

การประดิษฐ์และการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ และ
 CuSbS_2 เพื่อประยุกต์เป็นโฟโตไดโอด
FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ AND
 CuSbS_2 THIN FILMS FOR PHOTODIODE APPLICATION

ดุสิต ถือมัน

DUSIT THUEMAN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2562

KMITL-2019-SC-M-030-035

การประดิษฐ์และการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ และ
 CuSbS_2 เพื่อประยุกต์เป็นโฟโตไดโอด
FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ AND
 CuSbS_2 THIN FILMS FOR PHOTODIODE APPLICATION

ดุสิต ถือมัน
DUSIT THUEMAN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2562
KMITL-2019-SC-M-030-035

FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF
(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x AND CuSbS₂ THIN FILMS FOR PHOTODIODE
APPLICATION

DUSIT THUEMAN

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF MASTER IN APPLIED PHYSICS
DEPARTMENT OF PHYSICS, FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2019
KMITL-2019-SC-M-030-035

COPYRIGHT 2019

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประดิษฐ์และการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ และ CuSbS_2 เพื่อประยุกต์เป็นโฟโตไดโอด
ชื่อนักศึกษา	นายดุสิต ถิ่นมัน
รหัสนักศึกษา	59605090
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิสิกส์
พ.ศ.	2562
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.ฐิตินัย แก้วแดง
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ

บทคัดย่อ

ในวิทยานิพนธ์นี้ ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) และ CuSbS_2 โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศเคลือบลงบนแผ่นกระจกสไลด์ โดยใช้ผงผลึกของสารกึ่งตัวนำ CdS และ ZnTe ที่มีความบริสุทธิ์สูงเป็นสารตั้งต้นสำหรับเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ และใช้ผงผลึกของสารกึ่งตัวนำ Cu_2S และ Sb_2S_3 ที่มีความบริสุทธิ์สูง เป็นสารตั้งต้นสำหรับเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 จากการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่าโครงสร้างผลึกของฟิล์มบาง $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ที่มีเศษส่วนโดยมวล (x) ต่ำกว่า 0.2 จะเป็นแบบเฮกซะโกนัล ที่มีพีคการเลี้ยวเบนของระนาบ (002) โดดเด่นที่สุดในขณะที่กรณีเศษส่วนโดยโมล (x) ตั้งแต่ 0.8 จะมีโครงสร้างเป็นแบบคิวบิก และมีพีคการเลี้ยวเบนของระนาบ (111) ปรากฏโดดเด่นที่สุด สำหรับกรณีที่เศษส่วนโดยโมล (x) เป็น 0.4 และ 0.6 จะปรากฏเฟสคิวบิกและเฮกซะโกนัลเกิดร่วมกัน และความโดดเด่นของพีค (002) และ (111) จะลดลง ส่วนเฟส CuSbS_2 ที่มีโครงสร้างเป็นแบบออร์โธโรมบิกจะเกิดขึ้นเมื่อฟิล์มบางได้รับการแอนนัลในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที อย่างไรก็ตาม มีเฟส Sb_2S_3 และ $\text{Cu}_{1.8}\text{S}$ ในปริมาณเล็กน้อยปรากฏร่วมด้วย ลักษณะของผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดสามารถตรวจสอบโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม ค่าช่องว่างแถบพลังงานสามารถคำนวณได้จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง ทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยวิธีแวนเดอร์เพาว์ อีกทั้งยังได้ทำการประดิษฐ์รอยต่ออวิวิธพันธ์ของฟิล์มบาง $(\text{CdS})_{0.9}(\text{ZnTe})_{0.1}/\text{CuSbS}_2$ เคลือบบนแผ่นฐานรองรับ ITO และทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดลักษณะเฉพาะของกระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า และวัดลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า ภายใต้สภาวะไบแอสกลับทาง สิ่งประดิษฐ์นี้สามารถตอบสนองต่อแสงจากหลอดฮาโลเจนและหลอดอัลตราไวโอเล็ตได้ดี นั่นหมายความว่าสิ่งประดิษฐ์นี้สามารถประยุกต์เป็นโฟโตไดโอดสำหรับตรวจวัดแสงขาวและแสงอัลตราไวโอเล็ตได้

คำสำคัญ: การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ปรากฏการณ์ฮอลล์ วิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ สารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ สารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 สมบัติทางไฟฟ้า สมบัติทางแสง

Thesis Title	Fabrication and Characterization of $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ and CuSbS_2 Thin Films for Photodiode
Student Name	Mr.Dusit Thueman
Student ID	59605090
Degree	Master of Science (Applied Physics)
Department	Physics
Year	2019
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr Thitinai Gaewdang
Thesis Co-Advisor	Assoc.Prof Ngamnit Wongcharoen

Abstract

In this thesis, $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) and CuSbS_2 thin films were deposited on slide glass substrate by vacuum thermal evaporation method. The sets of CdS, ZnTe and Cu_2S , Sb_2S_3 powders with high purity grade were used as the precursors for the first kind and for the second kind of desired films, respectively. The XRD patterns showed that $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ thin films were crystallized in pure hexagonal phase with (002) preferred orientation at $x \leq 0.2$. While, $x \geq 0.8$, these films were crystallized in pure cubic phase with (111) preferred orientation. For the composition $x = 0.4$ and 0.6 , the cubic and the hexagonal phases were found to coexist in the system and the films become less preferentially oriented. However, CuSbS_2 phase belonging to orthorhombic crystal structure with small trace of Sb_2S_3 and $\text{Cu}_{1.8}\text{S}$ phases was formed after the films were annealed at 350°C in pure nitrogen atmosphere for 60 min. SEM, FESEM and AFM were used to study morphological features of the films. Energy gap values of the films were calculated from the optical transmission spectra. Electrical properties were performed by Hall effect measurements with van der Pauw configuration. In addition, we fabricated $(\text{CdS})_{0.9}(\text{ZnTe})_{0.1}/\text{CuSbS}_2$ heterojunction thin films by thermal evaporation method deposited on ITO substrate. Electrical properties of the heterojunction were investigated by meaning of I-V and C-V characterizations. Under reverse bias condition, it showed a good photo-response under illumination by ELH halogen and UV lamps. This behavior indicates that the device may be a suitable candidate for white light and UV light photodiode applications.

Keywords: XRD, Hall effect, vacuum thermal evaporation, $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$, CuSbS_2 , electrical properties, optical properties

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาของ รองศาสตราจารย์ ดร.ฐิติณัย แก้วแดง และรองศาสตราจารย์ งามนิตย์ วงษ์เจริญ ที่อำนวยความสะดวกในการใช้ระบบระยะเหยสารเคมีด้วยความร้อนในสุญญากาศ อุปกรณ์ในการวัดลักษณะเฉพาะต่างๆ ตลอดจนอุปการะทุนสนับสนุน และให้ความรู้และคำปรึกษาทางวิชาการที่ดีตลอดมารวมทั้งปลูกฝังคุณธรรมที่งดงามให้กับลูกศิษย์ ขอขอบคุณศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์และการแนะนำในการใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกโตรมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance ในการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค

ขอขอบคุณ คุณมนตรี หาญโก๋ย นักศึกษาปริญญาโทในหองปฏิบัติการวิจัยวัสดุโพโตนิคส์ สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ช่วยติดตั้งซอฟต์แวร์ในการวัดลักษณะ เฉพาะของกระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า และคำแนะนำในการใช้เครื่อง E4980A Agilent Precision LCR Meter สำหรับวัดค่าความนำไฟฟ้า และค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ แนะนำการใช้อุปกรณ์ต่างๆตลอดจนให้คำแนะนำในการใช้โปรแกรมเพื่อวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลอง

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่เมตตาประสิทธิ์ประสาทวิชาและให้การอบรมสั่งสอน ตั้งแต่การศึกษาภาคบังคับถึงปัจจุบัน

สุดท้ายนี้กราบขอบพระคุณพ่อ คุณแม่และญาติพี่น้องทุกท่านที่ให้ความอุปการะทุนในการศึกษาเล่าเรียนและเป็นกำลังใจด้วยดีตลอด

นายดุสิต ถิ่นมั่น

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญรูป	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	4
1.4 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน	4
1.5 ประโยชน์คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
2.1 วัตถุประสงค์ของสารกึ่งตัวนำ	7
2.2 โครงสร้างผลึกของสารประกอบที่เกิดจากอะตอมของธาตุกลุ่ม II – VI	8
2.2.1 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์	8
2.2.2 โครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซต์	9
2.2.3 โครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำ	10
2.3 หลักเกณฑ์ในการระบุชื่อระนาบของผลึก	11
2.3.1 การระบุตำแหน่ง	11
2.3.2 การระบุทิศทาง	11
2.3.3 การระบุชื่อระนาบ	11
2.4 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์	12
2.4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก	13
2.4.2 การหาขนาดของเกรน	13
2.5 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ ส่องกราด	14
2.6 การส่งผ่านแสง	15
2.6.1 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง	16
2.6.2 ส่วนหางของแถบพลังงาน	18
2.7 สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง	19
2.7.1 การวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพอร์	19
2.7.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง	20
2.7.3 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว	21
2.7.4 ปรากฏการณ์ฮอลล์	23

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.7.5 การศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพอร์	27
2.8 สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง	29
2.8.1 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกักตักพาหะในช่วงกระแสกลาง	36
2.8.2 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกักตักพาหะในช่วงกระแสขาขึ้น	38
2.9 รอยต่อของสารกึ่งตัวนำที่เป็นแบบพี-เอ็น	39
2.9.1 รอยต่อของสารกึ่งตัวนำที่เป็นแบบพี-เอ็นเมื่ออยู่ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน	39
2.9.2 รอยต่อของสารกึ่งตัวนำที่เป็นแบบชั้นบันได	41
2.9.3 รอยต่อของสารกึ่งตัวนำที่เป็นแบบพี-เอ็น ภายใต้สภาวะการไปกลับย้อนกลับ	43
2.10 ลักษณะเฉพาะของค่ากระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า ของรอยต่อของสารกึ่งตัวนำที่เป็นแบบพี-เอ็น	44
2.11 การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	45
2.11.1 อัตราการระเหยสาร	45
2.11.2 แหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้ในการระเหยสารด้วยไฟฟ้า	45
2.11.2.1 แหล่งกำเนิดชนิดทังสเตน	45
2.11.2.2 แหล่งกำเนิดชนิดแผ่นโลหะคงรูป	46
2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	47
บทที่ 3 วิธีดำเนินการงานวิจัย	51
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัย	51
3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	51
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง (CdS) _{1-x} (ZnTe) _x ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	51
3.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางแสง	52
3.1.4 เครื่องมือที่ใช้ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค	52
3.1.5 เครื่องมือที่ใช้ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค	52
3.1.6 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า	52
3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบาง (CdS) _{1-x} (ZnTe) _x องค์ประกอบต่างๆ (x = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0) เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	52
3.2.1 การคำนวณสารตั้งต้นของสารกึ่งตัวนำ (CdS) _{1-x} (ZnTe) _x (0 ≤ X ≤ 1.0)	52
3.2.2 การเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	54
3.2.3 การทำความสะอาดระบบสุญญากาศและหน้ากอกอะลูมิเนียมที่ใช้สำหรับออกแบบลักษณะรูปแบบของฟิล์มบางที่ถูกใช้ในระบบสุญญากาศ	55
3.2.4 การเคลือบฟิล์มบาง (CdS) _{1-x} (ZnTe) _x โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	55

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.2.5 การเคลือบฟิล์มบาง (CdS) _{1-x} (ZnTe) _x และฟิล์มบาง CuSbS ₂ โดยวิธี ระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	55
3.3 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์พื้นฐานต่างๆของฟิล์มบาง (CdS) _{1-x} (ZnTe) _x	57
3.3.1 การศึกษาสมบัติทางแสง	57
3.3.2 การศึกษาโครงสร้างเชิงจุลภาค	57
3.3.3 การศึกษาโครงสร้างเชิงมหภาค	57
3.3.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า	58
3.3.4.1 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า (R) ความต้านทานแผ่น (R _S) และสภาพต้านทานไฟฟ้าของเนื้อสาร (ρ_B) ด้วยวิธีสองขั้ว	58
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	59
4.1 การศึกษาสมบัติฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ (CdS) _{1-x} (ZnTe) _x (0 ≤ x ≤ 1) ที่เคลือบ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วย ความร้อนในระบบสุญญากาศ	59
4.1.1 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ (CdS) _{1-x} (ZnTe) _x (0 ≤ x ≤ 1) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่น กระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	59
4.1.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะของโครงสร้างเชิงมหภาค ด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ(CdS) _{1-x} (ZnTe) _x (0 ≤ x ≤ 1) ที่เคลือบ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วย ความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	62
4.1.3 ผลการวิเคราะห์ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณ ผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ (CdS) _{1-x} (ZnTe) _x (0 ≤ x ≤ 1) ที่เคลือบ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วย ความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	64
4.1.4 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงในช่วงอินฟราเรดด้วยเครื่องฟูเรียร์แทรนฟอร์ม์ อินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (FTIR) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ (CdS) _{1-x} (ZnTe) _x (0 ≤ x ≤ 1) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจก สไลด์ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	65
4.1.5 ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง ของสารกึ่งตัวนำ (CdS) _{1-x} (ZnTe) _x (0 ≤ x ≤ 1) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับ ที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อน ในระบบสุญญากาศ	66
4.1.6 ผลการศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง (CdS) _{1-x} (ZnTe) _x ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	69

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.1.7 ผลการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	71
4.1.8 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-150 องศาเซลเซียส เพื่อหาค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	78
4.1.9 ผลการศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	83
4.2 การศึกษาสมบัติฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	90
4.2.1 ลักษณะทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	90
4.2.2 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	90
4.2.3 ผลการวิเคราะห์ลักษณะของโครงสร้างเชิงมหภาค ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิชชัน (FESEM) ที่บริเวณผิวหน้า และผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	92
4.2.4 ผลการวิเคราะห์ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	93
4.2.5 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงในช่วงอินฟราเรดด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรด สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (FTIR) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	94
4.2.6 ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	95

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.2.7 ผลการศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CuSbS_2$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	97
4.2.8 ผลการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CuSbS_2$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	99
4.2.9 ผลการศึกษาความต้านทานเชิงแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CuSbS_2$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	106
4.3 การศึกษาสมบัติของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $CuSbS_2/CdS_{1-x}ZnTe_x$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	110
4.3.1 ลักษณะของรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{0.9}(ZnTe)_{0.1}/CuSbS_2$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	110
4.3.2 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับค่าแรงดันไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{0.9}(ZnTe)_{0.1}/CuSbS_2$ เมื่อไม่ได้มีการฉายแสง ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	110
4.3.3 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดโดยการฉายแสงด้วยหลอดฮาโลเจน ELH และหลอดแสงจันทร์ไสของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{0.9}(ZnTe)_{0.1}/CuSbS_2$ ซึ่ง เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	116
4.3.4 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้า กับแรงดันไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{0.9}(ZnTe)_{0.1}/CuSbS_2$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	120
4.3.5 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 300 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{0.9}(ZnTe)_{0.1}/CuSbS_2$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	123

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	125
5.1 สรุปผลการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	125
5.2 สรุปผลการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	126
5.3 สรุปผลการศึกษาสมบัติของสิ่งประดิษฐ์ของรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $\text{ITO}/(\text{CdS})_{0.9}(\text{ZnTe})_{0.1}/\text{CuSbS}_2$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	128
5.4 ปัญหาและข้อเสนอแนะ	128

เอกสารอ้างอิง

ภาคผนวก

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 แสดงค่าคงที่ผลึกและขนาดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	61
4.2 แสดงองค์ประกอบของธาตุที่ได้จากการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	63
4.3 แสดงขนาดของเกรนและความขรุขระของพื้นผิวที่ได้จากการวิเคราะห์ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	65
4.4 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผงผลึก CdS และ ZnTe มีความบริสุทธิ์สูง 99.999%	67
4.5 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	70
4.6 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่คำนวณได้จากผลการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	77
4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าพลังงานกระตุ้น กับ ค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอม(x) เมื่อทำการวัดค่าความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-150 องศาเซลเซียสของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ เมื่อ $x = 1.0$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	82
4.8 ค่าความหนาแน่นของกักพาหะที่คำนวณได้จากการวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงดอร์ันของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$)ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	88
4.9 ค่าช่วงชีวิตของพาหะที่คำนวณได้จากการวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงดอร์ันของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$)ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	89
4.10 แสดงค่าคงที่ผลึกและขนาดของเกรนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ และแอนนีสที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส	91

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.11 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศและแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียสตามลำดับ 95	
4.12 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	98
4.13 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่คำนวณได้จากผลการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	105
4.14 แสดงค่าสภาพการตอบสนองต่อแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศและแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียส	107
4.15 ค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะที่คำนวณได้จากการวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงที่ร้อนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบลงบน แผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศและแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียสตามลำดับ	108
4.16 ค่าช่วงชีวิตของพาหะที่คำนวณได้จากการวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงที่ร้อนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศและแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียสตามลำดับ	109
4.17 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิมิต์ย้อนกลับ ค่าפקเตอร์อุณหภูมิตี ค่าความสูงของกำแพงศักย์และค่าความต้านทานไฟฟ้านุกรม ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มิโอนิกอิมิตชันและวิธีของชวง เมื่อฉายแสงด้วยหลอดฮาโลเจน ELH และหลอดแสงจันทร์ใสตามลำดับ ของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{0.9}(\text{ZnTe})_{0.1}/\text{CuSbS}_2$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	119
4.18 แสดงค่าการตอบสนองต่อแสงในช่วงแรงดันไบแอสกลับ พิจารณาที่ความต่างศักย์ -3 โวลต์ เมื่อฉายแสงด้วยหลอดฮาโลเจน ELH และหลอดแสงจันทร์ใสตามลำดับ ของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{0.9}(\text{ZnTe})_{0.1}/\text{CuSbS}_2$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมี ด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	120
4.19 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการคำนวณของไดโอดของรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{0.9}(\text{ZnTe})_{0.1}/\text{CuSbS}_2$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	123

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 สภาพนำไฟฟ้าและสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารฉนวน สารกึ่งตัวนำและสารตัวนำ	7
2.2 พันธะสี่หน้าหรือพันธะเตตระฮีดรัล	8
2.3 โครงสร้างผลึกแบบคิวบิกหรือซิงค์เบลนด์ของสารกึ่งตัวนำ	9
2.4 โครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไฮท์ของสารกึ่งตัวนำ	9
2.5 แสดงโครงสร้างของผลึก $CuSbS_2$ เทียบกับ $CuInS_2$ และ Sb_2S_3	10
2.6 การบอกชื่อระนาบต่างๆของผลึก	11
2.7 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์	12
2.8 ตัวอย่างของสเปกตรัมที่ได้จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	13
2.9 ค่า $\beta_{2\theta}$ เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	14
2.10 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	15
2.11 ภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มบาง	15
2.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นโดย เส้นที่บจะแสดงขอบการดูดกลืนพื้นฐาน	17
2.13 ส่วนทางของแถบพลังงานซึ่งมีส่วนทางของแถบวาเลนซ์และส่วนทางของแถบนำ	18
2.14 ตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชั้นสารตัวอย่างเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้า ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์	19
2.15 ต่อขั้วเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์	19
2.16 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง	21
2.17 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว	22
2.18 การวัดค่าความต้านทานแผ่นโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น	22
2.19 แผนภาพแสดงปรากฏการณ์ฮอลล์บนแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิดพี	24
2.20 การวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์บนสารตัวอย่างที่เป็นแผ่นบาง ที่มีรูปทรงใดๆ	28
2.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า(I)	29
2.22 แสดงระดับพลังงานของกักพาหะชนิดจับอิเล็กตรอน (E_{ec}) และกักพาหะชนิดจับโฮล (E_{eh}) ที่ปรากฏในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ จุดทึบและจุดโปร่งจะแสดงแทน อิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ	30
2.23 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสขาขึ้น และ กระแสขาลง กับ ช่วงเวลาการ ตอบสนองต่อสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง	33

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ t ของค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงทั้งช่วง กระแสขาขึ้นและช่วงกระแสขาลง	34
2.25 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ t เพื่อใช้คำนวณหาค่าความหนาแน่น ของดัดักพาหะในช่วงกระแสขาลง	37
2.26 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ t เพื่อใช้คำนวณหาความหนาแน่นของ ดัดักพาหะในช่วงกระแสขาขึ้น	38
2.27 แสดงลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อวิวิธพันธ์ของสารกึ่งตัวนำที่เป็น แบบพี-เอ็น	40
2.28 แสดงไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธ์ของสารกึ่งตัวนำที่เป็นแบบพี-เอ็น ในกรณีที่เป็นแบบ ชั้นบันไดที่เป็นฟังก์ชันกับระยะทาง	41
2.29 แสดงโครงสร้างของไดโอดของสารกึ่งตัวนำที่มีรอยต่อแบบพี-เอ็น ขณะถูกไบอัสไปข้างหน้าด้วย แรงดัน V_a	44
2.30 แหล่งกำเนิดชนิดทั้งสแตน	46
2.31 แหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้ระเหยสารด้วยไฟฟ้าแบบต่างๆ	46
2.32 พิกัดความเข้มข้นการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบ อยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อน ในระบบสุญญากาศ	47
2.33 พิกัดความเข้มข้นการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบอยู่บน แผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบ สุญญากาศ	48
2.34 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสาร เคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	48
2.35 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบ อยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อน ในระบบสุญญากาศ	49
2.36 แสดง (a) การตอบสนองต่อแสง และ (b) ค่าความไวต่อแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสาร เคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	50
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมสิ่งประดิษฐ์ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ และ ฟิล์มบาง CuSbS_2 ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	56

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแอนนีกฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	57
3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า – แรงดันไฟฟ้า (I-V curve) ที่อุณหภูมิต่างๆ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ และฟิล์มบาง CuSbS_2 โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	58
4.1 แสดงพิกัดความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	59
4.2 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่โครงสร้าง a_H , c_H และ a_C กับค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	61
4.3 แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	62
4.4 แสดงสเปกตรัมที่ได้จากการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	63
4.5 แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	64
4.6 กราฟแสดงสเปกตรัมฟูเรียร์แทรนฟอร์มอินฟราเรด (FTIR) ในช่วงเลขคลื่น $400 - 4000 \text{ cm}^{-1}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	65
4.7 กราฟแสดงสเปกตรัมฟูเรียร์แทรนฟอร์มอินฟราเรด (FTIR) ในช่วงเลขคลื่น $400 - 1000 \text{ cm}^{-1}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	66
4.8 แสดงสเปกตรัมการส่งผ่านแสง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	66

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$ กับ hv ของฟิล์มบาง $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผงผลึก CdS และ ZnTe ที่มีความบริสุทธิ์สูง 99.999% เพื่อหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน	67
4.10 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงานกับเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	68
4.11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนทางของแถบพลังงานกับเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	68
4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเพื่อหาค่าความต้านทานจากกราฟของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	69
4.13 กราฟแสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	70
4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_{2d}) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ เมื่อ $x = 0.0$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	71
4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ เมื่อ $x = 0.0$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	71
4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_{2d}) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ เมื่อ $x = 0.2$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	72

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_{24}) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ เมื่อ $x = 1.0$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	76
4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ เมื่อ $x = 1.0$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	76
4.26 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอน และ ค่าสภาพคล่องของพาหะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	78
4.27 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1000/T$ กับค่า $\ln(R_0/R)$ เมื่อทำการวัดค่าความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-150 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ เมื่อ $x = 0.0$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	79
4.28 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1000/T$ กับค่า $\ln(R_0/R)$ เมื่อทำการวัดค่าความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-150 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ เมื่อ $x = 0.2$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	79
4.29 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1000/T$ กับค่า $\ln(R_0/R)$ เมื่อทำการวัดค่าความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-150 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ เมื่อ $x = 0.6$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	80
4.30 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1000/T$ กับค่า $\ln(R_0/R)$ เมื่อทำการวัดค่าความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-150 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ เมื่อ $x = 0.8$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	80

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.31 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1000/T$ กับค่า $\ln(R_0/R)$ เมื่อทำการวัดค่าความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-150 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ เมื่อ $x = 1.0$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	81
4.32 แสดงตัวอย่างการคำนวณกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1000/T$ กับค่า $\ln(R_0/R)$	81
4.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโฟโต (I_p) กับเวลา (t) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	84
4.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโฟโตในสเกลลอการิทึม ($\ln I_p$) กับเวลา (t) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	85
4.35 การพิตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสออร์มัลไลซ์ขาขึ้นกับเวลา ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	86
4.36 การพิตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสออร์มัลไลซ์ขาลงกับเวลา ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	87
4.37 แสดงฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CuSbS_2$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	90
4.38 แสดงพิกความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CuSbS_2$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	91
4.39 แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ใช้กำลังขยาย 100,000 เท่า ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CuSbS_2$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	92
4.40 แสดงสเปกตรัมที่ได้จากการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CuSbS_2$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	93

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.41 แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	93
4.42 กราฟแสดงสเปกตรัมฟูเรียร์แทรนฟอร์มอินฟราเรด (FTIR) ในช่วงเลขคลื่น $400 - 4000 \text{ cm}^{-1}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	94
4.43 กราฟแสดงสเปกตรัมฟูเรียร์แทรนฟอร์มอินฟราเรด (FTIR) ในช่วงเลขคลื่น $400 - 1000 \text{ cm}^{-1}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	94
4.44 แสดงสเปกตรัมการส่งผ่านแสง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	95
4.45 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เพื่อหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน	96
4.46 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าช่องว่างแถบพลังงาน กับ ส่วนหางแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	97
4.47 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเพื่อหาค่าความต้านทานจากกราฟของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	97
4.48 กราฟแสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	98
4.49 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_{24}) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	99

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.56 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของ ปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์ม บางของสารกึ่งตัวนำ $CuSbS_2$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดย วิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศและแอนนีลที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส	102
4.57 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_{24}) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของ ปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์ม บางของสารกึ่งตัวนำ $CuSbS_2$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดย วิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศและแอนนีลที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส	103
4.58 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของ ปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์ม บางของสารกึ่งตัวนำ $CuSbS_2$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดย วิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศและแอนนีลที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส	103
4.59 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_{24}) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของ ปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์ม บางของสารกึ่งตัวนำ $CuSbS_2$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดย วิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศและแอนนีลที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส	104
4.60 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของ ปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์ม บางของสารกึ่งตัวนำ $CuSbS_2$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดย วิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศและแอนนีลที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส	104
4.61 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอน และ ค่าสภาพคล่องของพาหะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CuSbS_2$ ที่เคลือบลงบน แผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบ สุญญากาศ	106

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.62 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโฟโต (I_p) กับเวลา (t) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CuSbS_2$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศและแอนนีลที่อุณหภูมิ 100, 200, 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียส ตามลำดับ	106
4.63 แสดงภาพถ่ายรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{0.9}(ZnTe)_{0.1}/CuSbS_2$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกITO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	110
4.64 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า (I) กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า (V) ในช่วง 3 ถึง 2 โวลต์ เมื่อไม่ได้มีการฉายแสง และทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{0.9}(ZnTe)_{0.1}/CuSbS_2$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	111
4.65 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I$ กับ $\ln V$ เมื่อไม่ได้มีการฉายแสงและทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{0.9}(ZnTe)_{0.1}/CuSbS_2$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	111
4.66 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I$ กับ (V) เมื่อไม่ได้มีการฉายแสงและทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{0.9}(ZnTe)_{0.1}/CuSbS_2$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	112
4.67 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $dV/d \ln I$ กับ I เมื่อไม่ได้มีการฉายแสงและทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{0.9}(ZnTe)_{0.1}/CuSbS_2$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	112
4.68 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $H(I)$ กับ I เมื่อไม่ได้มีการฉายแสงและทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{0.9}(ZnTe)_{0.1}/CuSbS_2$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	113

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.69 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า (I) กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า (V) เมื่อฉายแสงด้วยหลอดฮาโลเจน ELH และหลอดแสงจันทร์สีตามลำดับ ของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{0.9}(\text{ZnTe})_{0.1}/\text{CuSbS}_2$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	116
4.70 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I$ กับ $\ln V$ เมื่อฉายแสงด้วยหลอดไฟ ELH และหลอดไฟ UV ตามลำดับ ของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{0.9}(\text{ZnTe})_{0.1}/\text{CuSbS}_2$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	117
4.71 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln I$ กับ V เมื่อฉายแสงด้วยหลอดไฟ ELH และหลอดไฟ UV ตามลำดับ ของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{0.9}(\text{ZnTe})_{0.1}/\text{CuSbS}_2$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	117
4.72 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $dV/d \ln I$ กับ ค่า I เมื่อฉายแสงด้วยหลอดไฟ ELH และหลอดไฟ UV ตามลำดับ ของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{0.9}(\text{ZnTe})_{0.1}/\text{CuSbS}_2$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	118
4.73 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $H(I)$ กับ ค่า I โดยวิธีของชวง เมื่อฉายแสงด้วยหลอดไฟ ELH และหลอดไฟ UV ตามลำดับ ของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{0.9}(\text{ZnTe})_{0.1}/\text{CuSbS}_2$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	119
4.74 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $F(V)$ กับ ค่า V โดยวิธีของนอร์ด เมื่อฉายแสงด้วยหลอดไฟ ELH และหลอดไฟ UV ตามลำดับ ของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{0.9}(\text{ZnTe})_{0.1}/\text{CuSbS}_2$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	119
4.75 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{0.9}(\text{ZnTe})_{0.1}/\text{CuSbS}_2$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ ที่ความถี่ 300 กิโลเฮิรตซ์	121

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.76 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C^2$ กับแรงดันไฟฟ้า ของรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{0.9}(ZnTe)_{0.1}/CuSbS_2$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ ที่ความถี่ 300 กิโลเฮิร์ตซ์	121
4.77 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{0.9}(ZnTe)_{0.1}/CuSbS_2$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ ในช่วงความถี่ 300 ถึง 900 กิโลเฮิร์ตซ์	123
4.78 แสดงแผนภาพลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{0.9}(ZnTe)_{0.1}/CuSbS_2$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	124

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พลังงานเป็นสิ่งสำคัญในการดำเนินชีวิตของมนุษย์เป็นอย่างมาก และได้มีการใช้พลังงานไปอย่างมากมาย จนทำให้พลังงานเหล่านั้นลดลง จึงทำให้เกิดวิกฤตการณ์น้ำมันที่มีราคาเพิ่มขึ้นสูงมากทั่วโลกและยังรวมไปถึงอุตสาหกรรมปิโตรเลียม แก๊สธรรมชาติ ถ่านหิน และอื่นๆอีกมากมาย ในหลายประเทศได้มีการหามาตรการต่างๆเพื่อประหยัดพลังงาน รวมทั้งแสวงหาแหล่งพลังงานใหม่ๆเพื่อมาทดแทนซึ่งต้องเป็นพลังงานที่สะอาดและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม เช่น พลังงานน้ำ พลังงานลม พลังงานความร้อนใต้พิภพ และพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์ชนิดหนึ่งที่สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง ดังนั้นเซลล์แสงอาทิตย์จึงถูกสนใจที่จะนำมาพัฒนาและถูกนำมาผลิตเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่มีต้นทุนต่ำและใช้ได้ในระยะเวลาที่ยาวนาน แหล่งพลังงานทดแทนชนิดนี้เป็นที่ยอมรับกันทั่วไปว่าสะอาดและไม่สร้างมลภาวะเป็นพิษใดๆ ขณะใช้งาน ไม่ทำลายสิ่งแวดล้อมเพียงติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ไว้กลางแสงแดดก็สามารถใช้งานได้ทันที เซลล์แสงอาทิตย์สามารถทำงานได้โดยไม่ต้องสร้างเสียงรบกวนหรือการเคลื่อนไหวยังเป็นการประหยัดน้ำมันและสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้อย่างไม่สิ้นสุด มีอายุใช้งานยาวนานกว่า 20 ปี

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรง ซึ่งอาศัยปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก เมื่อมีการฉายแสงตกลงบนเซลล์แสงอาทิตย์ ทำให้อิออนิกโพตอนถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำจนมีพลังงานมากพอที่จะหลุดออกจากแรงดึงดูดระหว่างอะตอมและเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ดังนั้นเมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ครบวงจรจะทำให้เกิดไฟฟ้ากระแสตรงขึ้น เมื่อพิจารณาถึงเงื่อนไขการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จึงพบว่าเซลล์แสงอาทิตย์จะมีประสิทธิภาพสูงในช่วงเวลากลางวัน โดยในการวิจัยและการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์เริ่มจากการศึกษาคุณสมบัติของรอยต่อพี-เอ็นของสารกึ่งตัวนำซิลิกอน หลังจากนั้นจึงแผ่ขยายไปในกลุ่ม II – VI, III – V, I – III – VI₂ และอื่นๆอีก ยกตัวอย่างเช่น ZnTe, ZnSe, CdS, CdTe เป็นต้น ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์ส่วนใหญ่เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อวีวีพี (heterojunction solar cell) ของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งได้รับการพัฒนาขึ้นในช่วงใกล้เคียงกับเซลล์แสงอาทิตย์ของสารกึ่งตัวนำ นอกจากนี้ยังมีสารกึ่งตัวนำ Fe₂S, SnS, ZnSnP₂, Cu₂O, Cu₂S, Cu₂ZnSn(SSe)₄, และ CuTaN₂ เป็นต้น เนื่องจากสารประกอบส่วนใหญ่มีเสถียรภาพดีแม้จะอยู่ในสภาวะอุณหภูมิสูง ไม่เป็นสารพิษและมีราคาถูก โดยจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่ามีสมบัติทางแสงที่เป็นที่น่าสนใจทั้งค่าช่องว่างแถบพลังงานในช่วงที่ค่อนข้างกว้าง อยู่ในย่านที่ตามองเห็นและยังมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนที่สูงกว่า จึงมีการนำมาศึกษากันอย่างแพร่หลาย

โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางจะเป็นรอยต่อได้ทั้งแบบรอยต่อเอกพันธ์ (homojunction) และรอยต่อวีวีพี (heterojunction) ของสารกึ่งตัวนำชนิดพีและชนิดเอ็น แต่ที่

น่าสนใจคือเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ (heterojunction) ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำในหมู่ II-VI เช่น CdS ซึ่งเป็นที่นิยมในการศึกษา โดยมักจะศึกษาร่วมกันกับ CdTe ที่จะนำไปประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นการศึกษาของรอยต่อวิวิธพันธ์ n-CdS/p-CdTe ซึ่ง CdS ที่มีชนิดการนำไฟฟ้าแบบเอ็น ที่มีช่องว่างแถบพลังงานแบบตรง (direct band gap) จะทำหน้าที่เป็นชั้นบัฟเฟอร์ (buffer layer) ซึ่งปัจจุบันได้มีการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ในขณะที่ CdTe จะทำหน้าที่เป็นชั้นดูดกลืนแสง (absorber layer) จากนั้นได้มีการพัฒนาและปรับปรุงคุณภาพด้วยการเจือสารต่างๆเพื่อให้เกิดเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพที่สูงกว่าเดิม โดยสารที่นำมาเจือเข้ากับ CdS ที่เลือกมาคือ ZnTe ที่มีช่องว่างแถบพลังงานเป็นแบบตรงและมีค่าประมาณ 2.26 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งจะทำให้ได้เซลล์แสงอาทิตย์ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงตามมองเห็นได้ดีขึ้น เซลล์แสงอาทิตย์นี้จะมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ สามารถเตรียมได้หลายวิธี เช่น วิธีการระเหยสารในระบบสุญญากาศ วิธีสปัตเตอร์ วิธีสเปรย์ไพโรไลซิส และวิธีอบสารละลายเคมี เป็นต้น นอกเหนือจากการศึกษารอยต่อวิวิธพันธ์ของ n-CdS/p-CdTe ที่มีส่วนประกอบเป็นธาตุในหมู่ II-VI อย่าง แคดเมียม (Cd), สังกะสี (Zn), ซัลเฟอร์ (S), ซีเนียม (Se) ที่ได้รับความนิยมแล้ว ยังมีการศึกษาของธาตุอื่นๆอีก เช่น ทองแดง (Cu), ดีบุก (Sn), พลวง (Sb), ออกซิเจน (O) ซึ่งสารประกอบที่มักจะนำมาประดิษฐ์และศึกษาเช่น CuO , Cu_2O , ZnS , SnS , CuS , Cu_2S และ Sb_2S_3 เป็นต้น โดยสารประกอบที่กล่าวมานั้นต่างก็มีคุณสมบัติที่ใกล้เคียงกันกัน แต่ที่น่าสนใจคือจำพวก Cu_xS เพราะมีสมบัติโปร่งแสงในย่านตามมองเห็น มีช่องว่างแถบพลังงานต่ำกว่า 3 อิเล็กตรอนโวลต์ มีสมบัติทางไฟฟ้าที่เป็นได้ทั้งกึ่งโลหะ สารกึ่งตัวนำ มีช่องว่างแถบพลังงานได้แบบตรง (direct band gap) และแบบเฉียง (indirect band gap) และสารประกอบอีกชนิดที่จะทำการศึกษาคือ Sb_2S_3 ซึ่งค่าช่องว่างแถบพลังงานที่ค่อนข้างกว้างประมาณ 1.8 - 2.5 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งเหมาะที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในการประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งหากทำการเจือ Cu_2S เข้ากับ Sb_2S_3 เพื่อให้ได้เป็นสารประกอบ CuSbS_2 โดยที่สารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 เป็นสารประกอบในกลุ่ม I-III-VI₂ ที่มีช่องว่างแถบพลังงานแบบตรง มีค่าช่องว่างแถบพลังงานค่อนข้างกว้าง คือ ประมาณ 1.38-1.89 อิเล็กตรอนโวลต์ และมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่มากกว่า 10^4 ต่อตารางเซนติเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุชนิดซาลโคไพไรท์ (chalcopyrite structure) หรือเคสเตอร์ไท์ (kesterite structure) ซึ่งเหมาะที่จะนำไปประดิษฐ์เป็นชั้นดูดกลืนแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ได้ และนำไปประยุกต์ใช้ในชั้นดูดกลืนแสง (absorber layer) ยกตัวอย่างเช่น $\text{Al/ZnO/CdS/CuSbS}_2/\text{Mo/Sodalime glass}$ และจากตัวอย่างวิจัยของ Su. et al. (2018) และงานวิจัยของ Zhang. et al. (2018) ดังนั้นถ้าเลือกใช้สารประกอบ CuSbS_2 แทน จะทำให้ได้เซลล์แสงอาทิตย์ที่สามารถดูดกลืนแสงได้ดีขึ้นเซลล์แสงอาทิตย์นี้จะมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 สามารถเตรียมได้หลายวิธี เช่น วิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ วิธีสปัตเตอร์ วิธีสเปรย์ไพโรไลซิส และวิธีอบสารละลายเคมี เป็นต้น

ดังนั้นถ้าเลือกใช้สารประกอบ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ แทน CdS จะทำให้ได้เซลล์แสงอาทิตย์ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงตามมองเห็นได้ดีขึ้นเซลล์แสงอาทิตย์นี้จะมีประสิทธิภาพสูงขึ้น และเมื่อนำมาประยุกต์ใช้เข้าร่วมกับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ก็คาดการณ์ว่าจะยังเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นไปได้อีก โดยในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางและศึกษาสมบัติทางแสงและสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ และฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่ง

ฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 จะถูกนำไปแอนนีสในบรรยากาศไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 100, 200, 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียส ตามลำดับ หลังจากนั้นจะทำการประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธ์ของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x/\text{CuSbS}_2$ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ และทำการศึกษสมบัติทางไฟฟ้า รวมทั้งตรวจสอบปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิกของรอยต่อวิวิธพันธ์ที่ประดิษฐ์ได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1) เพื่อทำการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เพื่อให้มีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นชนิดเอ็น โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ CdS และ ZnTe
- 1.2.2) เพื่อทำการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์เพื่อให้มีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นแบบพี โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ Cu_2S และ Sb_2S_3
- 1.2.3) เพื่อทำการตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ และ CuSbS_2 โดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) โครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
- 1.2.4) ศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ และ CuSbS_2 โดยการวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงเพื่อหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน ด้วยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis Spectrophotometer)
- 1.2.5) ศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า โดยการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า และปรากฏการณ์ฮอลล์โดยวิธีแวนเดอร์เพาว์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ และฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2
- 1.2.6) เพื่อประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธ์ของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ และ CuSbS_2 โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ
- 1.2.7) เพื่อศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธ์ของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ และ CuSbS_2 โดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสไฟฟ้า - แรงดันไฟฟ้า ภายใต้การฉายแสงจากหลอดฮาโลเจน ELH และหลอดแสงจันทร์ใส เพื่อคำนวณความไวแสงของโฟโตไดโอด และศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสสลับโดยการวัดแอดมิตแตนซ์สเปกโตรสโกปีที่อุณหภูมิห้อง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1) ทำการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ CdS และ ZnTe ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์
- 1.3.2) ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ Cu_2S และ Sb_2S_3 ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ และนำไปแอนนیلที่อุณหภูมิ 100, 200, 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียส ตามลำดับ
- 1.3.3) ทำการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์พื้นฐานของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ และ CuSbS_2 โดยศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำด้วยวิธีเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
- 1.3.4) ศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ และ CuSbS_2 ด้วยการวัดสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง รวมทั้งสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง
- 1.3.5) ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ และ CuSbS_2 โดยการวัดความต้านทานไฟฟ้า และปรากฏการณ์ฮอลล์โดยวิธีแวนเดอร์เพาว์
- 1.3.6) ทำการประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธ์ของการกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ และ CuSbS_2 โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ
- 1.3.7) ทำการศึกษสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธ์ของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ และ CuSbS_2 โดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสไฟฟ้า - แรงดันไฟฟ้า ภายใต้การฉายแสงจากหลอดฮาโลเจน ELH กับหลอดแสงจันทร์ใส และศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสสลับโดยการวัดแอดมิตแตนซ์สเปกโทรสโกปีที่อุณหภูมิห้อง

1.4 ขั้นตอนของการดำเนินงานวิจัย

- 1.4.1) ค้นคว้า ศึกษาทฤษฎีและรวบรวมข้อมูลผลวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประดิษฐ์ฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ และ CuSbS_2 และที่เกี่ยวข้องกับการประดิษฐ์ฟิล์มบางด้วยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศผ่านฐานข้อมูลอิเล็กทรอนิกส์ รวมทั้งจัดหาอุปกรณ์ที่จำเป็นจะต้องใช้ในงานวิจัย
- 1.4.2) ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ด้วยองค์ประกอบ ($x = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ และ 1.0 ตามลำดับ) ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ CdS และ ZnTe
- 1.4.3) ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ จากสารตั้ง

ต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ Cu_2S และ Sb_2S_3 ตามสัดส่วนที่ได้จัดเตรียมไว้ และนำไปแอนนัลที่อุณหภูมิ 100, 200, 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

- 1.4.4) ศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์พื้นฐานของฟิล์มบาง $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ และ CuSbS_2 โดยการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางด้วยวิธีเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ และโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม
- 1.4.5) ศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบาง $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ และ CuSbS_2 โดยการวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านและการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้ เพื่อหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน และฟูเรียร์ทรานฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโทรสโกปี
- 1.4.6) ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธ์ของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x/\text{CuSbS}_2$ โดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสไฟฟ้า - แรงดันไฟฟ้า เพื่อหาพารามิเตอร์ที่สำคัญของไดโอด เช่น ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ค่าความสูงของกำแพงศักย์ และค่าค่าความต้านอนุกรมของไดโอด เป็นต้น และเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ความจุไฟฟ้า - แรงดันไฟฟ้า เพื่อหาค่าศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมบริเวณรอยต่อ และค่าความหนาแน่นของพาหะอิสระ
- 1.4.7) ศึกษาสมบัติของโฟโตไดโอดโดยการวัดการตอบสนองต่อแสงจากหลอดฮาโลเจน ELH และหลอดแสงจันทร์ใสของรอยต่อวิวิธพันธ์ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x/\text{CuSbS}_2$
- 1.4.8) ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสสลับของรอยต่อวิวิธพันธ์ของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x/\text{CuSbS}_2$ โดยการวัดแอดมิตแตนซ์สเปกโทรสโกปี ที่ความถี่ในช่วง 20 - 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เพื่อศึกษาอิทธิพลของกับดักพาหะที่ปรากฏในบริเวณรอยต่อวิวิธพันธ์

1.5 ประโยชน์คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1) ทำให้ทราบถึงหลักการ เงื่อนไข และวิธีการของการเตรียมฟิล์มบางและขั้นตอนการประดิษฐ์ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ และ CuSbS_2 โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์
- 1.5.2) ทำให้ทราบถึงวิธีการศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูลของสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบาง เช่น การศึกษาโครงสร้างโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคและเชิงมหภาคของฟิล์มบาง สมบัติทางแสง (ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงและค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง) และสมบัติทางไฟฟ้า
- 1.5.3) ทำให้ทราบถึงอิทธิพลของการเจือ ZnTe ที่มีต่อสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบาง CdS
- 1.5.4) ทำให้ทราบถึงผลของอุณหภูมิของการแอนนัลของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่มีต่อโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคและเชิงมหภาคของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ และทำให้ทราบ

ถึงผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเมื่อทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 อีกด้วย

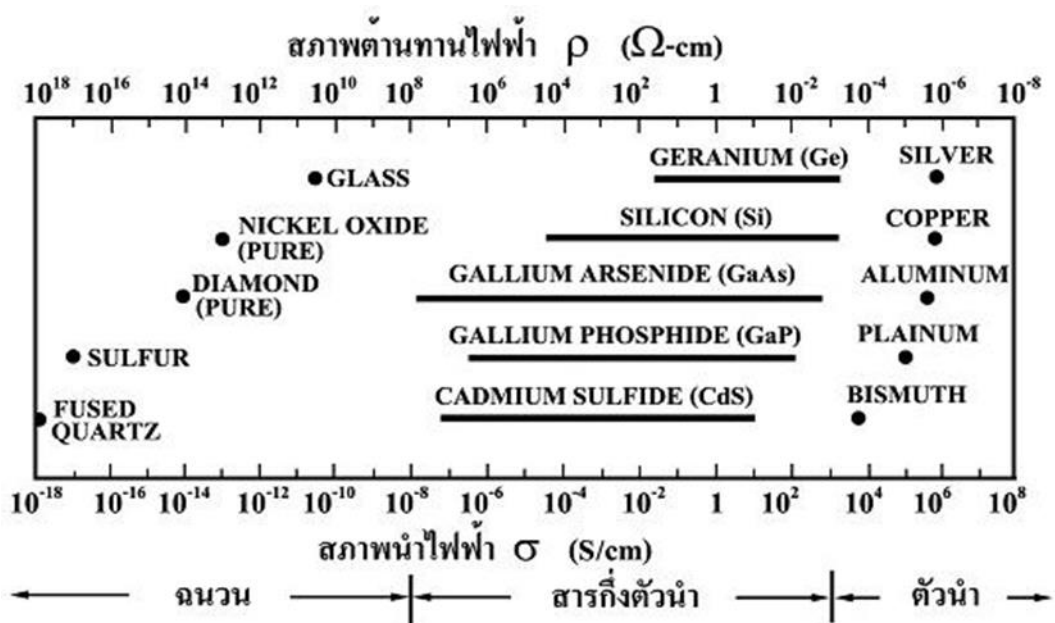
- 1.5.5) ทำให้ได้ศึกษาทฤษฎีและกฎเกณฑ์การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ และ CuSbS_2 ให้มีคุณภาพที่ดีและสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานด้านออปโตอิเล็กทรอนิกส์ได้
- 1.5.6) ทำให้ได้มีโอกาสศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าทั้งไฟฟ้ากระแสตรงและไฟฟ้ากระแสสลับของรอยต่อวีริทพันธ์ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x/\text{CuSbS}_2$

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในทางผลึกวิทยาสามารถแบ่งสสารและวัสดุที่อยู่ในสภาพของแข็งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ ตามการจัดเรียงตัวของอะตอม ได้แก่ วัสดุที่เป็นผลึก(Crystalline materials) และวัสดุที่เป็นอะมอร์ฟัส (amorphous materials) และสมบัติทางฟิสิกส์พื้นฐาน การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของผลึกหรือฟิล์มบางนั้นจะขึ้นกับลักษณะของโครงสร้างผลึก และความไม่สมบูรณ์ของผลึก ในบทนี้จึงจะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องต่างๆ เทคนิคการเตรียมฟิล์มบางและเทคนิคการวัดสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆ ต่อไป ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงวัสดุที่เป็นผลึกเท่านั้น

2.1 วัสดุของแข็งสารกึ่งตัวนำ (กามนิตย์, 2530; กามนิตย์, 2551; ฐิตินัย, 2530; ฐิตินัย, 2545)

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

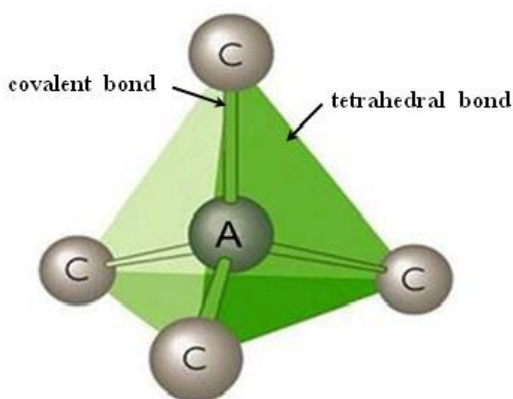


รูปที่ 2.1 สภาพนำไฟฟ้าและสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารฉนวน สารกึ่งตัวนำและสารตัวนำ

2.2 โครงสร้างผลึกของสารประกอบที่เกิดจากอะตอมของธาตุกลุ่ม II และกลุ่ม VI

(งามนิตย์, 2530; ฐิตินัย, 2546; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2552; ฐิตินัย, 2556; Kittel, 2005; Runyan, 1975; สุกฤษฎี, 2547; สมเกียรติ, 2542)

โครงผลึก คือ ตำแหน่งที่เป็นที่อยู่ของเบสิส (basis) ในระบบ 3 มิติ ส่วนเบสิส คืออะตอมหรือกลุ่มของอะตอมที่อยู่ภายในโครงผลึก ส่วนโครงสร้างผลึกของสารประกอบที่เกิดจากอะตอมของธาตุกลุ่ม II และกลุ่ม VI เกิดจากการสร้างพันธะเคมีระหว่างอะตอมของธาตุกลุ่ม II (อะตอม A) และกลุ่ม VI (อะตอม C) ซึ่งมีอิเล็กตรอนวาเลนซ์ต่ออะตอมเท่ากับ 4 ในโครงผลึกแต่ละอะตอม A หรืออะตอมของธาตุ C จะมีอะตอมของธาตุ C หรืออะตอมของธาตุ A ที่อยู่ใกล้เคียงที่สุดล้อมรอบอยู่ 4 อะตอม ซึ่งมีการสร้างพันธะเคมีระหว่างอะตอมเป็นแบบพันธะโควาเลนต์ (covalent bond) และมีพันธะเคมีของโมเลกุลเป็นแบบพันธะสี่หน้าหรือพันธะเตตระฮีดรัล (tetrahedral bond) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 จากลักษณะการจัดเรียงอะตอมดังกล่าวทำให้สามารถแบ่งโครงสร้างผลึกได้ 2 แบบ คือ โครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์ (zinc blende structure) และโครงสร้างแบบเวอร์ทซ์ไท์ (wurtzite structure)

