

การประดิษฐ์และการศึกษาสมบัติของรอยต่อวิวิธพันธุ์ระหว่าง
ทินซัลไฟด์กับทังสเตนออกไซด์ที่เจือด้วยอะตอมของแอนติโมนี

FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF
p-SnS/n-WO₃:Sb³⁺ HETEROJUNCTION



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

การประดิษฐ์และการศึกษาสมบัติของรอยต่อวิวิธพันธุ์ระหว่าง
ทินซัลไฟด์กับทังสเตนออกไซด์ที่เจือด้วยอะตอมของแอนติโมนี

FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF
p-SnS/n-WO₃:Sb³⁺ HETEROJUNCTION

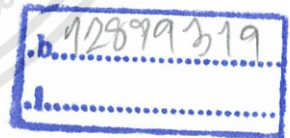


T149061



ชโลธร สุวรรณทัต
พิมพ์พร บุญฤทธิกุล
ศุภัชมา ตวงรัตน์สิริกุล

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....149061
วัน,เดือน,ปี.....27 S.A. 2560



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF
p-SnS/n-WO₃:Sb³⁺ HETEROJUNCTION



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIRMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (APPLIED PHYSICS)
DEPARTMENT OF PHYSICS, FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT' S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การประดิษฐ์และการศึกษาสมบัติของรอยต่อวิวิธพันธุ์ระหว่างทินซัลไฟด์
กับทั้งสแตนออกไซด์ที่เจือด้วยอะตอมของแอนติโมนี
Fabrication and Characterization of p-SnS/n-WO₃:Sb³⁺
Heterojunction

ชื่อนักศึกษา นางสาวชโลธร สุวรรณทัต รหัสนักศึกษา 55051481
นางสาวพิมพ์พร บุญฤทธิกุล รหัสนักศึกษา 55051569
นางสาวศุภัสมา ตวงรัตนสิริกุล รหัสนักศึกษา 55051630

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา ฟิสิกส์
ปีการศึกษา 2558
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ฐิตินัย แก้วแดง

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์)
ประจำปีการศึกษา 2558

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ ประธานกรรมการ	
อ.ภารุจ บัณฑิตาวิทย์ กรรมการ	
ผศ.ดร.ชัยสิทธิ์ ภูริกษ์เกียรติ กรรมการ	
รศ.ดร.ฐิตินัย แก้วแดง กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การประดิษฐ์และการศึกษาสมบัติของรอยต่อวิวิธพันธุ์ระหว่างทินซัลไฟด์กับทั้งสแตนออกไซด์ที่เจือด้วยอะตอมของแอนติโมนี	
ชื่อนักศึกษา	นางสาวชโลธร สุวรรณทัต	รหัสนักศึกษา 55051481
	นางสาวพิมพ์พร บุญฤทธิกุล	รหัสนักศึกษา 55051569
	นางสาวศุภัชฌมา ดวงรัตน์สิริกุล	รหัสนักศึกษา 55051630
ปริญญา ภาควิชา คณะ	วิทยาศาสตร์บัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์) ฟิสิกส์ วิทยาศาสตร์	
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง(สจล.)	
ปีการศึกษา	2558	
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร. ฐิตินัย แก้วแดง	

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ได้เคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำของ SnS บนแผ่นรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ด้วยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และบนแผ่นรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO_3 ที่เจือด้วย Sb_2O_3 ที่เตรียมได้โดยวิธีปฏิบัติกิจวิธานของแข็งจากการนำผงผลึกของสารประกอบ WO_3 และ Sb_2O_3 5 เปอร์เซ็นต์โดยมวลอะตอม ทำการผสมและบดคลุกเคล้าให้เข้ากันดีแล้วจึงอัดขึ้นรูปให้เป็นแผ่นกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตรและหนา 1 มิลลิเมตร จากนั้นจึงทำการเผาผลึกที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ในบรรยากาศปกติ ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $SnS/WO_3:Sb$ (5 at. %) ประดิษฐ์ได้โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิก $WO_3:Sb$ (5 at. %) โครงสร้างผลึกและลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS และไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $SnS/WO_3:Sb$ (5 at. %) ได้รับการตรวจสอบโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านตามลำดับ และทำการวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ด้วยเครื่องยิววิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ในช่วงความยาวคลื่น 400 – 1,000 นาโนเมตร จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า พบว่าไดโอดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้มีลักษณะสมบัติเรียงกระแสที่ดี พารามิเตอร์ต่างๆของไดโอดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำได้แก่ ความสูงของกำแพงศักย์แพกเตอร์ในอุดมคติ และความต้านทานอนุกรม ที่อุณหภูมิห้องมีค่าเท่ากับ 0.520 อิเล็กตรอนโวลต์ 15.383 และ 161.24 โอห์ม

คำสำคัญ : ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS เม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $WO_3:Sb_2O_3$ ลักษณะเฉพาะของค่ากระแสไฟฟ้า – แรงดันไฟฟ้า ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $SnS/WO_3:Sb$

Title	Fabrication and Characterization of p-SnS/n-WO ₃ :Sb ³⁺ Heterojunction	
Students	Miss Chalothorn Suwannathat	Students ID 55051481
	Miss Pimporn Boonrittikul	Students ID 55051569
	Miss Supatcha Tuangrattanasirikul	Students ID 55051630
Degree	Bachelor of science(Applied Physics)	
Department	Physics	
Faculty	Science	
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang(KMITL)	
Academic Year	2015	
Advisor	Assoc.Prof.Dr.Thitinai Geawdang	

Abstract

In this special project, SnS thin films have been deposited on slide glass substrate by thermal evaporation method in vacuum. WO₃ ceramic dope with 5 at.% Sb₂O₃ were prepared by solid state reaction method from the mixture of high purity grade of WO₃ and Sb₂O₃ powders. The mixed powders were ground and pressed into pellet form of 1 mm thick and 10 mm diameter and subsequently sintered at 1,000 °C for 48 hours in air. SnS/WO₃:Sb (5 at.%) heterojunction diode was fabricated by coating SnS thin films on WO₃:Sb (5 at.%) 1 mm thick ceramic pellet substrate. Crystal structure and morphology of the SnS thin films and SnS/WO₃:Sb (5 at.%) heterojunction diode were investigated by XRD and SEM, respectively. The transmission spectra of SnS thin films have been studied by UV-VIS spectrophotometer with the wavelength range 400 – 1,000 nm. The obtained device exhibits a good rectifying behavior from I-V characteristics. Various junction parameters such as barrier height, ideality factor and series resistance were calculated using I-V data and observed to be 0.520 eV, 15.383 and 161.24 Ω at room temperature, respectively.

Keywords : SnS thin films, WO₃:Sb ceramic, I-V characteristics, SnS/WO₃:Sb heterojunction diode.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาของ รองศาสตราจารย์ดร. ฐิตินัย แก้วแดง รองรองศาสตราจารย์ งามนิตย์ วงษ์เจริญ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ดร. ชัยสิงห์ ภูริกษ์เกียรติ และ อาจารย์ภารจ บัณฑิตธาวิทย ที่อำนวยความสะดวกในการใช้ระบบระบบสารสนเทศด้วยความร้อน ในระบบสุญญากาศ อุปกรณ์ในการวัดลักษณะเฉพาะต่างๆตลอดจนอุปการะทุนสนับสนุนและให้ความรู้และคำปรึกษาทางวิชาการที่ติดต่อมา รวมทั้งปลูกฝังคุณธรรมที่งดงามให้กับลูกศิษย์ทุกคน

ขอขอบคุณ คุณชนิภรณ์ จุไรสร และ คุณนพณัฐ เดชะคำภู นักศึกษาปริญญาโท ห้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุโฟโตนิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ช่วยให้คำแนะนำในการใช้อุปกรณ์ต่างๆ ตลอดจนให้คำแนะนำในการใช้โปรแกรมเพื่อวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลอง

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และอบรมสั่งสอนตั้งแต่วัยเด็กจนกระทั่งถึงปัจจุบัน

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่และผู้มีพระคุณทุกท่าน ที่ให้การอุปการะทุนในการศึกษาเล่าเรียน และเป็นกำลังใจที่ติดต่อมา

ชโลธร สุวรรณทัต

พิมพ์พร บุญฤทธิกุล

ศุภัชฌา ตวงรัตนสิริกุล



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	4
1.4 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	7
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	8
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเรื่องของลักษณะของโครงสร้างผลึก	8
2.1.1 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ	8
2.1.2 หลักเกณฑ์ในการระบุลักษณะพื้นฐานของผลึก	11
2.1.2.1 การระบุตำแหน่ง	11
2.1.2.2 การระบุทิศทาง	11
2.1.2.3 การระบุชื่อระนาบ	11
2.1.3 โครงสร้างผลึกของสารประกอบทินซิลไฟด์	12
2.1.4 โครงสร้างผลึกของสารประกอบ WO_3	13
2.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	16
2.2.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก	17
2.2.2 การหาขนาดของเกรน	18
2.3 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	19
2.4 สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง	21
2.4.1 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากการวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง	22
2.4.2 ส่วนหางของแถบพลังงาน	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.5 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า	25
2.5.1 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง	25
2.5.2 การวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพอร์	27
2.6 ปรากฏการณ์ฮอลล์	29
2.6.1 การศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพอร์	34
2.7 สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง	36
2.7.1 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกักพาหะในช่วงกระแสโฟโตชาลง	44
2.7.2 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกักพาหะในช่วงกระแสโฟโตชาขึ้น	46
2.8 รอยต่อของสารกึ่งตัวนำที่เป็นแบบพี-เอ็น	47
2.8.1 รอยต่อของสารกึ่งตัวนำที่เป็นแบบพี-เอ็น เมื่ออยู่ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน	47
2.8.2 รอยต่อของสารกึ่งตัวนำที่เป็นแบบชั้นบันได	50
2.8.3 รอยต่อของสารกึ่งตัวนำที่เป็นแบบพี-เอ็น ภายใต้สภาวะการไบอัสย้อนกลับ	53
2.9 ค่าความจุไฟฟ้า	53
2.10 ลักษณะเฉพาะของค่ากระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า ของรอยต่อของสารกึ่งตัวนำที่เป็นแบบพี-เอ็น	57
2.11 เงื่อนไขขอบเขตของความเข้มข้นของพาหะข้างน้อย	58
2.12 การวิเคราะห์ไดโอดอูดมคติ	59
2.12.1 ลักษณะสมบัติของไดโอดยาว	60
2.12.2 ลักษณะสมบัติของไดโอดสั้น	62
2.13 กระแสเนื่องจากบริเวณประจุค้าง	65
2.14 การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	68
2.14.1 อัตราการระเหยสาร	68
2.14.2 แหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้ในการระเหยสารด้วยไฟฟ้า	68
2.14.2.1 แหล่งกำเนิดชนิดถังสแตน	69
2.14.2.2 แหล่งกำเนิดชนิดแผ่นโลหะคงรูป	69

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.15 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	70
2.15.1 อิทธิพลของแผ่นฐานรองรับที่มีต่อสมบัติทางไฟฟ้าของซอตต์กัไดโอด	70
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	80
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัยที่ใช้ในการเตรียมไดโอดของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/ n-WO ₃ :Sb โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ลงบนแผ่นฐานรองรับ ที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ W _{1-x} Sb _x O ₃ (X=0.05) โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อน ในระบบสุญญากาศ	80
3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ W _{1-x} Sb _x O ₃ (X=0.05) เตรียมจากสารตั้งต้น ที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	80
3.1.2 การคำนวณปริมาณสารตั้งต้นเพื่อเตรียมเม็ดเซรามิกของ สารกึ่งตัวนำ W _{1-x} Sb _x O ₃ (x=0.05) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดย วิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	81
3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์	82
3.1.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมไดโอดของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-WO ₃ :Sb โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ลงบนแผ่นฐานรองรับ ที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO ₃ :Sb โดยวิธีการระเหยสารเคมี ด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO ₃ :Sb นั้น ถูกเตรียมขึ้นมาจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีการเกิดเป็น สารละลายของแข็ง	83
3.2 ขั้นตอนการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ W _{1-x} Sb _x O ₃ (x=0.05) จาก สารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งที่เตรียม โดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง และการเตรียมไดโอดของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-WO ₃ :Sb โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ลงบน แผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO ₃ :Sb โดยวิธีการระเหย สารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับ ประมาณ 100 องศาเซลเซียส	84

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.2.1 ขั้นตอนในการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ($x=0.05$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	84
3.2.2 ขั้นตอนในการเตรียมไดโอดของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-WO ₃ :Sb โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO ₃ :Sb โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ($0.00 \leq x \leq 0.05$) นั้นถูกเตรียมขึ้นมาจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	86
3.2.2.1 การเตรียมแผ่นกระจกสไลด์เพื่อใช้เป็นแผ่นฐานรองรับ	86
3.2.2.2 การเตรียมไดโอดของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-WO ₃ :Sb ตามลำดับโดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{0.95}Sb_{0.05}O_3$ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{0.95}Sb_{0.05}O_3$ นั้นถูกเตรียมขึ้นมาจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	86
3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ SnS ที่ถูกเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับกระจกสไลด์และไดโอดของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-WO ₃ :Sb ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส	89
3.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค	89
3.3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค	90
3.3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางแสง	90
3.3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า	90

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.3.4.1 การศึกษาสมบัติเฉพาะของไดโอดด้วยการวัดกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสกับแรงดันไฟฟ้า (I-V curve) ค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า (C-V curve) จากนั้น นำไปศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีโดยการวัดความสัมพันธ์ ระหว่างอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ที่อุณหภูมิต่างๆในช่วง 20-300 เคลวิน และอุณหภูมิในช่วง 25-90 องศาเซลเซียส	90
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	93
4.1 ลักษณะฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับ ที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $WO_3:Sb$ ซึ่งเตรียม โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	93
4.2 ผลการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบ อยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหย สารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	94
4.2.1 ผลการศึกษาโครงสร้างของผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่ เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อน ในระบบสุญญากาศ	94
4.3 ผลการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $WO_3:Sb$ เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลาย ของแข็ง	99
4.3.1 ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบน รังสีเอกซ์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $WO_3:Sb$ ที่เตรียมมาจาก สารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งที่ ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็น เม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $WO_3:Sb$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหย สารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	99

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.4 ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค ด้วยวิธีการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิต่างๆภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์	100
4.5 ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิต่างๆภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์	101
4.6 ผลการวิเคราะห์ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิต่างๆภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์	103
4.7 ผลการศึกษาสมบัติทางแสงฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	104
4.7.1 ผลการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	104
4.8 การวิเคราะห์เพื่อหาชนิดและโมเลกุลของสารประกอบที่อยู่ในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการวิเคราะห์สารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการดูดกลืนแสงในช่วงย่านอินฟราเรดด้วยเครื่องฟูเรียร์แทรนฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (FTIR)	108
4.9 ผลการศึกษาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	110
4.9.1 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ แล้วทำการวัดค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า	110

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.9.2 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอด ที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-WO ₃ :Sb ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	118
4.9.3 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำลงในช่วงอุณหภูมิ 300 – 20 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS / n-WO ₃ : Sb ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	128
4.9.4 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำขาขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 20 – 300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS / n-WO ₃ : Sb ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	135
4.9.5 ผลการศึกษาสภาพต้านทานเชิงแสงที่ร้อนของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	142
4.9.6 ผลการศึกษากภาพความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln(R_0/R)$ กับ $1000/T$ เมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิสูง ในช่วงอุณหภูมิ 20 – 120 องศาเซลเซียสของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิต่างๆ ตั้งแต่ 100-400 องศาเซลเซียส	148
4.9.7 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสสลับ ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ต ถึง 2 เมกะเฮิร์ต เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p – SnS / n – WO ₃ : Sb ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	151

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	163
5.1 फिल्मบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	163
5.2 ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-WO ₃ :Sb ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	164
5.3 สมบัติทางไฟฟ้าที่ทำการศึกษาโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า ในช่วง -3.0 ถึง 3.0 โวลต์เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20 – 300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-WO ₃ :Sb ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	165
5.4 ข้อเสนอแนะ	166
เอกสารอ้างอิง	
ภาคผนวก	

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆของหนึ่งหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ	9
2.2 แสดงระบบผลึกทั้งเจ็ดแบบในระบบสามมิติ	10
4.1 แสดงค่าคงที่โครงสร้างผลึกและขนาดของเกรนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีสล และมีการแอนนีสลที่อุณหภูมิต่างๆ ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	96
4.2 แสดงค่าคงที่โครงสร้างผลึกของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $WO_3:Sb$ ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	96
4.3 แสดงค่าขนาดของเกรนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ที่คำนวณจากวิธีการเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์	97
4.4 แสดงองค์ประกอบของธาตุที่ได้จากการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ของฟิล์มบาง ของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนีสลที่อุณหภูมิต่างๆ	102
4.5 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน (Eg) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบไนโตรเจนบริสุทธิ์ สุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีสลและแอนนีสลที่อุณหภูมิต่างๆภายใต้บรรยากาศของแก๊ส	107
4.6 แสดงค่าเลขคลื่นของการดูดกลืนอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่างๆของฟิล์มบาง SnS	109
4.7 แสดงผลการวัดปรากฏการณ์ของฮอลล์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อมีการแอนนีสลที่อุณหภูมิต่างๆภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์	117
4.8 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิมพัลส์ย้อนกลับ (I_s) ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ (n) ค่าความสูงกำแพงศักย์ ในขณะที่ไบแอสเป็นศูนย์ (ϕ_{BO}) และค่าความต้านทานอนุกรม (R_s) ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน และวิธีช่วงเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS / n- $WO_3 : Sb$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีสล	125

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.9 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิมิตวย้อนกลับ (I_s) ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ (n) ค่าความสูง กำแพงศักย์ในขณะที่ไบอัสเป็นศูนย์ (ϕ_{BO}) และค่าความต้านทานอนุกรม (R_s) เมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิต่ำขาลง ในช่วงอุณหภูมิ 300 - 20 เคลวิน ที่ได้จากการ การคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มิออนิกอิมิตชัน และวิธีของชวง ของไดโอดที่มี รอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-WO ₃ :Sb ซึ่ง เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	132
4.10 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิมิตวย้อนกลับ (I_s) ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ (n) ค่าความสูง กำแพงศักย์ในขณะที่ไบอัสเป็นศูนย์ (ϕ_{BO}) และค่าความต้านทานอนุกรม (R_s) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำขาขึ้น ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ที่ได้จากการ คำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มิออนิกอิมิตชัน และวิธีของชวง ของไดโอดที่มีรอยต่อ แบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-WO ₃ :Sb ซึ่งเตรียมโดย วิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	139
4.11 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงที่ได้จากการปรับ ผลการทดลองที่อุณหภูมิห้อง ให้เข้ากับฟังก์ชันมัลติเพิลเอ็กซ์โพเนนเชียล ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	146
4.13 แสดงค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบอยู่บน แผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วย ความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีส และมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ ต่างๆตั้งแต่ 100-400 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน บริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	150
4.14 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่สำคัญ ที่ได้จากการศึกษาค่าอิมพีแดนซ์ สเปกโทรสโกปี ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ต - 2 เมกะเฮิร์ต เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p - SnS / n - WO ₃ : Sb ซึ่งเตรียม โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิต่างๆ	155

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ	8
2.2 แสดงการบอกชื่อระนาบต่างๆของผลึก	12
2.3 แสดงโครงสร้างแบบทินซัลไฟด์	13
2.4 แสดงโครงสร้างผลึกของ WO_3 ในกรณีอุดมคติ	13
2.5 แสดงการเชื่อมต่อกันของออกตะฮีดรัลทำให้เกิดอุโมงค์รูปสามเหลี่ยมและอุโมงค์รูปหกเหลี่ยมร่วมกัน	14
2.6 แสดงเฟสโครงสร้างผลึกของสารประกอบ WO_3 ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 5 องศาเซลวิน	15
2.7 แสดงเฟสไดอะแกรมของระบบ W-O ที่เกิดเป็นสารประกอบ WO_3	15
2.8 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์	17
2.9 แสดงตัวอย่างของสเปกตรัมที่ได้จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	18
2.10 แสดงค่า β เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	19
2.11 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	20
2.12 แสดงภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มบาง	21
2.13 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง กับ ความยาวคลื่น โดยเส้นทึบจะแสดงขอบการดูดกลืนพื้นฐาน	23
2.14 แสดงส่วนทางของแถบพลังงานซึ่งมีส่วนทางของแถบวาเลนซ์และส่วนทางของแถบนำ	24
2.15 แสดงการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง	26
2.16 แสดงตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชิ้นสารตัวอย่างเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์	27
2.17 แสดงการต่อขั้วเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์	27
2.18 แสดงแผนภาพการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์บนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำชนิดพี	30
2.19 แสดงการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์บนสารตัวอย่างที่เป็นแผ่นบางที่มีรูปทรงใดๆ	34
2.20 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I)	35
2.21 แสดงระดับพลังงานของกักตักพาหะชนิดจับอิเล็กตรอน (E_{te}) และกักตักพาหะชนิดจับโฮล (E_{th}) ที่ปรากฏในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำจุดทึบและจุดโปร่งจะแสดงถึงอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ	37

สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสโตะขาขึ้น กับ ค่ากระแสโตะ ขาลงของค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงคือรึ้น	40
2.23 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ t ของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง คือรึ้นทั้งช่วงกระแสโตะขาขึ้นและช่วงกระแสโตะขาลง	41
2.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ t เพื่อใช้คำนวณหาค่าความหนา แน่นของกับดีกพาหะในช่วงกระแสโตะขาลง	44
2.25 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ t เพื่อใช้คำนวณหาค่าความหนา แน่นของกับดีกพาหะในช่วงกระแสโตะขาขึ้น	46
2.26 แสดงลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ ที่เป็นแบบพี-เอ็น	49
2.27 แสดงไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำที่เป็นแบบพี-เอ็น ในกรณีที่เป็น แบบชั้นบันไดที่เป็นฟังก์ชันกับระยะทาง	50
2.28 แสดงโปรไฟล์ของค่าพารามิเตอร์ต่างๆในบริเวณเขตปลอดพาหะ	55
2.29 แสดงโครงสร้างของไดโอดของสารกึ่งตัวนำที่มีรอยต่อแบบพี-เอ็น ขณะถูกไบอัส ไปข้างหน้าด้วยแรงดัน V_a	57
2.30 แสดงการลดลงของค่าความหนาแน่นของโฮลส่วนเกินในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิด เอ็น ของไดโอดของสารกึ่งตัวนำที่มีรอยต่อแบบพี-เอ็น ในกรณีที่เป็นไดโอดยาว ที่อยู่ภายใต้การฉีดพาหะระดับต่ำด้วยแรงดันไบอัสไปข้างหน้ามีค่าเท่ากับ V_a	60
2.31 แสดงกระแสโฮล(เส้นทึบ) กับ กระแสอิเล็กตรอน(เส้นประ) ในเนื้อสารด้านสาร กึ่งตัวนำชนิดเอ็นซึ่งอยู่นอกรอยต่อพี-เอ็น ซึ่งประมาณว่าเป็นกลางทางไฟฟ้า (guasi-neutral region) เนื่องจากประมาณว่าไม่ได้รับผลกระทบจากแรงดัน ไบอัสไปหน้า V_a	61
2.32 แสดงค่าความหนาแน่นของโฮลภายในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นของไดโอด ของสารกึ่งตัวนำที่มีรอยต่อแบบพี-เอ็น ในกรณีที่เป็นไดโอดสั้นที่อยู่ภายใต้ การไบอัสไปข้างหน้า V_a	63
2.33 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าอัตราส่วนของ x_i/x_d ที่เป็นฟังก์ชัน กับ แรงดันไฟฟ้าย้อนกลับที่มีความหนาแน่นของสารเจือของอะตอมผู้ให้ค่าต่างๆ ของรอยต่อแบบ p ⁺ -n	67
2.34 แสดงแหล่งกำเนิดชนิดทั้งสเดน	69
2.35 แสดงแหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้ระเหยสารด้วยไฟฟ้าแบบต่างๆ	70

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.36 แสดงโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่อุณหภูมิ 300 และ 200 เคลวิน	73
2.37 แสดงการส่งผ่านสูงสุดของฟิล์มบาง CdS เกิน 75 เปอร์เซ็นต์	73
2.38 แสดงลักษณะกระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าของโครงสร้าง Cu/CdS/SnO ₂ ในอุณหภูมิระยะ 100 ถึง 300 เคลวิน	74
2.39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง เซมิ-ล็อก (semi-logarithmic) forward biasกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของโครงสร้าง Cu/CdS/SnO ₂ วัดที่อุณหภูมิต่างๆจาก 100 ถึง 300 เคลวิน	75
2.40 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $dV/d(\ln I)$ กับ I ของโครงสร้าง Cu/CdS/SnO ₂ ที่ CdS 200 เคลวิน	76
2.41 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $I(A)$ กับ $\ln V(V)$ ของโครงสร้าง Cu/CdS/SnO ₂ ที่อุณหภูมิ 300 และ 200 เคลวิน	77
2.42 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแฟกเตอร์อุดมคติและอุณหภูมิ	78
3.1 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ($x = 0.5$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	81
3.2 แสดงกราฟโปรไฟล์เตาที่ใช้ในการตั้งอุณหภูมิเตาเพื่อทำการเผาเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ($x=0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	85
3.3 ภาพเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ($x = 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	85
3.4 แสดงแผนภาพสิ่งประดิษฐ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-WO ₃ :Sb โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO ₃ :Sb โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	88
3.5 ภาพถ่ายอุปกรณ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	89
3.6 ภาพถ่ายเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance	89
3.7 ภาพถ่ายเครื่อง UV-VIS ยี่ห้อ Thermo electron corporation รุ่น (He λ ios α)	90

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.8 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมไดโอดของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-WO ₃ :Sb ตามลำดับโดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์และที่เป็นเม็ตเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ W _{1-x} Sb _x O ₃ (x=0.05) โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ100องศาเซลเซียส	91
3.9 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าความต้านทานแผ่น	91
3.10 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-WO ₃ :Sb ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	92
3.11 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้วัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า และค่าอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี โดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับ ความถี่ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำp-SnS/n-WO ₃ :Sb ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	92
4.1 แสดงฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	93
4.2 แสดงพีคความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิต่างๆภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน	94
4.3 แสดงสเปกตรัมของพีคความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิต่างๆภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน	95
4.4 แสดงสเปกตรัมของพีคความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-WO ₃ :Sb ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	95

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าคงที่โครงสร้างผลึก กับ ค่าอุณหภูมิของสารตั้งต้น ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิต่างๆภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน	97
4.6 แสดงภาพถ่ายของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $WO_3:Sb$ ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติกริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	100
4.7 แสดงภาพถ่าย SEM ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิต่างๆภายใต้บรรยากาศ ของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์	101
4.8 แสดงภาพถ่าย SEM ที่บริเวณผิวหน้า ของ เซรามิก $WO_3:Sb$	102
4.9 แสดงภาพถ่าย SEM ที่บริเวณผิวหน้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n- $WO_3:Sb$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนัล	102
4.10 แสดงภาพถ่าย SEM ที่บริเวณภาคตัดขวางของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n- $WO_3:Sb$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนัล	103
4.11แสดงสเปกตรัมที่ได้จากการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิต่างๆภายใต้บรรยากาศของ แก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	104
4.12 แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหย สารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิต่างๆภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์	106

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าการส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียม โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนیل และมีการแอนนิลที่อุณหภูมิต่างๆภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที	108
4.14 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนิล และมีการแอนนิลที่อุณหภูมิต่างๆภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที	109
4.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง กับ อุณหภูมิของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนิลและมีการแอนนิลที่อุณหภูมิต่างๆภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนเป็นเวลา 30 นาที	110
4.16 แสดงสเปกตรัม FTIR ของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนิลและมีการแอนนิลด้วยอุณหภูมิตั้งแต่ 100 – 500 องศาเซลเซียส	111
4.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_{24}) กับ กระแสไฟฟ้า (I) ของ ปรากฏการณ์การรณฮอลล์ ในขณะที่ไม่มีการจ่ายสนามแม่เหล็ก และ มีการจ่ายสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS เมื่อมีการแอนนิลที่อุณหภูมิต่างๆภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียล	113
4.18 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (V_H) กับ กระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS เมื่อมีการแอนนิลที่อุณหภูมิต่างๆภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียล	114

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.19 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_{24}) กับ กระแสไฟฟ้า (I) ของ ปรากฏการณ์การรณฮอลล์ ในขณะที่ไม่มีการจ่าย สนามแม่เหล็กและ มีการจ่ายสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS เมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิต่างๆภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส	114
4.20 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (V_H) กับ กระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ ของฟิล์มบาง ของสารกึ่งตัวนำ SnS เมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิต่างๆ ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส	115
4.21 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_{24}) กับ กระแสไฟฟ้า (I) ของ ปรากฏการณ์การรณฮอลล์ ในขณะที่ไม่มีการจ่ายสนามแม่เหล็ก และ มีการจ่ายสนามแม่เหล็กของ ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS เมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิต่างๆ ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส	115
4.22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (V_H) กับ กระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ ของฟิล์มบางของ สารกึ่งตัวนำ SnS เมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิต่างๆภายใต้ บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส	116
4.23 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์การรณฮอลล์ในขณะที่ไม่มีการจ่ายสนามแม่เหล็ก และ มีการจ่ายสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS เมื่อมีการแอนนีส ที่อุณหภูมิต่างๆภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส	116
4.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS เมื่อมีการแอนนีส ที่อุณหภูมิต่างๆภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส	117

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.25 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_{2d}) กับ กระแสไฟฟ้า (I) ของ ปรากฏการณ์การถล่มฮอลล์ ในขณะที่ไม่มี การจ่ายสนามแม่เหล็ก และ มีการจ่ายสนามแม่เหล็กของฟิล์ม บางของสารกึ่งตัวนำ SnS เมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิต่างๆ ภาย ใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส	117
4.26 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (V_H) กับ กระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS เมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิต่างๆ ภายใต้อากาศของแก๊สไนโตร เจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส	118
4.27 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_{2d}) กับ กระแสไฟฟ้า (I) ของ ปรากฏการณ์การถล่มฮอลล์ ในขณะที่ไม่มี การจ่ายสนามแม่เหล็ก และ มีการจ่ายสนามแม่เหล็กของฟิล์ม บางของสารกึ่งตัวนำ SnS เมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิต่างๆ ภายใต้อากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส	118
4.28 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (V_H) กับ กระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัว นำ SnS เมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิต่างๆ ภายใต้อากาศของ แก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส	119
4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้าความหนาแน่นของ พหุและสภาพคล่องฮอลล์ของฟิล์มบางของกึ่งตัวนำ SnS ซึ่งเตรียมโดยวิธี การระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนีส ที่อุณหภูมิต่างๆ ภายใต้อากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์	121
4.30 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธ์ของฟิล์มบาง ของสารกึ่งตัวนำ p-SnS / n-WO ₃ : Sb ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วย ความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	122
4.31 แสดงกราฟที่ใช้ในการอธิบายกลไกการนำกระแสไฟฟ้าแต่ละช่วงของค่าแรงดัน ไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธ์ของฟิล์มบาง ของสารกึ่งตัวนำ p-SnS / n-WO ₃ : Sb ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วย ความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	122

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.32 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln I$ กับ V เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-SnS} / n\text{-WO}_3 : \text{Sb}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีสล	123
4.33 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $dV/d\ln(I)$ กับ I เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มี รอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-SnS} / n\text{-WO}_3 : \text{Sb}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีสล	126
4.34 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $H(I)$ กับ I เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-SnS} / n\text{-WO}_3 : \text{Sb}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีสล	127
4.35 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า C กับ V ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-SnS} / n\text{-WO}_3 : \text{Sb}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีสล	128
4.36 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1/C^2$ กับ V ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-SnS} / n\text{-WO}_3 : \text{Sb}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีสล	130
4.37 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิต่ำขาลง ในช่วงอุณหภูมิ 300 - 20 เคลวิน ของ ไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-SnS}/n\text{-WO}_3:\text{Sb}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีสล	131
4.38 แสดงกราฟที่ใช้ในการอธิบายกลไกการนำกระแสไฟฟ้าแต่ละช่วงของค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิต่ำขาลง ในช่วงอุณหภูมิ 300 - 20 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-SnS}/n\text{-WO}_3:\text{Sb}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีสล	132

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.39 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln I$ กับ V เมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิต่ำขาลง ในช่วงอุณหภูมิ 300 - 20 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-SnS}/n\text{-WO}_3\text{:Sb}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	132
4.40 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $dV/d\ln(I)$ กับ I เมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-SnS}/n\text{-WO}_3\text{:Sb}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	133
4.41 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $H(I)$ กับ I เมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิต่ำขาลง ในช่วงอุณหภูมิ 300 - 20 เคลวินของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-SnS}/n\text{-WO}_3\text{:Sb}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	133
4.42 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแฟกเตอร์อุดมคติกับ ค่าอุณหภูมิที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันและวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิต่ำขาลง ในช่วงอุณหภูมิ 300 - 20 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-SnS}/n\text{-WO}_3\text{:Sb}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	135
4.43 แสดงการหาค่า E_{00} โดยการพิตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าแฟกเตอร์อุดมคติกับ ค่าอุณหภูมิ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำขาลง ในช่วง อุณหภูมิ 300 - 20 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-SnS}/n\text{-WO}_3\text{:Sb}$ ซึ่งเตรียม โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีส	135
4.44 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูงกำแพงศักย์ กับ ค่าอุณหภูมิที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันและวิธีของชวงเมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิต่ำขาลง ในช่วงอุณหภูมิ 300 - 20 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-SnS}/n\text{-WO}_3\text{:Sb}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	136

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.45 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม กับ ค่าอุณหภูมิที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิออนิคมิสชันและวิธีของชวงเมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิต่ำขาลง ในช่วงอุณหภูมิ 300 - 20 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Wo ₃ :Sb ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	136
4.46 แสดงกราฟอาร์เรเนียสของ $n[\ln J_s]$ เมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิต่ำขาลง ในช่วงอุณหภูมิ 300 - 20 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Wo ₃ :Sb ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีส	137
4.47 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำขาขึ้น ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวินของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Wo ₃ :Sb ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	140
4.48 แสดงกราฟที่ใช้ในการอธิบายกลไกการนำกระแสไฟฟ้าแต่ละช่วงของค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิต่ำขาขึ้น ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวินของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Wo ₃ :Sb ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีส	140
4.49 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln I$ กับ V เมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิขาขึ้น 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Wo ₃ :Sbซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีส	141
4.50 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $dV/d\ln(I)$ กับ I ทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำขาขึ้น ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Wo ₃ :Sb ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	141

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.51 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $H(l)$ กับ l เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิขาขึ้น 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-SnS}/n\text{-WO}_3\text{:Sb}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	142
4.52 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแฟกเตอร์อุดมคติ กับ ค่าอุณหภูมิที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิโอนิกอิมิสชันและวิธีของชวงเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำขาขึ้น ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-SnS}/n\text{-WO}_3\text{:Sb}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	144
4.53 แสดงการหาค่า E_{00} โดยการพิตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแฟกเตอร์อุดมคติ กับ ค่าอุณหภูมิ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำขาขึ้น ในช่วงอุณหภูมิ 300 - 20 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-SnS}/n\text{-WO}_3\text{:Sb}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบ เมื่อไม่มีการแอนนีส	144
4.54 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูงกำแพงศักย์ กับ ค่าอุณหภูมิ ที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิโอนิกอิมิสชันและวิธีของชวงเมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิต่ำขาขึ้น ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-SnS}/n\text{-WO}_3\text{:Sb}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	145
4.55 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม กับ ค่าอุณหภูมิ ที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิโอนิกอิมิสชันและวิธีของชวงเมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิต่ำขาขึ้น ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-SnS}/n\text{-WO}_3\text{:Sb}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	145
4.56 แสดงกราฟอาร์เรเนียสของ $n[\ln J_s]$ เมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิต่ำขาขึ้น ในช่วงอุณหภูมิ 300 - 20 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-SnS}/n\text{-WO}_3\text{:Sb}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	146

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.57 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสโพลีโต กับ เวลา ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	148
4.58 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าลอกาลิทึมธรรมชาติของกระแสโพลีโต กับ เวลา ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	149
4.59 แสดงการพิตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสออร์มัลไลซ์ขาขึ้น กับ เวลา ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิต่างๆตั้งแต่ 100-500 องศาเซลเซียส	150
4.60 แสดงการพิตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสออร์มัลไลซ์ขาลง กับ เวลาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิต่างๆ ตั้งแต่ 100-500 องศาเซลเซียส	151
4.61 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln(R_0/R)$ กับ $1000/T$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 20 – 120 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส และมีการแอนนีสที่อุณหภูมิต่างๆ ตั้งแต่ 100-400 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจน เป็นเวลา 30 นาที	154
4.62 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ ความถี่ ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ - 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p - SnS / n - WO_3 : Sb$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	157
4.63 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความนำไฟฟ้า กับ ความถี่ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ - 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆ ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ $p - SnS / n - WO_3 : Sb$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	158
4.64 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของ ค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ - 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p - SnS / n - WO_3 : Sb$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	158

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.65 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p - SnS / n - WO_3 : Sb$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีสล	159
4.66 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p - SnS / n - WO_3 : Sb$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีสล	159
4.67 วงจรสมมูลของสิ่งประดิษฐ์ที่ใช้ศึกษาการจำลองหาค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนของฟิล์มบาง ของสารกึ่งตัวนำ	160
4.68 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p - SnS / n - WO_3 : Sb$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีสล	161
4.69 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(\omega_0/T^2)$ กับ $(1000/T)$ ที่ได้จากการหาค่า ω_0 จากกราฟความสัมพันธ์ของค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนเมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25-70 องศาเซลเซียส ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ $WO_3:Sb$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	162
4.70 แสดงแผนภาพลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p - SnS / n - WO_3 : Sb$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีสล	164

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พลังงานเป็นสิ่งสำคัญในการดำเนินชีวิตมนุษย์เป็นอย่างมากตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันและได้มีการใช้พลังงานไปอย่างมากมาย จนทำให้พลังงานที่ได้จากแหล่งพลังงานธรรมชาติ เช่น ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ น้ำมัน นั้นกำลังหมดไปจากโลกในเวลาอันใกล้ ทำให้มนุษย์ต้องหาแหล่งพลังงานใหม่ๆ เพื่อมาทดแทนพลังงาน ซึ่งพลังงานจากแสงอาทิตย์ก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่ง เนื่องจากแสงอาทิตย์เป็นพลังงานธรรมชาติที่สะอาดพบอยู่ทั่วไปและมีอยู่อย่างไม่จำกัด การนำแสงอาทิตย์มาใช้โดยสร้างสิ่งประดิษฐ์ของแสงอาทิตย์นั้นก็ไม่สร้างมลภาวะเป็นพิษใดๆไม่ส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศทางธรรมชาติและความเป็นอยู่ของมนุษย์อีกด้วย

งานวิจัยและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ของรอยต่อพี-เอ็นของสารกึ่งตัวซิลิกอน เริ่มขึ้นในปี พ.ศ.2497 หลังจากนั้นงานวิจัยก็แพร่ขยายไปสู่สารกึ่งตัวนำในกลุ่ม II-VI และ I-III-VI₂ เช่น CdTe , CdS , CuInSe₂ และ CuInGaSe₂ เป็นต้น ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์ของสารกึ่งตัวนำในกลุ่ม II-VI ชนิดแรกคือ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อวิวิธพันธุ์ (heterojunction solar cell) ของสารกึ่งตัวนำ Cu₂ / CdS ได้รับการพัฒนามาในเวลาใกล้เคียงกับเซลล์แสงอาทิตย์ของสารกึ่งตัวนำ Si ซึ่งปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ในท้องตลาดประดิษฐ์จากผลึกพันธุ์ (polycrystalline) และอะมอร์ฟัส (amorphous) ของซิลิกอนเกือบทั้งหมด

ปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำออกไซด์ได้รับการวิจัยและพัฒนากันมากมาย เช่น p-Cu₂O / n-ZnO , p-Cu₂O / n-CuO , Cu₂O / n-ZnO , และ p-Cu₂O / n-Si เป็นต้น เนื่องจากสารประกอบออกไซด์ส่วนใหญ่มีเสถียรภาพดีแม้ในสภาวะอุณหภูมิสูงไม่เป็นสารพิษ ราคาข้อมเยา วจึงเป็นทางเลือกใหม่ที่จะนำมาผลิตเป็นเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อทดแทนซิลิกอนที่ใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบัน จากการศึกษาในเบื้องต้นพบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu₂O / n-ZnO มีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าสูงในระดับ 3.83 เปอร์เซ็นต์ จึงเป็นแรงจูงใจให้นักวิจัยจำนวนมากมุ่งความสนใจ มายังสารกึ่งตัวนำออกไซด์กันมากขึ้นอีกทั้งได้มีการประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำออกไซด์กับสารประกอบซัลโคไนด์ เช่น CuAlO₂ / CdZnS , p-Cu₂Sn₇S₂O / n-ZnO และ CuO / CdS พบว่ามีสมบัติเรียงกระแสที่ดี แต่ยังไม่มียางานเกี่ยวกับการศึกษาผลการตอบสนองต่อแสงอาทิตย์

เมื่อไม่นานนี้ นักวิจัยได้มีการสนใจศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์และเคมี-ไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำทั้งสแตนออกไซด์ (WO₃) กันมากขึ้น สารกึ่งตัวนำชนิดนี้มีโครงสร้างผลึกแบบอโธโรมบิก มีโครงสร้างแถบพลังงานเป็นแบบตรงและมีค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ประมาณ 2.8 – 3.2 อิเล็กตรอนโวลต์ สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นสีเขียวและช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็นได้ จึงเหมาะที่จะพัฒนาเป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ สารกึ่งตัวนำ WO₃ มีข้อดีหลายประการ เช่น ต้นทุนการผลิตต่ำมีเสถียรภาพสูง ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมเป็นผลให้มีการนำสารกึ่งตัวนำ WO₃ มาประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ เช่น อุปกรณ์โฟโตโวลตาอิก ผิวเคลือบฟิล์มบางแบบอเล็กโตรโครมิก (electrochromic coatings) ตัวเร่งปฏิกิริยาสารเคมี สารกึ่งตัวนำยิ่งยวดที่อุณหภูมิสูง และประยุกต์เป็นขั้วนำไฟฟ้าโปร่งแสง เป็นต้น การสังเคราะห์ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ WO₃ ให้มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างในระดับไมโครเมตร หรือ นาโนเมตร สามารถสังเคราะห์ได้หลากหลายวิธีทั้งทางเคมีและทางฟิสิกส์ เช่น วิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ (vacuum evaporation) สเป็ตเตอริง (sputtering) วิธีพาไอระเหยสารเคมี วิธีออกซิเดชันจากโลหะ วิธีระเหยด้วยลำอิเล็กตรอน และวิธีเคลือบด้วยไฟฟ้าในสารละลายเคมี เป็นต้น สำหรับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe เตรียมขึ้นได้จากหลายวิธี เช่น วิธีสเปรย์ไพโรไลซิส (spray pyrolysis) วิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในสุญญากาศ วิธีเคลือบด้วยไฟฟ้าในสารละลายเคมี และวิธีเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีอบสารละลายเคมี (chemical bath deposition) เป็นต้น

ในโครงการพิเศษนี้ได้ทำการเตรียมและทำการศึกษสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-SnS} / n\text{-WO}_3 : \text{Sb}$ ซึ่งเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{W}_{1-x}\text{Sb}_x\text{O}_3$ นั้นจะถูกเตรียมขึ้นมาจากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ WO_3 และ Sb_2O_3 ที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็งต่อจากนั้นจึงทำการปรับปรุงประสิทธิภาพของไดโอดโดยทำการแอนนัลฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เตรียมได้ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 30 นาที ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาวิธีการเตรียมไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-SnS} / n\text{-WO}_3 : \text{Sb}$ โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกใสและที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{WO}_3 : \text{Sb}$ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ซึ่งเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{WO}_3 : \text{Sb}$ นั้นจะถูกเตรียมขึ้นมาจากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ WO_3 และ Sb_2O_3 ที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง ต่อจากนั้นจึงทำการปรับปรุงประสิทธิภาพของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เตรียมได้ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 100 , 200 , 300 , 400 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ต่อไป
2. เพื่อศึกษสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-SnS} / n\text{-WO}_3 : \text{Sb}$ ที่เตรียมได้ทั้งหมด ได้แก่ ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscop : SEM) ทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ โดยการทำขั้วอิเล็กโทรดด้วยการป้ายกาวเงินนำไฟฟ้าเป็นรูปทรงกลมให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.2 เซนติเมตรทางด้านที่เป็นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS แล้วหลังจากนั้นจึงนำไปศึกษาสมบัติเฉพาะกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า (I - V curve) , ค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า (C- V curve) แล้วหลังจากนั้นจึงนำไปศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี โดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ต่อไป
3. เพื่อศึกษสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เตรียมได้ทั้งหมด ได้แก่ ทำการศึกษาผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) ทำการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์(Hall Effect),วัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง (photoconductivity วัดสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 20 – 300 เคลวิน เพื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศึกษากลไก VRH วัดสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิสูงในช่วง 25 – 150 องศาเซลเซียสเพื่อหาค่าพลังงานกระตุ้น (activation energy)

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS โดยทำการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ
2. ทำการศึกษาสมบัติพื้นฐานทางฟิสิกส์ต่างๆของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่ถูกเคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมได้ โดยทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ทำการศึกษาสมบัติทางแสงด้วยการวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS Spectrophotometer) เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานและคำนวณช่องว่างแถบพลังงาน(E_g)
3. ทำการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $WO_3 : Sb$ จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ WO_3 และ Sb_2O_3 โดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง
4. ทำการศึกษาสมบัติพื้นฐานทางฟิสิกส์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $WO_3 : Sb$ โดยทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ทำการศึกษาคุณสมบัติทางแสงโดยการวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านทางแสง และศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสสลับโดยการวัดอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน
5. ทำการประดิษฐ์ไดโอดที่มีรอยต่ออวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS / n- $WO_3 : Sb$ โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $WO_3 : Sb$ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ
6. ทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสตรงของไดโอดที่มีรอยต่อแบบอวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS / n- $WO_3 : Sb$ ที่เตรียมได้โดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า – แรงดันไฟฟ้า (I-V curve) และค่าความจุไฟฟ้า – แรงดันไฟฟ้า (C-V curve) อุณหภูมิต่างๆ

1.4 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

1. ค้นคว้าและศึกษาข้อมูลต่างๆตลอดจนทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการระเหยสารเคมีในระบบสุญญากาศ
2. ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ
3. ทำการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่ถูกเคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ได้แก่ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตรมิเตอร์ Bruker รุ่น D8 Advance

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ในย่าน $Cu_{K\alpha}$ 1.5406 อังสตรอม โดยใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์ และ ความต่างศักย์ 25 กิโลโวลต์ ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ LEO รุ่น LEO 1455 VP ทำการศึกษาสมบัติทางแสงด้วยการวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ยี่ห้อ Thermoelectroncorporation ($He \lambda \text{ ion } \alpha$) โดยใช้ความยาวคลื่นช่วง 220 – 1,100 นาโนเมตร เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานและคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g)
4. ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $WO_3 : Sb$ จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ WO_3 และ Sb_2O_3 โดยวิธีปฏิบัติกิจวิธานของแข็งที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 68 ชั่วโมง
 5. ทำการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ โดยทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จากเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟร็กโทรมิเตอร์ Bruker รุ่น D8 Advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ในย่าน $Cu_{K\alpha}$ 1.5406 อังสตรอม โดยใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์ และ ความต่างศักย์ 25 กิโลโวลต์ ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ LEO รุ่น LEO 1455 VP ทำการศึกษาสมบัติทางแสงด้วยการวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ยี่ห้อ Thermoelectroncorporation ($He \lambda \text{ ion } \alpha$) โดยใช้ความยาวคลื่นช่วง 220 – 1,100 นาโนเมตร เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานและคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g)
 6. ทำการประดิษฐ์ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS / n- $WO_3 : Sb$ โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ SnS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $WO_3 : Sb$ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ โดยการให้อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับประมาณ 80 – 100 องศาเซลเซียส
 7. ทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสตรงไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS / n- $WO_3 : Sb$ โดยการทำให้ขั้วอิเล็กโทรด ด้วยการป้ายกาเงินนำไฟฟ้าเป็นรูปทรงกลมให้เต็มหน้าทางด้านที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $WO_3 : Sb$ และป้ายกาเงินนำไฟฟ้า เป็นรูปวงกลมให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.2 เซนติเมตร บนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS แล้วจึงนำไปศึกษาสมบัติเฉพาะของไดโอดด้วยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า – แรงดันไฟฟ้า ที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 20 – 300 เคลวิน และค่าความจุไฟฟ้า – แรงดันไฟฟ้า (C-V curve) ที่อุณหภูมิห้อง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้ทราบถึงวิธีการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่ถูกเคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ทั้งในกรณีที่ไม่มีการแอนนیلและมีการแอนนิลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 100 – 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ทำให้ทราบถึงสมบัติพื้นฐานทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่ถูกเคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมได้ทั้งหมด
3. ทำให้ทราบถึงการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $WO_3 : Sb$ จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ WO_3 และ Sb_2O_3 โดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง
4. ทำให้ทราบถึงสมบัติพื้นฐานทางฟิสิกส์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $WO_3 : Sb$
5. ทำให้ทราบถึงวิธีการประดิษฐ์ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p-SnS / n-WO_3 : Sb$ โดยทำการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $WO_3 : Sb$ ด้วยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ
6. ทำให้ทราบถึงสมบัติพื้นฐานทางฟิสิกส์ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p-SnS / n-WO_3 : Sb$ ที่เตรียมได้จากแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $WO_3 : Sb$



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

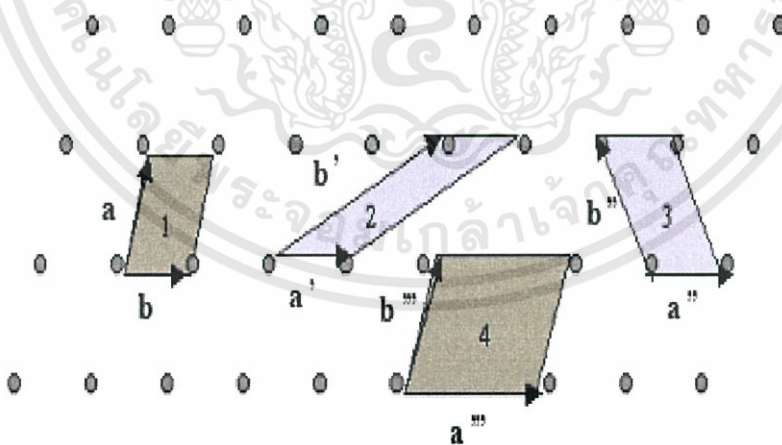
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเรื่องของลักษณะของโครงสร้างผลึก

(Runyan, 1975; Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2531; งามนิตย์, 2545; รัฐินัย, 2549; รัฐินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; รัฐินัย, 2551)s

ในทางผลึกวิทยาสามารถแบ่งสารและวัสดุที่อยู่ในสภาพของแข็งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆตามการจัดเรียงตัวของอะตอม ได้แก่ วัสดุที่เป็นผลึก(Crystalline materials) และวัสดุที่เป็นอะมอร์ฟัส(amorphous materials) ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงวัสดุที่เป็นผลึกเท่านั้น

2.1.1 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ

ผลึกของสารเกิดจากการที่อะตอมหรือโมเลกุลของสารชนิดนั้นมารวมกันอยู่ เป็นจำนวนมากโดยระยะห่างระหว่างอะตอมมีค่าคงที่และมีการจัดเรียงตัวกันเป็นระบบแบบรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอนเป็นระเบียบอย่างต่อเนื่องภายในหนึ่งหน่วยเซลล์ของผลึกอาจประกอบด้วยอะตอมของธาตุเพียงอะตอมเดียวไปจนถึงหลายๆ อะตอมหรือหลายๆโมเลกุล เซลล์ที่มีปริมาตรเล็กที่สุดที่สามารถใช้เป็นตัวแทนของผลึกนั้นเรียกว่า หน่วยเซลล์ (unit cell) ถ้าเอาหน่วยเซลล์นี้มาเรียงต่อกันจะได้ผลึกขึ้นมา และเรียกตำแหน่งต่างๆของอะตอมในระบบสามมิติว่าโครงผลึกหรือแลตทิซ(lattice)ในทางทฤษฎีการกำหนดหน่วยเซลล์จะทำได้ไม่จำกัด แต่ตามปกติจะเลือกหน่วยเล็กที่สุดที่เป็นไปได้และมีสมมาตรค่อนข้างสูง ตัวอย่างการเลือกหน่วยเซลล์ในโครงผลึก 2 มิติ ดังรูปที่ 2.1 ในระบบสองมิติพารามิเตอร์ของโครงผลึก ได้แก่ เวกเตอร์ \vec{a} และ \vec{b} และ มุม γ ซึ่งเป็นมุมระหว่าง เวกเตอร์ทั้งสอง ทั้งนี้ชนิดของโครงผลึกที่แตกต่างกันที่เป็นไปได้เพียงห้าแบบดังตารางที่ 2.1



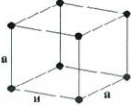

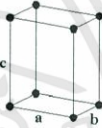

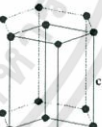

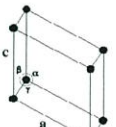
รูปที่ 2.1 แสดงหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆของหนึ่งหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ

ชนิดของโครงผลึกสองมิติ	ค่าคงที่ของโครงผลึก	มุม (องศา)
สี่เหลี่ยมจัตุรัส (square)	$a = b$	$\lambda = 90$
สี่เหลี่ยมผืนผ้า (rectangle)	$a \neq b$	$\lambda = 90$
สี่เหลี่ยมผืนผ้าแบบอดีเซนเตอร์ (body-centered rectangle)	$a \neq b$	$\lambda = 90$
สี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน 60 องศา (60° rhombus)	$a = b$	$\lambda = 90$
สี่เหลี่ยมด้านขนานทั่วไป (general parallelogram)	$a \neq b$	ไม่มีข้อกำหนด

ในระบบ 3 มิติพารามิเตอร์ของโครงผลึก ได้แก่ ขนาดของเวกเตอร์ \vec{a} , \vec{b} และ \vec{c} และ มุม α , β และ γ ซึ่งเป็นมุมระหว่างเวกเตอร์ต่างๆ ดังตัวอย่างในตารางที่ 2.2 ทั้งนี้สามารถจัดแบ่งรูปแบบของโครงสร้างผลึกขึ้นมาโดยสามารถแบ่งออกได้เป็นสิบสี่แบบในสามมิติ ซึ่งจัดได้เป็นเจ็ดกลุ่มคือ ไตรคลินิก(triclinic), โมโนคลินิก (monoclinic), ออร์โธโรมบิก (orthorhombic), เตตระโกนัล (tetragonal), คิวบิก (cubic), รอมโบฮีดรัล (rhombohedral), และเฮกซะโกนัล (hexagonal)

ตารางที่ 2.2 แสดงระบบผลึกทั้งเจ็ดแบบในระบบสามมิติ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 หลักเกณฑ์ในการระบุลักษณะพื้นฐานของผลึก (ฐิตินัย,2531; งามนิตย์,2530;Kittel, 2005; Runyan, 1975; ดุสิต, 2535; Schroder D.K., 1990; สิทธิชัย,2551; ฐิตินัย, 2551

เนื่องจากผลึกมีสมบัติที่ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของทิศทาง และระนาบของผลึก ดังนั้นจึงต้องระบุแน่นอนว่ากำลังศึกษาลักษณะส่วนใดของผลึกอยู่ การระบุลักษณะดังกล่าวจะบอกถึงตำแหน่งของทิศทางและระนาบของผลึกที่กำลังศึกษาอยู่นั้น มีเกณฑ์พื้นฐานดังนี้

2.1.2.1 การระบุตำแหน่ง

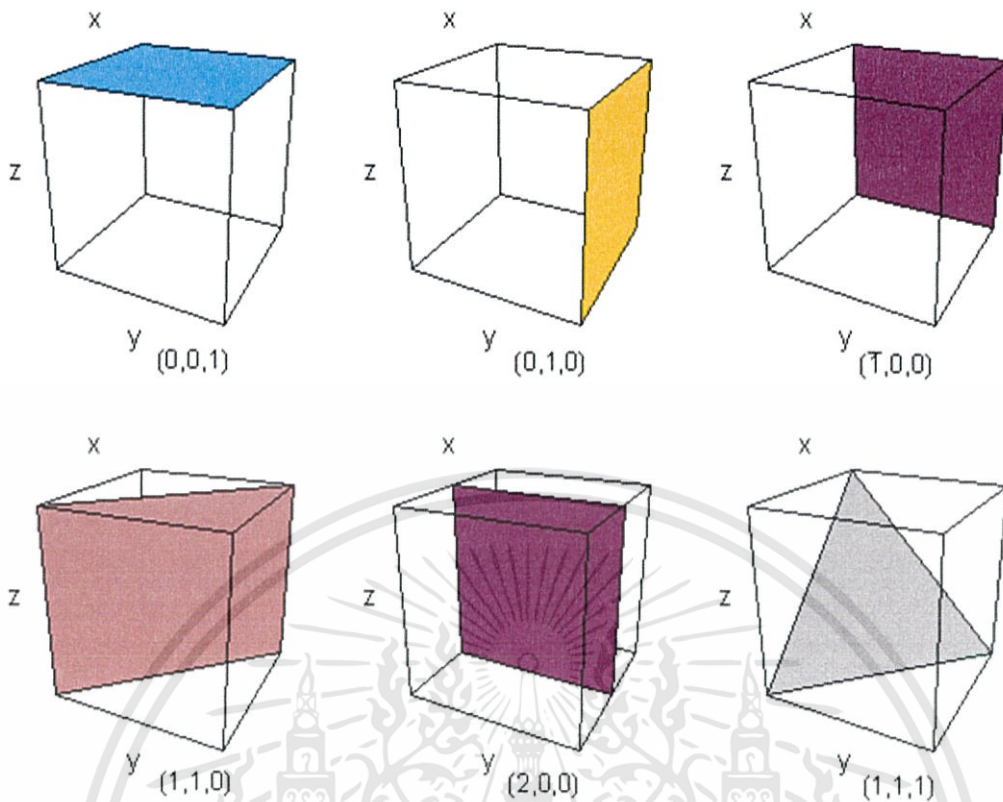
ในกรณีทั่วไปจะเขียนเป็น (x,y,z) ให้สังเกตเครื่องหมาย “,” ซึ่งคั่นแต่ละค่าตัวอย่างจุด $(1,2,3)$ หมายความว่า เป็นตำแหน่งอยู่ที่พิกัด $x = 1, y = 2$

2.1.2.2 การระบุทิศทาง

ในกรณีทั่วไปจะเขียนเป็น $[u v w]$ ให้สังเกตว่าใช้วงเล็บก้ามปู และไม่มีเครื่องหมาย “,” คั่นระหว่างค่าแต่ละค่า ถ้าเป็นทิศทางที่เป็นลบก็จะใส่เครื่องหมาย “,” หรือบาร์(bar) ไว้บนตัวเลขนั้นๆ เช่น ทิศทาง $[\bar{1}2\bar{1}]$ แสดงว่าในแนวแกน z มีค่าเป็นลบ

2.1.2.3 การระบุชื่อระนาบ

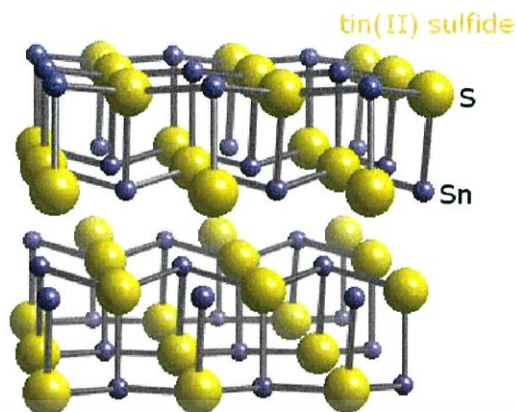
การระบุชื่อระนาบของผลึกจะใช้อักษร (hkl) ให้สังเกตการณ์ใช้วงเล็บ และไม่มีเครื่องหมาย “,” คั่นอยู่ระหว่างค่า (hkl) เรียกว่า ดัชนี มิลเลอร์ (miller indices) ระนาบของผลึกเป็นสิ่งสำคัญที่สุดอีกประการหนึ่งในการศึกษาผลึก เพราะในแต่ละระนาบจะประกอบไปด้วย อะตอม ไอออน หรือ โมเลกุล เรียงตัวกันอยู่บนระนาบนั้น อาจกล่าวได้ว่าระนาบแต่ละระนาบจะมีความแตกต่างกันเช่นเดียวกับทิศทาง จุดที่ระนาบหนึ่งๆตัดแกนผลึกจะได้มาจากค่าส่วนกลับของดัชนี มิลเลอร์ เช่น ระนาบ (010) จะตัดแกน (x,y,z) ที่จุด $(1/0,1/1,1/0)$ หรือจุด $(\infty,1,\infty)$ นั่นเอง (ระยะอนันต์หมายถึงระนาบกับแกนนั้นและไปตัดแกนนั้นที่ระยะอนันต์) ดังแสดงในรูป 2.2 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระนาบต่างๆกับระยะตัดแกนอ้างอิง



รูปที่ 2.2 แสดงการบอกระนาบต่างๆของผลึก

2.1.3 โครงสร้างผลึกของสารประกอบทินซัลไฟด์ (งามนิตย์, 2530; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2552; Kittl, 2005; Runyan, 1975; สุกฤษฏ์, 2547; สมเกียรติ, 2542)

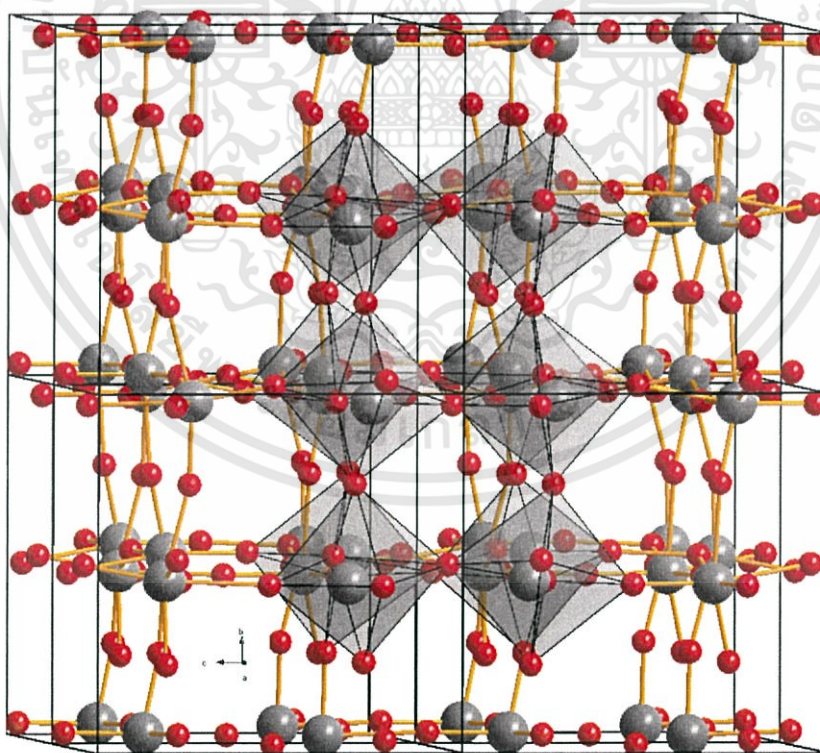
สารประกอบ SnS มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบออร์โธโรมบิกมีกลุ่มปริภูมิ (space group) เป็น Pnma ไอออนของธาตุ Sn²⁺ จะสร้างพันธะกับไอออนของธาตุ S²⁻ จำนวน 3 ไอออน ส่วนวาเลนซ์อิเล็กตรอน 5s² ของอะตอมของธาตุ Sn จะไม่สร้างพันธะ (lone pair) ดังนั้นพันธะระหว่างไอออนของธาตุ Sn²⁺ กับไอออนของธาตุ S²⁻ จะมีรูปทรงเป็นแบบเตตระโกนัล (tetragonal geometry) ค่าคงที่โครงสร้างของหนึ่งหน่วยเซลล์จะแสดงดังตารางที่ 2.4 อะตอมของธาตุ Sn กับอะตอมของธาตุ S จะสร้างพันธะต่อกันหนึ่งพันธะกลายเป็นแผ่นบางซ้อนกันเป็นชั้นๆ ซึ่งแต่ละชั้นจะดึงดูดกันด้วยแรงแวนเดอร์วาล (van der waals) ดังรูปที่ 2.3 และ 2.4 เฟสอื่นๆของสารประกอบ SnS ที่เกิดขึ้นได้อีก เช่น เฟสร็อคซอลต์ (rocksalts) เฟสออร์โธโรมบิกที่อุณหภูมิสูง และเฟสซิงค์เบลนด์ เป็นต้น



รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างแบบทินซัลไฟด์

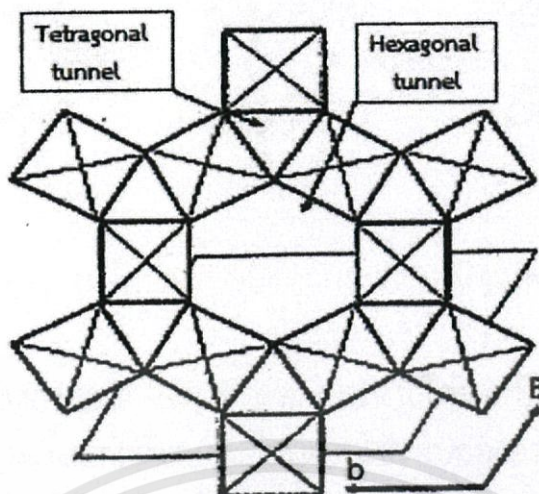
2.1.4 โครงสร้างผลึกของสารประกอบ WO_3

โครงสร้างผลึกของทั้งสแตนออกไซด์ในอุดมคติประกอบไปด้วยออกตะฮีดรัลจำนวนมากซึ่งแต่ละออกตะฮีดรัลจะใช้มุมเชื่อมกันกลายเป็นโครงข่ายสามมิติดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยแต่ละออกตะฮีดรัลจะมีอะตอมของธาตุ W เป็นศูนย์กลางและมีอะตอมของธาตุ O จำนวน 6 อะตอมอยู่ล้อมรอบ การเชื่อมต่อกันของแต่ละออกตะฮีดรัลจะก่อให้เกิดเป็นอูโมงค์แนวยาวในหลายรูปแบบเช่น อูโมงค์รูปสามเหลี่ยม อูโมงค์รูปสี่เหลี่ยม รูปที่ 2.5 แสดงให้เห็นอูโมงค์สามเหลี่ยมและอูโมงค์หกเหลี่ยมเกิดขึ้นร่วมกัน



รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างผลึกของ WO_3 ในกรณีอุดมคติ

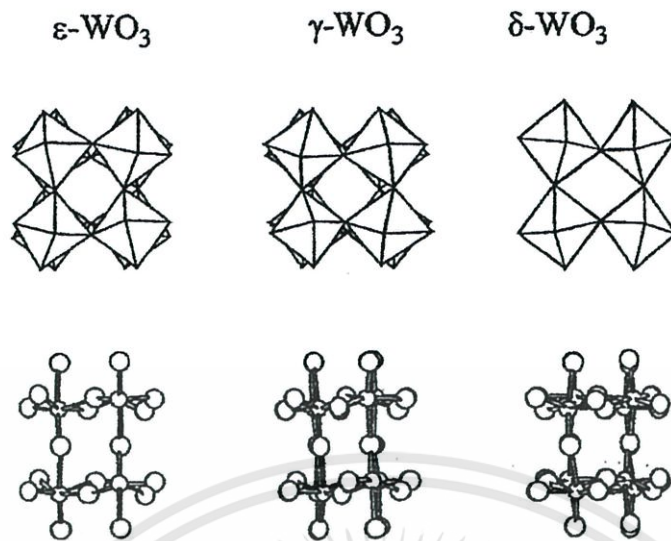
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 แสดงการเชื่อมต่อกันของออกตะฮีดรัลทำให้เกิดอุโมงค์รูปสามเหลี่ยมและอุโมงค์รูปหกเหลี่ยมร่วมกัน

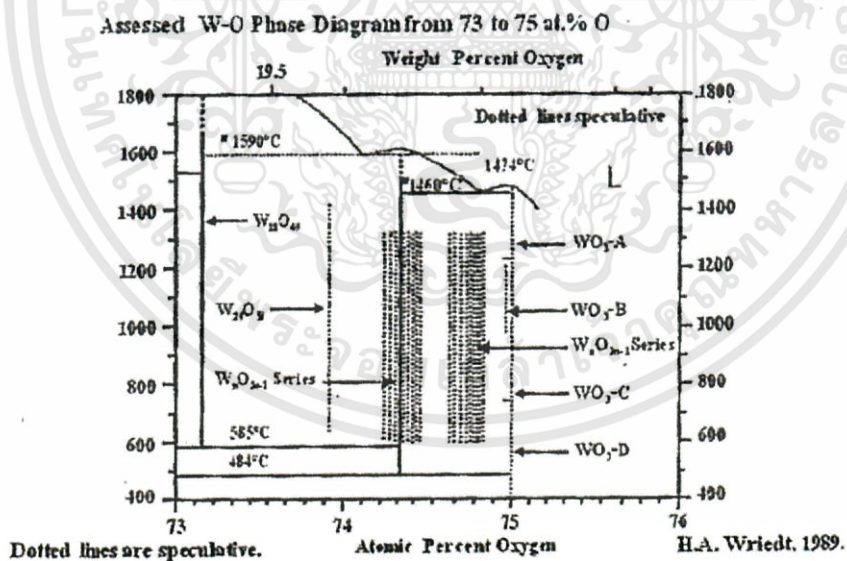
สารประกอบของ WO_3 ในกรณีอุดมคติจะมีปริมาณของอะตอมของธาตุ O เท่ากับ 75 เปอร์เซ็นต์โดยโมล แต่การเกิดแวนแวนดีนออกซิเจน จะส่งผลให้โครงสร้างผลึกเปลี่ยนแปลงไปทำให้เกิดเฟสต่างๆ จำนวนมากเช่น $\alpha-WO_x$ ($2.98 < x < 3.0$), $\beta-WO_x$ ($2.83 < x < 2.90$), $\gamma-WO_x$ ($2.66 < x < 2.72$) และสารประกอบ WO_3 โครงสร้างผลึกของเฟสของสารประกอบ WO_3 ในอุดมคติที่ไม่มีแวนดีนออกซิเจนจะมีโครงสร้างผลึกในระบบโมโนคลินิก (สเปกตรัม $P2_{1/n}$) ที่อุณหภูมิห้อง $a = 7.297$ อังสตรอม, $b = 7.539$ อังสตรอม, $c = 7.688$ อังสตรอม, $\beta = 90.91$ แต่มีผู้พบว่าที่อุณหภูมิห้องสารประกอบ WO_3 มักจะเกิดเป็นเฟสโมโนคลินิกร่วมกับ ไตรคลินิก

อย่างไรก็ตามโครงสร้างผลึกของสารประกอบ WO_3 ยังเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิอีกด้วย กล่าวคือในช่วง อุณหภูมิต่ำ 50 ถึง 71 องศาเซลเซียส จะมีโครงสร้างผลึกในระบบไตรคลินิก ในช่วงอุณหภูมิ 17-330 องศาเซลเซียส จะเป็นแบบโมโนคลินิก ในช่วงอุณหภูมิ 330-740 องศาเซลเซียสจะมีโครงสร้างผลึกแบบออร์โธโรมมบิก แต่ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 740 องศาเซลเซียสจะเป็นแบบเตตระโกนัลจากข้อมูลล่าสุด พบว่าโครงสร้างผลึกของสารประกอบ WO_3 ที่อุณหภูมิต่ำกว่าระดับ 5 องศาเซลวินเป็นไปได้ 3 แบบ คือ $\epsilon-WO_3$, $\gamma-WO_3$ และ $\delta-WO_3$ ซึ่งเกิดจากแต่ละออกตะฮีดรัลเอียงไปจากแนวแกนผลึกดังแสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงเฟสโครงสร้างผลึกของสารประกอบ WO₃ ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 5 องศาเซลวิน

จากการที่อะตอมของธาตุออกซิเจนขาดหายไปจากโครงสร้างผลึก แต่ละออกตะฮีดรัลของสารประกอบ WO₃ ที่เคยใช้มุมเชื่อมต่อกันจะเปลี่ยนเป็นไขว่ของออกตะฮีดรัลเชื่อมต่อกันจึงส่งผลให้เกิดเฟสอนสตอยคิโอเมตริกจำนวนมากดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงเฟสไดอะแกรมของระบบ W-O ที่เกิดเป็นสารประกอบ WO₃

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

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

การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟร็กโทรมิเตอร์ โดยใช้รังสีเอกซ์ความยาวคลื่นเดียวตกกระทบตัวอย่าง ซึ่งอาจเป็นผลึกเดี่ยวหรือผลึกพหุพันธ์ก็ได้ สารตัวอย่างจะหมุนไปเป็นมุม θ ในขณะที่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ รังสีเอกซ์จะเคลื่อนที่ไปเป็นมุม 2θ เพื่อให้การเลี้ยวเบนสอดคล้องกับกฎของแบรกก์

ในปี พ.ศ.2455 (ค.ศ.1912) W.H. Bragg และ W.L. Bragg ได้เสนอแนวคิดที่เราสามารถมองได้ว่าผลึกจัดเรียงตัวเป็นชั้น (layer) หรือระนาบ (plane) ของอะตอมซึ่งสามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบโดยมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน ทั้งนี้ลำคลื่นที่สะท้อนออกไปจากระนาบต่างๆดังกล่าวจะมีความเข้มสูงและแทรกสอดแบบเสริมกันถ้าหากความแตกต่างระหว่างทางเดินของคลื่นที่สะท้อนจากระนาบที่อยู่ข้างเคียง (path difference) มีค่าเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นที่ตกกระทบดังกล่าว

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

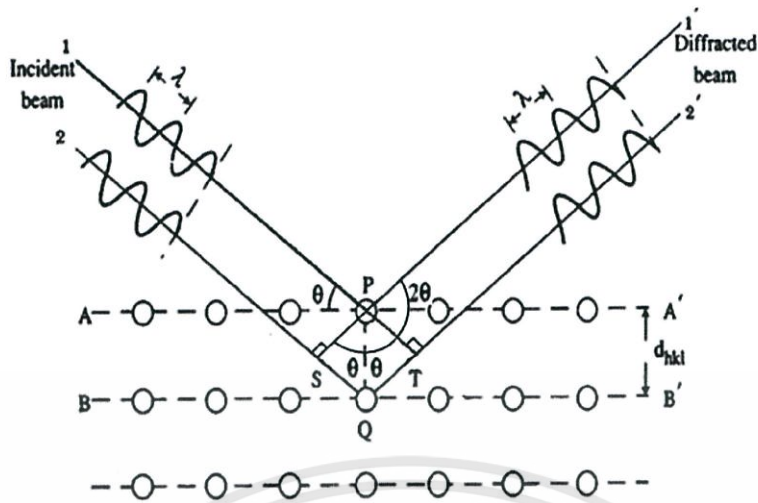
เมื่อ d_{hkl} คือ ระยะระหว่างระนาบที่ขนานกัน

θ คือ มุมของรังสีสะท้อนจากระนาบแบรกก์ของรังสีเอกซ์ซึ่งจะเท่ากับมุมของรังสีตกกระทบ

n คือ ลำดับของการเลี้ยวเบน มีค่าตั้งแต่ 1,2,3,...

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

ระนาบต่างๆของผลึกที่ก่อให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ต้องสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ เรียกว่าระนาบแบรกก์ (Bragg plane) และมุมที่รังสีสะท้อนทำกับแนวที่ขนานกับรังสีตกกระทบ เรียกว่ามุมเลี้ยวเบน (diffraction angle) ซึ่งมีค่าเป็นสองเท่าของมุมตกกระทบ (2θ) ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.8 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์

2.2.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

ข้อมูลที่ได้จากกราฟการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ดังในรูปที่ 2.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์และมุมเลี้ยวเบน เรียกว่า รูปแบบการเลี้ยวเบน (diffraction pattern) ซึ่งสำหรับแต่ละธาตุหรือสารประกอบต่างชนิดกันก็จะมีรูปแบบการเลี้ยวเบนแตกต่างกันซึ่งสามารถสังเกตได้จากพีค (peak) ของการเลี้ยวเบน จากกราฟการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์สามารถทำการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกได้ด้วยการคำนวณหาค่าคงที่ของโครงสร้างผลึก ขนาดของเกรนและความเครียดในระดับจุลภาคได้

สมการสำหรับหาค่าคงที่ของโครงสร้างผลึก (lattice constant) สำหรับโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์สามารถหาได้จากสมการที่ (2.2)

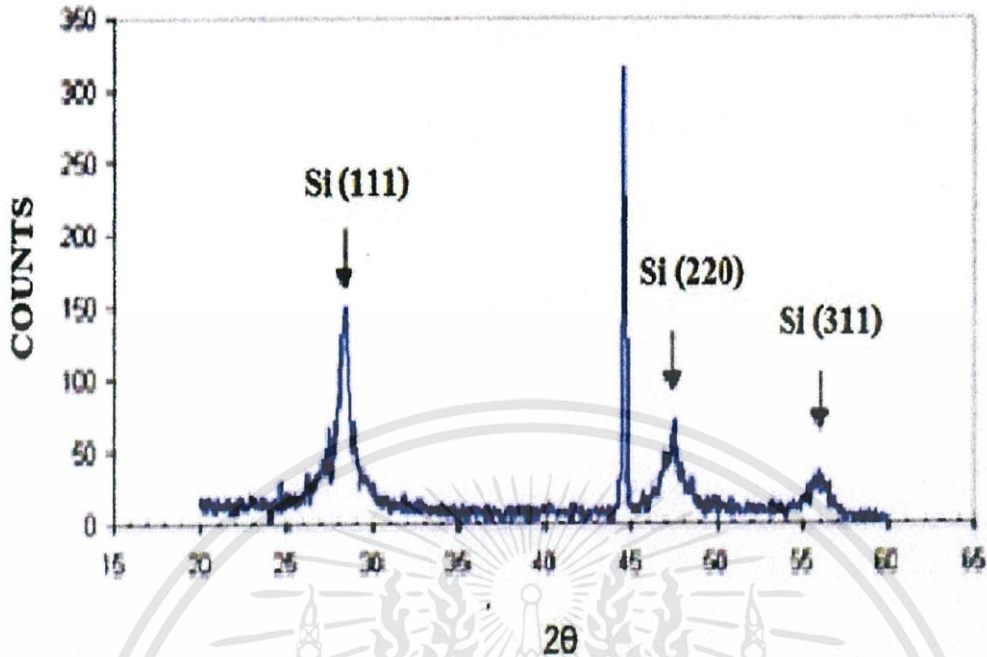
$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (2.2)$$

และสำหรับโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลหาได้จากสมการที่ 2.3

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

เมื่อ a, c คือ ค่าคงที่ของโครงสร้างผลึก

h, k, l คือ ดัชนีมิลเลอร์ที่ใช้บอกชื่อระนาบของผลึก



รูปที่ 2.9 แสดงตัวอย่างของสเปกตรัมที่ได้จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

2.2.2 การหาขนาดของเกรน

การหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์สามารถหาโดยเลือกพีคที่มีความเข้มสูงสุด ดังในรูปที่ 2.13 และใช้สมการของเชอร์เรอร์(Scherer) คำนวณหาขนาดของเกรน ดังนี้

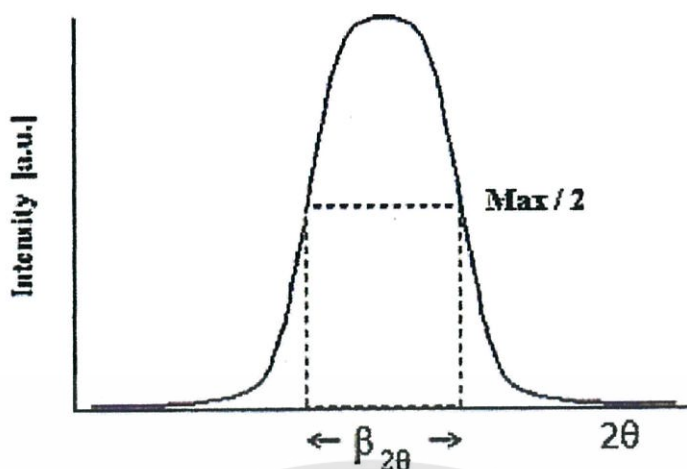
$$D = \frac{k\lambda}{\beta_{2\theta} \cos \theta} \quad (2.4)$$

เมื่อ D คือ ขนาดของเกรน

k คือ ค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับขนาดและรูปร่างของเกรน

$\beta_{2\theta}$ คือ ระยะเวลาความกว้างของพีคที่ความเข้มที่ค่าเป็นครึ่งหนึ่งของความเข้มสูงสุด

(full width at half-maximum of the diffraction peak)

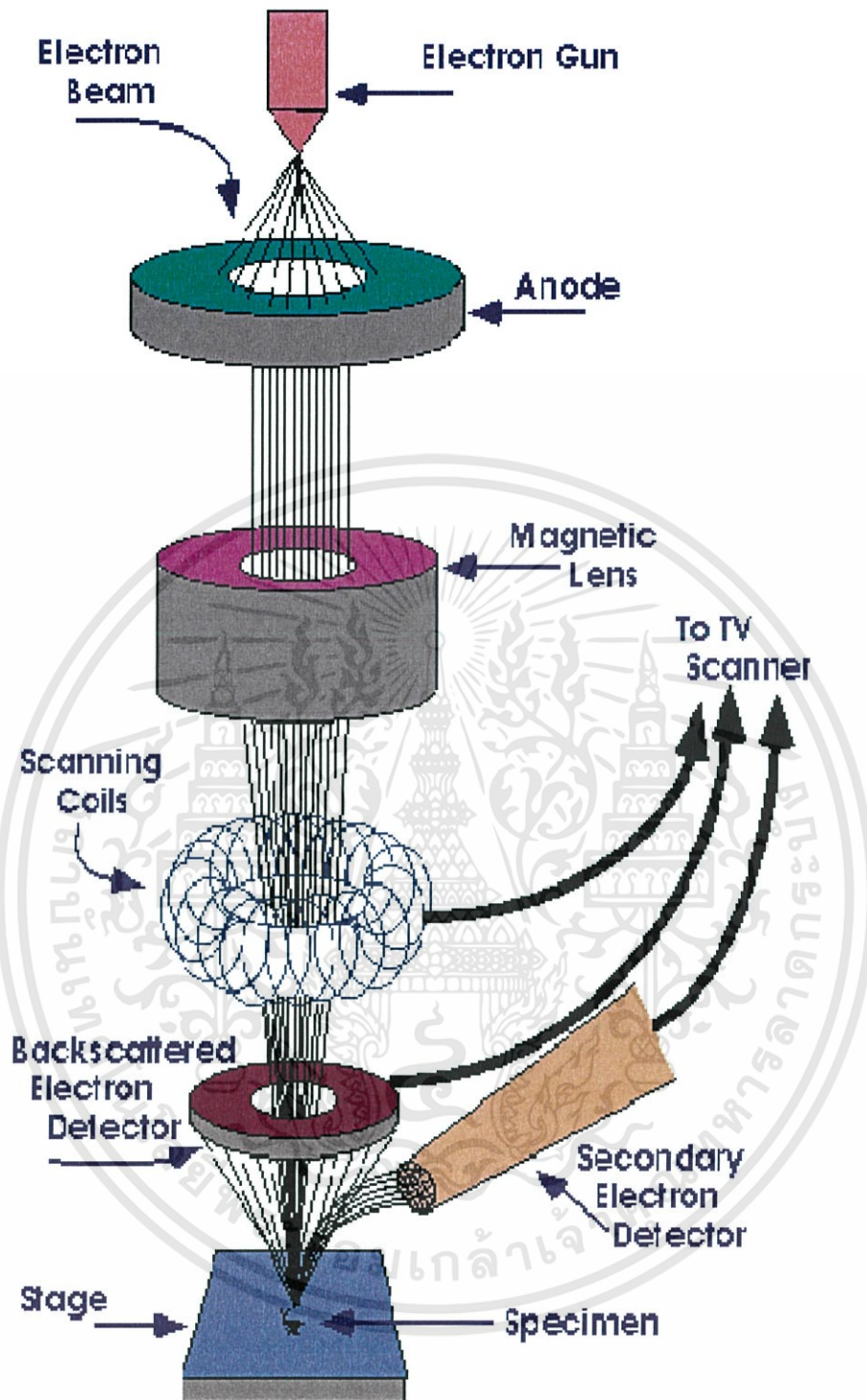


รูปที่ 2.10 แสดงค่า β เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

2.3 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Sze ., 1981; Kittel, 2005; ฐิตินัย, 2531; งามนิตย์, 2530; ดุสิต, 2535; Schroder .,1990; ลีทธิชัย, 2551; ฐิตินัย, 2550; งามนิตย์, 2553)

ในปี พ.ศ. 2478 แมก นอลล์ (Max Knoll) ได้คิดค้นหลักการและวิธีการในการประดิษฐ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดขึ้น และต่อมา แมนเฟรดวอนอาเดนเน (Manfred Von Ardenne) ได้ประดิษฐ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเครื่องแรกสำเร็จในปี พ.ศ. 2481 โดยเครื่องที่ประดิษฐ์นั้นยังมีกำลังขยายไม่สูงมากนัก ต่อมาในปี พ.ศ.2498 ชาร์ลส์ วิลเลียม แอ็ทเลย์ (Charles William Oatley) และทีมงานจากเคมบริดจ์ ได้สร้างกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีความละเอียดสูงถึง 250 อังสตรอม

การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังแสดงในรูปที่ 2.14 เริ่มจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งมีหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนจากไส้หลอด กลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า พร้อมทั้งบังคับกลุ่มอิเล็กตรอนให้มีลักษณะเป็นลำ โดยอิเล็กตรอนจะกราดไปบนพื้นผิวของตัวอย่างโดยขดลวดสนามแม่เหล็กบนระนาบเอกซ์-วาย เพื่อทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ และจะถูกตรวจจับโดยเซนเซอร์ เพื่อแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าเพื่อส่งต่อไปให้ระบบสร้างภาพต่อไป

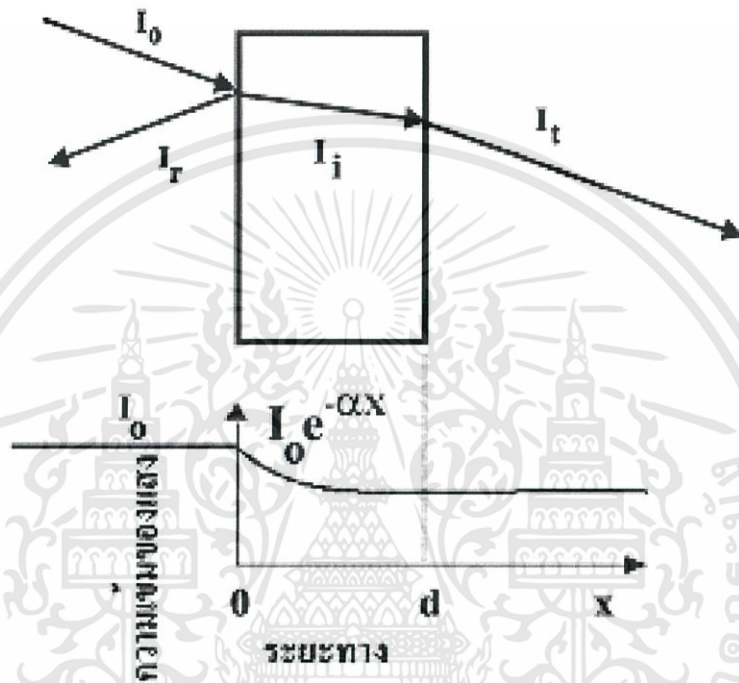


รูปที่ 2.11 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

พิจารณาการศึกษาริวัตค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงและค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง เมื่อแสงเดินทางไปกระทบฟิล์มบาง แสงบางส่วนจะสะท้อนกลับที่ผิวของฟิล์มบาง บางส่วนของแสงจะเดินทางเข้าไปในฟิล์มบางและถูกดูดกลืนดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.12 แสดงภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มบาง

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

สัมประสิทธิ์การสะท้อนของแสงมีค่าเท่ากับ

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

หรือ
$$I_r = RI_0 \quad (2.6)$$

เพราะฉะนั้น ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางมีค่า

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

เมื่อแสงนี้เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางจะถูกดูดกลืนทำให้ความเข้มแสงภายในแผ่นฟิล์มบางลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลตามระยะทาง ดังนั้นความเข้มแสงที่ส่งผ่านฟิล์มบางมีค่าดังสมการ

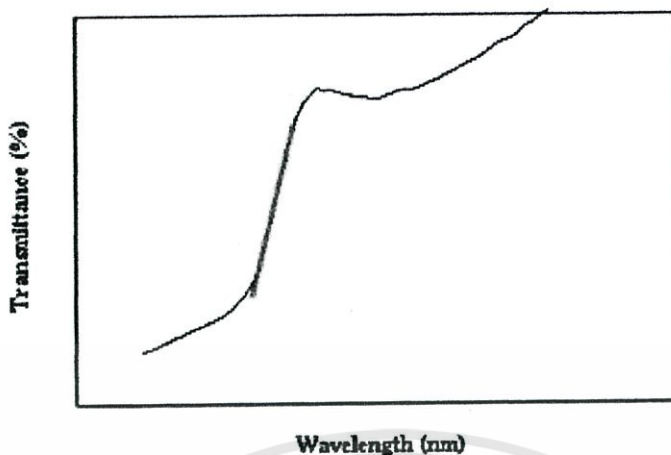
$$I_t = I_i \cdot e^{-\alpha d} = (1 - R)I_0 \cdot e^{-\alpha d} \quad (2.8)$$

ถ้าไม่มีการสะท้อนแสงที่ผิวด้านหลังสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของแสงจะมีค่าเท่ากับ

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

2.4.1 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากการวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง

การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำเกิดจากการที่อิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากแสงที่มีพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าแถบช่องว่างพลังงาน แล้วย้ายสถานะพลังงานจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปสู่แถบนำ สเปกตรัมการดูดกลืนแสงบริเวณที่พลังงานโฟตอนมีค่าน้อยจะมีลักษณะเป็นขอบแสดงถึงการลดลงของการดูดกลืนแสงอย่างกะทันหัน ขอบลักษณะนี้เรียกว่าขอบการดูดกลืนแสงหรือขอบการดูดกลืนพื้นฐาน (absorption edge or fundamental edge) แสดงได้ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.13 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง กับ ความยาวคลื่น โดยเส้นที่บจะแสดงขอบการดูดกลืนพื้นฐาน

การหาค่าของช่องว่างแถบพลังงานสามารถพิจารณาจากสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (α) ของสารกึ่งตัวนำที่จะสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (T) จากรูปที่ 2.16 แสดงภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบจาทางด้านซ้ายของฟิล์มบาง (I_0) ความเข้มแสงภายในฟิล์มบางจะลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียล และมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงโดยทั่วไป (R) มีค่าน้อยมากจะได้

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

ดังนั้น

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

ที่กล่าวมา เป็นการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงจากสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงโดยไม่คิดถึงการสะท้อนของแสงสำหรับกรณีการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง เนื่องจากการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนแสดงเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับค่าช่องว่างแถบพลังงาน ซึ่งมีลักษณะเป็นพาราโบลาของว่างแถบพลังงานของแผ่นฟิล์มบางประมาณได้โดยการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ซึ่งจะถูดูดกลืนเมื่อแสงที่ตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบางมีค่าพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าของแถบพลังงานต้องห้ามที่ขอบของการดูดกลืนค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนจะมีค่าเป็น

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

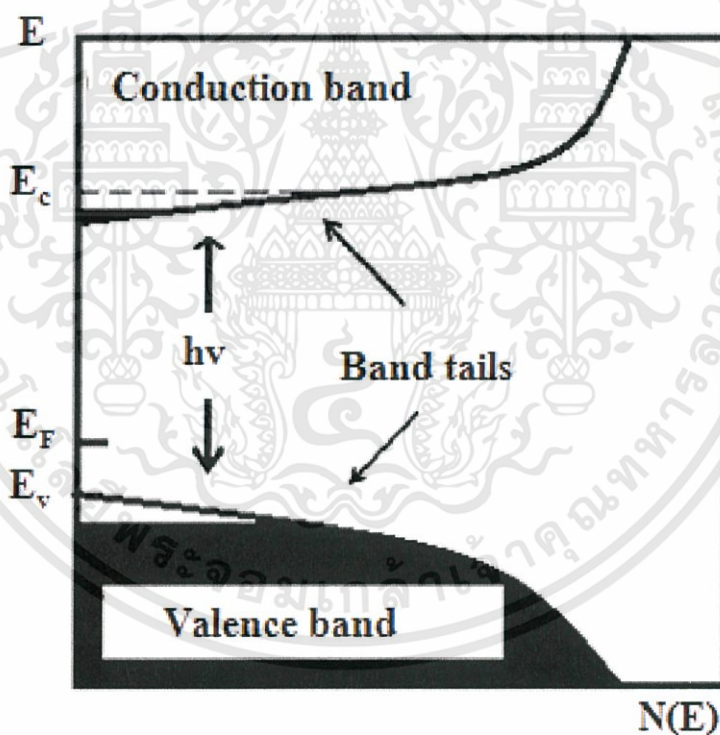
เมื่อ A คือ ค่าคงที่ และสมการที่ (2.12) ใช้กับสารที่มีสถานะพลังงานแบบตรง

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

เมื่อ B คือค่าคงที่ และสมการที่ (2.13) ใช้กับสารที่มีสถานะพลังงานแบบเฉียด

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

วัสดุประเภทฟิล์มบางมักมีข้อบกพร่องของผลึกจำนวนมากระดับพลังงานของข้อบกพร่องของผลึกเหล่านี้จะมีอันตรกิริยาต่อกันส่งผลให้ระดับพลังงานเหล่านี้แผ่ขยายออกโดยจะไม่เป็นระดับพลังงานเฉพาะค่า (discrete level) อีกต่อไปบางครั้งก็แผ่ออกไปจรดขอบบนสุดของแถบวาเลนซ์หรือขอบล่างสุดของแถบนำซึ่งเสมือนกับว่าแถบวาเลนซ์หรือแถบนำมีความหนาแน่นของสถานะทางพลังงาน (energy density of state) ยื่นเข้าไปในช่องว่างแถบพลังงานซึ่งนิยมเรียก ส่วนที่ยื่นเข้าไปในแถบช่องว่างแถบพลังงานนี้ว่าส่วนหางของแถบพลังงานหรือส่วนหางของแถบพลังงานของเออร์บัค (band tail หรือ Urbach's tail) ดังแสดงดังรูป 2.14



รูปที่ 2.14 แสดงส่วนหางของแถบพลังงานซึ่งมีส่วนหางของแถบวาเลนซ์และส่วนหางของแถบนำ

ในเชิงการทดลองส่วนหางของแถบพลังงานสามารถตรวจสอบได้จากการวัดขอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซึ่งเออร์บัค (Urbach) ได้แสดงให้เห็นว่าขอบการดูดกลืนผลึกจะเพิ่มขึ้นแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลดังความสัมพันธ์

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

เมื่อ α_0 และ E_0 คือ พารามิเตอร์ของผลึกแต่ละชนิด

k_B คือ ค่าคงที่ของโบลต์มันซ์

T คือ อุณหภูมิ (เคลวิน)

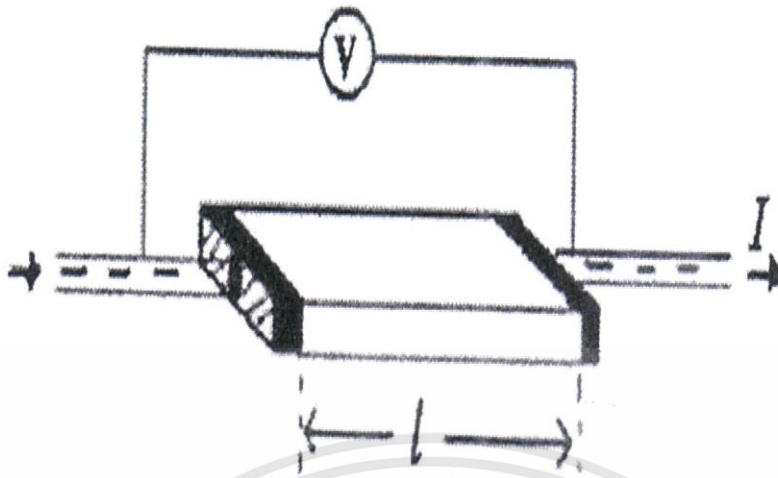
σ คือ ความชัน (*steepness*) ของขอบการดูดกลืนแสง

2.5 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2545; จูตินัย, 2549; จูตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; จูตินัย, 2551)

วิธีการวัดสภาพความต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำสามารถทำได้หลายวิธี ทั้งวิธีที่ใช้ส่วนของอุปกรณ์ต่อเข้าสัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่างและวิธีที่ไม่ต้องสัมผัสโดยตรงสำหรับวิธีที่จะกล่าวถึงในที่นี้เป็นวิธีที่ใช้การสัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่าง ซึ่งทำได้โดยการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในชิ้นสารตัวอย่างแล้ววัดความต่างศักย์ระหว่างจุดบนชิ้นสารนั้น

2.5.1 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง (direct resistivity method)

โดยทั่วไปแล้วการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้ามักจะวัดความต้านทานก่อน ซึ่งเป็นวิธีวัดโดยตรงนี้หมายถึง วัดค่าความต้านทานรวมของสารจากนั้นมาหาค่าความยาว และพื้นที่หน้าตัดของสารนั้น การวัดวิธีนี้จะต้องทำให้สารที่ต้องการวัดมีรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอน เพื่อที่จะวัดค่าพื้นที่หน้าตัดและความยาวให้ได้แน่นอน เช่น แท่งกลมทรงกระบอก แท่งสี่เหลี่ยม เป็นต้น จากนั้นจึงให้กระแสไฟฟ้าเข้าไปที่ปลายด้านหนึ่ง และให้กระแสไหลออกผ่านสารตัวอย่างที่ปลายอีกด้านหนึ่ง ขณะเดียวกันก็วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จุดปลายทั้งสองนั้นพร้อมๆกัน จากที่ทราบค่ากระแสและศักย์ไฟฟ้านี้ สามารถนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าได้ดังต่อไปนี้ เมื่อกำหนด R เป็นความต้านทานรวมจะมีความสัมพันธ์กับความต้านทานจำเพาะและพื้นที่หน้าตัด A บริเวณที่ปล่อยกระแสไหลเข้าไป และ l เป็นระยะทางระหว่างขั้วศักย์ไฟฟ้าที่วัด



รูปที่ 2.15 แสดงการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.15)$$

$$\rho = R \times \frac{A}{l} = \left(\frac{V}{I} \right) \left(\frac{A}{l} \right) \quad (2.16)$$

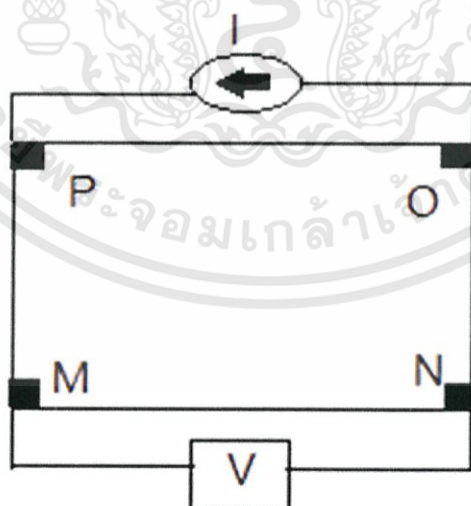
จะเห็นว่าวิธีนี้เป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็ว แต่ค่าที่ได้เป็นค่าโดยประมาณซึ่งต้องคำนึงถึงองค์ประกอบอื่นๆด้วย ซึ่งความถูกต้องในการวัดโดยวิธีนี้ขึ้นอยู่กับบริเวณผิวสัมผัสที่กระแสไหลเข้าและออกนั้นมีลักษณะเป็นโอห์มมิกที่ดีหรือไม่ ถ้าไม่มีคุณสมบัติโอห์มมิกที่ดีแสดงว่ามีความต้านทานที่ผิวสัมผัสทั้งสองขั้วไฟฟ้าเกิดขึ้นด้วย ค่าความต้านทาน R ที่วัดได้จึงเป็นค่าความต้านทานรวมทั้งหมด ดังนั้น ค่าความต้านทานจริงของสารกึ่งตัวนำจะน้อยกว่าค่าที่วัดได้แน่นอน ความถูกต้องอีกส่วนหนึ่งขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างความต้านทานของสารที่ต้องการวัดและความต้านทานภายใน (impedance) ของโวลต์มิเตอร์ที่ใช้วัด หากความต้านทานนี้ใกล้เคียงกับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จะมีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง ซึ่งในทางปฏิบัติจะคำนึงถึงผิวสัมผัสโอห์มมิกมากกว่าความผิดพลาดของโวลต์มิเตอร์ เนื่องจากที่ผิวสัมผัสจะดีหรือไม่ (เป็นโอห์มมิกหรือไม่) นั้นตรวจสอบได้ยากมาก จึงแก้ไขด้วยการทำให้เกิดผิวสัมผัสบริเวณพื้นที่มากขึ้นเพื่อลดความต้านทานที่ผิวสัมผัสลง จากนั้นจึงวัดศักย์ไฟฟ้าด้วยโวลต์มิเตอร์ โดยเลือกโวลต์มิเตอร์ที่มีความต้านทานภายในสูงๆ เท่าที่จะหาได้เพื่อลดความผิดพลาด

2.5.2 การวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ (ฐิตินัย, 2550; Runyan, 1975; Elangovan, 2003; Fahrenbruch, 1983; van der pauw, 1958)

วิธีการวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ดังแสดงในรูปที่ 2.19 และ 2.20 เป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับสำหรับการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของชิ้นสารตัวอย่างที่เป็นฟิล์มบางที่มีความหนาสม่ำเสมอและมีรูปร่างไม่แน่นอน โดยข้อสัมผัสจะอยู่บริเวณขอบของชิ้นสารตัวอย่าง รอยต่อระหว่างข้อสัมผัสที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะต้องไม่ขัดขวางการไหลของกระแส



รูปที่ 2.16 แสดงตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชิ้นสารตัวอย่างเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์



รูปที่ 2.17 แสดงการต่อขั้วเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถทำได้โดยจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าขั้ว P-O ทำการวัดความต่างศักย์ตกคร่อมขั้ว M-N จะทำให้ได้ค่า R_1 จากสมการที่ (2.17)

$$R_1 = \frac{V_{MN}}{I_{PO}} \quad (2.17)$$

หลังจากนั้นทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าที่ขั้ว P-M แล้วทำการวัดความต่างศักย์ตกคร่อมขั้ว O-N จะได้ค่า R_2 จากสมการที่ (2.18)

$$R_2 = \frac{V_{ON}}{I_{PM}} \quad (2.18)$$

เมื่อได้ค่า R_1 และ R_2 มาแล้วสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานแผ่นได้ดังนี้

$$R_{sh} = f \left(\frac{\pi}{\ln 2} \right) \left(\frac{R_1 + R_2}{2} \right) \quad (2.19)$$

เมื่อ f คือ แฟกเตอร์ค่าแก้ของแวนเดอร์เพาว์ (Van der pauw correction factor)

โดย

$$f = 1 - \left(\frac{\ln 2}{2} \right) \left(\frac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2} \right)^2 \quad (2.20)$$

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\rho = R_{sh} d \quad (2.21)$$

2.6 ปรากฏการณ์ฮอลล์(Hall Effect) (ฐิตินัย, 2545; ฐิตินัย, 2550; งามนิตย, 2551; Kittel, 1971; Runyan, 1957; Elandovan, 2003)

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถเขียนในเทอมของสภาพคล่องของพาหะได้และความหนาแน่นพาหะด้วยความสัมพันธ์
กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากอิเล็กตรอน

$$\rho = \frac{1}{ne\mu_e} \quad (2.22)$$

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากโฮล

$$\rho = \frac{1}{pe\mu_p} \quad (2.23)$$

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากพาหะสองชนิดคืออิเล็กตรอนและโฮลซึ่งมีปริมาณใกล้เคียงกัน สภาพต้านทานไฟฟ้าที่แท้จริงคือ

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

เมื่อ n คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระ
 p คือ ความหนาแน่นของโฮล
 n_e และ n_p คือ สภาพคล่องของอิเล็กตรอนและโฮล

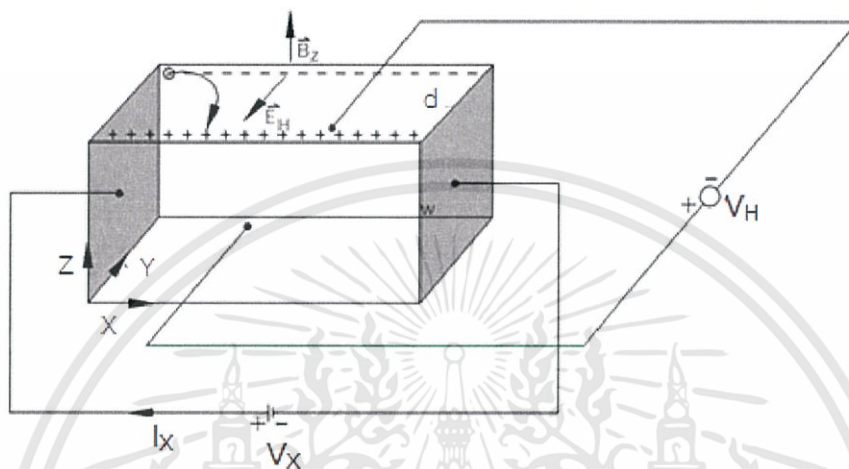
นั่นคือหากทราบสภาพต้านทานไฟฟ้า และสภาพคล่องของพาหะจะทำได้สามารถคำนวณค่าความหนาแน่นของพาหะข้างมากได้จากสมการที่ (2.25) และ (2.26) คือกรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอน $n = \frac{1}{e\rho\mu_e} \quad (2.25)$

กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดพี

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

เราสามารถคำนวณหา ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าค่าสภาพคล่องของพาหะได้หลายวิธี วิธีที่สะดวกและมักนิยมใช้กันอย่างกว้างขวางคือ การคำนวณจากการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ ปรากฏการณ์ฮอลล์ถูกค้นพบในปี พ.ศ.2422 โดย เอ็ดวิน เฮอร์เบิร์ต (Edwin Herbert Hall)



รูปที่ 2.18 แสดงแผนภาพการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์บนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำชนิดพี

พิจารณาชั้นสารกึ่งตัวนำชนิดพีที่เป็นรูปทรงดังแสดงในรูปที่ 2.22 ซึ่งมีกระแสไฟฟ้า I ไหลผ่านในแนว x หรืออาจมองว่ามีประจุบวกเคลื่อนที่ไปในทิศ x ด้วยความเร็วลอยเลื่อน v_x เกิดเป็นกระแสไฟฟ้าในแนวทิศทาง x คือ I_x ดังสมการที่ (2.27)

จาก
$$I = nqvA \quad (2.27)$$

ดังนั้น
$$I_x = qnv_x(wd) \quad (2.28)$$

จากกฎของโอห์ม
$$V = IR \quad (2.29)$$

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (2.30)$$

จากรูปที่ 2.22
$$A = w \cdot d \quad (2.31)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าทราบความต่างศักย์ (V_x) ระหว่างปลายทั้งสองของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น สามารถหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าได้จากสมการที่ (2.29) และ (2.30) และ (2.31)

$$\rho = \frac{V_x}{I_x} \cdot \frac{A}{L} = \frac{V_x}{I_x} \cdot \frac{wd}{L} \quad (2.32)$$

ปรากฏการณ์ฮอลล์เกิดขึ้นเมื่อสนามแม่เหล็ก (B_z) ที่กระทำกับชิ้นสารในทิศ z อย่างสม่ำเสมอ อันตรกิริยาจากสนามแม่เหล็กมีผลทำให้แนวกระแสของอิเล็กตรอนเบี่ยงเบนไปในทิศ $-y$ สม่ำเสมอในบริเวณขอบด้านนอก ($y=0$) และเหนี่ยวนำให้เกิดอิเล็กตรอนขึ้นที่ขอบด้านใน (y) ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าฮอลล์ในทิศ $-y$ (Hall field: E_y หรือ E_H) และเกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์หรือเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าฮอลล์ในทิศ y (Hall Voltage: V_H) ขึ้น ทำให้กลุ่มโฮลเคลื่อนที่ไปด้วยแรงลอเรนตซ์ (Lorentz's force)

$$F = q(v_x \times B_z) + qE_y \quad (2.33)$$

เมื่อแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่กระทำต่อโฮลมีค่าเท่ากันจะเกิดสภาวะสมดุลเชิงความร้อน หรือสภาวะคงตัว (steady state) ทำให้โฮลเคลื่อนที่ในทิศ $-z$ ดังเดิม เพราะฉะนั้นจะทำให้ได้ว่า

$$E_y = v_x B_z = \frac{1}{qn} \cdot \frac{I_x}{wd} \cdot B_z \quad (2.34)$$

หากพิจารณาสมการที่ (2.71) จะเห็นว่าสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดขึ้นเป็นปฏิภาคกับความหนาแน่นกระแสและสนามแม่เหล็ก สามารถเขียนได้ในรูปของ

$$E_y = R_H \cdot J_x \cdot B_z \quad (2.35)$$

เมื่อ

$$J_x = \frac{I_x}{wd} \quad (2.36)$$

แล้ว

$$R_H = \frac{E_y}{J_x B_z} = \frac{1}{qn} \quad (2.37)$$

เรียก R_H ว่าเป็นสัมประสิทธิ์ฮอลล์หรือค่าคงตัวฮอลล์ (Hall coefficient) ซึ่งนิยามว่าเป็นสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดจากความหนาแน่นกระแสของพาหะขนาด 1 หน่วยไหลผ่านภายใต้สนามแม่เหล็กขนาด 1 หน่วย

เราอาจทราบศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากสนามไฟฟ้าฮอลล์ โดยอินทิเกรตสนามไฟฟ้าฮอลล์ตลอดความกว้าง (w) ของแผ่นสารและเรียกความต่างศักย์นี้ว่า ความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) นั่นคือ

$$V_H = \int_0^w E_y dy = \int_0^w \frac{1}{qn} \cdot \frac{I_x B_z}{wd} dy = \frac{1}{qn} \cdot \frac{I_x B_z}{d} \quad (2.38)$$

สัมประสิทธิ์ฮอลล์ที่ได้จากการวัด คือ

$$R_H = \frac{V_H}{I_x} \cdot \frac{d}{B_z} \quad (2.39)$$

ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนตามนิยาม คือ

$$n = \frac{1}{qR_H} = \frac{I_x}{V_H} \cdot \frac{B_z}{qd} \quad (2.40)$$

โดยทั่วไปพาหะอิสระที่เคลื่อนที่ในสารกึ่งตัวนำ มักประสบกับกลไกการกระเจิงหลายๆ ชนิด กลไกการกระเจิงของพาหะในสารกึ่งตัวนำจะเป็นกลไกที่ขึ้นอยู่กับพลังงานของพาหะ โดยที่ช่วงเวลาการปลดการกระเจิง (τ) จะแสดงได้ดังนี้

$$\tau = \tau(E) \quad (2.41)$$

เมื่อคิดผลรวมจากการกระเจิงที่ขึ้นกับพลังงานของพาหะ สัมประสิทธิ์ฮอลล์สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

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

กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดพี
$$R_H = \frac{r}{pq} \quad (2.43)$$

เมื่อ r คือ แฟกเตอร์การกระเจิง (scattering factor) ของพาหะในปรากฏการณ์ฮอลล์ ซึ่งสามารถนิยาม ค่า r ได้จากความสัมพันธ์ดัง

$$r = \frac{\langle \tau \rangle^2}{\langle \tau^2 \rangle} \quad (2.44)$$

r มีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ขึ้นอยู่กับกลไกการกระเจิงของพาหะเช่น การกระเจิงเนื่องจากโครงผลึกหรือการกระเจิงเนื่องจากอะตอมของสารเจือปนที่ถูกไอออนส์สัมประสิทธิ์ฮอลล์แปรค่าตามสนามแม่เหล็กและอุณหภูมิ ซึ่งจะมีค่าใกล้ 1 เมื่อขึ้นสารอยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กความเข้มสูงมาก ดังนั้นเราทราบค่าของ r จากการทดลองด้วยความสัมพันธ์

$$r = \frac{R_H(B)}{R_H(B = \infty)} \quad (2.45)$$

ในทางปฏิบัติสนามแม่เหล็กที่ใช้วัดโดยทั่วไปมีค่าอยู่ระหว่าง 5 - 10000 เกาส์ ซึ่งค่า r ในช่วงนี้มีการเปลี่ยนแปลงไม่มาก ดังนั้นอาจประมาณได้ว่าเป็นค่าคงที่ จากสมการที่ (2.40) และ (2.41) สามารถนิยามค่าสภาพคล่องฮอลล์ (μ_H) ได้เป็น

$$\mu_H = \left| \frac{R_H}{\rho} \right| = r_\mu \quad (2.46)$$

หรือจากสมการที่ (2.38) และ (2.43)

$$\mu_H = \frac{V_H}{I_H} \cdot \frac{d}{B} \cdot \frac{1}{\rho} \quad (2.47)$$

ค่าสภาพคล่องฮอลล์แตกต่างจากค่าสภาพคล่องที่ได้จากการนำไฟฟ้าด้วยอัตราส่วนของ r ซึ่งมีค่ามากกว่า 1 โดยทั่วไปเพื่อลดความซับซ้อนเมื่อคำนวณความหนาแน่นของพาหะจึงมักประมาณว่า r มีค่าเท่ากับ 1 ความหนาแน่นของพาหะที่คำนวณจากปรากฏการณ์ของฮอลล์ จึงอาจสูงกว่าความหนาแน่นของพาหะที่แท้จริงถึง 30 เปอร์เซ็นต์

2.6.1 การศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ (จูตินัย, 2549; จูตินัย, 2550; วีรัชัย, 2547; อุปถัมภ์, 2548; สุกฤษฏ์, 2547; Marquardt, 2006; Dieter, 1998; Elangovan, 2003; Fahrenbruch, 1993; van der pauw, 1958; Tilley, 2004; Caballero, 2003)

เทคนิคนี้ได้รับการพัฒนาขึ้นมาจากพื้นฐานของวิชาคณิตศาสตร์ คือ คอนฟอร์มอลแมปปิง (conformal mapping) โดยนักวิทยาศาสตร์ชื่อ แวนเดอร์เพาว์ (van der pauw)

สาระสำคัญของเทคนิคนี้อยู่ที่การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของแผ่นสารตัวอย่างรูปทรงใดๆ ซึ่งสามารถทำได้อย่างแม่นยำโดยไม่จำเป็นต้องทราบลักษณะของรูปแบบการกระจายของ เส้นทางเดินกระแสที่ไหลภายในแผ่นสาร ถ้าสารตัวอย่างประพฤติตามเงื่อนไขต่อไปนี้

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

พิจารณาชิ้นสารรูปทรงเป็นแผ่นบางใดๆ และมีขั้วสัมผัสเล็กๆ M, N, O และ P กระจายอยู่ที่บริเวณขอบของแผ่นซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขข้างต้น



รูปที่ 2.19 แสดงการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์บนสารตัวอย่างที่เป็นแผ่นบางที่มีรูปทรงใดๆ

ในการวัดสภาพคล่องฮอลล์ หากกระบวนกรวัดกระทำภายใต้สนามแม่เหล็กความเข้ม B ที่กระทำตั้งฉากกับระนาบแผ่นสาร กระแสไฟฟ้าจ่ายเข้าในแนวทแยงมุมชี้ M , O และวัดความต่างศักย์จากชี้ N , P

นิยาม
$$R_{MNOP} = \frac{V_{NP}}{I_{MO}} \quad (2.48)$$

สัมประสิทธิ์ฮอลล์จากเทคนิคของแวนเดอร์เพอร์ คือ

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

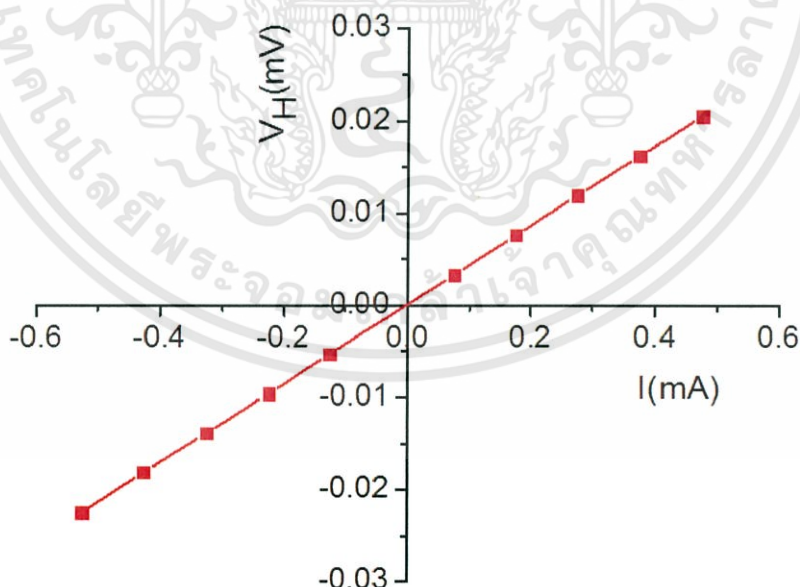
เมื่อ V_H คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์หรือผลต่างระหว่างค่า V_{NP} ในขณะที่มีสนามแม่เหล็ก และไม่มีสนามแม่เหล็ก

d คือ ความหนาของชิ้นสารตัวอย่าง

B คือ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก

จากสมการที่ (2.48) จะได้ว่า

$$R_H = \frac{V_H}{I} \left(\frac{d}{B} \right) \quad (2.50)$$



รูปที่ 2.20 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I)

เมื่อทำการเขียนกราฟระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ที่ได้จาก การทดลอง เราจะได้ลักษณะกราฟดังรูปที่ 2.23 โดยที่ความชันของกราฟที่ได้จะมีค่าเป็น $\frac{V_H}{I}$ สภาพคล่องพาหะของฮอลล์สามารถคำนวณได้จาก

$$\mu_H = \frac{R_H}{\rho} \quad (2.51)$$

และสามารถคำนวณหาระยะทางเฉลี่ยที่ปลอดภัยการกระเจิงได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$I = \left(\frac{h}{2e} \right) \left(\frac{3n}{\pi} \right)^{1/3} \mu_H \quad (2.52)$$

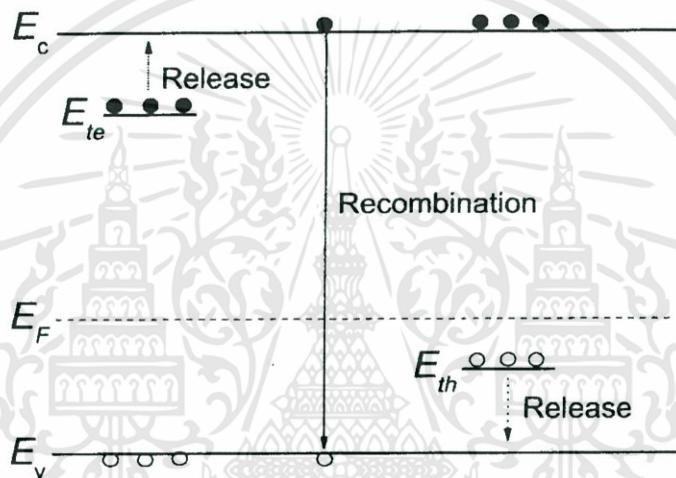
เมื่อ h คือ ค่าคงตัวของพลังค์ 6.625×10^{-34} จูล-วินาที

ในทางปฏิบัติการเตรียมสารให้มีรูปทรงตามเงื่อนไขทั้ง 4 ข้อดังกล่าวอาจเป็นไปได้ยาก โดยเฉพาะขนาดและตำแหน่งของขั้วสัมผัสซึ่งมักไม่เป็นจุดและไม่อยู่ที่ขอบของชิ้นสารตามทฤษฎีจึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของผลการวัด

2.7 สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง(จางนิตย, 2556; จูตินัย, 2556)

ในสารกึ่งตัวนำมักมีข้อบกพร่องผลึกเสมอ ข้อบกพร่องผลึกมีหลายชนิด ข้อบกพร่องผลึกบางชนิดมีคุณสมบัติในการจับอิเล็กตรอนและ/หรือโฮลอิสระได้ จึงมักเรียกว่ากับดักพาหะ กับดักพาหะชนิดต่างๆ จะปรากฏเป็นระดับพลังงานในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ โดยในรูปที่ 2.28 มีทั้งระดับพลังงานของกับดักพาหะชนิดจับโฮล (E_{th}) และกับดักพาหะชนิดจับอิเล็กตรอน (E_{te}) (Jiang, 2012) คำว่าการปลดปล่อย (release) เป็นกลไกที่กับดักพาหะปล่อยอิเล็กตรอนให้กับแถบนำ และเป็นกับดักพาหะชนิดปล่อยโฮลให้กับแถบวาเลนซ์ ส่วนคำว่าการรวมตัว (recombination) เป็นกลไกที่อิเล็กตรอนในแถบนำทรานสิชันลงมารวมตัวกับโฮลในแถบวาเลนซ์โดยไม่ผ่านกับดักพาหะ ขณะที่สารกึ่งตัวนำยังไม่ได้มีการฉายแสงกับดักพาหะจะมีการจับอิเล็กตรอนหรือจับโฮลอยู่ก่อนแล้ว ส่วนอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำและโฮลในแถบวาเลนซ์มีปริมาณน้อย สารกึ่งตัวนำจึงนำกระแสไฟฟ้าได้ไม่ดี กระแสมืด (dark current) จึงมีค่าน้อย แต่เมื่อมีการฉายแสงลงบนสารกึ่งตัวนำจะเกิดกระบวนการสร้างอิเล็กตรอนและโฮลอิสระขึ้นในแถบนำและแถบวาเลนซ์ตามลำดับ เนื่องจากการดูดกลืนโฟตอน

ที่มีพลังงานสูงเพียงพอ เมื่อไบแอสด้วยแรงดันไฟฟ้าให้กับสารกึ่งตัวนำ กระแสโฟตอนจะมีปริมาณเพิ่มขึ้น แต่เมื่อหยุดฉายแสงหรือหยุดการกระตุ้นด้วยแสง กระแสไฟฟ้าจะลดลงสู่ค่ากระแสมืดเหมือนในกรณีที่ไม่มีแสง แต่บางครั้งพบว่า กับดักพาหะที่จับอิเล็กตรอนและ/หรือจับโฮล มีพฤติกรรมไม่ปล่อยอิเล็กตรอนหรือโฮลออกมาทันทีอย่างปกติธรรมดา นั่นคือยังมีประจุค้างอยู่ในกับดักพาหะ ดังนั้นอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำและ/หรือโฮลในแถบวาเลนซ์จึงยังคงปรากฏอยู่มากเพื่อทำหน้าที่ในการรักษาความเป็นกลางทางไฟฟ้าโดยปกติกลไกการปลดปล่อยจะใช้เวลานานกว่ากลไกการรวมตัวแต่เนื่องจากกับดักพาหะมีการปล่อยอิเล็กตรอนและ/หรือโฮลออกมาช้ามาก ส่งผลให้กลไกการรวมตัวใช้เวลายังนานขึ้นไปอีก จึงเป็นที่มาของ ค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงดื้อรั้น (persistent photoconductivity)



รูปที่ 2.21 แสดงระดับพลังงานของกับดักพาหะชนิดจับอิเล็กตรอน (E_{te}) และกับดักพาหะชนิดจับโฮล (E_{th}) ที่ปรากฏในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ จุดทึบและจุดโปร่งจะแสดงถึงอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ

กำหนดให้ชั้นสารมีความกว้าง w ความหนา d และยาว l ให้กระแสไฟฟ้า I ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัด wd กระแสไฟฟ้า I จะเป็นดังสมการ

$$I = envA \quad (2.53)$$

และจากความสัมพันธ์ $\mu = v/\xi$ และ $\xi = V_a/l$ ดังนั้นจะได้ว่า

$$v = \frac{\mu V_a}{l} \quad (2.54)$$

แทนสมการที่ (2.53) ลงในสมการที่ (2.54) จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I = e\mu n_a \left(\frac{wd}{l} \right) \quad (2.55)$$

แต่เนื่องจากความหนาแน่นของพาหะอิสระ (n) เกิดมาจากกักตักพาหะ ดังนั้นความหนาแน่นของพาหะอิสระ (n) ที่สัมพันธ์กับกักตักพาหะชนิดที่ i ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา จะแสดงได้ดังนี้คือ (Studenikin, 1998)

$$n = N_{ii} \exp\left(-t/\tau_i\right) \quad (2.56)$$

แทนสมการที่ (2.55) ลงในสมการที่ (2.56) จะได้ว่า กระแสไฟฟ้า I_i ที่เกิดจากกักตักพาหะชนิด i คือ

$$I_i = e\mu N_{ii} V_a \left(\frac{wd}{l} \right) \exp\left(-t/\tau_i\right) \quad (2.57)$$

กระแสไฟฟ้าทั้งหมด (I) ที่สัมพันธ์กับกักตักพาหะทุกชนิดจะเป็นดังนี้คือ

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

เมื่อ N_{ii} คือ ความหนาแน่นของกักตักพาหะต่อปริมาตรชนิดที่ i ซึ่งสามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$N_{ii} = \frac{I}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{wd} \right) \exp\left(t/\tau_i\right) \quad (2.59)$$

สำหรับกรณีฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ จะประมาณว่า ความหนา d มีค่าน้อยมาก ดังนั้น จากสมการที่ (2.58) จะเขียนใหม่ได้ว่า (Gu, 2005; Huang, 2011)

$$I = e\mu \left(\frac{w}{l} \right) (nd) V_a = e\mu \left(\frac{w}{l} \right) \sigma_i V_a \quad (2.60)$$

เมื่อ σ_i คือ ความหนาแน่นของกักตักพาหะต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ แต่ถ้ากักตักพาหะมีหลายชนิด กระแสรวม (I) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่สัมพันธ์กับกักตักพาหะทุกชนิดจะเป็นดังนี้ คือ

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

เมื่อ σ_{ii} คือความหนาแน่นของกัมมันตภาพต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ชนิดที่ i ซึ่งสามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$\sigma_{ii} = \frac{I}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{w} \right) \exp\left(\frac{t}{\tau_i} \right) \quad (2.62)$$

โดยที่

V_a	คือ	แรงดันไบแอสที่ป้อนให้กับสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีหน่วยเป็นโวลต์
μ	คือ	สภาพคล่องของพาหะมีหน่วยเป็น ตารางเซนติเมตรต่อ(โวลต์-วินาที)
w	คือ	ความกว้างของสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีหน่วยเป็น เซนติเมตร
l	คือ	ความยาวของสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีหน่วยเป็น เซนติเมตร
d	คือ	ของสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีหน่วยเป็น เซนติเมตร
I	คือ	กระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากการทดลองที่เวลา t ใดๆ
τ_r	คือ	ช่วงชีวิตขาลง (decay time)
N_{ii}	คือ	ค่าความหนาแน่นของกัมมันตภาพในชั้นสารตัวอย่างมีหน่วยเป็นต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
σ_{ii}	คือ	ค่าความหนาแน่นของกัมมันตภาพในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำมีหน่วยเป็นต่อตารางเซนติเมตร

ช่วงชีวิตขาลงจะมีค่าสั้นลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีโฟนอนเข้ามามีส่วนร่วมด้วยในกระบวนการทรานซิชันระหว่างระดับพลังงานต่างๆ ดังความสัมพันธ์ (Studenikin, 1998; Johnson, 1996)

$$\tau_r = \tau_{ro} \exp\left(\frac{E_t}{kT} \right) \quad (2.63)$$

$$\ln \tau_r = \ln \tau_{ro} + \left(\frac{E_t}{k} \right) \left(\frac{1}{T} \right) = \ln \tau_{ro} + \frac{E_t}{(1,000k)} \left(\frac{1,000}{T} \right)$$

เมื่อ

$$\text{ความชื้น} = \frac{E_i}{(1,000)k}$$

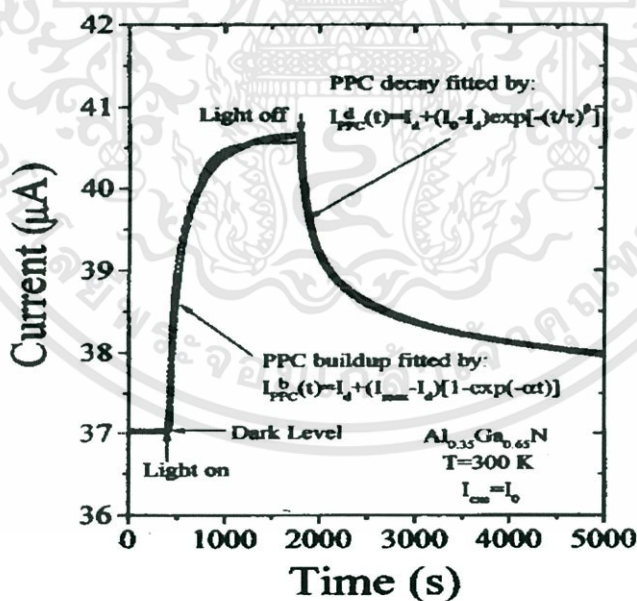
$$\text{ดังนั้น} \quad E_i = \frac{(1,000)k(\text{ความชื้น})}{q} = (0.086)(\text{ความชื้น}) \quad \text{อิเล็กตรอนโวลต์} \quad (2.64)$$

ในการศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงต้องรับจะต้องมีการฉายแสงให้กับสารตัวอย่าง จะได้ว่ากระแสโฟโต (I_p) จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลา (t) ดังรูปที่ 2.29 ซึ่งจะเรียกว่าเป็นกระแสโฟโตขาขึ้น (rise current) ดังความสัมพันธ์ (Ghosh, 2007)

$$I_p = I_o \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_r}\right) \right] \quad (2.65)$$

เมื่อ I_o คือกระแสเริ่มต้นของกระแสโฟโตขาขึ้น (เมื่อ $t=0$) หลังจากหยุดการฉายแสง กระแสโฟโตจะลดลงตามเวลา (t) ซึ่งจะเรียกว่าเป็นกระแสโฟโตขาลง (decay current) จะแสดงดังความสัมพันธ์ (Ghosh, 2007)

$$I_p = I_o' \exp\left(-\frac{t}{\tau_d}\right) \quad (2.66)$$



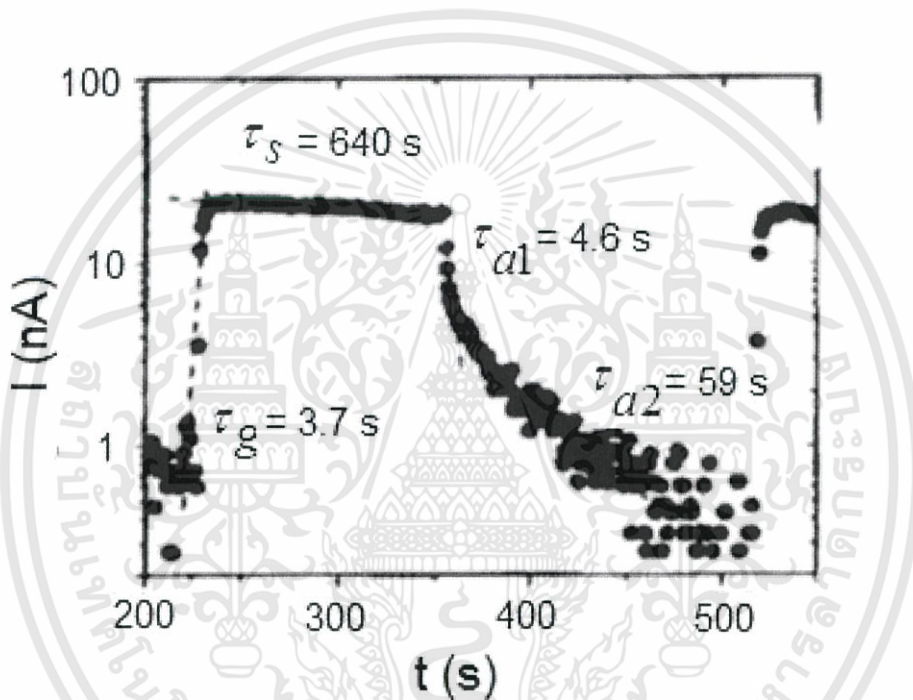
รูปที่ 2.22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสโฟโตขาขึ้น กับ ค่ากระแสโฟโตขาลงของค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงดีอาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.66) สามารถเขียนใหม่ได้ว่า

$$\ln I_p = \ln I_o - \frac{t}{\tau_d} \quad (2.67)$$

ความชันของกราฟคือ $\frac{1}{\tau_d}$ ดังนั้น ช่วงชีวิตขาลงจะคำนวณได้จากส่วนกลับของความชันของกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln I_p$ กับ t ในทำนองเดียวกันช่วงชีวิตขาขึ้นก็สามารถที่จะคำนวณได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ t (ดังรูปที่ 2.26) ได้ด้วยเช่นเดียวกัน



รูปที่ 2.23 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ t ของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงตัวรับทั้งช่วงกระแสโฟโตขาขึ้นและช่วงกระแสโฟโตขาลง

ในทางปฏิบัติช่วงชีวิตมีได้หลายค่า เนื่องจากกับดักพาหะมีหลายชนิด ดังนั้นกระแสโฟโตขาลงของฟิล์มบางที่ใช้หาค่าช่วงชีวิต 2 ค่า สามารถที่จะเขียนใหม่ได้ ดังนี้ คือ (Huang, 2011; Gu, 2005)

$$|I_p| = e\mu\left(\frac{w}{l}\right)V_a\sigma_{r1}\exp\left(-\frac{t}{\tau_{d1}}\right) + e\mu\left(\frac{w}{l}\right)V_a\sigma_{r2}\exp\left(-\frac{t}{\tau_{d2}}\right) \quad (2.68)$$

เพื่อให้ τ_{d1} และ τ_{d2} มีค่าถูกต้องมากขึ้น อาจดัดแปลงสมการ ให้อยู่ในรูปของฟังก์ชัน สเตรตเอ็กซ์โพเนนเชียล (stretched exponential function) ดังนี้คือ (Ghaffarzadeh, 2010; Luo, 2013; Guo, 2013)

$$|I_p| = e\mu \left(\frac{w}{l} \right) V_a \sigma_{i1} \exp\left(-t/\tau_{d1}\right) + e\mu \left(\frac{w}{l} \right) V_a \sigma_{i2} \exp\left[-\left(t/\tau_{d2}\right)^\beta\right] \quad (2.69)$$

จากสมการ สามารถที่จะหาค่า σ_{i1} และ σ_{i2} ได้ในรูปแบบเดียวกับสมการ ดังนี้คือ

$$\sigma_{i1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{w} \right) \exp\left(t/\tau_{d1}\right) \quad (2.70)$$

$$\sigma_{i2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{w} \right) \exp\left(t/\tau_{d2}\right) \quad (2.71)$$

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

$$\sigma_{i1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{w} \right) \quad (2.72)$$

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

(2.73)

สมการที่ (2.69) สามารถที่จะทำนอร์มัลไลเซชัน (normalization) ได้ดังนี้ คือ

$$|I_p| = A_1 \exp\left(-t/\tau_{d1}\right) + A_2 \exp\left[-\left(t/\tau_{d1}\right)^\beta\right] \quad (2.74)$$

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

ในกรณีกระแสโตะขาขึ้น (rise current) ก็สามารถที่จะพิจารณาให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันสเตรตเอ็กซ์โพเนนเชียลได้ด้วยเช่นกัน ดังสมการ

$$|I_p| = A_1' \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{r1}}\right) \right] + A_2' \left\{ 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau_{r1}}\right)^\beta\right] \right\} \quad (2.75)$$

ส่วนกรณีของขึ้นสารที่เป็นเม็ดเซรามิก กระแสโตะขณะกลางสามารถจะเขียนใหม่ ได้ดังนี้คือ

$$|I_p| = e\mu \left(\frac{wd}{l}\right) V_a N_{i1} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{d1}}\right) + e\mu \left(\frac{wd}{l}\right) V_a N_{i2} \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau_{d2}}\right)^\beta\right] \quad (2.76)$$

จากสมการ สามารถที่จะหาค่า

$$N_{i1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{wd}\right) \exp\left(\frac{t}{\tau_{d1}}\right) \quad (2.77)$$

$$N_{i2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{wd}\right) \exp\left(\frac{t}{\tau_{d2}}\right) \quad (2.78)$$

กับดักพาหะทั้งสองชนิดนี้สามารถที่จะจับหรือปล่อยพาหะอิสระได้อย่างเป็นอิสระซึ่งกันและกัน ถ้ากำหนดให้ I_1 และ I_2 คือกระแสเริ่มต้น ($t=0$) ที่เกี่ยวกับกับดักพาหะทั้งสองตามลำดับจะได้ว่า

$$N_{i1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{wd}\right) \quad (2.80)$$

$$N_{i2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{wd}\right) \quad (2.81)$$

จากสมการ สามารถที่จะทำนอร์มัลไลเซชัน (normalization) ได้ดังนี้คือ

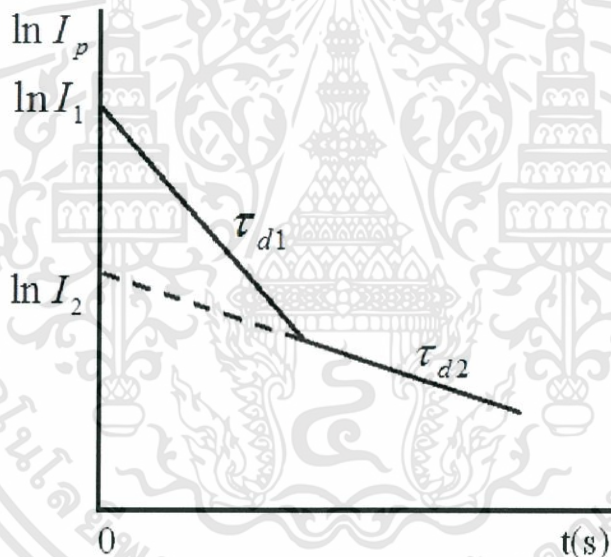
$$|I_p| = A_1'' \exp\left(-\frac{t}{\tau_{d1}}\right) + A_2'' \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau_{d2}}\right)^\beta\right] \quad (2.82)$$

ซึ่ง A_1'' และ A_2'' สามารถหาได้จากการพิทกราฟของผลการทดลอง ในกรณีกระแสไฟโตชาขึ้นก็สามารถที่จะพิจารณาให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันสเตรตเอ็กซ์โพเนนเชียลได้ด้วยเช่นกันดังสมการ

$$|I_p| = A_1''' \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{d1}}\right)\right] + A_2''' \left[1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau_{d2}}\right)^\beta\right]\right] \quad (2.83)$$

2.7.1 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกักพาหะในช่วงกระแสไฟโตชาลง

การหาค่าความหนาแน่นของกักพาหะในช่วงกระแสไฟโตชาลงจะอาศัยกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ t ดังรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ t เพื่อใช้คำนวณหา ค่าความหนาแน่นของกักพาหะในช่วงกระแสไฟโตชาลง

ค่า τ_{d1} หาได้จากความชันของกราฟ

$$\ln I_p = -\frac{t}{\tau_{d1}} + \ln I_1 \quad (2.84)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$\sigma_{r1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{w} \right) \quad (2.85)$$

บางครั้งมีการเลือกใช้กราฟ $\log I_p$ แทน $\ln I_p$ โดยที่ $\ln I_p = 2.3 \log I_p$ ในทำนองเดียวกัน τ_{d2} สามารถหาได้จากความชันของกราฟ

$$\ln I_p = -t/\tau_{d2} + \ln I_2 \quad (2.86)$$

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

$$\sigma_{r2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{w} \right) \quad (2.87)$$

สำหรับกรณีของความหนาแน่นพาหะของชั้นสารเช่นในเม็ดเซรามิก ก็สามารถใช้สูตร

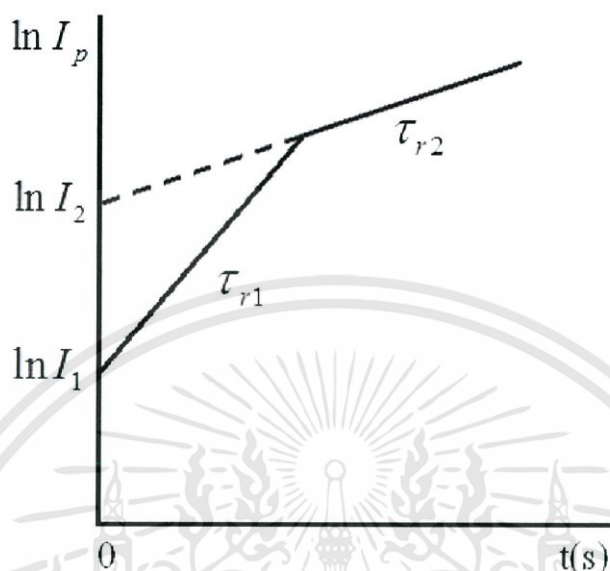
$$N_{r1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{wd} \right) \quad (2.88)$$

และ

$$N_{r2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{wd} \right) \quad (2.89)$$

2.7.2 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกักพาหะในช่วงกระแสไฟโตชาขึ้น

การหาค่าความหนาแน่นของกักพาหะในช่วงกระแสไฟโตชาขึ้น โดยอาศัยกราฟ $\ln I_p$ กับ t ดังรูปที่ 2.28



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

กระแสชาขึ้นอาจแสดงได้ดังสมการง่ายๆ ดังนี้คือ

$$I = I_{\max} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right] \quad (2.90)$$

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

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

$$\ln \left[1 - \frac{I}{I_{\max}} \right] = -\frac{t}{\tau_r} \quad (2.91)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ถ้า $\frac{I}{I_{\max}} \ll 1$ สมการที่ (2.89) จะประมาณได้ว่าเป็น

$$\frac{I}{I_{\max}} = t/\tau_r \quad (2.92)$$

ข้อสังเกตคือสมการที่ (2.89) จะใช้ได้จริงเมื่อ $\frac{I}{I_{\max}} \ll 1$ ก็คือช่วงแรกๆ ของกราฟกระแสขาขึ้น

ส่วนช่วงท้ายๆ ของกราฟความถูกต้องจะลดลง การคำนวณหาค่าความหนาแน่นของกักพาหะทั้งชนิดฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำและเซรามิกจะใช้สมการที่ได้เช่นเดียวกับกระแสขาลง

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

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

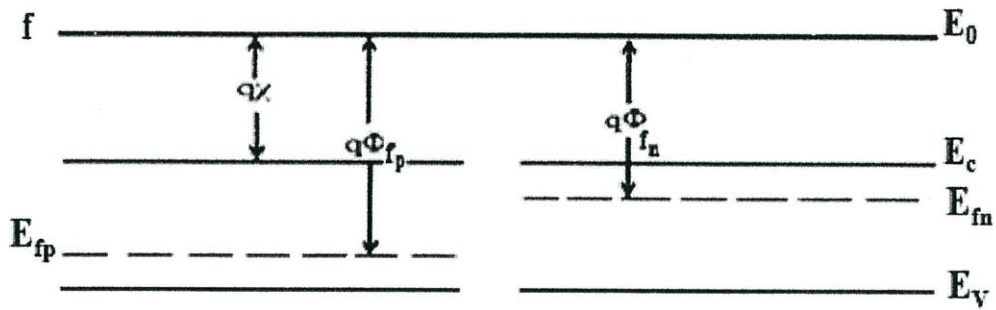
2.8.1 รอยต่อของสารกึ่งตัวนำที่เป็นแบบพี-เอ็น เมื่ออยู่ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน

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

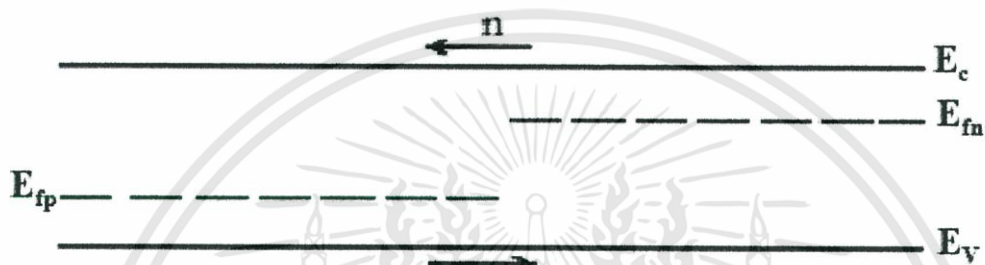
ของอะตอมผู้รับซึ่งมีประจุเป็นลบปรากฏอยู่ ยังส่งผลให้เกิดสนามไฟฟ้าที่รอยต่อโดยที่สนามไฟฟ้ามีทิศจากทางสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นไปทางสารกึ่งตัวนำชนิดพี ดังนั้นการแพร่ซึมของโฮลและอิเล็กตรอนจะลดลงเนื่องจากอิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่ต้านการแพร่ซึมบริเวณรอยต่อนี้จึงปลอดจากพาหะอิสระและเรียกบริเวณนี้ว่าเขตปลอดพาหะ(depletion region) หรือบางครั้งเรียกว่า บริเวณประจุค้าง (space charge region) เนื่องจากมีประจุของไอออนสารเจืออยู่ซึ่งเป็นประจุที่ถูกต้องอยู่กับที่ (fixed charge) ไม่ใช่ประจุอิสระ

ลักษณะการแพร่ซึมของอิเล็กตรอนและโฮลที่รอยต่ออาจแสดงได้โดยแผนภาพลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานดังรูปที่ 2.29 โดยที่รูป 2.29 (ก) แสดงลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดที่ยังไม่ได้สัมผัสกันเป็นรอยต่ออวิวิธพันธุ์ รูปที่ 2.29 (ข) แสดงลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดที่ถูกนำมาทำเป็นรอยต่ออวิวิธพันธุ์ ซึ่งจะเกิดการแพร่ของอิเล็กตรอนและโฮล จนกระทั่งเข้าสู่ภาวะสมดุลเชิงความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 2.29 (ค) โดยที่ ϕ คือศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อ และ ξ คือสนามไฟฟ้าที่รอยต่อ

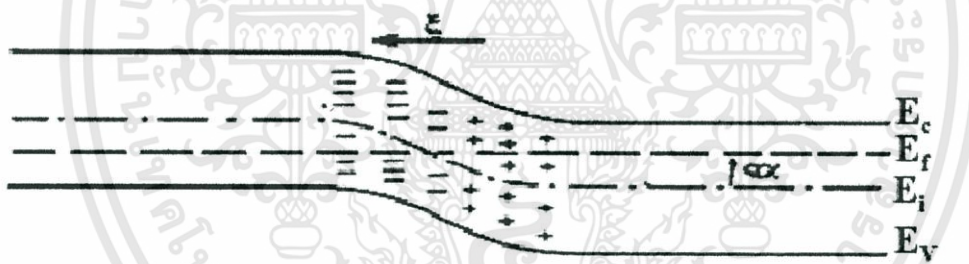




(ก)



(ข)



(ค)

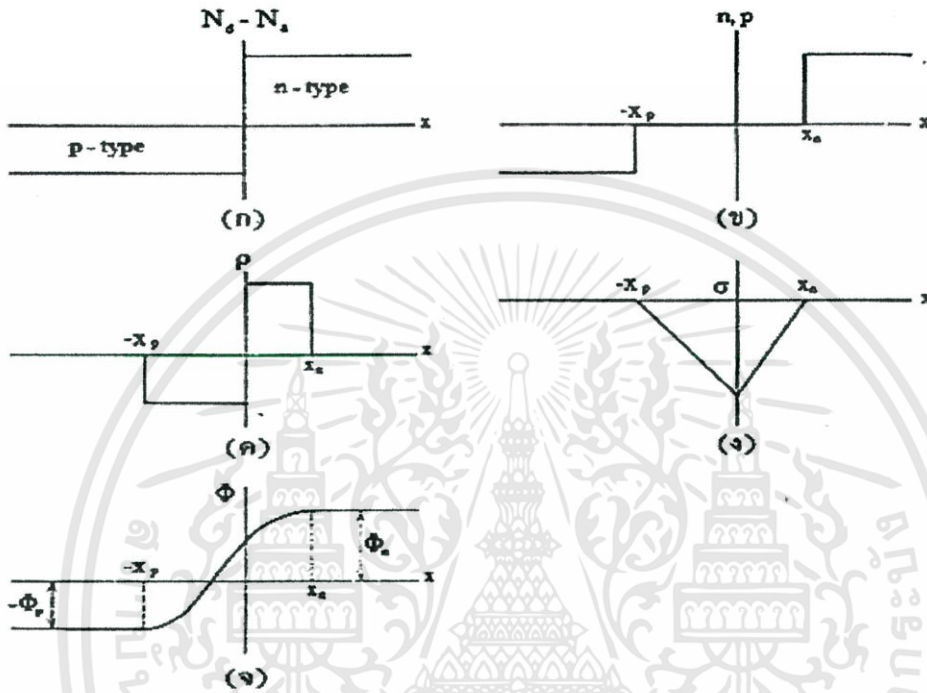
รูปที่ 2.26 แสดงลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำที่เป็นแบบพี-เอ็น

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.2 รอยต่อของสารกึ่งตัวนำที่เป็นแบบชั้นบันได

รอยต่อแบบชั้นบันได (step junction) เป็นรอยต่อในเชิงอุดมคติ ที่พิจารณาว่า ปริมาณความเข้มข้นของสารเจือในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและทางสารกึ่งตัวนำชนิดพีต่างมีค่าคงที่ (แต่ค่าไม่เท่ากัน) จนกระทั่งถึงจุดเชื่อมต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นกับสารกึ่งตัวนำชนิดพี ดังแสดงในรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.27 แสดงไดโอดที่มีรอยต่อวิธีพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำที่เป็นแบบพี-เอ็น ในกรณีที่แบบชั้นบันไดที่เป็นฟังก์ชันกับระยะทาง

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

ประจุไฟฟ้าจะมีค่าไม่เป็นศูนย์เฉพาะที่บริเวณเขตปลอดพาหะ จะหาสนามไฟฟ้าทางสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นได้โดยใช้สมการของปัวซอง (Poisson's equation) นั่นคือ

$$\frac{d^2\phi}{dx^2} = \frac{-d^2\xi}{dx} = \frac{-qN_d}{\epsilon_s} \quad (2.93)$$

แล้ว

$$\xi(x) = \frac{-qN_d}{\epsilon_s}(x_n - x); 0 < x < x_n \quad (2.94)$$

สนามไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นมีเครื่องหมายเป็นลบ แสดงว่ามีทิศไปทางซ้ายมือและสัมพันธ์กับระยะทางแบบเชิงเส้นและสิ้นสุดที่ระยะทาง x_n ดังนั้นสนามไฟฟ้าจะต้านการแพร่ซึมของอิเล็กตรอนที่จะแพร่ซึมจากขวาไปซ้าย ในทำนองเดียวกันสนามไฟฟ้าทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพี จะมีความสัมพันธ์กับระยะทางแบบเชิงเส้นดังนี้

$$\xi(x) = \frac{-qN_a}{\epsilon_s}(x - x_p); x_p < x < 0 \quad (2.95)$$

ซึ่งสนามไฟฟ้าทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพีจะมีทิศต้านทางการแพร่ของโฮลด้วยเหมือนกันที่ระยะ $x=0$ สนามไฟฟ้าจะต้องต่อเนื่อง นั่นคือ

$$N_a x_p = N_d x_n \quad (2.96)$$

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

ศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นสามารถหาได้โดยการอินทิเกรต สมการที่ 2.91 เทียบกับ x นั่นคือ

$$\phi(x) = \frac{-qN_d}{\epsilon_s}(x_n - x)^2; 0 < x < x_n \quad (2.97)$$

โดยที่
$$\phi_n = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_d}{n_i} \right) \quad (2.98)$$

ในทำนองเดียวกันศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพี คือ

$$\phi(x) = \phi_p + \frac{qN_a}{\epsilon_s} (x - x_p)^2; -x_p < x < 0 \quad (2.99)$$

โดยที่
$$\phi_p = -\frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_a}{n_i} \right) \quad (2.100)$$

คือศักย์ไฟฟ้าในเนื้อของสารกึ่งตัวนำชนิดพีนอกเขตปลอดพาหะอิสระและมีค่าเป็นลบผลต่างของศักย์ไฟฟาระหว่าง $\phi_n - \phi_p$ จะมีค่าดังนี้คือ

$$\phi_i = \phi_n - \phi_p = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_d}{n_i} \right) + \left(\frac{kT}{q} \right) \ln \left(\frac{N_a}{n_i} \right) = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_d N_a}{n_i} \right) \quad (2.101)$$

และเรียก ϕ_i ว่าแรงดันในตัว (built-in potential) ซึ่งจะมีเครื่องหมายเป็นบวก

ในกรณีที่มีการเจือสารด้วยความเข้มข้นสูงมาก 10^{19} ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร สมการที่ 2.99 จะไม่เป็นจริงอีกต่อไป เพราะว่าการเจือสารอย่างสูงเราจะประมาณฟังก์ชันการแจกแจงของเฟอร์มิ-ดิแรก ด้วยฟังก์ชันการแจกแจงของแม็กเวลล์-โบลต์ซมานน์ไม่ได้ เนื่องจากระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำจะเลื่อนเข้าหาขอบของแถบพลังงาน(ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี ระดับเฟอร์มิจะเลื่อนเข้าหาขอบบนสุดของแถบวาเลนซ์ เป็นต้น) นั่นคือระดับเฟอร์มิของสารที่ถูกเจืออย่างหนัก จะเลื่อนไปจากระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำอินทรินสิกเท่ากับ $E_g/2q$ หรือราวๆ 0.56 อิเล็กตรอนโวลต์ ในอะตอมของธาตุ Si ดังนั้นในรอยต่อของสารกึ่งตัวนำที่เป็นแบบ p-n ศักย์ในตัวจะมีค่าดังนั้นคือ

$$|\phi_i| = 0.56 + \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_d}{n_i} \right) \quad (2.102)$$

และที่บริเวณเขตปลอดพาหะเกือบทั้งหมดจะปรากฏในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นของหัวต่อแต่ถ้าเป็นหัวต่อพี-เอ็นปกติ จะพบว่าความกว้างของบริเวณเขตปลอดพาหะคือ

$$x_p + x_n = \left[\frac{2\epsilon_s}{q} \phi_i \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.103)$$

ซึ่งจะเห็นได้ชัดว่าความกว้างของบริเวณเขตปลอดพาหะขึ้นกับส่วนกลับของรากที่สองของความเข้มข้นของสารเจือโดยประมาณ

2.8.3 รอยต่อของสารกึ่งตัวนำที่เป็นแบบพี-เอ็น ภายใต้สภาวะการไบอัสย้อนกลับ

(Kittel, 2005; งามนิตย์, 2530; ฐิตินัย, 2531; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2550;

ฐิตินัย, 2552; Runyan, 1975; สุกฤษฏ์, 2547; สมเกียรติ, 2542)

ถ้าให้แรงดันไฟฟ้า V_a แก่รอยต่อในลักษณะที่ขั้วลบต่อเข้ากับสารกึ่งตัวนำชนิดพีและขั้วบวกต่อเข้ากับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และประมาณว่าแรงดัน V_a ทั้งหมดไปตกคร่อมอยู่ที่บริเวณรอยต่อดังนั้น แรงดันในตัว ϕ_i ของสมการที่ 2.101 จะถูกแทนที่ด้วย $(\phi_i - V_a)$

$$x_d = x_p + x_n = \left[\frac{2\epsilon_s}{q} \phi_i \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right) (\phi_i - V_a) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.104)$$

ถ้า V_a มีค่ามากกว่า ϕ_i แล้วความกว้างของเขตบริเวณเขตปลอดพาหะจะแปรผันตรงกับรากที่สองของ V_a จากรูปที่ 2.29 d. สนามไฟฟ้ามีค่าสูงสุดเมื่อ

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

ดังนั้น

$$\xi_{\max} = \frac{2(\phi_i - V_a)}{x_d} \quad (2.105)$$

2.9 ค่าความจุไฟฟ้า (Kittel, 2005; งามนิตย์, 2530; ฐิตินัย, 2531; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2552; Runyan, 1975; สุกฤษฏ์, 2547; สมเกียรติ, 2542; ฐิตินัย, 2552; วีรชัย, 2547; ดุสิต, 2535)

ค่าความจุไฟฟ้าของสัญญาณขนาดเล็กต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของบริเวณรอยต่อจะแสดงอยู่ในรูปของประจุ Q_s (ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่) ในบริเวณเขตปลอดพาหะ ดังความสัมพันธ์

$$Q_s = qN_d x_n = qN_a x_p \quad (2.106)$$

จากนิยามของค่าความจุไฟฟ้าคือ

$$C = \frac{dQ}{dV_a} = qN_d \frac{dx_n}{dV_a} = qN_a \frac{dx_p}{dV_a} \quad (2.107)$$

แต่เนื่องจาก $x_p = (N_d/N_a)$ และ $x_d = x_n + x_p$ รวมทั้งพิจารณาสมการที่ 2.102 จะได้

$$\frac{dx_n}{dV_a} = \frac{1}{N_d} \left[\frac{\epsilon_s}{2q \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right) (\phi_i - V_a)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.108)$$

และ

$$C = \left[\frac{\epsilon_s}{2q \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right) (\phi_i - V_a)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.109)$$

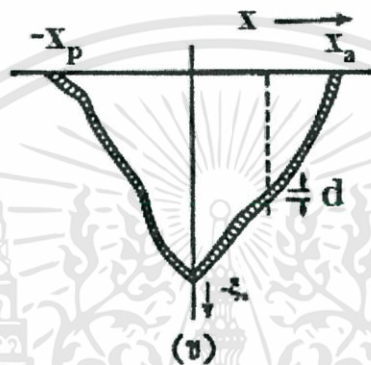
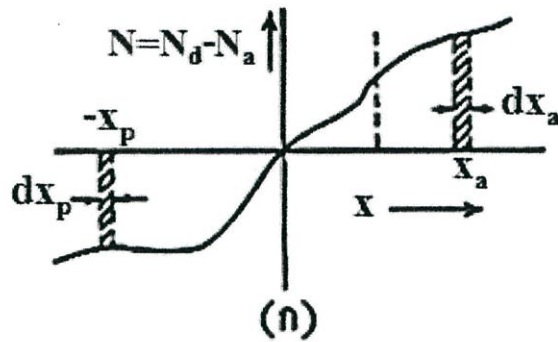
ในกรณีที่ $|V_a|$ มีค่ามากกว่า ϕ_i แล้วค่า ความจุไฟฟ้าของรอยต่อแบบชั้นจะลดลงโดยแปรผกผันกับรากที่สองของ V_a ถ้าแทนสมการที่ 2.101 ลงในสมการที่ 2.106 จะได้ว่า $C = \epsilon_s/x_d$ ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ที่รู้จักกันแพร่หลายสำหรับไฟฟ้าสถิตขนาดเล็ก

อย่างไรก็ตาม ถ้าเป็นกรณีที่ความหนาแน่นของสารเจือในบริเวณรอยต่อมีค่าไม่สม่ำเสมอในช่วง $-x_p$ ถึง x_d ดังรูปที่ 2.30 ประจุไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ Q ที่ปรากฏอยู่ระหว่าง x และขอบเขตบริเวณปลอดพาหะ x_n จะมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$Q = q \int_x^{x_n} N dx \quad (2.110)$$

เมื่อ N คือความหนาแน่นของประจุสุทธิ และมีค่าเท่ากับ $N_d - N_a$ แต่เนื่องจาก $\zeta_x(x_n) = 0$ โดยใช้กฎของเกาส์(Gauss's law) จะได้ว่าสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่ง x ใดๆมีค่าดังนี้คือ

$$\zeta(x) = \frac{1}{\epsilon_s} \int_x^{x_n} qN dx = \frac{q}{\epsilon_s} \quad (2.111)$$



รูปที่ 2.28 แสดงโปรไฟล์ของค่าพารามิเตอร์ต่างๆในบริเวณเขตปลอดพาหะ

- ก. แสดงการกระจายความหนาแน่นอะตอมของสารเจือที่มีค่าไม่สม่ำเสมอภายในเขตปลอดพาหะ
- ข. ลักษณะของสนามไฟฟ้าในบริเวณเขตปลอดพาหะเมื่อแรงดันไบอัสย้อนกลับมีค่าเปลี่ยนไปเล็กน้อย

จากรูปที่ 2.31 (ข) เมื่อแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ V_a มีค่าเปลี่ยนไป dV_a ขอบเขตบริเวณปลอดพาหะทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะเปลี่ยนไป dx_n และประจุไฟฟ้าที่ปรากฏอยู่ในบริเวณ ตั้งแต่ x จนถึง x_n จะมีค่าดังนี้คือ

$$dQ = qN(x_n)dx_n \quad (2.112)$$

แล้วสนามไฟฟ้าที่จุด x จะเปลี่ยนไปตามความสัมพันธ์

$$-d\xi_x = \frac{dQ}{\epsilon_s} = \frac{q}{\epsilon_s} N(x_n)dx_n \quad (2.113)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่เนื่องจากพื้นที่กราฟ ξ_x กับ x จะสัมพันธ์กับ $\phi - V_a$ ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปจะสอดคล้องกับพื้นที่แรของรูปที่ 2.31 (ข) ดังนั้นจะได้ว่า

$$dV_a \approx -x_d d\xi_x = \frac{x_d}{\epsilon_s} dQ \quad (2.114)$$

และจากนิยาม ค่าความจุไฟฟ้าของสัญญาณขนาดเล็ก คือ

$$C = \frac{dQ}{dV_a} = \frac{\epsilon_s}{x_d} \quad (2.115)$$

ภายใต้สภาวะไบอัสย้อนกลับ บริเวณขอบเขตปลอดพาหะทั้งด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพีและด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะเลื่อนออกไปจากแนวเดิม สำหรับอนุพันธ์ของสมการที่เทียบกับ x_n คือ

$$\frac{dC}{dx_n} = \frac{\epsilon_s}{(x_n + x_p)} \left(1 + \frac{dx_p}{dx_n} \right) \quad (2.116)$$

แต่เนื่องจากขนาดของประจุไฟฟ้าทั้งสองข้างของบริเวณรอยต่อที่เปลี่ยนไปต้องมีปริมาณที่เท่ากัน

นั่นคือ $|dQ| = |qN(-x_p)dx_p = qN(x_n)dx_n| \quad (2.117)$

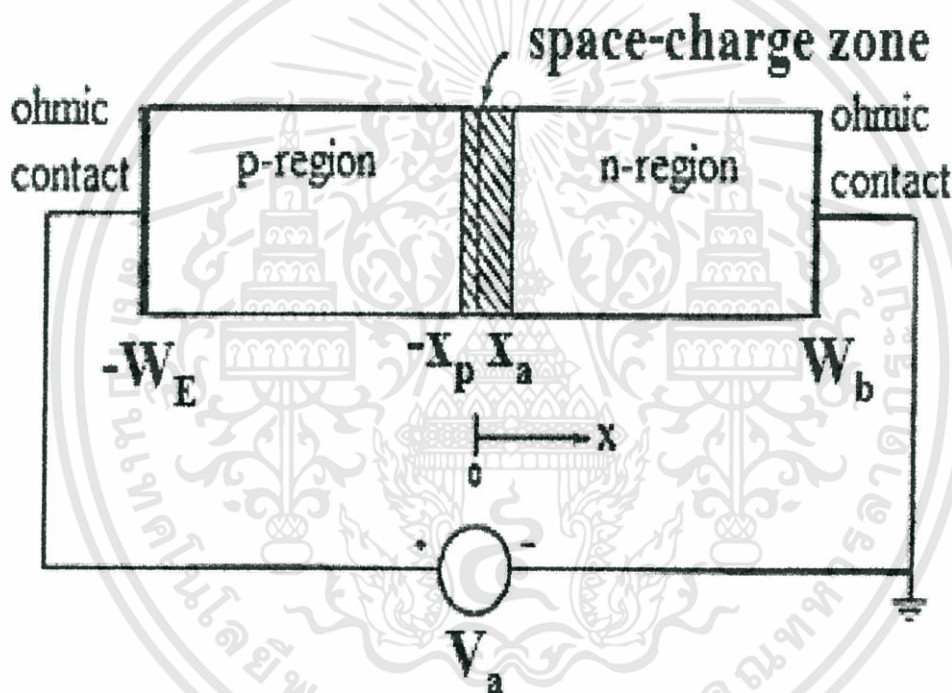
และ $\frac{dC}{dx_n} = \frac{-C^2}{\epsilon_s} \left(1 + \frac{N(x_n)}{|N(-x_p)|} \right) \quad (2.118)$

แทนค่า dx_n ของสมการที่ 2.165 ลงในสมการที่ 2.110 จะได้ว่า

$$N(x_n) = \frac{C^2}{\epsilon_s (dC/dV_a)} \left(1 + \frac{N(x_n)}{|N(-x_p)|} \right) \quad (2.119)$$

ถ้าด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพีถูกเจืออย่างหนัก แล้วพจน์ขวามือในวงเล็บของสมการที่ 2.116 จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งจะกลายเป็นการหาค่าความเข้มข้นสารเจือของรอยต่อแบบขั้นข้างเดียว (one sided step junction)

2.10 ลักษณะเฉพาะของค่ากระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า ของรอยต่อของสารกึ่งตัวนำที่เป็นแบบพี-เอ็น (Kittel, 2005; งามนิตย์, 2530; จูตินัย, 2531; งามนิตย์, 2545; จูตินัย, 2550; จูตินัย, 2552; Runyan, 1975; สุกฤษฎ์, 2547; สมเกียรติ, 2542) จากรูปที่ 2.31 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 เงื่อนไขขอบเขตของความเข้มข้นของพาหะข้างน้อย(Kittel, 2005; งามนิตย์, 2530; ฐิตินัย, 2531; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2552; Runyan, 1975; สุกฤษฏ์, 2547; สมเกียรติ, 2542; ฐิตินัย, 2552; วีรชัย, 2547; ดุสิต, 2535)

ภายใต้เงื่อนไขการฉีดกระแสระดับต่ำ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่ขอบของเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่ติดกับรอยต่อพี-เอ็น คือที่ระยะ x_n จะเท่ากับความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือไม่ว่าจะอยู่ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อนหรือภายใต้การไบอัสก็ตาม นั่นคือ $(x_n) = N_d(x_n)$ ในทำนองเดียวกันความหนาแน่นของโฮลที่ขอบของเนื้อสารชนิดกึ่งตัวนำชนิดพีที่ระยะ $-x_p$ จะมีค่า $n_{no}(-x_p) = N_d(-x_p)$ ดังนั้นจะสรุปได้ว่า

$$\begin{aligned} n_{po}(-x_p) &= n_{no}(-x_n) \exp\left(\frac{-q\phi_i}{kT}\right) \\ &= N_d(x_n) \exp\left(\frac{-q\phi_i}{kT}\right) \end{aligned} \quad (2.120)$$

$$\begin{aligned} p_{po}(x_n) &= p_{po}(-x_{pn}) \exp\left(\frac{-q\phi_i}{kT}\right) \\ &= N_a(-x_p) \exp\left(\frac{-q\phi_i}{kT}\right) \end{aligned} \quad (2.121)$$

ภายใต้การไบอัสด้วยแรงดันตามเงื่อนไขการฉีดพาหะระดับต่ำ จะได้

$$n_p(-x_p) = N_d(x_n) \exp\left(\frac{-q\phi_i - V_a}{kT}\right) \quad (2.122)$$

และ

$$p_n(x_n) = N_a(-x_p) \exp\left(\frac{-q\phi_i - V_a}{kT}\right) \quad (2.123)$$

นิยามความหนาแน่นของอิเล็กตรอนส่วนเกิน และความหนาแน่นของโฮลส่วนเกิน p' ที่เกิดขึ้นคือ

$$n' \equiv n - n_0 \quad (2.124)$$

$$p' \equiv p - p_0 \quad (2.125)$$

แล้ว

$$n'_p(-x_p) = n_{po}(-x_p) \left[\exp\left(\frac{-qV_a}{kt}\right) - 1 \right] \quad (2.126)$$

และ

$$p'_p(x_n) = p_{no}(x_n) \left[\exp\left(\frac{-qV_a}{kt}\right) - 1 \right] \quad (2.127)$$

2.12 การวิเคราะห์ไดโอดออคมคติ (Kittel, 2005; งามนิตย์, 2530; ฐิตินัย, 2531; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2552; Runyan, 1975; สุกฤษฏ์, 2547; สมเกียรติ, 2542; ฐิตินัย, 2552; วีรชัย, 2547; ดุสิต, 2535)

ในเบื้องต้นจะพิจารณาการฉีดโฮลจากด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพีข้ามรอยต่อเข้าไปในเนื้อสารของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นแล้วรวมตัวกับอิเล็กตรอนโดยผ่านศูนย์กลางการรวมตัว ดังนั้นสมการ ความต่อเนื่องในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นนอกรอยต่อคือ

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_n}{\partial t} &= D_p \frac{\partial^2 p_n}{\partial x^2} - (G - R) \\ &= D_p \frac{\partial^2 p_n}{\partial x^2} - U \end{aligned}$$

แต่จากสมการ

$$U = p'_n / \tau_p = (p_n - p_{no}) / \tau_p$$

ดังนั้น

$$\frac{\partial p_n}{\partial t} = D_p \frac{\partial^2 p_n}{\partial x^2} - \left(\frac{p_n - p_{no}}{\tau_p} \right) \quad (2.128)$$

ในสภาวะคงตัว $\frac{\partial p}{\partial t} = 0$ แล้ว จะได้สมการเป็น

$$0 = D_p \frac{d^2 p'_n}{dx^2} - \frac{p'_n}{\tau_p} \quad (2.129)$$

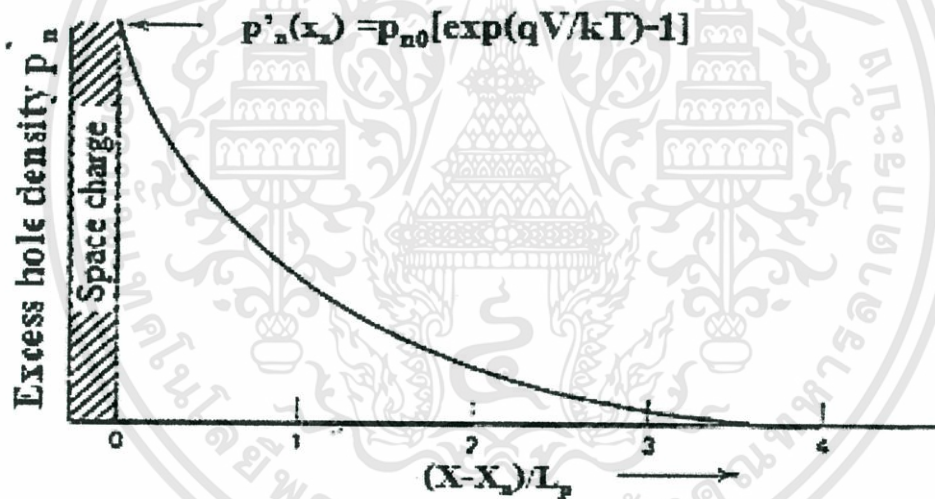
ผลเฉลยของสมการที่ 2.128 คือ

$$p'_n(x) = A \exp\left(-\frac{(x-x_n)}{\sqrt{D_p \tau_p}}\right) + B \exp\left(-\frac{(x-x_n)}{\sqrt{D_p \tau_p}}\right) \quad (2.130)$$

2.12.1 ลักษณะสมบัติของไดโอดยาว (long-base diode characteristics)

จากรูปที่ 2.30 ถ้า W_b มีความยาวมากกว่าความยาวแพร่ซึมของโฮล $L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$ ในกรณีที่โฮลที่ถูกฉีดเข้ามาในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะรวมตัวกับอิเล็กตรอนจนหมดก่อนที่จะถึงขั้วไฟฟ้า จะเรียกรณีนี้อันว่าไดโอดยาว เนื่องจาก p'_n ควรจะต้องมีค่าน้อยลงตามระยะทาง x ที่เพิ่มขึ้นด้วยเหตุผลนี้ค่าคงตัว B ในสมการที่ 2.127 จะต้องเป็นศูนย์ ดังนั้น

$$p'_n(x) = p_{n0} [e^{(qV/kT)} - 1] e^{-(x-x_p)/L_p} \quad (2.131)$$

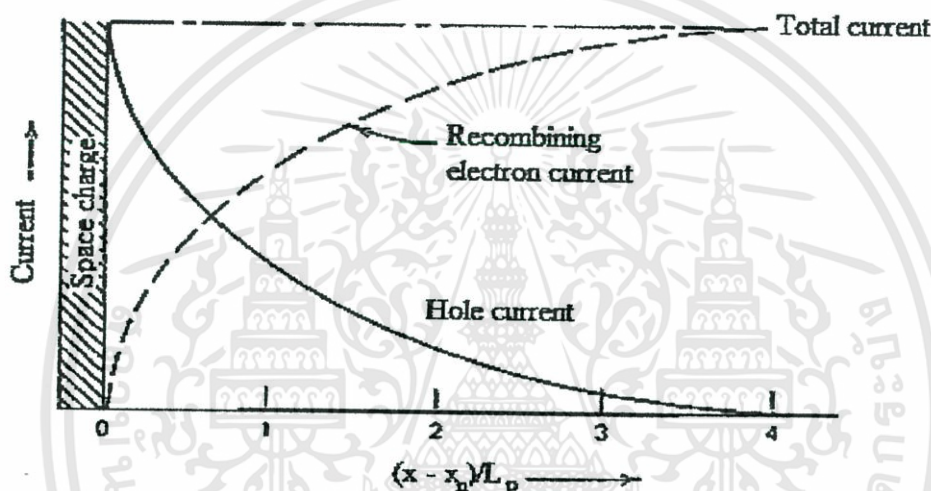


รูปที่ 2.30 แสดงการลดลงของค่าความหนาแน่นของโฮลส่วนเกินในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ของไดโอดของสารกึ่งตัวนำที่มีรอยต่อแบบพี-เอ็น ในกรณีที่เป็ไดโอดยาวที่อยู่ภายใต้การฉีดพาหะระดับต่ำด้วยแรงดันไบอัสไปข้างหน้ามีค่าเท่ากับ V_a

ความหนาแน่นของกระแสโฮลที่ไหลในเนื้อสาร จะคิดเฉพาะกระแสที่มาจากกลไกการแพร่ซึมเท่านั้น เนื่องจากถือว่าแรงดันตกคร่อมในเนื้อสารมีค่าน้อยมาก สนามไฟฟ้าจึงมีค่าเป็นศูนย์ จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
 J_p(x) &= -qD_p \frac{d^2 p'_n}{dx^2} = qD_p \frac{p_{no}}{L_p} \left[e^{(qV_a/kT)} - 1 \right] e^{-(x-x_n)/L_p} \\
 &= qD_p \frac{n_i^2}{N_d L_p} \left[e^{(qV_a/kT)} - 1 \right] e^{-(x-x_n)/L_p}
 \end{aligned} \tag{2.132}$$

กระแสโฮลจะมีค่าสูงสุดที่ระยะ $x=x_n$ เมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นแล้วความหนาแน่นของโฮลจะลดลง เนื่องจากรวมตัวกับอิเล็กตรอน แต่กระแสสุทธิจะต้องคงที่เสมอ ดังนั้นกระแสอิเล็กตรอนจะต้องมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะทาง x เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.34



รูปที่ 2.31 แสดงกระแสโฮล(เส้นทึบ) กับ กระแสอิเล็กตรอน(เส้นประ) ในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นซึ่งอยู่นอกรอยต่อพี-เอ็น ซึ่งประมาณว่าเป็นกลางทางไฟฟ้า(quasi-neutral region) เนื่องจากประมาณว่าไม่ได้รับผลกระทบจากแรงดันไบอัสไปหน้า V_a

ในการทำงานเดียวกันอิเล็กตรอนที่ถูกฉีดเข้าไปในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดพีรอยต่อพี-เอ็น อิเล็กตรอนจะกลายเป็นพาหะข้างน้อย จึงเรียกว่าการฉีดพาหะข้างน้อย (minority-carrier injection) ถ้า $W_E \gg L_n$ กระแสของอิเล็กตรอนที่ขั้วไฟฟ้าที่ตำแหน่ง $-W_E$ คือ

$$J_n(x) = qD_n \frac{n_i^2}{N_a L_n} \left[e^{(qV_a/kT)} - 1 \right] e^{-(x-x_n)/L_p} \tag{2.133}$$

โดยที่ x ในสมการที่ 2.134 จะมีเครื่องหมายเป็นลบ นั่นคือกระแสอิเล็กตรอนจะลดลงเมื่อ x ออกห่างจากรอยต่อพี-เอ็น ไปสู่นิวาสารกึ่งตัวนำชนิดพีมากขึ้น กระแสสุทธิจะหาได้จากการนำเอาสมการที่ 2.132 รวมกับสมการที่ 2.133 นั่นคือ

$$\begin{aligned} J_t &= J_p(x_a) + J_n(-x_p) \left(\frac{D_p}{N_d L_p} + \frac{D_n}{N_a L_n} \right) [e^{(qV_a)/kT} - 1] \\ &= J_0 [e^{(qV_a)/kT} - 1] \end{aligned} \quad (2.134)$$

เมื่อ

$$J_0 = qn_i^2 \left(\frac{D_p}{N_d L_p} + \frac{D_n}{N_a L_n} \right)$$

และเรียกว่าความหนาแน่นของกระแสอิ่มตัว J_0

2.12.2 ลักษณะสมบัติของไดโอดสั้น

ถ้าทั้ง W_B และ W_E สั้นกว่าความยาวแพร่ซึมของโฮล L_p และของอิเล็กตรอน L_n จะมีเพียงบางส่วนของพาหะข้างน้อยที่สุดสูญหายไปสู่นิวาสาร เนื่องจากการรวมตัวกับพาหะข้างมากในนิวาสารเหล่านั้น แล้วพาหะข้างน้อยนี้จะเกิดการรวมตัวกันหมดที่ขั้วไฟฟ้าที่ตำแหน่ง W_B และ $-W_E$ สำหรับไดโอดสั้น จากการกระจายพจน์ในสมการที่ 2.127 ด้วยอนุกรมเทย์เลอร์จะได้ว่า

$$p'_n(x) = A' + B' \frac{(x - x_n)}{L_p} \quad (2.135)$$

ที่ขั้วไฟฟ้า ณ ที่ตำแหน่ง

$$x = W_B, p'_n(W_B) = 0$$

หรือ

$$A' + B' \frac{(x - x_n)}{L_p} = 0$$

$$B' = \frac{-A' L_p}{(W_B - L_n)} \quad (2.136)$$

ที่ตำแหน่ง $x = x_n$ จะได้ว่า

$$p'_x(x_n) = p_{no} \left[e^{(qV_a/kT)} - 1 \right] \quad (2.137)$$

ที่ตำแหน่ง $x = x_n$ นี้สมการที่ 2.138 และสมการที่ 2.136 ต้องมีค่าเท่ากัน นั่นคือ

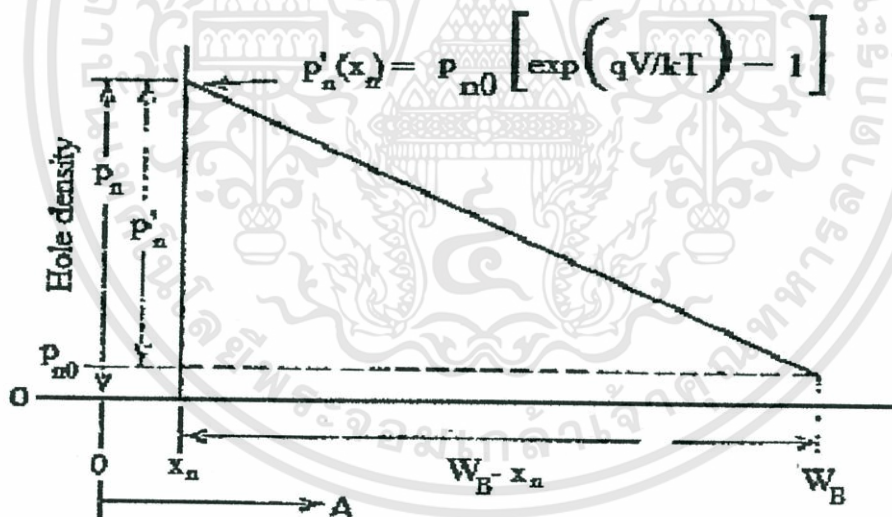
$$A' + B' \frac{(x - x_n)}{L_p} = p_{no} \left[e^{(qV_a/kT)} - 1 \right]$$

แล้ว
$$A' = p_{no} \left[e^{(qV_a/kT)} - 1 \right] \quad (2.138)$$

แทนสมการที่ 1.136 และสมการที่ 2.138 ลงในสมการที่ 2.135 จะได้

$$p''_n(x) = p_{no} \left[e^{(qV_a/kT)} - 1 \right] \left(1 - \frac{x - x_n}{W'_B} \right) \quad (2.139)$$

เมื่อ $W'_B = W_B - x_n$ ความเข้มข้นของโฮลส่วนเกินจะลดลงแบบเชิงเส้นกับระยะทางที่เพิ่มขึ้นดังรูปที่ 2.35



รูปที่ 2.32 แสดงค่าความหนาแน่นของโฮลภายในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นของไดโอดของสารกึ่งตัวนำที่มีรอยต่อแบบพี-เอ็น ในกรณีที่เป็นไดโอดสั้นที่อยู่ภายใต้การไบอัสไปข้างหน้า V_a จะหาความหนาแน่นของกระแสโฮล จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
 J_p &= -qD_p \frac{dp}{dx} = qD_p \frac{p_{no}}{W'_B} \left[e^{(qV_a/kT)} - 1 \right] \\
 &= qD_p \frac{n_i^2}{N_d W'_B} \left[e^{(qV_a/kT)} - 1 \right]
 \end{aligned} \tag{2.140}$$

ในทำนองเดียวกันสามารถที่จะหาความหนาแน่นของกระแสอิเล็กตรอนที่ฉีดเข้าไปในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นดังสมการ

$$J_n = qD_n \frac{n_i^2}{N_d W'_B} \left[e^{(qV_a/kT)} - 1 \right] \tag{2.141}$$

ความหนาแน่นกระแสสุทธิในไดโอดสั้นคือ

$$\begin{aligned}
 J_i &= qn_i^2 \left(\frac{D_p}{N_d W'_B} + \frac{D_n}{N_a W'_E} \right) \left[e^{(qV_a/kT)} - 1 \right] \\
 &= J_0 \left[e^{(qV_a/kT)} - 1 \right]
 \end{aligned} \tag{2.142}$$

เมื่อ

$$J_i = qn_i^2 \left(\frac{D_p}{N_d W'_B} + \frac{D_n}{N_a W'_E} \right)$$

ในทางปฏิบัติไดโอดที่ใช้งานจริง อาจจะเป็นรูปแบบการผสมไดโอดสั้นกับไดโอดยาวก็ได้ซึ่งการหาค่ากระแสอิเล็กตรอนและโฮลสามารถนำเอาผลที่ได้จากการวิเคราะห์ไดโอดยาวและไดโอดสั้นมาประยุกต์ใช้ได้ทันที จากสมการที่ 2.131 และสมการที่ 2.138 ภายใต้การไบอัสไปหน้า กระแสจะเพิ่มขึ้นอย่างมากตามค่าของ V_a เนื่องจากเป็นการฉีดพาหะข้างมากข้ามรอยต่อภายใต้การไบอัสย้อนกลับ จะมีกระแสอิ่มตัวปริมาณเล็กน้อยไหลผ่านไดโอด เนื่องจากเป็นการฉีดพาหะข้างน้อยข้ามรอยต่อ โดยที่กระแสอิ่มตัวนี้เพิ่มขึ้นกับแรงดันย้อนกลับ

2.13 กระแสเนื่องจากบริเวณประจุค้าง (space-charge-region currents) (Kittel, 2005; งามนิตย์, 2530; ฐิตินัย, 2531; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2552; Runyan, 1975; สุกฤษฎ์, 2547; สมเกียรติ, 2542; ฐิตินัย, 2552; วีรชัย, 2547; ดุสิต, 2535)

ในกรณีไดโอดอุดมคติซึ่งมีลักษณะสมบัติเฉพาะของความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า ดังสมการที่ 2.131 และสมการที่ 2.139 นั้นยังไม่ได้คิดถึงผลของกระแสที่อาจจะลดลงภายใต้การไบอัสไปข้างหน้า เนื่องจากพาหะในทางกลับกันพาหะอาจจะสร้างขึ้นได้ภายใต้การไบอัสย้อนกลับ ยังส่งผลให้กระแสอิ่มตัวมีค่ามากกว่าค่าที่ได้ในสมการของไดโอดอุดมคติ

จากทฤษฎีของช็อกเลย์-ฮอลล์-รีด สามารถจะหาอัตราการเกิด-การรวมตัว จะได้ว่า

$$U = n_i^2 \frac{[e^{(qV_a/kT)} - 1]}{p + n = 2n_i \cosh\left(\frac{E_t - E_i}{kT}\right)\tau_0} \quad (2.143)$$

ความหนาแน่นของกระแสเนื่องจากพาหะที่เกิดหรือรวมตัวในบริเวณประจุค้างคือ

$$J_r = q \int_{-x_p}^{x_n} U dx \quad (2.144)$$

ถ้าประมาณว่า $E_t \approx E_i$, $p = n = n_i \exp(qV_a/2kT)$ แล้วสมการ 2.143 จะกลายเป็น

$$U = \frac{n_i^2 [e^{(qV_a/kT)} - 1]}{2n_i [e^{(qV_a/kT)} + 1]\tau_0} \quad (2.145)$$

แทนสมการที่ 2.146 ลงในสมการที่ 2.145 จะได้

$$J_r = \frac{qx'n_i^2 [e^{(qV_a/kT)} - 1]}{2n_i [e^{(qV_a/kT)} + 1]\tau_0} \approx \frac{qx'n_i}{2\tau_0} \exp(qV_a/2kT) \quad (2.146)$$

เมื่อ $\tau_0 = 1 / N_i \sigma V_{th}$ ความหนาแน่นของกระแสเนื่องจากกลไกการรวมตัวของพาหะในบริเวณประจุค้ำภายใต้การไบอัสไปข้างหน้า จะเพิ่มขึ้นตามแรงดันในแบบ $\exp(qV_a / 2kT)$ ซึ่งจะเพิ่มขึ้นช้ากว่าในกรณีของไดโอดอุดมคติ อัตราส่วนของ J_i / J_r ภายใต้การไบอัสไปข้างหน้าคือ

$$\frac{J_i}{J_r} = \frac{2n_i}{x_d} \left[\frac{L_n}{x_d} + \frac{L_p}{N_d} \right] \exp(qV_a / 2kT) \quad (2.147)$$

ในสารกึ่งตัวนำที่มีข้อบกพร่องหรือตำหนิในผลึกน้อย ค่าความยาวแพร่ซึมจะยิ่งมากขึ้นยังส่งผลให้ J_i ยิ่งเด่นกว่า J_r ในกรณีไดโอดหัวต่อด้านที่มี $L_n = 60$ ไมโครเมตร, $x_d = 0.25$

ไมโครเมตร, $N_d = 10^{16}$ ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และ J_r เมื่อ V_a มากกว่า 0.375 โวลต์

ภายใต้การไบอัสกลับทาง ตัวเศษของสมการที่ 2.142 จะมีค่าเป็น $-n_i^2$ ยังส่งผลให้ U มีค่าเป็นลบ แสดงว่ามีการเกิดพาหะสุทธิ (net generation) ขึ้นในบริเวณประจุค้ำ บริเวณความกว้าง x_i ซึ่งมีค่าน้อยกว่าและอยู่ภายใต้บริเวณประจุค้ำ x_d เท่านั้นที่จะมีการเกิดพาหะสุทธಿಯ่างมีประสิทธิภาพและต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไข $p = n \ll n_i$ ซึ่งจะทำให้ U ของสมการที่ 2.141 กลายเป็น

$$U = -n_i / 2\tau_0$$

แทนค่า U ลงในสมการที่ 2.144 จะได้ว่า

$$J_g = \frac{qn_i x_i}{2\tau_0} \quad (2.148)$$

โดยประมาณว่าศูนย์กลางการเกิดการรวมตัวจะอยู่ที่บริเวณ E_i ซึ่งจะให้ประสิทธิภาพสูงสุดสำหรับรอยต่อ p-n บริเวณประจุค้ำจะอยู่ในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ความกว้างของบริเวณประจุค้ำ x_d และบริเวณ x_i ซึ่งจะมีอัตราการเกิดพาหะสูงสุด จะแสดงได้ดังความสัมพันธ์

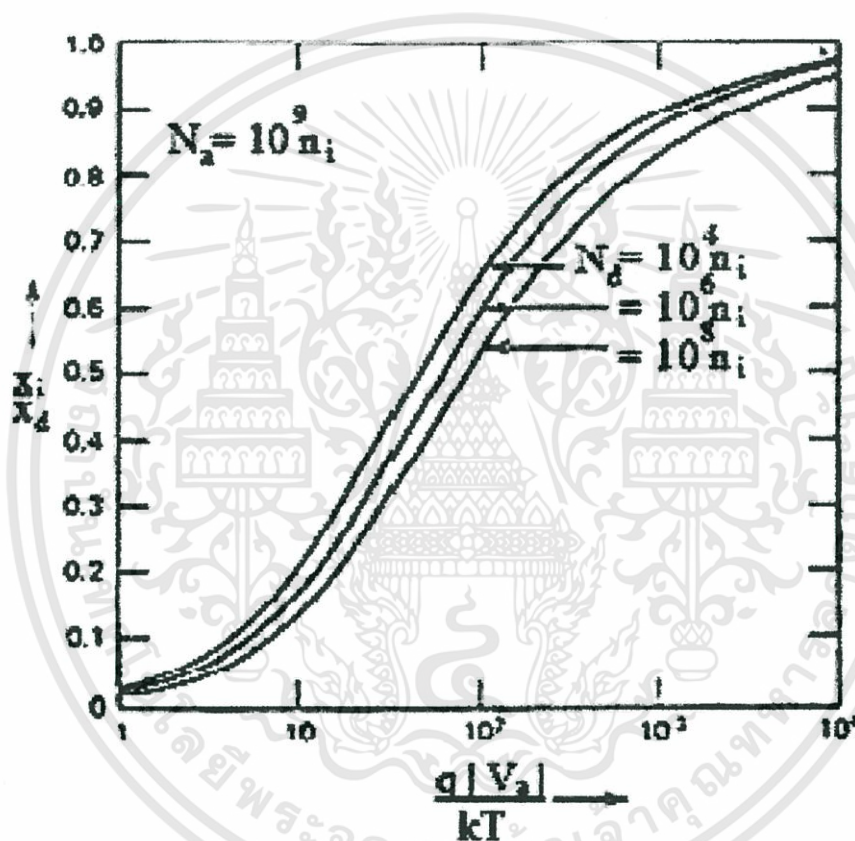
$$x_d = \left[\frac{2\epsilon_s}{qN_d} (\phi_i - V_a) \right]^{1/2}$$

$$x_d = \left[\frac{2\epsilon_s}{q^2 N_d} \left(\ln \left(\frac{N_d N_a}{n_i^2} \right) - \frac{qV_a}{kT} \right) \right]^{1/2} \quad (2.149)$$

และ

$$x_i = \left(\frac{2\tau_0 kT}{q^2 N_a} \right)^{\frac{1}{2}} \left[\left(\ln \left(\frac{N_d}{n_i} \right) - \frac{qV_a}{kT} \right)^{\frac{1}{2}} - \left(\ln \frac{N_d}{n_i} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (2.150)$$

ซึ่ง V_a คือแรงดันไบอัส ($V_a < 0$ ในกรณีไบอัสย้อนกลับ) ทั้ง x_d และ x_i จะขึ้นกับรากที่สองของแรงดันไบอัสย้อนกลับ ความต่างระหว่าง x_d และ x_i จะมีค่าน้อยลง เมื่อแรงดันย้อนกลับมีค่ามาก รูปที่ 2.36 แสดงอัตราส่วนของ x_i/x_d ที่เป็นฟังก์ชันกับแรงดันย้อนกลับที่ความเข้มข้นผู้ให้ค่าต่างๆ ของรอยต่อแบบขั้วด้านเดียว p^+-n



รูปที่ 2.33 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าอัตราส่วนของ x_i/x_d ที่เป็นฟังก์ชัน กับ แรงดันไฟฟ้าย้อนกลับที่มีความหนาแน่นของสารเจือของอะตอมผู้ให้ค่าต่างๆ ของรอยต่อแบบ p^+-n

2.14 การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ (จิตินัย, 2556)

เทคนิคการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศนั้น เป็นวิธีการเตรียมฟิล์มบางวิธีหนึ่งของการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการระเหยสารซึ่งต้องเตรียมในสุญญากาศที่ระดับความดันประมาณ 10^{-5} - 10^{-7} ทอร์ วัตถุประสงค์ของการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีนี้คือการควบคุมการเคลื่อนย้ายอะตอมจากแหล่งกำเนิดความร้อนไปยังฐานรองรับที่ห่างออกไปแล้ว เกิดเป็นฟิล์มบาง

2.14.1 อัตราการระเหยสาร

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

$$\phi_e = \frac{3.1513 \times 10^{22}}{(MT)^{1/2}} P_e \quad \text{โมเลกุลต่อตารางเซนติเมตร-วินาที} \quad (2.151)$$

