

กลไกการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำ
ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำกลุ่ม II-VI
ELECTRICAL CONDUCTION MECHANISM
OF II-VI SEMICONDUCTOR THIN FILMS



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

กลไกการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำ
ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำกลุ่ม II-VI
ELECTRICAL CONDUCTION MECHANISM
OF II-VI SEMICONDUCTOR THIN FILMS



T149336



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....149336
วัน เดือน ปี 12 ก.ย. 2561

12881764

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานปีการศึกษา 2559. อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น. อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ELECTRICAL CONDUCTION MECHANISM
OF II-VI SEMICONDUCTOR THIN FILMS



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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ ACADEMIC YEAR 2016 มอนูญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ กลไกการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำกลุ่ม II-VI
Electrical Conduction Mechanism of II-VI Semiconductor Thin
Films

ชื่อนักศึกษา นายธนาธิป ภูทอง รหัสนักศึกษา 56051153





ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)

ภาควิชา ฟิสิกส์

ปีการศึกษา 2559

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ฐิตินัย แก้วแดง

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง(สจล.) อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์)
ประจำปีการศึกษา 2559

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

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ประกอบการเรียนการสอน ไม่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	กลไกการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำกลุ่ม II-VI
ชื่อนักศึกษา	นายธนาธิป ภูทอง รหัสนักศึกษา 56051153
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิสิกส์
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2559
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.ฐิตินัย แก้วแดง

บทคัดย่อ

ในโครงการพิเศษนี้ ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ กลุ่ม II-VI ได้แก่ CdS_xTe_{1-x} และ Cu_2O โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ และ วิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงตามลำดับจากนั้นจึงทำการศึกษากลไกการนำไฟฟ้าของฟิล์มบางที่เตรียมได้ด้วยการวัดสภาพนำไฟฟ้าโดยการลดอุณหภูมิลง จากอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิต่ำของฮีเลียมเหลว สำหรับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ในช่วงอุณหภูมิสูงกว่า 210 เคลวิน สภาพนำไฟฟ้าขึ้นกับความสูงของกำแพงศักย์ที่บริเวณขอบของเกรน แต่เมื่ออุณหภูมิลดต่ำลง (อยู่ในช่วง 200-100 เคลวิน) กลไกการนำไฟฟ้าเกิดจากการที่อิเล็กตรอนกระโดดผ่านระดับพลังงานประจำถิ่นที่ปรากฏอยู่ในช่องว่างแถบพลังงาน จากการวิเคราะห์สภาพนำไฟฟ้าที่ขึ้นกับอุณหภูมิอย่างละเอียดพบว่า ที่อุณหภูมิในช่วง 280-220 เคลวิน กลไกการนำไฟฟ้าสามารถอธิบายได้ด้วย แบบจำลองซีโด ส่วนกลไกการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 200-150 เคลวิน จะอธิบายด้วยกลไกการกระโดดในระยะไม่คงที่ตามแบบจำลองของมอตต์ แต่เมื่ออุณหภูมิต่ำลงอีกจนถึงช่วง 140-100 เคลวิน กลไกการนำไฟฟ้าจะสอดคล้องดีกับกลไกการกระโดดในระยะไม่คงที่ตามแบบจำลองของเอฟโรส-ชลอปสกี สำหรับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O กลไกการนำไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิจะจำแนกได้เป็น 3 ชนิด ได้แก่ การกระโดดระหว่างระดับพลังงานผู้รับที่อยู่ติดกัน, การกระโดดในระยะไม่คงที่ตามแบบจำลองของมอตต์ และการกระโดดในระยะไม่คงที่ตามแบบจำลองของเอฟโรส-ชลอปสกี ในช่วงอุณหภูมิ 300-210 เคลวิน ในช่วง 200-110 เคลวิน และในช่วง 100-50 เคลวิน ตามลำดับ

คำสำคัญ : ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O , วิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง, สมบัติทางแสง, สมบัติทางไฟฟ้า, สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง

Title	Electrical Conduction Mechanism of II-VI Semiconductor Thin Films
Students	Mr. Thanatip Phuthong Student ID 56051153
Degree	Bachelor of Science (Applied Physics)
Department	Physics
Faculty	Science
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
Academic Year	2016
Advisor	Assoc. Prof. Dr. Thitinai Gaewdang

Abstract

In this special project, thin films of some II-VI compounds such as $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ and Cu_2O were prepared by thermal evaporation method in vacuum and reactive dc magnetron sputtering method, respectively. The temperature dependence of electrical conductivity from room temperature down to liquid-helium temperature of $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ and Cu_2O thin films were performed in order to identify the dominant conduction mechanism. For $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ thin films, electrical conductivity in the high temperature range (>210 K) was controlled by potential barriers caused by depletion of carriers at grain boundaries. Whereas, in the low temperature region (around 200-100 K), the hopping conduction was present. Detailed analysis of temperature dependence of conductivity of $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ thin films revealed that in the high temperature range from 280-220 K, Seto's model of thermionic emission dominated, whereas, in the low temperature range (about 200-150 K), the dominant hopping conduction was Mott variable range hopping. However, the lower temperature region (140-100 K) Efros-Shklovskii variable range hopping was observed. For Cu_2O thin films, it was show that three types of behavior can be expected, nearest-neighbor hopping at high temperature range (300-210 K), the Mott variable range hopping at low temperature (200-110 K) and Efros-Shklovskii variable range hopping at lower temperature (100-50 K).

Keywords: $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ thin films, Cu_2O thin films, Seto's model, Mott-VRH, ES-VRH

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยมาถึงจุดนี้ได้เนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูงจากรองศาสตราจารย์ ดร. ฐิตินัย แก้วแดง และ
รองศาสตราจารย์ งามนิตย์ วงษ์เจริญ ที่กรุณาให้คำแนะนำปรึกษาปรับปรุงแก้ไขบทพร่องต่างๆและคอยอบรมสอน
วิชาความรู้ต่างๆด้วยความเอาใจใส่จนงานวิจัยมาถึงจุดนี้ได้

ขอขอบคุณ นักศึกษาปริญญาโทในห้องปฏิบัติการวิจัยโฟโตนิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่คอยให้คำแนะนำต่างๆและคอยสอนและให้ความ
ช่วยเหลือในการทำงาน

สุดท้ายขอกราบพระคุณอาจารย์ทุกท่าน ที่เมตตาประสิทธิ์ประสาท วิชาความรู้ตั้งแต่เข้ามาจนถึงปัจจุบัน
ตลอดจนกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่ให้อุปการะทุนในการศึกษาเล่าเรียนและให้กำลังใจที่ดีตลอดมา

ธนาธิป ภูทอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ญ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในฟิล์มบางตามแบบจำลองของซีโต	4
2.1.1 กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในฟิล์มบางในช่วงอุณหภูมิสูง	5
2.1.2 กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในฟิล์มบางในช่วงอุณหภูมิต่ำปานกลาง	7
2.2 กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในฟิล์มบางชนิดอิล็กตรอนกระโดดระหว่างระดับผู้ให้ที่อยู่ติดกัน	10
2.3 กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในฟิล์มบางชนิดอิล็กตรอนกระโดดในระยยะไม่คงที่	11
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	17
2.4.1 ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	17
2.4.2 ผลการวิเคราะห์ธาตุต่างๆด้วยเทคนิค EDS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	19

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.3 ผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	21
2.4.4 ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	22
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์งานวิจัย	25
3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เพื่อใช้เคลือบฟิล์มบาง CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	25
3.1.2 ระบบการเคลือบฟิล์มบางโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	25
3.2 ขั้นตอนการเคลือบฟิล์มบาง CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	26
3.2.1 การเตรียมและทำความสะอาดแผ่นกระจกสไลด์เพื่อใช้เป็นแผ่นฐานรองรับ	26
3.3 การเตรียมสารตั้งต้นที่ใช้สำหรับเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	26
3.3.1 การเตรียมผงผลึกของสารตั้งต้นที่เป็นสารประกอบ CdS และ CdTe เพื่อใช้ในการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	27
3.4 การเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	30

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำของ CuO โดยวิธีรีแอคทีฟ ดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	31
3.5.1 การเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	31
3.6 การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu ₂ O โดยวิธีการเคลือบฟิล์มบางด้วยระบบดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	32
3.7 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า	39
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	
4.1 ผลการศึกษาฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS _x Te _{1-x} (0≤x≤1) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	40
4.2 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 300-100 เคลวิน ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS _x Te _{1-x} (0≤x≤1) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	41
4.2.1 ผลการศึกษาค่าความต้านทานไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 300-100 เคลวิน ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS _x Te _{1-x} (0≤x≤1) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	42
4.2.2 ผลการศึกษาค่าความต้านทานไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 300-15 เคลวิน ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS _x Te _{1-x} (0≤x≤1) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	64
4.3 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 300-20 เคลวิน ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu ₂ O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	76

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.1 ผลการศึกษาค่าความต้านทานไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 300-100 เคลวิน ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการรีแอคทีฟ ดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	76
บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัย	
5.1 สรุปผลการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนیل	86
5.2 สรุปผลการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO_2 ที่เคลือบลงบนฐานแผ่นรองรับกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟ ดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	87
เอกสารอ้างอิง	89

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงองค์ประกอบของธาตุต่างๆของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	20
4.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่คำนวณได้จากแบบจำลองซีโตที่อุณหภูมิสูงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq X \leq 1$)	59
4.2 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่คำนวณได้จากแบบจำลองซีโตที่อุณหภูมิปานกลางของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq X \leq 1$)	60
4.3 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่คำนวณได้จากแบบจำลองอะตอมแบบอิเล็กทรอนิกส์ของระดับพลังงานผู้ให้จะกระโดดไปยังระดับพลังงานผู้ให้ที่อยู่ติดกันค่าพารามิเตอร์ต่างๆของฟิล์มบาง ของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq X \leq 1$)	61
4.4 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่คำนวณได้จากแบบการกระโดดในระยะไม่คงที่ (Mott) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq X \leq 1$)	62
4.5 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่คำนวณได้จากแบบการกระโดดในระยะไม่คงที่ (ES) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq X \leq 1$)	63
4.6 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่คำนวณได้จากแบบจำลองซีโตที่อุณหภูมิสูงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq X \leq 1$)	71
4.7 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่คำนวณได้จากแบบจำลองซีโตที่อุณหภูมิปานกลางของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq X \leq 1$)	72
4.8 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่คำนวณได้จากแบบจำลองอะตอมแบบอิเล็กทรอนิกส์ของระดับพลังงานผู้ให้จะกระโดดไปยังระดับพลังงานผู้ให้ที่อยู่ติดกันค่าพารามิเตอร์ต่างๆของฟิล์มบาง ของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq X \leq 1$)	73
4.9 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่คำนวณได้จากแบบการกระโดดในระยะไม่คงที่ (Mott) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq X \leq 1$)	74

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.10 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่คำนวณได้จากแบบการกระโดดในระยยะไม่คงที่ (ES) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$)	75
4.11 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่คำนวณได้จากแบบจำลองอะตอมแบบอิเล็กทรอนิกส์ของระดับพลังงานผู้ให้จะกระโดดไปยังระดับพลังงานผู้ให้ที่อยู่ติดกันค่าพารามิเตอร์ต่างๆของฟิล์มบาง ของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O	83
4.12 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่คำนวณได้จากแบบการกระโดดในระยยะไม่คงที่ (Mott) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O .	84
4.13 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่คำนวณได้จากแบบการกระโดดในระยยะไม่คงที่ (ES) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O	85



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงแบบจำลองการเกิดบริเวณพร่องพาหะและโครงสร้างแถบพลังงานตรงบริเวณขอบรอยต่อของเกรนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ	5
2.2 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln\sigma$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่อุณหภูมิในช่วง 125-365 เคลวิน สำหรับในรูปแทรกคือกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(\sigma T^{-1})$ กับ $\frac{1000}{T}$ (serin et al. 2011)	9
2.3 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(\sigma T^{\frac{1}{2}})$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ CuO สำหรับในรูปแทรก คือกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(\sigma T^{\frac{1}{2}})$ กับ $T^{-\frac{1}{4}}$	9
2.4 แผนภาพกลไกการนำไฟฟ้า 4 ชนิด	15
2.5 แสดงพีคความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 < x < 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	17
2.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่โครงผลึก (a_0, c_0) กับเศษส่วนโดยโมลอะตอม(x) ค่าต่างๆ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 < x < 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	18
2.7 แสดงผลการวิเคราะห์ธาตุต่างๆด้วยสเปกตรัม EDX ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 < x < 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	19
2.8 แสดงภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ของฟิล์มบางของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 < x < 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	21
2.9 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง กับ ค่าความยาวคลื่นแสง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 < x < 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	22
2.10 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $(\alpha hu)^2$ กับ ค่า hu ของฟิล์มของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 < x < 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	23

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าช่องว่างแถบพลังงาน กับ ค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ	24
3.1 แสดงผลึกของสารตั้งต้นที่เป็นสารประกอบ CdS และ CdTe ที่ผสมเพื่อใช้ในการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xCdTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	30
3.2 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	32
3.3 (ก) ภาพแสดงวาล์วปล่อยอากาศเข้า (ข) ภาพแสดงคันบังคับขัดเตอร์ที่อยู่ด้านบนของห้องสุญญากาศ	33
3.4 (ก.) ภาพแสดงตำแหน่งสวิตช์ ROTARY ON (สำหรับเปิดปั๊มฟลักโรตารี) TIC POWER ON (สำหรับเปิดมาตรวัดความดัน) และ DIFFSTAK ON (สำหรับเปิดปั๊มฟิวส์กระจาย (ข.) ภาพแสดงวาล์วในตำแหน่ง backing (หากโยกมาข้างหน้าจะเป็นตำแหน่ง roughing)	34
3.5 (ก) ภาพแสดง Butterfly valve ในตำแหน่ง open (ข) ภาพแสดง speedy valve	34
3.6 (ก) ภาพแสดง Regulator valve และวาล์วหัวถังก๊าซ (ข) ภาพแสดง power supply	36
3.7 (ก) ภาพแสดงสวิตช์ของ power supply (ข) ภาพแสดงปุ่ม on เพื่อให้เครื่องเริ่มทำงาน	36
3.8 ภาพแสดงพลาสติกที่ติดในครั้งแรก	37
3.9 (ก) ภาพแสดงวาล์วเข็ม (needle valve) ใช้สำหรับปรับความดันของก๊าซอาร์กอนใน chamber แบบละเอียด (ข) ภาพแสดงท่อก๊าซ Ar และท่อน้ำหล่อเย็นสำหรับ target	37
3.10 ภาพแสดงการเริ่มเคลือบฟิล์ม	38
4.1 แสดงฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีสล	40

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องกับเศษส่วนโดยโมล (x) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีสล	41
4.3 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln \sigma$ กับ ค่า $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีสลที่ $x=0.0$, $x=0.2$, $x=0.4$, $x=0.6$, $x=0.8$, $x=1.0$	42
4.4 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln \sigma$ กับ ค่า $\frac{1000}{T}$, ค่า $\ln(\sigma T^2)$ กับ ค่า $\frac{1000}{T}$, ค่า $\ln(\sigma T^{-1})$ กับ ค่า $\frac{1000}{T}$, ค่า $\ln(\sigma T^{\frac{1}{2}})$ กับค่า $T^{\frac{1}{4}}$, ค่า $\ln(\sigma T)$ กับค่า $T^{-\frac{1}{2}}$ ตามลำดับ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} เมื่อ ($x=0.0$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีสล	43
4.5 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln \sigma$ กับ ค่า $\frac{1000}{T}$, ค่า $\ln(\sigma T^2)$ กับ ค่า $\frac{1000}{T}$, ค่า $\ln(\sigma T^{-1})$ กับ ค่า $\frac{1000}{T}$, ค่า $\ln(\sigma T^{\frac{1}{2}})$ กับค่า $T^{\frac{1}{4}}$, ค่า $\ln(\sigma T)$ กับค่า $T^{-\frac{1}{2}}$ ตามลำดับ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} เมื่อ ($x=0.2$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีสล	44
4.6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln \sigma$ กับ ค่า $\frac{1000}{T}$, ค่า $\ln(\sigma T^2)$ กับ ค่า $\frac{1000}{T}$, ค่า $\ln(\sigma T^{\frac{1}{2}})$ กับค่า $T^{\frac{1}{4}}$, ค่า $\ln(\sigma T)$ กับค่า $T^{-\frac{1}{2}}$ ตามลำดับ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} เมื่อ ($x=0.4$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีสล	45

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln\sigma$ กับ ค่า $\frac{1000}{T}$,ค่า $\ln(\sigma T^{\frac{1}{2}})$ กับ ค่า $\frac{1000}{T}$, ค่า $\ln(\sigma T^{-1})$ กับ ค่า $\frac{1000}{T}$, ค่า $\ln(\sigma T^{\frac{1}{2}})$ กับค่า $T^{-\frac{1}{4}}$,ค่า $\ln(\sigma T)$ กับค่า $T^{-\frac{1}{2}}$ ตามลำดับ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} เมื่อ ($x=0.6$) ที่เคลือบลงบนแผ่น ฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายใน ระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	46
4.8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln\sigma$ กับ ค่า $\frac{1000}{T}$,ค่า $\ln(\sigma T^{\frac{1}{2}})$ กับ ค่า $\frac{1000}{T}$, ค่า $\ln(\sigma T^{\frac{1}{2}})$ กับค่า $T^{-\frac{1}{4}}$,ค่า $\ln(\sigma T)$ กับค่า $T^{-\frac{1}{2}}$ ตามลำดับ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} เมื่อ ($x=0.8$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการ ระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	47
4.9 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln\sigma$ กับ ค่า $\frac{1000}{T}$,ค่า $\ln(\sigma T^{\frac{1}{2}})$ กับ ค่า $\frac{1000}{T}$, ค่า $\ln(\sigma T^{-1})$ กับ ค่า $\frac{1000}{T}$, ค่า $\ln(\sigma T^{\frac{1}{2}})$ กับค่า $T^{-\frac{1}{4}}$,ค่า $\ln(\sigma T)$ กับค่า $T^{-\frac{1}{2}}$ ตามลำดับ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} เมื่อ ($x=1.0$) ที่เคลือบลงบนแผ่น ฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายใน ระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	48
4.10 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln\sigma$ กับ ค่า $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่ง ตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ และแอนนีสในอากาศ ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส	64
4.11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln\sigma$ กับ ค่า $\frac{1000}{T}$,ค่า $\ln(\sigma T^{\frac{1}{2}})$ กับ $\frac{1000}{T}$ ค่า $\ln(\sigma T^{-1})$ กับค่า $\frac{1000}{T}$, ค่า $\ln(\sigma T^{\frac{1}{2}})$ กับค่า $T^{-\frac{1}{4}}$, ค่า $\ln(\sigma T)$ กับ ค่า $T^{-\frac{1}{2}}$ ตามลำดับ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} เมื่อ ($x=0.0$) ที่เคลือบลงบนแผ่น ที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในฐานรองรับระบบ สุญญากาศ และแอนนีสในอากาศที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส	65

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
<p>4.12 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln\sigma$ กับ ค่า $\frac{1000}{T}$, ค่า $\ln(\sigma T^{\frac{1}{2}})$ กับ $\frac{1000}{T}$ ค่า $\ln(\sigma T^{-1})$ กับค่า $\frac{1000}{T}$, ค่า $\ln(\sigma T^{\frac{1}{2}})$ กับค่า $T^{-\frac{1}{4}}$, ค่า $\ln(\sigma T)$ กับ ค่า $T^{-\frac{1}{2}}$ ตามลำดับ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} เมื่อ ($x=0.2$) ที่เคลือบลงบนแผ่น ที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในฐานรองรับระบบ สูญญากาศ และแอนนีสในอากาศที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส</p>	66
<p>4.13 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln\sigma$ กับ ค่า $\frac{1000}{T}$, ค่า $\ln(\sigma T^{\frac{1}{2}})$ กับ $\frac{1000}{T}$ ค่า $\ln(\sigma T^{\frac{1}{2}})$ กับค่า $T^{-\frac{1}{4}}$, ค่า $\ln(\sigma T)$ กับค่า $T^{-\frac{1}{2}}$ ตามลำดับ ของฟิล์มบางของ สารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} เมื่อ ($x=0.4$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจก สไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสูญญากาศ และแอนนีสใน อากาศที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส</p>	67
<p>4.14 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln\sigma$ กับ ค่า $\frac{1000}{T}$, ค่า $\ln(\sigma T^{\frac{1}{2}})$ กับ $\frac{1000}{T}$ ค่า $\ln(\sigma T^{-1})$ กับค่า $\frac{1000}{T}$, ค่า $\ln(\sigma T^{\frac{1}{2}})$ กับค่า $T^{-\frac{1}{4}}$, ค่า $\ln(\sigma T)$ กับ ค่า $T^{-\frac{1}{2}}$ ตามลำดับ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} เมื่อ ($x=0.6$) ที่เคลือบลงบนแผ่น ที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในฐานรองรับระบบ สูญญากาศ และแอนนีสในอากาศที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส</p>	68
<p>4.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln\sigma$ กับ ค่า $\frac{1000}{T}$, ค่า $\ln(\sigma T^{\frac{1}{2}})$ กับ $\frac{1000}{T}$ ค่า $\ln(\sigma T^{\frac{1}{2}})$ กับค่า $T^{-\frac{1}{4}}$, ค่า $\ln(\sigma T)$ กับค่า $T^{-\frac{1}{2}}$ ตามลำดับ ของฟิล์มบางของ สารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} เมื่อ ($x=0.8$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจก สไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสูญญากาศ และแอนนีสใน อากาศที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส</p>	69

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln\sigma$ กับ ค่า $\frac{1000}{T}$, ค่า $\ln(\sigma T^2)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ค่า $\ln(\sigma T^2)$ กับค่า $T^{-\frac{1}{4}}$, ค่า $\ln(\sigma T)$ กับค่า $T^{-\frac{1}{2}}$ ตามลำดับ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ เมื่อ ($x=1.0$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ และแอนนีสลในอากาศที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส	70
4.17 ภาพถ่ายฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.3, 0.5, 0.8, 1.2, 1.5 และ 1.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	76
4.18 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln\sigma$ กับ ค่า $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงด้วยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน	76
4.19 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln\sigma$ กับค่า $\frac{1000}{T}$, ค่า $\ln(\sigma T^2)$ กับค่า $T^{-\frac{1}{4}}$, ค่า $\ln(\sigma T)$ กับค่า $T^{-\frac{1}{2}}$ ตามลำดับ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O เมื่อที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงด้วยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 0.3 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	77
4.20 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln\sigma$ กับค่า $\frac{1000}{T}$, ค่า $\ln(\sigma T^2)$ กับค่า $T^{-\frac{1}{4}}$, ค่า $\ln(\sigma T)$ กับค่า $T^{-\frac{1}{2}}$ ตามลำดับ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O เมื่อที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงด้วยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 0.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	78
4.21 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln\sigma$ กับค่า $\frac{1000}{T}$, ค่า $\ln(\sigma T^2)$ กับค่า $T^{-\frac{1}{4}}$, ค่า $\ln(\sigma T)$ กับค่า $T^{-\frac{1}{2}}$ ตามลำดับ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O เมื่อที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงด้วยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 0.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	79

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln\sigma$ กับค่า $\frac{1000}{T}$, ค่า $\ln(\sigma T^{\frac{1}{2}})$ กับค่า $T^{-\frac{1}{4}}$, ค่า $\ln(\sigma T)$ กับค่า $T^{-\frac{1}{2}}$ ตามลำดับ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O เมื่อที่เคลือบ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอน- สปีดเตอริงด้วยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 1.2 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	80
4.23 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln\sigma$ กับค่า $\frac{1000}{T}$, ค่า $\ln(\sigma T^{\frac{1}{2}})$ กับค่า $T^{-\frac{1}{4}}$, ค่า $\ln(\sigma T)$ กับค่า $T^{-\frac{1}{2}}$ ตามลำดับ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O เมื่อที่เคลือบ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอน- สปีดเตอริงด้วยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 1.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	81
4.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln\sigma$ กับค่า $\frac{1000}{T}$, ค่า $\ln(\sigma T^{\frac{1}{2}})$ กับค่า $T^{-\frac{1}{4}}$, ค่า $\ln(\sigma T)$ กับค่า $T^{-\frac{1}{2}}$ ตามลำดับ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O เมื่อที่เคลือบ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอน- สปีดเตอริงด้วยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 0.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	82

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันพลังงานเป็นสิ่งสำคัญและจำเป็นต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์และความต้องการใช้พลังงานของมนุษย์มีเพิ่มขึ้นเรื่อยๆทุกวัน ส่งผลให้พลังงานที่มีอยู่ในธรรมชาติมีไม่เพียงพอต่อความต้องการของมนุษย์ จึงต้องคิดค้นและพัฒนาเพื่อหาแหล่งพลังงานมาทดแทนและตอบสนองความต้องการของมนุษย์ ซึ่งพลังงานนั้นคือ พลังงานแสงอาทิตย์ เป็นพลังงานจากธรรมชาติ สามารถนำมาใช้อย่างไม่หมดและยังช่วยลดปัญหาโลกร้อนได้อีกทางหนึ่งด้วย พลังงานแสงอาทิตย์สามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าจากปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก (photovoltaic effect) ได้มีการวิจัยและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์จากฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำในกลุ่ม II-VI ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ที่มีค่าช่องว่างแถบพลังงานอยู่ระหว่าง 1-3 อิเล็กตรอนโวลต์ มีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านทางแสงอยู่ในย่านตามองเห็นได้ ซึ่งในปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ที่โดดเด่นและน่าสนใจมากเป็นพิเศษ คือ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS/CdTe ซึ่งมีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าประมาณ 5-6 เปอร์เซ็นต์และให้ประสิทธิภาพสูงถึง 16.5 เปอร์เซ็นต์ (Tuttle, 2000)

ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่มีการนำไฟฟ้าเป็นชนิดเอ็น (n-type) มีลักษณะโครงสร้างพลังงานแบบตรง (direct band gap) มีช่องว่างแถบพลังงาน (energy gap) ที่อุณหภูมิห้องเท่ากับ 2.42 อิเล็กตรอนโวลต์ เป็นฟิล์มที่ได้รับการยอมรับว่าเหมาะกับการสร้างเป็นชั้นหน้าต่างของเซลล์แสงอาทิตย์ เมื่อทำเป็นรอยต่อระหว่างหัวต่อพี-เอ็น (เมื่อฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS มีความหนา 0.1 ไมโครเมตร จะดูดกลืนพลังงานที่สูงกว่า 2.42 อิเล็กตรอนโวลต์ ได้ถึง 36 เปอร์เซ็นต์) แต่ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS มีช่องว่างแถบพลังงานไม่กว้างนัก จึงต้องเพิ่มช่องว่างแถบพลังงานให้กว้างขึ้น โดยการผสมเข้ากับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe กลายเป็นสารประกอบกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) โดยโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำจะมี 2 แบบ คือ ซิงค์เบลนด์ (zinc blend) ซึ่งจัดอยู่ในระบบคิวบิก(cubic) หรือ เวิร์ทไซต์(wurtzite) ฟิล์มบางของสารประกอบกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$)ยังช่วยให้สามารถดูดกลืนแสงในช่วงพลังงานที่กว้างขึ้นอีกด้วยขึ้นอยู่กับ อัตราส่วนโมลของสารที่เจือแต่ละสาร (Gacia-Cuencu, 1987; Ramaiah, 1999; Gunal, 1997; Gilmore, 2000)

งานวิจัยและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์จากสารกึ่งตัวนำ ในกลุ่ม II-VI เช่น CdTe, CdSe ได้ดำเนินไปอย่างกว้างขวางทั้งในประเทศสหรัฐอเมริกา ยุโรป และญี่ปุ่น เป็นต้น ปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ที่โดดเด่นและน่าสนใจมาก คือ เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดหัวต่อวิวิธพันธุ์ (heterojunction solar cell)

ของสารกึ่งตัวนำ CdSe/CdTe ซึ่งปัจจุบันมีประสิทธิภาพสูงถึง 16.5% ในระดับห้องปฏิบัติการและโมดูลขนาดใหญ่มีประสิทธิภาพสูงกว่า 10% และมีแนวโน้มที่จะนำออกสู่ตลาดได้ในอนาคต

สารกึ่งตัวนำคิวปรอไซด์ (cuprous oxide; Cu_2O) เป็นสารประกอบออกไซด์อีกชนิดหนึ่งที่มีความโดดเด่น กล่าวคือมีช่องว่างแถบพลังงานในช่วง 1.7-2.0 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งขึ้นกับวิธีและเงื่อนไขการเตรียมฟิล์มบาง (Wong et al., 2016) สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงจึงสูงถึงระดับ 10^5 (เซนติเมตร)⁻¹ โครงสร้างผลึกเป็นแบบคิวบิก มีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นแบบพี (p-type) ซึ่งสามารถนำไปประดิษฐ์เป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ สารกึ่งตัวนำ Cu_2O มีข้อดีหลายประการ กล่าวคือโลหะทองแดงมีมากในธรรมชาติ Cu_2O ไม่เป็นสารพิษ ต้นทุนการผลิตต่ำ ผลิตได้ด้วยการวิธีที่ไม่ซับซ้อน มีสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำ และสภาพคล่องของพาหะสูง ในระดับ 100 ตารางเซนติเมตร/(โวลต์.วินาที) (Wong et al., 2016) ดังนั้นสารกึ่งตัวนำ Cu_2O มีศักยภาพที่จะนำมาประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ เช่น สิ่งประดิษฐ์โฟโตโวลตาอิก (Wong et al., 2016; Akimoto, 2006; Chen, 2013) ตัวตรวจรู้แก๊สออกซิเจน (Praveen et al., 2009) ตัวเร่งปฏิกิริยาเคมี (Hara et al., 1998) สิ่งประดิษฐ์บันทึกข้อมูลด้วยสภาพความเป็นแม่เหล็ก (Kale et al., 2003) อีกทั้ง Cu_2O ยังเป็นสารประกอบออกไซด์ต้นกำเนิดของตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสงชนิดพี ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเตลาฟอสไฟต์ CuMO_2 (M= Al, Cr, B, In, Ga) ซึ่งลักษณะของแถบวาเลนซ์และแถบนำเกิดจากระดับพลังงานของไอออน Cu^+ (Zhang et al., 2013)

การสังเคราะห์ฟิล์มบางของ Cu_2O ให้มีโครงสร้างในระดับไมโครเมตรหรือในระดับนาโนเมตรสามารถสังเคราะห์ได้หลากหลายวิธีทั้งทางเคมี และทางฟิสิกส์ เช่น วิธีเคลือบด้วยไฟฟ้าในสารละลายเคมี (Mukhopadhyay et al., 1992) วิธีสเปรย์ไพโรไลซิส (Kosugi et al., 1998) วิธีโซลเจล (Akgul et al., 2014) วิธีออกซิเดชันจากฟิล์มบางของโลหะ Cu ด้วยความร้อน (De Los Santos Valladares et al., 2012) วิธีพาโอระเหยสารเคมี (Chen, 2013) วิธีการระเหยด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ (Al-Khuhal, 2008) และวิธีสปัตเตอริง (Kuo et al., 2010; Jung et al., 2015) เป็นต้น

ในโครงการพิเศษนี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศและเตรียมฟิล์มบาง Cu_2O โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง จากนั้นจะทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) และฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O โดยการวัดสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 100-300 เคลวิน เพื่อศึกษากลไกการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) และฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษากลไกการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) โดยที่มีค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของธาตุ S เท่ากับ 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 ตามลำดับ และฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงด้วยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนในช่วง 0.3-1.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ
- 2) ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง
- 3) ทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) โดยการวัดสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 100-300 เคลวิน เพื่อศึกษากลไกการนำไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) และฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 1) ศึกษาและค้นคว้าหาข้อมูลเกี่ยวกับกลไกการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) และฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O
- 2) เตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ และเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง
- 3) ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) โดยการวัดสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 100-300 เคลวิน เพื่อศึกษากลไกการนำไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) และของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O
- 4) สรุปและวิเคราะห์ผล

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ทำให้ทราบถึงกลไกการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) และฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O
- 2) ทำให้ทราบสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) และฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ว่ามีความเหมาะสมมากน้อยเพียงใด ในการนำไปประยุกต์ทำเป็นเซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

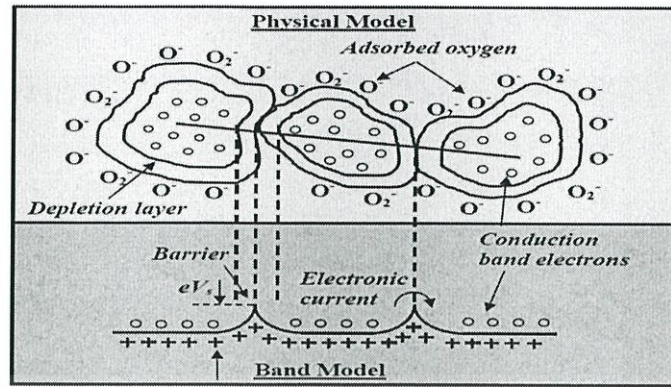
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในฟิล์มบางตามแบบจำลองของซีโต (Kittel, 2005; งามนิตย์, 2530; ฐิตินัย, 2531; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2552; Runyan, 1975)

ซีโต (Seto, 1975) ได้พัฒนาทฤษฎีที่ใช้อธิบายการเคลื่อนที่ของพาหะอิสระในวัสดุที่เป็นผลึกพหุพันธ์ (polycrystalline) เช่น ในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ เป็นต้น โดยใช้แบบจำลองกับดักประจุที่ขอบของเกรนร่วมกับกลไกเทอร์มออิเล็กทริก โดยตั้งสมมุติฐานดังนี้คือ

- 1) ผลึกพหุพันธ์ประกอบไปด้วยเกรนขนาดเล็กที่มีคุณสมบัติเหมือนกัน มีรูปร่างเป็นลูกบาศก์ แต่ละด้านยาว L ซึ่งในความเป็นจริงเกรนจะมีรูปร่างไม่คงที่ (irregular shaped grains)
- 2) กลไกการนำไฟฟ้าคิดเป็น 1 มิติ
- 3) โครงสร้างแถบพลังงานของผลึกเดี่ยว สามารถประยุกต์ใช้ในเนื้อเกรนได้
- 4) ความหนาของขอบเกรนมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับขนาดของเกรน
- 5) ขอบเกรนหรือผลึกถือว่าเป็นกับดักประจุที่ปรากฏอยู่ที่ขอบของเกรน เมื่อเริ่มต้นกับดักประจุจะเป็นกลางทางไฟฟ้า แต่เมื่อจับอิเล็กตรอน (จับโฮล) แล้วกับดักประจุกลายเป็นประจุลบ (ประจุบวก) ความหนาแน่นของกับดักประจุมีหน่วยเป็น ต่อตารางเซนติเมตร
- 6) ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น กับดักประจุจะเป็นผู้รับ (acceptor) ส่วนสารกึ่งตัวนำชนิดพี กับดักประจุจะเป็นผู้ให้ (donor)
- 7) ระดับพลังงานของกับดักประจุ (E_t) จะอยู่บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างแถบพลังงาน
- 8) ความเข้มข้นของสารเจือจะกระจายอย่างสม่ำเสมอตลอดเนื้อสารและอะตอมสารเจือจะถูกไอออไนซ์ทั้งหมด

จากข้อสมมุติฐานข้างต้น ร่วมกับการประมาณแบบรอยต่อชันบันได (abrupt junction approximation) แถบพลังงานของผลึกพหุพันธ์ตรงบริเวณรอยต่อสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงแบบจำลองการเกิดบริเวณพร่องพาหะและโครงสร้างแถบพลังงานตรงบริเวณขอบรอยต่อของเกรนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ

ค่าสภาพนำไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิจะขึ้นกับเนื้อเกรนว่าจะเป็นบริเวณพร่องพาหะทั้งหมด หรือเป็นบริเวณพร่องพาหะบางส่วน (partially depleted of carriers) ซึ่งจะอาศัยค่าวิกฤตของความหนาแน่นของสารเจือ (N_a^*) ดังรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1.1 กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในฟิล์มบางในช่วงอุณหภูมิสูง

จากแบบจำลองที่พัฒนาโดย เบ็คคาร์นินิ (Baccarini et al., 1978) เมื่อ $N_a < N_a^*$ ในเนื้อเกรนจะเป็นบริเวณพร่องพาหะทั้งหมด ซึ่งจะเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิสูง ระดับพลังงานเฟอร์มิ (E_F) จะอยู่ระดับเดียวกับ E_i สภาพนำไฟฟ้าจะแสดงได้ด้วยสมการ

$$\sigma = \left[\frac{L^2 e^2 N_v N_a v_c}{2kT(N_i - LN_a)} \right] \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (2.1)$$

เมื่อ

$$v_c = \left[\frac{kT}{2\pi m^*} \right]^{1/2} \quad (2.2)$$

และ

$$N_v = 2 \left[\frac{2\pi m^* kT}{h^2} \right]^{3/2} \quad (2.3)$$

สมการที่ (2.1) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\sigma T^{-1} = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\ln(\sigma T^{-1}) = -\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T} \right) + \ln \sigma_0 \quad (2.5)$$

$$\ln(\sigma T^{-1}) = -\frac{E_a}{1000k} \left(\frac{1000}{T} \right) + \ln \sigma_0 \quad (2.6)$$

$$\text{ความชัน} = -\frac{E_a}{1000k} \quad (2.7)$$

$$E_a = -\frac{1000k(\text{ความชัน})}{1.6 \times 10^{-19}} \quad (2.8)$$

โดยที่ E_a คือพลังงานกระตุ้น มีหน่วยเป็นอิเล็กตรอนโวลต์ รูปที่ 2.1 แสดงตัวอย่างของกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(\sigma T^{-1})$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่อุณหภูมิในช่วง 125 - 365 เคลวิน (Serin et al. 2011)

สำหรับค่าความหนาแน่นของกักประจุ (N_t) สามารถหาได้ เมื่อทราบขนาดของเกรน (L) แล้วซึ่งขนาดของเกรนสามารถคำนวณได้จากสมการของเซอร์เรอร์ดังสมการ

$$L = \frac{0.94l}{bcosq} \quad (2.9)$$

ส่วนค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่ขอบของเกรนจะแสดงได้ดังนี้ คือ

$$E_b = \frac{e^2 L^2 N_a}{8\epsilon_s} \quad (2.10)$$

ส่วนค่าระดับพลังงานของกักประจุ (E_t) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$E_a = \frac{1}{2} E_g - E_t \quad (2.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในฟิล์มบางในช่วงอุณหภูมิปานกลาง

เมื่ออุณหภูมิไม่สูงมากนักในเนื้อเกรนจะเป็นบริเวณพร่องพาหะเพียงบางส่วนซึ่งจะสอดคล้องกับเงื่อนไข $N_a > N_a^*$ สำหรับเงื่อนไขแรกคือ $E_f - E_t - E_b \gg kT$ ค่าสภาพนำไฟฟ้าจะสัมพันธ์กับอุณหภูมิ คือ

$$\sigma = \left[\frac{Le^2 n v_c}{kT} \right] \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (2.12)$$

เมื่อ n คือ ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระในบริเวณที่เป็นกลางทางไฟฟ้า

สมการที่ (2.12) สามารถเขียนใหม่ได้เป็นดังนี้ คือ

$$\sigma T^{\frac{1}{2}} = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (2.13)$$

$$\ln\left(\sigma T^{\frac{1}{2}}\right) = -\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T}\right) + \ln\sigma_0 \quad (2.14)$$

$$\ln\left(\sigma T^{\frac{1}{2}}\right) = -\frac{E_a}{1000k} \left(\frac{1000}{T}\right) + \ln\sigma_0 \quad (2.15)$$

$$\text{ความชัน} = -\frac{E_a}{1000k} \quad (2.16)$$

$$E_a = -\frac{1000k \left(\text{ความชัน} \right)}{1.6 \times 10^{-19}} \quad (2.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่ง E_a ในที่นี้ คือ ค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่ขอบของเกรน (E_b) โดยที่

$$E_b = \frac{e^2 L^2 N_a}{8 \epsilon_s} \quad (2.18)$$

เมื่อ ϵ_s คือ ค่าเพอร์มิตติวิตี (permittivity) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ

รูปที่ 2.3 แสดงตัวอย่างของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(\sigma T^{\frac{1}{2}})$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่อุณหภูมิในช่วง 125-365 เคลวิน (Serin et al. 2011) จากสมการที่ (2.18) จะเห็นได้ว่าค่า E_b จะไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ เนื่องจากเงื่อนไขที่ระดับพลังงานเฟอร์มิ (E_F) อยู่สูงกว่าระดับกับดักประจุ (E_t) ดังนั้นประจุไฟฟ้าจะเข้าไปบรรจุอยู่ในกับดักประจุทั้งหมดจนเต็ม ส่งผลให้กับกับดักประจุไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ สำหรับค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ (N_a) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.18) และค่าความยาวเดอบาย (L_D) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

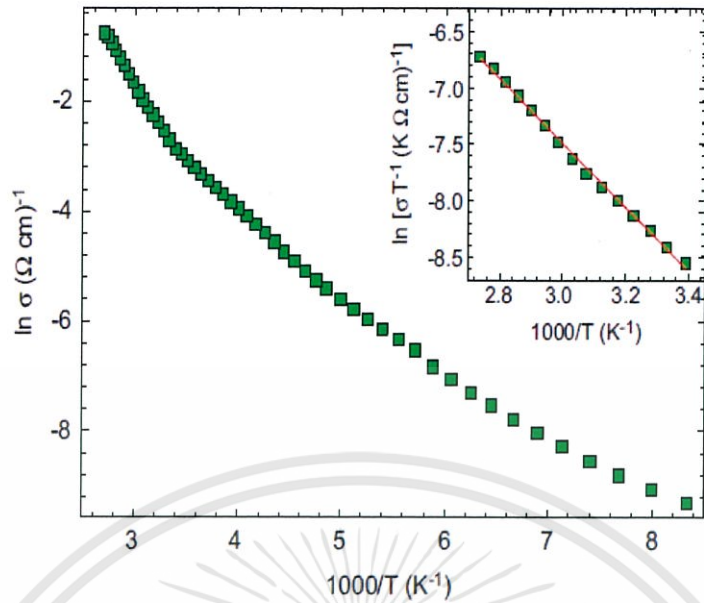
$$L_D = \left[\frac{kT \epsilon_s}{e^2 N_a} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.19)$$

สำหรับเงื่อนไขที่สอง คือ $E_t + E_b - E_F \gg kT$ เป็นเงื่อนไขที่ระดับกับดักประจุ (E_t) อยู่สูงกว่าระดับพลังงานเฟอร์มิ (E_F) แสดงว่ากับดักประจุบางส่วนเท่านั้นที่ถูกครอบครองโดยประจุไฟฟ้า ดังนั้นค่าสภาพนำไฟฟ้าจะสัมพันธ์กับค่าอุณหภูมิดังนี้ คือ

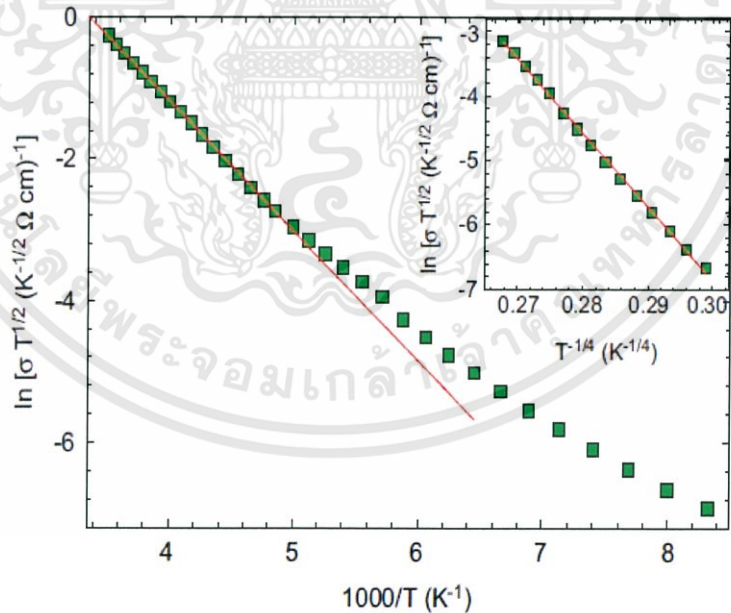
$$\sigma = e N_c^2 L v_c (2 \epsilon_s N_d^{-1} E_b)^{\frac{1}{2}} (kT N_t)^{-1} \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (2.20)$$

ซึ่ง

$$E_a = \frac{1}{2} E_g - E_t \quad (2.21)$$



รูปที่ 2.2 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln \sigma$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่อุณหภูมิในช่วง 125-365 เคลวิน สำหรับในรูปแทรกคือกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(\sigma T^{-1})$ กับ $\frac{1000}{T}$ (serin et al. 2011)



รูปที่ 2.3 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(\sigma T^{\frac{1}{2}})$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ CuO สำหรับในรูปแทรก คือกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(\sigma T^{\frac{1}{2}})$ กับ $T^{-\frac{1}{4}}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในฟิล์มบางชนิดอเล็กตรอนกระโดดระหว่างระดับผู้ให้ที่อยู่ติดกัน

เมื่ออุณหภูมิลดต่ำลง พลังงานความร้อนไม่สูงพอที่จะกระตุ้นอเล็กตรอนให้หลุดออกจากระดับพลังงานผู้ให้ (donor level) (ในกรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น) ไปยังแถบนำ เพื่อกลายเป็นอเล็กตรอนอิสระในแถบนำที่ จะไหลข้ามกำแพงศักย์ที่ขอบของเกรนได้ ดังนั้นอเล็กตรอนของระดับพลังงานผู้ให้จะกระโดดไปยังระดับพลังงานผู้ให้ที่อยู่ติดกัน (nearest-neighbour donors) ซึ่งระดับพลังงานผู้ให้เหล่านี้จะก่อตัวเป็นแถบพลังงาน (impurity band) ซึ่งจะเกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำชนิดคอมเพนเซตอย่างแรง (highly compensated semiconductor) นั่นคือเมื่ออุณหภูมิต่ำลง การนำไฟฟ้าจะเกิดจากกลไกการกระโดดของอเล็กตรอนระหว่างระดับผู้ให้ที่อยู่ติดกัน (nearest neighbor hopping conduction; NNH) สภาพนำไฟฟ้าสามารถเขียนได้ดังความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln\sigma$ กับ $\frac{1000}{T}$ ดังสมการ

$$\sigma = \sigma_{0,NNH} \exp\left(-\frac{E_{0,NNH}}{kT}\right) \quad (2.22)$$

โดยที่

$$E_{NNH} = \frac{0.99e^2 N_d^{1/3}}{4\pi\epsilon_s} \quad (2.23)$$

เมื่อ $\rho_{0,NNH}$ คือ ค่าคงที่

N_d คือ ความเข้มข้นของสารเจือชนิดผู้ให้ (donor concentration)

E_{NNH} คือ พลังงานกระตุ้นให้อเล็กตรอนกระโดด

อุณหภูมิของการทรานซิชันจากกลไกการกระโดดระหว่างระดับพลังงานผู้ให้ที่อยู่ติดกันไปเป็นการกระโดดในระยะไม่คงที่ของมอตต์ (Mott VRH) จะเป็นไปตามความสัมพันธ์

$$T_{CI} = \frac{e^2 N_d^{2/3} \xi_{Mott}}{4\pi\epsilon_s k_B} \quad (2.24)$$

สมการที่ (2.24) จะใช้ได้ก็ต่อเมื่อ $k > 0.5$ ค่า k นี้คือ อัตราส่วนของ $\frac{N_a}{N_d}$ (กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น) นิยามดังนี้ คือ

$$k = \frac{N_a}{N_d} = 1 - \left(\frac{N_0(E_F)e^2}{2\epsilon_s}\right)^{3/4} \left(\frac{1}{N_d}\right)^{1/3} \quad (2.25)$$

เมื่อ N_a คือ ความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ (acceptor concentration)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองสามารถคำนวณหาค่า N_d ได้จากค่า E_{NNH} จากนั้นจะนำมาคำนวณหาค่า k ได้จากค่า $N_0(E_F)$ และ N_d เมื่อรู้ค่า k แล้วก็จะคำนวณหาค่า N_a ได้

สำหรับค่าอุณหภูมิทรานซิชัน (T_{CI}) จากกลไก NNH ไปเป็น Mott-VRH จะคำนวณได้เมื่อรู้ค่า ξ_{Mott} , N_d และ ϵ_S ตามลำดับ

จากสมการ
$$\sigma = \sigma_{0,NNH} \exp\left(-\frac{E_{NNH}}{kT}\right)$$

$$\ln \sigma = -\frac{E_{NNH}}{1000k} \left(\frac{1000}{T}\right) + \ln \sigma_{0,NNH} \quad (2.26)$$

ความชัน คือ $\frac{E_{NNH}}{1000k}$ ส่วนจุดตัดแกน y คือ $\ln \sigma_{0,NNH}$

2.3 กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในฟิล์มบางชนิดอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสต์ในระยยะไม่คงที่

เมื่ออุณหภูมิต่ำลงอีก กลไกการนำไฟฟ้าจะเป็นแบบการกระโดดระหว่างระดับพลังงานในระยยะไม่คงที่ (Variable Range Hopping; VRH) ซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์

$$\sigma = \sigma_0(T) \exp\left[\left(-\frac{T_0}{T}\right)^s\right] \quad (2.27)$$

$$\sigma_0(T) = \sigma_0(T)^{-2s} \quad (2.28)$$

ในกรณีนี้ที่พาหะสามารถกระโดดได้ใน 3 มิติ และ 2 มิติ แล้ว $s = \frac{1}{4}$ และ $\frac{1}{3}$ ตามลำดับ ซึ่งจะเป็นกลไกการนำไฟฟ้าแบบกระโดดในระยยะไม่คงที่ของมอตต์ (Mott VRH) ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อคิดว่าความหนาแน่นของสถานะพลังงานท้องถิ่น (density of localized states) ที่ระดับเฟอร์มีมีค่าคงที่ แต่เมื่อพิจารณาถึงอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนในสถานะพลังงานท้องถิ่นด้วยกันเอง ส่งผลให้ความหนาแน่นของสถานะพลังงานที่ระดับเฟอร์มีแยกออกจากกันกลายเป็นช่องว่างซึ่งเรียกว่า ช่องว่างของคูลอมบ์ (Coulomb gap) ซึ่งกลไกการนำไฟฟ้าจะเป็นแบบกระโดดในระยยะไม่คงที่ของเอฟรอส-ชลอฟสกี (Efros-Shklovskii VRH; ES-VRH) ซึ่งจะได้ว่า $s = \frac{1}{2}$

สำหรับกลไกการนำไฟฟ้าแบบกระโดดในระยะไม่คงที่ของมอตต์ (Mott VRH) จะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$\sigma T^{\frac{1}{2}} = \sigma_{0,Mott} \exp \left[- \left(\frac{T_{0,Mott}}{T} \right)^{\frac{1}{4}} \right] \quad (2.29)$$

$$\ln \left(\sigma T^{\frac{1}{2}} \right) = - \left(\frac{T_{0,Mott}}{T} \right)^{\frac{1}{4}} + \ln \sigma_{0,Mott} \quad (2.30)$$

โดยที่องศาของความไม่เป็นระเบียบ ($T_{0,Mott}$) คือ

$$T_{0,Mott} = \frac{18.1}{k_B \xi_{Mott} N_0(E_F)} \quad (2.31)$$

ความชันของสมการ คือ $T^{\frac{1}{4}}_{0,Mott}$

ส่วน $\sigma_{0,Mott}$ คือสัมประสิทธิ์หน้าพจน์เอกซ์โพเนนเชียล (pre-exponential) จะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$\sigma_{0,Mott} = 3e^2 v \left[\frac{N_0(E_F) \xi_{Mott}}{8\pi k_B} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.32)$$

ส่วนระยะโลคัลไลเซชัน (localization length; ξ_{Mott}) ซึ่งแสดงถึงโอกาสที่จะเกิดการกระโดดระหว่างสถานะพลังงานท้องถิ่น คือ

$$\xi_{Mott} = \frac{1}{21.23 \sigma_{0,Mott} T_{0,Mott}^{\frac{1}{2}}} \quad (2.33)$$

ส่วนความหนาแน่นของสถานะถูกจำกัดเฉพาะที่ (density of localized state; $N_0(E_F)$) ที่ระดับเฟอร์มิ คือ

$$N_0(E_F) = 2.0 \times 10^9 \sigma_{0,Mott}^3 T_{0,Mott}^{\frac{1}{2}} \quad (2.34)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$N_0(E_F) = \frac{18\alpha^3}{\frac{k}{q} T_{0,\text{Mott}}} \quad (2.35)$$

ส่วนระยะทางเฉลี่ยของการกระโดด ($R_{\text{hop,Mott}}$) คือ

$$\frac{R_{\text{hop,Mott}}}{\xi_{\text{Mott}}} = \frac{3}{8} \left(\frac{T_{0,\text{Mott}}}{T} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (2.36)$$

หรือ

$$R_{\text{hop,Mott}} = \left(\frac{9\xi_{\text{Mott}}}{8\pi k_B T N_0(E_F)} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (2.37)$$

สำหรับพลังงานเฉลี่ยของการกระโดด ($W_{\text{hop,Mott}}$) คือ

$$W_{\text{hop,Mott}} = \frac{k_B T}{4} \left(\frac{T_{0,\text{Mott}}}{T} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (2.38)$$

หรือ

$$W_{\text{hop,Mott}} = \frac{3}{4\pi R_{\text{hop,Mott}}^3 N_0(E_F)} \quad (2.39)$$

และ

$$\frac{R_{\text{hop,Mott}}}{\xi_{\text{Mott}}} > 1 \quad (2.40)$$

อุณหภูมิทรานซิชันจากกลไก Mott-VRH ไปเป็น ES-VRH จะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$T_{C2} = 16 \left(\frac{T_{0,\text{ES}}^2}{T_{0,\text{Mott}}} \right) \quad (2.41)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่อุณหภูมิลดลงต่ำสุด กลไกการนำไฟฟ้าจะเป็นแบบกระโดดในระยะไม่คงที่ของเอพอส-ชอลอสกี (ES-VRH) ซึ่งจะแสดงดังความสัมพันธ์

$$\sigma = \sigma_{0,ES} T^{-1} \exp \left[- \left(\frac{T_{0,ES}}{T} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (2.42)$$

$$\ln(\sigma T) = - \left(\frac{T_{0,ES}}{T} \right)^{\frac{1}{2}} + \ln \sigma_{0,ES} \quad (2.43)$$

โดยที่องศาความไม่เป็นระเบียบของ ES ($T_{0,ES}$) คือ

$$T_{0,ES} = \frac{2.8e^2}{k_B \xi_{ES} \epsilon_S} \quad (2.44)$$

ค่า $T_{0,ES}$ สามารถหาได้จากความชันของกราฟ ส่วนค่า $\sigma_{0,ES}$ สามารถหาได้จากจุดตัดแกน y ดังนั้น ξ_{ES} ก็จะสามารถหาได้จากความชันของกราฟ ส่วนระยะทางเฉลี่ยของการกระโดด ($R_{hop,ES}$) จะแสดงดังความสัมพันธ์

$$\frac{R_{hop,ES}}{\xi_{ES}} = \frac{1}{4} \left(\frac{T_{0,Mott}}{T} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.45)$$

สำหรับพลังงานเฉลี่ยของการกระโดด ($W_{hop,ES}$) คือ

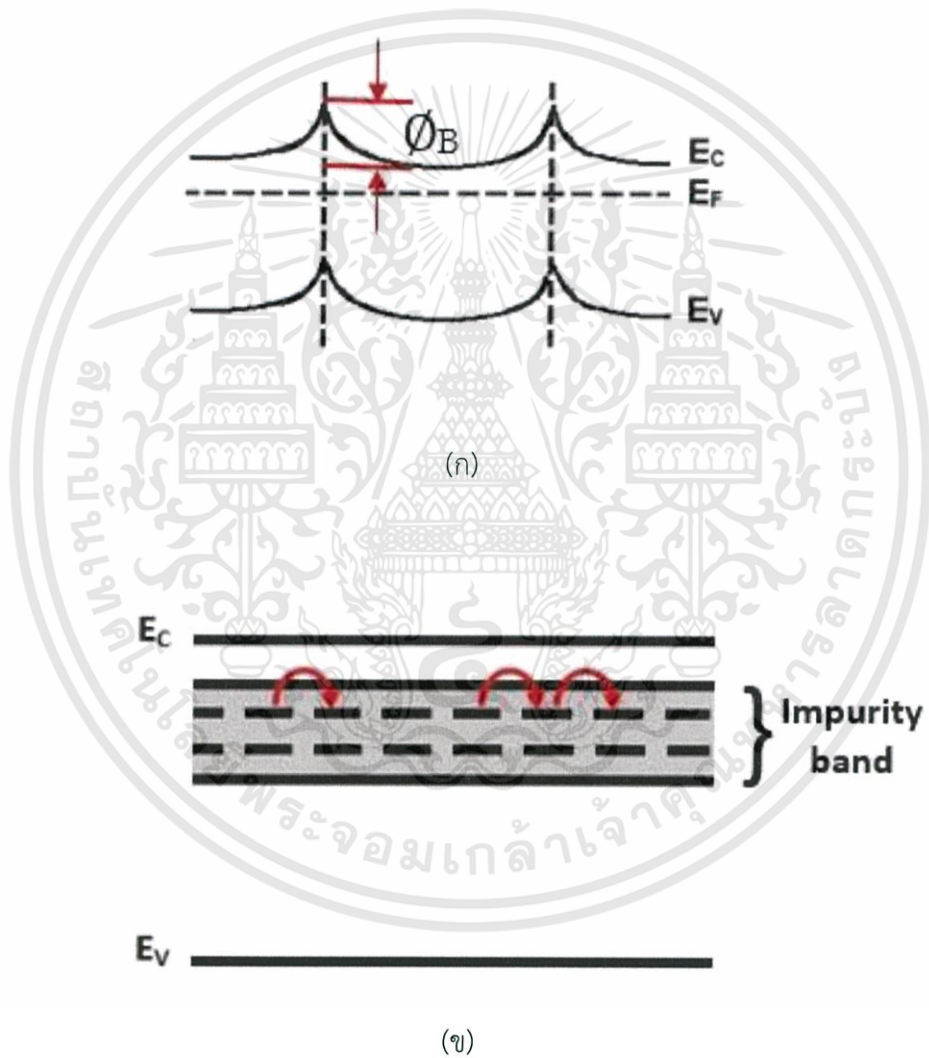
$$W_{hop,ES} = \frac{1}{2} k_B T \left(\frac{T_{0,ES}}{T} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.46)$$

เนื่องจากที่ระดับอุณหภูมิต่ำมากนี้อิเล็กตรอนในสถานะพลังงานท้องถิ่นมีอันตรกิริยาต่อกัน ส่งผลให้ความหนาแน่นของสถานะพลังงานที่ระดับเฟอร์มิแยกออกจากกันกลายเป็นช่องว่าง เรียกว่า ช่องว่างของคูลอมบ์ (Coulomb gap) จะแสดงดังความสัมพันธ์

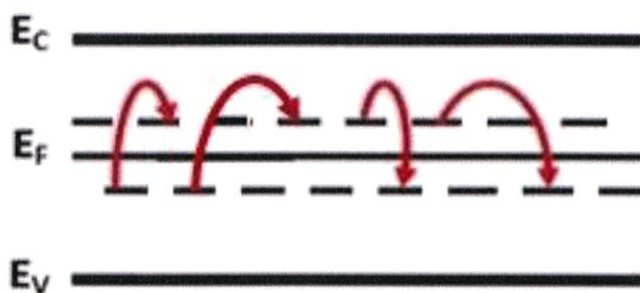
$$\Delta_C = \frac{e^2 N_0^{\frac{1}{2}}(E_F)}{\epsilon_s^{\frac{3}{2}}} \quad (2.47)$$

หรือ

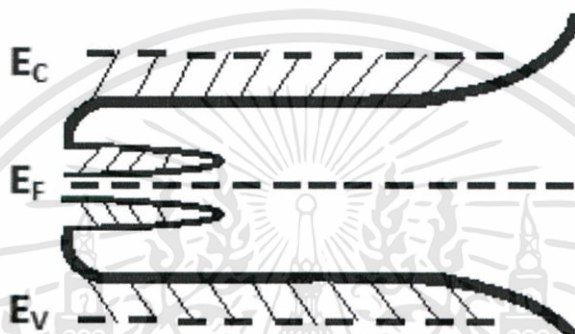
$$\Delta_C = k_B \left(\frac{T_{0,ES}}{T_{0,Mott}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.48)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)



(ง)

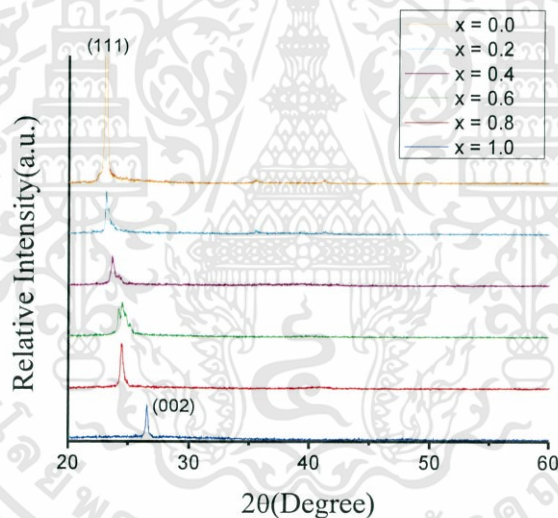
รูปที่ 2.4 แผนภาพกลไกการนำไฟฟ้า 4 ชนิด

- (ก) แผนภาพกลไกการนำกระแสไฟฟ้าตามแบบจำลองของซีโด
- (ข) แผนภาพกลไกการนำไฟฟ้าตามแบบจำลองการกระโดดของอิเล็กตรอนระหว่างระดับผู้ให้ที่อยู่ติดกัน
- (ค) แผนภาพกลไกการนำไฟฟ้าตามแบบจำลองการกระโดดระหว่างสถานะพลังงานท้องถิ่นในระยะไม่คงที่
- (ง) แผนภาพกลไกการนำไฟฟ้าตามแบบจำลองการกระโดดแบบเอฟรอส-ชโลพสกี