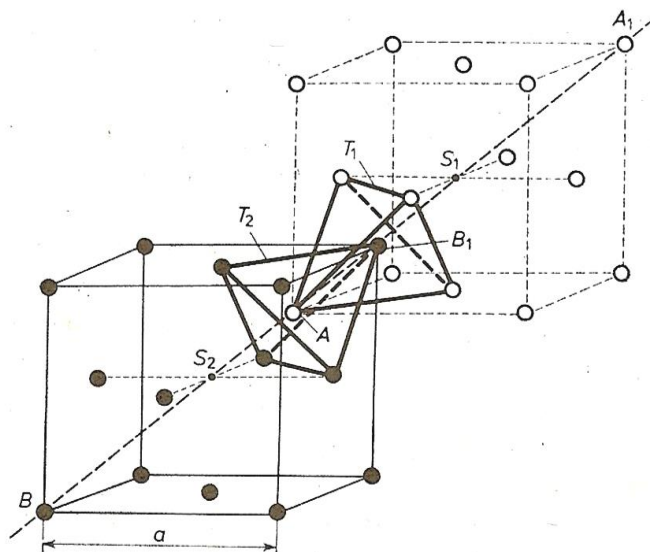


รูปที่ 2.2 พันธะสี่หน้าหรือพันธะเตตระฮีดรัล

2.2.1 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์

โครงสร้างผลึกแบบนี้มักพบในสารกึ่งตัวนำที่ประกอบด้วยอะตอมของธาตุสองชนิดหรือเรียกว่าเป็นสารประกอบกึ่งตัวนำเชิงคู่ (binary compound semiconductor) ได้แก่ สารประกอบของสารกึ่งตัวนำในกลุ่ม III-V และสารประกอบของสารกึ่งตัวนำในกลุ่ม II-VI โครงสร้างผลึกแบบนี้มีลักษณะคล้ายโครงสร้างผลึกแบบเพชร คือ อาจพิจารณาว่าเป็นโครงสร้างผลึกแบบเฟซเซนเตอร์คิวบิกสองโครงซ้อนกันอยู่แต่โครงหนึ่งเป็นธาตุหมู่ II (หรือ III) ส่วนอีกโครงผลึกเป็นธาตุหมู่ VI (หรือ V) สำหรับสารประกอบของสารกึ่งตัวนำเชิงคู่ II-VI (หรือ III-V) ในหนึ่งหน่วยเซลล์ประกอบด้วยอะตอมสองชนิดแต่ละชนิดมีสี่อะตอม เช่นในสารกึ่งตัวนำ ZnTe อะตอมของธาตุ Zn จะอยู่ที่ตำแหน่ง $(0,0,0)$, $(0,1/2,1/2)$, $(1/2,0,1/2)$ และ $(1/2,1/2,0)$ ส่วนตำแหน่งของอะตอมของธาตุ Te จะอยู่ที่ $(1/4,1/4,1/4)$, $(1/4,3/4,3/4)$, $(3/4,1/4,3/4)$ และ $(3/4,3/4,1/4)$ สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้าง

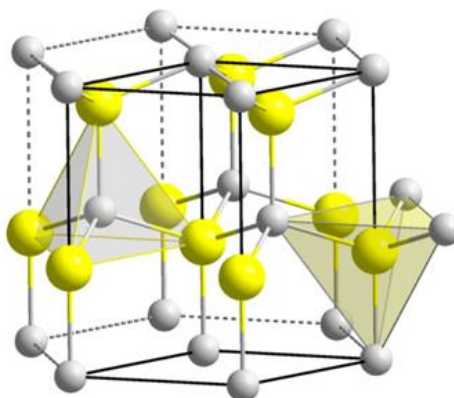
ผลึกแบบนี้ เป็นสารประกอบกึ่งตัวนำที่มีความสำคัญเหมาะสำหรับนำมาประยุกต์เพื่อประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เชิงแสง



รูปที่ 2.3 โครงสร้างผลึกแบบคิวบิกหรือซิงค์เบลนด์ของสารกึ่งตัวนำ

2.2.2 โครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซท์

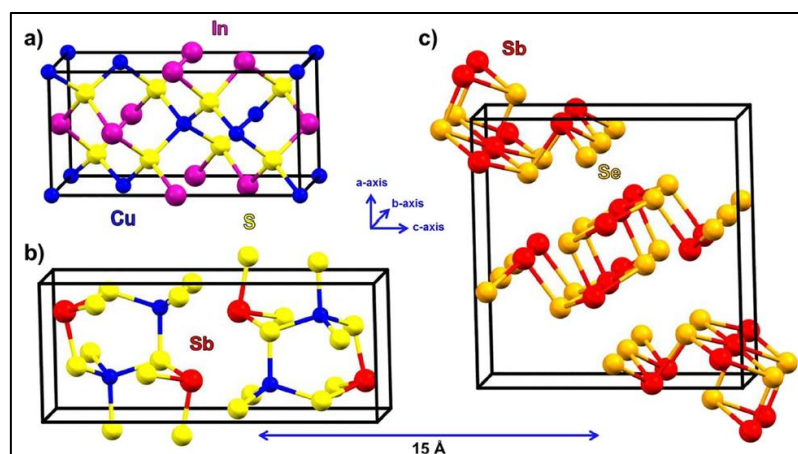
โครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซท์จัดอยู่ในระบบโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล ซึ่งเกิดจากการนำโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลที่มีอะตอมของธาตุต่างๆ สองชนิดวางซ้อนเหลื่อมกันเป็นระยะ $5/8$ ตามแนวแกน c (c - axis) หนึ่งหน่วยเซลล์จะมี 8 อะตอม มีอะตอมเพื่อนบ้านอยู่ 4 อะตอม มีพันธะเคมีของโมเลกุลเป็นแบบพันธะเตตระฮีดรัล และมีพันธะเคมีระหว่างอะตอมเป็นแบบพันธะโควาเลนต์ ดังนั้นจึงมีการจัดเรียงระนาบของอะตอมคล้ายกับโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ แต่จะมีความแตกต่างกัน คือ ในโครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซท์ จะมีการจัดเรียงระนาบของพันธะเตตระฮีดรัลเป็นแบบ ABAB... หรือ 0101... ส่วนในโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์จะมีการจัดเรียงระนาบของพันธะเตตระฮีดรัลแบบ ABCABC... หรือ 012012... เป็นต้น



รูปที่ 2.4 โครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซท์ของสารกึ่งตัวนำ

2.2.3 โครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำ

โดยส่วนใหญ่สารกึ่งตัวนำที่เป็นชั้นดุกคลื่นแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ เช่น Si, CdTe, CuInS_2 , $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ ซึ่งจะมีพันธะแบบสี่หน้า แต่ละอะตอมจะสร้างพันธะแบบ 4 แขนกับอะตอมต่างชนิดกันแบบ 3 มิติ ซึ่งคล้ายกับโครงสร้างผลึกแบบเพชร (diamond-like structure) อย่างไรก็ตาม CuSbS_2 มีโครงสร้างผลึกแบบซาลโคสติบไรต์ (chalcostibite) แม้ว่าจะมีสูตรเคมีคล้ายกับสารกึ่งตัวนำ CuInS_2 และมีรัศมีไอออนของ Sb^{3+} กับ In^{3+} มีค่าใกล้เคียงกัน แต่สารกึ่งตัวนำ CuInS_2 มีโครงสร้างผลึกแบบซาลโคไฟไรต์ ซึ่งแต่ละอะตอมของ Cu, In และ S จะมีพันธะ 4 แขนกับอะตอมชนิดอื่น แต่สำหรับสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 อะตอม Cu จะมีพันธะ 4 แขนกับอะตอม S สำหรับอะตอม Sb จะมีพันธะ 3 แขนกับ S ส่งผลให้โครงสร้างผลึกแบบซาลโคสติบไรต์ สารประกอบแบบเส้น (line compound) กล่าวคือองค์ประกอบของธาตุที่เบี่ยงเบนแตกต่างไปจากค่าสตอยคิโอเมตริแม้เพียงเล็กน้อยก็ทำให้เกิดเฟสแปลกปลอมได้ ซึ่งหมายความว่าอะตอมของ Cu กับ Sb จะสลับตำแหน่งกันไม่ได้ซึ่งแตกต่างจากกรณีของ CuInS_2 ที่อะตอม Cu กับ In สลับตำแหน่งกันได้เกินกว่า 20% ของค่าสตอยคิโอเมตริ โครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ประกอบขึ้นจากระนาบของชั้นของอะตอมที่เกิดจากโมทีฟของ SbS_2 สลับกับ CuS_3 ตามแนวแกน C โดยที่ระยะห่างระหว่างระนาบชั้นของอะตอมโมทีฟประมาณ 7.1 อังสตรอม จากการคำนวณเชิงทฤษฎีพบว่าชั้นอะตอมที่เกิดจากโมทีฟเหล่านี้ จะส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นสถานะทางพลังงาน (DOS) ของ CuSbS_2 แต่ละอะตอม Sb จะมีอิเล็กตรอน 1 ตัวที่มีออร์บิทัล 5s ที่ไม่ได้สร้างพันธะกับอะตอมใดทั้งชั้นของอะตอมที่เกิดจากโมทีฟ SbS_2 และ CuS_3 รวมทั้งอะตอม Sb ที่มีออร์บิทัล 5s ล้วนส่งผลให้สัมประสิทธิ์การสูญเสียทางแสงของ CuSbS_2 มีค่าสูงมากกว่าสารกึ่งตัวนำ Cu(In,Ga)Se_2 แต่อย่างไรก็ตามก็ยังส่งผลให้มวลยังผล (effective mass) ของ CuSbS_2 มีค่าสูง มวลยังผลที่มีค่าสูงเช่นนี้ จะไปลดความสามารถในการแยกอิเล็กตรอนและโฮลอิสระออกจากกันภายใต้การฉายแสง โครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำ CuInS_2 , CuSbS_2 และ Sb_2S_3 จะแสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างของผลึก CuSbS_2 เทียบกับ CuInS_2 และ Sb_2S_3

2.3 หลักเกณฑ์ในการระบุชื่อระนาบของผลึก (ฐิตินัย, 2531; งามนิศย์, 2530; Kittel, 2005; Runyan, 1975; ดุสิต, 2535; Schroder D.K.,1990; สิทธิชัย, 2551; ฐิตินัย, 2551)

เนื่องจากสมบัติทางฟิสิกส์ของผลึกขึ้นกับตำแหน่งของทิศทางและระนาบของผลึกดังนั้นจึงต้องระบุแน่นอนว่ากำลังศึกษาลักษณะส่วนใดของผลึกอยู่ การระบุลักษณะดังกล่าวจะบอกถึงตำแหน่งของทิศทางและระนาบของผลึกที่กำลังศึกษาอยู่นั้นมีเกณฑ์พื้นฐานดังนี้

2.3.1 การระบุตำแหน่ง

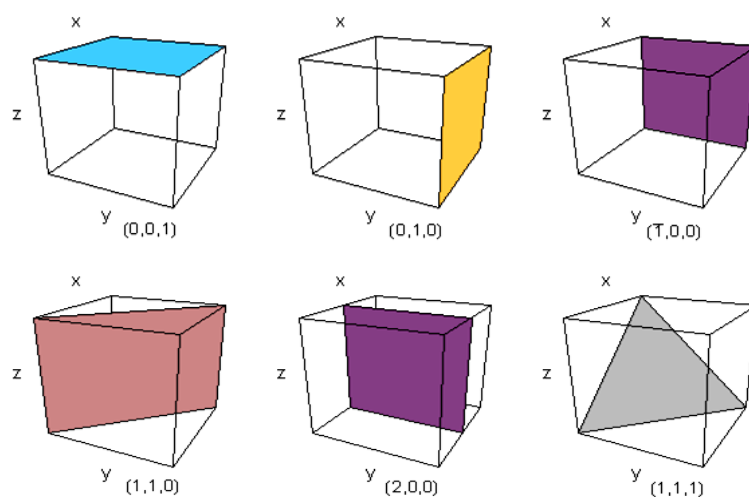
ในกรณีทั่วไปจะเขียนเป็น (x,y,z) โดยสังเกตเครื่องหมาย “,” ซึ่งคั่นอยู่ระหว่างค่าแต่ละค่า ตัวอย่างเช่น จุด $(1,2,3)$ หมายความว่า เป็นตำแหน่งอยู่ที่พิกัด $x = 1, y = 2, z = 3$

2.3.2 การระบุทิศทาง

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

2.3.3 การระบุชื่อระนาบ

การระบุชื่อระนาบ จะใช้อักษร (hkl) โดยให้สังเกตการใช้วงเล็บ และไม่มีเครื่องหมาย “,” คั่นอยู่ระหว่างค่า (hkl) เรียกว่า ดัชนี มิลเลอร์ (Miller indices) ระนาบของผลึกเป็นสิ่งสำคัญที่สุดในการศึกษาผลึก เพราะในแต่ละระนาบจะประกอบไปด้วยอะตอมไอออนหรือโมเลกุลเรียงตัวกันอยู่บนระนาบนั้น อาจกล่าวได้ว่าระนาบแต่ละระนาบจะมีความแตกต่างกันเช่นเดียวกับทิศทาง จุดที่ระนาบหนึ่งๆ ตัดแกนผลึกจะได้มาจากค่าส่วนกลับของดัชนี มิลเลอร์ เช่น ระนาบ (010) นั้นจะตัดแกน (x,y,z) ที่จุด $(1/0, 1/1, 1/0)$ หรือที่จุด $(\infty, 1, \infty)$ นั่นเอง (ระยะอนันต์หมายถึงระนาบนั้นขนานกับแกนนั้นและไปตัดแกนนั้นที่ระยะอนันต์) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งสรุปความสัมพันธ์ระหว่างระนาบต่างๆ กับระยะตัดแกนอ้างอิง



รูปที่ 2.6 การบอกชื่อระนาบต่างๆ ของผลึก

2.4 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุดภาคด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (ฐิตินัย, 2531; งามนิത്യ, 2530; Kittel, 2005; Runyan, 1975; ดุสิต, 2535; Schroder D.K., 1990; สิทธิชัย, 2551; ฐิตินัย, 2551; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, งามนิത്യ, ณัฐพร, 2550; ฐิติกร, 2550; เอกชัย, 2552)

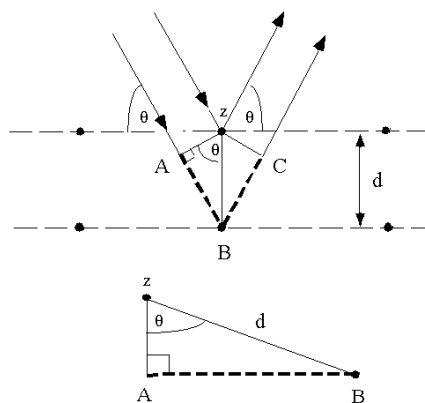
การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟร็กโทมิเตอร์ โดยใช้รังสีเอกซ์ความยาวคลื่นเดี่ยวตกกระทบตัวอย่างซึ่งอาจเป็นผลึกเดี่ยวหรือผลึกพหุพันธ์ ก็ได้สารตัวอย่างจะหมุนไปเป็นมุม θ ในขณะที่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณรังสีเอกซ์จะเคลื่อนที่ไปเป็นมุม 2θ เพื่อให้การเลี้ยวเบนสอดคล้องกับกฎของแบรกก์

ในปี พ.ศ. 2455 (ค.ศ. 1912) W.H. Bragg และ W.L. Bragg ได้เสนอแนวคิดที่เราสามารถมองได้ว่าผลึกจัดเรียงตัวเป็นชั้น (layer) หรือระนาบ (plane) ของอะตอมซึ่งสามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบโดยมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อนทั้งนี้ลำคลื่นที่สะท้อนออกไปจากระนาบต่างๆดังกล่าวจะมีความเข้มสูงและแทรกสอดแบบเสริมกัน ถ้าหากความแตกต่างระหว่างทางเดินของคลื่นที่สะท้อนจากระนาบที่อยู่ข้างเคียง (path difference) มีค่าเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นที่ตกกระทบดังสมการ

$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda \quad (2.1)$$

- เมื่อ λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์
 d_{hkl} คือ ระยะระหว่างระนาบที่ขนานกัน
 θ คือ มุมของรังสีสะท้อนจากระนาบแบรกก์ของรังสีเอกซ์ ซึ่งจะเท่ากับมุมของรังสีตกกระทบ
 n คือ ลำดับที่ของการเลี้ยวเบน มีค่าเป็นเลขจำนวนเต็ม คือ 1, 2, 3,...
 2θ คือ มุมเลี้ยวเบนที่เป็นมุมระหว่างรังสีตกกระทบทำกับรังสีสะท้อน

ระนาบต่าง ๆ ของผลึกที่ก่อให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ต้องสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ เรียกว่าระนาบแบรกก์ (Bragg plane) และมุมที่รังสีสะท้อนทำกับแนวที่ขนานกับรังสีตกกระทบ เรียกว่ามุมเลี้ยวเบน (diffraction angle) ซึ่งมีค่าเป็นสองเท่าของมุมตกกระทบ (2θ) ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์

2.4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

ข้อมูลที่ได้จากกราฟการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ดังในรูปที่ 2.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์และมุมเลี้ยวเบน เรียกว่า รูปแบบการเลี้ยวเบน (diffraction pattern) ซึ่งสำหรับแต่ละธาตุหรือสารประกอบต่างชนิดกันก็จะมีรูปแบบการเลี้ยวเบนแตกต่างกันซึ่งสามารถสังเกตได้จากพีค (peak) ของการเลี้ยวเบน จากกราฟการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์สามารถทำการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกได้โดยการคำนวณหาค่าคงที่ของโครงสร้างผลึก ขนาดของเกรนและความเครียดในระดับจุลภาคได้

สมการสำหรับหาค่าคงที่ของโครงสร้างผลึก (lattice constant) สำหรับโครงสร้างผลึกแบบ ซิงค์เบลนด์สามารถหาได้จากสมการที่ (2.2)

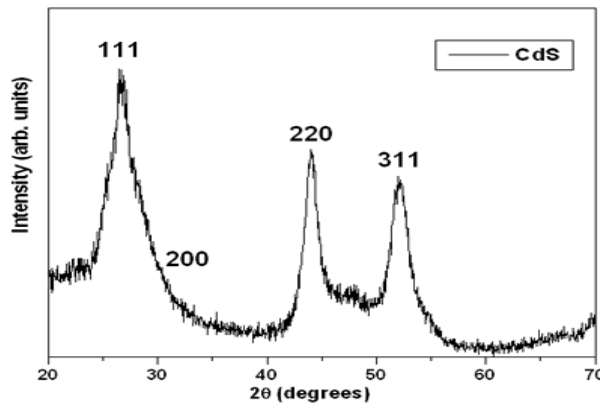
$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (2.2)$$

และสำหรับโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลหาได้จากสมการที่ (2.3)

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{4}{3} \left[\frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right] + \frac{l^2}{c^2} \quad (2.3)$$

เมื่อ a, c คือ ค่าคงที่ของโครงสร้างผลึก

h, k, l คือ ดัชนีมิลเลอร์ที่ใช้บอกชื่อระนาบของผลึก



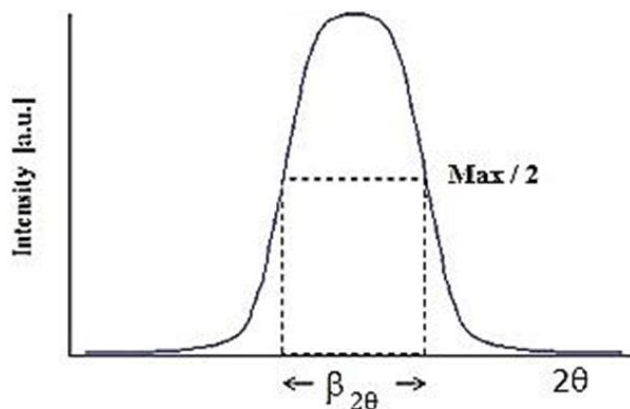
รูปที่ 2.8 ตัวอย่างของสเปกตรัมที่ได้จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

2.4.2 การหาขนาดของเกรน

การหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์สามารถหาโดยเลือกพีคที่มีความเข้มสูงสุดดังในรูปที่ 2.9 และใช้สมการของเชอร์เรอร์ (Scherrer) คำนวณหาขนาดของเกรนดังนี้

$$D = \frac{k\lambda}{\beta_{2\theta} \cos\theta} \quad (2.4)$$

- เมื่อ D คือ ขนาดของเกรน
 k คือ ค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับขนาดและรูปร่างของเกรน
 $\beta_{2\theta}$ คือ ระยะความกว้างของพีคที่ความเข้มที่ค่าเป็นครึ่งหนึ่งของความเข้มสูงสุด (full width at half-maximum of the diffraction peak)



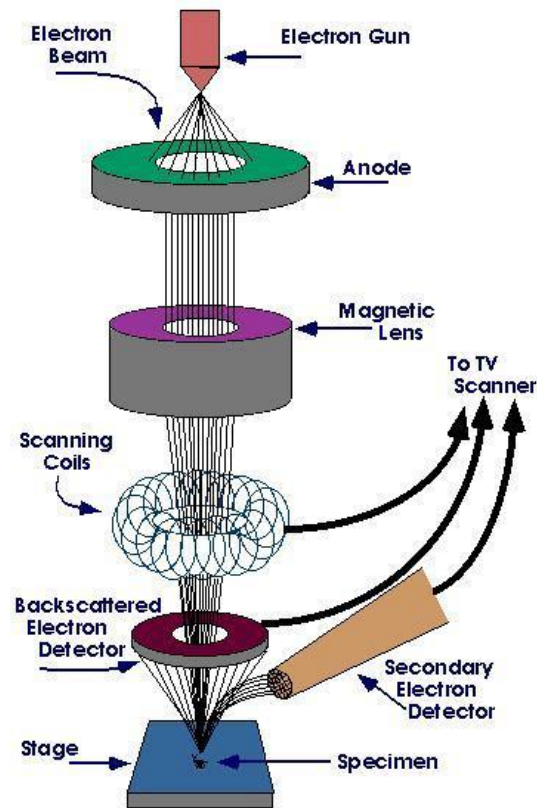
รูปที่ 2.9 ค่า $\beta_{2\theta}$ เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

2.5 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

(Sze S.M., 1981; Kittel, 2005; ฐิตินัย, 2531; งามนิตย, 2530; ดุสิต, 2535; Schroder D.K., 1990; ฐิตินัย, 2550; งามนิตย, 2553)

ในปี พ.ศ. 2478 แมก นอลล์ (Max Knoll) ได้คิดค้นหลักการและวิธีการในการประดิษฐ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดขึ้น และต่อมา แมนเฟรด วอน อาเดนเน (Manfred Von Ardenne) ได้ประดิษฐ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเครื่องแรกสำเร็จในปี พ.ศ.2481 โดยเครื่องมือที่ประดิษฐ์ได้นั้นยังมีกำลังขยายไม่สูงมากนัก ต่อมาในปี พ.ศ. 2498 ชาร์ลส์ วิลเลียม แอ็ทลีย์ (Charles William Oatley) และทีมงานจากเคมบริดจ์ ได้สร้างกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีความละเอียดสูงถึง 250 อังสตรอม

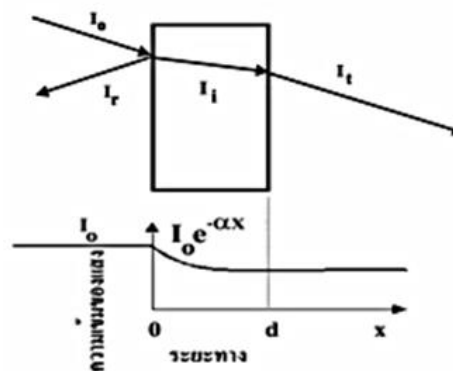
การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังแสดงในรูปที่ 2.10 เริ่มจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งมีหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนจากไส้หลอด กลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า พร้อมทั้งบังคับกลุ่มอิเล็กตรอนให้มีลักษณะเป็นลำ โดยลำอิเล็กตรอนจะกราดไปบนพื้นผิวของตัวอย่างโดยขดลวดสนามแม่เหล็กบนระนาบเอกซ์ - วาย เพื่อทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ และจะถูกตรวจจับโดยเซนเซอร์ เพื่อแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าเพื่อส่งต่อไปให้ระบบสร้างภาพต่อไป



รูปที่ 2.10 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

2.6 การส่งผ่านแสง (Kittel, 2005; งามนิตย์, 2530; ฐิตินัย, 2531; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2552; Runyan, 1975; สุกฤษฏ์, 2547; สมเกียรติ, 2542; ฐิตินัย, 2552; วีรัชย์, 2547; ดุสิต, 2535)

การศึกษาวีธีวัดสเปกตรัมการสะท้อนและการส่งผ่านแสงนี้จะกล่าวถึงสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงและองค์ประกอบของการวัดสเปกตรัมการส่งผ่านแสง เมื่อแสงเดินทางไปกระทบฟิล์มบางแสงบางส่วนจะสะท้อนกลับที่ผิวของฟิล์มบาง บางส่วนของแสงจะเดินทางเข้าไปในแผ่นฟิล์มบางและถูกดูดกลืนดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มบาง

เมื่อ I_0	คือ	ความเข้มแสงตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบาง
I_R	คือ	ความเข้มแสงสะท้อนจากฟิล์มบาง
I_r	คือ	ความเข้มแสงส่งผ่านออกมาจากฟิล์มบาง
I_I	คือ	ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบาง
R	คือ	สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง (reflectivity)
T	คือ	สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (transmittance)
α	คือ	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (absorption coefficient)
d	คือ	ระยะทางที่แสงเดินทางในแผ่นฟิล์มบาง

สัมประสิทธิ์การสะท้อนของแสงมีค่าเท่ากับ

$$R = \frac{I_r}{I_0} \quad (2.5)$$

หรือ
$$I_x = RI_0 \quad (2.6)$$

เพราะฉะนั้น ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางมีค่า

$$I_i = I_0 - I_r = I_0 - RI_0 = (1 - R) \quad (2.7)$$

เมื่อแสงนี้เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางจะถูกดูดกลืนทำให้ความเข้มแสงภายในแผ่นฟิล์มบางลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลตามระยะทาง ดังนั้นความเข้มแสงที่ส่งผ่านฟิล์มบางมีค่าดังสมการ

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

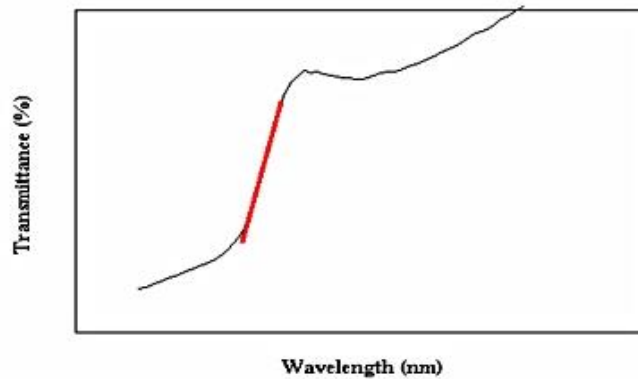
ถ้าไม่มีการสะท้อนแสงที่ผิวด้านหลังสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของแสงจะมีค่าเท่ากับ

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

2.6.1 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง

การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำเกิดจากการที่อิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากแสงที่มีพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าแถบช่องว่างพลังงาน แล้วย้ายสถานะพลังงานจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปสู่แถบนำ สเปกตรัมการดูดกลืนแสงบริเวณที่พลังงานโฟตอนมีค่าน้อยจะมีลักษณะเป็นขอบ แสดงถึงการลดลงของการดูดกลืนแสงอย่างกะทันหัน ขอบลักษณะนี้เรียกว่าขอบการดูดกลืนแสงหรือขอบการดูดกลืนพื้นฐาน (absorption edge or fundamental edge) แสดงได้ดังรูปที่ 2.12 พลังงานโฟตอนที่ขอบการดูดกลืนแสงมีค่าเท่ากับผลต่างของค่าพลังงานที่วัดจากจุดต่ำสุดของแถบความนำและ

จุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์จุดที่เส้นตรงตัดกับแกนในแนวนอนจะให้ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g)
วิธีการนี้เป็นการกำหนดค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่นิยมมากที่สุด



รูปที่ 2.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นโดยเส้นที่สีแดงแสดงขอบการดูดกลืนพื้นฐาน

การหาค่าของช่องว่างแถบพลังงานสามารถพิจารณาได้จากสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (α) ของสารกึ่งตัวนำจะสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (T) ได้จากรูปที่ 2.11 แสดงภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบจากด้านซ้ายของฟิล์มบาง (I_0) ความเข้มแสงภายในฟิล์มบางจะลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียล และมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงโดยทั่วไป (R) มีค่าน้อยมากจะได้

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

ดังนั้น

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

ที่กล่าวมาเป็นการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงจากสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง โดยไม่คิดถึงการสะท้อนของแสงสำหรับกรณีการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง เนื่องจากการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับค่าช่องว่างแถบพลังงาน ซึ่งมีลักษณะเป็นพาราโบลาช่องว่างแถบพลังงานของแผ่นฟิล์มบางประมาณได้ โดยการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ซึ่งจะถูดูดกลืนเมื่อแสงที่ตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบางมีค่าพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าของแถบพลังงานต้องห้ามที่ขอบของการดูดกลืนค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนจะมีค่าเป็น

$$(\alpha h\nu)^2 = A(h\nu - E_g) \quad (2.12)$$

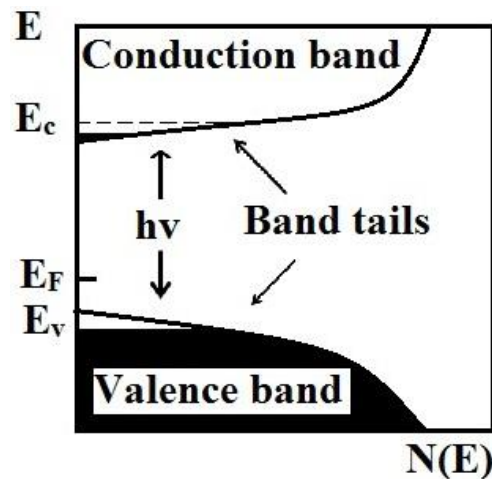
เมื่อ A คือ ค่าคงที่ และสมการที่ (2.12) ใช้กับสารที่มีสถานะพลังงานแบบตรง

$$(\alpha h\nu)^{1/2} = B(h\nu - E_g) \quad (2.13)$$

เมื่อ B คือ ค่าคงที่ และสมการที่ (2.13) ใช้กับสารที่มีสถานะพลังงานแบบเฉียง

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

วัสดุประเภทฟิล์มบางมักมีข้อบกพร่องของผลึกจำนวนมากระดับพลังงานของข้อบกพร่องของผลึกเหล่านี้จะมีอันตรกิริยาต่อกันส่งผลให้ระดับพลังงานเหล่านี้แผ่ขยายออกโดยจะไม่เป็นระดับพลังงานเฉพาะค่า (discrete level) อีกต่อไปบางครั้งก็แผ่ออกไปจรดขอบบนสุดของแถบวาเลนซ์หรือขอบล่างสุดของแถบนำซึ่งเหมือนกับว่าแถบวาเลนซ์หรือแถบนำมีความหนาแน่นของสถานะทางพลังงาน (energy density of state) ยื่นเข้าไปในช่องว่างแถบพลังงานซึ่งนิยมเรียกส่วนที่ยื่นเข้าไปในแถบช่องว่างแถบพลังงานนี้ว่าส่วนหางของแถบพลังงานหรือส่วนหางของแถบพลังงานของเออร์บัค (band tail หรือ Urbach's tail) ดังแสดงดังรูป 2.13



รูปที่ 2.13 ส่วนหางของแถบพลังงานซึ่งมีส่วนหางของแถบวาเลนซ์และส่วนหางของแถบนำ

ในเชิงการทดลองส่วนหางของแถบพลังงานสามารถตรวจสอบได้จากการวัดขอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซึ่งเออร์บัค (Urbach) ได้แสดงให้เห็นว่าขอบการดูดกลืนของผลึกจะเพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โพเนนเชียลดังความสัมพันธ์

$$\alpha = \alpha_0 \exp\left[\frac{\sigma(E - E_0)}{k_B T}\right] \quad (2.14)$$

เมื่อ α_0 และ E_0 คือ พารามิเตอร์ของผลึกแต่ละชนิด

k_B คือ ค่าของที่ของโบลตซ์มันน์

T คือ อุณหภูมิ (เคลวิน)

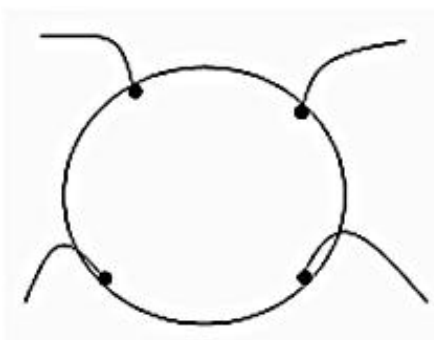
σ คือ ความชัน (steepness) ของขอบการดูดกลืนแสง

2.7 สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ (ฐิตินัย, 2549; Kittel, 2005; งามนิത്യ, 2530; ฐิตินัย, 2531; งามนิത്യ, 2545; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2552; Runyan, 1975; สุกฤษฎี, 2547; สมเกียรติ, 2542; ฐิตินัย, 2552; วีรชัย, 2547; คุสิต, 2535)

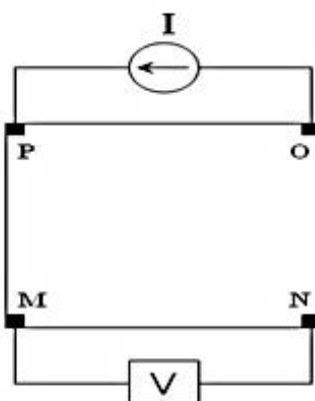
จากทฤษฎีโครงสร้างแถบพลังงานสารกึ่งตัวนำประกอบไปด้วยแถบวาเลนซ์ แถบพลังงานต้องห้ามและแถบนำ สารกึ่งตัวนำมีช่องว่างแถบพลังงานไม่เกิน 3 อิเล็กตรอนโวลต์ ที่อุณหภูมิห้อง อิเล็กตรอนและโฮลจากภายในผลึกจะถูกกระตุ้นด้วยพลังงานจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบนำ จากนั้นจะเกิดโฮลในแถบวาเลนซ์ ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิใดๆ ของสารกึ่งตัวนำจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของพาหะ และความคล่องตัวของพาหะอิสระเหล่านี้

2.7.1 การวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์

วิธีการวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ดังแสดงในรูปที่ 2.14 และ 2.15 เป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับสำหรับการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของชิ้นสารตัวอย่างที่เป็นฟิล์มบางที่มีความหนาสม่ำเสมอและมีรูปร่างไม่แน่นอน โดยขั้วสัมผัสจะอยู่บริเวณขอบของชิ้นสารตัวอย่างรอยต่อระหว่างขั้วสัมผัสที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะต้องไม่ขัดขวางการไหลของกระแส



รูปที่ 2.14 ตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชิ้นสารตัวอย่างเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์



รูปที่ 2.15 การต่อขั้วเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์

การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถทำได้โดยจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าขั้ว $P-O$ ทำการวัดความต่างศักย์ตกคร่อมขั้ว $M-N$ จะทำให้ได้ค่า R_1 จากสมการที่ (2.15)

$$R_1 = \frac{V_{MN}}{I_{PO}} \quad (2.15)$$

หลังจากนั้นทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าที่ขั้ว $P-M$ แล้วทำการวัดความต่างศักย์ตกคร่อมขั้ว $O-N$ จะได้ค่า R_2 จากสมการที่ (2.16)

$$R_2 = \frac{V_{ON}}{I_{PM}} \quad (2.16)$$

เมื่อได้ค่า R_1 และ R_2 มาแล้วสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานแผ่นได้ดังนี้

$$R_{sh} = f \left(\frac{\pi}{\ln 2} \right) \left(\frac{R_1 + R_2}{2} \right) \quad (2.17)$$

เมื่อ f คือ แฟกเตอร์ค่าแก้ของแวนเดอร์เพาว์ (van der Pauw correction factor)

$$\text{โดย} \quad f = 1 - \left(\frac{\ln 2}{2} \right) \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1 + R_2} \right)^2 \quad (2.18)$$

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถคำนวณได้ดังนี้

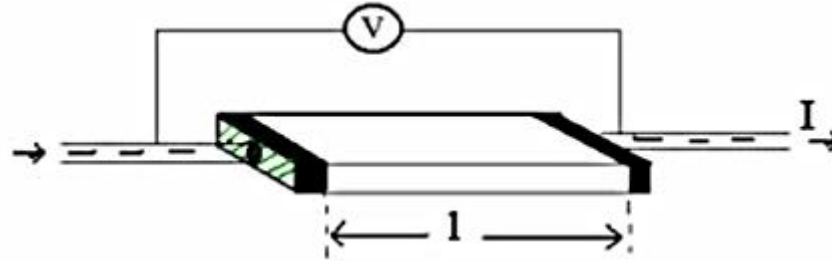
$$\rho = R_{sh} \cdot d \quad (2.19)$$

เมื่อ d คือ ความหนาของชิ้นสารตัวอย่าง

2.7.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง

โดยทั่วไปแล้วการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้ามักจะวัดความต้านทานก่อน ซึ่งเป็นวิธีวัดโดยตรงดังรูปที่ 2.16 นี้ หมายถึง วัดค่าความต้านทานรวมของสสารจากนั้นมาหาค่าความยาว และพื้นที่หน้าตัดของสสารนั้น การวัดวิธีนี้จะต้องทำให้สสารที่ต้องการวัดมีรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอน เพื่อที่จะวัดค่าพื้นที่หน้าตัดและความยาวให้ได้แน่นอน เช่น แท่งกลมทรงกระบอก แท่งสี่เหลี่ยม เป็นต้น จากนั้นจึงให้กระแสไฟฟ้าเข้าไปที่ปลายด้านหนึ่งและให้กระแสไหลออกผ่านสารตัวอย่างที่ปลายอีกด้านหนึ่ง ขณะเดียวกันก็วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จุดปลายทั้งสองนั้นพร้อมๆ กัน จากที่

ทราบค่ากระแสและศักย์ไฟฟ้านี้ สามารถนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าได้ดังต่อไปนี้ เมื่อ กำหนด R เป็นความต้านทานรวมจะมีความสัมพันธ์กับความต้านทานจำเพาะและพื้นที่หน้าตัด A เป็นบริเวณที่ปล่อยกระแสไหลเข้าไปและ l เป็นระยะทางระหว่างขั้วศักย์ไฟฟ้าที่วัด



รูปที่ 2.16 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง

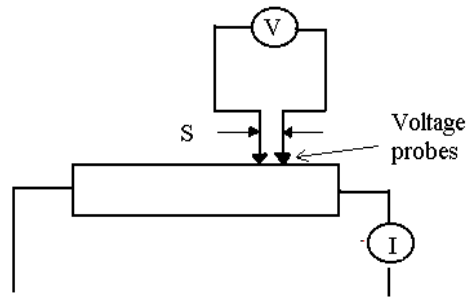
$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.20)$$

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

จะเห็นว่าวิธีนี้เป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็ว แต่ค่าที่ได้เป็นค่าโดยประมาณซึ่งต้องคำนึงถึงองค์ประกอบอื่นๆ ด้วย ซึ่งความถูกต้องในการวัดโดยวิธีนี้ขึ้นอยู่กับบริเวณผิวสัมผัสที่กระแสไหลเข้าและออกนั้นมีลักษณะเป็นโอห์มมิกที่ดีหรือไม่ ถ้าไม่มีคุณสมบัติโอห์มมิกที่ดีแสดงว่ามีความต้านทานที่ผิวสัมผัสทั้งสองขั้วไฟฟ้าเกิดขึ้นด้วย ค่าความต้านทาน R ที่วัดได้จึงเป็นค่าความต้านทานรวมทั้งหมด ดังนั้น ค่าความต้านทานจริงของสารกึ่งตัวนำจะน้อยกว่าค่าที่วัดได้แน่นอน ความถูกต้องอีกส่วนหนึ่งขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างความต้านทานของสารที่ต้องการวัดและความต้านทานภายใน (impedance) ของโวลต์มิเตอร์ที่ใช้วัด หากความต้านทานนี้ใกล้เคียงกันความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จะมีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง ซึ่งในทางปฏิบัติจะคำนึงถึงผิวสัมผัสโอห์มมิกมากกว่าความผิดพลาดของโวลต์มิเตอร์ เนื่องจากที่ผิวสัมผัสจะดีหรือไม่นั้น (เป็นโอห์มมิกหรือไม่) ตรวจสอบได้ยากมาก จึงแก้ไขด้วยการทำให้เกิดผิวสัมผัสบริเวณพื้นที่มากขึ้นเพื่อลดความต้านทานที่ผิวสัมผัสลง จากนั้นจึงวัดศักย์ไฟฟ้าด้วยโวลต์มิเตอร์ โดยเลือกโวลต์มิเตอร์ที่มีความต้านทานภายในสูงๆ เท่าที่จะหาได้เพื่อลดความผิดพลาด

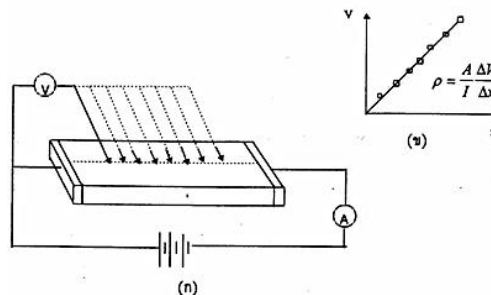
2.7.3 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว

การวัดด้วยวิธีนี้มีลักษณะใกล้เคียงกับวิธีวัดโดยตรงแตกต่างที่ลักษณะของขั้วไฟฟ้าของการวัดศักย์ไฟฟ้าจะวัดบนสารตัวอย่าง ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.17 วิธีการวัดชนิดนี้เป็นวิธีที่พัฒนาขึ้นจากแบบแรกเพื่อกำจัดศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อหัวท้ายของผิวสัมผัสให้น้อยลงและสามารถตรวจสอบความสกปรกบนพื้นผิวของชิ้นสารตัวอย่างได้ด้วย



รูปที่ 2.17 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว

ข้อจำกัดของการวัดด้วยวิธีนี้คือ จะต้องวัดบนสารตัวอย่างที่มีความหนาสม่ำเสมอและมีรูปทรงเรขาคณิตแน่นอนโดยพยายามให้กระแสผ่านเข้าไปในสารตัวอย่างมีค่าน้อยที่สุดเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความร้อนภายในสาร เพราะค่าความต่างศักย์ที่วัดได้อาจจะไม่ถูกต้อง อีกทั้งในการวัดทุกครั้งจะต้องใช้โวลต์มิเตอร์ที่มีค่าความต้านทานภายในสูงและจุดที่ต้องการวัดศักย์ไฟฟ้าควรจะต้องอยู่ห่างจากจุดที่ปล่อยกระแสเข้าและออกพอสมควร เพื่อป้องกันสารเจือเข้าไปทำการรวมตัวกันระหว่างจุดที่ทำการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า หากมีสารเจือเข้ามารวมตัวที่บริเวณที่วัดนี้จะมีผลทำให้เกิดการรวมกับพาหะข้างน้อย (minority carriers) บริเวณนั้น ทำให้การวัดค่าความต้านทานจำเพาะที่วัดได้สูงเกินความเป็นจริง นอกจากนี้ควรคำนึงถึงความสม่ำเสมอของเส้นสมศักย์ (equi-potential lines) โดยการวัดที่บริเวณจุดที่คิดว่าเป็นเส้นสมศักย์นั้นสม่ำเสมอ (ตรงกลางของสารตัวอย่าง) สัดส่วนระหว่างระยะขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้าต่อพื้นที่ตรงจุดที่ปล่อยกระแสเข้าและออกจะต้องมีค่ามากกว่าสามเท่า $l/A > 3$ เมื่อ l คือ ระยะห่างระหว่างขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้า และ A คือ พื้นที่บริเวณให้กระแสไฟฟ้า ข้อควรคำนึงถึงอีกประการก็คือ สารที่นำมาวัดมีโครงสร้างผลึกชนิดใด เป็นรูปลูกบาศก์หรือไม่ ถ้าไม่ใช่จะต้องทราบทิศทางของการวัดว่าอยู่ในทิศทางหรือระนาบใดของผลึก การวัดควรใช้วิธีเรียงที่ขั้วหนึ่งไว้และเลื่อนตำแหน่งอีกขั้วหนึ่งออกไปเป็นระยะๆ โดยมีมาตราส่วนบอกระยะและนำมาเขียนกราฟดังรูปที่ 2.18 (ก) และ (ข) ความชันที่ได้จะเป็นค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าข้อดีของการวัดแบบสองขั้วในหลายๆ ตำแหน่งนี้จะสามารถแยกสภาพต้านทานไฟฟ้าที่สภาพผิวระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำและความต้านทานจำเพาะภายในของสารกึ่งตัวนำได้



รูปที่ 2.18 การวัดค่าความต้านทานแผ่นโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น

- การวัดแบบสองขั้วโดยมีการเลื่อนระยะที่ขั้วหนึ่ง
- กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับระยะทางที่ได้จากการวัดชนิดเลื่อนขั้วไฟฟ้า

2.7.4 **ปรากฏการณ์ฮอลล์** (Kittel, 2005; งามนิตย์, 2530; ฐิตินัย, 2531; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2552; Runyan, 1975; สุกฤษฎี, 2547; สมเกียรติ, 2542; ฐิตินัย, 2552; วีระชัย, 2547; ดุสิต, 2535)

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถเขียนในเทอมของสภาพคล่องของพาหะได้และความหนาแน่นพาหะอิสระด้วยความสัมพันธ์กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากอิเล็กตรอน

$$\rho = \frac{I}{ne\mu_e} \quad (2.22)$$

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากโฮล

$$\rho = \frac{I}{pe\mu_p} \quad (2.23)$$

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากพาหะสองชนิดคืออิเล็กตรอนและโฮลซึ่งมีปริมาณใกล้เคียงกันสภาพต้านทานไฟฟ้าที่แท้จริงคือ

$$\rho = \frac{I}{e(n\mu_e + p\mu_p)} \quad (2.24)$$

เมื่อ n คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระ
 p คือ ความหนาแน่นของโฮลอิสระ
 μ_e และ μ_p คือ สภาพคล่องของอิเล็กตรอนและสภาพคล่องของโฮล

นั่นคือหากทราบสภาพต้านทานไฟฟ้า และสภาพคล่องของพาหะจะทำให้สามารถคำนวณค่าความหนาแน่นของพาหะข้างมากได้จากสมการที่ (2.22) และ (2.23) คือ

กรณีเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

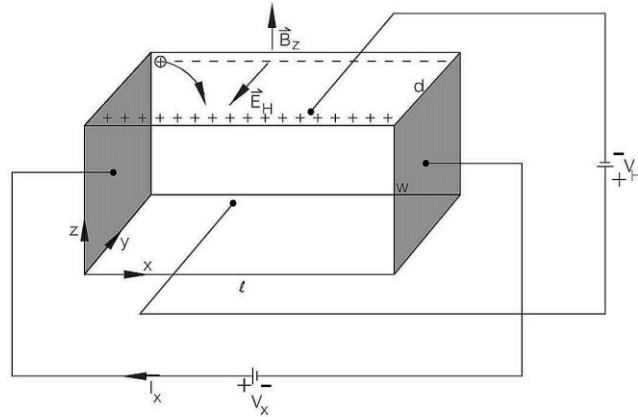
$$n = \frac{I}{e\rho\mu_e} \quad (2.25)$$

กรณีเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี

ความหนาแน่นของโฮล

$$p = \frac{I}{e\rho\mu_p} \quad (2.26)$$

เราสามารถคำนวณค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า, สภาพคล่องของพาหะได้หลายวิธี วิธีที่สะดวกและมักนิยมใช้กันอย่างกว้างขวางคือ การคำนวณจากการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ ปรากฏการณ์ฮอลล์ได้ถูกค้นพบในปี พ.ศ.2422 โดย เอ็ดวิน เฮอร์เบิร์ต ฮอลล์ (Edwin Herbert Hall)



รูปที่ 2.19 แผนภาพแสดงปรากฏการณ์ฮอลล์บนแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิดพี

พิจารณาชิ้นสารกึ่งตัวนำชนิดพี ที่เป็นรูปทรงดังแสดงในรูปที่ 2.19 ซึ่งมีกระแสไฟฟ้า I ไหลผ่านในแนว x หรืออาจมองว่ามีประจุบวกเคลื่อนที่ไปในทิศ x ด้วยความเร็วลอยเลื่อน V_x เกิดเป็นกระแสไฟฟ้าในแนวทิศทาง x คือ I_x ดังสมการที่ (2.27)

จาก
$$I = nqVA$$

ดังนั้น
$$I_x = qnV_x(wd) \quad (2.27)$$

จากกฎของโอห์ม

$$V = IR \quad (2.28)$$

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

จากรูปที่ 2.18
$$A = w \cdot d \quad (2.30)$$

ถ้าทราบความต่างศักย์ (V_x) ระหว่างปลายทั้งสองของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น สามารถหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าได้จากสมการที่ (2.28) และ (2.29) และ (2.30)

$$\rho = \frac{V_x}{I_x} \cdot \frac{A}{L} = \frac{V_x}{I_x} \cdot \frac{wd}{L} \quad (2.31)$$

ปรากฏการณ์ฮอลล์เกิดขึ้นเมื่อมีสนามแม่เหล็ก (B_z) ที่กระทำกับชิ้นสารในทิศ z อย่างสม่ำเสมอ อันตรกิริยาจากสนามแม่เหล็กมีผลทำให้แนวกระแสของโฮลเบี่ยงเบนไปในทิศ $-y$ สอดคล้องในบริเวณขอบด้านนอก ($y=0$) และเหนี่ยวนำให้เกิดอิเล็กตรอนขึ้นที่ขอบด้านใน (y) ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าฮอลล์ในทิศ $-y$ (Hall field: E_y หรือ E_H) และเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าฮอลล์ในทิศทางของ y (Hall voltage: V_H) ขึ้นทำให้กลุ่มพาหะข้างมากชนิดโฮลเคลื่อนที่ไปด้วยแรงลอเรนตซ์ (Lorentz's force)

$$F = q(V_x \times B_z) + qE_y \quad (2.32)$$

เมื่อแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่กระทำต่อโฮลมีค่าเท่ากันจะเกิดสภาวะสมดุลเชิงความร้อน หรือสภาวะคงตัว (steady state) ทำให้โฮลเคลื่อนที่ในทิศ x ดังเดิม เพราะฉะนั้นจะทำให้ได้ว่า

$$E_y = V_x B_z = \frac{I}{qn} \cdot \frac{I_x}{wd} \cdot B_z \quad (2.33)$$

หากพิจารณาสมการที่ (2.33) จะเห็นว่าสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดขึ้นเป็นปฏิภาคกับความหนาแน่นกระแสและสนามแม่เหล็ก สามารถเขียนได้ในรูปของ

$$E_y = R_H \cdot J_x B_z \quad (2.34)$$

เมื่อ

$$J_x = \frac{I_x}{wd} \quad (2.35)$$

แล้ว

$$R_H = \frac{E_y}{J_x B_z} = \frac{I}{qn} \quad (2.36)$$

เรียก R_H ว่าเป็นสัมประสิทธิ์ฮอลล์หรือค่าคงตัวฮอลล์ (Hall coefficient) ซึ่งนิยามว่าเป็นสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดจากความหนาแน่นกระแสของพาหะขนาด 1 หน่วย ไหลผ่านภายใต้สนามแม่เหล็กขนาด 1 หน่วย เราอาจทราบศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากสนามไฟฟ้าฮอลล์ โดยอินทิเกรตสนามไฟฟ้าฮอลล์ตลอดความกว้าง (w) ของแผ่นสารและเรียกความต่างศักย์นี้ว่า ความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) นั่นคือ

$$\begin{aligned} V_H &= \int_0^w E_y dy = \int_0^w \frac{I}{qn} \cdot \frac{I_x B_z}{wd} dy \\ &= \frac{I}{qn} \cdot \frac{I_x B_z}{d} \end{aligned} \quad (2.37)$$

