



สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาข้อสัมผัสไอห์มมิกของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์

STUDY OF OHMIC CONTACT OF CdTe THIN FILMS



ไกรศักดิ์ ยืนย้ง

KRAISAK YUENYOUNG

ค.ท.ม. ....  
เลขทะเบียน 116786  
วันเดือนปี 15 ส.ค. 2554

b. 12287155  
i. ....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2553

KMITL-2010-SC-M-030-014

**STUDY OF OHMIC CONTACT OF CdTe THIN FILMS**

**KRAISAK YUENYOUNG**

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF SCIENCE IN APPLIED PHYSICS**

**FACULTY OF SCIENCE**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2010**

**KMITL-2010-SC-M-030-014**

**COPYRIGHT 2010**

**FACULTY OF SCIENCE**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาข้อสัมผัสโอห์มมิกของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์  
Study of Ohmic Contact of CdTe Thin Films  
นักศึกษา นายไกรศักดิ์ ยืนยง  
รหัสประจำตัว 50067302  
ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.วิจิต	ศิริโชติ	
รศ.งามนิตย์	วงษ์เจริญ	
รศ.ดร.ฐิตินัย	แก้วแดง	
ผศ.ดร.ชัยสิงห์	ภูริรักษ์เกียรติ	

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 29 มีนาคม พ.ศ. 2553 เวลา 13.30 น.  
KING MONKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
สถานที่สอบ ณ ห้อง 307 ชั้น 3 อาคารจุฬารามวลัยลักษณ์ 1

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว  
  
(รองศาสตราจารย์ ดร.คุณฉวี ชนะบริพัฒน์)  
คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
7 มี.ค. 53

สำนักทะเบียนและประมวลผล สจล.  
วันที่ส่งเล่มวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์  
วันที่ 26 เดือน..... พ.ศ. 53  
ลงชื่อ.....

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาข้อสัมผัสไอหุ้มมิกของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์
นักศึกษา	นายไกรศักดิ์ ยืนยง
รหัสประจำตัว	50067302
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
พ.ศ.	2553
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาข้อสัมผัสไอหุ้มมิกของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ เนื่องจากข้อสัมผัสไอหุ้มมิกเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญอย่างมากในการกำหนดประสิทธิภาพสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ งานวิจัยมุ่งเน้นศึกษาถึงอิทธิพลของชั้นฟิล์มบางของ  $Sb_2Te_3$  ที่มีต่อความเป็นไอหุ้มมิกรวมทั้งค่าความต้านทานจำเพาะของข้อสัมผัสไฟฟ้า ( $\rho_c$ ) และความสูงของกำแพงศักย์ซึ่งเกิดจากรอยต่อระหว่างแคดเมียมเทลลูไรด์กับทองแดง การวิจัยนั้นเริ่มจากการเตรียมฟิล์มบาง CdTe และ  $Sb_2Te_3$  โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์และที่เป็นฟิล์มบางของทองแดงบริสุทธิ์ ตรวจสอบโครงสร้างผลึกโดยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ และตรวจสอบผิวหน้าผลึกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง CdTe หาได้จากการวัดเปอร์เซนต์การส่งผ่านแสงด้วยเครื่อง ยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ จากนั้นจึงทำการประดิษฐ์ และศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์ของฟิล์มบาง CdTe ที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Cu,  $Sb_2Te_3$ /CdTe/  $Sb_2Te_3$  และ Cu/CdTe/  $Sb_2Te_3$ /Cu โดยอาศัยการไหลของกระแสไฟฟ้าทั้งในแบบแนวตั้งและแบบแนวนอน จากแบบจำลองความสูงของกำแพงศักย์สมำเสมอของที่กับแบบจำลองที่ความสูงของกำแพงศักย์ ไม่สมำเสมอทั่วทั้งบริเวณผิวสัมผัสของทฤษฎีเทอร์มิโอนิกอิมิสชันสามารถที่จะหาพารามิเตอร์ที่สำคัญของรอยต่อได้ จากผลการทดลองพบว่าความต้านทานจำเพาะของรอยต่อ ความสูงของกำแพงศักย์ที่มี  $Sb_2Te_3$  เป็นชั้นไคโพลขั้วคู่มีค่าต่ำในระดับ  $8.15 \times 10^{-3}$  โอห์ม-ตารางเซนติเมตร และ 0.201 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องดีกับค่าที่ยอมรับได้ในเชิงพาณิชย์คืออยู่ในช่วง  $10^{-2}$ - $10^{-6}$  โอห์ม-ตารางเซนติเมตร อีกทั้งยังได้ประดิษฐ์ไคโอดของฟิล์มบาง n-CdS/p-CdTe โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ จากการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า และความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า จะได้พารามิเตอร์ที่สำคัญของไคโอด ได้แก่ แฟกเตอร์อุดมคติ ความสูงของกำแพงศักย์ และแรงดันตกคร่อมตรงบริเวณรอยต่อซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.20, 0.593 อิเล็กตรอนโวลต์และ 0.415 โวลต์ ตามลำดับ

<b>Thesis</b>	Study of Ohmic Contact of CdTe Thin Films
<b>Student</b>	Mr. Kraisaak Yuenyoung
<b>Student ID.</b>	50067302
<b>Degree</b>	Master of Science
<b>Program</b>	Applied Physics
<b>Year</b>	2010
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Ngamnit Wongcharoen

## ABSTRACT

This thesis has been studied the ohmic contact of CdTe thin films. The ohmic contact is one most important parameter to specify the efficiency of CdTe solar cells. This research has been emphasized the role of  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  layer to the ohmicity, the specific contact resistance ( $\rho_C$ ) and barrier height that formed after making contact between CdTe and copper. CdTe and  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  thin films have been deposited by thermal evaporation in vacuum on slide glass substrate and on pure Cu layer coated on slide glass substrate. Crystal structure and crystal morphology of these films were checked by XRD and SEM, respectively. The optical transmission spectrum of CdTe thin films were performed by UV-VIS spectrophotometer. Then, energy gap value of the films was evaluated from it. Furthermore, semiconductor devices have been fabricated on the structure of  $\text{Cu/CdTe/Cu, Sb}_2\text{Te}_3/\text{CdTe}/\text{Sb}_2\text{Te}_3$  and  $\text{Cu/CdTe}/\text{Sb}_2\text{Te}_3/\text{Cu}$ . Electrical properties of these devices were examined by using the vertical and lateral transmission methods. A point of view of the thermionic emission theory with homogeneous and inhomogeneous barrier height models, important parameters of these devices were extracted from the experimental results. The specific contact resistance ( $\rho_C$ ) and barrier height values are  $8.15 \times 10^{-3} \text{ } \Omega\text{-cm}^2$  and 0.201 eV, respectively. In commercial, the value of specific contact resistance of ohmic contact of electronics devices should be in the range of  $10^{-2}\text{-}10^{-6} \text{ } \Omega\text{-cm}^2$ . Thus, specific contact resistance of ohmic contact of CdTe thin films is well acceptable. Moreover, n-CdS/p-CdTe thin film diode was fabricated by thermal evaporation in vacuum. Ideality factor, barrier height and built-in voltage values having about 1.20, 0.593 eV and 0.415 V were evaluated from I-V and C-V measurements at room temperature.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาของ รองศาสตราจารย์ งามนิษฐ์ วงษ์เจริญ รองศาสตราจารย์ ดร.ฐิตินัย แก้วแดง รองศาสตราจารย์ ดร.ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ และอาจารย์ณัฐพร พรหมรส ที่อำนวยความสะดวกในการใช้อุปกรณ์เครื่องมือระบบระบบสารสนเทศมีความร้อนในสุญญากาศ อุปกรณ์ในการวัดลักษณะเฉพาะต่าง ๆ ตลอดจนอุปการะทุนสนับสนุน และให้ความรู้และคำปรึกษาทางวิชาการที่ดีตลอดมา รวมทั้งปลูกฝังคุณธรรมที่สั่งมาให้กับลูกศิษย์ทุกคน

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. วิสุทธิ์ ฐิตรุ่งเรือง หัวหน้าศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ให้ความอนุเคราะห์นำปลอดประจุม้าใช้ในการวิจัย

ขอขอบคุณ ดร.ชาญวิทย์ จิตยुทธการ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ออกแบบและสร้างระบบระบบสารสนเทศมีความร้อนในสุญญากาศเพื่อใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง

ขอขอบคุณ คุณเอกชัย วัฒมาศ นักศึกษาปริญญาโทห้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุโพลีเมติกส์ สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง คุณคงกฤษณ์ ไพรวัดย์ และคุณกุลวรงค์ นุตะมาน ศิษย์เก่าปริญญาตรีห้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุโพลีเมติกส์ สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ช่วยติดตั้งซอฟต์แวร์ในการวัดลักษณะเฉพาะกระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า และคำแนะนำในการใช้เครื่อง E4980A Agilent Precision LCR Meter สำหรับวัดค่าความนำไฟฟ้า และค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า

ขอขอบคุณครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดวิชาความรู้และประสบการณ์ให้แก่ข้าพเจ้า สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อเพ็ชร ยืนยง คุณแม่สนอง ยืนยง คุณเกษม ยืนยง คุณนวลศรี ยืนยง คุณมนัส แก้วเนตร์ และคุณพิกุล โคตรสมบัติที่ได้อบรมเลี้ยงดู ให้การสนับสนุนส่งเสริมในการศึกษา ให้คำปรึกษาทางเทคนิค อีกทั้งเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา

ไกรศักดิ์ ยืนยง

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	II
กิตติกรรมประกาศ .....	III
สารบัญ .....	IV
สารบัญตาราง .....	X
สารบัญรูป .....	XV
บทที่1 บทนำ .....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ .....	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย .....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	4
บทที่2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง .....	5
2.1 โครงสร้างผลึกของสารประกอบเชิงสองในตระกูลของอะตอมของธาตุ ที่เกิดขึ้นระหว่างหมู่ III-V หรือ II-VI .....	5
2.1.1 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ .....	6
2.1.2 โครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซท์ .....	6
2.2 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ของผลึก CdTe .....	7
2.3 การระบุตำแหน่งของทิศทางและชื่อระนาบของผลึก .....	8
2.3.1 การระบุตำแหน่ง .....	8
2.3.2 การระบุทิศทาง .....	8
2.3.3 การระบุชื่อระนาบ .....	8
2.4 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ .....	10
2.5 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด .....	13
2.6 สมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ .....	18
2.6.1 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน .....	18
2.6.2 การส่งผ่านแสง .....	21
2.6.3 การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ .....	22

## สารบัญ ( ต่อ )

	หน้า
2.6.4 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง .....	23
2.7 สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ .....	26
2.7.1 สภาพนำไฟฟ้า.....	27
2.7.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า.....	28
2.7.3 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง .....	28
2.7.4 การวัดความต้านทานจำเพาะโดยวิธีสองขั้ว .....	29
2.7.5 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสี่ขั้วเชิงเส้น .....	30
2.7.6 ทฤษฎีการนำไฟฟ้าในช่วงอุณหภูมิต่างๆ .....	31
2.8 การสร้างรอยต่อ.....	32
2.8.1 การสร้างรอยต่อแบบหลอมโลหะผสม.....	32
2.8.2 การสร้างรอยต่อแบบแพร่ซึม.....	33
2.8.3 การสร้างรอยต่อแบบอีพิแทกซี.....	35
2.8.4 การสร้างรอยต่อแบบการฝังไอออน.....	35
2.9 รอยต่อแบบโลหะ-สารกึ่งตัวนำ .....	36
2.10 กลไกการไหลของพาหะข้ามรอยต่อระหว่าง โลหะ-สารกึ่งตัวนำ.....	43
2.11 ผลของขอตดัก .....	49
2.12 กระบวนการจับและรวมตัวกันของพาหะ.....	50
2.12.1 การรวมกัน โดยตรง.....	50
2.12.2 การรวมตัวกันโดยผ่านบริเวณศูนย์กลางที่ทำหน้าที่เป็นกับดักประจุ.....	51
2.12.3 การรวมตัวกันแบบอเนก.....	51
2.12.4 การรวมตัวกันที่บริเวณผิวหน้าสาร.....	51
2.13 การวัดความต้านทานจำเพาะของรอยต่อแบบ โอห์มิกสำหรับฟิล์มบางของ สารกึ่งตัวนำ CdTe .....	51
2.14 การหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่รอยต่อระหว่าง โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ โดยการวัดความหนาแน่นของกระแสชาร์ดสัน.....	54
2.15 ความสูงกำแพงศักย์ที่ไม่สม่ำเสมอ.....	58

# สารบัญ ( ต่อ )

หน้า

2.16 การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ.....	61
2.16.1 อัตราการระเหยสาร .....	61
2.16.2 ความดันไอของธาตุ .....	62
2.16.3 การระเหยสารประกอบ .....	63
2.16.4 อิทธิพลของโครงสร้างเชิงเรขาคณิตต่อระบบการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการระเหยสาร .....	64
บทที่3 การดำเนินการวิจัย.....	67
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัยที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์พื้นฐานของฟิล์มบางชนิดต่าง ๆ และสิ่งประดิษฐ์ที่มีลักษณะ โครงสร้างแบบต่าง ๆ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ.....	67
3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์.....	67
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางชนิดต่าง ๆ และสร้างสิ่งประดิษฐ์ที่มีลักษณะ โครงสร้างแบบต่าง ๆ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ.....	68
3.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางแสง.....	68
3.1.4 เครื่องมือที่ใช้ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค.....	69
3.1.5 เครื่องมือที่ใช้ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค.....	69
3.1.6 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า.....	69
3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางชนิดต่าง ๆ และการสร้างสิ่งประดิษฐ์ที่มีลักษณะ โครงสร้างแบบต่าง ๆ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ .....	70
3.2.1 การเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์.....	70
3.2.2 การทำความสะอาดระบบสุญญากาศและหน้ากากอะลูมิเนียมที่ใช้สำหรับ ออกแบบลักษณะรูปแบบของฟิล์มบางที่ถูกใช้ในระบบสุญญากาศ.....	71

# สารบัญ ( ต่อ )

หน้า

3.2.3 การเคลือบฟิล์มบางชนิดต่าง ๆ และการสร้างสิ่งประดิษฐ์ที่มีลักษณะ โครงสร้างแบบต่าง ๆ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe โดยวิธี ระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศลงบนกระจกสไลด์.....	72
3.3 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์พื้นฐานประเภทต่าง ๆ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe และสิ่งประดิษฐ์ที่มีลักษณะ โครงสร้างแบบต่าง ๆ ของฟิล์มบางของ สารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้ .....	75
3.3.1 การศึกษาสมบัติทางแสง.....	75
3.3.2 การศึกษาโครงสร้างเชิงจุลภาค.....	75
3.3.3 การศึกษาโครงสร้างเชิงมหภาค.....	75
3.3.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า.....	75
3.3.4.1 การวัดค่าความต้านทาน ( R ) ความต้านทานแผ่น ( $R_s$ ) และสภาพต้านทานของเนื้อสาร ( $\rho_B$ ) ด้วยวิธีสองขั้ว.....	75
3.3.4.2 การหาค่าพลังงานกระตุ้น ( $E_g$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์.....	76
3.3.4.3 การหาค่าพลังงานกระตุ้น ( $E_g$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่มีลักษณะ โครงสร้างแบบต่าง ๆ.....	77
3.3.4.4 การหาความต้านทานจำเพาะของขั้วไฟฟ้า ( $\rho_C$ ) และ ความต้านทานที่ชั้นล่างสุดของฟิล์ม ( $R_E$ ).....	77
3.3.4.5 การหาค่ากระแสชาร์ดสัน ( $I_0$ ) และคำนวณความสูง ของกำแพงศักย์ ( $\phi_B$ ).....	78
3.3.4.6 การศึกษาแอดมิตแตนซ์สเปกโตรสโคปี .....	79
3.3.4.7 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของ CdS/CdTe ไลโอโด.....	80
บทที่4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล.....	81
4.1 ฟิล์มบางชนิดต่าง ๆ และสิ่งประดิษฐ์ที่มีลักษณะ โครงสร้างแบบต่าง ๆ ของ ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมี ด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ.....	81

## สารบัญ ( ต่อ )

หน้า

4.2 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางชนิดต่าง ๆ และสิ่งประดิษฐ์ที่มีลักษณะ โครงสร้างแบบต่าง ๆ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เตรียมได้โดย วิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ.....	83
4.2.1 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....	83
4.2.2 ผลการศึกษาภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของฟิล์มบาง.....	86
4.2.3 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางชนิดต่างๆ และสิ่งประดิษฐ์ที่มี ลักษณะ โครงสร้างแบบต่าง ๆ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เตรียม ได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วย ความร้อนในระบบสุญญากาศ.....	90
4.2.4 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เตรียม ได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ .....	88
4.3 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส.....	94
4.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Sb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> /CdTe/Sb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบ สุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส .....	107
4.5 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Sb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> /Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบ สุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส.....	119
4.5.1 การศึกษาแอดมิตแตนซ์สเปกโตรสโคปีเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วง ความถี่ 2 kHz ถึง 2 MHz ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Sb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> /Cu ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบ สุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส.....	129

# สารบัญ ( ต่อ )

หน้า

4.6 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอด CdS/CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส.....	138
4.6.1 ผลการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า ของไดโอด CdS/CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส.....	143
4.6.2 ผลการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า ของไดโอด CdS/CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส.....	145
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	149
เอกสารอ้างอิง.....	154
ภาคผนวก.....	158
ประวัติผู้เขียน.....	162

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีมิลเลอร์และจุดที่ระนาบตัดแกนผลึก.....	9
2.2 แสดงฟังก์ชันงานของโลหะที่สำคัญ.....	37
2.3 แสดงอิเล็กตรอนแอฟฟินิตีของสารประกอบกึ่งตัวนำหมู่ II-VI .....	37
2.4 แสดงปฏิกิริยาการระเหยสารประกอบ.....	64
4.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของฟิล์มบางชนิดต่าง ๆ และสิ่งประดิษฐ์ที่มีลักษณะ โครงสร้าง แบบต่าง ๆ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธี ระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ.....	89
4.2 แสดงค่าพลังงานกระตุ้น ( $E_g$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe/slide glass ที่เตรียม ได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่ให้อุณหภูมิกับแผ่น ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ และให้อุณหภูมิกับแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ 50 องศาเซลเซียส และ 100 องศาเซลเซียส.....	93
4.3 แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้า ความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าของเนื้อสาร ของฟิล์มบางชนิดต่าง ๆ และสิ่งประดิษฐ์ที่มีลักษณะ โครงสร้างแบบต่าง ๆ ที่เตรียมได้ โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรอง รับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 150 องศาเซลเซียสสำหรับ โครงสร้าง Cu/slide glass และ 100 องศาเซลเซียส สำหรับสิ่งประดิษฐ์ที่มีโครงสร้างอื่น .....	93
4.4 แสดงค่าความต้านทานรวมของสิ่งประดิษฐ์ของสารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้ อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส โดยทำการ วัดในแบบแนวตั้ง (vertical transmission line) ผ่านขั้วไฟฟ้าที่มีพื้นที่ต่างกัน.....	95
4.5 แสดงค่ากระแสชาร์ดสัน ( $I_0$ ) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ เมื่อทำการวัดในแบบแนวตั้งกับขั้ว ไฟฟ้าหมายเลข 5 ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Cu ที่ เตรียมได้โดยวิธี ระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่น ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส .....	98
4.6 แสดงค่าความสูงของกำแพงศักย์ ( $\phi_{B0}$ ) ที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิของรอยต่อโอห์มมิก ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหย สารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็น กระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส .....	99

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.7 แสดงค่าความต้านทานแผ่นที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu / CdTe / Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส .....	101
4.8 แสดงค่ากระแสชาร์ดสัน ( $I_0$ ) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ เมื่อวัดในแบบแนวนอน (lateral transmission line) กับขั้วไฟฟ้าหมายเลข 5 ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส.....	102
4.9 แสดงค่าความสูงของกำแพงศักย์ ( $\phi_{B0}$ ) ที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ ของรอยต่อโอห์มมิกของสิ่งประดิษฐ์ที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส .....	103
4.10 แสดงค่าความต้านทานแผ่นที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส .....	106
4.11 แสดงค่าความต้านทานรวม โดยทำการวัดในแบบแนวตั้ง (vertical transmission line) ผ่านขั้วไฟฟ้าที่มีพื้นที่ต่างกันของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ $Sb_2Te_3/CdTe/Sb_2Te_3$ ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส .....	108
4.12 แสดงค่ากระแสชาร์ดสัน ( $I_0$ ) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ เมื่อทำการวัดในแนวตั้งกับขั้วไฟฟ้าหมายเลข 2 ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ $Sb_2Te_3/CdTe/Sb_2Te_3$ ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส .....	110

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.13	แสดงค่าความสูงของกำแพงศักย์ ( $\phi_{B0}$ ) ที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิของรอยต่อโอห์มมิกของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ $Sb_2Te_3/CdTe/Sb_2Te_3$ ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส .....111
4.14	แสดงค่าความต้านทานแผ่นที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิของสิ่งประดิษฐ์ของสารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ $Sb_2Te_3/CdTe/Sb_2Te_3$ ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส .....113
4.15	แสดงค่ากระแสชาร์ดสัน ( $I_0$ ) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ เมื่อวัดในแบบแวนอนกับขั้วไฟฟ้าหมายเลข 1 ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ $Sb_2Te_3/CdTe/Sb_2Te_3$ ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส.....115
4.16	แสดงค่าความสูงของกำแพงศักย์ ( $\phi_{B0}$ ) ที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ $Sb_2Te_3/CdTe/Sb_2Te_3$ ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส .....116
4.17	แสดงค่าความต้านทานแผ่นที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ $Sb_2Te/CdTe/Sb_2Te_3$ ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส.....118
4.18	แสดงค่าความต้านทานรวม โดยทำการวัดในแบบแวนดิงผ่านขั้วไฟฟ้าที่มีพื้นที่ต่างกันของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ $Cu/CdTe/Sb_2Te_3/Cu$ ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส .....119
4.19	แสดงค่ากระแสชาร์ดสัน ( $I_0$ ) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ เมื่อวัดในแวนดิงกับขั้วไฟฟ้าหมายเลข 2 ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ $Cu/CdTe/Sb_2Te_3/Cu$ ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส .....121

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.20 แสดงค่าความสูงของกำแพงศักย์ ( $\phi_{B0}$ ) ที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิของรอยต่อโอห์มมิกของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Sb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> /Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส .....	122
4.21 แสดงค่าความต้านทานแผ่นที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Sb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> /Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส .....	124
4.22 แสดงค่ากระแสชาร์จัน ( $I_0$ ) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ เมื่อวัดในแบบแวนอนกับขั้วไฟฟ้าหมายเลข 4 ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Sb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> /Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส.....	125
4.23 แสดงค่าความสูงของกำแพงศักย์( $\phi_{B0}$ ) ที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ ของรอยต่อโอห์มมิกของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Sb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> /Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส .....	126
4.24 แสดงค่าความต้านทานแผ่นที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Sb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> /Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส .....	128
4.25 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแอดมิตแตนซ์สเปกโตรสโคปีเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่าง ๆ ในช่วงความถี่ 2 kHz ถึง 2 MHz ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Sb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> /Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส.....	135

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.26 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Cu, Sb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> /CdTe/Sb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> , Cu/CdTe/ Sb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> /Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส.....	137
4.27 แสดงค่าแรงดันไบแอสกลับทางกับความจุไฟฟ้าโดยทำการวัดเมื่อทำการวัดที่ความถี่ 1 MHz ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน ของไดโอด CdS/CdTe ที่เตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส.....	142
4.28 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้จากการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน และที่ได้จากการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่ความถี่ 1 MHz ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน ของไดโอด CdS/CdTe ที่เตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส.....	148

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	แสดงพันธะเคมีที่เป็นแบบสี่หน้าหรือพันธะเตตระฮีดรัล.....5
2.2	แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์.....6
2.3	แสดงโครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไฮท์.....7
2.4	แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ของผลึก CdTe .....7
2.5	แสดงการบอกชื่อระนาบต่าง ๆ ของผลึกด้วยค่าดัชนีมิลเลอร์.....9
2.6	แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากระนาบผลึก.....11
2.7	แสดงวิธีการหา $\beta_{2\theta}$ เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของ การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์.....13
2.8	แสดงอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับผิวของสารตัวอย่าง.....13
2.9	แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....14
2.10	แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานอย่างง่ายของ.....19
	ก. ฉนวน
	ข. สารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์
	ค. สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น
	ง. สารกึ่งตัวนำชนิดพี
	จ. โลหะ
	ฉ. สารกึ่งโลหะ
2.11	แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานและการย้ายสถานะของ พลังงานอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสมบูรณ์ ( $T = 0 \text{ K}$ ) .....20
	ก. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง
	ข. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง
2.12	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนของ สารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสมบูรณ์ ( $T = 0 \text{ K}$ ) .....21
	ก. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง
	ข. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงในกรณีที่เกิดกระบวนการ การสร้างโฟนอน

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.13	แสดงแผนภาพเมื่อแสงตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบาง.....21
2.14	แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับพลังงานโฟตอน.....24
2.15	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและค่าพลังงานโฟตอนหรือค่าความยาวคลื่นของพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำ.....25
2.16	แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของ CdTe.....26
2.17	การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง.....28
2.18	การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว.....29
2.19	แสดงการวัดความต้านทานแผ่นโดยวิธีสองขั้ว.....30
	ก. การวัดแบบสองขั้วโดยมีการเลื่อนระยะที่ขั้วหนึ่ง
	ข. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับระยะทางที่ได้จากการวัดชนิดเลื่อนขั้วไฟฟ้า
2.20	แสดงการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสี่ขั้วเชิงเส้น.....30
2.21	แสดงการสร้างรอยต่อแบบหลอมโลหะผสม.....33
	ก. ลักษณะโครงสร้างของรอยต่อแบบหลอมโลหะผสม
	ข. กราฟแสดงปริมาณความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือที่ระยะความลึกจากผิวรอยต่อค่าต่าง ๆ
2.22	แสดงการสร้างรอยต่อแบบแพร่ซึม.....34
	ก. ลักษณะโครงสร้างรอยต่อแบบแพร่ซึม
	ข. กราฟแสดงความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือที่ระยะความลึกจากผิวรอยต่อค่าต่าง ๆ
2.23	แสดงลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นเมื่อ $E_w(M) > E_w(s.c.)$ พื้นที่แรเงาแสดงว่ามีอิเล็กตรอนเติมอยู่.....38
	ก. ก่อนทำรอยต่อ
	ข. หลังทำรอยต่อ

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.24 แสดงลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานของไดโอดชอตต์กีแคเรียของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น.....	40
ก. ภายใต้สภาวะไบแอสตรง	
ข. สภาวะไบแอสกลับทาง	
ค. ลักษณะเฉพาะของสมบัติ กระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า และสัญลักษณ์ทางไฟฟ้าของไดโอดแบบชอตต์กีแคเรีย	
2.25 แสดงลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น เมื่อมีผลของสถานะผิวเกิดขึ้นบริเวณผิวของรอยต่อ.....	41
ก. ในกรณีที่ไม่มีโลหะต่อตรงบริเวณผิวหน้าสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น	
ข. ในกรณีที่โลหะมีอิทธิพลต่อการโค้งงอของแถบพลังงานบนผิวหน้าด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น	
2.26 แสดงลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อแบบโอห์มมิกระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น .....	42
ก. เป็นกรณี $E_w(M) > E_w(s.c.)$ ก่อนและหลังการทำรอยต่อ	
ข. เป็นกรณีที่มีชั้นของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่ถูกเจือด้วยอะตอมของสารเจือในปริมาณมาก ( $n^+$ ) ถูกสร้างขึ้นมาคั่นกลางรอยต่อระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น	
ค. ลักษณะเฉพาะของสมบัติ กระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า	
2.27 แสดงกลไกการไหลของอิเล็กตรอนข้ามบริเวณรอยต่อระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น.....	44
ก. แบบเทอร์มิโอนิกอิมิสชัน ( 1 )	
ข. แบบเทอร์มิโอนิก-ฟิลด์อิมิสชัน ( 2 )	
ค. แบบฟิลด์อิมิสชัน ( 3 )	
2.28 แสดงลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น.....	46
ก. ขณะไม่มีการไบแอส (zero bias) จะอยู่ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน	
ข. ขณะไบแอสตรง ( forward bias)	
ค. ขณะไบแอสกลับทาง (reverse bias)	

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.29 แสดงการลดลงของกำลังศักย์เนื่องมาจากผลของขอตัดก็.....	49
2.30 แสดงอิเล็กทรอนิกส์และ โสตรูจจับเอาไว้ที่ศูนย์กลางที่ทำหน้าที่เป็นกับดักประจุ.....	50
2.31 แสดงการวัดสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อ ไอหุ้มมีกระหว่าง โลหะ-สารกึ่งตัวนำ.....	53
ก. การวัดแบบ TLM	
ข. การวัดแบบ VTM	
ค. ลักษณะของกราฟจากการวัดแบบ VTM	
2.32 แสดงการศึกษาสมบัติของรอยต่อระหว่าง โลหะ-สารกึ่งตัวนำชนิดอื่น-โลหะ.....	54
ก. แสดงสิ่งประดิษฐ์ที่ทำจาก โลหะ-สารกึ่งตัวนำชนิดอื่น-โลหะ ซึ่งใช้ใน การศึกษา สมบัติของรอยต่อระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ	
ข. แสดงค่าความสูงของกำลังศักย์ที่รอยต่อระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ	
2.33 แสดงทิศทางและขนาดของกระแสชาร์ดสันที่ไหลข้ามกำลังศักย์ที่มีขนาดความสูง เป็น $\phi_{B1}$ และ $\phi_{B2}$ ตามลำดับ ในขณะที่ไม่มีการไบแอสกับสิ่งประดิษฐ์.....	55
2.34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ตกคร่อมสิ่งประดิษฐ์ซึ่งทำจาก Sn-GaAs-(Ge-Au) กับอุณหภูมิที่กระแสแสดงที่ค่าต่าง ๆ.....	56
2.35 แสดงอุณหภูมิ $T_s$ และ $T_B$ ที่กระแสค่าคงที่ต่าง ๆ.....	57
2.36 แสดงการหาค่าความสูงของกำลังศักย์จากกระแสชาร์ดสันกับส่วนกลับของอุณหภูมิ.....	58
2.37 แสดงค่าความสูงของกำลังศักย์ ( $\phi_{B0}$ ) ที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิของ สิ่งประดิษฐ์ที่มีโครงสร้าง Cu/CdTe/Cu.....	60
2.38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(2kT/q)^{-1}$ กับ $\phi_{B0}$ ของสิ่งประดิษฐ์ ที่มีโครงสร้าง Cu/CdTe/Cu.....	60
2.39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(I_s/T^2)-(q^2\sigma_s^2/2k^2T^2)$ กับ $1000/T$ ของสิ่งประดิษฐ์ที่มีโครงสร้าง $Sb_2Te_3/CdTe/Sb_2Te_3$ .....	61
2.40 กราฟแสดงค่าความดันไอของธาตุ โดยจุดต่างๆจะสัมพันธ์กับ จุดหลอมเหลว.....	63
2.41 กราฟแสดงค่าความดันไอของธาตุในสารกึ่งตัวนำโดยจุดต่าง ๆ จะสัมพันธ์ กับจุดหลอมเหลว.....	63
2.42 แสดงรูปแบบการระเหยของสารตั้งต้น.....	64
3.1 แสดงเครื่อง UV-VIS spectrophotometer ยี่ห้อ thermo electron corporation รุ่น Heios .....	68
3.2 แสดงเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 advance .....	69

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.3 แสดงขั้นตอนการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์.....	71
ก. การเสียบกระจกสไลด์เข้ากับตัวยึดที่ทำด้วยแท่งเทฟลอน	
ข. การล้างกระจกสไลด์ในอ่างอัลตราโซนิก	
ค. การเป่ากระจกสไลด์ด้วยเครื่องเป่าลมร้อน	
ง. การนำกระจกสไลด์ที่เป่าแห้งแล้วเข้าอบในเตาอบที่มีอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที	
3.4 แสดงการจัดเรียงกระจกสไลด์ที่ผ่านการทำความสะอาดเป็นที่เรียบร้อยแล้วลงบนแผ่น หน้ากากอะลูมิเนียมที่อยู่ภายในระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางที่สร้างขึ้นโดย ดร.ชาวุฒิชัย จิตยุทธการ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะ วิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.....	73
ก. ระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	
ข. การวางกระจกสไลด์ที่ล้างแล้วเรียงบนหน้ากากอะลูมิเนียม ที่ใช้เคลือบฟิล์มบาง	
3.5 แสดงการเคลือบฟิล์มทองแดง โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ.....	74
ก. แสดงทองแดงที่หลอมละลายอยู่ในภาชนะที่ใช้ใส่สารตั้งต้น ที่อยู่ภายในระบบสุญญากาศ	
ข. ลักษณะฟิล์มทองแดงที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	
3.6 แสดงแผ่นหน้ากากอะลูมิเนียมที่ใช้สำหรับเคลือบบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe และเคลือบฟิล์มบางของ Cu เพื่อทำเป็นขั้วไฟฟ้า .....	74
ก. แสดงแผ่นหน้ากากอะลูมิเนียมที่ใช้สำหรับเคลือบฟิล์ม CdTe	
ข. แสดงแผ่นหน้ากากอะลูมิเนียมที่ใช้สำหรับเคลือบฟิล์มบาง Cu เพื่อทำเป็นขั้วไฟฟ้า	
3.7 แสดงการต่อขั้วไฟฟ้าแบบสองขั้วด้วยกาวเงินนำไฟฟ้าลงบนฟิล์มบางของ สารกึ่งตัวนำ CdTe.....	76
3.8 แสดงการยึดฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe เข้ากับแท่นจับสารตัวอย่าง เพื่อใส่ในระบบทำความเย็นอุณหภูมิต่ำมาก.....	77
3.9 แสดงค่ากระแสริชาร์ดสัน ( $I_0$ ) ซึ่งเกิดตรงบริเวณจุดแยกของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า เมื่อมีการไบแอสตรงและไบแอสกลับทาง .....	79

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.10 แสดงการใช้ซอฟต์แวร์จำลองกราฟ ( เส้นสีน้ำเงิน ) เปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองเพื่อหาค่าแฟกเตอร์อุณหคคิ .....	80
4.1 แสดงภาพถ่ายของฟิล์มบางของ Cu, ของสารกึ่งตัวนำ $Sb_2Te_3$ และของสารกึ่งตัวนำ CdTe ซึ่งถูกเคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ตามลำดับที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ โดยให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ในกรณีทีเคลือบฟิล์มบางของ Cu เท่ากับ 150 องศาเซลเซียสและฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Sb_2Te_3$ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส แต่สำหรับในกรณีของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe นั้นจะไม่มีกรให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์.....	81
4.2 แสดงภาพถ่ายของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Sb_2Te_3$ และของสารกึ่งตัวนำ CdTeซึ่งเคลือบลงบนฟิล์มบางของ Cu ตามลำดับที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ โดยให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส.....	82
4.3 แสดงภาพถ่ายของสิ่งประดิษฐ์ที่มีโครงสร้างแบบต่าง ๆ ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ.....	82
ก. Cu/CdTe/Cu/slide glass	
ข. $Sb_2Te_3$ /CdTe/ $Sb_2Te_3$ /Cu/ slide glass	
ค. Cu/CdTe/ $Sb_2Te_3$ /Cu/ slide glass	
ง. CdS/CdTe/ $Sb_2Te_3$ /Cu/ slide glass	
4.4 แสดงพิกความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe/slide glass ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่ให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ และให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส.....	83
4.5 แสดงพิกความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe/Cu/slide glassที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่ให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ และให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส.....	83

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 แสดงพิกัดความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ CdTe/Sb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> /Cu/slide glass ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่ให้อุณหภูมิก่อนการรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ และให้อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส .....	84
4.7 แสดงพิกัดความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> /slide glass ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่ให้อุณหภูมิก่อนการรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ และให้อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส .....	84
4.8 แสดงพิกัดความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Sb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> /Cu/slide glass ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่ให้อุณหภูมิก่อนการรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ และให้อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส .....	85
4.9 แสดงภาพถ่าย SEM เมื่อเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe/slide glass, CdTe/Cu/slide glass และ CdTe/Sb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> /Cu/slide glass ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่ให้อุณหภูมิก่อนการรองรับที่เป็นกระจกสไลด์และให้อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ก่อนการรองรับที่เป็นกระจกสไลด์.....	86
4.10 แสดงภาพถ่าย SEM เมื่อเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> / slide glass และ Sb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> /Cu/slide glass ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่ให้อุณหภูมิก่อนการรองรับที่เป็นกระจกสไลด์และให้อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ก่อนการรองรับที่เป็นกระจกสไลด์.....	87

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 แสดงภาพถ่าย SEM บริเวณภาคตัดขวางของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Sb_2Te_3$ /slide glass และ $CdTe/Sb_2Te_3/Cu$ /slide glass ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่ให้อุณหภูมิกแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์และให้อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์.....	88
4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของแผ่นสารตัวอย่างที่เป็น.....	90
ก. แผ่นกระจกสไลด์	
ข. ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe$ ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิกแก่แผ่นฐานรองรับ 100 องศาเซลเซียส.....	91
4.13 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานของแผ่นสารตัวอย่างที่เป็น.....	91
ก. แผ่นกระจกสไลด์	
ข. ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe$ ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิกแก่แผ่นฐานรองรับ 100 องศาเซลเซียส.....	92
4.14 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{R_0}{R}\right)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe$ /slide glass ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยไม่ให้อุณหภูมิกกับแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ และให้อุณหภูมิกกับแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ 50 องศาเซลเซียส และ 100 องศาเซลเซียส.....	92
4.15 แสดงแผนภาพของสิ่งประดิษฐ์ของสารกึ่งตัวนำ $CdTe$ ที่ใช้ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่า กระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า ในแบบแวนดิง (VTM) เมื่อไบแอสขั้วไฟฟ้าด้านล่างด้วยแรงดันไฟลบ.....	94
4.16 แสดงแผนภาพของสิ่งประดิษฐ์ของสารกึ่งตัวนำ $CdTe$ ที่ใช้ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่า กระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า ในแบบแวนอน (LTM) เมื่อไบแอสขั้วไฟฟ้าพื้นที่ใหญ่ด้วยแรงดันไฟลบ.....	94

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.17 แสดงกำแพงศักย์ตรงบริเวณรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ CdTe ของ สิ่งประดิษฐ์ที่ใช้ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่า กระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า ทั้งในแบบแนวตั้งและในแบบแนวนอน .....	94
4.18 แสดงแผนภาพของโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อระหว่าง CdTe/Cu <sub>x</sub> Te/โลหะ.....	95
4.19 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนกลับของพื้นที่ขั้วไฟฟ้ากับความต้านทานรวมเพื่อ หาความต้านทานจำเพาะของรอยต่อ ไอหุ้มมิคของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้าง แบบ Cu/ CdTe /Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส โดยทำ การวัดในแบบแนวตั้ง.....	96
4.20 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า กระแสไฟฟ้า - แรงดันไฟฟ้า เพื่อแสดงค่ากระแส ริชาร์ดสัน โดยทำการวัดในแบบแนวตั้ง (vertical transmission line ) ผ่านขั้วไฟฟ้าที่มี พื้นที่ต่างกันเมื่อวัดในแบบแนวตั้งที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของรอยต่อ ไอหุ้มมิคของสิ่งประดิษฐ์ สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อน ในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส .....	97
4.21 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \frac{I_0}{T^2}$ กับ $\frac{1000}{T}$ เพื่อหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ใน แนวตั้งของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Cu ที่เตรียมได้โดย วิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็น กระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส.....	98
4.22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูงของกำแพงศักย์ ( $\phi_{B0}$ ) กับอุณหภูมิของสิ่ง ประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารด้วย ความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส .....	99
4.23 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(2kT/q)^{-1}$ กับ $\phi_{B0}$ ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มี โครงสร้างแบบ Cu / CdTe / Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนใน ระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส .....	100

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(I_s/T^2) - (q^2\sigma_s^2/2k^2T^2)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของ สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Cu ที่เตรียมได้โดย วิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่ แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส .....100	100
4.25 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \frac{R_0}{R}$ กับ $\frac{1000}{T}$ เพื่อแสดงค่าพลังงานกระตุ้น ( $E_a$ ) ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหย สารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็น กระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส .....101	101
4.26 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า เพื่อแสดงค่ากระแส ริชาร์ดสันเมื่อวัดในแบบแวนอนที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของรอยต่อโอห์มมิกของสิ่งประดิษฐ์ สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความ ร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส .....102	102
4.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \frac{I_0}{T^2}$ กับ $\frac{1000}{T}$ เพื่อหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ใน แนวราบของสิ่งประดิษฐ์ที่มีโครงสร้าง Cu/CdTe/Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมี ด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส.....103	103
4.28 แสดงค่าความสูงของกำแพงศักย์ ( $\phi_{B0}$ ) ที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิของสิ่งประดิษฐ์ สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมี ด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็น กระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส .....104	104
4.29 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(2kT/q)^{-1}$ กับ $\phi_{B0}$ ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อน ในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส .....104	104

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.30 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(I_s/T^2) - (q^2\sigma_s^2/2k^2T^2)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส .....	105
4.31 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \frac{R_0}{R}$ กับ $\frac{1000}{T}$ เพื่อแสดงค่าพลังงานกระตุ้น ( $E_g$ ) ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส .....	106
4.32 แสดงความสูงของกำแพงศักย์.....	107
ก. ที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe/โลหะ ข. ที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe/ชั้นไดโพล/โลหะ	
4.33 แสดงแผนภาพลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อระหว่าง CdTe/Sb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> /โลหะ.....	108
4.34 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนกลับของพื้นที่ขั้วไฟฟ้ากับความต้านทานรวม โดยทำการวัดในแบบแนวตั้งเพื่อหาความต้านทานจำเพาะของรอยต่อโอห์มมิกของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Sb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> /CdTe/Sb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส .....	109
4.35 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า เมื่อวัดในแบบแนวตั้งที่อุณหภูมิต่าง ๆ เพื่อแสดงค่ากระแสรีชาร์ดสัน ของรอยต่อโอห์มมิกของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Sb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> /CdTe/Sb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส .....	110

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.36 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \frac{I_0}{T^2}$ กับ $\frac{1000}{T}$ เมื่อวัดในแนวดิ่งเพื่อหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ $Sb_2Te_3/CdTe/Sb_2Te_3$ ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส.....	111
4.37 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูงของกำแพงศักย์ ( $\phi_{B0}$ ) กับอุณหภูมิของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ $Sb_2Te_3/CdTe/Sb_2Te_3$ ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส .....	112
4.38 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(2kT/q)^{-1}$ กับ $\phi_{B0}$ ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ $Sb_2Te_3/CdTe/Sb_2Te_3$ ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส.....	112
4.39 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(I_s/T^2)-(q^2\sigma_s^2/2k^2T^2)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ $Sb_2Te_3/CdTe/Sb_2Te_3$ ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส .....	113
4.40 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \frac{R_0}{R}$ กับ $\frac{1000}{T}$ เพื่อแสดงค่าพลังงานกระตุ้น ( $E_s$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ $Sb_2Te_3/CdTe/Sb_2Te_3$ ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส .....	114
4.41 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า เมื่อวัดในแบบแวนนอนที่อุณหภูมิต่าง ๆ เพื่อแสดงค่ากระแสรีชาร์ดสันของรอยต่อโอห์มมิกของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ $Sb_2Te_3/CdTe/Sb_2Te_3$ ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส .....	114

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.42 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \frac{I_0}{T^2}$ กับ $\frac{1000}{T}$ เมื่อวัดในแนวนอนเพื่อหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้าง $Sb_2Te_3/CdTe/Sb_2Te_3$ ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส.....	115
4.43 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของค่าความสูงของกำแพงศักย์ ( $\phi_{B0}$ ) ที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ $Sb_2Te_3/CdTe/Sb_2Te_3$ ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบ สุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส.....	116
4.44 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(2kT/q)^{-1}$ กับ $\phi_{B0}$ ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ $Sb_2Te_3/CdTe/Sb_2Te_3$ ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส.....	117
4.45 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(I_s/T^2) - (q^2\sigma_s^2/2k^2T^2)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ $Sb_2Te_3/CdTe/Sb_2Te_3$ ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส.....	117
4.46 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \frac{R_0}{R}$ กับ $\frac{1000}{T}$ เพื่อแสดงค่าพลังงานกระตุ้น ( $E_a$ ) ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ $Sb_2Te_3/CdTe/Sb_2Te_3$ ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส .....	118
4.47 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนกลับของพื้นที่ขั้วไฟฟ้ากับความต้านทานรวมโดยทำการวัดในแนวดิ่งเพื่อหาความต้านทานจำเพาะของรอยต่อโอห์มมิกของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ $Cu/CdTe/Sb_2Te_3/Cu$ ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส .....	119

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.48 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า เมื่อวัดในแนวตั้งผ่าน ขั้วไฟฟ้าที่มีพื้นที่ต่างกันที่อุณหภูมิต่าง ๆ เพื่อแสดงค่ากระแสรีชาร์ดสัน ของรอยต่อ ไอหุ้มมิกของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Sb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> /Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิ แก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส.....120	120
4.49 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \frac{I_0}{T^2}$ กับ $\frac{1000}{T}$ เมื่อวัดในแนวตั้งเพื่อหาค่าความสูง ของกำแพงศักย์ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Sb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> /Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิ แก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส .....121	121
4.50 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูงของกำแพงศักย์ ( $\phi_{B0}$ ) กับอุณหภูมิ ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Sb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> /Cu ที่เตรียมได้โดย วิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับ ที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส .....122	122
4.51 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(2kT/q)^{-1}$ กับ $\phi_{B0}$ ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Sb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> /Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อน ในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส .....123	123
4.52 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(I_S/T^2) - (q^2\sigma_s^2/2k^2T^2)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของสิ่งประดิษฐ์ สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Sb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> /Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมี ด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส .....123	123
4.53 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \frac{R_0}{R}$ กับ $\frac{1000}{T}$ เพื่อแสดงค่าพลังงานกระตุ้น ( $E_g$ ) ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Sb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> /Cu ที่เตรียมได้โดย วิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับ ที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส .....124	124

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.54 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า เมื่อวัดในแบบแนวนอน ที่อุณหภูมิต่าง ๆ เพื่อแสดงค่ากระแสชาร์ดสัน ของรอยต่อโอห์มมิกของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Sb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> /Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส .....	125
4.55 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \frac{I_0}{T^2}$ กับ $\frac{1000}{T}$ เมื่อวัดในแนวนอนเพื่อหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Sb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> /Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส.....	126
4.56 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของค่าความสูงของกำแพงศักย์ ( $\phi_{B0}$ ) ที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Sb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> /Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส .....	127
4.57 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\phi_{B0}$ กับ $(2kT/q)^{-1}$ ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Sb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> /Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส .....	127
4.58 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(I_S/T^2) - (q^2\sigma_s^2/2k^2T^2)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Sb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> /Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส.....	128
4.59 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \frac{R_0}{R}$ กับ $\frac{1000}{T}$ เพื่อแสดงค่าพลังงานกระตุ้น ( $E_g$ ) ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Sb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> /Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส .....	129

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.60	
แสดงวงจรสมมูลที่ใช้เป็นแบบจำลองในการศึกษาแอดมิตแตนซ์สเปกโตรสโคปี	
เมื่อทำการทำการวัดที่อุณหภูมิต่าง ๆ ในช่วงความถี่ 2 kHz ถึง 2 MHz ของ	
สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Sb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> /Cu ที่เตรียมโดย	
วิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่	
แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส .....129	
4.61	
แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้ากับความถี่ ส่วนจินตภาพของความนำ	
ไฟฟ้ากับความถี่และส่วนจินตภาพของความนำไฟฟ้ากับความนำไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่	
อุณหภูมิ 100 K ในช่วงความถี่ 2 kHz ถึง 2 MHz ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มี	
โครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Sb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> /Cu ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อน	
ในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	
เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส .....130	
4.62	
แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้ากับความถี่ ส่วนจินตภาพของความนำ	
ไฟฟ้ากับความถี่และส่วนจินตภาพของความนำไฟฟ้ากับความนำไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่	
อุณหภูมิ 150 K ในช่วงความถี่ 2 kHz ถึง 2 MHz ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มี	
โครงสร้าง แบบ Cu/CdTe/Sb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> /Cu ที่เตรียม โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อน	
ในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	
เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส.....131	
4.63	
แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้ากับความถี่ ส่วนจินตภาพของความนำ	
ไฟฟ้ากับความถี่และส่วนจินตภาพของความนำไฟฟ้ากับความนำไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่	
อุณหภูมิ 200 K ในช่วงความถี่ 2 kHz ถึง 2 MHz ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มี	
โครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Sb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> /Cu ที่เตรียม โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อน	
ในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	
เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส.....132	

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.64	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้ากับความถี่ ส่วนจินตภาพของความนำไฟฟ้ากับความถี่และส่วนจินตภาพของความนำไฟฟ้ากับความนำไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 250 K ในช่วงความถี่ 2 kHz ถึง 2 MHz ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Sb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> /Cu ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส.....133
4.65	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้ากับความถี่ ส่วนจินตภาพของความนำไฟฟ้ากับความถี่และส่วนจินตภาพของความนำไฟฟ้ากับความนำไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 300 K ในช่วงความถี่ 2 kHz ถึง 2 MHz ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Sb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> /Cu ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส.....134
4.66	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \frac{R_0}{R}$ กับ $\frac{1000}{T}$ ที่ได้จากการวัดค่าแอดมิตแตนซ์ในช่วงความถี่ 2 kHz ถึง 2 MHz เพื่อแสดงค่าพลังงานกระตุ้น ( $E_a$ ) ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Sb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> /Cu ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส.....135
4.67	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า โดยทำการวัดที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน ของไดโอด CdS/CdTe ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส.....138
ก.	แสดงกราฟความสัมพันธ์ตั้งแต่ช่วงไบแอสกลับทางถึงช่วงไบแอสตรง
ข.	แสดงกราฟความสัมพันธ์ในช่วงไบแอสตรง
4.68	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า ลอการิทึมของกระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน เพื่อหาค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับที่สอดคล้องกับกลไกการนำไฟฟ้าแบบเทอร์มิโอนิกอิมิสชันของไดโอด CdS/CdTe ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส .....139

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.69 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า ลอการิทึมของกระแสไฟฟ้า-ลอการิทึมของแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน ของไดโอด CdS / CdTe ที่เตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส .....	139
4.70 แสดงการจำลองกราฟเพื่อหาค่าแฟกเตอร์อุดมคติจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า โดยทำการวัดที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน ที่สอดคล้องกับกลไกการนำไฟฟ้าในช่วงเทอร์มิโอนิกอิมิสชันของไดโอด CdS/CdTe ที่เตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส .....	140
4.71 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $dV/dlnI$ กับ $I$ โดยทำการวัดที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน เพื่อหาค่าแฟกเตอร์อุดมคติที่สอดคล้องกับกลไกการนำไฟฟ้าในช่วงกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้าง (SCLC) และค่าความต้านทานอนุกรมของไดโอด CdS/CdTe ที่เตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส.....	140
4.72 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $H$ กับกระแสไฟฟ้า โดยทำการวัดที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน เพื่อหาความสูงของกำแพงศักย์ในช่วงกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้างของไดโอด CdS/CdTe ที่เตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส .....	141
4.73 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $dV/dI$ กับ $V$ โดยทำการวัดที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน เพื่อหาค่าความต้านทานชนิดและค่าความต้านทานอนุกรมของไดโอด CdS/CdTe ที่เตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส .....	141
4.74 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนกลับกำลังสองของค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่ความถี่ 1 MHz ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน เพื่อหาค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมรอยต่อระหว่าง CdS/CdTe ของไดโอด CdS/CdTe ที่เตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส.....	142

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย [1-2]

จากวิกฤตการราคาน้ำมันที่เพิ่มขึ้นสูงอย่างมากทั่วโลก ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าแหล่งพลังงานที่ได้จากฟอสซิลกำลังจะหมดไปจากโลกในเวลาอันใกล้ และรัฐบาลกำลังเร่งหามาตรการต่าง ๆ เพื่อประหยัดพลังงาน รวมทั้งแสวงหาแหล่งพลังงานใหม่ ๆ เพื่อมาทดแทนน้ำมัน พลังงานจากแสงอาทิตย์ก็เป็นทางเลือกอีกทางหนึ่ง เนื่องจากเป็นพลังงานทดแทนที่สะอาด ไม่สร้างมลภาวะขณะใช้งานและยังเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์ชนิดหนึ่งที่สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง เซลล์แสงอาทิตย์มีอายุการใช้งานมากกว่า 20 ปี ดังนั้นเซลล์แสงอาทิตย์จึงเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่มีต้นทุนต่ำ ใช้ได้ในระยะยาวนาน

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าได้ โดยอาศัยปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก ซึ่งค้นพบครั้งแรกโดยเบกเคอเรล ในปี ค.ศ. 1839 จากการศึกษาสมบัติของของแข็งที่อยู่ภายในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ขณะมีการฉายแสงอาทิตย์ลงบนตัวเซลล์จะปรากฏมีความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าขึ้นที่ขั้วไฟฟ้า งานวิจัยและการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ของหัวต่อพี-เอ็นของสารกึ่งตัวนำ Si เริ่มขึ้นในปี พ.ศ. 2497 หลังจากนั้นงานวิจัยก็แผ่ขยายไปสู่สารกึ่งตัวนำในกลุ่ม II-VI และ I-III-VI<sub>2</sub> เช่น CdTe, CdS, CuInSe<sub>2</sub> และ CuInGaSe<sub>2</sub> เป็นต้นซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์ของสารกึ่งตัวนำในกลุ่ม II-VI ชนิดแรกคือเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหัวต่อ Cu<sub>2</sub>S/CdS ได้รับการพัฒนาขึ้นมาในเวลาใกล้เคียงกับเซลล์แสงอาทิตย์ของสารกึ่งตัวนำ Si สำหรับ CdTe ก็เป็นสารกึ่งตัวนำในกลุ่ม II-VI อีกชนิดหนึ่ง ที่มีโครงสร้างแถบพลังงานเป็นแบบตรงและมีขนาดของช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 1.45 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งเหมาะสำหรับประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์อย่างมากเนื่องจากช่องว่างแถบพลังงานสอดคล้องกับช่วงพลังงานของสเปกตรัมแสงอาทิตย์ที่มีความเข้มสูงสุด สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงมีค่าสูงประมาณ 10<sup>5</sup> ต่อเซนติเมตร ดังนั้นความต้องการให้สารกึ่งตัวนำ CdTe เป็นชั้นบาง ๆ ซึ่งมีความหนาน้อยกว่า 0.5 ไมโครเมตร ก็เป็นการเพียงพอเพื่อเป็นชั้นดูดกลืนแสงที่ดี เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหัวต่อวิวิธพันธ์ทำให้ประสิทธิภาพสูงจะประดิษฐ์ได้จากการระเหิดสารเคมีในระบบสุญญากาศ โดยให้ภาชนะระเหิดสารตั้งต้นอยู่ใกล้กับแผ่นฐานรองรับ โดยไม่เกิน 2 เซนติเมตร ซึ่งเรียกวินี้ว่าวิธีระเหิดสารในระบูปริชิต (closed space sublimation : CSS) อุณหภูมิของภาชนะระเหิดสารตั้งต้นประมาณ 500 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับต่ำกว่าอุณหภูมิของภาชนะระเหิดสารประมาณ 50 องศาเซลเซียส และฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS เหมาะสำหรับเป็นชั้นหน้าต่างของเซลล์แสงอาทิตย์

ชนิด CdS/CdTe และ CdS/CuInGaSe<sub>2</sub> เนื่องจาก CdS เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแถบพลังงานเป็นแบบตรงและมีขนาดของช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 2.42 อิเล็กตรอน โวลต์และสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงมีค่าสูงในระดับ  $10^5$  ต่อเซนติเมตร

ในเชิงทฤษฎีเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่ออวิวิพันธ์ชั้นเดียว (single heterojunction) ของฟิล์มบาง CdS/CdTe สามารถให้ประสิทธิภาพสูงถึง 29 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ยังสามารถที่จะเพิ่มประสิทธิภาพให้เพิ่มสูงขึ้นได้อีก อีกทั้งสารประกอบกึ่งตัวนำ CdTe มีเสถียรภาพสูงมาก ดังนั้นโอกาสที่จะดอมโลหะ Cd จะหลุดเข้าไปปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมจึงเป็นไปได้น้อย

ขั้วไฟฟ้าด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์มีความสำคัญมาก เนื่องจากจะต้องเป็นรอยต่อแบบโอห์มมิก เพื่อลดปัญหาความต้านอนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งความต้านอนุกรมนี้จะทำให้กระแสลัดวงจร (short circuit current) มีค่าลดลง ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เป็นอย่างมาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องพัฒนาขั้วไฟฟ้าด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อให้เป็นรอยต่อโอห์มมิกที่ดี และเพื่อให้ง่ายต่อการต่อสายไฟฟ้าด้วย

การประดิษฐ์ขั้วไฟฟ้าด้านหลังมี 2 แนวทางใหญ่ ๆ แนวทางแรกคือการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่มีอะตอมของธาตุ Cu เป็นองค์ประกอบลงบนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ส่วนแนวทางที่สองคือการสร้างชั้นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่ไม่มีอะตอมของธาตุ Cu เป็นองค์ประกอบเช่น สารกึ่งตัวนำ Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> เป็นต้น จากนั้นจึงเคลือบชั้นฟิล์มบางของอะตอมของโลหะ เช่น Mo, W, Ni หรือ กราไฟต์ ทับลงไปอีกชั้นหนึ่งซึ่งมักเรียกชั้นโลหะนี้ว่าอิเล็กโทรด แล้วจึงต่อสายไฟฟ้าออกจากอิเล็กโทรด

นักวิจัยบางส่วนเลือกทำขั้วไฟฟ้าด้านหลังโดยการสร้างชั้นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่มีอะตอมของธาตุ Cu เป็นองค์ประกอบ เช่น อัลลอยด์ของ Cu-Au, Cu<sub>2</sub>Te, ZnTe:Cu และ Cu<sub>2</sub>S เป็นต้น เนื่องจากเชื่อว่าจำเป็นต้องมีอะตอมของธาตุ Cu ในการทำรอยต่อโอห์มมิกของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่มีการนำไฟฟ้าเป็นชนิดพีและการที่อะตอมของธาตุ Cu ที่แพร่เข้าไปในเนื้อของสารกึ่งตัวนำ CdTe จะช่วยทำให้ความต้านทานของสารกึ่งตัวนำ CdTe ลดลงส่งผลให้ความต้านทานอนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าลดลง ดังนั้นประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์จะมีค่าเพิ่มขึ้น แม้ว่าขั้วไฟฟ้าด้านหลังชนิดนี้จะใช้งานได้ดี แต่ทว่ากลับก่อให้เกิดปัญหาในระยะยาว เมื่อใช้เซลล์แสงอาทิตย์ไปเป็นระยะเวลา 10-20 ปี กล่าวคือเนื่องจากอะตอมของธาตุ Cu จะแพร่เข้าไปตามบริเวณขอบเขตรอยต่อของเกรน (grain boundaries) จนกระทั่งถึงรอยต่อพี-เอ็น ซึ่งจะก่อให้เกิดสะพานไฟ (shunting paths) แล้วเซลล์แสงอาทิตย์จะเสื่อมสภาพลง จากปัญหาดังกล่าวนี้ทางมหาวิทยาลัยพาร์มา (Parma university) ของประเทศอิตาลีได้เสนอให้ใช้สารกึ่งตัวนำ Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพีที่มีช่องว่างแถบพลังงานประมาณ 0.3 อิเล็กตรอน โวลต์ และมีสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำมากระดับ  $2 \times 10^{-4}$  โอห์ม-เซนติเมตร โดยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>

สามารถเตรียมได้โดยวิธีสปัตเตอร์ริงและโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

จากแนวทางดังกล่าวนี้ ทางกลุ่มวิจัยเลือกที่จะประดิษฐ์ขั้วไฟฟ้าด้านหลังโดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Sb_2Te_3$  ลงบนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $CdTe$  โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เนื่องจากเป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อนไม่ต้องใช้วิธีการกัดผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $CdTe$  ด้วยสารละลายเคมี และ  $Sb$  เป็นอะตอมของธาตุหมู่ V ซึ่งสามารถเจือเข้าไปในตำแหน่งอะตอมของธาตุ  $Te$  ซึ่งเป็นอะตอมของธาตุหมู่ VI ได้โดยจะให้การนำไฟฟ้ายังคงเป็นชนิดพี

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 ทำการเคลือบฟิล์มบาง  $CdTe, Cu$  และ  $Sb_2Te_3$  ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ
- 1.2.2 นำฟิล์มบาง  $CdTe, Cu$  และ  $Sb_2Te_3$  ที่เตรียมได้ไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
- 1.2.3 นำฟิล์มบาง  $CdTe, Cu$  และ  $Sb_2Te_3$  ที่เตรียมได้ไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์
- 1.2.4 นำฟิล์มบาง  $CdTe$  ไปศึกษาสมบัติการส่งผ่านแสงและหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน
- 1.2.5 นำฟิล์มบาง  $CdTe$  ไปศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยการวัดแบบวิธีสองขั้ว
- 1.2.6 นำฟิล์มบาง  $CdTe$  ไปศึกษาความต้านทานไฟฟ้าที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ
- 1.2.7 ศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่ใช้ในการประดิษฐ์รอยต่อแบบ โอลัมมิกที่มีคุณภาพ

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาวิธีการเคลือบฟิล์มบาง  $CdTe, Cu$  และ  $Sb_2Te_3$  บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ
- 1.3.2 ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์และศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของฟิล์มบาง  $CdTe, Cu$  และ  $Sb_2Te_3$  ที่เตรียมได้
- 1.3.3 ศึกษาสมบัติการส่งผ่านแสงและหาค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $CdTe$
- 1.3.4 ศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $CdTe$  ด้วยการวัดแบบวิธีสองขั้ว

