก CdTe:Cl ที่ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อน ข้อบกพร่องผลึก V_{Cd}^{2-} นี้จะค้ำปลิงกับ Cl_{Te} กลายเป็นศูนย์กลาง A ดังนั้น V_{Cd}^{2-} ที่เหลืออยู่จะมีปริมาณน้อยแต่บางครั้งในผลึก CdTe:Cl ที่มีข้อบกพร่องผลึกชนิด Te_{Cd}^- ปรากฏรวมอยู่ด้วยเมื่อผลึก CdTe:Cl นี้ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อน ข้อบกพร่องผลึกชนิด Te_{Cd}^- จะเปลี่ยนแปลงไปเป็น V_{Cd}^{2-} และ Te_i ซึ่งข้อบกพร่อง V_{Cd}^{2-} จะยังกลับมาปรากฏ โคลดเด่นอีกครั้งหนึ่ง

7. ระดับพลังงาน F เป็นระดับพลังงานลึก อยู่ที่ $E_v+0.57$ eV และปรากฏอยู่ในผลึก $Cd_{0.8}Zn_{0.2}Te$ แต่ไม่พบในผลึก CdTe และเชื่อว่าระดับพลังงานลึกนี้เป็นระดับพลังงานผู้รับ (acceptor level) ที่มีค่าอยู่ในช่วง 0.55-0.65 eV และเกี่ยวข้องกับ V_{Zn}

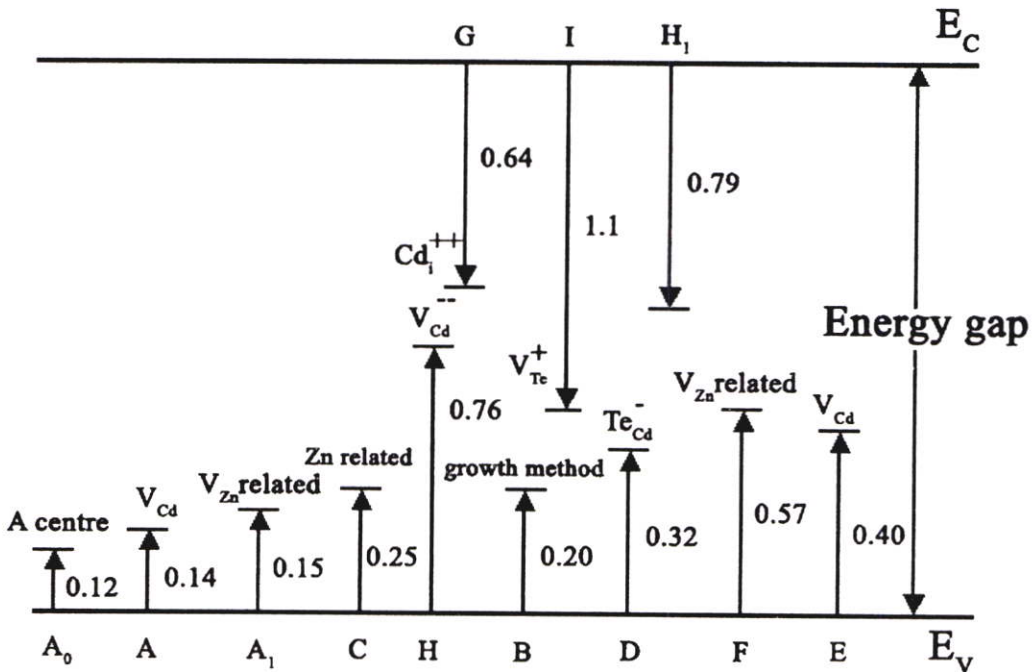
8. ระดับพลังงาน G เป็นกับดักอิเล็กตรอนที่มีระดับพลังงานอยู่ที่ $E_c-0.64$ eV และจะพบเฉพาะในผลึก CdTe:Cl ทั้งก่อนและหลังที่ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อนซึ่งระดับพลังงานนี้มีจุดกำเนิดมาจาก Cd_i^{2+}

9. ระดับพลังงาน H เป็นระดับพลังงานผลึกอยู่ที่ $E_v+0.76$ eV ได้มีการศึกษาพลังงานลึกนี้ทั้งสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติเชิงแสงไว้จำนวนมาก 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 ระดับพลังงานลึกนี้จะอยู่ห่างจากระดับเฟอร์มีมากและจะไม่เกี่ยวข้องกับกระบวนการตรึงระดับเฟอร์มี

10. ระดับพลังงาน H_1 เป็นกับดักอิเล็กตรอนระดับลึกอยู่ที่ $E_C - 0.79$ eV ซึ่งจะพบในผลึก CdTe:Cl ทั้งก่อนและหลังได้รับการแอนนัลด้วยความร้อน สารเจือ Cl จะเหนี่ยวนำให้เกิด $(V_{Cd}^{2-} - 2Cl_{Te}^+)^0$ ซึ่งก็ถือว่าเป็นศูนย์กลาง A ซึ่งจะมีพฤติกรรมหักล้างกับระดับผู้รับ V_{Cd}^{2-} ถึงแม้ว่า V_{Cd}^{2-} จะเป็นระดับพลังงานตื้นเกินไปที่จะก่อให้เกิดกระบวนการตรึงระดับเฟอร์มีที่ตรงบริเวณกึ่งกลางช่องว่างแถบพลังงานจากการเปรียบเทียบระดับพลังงาน H_1 กับระดับพลังงานต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในผลึกสารตัวอย่างทั้งหมดที่ได้ทำการศึกษา พบว่าระดับพลังงาน H_1 จะอยู่ตรงกึ่งกลางของช่องว่างแถบพลังงานและจะประพฤติตัวเป็นระดับพลังงานผู้ให้ ซึ่งจะหักล้างกับระดับพลังงานผู้รับในสารกึ่งฉนวน CdTe:Cl นอกจากนี้ระดับพลังงาน H_1 ยังมีปริมาณที่มากเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณของระดับพลังงาน H ดังนั้นระดับพลังงาน H_1 จะประพฤติตัวเป็นคู่แข่งกับระดับ H

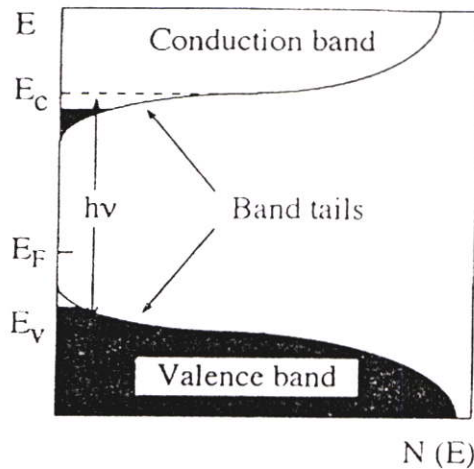
11. ระดับพลังงาน I เป็นระดับพลังงานอยู่ที่ $E_C - 1.10$ eV ซึ่งตรวจวัดได้จากเทคนิค PICTS และ CL ระดับพลังงานของกับดักใน CdTe และ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ นี้มีค่าเท่ากับ 1.1 eV มีจุดกำเนิดมาจาก V_{Te}^+ ซึ่งจะประพฤติตัวเป็นกับดักอิเล็กตรอนระดับพลังงานทั้งหมดเหล่านี้จะแสดงในรูปที่ 2.33



รูปที่ 2.33 แสดงระดับพลังงานต่างๆที่ปรากฏในผลึกของสารกึ่งตัวนำ CdTe และ CdZnTe [28]

2.16 ส่วนหางของแถบพลังงาน[31-33]

วัสดุประเภทฟิล์มบางมักมีข้อบกพร่องของผลึกจำนวนมากระดับพลังงานของข้อบกพร่องของผลึกเหล่านี้จะมีอันตรกิริยาต่อกันส่งผลให้ระดับพลังงานเหล่านี้แผ่ขยายออกโดยจะไม่เป็นระดับพลังงานเฉพาะค่า (discrete level) อีกต่อไปบางครั้งก็แผ่ออกไปจรดขอบบนสุดของแถบวาเลนซ์หรือขอบล่างสุดของแถบนำซึ่งเสมือนกับว่าแถบวาเลนซ์หรือแถบนำนี้มีความหนาแน่นของสถานะทางพลังงาน (energy density of state) ยื่นเข้าไปในช่องว่างแถบพลังงานซึ่งนิยมเรียกส่วนที่ยื่นเข้าไปในช่องว่างแถบพลังงานนี้ว่าส่วนหางของแถบพลังงาน (band tail หรือ Urbach's tail) ดังแสดงดังรูปที่ 2.34

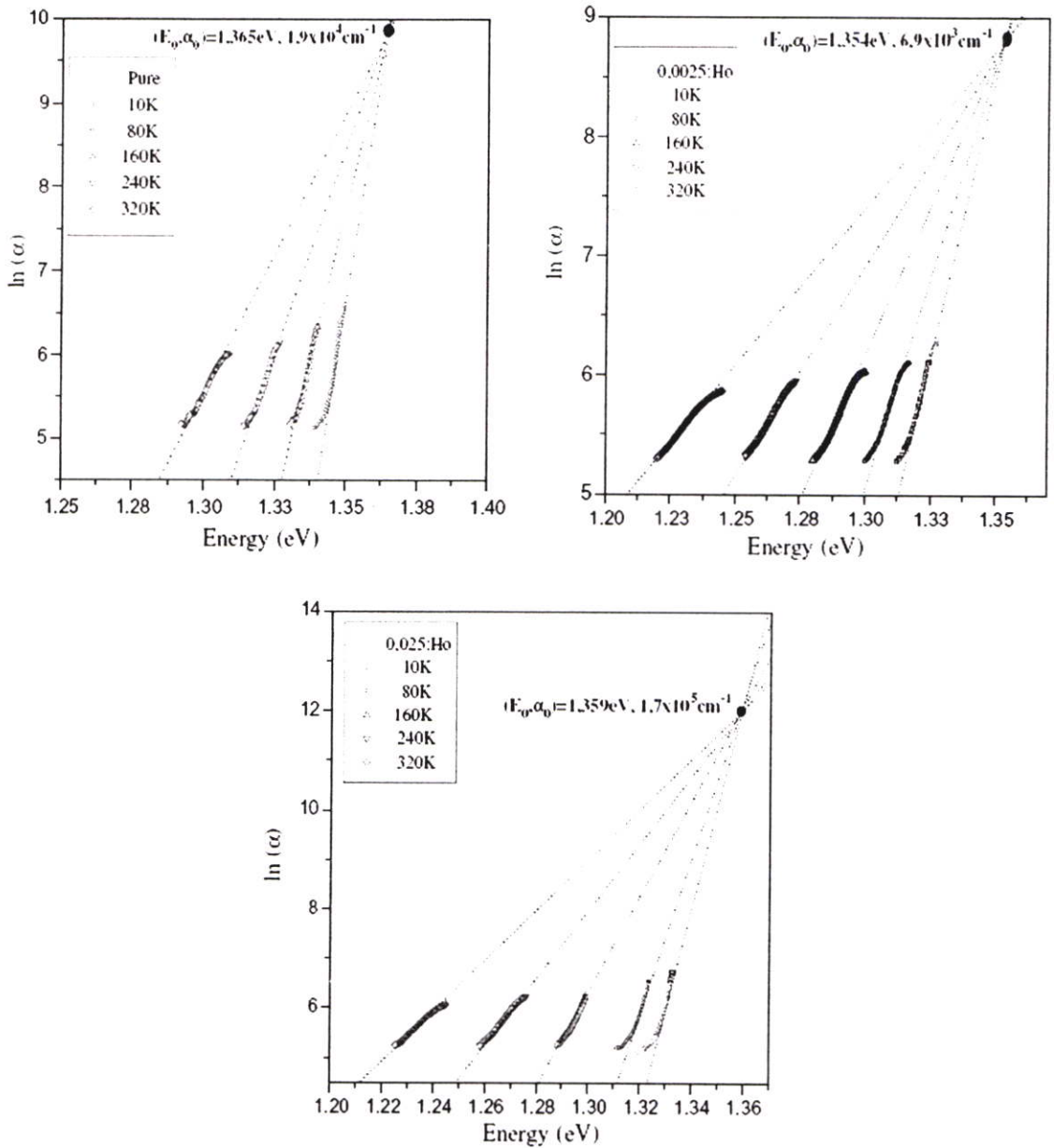


รูปที่ 2.34 แสดงส่วนหางของแถบพลังงานซึ่งมีทั้งส่วนหางของแถบวาเลนซ์และส่วนหางของแถบนำ

ในเชิงการทดลองส่วนหางของแถบพลังงานสามารถตรวจสอบได้จากการวัดขอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซึ่งเออแบ็ก (Urbach) ได้แสดงให้เห็นว่าขอบการดูดกลืนของผลึกจะเพิ่มขึ้นแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลดังความสัมพันธ์

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

เมื่อ α_0 และ E_0 เป็นพารามิเตอร์ของผลึกแต่ละชนิด ส่วน k_B คือค่าคงตัวของโบลตซ์มันน์ T คืออุณหภูมิ (เคลวิน) และ σ คือ ความชัน (steepness) ของขอบการดูดกลืนแสง จากสมการที่ 2.80 นี้บอกเป็นนัย ๆ ว่า กราฟของความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \alpha$ กับพลังงาน (E) จะเป็นเส้นตรงในช่วงพลังงานที่มีความต่ำกว่าขอบการดูดกลืนพื้นฐาน (หรือพิจารณาที่พลังงานต่ำกว่าช่องว่างแถบพลังงานนั่นเอง) การลากส่วนต่อของเส้นตรงที่วัดที่อุณหภูมิต่าง ๆ จะถูเข้าสู่จุด (E_0, α_0) ซึ่งเรียกจุดนี้ว่าจุดถูรวม (converging point) ดังปรากฏในรูปที่ 3.35



รูปที่ 2.35 แสดงกราฟเส้นตรงของความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \alpha$ กับพลังงาน (E) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ โดยมีจุดศูนย์กลางที่ (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

อริบารเรน (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 ชนิดจะแสดงถึงความสัมพันธ์

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

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

บทที่ 3

การดำเนินการวิจัย

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัย

3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เพื่อใช้เตรียมฟิล์มบาง แคลคิเมียมเทลลูไรด์โดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด

1. กระจกสไลด์
2. ที่ตัดกระจก
3. เครื่องอัลตราโซนิก
4. เครื่องเป่าลมร้อน
5. เตาอบ
6. บีกเกอร์ขนาด 200 มิลลิลิตร
7. ปากคืบ
8. สารเคมี (น้ำยาล้างจาน น้ำปลอตกประจุ อะซิโตนและ เอทธานอล)
9. นาฬิกาจับเวลา

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางแคลคิเมียมเทลลูไรด์โดยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิด

1. ระบบระเหิดสารในระยะประชิดประกอบด้วย
 - ท่อแก้วบอโรซิลิเกตปลายปิดหนึ่งด้าน
 - กล้องแกรไฟต์
 - เทอร์โมคัปเปิลชนิด K
 - เครื่องควบคุมอุณหภูมิของยี่ห้อ SHIMADEN รุ่น PID FP21
 - เครื่องควบคุมอุณหภูมิของยี่ห้อ SHIMADEN รุ่น PID FP93
 - หลอดทั้งสแตน 1,000 วัตต์
 - ปั๊มฟักโรตารี (rotary pump)
 - เกทวัดความดันต่ำ
2. สารแคลคิเมียมเทลลูไรด์บริสุทธิ์ 99.99%
3. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่งของยี่ห้อ sartorius
4. เมทธานอล
5. ปากคืบ

6. หน้ากากป้องกันไอระเหยของสารเคมี
7. แวนตากรองแสง
8. ภาชนะที่ใช้ใส่สารเคมีที่สามารถควบคุมความชื้นได้ (dessicator)

3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการแอนนัลฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ในบรรยากาศแคดเมียมคลอไรด์ในระบบสุญญากาศ

1. ระบบระเหิดสารในระบบสุญญากาศ
2. ถังแก๊สไนโตรเจนสำหรับการแอนนัล
3. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่งของยี่ห้อ sartorius
4. สารแคดเมียมคลอไรด์
5. ปากคีบ

3.1.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการแอนนัลฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ในบรรยากาศแคดเมียมคลอไรด์ในบรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน

1. เตาแอนนัล
2. แก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์
3. ถังแก๊สไนโตรเจนสำหรับการแอนนัล
4. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่งของยี่ห้อ sartorius
5. สารแคดเมียมคลอไรด์
6. ปากคีบ
7. นาฬิกาจับเวลา

3.1.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการแอนนัลฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ในอากาศ

1. เตาแอนนัล
2. นาฬิกาจับเวลา
3. ปากคีบ

3.1.6 อุปกรณ์ที่ใช้ในการแอนนัลฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ในบรรยากาศแคดเมียมคลอไรด์ในระบบระเหิดสารในระยะประชิด

1. เตาแอนนัล
2. สารแคดเมียมคลอไรด์
3. ถังแก๊สไนโตรเจนสำหรับการแอนนัลในระบบระเหิดสารในระยะประชิด
4. แก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์
5. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่งของยี่ห้อ sartorius

6. ปากคืบ

7. นาฬิกาจับเวลา

3.1.7 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค

เอกซเรย์ดิฟแฟรคโทรมิเตอร์(XRD) ของยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ 1.5418 อังสตรอม ใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์แรงดัน 30 กิโลโวลต์โดยวัดจากมุม 20 – 60 องศา

3.1.8 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope : SEM)ของยี่ห้อ LEO รุ่น LEO 1455VP โดยใช้แรงดัน 6 กิโลโวลต์ และกำลังแยกความละเอียดของภาพถ่าย 1,000 3,000 และ 5,000 เท่า

3.1.9 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางแสง

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

3.1.10 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า

1. อิเล็กโทรมิเตอร์ของยี่ห้อ Keithley รุ่น 610 CR
2. แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงของยี่ห้อ Keithley รุ่น 236
3. เครื่องควบคุมอุณหภูมิของยี่ห้อ SHINKO รุ่น MCD100 พร้อมเทอร์โมคัปเปิลชนิด K
4. เครื่องวัดอุณหภูมิของยี่ห้อ Digicon รุ่น Dp-50A
5. เต้าให้ความร้อน
6. กาวเงินนำไฟฟ้า
7. สายไฟ

3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด [9,12,]

3.2.1 การเตรียมและการทำความสะอาดแผ่นกระจกสไลด์เพื่อเป็นฐานรองรับ[9]

1. นำแผ่นกระจกสไลด์ตัดให้ได้ขนาด 25x50 มม.² แช่ในน้ำที่ผสมน้ำยาล้างจานเป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อทำการล้างคราบไขมันและสิ่งสกปรก
2. ทำความสะอาดกระจกสไลด์ด้วยน้ำปอดคประจุเป็นเวลา 10 นาที
3. ทำความสะอาดกระจกสไลด์ด้วยอะซีโตนเป็นเวลา 10 นาที
4. ทำความสะอาดกระจกสไลด์ด้วยเอทานอลเป็นเวลา 10 นาที
5. ทำความสะอาดกระจกสไลด์ด้วยน้ำปอดคประจุ 3 ครั้งๆละ 10 นาที
6. ขั้นตอนในข้อ 2-5 นำบีกเกอร์ไปใส่ในเครื่องอัลตราโซนิก
7. เป่าแห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน
8. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่เป่าแห้งแล้วไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที

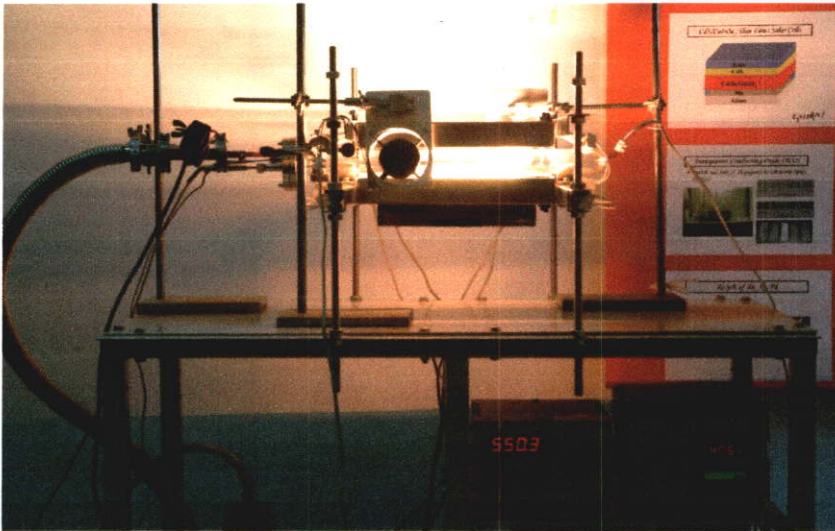
3.2.2 การเตรียมและการทำความสะอาดระบบระเหิดสารในระยะประชิด

1. ทำความสะอาดกล่องแกรไฟต์ด้วยเมทานอล
2. นำกล่องแกรไฟต์เป่าแห้งด้วยเครื่องเป่าลมร้อน
3. นำกล่องแกรไฟต์ไปใส่ในท่อแก้วในระบบเดาแอนนิตทำการอีแวก-รีฟิล (evac-refill) โดยการดูดอากาศภายในท่อแก้วออกแล้วเติมแก๊สไนโตรเจนเข้าไปจนกระทั่งมีความดันเกือบเท่าความดันบรรยากาศ ทำการดูดเอาแก๊สไนโตรเจนออกจากท่อแก้ว ทำซ้ำกันอีก 3 ครั้ง เพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีออกซิเจนเหลืออยู่
4. ทำการอบกล่องแกรไฟต์ที่ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
5. ปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิ รอจนถึงอุณหภูมิห้องแล้วนำกล่องแกรไฟต์ไปเก็บไว้ในภาชนะควบคุมความชื้น
6. ทำความสะอาดท่อแก้วบอโรซิลิเกตปลายปิดหนึ่งด้านด้วยน้ำยาล้างจาน เช่าทำความสะอาดทำความสะอาดด้วยน้ำจนกระทั่งไม่มีน้ำยาล้างจานเหลืออยู่ จากนั้นเช่าทำความสะอาดด้วยเอทานอล 1 ครั้งตามด้วยน้ำปอดคประจุ 3 ครั้ง ทำการเป่าแห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน ปิดปากท่อเพื่อป้องกันสิ่งสกปรก
7. ทำความสะอาดชิ้นส่วนต่างๆด้วยเอทานอล
8. ทำความสะอาดขั้วไฟฟ้าด้วยแปรงทองเหลือง ขัดให้เรียบด้วยกระดาษทรายละเอียด ทำความสะอาดสิ่งสกปรกที่ตกค้างด้วยน้ำยาทำความสะอาดขั้วไฟฟ้า

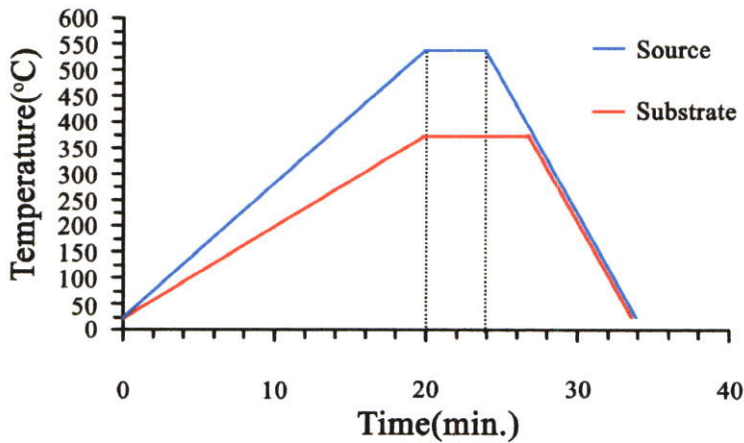
3.2.3 การเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดซึ่งประกอบด้วยวิธีและขั้นตอนดังนี้

1. ชั่งสารตั้งต้นแคดเมียมเทลลูไรด์บริสุทธิ์ 99.99% ให้ได้น้ำหนักประมาณ 0.0600 กรัม แล้วนำมาบรรจุในกล่องแกรไฟต์ เขย่าเพื่อให้สารตั้งต้นกระจายเท่าๆกันปรับผิวหน้าให้เรียบโดยการใช้แท่งแก้วค่อยๆกดให้ผิวหน้าสม่ำเสมอ
2. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมไว้ใส่ในกล่องแกรไฟต์
3. ทำการติดตั้งระบบระเหิดสารในระยะประชิดให้ครบถ้วน
4. ตั้งโปรแกรมอุณหภูมิสารตั้งต้นจากอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิ 550 °C ใช้เวลา 20 นาที คงตัวที่ 550 °C เป็นเวลา 4 นาทีแล้วลดลงมาถึงอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10 นาที
5. ตั้งโปรแกรมอุณหภูมิฐานรองรับจากอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิ 375 °C ใช้เวลา 20 นาที คงตัวที่ 375 °C เป็นเวลา 7 นาทีแล้วลดลงมาถึงอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10 นาที
6. เปิดปั๊มกลโรตารี แล้วเปิดวาล์วสูบอากาศออกจนได้ความดันประมาณ $5 \times 10^{-2} - 2 \times 10^{-2}$ มิลลิบาร์แล้วเปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิสารตั้งต้นและฐานรองรับ
7. ในช่วงเวลาระหว่างการเคลือบฟิล์ม(deposition time) ต้องควบคุมอุณหภูมิของระบบให้คงตัวโดยการปรับความต่างศักย์ให้เหมาะสม
8. เมื่อปลูกฟิล์มเสร็จแล้วรออุณหภูมิของสารตั้งต้นและฐานรองรับลดลงมาที่ 400 °C ปิดวาล์วปิดปั๊มพัลลโรตารี ความดันภายในระบบจะค่อยๆเพิ่มขึ้น
9. เมื่ออุณหภูมิของระบบลดลงเหลือประมาณ 200 °C ค่อยๆเปิดวาล์วให้อากาศเข้าไปจนกระทั่งความดันภายในระบบเท่ากับความดันภายนอก
10. สวมหน้ากากป้องกันไอระเหยของสารเคมี เปิดระบบเพื่อเอาฐานรองรับออกจากกล่องแกรไฟต์
11. นำกระจกสไลด์ที่เป็นฐานรองรับที่เคลือบด้วยฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์มาตรวจสอบผิวหน้าของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์ ถ้าคุณภาพของฟิล์มบางที่ได้มีผิวหน้าที่สมบูรณ์คือผิวหน้าสม่ำเสมอไม่มีรูพรุนก็นำฟิล์มบางไปเก็บในภาชนะควบคุมความชื้น
12. ทำการติดตั้งระบบเพื่อทำการเตรียมฟิล์มบางในเงื่อนไขต่อไป ซึ่งถ้าดำเนินการอย่างต่อเนื่องจะประหยัดเวลาในการสูบอากาศออกจากระบบ
13. ในการเตรียมฟิล์มบางครั้งต่อไป สารตั้งต้นสามารถใช้ซ้ำได้โดยสังเกตจากผิวหน้าของสารตั้งต้นที่อยู่ในกล่องแกรไฟต์ว่าสมบูรณ์ดีหรือไม่ ถ้าผิวหน้าของสารตั้งต้นหลอมรวมกันเป็นเม็ด ๆ จำนวนมากก็ให้เปลี่ยนสารตั้งต้นใหม่



รูปที่3.1 แสดงระบบระเหิดสารในระยะประชิด



รูปที่3.2 แสดงการตั้ง โปรแกรมควบคุมอุณหภูมิในการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์

3.2.4 การแอนนัลฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ในบรรยากาศแคดเมียมคลอไรด์ในระบบ

สูญญากาศ

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกฟิล์มบางที่เตรียมโดยวิธีระเหิดในระยะประชิดที่อุณหภูมิของสารตั้งต้นเท่ากับ 550°C และอุณหภูมิของฐานรองรับเท่ากับ 400°C โดยใช้เวลาในการเคลือบฟิล์ม (deposition time) เท่ากับ 4 นาทีมาแอนนัลในบรรยากาศแคดเมียมคลอไรด์ในเงื่อนไขต่างๆ สำหรับเงื่อนไขในระบบสูญญากาศมีวิธีและขั้นตอนดังนี้

1. ชั่งสารตั้งต้นแคดเมียมคลอไรด์บริสุทธิ์ 99.99% ให้ได้น้ำหนักประมาณ 0.0500 กรัม แล้วนำมาบรรจุในกล่องแกรไฟต์ เขย่าเพื่อให้สารตั้งต้นกระจายเท่าๆกันปรับผิวหน้าให้เรียบโดยการใช้แท่งแก้วค่อยๆ กดให้ผิวหน้าสม่ำเสมอ
2. นำแผ่นกระจกใสที่เคลือบด้วยฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ใส่ในกล่องแกรไฟต์
3. ทำการติดตั้งระบบระเหิดสารในระบบสูญญากาศให้ครบถ้วน

4. ตั้งโปรแกรมอุณหภูมิสารตั้งต้นจากอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิ 400°C ใช้เวลา 20 นาที
คงตัวที่ 400°C เป็นเวลา 10 นาทีแล้วลดลงมาถึงอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10 นาที
5. ตั้งโปรแกรมอุณหภูมิฐานรองรับจากอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิ 400°C ใช้เวลา 20 นาที
คงตัวที่ 400°C เป็นเวลา 10 นาทีแล้วลดลงมาถึงอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10 นาที
6. เปิดปั๊มพัลส์โรตารี แล้วเปิดวาล์วสูบบอากาศออกจนได้ความดันประมาณ
 $5 \times 10^{-2} - 2 \times 10^{-2}$ มิลลิบาร์แล้วเปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิสารตั้งต้นและฐานรองรับ
7. ในช่วงเวลาที่แอนนิลฟิล์มบางต้องควบคุมอุณหภูมิของระบบให้คงตัวโดยการปรับ
ความต่างศักย์ให้เหมาะสม
8. เมื่อแอนนิลฟิล์มบางเสร็จแล้วรอกอุณหภูมิของสารตั้งต้นและฐานรองรับลดลง
มาที่ 200°C ปิดวาล์วปิดปั๊มพัลส์โรตารี ความดันภายในระบบจะค่อยๆเพิ่มขึ้น
9. เมื่ออุณหภูมิของระบบลดลงเหลือประมาณ 100°C ค่อยๆเปิดวาล์วให้อากาศเข้าไป
จนกระทั่งความดันภายในระบบเท่ากับความดันภายนอก
10. สวมหน้ากากป้องกันไอระเหยของสารเคมี เปิดระบบเพื่อเอาฟิล์มบางออกจากกล่อง
แกรไฟต์
11. นำฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่ได้ไปเก็บในภาชนะที่ใช้ใส่สารเคมีที่สามารถควบคุม
ความชื้นได้

3.2.5 การแอนนิลฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ในบรรยากาศแคดเมียมคลอไรด์ในบรรยากาศ ของแก๊สไนโตรเจน

1. ชั่งสารตั้งต้นแคดเมียมคลอไรด์บริสุทธิ์ 99.99% ให้ได้น้ำหนักประมาณ 0.0500 กรัม
แล้วนำมาบรรจุในกล่องแกรไฟต์ เขย่าเพื่อให้สารตั้งต้นกระจายเท่าๆกันปรับผิวหน้า
ให้เรียบ โดยการใช้แท่งแก้วค่อยๆกดให้ผิวหน้าสม่ำเสมอ
2. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ใส่ในกล่องแกรไฟต์
3. นำกล่องแกรไฟต์ไปใส่ในท่อแก้วในระบบเตาแอนนิลทำการอีแวค-รีฟิล (evac-refill)
โดยการดูดอากาศภายในท่อแก้วออกแล้วเติมแก๊สไนโตรเจนเข้าไปจนกระทั่งมีความ
ดันเกือบเท่าความดันบรรยากาศ ทำการดูดเอาแก๊สไนโตรเจนออกจากท่อแก้ว ทำซ้ำ
กันอีก 3 ครั้งเพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีแก๊สออกซิเจนเหลืออยู่ แล้วปิดปั๊มดูดอากาศเติม
แก๊สไนโตรเจนเข้าไปในระบบด้วยความดันที่เหมาะสมจากนั้นปล่อยแก๊สไนโตรเจน
ออกจากระบบอย่างช้า ๆ
4. ทำการแอนนิลที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10 นาที
5. ปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิ รอกจนถึงอุณหภูมิห้อง แล้วจึงนำฟิล์มบางออกจากระบบ
และนำไปเก็บในภาชนะที่ใช้ใส่สารเคมีที่สามารถควบคุมความชื้นได้

3.2.6 การแอนนีสฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ในอากาศ

1. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ใส่ในระบบเตา โดยการเปิดปากท่อทั้งสอง
2. ทำการแอนนีสที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10 นาที
3. ปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิ รอจนถึงอุณหภูมิห้อง แล้วจึงนำฟิล์มบางออกจากระบบ และนำไปเก็บในภาชนะที่ใช้ใส่สารเคมีที่สามารถควบคุมความชื้นได้

3.2.7 การแอนนีสฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ในบรรยากาศแคดเมียมคลอไรด์ในระบบระเหิดสารในระยะประชิด

1. ชั่งสารตั้งต้นแคดเมียมคลอไรด์บริสุทธิ์ 99.99% ให้ได้น้ำหนักประมาณ 0.0500 กรัม แล้วนำมาบรรจุในกล่องแกรไฟต์สำหรับแอนนีสในระบบระเหิดในระยะประชิด เขย่าเพื่อให้สารตั้งต้นกระจายเท่าๆกันปรับผิวหน้าให้เรียบ โดยการใช้แท่งแก้วค่อยๆ กดให้ผิวหน้าสม่ำเสมอ
2. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ใส่ในกล่องแกรไฟต์
3. นำกล่องแกรไฟต์ไปใส่ในท่อแก้วในระบบเตาแอนนีสทำการอีแวก-รีฟิล (evac-refill) โดยการดูดอากาศภายในท่อแก้วออกแล้วเติมแก๊สไนโตรเจนเข้าไปจนกระทั่งมีความดันเกือบเท่าความดันบรรยากาศ ทำการปั๊มพีเอแก๊สไนโตรเจนออกจากท่อแก้วทำซ้ำกันอีก 3 ครั้ง เพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีแก๊สออกซิเจนเหลืออยู่แล้วปิดปั๊มดูดอากาศเติมแก๊สไนโตรเจนเข้าไปในระบบด้วยความดันที่เหมาะสม จากนั้นปล่อยแก๊สไนโตรเจนออกจากระบบอย่างช้า ๆ
4. ทำการแอนนีสที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10 นาที
5. ปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิ รอจนถึงอุณหภูมิห้อง แล้วจึงนำฟิล์มบางออกจากระบบ และนำไปเก็บในภาชนะที่ใช้ใส่สารเคมีที่สามารถควบคุมความชื้นได้

3.3 การศึกษาสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด

3.3.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค

นำฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จากเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ของยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ 1.5418 อังสตรอมโดยใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์ และความต่างศักย์ 30 กิโลโวลต์ โดยวัดจากมุม 2θ 20-60 องศา

3.3.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค

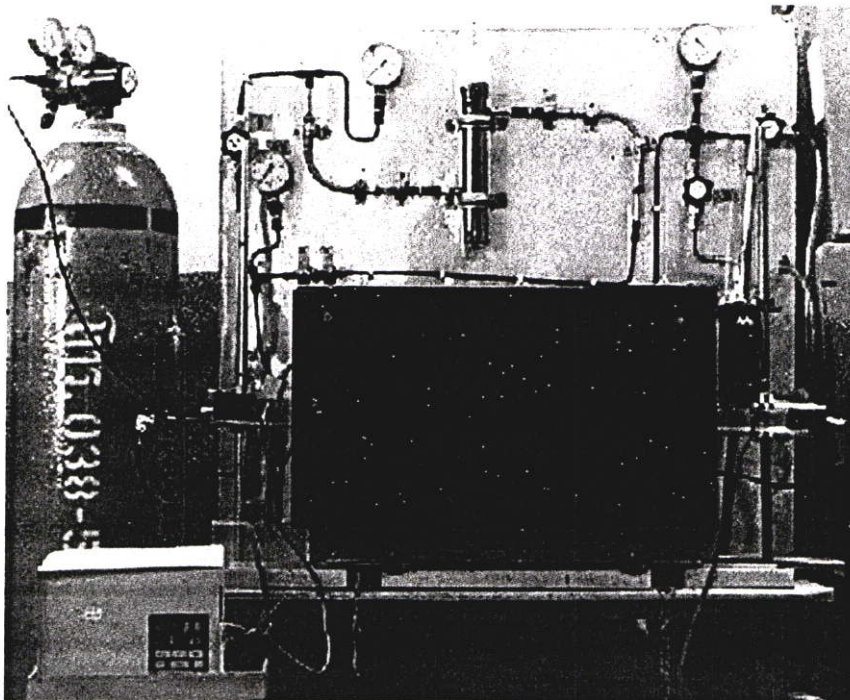
นำฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(scanning electron microscope: SEM)ของยี่ห้อ LEO รุ่น LEO 1455VP โดยใช้แรงดัน 6 กิโลโวลต์และกำลังแยกความละเอียดของภาพถ่าย 1,000 3,000 และ 5,000 เท่า

3.3.3 การศึกษาสมบัติทางแสง

นำฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาสมบัติทางแสงด้วยการวัดค่าการส่งผ่านแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์(UV-VIS spectrophotometer)ของยี่ห้อ thermo electron corporation รุ่น He ios โดยใช้ความยาวคลื่น 300 ถึง 1100 นาโนเมตร เพื่อคำนวณหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและค่าช่องว่างแถบพลังงาน

3.3.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า

นำฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดค่าความต้านทานแผ่นด้วยวิธีสองขั้วเชิงเส้นและวัดค่าพลังงานกระตุ้น โดยการศึกษาความต้านทานที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ



รูปที่ 3.3 แสดงระบบเตาแอนนิต

บทที่ 4

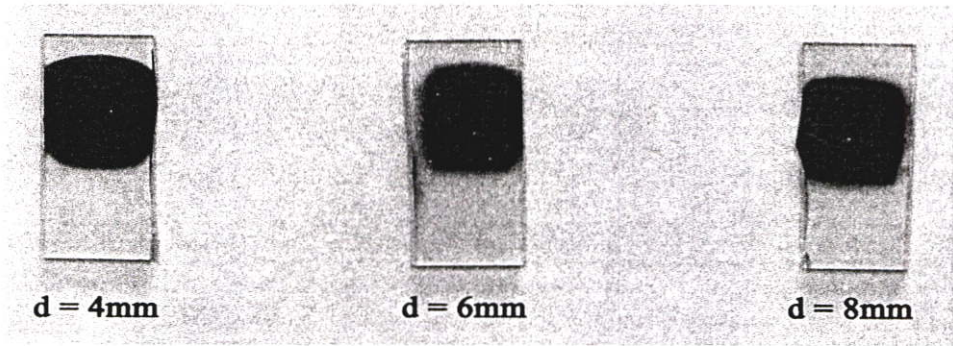
ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดภายในห้องสุญญากาศความดันต่ำระดับ 2.0×10^{-2} มิลลิบาร์เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 375, 400, 425, 450 และ 475 องศาเซลเซียสที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4, 6 และ 8 มิลลิเมตรใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที และนำฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400 องศาเซลเซียสมาแอนนัลในบรรยากาศของแคดเมียมคลอไรด์ภายใต้ระบบสุญญากาศ ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนและภายในระบบระเหิดสารในระยะประชิดตลอดจนทำการแอนนัลในอากาศจากนั้นนำฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ทั้งหมด ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ศึกษาสมบัติทางแสงด้วยการวัดค่าการส่งผ่านแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางทั้งความต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีสองขั้วเชิงเส้น และความต้านทานไฟฟ้าที่ขึ้นกับอุณหภูมิ จากผลการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ใช้เป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ต่อไป

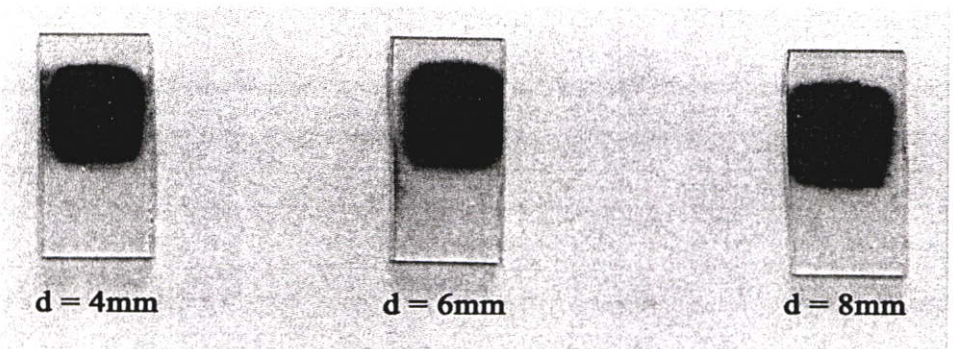
4.1 ฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดโดยให้

อุณหภูมิกับฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน

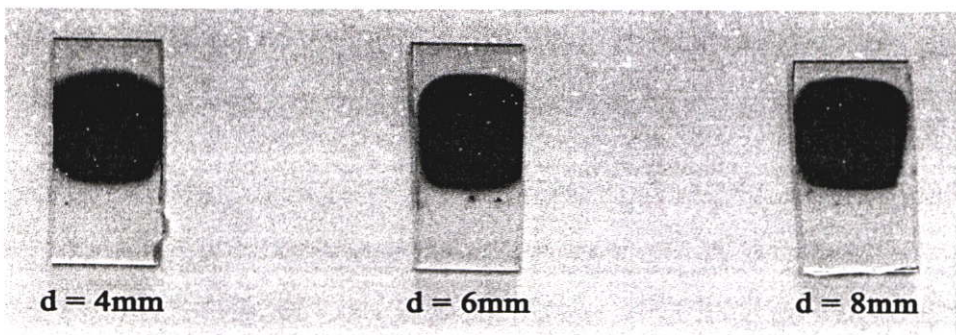
ฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด มีลักษณะเป็นสีเทาดำ มีผิวหน้าเรียบสม่ำเสมอ เกาะติดบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ได้ดีโดยไม่หลุดร่อนง่ายและไม่มีรูพรุน ซึ่งลักษณะของฟิล์มบางที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C อุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์และระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 4.1- 4.5



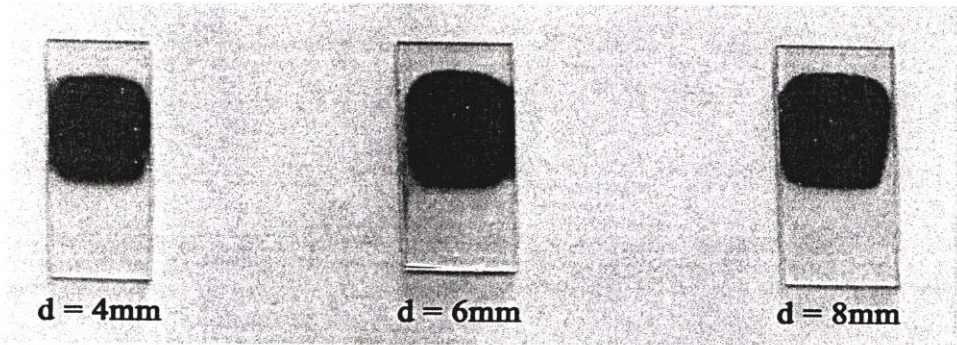
รูปที่ 4.1 แสดงฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด ที่มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกันเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C อุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 375°C และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที



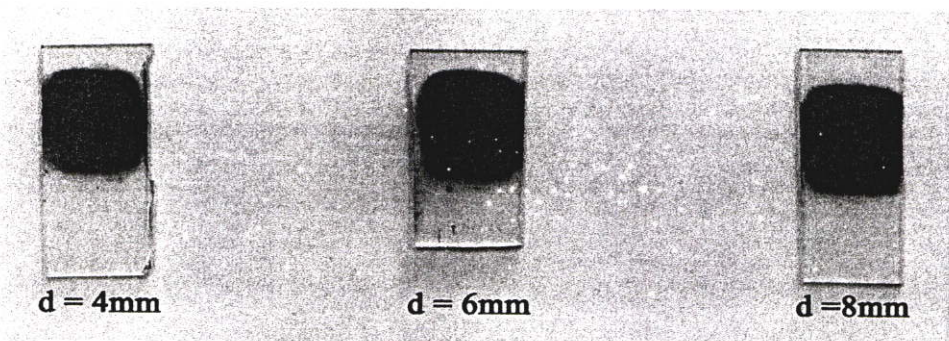
รูปที่ 4.2 แสดงฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด ที่มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกันเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C อุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400°C และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที



รูปที่ 4.3 แสดงฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด ที่มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกันเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C อุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 425°C และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที



รูปที่ 4.4 แสดงฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด ที่มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกันเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C อุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 450°C และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที



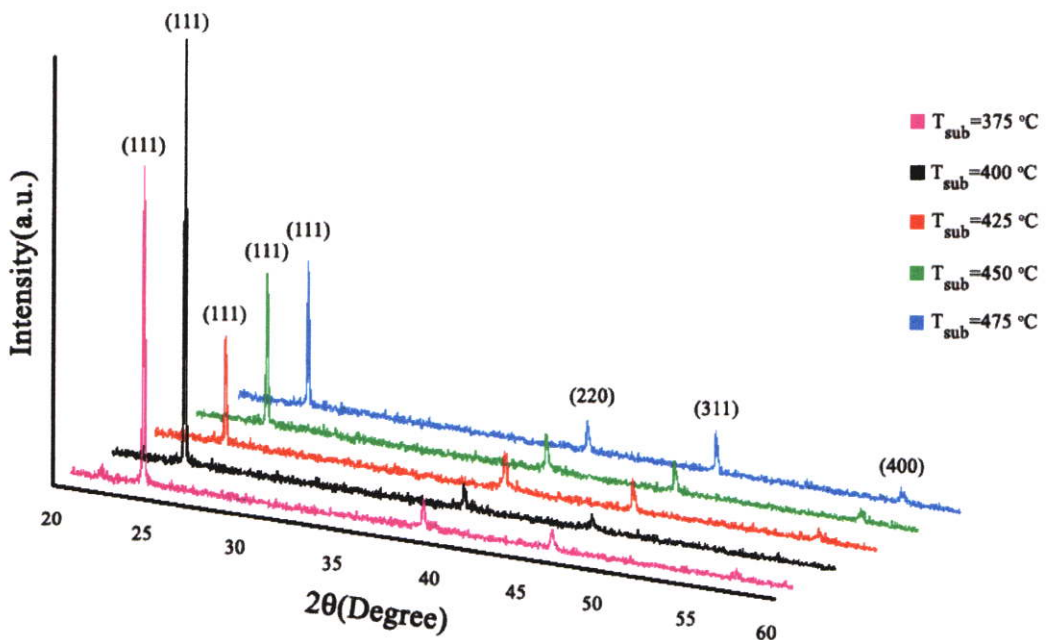
รูปที่ 4.5 แสดงฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด ที่มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกันเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C อุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 475°C และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

4.2 ผลการศึกษาสมบัติฟิสิกส์พื้นฐานของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด

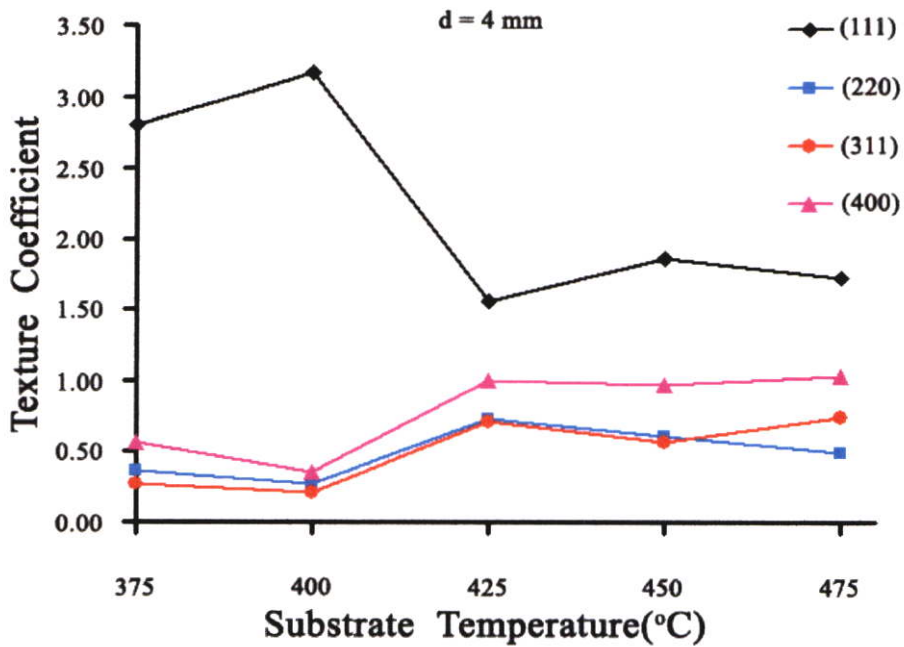
4.2.1 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์

การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เป็นวิธีการที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ พบว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 375, 400, 425, 450 และ 475 องศาเซลเซียสที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4, 6 และ 8 มิลลิเมตรใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที และฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ

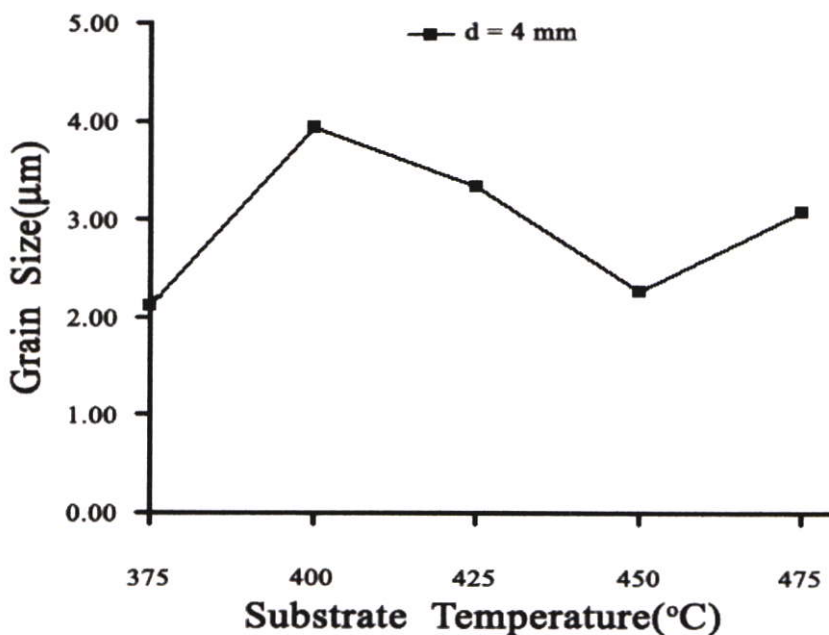
550 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400 องศาเซลเซียสที่ผ่านการแอนนیلในบรรยากาศของแคดเมียมคลอไรด์ภายใต้ระบบสุญญากาศ ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน และภายในระบบประเห็ดสารในระยะประชิด ตลอดจนทำการแอนนیلในอากาศมีโครงสร้างผลึกแบบลูกบาศก์ โดยจะปรากฏระนาบการเลี้ยวเบน (111) ที่มุม $2\theta \approx 23^\circ$ (220) ที่มุม $2\theta \approx 39^\circ$ (311) ที่มุม $2\theta \approx 46^\circ$ และ (400) ที่มุม $2\theta \approx 56^\circ$ เมื่อนำระนาบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางมาเทียบกับผงผลึกมาตรฐาน เราพบว่าระนาบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางที่เตรียมได้มีระนาบที่ตรงกัน เป็นการบ่งบอกว่าโครงสร้างของผลึกของฟิล์มบางมีลักษณะใกล้เคียงกับผลึกสมบูรณ์ และพบว่าพีคของระนาบการเลี้ยวเบน(111)จะปรากฏเด่นชัดที่สุด จากการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบผลึก (hkl) ของฟิล์มบาง CdTe พบว่ามีการจัดเรียงตัวในระนาบ (111) เด่นชัดและมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เพิ่มขึ้น และเด่นชัดมากที่สุดที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm จากผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์สามารถนำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณหาค่าคงตัวของโครงสร้างผลึก ขนาดของเกรน สัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบผลึก (hkl) ซึ่งแสดงดังในรูปที่ 4.6 – 4.25



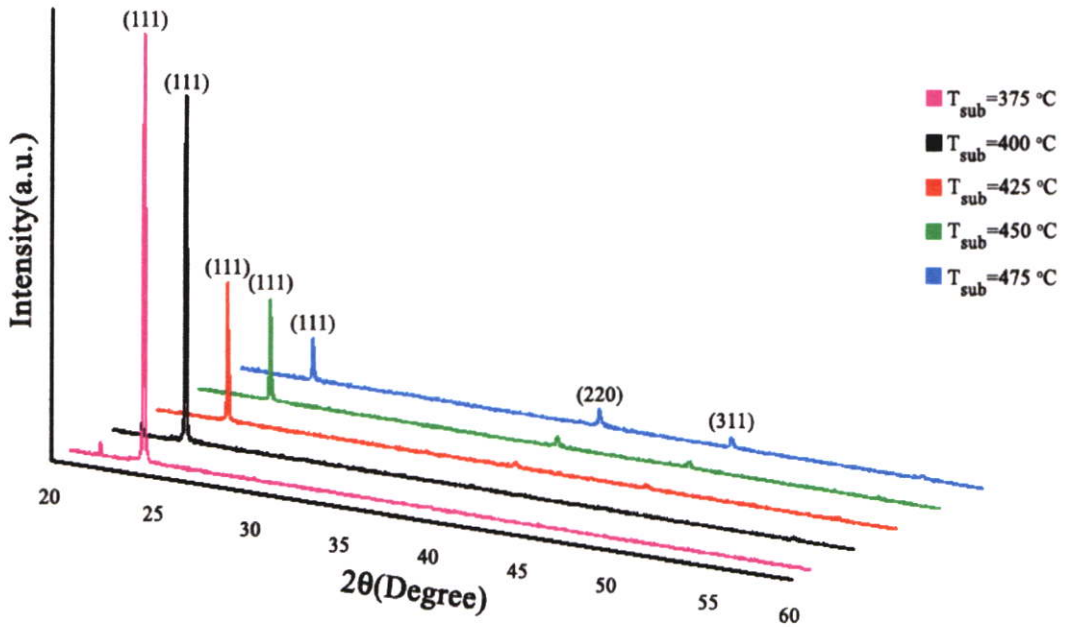
รูปที่ 4.6 แสดงพีคความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเห็ดสารในระยะประชิด เมื่อให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยที่กำหนดให้มี ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที



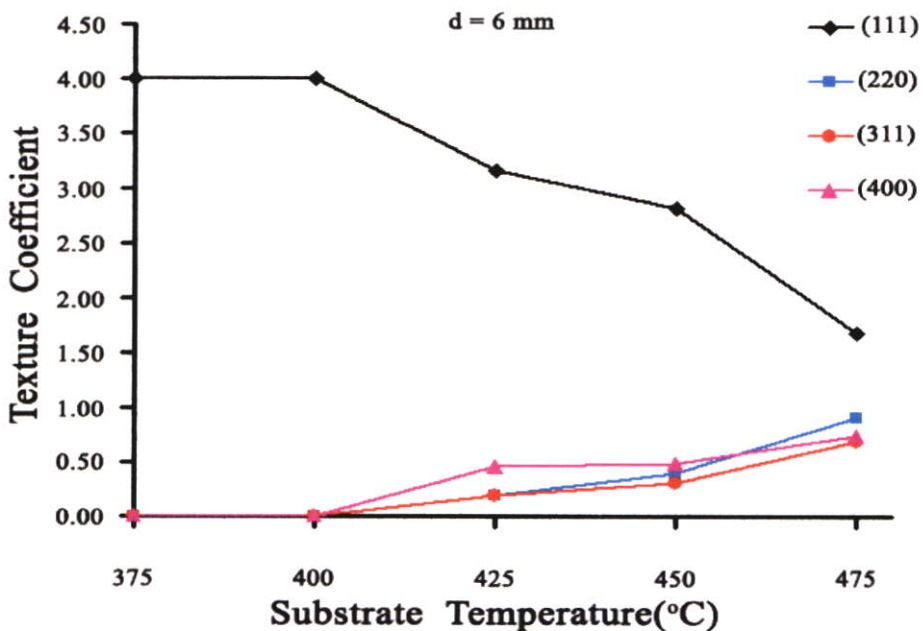
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบผลึก (hkl) ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด เมื่อให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจก สไลด์แตกต่างกัน โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็น กระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที



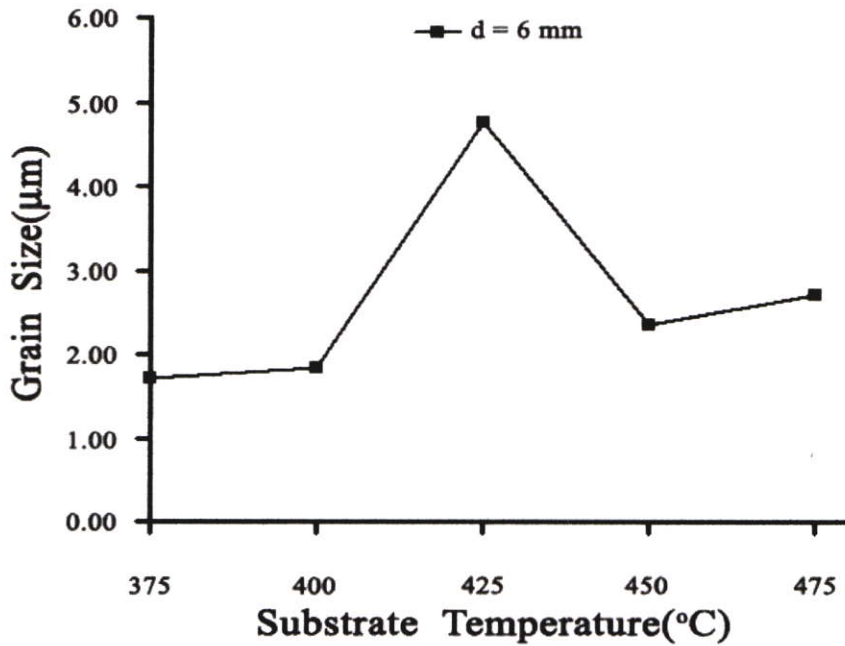
รูปที่ 4.8 แสดงขนาดของเกรนที่คำนวณจาก FWHM ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิด สารในระยะประชิด เมื่อให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยที่ กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที



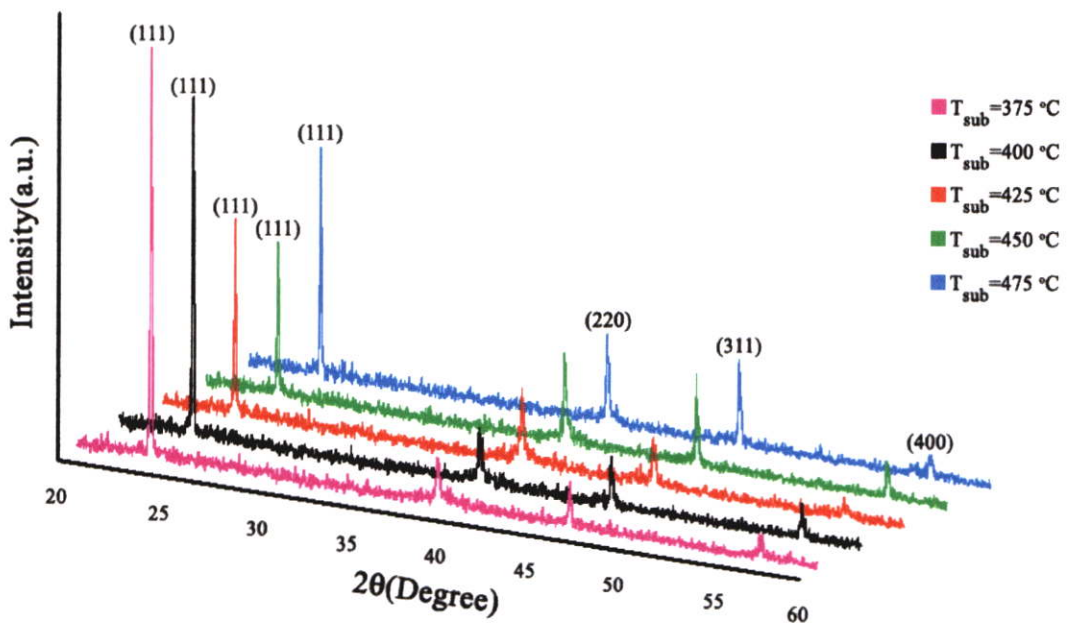
รูปที่ 4.9 แสดงพิกัดความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด เมื่อให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยที่กำหนดให้มี ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที



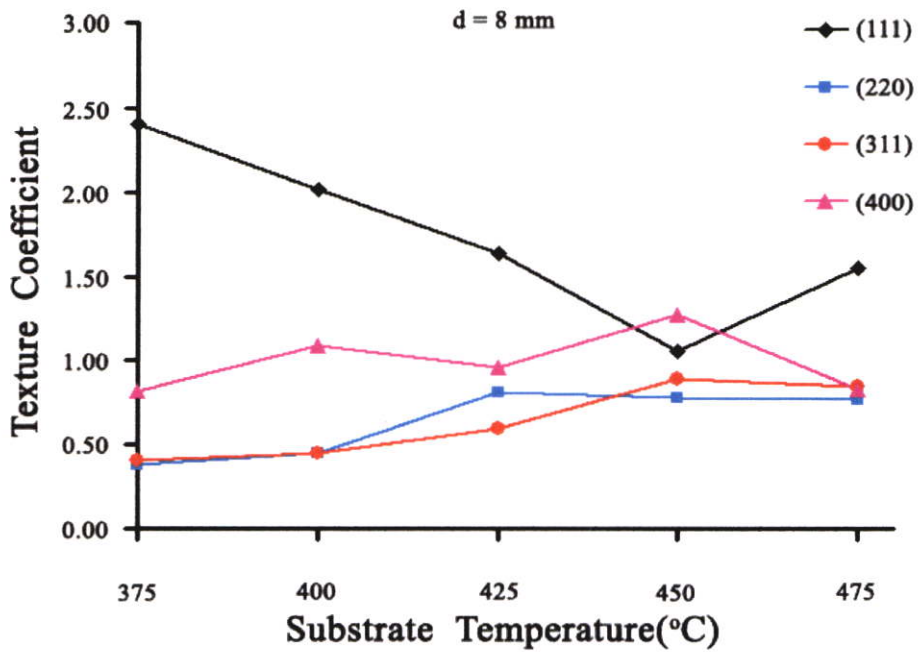
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบผลึก (hkl) ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด เมื่อให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที



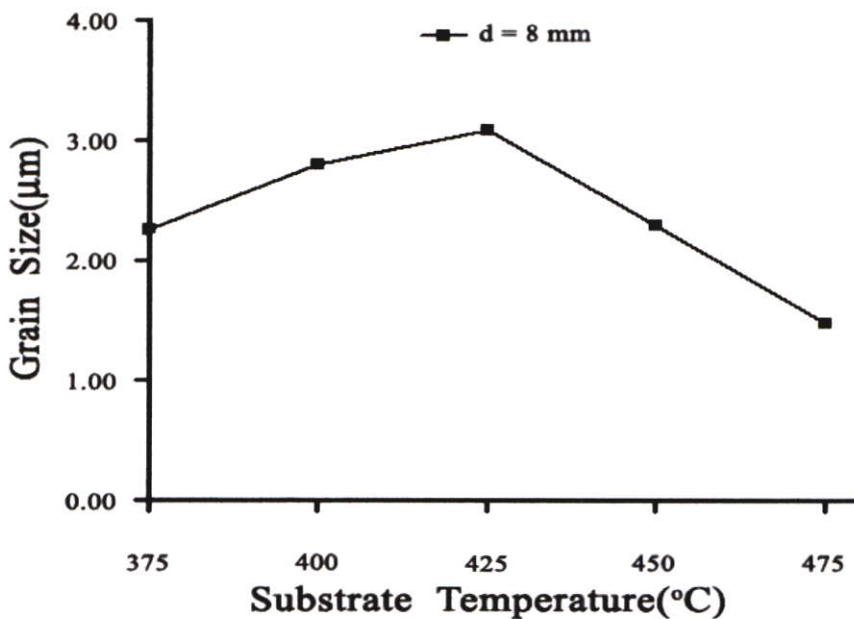
รูปที่ 4.11 แสดงขนาดของเกรนที่คำนวณจาก FWHM ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด เมื่อให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยที่ กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที



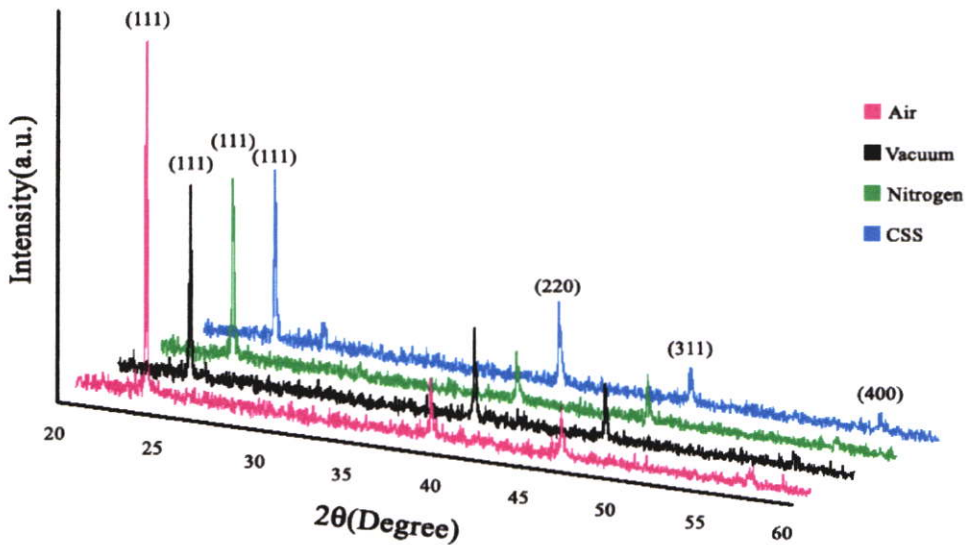
รูปที่ 4.12 แสดงพิคความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด เมื่อให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยที่ กำหนดให้มี ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที



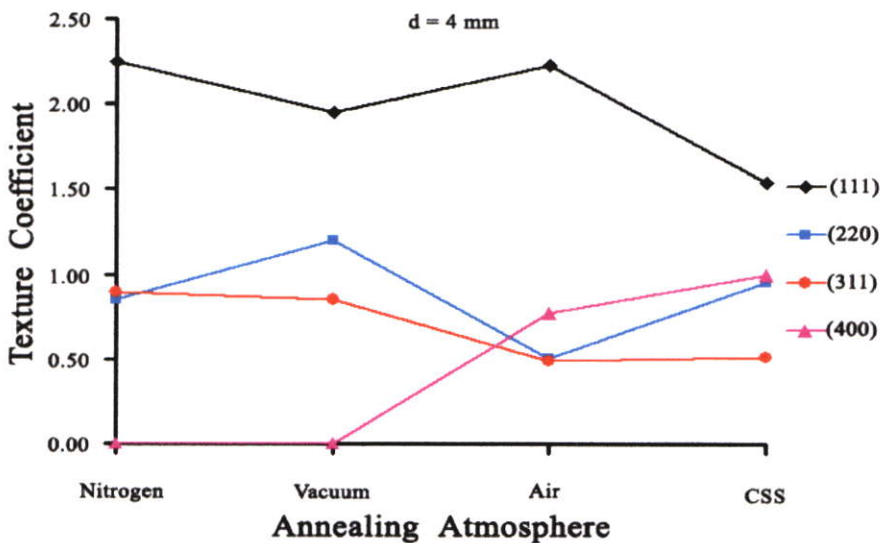
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบผลึก (hkl) ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด เมื่อให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจก สไลด์แตกต่างกัน โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็น กระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที



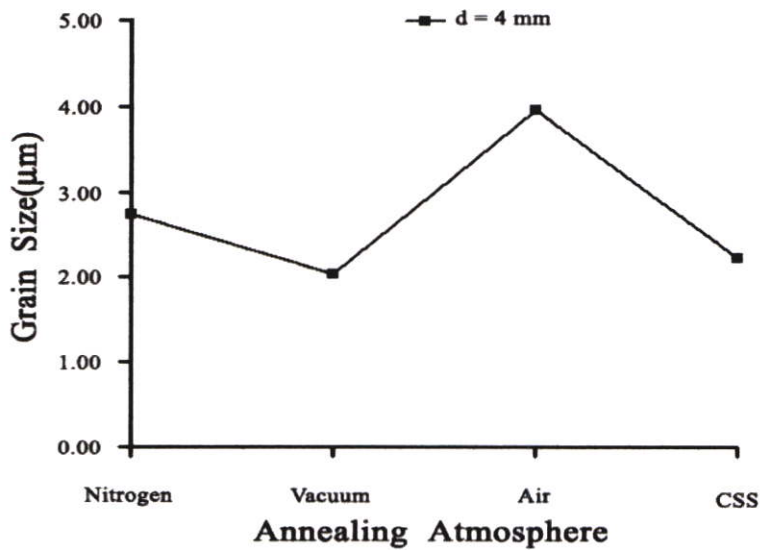
รูปที่ 4.14 แสดงขนาดของเกรนที่คำนวณจาก FWHM ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิด สารในระยะประชิด เมื่อให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยที่ กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที



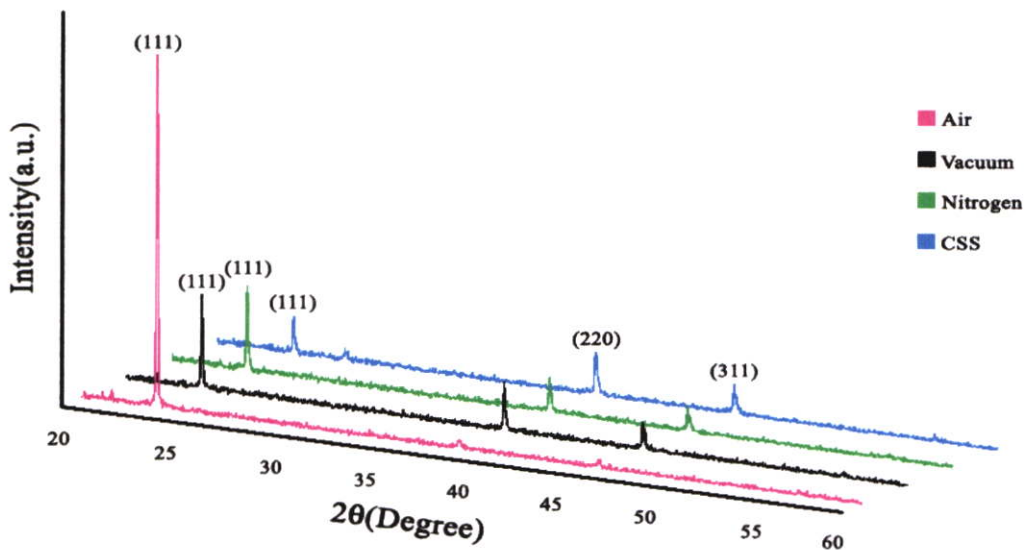
รูปที่ 4.15 แสดงพิกัดความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนีสลในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10 นาทีที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400 °C โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที



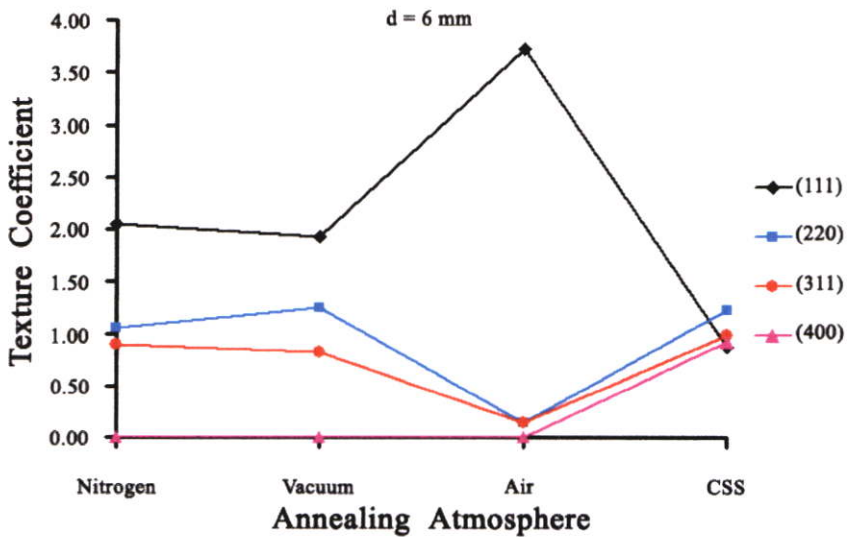
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบผลึก (hkl) ของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนีสลในบรรยากาศแตกต่างกัน ที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10 นาทีที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400 °C โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที



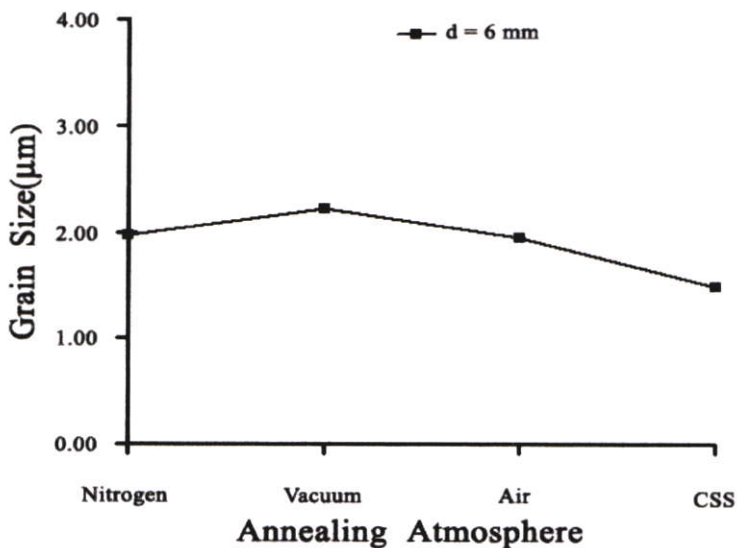
รูปที่ 4.17 แสดงขนาดของเกรนที่คำนวณจาก FWHM ของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนีสลในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10 นาที ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400 °C โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที



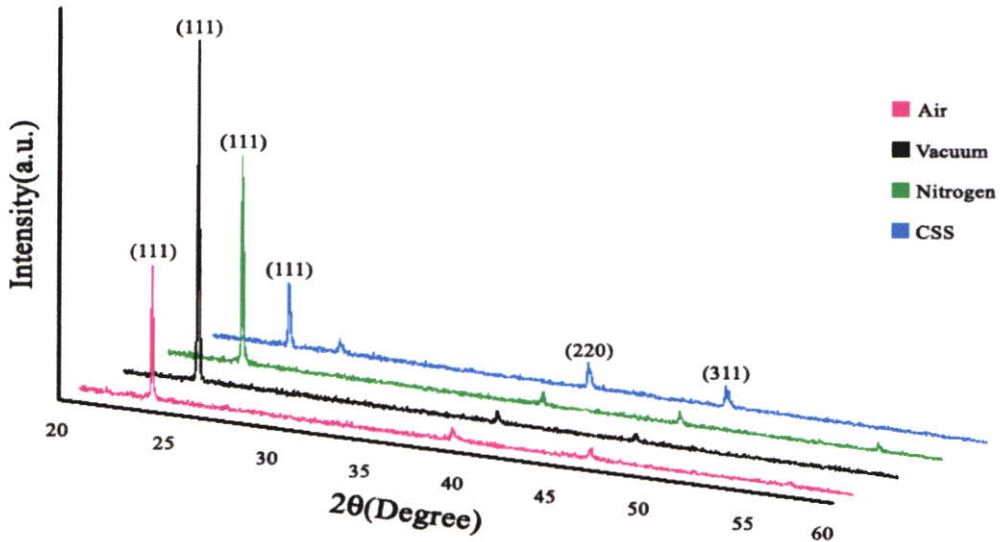
รูปที่ 4.18 แสดงพิกัดความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนีสลในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10 นาทีที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400 °C โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที



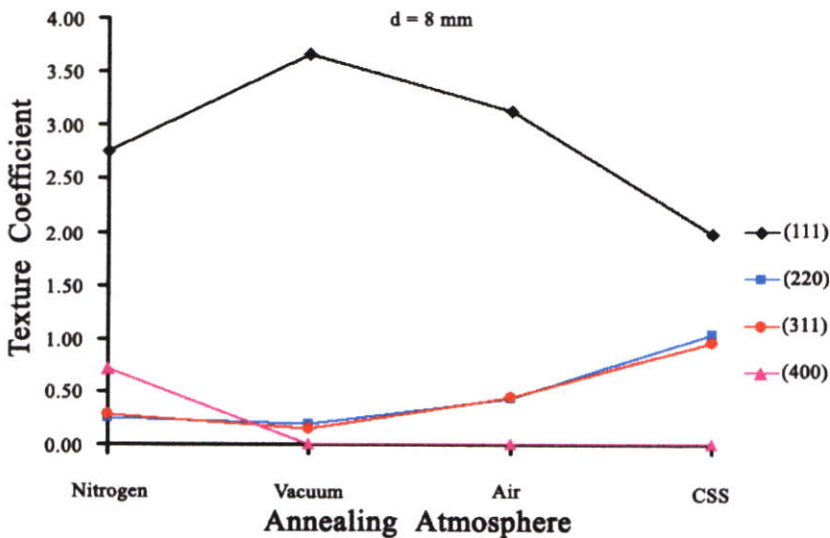
รูปที่ 4.19 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบผลึก (hkl) ของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนัลในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 10 นาทีที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400 °C โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที



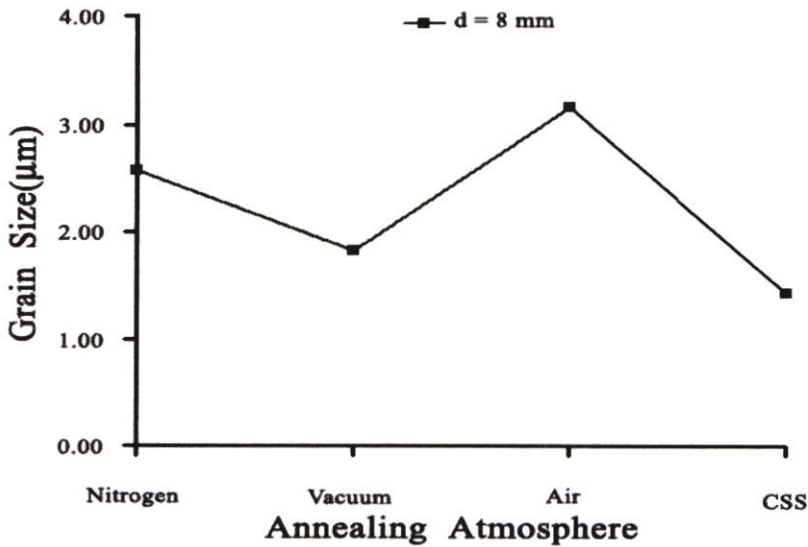
รูปที่ 4.20 แสดงขนาดของเกรนที่คำนวณจาก FWHM ของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนัลในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 10 นาทีที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400 °C โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที



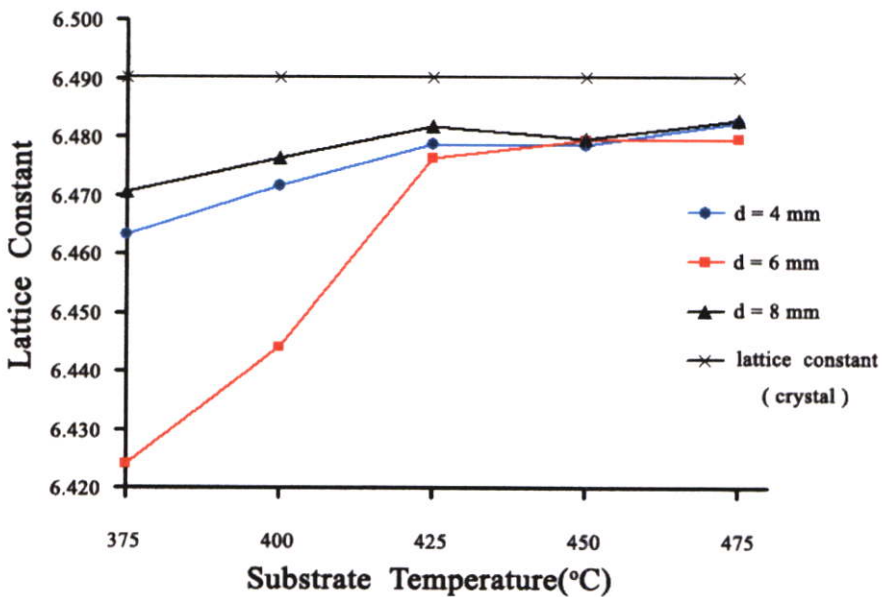
รูปที่ 4.21 แสดงพิกัดความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนีสลในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10 นาทีที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400°C โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที



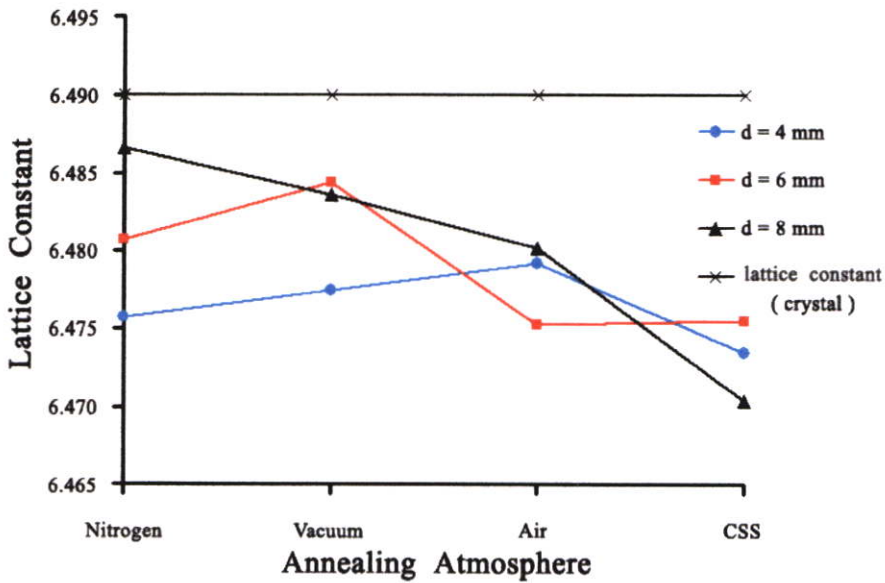
รูปที่ 4.22 กราฟแสดงการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบผลึก (hkl) ของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนีสลในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10 นาทีที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400°C โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที



รูปที่ 4.23 แสดงขนาดของเกรนที่คำนวณจาก FWHM ของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนัลในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 10 นาทีที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400 °C โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที



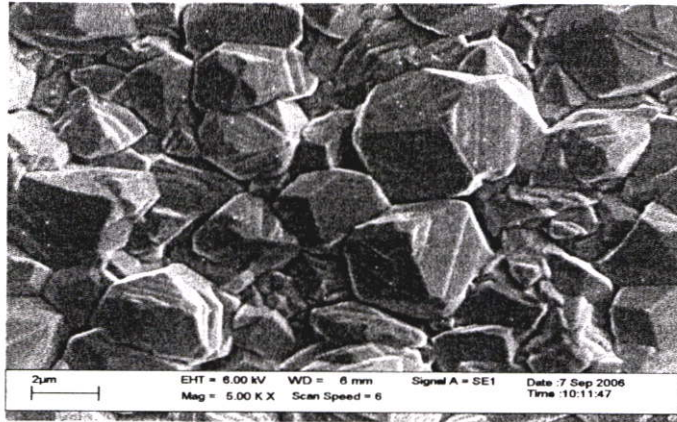
รูปที่ 4.24 แสดงค่าคงตัวของโครงผลึกของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดที่มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกันเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C อุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 375 - 475 °C และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที



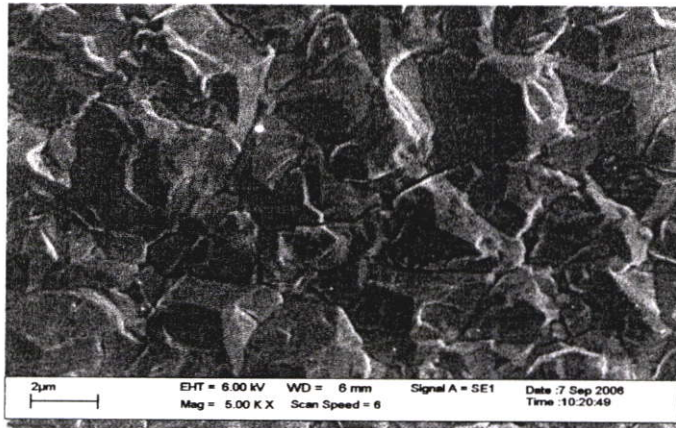
รูปที่ 4.25 แสดงค่าคงตัวของโครงผลึกของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนیلในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 10 นาทีที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400 °C โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

4.2.2 ผลการศึกษาจากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์

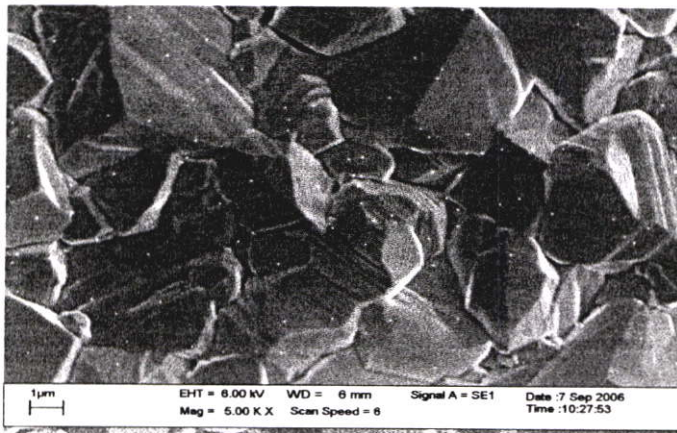
การศึกษาโครงผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นการศึกษาถึงลักษณะของสภาพพื้นผิวหน้าของฟิล์มบางและจากภาพถ่าย SEM ยังสามารถบอกถึงขนาดของเกรนของฟิล์มบางได้ ภาพถ่าย SEM ของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดโดยให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 375, 400, 425, 450 และ 475 °C เมื่อให้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4, 6 และ 8 mm มีขนาดของเกรนประมาณ 3.14-5.29 μm สำหรับระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm มีขนาดของเกรนเฉลี่ยประมาณ 3.98 μm ที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6mm มีขนาดของเกรนเฉลี่ยประมาณ 4.34 μm และที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm มีขนาดของเกรนเฉลี่ยประมาณ 4.74 μm ดังแสดงในรูปที่ 4.26-4.33



d = 4 mm

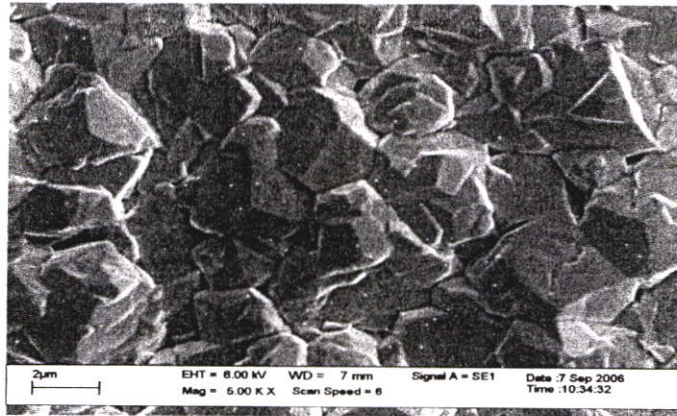


d = 6 mm

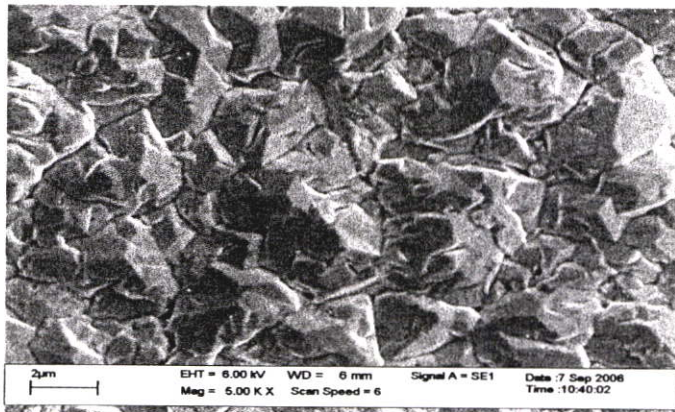


d = 8 mm

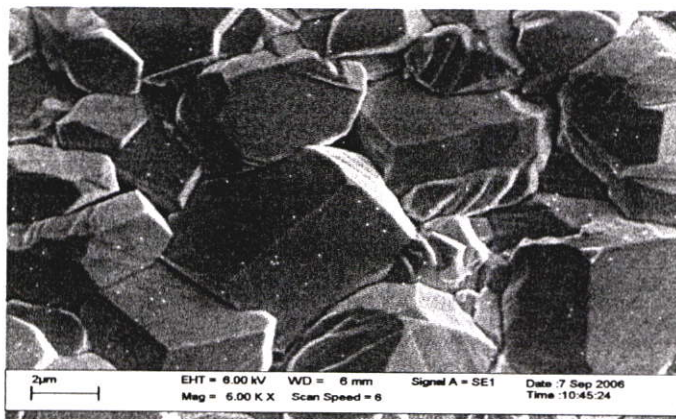
รูปที่ 4.26 แสดงภาพถ่าย SEM ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารใน ระยะ ประชิดเมื่อให้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C และอุณหภูมิของฐานรองรับเท่ากับ 375°C และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที



d = 4 mm

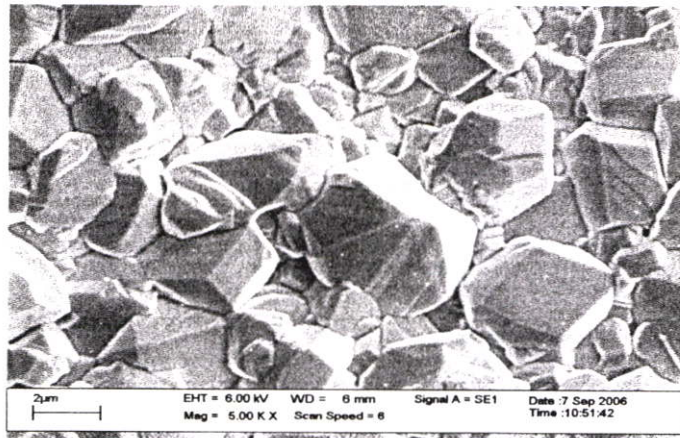


d = 6 mm

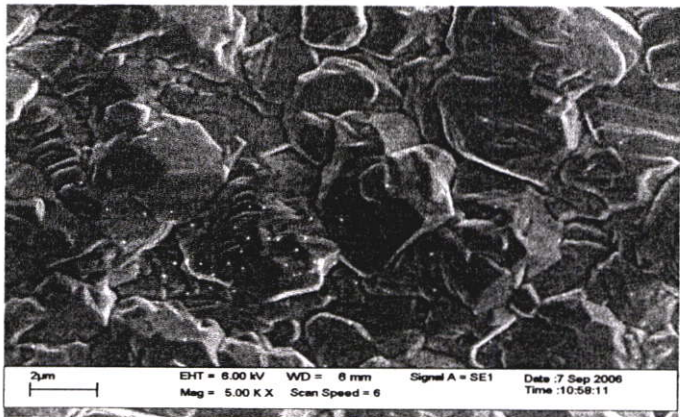


d = 8 mm

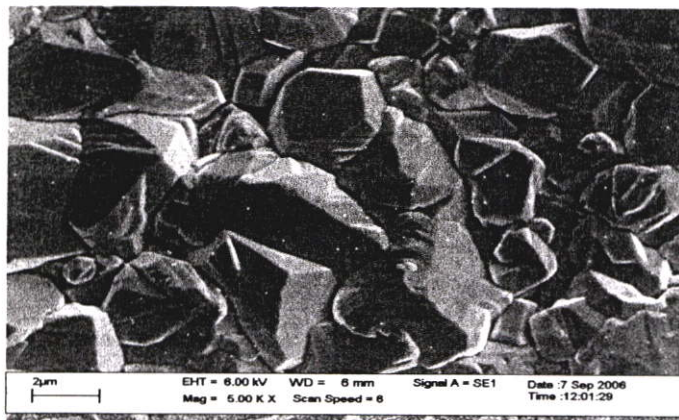
รูปที่ 4.27 แสดงภาพถ่าย SEM ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะ ประชิดเมื่อให้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C และอุณหภูมิของฐานรองรับเท่ากับ 400°C และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที



$d = 4 \text{ mm}$

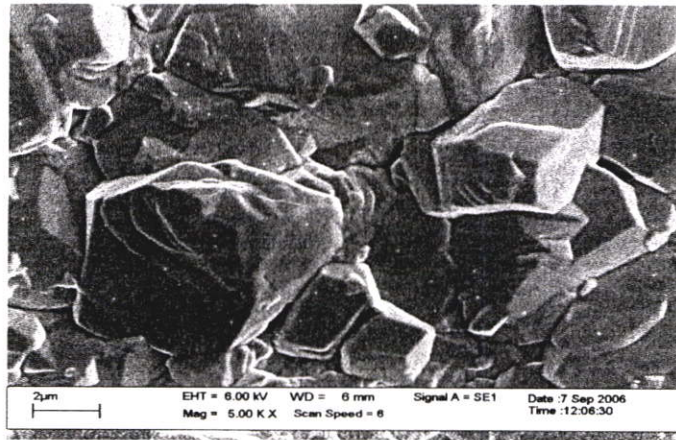


$d = 6 \text{ mm}$

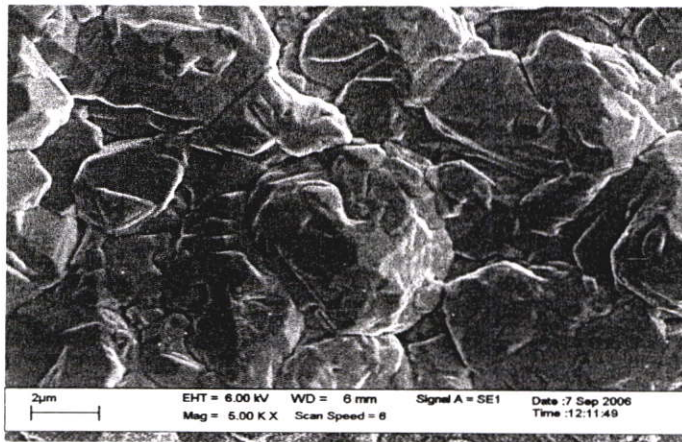


$d = 8 \text{ mm}$

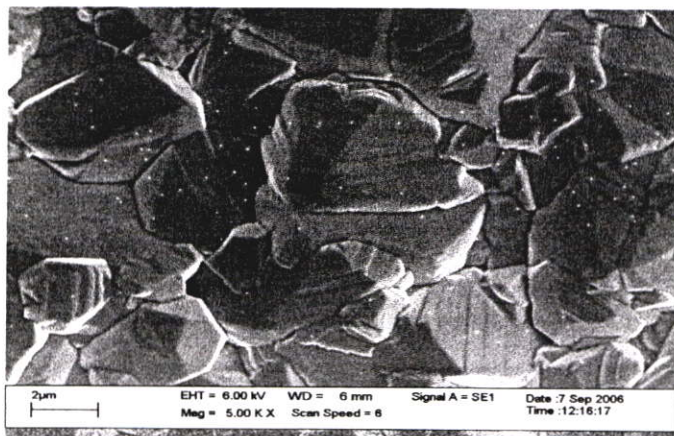
รูปที่ 4.28 แสดงภาพถ่าย SEM ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารใน ระยะ ประชิดเมื่อให้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C และอุณหภูมิของฐานรองรับเท่ากับ 425°C และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที



d = 4 mm

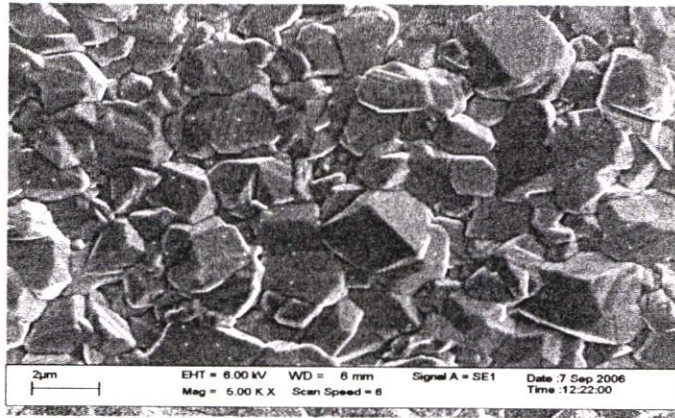


d = 6 mm

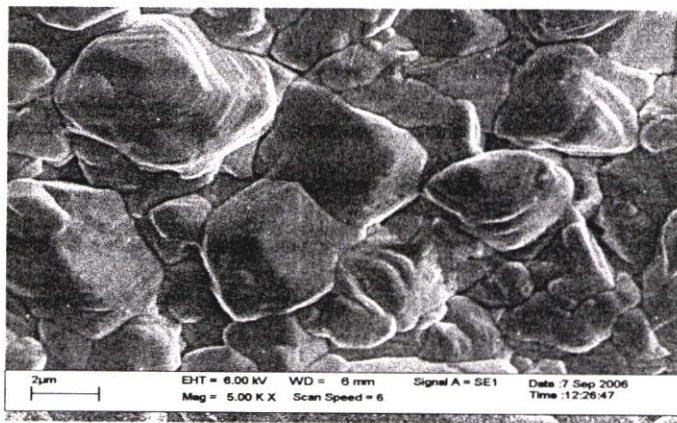


d = 8 mm

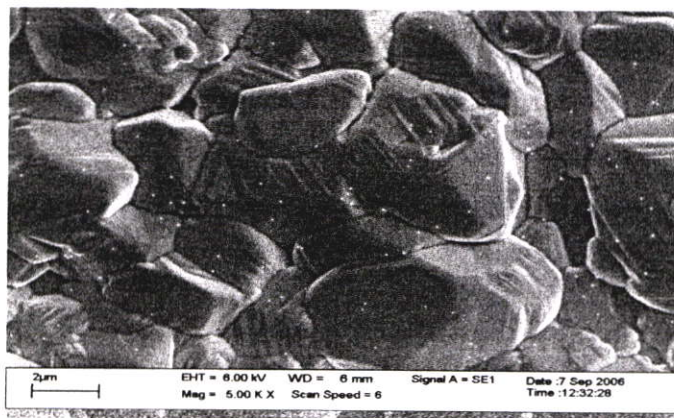
รูปที่ 4.29 แสดงภาพถ่าย SEM ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะ ประชิดเมื่อให้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C และอุณหภูมิของฐานรองรับเท่ากับ 450°C และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที



d = 4 mm

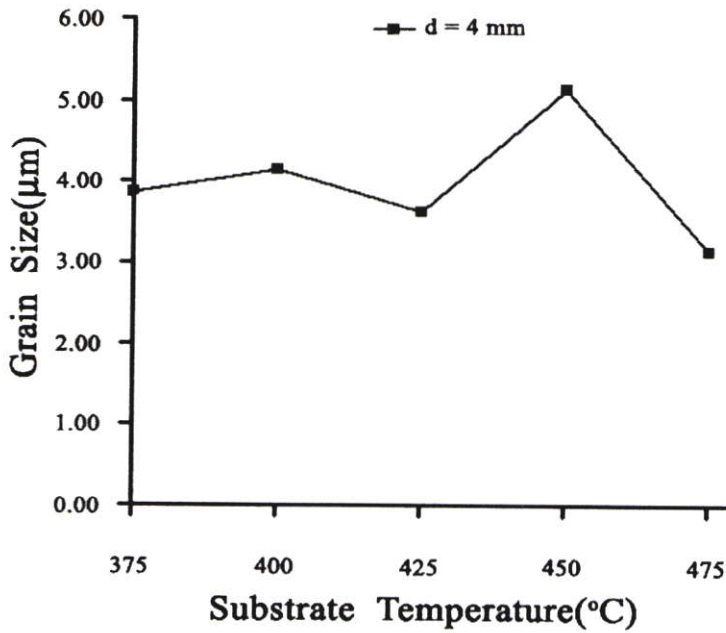


d = 6 mm

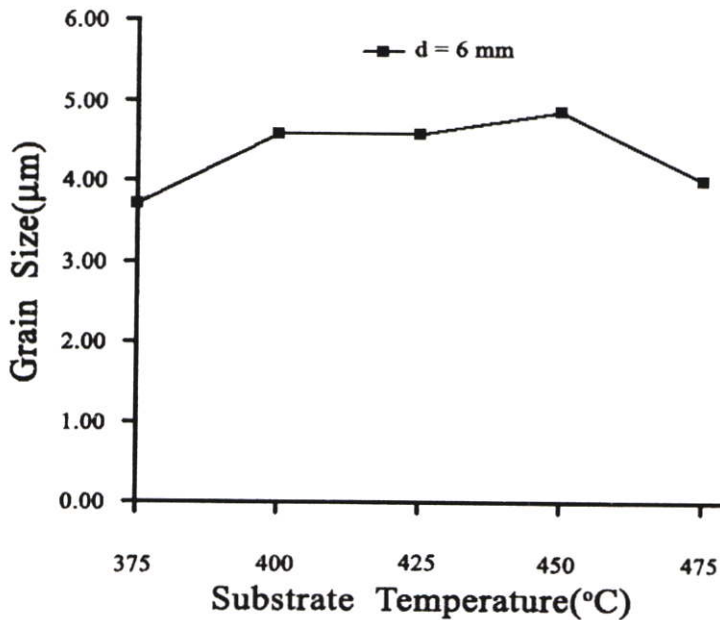


d = 8 mm

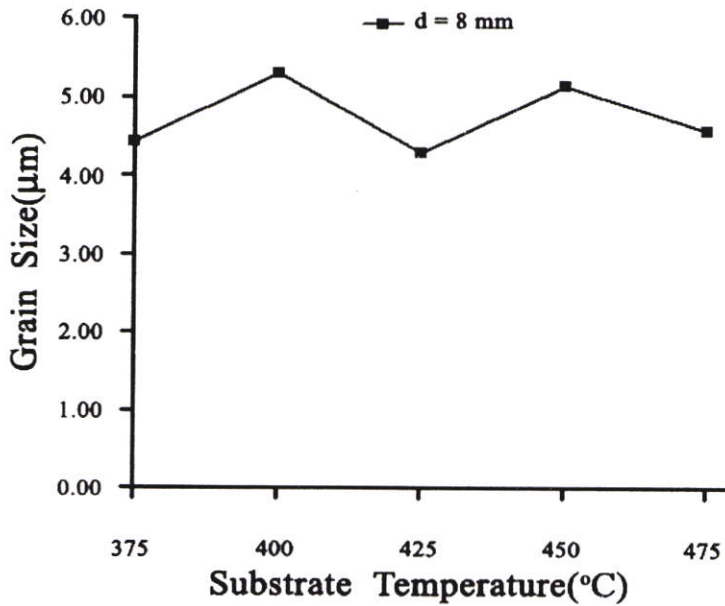
รูปที่ 4.30 แสดงภาพถ่าย SEM ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารใน ระยะ ประชิดเมื่อให้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C และอุณหภูมิของฐานรองรับเท่ากับ 475°C และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที



รูปที่4.31 แสดงขนาดของเกรนจากภาพถ่าย SEM ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด เมื่อให้อุณหภูมิแก๊ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยที่ กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

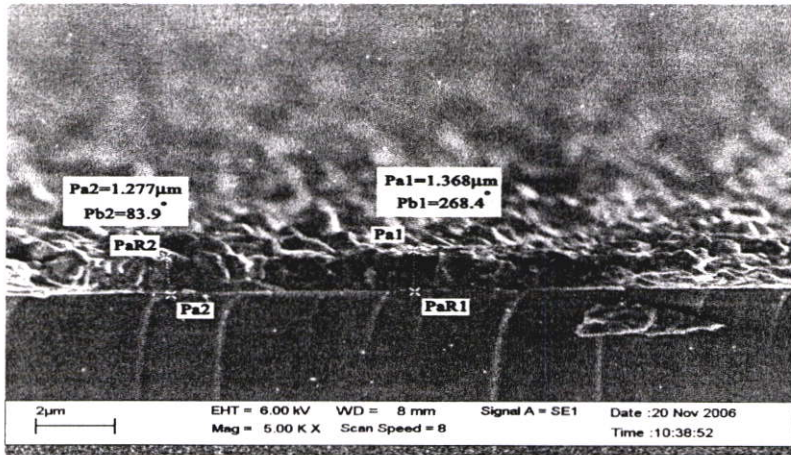


รูปที่4.32 แสดงขนาดของเกรนจากภาพถ่าย SEM ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด เมื่อให้อุณหภูมิแก๊ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยที่ กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

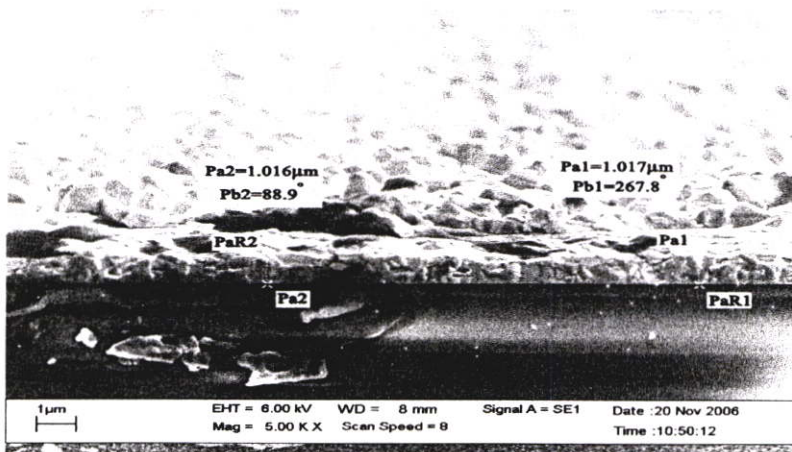


รูปที่ 4.33 แสดงขนาดของเกรนจากภาพถ่าย SEM ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด เมื่อให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

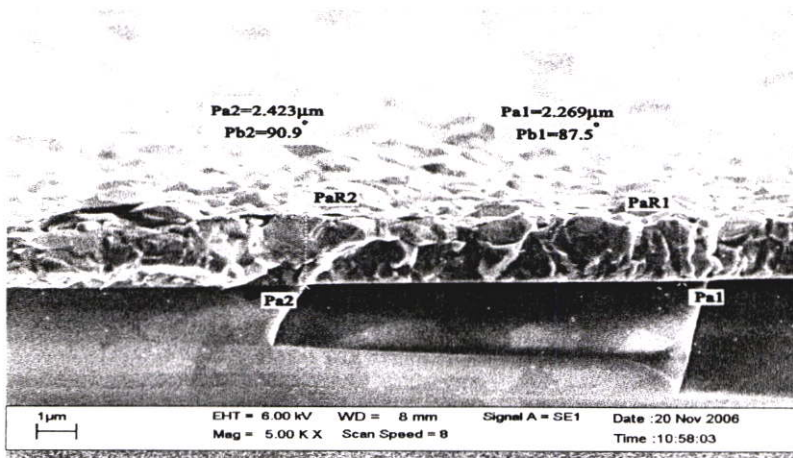
สำหรับภาพถ่าย SEM ที่บริเวณภาคตัดขวางของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดโดยให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400°C และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 2 และ 4 นาทีเพื่อศึกษาอัตราการเคลือบฟิล์มบาง ซึ่งจากการภาพถ่าย SEM ที่บริเวณภาคตัดขวางของฟิล์มบาง CdTe เมื่อใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 2 นาทีมีความหนาของชั้นฟิล์มบางที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm มีความหนาประมาณ 1.323 µm ที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm มีความหนาประมาณ 1.017 µm และที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm มีความหนาประมาณ 2.346 µm และเมื่อใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาทีมีความหนาของชั้นฟิล์มบางที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm มีความหนาประมาณ 2.511 µm ที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm มีความหนาประมาณ 3.986 µm และที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm มีความหนาประมาณ 2.990 µm ดังแสดงในรูปที่ 4.34-4.35



d = 4 mm

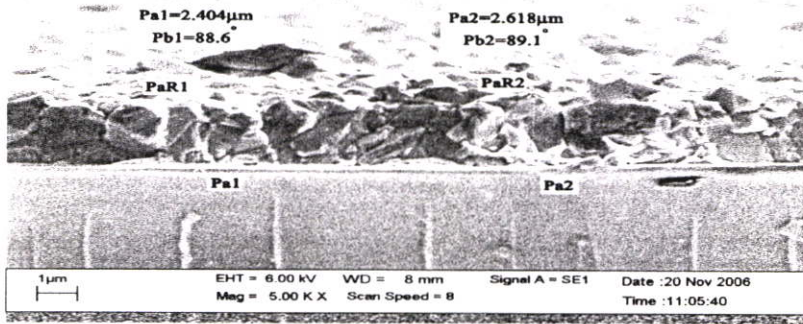


d = 6 mm

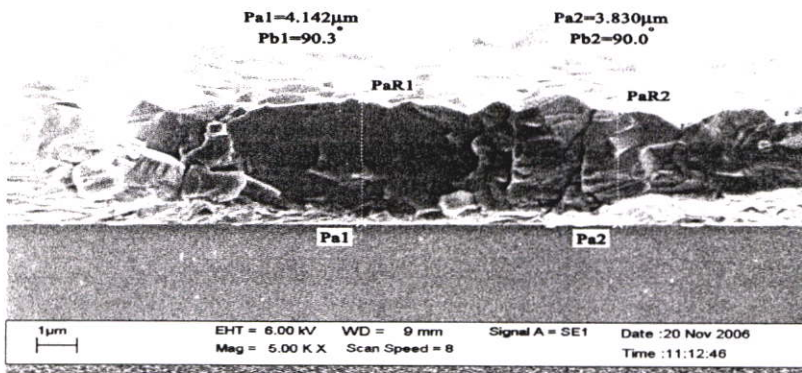


d = 8 mm

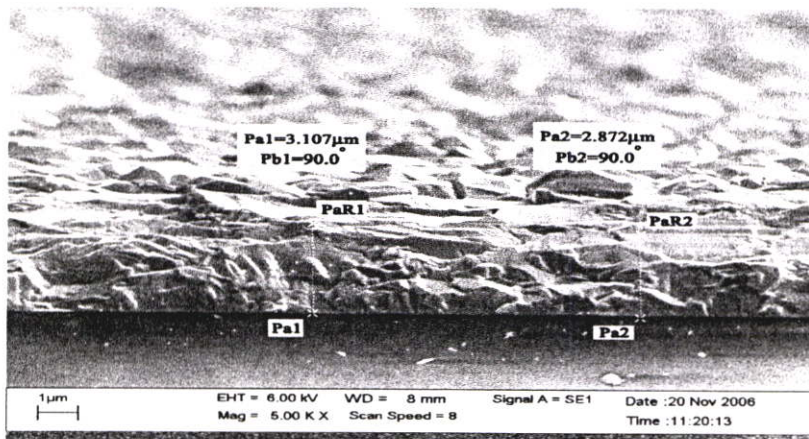
รูปที่ 4.34 แสดงภาพถ่าย SEM ที่บริเวณภาคตัดขวางของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C และอุณหภูมิของฐานรองรับเท่ากับ 400°C และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 2 นาที



d = 4 mm



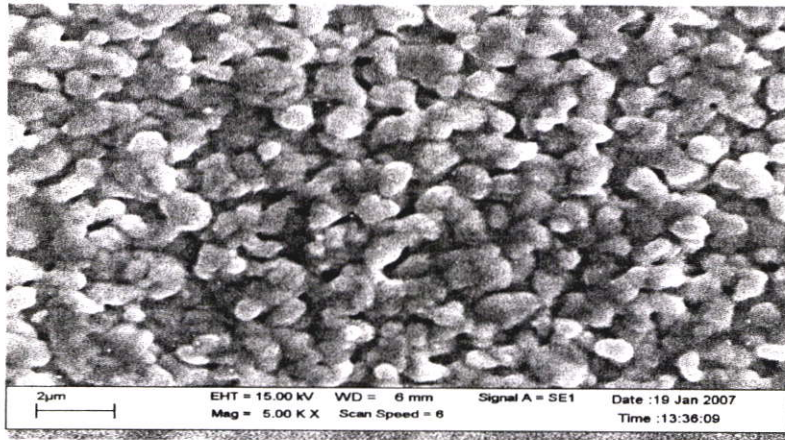
d = 6 mm



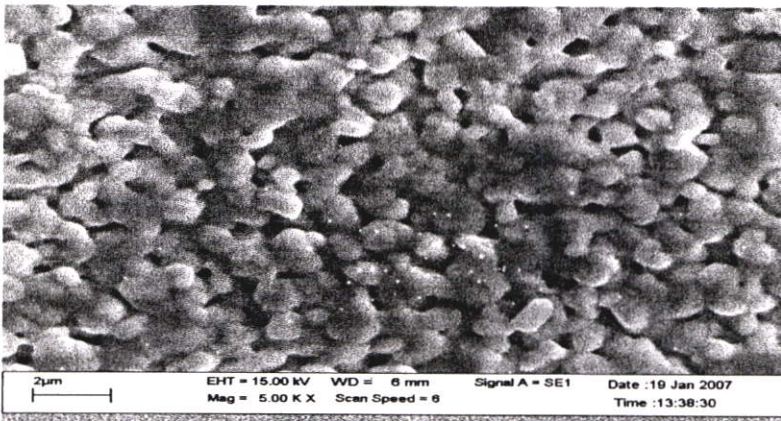
d = 8 mm

รูปที่ 4.35 แสดงภาพถ่าย SEM ที่บริเวณภาคตัดขวางของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C และอุณหภูมิของฐานรองรับเท่ากับ 400°C และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

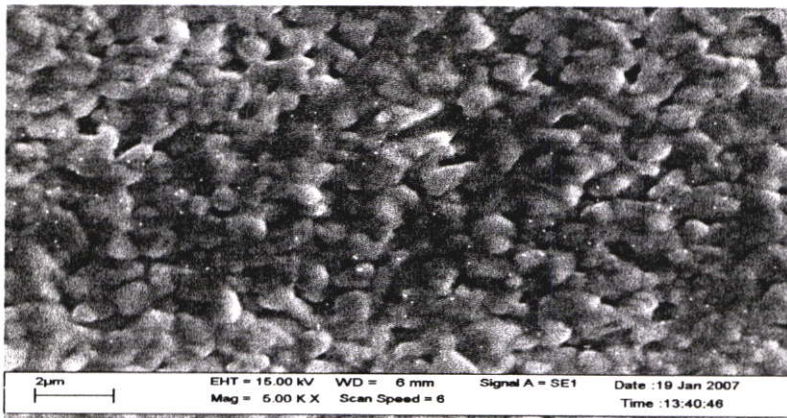
จากการศึกษาภาพถ่าย SEM ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารใน ระยะ ประชิดเมื่อให้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm 6 mm และ 8 mm โดยให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็น กระจก สไลด์เท่ากับ 400 °C และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที จากนั้นนำฟิล์มบาง CdTe มาแอนนีสด้วยแคดเมียมคลอไรด์ ภายใต้ระบบสุญญากาศ ภายใต้บรรยากาศของแก๊ส ไนโตรเจน และภายในระบบระเหิดสารในระยะประชิด ตลอดจนทำการแอนนีสในอากาศ ซึ่งจาก ภาพถ่าย SEM บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางพบว่าฟิล์มบางที่ผ่านการแอนนีสด้วยแคดเมียมคลอไรด์ ภายใต้ระบบสุญญากาศและภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนมีลักษณะผิวหน้าที่คล้ายคลึงกัน คือมีผิวหน้าที่เรียบสม่ำเสมอและเกรนมีลักษณะที่เชื่อมติดต่อกัน ส่วนกรณีที่แอนนีสด้วยแคดเมียม คลอไรด์ภายในระบบระเหิดสารในระยะประชิดมีลักษณะผิวหน้าที่เรียบสม่ำเสมอและเกรนมี ลักษณะเป็นเกรนเดียวกันและมีและมีเม็ดขนาดเล็กๆติดที่บริเวณผิวหน้าซึ่งน่าจะเป็นสารแคดเมียม คลอไรด์บางส่วนที่ยังไม่เข้าไปแทรกอยู่ในเนื้อของฟิล์มบาง และกรณีที่แอนนีสในอากาศมีลักษณะ ผิวหน้าที่เรียบสม่ำเสมอและเกรนมีลักษณะคล้ายคลึงกับกรณีที่ยังไม่ผ่านการแอนนีส ซึ่งจากภาพ ถ่ายผิวหน้าเราสันนิษฐานว่ากระบวนการที่เกิดขึ้นอาจจะยังไม่สมบูรณ์เพราะสังเกตจากลักษณะของ ขอบเขตของเกรนมีลักษณะที่สามารถรวมเป็นเกรนเดียวกันได้มากกว่านี้ ขนาดของเกรนเฉลี่ยของ ฟิล์มบางที่ผ่านการแอนนีสด้วยแคดเมียมคลอไรด์ภายใต้ระบบสุญญากาศ ภายใต้บรรยากาศของ แก๊สไนโตรเจน และภายในระบบระเหิดสารในระยะประชิดไม่สามารถคำนวณหาได้เนื่องจาก ขอบเขตของแต่ละเกรนไม่ชัดเจน ส่วนกรณีแอนนีสในอากาศขนาดของเกรนเฉลี่ยนั้นสามารถ คำนวณหาได้คือที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm มี ขนาดของเกรนเฉลี่ยเท่ากับ 3.20 μm ที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจก สไลด์เท่ากับ 6 mm มีขนาดของเกรนเฉลี่ยเท่ากับ 2.20 μm และที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึง ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm มีขนาดของเกรนเฉลี่ยเท่ากับ 2.37 μm ภาพถ่าย SEM ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารใน ระยะ ประชิดเมื่อให้ระยะห่าง ระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกันซึ่งผ่านการแอนนีสในบรรยากาศ ต่างๆแสดงได้ดังรูปที่ 4.36-4.39



$d = 4 \text{ mm}$

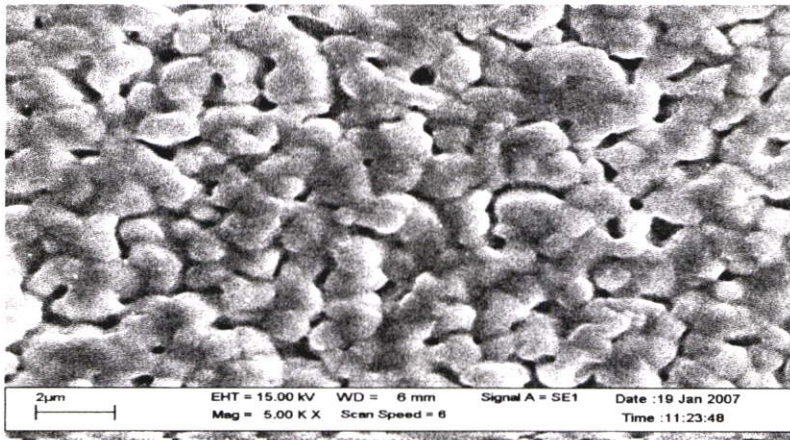


$d = 6 \text{ mm}$

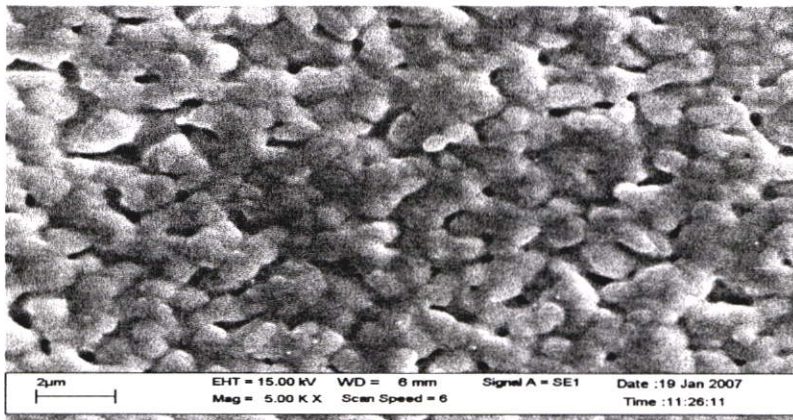


$d = 8 \text{ mm}$

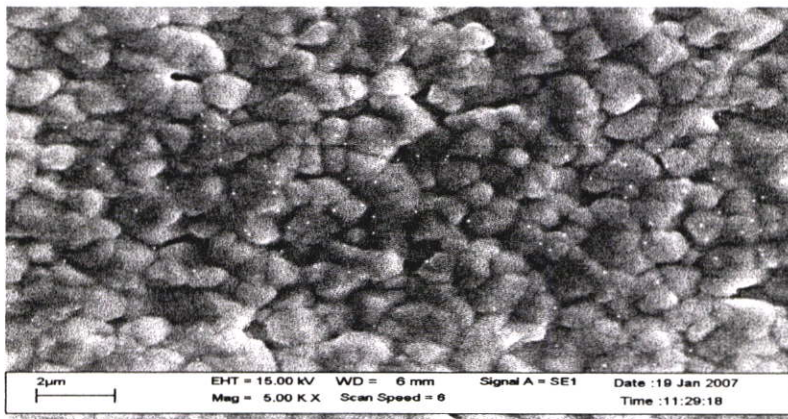
รูปที่ 4.36 แสดงภาพถ่าย SEM ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบาง CdTe ที่แอนนัลในบรรยากาศของ แคลเมียมคลอไรด์ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10 นาทีภายในระบบระเหิดสารในระยะประชิดที่มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน



$d = 4 \text{ mm}$

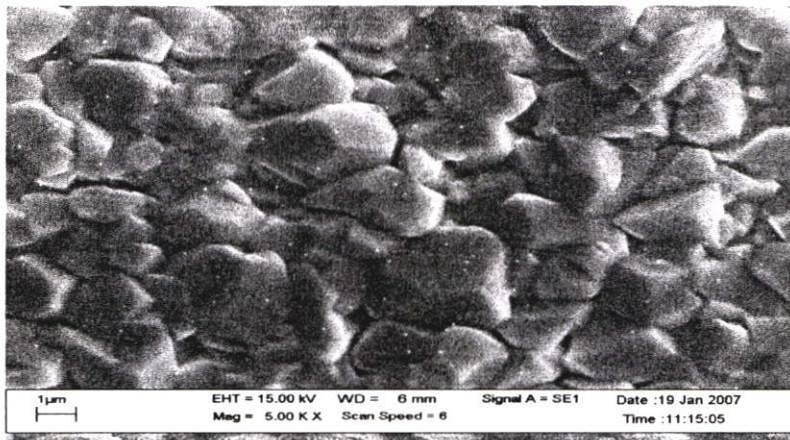


$d = 6 \text{ mm}$

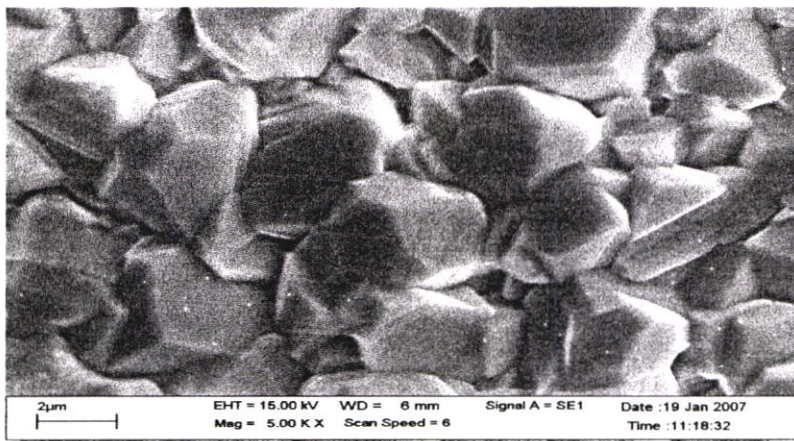


$d = 8 \text{ mm}$

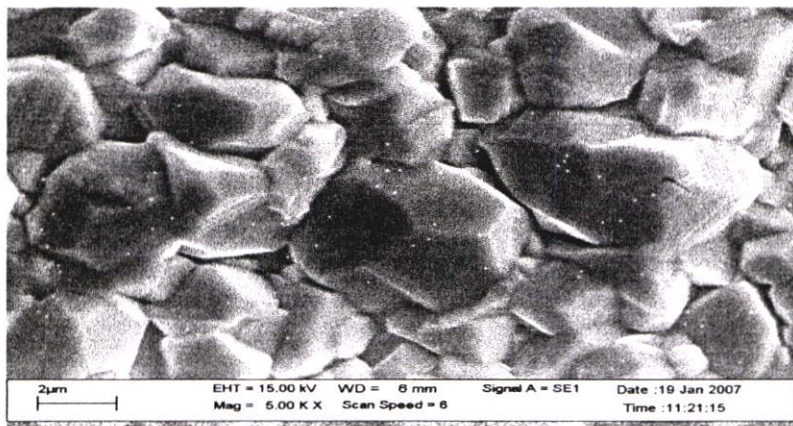
รูปที่ 4.37 แสดงภาพถ่าย SEM ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบาง CdTe ที่แอนนีสลในบรรยากาศของ แคลเมียมคลอไรด์ภายใต้ระบบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10 นาทีภายใน ระบบระเหิดสารในระยะประชิด ที่มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็น กระจกสไลด์แตกต่างกัน



$d = 4 \text{ mm}$

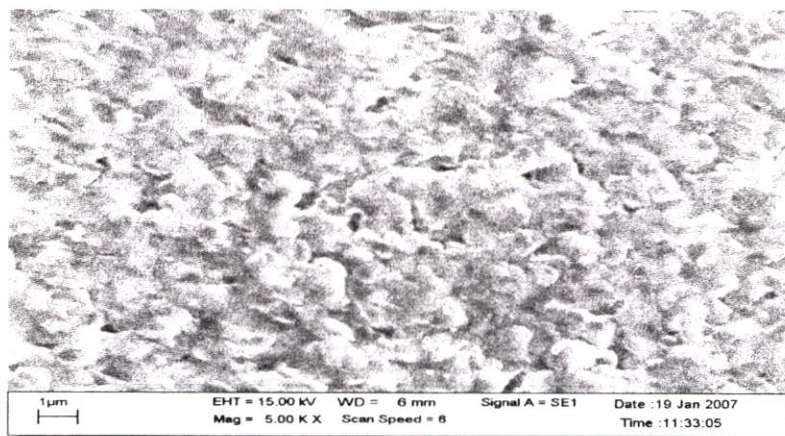


$d = 6 \text{ mm}$

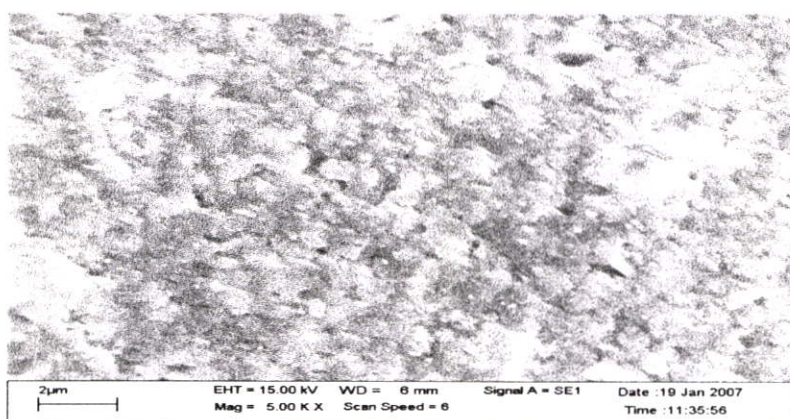


$d = 8 \text{ mm}$

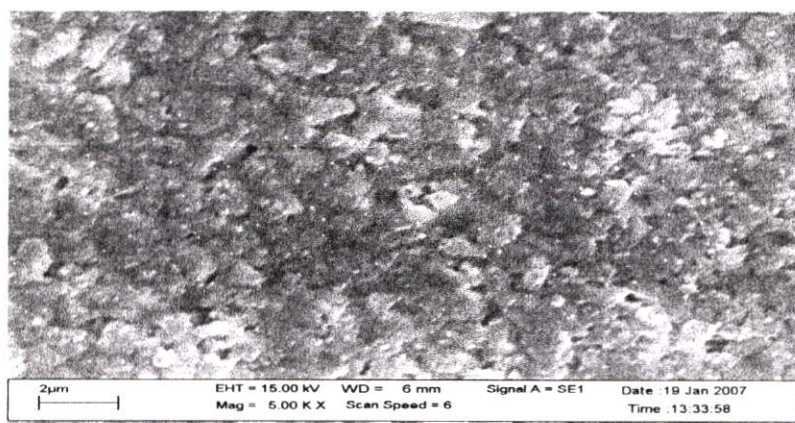
รูปที่ 4.38 แสดงภาพถ่าย SEM ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบาง CdTe ที่แอนนัลในอากาศที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10 นาทีที่มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน



d = 4 mm



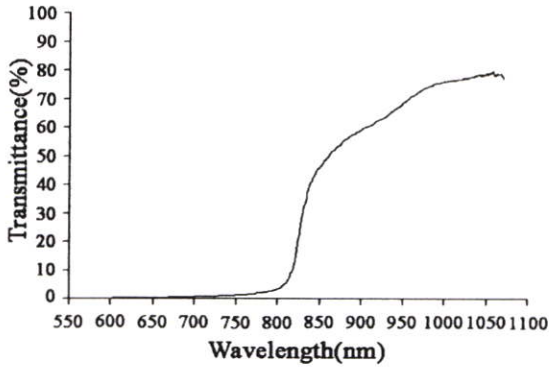
d = 6 mm



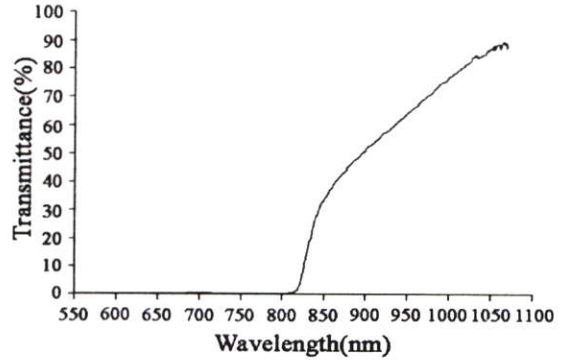
d = 8 mm

รูปที่ 4.39 แสดงภาพถ่าย SEM ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบาง CdTe ที่แอนนีสลในบรรยากาศของ แก๊สเมียมกลอไรด์ที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10 นาทีภายในระบบประเห็ดสารในระยะ ประชิดที่มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน

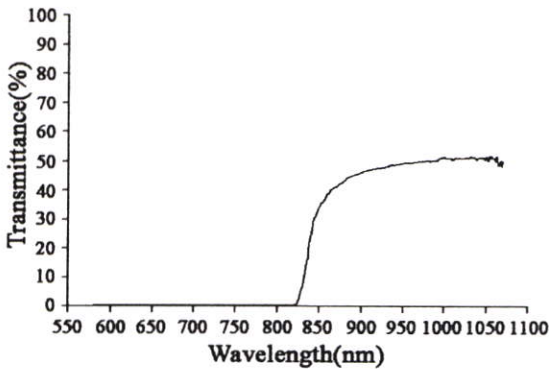
4.2.3 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์



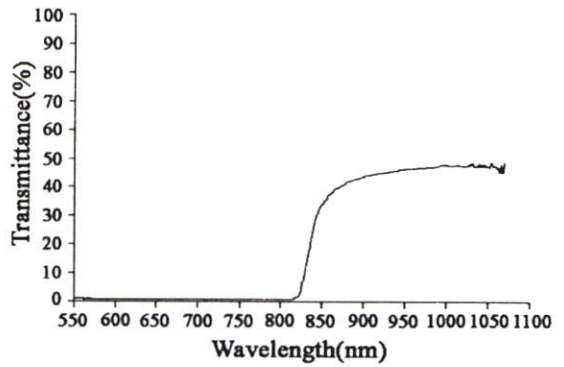
$T_{\text{sub}} = 375 \text{ }^{\circ}\text{C}$



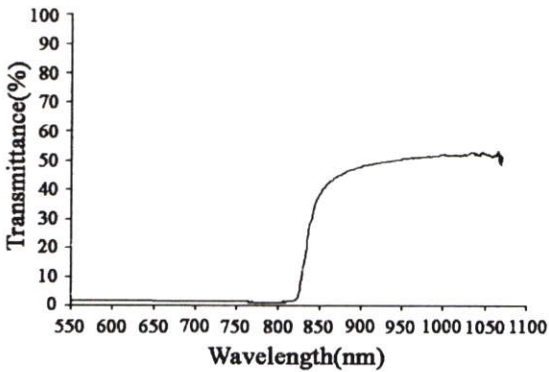
$T_{\text{sub}} = 400 \text{ }^{\circ}\text{C}$



$T_{\text{sub}} = 425 \text{ }^{\circ}\text{C}$

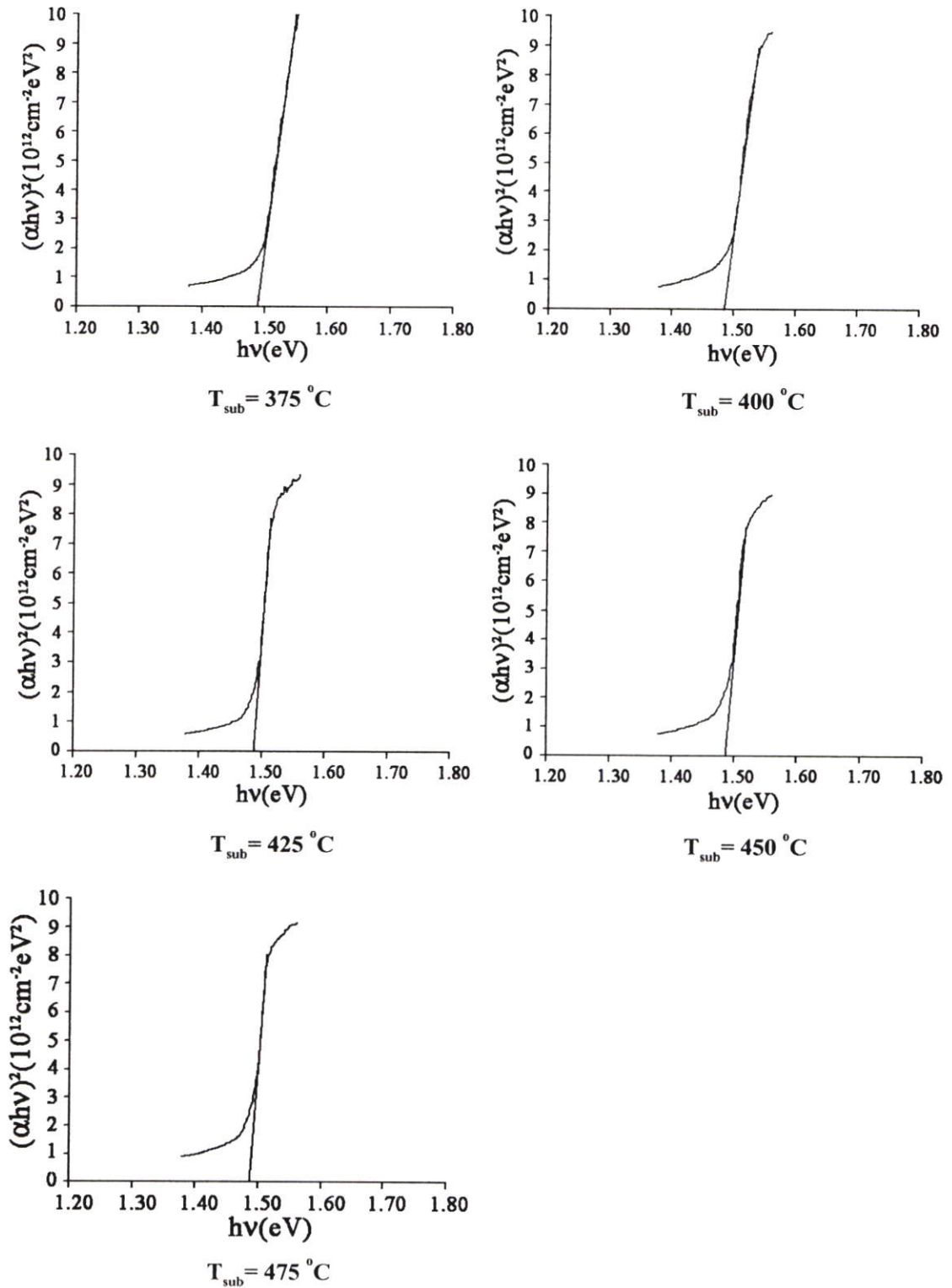


$T_{\text{sub}} = 450 \text{ }^{\circ}\text{C}$

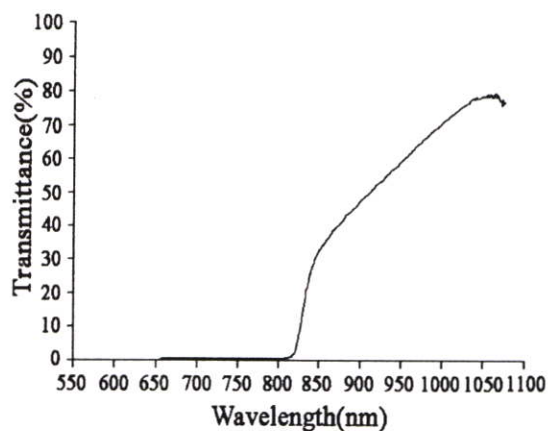
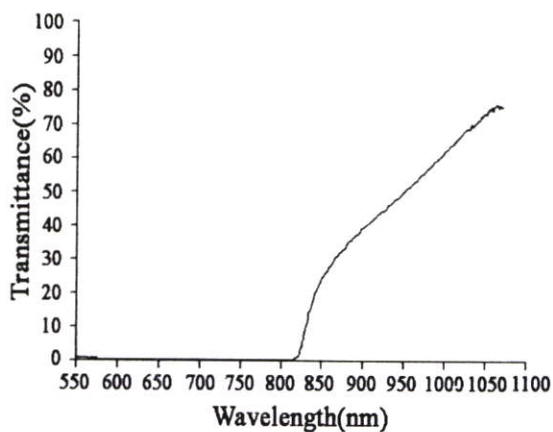
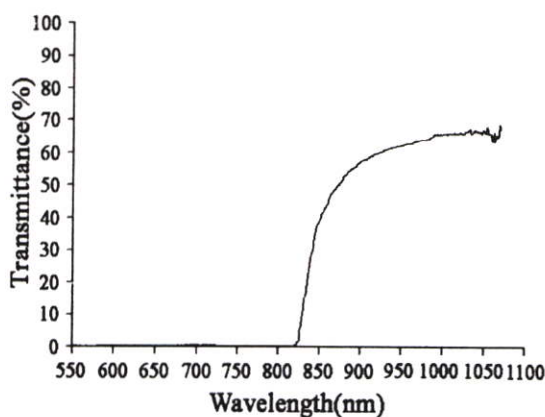
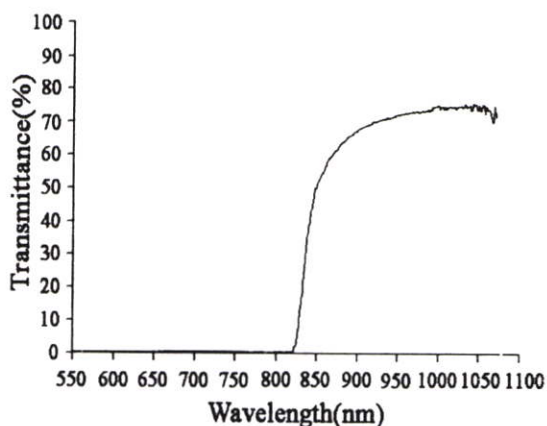
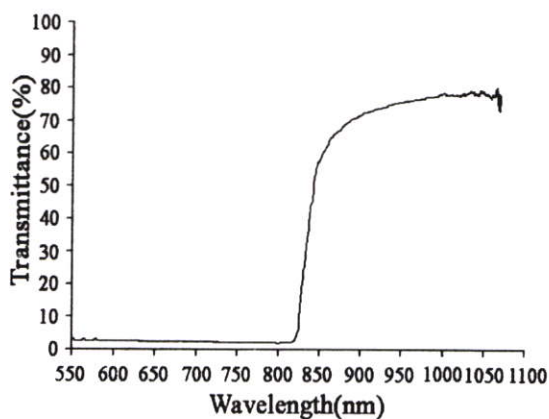


$T_{\text{sub}} = 475 \text{ }^{\circ}\text{C}$

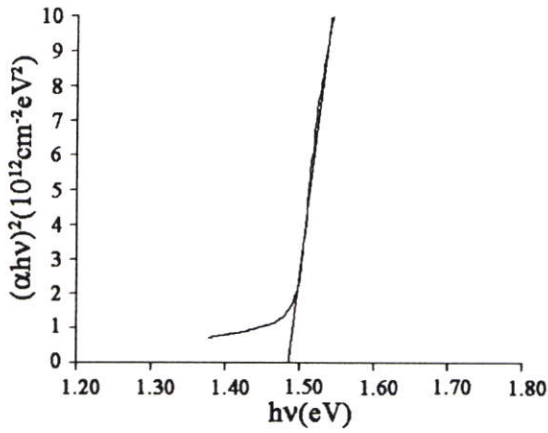
รูปที่ 4.40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระบะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ $550 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที



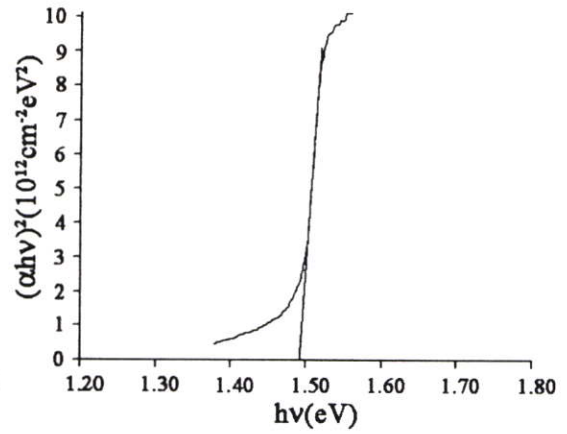
รูปที่ 4.41 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$ กับ hv फिल्मบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก๊สสารตั้งต้นเท่ากับ 550°C และให้อุณหภูมิแก๊สฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที


 $T_{\text{sub}} = 375 \text{ }^{\circ}\text{C}$

 $T_{\text{sub}} = 400 \text{ }^{\circ}\text{C}$

 $T_{\text{sub}} = 425 \text{ }^{\circ}\text{C}$

 $T_{\text{sub}} = 450 \text{ }^{\circ}\text{C}$

 $T_{\text{sub}} = 475 \text{ }^{\circ}\text{C}$

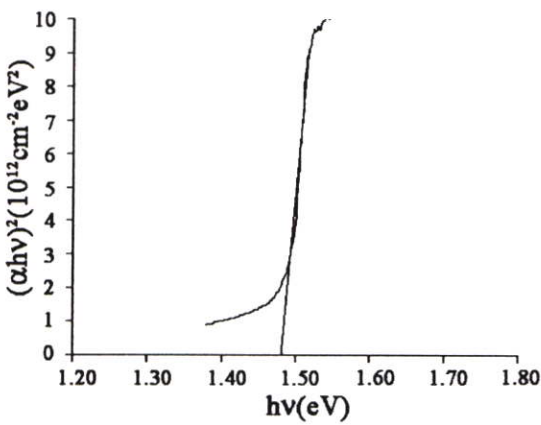
รูปที่ 4.42 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ $550 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที



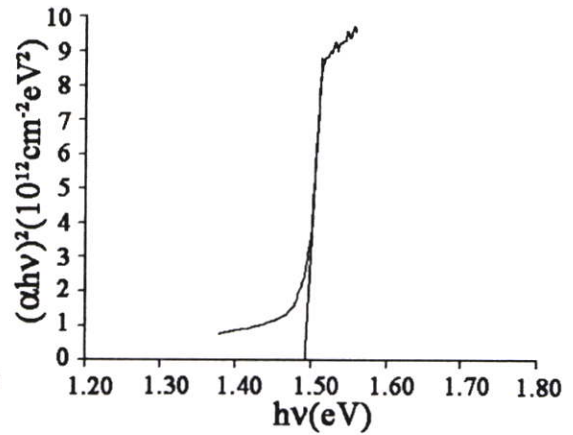
$T_{sub} = 375^\circ C$



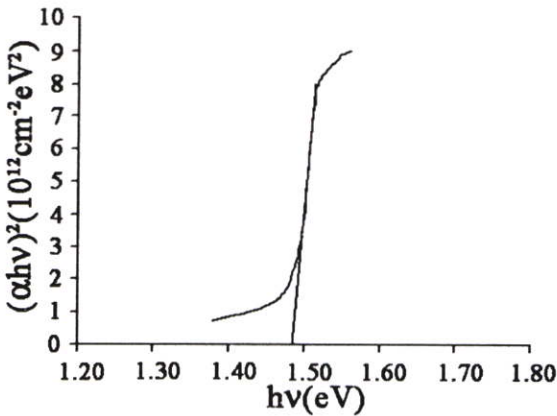
$T_{sub} = 400^\circ C$



$T_{sub} = 425^\circ C$

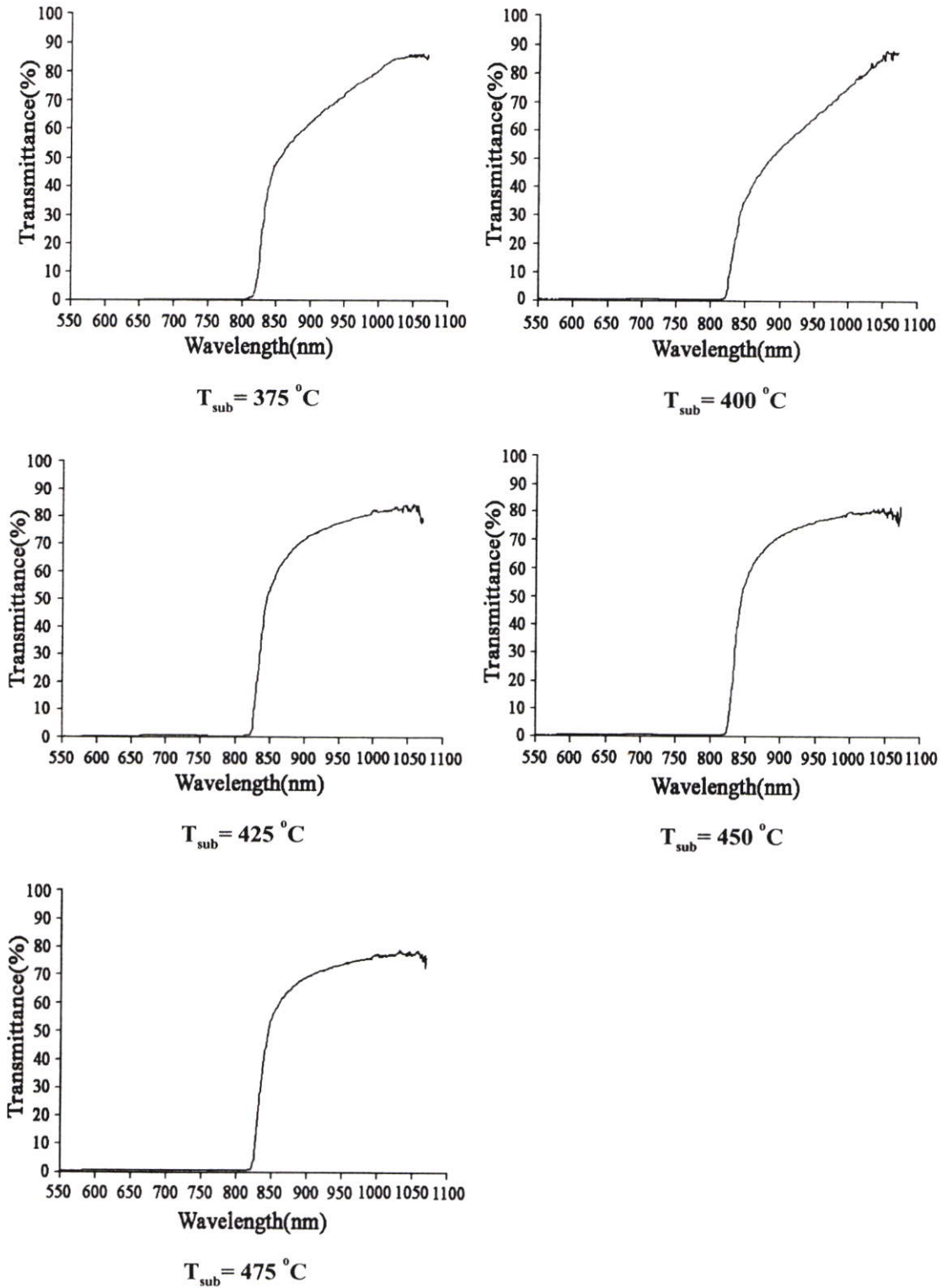


$T_{sub} = 450^\circ C$

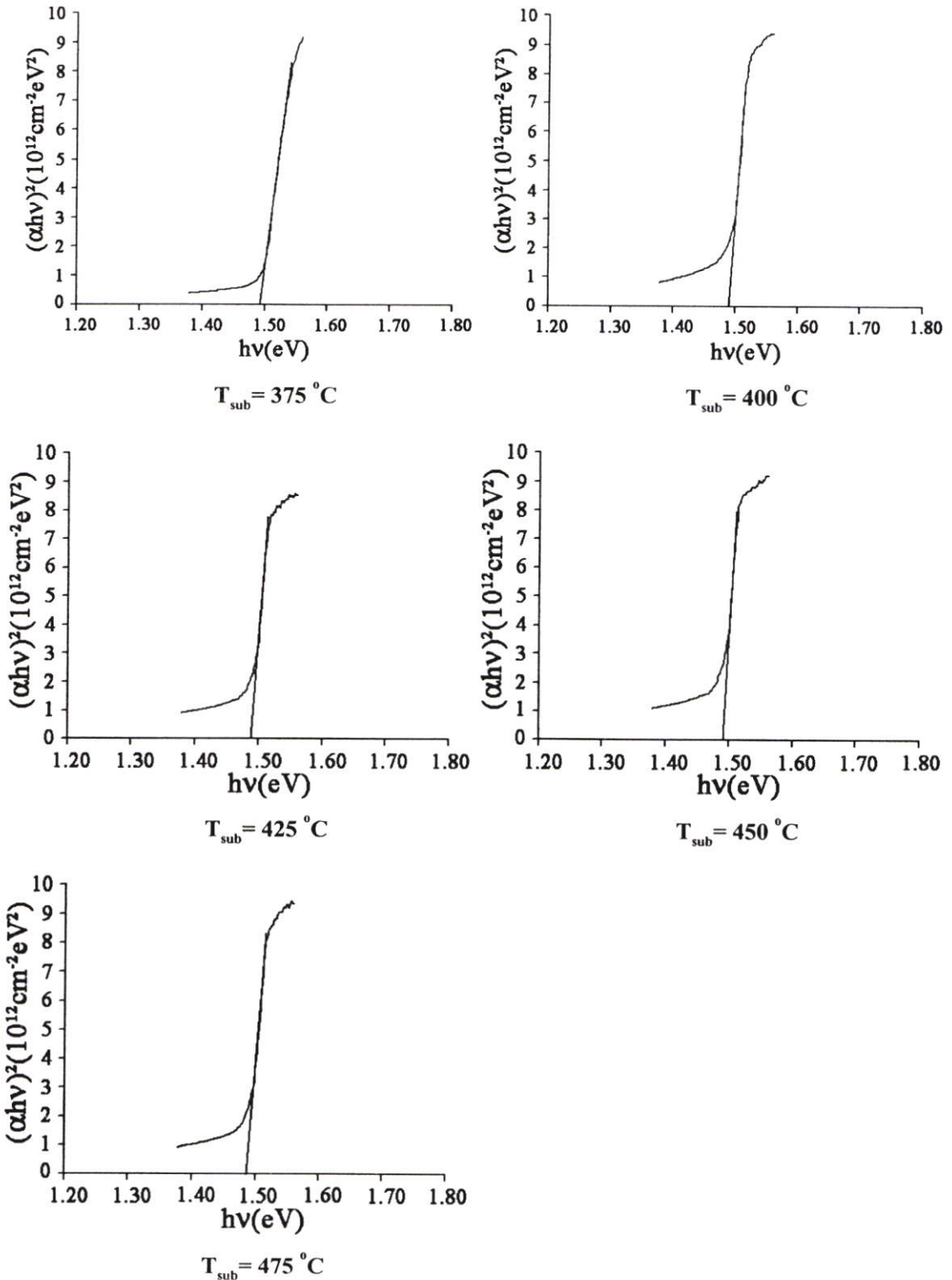


$T_{sub} = 475^\circ C$

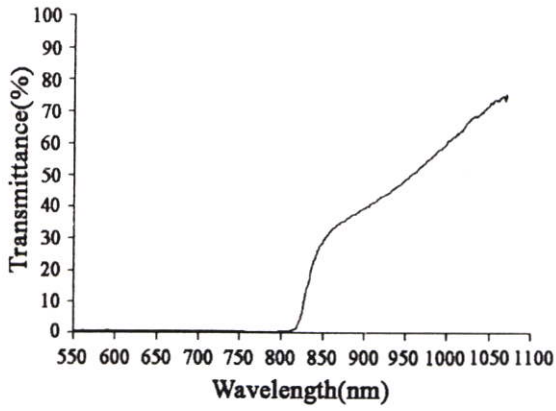
รูปที่ 4.43 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$ กับ $h\nu$ फिल्मบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก๊สเริ่มต้นเท่ากับ $550^\circ C$ และให้อุณหภูมิแก๊สฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที



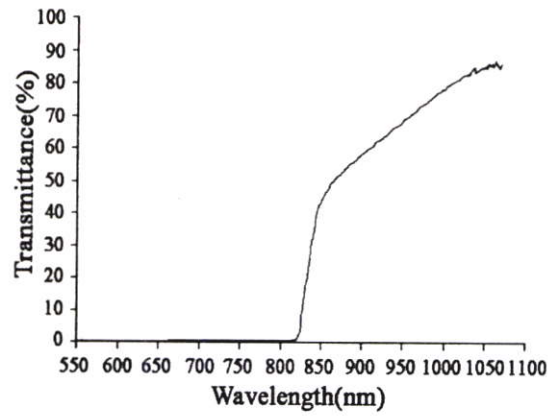
รูปที่ 4.44 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ และให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที



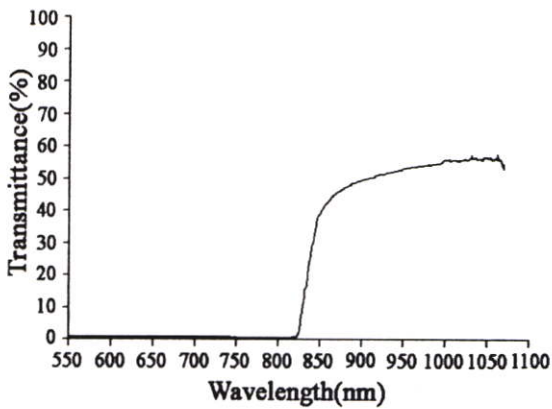
รูปที่ 4.45 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$ กับ hv ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ $550 \text{ }^\circ\text{C}$ และให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที



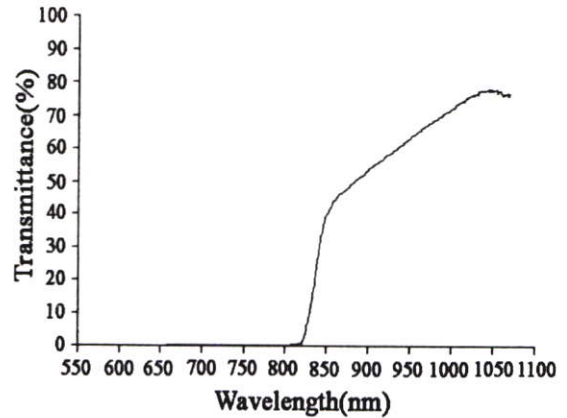
Nitrogen



Vacuum

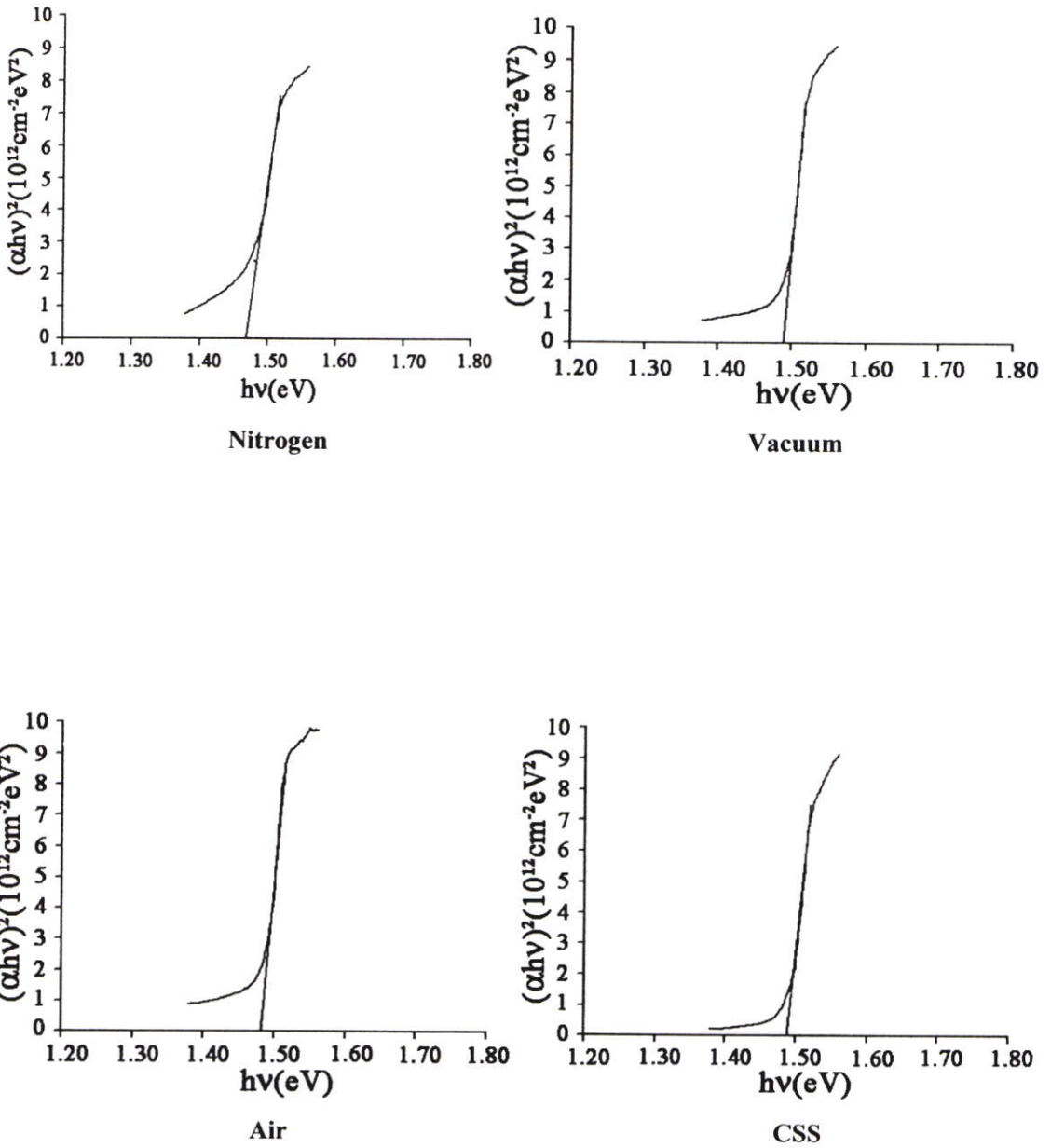


Air

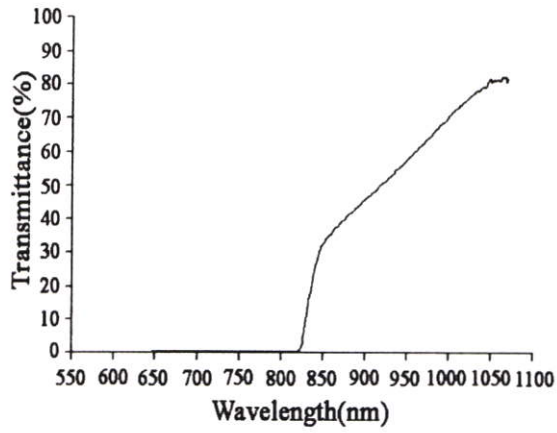


CSS

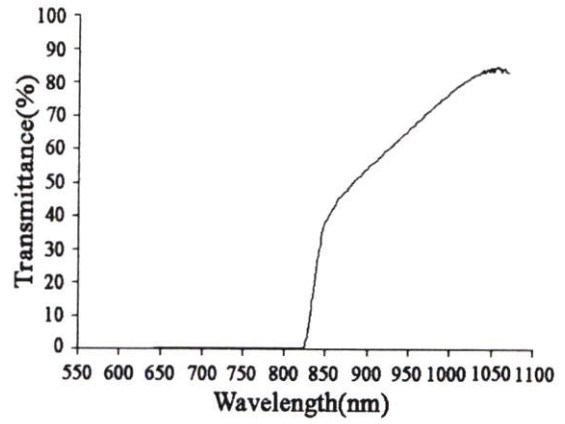
รูปที่ 4.46 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนัลในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10 นาที โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที



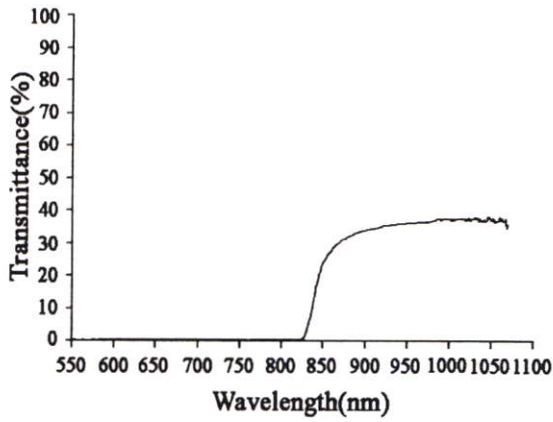
รูปที่ 4.47 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$ กับ hv ฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนิตในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10 นาที โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที



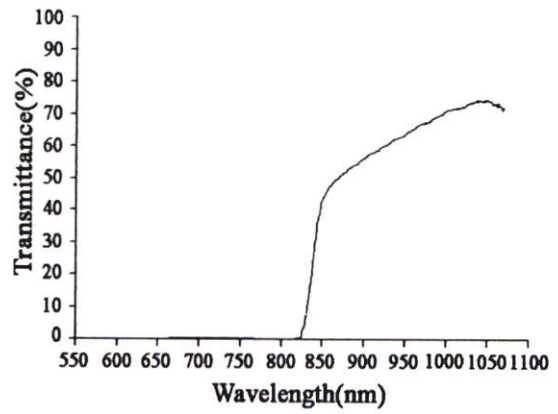
Nitrogen



Vacuum

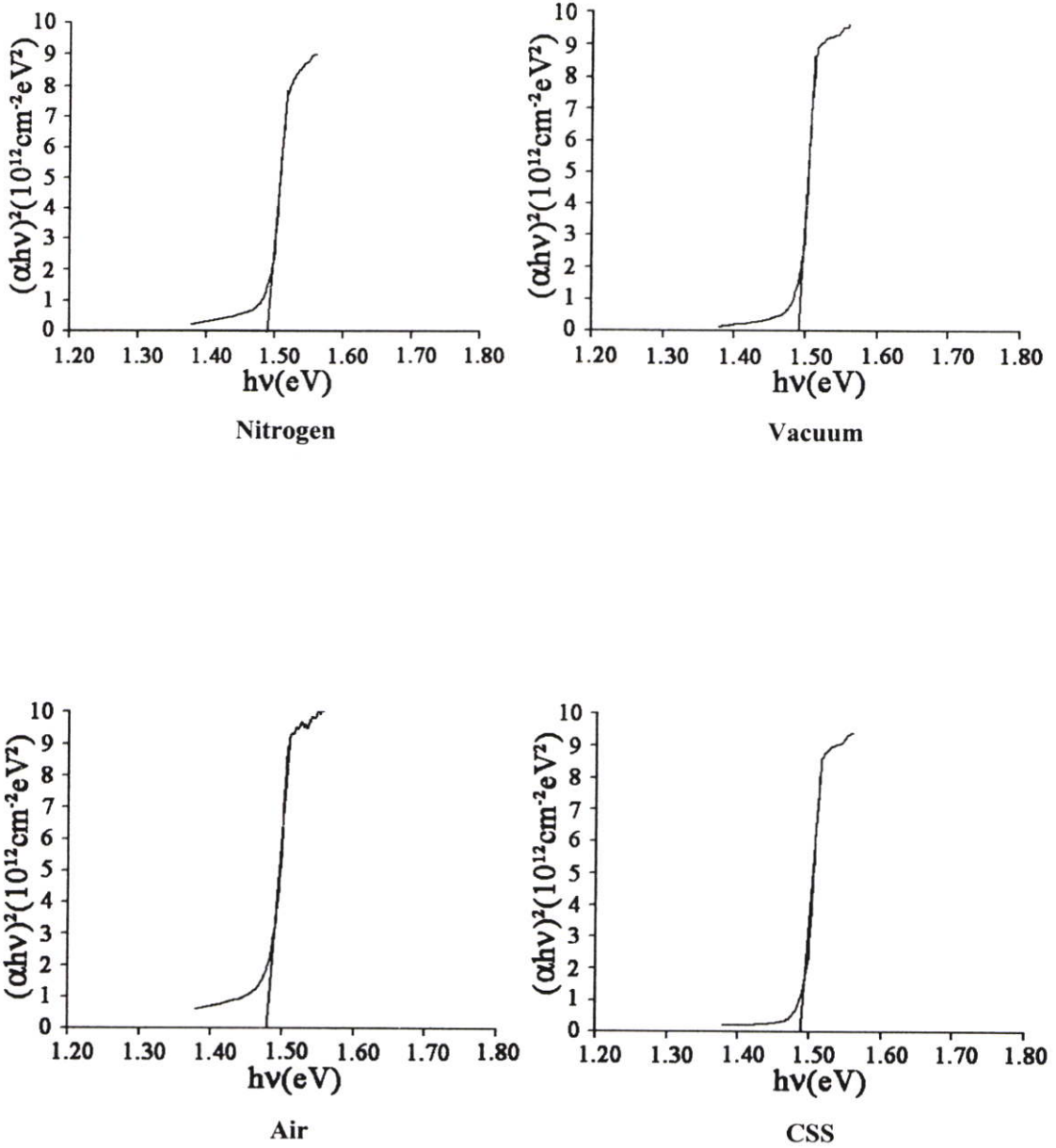


Air

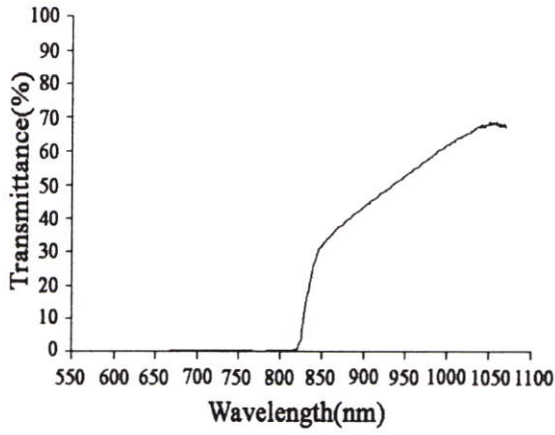


CSS

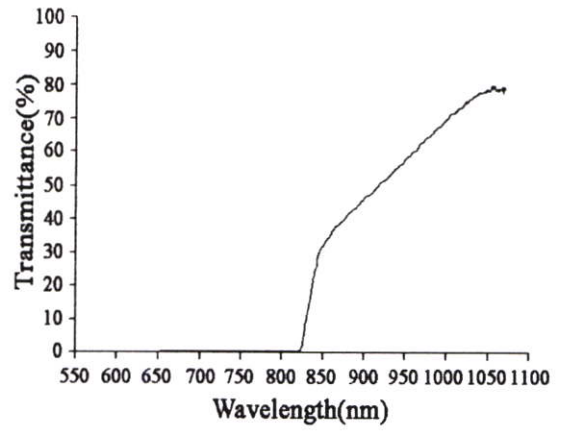
รูปที่ 4.48 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนिलในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10 นาที โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที



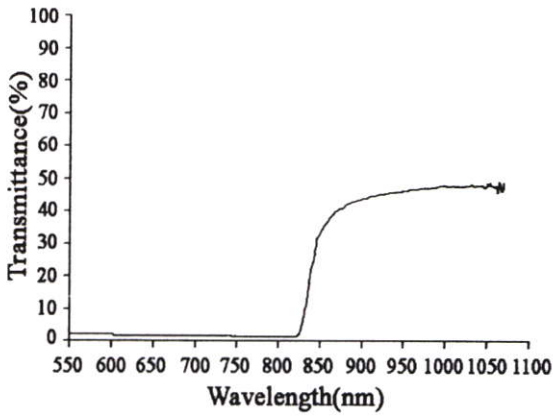
รูปที่ 4.49 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$ กับ hv ฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนัลในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10 นาที โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที



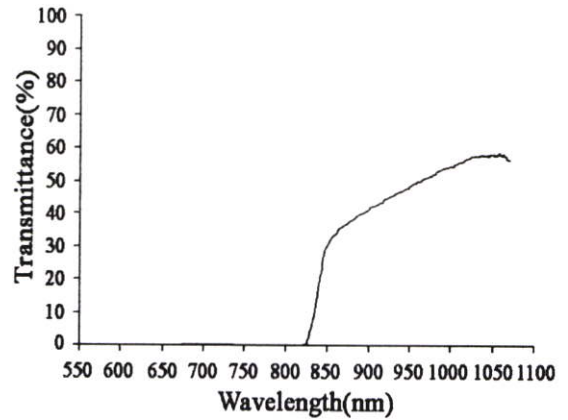
Nitrogen



Vacuum

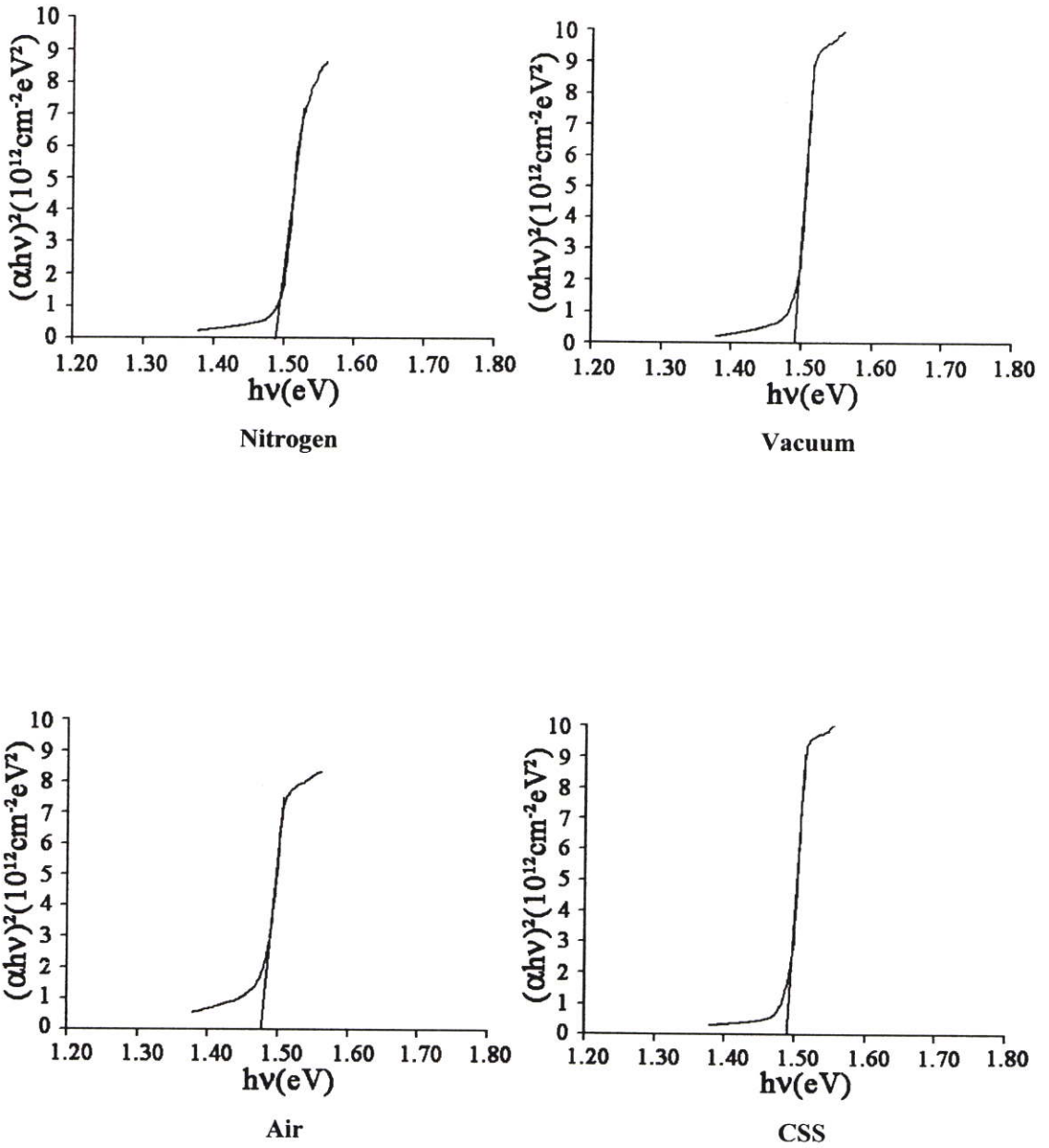


Air



CSS

รูปที่ 4.50 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนिलในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10 นาที โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที



รูปที่ 4.51 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$ กับ hv फिल्मบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนिलในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10 นาทีโดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดในระยะประชิดที่อุณหภูมิสารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิของฐานรองรับกระจกสไลด์เท่ากับ 375, 400, 425, 450 และ 475 องศาเซลเซียสที่ระยะระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับกระจกสไลด์เท่ากับ 4, 6 และ 8 มิลลิเมตรและกรณีที่แอนนีสในบรรยากาศแคดเมียมคลอไรด์ในบรรยากาศไนโตรเจน ในระบบสุญญากาศ ในระบบระเหิดในระยะประชิด และแอนนีสในอากาศพบว่ามีขอบการดูดกลืนแสงอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 830 นาโนเมตรและมีการส่งผ่านแสงประมาณ 30-80 เปอร์เซ็นต์ ข้อมูลที่ได้จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงสามารถคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงานโดยนำข้อมูลที่ได้ออกกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานโฟตอน $h\nu$ แล้วทำการลากเส้นตรงหาค่าคาดหมาย (extrapolation) ของกราฟในส่วนที่เป็นเชิงเส้นไปตัดกับแกนพลังงานโฟตอนจุดที่ตัดแกนคือ ค่าช่องว่างแถบพลังงาน ซึ่งแสดงในตารางที่ 4.1-4.2

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ที่ได้จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดในระยะประชิด

Substrate Temperature (°C)	Energy Gap With Different Source-Substrate Spacers (eV)		
	d = 4 mm	d = 6 mm	d = 8 mm
375	1.49	1.49	1.49
400	1.49	1.49	1.49
425	1.49	1.48	1.49
450	1.49	1.49	1.49
475	1.49	1.49	1.49

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ที่ได้จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนีสในบรรยากาศของแคดเมียมคลอไรด์ในบรรยากาศต่างๆ

Annealing Atmosphere	Energy Gap With Different Source-Substrate Spacers (eV)		
	d = 4 mm	d = 6 mm	d = 8 mm
แก๊สไนโตรเจน	1.47	1.49	1.49
ระบบสุญญากาศ	1.49	1.49	1.49
อากาศ	1.48	1.49	1.48
ระบบระเหิดสารในระยะประชิด	1.49	1.49	1.49

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความชันที่ได้จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด

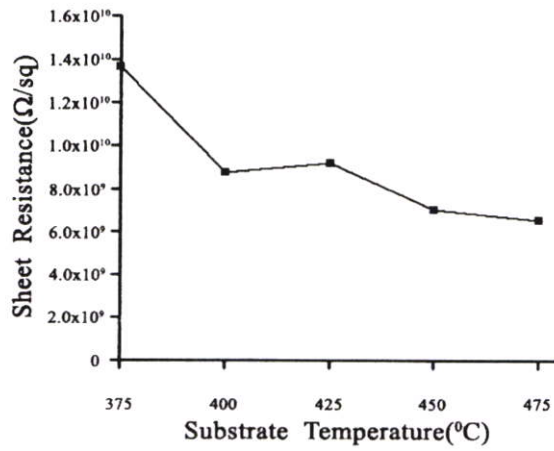
Substrate Temperature(°C)	Sharpness With Different Source-Substrate Spacers ($\times 10^{14} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{eV}$)		
	d = 4 mm	d = 6 mm	d = 8 mm
375	1.48	5.41	5.83
400	7.30	10.51	12.93
425	1.43	14.93	15.61
450	9.04	14.35	13.86
475	8.89	8.59	13.19

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าความชันที่ได้จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนีสในบรรยากาศของแควมเมียมคลอไรด์ในบรรยากาศต่างๆ

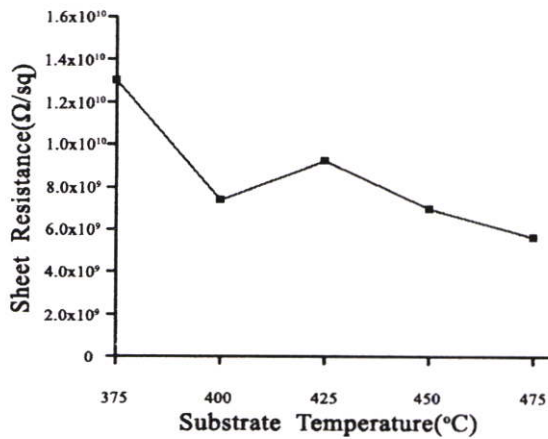
Annealing Atmosphere	Sharpness With Different Source-Substrate Spacers ($\times 10^{14} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{eV}$)		
	d = 4 mm	d = 6 mm	d = 8 mm
แก๊สไนโตรเจน	2.40	12.66	8.55
ระบบสุญญากาศ	10.29	14.88	14.09
อากาศ	10.84	15.66	7.91
ระบบระเหิดสารในระยะประชิด	7.09	12.27	12.86