สัมประสิทธิ์ฮอลล์ที่ได้จากการวัด คือ

$$R_H = \frac{V_H}{I_X} \cdot \frac{d}{B_Z} \quad (2.38)$$

ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนตามนิยาม คือ

$$n = \frac{I}{qR_H} = \frac{I_X}{V_H} \cdot \frac{B_Z}{qd} \quad (2.39)$$

โดยทั่วไปพาหะอิสระที่เคลื่อนที่ในสารกึ่งตัวนำมักประสบกับกลไกการกระเจิงหลายๆ ชนิด กลไกการกระเจิงของพาหะในสารกึ่งตัวนำจะเป็นกลไกที่ขึ้นอยู่กับพลังงานของพาหะโดยที่ช่วงเวลาปลอดการกระเจิง (τ) จะแสดงได้ดังนี้

$$\tau = \tau(E) \quad (2.40)$$

เมื่อคิดผลรวมจากการกระเจิงที่ขึ้นกับพลังงานของพาหะ สัมประสิทธิ์ฮอลล์สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

สัมประสิทธิ์ฮอลล์กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

$$R_H = \frac{r}{nq} \quad (2.41)$$

สัมประสิทธิ์ฮอลล์กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดพี

$$R_H = \frac{r}{pq} \quad (2.42)$$

เมื่อ r คือ แฟกเตอร์การกระเจิง (scattering factor) ของพาหะในปรากฏการณ์ฮอลล์ซึ่งสามารถนิยามค่า r ได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$r = \frac{\langle \tau \rangle^2}{\langle \tau^2 \rangle} \quad (2.43)$$

r มีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ขึ้นอยู่กับกลไกการกระเจิงของพาหะ เช่น การกระเจิงเนื่องจากโครงผลึกหรือการกระเจิงเนื่องจากอะตอมของสารเจือปนที่ถูกไอออนไนซ์ สัมประสิทธิ์ฮอลล์แปรค่าตามสนามแม่เหล็กและอุณหภูมิ ซึ่งจะมีค่าใกล้ 1 เมื่อขึ้นสารอยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กความเข้มสูงมากดังนั้นเราทราบค่าของ r จากการทดลองด้วยความสัมพันธ์

$$r = \frac{R_H(B)}{R_H(B = \infty)} \quad (2.44)$$

ในทางปฏิบัติสนามแม่เหล็กที่ใช้วัดโดยทั่วไปมีค่าอยู่ระหว่าง 5 ถึง 10,000 เกาส์ ซึ่งค่า r ในช่วงนี้มีการเปลี่ยนแปลงไม่มาก ดังนั้นอาจประมาณได้ว่าค่าคงที่

จากสมการที่ (2.42) และ (2.43) สามารถนิยามสภาพคล่องฮอลล์ (μ_H) ได้เป็น

$$\mu_H = \left| \frac{R_H}{\rho} \right| = r \mu \quad (2.45)$$

หรือ จากสมการที่ (2.39) และ (2.40)

$$\mu_H = \frac{V_H}{I_X} \cdot \frac{d}{B_Z} \cdot \frac{I}{\rho} \quad (2.46)$$

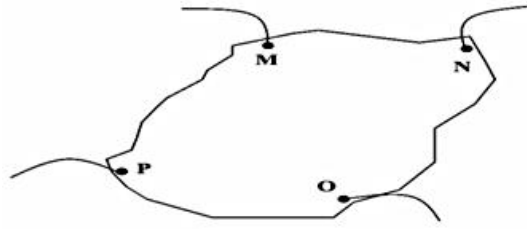
สภาพคล่องฮอลล์แตกต่างจากสภาพคล่องที่ได้จากการนำไฟฟ้าด้วยอัตราส่วนของ r ซึ่งมีค่ามากกว่า 1 โดยทั่วไปเพื่อลดความซับซ้อนเมื่อคำนวณความหนาแน่นของพาหะจึงมักประมาณว่า r มีค่าเท่ากับ 1 ความหนาแน่นของพาหะที่คำนวณจากปรากฏการณ์ฮอลล์ จึงอาจสูงกว่าความหนาแน่นของพาหะที่แท้จริงถึง 30 เปอร์เซ็นต์

2.7.5 การศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ (Kittel, 2005; งามนิตย์, 2530; ฐิตินัย, 2531; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2552; Runyan, 1975; สุกฤษฎี, 2547; สมเกียรติ, 2542; ฐิตินัย, 2552; วีรชัย, 2547; ดุสิต, 2535)

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

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

พิจารณาชิ้นสารรูปทรงเป็นแผ่นบางใดๆ และมีขั้วสัมผัสเล็กๆ M, N, O และ P กระจายอยู่ที่บริเวณขอบของแผ่นซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขข้างต้น



รูปที่ 2.20 การวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพา์วบนสารตัวอย่างที่เป็นแผ่นบางที่มีรูปทรงใดๆ

ในการวัดสภาพคล่องฮอลล์ หากกระบวนการวัดกระทำภายใต้สนามแม่เหล็กความเข้ม B ที่กระทำตั้งฉากกับระนาบแผ่นสาร กระแสไฟฟ้าจ่ายเข้าในแนวทะแยงมุมขึ้น M, O และวัดความต่างศักย์จากขั้ว N, P

นิยาม
$$R_{MNOP} = \frac{V_{NP}}{I_{MO}} \quad (2.47)$$

สัมประสิทธิ์ฮอลล์จากเทคนิคของแวนเดอร์เพา์ว คือ

$$R_H = \left(\frac{V_H}{I} \right) \left(\frac{d}{B} \right) \quad (2.48)$$

เมื่อ V_H คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์หรือผลต่างระหว่างค่า V_{NP} ในขณะที่มีสนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็ก

D คือ ความหนาของชิ้นสารตัวอย่าง

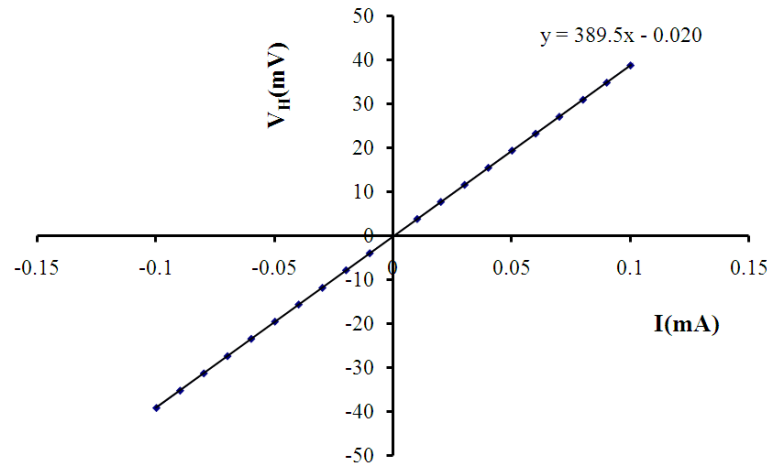
B คือ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก

จากสมการที่ (2.48) จะได้ว่า

$$R_H = \frac{V_H}{I} \left(\frac{d}{B} \right) \quad (2.49)$$

เมื่อทำการเขียนกราฟระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ที่ได้จากการทดลองเราจะได้ลักษณะกราฟดังรูปที่ 2.21 โดยที่ความชันของกราฟที่ได้จะเป็นค่า

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



รูปที่ 2.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I)

สภาพคล่องฮอลล์สามารถคำนวณได้จาก

$$\mu_H = \frac{R_H}{\rho} \quad (2.50)$$

และสามารถคำนวณหาระยะทางเฉลี่ยที่ปลดการกระเจิงได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$l = \left(\frac{h}{2e} \right) \left(\frac{3n}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \mu_H \quad (2.51)$$

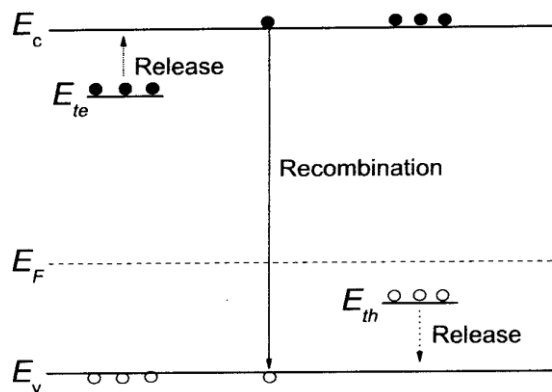
เมื่อ h คือ ค่าคงตัวของพลังค์ = 6.625×10^{-34} จูล-วินาที

ในทางปฏิบัติการเตรียมชิ้นสารให้มีรูปทรงตามเงื่อนไขทั้ง 4 ข้อดังกล่าวอาจเป็นไปได้ยาก โดยเฉพาะขนาดและตำแหน่งของขั้วสัมผัสซึ่งมักไม่เป็นจุดและไม่อยู่ที่ขอบของชิ้นสารตามทฤษฎี จึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของผลการวัด

2.8 สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง (งามนิตย์, 2556; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2554; ฐิตินัย, 2556; Kittel, 1971; Sze, 1981)

ในสารกึ่งตัวนำมักมีข้อบกพร่องผลึกเสมอ ข้อบกพร่องผลึกมีหลายชนิด ข้อบกพร่องผลึกบางชนิดมีคุณสมบัติในการจับอิเล็กตรอนและ/หรือโฮลอิสระได้ จึงมักเรียกว่ากับดักพาหะ กับดักพาหะชนิดต่างๆ จะปรากฏเป็นระดับพลังงานในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ โดยในรูปที่ 2.22 มีทั้งระดับพลังงานของกับดักพาหะชนิดจับโฮล (E_{th}) และกับดักพาหะชนิดจับอิเล็กตรอน (E_{te}) (Jiang, 2012) คำว่าการปลดปล่อย (release) เป็นกลไกที่กับดักพาหะปล่อยอิเล็กตรอนให้กับ

แถบนำ และเป็นกับดักพาหะที่ปล่อยโฮลให้กับแถบวาเลนซ์ ส่วนคำว่าการรวมตัว (recombination) เป็นกลไกที่อิเล็กตรอนในแถบนำทราวนิซันลงมารวมตัวกับโฮลในแถบวาเลนซ์โดยไม่ผ่านกับดักพาหะ ขณะที่สารกึ่งตัวนำยังไม่ได้มีการฉายแสง กับดักพาหะจะมีการจับอิเล็กตรอนหรือจับโฮลอยู่ก่อนแล้ว ส่วนอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำและโฮลในแถบวาเลนซ์มีปริมาณน้อย สารกึ่งตัวนำจึงนำกระแสไฟฟ้าได้ไม่ดี กระแสมืด (dark current) จึงมีค่าน้อย แต่เมื่อมีการฉายแสงลงบนสารกึ่งตัวนำจะเกิดกระบวนการสร้างอิเล็กตรอนและโฮลอิสระขึ้นในแถบนำและแถบวาเลนซ์ตามลำดับ เนื่องจากการดูดกลืนโฟตอนที่มีพลังงานสูงเพียงพอ เมื่อไบแอสด้วยแรงดันไฟฟ้าให้กับสารกึ่งตัวนำ กระแสโฟตอนจะมีปริมาณเพิ่มขึ้น แต่เมื่อหยุดฉายแสงหรือหยุดการกระตุ้นด้วยแสง กระแสไฟฟ้าควรลดลงสู่ค่ากระแสมืดเหมือนในขณะที่ไม่มีการฉายแสง แต่บางครั้งพบว่า กับดักพาหะที่จับอิเล็กตรอนและ/หรือจับโฮล มีพฤติกรรมไม่ปล่อยอิเล็กตรอนหรือโฮลออกมาทันทีอย่างปกติธรรมดา นั่นคือยังมีประจุค้างอยู่ในกับดักพาหะ ดังนั้นอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำและ/หรือโฮลในแถบวาเลนซ์จึงยังคงปรากฏอยู่มากเพื่อทำหน้าที่ในการรักษาความเป็นกลางทางไฟฟ้าโดยปกติกลไกการปลดปล่อยจะใช้เวลาานานกว่ากลไกการรวมตัวแต่เนื่องจากกับดักพาหะมีการปล่อยอิเล็กตรอนและ/หรือโฮลออกมาช้ามาก ส่งผลให้กลไกการรวมตัวใช้เวลายังนานขึ้นไปอีก จึงเป็นที่มาของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงดื้อรั้น (persistent photoconductivity)



รูปที่ 2.22 แสดงระดับพลังงานของกับดักพาหะชนิดจับอิเล็กตรอน (E_{te}) และกับดักพาหะชนิดจับโฮล (E_{th}) ที่ปรากฏในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ จุดทึบและจุดโปร่งจะแสดงแทนอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ

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

$$I = envA \quad (2.5)$$

และจากความสัมพันธ์ $\mu = \frac{v}{\xi}$ และ $\xi = \frac{V_a}{l}$ ดังนั้นจะได้ว่า

$$v = \frac{\mu V_a}{l} \quad (2.53)$$

แทนสมการที่ (2.52) ลงในสมการที่ (2.53) จะได้

$$I = en\mu V_a \frac{wd}{l} \quad (2.54)$$

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

$$n = N_{ii} \exp\left(\frac{-t}{\tau_i}\right) \quad (2.55)$$

แทนสมการที่ (2.55) ลงในสมการที่ (2.54) จะได้ว่า กระแส I_i ที่เกิดจากกับดักพาหะชนิด i คือ

$$I_i = e\mu N_{ii} V_a \left(\frac{wd}{l}\right) \exp\left(\frac{-t}{\tau_i}\right) \quad (2.56)$$

กระแสรวมทั้งหมด I ที่สัมพันธ์กับกับดักพาหะทุกชนิดจะเป็นดังนี้คือ

$$I = e\mu \left(\frac{wd}{l}\right) V_a \sum_i \left[N_{ii} \exp\left(\frac{-t}{\tau_i}\right) \right] \quad (2.57)$$

เมื่อ N_{ii} คือ ความหนาแน่นของกับดักพาหะต่อปริมาตรชนิดที่ i ซึ่งสามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$N_{ii} = \left(\frac{l}{e\mu V_a}\right) \left(\frac{l}{wd}\right) \exp\left(\frac{t}{\tau_i}\right) \quad (2.58)$$

สำหรับกรณีฟิล์มบาง จะประมาณว่า ความหนา d มีค่าน้อยมาก ดังนั้น จากสมการที่ (2.54) จะเขียนใหม่ได้ว่า (Gu, 2005; Huang, 2011)

$$\begin{aligned} I &= e\mu \left(\frac{w}{l}\right) ndV_a \\ &= e\mu \left(\frac{w}{l}\right) \sigma_t V_a \end{aligned} \quad (2.59)$$

เมื่อ σ_t คือ ความหนาแน่นของกักตักพาหะต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ แต่ถ้ากักตักพาหะมีหลายชนิด
กระแสรวม (I) ของฟิล์มบางที่สัมพันธ์กับกักตักพาหะทุกชนิดจะเป็นดังนี้ คือ

$$I = e\mu \left(\frac{wd}{l} \right) V_a \sum_i \left[\sigma_{ii} \exp \left(\frac{-t}{\tau_i} \right) \right] \quad (2.60)$$

เมื่อ σ_{ii} คือ ความหนาแน่นของกักตักพาหะต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ชนิดที่ i ซึ่งสามารถหาได้จาก
ความสัมพันธ์

$$\sigma_{ii} = \left(\frac{l}{e\mu V_a} \right) \left(\frac{l}{w} \right) \exp \left(\frac{t}{\tau_i} \right) \quad (2.61)$$

โดยที่	V_a	คือ แรงดันแรงดันไบแอสที่ป้อนให้กับสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมี หน่วยเป็นโวลต์
	μ	คือ สภาพคล่องของพาหะมีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตรต่อ(โวลต์-วินาที)
	w	คือ ความกว้างของสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีหน่วยเป็นเซนติเมตร
	l	คือ ความยาวของสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีหน่วยเป็นเซนติเมตร
	d	คือ ความหนาของสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีหน่วยเป็นเซนติเมตร
	I	คือ กระแสที่วัดได้จากการทดลองที่เวลา t ใดๆ
	τ_r	คือ ช่วงชีวิตขาลง (decay time)
	N_{ii}	คือ ความหนาแน่นของกักตักพาหะในชั้นสารตัวอย่างมีหน่วยเป็นต่อ ลูกบาศก์เซนติเมตร
	σ_{ii}	คือ ความหนาแน่นของกักตักพาหะในฟิล์มบางมีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตร

ช่วงชีวิตขาลงจะมีค่าสั้นลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีโฟนอนเข้ามาาร่วมด้วยใน
กระบวนการทรานซิชันระหว่างระดับพลังงานต่างๆ ดังความสัมพันธ์ (Studenikin, 1998; Johnson,
1996)

$$\tau_r = \tau_{r0} \exp \left(\frac{E_t}{kT} \right) \quad (2.62)$$

$$\begin{aligned} \ln \tau_r &= \ln \tau_{r0} + \left(\frac{E_t}{k} \right) \left(\frac{1}{T} \right) \\ &= \ln \tau_{r0} + \frac{E_t}{(1000)k} \left(\frac{1000}{T} \right) \end{aligned}$$

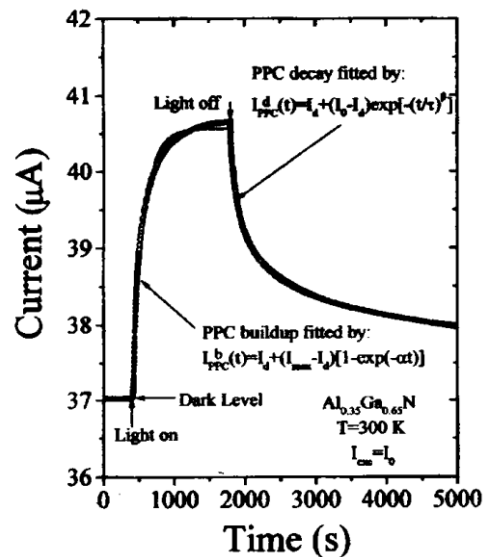
$$\begin{aligned} \text{เมื่อ} \quad & \text{ความชัน} = \frac{E_t}{1000k} \\ \text{ดังนั้น} \quad & E_t = \frac{(1000)k(\text{ความชัน})}{q} \\ & = (0.086)(\text{ความชัน}) \text{ อิเล็กตรอนโวลต์} \end{aligned} \quad (2.63)$$

ในการศึกษาสภาวะนำไฟฟ้าเชิงแสงจะต้องมีการฉายแสงให้กับสารตัวอย่าง จะได้ว่ากระแสโฟโต (I_p) จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลา (t) ดังรูปที่ 2.23 ซึ่งจะเรียกว่าเป็นกระแสขาขึ้น (rise current) ดังความสัมพันธ์ (Ghosh, 2007)

$$I_p = I_0 \left[1 - \exp\left(\frac{-t}{\tau_r}\right) \right] \quad (2.64)$$

เมื่อ I_0 คือ กระแสเริ่มต้นของกระแสขาขึ้น (เมื่อ $t = 0$) หลังจากหยุดการฉายแสง กระแสจะลดลงตามเวลา (t) ซึ่งจะเรียกว่าเป็นกระแสขาลง (decay current) จะแสดงดังความสัมพันธ์ (Ghosh, 2007)

$$I_p = I_0' \exp\left(\frac{-t}{\tau_d}\right) \quad (2.65)$$

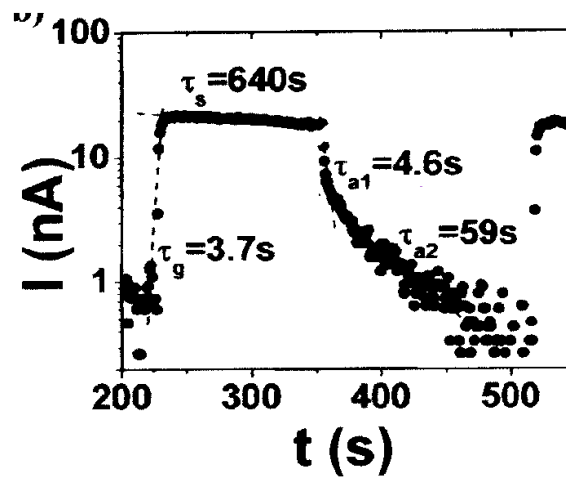


รูปที่ 2.23 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสขาขึ้น และ กระแสขาลง กับ ช่วงเวลาการตอบสนองต่อสภาวะนำไฟฟ้าเชิงแสง

จากสมการที่ (2.64) สามารถเขียนใหม่ได้ว่า

$$\ln I_p = \ln I_0 - \frac{t}{\tau_d} \quad (2.66)$$

ความชันของกราฟ คือ $\frac{1}{\tau_d}$ ดังนั้น ช่วงชีวิตกลางจะคำนวณได้จากส่วนกลับของความชันของกราฟ $\ln I_p$ กับ t ในทำนองเดียวกันช่วงชีวิตขาขึ้นก็สามารถที่จะคำนวณได้จากความชันของกราฟ $\ln I_p$ กับ t (ดังรูปที่ 2.23) ได้ด้วยเช่นเดียวกัน



รูปที่ 2.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ t ของค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงทั้งช่วง กระแสขาขึ้นและช่วงกระแสกลาง

ในทางปฏิบัติช่วงชีวิตมีได้หลายค่า เนื่องจากกับดักพาหะมีหลายชนิด ดังนั้นกระแสโฟโตกลางของฟิล์มบางที่ใช้หาค่าช่วงชีวิต 2 ค่า สามารถที่จะเขียนใหม่ได้โดยอาศัยสมการที่ (2.60) และสมการที่ (2.65) ดังนี้ คือ (Gu, 2005; Huang, 2011)

$$|I_p| = e\mu \left(\frac{w}{l} \right) V_a \sigma_{t1} \exp\left(\frac{-t}{\tau_{d1}} \right) + e\mu \left[\frac{w}{l} \right] V_a \sigma_{t2} \exp\left(\frac{-t}{\tau_{d2}} \right) \quad (2.67)$$

เพื่อให้ τ_{d1} และ τ_{d2} มีค่าถูกต้องมากขึ้น อาจดัดแปลงสมการที่ (2.66) ให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันสเตรตเอ็กซ์โพเนนเชียล (stretched exponential function) ดังนี้คือ (Ghaffarzadeh, 2010; Luo, 2013; Guo, 2013)

$$|I_p| = e\mu \left(\frac{w}{l} \right) V_a \sigma_{t1} \exp\left(\frac{-t}{\tau_{d1}} \right) + e\mu \left[\frac{w}{l} \right] V_a \sigma_{t2} \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau_{d2}} \right)^\beta \right] \quad (2.68)$$

จากสมการที่ (2.68) สามารถที่จะหาค่า σ_{t1} และ σ_{t2} ได้ในรูปแบบเดียวกับสมการที่ (2.61) ดังนี้คือ

$$\sigma_{t1} = \left(\frac{I_1}{e\mu V_a} \right) \left(\frac{1}{w} \right) \exp\left(\frac{t}{\tau_{d1}} \right) \quad (2.68)$$

$$\sigma_{t2} = \left(\frac{I_2}{e\mu V_a} \right) \left(\frac{1}{w} \right) \exp\left(\frac{t}{\tau_{d2}} \right) \quad (2.69)$$

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

$$\sigma_{t1} = \left(\frac{I_1}{e\mu V_a} \right) \left(\frac{1}{w} \right)$$

และ

$$\sigma_{t2} = \left(\frac{I_2}{e\mu V_a} \right) \left(\frac{1}{w} \right)$$

สมการที่ (2.68) สามารถที่จะทำนอร์มัลไลเซชัน (normalization) ได้ดังนี้ คือ

$$|I_p| = A_1 \exp\left(\frac{-t}{\tau_{d1}} \right) + A_2 \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau_{d1}} \right)^\beta \right] \quad (2.70)$$

เมื่อ A_1 และ A_2 คือ แฟกเตอร์ถ่วงน้ำหนัก (weighting factor) โดยที่ $A_1 + A_2 = 1$ (Lin, 2012; Lin, 2013; Ren, 2012) ซึ่งค่า A_1 และ A_2 สามารถหาได้จากการฟิตกราฟ (fit graph) ของผลการทดลองและ β มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1

ในกรณีกระแสไฟโตขาขึ้น (rise current) ก็สามารถที่จะพิจารณาให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันสเตรตเอ็กซ์โพเนนเชียลได้ด้วยเช่นกัน ดังสมการ

$$|I_p| = A'_1 \left[1 - \exp\left(\frac{-t}{\tau_{r1}} \right) \right] + A'_2 \left\{ 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau_{r1}} \right)^\beta \right] \right\} \quad (2.71)$$

ส่วนกรณีของขึ้นสาร เช่น เม็ดเซรามิก กระแสไฟโตขณะขาลงสามารถจะเขียนใหม่โดยอาศัยสมการที่ (2.57) และสมการที่ (2.68) ได้ดังนี้คือ

$$|I_p| = e\mu \left(\frac{wd}{l} \right) V_a N_{t1} \exp\left(\frac{-t}{\tau_{d1}}\right) + e\mu \left(\frac{wd}{l} \right) V_a N_{t2} \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau_{d2}}\right)^\beta\right] \quad (2.72)$$

จากสมการที่ (2.72) สามารถที่จะหาค่า

$$N_{t1} = \left(\frac{I_1}{e\mu V_a} \right) \left(\frac{l}{wd} \right) \exp\left(\frac{t}{\tau_{d1}}\right) \quad (2.73)$$

$$N_{t2} = \left(\frac{I_2}{e\mu V_a} \right) \left(\frac{l}{wd} \right) \exp\left(\frac{t}{\tau_{d2}}\right) \quad (2.74)$$

กับศักกพาหะทั้งสองชนิดนี้สามารถที่จะจับหรือปล่อยพาหะอิสระได้อย่างเป็นอิสระซึ่งกันและกัน ถ้ากำหนดให้ I_1 และ I_2 คือกระแสเริ่มต้น ($t = 0$) ที่เกี่ยวกับกับศักกพาหะทั้งสองตามลำดับเราจะได้ว่า

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

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

สมการที่ (2.72) สามารถที่จะทำนอร์มัลไลเซชัน (normalization) ได้ดังนี้คือ

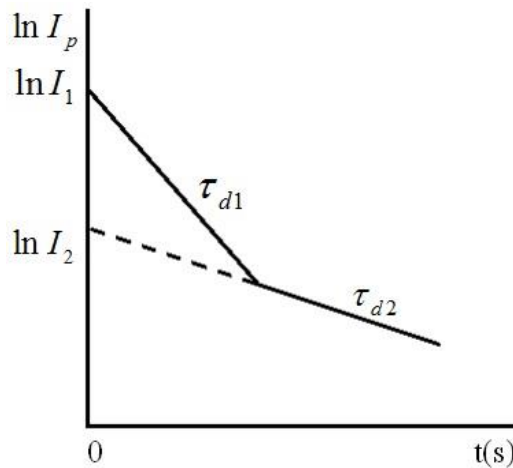
$$|I_p| = A_1'' \exp\left(\frac{-t}{\tau_{d1}}\right) + A_2'' \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau_{d2}}\right)^\beta\right] \quad (2.75)$$

ซึ่ง A_1'' และ A_2'' สามารถหาได้จากการพิตรกราฟของผลการทดลอง ในกรณีกระแสโฟโตชาขึ้น ก็สามารถที่จะพิจารณาให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันสเตรตเอ็กซีโพเนนเชียลได้ด้วยเช่นกันดังสมการ

$$|I_p| = A_1''' \left[1 - \exp\left(\frac{-t}{\tau_{d1}}\right) \right] + A_2''' \left\{ 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau_{d2}}\right)^\beta\right] \right\} \quad (2.76)$$

2.8.1 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกับดัคพาหะในช่วงกระแสขาลง

การหาค่าความหนาแน่นของกับดัคพาหะในช่วงกระแสขาลงจะอาศัยกราฟ $\ln I_p$ กับ t ดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ t เพื่อใช้คำนวณหาค่าความหนาแน่นของดับตกพาหะในช่วงกระแสขาลง

ค่า τ_{d1} หาค่าได้จากความชันของกราฟ

$$\ln I_p = \frac{-t}{\tau_{d1}} + \ln I_1 \quad (2.77)$$

เราสามารถหาค่า I_1 ได้จากจุดตัดแกน y คือ $(\ln I_1)$ และสามารถคำนวณหาค่าความหนาแน่นของกับดีกพาหะของฟิล์มบางได้ดังนี้คือ

$$\sigma_{i1} = \left(\frac{I_1}{e\mu V_a} \right) \left(\frac{l}{w} \right) \quad (2.78)$$

บางครั้งมีการเลือกใช้กราฟ $\log I_p$ แทน $\ln I_p$ โดยที่ $\ln I_p = 2.3 \log I_p$

ในทำนองเดียวกัน τ_{d2} สามารถหาได้จากความชันของกราฟ

$$\ln I_p = \frac{-t}{\tau_{d2}} + \ln I_2 \quad (2.79)$$

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

$$\sigma_{i2} = \left(\frac{I_2}{e\mu V_a} \right) \left(\frac{l}{w} \right) \quad (2.80)$$

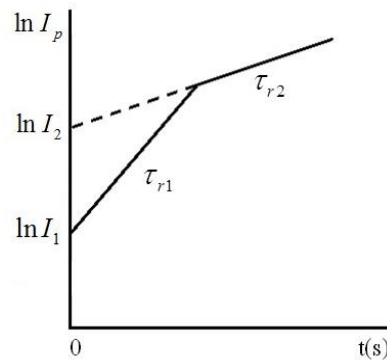
สำหรับกรณีของความหนาแน่นของชั้นสารเช่นในเซรามิกก็สามารถใช้สูตร

$$N_{t1} = \left(\frac{I_1}{e\mu V_a} \right) \left(\frac{l}{wd} \right) \quad (2.81)$$

$$N_{t2} = \left(\frac{I_2}{e\mu V_a} \right) \left(\frac{l}{wd} \right) \quad (2.82)$$

2.8.2 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกัณฑ์พาหะในช่วงกระแสขาขึ้น

การหาค่าความหนาแน่นของกัณฑ์พาหะในช่วงกระแสขาขึ้น โดยอาศัยกราฟ $\ln I_p$ กับ t ดังรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ t เพื่อใช้คำนวณหาความหนาแน่นของกัณฑ์พาหะในช่วงกระแสขาขึ้น กระแสขาขึ้นอาจแสดงได้ดังสมการง่ายๆ ดังนี้คือ

$$I = I_{\max} \left[1 - \exp\left(\frac{-t}{\tau_r}\right) \right] \quad (2.83)$$

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

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

$$\ln \left[1 - \frac{I}{I_{\max}} \right] = \frac{-t}{\tau_r} \quad (2.84)$$

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

ถ้า $\frac{I}{I_{mac}} \ll 1$ สมการที่ (2.84) จะประมาณได้ว่าเป็น

$$\frac{I}{I_{max}} = \frac{t}{\tau_r} \quad (2.85)$$

ข้อสังเกตคือสมการที่ (2.85) จะใช้ได้จริงเมื่อ $\frac{I}{I_{mac}} \ll 1$ ก็คือช่วงแรกของกราฟกระแส

ขาขึ้น ส่วนช่วงท้ายๆ ของกราฟความถูกต้องจะลดลง การคำนวณหาค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะทั้งชนิดฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำและเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำจะใช้สมการที่ (2.79), (2.80), (2.81) และสมการที่ (2.82) ได้เช่นเดียวกับกระแสขาลง

2.9 รอยต่อของสารกึ่งตัวนำที่เป็นแบบพี-เอ็น (p-n junction) (งามนิตย์, 2530; ฐิตินัย, 2546; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2552; Kittel, 2005; Runyan, 1975; วีรชัย, 2547; สุกฤษณ์, 2547; ดุสิต, 2535)

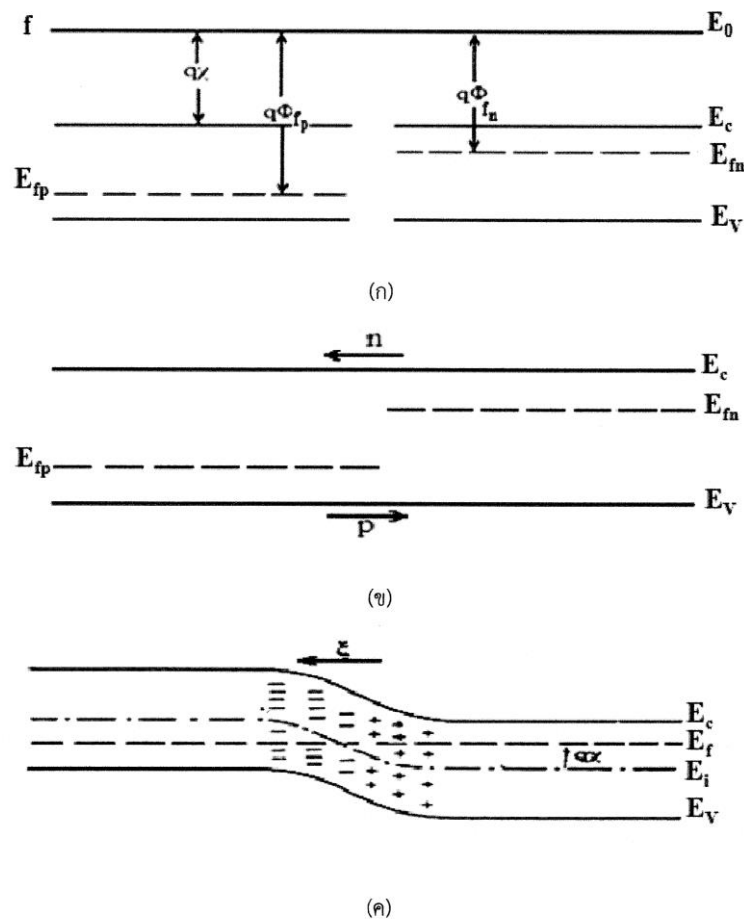
รอยต่อของสารกึ่งตัวนำที่เป็นแบบพี-เอ็น คือบริเวณที่ชนิดการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำเปลี่ยนจากชนิดพีเป็นชนิดเอ็น เปลี่ยนจากชนิดเอ็นเป็นชนิดพี โดยที่โครงสร้างของผลึกไม่มีการเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด รอยต่อของสารกึ่งตัวนำที่เป็นแบบพี-เอ็น เป็นส่วนที่สำคัญมากในสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำแทบทุกชนิด และคุณสมบัติของ รอยต่อของสารกึ่งตัวนำที่เป็นแบบพี-เอ็น ดังกล่าวนี้อาจจะขึ้นกับกระบวนการผลิตซึ่งมีมากมายหลายแบบ วิธีการประดิษฐ์รอยต่อที่สำคัญในปัจจุบันมีดังนี้ คือวิธีการแพร่ซึม วิธีอีพิแทกซี(epitaxy) วิธีฝังไอออน (ion implantation) และแบบหลอมผสม(alloying) เป็นต้น

2.9.1 รอยต่อของสารกึ่งตัวนำที่เป็นแบบพี-เอ็น เมื่ออยู่ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน

แบบจำลองของรอยต่อของสารกึ่งตัวนำที่เป็นแบบพี-เอ็น ในเชิงอุณหพลศาสตร์จะเริ่มพิจารณาในกรณีที่เป็นรอยต่อแบบโฮโม (homo junction) ซึ่งทั้งสารกึ่งตัวนำชนิดพีและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นเป็นวัสดุชนิดเดียวกัน จึงมีค่าช่องว่างแถบพลังงานเท่ากัน โดยเริ่มจากอิลเล็กตรอนที่มีอยู่จำนวนมากในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะแพร่ซึมไปยังสารกึ่งตัวนำชนิดพี ซึ่งมีอิลเล็กตรอนอยู่น้อยมาก ในทำนองเดียวกันโฮลที่มีอยู่เป็นจำนวนมากในสารกึ่งตัวนำชนิดพีจะแพร่ซึมไปยังด้านเอ็นซึ่งมีโฮลอยู่น้อยมากการแพร่ซึมของพาหะเหล่านี้จะทำให้เนื้อสารขาดความเป็นกลางทางไฟฟ้านั้นคือสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นสูญเสียอิลเล็กตรอนอิสระไป ทำให้บริเวณวารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นใกล้รอยต่อ แสดงอำนาจไฟฟ้าเป็นบวกเนื่องจากมีประจุบวกของไอออนของอะตอมผู้ให้ถูกทิ้งไว้ สำหรับทางสารกึ่งตัวนำชนิดพีก็จะมีลักษณะคล้ายๆกัน คือมีไอออนของอะตอมผู้รับซึ่งมีประจุเป็นลบปรากฏอยู่ ยังส่งผลให้เกิดสนามไฟฟ้าที่รอยต่อโดยที่สนามไฟฟ้ามีทิศจากทางสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นไปทางสารกึ่งตัวนำชนิดพี ดังนั้นการแพร่ซึมของโฮลและอิลเล็กตรอนจะลดลงเนื่องจากอิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่ด้านการแพร่ซึมบริเวณ

รอยต่อนี้จึงปลอดจากพาหะอิสระและเรียกบริเวณนี้ว่าเขตปลอดพาหะ (depletion region) หรือบางครั้งเรียกว่า บริเวณประจุค้าง (space charge region) เนื่องจากมีประจุของไอออนสารเจืออยู่ซึ่งเป็นประจุที่ถูกตรึงอยู่กับที่ (fixed charge) ไม่ใช่ประจุอิสระ

ลักษณะการแพร่ซึมของอิเล็กตรอนและโฮลที่รอยต่ออาจแสดงได้โดยแผนภาพลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานดังรูปที่ 2.27 โดยที่รูป 2.27 (ก) แสดงลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดที่ยังไม่ได้สัมผัสกันเป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์ รูปที่ 2.27 (ข) แสดงลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดที่ถูกนำมาทำเป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์ ซึ่งจะเกิดการแพร่ของอิเล็กตรอนและโฮล จนกระทั่งเข้าสู่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 2.27 (ค) โดยที่ ϕ คือศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อ และ ξ คือสนามไฟฟ้าที่รอยต่อ

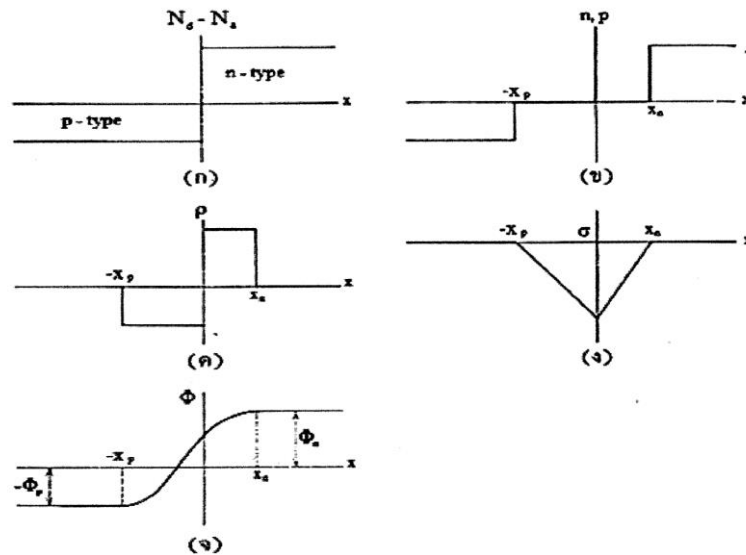


รูปที่ 2.27 แสดงลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำที่เป็นแบบพี-เอ็น

- ก. ขณะที่สารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดยังสัมผัสกันเป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์
- ข. ขณะที่สารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดที่ถูกนำมาทำเป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์
- ค. ขณะที่สารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดถูกนำมาทำเป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์และอยู่ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน

2.9.2 รอยต่อของสารกึ่งตัวนำที่เป็นแบบขั้นบันได

รอยต่อแบบขั้นบันได (step junction) เป็นรอยต่อในเชิงอุดมคติ ที่พิจารณาว่า ปริมาณความเข้มข้นของสารเจือในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและทางสารกึ่งตัวนำชนิดพีต่างมี ค่าคงที่ (แต่ค่าไม่เท่ากัน) จนกระทั่งถึงจุดเชื่อมต่อกันระหว่างสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นกับสารกึ่งตัวนำชนิดพี ดังแสดงในรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 แสดงไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำที่เป็นแบบพี-เอ็น ในกรณีที่เป็นแบบขั้นบันไดที่เป็นฟังก์ชันกับระยะทาง

- ก. ความเข้มข้นสารเจือ
- ข. ความหนาแน่นของพาหะอิสระ
- ค. ประจุค้าง
- ง. สนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อ
- จ. ศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อ

ประจุไฟฟ้าจะมีค่าไม่เป็นศูนย์เฉพาะที่บริเวณเขตปลอดพาหะ จะหาสนามไฟฟ้าทางสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นได้โดยใช้สมการของปัวซอง (Poisson's equation) นั่นคือ

$$\frac{d^2\phi}{dx^2} = \frac{-d^2\xi}{dx^2} = \frac{-qN_d}{\epsilon_s} \quad (2.86)$$

แล้ว

$$\xi(x) = \frac{-qN_d}{\epsilon_s}(x_n - x); 0 < x < x_n \quad (2.87)$$

สนามไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นมีเครื่องหมายเป็นลบ แสดงว่ามีทิศไปทางซ้ายมือและสัมพันธ์กับระยะทางแบบเชิงเส้นและสิ้นสุดที่ระยะทาง x_n ดังนั้นสนามไฟฟ้าจะต้านการแพร่ซึมของอิเล็กตรอนที่จะแพร่ซึมจากขวาไปซ้าย ในทำนองเดียวกันสนามไฟฟ้าทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพี จะมีความสัมพันธ์กับระยะทางแบบเชิงเส้นดังนี้

$$\xi(x) = \frac{-qN_a}{\epsilon_s}(x - x_p); x_p < x < 0 \quad (2.88)$$

ซึ่งสนามไฟฟ้าทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพีจะมีทิศต้านทางการแพร่ของโฮลด้วยเหมือนกันที่ระยะ $x=0$ สนามไฟฟ้าจะต้องต่อเนื่อง นั่นคือ

$$N_a x_p = N_d x_n \quad (2.89)$$

ซึ่งแสดงว่าความกว้างของเขตปลอดพาหะทั้งทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพีและทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะแปรผกผันกับความเข้มข้นของสารเจือ กล่าวคือถ้าด้านใดมีความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือสูง เขตปลอดพาหะจะยื่นเข้าไปในเนื้อสารด้านนั้นน้อย ในทางตรงกันข้ามถ้าด้านใดมีความเข้มข้นของสารเจือต่ำ เขตปลอดพาหะส่วนใหญ่จะตกอยู่ในเนื้อสารของด้านนั้น แต่ถ้าให้ความเข้มข้นของสารเจือของอะตอมผู้ให้ด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นมีค่ามากกว่าความเข้มข้นของสารเจือของอะตอมผู้รับทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพีมากๆ สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่ถูกเจืออย่างหนัก (heavily doped n-type) จะถือได้ว่าเขตปลอดพาหะที่รอยต่อเข้าไปอยู่ในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดพี และจะเรียกรอยต่อชนิดนี้ว่ารอยต่อแบบชั้นบันไดด้านเดียว (one-sided step junction)

ศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นสามารถหาได้โดยการอินทิเกรต เทียบกับ x นั่นคือ

$$\phi(x) = \frac{-qN_d}{\epsilon_s}(x_n - x)^2; 0 < x < x_n \quad (2.90)$$

โดยที่

$$\phi_n = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_d}{n_i}\right) \quad (2.91)$$

ในทำนองเดียวกันศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพี คือ

$$\phi(x) = \phi_p + \frac{qN_a}{\epsilon_s}(x - x_p)^2; -x_p < x < 0 \quad (2.92)$$

โดยที่

$$\phi_p = \frac{-kT}{q} \ln\left(\frac{N_a}{n_i}\right) \quad (2.93)$$

คือศักย์ไฟฟ้าในเนื้อของสารกึ่งตัวนำชนิดพีนอกเขตปลอดพาหะอิสระและมีค่าเป็นลบผลต่างของ ศักย์ไฟฟ้าระหว่าง $\phi_n - \phi_p$ จะมีค่าดังนี้คือ

$$\phi_i = \phi_n - \phi_p = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_d}{n_i}\right) + \left(\frac{kT}{q}\right) \ln\left(\frac{N_a}{n_i}\right) = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_d N_a}{n_i^2}\right) \quad (2.94)$$

และเรียก ϕ_i ว่าแรงดันในตัว (built-in potential) ซึ่งจะมีเครื่องหมายเป็นบวก

ในกรณีที่มีการเจือสารด้วยความเข้มข้นสูงมาก 10^{19} ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร สมการที่ 2.94 จะไม่เป็นจริงอีกต่อไป เพราะว่ากรณีที่มีการเจือสารอย่างสูงเราจะประมาณฟังก์ชันการแจกแจงของ เฟอร์มิ-ดิแรก ด้วยฟังก์ชันการแจกแจงของแม็กเวลล์-โบลต์ซมานน์ไม่ได้ เนื่องจากระดับเฟอร์มิของ สารกึ่งตัวนำจะเลื่อนเข้าหาขอบของแถบพลังงาน(ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี ระดับเฟอร์มิจะเลื่อนเข้าหา ขอบบนสุดของแถบวาเลนซ์ เป็นต้น) นั่นคือระดับเฟอร์มิของสารที่ถูกเจืออย่างหนัก จะเลื่อนไปจาก ระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำอินทรินสิกเท่ากับ $E_g/2q$ หรือราวๆ 0.56 อิเล็กตรอนโวลต์ ในอะตอม ของธาตุ Si ดังนั้นในรอยต่อของสารกึ่งตัวนำที่เป็นแบบ p-n ศักย์ในตัวจะมีค่าดังนี้คือ

$$|\phi_i| = 0.56 + \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_d}{n_i}\right) \quad (2.95)$$

และที่บริเวณเขตปลอดพาหะเกือบทั้งหมดจะปรากฏในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นของหัวต่อแต่ถ้าเป็น หัวต่อพี-เอ็นปกติ จะพบว่าความกว้างของบริเวณเขตปลอดพาหะคือ

$$x_p + x_n = \left[\frac{2\epsilon_s}{q} \phi_i \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.96)$$

ซึ่งจะเห็นได้ชัดว่าความกว้างของบริเวณเขตปลอดพาหะขึ้นกับส่วนกลับของรากที่สองของความเข้มข้นของสารเจือโดยประมาณ

2.9.3 รอยต่อของสารกึ่งตัวนำที่เป็นแบบพี-เอ็น ภายใต้สภาวะการไบอัสย้อนกลับ

(Kittel, 2005; งามนิตย, 2530; ฐิตินัย, 2531; งามนิตย, 2545; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2552; Runyan, 1975; สุกฤษณ์, 2547; สมเกียรติ, 2542)

ถ้าให้แรงดันไฟฟ้า V_a แก่รอยต่อในลักษณะที่ขั้วลบต่อเข้ากับสารกึ่งตัวนำชนิดพีและ ขั้วบวกต่อเข้ากับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และประมาณว่าแรงดัน V_a ทั้งหมดไปตกคร่อมอยู่ที่ บริเวณรอยต่อดังนั้น แรงดันในตัว ϕ_i ของสมการที่ 2.96 จะถูกแทนที่ด้วย $(\phi_i - V_a)$

$$x_d = x_p + x_n = \left[\frac{2\epsilon_s}{q} \phi_i \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right) (\phi_i - V_a) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.97)$$

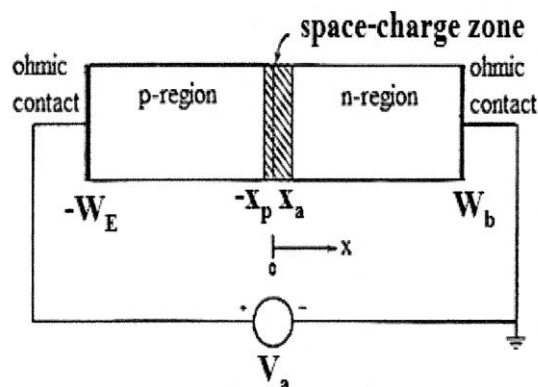
ถ้า V_a มีค่ามากกว่า ϕ_i แล้วความกว้างของเขตบริเวณเขตปลอดพาหะจะแปรผันตรงกับรากที่สองของ V_a สนามไฟฟ้ามีค่าสูงสุดเมื่อ

$$\frac{1}{2} \xi_{\max} x_d = (\phi_i - V_a)$$

ดังนั้น
$$\xi_{\max} = \frac{2(\phi_i - V_a)}{x_d} \quad (2.98)$$

2.10 ลักษณะเฉพาะของค่ากระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า ของรอยต่อของสารกึ่งตัวนำที่เป็นแบบพี-เอ็น (Kittel, 2005; งามนิตย, 2530; ฐิตินัย, 2531; งามนิตย, 2545; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2552; Runyan, 1975; สุกฤษฏ์, 2547; สมเกียรติ, 2542)

จากรูปที่ 2.29 แสดงการป้อนแรงดันไฟฟ้าตรง V_a ให้กับไดโอดชนิดของสารกึ่งตัวนำที่มีรอยต่อแบบพี-เอ็น ไดโอดมีพื้นที่หน้าตัด A ถ้าไม่มีการฉายแสงไปยังไดโอดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านไดโอดจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามขนาดของแรงดัน V_a แรงดันส่วนใหญ่จะตกคร่อมที่รอยต่อมากกว่าในเนื้อสารซึ่งถือว่าเป็นกลางทางไฟฟ้า (quasi-neutral region) และที่ขั้วไฟฟ้า (Ohmic contact) แรงดันไฟฟ้าสุทธิที่รอยต่อจะเท่ากับ $(\phi_i - V_a)$ ถ้า V_a มีค่าเป็นบวก จะเรียกว่าไบอัสไปหน้า แต่ถ้า V_a มีเครื่องหมายเป็นลบ เรียกว่าไบอัสย้อนกลับ กระแสที่ไหลในวงจรมีค่าน้อยมาก และกระแสจะคงที่ไม่ขึ้นกับค่า V_a ในช่วงของ V_a ขนาดหนึ่ง



รูปที่ 2.29 แสดงโครงสร้างของไดโอดของสารกึ่งตัวนำที่มีรอยต่อแบบพี-เอ็น ขณะถูกไบอัสไปข้างหน้าด้วยแรงดัน V_a

2.11 การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ (จูตินัย, 2556)

เทคนิคการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศนั้นเป็นวิธีการเตรียมฟิล์มบางวิธีหนึ่งของการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการระเหยสารซึ่งต้องเตรียมในสุญญากาศที่ระดับความดันประมาณ 10^{-5} - 10^{-7} ทอร์ วัตถุประสงค์ของการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีนี้ คือการควบคุมการเคลื่อนย้ายอะตอมจากแหล่งกำเนิดความร้อนไปยังฐานรองรับที่ห่างออกไปแล้วเกิดเป็นฟิล์มบาง

2.11.1 อัตราการระเหยสาร

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

$$\phi_e = \frac{3.513 \times 10^{22}}{(MT)^{1/2}} P_e \quad \text{โมเลกุลต่อตารางเซนติเมตร-วินาที} \quad (2.99)$$

เมื่อ ϕ_e คือ ฟลักซ์ของจำนวนอะตอมหรือโมเลกุลของสารที่ระเหยต่อหน่วยพื้นที่ต่อเวลา

P_e คือ ความดันสมดุล (equilibrium pressure) มีหน่วยเป็นทอร์

M คือ มวลโมเลกุล

T คือ อุณหภูมิในหน่วยเคลวิน

อัตราการระเหยมวลสาร (mass evaporation rate: Γ_e) สามารถหาได้จาก

$$\Gamma_e = 5.84 \times 10^{-2} (M/T)^{1/2} P_e \quad \text{กรัมต่อตารางเซนติเมตร-วินาที} \quad (2.100)$$