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

$$\Gamma_e = 5.84 \times 10^{-2} (M/T)^{1/2} P_e \quad \text{โมเลกุลต่อตารางเซนติเมตร-วินาที} \quad (2.152)$$

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

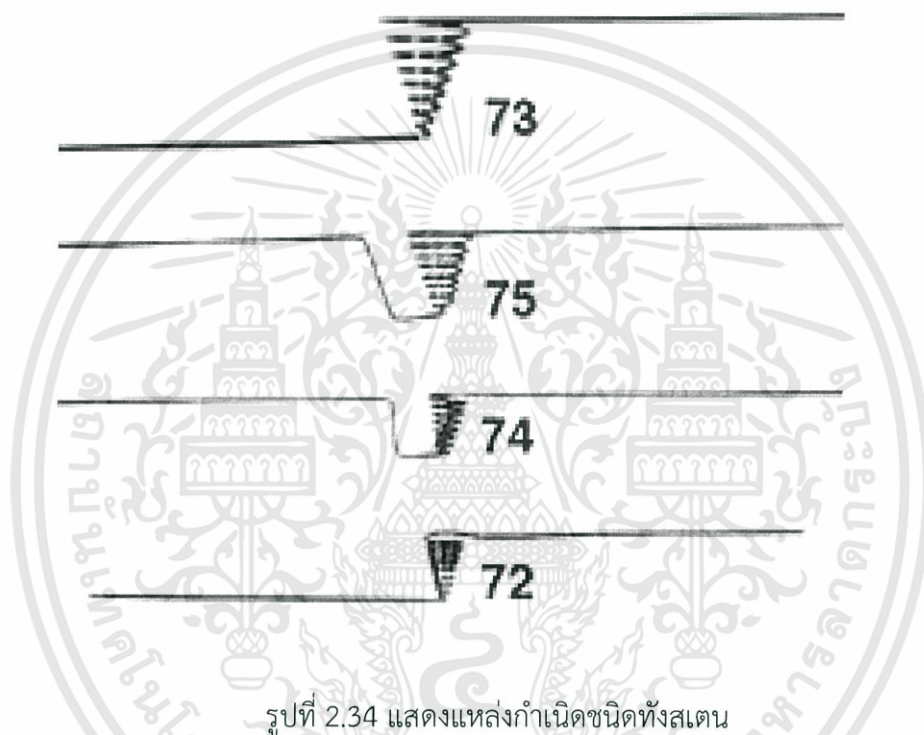
2.14.2 แหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้ในการระเหยสารด้วยไฟฟ้า

ในการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการระเหยด้วยความร้อนจะต้องใช้ความร้อนแก่สารกึ่งตัวนำ ที่ต้องการนำมาเคลือบบนผิวหน้าแผ่นฐานรองรับโดยทั่วไปแล้วจะใช้ตัวต้านทานหรือ

ขดลวดเหนี่ยวนำ เป็นแหล่งกำเนิดโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่ตัวต้านหรือขดลวดเหนี่ยวนำได้ แหล่งกำเนิดความร้อนมีหลายชนิด แบ่งออกได้ดังนี้

2.14.2.1 แหล่งกำเนิดชนิดทั้งสแตน

แหล่งกำเนิดนี้จะอยู่ในรูปพันรอบเดียวหรือหลายรอบเป็นเกลียวทรงกระบอกหรือรูปโคน โดยขดลวดทรงกระบอกจะใช้สำหรับโลหะที่หลอมละลายได้เร็ว ส่วนขดลวดรูปโคนจะใช้ได้ดีกับโลหะที่หลอมละลายช้า ขดลวดทั้งสแตนสามารถทำงานได้จนกระทั่งอุณหภูมิ 2,200 เคลวิน เกินกว่านี้ประสิทธิภาพจะลดลง

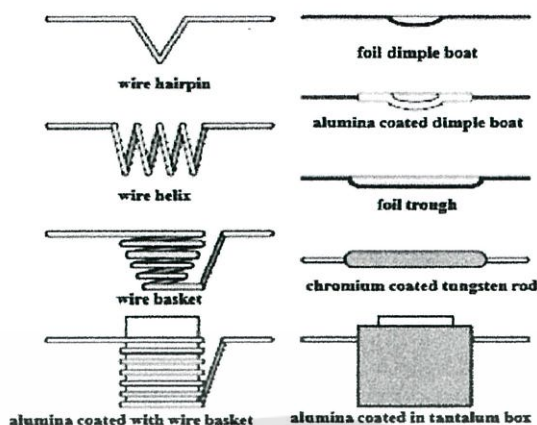


รูปที่ 2.34 แสดงแหล่งกำเนิดชนิดทั้งสแตน

2.14.2.2 แหล่งกำเนิดชนิดแผ่นโลหะคงรูป

แหล่งกำเนิดชนิดแผ่นโลหะคงรูป เช่น ทั้งสแตน แทนทาลัม และโมลิบดีนัมจะเหมือนกับอุปกรณ์ที่เป็นขดลวดคือมีความต้านทานในตัวเองและให้ความร้อนที่ค่าแรงดันต่ำแต่กระแสสูงแหล่งกำเนิดเหล่านี้จะถูกสร้างขึ้นมาในรูปแบบต่างๆ

Resistance Heated Evaporation Sources



รูปที่ 2.35 แสดงแหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้ระเหยสารด้วยไฟฟ้าแบบต่างๆ

2.15 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.15.1 อิทธิพลของแผ่นฐานรองรับที่มีต่อสมบัติทางไฟฟ้าของซอตต์กีไดโอด (kislyuk,2013)

ธาตุหมู่ 2-6 มีค่าช่องว่างแถบพลังงาน คือ 2.42 อิเล็กตรอนโวลต์ ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน แคดเมียม ซัลไฟด์ได้รับการศึกษาอย่างกว้างขวาง เช่น solar cells, optical detectors and optoelectronic devices ในปัจจุบันมีรายงานการทดลองมากมาย การแสดงสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำที่ถูกเคลือบอยู่บนโลหะ ที่สำคัญขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของผิว ผิวคริสตัล มักจะปกคลุมด้วยชั้นของออกไซด์ตลอด ชั้นออกไซด์นี้อาจจะมีความ แข็งแกร่ง มีอิทธิพลต่อลักษณะไดโอดและนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานของซอตต์กีไดโอด แน่นนอนว่าค่า ของกระแสและสัดส่วนที่เหมาะสมของ แคดเมียมซัลไฟด์(ผลึกเดี่ยว)ที่เคลือบอยู่บนทองคำ ผิวไดโอดของลักษณะแคดเมียม ซัลไฟด์ จากการส่มขนาด ลักษณะกระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า ของการเชื่อมต่อของ นาโนแคดเมียมซัลไฟด์ที่ถูกเคลือบอยู่บนทองคำ และ แคดเมียมซัลไฟด์ที่ถูกเคลือบอยู่บนทองคำ กระแสมีการไหลสูงในกรณี นาโนแคดเมียมซัลไฟด์ที่ถูกเคลือบอยู่บนทองคำ เทียบกับ แคดเมียมซัลไฟด์ที่ถูกเคลือบอยู่บนทองคำ โดยจากการกำหนดความหนาที่สูง มักถูกกำหนดโดย เมนเดล(Mandal) ที่เขียนกราฟกระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า ของAu/nano-Cu/CdS/SnO₂ และ Au/ Cu/CdS/SnO₂ พบว่าในชั้นนาโนมี การปรากฏตัวของความเข้มข้น ซึ่งส่งผลให้เกิดความเครียดที่สูงขึ้น

มันถูกพิสูจน์โดย Kislyuk ที่พื้นผิวแคดเมียมซัลไฟด์ที่สำคัญมีบทบาทในเซลล์แสงอาทิตย์ และทำหน้าที่เป็นพอลิเมอร์ เป็นองค์ประกอบการดำเนินการ และตั้งนั่นกลไกการตอบสนองของเซลล์แสงอาทิตย์ จะคล้ายที่จะพบ ในขอตกโคโอด

โลหะของกลุ่ม (Ag/Cu) มีความเร็วในการแพร่ในแคดเมียมซัลไฟด์และการแพร่กระจายเข้ามาใน แคดเมียมซัลไฟด์ สามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของพื้นที่เชื่อมต่อกันระหว่างโลหะ และแคดเมียมซัลไฟด์และอื่นๆในลักษณะของโครงสร้าง ฟิล์มบางที่บนกระจกเคลือบ โดยการขนส่ง ออกไซด์ เช่น SnS, SnO₂ ความสัมพันธ์ของอิเล็กตรอนและช่องว่างแถบพลังงานของ SnO₂ มีค่า 4.0 อิเล็กตรอนโวล และ 3.6 อิเล็กตรอนโวล ตามลำดับ ปริมาณ SnO₂ เพิ่มขึ้นของฟิล์มบาง CdS และวิธี CdS_{1-x}Sn_x สามารถแก้ปัญหาหระหว่างชั้น CdS และ SnO₂ ประสิทธิภาพของอุปกรณ์สามารถเปลี่ยนแปลงได้โดย ผลกระทบเหล่านี้

กระบวนการสะสม CdS เป็นสิ่งสำคัญในการพิจารณาคุณภาพของขอตกโคโอด เทคนิคต่างๆได้ถูก นำมาใช้เตรียมความพร้อมของฟิล์มบาง CdS เช่น การระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ ,การ เคลือบในอ่างสารเคมี ,การระเหิดในระยะประชิด ,สเปรย์ไพโรลิซิส,พัลส์ เลเซอร์เทคนิควิธีการระเหยสารเคมี ด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เป็นเทคนิคที่ดีในการทำฟิล์มและผลึก กลุ่มวิจัยของเราตรวจสอบ ฟิล์ม บาง CdS ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ ที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งปกติโดยทั่วไปจะใช้อุณหภูมิสูง มันถูกกำหนดให้แผ่นฐานรองรับมีอุณหภูมิลดลงจาก 300 เคลวิน ถึง 100 เคลวิน ลักษณะพื้นผิวของ CdS จะเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น และลดผิวที่ขรุขระนอกจากนี้พื้นผิวของชั้นตัวอย่างที่อุณหภูมิห้อง มีลักษณะที่มีรูพรุนมากกว่าที่อยู่อุณหภูมิเย็น นอกจากนี้ที่อุณหภูมิห้องยังมีเกรนที่ขนาด ต่างๆกันด้วย ผลที่ได้รับจากกลุ่มการเตรียมฟิล์มบาง CdSe ด้วยวิธีการระเหยสารเคมีภายในระบบสุญญากาศ ที่อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับต่ำ

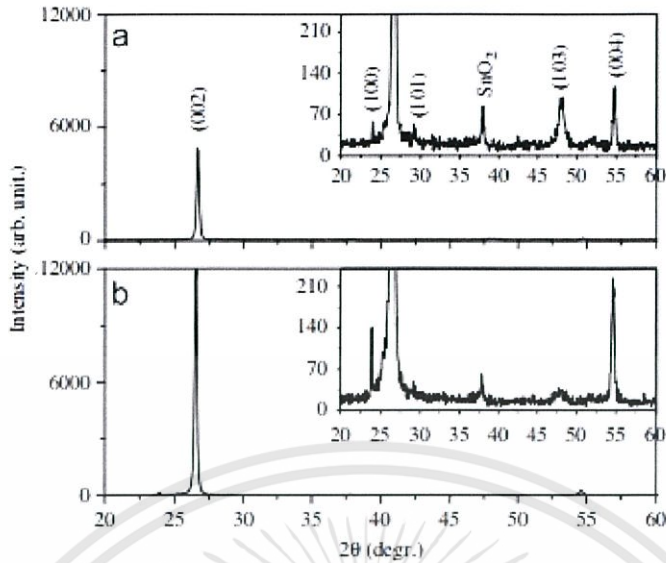
ในบทความนี้เรารายงานผลกระทบของอุณหภูมิพื้นผิวต่ำ ($T_s = 200$ เคลวิน และ 300 เคลวิน) ใช้สำหรับการผลิตฟิล์มบาง CdS ที่จัดทำขึ้นโดยเทคนิคการระเหยสารเคมีภายในระบบสุญญากาศ ศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโครงสร้าง Cu/CdS/SnO₂ ลักษณะ I-V ของการวัดสามารถสร้างความสัมพันธ์ระบบ พารามิเตอร์และคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโครงสร้าง Cu/CdS/SnO₂ 2.รายละเอียดการทดลอง

ฟิล์มบาง CdS ที่ได้จากวิธีการระเหยสารเคมีภายในระบบสุญญากาศ เคลือบลงบนกระจกโดยใช้ความสะอาดที่สูงเครื่องมือการระเหยสารเคมีโดยกำหนดว่าระยะจากแหล่งกำเนิดกับแผ่น ฐานรองรับต้องห่างกัน 9 เซนติเมตร แหล่งกำเนิดและอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับเป็นการตรวจสอบและ ควบคุมการแยกโดยใช้เทอร์โมคัปเปิล เมื่อความดันถึง 6.0×10^{-6} ทอร์ แผ่นฐานรองรับจะระบายความร้อนด้วยการสูบน้ำไนโตรเจนเหลวตลอดจนกระทั่งแผ่นฐานรองรับเย็นที่ทำมาจากท่อทองแดง เครื่องทำความร้อนวาง อยู่ระหว่างแผ่นฐานรองรับและการระบาย

ความร้อนปรับอุณหภูมิในระยะ 200 ถึง 300 เคลวิน เพื่อป้องกันไม่ให้ผงของสารเคมีกระเด็น จึงถูกตกลงในจานที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร อุณหภูมิจะถูกเก็บอยู่ ประมาณ 923 เคลวิน ฟิล์มบาง CdS ถูกปลูกที่แผ่นฐานรองรับอุณหภูมิ 300 ถึง 200 เคลวิน

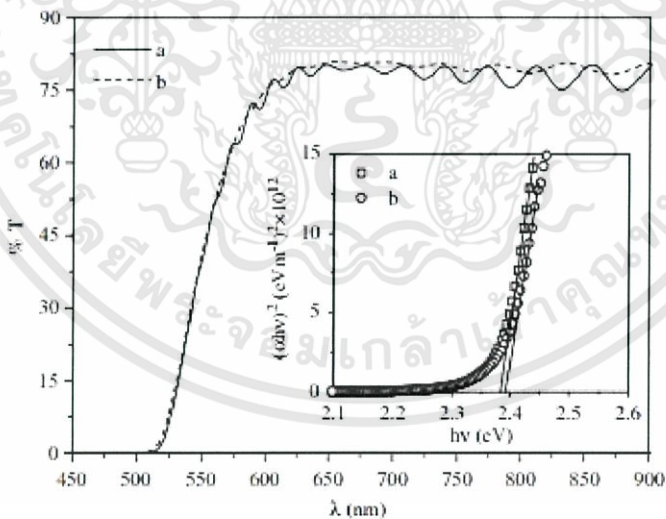
โครงสร้างผลึก CdS ศึกษาจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ โดยการใช้เครื่องมือ ดิฟแฟคโทมิเตอร์ วิธีการวัดความร้อนและฮอลล์เอฟเฟค ถูกนำมาใช้เพื่อหาชนิดของพาหะและความหนาแน่นของพาหะของฟิล์ม บาง CdS ที่อุณหภูมิห้อง ความต้านทานของฟิล์มบาง CdS วัดจาก 4 วิธี ในที่อุณหภูมิห้อง การวัดการส่งผ่าน ดำเนินการเพื่อกำหนดคุณสมบัติทางแสงของฟิล์มโดยการใช้ สเปกโทรโฟโตมิเตอร์(เครื่องมือวัดคุณสมบัติทาง แสง) ในระยะ 400 ถึง 1000 นาโนเมตร ทองแดงที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 มิลลิเมตร ถูกวางบนพื้นผิวด้านบน ของฟิล์มบาง CdS โดยใช้วิธีการระเหยสารเคมีภายในระบบสุญญากาศ โครงสร้าง CdS/SnO₂/กระจก ได้รับการระบายความร้อนด้วยไนโตรเจนเหลวเพื่อลดการแพร่กระจายของโครงสร้างทองแดง อุณหภูมิของโครงสร้าง CdS/SnO₂/กระจก กำหนดอุณหภูมิระหว่างการระเหยที่อุณหภูมิ 200 เคลวิน ลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของโครงสร้าง Cu/CdS/SnO₂ ที่ได้รับในช่วงอุณหภูมิ 100 ถึง 300 เคลวิน

ผลการศึกษากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์ม CdS บน SnO₂/กระจก ที่อุณหภูมิ 300 และ 200 เคลวิน แสดงในรูปที่ 1 พื้นผิวของฟิล์มที่มีหกลเหลี่ยมที่มีความแข็งแรงที่ต้องการทิศทางที่ตั้งฉากกับแผ่น ฐานรองรับ ความหนาแน่นของการสะท้อนเพิ่มขึ้น เช่น แผ่นฐานรองรับอุณหภูมิที่ลดลงจาก 300 ถึง 200 เคลวิน จุดสูงสุดของความหนาแน่นต่ำที่ 2θ เท่ากับ ประมาณ 24.0 องศา ,ประมาณ 29.1 องศา,ประมาณ 48.1 องศา และประมาณ54.7 องศา ประกอบไปยังระนาบของเฮกซะโกนัลของ CdS (1 0 0),(1 0 1),(1 0 3) และ (0 0 4) ตามลำดับ ในรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่าจุดสูงสุดที่ 2θ ประมาณ 37.9 องศา นี้คือจุดสูงสุด ประกอบกับ SnO₂ ที่มีโครงสร้างเตตระโกนัล SnO₂ แสดงจุดสูงสุดที่ 2θ เท่ากับ 38 องศา ที่สามารถมองเห็น ความหนาแน่นของการสะท้อนลดลง เช่นแผ่นฐานรองรับที่อุณหภูมิลดลงจาก 300 ถึง 200 เคลวิน จำนวน ของการลดลง ประกอบด้วยการแพร่ในแถบ junction ในระยะอุณหภูมิต่ำ



รูปที่ 2.36 แสดงโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่อุณหภูมิ 300 และ 200 เคลวิน

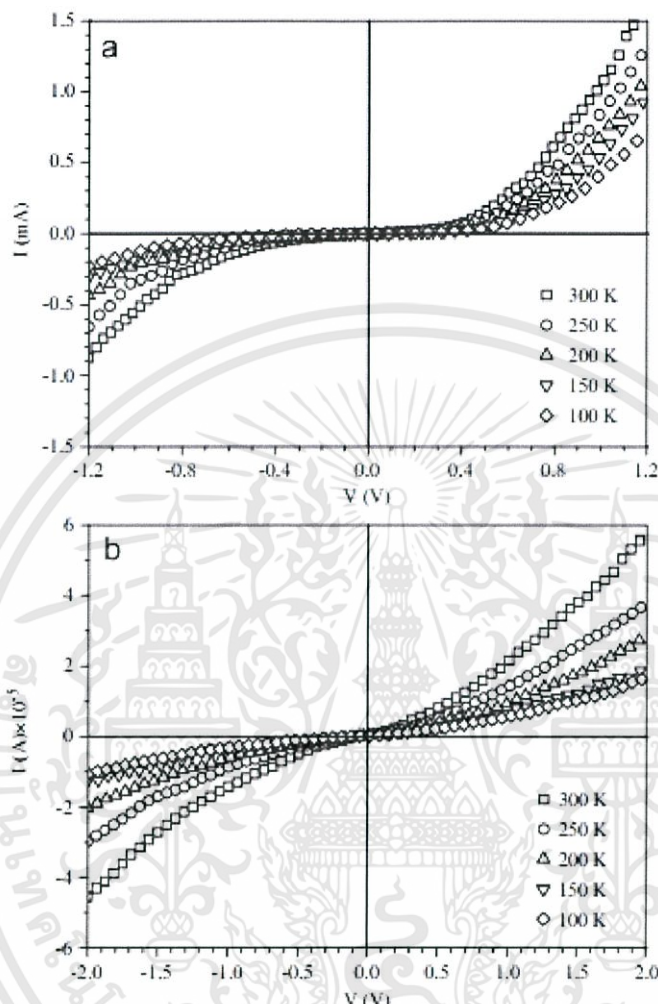
การเตรียมตัวอย่างที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน มีโครงสร้างผลึกขนาดเล็กกว่าฟิล์ม ภายใต้ความเครียดในแนวราบไปยังพื้นผิวแผ่นฐานรองรับ สเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์ม CdS เช่น ฟังก์ชันความยาวคลื่น



รูปที่ 2.37 แสดงการส่งผ่านสูงสุดของฟิล์มบาง CdS เกิน 75 เปอร์เซ็นต์

ความแตกต่างของ $\alpha h\nu^2$ เช่น ฟังก์ชันของ $h\nu$ แสดงในรูปที่ 2 ช่องว่างของ ตัวอย่าง เป็น 2.38 อิเล็กตรอนโวลต์ ที่ 200 เคลวิน ค่าช่องว่างของแถบพลังงานของตัวอย่างพบ

ข้อตกลงด้วย รายงานจาก (Pal et al) พบค่าเท่ากับ 2.38 อิเล็กตรอนโวลต์ สำหรับการเตรียม CdS ที่อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับ 300 เคลวินด้วยวิธีการระเหยสารเคมีภายในระบบสุญญากาศ

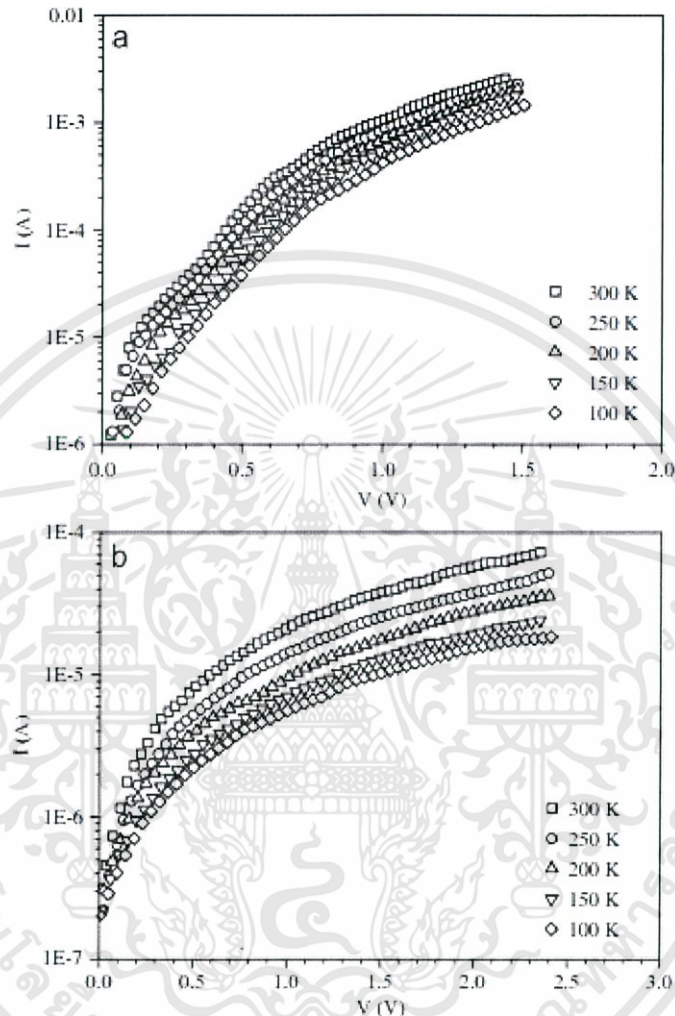


รูปที่ 2.38 แสดงลักษณะกระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้าของโครงสร้าง Cu/CdS/SnO₂ ในอุณหภูมิ ระยะ 100 ถึง 300 เคลวิน

ในรูปที่ 3a อธิบายกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของโครงสร้าง Cu/CdS/SnO₂ แต่ ลักษณะ กระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของโครงสร้าง Cu/CdS/SnO₂ รูป 3b ในตัวอย่าง รูปร่างของพฤติกรรมที่ สามารถประกอบไปด้วยทองแดงที่อุณหภูมิ 200 เคลวิน

การลดลงของอุณหภูมิเป็นการแพร่ทองแดงใน CdS ในการทำงานของเราพบว่า การไหลของกระแสไฟฟ้าที่มากขึ้นในโครงสร้าง Cu/CdS/SnO₂ ที่ CdS 300 เคลวิน เทียบกับ Cu/CdS/SnO₂ ที่ CdS 200 เคลวิน พฤติกรรมการกลั่นและกระแสไฟฟ้าสูงของโครงสร้าง Cu/CdS/SnO₂ ที่ CdS 300 สามารถนำมาประกอบระหว่างทองแดงและ CdS เนื่องจาก

พื้นผิวของ CdS มีรูพรุนและความหนาแน่นเพิ่มขึ้นของกับดักพื้นผิวที่โครงสร้าง Cu/CdS/SnO₂ ที่ CdS 300 ความสัมพันธ์เทอร์มิออนิกกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของขอตกไดโอด



รูปที่ 2.39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง เซมิ-ล็อก (semi-logarithmic) forward bias กระแสไฟฟ้าและ แรงดันไฟฟ้าของโครงสร้าง Cu/CdS/SnO₂ วัดที่อุณหภูมิต่างๆจาก 100 ถึง 300 เคลวิน

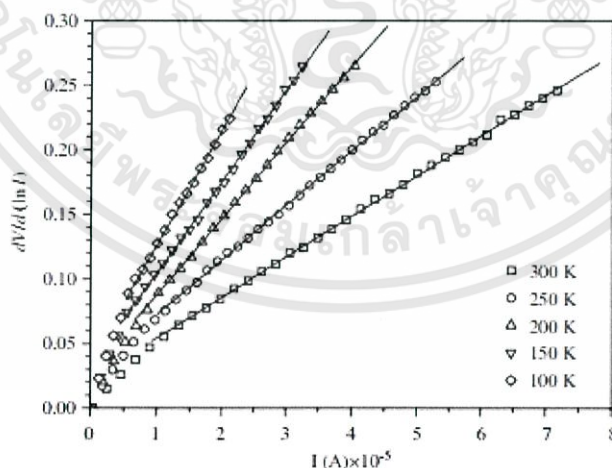
เส้นโค้งกราฟ $\ln(I)$ - V ของโครงสร้าง Cu/CdS/SnO₂ แสดงพฤติกรรมเชิงเส้นในระยาะ $0.1 \text{ V} < V < 0.7 \text{ V}$ ลักษณะกระแสไฟฟ้าและ แรงดันไฟฟ้าของโครงสร้าง Cu/CdS/SnO₂ เป็นเชิงเส้นในกราฟเซมิ-ล็อก(semi-logarithmic) ที่แรงดันต่ำ ($0 \text{ V} < V < 0.3 \text{ V}$) และเบี่ยงเบนจากเชิงเส้นที่แรงดันสูงเพราะผลกระทบของความต้านทาน การทดลองหา ค่าแพกเตอร์อุดมคติ (n) กระแสไฟฟ้าอิ่มตัว(I_0) ค่าความสูงของกำแพงศักย์(ϕ_{b0}) ให้ในตารางที่ 1

Table 1

Experimental values of n , I_0 , ϕ_{bo} and R_s .

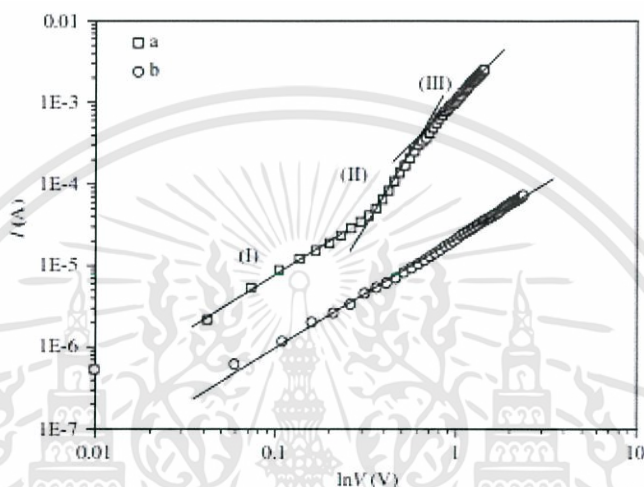
T (K)	$T_s=300$ K				$T_s=200$ K			
	I_0 (A)	n	ϕ_{bo} (eV)	R_s (Ω)	I_0 (A)	n	ϕ_{bo} (eV)	R_s (k Ω)
300	4.16×10^{-6}	5.44	0.57	89.7	2.89×10^{-7}	3.14	0.64	3.14
250	3.37×10^{-6}	6.72	0.47	97.8	1.88×10^{-7}	3.54	0.54	4.22
200	2.60×10^{-6}	8.51	0.38	104.2	2.22×10^{-7}	5.02	0.42	5.89
150	1.53×10^{-6}	10.89	0.28	107.8	1.95×10^{-7}	7.48	0.31	7.09
100	1.20×10^{-6}	16.73	0.18	118.4	1.91×10^{-7}	13.25	0.20	8.94

จากตารางที่ 1 ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ(n) เพิ่มขึ้น ค่าความสูงของกำแพงศักย์ลดลงอุณหภูมิก็ลดลงด้วย อาจเป็นเพราะค่ากำแพงศักย์ ระหว่างชั้นโลหะและสารกึ่งตัวนำ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติมากเนื่องจากค่ากำแพงศักย์น้อยและในทางกลับกัน จากตารางที่ 1 ค่าของกระแสไฟฟ้าอิ่มตัวและค่าแฟกเตอร์อุดมคติของโครงสร้าง Cu/CdS/SnO₂ ที่ CdS 300 เคลวิน มากกว่า โครงสร้าง Cu/CdS/SnO₂ ที่ CdS 200 เคลวิน ค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวและค่าแฟกเตอร์อุดมคติของโครงสร้าง Cu/CdS/SnO₂ ที่ CdS 300 เคลวิน สามารถนำมาประกอบพื้นผิวและสุมขนาด เกรนของ CdS ที่อุณหภูมิต้อง ค่าแฟกเตอร์อุดมคติของตัวอย่าง ซึ่งแสดงค่าเทอร์มิออนิกไม่ได้เป็นเพียงกลไกการนำความร้อนของกระแสไหล ค่าแฟกเตอร์อุดมคติสูงอาจเป็นเพราะเกิดการเลื่อนในชั้นหน้าสัมผัสระหว่าง โลหะและสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 2.40 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $dV/d(\ln I)$ กับ I ของโครงสร้าง Cu/CdS/SnO₂ ที่ CdS 200 เคลวิน

ค่าความต้านทานอนุกรมในระยะของ ค่าอุณหภูมิระบุไว้ในตารางที่ 1 ค่าความต้านทานอนุกรมของโครงสร้าง Cu/CdS/SnO₂ ที่ CdS 200 เคลวิน อาจนำมาประกอบค่าความต้านทานสูงของการเตรียมฟิล์ม CdS ที่ 200 เคลวิน ค่าความต้านทานของการเตรียม CdS ที่ 300 เคลวิน และ 200 เคลวิน เป็น 28.6 โอห์ม และ 73.7 โอห์ม ตามลำดับ ค่าความต้านทาน อนุกรมของชอตกีไดโอด ในอุดมคติอยู่ในการสั่งของความต้านทาน การเงิอจางเพิ่มขึ้นของความต้านทานอนุกรม ลักษณะการพล็อตกราฟ logI – logV ของโครงสร้าง Cu/CdS/SnO₂ ที่ CdS 200 เคลวิน ที่อุณหภูมิห้องทั้งหมด

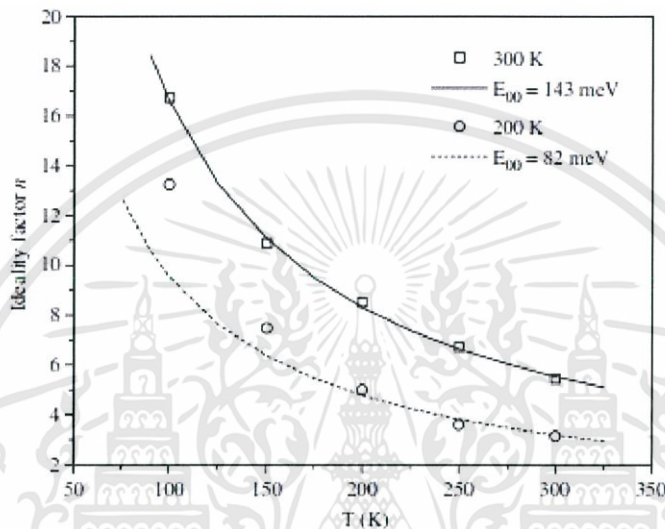


รูปที่ 2.41 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $I(A)$ กับ $\ln V(V)$ ของโครงสร้าง Cu/CdS/SnO₂ ที่อุณหภูมิ 300 และ 200 เคลวิน

ลักษณะ forward bias โครงสร้าง Cu/CdS/SnO₂ ที่ CdS 300 เคลวินมีระยะที่แตกต่างกัน อุปกรณ์ที่แสดง ให้เห็นถึงพฤติกรรมเดียวกันที่ทุกอุณหภูมิ ระยะที่ 1 แสดงพฤติกรรมโอมมิกอย่างเช่นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าขึ้นอยู่กับการแสดงของการสนับสนุนของระบบ Tunneling พล็อตกราฟ logI-logV ที่ระยะ 2 แนะนำความเป็นไปได้ของกลไกการนำไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้าง สโลปของระยะที่ 3 ในลักษณะกราฟ forward bias logI-logV ที่แรงดันไฟฟ้าสูงสโลปมีแนวโน้มลดลงเพราะวิธี trap-filled เช่นเดียวกับกลไกการนำชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้าง กราฟ logI-logV ของโครงสร้าง Cu/CdS/SnO₂ ที่ CdS 200 เคลวิน มีเส้นตรงเดียว ลักษณะกราฟ logI-logV เหมือนกับรายงานจาก Pal at el สำหรับทองแดง/นาโน CdS

ในทางปฏิบัติกลไก Tunneling ที่สำคัญมากสำหรับสารกึ่งตัวนำโดยพลังงานการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ (E_{00}) เท่ากับ 10 อิเล็กตรอนโวลต์หรือระดับการกระตุ้นสูงกว่า 1×10^{17} การเตรียมพาหะของ CdS ที่ 300 เคลวิน กำหนด เป็น 1.9×10^{17} ดังนั้นกลไกพลังงานการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ เป็นการตรวจสอบโครงสร้าง Cu/CdS/SnO₂ ที่

CdS 300 เคลวิน กลไกพลังงานการดูดุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ เกิดขึ้นได้จาก 2 กลไก
 1. การปล่อยอิเล็กตรอนจากสนามไฟฟ้า (FE) 2. การปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากความร้อน
 (TFE) ทฤษฎีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากความร้อน (TFE) มีลักษณะเด่นในอุณหภูมิ
 ปานกลาง และ การเติมสารตามทฤษฎีการปล่อยอิเล็กตรอนจากสนามไฟฟ้า (FE) มีลักษณะ
 เด่นอย่างเดี่ยวที่อุณหภูมิต่ำสำหรับวัสดุที่มีการโดปสารสูงๆ ในขณะที่อุณหภูมิต่ำก็มีการโดป
 สารที่พอประมาณหรือปานกลางโดยโดปใน ระดับ $10^{13} - 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $10^{15} - 10^{16} \text{ cm}^{-3}$
 และ $10^{17} - 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ตามลำดับ



รูปที่ 2.42 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแฟกเตอร์อุดมคติและอุณหภูมิ

แสดงการพล็อตกราฟของแฟกเตอร์อุดมคติและอุณหภูมิ เส้นทึบแสดงแฟกเตอร์อุดมคติที่ได้จากการคำนวณเมื่อค่าพลังงานการดูดุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ (E_{00}) เท่ากับ 143 มิลลิอิเล็กตรอนโวลต์จาก รูปที่ 8 คำนวณค่าแฟกเตอร์อุดมคติจะเห็นว่าเหมาะสมกับการทดลองของโครงสร้าง Cu/CdS/SnO₂ ที่ CdS 300 เคลวิน ค่าของพลังงานการดูดุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ (E_{00}) มากกว่า kT ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า กลไกการปล่อยอิเล็กตรอนจากสนามไฟฟ้า (FE) คือการลำเลียงกระแสไฟฟ้าสำหรับโครงสร้าง Cu/CdS/SnO₂ ที่ CdS 300 เคลวิน กลไกพลังงานการดูดุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ เป็นการตรวจสอบโครงสร้าง Cu/CdS/SnO₂ ที่ CdS 200 เคลวิน จากรูปที่ 8 คำนวณค่าแฟกเตอร์จะเห็นว่าเหมาะสมกับการทดลองของโครงสร้าง Cu/CdS/SnO₂ ที่ระยะอุณหภูมิ 200 ถึง 300 เคลวิน ตามผลการทดลองสามารถกล่าวได้ว่า กลไกการนำความร้อนของไดโอดเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิประมาณ 200 เคลวิน กลไกการรวมตัวกันจะกลายเป็นสิ่งที่ไดโอดเด่นสำหรับกำแพงศักย์สูง อุณหภูมิต่ำ และการโดปสารกึ่งตัวนำจากตารางที่ 1 จะเห็นว่า ที่การเตรียม CdS ที่อุณหภูมิ 200 และ 300 เคลวิน จะพบว่าที่ 300 เคลวิน จะมีค่ากำแพงศักย์ที่สูงกว่า 200 เคลวิน ดังนั้นพฤติกรรมที่อุณหภูมิต่ำสามารถอธิบายจากการทดลองของการรวมตัวกันในกลไกการนำความร้อน

ในการศึกษาฟิล์มบาง CdS เคลือบลงบนพื้นผิว SnO₂ ที่อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับต่ำโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แสดงให้เห็นว่าพื้นผิว โครงสร้าง Cu/CdS/SnO₂ เป็นเฮกซะโกนัล นอกเหนือจากนี้ การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่จุดสูงสุด $2\theta = 37.9$ องศา สังเกตการณ์อยู่ของ SnO₂ กับโครงสร้างเตตระโกนัล ค่าคงที่ของแลกทิตสำหรับการเตรียมตัวอย่างที่ 300 เคลวิน และ 200 เคลวิน เป็น 6.683 อังสตรอม และ 6.711 อังสตรอม ตามลำดับ ค่าช่องว่างระหว่างแถบพลังงานเป็น 2.38 อิเล็กตรอนโวลต์ที่ 300 เคลวิน และ 2.39 อิเล็กตรอนโวลต์ ที่ 200 เคลวิน การทดลองลักษณะกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าของโครงสร้าง Cu/CdS/SnO₂ ได้รับผลมาจากพฤติกรรม เนื่องจากความต้านทานอนุกรมแพกเตอร์อุดมคติของตัวอย่างทั้งหมดเป็นมากกว่า 1 ซึ่งบ่งบอกว่ากลไกการปล่อยอิเล็กตรอนจากสนามไฟฟ้า (FE) ไม่ได้เป็นเพียงกลไกการนำความร้อนและกระแสไหล ผลการทดลองบ่งชี้ว่าการลำเลียงกระแสในโครงสร้าง Cu/CdS/SnO₂ ในอุณหภูมิทั้งหมดสามารถควบคุมจากการขุด อุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ที่แรงดันต่ำและกลไกการนำกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้างที่แรงดันสูง อย่างไรก็ตามกลไกการลำเลียงกระแสในโครงสร้างต้องอยู่ในระยะอุณหภูมิ 200 เคลวิน และ 300 เคลวิน แต่มันถูกกำหนดให้ลักษณะพื้นผิวของ CdS เป็นตัวสำคัญในการกำหนดคุณภาพของขอตกไดโอด



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมไดโอดของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-WO₃:Sb โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ W_{1-x}Sb_xO₃ (X=0.05) โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ W_{1-x}Sb_xO₃ (X=0.05) จะถูกเตรียมขึ้นมาจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายสถานะของแข็ง และได้ทำการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่ถูกเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับในกรณีที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ และเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO₃ : Sb ทั้งในกรณีที่ไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 100 – 500 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัยที่ใช้ในการเตรียมไดโอดของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-WO₃:Sb โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ W_{1-x}Sb_xO₃ (X=0.05) โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศมีวิธีการดำเนินงานทดลองดังนี้ (งามนิตย์, 2556; ลูตินัย, 2557; นพณัฐ, 2556)

3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ W_{1-x}Sb_xO₃ (X=0.05) เตรียมจากสารตั้งต้น ที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

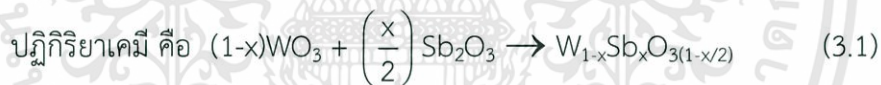
1. สารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ WO₃ และ Sb₂O₃ ที่มีน้ำหนักประมาณ 3 กรัม เพื่อใช้สำหรับทำเป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO₃:Sb
2. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่งของ Sartorius
3. อุปกรณ์บดสารครกอาเกต (agate mortar)
4. เครื่องอัดเม็ดสารตั้งต้น
5. เครื่องควบคุมอุณหภูมิเตาในการเผาสาร
6. เตาเผาสาร
7. ครูซิเบิล
8. เครื่องอัดไฮดรอลิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ($x = 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

3.1.2 การคำนวณปริมาณสารตั้งต้นเพื่อเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ($x = 0.05$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง (ฐิตินัย, 2550; ประธาน, 2550; งามนิธย์, 2556)



ซึ่งสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ WO_3 และ Sb_2O_3 จำนวน 3 กรัม ตามตารางที่ 3.1 บดให้คลุกเคล้าผสมกัน แล้วแบ่งเป็น 3 ส่วน เพื่ออัดเม็ดให้ได้ 3 เม็ด จากนั้นจึงทำการเผาเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ($x = 0.05$) ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{กรณี } x = 0.05$$

มวลโมเลกุลของผงผลึก $W_{0.95}Sb_{0.05}O_3$

$$= [(183.85 \times 0.95) + (121.75 \times 0.05) + (15.9994 \times 0.005)]$$

$$= 228.7432 \text{ กรัม/โมล}$$

ถ้าต้องการเตรียมผงผลึก $W_{0.95}Sb_{0.05}O_3$ จำนวน 3 กรัม

$$\text{ต้องใช้ผงผลึก } WO_3 = \frac{(0.95)(231.8482)(3)}{228.7432}$$

$$= 2.8887 \text{ กรัม}$$

$$\text{ต้องใช้ผงผลึก } Sb_2O_3 = \frac{(0.05)(291.4982)(3)}{228.7432}$$

$$= 0.1912 \text{ กรัม}$$

ดังนั้นปริมาณสารตั้งต้นที่ต้องใช้คือสารประกอบ WO_3 จำนวน 2.8887 กรัม และสารประกอบ Sb_2O_3 จำนวน 0.1912 กรัม

3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์

1. แผ่นกระจกสไลด์ขนาด 9 x 9 ตารางมิลลิเมตร
2. บีกเกอร์ขนาด 200 มิลลิลิตร
3. เครื่องสั่นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค
4. เครื่องเป่าลมร้อน
5. แก๊สไนโตรเจน
6. นาฬิกาจับเวลา
7. ปากคืบ
8. เตาอบ
9. สารเคมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 9.1 น้ำยาล้างจาน
- 9.2 น้ำปลอดประจุ
- 9.3 อะซีโตน
- 9.4 เอทานอล

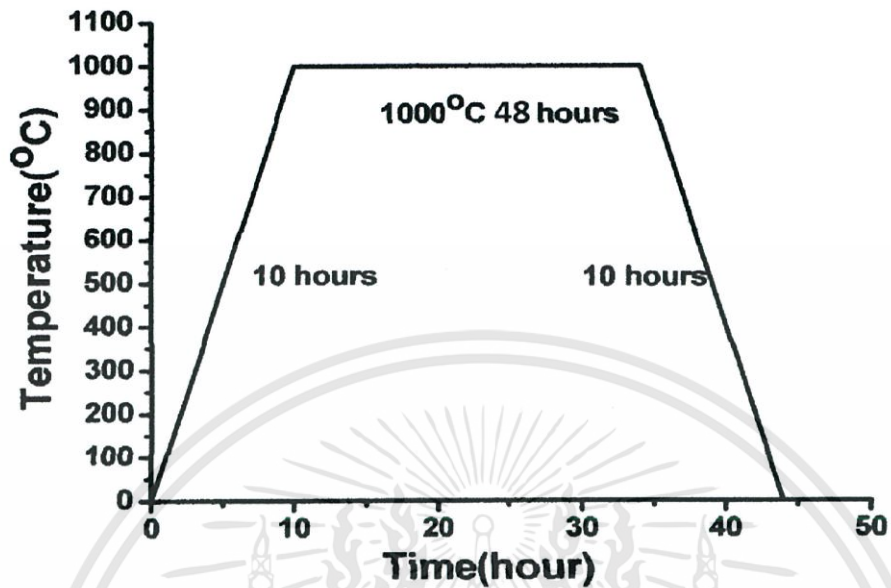
3.1.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมไดโอดของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-WO₃:Sb โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO₃:Sb โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO₃:Sb นั้นถูกเตรียมขึ้นมาจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

1. ระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ออกแบบ ที่สามารถลดความดันได้ต่ำถึงระดับ 5×10^{-6} มิลลิบาร์
2. สารตั้งต้นที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO₃:Sb ที่เตรียมได้เพื่อนำไปใช้ทำเป็นแผ่นฐานรองรับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS
3. สารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ SnS ที่เตรียมไว้แล้วหนัก 0.3 กรัม
4. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่งของ sartoris
5. เมทานอล
6. อุปกรณ์บดสาร ครกอาเกต
7. เต้าเผาสาร
8. ครุชีเบิล

3.2 ขั้นตอนการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ($x=0.05$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง และการเตรียมไดโอดของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n- $WO_3:Sb$ โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $WO_3:Sb$ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส (งามนิตย์, 2556; จิตินัย, 2557; นพณัฐ, 2556)

3.2.1 ขั้นตอนในการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ($x=0.05$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

1. นำผงผลึกของสารประกอบ WO_3 และสารประกอบ Sb_2O_3 ตามปริมาณที่คำนวณไว้แล้วนำมาบดรวมกันในครกอาเกตให้เป็นผงละเอียดคล้ายแป้งเป็นเวลา 2 ชั่วโมง
 2. เมื่อบดแล้วนำไปอัดเม็ดจะทำการอัดเม็ดโดยใช้แรงอัด 4 ตัน ด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก โดยเพิ่มแรงอัดทีละ 1 ตัน แล้วทิ้งไว้ 10 วินาที จากนั้นเพิ่มแรงอัดจนถึง 4 ตัน และตอนเอาเม็ดผงผลึกออกจากโมลด์อัดเม็ดจะใช้แรงอัดครั้งละประมาณ 0.5 ตัน
 3. นำเม็ดสารที่ได้มาใส่ในครุชีเบล ปิดฝาให้มิดชิดแล้วนำเข้าเตาเผา
 4. ในการเผาภายใต้บรรยากาศนั้นจะทำการเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 100 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง จนกระทั่งถึง 1000 องศาเซลเซียส จากนั้นทิ้งไว้ 48 ชั่วโมงแล้วลดอุณหภูมิลงด้วยอัตรา 100 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมงจนถึงอุณหภูมิห้องจึงปิดเตา นำออกมาทำการวิเคราะห์สมบัติเชิงฟิสิกส์และทำการเตรียมไดโอดต่อไป
- เม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{0.95}Sb_{0.05}O_3$ ที่เตรียมได้ขณะยังไม่มี การเผาจะมีสีเขียวอ่อน แต่เมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศเป็นเวลา 48 ชั่วโมง เม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{0.95}Sb_{0.05}O_3$ ที่ยังไม่มี การเผายังคงมีสีเขียวอ่อน ส่วนที่มีการเติมสารเจือแล้วจะมีสีเขียวเข้ม ดังรูป 3.3



รูปที่ 3.2 แสดงกราฟโปรไฟล์เตาที่ใช้ในการตั้งอุณหภูมิเตาเพื่อทำการเผาเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ($x=0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



รูปที่ 3.3 ภาพเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}Sb_xO_3$ ($x=0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 ขั้นตอนในการเตรียมไดโอดของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-WO₃:Sb โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO₃:Sb โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ โดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ W_{1-x}Sb_xO₃ (0.00 ≤ x ≤ 0.05) นั้นถูกเตรียมขึ้นมาจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

3.2.2.1 การเตรียมแผ่นกระจกสไลด์เพื่อใช้เป็นแผ่นฐานรองรับ

1. นำแผ่นกระจกสไลด์ขนาด 25x75 ตารางมิลลิเมตร ไปแช่ในน้ำที่ผสมน้ำยาล้าง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อทำการล้างคราบไขมันและสิ่งสกปรก
2. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วยน้ำปลอดประจุ
3. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปแช่ในอะซิโตนเป็นเวลา 10 นาที
4. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปแช่ในเอทานอลเป็นเวลา 10 นาที
5. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วยน้ำปลอดประจุ 3 ครั้ง ครั้งละ 10 นาที
6. ทำการเป่าแห้งแผ่นกระจกสไลด์ด้วยเครื่องเป่าลมร้อนและทำการตัดเป็นแผ่น เล็กที่มีขนาด 9x9 ตารางมิลลิเมตร
7. ทำการล้างด้วยน้ำปลอดประจุเป็นเวลา 10 นาที โดอนขั้นตอนในข้อ 2-7 จะนำบิกเกอร์ไปใส่ในเครื่องสั่นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค
8. ทำการเป่าแห้งด้วยเครื่องเป่าลมร้อน
9. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่ได้จากข้อ 8. นำไปอบแห้งที่ 95 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที

3.2.2.2 การเตรียมไดโอดของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-WO₃:Sb ตามลำดับ โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ W_{0.95}Sb_{0.05}O₃ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ W_{0.95}Sb_{0.05}O₃ นั้นถูกเตรียมขึ้นมาจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

1. ทำความสะอาดระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในสุญญากาศโดยทำการขจัดสิ่งปนเปื้อนต่างๆ เช่น คราบไขมันและผงฝุ่นด้วยอะซิโตนและเมทานอล
2. ทำการติดตั้งชุดอุปกรณ์ต่างๆภายในระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อนสุญญากาศให้ครบถ้วน

3. ทำการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดยุโรปของสารกึ่งตัวนำ $W_{0.95}Sb_{0.05}O_3$ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งสารกึ่งตัวนำ $W_{0.95}Sb_{0.05}O_3$ ที่เป็นเม็ดยุโรปนั้นจะถูกเตรียมขึ้นมาจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็งโดยเริ่มจากการนำสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ SnS มาบดให้ละเอียดมีปริมาณ 1 กรัม แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้นออกให้หมด เป็นสารตั้งต้นที่บรรจุใส่ลงไปในเบ้าภาชนะระเหยสาร (boat) ที่ทำด้วยโลหะทั้งสแตน
4. นำแผ่นฐานรองรับทั้งในกรณีที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และที่เป็นเม็ดยุโรปของสารกึ่งตัวนำ $W_{0.95}Sb_{0.05}O_3$ ที่ทำการเตรียมไว้แล้วตามลำดับมาวางลงบนหน้ากาก (mask) ซึ่งทำจากแผ่นอลูมิเนียมจะเป็นช่องตามขนาดที่ต้องการ หลังจากนั้นปิดห้องสุญญากาศให้เรียบร้อย
5. ตรวจสอบระบบระเหยสารเคมีว่าวาล์วสูบล้ออากาศออกและปล่อยอากาศเข้าให้อยู่ในตำแหน่งที่ปิดเรียบร้อย
6. ทำการเปิดปั๊มกลโรตารี จากนั้นเปิดวาล์วสูบล้ออากาศออกจนได้ความดันประมาณ 3×10^{-2} มิลลิบาร์ แล้วจึงเปิดปั๊มเทอร์โบโมเลกุลาร์จนได้ความดันตามต้องการ (ในการทดลองนี้ใช้ความดันประมาณ 5×10^{-2} มิลลิบาร์)
7. ทำการเปิดแผ่นกั้นสารระเหย (shutter) แล้วเริ่มทำการระเหยสารเคมี โดยมีแผ่นกระจกสไลด์เป็นแผ่นฐานรองรับ โดยการเปิดสวิตช์เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 10 โวลต์ 200 แอมแปร์ จากนั้นทำการปรับศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าอย่างช้าๆ จนกระทั่งได้ค่ากระแสอยู่ที่ประมาณ 60 แอมแปร์ แล้วทิ้งไว้สักพักประมาณ 5 นาที เพื่อให้ความดันไออิ่มตัว ต่อจากนั้นจึงค่อยๆ เพิ่มกระแสต่อไปอย่างช้าๆ จนถึง 100-130 แอมแปร์ จนได้ความหนาประมาณ 500-800 นาโนเมตร ซึ่งรวมแล้วทั้งหมดจะใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางประมาณ 30 นาที
8. เมื่อได้ความหนาของฟิล์มตามที่ต้องการแล้ว ให้ปิดแผ่นกั้นการระเหย และการปิดแบริแอก โดยค่อยๆ ลดกระแสลงอย่างช้าๆ จนกระทั่งเป็น 0
9. ต่อจากนั้นรอให้ระบบทำงานต่อไปอีกประมาณ 45 นาที เพื่อให้อุณหภูมิของห้องสุญญากาศลดลงแล้วจึงปิดปั๊มเทอร์โบโมเลกุลาร์ จากนั้นให้ระบบทำงานต่อไปอีกประมาณ 1 ชั่วโมงแล้วเปิดวาล์วสูบล้ออากาศและปั๊มกลโรตารี

10. รอจนอุณหภูมิภายในห้องสุญญากาศมีอุณหภูมิเท่ากับภายนอก จึงค่อยทำการเปิดวาล์วปล่อยอากาศเข้าภายในห้องสุญญากาศอย่างช้าๆ โดยใช้เวลาประมาณ 15 นาที
11. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่ถูกเคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS เป็นที่เรียบร้อยแล้วออกมาจากห้องสุญญากาศ นำไปตรวจสอบสภาพผิวหน้าของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์ หลังจากนั้นจึงนำไปเก็บไว้ในภาชนะควบคุมความชื้น
12. ทำการแอนนัลฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่ถูกเคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่เตรียมได้ทั้งหมด ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที และเมื่อเตาเย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้องจึงปิดเตา
13. ศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ SnS ที่ถูกเคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ทั้งในกรณีที่ไม่มีการแอนนัลและมีการแอนนัล ที่เตรียมได้ทั้งหมด ได้แก่ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จากเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ Bruker รุ่น D8 Advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ในย่าน $\text{Cu}_{\text{K}\alpha}$ 1.5406 อังสตรอม โดยใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์ และความต่างศักย์ 25 กิโลโวลต์ ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของ JEOL รุ่น JSM-6400 ทำการศึกษาคุณสมบัติทางแสง ด้วยการวัดค่าเอเพนซันต์การส่งผ่านแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Thermo electron corporation รุ่น Heions โดยใช้ความยาวคลื่นช่วง 190-1100 นาโนเมตร เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานและคำนวณหาช่องว่างแถบพลังงาน (E_g)
14. ศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n- $\text{WO}_3:\text{Sb}$ ที่เตรียมได้ทั้งหมด ได้แก่ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จากเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ Bruker รุ่น D8 Advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ในย่าน $\text{Cu}_{\text{K}\alpha}$ 1.5406 อังสตรอม โดยใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์ และความต่างศักย์ 25 กิโลโวลต์ ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของ JEOL รุ่น JSM-6400 ทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิในช่วง 10-300 เคลวิน โดยการทำขั้วอิเล็กโทรด ด้วยการป้ายกาวเงินนำไฟฟ้าเป็นรูปวงกลมให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เติมหน้าทางด้านที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{0.95}Sb_{0.05}O_3$ และ ป้ายกาวเงินนำไฟฟ้าเป็นรูปร่างกลมให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.4 เซนติเมตร ทางด้านที่เป็นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS จากนั้นนำไปศึกษาสมบัติเฉพาะของไดโอดด้วยการวัดกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสกับแรงดันไฟฟ้า (I-V curve) ค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า (C-V curve) จากนั้นนำไปศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีโดยการวัด ความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วง 20-300 เคลวิน ต่อไป

รูปที่ 3.4 แสดงแผนภาพสิ่งประดิษฐ์ของรอยต่ออิมพีแดนซ์ของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-WO₃:Sb โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO₃:Sb โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของ ฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ SnS ที่ถูกเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับกระจกสไลด์และไดโอดของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-WO₃:Sb ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส

3.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่ถูกเคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์และไดโอดของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-WO₃:Sb ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จากเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ Bruker รุ่น D8 Advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ในย่าน $Cu_{K\alpha}$ 1.5406 อังสตรอม โดยใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์ และความต่างศักย์ 25 กิโลโวลต์

3.3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึก

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่ถูกเคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์และไดโอดของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-WO₃:Sb ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปทำการศึกษาโครงสร้างผลึก จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) MODEL : EVO@MA10 สามารถวัดในโหมด Secondary Electron ,Backscattered Electrons และ VP Mode ซึ่งวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (EDS)



รูปที่ 3.5 ภาพถ่ายอุปกรณ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่ถูกเคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์และไดโอดของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-WO₃:Sb ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปทำการศึกษาโครงสร้างผลึก จาก เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance รั้งสีเอกซ์ย่าน CuK α มีความยาวคลื่น 1.5418 อังสตรอม ซึ่งใช้กระแส 30 มิลลิแอมแปร์และความต่างศักย์ 25 กิโลโวลต์



รูปที่ 3.6 ภาพถ่ายเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางแสง

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่ถูกเคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่เตรียมได้ทั้งหมด ไปศึกษาสมบัติทางแสง ด้วยการวัดค่าเปอเซนต์การส่งผ่านแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS spectrophotometer) ยี่ห้อ Thermo electron corporation รุ่น (He λ ios α) โดยใช้ความยาวคลื่นช่วง 200-1000 นาโนเมตร เพื่อศึกษา ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานและคำนวณหาช่องว่างแถบพลังงาน (E_g)



รูปที่ 3.7 ภาพถ่ายเครื่อง UV-VIS ยี่ห้อ Thermo electron corporation รุ่น (He λ ios α)

3.3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า

นำไดโอดของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-WO₃:Sb ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิในช่วง 20-300 เคลวิน ได้แก่ นำไปศึกษาสมบัติเฉพาะของไดโอดด้วยการวัดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสกับแรงดันไฟฟ้า (I-V curve) ค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า (C-V curve) จากนั้นนำไปศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ที่อุณหภูมิต่างๆในช่วง 20-300 เคลวิน

3.3.4.1 การศึกษาสมบัติเฉพาะของไดโอดด้วยการวัดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสกับแรงดันไฟฟ้า (I-V curve) ค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า (C-V curve) จากนั้นนำไปศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ที่อุณหภูมิต่างๆในช่วง 20-300 เคลวิน และอุณหภูมิในช่วง 25-90 องศาเซลเซียส

- เครื่อง Precision LCR meter ของ Agilent รุ่น E4980A ใช้สัญญาณไฟสลับ (ac signal) เท่ากับ 0.5 โวลต์
- มัลติมิเตอร์รุ่น METEC 8007
- เครื่องความเย็นไครโอจินิกและไครโอสเตต ยี่ห้อ Leybold รุ่น RW2
- เครื่องควบคุมอุณหภูมิ PL รุ่น MODEL 9700
- กาวเงินไฟฟ้าใช้ทำเป็นขั้วอิเล็กทรอนิกส์โดยอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
- สายไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมไดโอดของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-WO₃:Sb ตามลำดับโดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์และที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ W_{1-x}Sb_xO₃ (x=0.05) โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส

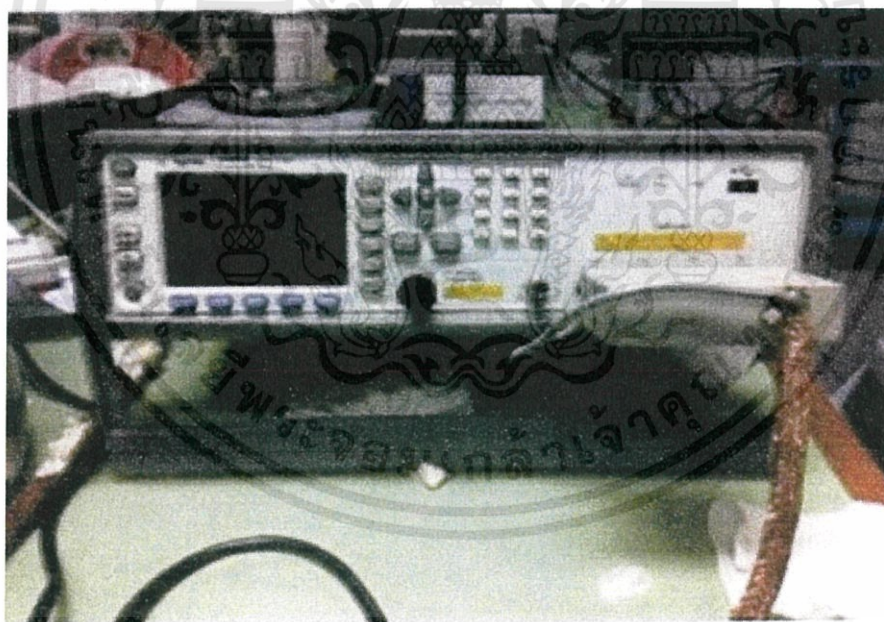


รูปที่ 3.9 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าความต้านทานแผ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ
ต่างๆของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-SnS}/n\text{-WO}_3 : \text{Sb}$
ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 3.11 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้วัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า และ ค่า
อิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี โดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน กับ
ความถี่ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-SnS}/n\text{-WO}_3 : \text{Sb}$
ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

โครงการพิเศษนี้ ได้ทำการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $WO_3:Sb$ โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง เพื่อเป็นแผ่นฐานรองรับในการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เพื่อประดิษฐ์เป็นไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n- $WO_3:Sb$ ได้มีการศึกษาสมบัติพื้นฐานทางฟิสิกส์ทั้งฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นกระจกสไลด์และบนเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $WO_3:Sb$ ได้แก่ ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ และโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคจากการถ่ายภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอนแบบส่องกราด ทำการศึกษาโดยการหาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง เพื่อหาค่าช่องว่างแถบพลังงานของสสาร จากนั้นจึงทำการศึกษาวัดค่าความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n- $WO_3:Sb$ ที่อุณหภูมิต่างๆ เพื่อคำนวณหาพารามิเตอร์ต่างๆที่สำคัญของไดโอด ได้แก่ ค่าความสูงของกำแพงศักย์ ค่าแพคเตอร์อุดมคติ ค่าความต้านทานอนุกรม ได้ทำการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า เพื่อคำนวณหา ค่าความหนาแน่นของ โหลดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS

4.1 ลักษณะฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $WO_3:Sb$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์มีสีดำคล้ำ ผิวหน้าเรียบ สะท้อนแสงและยึดติดกับกระจกสไลด์ได้ดี ส่วนเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $WO_3:Sb$ นั้นมีสีเขียว เมื่อทำการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ลงบนเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $WO_3:Sb$ จะเห็นว่าฟิล์มบางสีดำคล้ำ

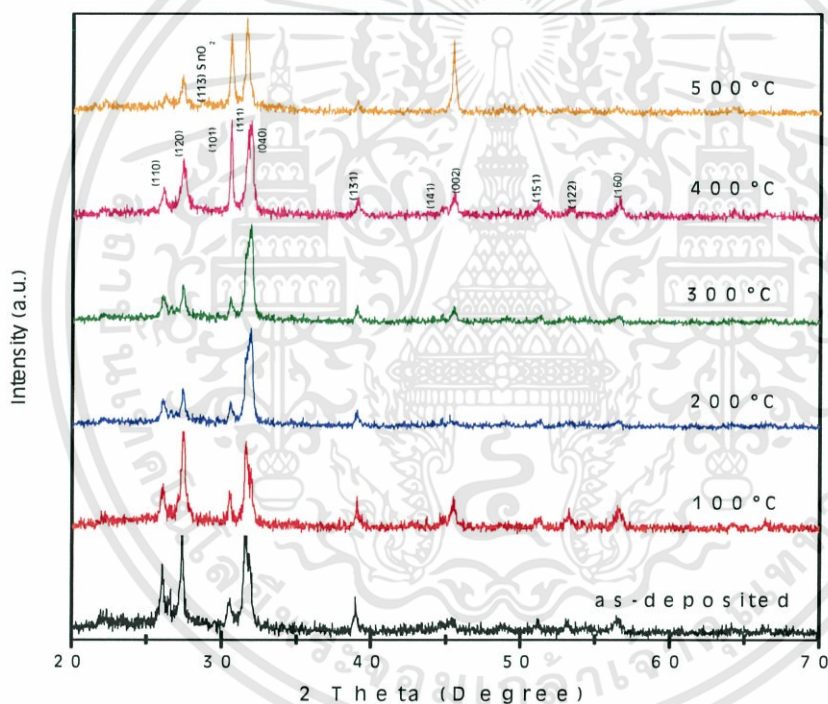


รูปที่ 4.1 แสดงฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนیل

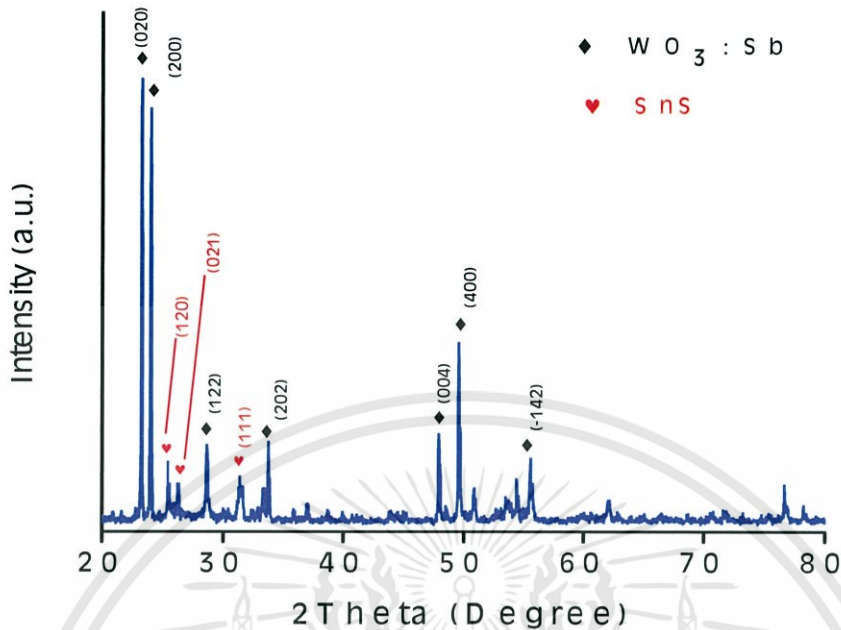
4.2 ผลการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