4.2.4 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางแควมเมียมเทลลูไรด์

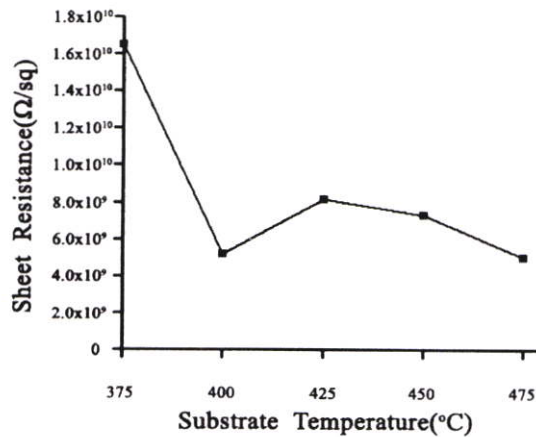
ในงานวิจัยนี้ ได้ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางแควมเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดในระยะประชิดซึ่งฟิล์มบางที่เตรียมได้มีความต้านทานสูง จึงวัดความต้านทานด้วยวิธีสองขั้วซึ่งจากผลการทดลองพบว่าฟิล์มบางที่เตรียมโดยวิธีระเหิดในระยะประชิด เมื่ออุณหภูมิของฐานรองรับกระจกสไลด์สูงขึ้นความต้านทานแผ่น โดยไม่ฉายแสงมีแนวโน้มลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.52 และในส่วนของฟิล์มบางที่แอนนีสในบรรยากาศต่างๆพบว่า ค่าความต้านทานแผ่น โดยไม่ฉายแสงมีค่าต่ำในกรณีที่แอนนีสในอากาศและแอนนีสในบรรยากาศแควมเมียมคลอไรด์ในระบบระเหิดในระยะประชิด ส่วนความต้านทานแผ่นในกรณีฉายแสงฟิล์มบางที่ผ่านการแอนนีสและไม่ผ่านการแอนนีสมีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลงดังแสดงในรูปที่ 4.53



d = 4 mm

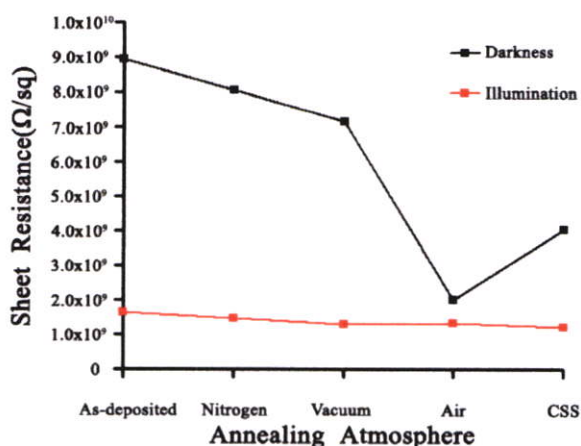


d = 6 mm

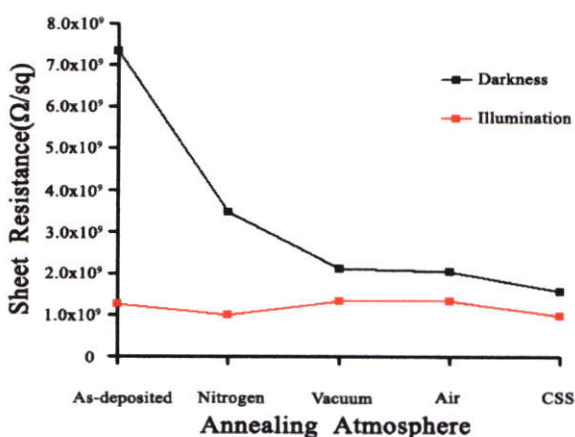


d = 8 mm

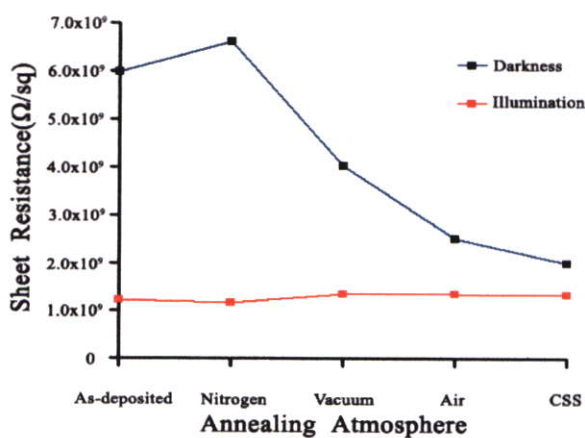
รูปที่ 4.52 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแผ่น โดยไม่ฉายแสงกับอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะ ประจิด เมื่อให้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกันและใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที



d = 4 mm

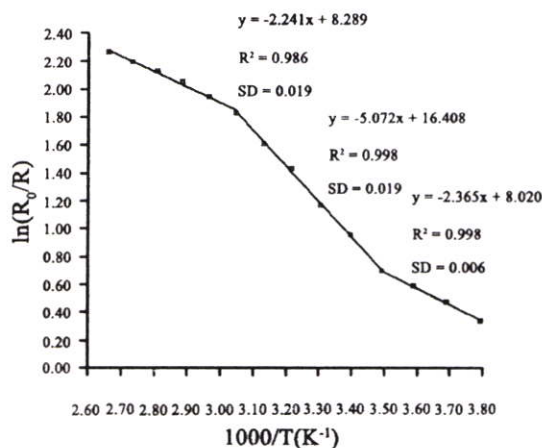


d = 6 mm

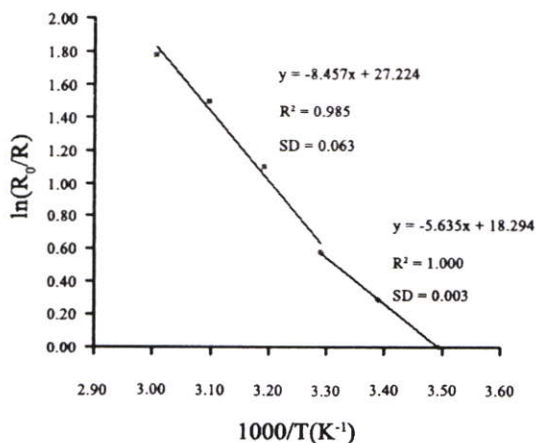


d = 8 mm

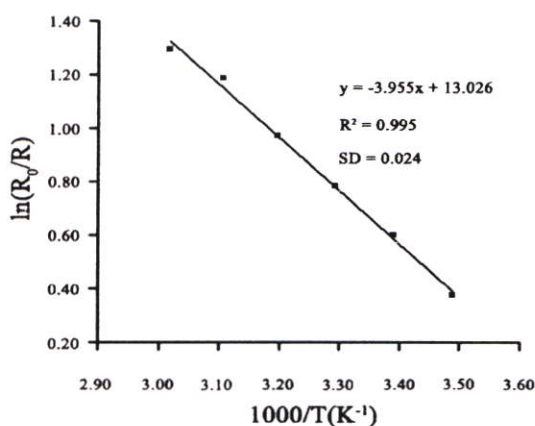
รูปที่ 4.53 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความต้านทานแผ่นทั้งฉายแสงและไม่ฉายแสงกับการแอนนิงในบรรยากาศต่างๆที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10 นาทีของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะ ประชิดเมื่อให้ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกันและใช้ เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที



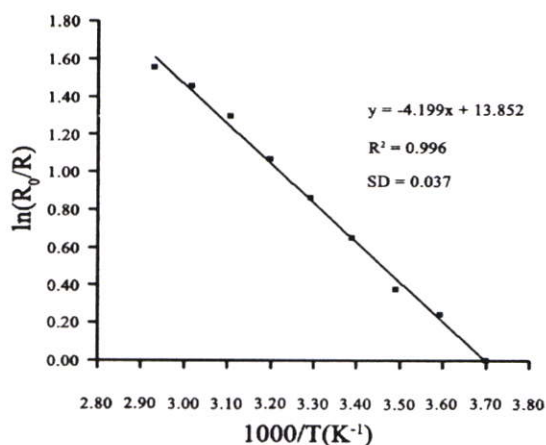
$$T_{\text{sub}} = 375 \text{ } ^\circ\text{C}$$



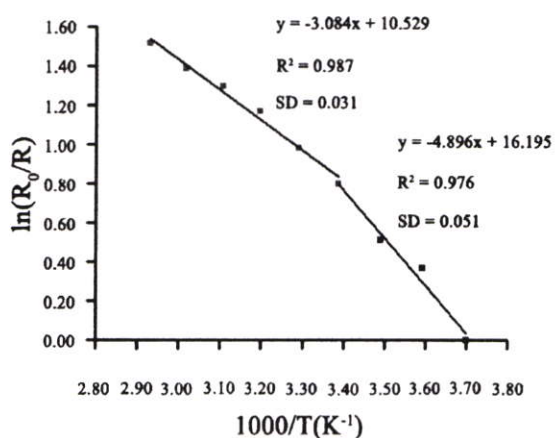
$$T_{\text{sub}} = 400 \text{ } ^\circ\text{C}$$



$$T_{\text{sub}} = 425 \text{ } ^\circ\text{C}$$



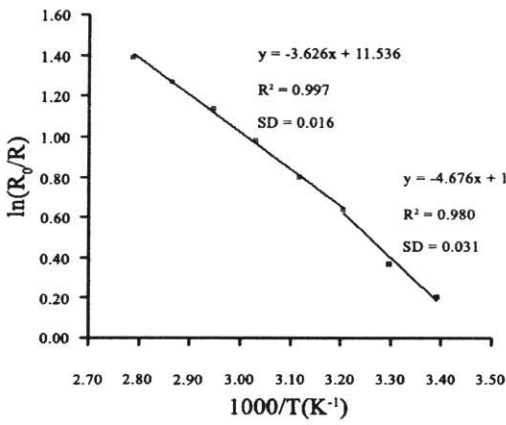
$$T_{\text{sub}} = 450 \text{ } ^\circ\text{C}$$



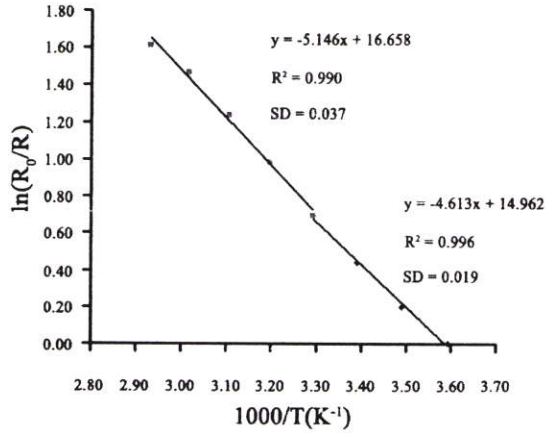
$$T_{\text{sub}} = 475 \text{ } ^\circ\text{C}$$

รูปที่ 4.54 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{R_0}{R}\right)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิด

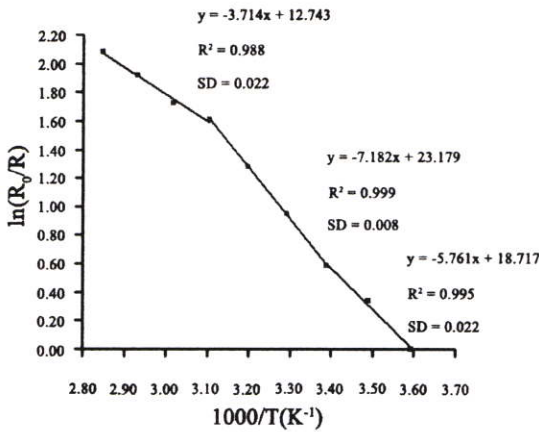
สารในระยะประชิด เมื่อให้อุณหภูมิแก๊สเริ่มต้นเท่ากับ $550 \text{ } ^\circ\text{C}$ และให้อุณหภูมิแก๊สฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกันโดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที



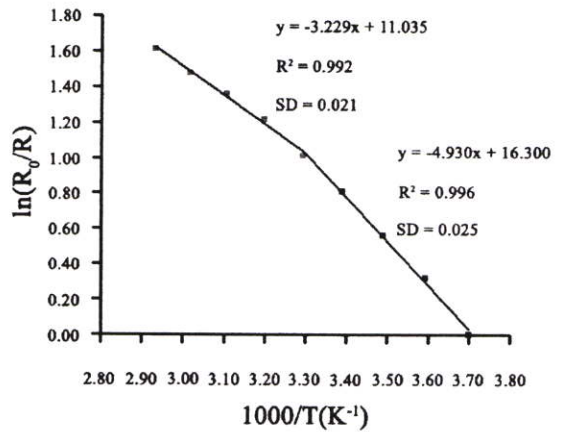
$T_{sub} = 375 \text{ }^\circ\text{C}$



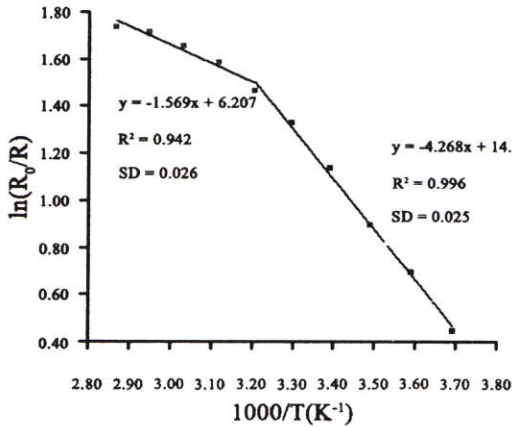
$T_{sub} = 400 \text{ }^\circ\text{C}$



$T_{sub} = 425 \text{ }^\circ\text{C}$



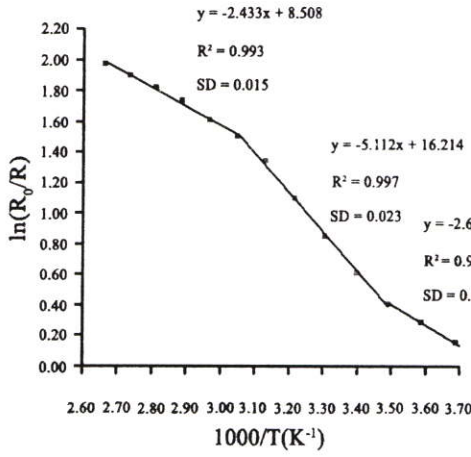
$T_{sub} = 450 \text{ }^\circ\text{C}$



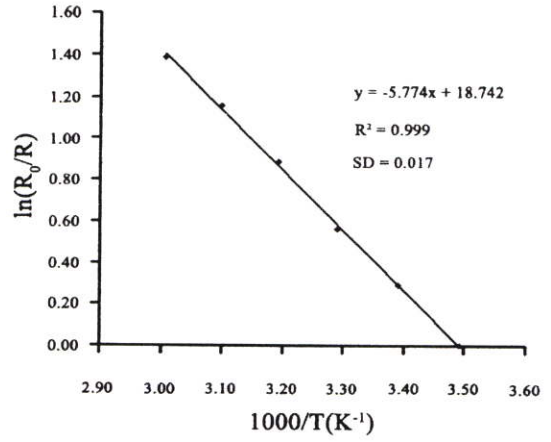
$T_{sub} = 475 \text{ }^\circ\text{C}$

รูปที่ 4.55 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{R_0}{R}\right)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิด

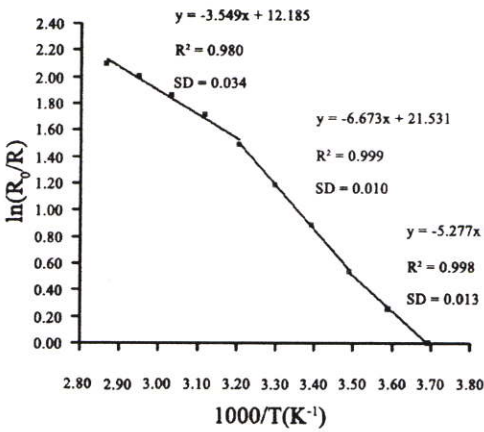
สารในระยะประชิด เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ $550 \text{ }^\circ\text{C}$ และให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกันโดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที



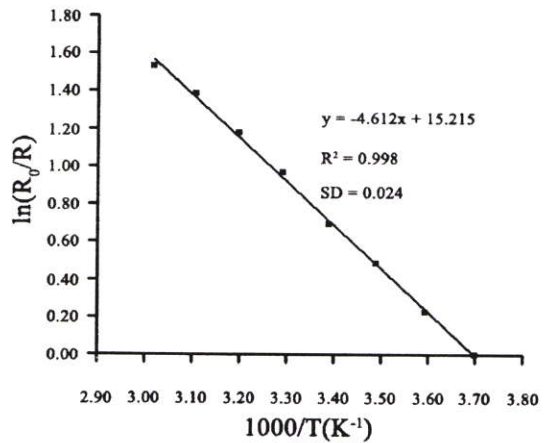
$T_{sub} = 375 \text{ }^{\circ}\text{C}$



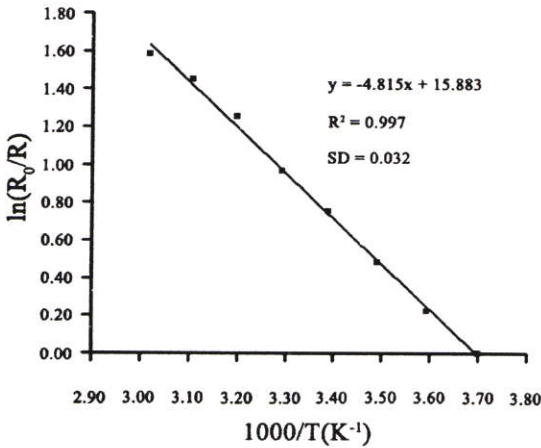
$T_{sub} = 400 \text{ }^{\circ}\text{C}$



$T_{sub} = 425 \text{ }^{\circ}\text{C}$



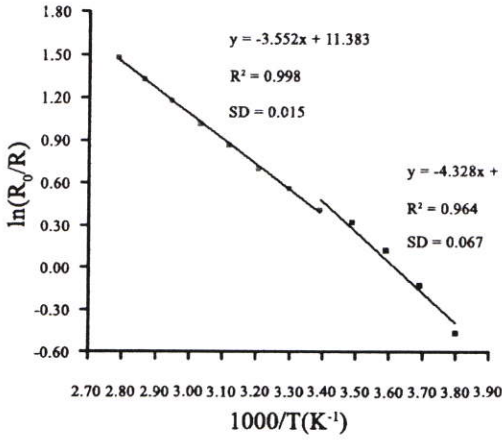
$T_{sub} = 450 \text{ }^{\circ}\text{C}$



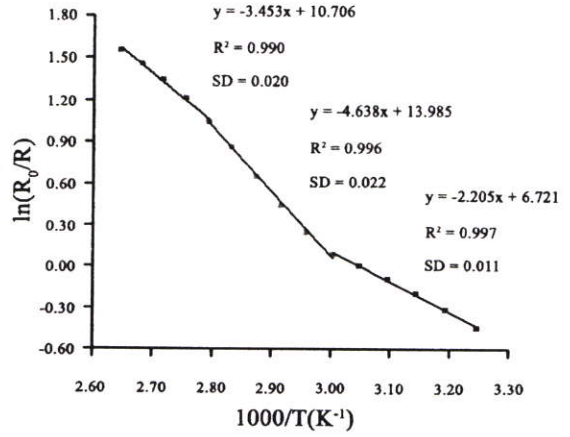
$T_{sub} = 475 \text{ }^{\circ}\text{C}$

รูปที่ 4.56 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{R_0}{R}\right)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิด

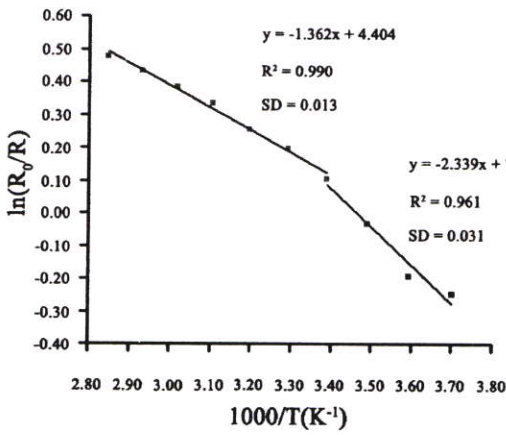
สารในระยะประชิด เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ $550 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที



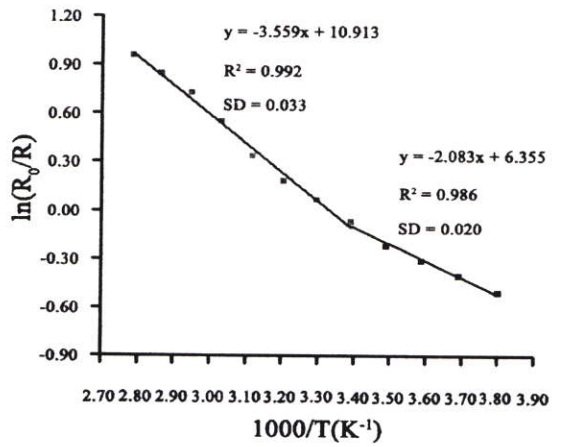
Nitrogen



Vacuum

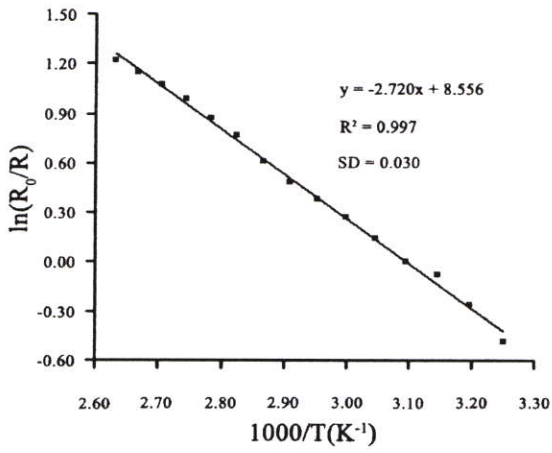


Air

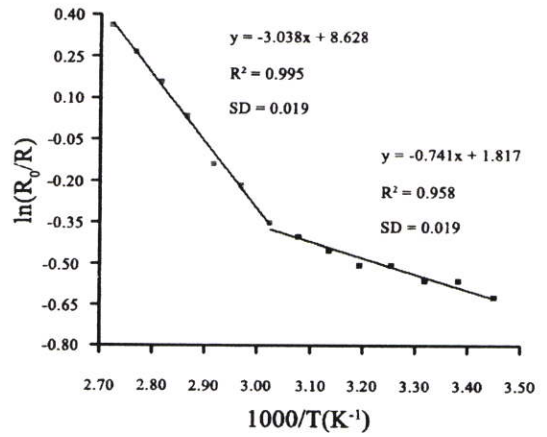


CSS

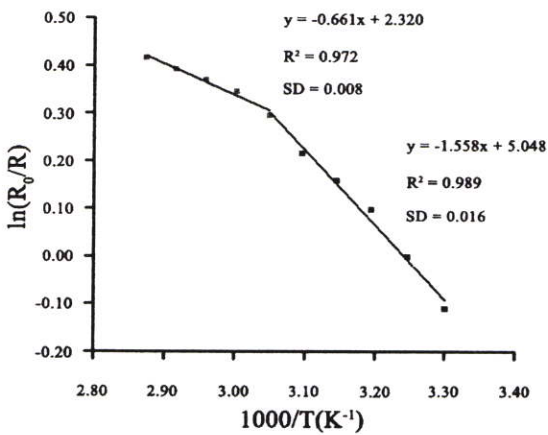
รูปที่ 4.57 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{R_0}{R}\right)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนัลในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 10 นาที โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที



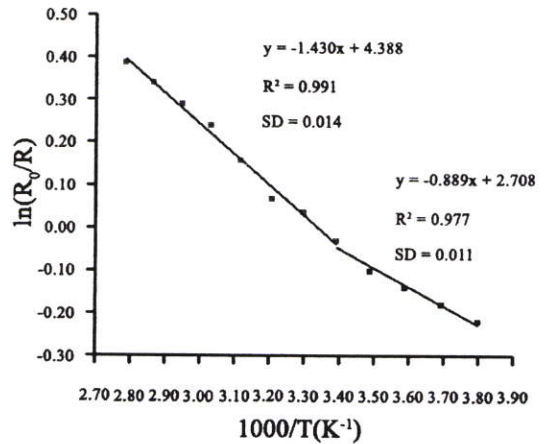
Nitrogen



Vacuum

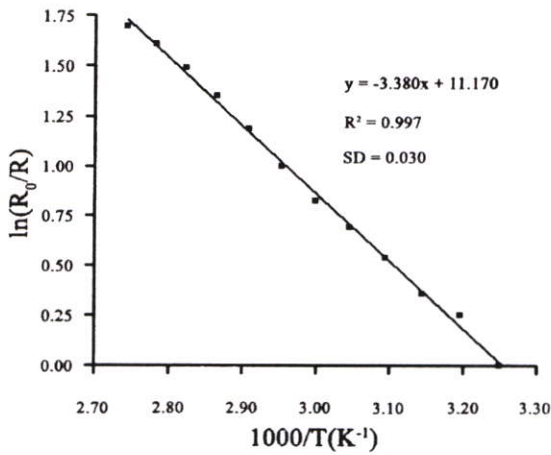


Air

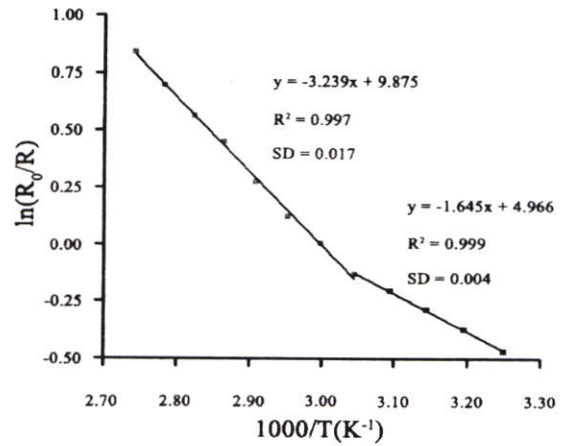


CSS

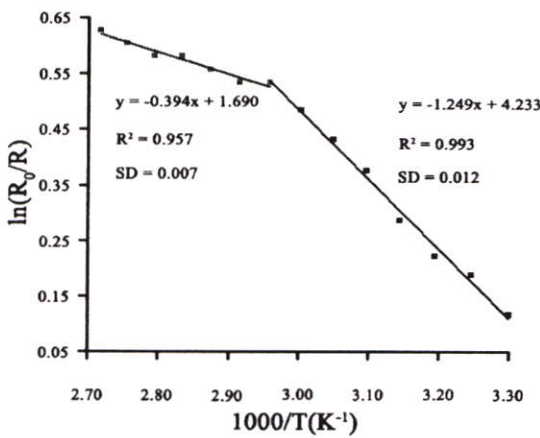
รูปที่ 4.58 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{R_0}{R}\right)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนัลในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10 นาที โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที



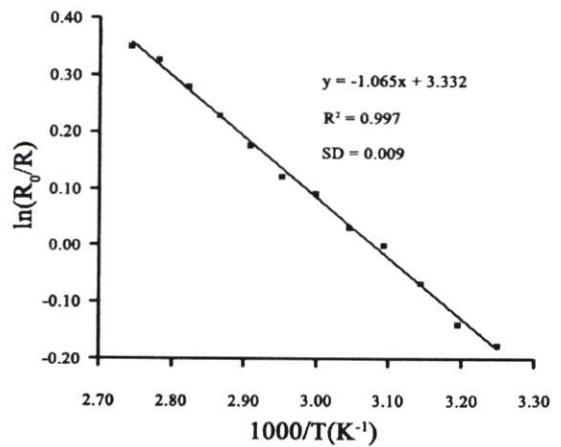
Nitrogen



Vacuum



Air



CSS

รูปที่ 4.59 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{R_0}{R}\right)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนัลในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10 นาที โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

การศึกษาพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ โดยการศึกษาความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ ในการทดลองนี้ ได้ทำการศึกษาความต้านทานไฟฟ้าในช่วงอุณหภูมิในช่วง 30-160°C โดยทำการเก็บข้อมูลในทุกๆ 5°C จากข้อมูลที่ได้นำไปวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{R_0}{R}\right)$ กับ $\left(\frac{1000}{T}\right)$ ซึ่งความชันของกราฟ สามารถนำมาคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบางได้ดังแสดงในตารางที่ 4.5-4.10

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกันโดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

Substrate Temperature(°C)	Activation Energy (meV)			
	Level B	Level D	Level E	Level H
375	193,204	-	437	-
400	-	-	486	729
425	-	341	-	-
450	-	362	-	-
475	266	-	422	-

จากตารางที่ 4.5 ค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง CdTe ที่อุณหภูมิฐานรองรับเท่ากับ 375 °C ค่าพลังงานกระตุ้นจะอยู่ในระดับพลังงานลึก โดยฟิล์มบางมีพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 193 meV และ 204 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน B ซึ่งระดับพลังงานนี้เป็นกับดักโฮล โดยปกติจะปรากฏในผลึก CdTe เสมอในแต่ละผลึกสารตัวอย่างที่เตรียมขึ้นนั้นอาจจะมีระดับพลังงานชนิดนี้แตกต่างกันบ้าง ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 อย่างคือปริมาณของสารเจือและเทคนิคของการเตรียมผลึกของสารตัวอย่าง ซึ่งต้องใช้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน อีกทั้งยังพบพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 437 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน E ซึ่งระดับพลังงานนี้จะปรากฏอยู่ในผลึก CdTe ที่ไม่มีสารเจือ ดังนั้นระดับพลังงานนี้จะเกิดจาก V_{Cd}^{2-} โดคเคียวแต่สำหรับในผลึก CdTe:Cl ที่ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อน ข้อบกพร่องผลึก V_{Cd}^{2-} นี้จะดับปลิงกับ Cl_{Te} กลายเป็นศูนย์กลาง A ดังนั้น V_{Cd}^{2-} ที่เหลืออยู่จะมีปริมาณน้อยแต่บางครั้งในผลึก CdTe:Cl ที่มีข้อบกพร่องชนิด Te_{Cd}^- ปรากฏรวมอยู่ด้วยเมื่อผลึก CdTe:Cl นี้ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อน ข้อบกพร่องผลึกชนิด Te_{Cd}^- จะเปลี่ยนแปลงไปเป็น V_{Cd}^{2-} และ Te_i ซึ่งข้อบกพร่อง V_{Cd}^{2-} จะยังกลับมาปรากฏโดดเด่นอีกครั้งหนึ่ง

ค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง CdTe ที่อุณหภูมิฐานรองรับเท่ากับ 400°C ค่าพลังงานกระตุ้นจะอยู่ในระดับพลังงานลึก โดยฟิล์มบางมีพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 486 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน E ซึ่งระดับพลังงานนี้จะปรากฏอยู่ในผลึก CdTe ที่ไม่มีสารเจือ ดังนั้นระดับพลังงานนี้จะเกิดจาก V_{Cd}^{2-} โดคเต็วแต่สำหรับในผลึก CdTe:Cl ที่ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อน ข้อบกพร่องผลึก V_{Cd}^{2-} นี้จะจับปลิงกับ Cl_{Tc} กลายเป็นศูนย์กลาง A ดังนั้น V_{Cd}^{2-} ที่เหลืออยู่จะมีปริมาณน้อยแต่บางครั้งในผลึก CdTe:Cl ที่มีข้อบกพร่องชนิด $\text{Te}_{\text{Cd}}^{-}$ ปรากฏรวมอยู่ด้วยเมื่อผลึก CdTe:Cl นี้ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อน ข้อบกพร่องผลึกชนิด $\text{Te}_{\text{Cd}}^{-}$ จะเปลี่ยนแปลงไปเป็น V_{Cd}^{2-} และ Te_i ซึ่งข้อบกพร่อง V_{Cd}^{2-} จะยังกลับมาปรากฏโดคเด่นอีกครั้งหนึ่งอีกทั้งยังพบพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 729 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน H ซึ่งได้มีการศึกษาในระดับพลังงานลึกนี้ทั้งสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติเชิงแสงไว้จำนวนมาก และเชื่อว่าระดับพลังงานนี้เป็นระดับพลังงานผู้รับที่เกิดจากข้อบกพร่องผลึกแบบเชิงซ้อนของ V_{Cd}^{2-} กับอะตอมสารเจือ ระดับพลังงานนี้จะอยู่ตรงกึ่งกลางของช่องว่างแถบพลังงานดังนั้นจึงเกี่ยวข้องกับกระบวนการตรึงระดับเฟอร์มิ (Fermi level pinning process) ในวัสดุกึ่งฉนวน เช่น CdTe:Cl และ $\text{Cd}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}\text{Te}$ ส่วนในวัสดุสารกึ่งตัวนำ เช่น CdTe ระดับพลังงานลึกนี้จะอยู่ห่างจากระดับเฟอร์มิมากและจะไม่เกี่ยวข้องกับการตรึงระดับเฟอร์มิ

ค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง CdTe ที่อุณหภูมิฐานรองรับเท่ากับ 425°C และ 450°C ค่าพลังงานกระตุ้นจะอยู่ในระดับพลังงานลึก โดยฟิล์มบางมีพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 341 meV และ 362 meV ตามลำดับ จะอยู่ในระดับพลังงาน D ซึ่งเป็นกับดักโฮลที่มีระดับพลังงานอยู่ที่ $E_v+0.32\text{ eV}$ ซึ่งเป็นระดับพลังงานที่เกี่ยวข้องกับข้อบกพร่องเชิงซ้อนของ $\text{Te}_{\text{Cd}}^{-}$ โดยจะเกิดขึ้นในขณะที่ทำการปลูกผลึก แต่ระดับพลังงานนี้มักจะถูกบดบังโดยระดับพลังงาน E ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันและผลึก CdTe:Cl ที่แอนนัลด้วยความร้อน ข้อบกพร่อง $\text{Te}_{\text{Cd}}^{-}$ นี้จะเปลี่ยนไปเป็น V_{Cd}^{2-} และ Te_i

ค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง CdTe ที่อุณหภูมิฐานรองรับเท่ากับ 475°C ค่าพลังงานกระตุ้นจะอยู่ในระดับพลังงานลึก โดยฟิล์มบางมีพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 266 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน B ซึ่งระดับพลังงานนี้เป็นกับดักโฮลโดยปกติจะปรากฏในผลึก CdTe เสมอในแต่ละผลึก สารตัวอย่างที่เตรียมขึ้นนั้นอาจจะมีระดับพลังงานชนิดนี้แตกต่างกันบ้างซึ่งก็ขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 อย่างคือปริมาณของสารเจือและเทคนิคของการเตรียมผลึกของสารตัวอย่างซึ่งต้องใช้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน อีกทั้งยังพบพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 422 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน E ซึ่งระดับพลังงานนี้จะปรากฏอยู่ในผลึก CdTe ที่ไม่มีสารเจือ ดังนั้นระดับพลังงานนี้จะเกิดจาก V_{Cd}^{2-} โดคเต็วแต่สำหรับในผลึก CdTe:Cl ที่ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อน ข้อบกพร่องผลึก V_{Cd}^{2-} นี้จะจับปลิงกับ Cl_{Tc} กลายเป็นศูนย์กลาง A ดังนั้น V_{Cd}^{2-} ที่เหลืออยู่จะมีปริมาณน้อยแต่บางครั้งในผลึก CdTe:Cl ที่มีข้อบกพร่องชนิด $\text{Te}_{\text{Cd}}^{-}$ ปรากฏรวมอยู่ด้วยเมื่อผลึก CdTe:Cl นี้ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อน ข้อบกพร่องผลึกชนิด $\text{Te}_{\text{Cd}}^{-}$ จะเปลี่ยนแปลงไปเป็น V_{Cd}^{2-} และ Te_i ซึ่งข้อบกพร่อง V_{Cd}^{2-} จะยังกลับมาปรากฏโดคเด่นอีกครั้งหนึ่ง