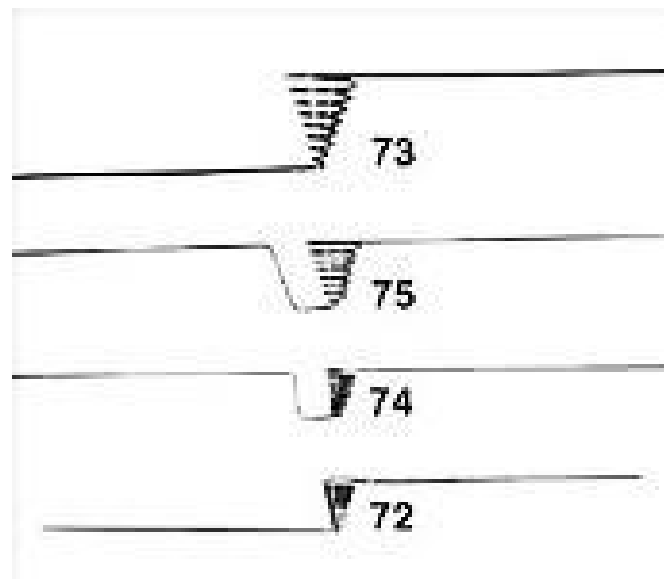
ที่ความดัน 10^{-2} ทอร์ ค่าของ Γ_e ในธาตุจำนวนมากจะมีค่าประมาณ 10^{-4} กรัมต่อตารางเซนติเมตร-วินาที ดังนั้นสิ่งที่มีอิทธิพลต่ออัตราการระเหยสารคือ อุณหภูมิ เพราะมีผลกระทบอย่างมากต่อความดันสมดุล

2.11.2 แหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้ในการระเหยสารด้วยไฟฟ้า

ในการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการระเหยด้วยความร้อนจะต้องให้ความร้อนแก่สารกึ่งตัวนำที่ต้องการนำมาเคลือบบนผิวหน้าแผ่นฐานรองโดยทั่วไปแล้วจะใช้ตัวต้านทานหรือขดลวดเหนี่ยวนำ เป็นแหล่งกำเนิดโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่ตัวต้านทานหรือขดลวดเหนี่ยวนำได้ แหล่งกำเนิดความร้อนมีหลายชนิด แบ่งออกได้ดังนี้

2.11.2.1 แหล่งกำเนิดชนิดทังสเตน

แหล่งกำเนิดนี้จะอยู่ในรูปพันรอบเดี่ยวหรือหลายรอบเป็นเกลียวทรงกระบอกหรือรูปโคน โดยขดลวดทรงกระบอกจะใช้สำหรับโลหะที่หลอมละลายได้เร็วส่วนขดลวดรูปโคนจะใช้ได้ดีกับโลหะที่หลอมละลายช้า ขดลวดทังสเตนสามารถทำงานได้จนกระทั่งอุณหภูมิ 2,200 เคลวิน เกินกว่านี้ประสิทธิภาพจะลดลง

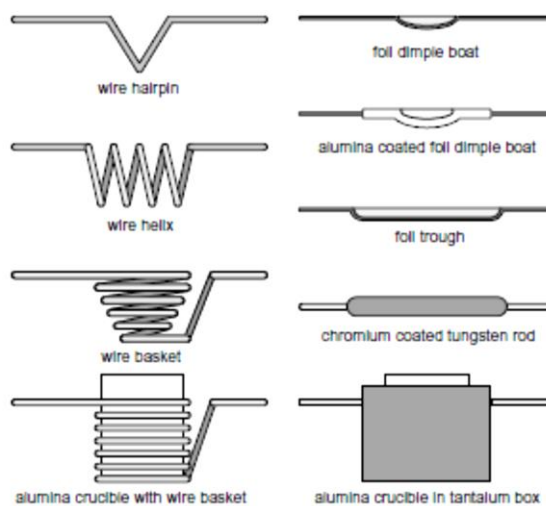


รูปที่ 2.30 แหล่งกำเนิดชนิดทังสเตน

2.11.2.2 แหล่งกำเนิดชนิดแผ่นโลหะคงรูป

แหล่งกำเนิดชนิดแผ่นโลหะคงรูป เช่น ทังสเตน แทนทาลัม และโมลิบดีนัมจะเหมือนกับอุปกรณ์ที่เป็นขดลวดคือ มีความต้านทานในตัวเองและให้ความร้อนที่ค่าแรงดันต่ำแต่กระแสสูง แหล่งกำเนิดเหล่านี้จะถูกสร้างขึ้นมาในรูปแบบต่างๆ

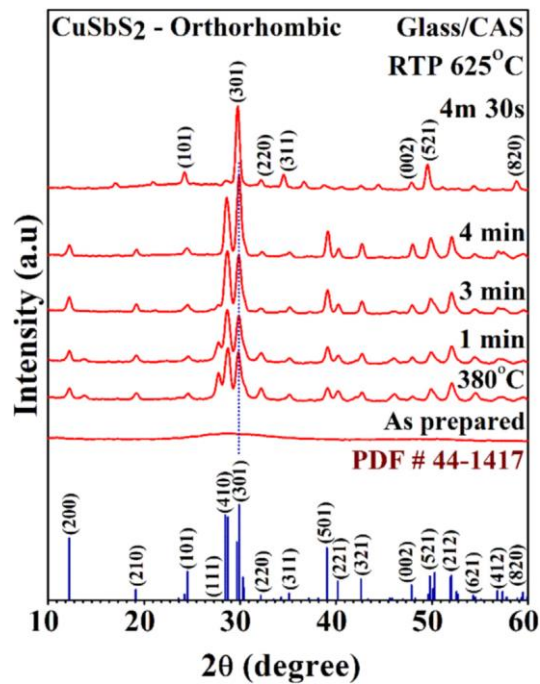
Resistance Heated Evaporation Sources



รูปที่ 2.31 แหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้ระเหยสารด้วยไฟฟ้าแบบต่างๆ

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Vinayakumar 2019)

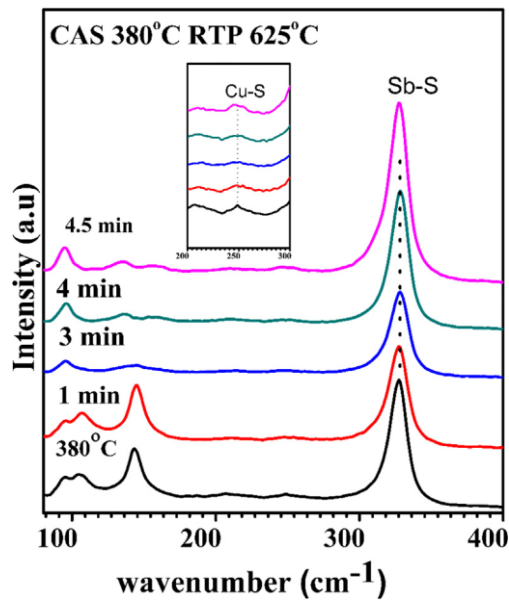
ได้มีการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Sb_2S_3 ลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นกระจกสไลด์ และฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu ด้วยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เพื่อให้เกิดชั้นของฟิล์มบางของ Sb_2S_3 - Cu ตามลำดับ หลังจากนั้นจึงนำฟิล์มบางที่ประดิษฐ์ได้ไปแอนนัล (heat treatments) ที่อุณหภูมิ 380 องศาเซลเซียส และได้ทำการศึกษสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆของฟิล์มบางต่อไป



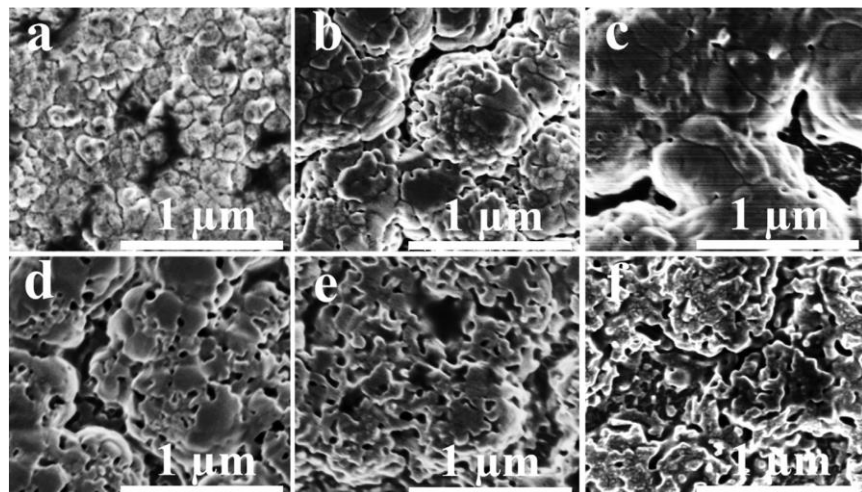
รูปที่ 2.32 พิกความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

จากรูปที่ 2.32 แสดงพิกความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 พบว่าฟิล์มบางที่ไม่ผ่านการแอนนัลจะไม่ปรากฏพิกออกมาหรือมีลักษณะเป็นอะมอร์ฟัส ในขณะที่เมื่อเพิ่มเวลาในการแอนนัลเพิ่มขึ้น จะพบว่าพิกความเข้มการเลี้ยวเบนปรากฏขึ้นมาอย่างเด่น โดยมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบออร์โธโรมบิก โดยมีระนาบ (101), (301), (220) และ (311) เป็นระนาบที่โดดเด่น

การศึกษารามานสเปกโทรสโกปีของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ทำให้ทราบว่ามีการเกิดพันธะระหว่าง Sb-S และ Cu-S ในโหมดสั้น (vibrational modes) ที่ตำแหน่ง 330 cm^{-1} และ 250 cm^{-1} ตามลำดับ โดยพิกที่มีความเข้มมากกว่านั้นเป็นพิกระหว่าง Sb-S ขณะที่พิกระหว่าง Cu-S มีความเข้มของพิกน้อยกว่าและสังเกตได้ยาก ดังแสดงในรูปที่ 2.33



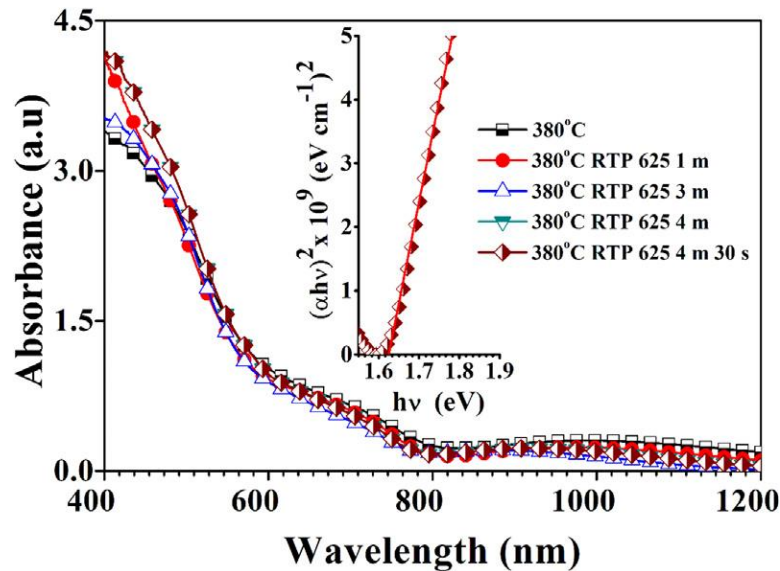
รูปที่ 2.33 พิกัดความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 2.34 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

- (a). pre-annealed
- (b). 1 min
- (c). 2 min
- (d). 3 min
- (e). 4 min
- (f). 5 min

ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(SEM) ของฟิล์มบาง CuSbS_2 จะแสดงดังรูปที่ 2.34 พบว่าฟิล์มบางที่ไม่ผ่านการแอนนีสจะไม่สามารถสังเกตเห็นความเป็นผลึกได้ และฟิล์มบางที่ได้รับการแอนนีสจะมีลักษณะเป็นผลึก และขนาดของเกรนที่ปรากฏจะมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาในการแอนนีสขึ้นไป



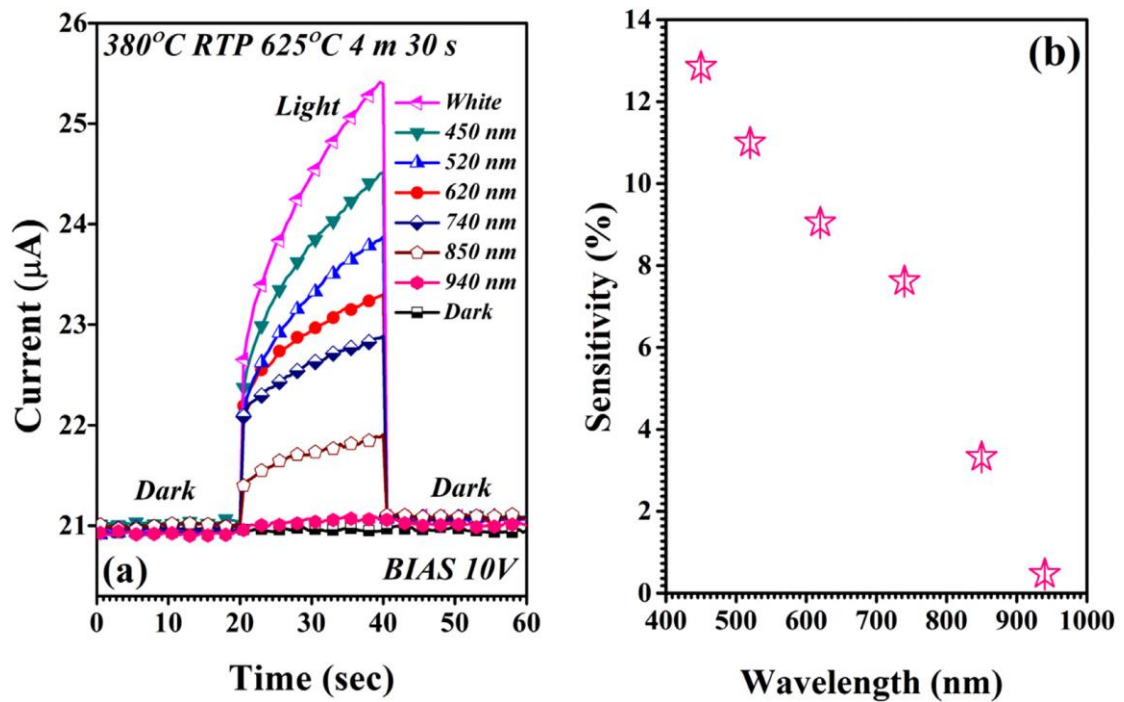
รูปที่ 2.35 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

การศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางช่วยให้ทราบถึงค่าช่องว่างแถบพลังงาน จากรูปที่ 2.35 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางที่ระยะเวลาในการแอนนีสที่แตกต่างกัน จากรูปจะพบว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 สามารถดูดกลืนแสงได้ดีในช่วง 400-700 นาโนเมตร หรือแสงในย่านตามองเห็น และจากนั้นจึงหาค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง จากสมการ

$$(\alpha h\nu)^2 = A(h\nu - E_g)$$

โดยเป็นการเขียนกราฟระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ และ $h\nu$ จากนั้นหาจุดตัดบนแกน X จะทำให้ทราบค่าช่องว่างแถบพลังงาน ซึ่งค่าช่องว่างแถบพลังงานที่ได้นั้นเท่ากับ 1.6 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งค่านี้สอดคล้องกับรายงานของสารประกอบนี้

จากนั้นศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางโดยการวัดความไวต่อแสง(Photosensitivity) โดยเป็นการวัดกระแสในขณะที่มีการฉายแสงลงบนฟิล์มบาง และศึกษาถึงการตอบสนองต่อแสง(Photo response) ที่ความยาวคลื่นต่างๆ พบว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ตอบสนองต่อแสงได้ดี ช่วง 400-700 นาโนเมตร จากนั้นการตอบสนองต่อแสงที่ความยาวคลื่นสูงขึ้น ค่าจะค่อยๆ ลดลง ดังรูปที่ 2.36



รูปที่ 2.36 แสดง (a) การตอบสนองต่อแสง และ (b) ค่าความไวต่อแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยที่จะดำเนินงานต่อไป ศึกษาการเตรียมฟิล์มบาง $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ และฟิล์มบาง CuSbS_2 ที่ถูกเคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ จากสารตั้งต้นที่มีความบริสุทธิ์สูง 99.999% จากนั้นนำไปตรวจสอบสมบัติทางฟิสิกส์ ได้แก่ การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ การศึกษาสมบัติทางแสงด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าสำหรับฟิล์มบางที่มีสภาพต้านทานสูง เพื่อให้ได้ฟิล์มบางที่เหมาะสมสำหรับการพัฒนาเป็นเซลล์แสงอาทิตย์หรือเซนเซอร์ต่อไป

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัย มีวิธีการดำเนินงานทดลองดังนี้ (ฐิตินัย, 2545; ฐิตินัย, 2546; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2552; งามนิศย์, 2551)

3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

1. แผ่นกระจกสไลด์ขนาด 12x25 ตารางมิลลิเมตร
2. ที่ตัดกระจกสไลด์
3. ปีกเกอร์ขนาด 200 มิลลิลิตร
4. เครื่องสั่นด้วยคลื่นอัลตราโซนิก
5. เครื่องเป่าลมร้อน
6. นาฬิกาจับเวลา
7. ปากคีบ
8. เตาอบ
9. สารเคมี
 - 9.1 น้ำยาล้างจาน
 - 9.2 น้ำปลอดประจุ
 - 9.3 อะซิโตน
 - 9.4 เอทานอล

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง CuSbS_2 ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

1. ระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ
2. เครื่องควบคุมอุณหภูมิห้อง SHIMADEN รุ่น PID FP93
3. เครื่องชั่งน้ำหนัก 4 ตำแหน่งยี่ห้อ Sartorius
4. แผ่นหน้ากากอะลูมิเนียม (mask) ที่ใช้สำหรับออกแบบลักษณะรูปแบบของฟิล์มบางที่ถูกใช้ในระบบสุญญากาศ
5. สารตั้งต้น CdS บริสุทธิ์ชนิดผง 99.99 เปอร์เซ็นต์
6. สารตั้งต้น ZnTe บริสุทธิ์ชนิดผง 99.99 เปอร์เซ็นต์

7. สารตั้งต้น Cu_2S บริสุทธิ์ชนิดผง 99.99 เปอร์เซ็นต์
8. สารตั้งต้น Sb_2S_3 บริสุทธิ์ชนิดผง 99.99 เปอร์เซ็นต์
9. ซ้อนตักสารเคมี

3.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางแสง

เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS spectrophotometer) ยี่ห้อ thermo electron corporation รุ่น Heios โดยใช้ความยาวคลื่น 200-1000 นาโนเมตร

3.1.4 เครื่องมือที่ใช้ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค

เอกซ์เรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ (XRD) ของยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ 1.5418 อังสตรอม ใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์ แรงดันไฟฟ้า 30 กิโลโวลต์ โดยวัดจากมุม 20-70 องศา

3.1.5 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค

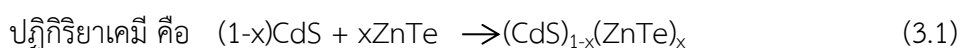
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) ของยี่ห้อ LEO รุ่น LEO 1455VP โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 6 กิโลโวลต์ และกำลังแยกความละเอียดของภาพถ่าย 1,000 3,000 และ 5,000 เท่า

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 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบาง $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ และฟิล์มบาง CuSbS_2 ที่เตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

3.2.1 การคำนวณปริมาณสารตั้งต้นของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq X \leq 1.0$)



ซึ่งสารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ CdS และ ZnTe จำนวน 1 กรัม และบดคลุกเคล้าให้เข้ากันในครกอากาศเป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง

มวลอะตอมของ

Cd	=	112.4110	กรัม/โมล
Zn	=	65.3800	กรัม/โมล
S	=	32.0660	กรัม/โมล

Te = 127.6000 กรัม/โมล
 มวลโมเลกุลของ CdS = 144.4760 กรัม/โมล
 ZnTe = 192.9800 กรัม/โมล

กรณี x = 0.00

ใช้ CdS จำนวน 1 กรัม

กรณี x = 0.20

$$\begin{aligned} \text{มวลโมเลกุลของผงผลึก } (\text{CdS})_{0.8}(\text{ZnTe})_{0.2} &= [(144.4760 \times 0.8) + (192.9800 \times 0.2)] \\ &= 154.1768 \text{ กรัม/โมล} \end{aligned}$$

ถ้าต้องการเตรียมผงผลึก $(\text{CdS})_{0.8}(\text{ZnTe})_{0.2}$ จำนวน 1 กรัม

$$\begin{aligned} \text{ต้องใช้ผงผลึก CdS} &= \frac{(144.4760)(0.8)}{154.1768} \\ &= 0.7497 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ต้องใช้ผงผลึก ZnTe} &= \frac{(192.9800)(0.2)}{154.1768} \\ &= 0.2503 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

กรณี x = 0.40

$$\begin{aligned} \text{มวลโมเลกุลของผงผลึก } (\text{CdS})_{0.6}(\text{ZnTe})_{0.4} &= [(144.4760 \times 0.6) + (192.9800 \times 0.4)] \\ &= 163.8776 \text{ กรัม/โมล} \end{aligned}$$

ถ้าต้องการเตรียมผงผลึก $(\text{CdS})_{0.6}(\text{ZnTe})_{0.4}$ จำนวน 1 กรัม

$$\begin{aligned} \text{ต้องใช้ผงผลึก CdS} &= \frac{(144.4760)(0.6)}{163.8776} \\ &= 0.5290 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ต้องใช้ผงผลึก ZnTe} &= \frac{(192.9800)(0.4)}{163.8776} \\ &= 0.4710 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

กรณี x = 0.60

$$\begin{aligned} \text{มวลโมเลกุลของผงผลึก } (\text{CdS})_{0.4}(\text{ZnTe})_{0.6} &= [(144.4760 \times 0.4) + (192.9800 \times 0.6)] \\ &= 173.5784 \text{ กรัม/โมล} \end{aligned}$$

ถ้าต้องการเตรียมผงผลึก $(\text{CdS})_{0.4}(\text{ZnTe})_{0.6}$ จำนวน 1 กรัม

$$\begin{aligned} \text{ต้องใช้ผงผลึก CdS} &= \frac{(144.4760)(0.4)}{173.5784} \\ &= 0.3329 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ต้องใช้ผงผลึก ZnTe} &= \frac{(192.9800)(0.6)}{173.5784} \end{aligned}$$

$$= 0.6671 \text{ กรัม}$$

กรณี $x = 0.80$

$$\begin{aligned} \text{มวลโมเลกุลของผงผลึก (CdS)}_{0.2}\text{(ZnTe)}_{0.8} &= [(144.4760 \times 0.2) + (192.9800 \times 0.8)] \\ &= 183.2792 \text{ กรัม/โมล} \end{aligned}$$

ถ้าต้องการเตรียมผงผลึก $(\text{CdS})_{0.2}(\text{ZnTe})_{0.8}$ จำนวน 1 กรัม

$$\begin{aligned} \text{ต้องใช้ผงผลึก CdS} &= \frac{(144.4760)(0.2)}{183.2792} \\ &= 0.1577 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ต้องใช้ผงผลึก ZnTe} &= \frac{(192.9800)(0.8)}{183.2792} \\ &= 0.8423 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

กรณี $x = 1.00$

ใช้ ZnTe จำนวน 1 กรัม

3.2.2 การคำนวณปริมาณสารตั้งต้นของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2



ซึ่งสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ Cu_2S และ Sb_2S_3 จำนวน 1 กรัม บดคลุกเคล้าให้เข้ากันในครกอาเกตเป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง

$$\begin{aligned} \text{มวลอะตอมของ } \text{Cu} &= 63.5460 \text{ กรัม/โมล} \\ \text{Sb} &= 121.760 \text{ กรัม/โมล} \\ \text{S} &= 32.0660 \text{ กรัม/โมล} \\ \text{มวลโมเลกุลของ } \text{Cu}_2\text{S} &= 79.579 \text{ กรัม/โมล} \\ \text{Sb}_2\text{S}_3 &= 169.859 \text{ กรัม/โมล} \\ \text{CuSbS}_2 &= 249.438 \text{ กรัม/โมล} \end{aligned}$$

ดังนั้น ถ้าต้องเตรียมผงผลึก CuSbS_2 จำนวน 1 กรัม จะต้องใช้

$$\begin{aligned} \text{ผงผลึกของ } \text{Cu}_2\text{S} &= \frac{(1)(79.579)}{(249.438)} \\ &= 0.319 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ผงผลึกของ } \text{Sb}_2\text{S}_3 &= \frac{(1)(169.859)}{(249.438)} \\ &= 0.680 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

3.2.3 การเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

1. ตัดแผ่นกระจกสไลด์ให้มีขนาด 12x25 ตารางมิลลิเมตร นำไปเช็ดทำความสะอาดด้วยฟองน้ำและน้ำยาล้างจานทั้งสองด้านเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่ติดแน่นออกแล้วล้างด้วยน้ำสะอาดปกติ
2. เสียบแผ่นกระจกสไลด์เข้ากับตัวยึดเทฟลอนแล้วนำไปล้างด้วยน้ำปลอดประจุ
3. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วยอะซีโตนในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาที
4. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วยเอทานอลในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาที
5. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วยน้ำปลอดประจุ 3 ครั้งๆละ 10 นาที
6. ทำการเป่าแห้งแผ่นกระจกสไลด์ด้วยเครื่องเป่าลมร้อนให้แห้งโดยไม่ต้องถอดกระจกสไลด์ออกจากตัวยึดที่ทำด้วยแท่งเทฟลอน ไม่ควรเป่าลมร้อนที่บริเวณเดียวและใกล้เกินไปเพราะจะส่งผลให้น้ำที่ติดอยู่ที่ผิวกระจกแห้งอย่างรวดเร็วแล้วทิ้งคราบน้ำเอาไว้ ควรเป่าวนรอบๆ
7. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปอบในเตาที่อุณหภูมิประมาณ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
8. เมื่อกระจกสไลด์เย็นตัวเก็บใส่ถุงซิปล็อคแยกจากกันในแต่ละชิ้น เพื่อป้องกันกระจกสไลด์ชูดกันเป็นรอย จากนั้นเก็บไว้ในหม้อดูดความชื้น

3.2.4 การทำความสะอาดระบบสุญญากาศและหน้ากากอะลูมิเนียมที่ใช้สำหรับออกแบบลักษณะรูปแบบของฟิล์มบางที่ถูกใช้ในระบบสุญญากาศ

1. ใช้สาลีเช็ดผิวภายในภาชนะสุญญากาศและกระจกมองด้านหน้า ผิวหน้าหัววัดความหนาและชิ้นส่วนภายในอื่นๆ ด้วยอะซีโตน ยกเว้นโอรังบริเวณฐานของระบบสุญญากาศจะต้องเช็ดด้วยเมทานอลเพราะหากเช็ดด้วยอะซีโตนอาจทำให้โอรังเสียหายได้
2. เช็ดทำความสะอาดแผ่นหน้ากากอะลูมิเนียมด้วยอะซีโตนแล้วเป่าด้วยเครื่องเป่าลมร้อนให้แห้ง
3. ชั่งสารเคมีตามปริมาณ ดังนี้
 - การเคลือบฟิล์มบาง $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ และฟิล์มบาง CuSbS_2 โดยจะชั่งสารตั้งต้นให้มีน้ำหนักประมาณ 0.3 กรัม และตักสารตั้งต้นให้เต็มภาชนะที่ใส่สารตั้งต้น (boat) ที่อยู่ในระบบสุญญากาศพอดี

3.2.5 การเคลือบฟิล์มบาง $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ และฟิล์มบาง CuSbS_2 โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

1. ปรับระยะห่างของแผ่นหน้ากากอะลูมิเนียมกับขอบด้านบนของภาชนะที่ใส่สารตั้งต้นให้อยู่ภายในระบบสุญญากาศให้มีระยะเท่ากับ 13 เซนติเมตร
2. ตักสารตั้งต้นใส่ให้เต็มภาชนะที่ใส่สารตั้งต้นที่อยู่ในระบบสุญญากาศพอดี
3. วางแผ่นหน้ากากอะลูมิเนียมที่ใช้สำหรับระเหยสารตั้งต้นลงบนขาตั้งในระบบสุญญากาศ

4. วางกระจกสไลด์ที่ล้างแล้วลงบนช่องของแผ่นหน้ากากอะลูมิเนียม แล้ววางแผ่นทำความร้อน (heater) ทับลงบนกระจกสไลด์อีกชั้นหนึ่งเพื่อเป็นการให้อุณหภูมิกับแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์
5. ตรวจสอบวัตต์อุณหภูมิ ปิดระบบสุญญากาศ แล้วทำการสูบลมออกจนได้ความดันอยู่ในระดับ $(3-4) \times 10^{-5}$ มิลลิบาร์
6. เปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิเพื่อให้อุณหภูมิกับแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ 100 องศาเซลเซียส จากนั้นค่อยๆ จ่ายกระแสไฟฟ้าทีละน้อยจนได้กระแสไฟฟ้าประมาณ 80-100 แอมแปร์ ในขณะที่สารตั้งต้นจะเริ่มระเหิด ทั้งนี้ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้จะขึ้นกับปริมาณสารตั้งต้นและความดันเมื่อเริ่มจ่ายกระแสไฟฟ้า
7. เมื่อสังเกตเห็นสารตั้งต้นระเหิดจนหมด ลดกระแสไฟฟ้าที่จ่ายจนเป็นศูนย์ ปิดระบบที่ให้อุณหภูมิกับแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ รอจนกระทั่งอุณหภูมิภายในระบบสุญญากาศลดลงจนมีค่าประมาณ 40 องศาเซลเซียส จึงปิดระบบปั๊มสุญญากาศและนำฟิล์มที่เคลือบเสร็จแล้วไปเก็บไว้ในหม้อดูดความชื้น
8. ทำการแอนนีสฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่ถูกเคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่เตรียมได้ทั้งหมด ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 100, 200, 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เป็นเวลา 30 นาที และเมื่อเตาเย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้องจึงปิดเตา โดยอุณหภูมิการแอนนีสได้จากการศึกษาวิจัยของ Hussain. et al. (2017) และ Vinayakumar. et al. (2019)



รูปที่ 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมสิ่งประดิษฐ์ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ และฟิล์มบาง CuSbS_2 ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแอนนีสฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

3.3 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์พื้นฐานประเภทต่างๆ ของฟิล์มบาง $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ และฟิล์มบาง CuSbS_2

3.3.1 การศึกษาสมบัติทางแสง

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ และ CuSbS_2 ที่เตรียมได้ทั้งหมด ไปศึกษาสมบัติทางแสงด้วยการวัดค่าเปอร์เซ็นต์ของการส่งผ่านแสงด้วยเครื่อง ยูวี-วิสลิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ thermo electron corporation รุ่น Heios โดยใช้ความยาวคลื่น 200-1000 นาโนเมตร เพื่อคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและค่าช่องว่างแถบพลังงาน

3.3.2 การศึกษาโครงสร้างเชิงจุลภาค

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ และ CuSbS_2 ที่เตรียมได้ทั้งหมด ไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จากเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตรมิเตอร์ (XRD) ของยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ 1.5406 อังสตรอม โดยใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์และความต่างศักย์ 30 กิโลโวลต์ โดยมีมุม 2θ เริ่มจาก 20-70 องศา นำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณหาค่าคงที่ของโครงผลึกขนาดของเกรน และตรวจสอบระนาบผลึกที่ปรากฏ

3.3.3 การศึกษาโครงสร้างเชิงมหภาค

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ และ CuSbS_2 ที่เตรียมได้ทั้งหมด ไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ LEO รุ่น LEO 1455VP โดยใช้แรงดันไฟฟ้า 6 กิโลโวลต์ และกำลังแยกความละเอียดของภาพถ่าย 1,000

3,000 และ 5,000 เท่า นำข้อมูลที่ได้มาประมาณขนาดของเกรนและศึกษาลักษณะของชั้นฟิล์มจากภาพตัดขวาง

3.3.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า

3.3.4.1 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า (R) ความต้านทานแผ่น (R_S) และสภาพต้านทานไฟฟ้าของเนื้อสาร (ρ_B) ด้วยวิธีสองขั้ว

1. ทำการต่อขั้วไฟฟ้าแบบสองขั้วโดยใช้สายไฟขนาดเล็กสองเส้นมาทำให้เป็นเส้นตรงวางห่างกันโดยประมาณ 3-4 มิลลิเมตร และป้ายด้วยกาวเงินนำไฟฟ้าลงบนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2
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 ρ_B จากสมการ $\rho_B = R \frac{A}{d}$ โดย R คือ ความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง, A คือ พื้นที่หน้าตัดของขั้วไฟฟ้า และ d คือ ความหนาของฟิล์มบาง



รูปที่ 3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า – แรงดันไฟฟ้า (I-V curve) ที่อุณหภูมิต่างๆ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ และฟิล์มบาง CuSbS_2 โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

บทที่ 4

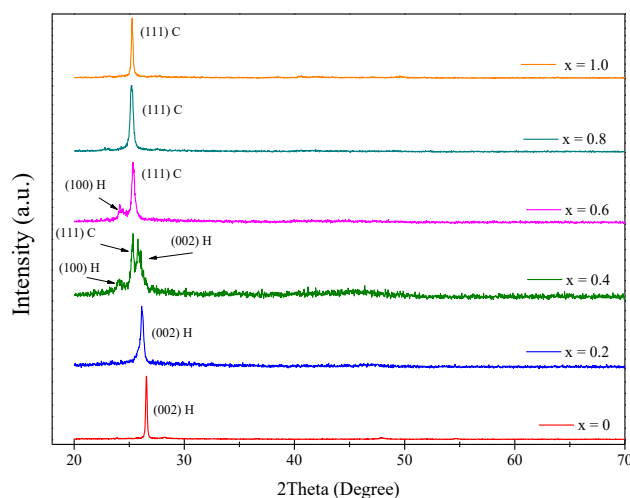
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์พื้นฐานของฟิล์มบาง $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) และฟิล์มบาง CuSbS_2 ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ นอกจากนี้ยังทำการศึกษารอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{ITO}/(\text{CdS})_{0.9}(\text{ZnTe})_{0.1}/\text{CuSbS}_2$ ซึ่งจะมุ่งเน้นในเรื่องของการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า กับค่าแรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง และสมบัติทางฟิสิกส์ของสารกึ่งตัวนำ

4.1 การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

4.1.1 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

เนื่องจากเราต้องการทราบถึงลักษณะโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และต้องการทราบถึงลักษณะโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำว่ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างไรบ้าง ดังนั้นเราจึงนำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้ไปทำการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เพื่อดูลักษณะของพีคความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ปรากฏขึ้นและนำมาเปรียบเทียบกับพีคความเข้มมาตรฐาน



รูปที่ 4.1 แสดงพีคความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

ลักษณะโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล และลักษณะของโครงสร้างผลึกแบบคิวบิกมีความสัมพันธ์กัน ดังนี้

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

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

จากการศึกษาลักษณะเฉพาะของโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ พบว่าเมื่อเศษส่วนโดยโมลอะตอม ($0.0 \leq x \leq 0.2$) ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำจะมีลักษณะเป็นเฟสเดี่ยวและมีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล โดยมีพิกัดลักษณะคล้ายกับงานวิจัยของ Huang. et al. (2015) เมื่อ ($0.4 \leq x \leq 0.6$) ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำจะมีลักษณะเป็นเฟสผสมและมีโครงสร้างผลึกแบบคิวบิกและเฮกซะโกนัล และเมื่อ ($0.8 \leq x \leq 1.0$) ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำจะมีลักษณะเป็นเฟสเดี่ยวและมีโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก ซึ่งมีพิกัดการเลี้ยวเบนที่ใกล้เคียงกับงานของ Hussain. et al. (2018) จากการศึกษาพบว่าผลมีลักษณะสอดคล้องกับงานวิจัยของ Lakshmi et al. (2003) ที่มีลักษณะของเฟสเป็นเฟสผสม ระหว่างเฟสของแคดเมียมซัลไฟด์และเฟสของซิงค์เทลลูไรด์

จากการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จะพบว่ามีพิกัดความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่แสดงให้เห็นดังรูปข้างต้น ถ้าเป็นโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล จะสอดคล้องกับระนาบ (100) และ (002) ถ้าเป็นโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก จะสอดคล้องกับระนาบ (111) ซึ่งรายงานโดย Lee. et al. (2003), Adachi. et al. (2009)

เมื่อพิจารณาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า a_H , c_H กับค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) โดยเริ่มจากการพิจารณาว่าเป็นระนาบ (111) ของโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก

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

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

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

ส่วนระบบผลึกแบบเฮกซะโกนัลจะได้ว่า

$$\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \left(\frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right) + \frac{l^2}{c^2} \quad (4.5)$$

ค่าความหนาแน่นของดิสโลเคชัน (γ) หาได้จากความสัมพันธ์

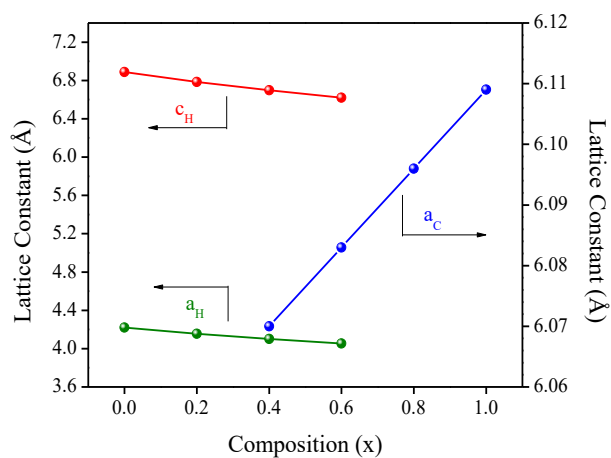
$$\gamma = \frac{1}{D^2}$$

เมื่อ D คือ ขนาดของเกรน

และความเครียด (ϵ) หาได้จากความสัมพันธ์ของวิลเลียมสัน-ฮอลล์ (Williamson-Hall relation) ดังนี้คือ

$$\beta \cos \theta = \frac{k\lambda}{D} + 4\epsilon \sin \theta \quad (4.6)$$

เมื่อ β คือ ความกว้างขอบฟุ้งที่ระยะครึ่งหนึ่งของความสูงฟุ้ง

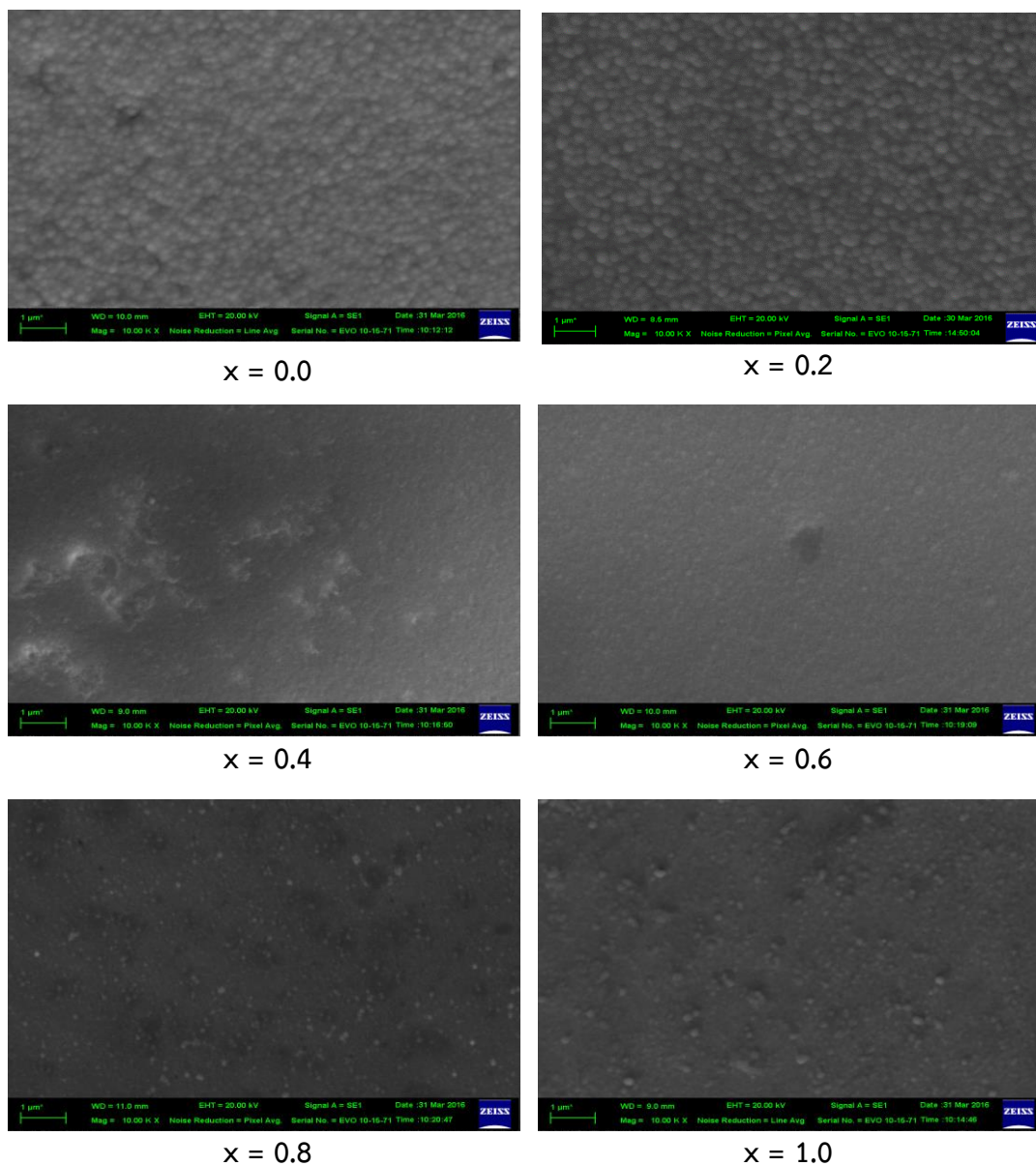


รูปที่ 4.2 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่โครงสร้างผลึก a_H , c_H และ a_c กับค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

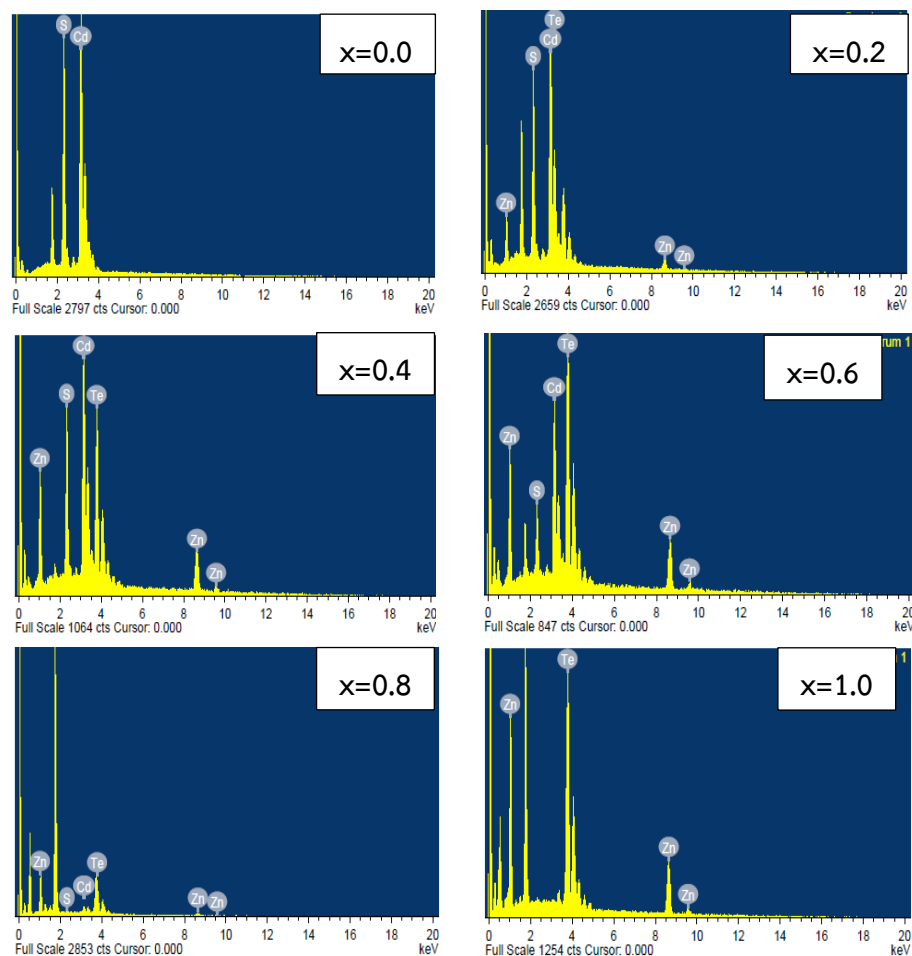
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าคงที่ผลึกและขนาดของเกรนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

Composition (x)	Phase	2θ	(hkl)	Lattice Constant (\AA)			Grain Size (nm)	Dislocation Density (line/m^2)	Strain
				a_c	a_H	c_H			
0.0	H (Single)	26.563	(002)	-	4.219	6.889	84.1	1.41×10^{16}	2.84×10^{-3}
		28.216	(101)						
		36.662	(102)						
		47.894	(103)						
		54.644	(004)						
0.2	H (Single)	26.131	(002)	-	4.155	6.785	43.3	2.87×10^{16}	5.64×10^{-3}
0.4	H	24.837	(100)	-	4.101	6.698	59.0	5.32×10^{16}	-
		25.769	(002)						4.21×10^{-3}
	C	25.350	(111)	6.070	-	-	45.6	5.64×10^{-3}	
0.6	H	24.127	(100)	-	-	-	45.0	5.75×10^{16}	5.56×10^{-3}
	C	25.356	(111)	6.083	-	-			
0.8	C (Single)	25.232	(111)	6.096	-	-	41.7	4.94×10^{16}	6.12×10^{-3}
1.0	C (Single)	25.275	(111)	6.109	-	-	74.8	1.79×10^{16}	3.40×10^{-3}

4.1.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะของโครงสร้างเชิงมหภาค ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่บริเวณผิวหน้า และผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.3 แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

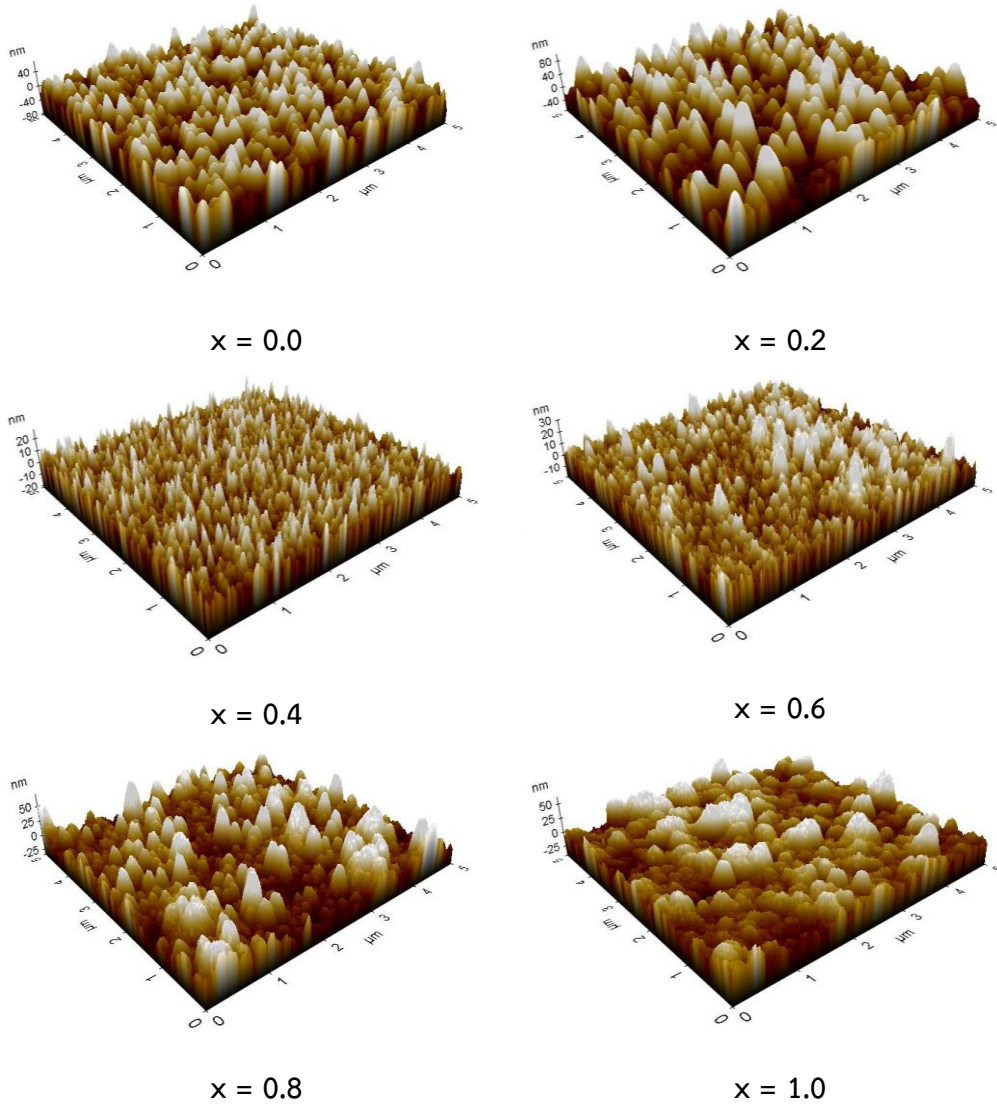


รูปที่ 4.4 แสดงสเปกตรัมที่ได้จากการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

ตารางที่ 4.2 แสดงองค์ประกอบของธาตุที่ได้จากการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

Composition (x)	Elements							
	Cd		S		Zn		Te	
	wt.%	at.%	wt.%	at.%	wt.%	at.%	wt.%	at.%
0.0	77.35	49.35	22.65	50.65	-	-	-	-
0.2	56.27	41.30	13.73	35.31	6.50	8.20	23.51	15.20
0.4	36.22	27.80	9.07	24.42	16.73	22.09	37.98	25.68
0.6	25.37	21.69	3.59	10.77	19.61	28.83	51.42	38.72
0.8	13.71	12.84	1.12	3.67	16.84	27.12	68.34	56.38
1.0	-	-	-	-	33.30	49.35	66.70	50.65

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

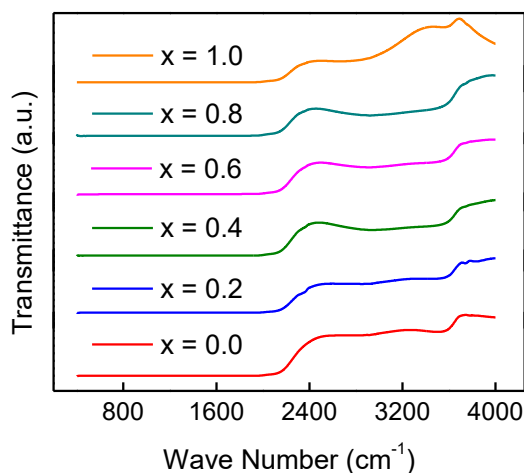


รูปที่ 4.5 แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

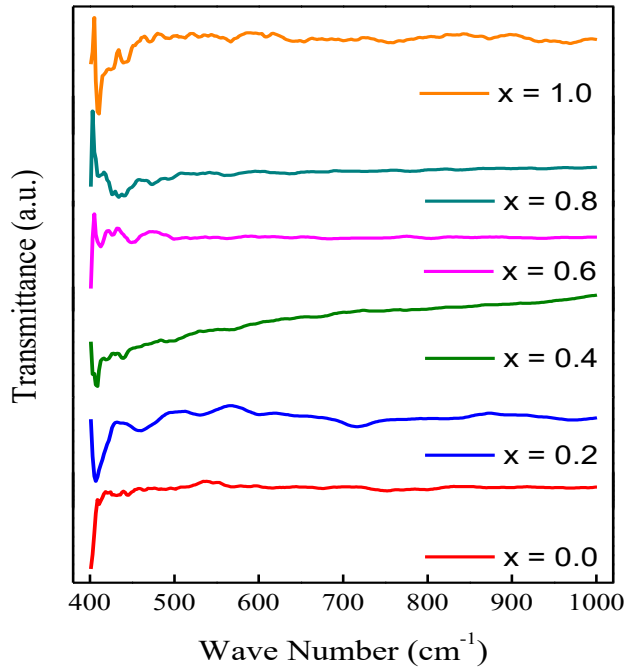
ตารางที่ 4.3 แสดงขนาดของเกรนและความขรุขระของพื้นผิวที่ได้จากการวิเคราะห์ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

Composition (x)	Roughness (nm)	Grain Size (nm)
0.0	20.68	156
0.2	33.27	361
0.4	6.61	117
0.6	6.09	88
0.8	17.82	205
1.0	16.30	264

4.1.4 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงในช่วงอินฟราเรดด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานซฟอร์หมอินฟราเรด สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (FTIR) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

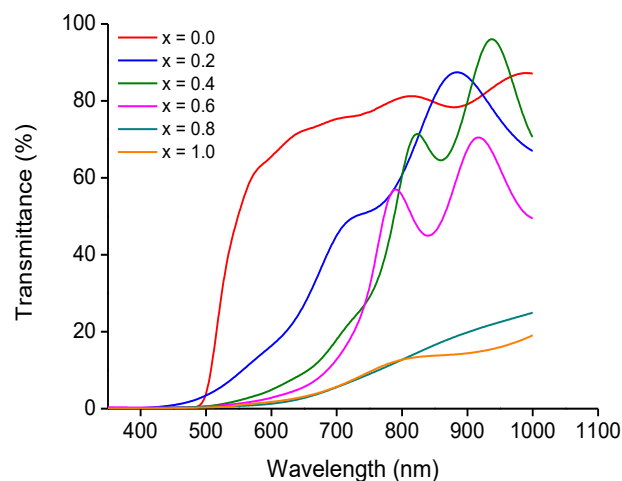


รูปที่ 4.6 กราฟแสดงสเปกตรัมฟูเรียร์ทรานซฟอร์หมอินฟราเรด (FTIR) ในช่วงเลขคลื่น $400 - 4000 \text{ cm}^{-1}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



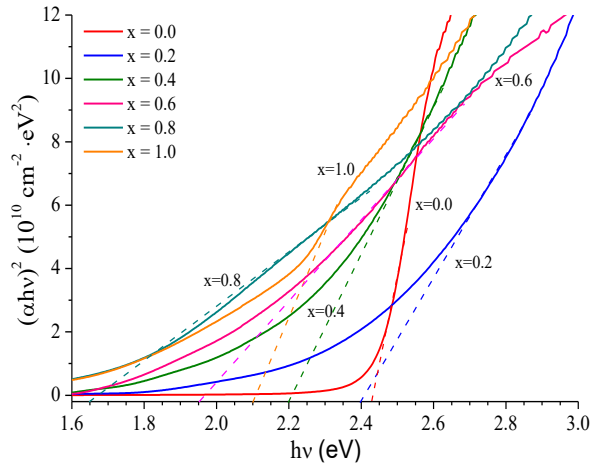
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงสเปกตรัมฟูเรียร์ทรานซฟอร์มอินฟราเรด (FTIR) ในช่วงเลขคลื่น 400 – 1000 cm^{-1} ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

4.1.5 ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.8 แสดงสเปกตรัมการส่งผ่านแสง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $(\alpha hv)^2$ กับ hv ของฟิล์มบาง $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึก CdS และ ZnTe ที่มีความบริสุทธิ์ 99.999% เพื่อหาค่าช่องว่างแถบพลังงานโดยการลากเส้นตรงการประมาณค่า(extrapolation) ของกราฟส่วนที่เป็นเชิงเส้นไปตัดกับแกนพลังงานโฟตอน จุดตัดที่ได้คือค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ ดังรูปที่ 4.9



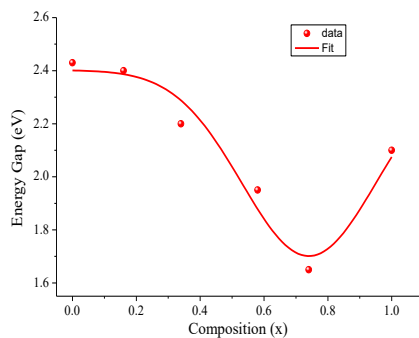
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$ กับ hv ของฟิล์มบาง $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึก CdS และ ZnTe ที่มีความบริสุทธิ์สูง 99.999% เพื่อหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในกรณีที่สารตั้งต้นเป็นผลึก CdS และ ZnTe มีความบริสุทธิ์สูง 99.999%

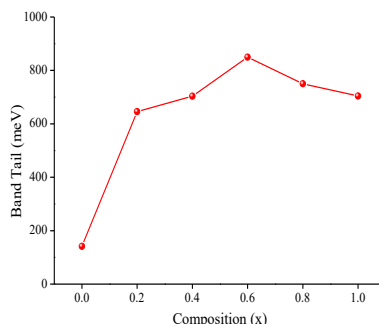
Composition (x)	Energy Gap (eV)	Band Tail (meV)
0.0	2.43	141.65
0.2	2.40	646.04
0.4	2.20	703.59
0.6	1.95	850.00
0.8	1.65	750.32
1.0	2.10	703.99

จากการศึกษาสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ จากรูปที่ 4.8 พบว่าขอบการดูดกลืนจะปรากฏที่ความยาวคลื่น 450 ถึง 750 นาโนเมตร ซึ่งสอดคล้องกับค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ CdS และ ZnTe

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $(\alpha hv)^2$ กับ hv เพื่อหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ของฟิล์มบาง $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ ($0 \leq x \leq 1$) พบว่าเมื่อค่าสัดส่วนผสมของโมลอะตอม ($x = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$) เพิ่มขึ้น ค่าช่องว่างแถบพลังงานมีค่าลดลงจนกระทั่งมีค่าต่ำสุดที่ $x=0.8$ จากนั้นค่าช่องว่างแถบพลังงานมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าสัดส่วนผสมของโมลอะตอม ($x = 1.0$) ดังรูปที่ 4.10 ซึ่งค่าช่องว่างแถบพลังงานที่ได้จากวิทยานิพนธ์นี้ มีค่าที่ใกล้เคียงกับของ Hussain. et al. (2012,) Islam. et al. (2015) และMuthusamy. et al. (2015).