4.2.1 ผลการศึกษาโครงสร้างของผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

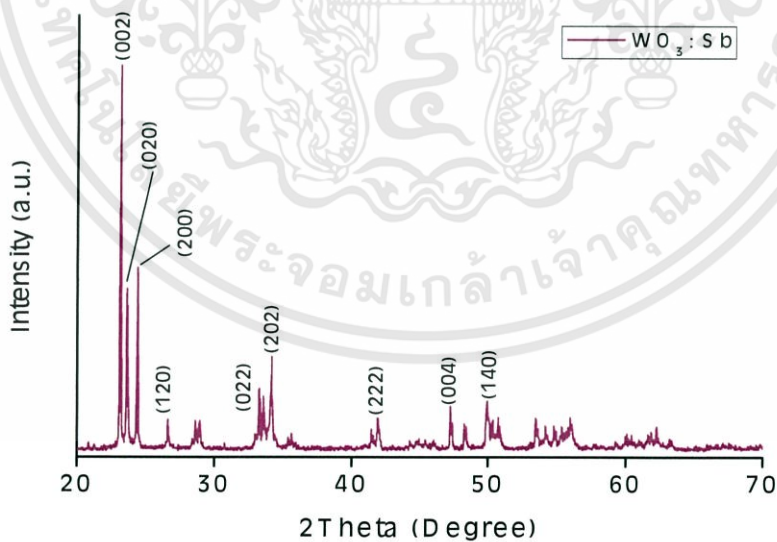
การศึกษาฟิสิกความเข้มที่ได้จากสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในสุญญากาศ พบว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบออร์โธโรอมบิก สอดคล้องกับไฟล์มาตรฐาน JCPDS 39-354 ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.2 แสดงฟิสิกความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิต่างๆภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน



รูปที่ 4.3 แสดงสเปกตรัมของพิคความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิต่างๆภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน



รูปที่ 4.4 แสดงสเปกตรัมของพิคความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-SnS}/n\text{-WO}_3:\text{Sb}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

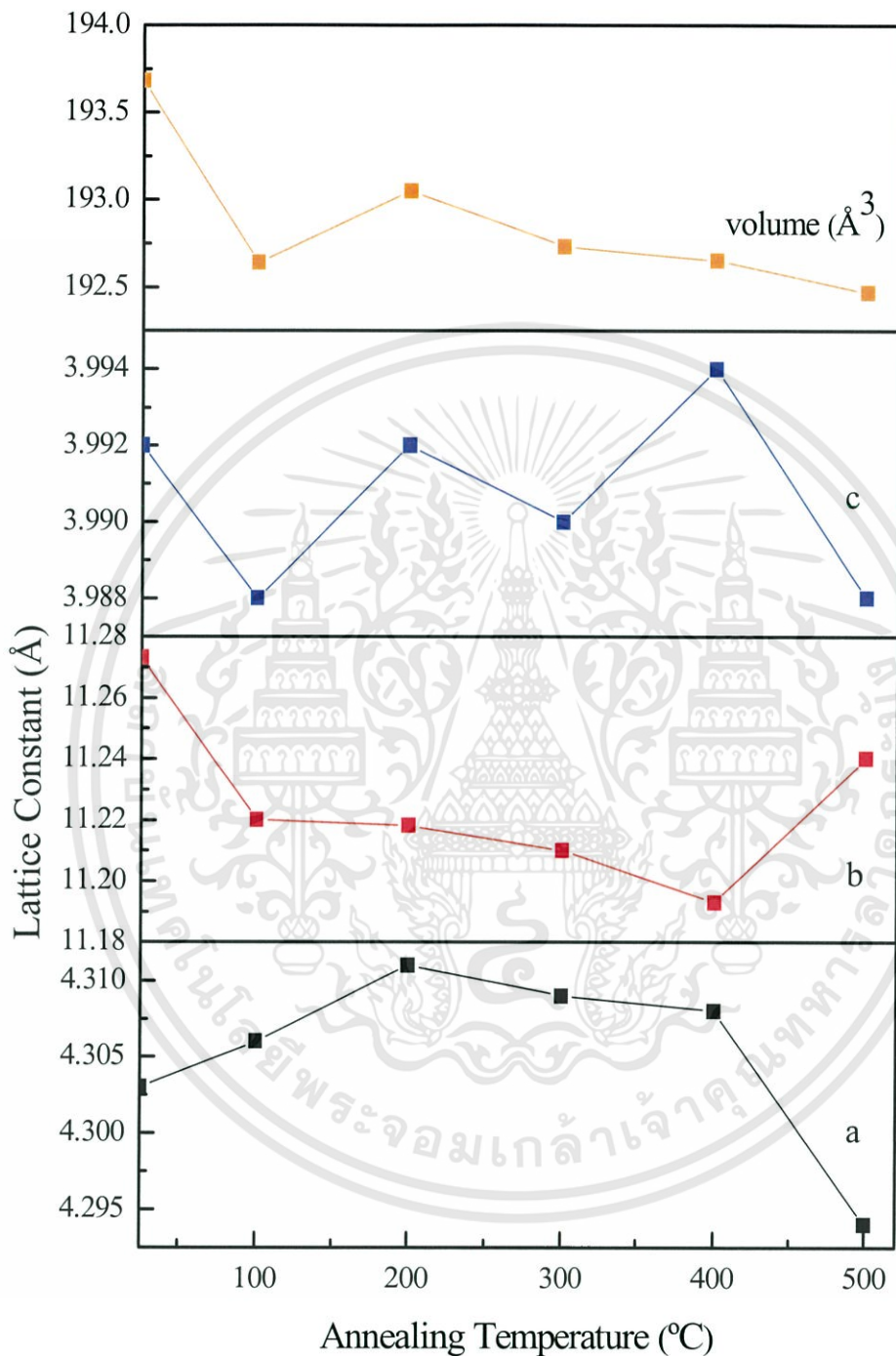
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าคงที่โครงสร้างผลึกและขนาดของเกรนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีส และมีการแอนนีสที่อุณหภูมิต่างๆ ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

Annealing Temperature (°C)	Lattice Constant (Å)			Volume (Å ³)	Dislocation Density (line/m ²)	Strain
	a	b	c			
As-deposited	4.303	11.273	3.992	193.68	4.50x10 ¹⁵	8.94x10 ⁻³
100	4.306	11.220	3.988	192.64	1.02x10 ¹⁵	4.24x10 ⁻³
200	4.311	11.218	3.992	193.05	3.76x10 ¹⁵	8.07x10 ⁻³
300	4.309	11.210	3.990	192.73	8.21x10 ¹⁵	3.80x10 ⁻³
400	4.308	11.193	3.994	192.65	2.98x10 ¹⁵	4.15x10 ⁻³
500	4.294	11.240	3.988	192.47	1.86x10 ¹⁵	5.95x10 ⁻³

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าคงที่โครงสร้างผลึกของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO₃:Sb ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

WO ₃ :Sb	Lattice Constant			Volume (Å ³)	β
	a (Å)	b (Å)	c (Å)		
	8.484	8.755	8.933	663.52	91.099

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าคงที่โครงสร้างผลึก กับ ค่าอุณหภูมิของสารตั้งต้น ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิต่างๆภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าขนาดของเกรนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ที่คำนวณจากวิธีการเอกซเรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์

Annealing Temperature (°C)	2θ (degree)	θ (degree)	(h k l)	FWHM (rad)	Grain Size from XRD (nm)
as-deposited	26.048	13.024	1 2 0	0.0030	49.23
	27.371	13.686	0 2 1	0.0031	47.44
	30.525	15.262	1 0 1	0.0038	38.58
	31.547	15.774	1 1 1	0.0101	14.90
	38.954	19.477	1 3 1	0.0025	61.98
100	26.081	13.041	2 0 1	0.0057	26.21
	27.417	13.709	2 1 0	0.0052	28.56
	30.500	15.250	1 0 1	0.0034	43.00
	31.573	15.787	1 1 1	0.0048	31.35
	39.050	19.525	1 3 1	0.0063	22.83
	45.460	22.730	0 2 0	0.0025	63.35
200	26.032	13.016	2 0 1	0.0049	30.09
	27.380	13.690	2 1 0	0.0038	38.82
	30.500	15.250	1 0 1	0.0034	43.00
	31.886	15.943	0 4 0	0.00923	16.31
	39.050	19.525	1 3 1	0.0063	22.83
300	26.050	13.025	1 2 0	0.0042	28.38
	27.396	13.698	2 1 0	0.0038	39.17
	30.528	15.264	0 1 1	0.0031	48.59
	31.533	15.766	0 4 0	0.0043	34.90
	39.050	19.525	1 3 1	0.0063	22.83
	45.427	22.714	0 2 0	0.0040	39.28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 (ต่อ)แสดงค่าขนาดของเกรนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ที่คำนวณจากวิธีการเอกซ์เรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์

Annealing Temperature (°C)	2θ (degree)	θ (degree)	(h k l)	FWHM (rad)	Grain Size from XRD (nm)
400	23.575	11.788	1 1 0	0.0014	104.14
	26.010	13.005	1 2 0	0.0045	29.42
	27.301	13.651	0 2 1	0.0040	37.61
	30.526	15.263	1 0 1	0.0039	38.57
	31.574	15.787	1 1 1	0.0047	32.17
	31.600	15.300	0 4 0	0.0082	18.33
	39.050	19.525	1 3 1	0.0063	22.83
	44.740	22.370	1 4 1	0.0091	17.21
	45.250	22.625	0 0 2	0.0055	28.52
	51.313	25.656	1 5 1	0.0052	30.85
	53.148	26.574	1 2 2	0.0033	49.06
500	26.175	13.088	2 0 1	0.0030	49.56
	27.35	13.675	2 1 0	0.0057	26.15
	30.525	15.263	1 1 1	0.0065	23.15
	31.575	15.788	3 0 1	0.0069	21.81
	45.425	22.713	0 2 0	0.0061	25.73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $WO_3:Sb$ เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

4.3.1 ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $WO_3:Sb$ ที่เตรียมมาจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งที่ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $WO_3:Sb$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

เม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $WO_3:Sb$ ที่เตรียมได้ขณะนี้ยังไม่มีอาการผอมหรือมีสีเขียวอ่อนๆ แต่เมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศเป็นเวลา 48 ชั่วโมง จะมีสีเขียวเข้มดังแสดงดังรูปที่ 4.6

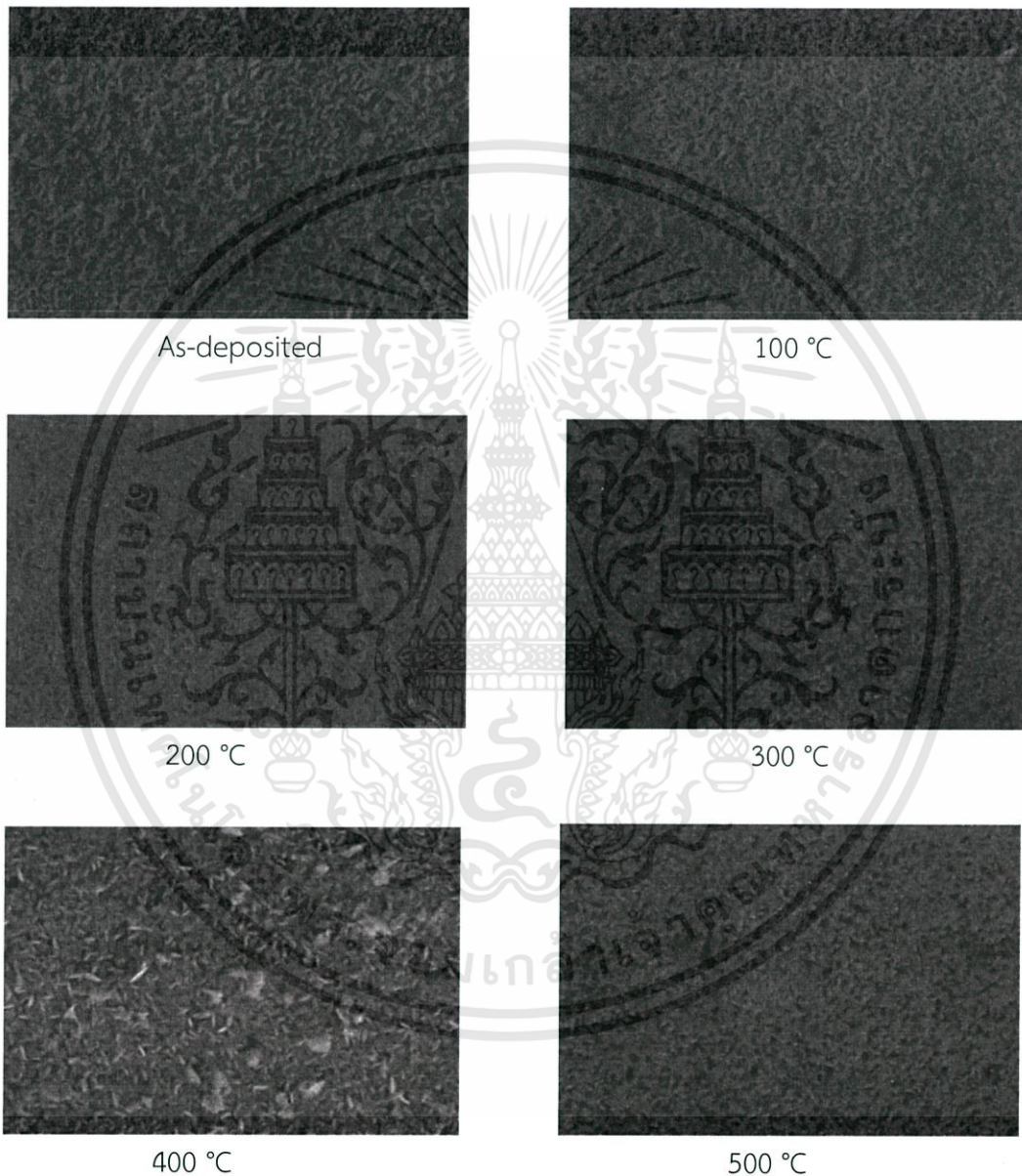


รูปที่ 4.6 แสดงภาพถ่ายของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $WO_3:Sb$ ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

ก. เมื่อไม่ได้เคลือบด้วยฟิล์มบาง SnS

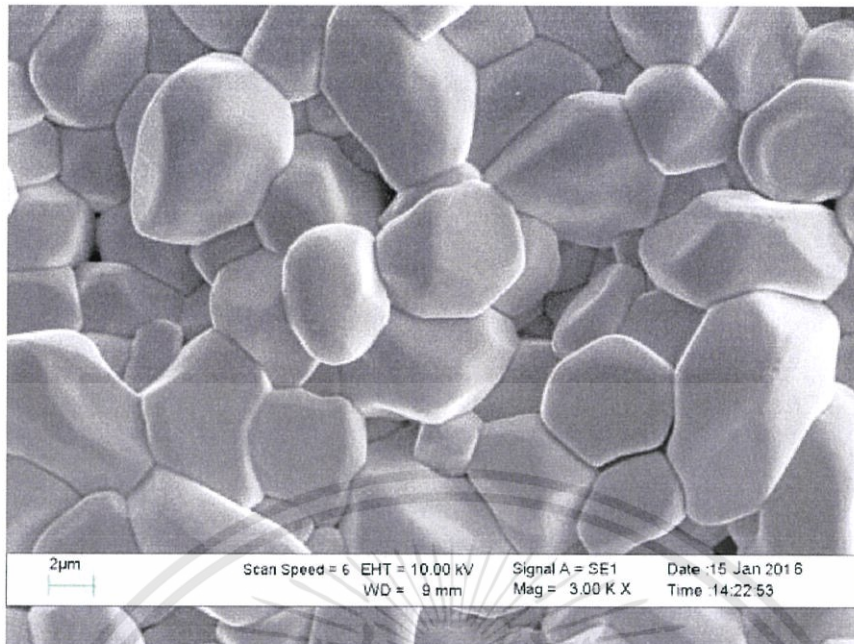
ข. เมื่อเคลือบด้วยฟิล์มบาง SnS

4.4 ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค ด้วยวิธีการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิต่างๆภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์

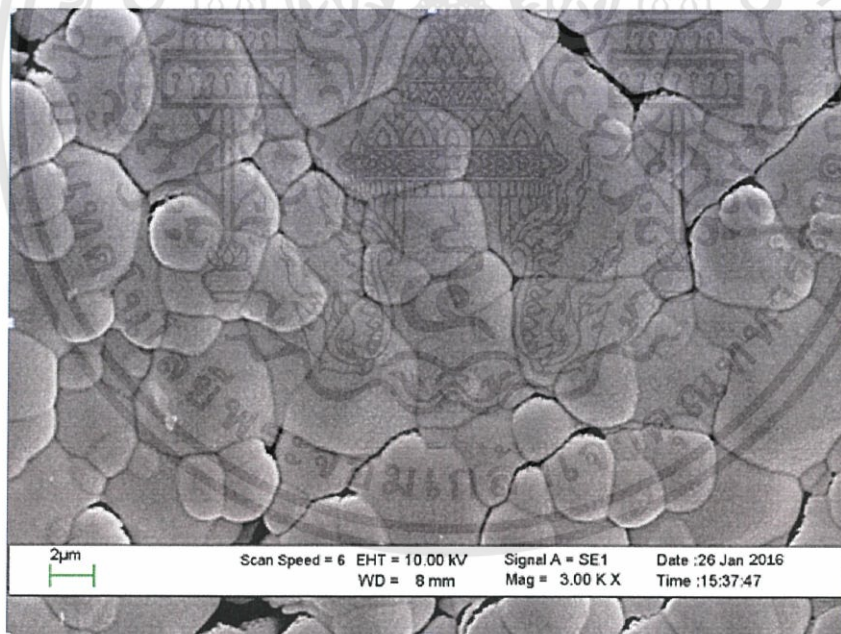


รูปที่ 4.7 แสดงภาพถ่าย SEM ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิต่างๆภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

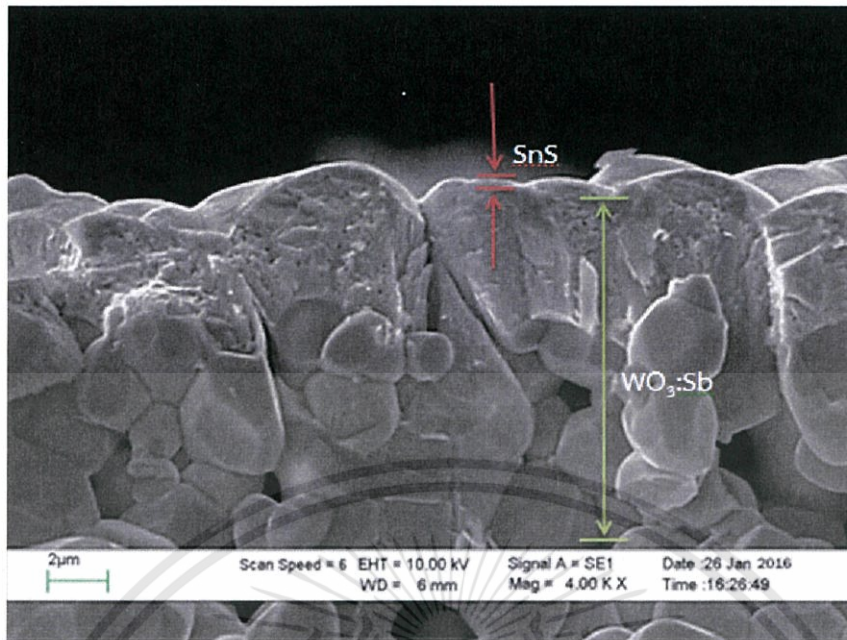


รูปที่ 4.8 แสดงภาพถ่าย SEM ที่บริเวณผิวหน้า ของ เซรามิก $\text{WO}_3:\text{Sb}$



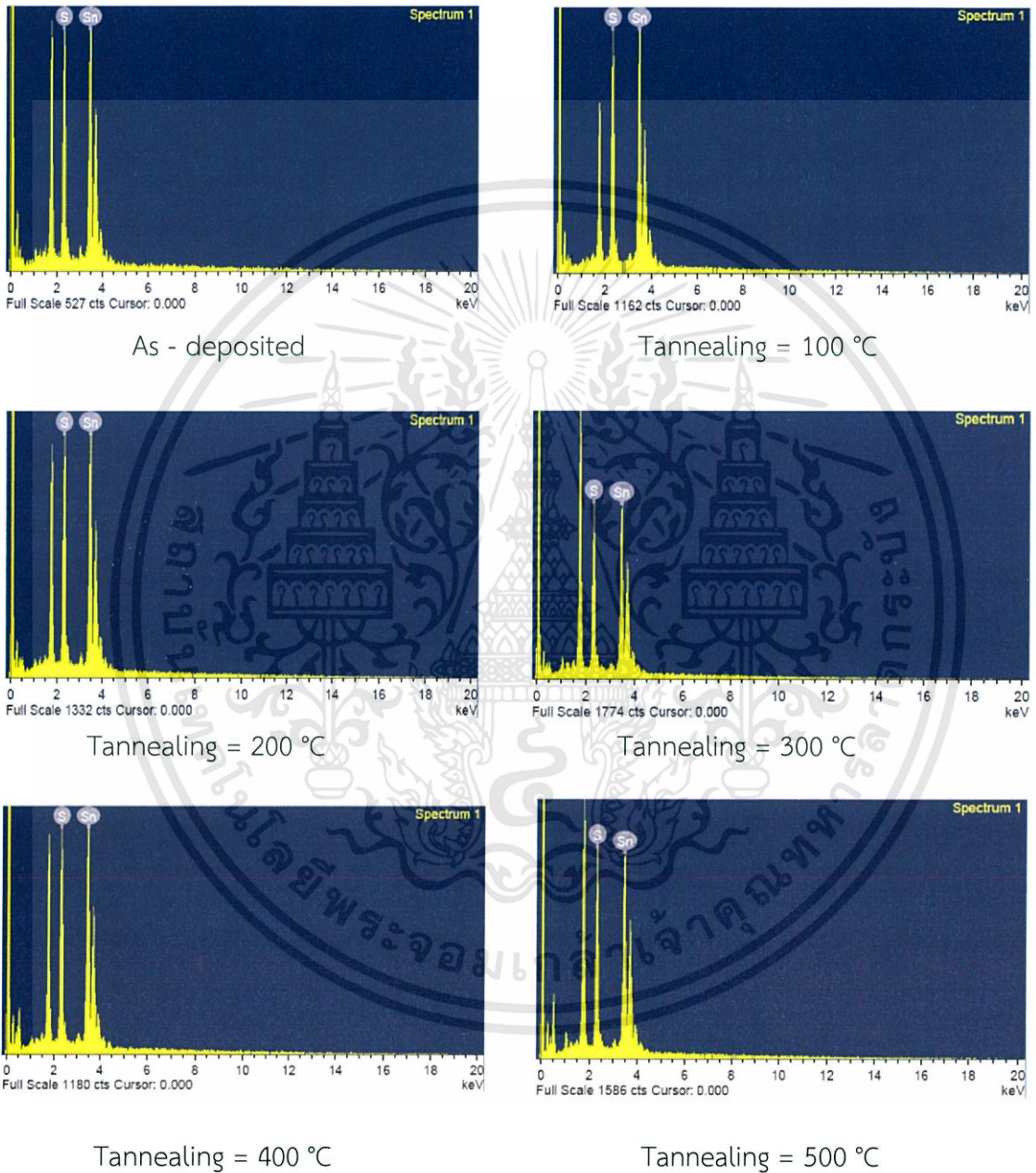
รูปที่ 4.9 แสดงภาพถ่าย SEM ที่บริเวณผิวหน้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n- $\text{WO}_3:\text{Sb}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 แสดงภาพถ่าย SEM ที่บริเวณภาคตัดขวางของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-WO₃:Sb ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส

4.5 ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิต่างๆภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์

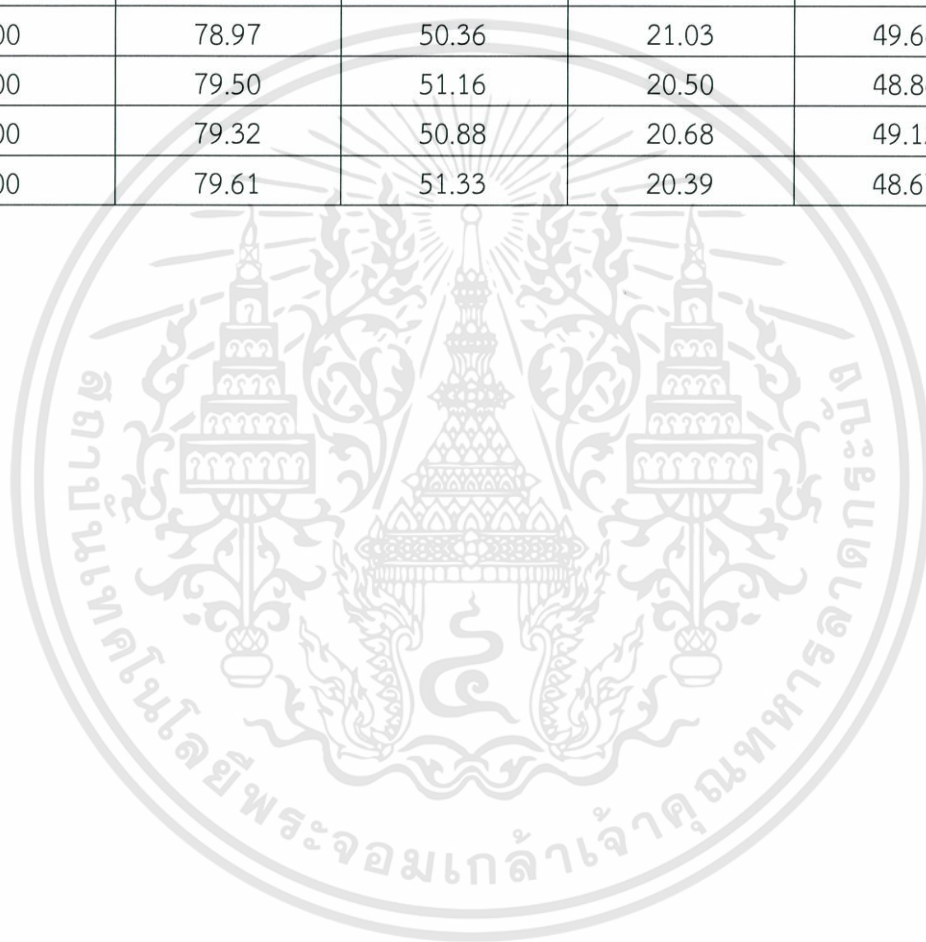


รูปที่ 4.11 แสดงสเปกตรัมที่ได้จากการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิต่างๆภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 แสดงองค์ประกอบของธาตุที่ได้จากการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิต่างๆ

Composition of SnS	Elements			
	Sn		S	
	Weight%	Atomic%	Weight%	Atomic%
as-deposited	79.48	51.13	20.52	48.87
100	78.22	49.24	21.78	50.76
200	78.97	50.36	21.03	49.64
300	79.50	51.16	20.50	48.84
400	79.32	50.88	20.68	49.12
500	79.61	51.33	20.39	48.67



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 ผลการวิเคราะห์ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิต่างๆภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์



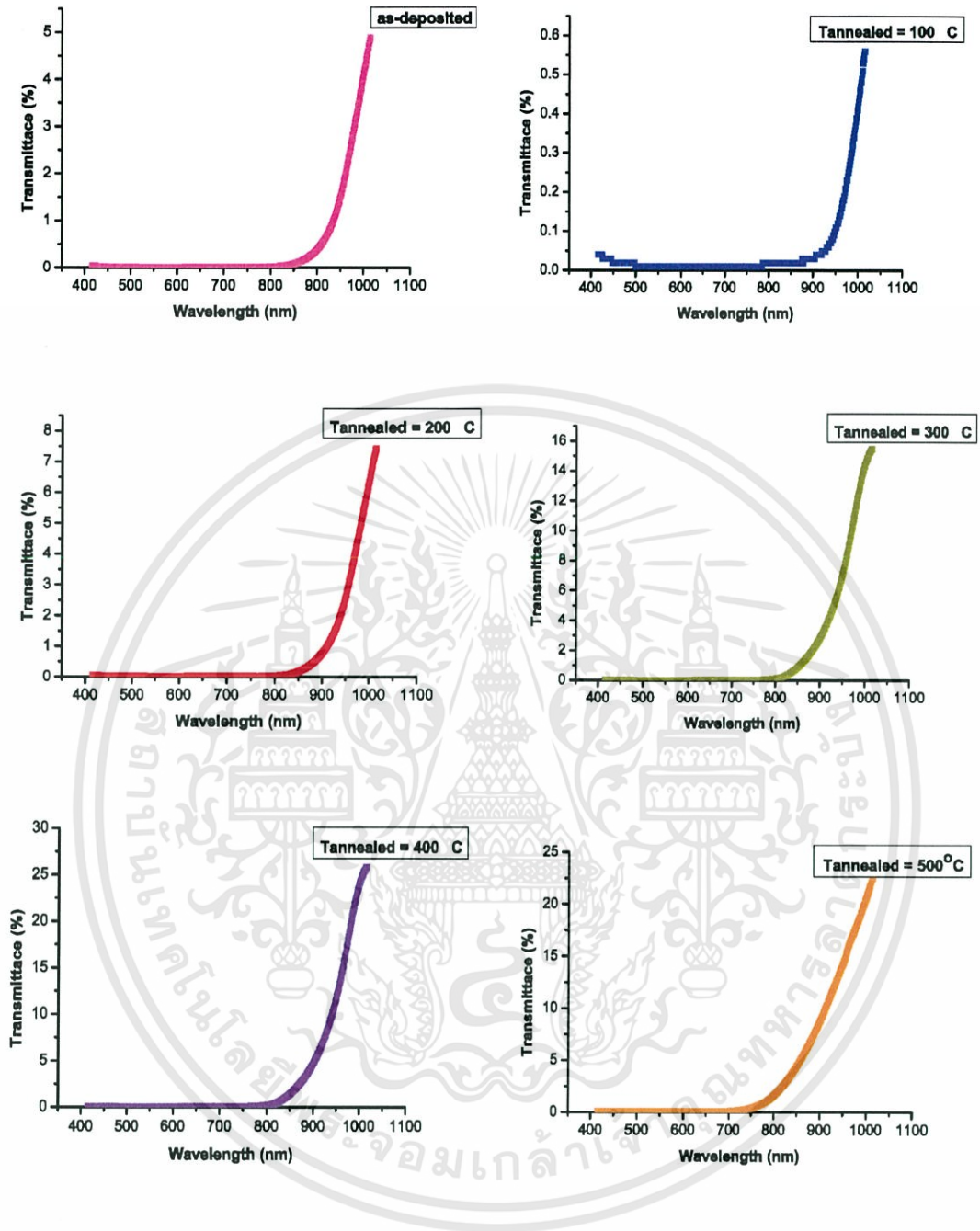
รูปที่ 4.12 แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิต่างๆภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์

4.7 ผลการศึกษาสมบัติทางแสงฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

4.7.1 ผลการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

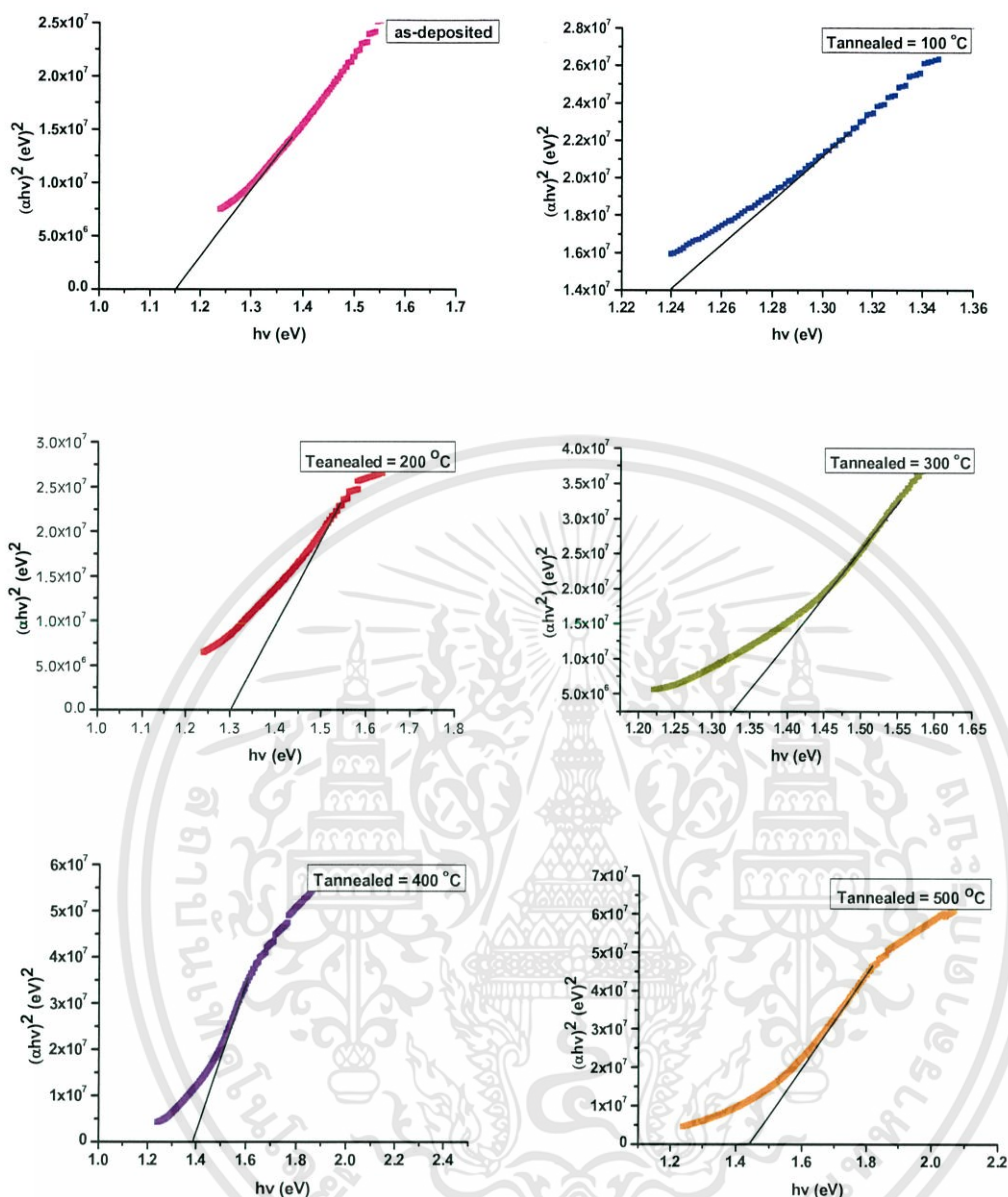
จากการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนیلและแอนนิลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที พิจารณาที่ความยาวคลื่น 400-1,000 นาโนเมตร และนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง กับพลังงานโฟตอน แล้วลากส่วนต่อของกราฟบริเวณที่เป็นเส้นตรงให้ตัดแกนพลังงานของโฟตอนโดยที่จุดตัดแกนคือค่าช่องว่างแถบพลังงาน ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6





รูปที่ 4.13 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าการส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส และมีการแอนนีสที่อุณหภูมิต่างๆภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

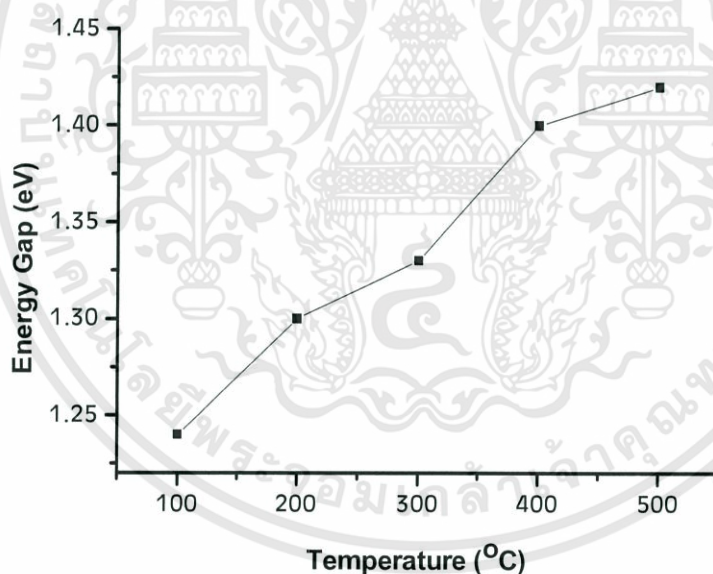
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 แสดงวิธีการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนัลและการแอนนัลที่อุณหภูมิต่างๆ ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนเป็นเวลา 30 นาที

ตารางที่4.5 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบไนโตรเจนบริสุทธิ์ สูญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีสและแอนนีสที่อุณหภูมิต่างๆ ภายใต้บรรยากาศของแก๊ส

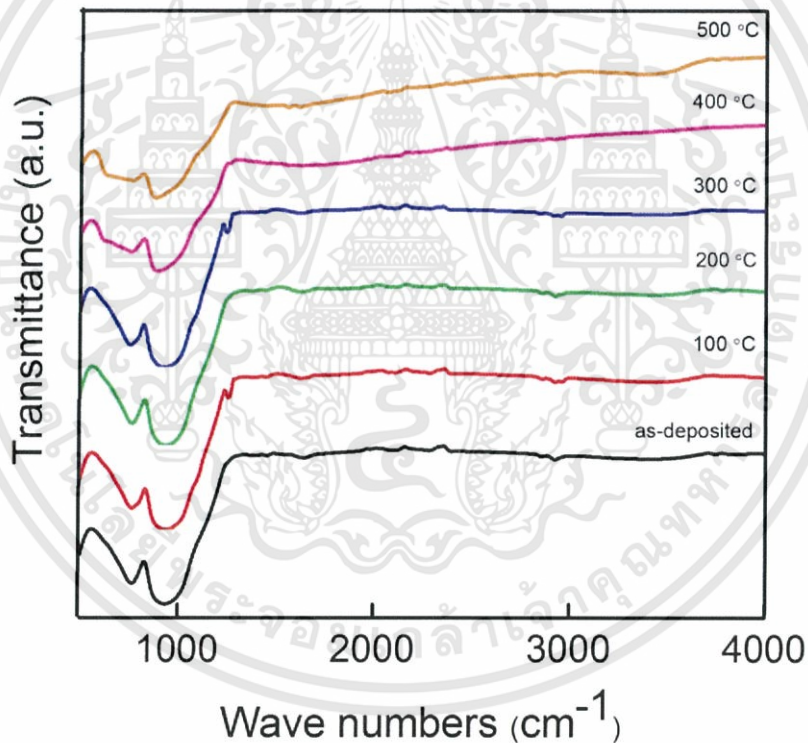
Annealing Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Energy Gap (E_g) (eV)
As-posited	1.15
100	1.24
200	1.30
300	1.33
400	1.40
500	1.42



รูปที่4.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง กับ อุณหภูมิของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสที่อุณหภูมิต่างๆ ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนเป็นเวลา 30 นาที

4.8 การวิเคราะห์เพื่อหาชนิดและโมเลกุลของสารประกอบที่อยู่ในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการวิเคราะห์สเปกตรัมอินฟราเรดด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ โดยการดูดกลืนแสงในช่วงย่านอินฟราเรดด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (FTIR)

การวิเคราะห์เพื่อหาชนิดและโมเลกุลของสารประกอบที่อยู่ในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการวิเคราะห์สเปกตรัมอินฟราเรดด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ โดยการดูดกลืนแสงในช่วงย่านอินฟราเรดด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ซึ่งทำการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง (Reflectance : %R) ที่ใช้เลขคลื่นมีค่าในช่วง 200 – 4000 ต่อเซนติเมตร



รูปที่ 4.16 แสดงสเปกตรัม FTIR ของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสด้วยอุณหภูมิตั้งแต่ 100 – 500 องศาเซลเซียส

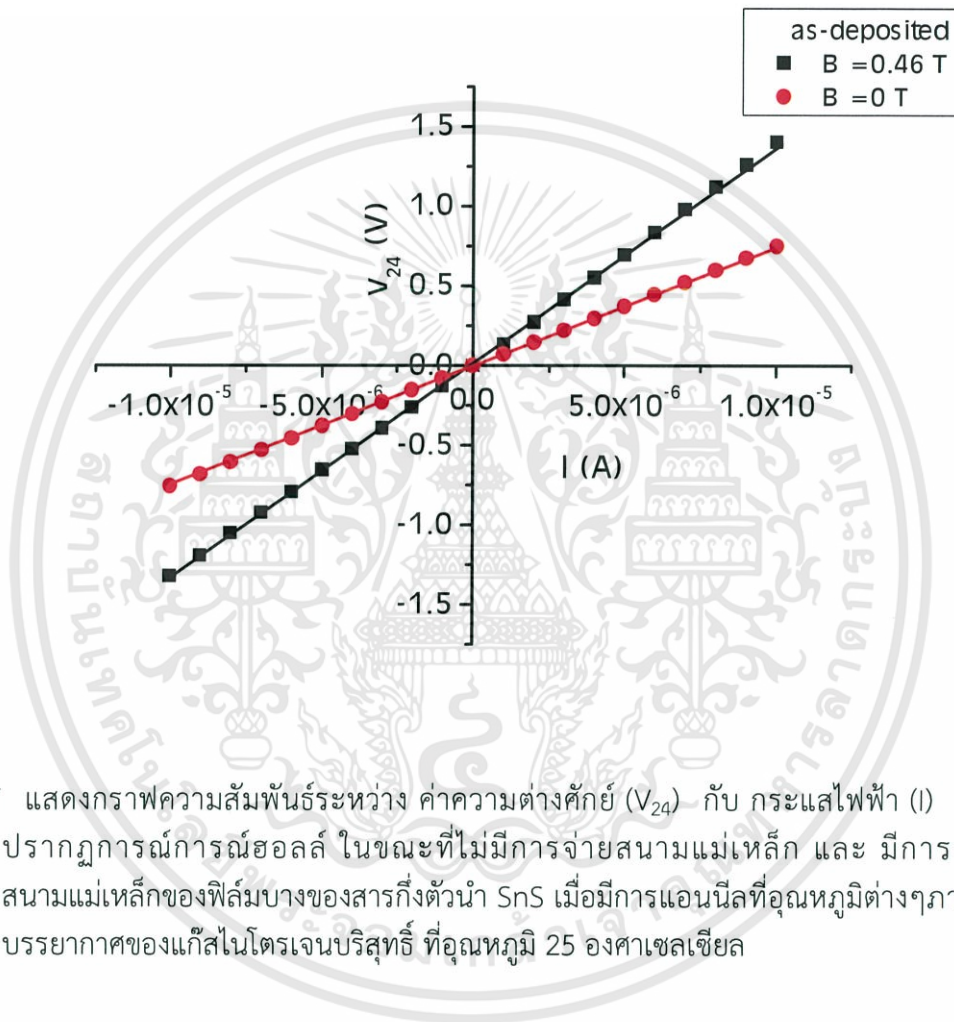
Assignments	FTIR Peaks						References
	As-deposited	100 °C	200 °C	300 °C	400 °C	500 °C	
Sn-S bond	765	765	765	765	760	765	This work
Sn-S bond	935	937	936	939	-	-	Mariappan, 2011, Kul, 2014
Sn-OH bond of SnO ₂ crystalline phase	-	-	-	-	895	881	Chaisitsak, 2011
Bending vibration of molecular water	1610	1600	1600	1600	1627	-	Das, 2015, Chaisitsak, 2011
C-H stretching mode	2926	2926	2926	2921	2900	2926	Aksay, 2009
O-H stretching vibration of absorbed H ₂ O	3500	3500	3430	3440	-	3500	Kuantama, 2009

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าเลขคลื่นของการดูดกลืนอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่างๆของฟิล์มบาง SnS

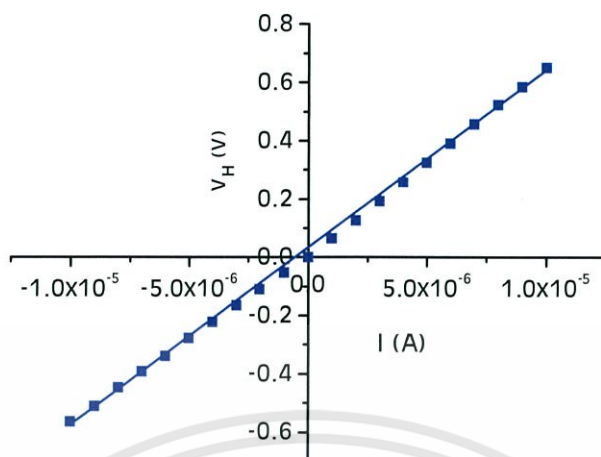
4.9 ผลการศึกษาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

4.9.1 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ แล้วทำการวัดค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า

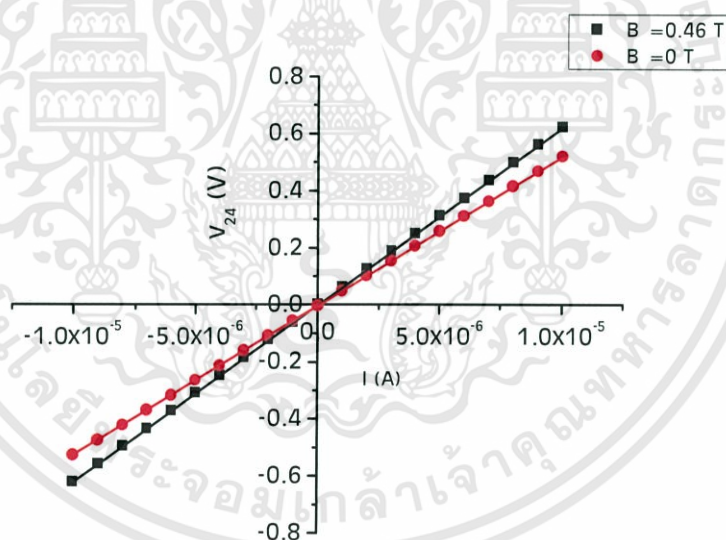
ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS



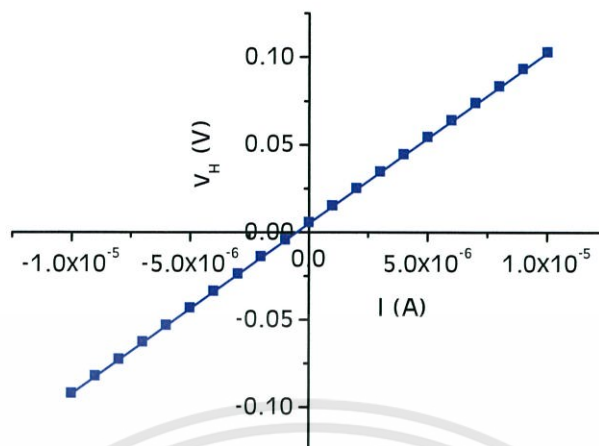
รูปที่ 4.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_{24}) กับ กระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์การณฮอลล์ ในขณะที่ไม่มีการจ่ายสนามแม่เหล็ก และ มีการจ่ายสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS เมื่อมีการแอนนิลที่อุณหภูมิต่างๆภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส



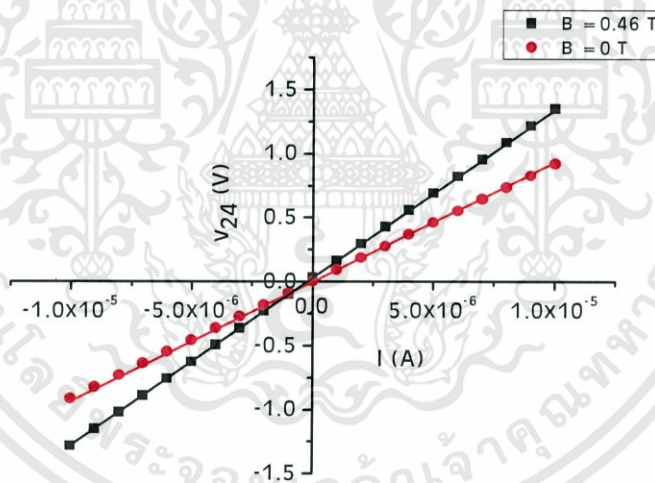
รูปที่ 4.18 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (V_H) กับ กระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิต่างๆ ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส



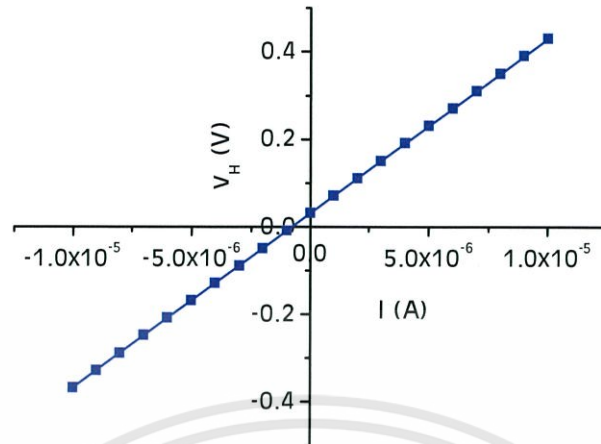
รูปที่ 4.19 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_{24}) กับ กระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ ในขณะที่ไม่มีการจ่ายสนามแม่เหล็ก และ มีการจ่ายสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิต่างๆ ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส



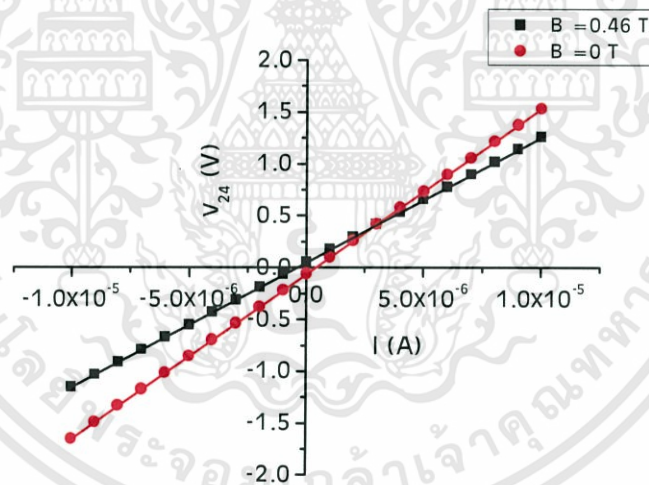
รูปที่ 4.20 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (V_H) กับ กระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิต่างๆ ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส



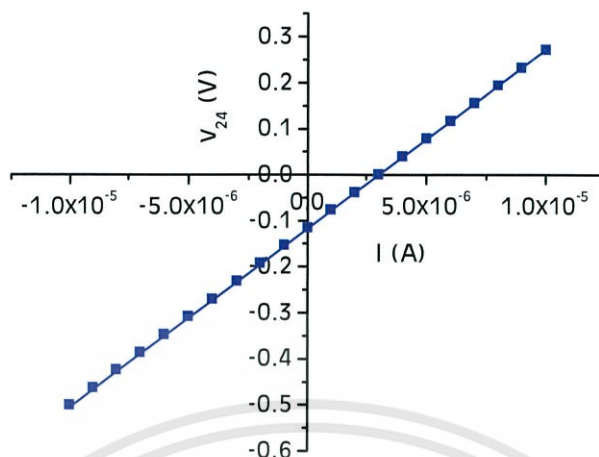
รูปที่ 4.21 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_{24}) กับ กระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์การฮอลล์ ในขณะที่ไม่มีการจ่ายสนามแม่เหล็ก และ มีการจ่ายสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิต่างๆ ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส



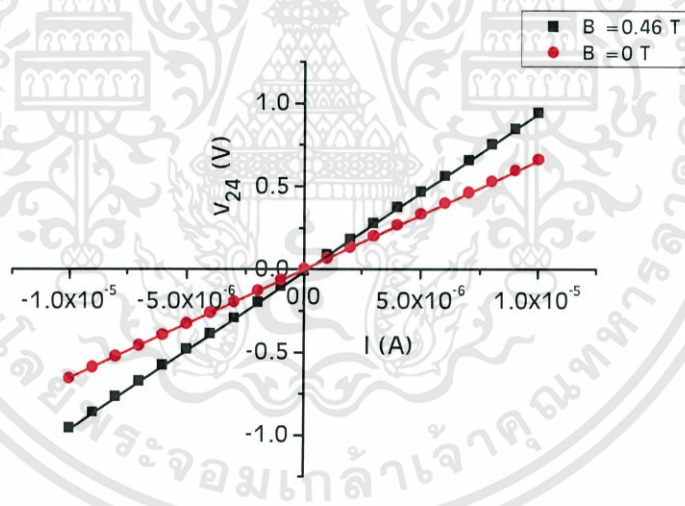
รูปที่ 4.22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (V_H) กับ กระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS เมื่อมีการแอนเนิลที่อุณหภูมิต่างๆ ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส



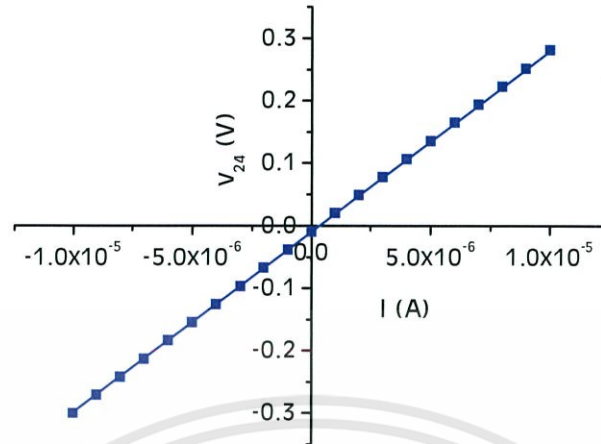
รูปที่ 4.23 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_{24}) กับ กระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ ในขณะที่ไม่มีการจ่ายสนามแม่เหล็ก และ มีการจ่ายสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS เมื่อมีการแอนเนิลที่อุณหภูมิต่างๆ ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส



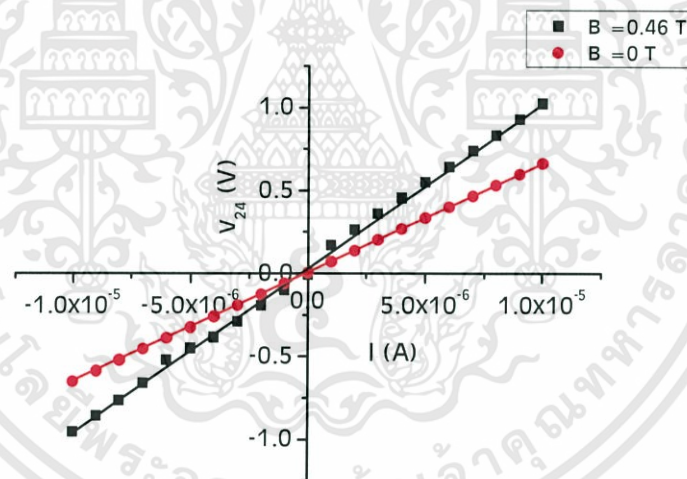
รูปที่ 4.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (V_{24}) กับ กระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS เมื่อมีการแอนเนิลที่อุณหภูมิต่างๆ ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส



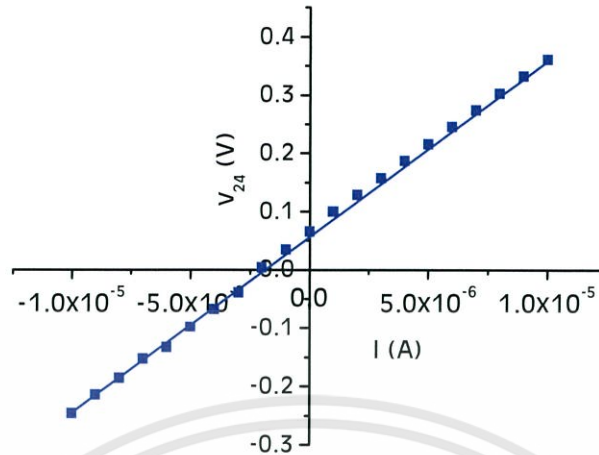
รูปที่ 4.25 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_{24}) กับ กระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์การฮอลล์ ในขณะที่ไม่มีการจ่ายสนามแม่เหล็ก และ มีการจ่ายสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS เมื่อมีการแอนเนิลที่อุณหภูมิต่างๆ ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.26 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (V_H) กับ กระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS เมื่อมีการแอนนิลที่อุณหภูมิต่างๆ ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.27 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_{24}) กับ กระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์การฮอลล์ ในขณะที่ไม่มีการจ่ายสนามแม่เหล็ก และ มีการจ่ายสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS เมื่อมีการแอนนิลที่อุณหภูมิต่างๆ ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส



รูปที่4.28 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (V_H) กับ กระแสไฟฟ้า (I) ของ ปรากฏการณ์ฮอลล์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิต่างๆ ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

จากการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS เมื่อ ไม่มีการแอนนัล สามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆได้ ดังนี้

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า สามารถคำนวณได้โดย

$$\begin{aligned} \rho &= R_{sh} d \\ &= 544142(5 \times 10^{-5}) \\ &= 27.2071 \text{ โอห์ม - เซนติเมตร} \end{aligned}$$

ค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ สามารถคำนวณได้โดย

$$\begin{aligned} R_H &= (10^6) \left(\frac{V_H}{I} \right) \left(\frac{d}{B} \right) \\ &= \frac{(10^6) (slope) (5 \times 10^{-5})}{4600} \end{aligned}$$

$$= 5.44 \times 10^5 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อคูอมบ์}$$

จากค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ สามารถนำมาคำนวณหา ค่าความหนาแน่นของพาหะ ได้ดังนี้

$$n = \frac{1}{qR_H}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \frac{1}{(1.6 \times 10^{19})(5.44 \times 10^5)}$$

$$n = 658.61 \text{ ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร}$$

และจากค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ และ ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า สามารถนำมาคำนวณหา ค่าสภาพคล่องตัวของพาหะ ได้ดังนี้

$$\mu_H = \frac{R_H}{\rho}$$

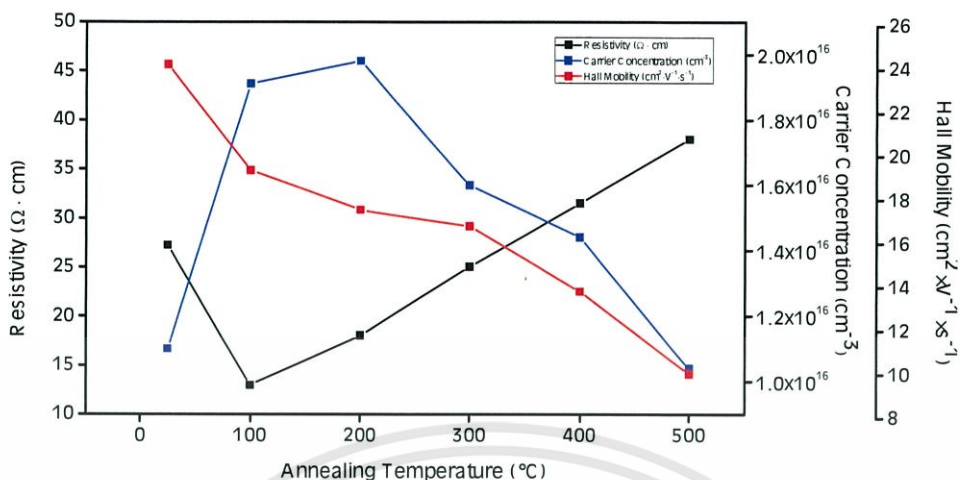
$$= 24.20 \text{ ตารางเซนติเมตรต่อ (โวลต์ - วินาที)}$$

และจากค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ ยืนยันได้ว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS มีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นชนิดพี (p-type)

ตารางที่ 4.7 แสดงผลการวัดปรากฏการณ์ของฮอลล์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิต่างๆภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์

Annealing Temperature (°C)	Resistivity ($\Omega \cdot \text{cm}$)	Hall coefficient (cm^2/C)	Hole concentration (cm^{-3})	Hall Mobility ($\text{cm} \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)	R_{sh} (Ω)
As-deposited	27.20	658.61	1.10×10^{16}	24.20	5.44×10^5
100	12.95	465.03	5.89×10^{16}	18.19	2.59×10^5
200	18.00	315.82	1.98×10^{16}	17.55	3.60×10^5
300	25.02	419.69	1.49×10^{16}	16.80	5.00×10^5
400	31.49	434.16	1.44×10^{16}	13.80	6.30×10^5
500	38.02	600.96	1.04×10^{16}	10.01	7.60×10^5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

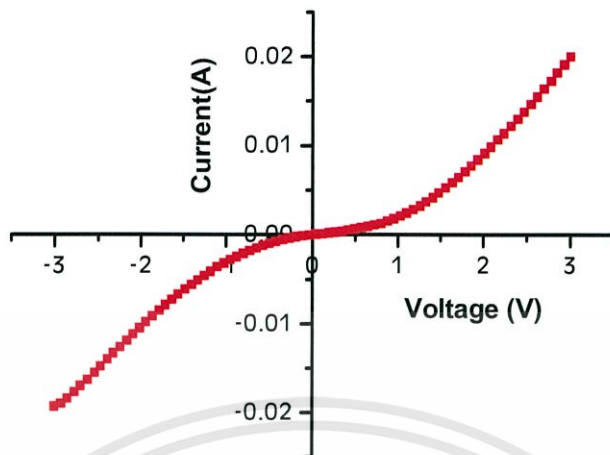


รูปที่ 4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้าความหนาแน่นของพาหะและสภาพคล่องฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิต่างๆภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์

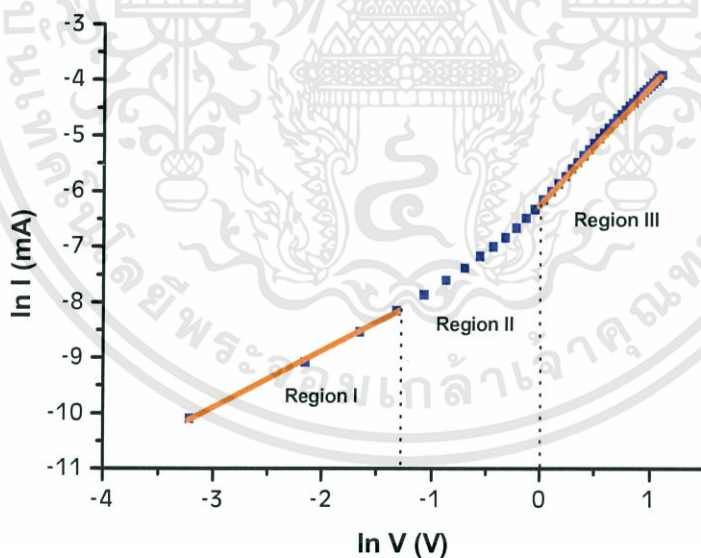
4.9.2 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอด ที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-WO₃:Sb ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-WO₃:Sb โดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า ในช่วง -3 ถึง 3 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องดังปรากฏในรูปที่ 4.30 พบว่ามีการเรียงกระแสไฟฟ้าทางเดียวเหมือนไดโอดทั่วไป โดยมีค่าแรงดันไฟฟ้าขีดเริ่ม (threshold voltage) อยู่ที่ 1.0 โวลต์ p-SnS/n-WO₃:Sb ที่อุณหภูมิห้องพบว่าที่แรงดันไฟฟ้าต่ำกว่า 0.25 โวลต์จะเป็นไปตามกฎของโอห์ม ส่วนในช่วงแรงดันไฟฟ้า ระหว่าง 0.25 – 1.0 โวลต์ เป็นกลไกการนำกระแสแบบเทอร์มิออนิกอิมิสชัน (thermionic emission) และช่วงแรงดันไฟฟ้ามากกว่า 1.0 โวลต์ เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้าง (Space Charge Limit Current)