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.4.1 ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ (ทศพร, 2557; ขวัญกมล, 2557)

เนื่องจากเราต้องการทราบถึงลักษณะของโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศและยังต้องการทราบถึงการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่โครงผลึก a_0 และ c_0 ที่ขึ้นกับค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ที่มีค่าในช่วง 0.0 ถึง 1.0 เราจึงนำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้ไปทำการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เพื่อดูลักษณะของพีคความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นแล้วจึงนำไปเปรียบเทียบกับพีคความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์มาตรฐานของสารกึ่งตัวนำ CdS และ CdTe



รูปที่ 2.5 แสดงพีคความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

ลักษณะของโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล และลักษณะของโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก มีความสัมพันธ์กัน ดังนี้

$$a_0 = a/(2)^{1/2} \quad (2.49)$$

$$c_0 = 2a/(3)^{1/2} \quad (2.50)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

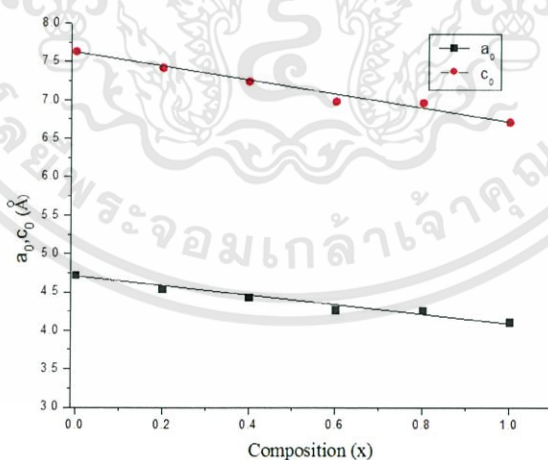
จากการศึกษาลักษณะของโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ พบว่าเมื่อเศษส่วนโดยโมลอะตอมของ (x) ≤ 0.2 ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำจะมีลักษณะโครงสร้างผลึกเป็นแบบคิวบิก และเมื่อเศษส่วนโดยโมลอะตอม $0.2 \leq x \leq 1.0$ ฟิล์มบางจะมีลักษณะโครงสร้างผลึกเป็นแบบเวิร์ทไซด์

ระนาบที่โดดเด่นของโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซด์ คือระนาบ (002) ส่วนระนาบที่โดดเด่นของโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก คือระนาบ (111) ค่าคงที่โครงผลึก (a) ของโครงผลึกแบบคิวบิกสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$2d\sin\theta = n\lambda \quad \text{เมื่อ } n = 1, 2, 3, \dots \quad (2.51)$$

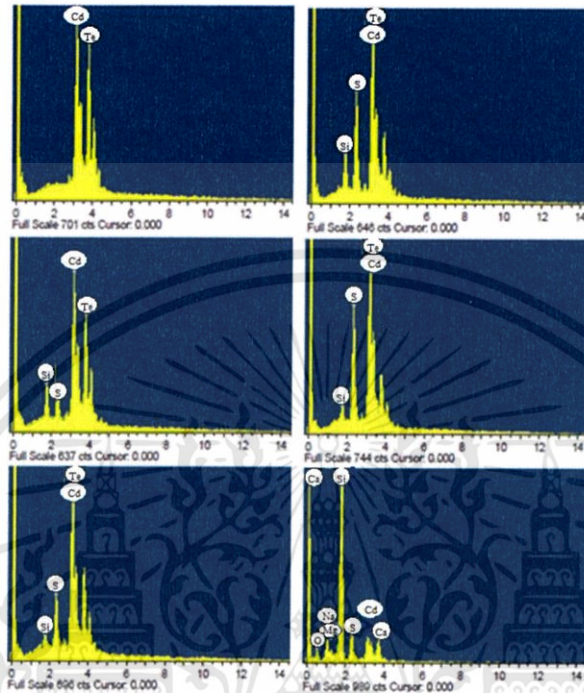
$$\text{และ} \quad \frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (2.52)$$

ส่วนค่าคงที่โครงผลึก (a) ของโครงผลึกแบบคิวบิกสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของค่าคงที่โครงผลึก (a_0, c_0) ของโครงผลึกแบบเฮกซะโกนัล โดยอาศัยสมการที่ (2.49) และ (2.50) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่โครงผลึก (a_0, c_0) กับเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ แสดงไว้ดังรูปที่ (2.6)



รูปที่ 2.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่โครงผลึก (a_0, c_0) กับ เศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ค่าต่างๆ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

2.4.2 ผลการวิเคราะห์ธาตุต่างๆด้วยเทคนิค EDS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ (ทศพร, 2557; ขวัญกมล, 2557)



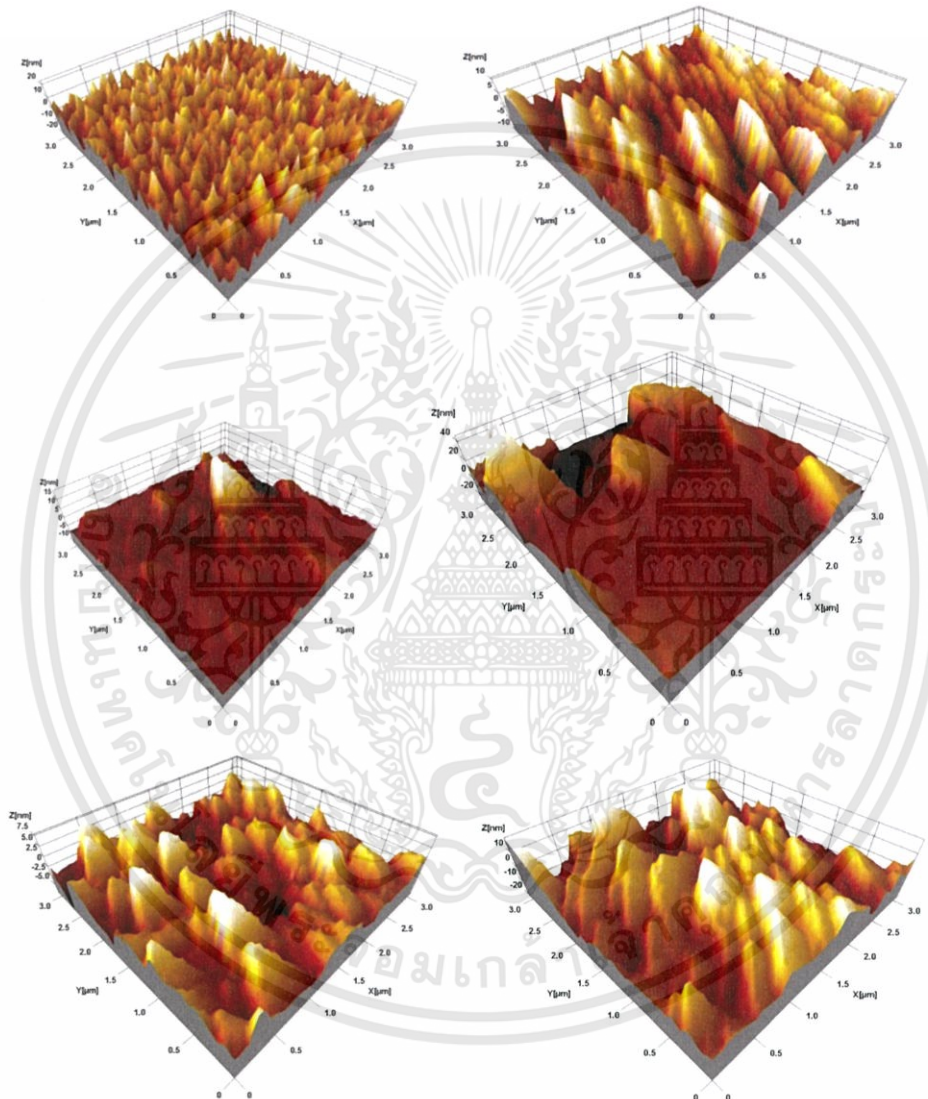
รูปที่ 2.7 แสดงผลการวิเคราะห์ธาตุต่างๆด้วยสเปกตรัม EDX ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

ตารางที่ 2.1 แสดงองค์ประกอบของธาตุต่างๆของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

Composition (x)	Elements					
	Cd		S		Te	
	wt.%	at.%	wt.%	at.%	wt.%	at.%
0.0	45.16	48.31	-	-	54.84	51.69
0.2	48.82	49.26	1.98	7.02	49.19	43.72
0.4	53.34	48.92	5.56	17.88	41.10	33.20
0.6	59.72	48.23	10.90	30.87	29.38	20.90
0.8	62.34	49.05	12.03	33.18	25.63	17.77
1.0	75.93	47.37	24.93	52.63	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

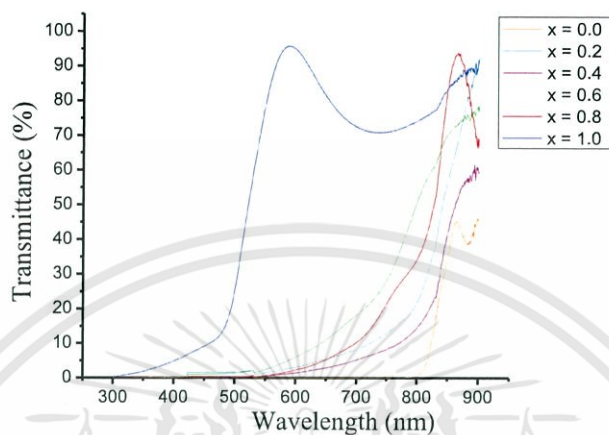
2.4.3 ผลการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ (ทศพร, 2557; ขวัญกมล, 2557)



รูปที่ 2.8 แสดงภาพถ่ายลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ของฟิล์มบางของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

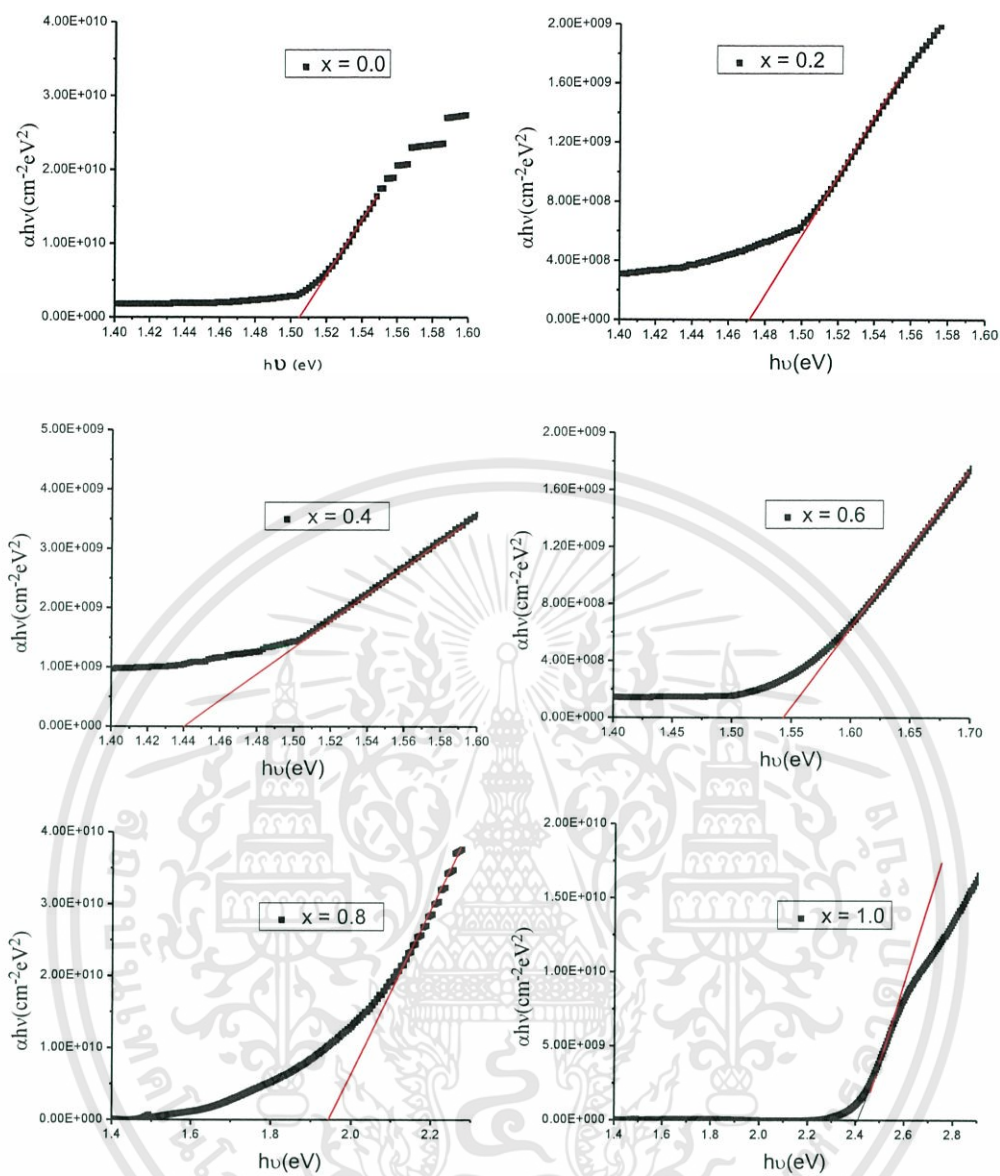
2.4.4 ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ (ทศพร, 2557; ขวัญกมล, 2557)



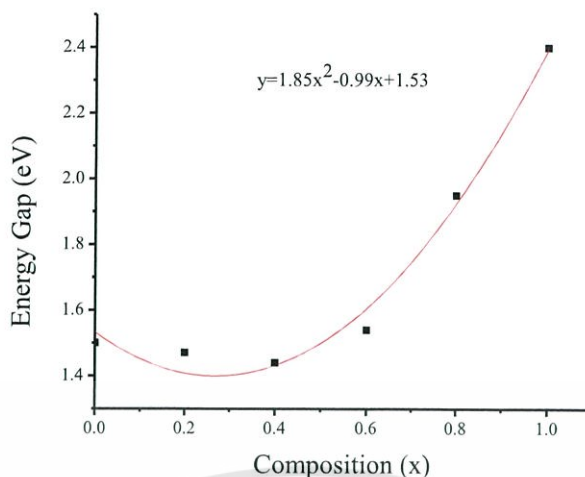
รูปที่ 2.9 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง กับ ค่าความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

รูปที่ 2.9 แสดงสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ โดยใช้เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ชนิดดับเบิลบีม ยี่ห้อ JASCO 7800 ที่ช่วงความยาวคลื่น 300-900 นาโนเมตร เมื่อไม่มีการแอนนีกัล พบว่าขอบของการดูดกลืนพื้นฐาน (fundamental band edge) เลื่อนไปทางความยาวคลื่นที่สั้นกว่า ซึ่งหมายความว่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) มีค่าสูงขึ้น เมื่อความเข้มข้นของอะตอมธาตุ S ที่อยู่ในผลึกของสารตั้งต้น CdS ที่มีความบริสุทธิ์สูงถึง 99.999 เปอร์เซ็นต์เพิ่มมากขึ้น

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(\alpha h\nu)^2$ กับ $h\nu$ เพื่อหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน พบว่าเมื่อเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) มีค่าเพิ่มขึ้นค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางมีค่าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.10 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(\alpha h\nu)^2$ กับ ค่า $h\nu$ ของฟิล์มของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 2.11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าช่องว่างแถบพลังงาน กับ ค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์งานวิจัย (ฐิตินัย,2557; ฐิตินัย,2556; ฐิตินัย,2547; งามนิตย์,2543)

3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์เพื่อใช้เคลือบฟิล์มบาง CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

- 1) แผ่นกระจกสไลด์
- 2) ที่ตัดกระจก
- 3) อ่างอัล
- 4) ตาโซนิค
- 5) เครื่องเป่าลมร้อน
- 6) เตอบ
- 7) ปีกเกอร์ขนาด 200 มิลลิลิตร
- 8) สารเคมี(น้ำยาล้างจาน น้ำปลอดประจุ อะซีโตน และเอทานอล)
- 9) นาฬิกาจับเวลา

3.1.2 ระบบการเคลือบฟิล์มบางโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางโดยการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ สิ่งที่สำคัญที่สุดก็คือระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยองค์ประกอบของระบบการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศประกอบด้วย

- 1) ภาชนะสุญญากาศทำหน้าที่เป็นห้องสุญญากาศให้แก่ระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ
- 2) เบ้าหลอมสาร ทำหน้าที่รองรับและให้ความร้อนแก่อะตอมของสารเคมีที่ใช้ในการระเหย
- 3) แผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ทำหน้าที่รองรับไอระเหยของสารเคมีที่ระเหยขึ้นมาเกาะติดเป็นฟิล์มบาง
- 4) ชัตเตอร์ ทำหน้าที่ปิดกั้นไอระเหยของสารเคมี
- 5) หม้อแปลงโวลต์ต่ำกระแสสูง ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายไฟให้แก่เบ้าหลอม เพื่อใช้ในการระเหยซึ่งเป็นแบบที่ให้เอาท์พุทเป็นแรงดันต่ำแต่ให้กระแสสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 6) แวริแอก ทำหน้าที่ควบคุมกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลงโวลต์ต่ำกระแสสูง
- 7) เกจวัดความดัน ทำหน้าที่วัดความดันในระบบสุญญากาศ
- 8) ปัมมกลโรตารี ทำหน้าที่ลดความดันในระบบขั้นต้นสามารถลดความดันได้ต่ำสุดประมาณ 10^{-2} ถึง 10^{-5} มิลลิบาร์
- 9) ปัมมดิฟฟิวชัน ทำหน้าที่ลดความดันในภาชนะ โดยทำงานร่วมกับปัมมกลโรตารีสามารถลดความดันได้ต่ำสุดประมาณ 10^{-5} มิลลิบาร์
- 10) เครื่องทำความเย็น ทำหน้าที่ให้ความเย็นแก่ปัมมดิฟฟิวชันเพื่อระบายความร้อนให้กับไอน้ำมัน

3.2 ขั้นตอนการเคลือบฟิล์มบาง CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกใส โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ (ฐิตินัย,2547; ฐิตินัย,2556)

3.2.1 การเตรียมและทำความสะอาดแผ่นกระจกใสเพื่อใช้เป็นแผ่นฐานรองรับ

- 1) ทำความสะอาดแผ่นกระจกใสด้วยน้ำยาล้างจาน
- 2) ทำความสะอาดแผ่นกระจกใสด้วยน้ำปลอดประจุเป็นเวลา 10 นาที 3 ครั้ง
- 3) ทำความสะอาดแผ่นกระจกใสด้วยอะซิโตนเป็นเวลา 10 นาที
- 4) ทำความสะอาดแผ่นกระจกใสด้วยเอธานอลเป็นเวลา 10 นาที
- 5) ทำความสะอาดแผ่นกระจกใสด้วยน้ำปลอดประจุอีก 3 ครั้ง ครั้งละ 10 นาที
- 6) ขั้นตอนในข้อ 2-5 นำปิกเกอร์ไปใส่ในอ่างอัลตราโซนิก
- 7) นำแผ่นกระจกใสไปเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน
- 8) บรรจุแผ่นกระจกใสในถุงเพื่อนำไปใช้สำหรับทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกใสโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

3.3 การเตรียมสารตั้งต้นที่ใช้สำหรับเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกใส โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ (ฐิตินัย,2547; ฐิตินัย,2556)

ในการเตรียมสารตั้งต้นที่ใช้สำหรับเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกใส โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ต้องเตรียมสารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ CdS และ CdTe ที่มีความบริสุทธิ์สูง 99.999 เปอร์เซ็นต์ โดยมีขั้นตอนปฏิบัติดังนี้

- 1) ทำการบดผงผลึกของสารประกอบ Cds และสารประกอบ CdTe ให้ละเอียด นำไปชั่งน้ำหนักตามอัตราส่วนที่คำนวณไว้ดังตารางที่ 3.1
- 2) นำผงผลึกของสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางที่บดแล้วไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- 3) เมื่ออุณหภูมิของสารตั้งต้นเย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้องแล้วจึงนำเข้าไปใส่ไว้ในภาชนะระเหยสารเคมี(boat)ที่อยู่ในระบบสุญญากาศต่อไป

3.3.1 การเตรียมผงผลึกของสารตั้งต้นที่เป็นสารประกอบ CdS และ CdTe เพื่อใช้ในการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ สารตั้งต้นสามารถเตรียมได้จากผงผลึกของสารประกอบ CdTe และ CdS ดังสมการ



มวลอะตอมของธาตุ Cd, S และ Te มีค่าเท่ากับ 112.41, 32.066 และ 127.60 กรัมต่อโมลตามลำดับ ดังนั้นจะได้ว่า

$$\text{มวลโมเลกุลของสารประกอบ CdTe} = 112.41 + 127.60 = 240.010 \text{ กรัมต่อโมล}$$

$$\text{มวลโมเลกุลของสารประกอบ CdS} = 112.41 + 32.066 = 144.476 \text{ กรัมต่อโมล}$$

กรณี $x = 0.2$



มวลโมเลกุลของสารตั้งต้นจะได้เท่ากับ

$$\begin{aligned} CdS_{0.2}Te_{0.8} &= 112.41 + (0.2 \times 32.066) + (0.8 \times 127.60) \\ &= 220.9032 \text{ กรัมต่อโมล} \end{aligned}$$

ถ้าต้องการใช้สารประกอบ $CdS_{0.2}Te_{0.8}$ จำนวน 1 กรัม จะต้องใช้สารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ

$$\text{ของสารประกอบ CdTe} = \frac{0.8 \times 240.01}{220.9032} = 0.8692 \text{ กรัม}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{ของสารประกอบ CdS} = \frac{0.2 \times 144.476}{220.9032} = 0.1308 \text{ กรัม}$$

$$\text{กรณี } x = 0.4$$



มวลโมเลกุลของสารตั้งต้นจะได้เท่ากับ

$$\begin{aligned} \text{CdS}_{0.4}\text{Te}_{0.6} &= 112.41 + (0.4 \times 32.066) + (0.6 \times 127.60) \\ &= 201.9764 \text{ กรัมต่อโมล} \end{aligned}$$

ถ้าต้องการใช้สารประกอบ $\text{CdS}_{0.4}\text{Te}_{0.6}$ จำนวน 1 กรัม จะต้องใช้สารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ

$$\text{ของสารประกอบ CdTe} = \frac{0.6 \times 240.01}{201.9764} = 0.7136 \text{ กรัม}$$

$$\text{ของสารประกอบ CdS} = \frac{0.4 \times 144.476}{201.9764} = 0.2864 \text{ กรัม}$$

$$\text{กรณี } x = 0.6$$



มวลโมเลกุลของสารตั้งต้นจะได้เท่ากับ

$$\begin{aligned} \text{CdS}_{0.6}\text{Te}_{0.4} &= 112.41 + (0.6 \times 32.066) + (0.4 \times 127.60) \\ &= 182.6891 \text{ กรัมต่อโมล} \end{aligned}$$

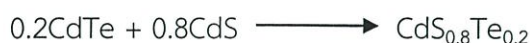
ถ้าต้องการใช้สารประกอบ $\text{CdS}_{0.6}\text{Te}_{0.4}$ จำนวน 1 กรัม จะต้องใช้สารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ

$$\text{ของสารประกอบ CdTe} = \frac{0.4 \times 240.01}{182.6891} = 0.5255 \text{ กรัม}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{ของสารประกอบ CdS} = \frac{0.6 \times 144.476}{182.6891} = 0.4745 \text{ กรัม}$$

$$\text{กรณี } x = 0.8$$



มวลโมเลกุลของสารตั้งต้นจะได้เท่ากับ

$$\begin{aligned} \text{CdS}_{0.8}\text{Te}_{0.2} &= 112.41 + (0.8 \times 32.066) + (0.2 \times 127.60) \\ &= 163.5828 \text{ กรัมต่อโมล} \end{aligned}$$

ถ้าต้องการใช้สารประกอบ $\text{CdS}_{0.8}\text{Te}_{0.2}$ จำนวน 1 กรัม จะต้องใช้สารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ

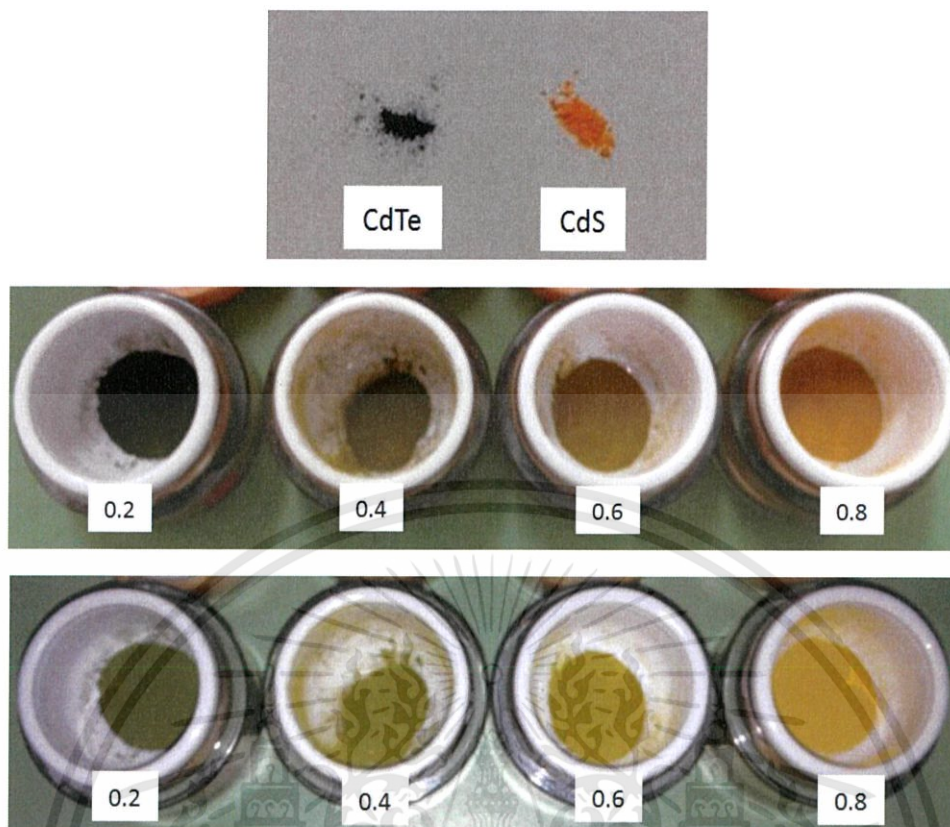
$$\text{ของสารประกอบ CdTe} = \frac{0.8 \times 240.01}{163.5828} = 0.2931 \text{ กรัม}$$

$$\text{ของสารประกอบ CdS} = \frac{0.2 \times 144.476}{163.5828} = 0.7066 \text{ กรัม}$$

ตัวอย่างที่ 3.1 แสดงค่าปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

เศษส่วนโดยโมลอะตอมของ (x)	ปริมาณสารตั้งต้น (ทั้งหมด 1 กรัม)	
	CdS (กรัม)	CdTe (กรัม)
0.0	-	1.0000
0.2	0.1308	0.8692
0.4	0.2864	0.7136
0.6	0.4745	0.5255
0.8	0.7066	0.2931
1.0	1.0000	-

หมายเหตุ : การนำสารตั้งต้นเข้าไปในระบบสุญญากาศไม่ควรมีความชื้น



รูปที่ 3.1 แสดงผงผลึกของสารตั้งต้นที่เป็นสารประกอบ CdS และ CdTe ที่ผสมเพื่อใช้ในการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xCdTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

3.4 การเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ (ฐิตินัย,2547; ฐิตินัย,2545; ฐิตินัย,2555; ฐิตินัย,2556; ฐิตินัย,2557)

ระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศแสดงในรูปที่ 3.1 โดยมีขั้นตอนในการเคลือบฟิล์มบางดังนี้

- 1) ทำความสะอาดระบบสุญญากาศโดยการกำจัดฝุ่นและสิ่งสกปรกต่างๆและตรึงไขมันด้วยอะซีโตน
- 2) ทำการติดตั้งระบบต่างๆภายในระบบสุญญากาศให้เสร็จสมบูรณ์
- 3) นำแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมเอาไว้แล้ว วางลงบนหน้ากักซึ่งทำมาจากแผ่นอลูมิเนียมเจาะเป็นช่องตามแบบและขนาดที่ต้องการ
- 4) นำผงผลึกของสารตั้งต้นใส่ลงในภาชนะระเหยสารซึ่งเป็นโลหะทังสเตนหลังจากนั้นปิดฝาห้องสุญญากาศให้เรียบร้อย

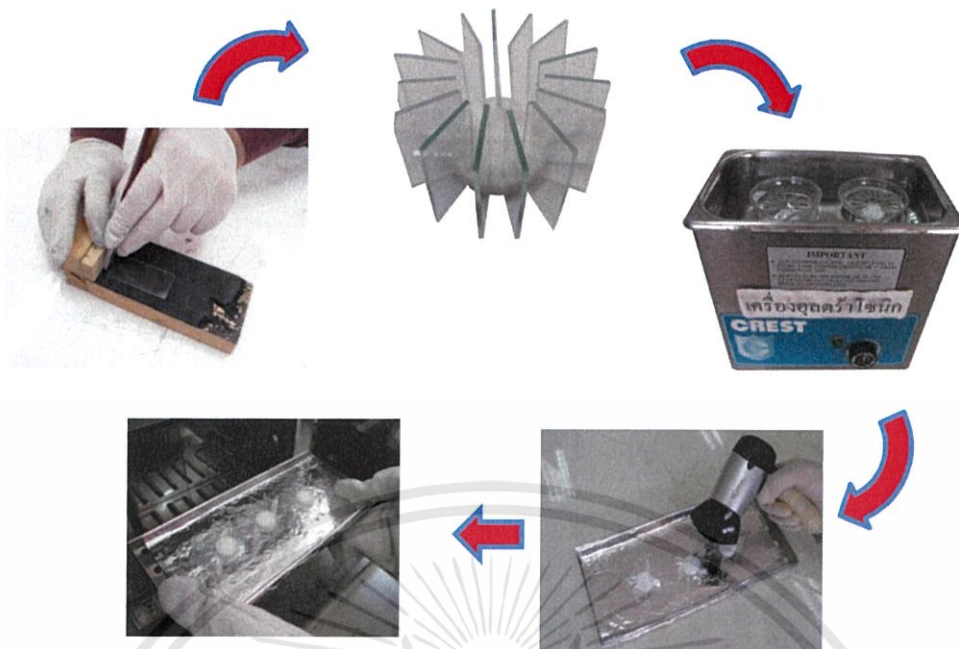
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 5) เปิด TC POWER ON ที่หน้าปัดควบคุม
- 6) เปิด ROTARY ON และเปิด ROTARY PUMP
- 7) โยกคันโยกไปตำแหน่ง BACKING รอประมาณ 5 นาที จึงโยกมาที่ตำแหน่ง ROUGHING
- 8) รอความดันลดลงจนถึงประมาณ 2.8×10^{-2} มิลลิบาร์ จึงเปิด WATER PUMP ON
- 9) ปิด DIFFSTAK รอน้ำมันเดือดประมาณ 15 นาที
- 10) โยกคันโยกมาที่ตำแหน่ง BACKING
- 11) โยกคันโยก BUTTERFLY ไปด้านหลัง
- 12) รอความดันลดลงจนถึงประมาณ 2.8×10^{-5} มิลลิบาร์
- 13) จ่ายแรงดันให้กับระบบ 100+150 โวลต์ รอจนอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์อยู่ที่ 90-95 องศาเซลเซียส
- 14) เริ่มจ่ายกระแสให้กับสารตั้งต้นประมาณ 95-12 แอมแปร์
- 15) เมื่อทำการระเหยเสร็จจึงค่อยๆ ปรับกระแสลงอย่างช้าๆ
- 16) รออุณหภูมิลดลงจนถึงประมาณ 70 องศาเซลเซียส แล้วจึงปิด DIFFSTAK
- 17) รอ 15 นาทีแล้วโยก BUTTERFLY เข้าหาตัวโยก BACKING มาตำแหน่งตรงกลาง
- 18) ปิด ROTARY PUMP และ ROTARY OFF
- 19) ปิด WATER PUMP ON และปิด COMPRESSOR ON

3.5 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำของ CuO โดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง (งามนิตย์, 2543; ฐิตินัย, 2546; ฐิตินัย, 2551)

3.5.1 การเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

1. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปทำความสะอาดด้วยน้ำยาล้างจาน
2. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วยอะซิโตนในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาทีจำนวน 1 ครั้ง
3. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วยเอทานอลในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาทีจำนวน 1 ครั้ง
4. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ในน้ำปilot ประจุในอ่างอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาทีจำนวน 3 ครั้งเป่าให้แห้ง
5. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปอบในเตาที่มีอุณหภูมิประมาณ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

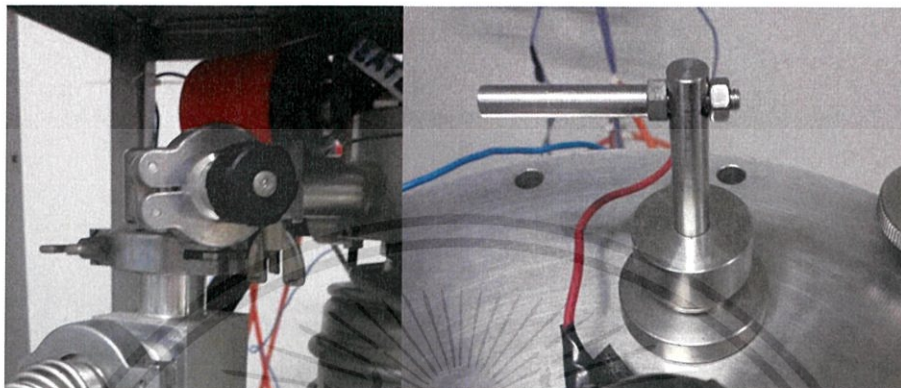
3.6 การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O โดยวิธีการเคลือบฟิล์มบางด้วยระบบดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริง

ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O โดยวิธีการเคลือบฟิล์มบางด้วยระบบดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริงมีขั้นตอนดังนี้

1. ดึงสวิทช์ปั๊มคอมเพรสเซอร์ (compressor) ที่ตู้ทำความเย็นของระบบน้ำหล่อเย็นขึ้น เพื่อทำความเย็นของน้ำไว้ แต่ยังไม่ต้องดึงสวิทช์ปั๊มน้ำ (WATER PUMP) ขึ้น
2. ชั่งมวลของแผ่นรองรับ เพื่อใช้คำนวณหาความหนาของฟิล์มบางและอัตราการเคลือบ (ทำในกรณีที่ต้องการคำนวณความหนาของฟิล์มและอัตราการเคลือบฟิล์ม หากไม่ต้องการสามารถข้ามขั้นตอนนี้ไปได้)
3. ทำความสะอาดเป่าด้วยกระดาษทรายเบอร์ละเอียด (ขัดผิวหน้าเป่าให้เรียบ) เพื่อกำจัดชั้นออกไซด์ที่ผิวเป่าซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการอาร์คขึ้นได้
4. ทำความสะอาดหัวแมกนีตรอนเพื่อป้องกันเศษผงที่ติดอยู่ระหว่างหัวแมกนีตรอนและกราวด์ชิลด์ (โลหะทรงกระบอกที่มีรูอยู่ตรงกลางซึ่งครอบหัวแมกนีตรอนและเป่าอยู่) และสาเหตุอื่นที่จะทำให้เกิดการอาร์คขึ้นได้
5. ติดตั้งเป่าทองแดงเข้ากับหัวแมกนีตรอน จากนั้นครอบด้วยกราวด์ชิลด์แล้วปรับระยะห่างระหว่างขั้วเตอร์และกราวด์ชิลด์ประมาณ 3 เซนติเมตร ปิดฝาบนห้องสุญญากาศเข้ากับตัวห้องสุญญากาศให้เรียบร้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ปรับระยะระหว่างฐานรองและเป่าตามที่ต้องการ วางหน้ากากลงบนแท่งยึด วางชิ้นสารตัวอย่างที่ต้องการเคลือบฟิล์มลงบนหน้ากาก ปิดฝาหน้าห้องสุญญากาศพร้อมหมวนน็อคทางปลายยึดให้แน่น
7. ปิดวาล์วปล่อยอากาศเข้า (leak valve)



(ก.)

(ข.)

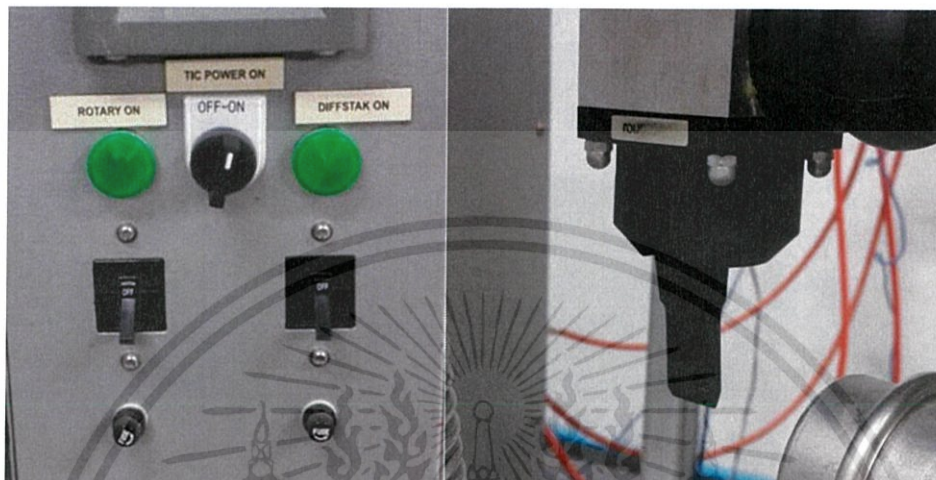
รูปที่ 3.3 (ก) ภาพแสดงวาล์วปล่อยอากาศเข้า

(ข) ภาพแสดงคั่นบังคับขีดเตอร์ที่อยู่ด้านบนของห้องสุญญากาศ

8. ปิดขีดเตอร์ (คั่นบังคับอยู่ด้านบนห้องสุญญากาศ) เพื่อบังเป้าเอาไว้
9. เปิดสวิตช์ตรงตำแหน่ง TIC POWER ON ไปที่ตำแหน่ง ON เพื่อทำการเปิดการทำงานมาตรวัดความดัน
10. โยกสวิตช์ตรงตำแหน่ง ROTARY ON ขึ้น เพื่อเปิดการทำงานของปั๊มกลโรตารี (rotary pump)
11. ทำการเปิดวาล์วหลัง (Backing valve) โดยปรับคั่นโยกวาล์วไปที่ตำแหน่ง Backing (ดันออกจากตัว) เพื่อสูบอากาศออกจากปั๊มไอฟุ้งกระจาย (Oil diffusion pump) จากนั้นรอประมาณ 5 นาที
12. หลังจากนั้นเปิดวาล์วหลังและเปิดวาล์วหยาบ (roughing valve) โดยโยกวาล์วไปที่ตำแหน่ง roughing (ดึงเข้าหาตัว) เพื่อสูบอากาศออกจากห้องสุญญากาศ จนความดันภายในมีค่าประมาณ 3×10^{-2} ทอร์ เป็นการปั๊มอากาศแบบหยาบ ลดความดันในห้องสุญญากาศด้วยปั๊มกลโรตารีอย่างเดียวสำหรับ Backing valve (back up) เป็นการปั๊มอากาศแบบละเอียด ลดความดันในห้องสุญญากาศด้วย กลปั๊มโรตารีและปั๊มไอฟุ้งกระจายไปพร้อมกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13. เปิดสวิตช์ WATER PUMP ON ขึ้นเพื่อเริ่มจ่ายน้ำเย็นให้กับระบบเพื่อระบายความร้อน จากนั้นโยกสวิตช์ DIFFSTAK ON ขึ้น เพื่อจ่ายไฟให้กับขดลวดความร้อนของปั๊มไอฟุ้งกระจายเพื่อต้มน้ำมันให้ร้อน ให้เวลาประมาณ 15 นาที (จะใช้ไอน้ำมันร้อนไปกวาดเอาโมเลกุลของอากาศออกจากภายในห้องสุญญากาศ)



(ก.)

(ข.)

- รูปที่ 3.4 (ก.) ภาพแสดงตำแหน่งสวิตช์ ROTARY ON (สำหรับเปิดปั๊มฟลักโรตารี) TIC POWER ON (สำหรับเปิดมาตรวัดความดัน) และ DIFFSTAK ON (สำหรับเปิดปั๊มไอฟุ้งกระจาย)
(ข.) ภาพแสดงวาล์วในตำแหน่ง backing (หากโยกมาข้างหน้าจะเป็นตำแหน่ง roughing)

14. เมื่อครบ 15 นาที เปิดวาล์วหลังโดยโยกตำแหน่งไปที่ Backing และปรับคันโยกของวาล์วผีเสื้อ (butterfly valve) ไปที่ตำแหน่งเปิด (open) (ดันคันโยกออกจากตัวจนสุด) หากดันคันโยกออกจากตัวตำแหน่งของวาล์วผีเสื้อคือเปิดแต่ถ้าดึงเข้าหาตัวคือ ปิด



(ก.)

(ข.)

- รูปที่ 3.5 (ก) ภาพแสดง Butterfly valve ในตำแหน่ง open
(ข) ภาพแสดง speedy valve

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

15. เมื่อความดันในห้องสุญญากาศมีค่าอยู่ประมาณ 3×10^{-5} ทอร์ หรือ ต่ำกว่า จึงเริ่มป้อนก๊าซอาร์กอนเข้าสู่ห้องสุญญากาศ
- พिरานิกเกจ (pirani gauge) เป็นมาตรวัดความดันบรรยากาศต่ำ ช่วงทำงานอยู่ที่ ความดันบรรยากาศต่ำถึง 10^{-3} ทอร์
 - เพนนิ่งเกจ (penning gauge) เป็นมาตรวัดความดันต่ำช่วงการทำงานเริ่มจาก 10^{-3} – 10^{-6} ทอร์
16. การป้อนอาร์กอนในช่วงแรกทำเพื่อต้องการให้ก๊าซอาร์กอนในห้องสุญญากาศให้มากที่สุด และใช้ก๊าซอาร์กอนเข้าไปแทนที่โมเลกุลของอากาศที่ยังเหลืออยู่โดยจะทำการป้อนอาร์กอนแล้วสูบล้อออกจำนวน 3 ครั้ง เรียก กระบวนการนี้ว่า การฟลัชอาร์กอน มีขั้นตอนดังนี้
- เปิดวาล์วที่หัวถังอาร์กอน เปิดวาล์วเรกูเลเตอร์ (Regulator) เปิดวาล์วรูเข็ม (needle valve) ปิด butterfly valve และเปิด สปีดวาล์ว (speedy valve) เพื่อป้อนอาร์กอนเข้าสู่ห้องสุญญากาศจนได้ความดันภายในเท่ากับ 7.5×10^2 ทอร์
 - ปิด สปีดวาล์ว เปิด butterfly valve ทำการดูดอากาศออกจากห้องสุญญากาศ โดยโยกวาล์วไปที่ตำแหน่ง backing จนกระทั่งความดันลดลงเป็น 3×10^{-5} ทอร์ (สูบล้อออกครั้งที่ 1)
 - ปิด butterfly valve และ เปิด สปีดวาล์ว เพื่อป้อนอาร์กอนเข้าสู่ห้องสุญญากาศจนได้ ความดันภายในเท่ากับ 7.5×10^2 ทอร์
 - ปิด สปีดวาล์ว เปิด butterfly valve ทำการดูดอากาศออกจากห้องสุญญากาศ โดยโยกวาล์วไปที่ตำแหน่ง backing จนกระทั่งความดันลดลงเป็น 3×10^{-5} ทอร์ (สูบล้อออกครั้งที่ 2)
 - ปิด butterfly valve และ เปิด สปีดวาล์ว เพื่อป้อนอาร์กอนเข้าสู่ห้องสุญญากาศจนได้ ความดันภายในเท่ากับ 7.5×10^2 ทอร์
 - ปิด สปีดวาล์ว เปิด butterfly valve ทำการดูดอากาศออกจากห้องสุญญากาศ โดยโยกวาล์วไปที่ตำแหน่ง backing จนกระทั่งความดันลดลงเป็น 3×10^{-5} ทอร์ (สูบล้อออกครั้งที่ 3) เสร็จขั้นตอนการฟลัชด้วยอาร์กอนเท่านั้น ขั้นตอนต่อไปเป็นการเริ่มจุดพลาสมาขึ้นมา



(ก.)

(ข.)

รูปที่ 3.6 (ก) ภาพแสดง Regulator valve และวาล์วหัวถังก๊าซ

(ข) ภาพแสดง power supply

17. เปิดสปีดวาล์วเพื่อป้อนอาร์กอนอีกครั้งจนได้ความดันภายในมีค่าประมาณ 3×10^{-5} ทอร์
18. เปิดสวิตช์แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง
19. กดปุ่ม ON ที่ตัวแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง (ปุ่ม cut on เป็นปุ่มสี่เหลี่ยมเล็กๆ ที่อยู่ทางขวามือสุดของเครื่อง)



(ก.)

(ข.)

รูปที่ 3.7 (ก) ภาพแสดงสวิตช์ของ power supply

(ข) ภาพแสดงปุ่ม on เพื่อให้เครื่องเริ่มทำงาน

20. หมุนปุ่มเพิ่มแรงดันไฟฟ้าไปเรื่อยๆ ช้าจนกระทั่ง พลาสมาติด (เมื่อพลาสมาติดจะเห็นเป็นแสงสีม่วงอยู่ในห้องสุญญากาศ) ช่วงที่พลาสมาติดในครั้งแรกชัตเตอร์จะต้องปิดอยู่เพราะเป็นช่วงที่พลาสมาสีสภาวะยังไม่เหมาะสม สำหรับการเคลือบฟิล์มบางบนฐานรอง เช่น แรงดันไฟฟ้ายังไม่อยู่ในช่วงที่ต้องการ ความดันก๊าซยังไม่นิ่ง และผิวหน้าของเป้ายังไม่สะอาดพอ หากเคลือบบนฐานรองที่วางไว้จะส่งผลให้ฟิล์มที่ได้มีคุณภาพไม่ดี มีความต้านทานสูง ดังนั้นเมื่อพลาสมาติดในครั้งแรกจึงต้องนำชัตเตอร์มาบังไว้เมื่อพลาสมา มีพลังงานและสภาวะที่เหมาะสมจึงเปิดชัตเตอร์ออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 ภาพแสดงพลาสมาที่ติดในครั้งแรก

21. เมื่อพลาสมาติดให้เริ่มป้อนออกซิเจนเข้าสู่ในห้องสุญญากาศ เปิดวาล์วที่หัวถังออกซิเจน เปิดวาล์วเรกูเลเตอร์ (Regulator) และเปิด สปีดวาล์ว (speedy valve) เพื่อป้อนออกซิเจนเข้าสู่ห้องสุญญากาศ โดยป้อนออกซิเจนที่อัตราการไหลของออกซิเจนค่าต่างๆ คือ 0.3 ,0.5 ,0.8 ,1.2 ,1.5 ,1.8 และ 6 sccm
22. เพิ่มแรงดันไฟฟ้าขึ้นตามที่ต้องการ ซึ่งโดยทั่วไปใช้อยู่ในช่วง 350-500 โวลต์ แปรตามค่าสปีดเตอริงยิลด์ของวัสดุแต่ละชนิด (สำหรับทองแดงจะอยู่ที่ 360-370 โวลต์) จากนั้นปรับความดันก๊าซให้คงที่หรือตามที่ต้องการ แรงดันไฟฟ้าหากมากเกินไปจะไม่ส่งผลดีต่อฟิล์มบางที่เคลือบบนฐานรองเนื่องจากอะตอมของเป้าบางส่วนชนกันเองจนไปตกบนฐานรอง ส่วนกระแสที่แปรไปตามปริมาณของพลาสมาโดยอัตโนมัติ ค่ากระแสที่เครื่องแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงอ่านได้นั้นบอกถึงอัตราการเคลือบฟิล์มที่เคลือบลงบนฐานรองว่ามากหรือน้อย



(ก.)

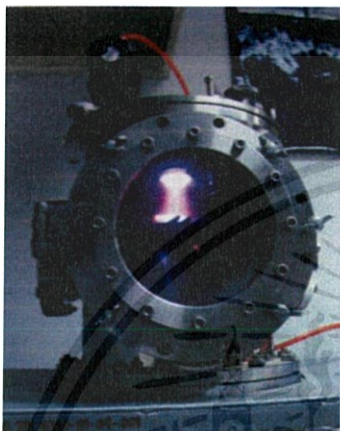
(ข.)

รูปที่ 3.9 (ก) ภาพแสดงวาล์วเข็ม (needle valve) ใช้สำหรับปรับความดันของก๊าซอาร์กอนใน chamber แบบละเอียด

(ข) ภาพแสดงท่อก๊าซ Ar และท่อน้ำหล่อเย็นสำหรับ target

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

23. เมื่อความดันก๊าซและแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ค่าที่ต้องการจึงจับเวลาไปอีก 15 นาที เพื่อให้เกิดการ สเป็คเตอริง จนกระทั่งผิวหน้าของเป้าสะอาดเรียกขั้นตอนนี้ว่าการเตรียมตัวสเป็คเตอริง (presputtering) หลังจากนั้นหมุนเปิดชัตเตอร์ออกเพื่อเริ่มการเคลือบฟิล์มตามเวลาที่ต้องการ ซึ่งต้องจดค่าต่างๆที่ใช้เอาไว้สำหรับเป็นตัวเลขอ้างอิง ตัวอย่าง เช่นการเคลือบฟิล์มบางทองแดงจะใช้ค่าต่างๆดังนี้



แรงดันไฟฟ้า : 360 โวลต์

กระแส : 0.05 แอมป์

ความดันที่พลาสมาคงสภาพอยู่ได้ : 5×10^{-3} ทอร์

ระยะห่างระหว่างเป้ากับฐานรองรับ : 5-10 เซนติเมตร

เวลาในการเคลือบฟิล์ม : 30 นาที

รูปที่ 3.10 ภาพแสดงการเริ่มเคลือบฟิล์ม

24. ในระหว่างการเคลือบฟิล์มจะต้องพยายามปรับค่าแรงดันไฟฟ้าและความดันก๊าซในห้องสุญญากาศให้คงที่ (ปรับความดันก๊าซอาร์กอนผ่าน mass flow meter เท่านั้น) เมื่อเคลือบฟิล์มจนได้ความหนาตามที่ต้องการแล้วให้หมุนชัตเตอร์มาที่ตำแหน่งปิดเพื่อป้องกันการเคลือบฟิล์ม หมุนแรงดันไฟฟ้าลงจนสุด กดปุ่มสีเหลี่ยมเล็กๆทางขวาของเครื่องเพื่อหยุดการทำงานของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงแล้วกดปิดสวิตช์สีดำ
25. หยุดการป้อนอาร์กอนและออกซิเจนโดยปิดสปีดวาล์วตามด้วยเรกูลเตอร์วาล์ว และสุดท้ายให้ปิดวาล์วหัวถังก๊าซ
26. ปิดวาล์วผีเสื้อ (ตั้งคั้นโยกเข้าตัว)
27. โยกสวิตช์ตรงตำแหน่ง DIFFSTAK ON ลง เพื่อหยุดการจ่ายไฟฟ้าให้กับขดลวดความร้อนที่ปัมไอฟุ้งกระจาย
28. ปิดสวิตช์ตรงตำแหน่ง TIC POWER ON ไปที่ตำแหน่ง OFF เพื่อปิดมาตรวัดความดันทั้งหมด

29. รอประมาณ 20 นาที เพื่อให้ฐานรองมีอุณหภูมิเย็นลง จากนั้นโยกสวิตช์ WATER PUMP ON ลงเพื่อทำการหยุดจ่ายน้ำเย็นให้กับระบบ แล้วจึงปิดปั๊มโรตารี จากนั้นหมุนคลายน็อตทางปลาที่ฝาหน้าห้องสุญญากาศออกให้หมด (ที่ต้องคลายน็อตออกก่อนเนื่องจากว่าเมื่อเปิดลิควาล์ว (leak valve) เพื่อปล่อยอากาศเข้าห้องสุญญากาศ ฝาหน้าจะถูกดันออกหากไม่ถอดน็อตทางปลาออกก่อน เกลียวน็อตจะถูกดันจนแน่นทำให้หมุนน็อตออกยากในภายหลัง) หมุนลิควาล์วเพื่อปล่อยอากาศเข้าห้องสุญญากาศอย่างช้าๆแล้วจะได้ยินเสียงอากาศไหลเข้าห้องสุญญากาศสักครู่หนึ่งฝาหน้าจะเด็นออกมาเอง
30. เปิดฝาหน้าออกนำตัวอย่างที่เคลือบเสร็จแล้วออกมาซึ่งมวลแผ่นรองรับหลังการเคลือบ (ทำเมื่อต้องการหาอัตราการเคลือบฟิล์ม) เช็ดทำความสะอาดภายในและฝาหน้า จากนั้นปิดให้เรียบร้อย

3.7 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) และฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดค่าความต้านทานแผ่นด้วยวิธีสองขั้วเชิงเส้นและวัดค่าพลังงานกระตุ้นโดยการศึกษาค่าความต้านทานแผ่นที่เป็นฟังก์ชันกับค่าอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิ 25-150 องศาเซลเซียส รวมทั้งวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 100-300 เคลวิน เพื่อศึกษากลไกการนำไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) และฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O

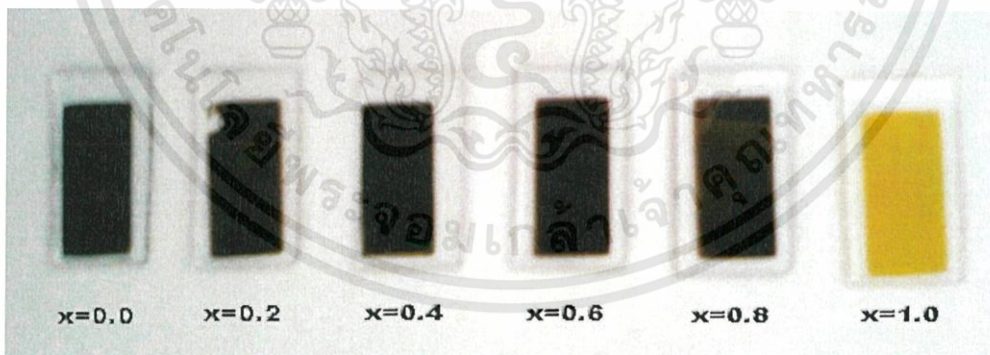
บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองที่ได้ทำการเตรียมและศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสตรงที่อุณหภูมิต่ำของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีสและเมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส รวมทั้งยังได้ทำการเตรียมและศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง Cu_2O ที่เตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง

4.1 ผลการศึกษาฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส

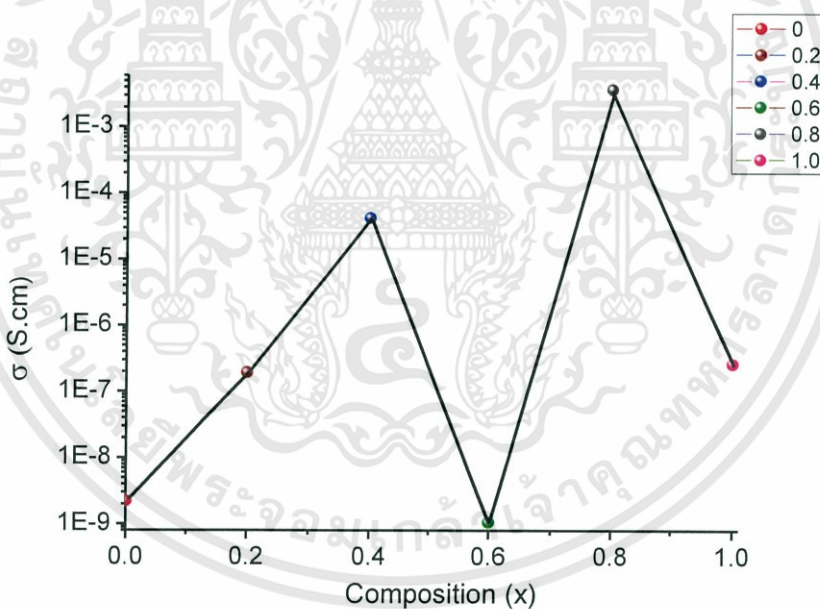
ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส ยึดติดแน่นดีกับแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ในกรณีเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของธาตุ S มีค่าเท่ากับ 0.0 ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe จะมีสีดำ แต่เมื่อเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) ของธาตุ S มีค่าเพิ่มขึ้นสีดำจะจางลงจนกลายเป็นสีเหลือง เมื่อเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) มีค่าเท่ากับ 1.0



รูปที่ 4.1 แสดงฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส

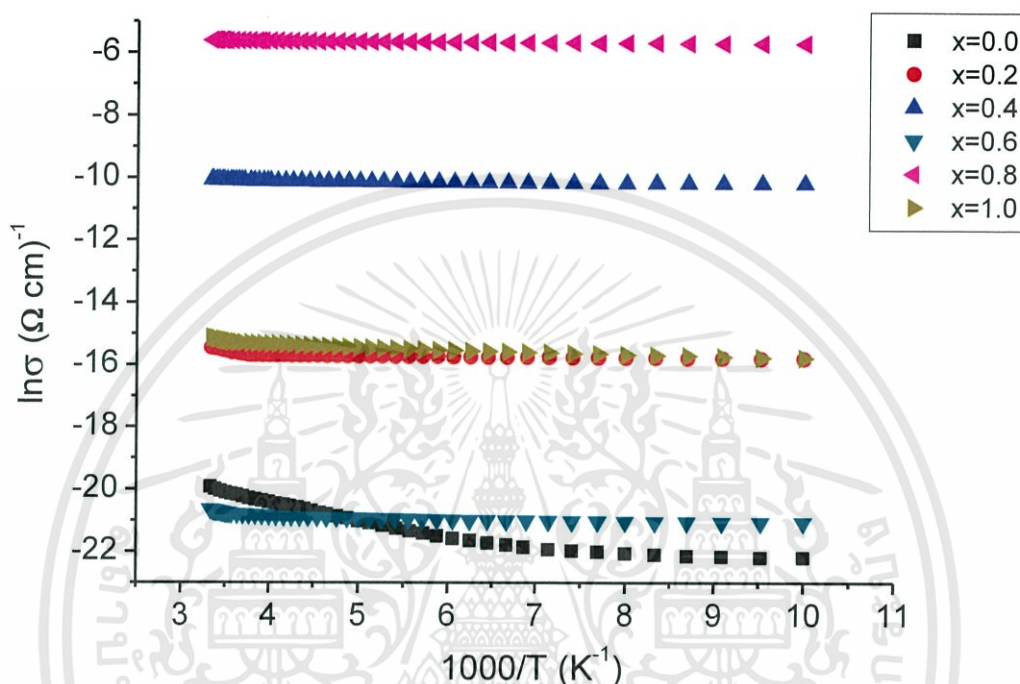
4.2 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 300-100 เคลวิน ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีสล

จากการวัดสนามไฟฟ้า (σ) ที่อุณหภูมิของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ที่เศษส่วนโดยโมล (x) อยู่ในช่วง 0 ถึง 1.0 พบว่าสภาพนำไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเศษส่วนโดยโมล (x) เพิ่มจาก 0 ถึง 0.4 จากนั้นสภาพนำไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็วจนมีค่าต่ำสุด ที่เศษส่วนโดยโมลเท่ากับ 0.6 แล้วสนามไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุด ที่เศษส่วนโดยโมล (x) เท่ากับ 0.8 จากนั้นสภาพนำไฟฟ้าจะกลับมีค่าลดลงอีกครั้งหนึ่งเมื่อเศษส่วนโดยโมลเท่ากับ 1.0 จากการตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าด้วยความร้อน พบว่าฟิล์มของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ที่เศษส่วนโดยโมลอยู่ในช่วง 0-0.4 มีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นแบบพี โดยพาหะข้างมากคือโฮล ส่วนชนิดการนำไฟฟ้าเป็นแบบเอ็น เมื่อเศษส่วนโดยโมลมีค่าตั้งแต่ 0.8 ขึ้นไป ส่วนที่เศษส่วนโดยโมลเท่ากับ 0.6 เป็นค่าที่เกิดการเปลี่ยนแปลงชนิดการนำไฟฟ้าจากชนิดพีเป็นชนิดเอ็น พาหะข้างมากเปลี่ยนจากโฮลเป็นอิเล็กตรอนอิสระ

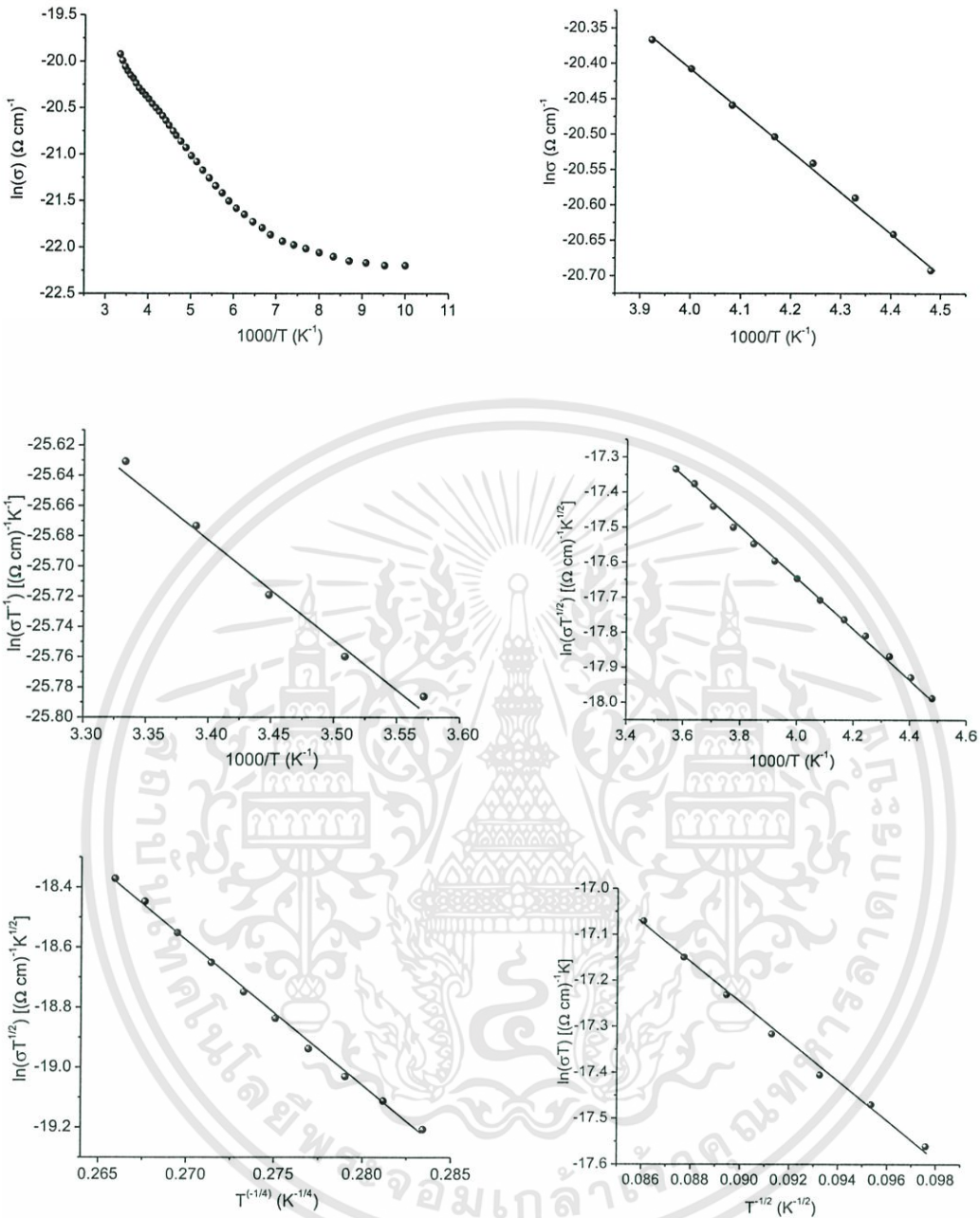


รูปที่ 4.2 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องกับเศษส่วนโดยโมล (x) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีสล

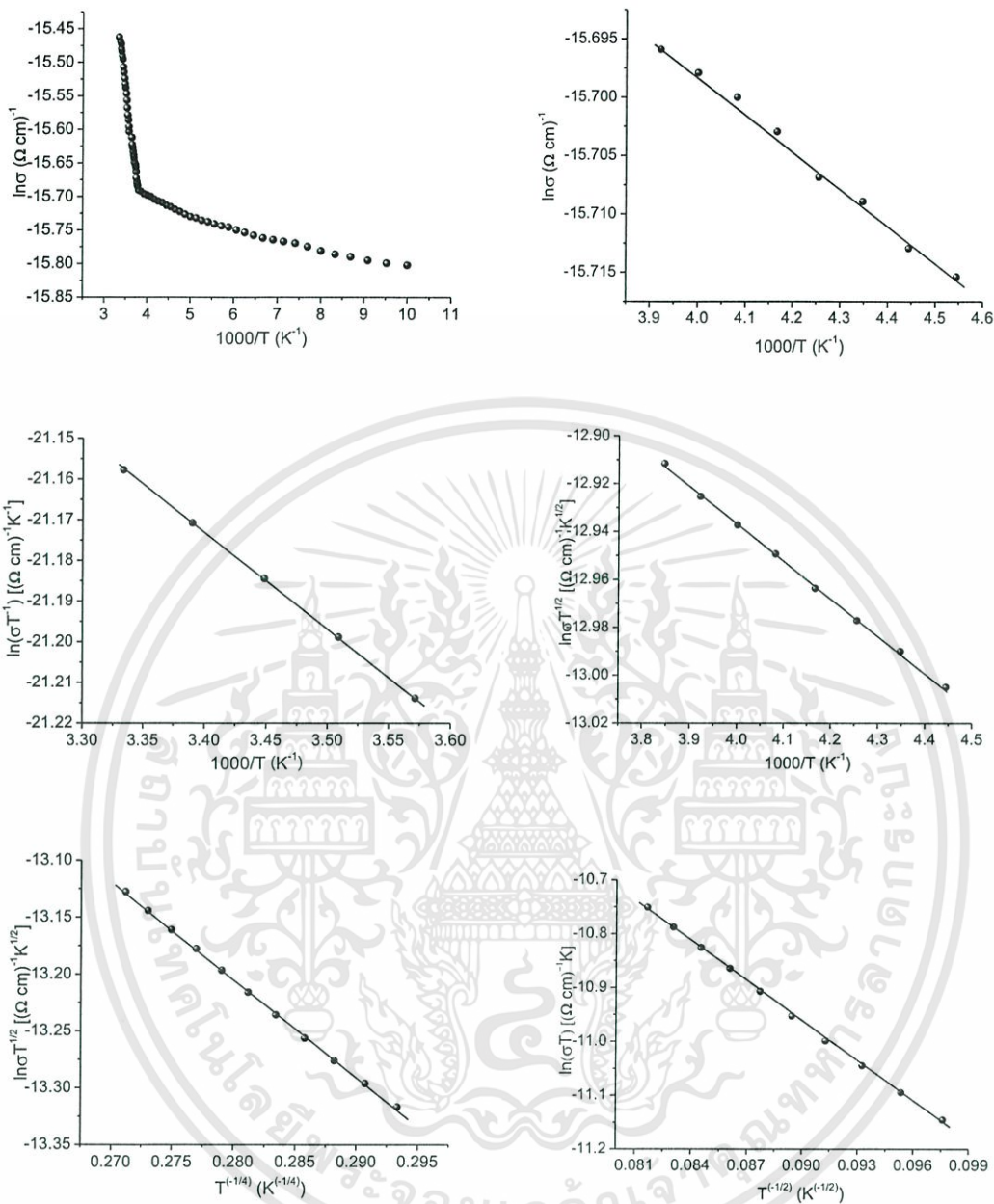
4.2.1 ผลการศึกษาค่าความต้านทานไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 300-100 เคลวิน ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีสล



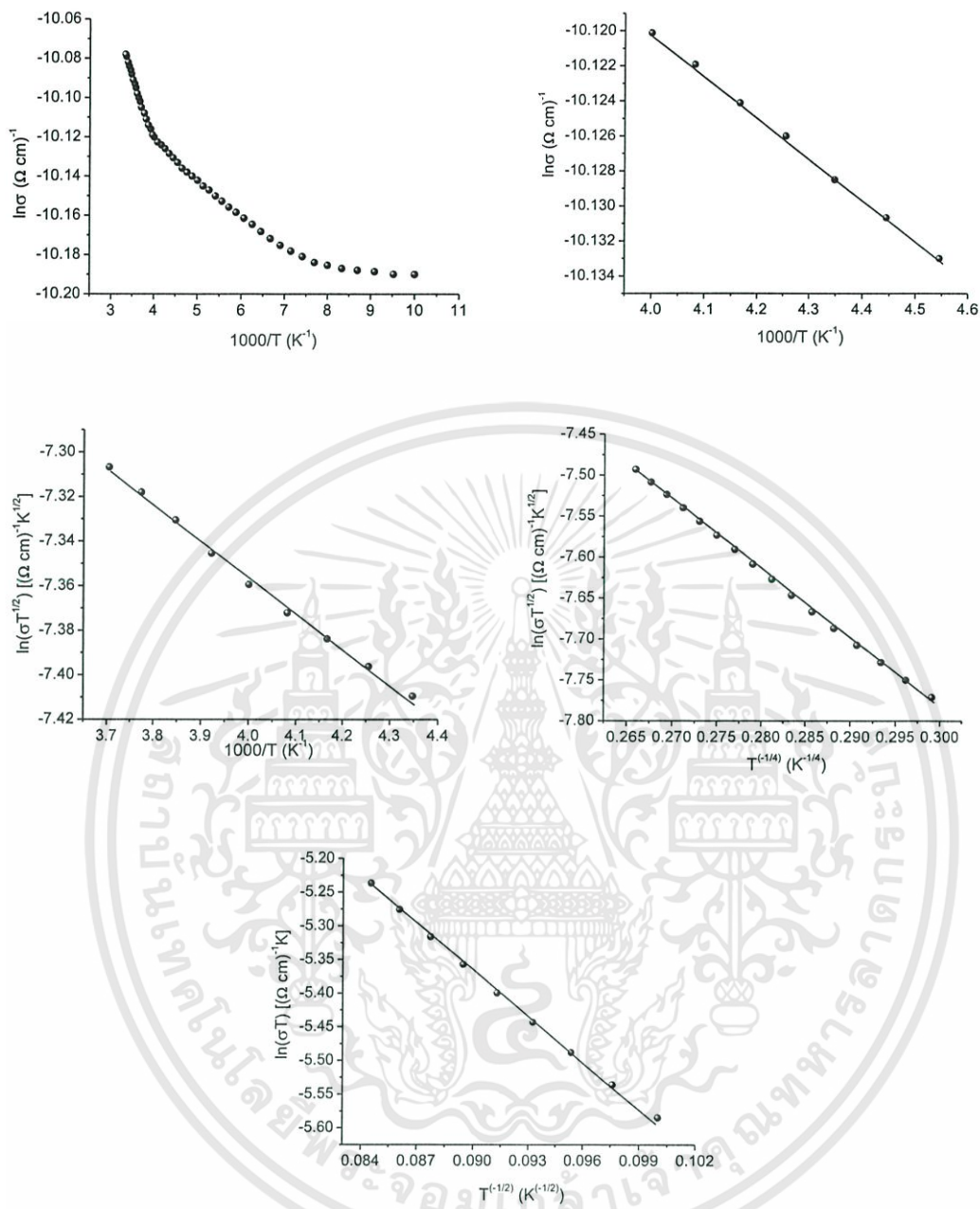
รูปที่ 4.3 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln \sigma$ กับ ค่า $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีสล



รูปที่ 4.4 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln \sigma$ กับค่า $\frac{1000}{T}$, ค่า $\ln(\sigma T^2)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ค่า $\ln(\sigma T^{-1})$ กับค่า $\frac{1000}{T}$, ค่า $\ln(\sigma T^2)$ กับค่า $T^{-\frac{1}{4}}$, ค่า $\ln(\sigma T)$ กับค่า $T^{-\frac{1}{2}}$ ตามลำดับ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ เมื่อ ($x=0.0$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส

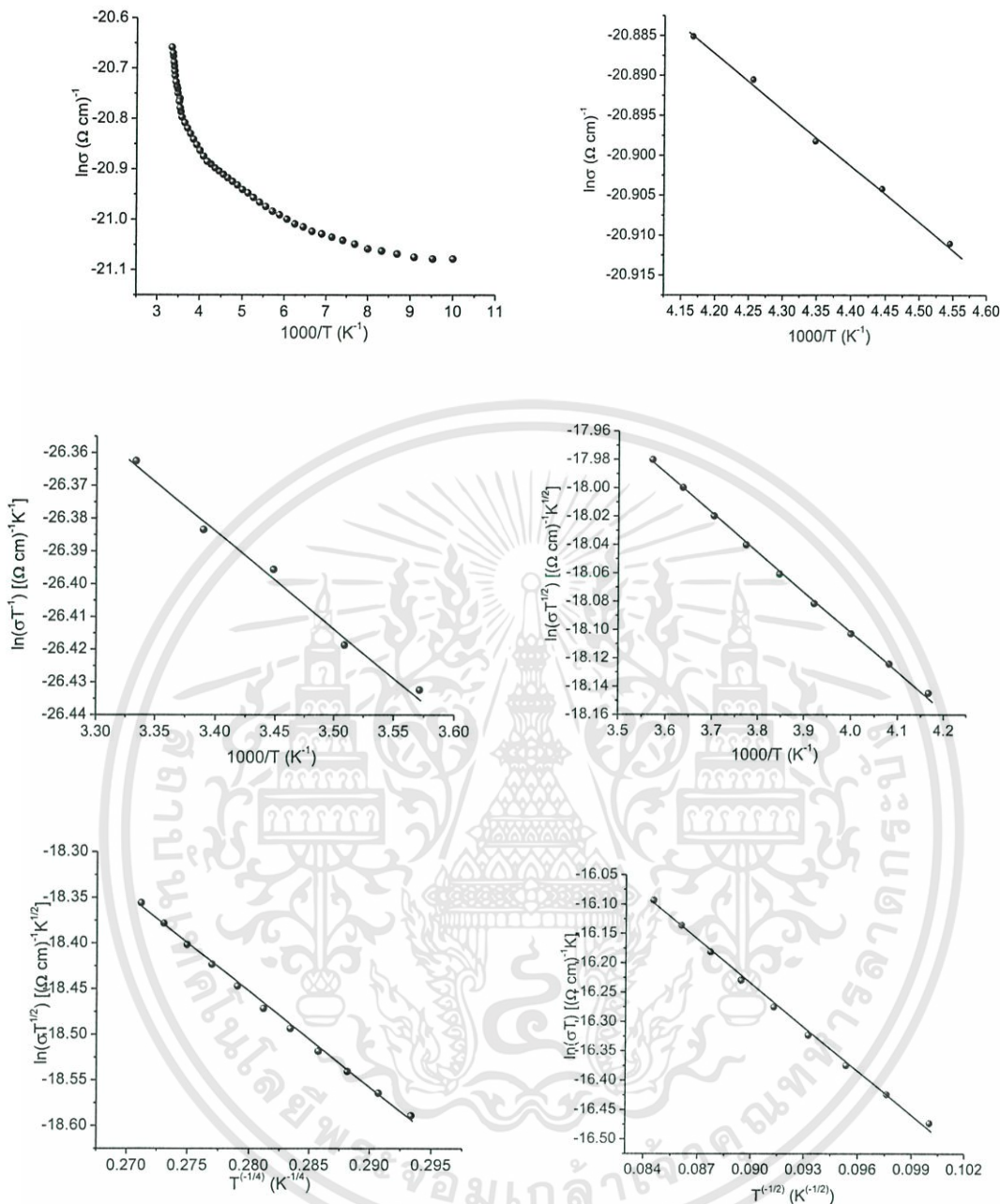


รูปที่ 4.5 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln\sigma$ กับค่า $\frac{1000}{T}$, ค่า $\ln(\sigma T^{\frac{1}{2}})$ กับ $\frac{1000}{T}$ ค่า $\ln(\sigma T^{-1})$ กับค่า $\frac{1000}{T}$, ค่า $\ln(\sigma T^{\frac{1}{2}})$ กับค่า $T^{-\frac{1}{4}}$, ค่า $\ln(\sigma T)$ กับค่า $T^{-\frac{1}{2}}$ ตามลำดับ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} เมื่อ ($x=0.2$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส

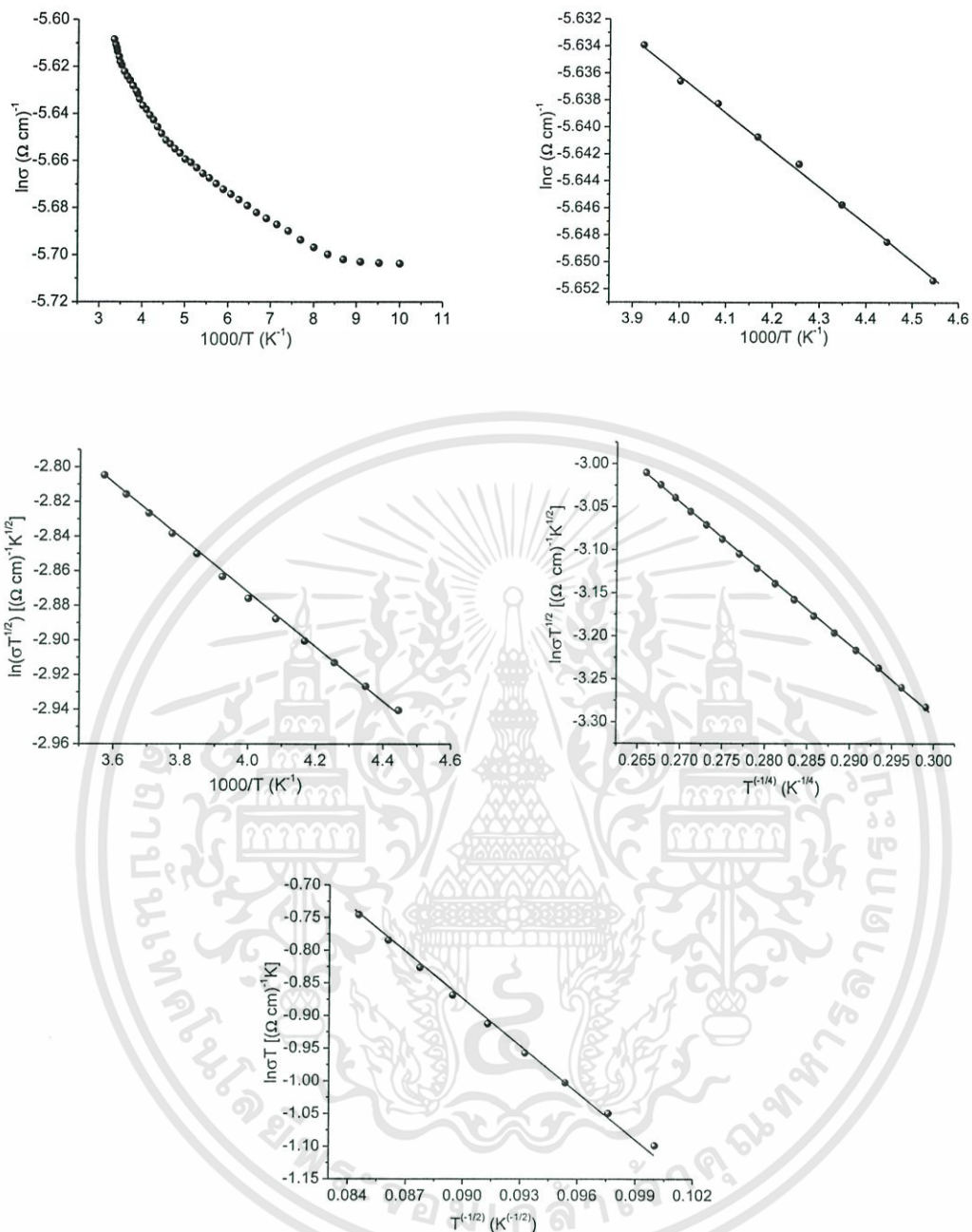


รูปที่ 4.6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln \sigma$ กับค่า $\frac{1000}{T}$, ค่า $\ln(\sigma T^2)$ กับ $\frac{1000}{T}$

ค่า $\ln(\sigma T^{\frac{1}{2}})$ กับค่า $T^{-\frac{1}{4}}$, ค่า $\ln(\sigma T)$ กับค่า $T^{-\frac{1}{2}}$ ตามลำดับ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ เมื่อ ($x=0.4$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีสล



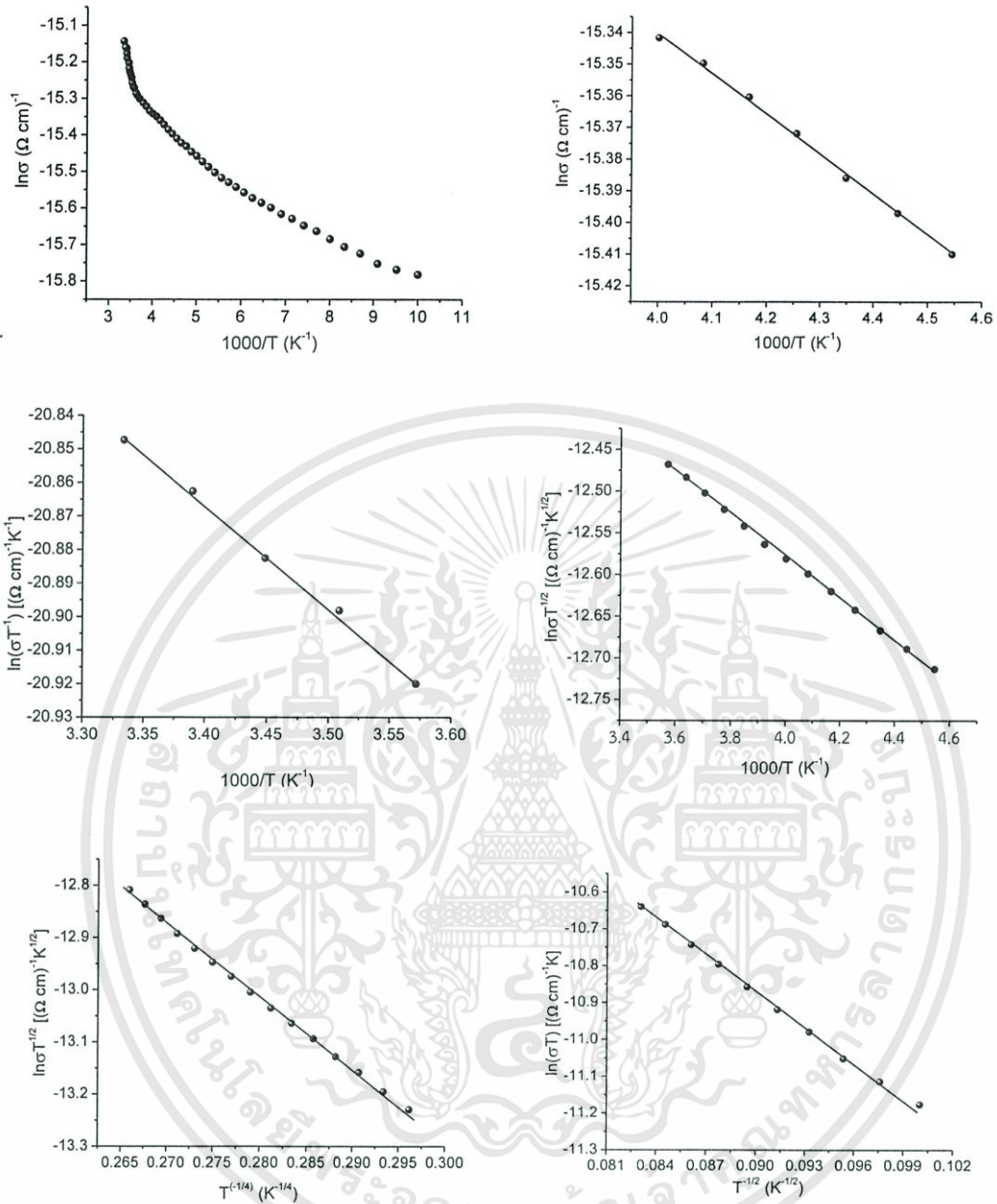
รูปที่ 4.7 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln\sigma$ กับค่า $\frac{1000}{T}$, ค่า $\ln(\sigma T^2)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ค่า $\ln(\sigma T^{-1})$ กับค่า $\frac{1000}{T}$, ค่า $\ln(\sigma T^2)$ กับค่า $T^{-1/4}$, ค่า $\ln(\sigma T)$ กับค่า $T^{-1/2}$ ตามลำดับ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} เมื่อ (x=0.6) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีสล



รูปที่ 4.8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln\sigma$ กับค่า $\frac{1000}{T}$, ค่า $\ln(\sigma T^2)$ กับ $\frac{1000}{T}$

ค่า $\ln(\sigma T^2)$ กับค่า $T^{-\frac{1}{4}}$, ค่า $\ln(\sigma T)$ กับค่า $T^{-\frac{1}{2}}$ ตามลำดับ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ เมื่อ ($x=0.8$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีสล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln \sigma$ กับค่า $\frac{1000}{T}$, ค่า $\ln(\sigma T^2)$ กับ $\frac{1000}{T}$

ค่า $\ln(\sigma T^{-1})$ กับค่า $\frac{1000}{T}$, ค่า $\ln(\sigma T^{\frac{1}{2}})$ กับค่า $T^{-\frac{1}{4}}$, ค่า $\ln(\sigma T)$ กับค่า $T^{-\frac{1}{2}}$

ตามลำดับ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ เมื่อ ($x=1.0$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนیل

วิธีการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าในที่นี้จะใช้ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} เมื่อ ($x = 0$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีก นำมาใช้เป็นตัวอย่างในการคำนวณ โดยเริ่มจากแบบจำลองอะตอมของซีโตที่อุณหภูมิสูง ซึ่งเป็นกรณี $N_a < N_a^*$ เกรนของผลึกจะเป็นสถานะพร่องพาหะทั้งหมด (entirely depleted) เราสามารถคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) ได้จากกราฟความสัมพันธ์

$$\sigma T^{-1} = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right)$$

$$\ln(\sigma T^{-1}) = -\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T}\right) + \ln \sigma_0$$

$$\ln(\sigma T^{-1}) = -\frac{E_a}{1000k} \left(\frac{1000}{T}\right) + \ln \sigma_0$$

-การหาค่าพลังงานกระตุ้น (E_a)

$$\text{ความชัน} = -\frac{E_a}{1000k}$$

แทนค่า

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

$$E_a = \frac{(1000)(1.38 \times 10^{-23})(-0.666)}{1.6 \times 10^{-19}} = -0.057 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

-การหาค่าเพอร์มิตติวิตี (ϵ_s)

$$\epsilon_s = \epsilon_r \epsilon_0$$

ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ_r) ของ CdS และ CdTe มีค่าเท่ากับ 9.38 และ 10.2 ตามลำดับ

แทนค่า

$$\epsilon_s = (9.38)(8.85 \times 10^{-14})$$

$$\epsilon_s = 8.3013 \times 10^{-13} \text{ ฟารัดต่อตารางเซนติเมตร}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-การหาค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ (N_a)

$$E_b = \frac{e^2 L^2 N_a}{8\epsilon_s}$$

$$N_a = \frac{8\epsilon_s E_b}{e^2 L^2}$$

แทนค่า $N_a = \frac{8(8.3013 \times 10^{-13})(0.057)(1.6 \times 10^{-19})}{(1.6 \times 10^{-19})^2 (77.7 \times 10^{-7})^2} = 3.94 \times 10^{16}$ ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

-การหาค่าระดับพลังงานของกึ่งตัวนำ (E_t)

$$E_a = \frac{1}{2} E_g - E_t$$

$$E_t = \frac{1}{2} E_g - E_a$$

แทนค่า $E_t = \frac{1}{2}(1.51) - 0.057 = 0.812$ อิเล็กตรอนโวลต์

สำหรับแบบจำลองอะตอมของซีโตที่อุณหภูมิปานกลาง เราสามารถที่จะคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) ได้จากกราฟความสัมพันธ์

$$\sigma T^{\frac{1}{2}} = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right)$$

$$\ln\left(\sigma T^{\frac{1}{2}}\right) = -\frac{E_a}{k}\left(\frac{1}{T}\right) + \ln\sigma_0$$

$$\ln\left(\sigma T^{\frac{1}{2}}\right) = -\frac{E_a}{1000k}\left(\frac{1000}{T}\right) + \ln\sigma_0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-การหาค่าพลังงานกระตุ้น (E_a)

$$\text{ความชัน} = -\frac{E_a}{1000k}$$

แทนค่า

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

$$E_a = \frac{(1000)(1.38 \times 10^{-23})(-0.7047)}{1.6 \times 10^{-19}} = -0.0608 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

-การหาค่าเพอร์มิตติวิตี (ϵ_s)

$$\epsilon_s = \epsilon_r \epsilon_0$$

ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ϵ_r) ของ CdS และ CdTe มีค่าเท่ากับ 9.38 และ 10.2 ตามลำดับ

แทนค่า

$$\epsilon_s = (9.38)(8.85 \times 10^{-14})$$

$$\epsilon_s = 8.3013 \times 10^{-13} \text{ ฟารัดต่อตารางเซนติเมตร}$$

-การหาค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ (N_a)

$$E_b = \frac{e^2 L^2 N_a}{8 \epsilon_s}$$

$$N_a = \frac{8 \epsilon_s E_b}{e^2 L^2}$$

$$\text{แทนค่า } N_a = \frac{8(8.3013 \times 10^{-13})(0.0608)(1.6 \times 10^{-19})}{(1.6 \times 10^{-19})^2 (77.7 \times 10^{-7})^2} = 4.18 \times 10^{16} \text{ ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-การหาค่าความยาวเดอบาย (L_D)

$$L_D = \left[\frac{kT\epsilon_s}{e^2 N_a} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\text{แทนค่า } L_D = \left[\frac{(1.38 \times 10^{-23})(250)(8.3013 \times 10^{-13})}{(1.6 \times 10^{-19})^2 (4.18 \times 10^{16})} \right]^{\frac{1}{2}} = 1.64 \times 10^{-6} \text{ เซนติเมตร}$$

-การหาค่าระดับพลังงานของกึ่งตัวนำ (E_t)

$$E_a = \frac{1}{2} E_g - E_t$$

$$E_t = \frac{1}{2} E_g - E_a$$

$$\text{แทนค่า } E_t = \frac{1}{2}(1.51) - 0.0608 = 0.694 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

-การหาค่าความหนาแน่นของกึ่งตัวนำ (N_t)

$$\sigma = \left[\frac{L^2 e^2 N_v N_a v_c}{2kT(N_t - LN_a)} \right] \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right)$$

$$N_t = \left[\frac{L^2 e^2 N_v N_a v_c}{2kT\sigma} \right] \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) + LN_a$$

สามารถหาค่าความเร็วเฉลี่ยของพาหะ (v_c) ได้จาก

$$v_c = \left[\frac{kT}{2\pi m^*} \right]^{\frac{1}{2}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{แทนค่า } v_c = \left[\frac{(1.38 \times 10^{-23})(250)}{2\pi(0.165 \times 9.1 \times 10^{-31})} \right]^{\frac{1}{2}} = 6.08 \times 10^4 \text{ เซนติเมตรต่อวินาที}$$

สามารถหาค่ายังผลของความหนาแน่นของสถานะทางพลังงานที่แถบวาเลนซ์ (N_v) ได้จาก

$$N_v = 2 \left[\frac{2\pi m^* kT}{h^2} \right]^{\frac{3}{2}}$$

มวลยังผลของ CdS และ CdTe มีค่าเท่ากับ $0.165m_0$ และ $0.35m_0$ ตามลำดับ

$$\text{แทนค่า } N_v = 2 \left[\frac{2\pi(0.165 \times 9.1 \times 10^{-31}) \times 1.38 \times 10^{-23} \times 250}{(6.63 \times 10^{-34})^2} \right]^{\frac{3}{2}}$$

$$N_v = 1.8032 \times 10^{24} \text{ ต่อตารางเซนติเมตร}$$

ดังนั้น

$$N_t = \left[\frac{L^2 e^2 N_v N_a v_c}{2kT\sigma} \right] \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) + LN_a$$

$$N_t = \left[\frac{(77.7 \times 10^{-7})^2 (1.6 \times 10^{-19})^2 (1.8032 \times 10^{24}) (4.18 \times 10^{16}) (6.0829 \times 10^4)}{2 \left(\frac{1.38 \times 10^{-23}}{1.6 \times 10^{-19}} \right) (250) (1.3714 \times 10^{-9})} \right] \times$$

$$\exp\left(-\frac{0.0608 \times 1.6 \times 10^{-19}}{1.38 \times 10^{-23} \times 250}\right) + (77.7 \times 10^{-7} \times 4.18 \times 10^{16})$$

$$= 3.25 \times 10^{11} \text{ ต่อตารางเซนติเมตร}$$

สำหรับแบบจำลองอะตอมแบบการกระโดดระหว่างสถานะพลังงานท้องถิ่นในระยะไม่คงที่

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆสามารถคำนวณได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(\sigma T^{\frac{1}{2}})$ กับ ค่า $T^{-\frac{1}{4}}$ จาก ค่าความชันของกราฟเส้นตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การหาค่าองศาของความร้อนไม่เป็นระเบียบ (T_0) และ ค่าแฟกเตอร์หน้าพจน์เอ็กซีโพเนนเชียล (σ_0)

$$m = -T^{\frac{1}{4}} = -48.606$$

$$T_0 = (48.606)^4 = 5.58 \times 10^6 \text{ เคลวิน}$$

$$c = \ln \sigma_0 = -5.4558$$

$$\sigma_0 = e^{-5.4558} = 4.27 \times 10^{-3} \text{ ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร}$$

- การหาค่าความหนาแน่นของสถานะถูกจำกัดเฉพาะที่ที่ระดับพลังงานเฟอร์มิ [$N(E_F)$] โดยที่

$$T_0 = \frac{18\alpha^3}{kN(E_F)} \quad \text{เมื่อ } \alpha = 1.24 \times 10^7 \text{ ต่อเซนติเมตร}$$

$$N(E_F) = \frac{18\alpha^3}{kT_0}$$

$$= \frac{18\alpha^3}{\frac{k}{q} T_0} = \frac{18(1.24 \times 10^7)^3}{\frac{1.38 \times 10^{-23}}{1.6 \times 10^{-19}} T_0} = \frac{(18)(1.24 \times 10^7)^3}{8.625 \times 10^{-5} T_0}$$

$$N(E_F) = \frac{3.98 \times 10^{26}}{T_0}$$

$$= \frac{3.98 \times 10^{26}}{5.58 \times 10^6}$$

$$= 7.13 \times 10^{19} \text{ ต่ออิเล็กตรอนโวลต์}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การหาค่าระยะทางเฉลี่ยของการกระโดด ($R_{\text{hop,Mott}}$)

โดยที่

$$R_{\text{hop,Mott}} = \left[\frac{9\xi_{\text{Mott}}}{8\pi k_B \text{TN}(E_F)} \right]^{\frac{1}{4}}$$

$$R_{\text{hop,Mott}} = \left[\frac{9}{8\pi\alpha \left[\frac{k_B}{q} \right] \text{TN}(E_F)} \right]^{\frac{1}{4}}$$

$$R_{\text{hop,Mott}} = \frac{0.135}{(\text{TN}(E_F))^{\frac{1}{4}}} \quad \text{เมื่อ } T=160 \text{ เคลวิน}$$

$$= \frac{0.135}{(160 \times 7.13 \times 10^{19})^{\frac{1}{4}}}$$

$$= 4.13 \times 10^{-7} \text{ เซนติเมตร}$$

- การหาค่าพลังงานเฉลี่ยของการก้าวกระโดด ($W_{\text{hop,Mott}}$)

โดยที่

$$W_{\text{hop,Mott}} = \frac{3}{4\pi R_{\text{hop,Mott}}^3 N(E_F)}$$

$$= \frac{3}{4\pi (4.13 \times 10^{-7})^3 \times (7.13 \times 10^{19})}$$

$$= 0.0475 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

และ

$$\alpha R_{\text{hop,Mott}} = (1.24 \times 10^7)(4.13 \times 10^{-7})$$

$$\alpha R_{\text{hop,Mott}} = 5.1212$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ

$$\frac{R_{\text{hop,Mott}}}{\xi_{\text{Mott}}} > 1$$

อุณหภูมิทรานซิชันจากกลไก Mott-VRH ไปเป็น ES-VRH จะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$T_{C2} = 16 \left(\frac{T_{0,ES}^2}{T_{0,Mott}} \right)$$

$$T_{C2} = 16 \left(\frac{(1801.83)^2}{5.58 \times 10^6} \right)$$

$$T_{C2} = 9.31$$

ในกรณีที่อุณหภูมิลดลงต่ำสุด กลไกการนำไฟฟ้าจะเป็นแบบกระโดดในระยะไม่คงที่ของเอพรอส-ชโลฟสกี (ES-VRH) ซึ่งจะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$\sigma = \sigma_{0,ES} T^{-1} \exp \left[- \left(\frac{T_{0,ES}}{T} \right)^{\frac{1}{2}} \right]$$

$$\ln(\sigma T) = - \left(\frac{T_{0,ES}}{T} \right)^{\frac{1}{2}} + \ln \sigma_{0,ES}$$

โดยที่องค์ความไม่เป็นระเบียบของ ES ($T_{0,ES}$) คือ

$$T_{0,ES} = \frac{2.8e^2}{k_B \xi_{ES} \epsilon_s}$$

$$T_{0,ES} = \frac{2.8e^2}{k_B \xi_{ES} \epsilon_s}$$

$$\xi_{ES} = \frac{2.8e^2}{k_B T_{0,ES} \epsilon_s}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\xi_{ES} = \frac{2.8(1.6 \times 10^{-19})^2}{(1.38 \times 10^{-23})(1801.83)(10.2 \times 8.85 \times 10^{-14})}$$

$$\xi_{ES} = 3.21 \times 10^{-6} \text{ cm}$$

ค่า $T_{0,ES}$ สามารถหาได้จากความชันของสมการที่ (2.43)

$$T_{0,ES} = (-42.448)^2 = 1801.83 \quad \text{เคลวิน}$$

ส่วนค่า $\sigma_{0,ES}$ สามารถหาได้จากจุดตัดแกน y ดังนั้น ξ_{ES} สามารถหาได้จากสมการที่ (2.44) ส่วนระยะทางเฉลี่ยของการกระโดด ($R_{hop,ES}$) จะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$\frac{R_{hop,ES}}{\xi_{ES}} = \frac{1}{4} \left(\frac{T_{0,ES}}{T} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\frac{R_{hop,ES}}{\xi_{ES}} = \frac{1}{4} \left(\frac{1801.83}{110} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\frac{R_{hop,ES}}{\xi_{ES}} = 1.01$$

สำหรับพลังงานเฉลี่ยของการกระโดด ($W_{hop,ES}$) คือ

$$W_{hop,ES} = \frac{1}{2} k_B T \left(\frac{T_{0,ES}}{T} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$W_{hop,ES} = \frac{1}{2} \left(\frac{1.38 \times 10^{-23}}{1.6 \times 10^{-19}} \right) (110) \left(\frac{1801.83}{110} \right)^{\frac{1}{2}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$W_{hop,ES} = 0.0192eV$$

เนื่องจากที่ระดับอุณหภูมิต่ำมากนี้อิเล็กตรอนในสถานะพลังงานท้องถิ่นมีอันตรกิริยาต่อกัน ส่งผลให้ความหนาแน่นของสถานะพลังงานที่ระดับเฟอร์มิแยกออกจากกันกลายเป็นช่องว่าง เรียกว่า ช่องว่างของคูลอมบ์ (Coulomb gap) จะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$\Delta_C = \frac{e^2 N_0^{\frac{1}{2}} (E_F)}{\epsilon_s^{\frac{3}{2}}}$$

หรือ

$$\Delta_C = k_B \left(\frac{T_{0,ES}}{T_{0,Mott}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\Delta_C = \left(\frac{1.38 \times 10^{-23}}{1.6 \times 10^{-19}} \right) \left(\frac{1801.83}{5.58 \times 10^6} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\Delta_C = 1.55 \times 10^{-6} eV$$

การตรวจสอบว่ากลไกการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำเป็นแบบใดให้พิจารณาจากค่า s ของสมการที่ (2.28) ซึ่งค่า s นี้ จะได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ $\ln W(T) = \ln(T)$

เมื่อ

$$W(T) = \frac{d[\ln(\sigma T)]}{d[\ln T]}$$

$$W(T) = \ln s + s \ln T_0 - s \ln T$$

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่คำนวณได้จากแบบจำลองซีโตที่อุณหภูมิสูงของฟิล์มบาง ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$)

Composition (x) of $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$	Temperature (K)		E_g	ϵ_s (F/cm ²) (10 ⁻¹³)	Grain Size (L) (nm)	E_a (eV)	N_a (or N_d) (cm ⁻³)	E_t (eV)
	temperature range	T (considered)						
0.0	280-300	300	1.51	8.3	77.7	0.0575	3.94×10^{16}	0.8125
0.2	280-300	300	1.47	8.3	39.9	0.0203	5.30×10^{16}	0.7553
0.6	280-300	300	1.54	8.3	3.4	0.0253	9.09×10^{18}	0.7953
1.0	280-300	300	2.40	8.3	34.2	0.0262	9.31×10^{16}	1.2262

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่คำนวณได้จากแบบจำลองซีไอทีที่อุณหภูมิปานกลางของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$)

Composition (x) of $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$	Temperature (K)		E_g	ϵ_s (F/cm^2) (10^{-13})	Grain Size (L) (nm)	E_b (eV)	N_a (or N_d) (cm^{-3})	E_t (eV)	N_t (cm^{-2}) (10^{11})	L_D (cm)
	temperature range	T (considered)								
0.0	223-280	250	1.51	8.3	77.7	0.0608	4.18×10^{16}	0.6942	3.25	1.64×10^{-6}
0.2	225-260	250	1.47	8.3	39.9	0.0133	3.48×10^{16}	0.7177	1.39	1.79×10^{-6}
0.4	230-270	250	1.44	8.3	15.1	0.0239	2.53×10^{17}	0.6961	6.58	5.07×10^{-7}
0.6	240-280	250	1.54	8.3	3.4	0.0239	8.60×10^{18}	0.7461	29.22	1.14×10^{-7}
0.8	225-280	250	1.84	8.3	5.9	0.0134	1.60×10^{18}	0.9066	9.45	2.64×10^{-7}
1.0	220-280	250	2.40	8.3	34.2	0.0217	7.71×10^{16}	1.1783	2.64	1.20×10^{-6}

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่คำนวณได้จากแบบจำลองอะตอมแบบอิเล็กทรอนิกส์ของระดับพลังงานผู้ให้จะกระโดดไปยังระดับพลังงานผู้ให้ที่อยู่ติดกัน
ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของฟิล์มบาง ของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq X \leq 1$)

Composition (x) of CdS_xTe_{1-x}	Temperature (K)		$\sigma_{0,NNH}$ (S/cm)	E_{NNH} (eV)	N_a (or N_d) (cm^{-3})	T_{CI} (K)
	temperature range	T (considered)				
0.0	223-255	230	1.36×10^{-8}	0.0495	3.48×10^{19}	170.33
0.2	220-255	230	1.73×10^{-7}	0.0028	6.24×10^{15}	0.54
0.4	220-250	230	4.43×10^{-5}	0.0021	2.47×10^{15}	0.29
0.6	220-240	230	1.13×10^{-9}	0.0060	6.08×10^{16}	2.47
0.8	220-260	230	3.98×10^{-3}	0.0024	3.86×10^{15}	0.39
1.0	220-250	230	3.63×10^{-7}	0.0110	3.83×10^{17}	8.43

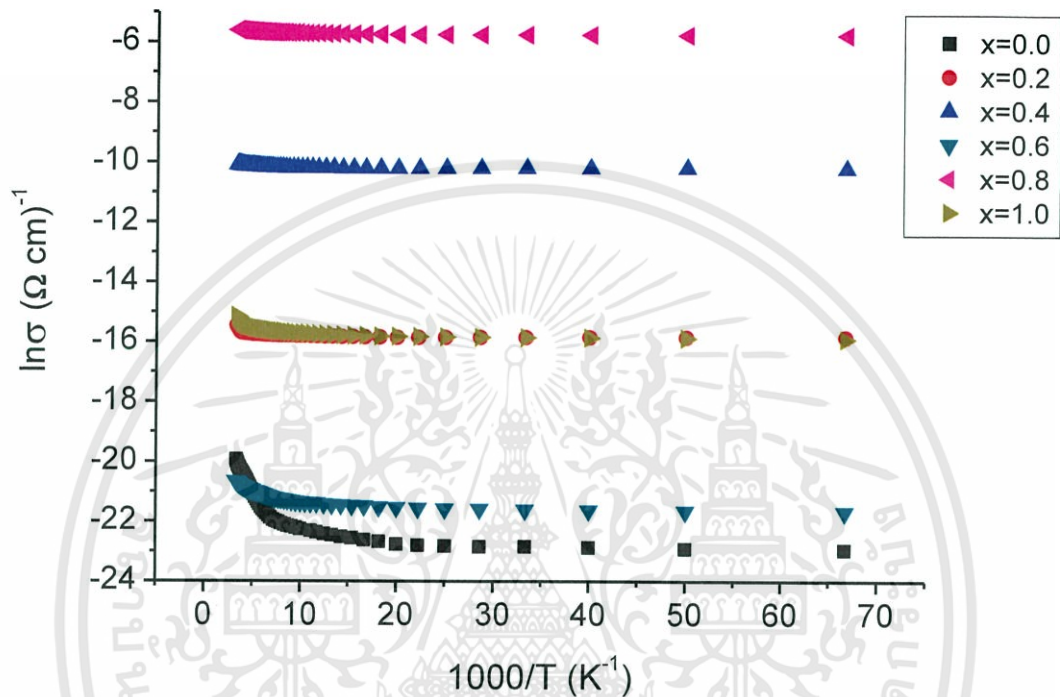
ตารางที่ 4.4 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่คำนวณได้จากแบบการกระโดดในระยะไม่คงที่ (Mott) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$)

Composition (x) of $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$	Temperature (K)		$\sigma_{0,\text{Mott}}$ ($\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	$T_{0,\text{Mott}}$ (K)	ξ_{Mott} (nm)	T_{Cl} (K)	$N(E_F)$ ($\text{cm}^{-3}\cdot\text{eV}^{-1}$)	$R_{\text{hop,Mott}}$ (cm) (10^{-7})	$\frac{R_{\text{hop,Mott}}}{\xi_{\text{Mott}}}$	$W_{\text{hop,Mott}}$ (eV)
	temperature range	T (considered)								
0.0	155-200	160	4.3×10^{-3}	5.58×10^6	0.8645	170.33	7.13×10^{19}	4.13	4.77	0.0475
0.2	135-185	160	2.04×10^{-5}	5.44×10^6	0.8645	0.54	7.32×10^{22}	0.73	0.84	0.0402
0.4	125-200	160	5.3×10^{-3}	5.13×10^3	0.8645	0.29	7.75×10^{22}	0.72	0.83	0.0391
0.6	135-185	160	1.82×10^{-7}	12.11×10^3	0.8645	2.47	3.29×10^{22}	0.89	1.03	0.0600
0.8	125-200	160	4.38×10^{-1}	4.57×10^3	0.8645	0.39	8.72×10^{22}	0.70	0.81	0.0369
1.0	130-200	160	1.07×10^{-4}	36.52×10^3	0.8645	8.43	1.09×10^{22}	1.18	1.36	0.1042

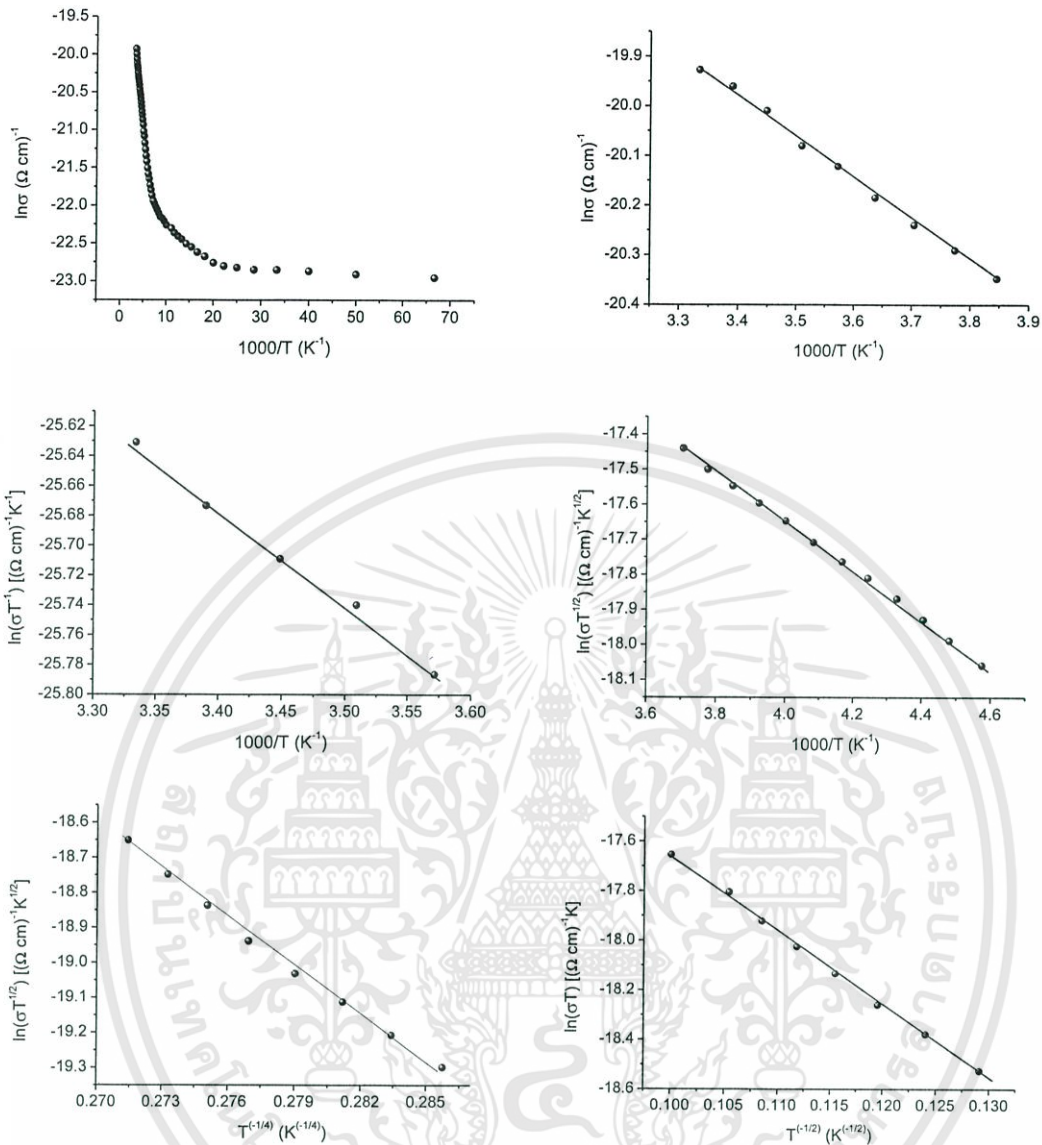
ตารางที่ 4.5 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่คำนวณได้จากแบบการกระโดดในระยะไม่คงที่ (ES) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$)

Composition (x) of $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$	Temperature (K)		$\sigma_{0,ES}$ ($\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	$T_{0,ES}$ (K)	$R_{\text{hop},ES}$	ξ_{ES} (cm)	$\frac{R_{\text{hop},ES}}{\xi_{ES}}$	$W_{\text{hop},ES}$ (meV)	T_{C2} (K)	Δ_C
	temperature range	T (considered)								
0.0	105-135	110	1.47×10^{-6}	1801.83	3.24×10^{-6}	3.21×10^{-6}	1.01	19.20×10^{-3}	9.31	1.55×10^{-6}
0.2	105-150	110	1.63×10^{-4}	619.41	5.53×10^{-6}	9.33×10^{-6}	0.59	11.26×10^{-3}	1.13	9.19×10^{-7}
0.4	100-140	110	3.53×10^{-2}	504.81	6.13×10^{-6}	1.14×10^{-5}	0.54	10.16×10^{-3}	794.80	2.71×10^{-5}
0.6	100-140	110	8.18×10^{-7}	608.71	5.58×10^{-6}	9.50×10^{-6}	0.59	11.20×10^{-3}	489.55	1.93×10^{-5}
0.8	100-140	110	3.25	522.21	6.03×10^{-6}	1.11×10^{-5}	0.54	10.30×10^{-3}	954.77	2.91×10^{-5}
1.0	100-145	110	3.46×10^{-4}	1023.17	4.30×10^{-6}	5.65×10^{-6}	0.76	14.60×10^{-3}	458.65	1.44×10^{-5}

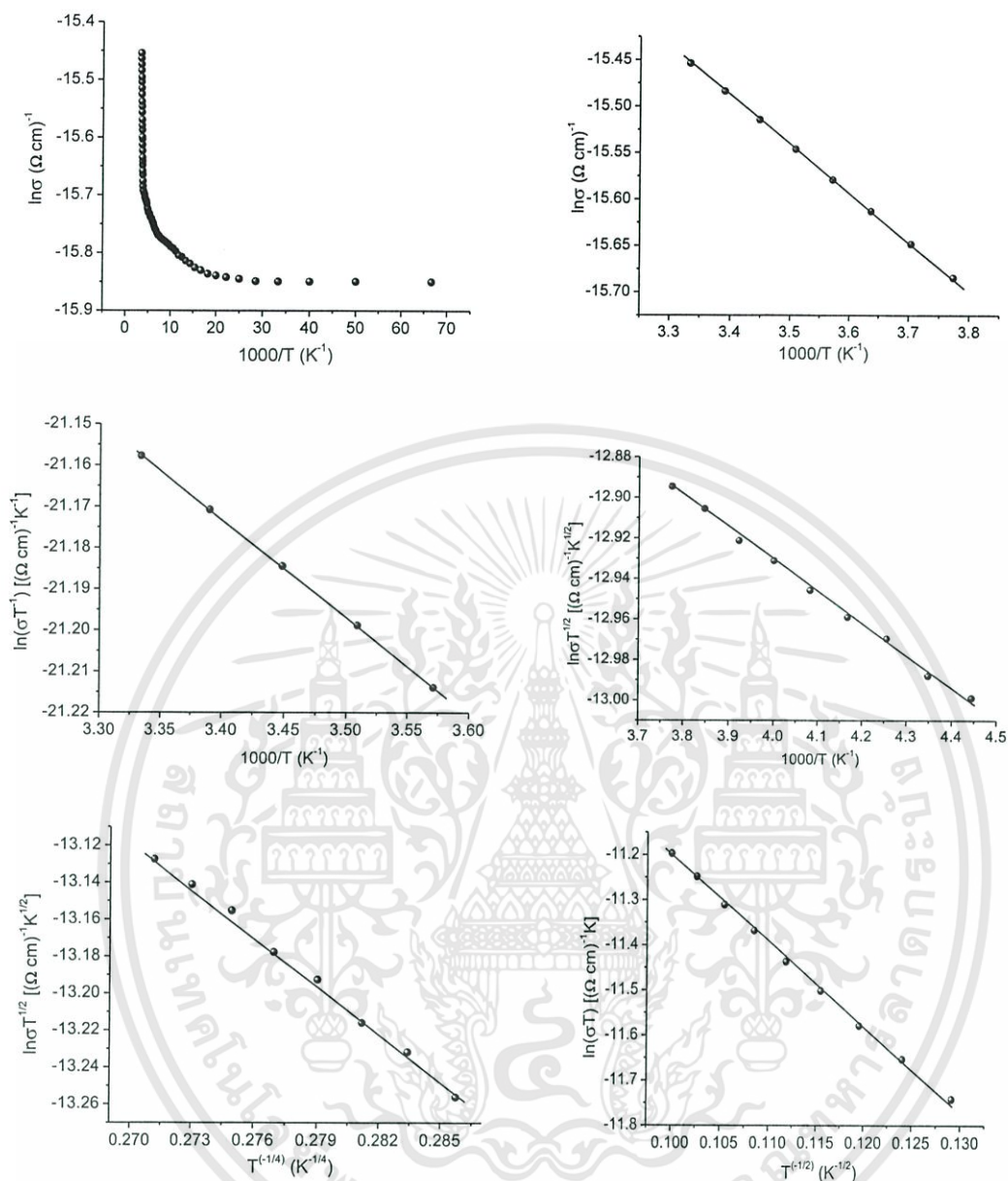
4.2.2 ผลการศึกษาค่าความต้านทานไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 300-15 เคลวิน ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ และแอนนیلในอากาศที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส



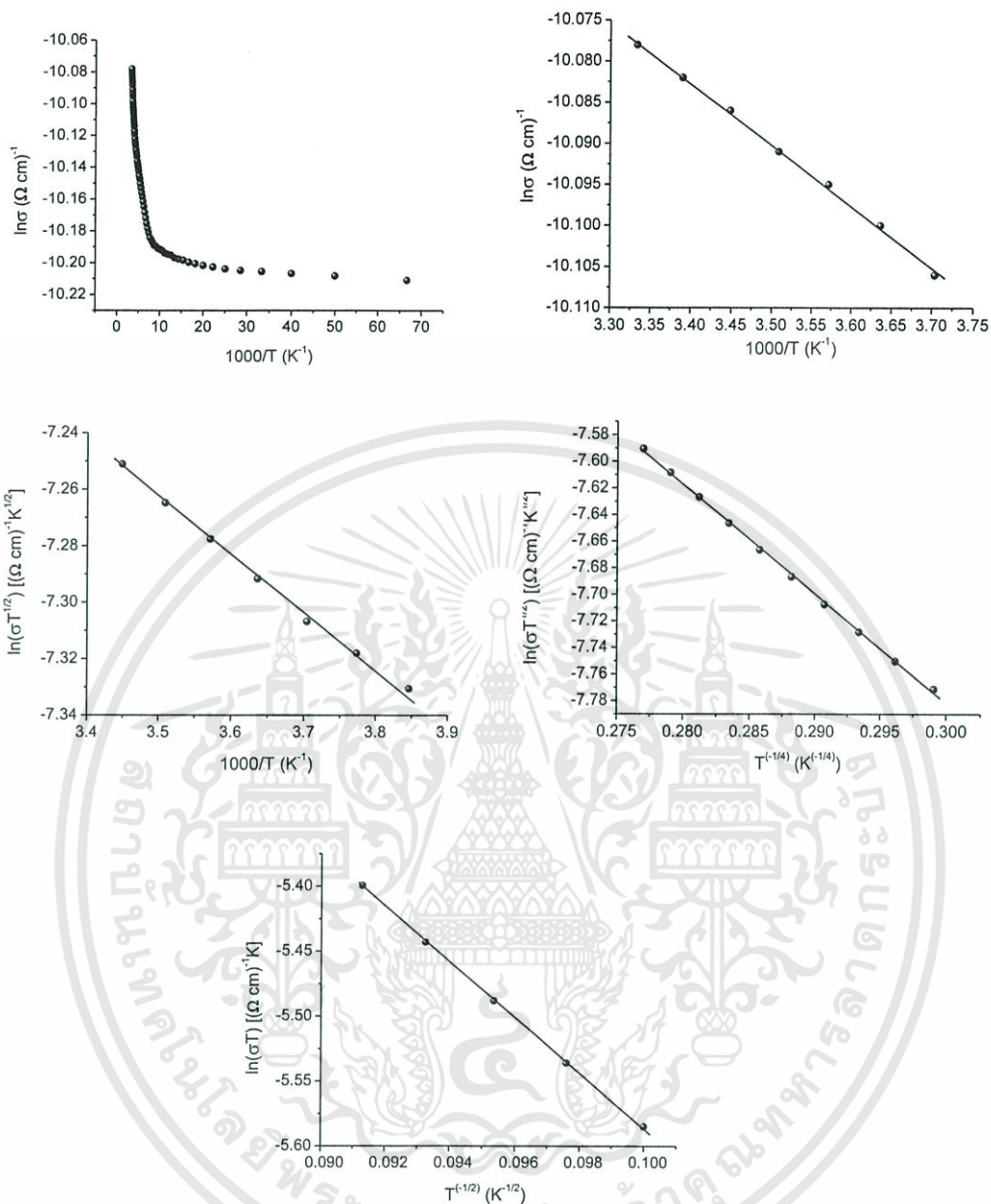
รูปที่ 4.10 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln\sigma$ กับ ค่า $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ และแอนนیلในอากาศที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln \sigma$ กับค่า $\frac{1000}{T}$, ค่า $\ln(\sigma T^2)$ กับ $\frac{1000}{T}$, ค่า $\ln(\sigma T^{-1})$ กับค่า $\frac{1000}{T}$, ค่า $\ln(\sigma T^2)$ กับค่า $T^{-1/4}$, ค่า $\ln(\sigma T)$ กับค่า $T^{-1/2}$ ตามลำดับ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ เมื่อ ($x=0.0$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ และแอนนีลในอากาศที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส

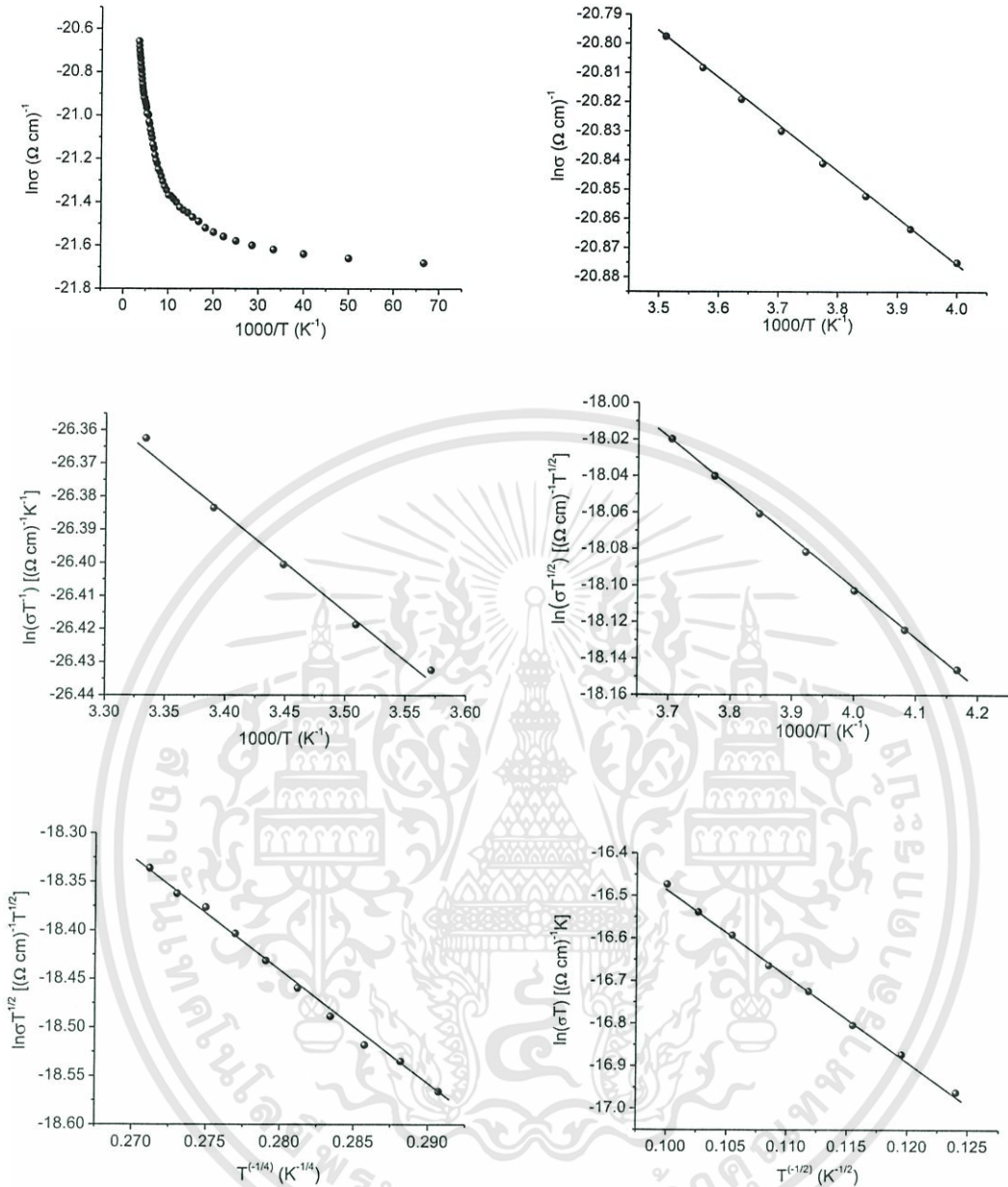


รูปที่ 4.12 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln \sigma$ กับค่า $\frac{1000}{T}$, ค่า $\ln(\sigma T^2)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ค่า $\ln(\sigma T^{-1})$ กับค่า $\frac{1000}{T}$, ค่า $\ln(\sigma T^{\frac{1}{2}})$ กับค่า $T^{-\frac{1}{4}}$, ค่า $\ln(\sigma T)$ กับค่า $T^{-\frac{1}{2}}$ ตามลำดับ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} เมื่อ (x=0.2) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ และแอนนีลในอากาศที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส

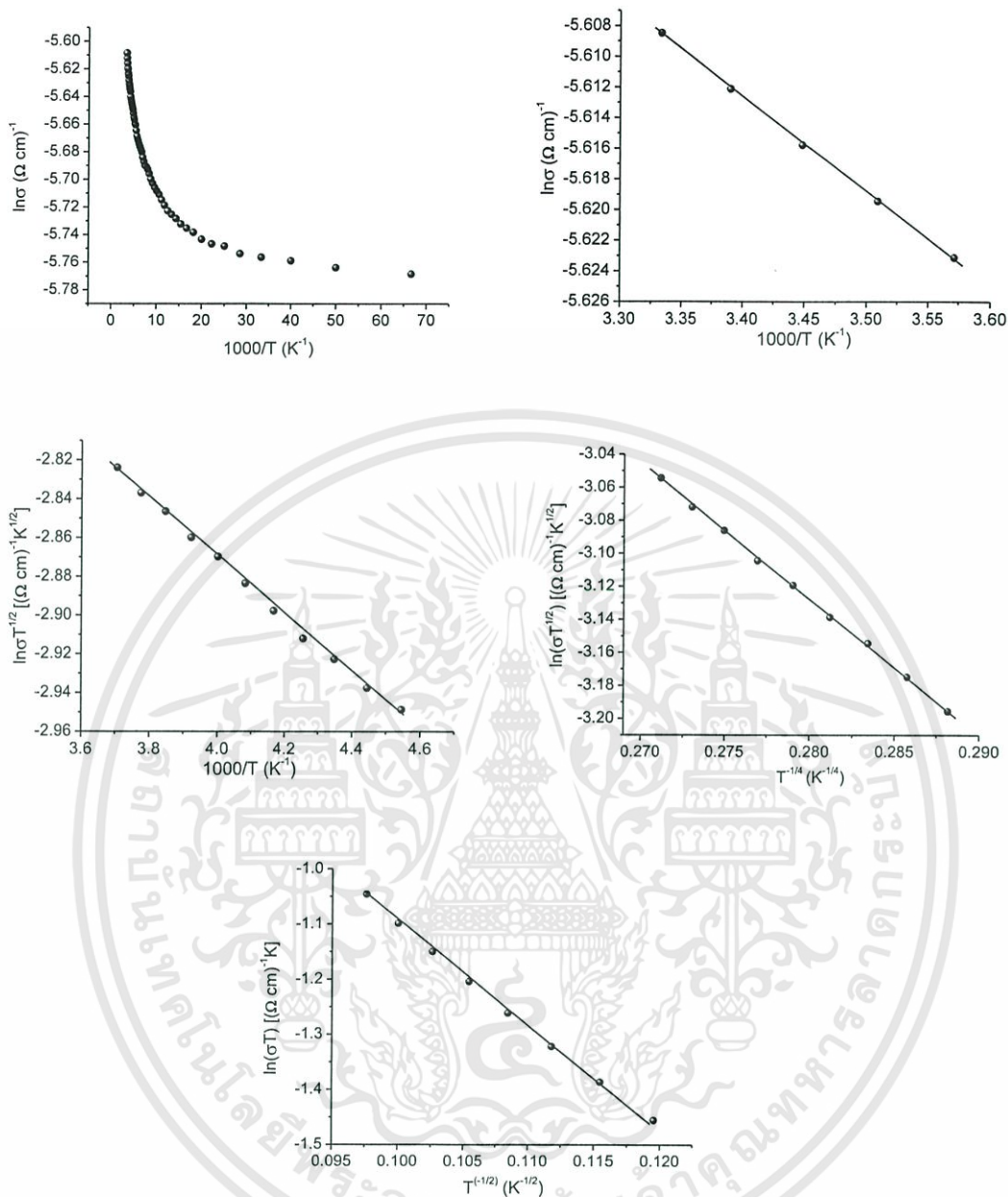


รูปที่ 4.13 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln \sigma$ กับค่า $\frac{1000}{T}$, ค่า $\ln(\sigma T^2)$ กับ $\frac{1000}{T}$

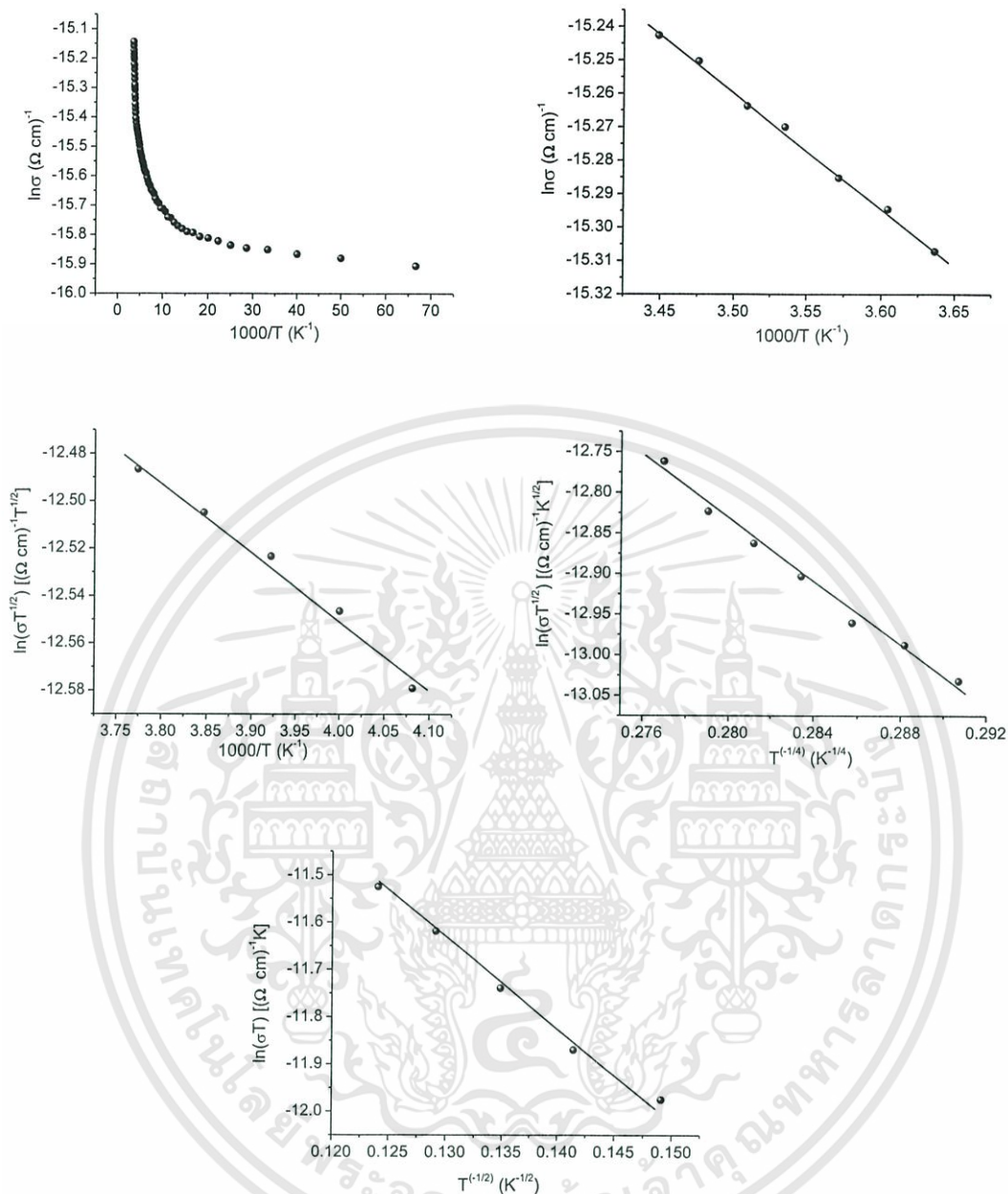
ค่า $\ln(\sigma T^2)$ กับค่า $T^{-1/4}$, ค่า $\ln(\sigma T)$ กับค่า $T^{-1/2}$ ตามลำดับ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} เมื่อ (x=0.4) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ และแอนนیلในอากาศที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.14 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln \sigma$ กับค่า $\frac{1000}{T}$, ค่า $\ln(\sigma T^{\frac{1}{2}})$ กับ $\frac{1000}{T}$ ค่า $\ln(\sigma T^{-1})$ กับค่า $\frac{1000}{T}$, ค่า $\ln(\sigma T^{\frac{1}{2}})$ กับค่า $T^{-\frac{1}{4}}$, ค่า $\ln(\sigma T)$ กับค่า $T^{-\frac{1}{2}}$ ตามลำดับ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} เมื่อ (x=0.6) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ และแอนนีลในอากาศที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln\sigma$ กับค่า $\frac{1000}{T}$, ค่า $\ln(\sigma T^2)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ค่า $\ln(\sigma T^2)$ กับค่า $T^{-\frac{1}{4}}$, ค่า $\ln(\sigma T)$ กับค่า $T^{-\frac{1}{2}}$ ตามลำดับ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ เมื่อ ($x=0.8$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ และแอนนีลในอากาศที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln\sigma$ กับค่า $\frac{1000}{T}$, ค่า $\ln(\sigma T^2)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ค่า $\ln(\sigma T^{1/2})$ กับค่า $\frac{1000}{T}$, ค่า $\ln(\sigma T)$ กับค่า $T^{1/2}$ ตามลำดับ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ เมื่อ ($x=1.0$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ และแอนนีสในอากาศที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่คำนวณได้จากแบบจำลองซีไอทีที่อุณหภูมิสูงของฟิล์มบาง ของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$)

Composition (x) of	Temperature (K)		E_g	ϵ_s (F/cm ²) (10 ⁻¹³)	Grain Size (L) (nm)	E_a (eV)	N_a (or N_d) (cm ⁻³)	E_t (eV)
	temperature range	T (considered)						
0	280-300	300	1.51	8.3	77.7	0.0547	3.76×10^{16}	0.8097
0.2	280-300	300	1.47	8.3	39.9	0.0203	5.30×10^{16}	0.7553
0.6	280-300	300	1.54	8.3	3.4	0.0253	9.08×10^{18}	0.7953

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่คำนวณได้จากแบบจำลองซีไอที่อุณหภูมิปานกลางของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$)

Composition (x) of $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$	Temperature (K)		E_g	ϵ_s (F/cm^2) (10^{-13})	Grain Size (L) (nm)	E_b (eV)	N_a (or N_d) (cm^{-3}) (10^{17})	E_t (eV)	N_t (cm^{-2}) (10^{11})	L_D (cm)
	temperature range	T (considered)								
0	225-265	250	1.51	8.3	77.7	0.0599	0.41	0.6950	3.20	1.65×10^{-6}
0.2	210-260	250	1.47	8.3	39.9	0.0135	0.35	0.7215	1.41	1.78×10^{-6}
0.4	225-260	250	1.44	8.3	15.1	0.0173	3.16	0.7026	4.77	5.95×10^{-7}
0.6	240-270	250	1.54	8.3	3.4	0.0235	84.47	0.7465	28.72	1.15×10^{-7}
0.8	220-270	250	1.84	8.3	5.9	0.0129	15.41	0.9071	9.09	2.69×10^{-7}
1.0	245-265	250	2.40	8.3	34.2	0.0254	0.90	1.1746	3.08	1.11×10^{-6}

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่คำนวณได้จากแบบจำลองอะตอมแบบอเล็กตรอนของระดับพลังงานผู้ให้จะกระโดดไปยังระดับพลังงานผู้ให้ที่อยู่ติดกัน ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของฟิล์มบาง ของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq X \leq 1$)

Composition (X) of CdS_xTe_{1-x}	Temperature (K)		$\sigma_{0,NNH}$ (S/cm)	E_{NNH} (eV)	N_a (or N_d) (cm^{-3})	T_{C1} (K)
	temperature range	T (considered)				
0	260-300	285	3.68×10^{-8}	0.073	1.09×10^{20}	365.43
0.2	265-300	285	1.11×10^{-6}	0.045	2.63×10^{19}	141.53
0.4	270-300	285	5.39×10^{-5}	0.006	7.65×10^{16}	2.88
0.6	250-285	285	1.61×10^{-9}	0.014	7.17×10^{17}	12.81
0.8	285-300	285	4.50×10^{-3}	0.005	4.27×10^{16}	1.95
1.0	275-290	285	7.85×10^{-7}	0.030	7.45×10^{18}	61.01

ตาราง 4.9 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่คำนวณได้จากแบบการกระโดดในระยะไม่คงที่ (Mott) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ($0 \leq x \leq 1$)

Composition (x) of $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$	Temperature (K)		$\sigma_{0,\text{Mott}}$ ($\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	$T_{0,\text{Mott}}$ (K)	ξ_{Mott} (nm)	T_{Cl} (K)	$N(E_F)$ ($\text{cm}^{-3}\cdot\text{eV}^{-1}$)	$R_{\text{hop,Mott}}$ (cm) (10^{-7})	$\frac{R_{\text{hop,Mott}}}{\xi_{\text{Mott}}}$	$W_{\text{hop,Mott}}$ (eV)
	temperature range	T (considered)								
0	150-185 K	160 K	1.57×10^{-3}	4102.81	0.8645	365.43	9.69×10^{19}	3.83	4.43	1.1049
0.2	150-185 K	160 K	2.21×10^{-5}	6.18	0.8645	141.53	6.44×10^{22}	0.755	0.87	0.0429
0.4	125-170 K	160 K	4.9×10^{-3}	4.56	0.8645	2.88	8.73×10^{22}	0.699	0.81	0.0368
0.6	140-185 K	160 K	2.75×10^{-7}	20.12	0.8645	12.81	1.98×10^{22}	1.01	1.17	0.0774
0.8	145-185 K	160 K	4.34×10^{-1}	4.50	0.8645	1.95	8.84×10^{22}	0.698	0.81	0.0366
1.0	140-170 K	160 K	6.0×10^{-3}	136.41	0.8645	61.01	2.92×10^{21}	1.64	1.89	0.2015

ตารางที่ 4.10 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่คำนวณได้จากแบบการกระโดดในระยไม่คงที่ (ES) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$)

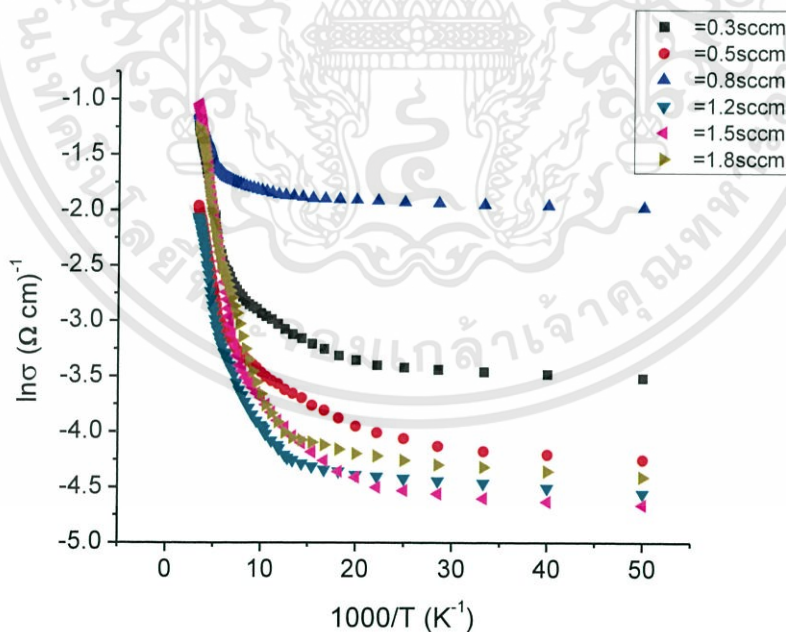
Composition (x) of CdS_xTe_{1-x}	Temperature (K)		$\sigma_{0,ES}$ ($S \cdot cm^{-1}$)	$T_{0,ES}$ (K)	$R_{hop,ES}$	ξ_{ES} (cm)	$\frac{R_{hop,ES}}{\xi_{ES}}$	$W_{hop,ES}$ (meV)	T_{C2} (K)	Δ_C
	temperature range	T (considered)								
0	60-100	100	4.31×10^{-7}	901.92	4.81×10^{-6}	6.40×10^{-6}	0.75	12.90×10^{-3}	3.17	1.28×10^{-6}
0.2	60-100	100	8.86×10^{-5}	351.34	7.70×10^{-6}	1.64×10^{-5}	0.47	8.10×10^{-3}	319.58	2.06×10^{-5}
0.4	100-120	100	3.15×10^{-2}	453.39	6.78×10^{-6}	1.27×10^{-5}	0.53	9.18×10^{-3}	721.28	2.72×10^{-5}
0.6	65-100	100	5.20×10^{-7}	405.94	7.17×10^{-6}	1.42×10^{-5}	0.50	8.69×10^{-3}	131.04	1.23×10^{-5}
0.8	70-105	100	2.14	345.74	7.77×10^{-6}	1.67×10^{-5}	0.46	8.02×10^{-3}	425.01	2.39×10^{-5}
1.0	45-65	50	9.57×10^{-5}	337.05	1.11×10^{-5}	1.71×10^{-5}	0.65	5.59×10^{-3}	13.33	4.29×10^{-6}

4.3 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 300-20 เคลวิน ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง



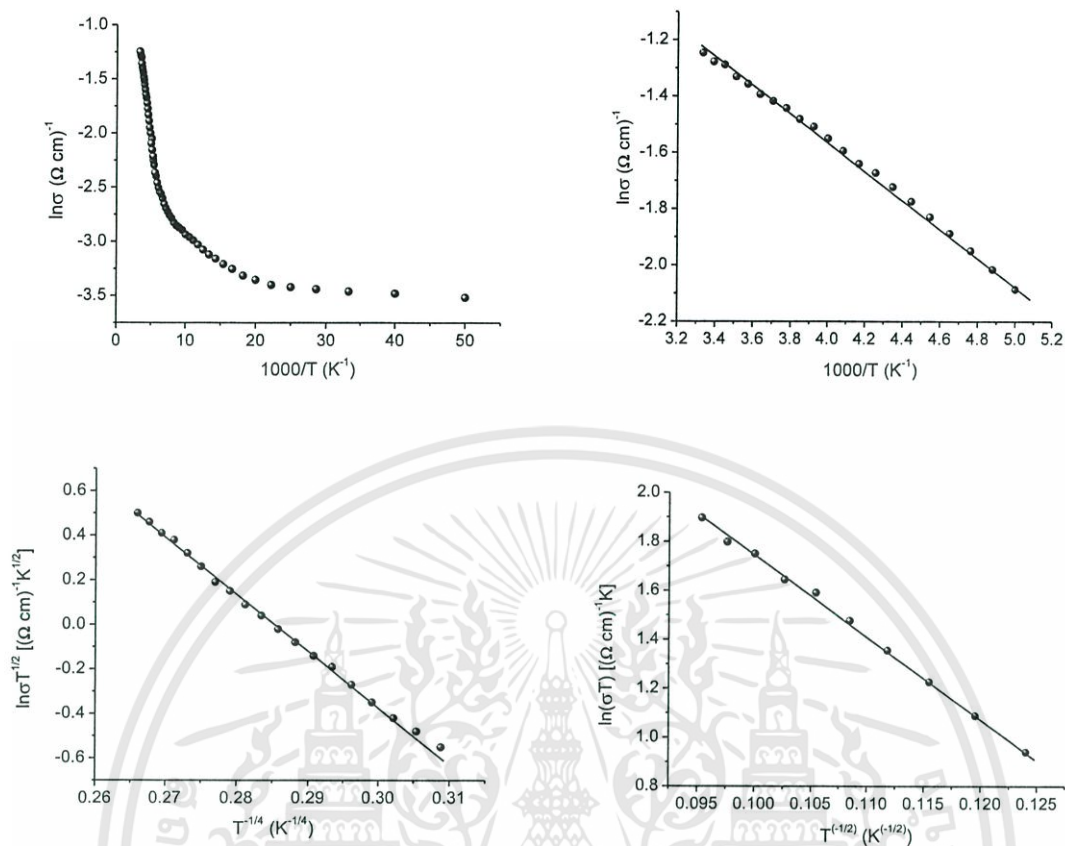
รูปที่ 4.17 ภาพถ่ายฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.3, 0.5, 0.8, 1.2, 1.5 และ 1.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

4.3.1 ผลการศึกษาค่าความต้านทานไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 300-100 เคลวิน ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริง

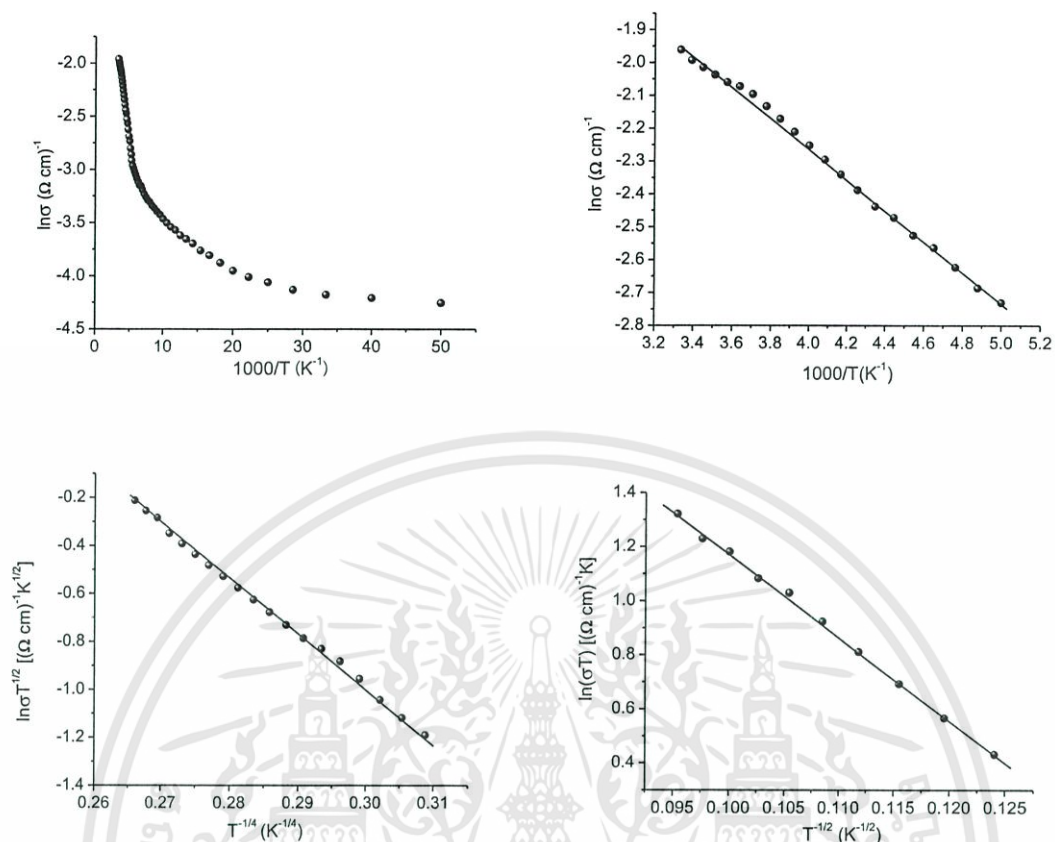


รูปที่ 4.18 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln \sigma$ กับ ค่า $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสเปตเตอริงด้วยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน

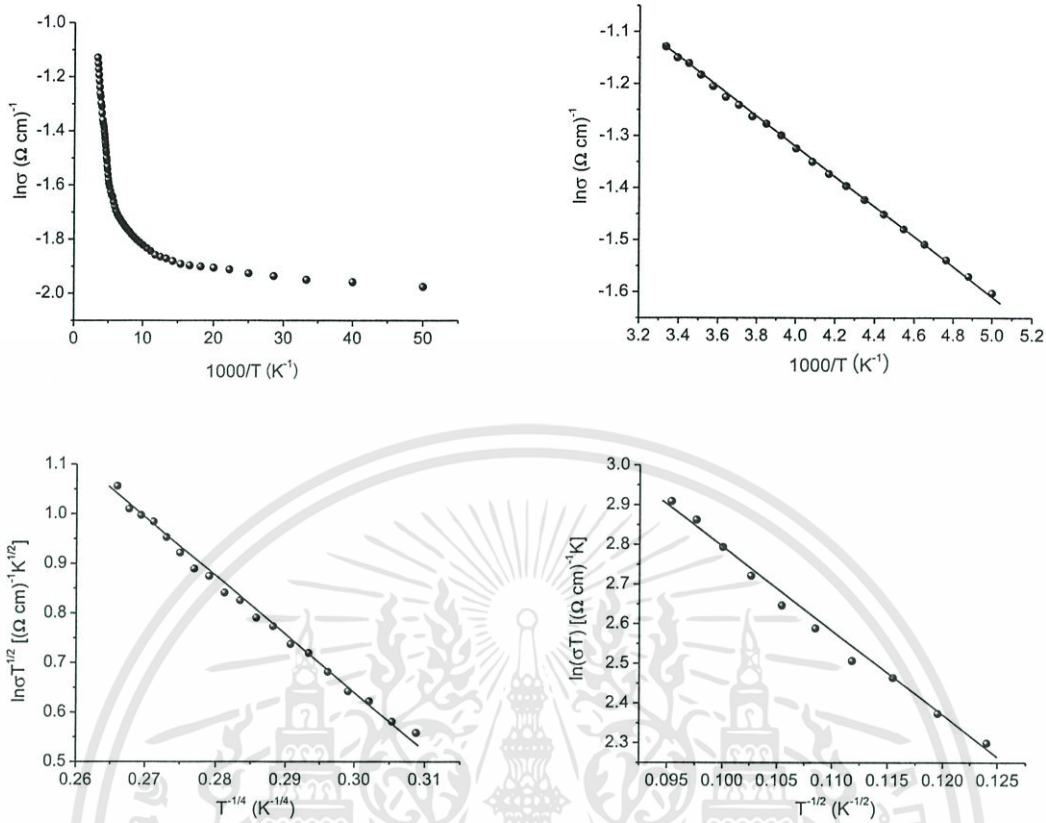
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



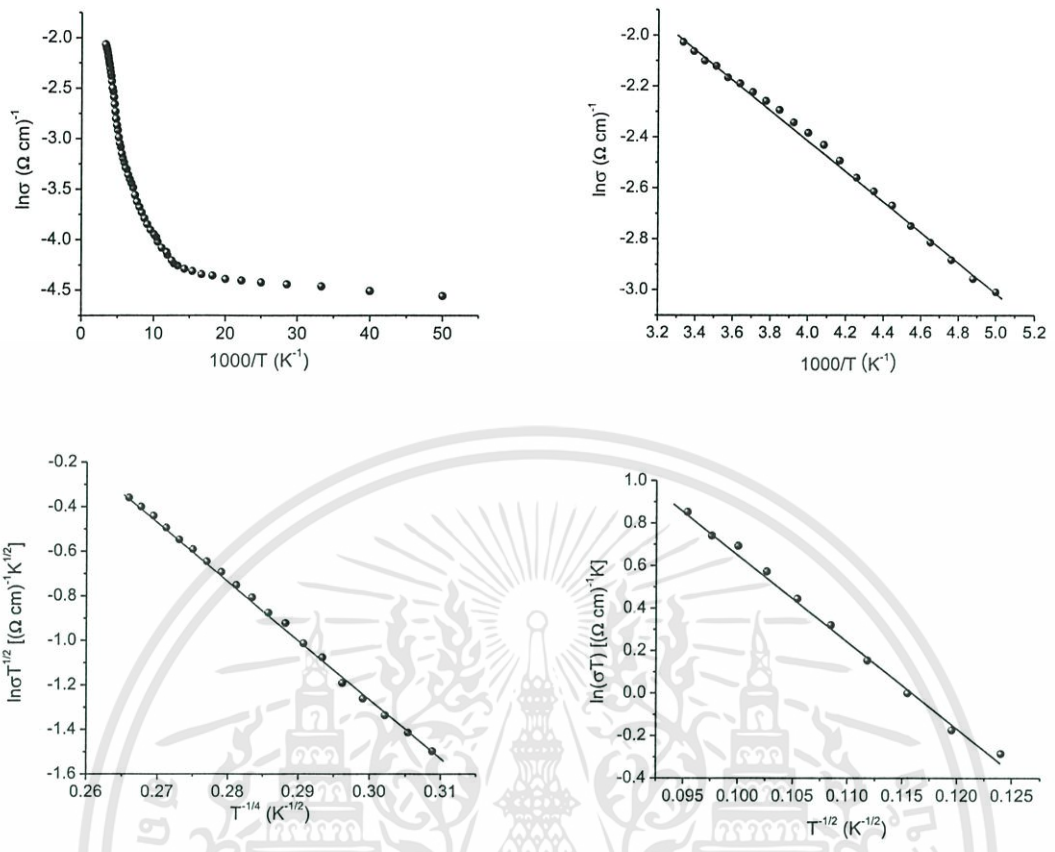
รูปที่ 4.19 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln \sigma$ กับค่า $\frac{1000}{T}$, ค่า $\ln(\sigma T^{\frac{1}{2}})$ กับค่า $T^{-\frac{1}{4}}$, ค่า $\ln(\sigma T)$ กับค่า $T^{-\frac{1}{2}}$ ตามลำดับ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O เมื่อที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนี ตรอนสปีดเตอริง ด้วยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 0.3 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที



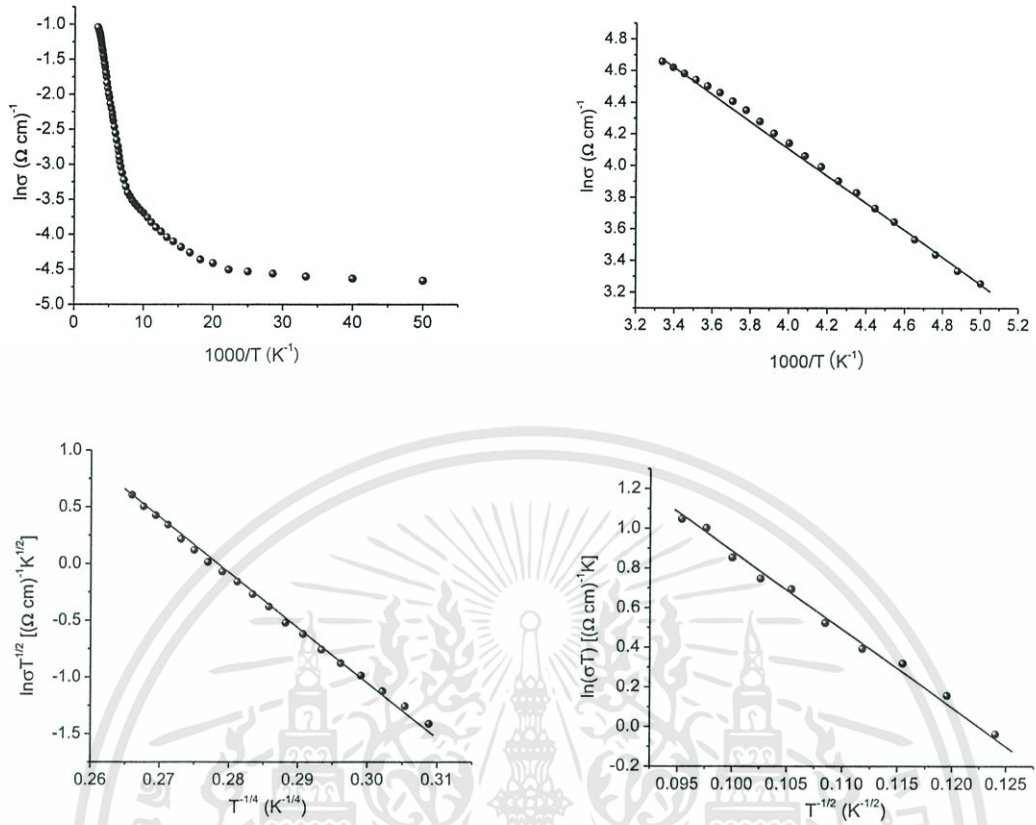
รูปที่ 4.20 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln\sigma$ กับค่า $\frac{1000}{T}$, ค่า $\ln(\sigma T^{\frac{1}{2}})$ กับค่า $T^{\frac{1}{4}}$, ค่า $\ln(\sigma T)$ กับค่า $T^{\frac{1}{2}}$ ตามลำดับ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O เมื่อที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนี ตรอนสปัตเตอริง ด้วยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 0.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที



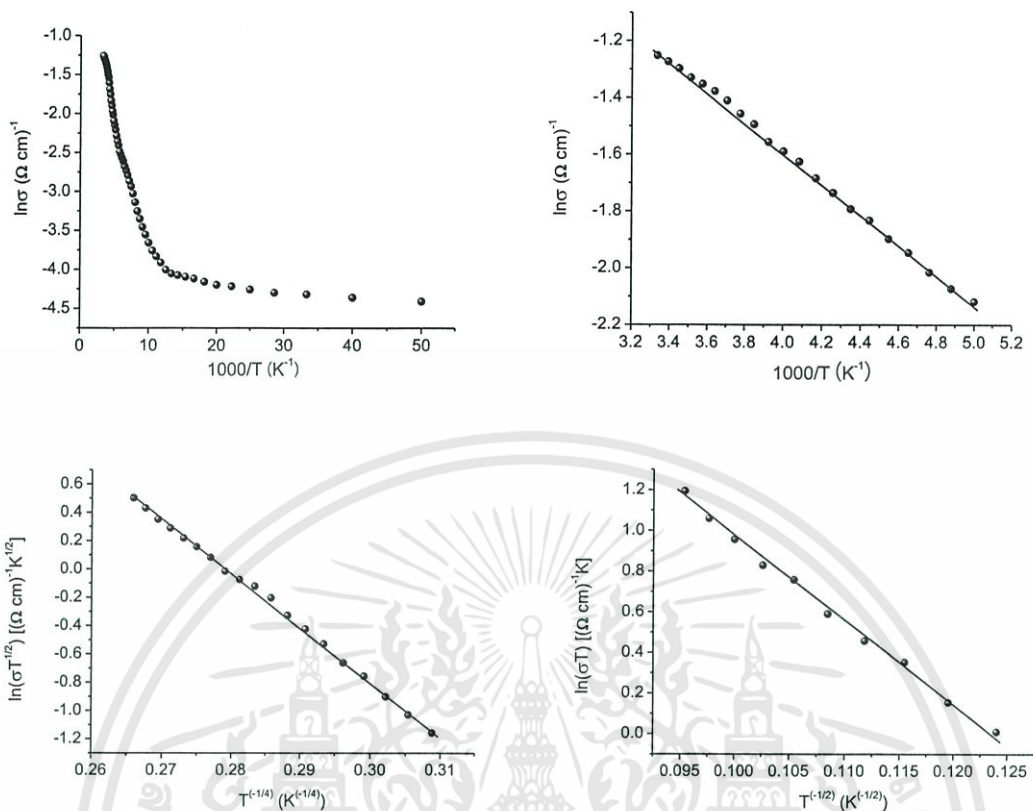
รูปที่ 4.21 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln \sigma$ กับค่า $\frac{1000}{T}$, ค่า $\ln(\sigma T^2)$ กับค่า $T^{-1/4}$, ค่า $\ln(\sigma T)$ กับค่า $T^{-1/2}$ ตามลำดับ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O เมื่อที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนี ตรอนสปัตเตอริง ด้วยอัตราการใช้ของก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 0.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที



รูปที่ 4.22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln \sigma$ กับค่า $\frac{1000}{T}$, ค่า $\ln(\sigma T^2)$ กับค่า $T^{-\frac{1}{4}}$, ค่า $\ln(\sigma T)$ กับค่า $T^{-\frac{1}{2}}$ ตามลำดับ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O เมื่อที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนี ทรอนสปัตเตอริง ด้วยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 1.2 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที



รูปที่ 4.23 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln \sigma$ กับค่า $\frac{1000}{T}$, ค่า $\ln(\sigma T^{\frac{1}{2}})$ กับค่า $T^{-\frac{1}{4}}$, ค่า $\ln(\sigma T)$ กับค่า $T^{-\frac{1}{2}}$ ตามลำดับ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O เมื่อที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนี ตรอนสปัตเตอริง ด้วยอัตราการใช้ของก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 1.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที



รูปที่ 4.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln \sigma$ กับค่า $\frac{1000}{T}$, ค่า $\ln(\sigma T^2)$ กับค่า $T^{-1/4}$, ค่า

$\ln(\sigma T)$ กับค่า $T^{-1/2}$ ตามลำดับ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O เมื่อที่เคลือบลงบน
 แผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการรีเอคทีฟดีซีแมกนี ทรอนสปัตเตอร์ริง
 ด้วยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนเท่ากับ 1.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

ตารางที่ 4.11 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่คำนวณได้จากแบบจำลองอะตอมแบบอิลีกรอนของระดับพลังงานผู้รับจะกระโดดไปยังระดับพลังงานผู้ให้ที่อยู่ติดกัน
ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu₂O

Cu ₂ O O ₂ flow rate (sccm)	Temperature (K)		$\sigma_{0,NNH}$ (S/cm)	E_{NNH} (eV)	N_a (or N_d) (cm ⁻³)	T_{CI} (K)
	temperature range	T (considered)				
0.3	200-300	300	1.53	0.043	2.25×10^{19}	127.36
0.5	200-300	300	0.69	0.041	1.94×10^{19}	115.44
0.8	200-300	300	0.83	0.024	4.19×10^{18}	41.59
1.2	200-300	300	0.99	0.052	3.98×10^{19}	186.35
1.5	200-300	300	2025.15	0.075	1.22×10^{20}	393.22
1.8	200-300	300	1.79	0.047	2.93×10^{19}	152.10

ตารางที่ 4.12 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่คำนวณได้จากแบบการกระโดดในระยยะไม่คงที่ (Mott) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu₂O

Cu ₂ O O ₂ flow rate (sccm)	Temperature (K)		$\sigma_{0,Mott}$ (S·cm ⁻¹)	T _{0,Mott} (K)	ξ_{Mott} (nm)	T _{C1} (K)	N(E _F) (cm ⁻³ ·eV ⁻¹)	R _{hop,Mott} (cm) (10 ⁻⁷)	$\frac{R_{hop,Mott}}{\xi_{Mott}}$	W _{hop,Mott} (eV)
	temperature range	T (considered)								
0.3	110-200	200	1.23×10 ³	385.03	0.8645	127.36	1.03×10 ²¹	2.00	2.31	0.38
0.5	110-200	200	3.13×10 ²	254.61	0.8645	115.44	1.56×10 ²¹	1.81	2.10	0.31
0.8	110-200	200	5.96×10 ¹	17.45	0.8645	41.59	2.28×10 ²²	0.926	1.10	0.08
1.2	110-200	200	9.19×10 ²	529.24	0.8645	186.35	7.52×10 ²⁰	2.17	2.51	0.44
1.5	110-200	200	4.66×10 ⁵	4865.2	0.8645	393.22	8.18×10 ¹⁹	3.78	4.37	1.35
1.8	110-200	200	4.28×10 ⁴	2132.1	0.8645	152.10	1.87×10 ²⁰	3.08	3.56	0.89

ตารางที่ 4.13 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่คำนวณได้จากแบบการกระโดดในระยั้งไม่คงที่ (ES) ของฟิล์มบาง ของสารกึ่งตัวนำ Cu₂O

Cu ₂ O O ₂ flow rate (sccm)	Temperature (K)		$\sigma_{0,ES}$ (S·cm ⁻¹)	T _{0,ES} (K)	R _{hop,ES}	ξ_{ES} (cm)	$\frac{R_{hop,ES}}{\xi_{ES}}$	W _{hop,ES} (meV)	T _{C2} (K)	Δ_C
	temperature range	T (considered)								
0.3	65-110	70	157.57	1100.05	5.20×10 ⁻⁶	5.25×10 ⁻⁶	0.99	12.00×10 ⁻³	50.29	4.61×10 ⁻⁶
0.5	65-110	70	70.82	951.78	5.60×10 ⁻⁶	6.07×10 ⁻⁶	0.92	11.10×10 ⁻³	56.93	5.28×10 ⁻⁵
0.8	65-110	70	138.84	460.02	8.05×10 ⁻⁶	1.26×10 ⁻⁵	0.64	7.70×10 ⁻³	194.03	1.40×10 ⁻⁵
1.2	65-110	70	120.81	1706.19	4.18×10 ⁻⁶	3.39×10 ⁻⁶	1.23	14.90×10 ⁻³	88.01	4.90×10 ⁻⁵
1.5	65-110	70	102.74	1414.36	4.59×10 ⁻⁶	4.08×10 ⁻⁶	1.12	13.60×10 ⁻³	6.58	1.47×10 ⁻⁵
1.8	65-110	70	126.48	1542.37	4.23×10 ⁻⁶	3.75×10 ⁻⁶	1.22	14.70×10 ⁻³	20.77	2.41×10 ⁻⁶

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

ในบทนี้จะเป็นการสรุปการดำเนินงานโครงการพิเศษ เพื่อศึกษากลไกการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 100-300 เคลวิน ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนیل และ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO_2 ที่เคลือบลงบนฐานแผ่นรองรับกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง รวมถึงการวิเคราะห์ผลสุดท้ายและข้อเสนอแนะเพื่อเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ทำเป็นเซลล์แสงอาทิตย์

5.1 สรุปผลการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนิล

จากการศึกษา พลังงานกระตุ้น (E_a) สามารถคำนวณหาได้จากการวัดความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) รอยต่อในช่วงอุณหภูมิ 25-150 องศาเซลเซียส ซึ่งค่าพลังงานกระตุ้นนี้คือ ค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่บริเวณรอยต่อของเกรน

จากการศึกษาค่าสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้องของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ($0 \leq x \leq 1$) ในช่วงอุณหภูมิ 280-300 เคลวิน กลไกการนำไฟฟ้าสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองอะตอมของซีโตซึ่งเป็นกรณี $N_a < N_a^*$ ดังสมการ

$$\sigma T^{-1} = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right)$$

จากนั้นในจะคำนวณหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่ขอบของเกรน ความหนาแน่นของอะตอมผู้รับและค่าระดับพลังงานของกัปดักพาหะได้ ในช่วงอุณหภูมิ 220-280 เคลวิน กลไกการนำไฟฟ้าสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองของซีโตซึ่งเป็นกรณี $N_a > N_a^*$ ดังความสัมพันธ์

$$\sigma T^{\frac{1}{2}} = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right)$$

กลไกการนำกระแสไฟฟ้าตามแบบจำลองของซีโตจะเกี่ยวข้องกับขอบเขตรอยต่อของเกรนซึ่งมีกัปดักพาหะและค่าความสูงของกำแพงศักย์อยู่ โดยสามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ค่าความสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของกำแพงศักย์ที่ขอบของเกรน ค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ ค่าระดับพลังงานของกักตักพาหะ ค่าความหนาแน่นของกักตักพาหะและค่าความยาวเดอริบายเป็นต้น ข้อสังเกตจากการคำนวณหา ค่าพารามิเตอร์ต่างๆด้วยเงื่อนไข $N_a < N_a^*$ และ $N_a > N_a^*$ พบว่าพารามิเตอร์ต่างๆที่คำนวณได้มีค่าใกล้เคียงกันมาก เมื่ออุณหภูมิต่ำลงในช่วงอุณหภูมิ 120-200 เคลวิน กลไกการนำไฟฟ้าสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองการกระโดดระหว่างสถานะพลังงานท้องถิ่นในระยะไม่คงที่ด้วยความสัมพันธ์

$$\sigma T^{\frac{1}{2}} = \sigma_{0,Mott} \exp \left[- \left(\frac{T_{0,Mott}}{T} \right)^{\frac{1}{4}} \right]$$

โดยสามารถคำนวณหาพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ความหนาแน่นของสถานะถูกจำกัดที่ระดับเฟอร์มิ ระยะทางเฉลี่ยของการกระโดดและพลังงานเฉลี่ยของการกระโดด สำหรับกลไกการนำกระแสไฟฟ้าตามแบบจำลองการกระโดดระหว่างสถานะพลังงานท้องถิ่นในระยะไม่คงที่จะเกิดการกระโดดไปมาในบริเวณระดับพลังงานเฟอร์มิ ซึ่งจะมุ่งเน้นไปที่กักตักพาหะที่อยู่ในเนื้อเกรน กรณีที่อุณหภูมิลดลงต่ำสุดในช่วงอุณหภูมิ 110-60 เคลวิน กลไกการนำไฟฟ้าจะเป็นแบบกระโดดในระยะไม่คงที่ของเอพรอส-ชลอพสกี (ES-VRH) ซึ่งจะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$\sigma = \sigma_{0,ES} T^{-1} \exp \left[- \left(\frac{T_{0,ES}}{T} \right)^{\frac{1}{2}} \right]$$

อิเล็กตรอนในสถานะพลังงานท้องถิ่นมีอันตรกิริยาต่อกัน ส่งผลให้ความหนาแน่นของสถานะพลังงานที่ระดับเฟอร์มิแยกออกจากกันกลายเป็นช่องว่าง เรียกว่า ช่องว่างของคูลอมบ์ โดยสามารถคำนวณหา ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ระยะทางเฉลี่ยของการกระโดด พลังงานเฉลี่ยของการกระโดด และช่องว่างของคูลอมบ์

5.2 สรุปผลการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO_2 ที่เคลือบลงบนฐานแผ่นรองรับกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง

จากการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ด้วยสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ พบว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.3, 0.5, 0.8, 1.2, 1.5 และ 1.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที่นั้นไม่ปรากฏระนาบใดๆแสดงว่าเป็นอะมอร์ฟัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง เนื่องจากฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O เป็นอะมอร์ฟัส ดังนั้นในช่วงอุณหภูมิ 200-300 เคลวิน การนำไฟฟ้าจะเกิดจากกลไกการกระโดดของอิเล็กตรอนระหว่างระดับผู้รับที่อยู่ติดกันดังความสัมพันธ์

$$\sigma = \sigma_{0,\text{NNH}} \exp\left(-\frac{E_{0,\text{NNH}}}{kT}\right)$$

เมื่อมีพลังงานความร้อนไม่สูงพอที่จะกระตุ้นโฮลให้หลุดออกจากระดับพลังงานผู้รับไปยังแถบวาเลนซ์ ที่ระดับพลังงานผู้รับจะเกิดการกระโดดระหว่างอะตอมผู้รับที่ระดับนั้น ดังนั้นโฮลของระดับพลังงานผู้รับจะกระโดดไปยังระดับพลังงานผู้รับที่อยู่ติดกันเมื่ออุณหภูมิต่ำลงในช่วงอุณหภูมิ 120-200 เคลวิน กลไกการนำไฟฟ้าสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองการกระโดดระหว่างสถานะพลังงานท้องถิ่นในระยะไม่คงที่ดังความสัมพันธ์

$$\sigma T^{\frac{1}{2}} = \sigma_{0,\text{Mott}} \exp\left[-\left(\frac{T_{0,\text{Mott}}}{T}\right)^{\frac{1}{4}}\right]$$

โดยสามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ความหนาแน่นของสถานะถูกจำกัดที่ระดับเฟอร์มิ ระยะทางเฉลี่ยของการกระโดดและพลังงานเฉลี่ยของการกระโดด สำหรับกลไกการนำกระแสไฟฟ้าตามแบบจำลองการกระโดดระหว่างสถานะพลังงานท้องถิ่นในระยะไม่คงที่จะเกิดการกระโดดไปมาในบริเวณระดับพลังงานเฟอร์มิ ซึ่งจะมุ่งเน้นไปที่กักตักพาหะที่อยู่ในเนื้อเกรน กรณีที่อุณหภูมิลดลงต่ำสุดในช่วงอุณหภูมิ 110-60 เคลวิน กลไกการนำไฟฟ้าจะเป็นแบบกระโดดในระยะไม่คงที่ของเอพรอส-ชลอฟสกี (ES-VRH) ซึ่งจะแสดงดังความสัมพันธ์

$$\sigma = \sigma_{0,\text{ES}} T^{-1} \exp\left[-\left(\frac{T_{0,\text{ES}}}{T}\right)^{\frac{1}{2}}\right]$$

อิเล็กตรอนในสถานะพลังงานท้องถิ่นมีอันตรกิริยาต่อกัน ส่งผลให้ความหนาแน่นของสถานะพลังงานที่ระดับเฟอร์มิแยกออกจากกันกลายเป็นช่องว่าง เรียกว่า ช่องว่างของคูลอมบ์ โดยสามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ระยะทางเฉลี่ยของการกระโดด พลังงานเฉลี่ยของการกระโดด และช่องว่างของคูลอมบ์

เอกสารอ้างอิง

- ขวัญกมล สุวรรณเทศ 2557. “กลไกการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์บัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง และณัฐพร พรหมรส. 2551. “การเตรียมฟิล์มบาง CdTe โดยการระเหิดในระยะประชิดเพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ. 2531. “การศึกษารอยต่อแบบโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำของคอปเปอร์-อินเดียมไดซัลไฟด์.” วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และชัยสิทธิ์ ภูริรักษ์เกียรติ. 2543. “การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และชัยสิทธิ์ ภูริรักษ์เกียรติ. 2545. “การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง และณัฐพร พรหมรส. 2551. “การเตรียมฟิล์มบาง CdTe โดยการระเหิดในระยะประชิดเพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2556. “ความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้าของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $In_xWO_3 (0 \leq x \leq 0.05)$ และการประยุกต์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- ฐิตินัย แก้วแดง. 2530. “การเตรียมและศึกษาสมบัติของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์.” วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และชัยสิทธิ์ ภูริรักษ์เกียรติ. 2545. “การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี Zn เพื่อประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. 2547. “การเตรียมฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วย In โดยระเหยในระบบสุญญากาศ.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

- ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2549. “การประดิษฐ์ฟิล์มบางตีบุกออกไซด์ที่เจือด้วยอะตอมฟลูออรีนสำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2550. “การประดิษฐ์ฟิล์มหนา CuAlO_2 เพื่อเป็นชั้นดูดกลืนของเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และณัฐพร พรหมรส. 2551. “การเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธีอบสารละลายเคมีภายใต้คลื่นไมโครเวฟเพื่อประดิษฐ์เป็นหน้าต่างรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ณัฐพร พรหมรส และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2552. “การพัฒนาขั้วไฟฟ้าด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ของฟิล์มบางของรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CuO .” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ และชัยสิงห์ ภูรักษาเกียรติ. 2556. “การประดิษฐ์ฟิล์มบาง $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ เพื่อประยุกต์ใช้เป็นเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2557. “การประดิษฐ์และการศึกษาสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CuO .” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ดุสิต เครื่องาม. 2535. โขลิตสเดทฟิสิกส์. กรุงเทพมหานคร: ซีเอ็ดยูเคชั่น
- นพนัฐ เดชะคำภู. 2556. “การประดิษฐ์ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด.” ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- วีรชัย ลิภา. 2547. “การศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง CdS-ZnS ซึ่งเตรียมโดยวิธีอบสารละลายเคมี.” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- สมเกียรติ ศุภเดช. 2542. เชมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์. แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- สุกฤษฎ์ เกิดแสง. 2547. “การเตรียมและศึกษาสมบัติของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ CdTe .” วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

- Abd-Ellah, M. Thomas, J.P. Zhang, L. and Leung, K.T. 2016 “Enhancement of Solar Cell Performance of p- $\text{Cu}_2\text{O}/\text{n-ZnO}$ -Nanotube and Nanorod Heterojunction Devices.” *Sol. Energy Mater. & Sol. Cells.* 15:87-93.
- Akgul, F.A. Akgul, G. Yildirim, N. Unalan, H.E. and Turan, R. 2014 “Influence of Thermal Annealing in Microstructure, Morphology, Optical Properties and Surface Electronic Structure of Copper Oxide Thin Films.” *Mater. Chem. Phys.* 147:987-995.
- Akimoto, K. Ishizuka, S. Yanagita, M. Nawa, Y. Paul, G.K. and Sakurai, T. 2006 “Thin Film Deposition of Cu_2O and Applications for Solar Cells.”, *Sol. Energy.* 80:715-722.
- Al-Khuhali, M.F. 2008 “Characterization of Copper Oxide Thin Films Deposited by the Thermal Evaporation of Cuprous Oxide (Cu_2O).”, *Vacuum.* 82:623-629.
- Chen, L.C. 2013 “Review of Preparation and Optoelectronic Characteristics of Cu_2O -Based Solar Cells with Nanostructure.” *Materials Science in Semiconductor Processing.* 16:1172-1185.
- Cullity, B.D. 1956. **Elements of X-rays Diffraction.** Addison-Wesley Publishing Company Inc.; pp 9-14.
- De Los Santos Valladares, L. Hurtado Salinas, D. Bustamante Dominguez, A. Acosta Najarro, D. Khondaker, S.J. Mitrelias, T. Barnes, C.H.W. Albino Aguiar, J. and Majima, Y. 2012 “Crystallization and Electrical Resistivity of Cu_2O and CuO Obtained by Thermal Oxidation of Cu Thin Films on SiO_2/Si Substrates.” *Thin Solid Films.* 520:6368–6374.
- Gacia-Cuencu, M.V. Morenza, J.L. Bertran, E. and Lousa, A. 1987. “Electrical Condition in Polycrystalline CdS Films: II. Comparison of Theory and Experiment.” *J. Phys. D: Appl. Phys.* 20:958-962.
- Gaewdang, T. Wongcharoen, Ng. Nopparuchikun, A. Wongcharoen, T. and Poo-Rakkiat, C. 2012 “Fabrication and Characterization of Heterojunction for CdS Thin Films and CuAlO_2 Ceramic Pill Substrate.” *Journal of Metals, Materials and Minerals.* 22(2):125-129.

- Gao, F. Zhang, X.J. Song, M.Z. and Li N. 2012 “Photovoltaic Properties of the p-CuO/n-Si Heterojunction Prepared Through Reactive Magnetron Sputtering.” *J. Appl. Phys.* 111:084507(1)-084507(3).
- Gilmore, A.S. 2000. “Studies of the Basic Electronic Properties of CdTe and CdS Thin Films and CdTe/CdS Solar Cells.” Thesis Proposal Colorado School of Mines.
- Gupta, N. Singh, R. Wu, F. and Narayan, J. 2013 “Deposition and Characterization of Nanostructured Cu₂O Thin Film for Potential Photovoltaic Applications.”, *J Mater, Res.* 28:1740-1746.
- Gunal, I. and Parlak, M. 1997. “Current Transport Mechanisms in Low Resistive CdS Thin Films.” *J. Mater. Sci. Mater. Elec.* 8:9-13.
- Hara, M. Kondo, T. Komoda, M. Ikeda, S. Shinohara, K. Tanaka, A. Kondo, J.N. and Domen, K. 1998 “Cu₂O as a Photocatalyst for Overall Water Splitting under Visible Light Irradiation.” *Chemical Communications.* 3(3):357-358.
- Ismail, R.A. 2009 Characteristics of p-Cu₂O/n-Si Heterojunction Photodiode made by Rapid Thermal Oxidation.”, *Journal of Semiconductor and Science.* 9:51-54.
- Jayathilaka, C. Kapaklis, V. Siripala, W. and Jayanetti, S. 2015 “Improved Efficiency of Electrodeposited p-CuO/n-Cu₂O Heterojunction Solar Cell.” *Appl. Phys. Express.* 8(6):065503(1)-065503(4).
- Jung, Y.S. and Kim, K.H. 2015 “Effect of Post-Annealing Treatment on the Properties of Reactive Sputtered Cuprous Oxide Thin Films.” *J. Korean Phys. Soc.* 67(6):1013-1017.
- Kale, S.N. Ogale, S.B. Shinde, S.R. Sahasrabudhe, M. Kulkarni, V. Greene, R. and Venkatesan, T. 2003 “Magnetism in Cobalt-Doped Cu₂O Thin Films Without and With Al, V, or Zn Co-dopants.” *Appl. Phys. Lett.* 82:2100-2102.
- Kidowaki, H. Oku, T. and Akiyama, T. 2011 “Fabrication and Characterization of CuO/ZnO Solar Cells.”, *Journal of Physics: Conference Series.* 352:012022(1)-012022(5).

- Kittel, C. 1971. *Introduction of Solid State Physics*. 4th ed. New York: John Wiley & Sons Inc.; pp 4-32, 49-48, 56-60, 364-365, 540-552, 611-612.
- Kittel, C. 2005. *Introduction to Solid State Physics*. 8th Edition. United States of America: John Wiley&Sons Inc.
- Kosugi, T. and Kaneko, S. 1998 “Novel Spray Pyrolysis Deposition of Cuprous Oxide Thin Films.”, *J. Am. Ceram. Soc.* 81:3117-3124.
- Kuo, P.W. Hsieh, J.H. Wu, W.T. and Wu, C.H. 2010 “Optoelectronic Properties of Sputter-Deposited Cu₂O-Ag-Cu₂O Treated With Rapid Thermal Annealing.”, *Vacuum*. 84:633-637.
- Minami, T. Nishi, Y. and Miyata, T. 2015 “Heterojunction Solar Cell With 6% Efficiency Based on an n-type Aluminum-Gallium-Oxide Thin Films and p-Type Sodium-Doped Cu₂O Sheet.” *Appl. Phys. Express*. 5:022301(1)-022301(6).
- Mukhopadhyay, A.K. Chakraborty, A.K. Chatterjee, A.P. and Lahiri, S.K. 1992 “Galvanostatic Deposition and Electrical Characterization of Cuprous Oxide Thin Films.” *Thin Solid Films*. 209:92-96.
- Nakashima, Y. and Ichimura, M. 2012 “Electrochemical Deposition of Cu_xSn_yS_zO Thin Films and Their Application for Heterojunction Solar Cells.” *International Journal of Photoenergy*. Article ID 171432:1-8.
- Praveen Janantha, P.A. Perera, I.N.I. Jayathilaka, K.M.D.C. Jayanetti, I.K.D.S. Dissanayaka, D.P. and Siripara, W.P. 2009 “Use of Cu₂O Microcrystalline Thin Film Semiconductors for Gas Sensing.”, *Proc. Tech. Sessions*. 25:70-76.
- Ramaiah, K.S. 1999. “Electrical Properties of in Doped CdS Thin Films.” *J. Mater. Sci. Mater. Elec.* 10:291-294
- Runyan, W.R. 1975. *Semiconductor Measurement and Instrument*. New York: McGrawHill: Bombay.

- Serin, T. Yildiz, A. Sahin, S.H. and Serin, N. 2011. "Extraction of Important Electrical Parameters of CuO." *Physica B*, 406, 575-578.
- Serin, T. Gurakar, S. Serin, N. Yildirim, N. and Ozyurt, Kus F. 2009 "Current Flow Mechanism in Cu₂O/p-Si Heterojunction Prepared by Chemical Method.", *J. Phys. D: Appl. Phys.* 42, 2009:225108(1)- 225108(5).
- Tuttle, J.R., Szalaj, A. and Keane, J. 2000. "A 15.2% AMO/1433 W/kg Thin Films Cu(In,Ga)Se₂ Solar Cell for Space Application." *28th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*. September 15-22.
- Wongcharoen Ng. and Gaewdang T. 2017 "Preparation of CuO Thin Films by Thermally Oxidized Metallic Cu Films for CdS/CuO Heterojunction Diode." *CMU J. Nat. Sci.* 16(1):63-76.
- Wong, T.K.S. Zhuk, S. Masudy-Panah, S. and Dalapati, G.K. 2016 "Current Status and Future Prospects of Copper Oxide Heterojunction Solar Cells.", *Materials*. 9:271(1)-271(21).
- Zhang, L. Mcmillon, L. and McNatt, J. 2013 "Gas-Dependent Bandgap and Electrical Conductivity of Cu₂O Thin Films." *Sol. Energy & Sol. Cells*. 108:230-234.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน นายธนาริพ ภู่ทอง

เกิดเมื่อ วันที่ 4 เมษายน 2538

ภูมิลำเนา จังหวัดนนทบุรี

ประวัติการศึกษา ปี พ.ศ. 2555 จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย

โรงเรียนมทรธนพาราม

ปี พ.ศ. 2556 เข้ารับการศึกษาระดับอุดมศึกษา หลักสูตรฟิสิกส์ประยุกต์

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้