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารใน ระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C และให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับ ที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

Substrate Temperature ($^\circ\text{C}$)	Activation Energy (meV)				
	Level A	Level B	Level D	Level E	Level G
375	-	-	313	403	-
400	-	-	398	444	-
425	-	-	320	497	619
450	-	279	-	425	-
475	135	-	368	-	-

จากตารางที่ 4.6 ค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง CdTe ที่อุณหภูมิฐานรองรับเท่ากับ 375°C และ 400°C ค่าพลังงานกระตุ้นจะอยู่ในระดับพลังงานลึก โดยฟิล์มบางมีพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 313 meV และ 398 meV ตามลำดับจะอยู่ในระดับพลังงาน D ซึ่งเป็นกับดักโฮลและเป็นระดับพลังงานที่เกี่ยวข้องกับข้อบกพร่องเชิงซ้อนของ Te_{Cd}^- โดยจะเกิดขึ้นในขณะที่ทำการปลูกผลึก แต่ระดับพลังงานนี้มักจะถูกบดบังโดยระดับพลังงาน E ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันและผลึก CdTe:Cl ที่แอนนัลด้วยความร้อน ข้อบกพร่อง Te_{Cd}^- นี้จะเปลี่ยนไปเป็น $\text{V}_{\text{Cd}}^{2-}$ และ Te_i อีกทั้งยังพบพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 403 meV และ 444 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน E ซึ่งจะปรากฏอยู่ในผลึก CdTe ที่ไม่มีสารเจือ ดังนั้นระดับพลังงานนี้จะเกิดจาก $\text{V}_{\text{Cd}}^{2-}$ โดดเดี่ยวแต่สำหรับในผลึก CdTe:Cl ที่ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อน ข้อบกพร่องผลึก $\text{V}_{\text{Cd}}^{2-}$ นี้จะจับปฏิกิริยากับ Cl_{Tc} กลายเป็นศูนย์กลาง A ดังนั้น $\text{V}_{\text{Cd}}^{2-}$ ที่เหลืออยู่จะมีปริมาณน้อยแต่บางครั้งในผลึก CdTe:Cl ที่มีข้อบกพร่องชนิด Te_{Cd}^- ปรากฏรวมอยู่ด้วยเมื่อผลึก CdTe:Cl นี้ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อน ข้อบกพร่องผลึกชนิด Te_{Cd}^- จะเปลี่ยนแปลงไปเป็น $\text{V}_{\text{Cd}}^{2-}$ และ Te_i ซึ่งข้อบกพร่อง $\text{V}_{\text{Cd}}^{2-}$ จะยังกลับมาปรากฏโดดเด่นอีกครั้งหนึ่ง

ค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง CdTe ที่อุณหภูมิฐานรองรับเท่ากับ 425°C ค่าพลังงานกระตุ้นจะอยู่ในระดับพลังงานลึก โดยฟิล์มบางมีพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 320 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน D ซึ่งเป็นกับดักโฮลและเป็นระดับพลังงานที่เกี่ยวข้องกับข้อบกพร่องเชิงซ้อนของ Te_{Cd}^- โดยจะเกิดขึ้นในขณะที่ทำการปลูกผลึก แต่ระดับพลังงานนี้มักจะถูกบดบังโดยระดับพลังงาน E ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันและผลึก CdTe:Cl ที่แอนนัลด้วยความร้อน ข้อบกพร่อง Te_{Cd}^- นี้จะเปลี่ยนไปเป็น $\text{V}_{\text{Cd}}^{2-}$ และ Te_i ที่พลังงานกระตุ้นเท่ากับ 497 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน E ซึ่งจะปรากฏอยู่ในผลึก CdTe ที่ไม่มีสารเจือ ดังนั้นระดับพลังงานนี้จะเกิดจาก $\text{V}_{\text{Cd}}^{2-}$ โดดเดี่ยวแต่สำหรับในผลึก CdTe:Cl ที่ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อน ข้อบกพร่องผลึก $\text{V}_{\text{Cd}}^{2-}$ นี้จะจับปฏิกิริยากับ Cl_{Tc} กลายเป็นศูนย์กลาง A ดังนั้น

V_{Cd}^{2-} ที่เหลืออยู่จะมีปริมาณน้อยแต่บางครั้งในผลึก CdTe:Cl ที่มีข้อบกพร่องชนิด Te_{Cd}^- ปรากฏรวมอยู่ด้วยเมื่อผลึก CdTe:Cl นี้ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อน ข้อบกพร่องผลึกชนิด Te_{Cd}^- จะเปลี่ยนแปลงไปเป็น V_{Cd}^{2-} และ Te_i ซึ่งข้อบกพร่อง V_{Cd}^{2-} จะยังกลับมาปรากฏโดดเด่นอีกครั้งหนึ่ง ส่วนพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 619 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน G ซึ่งเป็นกับดักอิเล็กตรอนและจะพบเฉพาะในผลึก CdTe:Cl ทั้งก่อนและหลังที่ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อนซึ่งระดับพลังงานนี้มีจุดกำเนิดมาจาก Cd_i^{2+}

ค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง CdTe ที่อุณหภูมิฐานรองรับเท่ากับ 450 °C ค่าพลังงานกระตุ้นจะอยู่ในระดับพลังงานลึก โดยฟิล์มบางมีพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 279 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน B ซึ่งเป็นกับดักโฮล โดยปกติจะปรากฏในผลึก CdTe เสมอ ในแต่ละผลึกสารตัวอย่างที่เตรียมขึ้นนั้นอาจจะมีระดับพลังงานชนิดนี้แตกต่างกันบ้าง ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 อย่างคือปริมาณของสารเจือและเทคนิคของการเตรียมผลึกของสารตัวอย่างซึ่งต้องใช้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน อีกทั้งยังพบพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 425 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน E ซึ่งจะปรากฏอยู่ในผลึก CdTe ที่ไม่มีสารเจือ ดังนั้นระดับพลังงานนี้จะเกิดจาก V_{Cd}^{2-} โดดเดี่ยวแต่สำหรับในผลึก CdTe:Cl ที่ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อน ข้อบกพร่องผลึก V_{Cd}^{2-} นี้จะค้ำปลิงกับ Cl_{Te} กลายเป็นศูนย์กลาง A ดังนั้น V_{Cd}^{2-} ที่เหลืออยู่จะมีปริมาณน้อยแต่บางครั้งในผลึก CdTe:Cl ที่มีข้อบกพร่องชนิด Te_{Cd}^- ปรากฏรวมอยู่ด้วยเมื่อผลึก CdTe:Cl นี้ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อน ข้อบกพร่องผลึกชนิด Te_{Cd}^- จะเปลี่ยนแปลงไปเป็น V_{Cd}^{2-} และ Te_i ซึ่งข้อบกพร่อง V_{Cd}^{2-} จะยังกลับมาปรากฏโดดเด่นอีกครั้งหนึ่ง

ค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง CdTe ที่อุณหภูมิฐานรองรับเท่ากับ 475 °C ค่าพลังงานกระตุ้นจะอยู่ในระดับพลังงานลึก โดยฟิล์มบางมีพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 135 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน A ซึ่งจะพบในผลึก CdTe และผลึก CdTe:Cl ที่ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อน แต่จุดกำเนิดของระดับพลังงานทั้ง A นี้ยังไม่แน่ชัดว่าเกิดจากอะไร แต่จากการศึกษาโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของ CdZnTe ทำให้เชื่อกันว่าระดับพลังงาน A 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-} หรือเกี่ยวข้องกับ V_{Te}^+ [29] ระดับพลังงาน A นี้จะมีค่าใกล้เคียงกับระดับพลังงานของศูนย์กลาง A แต่จุดกำเนิดของระดับพลังงานเหล่านี้แตกต่างกัน อีกทั้งยังพบพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 368 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน D ซึ่งเป็นกับดักโฮลและเป็นระดับพลังงานที่เกี่ยวข้องกับข้อบกพร่องเชิงซ้อนของ Te_{Cd}^- โดยจะเกิดขึ้นในขณะที่ทำการปลูกผลึก แต่ระดับพลังงานนี้มักจะถูกบดบังโดยระดับพลังงาน E ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันและผลึก CdTe:Cl ที่แอนนัลด้วยความร้อน ข้อบกพร่อง Te_{Cd}^- นี้จะเปลี่ยนแปลงไปเป็น V_{Cd}^{2-} และ Te_i

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารใน ระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C และให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับ ที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกันโดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

Substrate Temperature ($^\circ\text{C}$)	Activation Energy (meV)			
	Level B	Level D	Level E	Level G
375	210,232	-	441	-
400	-	-	498	-
425	-	306	455	576
450	-	-	398	-
475	-	-	415	-

จากตารางที่ 4.7 ค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง CdTe ที่อุณหภูมิฐานรองรับเท่ากับ 375°C ค่าพลังงานกระตุ้นจะอยู่ในระดับพลังงานลึก โดยฟิล์มบางมีพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 210 meV และ 232 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน B ซึ่งป็นกับดักโฮล โดยปกติจะปรากฏในผลึก CdTe เสมอ ในแต่ละผลึกสารตัวอย่างที่เตรียมขึ้นนั้นอาจจะมีระดับพลังงานชนิดนี้แตกต่างกันบ้างซึ่งก็ขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 อย่างคือปริมาณของสารเจือและเทคนิคของการเตรียมผลึกของสารตัวอย่างซึ่งต้องใช้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน อีกทั้งยังพบพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 441 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน E ซึ่งจะปรากฏอยู่ในผลึก CdTe ที่ไม่มีสารเจือ ดังนั้นระดับพลังงานนี้จะเกิดจาก V_{Cd}^{2-} โดคเด็ยว แต่สำหรับในผลึก CdTe:Cl ที่ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อน ข้อบกพร่องผลึก V_{Cd}^{2-} นี้จะดับปลิงกับ Cl_{Te} กลายเป็นศูนย์กลาง A ดังนั้น V_{Cd}^{2-} ที่เหลืออยู่จะมีปริมาณน้อยแต่บางครั้งในผลึก CdTe:Cl ที่มีข้อบกพร่องชนิด Te_{Cd}^- ปรากฏรวมอยู่ด้วยเมื่อผลึก CdTe:Cl นี้ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อน ข้อบกพร่องผลึกชนิด Te_{Cd}^- จะเปลี่ยนแปลงไปเป็น V_{Cd}^{2-} และ Te_i ซึ่งข้อบกพร่อง V_{Cd}^{2-} จะยังกลับมาปรากฏโดดเด่นอีกครั้งหนึ่ง

ค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง CdTe ที่อุณหภูมิฐานรองรับเท่ากับ 400°C ค่าพลังงานกระตุ้นจะอยู่ในระดับพลังงานลึกโดยฟิล์มบางมีพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 498 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน E ซึ่งจะปรากฏอยู่ในผลึก CdTe ที่ไม่มีสารเจือ ดังนั้นระดับพลังงานนี้จะเกิดจาก V_{Cd}^{2-} โดคเด็ยว แต่สำหรับในผลึก CdTe:Cl ที่ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อน ข้อบกพร่องผลึก V_{Cd}^{2-} นี้จะดับปลิงกับ Cl_{Te} กลายเป็นศูนย์กลาง A ดังนั้น V_{Cd}^{2-} ที่เหลืออยู่จะมีปริมาณน้อยแต่บางครั้งในผลึก CdTe:Cl ที่มีข้อบกพร่องชนิด Te_{Cd}^- ปรากฏรวมอยู่ด้วยเมื่อผลึก CdTe:Cl นี้ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อน ข้อบกพร่องผลึกชนิด Te_{Cd}^- จะเปลี่ยนแปลงไปเป็น V_{Cd}^{2-} และ Te_i ซึ่งข้อบกพร่อง V_{Cd}^{2-} จะยังกลับมาปรากฏโดดเด่นอีกครั้งหนึ่ง

ค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง CdTe ที่อุณหภูมิฐานรองรับเท่ากับ 425 °C ค่าพลังงานกระตุ้นจะอยู่ในระดับพลังงานลึกโดยฟิล์มบางมีพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 306 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน D ซึ่งเป็นกับดักโฮลและเป็นระดับพลังงานที่เกี่ยวข้องกับข้อบกพร่องเชิงซ้อนของ Te_{Cd}^- โดยจะเกิดขึ้นในขณะที่ทำการปลูกผลึก แต่ระดับพลังงานนี้มักจะถูกบดบังโดยระดับพลังงาน E ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันและผลึก CdTe:Cl ที่แอนนัลด้วยความร้อน ข้อบกพร่อง Te_{Cd}^- นี้จะเปลี่ยนไปเป็น $\text{V}_{\text{Cd}}^{2-}$ และ Te_i พลังงานกระตุ้นเท่ากับ 455 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน E ซึ่งจะปรากฏอยู่ในผลึก CdTe ที่ไม่มีสารเจือ ดังนั้นระดับพลังงานนี้จะเกิดจาก $\text{V}_{\text{Cd}}^{2-}$ โดดเดี่ยว แต่สำหรับในผลึก CdTe:Cl ที่ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อน ข้อบกพร่องผลึก $\text{V}_{\text{Cd}}^{2-}$ นี้จะจับปลิงกับ Cl_{Te} กลายเป็นศูนย์กลาง A ดังนั้น $\text{V}_{\text{Cd}}^{2-}$ ที่เหลืออยู่จะมีปริมาณน้อยแต่บางครั้งในผลึก CdTe:Cl ที่มีข้อบกพร่องชนิด Te_{Cd}^- ปรากฏรวมอยู่ด้วยเมื่อผลึก CdTe:Cl นี้ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อน ข้อบกพร่องผลึกชนิด Te_{Cd}^- จะเปลี่ยนแปลงไปเป็น $\text{V}_{\text{Cd}}^{2-}$ และ Te_i ซึ่งข้อบกพร่อง $\text{V}_{\text{Cd}}^{2-}$ จะยังกลับมาปรากฏโดดเด่นอีกครั้งหนึ่งอีกทั้งยังพบพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 576 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน G ซึ่งเป็นกับดักอิเล็กตรอน และจะพบเฉพาะในผลึก CdTe:Cl ทั้งก่อนและหลังที่ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อนซึ่งระดับพลังงานนี้มีจุดกำเนิดมาจาก Cd_i^{2+}

ค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง CdTe ที่อุณหภูมิฐานรองรับเท่ากับ 450 °C ค่าพลังงานกระตุ้นจะอยู่ในระดับพลังงานลึกโดยฟิล์มบางมีพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 398 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน E ซึ่งจะปรากฏอยู่ในผลึก CdTe ที่ไม่มีสารเจือ ดังนั้นระดับพลังงานนี้จะเกิดจาก $\text{V}_{\text{Cd}}^{2-}$ โดดเดี่ยว แต่สำหรับในผลึก CdTe:Cl ที่ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อน ข้อบกพร่องผลึก $\text{V}_{\text{Cd}}^{2-}$ นี้จะจับปลิงกับ Cl_{Te} กลายเป็นศูนย์กลาง A ดังนั้น $\text{V}_{\text{Cd}}^{2-}$ ที่เหลืออยู่จะมีปริมาณน้อยแต่บางครั้งในผลึก CdTe:Cl ที่มีข้อบกพร่องชนิด Te_{Cd}^- ปรากฏรวมอยู่ด้วยเมื่อผลึก CdTe:Cl นี้ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อน ข้อบกพร่องผลึกชนิด Te_{Cd}^- จะเปลี่ยนแปลงไปเป็น $\text{V}_{\text{Cd}}^{2-}$ และ Te_i ซึ่งข้อบกพร่อง $\text{V}_{\text{Cd}}^{2-}$ จะยังกลับมาปรากฏโดดเด่นอีกครั้งหนึ่ง

ค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง CdTe ที่อุณหภูมิฐานรองรับเท่ากับ 475 °C ค่าพลังงานกระตุ้นจะอยู่ในระดับพลังงานลึกโดยฟิล์มบางมีพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 415 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน E ซึ่งจะปรากฏอยู่ในผลึก CdTe ที่ไม่มีสารเจือ ดังนั้นระดับพลังงานนี้จะเกิดจาก $\text{V}_{\text{Cd}}^{2-}$ โดดเดี่ยว แต่สำหรับในผลึก CdTe:Cl ที่ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อน ข้อบกพร่องผลึก $\text{V}_{\text{Cd}}^{2-}$ นี้จะจับปลิงกับ Cl_{Te} กลายเป็นศูนย์กลาง A ดังนั้น $\text{V}_{\text{Cd}}^{2-}$ ที่เหลืออยู่จะมีปริมาณน้อยแต่บางครั้งในผลึก CdTe:Cl ที่มีข้อบกพร่องชนิด Te_{Cd}^- ปรากฏรวมอยู่ด้วยเมื่อผลึก CdTe:Cl นี้ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อน ข้อบกพร่องผลึกชนิด Te_{Cd}^- จะเปลี่ยนแปลงไปเป็น $\text{V}_{\text{Cd}}^{2-}$ และ Te_i ซึ่งข้อบกพร่อง $\text{V}_{\text{Cd}}^{2-}$ จะยังกลับมาปรากฏโดดเด่นอีกครั้งหนึ่ง

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) ของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนีสลในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 10 นาทีที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

Annealing Atmosphere	Activation Energy (meV)			
	Level A	Level B	Level D	Level E
แก๊สไนโตรเจน	-	-	306,373	-
ระบบสุญญากาศ	-	190	298	400
อากาศ	117	202	-	-
ระบบระเหิดสารในระยะประชิด	-	180	307	-

จากตารางที่ 4.8 ค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนีสลในบรรยากาศของแคดเมียมคลอไรด์ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน โดยฟิล์มบางมีพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 306 meV และ 373 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน D เป็นกับดักโฮลซึ่งเป็นระดับพลังงานที่เกี่ยวข้องกับข้อบกพร่องเชิงซ้อนของ Te_{Cd}^- โดยจะเกิดขึ้นในขณะที่ทำการปลูกผลึก แต่ระดับพลังงานนี้มักจะถูกลบทิ้งโดยระดับพลังงาน E ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันและผลึก CdTe:Cl ที่แอนนีสลด้วยความร้อน ข้อบกพร่อง Te_{Cd}^- นี้จะเปลี่ยนไปเป็น $\text{V}_{\text{Cd}}^{2-}$ และ Te_i

ค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนีสลในบรรยากาศของแคดเมียมคลอไรด์ภายใต้ระบบสุญญากาศโดยฟิล์มบางมีพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 190 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน B ซึ่งเป็นกับดักโฮล โดยปกติจะปรากฏในผลึก CdTe เสมอ ในแต่ละผลึกสารตัวอย่างที่เตรียมขึ้นนั้น อาจจะมีระดับพลังงานชนิดนี้แตกต่างกันบ้างซึ่งก็ขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 อย่างคือปริมาณของสารเจือและเทคนิคของการเตรียมผลึกของสารตัวอย่างซึ่งต้องใช้อุณหภูมิที่แตกต่างกันและพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 298 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน D เป็นกับดักโฮลซึ่งเป็นระดับพลังงานที่เกี่ยวข้องกับข้อบกพร่องเชิงซ้อนของ Te_{Cd}^- โดยจะเกิดขึ้นในขณะที่ทำการปลูกผลึก แต่ระดับพลังงานนี้มักจะถูกลบทิ้งโดยระดับพลังงาน E ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันและผลึก CdTe:Cl ที่แอนนีสลด้วยความร้อน ข้อบกพร่อง Te_{Cd}^- นี้จะเปลี่ยนไปเป็น $\text{V}_{\text{Cd}}^{2-}$ และ Te_i อีกทั้งยังพบพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 400 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน E ซึ่งจะปรากฏอยู่ในผลึก CdTe ที่ไม่มีสารเจือ ดังนั้นระดับพลังงานนี้จะเกิดจาก $\text{V}_{\text{Cd}}^{2-}$ โดดเดี่ยว แต่สำหรับในผลึก CdTe:Cl ที่ได้รับการแอนนีสลด้วยความร้อน ข้อบกพร่องผลึก $\text{V}_{\text{Cd}}^{2-}$ นี้จะจับปฏิกิริยากับ Cl_{Te} กลายเป็นศูนย์กลาง A ดังนั้น $\text{V}_{\text{Cd}}^{2-}$ ที่เหลืออยู่จะมีปริมาณน้อยแต่บางครั้งในผลึก CdTe:Cl ที่มีข้อบกพร่องชนิด Te_{Cd}^- ปรากฏรวมอยู่ด้วยเมื่อผลึก CdTe:Cl นี้ได้รับการแอน

นี้ด้วยความร้อน ข้อบกพร่องผลึกชนิด Te_{Cd}^- จะเปลี่ยนแปลงไปเป็น $\text{V}_{\text{Cd}}^{2-}$ และ Te_i ซึ่งข้อบกพร่อง $\text{V}_{\text{Cd}}^{2-}$ จะยังกลับมาปรากฏ โคเดเด่นอีกครั้งหนึ่ง

ค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนัลในอากาศโดยฟิล์มบางมีพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 117 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน A ซึ่งจะพบในผลึก CdTe และผลึก CdTe:Cl ที่ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อน แต่จุดกำเนิดของระดับพลังงานทั้ง A นี้ยังไม่แน่ชัดว่าเกิดจากอะไร แต่จากการศึกษาโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของ CdZnTe ทำให้เชื่อกันว่าระดับพลังงาน A จะเกี่ยวข้องกับข้อบกพร่องเชิงซ้อน V_{Cd} และ V_{Te} แต่สาเหตุอื่น ๆ เช่น สารเจือคดค้าง Li หรือ Cu อาจมีส่วนเกี่ยวข้องกับข้อบกพร่องเชิงซ้อน V_{Cd} และ V_{Te} นี้ในรูปแบบต่าง ๆ เช่น $(\text{V}_{\text{Cd}}^{2-} - \text{Cu}_i^+)^-$, $(2\text{Cu}_{\text{Cd}}^- - \text{V}_{\text{Te}}^+)^-$ หรือข้อบกพร่องเชิงซ้อนที่เกี่ยวข้องกับ $\text{V}_{\text{Cd}}^{2-}$ หรือเกี่ยวกับ V_{Te}^+ [29] ระดับพลังงาน A นี้จะมีค่าใกล้เคียงกับระดับพลังงานของศูนย์กลาง A แต่จุดกำเนิดของระดับพลังงานเหล่านี้แตกต่างกัน และพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 202 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน B ซึ่งเป็นกับดักโฮล โดยปกติจะปรากฏในผลึก CdTe เสมอ ในแต่ละผลึกสารตัวอย่างที่เตรียมขึ้นนั้นอาจจะมีระดับพลังงานชนิดนี้แตกต่างกันบ้างซึ่งก็ขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 อย่างคือปริมาณของสารเจือและเทคนิคของการเตรียมผลึกของสารตัวอย่างซึ่งต้องใช้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน

ค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนัลในบรรยากาศของแคดเมียมคลอไรด์ภายใต้ระบบประเห็ดสารในระยะประชิดโดยฟิล์มบางมีพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 180 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน B ซึ่งเป็นกับดักโฮล โดยปกติจะปรากฏในผลึก CdTe เสมอ ในแต่ละผลึกสารตัวอย่างที่เตรียมขึ้นนั้นอาจจะมีระดับพลังงานชนิดนี้แตกต่างกันบ้างซึ่งก็ขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 อย่างคือปริมาณของสารเจือและเทคนิคของการเตรียมผลึกของสารตัวอย่างซึ่งต้องใช้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน และพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 307 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน D เป็นกับดักโฮลซึ่งเป็นระดับพลังงานที่เกี่ยวข้องกับข้อบกพร่องเชิงซ้อนของ Te_{Cd}^- โดยจะเกิดขึ้นในขณะที่ทำการปลูกผลึก แต่ระดับพลังงานนี้มักจะถูกบดบังโดยระดับพลังงาน E ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันและผลึก CdTe:Cl ที่แอนนัลด้วยความร้อน ข้อบกพร่อง Te_{Cd}^- นี้จะเปลี่ยนแปลงไปเป็น $\text{V}_{\text{Cd}}^{2-}$ และ Te_i

ตารางที่ 4.9 แสดงค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) ของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนีสลในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 10 นาทีที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400 °C โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

Annealing Atmosphere	Activation Energy (meV)		
	Level A ₀	Level A	Level B
แก๊สไนโตรเจน	-	-	235
ระบบสุญญากาศ	64	-	262
อากาศ	57	134	-
ระบบระเหิดสารในระยะประชิด	77	123	-

จากตารางที่ 4.9 ค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนีสลในบรรยากาศของแคดเมียมคลอไรด์ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน โดยฟิล์มบางมีพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 235 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน B ซึ่งเป็นกับดักโฮล โดยปกติจะปรากฏในผลึก CdTe เสมอ ในแต่ละผลึกสารตัวอย่างที่เตรียมขึ้นนั้นอาจจะมีระดับพลังงานชนิดนี้แตกต่างกันบ้างซึ่งก็ขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 อย่างคือปริมาณของสารเจือและเทคนิคของการเตรียมผลึกของสารตัวอย่างซึ่งต้องใช้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน

ค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนีสลในบรรยากาศของแคดเมียมคลอไรด์ภายใต้ระบบสุญญากาศโดยฟิล์มบางมีพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 64 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน A₀ ซึ่งเป็นระดับพลังงานที่ปรากฏอยู่ในผลึก CdTe ที่เจือด้วย Cl เท่านั้น โดยที่อะตอม Cl จะเข้าไปแทนที่ในตำแหน่งของอะตอม Te และเกิดการทับปดกับ V_{Cd} แล้วกลายเป็น ขอบกพร่องเชิงซ้อน $V_{Cd}-Cl_{Te}$ เช่น $(V_{Cd}^{2-} - Cl_{Te}^{+})^{-}$ [29] และระดับ DX₂ ของ $(V_{Cd}^{2-} - Cl_{Te}^{+})$ [29]ซึ่งมักจะเรียกระดับพลังงานนี้ว่าศูนย์กลาง A (A center) และโดย (Mathew) [30] ระบุว่าศูนย์กลาง A มีระดับอยู่เหนือขอบบนสุดของแถบวาเลนซ์ในช่วง 0.12 – 0.16 eV และพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 262 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน B ซึ่งเป็นกับดักโฮล โดยปกติจะปรากฏในผลึก CdTe เสมอ ในแต่ละผลึกสารตัวอย่างที่เตรียมขึ้นนั้นอาจจะมีระดับพลังงานชนิดนี้แตกต่างกันบ้างซึ่งก็ขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 อย่างคือปริมาณของสารเจือ และเทคนิคของการเตรียมผลึกของสารตัวอย่างซึ่งต้องใช้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน

ค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนีสลในอากาศโดยฟิล์มบางมีพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 57 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน A₀ ซึ่งเป็นระดับพลังงานที่ปรากฏอยู่ในผลึก CdTe ที่เจือด้วย Cl เท่านั้น โดยที่อะตอม Cl จะเข้าไปแทนที่ในตำแหน่งของอะตอม Te และเกิดการทับ

ปลิงกับ V_{Cd} แล้วกลายเป็น ขัอบกพร่องเชิงซ้อน $V_{Cd}-Cl_{Te}$ เช่น $(V_{Cd}^{2-} - Cl_{Te}^+)^-$ [29] และระดับ DX_2 ของ $(V_{Cd}^{2-} - Cl_{Te}^+)$ [29]ซึ่งมักจะเรียกระดับพลังงานนี้ว่าศูนย์กลาง A (A center) และโดย (Mathew) [30] ระบุว่าศูนย์กลาง A มีระดับอยู่เหนือขอบบนสุดของแถบวาเลนซ์ในช่วง $0.12 - 0.16$ eV และพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 134 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน A ซึ่งจะพบในผลึก CdTe และผลึก CdTe:Cl ที่ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อน แต่จุดกำเนิดของระดับพลังงานทั้ง A นี้ยังไม่แน่ชัดว่าเกิดจากอะไร แต่จากการศึกษาโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของ CdZnTe ทำให้เชื่อกันว่าระดับพลังงาน A จะเกี่ยวข้องกับ ขัอบกพร่องเชิงซ้อน V_{Cd} และ V_{Te} แต่สาเหตุอื่น ๆ เช่น สารเจือตกค้าง Li หรือ Cu อาจมีส่วนเกี่ยวข้องกับขัอบกพร่องเชิงซ้อน V_{Cd} และ V_{Te} นี้ในรูปแบบต่าง ๆ เช่น $(V_{Cd}^{2-} - Cu_i^+)^-$, $(2Cu_{Cd}^- - V_{Te}^+)^-$ หรือขัอบกพร่องเชิงซ้อนที่เกี่ยวข้องกับ V_{Cd}^{2-} หรือเกี่ยวกับ V_{Te}^+ [29]ระดับพลังงาน A นี้จะมีค่าใกล้เคียงกับระดับพลังงานของศูนย์กลาง A แต่จุดกำเนิดของระดับพลังงานเหล่านี้แตกต่างกัน

ค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนัลในบรรยากาศของแควมเมียมคลอไรด์ ภายใต้ระบบระเหิดสารในระยะประชิดโดยฟิล์มบางมีพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 77 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน A_0 ซึ่งเป็นระดับพลังงานที่ปรากฏอยู่ในผลึก CdTe ที่เจือด้วย Cl เท่านั้น โดยที่อะตอม Cl จะเข้าไปแทนที่ในตำแหน่งของอะตอม Te และเกิดการคัปปลิงกับ V_{Cd} แล้วกลายเป็น ขัอบกพร่องเชิงซ้อน $V_{Cd}-Cl_{Te}$ เช่น $(V_{Cd}^{2-} - Cl_{Te}^+)^-$ [29] และระดับ DX_2 ของ $(V_{Cd}^{2-} - Cl_{Te}^+)$ [29]ซึ่งมักจะเรียกระดับพลังงานนี้ว่าศูนย์กลาง A (A center) และโดย (Mathew) [30] ระบุว่าศูนย์กลาง A มีระดับอยู่เหนือขอบบนสุดของแถบวาเลนซ์ในช่วง $0.12 - 0.16$ eV และพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 123 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน A ซึ่งจะพบในผลึก CdTe และผลึก CdTe:Cl ที่ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อน แต่จุดกำเนิดของระดับพลังงานทั้ง A นี้ยังไม่แน่ชัดว่าเกิดจากอะไร แต่จากการศึกษาโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของ CdZnTe ทำให้เชื่อกันว่าระดับพลังงาน A จะเกี่ยวข้องกับ ขัอบกพร่องเชิงซ้อน V_{Cd} และ V_{Te} แต่สาเหตุอื่น ๆ เช่น สารเจือตกค้าง Li หรือ Cu อาจมีส่วนเกี่ยวข้องกับขัอบกพร่องเชิงซ้อน V_{Cd} และ V_{Te} นี้ในรูปแบบต่าง ๆ เช่น $(V_{Cd}^{2-} - Cu_i^+)^-$, $(2Cu_{Cd}^- - V_{Te}^+)^-$ หรือขัอบกพร่องเชิงซ้อนที่เกี่ยวข้องกับ V_{Cd}^{2-} หรือเกี่ยวกับ V_{Te}^+ [29]ระดับพลังงาน A นี้จะมีค่าใกล้เคียงกับระดับพลังงานของศูนย์กลาง A แต่จุดกำเนิดของระดับพลังงานเหล่านี้แตกต่างกัน

ตารางที่ 4.10 แสดงค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) ของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนัลในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10 นาทีที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400°C โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

Annealing Atmosphere	Activation Energy (meV)		
	Level A_0	Level A	Level B
แก๊สไนโตรเจน	-	-	239
ระบบสุญญากาศ	-	142	279
อากาศ	34	108	-
ระบบระเหิดสารในระยะประชิด	92	-	-

จากตารางที่ 4.10 ค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนัลในบรรยากาศของแคดเมียมคลอไรด์ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน โดยฟิล์มบางมีพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 239 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน B ซึ่งเป็นกับดักโฮล โดยปกติจะปรากฏในผลึก CdTe เสมอ ในแต่ละผลึกสารตัวอย่างที่เตรียมขึ้นนั้นอาจจะมีระดับพลังงานชนิดนี้แตกต่างกันบ้างซึ่งก็ขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 อย่างคือปริมาณของสารเจือและเทคนิคของการเติมผลึกของสารตัวอย่างซึ่งต้องใช้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน

ค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนัลในบรรยากาศของแคดเมียมคลอไรด์ภายใต้ระบบสุญญากาศโดยฟิล์มบางมีพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 142 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน A ซึ่งจะพบในผลึก CdTe และผลึก CdTe:Cl ที่ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อน แต่จุดกำเนิดของระดับพลังงานทั้ง A นี้ยังไม่แน่ชัดว่าเกิดจากอะไร แต่จากการศึกษาโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของ CdZnTe ทำให้เชื่อกันว่าระดับพลังงาน A จะเกี่ยวข้องกับ ขอบกพร่องเชิงซ้อน V_{Cd} และ V_{Te} แต่สาเหตุอื่น ๆ เช่น สารเจือตกค้าง Li หรือ Cu อาจมีส่วนเกี่ยวข้องกับขอบกพร่องเชิงซ้อน V_{Cd} และ V_{Te} นี้ในรูปแบบต่าง ๆ เช่น $(V_{\text{Cd}}^{2-} - \text{Cu}_i^+)^-$, $(2\text{Cu}_{\text{Cd}}^- - V_{\text{Te}}^+)^-$ หรือขอบกพร่องเชิงซ้อนที่เกี่ยวข้องกับ V_{Cd}^{2-} หรือเกี่ยวกับ V_{Te}^+ [29] ระดับพลังงาน A นี้จะมีค่าใกล้เคียงกับระดับพลังงานของศูนย์กลาง A แต่จุดกำเนิดของระดับพลังงานเหล่านี้แตกต่างกัน และพบพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 279 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน B ซึ่งเป็นกับดักโฮล โดยปกติจะปรากฏในผลึก CdTe เสมอ ในแต่ละผลึกสารตัวอย่างที่เตรียมขึ้นนั้นอาจจะมีระดับพลังงานชนิดนี้แตกต่างกันบ้างซึ่งก็ขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 อย่างคือปริมาณของสารเจือและเทคนิคของการเติมผลึกของสารตัวอย่างซึ่งต้องใช้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน

ค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนัลในอากาศโดยฟิล์มบางมีพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 34 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน A_0 ซึ่งเป็นระดับพลังงานที่ปรากฏอยู่ในผลึก CdTe ที่เจือด้วย Cl เท่านั้น โดยที่อะตอม Cl จะเข้าไปแทนที่ในตำแหน่งของอะตอม Te และเกิดการทับปดกับ V_{Cd} แล้วกลายเป็น ข้อบกพร่องเชิงซ้อน $V_{Cd}-Cl_{Te}$ เช่น $(V_{Cd}^{2-} - Cl_{Te}^+)^-$ [29] และระดับ DX_2 ของ $(V_{Cd}^{2-} - Cl_{Te}^+)^-$ [29]ซึ่งมักจะเรียกระดับพลังงานนี้ว่าศูนย์กลาง A (A center) และโดย (Mathew) [30] ระบุว่าศูนย์กลาง A มีระดับอยู่เหนือขอบบนสุดของแถบวาเลนซ์ในช่วง 0.12 – 0.16 eV และพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 108 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน A ซึ่งจะพบในผลึก CdTe และผลึก CdTe:Cl ที่ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อน แต่จุดกำเนิดของระดับพลังงานทั้ง A นี้ยังไม่แน่ชัดว่าเกิดจากอะไร แต่จากการศึกษาโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของ CdZnTe ทำให้เชื่อกันว่าระดับพลังงาน A 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 นี้จะมีค่าใกล้เคียงกับระดับพลังงานของศูนย์กลาง A แต่จุดกำเนิดของระดับพลังงานเหล่านี้แตกต่างกัน

ค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนัลในบรรยากาศของแคดเมียมคลอไรด์ภายใต้ระบบระเหิดสารในระยะประชิดโดยฟิล์มบางมีพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 92 meV จะอยู่ในระดับพลังงาน A_0 ซึ่งเป็นระดับพลังงานที่ปรากฏอยู่ในผลึก CdTe ที่เจือด้วย Cl เท่านั้น โดยที่อะตอม Cl จะเข้าไปแทนที่ในตำแหน่งของอะตอม Te และเกิดการทับปดกับ V_{Cd} แล้วกลายเป็น ข้อบกพร่องเชิงซ้อน $V_{Cd}-Cl_{Te}$ เช่น $(V_{Cd}^{2-} - Cl_{Te}^+)^-$ [29] และระดับ DX_2 ของ $(V_{Cd}^{2-} - Cl_{Te}^+)^-$ [29]ซึ่งมักจะเรียกระดับพลังงานนี้ว่าศูนย์กลาง A (A center) และโดย (Mathew) [30] ระบุว่าศูนย์กลาง A มีระดับอยู่เหนือขอบบนสุดของแถบวาเลนซ์ในช่วง 0.12 – 0.16 eV

การศึกษาส่วนหางของแถบพลังงานของฟิล์มบาง CdTe สามารถคำนวณได้จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงและขนาดของเกรนซึ่งจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงนำไปวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \alpha$ กับ $h\nu$ ซึ่งความชันของกราฟสามารถนำมาคำนวณหาค่าส่วนหางของแถบพลังงานของฟิล์มบาง CdTe ได้ [32] ส่วนขนาดของเกรนของฟิล์มบางที่คำนวณได้จากภาพถ่ายผิวหน้า (SEM) และคำนวณจาก FWHM ที่ได้จากพิกัดความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์นั้นสามารถนำขนาดของเกรนของฟิล์มบางมาคำนวณหาค่าส่วนหางของแถบพลังงานของฟิล์มบาง CdTe ได้จากความสัมพันธ์ $E_0 = 21.18 + \frac{121.84}{R}$ [33] ซึ่งส่วนหางของแถบพลังงานของฟิล์มบาง CdTe แสดงในตารางที่ 4.11-4.22

ตารางที่ 4.11 แสดงส่วนหางของแถบพลังงานที่คำนวณจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระบะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C และให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

Substrate Temperature($^{\circ}\text{C}$)	Band Tail (meV)
375	54
400	62
425	38
450	50
475	47

ตารางที่ 4.12 แสดงส่วนหางของแถบพลังงานที่คำนวณจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระบะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C และให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

Substrate Temperature($^{\circ}\text{C}$)	Band Tail (meV)
375	38
400	51
425	40
450	36
475	47

ตารางที่ 4.13 แสดงส่วนหางของแถบพลังงานที่คำนวณจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระบะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C และให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

Substrate Temperature($^{\circ}\text{C}$)	Band Tail (meV)
375	33
400	47
425	36
450	35
475	40

ตารางที่ 4.14 แสดงส่วนหางของแถบพลังงานที่คำนวณจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนัลในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10 นาที ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระบะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400°C โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

Annealing Atmosphere	Band Tail (meV)
แก๊สไนโตรเจน	104
ระบบสุญญากาศ	40
อากาศ	40
ระบบระเหิดสารในระบะประชิด	34

ตารางที่ 4.15 แสดงส่วนหางของแถบพลังงานที่คำนวณจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนีสในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10 นาที ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระบะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400°C โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

Annealing Atmosphere	Band Tail (meV)
แก๊สไนโตรเจน	31
ระบบสุญญากาศ	24
อากาศ	35
ระบบระเหิดสารในระบะประชิด	21

ตารางที่ 4.16 แสดงส่วนหางของแถบพลังงานที่คำนวณจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนีสในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10 นาที ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระบะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400°C โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

Annealing Atmosphere	Band Tail (meV)
แก๊สไนโตรเจน	29
ระบบสุญญากาศ	27
อากาศ	54
ระบบระเหิดสารในระบะประชิด	23

ตารางที่ 4.17 แสดงส่วนหางของแถบพลังงาน ที่คำนวณจากขนาดของเกรนของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระบะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

Substrate Temperature(°C)	Band Tail From Grain Size (meV)	
	SEM	XRD
375	53	79
400	51	52
425	55	58
450	45	75
475	60	61

ตารางที่ 4.18 แสดงส่วนหางของแถบพลังงาน ที่คำนวณจากขนาดของเกรนของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระบะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

Substrate Temperature(°C)	Band Tail From Grain Size (meV)	
	SEM	XRD
375	54	92
400	48	88
425	48	47
450	46	73
475	52	66

ตารางที่ 4.19 แสดงส่วนหางของแถบพลังงาน ที่คำนวณจากขนาดของเกรนของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระบะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกัน โดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

Substrate Temperature (°C)	Band Tail From Grain Size (meV)	
	SEM	XRD
375	49	75
400	44	65
425	50	61
450	45	74
475	48	103

ตารางที่ 4.20 แสดงส่วนหางของแถบพลังงานที่คำนวณจากขนาดของเกรนของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนีสในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 10 นาที ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระบะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400 °C โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

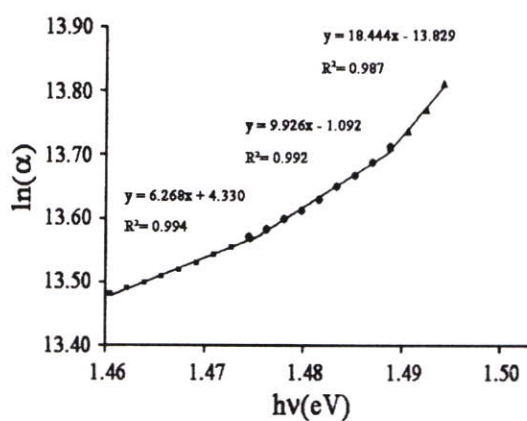
Annealing Atmosphere	Band Tail From Grain Size (meV)
	XRD
แก๊สไนโตรเจน	66
ระบบสุญญากาศ	81
อากาศ	52
ระบบระเหิดสารในระบะประชิด	76

ตารางที่ 4.21 แสดงส่วนหางของแถบพลังงานที่คำนวณจากขนาดของเกรนของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนีสลในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 10 นาที ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระบะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400°C โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

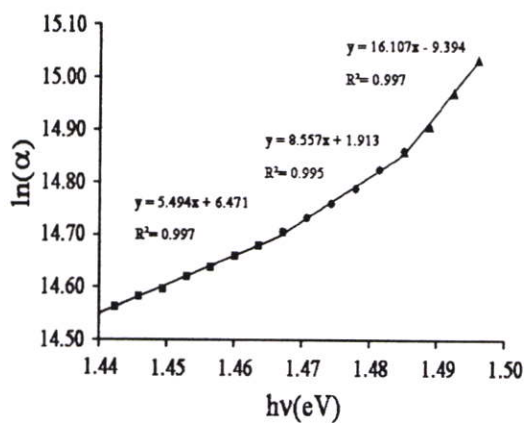
Annealing Atmosphere	Band Tail From Grain Size (meV)
	XRD
แก๊สไนโตรเจน	83
ระบบสุญญากาศ	76
อากาศ	84
ระบบระเหิดสารในระบะประชิด	103

ตารางที่ 4.22 แสดงส่วนหางของแถบพลังงานที่คำนวณจากขนาดของเกรนของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนีสลในบรรยากาศแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 10 นาที ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระบะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 °C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400°C โดยที่กำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

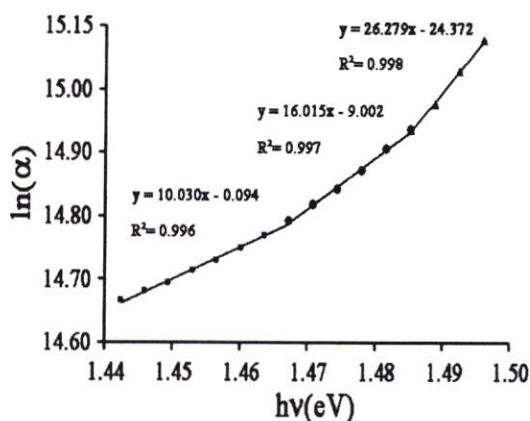
Annealing Atmosphere	Band Tail From Grain Size (meV)
	XRD
แก๊สไนโตรเจน	69
ระบบสุญญากาศ	88
อากาศ	60
ระบบระเหิดสารในระบะประชิด	107



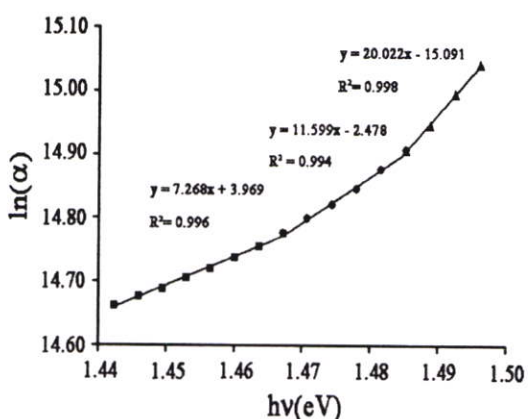
$T_{\text{sub}} = 375 \text{ }^{\circ}\text{C}$



$T_{\text{sub}} = 400 \text{ }^{\circ}\text{C}$



$T_{\text{sub}} = 425 \text{ }^{\circ}\text{C}$



$T_{\text{sub}} = 450 \text{ }^{\circ}\text{C}$



$T_{\text{sub}} = 475 \text{ }^{\circ}\text{C}$

รูปที่ 4.60 แสดงการหาส่วนหางของแถบพลังงาน จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\alpha$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ $550 \text{ }^{\circ}\text{C}$ และให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์แตกต่างกันโดยกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในบทที่ 5 นี้เป็นการสรุปผลการดำเนินงานวิจัยตั้งแต่การเตรียมฟิล์มบาง การวัดสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆของฟิล์มบาง การวิเคราะห์ผล พร้อมทั้งปัญหาที่พบและข้อเสนอแนะเพื่อเป็นแนวทางในการทำการวิจัยขั้นต่อไป

สรุปผลการศึกษาฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด

ฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดนี้เราใช้สารตั้งต้นเป็นแบบผงบริสุทธิ์ 99.99 % โดยให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C และให้อุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ $375, 400, 425, 450,$ และ 475°C โดยใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มเท่ากับ 4 นาที ฟิล์มบางที่เตรียมได้ มีลักษณะเป็นสีเทาอ่อนเนื่องจากค่าช่องว่างแถบพลังงานมีค่าในช่วง $1.45\text{-}1.50\text{ eV}$ นั่นคือฟิล์มบางดูดกลืนแสงในย่านความยาวคลื่นที่ตามองเห็นจนหมดและส่งผ่านแสงที่ค่าความยาวคลื่นตั้งแต่ประมาณ 800 nm เป็นต้น

การศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่าฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ $375, 400, 425, 450$ และ 475°C ที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4, 6 และ 8 มิลลิเมตร ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาที และฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด เมื่อให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400 องศาเซลเซียสที่ผ่านการแอนนیلในบรรยากาศของแคดเมียมคลอไรด์ภายใต้ระบบสุญญากาศ ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน และภายในระบบระเหิดสารในระยะประชิด ตลอดจนทำการแอนนیلในอากาศมีโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ โดยจะปรากฏระนาบการเลี้ยวเบน (111) ที่มุม $2\theta \approx 23^{\circ}$ (220) ที่มุม $2\theta \approx 39^{\circ}$ (311) ที่มุม $2\theta \approx 46^{\circ}$ และ (400) ที่มุม $2\theta \approx 56^{\circ}$ เมื่อนำระนาบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางมาเทียบกับไฟล์มาตรฐาน JCPDS No 10-207 เราพบว่าระนาบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางที่เตรียมได้มีระนาบที่ตรงกัน เป็นการบ่งบอกว่าโครงสร้างของผลึกของฟิล์มบางมีลักษณะใกล้เคียงกับผลึกสมบูรณ์ และพบว่าพีคของระนาบการเลี้ยวเบน(111)จะปรากฏเด่นชัดที่สุด จากการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบผลึก (hkl) ของฟิล์มบาง CdTe พบว่ามีการจัดเรียงตัวในระนาบ (111) เด่นชัดและมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เพิ่มขึ้นและเด่นชัดมากที่สุดที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm จากผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์

มีโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ หน่วยเซลล์เป็นแบบคิวบิก ค่าคงตัวของโครงสร้างผลึกมีแนวโน้มเป็นผลึกที่สมบูรณ์เมื่ออุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์สูงขึ้น

การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นการศึกษาถึงลักษณะของสภาพพื้นผิวหน้าของฟิล์มบาง จากภาพถ่าย SEM ของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดมีขนาดของเกรนประมาณ 3.14-5.29 μm สำหรับที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm มีขนาดของเกรนเฉลี่ยประมาณ 3.98 μm ที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6mm มีขนาดของเกรนเฉลี่ยประมาณ 4.34 μm และที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm มีขนาดของเกรนเฉลี่ยประมาณ 4.74 μm

สำหรับภาพถ่าย SEM ที่บริเวณภาคตัดขวางของฟิล์มบาง CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด โดยให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นเท่ากับ 550°C และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400°C และใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 2 และ 4 นาทีเพื่อศึกษาอัตราการเคลือบฟิล์มบาง ซึ่งจากการภาพถ่าย SEM ที่บริเวณภาคตัดขวางของฟิล์มบาง CdTe เมื่อใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 2 นาทีที่มีความหนาของชั้นฟิล์มบางที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm มีความหนาประมาณ 1.323 μm ที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm มีความหนาประมาณ 1.017 μm และที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm มีความหนาประมาณ 2.346 μm และเมื่อใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางเท่ากับ 4 นาทีที่มีความหนาของชั้นฟิล์มบางที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 4 mm มีความหนาประมาณ 2.511 μm ที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 6 mm มีความหนาประมาณ 3.986 μm และที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 8 mm มีความหนาประมาณ 2.990 μm

จากการศึกษาภาพถ่าย SEM ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบาง CdTe ที่ผ่านการแอนนัลด้วยแคดเมียมคลอไรด์ ภายใต้ระบบสุญญากาศ ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน และภายในระบบระเหิดสารในระยะประชิด ตลอดจนทำการแอนนัลในอากาศ ซึ่งจากภาพถ่าย SEM บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางพบว่าฟิล์มบางที่ผ่านการแอนนัลด้วยแคดเมียมคลอไรด์ภายใต้ระบบสุญญากาศและภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนมีลักษณะผิวหน้าที่คล้ายคลึงกันคือมีผิวหน้าที่เรียบสม่ำเสมอและเกรนมีลักษณะที่เชื่อมติดต่อกัน ส่วนกรณีที่แอนนัลด้วยแคดเมียมคลอไรด์ภายในระบบระเหิดสารในระยะประชิดมีลักษณะผิวหน้าที่เรียบสม่ำเสมอและเกรนมีลักษณะเป็นเกรนเดียวกันและมีเม็ดขาวเล็กๆติดที่บริเวณผิวหน้า และกรณีที่แอนนัลในอากาศมีลักษณะผิวหน้าที่เรียบสม่ำเสมอและเกรนมีลักษณะคล้ายคลึงกับกรณีที่ยังไม่ผ่านการแอนนัล

การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดในระยะเวลาประชิดพบว่ามีการดูดกลืนแสงอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 830 นาโนเมตรและมีการส่งผ่านแสงประมาณ 30-80 เปอร์เซ็นต์ จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงานได้ประมาณ 1.47-1.49 eV

สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดในระยะเวลาประชิดซึ่งฟิล์มบางที่เตรียมได้มีความต้านทานสูง จึงวัดความต้านทานด้วยวิธีสองขั้วเชิงเส้นซึ่งจากผลการทดลองพบว่าเมื่ออุณหภูมิของฐานรองรับกระจกสไลด์สูงขึ้นความต้านทานแผ่นโดยไม่ฉายแสงมีแนวโน้มลดลง และในส่วนของฟิล์มบางที่แอนนัลในบรรยากาศต่างๆพบว่า ค่าความต้านทานแผ่นโดยไม่ฉายแสงมีค่าต่ำในกรณีที่แอนนัลในอากาศและแอนนัลในบรรยากาศแคดเมียมเทลลูไรด์ในระบบระเหิดในระยะเวลาประชิด ส่วนความต้านทานแผ่นในกรณีฉายแสงฟิล์มบางที่ผ่านการแอนนัลและไม่ผ่านการแอนนัลมีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลง

พลังงานกระตุ้นของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ โดยการศึกษาความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ ซึ่งพบระดับพลังงานต่างๆดังนี้

1. ระดับพลังงาน A_0 ดังตารางที่ 4.9 และตารางที่ 4.10 เป็นระดับพลังงานที่อยู่เหนือขอบบนสุดของแถบวาเลนซ์เท่ากับ 0.12 eV หรือ $E_v+0.12$ eV ซึ่งเป็นระดับพลังงานที่ปรากฏอยู่ในผลึก CdTe ที่เจือด้วย Cl เท่านั้น โดยที่อะตอม Cl จะเข้าไปแทนที่ในตำแหน่งของอะตอม Te และเกิดการคัปปลิงกับ V_{Cd} แล้วกลายเป็นข้อบกพร่องผลึกเชิงซ้อน $V_{Cd}-Cl_{Te}$ เช่น $(V_{Cd}^{2-} - Cl_{Te}^+)^-$ [29] และระดับ DX_2 ของ $(V_{Cd}^{2-} - Cl_{Te}^+)$ [29]ซึ่งมักจะเรียกระดับพลังงานนี้ว่าศูนย์กลาง A (A-center) และโดย (Mathew) [30] ระบุว่าศูนย์กลาง A มีระดับอยู่เหนือขอบบนสุดของแถบวาเลนซ์ในช่วง 0.12 – 0.16 eV

2. ระดับพลังงาน A และ A_1 ดังตารางที่ 4.6, 4.8, 4.9 และ 4.10 ระดับพลังงาน A จะปรากฏอยู่ที่ $E_v+0.14$ eV ซึ่งจะพบในผลึก CdTe และผลึก CdTe:Cl ที่ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อนส่วนระดับพลังงาน A_1 จะอยู่ที่ $E_v+0.15$ eV ซึ่งจะพบอยู่ในผลึก CdTe:Cl และในผลึก CdZnTe แต่จุดกำเนิดของระดับพลังงานทั้ง A และ A_1 นี้ยังไม่แน่ชัดว่าเกิดจากอะไรแต่จากการศึกษาโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของ CdZnTe ทำให้เชื่อกันว่าระดับพลังงาน A และ A_1 จะเกี่ยวข้องกับข้อบกพร่องผลึกเชิงซ้อน V_{Cd} และ V_{Te} แต่สาเหตุอื่น ๆ เช่น สารเจือตกค้าง Li หรือ Cu อาจมีส่วนเกี่ยวข้องกับข้อบกพร่องผลึกเชิงซ้อน V_{Cd} และ V_{Te} นี้ในรูปแบบต่าง ๆ เช่น $(V_{Cd}^{2-} - Cu_i^+)^-$, $(2Cu_{Cd}^- - V_{Te}^+)^-$ หรือข้อบกพร่องผลึกเชิงซ้อนที่เกี่ยวข้องกับ V_{Cd}^{2-} หรือเกี่ยวข้องกับ V_{Te}^+ [29] ระดับพลังงาน A และ A_1 นี้จะมีค่าใกล้เคียงกับระดับพลังงานของศูนย์กลาง A แต่จุดกำเนิดของระดับพลังงานเหล่านี้แตกต่างกัน

3. ระดับพลังงาน B ดังตารางที่ 4.5-4.10 เป็นกับดักโฮลที่มีพลังงานอยู่ที่ $E_v+0.2$ eV โดยปกติจะปรากฏในผลึก CdTe เสมอ ในแต่ละผลึกสารตัวอย่างที่เตรียมขึ้นนั้นอาจจะมีระดับพลังงานชนิดนี้

แตกต่างกันบ้างซึ่งก็ขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 อย่างคือปริมาณของสารเจือและเทคนิคของการเตรียมผลึกของสารตัวอย่างซึ่งต้องใช้อุณหภูมิที่แตกต่างกัน

4. ระดับพลังงาน D ดังตารางที่ 4.5-4.8 เป็นกับดักโฮลที่มีระดับพลังงานอยู่ที่ $E_v+0.32$ eV ซึ่งเป็นระดับพลังงานที่เกี่ยวข้องกับข้อบกพร่องผลึกเชิงซ้อนของ Te_{Cd}^- โดยจะเกิดขึ้นในขณะที่ทำการปลูกผลึก แต่ระดับพลังงานนี้มักจะถูกบดบังโดยระดับพลังงาน E ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันและผลึก CdTe:Cl ที่แอนนัลด้วยความร้อน ข้อบกพร่องผลึก Te_{Cd} นี้จะเปลี่ยนไปเป็น V_{Cd}^{2-} และ Te_i

5. ระดับพลังงาน E ดังตารางที่ 4.5-4.8 มีระดับพลังงานอยู่ที่ $E_v+0.40$ eV ซึ่งจะปรากฏอยู่ในผลึก CdTe ที่ไม่มีสารเจือ ดังนั้นระดับพลังงานนี้จะเกิดจาก V_{Cd}^{2-} โดดเดี่ยว แต่สำหรับในผลึก CdTe:Cl ที่ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อน ข้อบกพร่องผลึก V_{Cd}^{2-} นี้จะจับปดกับ Cl_{Tc} กลายเป็นศูนย์กลาง A ดังนั้น V_{Cd}^{2-} ที่เหลืออยู่จะมีปริมาณน้อยแต่บางครั้งในผลึก CdTe:Cl ที่มีข้อบกพร่องผลึกชนิด Te_{Cd}^- ปรากฏรวมอยู่ด้วยเมื่อผลึก CdTe:Cl นี้ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อน ข้อบกพร่องผลึกชนิด Te_{Cd}^- จะเปลี่ยนแปลงไปเป็น V_{Cd}^{2-} และ Te_i ซึ่งข้อบกพร่อง V_{Cd}^{2-} จะยังกลับมาปรากฏโดดเด่นอีกครั้งหนึ่ง

6. ระดับพลังงาน G ดังตารางที่ 4.6 และ ตารางที่ 4.7 เป็นกับดักอิเล็กตรอนที่มีระดับพลังงานอยู่ที่ $E_c-0.64$ eV และจะพบเฉพาะในผลึก CdTe:Cl ทั้งก่อนและหลังที่ได้รับการแอนนัลด้วยความร้อน ซึ่งระดับพลังงานนี้มีจุดกำเนิดมาจาก Cd_i^{2+}

7. ระดับพลังงาน H ดังตารางที่ 4.5 เป็นระดับพลังงานผลึกอยู่ที่ $E_v+0.76$ eV ได้มีการศึกษาระดับพลังงานลักษณะนี้ทั้งสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติเชิงแสงไว้จำนวนมาก และเชื่อว่าระดับพลังงานนี้เป็นระดับพลังงานผู้รับที่เกิดจากข้อบกพร่องผลึกแบบเชิงซ้อนของ V_{Cd}^{2-} กับอะตอมสารเจือ ระดับพลังงานนี้จะอยู่ตรงกึ่งกลางของช่องว่างแถบพลังงานดังนั้นจึงเกี่ยวข้องกับกระบวนการตรึงระดับเฟอร์มี (Fermi level pinning process) ในวัสดุกึ่งฉนวน เช่น CdTe:Cl และ $Cd_{0.8}Zn_{0.2}Te$ ส่วนในวัสดุสารกึ่งตัวนำ เช่น CdTe ระดับพลังงานลักษณะนี้จะอยู่ห่างจากระดับเฟอร์มีมากและจะไม่เกี่ยวข้องกับการตรึงระดับเฟอร์มี

การศึกษาส่วนหางของแถบพลังงานของฟิล์มบาง CdTe ที่คำนวณจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงมีค่าอยู่ในช่วง 21-104 meV และที่คำนวณจากขนาดของเกรนส่วนหางของแถบพลังงานของฟิล์มบาง CdTe มีค่าอยู่ในช่วง 44-107 meV ซึ่งจากการคำนวณทั้งสองกรณีได้ผลการคำนวณที่สอดคล้องกัน

ที่ระยะห่างระหว่างสารตั้งต้นและฐานรองรับเท่ากับ 8 mm และอุณหภูมิของฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ $400^\circ C$ จะได้ฟิล์มบางที่มีความเป็นผลึกสมบูรณ์ที่สุดซึ่งจะสังเกตเห็นว่าจะได้เกรนที่มีขนาดโตสุด ความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและค่าพลังงานโฟตอนมากขึ้นหรือส่วนหางของแถบพลังงานมีค่าลดลง

ประโยชน์ที่ได้รับ

จากการศึกษาการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดทำให้ผู้วิจัยได้รับประโยชน์ในหลายด้านๆคือ ความพยายามและอดทนในการศึกษาค้นคว้ากับผลงานวิจัยที่ผ่านมาเพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับระบบที่ห้องวิจัย PMRL สร้างขึ้นเพื่อให้สามารถใช้งานได้จริงซึ่งเรามีข้อจำกัดในด้านระบบคือ ความดันต่ำระบบสามารถทำได้ในระดับ 2×10^{-2} มิลลิบาร์และอุณหภูมิของระบบสามารถรองรับได้ไม่เกิน 570 องศาเซลเซียสซึ่งจากการศึกษาผลงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า ระบบที่ทำการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีระเหิดในระยะประชิด ทำการเตรียมที่ความดันที่ต่ำกว่าและอุณหภูมิที่สูงกว่า ดังนั้นผู้วิจัยจึงพยายามหาข้อมูลจนได้สมมติฐานว่าระบบของเราน่าจะสามารถเตรียมฟิล์มบางได้ที่อุณหภูมิของสารตั้งต้นประมาณ 500-550 องศาเซลเซียสผู้วิจัยจึงทดลองเตรียมฟิล์มบางโดยให้อุณหภูมิแก๊สสารตั้งต้นเท่ากับ 500 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 400 องศาเซลเซียสปรากฏว่าสามารถเตรียมฟิล์มบางได้ผู้วิจัยจึงสร้างขอบเขตของงานวิจัยคือ ศึกษาการเตรียมฟิล์มบางที่อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่อุณหภูมิต่างๆ ซึ่งระบบก็สามารถศึกษาที่อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ต่ำสุดเท่ากับ 375 องศาเซลเซียสจึงทำให้ผู้วิจัยศึกษาที่อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ต่ำสุดเท่ากับ 375, 400, 425, 450 และ 475 องศาเซลเซียสจากการศึกษาที่ผ่านมาทำให้ผู้วิจัยทราบถึงเทคนิคในการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด

จากการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุดภาคทำให้ทราบถึงหลักการศึกษาคโครงสร้างผลึกเชิงจุดภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ การหาค่าคงตัวของโครงสร้างผลึก สัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบผลึกขนาดของเกรน

จากการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคทำให้ทราบถึงหลักการศึกษาคโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(SEM) ขนาดของเกรนจากภาพถ่าย SEM

จากการศึกษาสมบัติทางแสงด้วยการวัดค่าการส่งผ่านแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสตีบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ทำให้ทราบถึงหลักการหาขนาดช่องว่างแถบพลังงาน การคำนวณหาส่วนหางของแถบพลังงานจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง

จากการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าทำให้ทราบถึงหลักการวัดความต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีสองขั้วเชิงเส้น การคำนวณหาพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบาง ระดับพลังงานต่างๆที่พบในฟิล์มบาง

การเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดในระยะประชิดมีความเหมาะสมมากในกระบวนการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์โดยมีความโดดเด่นมากในด้านขนาดของเกรนที่โตใช้เวลาเพียง 5-10 นาทีในการเคลือบฟิล์มเพื่อให้ความหนาในระดับ 5-10 ไมโครเมตรและปัจจุบันเป็นวิธีที่ให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สูงที่สุด สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ ของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์/แคดเมียมซัลไฟด์ (CdTe/CdS)

ปัญหาและข้อเสนอแนะ

ในการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเพื่อประยุกต์ใช้เป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ ในการเตรียมฟิล์มบางและการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าในงานวิจัยนี้เราพบปัญหาบางประการที่เป็นอุปสรรคในการวิจัย ซึ่งได้หาแนวทางในการแก้ไขปัญหาเพื่อให้งานวิจัยในครั้งนี้ลุล่วงไปด้วยความสำเร็จ ซึ่งปัญหาที่พบและแนวทางในการแก้ไขปัญหามีดังนี้

1. ปัญหาในการติดตั้งระบบผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะผู้ติดตั้งระบบควรศึกษาการติดตั้งอย่างละเอียด ทุกครั้งที่ติดตั้งระบบต้องมีสมาธิในการทำงาน และลองติดตั้งก่อนการทำงานจริงจนให้เกิดความชำนาญเพราะในขั้นตอนการปฏิบัติงานจริงต้องใช้ความระมัดระวังในการติดตั้งและใช้เวลาให้น้อยที่สุดเพราะผู้วิจัยพบว่าในการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดนี้ ถ้ามีความชำนาญในการติดตั้งและทำงานอย่างต่อเนื่อง ผู้วิจัยพบว่าในการเตรียมฟิล์มบางนั้นจะใช้เวลาให้น้อยมากและได้ฟิล์มบางที่มีคุณภาพที่ดีโดยตรวจสอบชั้นต้นคือมองด้วยตาเปล่าจะพบว่าฟิล์มบางมีผิวหน้าเรียบสม่ำเสมอเป็นมันวาวจากนั้นดูรายละเอียดสภาพผิวหน้าของฟิล์มบางจากกล้องจุลทรรศน์ซึ่งฟิล์มบางที่เตรียมได้นั้นมีผิวหน้าสม่ำเสมอไม่มีจุดสีดำหรือรูพรุนเกิดขึ้น

2. ในขั้นตอนการสูบลำอากาศออกจากระบบครั้งแรกที่ทำการเตรียมฟิล์มบาง เพื่อให้ได้ความดันประมาณ $5 \times 10^{-2} - 2 \times 10^{-2}$ มิลลิบาร์จะใช้เวลาประมาณ 1-2 ชั่วโมงหรือมากกว่าก็ไม่สามารถทำความดันได้ตามต้องการ ผู้วิจัยมีแนวทางการแก้ไขปัญหานี้คือหลังจากสูบลำอากาศออกจากระบบประมาณ 15 นาที จะทำการให้อุณหภูมิแก่ระบบเท่ากับ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นปิดระบบการให้อุณหภูมิ ระบบก็จะทำการสูบลำอากาศออกจากระบบได้อย่างรวดเร็ว

3. หลังจากใช้งานระบบระเหิดสารในระยะประชิด ที่ชั่วหลอดทั้งสแตนด์จะเกิดออกไซด์ต้องคอยทำความสะอาดก่อนการใช้งานระบบทุกครั้งเพื่อให้ระบบทางไฟฟ้าสมบูรณ์และยังสามารถยืดอายุการทำงานของหลอดทั้งสแตนด์ได้ด้วย

4. ในการเตรียมฟิล์มบางที่อุณหภูมิฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 475 องศาเซลเซียสฟิล์มบางค่อนข้างเคลือบยากสำหรับระยะระหว่างสารตั้งต้นถึงฐานรองรับกระจกสไลด์เท่ากับ 4 มิลลิเมตรแนวทางการแก้ไขคือ ถ้าสารตั้งต้นถูกใช้งานมานานแล้ว ควรทำการเปลี่ยนสารตั้งต้นใหม่ และต้องคอยควบคุมระบบอุณหภูมิให้คงที่ในช่วงเวลาที่เคลือบฟิล์ม เพราะในกรณีนี้อุณหภูมิของระบบค่อนข้างมีการเปลี่ยนแปลงสูง

5. ในการวัดสมบัติทางไฟฟ้า ผู้วิจัยพบว่าต้องทำขั้วไฟฟ้าให้มีขนาดที่เล็กและสม่ำเสมอโดยกาวเงินที่ใช้นั้นต้องมีคุณสมบัติในด้านความเงาที่เหมาะสมเพื่อแก้ไขปัญหาค่าการแพร่อย่างรวดเร็วของกาวเงินในเนื้อฟิล์มบาง

เอกสารอ้างอิง

1. ยงยุทธ เหล่าสิริถาวร,รัตติกร ยิ้มนิรัญ. “ไอน์สไตน์กับพลังงานแสงอาทิตย์” วารสารฟิสิกส์
ไทย : **World Year of PHYSICS 2005**. ปีที่22. ฉบับที่1. 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”
วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
2530.
7. งามนิษฐ์ วงษ์เจริญ. “การศึกษารอยต่อแบบโหนด-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ ของคอปเปอร์อินเดียม
ไดซัลไฟด์” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย. 2530.
8. ปกรณ์ สิริขัตติวงษ์. “การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์ที่เตรียมได้
จากกระบวนการซีดีในเซชัน” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์
บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2550.
9. งามนิษฐ์ แก้วแดง,จูตินัย แก้วแดง,ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. “การเตรียมและ
การศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์” รายงานวิจัย
เสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2545.
10. Kittel C. **Introduction to Solid State Physics**. 8th ed. United States of America : John
Wiley&Sons. 2005.
11. วีระชัย ถิลา. “การศึกษาสมบัติฟิล์มบาง CdS-ZnS ซึ่งเตรียมโดยวิธีอบสารละลายเคมี”
วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2547.

12. สุกฤษฏี เกิดแสง. “การเตรียมและศึกษาสมบัติของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ CdTe.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2547.
13. จูติกร จรรยาธรรม. “การศึกษาเชิงเปรียบเทียบสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่เตรียมโดยเทคนิคที่ต่างกัน” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 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.** 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.,Marinskiy 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. 83. No 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 thansient 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 crytals" **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.No20.1999. pp. 2957-2959.

ภาคผนวก

ไฟล์มาตรฐานของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

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

Pattern : 26-1079		Raduatuib = 1.540598		Quality : Calculated		
C		<i>2th</i>	<i>l</i>	<i>h</i>	<i>k</i>	<i>l</i>
Graphite-3R,syn[NR]/Carbon		26.603	100	0	0	3
		43.451	11	1	0	1
		46.334	9	0	1	2
		54.794	6	0	0	6
		56.668	4	1	0	4
		63.687	2	0	1	5
		77.699	4	1	1	0
		80.678	1	1	0	7
<i>Lattice</i> : Rhombohedral		83.838	6	1	1	3
<i>S.G.</i> : R3 (146)		87.297	1	0	0	9
<i>a</i> = 2.45600		90.890	1	0	1	8
<i>c</i> = 10.04400		102.142	4	1	1	6
<i>Z</i> = 6		133.943	1	0	0	12
		137.712	4	1	1	9
		147.971	1	2	1	1
		152.047	1	1	2	2
CAS: 7440-44-0						
*Private Communication,(1974) Primary reference : Holcombe.						
*U.S.AEC Oak Ridge Y-12 Plant,Report Y1887,(1973) unit cell data : Holcombe.						
<i>Radiation</i> : CuKa						
<i>Lambda</i> : 1.54178						
<i>SS/FOM</i> : F16=72(0.0093,24)						
<i>Filter</i> : Not specified						
<i>d-sp</i> : Calculated spacings						

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายอคุตต์ หาญวังม่วง
วัน เดือน ปีเกิด	9 มีนาคม 2520
สถานที่เกิด	2 หมู่ 4 บ้านสารจอกใหม่ ตำบลหนองโพนงาม อำเภอเกษตรสมบูรณ์ จังหวัดชัยภูมิ 36120
ที่อยู่ปัจจุบัน	35 ซอยทรายทอง 26 ถนนติวานนท์ ตำบลท่าทราย อำเภอเมือง จังหวัดนนทบุรี 11000
การศึกษา	2532 ประถมศึกษา โรงเรียนบ้านสารจอก 2535 มัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนบ้านเป่าวิทยา 2539 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนภูเขียว 2543 ปริญญาตรี สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม 2544 ประกาศนียบัตรบัณฑิตทางการสอน คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 2550 ปริญญาโท สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ทุนการศึกษา	2539-2544 ทุนโครงการส่งเสริมการผลิตครูที่มีความสามารถพิเศษทางวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ (สกวค.) จากสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.) 2548-2550 ทุนสนับสนุนการศึกษาจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
สถานที่ทำงาน	2544-ปัจจุบัน รับราชการตำแหน่งอาจารย์ สังกัดแผนกวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์นนทบุรี