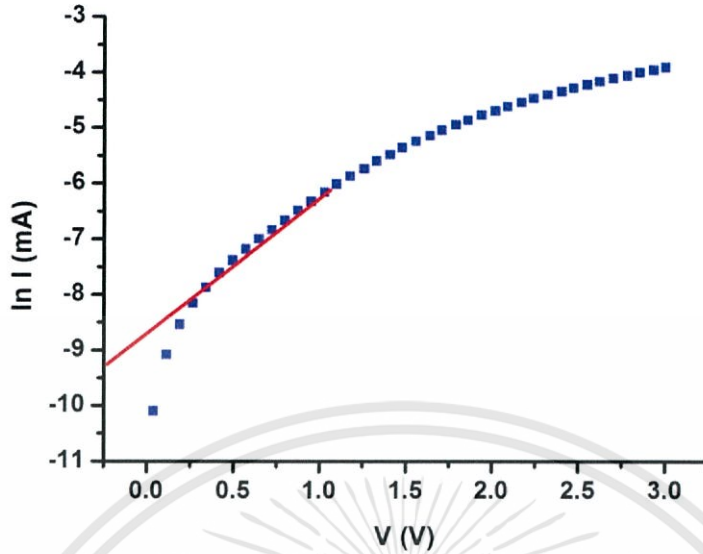
เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln I$ กับ V ดังรูป 4.32 เพื่อหาค่าแพกเตอร์ในอุดมคติ และค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับ แล้วนำไปใช้เป็นค่าเริ่มต้นในการจำลองข้อมูลเพื่อนำผลคำนวณที่ได้มาเทียบกับผลการคำนวณที่ได้จากการวัด ค่ากระแสไฟฟ้า และ แรงดันไฟฟ้า ใช้วงจรไหลแบบเทอร์มิออนิกอิมิสชัน ซึ่งจะใช้การหาค่าแพกเตอร์ไดโอดในอุดมคติ การหาค่าความต้านทานอนุกรมด้วยวิธีของช่วงนั้น จะเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $dV/d\ln(I)$ ดังรูปที่ 4.26 ซึ่งจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $H-I$ ดังรูปที่ 4.27 จะได้ค่าก่าแพกต์กัยในขณะที่ค่าไบแอสเป็นศูนย์



รูปที่ 4.30 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS / n-WO₃ : Sb ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนัล



รูปที่ 4.31 แสดงกราฟที่ใช้ในการอธิบายกลไกการนำกระแสไฟฟ้าแต่ละช่วงของค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS / n-WO₃ : Sb ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนัล



รูปที่ 4.32 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln |I|$ กับ V เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-SnS} / n\text{-WO}_3 : \text{Sb}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีสล

จากรูปที่ $\ln |I| - V$ คือกราฟแสดงความสัมพันธ์ค่าลอการิทึมของค่ากระแสไฟฟ้า และแรงดันไฟฟ้า เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับ (I_s) และค่าแฟกเตอร์ในอุดมคติ (n) โดยอาศัยกราฟเส้นตรงในช่วงที่มีการนำกระแสไฟฟ้าที่เป็นกลไกแบบเทอร์มิออนิกอิมิสชัน ดังสมการ

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

เมื่อ I_s คือ ค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับมีค่าเท่ากับ

$$I_s = AA^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_{BO}}{kT}\right) \quad (4.2)$$

เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln |I|$ กับ V เพื่อหาค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับได้จากกราฟลากเส้นตรงผ่านบริเวณกราฟที่เป็นกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันตัดแกน $\ln |I|$ โดยจุดตัดกราฟที่ค่าเท่ากับ $\ln |I_s|$ และค่าความชันของกราฟเท่ากับ $\frac{q}{nkT}$ ซึ่งสามารถนำมาคำนวณหาค่าแฟกเตอร์อุดมคติ(n)ได้จากสมการที่ 4.2 จะได้ค่าความสูงของกำแพงศักย์คือ

$$\phi_{BO} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{AA^* T^2}{I_s}\right) \quad (4.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสูงของกำแพงศักย์ ϕ_{BO} ของสมการที่ (4.3) จะเป็นค่าในขณะแรงดันไบแอสเป็นศูนย์ที่ อุณหภูมิห้องและค่ามวลยวผล (m_h^*) ของโฮลในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS เท่ากับ $0.33 m_0$ ดังนั้นค่า A^* เท่ากับ 39.6 แอมแปร์ ต่อ (ตารางเซนติเมตร - เคลวินยกกำลังสอง)

นอกจากนี้ยังสามารถที่จะหาค่าแฟกเตอร์อุดมคติ (n) ของไดโอดที่ขึ้นกับแรงดันไบแอสโดยอาศัยความสัมพันธ์ ดังนี้

$$n = \frac{q}{kT} \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (4.4)$$

ในความจริงแล้วไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS / n-WO₃ : Sb มักจะมีความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม (R_s) เกิดขึ้นเสมอ ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากความต้านทานของเนื้อสารและขั้วไฟฟ้าด้านหลัง จึงต้องทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าในช่วงแรงดันไฟฟ้าค่าสูงๆ เพื่อให้ความต้านทานอนุกรมนั้นแสดงผลออกมา ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS / n-WO₃ : Sb ที่มีความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมมาเกี่ยวข้องจะเป็น

$$I = I_s \left\{ \frac{q}{kT} (V - IR_s) - 1 \right\} \quad (4.5)$$

เมื่อกระแสอิมิตัวย้อนกลับ คือ

$$I_s = AA^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_{BO}}{kT}\right) \quad (4.6)$$

อาจเขียนสมการที่ (4.5) อีกรูปหนึ่งได้เป็น

$$I = I_s \left\{ \exp\frac{q}{nkT} (V - IR_s) \left[-\exp\left(-\frac{qV}{kT}\right) \right] \right\} \quad (4.7)$$

วิธีการหาค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมของชวง (Cheung's method) พิจารณาในช่วงแรงดันไบแอสไปข้างหน้า โดยการแทนสมการที่ (4.6) ลงในสมการที่ (4.5) แล้วจะได้ว่า

$$V = IR_s + n\phi_B + \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I}{AA^* T^2}\right) \quad (4.8)$$

หาอนุพันธ์ของค่า V เทียบกับ $\ln I$ เพื่อหาค่าความต้านทานอนุกรม จากสมการที่ (4.8) จัดรูปใหม่ได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{q} + IR_s \quad (4.9)$$

ซึ่งสอดคล้องกับกราฟเส้นตรง จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $dV/d(\ln I)$ กับ I ดังรูปที่ $dV/d(\ln I)$ กับ I

โดยค่าความชันกราฟนั้นคือ ค่าความต้านทานอนุกรมของวงจร (R_s) และจุดตัดแกน $dV/d(\ln I)$ มีค่าเท่ากับ nkT/q

ส่วนการหาค่าความสูงของกำแพงศักย์นั้นจะหาได้โดยการจัดรูปของสมการที่ (4.8) ให้อยู่ในรูปฟังก์ชันของ $H(I)$ ดังนี้

$$H(I) = V - n \left(\frac{kT}{q} \right) \ln \left(\frac{I}{AA^*T^2} \right) \quad (4.10)$$

แล้วสมการที่ (4.10) จะกลายเป็น

$$H(I) = n\phi_B + IR_s$$

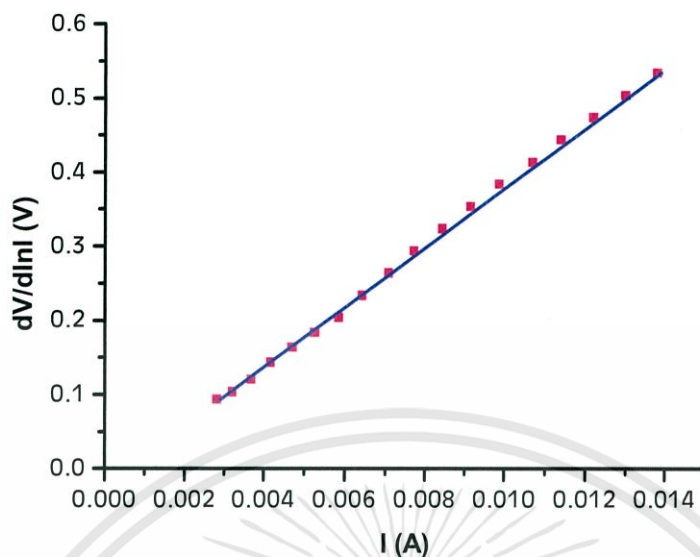
เมื่อทำการคำนวณค่า $H(I)$ จากข้อมูลของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าแล้วนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $H(I)$ กับ I ก็จะได้ผลดังรูปที่ $H(I) - I$ โดยจะคำนวณหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ได้จากจุดตัดแกนตั้ง ($n\phi_B$) ของกราฟ ความสัมพันธ์ดังกล่าว นอกจากนี้ค่าความชันของกราฟที่เขียนขึ้นในรูปของฟังก์ชัน $H(I)$ นั้นก็คือ ค่าความต้านทานอนุกรมเช่นเดียวกับความสัมพันธ์ในสมการที่ (4.9) ซึ่งจะส่งผลให้ค่าความต้านทานอนุกรม (R_s) ที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกัน

กลไกการนำไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้าง (SCLC) มักจะเขียนความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า - แรงดันไฟฟ้า ดังนี้คือ

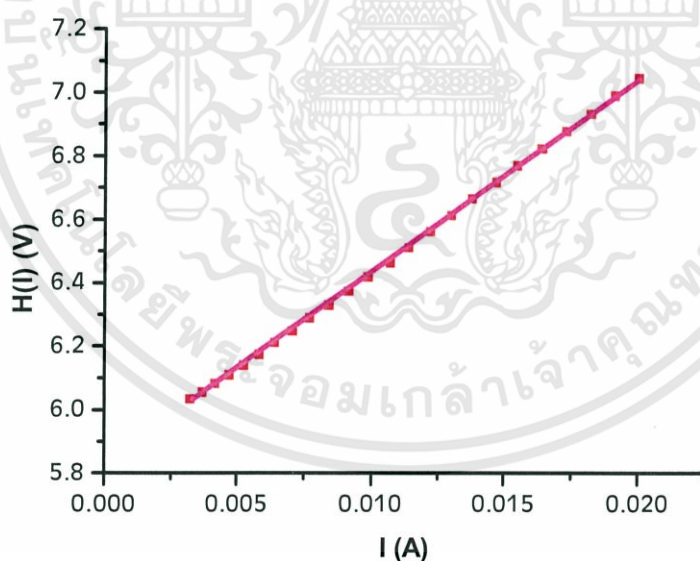
$$I = kV^m \quad (4.12)$$

$$\ln I = m \ln V + \ln k \quad (4.13)$$

เมื่อ m คือ ค่าความชันของกราฟ ถ้า m มีค่าเท่ากับ 1.5 กลไกการนำไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้างจะเป็นไปตามกฎของไชด์-แลงมัวร์(Child-Langmuir's law) แต่ถ้า m เท่ากับ 2 จะเป็นไปตามกฎของมอตต์-เกอร์นีย์(Mott-Gurney's law) แต่ถ้า $m > 2$ จะหมายถึงว่ากับดักประจุมีระดับพลังงานต่อเนื่องและมีการแจกแจงแบบเอกซ์โพเนนเชียล ซึ่งจากผลการทดลองได้ค่า m เท่ากับ 2.5 แสดงว่ากับดักประจุมีระดับพลังงานต่อเนื่องและมีการแจกแจงแบบเอกซ์โพเนนเชียล



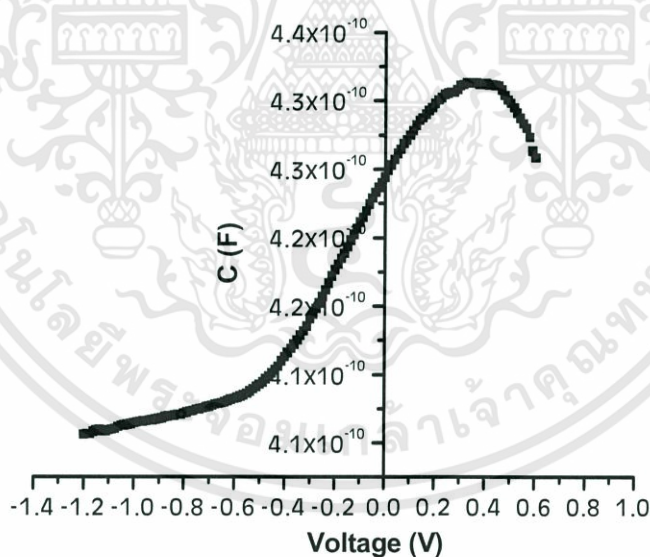
รูปที่ 4.33 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $dV/d\ln(I)$ กับ I เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของ ไดโอดที่มี รอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS / n-WO₃ : Sb ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนัล



รูปที่ 4.34 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $H(I)$ กับ I เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS / n-WO₃ : Sb ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนัล

ตารางที่ 4.8 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ (I_s) ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ (n) ค่าความสูงกำแพงศักย์ในขณะที่ไบแอสเป็นศูนย์ (ϕ_{BO}) และค่าความต้านทานอนุกรม (R_s) ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มิโอนิกอิมิสชัน และวิธีชวงเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS / n-WO₃ : Sb ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนัล

T (K)	Saturation Current I_s (A)	Ideality Factor (n)		Barrier Height ϕ_{BO} (eV)		Series Resistance R_s (Ω)	
		TE	Cheung	TE	Cheung	Cheung	Cheung
		I-V	$[dv/d\ln(I)]-I$	I-V	$H(I)-I$	$H(I)-I$	$[dv/d\ln(I)]-I$
300	2.38×10^{-4}	15.383	15.192	0.520	0.362	161.24	150.36



รูปที่ 4.35 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า C กับ V ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS / n-WO₃ : Sb ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนัล

จากรูปที่ 4.35 แสดงผลการศึกษารูปความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้า กับแรงดันไฟฟ้า โดยจ่ายแรงดันไบแอสในช่วง 0 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS / n-WO₃ : Sb พบว่าเมื่อแรงดันไบแอส เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ย้อนกลับมีค่ามากขึ้นจะทำให้ค่าความจุไฟฟ้านั้นลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากความกว้างของบริเวณพร่องพาหะจะลดลง ซึ่งจะส่งผลให้ค่าความจุไฟฟ้ามีค่ามากขึ้นจนถึงจุดสูงสุดค่าหนึ่ง จากนั้นค่าความจุไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเนื่องจากการฉีดพาหะอิสระจำนวนมากผ่านรอยต่อจนเสมอวารอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ p-SnS / n-WO₃ : Sb หายไปในชั่วขณะ

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าที่แสดงรูปที่ 4.25 กราฟ lnI-lnV นำมาเขียนใหม่ให้อยู่ในรูปของส่วนกลับของค่าความจุไฟฟ้ายกกำลังสองกับแรงดันไฟฟ้าจะสามารถหา ค่าศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมรอยต่อ (V_{bi}) และความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ (N_D) ได้จากสมการดังนี้

$$\frac{1}{C^2} = \left(\frac{2}{\epsilon_S q N_A A^2} \right) \left(V_{bi} - \frac{kT}{q} - V \right) \quad (4.14)$$

โดยที่จะเอาส่วนที่เป็นเส้นตรงในช่วงไบแอสแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับตั้งแต่ 0 โวลต์ โดยประมาณแล้วทำการลากเส้นตรงไปตัดผ่านแกน X จะทำให้ได้ค่า V_i แล้วนำมาหาศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมตรงบริเวณรอยต่อจากความสัมพันธ์

$$V_{bi} = V_i + \frac{kT}{q} \quad (4.15)$$

ส่วนความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ มีค่าเท่ากับ 4.47×10^{14} ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร สามารถคำนวณได้จากค่าความชันของกราฟตามสมการที่ (4.16) คือ

$$\text{Slope} = \frac{2}{q \epsilon_S N_D A^2} \quad (4.16)$$

เมื่อ ϵ_S คือ เพอร์มิตติวิตี (permittivity) ของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO₃ จะมีค่า $\epsilon_S = \epsilon_r \epsilon_0$ โดย ϵ_r คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกซึ่งมีค่าเท่ากับ 12.1

จะได้

$$\begin{aligned} \epsilon_S &= \epsilon_r \epsilon_0 \\ &= 12.1 \times 885 \times 10^{14} \\ &= 1.07 \times 10^{-12} \\ A &= \pi \cdot^2 \end{aligned}$$

$$= \pi(0.1)^2$$

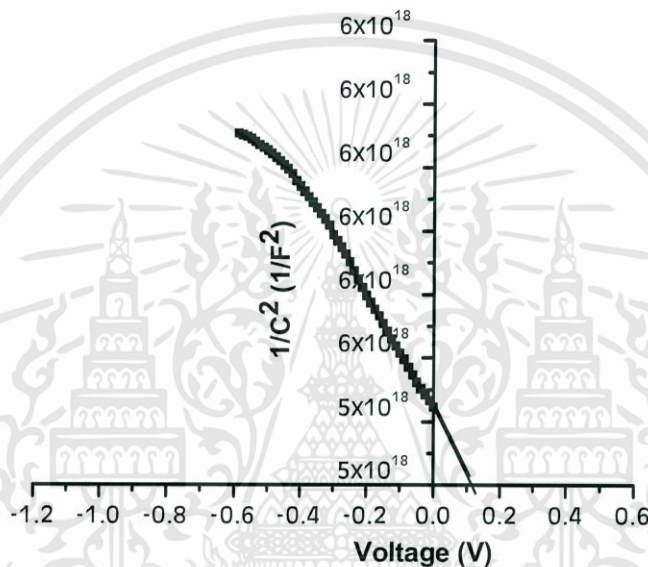
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= 0.03$$

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

$$N_D = \frac{2}{(1.6 \times 10^{-19})(1.07 \times 10^{-12})(0.03)^2 (8.7346 \times 10^{17})}$$

$$= 4.46 \times 10^{14} \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตร}$$



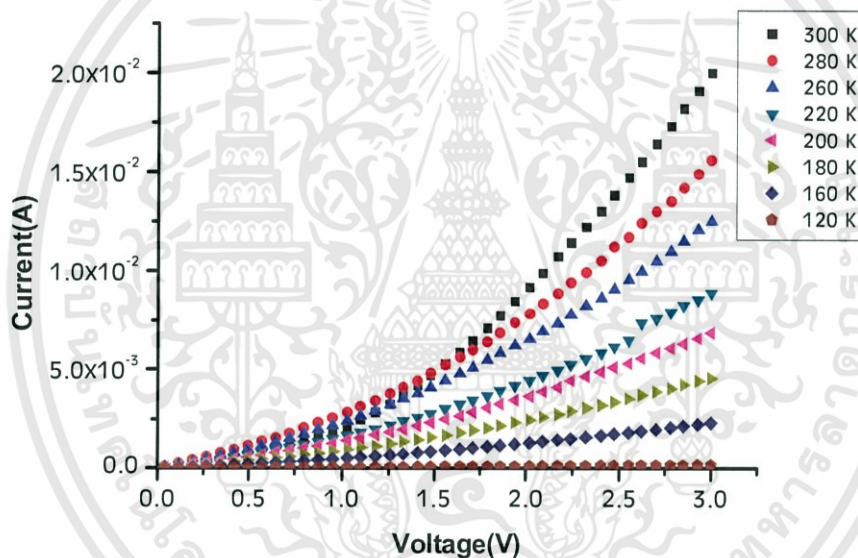
รูปที่ 4.36 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1/C^2$ กับ V ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ p-SnS / n-WO₃ : Sb ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนัล

4.9.3 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า กับ แรงดันไบอัสตรง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำลงในช่วงอุณหภูมิ 300 – 20 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS / n-WO₃ : Sb ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

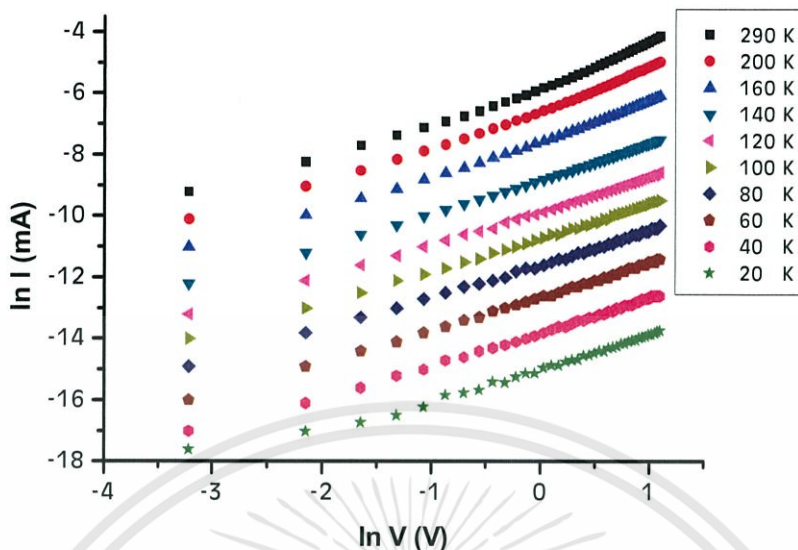
ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS / n-WO₃ : Sb โดยวัดค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า ในช่วง -3 ถึง 3 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 300 – 20 เคลวิน พบว่าที่ค่าแรงดันไฟฟ้าเท่ากันในกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ตรงบริเวณรอยต่อมีค่าลดลงตามค่าอุณหภูมิที่ลดลง ดังแสดงดังรูปที่ 1 – V (ที่มีหลายๆอุณหภูมิ) การศึกษากลไกของกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ตรงบริเวณรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS / n-WO₃ : Sb ที่ช่วงแรงดันไฟฟ้า -3 ถึง 3 ที่อุณหภูมิห้อง พบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าน้อยกว่า 0.25 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องพบว่าที่ค่าแรงดันไฟฟ้าที่เป็นไปตามกฎของโอห์ม ส่วนช่วงแรงดันไฟฟ้า 0.25 ถึง 1.0 โวลต์ เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

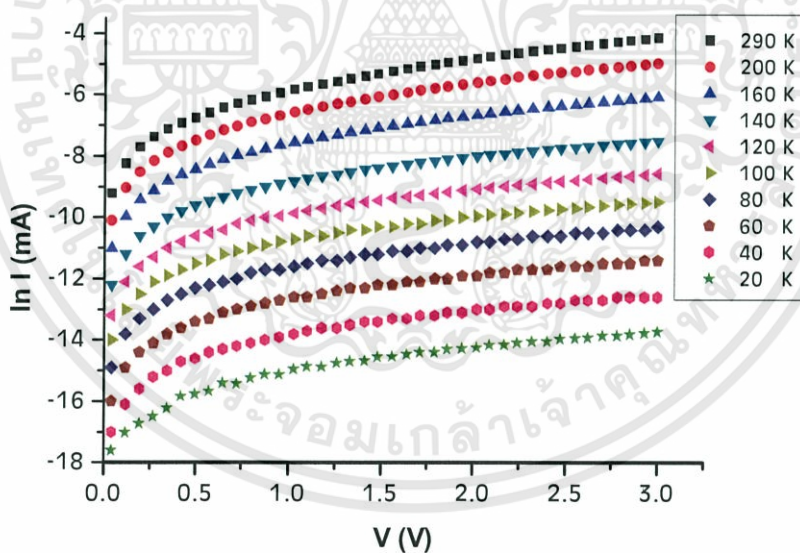
เป็นไปตามแบบกลไกเทอร์มออิเล็กทริก และที่แรงดันไฟฟ้าบริเวณมากกว่า 1 โวลต์ จะเป็นกลไกการนำไฟฟ้าแบบชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้ำที่เกิดจากกับดักประจุในเนื้อสารที่มีการแจกแจงแบบเอกซ์โพเนนเชียล เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln I$ กับ V เพื่อหาค่าแฟกเตอร์อุณหภูมิตีและค่ากระแสไฟฟ้าอิมิตัวย้อนกลับแล้วนำไปใช้เป็นค่าเริ่มต้นในการจำลองข้อมูลเพื่อเปรียบเทียบกับผลการคำนวณที่ได้จากการวัดค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า ในช่วงการไหลของกระแสไฟฟ้าข้ามกำแพงศักย์ตรงบริเวณต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS / n-WO₃ : Sb ที่เป็นกลไกเทอร์มออิเล็กทริก เพื่อช่วยให้หาค่ากระแสไฟฟ้าอิมิตัวย้อนกลับและแฟกเตอร์อุณหภูมิตีให้ถูกต้องยิ่งขึ้น การหาค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมจะใช้วิธีของชวงโดยที่ค่ากระแสไฟฟ้าอิมิตัวย้อนกลับค่าแฟกเตอร์อุณหภูมิตี ค่าความสูงของกำแพงศักย์ และ ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมที่อุณหภูมิต่ำขาลงในช่วง 300 ถึง 20 เคลวิน ที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มออิเล็กทริก และวิธีชวง แสดงในตารางที่ 4.9



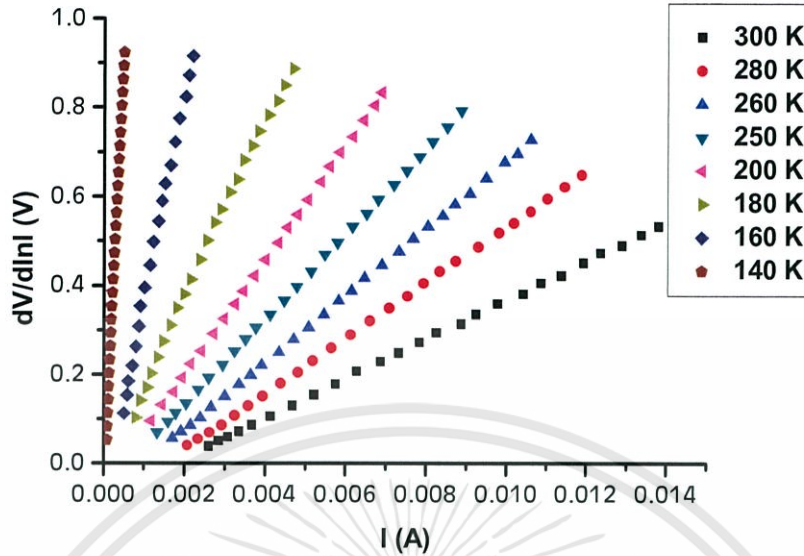
รูปที่ 4.37 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำขาลง ในช่วงอุณหภูมิ 300 - 20 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-WO₃:Sb ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนัล



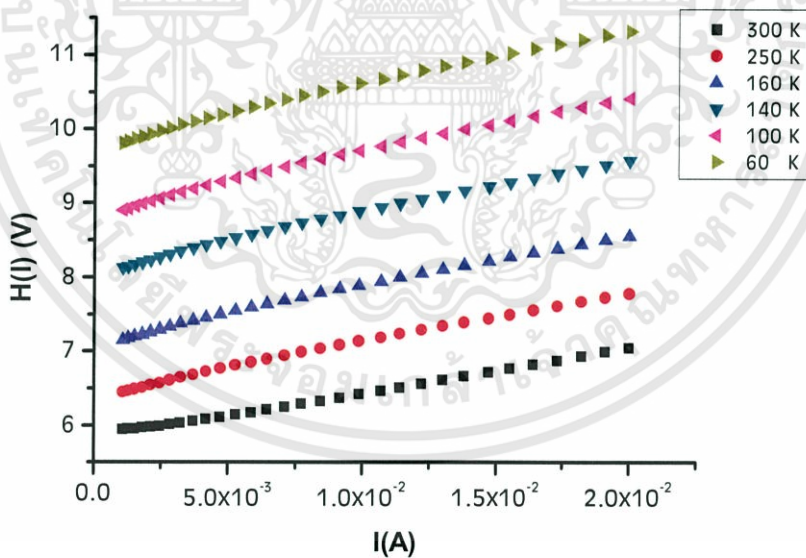
รูปที่ 4.38 แสดงกราฟที่ใช้ในการอธิบายกลไกการนำกระแสไฟฟ้าแต่ละช่วงของค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิต่ำขาลง ในช่วงอุณหภูมิ 300 - 20 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-WO₃:Sb ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนیل



รูปที่ 4.39 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln I$ กับ V เมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิต่ำขาลง ในช่วงอุณหภูมิ 300 - 20 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-WO₃:Sb ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนิล



รูปที่ 4.40 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $dV/d\ln(I)$ กับ I เมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-SnS}/n\text{-WO}_3\text{:Sb}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีสล

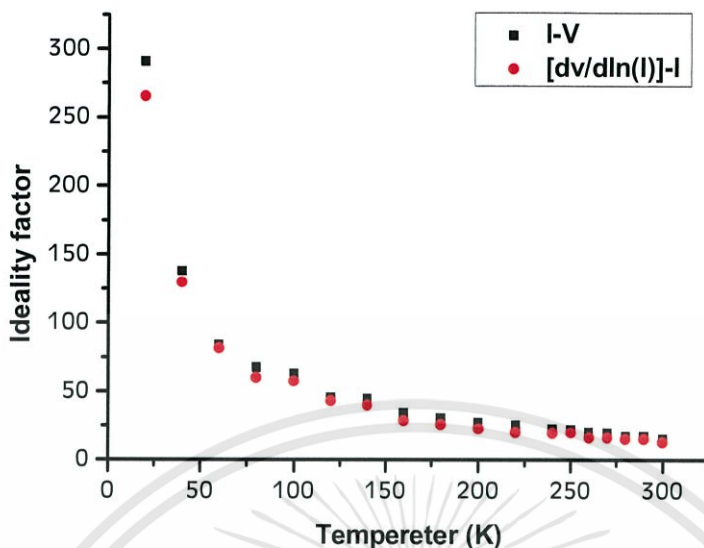


รูปที่ 4.41 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $H(I)$ กับ I เมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 300 - 20 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-SnS}/n\text{-WO}_3\text{:Sb}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีสล

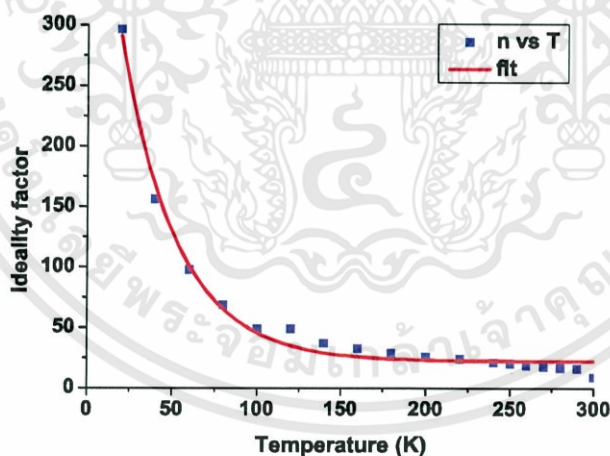
ตารางที่ 4.9 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ (I_s) ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ (n) ค่าความสูงกำแพงศักย์ในขณะที่ไบอัสเป็นศูนย์ (ϕ_{BO}) และค่าความต้านทานอนุกรม (R_s) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำขาลง ในช่วงอุณหภูมิ 300 - 20 เคลวิน ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มออิเล็กทริก และวิธีของชวง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-WO₃:Sb ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส

T (K)	Saturation Current I_s (A)	Ideality Factor (n)		Barrier Height(eV)		Series Resistance (Ω)	
		TE	Cheung	TE	Cheung	Cheung	Cheung
		I-V	$[dV/d\ln(I)]-I$	I-V	H(I)-I	H(I)-I	$[dV/d\ln(I)]-I$
300	2.38×10^{-4}	15.383	13.192	0.520	0.362	1.61×10^2	1.50×10^2
290	2.35×10^{-4}	17.520	15.384	0.502	0.351	1.76×10^2	1.88×10^2
280	1.77×10^{-4}	17.623	15.436	0.490	0.344	2.29×10^2	2.56×10^2
270	1.84×10^{-4}	19.865	16.260	0.468	0.330	2.80×10^2	3.31×10^2
260	1.24×10^{-4}	20.381	16.450	0.459	0.325	4.33×10^2	4.87×10^2
250	8.55×10^{-5}	22.187	19.871	0.447	0.320	7.69×10^2	9.11×10^2
240	5.87×10^{-5}	22.743	19.729	0.437	0.313	1.19×10^3	1.42×10^3
220	3.49×10^{-5}	25.534	20.364	0.405	0.296	2.23×10^3	2.76×10^3
200	1.89×10^{-5}	27.340	22.750	0.377	0.278	4.28×10^3	5.47×10^3
180	1.02×10^{-5}	30.595	25.713	0.335	0.260	8.41×10^3	1.05×10^4
160	5.07×10^{-6}	34.420	28.557	0.313	0.240	1.71×10^4	2.12×10^4
140	2.75×10^{-6}	44.956	39.836	0.277	0.218	3.46×10^4	4.62×10^4
120	1.13×10^{-6}	45.893	43.024	0.245	0.195	7.90×10^4	1.00×10^5
100	5.57×10^{-7}	62.937	57.536	0.207	0.169	1.70×10^5	2.26×10^5
80	1.74×10^{-7}	67.632	59.826	0.170	0.143	4.78×10^5	6.16×10^5
60	8.27×10^{-8}	84.263	81.468	0.128	0.111	9.35×10^5	7.67×10^5
40	5.27×10^{-8}	137.681	129.71	0.084	0.075	9.76×10^5	8.58×10^5
20	5.15×10^{-8}	290.949	265.652	0.039	0.038	9.95×10^5	9.62×10^5

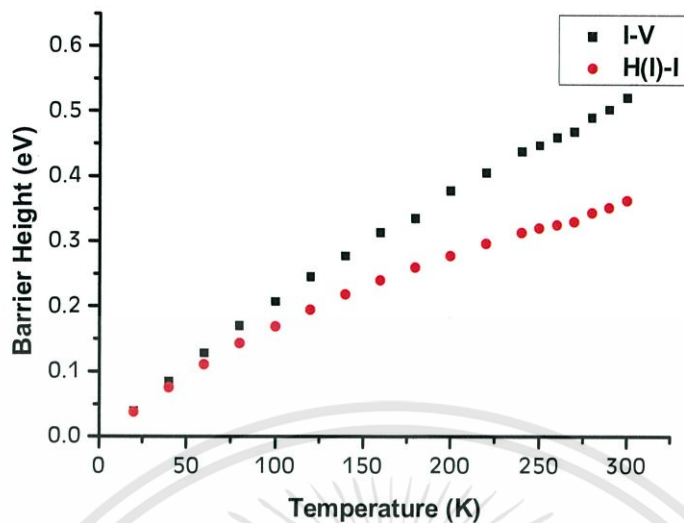
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



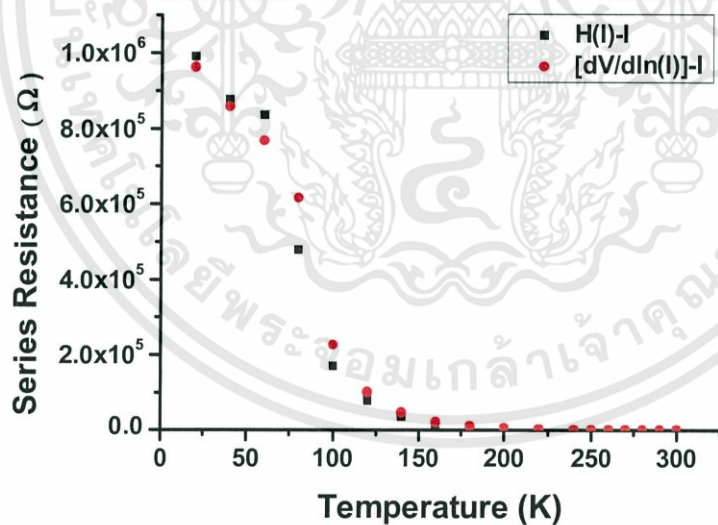
รูปที่ 4.42 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแฟกเตอร์อุดมคติ กับ ค่าอนุกรมที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มอไดนามิกส์และวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิต่ำขาลง ในช่วงอุณหภูมิ 300 - 20 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-WO₃:Sb ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีสล



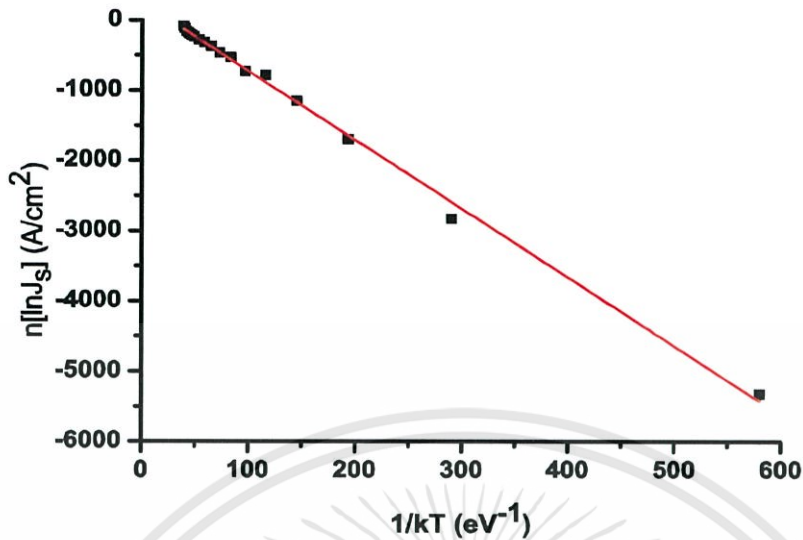
รูปที่ 4.43 แสดงการหาค่า E_{00} โดยการพิตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ กับ ค่าอนุกรม เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำขาลง ในช่วงอุณหภูมิ 300 - 20 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-WO₃:Sb ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีสล



รูปที่ 4.44 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูงกำแพงศักย์ กับ ค่าอุณหภูมิ ที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันและวิธีของชวงเมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิต่ำขาลง ในช่วงอุณหภูมิ 300 - 20 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-WO₃:Sb ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีส



รูปที่ 4.45 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม กับ ค่าอุณหภูมิ ที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันและวิธีของชวงเมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิต่ำขาลง ในช่วงอุณหภูมิ 300 - 20 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-WO₃:Sb ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีส



รูปที่ 4.46 แสดงกราฟอาร์เรเนียสของ $n[\ln J_s]$ เมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิต่ำขาลง ในช่วงอุณหภูมิ 300 - 20 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่ออวิวิพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-WO₃:Sb ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส

จากค่าความชันของกราฟในรูปที่ 4.46 สามารถคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้นของรอยต่อได้จากสมการที่ (4.18)

$$n[\ln J_s] = -E_a \left[\frac{1}{kT} \right] \quad (4.18)$$

ค่าพลังงานกระตุ้น E_a หาได้จากค่าความชันของรูปที่ 4.46

ดังนั้น

$$\text{ความชัน} = E_a$$

จากนั้น

$$E_a = 1.565 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

จากการทดลองพบว่า กระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ส่วนค่าแฟกเตอร์อุดมคติที่ได้จากกลไกเทอร์มิโอนิกอิมิสชันและวิธีของชวงมีค่าที่ลดลง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะพบว่า มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น แสดงดังรูปที่ 4.42 และเมื่อนำกราฟความสัมพันธ์เทียบกับสมการที่ 4.19 เพื่อหาค่าลักษณะเฉพาะของพลังงานการชุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ (E_{00}) พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.0995 อิเล็กตรอนโวลต์

$$n = \frac{E_{00}}{kT} \coth \left(\frac{E_{00}}{kT} \right) \quad (4.19)$$

และจากทฤษฎีเทอร์มิโอนิกอิมิสชันจะได้ว่า

$$E_{00} = \left(\frac{q\hbar}{2} \right) \left[\frac{N_D}{m^* \epsilon_s} \right] \quad (4.20)$$

และคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้นจากสมการ

$$n \ln(I_s) = \frac{-E_a}{kT} + n \ln(J_{00}) \quad (4.21)$$

และจากค่าความชันของกราฟในรูปที่ 4.46 จะทำให้ทราบถึงค่าพลังงานกระตุ้นของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS / n-WO₃ : Sb ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ มีค่าเท่ากับ 1.565 อิเล็กตรอนโวลต์ ส่วน E₀₀ ที่คำนวณได้มีค่าสูงกว่า 25 อิเล็กตรอนโวลต์ แสดงว่าที่อุณหภูมิต่ำๆ นั้น กลไกการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ของโพลเด่นกว่ากลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน จากนั้นโพลกับอิเล็กตรอนจะรวมตัวกันที่สถานะผิวเชื่อมต่อกับบริเวณพร่องพาหะ

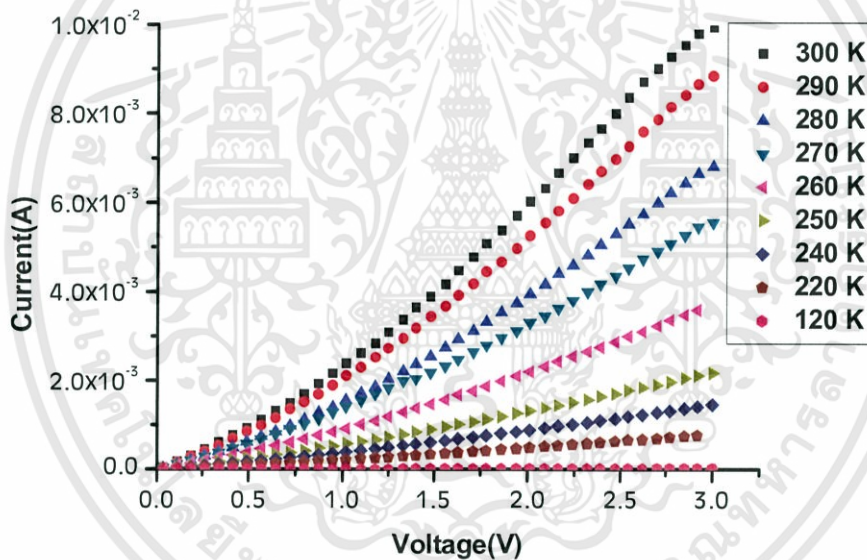
การที่ค่าแพกเตอร์อุดมคติและค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ เนื่องจากใช้การวัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์มาคำนวณหาตัวแปรเหล่านี้ โดยอาศัยทฤษฎีเทอร์มิออนิกอิมิสชัน ดังนั้นค่าตัวแปรขึ้นอยู่กับปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่วัดได้ ที่อุณหภูมิสูงพลังงานความร้อนจะกระตุ้นพาหะอิสระให้มีพลังงานสูงและจำนวนมากขึ้น เมื่อทำการให้แรงดันไบแอสไปข้างหน้าพาหะอิสระที่มีพลังงานความร้อนสูงเหล่านี้จะสามารถข้ามกำแพงศักย์ที่มีค่าสูงได้ ดังนั้นจะได้ค่ากำแพงศักย์ที่มีค่ามากและค่าแพกเตอร์อุดมคติที่มีค่าเข้าใกล้หนึ่ง แต่ที่อุณหภูมิต่ำพาหะอิสระจะมีพลังงานต่ำจึงจำเป็นต้องใช้แรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเพื่อจะข้ามกำแพงศักย์ขณะป้อนแรงดันไบแอสไปข้างหน้าให้มีค่าเพิ่มขึ้น กลไกการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์จะโดดเด่นขึ้นแต่เมื่ออุณหภูมิลดลงกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันจะลดความโดดเด่นลงและในทางกลับกันกลไกการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์จะโดดเด่นมากขึ้นจะเสมือนว่าอิสระสามารถไหลข้ามรอยต่อต่อไปเนื่องจากความสูงของกำแพงศักย์มีค่าลดลง ส่วนค่าแพกเตอร์อุดมคติจะมีค่าสูงขึ้นซึ่งจะแสดงว่าการนำกระแสผ่านรอยต่อที่ช่วงอุณหภูมิต่ำสอดคล้องกับกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันน้อยลง

4.9.4 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้าไบแอสกลับทาง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำๆ ในช่วงอุณหภูมิ 20 – 300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS / n-WO₃ : Sb ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

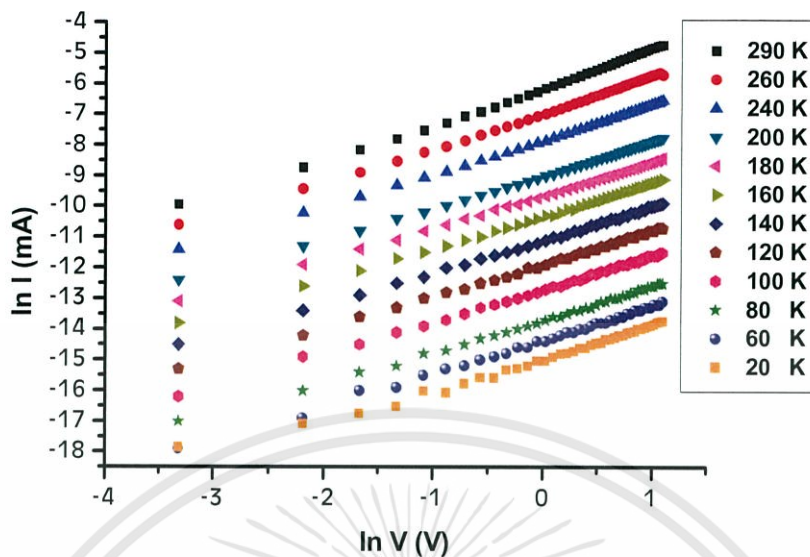
ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS / n-WO₃ : Sb โดยวัดค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า ในช่วง -3 ถึง 3 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 20 – 300 เคลวิน พบว่าที่ค่าแรงดันไฟฟ้าเท่ากันในกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ตรงบริเวณรอยต่อมีค่าลดลงตามค่าอุณหภูมิที่ลดลง ดังแสดงดังรูปที่ 1 – V (ที่มีหลายๆ อุณหภูมิ) การศึกษาของกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ตรงบริเวณรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS / n-WO₃ : Sb ที่ช่วงแรงดันไฟฟ้า -3 ถึง 3 ที่อุณหภูมิต่ำ พบว่าค่าแรงดันไฟฟ้าน้อยกว่า 0.25 โวลต์ ที่อุณหภูมิต่ำพบว่าที่ค่าแรงดันไฟฟ้าที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

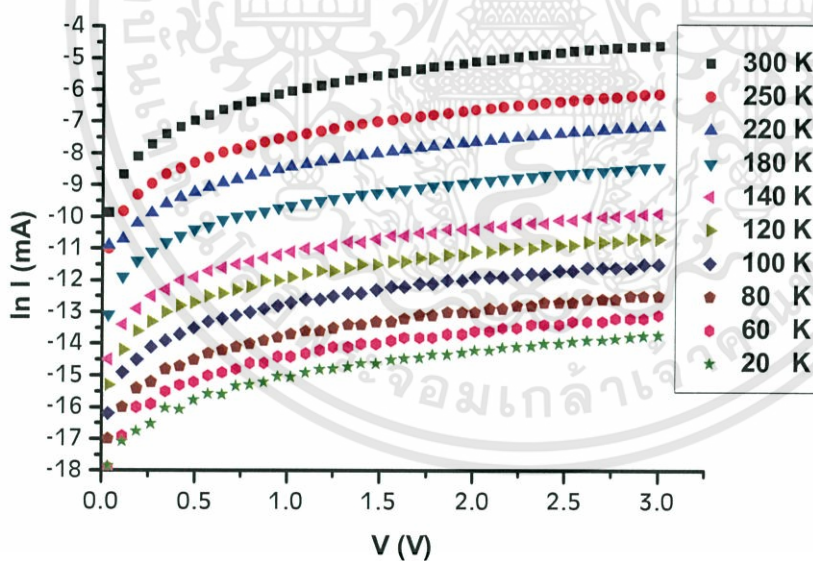
เป็นไปตามกฎของโอห์ม ส่วนช่วงแรงดันไฟฟ้า 0.25 ถึง 1 โวลต์ เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้า เป็นไปตามแบบกลไกเทอร์มออิเล็กทริก และที่แรงดันไฟฟ้าบริเวณมากกว่า 1 โวลต์ จะเป็นกลไกการนำไฟฟ้าแบบชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้ำที่เกิดจากกับดักประจุในเนื้อสารที่มีการแจกแจงแบบเอกซ์โพเนนเชียล เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln I$ กับ V เพื่อหาค่าแพกเตอร์อุณหภูมิและค่ากระแสไฟฟ้าอิมิต์ย้อนกลับแล้วนำไปใช้เป็นตัวเริ่มต้นในการจำลองข้อมูลเพื่อเปรียบเทียบกับผลการคำนวณที่ได้จากการวัดค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า ในช่วงการไหลของกระแสไฟฟ้าข้ามกำแพงศักย์ตรงบริเวณต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS / n-WO₃ : Sb ที่เป็นกลไกเทอร์มออิเล็กทริก เพื่อช่วยให้หาค่ากระแสไฟฟ้าอิมิต์ย้อนกลับและแพกเตอร์อุณหภูมิให้ถูกต้องยิ่งขึ้น การหาค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมจะใช้วิธีของชวงโดยที่ค่ากระแสไฟฟ้าอิมิต์ย้อนกลับค่าแพกเตอร์อุณหภูมิ ค่าความสูงของกำแพงศักย์ และ ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 20 ถึง 300 เคลวิน ที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มออิเล็กทริกและวิธีชวง แสดงในตารางที่ 4.9



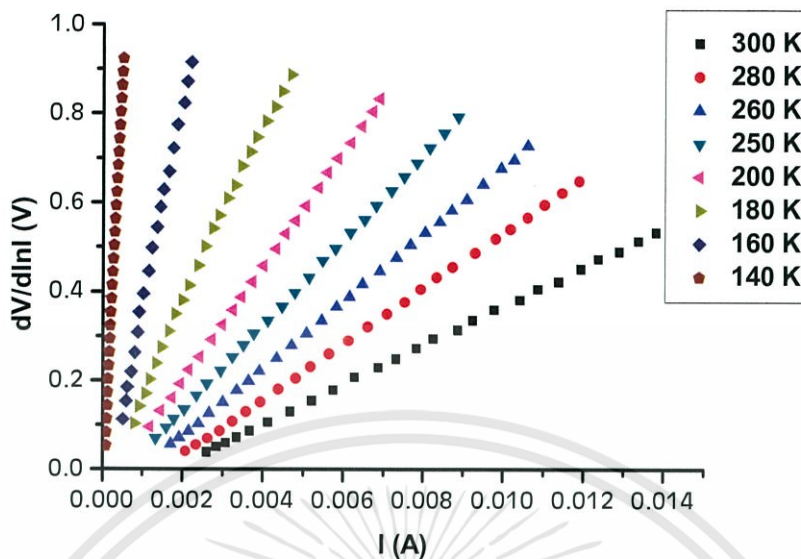
รูปที่ 4.47 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำขึ้นไปในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-WO₃:Sb ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส



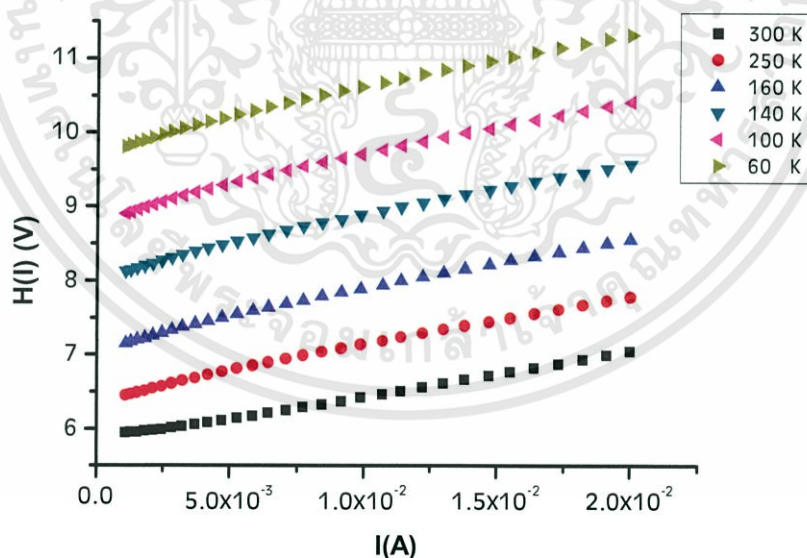
รูปที่ 4.48 แสดงกราฟที่ใช้ในการอธิบายกลไกการนำกระแสไฟฟ้าแต่ละช่วงของค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิต่ำขาขึ้น ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-WO₃:Sb ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนัล



รูปที่ 4.49 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln I$ กับ V เมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิขาขึ้น 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-WO₃:Sb ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนัล



รูปที่ 4.50 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $dV/d\ln(I)$ กับ I เมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิต่ำขาขึ้น ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-SnS}/n\text{-WO}_3\text{:Sb}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนیل

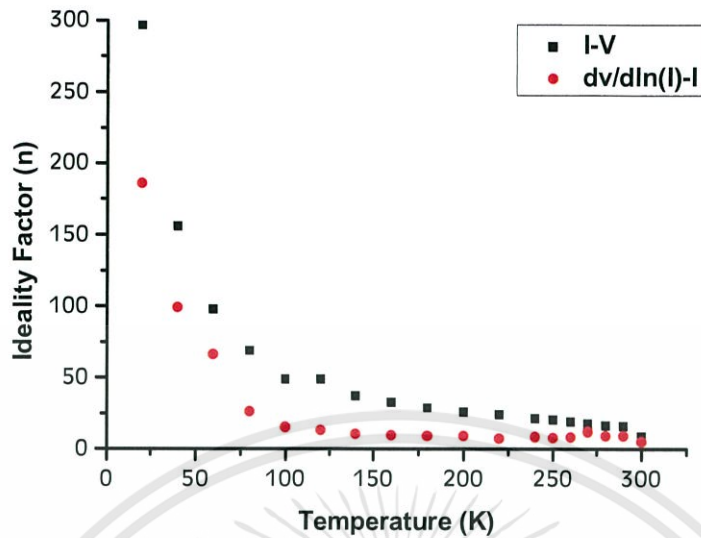


รูปที่ 4.51 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $H(I)$ กับ I เมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ ขาขึ้น 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-SnS}/n\text{-WO}_3\text{:Sb}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนิล

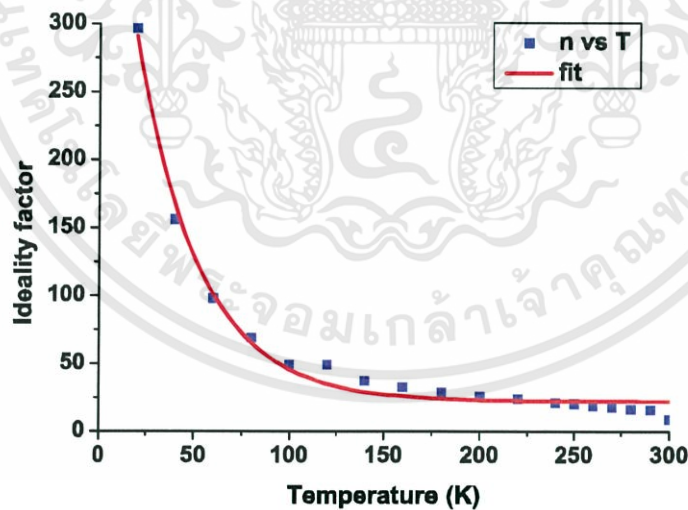
ตารางที่ 4.10 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ (I_s) ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ (n) ค่าความสูงกำแพงศักย์ในขณะที่ไบอัสเป็นศูนย์ (ϕ_{BO}) และค่าความต้านทานอนุกรม (R_s) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน และวิธีของชวง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบบิวริทซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-WO₃:Sb ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส

T (K)	Saturation Current I_s (A)	Ideality Factor (n)		Barrier Height (eV)		Series Resistance (Ω)	
		TE	Cheung	TE	Cheung	Cheung	Cheung
		I-V	dV/dln(I)-I	I-V	H(I)-I	H(I)-I	dV/dln(I)-I
300	2.633×10^{-4}	8.92	5.078	0.518	0.3735	2.10×10^2	2.28×10^3
290	2.4049×10^{-4}	16.128	9.207	0.640	0.3448	1.98×10^2	2.29×10^3
280	1.7322×10^{-4}	16.39	9.349	0.491	0.3418	2.57×10^2	2.94×10^3
270	1.7265×10^{-4}	17.931	12.132	0.470	0.3265	3.31×10^2	3.63×10^3
260	1.1967×10^{-4}	18.933	8.222	0.460	0.325029	4.82×10^3	5.93×10^3
250	8.0810×10^{-5}	20.492	7.842	0.448	0.3183	8.58×10^2	1.06×10^3
240	5.4440×10^{-5}	21.101	8.454	0.438	0.3134	1.29×10^3	1.58×10^3
220	3.3062×10^{-5}	23.984	7.515	0.406	0.2975	2.32×10^3	3.06×10^3
200	1.7894×10^{-5}	25.764	9.13	0.378	0.2787	4.56×10^3	5.56×10^3
180	9.7280×10^{-6}	28.796	9.172	0.346	0.2601	9.03×10^3	1.11×10^4
160	4.8307×10^{-6}	32.39	9.695	0.314	0.2402	1.83×10^4	2.26×10^4
140	2.2483×10^{-6}	37.022	10.486	0.279	0.2191	3.99×10^4	4.94×10^4
120	1.1788×10^{-6}	48.955	13.13	0.244	0.1956	8.10×10^4	1.06×10^5
100	4.1908×10^{-7}	48.953	15.315	0.209	0.1709	1.99×10^5	2.43×10^5
80	1.7903×10^{-7}	68.84	26.347	0.170	0.1436	4.05×10^5	4.42×10^5
60	9.6763×10^{-8}	97.91	66.338	0.128	0.1116	6.01×10^5	7.22×10^5
40	4.26660×10^{-8}	155.94	99.275	0.085	0.0766	7.10×10^5	8.25×10^5
20	5.2135×10^{-8}	296.557	185.884	0.039	0.0381	8.05×10^5	9.26×10^5

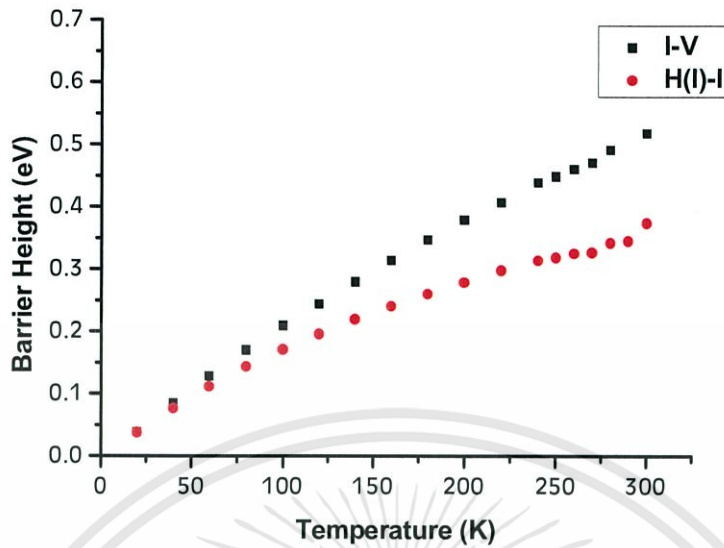
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



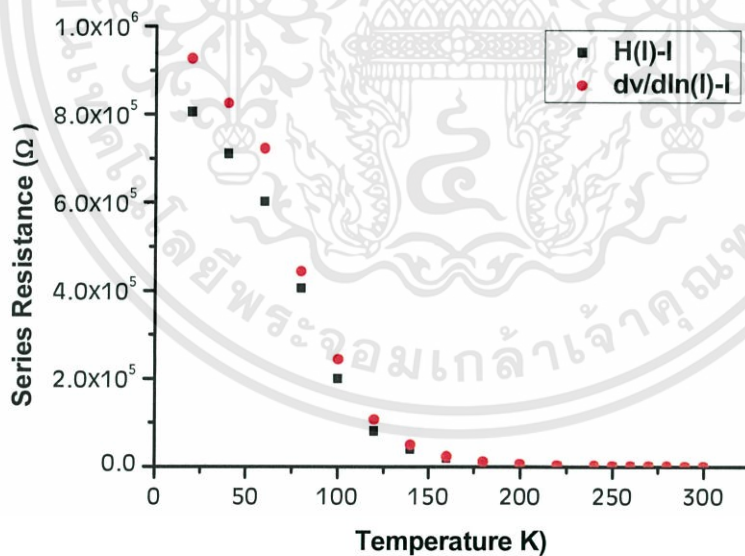
รูปที่ 4.52 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแฟกเตอร์อุดมคติ กับ ค่าอุณหภูมิต่ำที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มอไดนามิกส์และวิธีของชวงเมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิต่ำมากขึ้น ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-WO₃:Sb ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส



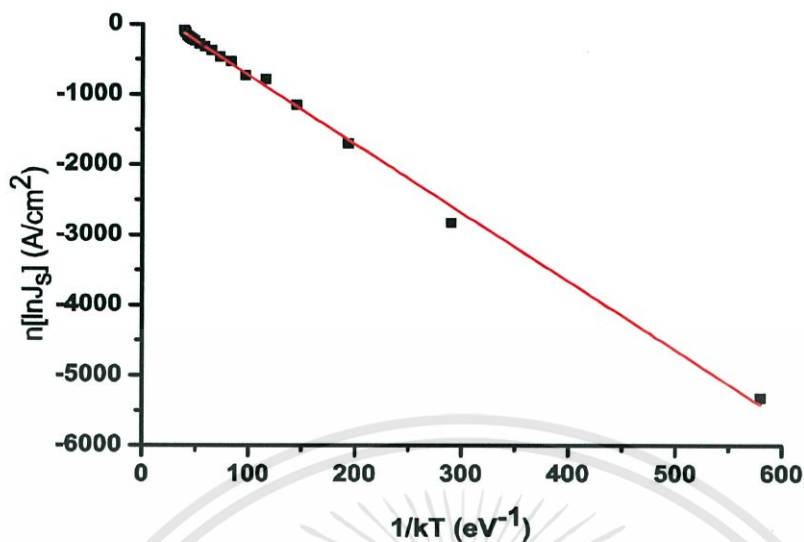
รูปที่ 4.53 แสดงการหาค่า E_{00} โดยการพิตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ กับ ค่าอุณหภูมิต่ำที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มอไดนามิกส์และวิธีของชวงเมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิต่ำมากขึ้น ในช่วงอุณหภูมิ 300 - 20 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-WO₃:Sb ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส



รูปที่ 4.54 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูงกำแพงศักย์ กับ ค่าอุณหภูมิ ที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิโอนิกอิมิสชันและวิธีของชวงเมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิต่ำขาขึ้น ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-WO₃:Sb ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส



รูปที่ 4.55 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม กับ ค่าอุณหภูมิ ที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิโอนิกอิมิสชันและวิธีของชวงเมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิต่ำขาขึ้น ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-WO₃:Sb ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส



รูปที่ 4.56 แสดงกราฟอาร์เรเนียสของ $n[\ln J_s]$ เมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิต่ำขึ้น ในช่วงอุณหภูมิ 300 - 20 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-WO₃:Sb ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส

จากค่าความชันของกราฟในรูปที่ 4.46 สามารถคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้นของรอยต่อได้จากสมการที่ (4.22)

$$n[\ln J_s] = -E_a \left[\frac{1}{kT} \right] \quad (4.22)$$

ค่าพลังงานกระตุ้น E_a หาได้จากค่าความชันของรูปที่ 4.46

ดังนั้น

$$\text{ความชัน} = E_a$$

จากนั้น

$$E_a = 1.565 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

จากการทดลองพบว่า กระแสไฟฟ้าอิมิต์ย้อนกลับเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ส่วนค่าแฟกเตอร์อุดมคติที่ได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิตชันและวิธีของชวงมีค่าที่ลดลง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะพบว่ามิลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น แสดงดังรูปที่ 4.42 และเมื่อนำกราฟความสัมพันธ์เทียบกับสมการที่ 4.19 เพื่อหาค่าลักษณะเฉพาะของพลังงานการชุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ (E_{00}) พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.0995 อิเล็กตรอนโวลต์

$$n = \frac{E_{00}}{kT} \coth \left(\frac{E_{00}}{kT} \right) \quad (4.23)$$

และจากทฤษฎีเทอร์มิออนิกอิมิตชันจะได้ว่า

$$E_{00} = \left(\frac{q\hbar}{2} \right) \left[\frac{N_D}{m^* \epsilon_s} \right] \quad (4.24)$$