- 1.3.5 ประดิษฐ์รอยต่อแบบโอห์มมิกที่เกิดขึ้นระหว่างฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe กับฟิล์มบาง Cu บริสุทธิ์ โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ลงบนฟิล์มบางของ Cu บริสุทธิ์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ
- 1.3.6 ปรับปรุงเงื่อนไขในการเตรียมฟิล์มบางที่เหมาะสมในการทำรอยต่อแบบโอห์มมิกที่เกิดขึ้นระหว่างฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe กับฟิล์มบางของ Cu บริสุทธิ์ให้มีคุณภาพดีขึ้น โดยการเคลือบชั้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Sb_2Te_3$  แทรกขึ้นมาให้อยู่ระหว่างฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe กับฟิล์มบางของ Cu บริสุทธิ์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ
- 1.3.7 ศึกษาถึงสมบัติทางฟิสิกส์ต่าง ๆ ของรอยต่อโอห์มมิก
- 1.3.8 ศึกษาค่ากระแสรีชาร์ดสัน และความสูงของกำแพงศักย์จากฟิล์มบางที่ได้ด้วยเงื่อนไขการเตรียมฟิล์มแบบต่าง ๆ
- 1.3.9 พัฒนาระบบที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเพื่อให้เหมาะสมกับแผ่นฐานรองรับที่ซับซ้อนมากขึ้น

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ทำให้ทราบถึงเงื่อนไขที่เหมาะสมในเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีคุณภาพ
- 1.4.2 ทำให้ทราบถึงสมบัติทางฟิสิกส์พื้นฐานต่าง ๆ ของฟิล์มบาง CdTe ได้แก่โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค โครงสร้างผลึกเชิงมหภาค สมบัติทางแสงและสมบัติทางไฟฟ้า เป็นต้น
- 1.4.3 ทำให้ได้ความรู้เกี่ยวกับกระบวนการประดิษฐ์ขั้วไฟฟ้าด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์และเทคโนโลยีของการเตรียมฟิล์มบางแต่ละชั้นที่ประกอบกันขึ้นเป็นเซลล์แสงอาทิตย์
- 1.4.4 ทำให้ได้ทราบถึงสมบัติทางฟิสิกส์ต่าง ๆ ที่บริเวณรอยต่อแบบโอห์มมิกที่เกิดขึ้นระหว่างสารกึ่งตัวนำกับโลหะ
- 1.4.5 ทำให้ได้เรียนรู้วิธีการตรวจสอบสมบัติทางฟิสิกส์พื้นฐานของฟิล์มบางและสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อแบบโอห์มมิก
- 1.4.6 นำข้อมูลที่ได้จากการวิจัยมาใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่ออวิวิพันธ์ (heterojunction) ของฟิล์มบาง CdS/CdTe ต่อไป

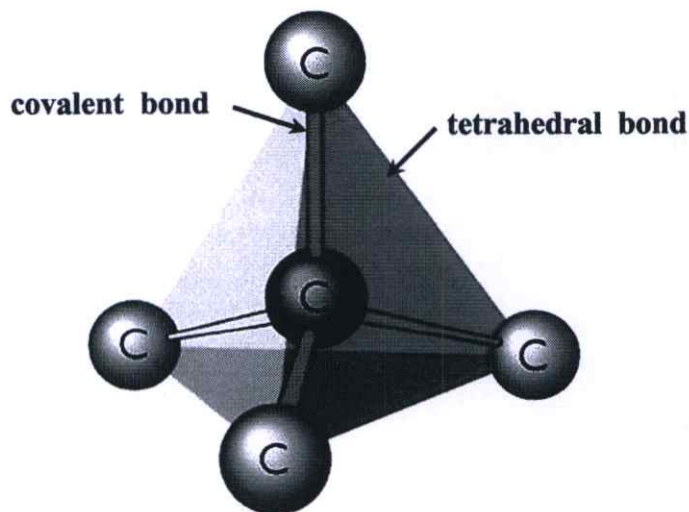
## บทที่ 2

# ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

สมบัติทางฟิสิกส์พื้นฐานของผลึกนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะของโครงสร้างผลึก และความไม่สมบูรณ์ของผลึก การวัดสมบัติทางไฟฟ้าต่าง ๆ ก็จะต้องคำนึงถึงสมบัติพื้นฐานของผลึกด้วยเพื่อให้ได้ผลการวัดที่ถูกต้อง ในบทนี้จึงจะได้กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องต่าง ๆ เทคนิคการเตรียมผลึกของฟิล์มบางและเทคนิคการวัดสมบัติทางไฟฟ้าต่าง ๆ ต่อไป

### 2.1 โครงสร้างผลึกของสารประกอบเชิงสองในตระกูลของอะตอมของธาตุที่เกิดขึ้นระหว่างหมู่ III-V หรือ II-VI [3-16]

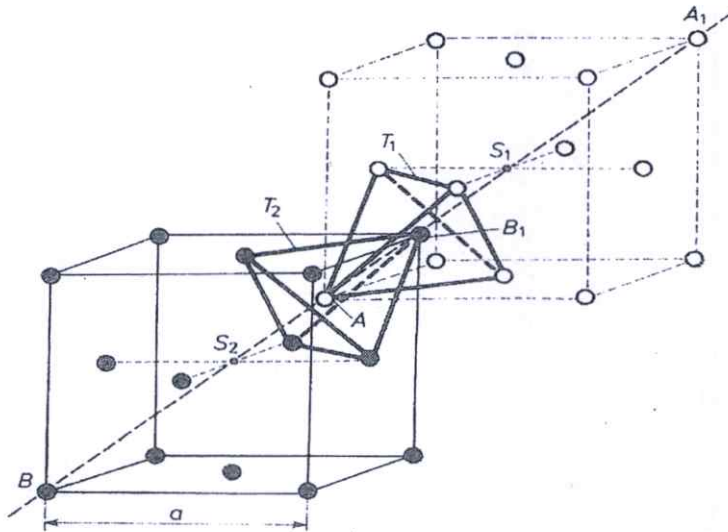
ในผลึกของสารประกอบเชิงสอง (binary compound) ในตระกูลของอะตอมของธาตุที่เกิดขึ้นระหว่างหมู่ III-V หรือ II-VI นั้นเป็นผลึกของสารประกอบที่เกิดจากการสร้างพันธะเคมีระหว่างอะตอมของธาตุกลุ่ม II (อะตอม A) และกลุ่ม VI (อะตอม B) ซึ่งมีอิเล็กตรอนวาเลนซ์ต่ออะตอมเท่ากับ 4A ใน โครงผลึกแต่ละอะตอม A หรืออะตอม B จะมีอะตอม B หรืออะตอม A ที่อยู่ใกล้เคียงที่สุด ล้อมรอบอยู่ 4 อะตอม ซึ่งมีการสร้างพันธะเคมีระหว่างอะตอมเป็นแบบพันธะโควาเลนต์ (covalent bond) และมีพันธะเคมีของโมเลกุลเป็นแบบพันธะสี่หน้าหรือพันธะเตตระฮีดรัล (tetrahedral bond) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 จากลักษณะการจัดเรียงอะตอมดังกล่าวทำให้สามารถแบ่งโครงสร้างผลึกได้ 2 แบบคือ โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ (zincblende structure) และโครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซต์ (wurtzite structure)



รูปที่ 2.1 แสดงพันธะเคมีที่เป็นแบบสี่หน้าหรือพันธะเตตระฮีดรัล

### 2.1.1 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ (zincblende structure)

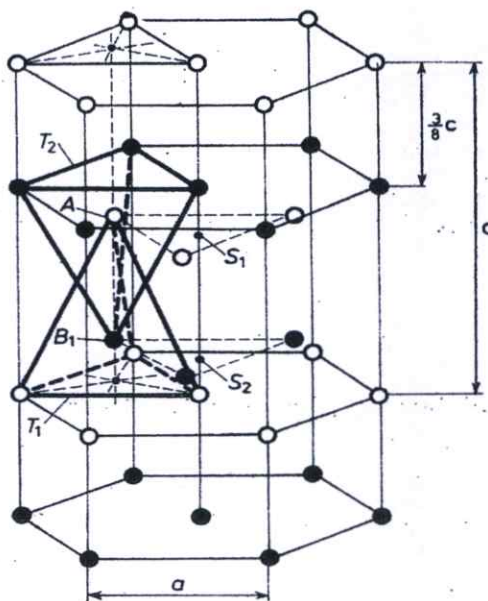
โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ (zincblende structure) เกิดจากการซ้อนเหลื่อมกันของโครงสร้างผลึกแบบเฟสเซนเตอร์คิวบิก (face centered cubic : fcc) 2 หน่วยเซลล์ ที่ตำแหน่ง  $\frac{1}{4}$  ของแนวทแยงของเซลล์แรกซึ่งมีค่าคงที่ของโครงผลึก (lattice constant) เท่ากับ  $a$  และมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่  $s_1$  (อะตอม A : สีขาว) และมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่  $s_2$  (อะตอม B : สีดำ) และหน่วยเซลล์จัดเรียงไปตามแนว  $A_1B_1$  ดังนั้นจะได้ระยะ  $AB = \frac{1}{4} AA_1 = \frac{1}{4} BB_1$  ฐานของพีระมิดสี่หน้า  $T_1$  และ  $T_2$  ขนานกันและหมุนทำมุม 60 องศา รอบแกน  $A_1B_1$  ระยะระหว่างอะตอมกับอะตอมเพื่อนบ้านที่ใกล้ที่สุด (nearest neighbors) มีค่าเท่ากับ  $d_{AB} = \frac{\sqrt{3}}{4} a$  ซึ่งลักษณะโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์แสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์

### 2.1.2 โครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไฮท์ (wurtzite structure)

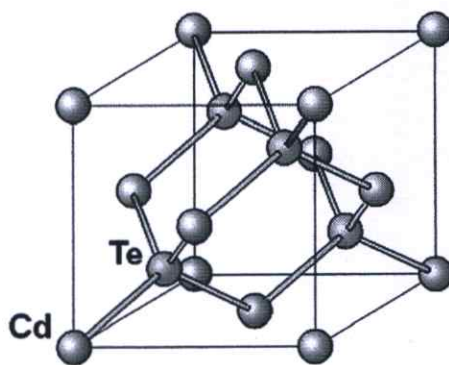
โครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไฮท์เกิดจากการซ้อนเหลื่อมกันของโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล 2 หน่วยเซลล์ ซึ่งมีค่าคงที่ของโครงผลึกเท่ากับ  $a$  และ  $c$  มีจุดศูนย์กลางอยู่ที่  $s_1$  และ  $s_2$  หน่วยเซลล์จัดเรียงไปในแนวแกน  $c$  ระยะระหว่างอะตอมกับอะตอมเพื่อนบ้านที่ใกล้ที่สุดมีค่าเท่ากับ  $d_{AB} = \frac{3}{8} c = \sqrt{\frac{3}{8}} a$  ฐานพีระมิดสี่หน้า  $T_1$  และ  $T_2$  ขนานกันและระยะระหว่างฐานมีค่าตามแนวแกน  $c$  ซึ่งลักษณะโครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไฮท์แสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซต์

## 2.2 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ของผลึก CdTe [4-7, 10, 14-16]

ผลึก CdTe เป็นสารประกอบกึ่งตัวนำหมู่ II-VI มีโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.4 มีค่าคงที่ของโครงผลึกเท่ากับ 6.481 อังสตรอม และมีความหนาแน่น 6.2 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีจุดหลอมเหลว 1040 องศาเซลเซียส เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีค่าช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 1.50 อิเล็กตรอนโวลต์ มีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงสูงในย่านความยาวคลื่นแสงที่ตามองเห็น สำหรับ CdTe ที่มีความหนาในระดับไมครอนสามารถดูดกลืนพลังงานโฟตอนได้มากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ สำหรับโฟตอนที่มีพลังงานมากกว่า 1.50 อิเล็กตรอน-โวลต์ ผลึก CdTe เสถียรที่อุณหภูมิสูงกว่า 500 องศาเซลเซียส ดังนั้นผลึก CdTe จึงเหมาะกับการนำมาใช้เป็นชั้นดูดกลืนพลังงานโฟตอนในเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ของผลึก CdTe

## 2.3 การระบุตำแหน่งของทิศทางและชื่อระนาบของผลึก [4-17]

เนื่องจากสมบัติทางฟิสิกส์ของผลึกขึ้นกับตำแหน่งของทิศทางและระนาบของผลึก ดังนั้นจึงต้องระบุแน่นอนว่ากำลังศึกษาส่วนใดของผลึกอยู่ การระบุถึงตำแหน่งของทิศทางและระนาบของผลึกที่กำลังศึกษาอยู่นั้น มีหลักเกณฑ์พื้นฐานดังนี้

### 2.3.1 การระบุตำแหน่ง

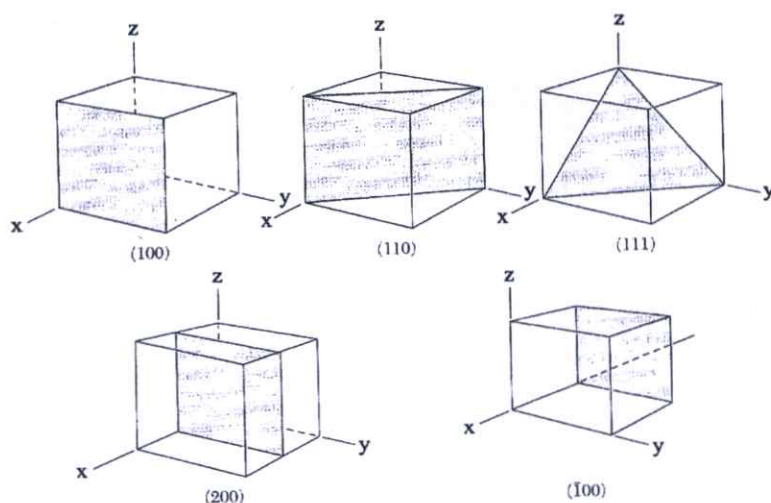
ในกรณีทั่วไปจะเขียนเป็น  $(x,y,z)$  โดยให้สังเกตเครื่องหมาย “,” ซึ่งคั่นอยู่ระหว่างค่าแต่ละค่า ตัวอย่างเช่น จุด  $(1,2,3)$  หมายความว่า เป็นตำแหน่งอยู่ที่พิกัด  $x = 1, y = 2$  และ  $z = 3$

### 2.3.2 การระบุทิศทาง

ในกรณีทั่วไปจะเขียนเป็น  $[u v w]$  โดยให้สังเกตว่าใช้วงเล็บก้ามปู และไม่มีเครื่องหมาย “,” คั่นอยู่ระหว่างค่าแต่ละค่า ถ้าเป็นทิศทางที่เป็นลบก็จะใส่เครื่องหมาย “-” หรือ บาร์(bar) ไว้บนตัวเลขนั้น ๆ 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  $(\bar{1}\bar{1}1)$  จะตัดแกนผลึกที่  $(-1,1,1)$  ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 2.5 และตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.5 แสดงการบอกชื่อระนาบต่าง ๆ ของผลึกด้วยค่าดัชนีมิลเลอร์

ตารางที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีมิลเลอร์และจุดที่ระนาบตัดแกนผลึก

จุดที่ระนาบตัดแกนผลึก (x,y,z)	ส่วนกลับของจุดที่ระนาบตัดแกนผลึก $\frac{1}{x}, \frac{1}{y}, \frac{1}{z}$	ดัชนีมิลเลอร์(hkl) หรือชื่อระนาบ ของผลึก
( $\infty, 1, \infty$ )	$\frac{1}{0}, \frac{1}{1}, \frac{1}{0}$	(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)

มีข้อสังเกตที่ควรรู้เกี่ยวกับค่าดัชนีมิลเลอร์เพิ่มเติมดังนี้

สำหรับโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลจะระบุค่าดัชนีมิลเลอร์ที่ต่างไปเป็น (hkil) แต่เนื่องจากมีสมบัติความสมมาตรของแกนผลึกจึงกำหนดให้ค่าดัชนีมิลเลอร์ตัวที่สาม (หรือ i) ซึ่งเพิ่มเข้ามานั้น จะมีความสัมพันธ์กับค่าดัชนีมิลเลอร์สองตัวแรก (h และ k) ดังนี้

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

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

## 2.4 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ [4-16]

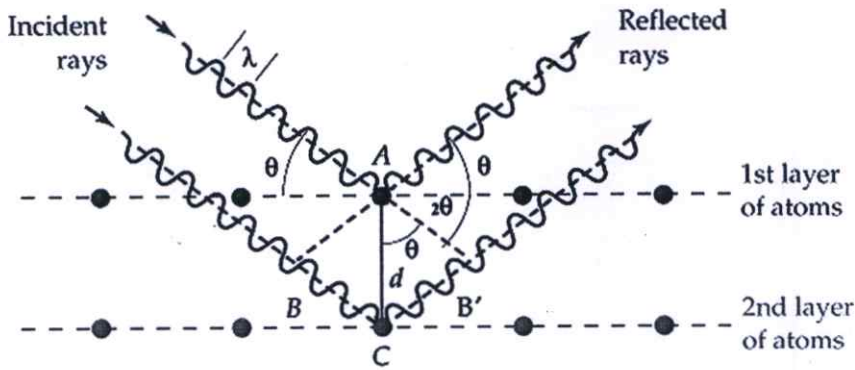
การศึกษาโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction) เป็นการศึกษาเพื่อยืนยันว่าฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้มีโครงสร้างผลึกแบบใด เป็นไปตามที่ต้องการหรือไม่ และเมื่อทราบผลแล้วจึงจะนำฟิล์มบางที่ได้ไปตรวจสอบสมบัติทางฟิสิกส์อื่น ๆ ต่อไป

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

ต่อมาในปีเดียวกันนักวิทยาศาสตร์ฟิสิกส์ชาวอเมริกันชื่อ วิลเลียม เฮนรี แบริก และวิลเลียม ลอร์เรนซ์ แบริก (William Henry Bragg and William Lawrence Bragg) ได้เสนอแนวคิดที่เราสามารถมองได้ว่าผลึกจัดเรียงตัวเป็นชั้น (layer) หรือ ระนาบ (plane) ของอะตอมซึ่งสามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบ โดยมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน และได้ตั้งกฎการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ไว้ว่า รังสีเอกซ์จะแทรกสอดเสริมกันมากที่สุดเมื่อมีการกระเจิงออกจากแต่ละระนาบด้วยระยะที่แตกต่างกันเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ และกฎนี้เรียกว่ากฎของแบรกก์ (Bragg's law) ดังสมการที่ (2.2)

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

เมื่อ	$d_{hkl}$	คือ	ระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอมในผลึกที่ขนานกัน
	$\theta$	คือ	มุมตกกระทบและมุมสะท้อนของรังสีเอกซ์ที่ทำกับระนาบของผลึก
	$2\theta$	คือ	มุมแบรกก์หรือมุมเลี้ยวเบนซึ่งเป็นมุมที่รังสีตกกระทบทำมุมกับรังสีสะท้อน
	$n$	คือ	ลำดับที่ของการเลี้ยวเบนมีค่าตั้งแต่ 1, 2, 3, ...
	$\lambda$	คือ	ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์



รูปที่ 2.6 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากระนาบผลึก

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

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

จากสมการที่ (2.2) เมื่อ  $n = 1$  แทนใส่ในสมการที่ (2.3) จะได้ความสัมพันธ์ที่ใช้หาค่าคงที่ของโครงผลึก ( $a$ ) เมื่อทราบมุมแบรกก์ ( $\theta$ ) ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ ( $\lambda$ ) และดัชนีมิลเลอร์ ( $hkl$ ) ดังสมการ

$$\frac{4 \sin^2 \theta}{\lambda^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (2.4)$$

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

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad (2.5)$$

ในทำนองเดียวกันจากสมการที่ (2.2) เมื่อ  $n = 1$  แทนใส่ในสมการที่ (2.5) จะได้ความสัมพันธ์ที่ใช้หาค่าคงที่ของโครงผลึก ( $a$ ,  $c$ ) เมื่อทราบขนาดมุมแบรกก์ ( $\theta$ ) ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ ( $\lambda$ ) และดัชนีมิลเลอร์ ( $h k l$ ) ดังสมการ

$$\frac{4 \sin^2 \theta}{\lambda^2} = \frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad (2.6)$$

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

$$TC(hkl) = \frac{\frac{I(hkl)}{I_0(hkl)}}{\frac{1}{N} \sum \frac{I(hkl)}{I_0(hkl)}} \quad (2.7)$$

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

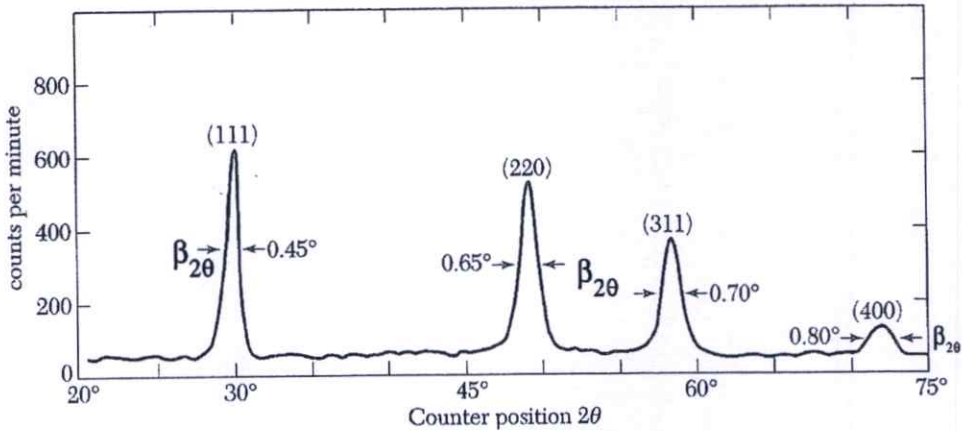
ขนาดของเกรน (D) และความเครียด ( $\epsilon_s$ ) เราสามารถหาได้จากสมการ

$$\beta = \frac{\lambda}{D \cos \theta} - \epsilon_s \tan \theta \quad (2.8)$$

ดังนั้น

$$\beta \cos \theta = \frac{\lambda}{D} - \epsilon_s \sin \theta \quad (2.9)$$

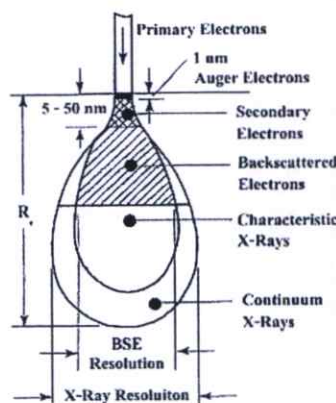
เมื่อ	D	คือ	ขนาดของเกรน
	$\beta$	คือ	ความกว้างของพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่มีความเข้มเป็นครึ่งหนึ่งของความเข้มสูงสุด (full width at half maximum :FWHM)
	$\theta$	คือ	มุมตกกระทบและมุมสะท้อนของรังสีเอกซ์ที่ทำกับระนาบของผลึก
	$\epsilon_s$	คือ	ความเครียด



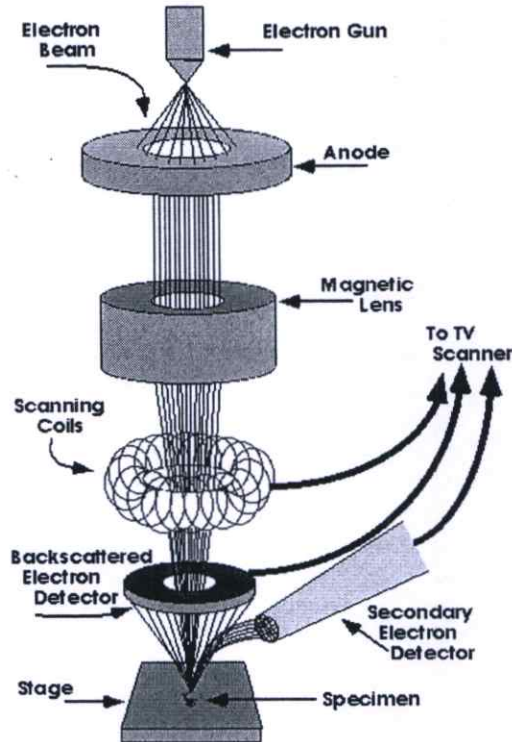
รูปที่ 2.7 แสดงวิธีการหา  $\beta_{2\theta}$  เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

## 2.5 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [5-15]

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 2.8 แสดงอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับผิวของสารตัวอย่าง



รูปที่ 2.9 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

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

ปัจจัยสำคัญสำหรับการใช้งาน SEM มีดังนี้

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

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

อันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับสารตัวอย่าง

อันตรกิริยาของลำอิเล็กตรอนที่ตกกระทบบนพื้นผิวของสารตัวอย่างจะกำเนิดสัญญาณต่างๆ ดังรูปที่ 2.9 ซึ่งสามารถแบ่งอันตรกิริยาของการชนเป็นสองลักษณะคือการชนแบบยืดหยุ่นและการชนแบบไม่ยืดหยุ่นซึ่งการชนทั้งสองลักษณะนี้จะให้ผลหรือสัญญาณที่แตกต่างกัน

#### การชนแบบยืดหยุ่น (elastic scattering)

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

#### การชนแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic scattering)

ในกรณีการชนแบบไม่ยืดหยุ่นอิเล็กตรอนปฐมภูมิจะถ่ายโอนพลังงานจนทำให้กับอิเล็กตรอนของสารตัวอย่างและทำให้อะตอมของสารตัวอย่างที่อยู่ในระดับลึกจากผิวตัวอย่างได้รับอันตรกิริยาที่แตกต่างกัน ซึ่งหลังจากการชนชนิดนี้จะกำเนิดสัญญาณหลายชนิดหลังจากการชน 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) ของธาตุในสารตัวอย่างจากสัญญาณของรังสีเอกซ์อื่นจะทำให้ทราบชนิดและปริมาณของธาตุในตัวอย่างนั้น ๆ

#### อิเล็กตรอนทุติยภูมิ

การถ่ายโอนพลังงานจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิของสารตัวอย่างไปยังบริเวณชั้นอิเล็กตรอนหรืออิเล็กตรอนของสารตัวอย่างได้รับพลังงานสูงขึ้นกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอะตอม อิเล็กตรอนจึงหลุดออกจากอะตอมกลายเป็นอิเล็กตรอนทุติยภูมิ ซึ่งสัญญาณชนิดนี้มีความสำคัญมากในการศึกษาลักษณะพื้นผิวของสารตัวอย่าง ซึ่งจะใช้ภาพของสัญญาณ SE เป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้โอกาสในการเกิดสัญญาณ SE ยังขึ้นอยู่กับความลึกที่อิเล็กตรอนปฐมภูมิจะสามารถเคลื่อนผ่านลงไปในเรื่อง

ของสารตัวอย่าง ซึ่งถ้าความถี่ของอิเล็กตรอนปฐมภูมิต่ำมากโอกาสที่จะเกิด SE นั้นก็จะน้อยลง หมายถึง สัญญาณ SE ที่หลุดออกมาจากสารตัวอย่างส่วนใหญ่จะออกมาจากบริเวณผิวของสารตัวอย่าง ทั้งนี้สามารถอธิบายได้จากสัญญาณ SE เป็นอิเล็กตรอนที่มีพลังงานต่ำ ดังนั้นเมื่ออิเล็กตรอนปฐมภูมิลงไปกระตุ้นอะตอมของตัวอย่างในบริเวณลึกจากผิวของสารตัวอย่าง โอกาสที่ SE จะหลุดออกมาจากชั้นที่อยู่ในระดับลึกนั้นมีน้อยเพราะสัญญาณ SE จะถูกดูดกลืนโดยอะตอมบนผิวก่อนที่จะเล็ดลอดออกมา

### รังสีเอกซ์

รังสีเอกซ์ที่เกิดจากการกระตุ้นโดยอิเล็กตรอนปฐมภูมิแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ รังสีเอกซ์ชนิดต่อเนื่องและรังสีเอกซ์เฉพาะธาตุ

รังสีเอกซ์ชนิดต่อเนื่องเกิดจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิทำอันตรกิริยากับอะตอมที่บริเวณสนามคูโลมบีใกล้นิวเคลียสเกิดการเปลี่ยนทิศทางและสูญเสียพลังงานอย่างรวดเร็วจึงคายพลังงานออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic field) ซึ่งจะมีพลังงานตั้งแต่ค่าสูงสุดของพลังงานอิเล็กตรอนปฐมภูมิก่อนทำอันตรกิริยาถึงค่าพลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิหลังทำอันตรกิริยาสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ (กรณี  $E_0 > E_1$ )

$$E_0 - E_1 = \Delta E = h\nu \quad (2.10)$$

เมื่อ	$E_0$	คือ	พลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิก่อนทำอันตรกิริยา
	$E_1$	คือ	พลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิหลังทำอันตรกิริยา
	$h$	คือ	ค่าคงตัวของพลังค์ (Planck constant) = $6.625 \times 10^{-34}$ จูล-วินาที
	$\nu$	คือ	ความถี่ของรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้น

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

เนื่องจากระดับพลังงานในชั้น โครจรของอิเล็กตรอนสำหรับแต่ละธาตุนั้นมีค่าไม่เท่ากันจึงสามารถนำความแตกต่างของระดับพลังงานเป็นตัวจำแนกชนิดของธาตุที่มีอยู่ในตัวอย่างซึ่งเป็นการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ และนอกจากนั้นความเข้มของรังสีเอกซ์บ่งบอกถึงปริมาณของธาตุในเนื้อตัวอย่างได้อีกด้วยซึ่งเป็นการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ

### ออเจิเล็กตรอน

ออเจิเล็กตรอนเกิดจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิตกกระทบตัวอย่างและเหนี่ยวนำให้เกิดรังสีเอกซ์เฉพาะธาตุของชั้น โครจรใด ๆ รังสีเอกซ์ที่ปลดปล่อยจากอันตรกิริยานี้มีโอกาสดำยโอนพลังงานให้กับอิเล็กตรอนชั้น โครจรถัดออกไปทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากวง โครจร ซึ่งการวิเคราะห์พลังงานออเจิเล็กตรอนนี้มีประโยชน์ในการวิเคราะห์พื้นผิวของตัวอย่าง เช่น การวัดปริมาณของธาตุที่ฉาบอยู่บนผิวที่บางมาก

### การเรืองแสงคาโทด

เป็นลักษณะเรืองแสงจากสารตัวอย่างซึ่งแสงที่เรืองนี้เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงที่ตามองไม่เห็นเกิดจากอะตอมของตัวอย่างได้รับพลังงานจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิทำให้อิเล็กตรอนในวง โครจรชั้นนอกถูกกระตุ้นและเมื่อกลับเข้าสู่ภาวะปกติอิเล็กตรอนจะคายพลังงานออกมาในลักษณะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเนื่องจากสภาวะกระตุ้นและสภาวะปกติมีช่วงพลังงานไม่ห่างกันมากเมื่อคายพลังงานออกมาแล้วทำให้ความถี่หรือความยาวคลื่นอยู่ในช่วงที่ตามองเห็นได้

### การกำเนิดภาพของสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิ

เมื่ออิเล็กตรอนจากขดลวดที่ถูกใช้เป็นไส้หลอด (filament) ถูกควบคุมให้เป็นลำอิเล็กตรอนและโฟกัสด้วยเลนส์แม่เหล็กลงบนผิวของตัวอย่างและลำอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมโดยชุดขดลวดสนามแม่เหล็กซึ่งเป็นขดลวดที่สร้างสนามแม่เหล็กเพื่อควบคุมการกราดของลำอิเล็กตรอน ไปบนผิวของสารตัวอย่าง ซึ่งการกราดบนผิวของสารตัวอย่างนี้จะทำให้ได้สัญญาณต่าง ๆ สัญญาณควบคุมการกราดบนพื้นผิวนี้อาจทำงานเข้าจังหวะกับชุดควบคุมการแสดงผลบนจอภาพ CRT จุดต่อจุดและเส้นต่อเส้นในขณะที่เดียวกันสัญญาณอิเล็กตรอนจะถูกนำไปควบคุมปริมาณความมืด-สว่างบนจอ CRT เกิดเป็นภาพขึ้นตามระนาบการกราดของอิเล็กตรอนใน SEM เนื่องจากพื้นที่แสดงผลภาพ CRT ใหญ่กว่าพื้นที่สแกนบนผิวของตัวอย่างโดยลำอิเล็กตรอนใน SEM ดังนั้นจึงสามารถหาความสัมพันธ์เพื่อหาค่าล้างขยายของภาพได้ดังนี้

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

ชุดของขดลวดสนามแม่เหล็กเป็นตัวควบคุมพื้นที่ของการกราดบนตัวอย่างของลำอิเล็กตรอน และนอกจากควบคุมพื้นที่ในการกราดแล้วยังควบคุมความเร็วในการกราดอีกด้วย โดยที่ลักษณะของความเร็วในการกราดนี้จะทำให้ภาพออกมามีความละเอียดแตกต่างกัน ถ้าเราใช้ความเร็วในการกราดมีความเร็วสูงเราจะได้ภาพที่มีความละเอียดต่ำกว่าใช้ความเร็วในการกราดต่ำ

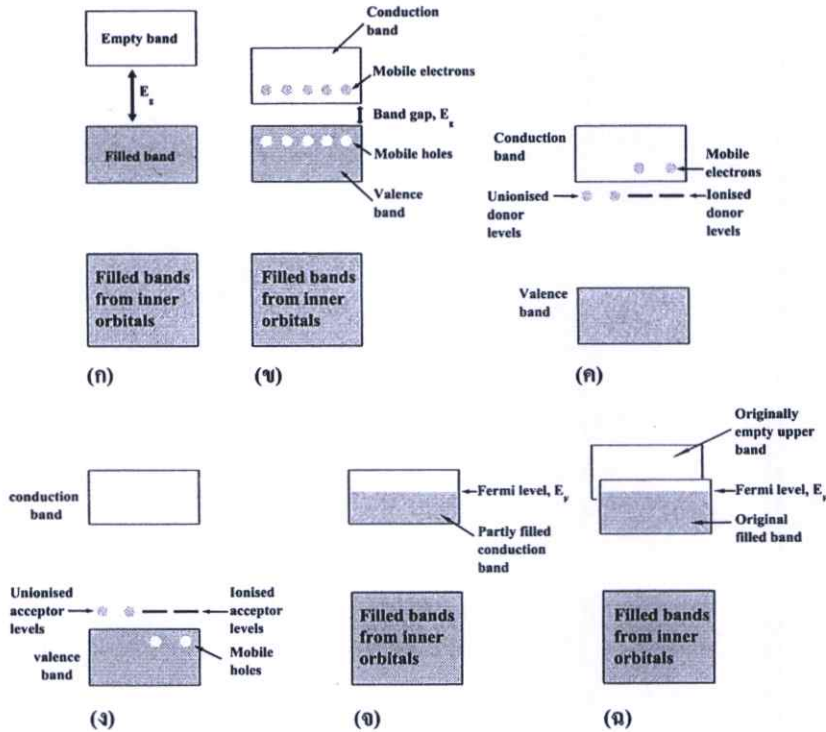
## 2.6 สมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ [4-12]

เมื่อแสงตกกระทบกับสารกึ่งตัวนำพฤติกรรมทางแสงที่สังเกตได้ก็คือ การดูดกลืน การสะท้อน และการส่งผ่านของแสง จากผลของสมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ เราสามารถหาลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน (energy band) และขนาดช่องว่างแถบพลังงาน (energy gap :  $E_g$ ) ของสารกึ่งตัวนำได้โดยจะกล่าวถึงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ การส่งผ่านแสง และการคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงานตามลำดับ

### 2.6.1 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน

ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานจะประกอบไปด้วยส่วนใหญ่อัน 3 ส่วน คือ แถบนำ (conduction band) แถบวาเลนซ์ (valence band) และแถบพลังงานต้องห้าม (forbidden band หรือ forbidden region หรือ forbidden gap) และเรียกความกว้างของช่องว่างแถบพลังงานระหว่างแถบนำกับแถบวาเลนซ์นั้นว่าช่องว่างแถบพลังงาน (energy gap) โดยเราสามารถที่จะแบ่งประเภทของวัสดุว่าเป็น ฉนวน (insulator) โลหะหรือตัวนำ (metal or conductor) และสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) ได้โดยดูจากขนาดของช่องว่างแถบพลังงานที่แตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 2.10

ในวัสดุที่เป็นฉนวนเมื่อดูจากแถบพลังงานจะเห็นได้ว่าขนาดช่องว่างแถบพลังงานจากขอบล่างสุดของแถบว่าง (แถบนำ) ถึงขอบบนสุดของแถบเต็ม (แถบวาเลนซ์) มีขนาดกว้างมากประมาณได้ว่า  $E_g \gg kT$  หรือมากกว่า 3 eV ดังแสดงในรูปที่ 2.10 (ก) การที่จะทำให้วัสดุนี้นำไฟฟ้าได้ต้องใส่พลังงานที่สูงมากเพื่อที่จะทำให้อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปยังแถบนำได้ ถ้าช่องว่างแถบพลังงานระหว่างแถบนำกับแถบวาเลนซ์มีขนาดเล็กพอที่อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ เมื่อได้รับพลังงานความร้อนสามารถเคลื่อนย้ายขึ้นไปยังแถบนำ และทำให้วัสดุนี้นำไฟฟ้าได้เราจะเรียกสารชนิดนี้ว่า สารกึ่งตัวนำชนิดอินทรินสิก (intrinsic semiconductors) ดังแสดงในรูปที่ 2.10 (ข) จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนย้ายขึ้นไปอยู่ในแถบนำแล้วจะเหลือที่ว่างไว้ในแถบวาเลนซ์ โดยจะมีสภาพทางไฟฟ้าเป็นบวก และจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงข้ามกับอิเล็กตรอนเมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า เราจะเรียกที่ว่างนี้ว่า โฮล และถ้าเราทำการเจืออะตอมของธาตุบางอย่างลงไปนในสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์แล้ว อะตอมของสารเจือประพหุติตัวเป็นอะตอมผู้ให้ ก็จะทำให้เกิดระดับพลังงานผู้ให้ โดยให้อิเล็กตรอนกับแถบนำ เราจะเรียกสารนี้ว่าสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductors)

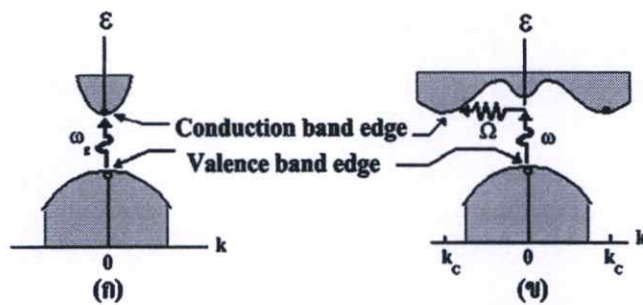


รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานอย่างง่ายของ

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

ดังแสดงในรูปที่ 2.10 (ค) และถ้าอะตอมประพหุคิตัวเป็นอะตอมผู้รับก็จะทำให้เกิดระดับพลังงานผู้รับ โดยทำการรับอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ เราจะเรียกสารนี้ว่าสารกึ่งตัวนำชนิดพี ( p-type semiconductors ) ดังแสดงในรูปที่ 2.10 (ง) สำหรับแถบพลังงานของวัสดุที่เป็นโลหะหรือตัวนำจะพบว่าอิเล็กตรอนเข้าไปอยู่ในแถบนำแล้วบางส่วนรูปที่ 2.10(จ) และเราบอกได้ว่าแถบวาเลนซ์กับแถบนำมีการซ้อนเหลื่อมกันอยู่ ทำให้สารสามารถนำไฟฟ้าได้ และในรูปที่ 2.10 (ฉ) ถ้าขอบล่างของแถบว่างที่ (n+1) ซ้อนเหลื่อมกับขอบสูงสุดของแถบที่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่ที่ n และระดับเฟอร์มิอยู่ระหว่างแถบทั้งสอง อิเล็กตรอนก็จะสามารถไหลจากแถบเต็มไปยังด้านล่างของแถบว่างได้ เราจะเรียกสารที่มีโครงสร้างแถบพลังงานแบบนี้ว่าเป็นสารกึ่งโลหะ ลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง คือ อิเล็กตรอนได้รับพลังงานโฟตอนที่มีค่าเท่ากับขนาดของช่องว่าง

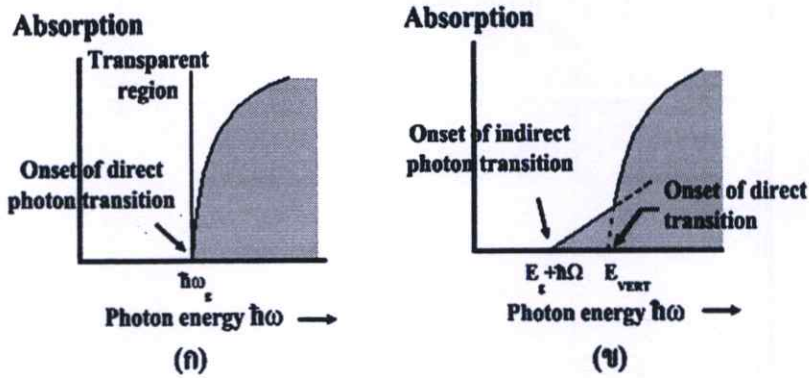
แถบพลังงาน ( $\hbar\omega = E_g$ ) อิเล็กตรอนจะดูดกลืนพลังงานโฟตอนนั้นและอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นจึงย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำกลายเป็นอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ โดยไม่มีการสูญเสียพลังงานให้แก่โครงสร้างผลึก คือ ไม่มีการสร้างหรือทำลายโฟนอน ดังแสดงในรูปที่ 2.11 (ก) และเมื่อเขียนกราฟระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนจะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 2.12 (ก) และลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง คือ โครงสร้างแถบพลังงานที่มีจุดต่ำสุดของแถบวาเลนซ์ไม่อยู่ที่ตำแหน่งเวกเตอร์คลื่นค่าเดียวกันหรืออยู่ที่ตำแหน่งโมเมนตัมของคลื่นไม่เท่ากัน ดังนั้นอิเล็กตรอนจะต้องได้รับพลังงานโฟตอนที่มีค่ามากกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ในกรณีนี้มีกระบวนการสร้างโฟนอนเกิดขึ้น ( $\hbar\omega = E_g + \hbar\Omega$ ) เมื่อ  $\Omega$  คือค่าความถี่เชิงมุมของพลังงานโฟนอน ซึ่งมีค่าน้อยกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงานหรือในกรณีที่มีการทำลายล้างโฟนอน ( $\hbar\omega = E_g - \hbar\Omega$ ) นั่นคือเมื่ออิเล็กตรอนที่อยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นการย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำจะมีการปล่อยโฟนอน (emitted phonon) ที่มีความถี่เชิงมุม  $\Omega$  มีเวกเตอร์คลื่น  $K \cong k_c$  ออกมา จึงเกิดการสร้างโฟนอน ( $E_g + \hbar\Omega$ ) และการสร้างอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ ( $E_{\text{VERT}}$ ) ขึ้นมาในกระบวนการนี้ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 (ข) และเมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนจะได้ดังแสดงในรูปที่ 2.12 (ข)



รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานและการย้ายสถานะของพลังงานอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสมบูรณ์ ( $T = 0 \text{ K}$ )

ก. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง

ข. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง



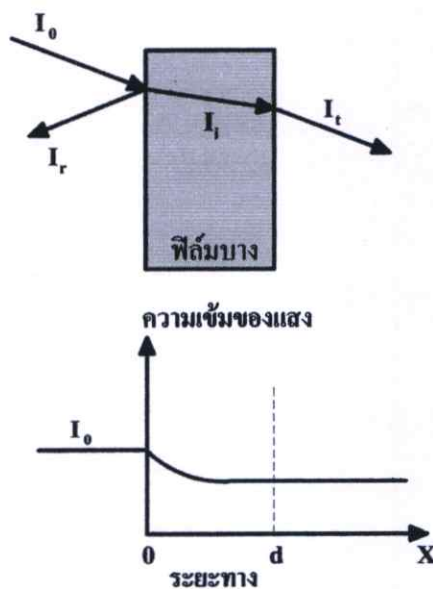
รูปที่ 2.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน โฟตอนกับพลังงาน โฟตอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ( $T = 0 \text{ K}$ )

ก. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง

ข. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงในกรณีที่เกิดกระบวนการสร้างโฟนอน

### 2.6.2 การส่งผ่านแสง

การศึกษาวิธีวัดสเปกตรัมการสะท้อนและการส่งผ่านแสงนี้จะกล่าวถึงสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงและองค์ประกอบของการวัดสเปกตรัมการส่งผ่านแสง เมื่อแสงเดินทางไปกระทบฟิล์มบาง แสงบางส่วนจะสะท้อนกลับที่ผิวของฟิล์มบาง บางส่วนของแสงจะเดินทางเข้าไปในแผ่นฟิล์มบาง และถูกดูดกลืน ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงแผนภาพเมื่อแสงตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มบาง

สัมประสิทธิ์การสะท้อนของแสงมีค่าเป็น

$$R = \frac{I_r}{I_0} \quad (2.11)$$

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

เพราะฉะนั้น ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางมีค่า

$$I_i = I_0 - I_r = I_0 - RI_0 = (1 - R)I_0 \quad (2.12)$$

เมื่อแสงนี้เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางจะถูกดูดกลืนทำให้ความเข้มแสงภายในแผ่นฟิล์มบางลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลตามระยะทาง ดังนั้นความเข้มแสงที่ส่งผ่านฟิล์มบางมีค่าเป็น

$$I_t = I_i \cdot e^{-\alpha d} = (1 - R)I_0 \cdot e^{-\alpha d} \quad (2.13)$$

ถ้าไม่มีการสะท้อนแสงที่ผิวด้านหลัง สัมประสิทธิ์การส่งผ่านของแสงจะมีค่าเท่ากับ

$$T = \frac{I_t}{I_0} = (1 - R)e^{-\alpha d} \quad (2.14)$$

### 2.6.3 การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ

เมื่อแสงตกกระทบบนสารกึ่งตัวนำ ด้วยความเข้ม  $I_0$  แสงบางส่วนจะส่งผ่านออกไปบางส่วนถูกดูดกลืนและส่วนที่เหลือจะสะท้อนกลับมา ดังแสดงในรูปที่ 2.23 โดย

$$T + A + R = 1 \quad (2.15)$$

เมื่อ T คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง  
 A คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง  
 R คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง

โดยที่ 
$$R = \frac{(n-1)^2 + K^2}{(n+1)^2 + K^2} \quad (2.16)$$

และค่าดัชนีหักเหของผลึก 
$$n_c = n - iK \quad (2.17)$$

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

#### 2.6.4 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง

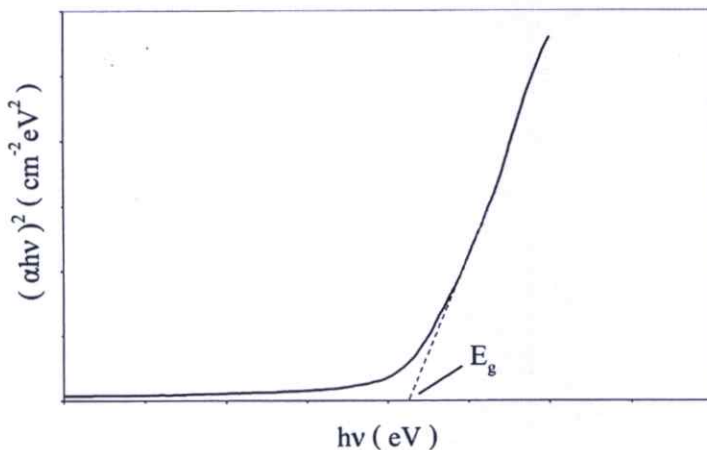
การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ เกิดจากการที่อิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากแสงที่มีพลังงานโฟตอนเท่ากับหรือมากกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงาน จากนั้นจึงย้ายสถานะพลังงานจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปสู่ แถบนำ สเปกตรัมการดูดกลืนแสงบริเวณที่พลังงานโฟตอนมีค่าน้อยจะมีลักษณะเป็นขอบแสดงถึงการลดลงของการดูดกลืนแสงอย่างฉับพลันขอบลักษณะนี้เรียกว่าขอบการดูดกลืนแสง (absorption edge) หรือขอบการดูดกลืนพื้นฐาน (fundamental edge) พลังงานโฟตอนที่ขอบการดูดกลืนแสง มีค่าเท่ากับผลต่างของค่าพลังงานที่วัดจากจุดต่ำสุดของแถบนำกับจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ จุดที่เส้นตรงตัดกับแกนในแนวนอน จะให้ค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) วิธีการนี้เป็นการกำหนดค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่นิยมมากที่สุด

การหาค่าของช่องว่างแถบพลังงาน สามารถพิจารณาได้จากสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ( $\alpha$ ) ของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (T) จากรูปที่ 2.13 แสดงภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบจากด้านซ้ายของฟิล์มบาง ( $I_0$ ) ความเข้มแสงภายในฟิล์มบางจะลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลและมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง โดยทั่วไปการสะท้อน (R) มีค่าน้อยมากและมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับความยาวคลื่นแสงที่ตกกระทบดังนั้น

$$T = e^{-\alpha d} \quad (2.18)$$

จะได้ว่า

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln\left(\frac{1}{T}\right) \quad (2.19)$$



**รูปที่ 2.14** แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับพลังงานโฟตอน

ที่กล่าวมาเป็นการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง จากสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงโดยไม่คิดถึงการสะท้อนของแสง สำหรับกรณีการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเนื่องจากการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอน ในกรณีที่อิเล็กตรอนย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำที่เวกเตอร์คลื่นค่าเดียวกัน เรียกการย้ายสถานะพลังงานแบบนี้ว่าการย้ายสถานะพลังงานแบบตรง และการย้ายสถานะพลังงานแบบตรงนี้ยังแบ่งได้อีกสองชนิด คือ การย้ายสถานะพลังงานชนิดอินยอม และชนิดต้องห้าม โดยทั้งสองชนิดนี้ขึ้นกับค่าองค์ประกอบเมตริกซ์เชิงแสง (optical matrix element) ในการประมาณครั้งที่หนึ่งว่าเป็นศูนย์หรือไม่ คือ ถ้าเป็นศูนย์จะเป็นการย้ายสถานะพลังงานชนิดต้องห้าม และถ้าไม่เป็นศูนย์จะเป็นการย้ายสถานะพลังงานชนิดอินยอม เมื่อพิจารณาการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนในบริเวณตำแหน่งจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำ แสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับค่าช่องว่างแถบพลังงานซึ่งมีลักษณะเป็นพาราโบลา ช่องว่างแถบพลังงานของแผ่นฟิล์มบางประมาณได้โดยการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงซึ่งจะถูกดูดกลืนเมื่อแสงที่ตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบางมีค่าพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานต้องห้าม ที่ขอบการดูดกลืนค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนจะมีค่าเป็น

สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานชนิดอินยอมแบบตรง

$$(\alpha h\nu) = A(h\nu - E_g)^{\frac{1}{2}} \quad (2.20)$$

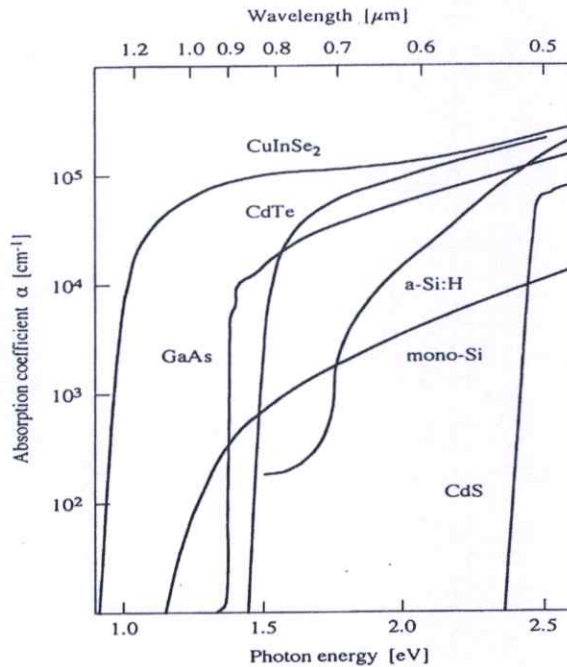
สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานชนิดอินยอมแบบเฉียง

$$(\alpha h\nu) = B(h\nu - E_g)^2 \quad (2.21)$$

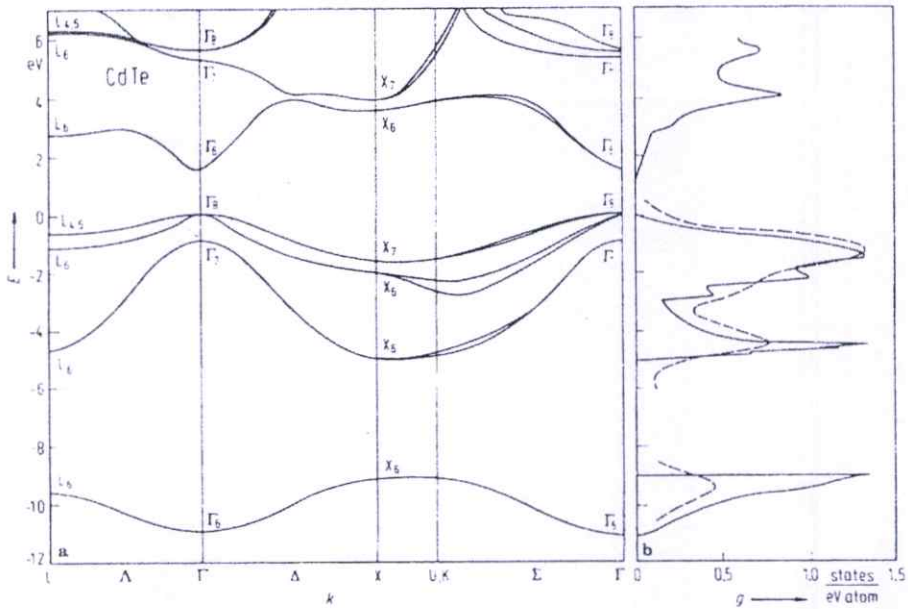
และสำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานชนิดต้องห้าม

$$(\alpha h\nu) = C(h\nu - E_g)^{\frac{3}{2}} \quad (2.22)$$

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



รูปที่ 2.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและค่าพลังงานโฟตอน หรือค่าความยาวคลื่นของพลังงาน โฟตอนของสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 2.16 แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานของ CdTe

## 2.7 สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง CdTe [3-12, 17-25]

ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน ผลึกของสารกึ่งตัวนำ CdTe ชนิดเอ็็นมีสภาพคล่องของอิเล็กตรอนประมาณ 800-900 ตารางเซนติเมตรต่อโวลต์-วินาที ส่วนสารกึ่งตัวนำ CdTe ชนิดพีมีสภาพคล่องของโฮลประมาณ 80 ตารางเซนติเมตรต่อโวลต์-วินาที ความหนาแน่นของพาหะมีค่า  $10^{16}$  ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร การแอนนีสสารกึ่งตัวนำ CdTe ชนิดเอ็็นในบรรยากาศของแคดเมียมเป็นการเพิ่มความหนาแน่นของอิเล็กตรอน ส่วนสารกึ่งตัวนำ CdTe ชนิดพีซึ่งมีความต้านทานสูงเมื่อให้ความร้อนในบรรยากาศของเทลลูเรียมจะทำให้มีความต้านทานต่ำซึ่งแสดงถึงการเพิ่มสภาพต้านทานการเพิ่มขึ้นของสภาพต้านทานเกิดขึ้นเนื่องจากเทลลูเรียมจะสร้างระดับพลังงานขึ้นภายในช่องว่างแถบพลังงาน ที่ 0.1 ถึง 0.28 อิเล็กตรอน โวลต์ ที่ระดับพลังงานสูงกว่าแถบวาเลนซ์กลไกการนำไฟฟ้าของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ขึ้นกับคุณสมบัติของผลึก จากการศึกษาของบาโกซิวนท์ (Bagociunaite) และคณะ แสดงให้เห็นถึงขอบของเกรนมีบทบาทมากกับการนำไฟฟ้าของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ จากผลการทดลองส่วนใหญ่แสดงให้เห็นถึงฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์มีความหนาแน่นอิเล็กตรอนอิสระเท่ากับ  $10^{16} - 10^{17}$  ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และสภาพคล่องของอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ 5-50 ตารางเซนติเมตรต่อโวลต์-วินาที

### 2.7.1 สภาพนำไฟฟ้า

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

$$J = \sigma E = e(\mu_n n + \mu_p p)E \quad (2.23)$$

เมื่อ  $\mu_n, \mu_p$  คือ สภาพคล่องของอิเล็กตรอนและโฮล ตามลำดับ

$n$  คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

$p$  คือ ความหนาแน่นของโฮล

ส่วนกลับของสภาพนำไฟฟ้า เรียกว่า สภาพต้านทานไฟฟ้า (resistivity : $\rho$ ) ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{e(\mu_n n + \mu_p p)} \quad (2.24)$$

ถ้ามีก้อนเนื้อสารกึ่งตัวนำซึ่งให้แรงดัน  $V$  และเกิดกระแส  $I$  แล้วจะได้ว่า

$$J = \frac{I}{A} \quad (2.25)$$

และ

$$E = \frac{V}{\ell} \quad (2.26)$$

สามารถเขียนสมการที่ (2.23) ใหม่ได้เป็น

$$\frac{I}{A} = \sigma \left( \frac{V}{\ell} \right) \quad (2.27)$$

หรือ

$$V = \left( \frac{\ell}{\sigma A} \right) I = \left( \frac{\rho \ell}{A} \right) I = IR \quad (2.28)$$

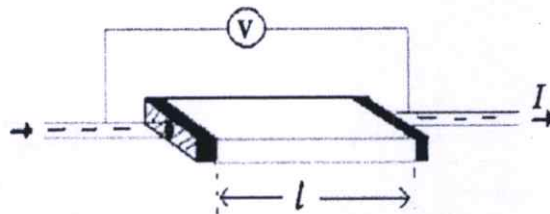
สมการที่ (2.28) คือ กฎของโอห์มสำหรับสารกึ่งตัวนำ ความต้านทานเป็นฟังก์ชันกับสภาพความต้านทานหรือสภาพนำไฟฟ้า และขึ้นกับมิติรูปทรงทางเรขาคณิตของสารกึ่งตัวนำ

### 2.7.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า

วิธีการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำสามารถกระทำได้หลายวิธี ทั้งวิธีที่ใช้ส่วนของอุปกรณ์ต่อเข้าสัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่างและวิธีที่ไม่ต้องสัมผัสโดยตรง สำหรับวิธีที่จะกล่าวถึงในที่นี้เป็นวิธีที่ใช้การสัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่าง ซึ่งทำได้โดยการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในชิ้นสารตัวอย่างแล้ววัดความต่างศักย์ระหว่างจุดสองจุดบนชิ้นสารนั้น

### 2.7.3 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง (direct resistivity method)

โดยทั่วไปแล้วการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้ามักจะวัดความต้านทานก่อน ซึ่งวิธีวัดโดยตรงนี้หมายถึง วัดค่าความต้านทานรวมของสารจากนั้นมาหาค่าความยาว และพื้นที่หน้าตัดของสารนั้น การวัดวิธีนี้จะต้องทำให้สารที่ต้องการวัดมีรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอน เพื่อที่จะวัดค่าพื้นที่หน้าตัดและความยาวให้ได้แน่นอน เช่น แท่งกลมทรงกระบอก แท่งสี่เหลี่ยม เป็นต้น จากนั้นจึงให้กระแสไฟฟ้าเข้าไปที่ปลายด้านหนึ่ง และให้กระแสไหลออกผ่านสารตัวอย่างที่ปลายอีกด้าน ขณะเดียวกันก็วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จุดปลายทั้งสองนั้นพร้อมๆ กัน จากที่ทราบค่ากระแสและศักย์ไฟฟ้านี้ สามารถนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าได้ดังต่อไปนี้ เมื่อกำหนด  $R$  เป็นความต้านทานรวมและมีความสัมพันธ์กับความต้านทานจำเพาะ พื้นที่หน้าตัด  $A$  คือบริเวณที่ปล่อยกระแสไหลเข้าไป และ  $l$  เป็นระยะทางระหว่างขั้วศักย์ไฟฟ้าที่วัด



รูปที่ 2.17 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.29)$$

$$\rho = R \times \frac{A}{l} = \left( \frac{V}{I} \right) \left( \frac{A}{l} \right) \quad (2.30)$$

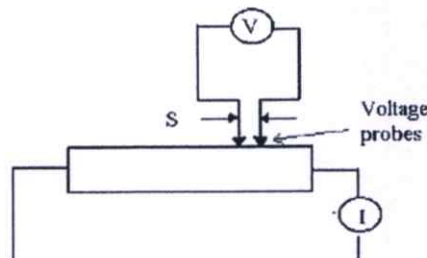
จะเห็นว่าวิธีนี้เป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็ว แต่ค่าที่ได้เป็นค่าโดยประมาณซึ่งต้องคำนึงถึงองค์ประกอบอื่นๆ ด้วย ซึ่งความถูกต้องในการวัดโดยวิธีนี้ขึ้นอยู่กับบริเวณผิวสัมผัสที่กระแสไหลเข้าและออกนั้นมีลักษณะเป็น โอห์มมิกที่ดีหรือไม่ ถ้าไม่มีคุณสมบัติโอห์มมิกที่ดีแสดงว่ามีความต้านทานที่ผิวสัมผัสทั้งสองของขั้วไฟฟ้าเกิดขึ้นด้วย ค่าความต้านทาน  $R$  ที่วัดได้จึงเป็นค่าความต้านทานรวมทั้งหมด ดังนั้น ค่าความต้านทานจริงของสารกึ่งตัวนำจะน้อยกว่าค่าที่วัดได้แน่นอน

ความถูกต้องอีกส่วนหนึ่งขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างความต้านทานของสารที่ต้องการวัดและความต้านทานภายใน(impedance) ของโวลต์มิเตอร์ที่ใช้วัด หากความต้านทานนี้ใกล้เคียงกัน ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จะมีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง ซึ่งในทางปฏิบัติจะคำนึงถึงผิวสัมผัสโอห์มมิกมากกว่าความผิดพลาดของโวลต์มิเตอร์ เนื่องจากที่ผิวสัมผัสจะดีหรือไม่ (เป็นโอห์มมิกหรือไม่) นั้นตรวจสอบได้ยากมาก จึงแก้ไขด้วยการทำให้เกิดผิวสัมผัสบริเวณพื้นที่มากขึ้นเพื่อลดความต้านทานที่ผิวสัมผัสลง จากนั้นจึงวัดศักย์ไฟฟ้าด้วยโวลต์มิเตอร์ โดยเลือกโวลต์มิเตอร์ที่มีความต้านทานภายในสูงๆ เท่าที่จะหาได้เพื่อลดความผิดพลาด

#### 2.7.4 การวัดความต้านทานจำเพาะโดยวิธีสองขั้ว (two point probes)

การวัดด้วยวิธีนี้มีลักษณะใกล้เคียงกับวิธีวัดโดยตรง แตกต่างที่ลักษณะของขั้วไฟฟ้าของการวัด ศักย์ไฟฟ้าจะวัดบนสารตัวอย่าง ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.18 วิธีการวัดชนิดนี้เป็นวิธีที่พัฒนาขึ้นจากแบบแรกเพื่อกำจัดศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อหัวท้ายของผิวสัมผัสให้น้อยลงและสามารถตรวจสอบความสกปรกบนพื้นผิวของชิ้นสารตัวอย่างได้ด้วย

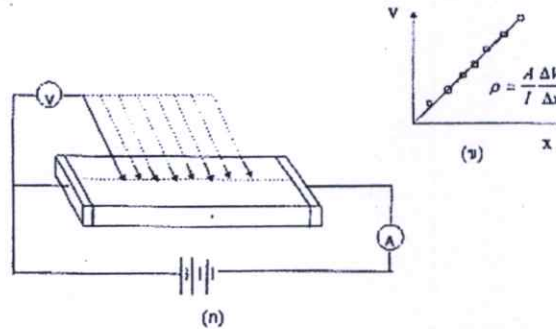
ข้อจำกัดของการวัดด้วยวิธีนี้คือ จะต้องวัดบนสารตัวอย่างที่มีความหนาสม่ำเสมอและมีรูปทรงเรขาคณิตแน่นอน โดยพยายามให้กระแสผ่านเข้าไปในสารตัวอย่างมีค่าน้อยที่สุดเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความร้อนภายในสาร เพราะค่าความต่างศักย์ที่วัดได้อาจจะไม่ถูกต้อง อีกทั้งในการวัดทุกครั้ง



รูปที่ 2.18 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว

จะต้องใช้โวลต์มิเตอร์ที่มีค่าความต้านทานภายในสูง และจุดที่ต้องการวัดศักย์ไฟฟ้าควรจะอยู่ห่างจากจุดที่ปล่อยกระแสเข้าและออกพอสมควร เพื่อป้องกันสารเจือเข้าไปทำการรวมตัวกันระหว่างจุดที่ทำการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า หากมีสารเจือเข้ามารวมตัวที่บริเวณที่วัดนี้จะมีผลทำให้เกิดการรวมกับพาหะข้างน้อย(minority carriers) บริเวณนั้น ทำให้ค่าความต้านทานจำเพาะที่วัดได้สูงเกินความเป็นจริง นอกจากนี้ควรคำนึงถึงความสม่ำเสมอของเส้นสมศักย์(equi-potential lines) โดยการวัดที่บริเวณจุดที่คิดว่าเป็นเส้นสมศักย์นั้นสม่ำเสมอ (ตรงกลางของสารตัวอย่าง) สัดส่วนระหว่างระยะขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้าต่อพื้นที่ ตรงจุดที่ปล่อยกระแสเข้าและออกจะต้องมีค่ามากกว่าสามเท่า  $l/A > 3$  เมื่อ  $l$  คือ ระยะห่างระหว่างขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้า และ  $A$  คือ พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า ข้อควรคำนึงถึงอีกประการก็คือ สารที่นำมาวัดมีโครงสร้างผลึกชนิดใด เป็นรูปลูกบาศก์หรือไม่ ถ้าไม่ใช่

จะต้องทราบทิศทางของการวัดว่าอยู่ในทิศทางหรือระนาบใดของผลึก การวัดควรใช้วิธีครึ่งที่ขั้วหนึ่งไว้และเลื่อนตำแหน่งอีกขั้วหนึ่งออกไปเป็นระยะๆ โดยมีมาตราส่วนบอกระยะและนำมาเขียนกราฟดังรูปที่ 2.19 (ก) และ (ข) ความชันที่ได้จะเป็นค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้า



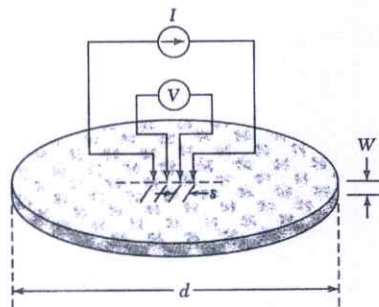
รูปที่ 2.19 แสดงการวัดความต้านทานแผ่นโดยวิธีสองขั้ว

- ก. การวัดแบบสองขั้วโดยมีการเลื่อนระยะที่ขั้วหนึ่ง
- ข. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับระยะทางที่ได้จากการวัดชนิดเลื่อนขั้วไฟฟ้า

ข้อดีของการวัดแบบสองขั้วในหลาย ๆ ตำแหน่งนี้จะสามารถแยกสภาพต้านทานไฟฟ้าที่สภาพผิวระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำและความต้านทานจำเพาะภายในของสารกึ่งตัวนำได้

### 2.7.5 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสี่ขั้วเชิงเส้น (linear four point probes)

วิธีนี้มีหลักการวัดคือ สองขั้วนอกจ่ายกระแสไฟฟ้า สองขั้วในวัดความต่างศักย์ไฟฟ้างดแสดงในรูปที่ 2.20 วิธีนี้จะไม่มีปัญหาเรื่องความต้านทานของรอยต่อ และความต้านทานจะคำนวณได้จากกฎของโอห์มและถ้ารู้ขนาดของฟิล์ม ก็จะสามารถคำนวณหาสภาพต้านทานไฟฟ้าได้ โดยส่วนใหญ่ มักจะรายงานค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าอยู่ในเทอมของความต้านทานแผ่น (sheet resistance :  $R_{sh}$ ) ซึ่งมีหน่วยเป็น โอห์มต่อตารางเซนติเมตร ( $\Omega/\text{sq}$ )



รูปที่ 2.20 แสดงการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสี่ขั้วเชิงเส้น

จากรูปที่ 2.20 เป็นการวัดความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มแบบสี่ขั้วเชิงเส้น โดยวัดที่ผิวหน้าของฟิล์มที่มีรูปแบบใดๆ ก็ได้ แต่ตำแหน่งของขั้วทั้งสองจะต้องวางเรียงอยู่ในแนวเดียวกัน โดยสองขั้วนอกวัดกระแสไฟฟ้าได้จากสมการดังนี้

$$\rho = \frac{2\pi \frac{V}{I}}{\left[ \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_3} - \frac{1}{S_1 + S_2} - \frac{1}{S_2 + S_3} \right]} \quad (2.31)$$

โดยที่ S คือช่องว่างระหว่างขั้วที่ติดกัน ในกรณีที่  $S_1 = S_2 = S_3$  สมการที่ (2.31) จะเขียนใหม่ได้เป็น

$$\rho = \frac{2\pi SV}{I} \quad (2.32)$$

### 2.7.6 ทฤษฎีการนำไฟฟ้าในช่วงอุณหภูมิต่างๆ

ในการศึกษากลไกการนำไฟฟ้าซึ่งเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมินั้นแบ่งออกเป็น 2 ช่วงอุณหภูมิด้วยกัน โดยในช่วงอุณหภูมิสูงการนำไฟฟ้าอธิบายได้โดยการประมาณของซีโต (Seto) ในแบบจำลองนี้ประจุจะถูกดักจับไว้ที่ขอบเขตของเกรน ทำให้เกิดเขตปลอดพาหะขึ้นในบริเวณเกรน ซึ่งเป็นเหตุผลที่ทำให้เกิดค่าแกมมาที่ขอบเขตของเกรน หรือเกิดการขยายตัวของเขตปลอดพาหะหรือเพียงบางส่วน ซึ่งขึ้นกับขนาดของความหนาแน่นของระดับพลังงานของกัมดักประจุ ระดับพลังงานของสารเจือ ขนาดของเกรน และความยาวเดออร์บายน์ซึ่งความสูงของค่าแกมมาที่ขอบเขตของเกรนนี้จะขึ้นกับอุณหภูมิ พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าแกมมาจะลดลง และทำให้การนำไฟฟ้าเป็นแบบเทอร์มิโอนิกอิมิสชันซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\sigma = AT^{-\frac{1}{2}} \exp \left[ \frac{-\phi_B}{kT} \right] \quad (2.33)$$

เมื่อ	$\phi_B$	คือ	ค่าค่าแกมมา
	A	คือ	ค่าคงตัว
	T	คือ	อุณหภูมิเป็นเคลวิน
	k	คือ	ค่าคงตัวของโบลทซ์มันน์ (Boltzmann) = $1.38 \times 10^{-23}$ จูลต่อเคลวิน

ส่วนในช่วงอุณหภูมิต่ำนั้นการนำไฟฟ้าอธิบายได้โดยการประมาณตามแบบจำลองของ Mott ซึ่งจำลองมาจากการนำไฟฟ้าในสารที่มีการจัดเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบ เช่น อะมอร์ฟัส เรียกการ

นำไฟฟ้าแบบการกระโดดเป็นช่วง ๆ (variable-range hopping) ซึ่งจะโดดเด่นในช่วงที่สารกึ่งตัวนำมีอุณหภูมิต่ำ เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำสารกึ่งตัวนำมีลักษณะการจัดเรียงตัวของอะตอมแบบไม่เป็นระเบียบ โฟนอนมีพลังงานไม่เพียงพอในการเคลื่อนย้ายไปยังอะตอมข้างเคียงและพาหะจะเคลื่อนที่ลักษณะคล้ายการกระโดดจากอะตอมเดิมไปยังอะตอมข้างเคียงที่มีระดับพลังงานเดียวกันซึ่งในสารกึ่งตัวนำที่เป็นผลึกพหุพันธ์นั้นที่อุณหภูมิต่ำ พาหะไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านบริเวณขอบเขตของเกรนได้ด้วยกระบวนการเทอร์มิโอนิกอิมิสชัน ซึ่งที่ขอบเขตของเกรนนั้นมีลักษณะเป็นระดับพลังงานของกับดักประจุซึ่งเกิดจากความไม่เป็นระเบียบของอะตอมหรือความไม่สมบูรณ์ของพันธะเคมีซึ่งกระจายอยู่ในช่องว่างแถบพลังงาน โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\sigma T^{1/2} = A \exp \left[ - \left( \frac{T_0}{T} \right)^{1/4} \right] \quad (2.34)$$

เมื่อ  $T_0$  คือ อุณหภูมิห้อง (300 เคลวิน)

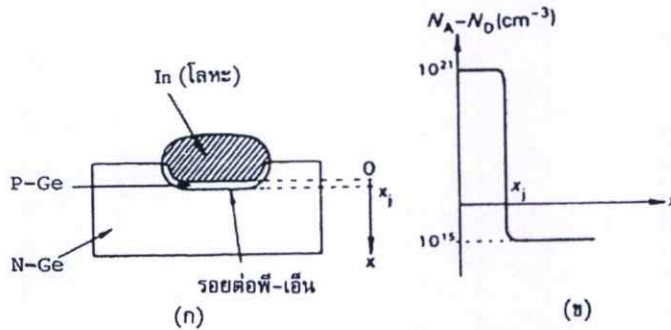
## 2.8 การสร้างรอยต่อ [11-12, 17-24]

สำหรับสารกึ่งตัวนำที่เป็นผลึกเดี่ยวหรือผลึกเอกพันธ์ (single crystal) รอยต่อพี-เอ็น ไม่ได้เกิดจากการนำชั้นสารกึ่งตัวนำชนิดตรงข้าม 2 ชั้นมาทำรอยต่อกันหากแต่เป็นชั้นสาร โครงผลึกเดี่ยวที่ประกอบด้วยสารเจือตัวให้เป็นจำนวนมากในด้านหนึ่ง โดยมีการเติมสารเจือตัวรับจำนวนมากในอีกด้านหนึ่ง การประดิษฐ์รอยต่อที่สำคัญ ๆ ในปัจจุบันมีอยู่ 3 วิธี คือ วิธีการแพร่ซึม (diffusion) วิธีการอีพิแทกซ์ (epitaxy) และวิธีการฝังไอออน (ion implantation) สำหรับวิธีที่ 4 นั้นเป็นแบบหลอมโลหะผสม (alloying) ซึ่งเป็นรอยต่อที่ประดิษฐ์ในยุคที่ใช้ Ge เป็นวัสดุในการสร้างรอยต่อและวิธีการนี้ยังคงใช้ในการประดิษฐ์ทรานซิสเตอร์กำลังและการสร้างผิวสัมผัสระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ

### 2.8.1 การสร้างรอยต่อแบบหลอมโลหะผสม (alloy junction)

การประดิษฐ์รอยต่อแบบนี้ คือ การนำแว่นผลึกหรือแว่นเวเฟอร์สารกึ่งตัวนำ (ในที่นี่สมมติว่าเป็นชนิดเอ็น) มาทำการเคลือบ (deposit) สารเจือชนิดตรงข้ามในปริมาณเล็กน้อยลงบนผิวหน้าบริเวณที่ต้องการทำให้เกิดรอยต่อ อย่างเช่น ทำการเคลือบอะตอมของสารเจือลูมิเนียมลงบนซิลิกอน หรือ อินเดียมบนเจอร์เมเนียม เป็นต้น จากนั้นจึงนำแว่นผลึกวางลงในเตาที่มีบรรยากาศของก๊าซเฉื่อยไหลผ่าน และเพิ่มอุณหภูมิเตาจนถึงจุดหลอมละลายของสาร (ในที่นี่ถือว่าเติม In ลงบนชั้น Ge) In และ Ge บางส่วนจะหลอมกลายเป็นฟิล์มบางของ In และ Ge อยู่ที่ผิวรอยต่อของสารทั้งสอง จากนั้นจึงค่อย ๆ ลดอุณหภูมิลง ส่วนหลอมละลายจึงเริ่มแข็งตัวและทำให้เกิด

เป็นผลึกเดี่ยวอีกครั้ง โดยที่โครงสร้างของโครงผลึกส่วนที่อยู่ข้างใต้และส่วนบนของชั้นสาร (ซึ่งประกอบด้วยสารเจือชนิดใหม่ส่วนเกิน) มีความต่อเนื่อง ดังแสดงการประดิษฐ์รอยต่อแบบหลอมโลหะผสมในรูปที่ 2.21 ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือที่เดิมจะขึ้นกับสภาพละลายได้ของของแข็ง (ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือสูงสุดของสารเจือใด ๆ ที่สามารถเข้าไปสะสมอยู่ในของแข็งที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ) ของสารเจือ นั้น ๆ ในสารกึ่งตัวนำในรูปที่ 2.21 บริเวณที่ทำให้เกิดเป็นผลึกอีกครั้งจะเป็นสารชนิดตรงข้ามกับแวนผลึกเดิม



รูปที่ 2.21 แสดงการสร้างรอยต่อแบบหลอมโลหะผสม

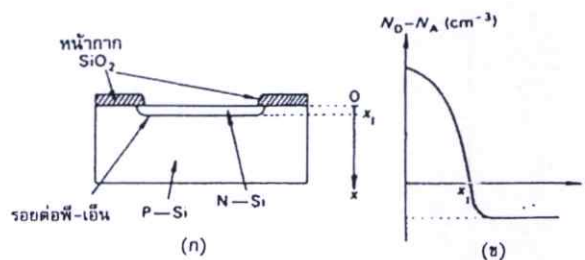
- ก. ลักษณะโครงสร้างของรอยต่อแบบหลอมโลหะผสม
- ข. กราฟแสดงปริมาณความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือที่ระยะความลึกจากผิวรอยต่อค่าต่าง ๆ

และรอยต่อแบบหลอมโลหะผสมจะเกิดขึ้นระหว่างรอยต่อของสารทั้งสองชนิด วิธีนี้เป็นวิธีดั้งเดิมที่ใช้ประดิษฐ์รอยต่อที่ผลิตจากสาร Ge รูปที่ 2.21 (ข) แสดงลักษณะสมบัติของรอยต่อที่หลอมโลหะผสมซึ่งมีโปรไฟล์ของอะตอมของสารเจือที่ชันมาก ณ บริเวณที่ห่างออกไปจากรอยต่อจะมีความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือคงที่และรอยต่อลักษณะนี้เรียกว่า รอยต่อแบบเป็นขั้น (step junction)

### 2.8.2 การสร้างรอยต่อแบบแพร่ซึม (diffused junction)

การแพร่ซึม คือ กรรมวิธีการประดิษฐ์รอยต่อที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน แวนผลึกสารกึ่งตัวนำที่เรียกว่า “แผ่นฐานรองรับ (substrate)” ซึ่งอาจเป็นแวนผลึก Si ชนิดพีที่เจือด้วยอะตอมโบรอนที่มีความหนาแน่นของอะตอมเป็น  $N_A$  จะถูกนำมาวางบนเตาแพร่ซึมที่มีอุณหภูมิสูง โดยทั่วไปมีค่าประมาณหรือมากกว่า 1,000 องศาเซลเซียส ก๊าซที่ทำหน้าที่เป็นตัวพา (carrier gas) อย่างเช่น Ni หรือ Ar จะไหลผ่านเข้ามาในเตาโดยมีการควบคุมอัตราการไหล โดยที่ก๊าซที่ทำหน้าที่เป็นตัวพาจะนำเอาโมเลกุล (ในรูปของไอ) ของสารประกอบของอะตอมของสารเจือชนิดตรงข้ามอย่างเช่น  $POCl_3$  เข้ามาด้วยเนื่องจากเตาแพร่ซึมมีอุณหภูมิสูง สารประกอบจึงแตกตัว

เป็นอะตอมของฟอสฟอรัสและเคลือบลงบนผิวหน้าของแวนผลึกโดยค่อย ๆ แพร่ซึมเข้าไปในเนื้อสารกึ่งตัวนำ เนื่องจากการแพร่ซึมจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อมี เกรเดียนต์ความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือ จึงเห็นได้ว่าความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือที่แพร่ซึมจะเกิดที่ผิวหน้าแผ่นฐานรองและค่อย ๆ ลดลงตามระยะทางลึกเข้าไปในเนื้อสาร ความลึกที่ความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือแพร่ซึมจะลดลงจนมีค่าเท่ากับความหนาแน่นของอะตอมสารเจือเดิมในแผ่นฐานรองรับ ก็คือ ความลึกรอยต่อ ( junction depth ) และโดยการควบคุมเวลา อุณหภูมิ และอัตราการไหลของก๊าซในขณะแพร่ซึมอะตอมของสารเจือ จะทำให้ควบคุมความลึกรอยต่อได้อย่างแม่นยำ โดยทั่วไปสามารถควบคุมความลึกรอยต่อให้มีค่าน้อยกว่า 2-3 ไมโครเมตรได้ เมื่อต้องการกำหนดพื้นที่ในการแพร่ซึมที่ผิวหน้าของแวนผลึก สามารถทำได้โดยการอาศัยชั้นหน้ากัก ที่สร้างจาก  $\text{SiO}_2$  เข้ามาช่วย โดยการใช้  $\text{SiO}_2$  ทำหน้าที่เป็นหน้ากักป้องกันการแพร่ซึมของอะตอมของสารเจือ ( diffusion blocking mask ) ในบริเวณที่ไม่ต้องการ ซึ่งหน้ากักป้องกันการแพร่ซึมนี้จะถูกสร้างและโดยอาศัยเทคนิคการถ่ายแบบลงบนแผ่นฐานรองรับโดยใช้แสงเข้ามาช่วยที่เรียกว่าโฟโตลิโทกราฟี ( photolithography ) จะทำให้ได้พื้นที่ที่เป็นหน้าต่าง ( window ) สำหรับแพร่ซึมอะตอมของสารเจือลงในบริเวณดังกล่าว โดยทั่วไปบริเวณที่กำหนดให้มีการแพร่ซึมจะสามารถสร้างรอยต่อได้มากมายบนพื้นที่เล็ก ๆ บนแวนผลึกหนึ่ง ๆ รูปที่ 2.22 (ก) แสดงภาคตัดขวางและโปรไฟล์ความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือของรอยต่อชนิดแพร่ซึม จะพบว่ารอยต่อชนิดนี้มีโปรไฟล์ของอะตอมของสารเจือเป็นแบบค่อย ๆ ลาด ( graded impurity profile ) ที่บริเวณใกล้ ๆ รอยต่อสำหรับชั้นของ  $\text{SiO}_2$  ที่ใช้เป็นหน้ากักป้องกันการแพร่ซึมนั้น ยังมีบทบาทที่สำคัญอีกประการหนึ่งนั่นคือ เนื่องจากการแพร่ซึมเกิดขึ้นทางด้านข้าง ( lateral diffusion ) ได้ดีพอๆ กับการแพร่ซึมทางแนวตั้ง จึงทำให้ขอบของรอยต่อเกิดบริเวณที่เกินเลยเข้าไปในผิวหน้าที่มี  $\text{SiO}_2$  ปกป้องกันอยู่ ซึ่งลักษณะนี้มีความสำคัญต่อการป้องกันผลของกระแสรั่วที่ผิวหน้าของรอยต่อ ( surface leakage effect )



รูปที่ 2.22 แสดงการสร้างรอยต่อแบบแพร่ซึม

ก. ลักษณะโครงสร้างรอยต่อแบบแพร่ซึม

ข. กราฟแสดงความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือที่ระยะความลึกจากผิวรอยต่อค่าต่าง ๆ

### 2.8.3 การสร้างรอยต่อแบบอีพิแทกซี ( epitaxy )

การปลูกชั้นผลึกอีพิแทกซีเป็นขั้นตอนที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในกระบวนการสร้างสิ่งประดิษฐ์พวก Si และ GaAs คำว่า อีพิแทกซี หมายถึง การปลูกชั้นฟิล์มบางที่เป็นผลึกเดี่ยว (ซึ่งอาจจะเชื่อให้เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพีหรือชนิดเอ็นที่มีค่าสภาพด้านทานไฟฟ้าตามต้องการ) ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นผลึกเดี่ยวเช่นกัน โดยที่แผ่นฐานรองรับนั้นอาจถูกเจือด้วยอะตอมของสารเจือคนละชนิดหรือชนิดเดียวกับชั้นอีพิแทกซีก็ได้ นอกจากนี้ปริมาณความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือในแผ่นฐานรองรับอาจมีค่าสูงกว่าหรือต่ำกว่าของชั้นฟิล์มบางที่ปลูกก็ได้เช่นกัน แต่มีข้อแม้ว่าชั้นฟิล์มบางที่ปลูกขึ้นใหม่ต้องมีโครงสร้างทางผลึกที่ต่อเนื่องกับของแผ่นฐานรองรับ ซึ่งก็คือต้องมีค่าคงที่ของโครงผลึกใกล้เคียงกัน ( matching ) เทคนิคการปลูกฟิล์มอีพิแทกซีมีข้อได้เปรียบที่ว่าการควบคุมโปรไฟล์ของอะตอมของสารเจือกระทำได้ง่ายถึงแม้ว่าความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือจะเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหันก็ตาม และเครื่องมือที่ถือว่าเป็นเทคโนโลยีขั้นสูงที่ใช้ในการปลูกฟิล์มบางดังกล่าวนี้ในปัจจุบันก็คือ อีพิแทกซีที่ใช้ลำโมเลกุล ( molecular beam epitaxy : MBE ) ด้วยเครื่องมือดังกล่าวทำให้สามารถปลูกฟิล์มที่บางมากซึ่งมีความหนาอยู่ในระดับอะตอมเดี่ยว หรืออาจปลูกฟิล์มที่มีส่วนประกอบต่าง ๆ กันได้ซึ่งความต้องการเหล่านี้เป็นพื้นฐานของสิ่งประดิษฐ์จำพวกออปโตอิเล็กทรอนิกส์แบบใหม่จำนวนมากอย่างเช่น เลเซอร์ไดโอดที่เปล่งแสงที่มีความเป็นระเบียบสูง ( มีความเป็น โคฮีเรนต์ดี ) และเป็นแสงสีเดียวอย่างแท้จริง เช่น เลเซอร์ไดโอดแบบกระจายแสงแบบป้อนกลับ ( distributed feedback : DFB ) เป็นต้น

### 2.8.4 การสร้างรอยต่อแบบการฝังไอออน ( ion implantation )

เทคนิคนี้นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมปัจจุบัน การฝังไอออนเริ่มต้นด้วยไอออนจากอะตอมของสารเจือที่ต้องการจะถูกเร่งผ่านสุญญากาศไปยังที่มีพลังงานสูง จากนั้นไอออนจะถูกกระดมยิงไปบนผิวหน้าแผ่นฐานรองรับที่เป็นสารกึ่งตัวนำ ไอออนเหล่านี้จะฝังตัวเข้าไปในยังโครงผลึก โดยทั่วไปความลึกของการฝังตัวมีค่าเป็นเศษส่วนของไมครอน เทคนิคนี้มักทำให้โครงสร้างที่ผิวหน้าผลึกเกิดความเสียหาย ( damage ) หรือผิดเพี้ยนเนื่องจากการวิ่งชนของไอออนที่มีพลังงานสูงตกกระทบบนผิวหน้าแล้วผลึกด้วยเหตุนี้หลังจากผ่านกระบวนการฝังไอออนแล้วจึงต้องมีการแอนนัล ( annealing ) แวนผลึกที่อุณหภูมิค่าหนึ่งเป็นเวลาสั้น ๆ เพื่อให้เกิดการแพร่ซึมของอะตอมที่ฝังตัวอยู่ ต่อไปในระหว่างการแอนนัลซึ่งจะทำให้อะตอมของสารเจือเคลื่อนไปแทนที่ตำแหน่งของอะตอมเจ้าของบ้าน ( host lattice ) ในโครงผลึกในลักษณะแบบเข้าไปแทนที่ ( substitutional ) การแทนที่ลักษณะนี้จะทำให้อะตอมของสารเจือที่เข้ามาอยู่ในโครงผลึกมีความแอกทีฟทางไฟฟ้า และด้วยการควบคุมปริมาณความเข้มข้น ( dose ) ของไอออนที่จะทำการฝังให้เหมาะสมจะทำให้การฝังไอออนเกิดอย่างสม่ำเสมอตลอดผิวหน้าผลึกและการผลิตสามารถผลิตซ้ำได้โดยได้ผลที่ติดังเดิม ( reproducibility )

## 2.9 รอยต่อแบบ โลหะ-สารกึ่งตัวนำ ( M-S junction ) [1-3, 11-12, 14, 25-33]

สิ่งประดิษฐ์ที่ใช้ในงานในทางปฏิบัติ มักต้องเกี่ยวข้องกับการทำรอยต่อระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ ก่อนที่จะนำลวดตัวนำมาต่อออกสู่ภายนอกเพื่อประยุกต์ใช้งาน การทำรอยต่อในลักษณะนี้เป็นสิ่งที่ละเอียดไม่ได้เนื่องจากการทำรอยต่อระหว่าง โลหะ-สารกึ่งตัวนำ ก็คือ รอยต่อประเภทหนึ่งนั่นเองโดยที่สมบัติการนำไฟฟ้าสามารถกำหนดได้จากสนามไฟฟ้าที่เกิดระหว่างรอยต่อของคู่วัสดุแต่ละชนิด ซึ่งสมบัติตรงนี้สามารถพิจารณาได้จากความแตกต่างระหว่างระดับพลังงานเฟอร์มิของวัสดุทั้งสองที่ใช้ทำรอยต่อ และเมื่อนำวัสดุสองชนิดมาทำรอยต่อกัน โดยปรกติระดับเฟอร์มิในวัสดุทั้งสองจะปรับตัวให้อยู่ในแนวระดับเดียวกันหลังจากที่มีการถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างกันเรียบร้อยแล้ว

ปรกติระดับเฟอร์มิในโลหะจะอยู่ประมาณกลาง ๆ ของช่องว่างแถบพลังงาน และโดยทั่วไปความน่าจะเป็นในการพบอิเล็กตรอนจะเป็นไปตามรูปแบบของฟังก์ชันการกระจายแบบเฟอร์มิ-ดิแรก ( Fermi-Dirac distribution function) ดังนั้นในแถบนำจึงมีจำนวนอิเล็กตรอนเพียงเล็กน้อยที่มีพลังงานสูงกว่าระดับพลังงานเฟอร์มิ ( $E_F$ ) ได้ที่อุณหภูมิห้อง ด้วยเหตุนี้จึงสามารถคิดได้ว่า  $E_F$  เป็นค่าพลังงานเฉลี่ยของอิเล็กตรอนพวกที่มีพลังงานสูงสุดในโลหะ และการที่อิเล็กตรอนเหล่านี้จะสามารถหลุดออกมาจากโลหะได้จะต้องให้พลังงานแก่โลหะอย่างน้อยที่สุดเท่ากับ  $E_w(M)$  ซึ่งเรียกว่า ฟังก์ชันงาน ( work function:  $\phi_m$  ) ค่าพลังงานนี้ คือ ความแตกต่างระหว่างระดับสุญญากาศและระดับ  $E_F$  ของสาร ตารางที่ 2.2 แสดงฟังก์ชันงานของสารบางชนิด ในสารกึ่งตัวนำก็เช่นกันหากต้องการให้อิเล็กตรอนหลุดจากเนื้อสารก็ต้องมีการให้พลังงานอย่างน้อยที่สุดค่าหนึ่ง แต่เนื่องจากระดับ  $E_F$  ในสารกึ่งตัวนำจะอยู่ในแถบต้องห้ามที่ซึ่งไม่สามารถมีอิเล็กตรอนอยู่ได้ ดังนั้น ในทางปฏิบัติมักใช้ปริมาณที่มีความหมายมากกว่าซึ่งเรียกว่า อิเล็กตรอนแอฟฟินิตี (electron affinity,  $\chi$ ) แทนค่าฟังก์ชันงานในสารกึ่งตัวนำ [ $E_w(s.c.)$ ] และอิเล็กตรอนแอฟฟินิตีคือ พลังงานที่ต้องให้แก่สารกึ่งตัวนำเพื่อทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่บริเวณจุดต่ำสุดของแถบนำที่มีพลังงานเป็น  $E_C$  สามารถหลุดจากเนื้อสารได้ ( นั่นคือ  $\chi = E_\infty - E_C$  ) รูปที่ 2.23(ก) แสดงแผนภูมิลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นก่อนทำรอยต่อโดยที่  $E_w(M) > E_w(s.c.)$

ตารางที่ 2.2 แสดงฟังก์ชันงานของโลหะที่สำคัญ

วัสดุ	ฟังก์ชันงาน : $\phi_m$ (eV)	วัสดุ	ฟังก์ชันงาน : $\phi_m$ (eV)	วัสดุ	ฟังก์ชันงาน : $\phi_m$ (eV)
Ag	4.63	Ga	4.32	Pd	5.41
Al	4.17	Hf	3.90	Pt	5.55
Au	5.38	Hg	4.475	Re	4.72
Ba	2.52	In	4.09	Rh	4.98
Be	4.98	Ir	5.46	Ru	4.71
Bi	4.34	K	2.29	Sb	4.63
Ca	2.87	Mg	3.66	Sm	2.70
Cd	4.08	Mn	4.10	Sn	4.42
Co	5.0	Mo	4.57	Ta	4.30
Cr	4.5	Nb	4.33	Tb	3.00
Cs	1.95	Ni	5.20	Ti	4.33
Cu	4.76	Os	5.93	W	4.61
Fe	4.74	Pb	4.25	Zn	3.63

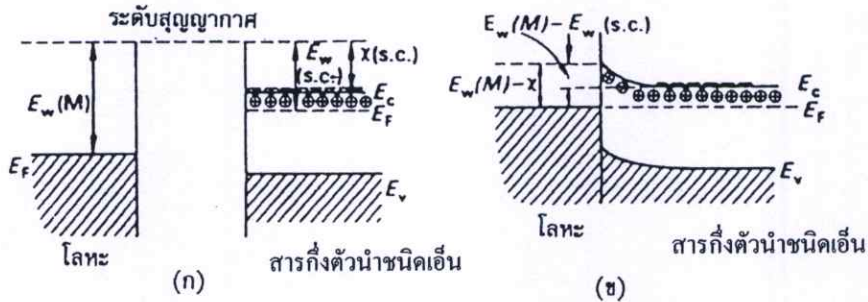
ตารางที่ 2.3 แสดงอิเล็กตรอนแอฟฟินิตีของสารประกอบกึ่งตัวนำหมู่ II-VI

วัสดุ	อิเล็กตรอนแอฟฟินิตี : $\chi$ (eV)
MgO	-2.5 (Negative value)
ZnO	3.7 ~ 4.60*
$\alpha$ -ZnS	3.9
ZnSe	4.06
ZnTe	3.68
$\omega$ -CdS	4.50
$\omega$ -CdSe	4.95
CdTe	4.28

\* ขึ้นอยู่กับทิศทางการจัดเรียงระนาบของอะตอม ( surface orientation )

เมื่อนำโลหะมาทำรอยต่อกับสารกึ่งตัวนำ โดยที่ฟังก์ชันงานของวัสดุทั้งสองมีค่าแตกต่างกันจะทำให้มีการถ่ายเทอิเล็กตรอนจากวัสดุที่มีค่าฟังก์ชันงานน้อยกว่าไปยังวัสดุที่มีฟังก์ชันงานมากกว่าจนในที่สุดที่สภาวะสมดุลความร้อน ระดับเฟอร์มิในวัสดุทั้งสองจะจัดเรียงอยู่ในแนวระดับเดียวกัน และขณะนี้จะมีการสร้างความต่างศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมที่บริเวณระหว่างผิวสัมผัสของวัสดุทั้งสอง โดยที่ความต่างศักย์นี้มีค่าเท่ากับความแตกต่างระหว่างค่าฟังก์ชันงานของสาร รูปที่ 2.23 (ข) แสดงแผนภาพของลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อระหว่าง โลหะ-สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น หลังจากทำรอยต่อแล้ว โดยที่โลหะมีค่าฟังก์ชันงานสูงกว่า ในกรณีนี้อิเล็กตรอนจะเคลื่อนย้ายจากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะ ทำให้ด้านโลหะมีประจุลบเพิ่มขึ้น สำหรับในด้านสารกึ่งตัวนำเนื่องจากสูญเสียอิเล็กตรอนไป ทำให้มีการสะสมของอะตอมผู้ให้ที่ถูกละอองไอออไนซ์ (ionized donor atom) ซึ่งเป็นประจุบวกที่เคลื่อนที่ไม่ได้อยู่ภายในเขตปลอดพาหะซึ่งอยู่ใกล้กับรอยต่อทางด้านสาร

กึ่งตัวนำชนิดอื่น ลักษณะนี้ทำให้ระยะทางจาก  $E_C$  ถึง  $E_F$  ภายในสารกึ่งตัวนำตรงบริเวณใกล้รอยต่อเกิดการโค้งงอขึ้นตามซึ่งแสดงในรูปที่ 2.23 (ข) และกำแพงศักย์ที่สร้างขึ้นที่บริเวณรอยต่อทางด้านสารกึ่งตัวนำจะต้านการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ความกว้างของเขตปลอดพาหะที่เกิดในสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นจะขึ้นกับปริมาณความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือที่เติมลงไปและโดยทั่วไปความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือนี้ จะมีค่าน้อยกว่าจำนวนของสถานะพลังงานยินยอม (allowed state) และความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่อยู่บริเวณ  $E_F$  ในโลหะ



**รูปที่ 2.23** แสดงลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อระหว่าง โลหะ-สารกึ่งตัวนำชนิดอื่น เมื่อ  $E_w(M) > E_w(s.c.)$  พื้นที่แรเงาแสดงว่ามีอิเล็กตรอนเดิมอยู่  
ก. ก่อนทำรอยต่อ  
ข. หลังทำรอยต่อ

(ข้อพึงระลึกถึง คือ  $E_F$  ในโลหะจะอยู่ประมาณกลาง ๆ แถบนำ) ด้วยเหตุนี้จึงถือได้ว่าไม่มีการขยับของระดับ  $E_F$  ในโลหะ (หรือประมาณว่าสามารถละทิ้งการขยับของ  $E_F$ ) แต่ถือว่าการขยับของ  $E_F$  และการโค้งงอของแถบพลังงานจะเกิดขึ้นเฉพาะในด้านสารกึ่งตัวนำ โดยความต่างศักย์ทั้งหมดที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นจะถูกกำหนดโดยแฟกเตอร์  $E_w(M) - E_w(s.c.)$  ลักษณะเช่นนี้ มีความคล้ายคลึงกับรอยต่อแบบเป็นชั้นมาก (ซึ่งเป็นรอยต่อที่มีการเติมอะตอมของสารเจือในระดับสูงมากเมื่อเทียบกับปริมาณอะตอมของสารเจือในอีกด้านหนึ่ง)

เมื่อรอยต่อระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำชนิดอื่นเข้าสู่ภาวะสมดุลความร้อน ความต่างศักย์จะมีค่า  $(1/q)[E_w(M) - E_w(s.c.)]$  และเขตปลอดพาหะจะไม่ขยายอีกต่อไปเนื่องจากไม่มีพาหะสุทธิไหลข้ามรอยต่อ ดังนั้น ขณะนี้อิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นจะไหลข้ามกำแพงศักย์ไปในโลหะได้ต้องป็นข้ามกำแพงศักย์ที่สูงเท่ากับความแตกต่างของฟังก์ชันงานของสารทั้งสอง และอิเล็กตรอนในด้านโลหะจะสามารถไหลข้ามกำแพงศักย์มายังด้านสารกึ่งตัวนำได้ต้องเอาชนะกำแพงศักย์ที่มีความสูงเท่ากับ

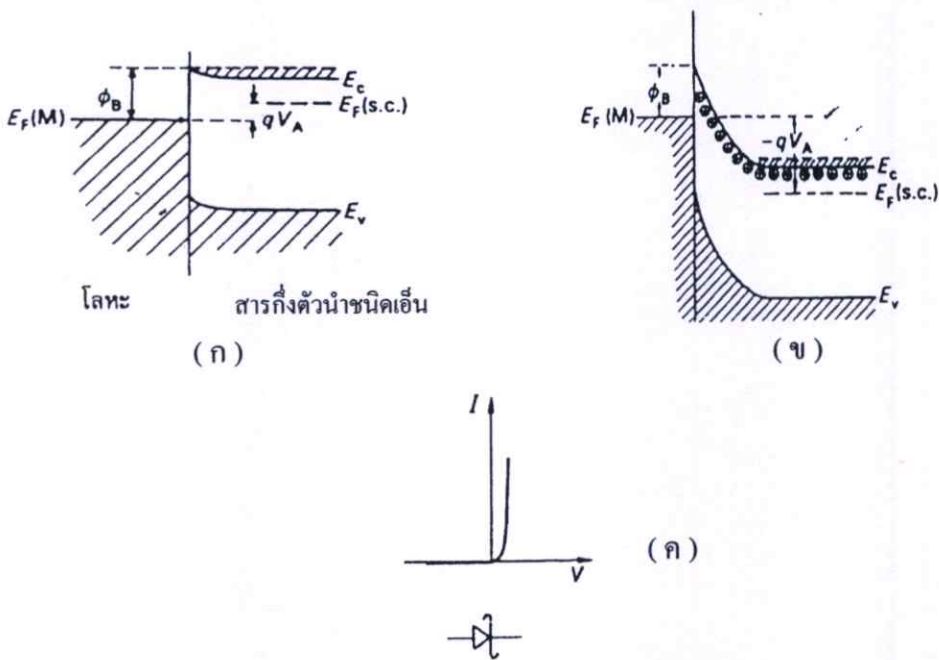
$$\phi_{B_n} = E_w(M) - E_w(s.c.) + [E_C - E_F(s.c.)] = E_w(M) - \chi(s.c.) \quad (2.35)$$

และสำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดพี โหลดจากด้านสารกึ่งตัวนำจะสามารถไหลข้ามกำแพงศักย์จากสารกึ่งตัวนำไปสู่ขั้วไฟฟ้าโลหะได้ต้องเอาชนะกำแพงศักย์ที่มีความสูงเท่ากับ

$$\phi_{B_p} = E_g - E_w(M) + \chi(s.c.) \quad (2.36)$$

อันที่จริงแล้วจากการใช้สถิติของฟังก์ชันการกระจายแบบโบลต์ซมันน์ ( Boltzmann's distribution function ) เพื่อช่วยในการคำนวณจำนวนอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงพอที่จะสามารถไหลข้ามกำแพงศักย์ได้ พบว่าจะมีการไหลของอิเล็กตรอนจากด้านหนึ่งไปอีกด้านหนึ่งจริงและในขณะเดียวกันก็จะมีอิเล็กตรอนจำนวนเท่ากันไหลในทิศตรงข้าม ดังนั้นกระแสสุทธิที่ไหลข้ามรอยต่อจึงเป็นศูนย์ และนี่คือสถานะสมดุลความร้อน เมื่อมีการไบแอสกลับทาง  $-V_A$  ให้กับรอยต่อ ( โดยที่ด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นมีศักย์สูงกว่า ) จะทำให้กำแพงพลังงานศักย์ทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นถูกดึงยี่ดลงมาเมื่อเทียบกับทางด้านโลหะดังแสดงในรูปที่ 2.24 (ข) ดังนั้นอิเล็กตรอนในแถบนำจะไหลข้ามกำแพงพลังงานศักย์เพื่อเข้าไปในโลหะได้ยากขึ้นด้วยเหตุนี้จึงไม่มีอิเล็กตรอนไหลข้ามกำแพงพลังงานศักย์นี้ไป ในทางตรงข้าม อิเล็กตรอนในโลหะยังคงเห็นกำแพงพลังงานศักย์ที่จะไหลข้าม ( เพื่อเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ ) ด้วยความสูง  $\phi_B$  คงเดิม ยังผลให้อิเล็กตรอนที่ไหลจากโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำมีปริมาณไม่เปลี่ยนแปลงจากสถานะสมดุลความร้อน ดังนั้นจึงเกิดกระแสรั่วไหลข้ามรอยต่อในปริมาณเล็กน้อย และกระแสรั่วไหลนี้จะขึ้นกับ  $\phi_B$  แต่ไม่ขึ้นกับ  $-V_A$  เหมือนอย่างเช่นในรอยต่อ พี-เอ็น

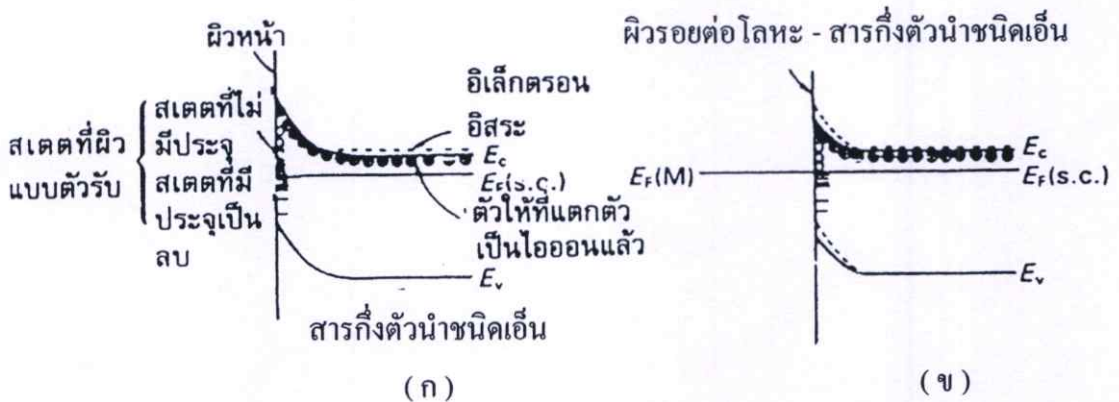
การไบแอสตรง  $+V_A$  ให้กับรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ( ก็คือด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นให้มีศักย์ไฟฟ้าเป็นลบ ) จะทำให้กำแพงพลังงานศักย์ทางด้านสารกึ่งตัวนำลดลงยังผลให้พาหะข้างมาก ( อิเล็กตรอน ) สามารถไหลข้ามกำแพงพลังงานศักย์ไปยังโลหะได้ง่ายขึ้น และกระแสอันเนื่องมาจากอิเล็กตรอนส่วนนี้จะมีค่ามากสำหรับอิเล็กตรอนในโลหะยังต้องเอาชนะกำแพงศักย์  $\phi_B$  เท่าเดิมเพื่อจะข้ามมาในสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นกระแสอันเกิดจากอิเล็กตรอนส่วนนี้จะมีปริมาณน้อย ด้วยเหตุนี้จึงมีอิเล็กตรอนสุทธิ ( กระแสอิเล็กตรอน ) ไหลจากสารกึ่งตัวนำเข้าไปในโลหะในปริมาณสูง รูปที่ 2.24(ก) แสดงแผนภูมิแถบพลังงานในขณะที่ไบแอสตรงของรอยต่อระหว่าง โลหะ-สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และรูปที่ 2.24 (ค) แสดงลักษณะเฉพาะของสมบัติกระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า และสัญลักษณ์ของรอยต่อดังกล่าวจะพบว่ากระแสรั่วมีปริมาณน้อยมากและรอยต่อแบบนี้เรียกว่า รอยต่อแบบเรียงกระแส ( rectifying contact ) ซึ่งมีคุณสมบัติเหมือนรอยต่อ พี-เอ็น และสิ่งประดิษฐ์ที่มีพื้นฐานมาจากสิ่งประดิษฐ์ดังกล่าวนี้ เรียกว่า ไดโอดแบบชอตต์กีแบเรีย ( Schottky barrier diode หรือ metal-semiconductor diode )



**รูปที่ 2.24** แสดงลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานของไดโอดชนิดกึ่งตัวนำชนิดอื่นของสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น  
 ก. ภายใต้สภาวะไบแอสตรง  
 ข. สภาวะไบแอสกลับทาง  
 ค. ลักษณะเฉพาะของสมบัติ กระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า และสัญลักษณ์ทางไฟฟ้าของไดโอดแบบชอตต์กีแบบเรียบ

นอกจากนี้ยังประดิษฐ์ไดโอดที่มีลักษณะสมบัติเหมือนดังที่กล่าวมาแล้วได้เช่นกัน โดยทำรอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำชนิดพี-โลหะ โดยมีเงื่อนไขเป็น  $E_w(M) < E_w(s.c.)$  ในทางปฏิบัติพฤติกรรมของไดโอดชอตต์กีแบบเรียบส่วนใหญ่จะแตกต่างจากรูปลักษณะแบบง่าย ๆ ดังที่กล่าวไปแล้วเนื่องจากมีผลของความหนาแน่นของสถานะผิว (surface state) ที่มีค่าสูงเข้ามาเกี่ยวข้องซึ่งสถานะผิวเหล่านี้จะพบที่ผิวหน้าของผลึกเสมออันเนื่องมาจากความไม่ต่อเนื่องของผลึก (crystal discontinuity) ลักษณะเช่นนี้ทำให้เกิดสถานะพลังงานยินยอมที่มีพลังงานอยู่ในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำจากการทดลองพบว่า สถานะผิวจะมีความหนาแน่นมากบริเวณกึ่งกลางของช่องว่างแถบพลังงาน และประจุอันเนื่องมาจากสถานะผิวเหล่านี้จะบังคับให้ระดับเฟอร์มิ  $E_F$  อยู่บริเวณกลาง ๆ ช่องว่างแถบพลังงาน  $E_g$  ที่บริเวณผิวหน้าสาร นั่นคือสถานะผิวเหล่านี้จะทำให้เกิดการโค้งงอของแถบพลังงานที่ผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำแม้จะไม่มีโลหะมาทำรอยต่ออยู่ด้านบนด้วยก็ตาม และรูปที่ 2.25 แสดงผลของสถานะผิวเหล่านี้บริเวณผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำที่

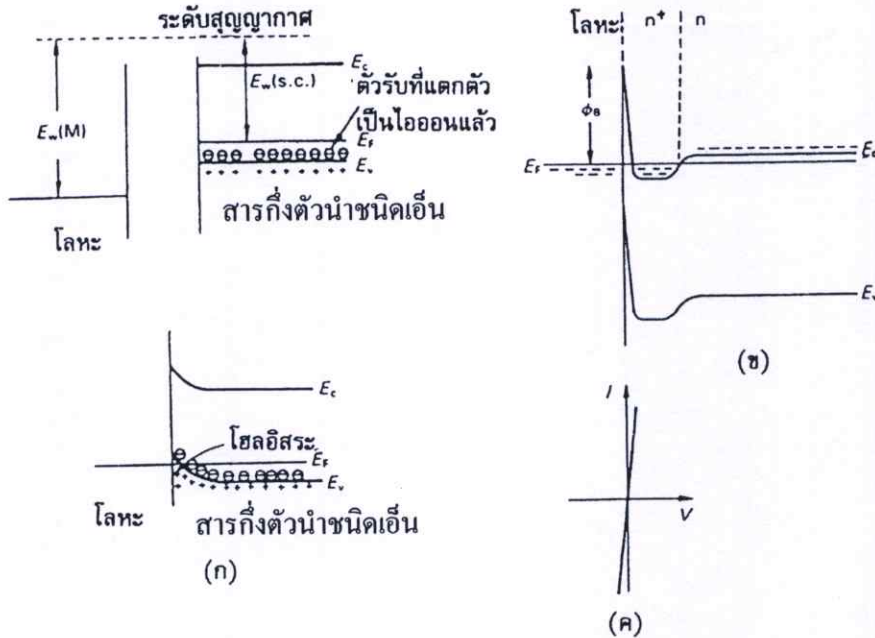
ไม่มีการทำรอยต่อกับวัสดุใด ๆ สถานะผิวที่อยู่ต่ำกว่าระดับพลังงานเฟอร์มี  $E_F$  จะมีอิเล็กตรอนอยู่ ในขณะที่สถานะผิวที่อยู่เหนือขึ้นไปจะเป็นสถานะพลังงานที่ว่าง เมื่อนำโลหะมาทำรอยต่อกับสารกึ่งตัวนำจะมีการเปลี่ยนแปลงการโค้งงอของแถบพลังงานอีกเพียงเล็กน้อยเนื่องจากการปรับระดับพลังงานเฟอร์มี  $E_F$  ของรอยต่อระหว่าง โลหะ-สารกึ่งตัวนำ ที่แตกต่างกันไม่มากนัก ในกรณีนี้เมื่อเทียบกับการทำรอยต่อระหว่าง โลหะ-สารกึ่งตัวนำ ในกรณีที่ไม่มีผลของสถานะผิวเข้ามาเกี่ยวข้อง รูปที่ 2.25 แสดงแถบพลังงานในสภาวะสมดุลความร้อนระหว่างรอยต่อ โลหะ-สารกึ่งตัวนำ กรณีมีสถานะผิวเข้ามาเกี่ยวข้อง



**รูปที่ 2.25** แสดงลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อระหว่าง โลหะ-สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น เมื่อมีผลของสถานะผิวเกิดขึ้นบริเวณผิวของรอยต่อ

- ในกรณีที่ไม่มีโลหะต่อตรงบริเวณผิวหน้าสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น
- ในกรณีที่โลหะมีอิทธิพลต่อการโค้งงอของแถบพลังงานบนผิวหน้าด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

ผลของสถานะผิวที่ปรากฏจะช่วยให้ลดผลของฟังก์ชันงานของโลหะที่มีต่อการโค้งงอของแถบพลังงานลง โดยที่ชนิดและความหนาแน่นของสถานะผิวจะขึ้นกับการเตรียมที่ผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำโดยปรกติ ผลของสถานะผิวจะตรึงระดับ  $E_F$  ที่ผิวรอยต่อ (interface) ไว้ที่ประมาณ  $(1/3)E_g$  เหนือแถบวาเลนซ์ ดังนั้นกำแพงศักย์ทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่ได้จากการวัดจะมีค่าความสูงประมาณ  $(2/3)E_g$  กรณีต้องการทำรอยต่อระหว่างสิ่งประจักษ์หรือต่อสิ่งประจักษ์ด้วยลวดตัวนำเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งาน มักไม่ต้องการทำรอยต่อแบบเรียงกระแส แต่รอยต่อที่ต้องการสร้างขึ้นในกรณีนี้ต้องเป็นไปตามกฎของโอห์ม คือ ยอมให้กระแสไหลผ่านรอยต่อได้ดีพอ ๆ กัน ทั้งสองทางไม่ว่าจะเป็นกรณีไบแอสตรงหรือไบแอสกลับทาง นอกจากนี้บริเวณรอยต่อยังต้องมีความต้านทานต่ำด้วย เรียกรอยต่อชนิดนี้ว่ารอยต่อแบบโอห์มมิก (ohmic contact) ซึ่งสามารถประจักษ์ได้สองวิธี คือ



รูปที่ 2.26 แสดงลักษณะของ โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อแบบ โอห์มมิก

ระหว่าง โลหะ-สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

- ก. เป็นกรณี  $E_w(M) > E_w(s.c.)$  ก่อนและหลังการทำรอยต่อ
- ข. เป็นกรณีที่ มีชั้นของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่ถูกเจือด้วยอะตอมของสารเจือ ในปริมาณมาก ( $n^+$ ) ถูกสร้างขึ้นมาคั่นกลางรอยต่อระหว่าง โลหะ-สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น
- ค. ลักษณะเฉพาะของสมบัติ กระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า

วิธีแรก โดยการนำโลหะที่มีค่าฟังก์ชันงานมากกว่ามาต่อกับสารกึ่งตัวนำชนิดพี (หรือนำโลหะที่มีฟังก์ชันงานน้อยกว่ามาต่อกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น) ดังแสดงในรูปที่ 2.26 เมื่อทำการต่อโลหะเข้ากับสารกึ่งตัวนำชนิดพี ระดับเฟอร์มิของโลหะจะอยู่ต่ำกว่าระดับ  $E_v$  ของสารกึ่งตัวนำชนิดพี อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์จะมีพลังงานสูงพอที่จะไหลข้ามกำแพงศักย์เข้าไปในโลหะ หรือกล่าวในลักษณะการขนส่งของโฮล โฮลจะแพร่ซึมจากโลหะมายังแถบเวเลนซ์ของสารกึ่งตัวนำชนิดพี เพื่อให้ระดับเฟอร์มิของสารทั้งสองจัดตัวอยู่ในระดับเดียวกันและในสภาวะสมดุลความร้อนสารกึ่งตัวนำชนิดพีจะได้รับโฮลเพิ่มทำให้บริเวณใกล้ผิวรอยต่อทางด้านสารกึ่งตัวนำมีความเป็นชนิดพีมากขึ้นซึ่งเป็นการสะสมของพาหะข้างมากที่เป็นโฮล (hole accumulation) จากรูปจะเห็นว่าไม่มีกำแพงศักย์สำหรับโฮล ดังนั้นจึงทำให้บริเวณรอยต่อมีความต้านทานต่ำ และกระแสจะไหลได้ดีพอ ๆ กันทั้งสองทิศทางซึ่งเป็นลักษณะของรอยต่อแบบโอห์มมิก รูปที่ 2.26(ค) แสดงลักษณะเฉพาะ

ของสมบัติ กระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า ของรอยต่อแบบโอห์มมิก ในทางปฏิบัติมักใช้ AI เป็นโลหะทำรอยต่อกับ p-Si

สำหรับการใช้ n-Si ร่วมกับโลหะเพื่อทำรอยต่อแบบโอห์มมิกมักพบปัญหาเรื่องสถานะผิวค้างได้กล่าวมาแล้ว ดังนั้นปัญหาในการทำรอยต่อจึงมากกว่าในกรณี p-Si วิธีหลีกเลี่ยงปัญหานี้ก็คือการทำรอยต่อแบบโอห์มมิกอีกวิธีหนึ่ง นั่นคือ การเติมอะตอมของสารเจือลงในสารกึ่งตัวนำในส่วนที่ใกล้ผิวหน้าให้มีปริมาณสูงจนเป็นภาวะดีเจเนอเรตดังแสดงในรูปที่ 2.26 (ข) ลักษณะนี้จะทำให้สถานะผิวเกิดการอิมิตัวและระดับเฟอร์มิจะเข้าไปอยู่ในแถบนำ กรณีนี้การสร้างกำแพงศักย์และเขตปลอดพาหะอันเนื่องจากการทำรอยต่อกับ AI จะทำให้กำแพงศักย์แคบมาก (อยู่ในหน่วยของสิบลึงstrom) จนพาหะสามารถขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ ( tunnel ) ได้ดีพอ ๆ กันทั้งสองทิศทางโดยมีค่าความต้านทานต่ำที่บริเวณรอยต่อ สมบัติที่สำคัญของรอยต่อแบบโอห์มมิกคือ มีการแพร่ซึมของพาหะข้างน้อยในสารกึ่งตัวนำมายังส่วนที่อยู่ใกล้ผิวรอยต่อ และเกิดการรวมตัวอันเนื่องมาจากมีพาหะข้างมากเป็นจำนวนมาก ณ บริเวณนั้น ดังนั้นรอยต่อแบบโอห์มมิกจึงกระทำตัวคล้ายกับเป็นแหล่งระบาย ( sink ) ให้กับพาหะข้างน้อย

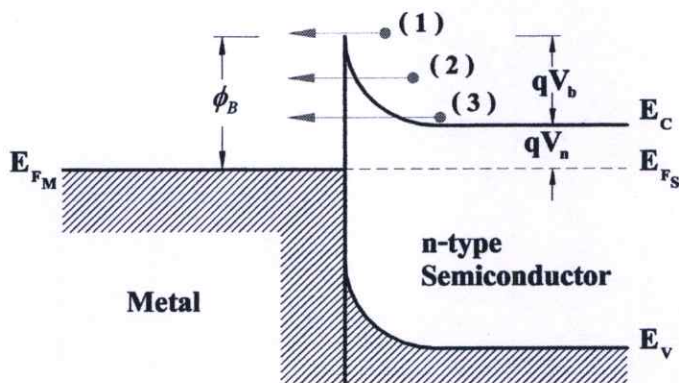
## 2.10 กลไกการไหลของพาหะข้ามรอยต่อระหว่าง โลหะ-สารกึ่งตัวนำ [1-3, 6, 11-12, 16-17, 26-33]

โดยทั่วไปสารกึ่งตัวนำกลุ่ม II-VI จะมีสภาพต้านทานสูง เช่น CdTe, CdZnTe และ CdMnTe สารกึ่งตัวนำเหล่านี้มักประสบปัญหาในการทำรอยต่อแบบโอห์มมิกเนื่องจากมีค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี ( electron affinity:  $\chi$  ) และค่าฟังก์ชันงาน ( $\phi_s$ ) ที่สูง สำหรับโลหะที่นำมาทำรอยต่อแบบโอห์มมิกกับสารกึ่งตัวนำดังกล่าวจะต้องมีค่าฟังก์ชันงาน ( $\phi_M$ ) ที่สูงด้วยเพื่อให้ได้กำแพงศักย์ตรงบริเวณรอยต่อไม่สูงมากนัก โลหะที่มีความเป็นไปได้ได้แก่ Ni, Au, Pt และ Mo ในขณะที่มนุษย์ใช้ค่าพุดในการสื่อสารระหว่างกัน สิ่งประดิษฐ์จากสารกึ่งตัวนำก็สื่อสารกับผู้ทำการทดลองด้วยความสัมพันธ์ของ กระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า ผ่านทางรอยต่อแบบโอห์มมิก รอยต่อแบบโอห์มมิกจึงนับว่ามีบทบาทสำคัญโดยจะยินยอมให้สัญญาณไฟฟ้าแสดงความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปโดยเกิดความต้านทานบริเวณขั้วไฟฟ้าน้อยที่สุดซึ่งความต้านทานของขั้วไฟฟ้านี้เป็นตัวกำหนดความเป็นโอห์มมิกของขั้วไฟฟ้า สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำที่มีพื้นที่ขนาดใหญ่การทำขั้วไฟฟ้าโลหะที่ดีจะส่งผลต่อประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของเซลล์แสงอาทิตย์ ตรงจุดนี้เองที่ขั้วไฟฟ้าโอห์มมิกมีความสำคัญ

ความแตกต่างของสมบัติทางไฟฟ้าระหว่าง โลหะ-สารกึ่งตัวนำ มักแสดงออกมาในรูปแบบของขั้วไฟฟ้าที่ให้กระแสไหลทางเดียวที่บริเวณผิวหน้าของรอยต่อระหว่าง โลหะ-สารกึ่งตัวนำ ในกรณีที่สารกึ่งตัวนำมีค่า  $\phi_s$  ที่สูงกำแพงศักย์ในลักษณะที่ให้กระแสไหลทางเดียวจะเกิดขึ้นในระหว่าง

การสร้างรอยต่อ ดังนั้นรอยต่อระหว่าง โลหะ-สารกึ่งตัวนำ จะเกิดกำแพงศักย์สกัดกั้นการไหลของกระแสเสมอ ในการสร้างรอยต่อโอห์มิกที่ดีกำแพงศักย์ตรงจุดนี้ต้องหมดไปหรือมีขนาดน้อยที่สุด

การไหลของพาหะข้ามกำแพงศักย์บริเวณรอยต่อ โลหะ-สารกึ่งตัวนำ ประกอบไปด้วยกลไกการนำกระแสสามชนิด คือ เทอร์มิโอนิกอิมิสชัน (Thermionic Emission: TE ) เกิดขึ้นโดยการกระตุ้นด้วยความร้อนทำให้พาหะไหลข้ามกำแพงศักย์จากแถบนำของสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะ ดังแสดงในรูปที่ 2.27 โดยทั่วไป TE จะมีอิทธิพลโดดเด่นเมื่อสารกึ่งตัวนำมีการเจือปนไปจนถึงความเข้มข้นของพาหะ  $10^{16}$  ต่อลูกบาศก์เซนติเมตรที่อุณหภูมิห้อง กลไกการเคลื่อนที่ชนิดที่สองคือฟิลด์อิมิสชัน ( Field Emission: FE ) ซึ่งเกี่ยวข้องกับผลของกลศาสตร์ควอนตัมอันเกิดจากการที่อิเล็กตรอนชุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ของรอยต่อระหว่าง โลหะ-สารกึ่งตัวนำ ตรงบริเวณระดับพลังงานเฟอร์มิภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้า กลไกการนำไฟฟ้าแบบ FE จะเริ่มมีบทบาทก็ต่อเมื่อมีอะตอมของสารเจือในปริมาณสูงมากกว่า  $10^{19}$  ต่อลูกบาศก์เซนติเมตรขึ้นไป กลไกการนำไฟฟ้าแบบเทอร์มิโอนิก-ฟิลด์ อิมิสชัน ( Thermionic-Field Emission : TFE ) เป็นการรวมกระบวนการไหลของพาหะแบบ TE และ FE เข้าด้วยกัน โดยพาหะจะถูกกระตุ้นด้วยความร้อนจนขึ้นไปอยู่เหนือระดับพลังงานเฟอร์มิตรงบริเวณที่สามารถชุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ตรงบริเวณส่วนที่แคบ ๆ ของกำแพงศักย์ไปได้



รูปที่ 2.27 แสดงกลไกการไหลของอิเล็กตรอนข้ามบริเวณรอยต่อระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

- ก. แบบเทอร์มิโอนิกอิมิสชัน ( 1 )
- ข. แบบเทอร์มิโอนิก-ฟิลด์อิมิสชัน ( 2 )
- ค. แบบฟิลด์อิมิสชัน ( 3 )

กรณีกลไกการนำกระแสแบบ TE ประมาณว่ามีเฉพาะอิเล็กตรอนเท่านั้นที่สามารถไหลจากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะด้วยพลังงานความร้อนที่มากพอที่จะเอาชนะกำแพงศักย์แล้วเคลื่อนที่ต่อไปได้ ความหนาแน่นของกระแสอิเล็กตรอนที่ไหลจากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะสามารถเขียนได้โดย

$$\begin{aligned} J_{S \rightarrow M} &= \dot{A} T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_B}{kT}\right) \cdot \exp\left(\frac{qV_a}{kT}\right) \\ &= J_{TH} \exp\left(\frac{-q\phi_B}{kT}\right) \exp\left(\frac{qV_a}{kT}\right) \end{aligned} \quad (2.37)$$

ในทำนองเดียวกันความหนาแน่นของกระแสอิเล็กตรอนที่ไหลจากโลหะไปสู่สารกึ่งตัวนำจะอยู่ในรูปของ

$$J_{S \leftarrow M} = J_{TH} \cdot \exp\left(\frac{-q\phi_B}{kT}\right) \quad (2.38)$$

โดย  $\dot{A}$  คือ ค่าคงตัวริชาร์ดสัน (Richardson's constant),  $V_a$  คือ แรงดันไบแอส และ  $T$  คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์มีหน่วยเป็นเคลวินของกำแพงศักย์ตรงรอยต่อระหว่าง โลหะ-สารกึ่งตัวนำ โดย  $\dot{A} = (4\pi q m^* k^2 / h^3)$  โดย  $m^*$  คือมวลยังผลอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำ  $k$  คือค่าคงที่โบลต์ซมันน์ มีค่าเท่ากับ  $1.38 \times 10^{-23}$  จูลต่อวินาที และ  $h$  คือค่าคงตัวของพลังค์มีค่าเท่ากับ  $6.625 \times 10^{-34}$  จูล-วินาที สำหรับอิเล็กตรอนอิสระ  $\dot{A}$  มีค่า 120 แอมแปร์ต่อ(ตารางเซนติเมตร-เคลวินยกกำลังสอง) ส่วน  $J_{TH}$  คือ สัมประสิทธิ์กระแสเทอร์มิโอนิก ซึ่งกำหนดโดย

$$J_{TH} = \dot{A} T^2 = 120 \left(\frac{m^*}{m}\right) T^2 \quad (2.39)$$

เมื่อ

$$\dot{A} = 120 \left(\frac{m^*}{m}\right)$$

ที่สภาวะสมดุลความร้อนกระแสสุทธิที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ ไป-มา ระหว่างรอยต่อ โลหะ-สารกึ่งตัวนำ นิยามจาก

$$\begin{aligned} J_{net} &= J_{S \rightarrow M} + J_{M \rightarrow S} \\ &= J_0 \left[ \exp\left(\frac{qV_a}{kT}\right) - 1 \right] \end{aligned} \quad (2.40)$$

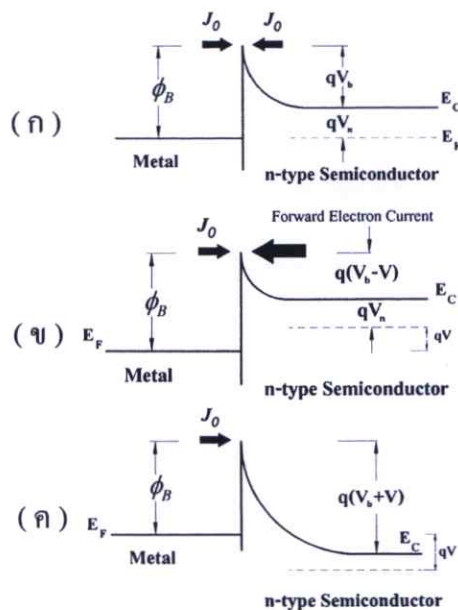
โดย  $J_0$  คือความหนาแน่นกระแสอิ่มตัว (saturation current density) นิยามโดย

$$J_0 = J_{TH} \cdot \exp\left(\frac{-q\phi_B}{kT}\right) \quad (2.41)$$

เรียก  $J_0$  นี้ว่าความหนาแน่นของกระแสริชาร์ดสัน (Richardson's current density) สำหรับการไบแอสตรงในปริมาณมาก ๆ ที่  $V_a \gg kT/q$  สมการที่ (2.40) จะลดลงเหลือ

$$J_{net} = J_0 \cdot \exp\left(\frac{qV_a}{kT}\right) \quad (2.42)$$

สมการ (2.42) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแรงดันไฟฟ้าของรอยต่อระหว่าง โลหะ-สารกึ่งตัวนำ ภายใต้การไบแอสตรง กระแสอิ่มตัว  $J_0$  ได้มาจากการกำหนด  $J_{net}$  ที่  $V_a = 0$  จากการเขียนกราฟระหว่าง  $\ln(J_{net})$  กับแรงดันไฟฟ้าแบบไบแอสตรง  $V_a$  แล้วความสูงของกำแพงศักย์จะหาได้จากสมการที่ (2.41) หากกำหนดไบแอสกลับทางด้วยแรงดันไฟฟ้ามาก ๆ คือ  $V_a \ll -kT/q$  พจน์  $\exp(-qV_a/kT)$  จะมีค่าน้อยกว่าหนึ่งมาก ๆ จากเงื่อนไขนี้  $J_{net} = -J_0$  ซึ่งจะบ่งบอกถึงค่ากระแสอิ่มตัวคงที่ซึ่งเป็นอิสระจากแรงดันไฟฟ้าไบแอส ลักษณะของแถบพลังงานตรงบริเวณรอยต่อขณะไบแอสตรงและไบแอสกลับทางจะแสดงดังรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 แสดงลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

- ก. ขณะไม่มีการไบแอส (zero bias) จะอยู่ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน
- ข. ขณะไบแอสตรง (forward bias)
- ค. ขณะไบแอสกลับทาง (reverse bias)

กระบวนการการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ ( tunneling current process ) ของอิเล็กตรอนใช้ในการอธิบายการไหลของกระแสของพาหะภายใต้สนามไฟฟ้าซึ่งไม่ขึ้นกับอุณหภูมิจากโลหะสู่สารกึ่งตัวนำ การไหลของพาหะผ่านรอยต่อ โลหะ-สารกึ่งตัวนำ ด้วยกระบวนการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงกำแพงศักย์ถูกนำมาใช้อธิบายการก่อตัวของรอยต่อโอห์มมิกในรอยต่อระหว่าง โลหะ-CdS กระแสที่ไหลจากการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ กำหนดโดยจำนวนของอิเล็กตรอนซึ่งส่งผลกระทบต่อและความเป็นไปได้ของการไหลของอิเล็กตรอนผ่านกำแพงศักย์บริเวณรอยต่อโลหะ-สารกึ่งตัวนำ กระแสจากการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์เป็นไปตามสมการ

$$J_{tun} = qNvP(\phi_B) \quad (2.43)$$

โดย  $q$  คือ ประจุของอิเล็กตรอน,  $N$  คือ จำนวนของอิเล็กตรอนที่ชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ตรงบริเวณรอยต่อ โลหะ-สารกึ่งตัวนำ  $v$  คือ ความเร็วของอิเล็กตรอนที่ขึ้นกับอุณหภูมิ และ  $P(\phi_B)$  คือ ความน่าจะเป็นของการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ พจน์  $P(\phi_B)$  ได้มาจากการแก้สมการชโรดิงเงอร์ด้วยเงื่อนไขขอบเขตที่เหมาะสม ในการคำนวณความน่าจะเป็นของการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ที่มีความสูง  $\phi_B$  โดยไม่มีการไบแอสแรงดัน โดยใช้หลักการประมาณสามารถเขียนได้ตามสมการ

$$J \propto \exp\left(\frac{\phi_B}{E_{00}}\right) \quad (2.44)$$

โดย  $E_{00} = \left(\frac{h}{4\pi}\right)\sqrt{\frac{N}{m^* \cdot \epsilon_s^*}}$  ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ของการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ของพาหะ (tunneling parameter) สำหรับการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์สนามไฟฟ้าขนาด  $10^7 - 10^8$  โวลต์ต่อเซนติเมตร นั้นมีความจำเป็น ในสารกึ่งตัวนำสนามไฟฟ้าที่มีความแรงจะเกิดขึ้นบริเวณที่พื้นผิวมีปริมาณของอะตอมของสารเจือมาก ๆ ใกล้บริเวณรอยต่อ โลหะ-สารกึ่งตัวนำ กระแสจากการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์จะเริ่มมีอิทธิพลต่อการเคลื่อนที่ของพาหะข้ามรอยต่อ โลหะ-สารกึ่งตัวนำ กระบวนการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์จะให้ความหนาแน่นกระแสมากกว่ากระบวนการ TE นี้เป็นเหตุผลว่าเพราะเหตุใดผิวหน้าที่เจือแบบ  $n^+$  และ  $p^+$  มักให้รอยต่อแบบโอห์มมิกที่ดี

ทฤษฎี TE, FE และ TFE มักใช้อธิบายในเทอมของ ความต้านทานจำเพาะของรอยต่อ ( $\rho_c$ ) ด้วยการหาอนุพันธ์สมการ (2.40) และ (2.44) เทียบกับ  $V_a$  โดยค่า  $\rho_c$  นิยามจากสมการ

$$\rho_C = \left( \frac{dJ}{dV_a} \right)^{-1} \text{ ที่ } V_a = 0 \quad (2.45)$$

โดย  $V_a$  คือ แรงดันไบแอสที่จ่ายผ่านขั้วไฟฟ้า สำหรับ TE บนรอยต่อแบบชอตต์กี การแก้ปัญหาลำหรับ  $\rho_C$  ทำได้โดย

$$\rho_C = \left( \frac{k}{qAT} \right) \cdot \exp\left( \frac{q\phi_B}{kT} \right) \quad (2.46)$$

จากสมการที่ (2.46) ความต้านทานจำเพาะของขั้วไฟฟ้าสำหรับ TE จะไม่ขึ้นกับความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือและความสูงของกำแพงศักย์ซึ่งเป็นตัวกำหนดความต้านทานขั้วไฟฟ้า ในกรณีของการชดเชยโม่งค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ความต้านทานจำเพาะของขั้วไฟฟ้ามักมีค่าโดยประมาณคือ

$$\rho_C \propto \exp\left( \frac{q\phi_B}{E_{00}} \right) \quad (2.47)$$

ในกรณีนี้ค่า  $E_{00}$  มีความสัมพันธ์อย่างมากกับค่า  $N$  เมื่อค่า  $N$  คือ จำนวนของอิเล็กตรอนที่ชดเชยโม่งค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ตรงบริเวณรอยต่อ โลหะ-สารกึ่งตัวนำ ซึ่งเป็นค่าตัวหนึ่งที่เป็นผลจากความกว้างของบริเวณปลอดพาหะสำหรับกรณี TFE ความต้านทานจำเพาะของขั้วไฟฟ้านิยามจากสมการ

$$\rho_C \propto \frac{\exp\left( \frac{q\phi_B}{E_{00}} \right)}{\coth\left( \frac{E_{00}}{kT} \right)} \quad (2.48)$$

ในกรณีนี้พจน์ที่ขึ้นกับอุณหภูมิจะอยู่ในพจน์ล่าง คือ  $\coth(E_{00}/kT)$  โดยจากทฤษฎี  $\coth(Z)$  จะเข้าใกล้ 1 หาก  $Z$  มีค่ามาก ๆ ( $Z = E_{00}/kT$ ) สมการที่ (2.48) ใช้ในการพิจารณาว่ารอยต่อแบบ TFE จะประพฤติตัวอย่างใดโดยอาศัยค่าสามเงื่อนไขของ  $E_{00}/kT$  คือ

$$\begin{aligned} E_{00}/kT &\gg 1 && ; \text{ FE} \\ E_{00}/kT &\ll 1 && ; \text{ TE} \\ E_{00}/kT &= 1 && ; \text{ TFE} \end{aligned} \quad (2.49)$$

พจน์  $\coth(Z)$  ได้แสดงให้เห็นฟังก์ชันที่ผิดพลาดและ  $\coth(Z) = 1$  เมื่อค่า  $Z$  เท่ากับ 2.7 ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะประมาณความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือที่เพียงพอทำให้เกิดขั้วไฟฟ้าแบบขูดอู๋โม่งค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ด้วยการตั้งค่า  $E_{00}/kT > 2.7$  ดังนั้นแล้วสมการที่ (2.49) จะลดรูปเหลือ

$$E_{00} = 18.5 \times 10^{12} \sqrt{\frac{N}{m_r \epsilon_r}} > 2.7kT \text{ eV} \quad (2.50)$$

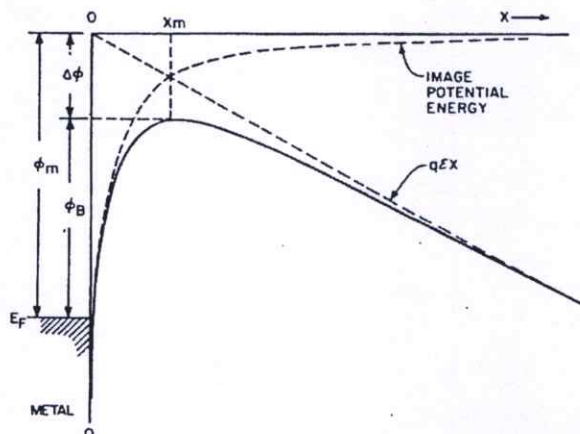
โดย  $m_r = \frac{m^*}{m}$  และ  $\epsilon_r = \frac{\epsilon_s}{\epsilon_0}$  สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดพีของ CdTe ที่ 300  $m_r = 0.09$   $\epsilon_r = 12$  สมการ(2.50) จะประพุดิตัวเป็นขั้วไฟฟ้าแบบโอห์มมิกเมื่อ  $N > 1.3 \times 10^{19}$  ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

### 2.11 ผลของชอตต์กี (Schottky effect) [1-3, 6, 11-12, 16-17, 26-33]

ผลของชอตต์กีเป็นปรากฏการณ์ที่ทำให้กำแพงศักย์ลดต่ำลง เมื่อมีสนามไฟฟ้าใส่เข้าไประหว่างรอยต่อของ โลหะ-สารกึ่งตัวนำ กำแพงศักย์จะมีค่าลดลงเท่ากับ  $(qE/4\pi\epsilon_s)^2$  ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าสนามไฟฟ้าที่ใส่เข้าไป เพราะฉะนั้นค่าความหนาแน่นของกระแสชาร์ตสันจะกลายเป็น

$$J_0 = A^* T^2 \exp(-\phi_B/kT) \exp\left[\frac{(qE/4\pi\epsilon_s)^2}{kT}\right] \quad (2.51)$$

เมื่อ  $E = [2qN_D(V_b - V)/\epsilon_s]^{1/2}$  นั่นคือ ค่าความหนาแน่นของกระแสชาร์ตสันจะเพิ่มขึ้นจากเดิมเนื่องจากการลดลงของกำแพงศักย์ดังกล่าว

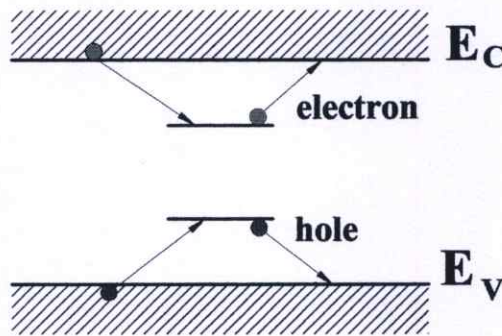


รูปที่ 2.29 แสดงการลดลงของกำแพงศักย์เนื่องมาจากผลของชอตต์กี

## 2.12 กระบวนการจับและรวมตัวกันของพาหะ [1-3, 6, 11-12, 16-17, 26-33]

การรวมตัวกันของพาหะ ( recombination process ) คือ การที่อิเล็กตรอนและโฮลอิสระมารวมกัน ( อิเล็กตรอนเข้าไปครอบครองสถานะที่ว่างของโฮล ) ส่งผลให้อิเล็กตรอนและโฮลอิสระคู่นั้นหายไป ( เมื่อได้รับพลังงานใหม่ที่พอเพียงอิเล็กตรอนนั้นก็จะถูกกระตุ้นให้กลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระอีกครั้ง เกิดเป็นอิเล็กตรอนกับโฮลอิสระขึ้นมาใหม่ ) ส่วนกระบวนการจับพาหะ ( trapping process ) คือ กระบวนการที่อิเล็กตรอน หรือ โฮลอิสระถูกกักอยู่ที่บริเวณศูนย์กลางที่ทำหน้าที่เป็นกับดักประจุ (trapping center) ชั่วครู่แล้วจึงออกไปเป็นอิสระอีกครั้ง กับดักประจุส่วนมากเกิดขึ้นจากความไม่สมบูรณ์ของผลึก ( defects ) หรือเกิดจากอะตอมของสารเจือในสารกึ่งตัวนำ กระบวนการจับและรวมตัวของพาหะจะทำให้ช่วงชีวิตของอิเล็กตรอนหรือโฮลอิสระลดลง ซึ่งส่งผลให้สภาพนำไฟฟ้าลดลงด้วยกระบวนการรวมตัวของพาหะที่สำคัญมีดังนี้ คือ

1. การรวมตัวกัน โดยตรง ( direct recombination หรือ band to band recombination )
2. การรวมตัวกัน โดยผ่านบริเวณศูนย์กลางที่ทำหน้าที่เป็นกับดักประจุ ( recombination through traps )
3. การรวมตัวกันแบบออเจ ( Auger recombination )
4. การรวมตัวกันที่บริเวณผิวหน้าสาร ( surface recombination )



รูปที่ 2.30 แสดงอิเล็กตรอนและโฮลถูกจับเอาไว้ที่ศูนย์กลางที่ทำหน้าที่เป็นกับดักประจุ

### 2.12.1 การรวมกันโดยตรง ( direct recombination หรือ band to band recombination )

อิเล็กตรอนจากแถบนำจะเข้ารวมตัวกับโฮลในแถบเวเลนซ์ ซึ่งขบวนการนี้จะทำให้เกิดการปล่อยพลังงานออกมาในรูปของโฟตอน โฟตอนที่ปล่อยออกมาจะมีพลังงานเท่ากับพลังงานของ  $E_g$  พลังงานนี้จะถูกดูดกลืนแค่เพียงบางส่วนเท่านั้นจึงสามารถปลดปล่อยออกมาจากชั้นสารกึ่งตัวนำได้ ยกตัวอย่างเช่นแสงซึ่งได้ออกมาจากไดโอดเปล่งแสง ( LED )

### 2.12.2 การรวมตัวกันโดยผ่านบริเวณศูนย์กลางที่ทำหน้าที่เป็นกับดักประจุ ( recombination through traps หรือ Shockley-Read-Hall ; SHR recombination หรือ recombination center )

เป็นการรวมตัวกันโดยที่อิเล็กตรอนจากแถบนำเคลื่อนลงสู่สถานะว่างในแถบวาเลนซ์เป็นสองจังหวะ โดยในสองจังหวะนี้ทิ้งช่วงห่างกันพอควร ( ซึ่งทำให้ต่างกับการตกลงสู่แถบเวเลนซ์ของสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างแถบพลังงานแบบเฉียง ซึ่งแบบนี้ระยะห่างของเวลาในสองจังหวะแทบไม่มีเลย ) เริ่มจากอิเล็กตรอนตกลงมาที่บริเวณกับดักประจุซึ่งอยู่ตรงกลางช่องว่างแถบพลังงาน โดยสมมติว่ามีกับดักประจุอยู่ตรงกลางช่องว่างแถบพลังงานเพียงระดับเดียว แต่ในเนื้อสารจริง ๆ ไม่เป็นเช่นนั้น เพราะประกอบไปด้วยกับดักประจุมากมายหลายชนิด อีกทั้งกับดักประจุนี้ก็อาจจะจับโฮลได้ด้วย ทำให้อิเล็กตรอนและโฮลรวมตัวกันที่บริเวณศูนย์กลางที่ทำหน้าที่เป็นกับดักประจุ ซึ่งจะเรียกชื่อใหม่ว่าเป็น ศูนย์กลางการรวมตัวกันของพาหะ ( recombination center )

### 2.12.3 การรวมตัวกันแบบออเจจ ( Auger recombination )

การรวมตัวกันแบบออเจจนั้นประกอบไปด้วยพาหะประจุ 3 ตัว เริ่มจากอิเล็กตรอนเข้าร่วมตัวกับโฮล จากนั้นปล่อยพลังงานออกมาในรูปของโฟตอนหรือความร้อน พลังงานดังกล่าวจะถูกดูดกลืนโดยอิเล็กตรอนอีกตัวหนึ่งซึ่งอยู่ในขอบล่างของแถบนำ ส่งผลให้อิเล็กตรอนมีพลังงานเพิ่มขึ้นและเคลื่อนขึ้นสู่ระดับพลังงานที่สูงขึ้นบนแถบนำ สุดท้ายแล้วจะคายพลังงานออกมาและตกลงมายังขอบล่างของแถบนำอีกครั้ง การรวมตัวกันใหม่แบบออเจจนี้เป็นกลไกที่สำคัญในสารกึ่งตัวนำที่มีการเจืออย่างหนัก

### 2.12.4 การรวมตัวกันที่บริเวณผิวหน้าสาร ( surface recombination )

เป็นการรวมตัวของอิเล็กตรอนและโฮลที่เดินทางไปถึงบริเวณผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งจะเกิดการรวมตัวกันที่นั่น เพราะมีฉะนั้นจะทำให้บริเวณผิวเกิดประจุไฟฟ้าขึ้น คือ ไม่เป็นกลางทางไฟฟ้าอัตราการรวมตัวกันที่ผิวมีค่าสูงและบางครั้งมากกว่าอัตราการรวมตัวกันที่เกิดขึ้นภายในเนื้อสารเสียอีก

## 2.13 การวัดความต้านทานจำเพาะของรอยต่อแบบโอห์มมิกสำหรับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe [1-3, 6, 11-12, 16-17, 26-33]

ในบางครั้งเป็นการยากที่จะวัดสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อแบบโอห์มมิกระหว่าง โลหะ-สารกึ่งตัวนำ ด้วยการใช้วิธีการวัดโดยแบบจำลองเส้นการส่งผ่าน ( Transmission Line Model:TLM ) โดยเฉพาะกับสารกึ่งตัวนำที่มีค่าฟังก์ชันงานสูง ข้อมูลการวัดจากวิธี TLM นั้นไม่เพียงพอสำหรับฟิล์มบางของผลึกพหุพันธ์เนื่องจากมีกำแพงศักย์บริเวณขอบของเกรนคอยกระเจิงพาหะในระหว่าง

ที่ไหลไปตามแนวราบ ดังนั้นจึงต้องมีการตัดแปลงวิธีการวัดเพื่อให้ได้ค่าที่แม่นยำของสภาพต้านทานของเนื้อฟิล์มบาง ( Bulk resistivity:  $\rho_B$  ที่มีหน่วยเป็น โอห์ม-เซนติเมตร ), ความต้านทานจำเพาะของรอยต่อ ( specific contact resistance:  $\rho_C$  ที่มีหน่วยเป็น โอห์ม-ตารางเซนติเมตร ), และ  $R_E$  เป็นความต้านทานของฟิล์มชั้นล่างสุด ( end resistance )

การเกิดของรอยต่อแบบโอห์มมีกระหว่าง โลหะ-สารกึ่งตัวนำ เป็นนิยามจากการละทิ้งค่าความต้านทานบริเวณรอยต่อซึ่งมีความสัมพันธ์อยู่กับสมบัติและความต้านทานเนื้อสารของสารกึ่งตัวนำ ในการตรวจความเป็นโอห์มมีกนั้นวิธีทั่วไปที่ใช้วัดถูกเสนอขึ้นเป็นครั้งแรกโดยชอกคีย์ ( Shockley ) เรียกว่าแบบจำลองเส้นการส่งผ่าน ( TLM ) ซึ่งมักใช้ในการพิจารณาค่าของ  $\rho_C$  ในการวัดแบบแวนนอน มีการเสนอว่าความต้านทานรวม  $R_T$  ระหว่างขั้วไฟฟ้าใดๆ ที่มีพื้นที่ขนาดยาว  $d$  กว้าง  $w$  วางห่างกันเป็นระยะทาง  $l$  บนผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำจะเป็นฟังก์ชันกับระยะทาง  $l$  และการเขียนกราฟระหว่าง  $R_T$  กับ  $l$  จะให้เส้นตรงโดยมี  $\rho_B$  ของสารกึ่งตัวนำ คือ ความชันของเส้นตรง และ  $\rho_C$  คือ จุดตัดแกน ในบางครั้งการใช้วิธีดังกล่าวกับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำชนิดผลึกพหุพันธ์ที่มีความต้านทานสูงเป็นการยากที่จะได้ผลการทดลองซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎี สำหรับการวัดแบบ TLM นั้นความต้านทานรวมเป็นไปตามสมการ

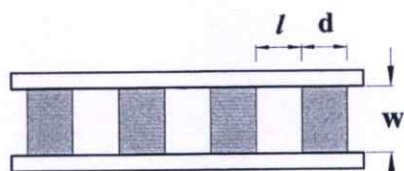
$$R_T = \frac{2\rho_C}{d.w} + \frac{\rho_B.l}{t.w} \quad (2.52)$$

โดย  $t$  คือ ความหนาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ

หาก  $t$  มีค่าน้อยมากและ  $\rho_B$  มีค่าสูงมาก ๆ พจน์ที่สองของสมการจะมีขนาดมากเมื่อเทียบกับพจน์ที่หนึ่งและพจน์ที่สองนั้นจะมีค่าขึ้นกับ  $\rho_B$  พจน์ที่หนึ่งจะมีค่าน้อยมากและส่งผลน้อยต่อค่า  $R_T$  ดังนั้นการเขียนกราฟระหว่างค่า  $R_T$  กับ  $l$  จะให้จุดตัดที่มีขนาดเล็กมากและในบางครั้งก็ผ่านจุดกำเนิดของกราฟซึ่งหมายถึงมีค่า  $\rho_C$  ที่น้อยมาก ๆ ซึ่งไม่เป็นความจริง ดังนั้นหากจะใช้วิธี TLM ให้ได้ผลสอดคล้องกับทฤษฎีจะต้องเตรียมพื้นที่ขั้วไฟฟ้าที่มีขนาดเล็กมาก ๆ ลงบนฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำที่มีความหนาพอควร โดยขั้วไฟฟ้าแต่ละขั้วต้องมีระยะห่างระหว่างกันที่น้อยมาก ๆ ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วเป็นไปได้ยาก เพื่อหลีกเลี่ยงข้อจำกัดเหล่านี้มีอีกวิธีหนึ่งซึ่งสามารถวัดค่า  $R_T$  ได้เสนอโดยโกช ( Ghosh ) เรียกว่าวิธีการส่งผ่านแนวตั้ง ( Vertical Transmission Method:VTM ) มีความสัมพันธ์ตามสมการ

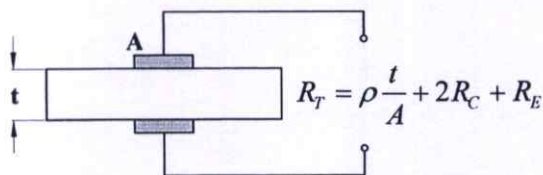
$$R_T = \frac{2\rho_C}{A} + \frac{\rho_B.t}{A} + R_E \quad (2.53)$$

โดย  $A$  คือพื้นที่ของขั้วไฟฟ้า และ  $R_E$  คือความต้านทานปลาย (end resistance) เป็นความต้านทานของฟิล์มบางในชั้นสุดท้าย จากสมการนี้จะพบว่ามีความสัมพันธ์สองตัว คือ พื้นที่และความหนาของขั้วไฟฟ้า หากให้ความหนาเป็นค่าคงตัวการเขียนกราฟระหว่าง  $R_T$  กับ  $1/A$  จะให้กราฟเส้นตรงโดยมีความชันเท่ากับ  $(2\rho_C + \rho_B \cdot t)$  และมีค่า  $R_E$  เป็นจุดตัดแกน  $Y$  แต่ถ้าให้  $A$  เป็นค่าคงที่การเขียนกราฟระหว่าง  $R_T$  กับ  $t$  จะได้กราฟเส้นตรงโดยมีความชันเท่ากับ  $\rho_B/A$  และมีค่า  $(\frac{2\rho_C}{A} + R_E)$  เป็นจุดตัดแกน  $Y$  จากการวัดทั้งสองแบบนี้สามารถวัดค่า  $\rho_B$ ,  $\rho_C$  และ  $R_E$

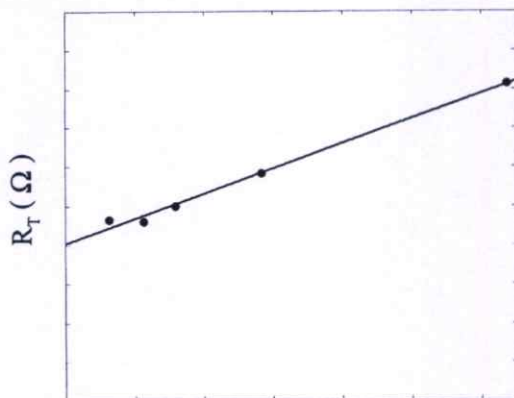


$$R_T = \rho \frac{l}{w \times d} + 2R_E$$

(ก)



(ข)


 $A^{-1} (\text{cm}^{-2})$  หรือ  $t (\mu\text{m})$ 

(ค)

### รูปที่ 2.31 แสดงการวัดสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อโอห์มมิก

ระหว่าง โลหะ-สารกึ่งตัวนำ

ก. การวัดแบบ TLM

ข. การวัดแบบ VTM

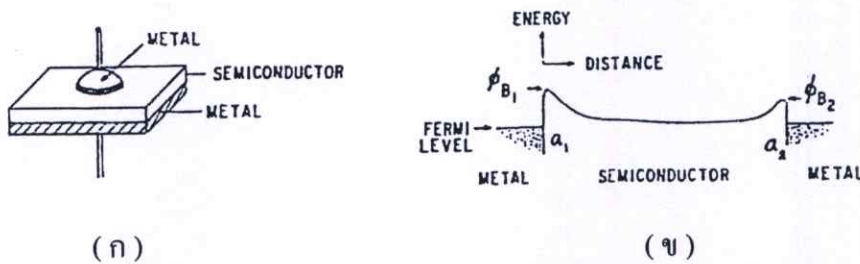
ค. ลักษณะของกราฟจากการวัดแบบ VTM

เป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าการสร้างขั้วไฟฟ้าแบบโอห์มมิกกับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe นั้นไม่่ง่ายนักและค่าของ  $\rho_C$  ในรอยต่อระหว่าง โลหะ-สารกึ่งตัวนำ จะเป็นตัวกำหนดระดับของความเป็นโอห์มมิก ดังนั้นการวัดค่า  $\rho_C$  ที่แม่นยำจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งการวัดแบบ TLM พาหะจะถูกกระเจิงด้วยกำแพงศักย์บริเวณขอบของเกรนซึ่งจะไปเพิ่มค่าของความต้านทานของการวัดซึ่ง

เป็นตัวการสำคัญให้ผลการทดลองผิดพลาด ในอีกด้านหนึ่งการวัดแบบ VTM พาหะจะเคลื่อนที่ในแนวตั้ง และมีโอกาสน้อยที่จะปะทะกับกำแพงศักย์บริเวณขอบของเกรนส่งผลให้ได้ค่า  $R_T$  ที่สอดคล้องกับความเป็นจริง

## 2.14 การหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่รอยต่อระหว่าง โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ โดยการวัดความหนาแน่นของกระแสริชาร์ดสัน [6, 11-12, 16-17, 25]

การศึกษาสมบัติของรอยต่อระหว่าง โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ ในที่นี้จะพิจารณาในระบบที่ประกอบด้วยคาโทด-บัลค์-แอโนด (cathode-bulk-anode) ดังรูป 2.32



**รูปที่ 2.32** แสดงการศึกษาสมบัติของรอยต่อระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น-โลหะ

- ก. แสดงสิ่งประดิษฐ์ที่ทำจาก โลหะ-สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น-โลหะ ซึ่งใช้ในการศึกษาสมบัติของรอยต่อระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ
- ข. แสดงค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่รอยต่อระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ

วิธีนี้สามารถที่จะหาความสูงของกำแพงศักย์ได้ทั้งที่มีค่ามากหรือน้อย โดยตั้งสมมติฐานว่าปรากฏการณ์ที่เกิดกำแพงศักย์จะอยู่ที่รอยต่อระหว่างคาโทดกับบัลค์เท่านั้น ความต้านทานที่อยู่ถัดจากรอยต่อระหว่างคาโทดกับสารกึ่งตัวนำออกไปจะเรียกรวมกันว่าเป็นความต้านทานของบัลค์ที่สถานะสมดุลความร้อนความหนาแน่นของกระแสที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ได้ทั้งจากทางด้านโลหะเข้าสู่สารกึ่งตัวนำ หรือจากด้านสารกึ่งตัวนำสู่โลหะจะเป็นไปตามสมการ

$$J_0 = A^* T^2 \exp(-\phi_B / kT) \quad (2.54)$$

ถ้ารอยต่อมีพื้นที่  $a_1$  และความสูงของกำแพงศักย์มีค่าเท่ากับ  $\phi_{B1}$  ดังรูปที่ 2.32 (ข) ดังนั้นค่ากระแสริชาร์ดสัน ดังรูปที่ 2.33 จะเป็นไปตามสมการ

$$\begin{aligned}
 I_{01} &= a_1 J_{01} \\
 &= a_1 \dot{A} T^2 \exp(-\phi_{B1} / kT)
 \end{aligned}
 \tag{2.55}$$

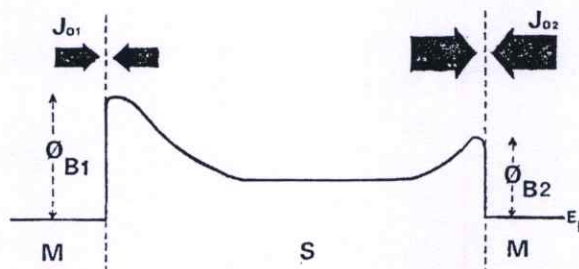
ในทำนองเดียวกันหากรอยต่อมีพื้นที่  $a_2$  โดยที่  $a_2 > a_1$  ดังรูปที่ 2.32( ก.) และความสูงของกำแพงศักย์มีค่าเท่ากับ  $\phi_{B2}$  กระแสริชาร์ดสันจะมีค่าดังนี้

$$I_{02} = a_2 \dot{A} T^2 \exp(-\phi_{B2} / kT) \tag{2.56}$$

ในกรณีที่ป้อนแรงดันให้กับสิ่งประดิษฐ์ ดังรูปที่ 2.32 ( ก.) กระแสที่ไหลผ่านความต้านทานของบัลค์ ( bulk resistance, R ) จะเป็นไปตามสมการ

$$I = \frac{V_R}{R} \tag{2.57}$$

เมื่อ  $V_R$  คือแรงดันที่ตกคร่อมบัลค์

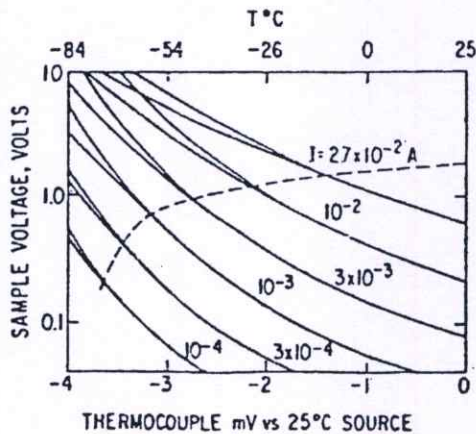


**รูปที่ 2.33** แสดงทิศทางและขนาดของกระแสริชาร์ดสันที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ที่มีขนาดความสูงเป็น  $\phi_{B1}$  และ  $\phi_{B2}$  ตามลำดับ ในขณะที่ไม่มีการไบแอสกับสิ่งประดิษฐ์

หากให้ขั้วลบ ( negative side ) ของแรงดันไฟฟ้า  $V_1$  อยู่ทางด้านรอยต่อที่มีพื้นที่  $a_1$  กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านกำแพงศักย์มีค่าเป็น  $I$  สำหรับในกรณีที่  $I \ll I_{01}$  แล้วกำแพงศักย์  $\phi_{B1}$  ของรอยต่อ จะไม่มีผลในการขัดขวางการไหลของกระแส ฉะนั้นความต่างศักย์ไฟฟ้า  $V_R$  จะมีค่าเท่ากับ  $V_1$  แต่ถ้าในกรณีที่ให้ขั้วลบของแรงดันไฟฟ้า  $V_2$  อยู่ทางด้านรอยต่อที่มีพื้นที่  $a_2$  ถ้ากระแสไฟฟ้า  $I$  ค่าเดิม และ  $I \ll I_{02}$  แล้วกำแพงศักย์  $\phi_{B2}$  จะไม่ขัดขวางการไหลของกระแสไฟฟ้าเพราะฉะนั้น  $V_R$  จะเท่ากับ  $V_2$  หรือ  $V_1 = V_2$  นั่นคือเมื่อกระแสไฟฟ้ามีค่าน้อย ๆ

( $I \ll I_{01}, I_{02}$ ) ถึงแม้ว่าจะมีการสลับขั้วของแรงดันไฟฟ้าก็ตาม แต่กำแพงศักย์จะไม่ขัดขวางการไหลของกระแสไฟฟ้า

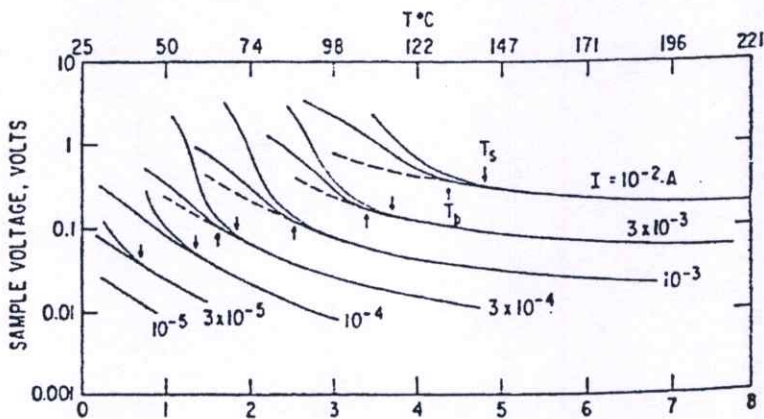
แต่ในกรณีที่  $\phi_{B1} > \phi_{B2}$  เราทราบแล้วว่า  $J_{01} < J_{02}$  ถ้ากำหนดให้พื้นที่  $a_1 = a_2$  เราจะได้  $I_{01} < I_{02}$  สำหรับในทางปฏิบัติหากให้กระแสไฟฟ้า  $I$  อยู่ในช่วง  $I_{01} < I < I_{02}$  ถ้าใส่แรงดันไฟฟ้า  $V_2$  เข้าไปโดยให้ขั้วลบอยู่ทางด้านรอยต่อที่มีพื้นที่  $a_2$  แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมบัลลิ่ง ( $V_R$ ) จะมีค่าเท่ากับ  $V_2$  แต่ถ้าสลับขั้วของแรงดันไฟฟ้าและต้องการจะให้ได้กระแสไฟฟ้า  $I$  ค่าเดิม จะเห็นได้ชัดว่ากระแสรีชาร์ดสัน ( $I_{01}$ ) มีค่าน้อยกว่ากระแสไฟฟ้า  $I$  ที่ต้องการ ฉะนั้นกระแสไฟฟ้า  $I$  นี้จะได้อาจมาจากกระแสรีชาร์ดสันร่วมกับกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากอิเล็กทรอนิกส์ที่มีพลังงานต่ำกว่ากำแพงศักย์  $\phi_{B1}$  กำแพงศักย์  $\phi_{B1}$  ดังกล่าวนี้จะมีผลในการขัดขวางการไหลของกระแสไฟฟ้าเปรียบเสมือนว่าเกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมขึ้นที่รอยต่อ ดังนั้นเพื่อให้ได้กระแสไฟฟ้า  $I$  ค่าดังกล่าว จะต้องมีการเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้นเป็น  $V_1$  โดยที่  $|V_1| > |V_R|$  สรุปได้ว่าหากกำหนดให้กระแสไฟฟ้า  $I$  มีค่าคงที่และ  $I_{01} < I_{02}$  แล้วเราจะได้ว่า  $|V_1| > |V_2|$  แสดงว่าที่กระแสไฟฟ้ค่าคงที่นี้กำแพงศักย์  $\phi_{B1}$  เท่านั้นที่ขัดขวางการไหลของกระแสไฟฟ้า



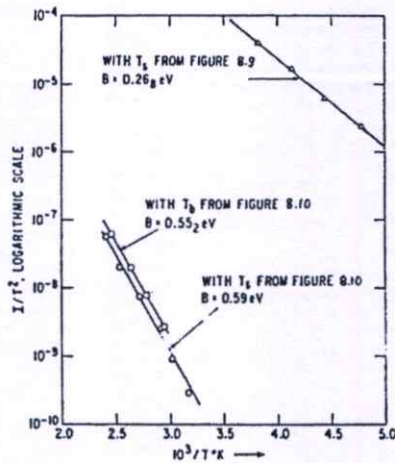
รูปที่ 2.34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ตกคร่อมสิ่งประดิษฐ์ซึ่งทำจาก Sn-GaAs-(Ge-Au) กับอุณหภูมิที่กระแสคงที่ค่าต่าง ๆ

สำหรับการทดลองเพื่อที่จะหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่รอยต่อระหว่างโลหะชนิดใด ๆ กับสารกึ่งตัวนำ ถ้าใช้โลหะชนิดเดียวกันในการทำรอยต่อดังกล่าว กำแพงศักย์  $\phi_{B1}$  จะเท่ากับ  $\phi_{B2}$  แต่กำหนดให้  $a_1 < a_2$  ซึ่งจะได้เงื่อนไข  $I_{01} < I_{02}$  เหมือนดังที่กล่าวมาข้างต้น จากเงื่อนไข  $I_{01} < I_{02}$ ,  $|V_1| > |V_2|$  และที่กระแสไฟฟ้าค่าคงที่หลาย ๆ ค่า รวมทั้งมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (เนื่องจากอุณหภูมิมีผลต่อค่ากระแส  $I_{01}$  และ  $I_{02}$ ) จะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์  $|V_1|, |V_2|$  กับอุณหภูมิ  $T$  ของสิ่งประดิษฐ์ที่ทำจาก Sn-GaAs-(Ge-Au) ดังปรากฏในรูปที่ 2.34 จากกราฟในรูปที่ 2.34 จะเห็นว่าที่อุณหภูมิ -26 องศาเซลเซียส ค่าของแรงดันไฟฟ้า

ขนาด  $|V_1|$  จะเท่ากับขนาด  $|V_2|$  ที่กระแสไฟฟ้าค่าคงที่ทุกค่าเฉพาะค่าที่ต่ำกว่า  $10^{-2}$  แอมป์ แต่ถ้ากระแสไฟฟ้าสูงกว่าค่านี้ความต่างศักย์ไฟฟ้าขนาด  $|V_1|$  จะเริ่มมีค่ามากกว่า  $|V_2|$  แสดงว่าค่าแรงแศก  $\phi_{B1}$  เริ่มมีผลในการขัดขวางการไหลของกระแสไฟฟ้าสำหรับกระแสไฟฟ้าค่าคงที่แต่ละค่าจะเกิดการแยก (split) ของ  $|V_1|$  และ  $|V_2|$  ที่อุณหภูมิ  $T_S$  ดังนั้นค่าแรงแศกจะไม่ขัดขวางการไหลของกระแสไฟฟ้าเมื่อค่ากระแสไฟฟ้าและอุณหภูมิลดต่ำกว่าเส้นประของรูปที่ 2.34 ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมบัลลัส ( $V_R$ ) จึงเท่ากับขนาดของ  $|V_1|$  และ  $|V_2|$  นั่นคือเป็นการศึกษาความต้านทานของสารกึ่งตัวนำที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิโดยที่ไม่มีผลของรอยต่อเข้ามาเกี่ยวข้อง หากยังคงมีการลดอุณหภูมิให้ต่ำกว่า  $T_S$  ต่อไปจนกระทั่งกระแสไฟฟ้าค่าคงที่  $I > I_{02}$  แล้ว  $|V_2| > V_R$  เส้นโค้งของกราฟระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับอุณหภูมิมิมีแนวโน้มที่จะโค้งแยกออกจากแนวเดิมที่อุณหภูมิ  $T_b$  แสดงว่าค่าแรงแศก  $\phi_{B2}$  เริ่มมีผลในการขัดขวางการไหลของกระแสไฟฟ้าค่าคงที่  $I$  ดังปรากฏในรูปที่ 2.35 ให้นำเอาค่ากระแสไฟฟ้าและอุณหภูมิที่จุดเริ่มต้นมีการแยกของความต่างศักย์ (ดังรูปที่ 2.34 และ 2.35) ไปเขียนกราฟระหว่าง  $\ln(I/T^2)$  กับ  $\frac{1}{T}$  โดยที่  $T$  คือ  $T_S$  หรือ  $T_b$  จะได้กราฟเส้นตรงมีความชันเท่ากับ  $-\phi_{B1}/k$  หรือ  $-\phi_{B2}/k$  ซึ่งสามารถหาค่าความสูงของค่าแรงแศกที่มีผลในการขัดขวางการไหลของกระแสไฟฟ้าได้โดยง่าย (ดังรูปที่ 2.36) ถ้าความสูงของค่าแรงแศกมีค่ามาก ที่อุณหภูมิห้อง ค่าแรงแศก  $\phi_{B1}$  และ  $\phi_{B2}$  จะขัดขวางการไหลของกระแสไฟฟ้าซึ่งทำให้มีกระแสไฟฟ้าค่าคงที่ค่าหนึ่ง ความต่างศักย์ไฟฟ้าขนาด  $|V_1|$  จะไม่เท่ากับขนาด  $|V_2|$  ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นเพื่อหาค่าอุณหภูมิ  $T_S$  แทนที่จะเป็นการลดอุณหภูมิให้ต่ำลงตามวิธีที่ได้กล่าวมาแล้ว ดังนั้นที่กระแสไฟฟ้าค่าคงที่นี้ ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากการสลับขั้วจะมีค่าเท่ากัน ( $|V_1| = |V_2|$ ) เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า  $T_S$



รูปที่ 2.35 แสดงอุณหภูมิ  $T_S$  และ  $T_B$  ที่กระแสค่าคงที่ต่าง ๆ



รูปที่ 2.36 แสดงการหาค่าความสูงของกำแพงศักย์จากกระแสชาร์ดสันกับส่วนกลับของอุณหภูมิ

จากระบบที่ประกอบด้วย คาโทด-บัลค์-อานอด ดังกล่าวนี ช่วยทำให้เราหาความสูงของกำแพงศักย์ที่รอยต่อได้อย่างถูกต้องทั้งที่มีค่ามากหรือน้อย รวมทั้งค่าคงที่ริชาร์ดสันที่กำแพงศักย์  $\phi_{B1}$  และ  $\phi_{B2}$  ได้ด้วย นอกจากนี้ยังทำให้สามารถศึกษาสมบัติของบัลค์ได้โดยตรงในอานาบรีเวณได้เส้นประ  $T_s$  ของรูปที่ 2.34 โดยไม่มีผลของรอยต่อเข้ามารบกวน สมบัติบางประการของบัลค์ เช่นพลังงานไอออไนซ์ของระดับพลังงานสิ่งเจือปน หาได้จากการวัดส่วนกลับของความต้านทานของบัลค์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ เป็นต้น

## 2.15 ความสูงกำแพงศักย์ที่ไม่สม่ำเสมอ ( inhomogeneous barrier height ) [6, 17, 31]

จากทฤษฎีในแนวคิดเดิมนั้นความสูงของกำแพงศักย์มีค่าคงตัวไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ แต่ในการทดลองจริงพบว่าค่าความสูงของกำแพงศักย์และค่าแฟกเตอร์อุดมคติที่ได้จะขึ้นกับอุณหภูมิที่ใช้วัด โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นความสูงของกำแพงศักย์จะเพิ่มขึ้นแต่ค่าแฟกเตอร์อุดมคติลดลง ความสูงของกำแพงศักย์มีค่าไม่สม่ำเสมอตลอดทั่วผิวรอยต่อระหว่าง โลหะ-สารกึ่งตัวนำ ส่งผลให้ค่ากระแส-แรงดันไฟฟ้า ที่วัดได้มีค่าเบี่ยงเบนไปจากทฤษฎี TE กลไกการเกิดความไม่สม่ำเสมอของความสูงของกำแพงศักย์นั้นยังไม่เป็นที่แน่ชัด แต่ความสูงของกำแพงศักย์นั้นมักขึ้นกับโครงสร้างระดับอะตอมของผิวรอยต่อ ( interface atomic structure ) นอกจากนี้ความสูงของกำแพงศักย์ที่ไม่สม่ำเสมอตลอดทั่วผิวรอยต่อระหว่าง โลหะ-สารกึ่งตัวนำ ยังอาจมีสาเหตุจากอิทธิพลของบริเวณขอบรอยต่อของเกรน, เฟสซับซ้อน ( multiple phase ), ระนาบผลึก ( facets ), ความไม่สมบูรณ์ของผลึก และการผสมกันของเฟสที่ต่างกัน ในการเขียนกราฟริชาร์ดสันจะพบค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกราฟซึ่งมีผลมาจากความสูงของกำแพงศักย์ที่ไม่สม่ำเสมอตลอดทั่วผิวรอยต่อซึ่งมีทั้งบริเวณที่กำแพงศักย์สูงและกำแพงศักย์ต่ำ โดยกระแสที่ไหลผ่านรอยต่อของสิ่งประดิษฐ์จะเลือกไหลผ่านบริเวณที่มีกำแพงศักย์ต่ำ การศึกษาความสูงของกำแพงศักย์ที่ไม่

สมำเสมอและกลไกการนำไฟฟ้าในช่วงต่าง ๆ สามารถศึกษาได้จากความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า ด้วยการวัดแบบไบแอสตรง จากทฤษฎี TE ความสัมพันธ์ของกระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้าสำหรับ ซอตต์ก์ไดโอด คือ

$$I = I_S \left[ \exp\left(\frac{qV_a}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2.58)$$

โดย  $I$  คือ กระแสที่วัดได้,  $V_a$  คือ แรงดันไฟฟ้าไบแอส,  $q$  คือ ค่าประจุของอิเล็กตรอน,  $n$  คือ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ,  $k$  คือ ค่าคงตัวโบลตซ์มันน์,  $T$  คือ อุณหภูมิที่ใช้วัดในหน่วยเคลวิน และ  $I_S$  คือ ค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับที่อุณหภูมิต่าง ๆ ซึ่งนิยามโดย

$$I_S = A \dot{A} T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_{BO}}{kT}\right) \quad (2.59)$$

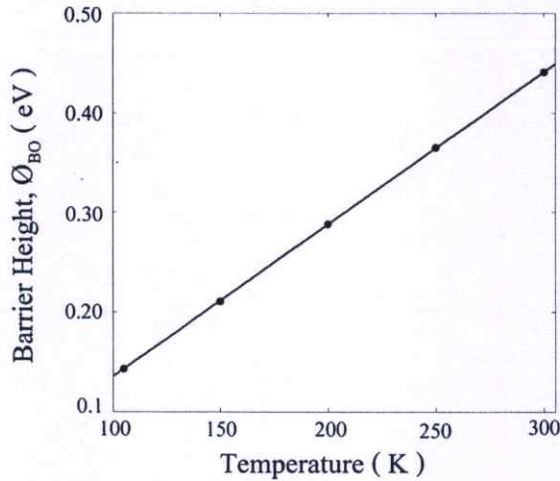
โดย  $A$  คือ พื้นที่ของขั้วไฟฟ้า,  $\dot{A}$  คือ ค่าคงตัวริชาร์ดสัน,  $\phi_{BO}$  คือ ค่ากัมแพงศักย์ที่วัดได้จริงเมื่อ  $V_a = 0$  โดยค่า  $\phi_{BO}$  นิยามตามสมการ

$$\phi_{BO} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{A \dot{A} T^2}{I_S}\right) \quad (2.60)$$

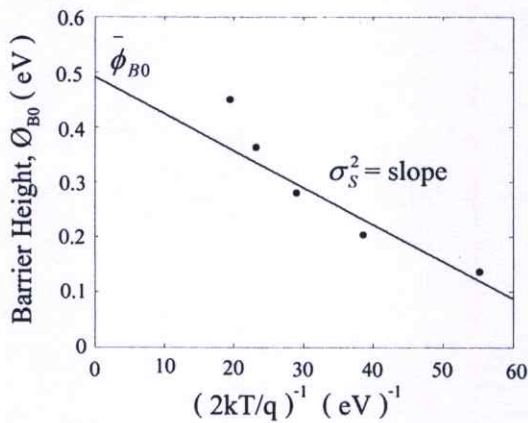
ในกรณีที่รอยต่อเป็นแบบโอห์มมิกความสัมพันธ์ระหว่าง  $\phi_{BO}$  และอุณหภูมิจะเป็นแบบเชิงเส้นดังแสดงตามรูปที่ 2.37 ในขณะที่เดียวกันหากนำค่าความสูงของกัมแพงศักย์  $\phi_{BO}$  มาเขียนกราฟความสัมพันธ์กับ  $q/2kT$  จะได้ความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น โดยมีจุดตัดแกนตั้งเป็นค่ากัมแพงศักย์เฉลี่ยที่อุณหภูมิศูนย์เคลวินและมีความชันของกราฟเป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแนวโน้มข้อมูลตามสมการ

$$\phi_{BO} = \bar{\phi}_{BO} - \frac{q\sigma_S^2}{2kT} \quad (2.61)$$

เมื่อ  $\bar{\phi}_{BO}$  คือ ค่าเฉลี่ยของกัมแพงศักย์ เมื่อประมาณว่าวัดที่อุณหภูมิศูนย์เคลวิน  $\bar{\phi}_{BO}(T=0)$  และ  $\sigma_S$  คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน



รูปที่ 2.37 แสดงค่าความสูงของกำแพงศักย์ ( $\phi_{B0}$ ) ที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิของสิ่งประดิษฐ์ที่มีโครงสร้าง Cu/CdTe/Cu

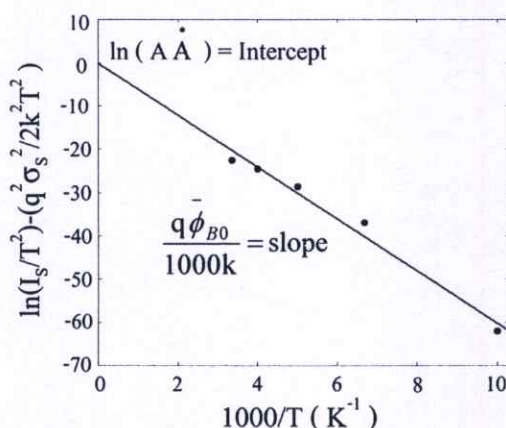


รูปที่ 2.38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $(2kT/q)^{-1}$  กับ  $\phi_{B0}$  ของสิ่งประดิษฐ์ที่มีโครงสร้าง Cu/CdTe/Cu

ในบางครั้งการเขียนกราฟของกระแสชาร์ดสันของรอยต่อที่เป็นแบบชอตต์กี อาจได้เส้นแนวโน้มที่เบี่ยงเบนไปของข้อมูล (แต่จะเป็นเส้นตรงเสมอในกรณีของรอยต่อแบบโอห์มมิก) ซึ่งเป็นผลมาจากความสูงของกำแพงศักย์ที่มีค่าไม่สม่ำเสมอตลอดทั่วผิวรอยต่อ ดังนั้นจึงมีการเพิ่มพจน์ที่เกี่ยวข้องกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความสูงของกำแพงศักย์ ( $\sigma_s$ ) เมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยของความสูงของกำแพงศักย์ ( $\phi_{B0}^-$ ) เข้าไปในกราฟชาร์ดสัน ดังสมการ

$$\ln\left(\frac{I_S}{T^2}\right) - \frac{q^2\sigma_s^2}{2k^2T^2} = \ln(A \dot{A}) - \frac{q\phi_{B0}^-}{kT} \quad (2.62)$$

สมการดังกล่าวเรียกว่ากราฟกระแสริชาร์ดสันที่ถูกดัดแปลง ( modified Richardson plot ) การเขียนระหว่าง  $\ln(I_s/T^2) - q^2\sigma_s^2/2k^2T^2$  กับ  $1000/T$  จะให้กราฟเส้นตรงที่มีจุดตัดแกนตั้ง คือ  $\ln(AA^*)$  และความชันของเส้นตรงคือ  $q\bar{\phi}_{B0}/1000k$  โดยค่า  $\bar{\phi}_{B0}$  จากสมการที่ (2.61) และ (2.62) จะมีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 2.39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(I_s/T^2) - (q^2\sigma_s^2/2k^2T^2)$  กับ  $1000/T$  ของสิ่งประดิษฐ์ที่มีโครงสร้าง  $Sb_2Te_3/CdTe/Sb_2Te_3$

## 2.16 การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

[6, 18-19, 22]

เทคนิคการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศนั้น เป็นวิธีการเตรียมฟิล์มบางวิธีหนึ่งของการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการระเหยสาร ซึ่งต้องเตรียมในสุญญากาศที่ระดับความดันประมาณ  $10^{-5}$ - $10^{-7}$  ทอร์ วัตถุประสงค์ของการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีนี้ คือ การควบคุมการเคลื่อนย้ายอะตอมจากแหล่งกำเนิดความร้อนไปยังฐานรองรับที่ห่างออกไปแล้ว เกิดเป็นฟิล์มบาง

### 2.16.1 อัตราการระเหยสาร

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

$$\Phi_e = \frac{3.513 \cdot 10^{22}}{(MT)^{1/2}} P_e \quad \text{โมเลกุลต่อตารางเซนติเมตร-วินาที} \quad (2.63)$$

- เมื่อ  $\Phi_e$  คือ ฟลักซ์ของจำนวนอะตอมหรือโมเลกุลของสารที่ระเหยต่อหน่วยพื้นที่ต่อเวลา  
 $P_e$  คือ ความดันสมดุล (equilibrium pressure) มีหน่วยเป็นทอร์  
 $M$  คือ มวลโมเลกุล  
 $T$  คือ อุณหภูมิในหน่วยเคลวิน

อัตราการระเหยมวลสาร (mass evaporation rate:  $\Gamma_e$ ) สามารถหาได้จาก

$$\Gamma_e = 5.84 \cdot 10^{-2} (M/T)^{1/2} P_e \text{ กรัมต่อตารางเซนติเมตร-วินาที} \quad (2.64)$$

ที่ความดัน  $10^{-2}$  ทอร์ ค่าของ  $\Gamma_e$  ในธาตุจำนวนมากจะมีค่าประมาณ  $10^{-4}$  กรัมต่อตารางเซนติเมตร-วินาที ดังนั้นสิ่งที่มิอิทธิพลต่ออัตราการระเหยสาร คือ อุณหภูมิ เพราะมีผลกระทบอย่างมากต่อความดันสมดุล

### 2.16.2 ความดันไอของธาตุ (vapor pressure of the elements)

ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความดันไอ แสดงได้ดังสมการ

$$\frac{dP}{dT} = \frac{\Delta H(T)}{T\Delta V} \quad (2.65)$$

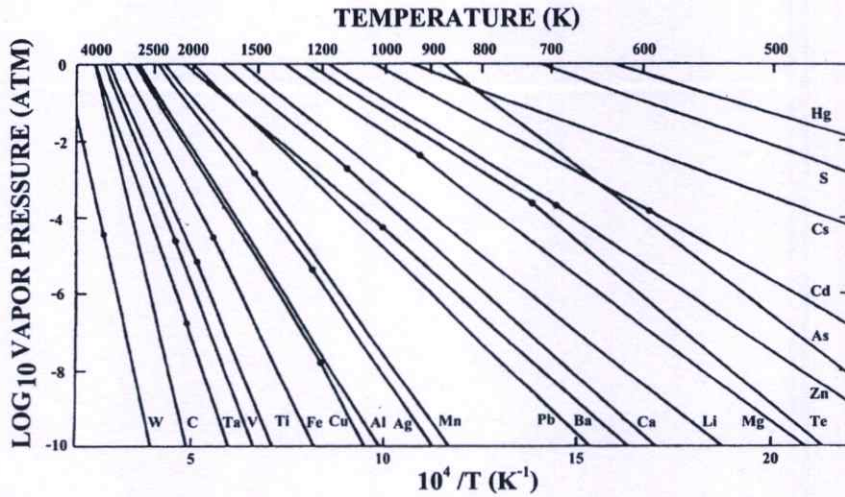
ถ้าให้  $\Delta V$  มีค่าเท่ากับปริมาตรของไอ ( $V_v$ ) และเมื่อแก๊สนี้เป็นแก๊สในอุดมคติแล้ว  $V_v$  จะมีค่าเป็น  $RT/P$  ดังนั้น เขียนสมการที่ (2.65) ใหม่ได้เป็น

$$\frac{dP}{dT} = \frac{P\Delta H(T)}{RT^2} \quad (2.66)$$

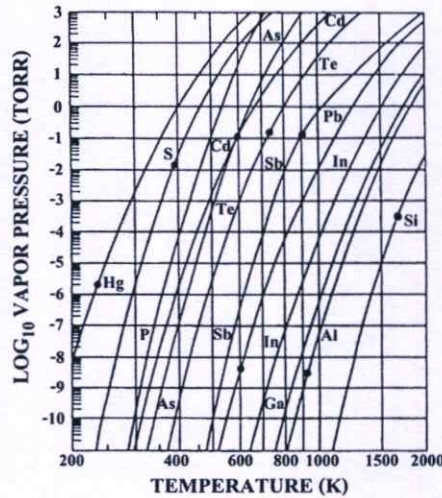
ถ้าประมาณให้  $\Delta H(T)$  มีค่าเท่ากับ  $\Delta H_e$  (ความร้อนของสารในการระเหย) ในกรณีนี้ จะได้

$$\ln P \cong -\frac{\Delta H_e}{RT} + I \quad \text{หรือ} \quad P = P_0 \exp\left(-\frac{\Delta H_e}{RT}\right) \quad (2.67)$$

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



รูปที่ 2.40 แสดงกราฟค่าความดันไอของธาตุ โดยจุดต่างๆจะสัมพันธ์กับ จุดหลอมเหลว



รูปที่ 2.41 แสดงกราฟค่าความดันไอของธาตุในสารกึ่งตัวนำโดยจุดต่างๆ จะสัมพันธ์กับจุดหลอมเหลว

### 2.16.3 การระเหยสารประกอบ (evaporation of compound)

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

ตารางที่ 2.4 แสดงปฏิกิริยาการระเหยสารประกอบ

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

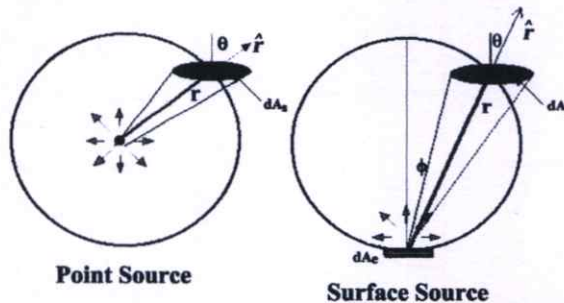
M = โลหะ X = อโลหะ

#### 2.16.4 อิทธิพลของโครงสร้างเชิงเรขาคณิตต่อระบบการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการ

##### ระเหยสาร (deposition geometry)

การเตรียมฟิล์มบางนั้นจะต้องพิจารณาประเภทของแหล่งกำเนิดสารที่ใช้ในการระเหยรวมถึงฐานรองรับที่อะตอมของสารจะมาตกกระทบด้วย สมมติว่าการระเหยสารเกิดขึ้นในระบบการไหลของโมเลกุล พิจารณาการระเหยสารจากแหล่งกำเนิดแบบจุด (point source) มวลรวมของสารจากการระเหย (total evaporation mass:  $\bar{M}_e$ ) สามารถวัดได้จากน้ำหนักของสารก่อนและหลังระเหยแต่เมื่อพิจารณาแหล่งกำเนิดพื้นผิว (surface source) มวลรวมของสารจากการระเหยจะหาได้จาก

$$\bar{M}_e = \int_0^t \int_{A_e} \frac{M}{N_A} \Phi_e dA_e dt = \int_0^t \int_{A_e} \Gamma_e dA_e dt \quad (2.68)$$



รูปที่ 2.42 แสดงรูปแบบการระเหยของสารตั้งต้น

โดยที่  $A_E$  คือ พื้นที่ผิวของสารที่ใช้ระเหย ปริมาณของมวล  $d\bar{M}_s$  ที่ตกลงบนฐานรองเป็นพื้นที่  $dA_s$  จากรูปที่ 2.42  $dA_c$  คือ พื้นที่ผิวของทรงกลม จะได้ว่า  $dA_c = dA_s \cos \theta$  ดังนั้น จะมีค่าเป็น

$$d\bar{M}_s = dA_s \left( \frac{\bar{M}_e \cos \theta}{4\pi^2} \right) \quad (2.69)$$

เมื่อ  $r$  คือระยะระหว่างแหล่งกำเนิดถึงฐานรอง

เมื่อพิจารณาการระเหยสารจากแหล่งกำเนิดที่มีผิวเรียบ มวลตกกระทบบนพื้นที่เล็กน้อย  $dA_c$  โดยทำมุมกับพื้นผิวแหล่งกำเนิด  $\phi$  และอยู่ห่างเป็นระยะ  $r$  จะได้

$$d\bar{M}_s(\phi, r) = (\cos \phi) d\bar{M}_s(0, r) dA_c \quad (2.70)$$

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

$$\bar{M}_e = \int_0^{\pi/2} \left( \frac{d\bar{M}_s(0, r)}{dA_c} \right) (\cos \phi) 2\pi (\sin \phi) r d\phi \quad (2.71)$$

จากการประมาณค่าอินทิเกรตข้างต้นจะพบว่า

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

ดังนั้น

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

จาก

$$dA_c = dA_s \cos \theta$$

จะได้

$$\frac{d\bar{M}_s(\phi, \theta, r)}{dA_s} = \frac{\bar{M}_e \cos \phi \cos \theta}{\pi^2} \quad (2.72)$$

และสามารถเขียนเป็นสมการทั่วไปได้ดังนี้ คือ

$$\frac{d\bar{M}_s(\phi, \theta, r)}{dA_s} = \bar{M}_e \frac{(n+1)\cos^n \phi \cos \theta}{2\pi^2} \quad (n \geq 0) \quad (2.73)$$

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

## บทที่ 3

### การดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยที่จะดำเนินงานต่อไป ช่วงแรกเน้นศึกษาเทคนิคการเตรียมฟิล์มบางชนิดต่าง ๆ โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศและศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์พื้นฐานของฟิล์มบางชนิดต่าง ๆ ที่ถูกเคลือบลงบนแผ่นบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ได้แก่ Cu, CdTe และ  $Sb_2Te_3$  หลังจากนั้นจึงศึกษาการปลูกฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe และ  $Sb_2Te_3$  ลงบนฟิล์มบางของทองแดงที่ถูกเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เพื่อศึกษาอิทธิพลของฟิล์มทองแดงที่มีต่อชั้นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำเหล่านั้น สุดท้ายจึงสร้างสิ่งประดิษฐ์ขึ้นมาโดยมีโครงสร้างสี่แบบ ดังนี้คือ Cu/CdTe/Cu ,  $Sb_2Te_3$ /CdTe/ $Sb_2Te_3$ /Cu , Cu/CdTe/ $Sb_2Te_3$ /Cu , และไดโอดชนิด CdS/CdTe โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศหลังจากได้สิ่งประดิษฐ์ทั้งหมดจึงศึกษาสมบัติความเป็นโอห์มมิกและสมบัติทางฟิสิกส์อื่น ต่อไป

**3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัยที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์พื้นฐานของฟิล์มบางชนิดต่าง ๆ และสิ่งประดิษฐ์ที่มีลักษณะโครงสร้างแบบต่าง ๆ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ [5-10]**

**3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์**

1. เตาอบ
2. เครื่องอัลตราโซนิก
3. เครื่องเป่าลมร้อน
4. หม้อดูดความชื้น ( desiccator )
5. กระจกสไลด์
6. ที่ตัดกระจกสไลด์
7. บีกเกอร์ขนาด 200 มิลลิลิตร
8. ปากคีบ
9. นาฬิกาจับเวลา
10. สารเคมี ( น้ำยาล้างจาน น้ำปลออดประจุ อะซีโตนและ เอทานอล)

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางชนิดต่าง ๆ และสร้างสิ่งประดิษฐ์ที่มีลักษณะโครงสร้างแบบต่าง ๆ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

1. ระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ
2. เครื่องควบคุมอุณหภูมิห้อง SHIMADEN รุ่น PID FP93
3. เครื่องชั่งน้ำหนัก 4 ตำแหน่งยี่ห้อ Sartorius
4. แผ่นหน้ากากอะลูมิเนียม (mask) ที่ใช้สำหรับออกแบบลักษณะรูปแบบของฟิล์มบางที่ถูกใช้ในระบบสุญญากาศ
5. สารตั้งต้น CdTe บริสุทธิ์ชนิดผง 99.99 เปอร์เซ็นต์
6. สารตั้งต้น  $Sb_2Te_3$  บริสุทธิ์ชนิดผง 99.99 เปอร์เซ็นต์
7. สารตั้งต้นที่เป็นผงทองแดงบริสุทธิ์ 99.99 เปอร์เซ็นต์
8. อะซีโตน
9. ซ้อนตักสารเคมี
10. นาฬิกาจับเวลา

3.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางแสง

เครื่องยูวี-วิสทิเบล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS spectrophotometer) ยี่ห้อ thermo electron corporation รุ่น Heios โดยใช้ความยาวคลื่น 300 - 1,100 นาโนเมตร



รูปที่ 3.1 แสดงเครื่อง UV-VIS spectrophotometer ยี่ห้อ thermo electron corporation รุ่น Heios

### 3.1.4 เครื่องมือที่ใช้ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค

เอกซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (XRD) ของยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ 1.5418 อังสตรอม ใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์ แรงดันไฟฟ้า 30 กิโลโวลต์ โดยวัดจากมุม 20 – 90 องศา



รูปที่ 3.2 แสดงเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 advance

### 3.1.5 เครื่องมือที่ใช้ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) ของยี่ห้อ LEO รุ่น LEO 1455VP โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 6 กิโลโวลต์ และกำลังแยกความละเอียดของภาพถ่าย 1,000 3,000 และ 5,000 เท่า

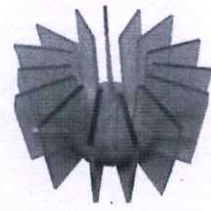
### 3.1.6 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า

1. ระบบทำความเย็นอุณหภูมิต่ำมาก (cryostat)
2. LCR meter ยี่ห้อ Agilent รุ่น E4980A
3. แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงของยี่ห้อ Keithley รุ่น 236
4. เครื่องควบคุมอุณหภูมิยี่ห้อ SHIMADEN รุ่น FP21 และเทอร์โมคัปเปิลชนิด K
5. เครื่องวัดอุณหภูมิยี่ห้อ Digicon รุ่น Dp-50A
6. กาวเงินนำไฟฟ้า
7. สายไฟขนาดเล็กสำหรับต่อขั้วไฟฟ้า

### 3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางชนิดต่าง ๆ และการสร้างสิ่งประดิษฐ์ที่มีลักษณะโครงสร้างแบบต่าง ๆ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ [5-10]

#### 3.2.1 การเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

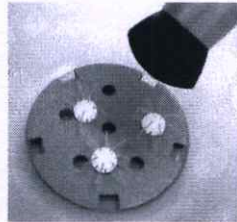
1. ตัดแผ่นกระจกสไลด์ให้มีขนาด  $10 \times 15$  ตารางมิลลิเมตร นำไปแช่ในน้ำที่ผสมน้ำยาล้างจานเป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อล้างคราบไขมัน จากนั้นเช็ดทำความสะอาดด้วยฟองน้ำและน้ำยาล้างจานอีกครั้งทั้งสองด้านเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่ติดแน่นออก แล้วล้างด้วยน้ำสะอาดปกติ
2. เสียบแผ่นกระจกสไลด์เข้ากับตัวยึดเทฟลอนแล้วนำไปล้างด้วยน้ำปลอดประจุในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาที
3. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วยอะซิโตนในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาที
4. นำไปล้างด้วยน้ำปลอดประจุในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาที
5. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วยเอทานอลในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาที
6. นำไปล้างด้วยน้ำปลอดประจุในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาที
7. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปกัดด้วยกรดกัดแก้วเนื่องจากความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 13 นาที แล้วล้างด้วยน้ำปลอดประจุในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาที
8. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ในน้ำปลอดประจุด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาที อีกสามครั้งโดยในแต่ละครั้งต้องเปลี่ยนน้ำปลอดประจุใหม่ทุกครั้ง
9. นำแผ่นกระจกสไลด์ทั้งหมดไปเป่าด้วยเครื่องเป่าลมร้อนให้แห้ง โดยไม่ต้องถอดกระจกสไลด์ออกจากตัวยึดที่ทำด้วยแท่งเทฟลอน ไม่ควรเป่าลมร้อนที่บริเวณเดียวและใกล้เกินไปเพราะจะส่งผลให้น้ำที่ติดอยู่ที่ผิวกระจกแห้งอย่างรวดเร็วแล้วทิ้งคราบน้ำเอาไว้ ควรเป่าวนรอบ ๆ
10. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปอบในเตาที่อุณหภูมิประมาณ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที โดยไม่ต้องถอดกระจกสไลด์ออกจากตัวยึดเทฟลอนเพราะควรให้กระจกสไลด์ตั้งขึ้นในระหว่างการอบเพื่อให้ความชื้นระเหยได้ดีทั้งสองด้านของกระจก
11. เมื่อกระจกสไลด์เย็นตัวเก็บใส่ถุงซิปลแยกจากกันในแต่ละชั้น เพื่อป้องกันกระจกสไลด์ชูดกันเป็นรอย จากนั้นเก็บไว้ในหม้อสุญญากาศความชื้น



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

### รูปที่ 3.3 แสดงขั้นตอนการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

- ก. การเสียบกระจกสไลด์เข้ากับตัวยึดที่ทำด้วยแท่งเพฟลอน
- ข. การล้างกระจกสไลด์ในอ่างอัลตราโซนิค
- ค. การเป่ากระจกสไลด์ด้วยเครื่องเป่าลมร้อน
- ง. การนำกระจกสไลด์ที่เป่าแห้งแล้วเข้าอบในเตาอบที่มีอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที

#### 3.2.2 การทำความสะอาดระบบสุญญากาศและหน้ากอกอะลูมิเนียมที่ใช้สำหรับออกแบบลักษณะรูปแบบของฟิล์มบางที่ใช้ในระบบสุญญากาศ

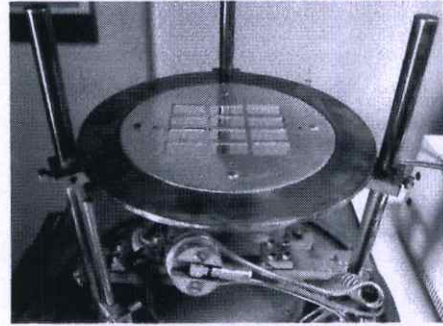
1. ใช้สำลีเช็ดพื้นผิวภายในภาชนะสุญญากาศและกระจกมองด้านหน้า ผิวหน้าหัววัด ความหนาและชิ้นส่วนภายในอื่น ๆ ด้วยอะซิโตน ยกเว้นโอริงบริเวณฐานของระบบสุญญากาศจะต้องเช็ดด้วยเมทานอลเพราะหากเช็ดด้วยอะซิโตนอาจทำให้โอริงเสียหายได้
2. เช็ดทำความสะอาดแผ่นหน้ากอกอะลูมิเนียมด้วยอะซิโตนแล้วเป่าด้วยเครื่องเป่าลมร้อนให้แห้ง
3. ชั่งสารเคมีตามปริมาณ ดังนี้
  - การเคลือบฟิล์มทองแดง ตักผงทองแดงให้เต็มภาชนะที่ใช้ใส่สารตั้งต้น (boat) ที่อยู่ภายในระบบสุญญากาศพอดี
  - การเคลือบฟิล์ม  $Sb_2Te_3$  ชั่งสารตั้งต้นให้มีน้ำหนัก 0.3 กรัม
  - การเคลือบฟิล์ม CdTe ชั่งสารตั้งต้นให้มีน้ำหนัก 1.0 กรัม
  - การเคลือบฟิล์ม CdS ชั่งสารตั้งต้นให้มีน้ำหนัก 1.0 กรัม

### 3.2.3 การเคลือบฟิล์มบางชนิดต่าง ๆ และการสร้างถึงประดิษฐ์ที่มีลักษณะโครงสร้างแบบต่าง ๆ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศของแดงลงบนกระจกสไลด์

1. ปรับระยะห่างของแผ่นหน้ากากอะลูมิเนียมกับขอบด้านบนของภาชนะที่ใส่สารตั้งต้นที่อยู่ภายในระบบสุญญากาศให้มีระยะเท่ากับ 13 เซนติเมตร
2. ตักผงทองแดงใส่ให้เต็มภาชนะที่ใส่สารตั้งต้นที่อยู่ภายในระบบสุญญากาศพอดี
3. วางแผ่นหน้ากากอะลูมิเนียมที่ใช้สำหรับระเหยทองแดงลงบนขาตั้งในระบบสุญญากาศ
4. วางกระจกสไลด์ที่ล้างแล้วลงบนช่องของแผ่นหน้ากากอะลูมิเนียม แล้ววางแผ่นทำความร้อน (heater) ทับลงบนกระจกสไลด์อีกชั้นหนึ่งเพื่อเป็นการให้อุณหภูมิกับแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์
5. ตรวจสอบหัววัดความหนาว่าทำงานได้ปกติ และปรับระดับให้อยู่ระดับเดียวกันกับหน้ากากอะลูมิเนียม ตรวจสอบวัดอุณหภูมิ ปิดระบบสุญญากาศ แล้วทำการสูบล้างอากาศออกจนได้ความดันอยู่ในระดับ  $(3-4) \times 10^{-5}$  มิลลิบาร์
6. เปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิให้อุณหภูมิกับแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ 150 องศาเซลเซียส จากนั้นค่อย ๆ จ่ายกระแสไฟฟ้าทีละน้อยจนได้กระแสไฟฟ้าประมาณ 80-100 แอมแปร์ ในขณะที่ทองแดงจะเริ่มหลอมละลายเป็นของเหลว ทั้งนี้ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้จะขึ้นกับปริมาณทองแดงและความดันเมื่อเริ่มจ่ายกระแสไฟฟ้า
7. เมื่อสังเกตเห็นทองแดงหลอมละลายจนหมดให้เพิ่มกระแสไฟฟ้าเข้าไปอีกเล็กน้อย ทองแดงจะเริ่มระเหย หัววัดความหนาจะเริ่มอ่านค่าได้ นำนาฬิกาจับเวลามาวางเทียบกับค่าความหนาที่อ่านได้ ปรับลดหรือเพิ่มกระแสไฟฟ้าอีกเล็กน้อยให้อัตราการเคลือบอยู่ที่ประมาณ 10 อังสตรอม/วินาที (1 นาโนเมตร/วินาที) รักษาอัตราการเคลือบฟิล์มให้คงที่เนื่องจากเมื่อทองแดงในภาชนะที่ใช้ใส่สารตั้งต้นที่อยู่ภายในระบบสุญญากาศลดอัตราการเคลือบฟิล์มจะลดลง จึงต้องจ่ายกระแสไฟฟ้าเพิ่มอีกเล็กน้อยเพื่อคงอัตราการเคลือบเอาไว้จนกระทั่งได้ความหนา 400 นาโนเมตร
8. เมื่อได้ความหนาตามต้องการ ลดกระแสไฟฟ้าที่จ่ายจนเป็นศูนย์ ปิดระบบที่ให้อุณหภูมิกับแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ รอจนกระทั่งอุณหภูมิภายในระบบสุญญากาศลดลงจนมีค่าประมาณ 40 องศาเซลเซียส จึงปิดระบบปั๊มสุญญากาศ และนำฟิล์มที่เคลือบเสร็จแล้วไปเก็บไว้ในหม้อสุญญากาศ



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.4 แสดงการจัดเรียงกระจกสไลด์ที่ผ่านการทำความสะอาดเป็นที่เรียบร้อยแล้ววางบนแผ่นหน้ากากอะลูมิเนียมที่อยู่ในระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางที่สร้างขึ้นโดย ดร.ชาญวิทย์ จิตยุทธการ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

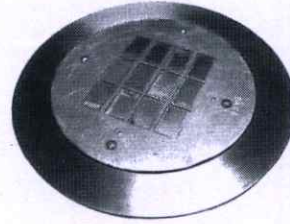
ก. ระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

ข. การวางกระจกสไลด์ที่ล้างแล้วเรียงบนหน้ากากอะลูมิเนียมที่ใช้เคลือบฟิล์มบาง

9. สำหรับฟิล์มบางชนิดอื่น ๆ ที่จะต้องเคลือบฟิล์มทับลงไปเป็นชั้น ๆ นั้นใช้วิธีการเคลือบฟิล์มคล้ายกัน แตกต่างกันที่ความหนาของฟิล์ม จะให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์และขนาดแผ่นหน้ากากอะลูมิเนียมที่ต่างกันเพราะต้องการพื้นที่การเคลือบฟิล์มที่ต่างกัน
10. การเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ใช้ความหนา 1 ไมโครเมตร จะให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส โดยใช้แผ่นหน้ากากอะลูมิเนียมที่มีพื้นที่การเคลือบฟิล์ม 1.19 ตารางเซนติเมตร
11. การเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Sb_2Te_3$  ใช้ความหนา 100 นาโนเมตรจะให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส โดยใช้แผ่นหน้ากากอะลูมิเนียมที่มีพื้นที่การเคลือบฟิล์ม 2.0 ตารางเซนติเมตร
12. การเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ใช้ความหนา 500 นาโนเมตร จะให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียสโดยใช้แผ่นหน้ากากอะลูมิเนียมที่มีพื้นที่การเคลือบฟิล์ม 0.7 ตารางเซนติเมตร



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.5 แสดงการเคลือบฟิล์มทองแดง โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

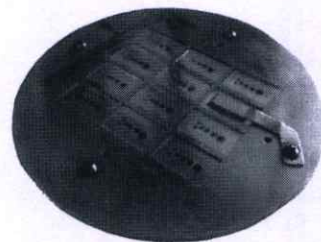
ก. แสดงทองแดงที่หลอมละลายอยู่ภายในภาชนะที่ใช้ใส่สารตั้งต้นที่อยู่ภายในระบบสุญญากาศ

ข. ลักษณะฟิล์มทองแดงที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

13. การเคลือบฟิล์มบางเพื่อใช้สำหรับทำเป็นขั้วไฟฟ้าที่มีพื้นที่ของขั้วไฟฟ้าแตกต่างกันไม่ว่าจะเป็นฟิล์มบางของ Cu หรือเป็นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Sb_2Te_3$  ใช้ความหนา 300 นาโนเมตรจะให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส โดยใช้แผ่นหน้ากากอะลูมิเนียมที่ใช้สำหรับเคลือบฟิล์มบางเพื่อทำเป็นขั้วไฟฟ้าซึ่งมีลักษณะพื้นที่ของขั้วไฟฟ้าเป็นวงกลมห้าขนาด แยกออกจากกันและเรียงกันเป็นแนวเส้นตรงซึ่งขนาดของพื้นที่ของแต่ละวงคือ  $7.85 \times 10^{-3}$ ,  $1.77 \times 10^{-2}$ ,  $3.14 \times 10^{-2}$ ,  $4.45 \times 10^{-2}$  และ  $7.89 \times 10^{-2}$  ตารางเซนติเมตร
14. นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe และสิ่งประดิษฐ์ที่มีลักษณะโครงสร้างแบบต่าง ๆ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่ได้เตรียมไว้ไปศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ต่อไป



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.6 แสดงแผ่นหน้ากากอะลูมิเนียมที่ใช้สำหรับเคลือบบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe และเคลือบฟิล์มบางของ Cu เพื่อทำเป็นขั้วไฟฟ้า

ก. แสดงแผ่นหน้ากากอะลูมิเนียมที่ใช้สำหรับเคลือบฟิล์ม CdTe

ข. แสดงแผ่นหน้ากากอะลูมิเนียมที่ใช้สำหรับเคลือบฟิล์มบาง Cu เพื่อทำเป็นขั้วไฟฟ้า

### 3.3 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์พื้นฐานประเภทต่าง ๆ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe และสิ่งประดิษฐ์ที่มีลักษณะโครงสร้างแบบต่าง ๆ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้ [5-10]

#### 3.3.1 การศึกษาสมบัติทางแสง

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาสมบัติทางแสงด้วยการวัดค่าเปอร์เซ็นต์ของการส่งผ่านแสงด้วยเครื่อง ยูวี-วิสทิเบลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ thermo electron corporation รุ่น Heios โดยใช้ความยาวคลื่น 300 ถึง 1100 นาโนเมตร เพื่อคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและค่าช่องว่างแถบพลังงาน

#### 3.3.2 การศึกษาโครงสร้างเชิงจุลภาค

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จากเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (XRD) ของยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ 1.5406 อังสตรอมโดยใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์และความต่างศักย์ 30 กิโลโวลต์ โดยมีมุม  $2\theta$  เริ่มจาก 20-90 องศา นำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณหาค่าคงที่ของโครงผลึกขนาดของเกรน และตรวจสอบระนาบผลึกที่ปรากฏ

#### 3.3.3 การศึกษาโครงสร้างเชิงมหภาค

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดยี่ห้อ LEO รุ่น LEO 1455VP โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 6 กิโลโวลต์ และกำลังแยกความละเอียดของภาพถ่าย 1,000, 3,000 และ 5,000 เท่า นำข้อมูลที่ได้มาประมาณขนาดของเกรนและศึกษาลักษณะของชั้นฟิล์มจากภาพถ่าย

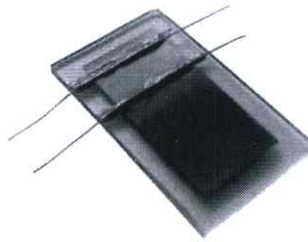
#### 3.3.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า

##### 3.3.4.1 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า ( $R$ ) ความต้านทานแผ่น ( $R_s$ ) และสภาพ

ต้านทานไฟฟ้าของเนื้อสาร ( $\rho_B$ ) ด้วยวิธีสองขั้ว

1. ทำการต่อขั้วไฟฟ้าแบบสองขั้วโดยใช้สายไฟขนาดเล็กสองเส้นมาทำให้เป็นเส้นตรงวางห่างกันโดยประมาณ 3-4 มิลลิเมตร และป้ายด้วยกาวเงินนำไฟฟ้าลงบนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe
2. ต่อปลายลวดตัวนำเข้ากับแหล่งจ่ายไฟตรง Keithley รุ่น 236
3. ไบแอสแรงดันไฟฟ้าให้กับฟิล์มบางที่อุณหภูมิห้อง โดยขนาดของแรงดันไบแอสจะขึ้นกับชนิดของสารกึ่งตัวนำ จากนั้นนำค่า กระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า ไปหาความต้านทานไฟฟ้า

4. หาค่า  $R_s$  จากสมการ  $R_s = R \frac{w}{l}$  โดย  $R$  คือ ความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง,  $w$  คือ ความกว้างของฟิล์มบาง และ  $l$  คือ ระยะห่างระหว่างกาวเงินนำไฟฟ้าแต่ละเส้น
5. หาค่า  $\rho_B$  จากสมการ  $\rho_B = R \frac{A}{d}$  โดย  $R$  คือ ความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง  $A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของขั้วไฟฟ้า และ  $d$  คือ ความหนาของฟิล์มบาง



รูปที่ 3.7 แสดงการต่อขั้วไฟฟ้าแบบสองขั้วด้วยกาวเงินนำไฟฟ้าลงบนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe

### 3.3.4.2 การหาค่าพลังงานกระตุ้น ( $E_g$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

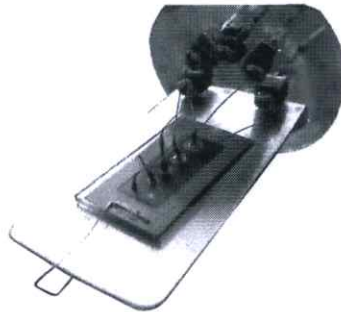
สำหรับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์นั้นมีความต้านทานสูงมาก ในกรณีที่ต้องการวัดค่าพลังงานกระตุ้นจะต้องวัดแบบเพิ่มอุณหภูมิ เพื่อให้พาหะมีค่าพลังงานเพิ่มขึ้นจากความร้อนแล้วจึงวัดความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่าง ๆ ตามขั้นตอนดังนี้

1. นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์มาทำขั้วไฟฟ้าแบบสองขั้วด้วยกาวเงินนำไฟฟ้า นำไปวางบนเตาให้ความร้อนและปลายเทอร์โมคัปเปิลเข้าที่กระจกสไลด์แล้วต่อสายไฟของขั้วไฟฟ้าเข้ากับแหล่งจ่ายไฟตรง
2. ให้ไบแอสแรงดันไฟฟ้า 80 โวลต์ อ่านค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ เปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิ เพื่อให้ความร้อนกับแผ่นกระจกสไลด์ จดบันทึกค่ากระแสที่อ่านได้ ทุก ๆ อุณหภูมิที่เปลี่ยนไป 5 องศาเซลเซียส เริ่มตั้งแต่ 50 -150 องศาเซลเซียส
3. นำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln \frac{R_0}{R}$  กับ  $\frac{1000}{T}$  เพื่อหาค่าพลังงานกระตุ้นจากความชันของกราฟตามสมการ ความชัน =  $E_g/1000k$

### 3.3.4.3 การหาค่าพลังงานกระตุ้น ( $E_g$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่มีลักษณะโครงสร้างแบบต่าง ๆ

สำหรับฟิล์มบางของสารประกอบบางชนิดที่มีสภาพนำไฟฟ้าสูงปริมาณความหนาแน่นของพาหะอิสระมีค่าสูงที่อุณหภูมิห้องดังนั้นการหาค่าพลังงานกระตุ้นจึงต้องวัดโดยวิธีลดอุณหภูมิ ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ยึดฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe เข้ากับแท่นจับตัวอย่าง ต่อขั้วไฟฟ้าตามรูปที่ 3.8 แล้วนำเข้าไปติดตั้งในระบบทำความเย็นอุณหภูมิต่ำมาก
2. ต่อขั้วไฟฟ้าของแท่นจับตัวอย่างเข้ากับแหล่งจ่ายไฟตรง ลดอุณหภูมิภายในระบบลงตั้งแต่อุณหภูมิตั้ง (300), 250, 200, 150 และ 100 เคลวิน ในแต่ละช่วงอุณหภูมิวัดค่ากระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้าโดยให้แรงดันไบแอสขนาด 0.1, 0.05 หรือ 0.02 โวลต์ ขึ้นอยู่กับสิ่งประดิษฐ์แต่ละชนิด
3. นำข้อมูลที่ได้เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln \frac{R_0}{R}$  กับ  $\frac{1000}{T}$  เพื่อหาค่าพลังงานกระตุ้นจากความชันของกราฟตามสมการ ความชัน =  $E_g/1000k$



รูปที่ 3.8 แสดงการยึดฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe เข้ากับแท่นจับสารตัวอย่างเพื่อใส่ในระบบทำความเย็นอุณหภูมิต่ำมาก

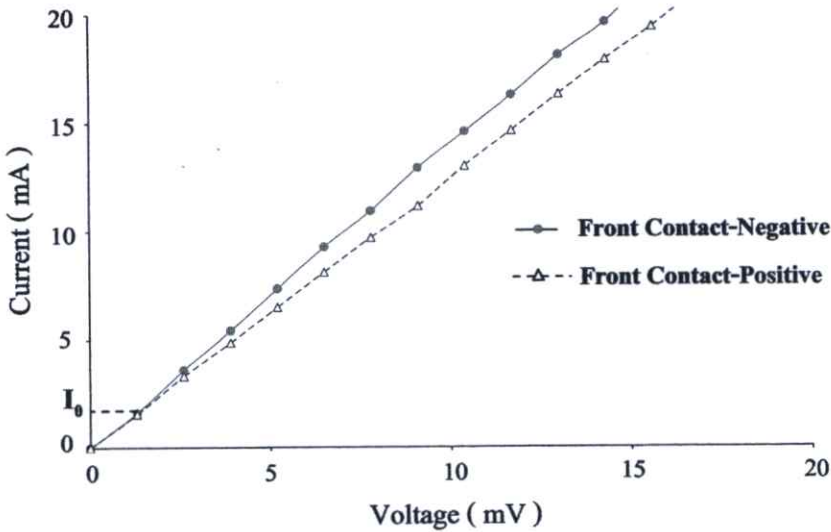
### 3.3.4.4 การหาความต้านทานจำเพาะของขั้วไฟฟ้า (specific contact resistance: $\rho_c$ ) และความต้านทานที่ชั้นล่างสุดของฟิล์มบาง (end resistance : $R_E$ )

1. ยึดฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe เข้ากับแท่นจับสารตัวอย่างต่อขั้วไฟฟ้าให้ครบทั้งห้าขั้ว
2. วัดค่า กระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า จากขั้วไฟฟ้าทั้งห้าขั้วที่อุณหภูมิห้องแล้วหาค่าความต้านทานจากกราฟระหว่างค่า กระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า ของขั้วไฟฟ้าแต่ละขั้ว

3. เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานไฟฟ้าในแต่ละช่วงกับส่วนกลับของพื้นที่ขั้วไฟฟ้านั้น ๆ ( $R_T \cdot A^{-1}$ ) จากนั้นลากเส้นแนวโน้มเส้นตรงเทียบกับข้อมูล
4. คำนวณค่า  $\rho_C$  จากสมการ  $\rho_C = \frac{m - \rho_B \cdot t}{2}$  และ  $R_E$  จากจุดตัดแกน Y โดย m คือ ความชันของเส้นแนวโน้ม  $\rho_B$  คือสภาพต้านทานไฟฟ้าของเนื้อสารของฟิล์มบาง และ t คือ ความหนาของชั้นฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ

#### 3.3.4.5 การหาค่ากระแสชาร์ดสัน ( $I_0$ ) และคำนวณความสูงของกำแพงศักย์ ( $\phi_B$ )

1. ยึดฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe เข้ากับแท่นจับตัวอย่าง ต่อขั้วไฟฟ้าให้ครบทั้งห้าขั้ว
2. ต่อขั้วไฟฟ้าของแท่นจับตัวอย่างเข้ากับแหล่งจ่ายไฟตรง ลดอุณหภูมิภายในระบบลงตั้งแต่อุณหภูมิห้อง(300), 250, 200, 150 และ 100 เคลวิน ในแต่ละช่วงอุณหภูมิวัดค่า กระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า เอาไว้ทั้งกรณีไบแอสตรงและไบแอสกลับทาง ให้ครบทั้งห้าขั้วไฟฟ้า จำนวนจุดข้อมูลที่อยู่ในช่วงแรงดันไบแอสควรมีจำนวนขั้นต่ำ 80 จุด หากสามารถวัดได้ 90 จุด จะดีมากโดยให้แรงดันไบแอสขนาด 0.1, 0.05 หรือ 0.02 โวลต์ ขึ้นอยู่กับสิ่งประดิษฐ์แต่ละชนิด
3. ในทางปฏิบัติจะมีขั้วไฟฟ้าเพียงขั้วเดียวที่สามารถวัดค่ากระแสชาร์ดสันได้ครบทุกช่วงอุณหภูมิซึ่งจะเป็นขั้วไฟฟ้าใดนั้นไม่สามารถทราบได้ จึงต้องทำการเก็บข้อมูลของทุกขั้วไฟฟ้าเอาไว้ก่อน จากนั้นจึงเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า ทั้งในกรณีไบแอสตรงและไบแอสกลับทางบนแกนเดียวกันในแต่ละช่วงอุณหภูมิก็จะทราบว่าขั้วไฟฟ้าใดให้ข้อมูลครบทุกช่วงอุณหภูมิ โดยสังเกตจากจุดที่กราฟทั้งสองเส้นเริ่มแยกออกจากกัน ตรงจุดแยกบอกถึงค่ากระแสชาร์ดสัน
4. นำค่ากระแสชาร์ดสันที่ได้จากทั้งห้าอุณหภูมิมายืนยันความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln \frac{I_0}{T^2}$  กับ  $\frac{1000}{T}$  ลากแนวโน้มเส้นตรงเข้ากับจุดข้อมูลทั้งหมดจากความชันของเส้นตรงจะสามารถนำไปหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ได้



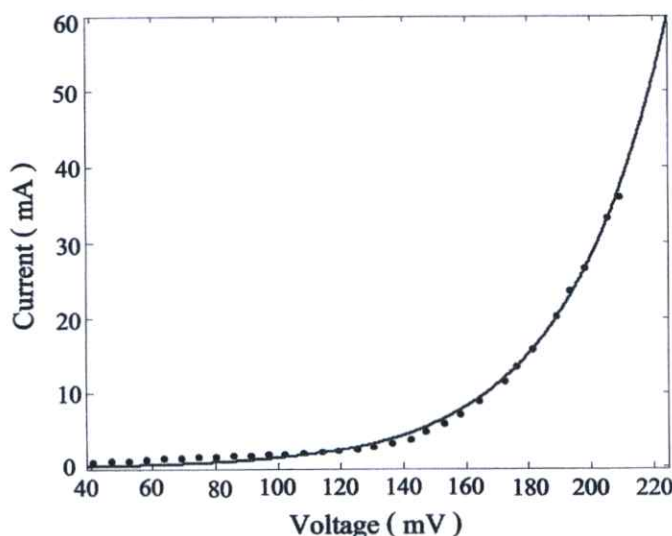
รูปที่ 3.9 แสดงค่ากระแสชาร์ดสัน ( $I_0$ ) ซึ่งเกิดตรงบริเวณจุดแยกของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า เมื่อมีการไบแอสตรงและไบแอสกลับทาง

#### 3.3.4.6 การศึกษาแอดมิแตนซ์สเปกโทรสโกปี (Admittance Spectroscopy)

1. ยึดฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe เข้ากับแท่นจับตัวอย่าง ต่อขั้วไฟฟ้าให้ครบทั้งห้าขั้ว
2. ต่อขั้วไฟฟ้าของแท่นจับตัวอย่างเข้ากับ LCR meter ยี่ห้อ Agilent รุ่น E4980A ลดอุณหภูมิภายในระบบลงตั้งแต่ อุณหภูมิห้อง (300), 250, 200, 150 และ 100 เคลวิน ในแต่ละช่วงอุณหภูมิวัดค่า ความนำไฟฟ้า (G)-ความถี่ (f), ส่วนกลับของความนำไฟฟ้า (B)-ความถี่ (f) และความนำไฟฟ้า (G)-ส่วนกลับของความนำไฟฟ้า (B) โดยใช้ความถี่ในช่วง 2 กิโลเฮิร์ตซ์ -2 เมกะเฮิร์ตซ์ และแรงดันไฟฟ้าของสัญญาณไฟสลับเท่ากับ 26 มิลลิโวลต์
3. เขียนกราฟเพื่อศึกษาลักษณะข้อมูล
4. นำข้อมูลของค่า ความนำไฟฟ้า (G) – ส่วนกลับของความนำไฟฟ้า (B) มาจำลองเส้นกราฟด้วยซอฟต์แวร์ EIS spectrum analyzer เพื่อหา  $f_{max}$ ,  $C_p$ ,  $R_p$  และ  $R_s$
5. จากค่าความต้านทานไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ นำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln \frac{R_0}{R}$  กับ  $\frac{1000}{T}$  เพื่อหาค่าพลังงานกระตุ้น

### 3.3.4.7 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดของ CdS/CdTe

1. ต่อขั้วไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์เข้ากับแหล่งจ่ายไฟตรง Keithley รุ่น 236 แล้วทำการไบแอสด้วยแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ช่วง  $-0.3 - 0.3$  โวลต์ เพื่อศึกษากราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้าที่แสดงถึงลักษณะสมบัติเฉพาะของไดโอด
2. เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln I$  กับ  $V$  ของข้อมูลในช่วงแรงดันไฟฟ้าบวก เพื่อแสดงกลไกการนำไฟฟ้าในแต่ละช่วงแรงดันไฟฟ้า แล้วลากกราฟแนวโน้มเส้นตรงสัมพันธ์กับช่วง TE เพื่อหาค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับจากจุดตัดแกนตั้ง
3. ใช้ซอฟต์แวร์จำลองกราฟเทียบกับข้อมูลการทดลองในช่วง TE เพื่อหาค่าแฟกเตอร์อุดมคติ
4. นำข้อมูลการทดลองในช่วง SCLC มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\frac{dV}{d\ln I}$  กับ  $I$  เพื่อหาแฟกเตอร์อุดมคติ ความต้านทานอนุกรมและขนาดความสูงของกำแพงศักย์ ในช่วง SCLC
5. นำข้อมูลการทดลองช่วงไบแอสตรงทั้งหมดมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\frac{dV}{dI}$  กับ  $I$  เพื่อหาความต้านทานชันต์ ( $R_{SH}$ ) และความต้านทานอนุกรม ( $R_S$ )
6. ใช้เครื่อง LCR meter จ่ายแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่  $0.1-2.0$  โวลต์ โดยทำการวัดครั้งละ  $0.1$  โวลต์ ด้วยความถี่ถึงที่  $1$  เมกะเฮิรตซ์ แล้วเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\frac{1}{C^2}$  กับ  $V$  เพื่อหาค่าแรงดันตกคร่อมรอยต่อ ( $V_b$ )



รูปที่ 3.10 แสดงการใช้ซอฟต์แวร์จำลองกราฟ (เส้นสีน้ำเงิน) เปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองเพื่อหาค่าแฟกเตอร์อุดมคติ

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์พื้นฐานของฟิล์มบางชนิดต่าง ๆ และของสิ่งประดิษฐ์ที่มีลักษณะโครงสร้างแบบต่าง ๆ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เตรียมได้โดยจะมุ่งเน้นในเรื่องของการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของรอยต่อ โอลิฮัมมิกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ โดยมีฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Sb_2Te_3$  คั่นระหว่างชั้นของฟิล์มของสารกึ่งตัวนำ CdTe และฟิล์มบางของ Cu ซึ่งใช้เป็นชั้นขั้วไฟฟ้าเพื่อป้องกันการแพร่ของอะตอมของ Cu ลงสู่ชั้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe และฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Sb_2Te_3$  ที่ประพาดเป็นตัวเป็นชั้นไดโพลขั้วคู่ (dipole layer) ซึ่งจะเกิดการโพลาไรซ์ประจุตรงบริเวณผิวรอยต่อทำให้ความสูงของกำแพงศักย์มีค่าลดลง และ/หรือกำแพงศักย์บางลง

#### 4.1 ฟิล์มบางชนิดต่าง ๆ และสิ่งประดิษฐ์ที่มีลักษณะโครงสร้างแบบต่าง ๆ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

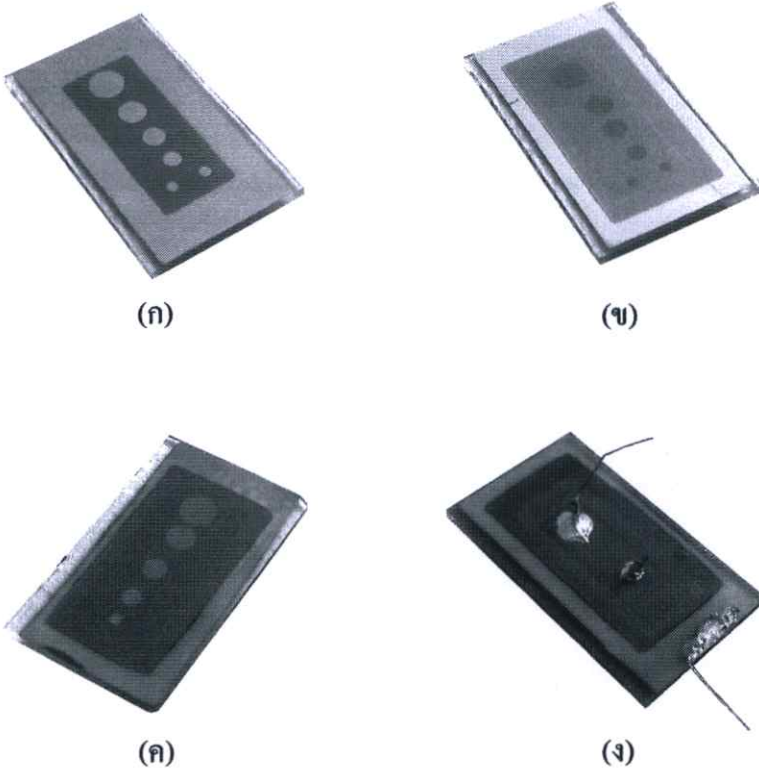
ฟิล์มบางที่เตรียมได้นั้นจะประกอบด้วยชั้นต่าง ๆ ดังนี้  $Cu/CdTe/Sb_2Te_3/Cu$  ลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบางเป็นสีดำ ไม่เงา โดยมีฐานตรงบริเวณขอบนอกเป็นสีส้มซึ่งเป็นฟิล์มบางทองแดงสำหรับต่อขั้ว ไฟฟ้า ลักษณะของฟิล์มบางที่เตรียมได้แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงภาพถ่ายของฟิล์มบางของ Cu, ของสารกึ่งตัวนำ  $Sb_2Te_3$  และของสารกึ่งตัวนำ CdTe ซึ่งถูกเคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ตามลำดับที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ โดยให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ในกรณีที่เคลือบฟิล์มบางของ Cu เท่ากับ 150 องศาเซลเซียสและฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Sb_2Te_3$  เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส แต่สำหรับในกรณีของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe นั้นจะไม่มีกรให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์



รูปที่ 4.2 แสดงภาพถ่ายของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Sb_2Te_3$  และของสารกึ่งตัวนำ  $CdTe$  ซึ่งเคลือบลงบนฟิล์มบางของ  $Cu$  ตามลำดับที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ โดยให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

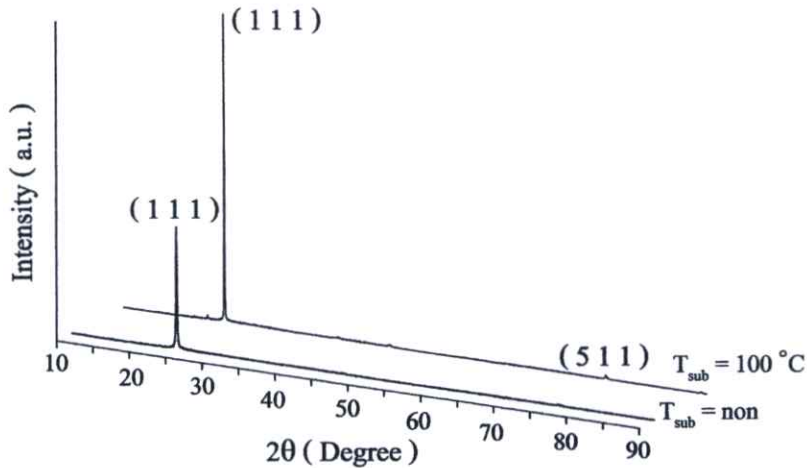


รูปที่ 4.3 แสดงภาพถ่ายของสิ่งประดิษฐ์ที่มีโครงสร้างแบบต่าง ๆ ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

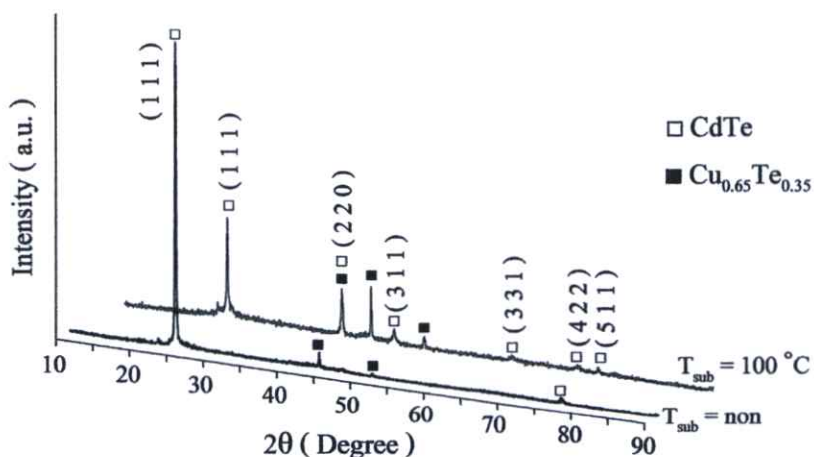
- ก.  $Cu/CdTe/Cu$ /slide glass
- ข.  $Sb_2Te_3/CdTe/Sb_2Te_3/Cu$ / slide glass
- ค.  $Cu/CdTe/Sb_2Te_3/Cu$ / slide glass
- ง.  $CdS/CdTe/Sb_2Te_3/Cu$ / slide glass

## 4.2 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางชนิดต่าง ๆ และสิ่งประดิษฐ์ที่มีลักษณะโครงสร้างแบบต่าง ๆ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

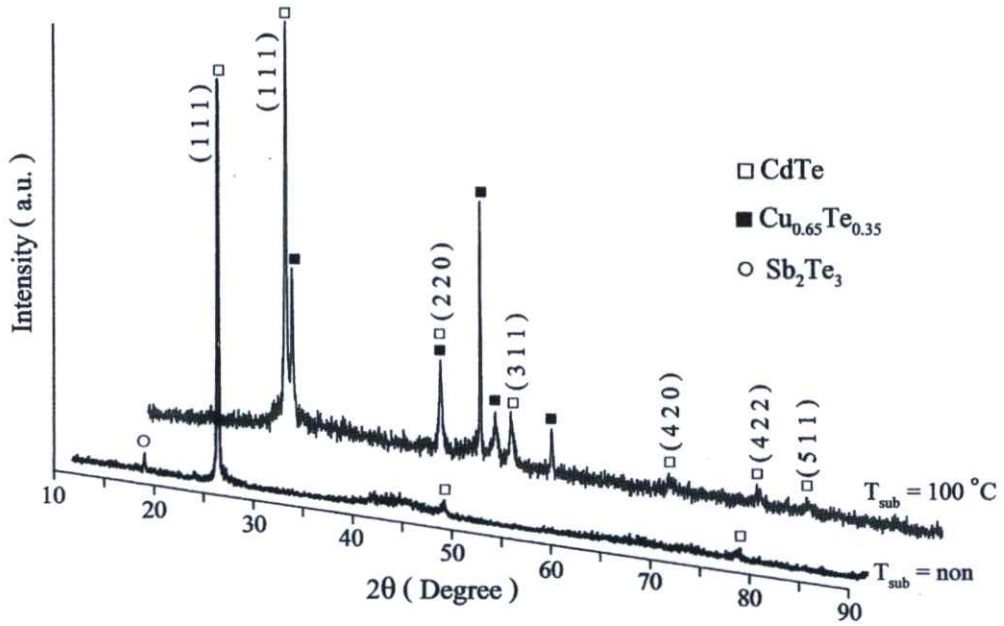
### 4.2.1 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์



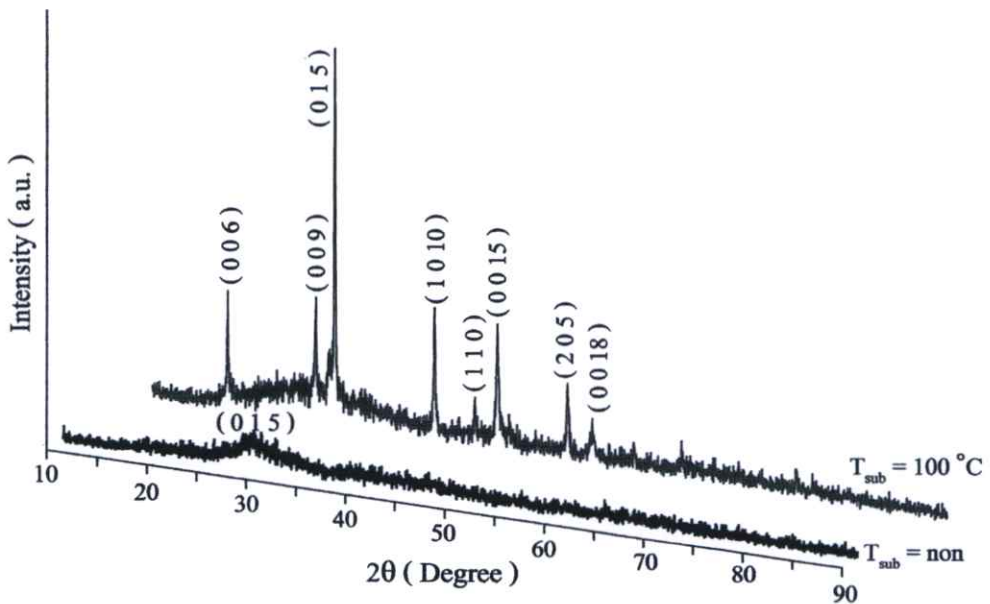
รูปที่ 4.4 แสดงฟิสิกความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe / slide glass ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่ให้ อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ และให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับ ที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส



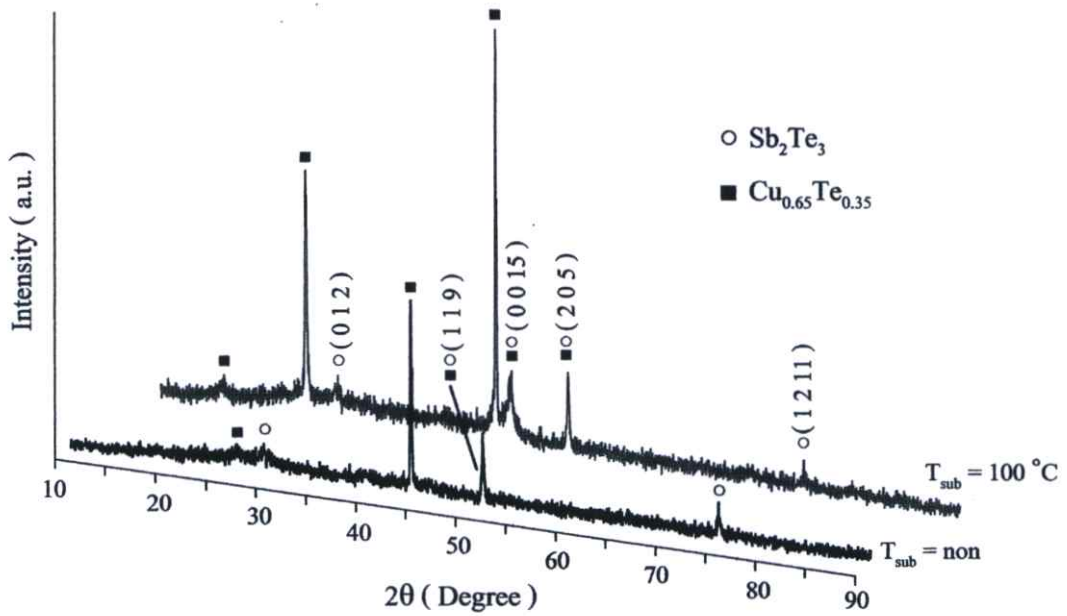
รูปที่ 4.5 แสดงฟิสิกความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe/Cu / slide glass ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่ให้ อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ และให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.6 แสดงพิกัดความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ CdTe/Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>/Cu/slide glass ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่ให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ และให้อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

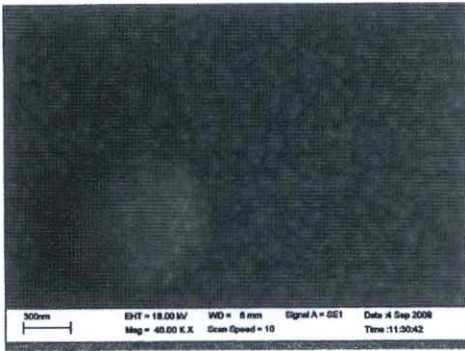


รูปที่ 4.7 แสดงพิกัดความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>/slide glass ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่ให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ และให้อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

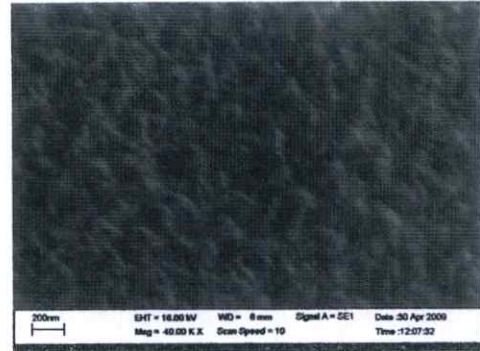


รูปที่ 4.8 แสดงพิกัดความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ  $\text{Sb}_2\text{Te}_3/\text{Cu}/\text{slide glass}$  ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่ให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ และให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

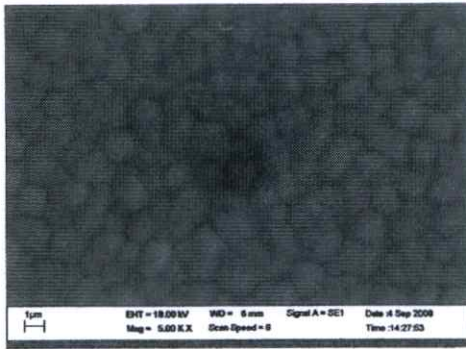
#### 4.2.2 ผลการศึกษาภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบาง



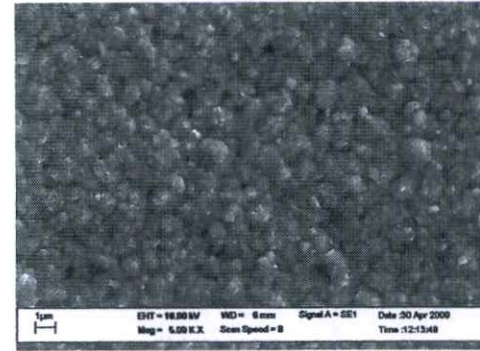
CdTe/slide glass,  $T_{\text{sub}} = \text{non}$



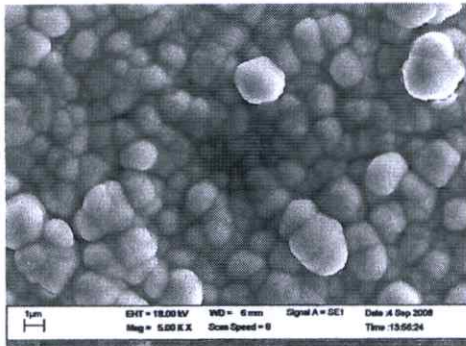
CdTe/slide glass,  $T_{\text{sub}} = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$



CdTe/Cu/slide glass,  $T_{\text{sub}} = \text{non}$



CdTe/Cu/slide glass,  $T_{\text{sub}} = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$

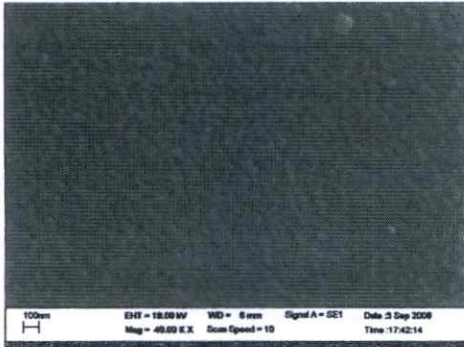


CdTe/Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>/Cu/slide glass,  $T_{\text{sub}} = \text{non}$



CdTe/Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>/Cu/slide glass,  $T_{\text{sub}} = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$

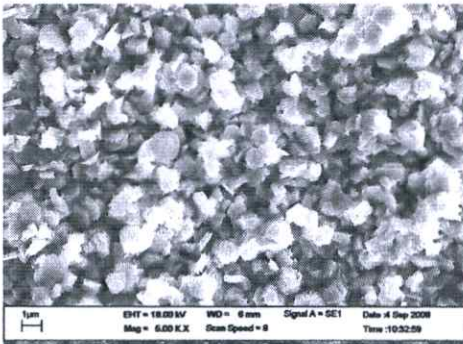
รูปที่ 4.9 แสดงภาพถ่าย SEM เมื่อเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe/slide glass, CdTe/Cu/slide glass และ CdTe/Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>/Cu/slide glass ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่ให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์และให้อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์



$\text{Sb}_2\text{Te}_3/\text{slide glass}, T_{\text{sub}} = \text{non}$



$\text{Sb}_2\text{Te}_3/\text{slide glass}, T_{\text{sub}} = 100^\circ\text{C}$

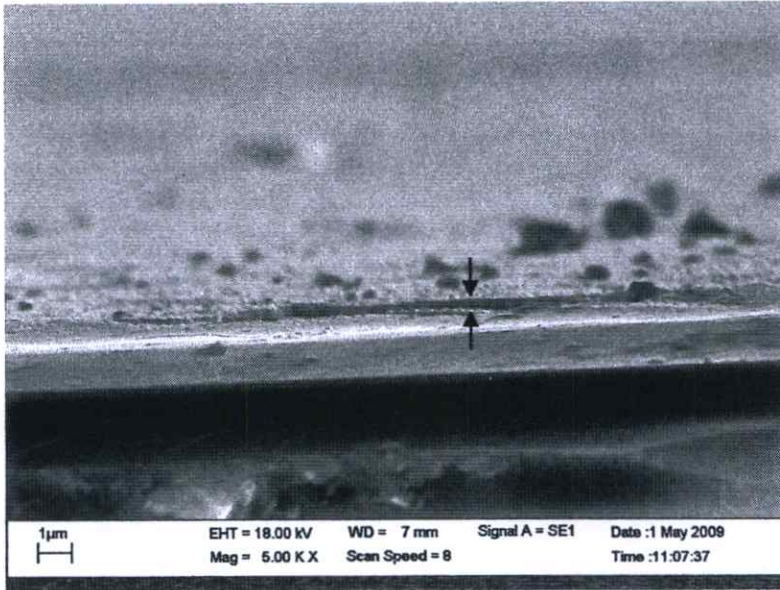


$\text{Sb}_2\text{Te}_3/\text{Cu}/\text{slide glass}, T_{\text{sub}} = \text{non}$

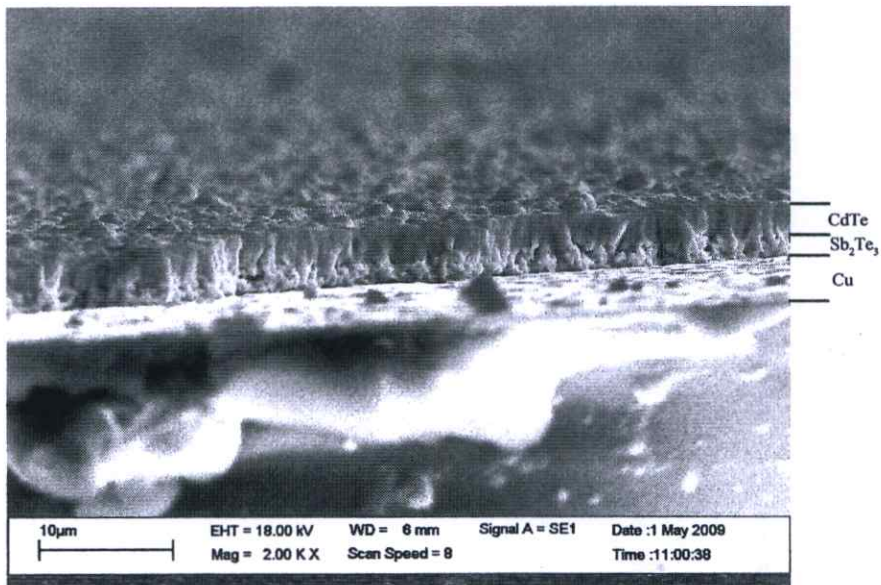


$\text{Sb}_2\text{Te}_3/\text{Cu}/\text{slide glass}, T_{\text{sub}} = 100^\circ\text{C}$

รูปที่ 4.10 แสดงภาพถ่าย SEM เมื่อเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Sb}_2\text{Te}_3/\text{slide glass}$  และ  $\text{Sb}_2\text{Te}_3/\text{Cu}/\text{slide glass}$  ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่ให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์และให้อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส แก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์



$\text{Sb}_2\text{Te}_3/\text{slide glass}, T_{\text{sub}} = \text{non}$



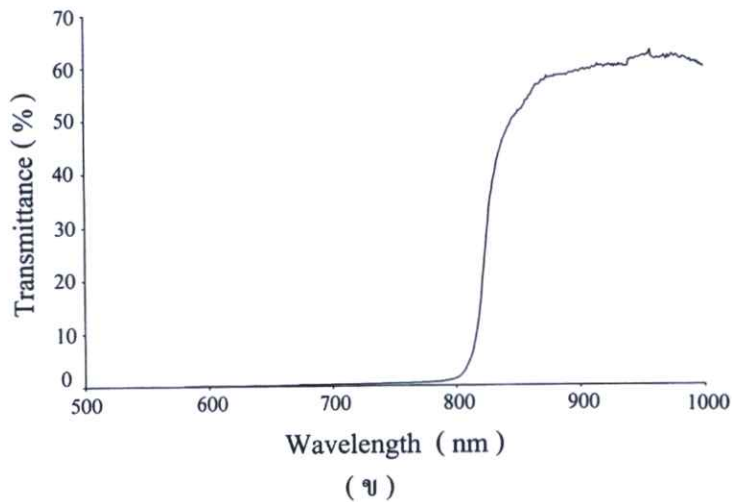
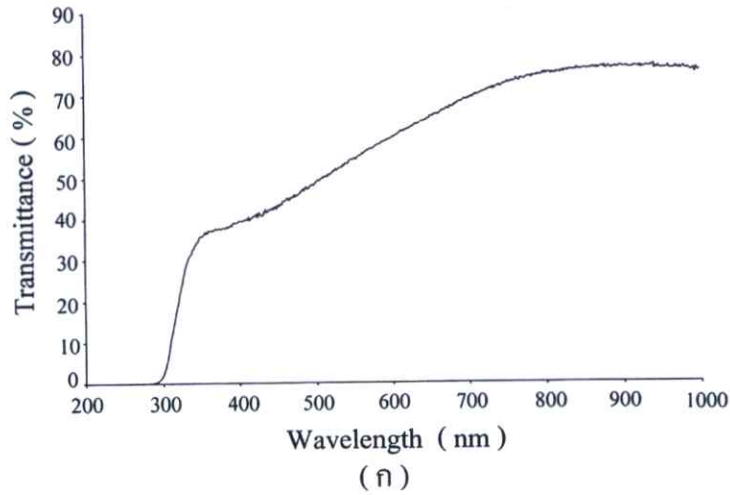
$\text{CdTe}/\text{Sb}_2\text{Te}_3/\text{Cu}/\text{slide glass}, T_{\text{sub}} = 100^\circ\text{C}$

รูปที่ 4.11 แสดงภาพถ่าย SEM บริเวณภาคตัดขวางของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  / slide glass และ  $\text{CdTe}/\text{Sb}_2\text{Te}_3/\text{Cu}/\text{slide glass}$  ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่ให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์และให้อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

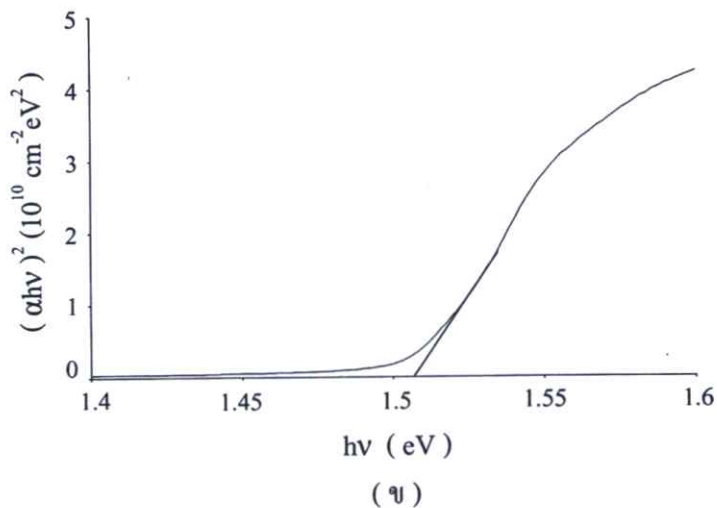
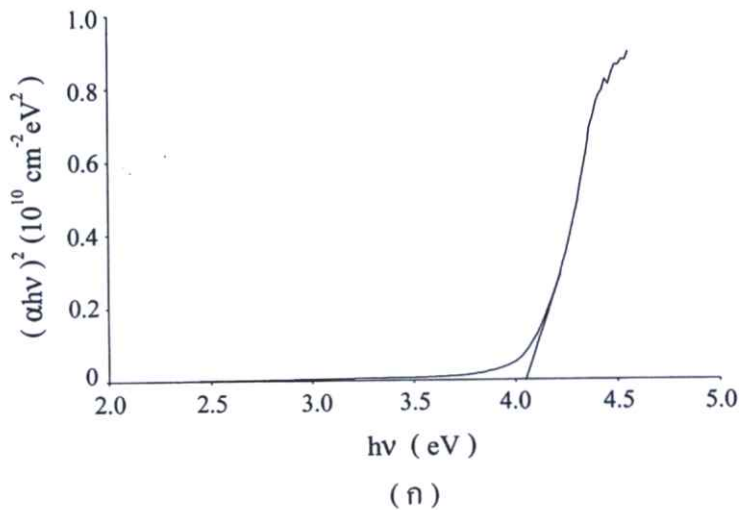
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของฟิล์มบางชนิดต่าง ๆ และสิ่งประดิษฐ์ที่มีลักษณะโครงสร้างแบบต่าง ๆ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

Semiconducting Films	Thickness (nm)	Substrate Temperature (°C)	Lattice Constant		Grain Size (XRD) (nm)	Grain Size (SEM) (nm)
			a (Å)	c (Å)		
CdTe/slide glass	1,000	non	6.313	-	55.40	100
		100	6.470	-	98.04	200
CdTe/Cu/slide glass	1,000	non	6.326	-	51.59	1,500
		100	6.461	-	44.0	1,500
CdTe/Sb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> /Cu/slide glass	1,000	non	6.348	-	48.83	1,500
		100	6.431	-	41.01	1,500
Sb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> /slide glass	300	non	4.181	30.338	-	80
		100	4.258	30.348	68.96	200
Sb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> /Cu/slide glass	300	non	4.396	26.666	43.88	1,500
		100	4.314	29.312	55.49	1,500

4.2.3 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางชนิดต่างๆ และสิ่งประดิษฐ์ที่มีลักษณะโครงสร้างแบบต่าง ๆ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



- รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของแผ่นสารตัวอย่างที่เป็น
- ก. แผ่นกระจกสไลด์
  - ข. ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อใช้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับ 100 องศาเซลเซียส

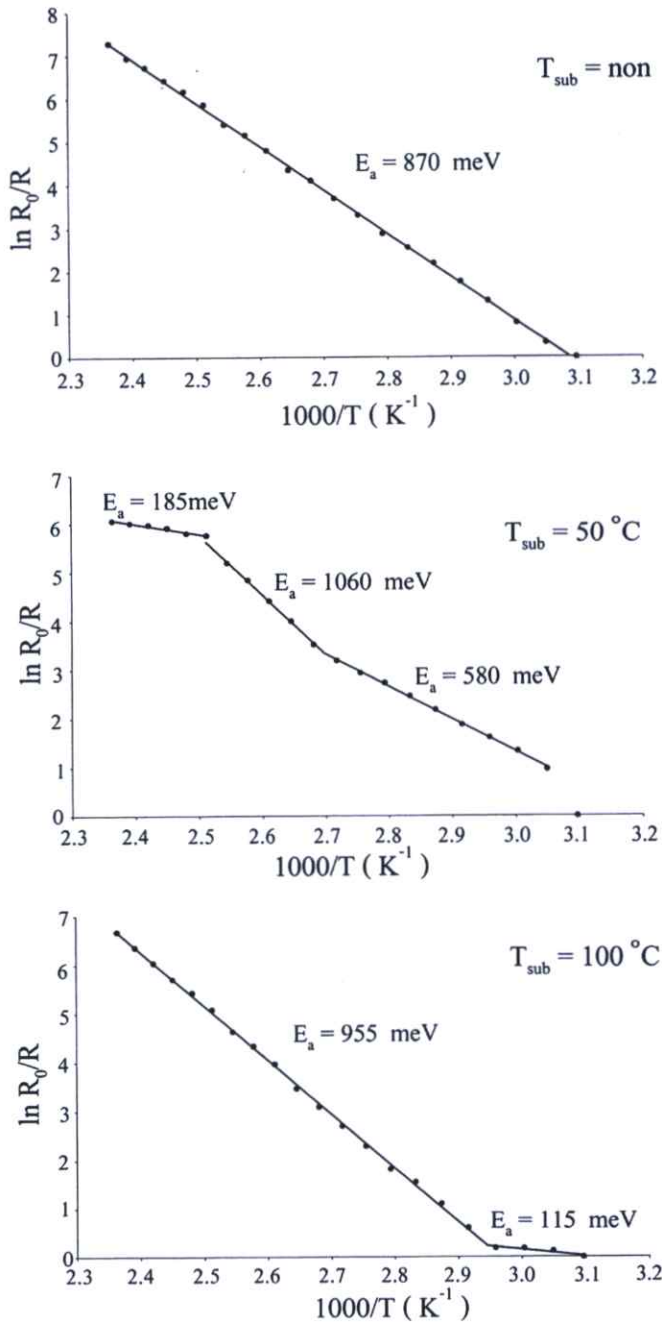


รูปที่ 4.13 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานของแผ่นสารตัวอย่างที่เป็น

ก. แผ่นกระจกสไลด์

ข. ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อใช้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับ 100 องศาเซลเซียส

#### 4.2.4 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.14 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln\left(\frac{R_0}{R}\right)$  กับ  $\frac{1000}{T}$  ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ

CdTe/slide glass ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยไม่ให้อุณหภูมิกับแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ และให้อุณหภูมิกับแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ 50 องศาเซลเซียส และ 100 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าพลังงานกระตุ้น ( $E_a$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe/slide glass ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่ให้อุณหภูมิกับแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ และให้อุณหภูมิกับแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ 50 องศาเซลเซียส และ 100 องศาเซลเซียส

Substrate Temperature ( °C )	Activation Energy ( meV )			
	$E_{a1}$	$E_{a2}$	$E_{a3}$	$E_{a4}$
non	-	-	870	-
50	185	580	-	1,060
100	115	-	-	955

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความต้านทานไฟฟ้า ความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าของเนื้อสารของฟิล์มบางชนิดต่าง ๆ และสิ่งประดิษฐ์ที่มีลักษณะ โครงสร้างแบบต่าง ๆ ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 150 องศาเซลเซียสสำหรับ โครงสร้าง Cu/slide glass และ 100 องศาเซลเซียส สำหรับสิ่งประดิษฐ์ที่มีโครงสร้างอื่น

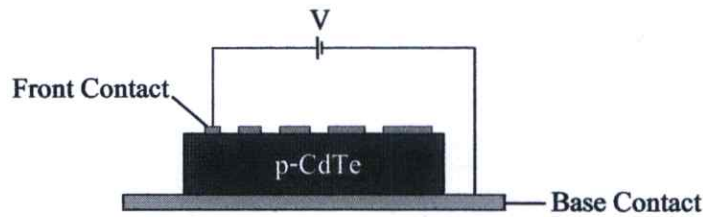
Device Under Test ( DUT )	Resistance ( $\Omega$ )		Sheet Resistance ; $R_s$ ( $\Omega$ )		Bulk Resistivity ; $\rho_b$ ( $\Omega.cm$ )	
	Darkness	Illumination	Darkness	Illumination	Darkness	Illumination
Cu/glass	2.17	-	9.40	-	$3.76 \times 10^{-4}$	-
CdTe/glass	$1.67 \times 10^{10}$	$1.11 \times 10^{10}$	$2.92 \times 10^{10}$	$1.94 \times 10^{10}$	$2.71 \times 10^6$	$1.81 \times 10^6$
CdTe/Cu/glass	6.17	8.58	14.40	20.02	$1.34 \times 10^{-3}$	$1.86 \times 10^{-3}$
CdTe/ $Sb_2Te_3$ /Cu/glass	0.864	0.878	1.51	1.54	$1.51 \times 10^{-4}$	$1.54 \times 10^{-4}$
$Sb_2Te_3$ /glass	21.23	24.57	53.08	61.43	$1.59 \times 10^{-3}$	$1.84 \times 10^{-3}$
$Sb_2Te_3$ /Cu/glass	1.63	4.81	4.08	12.03	$4.10 \times 10^{-5}$	$1.20 \times 10^{-4}$

จากตารางที่ 4.2 จะพบว่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เตรียมโดยไม่ได้ให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับมีค่าเท่ากับ 879 มิลลิอิเล็กตรอน โวลต์ สอดคล้องกับข้อบกพร่องผลึกชนิด  $V_{Cd}^{2+}$  แต่เมื่อให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับเป็น 50 เคลวิน ระดับพลังงานกระตุ้นมี 3 ค่าคือ 185, 580 และ 1,060 มิลลิอิเล็กตรอน โวลต์ ซึ่งจะสอดคล้องกับข้อบกพร่องผลึกชนิด  $V_{Cd}^+$ ,  $V_{Cd}^{2+}$  และ  $V_{Te}^+$  ตามลำดับ ส่วนกรณีให้อุณหภูมิกับฐานรองรับเป็น 100 เคลวิน พลังงานกระตุ้นจะมีค่าเท่ากับ 115 และ 955 มิลลิอิเล็กตรอน โวลต์ ซึ่งจะสอดคล้องกับข้อบกพร่องผลึกชนิด  $V_{Cd}^+$  และ  $V_{Te}^+$  ตามลำดับ

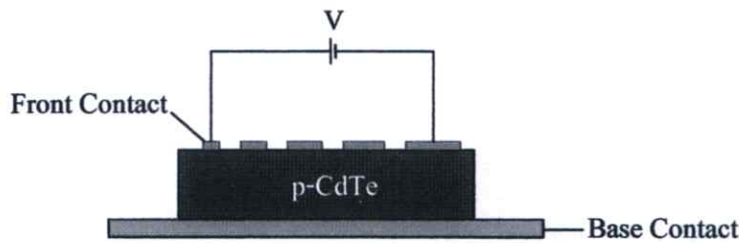
### 4.3 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ

$\text{Cu}/\text{CdTe}/\text{Cu}$  ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ  
เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

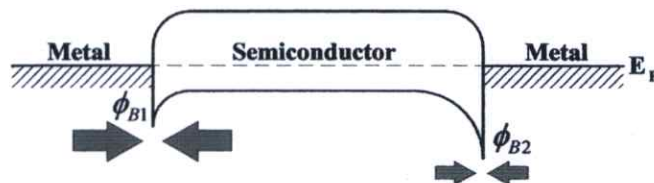
สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ  $\text{Cu}/\text{CdTe}/\text{Cu}$  เรียกว่าโครงสร้างแบบแซนดวิช โดยฟิล์มบาง ของสารกึ่งตัวนำ CdTe จะถูกประกบ ด้วยฟิล์มบางของ Cu ทั้งสองด้าน ด้านล่าง เป็นฟิล์ม Cu แบบเต็มพื้นที่ของแผ่นกระจกสไลด์สำหรับเป็นชั้นนำไฟฟ้าส่วนด้านบนเป็นฟิล์มบางของ Cu ซึ่งเคลือบเป็นชั้นขั้วไฟฟ้าลักษณะเป็นวงกลมห้าวที่มีพื้นที่ต่างกันเรียงกัน ไปเป็นแนวเส้นตรง โดยที่แต่ละวงแยกห่างจากกัน ใช้เพื่อศึกษาผลของรอยต่อระหว่างฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe กับ ฟิล์มบาง Cu



รูปที่ 4.15 แสดงแผนภาพของสิ่งประดิษฐ์ของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่ใช้ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่า กระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า ในแบบแนวตั้ง (VDM) เมื่อไบแอสขั้วไฟฟ้า ด้านล่างด้วยแรงดันไฟลบ

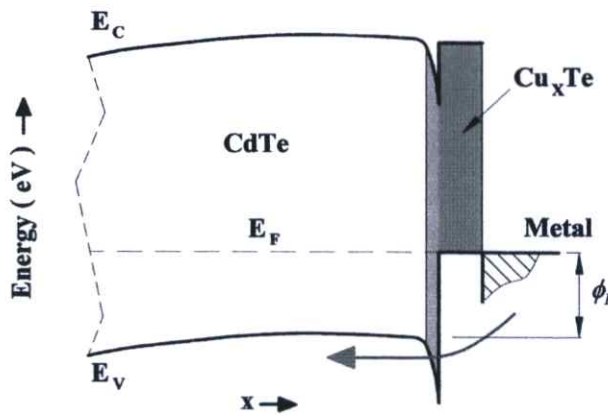


รูปที่ 4.16 แสดงแผนภาพของสิ่งประดิษฐ์ของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่ใช้ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่า กระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า ในแบบแนวนอน (LTM) เมื่อไบแอสขั้วไฟฟ้า พื้นที่ใหญ่ด้วยแรงดันไฟลบ



รูปที่ 4.17 แสดงค่าแพนศักย์ตรงบริเวณรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ CdTe ของสิ่งประดิษฐ์ ที่ใช้ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่า กระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า ทั้งในแบบแนวตั้ง และในแบบแนวนอน

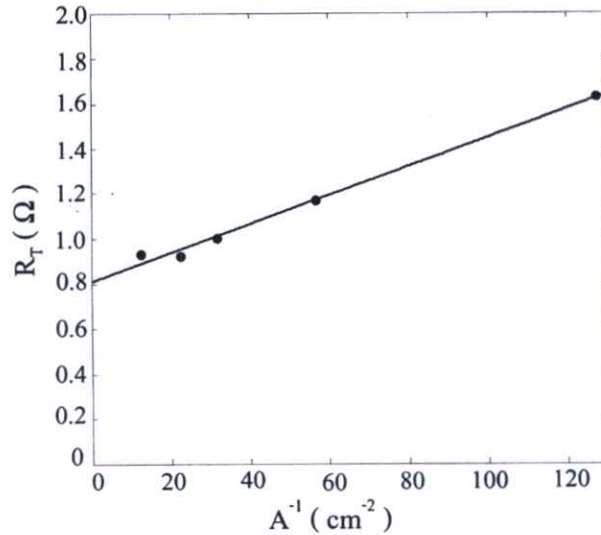
การเคลือบฟิล์มบางของโลหะ Cu ลงบนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่ทำความสะอาดโดยการกัดด้วยสารละลายที่เหมาะสมจะเป็นการสร้างผิวหน้าที่อุดมไปด้วยอะตอมของธาตุ Te ( Te-rich surface ) จากนั้นอะตอม Cu จะแพร่เข้าร่วมกับ Te กลายเป็นชั้นบาง ๆ ของสารประกอบ  $Cu_xTe$  สปาดและผู้ร่วมงาน [29] ได้ใช้เทคนิค UPS ในการตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุของ  $Cu_xTe$  พบว่า x มีค่าอยู่ระหว่าง 1.5-1.9 และให้ความสูงของกำแพงศักย์มีค่าอยู่ระหว่าง 0.7-0.8 อิเล็กตรอนโวลต์ แต่จากการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่า กระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า ของเซลล์แสงอาทิตย์ CdS/CdTe ที่ประดิษฐ์ขึ้นพบว่าความสูงของกำแพงศักย์ มีค่าเท่ากับ 0.48 อิเล็กตรอนโวลต์ นั้นแสดงว่ากลไกการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ที่บริเวณรอยต่อเด่นมาก และแผนภาพแถบพลังงานของรอยต่อระหว่าง CdTe/ $Cu_xTe$ /M จะแสดงดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 แสดงแผนภาพของโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อระหว่าง CdTe/ $Cu_xTe$ /โลหะ [29]

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าความต้านทานรวมของสิ่งประดิษฐ์ของสารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส โดยทำการวัดในแบบแนวตั้ง (vertical transmission line) ผ่านขั้วไฟฟ้าที่มีพื้นที่ต่างกัน

Contact	Diameter (cm)	Area (cm <sup>2</sup> )	Inverse Area (cm <sup>-2</sup> )	Resistance (Ω)
C-1	0.10	$7.86 \times 10^{-3}$	127.27	1.63
C-2	0.15	$1.77 \times 10^{-2}$	56.57	1.17
C-3	0.20	$3.14 \times 10^{-2}$	31.82	1.00
C-4	0.24	$4.45 \times 10^{-2}$	22.47	0.92
C-5	0.32	$7.90 \times 10^{-2}$	12.67	0.93



**รูปที่ 4.19** แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนกลับของพื้นที่ขั้วไฟฟ้ากับความต้านทานรวมเพื่อหาความต้านทานจำเพาะของรอยต่อโอห์มมิกของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส โดยทำการวัดในแบบแนวตั้ง

จาก

$$\begin{aligned}
 R_T &\approx \frac{2\rho_C}{A} + \frac{\rho_B \cdot t}{A} + R_E \\
 &\approx (2\rho_C + \rho_B \cdot t) \frac{1}{A} + R_E \\
 m &= 2\rho_C + \rho_B \cdot t \\
 \rho_C &= \frac{m - \rho_B \cdot t}{2} \\
 &= \frac{[6.41 \times 10^{-3} - (1.34 \times 10^{-3} \times 9.3 \times 10^{-5})]}{2} \\
 &= 3.20 \times 10^{-3} \text{ } \Omega \cdot \text{cm}^2
 \end{aligned}$$

และ

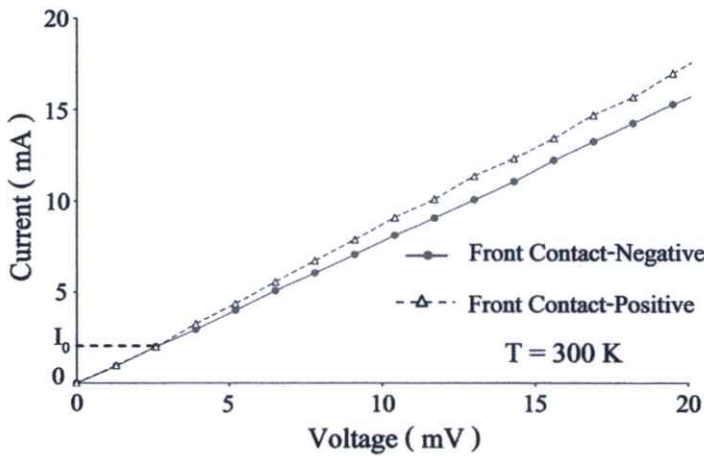
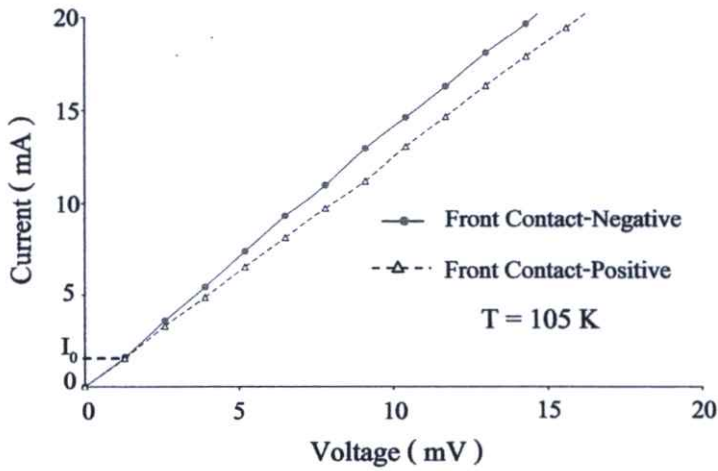
$$R_E = 0.808 \text{ } \Omega$$

และจาก

$$\begin{aligned}
 \rho_C &= \frac{k}{q \dot{A} T} \exp\left(\frac{q\phi_B}{kT}\right) \\
 \phi_B &= \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{\rho_C q \dot{A} T}{k}\right) \quad ; \text{เมื่อ } \rho_C = 3.20 \times 10^{-3} \text{ } \Omega \cdot \text{cm}^2
 \end{aligned}$$

จะได้

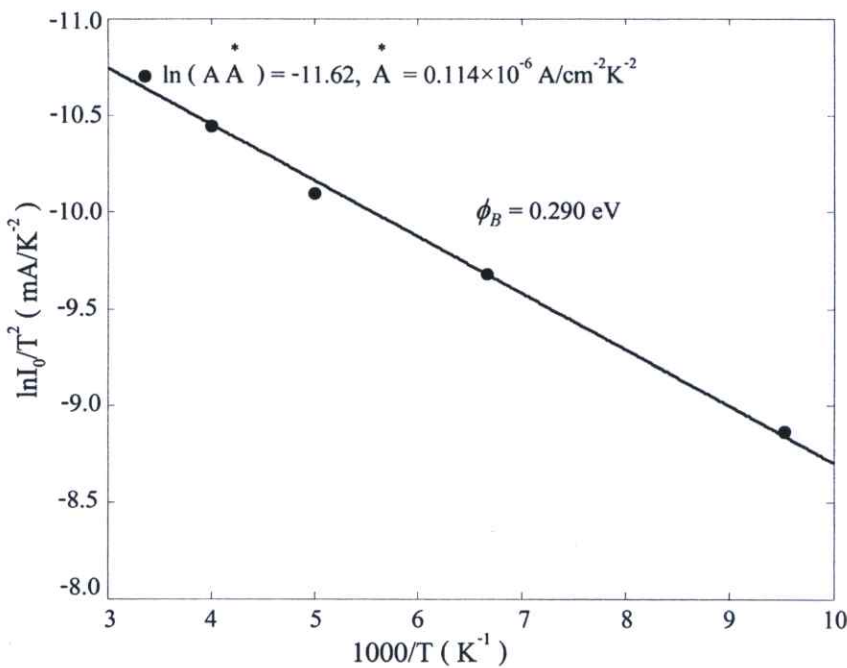
$$\begin{aligned}
 \phi_B &= (0.025) \ln\left[\frac{(3.20 \times 10^{-3})(1.6 \times 10^{-19})(12)(300)}{1.38 \times 10^{-23}}\right] \\
 &= 0.304 \text{ eV}
 \end{aligned}$$



รูปที่ 4.20 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า กระแสไฟฟ้า - แรงดันไฟฟ้า เพื่อแสดงค่ากระแส ริชาร์ดสัน โดยทำการวัดในแบบแนวตั้ง (vertical transmission line) ผ่านขั้วไฟฟ้าที่มี พื้นที่ต่างกันเมื่อวัดในแบบแนวตั้งที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของรอยต่อโอห์มมิกของสิ่งประดิษฐ์ สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อน ในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.5 แสดงค่ากระแสริชาร์ดสัน ( $I_0$ ) ที่อุณหภูมิต่างๆ เมื่อทำการวัดในแบบแนวตั้งกับขั้วไฟฟ้าหมายเลข 5 ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Cu ที่เตรียมได้โดยวิธี ระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

Temperature (K)	Area (cm <sup>2</sup> )	Richardson Current (mA)	Richardson Current Density (mA/cm <sup>2</sup> )
105	$7.90 \times 10^{-2}$	1.56	19.79
150	$7.90 \times 10^{-2}$	1.41	17.85
200	$7.90 \times 10^{-2}$	1.65	20.38
250	$7.90 \times 10^{-2}$	1.82	23.04
300	$7.90 \times 10^{-2}$	2.00	25.32



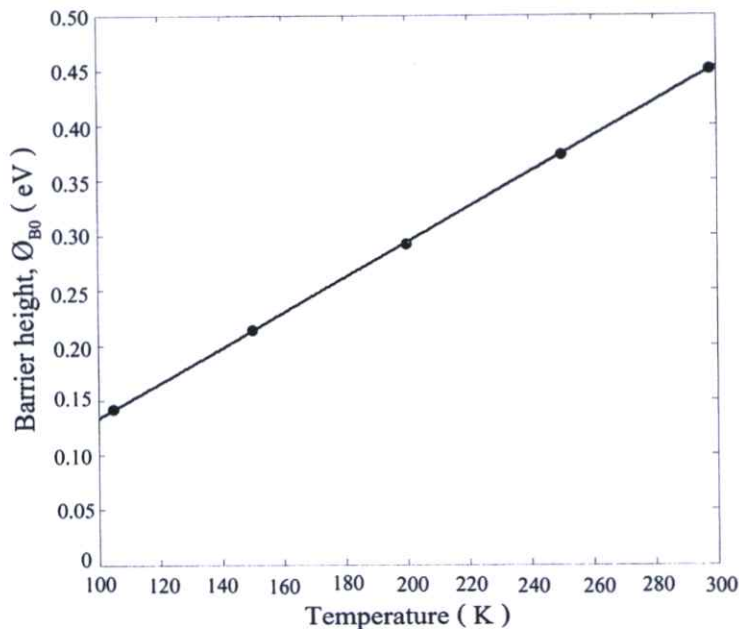
รูปที่ 4.21 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln \frac{I_0}{T^2}$  กับ  $\frac{1000}{T}$  เพื่อหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ในแนวตั้งของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

จากทฤษฎีเทอร์มิโอนิกอิมิสชันสามารถหา  $\phi_{B0}$  โดยอาศัยสมการ  $\phi_{B0} = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{A A T^2}{I_S} \right)$  และ

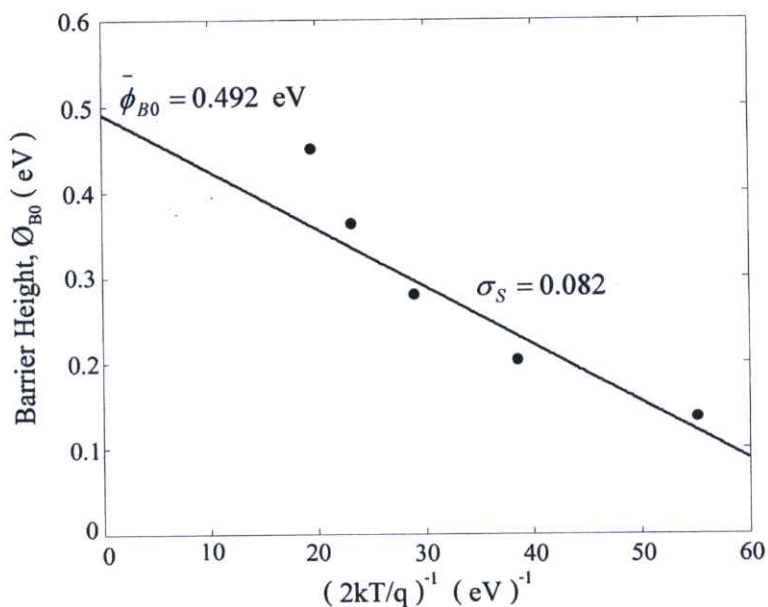
ค่าความสูงของกำแพงศักย์จะปรากฏในตารางที่ (4.6)

**ตารางที่ 4.6** แสดงค่าความสูงของกำแพงศักย์ ( $\phi_{B0}$ ) ที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิของรอยต่อโอห์มมิกของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

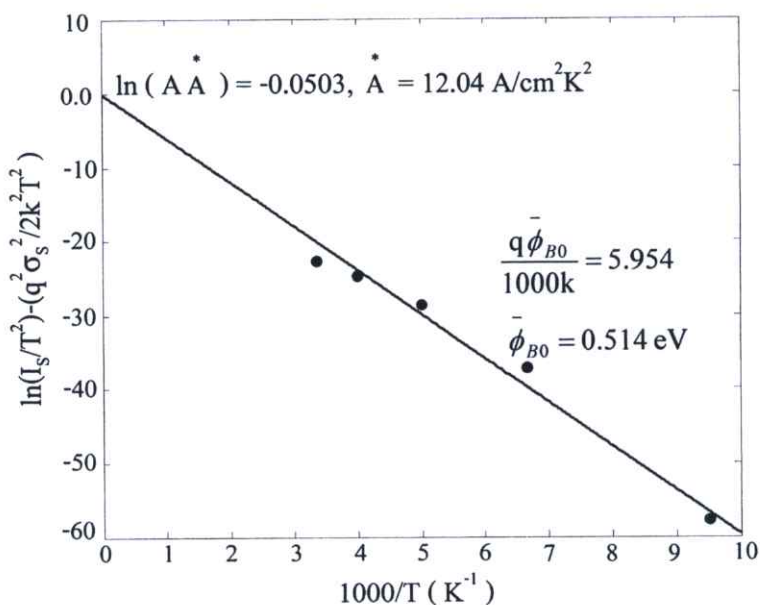
Temperature ( K )	$\phi_{B0}$ ( eV )
105	0.142
150	0.214
200	0.292
250	0.373
300	0.451



**รูปที่ 4.22** แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูงของกำแพงศักย์ ( $\phi_{B0}$ ) กับอุณหภูมิของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.23 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(2kT/q)^{-1}$  กับ  $\phi_{B0}$  ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

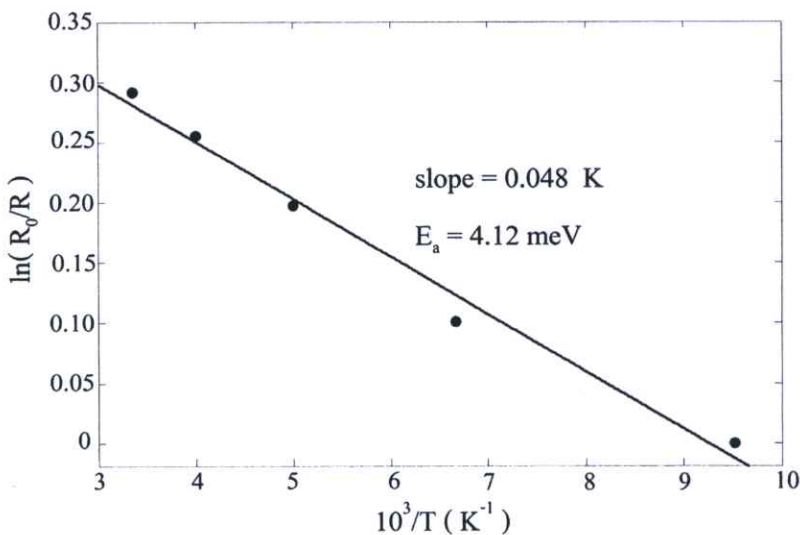


รูปที่ 4.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(I_s/T^2) - (q^2\sigma_s^2/2k^2T^2)$  กับ  $\frac{1000}{T}$  ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

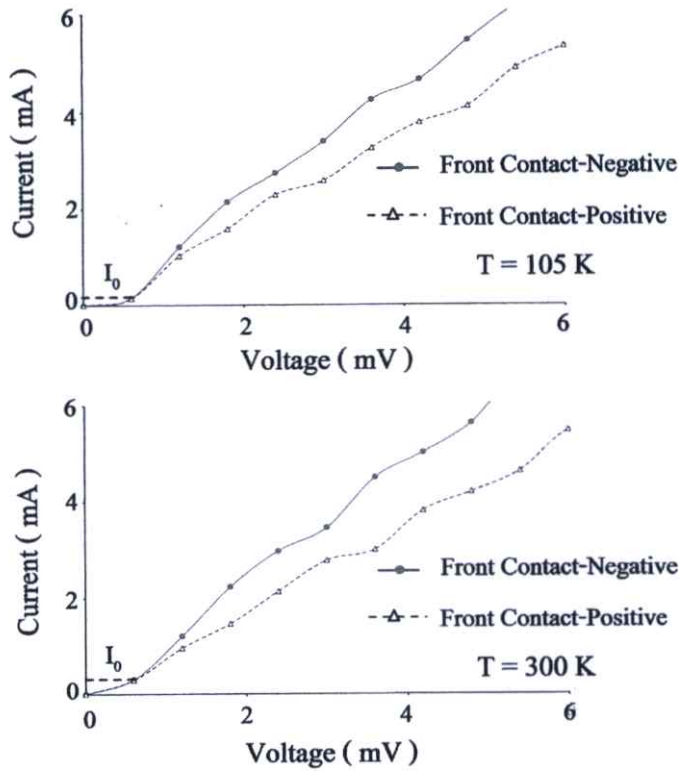
หากพิจารณาในช่วงกระแสที่ต่ำกว่าค่ากระแสชาร์ทสันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า ดังรูปที่ 4.20 จะได้ว่าความชัน คือ ส่วนกลับของความต้านทานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ถ้าพิจารณาที่อุณหภูมิต่างๆ จะพบว่าเมื่ออุณหภูมิต่ำลง ความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe จะมีค่าเพิ่มขึ้นดังตารางที่ 4.7 เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(R_0/R)$  กับ  $10^3/T$  จะได้ค่าพลังงานกระตุ้น ของระดับพลังงานของอะตอมผู้รับ (acceptor) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ดังแสดงในรูปที่ 4.25

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าความต้านทานแผ่นที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu / CdTe / Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

Temperature ( K )	Resistance ( $\Omega$ )
105	0.92
150	0.83
200	0.76
250	0.71
300	0.69



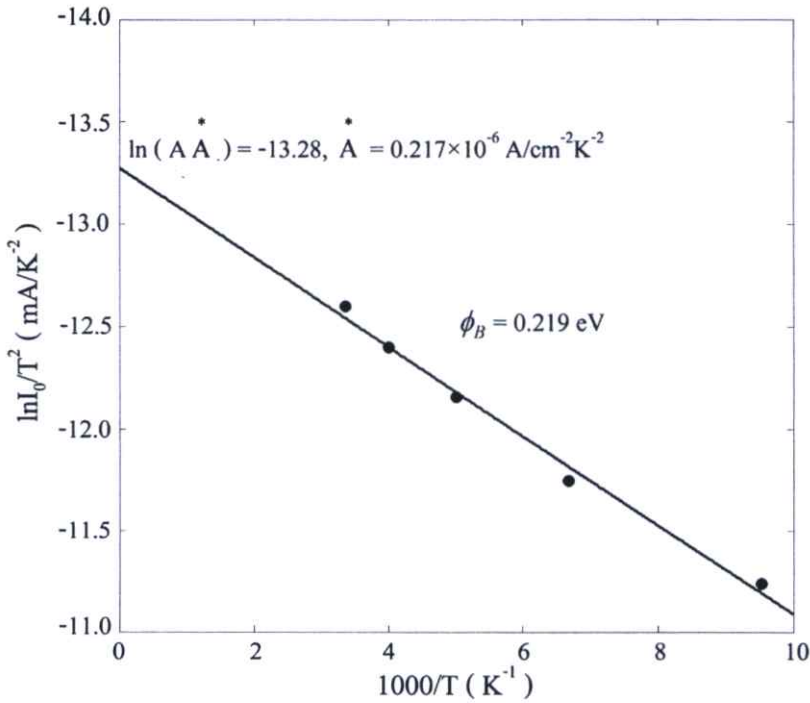
รูปที่ 4.25 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln \frac{R_0}{R}$  กับ  $\frac{1000}{T}$  เพื่อแสดงค่าพลังงานกระตุ้น ( $E_a$ ) ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.26 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า เพื่อแสดงค่ากระแสรีชาร์ดสันเมื่อวัดในแบบแนวนอนที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของรอยต่อไอหุ้มมิกของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.8 แสดงค่ากระแสรีชาร์ดสัน ( $I_0$ ) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ เมื่อวัดในแบบแนวนอน (lateral transmission line) กับขั้วไฟฟ้าหมายเลข 5 ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

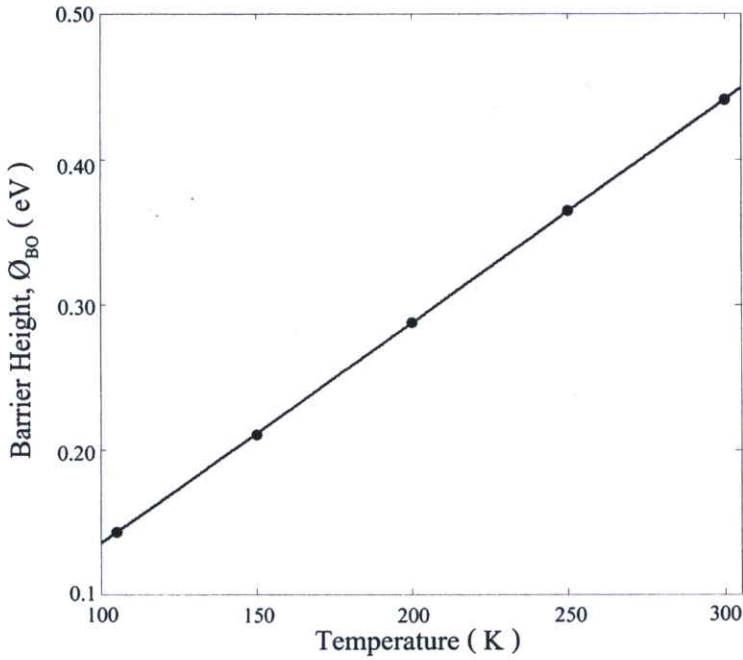
Temperature (K)	Area (cm <sup>2</sup> )	Richardson Current (mA)	Richardson Current Density (mA/cm <sup>2</sup> )
105	$7.86 \times 10^{-3}$	0.145	18.45
150	$7.86 \times 10^{-3}$	0.178	22.65
200	$7.86 \times 10^{-3}$	0.210	26.72
250	$7.86 \times 10^{-3}$	0.257	32.70
300	$7.86 \times 10^{-3}$	0.300	38.17



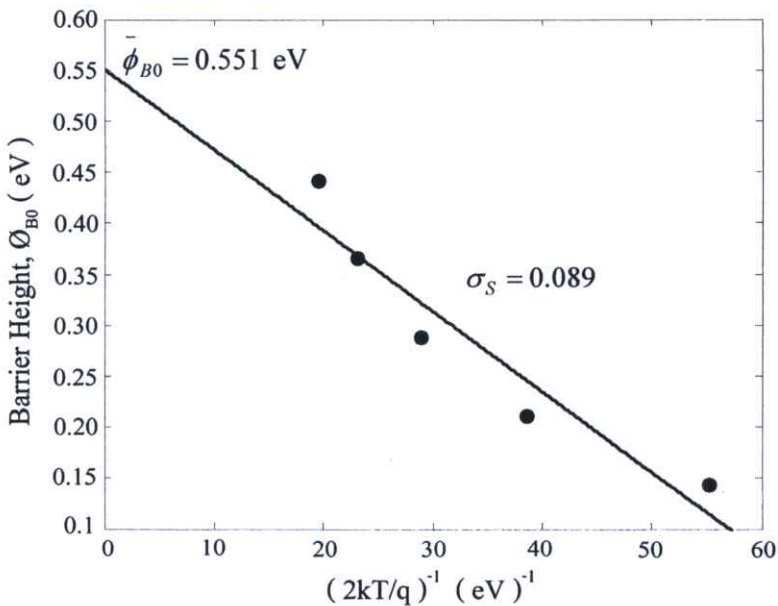
รูปที่ 4.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln \frac{I_0}{T^2}$  กับ  $\frac{1000}{T}$  เพื่อหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ในแนวราบของสิ่งประดิษฐ์ที่มีโครงสร้าง Cu/CdTe/Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.9 แสดงค่าความสูงของกำแพงศักย์ ( $\phi_{B0}$ ) ที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ ของรอยต่อโอห์มมิกของสิ่งประดิษฐ์ที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

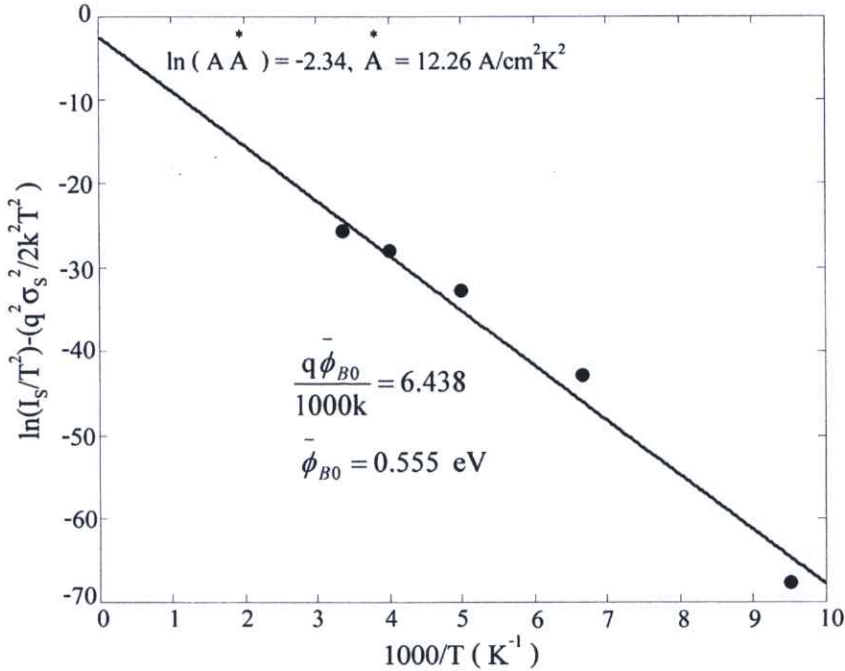
Temperature ( K )	$\phi_{B0}$ ( eV )
105	0.143
150	0.211
200	0.288
250	0.365
300	0.441



รูปที่ 4.28 แสดงค่าความสูงของกำแพงศักย์ ( $\phi_{B0}$ ) ที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.29 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(2kT/q)^{-1}$  กับ  $\phi_{B0}$  ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

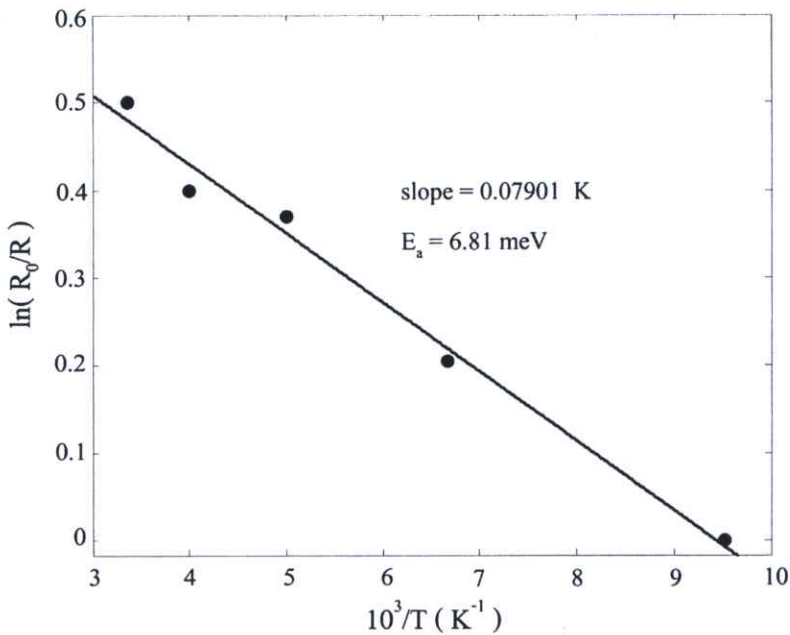


**รูปที่ 4.30** แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(I_s/T^2) - (q^2 \sigma_s^2 / 2k^2 T^2)$  กับ  $\frac{1000}{T}$  ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

หากพิจารณาในช่วงกระแสที่ต่ำกว่าค่ากระแสรีชาร์ดสันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า ดังรูปที่ 4.26 จะได้ว่าความชัน คือ ส่วนกลับของความต้านทานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ถ้าพิจารณาที่อุณหภูมิต่างๆ จะพบว่าเมื่ออุณหภูมิต่ำลง ความต้านทานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe จะมีค่าเพิ่มขึ้นดังตารางที่ 4.10 เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(R_0/R)$  กับ  $10^3/T$  จะได้ค่าพลังงานกระตุ้น ของระดับพลังงานของอะตอมผู้รับ (acceptor) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ดังแสดงในรูปที่ 4.31

ตารางที่ 4.10 แสดงค่าความต้านทานแผ่นที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

Temperature ( K )	Resistance ( $\Omega$ )
105	4.14
150	3.37
200	2.86
250	2.77
300	2.51

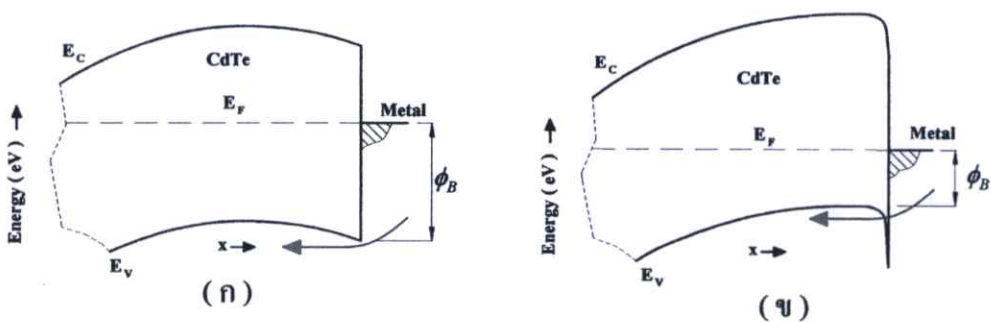


รูปที่ 4.31 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln \frac{R_0}{R}$  กับ  $\frac{1000}{T}$  เพื่อแสดงค่าพลังงานกระตุ้น ( $E_a$ ) ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

#### 4.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ $Sb_2Te_3/CdTe/Sb_2Te_3$ ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

สิ่งประดิษฐ์ของสารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ  $Sb_2Te_3/CdTe/Sb_2Te_3$  เรียกว่าโครงสร้างแบบแซนดวิชโดยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe จะถูกประกบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Sb_2Te_3$  ทั้งสองด้าน ด้านล่างเป็นฟิล์มบางของ Cu แบบเต็มพื้นที่ของกระจกสไลด์ สำหรับเป็นชั้นนำไฟฟ้าส่วนด้านบนเป็นฟิล์มบางของ Cu ซึ่งเคลือบเป็นชั้นขั้วไฟฟ้าลักษณะเป็นวงกลมห้วงที่มีพื้นที่ต่างกันเรียงกันไปเป็นแนวเส้นตรง โดยที่แต่ละวงแยกห่างจากกันใช้เพื่อศึกษาผลของรอยต่อระหว่างฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe กับฟิล์มบาง Cu

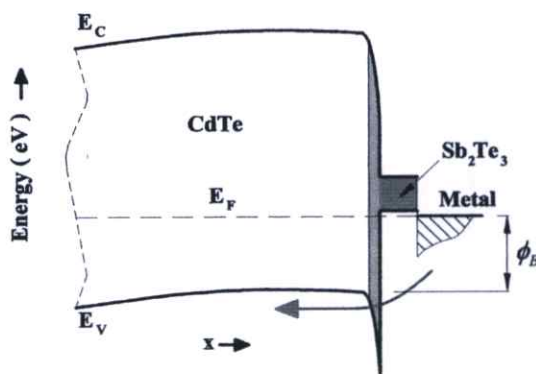
ความสูงของกำแพงศักย์ที่รอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ CdTe มักมีค่าไม่คงตัวขึ้นกับวิธีการเตรียมผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ก่อนที่จะทำการเคลือบโลหะอาจเป็นไปได้ว่าตรงบริเวณรอยต่อได้มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเคมีในระดับอะตอม (atomic scale) เช่นที่สถานะผิวรอยต่อ (interface state) ไปเหนี่ยวนำให้เกิดเป็นชั้นไดโพลขั้วคู่บาง ๆ (dipole layer) ซึ่งมีความหนาในระดับ 2-3 ชั้นอะตอมเท่านั้น แต่ส่งผลให้ค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี (electron affinity) ของผิวหน้า CdTe มีค่าลดต่ำกว่าในเนื้อสารของ CdTe ซึ่งทำให้ความสูงของกำแพงศักย์ยังผล (effective barrier height) มีค่าลดลงได้ การลดลงของความสูงกำแพงศักย์ตรงบริเวณรอยต่อระหว่างฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe/โลหะ และระหว่างฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe/ชั้นไดโพล/โลหะ จะแสดงดังรูปที่ 4.32



รูปที่ 4.32 แสดงความสูงของกำแพงศักย์

- ที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe/โลหะ
- ที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe/ชั้นไดโพล/โลหะ

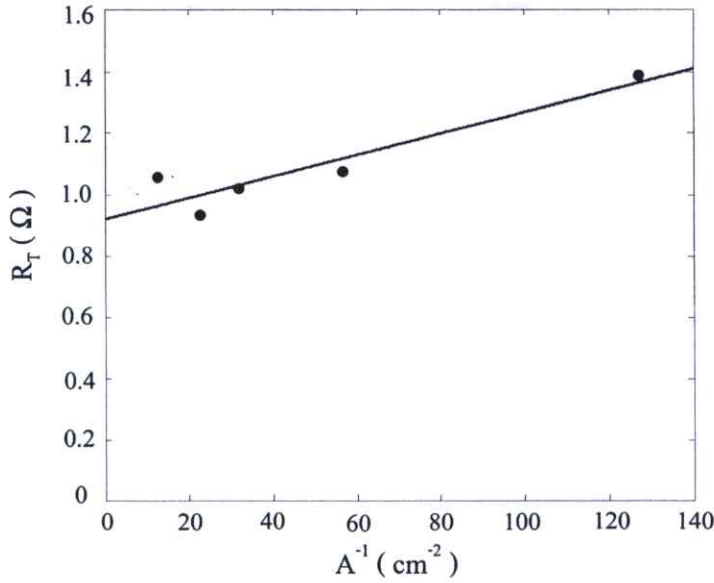
โรมิโอและเพื่อนร่วมงาน [27] เลือกใช้  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  เคลือบบน  $\text{CdTe}$  เพื่อสร้างชั้นโคโพลของรอยต่อ  $\text{CdTe}/\text{Sb}_2\text{Te}_3/\text{Mo}$  โดยหลีกเลี่ยงการใช้โลหะ  $\text{Cu}$   $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) เท่ากับ 0.3 อิเล็กตรอนโวลต์ ส่งผลให้ความสูงของกำแพงศักย์เท่ากับ 0.45 อิเล็กตรอนโวลต์ ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $\text{CdS}/\text{CdTe}$  ที่มีชั้นขั้วไฟฟ้าเป็น  $\text{CdTe}/\text{Sb}_2\text{Te}_3/\text{Mo}$  มีค่าไม่สูงมากนักเนื่องจากความหนาแน่นของโฮลใน  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  มีค่าต่ำ แต่หากเปลี่ยนขั้วไฟฟ้าเป็น  $\text{CdTe}/\text{Sb}_2\text{Te}_3/\text{Cu}$  พบว่าประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์สูงถึง 15.8 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากอะตอม  $\text{Cu}$  แพร่เข้าสู่ชั้น  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  ทำให้ความหนาแน่นของโฮลใน  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  มีค่าเพิ่มขึ้น แผนภาพลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน ของรอยต่อ  $\text{CdTe}/\text{Sb}_2\text{Te}_3/\text{โลหะ}$  แสดงดังรูปที่ 4.33



รูปที่ 4.33 แสดงแผนภาพลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อระหว่าง  $\text{CdTe}/\text{Sb}_2\text{Te}_3/\text{โลหะ}$

ตารางที่ 4.11 แสดงค่าความต้านทานรวมโดยทำการวัดในแบบแนวตั้ง (vertical transmission line) ผ่านขั้วไฟฟ้าที่มีพื้นที่ต่างกันของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ  $\text{Sb}_2\text{Te}_3/\text{CdTe}/\text{Sb}_2\text{Te}_3$  ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

Contact	Diameter (cm)	Area ( $\text{cm}^2$ )	Inverse Area ( $\text{cm}^{-2}$ )	Resistance ( $\Omega$ )
C-1	0.100	$7.86 \times 10^{-3}$	127.27	1.39
C-2	0.150	$1.77 \times 10^{-2}$	56.57	1.08
C-3	0.200	$3.14 \times 10^{-2}$	31.82	1.06
C-4	0.238	$4.45 \times 10^{-2}$	22.47	1.02
C-5	0.317	$7.90 \times 10^{-2}$	12.67	0.93



รูปที่ 4.34 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนกลับของพื้นที่ขั้วไฟฟ้ากับความต้านทานรวมโดยทำการวัดในแบบแนวตั้งเพื่อหาความต้านทานจำเพาะของรอยต่อไอหุ้มมิกของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ  $\text{Sb}_2\text{Te}_3/\text{CdTe}/\text{Sb}_2\text{Te}_3$  ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

จาก

$$R_T = (2\rho_C + \rho_B \cdot t) \frac{1}{A} + R_E$$

$$\rho_C = \frac{\text{slope} - \rho_B \cdot t}{2} = \frac{[3.5 \times 10^{-3} (1.51 \times 10^{-4} \times 1 \times 10^{-4})]}{2}$$

$$= 1.75 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}^2$$

$$R_E = 0.920 \Omega$$

และจาก

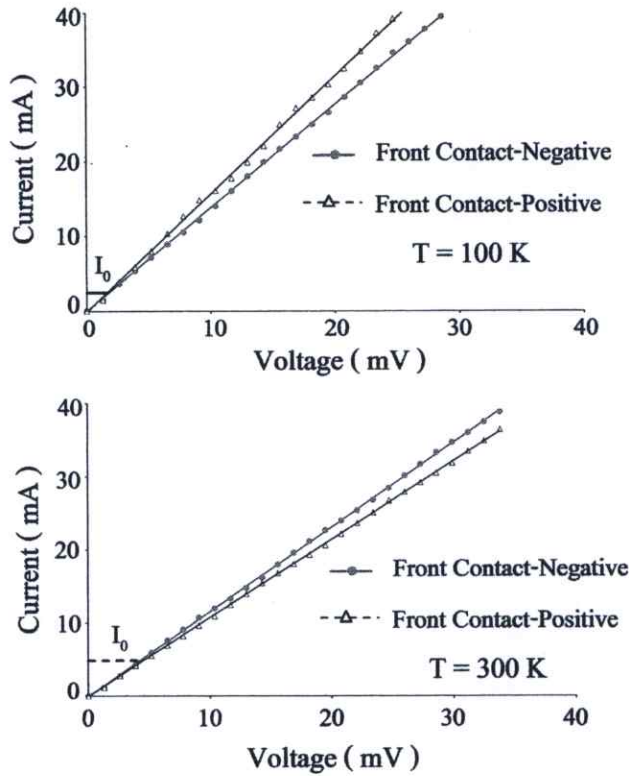
$$\rho_C = \frac{k}{qA^*T} \exp\left(\frac{q\phi_B}{kT}\right)$$

ดังนั้นจะได้

$$\phi_B = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{\rho_C q A^* T}{k}\right) \quad ; \quad \text{เมื่อ } \rho_C = 1.75 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}^2 \text{ จะได้}$$

$$\phi_B = (0.025) \ln\left[\frac{(1.75 \times 10^{-3})(1.6 \times 10^{-19})(12)(300)}{1.38 \times 10^{-23}}\right]$$

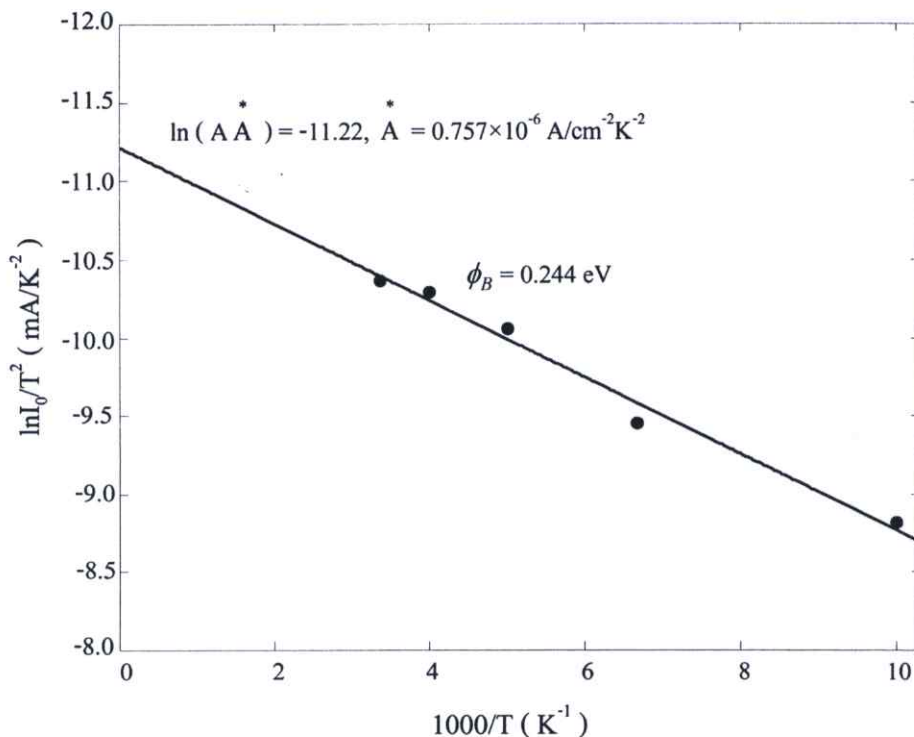
$$= 0.280 \text{ eV}$$



รูปที่ 4.35 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า เมื่อวัดในแบบแนวตั้งที่อุณหภูมิต่าง ๆ เพื่อแสดงค่ากระแสรีชาร์ดสัน ของรอยต่อโอห์มมิกของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ  $Sb_2Te_3/CdTe/Sb_2Te_3$  ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.12 แสดงค่ากระแสรีชาร์ดสัน ( $I_0$ ) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ เมื่อทำการวัดในแนวตั้งกับขั้วไฟฟ้าหมายเลข 2 ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ  $Sb_2Te_3/CdTe/Sb_2Te_3$  ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

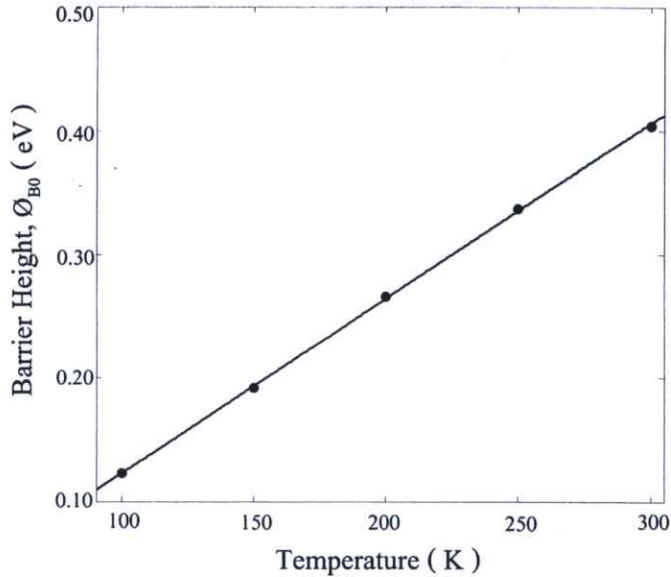
Temperature (K)	Area (cm <sup>2</sup> )	Richardson Current (mA)	Richardson Current Density (mA/cm <sup>2</sup> )
100	$1.77 \times 10^{-2}$	1.48	83.62
150	$1.77 \times 10^{-2}$	1.77	100.00
200	$1.77 \times 10^{-2}$	1.72	97.18
250	$1.77 \times 10^{-2}$	2.12	119.77
300	$1.77 \times 10^{-2}$	2.79	157.63



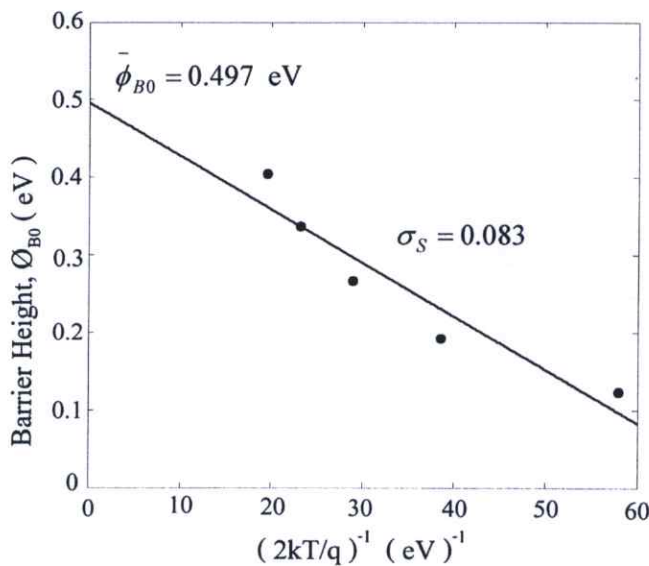
รูปที่ 4.36 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln \frac{I_0}{T^2}$  กับ  $\frac{1000}{T}$  เมื่อวัดในแนวตั้งเพื่อหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ  $\text{Sb}_2\text{Te}_3/\text{CdTe}/\text{Sb}_2\text{Te}_3$  ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.13 แสดงค่าความสูงของกำแพงศักย์ ( $\phi_{B0}$ ) ที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิของรอยต่อ โอลิฮัมมิกของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ  $\text{Sb}_2\text{Te}_3/\text{CdTe}/\text{Sb}_2\text{Te}_3$  ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

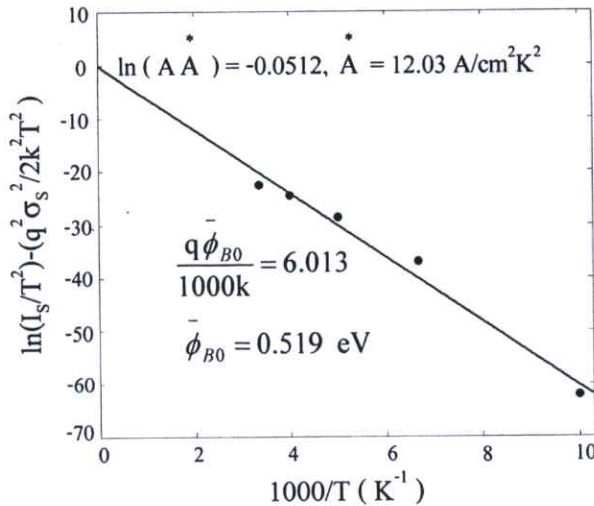
Temperature ( K )	$\phi_{B0}$ ( eV )
100	0.123
150	0.192
200	0.266
250	0.337
300	0.404



รูปที่ 4.37 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูงของกำแพงศักย์ ( $\phi_{B0}$ ) กับอุณหภูมิของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ  $Sb_2Te_3/CdTe/Sb_2Te_3$  ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.38 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(2kT/q)^{-1}$  กับ  $\phi_{B0}$  ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ  $Sb_2Te_3/CdTe/Sb_2Te_3$  ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

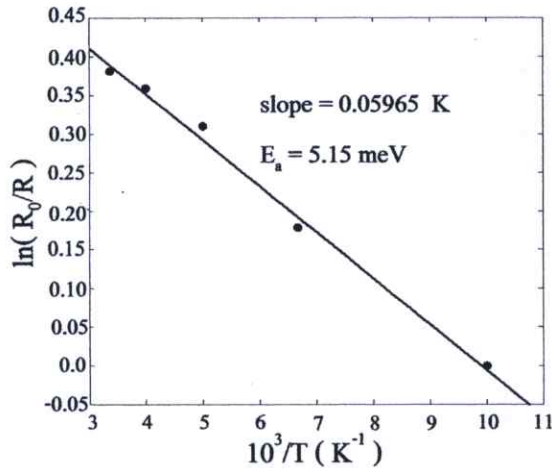


**รูปที่ 4.39** แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(I_s/T^2) - (q^2 \sigma_s^2 / 2k^2 T^2)$  กับ  $\frac{1000}{T}$  ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ  $\text{Sb}_2\text{Te}_3/\text{CdTe}/\text{Sb}_2\text{Te}_3$  ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

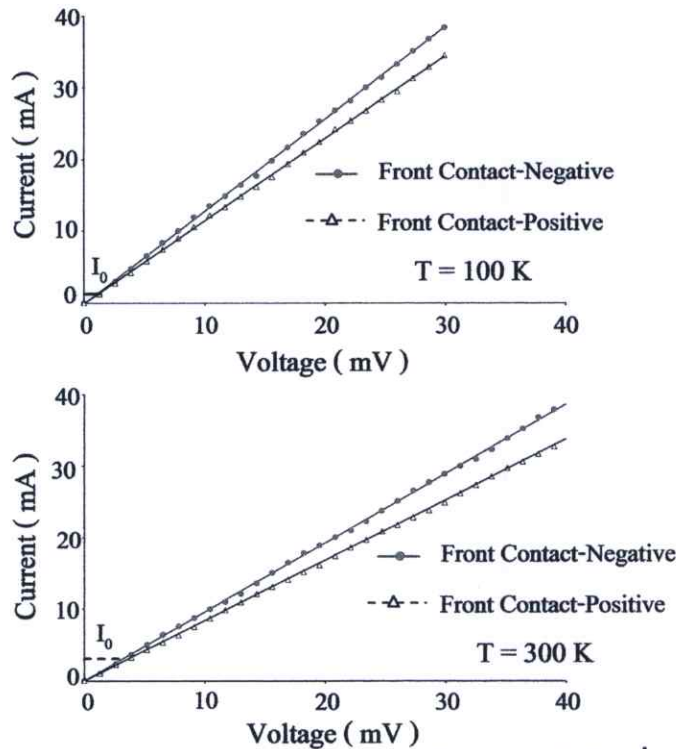
หากพิจารณาในช่วงกระแสที่ต่ำกว่าค่ากระแสรีชาร์ดสันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า ดังรูปที่ 4.35 จะได้ว่าความชัน คือ ส่วนกลับของความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ถ้าพิจารณาที่อุณหภูมิต่าง ๆ จะพบว่าเมื่ออุณหภูมิต่ำลง ความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe จะมีค่าเพิ่มขึ้นดังตารางที่ 4.14 เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(R_0/R)$  กับ  $10^3/T$  จะได้ค่าพลังงานกระตุ้น ของระดับพลังงานของอะตอมผู้รับ (acceptor) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ดังแสดงในรูปที่ 4.40

**ตารางที่ 4.14** แสดงค่าความต้านทานแผ่นที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิของสิ่งประดิษฐ์ของสารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ  $\text{Sb}_2\text{Te}_3/\text{CdTe}/\text{Sb}_2\text{Te}_3$  ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

Temperature ( K )	Resistance ( $\Omega$ )
100	0.88
150	0.73
200	0.64
250	0.61
300	0.60



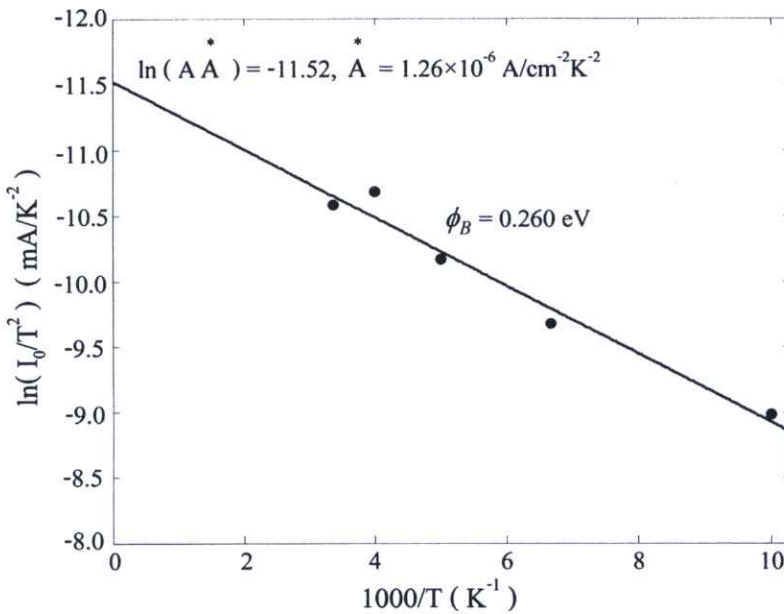
รูปที่ 4.40 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln \frac{R_0}{R}$  กับ  $\frac{1000}{T}$  เพื่อแสดงค่าพลังงานกระตุ้น ( $E_a$ ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ  $Sb_2Te_3/CdTe/Sb_2Te_3$  ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.41 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า เมื่อวัดในแบบแวนอนที่อุณหภูมิต่าง ๆ เพื่อแสดงค่ากระแสรีชาร์ดสันของรอยต่อไอหุ้มมิกของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ  $Sb_2Te_3/CdTe/Sb_2Te_3$  ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.15 แสดงค่ากระแสริชาร์ดสัน ( $I_0$ ) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ เมื่อวัดในแบบแวนอนกับขั้วไฟฟ้าหมายเลข 1 ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ  $Sb_2Te_3/CdTe/Sb_2Te_3$  ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

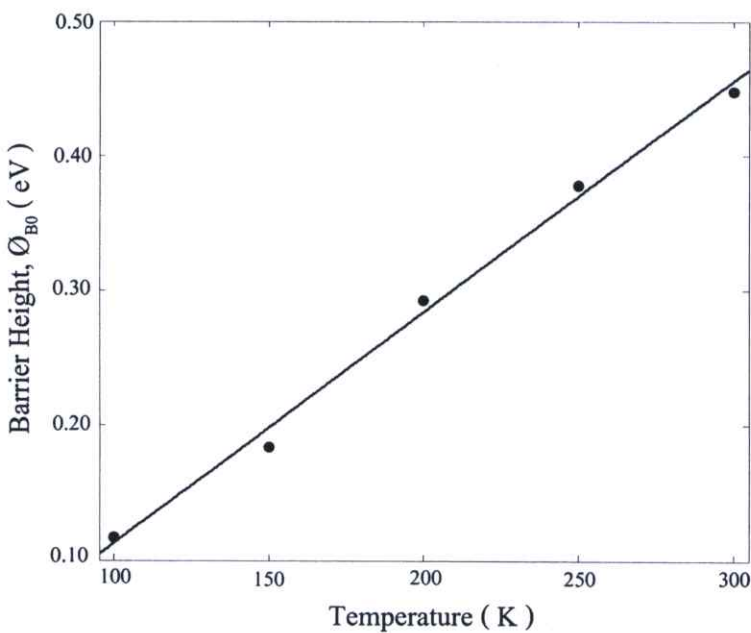
Temperature (K)	Area (cm <sup>2</sup> )	Richardson Current (mA)	Richardson Current Density (mA/cm <sup>2</sup> )
100	$7.86 \times 10^{-3}$	1.26	160.31
150	$7.86 \times 10^{-3}$	1.42	180.66
200	$7.86 \times 10^{-3}$	1.54	195.93
250	$7.86 \times 10^{-3}$	1.44	183.21
300	$7.86 \times 10^{-3}$	2.26	287.53



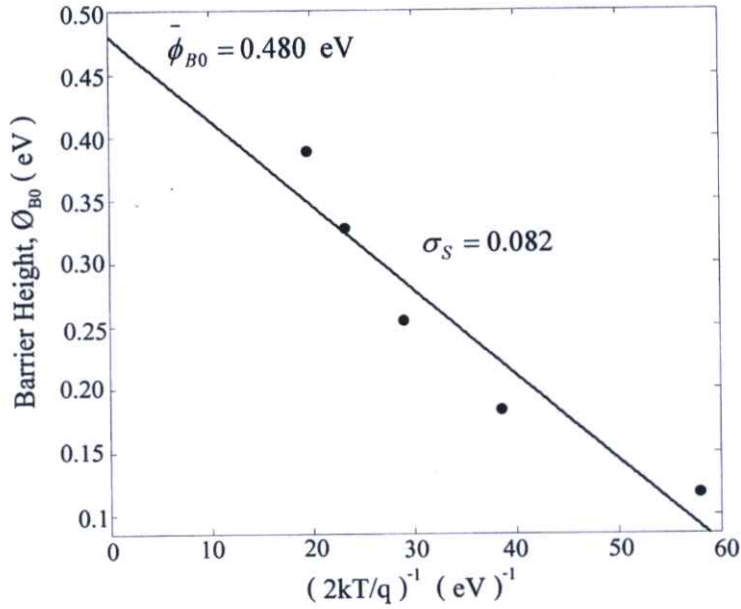
รูปที่ 4.42 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln \frac{I_0}{T^2}$  กับ  $\frac{1000}{T}$  เมื่อวัดในแวนอนเพื่อหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้าง  $Sb_2Te_3/CdTe/Sb_2Te_3$  ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.16 แสดงค่าความสูงของกำแพงศักย์ ( $\phi_{B0}$ ) ที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ  $\text{Sb}_2\text{Te}_3/\text{CdTe}/\text{Sb}_2\text{Te}_3$  ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

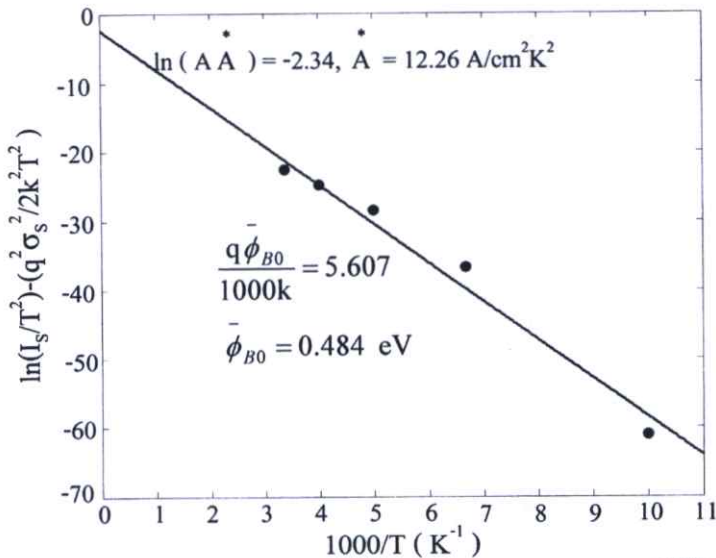
Temperature ( K )	$\phi_{B0}$ ( eV )
100	0.117
150	0.184
200	0.293
250	0.378
300	0.448



รูปที่ 4.43 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของค่าความสูงของกำแพงศักย์ ( $\phi_{B0}$ ) ที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ  $\text{Sb}_2\text{Te}_3/\text{CdTe}/\text{Sb}_2\text{Te}_3$  ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบ สุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.44 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(2kT/q)^{-1}$  กับ  $\phi_{B0}$  ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ  $Sb_2Te_3/CdTe/Sb_2Te_3$  ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

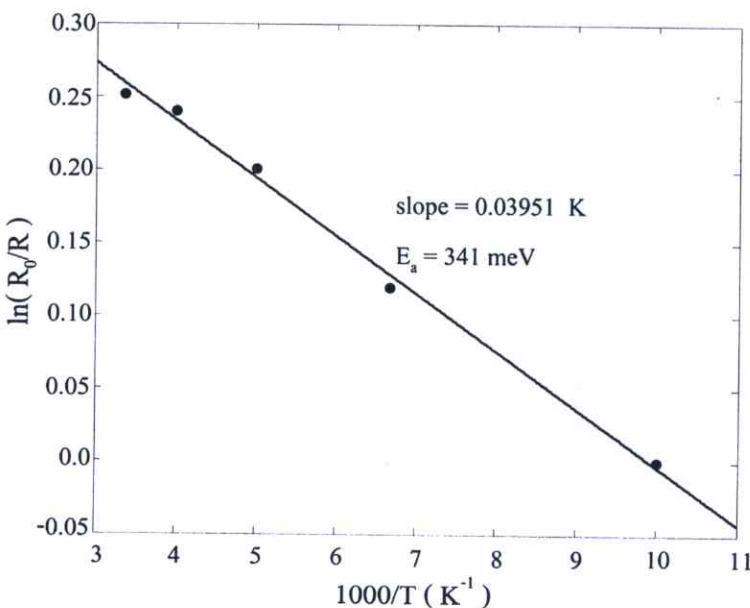


รูปที่ 4.45 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(I_s/T^2) - (q^2\sigma_s^2/2k^2T^2)$  กับ  $\frac{1000}{T}$  ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ  $Sb_2Te_3/CdTe/Sb_2Te_3$  ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

หากพิจารณาในช่วงกระแสที่ต่ำกว่าค่ากระแสชาร์ดสันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า ดังรูปที่ 4.41 จะได้ว่าความชัน คือ ส่วนกลับของความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ถ้าพิจารณาที่อุณหภูมิต่าง ๆ จะพบว่าเมื่ออุณหภูมิต่ำลง ความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe จะมีค่าเพิ่มขึ้นดังตารางที่ 4.17 เมื่อเขียนกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(R_0/R)$  กับ  $\frac{1000}{T}$  จะได้ค่าพลังงานกระตุ้น ของระดับพลังงานของอะตอมผู้รับ (acceptor) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ดังแสดงในรูปที่ 4.46

ตารางที่ 4.17 แสดงค่าความต้านทานแผ่นที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ  $Sb_2Te_3/CdTe/Sb_2Te_3$  ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

Temperature ( K )	Resistance ( $\Omega$ )
100	1.032
150	0.916
200	0.844
250	0.812
300	0.801



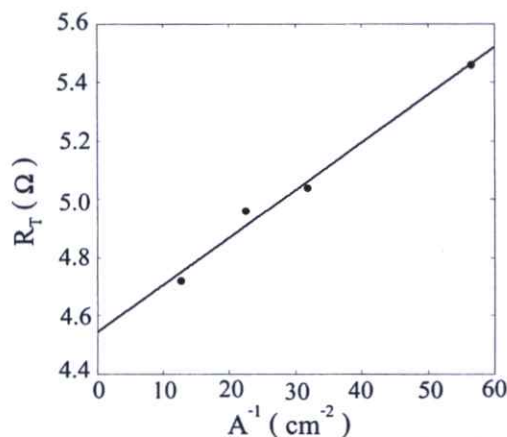
รูปที่ 4.46 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln \frac{R_0}{R}$  กับ  $\frac{1000}{T}$  เพื่อแสดงค่าพลังงานกระตุ้น ( $E_a$ ) ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ  $Sb_2Te_3/CdTe/Sb_2Te_3$  ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

#### 4.5 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>/Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>/Cu เพื่อเป็นการศึกษาอิทธิพลของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> ที่มีต่อฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.18 แสดงค่าความต้านทานรวม โดยทำการวัดในแบบแนวตั้งผ่านขั้วไฟฟ้าที่มีพื้นที่ต่างกันของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>/Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

Contact	Diameter (cm)	Area (cm <sup>2</sup> )	Inverse Area (cm <sup>-2</sup> )	Resistance (Ω)
C-1	0.10	7.86×10 <sup>-3</sup>	127.27	-
C-2	0.15	1.77×10 <sup>-2</sup>	56.57	5.46
C-3	0.20	3.14×10 <sup>-2</sup>	31.82	5.04
C-4	0.24	4.45×10 <sup>-2</sup>	22.47	4.96
C-5	0.32	7.90×10 <sup>-2</sup>	12.67	4.72



รูปที่ 4.47 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนกลับของพื้นที่ขั้วไฟฟ้ากับความต้านทานรวม โดยทำการวัดในแนวตั้งเพื่อหาความต้านทานจำเพาะของรอยต่อโอห์มมิกของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>/Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

จาก 
$$R_T = (2\rho_C + \rho_B \cdot t) \frac{1}{A} + R_E$$

$$\rho_C = \frac{\text{slope} - \rho_B \cdot t}{2} = \frac{[1.63 \times 10^{-2} - (1.34 \times 10^{-3} \times 1 \times 10^{-4})]}{2}$$

$$= 8.15 \times 10^{-3} \text{ } \Omega \cdot \text{cm}^2$$

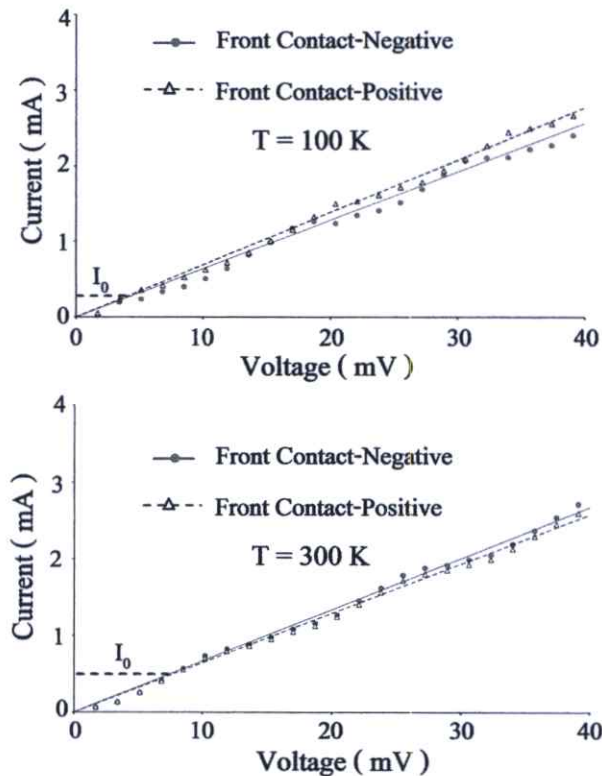
และ 
$$R_E = 4.542 \text{ } \Omega$$

และจาก 
$$\rho_C = \frac{k}{qAT} \exp\left(\frac{q\phi_B}{kT}\right)$$

ดังนั้นจะได้ 
$$\phi_B = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{\rho_C qAT}{k}\right) ; \text{ เมื่อ } \rho_C = 8.15 \times 10^{-3} \text{ } \Omega \cdot \text{cm}^2 \text{ จะได้}$$

$$\phi_B = (0.025) \ln\left[\frac{(8.15 \times 10^{-3})(1.6 \times 10^{-19})(12)(300)}{1.38 \times 10^{-23}}\right]$$

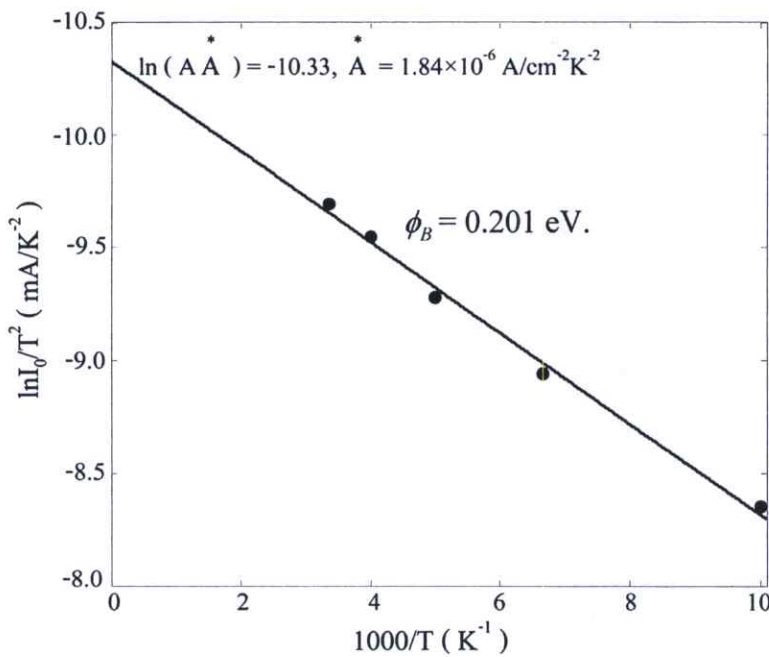
$$= 0.318 \text{ eV}$$



รูปที่ 4.48 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า เมื่อวัดในแนวตั้งผ่าน ขั้วไฟฟ้าที่มีพื้นที่ต่างกันที่อุณหภูมิต่าง ๆ เพื่อแสดงค่ากระแสรีชาร์ดสัน ของรอยต่อ โอลิฮัมมิกของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>/Cu ที่เตรียม ได้โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่น ฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.19 แสดงค่ากระแสริชาร์ดสัน ( $I_0$ ) ที่อุณหภูมิต่างๆ เมื่อวัดในแนวตั้งกับขั้วไฟฟ้าหมายเลข 2 ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>/Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

Temperature (K)	Area (cm <sup>2</sup> )	Richardson Current (mA)	Richardson Current Density (mA/cm <sup>2</sup> )
100	1.77×10 <sup>-2</sup>	2.36	133
150	1.77×10 <sup>-2</sup>	2.96	167
200	1.77×10 <sup>-2</sup>	3.73	210
250	1.77×10 <sup>-2</sup>	4.47	252
300	1.77×10 <sup>-2</sup>	5.51	311

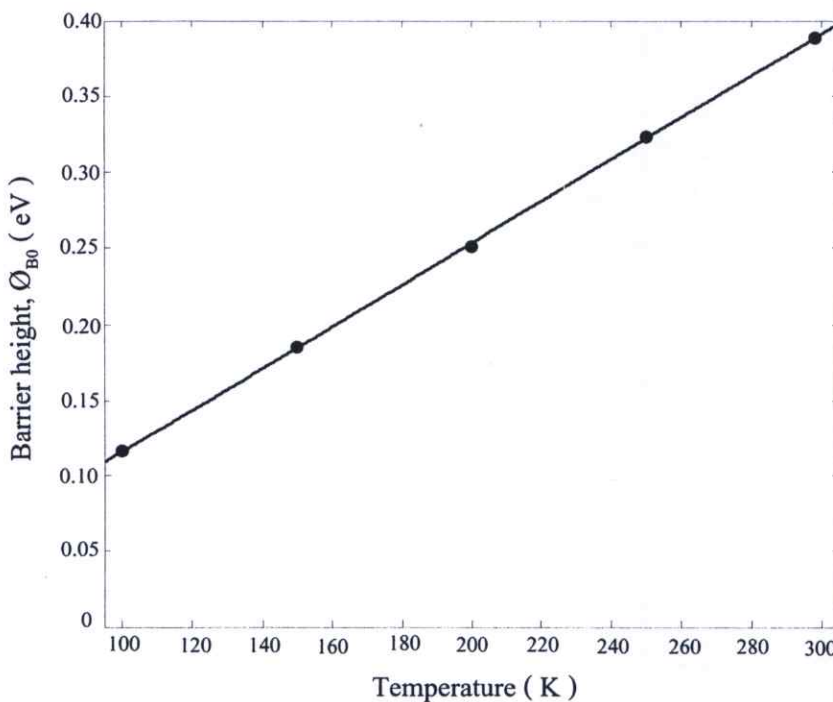


รูปที่ 4.49 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln \frac{I_0}{T^2}$  กับ  $\frac{1000}{T}$  เมื่อวัดในแนวตั้งเพื่อหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>/Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

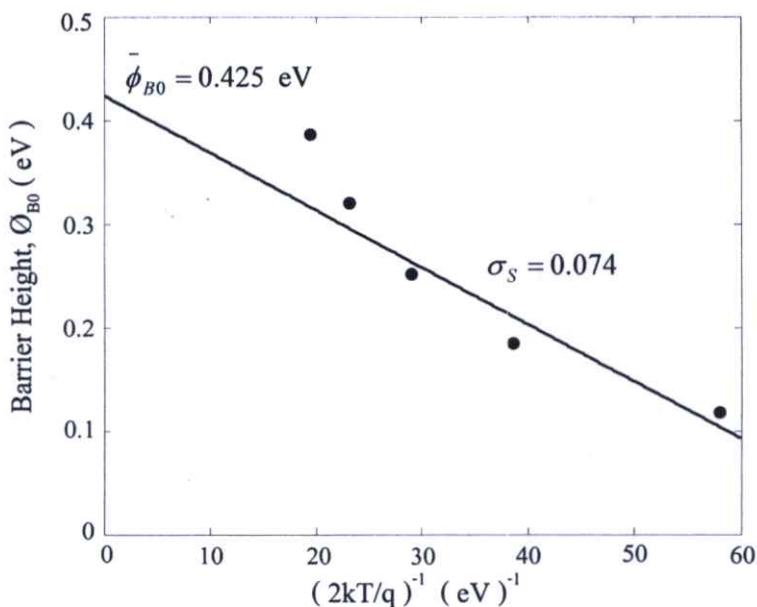
จากทฤษฎีเทอร์มิโอนิกอิมิสชันสามารถหา  $\phi_{B0}$  โดยอาศัยสมการ  $\phi_{B0} = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{A A^* T^2}{I_s} \right)$  และค่าความสูงของกำแพงศักย์จะปรากฏในตารางที่ 4.20

ตารางที่ 4.20 แสดงค่าความสูงของกำแพงศักย์ ( $\phi_{B0}$ ) ที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิของรอยต่อ โอลิเมอร์ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>/Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

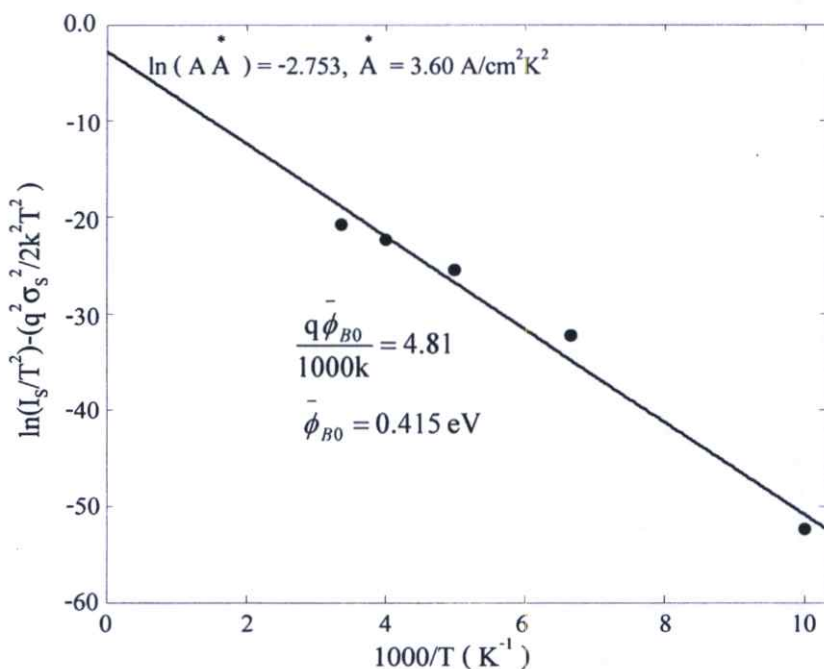
Temperature ( K )	$\phi_{B0}$ ( eV )
100	0.118
150	0.185
200	0.253
250	0.321
300	0.387



รูปที่ 4.50 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูงของกำแพงศักย์ ( $\phi_{B0}$ ) กับอุณหภูมิของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>/Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.51 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $(2kT/q)^{-1}$  กับ  $\phi_{B0}$  ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>/Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

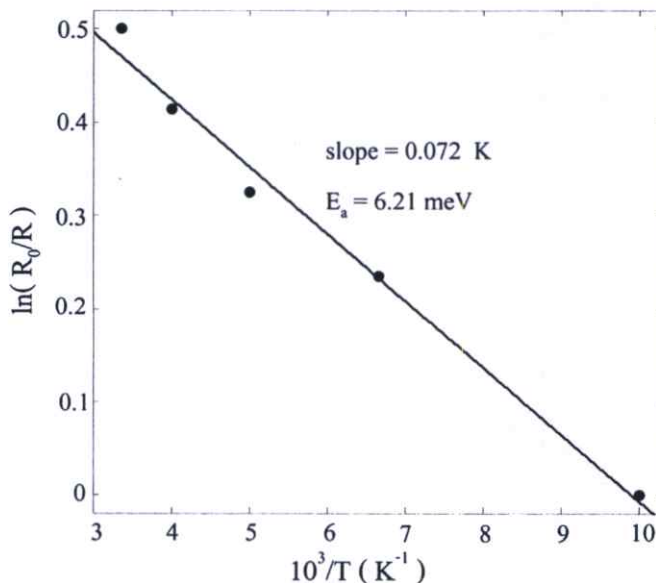


รูปที่ 4.52 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(I_s/T^2) - (q^2 \sigma_s^2 / 2k^2 T^2)$  กับ  $\frac{1000}{T}$  ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>/Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

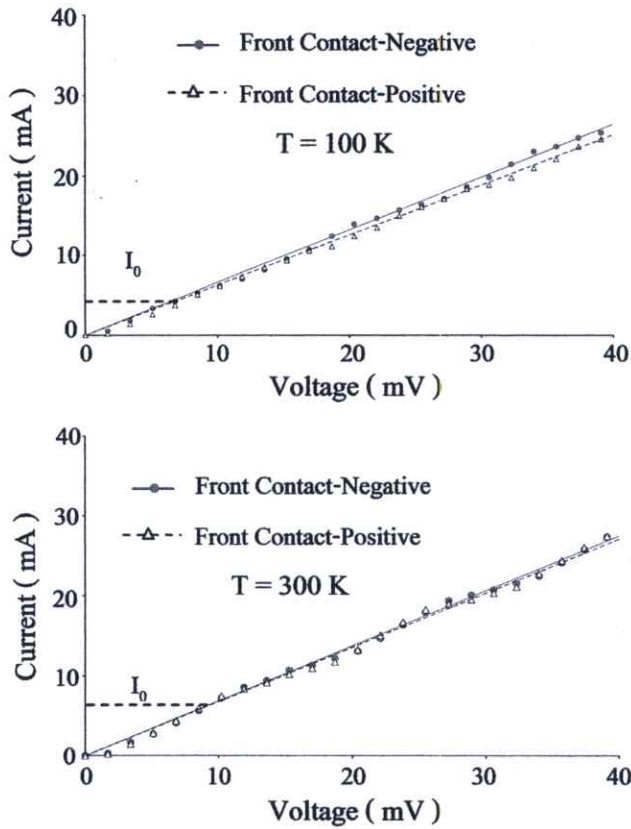
หากพิจารณาในช่วงกระแสที่ต่ำกว่าค่ากระแสชาร์ดสันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า ดังรูปที่ 4.48 จะได้ว่าความชัน คือ ส่วนกลับของความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ถ้าพิจารณาที่อุณหภูมิต่าง ๆ จะพบว่าเมื่ออุณหภูมิต่ำลง ความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe จะมีค่าเพิ่มขึ้นดังตารางที่ 4.21 เมื่อเขียนกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(R_0/R)$  กับ  $10^3/T$  จะได้ค่าพลังงานกระตุ้นของระดับพลังงานของอะตอมผู้รับ (acceptor) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ดังแสดงในรูปที่ 4.53

ตารางที่ 4.21 แสดงค่าความต้านทานแผ่นที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>/Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

Temperature ( K )	Resistance ( $\Omega$ )
100	2.77
150	2.19
200	2.00
250	1.83
300	1.68



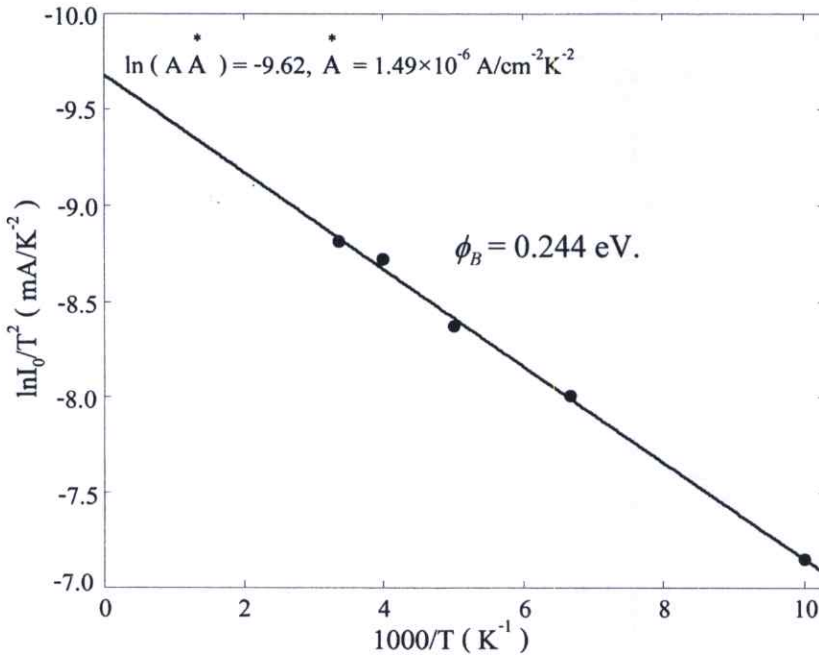
รูปที่ 4.53 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln \frac{R_0}{R}$  กับ  $\frac{1000}{T}$  เพื่อแสดงค่าพลังงานกระตุ้น ( $E_a$ ) ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>/Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.54 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า เมื่อวัดในแบบแวนนอน ที่อุณหภูมิต่าง ๆ เพื่อแสดงค่ากระแสริชาร์ดสัน ของรอยต่อไอทึมิกของสิ่งประดิษฐ์ สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>/Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมี ด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.22 แสดงค่ากระแสริชาร์ดสัน ( $I_0$ ) ที่อุณหภูมิต่าง ๆ เมื่อวัดในแบบแวนนอนกับขั้วไฟฟ้า หมายเลข 4 ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>/Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

Temperature (K)	Area (cm <sup>2</sup> )	Richardson Current (mA)	Richardson Current Density (mA/cm <sup>2</sup> )
100	4.45×10 <sup>-2</sup>	7.85	176.40
150	4.45×10 <sup>-2</sup>	7.51	168.76
200	4.45×10 <sup>-2</sup>	9.97	224.04
250	4.45×10 <sup>-2</sup>	10.21	229.44
300	4.45×10 <sup>-2</sup>	13.20	296.63

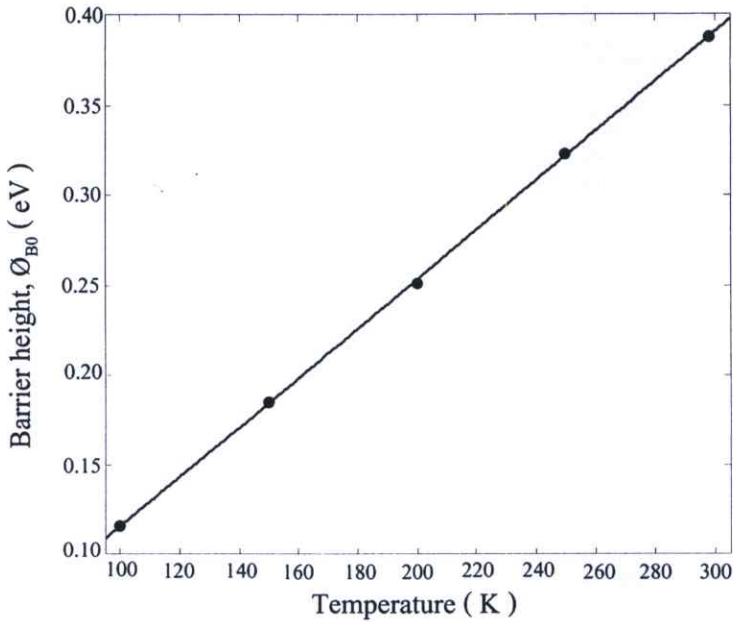


**รูปที่ 4.55** แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln \frac{I_0}{T^2}$  กับ  $\frac{1000}{T}$  เมื่อวัดในแนวนอนเพื่อหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>/Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

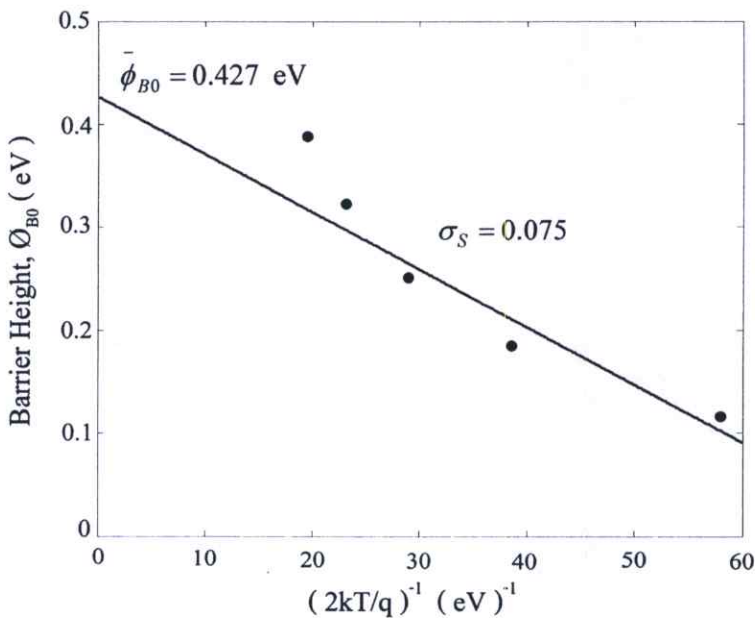
จากทฤษฎีเทอร์มิโอนิกอิมิสชันสามารถหา  $\phi_{B0}$  โดยอาศัยสมการ  $\phi_{B0} = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{A A T^2}{I_s} \right)$  และค่าความสูงของกำแพงศักย์จะปรากฏในตารางที่ 4.23

**ตารางที่ 4.23** แสดงค่าความสูงของกำแพงศักย์ ( $\phi_{B0}$ ) ที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ ของรอยต่อโอห์มมิกของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>/Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

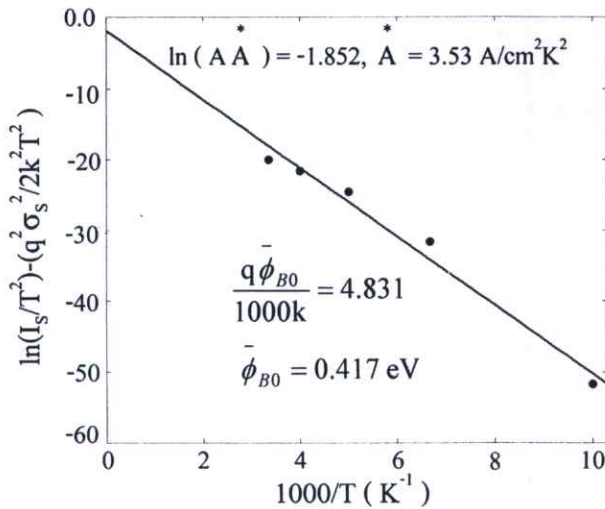
Temperature (K)	$\phi_{B0}$ (eV)
100	0.116
150	0.185
200	0.251
250	0.323
300	0.388



รูปที่ 4.56 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของค่าความสูงของกำแพงศักย์ ( $\phi_{B0}$ ) ที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>/Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.57 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\phi_{B0}$  กับ  $(2kT/q)^{-1}$  ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>/Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

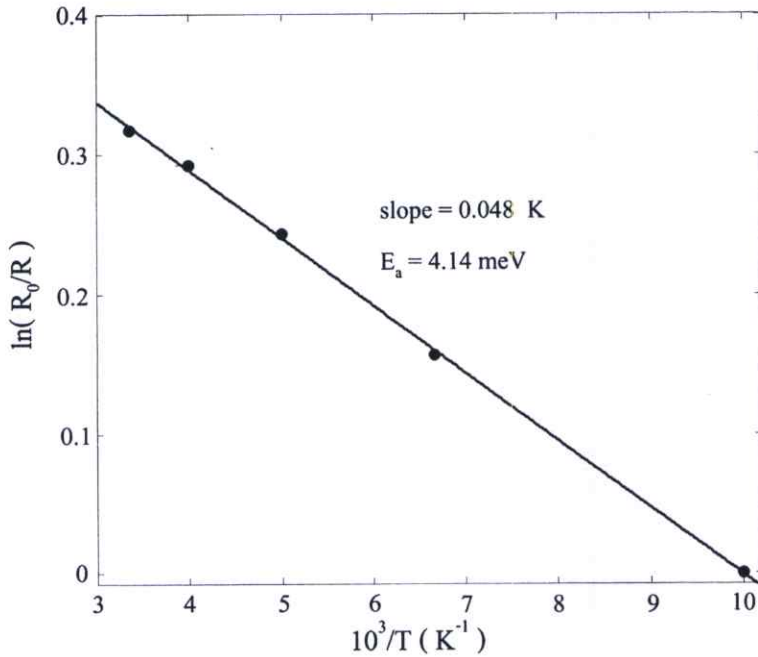


**รูปที่ 4.58** แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(I_s/T^2) - (q^2 \sigma_s^2 / 2k^2 T^2)$  กับ  $\frac{1000}{T}$  ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>/Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

หากพิจารณาในช่วงกระแสที่ต่ำกว่าค่ากระแสชาร์ตสันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า ดังรูปที่ 4.54 จะได้ว่าความชัน คือ ส่วนกลับของความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ถ้าพิจารณาที่อุณหภูมิต่าง ๆ จะพบว่าเมื่ออุณหภูมิต่ำลง ความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe จะมีค่าเพิ่มขึ้นดังตารางที่ 4.24 เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(R_0/R)$  กับ  $10^3/T$  จะได้ค่าพลังงานกระตุ้น ของระดับพลังงานของอะตอมผู้รับ (acceptor) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ดังแสดงในรูปที่ 4.59

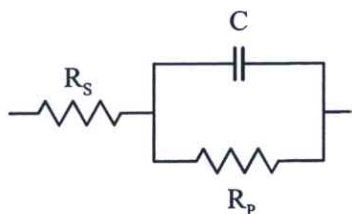
**ตารางที่ 4.24** แสดงค่าความต้านทานแผ่นที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>/Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

Temperature ( K )	Resistance ( $\Omega$ )
100	2.13
150	1.82
200	1.67
250	1.59
300	1.55

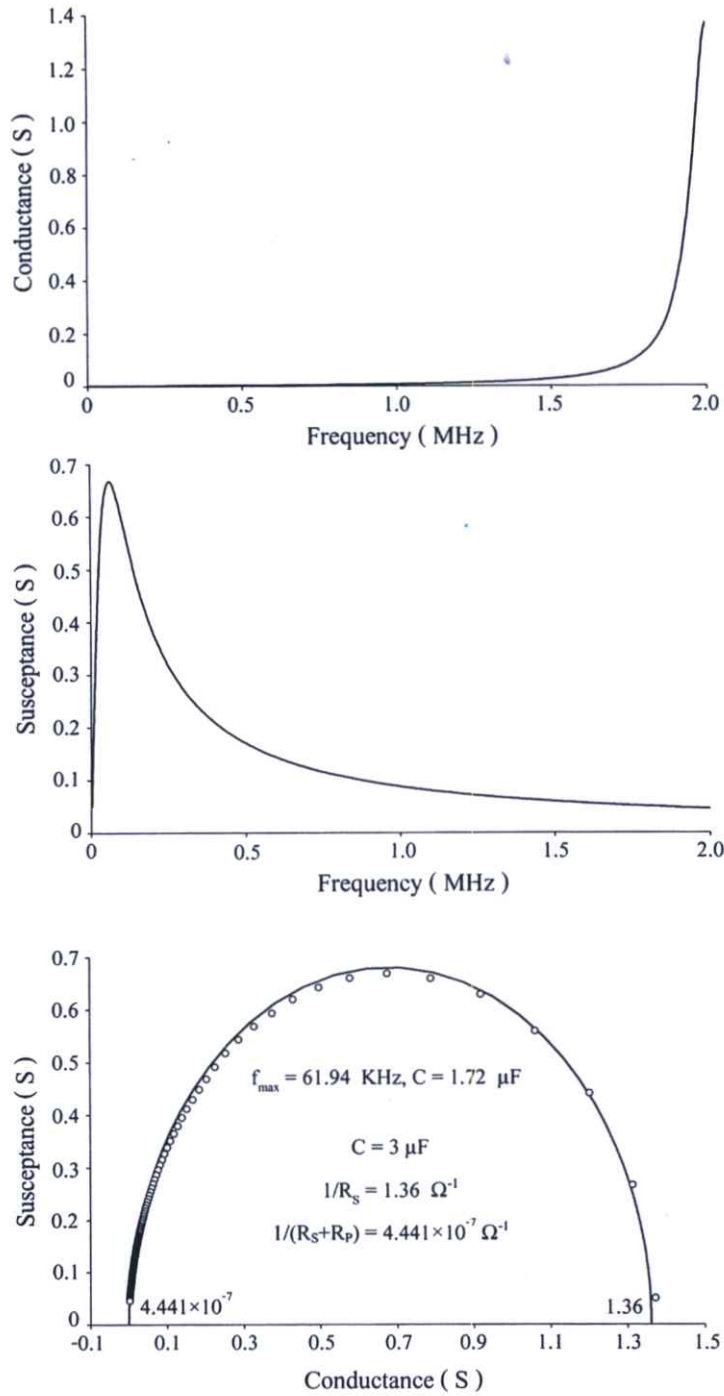


**รูปที่ 4.59** แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln \frac{R_0}{R}$  กับ  $\frac{1000}{T}$  เพื่อแสดงค่าพลังงานกระตุ้น ( $E_a$ ) ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>/Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

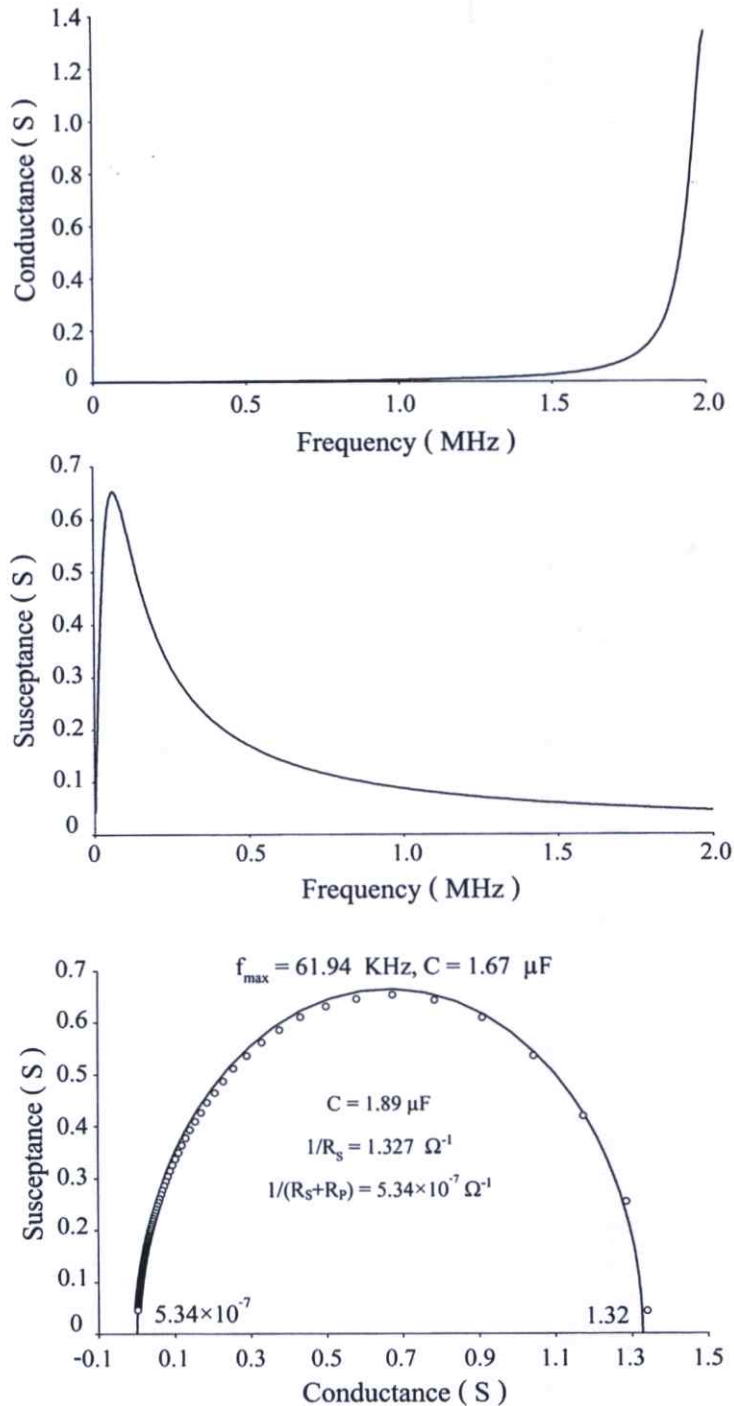
**4.5.1** การศึกษาแอดมิตแดนซ์สเปกโทรสโคปีเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่าง ๆ ในช่วงความถี่ 2 kHz ถึง 2 MHz ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>/Cu ที่เตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส



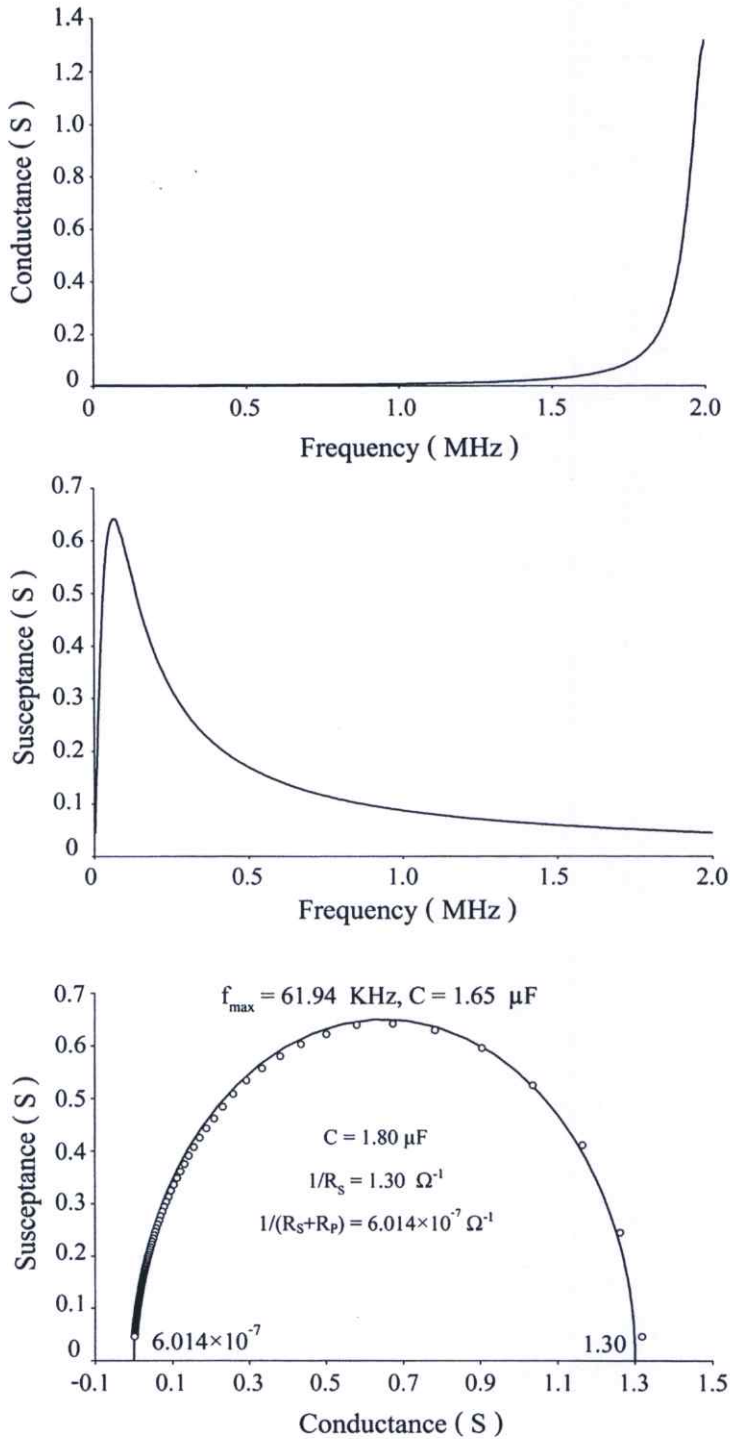
**รูปที่ 4.60** แสดงวงจรสมมูลที่ใช้เป็นแบบจำลองในการศึกษาแอดมิตแดนซ์สเปกโทรสโคปีเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่าง ๆ ในช่วงความถี่ 2 kHz ถึง 2 MHz ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>/Cu ที่เตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส



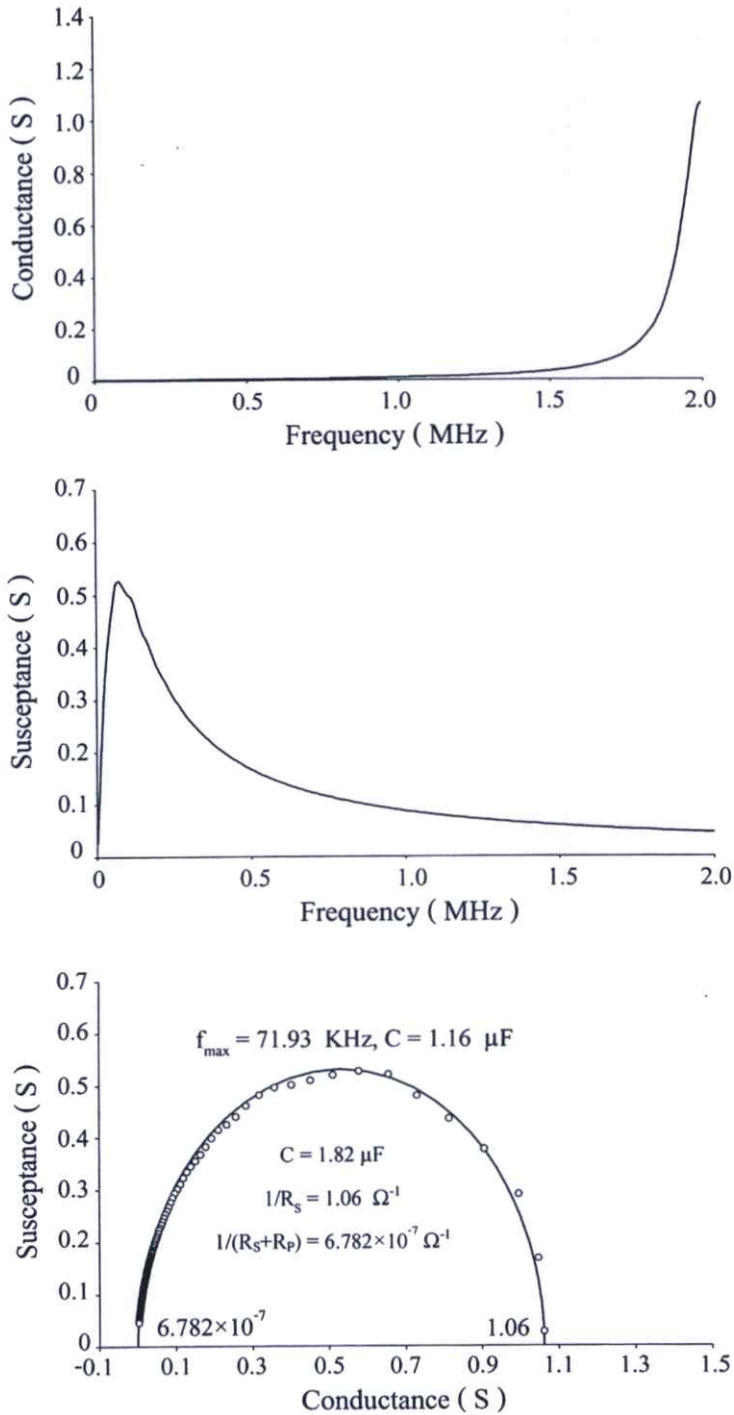
**รูปที่ 4.61** แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้ากับความถี่ ส่วนจินตภาพของความนำไฟฟ้ากับความถี่และส่วนจินตภาพของความนำไฟฟ้ากับความนำไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 100 K ในช่วงความถี่ 2 kHz ถึง 2 MHz ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>/Cu ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส



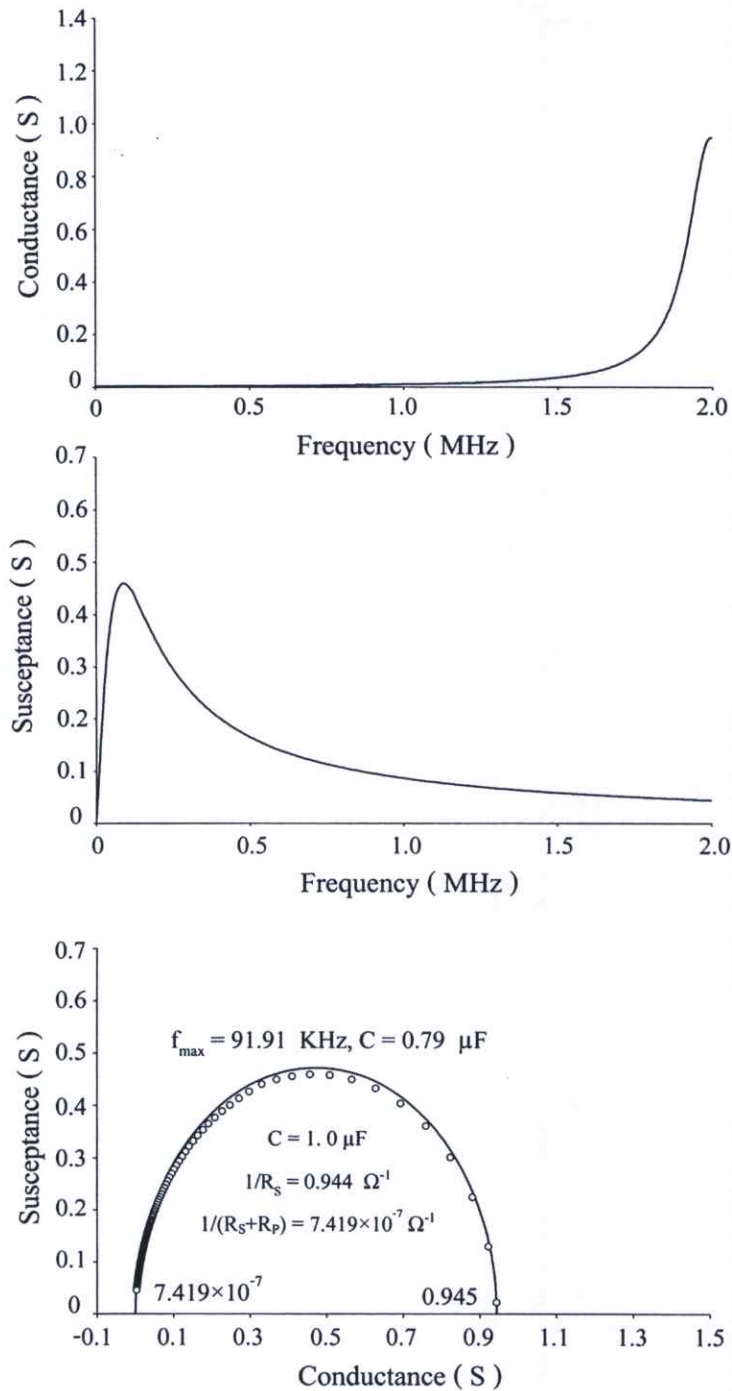
**รูปที่ 4.62** แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้ากับความถี่ ส่วนจินตภาพของความนำไฟฟ้ากับความถี่และส่วนจินตภาพของความนำไฟฟ้ากับความนำไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 150 K ในช่วงความถี่ 2 kHz ถึง 2 MHz ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้าง แบบ Cu/CdTe/Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>/Cu ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส



**รูปที่ 4.63** แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้ากับความถี่ ส่วนจินตภาพของความนำไฟฟ้ากับความถี่และส่วนจินตภาพของความนำไฟฟ้ากับความนำไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 200 K ในช่วงความถี่ 2 kHz ถึง 2 MHz ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>/Cu ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส



**รูปที่ 4.64** แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้ากับความถี่ ส่วนจินตภาพของความนำไฟฟ้ากับความถี่และส่วนจินตภาพของความนำไฟฟ้ากับความนำไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 250 K ในช่วงความถี่ 2 kHz ถึง 2 MHz ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>/Cu ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

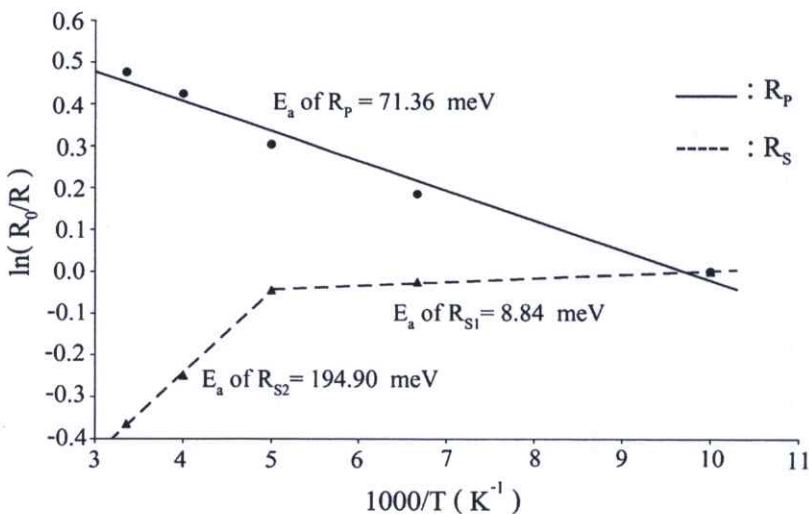


**รูปที่ 4.65** แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้ากับความถี่ ส่วนจินตภาพของความนำไฟฟ้ากับความถี่และส่วนจินตภาพของความนำไฟฟ้ากับความนำไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 300 K ในช่วงความถี่ 2 kHz ถึง 2 MHz ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>/Cu ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เพื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4.61 จะเห็นได้ว่าจุดตัดแกนนอนมีค่า  $4.44 \times 10^{-7}$  และ 1.36 ซีเมน ซึ่งสอดคล้องกับค่า  $\frac{1}{(R_S + R_p)}$  และ  $\frac{1}{R_S}$  ตามวงจรสมมูลในรูปที่ 4.60 ความต้านทานอนุกรม  $R_S$  คือความต้านทานไฟฟ้าของรอยต่อโอห์มมิกที่อุณหภูมิ 100 เคลวินมีค่าเท่ากับ 0.735 โอห์ม ส่วน  $R_p$  คือความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe มีค่าเท่ากับ 2.252 เมกกะโอห์ม และค่าความจุ  $C$  คือ ความจุไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่อยู่ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทั้งสอง

**ตารางที่ 4.25** แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแอดมิตแดนซ์สเปกโตรสโคปีเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่าง ๆ ในช่วงความถี่ 2 kHz ถึง 2 MHz ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>/Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

Temperature ( K )	$f_{\max}$ ( kHz )	$C_p$ ( $\mu$ F )	$R_p$ ( M $\Omega$ )	$R_S$ ( $\Omega$ )
100	61.94	3.00	2.252	0.735
150	61.94	1.89	1.873	0.754
200	61.94	1.80	1.663	0.769
250	71.93	1.82	1.474	0.943
300	91.91	1.00	1.399	1.058



**รูปที่ 4.66** แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln \frac{R_p}{R}$  กับ  $\frac{1000}{T}$  ที่ได้จากการวัดค่าแอดมิตแดนซ์ในช่วงความถี่ 2 kHz ถึง 2 MHz เพื่อแสดงค่าพลังงานกระตุ้น ( $E_a$ ) ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>/Cu ซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 4.66 ระดับพลังงาน  $E_a = 71.36$  มิลลิอิเล็กตรอนโวลต์ เป็นระดับพลังงานของอะตอมผู้รับอิเล็กตรอน ( acceptor level ) ระดับพลังงาน  $E_a = 8.84$  มิลลิอิเล็กตรอน-โวลต์ เป็นระดับพลังงานของอะตอมผู้ให้อิเล็กตรอนในสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า ( neutral donor ) และระดับพลังงาน  $E_a = 194.90$  มิลลิอิเล็กตรอนโวลต์ เป็นระดับพลังงานของอะตอมผู้ให้อิเล็กตรอน ( donor level )

จากข้อมูลดังกล่าวจะพบว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe มีทั้งระดับพลังงานอะตอมผู้รับและระดับพลังงานของอะตอมผู้ให้อิเล็กตรอนแต่พาหะสุทธิเป็น โฮล แสดงว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดคอมเพนเซต ( compensated semiconductor )

จากตารางที่ 4.26 ค่าพลังงานกระตุ้น ( $E_g$ ) ที่อยู่ในช่วง 3.41-6.81 มิลลิอิเล็กตรอนโวลต์ เกิดจากการคัปปลิงของข้อบกพร่องผลึกชนิด ( $\text{Cu}_i^+ - \text{V}_{\text{Cd}}^-$ ) และ/หรือ ( $\text{Cu}_i^+ - \text{Cu}_{\text{Cd}}^-$ )

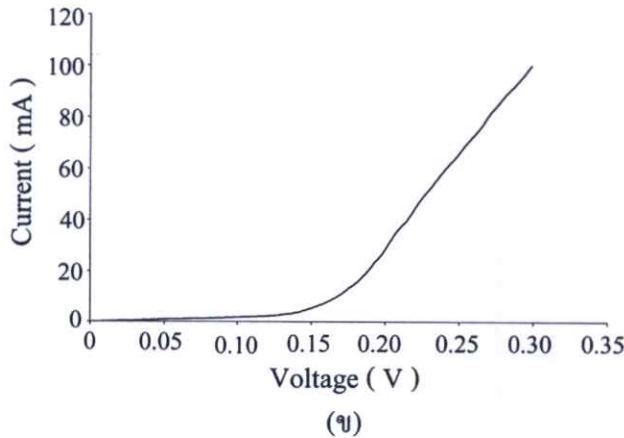
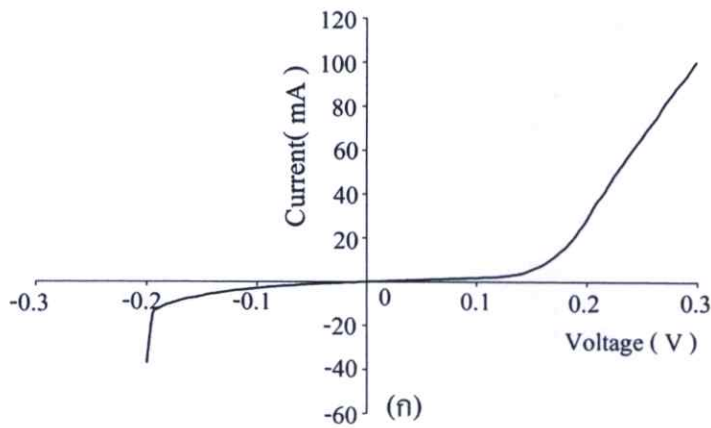
Device Under Test (DUT)	Vertical Transmission Method (VTM)				Lateral Transmission Method (LTM)										
	$\rho_B$ ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )	$R_E$ ( $\Omega$ )	$\phi_B$ from $\rho_C$ (eV)	Barrier Height Homogeneity		Barrier Height Inhomogeneity		Barrier Height Homogeneity		Barrier Height Inhomogeneity					
				$\phi_B$ (eV)	$\dot{A}$ $A/(\text{cm}^2 \cdot \text{K}^2)$	$E_a$ (meV)	$\bar{\phi}_{B0}$ (T=0) (eV)	$\sigma_S$	$\dot{A}$ $A/(\text{cm}^2 \cdot \text{K}^2)$	$E_a$ (meV)	$\bar{\phi}_{B0}$ (T=0) (eV)	$\sigma_S$	$\dot{A}$ $A/(\text{cm}^2 \cdot \text{K}^2)$		
A	$1.34 \times 10^{-3}$	0.808	0.304	0.290	$0.114 \times 10^{-6}$	4.12	0.514	0.082	12.04	0.219	$0.217 \times 10^{-6}$	6.81	0.555	0.089	12.26
B	$1.51 \times 10^{-4}$	0.920	0.280	0.244	$0.757 \times 10^{-6}$	5.15	0.519	0.089	12.03	0.260	$1.26 \times 10^{-6}$	3.41	0.484	0.082	12.26
C	$1.34 \times 10^{-3}$	4.542	0.318	0.201	$1.84 \times 10^{-6}$	6.21	0.425	0.074	3.60	0.244	$1.49 \times 10^{-6}$	4.14	0.427	0.075	3.53

\*หมายเหตุ : A คือ Cu/CdTe/Cu, B คือ  $\text{Sb}_2\text{Te}_3/\text{CdTe}/\text{Sb}_2\text{Te}_3$  และ C คือ Cu/CdTe/ $\text{Sb}_2\text{Te}_3/\text{Cu}$

**ตารางที่ 4.26** แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของถึงประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Cu,  $\text{Sb}_2\text{Te}_3/\text{CdTe}/\text{Sb}_2\text{Te}_3$  และ Cu/CdTe/ $\text{Sb}_2\text{Te}_3/\text{Cu}$  ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเพื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

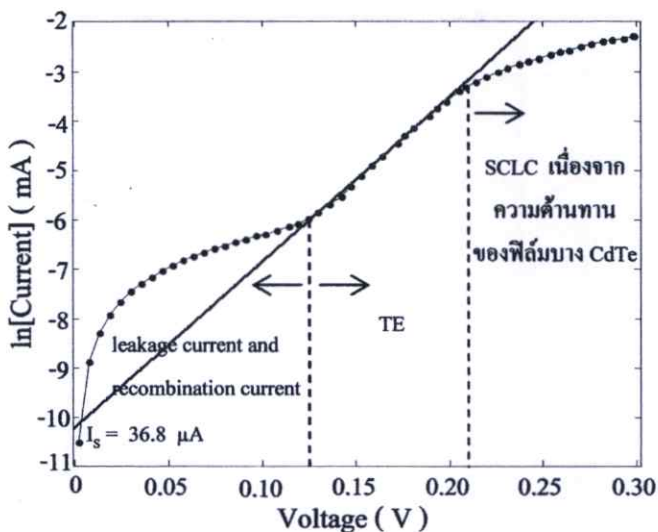
#### 4.6 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอด CdS/CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ขนาดพื้นที่  $0.5 \times 1.4$  ตารางเซนติเมตร ถูกเคลือบลงบนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ตามรูปที่ 4.3(ง) โดยให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส จากนั้นป้ายกาวเงินนำไฟฟ้าลงบนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS เพื่อเป็นขั้วไฟฟ้าโดยมีขนาดพื้นที่ 0.1075 ตารางเซนติเมตร แล้วทำการวัดสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอด CdS/CdTe ที่เตรียมได้

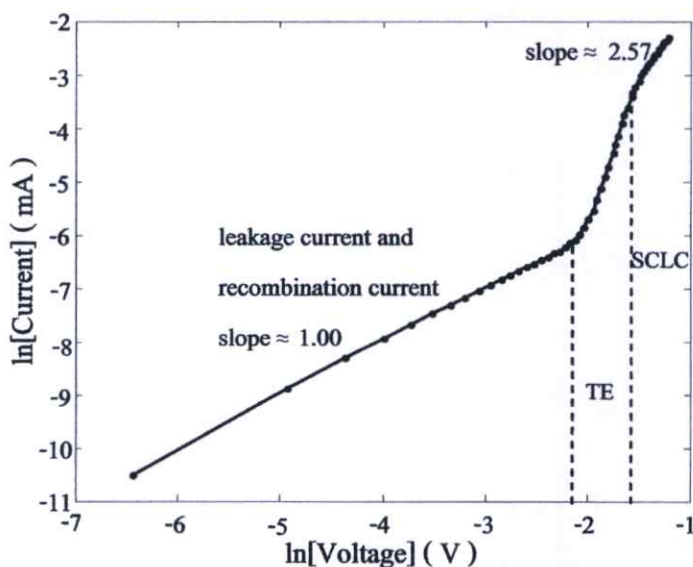


รูปที่ 4.67 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า โดยทำการวัดที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน ของไดโอด CdS/CdTe ที่เตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

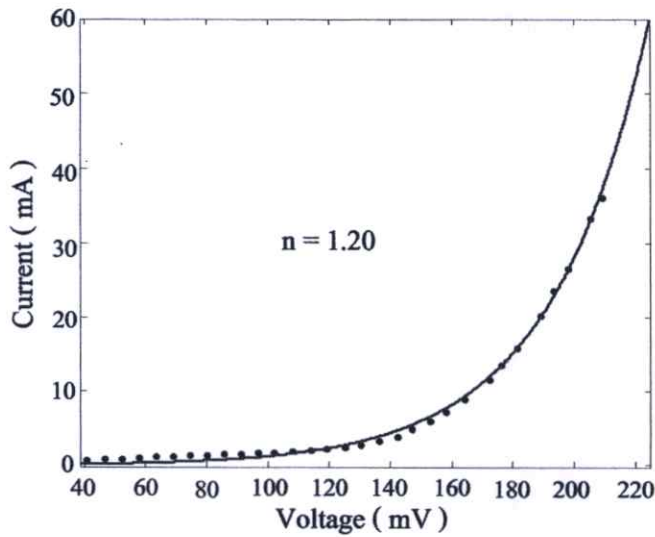
- ก. แสดงกราฟความสัมพันธ์ตั้งแต่ช่วงไบแอสกลับทางถึงช่วงไบแอสตรง  
 ข. แสดงกราฟความสัมพันธ์ในช่วงไบแอสตรง



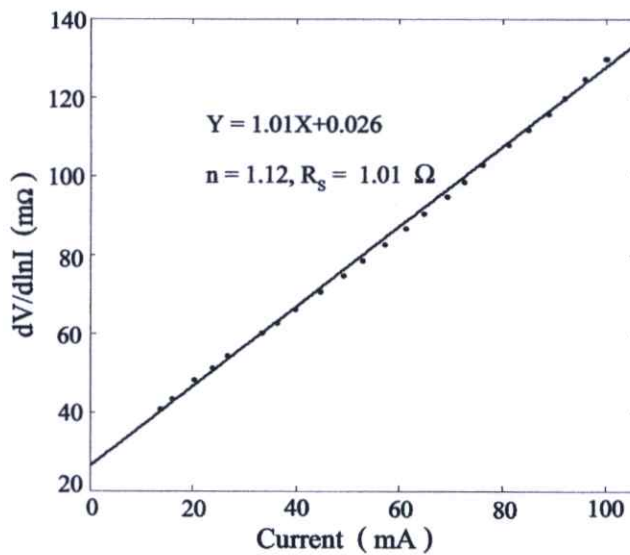
รูปที่ 4.68 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า ลอการิทึมของกระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน เพื่อหาค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับที่สอดคล้องกับกลไกการนำไฟฟ้าแบบเทอร์มิโอนิกอิมิสชันของไดโอด CdS/CdTe ที่เตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส



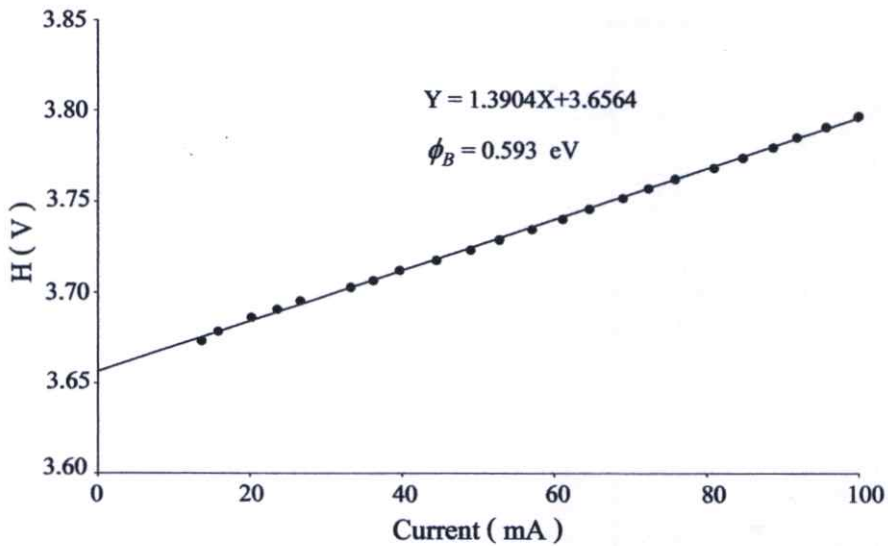
รูปที่ 4.69 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า ลอการิทึมของกระแสไฟฟ้า-ลอการิทึมของแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน ของไดโอด CdS / CdTe ที่เตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส



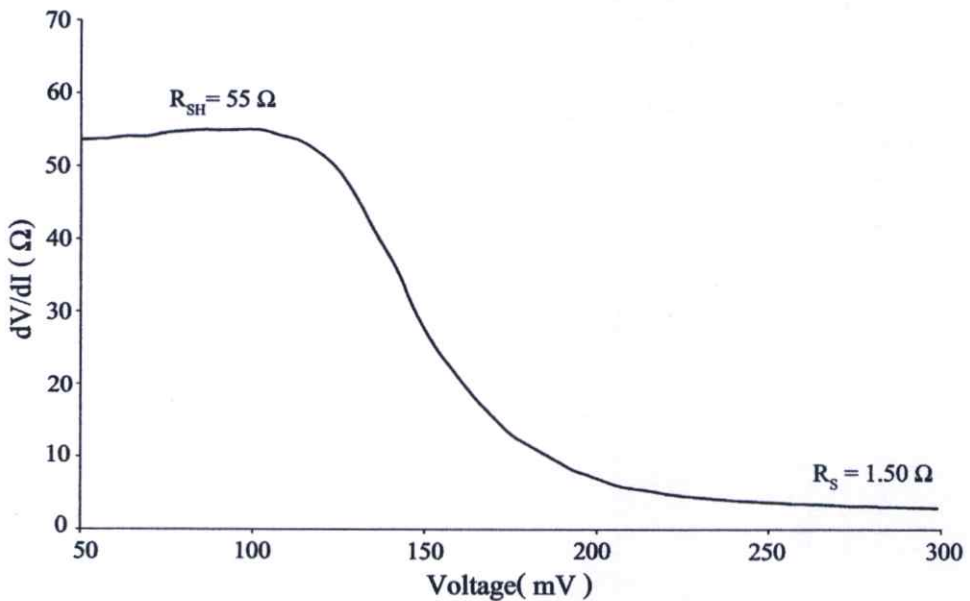
รูปที่ 4.70 แสดงการจำลองกราฟเพื่อหาค่าแฟกเตอร์อุดมคติจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า โดยทำการวัดที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน ที่สอดคล้องกับกลไกการนำไฟฟ้าในช่วงเทอร์มิโอนิกอิมิสชันของไดโอด CdS/CdTe ที่เตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.71 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $dV/d\ln I$  กับ  $I$  โดยทำการวัดที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน เพื่อหาค่าแฟกเตอร์อุดมคติที่สอดคล้องกับกลไกการนำไฟฟ้าในช่วงกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้าง (SCLC) และค่าความต้านทานอนุกรมของไดโอด CdS/CdTe ที่เตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส



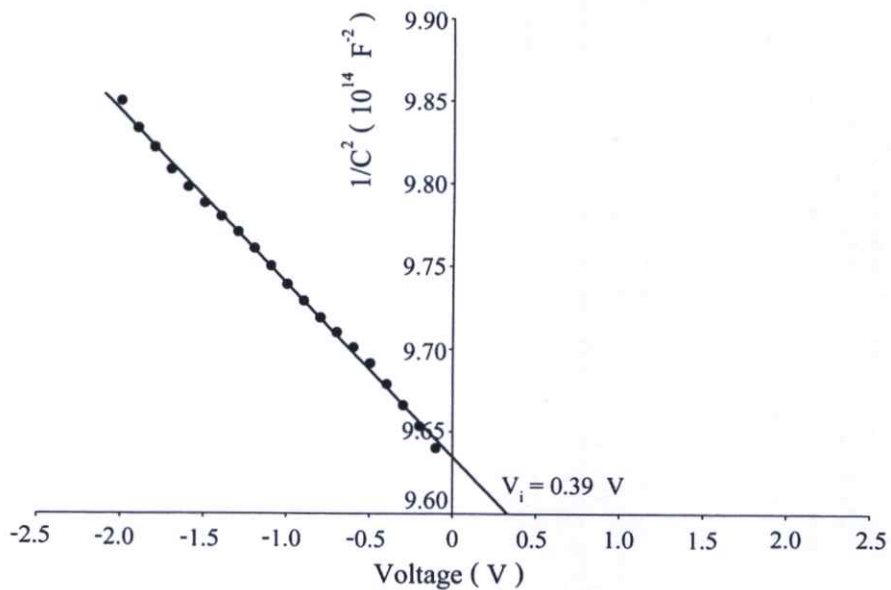
รูปที่ 4.72 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $H$  กับกระแสไฟฟ้า โดยทำการวัดที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน เพื่อหาความสูงของกำแพงศักย์ในช่วงกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้างของไดโอด CdS/CdTe ที่เตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.73 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $dV/dI$  กับ  $V$  โดยทำการวัดที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน เพื่อหาค่าความต้านทานขั้วและค่าความต้านทานอนุกรมของไดโอด CdS/CdTe ที่เตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.27 แสดงค่าแรงดันไบแอสกลับทางกับความจุไฟฟ้าโดยทำการวัดเมื่อทำการวัดที่ความถี่ 1 MHz ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน ของไดโอด CdS/CdTe ที่เตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

Voltage ( V )	$C_p$ ( nF )	Voltage ( V )	$C_p$ ( nF )
0.10	32.21	1.10	32.03
0.20	32.19	1.20	32.01
0.30	32.16	1.30	31.99
0.40	32.14	1.40	31.98
0.50	32.12	1.50	31.96
0.60	32.11	1.60	31.95
0.70	32.09	1.70	31.93
0.80	32.08	1.80	31.91
0.90	32.06	1.90	31.89
1.00	32.04	2.00	31.86



รูปที่ 4.74 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนกลับกำลังสองของค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่ความถี่ 1 MHz ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน เพื่อหาค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมรอยต่อระหว่าง CdS/CdTe ของไดโอด CdS/CdTe ที่เตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

4.6.1 ผลการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า ของไดโอด CdS/CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

ภายใต้แรงดันไบแอสตรง แรงดันไฟฟ้าบางส่วนจะตกคร่อมความต้านทานอนุกรม ( $R_s$ ) ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ส่วนแรงดันไบแอสตรงที่ตกคร่อมรอยต่อระหว่าง CdS/CdTe จะลดลงเหลือ ( $V-IR_s$ ) ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของไดโอดเป็นดังนี้คือ [34]

$$I = I_s \left[ \exp\left(\frac{q(V-IR_s)}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (4.1)$$

เมื่อ 
$$I_s = A A T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_{B0}}{kT}\right) \quad (4.2)$$

ภายใต้แรงดันไบแอสตรง  $V > \frac{3kT}{q}$  พจน์ที่ 2 ของสมการที่ (4.1) สามารถตัดทิ้งได้ ดังนั้นจะได้

$$\begin{aligned} I &= A A T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_{B0}}{kT}\right) \exp\left[\frac{q(V-IR_s)}{nkT}\right] \\ \frac{I}{A A T^2} &= \exp\left(\frac{-q\phi_{B0}}{kT}\right) \exp\left[\frac{q(V-IR_s)}{nkT}\right] \\ \ln\left(\frac{I}{A A T^2}\right) &= \frac{-q\phi_{B0}}{kT} + \frac{V-IR_s}{nkT} \\ \ln\left(\frac{I}{A A T^2}\right) &= \frac{q}{nkT}(-n\phi_{B0} + V - IR_s) \\ V &= n\phi_{B0} + IR_s + \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I}{A A T^2}\right) \end{aligned} \quad (4.3)$$

หาอนุพันธ์ของแรงดันไฟฟ้า  $V$  เทียบกับ  $\ln I$  ของสมการที่ (4.3) แล้วจะได้ว่า

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = I \frac{dV}{dI} = \frac{nkT}{q} + IR_s \quad (4.4)$$

จากสมการที่ (4.3) จะเขียนใหม่ได้ว่า

$$V - \frac{nkT}{q} \ln \left( \frac{I}{A A T^2} \right) = IR_S + n\phi_{B0} \quad (4.5)$$

กำหนดให้

$$H(I) = V - \frac{nkT}{q} \ln \left( \frac{I}{A A T^2} \right) \quad (4.6)$$

แล้วสมการที่ (4.5) จะกลายเป็น

$$H(I) = IR_S + n\phi_{B0}$$

จากสมการที่ (4.4) จะได้ว่าจุดตัดแกนตั้ง คือ  $\frac{nkT}{q}$  และความชันของกราฟเส้นตรง คือ  $R_S$  และจากสมการที่ (4.6) จะได้ว่าจุดตัดแกนตั้ง คือ  $n\phi_{B0}$  และความชันของกราฟเส้นตรง คือ  $R_S$  ดังนั้นทั้งสมการที่ (4.4) และ (4.6) จะสามารถหาค่า  $n, \phi_{B0}$  และ  $R_S$  ได้โดยไม่ต้องรู้ค่า  $A$  วิธีนี้เรียกว่าวิธีของชวง (Cheung's method) ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้หาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของขอตัก์กไดโอด แต่สำหรับกรณีไดโอดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe จะใช้วิธีการของชวงได้ต่อเมื่อประมาณว่ารอยต่อ พี-เอ็น เป็นแบบขั้นบันไดข้างเดียว (one side step junction)

นอกจากนั้นยังมีผู้เสนอวิธีการหาค่าความต้านทานไฟฟ้าของรอยต่อวิวิพันธุ์ที่ขึ้นกับแรงดันไฟฟ้าโดยเริ่มต้นจากการหาอนุพันธ์ของ  $V$  ของสมการที่ (4.3) เทียบกับ  $I$  ซึ่งจะได้ว่า

$$\frac{dV}{dI} = R_S + \frac{nkT}{qI}$$

โดยนิยามความต้านทานไฟฟ้าของรอยต่อวิวิพันธุ์ ( $R_J$ ) ที่ขึ้นกับแรงดันไฟฟ้า ดังนี้คือ

$$R_J = \frac{dV}{dI}$$

แล้ว

$$R_J = R_S + \frac{nkT}{qI}$$

(4.7)

เมื่อแรงดันไบแอสตรงมีค่าเพิ่มขึ้น กระแสไฟฟ้า  $I$  ของสมการที่ (4.7) จะมีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้พจน์ที่ 2 ของสมการที่ (4.7) มีค่าลดลง ดังนั้นจะได้ว่า เมื่อแรงดันไบแอสตรงมากขึ้นค่าความ

ด้านทานไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำจะมีค่าเท่ากับ  $R_s$  ดังนั้นสมการที่ (4.7) จะเป็นวิธีการหาค่า  $R_s$  ได้อีกวิธีหนึ่งรวมทั้งสามารถหาค่า  $R_{sh}$  ได้ด้วยขณะเมื่อแรงดันไบแอสเข้าสู่ศูนย์ จากสมการที่ (4.3) ถ้านำ  $I$  คูณตลอดจะได้ว่า

$$I \frac{dV}{dI} = IR_s + \frac{nkT}{q} \quad (4.8)$$

ซึ่งสมการที่ (4.8) ก็คือสมการที่ (4.4) ของวิธีของชวงนั่นเอง

กลไกการนำไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้าง (SCLC) มักจะเขียนความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า ดังนี้คือ

$$I = kV^m$$

$$\ln I = m \ln V + \ln k \quad (4.9)$$

เมื่อ  $m$  คือความชันของกราฟ ถ้า  $m$  มีค่าเท่ากับ 1.5 กลไกการนำไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้างจะเป็นไปตามกฎของ ไชด์-แลงมัวร์ (Child-Langmuir's law) แต่ถ้า  $m$  เท่ากับ 2 จะเป็นไปตามกฎของ มอตต์-เกอร์นีย์ (Mott-Gurney's law) แต่ถ้า  $m > 2$  จะหมายถึงว่ากับดักประจุมีระดับ

พลังงานต่อเนื่องและมีการแจกแจงแบบเอกซ์โพเนนเชียล ซึ่งจากผลการทดลองได้ค่า  $m = 2.57$  แสดงว่ากับดักประจุมีระดับพลังงานต่อเนื่องและมีการแจกแจงแบบเอกซ์โพเนนเชียล

#### 4.6.2 ผลการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า ของไดโอด CdS/CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

เนื่องจากความหนาแน่นอิเล็กตรอนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS อยู่ในระดับ  $10^{15}$  ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร แต่ความหนาแน่นของโฮลในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe อยู่ในระดับ  $10^{14}$  ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ดังนั้นอาจจะประมาณได้ว่า รอยต่อพี-เอ็น เป็นแบบรอยต่อชั้นบันไดข้างเดียว (one side step junction) ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยรอยต่อชอตต์กี จากการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า จะได้ว่า

$$\frac{1}{C^2} = \frac{-2}{q\epsilon_s N_A A^2} \left( V_{bi} - V_a - \frac{kT}{q} \right) \quad (4.10)$$

เมื่อ  $C$  คือ ความจุไฟฟ้า  $\epsilon_s$  คือ สภาพยอมทางไฟฟ้า (permittivity) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ส่วน  $A$  คือ พื้นที่ของรอยต่อมีหน่วยเป็น ตารางเซนติเมตร

เมื่อ  $V_a$  คือ แรงดันไบแอสกลับทาง ส่วนจุดตัดแกนนอนหรือแกนแรงดันไฟฟ้า ( $V_i$ ) คือ

$$V_i = V_{bi} - \frac{kT}{q}$$

แล้วแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมรอยต่อ (built-in potential,  $V_{bi}$ ) คือ

$$V_{bi} = V_i + \frac{kT}{q} \quad (4.11)$$

ส่วนความสูงของกำแพงศักย์ที่รอยต่อจะสัมพันธ์กับ  $V_{bi}$  ดังนี้ คือ

$$\phi_B = V_{bi} + E_F + \Delta\Phi \quad (4.12)$$

เมื่อ  $\Delta\Phi$  คือ ความสูงของกำแพงศักย์ที่ลดลงเนื่องจากแรงดันไบแอสกลับทางที่ใช้วัด ส่วนระดับเฟอร์มิ ( $E_F$ ) จะสัมพันธ์กับความหนาแน่นของระดับอะตอมผู้รับ ( $N_A$ ) ดังนี้

$$E_F = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{N_V}{N_A} \right) \quad (4.13)$$

โดยที่  $N_V$  คือ ความหนาแน่นยังผลของสถานะทางพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe และมีค่าเท่ากับ  $8.65 \times 10^{17}$  ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร แทน  $E_F$  ของสมการที่ (4.13) ลงในสมการที่ (4.12) จะได้ว่าความสูงของกำแพงศักย์ที่ได้จากการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่า ความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า คือ

$$\phi_B = V_i + \frac{kT}{q} \left[ 1 + \ln \left( \frac{N_V}{N_A} \right) \right] + \Delta\Phi \quad (4.14)$$

แต่เนื่องจาก  $\Delta\Phi$  มีผลไม่มากนัก เพราะแรงดันไบแอสกลับทางที่ใช้มีค่าค่อนข้างน้อยจึงละเลยพจน์  $\Delta\Phi$  นี้ได้ โดยปกติแล้ว  $\phi_B$  ที่คำนวณได้จากการวัดค่า ความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า จะมีค่าน้อยกว่าที่ได้จากการวัด กระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า เสมอ เนื่องจากขณะที่วัด ความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า จะมีแรงดันไฟฟ้าบางส่วนตกคร่อมชั้นฉนวนบาง ๆ ที่บริเวณรอยต่อ (interfacial

insulating layer) จากการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่า ความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า ความหนาแน่นของโฮล ( $N_A$ ) สามารถหาได้จากสมการที่ (4.10) คือ

$$\text{slope} = \frac{2}{q\epsilon_s N_A A^2} \quad (4.15)$$

$$N_A = \frac{2}{q\epsilon_s A^2 (\text{slope})} \quad (4.16)$$

เมื่อค่าคงที่ได้อิเล็กทรอนิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe เท่ากับ 9.4 ส่วนค่าความจุไฟฟ้าของบริเวณpletionหะ ( $C_D$ ) หาได้จากความสัมพันธ์

$$C_D = \frac{\epsilon_s}{W_D} \quad (4.17)$$

เมื่อความกว้างของบริเวณpletionหะ ( $W_D$ ) ที่ขึ้นกับแรงดันไบแอส คือ

$$W_D = \left[ \frac{2\epsilon_s (V_{bi} - V_a - \frac{kT}{q})}{qN_A} \right]^{1/2} \quad (4.18)$$

แต่โดยทั่วไปมักคำนวณหาค่า  $W_D$  จากการวัดความจุไฟฟ้าที่แรงดันไบแอสเท่ากับศูนย์ จากนั้นจะ  
ได้ว่า

$$C_D = \frac{\epsilon_s}{W_D} = \left[ \frac{\epsilon_s q N_A}{2V_{bi}} \right]^{1/2} \quad (4.19)$$

I-V Measurement				C-V Measurement							
$J_s$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	TE Mechanism	Cheung's Method		$\frac{dV}{dI}$ -V Relation		$V_i$ (V)	$V_{bi}$ (V)	$N_A$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$\Phi_B$ (eV)	$W_D$ (nm)	$C_D$ ( $\mu\text{F}$ )
		$n$	$\phi_B$ (eV)	$R_S$ ( $\Omega$ )	$R_{SH}$ ( $\Omega$ )						
	$n$ $0.12 < V < 0.21$	$n$ $0.21 < V < 0.30$	$R_S$ ( $\Omega$ )	$R_{SH}$ ( $\Omega$ )	$R_S$ ( $\Omega$ )						
342.36	1.20	1.12	0.593	1.01	55	1.5	0.415	$1.40 \times 10^{14}$	0.403	17.28	0.481

**ตารางที่ 4.28** แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากการวัดความสัมพัทธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน และที่ได้จากการวัดความสัมพัทธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่ความถี่ 1 MHz ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน ของไดโอด CdS/CdTe ที่เตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเพื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ผลการวิจัยมาจากฟิล์มบางที่มีโครงสร้างหลายชนิดเริ่มตั้งแต่ฟิล์มบางเดี่ยวบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่เคลือบบนฟิล์มบาง Cu และสิ่งประดิษฐ์ที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Cu,  $Sb_2Te_3/CdTe/Sb_2Te_3$ , Cu/CdTe/  $Sb_2Te_3/Cu$  และไดโอดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำชนิด CdS/CdTe

สำหรับฟิล์มบางบนฐานรองรับกระจกจากผลการศึกษาคือการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์พบว่าในกรณีของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส ฟิล์มบางจะมีความเป็นผลึกมากกว่าเมื่อไม่ให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยมีระนาบการเลี้ยวเบนที่โดดเด่นคือระนาบ (1 1 1) แต่เมื่อเคลือบฟิล์มลงบนฐานรองรับที่เป็นฟิล์มบาง Cu กลับพบว่าฟิล์มบางที่เตรียมโดยไม่ให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์มีความเป็นผลึกที่โดดเด่นกว่า และพบการเกิดเฟสของ  $Cu_{0.65}Te_{0.35}$  บนผิวหน้าของฟิล์มบางที่ให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับ 100 องศาเซลเซียส จากจุดนี้เองทำให้ได้ทราบว่าด้วยอุณหภูมิเพียง 100 องศาเซลเซียส ก็เพียงพอที่จะทำให้อะตอมของธาตุ Cu แพร่เข้าสู่ชั้นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ได้ ส่งผลต่อความต้านทานแผ่นที่ลดลงอย่างมากจาก  $2.92 \times 10^{10}$  โอห์ม เมื่อไม่มีชั้นฟิล์มบางของ Cu เหลือเพียง 14.40 โอห์ม สำหรับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Sb_2Te_3$  ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส มีความเป็นผลึกดีกว่าเมื่อไม่ให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ โดยมีระนาบการเลี้ยวเบนที่โดดเด่นคือระนาบ (0 1 5) แนวโน้มนี้เป็นไปในทางเดียวกันเมื่อเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Sb_2Te_3$  ลงบนฟิล์มบางของ Cu และพบการเกิดเฟสของ  $Cu_{0.65}Te_{0.35}$  เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส จึงได้ข้อสรุปว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Sb_2Te_3$  ไม่สามารถป้องกันการแพร่ของอะตอมของ Cu ได้ หากต้องการใช้ชั้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ  $Sb_2Te_3$  จะต้องเคลือบฟิล์มให้มีความหนาพอควร

ผลการศึกษาภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบแนวโน้มว่าขนาดของเกรนในฟิล์มชนิดต่าง ๆ ไม่ว่าจะให้อุณหภูมิกับแผ่นฐานรองรับหรือให้อุณหภูมิกับแผ่นฐานรองรับ 100 องศาเซลเซียส มีขนาดเกรนที่ใกล้เคียงกัน

ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์ที่มีโครงสร้างแบบ Cu/CdTe/Cu ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

พบว่ามีความต้านทานจำเพาะของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ  $3.20 \times 10^{-3}$  โอห์ม-ตารางเซนติเมตร ความสูงของกำแพงศักย์ในแนวตั้งเท่ากับ 0.290 อิเล็กตรอนโวลต์ ความสูงของกำแพงศักย์ในแนวนอนเท่ากับ 0.219 อิเล็กตรอนโวลต์ และจากการศึกษาความไม่สม่ำเสมอของกำแพงศักย์ในแนวตั้งทำให้ได้ค่าเฉลี่ยของกำแพงศักย์ที่อุณหภูมิศูนย์เคลวิน ( $\bar{\phi}_{B0}$ ) เท่ากับ 0.503 อิเล็กตรอนโวลต์ และเท่ากับ 0.553 อิเล็กตรอนโวลต์ ในแนวนอนตามลำดับ

ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์ที่มีโครงสร้างแบบ  $Sb_2Te_3/CdTe/Sb_2Te_3$  ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

พบว่ามีความต้านทานจำเพาะของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ  $1.75 \times 10^{-3}$  โอห์ม-ตารางเซนติเมตร ความสูงของกำแพงศักย์ในแนวตั้งเท่ากับ 0.244 อิเล็กตรอนโวลต์ ความสูงของกำแพงศักย์ในแนวนอนเท่ากับ 0.260 อิเล็กตรอนโวลต์ และจากการศึกษาความไม่สม่ำเสมอของกำแพงศักย์ในแนวตั้งทำให้ได้ค่าเฉลี่ยของกำแพงศักย์ที่อุณหภูมิศูนย์เคลวิน ( $\bar{\phi}_{B0}$ ) เท่ากับ 0.508 อิเล็กตรอนโวลต์ และเท่ากับ 0.482 อิเล็กตรอนโวลต์ ในแนวนอนตามลำดับ

ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์ที่มีโครงสร้าง  $Cu/CdTe/Sb_2Te_3/Cu$  ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

พบว่ามีความต้านทานจำเพาะของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ  $8.15 \times 10^{-3}$  โอห์ม-ตารางเซนติเมตร ความสูงของกำแพงศักย์ในแนวตั้งเท่ากับ 0.201 อิเล็กตรอนโวลต์ ความสูงของกำแพงศักย์ในแนวนอนเท่ากับ 0.244 อิเล็กตรอนโวลต์ และจากการศึกษาความไม่สม่ำเสมอของกำแพงศักย์ในแนวตั้งทำให้ได้ค่าเฉลี่ยของกำแพงศักย์ที่อุณหภูมิศูนย์เคลวิน ( $\bar{\phi}_{B0}$ ) เท่ากับ 0.420 อิเล็กตรอนโวลต์ และเท่ากับ 0.422 อิเล็กตรอนโวลต์ ในแนวนอนตามลำดับ การศึกษาแอดมิตแตนซ์สเปกโตรสโกปีของสิ่งประดิษฐ์ที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิพบว่าความต้านทานอนุกรมของสิ่งประดิษฐ์ที่อุณหภูมิห้องมีค่าเท่ากับ 1.058 โอห์ม และมีแนวโน้มลดลงตามอุณหภูมิที่ลดลงจนเหลือ 0.735 โอห์ม ที่อุณหภูมิ 100 เคลวิน

ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำชนิด CdS/CdTe ที่เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

พบว่ามีการเสถียรตัวย้อนกลับเท่ากับ 36.8 ไมโครแอมป์ ช่วงแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 0-0.13 โวลต์ มีกลไกการนำไฟฟ้าแบบกระแสรั่วและกระแสการรวมตัวของพาหะ (leakage current and recombination current) ช่วงแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 0.13-0.21 โวลต์ มีกลไกการนำไฟฟ้าแบบเทอร์มิโอนิกอิมิสชัน และช่วงแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 0.21-0.30 โวลต์มีกลไกการนำไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้างโดยผลของความต้านทานอนุกรมเริ่มโคคเค่นออกมา สิ่งประดิษฐ์มีค่าแพกเตอร์อุดมคติเท่ากับ 1.20 ความต้านทานอนุกรมเท่ากับ 1.01 โอห์ม และค่าความสูงของกำแพงศักย์เท่ากับ 0.593 อิเล็กตรอนโวลต์ จากการศึกษาค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า ของรอยต่อพบว่ามีความจุไฟฟ้าตกคร่อมรอยต่อเท่ากับ 0.415 โวลต์ ความหนาแน่นของอะตอมผู้รับเท่ากับ  $1.40 \times 10^{18}$  ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะเท่ากับ 17.28 นาโนเมตร และความจุไฟฟ้าของรอยต่อเท่ากับ 0.481 ไมโครฟารัด

### ประโยชน์ที่ได้รับ

ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์จะต้องทำการกัดแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ก่อนเพื่อให้ผิวหน้าของกระจกสไลด์มีพื้นที่สำหรับให้ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe เข้ามายึดเมื่อเป็นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์พบว่าอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่มากกว่า 100 องศาเซลเซียส จะทำให้เคลือบฟิล์มไม่ติดแต่สำหรับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นฟิล์มบาง Cu นั้นสามารถให้อุณหภูมิกับแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ได้สูงถึง 150 องศาเซลเซียส หากมากกว่านี้จะทำให้ฟิล์มบางของ Cu ลอกออกมา ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่หนาขึ้นจะมีความเป็นผลึกที่ดีขึ้นและความเป็นผลึกจะโคคเค่นขึ้นเมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ แต่ขนาดของเกรนที่ได้ไม่แตกต่างกันมากนัก สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe จะดีขึ้นอย่างมาก (ประมาณ  $2 \times 10^9$  เท่า) เมื่อเคลือบอยู่บนฟิล์มบาง Cu ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในสุญญากาศพบว่าอุณหภูมิแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส นั้นเหมาะสมในการสร้างรอยต่อกับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นและมีความเสี่ยงน้อยในการที่ฟิล์มจะลอกหลุดออกจากฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ หากรอยต่อยังไม่สมบูรณ์ควรนำไปแอนนัลในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิประมาณ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 2 ชั่วโมงเพื่อให้รอยต่อหลอมเข้าด้วยกันแทนการเพิ่มอุณหภูมิให้กับแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ สำหรับแนวทางแนวทางในการพัฒนาการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดที่เป็นรอยต่ออวิวิพันธ์ (heterojunction) ของฟิล์มบางของ

สารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe นั้นควรใช้  $Sb_2Te_3$  เป็นชั้นกั้นกลางก่อนที่จะทำการเคลือบฟิล์มบางของโลหะเพื่อทำขั้วไฟฟ้า เนื่องจากให้ผลของความเป็นโอห์มมิกที่ดีแต่ควรเคลือบฟิล์มให้หนาเพื่อการป้องกันการแพร่ของอะตอม Cu ที่มีประสิทธิภาพขึ้น ได้ค่าความต้านทานจำเพาะของขั้วไฟฟ้าและความสูงของกำแพงศักย์ตรงบริเวณรอยต่อที่อยู่ในเกณฑ์ที่ดี สำหรับกำแพงศักย์บริเวณรอยต่อระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ พบว่ามีค่าเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ โดยจะมีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลง

จากการศึกษาความสูงของกำแพงศักย์ในแบบสม่ำเสมอ (homogeneous barrier height) และความสูงของกำแพงศักย์แบบไม่สม่ำเสมอ (inhomogeneous barrier height) ของรอยต่อโอห์มมิกที่ได้โดยแนวคิดทั้งสองตั้งอยู่บนทฤษฎีเทอร์มิโอนิกอิมิสชัน พบว่าความสูงของกำแพงศักย์ตลอดทั่วทั้งผิวยุติต่อโอห์มมิกมีความสม่ำเสมอดี มีค่าเบี่ยงเบนของความสูงของกำแพงศักย์น้อย จึงสรุปได้ว่าสำหรับความสูงของกำแพงศักย์ในรอยต่อแบบโอห์มมิกนั้นใช้แนวคิดว่าความสูงของกำแพงศักย์มีค่าต่ำและสม่ำเสมอตลอดผิวหน้าสัมผัสของโลหะกับสารกึ่งตัวนำ CdTe

### ปัญหาและข้อเสนอแนะ

1. ในการเตรียมฟิล์มเพื่อทดสอบสมบัติต่าง ๆ ที่ได้วางแผนงานไว้จะต้องมีกระบวนการที่ต่อเนื่องจนได้สิ่งประดิษฐ์ในขั้นตอนสุดท้ายเพื่อลดผลจากสถานะผิวยุติต่อ
2. ไม่ควรเร่งจ่ายกระแสให้กับระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เนื่องจากจะทำให้สารตั้งต้น ระเหย / ระเหิด เร็วเกินไปส่งผลให้ควบคุมอัตราการเคลือบให้สม่ำเสมอได้ยาก และได้ฟิล์มที่คุณภาพไม่ดี
3. ควรเช็คทำความสะอาดระบบระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศทุกครั้งเมื่อทำงานเสร็จเนื่องจากฟิล์มบางที่เคลือบอยู่ภายในระบบสุญญากาศจะเป็นตัวจับออกไซด์ไว้ภายใน เมื่อทิ้งระบบไว้เวลานานย่อมส่งผลให้ชั้นออกไซด์ที่สะสมไว้หนาขึ้นทำให้ระบบสุบอากาศออกได้ช้าในการทำงานครั้งต่อไป
4. ในการเคลือบฟิล์มบางโลหะลงบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ใด ๆ อัตราการเคลือบฟิล์มต้องต่ำเพื่อปิดช่องว่างที่เกิดจากโลหะเคลือบไม่สม่ำเสมอบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์
5. เทอร์โมคัปเปิลที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ในระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในสุญญากาศจะต้องพยายามคัดปลายให้สัมผัสที่แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เสมอ มิเช่นนั้นการอ่านอุณหภูมิในระหว่างการเคลือบฟิล์มจะผิดพลาด
6. หัววัดความหนาของฟิล์มบางควรปรับระดับให้มีระดับเดียวกับหน้าฉากอะลูมิเนียมระเหยสารเคมีเพื่อให้ได้ค่าเฉลี่ยของความหนาของฟิล์มบางที่ใกล้เคียงความจริงมากที่สุด

7. ในการเคลือบฟิล์มบางที่เป็นโลหะเนื่องจากต้องใช้อัตราการเคลือบที่ไม่สูงนักจึงต้องใช้เวลาคเคลือบฟิล์มนาน และใช้ค่ากระแสไฟฟ้าสูง ทำให้มีความร้อนสะสมในระบบมากซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อโอริงภายในระบบสุญญากาศ จึงควรเคลือบฟิล์มโลหะด้วยระบบสปีดเทออร์ริงเนื่องจากสามารถเคลือบฟิล์มได้นาน โดยมีความร้อนสะสมน้อย

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Zappettini A., Bissoli F., Gombia E., Bosio A. and Romeo N. "Characterization of  $Sb_2Te_3$  Ohmic Contacts on P-Type CdTe Single Crystals" **IEEE Transactions on Nuclear Science**. vol.52, no.5. 2005. pp. 1961-1963.
- [2] Bosio A., Romeo N., Mazzamuto S. and Canevari V. "Polycrystalline CdTe Thin Films for Photovoltaic Applications" **Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials**. vol.52, 2006. pp. 247-279.
- [3] Sze S.M. and Kwok K. Ng. **Physics of Semiconductor Devices**. 3<sup>rd</sup> ed. New Jersey : John Wiley & Sons, Inc., Publication. 2006.
- [4] Kittel C. **Introduction to Solid State Physics**. 8<sup>th</sup> ed. New Jersey : John Wiley & Sons, Inc., Publication. 2005.
- [5] งามนิตย์ วงษ์เจริญ, จูตินัย แก้วแดง และ ฉัฐพร พรหมรส. "การเตรียมฟิล์มบาง CdTe โดยวิธีระเหิดในระบะประชิดเพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์" รายงานวิจัยเสนอต่อ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2551.
- [6] จูตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฉัฐพร พรหมรส และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. "การพัฒนา ขั้วไฟฟ้าด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CdS/CdTe" รายงานวิจัยเสนอต่อ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2552.
- [7] จูตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ฉัฐพร พรหมรส. "การเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธี ออบสารละลายเคมีภายใต้คลื่นไมโครเวฟ เพื่อประดิษฐ์เป็นหน้าต่างรับแสงของ เซลล์แสงอาทิตย์" รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2551.
- [8] จูตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. "การประดิษฐ์ฟิล์มหนา  $CuAlO_2$  เพื่อเป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์" รายงานวิจัยเสนอต่อ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2550.
- [9] จูตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. "การประดิษฐ์ฟิล์มบาง ดินบุกออกไซด์ที่เจือด้วยอะตอมฟลูออรีนสำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของ เซลล์แสงอาทิตย์" รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2549.

- [10] งามนิตย์ วงษ์เจริญ, จูตินัย แก้วแดง และฉัฐพร พรหมรส. “การประดิษฐ์ฟิล์มหนา CdO ที่เจือด้วยอะตอม Al สำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2553.
- [11] จูตินัย แก้วแดง. “การเตรียมและศึกษาสมบัติของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารศึกษาศาสตร์ ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2530.
- [12] งามนิตย์ วงษ์เจริญ. “การศึกษารอยต่อแบบโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ ของคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารศึกษาศาสตร์ ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2530.
- [13] ปกรณ์ สิทธิเชตรกรรม. “การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์ที่เตรียมได้จากกระบวนการซีลีในเซชัน” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารศึกษาศาสตร์ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2550.
- [14] อุดลย์ หาญวังม่วง. 2550. “การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดในระยะประชิด” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารศึกษาศาสตร์ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [15] เอกชัย วิลามาศ. “การเตรียมและการศึกษาสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางของรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CdTe” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารศึกษาศาสตร์ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2552.
- [16] กุลวรงค์ นุตะมาน, คงกฤษณ์ ไพรวัลย์. “การศึกษาสมบัติรอยต่อโอห์มมิกของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เตรียมด้วยวิธีอบสารละลายเคมี” โครงการพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2549.
- [17] งามนิตย์ วงษ์เจริญ. “รอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ” วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง. ปีที่4, ฉบับที่2. 2537. หน้า 99-110.
- [18] มนตรี เข้มวงษ์. ฟิสิกส์ของสารกึ่งตัวนำ. พิมพ์ครั้งที่3. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง. 2543.
- [19] สิทธิชัย โกโคยอุดม. อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำสำหรับวงจรรวมยุคใหม่. พิมพ์ครั้งที่1. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร. 2551.
- [20] Moller H. J. **Semiconductors for Solar Cells**. Boston : Artech House. 1993.

- [21] Schroder D. K. **Semiconductor Material and Device Characterization**. New York : John Wiley & Sons, Inc., Publication. 1990.
- [22] Ohring M. **Materials Science of Thin Films Deposition and Structure**. 2<sup>nd</sup> ed. San Diego : Academic Press. 2002.
- [23] Adachi S. **Properties of Group-IV, III-V and II-VI Semiconductors**. Great Britain : John Wiley & Sons, Ltd. 2005.
- [24] Markvart T. and Castaner L. **Solar Cells: Material, Manufacture and Operation**. Great Britain : Elsevier Advanced Technology. 2005.
- [25] Tantraporn W. "Determination of Low Barrier Heights in Metal-Semiconductor Contacts" **J. Appl. Phys.** vol.41, no.8. 1970. pp. 4669-4671.
- [26] Tewari S, Bhattacharjee A. and Sahay P. P. "Structural, Dielectric and Electrical Studies on Thermally Evaporated CdTe Thin Films" **J. Mater. Sci.** vol.44, 2009. pp. 534-540.
- [27] Fahrenbruch A. L. "Measuring CdS/CdTe Back Contact Barrier Heights by Internal Photoemission" **33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference**. 2008. paper no. 709.
- [28] Ghosh B., Miles R. W., Carter M. J. and Hill R. "Correct Evaluation of Ohmic Contacts to p-CdTe Thin Films" **Electronics Letters**. vol.29, no.5. 1993. pp. 438-440.
- [29] Fahrenbruch A.L. "Exploring Back Contact Technology to Increase CdS/CdTe Solar Cell Efficiency" **The Materials Research Society Meeting**. 2007. paper no. Y7-5.
- [30] Ghosh B. "Work Function Engineering and Its Applications in Ohmic Contact Fabrication to II-VI Semiconductors" **Applied Surface Science**. vol.254, 2008. pp. 4908-4911.
- [31] Ghosh B. "Electrical Contacts for II-VI Semiconducting Devices" **Microelectronic Engineering**. 2009.
- [32] Tataroglu A. and Altindal S. "The Distribution of Barrier Heights in MIS Type Schottky Diodes from Current-Voltage-Temperature (I-V-T) Measurements" **Journal of Alloy and Compounds**. vol.479, 2009. pp. 893-897.

- [33] Hernandez G.P., Juarez A.S., Resendiz M.C. and Mathe X. "Influence of Au Interlayer on the Contact Resistance and Morphology of CdTe Films Deposited on Molybdenum Substrate" **Solar Energy Materials & Solar Cells.** vol.90, 2006. pp. 2289-2296.
- [34] Cheung S. K. and Cheung N. W. "Extraction of Schottky Diodes Parameters From Forward Current-Voltage Characteristics" **Appl. Phys. Lett.** Vol.49, 1986. pp. 85-87.

## ภาคผนวก

Pattern : 75-2086

Radiation = 1.540600

Quality : Calculated

		2 $\theta$	<i>l</i>	<i>h</i>	<i>k</i>	<i>l</i>
Cd Te		24.027	100	1	1	1
		27.814	<1	2	0	0
Cadmium Telluride		39.741	66	2	2	0
		46.977	38	3	1	1
		49.201	<1	2	2	2
		57.460	9	4	0	0
		63.177	13	3	3	1
		65.017	<1	4	2	0
Lattice : Face-centered cubic		72.132	15	4	2	2
Mol. weight = 240.01		77.280	8	5	1	1
S.G. : F-43m (216)		85.655	4	4	4	0
Volume [CD] = 263.37						
a = 6.41000						
Dx = 6.053						
Dm = 6.200						
Z = 4						
I/cor = 15.88						
<p>ICSD COLLECTION CODE : 031844  TEST FROM ICSD : Calc. density unusual but tolerable.  *TEST FROM ICSD : No R value given.  .ST FROM ICSD : At least one TF missing.</p>						
<p>*Calculated from ICSD using POWD-12+, (1997) primary reference :  *Nor. Geol. Tidsskr., volume 8, page 302, (1926) :  Zachariasen, W.H.</p>						
Radiation : CuK $\alpha$ 1		Filter : Not specified				
Lambda : 1.54060		d-sp : Calculated spacings				

Pattern : 71-393

Radiation = 1.540600

Quality : Calculated

Sb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub>		2th	l	h	k	l
Antimony Telluride		8.703	4	0	0	3
		17.456	4	0	0	6
		24.260	<1	1	0	1
		24.789	<1	0	1	2
		26.313	2	0	0	9
		26.810	2	1	0	4
		28.238	100	0	1	5
		31.757	1	1	0	7
		33.788	3	0	1	8
		35.334	<1	0	0	12
		38.275	32	1	0	10
		40.695	3	0	1	11
		42.361	31	1	1	0
		43.331	<1	1	1	3
		44.588	5	0	0	15
		45.830	4	1	0	13
		46.143	1	1	1	6
		48.529	2	0	1	14
		49.412	<1	0	2	1
		49.701	<1	2	0	2
		50.558	2	1	1	9
		50.845	<1	0	2	4
		51.690	15	2	0	5
		53.899	<1	0	2	7
		54.162	4	0	0	18
		*54.162	4	1	0	16
		55.248	1	2	0	8
		56.309	<1	1	1	12
		57.093	<1	0	1	17
		58.401	8	0	2	10
		60.191	1	2	0	11
		63.186	8	1	0	19
		*63.186	8	1	1	15
		64.170	2	0	0	21
		*64.170	2	0	2	13
		66.342	2	0	1	20
		*66.342	2	2	0	14
		67.313	<1	1	2	2
		68.263	<1	2	1	4
		68.972	10	1	2	5
		70.845	<1	2	1	7
		71.068	4	1	1	18
		*71.068	4	0	2	16
		72.005	<1	1	2	8
		72.913	<1	1	0	22
		73.608	<1	2	0	17
		74.759	6	0	0	24
		*74.759	6	2	1	10
		76.334	3	0	1	23
		*76.334	3	1	2	11
		77.481	4	3	0	0
		78.156	<1	0	3	3
		79.042	<1	0	2	19
		79.934	2	1	1	21
		*79.934	2	2	1	13
		80.171	1	0	3	6
		81.941	1	2	0	20
		*81.941	1	1	2	14
		83.485	1	1	0	25
		*83.485	1	3	0	9
		86.133	<1	0	0	27
		86.369	1	2	1	16
		87.236	1	0	1	26
		88.135	<1	0	3	12
		88.791	<1	1	2	17
		89.880	<1	1	1	24
Lattice : Rhombohedral S.G. : R-3m (166) a = 4.26400 c = 30.45800 Z = 3		Mol. weight = 626.30 Volume [CD] = 479.59 Dx = 6.506 I/cor = 15.23				
ICSD COLLECTION CODE : 002084 REMARKS FROM ICSD : REM REF. TEMPERATURE FACTOR : ITF		*Calculated from ICSD using POWD-12++, (1997) primary reference : *Acta Crystallogr., Sec. B, volume 30, page 1307, (1974) : Anderson, T.L., Krause, H.B.				
Radiation : CuKα1 Lambda : 1.54060		Filter : Not specified d-sp : Calculated spacings				

Pattern : 2-1222

Radiation = 1.540600

Quality : Deleted

Cu<sub>5</sub>Te<sub>3</sub>

Weissite / Copper Telluride

2th	l	h	k	l
24.851	80			
27.681	90			
35.165	40			
39.492	30			
41.385	20			
43.473	100			
45.306	90			
50.674	60			
51.911	10			
64.678	30			
70.178	10			
81.506	10			

Lattice : Not assigned

Mol. weight = 700.53

S.G. : (0)

DELETED AND REJECTED BY : Delete: Berry parcel of August 6, 1957  
 COLOR : Bluish-black  
 SAMPLE SOURCE OR LOCALITY : Specimen from Vulcan Mine. CO, USA.

\*Am. Mineral., volume 27, page 63, (1942) primary reference :  
 Harcourt, G.

Radiation : MoK $\alpha$ 1

Filter : Not specified

Lambda : 0.70900

d-sp : Not given

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายไกรศักดิ์ ยืนยั้ง
วัน เดือน ปีเกิด	19 ตุลาคม 2522
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลภูมิพล กรุงเทพฯ
ที่อยู่ปัจจุบัน	194/101-102 ซีรธรรมอนุพัทธ์เมนต์ ซอยลาดพร้าว 63 ถนนลาดพร้าว เขตวังทองหลาง กรุงเทพฯ 10310
การศึกษา	2547 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง 2553 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย	
มิ.ย. 2551-ก.ย. 2552	ผู้ช่วยสอนวิชาปฏิบัติการฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ก.ย.2548-มิ.ย.2550	นักวิชาการสาขาฟิสิกส์ สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี
ธ.ค.2547-ก.พ.2548 พ.ศ.2552	ผู้ช่วยนักวิทยาศาสตร์ กองฟิสิกส์และวิศวกรรม กรมวิทยาศาสตร์บริการ - การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เคลือบด้วยความร้อน ภายในระบบสุญญากาศบนแผ่นรองรับต่างชนิดกัน การประชุมทางวิชาการ ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 47 ประจำปี 2552 - การศึกษาสมบัติของเซลล์โฟโตโวลตาอิกของฟิล์มบาง CdS/CdTe การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 47 ประจำปี 2552 - การเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์โดยวิธีระเหยด้วยความร้อนสำหรับ ขอตักกึ่งไดโอดชนิดรอยต่อ Al/p-CdTe การประชุมวิชาการและแสดงผล งานทางวิชาการ พระจอมเกล้าลาดกระบังประจำปี 2552