รูปที่ 4.10 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงานกับเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนหางของแถบพลังงานกับเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

ค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง $(CdS)_{1-x}(ZnTe)_x$ เปลี่ยนแปลงตามค่าสัดส่วนโดยโมลอะตอม (x) ดังปรากฏใน Adachi (2009)

$$E_g(x) = E_g(ZnTe) + (E_g(CdS) - E_g(ZnTe) - b)x + bx^2 \quad (4.7)$$

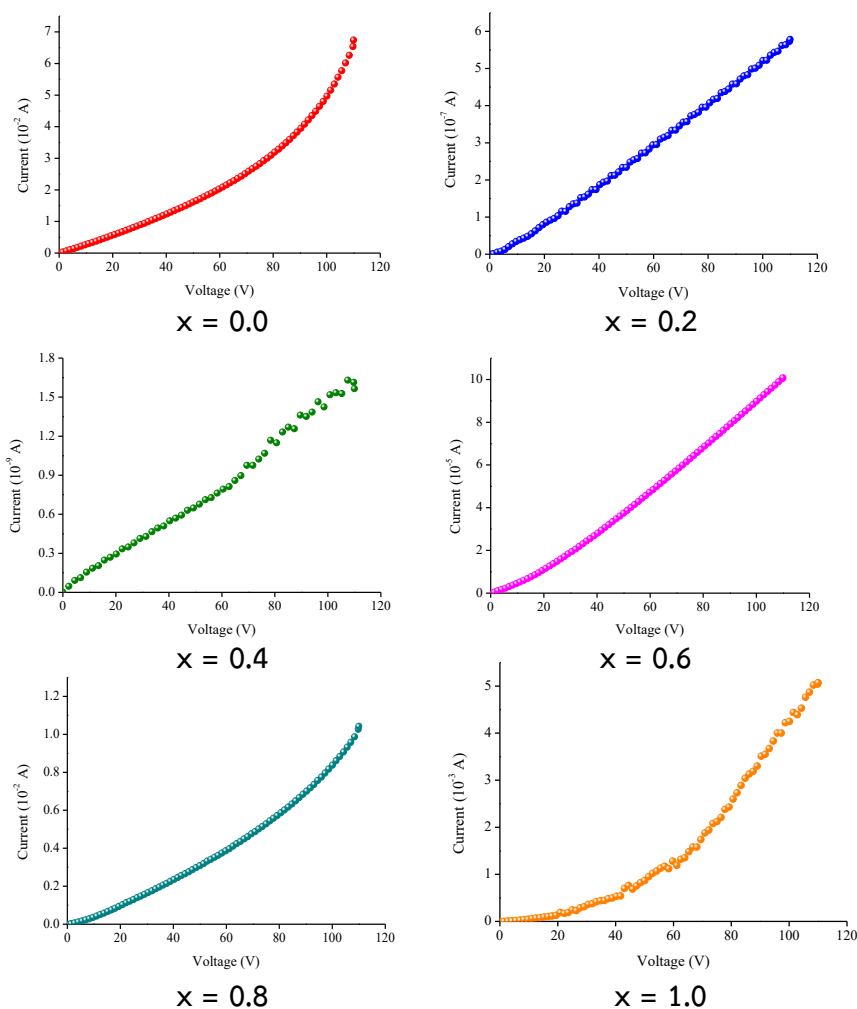
เมื่อ b คือ พารามิเตอร์ความโค้ง (bowing parameter) มีค่าเท่ากับ 1.23 อิเล็กตรอนโวลต์

4.1.6 ผลการศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) มีพื้นที่หน้าตัดเป็น A มีความหนา l มีความต้านทาน R และมีสภาพต้านทานไฟฟ้า (ρ) จะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$\rho = \frac{RA}{l} \quad (4.8)$$

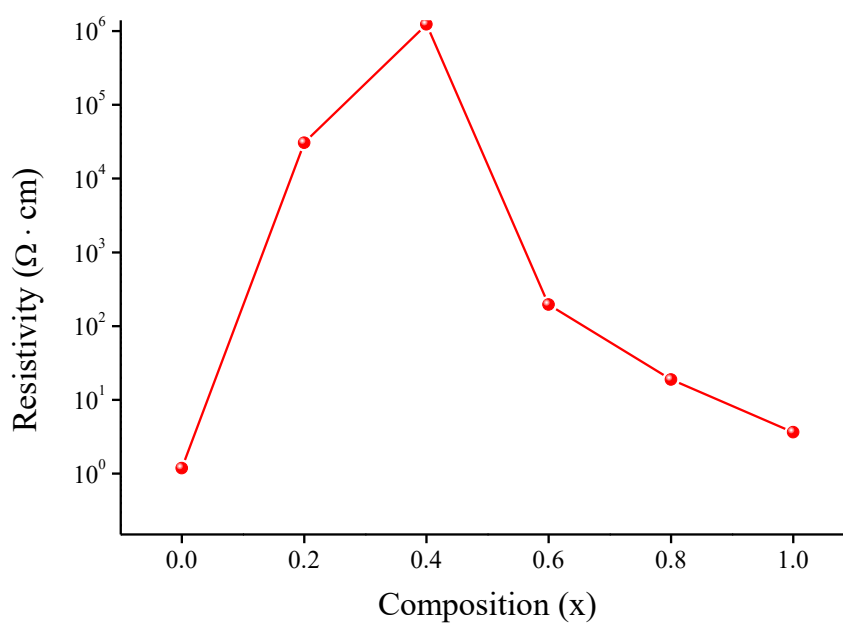
โดยที่ R คือ ความต้านทานที่วัดได้จากกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเพื่อหาค่าความต้านทานจากกราฟของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

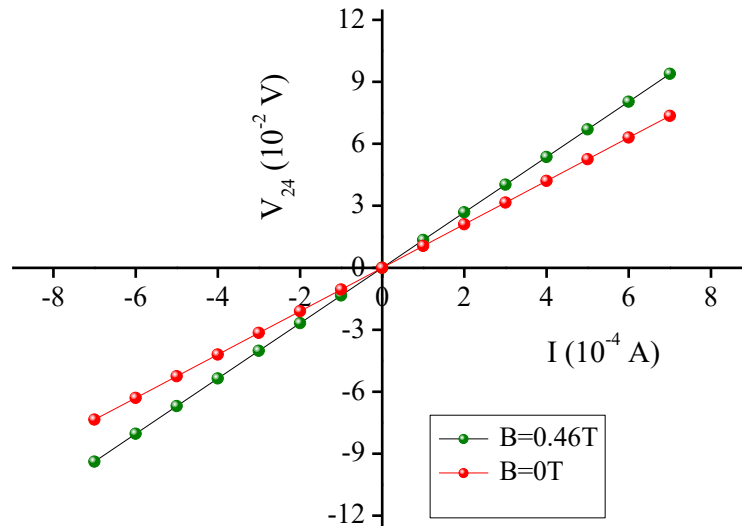
ตารางที่ 4.5 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

Composition (x)	Resistivity ($\Omega \cdot \text{cm}$)
0.0	3.73×10^{-1}
0.2	3.04×10^4
0.4	1.18×10^7
0.6	1.96×10^2
0.8	1.88
1.0	1.32×10^1

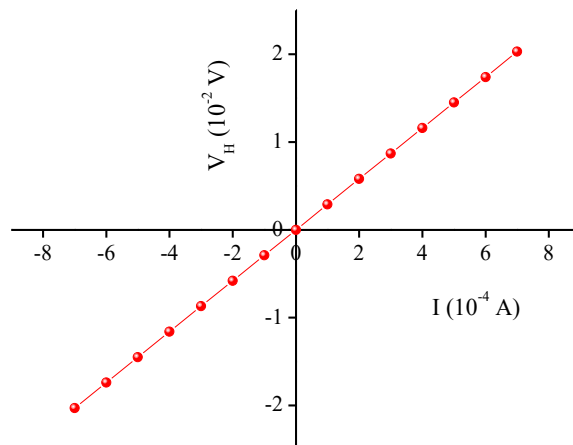


รูปที่ 4.13 กราฟแสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

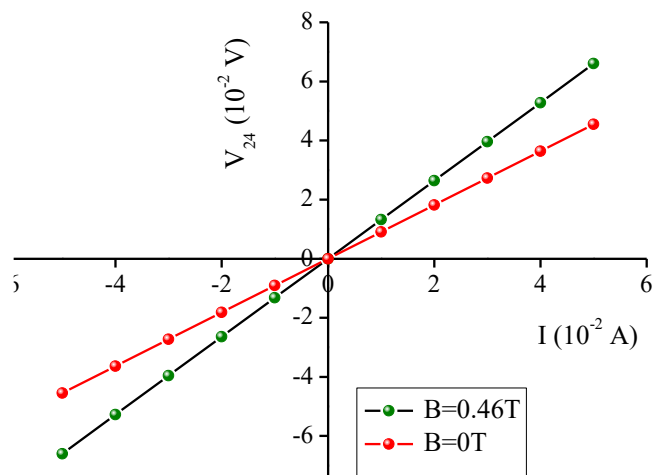
4.1.7 ผลการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



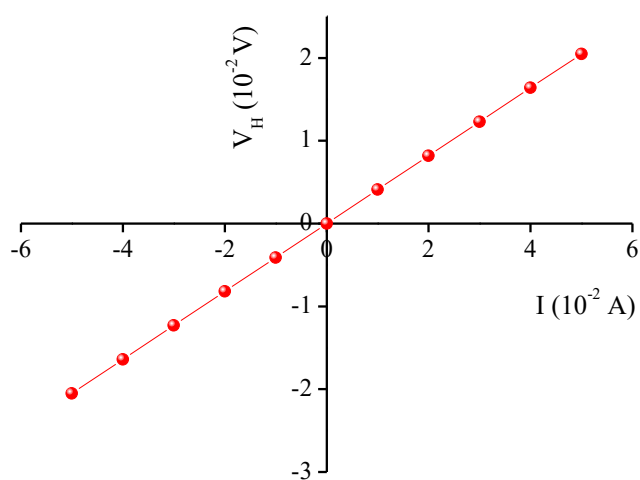
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_{24}) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ เมื่อ $x = 0.0$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



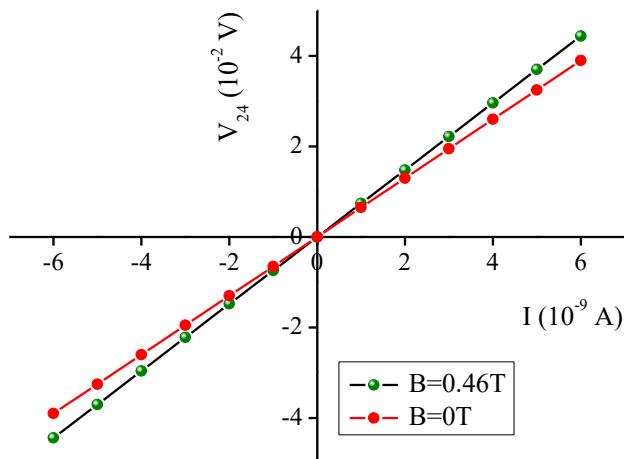
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ เมื่อ $x = 0.0$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



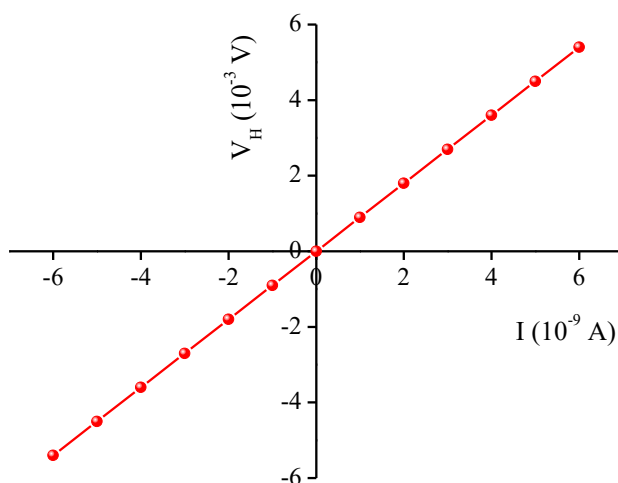
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_{24}) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ เมื่อ $x = 0.2$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



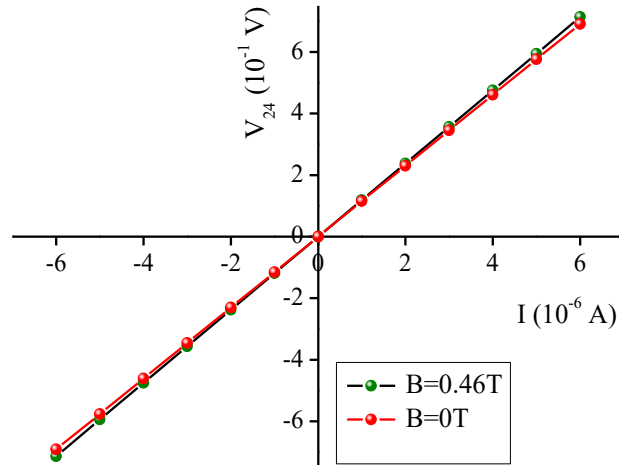
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ เมื่อ $x = 0.2$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



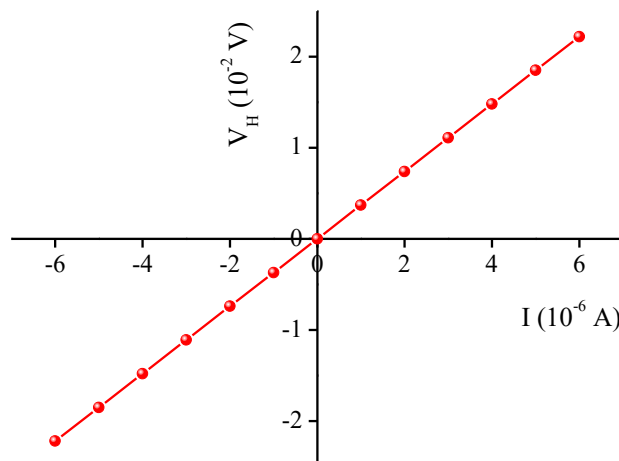
รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_{24}) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ เมื่อ $x = 0.4$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



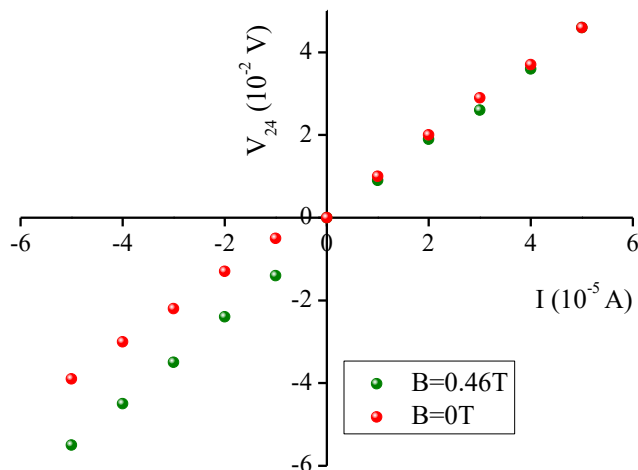
รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ เมื่อ $x = 0.4$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



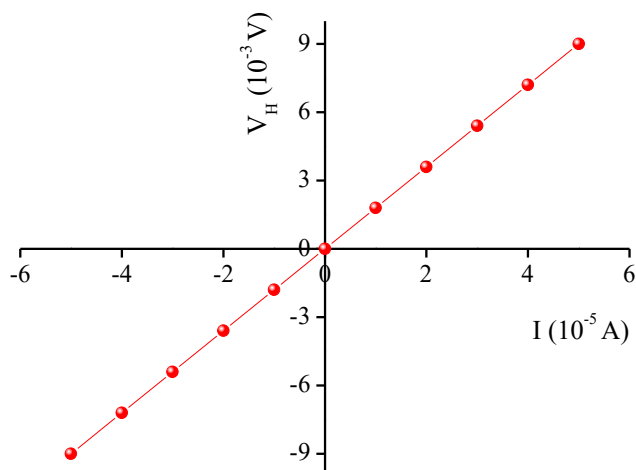
รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_{24}) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ เมื่อ $x = 0.6$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



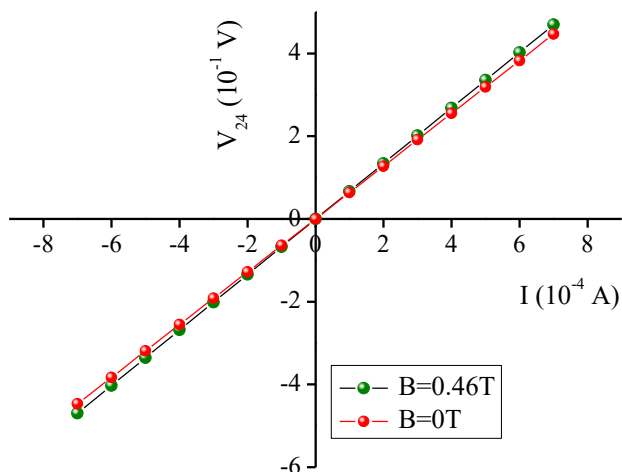
รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ เมื่อ $x = 0.6$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



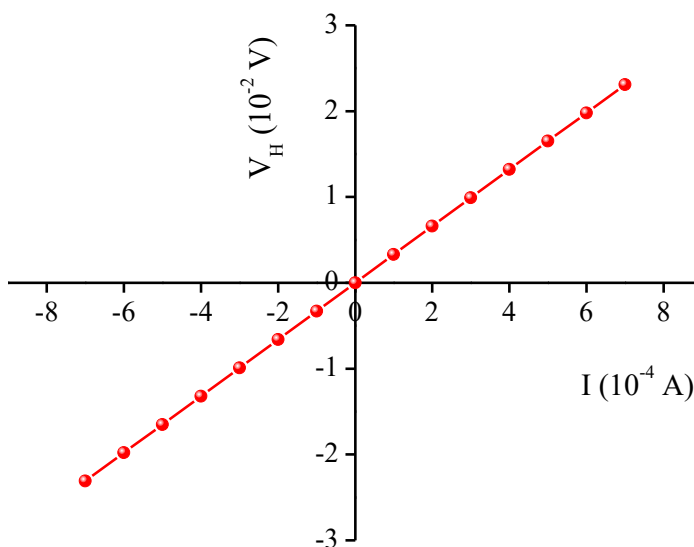
รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_{24}) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ เมื่อ $x = 0.8$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ เมื่อ $x = 0.8$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_{24}) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ เมื่อ $x = 1.0$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ เมื่อ $x = 1.0$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

จากการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศสามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆได้ ดังนี้

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า สามารถคำนวณได้โดย

$$\begin{aligned}\rho &= R_{sh}d \\ &= (1.08 \times 10^3)(1 \times 10^{-4}) = 1.08 \times 10^{-1} \text{ โอห์ม-เซนติเมตร}\end{aligned}\quad (4.9)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ สามารถคำนวณได้โดย

$$\begin{aligned}R_H &= (10^8) \left(\frac{V_H}{I} \right) \left(\frac{d}{B} \right) \\ &= (10^8) \left(\frac{0.0029}{10^{-4}} \right) \left(\frac{10^{-4}}{4600} \right) \\ &= 63.04 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อคูลอมบ์}\end{aligned}\quad (4.10)$$

จากค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ สามารถนำมาคำนวณหาค่าความหนาแน่นของพาหะ ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}n &= \frac{1}{qR_H} = \frac{1}{(1.6 \times 10^{-19})(63)} \\ &= 9.92 \times 10^{16} \text{ ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร}\end{aligned}\quad (4.11)$$

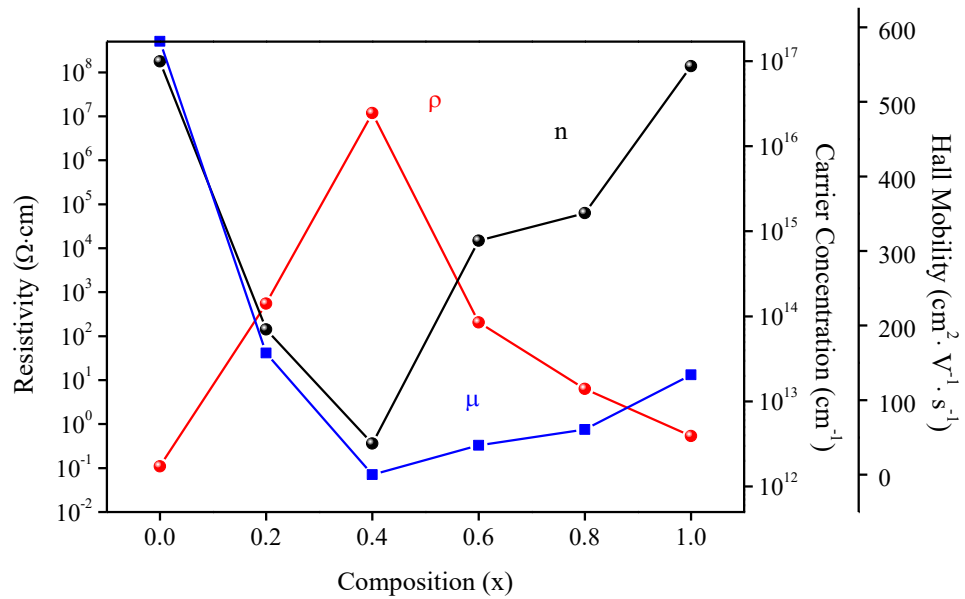
และจากค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ และ ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า สามารถนำมาคำนวณหา ค่าสภาพคล่องตัวพาหะ ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\mu_H &= \frac{R_H}{\rho} = \frac{(63)}{(1.08 \times 10^{-1})} \\ &= 5.81 \times 10^2 \text{ ตารางเซนติเมตรต่อ (โวลต์-วินาที)}\end{aligned}\quad (4.12)$$

และจากค่าศักย์ไฟฟ้าของฮอลล์ ยืนยันได้ว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ มีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นทั้งชนิดพี (p-type) และชนิดเอ็น (n-type)

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่คำนวณได้จากผลการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

Composition (x)	Resistivity ($\Omega \cdot \text{cm}$)	Hall Coefficient (cm^3/C)	Carrier Concentration (cm^{-3})	Hall Mobility ($\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$)
0.0	0.11	63.04	-9.92×10^{16}	5.81×10^2
0.2	5.45×10^2	8.91×10^4	-7.01×10^{13}	1.63×10^2
0.4	1.18×10^7	1.96×10^6	-3.19×10^{12}	0.17
0.6	2.04×10^2	8.04×10^3	7.77×10^{14}	39.36
0.8	6.31	3.83×10^3	1.63×10^{15}	60.61
1.0	0.54	71.74	8.71×10^{16}	1.33×10^2



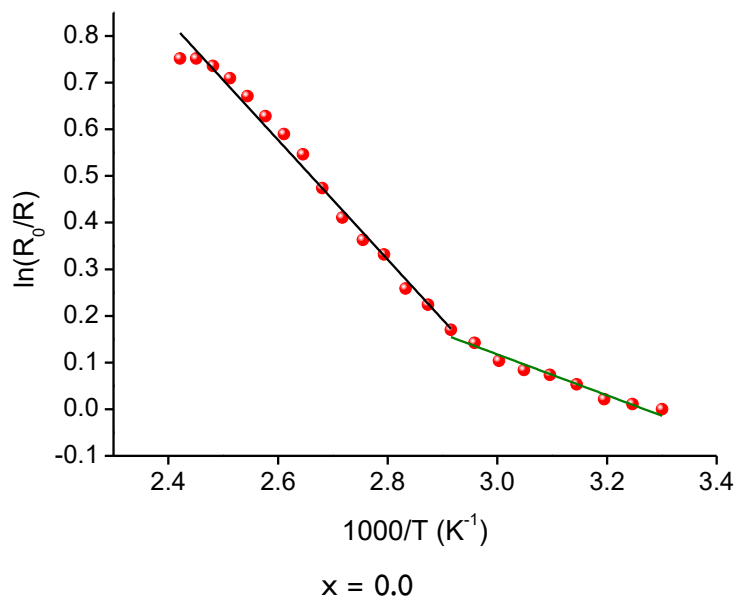
รูปที่ 4.26 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอน และ ค่าสภาพคล่องของพาหะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

4.1.8 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-150 องศาเซลเซียส เพื่อหาค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

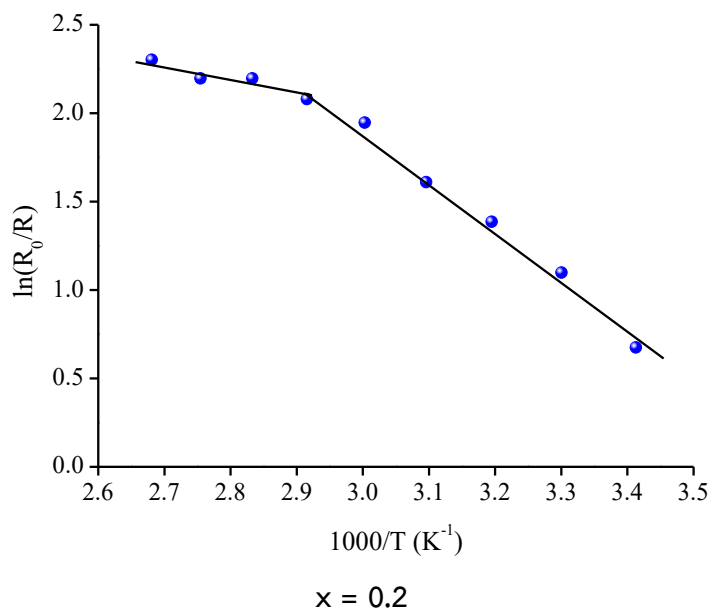
จากรูปที่ 4.27, 4.28, 4.29, 4.30, 4.31, 4.32 และจากตารางที่ 4.8 เป็นผลการวัดความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-150 องศาเซลเซียส เพื่อหาค่าพลังงานกระตุ้น (activation energy : E_a) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ พบว่าค่าพลังงานกระตุ้น(E_a) จะมีเพียงค่าเดียวซึ่งจะเป็นค่ากัมพวงศักย์ที่บริเวณรอยต่อของเกรน โดยเกรนมีขนาดเล็กลง ค่าของกัมพวงศักย์จะมีค่าเพิ่มขึ้นสอดคล้องกับค่าความต้านทานไฟฟ้า ซึ่งอธิบายได้จากสมการ

$$\sigma = AT^{\frac{1}{2}} \exp\left[\frac{-\phi_b}{kT}\right] \quad (4.13)$$

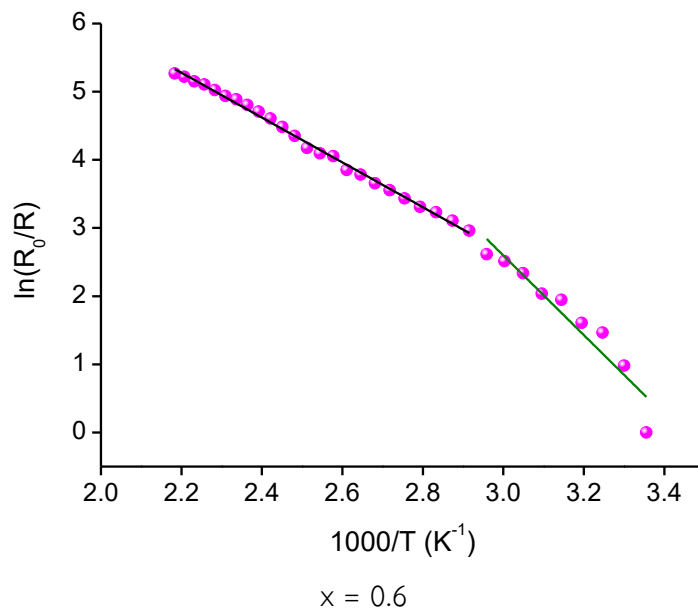
จากสมการข้างต้นจะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้น กัมพวงศักย์จะมีค่าลดลงส่งผลให้ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ จะนำไฟฟ้าได้ดีขึ้น



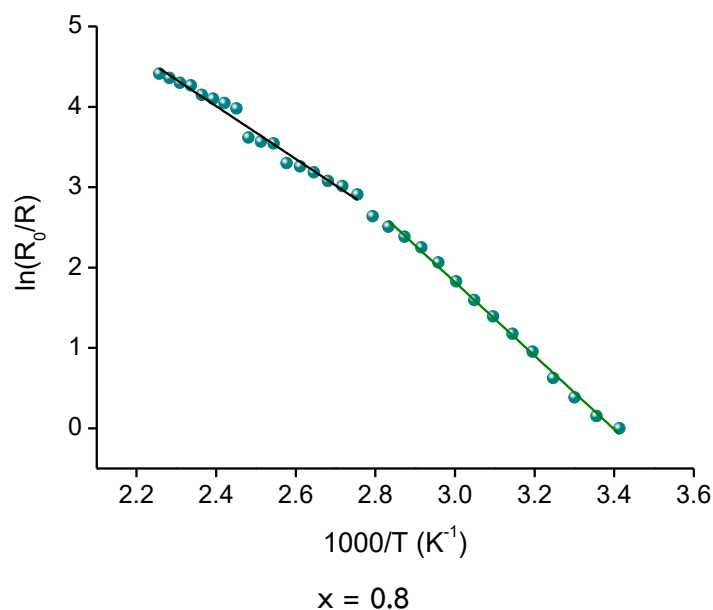
รูปที่ 4.27 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1000/T$ กับค่า $\ln(R_0/R)$ เมื่อทำการวัดค่าความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-150 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ เมื่อ $x = 0.0$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



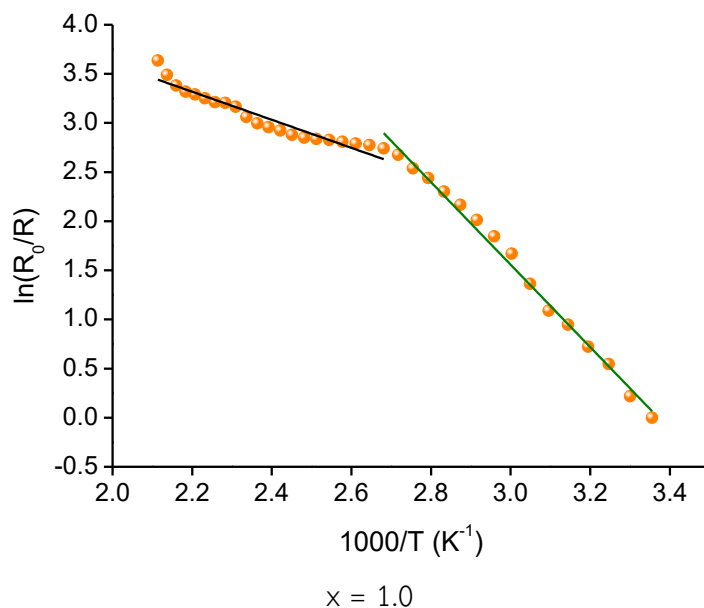
รูปที่ 4.28 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1000/T$ กับค่า $\ln(R_0/R)$ เมื่อทำการวัดค่าความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-150 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ เมื่อ $x = 0.2$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.29 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1000/T$ กับค่า $\ln(R_0/R)$ เมื่อทำการวัดค่าความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-150 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ เมื่อ $x = 0.6$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



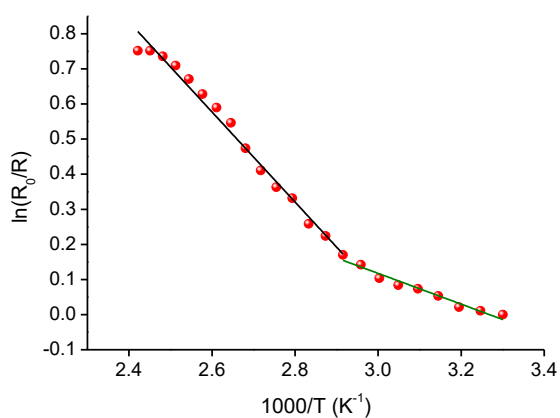
รูปที่ 4.30 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1000/T$ กับค่า $\ln(R_0/R)$ เมื่อทำการวัดค่าความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-150 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ เมื่อ $x = 0.8$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.31 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1000/T$ กับค่า $\ln(R_0/R)$ เมื่อทำการวัดค่าความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-150 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ เมื่อ $x = 1.0$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

เราสามารถหาค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ได้ดังนี้

$$\text{เขียนกราฟ } \ln\left(\frac{R_0}{R}\right) \text{ vs } \frac{1000}{T}$$



รูปที่ 4.32 แสดงตัวอย่างการคำนวณกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1000/T$ กับค่า $\ln(R_0/R)$

$$R = R_0 \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right) \quad (4.15)$$

$$\frac{R}{R_0} = \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right) \quad (4.16)$$

$$\ln\left(\frac{R_0}{R}\right) = \frac{-E_a}{kT} \quad (4.17)$$

$$\ln\left(\frac{R_0}{R}\right) = \frac{-E_a}{1,000k} \left(\frac{1000}{T}\right) \quad (4.18)$$

$$(Slope) = \frac{-E_a}{1,000k}$$

$$E_a = 1,000k(Slope) \text{ หน่วยเป็น J}$$

$$= \frac{1,000(1.38 \times 10^{-23})(-1.283)}{(1.6 \times 10^{-19})} = 0.111 \text{ eV}$$

ตารางที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าพลังงานกระตุ้น กับ ค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอม(x) เมื่อทำการวัดค่าความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-150 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ เมื่อ $x = 1.0$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

Composition (x)	Activation Energy (eV)	
	Ea ₁	Ea ₂
0.0	0.111	0.038
0.2	0.126	0.244
0.6	0.283	0.503
0.8	0.283	0.394
1.0	0.123	0.362

4.1.9 ผลการศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

ในการศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงจะต้องมีการฉายแสงให้กับสารตัวอย่าง แล้วทำการบันทึกกระแสโฟโตที่เพิ่มขึ้นตามเวลา ซึ่งจะเรียกว่าเป็นกระแสโฟโตขาขึ้น แต่เมื่อหยุดการฉายแสงกระแสโฟโตจะลดลงตามเวลาซึ่งจะเรียกว่ากระแสโฟโตขาลง ทั้งกระแสโฟโตขาขึ้นและกระแสไฟฟ้าขาลงจะเป็นไปดังสมการ

$$I = I_0(1 - e^{-t/\tau_r}) \quad (4.19)$$

$$I = I_0 e^{-t/\tau_d} \quad (4.20)$$

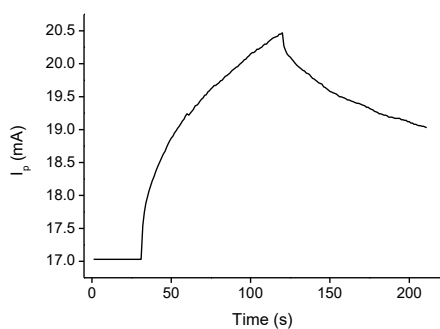
ส่วนใหญ่พบว่าเวลาขาขึ้น (rise time) และเวลาขาลง (decay time) มีได้มากกว่าหนึ่งค่า กระแสโฟโตขาขึ้นและกระแสโฟโตขาลงจะเขียนอยู่ในรูปฟังก์ชันมัลติเพิลเอ็กซ์โพเนนเชียลดังสมการ

$$I = \sum_1^n A_n [1 - \exp(-t/\tau_{rn})] + A_{n+1} [1 - \exp(-(t/\tau_{rn+1})^\beta)] \quad (4.21)$$

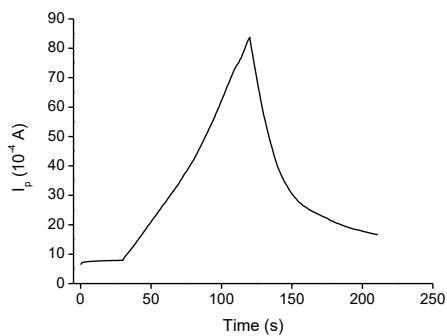
$$I = \sum_1^n A_n [\exp(-t/\tau_{dn})] + A_{n+1} [\exp(-(t/\tau_{dn+1})^\beta)] \quad (4.22)$$

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของค่ากระแสเฟอร์ริซิเทนต์แสดงในตารางที่ 4.8 และสามารถหาค่าความหนาแน่นของกักตักพาหะ ได้ตามตารางที่ 4.9 จากสมการ

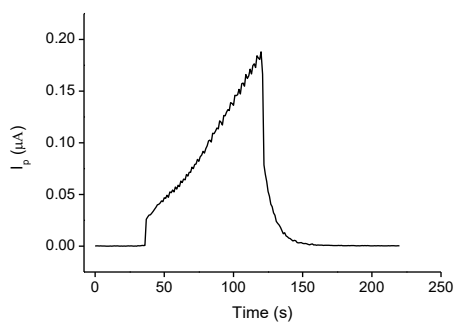
$$N_t = \frac{I_0}{q\mu V_a} \left(\frac{l}{wd} \right) \quad (4.23)$$



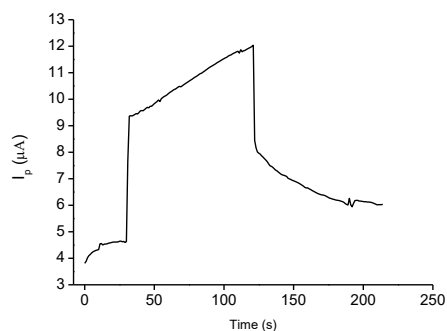
$x = 0.0$



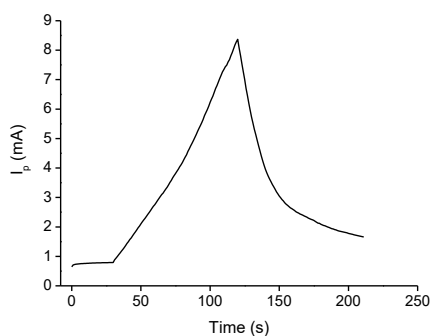
$x = 0.2$



$x = 0.4$

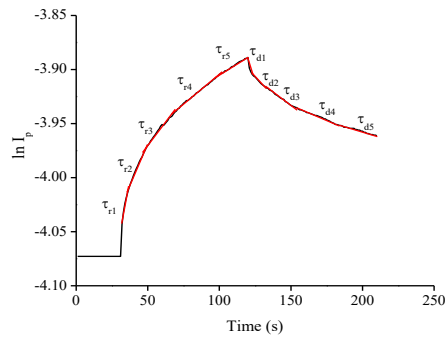


$x = 0.6$

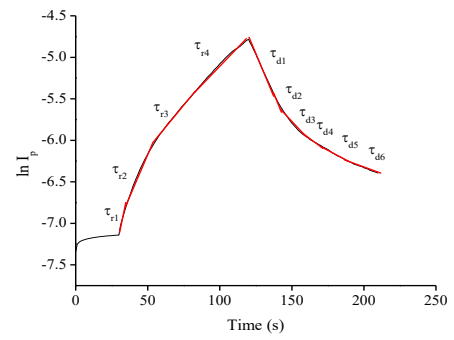


$x = 0.8$

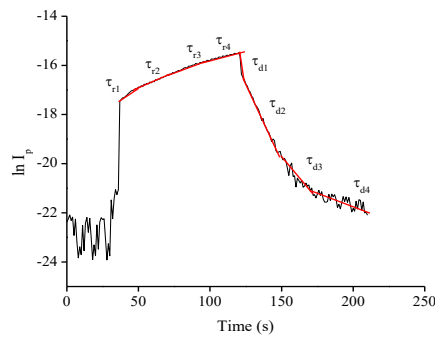
รูปที่ 4.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโฟโต (I_p) กับเวลา (t) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



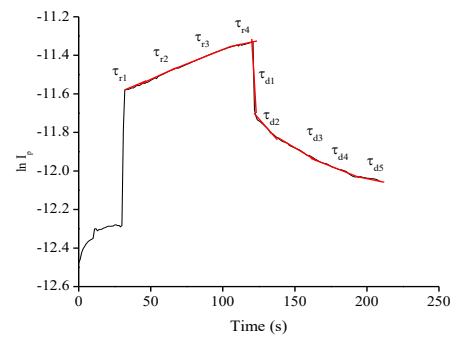
$x = 0.0$



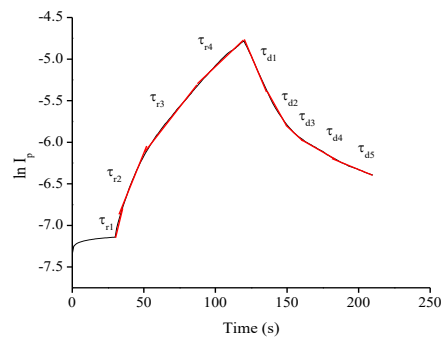
$x = 0.2$



$x = 0.4$

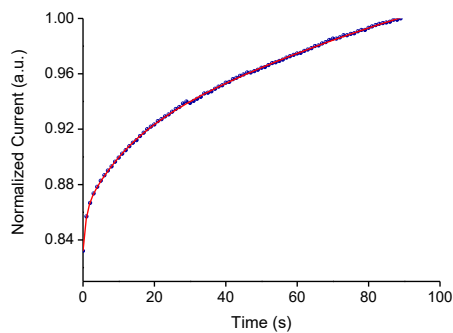


$x = 0.6$

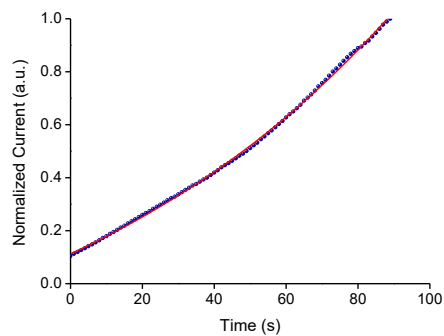


$x = 0.8$

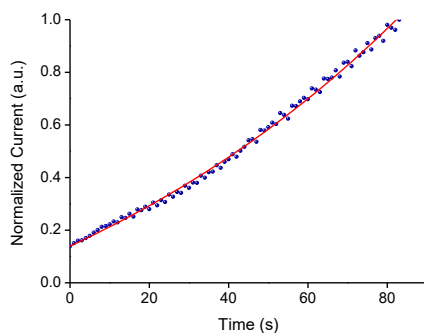
รูปที่ 4.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโฟโตโนสเกลลอกลิทึม ($\ln I_p$) กับเวลา (t) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



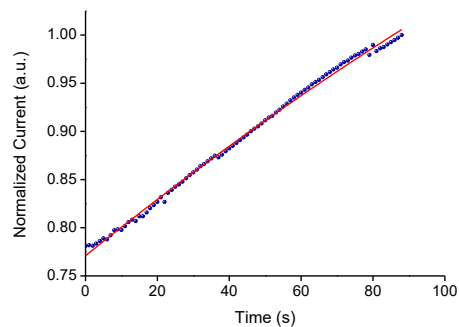
$x = 0.0$



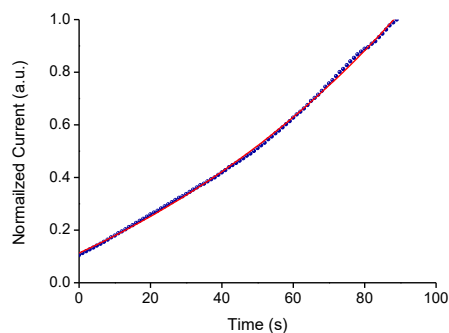
$x = 0.2$



$x = 0.4$

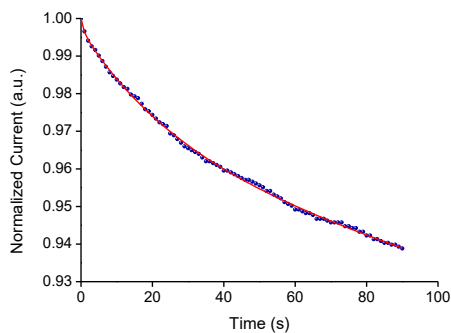


$x = 0.6$

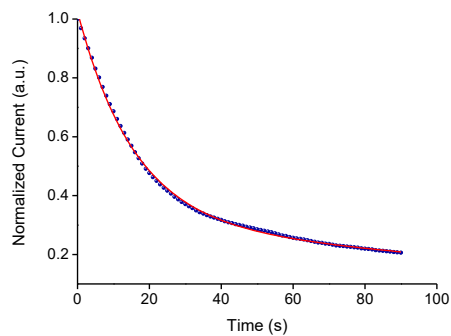


$x = 0.8$

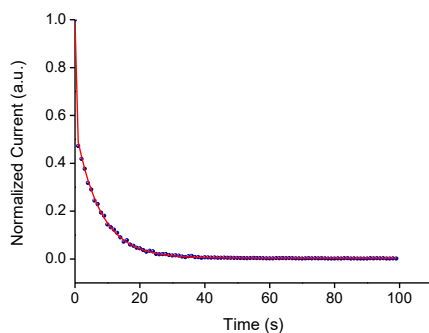
รูปที่ 4.35 การพิตกกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสออร์มัลไลซ์ขาขึ้นกับเวลา ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



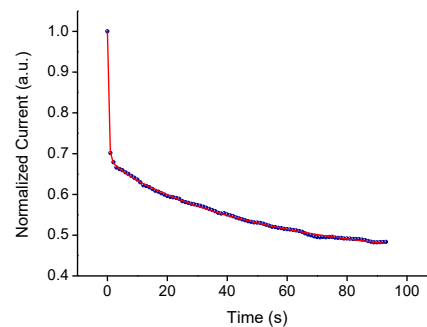
$x = 0.0$



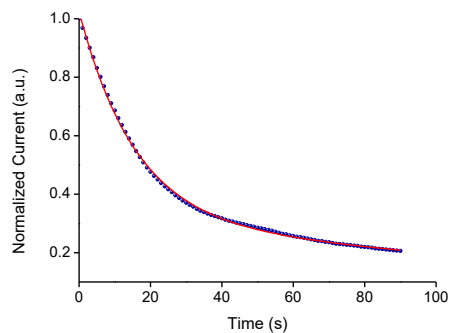
$x = 0.2$



$x = 0.4$



$x = 0.6$



$x = 0.8$

รูปที่ 4.36 การพิตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสออร์มัลไลซ์ขาลงกับเวลา ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

Composition (x)		Rise Time (s)					Decay Time (s)					
		1 st Term	2 nd Term	3 rd Term	4 th Term	5 th Term	1 st Term	2 nd Term	3 rd Term	4 th Term	5 th Term	6 th Term
0.0	σ_i	3.84×10^{12}	3.96×10^{12}	4.05×10^{-12}	4.17×10^{-12}	4.25×10^{-12}	4.54×10^{12}	4.52×10^{12}	4.51×10^{12}	4.46×10^{12}	4.41×10^{12}	-
	I_i	1.71×10^{-2}	1.77×10^{-2}	1.81×10^{-2}	1.86×10^{-2}	1.90×10^{-2}	2.03×10^{-2}	2.02×10^{-2}	2.01×10^{-2}	1.99×10^{-2}	1.97×10^{-2}	-
0.2	σ_i	5.82×10^{11}	7.47×10^{11}	1.01×10^{12}	1.43×10^{12}	-	5.25×10^{12}	4.09×10^{12}	3.35×10^{12}	2.61×10^{12}	2.47×10^{12}	1.93×10^{12}
	I_i	9.12×10^{-4}	1.17×10^{-3}	1.58×10^{-3}	2.24×10^{-3}	-	8.23×10^{-3}	6.41×10^{-3}	5.25×10^{-3}	4.09×10^{-3}	3.87×10^{-3}	3.03×10^{-3}
0.4	σ_i	7.89×10^9	1.01×10^{10}	1.24×10^{10}	1.76×10^{10}	-	2.15×10^{10}	3.21×10^9	3.22×10^8	-	-	-
	I_i	2.51×10^{-8}	3.22×10^{-8}	3.94×10^{-8}	5.59×10^{-8}	-	6.83×10^{-8}	1.02×10^{-8}	1.02×10^{-9}	-	-	-
0.6	σ_i	2.46×10^{10}	-	2.47×10^{10}	2.71×10^{10}	-	2.23×10^{10}	2.15×10^{10}	2.06×10^{10}	1.97×10^{10}	1.75×10^{10}	-
	I_i	9.30×10^{-6}	-	9.35×10^{-6}	9.12×10^{-5}	-	8.42×10^{-6}	8.13×10^{-6}	7.77×10^{-6}	7.43×10^{-6}	6.62×10^{-6}	-
0.8	σ_i	1.82×10^{12}	2.23×10^{12}	3.16×10^{12}	4.16×10^{12}	-	1.69×10^{13}	1.35×10^{13}	9.97×10^{12}	6.69×10^{12}	6.36×10^{12}	-
	I_i	8.67×10^{-4}	1.06×10^{-3}	1.50×10^{-3}	1.98×10^{-3}	-	8.03×10^{-3}	6.41×10^{-3}	4.75×10^{-3}	3.18×10^{-3}	3.03×10^{-3}	-

ตารางที่ 4.8 ค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะที่คำนวณได้จากการวัดกระแสเพอร์ซิสเทนต์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

Composition (x)		Rise Time (s)					Decay Time (s)					
		1 st Term	2 nd Term	3 rd Term	4 th Term	5 th Term	1 st Term	2 nd Term	3 rd Term	4 th Term	5 th Term	6 th Term
0.0	τ_{ri}	63.51	260.21	471.37	836.44	1147.83	480.48	843.49	1056.31	1879.33	2596.86	-
	A_{ri}	0.0295	-2.9990	12.4000	-12.7800	0.0375	3.7390	-42.0800	55.9700	-16.7900	-0.8145	-
	β	-	-	-	-	0.6788	-	-	-	-	0.9957	-
0.2	τ_{ri}	27.66	48.15	97.66	152.91	-	26.37	37.49	52.49	86.64	101.01	152.32
	A_{ri}	0.0214	-0.0869	0.0802	0.0012	-	0.1053	-0.3480	0.4645	-0.6011	0.3913	0.3452
	β	-	-	-	0.6463	-	-	-	-	-	-	-0.0040
0.4	τ_{ri}	20.33	40.71	48.74	68.76	-	8.31	18.35	80.67	-	-	-
	A_{ri}	1.58×10^{-7}	-2.64×10^{-6}	2.70×10^{-6}	1.43×10^{-7}	-	8.73×10^{-8}	-9.89×10^{-9}	1.39×10^{-9}	-	-	-
	β	-	-	-	0.6832	-	-	-	0.8924	-	-	-
0.6	τ_{ri}	360.67	289.97	318.52	559.13	-	36.15	147.69	244.96	315.48	686.93	-
	A_{ri}	-0.0252	0.0503	-0.0256	1.49×10^{-6}	-	-2.06×10^{-6}	7.34×10^{-5}	-2.33×10^{-4}	1.66×10^{-4}	4.77×10^{-6}	-
	β	-	-	-	0.7793	-	-	-	-	-	0.4135	-
0.8	τ_{ri}	18.58	28.35	47.30	61.52	-	26.37	39.16	64.43	98.84	147.76	-
	A_{ri}	0.0456	-0.1058	0.0896	-0.0173	-	0.4287	-1.0870	3.1090	-4.3580	1.9150	-
	β	-	-	-	0.7392	-	-	-	-	-	1.0050	-

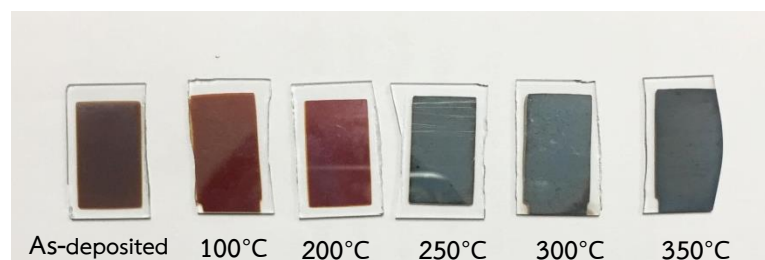
ตารางที่ 4.9 ค่าช่วงชีวิตของพาหะที่คำนวณได้จากการวัดกระแสเพอร์ซิสเทนซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

4.2 การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

หลังจากที่ศึกษาสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ แล้ว จึงได้ทำการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ก่อนที่จะทำการศึกษาถึงสมบัติของรอยต่อวิวิธพันธ์ $(\text{CdS})_{0.9}(\text{ZnTe})_{0.1} / \text{CuSbS}_2$ โดยเป็นการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ ทางไฟฟ้า และทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ดังนี้

4.2.1 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

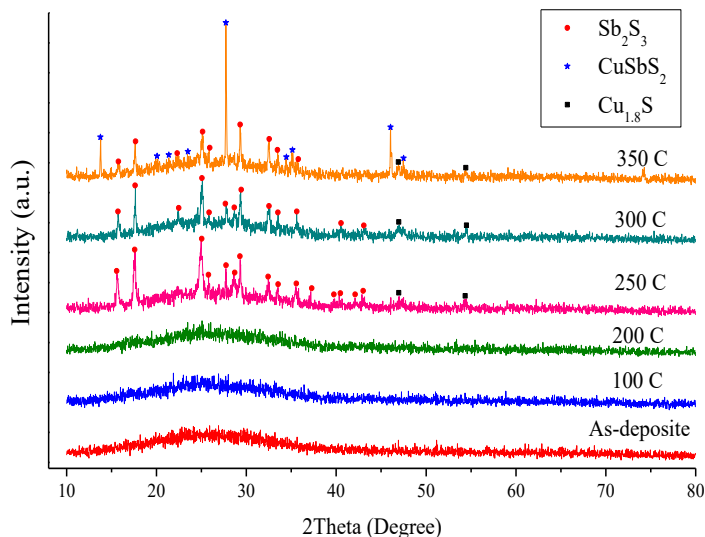
ฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เตรียมได้ เมื่อยังไม่ได้รับการแอนนัลจะมีสีน้ำตาลเข้ม แต่หลังจากที่ทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 100 และ 200 องศาเซลเซียส สีฟิล์มบางจะเป็นสีน้ำตาลแดง แต่เมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิในช่วง 250-350 องศาเซลเซียส สีของฟิล์มบางจะกลายเป็นสีเทาดำ ถ้าอุณหภูมิแอนนัลสูงกว่า 350 องศาเซลเซียส ฟิล์มบางจะหลุดร่อนออกจากแผ่นฐานรองรับกระจกสไลด์และบางส่วนของเนื้อฟิล์มบางจะระเหิดหายไป ภาพถ่ายของฟิล์มบางที่เตรียมได้และที่ได้รับแอนนัล ในช่วงอุณหภูมิ 100-350 องศาเซลเซียส จะแสดงดังรูปที่ 4.37



รูปที่ 4.37 แสดงฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

4.2.2 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

การศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เพื่อต้องการทราบถึงลักษณะโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ว่ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างไรเมื่ออุณหภูมิการแอนนัลแตกต่างกัน ดังนั้นเราจึงนำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้ไปทำการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยการนำพีคการเลี้ยวเบนไปเทียบกับไฟล์ JCPDS มาตรฐานเลขที่ 44-1417 ซึ่งมีโครงสร้างผลึกชัลโคสตีไบต์ (chalcocite)



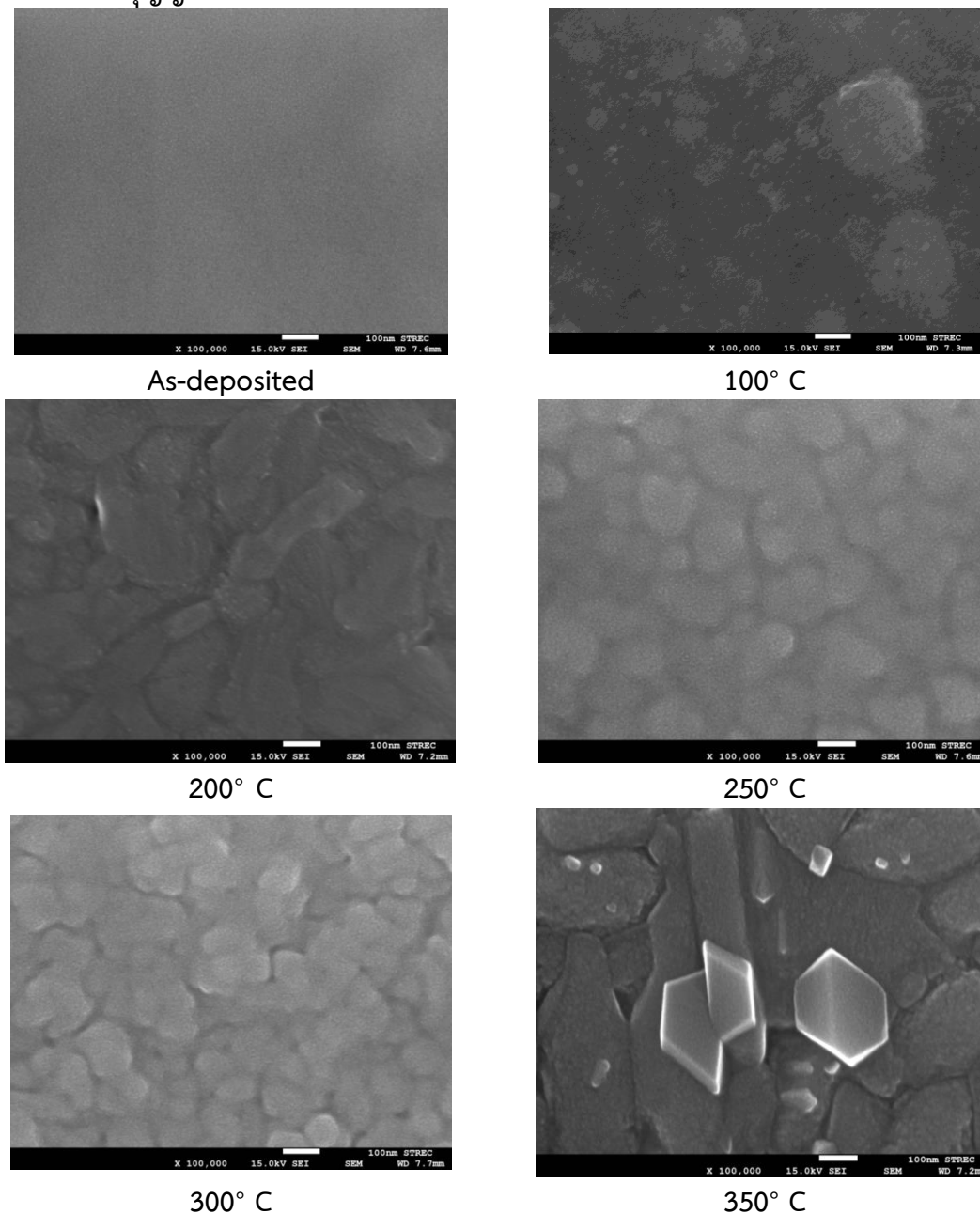
รูปที่ 4.38 กราฟแสดงพีคความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

จากการศึกษาลักษณะเฉพาะของโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ พบว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำแอนนีสที่อุณหภูมิ 100 และ 200 องศาเซลเซียสนั้น ไม่ปรากฏการเป็นผลึกหรือมีลักษณะเป็นอะมอร์ฟัส ในขณะที่ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำแอนนีสที่อุณหภูมิ 250 และ 300 องศาเซลเซียส จะปรากฏพีคการเลี้ยวเบนของเฟส Sb_2S_3 และ $\text{Cu}_{1.8}\text{S}$ แต่เมื่อทำการแอนนีสที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส จะปรากฏพีคการเลี้ยวเบนของเฟส CuSbS_2 จำนวนมาก โดยมีพีคการเลี้ยวเบนระนาบ (111) ของระบบผลึกออร์โธโรมบิก ที่มีความเข้มสูงสุด อย่างไรก็ตามยังคงมีเฟส Sb_2S_3 และ $\text{Cu}_{1.8}\text{S}$ เกิดร่วมอยู่ด้วย ผลการแอนนีสที่อุณหภูมินี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Hussain. et al. (2017) และงานวิจัยของ Vinayakumar. et al. (2019).

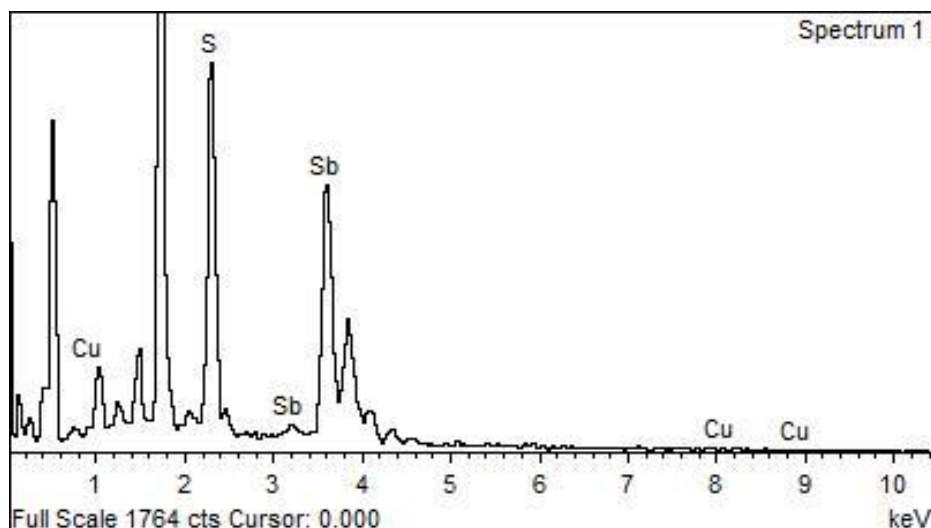
ตารางที่ 4.10 แสดงค่าคงที่ผลึกและขนาดของเกรนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ และแอนนีสที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส

2θ	(hkl)	Lattice Constant (Å)			Grain Size (nm)
		a	b	c	
12.202	2 0 0	14.331	5.092	4.205	293.946
28.448	1 1 1				
29.910	3 0 1				
42.614	3 2 0				
45.861	4 2 1				

4.2.3 ผลการวิเคราะห์ลักษณะของโครงสร้างเชิงมหภาค ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิสชัน (FESEM) ที่บริเวณผิวหน้า และผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

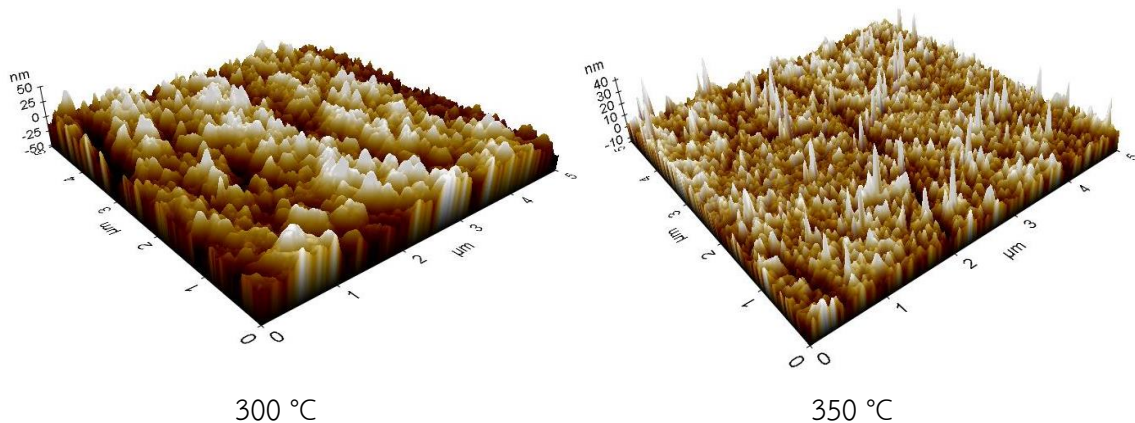


รูปที่ 4.39 แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ใช้กำลังขยาย 100,000 เท่า ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ



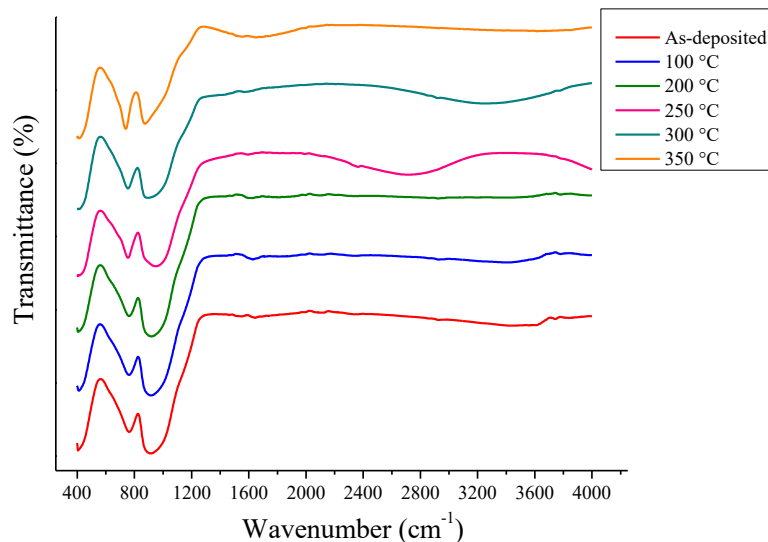
รูปที่ 4.40 แสดงสเปกตรัมที่ได้จากการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

4.2.4 ผลการวิเคราะห์ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

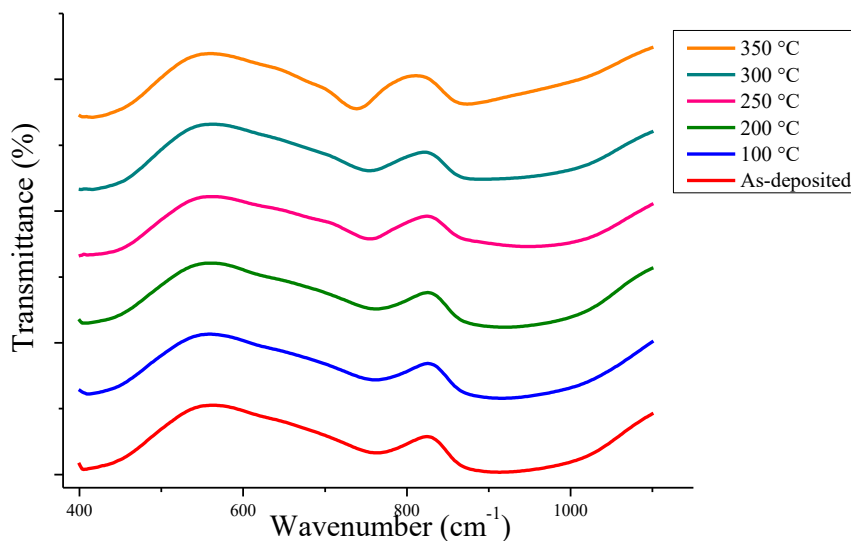


รูปที่ 4.41 แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

4.2.5 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงในช่วงอินฟราเรดด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรด สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (FTIR) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

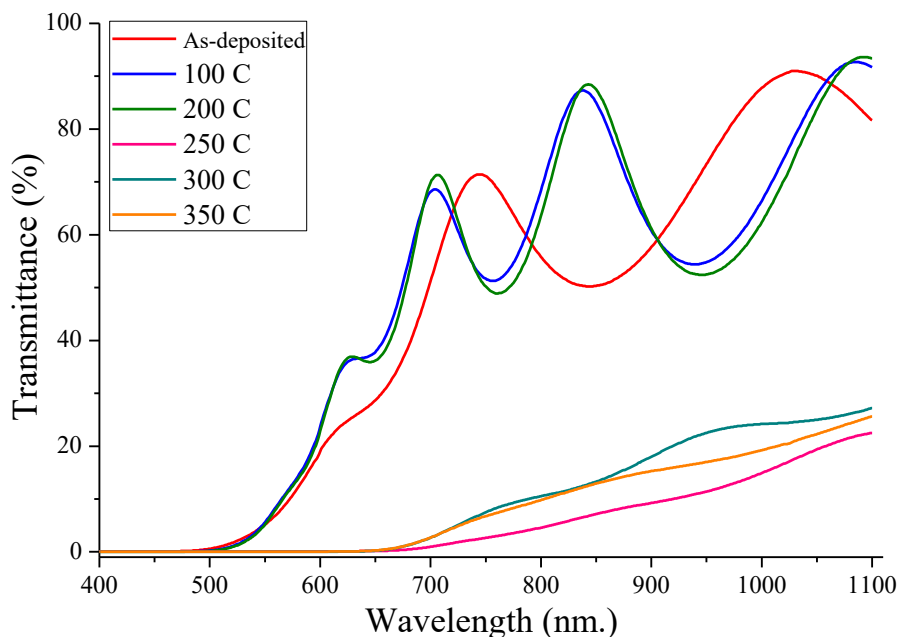


รูปที่ 4.42 กราฟแสดงสเปกตรัมฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรด (FTIR) ในช่วงเลขคลื่น $400 - 4000 \text{ cm}^{-1}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.43 กราฟแสดงสเปกตรัมฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรด (FTIR) ในช่วงเลขคลื่น $400 - 1000 \text{ cm}^{-1}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

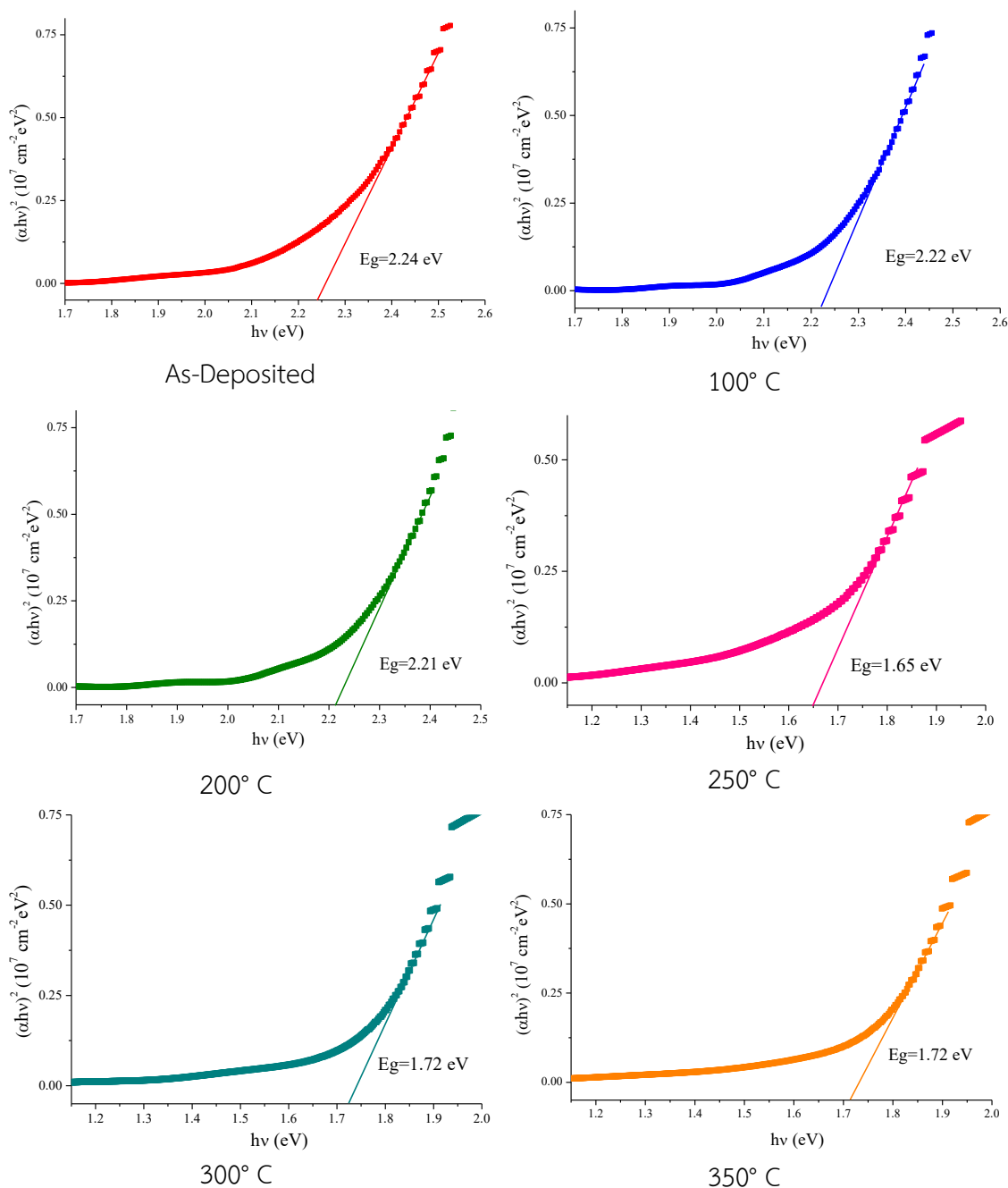
4.2.6 ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.44 กราฟแสดงสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

ตารางที่ 4.11 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ และแอนนัลที่อุณหภูมิ 100, 200, 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

Annealing Temperature (°C)	Energy Gap (eV)
As-deposited	2.24
100	2.22
200	2.21
250	1.65
300	1.72
350	1.72

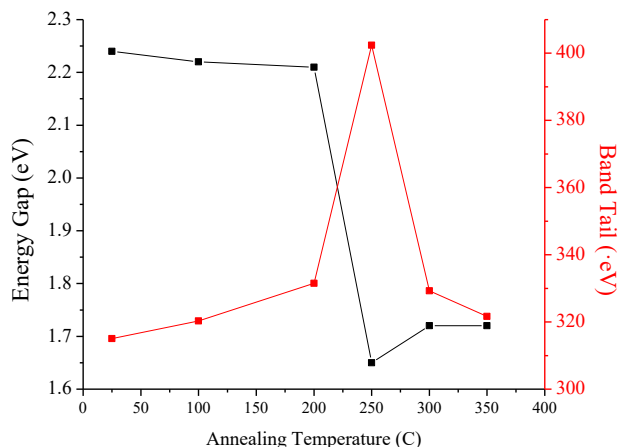


รูปที่ 4.45 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$ กับ $h\nu$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS₂ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เพื่อหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน

จากการศึกษาสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS₂ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ และแอนนัลที่อุณหภูมิ 100, 200, 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จากรูปที่ 4.44 พบว่าขอบการดูดกลืนของฟิล์มบางที่ไม่ผ่านการแอนนัล และแอนนัลที่อุณหภูมิ 100, 200 องศาเซลเซียส จะปรากฏที่ความยาวคลื่น 450 ถึง 600 นาโนเมตร และขอบการดูดกลืนของฟิล์มบางแอนนัลที่อุณหภูมิ 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียส จะปรากฏ

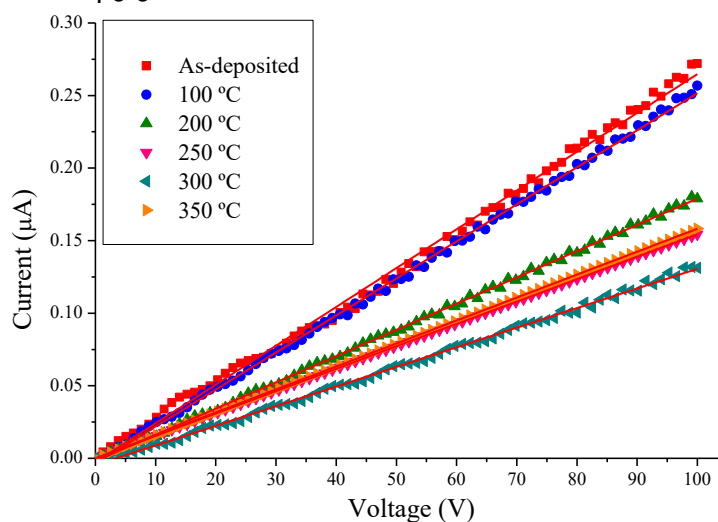
ที่ความยาวคลื่น 600 ถึง 900 นาโนเมตร ซึ่งค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำมีค่าที่ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Banu. et al. (2016) และ Yang. et al. (2014)

สำหรับส่วนหางของแถบพลังงาน(band tail) สามารถหาได้จาก กราฟความสัมพันธ์ $\ln\alpha$ กับ $h\nu$ ซึ่งค่าส่วนหางของแถบพลังงานของฟิล์มบางที่แอนนัลที่อุณหภูมิต่างๆ จะปรากฏในรูปที่ 4.46



รูปที่ 4.46 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าช่องว่างแถบพลังงาน กับส่วนหางแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

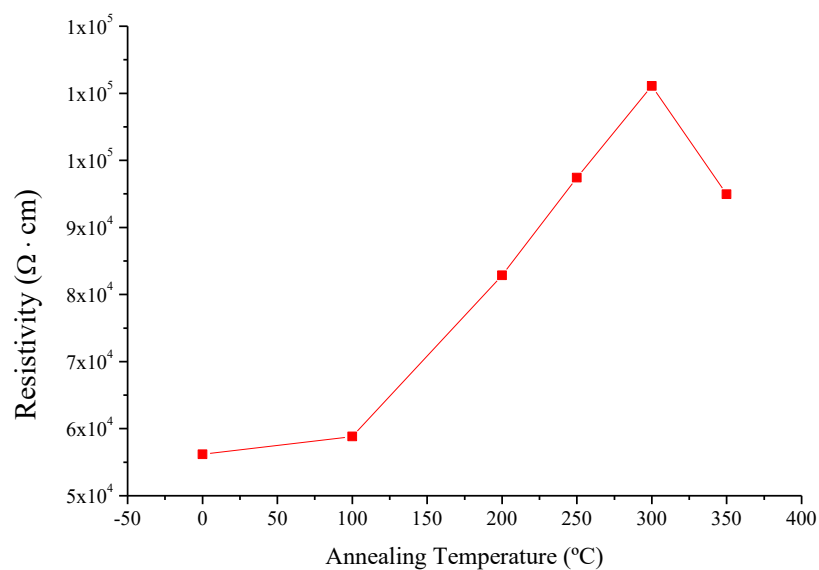
4.2.7 ผลการศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.47 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเพื่อหาค่าความต้านทานจากกราฟของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

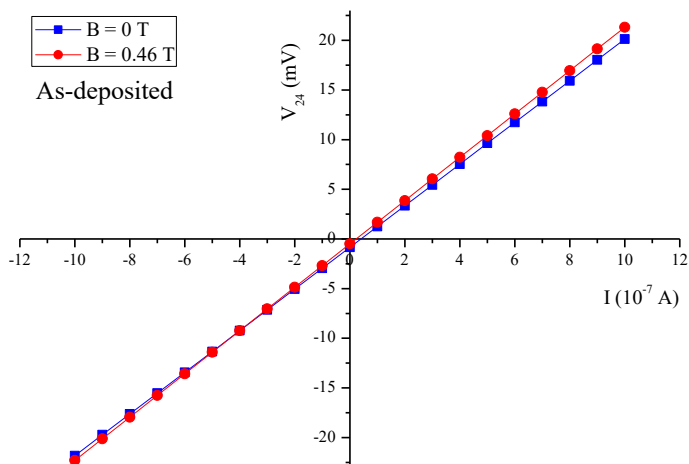
ตารางที่ 4.12 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

Annealing Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Resistivity ($\Omega \cdot \text{cm}$)
As-deposited	5.62×10^4
100	5.88×10^4
200	8.29×10^4
250	9.74×10^4
300	1.11×10^5
350	9.49×10^4

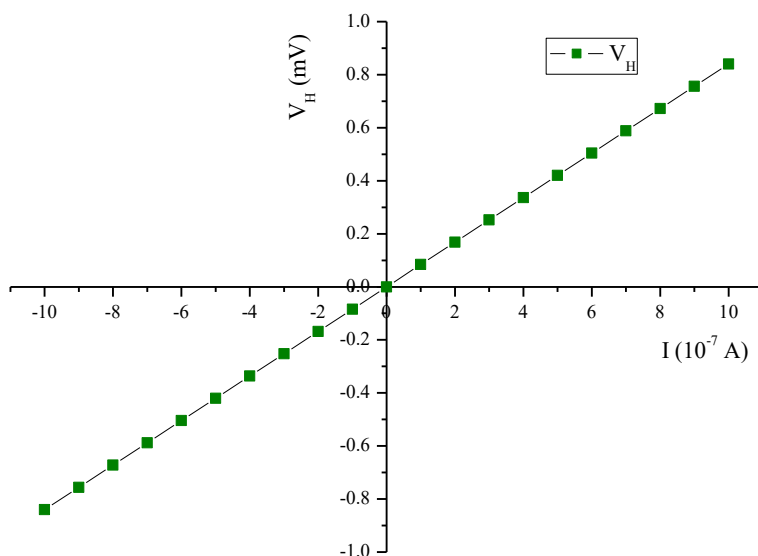


รูปที่ 4.48 กราฟแสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

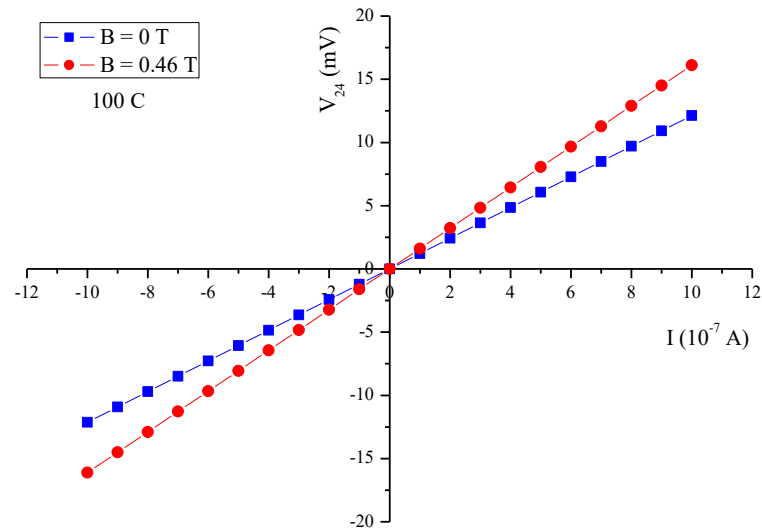
4.2.8 ผลการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ



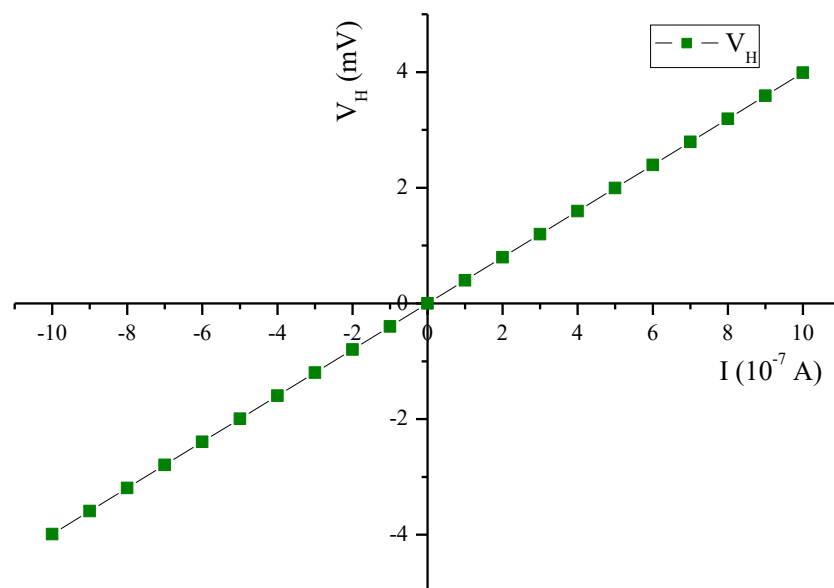
รูปที่ 4.49 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_{24}) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ



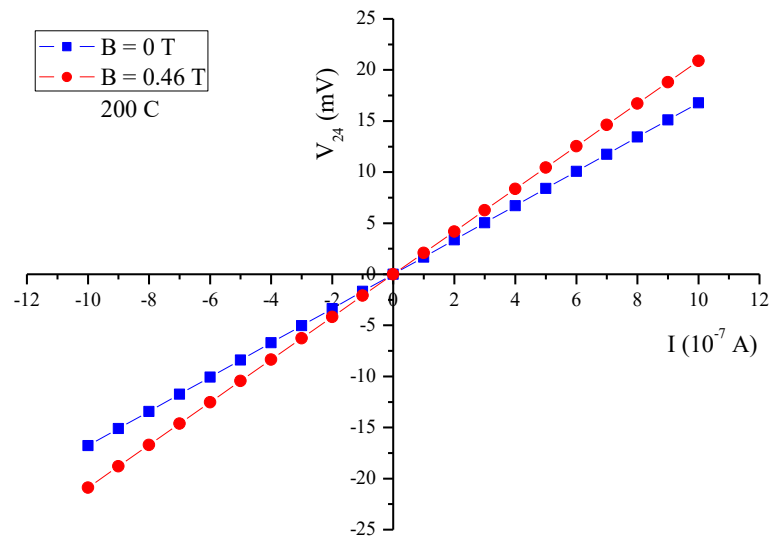
รูปที่ 4.50 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ



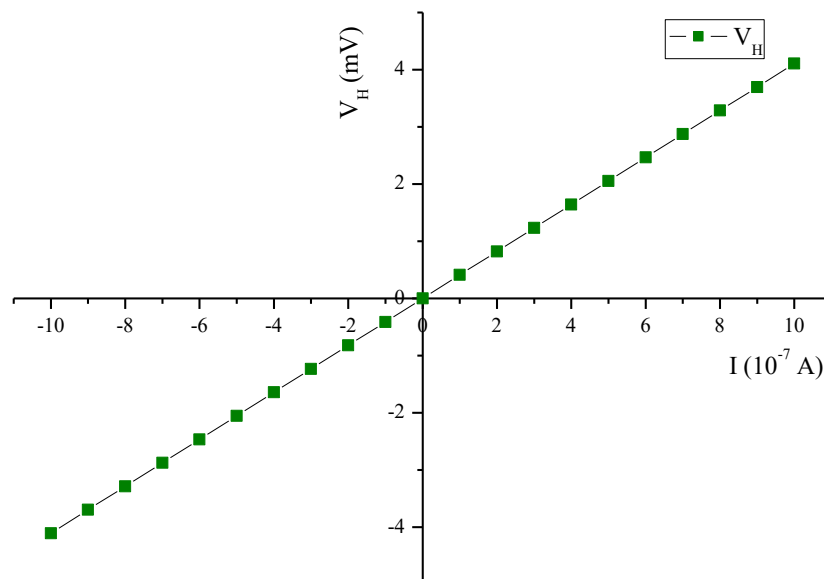
รูปที่ 4.51 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_{24}) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศและแอนนีลที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส



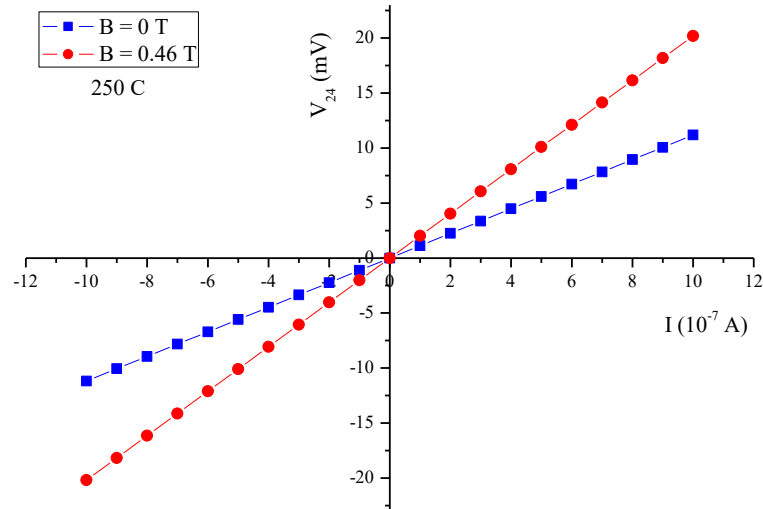
รูปที่ 4.52 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศและแอนนีลที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส



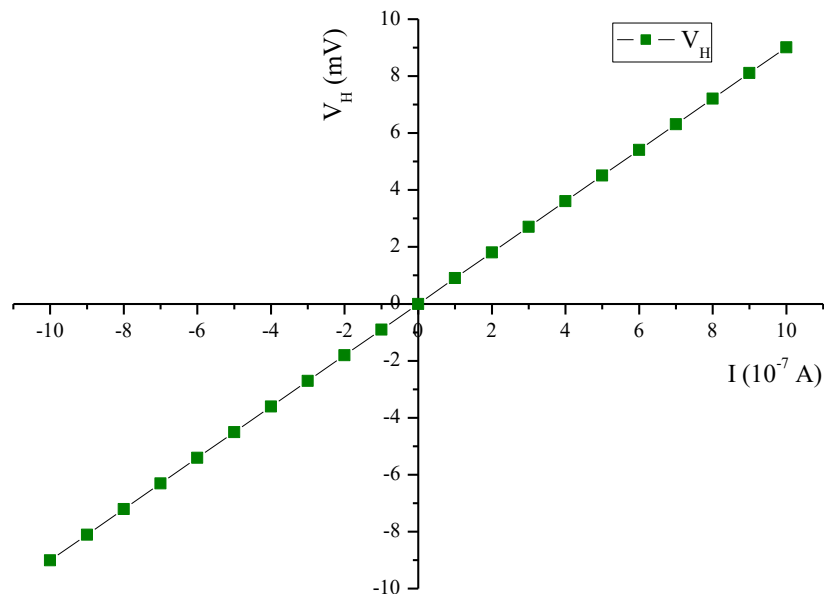
รูปที่ 4.53 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_{24}) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศและแอนนีลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส



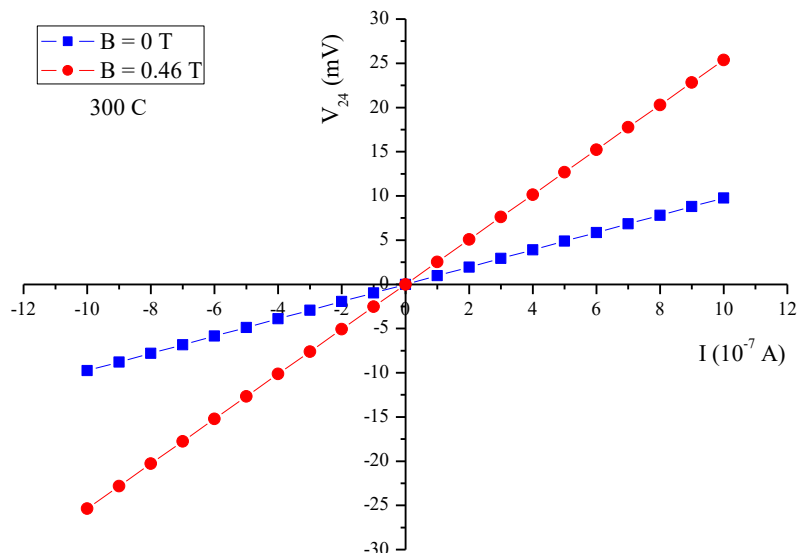
รูปที่ 4.54 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศและแอนนีลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส



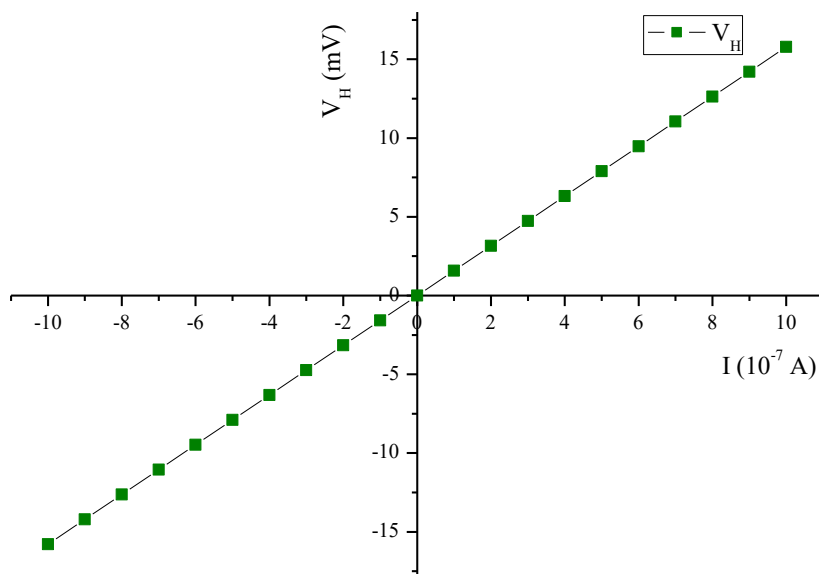
รูปที่ 4.55 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_{24}) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศและแอนนีลที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส



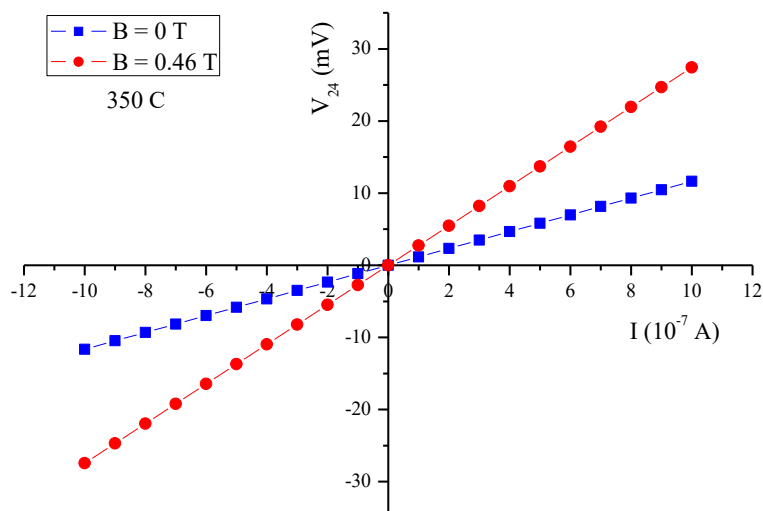
รูปที่ 4.56 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศและแอนนีลที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส



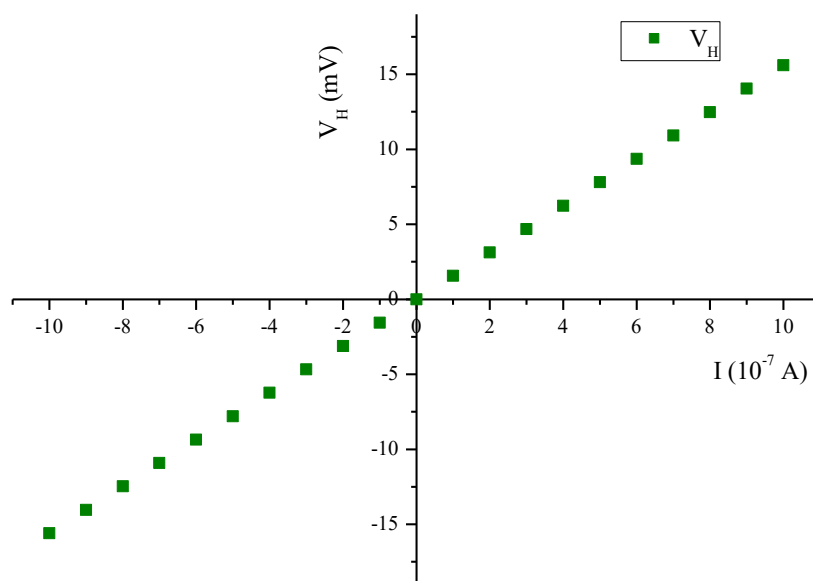
รูปที่ 4.57 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_{24}) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศและแอนนีลที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.58 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศและแอนนีลที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.59 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_{24}) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศและแอนนีลที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.60 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศและแอนนีลที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส

จากการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ สำหรับกรณีฟิล์มบางที่ยังไม่ได้แอนนีส สามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆได้ ดังนี้

ค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ สามารถคำนวณได้โดย

$$\begin{aligned} R_H &= (10^8) \left(\frac{V_H}{I} \right) \left(\frac{d}{B} \right) \\ &= (10^8) \left(\frac{0.84 \times 10^{-3}}{10 \times 10^{-7}} \right) \left(\frac{5 \times 10^{-5}}{4600} \right) \\ &= 9.13 \times 10^2 \text{ cm}^3 \text{ C}^{-1} \end{aligned} \quad (4.24)$$

จากค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ สามารถนำมาคำนวณหาค่าความหนาแน่นของพาหะ ได้ดังนี้

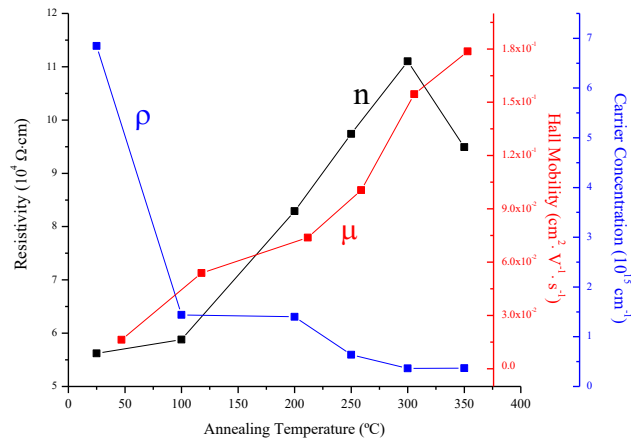
$$\begin{aligned} n &= \frac{1}{qR_H} = \frac{1}{(1.6 \times 10^{-19})(9.13 \times 10^2)} \\ &= 6.85 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3} \end{aligned} \quad (4.25)$$

สำหรับสภาพคล่องพาหะ สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{R_H}{\rho} \\ &= \frac{9.13 \times 10^2}{5.62 \times 10^4} = 1.62 \times 10^{-2} \text{ cm}^2 (\text{V}^{-1} \text{ s}^{-1}) \end{aligned} \quad (4.26)$$

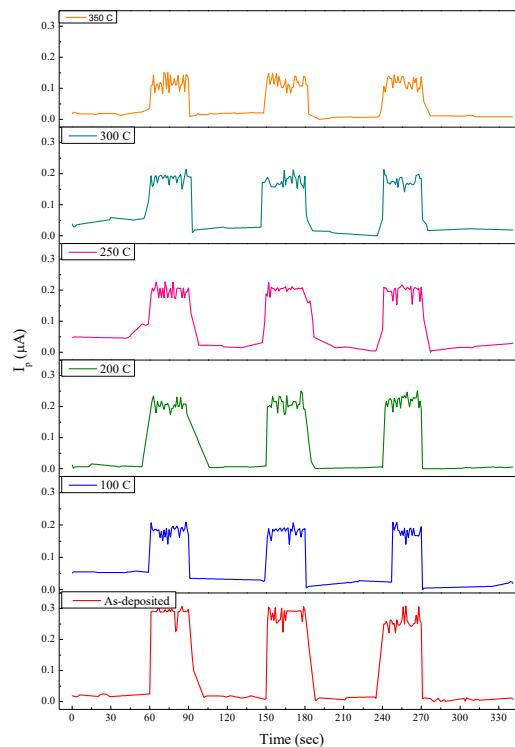
ตารางที่ 4.13 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่คำนวณได้จากผลการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

Annealing Temperature (°C)	Resistivity ($\Omega \cdot \text{cm}$)	Hall Coefficient (cm^3/C)	Hole Concentration (cm^{-3})	Hall Mobility ($\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$)
As-deposited	5.62×10^4	9.13×10^2	6.85×10^{15}	0.02
100	5.88×10^4	4.34×10^3	1.44×10^{15}	0.05
200	8.29×10^4	4.46×10^3	1.40×10^{15}	0.07
250	9.74×10^4	9.79×10^3	6.38×10^{14}	0.10
300	1.11×10^5	1.72×10^4	3.64×10^{14}	0.15
350	9.49×10^4	1.70×10^4	3.69×10^{14}	0.18



รูปที่ 4.61 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอน และ ค่าสภาพคล่องของพาหะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

4.2.9 ผลการศึกษาความต้านทานเชิงแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.62 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโฟโต (I_p) กับเวลา (t) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศและแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

ตารางที่ 4.14 แสดงค่าสภาพการตอบสนองต่อแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศและแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

Annealing Temperature (°C)	I_p		Photosensitivity	
	I_{light}	I_{dark}	$S = \left(\frac{I_{light} - I_{dark}}{I_{light}} \right) \times 100\%$	$S = \frac{I_{light}}{I_{dark}}$
As-deposited	2.91×10^{-7}	7.80×10^{-9}	97.32	37.33
100	1.83×10^{-7}	4.80×10^{-8}	97.38	38.21
200	2.01×10^{-7}	4.83×10^{-9}	97.60	41.67
250	2.03×10^{-7}	1.83×10^{-8}	90.98	11.08
300	1.77×10^{-7}	1.83×10^{-8}	89.67	9.68
350	1.20×10^{-7}	1.38×10^{-8}	88.45	8.66

Annealing Temperature (°C)		Rise Time (s)						Decay Time (s)					
		1 st Term	2 nd Term	3 rd Term	4 th Term	5 th Term	6 th Term	1 st Term	2 nd Term	3 rd Term	4 th Term	5 th Term	6 th Term
As-deposited	σ_i	1.91×10^{12}	2.07×10^{12}	3.91×10^{12}	7.01×10^{12}	1.26×10^{13}	2.93×10^{12}	3.51×10^{12}	4.10×10^{12}	5.75×10^{12}	1.38×10^{13}	5.55×10^{13}	4.01×10^{14}
	I_i	0.15×10^{-7}	0.16×10^{-7}	0.30×10^{-7}	0.55×10^{-7}	0.98×10^{-7}	2.29×10^{-7}	2.73×10^{-7}	3.20×10^{-7}	4.49×10^{-7}	1.08×10^{-6}	4.33×10^{-6}	3.13×10^{-5}
100	σ_i	4.36×10^{11}	2.14×10^{12}	2.76×10^{12}	4.33×10^{12}	6.71×10^{12}	6.41×10^{12}	7.70×10^{12}	8.27×10^{12}	1.05×10^{13}	1.89×10^{13}	1.21×10^{14}	
	I_i	0.15×10^{-7}	0.76×10^{-7}	0.98×10^{-7}	1.53×10^{-7}	2.38×10^{-7}	2.27×10^{-7}	2.73×10^{-7}	2.93×10^{-7}	3.73×10^{-7}	6.69×10^{-7}	4.27×10^{-7}	
200	σ_i	1.75×10^{11}	3.22×10^{11}	1.06×10^{12}	3.73×10^{12}	9.13×10^{12}		1.06×10^{13}	1.22×10^{13}	1.87×10^{13}	4.84×10^{13}	4.94×10^{13}	4.28×10^{13}
	I_i	0.05×10^{-7}	0.08×10^{-7}	0.27×10^{-7}	0.96×10^{-7}	2.36×10^{-7}		2.74×10^{-7}	3.15×10^{-7}	4.82×10^{-7}	1.25×10^{-6}	2.77×10^{-6}	6.26×10^{-6}
250	σ_i	7.18×10^{11}	8.51×10^{11}	1.65×10^{12}	2.92×10^{12}	4.76×10^{12}	5.55×10^{12}	5.66×10^{12}	6.27×10^{12}	8.73×10^{12}	1.74×10^{13}	2.39×10^{13}	6.90×10^{13}
	I_i	0.35×10^{-7}	0.41×10^{-7}	0.80×10^{-7}	1.41×10^{-7}	2.30×10^{-7}	2.68×10^{-7}	2.73×10^{-7}	3.02×10^{-7}	4.21×10^{-7}	8.41×10^{-7}	1.15×10^{-6}	3.33×10^{-6}
300	σ_i	5.35×10^{11}	6.29×10^{11}	1.00×10^{12}	1.81×10^{12}	3.03×10^{12}	2.83×10^{13}	3.67×10^{12}	3.92×10^{12}	4.93×10^{12}	7.54×10^{12}	1.44×10^{13}	3.12×10^{13}
	I_i	0.40×10^{-7}	0.47×10^{-7}	0.74×10^{-7}	1.34×10^{-7}	2.25×10^{-7}	2.10×10^{-7}	2.72×10^{-7}	2.91×10^{-7}	3.66×10^{-7}	5.59×10^{-7}	1.07×10^{-6}	2.31×10^{-6}
350	σ_i	5.79×10^{11}	6.94×10^{11}	1.24×10^{12}	2.02×10^{12}	2.65×10^{12}		3.17×10^{12}	3.37×10^{12}	4.05×10^{12}	6.77×10^{12}	1.18×10^{13}	3.30×10^{13}
	I_i	0.50×10^{-7}	0.60×10^{-7}	1.06×10^{-7}	1.73×10^{-7}	2.27×10^{-7}		2.72×10^{-7}	2.89×10^{-7}	3.47×10^{-7}	5.80×10^{-7}	1.01×10^{-6}	2.83×10^{-6}

ตารางที่ 4.15 ค่าความหนาแน่นของกัมมันตภาพหะที่คำนวณได้จากการวัดกระแสเฟอร์มิชิตเทนตของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศและแอนนีลที่อุณหภูมิ 100, 200, 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียสตามลำดับ

Annealing Temperature (°C)		Rise Time (s)						Decay Time (s)					
		1 st Term	2 nd Term	3 rd Term	4 th Term	5 th Term	6 th Term	1 st Term	2 nd Term	3 rd Term	4 th Term	5 th Term	6 th Term
As-deposited	T_{ri}	5.500	11.000	29.000	61.500	110.000	4.160	2251.000	7.127	12.099	20.078	3.800	5.940
	A_{ri}	0.293	15.480	45.600	77.370	43.740	1.428	6.843	0.348	7.916	14.380	3.960	2.930
	β	-	-	-	-	-	0.649	-	-	-	-	-	0.631
100	T_{ri}	8.234	10.753	7.593	35.070	0.367	5.940	1312.000	4.865	12.099	20.078	3.800	5.940
	A_{ri}	1119.000	201.100	1024.000	7.807	1.379	98.220	17.670	0.545	22.840	39.910	1.345	0.284
	β	-	-	-	-	-	0.965	-	-	-	-	-	0.290
200	T_{ri}	48.545	33.391	16.816	6.087	5.250	5.940	19.070	6.268	1.210	20.078	3.800	5.940
	A_{ri}	18.580	28.990	17.720	52.180	83.110	41.630	1.492	0.288	0.000	1.343	9.066	7.379
	β	-	-	-	-	-	0.886	-	-	-	-	-	0.697
250	T_{ri}	2.518	2.158	1.194	5.099	3.800	5.940	125.000	3.781	8.459	15.362	3.800	4.940
	A_{ri}	69.640	61.620	5.902	3.312	14.980	1.005	0.636	0.024	1.249	1.959	290.400	290.000
	β	-	-	-	-	-	0.884	-	-	-	-	-	0.835
300	T_{ri}	2.035	1.933	9.153	15.237	5.600	59.400	31.500	2.355	8.459	15.362	3.800	4.940
	A_{ri}	52.100	46.170	32.980	19.780	24.910	4.803	2.008	0.000	0.404	0.407	0.794	0.597
	β	-	-	-	-	-	0.959	-	-	-	-	-	0.685
350	T_{ri}	1.596	1.307	6.598	257.000	6.380	-	1.591	2.355	8.459	15.362	3.800	4.940
	A_{ri}	30.250	21.750	1.027	1.127	10.570	-	0.000	0.005	2.077	3.365	0.828	0.532
	β	-	-	-	-	0.483	-	-	-	-	-	-	0.577

ตารางที่ 4.16 ค่าช่วงชีวิตของพาหะที่คำนวณได้จากการวัดกระแสเฟอร์มิสเทนต์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศและแอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียสตามลำดับ

4.3 การศึกษาสมบัติของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{0.9}(\text{ZnTe})_{0.1}/\text{CuSbS}_2$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{0.9}(\text{ZnTe})_{0.1}/\text{CuSbS}_2$ ซึ่งฟิล์มบาง $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ที่จะนำมาประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธ์ จะใช้ที่ $x = 0.1$ ซึ่งทำให้ได้ฟิล์มบางที่มีการนำไฟฟ้าชนิดเอ็น ในขณะที่ CuSbS_2 จะมีการนำไฟฟ้าเป็นชนิดพี และจะถูกประติขัลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วย ITO โดยจะได้เป็นชั้นบางๆของสารกึ่งตัวนำ ITO/ $(\text{CdS})_{0.9}(\text{ZnTe})_{0.1}/\text{CuSbS}_2$

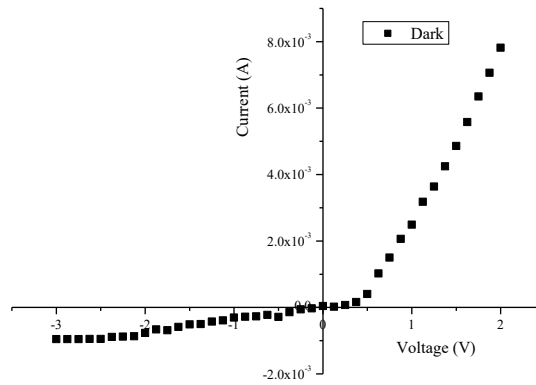
4.3.1 ลักษณะของรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{0.9}(\text{ZnTe})_{0.1}/\text{CuSbS}_2$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.63 แสดงภาพถ่ายรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{0.9}(\text{ZnTe})_{0.1}/\text{CuSbS}_2$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจก ITO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

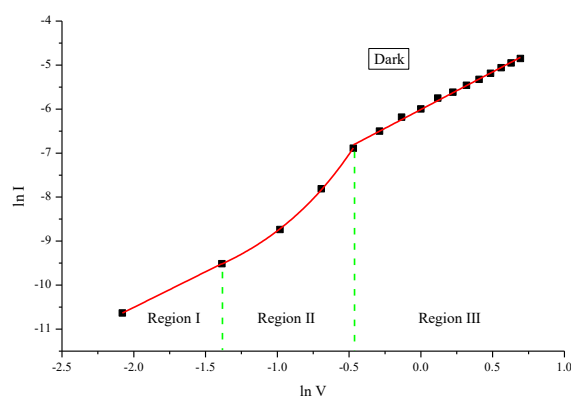
4.3.2 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{0.9}(\text{ZnTe})_{0.1}/\text{CuSbS}_2$ เมื่อไม่ได้มีการฉายแสง ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้าในช่วง -3 ถึง 2 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธ์ของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{0.9}(\text{ZnTe})_{0.1}/\text{CuSbS}_2$ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ แสดงในรูปที่ 4.64 พบว่ามีการเรียงกระแสไฟฟ้าทางเดียวเหมือนไดโอดทั่วไป โดยมีค่าแรงดันไฟฟ้าขีดเริ่ม (threshold voltage) อยู่ที่ 0.5 โวลต์



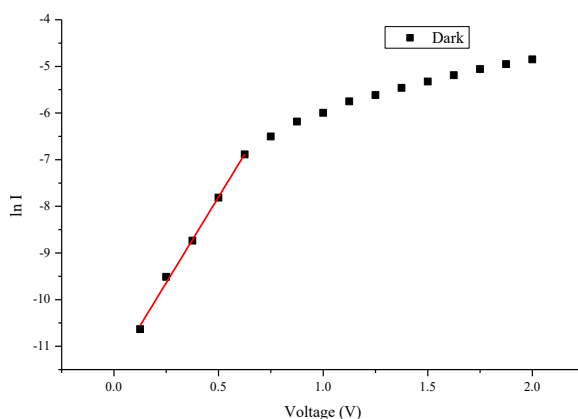
รูปที่ 4.64 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า (I) กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า (V) ในช่วง -3 ถึง 2 โวลต์ เมื่อไม่ได้มีการฉายแสง และทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{0.9}(\text{ZnTe})_{0.1}/\text{CuSbS}_2$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจก ITO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

กลไกของกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ตรงบริเวณรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{0.9}(\text{ZnTe})_{0.1}/\text{CuSbS}_2$ ในช่วงแรงดันไฟฟ้า -3 ถึง 2 โวลต์ เมื่อพิจารณาจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I$ กับ $\ln V$ ดังรูปที่ 4.65 ของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{0.9}(\text{ZnTe})_{0.1}/\text{CuSbS}_2$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องพบว่าที่แรงดันไฟฟ้าต่ำกว่า 0.3 โวลต์ จะเป็นไปตามกฎของโอห์ม ส่วนที่ช่วงแรงดันไฟฟ้าระหว่าง 0.3 – 0.6 โวลต์ เป็นกลไกการนำกระแสแบบเทอร์มิออนิกอิมิสชัน (thermionic emission) และช่วงแรงดันไฟฟ้ามากกว่า 0.6 โวลต์ เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้าง (space charge limited current) ตามลำดับ ซึ่งเกิดจากกับดักพาหะในเนื้อสารที่มีการแจกแจงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล

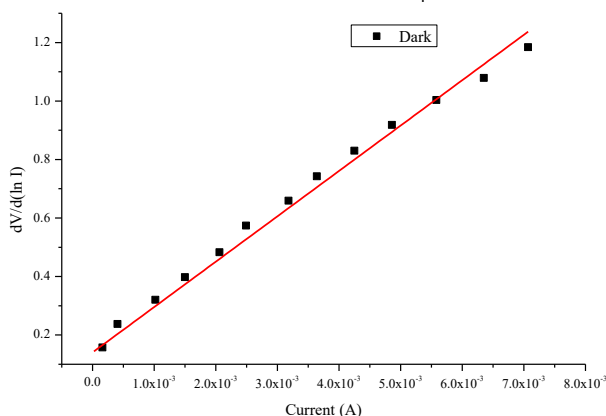


รูปที่ 4.65 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I$ กับ $\ln V$ เมื่อไม่ได้มีการฉายแสงและทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{0.9}(\text{ZnTe})_{0.1}/\text{CuSbS}_2$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจก ITO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

จากนั้นจะทำการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I$ กับ V ดังรูปที่ 4.66 เพื่อหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ และ ค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับซึ่งนำไปใช้เป็นตัวเริ่มต้นในการจำลองข้อมูลเพื่อเทียบกับผลจากการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ในช่วงการไหลของกระแสไฟฟ้าข้ามรอยต่อพี-เอ็น ที่เป็นกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.65 เพื่อใช้ช่วยหาค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ และ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติให้ถูกต้องยิ่งขึ้น ในการหาค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมด้วยวิธีของชวงนั้น จะเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $dV/d \ln I$ กับ ค่า I ดังรูปที่ 4.67 ซึ่งจากกราฟนี้จะได้ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ และ ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม



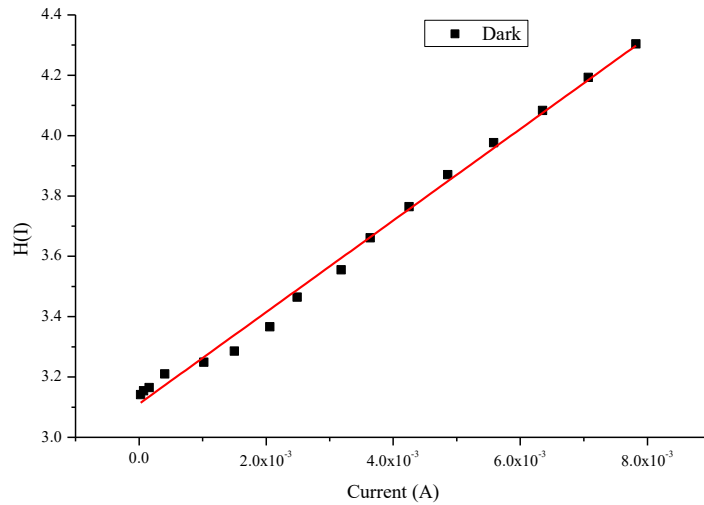
รูปที่ 4.66 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I$ กับ (V) เมื่อไม่ได้มีการฉายแสงและทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{0.9}(\text{ZnTe})_{0.1}/\text{CuSbS}_2$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจก ITO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.67 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $dV/d \ln I$ กับ I เมื่อไม่ได้มีการฉายแสงและทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{0.9}(\text{ZnTe})_{0.1}/\text{CuSbS}_2$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจก ITO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

และจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $H(I)$ กับ ค่า I ดังรูปที่ 4.68 จะได้ค่าความสูงกำแพงศักย์ที่แรงดันไบแอสเป็นศูนย์ สำหรับค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ ค่าแฟกเตอร์อุดม

คติ ค่าความสูงกำแพงศักย์ และ ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม ที่ได้จากกลไกเทอร์มออิเล็กทรอนิกส์ชั้นและวิธีของขวงจะแสดงในตารางที่ 4.17



รูปที่ 4.68 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $H(I)$ กับ I เมื่อไม่ได้มีการฉายแสงและทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{0.9}(\text{ZnTe})_{0.1}/\text{CuSbS}_2$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจก ITO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

จากรูปที่ 4.66 คือกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าลอการิทึมของกระแส ($\ln I$) กับ ค่าแรงดัน ไฟฟ้า (V) เพื่อใช้ในการคำนวณหา ค่ากระแสไฟฟ้าอิมิตัวย้อนกลับ (I_s) และค่าแฟกเตอร์ในอุดมคติ (n) โดยอาศัยกราฟเส้นตรงช่วงที่มีการนำกระแสไฟฟ้าที่เป็นกลไกแบบเทอร์มออิเล็กทรอนิกส์ชั้น ซึ่งกลไกแบบเทอร์มออิเล็กทรอนิกส์ชั้น จะปรากฏในช่วงแรงดัน 0.3-0.6 โวลต์ และแรงดันในช่วง 0.3-0.6 นี้ ได้รับการตรวจสอบอีกครั้งหนึ่งว่า กลไกเทอร์มออิเล็กทรอนิกส์ชั้น แสดงผลออกมาจริง โดยอาศัยกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าลอการิทึมของกระแส ($\ln I$) กับ ค่าลอการิทึมของแรงดัน ($\ln V$) ดังรูปที่ 4.65 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า กับแรงดันไฟฟ้าของไดโอดจะแสดงดังสมการ

$$I = I_s \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (4.27)$$

เมื่อ I_s คือ ค่ากระแสไฟฟ้าอิมิตัวย้อนกลับมีค่าเท่ากับ

$$I_s = AA^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_{B0}}{kT}\right) - 1 \quad (4.28)$$

เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I$ กับ V เพื่อหาค่ากระแสไฟฟ้าอิมิตัวย้อนกลับได้จากการลากเส้นตรงผ่านบริเวณกราฟที่เป็นกลไกเทอร์มออิเล็กทรอนิกส์ชั้นตัดแกน $\ln I$ โดยจุดตัดมีค่า

เท่ากับ $\ln I_s$ และ มีค่าความชันของกราฟเท่ากับ $\frac{q}{nkT}$ ซึ่งสามารถนำมาคำนวณหา ค่าแฟกเตอร์อุณหภูมิต n ได้จากสมการที่ (4.28) จะได้ค่าความสูงของกำแพงศักย์คือ

$$\phi_{B0} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{AA^*T^2}{I_s} \right) \quad (4.29)$$

ค่าความสูงกำแพงศักย์ (ϕ_B) ของสมการที่ (4.29) จะเป็นค่าในขณะแรงดันไบแอสเป็นศูนย์ที่อุณหภูมิใดๆ และ A^* เท่ากับ 19.8 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรต่อเคลวินยกกำลังสอง

นอกจากนี้ยังสามารถที่จะหา ค่าแฟกเตอร์อุณหภูมิต (n) ของไดโอดที่ขึ้นกับแรงดันไบแอสโดยอาศัยความสัมพันธ์ดังนี้

$$n = \frac{q}{kT} \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (4.30)$$

ในความเป็นจริงแล้วไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/(CdS)_{0.9}(ZnTe)_{0.1}/CuSbS₂ มักจะมีความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม (R_s) เกิดขึ้นเสมอซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากค่าความต้านทานไฟฟ้าของเนื้อสารและที่บริเวณขั้วไฟฟ้าด้านหลัง จึงต้องทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าในช่วงแรงดันไฟฟ้ามีค่าสูงๆ (region III) เพื่อให้ความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมนั้นแสดงผลออกมา ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/(CdS)_{0.9}(ZnTe)_{0.1}/CuSbS₂ ที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมมาเกี่ยวข้องจะเป็น

$$I = I_s \left\{ \exp \left(\frac{q}{nkT} (V - IR_s) \right) - 1 \right\} \quad (4.31)$$

เมื่อ ค่ากระแสไฟฟ้าอิมิต์ย้อนกลับ คือ

$$I_s = AA^*T^2 \exp \left(-\frac{q\phi_{B0}}{kT} \right) \quad (4.32)$$

อาจเขียนสมการที่ (4.28) อีกรูปหนึ่งได้เป็น

$$I = I_s \left\{ \exp \frac{q}{nkT} (V - IR_s) [1 - \exp(-qV/kT)] \right\} \quad (4.33)$$

วิธีการหาค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมของขง (Cheung's Method) พิจารณาในช่วงแรงดันไบแอสตรง โดยการแทนสมการที่ (4.32) ลงในสมการที่ (4.31) แล้วจะได้ว่า

$$V = IR_s + n\phi_B + \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{I}{AA^*T^2} \right) \quad (4.34)$$

หาอนุพันธ์ของค่า V เทียบกับ ค่า $\ln I$ เพื่อหาค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม จากสมการที่ (4.34) จัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{q} + IR_S \quad (4.35)$$

ซึ่งจะเป็นกราฟเส้นตรง กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $dV/d \ln I$ กับ ค่า I ดังกล่าวนี จะดังรูปที่ 4.67 โดยค่าความชันของกราฟนั้นคือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมของวงจร (R_S) และจุดตัดแกนของค่า $dV/d \ln I$ มีค่าเท่ากับ nkT/q

ส่วนการหาค่าความสูงของกำแพงศักย์นั้นจะหาได้โดยการจัดรูปของสมการที่ (4.34) ให้อยู่ในรูปฟังก์ชันของค่า $H(I)$ ดังนี้

$$H(I) = V - n \left(\frac{kT}{q} \right) \ln \left(\frac{I}{AA^*T^2} \right) \quad (4.36)$$

แล้วสมการที่ (4.36) จะกลายเป็น

$$H(I) = n\phi_B + IR_S \quad (4.37)$$

เมื่อทำการคำนวณค่า $H(I)$ จากข้อมูลของ ค่ากระแสไฟฟ้า และ แรงดันไฟฟ้า แล้วนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $H(I)$ กับ ค่า I ก็จะได้ดังรูปที่ 4.68 โดยจะคำนวณหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ได้จากจุดตัดแกนตั้งของค่า ($n\phi_B$) ของกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าวแล้ว นอกจากนี้ความชันก็คือค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมเช่นเดียวกับความสัมพันธ์ในสมการที่ (4.35) ซึ่งจะส่งผลให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกัน

กลไกการนำไฟฟ้าชนิดกระแสไฟฟ้าถูกจำกัดโดยประจุค้าง (SCLC) มักจะเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ดังนี้คือ

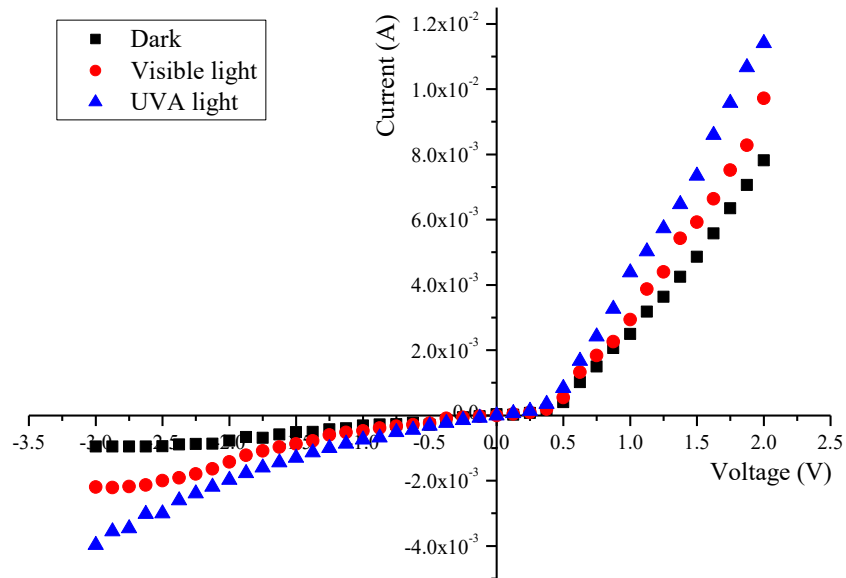
$$I = kV^m \quad (4.38)$$

$$\ln I = m \ln V + \ln k \quad (4.39)$$

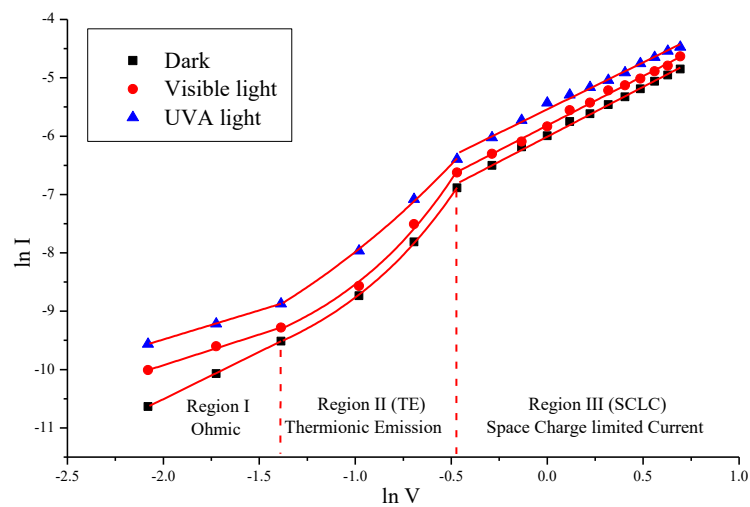
เมื่อ m คือ ค่าความชันของกราฟ ถ้า m มีค่าเท่ากับ 1.5 กลไกการนำไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัด โดยประจุค้างจะเป็นไปตามกฎของ ไซด์-แลงมัวร์ (Child-Langmuir's law) แต่ถ้า m เท่ากับ 2 จะเป็นไปตามกฎของมอตต์-เกอร์นีย์ (Mott-Gurney's law) แต่ถ้า $m > 2$ จะหมายถึงว่ากับดักประจุมีระดับพลังงานต่อเนื่องและมีการแจกแจงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลซึ่งจากผลการทดลองได้ค่า m เท่ากับ 2.38 แสดงว่ากับดักประจุมีระดับพลังงานต่อเนื่องและมีการแจกแจงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล

4.3.3 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดโดยการฉายแสงด้วยหลอดฮาโลเจน ELH และหลอดแสงจันทร์ใส ของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{0.9}(\text{ZnTe})_{0.1}/\text{CuSbS}_2$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

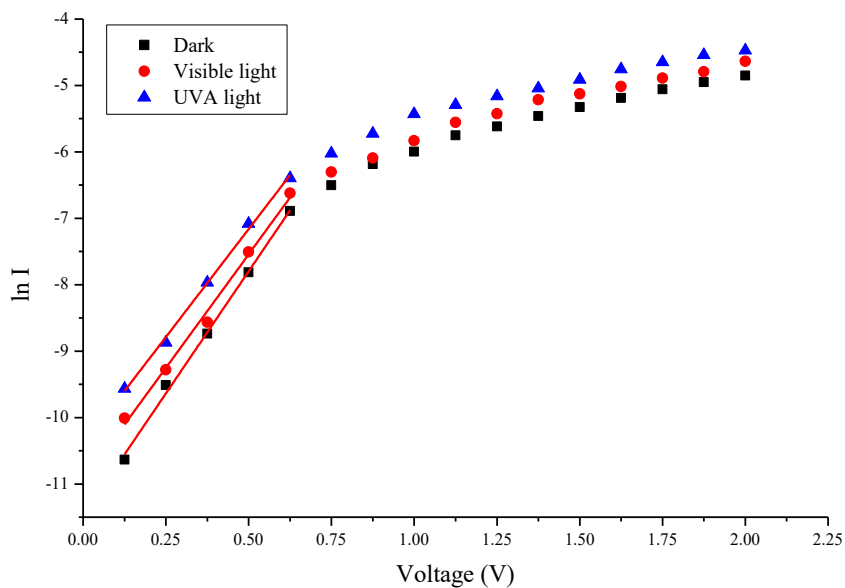
ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{0.9}(\text{ZnTe})_{0.1}/\text{CuSbS}_2$ โดยวัดค่าความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ในช่วง -3 ถึง 2 โวลต์ ขณะไม่มีการฉายแสง (darkness) และขณะมีการฉายแสงจากหลอดฮาโลเจน ELH กำลังไฟฟ้า 300 วัตต์ และจากหลอดแสงจันทร์ใส (high pressure mercury vapor lamp) กำลังไฟฟ้า 400 วัตต์ พบว่ามีแรงดันไฟฟ้าเท่ากัน กระแสไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อฉายแสงจากหลอดฮาโลเจนและจากหลอดจันทร์ใสตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.69 แสดงว่ารอยต่อวิวิธพันธ์มีสมบัติเป็นโฟโตไดโอดได้ เมื่อพิจารณาที่แรงดันไฟฟ้า -3 โวลต์ โฟโตไดโอดนี้จะมีค่าความไวแสง (sensitivity, S) เท่ากับ 56.43 และ 75.97 ตามลำดับ ภายใต้การฉายแสง โฟตอนที่ตกลงบนรอยต่อวิวิธพันธ์จะก่อให้เกิดการคู่อิเล็กตรอน – โฮลอิสระขึ้น ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลที่เพิ่มขึ้นจะทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านโฟโตไดโอดมีค่าเพิ่มขึ้น อีกทั้งพลังงานของโฟตอนที่ได้จากหลอดแสงจันทร์ใสมีค่าสูงกว่าพลังงานของโฟตอนที่ได้จากหลอดฮาโลเจน ELH จึงส่งผลให้กระแสไฟฟ้าภายใต้การฉายแสงจากหลอดแสงจันทร์ใสมีค่าสูงกว่ากระแสไฟฟ้าที่อยู่ภายใต้การฉายแสงจากหลอดฮาโลเจน ELH การศึกษากลไกของกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ตรงบริเวณไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{0.9}(\text{ZnTe})_{0.1}/\text{CuSbS}_2$ สามารถศึกษาได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I$ กับ $\ln V$ โดยสามารถแบ่งกลไกการนำไฟฟ้าได้เป็นสองช่วง คือ กลไกการนำกระแสไฟฟ้าเป็นไปตามกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันและกลไกการนำกระแสไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้างที่เกิดจากกับดักประจุในเนื้อสารที่มีการแจกแจงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลและสามารถหาค่าแพกเตอร์อูดมคติ และ ค่ากระแสไฟฟ้าอิมิตัวย้อนกลับ ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I$ กับ V เพื่อนำไปใช้เป็นค่าเริ่มต้นในการจำลองข้อมูล และในการหาค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม จะใช้วิธีของชวงโดยค่ากระแสไฟฟ้าอิมิตัวย้อนกลับ



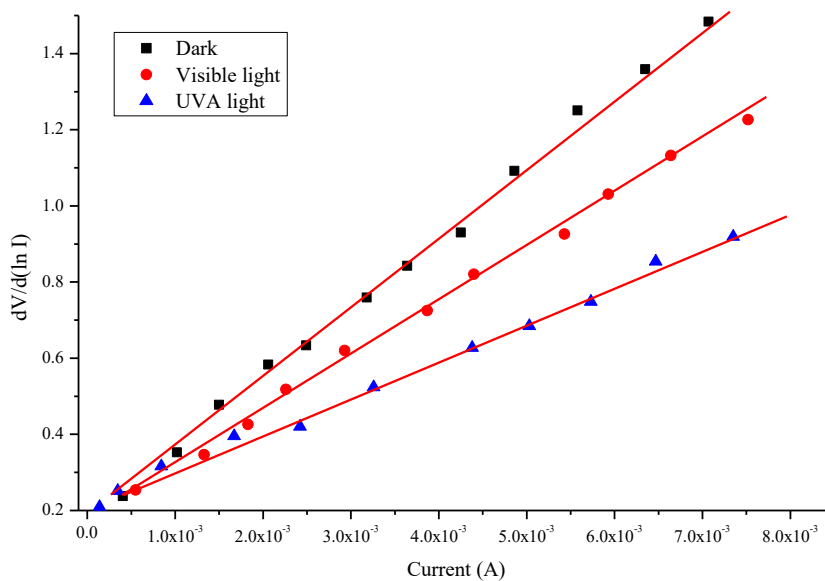
รูปที่ 4.69 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า (I) กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า (V) เมื่อฉายแสงด้วยหลอดฮาโลเจน ELH และหลอดแสงจันทร์สี ตามลำดับ ของไดโอดที่มีรอยต่ออวิวิชันของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{0.9}(\text{ZnTe})_{0.1}/\text{CuSbS}_2$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ



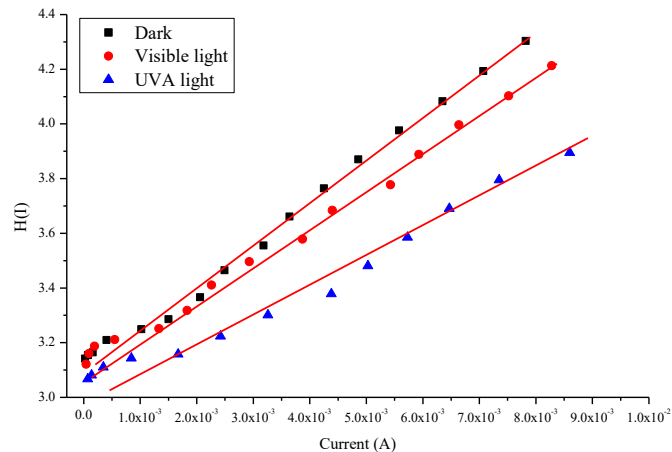
รูปที่ 4.70 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I$ กับ $\ln V$ เมื่อฉายแสงด้วยหลอดฮาโลเจน ELH และหลอดแสงจันทร์สี ตามลำดับ ของไดโอดที่มีรอยต่ออวิวิชันของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{0.9}(\text{ZnTe})_{0.1}/\text{CuSbS}_2$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ



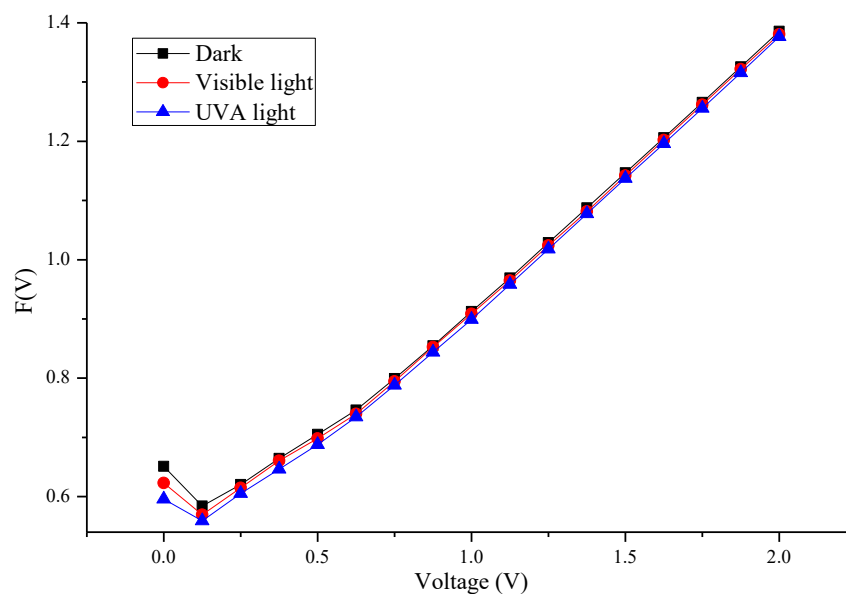
รูปที่ 4.71 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln I$ กับ V เมื่อฉายแสงด้วยหลอดฮาโลเจน ELH และหลอดแสงจันทร์ใส ตามลำดับ ของไดโอดที่มีรอยต่ออวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{0.9}(\text{ZnTe})_{0.1}/\text{CuSbS}_2$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.72 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $dV/d \ln I$ กับ ค่า I เมื่อฉายแสงด้วยหลอดฮาโลเจน ELH และหลอดแสงจันทร์ใส ตามลำดับ ของไดโอดที่มีรอยต่ออวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{0.9}(\text{ZnTe})_{0.1}/\text{CuSbS}_2$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.73 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $H(I)$ กับ ค่า I โดยวิธีของชวง เมื่อฉายแสงด้วยหลอดฮาโลเจน ELH และหลอดแสงจันทร์ใส ตามลำดับ ของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{0.9}(\text{ZnTe})_{0.1}/\text{CuSbS}_2$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.74 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $F(V)$ กับ ค่า V โดยวิธีของนอร์ด เมื่อฉายแสงด้วยหลอดฮาโลเจน ELH และหลอดแสงจันทร์ใส ตามลำดับ ของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{0.9}(\text{ZnTe})_{0.1}/\text{CuSbS}_2$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ค่าความสูงของกำแพงศักย์ และ ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม เมื่อฉายแสงด้วยหลอดฮาโลเจน ELH และหลอดแสงจันทร์ใส ตามลำดับ ที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มออิเล็กทริกวิธีของชวง และวิธีของนอร์ดแสดงในตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.17 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ค่าความสูงของกำแพงศักย์และค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มิโอนิกอิมิสชัน และวิธีของชวง เมื่อฉายแสงด้วยหลอดฮาโลเจน ELH และหลอดแสงจันทร์สี ตามลำดับ ของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{0.9}(\text{ZnTe})_{0.1}/\text{CuSbS}_2$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

Light Source	Saturation Current (A)	Ideality Factor (n)		Barrier Height, ϕ_B (eV)			Series Resistance, R_s (k Ω)		
		TE	Cheung	TE	Cheung	Norde	Cheung	Cheung	Norde
		I-V	dV/dln(I)-I	I-V	H(I)-I	F(V)-V	H(I)-I	dV/dln(I)-I	F(V)-V
Dark	1.04×10^{-5}	5.78	5.97	0.54	0.52	0.58	151.83	155.12	164.59
ELH light	1.74×10^{-5}	6.22	6.47	0.52	0.51	0.56	126.80	145.82	154.37
UVA light	3.00×10^{-5}	6.54	6.83	0.51	0.49	0.55	101.41	145.08	148.25

ตารางที่ 4.18 แสดงค่าการตอบสนองต่อแสงในช่วงแรงดันไบแอสกลับ พิจารณาที่ความต่างศักย์ -3 โวลต์ เมื่อฉายแสงด้วยหลอดฮาโลเจน ELH และหลอดแสงจันทร์สี ตามลำดับ ของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{0.9}(\text{ZnTe})_{0.1}/\text{CuSbS}_2$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

Light Source	Current (A)	Sensitivity, S
Dark	0.95×10^{-3}	-
ELH	2.19×10^{-3}	56.43
UVA	3.97×10^{-3}	75.97

4.3.4 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้า กับแรงดันไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{0.9}(\text{ZnTe})_{0.1}/\text{CuSbS}_2$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

ได้ทำการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{0.9}(\text{ZnTe})_{0.1}/\text{CuSbS}_2$ ในช่วงแรงดันไฟฟ้า -3 ถึง 2 โวลต์ และในช่วงความถี่ 200 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิรตซ์ พบว่าเมื่อแรงดันไบแอสเพิ่มขึ้น ความจุไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.75

แต่เมื่อนำมาเขียนกราฟตามความสัมพันธ์

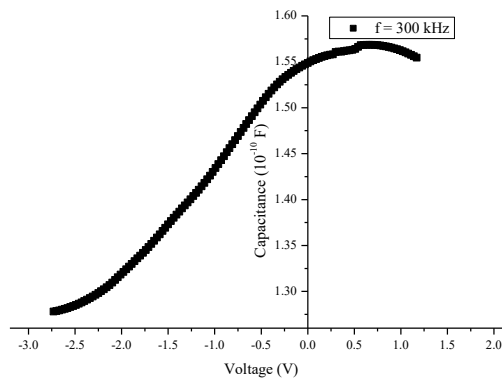
$$\frac{1}{C^2} = \left(\frac{2}{q\epsilon_s N_A A^2} \right) \left(V_{bi} - \frac{kT}{q} - V \right) \quad (4.40)$$

เมื่อ C คือความจุไฟฟ้า ϵ_s คือเพอร์มิตติวิตีของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ซึ่ง $\epsilon_s = \epsilon_r \epsilon_0$ โดยที่ ϵ_r ของ CuSbS_2 มีค่าประมาณ 10 ส่วน ϵ_0 คือเพอร์มิตติวิตีของสุญญากาศมีค่าเท่ากับ 8.85×10^{-14} ฟารัดต่อเซนติเมตร และจากสมการที่ (4.40) ความชันของเส้นตรงคือ

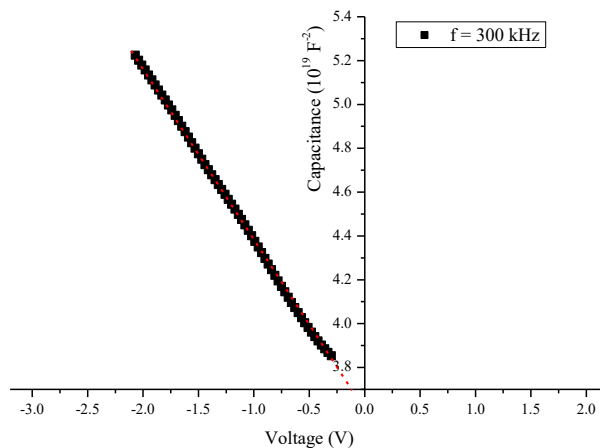
$$\text{slope} = \frac{2}{q \epsilon_s N_A A^2}$$

เมื่อ N_A คือความหนาแน่นของอะตอมผู้รับของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ส่วนจุดตัดแกน y (V_i) ของสมการที่ (4.40) สามารถที่จะนำไปหาค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมรอยต่อ (V_{bi}) ดังนี้คือ

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



รูปที่ 4.75 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{0.9}(\text{ZnTe})_{0.1}/\text{CuSbS}_2$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ ที่ความถี่ 300 กิโลเฮิร์ตซ์



รูปที่ 4.76 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C^2$ กับแรงดันไฟฟ้า ของรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{0.9}(\text{ZnTe})_{0.1}/\text{CuSbS}_2$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ ที่ความถี่ 300 กิโลเฮิร์ตซ์

จากการทดลองวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่ 300 กิโลเฮิรตซ์สามารถที่จะนำมาคำนวณหาค่า N_A ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} N_A &= \frac{2}{q\epsilon_s A^2 (\text{slope})} \\ &= \frac{2}{(1.6 \times 10^{-19})(10)(8.85 \times 10^{-14})(0.07)^2 (7.96 \times 10^{18})} \\ &= 3.62 \times 10^{14} \text{ ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร} \end{aligned}$$

ความหนาแน่นของอะตอมผู้รับของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่คำนวณจากการ C-V มีค่า 3.62×10^{14} ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่า 3.69×10^{14} ต่อลูกบาศก์เซนติเมตรที่คำนวณได้จากปรากฏการณ์ฮอลล์ ความหนาแน่นของสถานะทางพลังงานในแถบวาเลนซ์ N_V สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$N_V = 4.82 \times 10^{15} T^{3/2} \left(\frac{m_h^*}{m_0} \right)^{3/2}$$

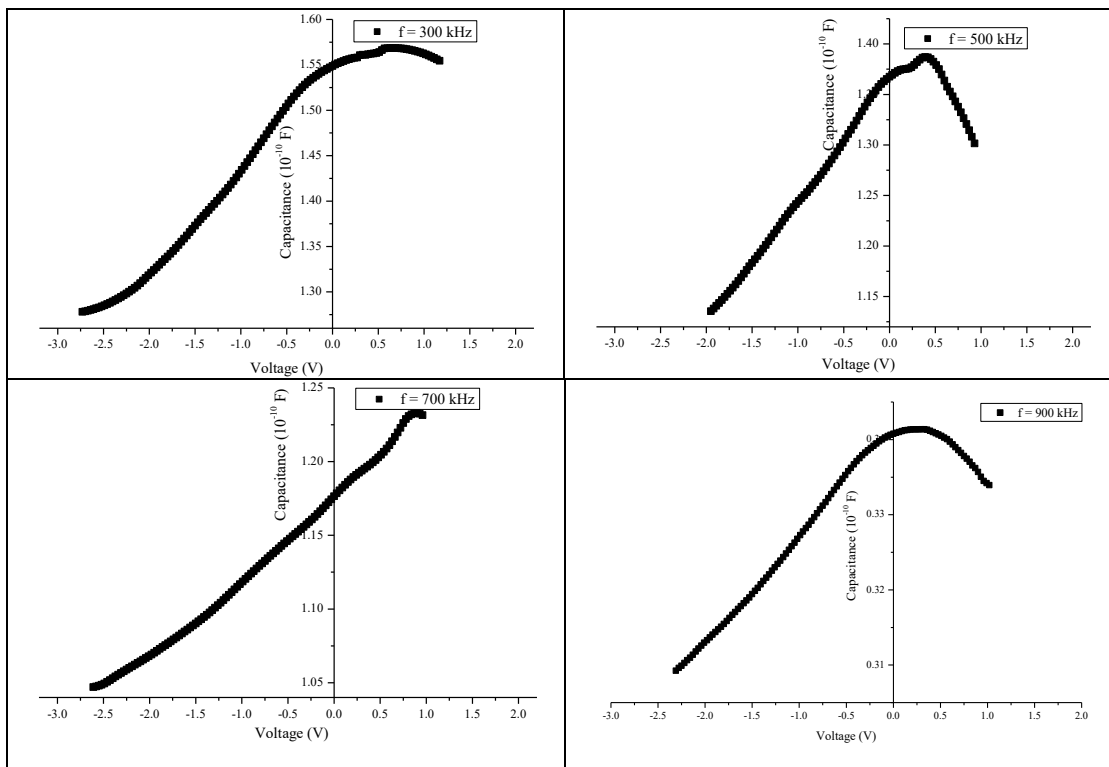
โดยที่มวลยังผล (effective mass) ของโฮลใน CuSbS_2 มีค่าเท่ากับ $3.4m_0$ ดังนั้น N_V ที่อุณหภูมิห้องจะมีค่าดังนี้

$$\begin{aligned} N_V &= 4.82 \times 10^{15} (300)^{3/2} \left(\frac{3.4m_0}{m_0} \right)^{3/2} \\ &= 1.78 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3} \end{aligned}$$

จากค่า N_A ที่ได้จะสามารถนำไปหาค่าระดับพลังงานเฟอร์มิได้จากสมการ

$$\begin{aligned} E_F &= \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_V}{N_A} \right) \\ &= \frac{(1.38 \times 10^{-23})(300)}{(1.6 \times 10^{-19})} \ln \left(\frac{1.78 \times 10^{20}}{3.62 \times 10^{14}} \right) \\ &= 0.328 \text{ eV} \end{aligned}$$

4.3.5 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อวัด ในช่วงความถี่ 300 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธ พันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{0.9}(\text{ZnTe})_{0.1}/\text{CuSbS}_2$

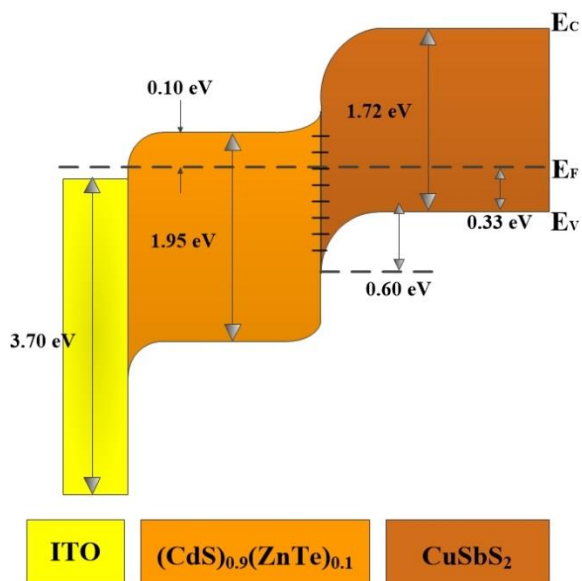


รูปที่ 4.77 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{0.9}(\text{ZnTe})_{0.1}/\text{CuSbS}_2$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ ในช่วงความถี่ 300 ถึง 900 กิโลเฮิร์ตซ์

ตารางที่ 4.19 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการคำนวณของไดโอดของรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{0.9}(\text{ZnTe})_{0.1}/\text{CuSbS}_2$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

Frequency (kHz)	N_A (cm^{-3})	E_F (eV)
100	7.81×10^{14}	0.319
200	6.48×10^{14}	0.324
300	3.62×10^{14}	0.328
500	3.26×10^{14}	0.339
700	2.51×10^{14}	0.341
900	2.31×10^{14}	0.349
1000	1.31×10^{14}	0.366

จากผลการทดลองทั้งหมดที่กล่าวมา สามารถนำมาสร้างเป็นแผนภาพแถบพลังงานของ ไดโอดของรอยต่อวิวิธพันธ์ $(\text{CdS})_{0.9}(\text{ZnTe})_{0.1}/\text{CuSbS}_2$ ได้ดังรูปที่ 4.78



รูปที่ 4.78 แสดงแผนภาพลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{0.9}(\text{ZnTe})_{0.1}/\text{CuSbS}_2$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้เป็นการสรุปผลการดำเนินการวิจัยของการศึกษาสมบัติของรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่ง (CdS)_{1-x}(ZnTe)_x/CuSbS₂ ซึ่งฟิล์มบาง (CdS)_{1-x}(ZnTe)_x ที่จะนำมาประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธ์ จะใช้ที่ $x = 0.1$ และฟิล์มบาง CuSbS₂ แอนนีลที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ประดิษฐ์ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่เคลือบด้วย ITO ซึ่งจะได้ว่า ITO/(CdS)_{0.9}(ZnTe)_{0.1}/CuSbS₂

5.1 สรุปผลการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ (CdS)_{1-x}(ZnTe)_x ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ (CdS)_{1-x}(ZnTe)_x ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ พบว่าลักษณะของฟิล์มบาง CdS ($x=0$) มีสีส้มเหลือง และเมื่อมีการเพิ่มเศษส่วนโดยโมล (x) ซึ่งเป็นการเพิ่มปริมาณของ ZnTe ลักษณะสีของฟิล์มที่ได้จะมีสีเข้มขึ้นและเป็นสีดำที่เราเพิ่มปริมาณของ ZnTe 100 เปอร์เซ็นต์ ($x=1$) ลักษณะการยึดเกาะของฟิล์มบางกับแผ่นฐานรองรับ ยึดเกาะกันได้ดีไม่มีการหลุดร่อน

การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ (CdS)_{1-x}(ZnTe)_x ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ด้วยสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์พบว่าระนาบการเลี้ยวเบนปรากฏอยู่ในช่วง 25.20 – 26.60 องศา โดยฟิล์มบางกรณีพิเศษส่วนโดยมวล ($x \leq 0.2$ และ $x \geq 0.8$) ฟิล์มบางมีลักษณะเป็นเฟสเดี่ยว (single phase) และกรณีพิเศษส่วนโดยมวล ($0.4 \leq x \leq 0.6$) ฟิล์มบางมีลักษณะเป็นเฟสผสม (mix phase) ในกรณีพิเศษส่วนโดยมวล ($x \leq 0.2$) จะพบพีคการเลี้ยวเบนของระนาบ (002)H ที่ปรากฏอย่างเด่นชัด ที่เศษส่วนโดยมวล ($x=0.4$) พบพีคการเลี้ยวเบนของระนาบ (100)H และ (111)C ปรากฏเด่นชัดขึ้นมาในขณะที่ พีคการเลี้ยวเบนของระนาบ (002)H ยังคงปรากฏเด่นชัดอยู่ ที่เศษส่วนโดยมวล ($x=0.6$) พีคการเลี้ยวเบนของระนาบ (100)H และ (111)C ยังคงปรากฏอยู่ดังเดิม ในขณะที่พีคการเลี้ยวเบนของระนาบ (002)H เริ่มหายไป และที่เศษส่วนโดยมวล ($x \geq 0.8$) พบว่าพีคการเลี้ยวเบนของระนาบอื่นหายไปเหลือเพียงแต่พีคการเลี้ยวเบนของระนาบ (111)C ปรากฏเด่นชัด จากค่าโครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำที่เปลี่ยนแปลงไป พบว่าที่ เศษส่วนโดยมวล ($0 \leq x \leq 0.6$) Zn²⁺ เข้าแทนที่ Cd²⁺ มีบทบาทมากกว่า Te²⁻ เข้าแทนที่ S²⁻ ส่งผลให้ค่าคงที่โครงสร้างผลึก (แบบเฮกซะโกนัล) มีแนวโน้มลดลง และที่เศษส่วนโดยมวล ($0.4 \leq x \leq 1$) Te²⁻ เข้าแทนที่ S²⁻ มีบทบาทมากกว่า Cd²⁺ เข้าแทนที่ Zn²⁺ ส่งผลให้ค่าคงที่โครงสร้างผลึก (แบบคิวบิก) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

การศึกษาลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ (CdS)_{1-x}(ZnTe)_x ($0 \leq x \leq 1$) โดยการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำมีความเรียบสม่ำเสมอ ไม่มีรอยแตกขนาดเล็ก มีความสะอาดสูง และสามารถมองเห็นขนาดของเกรนได้ และจากการศึกษาลักษณะของผิวหน้าด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมสามารถเห็นลักษณะของเกรนว่ามีขนาดที่ค่อยๆลดลงไปจนถึงที่ $x = 0.6$ และกลับมาขยายขึ้นหลังจากนั้น

จากการศึกษาสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) พบว่าขอบการดูดกลืนจะปรากฏที่ความยาวคลื่น 450 ถึง 550 นาโนเมตร และค่าช่องว่างแถบพลังงานที่คำนวณได้จากค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง พบว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานจะลดลงเมื่อมีการเพิ่มปริมาณ ZnTe เพิ่มขึ้นจนถึงประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ และหลังจากนั้น ค่าช่องว่างแถบพลังงานจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ โดยเราพบว่าค่าส่วนหางของแถบพลังงานมีความสัมพันธ์กับค่าช่องว่างแถบพลังงาน โดยค่าส่วนหางของแถบพลังงานที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าช่องว่างแถบพลังงานมีค่าลดลง ซึ่งเราสรุปได้ว่าค่าส่วนหางของแถบพลังงานก็คือขอบการส่งผ่านแสงของโครงสร้างผลึกนั่นเอง และจากการวัดการส่งผ่านแสงย่านอินฟราเรดของฟิล์มบาง พบว่าฟิล์มบางจะมีนัยสำคัญในช่วง เลขคลื่น $400\text{-}1000\text{ cm}^{-1}$ โดยจะพบว่าโมเลกุลของอะตอม CdS และ ZnTe จะมีการสั่นแบบ Stretching Vibration

จากการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าพบว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามากที่สุด เมื่อเพิ่มปริมาณ ZnTe 40 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจาก CdS ($x=0$) ซึ่งเป็น n-type และ ZnTe ($x=1$) เป็น p-type เมื่อเพิ่มปริมาณของ ZnTe จนถึง 40 เปอร์เซ็นต์ จะพบว่าปริมาณพาหะระหว่างอิเล็กตรอนและโฮลมีปริมาณที่ใกล้เคียงกันหรือหักล้างกัน ทำให้ค่าสภาพนำไฟฟ้ามีค่าน้อยลงส่งผลให้ฟิล์มบางมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสูงที่สุดที่เศษส่วนโดยมวล ($x=0.4$) และที่จุดนี้เราพบว่าฟิล์มบางเริ่มเปลี่ยนจาก n-type เป็น p-type และจากปรากฏการณ์ฮอลล์ พบว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) มีค่าสภาพนำไฟฟ้าที่สอดคล้องกับค่าความหนาแน่นของพาหะเป็นอย่างดี

การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิสูงในช่วง 25 – 150 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาหาค่าพลังงานกระตุ้น (E_g) พบว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) มีค่าพลังงานกระตุ้นอยู่ 2 ช่วง

ตลอดจนการศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ($0 \leq x \leq 1$) โดยการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของกระแสเมื่อการฉายแสงลงบนฟิล์มบาง ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงการตอบสนองต่อแสงของฟิล์มบาง โดยฟิล์มบางที่ $x=0.6$ จะมีการตอบสนองต่อแสงที่ดีกว่าที่เศษส่วนโดยมวลอื่นๆ และทำการศึกษาต่อโดยคำนวณหาความหนาแน่นของกับดักพาหะ ซึ่งจากผลที่ได้ นั้น ค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะจะมีค่าอยู่ในช่วง $10^{10}\text{-}10^{12}$ ต่อตารางเซนติเมตร

5.2 สรุปผลการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 แอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียสตามลำดับ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ พบว่าสีของฟิล์มที่ได้จะมีสีเข้มขึ้นและเป็นสีดำเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ลักษณะการยึดเกาะของฟิล์มบางกับแผ่นฐานรองรับ ยึดเกาะกันได้ดี

การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางของสารกึ่ง CuSbS_2 แอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียสตามลำดับ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ด้วยสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์พบว่า ฟิล์มบางของสารกึ่ง CuSbS_2 แอนนีสที่อุณหภูมิ 100 และ 200 องศาเซลเซียส ไม่

ปรากฏการณ์เป็นผลึกหรือมีลักษณะเป็นอะมอร์ฟัส ในขณะที่ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำแอนนีสที่อุณหภูมิ 250 และ 300 องศาเซลเซียส จะปรากฏเฟสของ $\text{Cu}_{1.8}\text{S}$ และ Sb_2S_3 อย่างเด่นชัด แต่เมื่อทำการแอนนีสที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส จะปรากฏฟิสิกการเลี้ยวเบนของเฟส Cu_2S จำนวนมาก โดยมีฟิสิกการเลี้ยวเบนของระนาบ (111) ของระบบผลึกออร์โธโรมบิกที่มีความเข้มสูงสุด อย่างไรก็ตามก็ยังคงมีเฟสของ $\text{Cu}_{1.8}\text{S}$ และ Sb_2S_3 เกิดร่วมอยู่ด้วย

ได้ทำการการศึกษาลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 แอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียสตามลำดับ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ด้วยการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 แอนนีสที่อุณหภูมิ 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียส มีความเรียบสม่ำเสมอ ไม่มีรอยแตกขนาดเล็ก มีความสะอาดสูง และสามารถมองเห็นขนาดของเกรนได้ และจากการศึกษาลักษณะของผิวหน้าด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) สามารถเห็นลักษณะของเกรนว่ามีขนาดที่ค่อยๆ ลดลงเมื่ออุณหภูมิการแอนนีสสูงขึ้น

จากการศึกษาสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง CuSbS_2 แอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียสตามลำดับ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ พบว่าขอบการดูดกลืนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 แอนนีสที่อุณหภูมิ 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียส จะปรากฏที่ความยาวคลื่น 600 ถึง 900 นาโนเมตร และค่าช่องว่างแถบพลังงานที่คำนวณได้จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง พบว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานจะลดลงเมื่ออุณหภูมิการแอนนีสเพิ่มขึ้น ค่าช่องว่างแถบพลังงานจะมีน้อยที่สุดที่อุณหภูมิการแอนนีส 250 องศาเซลเซียส โดยเราพบว่าค่าส่วนหางของแถบพลังงานมีความสัมพันธ์กับค่าช่องว่างแถบพลังงาน โดยค่าส่วนหางของแถบพลังงานที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าช่องว่างแถบพลังงานมีค่าลดลง ซึ่งเราสรุปได้ว่า ค่าส่วนหางของแถบพลังงานก็คือข้อบกพร่องของโครงสร้างนั่นเอง และจากการวัดการส่งผ่านแสงย่านอินฟราเรดของฟิล์มบาง พบว่าฟิล์มบางจะมีนัยสำคัญในช่วง เลขคลื่น 400-1000 ต่อเซนติเมตร

จากการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าพบว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 แอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียสตามลำดับ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามากขึ้น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิการแอนนีส เนื่องจาก ฟิล์มบางของสารกึ่ง CuSbS_2 แอนนีสที่อุณหภูมิ 100 และ 200 องศาเซลเซียส ยังคงมีลักษณะเป็นอะมอร์ฟัส ทำให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าน้อย และที่อุณหภูมิการแอนนีส 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียส ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าจึงจะเพิ่มขึ้น และจากปรากฏการณ์ฮอลล์ พบว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 ที่แอนนีสอุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส มีความหนาแน่นของอะตอมผู้รับเท่ากับ 3.69×10^{14} ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

อีกทั้งยังมีการศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 แอนนีสที่อุณหภูมิ 100, 200, 250, 300 และ 350 องศาเซลเซียสตามลำดับ โดยการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของกระแสเมื่อการฉายแสงลงบนฟิล์มบาง ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงการตอบสนองต่อแสงของฟิล์มบาง โดยฟิล์มบางจะมีการตอบสนองต่อแสงลดลง เมื่อฟิล์มบางแอนนีสที่อุณหภูมิสูงขึ้น และทำการศึกษาต่อโดยคำนวณหาค่าความหนาแน่นของกักพาหะ ซึ่งจากผลที่ได้ นั้น ค่าความหนาแน่นของกักพาหะจะมีค่าอยู่ในช่วง 10^{10} - 10^{12} ต่อตารางเซนติเมตร

5.3 สรุปผลการศึกษาสมบัติของสิ่งประดิษฐ์ของรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{0.9}(\text{ZnTe})_{0.1}/\text{CuSbS}_2$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

รอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{0.9}(\text{ZnTe})_{0.1}/\text{CuSbS}_2$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ พบว่าสีของฟิล์มที่ได้จะมีสีเข้มขึ้นและเป็นสีดำเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ลักษณะการยึดเกาะของฟิล์มบางกับแผ่นฐานรองรับ ยึดเกาะกันได้ดี

จากการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าพบว่ารอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{0.9}(\text{ZnTe})_{0.1}/\text{CuSbS}_2$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ พบว่าค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้าในช่วง -3 ถึง 2 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง มีลักษณะการเรียงกระแสไฟฟ้าทางเดียวเหมือนไดโอดทั่วไป โดยมีค่าแรงดันไฟฟ้าขีดเริ่ม (threshold voltage) อยู่ที่ 0.4 โวลต์ มีค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับเท่ากับ 1.04×10^{-5} แอมแปร์ จากการคำนวณโดยอาศัยทฤษฎีเทอร์มิออนิกอิมิสชัน และวิธีของชวงในการหาค่าของแฟกเตอร์ในอุดมคติ ค่าเท่ากับ 5.78 และ 5.97 ตาม ลำดับ และค่าความสูงของกำแพงศักย์โดยอาศัยทฤษฎีเทอร์มิออนิกอิมิสชัน วิธีของชวง และวิธีของนอร์ด ในการหาค่าพบว่าค่าที่คำนวณได้มีค่าใกล้เคียงกัน คือค่าความสูงของกำแพงศักย์ มีค่าเท่ากับ 0.54, 0.52 และ 0.58 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมที่คำนวณโดยวิธีของชวงที่คำนวณได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $H(I)$ กับ I และ $dV/d \ln I$ กับ I มีค่าใกล้เคียงกันคือ มีค่าเท่ากับ 151.83 และ 155.12 กิโลโอห์ม ตามลำดับ

จากการศึกษาการตอบสนองต่อแสงของรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{0.9}(\text{ZnTe})_{0.1}/\text{CuSbS}_2$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ในช่วงแรงดันไบแอสกลับทาง พิจารณาที่ความต่างศักย์ -3 โวลต์ เมื่อฉายแสงด้วยหลอดฮาโลเจน ELH กับหลอดแสงจันทร์ใส ตามลำดับ พบว่ารอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำตอบสนองต่อแสงในย่านอัลตราไวโอเล็ตเอ(UVA) ดีกว่าแสงในย่านตามองเห็นได้ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์โฟโตไดโอดได้ และจากการกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C^2$ กับ V พบว่าความแน่นของอะตอมผู้รับของสารกึ่งตัวนำ CuSbS_2 มีค่าใกล้เคียงกับที่วัดได้จากปรากฏการณ์ฮอลล์ คือมีค่าอยู่ที่ระดับ 10^{14} ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

5.4 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

1. การเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ระวางอย่าให้ผิวหน้าเป็นรอยเพราะจะทำให้ฟิล์มบางที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกไม่สม่ำเสมอหรือเคลือบไม่ติด
2. ต้องการทำความสะอาดระบบระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศทุกครั้งเมื่อทำงานเสร็จหรือก่อนใช้งานเพื่อที่ไม่ได้มีสารอื่นมาปนเปื้อนระหว่างการเตรียมฟิล์มบาง
3. การวัดอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับในระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในสุญญากาศ ต้องให้ปลายเทอร์โมคัปเปิลสัมผัสกับแผ่นฐานรองรับเพื่อให้เครื่องควบคุมอุณหภูมิง่าย

- กระแสน้ำผ่านฐานรองรับให้ได้อุณหภูมิที่ถูกต้องตามที่ต้องการและจะไม่เกิดความเสียหายกับฟิล์มบางที่เคลือบกับแผ่นฐานรองรับที่เตรียมไว้แล้วหรือที่กำลังเตรียมใหม่
4. การวัดค่าต่างๆที่ความถี่ต่ำต้องมีระบบกันสัญญาณรบกวนที่ดีเพราะเวลาวัดค่าไฟฟ้า กระแสสลับที่ความถี่ต่ำมีสัญญาณรบกวนมากเกินไป

บรรณานุกรม

- ไกรศักดิ์ ยืนยง. 2553. “การศึกษาชั้นสัมผัสไอโธรมิกของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์.” วิทยานิพนธ์
วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ขวัญกมล สุวรรณเทศ. 2557. “กลไกการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} .
” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ. 2531. “การศึกษารอยต่อแบบโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ ของคอปเปอร์อินเดียมไดซี้
ลีไนต์.” วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ และฐิตินัย แก้วแดง. 2553. “การประดิษฐ์ฟิล์มบาง CdO ที่เจือด้วย Al สำหรับ
ชั้นไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์.” **รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์.** สถาบัน
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2556. “ความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้าของ
เซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $In_xWO_3(0 \leq x \leq 0.05)$ และการประยุกต์.” **รายงานวิจัยเสนอต่อ
คณะวิทยาศาสตร์.** สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2551. “การเตรียมฟิล์มบาง CdTe โดยวิธี
ระเหิดในระยะประชิดเพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์.” **รายงานวิจัยเสนอต่อคณะ
วิทยาศาสตร์.** สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง และ ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2558. “การเตรียมฟิล์มบาง CuO โดยวิธี
ปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu ที่ได้จากการสเปตเตอร์ริงเพื่อประยุกต์ใช้ใน
เซลล์แสงอาทิตย์.” **รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์.** สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้า
คุณทหารลาดกระบัง.
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง, ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ และชัยสิงห์ ภูริกษ์เกียรติ. 2543. “การเตรียม
และการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์.” **รายงานวิจัย
เสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์.** สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง, ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ และชัยสิงห์ ภูริกษ์เกียรติ. 2545. “การเตรียม
และการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์.” **รายงานวิจัย
เสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์.** สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- ชนิภรณ์ จุไรสง, ธิรญา โชติธนนันท์. 2556. “การศึกษาสมบัติของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธ์ของ ฟิล์ม
บางCdS/CuO.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์, สถาบันเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ฐิตินัย แก้วแดง. 2530. “การเตรียมและศึกษาสมบัติของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมไดซี้ลีไนต์.”
วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2549. “การประดิษฐ์ฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่เจือด้วยอะตอมฟลูออรีนสำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าโปรงแสงของเซลล์แสงอาทิตย์.” **รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์**. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ฐิตินัย แก้วแดง และงามนิตย์ วงษ์เจริญ. 2551. “การเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธีออบสารละลายเคมีภายใต้คลื่นไมโครเวฟเพื่อประดิษฐ์เป็นหน้าต่างรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์.” **รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์**. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ฐิตินัย แก้วแดง งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2552. “การพัฒนาขั้วไฟฟ้าด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CdS/CdTe.” **รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์**. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2554. “การประดิษฐ์ขั้วไฟฟ้าด้านหลังชนิดใหม่ที่เหมาะสมกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CdS/CdTe.” **รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์**. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ฐิตินัย แก้วแดง งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2557. “การประดิษฐ์และการศึกษาสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS/CuO.” **รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์**. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิงห์ ภูริกษ์เกียรติ. 2558. “การเตรียมฟิล์มบาง CuO โดยวิธีรีแอคทีฟที่พีเอสพีเตอริงเพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS/CuO.” **รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์**. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิงห์ ภูริกษ์เกียรติ. 2545. “การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ เพื่อประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์.” **รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์**. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิงห์ ภูริกษ์เกียรติ. 2546. “การประดิษฐ์ฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี Zn ในปริมาณสูงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์.” **รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์**. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- นิโลบล แก้วพ่วง, นิศานาถย์ ชัยชนะ, ชุตติกาญจน์ ชุมลา . 2554. “ลักษณะของกระแส-แรงดันไฟฟ้าที่ขึ้นกับอุณหภูมิของไดโอดรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS/CuCrO₂.” **ปริญญาานิพนธ์วิทยาศาสตร์บัณฑิต**. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- วรรณภา จำเนียรพีช. 2555. “การศึกษาสมบัติของรอยต่อวิวิธพันธ์ของไดโอด CdS/CuO.” **วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**.
- วรารณณ์ บุญเกื้อ. 2554. “สมบัติของรอยต่อวิวิธพันธ์ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CdS/CdTe.” **วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง**.

- สมเกียรติ ศุภเดช. 2542. **เซมิคอนดักเตอร์ฟิล์ม**, กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง .
- เอกชัย วิลามาศ. 2552. “การเตรียมและการศึกษาสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางของรอยต่อ วิวิธพันธ์ CdS/CdTe.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- อัญฐพร อริยฤทธิ์. 2553. “การศึกษาสมบัติรอยต่อวิวิธพันธ์ $Cd_{0.6}Zn_{0.4}S/CuAlO_2$.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- อดิสร นพจรุกิจ. 2555. “สมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธ์ CdS กับ $CuAlO_2$.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- Abdul-Jabbar Jassim, S. Zumaila, A.A.R.A. Waly, G.A.A.A. 2013. “Influence of Substrate Temperature on The Structural, Optical and Electrical Properties of CdS Thin Films Deposited by Thermal Evaporation.” *Results in Physics* 3 : 173–178.
- Adachi, S. 2009. **Properties of Semiconductor Alloys Group-IV, III-V and II-VI Semiconductor**. John Wiley & Sons, Inc.
- Baghchesara, M. A. Yousefi, R. Cheraghizade, M. Jamali-Sheini, F. Saáedi, A. 2016. “Photocurrent Application of Zn-doped CdS Nanostructures Grown by Thermal Evaporation Method.” *Ceramics International*. 42 : 1891–1896.
- Banu, S. Ahn, S. J. Ahn, S. K. Yoon, K. Cho, A. 2016. “Fabrication and Characterization of Cost-Efficient $CuSbS_2$ Thin Film Solar Cells using Hybrid Inks.” *Solar Energy Materials & Solar Cells*. 151 : 14–23.
- Bouchard, R.J. and Gillson, J.L. 1968. “Hexagonal Indium Tungsten Bronze.” *Inorganic Chemistry*. 7(5) : 969-972.
- Cullity, B.D. 1956. **Element of X-Ray Diffraction**. Addison-Wesley Publishing Company.
- Edley, M.E. Opananont, B. Conley, J.T. Tran, H. Smolin, S.Y. Li, S. Dillon, A.D. Fafarman, A.T. Baxter, J.B. 2018. “Solution Processed $CuSbS_2$ Films for Solar Cell Applications.” *Thin Solid Films*. 646 : 180–189.
- Gu, G. Kane, M.G. Doty, J.E. and Firester, A.H. 2005. “Electron Traps and Hysteresis in Pentacene-Based Organic Thin Film Transistors.” *App. Phys. Lett.* 87 : 243512-1-243512-3.
- Habibi, M.H. and Rahmati, M.H. 2014. “Fabrication and Characterization of ZnO-CdS Core-Shell Nanostructure using Acetate Precursors: XRD, FESEM, DRS, FTIR Studies and Effects of Cadmium Ion Concentration on Band Gap.” *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and iomolecular Spectroscopy*. 133 : 13–18

- Huang, L. Wei, Z.L. Zhang, F.M. Wu, X.S. 2015. "Electronic and Optical Properties of CdS Films Deposited by Evaporation." *Journal of Alloys and Compounds*. 648 : 591-594.
- Hussain, A. Ahmed, R. Ali, N. Shaari, A. Luo, J. T. Fu, Y. Q. 2017. "Characterization of Cu_3SbS_3 Thin Films Grown by Thermally Diffusing Cu_2S and Sb_2S_3 Layers." *Surface & Coatings Technology*. 319 : 294–300.
- Hussain, T. Al-Kuhaili, M.F. Durrani, S.M.A. Qayyum, H.A. 2018. "Influence of Angle Deposition on The Properties of ZnTe Thin Films Prepared by Thermal Evaporation." *Ceramics International*. 44 : 10130–10140.
- Islam, M.A. Haque, K.S. Rahman, N. Dhar, M.S. Hossain, Y. Sulaiman, N. Amin. 2015. "Effect of Oxidation on Structural, Optical and Electrical Properties of CdS Thin Films Grown by Sputtering." *Optik*. 126 : 3177–3180
- Kittel, C. 1971. **Introduction to Solid State Physics**. 2nd ed. New York : John Wiley & Sons.
- Kumar, M. and Persson, C. 2014. " $\text{Cu}(\text{Sb},\text{Bi})(\text{S},\text{Se})_2$ as Indium-Free Absorber Material With High Optical Efficiency." *Energy Procedia*. 44 : 176 – 183.
- Lakshmi, N. Madhusudhana Rao, N. Venugopal, R. Reddy, D.R. Reddy, B.K. 2003. "Formation of Mixed Phases and Mutual Chemical Analogs in ZnTe–CdS Films." *Materials Chemistry and Physics* 82 : 764–770.
- Lee, J.H. Song, W.C. Yi, J.S. Yang, K.J. Han, W.D. and Hwang, J. 2003. "Growth and Properties of The $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ Thin Films for Solar Cell Applications." *Thin. Solid. Films*. 431-432 : 349-353.
- Mukherjee, A.B. Satpati, S.R. Bhattacharyya, R. Ghosh, P. 2015. "Synthesis of Nano Crystalline CdS Thin Film by SILAR and Their Characterization." *Physica E*. 65 : 51–55
- Muthusamy, M., S. Muthukumar. 2015. "Effect of Cu-Doping on Structural, Optical and Photoluminescence Properties of CdS Thin Films." *Optik*. 126 : 5200–5206
- Richard, A.P. and Edwards, D.D. 2004. "Sub solidus Phase Relation and Crystal Structures of the Mixed - Phases in the In_2O_3 - WO_3 System." *J. Solid State Chem*. 177 : 2740-2748.
- Runyan, W.R. 1975. **Semiconductor Measurement and Instrument**. 3rd ed. New York : Mc.Graw-Hill.
- Satyendra, K. Paramjit Singh, R.G. Sonkawade, K. Awasthi, R.K. 2014. "60 MeV Ni Ion Induced Modifications in Nano-CdS/Polystyrene Composite Films." *Radiation Physics and Chemistry*. 94 : 49–53

- Su, R.R. Yu, Y.X. Xiao, Y.H. Yang, X.F. Zhang, W.D. 2018. "Earth Abundant ZnO/CdS/CuSbS₂ Core-Shell Nanowire Arrays as Highly Efficient Photoanode for Hydrogen Evolution." *International Journal of Hydrogen Energy*. 43(12) : 6040-6048.
- Suriakarthick, R. Nirmal Kumar, V. Shyju, T.S. Gopalakrishnan, R. 2015. "Effect of Substrate Temperature on Copper Antimony Sulphide Thin Films from Thermal Evaporation." *Journal of Alloys and Compounds*. 651 : 423-433.
- Sze, S.M. 1981. **Physics of Semiconductor Devices**. 2nd ed. New York : John Wiley & Sons.
- Thool, K. Sraveen, S. Pal, S. 2015. "Core-Shell Architectures: Low Temperature Growth of Ni Doped CdS Film." *Journal of Alloys and Compounds*. 649 : 553-558
- Van de Pauw, L.J. 1958. "A Method of Measuring Specific Resistivity and Hall Effect of Arbitrary Shape." *Philips Res. Reports*. 13 : 1-9.
- Vinayakumar, V. Shaji, S. Avellaneda, D.A. Aguilar Martinez, J. Krishnan, A.B. 2019. "Highly Oriented CuSbS₂ Thin Films by Rapid Thermal Processing of Preannealed Sb₂S₃-Cu Layers for PV Applications." *Materials Science in Semiconductor Processing* 91 : 81-89.
- Wada, T. and Maeda, T. 2017. "Optical Properties and Electronic Structures of CuSbS₂, CuSbSe₂, and CuSb(S_{1-x}Se_x)₂ solid solution." *Phys. Status Solidi C*. 1600191 : 1-5.
- Yang, B. Wang, L. Han, J. Zhou, Y. Song, H. Chen, S. Zhong, J. Lv, L. Niu, D. and Tang, J. 2014. "CuSbS₂ as a Promising Earth-Abundant Photovoltaic Absorber Material: A Combined Theoretical and Experimental Study." *Chem. Mater.* 26 : 3135-3143.
- Zhang, Y. Huang, J. Yan, C. Sun, K. Cui, X. Liu, F. Liu, F. Liu, Z. Zhang, X. Liu, X. stride, J.A. Green, M.A. Hao, X. 2018. "High Open-Circuit Voltage CuSbS₂ Solar Cells Achieved Through The Formation of Epitaxial Growth of CdS/CuSbS₂ Hetero-Interface by Post-Annealing Treatment." *Prog Photovolt Res Appl*. 27 : 37-43.

ภาคผนวก

ข้อมูลการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ CdS
ไฟล์มาตรฐาน JCPDS No.75-581

Pattern : 75-581		Radiation = 1.540600	Quality : Calculated																																																											
<p>Cd S</p> <p>Cadmium Sulfide</p>		<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;">2th</th> <th style="text-align: left;">I</th> <th style="text-align: left;">h</th> <th style="text-align: left;">k</th> <th style="text-align: left;">l</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>26.552</td><td>100</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>30.753</td><td>22</td><td>2</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>44.048</td><td>47</td><td>2</td><td>2</td><td>0</td></tr> <tr><td>52.173</td><td>34</td><td>3</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>54.681</td><td>5</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>64.055</td><td>6</td><td>4</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>70.607</td><td>11</td><td>3</td><td>3</td><td>1</td></tr> <tr><td>72.729</td><td>5</td><td>4</td><td>2</td><td>0</td></tr> <tr><td>81.010</td><td>10</td><td>4</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>87.089</td><td>7</td><td>5</td><td>1</td><td>1</td></tr> </tbody> </table>	2th	I	h	k	l	26.552	100	1	1	1	30.753	22	2	0	0	44.048	47	2	2	0	52.173	34	3	1	1	54.681	5	2	2	2	64.055	6	4	0	0	70.607	11	3	3	1	72.729	5	4	2	0	81.010	10	4	2	2	87.089	7	5	1	1					
2th	I	h	k	l																																																										
26.552	100	1	1	1																																																										
30.753	22	2	0	0																																																										
44.048	47	2	2	0																																																										
52.173	34	3	1	1																																																										
54.681	5	2	2	2																																																										
64.055	6	4	0	0																																																										
70.607	11	3	3	1																																																										
72.729	5	4	2	0																																																										
81.010	10	4	2	2																																																										
87.089	7	5	1	1																																																										
<p>Lattice : Face-centered cubic</p> <p>S.G. : F-43m (216)</p> <p>a = 5.81000</p>		<p>Mol. weight = 144.47</p> <p>Volume [CD] = 196.12</p> <p>Dx = 4.893</p> <p>Z = 4</p> <p>I/cor = 14.06</p>																																																												
<p>ICSD COLLECTION CODE : 029278 TEST FROM ICSD : No R value given. TEST FROM ICSD : At least one TF missing.</p>																																																														
<p>*Calculated from ICSD using POWD-12+*, (1997) primary reference :</p> <p>*Angew. Chem., volume 46, page 538, (1933) : Mueller, W.J., Loeffler, G.</p>																																																														
<p>Radiation : CuKα1</p> <p>Lambda : 1.54060</p>		<p>Filter : Not specified</p> <p>d-sp : Calculated spacings</p>																																																												

ข้อมูลการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ ZnTe
ไฟล์มาตรฐาน JCPDS No.15-746

Pattern : 15-746		Radiation = 1.540600	Quality : High																																																																																																													
Zn Te Zinc Telluride		<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;">2θ</th> <th style="text-align: left;">I</th> <th style="text-align: left;">h</th> <th style="text-align: left;">k</th> <th style="text-align: left;">l</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>25.259</td><td>100</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>29.248</td><td>10</td><td>2</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>41.806</td><td>80</td><td>2</td><td>2</td><td>0</td></tr> <tr><td>49.498</td><td>35</td><td>3</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>51.847</td><td>4</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>60.634</td><td>8</td><td>4</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>66.747</td><td>14</td><td>3</td><td>3</td><td>1</td></tr> <tr><td>68.739</td><td>4</td><td>4</td><td>2</td><td>0</td></tr> <tr><td>76.401</td><td>10</td><td>4</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>81.969</td><td>8</td><td>5</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>91.117</td><td>4</td><td>4</td><td>4</td><td>0</td></tr> <tr><td>96.624</td><td>6</td><td>5</td><td>3</td><td>1</td></tr> <tr><td>98.462</td><td>2</td><td>6</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>105.956</td><td>6</td><td>6</td><td>2</td><td>0</td></tr> <tr><td>111.718</td><td>4</td><td>5</td><td>3</td><td>3</td></tr> <tr><td>113.709</td><td>2</td><td>6</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>121.983</td><td>2</td><td>4</td><td>4</td><td>4</td></tr> <tr><td>128.702</td><td>6</td><td>5</td><td>5</td><td>1</td></tr> <tr><td>141.669</td><td>8</td><td>6</td><td>4</td><td>2</td></tr> <tr><td>151.645</td><td>6</td><td>7</td><td>3</td><td>1</td></tr> </tbody> </table>	2 θ	I	h	k	l	25.259	100	1	1	1	29.248	10	2	0	0	41.806	80	2	2	0	49.498	35	3	1	1	51.847	4	2	2	2	60.634	8	4	0	0	66.747	14	3	3	1	68.739	4	4	2	0	76.401	10	4	2	2	81.969	8	5	1	1	91.117	4	4	4	0	96.624	6	5	3	1	98.462	2	6	0	0	105.956	6	6	2	0	111.718	4	5	3	3	113.709	2	6	2	2	121.983	2	4	4	4	128.702	6	5	5	1	141.669	8	6	4	2	151.645	6	7	3	1					
2 θ	I	h	k	l																																																																																																												
25.259	100	1	1	1																																																																																																												
29.248	10	2	0	0																																																																																																												
41.806	80	2	2	0																																																																																																												
49.498	35	3	1	1																																																																																																												
51.847	4	2	2	2																																																																																																												
60.634	8	4	0	0																																																																																																												
66.747	14	3	3	1																																																																																																												
68.739	4	4	2	0																																																																																																												
76.401	10	4	2	2																																																																																																												
81.969	8	5	1	1																																																																																																												
91.117	4	4	4	0																																																																																																												
96.624	6	5	3	1																																																																																																												
98.462	2	6	0	0																																																																																																												
105.956	6	6	2	0																																																																																																												
111.718	4	5	3	3																																																																																																												
113.709	2	6	2	2																																																																																																												
121.983	2	4	4	4																																																																																																												
128.702	6	5	5	1																																																																																																												
141.669	8	6	4	2																																																																																																												
151.645	6	7	3	1																																																																																																												
Lattice : Face-centered cubic S.G. : F-43m (216) a = 6.10260	Mol. weight = 192.98 Volume [CD] = 227.27 Dx = 5.640 Z = 4 I/cor = 9.30																																																																																																															
COLOR : Reddish brown SAMPLE SOURCE OR LOCALITY : Sample was obtained from Semi-Elements, Inc., Saxonburg, PA, USA. ANALYSIS : Spectrographic analysis: 0.01-0.1% of Si; 0.001-0.01% each of Al, Ba, Fe, and Mg. TEMP. OF DATA COLLECTION : Pattern taken at 25 C.																																																																																																																
CAS: 1315-11-3 *Natl. Bur. Stand. (U.S.) Monogr. 25, volume 3, page 58, (1964) primary reference :																																																																																																																
Radiation : CuK α 1 Lambda : 1.54050 SS/FOM : F20=121(0.0079,21)	Filter : Beta d-sp : Not given Internal standard : W																																																																																																															

ข้อมูลการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ Sb₂S₃
ไฟล์มาตรฐาน JCPDS No.42-1393

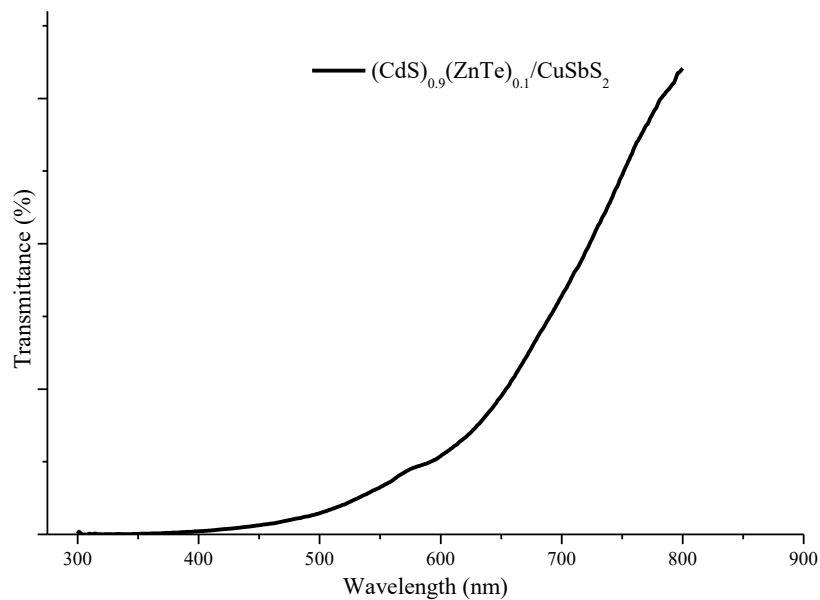
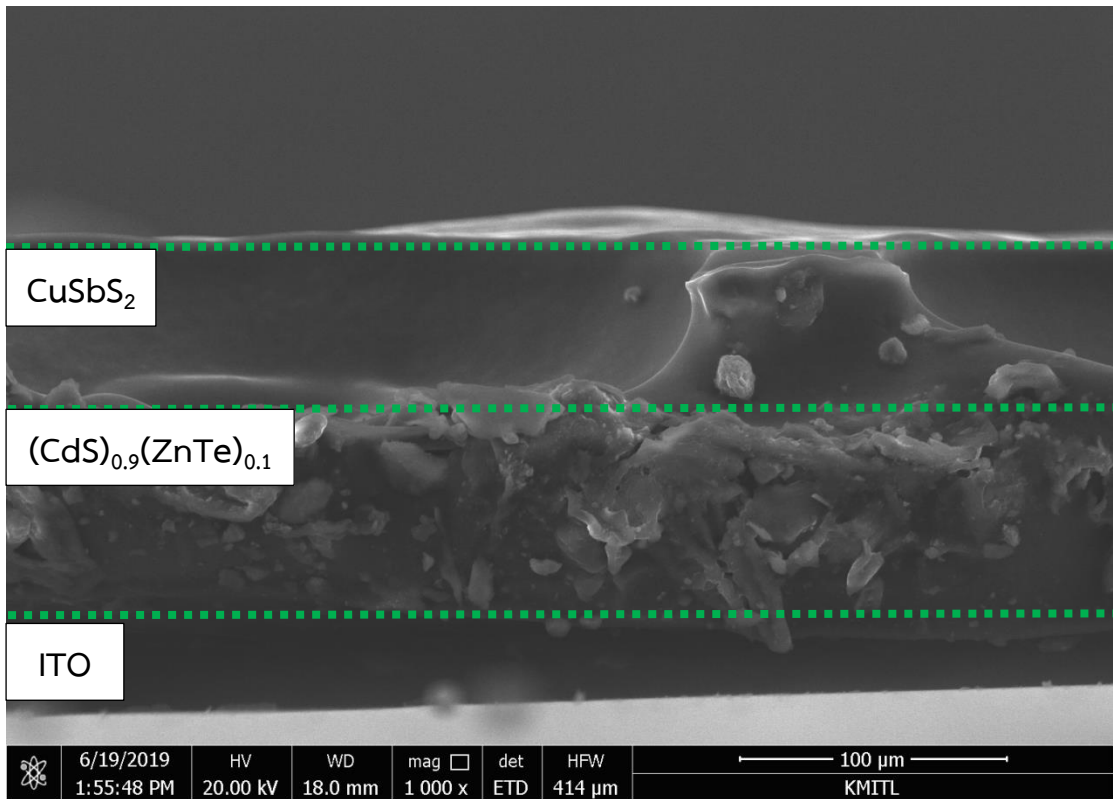
Pattern : 42-1393		Radiation = 1.540600					Quality : High				
Sb ₂ S ₃		2θ	I	h	k	l	2θ	I	h	k	l
Sb ₂ S ₃ / Antimony Sulfide antimonic antimony black antimony glance		11.122	14	1	1	0	63.252	1	7	1	
		15.644	57	0	2	0	63.590	2	3	4	
		15.742	21	2	0	0	*63.590	2	4	3	
		17.523	74	1	2	0	64.278	4	5	1	
		22.280	27	2	2	0	64.328	5	6	4	
		24.496	28	1	0	1	64.428	6	5	6	
		24.886	100	1	3	0	64.528	4	6	3	
		25.016	79	3	1	0	64.678	4	2	7	
		25.727	23	1	1	1	65.033	4	7	2	
		26.073	14	0	2	1	65.060	4	2	6	
		26.485	39	2	3	0	65.017	4	5	2	
		28.578	30	3	2	0	68.495	3	8	0	
		29.160	45	1	2	1	68.692	4	1	8	
		29.248	82	2	1	1	68.710	3	4	7	
		32.352	66	2	2	1	67.089	2	8	1	
		32.697	19	1	4	0	67.583	2	3	7	
		32.840	8	4	1	0	67.694	1	4	4	
		33.395	34	3	0	1	68.768	3	3	5	
		33.666	9	3	3	0	*68.768	3	8	2	
		34.236	11	1	3	1	68.683	4	5	3	
		34.345	15	3	1	1	68.465	3	5	6	
		35.525	43	2	4	0	68.620	3	0	6	
		36.641	19	4	2	0	70.118	2	6	0	
		38.994	12	2	3	1	70.663	2	6	1	
		39.546	17	0	4	1	70.646	2	6	6	
		39.911	13	3	4	0	71.216	2	3	8	
		40.004	12	4	3	0	71.989	6	8	1	
		40.375	21	1	4	1	72.096	5	2	8	
		40.565	14	4	1	1	72.262	3	6	2	
		40.894	4	5	1	0	72.670	2	5	4	
		41.286	3	3	3	1	73.196	3	2	6	
		42.893	11	2	4	1	74.955	1	3	6	
		42.852	22	4	2	1	75.094	2	1	1	
		43.038	19	2	5	0	75.515	2	8	4	
		43.298	9	5	2	0	76.445	2	8	3	
		45.450	6	4	4	0	76.663	3	5	7	
		46.611	7	3	4	1	76.735	3	9	1	
		46.764	44	5	0	1	*76.735	3	1	2	
		47.045	27	5	3	0	77.775	2	2	9	
		47.306	27	1	6	1	77.526	2	7	1	
		*47.306	27	0	0	2	78.383	2	2	2	
		47.543	18	5	1	1	78.768	2	4	6	
		48.213	6	0	6	0	78.923	3	0	4	
		48.569	4	6	0	0	*78.923	3	3	0	
		48.735	3	1	1	2	79.236	3	2	7	
		48.930	3	1	6	0	79.551	4	7	2	
		49.298	5	6	1	0	79.870	3	4	8	
		49.440	4	2	5	1					
		50.138	2	0	2	2					
		50.805	3	2	1	2					
		51.069	2	2	6	0					
		51.378	2	6	2	0					
		51.911	3	5	4	0					
		52.913	15	3	5	1					
		53.045	13	5	3	1					
		54.129	26	0	6	1					
		54.198	27	1	3	2					
		*54.198	27	3	1	2					
		54.407	12	3	8	0					
		54.663	5	6	3	0					
		54.759	3	1	6	1					
		55.116	2	6	1	1					
		56.141	3	2	3	2					
		58.216	4	3	2	2					
		57.559	2	5	4	1					
		*57.559	2	1	7	0					
		58.930	2	4	6	0					
		58.095	2	6	4	0					
		59.304	2	3	3	2					
		59.472	3	2	7	0					
		59.812	7	7	2	0					
		59.897	5	3	6	1					
		60.155	4	6	3	1					
		60.546	6	2	4	2					
		60.634	7	4	2	2					
		62.540	3	3	7	0					
		62.681	3	7	0	1					
		62.870	3	7	3	0					
Radiation : CuKα		Filter : Monochromator crystal									
Lambda : 1.54184		d-sp : Diffractometer									
SSPDM : F30= 62(0.0137,35)		Internal standard : Si									

ข้อมูลการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของ CuSbS₂

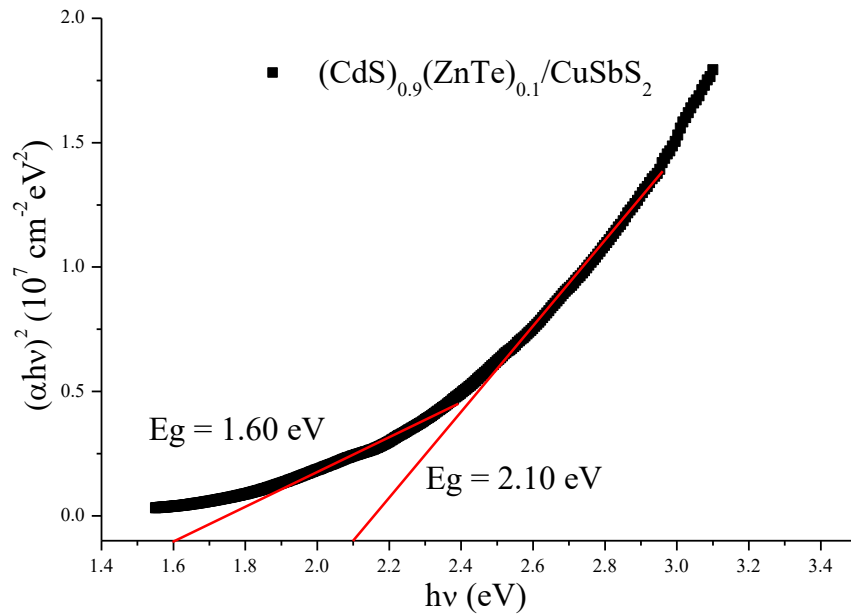
ไฟล์มาตรฐาน JCPDS No.44-1417

Pattern : 44-1417		Radiation = 1.540600				Quality : High					
Cu ₂ SbS ₂		2θ	I	h	k	l	2θ	I	h	k	l
Chalcocobaltite / Copper Antimony Sulfide		17.202	65	2	0	0	83.246	2	5	0	0
		19.141	11	2	1	0	*83.246	2	7	4	4
		23.588	2	3	1	0	83.413	2	8	4	4
		24.212	6	1	0	1	83.955	2	2	2	2
		24.537	30	4	0	0	84.053	1	11	2	2
		28.440	89	1	1	1	84.324	2	7	3	3
		28.728	87	4	1	0	84.641	3	1	5	5
		29.655	61	0	2	0	84.760	3	4	5	5
		29.910	100	3	0	1	85.602	2	3	2	2
		30.304	24	1	2	0	*85.602	2	2	5	5
		30.410	13	2	1	1	85.789	2	10	1	1
		32.173	5	2	2	0	88.175	1	8	3	3
		33.472	1	3	1	1	88.516	1	4	5	5
		34.277	3	5	1	0	90.790	1	5	2	2
		35.094	7	3	2	0	91.020	1	7	0	0
		37.189	2	6	0	0	91.444	1	10	2	2
		38.131	2	0	2	1					
		38.051	55	5	0	1					
		40.167	20	2	2	1					
		*40.167	20	6	1	0					
		42.614	22	3	2	1					
		43.322	1	5	2	0					
		45.602	2	1	3	0					
		45.881	2	4	2	1					
		46.946	1	2	3	0					
		47.864	16	0	0	2					
		48.237	2	6	2	0					
		49.583	6	2	0	2					
		49.780	26	5	2	1					
		50.120	12	7	0	1					
		50.277	29	8	0	0					
		51.875	24	1	3	1					
		52.035	26	2	1	2					
		*52.035	26	4	3	0					
		52.540	9	7	1	1					
		52.680	6	0	1	0					
		54.299	5	6	2	1					
		54.519	3	4	0	2					
		55.098	1	3	3	1					
		56.791	10	4	1	2					
		57.328	9	0	2	2					
		57.728	3	1	2	2					
		57.916	3	4	3	1					
		58.876	2	2	2	2					
		59.325	3	9	1	0					
		59.477	8	0	2	0					
		59.880	3	0	3	0					
		60.218	1	5	1	2					
		60.726	2	3	2	2					
		61.571	1	0	4	0					
		62.606	1	9	0	1					
		64.188	4	6	1	2					
		64.678	12	9	1	1					
		64.840	8	3	4	0					
		66.223	1	10	1	0					
		68.232	1	2	4	1					
		*68.232	1	1	3	2					
		69.731	3	7	3	1					
		69.898	3	8	3	0					
		69.957	3	3	4	1					
		70.299	2	6	2	2					
		70.426	1	5	4	0					
		71.909	4	8	0	2					
		73.396	7	4	3	2					
		75.367	2	5	4	1					
		75.628	1	9	3	0					
		76.387	1	5	3	2					
		*76.387	1	11	0	1					
		77.214	1	1	1	3					
		77.941	2	3	0	3					
		78.383	1	11	1	1					
		79.220	2	12	0	0					
		79.750	3	8	2	2					
		79.902	2	3	1	3					
		*79.902	2	1	5	0					
		80.450	3	9	3	1					
		81.114	3	12	1	0					
		81.547	1	0	4	2					
Lattice : Orthorhombic		Mol. weight = 249.42									
S.G. : Pbnm (62)		Volume [CC] = 331.39									
a = 14.50100		Dx = 4.959									
b = 6.01900		Dm = 4.950									
c = 3.79680		Wcor = 3.10									
a/b = 2.40920		Z = 4									
c/b = 0.63080											
<p>COLOR : Dark gray metallic</p> <p>SAMPLE SOURCE OR LOCALITY : Specimen from Rhar el Arz, Tunisia (Glenbow Museum, Calgary 433).</p> <p>ANALYSIS : X-ray emission analysis (under SEM): major Cu, Sb and S, minor Cl and trace Fe.</p> <p>GENERAL COMMENTS : Preferred orientation enhances 100.</p> <p>GENERAL COMMENTS : Unidentified reflection at d=5.929 was deleted.</p> <p>STRUCTURE : Enargite is the Si analog.</p> <p>ADDITIONAL PATTERN : Validated by calculated pattern.</p> <p>ADDITIONAL PATTERN : To replace 35-413.</p>											
<p>*ICDD Grant-in-Aid, (1991) primary reference : McCarthy, G. et al., North Dakota State Univ., Fargo, North Dakota, USA. Z. Kristallogr., Kristallgeom., Kristalphys., Kristallchem., volume 84, page 177, (1983) : Holmann, W.</p>											
Radiation : CuKα1		Filter : Monochromator crystal									
Lambda : 1.54060		d-sp : Diffractometer									
SS/POW : F30-113(0.0070,38)		Internal standard : Si									

ภาพตัดขวางของรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ
(CdS)_{0.9}(ZnTe)_{0.1}/CuSbS₂



กราฟแสดงสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ (CdS)_{0.9}(ZnTe)_{0.1}/CuSbS₂ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ



กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha hv)^2$ กับ hv ของรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(CdS)_{0.9}(ZnTe)_{0.1}/CuSbS_2$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เพื่อหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายดุสิต ถิ่นมัน
วัน เดือน ปีเกิด	8 มิถุนายน 2536
ที่อยู่ปัจจุบัน	เลขที่ 66 หมู่ 7 ตำบลบ้านพริก อำเภอบ้านนา จังหวัดนครนายก 26110
ประวัติการศึกษา	2558 วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ เกรดเฉลี่ย 3.33 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผลงานทางวิชาการ	1. Structural, optical and electrical properties of $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ solid solution thin films prepared by vacuum thermal evaporation method.