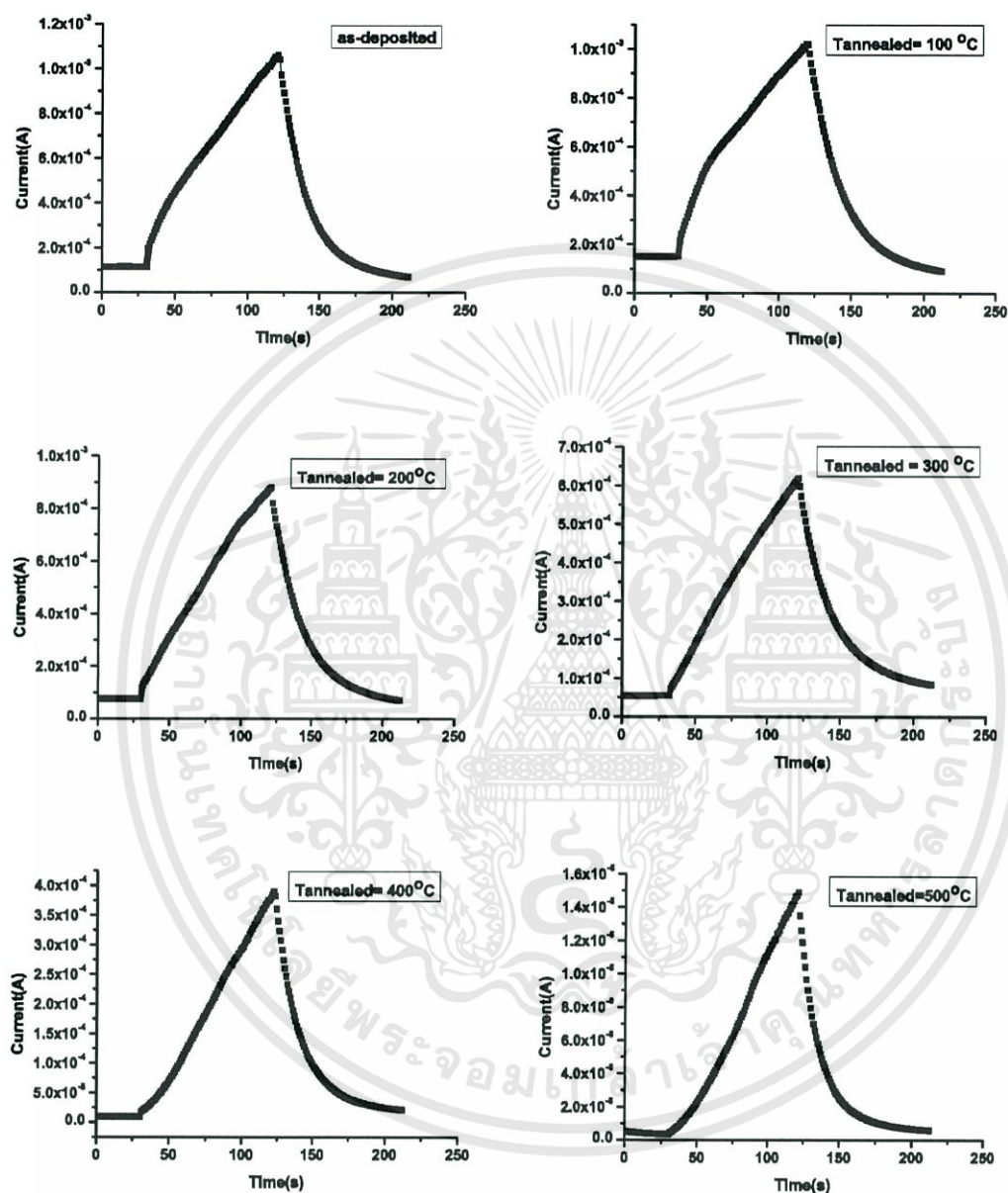
และคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้นจากสมการ

$$n \ln(I_s) = \frac{-E_a}{kT} + n \ln(J_{00}) \quad (4.25)$$

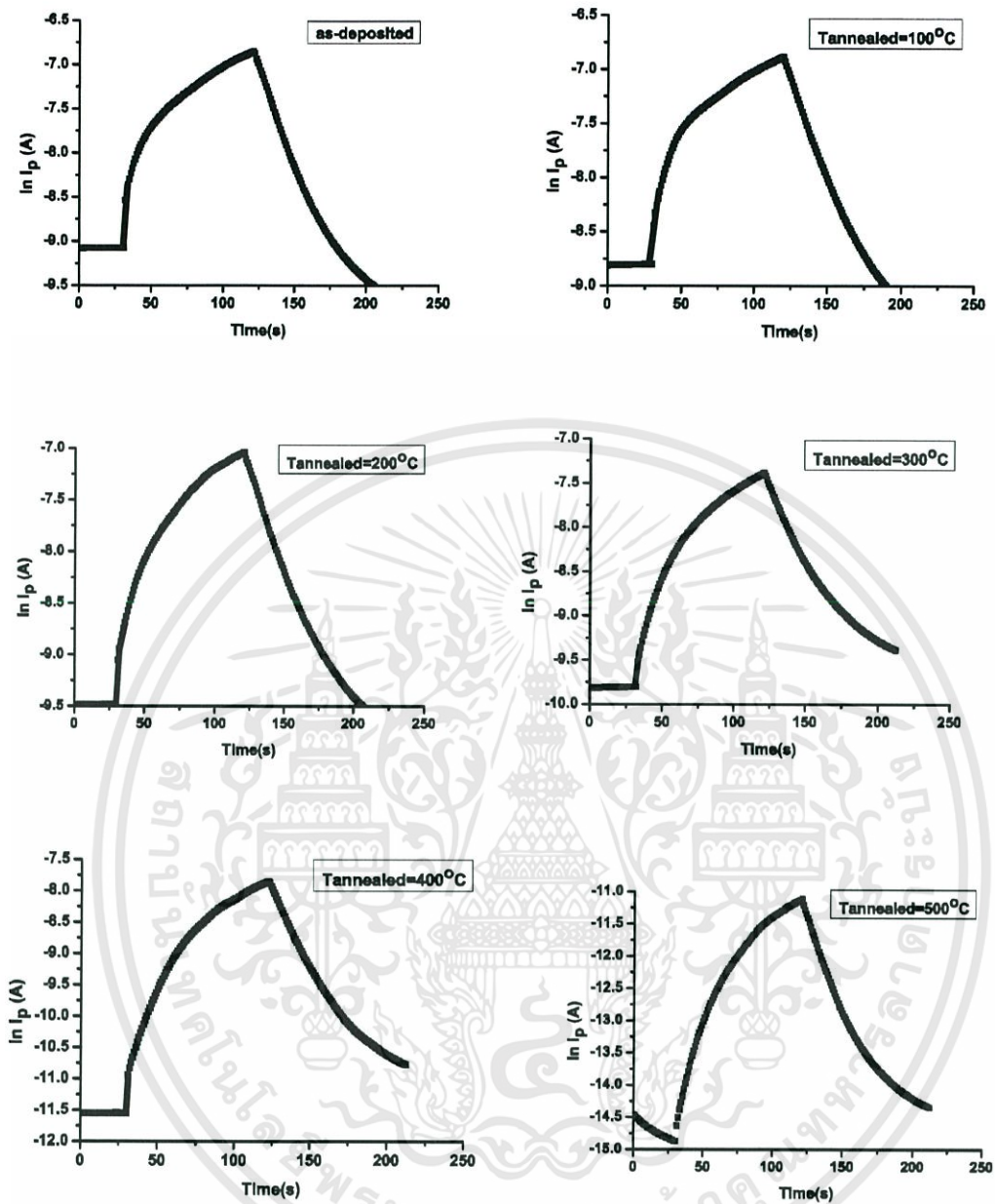
และจากค่าความชันของกราฟในรูปที่ 4.46 จะทำให้ทราบถึงค่าพลังงานกระตุ้นของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS / n-WO₃ : Sb ที่เตรียมโดยวิธีการวิวิธพันธุ์สารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ มีค่าเท่ากับ 1.565 อิเล็กตรอนโวลต์ ส่วน E₀₀ ที่คำนวณได้มีค่าสูงกว่า 25 อิเล็กตรอนโวลต์ แสดงว่าที่อุณหภูมิต่ำๆ นั้น กลไกการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ของโพลเด้นกว่ากลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน จากนั้นโพลกับอิเล็กตรอนจะรวมตัวกันที่สถานะผิวเชื่อมต่อที่บริเวณพร่องพาหะ

การที่ค่าแฟกเตอร์อุดมคติและค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ เนื่องจากใช้การวัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์มาคำนวณหาค่าตัวแปรเหล่านี้ โดยอาศัยทฤษฎีเทอร์มิออนิกอิมิสชัน ดังนั้นค่าตัวแปรขึ้นอยู่กับปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่วัดได้ ที่อุณหภูมิสูงพลังงานความร้อนจะกระตุ้นพาหะอิสระให้มีพลังงานสูงและจำนวนมากขึ้น เมื่อทำการให้แรงดันไบแอสไปข้างหน้าพาหะอิสระที่มีพลังงานความร้อนสูงเหล่านี้จะสามารถข้ามกำแพงศักย์ที่มีค่าสูงได้ดังนั้นจะได้ค่ากำแพงศักย์ที่มีค่ามากและค่าแฟกเตอร์อุดมคติที่มีค่าเข้าใกล้หนึ่ง แต่ที่อุณหภูมิต่ำพาหะอิสระจะมีพลังงานต่ำจึงจำเป็นต้องใช้แรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเพื่อจะข้ามกำแพงศักย์ขณะป้อนแรงดันไบแอสไปข้างหน้าให้มีค่าเพิ่มขึ้น กลไกการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์จะโดดเด่นขึ้นแต่เมื่ออุณหภูมิลดลงกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันจะลดความโดดเด่นลงและในทางกลับกันกลไกการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์จะโดดเด่นมากขึ้นจะเสมือนว่าอิสระสามารถไหลข้ามรอยต่อต่อไปเนื่องจากความสูงของกำแพงศักย์มีค่าลดลง ส่วนค่าแฟกเตอร์อุดมคติจะมีค่าสูงขึ้นซึ่งจะแสดงว่าการนำกระแสผ่านรอยต่อที่ช่วงอุณหภูมิต่ำสอดคล้องกับกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันน้อยลง

4.9.5 ผลการศึกษาสภาพต้านทานเชิงแสงต่อร้อนของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



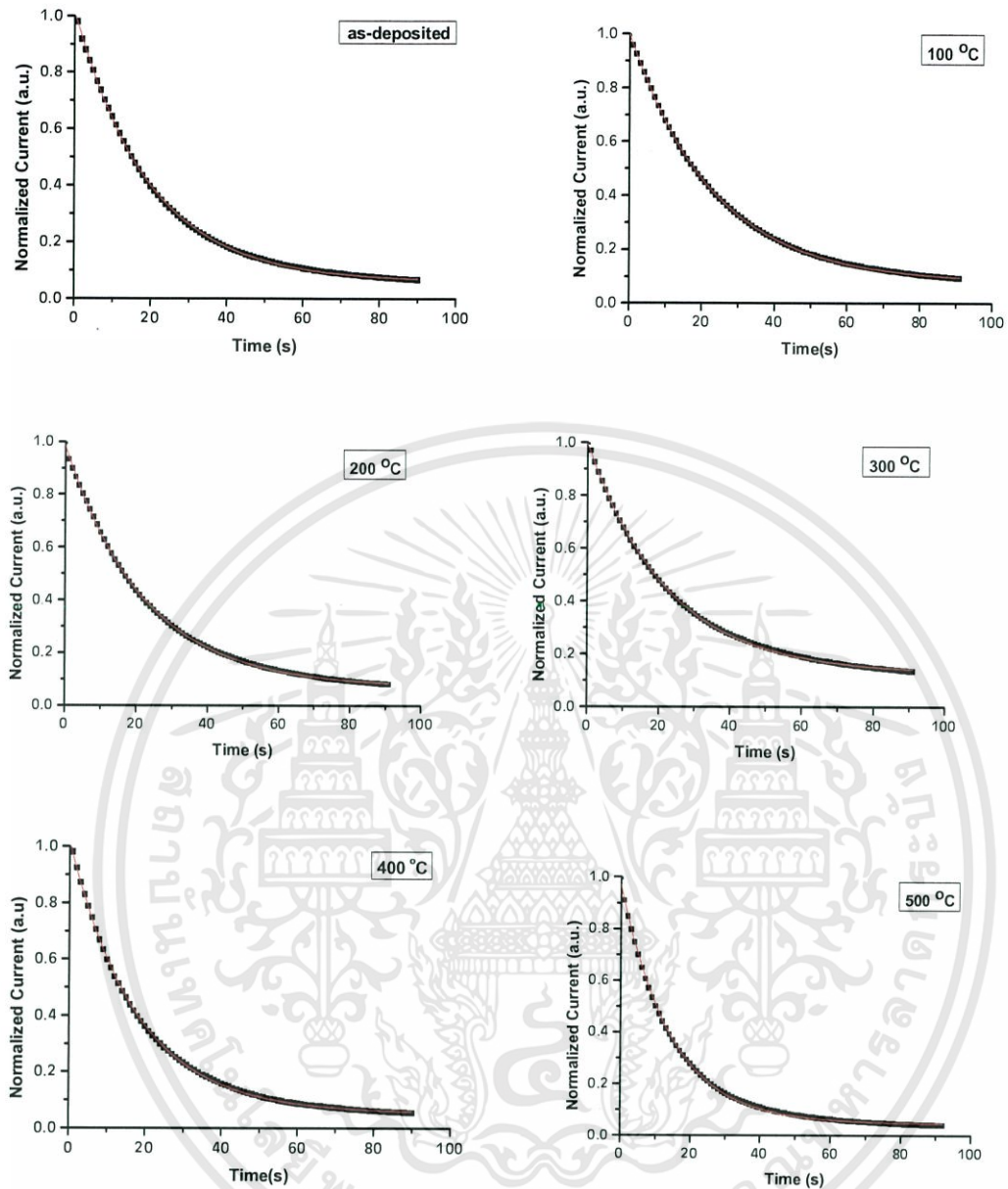
รูปที่ 4.57 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสโฟโต กับ เวลา ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.58 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าลอการิทึมธรรมชาติของกระแสโพลโต กับ เวลา ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.59 แสดงการฟิตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสอร์มัลไลซ์ขาขึ้น กับ เวลา ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิต่างๆ ตั้งแต่ 100-500 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.60 แสดงการฟิตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสออร์มัลไลซ์ซาลง กับ เวลา ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิต่างๆ ตั้งแต่ 100-500 องศาเซลเซียส

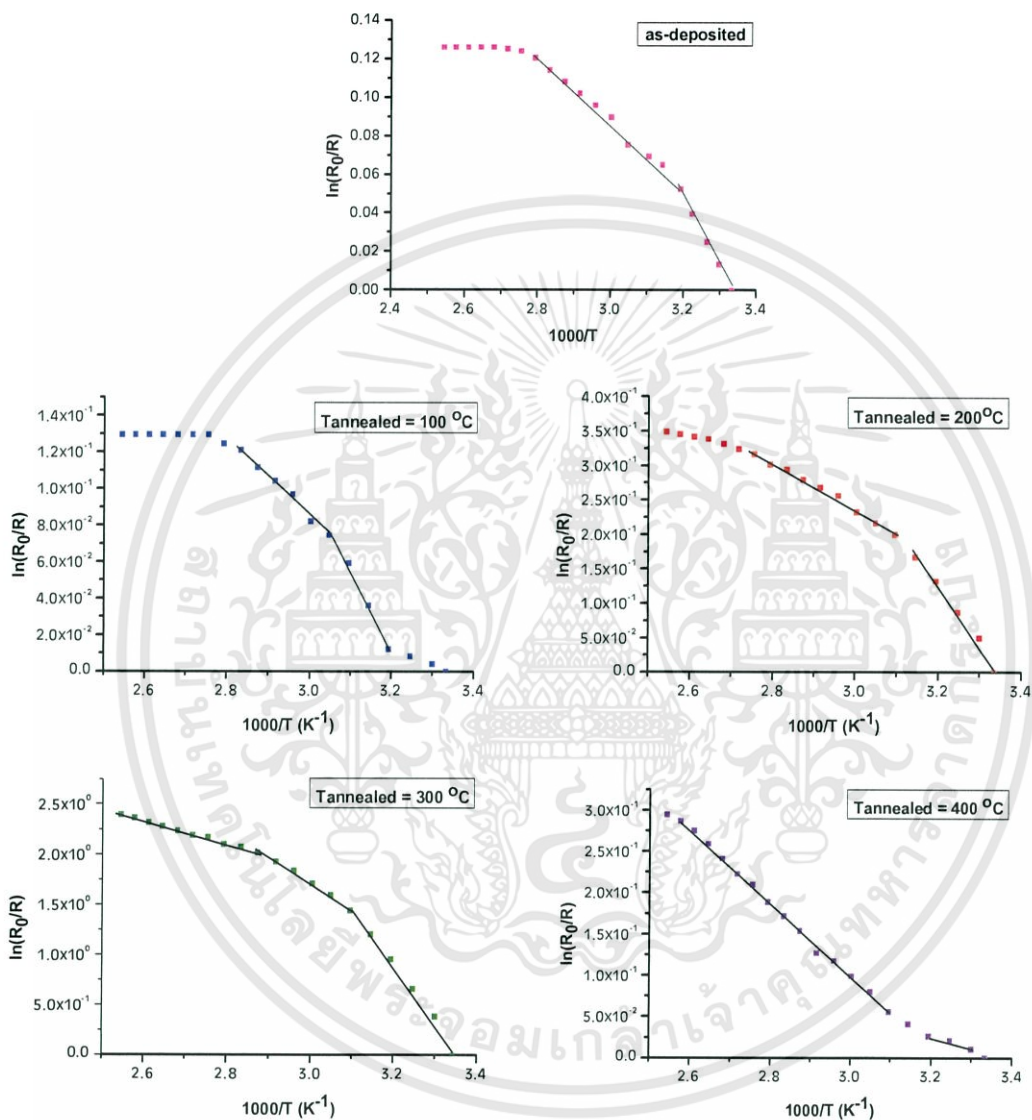
Composition	Rise Time(s)					Decay Time (s)				
	1 st Term	2 nd Term	3 rd Term	4 th Term	5 th Term	1 st Term	2 nd Term	3 rd Term	4 th Term	5 th Term
as-deposited	$\tau_{r1}=59.66$ $A_1=0.0479$	$\tau_{r2}=78.55$ $A_2=-0.5324$	$\tau_{r3}=85.03$ $A_3=0.6162$	$\tau_{r4}=103.19$ $A_4=-0.1307$	$\tau_{r5}=183.15$ $A_5=0.0009$ $\beta=0.364$	$\tau_{d1}=22.47$ $A_1=0.3189$	$\tau_{d2}=23.69$ $A_2=-0.5626$	$\tau_{d3}=26.53$ $A_3=0.3129$	$\tau_{d4}=34.36$ $A_4=-0.0904$	$\tau_{d5}=45.87$ $A_5=0.0223$ $\beta=1.049$
100	$\tau_{r1}=82.30$ $A_1=3.809$	$\tau_{r2}=99.80$ $A_2=-39.6800$	$\tau_{r3}=105.25$ $A_3=41.6700$	$\tau_{r4}=131.71$ $A_4=-5.8660$	$\tau_{r5}=324.14$ $A_5=0.0002$ $\beta=0.219$	$\tau_{d1}=25.64$ $A_1=-0.0399$	$\tau_{d2}=27.78$ $A_2=0.1326$	$\tau_{d3}=29.41$ $A_3=-0.0975$	$\tau_{d4}=41.84$ $A_4=0.0060$	$\tau_{d5}=50.00$ $A_5=-0.0002$ $\beta=0.764$
200	$\tau_{r1}=46.94$ $A_1=-0.1080$	$\tau_{r2}=54.64$ $A_2=0.277$	$\tau_{r3}=67.34$ $A_3=-0.2239$	$\tau_{r4}=107.06$ $A_4=0.060$	$\tau_{r5}=133.57$ $A_5=0.0002$ $\beta=0.197$	$\tau_{d1}=25.51$ $A_1=0.1723$	$\tau_{d2}=26.32$ $A_2=-0.2538$	$\tau_{d3}=29.59$ $A_3=0.1173$	$\tau_{d4}=35.84$ $A_4=-0.0450$	$\tau_{d5}=45.45$ $A_5=0.0101$ $\beta=1.012$
300	$\tau_{r1}=35.88$ $A_1=-0.0105$	$\tau_{r2}=56.75$ $A_2=0.1037$	$\tau_{r3}=71.42$ $A_3=-0.1747$	$\tau_{r4}=93.54$ $A_4=0.0856$	$\tau_{r5}=110.25$ $A_5=0.0002$ $\beta=0.216$	$\tau_{d1}=25.97$ $A_1=0.0511$	$\tau_{d2}=30.21$ $A_2=-0.1435$	$\tau_{d3}=39.06$ $A_3=0.6988$	$\tau_{d4}=50.76$ $A_4=-0.6203$	$\tau_{d5}=63.69$ $A_5=0.0144$ $\beta=1.038$
400	$\tau_{r1}=22.72$ $A_1=-0.0002$	$\tau_{r2}=37.03$ $A_2=-0.0007$	$\tau_{r3}=51.02$ $A_3=0.0013$	$\tau_{r4}=68.96$ $A_4=0.0002$	$\tau_{r5}=86.95$ $A_5=0.0001$ $\beta=0.217$	$\tau_{d1}=20.28$ $A_1=-0.0023$	$\tau_{d2}=22.16$ $A_2=0.0043$	$\tau_{d3}=28.29$ $A_3=-0.0024$	$\tau_{d4}=30.81$ $A_4=0.0003$	$\tau_{d5}=39.02$ $A_5=0.0005$ $\beta=0.888$
500	$\tau_{r1}=61.72$ $A_1=-0.0061$	$\tau_{r2}=65.02$ $A_2=5.1570$	$\tau_{r3}=65.03$ $A_3=-5.1570$	$\tau_{r4}=75.96$ $A_4=-0.0002$	$\tau_{r5}=86.95$ $A_5=0.0000$ $\beta=0.7097$	$\tau_{d1}=14.64$ $A_1=3.894 \times 10^{-5}$	$\tau_{d2}=17.52$ $A_2=-6.848 \times 10^{-5}$	$\tau_{d3}=22.12$ $A_3=6.209 \times 10^{-5}$	$\tau_{d4}=32.57$ $A_4=-2.735 \times 10^{-5}$	$\tau_{d5}=46.51$ $A_5=9.509 \times 10^{-5}$ $\beta=0.871$

ตารางที่ 4.11 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของค่าสภาวะนำไฟฟ้าเชิงแสงที่ได้จากการปรับผลการทดลองที่อุณหภูมิห้อง ให้เข้ากับฟังก์ชันมัลติเพิลเอ็กซ์โพเนนเชียล ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสที่อุณหภูมิต่างๆ ตั้งแต่ 100-400 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจน เป็นเวลา 30 นาที

Composition	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
as-deposited	$I_{01} = 1.05 \times 10^3$ $\sigma_{t1} = 3.25 \times 10^{12}$	$I_{02} = 9.36 \times 10^4$ $\sigma_{t2} = 2.90 \times 10^{12}$	$I_{03} = 8.13 \times 10^4$ $\sigma_{t3} = 2.51 \times 10^{12}$	$I_{04} = 6.87 \times 10^4$ $\sigma_{t4} = 2.12 \times 10^{12}$	$I_{05} = 5.70 \times 10^4$ $\sigma_{t5} = 1.76 \times 10^{12}$	$I_{01} = 1.03 \times 10^3$ $\sigma_{t1} = 3.12 \times 10^{12}$	$I_{02} = 6.49 \times 10^4$ $\sigma_{t2} = 2.01 \times 10^{12}$	$I_{03} = 3.52 \times 10^4$ $\sigma_{t3} = 1.09 \times 10^{12}$	$I_{04} = 2.12 \times 10^4$ $\sigma_{t4} = 6.57 \times 10^{11}$	$I_{05} = 1.59 \times 10^4$ $\sigma_{t5} = 4.92 \times 10^{11}$
100	$I_{01} = 9.99 \times 10^4$ $\sigma_{t1} = 9.14 \times 10^{12}$	$I_{02} = 9.21 \times 10^4$ $\sigma_{t2} = 8.43 \times 10^{12}$	$I_{03} = 8.34 \times 10^4$ $\sigma_{t3} = 7.63 \times 10^{12}$	$I_{04} = 7.33 \times 10^4$ $\sigma_{t4} = 6.71 \times 10^{12}$	$I_{05} = 6.30 \times 10^4$ $\sigma_{t5} = 5.76 \times 10^{12}$	$I_{01} = 1.02 \times 10^3$ $\sigma_{t1} = 9.34 \times 10^{12}$	$I_{02} = 6.40 \times 10^4$ $\sigma_{t2} = 5.86 \times 10^{12}$	$I_{03} = 3.82 \times 10^4$ $\sigma_{t3} = 3.49 \times 10^{12}$	$I_{04} = 2.65 \times 10^4$ $\sigma_{t4} = 2.42 \times 10^{12}$	$I_{05} = 1.76 \times 10^4$ $\sigma_{t5} = 1.61 \times 10^{12}$
200	$I_{01} = 8.56 \times 10^4$ $\sigma_{t1} = 3.65 \times 10^{12}$	$I_{02} = 7.81 \times 10^4$ $\sigma_{t2} = 3.33 \times 10^{12}$	$I_{03} = 6.83 \times 10^4$ $\sigma_{t3} = 2.91 \times 10^{12}$	$I_{04} = 5.72 \times 10^4$ $\sigma_{t4} = 2.44 \times 10^{12}$	$I_{05} = 4.27 \times 10^4$ $\sigma_{t5} = 1.82 \times 10^{12}$	$I_{01} = 8.62 \times 10^4$ $\sigma_{t1} = 3.52 \times 10^{12}$	$I_{02} = 5.52 \times 10^4$ $\sigma_{t2} = 2.35 \times 10^{12}$	$I_{03} = 3.29 \times 10^4$ $\sigma_{t3} = 1.40 \times 10^{12}$	$I_{04} = 2.05 \times 10^4$ $\sigma_{t4} = 8.76 \times 10^{11}$	$I_{05} = 1.59 \times 10^4$ $\sigma_{t5} = 6.79 \times 10^{11}$
300	$I_{01} = 5.97 \times 10^4$ $\sigma_{t1} = 2.66 \times 10^{12}$	$I_{02} = 5.23 \times 10^4$ $\sigma_{t2} = 2.33 \times 10^{12}$	$I_{03} = 4.51 \times 10^4$ $\sigma_{t3} = 2.01 \times 10^{12}$	$I_{04} = 3.67 \times 10^4$ $\sigma_{t4} = 1.63 \times 10^{12}$	$I_{05} = 2.85 \times 10^4$ $\sigma_{t5} = 1.27 \times 10^{12}$	$I_{01} = 5.97 \times 10^4$ $\sigma_{t1} = 2.66 \times 10^{12}$	$I_{02} = 4.20 \times 10^4$ $\sigma_{t2} = 1.87 \times 10^{12}$	$I_{03} = 2.68 \times 10^4$ $\sigma_{t3} = 1.19 \times 10^{12}$	$I_{04} = 1.91 \times 10^4$ $\sigma_{t4} = 8.52 \times 10^{11}$	$I_{05} = 1.50 \times 10^4$ $\sigma_{t5} = 6.69 \times 10^{11}$
400	$I_{01} = 3.70 \times 10^4$ $\sigma_{t1} = 2.01 \times 10^{12}$	$I_{02} = 3.18 \times 10^4$ $\sigma_{t2} = 1.72 \times 10^{12}$	$I_{03} = 2.51 \times 10^4$ $\sigma_{t3} = 1.36 \times 10^{12}$	$I_{04} = 1.93 \times 10^4$ $\sigma_{t4} = 1.04 \times 10^{12}$	$I_{05} = 1.33 \times 10^4$ $\sigma_{t5} = 7.22 \times 10^{11}$	$I_{01} = 3.74 \times 10^4$ $\sigma_{t1} = 2.03 \times 10^{12}$	$I_{02} = 2.47 \times 10^4$ $\sigma_{t2} = 1.34 \times 10^{12}$	$I_{03} = 1.28 \times 10^4$ $\sigma_{t3} = 6.95 \times 10^{11}$	$I_{04} = 7.69 \times 10^3$ $\sigma_{t4} = 4.17 \times 10^{11}$	$I_{05} = 14.84 \times 10^3$ $\sigma_{t5} = 2.63 \times 10^{11}$
500	$I_{01} = 1.42 \times 10^5$ $\sigma_{t1} = 1.06 \times 10^{11}$	$I_{02} = 1.18 \times 10^5$ $\sigma_{t2} = 8.84 \times 10^{11}$	$I_{03} = 9.47 \times 10^6$ $\sigma_{t3} = 7.09 \times 10^{11}$	$I_{04} = 6.81 \times 10^6$ $\sigma_{t4} = 5.10 \times 10^{11}$	$I_{05} = 4.39 \times 10^6$ $\sigma_{t5} = 3.28 \times 10^{12}$	$I_{01} = 1.42 \times 10^5$ $\sigma_{t1} = 1.06 \times 10^{11}$	$I_{02} = 6.99 \times 10^6$ $\sigma_{t2} = 5.23 \times 10^{10}$	$I_{03} = 3.48 \times 10^6$ $\sigma_{t3} = 2.60 \times 10^{10}$	$I_{04} = 2.21 \times 10^6$ $\sigma_{t4} = 1.65 \times 10^{10}$	$I_{05} = 1.37 \times 10^6$ $\sigma_{t5} = 1.02 \times 10^{10}$

ตารางที่ 4.12 แสดงค่าความหนาแน่นของกัมมันตภาพรังสีที่ได้จากการวัดค่าสภาวะไฟฟ้าเชิงแสงในช่วงกระแสโฟโตคาขึ้นและขาลง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนیلและมีการแอนนิลที่อุณหภูมิต่างๆ ตั้งแต่ 100-400 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจน เป็นเวลา 30 นาที

4.9.6 ผลการศึกษากราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln(R_0/R)$ กับ $1000/T$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูง ในช่วงอุณหภูมิ 20 – 120 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิต่างๆ ตั้งแต่ 100-400 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.61 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln(R_0/R)$ กับ $1000/T$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูง ในช่วงอุณหภูมิ 20 – 120 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนัลและมีการแอนนัลที่อุณหภูมิต่างๆ ตั้งแต่ 100-400 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศแก๊สไนโตรเจน เป็นเวลา 30 นาที

จากรูปที่ 4.36 เป็นผลจากการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการวัดการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนิลและแอนนิลที่อุณหภูมิต่างๆ ตั้งแต่ 100-400 องศาเซลเซียส ซึ่งจากผลการทดลองนี้ทำให้สามารถหา ค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) ได้จากสมการ

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

$$\ln\left(\frac{R_0}{R}\right) = \left(\frac{E_a}{1000k}\right)\left(\frac{1000}{T}\right)$$

$$\text{ความชัน} = -\left(\frac{E_a}{1000k}\right)$$

แทนค่า

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

$$E_a = -\frac{1000 \times (1.38 \times 10^{-23})(-0.14)}{1.6 \times 10^{-19}}$$

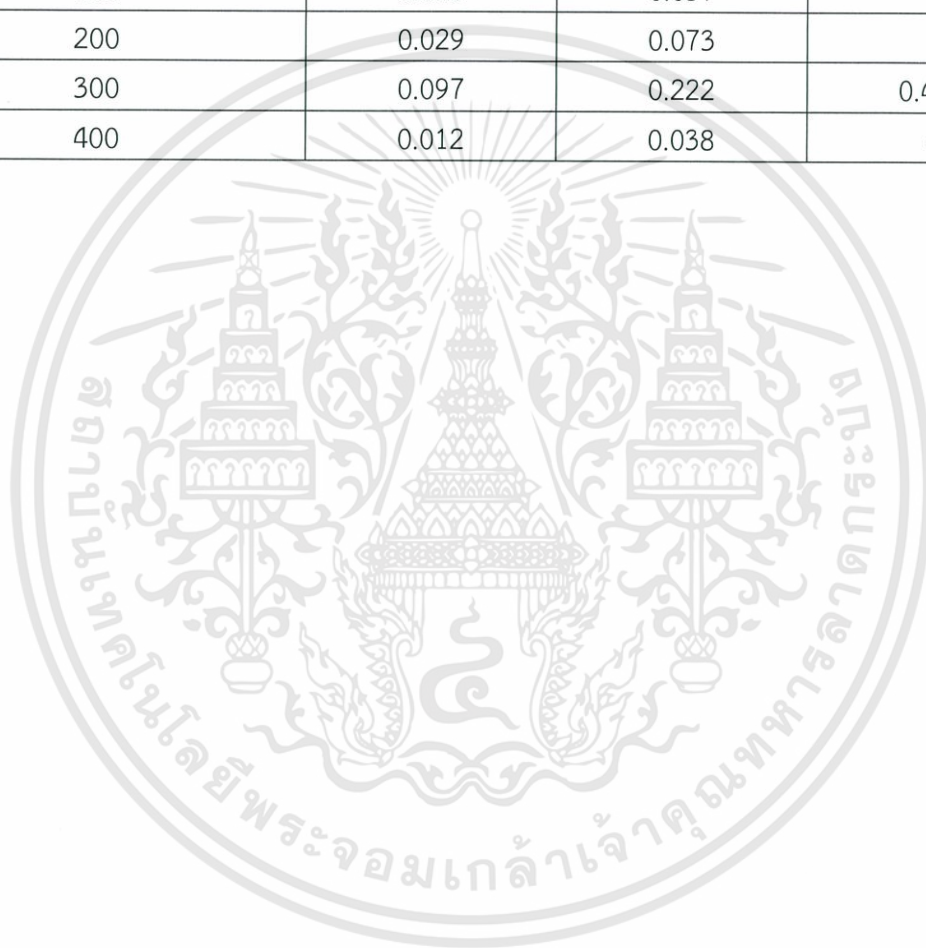
$$E_a = 0.012 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

เมื่อ R_0 คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง

E_a คือ ค่าพลังงานกระตุ้น

ตารางที่ 4.13 แสดงค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนัล และมีการแอนนัลที่อุณหภูมิต่างๆตั้งแต่ 100-400 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

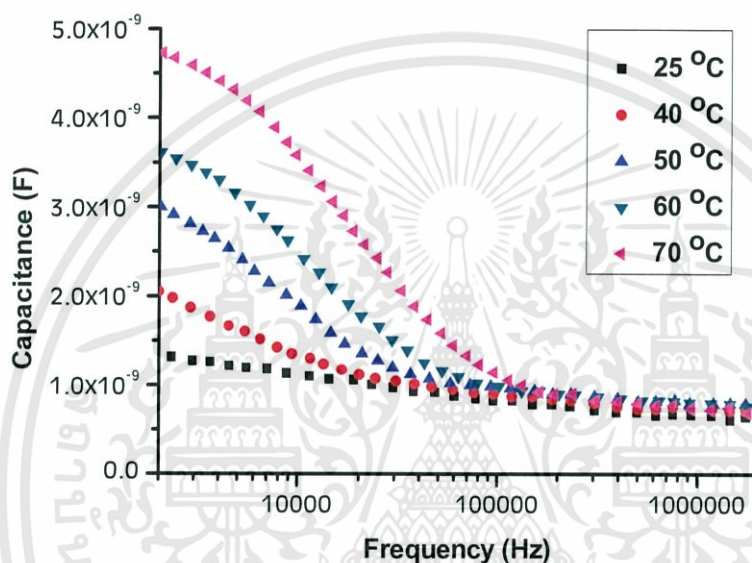
Annealing Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Activation Energy (eV)		
	E_{a1}	E_{a2}	E_{a3}
As-deposited	0.014	0.0320	-
100	0.018	0.037	-
200	0.029	0.073	-
300	0.097	0.222	0.487
400	0.012	0.038	-



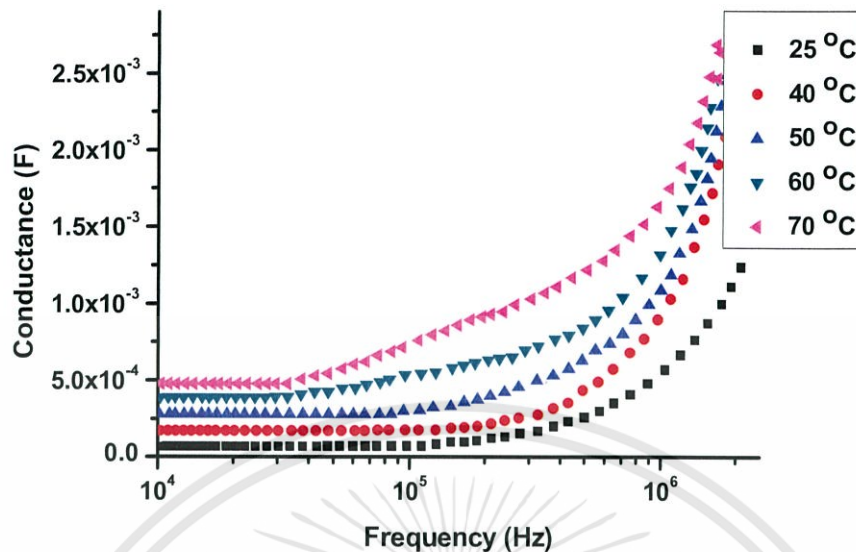
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.9.7 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสสลับ ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p - \text{SnS} / n - \text{WO}_3 : \text{Sb}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

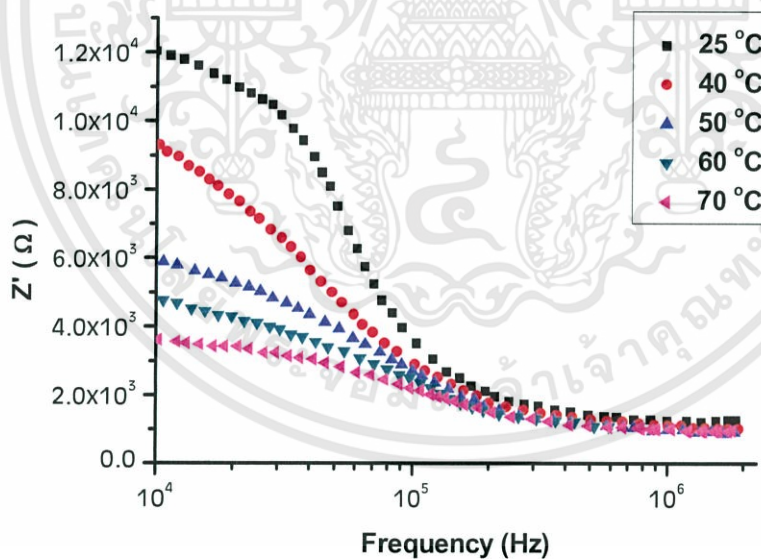
ผลการศึกษาค่าอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี ในความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p - \text{SnS} / n - \text{WO}_3 : \text{Sb}$



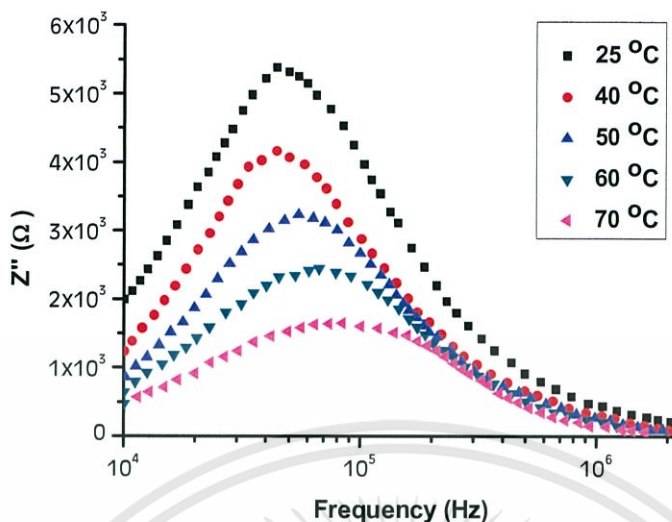
รูปที่ 4.62 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ ความถี่ ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ - 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p - \text{SnS} / n - \text{WO}_3 : \text{Sb}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส



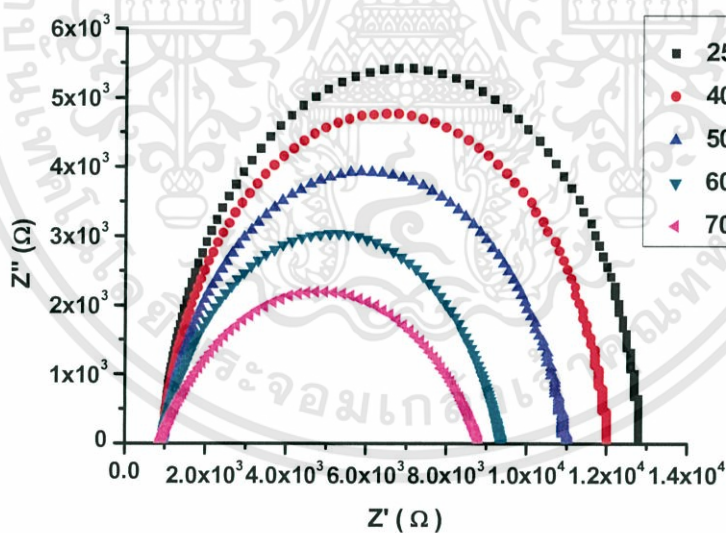
รูปที่ 4.63 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความนำไฟฟ้า กับ ความถี่ ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ – 2 เมกะเฮิรตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิธีสัมผัส p – SnS / n – WO₃ : Sb ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส



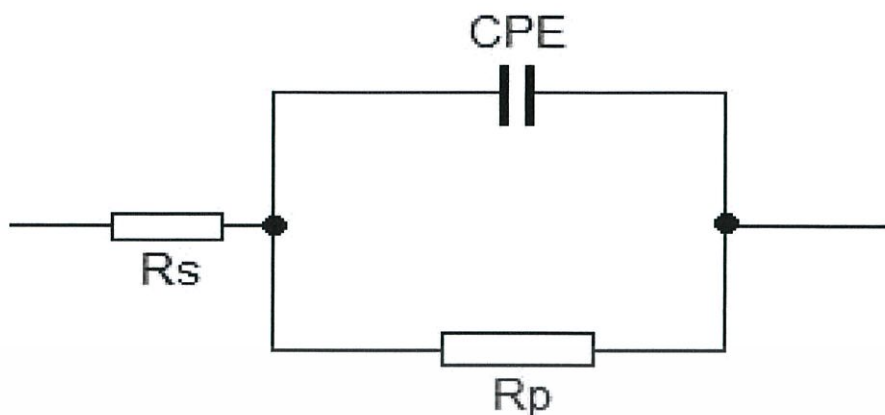
รูปที่ 4.64 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของ ค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ – 2 เมกะเฮิรตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิธีสัมผัสของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p – SnS / n – WO₃ : Sb ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส



รูปที่ 4.65 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p – SnS / n – WO₃: Sb ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส

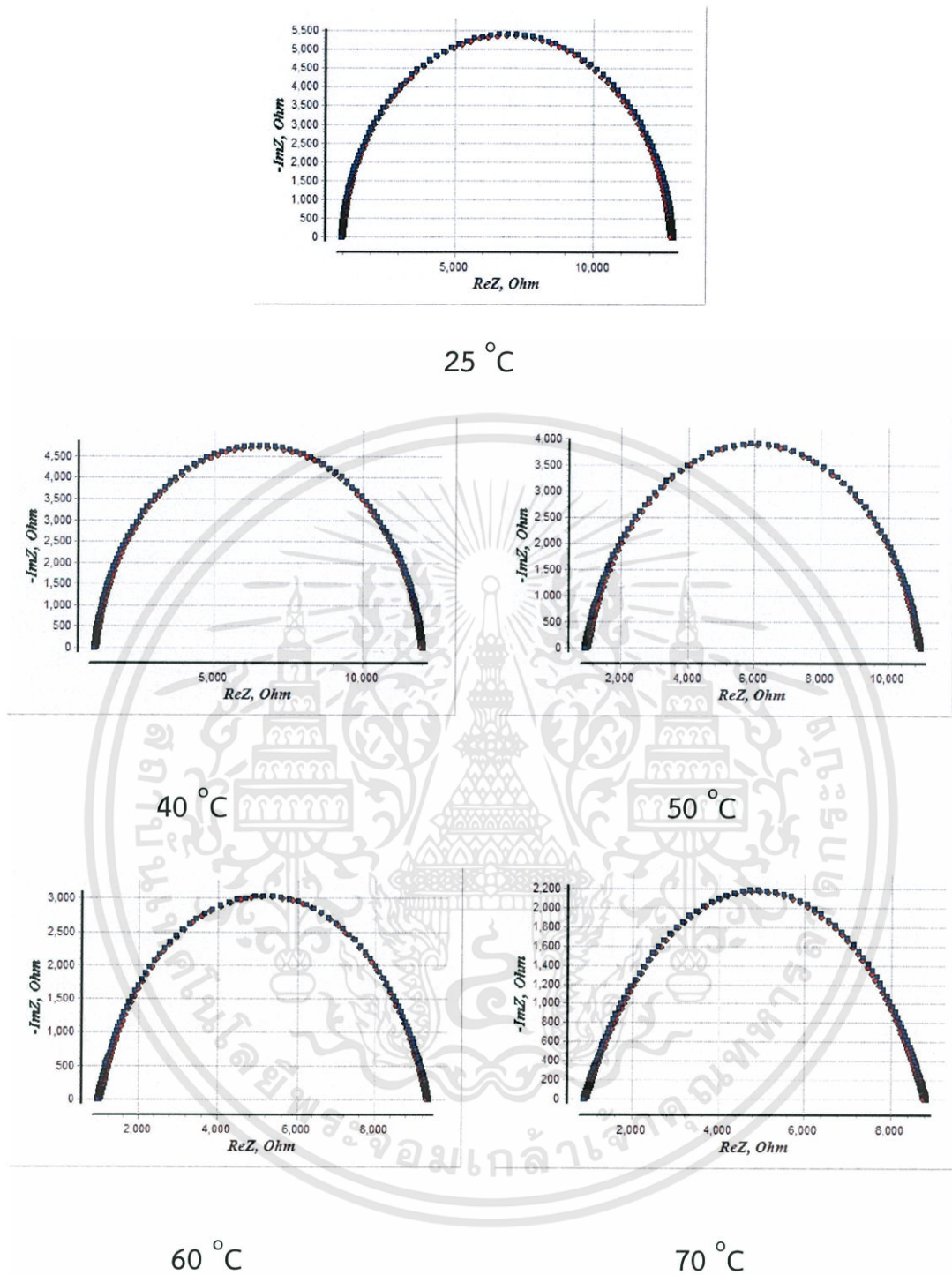


รูปที่ 4.66 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p – SnS / n – WO₃: Sb ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส



รูปที่ 4.67 วงจรสมมูลของสิ่งประดิษฐ์ที่ใช้ศึกษาการจำลองหาค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ

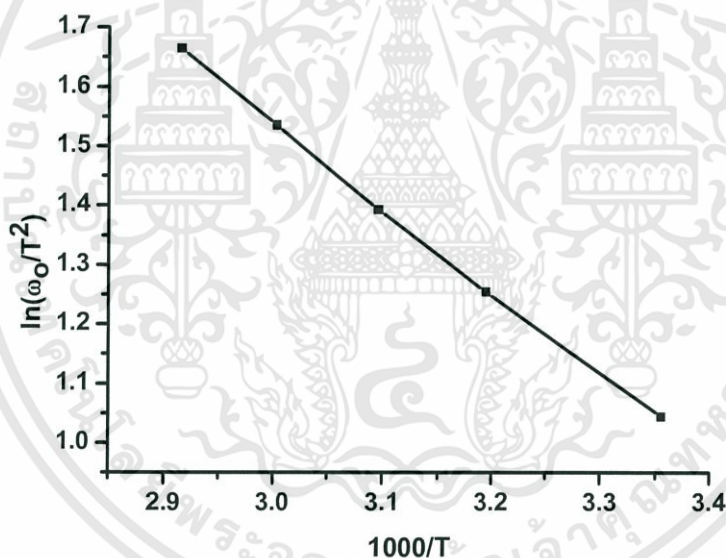
การจำลองหาค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS:WO_3 จะแสดงในรูปและพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆที่ได้จากการจำลองจะปรากฏในตารางที่ 4.11



รูปที่ 4.68 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p - \text{SnS} / n - \text{WO}_3 : \text{Sb}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนیل

ตารางที่ 4.14 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่สำคัญ ที่ได้จากการศึกษาค่าอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอด ที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p – SnS / n – WO₃ : Sb ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อมีการแอนนัล ที่อุณหภูมิต่างๆ

Temperature (°C)	Parameters						
	R _s (Ω)	R _p (Ω)	P(10 ⁻⁸)	n	C _p (F)(10 ⁻¹⁰)	f _{max} (Hz)	ω _{max} R _p C _p
25	950	11900	7.90	0.9408	3.32	40190.00	1.000
40	940	11100	7.30	0.9030	2.62	54710.00	1.000
50	930	10057	6.70	0.8440	2.36	66890.00	1.000
60	920	8450	6.30	0.7930	2.29	81970.00	1.000
70	880	7950	5.80	0.6410	2.02	98970.00	1.000



รูปที่ 4.69 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(\omega_0/T^2)$ กับ $(1000/T)$ ที่ได้จากการหาค่า ω_0 จากกราฟความสัมพันธ์ของค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนเมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25-70 องศาเซลเซียส ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ WO₃:Sb ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

การหาค่า ω_0 จากค่าอนุพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้าเทียบกับความถี่เชิงมุมแล้วนั้น จะสามารถหาค่าของพลังงานกระตุ้นได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(\omega_0/T^2)$ กับส่วนกลับของอุณหภูมิซึ่งจะมีที่มาจากสมการ (4.17)

$$\omega = \zeta_0 T^2 \exp\left(\frac{-E_a}{kT}\right) \quad (4.17)$$

จัดรูปใหม่ให้อยู่ในรูปสมการของเส้นตรงจะได้ว่า

$$\ln\left(\frac{\omega_0}{T^2}\right) = \frac{-E_a}{k}\left(\frac{1}{T}\right) + \ln \zeta_0 \quad (4.18)$$

และเพื่อให้ง่ายในการคำนวณก็นำสมการ (4.10) มาปรับปรุงใหม่ จะได้ว่า

$$\ln\left(\frac{\omega_0}{T^2}\right) = \frac{-E_a}{1000k}\left(\frac{1000}{T}\right) + \ln \zeta_0 \quad (4.19)$$

จุดตัดแกน y นั้นจะได้ค่า ζ_0 แล้วจะสามารถหาค่า ζ_0 ได้ จากนั้นจะหาค่า σ_T ได้จากสมการ

$$\zeta_0 = 2\sigma_T v_{th} N_c \quad (4.20)$$

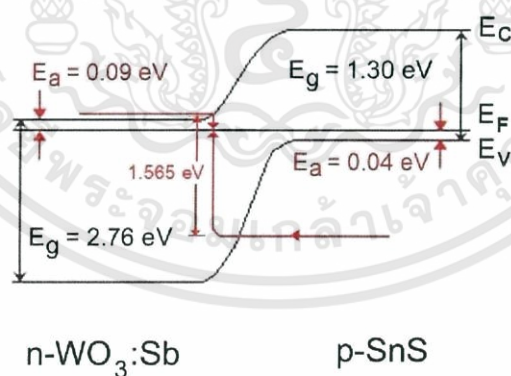
$$\sigma_T = \frac{\zeta_0}{2v_{th} N_c} \quad (4.21)$$

เมื่อ ζ_0 คือพารามิเตอร์ของการปล่อยอิเล็กตรอนออกจากกักประจุซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ไม่ได้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ส่วน σ_T คือพื้นที่ภาคตัดขวางในการวิจัยอิเล็กตรอนของกักประจุ ค่าพลังงานกระตุ้น E_a สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ $\ln(\omega_0/T^2)$ กับ $(1000/T)$ ซึ่ง ω_0 สามารถหาได้ด้วยวิธีต่างๆ ก็จะมีอีกว่าทุกวิธีนั้นสามารถคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้นได้มีค่าใกล้เคียงกันมาก แต่ค่าของ ζ_0 และ σ_T นั้นมีความแตกต่างกันค่อนข้างมาก โดยค่า ζ_0 ที่ได้จากวิธีการหาอนุพันธ์ของค่าความจุไฟฟ้ากับค่าลอการิทึมของความถี่เชิงมุมซึ่งมีค่าอยู่ที่ 3.21×10^2 ต่อวินาทีเคลวินยกกำลังสอง ($s^{-1}K^{-2}$) ดังแสดงในตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.15 ค่าความถี่กำหนด พลังงานกระตุ้นและตัวแปรต่างๆที่คำนวณได้จากวิธีอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโกปีเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิในช่วง 25-70 องศาเซลเซียส ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ $WO_3:Sb$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

T (°C)	ω_0 (s ⁻¹)	E_a (meV)	ζ_0 (s ⁻¹ K ⁻²)	σ_T (cm ⁻²)
25	2.52×10^5	0.1215	3.21×10^2	3.37×10^{-24}
40	3.44×10^5			
50	4.20×10^5			
60	5.15×10^5			
70	6.22×10^5			

จากข้อมูลของผลการทดลองที่ผ่านมาทั้งหมด ได้แก่ ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ค่าพลังงานกระตุ้น ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p - SnS / n - $WO_3 : Sb$ และค่าพลังงานกระตุ้น ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS สามารถนำมาเขียนโครงสร้างแถบพลังงานของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p - SnS / n - $WO_3 : Sb$ ได้ดังรูปที่ 4.42



รูปที่ 4.70 แสดงแผนภาพลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p - SnS / n - $WO_3 : Sb$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนیل

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในโครงการพิเศษนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็นสามส่วนใหญ่ๆคือ ส่วนแรกเป็นการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยไม่ได้ให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับ ส่วนที่สองเป็นการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO_3 ที่เจือด้วย Sb_2O_3 จากสารกึ่งตัวนำที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง และส่วนสุดท้ายเป็นการประดิษฐ์ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n- WO_3 :Sb จากนั้นได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า ที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วงอุณหภูมิ 200-300 เคลวิน เพื่อคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่สำคัญของไดโอดดังกล่าว รวมทั้งยังทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า ที่อุณหภูมิห้อง เพื่อคำนวณหาค่าความหนาแน่นของพาหะอิสระของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS

5.1 ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ มีสีดำ มันวาวสะท้อนแสงและติดแน่นกับแผ่นฐานรองรับได้ดี แม้ว่าจะไม่ได้ให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับ ทั้งกรณีที่ไม่มีการแอลนีสและในกรณีที่มีการแอลนีสที่อุณหภูมิ 100 , 200 , 300 , 400 และ 500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

จากการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคโดยการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ พบว่าเกิดความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ปรากฏหลายระนาบ

จากการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นการศึกษาถึงลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ทั้งกรณีที่ไม่มีการแอลนีสและในกรณีที่มีการแอลนีสที่อุณหภูมิ 100 , 200 , 300 , 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที พบว่าอุณหภูมิแอลนีสมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของเกรน กล่าวคือทำให้เกรนมีขนาดโตขึ้นตามอุณหภูมิแอลนีสที่เพิ่มขึ้น

ผลการศึกษาสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ พบว่าขอบการดูดกลืนแสงอยู่ที่ความยาวคลื่น

ประมาณ 900 นาโนเมตร และสามารถนำไปคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) มีค่าเท่ากับ 1.15 อิเล็กตรอนโวลต์

5.2 ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-WO₃:Sb ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

การเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO₃:Sb ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสถานะของแข็ง เม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO₃:Sb ที่ได้ นั้นพบว่าเป็นสีเขียวเข้ม และต่อจากนั้นได้ทำการเตรียมไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-WO₃:Sb โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO₃:Sb โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อทำการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ลงบนเม็ดเซรามิกจะพบว่าฟิล์มบางสีดำปรากฏ

การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคและการสังเกตภาคตัดขวางตรงบริเวณผิวรอยต่อของไดโอดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-WO₃:Sb ซึ่งเตรียมได้จากการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO₃:Sb โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ พบว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS มีความหนาประมาณ 1 ไมโครเมตร แต่ไม่สามารถเห็นขนาดเกรนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ได้ ส่วนเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO₃:Sb มีขนาดเกรนประมาณ 6 ไมโครเมตร

5.3 สมบัติทางไฟฟ้าที่ทำการศึกษาโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับแรงดันไฟฟ้า ในช่วง -3.0 ถึง 3.0 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องและ อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20 - 300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-WO₃:Sb ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหย สารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า โดยวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า ในช่วง -3.0 ถึง 3.0 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์ม บางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-WO₃:Sb ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบ สุญญากาศ พบว่ามีการเรียงกระแสไฟฟ้าทางเดียวเหมือนไดโอด โดยมีค่าแรงดันขีดเริ่ม (threshold voltage) อยู่ที่ 0.8 โวลต์ แต่เนื่องจากค่าความหนาแน่นของพาหะอิสระของเม็ดเซรามิกของสารกึ่ง ตัวนำ WO₃:Sb และของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS อยู่ในระดับ 10¹⁶ และ 10¹⁴ ลูกบาศก์ เซนติเมตร ตามลำดับ ดังนั้นจะประมาณได้ว่าไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่ง ตัวนำ p-SnS/n-WO₃:Sb เป็นรอยต่อแบบ p⁺-n ซึ่งกลไกการนำกระแสจะอธิบายได้ เช่นเดียวกับ รอยต่อขอตดีก็โดยบริเวณพร่องพาหะอิสระตรงบริเวณรอยต่อเกือบทั้งหมดจะปรากฏอยู่ในเนื้อของ ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS

พิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln I$ กับ $\ln V$ ที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มี รอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-WO₃:Sb พบว่าส่วนที่ช่วงแรงดันไฟฟ้า น้อยกว่า 0.25 โวลต์ เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าเป็นไปตามกฎของโอห์ม ส่วนที่ช่วงแรงดันระหว่าง 0.25 ถึง 0.5 โวลต์ เป็นกลไกการนำกระแสแบบเทอร์มิออนิกอิมิสชัน และช่วงที่แรงดันไฟฟ้า มากกว่า 0.5 โวลต์ เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้าง (space charge limit current) ที่เกิดจากกับดักประจุในเนื้อสารที่มีการแจกแจงแบบเอกซ์โพเนนเชียล เมื่อเขียน กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln I$ กับ $\ln V$ จะได้แพกเตอร์อุดมคติและค่ากระแสไฟฟ้าอิมิตัวย้อนกลับ และนำไปใช้เป็นค่าเริ่มต้นในการจำลองข้อมูลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อหาค่าแพกเตอร์อุดมคติ และค่าความต้านทานอนุกรม และจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $H(I)$ กับ I จะได้ค่าความสูงของ กำแพงศักย์ในขณะที่ยังแรงดันไบแอสเป็นศูนย์

ที่อุณหภูมิห้อง ค่าแพกเตอร์ในอุดมคติและค่าความสูงของกำแพงศักย์มีค่าเท่ากับ 15.383 และ 0.520 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ และเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆในช่วง 20-300 เคลวิน พบว่า ค่าความสูงของกำแพงศักย์จะมีค่าลดลงตามอุณหภูมิ แต่ค่าแพกเตอร์ในอุดมคตินั้นจะมีค่า เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลง โดยการที่ค่าแพกเตอร์อุดมคติ และ ค่าความสูงของกำแพงศักย์ เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ เกิดเนื่องจากได้ใช้การวัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์มาคำนวณหา ตัวแปรเหล่านี้ ดังนั้นค่าของตัวแปรจะขึ้นอยู่กับปริมาณของค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ ที่อุณหภูมิสูงจะมี พลังงานความร้อนไปกระตุ้นพาหะอิสระให้มีระดับพลังงานสูงและมีจำนวนมากขึ้น เมื่อมีการให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันไบแอสไปข้างหน้า ประจุอิสระที่มีระดับพลังงานสูงเหล่านี้ ก็สามารถไหลข้ามกำแพงศักย์ที่มีค่าสูงได้ ดังนั้นจะได้ค่ากำแพงศักย์ที่มีค่ามาก และ ค่าแพกเตอร์อุทมคติ มีค่าเข้าใกล้หนึ่ง แต่ที่อุณหภูมิ ต่ำระดับพลังงานพาหะอิสระมีค่าน้อย จึงจำเป็นต้องใช้ค่าแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเพื่อไหลให้ข้ามกำแพง ศักย์ ขณะเมื่อป้อนแรงดันไบแอสไปข้างหน้าให้มากขึ้น กลไกการชดเชยโม่งค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์จะ โดดเด่นขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิต่ำลง กลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันจะลงความโดดเด่นลง และในทาง กลับกัน กลไกการชดเชยโม่งค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์จะโดดเด่นมากยิ่งขึ้น จึงเสมือนว่ามีพาหะอิสระ สามารถไหลข้ามรอยต่อได้ เนื่องจากค่าความสูงของกำแพงศักย์ลดลง ส่วนค่าแพกเตอร์อุทมคติ (n) จะมีค่าสูงขึ้น ซึ่งแสดงว่าการนำกระแสไฟฟ้าผ่านรอยต่อที่ช่วงอุณหภูมิต่ำ จะสอดคล้องกับกลไก เทอร์มิออนิกอิมิสชันน้อยลง

ผลการศึกษารูปความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ แรงดันไบแอสที่ 0 โดยใช้ ความถี่ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบาง ของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-SnS}/n\text{-WO}_3\text{:Sb}$ จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $1/C^2$ กับ V จุดตัดที่ได้จาก กราฟคือ ค่า V_i ซึ่งสามารถนำไปหา ค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมรอยต่อ (V_{bi}) ได้ และ จากค่าความชัน ของกราฟนี้สามารถหาคำนวณหา ค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้รับได้เท่ากับ 4.46×10^{14} ต่อ ลูกบาศก์เซนติเมตร

5.4 ข้อเสนอแนะ

1. ต้องทำความสะอาดระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศทุกครั้งเมื่อทำงาน เสร็จหรือก่อนใช้งาน เพื่อที่ไม่ให้มีสารมาปนเปื้อนระหว่างการเคลือบฟิล์ม
2. เตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ด้วยความระมัดระวังไม่ให้ผิวหน้าเป็นรอย เพราะ จะทำให้ฟิล์มบางที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ไม่เรียบสม่ำเสมอ หรือเคลือบไม่ ติดทั้งแผ่น
3. การเตรียมเม็ดเซรามิกเพื่อใช้เป็นแผ่นฐานรองรับในการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบ สุญญากาศ ควรจะวางแผนการทำงานล่วงหน้า เพราะถ้าเม็ดเซรามิกที่ผ่านการเผาแล้ว เมื่อโดนอากาศ จะเกิดการร่อนหรือแตกได้
4. การระเหยสารเคมีขึ้นไปเคลือบยังแผ่นฐานรองรับ ควรใช้อัตราการระเหยที่เหมาะสม ซึ่ง ขึ้นกับชนิดสารเคมีที่ใช้
5. ควรทำการวัดระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับแรงดันไฟฟ้า ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-SnS}/n\text{-WO}_3\text{:Sb}$ โดยทันทีเพื่อหลีกเลี่ยงการแพร่เข้าหากันของ อะตอมที่อยู่ตรงบริเวณรอยต่อ ซึ่งจะส่งผลให้ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่ง ตัวนำ $p\text{-SnS}/n\text{-WO}_3\text{:Sb}$ เสื่อมคุณภาพได้

เอกสารอ้างอิง

- งามนิตย์ วงษ์เจริญ. 2531. “การศึกษารอยต่อแบบโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ ของคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์”. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ และฐิตินัย แก้วแดง. 2553. “การประดิษฐ์ฟิล์มบาง CdO ที่เจือด้วย Al สำหรับขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์”. รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2556. “ความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้าของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) และการประยุกต์”. รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2551. “การเตรียมฟิล์มบาง CdTe โดยวิธีระเหิดในระยะเวลาประชิดเพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์”. รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2558. “การเตรียมฟิล์มบาง CuO โดยวิธีปฏิบัติภายนอกซีเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu ที่ได้จากการสเปคโตรริงเพื่อประยุกต์ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์”. รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง, ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ และชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ. 2543. “การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์”. รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง, ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ และชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ. 2545. “การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์”. รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- ฐิตินัย แก้วแดง. 2530. “การเตรียมและศึกษาสมบัติของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์”. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ฐิตินัย แก้วแดง. 2545. “เอกสารประกอบการสอนวิชา ฟิสิกส์ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ”. ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- ฐิตินัย แก้วแดง และงามนิตย์ วงษ์เจริญ. 2544. “เอกสารประกอบการสอนวิชา ฟิสิกส์และเทคโนโลยีของเซลล์แสงอาทิตย์”. ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2549. “การประดิษฐ์ฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่เจือด้วยอะตอมฟลูออรีนสำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์”. รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ฐิตินัย แก้วแดง และงามนิตย์ วงษ์เจริญ. 2551. “การเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธีอบสารละลายเคมีภายใต้คลื่นไมโครเวฟเพื่อประดิษฐ์เป็นหน้าต่างรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์”. รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ฐิตินัย แก้วแดง งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2552. “การพัฒนาชั้นไฟฟ้าด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CdS/CdTe”. รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2554. “การประดิษฐ์ชั้นไฟฟ้าด้านหลัง ชนิดใหม่ที่เหมาะสมกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CdS/CdTe”. รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฐิตินัย แก้วแดง งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2557. “การประดิษฐ์และการศึกษาสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CuO”. รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ. 2558. “การเตรียมฟิล์ม

บาง CuO โดยวิธีรีแอ็คทีฟตีซีสปีดเตอริงเพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อวิวิธพันธุ์

CdS/CuO”. รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

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

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ. 2546. “การประดิษฐ์ฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี Zn ในปริมาณสูงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์”. รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

เตชวัต ณรงค์รัตน์ ,สมฤทัย ชาติทอง. 2557 “สมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ระหว่างฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe กับเมมเบรนเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO_3 ”. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

นพณัฐ เดชะคำภู. 2556. “การประดิษฐ์ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด”. โครงการพิเศษ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

วรรณภา จำเนียรพีช. 2555. “การศึกษาสมบัติของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอด Cd/CuO”. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

วุฒิ สารรัตน์. 2555. “ลักษณะเฉพาะทางแสงของฟิล์มบางแคดเมียมซิงค์ซัลไฟด์เตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ”. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

สุกฤษฎี เกิดแสง. 2547. “การเตรียมและศึกษาสมบัติของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ CdTe”. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

- Aksay, S. ozer, T. and Zor, M. 2009. "Vibration and x-ray Diffraction Spectra of SnS Film Deposited by chemical Bath Deposition Method" *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* 47:30502-p1-30502-p3
- Chaisitsak, S. 2011. "Nanocrystalline SnO₂ :F Thin Films for Liquid Petroleum Gas Sensors." *Sensors.* 11 : 7127 – 7140.
- Das, D. and Dutta, R.K. 2015. "A Novel Method of synthesis of small Band Gap SnS Nanorods and Its Efficient Photocatalytic Dye Degradation." *J. Colloid and Interfare Science.* 457:339–344
- Kuantama, E. Han, D.W. Sung, Y.M. Jong, J.E. and Han, C.H. 2009. "Structural and thermal Properties of Transparent Conductive Nanoporous F:SnO₂ Films". *Thin Solid Films.* 517:4211-4214
- Kul, M. 2014 "Electrodeposited SnS Film for photovoltaic Applications." *Vacuum.* 107:213-218





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ SnS

ไฟล์มาตรฐาน JCPDS NO.73-1859

Pattern : 73-1859		Radiation = 1.540600					Quality : Calculated				
Sn S		2th	l	h	k	i	2th	l	h	k	i
Tin Sulfide		15.841	<1	2	0	0	*84.664	8	2	2	3
		22.001	32	1	0	1	84.935	5	6	0	3
		26.013	66	2	0	1	86.352	3	8	1	2
		27.479	71	2	1	0	*86.352	3	1	3	2
		30.477	53	0	1	1	87.406	2	3	2	3
		31.533	100	1	1	1	87.986	<1	2	3	2
		31.655	63	3	0	1	88.300	1	8	2	1
		31.995	68	4	0	0	88.526	3	5	3	1
		34.527	<1	2	1	1	89.230	<1	6	1	3
		38.301	1	4	0	1					
		39.069	42	3	1	1					
		39.354	6	4	1	0					
		41.695	2	0	0	2					
		42.506	19	1	0	2					
		44.771	30	4	1	1					
		44.869	17	2	0	2					
		45.522	25	0	2	0					
		45.628	23	5	0	1					
		48.520	24	2	2	0					
		*48.520	24	1	1	2					
		48.605	22	3	0	2					
		50.663	1	2	1	2					
		51.111	6	1	2	1					
		51.357	18	5	1	1					
		53.178	15	2	2	1					
		53.496	9	6	0	1					
		*53.496	9	4	0	2					
		54.097	10	3	1	2					
		54.313	12	6	1	0					
		56.505	2	3	2	1					
		56.721	20	4	2	0					
		58.671	1	6	1	1					
		*58.671	1	4	1	2					
		59.380	4	5	0	2					
		60.962	<1	4	2	1					
		61.871	<1	7	0	1					
		63.428	1	0	2	2					
		64.034	9	1	2	2					
		64.247	14	5	1	2					
		65.129	3	1	0	3					
		65.836	<1	2	2	2					
		66.115	1	6	0	2					
		66.425	5	5	2	1					
		66.634	7	7	1	1					
		66.899	7	8	0	0					
		*66.899	7	2	0	3					
		68.784	8	3	2	2					
		68.972	5	6	2	0					
		69.192	5	0	1	3					
		69.841	2	1	1	3					
		*69.841	2	3	0	3					
		70.790	<1	6	1	2					
		*70.790	<1	8	0	1					
		71.487	2	8	1	0					
		*71.487	2	2	1	3					
		72.812	5	6	2	1					
		*72.812	5	4	2	2					
		73.235	3	2	3	0					
		73.652	4	7	0	2					
		73.849	2	4	0	3					
		74.349	2	3	1	3					
		74.746	3	0	3	1					
		75.310	8	8	1	1					
		*75.310	8	1	3	1					
		76.990	<1	2	3	1					
		77.880	3	5	2	2					
		78.075	3	7	1	2					
		78.269	6	4	1	3					
		78.889	1	5	0	3					
		79.768	3	3	3	1					
		79.950	2	4	3	0					
		80.350	2	9	0	1					
		82.006	<1	8	0	2					
		83.038	2	1	2	3					
		83.231	1	5	1	3					
		83.616	3	4	3	1					
		83.942	2	6	2	2					
		84.664	8	8	2	0					
Lattice : Orthorhombic		Mol. weight = 150.75									
S.G. : Pnma (62)		Volume [CD] = 192.72									
a = 11.18000		Dx = 5.196									
b = 3.98200											
c = 4.32900											
a/b = 2.80763		Z = 4		l/cor = 4.54							
c/b = 1.08714											
ICSD COLLECTION CODE : 024376											
TEMPERATURE FACTOR : ATF											
REMARKS FROM ICSD : PICT.											
*Calculated from ICSD using POWD-12+, (1997) primary reference :											
*Acta Crystallogr., Sec. B, volume 37, page 1903, (1981) :											
del Bucchia, S., Jumas, J.C., Maurin, M.											
Radiation : CuKα1		Filter : Not specified									
Lambda : 1.54060		d-sp : Calculated spacings									

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ SnS

ไฟล์มาตรฐาน JCPDS NO.39-354

Pattern : 39-354		Radiation = 1.540600		Quality : High		
Sn S		2θ	I	h	k	l
Herzenbergite, syn / Tin Sulfide		22 011	40	1	1	0
		26 010	50	1	2	0
		27 473	65	0	2	1
		30 474	70	1	0	1
		31 532	100	1	1	1
		31 972	50	0	4	0
		39 046	50	1	3	1
		39 330	6	0	4	1
		41 685	3	2	0	0
		42 507	25	2	1	0
		44 740	35	1	4	1
		45 496	50	0	0	2
		48 511	45	2	1	1
		51 088	25	1	1	2
		51 313	35	1	5	1
		53 148	40	1	2	2
		53 443	17	1	6	0
		54 073	19	2	3	1
		54 257	16	0	6	1
		56 676	35	0	4	2
		59 342	8	2	5	0
		60 930	4	1	4	2
		63 391	7	2	0	2
		64 006	30	2	1	2
		64 199	22	2	5	1
		66 372	9	1	5	2
		68 565	12	1	7	1
		68 812	11	0	8	0
		68 745	20	2	3	2
		69 761	2	3	1	1
		71 396	6	0	8	1
		72 746	11	1	6	2
		73 198	8	0	2	3
		73 588	7	2	7	0
		77 843	8	2	5	2
		78 245	9	3	4	1
		79 710	8	1	3	3
		80 256	6	1	9	0
		83 635	5	3	1	2
		83 572	12	1	4	3
Lattice : Orthorhombic S.G. : Pbnm (62) a = 4.32910 b = 11.19230 c = 3.98380 a/b = 0.38679 c/b = 0.35594 Z = 4		Mol. weight = 150.75 Volume [CD] = 193.03 Dx = 5.187				
SAMPLE PREPARATION : Synthesized by dry method in an evacuated silica glass tube. ADDITIONAL PATTERN : To replace 1-984 and 14-620 and validated by calculated pattern 33-1375. STRUCTURE : Teallite is the Pb analogue						
*Sci. Rep. Tohoku Univ., volume 16, page 199, (1965) primary reference : Sugaki, A., Kitakaze, A., Kitazawa, H. *Z. Kristallogr., volume 148, page 295, (1978) : Wiedemeier, H., von Schnerring						
Radiation : CuK α 1 Lambda : 1.54050 SS/FOM : F30= 95(0.0061,52)		Filter : Monochromator crystal d-sp : Guinier Internal standard : Si				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ SnO₂

ไฟล์มาตรฐาน JCPDS NO.78-1063

Pattern : 78-1063		Radiation = 1.540600					Quality : Calculated				
SnO ₂		2th	l	h	k	l	2th	l	h	k	l
Tin Oxide		11.145	<1	0	0	2	73.208	<1	1	4	4
		21.836	<1	1	0	2	73.513	1	0	2	11
		22.398	<1	0	0	4	73.707	<1	2	1	10
		24.399	1	1	1	0	74.444	<1	1	0	12
		25.045	40	1	1	1	74.879	2	2	2	9
		26.896	79	1	1	2	*74.879	2	3	2	5
		29.743	100	1	1	3	75.133	2	3	1	7
		31.317	1	0	2	0	75.671	1	0	4	6
		31.833	3	0	2	1	*75.671	1	1	4	5
		33.358	58	0	2	2	76.267	1	1	3	9
		*33.358	58	1	1	4	77.157	<1	3	0	8
		33.874	31	0	0	6	78.131	1	2	4	0
		35.721	14	0	2	3	78.406	1	2	4	1
		37.183	<1	1	2	1	78.684	6	3	3	0
		37.550	13	1	1	5	78.960	3	3	3	1
		37.959	19	2	0	0	79.289	3	0	4	7
		38.504	2	1	2	2	*79.289	3	3	1	8
		38.843	19	0	2	4	79.541	2	2	1	11
		38.979	12	1	0	6	79.900	<1	0	2	12
		40.625	1	1	2	3	80.138	3	2	2	10
		41.641	<1	2	1	1	80.605	4	2	4	3
		42.187	1	1	1	6	80.857	2	2	3	8
		42.571	3	0	2	5	*80.857	4	4	0	0
		43.449	1	1	2	4	*81.152	4	3	3	3
		44.519	<1	2	0	4	82.516	1	2	4	4
		46.798	1	0	2	6	83.461	1	1	1	13
		46.878	1	1	2	5	*83.461	1	4	1	1
		47.183	7	1	1	7	83.713	6	2	0	12
		50.002	1	2	2	0	83.932	6	3	1	9
		50.354	5	2	2	1	84.962	1	2	4	5
		*51.398	22	2	2	2	85.507	<1	4	0	4
		*51.398	22	0	2	7	*85.507	<1	3	3	5
		51.777	45	1	3	0	85.856	<1	2	1	12
		*51.777	45	2	0	6	*85.856	<1	2	1	11
		52.487	10	1	1	8	86.411	<1	1	4	8
		53.107	12	1	3	2	86.704	<1	0	2	13
		*53.107	12	2	2	3	86.989	<1	3	0	10
		54.769	3	1	3	3	87.202	<1	1	3	11
		55.436	13	2	2	4	87.976	2	2	4	6
		56.458	8	0	2	8	*87.976	2	0	9	9
		57.053	<1	1	3	4	88.177	2	1	5	1
		58.077	13	1	1	9	88.483	8	3	3	6
		*58.077	13	0	0	10	88.988	4	1	2	2
		59.905	1	1	3	5	89.805	<1	4	1	1
		60.022	<1	1	2	8	*89.805	<1	1	2	13
		60.817	<1	3	1	0					
		*60.817	<1	2	0	8					
		61.126	3	3	1	1					
		*61.810	5	2	2	6					
		*61.810	5	0	2	9					
		62.047	6	3	1	2					
		*63.284	22	2	1	8					
		*63.284	22	1	3	6					
		63.566	11	3	1	3					
		63.782	6	2	3	2					
		63.947	5	1	1	10					
		65.341	1	2	3	3					
		*65.341	1	0	4	0					
		65.659	7	3	1	4					
		*65.659	7	2	2	7					
		66.524	2	0	4	2					
		67.153	<1	1	3	7					
		67.491	4	0	2	10					
		67.989	5	0	4	3					
		68.301	2	2	1	9					
		*68.301	2	3	1	5					
		68.932	<1	1	4	1					
		*68.932	<1	3	2	2					
		69.250	<1	3	0	6					
		70.061	5	2	2	8					
		*70.061	5	1	1	11					
		70.735	<1	1	2	10					
		71.273	4	1	4	3					
		*71.273	4	0	0	12					
		71.486	2	3	1	8					
		*71.486	2	1	3	8					
		72.369	<1	3	2	4					
		72.581	1	0	4	5					
Lattice : Orthorhombic		Mol. weight = 150.69									
S.G. : Pbcn (60)		Volume [CD] = 428.97									
a = 4.73700		Dx = 7.000									
b = 5.70800		Z = 12									
c = 15.86500		l/Cor = 5.29									
a/b = 0.82989											
c/b = 2.77943											
ICSD COLLECTION CODE 062199											
TEST FROM ICSD : At least one TF implausible.											
TEMPERATURE FACTOR : ITF											
*Calculated from ICSD using POWD-12++ (1997) primary reference											
*Acta Crystallogr., Sec. B, Structural Science, volume 40, page 359, (1984) : Muetler, E.											
Radiation : CuKα1		Filter : Not specified									
Lambda : 1.54060		d-sp : Calculated spacings									

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ WO₃

ไฟล์มาตรฐาน JCPDS NO.83-951

Pattern : 83-951		Radiation = 1.540600				Quality : Calculated				
WO ₃		2th	l	h	k	l	2th	l	h	k
Tungsten Oxide		16.455	<1	0	1	1	64.214	<1	1	5
		16.864	<1	1	0	1	64.214	<1	4	1
		16.864	<1	1	1	0	64.335	<1	4	3
		20.590	<1	1	1	1	64.751	<1	-5	0
		23.118	96	0	0	2	64.845	<1	3	3
		23.583	96	0	2	0	65.010	<1	5	1
		24.365	100	2	0	0	65.168	<1	5	0
		25.997	1	0	1	2	65.507	<1	0	2
		26.592	19	1	2	0	65.979	1	-2	3
		28.614	17	-1	1	2	66.248	1	-3	2
		28.928	17	1	1	2	66.414	<1	-2	4
		28.928	17	-1	2	1	66.414	<1	5	1
		29.390	<1	-2	1	1	66.539	2	2	3
		29.697	<1	2	1	1	66.639	2	-1	2
		33.261	38	0	2	2	67.097	3	-3	4
		33.564	24	-2	0	2	67.097	3	1	2
		34.166	57	2	0	2	67.235	2	3	2
		34.166	57	2	2	0	67.588	3	3	4
		35.390	6	-1	2	2	67.588	3	-4	3
		35.650	7	1	2	2	68.030	1	1	5
		35.650	7	-2	1	2	68.209	1	-2	3
		36.035	<1	-2	2	1	68.209	<1	-2	5
		36.185	1	2	1	2	68.436	<1	2	5
		36.291	<1	2	1	2	68.911	1	5	2
		36.983	<1	-1	0	3	69.590	1	-5	1
		37.019	<1	0	1	3	69.637	2	0	4
		37.338	<1	1	0	3	70.394	1	5	2
		37.527	<1	0	3	1	70.394	1	5	1
		38.602	<1	-3	0	1	70.545	2	-4	0
		38.909	<1	-1	1	3	70.545	2	-2	2
		38.909	<1	3	0	1	71.030	1	-1	4
		39.268	<1	1	1	3	71.349	1	1	4
		39.729	1	1	3	1	71.349	1	2	2
		40.481	<1	-3	1	1	71.622	2	4	0
		40.829	<1	3	1	1	71.622	2	-2	5
		41.432	13	-2	2	2	71.961	4	0	3
		41.886	14	2	2	2	71.961	4	4	4
		42.626	<1	0	2	3	72.182	3	2	5
		42.965	1	0	3	2	72.640	2	-3	3
		43.596	<1	2	3	0	72.640	2	0	5
		44.298	4	3	2	0	73.077	<1	-4	1
		44.298	4	-1	2	3	73.077	<1	-3	4
		44.598	4	1	2	3	73.375	1	3	1
		44.598	4	-1	3	2	73.375	1	-5	2
		44.912	4	1	3	2	73.887	2	-4	3
		45.383	5	-3	1	2	73.887	2	3	3
		45.383	5	2	3	1	73.805	1	3	4
		45.735	<1	-3	2	1	74.152	1	5	2
		46.016	4	3	1	2	74.162	1	-5	0
		46.016	4	3	2	1	74.876	1	0	4
		47.251	9	0	0	4	75.145	1	-2	1
		48.247	9	0	4	0	75.550	2	2	4
		48.860	1	0	1	4	75.550	2	-4	2
		49.929	25	4	0	0	76.227	4	-5	3
		49.929	25	1	4	0	76.227	4	-1	1
		50.228	5	2	3	2	76.430	4	-4	4
		50.228	5	-3	2	2	76.693	5	1	1
		50.337	12	-1	1	4	76.794	3	-2	3
		50.728	11	1	1	4	76.794	3	4	2
		50.815	7	3	2	2	76.935	6	1	6
		50.815	7	0	3	3	77.051	4	4	4
		51.374	<1	-1	4	1	77.051	4	-3	2
		51.470	<1	1	4	1	77.612	<1	2	3
		51.470	<1	4	1	0	78.152	<1	1	6
		52.194	<1	3	0	3	78.152	<1	3	2
		52.330	<1	3	3	0	78.389	<1	-3	5
		52.330	<1	-1	3	3	78.556	2	6	0
		52.616	<1	1	3	3	78.852	1	0	2
		52.741	<1	-4	1	1	78.852	1	3	5
		53.469	11	0	2	4	79.104	<1	-5	2
		53.469	11	-2	0	4	79.531	1	-5	3
		53.588	6	-3	3	1	79.775	<1	6	1
		54.153	8	0	4	2	79.908	<1	-1	2
		54.236	6	2	0	4	79.908	<1	-2	1
		54.771	9	2	4	0	80.298	1	5	3
		54.963	5	-2	1	4	80.298	1	1	2
		55.340	7	-4	0	2	80.560	<1	0	4
		55.621	7	-1	4	2	80.836	1	2	1
		55.804	9	1	4	2	80.836	1	2	6
		55.929	16	4	2	0	80.980	1	0	5
		56.071	13	4	0	2	81.245	2	6	1
		56.071	13	-2	4	1	81.245	2	-3	4
		56.257	4	2	4	1	81.542	3	-1	6
		56.782	<1	-4	1	2	81.695	3	-1	4
		56.888	<1	-2	3	3	81.695	3	1	6
		57.127	<1	-4	2	1	81.923	2	-2	6
		57.226	<1	-3	2	3	82.161	1	-1	5
		57.634	1	-3	3	2	82.161	1	3	4
		58.168	1	3	3	2	82.422	1	1	5
		59.238	3	-2	2	4	82.762	1	-6	0
		59.939	4	2	2	4	82.874	1	4	3
		60.054	5	-2	4	2	83.047	1	4	5
		60.402	4	2	4	2	83.047	1	4	4
		60.603	3	0	3	4	83.127	1	-3	3
		60.975	6	0	4	2	83.403	4	6	2
		60.975	6	-4	2	2	83.403	4	-5	1
		61.664	7	4	2	2				
		61.885	6	-1	3	4				
		62.263	13	3	4	0				
		62.263	13	-3	1	4				
		63.282	5	-4	1	4				
		63.282	5	3	1	4				
		63.421	2	-3	4	1				
Radiation : CuKα1		Filter : Not specified								
Lambda : 1.54060		d-sp : Calculated spacings								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ Sb:WO₃

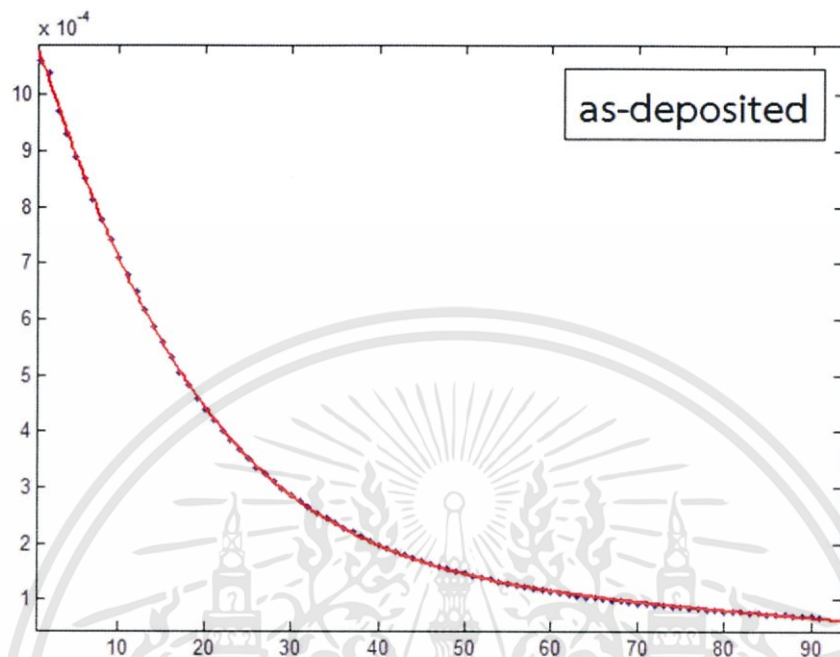
ไฟล์มาตรฐาน JCPDS NO.29-137

Pattern : 29-137		Radiation = 1.540600		Quality : Not indexed		
Sbx W O ₃		2th	l	h	k	l
Antimony Tungsten Oxide		23.144	80	0	0	1
		23.707	80	0	2	0
		24.299	100	2	0	0
		26.668	15	1	2	0
		28.587	8	-1	1	1
		28.871	8	1	1	1
		33.293	50	0	2	1
		33.550	2	-2	0	1
		34.142	50	2	2	0
		35.438	2	-1	2	1
		35.627	2	1	2	1
		41.424	5	-2	2	1
		41.826	5	2	2	1
		43.917	2	2	3	0
		44.880	2	-1	3	1
		46.840	10	0	0	2
		48.376	10	0	4	0
		49.786	15	4	0	0
		50.020	5	-2	3	1
		50.345	5	-3	2	1
		50.674	5	3	2	1
		53.413	15	0	2	2
		54.233	10	0	4	1
		54.830	10	-1	2	2
		55.296	2	-4	0	1
		56.178	30	1	4	1
Lattice : Monoclinic S.G. : (0) Volume [CDJ] = 211.25 a = 7.32300 b = 7.49500 c = 3.84900 a/b = 0.97705 c/b = 0.51354 Beta = 90.41 Z = 4						
GENERAL COMMENTS : Stabilized by addition of 0.005 atomic volume of Sb. COLOR : Green SAMPLE PREPARATION : Prepared by heating W O ₃ and Sb in a closed system under vacuum at 900 C for 12 hours. GENERAL COMMENTS : Homogeneous range: Sb _x W O ₃ , x<0.01. GENERAL COMMENTS : x=0, beta=90.90; x=0.01, beta=90. GENERAL COMMENTS : For the formula, x=0.005.						
*Mater. Res. Bull., volume 10, page 341, (1975) primary reference : Parmentier, M. et al.						
Radiation : CoKa Lambda : 1.79020 SS/FOM : F26= 4(0.0980,65)		Filter : Not specified d-sp : Guinier Internal standard : NaCl				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Decaytime

As-deposited



General model:

$$f(x) = (a*(\exp(-x/ 22.471)))+(b*(\exp(-x/ 23.691)))+(c*(\exp(-x/26.5251)))+(d*(\exp(-x/ 34.3642)))+(e*(\exp(-x/ 45.8715))^f))$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 0.3189 (0.1885, 0.4492)$$

$$b = -0.5626 (-0.7978, -0.3274)$$

$$c = 0.3129 (0.182, 0.4439)$$

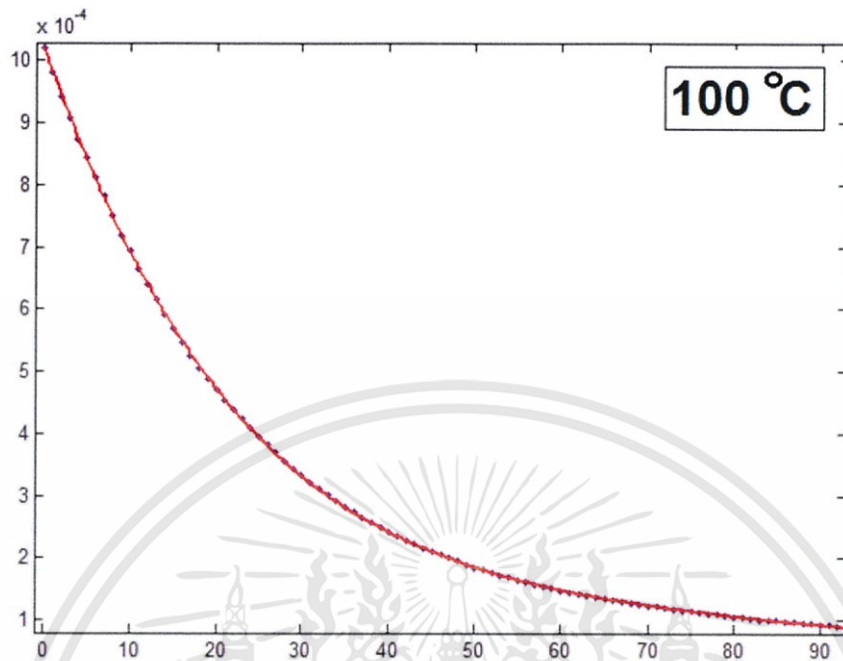
$$d = -0.09045 (-0.1227, -0.05821)$$

$$e = 0.02229 (0.01615, 0.02844)$$

$$f = 1.049 (1.04, 1.059)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

100 °C



General model:

$$f(x) = (a*(\exp(-x/ 25.6410)))+(b*(\exp(-x/ 27.777)))+(c*(\exp(-x/29.4117)))+(d*(\exp(-x/ 41.8410)))+(e*(\exp(-x/ 50)^f))$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = -0.03995 \quad (-0.04596, -0.03394)$$

$$b = 0.1326 \quad (0.1102, 0.1551)$$

$$c = -0.0975 \quad (-0.1156, -0.07938)$$

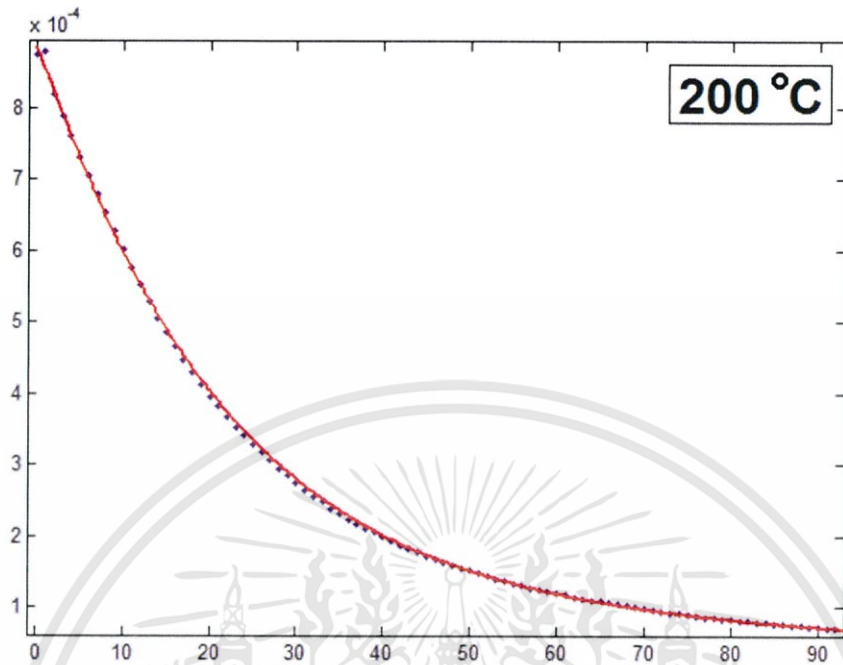
$$d = 0.00603 \quad (0.003724, 0.008336)$$

$$e = -0.0001779 \quad (-0.0008479, 0.0004921)$$

$$f = 0.7638 \quad (0.1485, 1.379)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

200 °C



General model:

$$f(x) = (a*(\exp(-x/25.5102)))+(b*(\exp(-x/26.3157)))+(c*(\exp(-x/29.5857)))+(d*(\exp(-x/35.8422)))+(e*(\exp(-x/45.4545)^f))$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 0.1723 \quad (-0.3056, 0.6503)$$

$$b = -0.2538 \quad (-0.9566, 0.4491)$$

$$c = 0.1173 \quad (-0.1879, 0.4224)$$

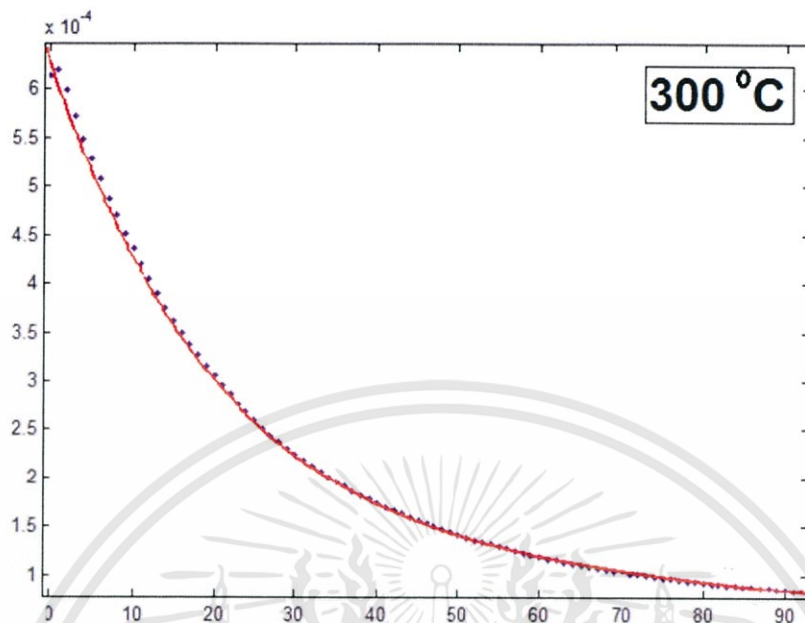
$$d = -0.04504 \quad (-0.1417, 0.05158)$$

$$e = 0.0101 \quad (-0.006244, 0.02644)$$

$$f = 1.012 \quad (1, 1.025)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

300 °C



General model:

$$f(x) = (a*(\exp(-x/25.9740)))+(b*(\exp(-x/30.2114)))+(c*(\exp(-x/39.0625)))+(d*(\exp(-x/40.5614)))+(e*(\exp(-(x/63.6942)^f)))$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 0.05118 (0.03414, 0.06822)$$

$$b = -0.1435 (-0.1935, -0.09356)$$

$$c = 0.6988 (0.4553, 0.9424)$$

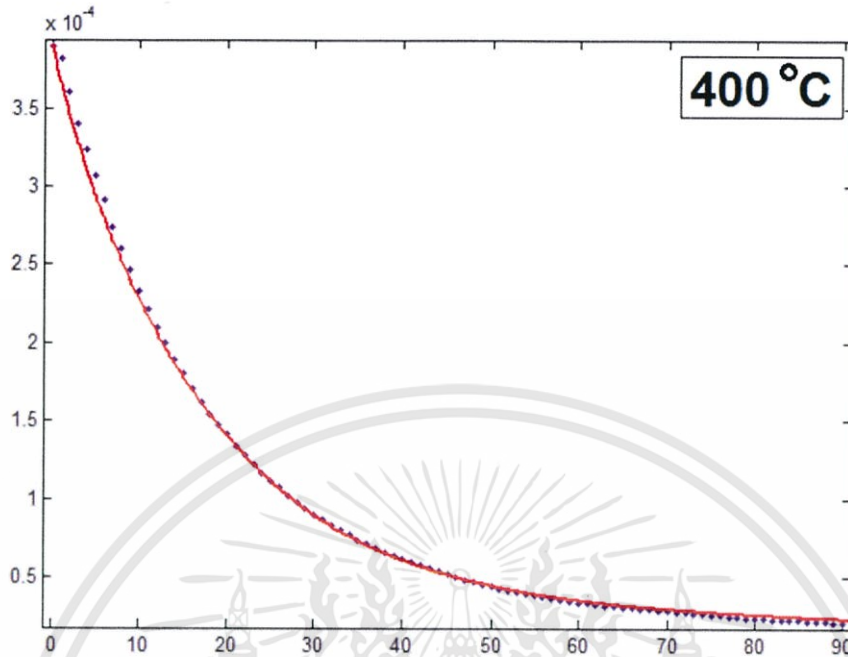
$$d = -0.6203 (-0.8354, -0.4052)$$

$$e = 0.01439 (0.009916, 0.01887)$$

$$f = 1.038 (1.031, 1.045)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

400 °C



General model:

$$f(x) = (a*(\exp(-x/20.2850)))+(b*(\exp(-x/22.1612)))+(c*(\exp(-x/28.2941)))+(d*(\exp(-x/30.8117)))+(e*(\exp(-x/39.028)^f))$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = -0.00229 \quad (-0.02266, 0.01808)$$

$$b = 0.004302 \quad (-0.03992, 0.04852)$$

$$c = -0.002416 \quad (-0.09379, 0.08896)$$

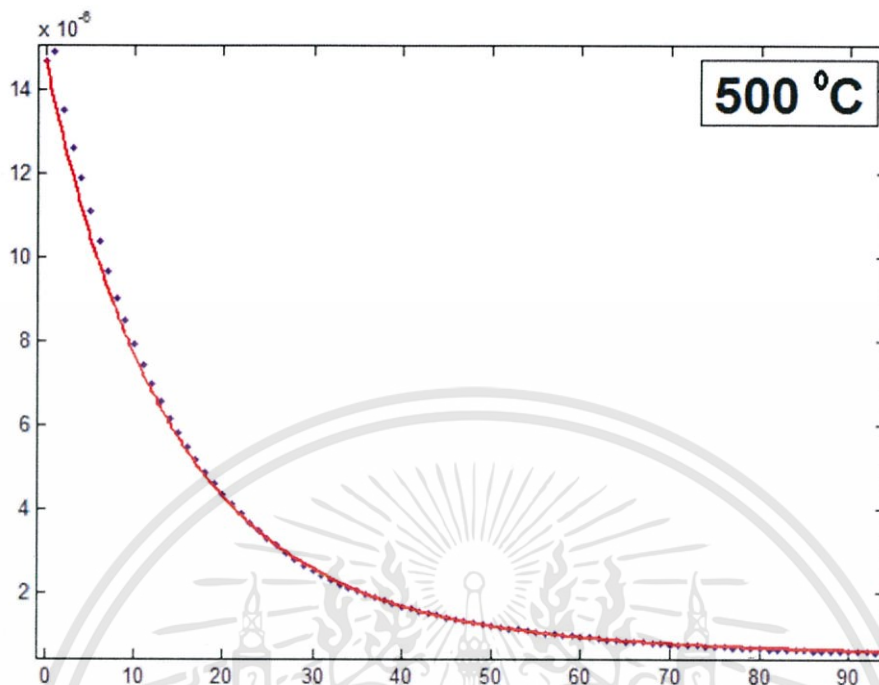
$$d = 0.0003021 \quad (-0.07474, 0.07534)$$

$$e = 0.0004922 \quad (-0.007035, 0.008019)$$

$$f = 0.8885 \quad (-0.5517, 2.329)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

500 °C



General model:

$$f(x) = (a*(\exp(-x/14.6412)))+(b*(\exp(-x/17.5223)))+(c*(\exp(-x/22.123)))+(d*(\exp(-x/32.5732)))+(e*(\exp(-(x/46.5116)^f)))$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 3.894e-005 \quad (-0.0001603, 0.0002382)$$

$$b = -6.848e-005 \quad (-0.0005801, 0.0004431)$$

$$c = 6.209e-005 \quad (-0.0004042, 0.0005284)$$

$$d = -2.735e-005 \quad (-0.0002419, 0.0001872)$$

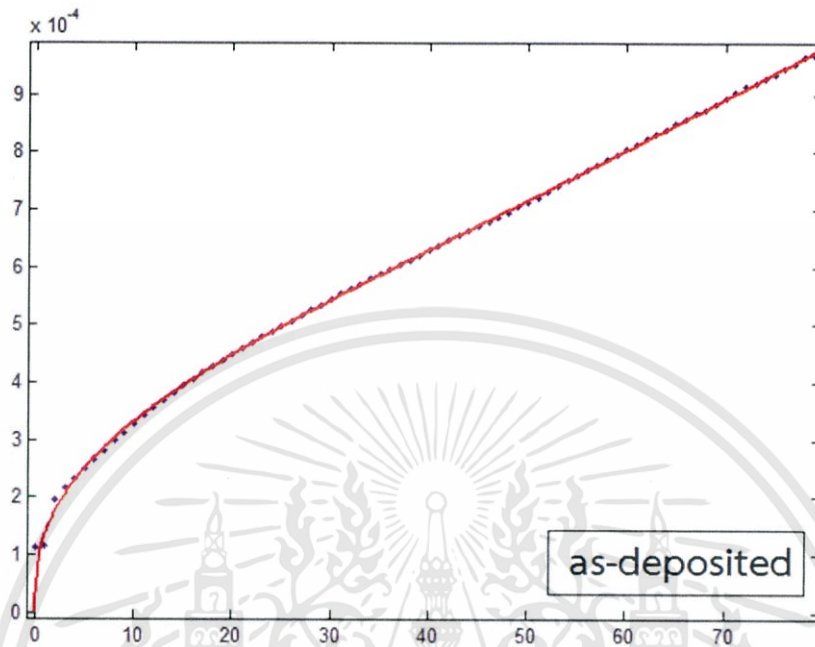
$$e = 9.509e-006 \quad (-5.101e-005, 7.003e-005)$$

$$f = 0.8714 \quad (-0.2181, 1.961)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Risetime

As-deposited



General model:

$$f(x) = (a*(1-\exp(-x/59.6658)))+(b*(1-\exp(-x/78.5545)))+(c*(1-\exp(-x/85.034)))+(d*(1-\exp(-x/103.1991)))+(e*(1-\exp(-(x/183.1501)^f)))$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 0.04794 \quad (-0.5555, 0.6514)$$

$$b = -0.5324 \quad (-8.488, 7.424)$$

$$c = 0.6162 \quad (-9.145, 10.38)$$

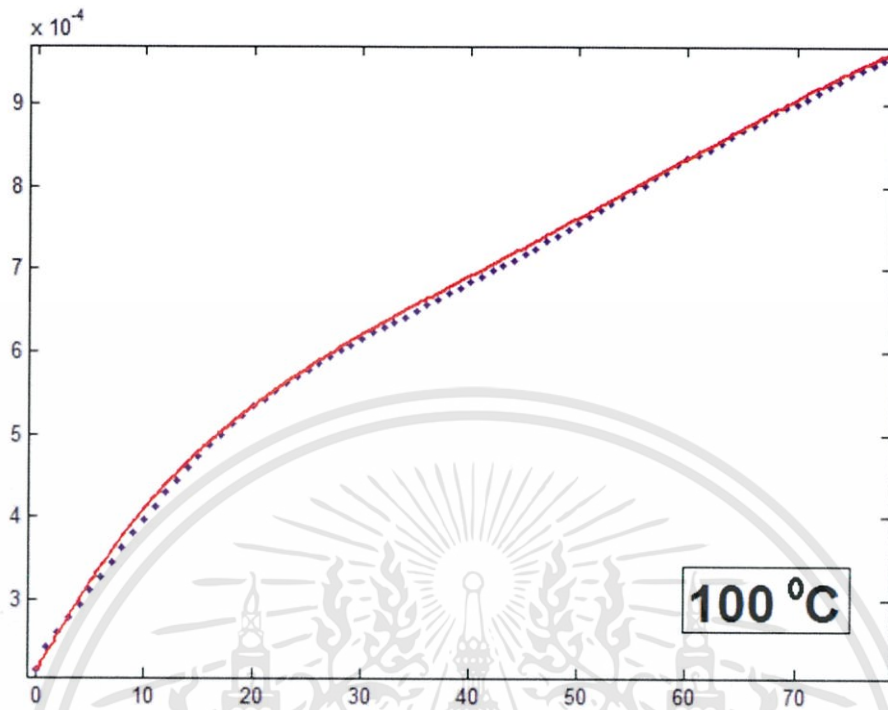
$$d = -0.1307 \quad (-2.567, 2.305)$$

$$e = 0.0009365 \quad (-0.0003968, 0.00227)$$

$$f = 0.3643 \quad (0.08003, 0.6485)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

100 °C



General model:

$$f(x) = (a*(1-\exp(-x/82.3045)))+(b*(1-\exp(-x/99.80039)))+(c*(1-\exp(-x/105.2518)))+(d*(1-\exp(-x/131.7175)))+(e*(1-\exp(-(x/324.1491)^f)))$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = 3.809 (2.617, 5.001)$$

$$b = -39.68 (-52.44, -26.92)$$

$$c = 41.67 (28.18, 55.16)$$

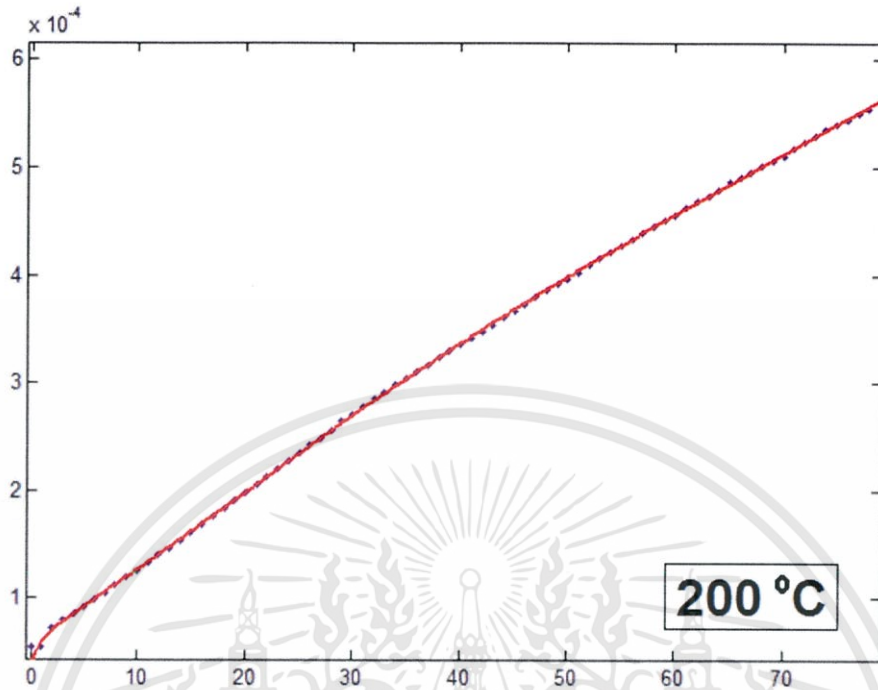
$$d = -5.866 (-7.812, -3.919)$$

$$e = 0.0002133 (0.0002005, 0.0002262)$$

$$f = -0.2189 (-0.3182, -0.1196)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

200 °C



General model:

$$f(x) = (b*(1-\exp(-x/46.9483)))+(c*(1-\exp(-x/54.6448)))+(d*(1-\exp(-x/67.340)))+(e*(1-\exp(-x/107.0686)))+(f*(1-\exp(-x/133.5789)^g))$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$b = -0.108 \quad (-0.26, 0.04407)$$

$$c = 0.277 \quad (-0.1132, 0.6671)$$

$$d = -0.2239 \quad (-0.539, 0.09108)$$

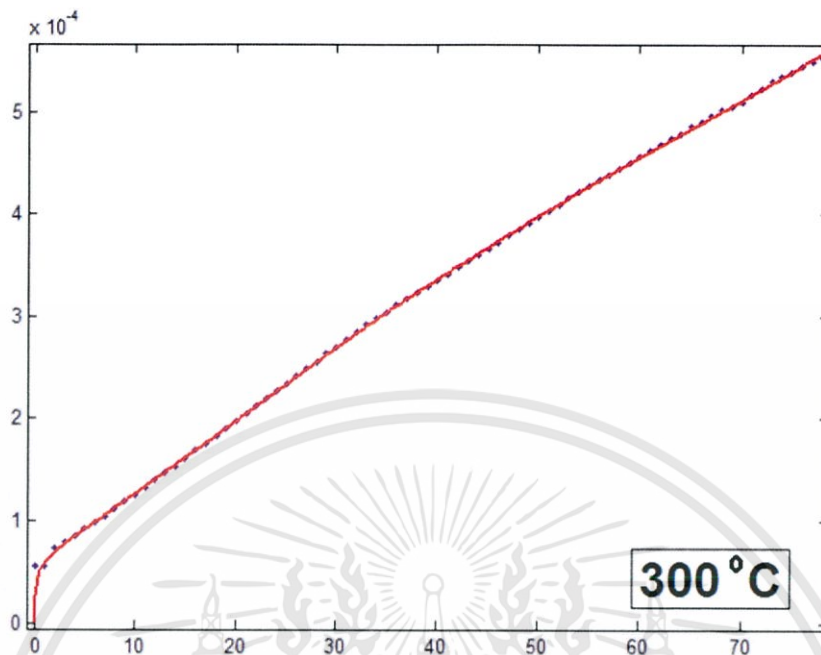
$$e = 0.06 \quad (-0.02243, 0.1424)$$

$$f = 0.0001765 \quad (-6.143e-005, 0.0004145)$$

$$g = 0.197 \quad (-0.1436, 0.5375)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

300 °C



General model:

$$f(x) = (a*(1-\exp(-x/35.8808)))+(b*(1-\exp(-x/56.7536)))+(c*(1-\exp(-x/71.42857)))+(d*(1-\exp(-x/93.5453)))+(e*(1-\exp(-x/110.2535)^f))$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = -0.0105 \quad (-0.02494, 0.003945)$$

$$b = 0.1037 \quad (-0.03878, 0.2461)$$

$$c = -0.1747 \quad (-0.4133, 0.06388)$$

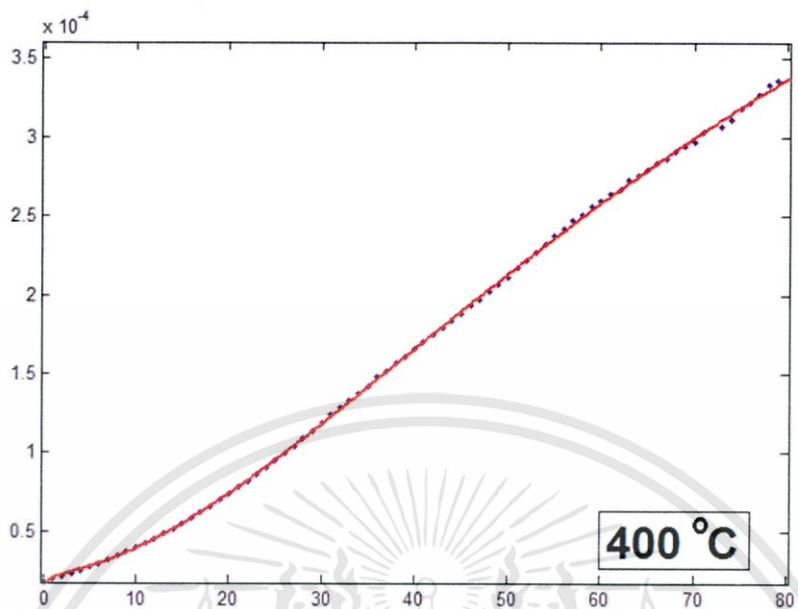
$$d = 0.08559 \quad (-0.02903, 0.2002)$$

$$e = 0.000184 \quad (-6.218e-005, 0.0004302)$$

$$f = 0.2165 \quad (-0.1288, 0.5617)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

400 °C



General model:

$$f(x) = (a*(1-\exp(-x/22.7272)))+(b*(1-\exp(-x/37.0370)))+(c*(1-\exp(-x/51.0204)))+(d*(1-\exp(-x/68.9655)))+(e*(1-\exp(-x/86.9565))^f))$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = -0.0001853 \quad (-0.001374, 0.001003)$$

$$b = -0.0007293 \quad (-0.008447, 0.006988)$$

$$c = 0.001261 \quad (-0.01221, 0.01473)$$

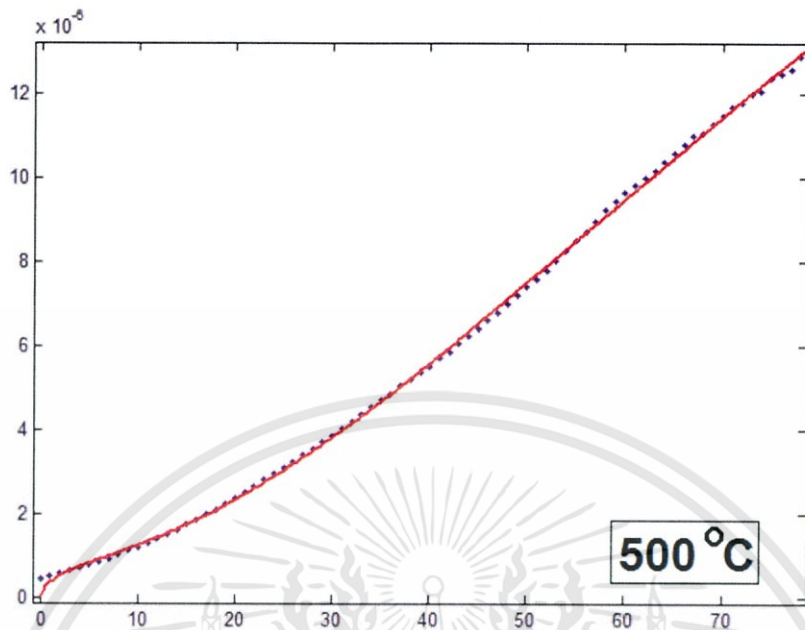
$$d = 0.0001819 \quad (-0.007016, 0.007379)$$

$$e = 6.272e-005 \quad (-3.272e-005, 0.0001582)$$

$$f = 0.217 \quad (-0.1921, 0.6262)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

500 °C



General model:

$$f(x) = (a*(1-\exp(-x/61.7272)))+(b*(1-\exp(-x/65.0270)))+(c*(1-\exp(-x/65.0304)))+(d*(1-\exp(-x/75.9655)))+(e*(1-\exp(-x/86.9565)^f))$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$a = -0.006184 \quad (-0.01247, 0.0001035)$$

$$b = 5.157 \quad (-3.333, 13.65)$$

$$c = -5.151 \quad (-13.64, 3.334)$$

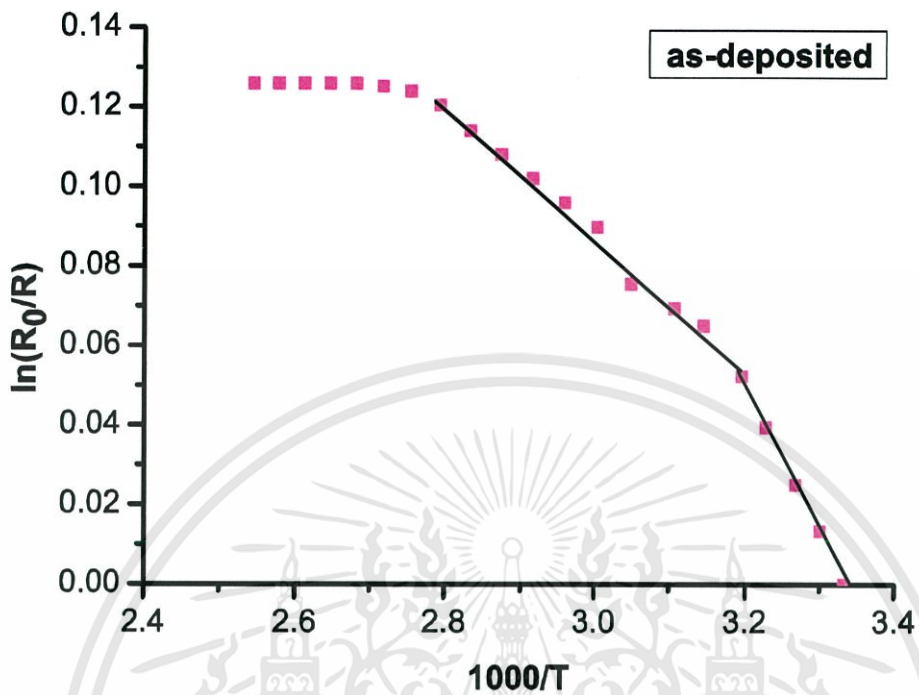
$$d = -0.0002368 \quad (-0.001599, 0.001125)$$

$$e = 1.343e-005 \quad (-2.093e-005, 4.779e-005)$$

$$f = 0.7097 \quad (0.2849, 1.135)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

as-deposited



รูปกราฟแสดงการหาค่าพลังงานดาร์กระตุ้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยระบบสุญญากาศ ไม่แอ่นนี้ล

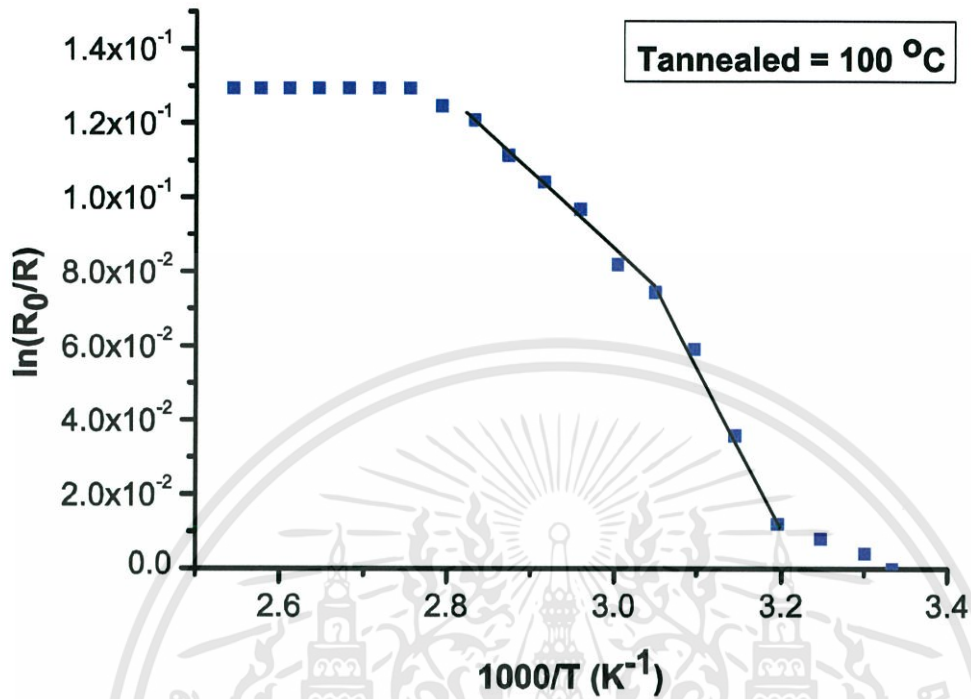
$$E_a = -\frac{1000k(\text{slope})}{1.6 \times 10^{-19}}$$

$$E_a = -\frac{1000 \times (1.38 \times 10^{-23})(0.16)}{1.6 \times 10^{-19}}$$

$$E_a = 0.014 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

100 °C



รูปกราฟแสดงการหาค่าพลังงานการกระตุ้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยระบบสุญญากาศ ที่แอนนัลที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

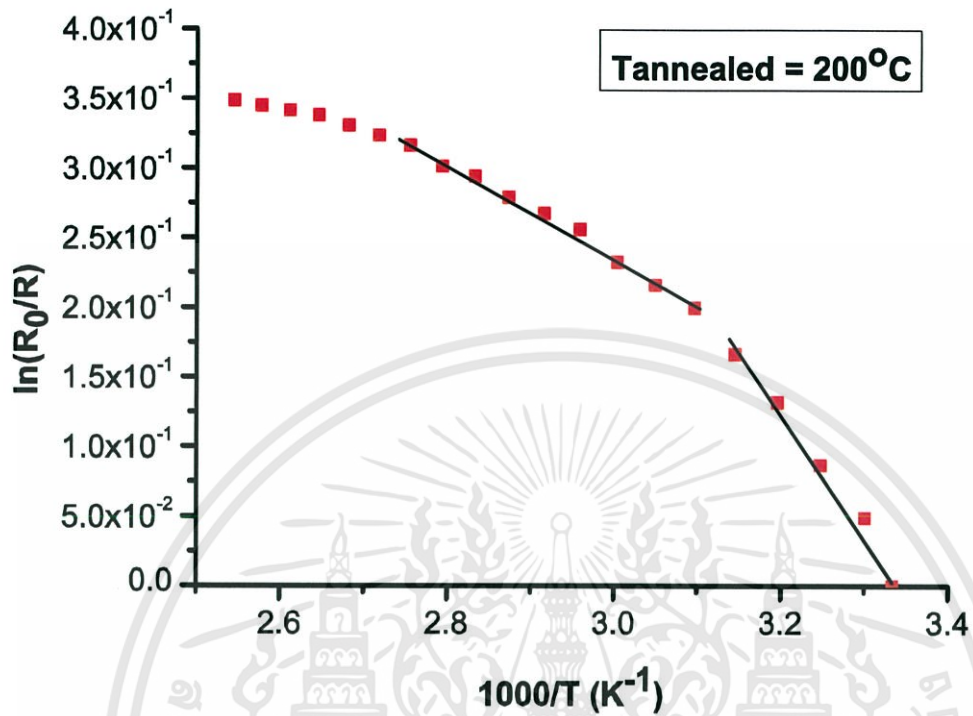
$$E_a = -\frac{1000k(\text{slope})}{1.6 \times 10^{-19}}$$

$$E_a = -\frac{1000 \times (1.38 \times 10^{-23}) \times (0.21)}{1.6 \times 10^{-19}}$$

$$E_a = 0.018 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

200 °C



รูปกราฟแสดงการหาค่าพลังงานการกระตุ้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยระบบสุญญากาศ ที่แอนนีสที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส

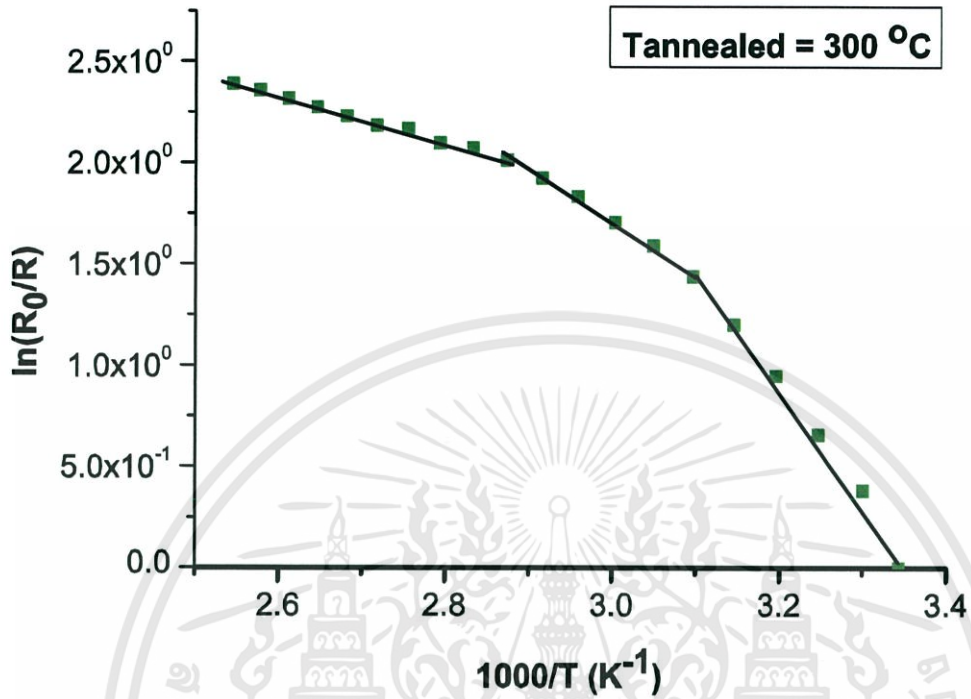
$$E_a = -\frac{1000k(\text{slope})}{1.6 \times 10^{-19}}$$

$$E_a = -\frac{1000 \times (1.38 \times 10^{-23})(0.34)}{1.6 \times 10^{-19}}$$

$$E_a = 0.029 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

300 °C



รูปกราฟแสดงการหาค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยระบบสุญญากาศ ที่แอนนัลที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

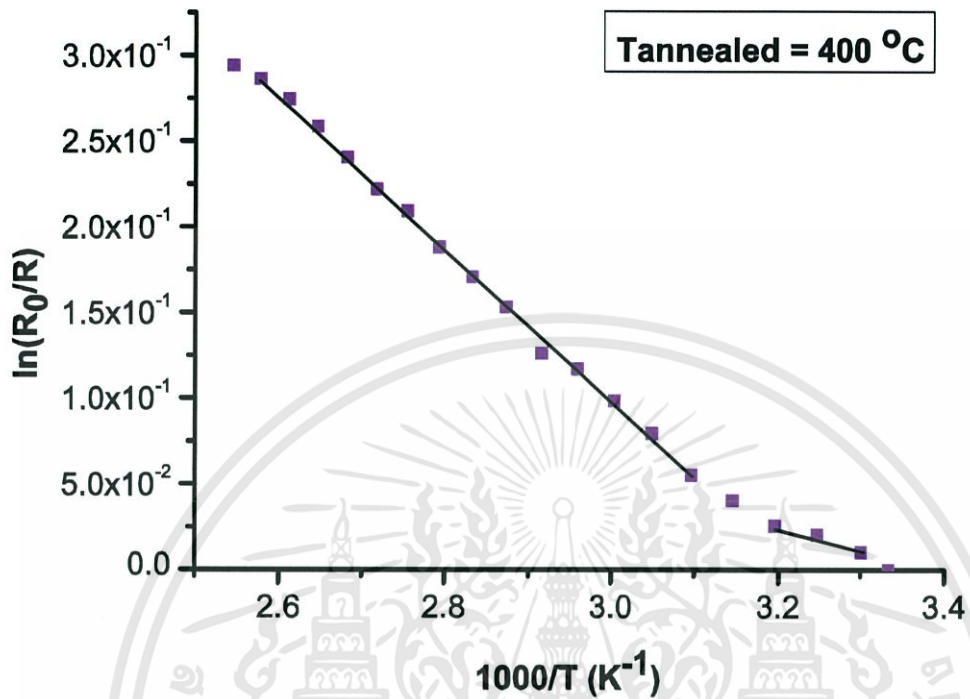
$$E_a = -\frac{1000k(\text{slope})}{1.6 \times 10^{-19}}$$

$$E_a = -\frac{1000 \times (1.38 \times 10^{-23})(1.13)}{1.6 \times 10^{-19}}$$

$$E_a = 0.097 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

400 °C



รูปกราฟแสดงการหาค่าพลังงานดาร์กระตุ้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยระบบสุญญากาศ ที่แอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

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

$$E_a = -\frac{1000 \times (1.38 \times 10^{-23}) (0.44)}{1.6 \times 10^{-19}}$$

$$E_a = 0.038 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นางสาว ชโลธร สุวรรณทัต
วัน เดือน ปีเกิด 3 เมษายน 2537
ที่อยู่ปัจจุบัน 49/135 หมู่บ้านเค.ซี.สุวินทวงศ์ แขวงลำผักชี เขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร 10530
การศึกษา ปี 2555 เข้ารับการศึกษาระดับอุดมศึกษา ปริญญาตรี สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อ-นามสกุล นางสาว พิมพ์พร บุญฤทธิกุล
วัน เดือน ปีเกิด 9 พฤศจิกายน 2536
ที่อยู่ปัจจุบัน 1506/176 หมู่ 6 ซอย ที่ดินทอง 4 ต.เทพารักษ์ อ.เมือง จ.สมุทรปราการ 10270
การศึกษา ปี 2555 เข้ารับการศึกษาระดับอุดมศึกษา ปริญญาตรี สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อ-นามสกุล นางสาว ศุภิษมา ตวงรัตนสิริกุล
วัน เดือน ปีเกิด 14 กรกฎาคม 2537
ที่อยู่ปัจจุบัน 12 หมู่ 5 หมู่บ้านธารารินทร์ ซอย 2 ต.ประชาธิปัตย์ อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12130
การศึกษา ปี 2555 เข้ารับการศึกษาระดับอุดมศึกษา ปริญญาตรี สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง