

การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xTe$
เพื่อประยุกต์ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์

PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF $Cd_{1-x}Zn_xTe$
THIN FILMS FOR SOLAR CELL APPLICATION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2561

KMIT-2018-SC-M-030-011

การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xTe$
เพื่อประยุกต์ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์

PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF $Cd_{1-x}Zn_xTe$
THIN FILMS FOR SOLAR CELL APPLICATION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KMIT-2018-SC-M-030-011

PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$
THIN FILMS FOR SOLAR CELL APPLICATION



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE
DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN APPLIED PHYSICS
DEPARTMENT OF PHYSICS
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KMIT-2018-SC-M-030-011



COPYRIGHT 2018

FACULTY OF SCIENCE


KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ “การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xTe$ เพื่อประยุกต์ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์”
“PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF $Cd_{1-x}Zn_xTe$ THIN FILMS FOR SOLAR CELL APPLICATION”

ชื่อนักศึกษา นางสาวกัญญ์ณัชฐ์ จันทร์ครบ
รหัสประจำตัว 59605084
ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา ฟิสิกส์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ฐิตินัย แก้วแดง

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ ประธานกรรมการ รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ อาจารย์บัณฑิตประจำ (ในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้อง) รศ.วิชิต ศิริโชติ อาจารย์บัณฑิตประจำ (ในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้อง) รศ.ดร.ฐิตินัย แก้วแดง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	

วัน/ เดือน/ ปี ที่สอบ วันพุธที่ 4 กรกฎาคม พ.ศ. 2561 เวลา 13.00-16.00 น.
สถานที่สอบ ณ ห้อง 307 อาคารจุฬารามวลัยลักษณ์ 1 ชั้น 3

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.อิทธิพล แจ้งชัด)

คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xTe$ เพื่อประยุกต์ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์
ชื่อนักศึกษา	นางสาวกัญญ์กนิษฐ์ จันทร์ครบ
รหัสประจำตัว	59605084
ปริญญา	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
ภาควิชา	ฟิสิกส์
พ.ศ.	2561
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. รุติฉัย แก้วแดง

บทคัดย่อ

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกใสโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ จากนั้นจึงทำการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์พบว่าฟิล์มทั้งหมดมีโครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์ และปรากฏระนาบ (111) เป็นระนาบที่โดดเด่น ตรวจสอบลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุต่างๆของฟิล์มบางด้วยเทคนิค EDS และ XPS ตามลำดับ ตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีและพันธะเคมีที่พื้นผิวของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ด้วยรามานสเปกโทรสโคปี และฟูเรียรานพอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี ศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางโดยวัดสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง เพื่อทำการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ที่อุณหภูมิห้อง ศึกษาสมบัติการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ เพื่อศึกษากลไกการนำไฟฟ้า และทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเชิงแสงเพื่อคำนวณหาค่าช่วงชีวิตของพาหะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ อีกทั้งยังได้ทำการประดิษฐ์ไดโอดชนิดรอยต่อวิวิพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $ITO/Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te$ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด ทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงทั้งที่อุณหภูมิห้อง และที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง และทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสสลับโดยการวัดแอดมิตแตนซ์สเปกโทรสโคปีและอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปีที่อุณหภูมิห้อง

คำสำคัญ : ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำแคดเมียมซิงค์เทลลูไรด์ ลักษณะเฉพาะของกระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า วิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด แอดมิตแตนซ์สเปกโทรสโคปี

Thesis Title	PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF Cd _{1-x} Zn _x Te THIN FILMS FOR SOLAR CELL APPLICATION
Student Name	Miss. Kankanis Chanthercrob
Student ID	59605084
Degree	Master of Science
Department	Physics
Year	2018
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. Thitinai Geawdang

Abstract

In this thesis, Cd_{1-x}Zn_xTe thin films in the whole range ($0 \leq x \leq 1$) were deposited on by close spaced sublimation (CSS) method. XRD revealed that the all prepared films exhibited the zincblende structure with the preferred orientation of (111) plane. SEM, EDS and XPS were used to study the surface morphology and elemental compositions of the samples. Chemical structure and chemical bonding between its constitutional elements were studied by Raman spectroscopy and FTIR spectroscopy. The transmission spectra of the films were measured for determining energy gap value. Electrical properties were performed by Hall effect measurements. The variations of electrical conductivity as a function of measured temperature were performed in order to identify the dominant conduction mechanism. The carrier lifetime was studied by the transient photoconductivity. Moreover, we prepared ITO/Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te heterojunction by close spaced sublimation (CSS) method. Electrical properties were measured by measuring the current and voltage relationship at room and low temperature. Finally, the admittance and impedance spectroscopies were studied at room temperature.

Keywords : CdZnTe thin films, I-V characteristic, Close spaced sublimation method, Admittance spectroscopy.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาของ รองศาสตราจารย์ ดร. ฐิตินัย แก้วแดง รองศาสตราจารย์ งามนิตย์ วงษ์เจริญ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ ที่คอยอบรม สอนวิชาความรู้ต่างๆ และคอยช่วยเหลือในทุกๆด้านตลอดมา จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ นักศึกษาในห้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุโพลีเมอร์ สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่คอยให้ความช่วยเหลือในการทำงานเสมอ

สุดท้ายขอกราบขอบคุณ อาจารย์ทุกท่าน ที่เมตตาประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ตั้งแต่ การศึกษาภาคบังคับจนถึงปัจจุบัน ตลอดจนกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และผู้มีพระคุณทุกท่าน ที่ให้การอุปการะทุนในการศึกษาเล่าเรียน และเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา

กัญญ์กนิษฐ จันท์ครบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญรูป	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย/ปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	4
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเรื่องของลักษณะของโครงสร้างผลึก	7
2.1.1 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ	8
2.1.2 โครงสร้างผลึกแบบเวอ์ทไซต์ (wurtzite structure)	12
2.1.3 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ (zinc blend structure)	12
2.1.4 ข้อบกพร่องผลึก	13
2.1.4.1 ข้อบกพร่องผลึกแบบจุด (point defect)	13
2.1.4.2 ข้อบกพร่องผลึกแบบเชิงเส้น (line defect)	14
2.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์	15
2.3 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	16
2.4 สมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ	18
2.4.1 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน	18
2.4.2 สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง	21
2.4.3 การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ	22
2.4.4 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง	22
2.4.5 ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี	25
2.5 สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง	29
2.5.1.1 สารกึ่งตัวนำอินทรีนสิก	29
2.5.1.2 สารกึ่งตัวนำชนิดเอกซ์ทรีนสิก	31
2.6 สภาพนำไฟฟ้า	35
2.7 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7.1 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง (direct resistivity method)	37
2.7.2 การวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์	38
2.8 ปราบกฎการณฮอลล์	39
2.8.1 การศึกษาปราบกฎการณฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์	43
2.9 กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในฟิล์มบางในช่วงอุณหภูมิต่างๆ	46
2.9.1 กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในฟิล์มบางในช่วงอุณหภูมิสูง	47
2.9.2 กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในฟิล์มบางในช่วงอุณหภูมิต่ำปานกลาง	49
2.9.3 การนำไฟฟ้าของพาหะแบบกระโดดในระยะไม่คงที่ (Variable Range Hopping Conduction: VRH)	51
2.10 การระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด (Close-Space Sublimation: CSS)	54
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	56
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	65
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัย	65
3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	65
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	65
3.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค	66
3.1.4 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค	66
3.1.5 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาองค์ประกอบของธาตุต่างๆของฟิล์มบาง	66
3.1.6 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางแสง	66
3.1.7 เครื่องมือที่ใช้ในการวัดสมบัติทางไฟฟ้า	66
3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	67
3.2.1 การเตรียมและทำความสะอาดแผ่นกระจกสไลด์เพื่อเป็นฐานรองรับ	67
3.2.2 การเตรียมและทำความสะอาดระบบระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	67
3.2.3 การเตรียมผลึกของสารตั้งต้น $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่มีองค์ประกอบต่างกัน	68

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.4 การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิดภายในระยยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	70
3.2.5 การเตรียมไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $ITO/Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te$ โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิดภายในระยยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	73
3.3 การศึกษาสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	75
3.3.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค	75
3.3.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค	75
3.3.3 การศึกษาสมบัติทางแสง	75
3.3.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า	75
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	76
4.1 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยสมบัติทางความร้อนของผลึกของสารกึ่งตัวนำ $CdTe$ และ $ZnTe$	76
4.2 ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	78
4.3 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	79
4.4 ผลการศึกษาภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	83
4.5 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานที่บริเวณชั้นผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	85
4.6 ผลการศึกษาการวัดจำนวนโฟโตอิมิชชันของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	88
4.7 ผลการศึกษาสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	95

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.8 ผลการศึกษารามานสเปกโทรสโกปีของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	98
4.9 ผลการศึกษาฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	99
4.10 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	100
4.11 ผลการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	101
4.12 ผลการศึกษาศมบัติทางไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-200 องศาเซลเซียส เพื่อหาค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	109
4.13 ผลการศึกษาศมบัติทางไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	115
4.14 ผลการศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	124
4.15 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $ITO/Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te$	127
4.16 ผลการศึกษาภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $ITO/Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te$	128
4.17 ผลการศึกษาสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $ITO/Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te$	129
4.18 การศึกษาศมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ $ITO/Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	130

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.18.1 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd _{0.6} Zn _{0.4} Te ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	130
4.18.2 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่ภายใต้การฉายแสงที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ ในช่วงความเข้มแสง 50 - 100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd _{0.6} Zn _{0.4} Te ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	141
4.18.3 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 190-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd _{0.6} Zn _{0.4} Te ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	150
4.18.4 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสสลับในช่วงความถี่ 20 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิรตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd _{0.6} Zn _{0.4} Te ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	158
4.18.5 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดัน ไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธ-พันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd _{0.6} Zn _{0.4} Te ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	165
บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ	175
5.1 ผลการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cd _{1-x} Zn _x Te (0 ≤ x ≤ 1) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	175
5.2 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd _{0.6} Zn _{0.4} Te ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	177

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2.1 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ที่ภายใต้การฉายแสงที่ความเข้มค่าต่างๆ ในช่วง 50-100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร และอุณหภูมิค่าในช่วง อุณหภูมิ 190-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd _{0.6} Zn _{0.4} Te ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	177
5.2.2 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้า และ ความนำไฟฟ้า กับ ความถี่ เมื่อทำการไบแอสด้วยแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.8 ถึง 0.8 โวลต์ที่ อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd _{0.6} Zn _{0.4} Te ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	178
5.3 ข้อเสนอแนะ	179
เอกสารอ้างอิง	
ภาคผนวก	
ประวัติผู้เขียน	

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ของหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ	8
2.2 แสดงระบบผลึกทั้งเจ็ดแบบในระบบสามมิติ	9
2.3 แสดงความสัมพันธ์ของดัชนีมิลเลอร์ (hkl) และจุดตัดแกนผลึก (x,y,z)	11
2.4 แสดงค่าเลขคลื่นต่างๆของพลังงานที่ได้จากการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ	27
3.1 แสดงปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) จำนวน 1 กรัม และแสดงอุณหภูมิ Source และอุณหภูมิ Substrate ในขณะที่ทำการเตรียมฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0.00 \leq x \leq 0.10$) โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด	70
4.1 แสดงมุม ระนาบของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ และขนาดเกรนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที	80
4.2 แสดงค่าคงที่โครงสร้างของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที	81
4.3 แสดงองค์ประกอบของธาตุต่างๆ ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที	87
4.4 แสดงองค์ประกอบของธาตุต่างๆวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XPS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที	93
4.5 แสดง Raw Area และ Atomic Conc % ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที	93
4.6 แสดงองค์ประกอบของธาตุ O ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค XPS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที	95
4.7 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที	97
4.8 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่คำนวณได้จากผลการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที	108

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าพลังงานกระตุ้น กับ ค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) เมื่อทำการวัดค่าความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-200 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมี ด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที	113
4.10 แสดงค่าพลังงานกระตุ้น (E_g) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที	113
4.11 แสดงค่าพารามิเตอร์ของกลไกการนำกระแสไฟฟ้าตามแบบจำลองของซีโตของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1.0$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที	122
4.12 แสดงค่าพารามิเตอร์ของกลไกการนำกระแสไฟฟ้าตามแบบจำลองการกระโดดระหว่างสถานะพลังงานท้องถิ่นในระยะไม่คงที่ (Mott-VRH) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ เมื่อ $x=1.0$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที	122
4.13 แสดงค่าพารามิเตอร์ของกลไกการนำกระแสไฟฟ้าตามแบบจำลองการกระโดดแบบเอโฟโรส-ชลอปสกี ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ เมื่อ $x=1.0$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที	123
4.14 แสดงความไวในการตอบสนองต่อแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที	124
4.15 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงดื้อรั้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0.8 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที ที่ได้จากการปรับผลการทดลองที่อุณหภูมิห้องให้เข้ากับฟังก์ชันมัลติเพิลเอ็กซ์โพแนนเชียล	125
4.16 ความหนาแน่นของประจุชนิดต่างๆ ที่ได้จากการวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงดื้อรั้น $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0.8 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที ที่ได้จากการปรับผลการทดลองที่อุณหภูมิห้องให้เข้ากับฟังก์ชันมัลติเพิลเอ็กซ์โพแนนเชียล	126

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.17 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิมิต์ย้อนกลับ (I_s) ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ (n) ค่าความสูงของกำแพงศักย์ (Φ_B) และค่าความต้านทานอนุกรม (R_s) ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd _{0.6} Zn _{0.4} Te ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ ขณะไม่มีการฉายแสง ที่อุณหภูมิห้อง	140
4.18 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิมิต์ย้อนกลับ (I_s) ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ (n) ค่าความสูงของกำแพงศักย์ (Φ_B) และค่าความต้านทานอนุกรม (R_s) ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd _{0.6} Zn _{0.4} Te ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ ภายใต้การฉายแสงที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ ในช่วง 50-100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร	145
4.19 แสดงค่ากระแสลัดวงจร และ แรงดันวงจรเปิด ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ ภายใต้การฉายแสงที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ ในช่วง 50-100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ที่อุณหภูมิห้อง	145
4.20 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิมิต์ย้อนกลับ (I_s) ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ (n) ค่าความสูงของกำแพงศักย์ (Φ_B) ค่าความต้านทานอนุกรม (R_s) ค่ากระแสลัดวงจร และ แรงดันวงจรเปิดของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd _{0.6} Zn _{0.4} Te ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ ภายใต้การฉายแสงที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ ในช่วง 50-100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร	149
4.21 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิมิต์ย้อนกลับ (I_s) ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ (n) ค่าความสูงของกำแพงศักย์ (Φ_B) และค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม (R_s) ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มิออนิกอิมิตชัน วิธีของชวง และวิธีของนอร์ด เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง ITO/Cd _{0.6} Zn _{0.4} Te	154
4.22 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีของไดโอด ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	162

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ	9
2.2 แสดงการบอกชื่อระนาบต่างๆของผลึก	10
2.3 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซด์ของผลึกแคดเมียมซีลีไนด์	12
2.4 แสดงโครงสร้างแบบซิงค์แบลนด์ของผลึกแคดเมียมเทลลูไรด์	13
2.5 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบจุดชนิดต่างๆ	14
2.6 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชันแบบขอบและดิสโลเคชันแบบสกรู	14
2.7 แสดงเกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน	15
2.8 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์	16
2.9 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	17
2.10 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานอย่างง่ายของ ก. ฉนวน ข. สารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ ค. สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ง. สารกึ่งตัวนำชนิดพี จ. โลหะ ฉ. สารกึ่งโลหะ	18
2.11 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานและการย้ายสถานะของพลังงานอิเล็กตรอนของ สารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ($T=0$ เคลวิน)	20
2.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนของสาร กึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ($T=0$ เคลวิน)	20
2.13 แสดงแผนภาพเมื่อแสงตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มบาง	21
2.14 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การ ดูดกลืนแสง กับ พลังงานโฟตอน	23
2.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง กับ ค่าพลังงานโฟตอน หรือค่าความยาวคลื่นของพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำ	25
2.16 แสดงสเปกตรัมอินฟราเรด สเปกตรัมของ 2-pentanone	26
2.17 แสดงรูปแบบการสั่นของพันธะเคมีระหว่างไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้าของสารอินทรีย์	26
2.18 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น กับส่วนกลับของอุณหภูมิ	32
2.19 แสดงการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง	37
2.20 แสดงตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชิ้นสารตัวอย่างเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและสภาพ ต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์	38
2.21 แสดงการต่อขั้วเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวน- เดอร์เพาว์	38
2.22 แสดงแผนภาพการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์บนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำชนิดพี	40
2.23 แสดงการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์บนสารตัวอย่างที่เป็นแผ่น บางที่มีรูปทรงใดๆ	44
2.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I)	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.25 แสดงแบบจำลองของฟิล์มบางตรงบริเวณขอบรอยต่อของเกรน	47
2.26 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln \sigma$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่อุณหภูมิในช่วง 125-365 เคลวิน สำหรับในรูปแทรกคือกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln \sigma T^{-1}$ กับ $\frac{1000}{T}$ (serin et al., 2011)	50
2.27 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln \sigma T^{1/2}$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO สำหรับในรูปแทรกกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln \sigma T^{1/2}$ กับ $T^{-1/4}$	51
2.28 แสดงแผนภาพพลังงานของรอยต่อวิวิธพันธุ์ n-ZnO/pCdTe ที่ Volts = 0 V : $E_g(\text{ZnO})=3.3\text{eV}$, $\chi(\text{ZnO})=4.35\text{eV}$, $E_g(\text{CdTe})=1.5\text{eV}$, $\chi(\text{CdTe})=4.28\text{eV}$, $\Delta E_c = 0.07\text{ eV}$, $\Delta E_v = 1.72\text{eV}$, $e\phi_k = 1.27\text{eV}$, E_{vac} คือระดับสูญญากาศ E_F คือระดับเฟอร์มิ E_c และ E_v คือ พลังงานแถบนำ และ พลังงานแถบวาเลนซ์ χ คือ อิเล็กตรอนอัฟฟินิตี และ E_g คือพลังงานช่องว่างแถบพลังงาน	56
2.29 แสดงลักษณะของ $I-V$ ของโครงสร้างรอยต่อวิวิธพันธุ์ n-ZnO/p-CdTe ที่วัดภายใต้ อุณหภูมิต่างๆ 1-295 เคลวิน, 2-313 เคลวิน, 3-323 เคลวิน, 4-333 เคลวิน, และ 5-355 เคลวิน อุณหภูมิส่งผลต่อค่าความสูงของกำแพงศักย์ $e\phi_k$	57
2.30 แสดงลักษณะเฉพาะของ $\ln I-V$ ของโครงสร้างรอยต่อวิวิธพันธุ์ n-ZnO/p-CdTe ที่ อุณหภูมิต่างๆ: 1-295 เคลวิน, 2-313 เคลวิน, 3-333 เคลวิน และ 4-355 เคลวิน ส่วนแทรกแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับกระแสอิ่มตัวที่เกิดขึ้นในฟังก์ชันของ $\ln I_s = f(10^3/T)$	59
2.31 ลักษณะเฉพาะของ $\ln I - \ln V$ ภายใต้ไบแอสกลับทางของรอยต่อวิวิธพันธุ์ n-ZnO/p-CdTe ที่อุณหภูมิต่างๆ: 1-292 K, 2-307 K, 3-313 K, 4-333 K	61
2.32 ลักษณะ $C-V$ ของโครงสร้างรอยต่อวิวิธพันธุ์ n-ZnO/p-CdTe ที่ความถี่แตกต่างกันของ ไฟกระแสสลับ: 1-30 kHz, 2-20 kHz, and 3-10 kHz	63
2.33 ลักษณะ $I-V$ ขณะไม่ฉายแสง (1) และ ลักษณะ $I-V$ ขณะฉายแสง (2) ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ n-ZnO/p-CdTe	63
3.1 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการประดิษฐ์ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสูญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที	72

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.2 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการประดิษฐ์ไดโอดที่มีรอยต่อ วิธีพันธุของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd _{0.6} Zn _{0.4} Te ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วย ความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที	74
3.3 แสดงระบบการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด ภายในระบบสุญญากาศ	74
4.1 แสดงน้ำหนักโดยใช้เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริก อะนาไลเซอร์ของผลึกของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่ลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น	77
4.2 แสดงน้ำหนักโดยใช้เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริก อะนาไลเซอร์ของผลึกของสารกึ่งตัวนำ ZnTe ที่ลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น	77
4.3 ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cd _{1-x} Zn _x Te (0 ≤ x ≤ 1) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมี ด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที	78
4.4 แสดงพีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cd _{1-x} Zn _x Te (0 ≤ x ≤ 1) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบ สุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที	79
4.5 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Texture Coefficient กับเศษส่วนโดยโมลอะตอม ของธาตุ Zn ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cd _{1-x} Zn _x Te (0 ≤ x ≤ 1) ที่เตรียมโดยวิธีการ ระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการ ระเหิดสารเคมี 20 นาที	81
4.6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่โครงสร้างกับเศษส่วนโดยโมลอะตอมของธาตุ Zn ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cd _{1-x} Zn _x Te (0 ≤ x ≤ 1) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมี ด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที	82
4.7 แสดงภาพถ่าย SEM ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cd _{1-x} Zn _x Te (0 ≤ x ≤ 1) ที่เตรียม โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้ เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที	83
4.8 แสดงสเปกตรัม EDS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cd _{1-x} Zn _x Te (0 ≤ x ≤ 1) ที่เตรียม โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้ เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที	85
4.9 แสดงแผนที่การกระจายตัวของธาตุในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cd _{1-x} Zn _x Te (0 ≤ x ≤ 1) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที	86

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.10 แสดงสเปกตรัม XPS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที	88
4.11 แสดงสเปกตรัม XPS ในช่วง 402-418 อิเล็กตรอนโวลต์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 0.8$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที	89
4.12 แสดงสเปกตรัม XPS ในช่วง 570-593 อิเล็กตรอนโวลต์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที	90
4.13 แสดงสเปกตรัม XPS ในช่วง 570-593 อิเล็กตรอนโวลต์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที	91
4.14 แสดงสเปกตรัม XPS ในช่วง 1017-1060 อิเล็กตรอนโวลต์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0.2 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที	92
4.15 แสดงสเปกตรัม XPS ในช่วง 527-536 อิเล็กตรอนโวลต์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0.2 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที	94
4.16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที	95
4.17 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(\alpha hv)^2$ กับ hv ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที	96
4.18 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงานกับเศษส่วนโดยโมลอะตอมของธาตุ Zn ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที	96
4.19 แสดงสเปกตรัม Raman ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที	98

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.20 แสดงสเปกตรัม FTIR ในช่วงคลื่น 400-4000 ต่อเซนติเมตร ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที	99
4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเพื่อหาค่าความต้านทานจากกราฟของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที	100
4.22 แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้าและสัดส่วนโดยโมลอะตอมของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ	101
4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_{24}) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ เมื่อ $x=0.0$ เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที	101
4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ฮอลล์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ เมื่อ $x=0.0$ เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที	102
4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_{24}) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ เมื่อ $x=0.2$ เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที	102
4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ฮอลล์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ เมื่อ $x=0.2$ เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที	103
4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_{24}) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ เมื่อ $x=0.4$ เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที	103

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ฮอลล์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ เมื่อ $x=0.4$ เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที	104
4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_{24}) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ เมื่อ $x=0.6$ เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที	104
4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ฮอลล์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ เมื่อ $x=0.6$ เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที	105
4.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_{24}) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ เมื่อ $x=0.8$ เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที	105
4.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ฮอลล์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ เมื่อ $x=0.8$ เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที	106
4.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_{24}) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ เมื่อ $x=1.0$ เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที	106

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ฮอลล์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ เมื่อ $x=1.0$ เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที	107
4.35 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอน และค่าสภาพคล่องของพาหะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที	108
4.36 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1000/T$ กับค่า $\ln(R_0/R)$ เมื่อทำการวัดค่าความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-150 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ เมื่อ $x=0.0$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที	110
4.37 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1000/T$ กับค่า $\ln(R_0/R)$ เมื่อทำการวัดค่าความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-150 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ เมื่อ $x=0.2$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที	111
4.38 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1000/T$ กับค่า $\ln(R_0/R)$ เมื่อทำการวัดค่าความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-150 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ เมื่อ $x=0.4$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที	111
4.39 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1000/T$ กับค่า $\ln(R_0/R)$ เมื่อทำการวัดค่าความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-150 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ เมื่อ $x=0.6$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที	112
4.40 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1000/T$ กับค่า $\ln(R_0/R)$ เมื่อทำการวัดค่าความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-200 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ เมื่อ $x=1.0$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที	112
4.41 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(\sigma)$ กับ $1000/T$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที	115

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.42 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(\sigma)$ กับ $1000/T$, $\ln(\sigma T^{1/2})$ กับ $1000/T$, $\ln(\sigma T^{1/2})$ กับ $T^{-1/4}$ และ $\ln(\sigma T)$ กับ $T^{-1/2}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ เมื่อ $x=0.0$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที	116
4.43 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(\sigma)$ กับ $1000/T$, $\ln(\sigma T^{1/2})$ กับ $1000/T$, $\ln(\sigma T^{1/2})$ กับ $T^{-1/4}$ และ $\ln(\sigma T)$ กับ $T^{-1/2}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ เมื่อ $x=0.2$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที	117
4.44 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(\sigma)$ กับ $1000/T$, $\ln(\sigma T^{1/2})$ กับ $1000/T$, $\ln(\sigma T^{1/2})$ กับ $T^{-1/4}$ และ $\ln(\sigma T)$ กับ $T^{-1/2}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ เมื่อ $x=0.4$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที	118
4.45 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(\sigma)$ กับ $1000/T$, $\ln(\sigma T^{1/2})$ กับ $1000/T$, $\ln(\sigma T^{1/2})$ กับ $T^{-1/4}$ และ $\ln(\sigma T)$ กับ $T^{-1/2}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ เมื่อ $x=0.6$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที	119
4.46 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(\sigma)$ กับ $1000/T$, $\ln(\sigma T^{1/2})$ กับ $1000/T$, $\ln(\sigma T^{1/2})$ กับ $T^{-1/4}$ และ $\ln(\sigma T)$ กับ $T^{-1/2}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ เมื่อ $x=0.8$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที	120
4.47 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(\sigma)$ กับ $1000/T$, $\ln(\sigma T^{1/2})$ กับ $1000/T$, $\ln(\sigma T^{1/2})$ กับ $T^{-1/4}$ และ $\ln(\sigma T)$ กับ $T^{-1/2}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ เมื่อ $x=1.0$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที	121
4.48 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟโตกับเวลาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที	124
4.49 แสดงพีคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ ITO/ $Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te$	127
4.50 แสดงภาพถ่าย SEM แบบตัดขวางของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/ $Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	128
4.51 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te$	129

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.52 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $(\alpha hv)^2$ กับ hv ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te$	129
4.53 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า (I) กับ แรงดันไฟฟ้า (V) ที่ช่วงแรงดันไฟฟ้า -2.5 ถึง 2.5 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $ITO/Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	131
4.54 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความหนาแน่นกระแส (J) กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า (V) ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $ITO/Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	131
4.55 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I$ กับ $\ln V$ ที่อุณหภูมิห้อง เพื่อใช้อธิบายกลไกการนำกระแสไฟฟ้าในแต่ละช่วงของค่าแรงดัน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $ITO/Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	132
4.56 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I$ กับ V ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $ITO/Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	132
4.57 แสดงกราฟวิธีของช่วงที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง $dV/d(\ln I)$ กับกระแสไฟฟ้า ขณะไม่มีการฉายแสง ที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $ITO/Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	133
4.58 แสดงกราฟวิธีของช่วงที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง $H(I)$ กับกระแสไฟฟ้า ขณะไม่มีการฉายแสง ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $ITO/Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	133
4.59 แสดงกราฟวิธีของนอร์ด ที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง $F(V)$ กับแรงดันไฟฟ้าช่วง -2.5 ถึง 2.5 โวลต์ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $ITO/Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	134
4.60 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(dI/dV)^{-1}$ กับแรงดันไฟฟ้า ขณะไม่มีการฉายแสง ที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $ITO/Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	134

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.61 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า (I) กับ แรงดันไฟฟ้า (V) ที่ช่วงแรงดันไฟฟ้า -2.0 ถึง 2.0 โวลต์ เมื่อวัดภายใต้การฉายแสงที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ ในช่วง 50-100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd _{0.6} Zn _{0.4} Te ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	142
4.62 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความหนาแน่นกระแส (J) กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า (V) ที่ภายใต้การฉายแสงที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ ในช่วง 50-100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd _{0.6} Zn _{0.4} Te ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	142
4.63 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง lnI กับ lnV ที่ภายใต้การฉายแสงที่ความเข้มค่าต่างๆ ตั้งแต่ช่วง 50-100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร เพื่อใช้อธิบายกลไกการนำกระแสไฟฟ้าในแต่ละช่วงของค่าแรงดัน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd _{0.6} Zn _{0.4} Te ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	143
4.64 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง lnI กับ V ที่ภายใต้การฉายแสงที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ ในช่วง 50-100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd _{0.6} Zn _{0.4} Te ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	144
4.65 แสดงกราฟวิธีของขงที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง dV/d(lnI) กับกระแสไฟฟ้า ที่ภายใต้การฉายแสงที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ ในช่วง 50-100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd _{0.6} Zn _{0.4} Te ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	146
4.66 แสดงกราฟวิธีของขงที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง H(I) กับกระแสไฟฟ้า ที่ภายใต้การฉายแสงที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ ในช่วง 50-100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd _{0.6} Zn _{0.4} Te ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	147
4.67 แสดงกราฟวิธีของนอร์ด ที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง F(V) กับแรงดันไฟฟ้าช่วง -2.0 ถึง 2.0 โวลต์ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd _{0.6} Zn _{0.4} Te ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	148

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.68 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า (I) กับ แรงดันไฟฟ้า (V) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 190-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd _{0.6} Zn _{0.4} Te ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	150
4.69 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความหนาแน่นกระแส (J) กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า (V) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วง 190-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd _{0.6} Zn _{0.4} Te ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	151
4.70 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า lnI กับ lnV เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วง 190-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd _{0.6} Zn _{0.4} Te ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	151
4.71 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า lnI กับ V เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วง 190-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd _{0.6} Zn _{0.4} Te ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	152
4.72 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $dV/d(\ln I)$ กับ I เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วง 190-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd _{0.6} Zn _{0.4} Te ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	152
4.73 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า H(I) กับ I เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วง 190-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd _{0.6} Zn _{0.4} Te ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	153
4.74 แสดงกราฟวิธีของนอร์ด ที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง F(V) กับแรงดันไฟฟ้าช่วง -1.5 ถึง 1.5 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วง 190-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd _{0.6} Zn _{0.4} Te ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	153
4.75 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแฟกเตอร์อุดมคติ กับ อุณหภูมิ ที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน และวิธีของชวง ที่เป็นความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 190-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd _{0.6} Zn _{0.4} Te ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	154

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.76 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูงกำแพงศักย์ กับ อุณหภูมิ ที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มอไดนามิกส์ชั้น วิธีของชวง และวิธีของนอร์ด ที่เป็นความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 190-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd _{0.6} Zn _{0.4} Te ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	155
4.77 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม กับ อุณหภูมิ ที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มอไดนามิกส์ชั้น ที่เป็นความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 190-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd _{0.6} Zn _{0.4} Te ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	155
4.78 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม กับ อุณหภูมิ ที่คำนวณได้จากวิธีของชวง ที่เป็นความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 190-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd _{0.6} Zn _{0.4} Te ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	156
4.79 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม กับ อุณหภูมิ ที่คำนวณได้จากวิธีของนอร์ด ที่เป็นความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 190-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd _{0.6} Zn _{0.4} Te ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	156
4.80 แสดงกราฟอาร์เนียบของ $n[\ln p]$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 190-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd _{0.6} Zn _{0.4} Te ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	157
4.81 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับความถี่ ที่แรงดันไบแอสในช่วง -0.8-0.8 โวลต์ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd _{0.6} Zn _{0.4} Te ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	158
4.82 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้ากับความถี่ ที่แรงดันไบแอสในช่วง -0.8-0.8 โวลต์ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd _{0.6} Zn _{0.4} Te ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	158

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.83 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ ที่แรงดันไบแอสในช่วง -0.8-0.8 โวลต์ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd _{0.6} Zn _{0.4} Te ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	159
4.84 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ ที่แรงดันไบแอสในช่วง -0.8-0.8 โวลต์ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd _{0.6} Zn _{0.4} Te ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	159
4.85 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ที่แรงดันไบแอสในช่วง -0.8-0.8 โวลต์ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd _{0.6} Zn _{0.4} Te ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	160
4.86 แสดงวงจรสมมูลสำหรับการจำลอง (simulation) หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ	160
4.87 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานขั้วไฟฟ้า และ ค่าคงตัวของเวลา กับแรงดันไบแอสในช่วง -0.8-0.8 โวลต์ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd _{0.6} Zn _{0.4} Te ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	163
4.88 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานชั้นที่ และ ความต้านทานของกัปกพาหะ กับแรงดันไบแอสในช่วง -0.8-0.8 โวลต์ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd _{0.6} Zn _{0.4} Te ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	163
4.89 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุบริเวณพริ่งพาหะ และ ค่าความจุของกัปกพาหะ กับแรงดันไบแอสในช่วง -0.8-0.8 โวลต์ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd _{0.6} Zn _{0.4} Te ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	164
4.90 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของกัปกพาหะ และ ค่าคงตัวของเวลา กับแรงดันไบแอสในช่วง -0.8-0.8 โวลต์ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd _{0.6} Zn _{0.4} Te ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	164
4.91 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd _{0.6} Zn _{0.4} Te ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	165

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.92 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความนำไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 50 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd _{0.6} Zn _{0.4} Te ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	166
4.93 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง C_{adj} กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 50 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd _{0.6} Zn _{0.4} Te ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	167
4.94 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง G_{adj} กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 50 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd _{0.6} Zn _{0.4} Te ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	168
4.95 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง R_s กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 50 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd _{0.6} Zn _{0.4} Te ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	168
4.96 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง C_{ox} กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 50 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd _{0.6} Zn _{0.4} Te ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	169
4.97 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง D_{it} กับ ความถี่ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd _{0.6} Zn _{0.4} Te ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	169
4.98 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1/C^2$ กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ที่ความถี่ 50 กิโลเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd _{0.6} Zn _{0.4} Te ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	170
4.99 แสดงแผนภาพแถบพลังงานของรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd _{0.6} Zn _{0.4} Te ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ	174

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

สถานการณ์ในปัจจุบันโลกกำลังเผชิญกับปัญหาด้านทรัพยากรธรรมชาติที่ลดน้อยถอยลงไปทำให้มีปัญหาด้านพลังงานโลกกำลังขาดแคลนตามมาอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ในยุคที่สังคมเต็มไปด้วยเทคโนโลยีล้ำสมัยสิ่งอำนวยความสะดวกครบครัน อีกทั้งการเติบโตทางเศรษฐกิจขยายตัวเพิ่มขึ้น มีการผลิตสินค้าและบริการมากมายทำให้มนุษย์รักความสะดวกสบายมากขึ้นส่งผลให้มีอุปนิสัยในการบริโภคที่เกินพอดีผนวกกับจำนวนประชากรโลกในปัจจุบันที่เพิ่มสูงขึ้นยิ่งทำให้มีการบริโภคพลังงานสูงมากขึ้นเป็นทวีคูณ การแก้ปัญหาวิกฤติพลังงานโดยการบริโภคให้น้อยลงจึงแทบจะเป็นไปไม่ได้และไม่ใช่วิธีการแก้ปัญหาอย่างยั่งยืนจึงต้องหาหนทางการบริโภคที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นแทนแหล่งกำเนิดพลังงานที่ได้จากฟอสซิล คือ น้ำมัน ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ เชื้อเพลิง ที่นอกจากจะมีอยู่อย่างจำกัดใช้แล้วหมดไปยังเป็นต้นตอของปัญหาสิ่งแวดล้อมเป็นพิษและทำลายชั้นบรรยากาศอีกด้วย จากสถานการณ์ราคาน้ำมันในปัจจุบันที่นับวันราคายิ่งแพงขึ้นยิ่งตอกย้ำให้เห็นว่าแหล่งพลังงานที่ได้จากฟอสซิลกำลังจะหมดไป โดยมีการคาดการณ์ไว้ว่าอีกประมาณ 50-60 ปี น้ำมันจะหมดไปจากโลกนี้ด้วยเหตุนี้เองจึงทำให้ทั่วโลกเริ่มตื่นตัว มีการหยิบยกเรื่องพลังงานทดแทนมาหารือในการประชุมระดับเวทีโลก มีข้อตกลงในความร่วมมือ ช่วยกันค้นคว้าวิจัยและพัฒนา เพื่อเป็นทางเลือกและทางออกในการแก้ไขปัญหาพลังงานของโลก

ปัจจุบันนี้มีความพยายามแสวงหาพลังงานใหม่มาทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลประเภทน้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ และถ่านหิน พลังงานที่ประเทศต่างๆหันมาให้ความสนใจ คือ พลังงานแสงอาทิตย์ เนื่องจากแหล่งต้นกำเนิดพลังงานไม่มีค่าใช้จ่าย สาดส่องไปทุกที่และยังอยู่กับมนุษย์ไปอีกนาน เป็นพลังงานที่สะอาดไร้มลพิษขณะใช้งานจึงไม่มีการปล่อยมลพิษและของเสีย จึงช่วยลดและหยุดภาวะโลกร้อน นอกจากนี้จะไม่สร้างมลพิษทางอากาศแล้วยังไม่ก่อมลพิษทางเสียงอีกด้วย เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์เป็นอุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่กับที่ ไม่มีสิ่งใดเคลื่อนไหวขณะใช้งาน ด้วยเหตุนี้จึงไม่เกิดการสึกหรอ ต้องการการดูแลรักษาน้อยมาก ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา และยังให้ผลลัพธ์ระยะยาวคุ้มค่างกับการลงทุนเนื่องจากอายุการใช้งานของเซลล์แสงอาทิตย์ยาวนานถึง 25-30 ปี เมื่อเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายทั้งในด้านการลงทุนเพื่อให้ได้มาซึ่งพลังงานโดยรวมถึงผลกระทบที่อาจมีต่อสิ่งแวดล้อมด้วยแล้วถือว่าต้นทุนพลังงานที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์มีราคาถูกกว่าแหล่งพลังงานทดแทนประเภทอื่น เมื่อติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ในครั้งแรกก็แทบจะไม่มีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นอีกต่อไป และที่สำคัญประเทศไทยมีศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ค่อนข้างสูง นอกจากนี้ปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ได้ถูกพัฒนาให้สามารถใช้งานได้ดีแม้ในวันที่มีเมฆมากโดยที่สามารถผลิตไฟฟ้าได้สัดส่วนกับความหนาแน่นของเมฆ การพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ในลักษณะเช่นนี้ยังเป็นการเพิ่มศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศเพิ่มขึ้นไปอีก ความพยายามที่จะนำพลังงานแสงอาทิตย์มาเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าเพื่อการบริโภคในชีวิตประจำวันนั้นนับว่าเป็นการมองหาความยั่งยืนในการใช้พลังงานและทางออกของปัญหภาวะโลกร้อน การพัฒนางานวิจัยเกี่ยวกับเซลล์แสงอาทิตย์จึงเป็นแรงผลักดันสำคัญที่จะนำประเทศไทยก้าวไปสู่ยุคแห่งพลังงานทดแทนและเป็นอิสระในการใช้พลังงานจากวิกฤติพลังงานที่ทั่วโลกกำลังประสบอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซลล์แสงอาทิตย์ (photovoltaic cell หรือ solar cell) เป็นสิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ที่ประดิษฐ์จากสารกึ่งตัวนำ สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์หรือแสงจากหลอดแสงสว่างให้เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรงทันทีที่มีพลังงานโฟตอนที่มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ($h \geq E_g$) ตกกระทบที่ตรงบริเวณรอยต่อของเซลล์แสงอาทิตย์ตามปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก (photovoltaic effect) ซึ่งกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเซลล์แสงอาทิตย์นี้จะเป็นไฟฟ้ากระแสตรง (direct current) และเป็นที่ยอมรับกันว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำหมู่ II-VI อย่าง CdTe มักนิยมนำมาประยุกต์ใช้งานในด้านเซลล์แสงอาทิตย์ [1] เนื่องจาก CdTe มีค่าช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 1.45 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งค่าช่องว่างแถบพลังงานนี้สามารถดูดกลืนสูงประมาณ 10^5 ต่อเซนติเมตร สารกึ่งตัวนำ CdTe ยังคงเป็นที่น่าสนใจอยู่เนื่องจากประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ CdTe ปัจจุบันสูงถึง 22.1% จากประสิทธิภาพทางทฤษฎี 29% ซึ่งเป็นการพัฒนาที่มีแนวโน้มที่ดีและใกล้เคียงกับประสิทธิภาพทางทฤษฎีในตัวเลขที่สูงขึ้นมากกว่าในอดีตที่ประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ CdTe เป็น 17.3% ซึ่งค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับประสิทธิภาพทางทฤษฎีเป็นระยะเวลาจนถึง 10 ปี จากการพัฒนาที่ทำให้เห็นตัวเลขประสิทธิภาพที่ก้าวหน้าขึ้นทำให้มองเห็นถึงความเป็นไปได้ที่เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดนี้ยังสามารถที่จะเพิ่มประสิทธิภาพให้สูงขึ้นต่อไปได้จริง ส่วน ZnTe ก็เป็นหนึ่งในสารกึ่งตัวนำหมู่ II-VI มีค่าช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 2.26 อิเล็กตรอนโวลต์ ในการประยุกต์ใช้งานในด้านเซลล์แสงอาทิตย์มีแนวโน้มที่สามารถนำไปใช้เป็นชั้นหน้าต่างและประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ นอกจากนี้ยังสามารถใช้เป็นขั้วไฟฟ้าด้านหลัง (back contact) บนชั้นดูดกลืน CdTe ในเซลล์แสงอาทิตย์ CdTe ดังในงานวิจัยของ Khosroabadi et al. [2] ที่เคยรายงานไว้ก่อนหน้านี้ พวกเขาทำการออกแบบเซลล์แสงอาทิตย์ CdS/CdTe ชนิดบางมากโดยการเพิ่มกำแพงศักย์ที่ผิวด้านหลังเซลล์ (back surface field) เข้ามาในโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ CdS/CdTe โดยใช้ ZnTe เพื่อให้ทำหน้าที่ผลัดกันพาหะตรงบริเวณโครงสร้าง CdTe/ZnTe ออกจากผิวด้านหลังเซลล์ (back surface) และลดการเกิดการรวมตัวของพาหะอิสระที่ผิวด้านหลังเซลล์ (back-surface recombination) เนื่องจากมีสิ่งกีดขวางนี้ทำให้ลดการสูญเสียของพาหะและการรวมตัวของพาหะที่บริเวณขั้วไฟฟ้าด้านหลัง ซึ่งขั้วไฟฟ้าด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์จะต้องเป็นรอยต่อโอห์มิกเพื่อลดปัญหาความต้านทานอนุกรมของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งความต้านทานอนุกรมนี้อาจจะทำให้กระแสลัดวงจรมีค่าลดลง ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์เป็นอย่างมาก และเนื่องจากชั้นดูดกลืนเป็น CdTe และบริเวณกำแพงศักย์ที่ผิวด้านหลังเซลล์ที่ถูกเพิ่มเข้ามาในโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ CdS/CdTe เป็น ZnTe จึงทำให้เกิดสารประกอบ $Cd_{1-x}Zn_x$ ที่บริเวณผิวเชื่อมต่อ ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำโลหะผสม $Cd_{1-x}Zn_x$ จึงเป็นที่น่าสนใจในการพัฒนาให้มีสมบัติการนำไฟฟ้าแบบโอห์มิกที่ดีและศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์อื่นๆ ที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ตามองค์ประกอบของ Zn ที่เปลี่ยนไปเพราะเป็นตัวกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อคุณภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ นอกจากนี้ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_x$ ยังได้รับความสนใจในการนำมาใช้เป็นชั้นดูดกลืนในงานวิจัยของ Imamzai et al. [3] ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และวิเคราะห์เซลล์แสงอาทิตย์ CdS/ $Cd_{1-x}Zn_x$ ขึ้น ซึ่งเป็นการวิจัยที่พัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ CdS/CdTe ขึ้นโดยการเติม Zn ลงไปใน CdTe เพื่อปรับเปลี่ยนค่าช่องว่างแถบพลังงานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับชั้นดูดกลืน CdZnTe ถูกนำมาใช้เป็นชั้นดูดกลืนที่มีความหนา 4 μ m จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) กับสัดส่วนโดยโมลของ Zn ในฟิล์มบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$Cd_{1-x}Zn_xTe$ พบว่าเมื่อ $x=0.5$ ได้ค่า $E_g=1.88$ อิเล็กตรอนโวลต์ จากที่ $CdTe$ มีค่า $E_g=1.45$ อิเล็กตรอนโวลต์ ผลปรากฏว่าการเพิ่มค่าช่องว่างพลังงานทำให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ ใช้เวลาในการปลูกฟิล์มนาน 20 นาที ให้อุณหภูมิกับภาชนะระเหิดสารตั้งต้นประมาณ 550 องศาเซลเซียสสำหรับ $CdTe$ และประมาณ 650 องศาเซลเซียส สำหรับ $CdZnTe$ และ $ZnTe$ ส่วนอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับต่ำกว่าอุณหภูมิของภาชนะระเหิดสารตั้งต้นประมาณ 100 องศาเซลเซียส จากนั้นจึงทำการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ตรวจสอบลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุต่างๆของฟิล์มบางด้วยเทคนิค EDS และ XPS ตามลำดับ ศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางโดยวัดเปอร์เซ็นต์ส่งผ่านแสงในย่าน UV เพื่อทำการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน ตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีและพันธะเคมีที่พื้นผิวของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ด้วยรามานสเปกโตรสโคปีและฟูเรียรทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดสภาพต้านทานและปรากฏการณ์ฮอลล์ ศึกษาสมบัติการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิตั้ง และที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิตั้ง ตามลำดับ และทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเชิงแสงเพื่อตรวจสอบการตอบสนองต่อแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ในส่วนของการประดิษฐ์ไดโอดชนิดรอยต่ออวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ จะทำการเคลือบฟิล์มบาง $Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te$ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจก ITO ด้วยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ ใช้เวลาในการปลูกฟิล์มนาน 20 นาที ให้อุณหภูมิกับภาชนะระเหิดสารตั้งต้นประมาณ 685 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับต่ำกว่าอุณหภูมิของภาชนะระเหิดสารประมาณ 100 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการตรวจสอบความหนาของชั้นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำด้วยการถ่ายภาพภาคตัดขวางโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าแรงดันไฟฟ้าทั้งที่อุณหภูมิตั้งที่ภายใต้การฉายแสง และที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิตั้ง ตามลำดับ และทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสสลับโดยการวัดอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีที่อุณหภูมิตั้ง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) จากสารกึ่งตัวนำที่เป็นผลึกของสารประกอบ $CdTe$ และ $ZnTe$ ที่มีความบริสุทธิ์สูงถึง 99.999 เปอร์เซ็นต์ เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่ผ่านการกัดผิวกระจกด้วยกรดไฮโดรฟลูออริกโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ โดยที่ใช้อุณหภูมิของภาชนะระเหิดสารตั้งต้นประมาณ 550 องศาเซลเซียส สำหรับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe$ และใช้อุณหภูมิของภาชนะระเหิดสารตั้งต้นประมาณ 650 องศาเซลเซียส สำหรับทั้งฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdZnTe$ และ $ZnTe$ โดยที่อุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับต่ำกว่าอุณหภูมิของภาชนะระเหิดสารประมาณ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที
2. เพื่อศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$)

3. เพื่อศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคโดยการถ่ายภาพผิวหน้าด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$)
4. เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุต่างๆด้วยเทคนิค EDS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$)
5. เพื่อวิเคราะห์เพื่อระบุชนิดและสถานะทางเคมีของธาตุที่เป็นองค์ประกอบบริเวณพื้นผิวด้วยเทคนิค XPS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$)
6. เพื่อศึกษาโครงสร้างทางเคมีและการเกิดพันธะเคมีที่พื้นผิวของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ด้วยเทคนิครามานสเปกโตรสโคปี และฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี
7. เพื่อศึกษาสมบัติทางแสงโดยการวัดสเปกตรัมของค่าเปอร์เซ็นต์สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$)
8. เพื่อศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเชิงแสงโดยการวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง เพื่อตรวจสอบการตอบสนองต่อแสง และนำผลการทดลองไปคำนวณหาค่าชีวิตของพาหะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$)
9. เพื่อศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) โดยการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ การนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง (190-300 เคลวิน) และที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง (300-423 เคลวิน) ตามลำดับ
10. เพื่อทำการประดิษฐ์ไดโอดชนิดรอยต่อวิธีพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $ITO/Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te$ โดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ โดยที่ใช้อุณหภูมิของภาชนะระเหิดสารตั้งต้นประมาณ 685 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับต่ำกว่าอุณหภูมิของภาชนะระเหิดสารประมาณ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที
11. ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ต้นแบบโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า ที่อุณหภูมิห้อง ที่ภายใต้การฉายแสง และที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ตามลำดับ และศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสลับโดยการวัดอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีที่อุณหภูมิห้อง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาวิธีการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) โดยที่มีค่าเศษส่วนโมลอะตอม (x) = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 ตามลำดับ จากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ CdTe และ ZnTe ที่มีความบริสุทธิ์สูงถึง 99.999 เปอร์เซ็นต์ เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่ผ่านการกัดผิวกระจกด้วยกรดไฮโดรฟลูออริกโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ แล้วนำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้ไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางด้วยเทคนิครามานสเปกโตรสโคปี ฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี และยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรสโคปี และสมบัติทางไฟฟ้าโดยการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ การนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้องและสูงกว่าอุณหภูมิห้องในช่วงอุณหภูมิ 300-423 เคลวิน และ 190-300 เคลวิน ตามลำดับ

ทำการประดิษฐ์ไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te โดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ โดยสารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารกึ่งตัวนำ Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te จากนั้นจึงนำเอาสิ่งประดิษฐ์ไปทำการศึกษสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าแรงดันไฟฟ้าทั้งที่อุณหภูมิห้อง ที่ภายใต้การฉายแสง และที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ตามลำดับ และทำการศึกษสมบัติทางไฟฟ้ากระแสสลับโดยการวัดอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีที่อุณหภูมิห้อง

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและเงื่อนไขต่างๆสำหรับการทำฟิล์มบางโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิดจากฐานข้อมูลอิเล็กทรอนิกส์เพื่อเป็นแนวทางในการทำวิจัย
2. เตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cd_{1-x}Zn_xTe (0 ≤ x ≤ 1) โดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด
3. ตรวจสอบสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cd_{1-x}Zn_xTe (0 ≤ x ≤ 1) ที่ได้ดังต่อไปนี้
 - ตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์
 - ตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคโดยการถ่ายภาพผิวหน้าผลึกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและองค์ประกอบของธาตุต่างๆด้วยเทคนิค EDS
 - ตรวจสอบเพื่อระบุชนิดและสถานะทางเคมีของธาตุที่เป็นองค์ประกอบบริเวณพื้นผิวด้วยเทคนิค XPS
 - ตรวจสอบสมบัติทางแสงด้วยเทคนิครามานสเปกโตรสโคปี พูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี และยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรสโคปี
 - ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางโดยการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์การนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง การนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง และที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้องในช่วงอุณหภูมิ 190-300 K และ 300-423 K ตามลำดับ
4. ทำการประดิษฐ์ไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำITO/Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดโดยจากสารตั้งต้น CdTe และ ZnTe
5. ตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้ากระแสตรงของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te ที่อุณหภูมิห้อง ที่ภายใต้การฉายแสง และที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ตามลำดับ และตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้ากระแสสลับของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te ที่อุณหภูมิห้อง ตามลำดับ
6. ทดสอบการตอบสนองต่อแสงอาทิตย์ของเซลล์แสงอาทิตย์ต้นแบบโดยการวัดกระแสไฟฟ้าแรงดันไฟฟ้า เพื่อหาพารามิเตอร์ที่สำคัญได้แก่ ค่ากระแสลัดวงจร ค่าแรงดันวงจรเปิด
7. วิเคราะห์และสรุปผล
8. เขียนรูปเล่มวิทยานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงหลักการและวิธีการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) โดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด และการประดิษฐ์ไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/ $Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te$ รวมทั้งเทคนิคการเตรียมฟิล์มบางและวิธีการควบคุมเงื่อนไขในการเตรียมฟิล์มบางเพื่อให้ได้มาซึ่งฟิล์มบางที่มีคุณภาพดี
2. ทราบถึงอิทธิพลของอะตอมของธาตุ Zn ของสารกึ่งตัวนำ ZnTe ที่มีต่อสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ เมื่อเติมอะตอมของธาตุ Zn เข้าไปในสารกึ่งตัวนำ CdTe เป็นเศษส่วนโมลอะตอมในช่วง $0 \leq x \leq 1$
3. ทราบถึงปริมาณของอะตอมของธาตุ Zn ของสารกึ่งตัวนำ ZnTe ที่ทำให้ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ มีความเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์มากที่สุด เพื่อนำไปประดิษฐ์เป็นไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ต่อไป
4. ทราบสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดชนิดรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/ $Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te$ ว่ามีสมบัติความเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่ตีมากน้อยเพียงใด
5. ทราบถึงหลักการงานและวิธีการใช้อุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการวิจัยเพื่อตรวจสอบสมบัติทางฟิสิกส์ เช่น สมบัติทางไฟฟ้า สมบัติทางแสง เป็นต้น
6. ทำให้ได้รู้ถึงแนวทางการทำงานวิจัยและการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานด้านอื่นๆต่อไปได้

บทที่ 2

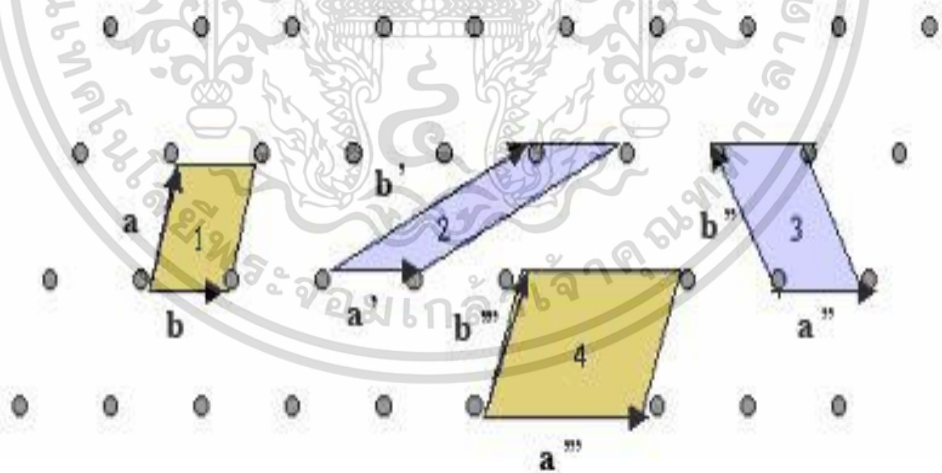
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเรื่องของลักษณะของโครงสร้างผลึก [4-9]

ในทางผลึกวิทยาสามารถแบ่งสสารและวัสดุที่อยู่ในสภาพของแข็งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ ตามการจัดเรียงตัวของอะตอม ได้แก่ วัสดุที่เป็นผลึก (crystalline materials) และวัสดุที่เป็นอะมอร์ฟัส (amorphous materials) ซึ่งในที่นี่จะกล่าวถึงวัสดุที่เป็นผลึกเท่านั้น

2.1.1 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ

ผลึกของสารเกิดจากการที่อะตอมหรือโมเลกุลของสารชนิดนั้นมารวมกันอยู่เป็นจำนวนมากโดยระยะห่างระหว่างอะตอมมีค่าคงที่และมีการจัดเรียงตัวกันเป็นระบบแบบรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอนเป็นระเบียบอย่างต่อเนื่องภายในหนึ่งหน่วยเซลล์ของผลึกอาจประกอบด้วยอะตอมของธาตุเพียงอะตอมเดียวไปจนถึงหลายๆ อะตอมหรือหลายๆ โมเลกุล เซลล์ที่มีปริมาตรเล็กที่สุดที่สามารถใช้เป็นตัวแทนของผลึกนั้นเรียกว่า หน่วยเซลล์ (unit cell) กล่าวคือ ถ้าเอาหน่วยเซลล์นี้มาเรียงต่อกันก็จะได้ผลึกขึ้นมา และเรียกตำแหน่งต่างๆ ของอะตอมในระบบสามมิติว่าโครงผลึกหรือแลตทิซ (lattice) ในทางทฤษฎีการกำหนดหน่วยเซลล์ทำได้ไม่จำกัด แต่ตามปกติจะเลือกหน่วยเล็กที่สุด ที่เป็นไปได้ และมีสมมาตรค่อนข้างสูง ตัวอย่างการเลือกหน่วยเซลล์ในโครงผลึก 2 มิติ ดังรูปที่ 2.1 ในระบบสองมิติพารามิเตอร์ของโครงผลึก ได้แก่ เวกเตอร์ \vec{a} และ \vec{b} และ มุม γ ซึ่งเป็นมุมระหว่าง เวกเตอร์ทั้งสอง ทั้งนี้ชนิดของโครงผลึกที่แตกต่างกันที่เป็นไปได้มีเพียงห้าแบบ ดังตารางที่ 2.1



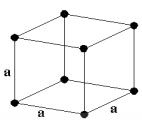
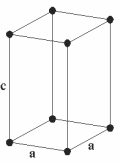
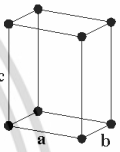
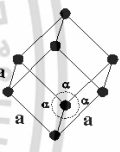
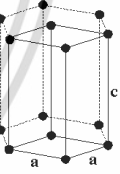
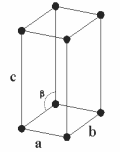
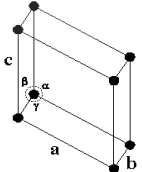
รูปที่ 2.1 แสดงหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ของหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ

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

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

ตารางที่ 2.2 แสดงระบบผลึกทั้งเจ็ดแบบในระบบสามมิติ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การระบุตำแหน่งทิศทางและระนาบของโครงสร้างผลึก [4-19]

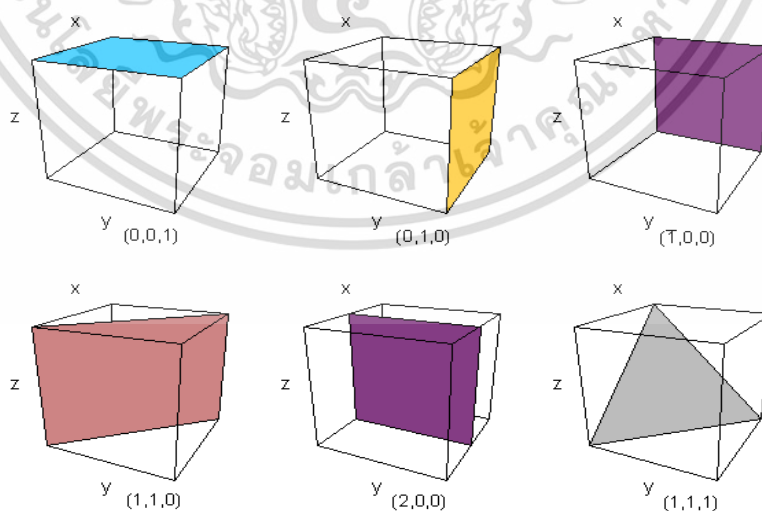
เนื่องจากผลึกมีสมบัติที่ขึ้นอยู่กับทิศทาง ดังนั้นจึงต้องระบุแน่นอนว่ากำลังศึกษาลักษณะส่วนใดของผลึกอยู่ซึ่งการระบุลักษณะที่ว่า จะกล่าวถึงตำแหน่ง, ทิศทางและระนาบของผลึกที่กำลังศึกษาอยู่นั้น

หลักเกณฑ์ในการระบุลักษณะพื้นฐานของผลึก

การระบุตำแหน่ง

1. กรณีทั่วไปจะเขียนเป็น (x,y,z) ให้สังเกตเครื่องหมาย “ , ” ซึ่งคั่นแต่ละค่าตัวอย่างจุด $(1,2,3)$ หมายความว่า เป็นตำแหน่งอยู่ที่พิกัด $x=1, y=2$ และ $z=3$ การบอกตำแหน่ง
2. การระบุทิศทางในกรณีทั่วไปจะเขียนเป็น $[uvw]$ ให้สังเกตว่าใช้วงเล็บก้ามปู และไม่มีเครื่องหมาย “ , ” คั่นระหว่างค่าแต่ละค่า ถ้าเป็นทิศทางที่เป็นลบก็จะใส่เครื่องหมาย “ - ” หรือบาร์ (bar) ไว้บนตัวเลขนั้นๆ เช่น ทิศทาง $[\bar{1}2\bar{1}]$ แสดงว่าในแนวแกน z มีค่าเป็นลบ

การระบุชื่อระนาบของผลึกจะใช้อักษร (hkl) ให้สังเกตการใช้วงเล็บ และไม่มีเครื่องหมาย “ , ” คั่น โดยที่หากระนาบใดตัดแกนลบก็ให้ใส่เครื่องหมาย “ - ” หรือบาร์ข้างบนตัวเลขดัชนีมิลเลอร์ ค่า hkl เรียกว่า ดัชนีมิลเลอร์ (miller indices) ชื่อระนาบของผลึกเป็นสิ่งที่สำคัญที่สุดอีก ประการหนึ่งในการศึกษาผลึก เพราะในแต่ละระนาบจะประกอบไปด้วยอะตอม ไอออนหรือโมเลกุลเรียงตัวกันอยู่บนระนาบนั้น อาจกล่าวได้ว่าระนาบแต่ละระนาบจะมีความแตกต่างกันเช่นเดียวกับทิศทาง การบอกชื่อระนาบหรือดัชนีมิลเลอร์นั้นทำได้โดยกำหนดจุดที่ระนาบนั้นตัดแกนพิกัดฉากขึ้นมาเป็น (x,y,z) โดยที่หากระนาบตัดแกนใดให้ถือว่าระนาบนั้นตัดแกนนั้นที่ระยะอนันต์ (∞) และหากระนาบใดตัดแกนลบ (-) ก็ให้ใส่เครื่องหมายบาร์ (-) ข้างบนตัวเลขดัชนีนั้น ทำค่าจุดตัดต่างๆที่ได้จากข้อ 1 ทั้งหมดให้เป็นเศษส่วนกลับทำให้เป็นเลขจำนวนเต็มโดยการหาค่าผลคูณร่วมน้อย (ค.ร.น) ของค่าเศษส่วนที่ได้จากข้อ 2 ซึ่งก็จะได้ค่าตัวเลขดัชนีมิลเลอร์ (hkl) ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 และ ตารางที่ 2.3 ซึ่งสรุปความสัมพันธ์ระหว่างระนาบต่างๆกับระยะตัดแกนอ้างอิง



รูปที่ 2.2 แสดงการบอกชื่อระนาบต่างๆของผลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ของดัชนีมิลเลอร์ (hkl) และจุดตัดแกนผลึก (x,y,z)

จุดตัดแกนผลึก (x,y,z)	ส่วนกลับของจุดตัดบนแกนผลึก $\frac{1}{x}, \frac{1}{y}, \frac{1}{z}$	ชื่อระนาบหรือดัชนีมิลเลอร์ (hkl)
$\infty, 1, \infty$	$\frac{1}{\infty}, \frac{1}{1}, \frac{1}{\infty}$	(010)
-1, 1, 1	$\frac{1}{-1}, \frac{1}{1}, \frac{1}{1}$ $-1, 1, 1$	($\bar{1}11$)
-1, -1, -1	$\frac{1}{-1}, \frac{1}{-1}, \frac{1}{-1}$ $-1, -1, -1$	($\bar{1}\bar{1}\bar{1}$)
0.5, 0.5, 0.25	$\frac{1}{0.5}, \frac{1}{0.5}, \frac{1}{0.25}$ $2, 2, 4$	(224)
0.5, 0.5, ∞	$\frac{1}{0.5}, \frac{1}{0.5}, \frac{1}{\infty}$ $2, 2, 0$	(220)

มีข้อสังเกตที่ควรรู้เกี่ยวกับดัชนีมิลเลอร์ที่ใช้บอกชื่อระนาบของผลึกเพิ่มเติมดังนี้
สำหรับระบบเฮกซะโกนัลจะระบุดัชนีมิลเลอร์ที่ใช้บอกชื่อระนาบที่ต่างไปเป็น (hkl) โดยที่มีกฎเกณฑ์ว่าดัชนีตัวที่สาม (หรือ l) ซึ่งเพิ่มเข้ามานั้นจะมีความสัมพันธ์กับดัชนีสองตัวแรก (h และ k) ดังนี้

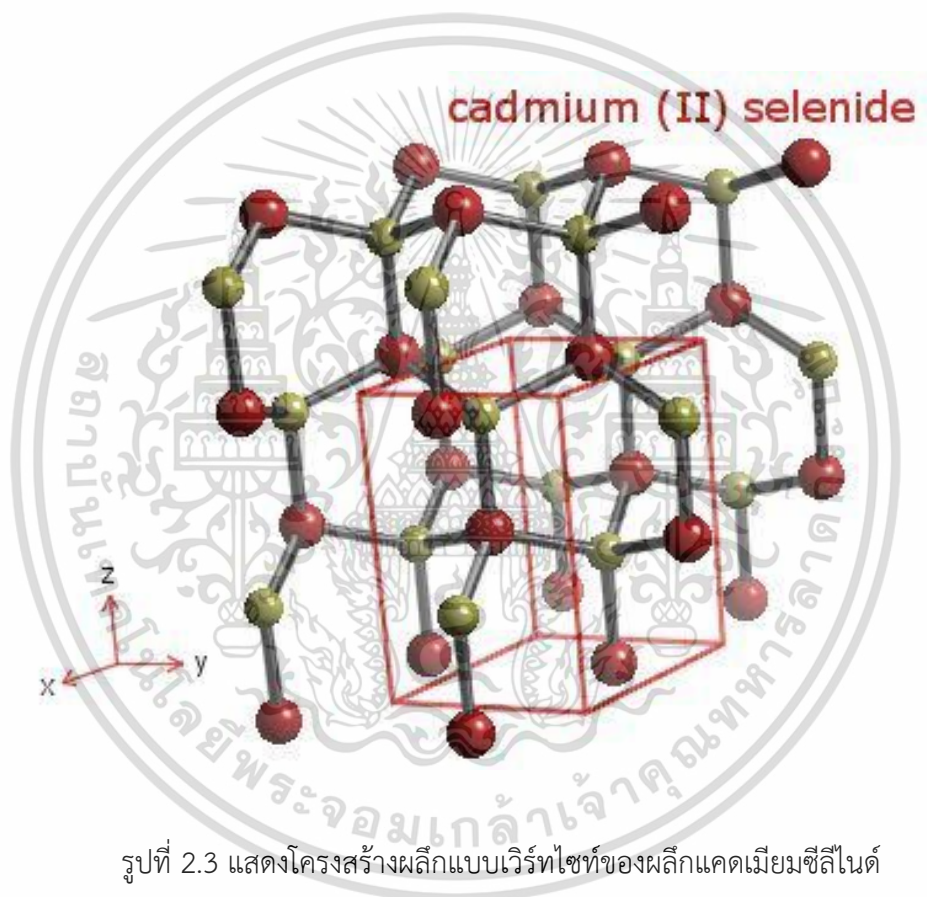
$$l = -(h + k) \quad (2.1)$$

เช่น ระนาบ (110) จะเรียกว่า ($11\bar{2}$) ในระบบเฮกซะโกนัล

เฉพาะระบบลูกบาศก์เท่านั้นที่จะพบว่าทิศทาง [hkl] จะตั้งฉากกับระนาบที่มีค่าตัวเลขดัชนีเหมือนกันนั่นคือ ระนาบ (hkl) ตัวอย่างเช่น ทิศทาง [102] จะตั้งฉากกับระนาบ (102)

2.1.2 โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์ (wurtzite structure)

โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์จัดอยู่ในระบบโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลเกิดจากการนำโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลที่มีอะตอมของธาตุต่างๆอยู่สองชนิดวางซ้อนเหลื่อมกันเป็นระยะ $5/8$ ตามแนวแกน c (c -axis) หนึ่งหน่วยเซลล์จะมี 8 อะตอม มีอะตอมเพื่อนบ้านอยู่ 4 อะตอมมีพันธะเคมีของโมเลกุลเป็นแบบพันธะเตตระฮีดรอน และมีพันธะเคมีระหว่างอะตอมเป็นแบบโควาเลนต์ ดังนั้นจึงมีการจัดเรียงของอะตอมคล้ายกับโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์แต่จะมีความแตกต่างกัน คือ ในโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์จะมีการจัดเรียงระนาบของพันธะเตตระฮีดรอนเป็นแบบ ABAB...หรือ 0101... ส่วนโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์จะมีการจัดเรียงระนาบของพันธะเตตระฮีดรอนแบบ ABCABC... หรือ 012012... สารที่มีโครงสร้างผลึกแบบนี้ได้แก่ สารกึ่งตัวนำ CdS, ZnS, CdSe เป็นต้น

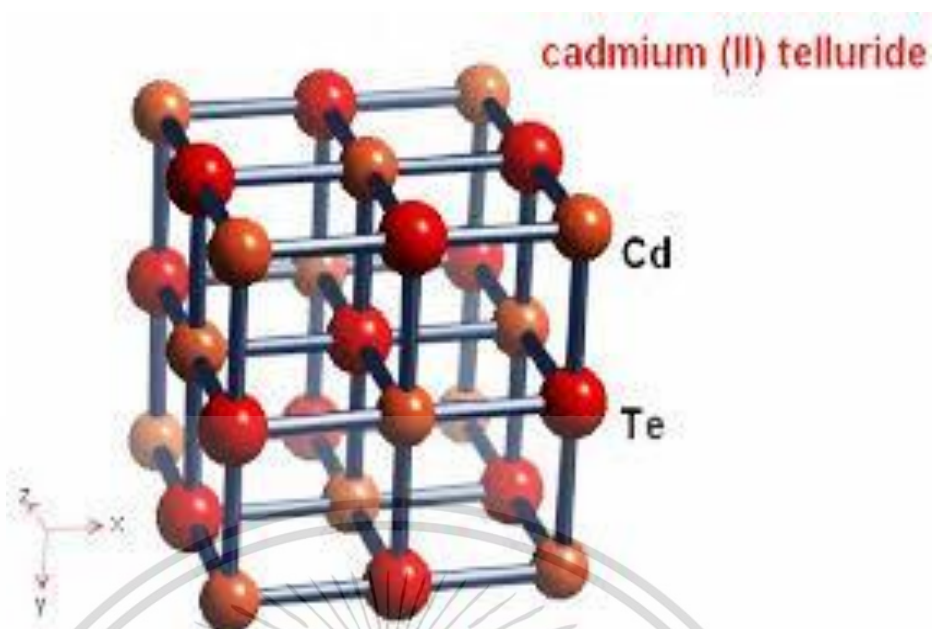


รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์ของผลึกแคดเมียมซีลีไนด์

2.1.3 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ (zinc blend structure)

ผลึกแคดเมียมเทลลูไรด์เป็นสารประกอบกึ่งตัวนำหมู่ 2-6 มีโครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์ มีค่าคงตัวของโครงสร้างผลึกเท่ากับ 6.481 อังสตรอม และมีค่าความหนา 6.2 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีจุดหลอมเหลว 1040 องศาเซลเซียส เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีแถบช่องว่างพลังงานเท่ากับ 1.50 อิเล็กตรอนโวลต์ มีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงในย่านความยาวคลื่นแสงที่ตามองเห็น สำหรับแคดเมียมเทลลูไรด์ที่มีความหนาในระดับไมครอนสามารถดูดกลืนพลังงานโฟตอนได้มากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ผลึกแคดเมียมเทลลูไรด์เสถียรที่อุณหภูมิสูงกว่า 500 องศาเซลเซียส ดังนั้นผลึกแคดเมียมเทลลูไรด์จึงเหมาะกับการนำมาใช้เป็นชั้นดูดกลืนพลังงานโฟตอนในเซลล์แสงอาทิตย์ ดังรูปที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างแบบซิงค์แบลนด์ของผลึกแคดเมียมเทลลูไรด์

2.1.4 ข้อบกพร่องผลึก [8-19]

ในความเป็นจริงแล้วโครงสร้างผลึกจะมีลักษณะไม่สมบูรณ์แบบตามโครงสร้างผลึกในอุดมคติทั้งหมดโดยเฉพาะโครงสร้างผลึกในฟิล์มบาง นอกจากจะทำให้ผลึกขาดความสม่ำเสมอแล้ว ความไม่สมบูรณ์ของผลึกยังมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบาง ได้แก่สมบัติทางไฟฟ้า สมบัติในการทำปฏิกิริยาเคมี และพฤติกรรมในการเกิดกระบวนการต่างๆ ซึ่งตัวอย่างของข้อบกพร่องผลึกเหล่านี้คือ ข้อบกพร่องผลึกแบบแวนแคนซี (vacancy defect) ข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชัน (dislocation) ตลอดจนเกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน (grain and grain boundaries)

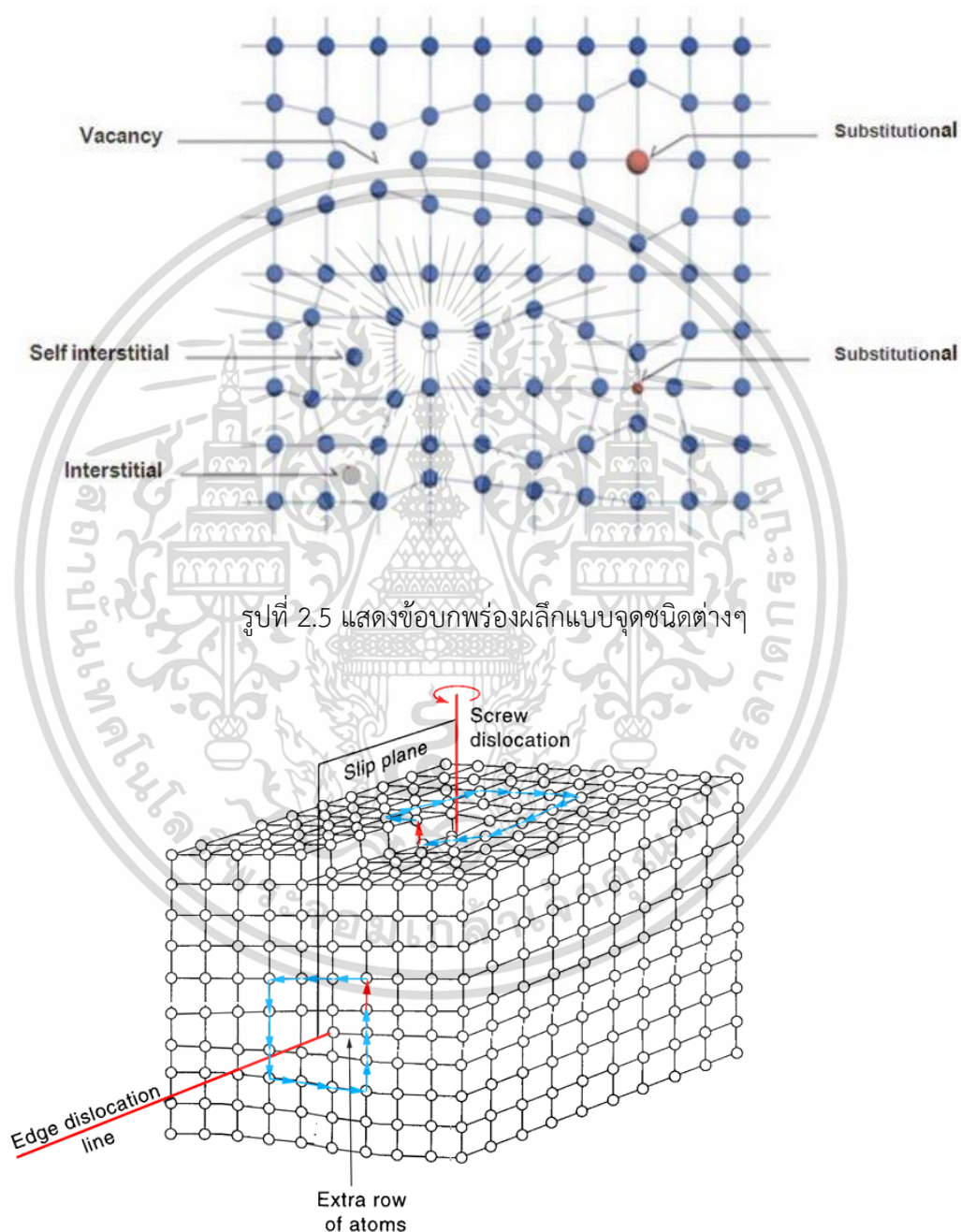
2.1.4.1 ข้อบกพร่องผลึกแบบจุด (point defect)

ข้อบกพร่องของผลึกแบบจุดจะเกี่ยวข้องกับการพิจารณาอะตอมที่ผิดเพี้ยนไปจากตำแหน่งเดิมในโครงสร้างผลึก ข้อบกพร่องผลึกแบบแวนแคนซี (vacancy defect) ซึ่งมีลักษณะที่อะตอมหรือไอออนหลุดหายไป โดยที่ถ้าหากเป็นกรณีที่เกิดจากการที่มีอะตอมหรือไอออนหลุดหายไปจากตำแหน่งของโครงผลึกที่อยู่ภายในย้ายขึ้นไปอยู่ที่บริเวณผิวหน้าของสารจะเรียกว่า ข้อบกพร่องผลึกแบบชอตต์กี (schottky defect) ข้อบกพร่องผลึกแบบอินเตอร์สติเชียล (interstitial defect) ซึ่งเป็นลักษณะที่อะตอมบางอะตอมหรือไอออนที่ไม่อยู่ที่ตำแหน่งของโครงผลึก แต่จะเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างตำแหน่งที่เป็นที่ว่างของโครงผลึก โดยทั่วไปแล้วรัศมีอะตอมที่เข้าไปแทรกอยู่จะเท่าหรือน้อยกว่ารัศมีของอะตอมหลัก ข้อบกพร่องผลึกแบบเฟรเนล (frenkel defect) คือเกิดจากการที่มีอะตอมหรือไอออนหลุดหายไปจากตำแหน่งของโครงผลึกที่อยู่ภายในย้ายไปแทรกอยู่ที่ตำแหน่งที่ควรเป็นที่ว่างของโครงผลึก การผิดรูปของโครงผลึกแบบแอนติสตรัคเจอร์ (antistructure disorder) เป็นลักษณะของอะตอมตั้งแต่ 2 อะตอมขึ้นไป เข้าไปอยู่ในตำแหน่งของโครงผลึกทำให้ลักษณะของโครงผลึกไม่เป็นระเบียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

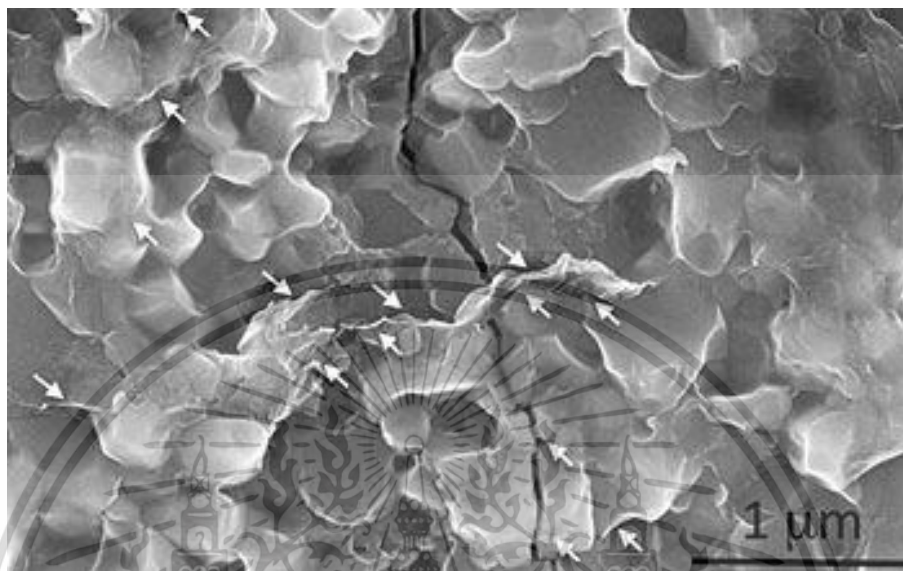
2.1.4.2 ข้อบกพร่องผลึกแบบเชิงเส้น (line defect)

ข้อบกพร่องผลึกแบบเชิงเส้นอาจจะแยกได้อีกยกย่ว่า ดิสโลเคชัน เกิดจากความผิดปกติแบบจุดโครงสร้างผลึกตั้งแต่ 2 จุดขึ้นไปซึ่งอาจขาดหายหรือเพิ่มขึ้นมาซึ่งมีผลทำให้เกิดการผิดปกติของโครงสร้างผลึกแบบเชิงเส้น การเกิดดิสโลเคชันอาจจะแบ่งออกได้ตามลักษณะรูปร่างที่สังเกตเห็นคือ ดิสโลเคชันแบบขอบ (edge dislocations) และดิสโลเคชันแบบสกรู (screw dislocations) ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.6 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชันแบบขอบและดิสโลเคชันแบบสกรู

ข้อบกพร่องผลึกชนิดนี้มักจะเกิดขึ้นในผลึกพหุพันธ์ (polycrystalline) ที่มีหลายเกรน ดังรูปที่ 2.6 ซึ่งในแต่ละเกรนจะมีการจัดเรียงตัวของผลึกในทิศทางเดียวกัน และมีแนวแบ่งระหว่างแต่ละเกรนที่มีการจัดเรียงตัวของผลึกในทิศทางต่างกัน เรียกว่า ขอบเขตรอยต่อของเกรน ซึ่งเกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน จะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางฟิสิกส์แตกต่างไปจากผลึกในอุดมคติ



รูปที่ 2.7 แสดงเกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน

2.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ [8-19]

การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟร็กโทรมิเตอร์ โดยใช้รังสีเอกซ์ความยาวคลื่นเดี่ยวตกกระทบตัวอย่าง ซึ่งอาจเป็นผลึกเดี่ยวหรือผลึกพหุพันธ์ก็ได้ สารตัวอย่างจะหมุนไปเป็นมุม θ ในขณะที่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ รังสีเอกซ์จะเคลื่อนที่ไปเป็นมุม θ เพื่อให้การเลี้ยวเบนสอดคล้องกับกฎของแบรกก์

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

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

เมื่อ d_{hkl} คือ ระยะระหว่างระนาบ

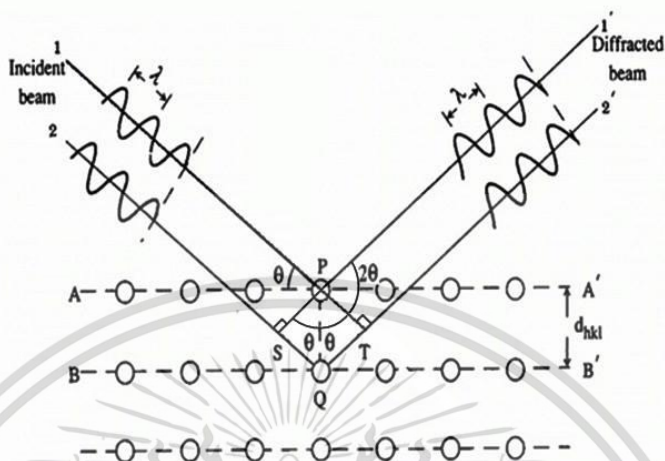
θ คือ มุมของรังสีสะท้อนจากระนาบแบรกก์ของรังสีเอกซ์ ซึ่งจะเท่ากับมุมของรังสีตกกระทบ

n คือ ลำดับของการเลี้ยวเบน มีค่าตั้งแต่ 1, 2, 3,

λ คือ ความยาวคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระนาบต่าง ๆ ของผลึกที่ก่อให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ต้องสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ เรียกว่า ระนาบแบรกก์ (Bragg plane) และมุมที่รังสีสะท้อนทำกับแนวที่ขนานกับรังสีตกกระทบเรียกว่ามุมเลี้ยวเบน (diffraction angle) ซึ่งมีค่าเป็นสองเท่าของมุมตกกระทบ 2θ ดังรูปที่ 2.7

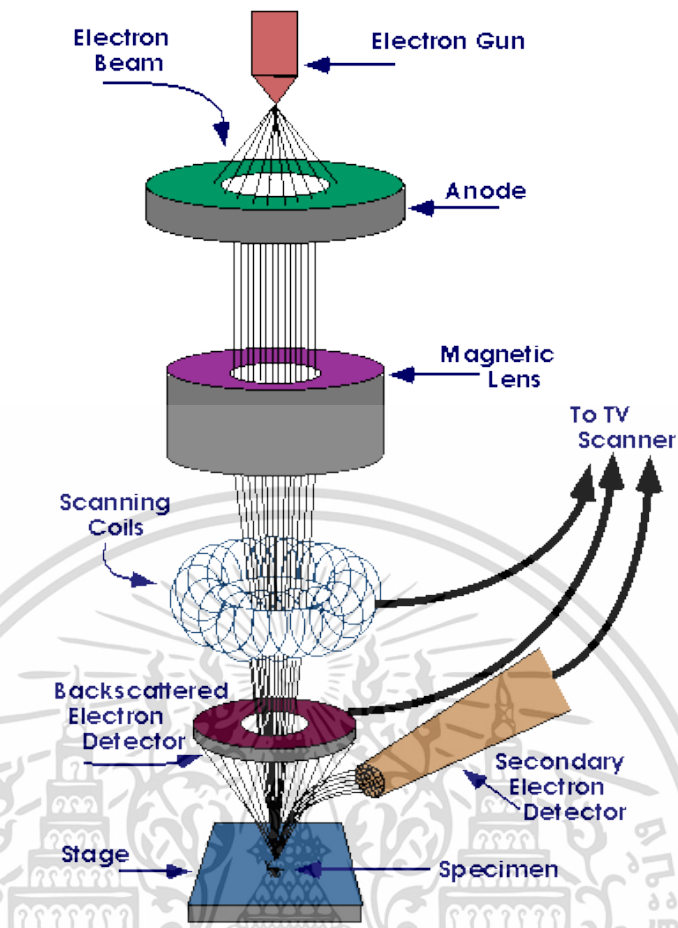


รูปที่ 2.8 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์

2.3 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [8-19]

ในปี พ.ศ. 2478 แมก นอลล์ (Max Knoll) ได้คิดค้นหลักการ และวิธีการในการประดิษฐ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดขึ้น และต่อมาแมนเฟรด วอน อาเดนเน (Manfred Von Ardenne) ได้ประดิษฐ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเครื่องแรกสำเร็จในปี พ.ศ. 2481 โดยเครื่องมือที่ประดิษฐ์ได้นั้นยังมีกำลังขยายไม่สูงมากนัก ต่อมาในปี พ.ศ. 2498 ชาลส์วิลเลียมแอ็ทลีย์ (Charles William Oatley) และทีมงานจากเคมบริดจ์ได้สร้างกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีความละเอียดสูงถึง 250 อังสตรอม

การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังแสดงในรูปที่ 2.8 เริ่มจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ซึ่งมีหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนจากไส้หลอด กลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า พร้อมทั้งบังคับกลุ่มอิเล็กตรอนให้มีลักษณะเป็นลำ โดยลำอิเล็กตรอนจะกราดไปบนพื้นผิวของตัวอย่างโดยขดลวดสนามแม่เหล็กบนระนาบเอกซ์-วาย เพื่อทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ อิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกตรวจจับโดยเซนเซอร์ และแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าเพื่อส่งต่อไปให้ระบบสร้างภาพต่อไป



รูปที่ 2.9 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ปัจจัยสำคัญสำหรับการใช้งาน SEM

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

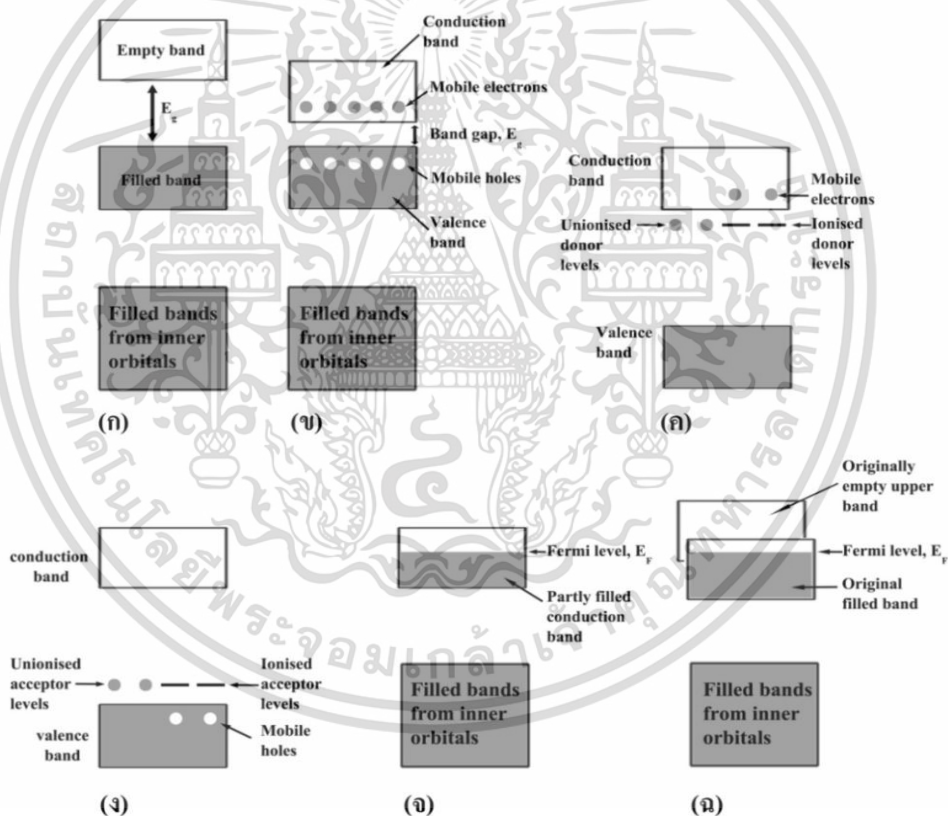
ปัจจัยทั้ง 3 มีความสำคัญต่อการศึกษาคross-section โครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วย SEM ซึ่งปัจจัยทั้ง 3 มีความสัมพันธ์กันโดย d_p แปรผันตรงกับ i_p แต่แปรผันแบบผกผันกับ α_p ตัวอย่างเช่น เมื่อ d_p มีขนาดลดลง i_p จะมีค่าน้อยลงแต่ α_p จะมีค่ามากขึ้น

2.4 สมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ [8-19]

เมื่อแสงตกกระทบกับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำพฤติกรรมทางแสงที่สังเกตได้ก็คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง ทำให้สามารถนำมาหาลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน (energy band) และหาขนาดค่าช่องว่างแถบพลังงาน (energy gap: E_g) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำได้

2.4.1 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน [8-19]

ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานจะประกอบไปด้วยส่วนใหญ่ๆ 3 ส่วน คือ แถบนำ (conduction band) แถบวาเลนซ์ (valence band) และ แถบพลังงานต้องห้าม (forbidden band หรือ forbidden region หรือ forbidden gap) และ เรียกค่าความกว้างของช่องว่างระหว่างแถบนำกับแถบวาเลนซ์นั้นว่า ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (energy gap) โดยจากขนาดของช่องว่างแถบพลังงานนี้สามารถที่จะแบ่งประเภทของวัสดุว่าเป็นฉนวน (insulator) โลหะหรือตัวนำ (metal or conductor) และ สารกึ่งตัวนำ (semiconductor) ดังแสดงในรูปที่ 2.9



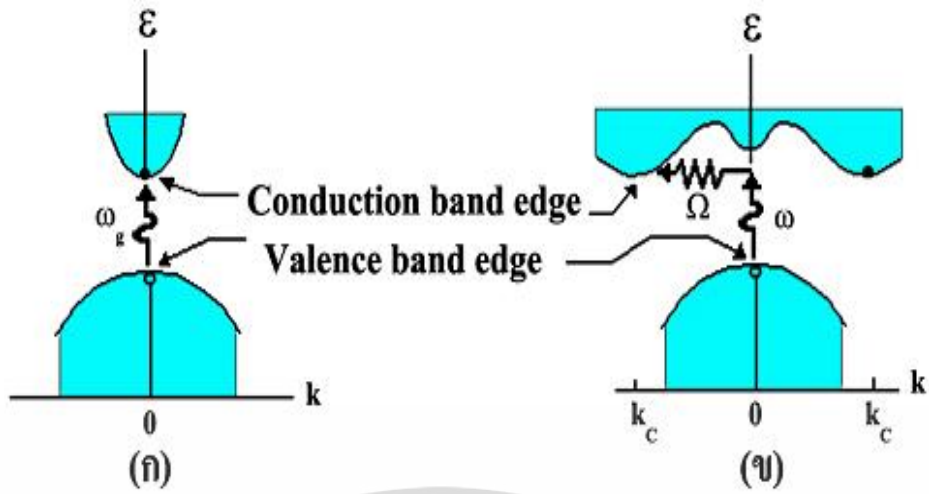
รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานอย่างง่ายของ

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

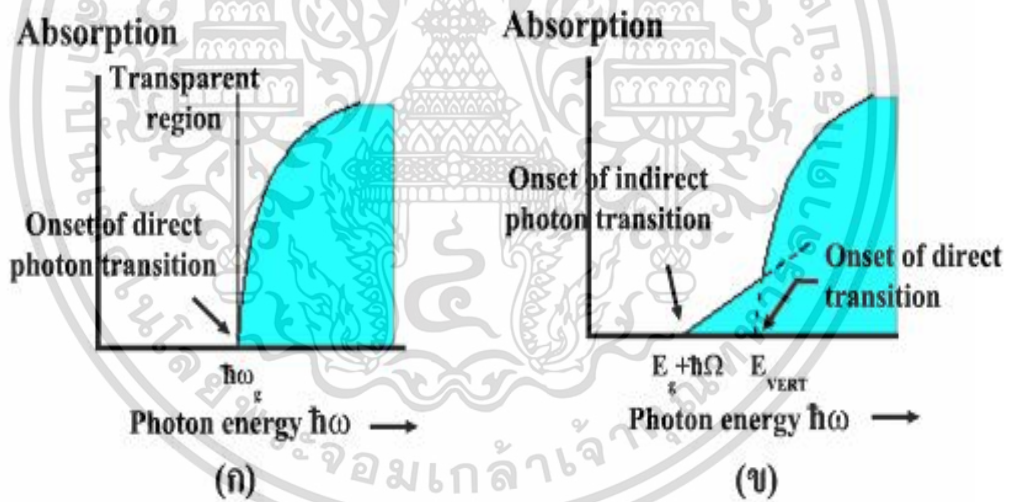
ในวัสดุที่เป็นฉนวนเมื่อดูจากแถบพลังงานจะเห็นได้ว่าขนาดช่องว่างแถบพลังงานจากขอบล่างสุดแถบว่าง(แถบนำ)ถึงขอบบนสุดของแถบเต็ม(แถบวาเลนซ์)มีขนาดกว้างมากประมาณ ได้ว่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยญาติเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$E_g \gg kT$ หรือมากกว่า 3 อิเล็กตรอนโวลต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.9 (ก) การที่จะทำให้อิเล็กตรอนนี้ นำไฟฟ้าได้ ต้องใส่พลังงานที่สูงมากเพื่อที่จะทำให้อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปยังแถบนำได้ถ้าช่องว่างแถบพลังงานระหว่างแถบนำกับแถบวาเลนซ์มีขนาดเล็กพอที่อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ เมื่อได้รับพลังงานความร้อนสามารถเคลื่อนย้ายขึ้นไปยังแถบนำ และทำให้อิเล็กตรอนนี้ นำไฟฟ้าได้เราจะเรียกสารชนิดนี้ว่า สารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ (intrinsic semiconductors) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 (ข) จากรูปจะเห็นได้ว่า เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนย้ายขึ้นไปอยู่ในแถบนำแล้วจะเหลือที่ว่างไว้ในแถบวาเลนซ์โดยจะมีสภาพทางไฟฟ้าเป็นบวก และจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงข้ามกับอิเล็กตรอนเมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า เราเรียกที่ว่างนี้ว่า โฮล และถ้าเราทำการเจืออะตอมของธาตุบางอย่าง ลงไปในสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์แล้ว อะตอมของสารเจือประพติดัวเป็นอะตอมผู้ให้ ก็จะทำให้เกิดระดับพลังงานผู้ให้ โดยให้อิเล็กตรอนกับแถบนำ เราจะเรียกสารนี้ว่า สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductors) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 (ค) และถ้าอะตอมประพติดัวเป็นอะตอมผู้รับก็จะทำให้เกิดระดับพลังงานผู้รับ โดยทำการรับอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์เราจะเรียกสารนี้ว่า สารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type semiconductors) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 (ง) สำหรับแถบพลังงานของวัสดุที่เป็นโลหะหรือตัวนำ จะพบว่ามีอิเล็กตรอนเข้าไปอยู่ในแถบนำแล้วบางส่วนรูปที่ 2.9 (จ) และเราบอกได้ว่าแถบวาเลนซ์กับแถบนำมีการซ้อนเหลื่อมกันอยู่ ทำให้สามารถนำไฟฟ้าได้และในรูปที่ 2.9 (ฉ) ถ้าขอบล่างของแถบบางที่ (n+1) ซ้อนเหลื่อมกับขอบสูงสุดของแถบที่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่ที่ n และระดับพลังงานเฟอร์มิอยู่ระหว่างแถบทั้งสอง อิเล็กตรอนก็จะสามารถไหลจากแถบเต็มไปยังด้านล่างของแถบบางได้ เราจะเรียกสารที่มีโครงสร้างแถบพลังงานแบบนี้ว่าเป็นสารกึ่งโลหะ ลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง คือ อิเล็กตรอนได้รับพลังงานโฟตอนที่มีค่าเท่ากับขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ($E_g = hv$) อิเล็กตรอนจะดูดกลืนพลังงานโฟตอนนั้นและอยู่ในสถานะถูกกระตุ้นจึงย้ายสถานะพลังงานทรานซิชันจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำกลายเป็นอิเล็กตรอนและโฮลอิสระโดยไม่มีการสูญเสียพลังงานให้แก่โครงสร้างผลึก คือไม่มีการสร้างหรือทำลายโฟนอน ดังแสดงในรูปที่ 2.10 (ก) และเมื่อเขียนกราฟระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนจะได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 2.11 (ก) และลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงคือ โครงสร้างแถบพลังงานที่มีจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไม่อยู่ที่ตำแหน่งเวกเตอร์คลื่นค่าเดียวกันหรืออยู่ที่ตำแหน่งโมเมนตัมของคลื่นไม่เท่ากัน ดังนั้นอิเล็กตรอนจะต้องได้รับพลังงานโฟตอนที่มีค่ามากกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ในกรณีนี้มีกระบวนการสร้างโฟนอนเกิดขึ้น ($E_g + h\Omega = hv$) เมื่อ Ω คือค่าความถี่เชิงมุมของพลังงานโฟนอน ซึ่งมีค่าน้อยกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงานหรือในกรณีที่มีการทำลายล้างโฟนอน ($E_g + h\Omega = hv$) นั่นคือเมื่ออิเล็กตรอนที่อยู่ในสถานะถูกกระตุ้นการย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำจะมีการปล่อย โฟนอน (emitted phonon) ที่มีความถี่เชิงมุม Ω มีเวกเตอร์คลื่น $K \cong k_c$ ออกมา จึงเกิดการสร้างโฟนอน ($E_g + h\Omega = hv$) และเกิดการสร้างอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ (E_{VERT}) ขึ้นมาในกระบวนการนี้ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 (ข) และเมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนจะได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานและการย้ายสถานะของพลังงานอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ($T = 0$ เคลวิน)
 ก. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง
 ข. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง

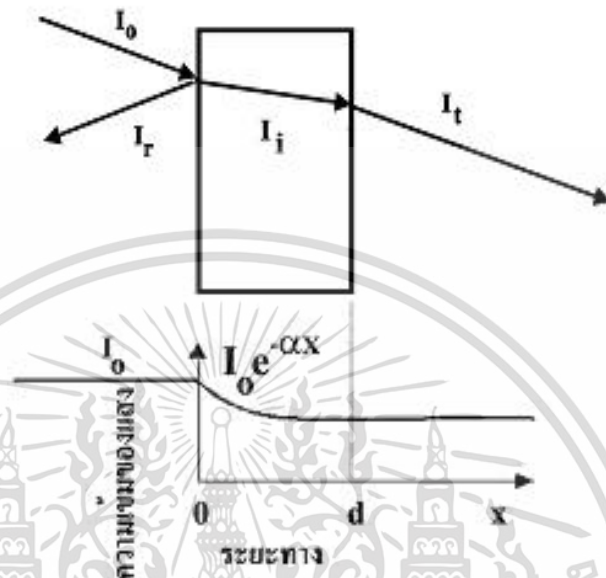


รูปที่ 2.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ ($T = 0$ เคลวิน)
 ก. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง
 ข. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงในกรณีที่เกิดกระบวนการสร้างโฟนอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง [8-19]

พิจารณาการศึกษาวิธีวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงเมื่อแสงเดินทางไปกระทบฟิล์มบาง แสงบางส่วนจะสะท้อนกลับที่ผิวของฟิล์มบาง บางส่วนของแสงจะเดินทางเข้าไปในแผ่นฟิล์มบางและถูกดูดกลืน ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.13 แสดงแผนภาพเมื่อแสงตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มบาง

สัมประสิทธิ์การสะท้อนของแสงมีค่าเป็น

$$R = \frac{I_r}{I_0} \quad (2.3)$$

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

เพราะฉะนั้น ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางมีค่า

$$I_i = I_0 - I_r = I_0 - RI_0 = (1-R) I_0 \quad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อแสงนี้เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางจะถูกดุดกลืนทำให้ความเข้มแสงภายในแผ่นฟิล์มบางลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลตามระยะทาง ดังนั้นความเข้มแสงที่ส่งผ่านฟิล์มบางมีค่าเป็น

$$I_t = I_i \cdot e^{-\alpha d} = (1-R)I_0 \cdot e^{-\alpha d} \quad (2.5)$$

ถ้าไม่มีการสะท้อนแสงที่ผิวด้านหลัง สัมประสิทธิ์การส่งผ่านของแสงจะมีค่าเท่ากับ

$$T = \frac{I_t}{I_0} = (1-R)e^{-\alpha d} \quad (2.6)$$

2.4.3 การดุดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ [8-19]

เมื่อแสงตกกระทบบสารกึ่งตัวนำ ด้วยความเข้ม I_0 แสงบางส่วนจะส่งผ่านออกไปบางส่วน ถูกดุดกลืนและส่วนที่เหลือจะสะท้อนกลับมา ดังแสดงในรูปที่ 2.12 โดย

$$T + A + R = 1 \quad (2.7)$$

เมื่อ T คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง
 A คือ สัมประสิทธิ์การดุดกลืนแสง
 R คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง

โดยที่
$$R = \frac{(n-1)^2 + K^2}{(n+1)^2 + K^2} \quad (2.8)$$

และค่าดัชนีหักเหของผลึก
$$n_c = n - iK \quad (2.9)$$

เมื่อ n คือ จำนวนจริง
 K คือ จำนวนเชิงซ้อน เรียกว่า สัมประสิทธิ์การสูญเสี (extinction coefficient)

โดยทั้ง n และ K เป็นฟังก์ชันของ λ

2.4.4 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง [8-19]

การดุดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำเกิดจากการที่อิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากแสงที่มีพลังงานโฟตอนเท่ากับหรือมากกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานจากนั้นจึงย้ายสถานะพลังงานจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปสู่แถบนำสเปกตรัมการดุดกลืนแสงบริเวณที่พลังงานโฟตอนมีค่าน้อยจะมีลักษณะเป็นขอบแสดงถึงการลดลงของการดุดกลืนแสงอย่างฉับพลันขอบลักษณะนี้เรียกว่า ขอบการดุดกลืนแสง (absorption edge) หรือขอบการดุดกลืนหลัก (fundamental edge) พลังงานโฟตอนที่ขอบการดุดกลืนแสงมีค่าเท่ากับผลต่างของค่าพลังงานที่วัดจากจุดต่ำสุดของแถบนำกับจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์จุดที่เส้นตรงตัดกับแกนในแนวนอน จะให้ค่าช่องว่างพลังงาน (E_g) วิธีการนี้เป็นการกำหนดค่า

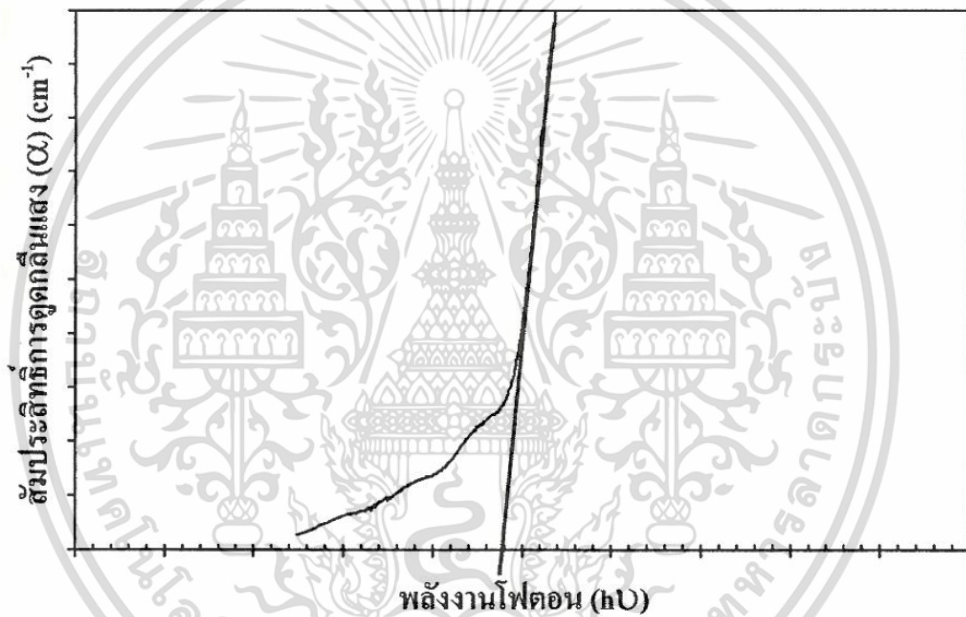
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ประโยชน์ในวงจำกัดเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นเป็นประโยชน์ในการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ หรือมีการดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาได้จากสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (α) ของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (T) จากรูปที่ 2.13 แสดงภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบจากด้านซ้ายของฟิล์มบาง (I_0) ความเข้มแสงภายในฟิล์มบางจะลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลและมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงโดยทั่วไปการสะท้อน (R) มีค่าน้อยมากและมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับความยาวคลื่นแสงที่ตกกระทบตั้งนั้น

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

จะได้ว่า

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



รูปที่ 2.14 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง กับ พลังงานโฟตอน

ที่กล่าวมาเป็นการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงจากสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงโดยไม่คิดถึงการสะท้อนของแสง สำหรับกรณีการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเนื่องจากการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอน ในกรณีที่อิเล็กตรอนย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำที่เวกเตอร์คลื่นค่าเดียวกัน เรียกรายการย้ายสถานะพลังงานแบบนี้ว่า การย้ายสถานะพลังงานแบบตรง และการย้ายสถานะพลังงานแบบตรงนี้ยังแบ่งได้อีกสองชนิด คือการย้ายสถานะพลังงานชนิดยินยอม และชนิดต้องห้ามโดยทั้งสองชนิดนี้ขึ้นกับค่าสมาชิกเมทริกซ์เชิงแสง (optical matrix element) ในการประมาณครั้งที่หนึ่งว่าเป็นศูนย์หรือไม่ คือ ถ้าเป็นศูนย์จะเป็นการย้ายสถานะพลังงานชนิดต้องห้าม และถ้าไม่เป็นศูนย์จะเป็นการย้ายสถานะพลังงานชนิดยินยอม เมื่อพิจารณาการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนในบริเวณตำแหน่งจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่ำสุดของแถบนำแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับค่าช่องว่างพลังงานซึ่งมีลักษณะเป็นพาราโบลา ช่องว่างแถบพลังงานของแผ่นฟิล์มบางประมาณได้โดยการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ซึ่งจะถูกลดทอนเมื่อแสงที่ตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบางมีค่าพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าของพลังงานต้องห้ามที่ขอบการดูดกลืนค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนจะมีค่าเป็น

สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานชนิดอินยอมแบบตรง

$$(\alpha h\nu) = A(h\nu - E_g)^{\frac{1}{2}} \quad (2.12)$$

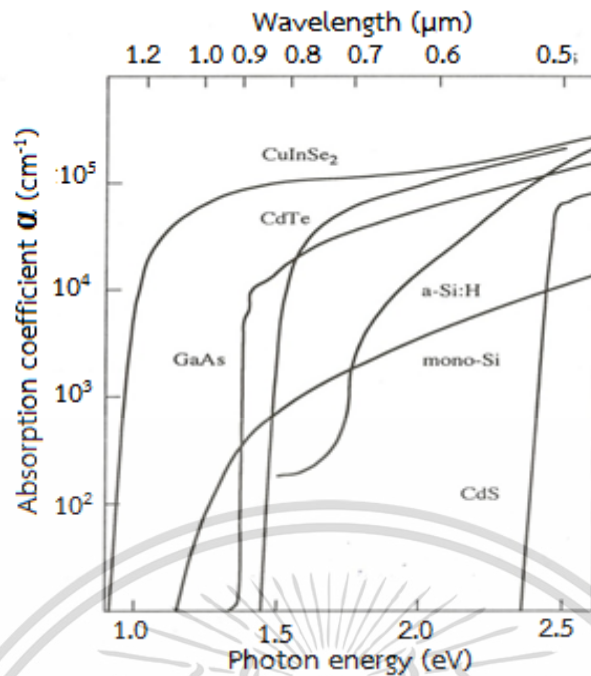
สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานชนิดอินยอมแบบเฉียง

$$(\alpha h\nu) = B(h\nu - E_g)^2 \quad (2.13)$$

และสำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานชนิดต้องห้าม

$$(\alpha h\nu) = C(h\nu - E_g)^{\frac{3}{2}} \quad (2.14)$$

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



รูปที่ 2.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง กับ ค่าพลังงานโฟตอน หรือค่าความยาวคลื่น ของพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำ

2.4.5 ฟูเรียร์แทรนส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี [17]

อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีเป็นเทคนิคที่รวดเร็วและมีประสิทธิภาพในการหาหมู่ฟังก์ชันในโมเลกุลของสารประกอบอินทรีย์ สเปกตรัมของรังสีอินฟราเรดที่มีประโยชน์ต่อนักเคมีอินทรีย์คือในย่านเลขคลื่น (k) 4000-650 ต่อเซนติเมตร ถ้าคิดเป็นความยาวคลื่น (λ) จะอยู่ในช่วง 2.5-15 ไมโครเมตร สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความยาวคลื่น และ เลขคลื่น คือ

$$\text{ความยาวคลื่น } (\mu\text{m}) = \frac{10,000}{\text{เลขคลื่น } (\text{cm}^{-1})} \quad (2.16)$$

สเปกตรัมอินฟราเรด เป็นการพล็อตระหว่างค่าความถี่ (เลขคลื่น, ต่อเซนติเมตร) หรือความยาวคลื่น (ไมโครเมตร) กับ ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (T) (รูปที่ 2.16) นิยามของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง คือ อัตราส่วนระหว่างความเข้มของรังสีที่ผ่านฟิล์มบางของสารตัวอย่างกับความเข้มของรังสีที่ตกกระทบสารตัวอย่าง สมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความเข้มของรังสีที่ผ่านสารตัวอย่าง กับ ค่าความเข้มของรังสีที่ตกกระทบสารตัวอย่าง คือ

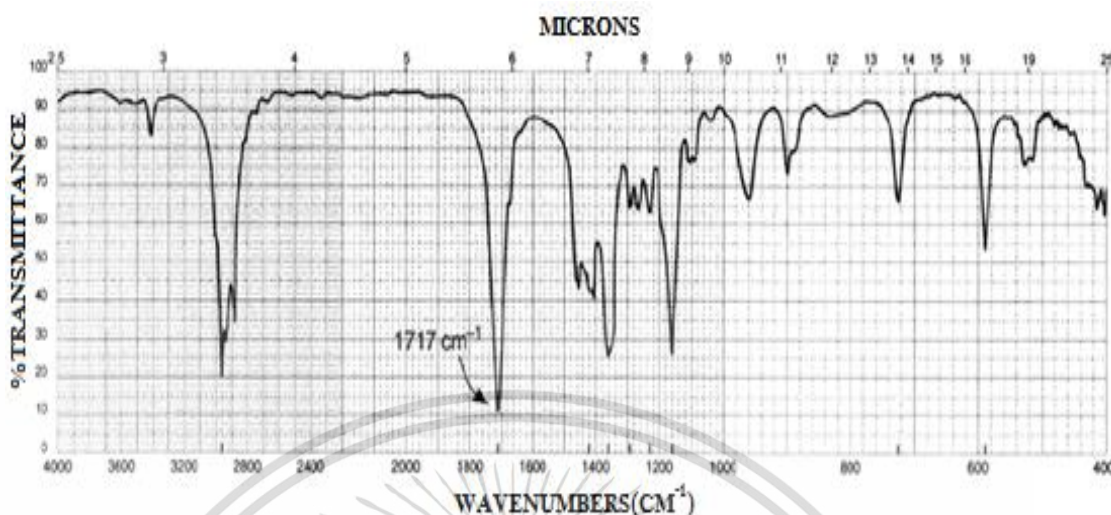
$$T = \frac{I}{I_0} \quad (2.17)$$

เมื่อ T คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง

I คือ ความเข้มของรังสีที่ผ่านสารตัวอย่าง

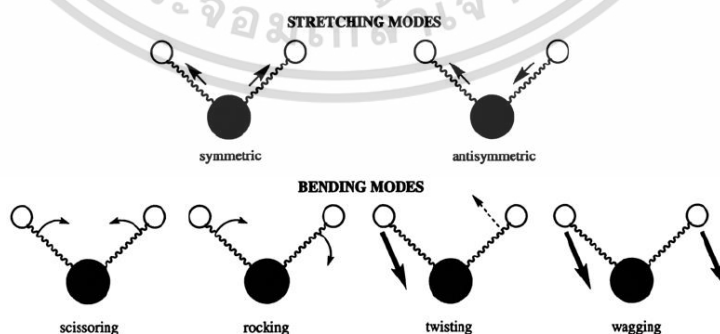
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกัการศึกษเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

I_0 คือ ความเข้มของรังสีที่ตกกระทบสารตัวอย่าง



รูปที่ 2.16 แสดงสเปกตรัมอินฟราเรด สเปกตรัมของ 2-pentanone

การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดตรงกับพลังงานในช่วง 2-10 กิโลแคลอรีต่อโมล พลังงานของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านนี้ก่อให้เกิดการสั่นแบบยืด (stretching) และแบบงอ (bending) ของพันธะในโมเลกุลของสาร การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดเป็นแบบไม่ต่อเนื่อง (quantized) กล่าวคือสารจะดูดกลืนรังสีอินฟราเรดนั้น ความถี่ของรังสีที่ถูกดูดกลืนจะต้องตรงกับความถี่ของการสั่นของพันธะนั้นั้น นอกจากนี้ การสั่นของพันธะทุกประเภทในโมเลกุลมิได้ให้ฟิสิกใน สเปกตรัมอินฟราเรดเสมอไป การสั่นของพันธะที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้า (electrical dipole moment) เท่านั้นที่จะมีฟิสิกปรากฏใน สเปกตรัมอินฟราเรดตัวอย่างเช่น การสั่นของพันธะระหว่างไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้าของสารประกอบ $C=C$ ใน $RCH=CHR$ ไม่มีฟิสิกใน สเปกตรัมอินฟราเรด ส่วนการสั่นของพันธะ $C=O$ ในสารประกอบคาร์บอนิลเกิดฟิสิกที่มีความเข้มสูงใน สเปกตรัมอินฟราเรด



รูปที่ 2.17 แสดงรูปแบบการสั่นของพันธะเคมีระหว่างไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้าของสารอินทรีย์

โดยทั่วไป แถบพลังงานที่เกิดใน สเปกตรัมอินฟราเรด เกิดจากการสั่นแบบพื้นฐาน ได้แก่ การยืดและการงอ ยังมีแถบพลังงานที่มีความเข้มต่ำเกิดจากความถี่ 2 เท่า 3 เท่า หรือ 4 เท่าของความถี่แบบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พื้นฐาน แถบพลังงานเหล่านี้ เรียกว่า โอเวอร์โทน ซึ่งเกิดเมื่อความถี่พื้นฐานมีความเข้มสูงบางครั้ง อาจมีแถบพลังงานเกิดที่ความถี่ที่เป็นผลบวกหรือผลต่างของความถี่แบบพื้นฐาน แถบเหล่านี้เรียกว่า แถบพลังงานรวม (combination bands) ถ้าโอเวอร์โทน หรือ แถบพลังงานรวม เกิดใกล้กับ แถบพลังงานพื้นฐาน ผลก็คือ ทำให้ความเข้มของแถบพลังงานพื้นฐานลดลง แต่ไปเพิ่มความเข้มของ โอเวอร์โทน หรือแถบพลังงานรวม ปรากฏการณ์นี้ คือเกิด เฟอร์มิ เรโซแนนซ์ (Fermi resonance) และพีคทั้งคู่บางครั้งเรียกว่า เฟอร์มิดับเบิ้ล็ต (Fermi doublet) รูปที่ 2.17 แสดงการสั่นแบบพื้นฐาน ของหมู่ CH_2

ตารางที่ 2.4 แสดงค่าเลขคลื่นต่างๆของพลังงานที่ได้จากการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชัน ต่างๆ

เลขคลื่น (ต่อเซนติเมตร)	หมู่ฟังก์ชัน	รายละเอียด
3600-3400	O-H stretching	3650-3590 cm^{-1} (sh, w) แอลกอฮอล์อิสระ 3400-3200 cm^{-1} (b) แอลกอฮอล์ที่เกิด พันธะ ไฮโดรเจน 3400-2400 cm^{-1} (vs, vb) กรดคาร์บอกซิ ลิก
3500-3200	N-H stretching	3200-3400 cm^{-1} (m) 1° เอมีนและเอมีด มี 2 แถบ 3200-3400 cm^{-1} (w) 2° เอมีนและเอมีด มี 1 แถบ
3300 (vs)	=C-H stretching	3300 cm^{-1} อัลไคน์ที่มี =C-H ที่ปลายโซ่
3100-3000 (w, sh)	=C-H stretching	อัลคีนและเบนซีน (อาจมีหลายพีค)
3000-2800	C-H stretching	หมู่ CH_3 , CH_2 และ CH ของอัลเคน
2850-2780	C-H stretching	แอลดีไฮด์
2250-2225	C=N stretching	ไนทริล (m)
2260-2100	C=C stretching	อัลไคน์ (w) โมเลกุลที่สมมาตรจะไม่มีแถบนี้ ปรากฏ
1820-1760 (s)	C=O stretching	แอนไฮไดรด์ (s) มี 2 แถบ
1800 (s)	C=O stretching	กรดคลอไรด์
1770 (s)	C=O stretching	แกมมา-แลกโตน
1735 (s)	C=O stretching	เอสเทอร์
1725 (s)	C=O stretching	แอลดีไฮด์
1715 (s)	C=O stretching	คีโตน
1710 (s)	C=O stretching	กรดคาร์บอกซิลิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลขคลื่น (ต่อเซนติเมตร)	หมู่ฟังก์ชัน	รายละเอียด
1690-1650 (s)	C=O stretching	เอไมด์
1650-1600 (w)	C=C stretching	อัลคีน
1650-1590 (s-m)	N-H bending	1° เอมีน
1650-1550 (w)	N-H bending	2° เอมีน
1620-1590 (s)	N-H bending	1° เอมีน
1550-1510 (s)	N-H bending	2° เอมีน
1600, 1580, 1500 และ 1450	C=C stretching	เบนซีนและเบนซีนที่มีหมู่แทนที่ ความเข้มข้น แน่นอน อาจมี 2, 3 หรือมีทั้ง 4 แถบ
1520 (s) และ 1350 (s)	NO ₂ bending	สารประกอบไนโตร
1465-1450	C-H bending	หมู่ CH ₂
1450-1375	C-H bending	หมู่ CH ₃
1400-1000	C-F stretching	สารประกอบฟลูออไรด์
1300-1150	CH ₂ -X	สารประกอบเฮโลเจน
1300-1000	C-O stretching	อีเธอร์และเอสเทอร์
1220	C-O stretching	ฟีนอล
1150	C-O stretching	3° แอลกอฮอล์
1100	C-O stretching	2° แอลกอฮอล์
1050	C-O stretching	1° แอลกอฮอล์
990 และ 910	C-H (OOP bending)	อัลคีน (หมู่แทนที่ 1 หมู่, RCH=CH ₂)
970	C-H (OOP bending)	อัลคีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่, trans)
890	C-H (OOP bending)	อัลคีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่, R ₂ C=CH ₂)
815	C-H (OOP bending)	อัลคีน (หมู่แทนที่ 3 หมู่, R ₂ C=CHR)
700-690	C-H (OOP bending)	อัลคีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่, cis)
750 และ 690	C-H (OOP bending)	เบนซีน (หมู่แทนที่ 1 หมู่)
750	C-H (OOP bending)	เบนซีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่ แบบ ออโท)
780 และ 700	C-H (OOP bending)	เบนซีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่ แบบ เมตา)
825-800	C-H (OOP bending)	เบนซีน (หมู่แทนที่ 2 หมู่ แบบ พารา)
800-600	C-Cl	สารประกอบคลอไรด์
600-500	C-Br	สารประกอบโบรมைด์
~ 500	C-I	สารประกอบไอโอดีน

คำย่อ : s = ความเข้มสูง, vs = ความเข้มสูงมาก, m = ความเข้มปานกลาง, w = ความเข้มต่ำ, vw = ความเข้มต่ำมาก, sh แหลมคม, b = กว้าง, vb = กว้างมาก, OOP = out - of - plane (การสั่นออกนอกระนาบ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง [8-19]

จากทฤษฎีแถบพลังงานนั้นสารกึ่งตัวนำสามารถมีขนาดช่องว่างแถบพลังงานได้ใหญ่เกินกว่า 2 อิเล็กตรอนโวลต์ พลังงานความร้อนที่อุณหภูมิห้องไม่เพียงพอที่จะกระตุ้นให้เกิดพาหะอิสระได้ ดังนั้นพาหะอิสระของสารกึ่งตัวนำประเภทนี้จึงน้อยส่วนใหญ่มาจากระดับพลังงานผู้รับหรือศูนย์กลางการรวมตัว (recombination center) ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิใดๆของสารกึ่งตัวนำจึงขึ้นกับความหนาแน่นของพาหะอิสระเหล่านี้

2.5.1 สมบัติการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ

สมบัติการนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำขึ้นอยู่กับจำนวนพาหะอิสระเป็นสำคัญ กล่าวคือ ถ้าจำนวนอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์เพิ่มมากขึ้น สารกึ่งตัวนำนั้นจะนำไฟฟ้าได้ดียิ่งขึ้น ปริมาณความหนาแน่นของพาหะอิสระในสารกึ่งตัวนำถูกกำหนดด้วยขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือ และอุณหภูมิเป็นสำคัญ ที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน การกระจายของพาหะอิสระตามระดับพลังงานของผลึกเป็นตามฟังก์ชันการกระจายแบบเฟอร์มี-ดิเรก (Fermi-Dirac distribution) ดังสมการที่ (2.18)

$$f(E) = \frac{1}{\exp[(E - E_F)/kT] + 1} \quad (2.18)$$

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

E_F คือ ระดับพลังงานเฟอร์มี (Fermi energy level)

k คือ ค่าคงตัวของโบลตซ์มันน์ (Boltzmann's constant) = 1.38×10^{-23} จูลต่อเคลวิน

T คือ อุณหภูมิในหน่วยของเคลวิน

ในการพิจารณาความหนาแน่นพาหะอิสระในสภาวะสมดุลเชิงความร้อนสามารถแยกได้เป็น 2 กรณี คือกรณีสารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีนสิกซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน (intrinsic semiconductor) และกรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอกซ์ทรีนสิกเป็นสารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ (extrinsic semiconductor)

2.5.1.1 สารกึ่งตัวนำอินทรีนสิก

สารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีนสิกซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นด้วยพลังงานความร้อนขึ้นไปยังแถบนำและทิ้งโฮลจำนวนเท่ากันไว้ในแถบวาเลนซ์ ถ้ากำหนดให้ $N_c(E)dE$ เป็นจำนวนสถานะในแถบนำต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรที่มีพลังงานอยู่ระหว่าง E และ $E + dE$ ดังนั้นความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำที่มีค่าพลังงานอยู่ระหว่าง E และ $E + dE$ ที่อุณหภูมิใดๆคือ

$$n(E)dE = N_c(E)f(E)dE \quad (2.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ N_c คือ ความหนาแน่นของสถานะพลังงาน (density of state) ในแถบนำซึ่งเมื่อพิจารณาจากกรณีแถบนำมีความสมมาตรในเชิงทรงกลมและมีจุดต่ำสุดเพียงจุดเดียวดังนี้

$$N_c(E) = 2\pi \left(\frac{2m_e^*}{h} \right)^{3/2} E^{1/2} \quad (2.20)$$

เมื่อ m_e^* คือ มวลยังผลของอิเล็กตรอนในแถบนำ

h คือ ค่าคงตัวของพลังค์ (Planck's constant) = 6.625×10^{-34} จูล-วินาที
จากสมการที่ (2.20) พิจารณาโดยกำหนดให้ระดับพลังงานศูนย์อยู่ตรงขอบล่างของแถบนำนั้นคือจะมีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในแถบนำทั้งหมดเท่ากับ

$$n_i = \int_0^{E_i} n(E) dE = \int_0^{E_i} N_c(E) f(E) dE \quad (2.21)$$

เมื่อ E_i คือ ค่าพลังงานที่ขอบบนของแถบนำ

โดยทั่วไปพลังงานความร้อน (kT) ของผลึกมีค่าน้อยกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานของผลึกมากๆ จนกระทั่งมั่นใจได้ว่าสถานะพลังงานของแถบนำอยู่ในสภาวะที่เป็นระดับพลังงานซ้อน (non-degeneracy) และ $n(E)dE$ มีค่าใกล้ศูนย์ที่ค่าระดับพลังงานสูงๆ สมการที่ (2.21) จึงสามารถขยายของเขต E_i ออกไปจนถึงอนันต์ และสามารถเขียนสมการที่ (2.21) ใหม่ได้เป็น

$$n_i = 4\pi \left[\frac{2m_e^*}{h^2} \right]^{3/2} \int_0^{\infty} \frac{E^{3/2}}{\exp\left[\frac{(E - E_F)}{kT}\right] + 1} dE \quad (2.22)$$

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

$$n_i = N_c \exp\left[\frac{E_F}{kT}\right] \quad (2.23)$$

เมื่อ

$$N_c = 2 \left[\frac{2\pi m_e^* kT}{h^2} \right]^{3/2} \quad (2.24)$$

และทำนองเดียวกันเราจะได้ความหนาแน่นของโฮลในแถบวาเลนซ์ดังนี้

$$p_i = N_v \exp \left[-\frac{E_c + E_g}{kT} \right] \quad (2.25)$$

โดย
$$N_v = 2 \left[\frac{2\pi m_h^*}{h^2} \right]^{3/2} \quad (2.26)$$

เมื่อ E_g คือ ค่าช่องว่างของแถบพลังงาน

m_h^* คือ มวลยังผลของโฮลในแถบวาเลนซ์

N_v คือ ความหนาแน่นของสถานะพลังงานในแถบวาเลนซ์

เนื่องจากในสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน โฮลและอิเล็กตรอนมีจำนวนเท่ากัน ดังนั้นจากสมการที่ (2.24) และสมการที่ (2.25) จะได้

$$n_i p_i = n_i^2 = N_c N_v \exp \left[-\frac{E_g}{kT} \right] \quad (2.27)$$

และ
$$n_i = (N_c N_v)^{1/2} \exp \left[-\frac{E_g}{kT} \right] \quad (2.28)$$

หรือ
$$n_i = p_i = 4.82 \times 10^{15} T^{3/2} \left(\frac{m_e^* m_h^*}{m^2} \right) \exp \left[-\frac{E_g}{kT} \right] \quad (2.29)$$

จากสมการที่ (2.28) พาหะอิสระในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิในเทอมของเอกซ์โพเนนเชียล อุณหภูมิจึงมีบทบาทสำคัญกับสมบัติไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน

2.5.1.2 สารกึ่งตัวนำชนิดเอกซ์ทรินสิก

สารกึ่งตัวนำชนิดเอกซ์ทรินสิกเป็นสารกึ่งตัวนำที่ไม่บริสุทธิ์ เมื่อมีการเติมอะตอมของสารเจือลงในสารกึ่งตัวนำที่อาจมีได้ทั้งอะตอมผู้ให้ (donor) และอะตอมผู้รับ (acceptor) ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อนของผลึก ความหนาแน่นอิสระทั้งอิเล็กตรอนและโฮลจะหาได้ทำนองเดียวกับสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน นั่นคือความหนาแน่นอิเล็กตรอนในแถบนำคือ

$$n = N_c \exp \left[\frac{E_F}{kT} \right] \quad (2.30)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และความหนาแน่นของโฮลในแถบวาเลนซ์คือ

$$p = N_v \exp \left[- \frac{E_F + E_g}{kT} \right] \quad (2.31)$$

จะได้กฎการคงตัวของมวลดั่งสมการ

$$np = n_i^2 = N_c N_v \exp \left[- \frac{E_g}{kT} \right] \quad (2.32)$$

พิจารณาสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type) ที่มีทั้งอะตอมผู้ให้ (N_d) ที่มีระดับพลังงานลึกจากขอบล่างของแถบนำเป็นสถานะระดับพลังงานของอะตอมผู้ให้ (donor level: E_d) และ อะตอมผู้รับ (N_a) ที่มีระดับพลังงานสูงกว่าขอบล่างของแถบวาเลนซ์เป็นสถานะพลังงานของอะตอมผู้รับ (acceptor level: E_a) จากเงื่อนไขความเป็นกลางทางไฟฟ้าของระบบจะได้

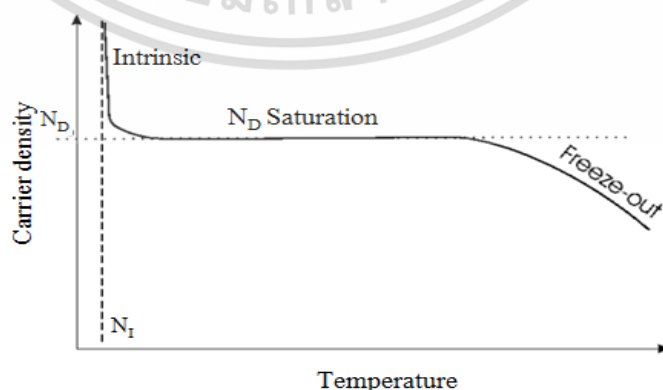
$$n + (N_a - n_a) = p + (N_d - n_d) \quad (2.33)$$

เมื่อ n, p คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ

N_d, N_a คือ ความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้และผู้รับ

n_d, n_a คือ ความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้และผู้รับที่ไม่ถูกไอออไนซ์

เราสามารถแยกพิจารณาลักษณะการแปรผันตามอุณหภูมิของพาหะได้เป็น 2 กรณีดังแสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นกับ

อุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่โดยทีมงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือมีค่าน้อยหรือที่อุณหภูมิสูง

ในกรณีเช่นอะตอมของสารเจือจะถูกไอออไนซ์จนหมดด้วยพลังงานความร้อน พาหะอิสระเกิดจากสองส่วนคือ มาจากสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน และมาจากอะตอมของสารเจือทั้งหมด จากเงื่อนไขเป็นกลางทางไฟฟ้าสมการที่ (2.33) ลดรูปได้เป็น

$$n = p + (N_d - N_a) \quad (2.34)$$

จากสมการที่ (2.34) จะได้ว่า

$$n = \frac{1}{2} \left[(N_d - N_a) + \sqrt{(N_d - N_a)^2 + 4n_i^2} \right] \quad (2.35)$$

$$p = \frac{n_i^2}{n} \quad (2.36)$$

ในช่วงอุณหภูมิสูงมากจนกระทั่งความหนาแน่นพาหะส่วนใหญ่มาจากสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน มากกว่าอะตอมของสารเจือมากๆ ($|N_d - N_a| \ll n_i$) ช่วงนี้จะมีการเพิ่มขึ้นของพาหะอิสระตามการเพิ่มของอุณหภูมิอย่างรวดเร็วแบบเอกซ์โพเนนเชียล เรียกช่วงนี้ว่าเป็นบริเวณย่านอินทรินสิก (intrinsic region) และสมการที่ (2.33) และ (2.34) จะกลายเป็นสมการของบริเวณย่านอินทรินสิก

$$n = p = n_i \quad (2.37)$$

ในช่วงที่อุณหภูมิต่ำกว่าช่วงอินทรินสิก พาหะที่มาจากสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 0 เคลวิน จะมีค่าน้อยกว่าพาหะที่มาจากอะตอมของสารเจือมากๆ ($|N_d - N_a| \gg n_i$) พาหะขั้วมากในช่วงนี้จะมีค่าคงที่เรียกช่วงนี้ว่าบริเวณย่านอิ่มตัว (saturation region) โดยสมการที่ (2.34) จะเปลี่ยนเป็น

$$n \cong N_d - N_a \quad (2.38)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือมีมากหรือที่อุณหภูมิต่ำ

ในกรณีนี้พลังงานเนื่องจากความร้อนไม่สามารถไอออไนซ์อะตอมของสารเจือได้ทั้งหมด ดังนั้นจึงยังมีอะตอมผู้ให้ที่ไม่ถูกไอออไนซ์ (n_d) บางส่วนเหลืออยู่ แต่โฮล (p) และ อะตอมผู้รับที่ไม่ถูกไอออไนซ์ (n_a) จะมีค่าน้อยมาก ดังนั้นสมการที่ (2.38) จะเปลี่ยนเป็น

$$n = N_d - N_a - n_d \quad (2.39)$$

และ

$$n_d = N_d \left[\frac{1}{1 + \beta \exp \left\{ \frac{E_d + E_F}{kT} \right\}} \right] \quad (2.40)$$

เมื่อ β คือ แฟกเตอร์สถานะพลังงานซ้อนทับ (degeneracy factor)

ที่สถานะพื้นฐานของอะตอมผู้ให้ จากสมการที่ (2.37), (2.38) และ (2.39) สามารถเขียนได้ในรูปของสมการที่ (2.40) ดังนี้

$$n^2 + n(N_d + N_c) - (N_d - N_a)N_c = 0 \quad (2.41)$$

เมื่อ

$$N_c = \beta N_c \exp \left(-\frac{E_d}{kT} \right) \quad (2.42)$$

n อยู่ในรูปของสมการควอดราติกซึ่งมีรากของสมการคือ

$$n = -\frac{1}{2}(N_d + N_c) + \frac{1}{2} \left[(N_d + N_c)^2 + 4N_c(N_d - N_a) \right]^{1/2} \quad (2.43)$$

เมื่อ $E_d \gg kT$ และ N_c จะมีค่าน้อย เราสามารถกระจายสมการที่ (2.43) เทอมที่สองด้านขวามือได้ด้วยอนุกรมทวินาม (binomial series) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$n \cong \frac{N_c(N_d - N_a)}{N_a + N_c} \quad (2.44)$$

ถ้า $N_a \gg N_c$ สมการที่ (2.44) จะกลายเป็น

$$\frac{n^2}{N_d} - N_c = 0 \quad (2.45)$$

หรือ
$$n \approx \sqrt{\beta N_d N_c} \exp\left[-\frac{E_d}{2kT}\right] \quad (2.46)$$

จะเห็นได้ว่าความหนาแน่นของพาหะอิสระจะลดลงตามการลดลงของอุณหภูมิในแบบเอกซ์โพเนนเชียล ซึ่งเรียกช่วงทั้งสองนี้ว่าย่าน ฟรีซเอาท์ (freeze-out region) โดยการลดลงจะเป็นไปตามสมการที่ (2.44) เมื่ออุณหภูมิต่ำลง จนกระทั่ง $N_a < n < N_d$ และลดลงตามสมการที่ (2.46) เมื่ออุณหภูมิลดลงจนกระทั่ง $n < N_a < N_d$

2.6 สภาพนำไฟฟ้า [8-19]

เมื่อใส่สนามไฟฟ้าเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบนำจะตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าเกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนกลายเป็นกระแสไฟฟ้า จากกฎของโอห์ม(Ohm's law) สภาพนำไฟฟ้า (electrical conductivity : σ) คืออัตราส่วนของ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (current density : J) ต่อ ค่าสนามไฟฟ้า (electric field : E) ที่ใส่เข้าไปสมการ

$$J = \sigma E = e(\mu_n n + \mu_p p)E \quad (2.47)$$

เมื่อ μ_n, μ_p คือ สภาพคล่องของอิเล็กตรอนและโฮล ตามลำดับ

n คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

p คือ ความหนาแน่นของโฮล

ค่าส่วนกลับของสภาพนำไฟฟ้า เรียกว่า ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (resistivity: ρ) ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{e(\mu_n n + \mu_p p)} \quad (2.48)$$

ถ้ามีก้อนเนื้อสารกึ่งตัวนำซึ่งให้แรงดัน V และเกิดกระแส I แล้วจะได้ว่า $J = \frac{I}{A}$ และ $E = \frac{V}{l}$

สามารถเขียนสมการข้างต้นใหม่ได้เป็น

$$\frac{I}{A} = \sigma \left(\frac{V}{l} \right) \quad (2.49)$$

$$V = \left(\frac{l}{\sigma A} \right) I = \left(\frac{\rho l}{A} \right) I = IR \quad (2.50)$$

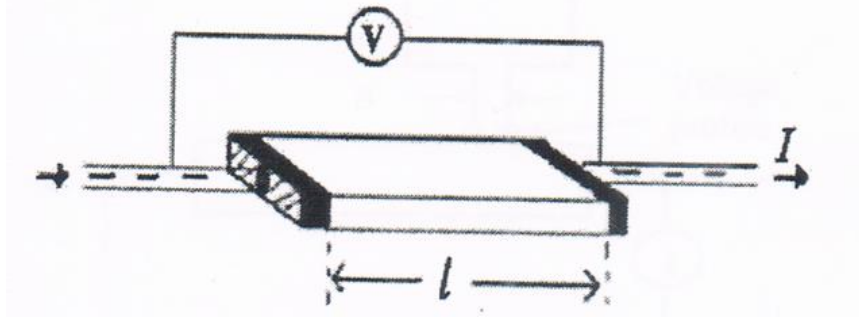
สมการข้างต้น คือกฎของโอห์มสำหรับสารกึ่งตัวนำ ความต้านทานเป็นฟังก์ชันกับสภาพความต้านทานหรือสภาพนำไฟฟ้า และขึ้นกับมิติรูปทรงเรขาคณิตของสารกึ่งตัวนำ

2.7 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า [8-19]

วิธีการวัดสภาพความต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำสามารถกระทำได้หลายวิธี ทั้งวิธีที่ใช้ส่วนของอุปกรณ์ต่อเข้าสัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่างและวิธีที่ไม่ต้องสัมผัสโดยตรงสำหรับวิธีที่จะกล่าวถึงในที่นี้เป็นวิธีที่ใช้การสัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่าง ซึ่งทำได้โดยการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในชิ้นสารตัวอย่าง แล้ววัดความต่างศักย์ระหว่างจุดบนชิ้นสารนั้น

2.7.1 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง (direct resistivity method)

โดยทั่วไปแล้วการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้ามักจะวัดความต้านทานก่อน ซึ่งเป็นวิธีวัดโดยตรงนี้หมายถึง วัดค่าความต้านทานรวมของสสารจากนั้นมาหาค่าความยาว และพื้นที่หน้าตัดของสสารนั้น การวัดวิธีนี้จะต้องทำให้สสารที่ต้องการวัดมีรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอน เพื่อที่จะวัดค่าพื้นที่หน้าตัดและความยาวให้ได้แน่นอน เช่น แท่งกลมทรงกระบอก แท่งสี่เหลี่ยม เป็นต้น จากนั้นจึงให้กระแสไฟฟ้าเข้าไปที่ปลายด้านหนึ่ง และให้กระแสไหลออกผ่านสารตัวอย่างที่ปลายอีกด้านหนึ่ง ขณะเดียวกันก็วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จุดปลายทั้งสองนั้นพร้อมๆกัน จากที่ทราบค่ากระแสและศักย์ไฟฟ้านี้ สามารถนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าได้ดังต่อไปนี้ เมื่อกำหนด R เป็นความต้านทานรวมจะมีความสัมพันธ์กับความต้านทานจำเพาะและพื้นที่หน้าตัด A บริเวณที่ปล่อยกระแสไหลเข้าไปและ l เป็นระยะทางระหว่างขั้วศักย์ไฟฟ้าที่วัด



รูปที่ 2.19 แสดงการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง

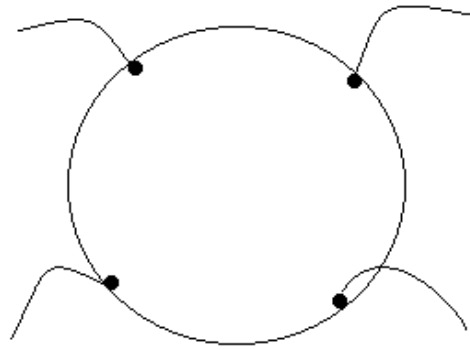
$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.51)$$

$$\rho = R \times \frac{A}{l} = \left(\frac{V}{I} \right) \left(\frac{A}{l} \right) \quad (2.52)$$

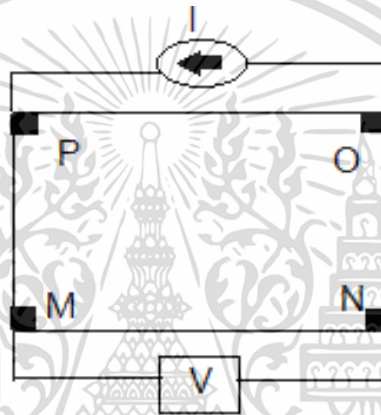
จะเห็นว่าวิธีนี้เป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็ว แต่ค่าที่ได้เป็นค่าโดยประมาณซึ่งต้องคำนึงถึงองค์ประกอบอื่นๆด้วย ซึ่งความถูกต้องในการวัดโดยวิธีนี้ขึ้นอยู่กับบริเวณผิวสัมผัสที่กระแสไหลเข้าและออกนั้นมีลักษณะเป็นโอห์มมิกที่ดีหรือไม่ ถ้าไม่มีคุณสมบัติโอห์มมิกที่ดีแสดงว่ามีความต้านทานที่ผิวสัมผัสทั้งสองขั้วไฟฟ้าเกิดขึ้นด้วย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

2.7.2 การวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ [8-19]

วิธีการวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ดังแสดงในรูปที่ 2.20 และ 2.21 เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมสำหรับการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของชิ้นสารตัวอย่างที่เป็นฟิล์มบางที่มีความหนาสม่ำเสมอและมีรูปร่างไม่แน่นอน โดยขั้วสัมผัสจะอยู่บริเวณขอบของชิ้นสารตัวอย่าง รอยต่อระหว่างขั้วสัมผัสที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะต้องไม่ขัดขวางการไหลของกระแส



รูปที่ 2.20 แสดงตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชิ้นสารตัวอย่างเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์



รูปที่ 2.21 แสดงการต่อขั้วเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์

การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถทำได้โดยจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าขั้ว P-O ทำการวัดความต่างศักย์ตกคร่อมขั้ว M-N จะทำให้ได้ค่า R_1 จากสมการที่ (2.53)

$$R_1 = \frac{V_{MN}}{I_{PO}} \quad (2.53)$$

หลังจากนั้นทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าที่ขั้ว P-M แล้วทำการวัดความต่างศักย์ตกคร่อมขั้ว O-N จะได้ค่า R_2 จากสมการที่ (2.54)

$$R_2 = \frac{V_{ON}}{I_{PM}} \quad (2.54)$$

เมื่อได้ค่า R_1 และ R_2 มาแล้วสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานแผ่นได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_{sh} = f \left(\frac{\pi}{\ln 2} \right) \left(\frac{R_1 + R_2}{2} \right) \quad (2.55)$$

เมื่อ f คือ แฟกเตอร์ค่าแก้ของแวนเดอร์เพาว์ (Van der pauw correction factor)

โดย
$$f = 1 - \left(\frac{\ln 2}{2} \right) \left(\frac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2} \right)^2 \quad (2.56)$$

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\rho = R_{sh} d \quad (2.57)$$

2.8 ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect) [7-18]

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถเขียนในเทอมของสภาพคล่องของพาหะได้และความหนาแน่นพาหะด้วยความสัมพันธ์

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากอิเล็กตรอน

$$\rho = \frac{1}{ne\mu_e} \quad (2.58)$$

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากโฮล

$$\rho = \frac{1}{pe\mu_p} \quad (2.59)$$

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากพาหะสองชนิดคืออิเล็กตรอน และ โฮลซึ่งมีปริมาณใกล้เคียงกันสภาพต้านทานไฟฟ้าที่แท้จริงคือ

$$\rho = \frac{1}{e \left(n\mu_e + p\mu_p \right)} \quad (2.60)$$

เมื่อ n คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระ

p คือ ความหนาแน่นของโฮล

n_e และ n_p คือ สภาพคล่องของอิเล็กตรอนและโฮล

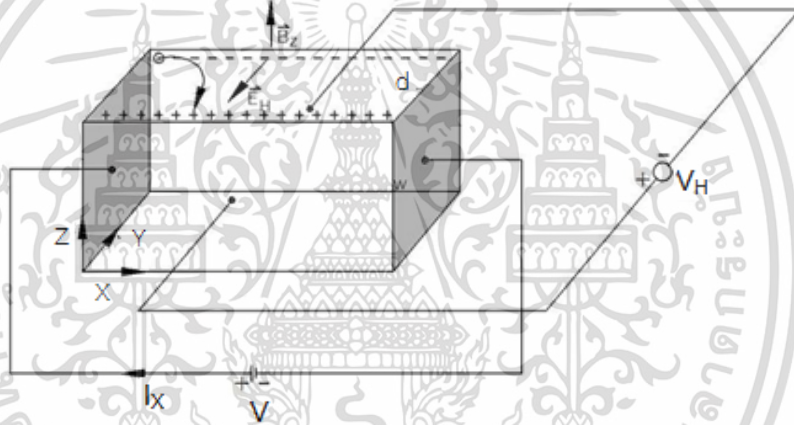
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั่นคือหากทราบสภาพต้านทานไฟฟ้า และสภาพคล่องของพาหะจะทำให้สามารถคำนวณค่าความหนาแน่นของพาหะข้างมากได้จากสมการที่ (2.61) และ (2.62) คือ

ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอน
$$n = \frac{1}{e\rho\mu_e} \quad (2.61)$$

กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดพี
$$p = \frac{1}{e\rho\mu_p} \quad (2.62)$$

เราสามารถคำนวณหา ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ค่าสภาพคล่องของพาหะ ได้หลายวิธี วิธีที่สะดวกและมักนิยมใช้กันอย่างกว้างขวางคือ การคำนวณจากการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ ปรากฏการณ์ฮอลล์ ถูกค้นพบในปี พ.ศ.2422 โดย เอ็ดวิน เฮอร์เบิร์ต (Edwin Herbert Hall)



รูปที่ 2.22 แสดงแผนภาพการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์บนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำชนิดพี

พิจารณาชิ้นสารกึ่งตัวนำชนิดพีที่เป็นรูปทรงดังแสดงในรูปที่ 2.22 ซึ่งมีกระแสไฟฟ้า I ไหลผ่านในแนว x หรืออาจมองว่ามีประจุบวกเคลื่อนที่ไปในทิศ x ด้วยความเร็วลอยเลื่อน v_x เกิดเป็นกระแสไฟฟ้าในแนวทิศทาง x คือ I ดังสมการที่ (2.63)

จาก
$$I = nqvA \quad (2.63)$$

ดังนั้น
$$I = qnv(wd) \quad (2.64)$$

จากกฎของโอห์ม
$$V = IR \quad (2.65)$$

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (2.66)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.22

$$A = w \cdot d \quad (2.67)$$

ถ้าทราบความต่างศักย์ (V) ระหว่างปลายทั้งสองของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น สามารถหาค่า สภาพต้านทานไฟฟ้าได้จากสมการที่ (2.64) และ (2.65) และ (2.67)

$$\rho = \frac{V}{I} \cdot \frac{A}{L} = \frac{V}{I} \cdot \frac{wd}{L} \quad (2.68)$$

ปรากฏการณ์ฮอลล์เกิดขึ้นเมื่อสนามแม่เหล็ก (B_z) ที่กระทำกับชิ้นสารในทิศ z อย่างสม่ำเสมอ อันตรกิริยาจากสนามแม่เหล็กมีผลทำให้แนวกระแสของอิเล็กตรอนเบี่ยงเบนไปในทิศ $-y$ สละสมในบริเวณขอบด้านนอก ($y=0$) และเหนี่ยวนำให้เกิดอิเล็กตรอนขึ้นที่ขอบด้านใน (y) ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าฮอลล์ในทิศ $-y$ (Hall field: E_y หรือ E_H) และเกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์หรือ เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าฮอลล์ในทิศ y (Hall Voltage : V_H) ขึ้น ทำให้กลุ่มโฮลเคลื่อนที่ไปด้วย แรงลอเรนตซ์ (Lorentz's force)

$$F = q(v_x \times B_z) + qE_y \quad (2.69)$$

เมื่อแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่กระทำต่อโฮลมีค่าเท่ากันจะเกิดสภาวะสมดุลเชิงความร้อน หรือสภาวะคงตัว (steady state) ทำให้โฮลเคลื่อนที่ในทิศ $-z$ ดังเดิมเพราะฉะนั้นจะทำให้ได้ว่า

$$E_y = v_x B_z = \frac{1}{qn} \cdot \frac{I}{wd} \cdot B_z \quad (2.70)$$

หากพิจารณาสมการที่ (2.70) จะเห็นว่าสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดขึ้นเป็นปฏิภาคกับความหนาแน่นกระแสและสนามแม่เหล็ก สามารถเขียนได้ในรูปของ

$$E_y = R_H \cdot J \cdot B_z \quad (2.71)$$

เมื่อ

$$J = \frac{I}{wd} \quad (2.72)$$

แล้ว

$$R_H = \frac{E_y}{J B_z} = \frac{1}{qn} \quad (2.73)$$

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

เราอาจทราบศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากสนามไฟฟ้าฮอลล์ โดยอินทิเกรตสนามไฟฟ้าฮอลล์ ตลอดความกว้าง (w) ของแผ่นสารและเรียกความต่างศักย์นี้ว่า ความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) นั่นคือ

$$V_H = \int_0^w E_y dy = \int_0^w \frac{1}{qn} \cdot \frac{IB_z}{wd} dy = \frac{1}{qn} \cdot \frac{IB_z}{d} \quad (2.74)$$

สัมประสิทธิ์ฮอลล์ที่ได้จากการวัด คือ

$$R_H = \frac{V_H}{I} \cdot \frac{d}{B_z} \quad (2.75)$$

ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนตามนิยาม คือ

$$n = \frac{1}{qR_H} = \frac{I_x}{V_H} \cdot \frac{B_z}{qd} \quad (2.76)$$

โดยทั่วไปพาหะอิสระที่เคลื่อนที่ในสารกึ่งตัวนำ มักประสบกับกลไกการกระเจิงหลายๆ ชนิด กลไกการกระเจิงของพาหะในสารกึ่งตัวนำจะเป็นกลไกที่ขึ้นอยู่กับพลังงานของพาหะ โดยที่ช่วงเวลาการปลดปล่อยการกระเจิง (τ) จะแสดงได้ดังนี้

$$\tau = \tau(E) \quad (2.77)$$

เมื่อคิดผลรวมจากการกระเจิงที่ขึ้นกับพลังงานของพาหะ สัมประสิทธิ์ฮอลล์สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\text{กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น} \quad R_H = \frac{r}{nq} \quad (2.78)$$

$$\text{กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดพี} \quad R_H = \frac{r}{pq} \quad (2.79)$$

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

$$r = \frac{\langle \tau \rangle^2}{\langle \tau^2 \rangle} \quad (2.80)$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$r = \frac{R_H(B)}{R_H(B = \infty)} \quad (2.81)$$

ในทางปฏิบัติสนามแม่เหล็กที่ใช้วัดโดยทั่วไปมีค่าอยู่ระหว่าง 5 – 10000 เกาส์ ซึ่งค่า r ในช่วงนี้มีการเปลี่ยนแปลงไม่มาก ดังนั้นอาจประมาณได้ว่าเป็นค่าคงที่

จากสมการที่ (2.76) และ (2.77) สามารถนิยามค่าสภาพคล่องฮอลล์ (μ_H) ได้เป็น

$$\mu_H = \left| \frac{R_H}{\rho} \right| = r_\mu \quad (2.82)$$

หรือจากสมการที่ (2.74) และ (2.79)

$$\mu_H = \frac{V_H}{I_H} \cdot \frac{d}{B_z} \cdot \frac{1}{\rho} \quad (2.83)$$

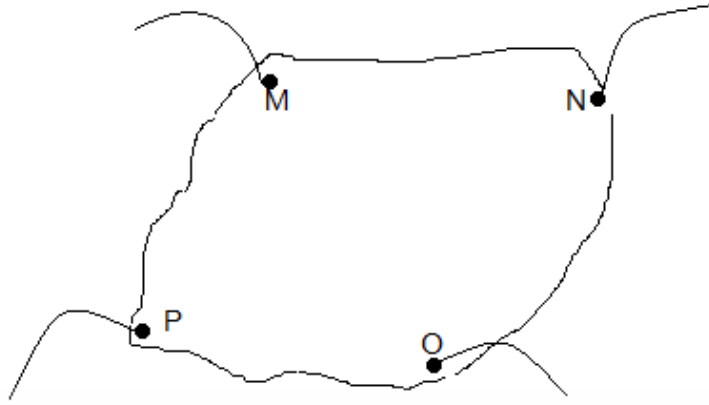
ค่าสภาพคล่องฮอลล์แตกต่างจากค่าสภาพคล่องที่ได้จากการนำไฟฟ้าด้วยอัตราส่วนของ r ซึ่งมีค่ามากกว่า 1 โดยทั่วไปเพื่อลดความซับซ้อนเมื่อคำนวณความหนาแน่นของพาหะจึงมักประมาณว่า r มีค่าเท่ากับ 1 ความหนาแน่นของพาหะที่คำนวณจากปรากฏการณ์ของฮอลล์จึงอาจสูงกว่าความหนาแน่นของพาหะที่แท้จริงถึง 30 เปอร์เซ็นต์

2.8.1 การศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ [8-19]

เทคนิคนี้ได้รับการพัฒนาขึ้นมาจากพื้นฐานของวิชาคณิตศาสตร์ คือ คอนฟอร์มอลแมปปิง (conformal mapping) โดยนักวิทยาศาสตร์ชื่อ แวนเดอร์เพาว์ (van der pauw) สำคัญสำคัญของเทคนิคนี้อยู่ที่การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของแผ่นสารตัวอย่างรูปทรงใดๆ ซึ่งสามารถทำได้อย่างแม่นยำโดยไม่จำเป็นต้องทราบ ลักษณะของรูปแบบการกระจายของเส้นทางเดินกระแสที่ไหลภายในแผ่นสาร ถ้าสารตัวอย่างประพฤติตามเงื่อนไขต่อไปนี้

- ขั้วสัมผัสวางอยู่ที่ขอบของชิ้นสาร
- ขนาดของขั้วสัมผัสต้องมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับเส้นรอบรูปของชิ้นสาร
- สารตัวอย่างต้องมีความหนาแน่นเท่ากันตลอด
- เนื้อสารตัวอย่างต้องไม่มีรูหรือรอยแยกใดๆ

พิจารณาชิ้นสารรูปทรงเป็นแผ่นบางใดๆ และมีขั้วสัมผัสเล็กๆ M, N, O และ P กระจายอยู่ที่บริเวณขอบของแผ่นซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขข้างต้น



รูปที่ 2.23 แสดงการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพอร์บนสารตัวอย่างที่เป็นแผ่นบางที่มีรูปทรงใดๆ

ในการวัดสภาพคล่องฮอลล์ หากกระบวนกรวัดกระทำภายใต้สนามแม่เหล็ก ความเข้ม B ที่กระทำตั้งฉากกับระนาบแผ่นสาร กระแสไฟฟ้าจ่ายเข้าในแนวทแยงมุมซ้าย M, O และวัดความต่างศักย์จากซ้าย N, P

นิยาม
$$R_{MNOP} = \frac{V_{NP}}{I_{MO}} \quad (2.84)$$

สัมประสิทธิ์ฮอลล์จากเทคนิคของแวนเดอร์เพอร์ คือ

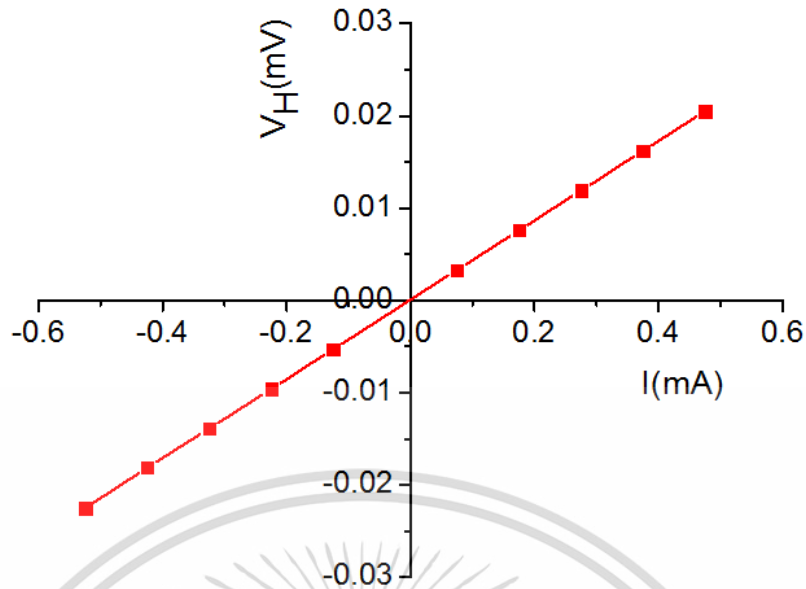
$$R_H = \left(\frac{V_H}{I} \right) \left(\frac{d}{B} \right) \quad (2.85)$$

เมื่อ	V_H	คือ	ความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์หรือผลต่างระหว่างค่า V_{NP} ในขณะที่มีสนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็ก
	d	คือ	ความหนาของชิ้นสารตัวอย่าง
	B	คือ	ความเข้มของสนามแม่เหล็ก

จากสมการที่ (2.84) จะได้ว่า

$$R_H = \frac{V_H}{I} \left(\frac{d}{B} \right) \quad (2.86)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I)

เมื่อทำการเขียนกราฟระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) กับ ค่ากระแสไฟฟ้า (I) ที่ได้จากการทดลองเราจะได้ลักษณะกราฟดังรูปที่ 2.24 โดยที่ความชันของกราฟที่ได้จะมีค่าเป็น $\frac{V_H}{I}$ สภาพคล่องพาหะของฮอลล์สามารถคำนวณได้จาก

$$\mu_H = \frac{R_H}{\rho} \quad (2.87)$$

และสามารถคำนวณหาระยะทางเฉลี่ยที่ปลอดภัยกระเจิงได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$I = \left(\frac{h}{2e}\right) \left(\frac{3n}{\pi}\right)^{1/3} \mu_H \quad (2.88)$$

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

ในทางปฏิบัติการเตรียมสารให้มีรูปทรงตามเงื่อนไขทั้ง 4 ข้อดังกล่าวอาจเป็นไปได้ยาก โดยเฉพาะขนาดและตำแหน่งของขั้วสัมผัสซึ่งมักไม่เป็นจุดและไม่อยู่ที่ขอบของชิ้นสารตามทฤษฎีจึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของผลการวัด

2.9 กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในฟิล์มบางที่อุณหภูมิต่างๆ [19,33-35]

ซีโต (Seto,1975) ได้พัฒนาทฤษฎีที่ใช้อธิบายการเคลื่อนที่ของพาหะอิสระในวัสดุที่เป็นผลึกพหุพันธ์ (polycrystalline) เช่น ในฟิล์มบาง เป็นต้น โดยใช้แบบจำลองกับดักพาหะที่ขอบของเกรนร่วมกับกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน โดยตั้งสมมุติฐานดังนี้คือ

ผลึกพหุพันธ์ประกอบไปด้วยเกรนขนาดเล็กที่มีคุณสมบัติเหมือนกัน มีรูปร่างเป็นลูกบาศก์ แต่ละด้านยาว L ซึ่งในความเป็นจริงเกรนจะมีรูปร่างไม่คงที่ (irregular shaped grains)

กลไกการนำไฟฟ้าคิดเป็น 1 มิติ

โครงสร้างแถบพลังงานของผลึกเดี่ยวสามารถประยุกต์ใช้ในเนื้อเกรนได้

ความหนาของขอบเกรนมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับขนาดของเกรน

ข้อบกพร่องผลึกถือว่าเป็นกับดักพาหะที่ปรากฏอยู่ที่ขอบของเกรน เมื่อเริ่มต้นกับดักพาหะจะเป็นกลางทางไฟฟ้า แต่เมื่อจับอิเล็กตรอน (จับโฮล) แล้ว กับดักพาหะกลายเป็นประจุลบ (ประจุบวก)

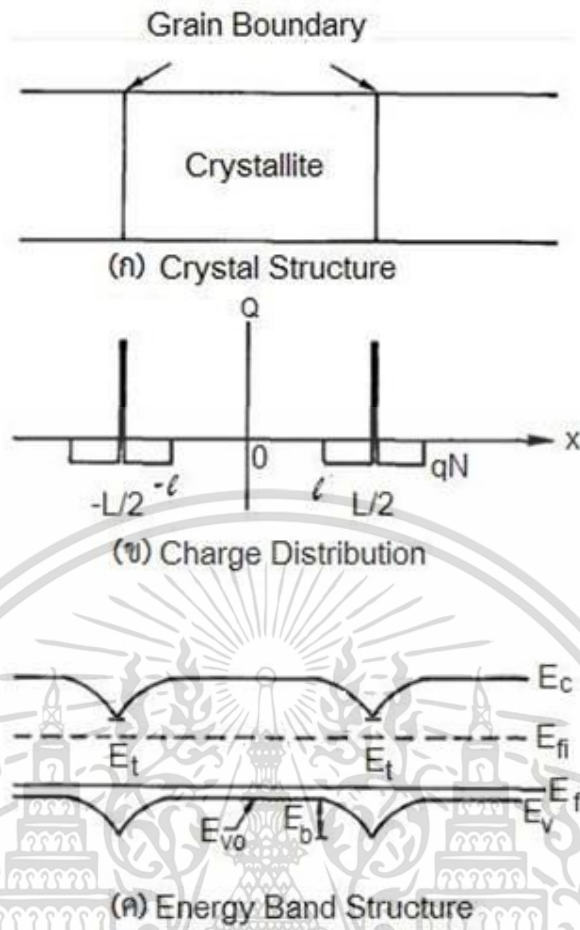
ความหนาแน่นของกับดักพาหะมีหน่วยเป็น ต่อตารางเซนติเมตร

ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น กับดักพาหะจะเป็นผู้รับ (acceptor) ส่วนสารกึ่งตัวนำชนิดพี กับดักพาหะจะเป็นผู้ให้ (donor)

ระดับพลังงานของกับดักพาหะ (E_T) จะอยู่ที่บริเวณกึ่งกลางของช่องว่างแถบพลังงาน

ความเข้มข้นของสารเจือจะกระจายอย่างสม่ำเสมอตลอดเนื้อสารและอะตอมสารเจือจะถูกไอออไนซ์ทั้งหมด

จากข้อสมมุติฐานดังกล่าวข้างต้น และโดยการประมาณแบบรอยต่อชั้นบันได (abrupt junction approximation) แถบพลังงานของผลึกพหุพันธ์ตรงบริเวณรอยต่อสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 แสดงแบบจำลองของฟิล์มบางตรงบริเวณขอบรอยต่อของเกรนดังนี้ คือ
 ก. ลักษณะของเกรนในผลึกพหุพันธ์
 ข. การกระจายของประจุในเนื้อเกรนและที่ขอบของเกรน
 ค. โครงสร้างแถบพลังงานของผลึกพหุพันธ์ในเนื้อเกรนและที่ขอบของเกรน

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

2.9.1 กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในฟิล์มบางในช่วงอุณหภูมิสูง

จากแบบจำลองที่พัฒนาโดยเบ็คคารินี (Baccarini et al., 1978) เมื่อ $N_a < N_a^*$ ในเนื้อเกรนจะเป็นบริเวณพร่องพาหะทั้งหมด ซึ่งจะเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิสูงระดับเฟอร์มิ (E_f) จะอยู่ระดับเดียวกับ E_i สภาพนำไฟฟ้าจะแสดงได้ด้วยสมการ

$$\sigma = \left[\frac{L^2 e^2 N_v N_a v_c}{2kT(N_t - LN_a)} \right] \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (2.89)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ
$$v_c = \left[\frac{kT}{2\pi m^*} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.90)$$

และ
$$N_v = 2 \left[\frac{2\pi m^* kT}{h^2} \right]^{\frac{3}{2}} \quad (2.91)$$

สมการที่ (2.90) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\sigma T^{-1} = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (2.92)$$

$$\ln \sigma T^{-1} = -\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T}\right) + \ln \sigma_0 \quad (2.93)$$

$$\ln \sigma T^{-1} = -\frac{E_a}{1,000k} \left(\frac{1,000}{T}\right) + \ln \sigma_0 \quad (2.94)$$

$$\text{ความชัน} = -\frac{E_a}{1,000k} \quad (2.95)$$

$$E_a = \frac{(1,000)(k)(\text{ความชัน})}{1.8 \times 10^{-19}} \quad (2.96)$$

โดยที่ E_a คือ ค่าพลังงานกระตุ้น มีหน่วยเป็นอิเล็กตรอนโวลต์ รูปที่ 2.26 แสดงตัวอย่างของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln \sigma T^{-1}$ กับ $\frac{1,000}{T}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่อุณหภูมิในช่วง 125-365 เคลวิน (Serin et al. 2011) สำหรับ ค่าความหนาแน่นของกักตักพาหะ N_t สามารถหาได้จากสมการที่ (2.88) เมื่อทราบขนาดของเกรน (L) แล้ว ซึ่งขนาดของเกรนสามารถคำนวณได้จากสมการของเซอร์เรอร์ดังสมการ

$$L = \frac{0.94\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (2.97)$$

ส่วนค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่ขอบของเกรนจะแสดงได้ดังนี้ คือ

$$E_b = \frac{e^2 L^2 N_a}{8\epsilon_s} \quad (2.98)$$

ส่วนระดับพลังงานของกักตักพาหะ(E_t) สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_a = \frac{1}{2}E_g - E_t \quad (2.99)$$

2.9.2 กลไกการนำไฟฟ้ากระแสตรงในฟิล์มบางในช่วงอุณหภูมิปานกลาง

เมื่ออุณหภูมิไม่สูงมากนัก ในเนื้อเกรนจะเป็นบริเวณพร่องพาหะเพียงบางส่วน ยิ่งจะสอดคล้องกับเงื่อนไข $N_a > N_a^*$ สำหรับเงื่อนไขแรกคือ $E_F - E_t - E_b \gg kT$ สภาพนำไฟฟ้าจะสัมพันธ์กับอุณหภูมิ คือ

$$\sigma = \left[\frac{Le^2 n v_c}{kT} \right] \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (2.100)$$

เมื่อ n คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระในบริเวณที่เป็นกลางทางไฟฟ้าสมการที่ (2.100) สามารถเขียนใหม่ได้เป็นดังนี้ คือ

$$\sigma T^{\frac{1}{2}} = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (2.101)$$

$$\ln \sigma T^{\frac{1}{2}} = -\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T}\right) + \ln \sigma_0 \quad (2.102)$$

$$\ln \sigma T^{\frac{1}{2}} = -\frac{E_a}{1,000k} \left(\frac{1,000}{T}\right) + \ln \sigma_0 \quad (2.103)$$

$$\text{ความชัน} = -\frac{E_a}{1,000k} \quad (2.104)$$

$$E_a = -\frac{1,000(k)(\text{ความชัน})}{(1.6 \times 10^{-19})} \quad (2.105)$$

ซึ่ง E_a ในที่นี้ คือ ความสูงของกำแพงศักย์ที่ขอบของเกรน (E_b) โดยที่

$$E_b = \frac{e^2 L^2 N_a}{8\epsilon_s} \quad (2.106)$$

เมื่อ ϵ_s คือ เพอร์มิตติวิตี (permittivity) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.27 แสดงตัวอย่างของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln \sigma T^{\frac{1}{2}}$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่อุณหภูมิในช่วง 125-365 เคลวิน (Serin et al., 2011) จากสมการที่ (2.105) จะเห็นได้ว่าค่า E_b จะไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ เนื่องจากเงื่อนไขที่ระดับเฟอร์มิ (E_F) อยู่สูงกว่าระดับกับดักพาหะ (E_t) ดังนั้นประจุไฟฟ้าจะเข้าไปบรรจุอยู่ในกับดักพาหะทั้งหมดจนเต็ม ส่งผลให้กับกับดักพาหะไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ สำหรับความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ (N_a) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.105) รวมทั้งความยาวเดอบาย (L_D) จะคำนวณได้จากความสัมพันธ์

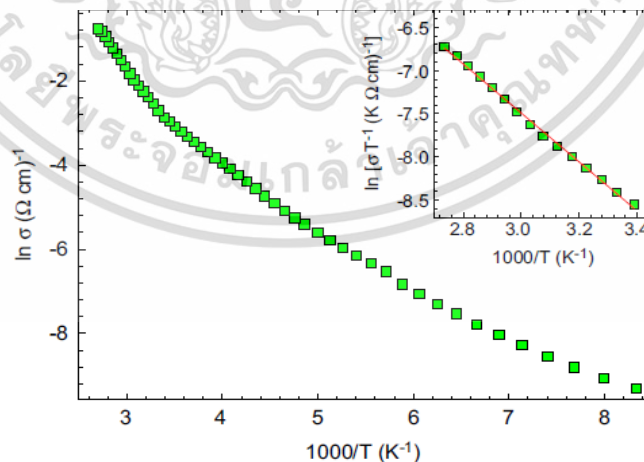
$$L_D = \left[\frac{kT\epsilon_s}{e^2 N_a} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.107)$$

สำหรับเงื่อนไขที่สอง คือ $E_F + E_t - E_b \gg kT$ เป็นเงื่อนไขที่ระดับกับดักประจุ (E_t) อยู่สูงกว่าระดับเฟอร์มิ (E_F) แสดงว่ากับดักพาหะบางส่วนเท่านั้นที่ถูกครอบครองโดยประจุไฟฟ้างั้นสภาพนำไฟฟ้าจะสัมพันธ์กับอุณหภูมิดังนี้ คือ

$$\sigma = eN_c^2 L_v^2 (2\epsilon_s N_d^{-1} E_b)^{\frac{1}{2}} (kTN_t)^{-1} \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \quad (2.108)$$

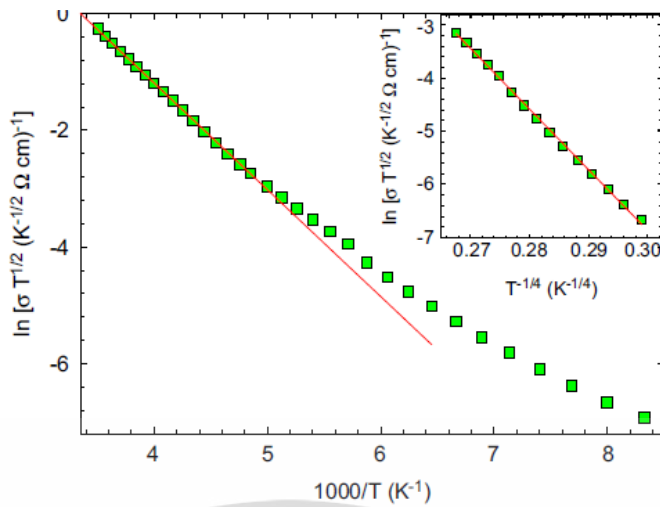
ซึ่ง

$$E_a = \frac{1}{2} E_g - E_t \quad (2.109)$$



รูปที่ 2.26 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln \sigma$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่อุณหภูมิในช่วง 125-365 เคลวิน สำหรับในรูปแทรกคือกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln \sigma T^{-1}$ กับ $\frac{1000}{T}$ (serin et al., 2011)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.27 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln \sigma T^{1/2}$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ

CuO สำหรับในรูปแทรกกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln \sigma T^{1/2}$ กับ $T^{-1/4}$

2.9.3 การนำไฟฟ้าของพาหะแบบกระโดดในระยะไม่คงที่ (Variable Range Hopping Conduction: VRH) [18]

การนำไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิต่ำมาก จะเกี่ยวกับการนำไฟฟ้าของพาหะแบบอยู่ในช่องว่างแถบพลังงาน สถานะถูกจำกัดเฉพาะที่เวลานี้มีระยะทางไม่คงที่ ดังนั้นจึงเรียกการนำไฟฟ้าชนิดนี้ว่าการนำไฟฟ้าของพาหะแบบกระโดดในระยะไม่คงที่ (VRH) และจะปรากฏเด่นชัดที่อุณหภูมิต่ำมากซึ่งในกรณี 3 มิติ จะแสดงได้โดยความสัมพันธ์ดังนี้

$$\sigma_{hop} = \sigma = \frac{\sigma_0}{T^{\frac{1}{2}}} \exp \left[-\frac{T_0}{T} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (2.110)$$

$$\sigma T^{\frac{1}{2}} = \sigma_0 \exp \left[-\frac{T_0}{T} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (2.111)$$

$$\ln \left(\sigma T^{\frac{1}{2}} \right) = -\left(\frac{T_0}{T} \right)^{\frac{1}{4}} + \ln \sigma_0 \quad (2.112)$$

เมื่อ σ_0 คือ แฟกเตอร์หน้าพจน์เอกซ์โพเนนเชียล (pre-exponential factor)

k คือ ค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.38×10^{-23} จูลต่อเคลวิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการเรียนการสอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำเอาสมการที่ (2.111) ไปเขียนกราฟจะได้กราฟเชิงเส้นโดยที่ค่าความชันของกราฟคือ

$$-\left(T_0\right)^{-\frac{1}{4}} \text{ ส่วน ค่า } \ln \sigma_0 \text{ คือจุดตัดแกน } \ln \left(\sigma T^{\frac{1}{2}}\right) \text{ ที่จุด } T^{-\frac{1}{4}} = 0 \text{ โดยที่}$$

$$\sigma_0 = 3e^2 v \left[\frac{N(E_F)}{8\pi\alpha k} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.113)$$

$$T_0 = \frac{18\alpha^3}{kN(E_F)} \quad (2.114)$$

เมื่อ	v	คือ	ความถี่ของโฟนอนที่อุณหภูมิเดอบาย (debye temperature) จะมีค่าประมาณ 1×10^{13} เฮิร์ตซ์
	$N(E_F)$	คือ	ความหนาแน่นของสถานะถูกจำกัดเฉพาะที่ที่ระดับเฟอร์มี (density of localized states at Fermi level)
	α	คือ	ค่าคงที่ของการสลายตัวของฟังก์ชันคลื่นของสถานะถูกจำกัดเฉพาะที่ระดับเฟอร์มี (decay constant of the wave function at the localized state near Fermi level)
	e	คือ	ประจุอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ 1.6×10^{-19} คูลอมบ์
	T_0	คือ	องศาของความไม่เป็นระเบียบ (degree of disorder)

จากสมการที่ (2.113) ถ้ายกกำลังสองทางด้านซ้ายและขวามือของเครื่องหมายเท่ากับจะได้

$$\sigma_0^2 = 9e^4 v^2 \left[\frac{N(E_F)}{8\pi\alpha k} \right] \quad (2.115)$$

เอาสมการที่ (2.114) คูณกับสมการที่ (2.115) จะได้

$$\sigma_0^2 T_0 = \frac{81\alpha^2 e^4 v^2}{4\pi k^2} \quad (2.116)$$

$$\alpha^2 = \left[\frac{4\pi k^2}{81e^4 v^2} \right] \sigma_0^2 T_0 \quad (2.117)$$

$$\alpha = \left[\frac{2\sqrt{\pi} k}{9e^2 v} \right] \sigma_0 T_0^{\frac{1}{2}} \quad (2.118)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อค่าความถี่โฟนอน $\nu = 1 \times 10^{13}$ เฮิร์ตซ์ดังนั้นจะได้ว่า

$$\alpha = 21.23 \sigma_0 T_0^{\frac{1}{2}} \quad (2.119)$$

ถ้าแทนสมการที่ (2.118) ลงในสมการที่ (2.117) จะได้ว่า

$$N(E_F) = \left[\frac{16\pi^2 k^2}{81e^6 \nu^3} \right] \sigma_0^3 T_0^{\frac{1}{2}} \quad (2.120)$$

$$N(E_F) = (2.0 \times 10^9) \sigma_0^3 T_0^{\frac{1}{2}} \quad (2.121)$$

ค่าระยะทางเฉลี่ยของการกระโดด (average hopping distance: R) มีหน่วยเป็น เซนติเมตรและค่าพลังงานเฉลี่ยของการกระโดด (average hopping energy: W) มีหน่วยเป็นอิเล็กตรอนโวลต์ จะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$R = \left[\frac{9}{8\pi \alpha k T N(E_F)} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (2.122)$$

$$W = \frac{3}{4\pi R^3 N(E_F)} \quad (2.123)$$

เมื่อทราบค่า $N(E_F)$ และ N_a เราสามารถที่จะคำนวณหา N_d ได้จากความสัมพันธ์

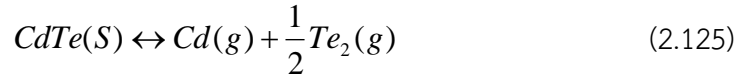
$$N(E_F) = \left(\frac{2\varepsilon_s}{e^2} \right) N_a^{\frac{2}{3}} \left(1 - \frac{N_d}{N_a} \right)^{\frac{4}{3}} \quad (2.124)$$

โดยที่ N_d คือ ค่าความหนาแน่นของอะตอมสารเจือชนิดผู้ให้ ซึ่งเป็นพาหะข้างน้อยของสารกึ่งตัวนำ

ชนิดพี โดยอัตราส่วน $\frac{N_d}{N_a} = k$ และ $k < 1$ เสมอ

2.10 การระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด (Close-Space Sublimation: CSS) [15, 17]

การระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดเป็นกระบวนการเกิดก้อนเนื้อผลึก (bulk) หรือฟิล์มบางของสารตั้งต้น ที่กลายเป็นไอแล้วควบแน่นลงบนแผ่นฐานรองรับที่วางอยู่บนสารตั้งต้นในระบบปิดในกระบวนการระเหิดในระยะประชิดนี้สามารถให้อัตราการเคลือบต่ำ ในกระบวนการระเหิดในระยะประชิดนี้ พิจารณาสมดุลปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารตั้งต้นและแผ่นฐานรองรับดังสมการ



จากกฎการคงตัวของมวล (law of mass action) พิจารณาที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน

$$P\left(\frac{Cd}{CdTe}\right)P^{\frac{1}{2}}\left(\frac{Te_2}{CdTe}\right) = K_p(T) \quad (2.126)$$

เมื่อ P คือ ความดัน

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

$$K_p(T) = \exp\left[\frac{-\Delta G}{RT}\right] \quad (2.127)$$

เมื่อ $\Delta G(T)$ คือ พลังงานอิสระของกิบส์

สำหรับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำแคดเมียมเทลลูไรด์ $\Delta G_{CdTe} = +68.64 - 44.94 \times 10^{-3} T$ กิโลแคลอรีต่อโมล

เมื่อพิจารณาค่าคงตัวของปฏิกิริยาที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน $K_p(T)$ ของสารตั้งต้นที่มีอุณหภูมิ (T_{so}) และแผ่นฐานรองรับที่มีอุณหภูมิ (T_{sub}) มีความสัมพันธ์ตามสมการ

$$K_p(T_{so}) = P\left(\frac{Cd}{CdTe}\right)(T_{so})P^{\frac{1}{2}}\left(\frac{Te_2}{CdTe}\right)(T_{so}) = \exp\left[\frac{-\Delta G}{RT_{so}}\right] \quad (2.128)$$

$$K_p(T_{sub}) = P\left(\frac{Cd}{CdTe}\right)(T_{sub})P^{\frac{1}{2}}\left(\frac{Te_2}{CdTe}\right)(T_{sub}) = \exp\left[\frac{-\Delta G}{RT_{sub}}\right] \quad (2.129)$$

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

$$J_{Cd,j} = \frac{D_{Cd,j}}{Rd} \left(\frac{P_{Cd}(T_{SO})}{T_{SO}} - \frac{P_{Cd}(T_{sub})}{T_{sub}} \right) \equiv J \quad (2.130)$$

$$J_{Te_2,j} = \frac{D_{Te_2,j}}{Rd} \left(\frac{P_{Te_2}(T_{SO})}{T_{SO}} - \frac{P_{Te_2}(T_{sub})}{T_{sub}} \right) \equiv \frac{J}{2} \quad (2.131)$$

เมื่อ $J_{Cd,j}$	คือ	ฟลักซ์ของการแพร่ของอะตอมของธาตุ Cd ในแก๊ส j
$J_{Te_2,j}$	คือ	ฟลักซ์ของการแพร่ของโมเลกุลของแก๊ส Te_2 ในแก๊ส j
J	คือ	ฟลักซ์ของการแพร่
$D_{i,j}$	คือ	สัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมของธาตุ i ในแก๊ส j

ซึ่งในกรณีนี้หน้าโมเลกุลและขนาดของแก๊ส Te_2 มีค่ามากกว่าอะตอมของธาตุ Cd ดังนั้นจะได้สัมประสิทธิ์การแพร่ $D_{Cd,j} = 1.85D_{Te_2,j}$ ในบรรยากาศของแก๊ส H_2 , He หรือ Ar จากสมการการส่งผ่านโมเลกุลของ $CdTe$ ที่อุณหภูมิของสารตั้งต้น (T_{SO}) มีค่าต่างกัน $T_{SO} - T_{sub} = 70$ องศาเซลเซียส จะได้ $P_{Cd}(T_{SO}) \gg P_{Cd}(T_{sub})$ และ $P_{Te_2}(T_{SO}) \gg P_{Te_2}(T_{sub})$ ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$\frac{P_{Cd}(T_{SO})}{P_{Te_2}(T_{SO})} = \frac{2D_{Te_2,j}}{D_{Cd,j}} = 1.1 \quad (2.132)$$

หมายเหตุ ค่าอุดมคติอัตราส่วนเท่ากับ 1

ดังนั้นจากสมการที่ (2.166), (2.167), (2.168), (2.169), (2.170) สามารถคำนวณหา J และอัตราการปลูกฟิล์มบาง (growth rate) ซึ่งมีความสัมพันธ์ตามสมการ

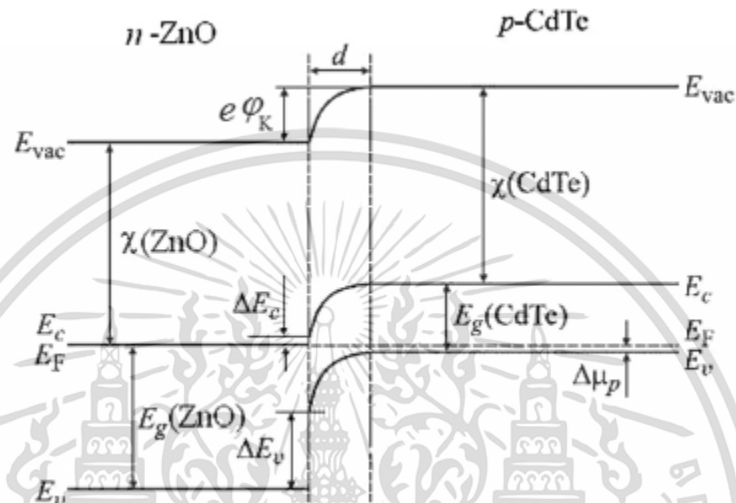
$$GR \left(\frac{\mu m}{min} \right) = \frac{JxMx60x10^4}{\rho} \quad (2.133)$$

เมื่อ J	คือ	ฟลักซ์ของการแพร่
M	คือ	มวลโมเลกุลของ $CdTe$
ρ	คือ	ความหนาแน่นของ $CdTe$

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง [20]

Khomyak และเพื่อนร่วมงาน (Khomyak, 2013) ได้ทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของ โครงสร้างรอยต่อวิวิธพันธุ์พื้นผิวกึ่งตัวนำ anisotype ที่เกิดขึ้นจากการปลูกฟิล์ม n-ZnO บน พื้นผิวของ p-CdTe โดยอาศัยเทคนิคอาร์เอฟแมกนีตรอนสเปตเตอริง

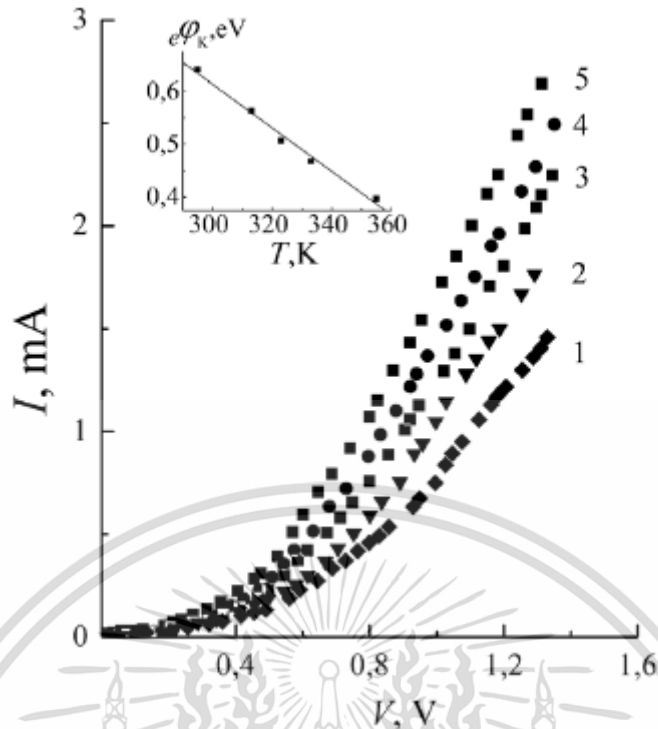
แผนภาพพลังงานที่ศึกษารอยต่อวิวิธพันธุ์ n-ZnO/p-CdTe (รูปที่ 2.28) โดยกำหนดให้ไม่มี ประจุที่บริเวณผิวเชื่อมต่อ และใช้ค่าพารามิเตอร์พลังงานของสารกึ่งตัวนำจากงานของ [21-22]



รูปที่ 2.28 แสดงแผนภาพพลังงานของรอยต่อวิวิธพันธุ์ n-ZnO/pCdTe Volts = 0 V : $E_g(\text{ZnO})=3.3\text{eV}$, $\chi(\text{ZnO})=4.35\text{eV}$, $E_g(\text{CdTe})=1.5\text{eV}$, $\chi(\text{CdTe})=4.28\text{eV}$, $\Delta E_c = 0.07\text{ eV}$, $\Delta E_v = 1.72\text{eV}$, $e\phi_k = 1.27\text{eV}$, E_{vac} คือระดับสูญญากาศ E_F คือ ระดับเฟอร์มี E_c และ E_v คือ พลังงานแถบนำ และ พลังงานแถบวาเลนซ์ χ คือ อิเล็กตรอนอัมฟิ นิตี และ E_g คือพลังงานช่องว่างแถบพลังงาน

ผลต่างของระดับเฟอร์มีกับแถบนำของ n-ZnO ($\Delta\mu_n$) และผลต่างของระดับเฟอร์มีกับแถบวาเลนซ์ของ p-CdTe ($\Delta\mu_p$) พิจารณาจากค่าความเข้มข้นของพาหะในสารกึ่งตัวนำที่ได้จากการทดลอง การคำนวณแสดงให้เห็นว่าระดับเฟอร์มีใน n-ZnO ใกล้เคียงกับขอบล่างสุดของแถบนำ ($\Delta\mu_n = 0$) ดังนั้นเป็นหนึ่งสิ่งที่สามารถยืนยันได้ว่าบริเวณพร่องพาหะจะปรากฏอยู่ในเนื้อสารของ p-CdTe เนื่องจากการนำไฟฟ้าของฟิล์ม ZnO สูงมากกว่า p-CdTe ในกรณีนี้การโค้งงอของแถบพลังงานจะเกิดขึ้นในชั้นผิวหน้าของ CdTe

โครงสร้างของรอยต่อวิวิธพันธุ์ n-ZnO/p-CdTe มีการศึกษาถึงลักษณะเด่นของไดโอดด้วย อัตราการขยายกระแส 10^3 เท่า ที่อุณหภูมิ 295 เคลวิน และแรงดัน 2 โวลต์ ลักษณะเฉพาะของ I-V (วัดที่อุณหภูมิต่างๆ) แสดงในรูปที่ 2.29 พบว่าความสูงของกำแพงศักย์ $e\phi_k$ ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ (ในรูปที่ 2.29) ซึ่งสามารถหาได้โดย



รูปที่ 2.29 แสดงลักษณะของ $I-V$ ของโครงสร้างรอยต่อวิวิธพันธุ์ n-ZnO/p-CdTe ที่วัดภายใต้ อุณหภูมิต่างๆ 1-295 เคลวิน, 2-313 เคลวิน, 3-323 เคลวิน, 4-333 เคลวิน, และ 5-355 เคลวิน อุณหภูมิส่งผลต่อค่าความสูงของกำแพงศักย์ $e\phi_k$

การอนุมานส่วนหนึ่งของเส้นตรงของกราฟ $I-V$ ไปยังจุดตัดของแกนแรงดันไฟฟ้า อธิบายได้ดีโดยสมการต่อไปนี้เป็น คือ

$$e\phi_k(T) = e\phi_k(0) - \beta_\phi \cdot T \quad (2.134)$$

โดยที่ $\beta_\phi = 3.92 \times 10^{-3}$ อิเล็กตรอนโวลต์/เคลวิน คือ ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความสูงกำแพงศักย์ และ $e\phi_k(0) = 1.83$ อิเล็กตรอนโวลต์ คือ ความสูงกำแพงศักย์ที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์

เนื่องจากการนำไฟฟ้าของ CdTe และ ZnO มีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด จึงเห็นได้ชัดถึงการเปลี่ยนแปลงความสูงของกำแพงศักย์กับอุณหภูมิที่ขึ้นอยู่กับเคลื่อนไปของระดับเฟอร์มิใน CdTe ในกรณีของสารกึ่งตัวนำชนิดเซย์ ตำแหน่งระดับเฟอร์มิ E_F ในแถบช่องว่างพลังงานถูกกำหนดให้เป็น

$$E_F = E_a - kT \ln \frac{N_a - N_d}{N_a} \quad (2.135)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ E_o คือ ตำแหน่งของระดับผู้รับในช่องว่างแถบพลังงาน; N_o, N_d คือ ความเข้มข้นของผู้รับและผู้ให้ ตามลำดับ สมมติให้ตำแหน่งระดับเฟอร์มิเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นกับอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิ $T=0-295$ เคลวิน และพิจารณาสมการที่ (2.135) จะสามารถเขียนสมการได้ดังต่อไปนี้:

$$E_F(T) = E_o - \beta'T \quad (2.136)$$

จากสมการที่ 2.136 ค่าระดับเฟอร์มิที่ $T=0$ เคลวิน สอดคล้องกับพลังงานของระดับผู้รับ E_o ค่าของ E_o ที่ $T=0$ เคลวิน สามารถหาค่าได้จากการวัดสัมประสิทธิ์ฮอลล์และมีค่าประมาณ 0.05 อิเล็กตรอนโวลต์ ค่าของ E_F ที่ $T=295$ เคลวิน สามารถหาค่าได้โดยใช้ค่าของความเข้มข้นของโฮลและมีค่าเท่ากับ 0.19 อิเล็กตรอนโวลต์ สมมติว่าระดับเฟอร์มิในช่วงอุณหภูมิ $T=0-295$ เคลวิน แตกต่างกันไปตั้งแต่ 0.05 ถึง 0.19 อิเล็กตรอนโวลต์ และความสัมพันธ์นี้เป็นไปแบบเชิงเส้น เราสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ของระดับพลังงานเฟอร์มิ: $\beta' = 4.75 \times 10^{-4}$ อิเล็กตรอนโวลต์/เคลวิน ดังนั้นค่าของ β' มีค่าน้อยกว่า β_o ประมาณ 10 เท่า นอกจากนี้ยังมีความแตกต่างระหว่างค่าทดลองและค่าที่คำนวณของ $e\beta_o$ ที่ $T=0$ เคลวิน (1.83 และ 0.79 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ) ความคลาดเคลื่อนนี้อาจเกิดจากข้อบกพร่องที่พื้นผิว N_{ss} ที่บริเวณผิวเชื่อมต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำสองชนิดเนื่องจากความแตกต่างกันมากของค่าคงที่โครงสร้างผลึก a ของ CdTe และ ZnO ในการประมาณครั้งเบื้องต้นสามารถเขียนได้ว่า

$$N_{ss} \sim x^{-2} \quad (2.137)$$

โดยที่ x คือระยะความคลาดเคลื่อนของโครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำ ZnO และ CdTe ที่จะประสานเข้ากันได้คำนวณได้จาก

$$x = a_1 \cdot a_2 / (a_1 - a_2) \quad (2.138)$$

ใช้ค่าที่รู้คือ $a_1 = 6.48 \text{ \AA}$ (CdTe) และ $a_2 = 3.24 \text{ \AA}$ (ZnO) เราได้ค่า x และ N_{ss} ซึ่งมีค่าประมาณ 6.48 \AA และ 4×10^{14} ต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ข้อบกพร่องผลึกที่พื้นผิวที่มีความเข้มข้นสูงเช่นนี้ควรมีบทบาทในการดักจับหรือเป็นศูนย์กลางการรวมตัวที่มีผลต่อสมบัติของกระแสที่ไหลผ่านรอยต่ออวิวิธพันธุ์อย่างมาก

การวิเคราะห์การไหลของกระแสผ่านกำแพงศักย์ในขณะไบแอสตรง ถึง 0.7 โวลต์ (รูปที่ 2.30) บ่งบอกถึงการมีอยู่ของกลไกการถ่ายโอนของประจุสองชนิด ลักษณะเฉพาะของ I-V ในส่วนแรก ($V < 0.25 \text{ V}$) สามารถอธิบายได้อย่างดีด้วยตามสูตร

$$I(V) = I_s [\exp(eV / kT) - 1] \quad (2.139)$$

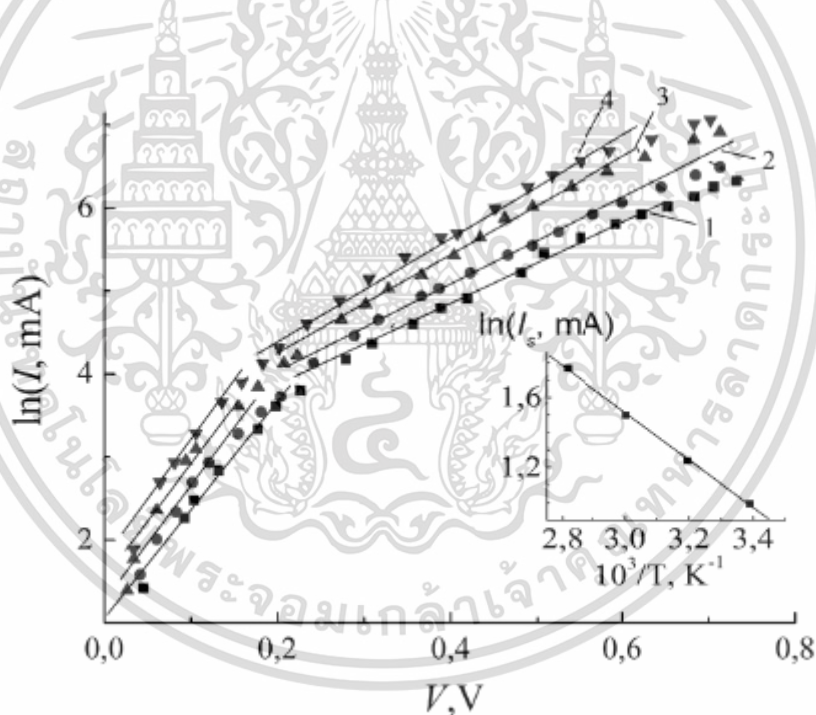
โดย I_s คือ ค่าของกระแสอิ่มตัว e คือ ประจุอิเล็กตรอน V คือ แรงดันที่จ่าย k คือ ค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์ A คือ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ และ T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ A สำหรับกระบวนการเทอร์มิออร์นิกอิมิซันและกระบวนการรวมตัวใหม่ในชั้นปลอดพาหะมีค่าเท่ากับ 1 และ 2 ตามลำดับ โดยทั่วไปค่าของ A อยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 (บางครั้งมากกว่า 2)

อย่างไรก็ตาม ค่าแฟกเตอร์อุดมคติมีค่าประมาณ 2 เฉพาะที่อุณหภูมิสูง $T=355$ เคลวิน ในช่วงอุณหภูมิต่ำลง $295 \leq T \leq 355$ เคลวิน ค่า A มากกว่า 2 ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจาก 295 ถึง 355 เคลวิน ค่า A เพิ่มขึ้นจาก 2.6 ถึง 2.0 นี้แสดงให้เห็นถึงว่าบริเวณพร่องพาหะไม่ได้มีเพียงแค่ศูนย์กลางการรวมตัวเท่านั้น แต่ประกอบไปด้วยศูนย์กลางดักจับพาหะ ในกรณีนี้อิทธิพลของศูนย์กลางดักจับพาหะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่ลดลง

การหาตำแหน่งของระดับพลังงานของการรวมตัวใหม่ในช่องว่างแถบพลังงานของ CdTe โดยใช้ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับกระแสอิ่มตัวที่เกิดขึ้นในกราฟความสัมพันธ์ของ $\ln I_s = f(10^3/T)$ (รูปที่ 2.30) ค่าที่ได้คือ 0.13 อิเล็กตรอนโวลต์ ศูนย์กลางการรวมตัวดังกล่าวใน CdTe ชนิดอินทรีนลิกกับการนำไฟฟ้าแบบ p มีความเกี่ยวเนื่องกับข้อบกพร่องผลึกที่ซับซ้อนชนิดแควแคนซีของแคดเมียมที่มีจำนวนมากและไอออนของอะตอมผู้ให้ $(V_{Cd}^{-2}D^{+1})^{-1}$ ซึ่งเป็นทั้งในเนื้อสารและบนพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำตรงบริเวณรอยต่อ



รูปที่ 2.30 แสดงลักษณะเฉพาะของ $\ln I_s - V$ ของโครงสร้างรอยต่ออิมิซัน $n\text{-ZnO}/p\text{-CdTe}$ ที่อุณหภูมิต่างๆ: 1-295 เคลวิน, 2-313 เคลวิน, 3-333 เคลวิน และ 4-355 เคลวิน ส่วนแทรกแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับกระแสอิ่มตัวที่เกิดขึ้นในฟังก์ชันของ $\ln I_s = f(10^3/T)$

ภายใต้แรงดันไบแอสตรง $V > 0.25$ โวลต์ อัตราการเพิ่มของกระแสไฟฟ้า $I(V)$ จะลดลง โดยที่ในช่วงแรงดันไบแอสต่ำกว่า 0.25 โวลต์ ความชันของเส้นประมิต่ำน้อยและไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิมากนัก แสดงว่ากลไกการนำกระแสไฟฟ้า เป็นการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ที่เกิดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ร่วมกับกลไกการรวมตัวของพาหะผ่านศูนย์กลางการรวมตัว ซึ่งในช่วงแรงดันไบแอสต่ำกว่า 0.25 โวลต์ สามารถอธิบายได้ด้วยสมการ

$$I(V) = B \exp[-\alpha(\phi_k - V)] \quad (2.134)$$

โดยที่ B เป็นค่าสัมประสิทธิ์ ซึ่งขึ้นอยู่กับแรงดันและอุณหภูมิอย่างมากและ α คือขนาดที่ขึ้นอยู่กับมวลยังผลของอิเล็กตรอนในช่องว่างแถบพลังงาน เพอร์มิตติวิตี ความเข้มข้นของพาหะที่สภาวะสมดุล และรูปร่างของกำแพงศักย์ สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ α สามารถหาได้จากส่วนของเส้นตรงของกราฟ $I-V$ ที่มีค่าประมาณ 5.05 V^{-1} ที่ $T=295$ เคลวิน

ค่าของสัมประสิทธิ์ B สามารถหาได้จากการใช้สมการ

$$\ln B = \ln I_0 + \alpha\phi_k \quad (2.135)$$

โดยที่ $\ln I_0$ สามารถหาค่าได้โดยการอนุমানส่วนของเส้นตรงของกราฟ $I-V$ ไปยังจุดตัดกับแกนของกระแส รูปที่แทรกในรูปที่ 2.30 แสดงให้เห็นถึงค่าสัมประสิทธิ์ B ที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิไม่มากนัก เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนจาก 295 ไปยัง 355 เคลวิน ค่าสัมประสิทธิ์ B มีค่าเปลี่ยนแปลงไปจาก 3.2×10^{-4} ไปจนถึง 2.2×10^{-4} แอมแปร์

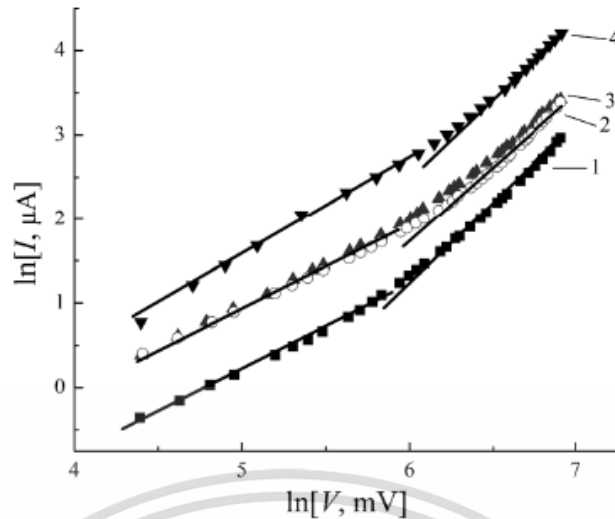
เมื่อพิจารณาถึงกลไกของการถ่ายโอนประจุและแผนภาพแถบพลังงานของโครงสร้าง $n\text{-ZnO}/p\text{-CdTe}$ เราสามารถสันนิษฐานได้ว่ากระแสของพาหะหลักรวมตัวกันผ่านสถานะพื้นผิวที่บริเวณผิวเชื่อมต่อและที่บริเวณพร่องพาหะ (space charge region) ซึ่งเกิดจากพาหะขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ แล้วเกิดการรวมตัวกันผ่านสถานะพื้นผิว (surface states) ขอบกำแพงศักย์ โดยกำแพงศักย์นี้จะปรากฏอยู่ที่ผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำ CdTe สำหรับกลไกการรวมตัวกันของพาหะที่เกิดในเนื้อสารกึ่งตัวนำ $p\text{-CdTe}$ เป็นไปได้ยากเนื่องจากความไม่ต่อเนื่องของแถบวาเลนซ์มีค่าสูงมาก ($\Delta E_v = 1.72$ อิเล็กตรอนโวลต์)

ลักษณะเฉพาะของ $\ln I - \ln V$ ที่ภายใต้การไบแอสกลับทางที่อุณหภูมิต่างๆ แสดงไว้ในรูปที่ 2.31 จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันเป็นเส้นตรงด้วยความชันค่าต่างๆ ซึ่งหมายความว่าสามารถอธิบายได้ด้วยฟังก์ชัน $I \sim V^m$

ในช่วงไบแอส $V < 0.4$ โวลต์ ความชันของกราฟ $I-V$ เท่ากับ 1 ซึ่งอาจเกิดจากกระแสรั่วบนพื้นผิว นอกจากนี้ยังอาจเกี่ยวข้องกับกลไกกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้าง (spacecharge limited current; SCLC) ในย่านของความเร็วมืด

$$J = \frac{2\varepsilon_0 q_{sat} A}{L^2} V \quad (2.136)$$

โดยที่ ε คือ ค่าเพอร์มิตติวิตีของสารกึ่งตัวนำ q_{sat} คือ ความเร็วมืด L คือ ความหนาของสารกึ่งตัวนำ และ A คือ พื้นที่ของรอยต่อ



รูปที่ 2.31 ลักษณะเฉพาะของ $\ln I - \ln V$ ภายใต้ไบแอสกลับทางของรอยต่อวิวิธพันธุ์ n-ZnO/p-CdTe ที่อุณหภูมิต่างๆ: 1-292 K, 2-307 K, 3-313 K, 4-333 K

สำหรับแรงดัน $V > 0.4$ V สมการกำลังสองของกระแสกับแรงดันที่เกิดขึ้น แสดงให้เห็นว่า SCLC อยู่ในโหมดความคล่องของพาหะ

$$J = \frac{9\epsilon\epsilon_0\mu A}{8L^2} V^2 \quad (2.137)$$

โดยที่ μ คือ ความคล่องของประจุพาหะ

ความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นของค่าความจุของรอยต่อกับแรงดัน ได้มาจากกราฟของ $1/C^3 = f(V)$ แสดงให้เห็นว่าการกระจายตัวของอะตอมสารเจือในบริเวณทรานซิชันของไดโอด (รูปที่ 2.32) เนื่องจากกำแพงศักย์ถูกสร้างขึ้นใน CdTe การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของอะตอมสารเจือผู้รับไม่ชัดเจน ซึ่งสามารถหาได้จากความหนาแน่นของประจุค่าตรงบริเวณรอยต่อ อาจเกิดจากการแพร่กระจายของอะตอม Zn และเข้าไปแทนที่ในตำแหน่งว่างของ Cd ระหว่างกระบวนการสร้างรอยต่อขึ้นมา ดังนั้นการปรากฏของข้อบกพร่องผลึกในวัสดุเกิดจากวิธีการปลูกฟิล์ม

ลักษณะเฉพาะของ $(C - V)$ ของรอยต่อแสดงให้เห็นว่าความชันของเส้นตรงของ $C^{-3}(V)$ ขึ้นกับความถี่อย่างมาก ผลที่กระทบที่สังเกตได้ในรอยต่อวิวิธพันธุ์อาจถูกอธิบายโดยการปรากฏของสถานะพื้นผิวที่บริเวณผิวเชื่อมต่อและความถี่ที่ขึ้นอยู่กับเวลาผ่อนคลาย (relaxation time) อย่างไรก็ตาม ค่าของ แรงดันคัตออฟ (V_C) ที่ได้จาก $C^{-3}(V)$ มีค่าเท่ากับศักย์ตกคร่อมรอยต่อ (built-in potential; ϕ_K) ที่คำนวณได้จากส่วนของเส้นตรงของลักษณะ $I-V$ (วัดที่ ไบแอสตรง) แสดงให้เห็นถึงการลดลงของอิทธิพลจากสถานะพลังงานที่บริเวณผิวเชื่อมต่อของรอยต่อวิวิธพันธุ์ n-ZnO/p-CdTe ในทางตรงข้ามผลกระทบของสถานะผิวเชื่อมต่อในโครงสร้าง n-ZnO/p-CdTe ที่ได้จากการคำนวณมีค่าเท่ากับ $N_{ss} \approx 2.0 \times 10^{14}$ ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งมีค่าเหมือนกับกรณีรอยต่อวิวิธพันธุ์ n-CdZnO/p-CdTe สำหรับค่าของ V_C และ ϕ_K มีความแตกต่างกันอย่างมากเนื่องจากการเกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของประจุไฟฟ้าบนสถานะพื้นผิว การลดลงของผลกระทบจากสถานะพื้นผิวอาจเกิดจากการก่อตัวของสารละลายของแข็ง (solid solution) ในบริเวณทรานซิชัน ซึ่งส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องของช่องว่างแถบพลังงานและความหนาแน่นของอิเล็กตรอน มีความเป็นไปได้สูงที่จะเกิดเป็นสารละลายของแข็ง $Cd_{1-x}Zn_xTe$ (ชั้นตรงกลางระหว่าง CdTe และ ZnO) สามารถเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการสร้างรอยต่อวิวิธพันธุ์ n-ZnO/p-CdTe ความเรียบของรอยต่อในบริเวณกึ่งตัวนำจะนำไปสู่การปรับปรุงพัฒนาพารามิเตอร์ทางเซลล์แสงอาทิตย์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ ซึ่งจะลดผลของกลไกการกลับมารวมตัวที่บริเวณพื้นผิวให้น้อยลง

คู่อิเล็กตรอน-โฮลถูกสร้างขึ้นในบริเวณทรานซิชัน สามารถทำให้อิเล็กตรอน-โฮลแยกออกจากกันได้ด้วยสนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อ ทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลสู่วงจรภายนอก ลักษณะเฉพาะทาง $I-V$ ของเซลล์แสงอาทิตย์ (Photocell) ถูกอธิบายด้วยสมการ

$$I(V) = I_s [\exp(eV/AkT) - 1] - I_{ph} \quad (2.138)$$

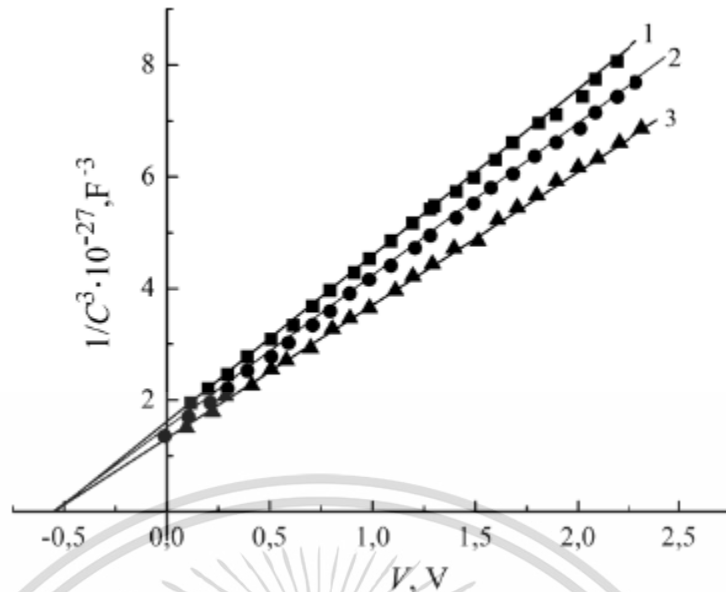
โดยที่ I_{ph} คือ ความเข้มของกระแสโฟโต

จากสมการที่ (2.136) เราสามารถหาค่าแรงดันวงจรเปิด V_{oc} ที่ $I = 0$ และกระแสลัดวงจร ที่ $V = 0$

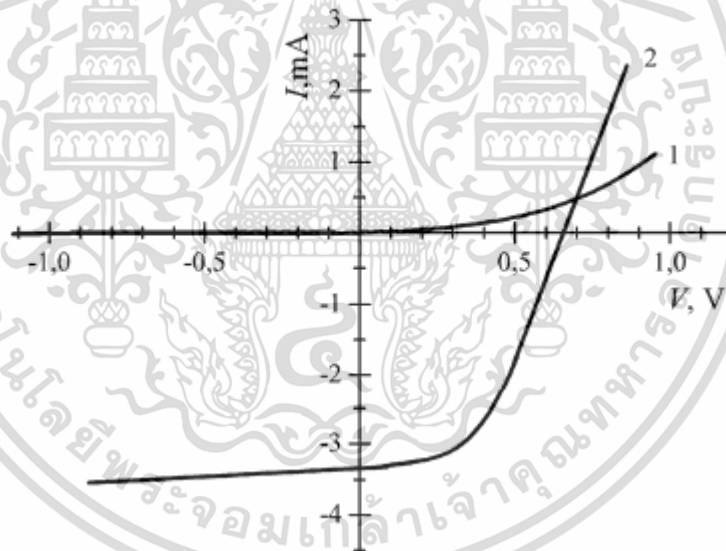
ลักษณะเฉพาะของ $I-V$ ของเซลล์แสงอาทิตย์ n-ZnO/p-CdTe แสดงในรูปที่ 2.32 ความสัมพันธ์ของ $I(V)$ ถูกวัดภายใต้การฉายแสงลงบน ZnO สารกึ่งตัวนำ ZnO ที่มีช่องว่างแถบพลังงานกว้าง จะเห็นได้ว่าลักษณะ $I-V$ ภายใต้การฉายแสงเลื่อนลงไปอยู่ในควอเตอร์ที่ 4 ของกราฟ $I-V$ นอกจากนี้ลักษณะ $I-V$ ขณะไม่ฉายแสงและฉายแสงมีการตัดกันภายใต้ไบแอสตรง สาเหตุหนึ่งที่เป็นไปได้ของการตัดกันอาจเกิดจากการตอบสนองต่อแสงของเนื้อสาร CdTe

ในความเป็นจริงถ้าเราพิจารณาผลของความต้านทานอนุกรม R_s ร่วมกับแล้วสมการที่ 2.136 จะเปลี่ยนเป็น

$$I(V) = I_s [\exp(e(V - IR_s)/AkT) - 1] - I_{ph} \quad (2.139)$$



รูปที่ 2.32 ลักษณะ C-V ของโครงสร้างรอยต่ออวิวิธพันธุ์ n-ZnO/p-CdTe ที่ความถี่แตกต่างกันของไฟกระแสดสอบ: 1-30 kHz, 2-20 kHz, and 3-10 kHz



รูปที่ 2.33 ลักษณะ I-V ขณะไม่ฉายแสง (1) และ ลักษณะ I-V ขณะฉายแสง (2) ของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ n-ZnO/p-CdTe

ที่ขณะฉายแสงค่าของ R_s ลดลง เพราะเนื่องจากผลของความต้านทานไฟฟ้าของ CdTe ลดลง จะนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของพจน์เอ็กโพเนนเชียล $[e(V - IR_s)/kT]$ ซึ่งจะเป็นการเพิ่มค่ากระแสรวม และจุดตัด $I(V)$ ของเซลล์แสงอาทิตย์ อันที่จริงความต้านทานอนุกรมขณะไม่ฉายแสงและฉายแสงของรอยต่ออวิวิธพันธุ์อยู่ที่ประมาณ 350Ω และ 90Ω ตามลำดับ

แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด, กระแสลัดวงจร และฟิลแฟกเตอร์ สามารถหาได้จากลักษณะเฉพาะ I-V ขณะฉายแสงของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ n-ZnO/p-CdTe มีค่าเป็น $V_{oc} = 0.66$ โวลต์, $I_{sc} = 3.2$ มิลลิแอมป์

และ $FF = 0.49$ ตามลำดับ วิธีหนึ่งในการปรับปรุงพารามิเตอร์ของเซลล์แสงอาทิตย์คือการใช้ผลึกไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

p-CdTe ที่มีความต้านทานต่ำและการลดความเข้มข้นของข้อบกพร่องผลึกที่พื้นผิวที่บริเวณผิว
เชื่อมต่อโดยการปรับปรุงสภาพเทคโนโลยีของการประดิษฐ์โครงสร้างของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ดังกล่าว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยโดยเริ่มจากการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ จากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ CdTe และ ZnTe ด้วยวิธีการระเหิดสารในระยะประชิดที่อุณหภูมิของภาชนะระเหิดสารตั้งต้นประมาณ 550 องศาเซลเซียส สำหรับ CdTe และที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส สำหรับ CdZnTe และ ZnTe โดยที่อุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับต่ำกว่าอุณหภูมิของภาชนะระเหิดสารประมาณ 100 องศาเซลเซียส เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที ภายในระบบสุญญากาศ

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัย

3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

1. กระจกสไลด์
2. ที่ตัดกระจก
3. น้ำยาล้างจาน
4. อะซิโตน (CH_3COOH)
5. เอทานอล (C_2H_5OH)
6. น้ำปอดประจุ (DI water)
7. เครื่องอัลตราโซนิก
8. เครื่องเป่าลมร้อน
9. เต้าอบ
10. ปีกเกอร์ขนาด 200 มิลลิลิตร
11. นาฬิกาจับเวลา

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

1. ระบบระเหิดสารเคมีในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศที่ประกอบไปด้วย
 - ท่อแก้วควอซปลายปิดหนึ่งด้าน
 - กล่องแกรไฟต์
 - เทอร์โทคัปเปิลชนิด K
 - เครื่องควบคุมอุณหภูมิยี่ห้อ SHIMADEN รุ่น PID FP21
 - หลอดทังสเตน 1,000 วัตต์
2. ผลึกของสารประกอบ CdTe และ ZnTe บริสุทธิ์ 99.999 เปอร์เซ็นต์
3. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่งยี่ห้อ Sartorius
4. เมทานอล
5. ปากคืบ
6. หน้ากากป้องกันไอระเหยของสารเคมี
7. แวนตากรองแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. ภาชนะที่ใช้สำหรับเก็บสารเคมีที่สามารถควบคุมความชื้นได้

9. ครกบดสาร

3.1.3 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค

เอกซ์เรดิฟแฟรกโตรมิเตอร์ (XRD) ของยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ 1.5418 อังสตรอม ใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์ แรงไฟฟ้าดัน 30 กิโลโวลต์ โดยที่จะวัดจากมุม 20-70 องศา

3.1.4 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค

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

3.1.5 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาองค์ประกอบของธาตุต่างๆของฟิล์มบาง

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope : SEM) ของยี่ห้อ Zeiss รุ่น EVO MA 10 โดยใช้แรงดัน 20 กิโลโวลต์ ที่แยกความละเอียดของภาพถ่าย 1,000เท่า เครื่องรามานสเปกโตรสโคปีของยี่ห้อ Renishaw inVia Raman microscope โดยใช้เลขคลื่นตั้งแต่ 110-250 ซม.⁻¹ เครื่องสเปกโตรสโคปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ (XPS) ของยี่ห้อ Kratos AXIS Ultra DLD รุ่น AXIS Ultra DLD โดยใช้ค่าพลังงานยึดเหนี่ยวตั้งแต่ 0-1200 อิเล็กตรอนโวลต์ และเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีของยี่ห้อ Thermo Scientific Nicollet 6700 โดยใช้เลขคลื่นระหว่าง 450-4000 ซม.⁻¹

3.1.6 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางแสง

เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS spectrophotometer) ยี่ห้อ thermo electron corporation รุ่น He ios โดยใช้ความยาวคลื่น 300-1100 นาโนเมตร

3.1.7 เครื่องมือที่ใช้ในการวัดสมบัติทางไฟฟ้า

1. อิเล็กโตรมิเตอร์ของยี่ห้อ Keithley รุ่น 610 CR
2. แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงของยี่ห้อ Keithley รุ่น 236
3. เครื่องควบคุมอุณหภูมิยี่ห้อ SHINKO รุ่น MCD100 พร้อมเทอร์โมคัปเปิลชนิด K
4. เครื่องวัดอุณหภูมิของยี่ห้อ Digicon รุ่น Dp-50A
5. เตาให้ความร้อน
6. กาวเงินนำไฟฟ้า
7. สายไฟ
8. คอมพิวเตอร์

3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

3.2.1 การเตรียมและทำความสะอาดแผ่นกระจกสไลด์เพื่อเป็นฐานรองรับ

1. นำแผ่นกระจกสไลด์มาตัดให้ได้ขนาดประมาณ 25×50 ตารางมิลลิเมตร แล้วนำกระดาษทรายมาขัดกระจกเพื่อลบคมกระจก จากนั้นจึงนำแผ่นกระจกสไลด์ที่ผ่านการขัดเรียบร้อยแล้วลงไปแช่ในภาชนะที่มีน้ำยาล้างจานที่ผสมกับน้ำและถูทำความสะอาดเพื่อกำจัดคราบไขมันและสิ่งสกปรกที่เปื้อนอยู่บนแผ่นกระจกสไลด์ เมื่อเสร็จแล้วจึงล้างทำความสะอาดด้วยน้ำสะอาด
2. นำกระจกสไลด์ใส่เข้ากับที่หนีบสไลด์แล้วบรรจุลงในบีกเกอร์พร้อมเทอะซีโตนลงไปให้ท่วมกระจกสไลด์แล้วนำไปวางในอ่างของเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาที
3. นำกระจกสไลด์ใส่เข้ากับที่หนีบสไลด์แล้วบรรจุลงในบีกเกอร์พร้อมเททานอลลงไปให้ท่วมกระจกสไลด์แล้วนำไปวางในอ่างของเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาที
4. นำกรดไฮโดรฟลูออริก 10 มิลลิลิตร ผสมกับน้ำปอดประจุ 100 มิลลิลิตรลงในบีกเกอร์พลาสติก
5. นำไม้หนีบที่ทำจากไม้หนีบกับกระจกสไลด์แล้วนำไปแช่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกความเข้มข้น 10 มิลลิลิตร เป็นเวลา 10 นาที ครบแล้วจึงทำความสะอาดด้วยน้ำปอดประจุเป็นเวลา 10 นาที ในอ่างของเครื่องอัลตราโซนิก
6. ทำความสะอาดกระจกสไลด์ด้วยน้ำปอดประจุเป็นเวลา 10 นาที ในอ่างของเครื่องอัลตราโซนิกอีก 3 ครั้ง
7. นำกระจกสไลด์มาเป่าให้แห้งด้วยเครื่องเป่าลมร้อน หลังจากนั้นจึงนำกระจกสไลด์ที่ผ่านการเป่าจนแห้งแล้วเรียบร้อยแล้ววางบนแผ่นอลูมิเนียมฟอยล์แล้วนำไปอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

3.2.2 การเตรียมและทำความสะอาดระบบระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

1. ทำความสะอาดกล่องแกรไฟต์ด้วยอะซีโตนโดยนำกล่องแกรไฟต์บรรจุลงในบีกเกอร์แล้วเทอะซีโตนลงไปให้ท่วมแล้วนำไปวางในอ่างของเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาที ทำแบบเดิมซ้ำกัน 3 ครั้ง
2. นำกล่องแกรไฟต์เป่าให้แห้งด้วยเครื่องเป่าลมร้อน
3. นำกล่องแกรไฟต์ไปใส่ในท่อแก้วในระบบระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
4. รอจนกว่าระบบเย็นแล้วจึงนำกล่องแกรไฟต์ออกจากระบบ
5. ทำความสะอาดท่อแก้วควอซด้วยน้ำยาล้างจานและล้างออกด้วยน้ำสะอาด ตามด้วยอะซีโตนและเป่าให้แห้งด้วยเครื่องเป่าลมร้อน
6. ทำความสะอาดขั้วไฟฟ้าด้วยสก็อตช์ไบรด์และกระดาษทรายละเอียดเพื่อกำจัดคราบดำที่เกาะอยู่ที่ขั้วไฟฟ้า

3.2.3 การเตรียมผลึกของสารตั้งต้น $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่มีองค์ประกอบต่างกัน การคำนวณปริมาณสารตั้งต้นสำหรับเตรียมฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) จำนวน 1 กรัม

ฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xTe$ เตรียมโดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดจากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ CdTe รวมกับผลึกของสารประกอบ ZnTe ดังสมการ



มวลอะตอมของธาตุ Cd, Zn และ Te มีค่าเท่ากับ 112.40, 65.39 และ 127.60 กรัมต่อโมล ตามลำดับ ดังนั้นจะได้ว่า

มวลโมเลกุลของสารประกอบ CdTe = $112.40 + 127.60 = 240.00$ กรัมต่อโมล

มวลโมเลกุลของสารประกอบ ZnTe = $65.39 + 127.60 = 192.99$ กรัมต่อโมล

กรณี $x = 0$

เมื่อนำ $x = 0$ เข้าไปแทนในสมการเคมี (3.1) จะได้เป็น



มวลโมเลกุลของสารประกอบ Cd_1Zn_0Te จะได้เท่ากับ

$$Cd_1Zn_0Te = (1 \times 112.40) + (0 \times 65.39) + 127.60 = 240.00 \text{ กรัมต่อโมล}$$

ถ้าต้องการสารตั้งต้น Cd_1Zn_0Te จำนวน 1 กรัม จะต้องใช้สารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ

$$CdTe = \frac{(1)(240.00)}{240.00} = 1 \text{ กรัม}$$

กรณี $x = 0.2$

เมื่อนำ $x = 0.2$ เข้าไปแทนในสมการเคมี (3.1) จะได้เป็น



มวลโมเลกุลของสารประกอบ $Cd_{0.8}Zn_{0.2}Te$ จะได้เท่ากับ

$$Cd_{0.8}Zn_{0.2}Te = (0.8 \times 112.40) + (0.2 \times 65.39) + 127.60 = 230.598 \text{ กรัมต่อโมล}$$

ถ้าต้องการสารตั้งต้น $Cd_{0.8}Zn_{0.2}Te$ จำนวน 1 กรัม จะต้องใช้สารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ

$$CdTe = \frac{(1)(0.8(240.00))}{230.598} = 0.8326 \text{ กรัม}$$

$$\text{และ } ZnTe = \frac{(1)(0.2(192.99))}{230.598} = 0.1674 \text{ กรัม}$$

กรณี $x = 0.4$

เมื่อนำ $x = 0.4$ เข้าไปแทนในสมการเคมี (3.1) จะได้เป็น



มวลโมเลกุลของสารประกอบ $Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te$ จะได้เท่ากับ

$$Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te = (0.6 \times 112.40) + (0.4 \times 65.39) + 127.60 = 221.196 \text{ กรัมต่อโมล}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

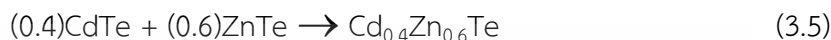
ถ้าต้องการสารตั้งต้น $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Te}$ จำนวน 1 กรัม จะต้องใช้สารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ

$$\text{CdTe} = \frac{(1)(0.6(240.00))}{221.196} = 0.6510 \text{ กรัม}$$

$$\text{และ ZnTe} = \frac{(1)(0.4(192.99))}{221.196} = 0.3490 \text{ กรัม}$$

กรณี x = 0.6

เมื่อนำ x = 0.6 เข้าไปแทนในสมการเคมี (3.1) จะได้เป็น



มวลโมเลกุลของสารประกอบ $\text{Cd}_{0.4}\text{Zn}_{0.6}\text{Te}$ จะได้เท่ากับ

$$\text{Cd}_{0.4}\text{Zn}_{0.6}\text{Te} = (0.4 \times 112.40) + (0.6 \times 65.39) + 127.60 = 211.794 \text{ กรัมต่อโมล}$$

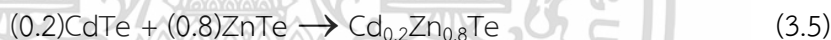
ถ้าต้องการสารตั้งต้น $\text{Cd}_{0.4}\text{Zn}_{0.6}\text{Te}$ จำนวน 1 กรัม จะต้องใช้สารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ

$$\text{CdTe} = \frac{(1)(0.4(240.00))}{211.794} = 0.4533 \text{ กรัม}$$

$$\text{และ ZnTe} = \frac{(1)(0.6(192.99))}{211.794} = 0.5467 \text{ กรัม}$$

กรณี x = 0.8

เมื่อนำ x = 0.8 เข้าไปแทนในสมการเคมี (3.1) จะได้เป็น



มวลโมเลกุลของสารประกอบ $\text{Cd}_{0.2}\text{Zn}_{0.8}\text{Te}$ จะได้เท่ากับ

$$\text{Cd}_{0.2}\text{Zn}_{0.8}\text{Te} = (0.2 \times 112.40) + (0.8 \times 65.39) + 127.60 = 202.392 \text{ กรัมต่อโมล}$$

ถ้าต้องการสารตั้งต้น $\text{Cd}_{0.2}\text{Zn}_{0.8}\text{Te}$ จำนวน 1 กรัม จะต้องใช้สารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ

$$\text{CdTe} = \frac{(1)(0.2(240.00))}{202.392} = 0.2372 \text{ กรัม}$$

$$\text{และ ZnTe} = \frac{(1)(0.8(192.99))}{202.392} = 0.7628 \text{ กรัม}$$

กรณี x = 1

เมื่อนำ x = 1 เข้าไปแทนในสมการเคมี (3.1) จะได้เป็น



มวลโมเลกุลของสารประกอบ $\text{Cd}_0\text{Zn}_1\text{Te}$ จะได้เท่ากับ

$$\text{Cd}_0\text{Zn}_1\text{Te} = (0 \times 112.40) + (1 \times 65.39) + 127.60 = 192.99 \text{ กรัมต่อโมล}$$

ถ้าต้องการสารตั้งต้น $\text{Cd}_0\text{Zn}_1\text{Te}$ จำนวน 1 กรัม จะต้องใช้สารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ

$$\text{ZnTe} = \frac{(1)(1(192.99))}{192.99} = 1 \text{ กรัม}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 แสดงปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) จำนวน 1 กรัม และแสดงอุณหภูมิ Source และอุณหภูมิ Substrate ในขณะที่ทำการเตรียมฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0.00 \leq x \leq 0.10$) โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิด

Composition (x)	Starting Material Content (g)		Source Temperature (°C)	Substrate Temperature (°C)
	CdTe	ZnTe		
0	1.0000	-	550	450
0.2	0.8326	0.1674	650	550
0.4	0.6510	0.3490	650	550
0.6	0.4533	0.5467	650	550
0.8	0.2372	0.7628	650	550
1.0	-	1.0000	650	550

3.2.4 การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ ซึ่งประกอบไปด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้

- การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

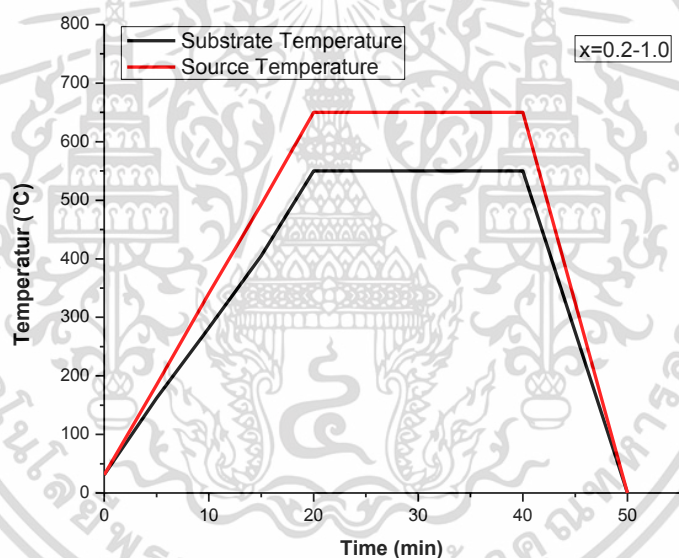
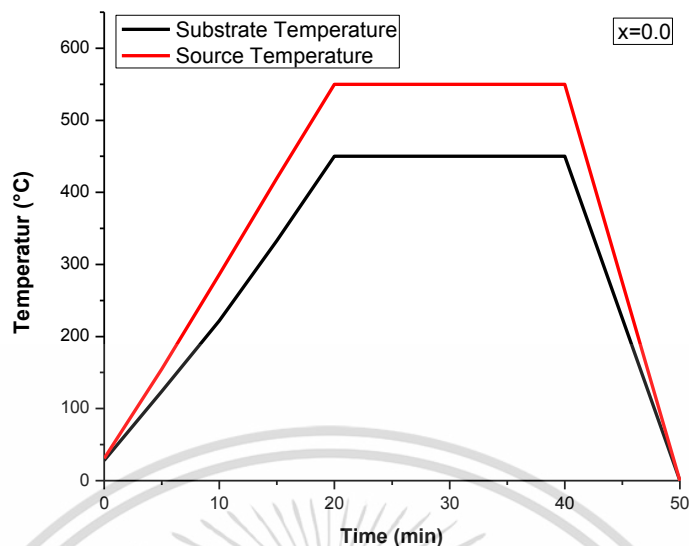
1. เตรียมสารตั้งต้นโดยการนำผงผลึกของสารประกอบ CdTe และ ZnTe มาชั่งให้ได้ตามสัดส่วนผสมทางเคมี ($x = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ และ 1.0) ในปริมาณที่ต้องการ แล้วนำไปบดรวมกันในครกอาเกตให้เป็นผงละเอียดเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
2. นำสารตั้งต้นที่ผ่านการบดละเอียดเรียบร้อยแล้วมาบรรจุในกล่องแกรไฟต์ในปริมาณช่องละ 0.01 กรัม โดยให้สารตั้งต้นกระจายในช่องเท่าๆกัน
3. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมไว้ใส่ในกล่องแกรไฟต์แล้วทำการปิดกล่องแกรไฟต์ด้วยนีโอทให้เรียบร้อย
4. นำกล่องแกรไฟต์สวมเข้ากับเทอร์โมคัปเปิลแล้วจึงนำเข้าไปในท่อแก้วควอทซ์ หลังจากนั้นจึงทำการปิดปากท่อแก้วให้เรียบร้อยและตามด้วยปิดรีกิวลาร์
5. ตั้งโปรแกรมเครื่องควบคุมอุณหภูมิ โดยให้อุณหภูมิสารตั้งต้นเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิห้องจนถึงอุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส หรือ 650 องศาเซลเซียส แล้วแต่สารตั้งต้น ให้ใช้เวลานาน 20 นาที ให้คงที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส หรือ 650 องศาเซลเซียส แล้วแต่สารตั้งต้น เป็นเวลานาน 20 นาที แล้วลดอุณหภูมิลงมาถึงอุณหภูมิห้องโดยใช้เวลา 10 นาที
6. เปิดปั๊มกลโรตารี แล้วเปิดวาล์วสูบอากาศออก จนได้ระดับความดันประมาณ 3×10^{-2} มิลลิบาร์ แล้วเปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิสารตั้งต้นและแผ่นฐานรองรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. เมื่อปลูกฟิล์มเสร็จแล้ว รอจนกว่าอุณหภูมิของสารตั้งต้นและแผ่นฐานรองรับลดลงมาต่ำกว่า 80 องศาเซลเซียส แล้วปิดวาล์วปั๊มกลโรตารี ความดันภายในระบบจะค่อยๆเพิ่มขึ้น
8. รอให้อุณหภูมิของสารตั้งต้นและฐานรองรับลดลงเท่ากับอุณหภูมิห้องแล้วจึงทำการเอากล่องแกรไฟต์ออกมาจากระบบโดยเริ่มจากการค่อยๆเปิดวาล์วให้อากาศเข้าไปจนกระทั่งความดันภายในเท่ากับความดันภายนอก
9. สวมหน้ากากป้องกันไอระเหยจากสารเคมี เปิดระบบเพื่อนำเอากล่องแกรไฟต์ออกมาจากระบบเพื่อนำเอาแผ่นฐานรองรับออกจากกล่องแกรไฟต์
10. นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์มาตรวจสอบผิวหน้าของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์
11. นำฟิล์มยาวไปเก็บในภาชนะควบคุมความชื้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

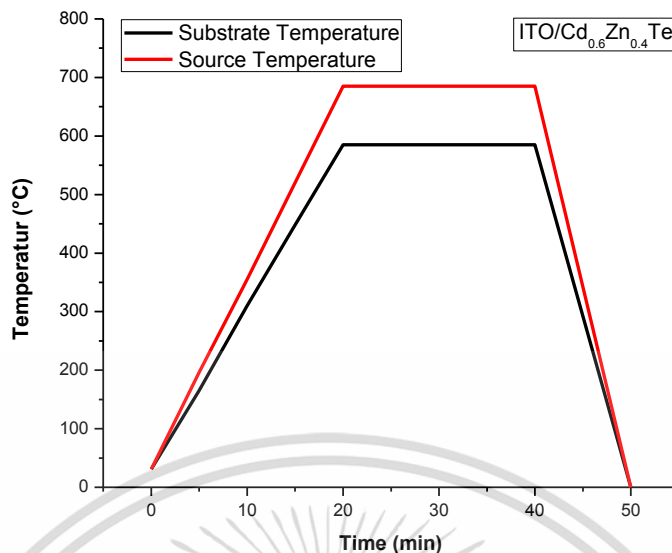


รูปที่ 3.1 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการประดิษฐ์ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.5 การเตรียมไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

1. ทำความสะอาดกระจก ITO ในลักษณะเดียวกันกับในกรณีของแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ตามหัวข้อ 3.2.1
2. ทำความสะอาดระบบสุญญากาศ โดยการกำจัดฝุ่นและสิ่งสกปรกต่างๆ และคราบไขมันด้วยอะซิโตนและเอทานอล
3. ชั่งสารตั้งต้น Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te ให้ได้น้ำหนัก 0.01 กรัม แล้วนำมาบรรจุในกล่องแกรไฟต์เขย่าเพื่อให้สารตั้งต้นกระจายเท่าๆกัน ปรับผิวหน้าให้เรียบโดยใช้แท่งแก้วค่อยๆกดให้ผิวหน้าสม่ำเสมอ
4. นำแผ่นกระจก ITO ที่ทำความสะอาดเตรียมไว้แล้วใส่ในกล่องแกรไฟต์เพื่อใช้เป็นแผ่นฐานรองรับ
5. ทำการติดตั้งระบบต่างๆภายในระบบสุญญากาศให้เสร็จสมบูรณ์
6. ตั้งโปรแกรมให้อุณหภูมิแก่สารตั้งต้นจากอุณหภูมิห้องถึงอุณหภูมิ 685 องศาเซลเซียส และให้ควบคุมอุณหภูมิแผ่นฐานรองรับคงที่ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิที่ให้แก่สารตั้งต้นประมาณ 100 องศา โดยใช้เวลาในการปลูกฟิล์มเป็นเวลานาน 20 นาที
7. เปิดปั๊มกลโรตารี แล้วเปิดวาล์วสูบอากาศออกจนได้ความดันประมาณ 3×10^{-3} มิลลิบาร์ แล้วเปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิสารตั้งต้นและแผ่นฐานรองรับ
8. เมื่อปลูกฟิล์มเสร็จแล้ว รอจนกว่าอุณหภูมิของสารตั้งต้นและแผ่นฐานรองรับลดลงต่ำกว่า 30 องศาเซลเซียส แล้วปิดวาล์วปั๊มกลโรตารี ความดันภายในระบบจะค่อยๆเพิ่มขึ้น แล้วหลังจากนั้นจึงค่อยๆเปิดวาล์วให้อากาศเข้าไปจนกระทั่งความดันภายในเท่ากับความดันภายนอก
7. สวมหน้ากากป้องกันไอระเหยจากสารเคมี เปิดระบบเพื่อนำเอาแผ่นฐานรองรับออกจากกล่องแกรไฟต์
8. นำไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te มาตรวจสอบผิวหน้าของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์ เพื่อตรวจสอบคุณภาพของฟิล์มบางที่ได้ว่ามีผิวหน้าสม่ำเสมอ ไม่มีรูพรุน หรือไม่
9. นำฟิล์มบางไปเก็บในภาชนะควบคุมความชื้น



รูปที่ 3.2 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการประดิษฐ์ไดโอดที่มีรอยต่อ
 วิธพันธ์ของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความ
 ร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที



รูปที่ 3.3 แสดงระบบการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายใน
 ระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การศึกษาสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

3.3.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ จากเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรกโตมิเตอร์ของยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ 1.5418 อังสตรอม โดยใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์ ความต่างศักย์ 30 กิโลโวลต์ โดยวัดจากมุม 20-60 องศา

3.3.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope: SEM) ของยี่ห้อ Zeiss รุ่น EVO MA 10 โดยใช้แรงดัน 20 กิโลโวลต์และกำลังแยกความละเอียดของภาพถ่าย 1,000, 3,000 และ 5,000 เท่า

3.3.3 การศึกษาสมบัติทางแสง

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาสมบัติทางแสงด้วยการวัดค่าการส่งผ่านแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลดับเบิลบีมสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis double beam spectrophotometer) ของยี่ห้อ thermo electron corporation รุ่น He ios โดยใช้ความยาวคลื่น 300 ถึง 1100 นาโนเมตร เพื่อคำนวณหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและค่าช่องว่างแถบพลังงาน

3.3.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดค่าความต้านทานแผ่นด้วยวิธีสองขั้ว ปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยวิธีสี่ขั้ว วัดค่าพลังงานกระตุ้นโดยการศึกษาความต้านทานที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิที่อุณหภูมิห้อง ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง ตามลำดับ และทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเชิงแสงเพื่อตรวจสอบการตอบสนองต่อแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$

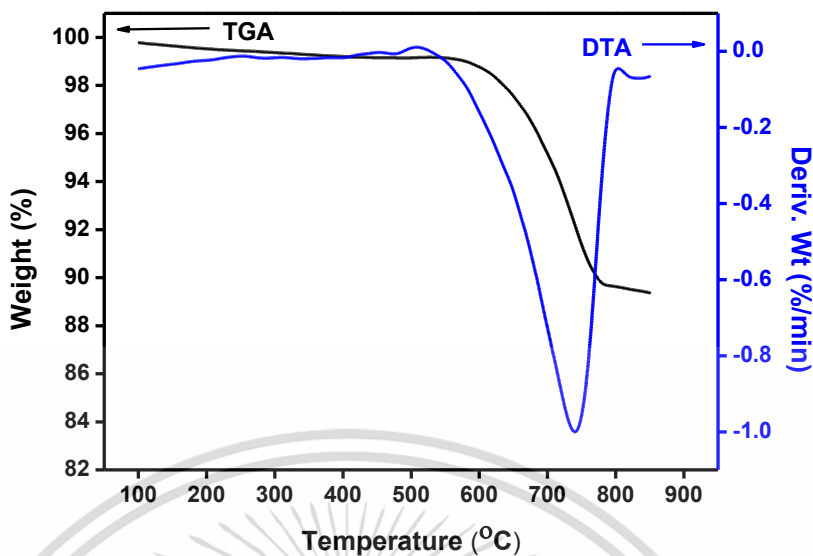
บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

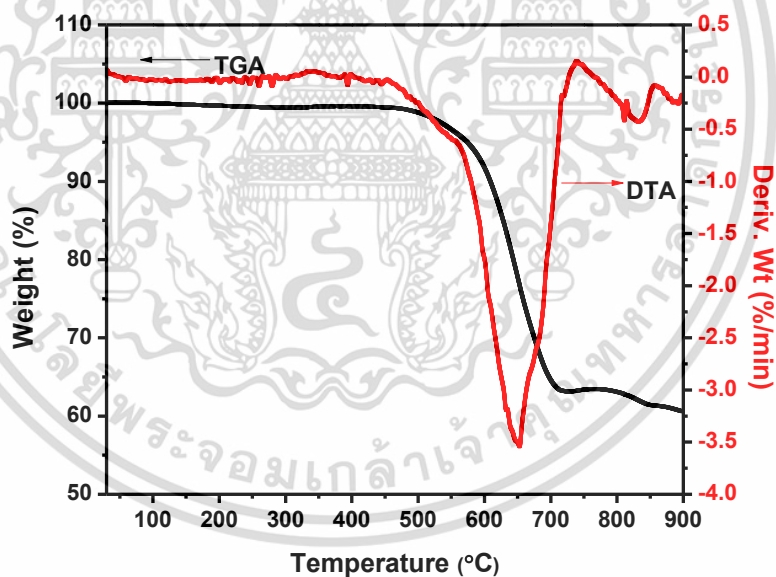
ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการเตรียมและศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศที่ความดันต่ำระดับ 3×10^{-2} มิลลิบาร์ ใช้เวลาในการปลูกฟิล์มนาน 20 นาที ให้อุณหภูมิกับภาชนะระเหิดสารตั้งต้นประมาณ 550 องศาเซลเซียสสำหรับ CdTe ($x=0.0$) และประมาณ 650 องศาเซลเซียส สำหรับ CdZnTe ($0.2 \leq x \leq 0.8$) และ ZnTe ($x=1.0$) และควบคุมอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับให้ได้ต่ำกว่าอุณหภูมิของภาชนะระเหิดสารตั้งต้นประมาณ 100 องศาเซลเซียส และนำฟิล์มบางที่ได้ไปตรวจสอบลักษณะโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ตรวจสอบลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุต่างๆของฟิล์มบางด้วยเทคนิค EDS และ XPS ตามลำดับ ศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางโดยวัดเปอร์เซ็นต์ส่งผ่านแสงในย่าน UV ตรวจสอบโครงสร้างทางเคมีและพันธะเคมีที่พื้นผิวของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ด้วยรามานสเปกโตรสโคปีและฟูเรียรทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดสภาพต้านทานและปรากฏการณ์ฮอลล์ ศึกษาสมบัติการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต้อง ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิต้อง และที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิต้อง ตามลำดับ และทำการศึกษาการตอบสนองต่อแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ โดยการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเชิงแสง

4.1 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยสมบัติทางความร้อนของผลึกของสารกึ่งตัวนำ CdTe และ ZnTe

เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริก อะนาไลเซอร์ (TGA) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยสมบัติทางความร้อน ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน โดยใช้อุณหภูมิตั้งแต่ 0-1,000 องศาเซลเซียส ซึ่งจะใช้บ่งบอกว่าสารตัวอย่าง มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักและการเปลี่ยนสถานะเนื่องจากเกิดการสลายตัวของสารด้วยปฏิกิริยาสลายความชื้น (dehydration) โดยใช้สารตั้งต้น 0.01 กรัม



รูปที่ 4.1 แสดงน้ำหนักโดยใช้เครื่องเทอร์โมกราวิเมตตริก อะนาลิเซอร์ของผงผลึกของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่ลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

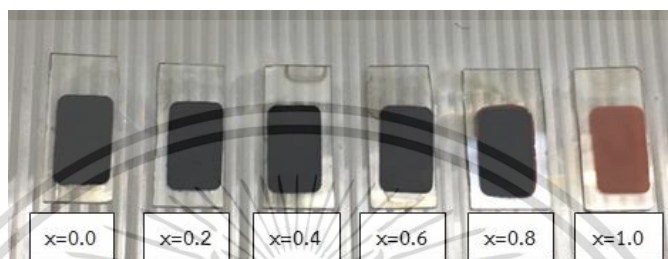


รูปที่ 4.2 แสดงน้ำหนักโดยใช้เครื่องเทอร์โมกราวิเมตตริก อะนาลิเซอร์ของผงผลึกของสารกึ่งตัวนำ ZnTe ที่ลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

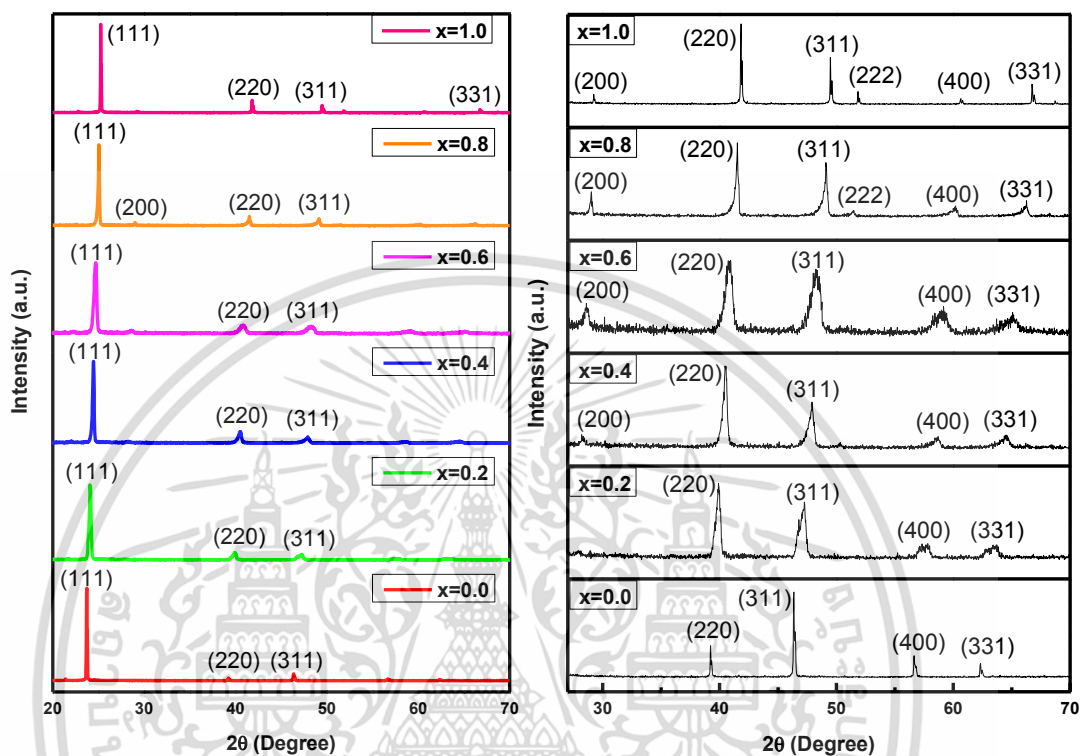
4.2 พิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

ลักษณะของฟิล์มบางที่เตรียมได้จากเศษส่วนโดยโมลอะตอมของธาตุ Zn ที่ x เท่ากับ 0.0, 0.2, 0.4 และ 0.6 ฟิล์มจะมีลักษณะเป็นสีดำ มีผิวหน้าเรียบสม่ำเสมอ ไม่มีรูพรุน ในขณะที่เศษส่วนโดยโมลอะตอมของธาตุ Zn ที่ x เท่ากับ 0.8 ฟิล์มบางมีลักษณะเป็นสีดำ มีขอบสีส้ม มีผิวหน้าเรียบสม่ำเสมอ ไม่มีรูพรุน ที่เศษส่วนโดยโมลอะตอมของธาตุ Zn เท่ากับ 1.0 ฟิล์มบางมีลักษณะเป็นสีส้มผิวหน้าเรียบสม่ำเสมอ ไม่มีรูพรุน ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 พิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที

4.3 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ



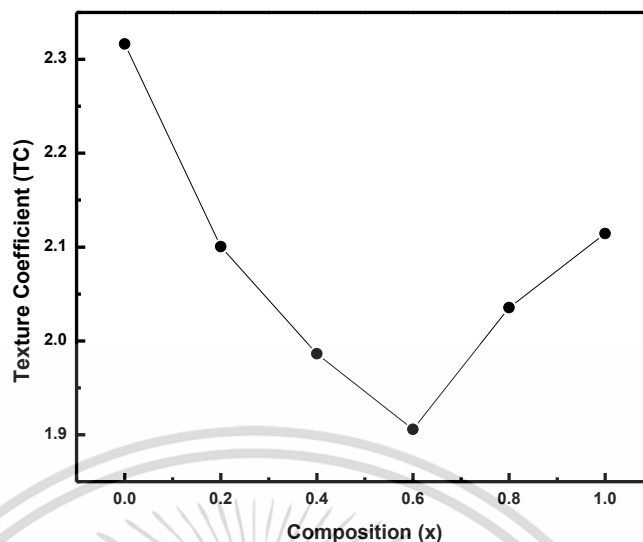
รูปที่ 4.4 แสดงพีคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที

ลักษณะโครงสร้างผลึกจากการศึกษาด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ แสดงในรูปที่ 4.2 พบว่าทุกค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอมของธาตุ Zn เป็นโครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์ [23] ที่เศษส่วนโดยโมลอะตอมของธาตุ Zn เท่ากับ $x=0.0$ พบพีคที่สำคัญอยู่ 3 พีค ได้แก่ พีคโดดเด่นที่มีความเข้มของสัญญาณสูงที่ ค่า $2\theta=23.725^\circ$ พร้อมกับอีกสองพีคที่ค่า $2\theta=39.223^\circ$ และ 46.337° ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีพีคที่มีความเข้มของสัญญาณต่ำมากอีก 2 พีค ที่ $2\theta=56.600^\circ$ และ 62.353° พีคเหล่านี้สอดคล้องกับระนาบ (111), (220), (311), (400) และ (331) ตามลำดับ [24] ที่เศษส่วนโดยโมลอะตอมของธาตุ Zn เท่ากับ $x=1.0$ พบพีคที่โดดเด่นที่ค่า $2\theta=25.252^\circ$ ที่ระนาบ (111) พีคที่มีความเข้มของสัญญาณอ่อนปรากฏที่ค่า $2\theta=41.824^\circ$ ที่ระนาบ (220) และ $2\theta=49.474^\circ$ ที่ระนาบ (311) และยังมีพีคที่มีความเข้มของสัญญาณต่ำมากอีก 2 พีค ที่ค่า $2\theta=60.634^\circ$ ที่ระนาบ (400) และ $2\theta=66.747^\circ$ ที่ระนาบ (331) สังเกตการปรากฏตัวของระนาบ (200) จะเห็นว่าระนาบนี้จะพบในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe แต่ไม่พบในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe [25-26] ในกรณีของเศษส่วนโมลอะตอมของธาตุ Zn ที่ $x \geq 0.4$ มีพีคสอดคล้อง

กับระนาบ (200) ซึ่งโครงสร้างผลึกจะมีเฟสคล้ายคลึงกับ ZnTe นอกจากนี้ในขณะที่พบว่ามีฟิสิกใหม่ปรากฏให้เห็นฟิสิกที่โดดเด่นก็จะมีค่าความเข้มของสัญญาณที่ลดลงเป็นไปตามค่า Texture Coefficient ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ตำแหน่งของมุมเลี้ยวเบนเคลื่อนไปทางค่ามุมที่สูงขึ้นตามความเข้มข้นของอะตอม Zn ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากอะตอมของธาตุ Zn ที่มีขนาดเล็กกว่าอะตอมของธาตุ Cd แทนที่เข้าในตำแหน่งของอะตอมของธาตุ Cd ในโครงสร้างผลึก ดังนั้นจึงพบว่าค่าคงที่โครงสร้างผลึก (a) จะลดลงตามความเข้มข้นของอะตอมของธาตุ Zn ที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.4 โดยที่ลดลงจาก 6.492 ถึง 6.104 Å จากกราฟที่แสดงในรูปที่ 4.4 จะเห็นว่าค่าคงที่โครงสร้างผลึกมีค่าลดลงอย่างเป็นเชิงเส้นเกือบเป็นไปตามกฎของ Vegard [27] ดังนั้นการลดลงของค่าคงที่โครงสร้างผลึกแสดงให้เห็นว่าเกิดการรวมตัวกันระหว่าง CdTe และ ZnTe

ตารางที่ 4.1 แสดงมุม ระนาบของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ และขนาดเกรนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาในระบอบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที

Composition (x)	2θ	(h,k,l)	β ($\times 10^{-3}$)	Grain Size from XRD (nm)	Dislocation, γ (line/m ²)	Strain, ϵ
0.0	23.725	(1 1 1)	1.78	83.13	1.45×10^{14}	2.12×10^{-3}
0.2	24.102	(1 1 1)	4.08	36.29	7.59×10^{14}	4.78×10^{-3}
0.4	24.451	(1 1 1)	3.46	42.83	5.45×10^{14}	3.99×10^{-3}
0.6	24.717	(1 1 1)	6.09	24.34	1.69×10^{15}	6.94×10^{-3}
0.8	25.052	(1 1 1)	2.67	55.56	3.24×10^{14}	3.00×10^{-3}
1.0	25.252	(1 1 1)	1.05	141.34	5.01×10^{14}	1.17×10^{-3}

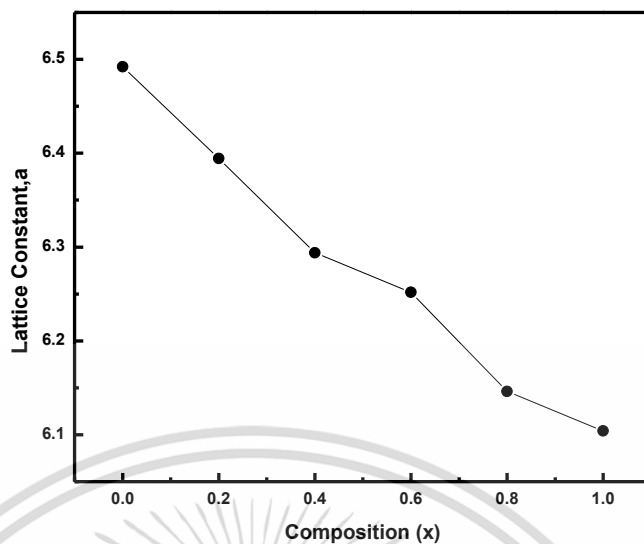


รูปที่ 4.5 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า Texture Coefficient กับเศษส่วนโดยโมลอะตอมของธาตุ Zn ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าคงที่โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที

Composition (x)	Lattice Constant (Å)
	Cubic
0.0	6.492
0.2	6.394
0.4	6.293
0.6	6.251
0.8	6.147
1.0	6.104

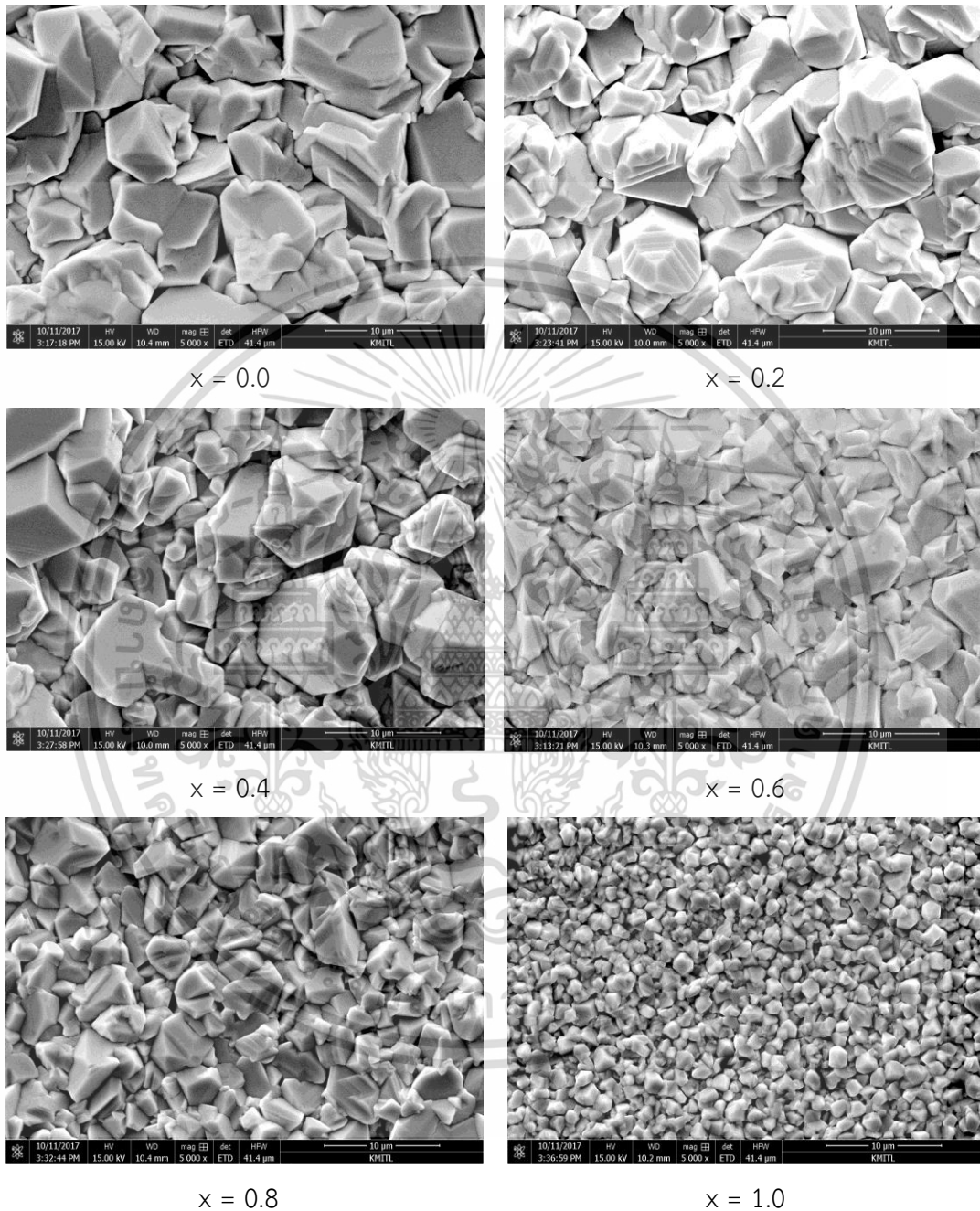
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่โครงผลึกกับเศษส่วนโดยโมลอะตอมของธาตุ Zn ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ผลการศึกษาภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.7 แสดงภาพถ่าย SEM ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

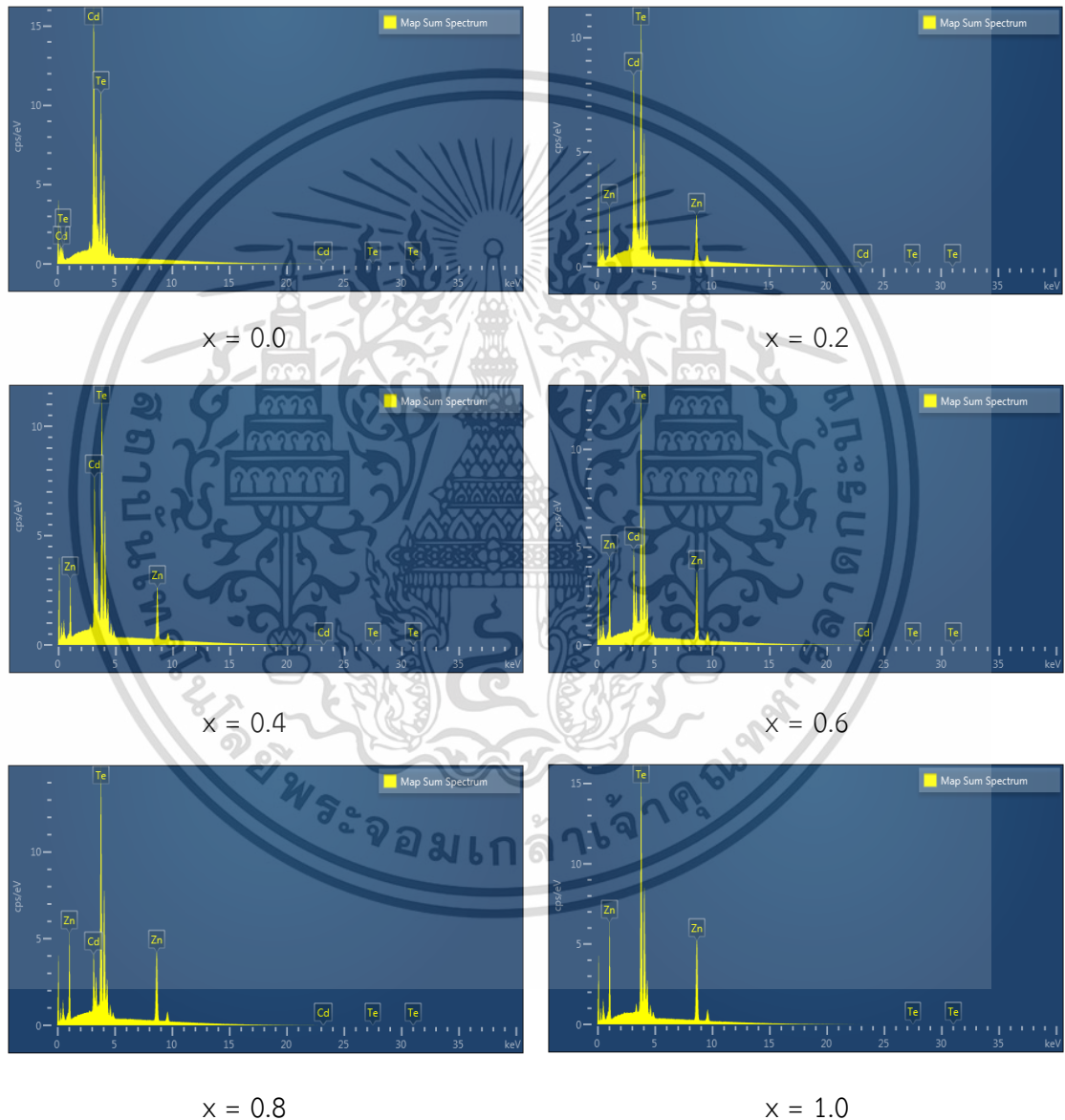
จากรูปที่ 4.7 เห็นได้ชัดว่าขนาดเกรนลดลงตามความเข้มข้นของอะตอม Zn ที่เพิ่มขึ้น [27] แต่ขนาดเกรนที่ได้มีค่าแตกต่างและไม่ใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้จากพีคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เนื่องจากขนาดของเกรนที่เห็นได้จากภาพ SEM ที่ดูมีขนาดใหญ่ขึ้นแท้จริงแล้วประกอบไปด้วยเกรนเล็กๆรวมกันเป็นเกรนขนาดใหญ่



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานที่บริเวณชั้นผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

การศึกษาการวิเคราะห์ธาตุของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ด้วยเทคนิค EDS (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) เพื่อเป็นการระบุชนิดและปริมาณของธาตุที่อยู่ในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 4.8 แสดงสเปกตรัม EDS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 แสดงแผนที่การกระจายตัวของธาตุในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

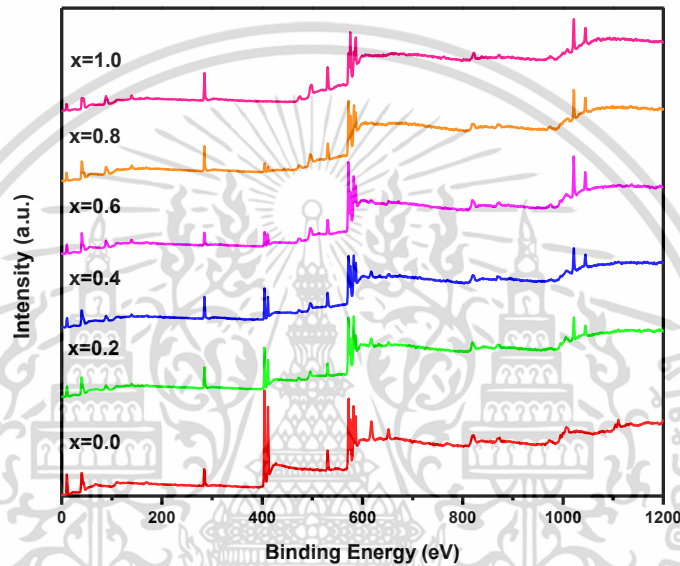
ตารางที่ 4.3 แสดงองค์ประกอบของธาตุต่างๆ ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระบะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที

Composition (x)	Elements					
	Cd		Te		Zn	
	wt(%)	at(%)	wt(%)	at(%)	wt(%)	at(%)
0.0	47.90	51.07	52.10	48.93	-	-
0.2	28.40	27.39	57.02	48.44	14.57	24.16
0.4	25.41	24.13	57.69	48.26	16.90	27.60
0.6	15.30	13.87	60.44	48.28	24.26	37.84
0.8	11.49	10.31	62.32	49.27	26.20	40.42
1.0	-	-	65.55	49.37	34.45	50.63

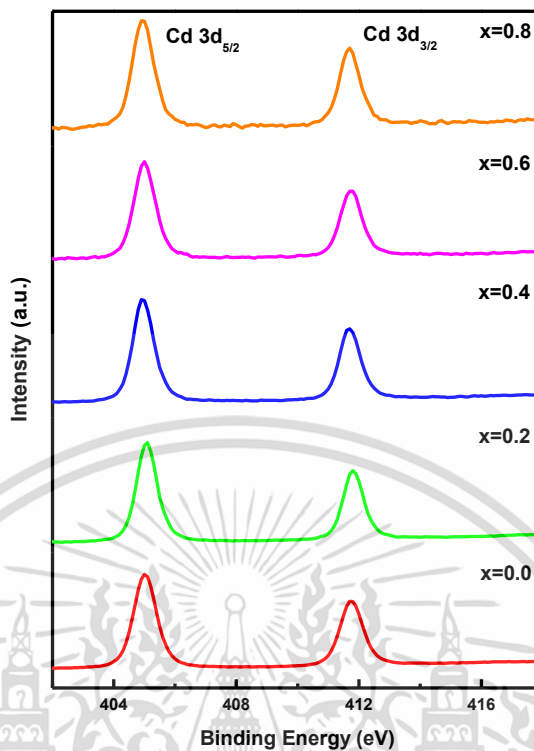
จากรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่ามีอะตอมของธาตุ Cd, Zn และ Te ในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ องค์ประกอบของธาตุต่างๆของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ที่องค์ประกอบ Zn ต่างๆถูกระบุไว้ในตารางที่ 4.3 จะเห็นว่าค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์อะตอมของ Zn เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของค่า x เมื่อพิจารณาถึงสัดส่วนร้อยละทางเคมีของสารตั้งต้นพบว่าเป็นในลักษณะของ excess Zn ยกเว้นใน CdTe ที่เป็นในลักษณะของ excess Cd [28-29]

4.6 ผลการศึกษาการวัดจำนวนโฟโตอิมิชชันของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

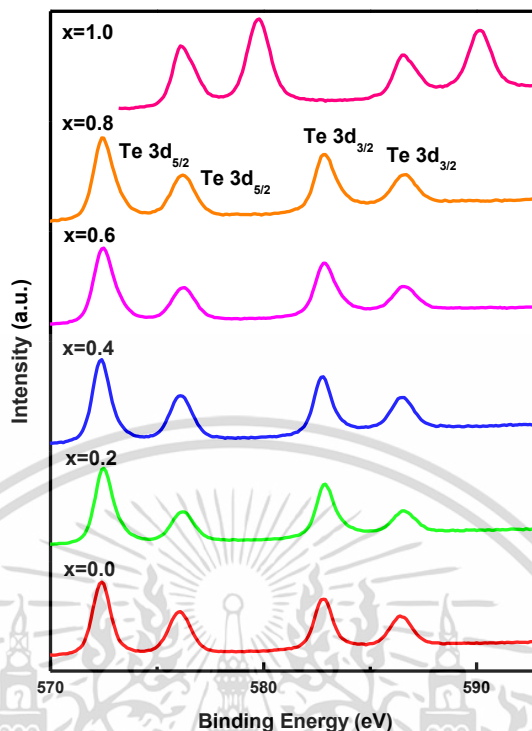
การศึกษาการวัดจำนวนโฟโตอิมิชชัน เป็นอีกวิธีที่ใช้วิเคราะห์ธาตุของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยจะใช้เทคนิคสเปกโตรสโคปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ (X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS) เพื่อเป็นการระบุชนิดของธาตุที่อยู่ในฟิล์มบาง



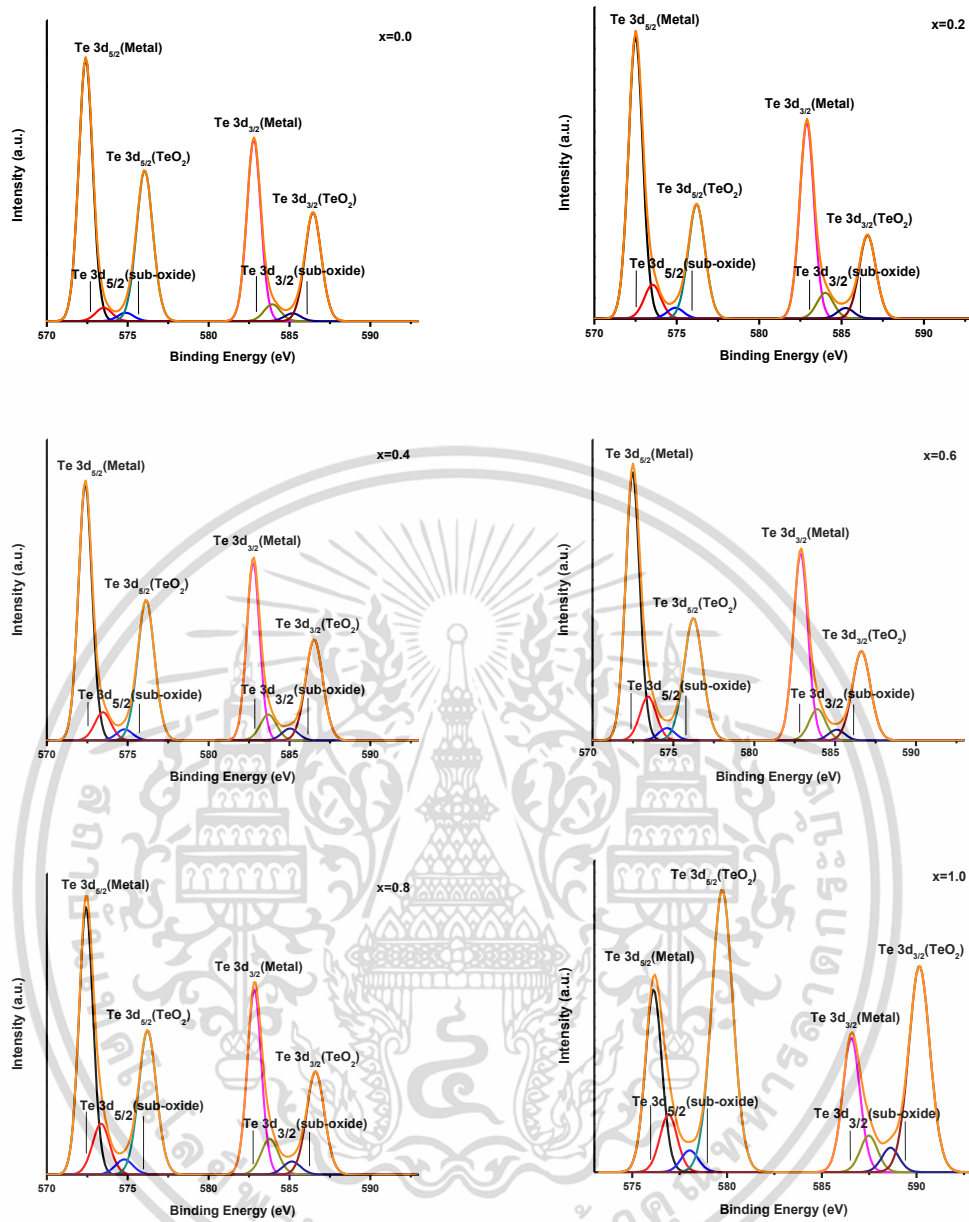
รูปที่ 4.10 แสดงสเปกตรัม XPS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที



รูปที่ 4.11 แสดงสเปกตรัม XPS ในช่วง 402-418 อิเล็กตรอนโวลต์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ ($0 \leq x \leq 0.8$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที

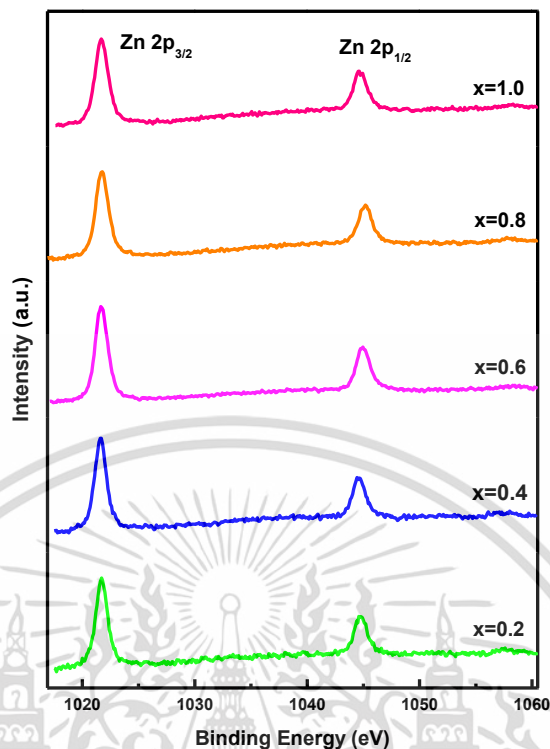


รูปที่ 4.12 แสดงสเปกตรัม XPS ในช่วง 570-593 อิเล็กตรอนโวลต์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที



รูปที่ 4.13 แสดงสเปกตรัม XPS ในช่วง 570-593 อิเล็กตรอนโวลต์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cd_{1-x}Zn_xTe ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 แสดงสเปกตรัม XPS ในช่วง 1017-1060 อิเล็กตรอนโวลต์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ ($0.2 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที

จากผลการตรวจสอบพบธาตุ Cd คือ $\text{Cd } 3d_{5/2}$ และ $\text{Cd } 3d_{3/2}$ ที่พลังงานประมาณ 405 และ 411 eV ตามลำดับ (รูปที่ 4.9) ธาตุ Te คือ $\text{Te } 3d_{5/2}(\text{Metal})$, $\text{Te } 3d_{5/2}(\text{TeO}_2)$, $\text{Te } 3d_{3/2}(\text{Metal})$ และ $\text{Te } 3d_{3/2}(\text{TeO}_2)$ ที่พลังงานประมาณ 572, 576, 582 และ 586 eV (รูปที่ 4.11) ตามลำดับ ธาตุ Zn คือ $\text{Zn } 2p_{3/2}$ และ $\text{Zn } 2p_{1/2}$ ที่พลังงานประมาณ 1021 และ 1044 eV ตามลำดับ (รูปที่ 4.10) ดังแสดงตามตารางที่ 4.4

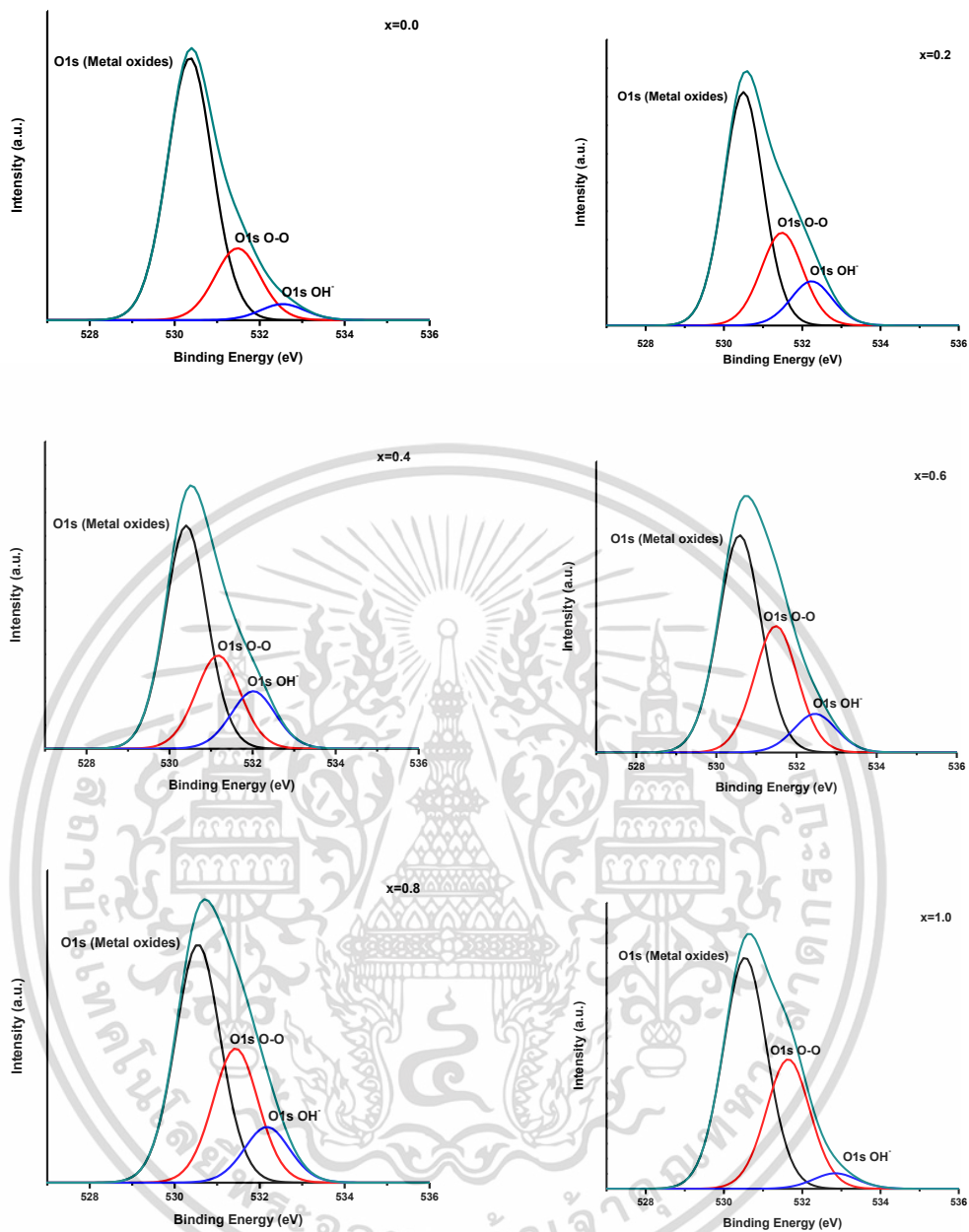
ตารางที่ 4.4 แสดงองค์ประกอบของธาตุต่างๆวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XPS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระบะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที

Composition (x)	Binding Energy (eV)							
	Cd		Te				Zn	
	3d _{5/2}	3d _{3/2}	3d _{5/2} (Metal)	3d _{5/2} (TeO ₂)	3d _{3/2} (Metal)	3d _{3/2} (TeO ₂)	2p _{3/2}	2p _{1/2}
0.0	405.036	411.776	572.389	576.061	582.780	586.471	-	-
0.2	405.105	411.799	572.487	576.220	582.877	586.590	1021.695	1044.745
0.4	404.979	411.706	572.359	576.134	582.731	586.506	1021.613	1044.666
0.6	405.014	411.754	572.465	576.240	582.874	586.607	1021.665	1044.699
0.8	404.939	411.692	572.410	576.248	582.812	586.630	1021.699	1044.779
1.0	-	-	576.115	579.757	586.560	590.160	1021.735	1044.775

ตารางที่ 4.5 แสดง Raw Area และ Atomic Conc % ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระบะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที

Composition (x)	Cd		Te		Zn	
	Raw Area (cps eV)	Atomic Conc %	Raw Area (cps eV)	Atomic Conc %	Raw Area (cps eV)	Atomic Conc %
0.0	618730	15.89	761170	13.03	-	-
0.2	225555	6.50	590430	40.16	84760	60.71
0.4	171790	4.81	562739.9	10.51	328270.1	9.67
0.6	91405	112.422	663740	14.37	346550	11.83
0.8	47500	1.24	586770.1	10.23	327360.1	9.00
1.0	-	-	515410	7.73	338300	8.01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



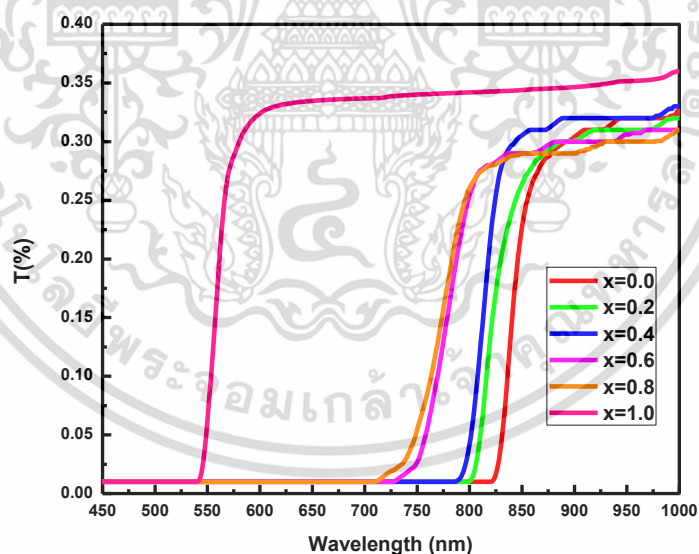
รูปที่ 4.15 แสดงสเปกตรัม XPS ในช่วง 527-536 อิเล็กตรอนโวลต์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cd_{1-x}Zn_xTe ($0.2 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

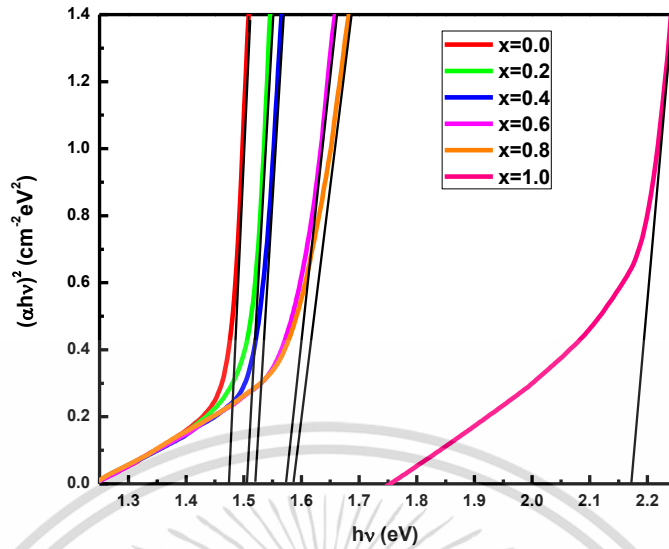
ตารางที่ 4.6 แสดงองค์ประกอบอะตอมของธาตุ O ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค XPS ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที

Composition (x)	Binding Energy (eV)		
	O		
	O1s (Metal oxides)	O1s O-O	O1s OH ⁻
0.0	530.340	531.460	532.520
0.2	530.486	531.461	532.215
0.4	530.394	531.148	531.994
0.6	530.564	531.465	532.440
0.8	530.528	531.412	532.148
1.0	530.520	531.620	532.820

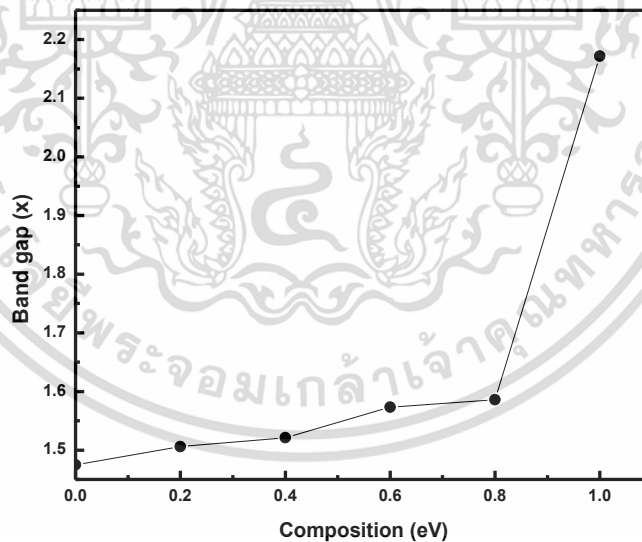
4.7 ผลการศึกษาสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที



รูปที่ 4.17 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $(\alpha hv)^2$ กับ hv ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที



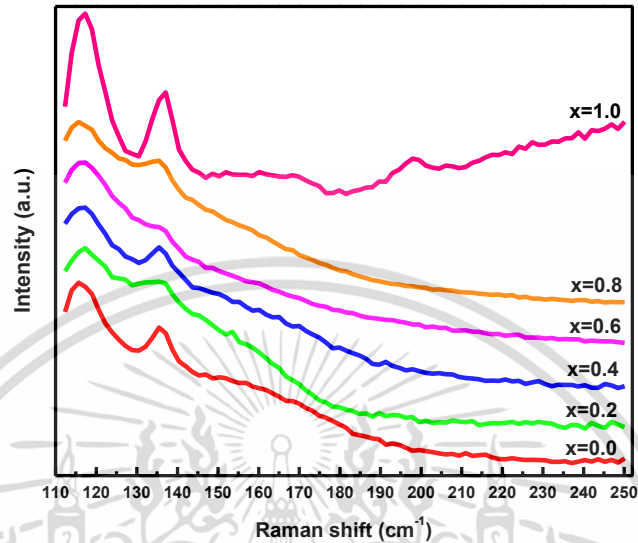
รูปที่ 4.18 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงานกับเศษส่วนโดยโมลอะตอมของธาตุ Zn ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที

Composition (x)	Energy Gap, (E_g) (eV)
0.0	1.475
0.2	1.506
0.4	1.521
0.6	1.573
0.8	1.586
1.0	2.172

จากรูปที่ 4.15 แสดงการส่งผ่านของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ พบว่า เมื่อค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอมของธาตุ Zn เพิ่มขึ้น [27] ทำให้จุดเปลี่ยนของเส้นสเปกตรัมเลื่อนไปทางด้านความยาวคลื่นที่ลดลง ซึ่งจะบ่งบอกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานเพิ่มขึ้น ดังที่แสดงในรูปที่ 4.16, 4.17 และในตารางที่ 4.7 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าช่องว่างแถบจาก 1.48 eV (สำหรับฟิล์ม CdTe) ไปเป็น 2.17 eV (สำหรับ ZnTe) การเพิ่มขึ้นของช่องว่างแถบพลังงานเป็นผลมาจากการเพิ่มอะตอม Zn เข้าไปในโครงสร้างผลึกของ CdTe จะเห็นได้ว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานในช่วงองค์ประกอบ Zn ระหว่าง 0.2 และ 0.8 มีค่าที่ใกล้เคียงกันกับค่าช่องว่างแถบพลังงานของ CdTe ซึ่งอาจเป็นตัวบ่งชี้ได้ว่าฟิล์มบางมีความเข้มข้นของ Zn ที่ต่ำ ซึ่งไม่สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ EDS ซึ่งแสดงออกมาให้เห็นว่ามีความเข้มข้นของสังกะสีมากขึ้นไป ซึ่งในความเป็นจริงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุจากเทคนิค EDS นั้นสามารถเชื่อถือได้ เหตุที่ค่าช่องว่างแถบพลังงาน $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ที่องค์ประกอบ Zn ระหว่าง 0.2 และ 0.8 เปลี่ยนแปลงเล็กน้อยจาก 1.48 eV เป็น 1.59 eV เป็นเพราะว่าแสงถูกดูดกลืนโดย CdTe ที่อยู่บนพื้นผิวของฟิล์มบาง

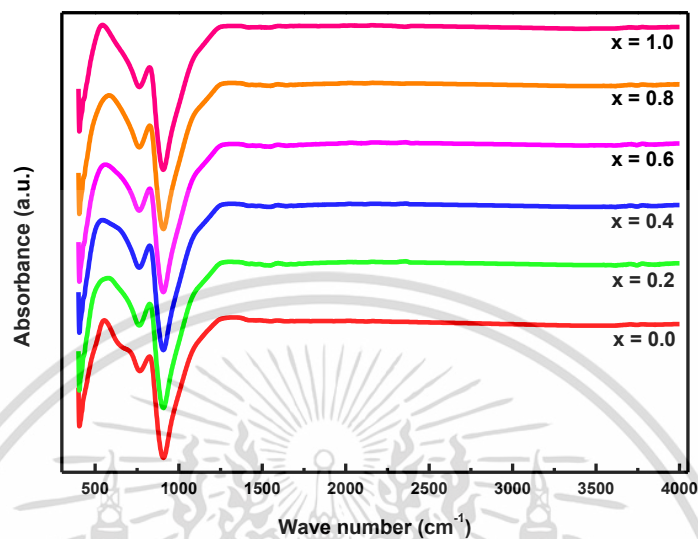
4.8 ผลการศึกษารามานสเปกโทรสโกปีของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.19 แสดงสเปกตรัม Raman ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที

จากรูปที่ 4.18 จะพบโหมด Te(A1) phonon ที่เลขคลื่นประมาณ 116 cm^{-1} ในทุกสัดส่วนโมลอะตอม x สำหรับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe และในกรณีของฟิล์มบางที่ผ่านปฏิกิริยาของแข็งทั้งหมดจะพบโหมด CdTe(1TO) + Te(E) phonon ที่เลขคลื่นประมาณ 137 cm^{-1} การปรากฏของพีคโหมด CdTe(1LO) phonon ถูกพบในฟิล์มที่มีสัดส่วนโมลอะตอม x ในช่วง $0 \leq x \leq 0.4$ ที่เลขคลื่นประมาณ 160 cm^{-1} และจะหายไปเมื่อ x มีค่ามากกว่า 0.4 ในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe ปรากฏโหมด Te(E) phonon ที่เลขคลื่น 137 cm^{-1} และโหมด ZnTe(1LO) phonon ที่เลขคลื่น 198 cm^{-1} [30]

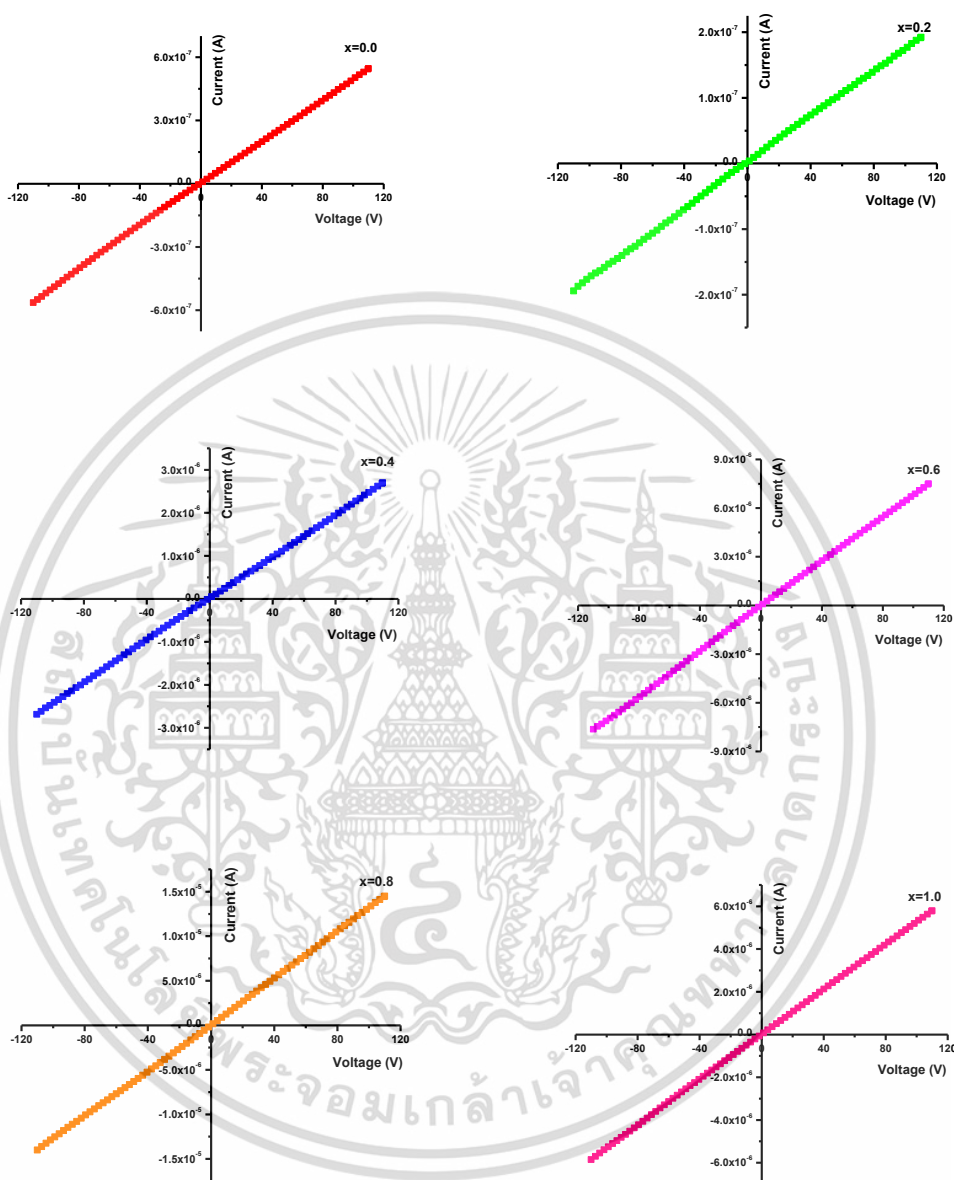
4.9 ผลการศึกษาฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ



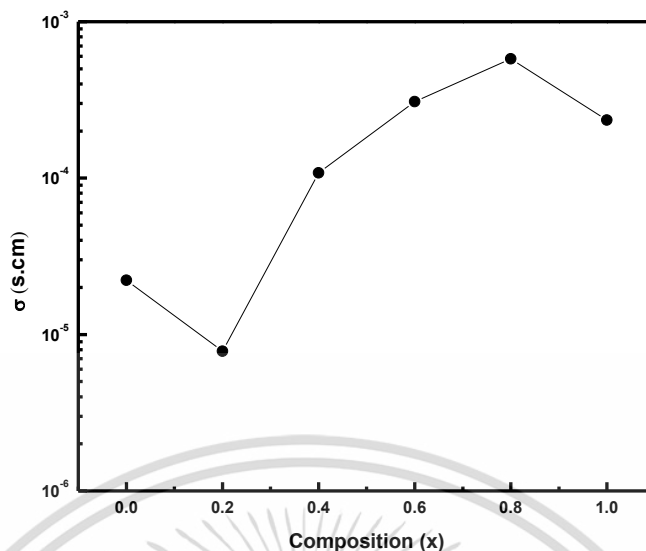
รูปที่ 4.20 แสดงสเปกตรัม FTIR ในช่วงคลื่น 400-4000 ต่อเซนติเมตร ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที

จากรูปที่ 4.19 สเปกตรัม FTIR ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ มีการดูดกลืนแสงที่เด่นชัดที่ ตำแหน่งเลขคลื่นประมาณ 550 และ 825 cm^{-1} ในฟิล์มบางทั้งหมด [31] สังเกตตำแหน่งเลขคลื่นของพีคแรกจะเลื่อนไปทางพลังงานที่ลดลง เลื่อนจาก 553 cm^{-1} ในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ไปยัง 542 cm^{-1} ในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe เนื่องจากว่าความยาวพันธะของ Zn-Te สั้นกว่า Cd-Te ซึ่งพฤติกรรมในลักษณะแบบนี้สามารถพบได้ในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xO$ ด้วยเช่นกัน [32]

4.10 ผลการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

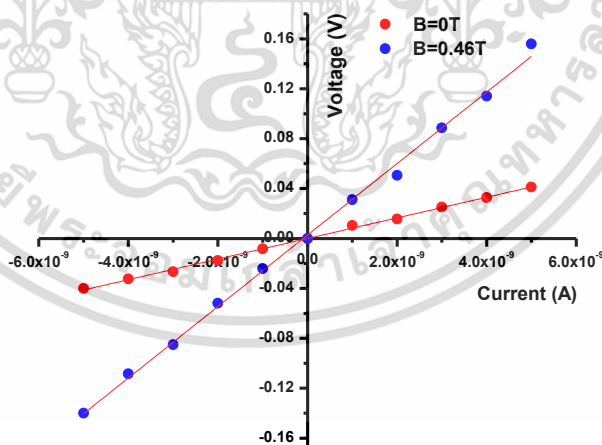


รูปที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเพื่อหาค่าความต้านทานจากกราฟของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที

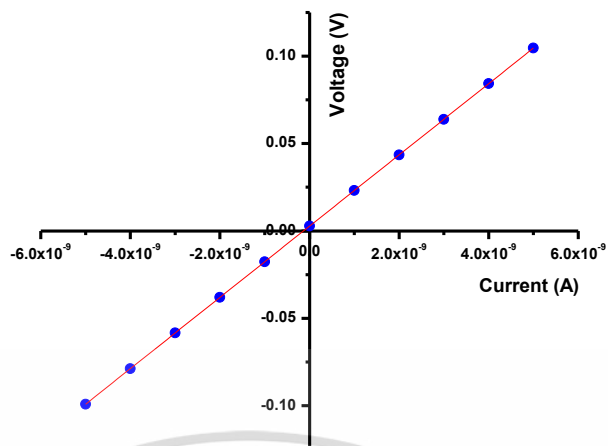


รูปที่ 4.22 แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้าและสัดส่วนโดยโมลอะตอมของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ

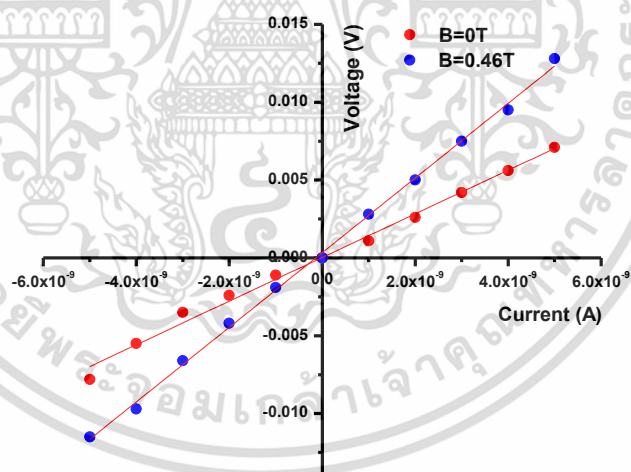
4.11 ผลการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ



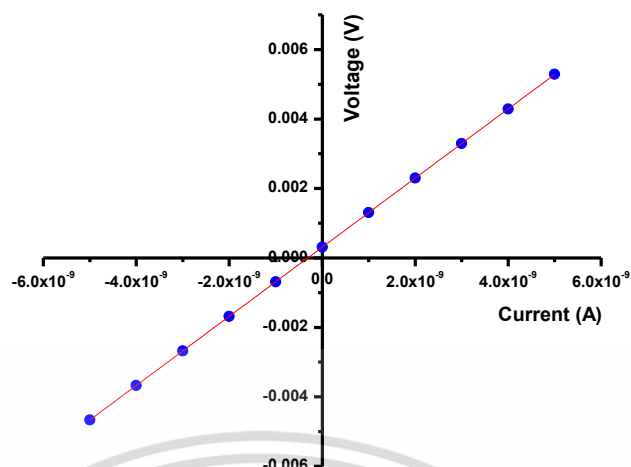
รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ฮอลล์ (V_{24}) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ เมื่อ $x=0.0$ เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที



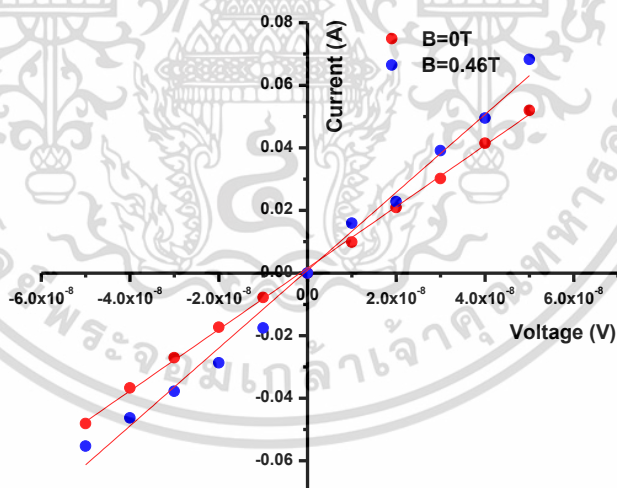
รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ฮอลล์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ เมื่อ $x=0.0$ เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที



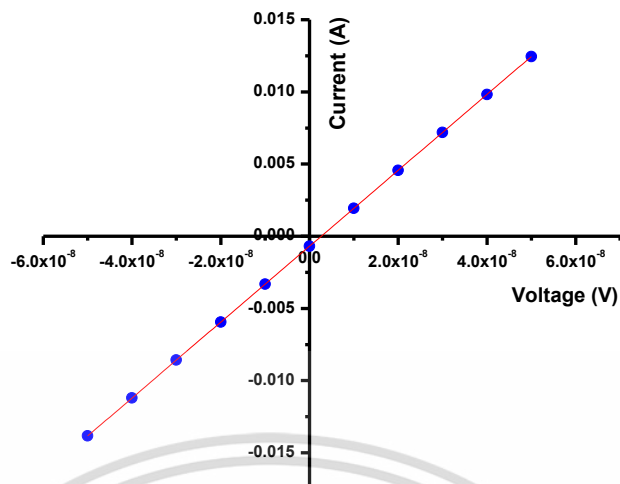
รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ฮอลล์ (V_{24}) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ เมื่อ $x=0.2$ เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที



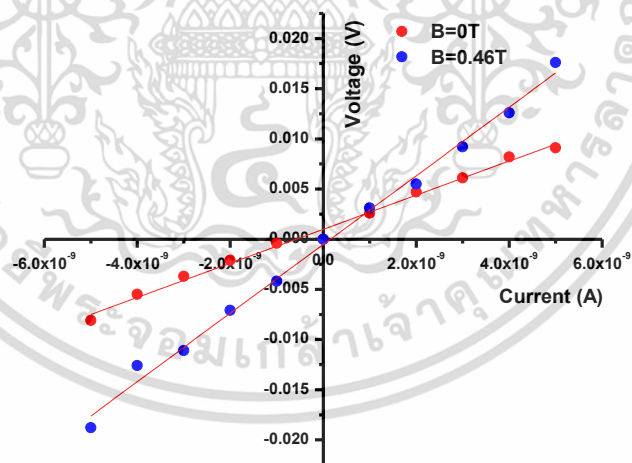
รูปที่ 4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ฮอลล์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ เมื่อ $x=0.2$ เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที



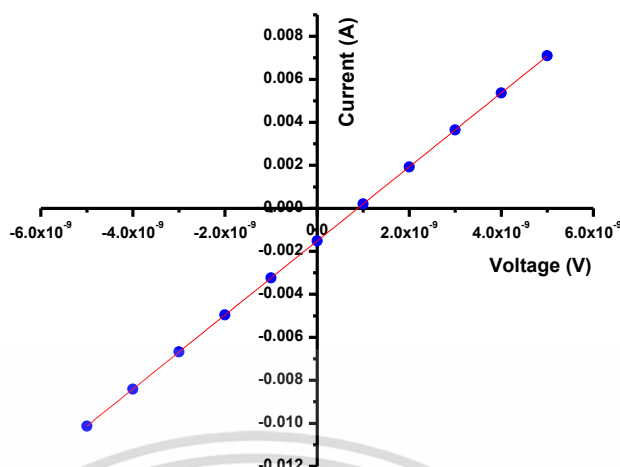
รูปที่ 4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ฮอลล์ (V_{24}) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ เมื่อ $x=0.4$ เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที



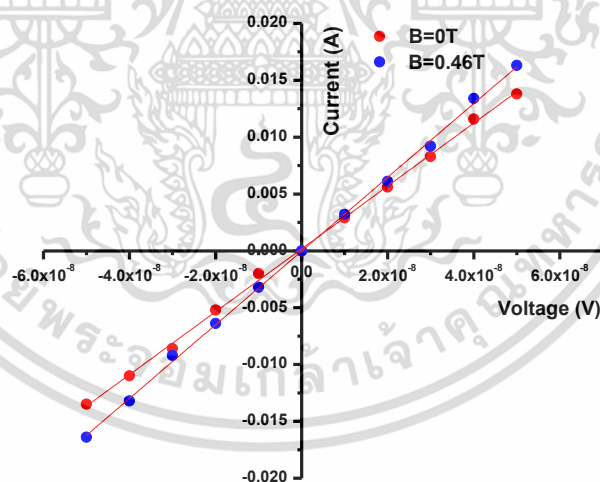
รูปที่ 4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ฮอลล์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ เมื่อ $x=0.4$ เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที



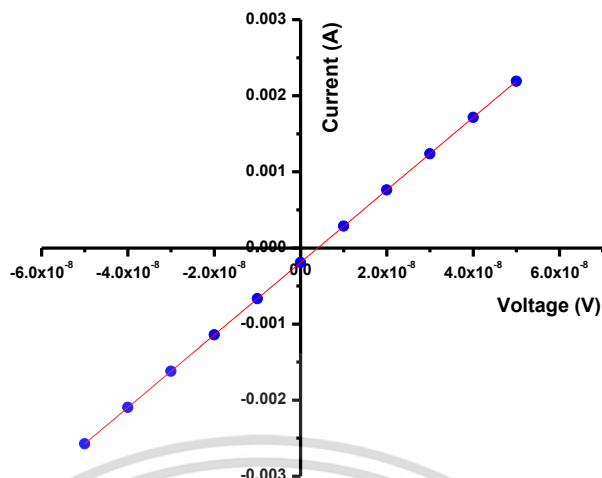
รูปที่ 4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ฮอลล์ (V_{24}) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ เมื่อ $x=0.6$ เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที



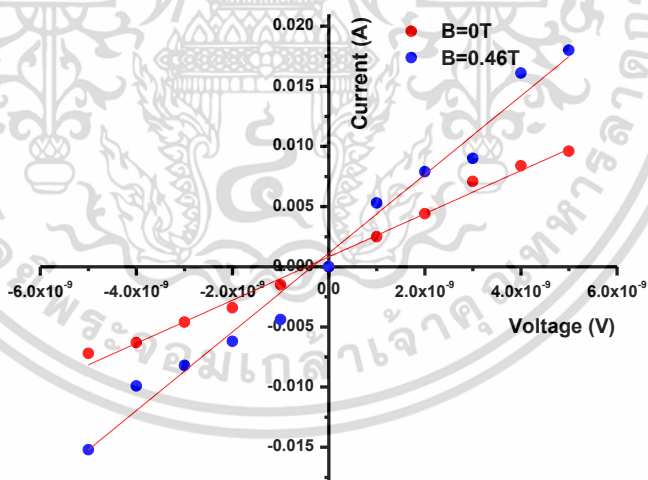
รูปที่ 4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ฮอลล์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ เมื่อ $x=0.6$ เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที



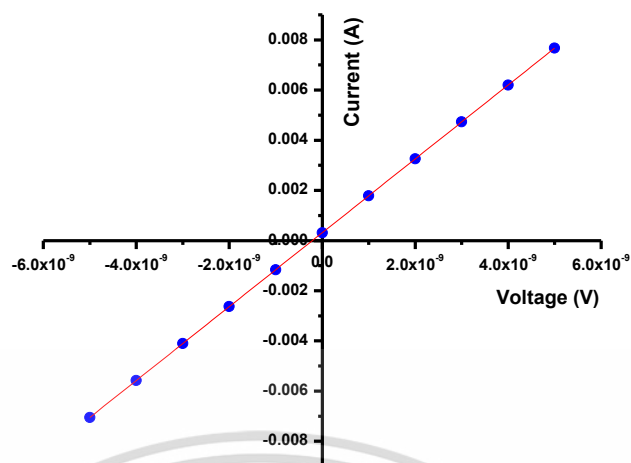
รูปที่ 4.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ฮอลล์ (V_{24}) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ เมื่อ $x=0.8$ เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที



รูปที่ 4.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ฮอลล์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ เมื่อ $x=0.8$ เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที



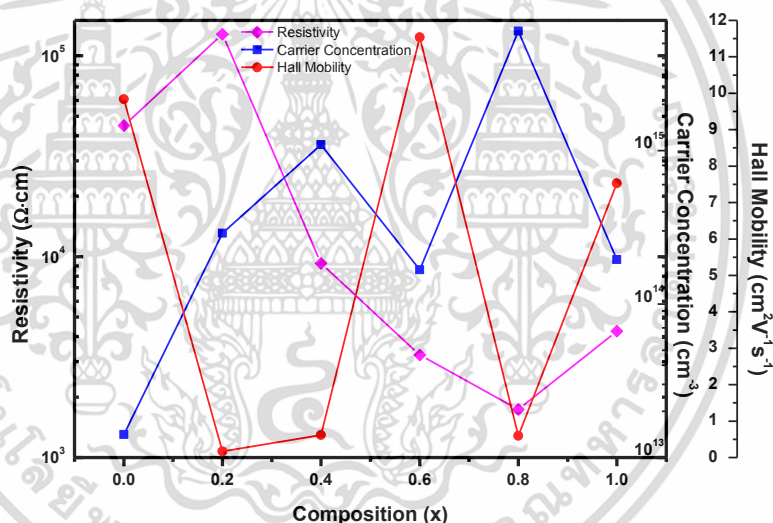
รูปที่ 4.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ฮอลล์ (V_{24}) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ เมื่อ $x=1.0$ เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที



รูปที่ 4.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ฮอลล์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ทั้งในกรณีที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ เมื่อ $x=1.0$ เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่คำนวณได้จากผลการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที

Composition of (x) ($\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$)	Resistivity ($\Omega\cdot\text{cm}$)	Hall Coefficient (cm^3/C)	Carrier Concentration (cm^{-3})	Hall Mobility ($\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$)	Type
0.0	4.50×10^4	4.43×10^5	1.41×10^{13}	9.84	P
0.2	1.28×10^5	2.16×10^4	2.89×10^{14}	0.17	P
0.4	9.25×10^3	5.71×10^3	1.09×10^{15}	0.62	P
0.6	3.24×10^3	3.74×10^4	1.67×10^{14}	11.54	P
0.8	1.73×10^3	1.04×10^3	6.01×10^{15}	0.60	P
1.0	4.25×10^3	3.20×10^4	1.95×10^{14}	7.53	P



รูปที่ 4.35 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอน และค่าสภาพคล่องของพาหะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที

4.12 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-200 องศาเซลเซียส เพื่อหาค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

จากรูปที่ 4.36, 4.37, 4.38, 4.39, 4.40 และจากตารางที่ 4.9 เป็นผลการวัดความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-200 องศาเซลเซียส เพื่อหาค่าพลังงานกระตุ้น (activation energy : E_g) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที พบว่าค่าพลังงานกระตุ้น (E_g) จะมีเพียงค่าเดียวซึ่งจะเป็นค่ากัมพวงศักย์ที่บริเวณรอยต่อของเกรนโดยเกรนมีขนาดเล็กลง ค่าของกัมพวงศักย์จะมีค่าเพิ่มขึ้นสอดคล้องกับค่าความต้านทานไฟฟ้า ซึ่งอธิบายได้จากสมการ

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

จากสมการข้างต้นจะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้น กัมพวงศักย์จะมีค่าลดลงส่งผลให้ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำนำไฟฟ้าได้ดีขึ้น

จากผลการทดลองสามารถนำมาหาค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) ได้จาก

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

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

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

$$\ln R - \ln R_0 = \frac{E_a}{kT}$$

$$-\ln R + \ln R_0 = \frac{-E_a}{kT}$$

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

$$\ln\left(\frac{R_0}{R}\right) = \frac{-E_a}{1000k} \left(\frac{1000}{T}\right); k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J / K}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

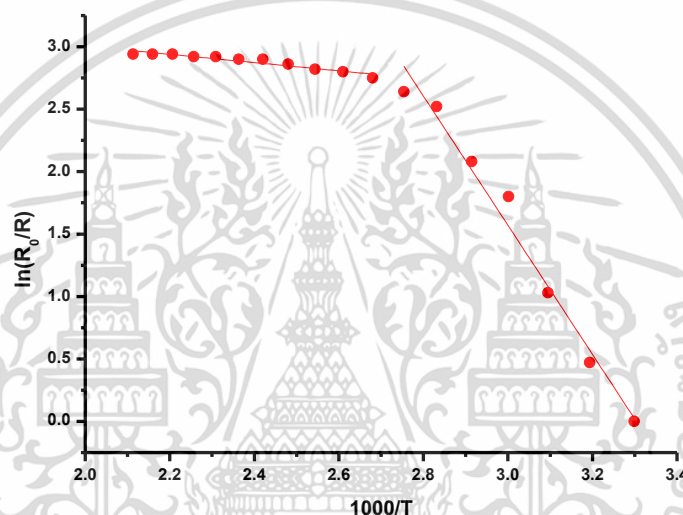
$$\ln\left(\frac{R_0}{R}\right)\left(\frac{T}{1000}\right) = \frac{-E_a}{1000k}$$

$$\text{slope} = \frac{-E_a}{1000k} \text{ หน่วยเป็นจูล}$$

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

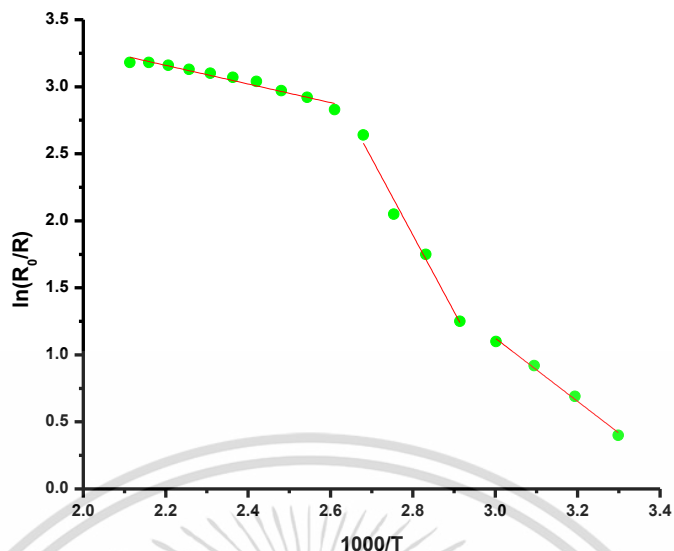
เมื่อ R_0 คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง

E_a คือ ค่าพลังงานกระตุ้น

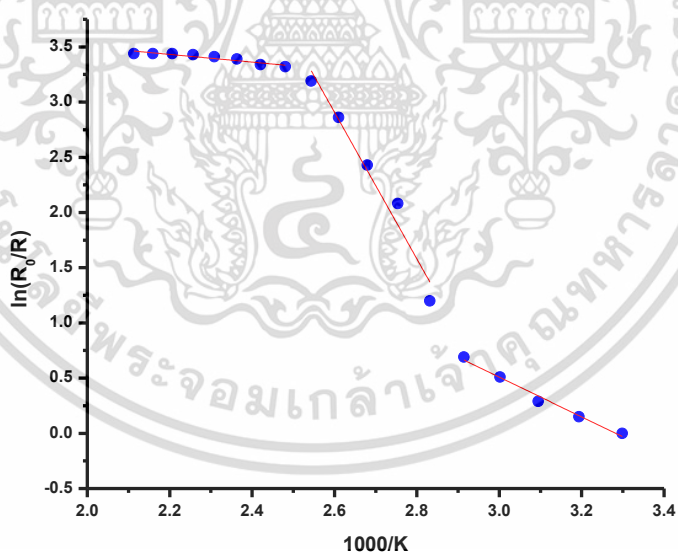


รูปที่ 4.36 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1000/T$ กับค่า $\ln(R_0/R)$ เมื่อทำการวัดค่าความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-150 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ เมื่อ $x=0.0$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที

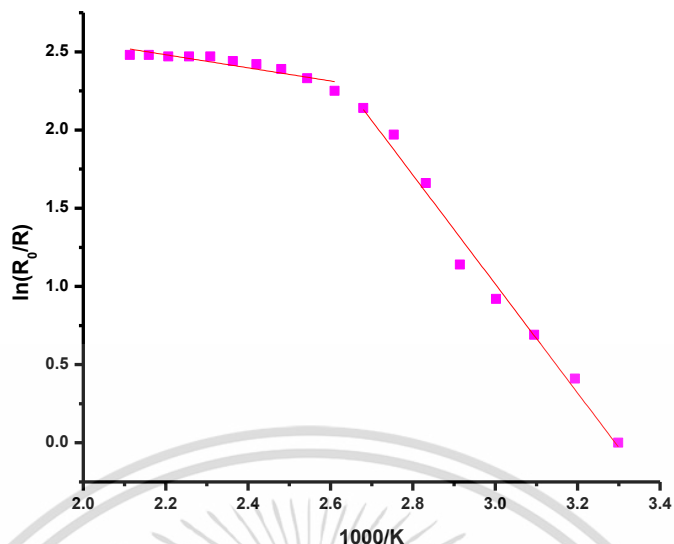
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



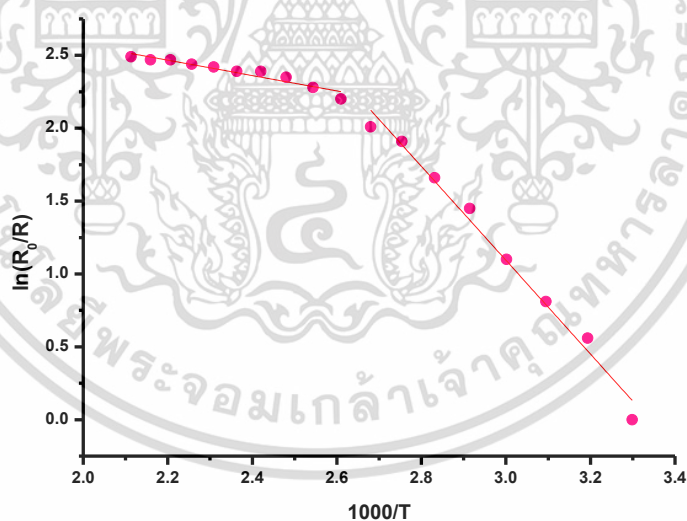
รูปที่ 4.37 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1000/T$ กับค่า $\ln(R_0/R)$ เมื่อทำการวัดค่าความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-150 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ เมื่อ $x=0.2$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที



รูปที่ 4.38 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1000/T$ กับค่า $\ln(R_0/R)$ เมื่อทำการวัดค่าความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-150 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ เมื่อ $x=0.4$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที



รูปที่ 4.39 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1000/T$ กับค่า $\ln(R_0/R)$ เมื่อทำการวัดค่าความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-150 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ เมื่อ $x=0.6$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที



รูปที่ 4.40 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1000/T$ กับค่า $\ln(R_0/R)$ เมื่อทำการวัดค่าความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-200 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ เมื่อ $x=1.0$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที

ตารางที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าพลังงานกระตุ้น กับ ค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอม (x) เมื่อทำการวัดค่าความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-200 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที

Composition (x) of $Cd_{1-x}Zn_xTe$	Activation Energy (E_a , eV)		
	E_{a1}	E_{a2}	E_{a3}
0.0	0.028	0.446	-
0.2	0.060	0.493	0.203
0.4	0.030	0.573	0.156
0.6	0.036	0.368	0.251
1.0	0.046	-	0.278

ตารางที่ 4.10 แสดงค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที

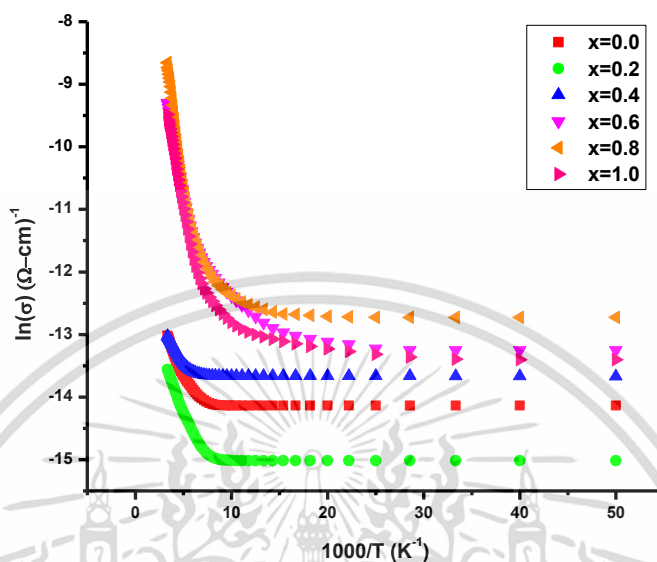
Composition (x) of $Cd_{1-x}Zn_xTe$	Activation Energy (E_a , eV)					
	Level A ₁	Level C	Level B	Level D	Level F	Level E
0.0	-	-	-	-	-	0.446
0.2	-	-	0.203	-	-	0.493
0.4	0.156	-	-	-	0.573	-
0.6	-	0.251	-	0.368	-	-
1.0	-	0.278	-	-	-	-

จากตารางที่ 4.10 ค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ เมื่อ $x=0.0$ พลังงานกระตุ้นจะอยู่ในระดับพลังงานลึก โดยฟิล์มบางมีพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 0.446 eV จะอยู่ในระดับพลังงาน E ซึ่งจะปรากฏอยู่ในผลึก CdTe ที่ไม่มีสารเจือ ดังนั้นระดับพลังงานนี้จะเกิดจาก V_{Cd}^{2-} โดตเดี่ยว [9] ถัดมาค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ เมื่อ $x=0.2$ พบพลังงานกระตุ้นอยู่ในระดับพลังงานลึก 2 ระดับพลังงาน โดยที่มีพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 0.203 eV ในระดับพลังงาน B และ 0.493 eV ในระดับพลังงาน E ที่ระดับพลังงาน B เป็นกับดักโฮลโดยจะปรากฏในผลึก CdTe เสมอ โดยที่ระดับพลังงานนี้จะขึ้นอยู่กับ 2 ปัจจัย คือ ปริมาณของสารเจือ โดยในที่นี้ก็คือ ปริมาณของอะตอม Zn ที่เจือเข้าไป และเทคนิคของการเตรียมผลึกของสารตัวอย่างซึ่งต้องใช้ข้อมูลที่แตกต่างกัน ที่จะทำให้อัตราพลังงานนี้แตกต่างกันไปบ้างในแต่ละผลึกของสารตัวอย่าง และที่ระดับพลังงาน E เป็นระดับพลังงานของ CdTe เนื่องจากว่าโดยตามหลักการแล้วระดับพลังงานนี้จะปรากฏอยู่ในผลึก CdTe ที่ไม่มีสารเจือ และเกิดจาก V_{Cd}^{2-} โดตเดี่ยว ค่าพลังงาน

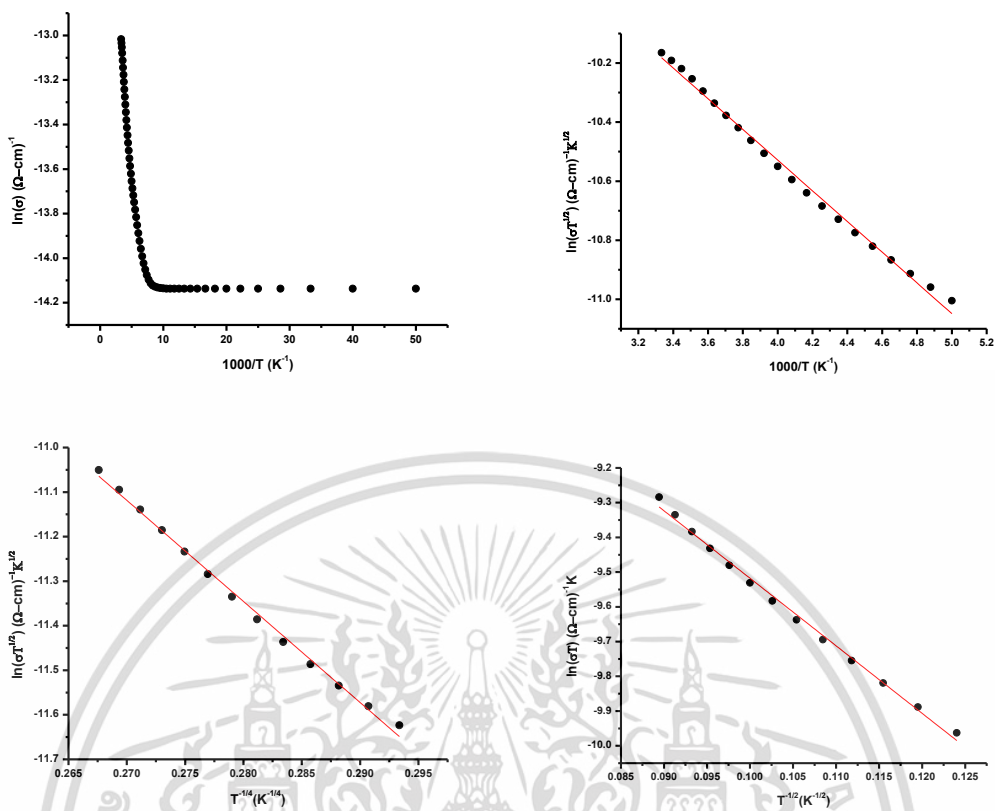
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระตุ้นของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ เมื่อ $x=0.4$ เท่ากับ 0.156 eV อยู่ในระดับพลังงาน A_1 ซึ่งจะพบในผลึก $CdZnTe$ แต่จุดกำเนิดของระดับพลังงานนี้ยังไม่แน่ชัดว่าเกิดจากอะไรแต่จากการศึกษาโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของ $CdZnTe$ ทำให้เชื่อกันว่าระดับพลังงานนี้จะเกี่ยวข้องกับข้อบกพร่องผลึกเชิงซ้อน V_{Cd} และ V_{Te} หรือข้อบกพร่องผลึกเชิงซ้อนที่เกี่ยวข้องกับ V_{Cd}^{2-} กับ V_{Te}^+ อีกระดับพลังงานที่พบคือ ระดับพลังงาน F มีค่าพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 0.573 eV ระดับพลังงาน F เป็นระดับพลังงานลึก และปรากฏอยู่ในผลึก $CdZnTe$ แต่ไม่พบในผลึก $CdTe$ และเชื่อว่าระดับพลังงานลึกนี้เป็นระดับพลังงานผู้รับ (acceptor level) ที่มีค่าอยู่ในช่วง 0.55-0.65 eV และเกี่ยวข้องกับ V_{Zn} ต่อมาพบค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ เมื่อ $x=0.6$ เท่ากับ 0.251 eV อยู่ในระดับพลังงาน C ซึ่งจะพบในผลึกของสารประกอบ $CdZnTe$ ซึ่งระดับพลังงานนี้จะเกี่ยวข้องกับ V_{Zn} อีกระดับพลังงานหนึ่งที่พบคือ ระดับพลังงาน D มีค่าพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 0.368 eV เป็นกับดักโฮล ซึ่งเป็นพลังงานที่เกี่ยวข้องกับข้อบกพร่องเชิงซ้อนของ Te_{Cd}^- โดยจะเกิดขึ้นในขณะที่ทำการปลูกผลึก แต่ระดับพลังงานนี้มักจะถูกบดบังโดยระดับพลังงาน E ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน สุดท้ายฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ เมื่อ $x=1.0$ พบระดับพลังงาน C ที่มีค่าระดับพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 0.278 eV ซึ่งจะพบในผลึกของสารประกอบ $CdZnTe$ ซึ่งระดับพลังงานนี้จะเกี่ยวข้องกับ V_{Zn} ดังที่เคยกล่าวไปแล้วข้างต้น การปรากฏระดับพลังงานต่างๆของธาตุต่างๆในสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ นับว่าเป็นข้อยืนยันอย่างหนึ่งว่าเกิดการรวมตัวกันของสารกึ่งตัวนำ $CdTe$ และสารกึ่งตัวนำ $ZnTe$ ขึ้นจริง

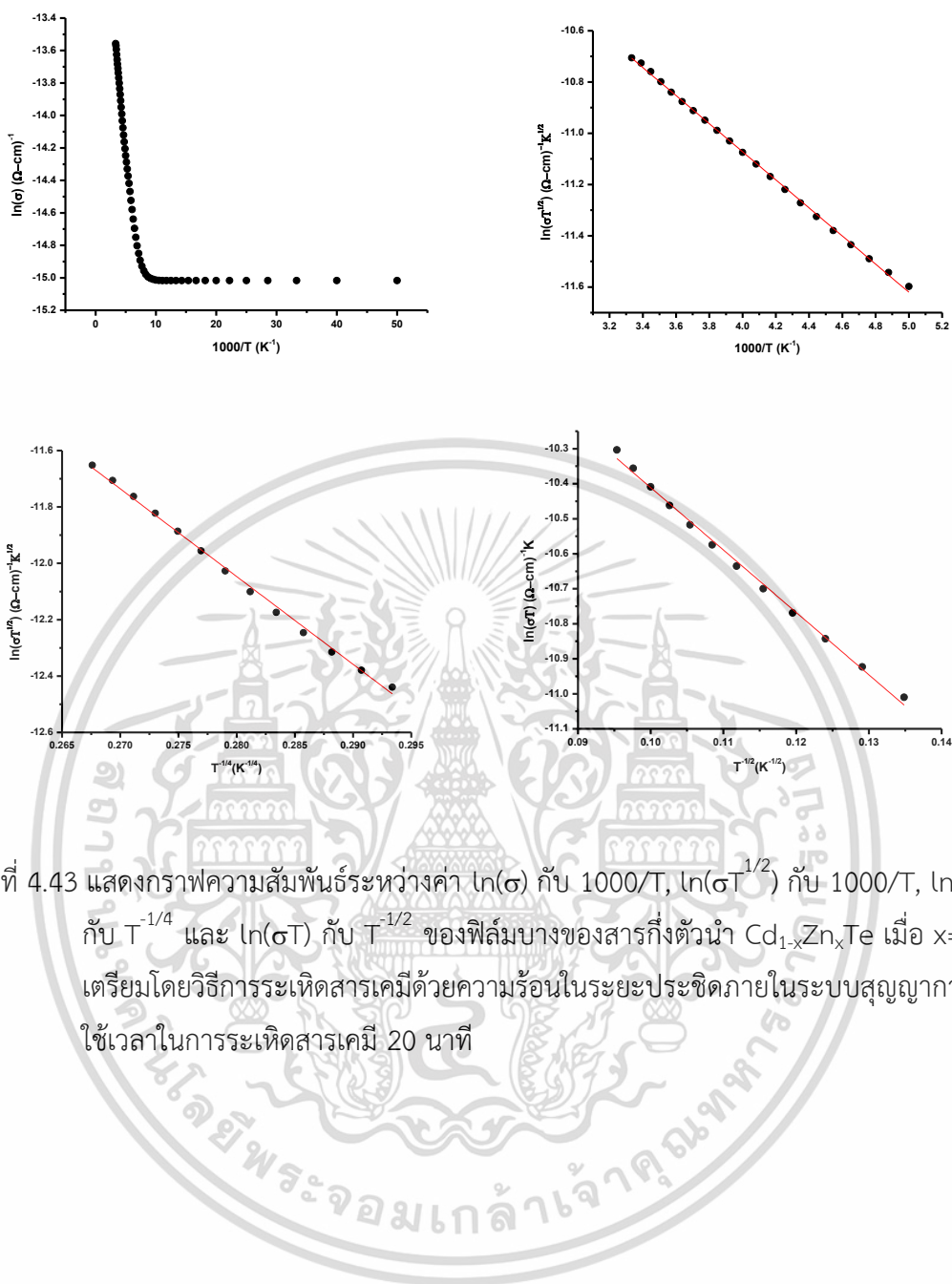
4.13 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ



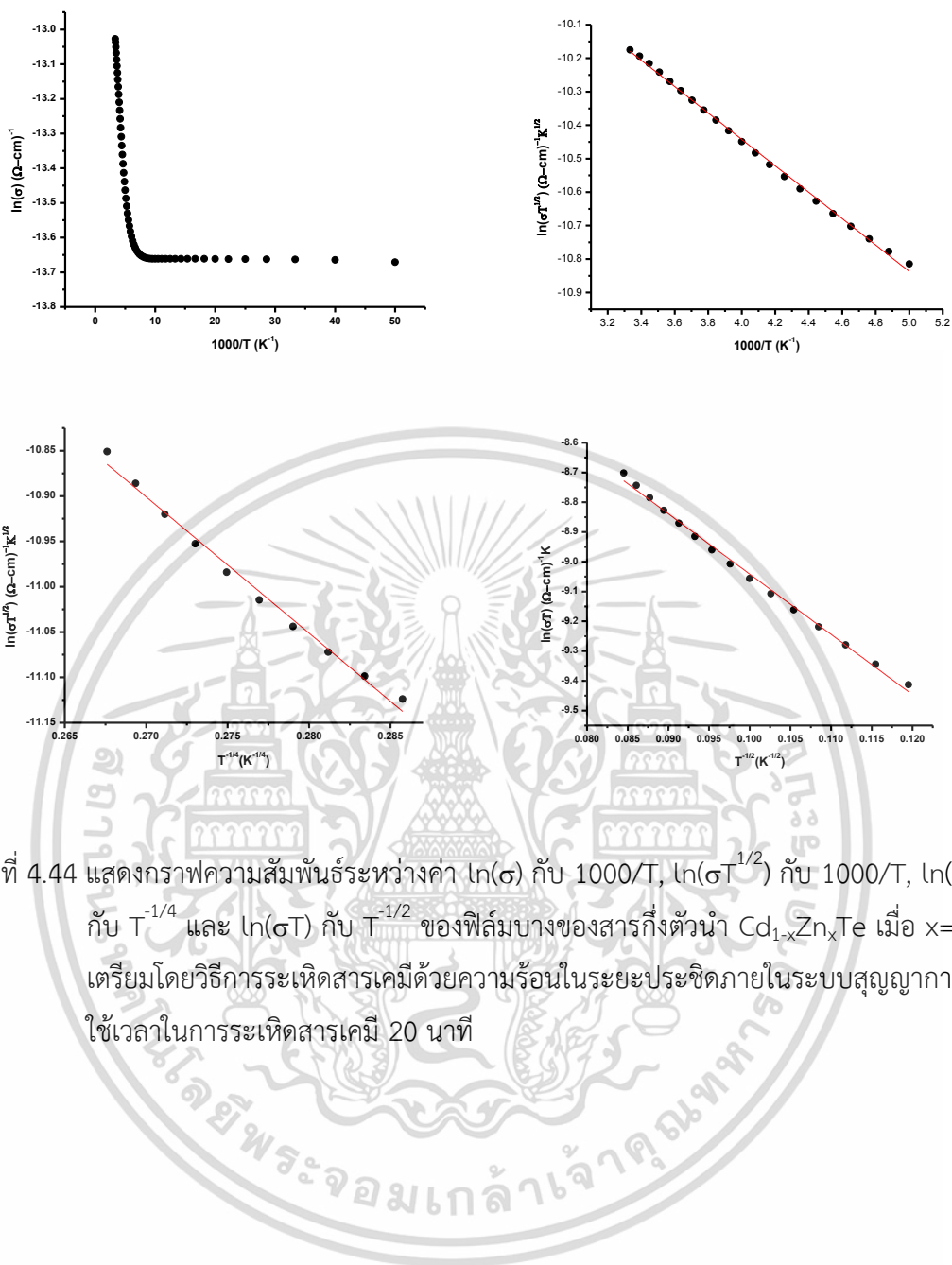
รูปที่ 4.41 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(\sigma)$ กับ $1000/T$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที



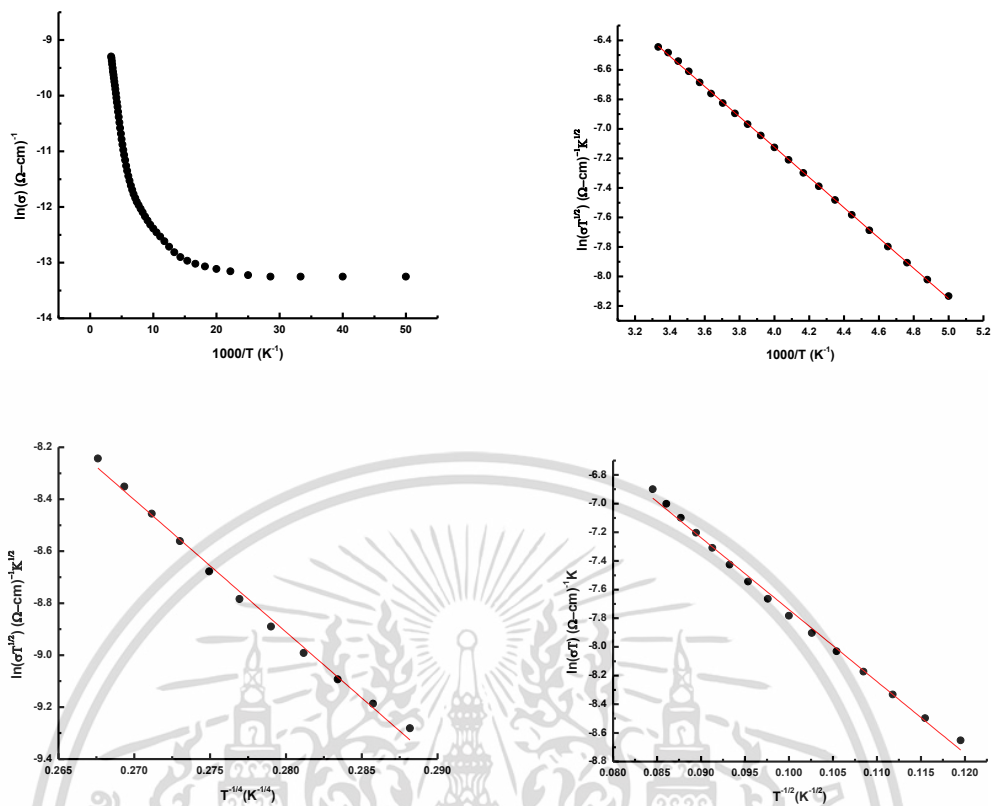
รูปที่ 4.42 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(\sigma)$ กับ $1000/T$, $\ln(\sigma^{1/2})$ กับ $1000/T$, $\ln(\sigma^{1/2})$ กับ $T^{-1/4}$ และ $\ln(\sigma T)$ กับ $T^{-1/2}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cd_{1-x}Zn_xTe เมื่อ $x=0.0$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที



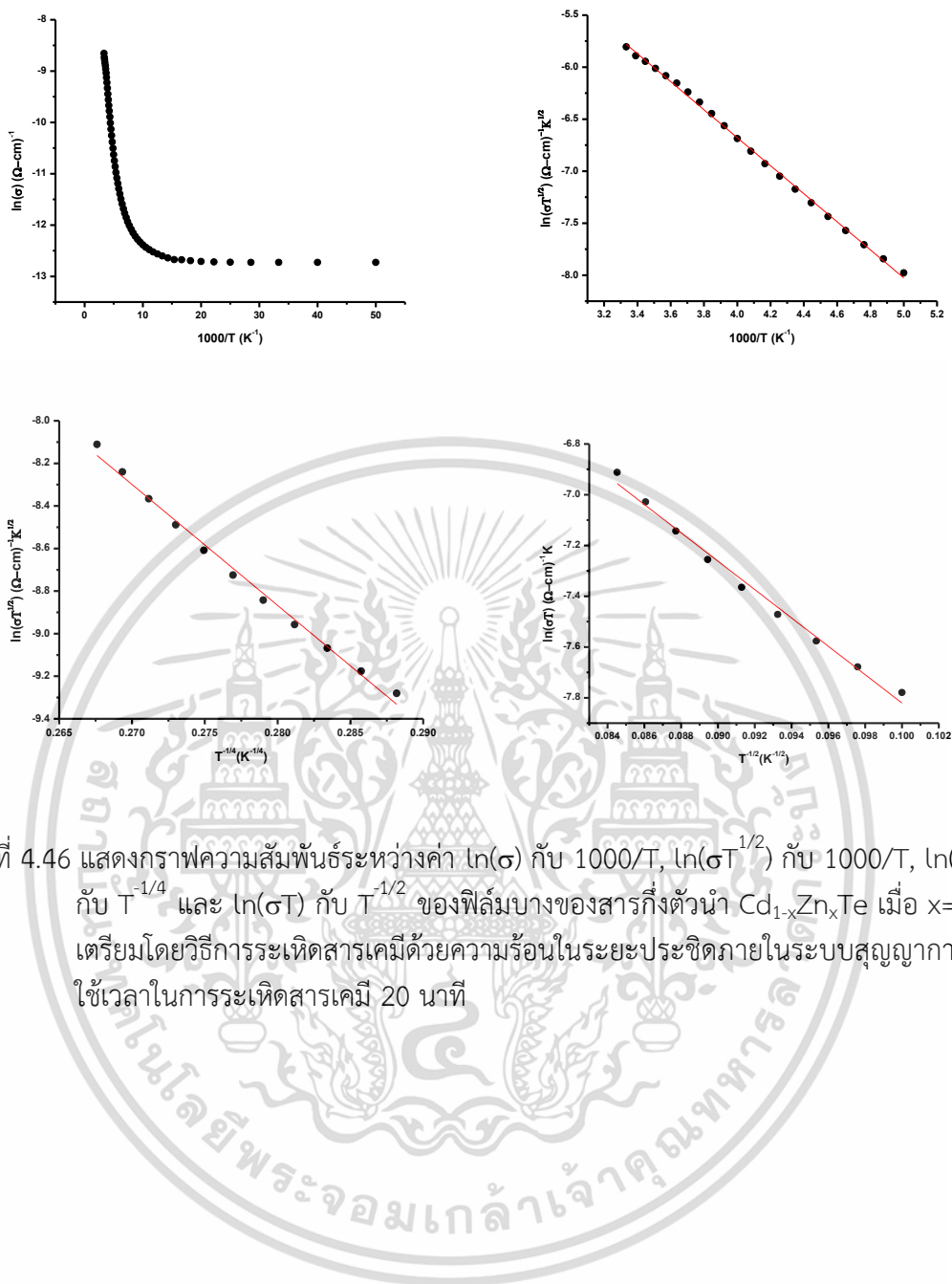
รูปที่ 4.43 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(\sigma)$ กับ $1000/T$, $\ln(\sigma T^{1/2})$ กับ $1000/T$, $\ln(\sigma T^{1/2})$ กับ $T^{-1/4}$ และ $\ln(\sigma)$ กับ $T^{-1/2}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ เมื่อ $x=0.2$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที



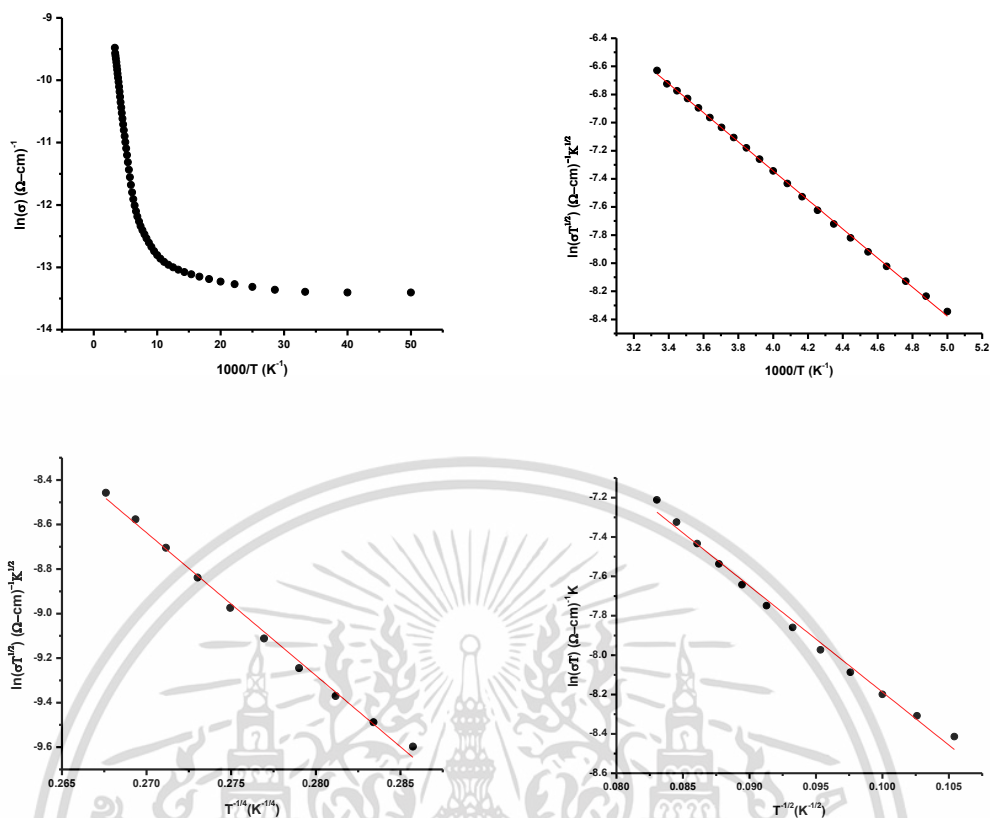
รูปที่ 4.44 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(\sigma)$ กับ $1000/T$, $\ln(\sigma T^{1/2})$ กับ $1000/T$, $\ln(\sigma T^{1/2})$ กับ $T^{-1/4}$ และ $\ln(\sigma T)$ กับ $T^{-1/2}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cd_{1-x}Zn_xTe เมื่อ $x=0.4$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที



รูปที่ 4.45 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(\sigma)$ กับ $1000/T$, $\ln(\sigma T^{1/2})$ กับ $1000/T$, $\ln(\sigma T^{1/2})$ กับ $T^{-1/4}$ และ $\ln(\sigma T)$ กับ $T^{-1/2}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ เมื่อ $x=0.6$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที



รูปที่ 4.46 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(\sigma)$ กับ $1000/T$, $\ln(\sigma T^{1/2})$ กับ $1000/T$, $\ln(\sigma T^{1/2})$ กับ $T^{-1/4}$ และ $\ln(\sigma T)$ กับ $T^{-1/2}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ เมื่อ $x=0.8$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที



รูปที่ 4.47 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(\sigma)$ กับ $1000/T$, $\ln(\sigma T^{1/2})$ กับ $1000/T$, $\ln(\sigma T^{1/4})$ กับ $T^{-1/4}$ และ $\ln(\sigma T)$ กับ $T^{-1/2}$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cd_{1-x}Zn_xTe เมื่อ x=1.0 ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที

ตารางที่ 4.11 แสดงค่าพารามิเตอร์ของกลไกการนำกระแสไฟฟ้าตามแบบจำลองของซีโตของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1.0$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที

Composition (x)	T (K)	E_g (eV)	ϵ_r	L (nm)	E_b (eV)	N_a (cm^{-3})	E_t (eV)	N_t (cm^{-2})	L_D (nm)
0.0	200-300	1.475	10.6	83.13	0.0448	3.04×10^{16}	0.693	2.53×10^{11}	0.203
0.2	200-300	1.506	10.9	36.29	0.0473	1.73×10^{17}	0.706	6.29×10^{11}	8.66
0.4	205-300	1.521	10.9	42.83	0.034	8.94×10^{16}	0.727	3.83×10^{11}	0.12
0.6	200-300	1.573	10.9	24.34	0.0885	7.21×10^{17}	0.698	1.75×10^{12}	4.25
0.8	200-300	1.586	10.9	55.56	0.1162	1.82×10^{17}	0.677	1.01×10^{12}	0.12
1.0	200-300	2.172	8.19	141.34	0.0892	1.62×10^{16}	0.997	2.29×10^{11}	0.25

ตารางที่ 4.12 แสดงค่าพารามิเตอร์ของกลไกการนำกระแสไฟฟ้าตามแบบจำลองการกระโดดระหว่างสถานะ พลังงานท้องถิ่นในระยะไมคองที (Mott-VRH) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ เมื่อ $x=1.0$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที

Composition (x)	T (K)	$\sigma_{0,Mott}$ (S/cm)	$T_{0,Mott}$ (K)	ξ_{Mott} (nm)	$N_0(E_F)$ ($cm^{-3} \cdot eV^{-1}$)	$R_{hop,Mott}$ (nm)	$\frac{R_{hop,Mott}}{\xi_{Mott}}$	$W_{hop,Mott}$ (eV)
0.0	135-195	6.79×10^{-3}	2.65×10^5	0.806	1.5×10^{21}	1.92	2.37	0.023
0.2	150-195	3.58×10^{-2}	9.39×10^6	0.806	4.24×10^{20}	2.65	3.28	0.0302
0.4	125-175	1.07×10^{-3}	5.1×10^4	0.806	7.8×10^{21}	1.25	3.28	0.016
0.6	145-195	205.69	6.68×10^6	0.806	5.95×10^{19}	4.26	5.28	0.052
0.8	145-195	8.77×10^{-4}	1.04×10^7	0.806	3.82×10^{19}	4.76	5.90	0.058
1.0	150-195	5.82×10^3	1.69×10^7	0.806	2.36×10^{19}	5.34	6.61	0.066

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

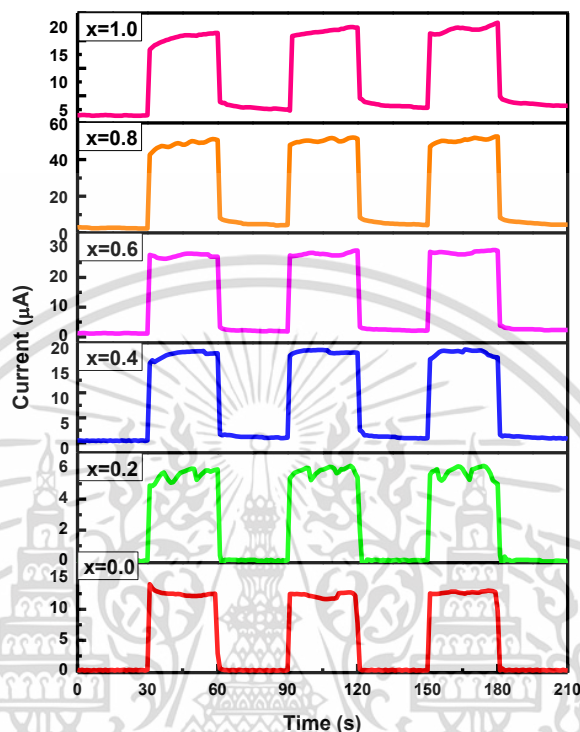
ตารางที่ 4.13 แสดงค่าพารามิเตอร์ของกลไกการนำกระแสไฟฟ้าตามแบบจำลองการกระโดดแบบเอฟโรส-ชลอปสกี ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ เมื่อ $x=1.0$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที

Composition (x)	T (K)	$\sigma_{0,ES}$ (S/cm)	$T_{0,ES}$ (K)	$R_{hop,ES}$ (nm)	ξ_{ES} (nm)	$\frac{R_{hop,ES}}{\xi_{ES}}$	$W_{hop,ES}$ (meV)	T_{c2} (K)	Δ_c (eV)
0.0	65-130	5.14×10^{-4}	3.78×10^2	73.06	146.52	0.4986	8.17	8.62	3.26×10^{-6}
0.2	70-145	1.79×10^{-4}	317.78	79.57	0.17	0.47	7.29	1.72	1.59×10^{-6}
0.4	60-120	8.98×10^{-4}	4.1×10^2	64.82	0.131	0.494	8.95	52.83	7.74×10^{-6}
0.6	70-130	6.58×10^{-2}	2.52×10^3	28.27	21.37	1.323	20.53	15.19	1.67×10^{-6}
0.8	100-140	0.1071	3.12×10^3	22.46	0.17	1.302	0.26	14.97	1.49×10^{-6}
1.0	90-145	0.061	2.91×10^3	30.98	0.25	1.257	0.25	8.01	1.13×10^{-6}



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.14 ผลการศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.48 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟโตกับเวลาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที

ตารางที่ 4.14 แสดงความไวในการตอบสนองต่อแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในสุญญากาศ เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที

Composition (x)	Photosensitivity (S)	
	$S = \left(\frac{\Delta R}{R_{dark}} \right) \times 100\%$	$S = \frac{R_{dark}}{R_{light}}$
0.0	98.37	61.486
0.2	98.86	87.729
0.4	95.15	20.630
0.6	92.33	13.032
0.8	90.90	10.100
1.0	82.11	5.590

ตารางที่ 4.15 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆของสภานำไฟฟ้าเชิงแสงตัวร้อนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0.8 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที ที่ได้จากการปรับผลการทดลองที่อุณหภูมิห้องให้เข้ากับฟังก์ชันมัลติเพิลเอ็กซ์โพเนนเชียล

Composition (x)	Decay Time (s)					
	1 st Term	2 nd Term	3 rd Term	4 th Term	5 th Term	6 th Term
0.8	$\tau_{d1}=7.90$ $A_1=0.334$	$\tau_{d2}=18.33$ $A_1=0.890$	$\tau_{d3}=35.06$ $A_1=0.874$	$\tau_{d4}=25.69$ $A_1=0.897$	$\tau_{d5}=66.62$ $A_1=0.456$	$\tau_{d6}=100.73$ $A_1=0.239$
1.0	$\tau_{d1}=11.33$ $A_1=0.846$	$\tau_{d2}=39.43$ $A_2=0.205$	$\tau_{d3}=54.92$ $A_3=0.830$	$\tau_{d4}=22.20$ $A_4=0.627$	$\tau_{d5}=117.93$ $A_5=0.915$	$\tau_{d6}=322.54$ $A_6=0.369$

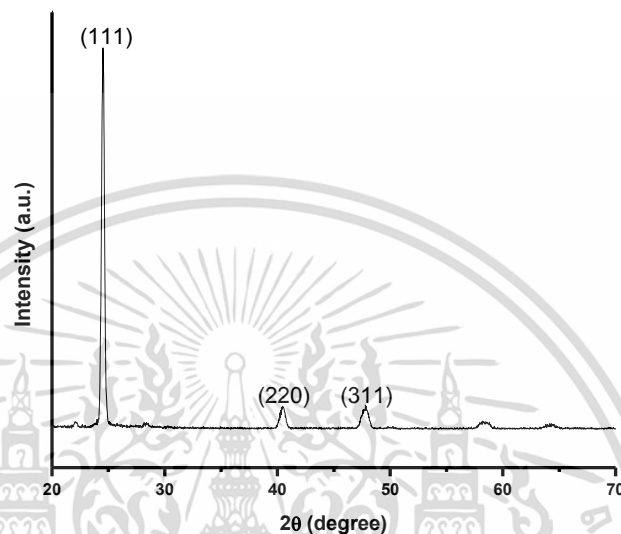
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Composition (x)	Decay Component					
	1 st Term	2 nd Term	3 rd Term	4 th Term	5 th Term	6 th Term
0.8	$I_1=8.41 \times 10^{-6} \text{ A}$ $N_{t1}=6.50 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$	$I_2=7.52 \times 10^{-6} \text{ A}$ $N_{t2}=5.80 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$	$I_3=6.70 \times 10^{-6} \text{ A}$ $N_{t3}=5.17 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$	$I_4=5.72 \times 10^{-6} \text{ A}$ $N_{t4}=4.41 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$	$I_5=5.28 \times 10^{-6} \text{ A}$ $N_{t5}=4.07 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$	$I_6=4.90 \times 10^{-6} \text{ A}$ $N_{t6}=3.78 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$
1.0	$I_1=4.56 \times 10^{-6} \text{ A}$ $N_{t1}=2.80 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$	$I_2=3.93 \times 10^{-6} \text{ A}$ $N_{t2}=2.41 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$	$I_3=3.64 \times 10^{-6} \text{ A}$ $N_{t3}=2.24 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$	$I_4=3.44 \times 10^{-6} \text{ A}$ $N_{t4}=2.11 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$	$I_5=3.30 \times 10^{-6} \text{ A}$ $N_{t5}=2.03 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$	$I_6=3.18 \times 10^{-6} \text{ A}$ $N_{t6}=1.96 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$

ตารางที่ 4.16 ความหนาแน่นของประจุชนิดต่างๆ ที่ได้จากการวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงต่อออร์ัน $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Te}$ ($0.8 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิด เมื่อใช้เวลาในการระเหิดสารเคมี 20 นาที ที่ได้จากการปรับผลการทดลองที่อุณหภูมิห้องให้เข้ากับฟังก์ชันมัลติเพิลเอ็กซ์โพเนนเชียล

4.15 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te

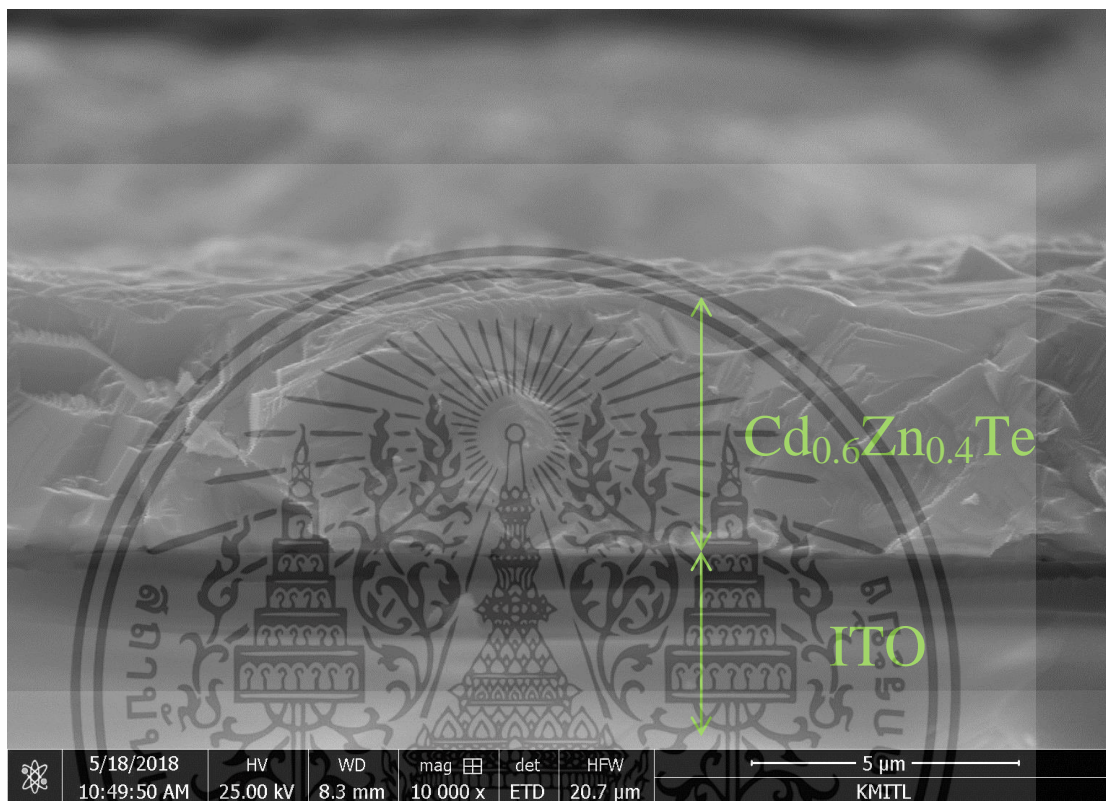
ผลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te พบว่าปรากฏพีคตรงกับระนาบ (111) ของโครงสร้างผลึกแบบคิวบิก แสดงดังรูปที่ 4.49



รูปที่ 4.49 แสดงผลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te

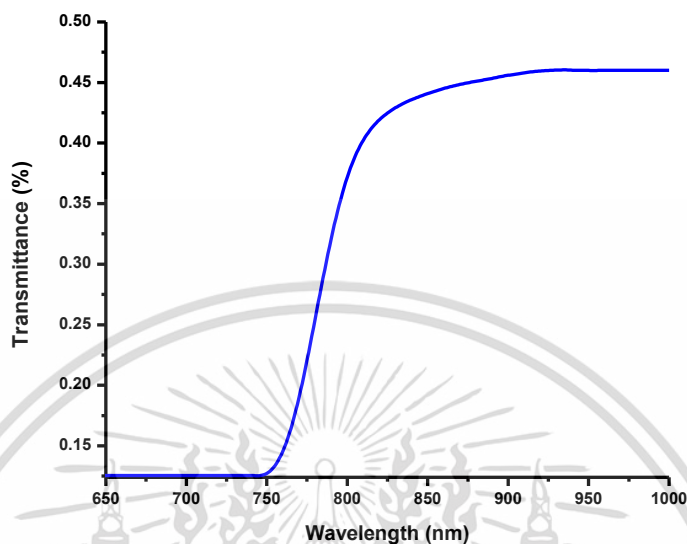
4.16 ผลการศึกษาภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/ $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Te}$

จากภาพถ่ายแบบ พบว่า ชั้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Te}$ มีความหนาประมาณ 5 ไมโครเมตร แสดงดังรูปที่ 4.50

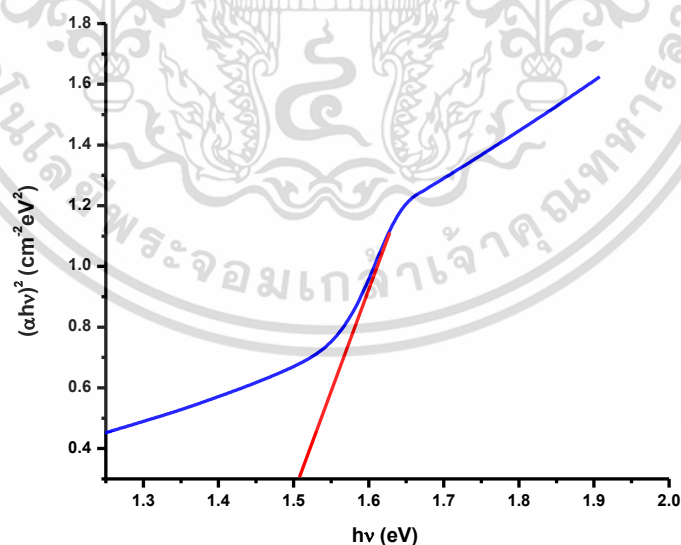


รูปที่ 4.50 แสดงภาพถ่าย SEM แบบตัดขวางของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/ $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Te}$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

4.17 ผลการศึกษาสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te



รูปที่ 4.51 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te



รูปที่ 4.52 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $(\alpha hv)^2$ กับ hv ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

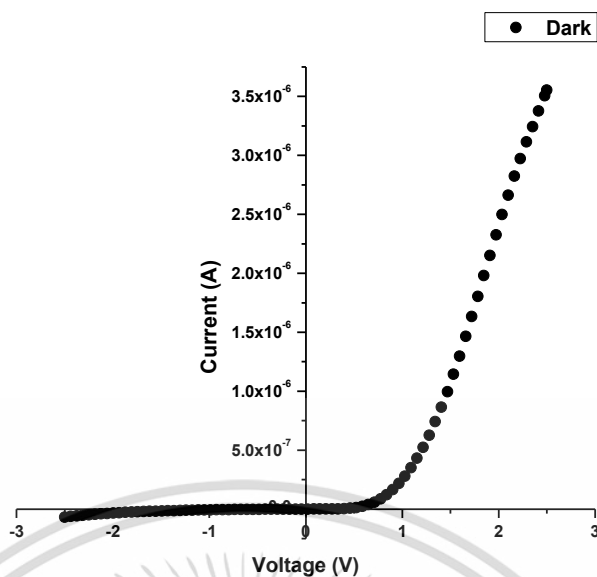
4.18 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ที่อุณหภูมิห้อง ที่ภายใต้การฉายแสงที่ค่าเข้มแสงค่าต่างๆ ตั้งแต่ช่วง 50 -100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 20-300 เคลวิน ตลอดจนการศึกษาค่าความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้ากับค่าแรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง เพื่อใช้คำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณรอยต่อ เป็นต้น

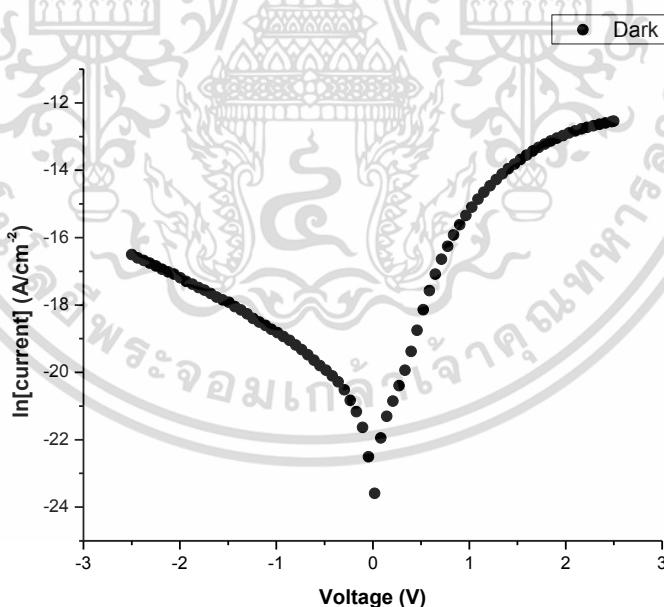
4.18.1 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้าในช่วง -2.5 ถึง 2.5 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ พบว่ามีการเรียงกระแสไฟฟ้าทางเดียวเหมือนไดโอดทั่วไปโดยมีค่าแรงดันไฟฟ้าซีดเริ่มอยู่ที่ 1.1 โวลต์

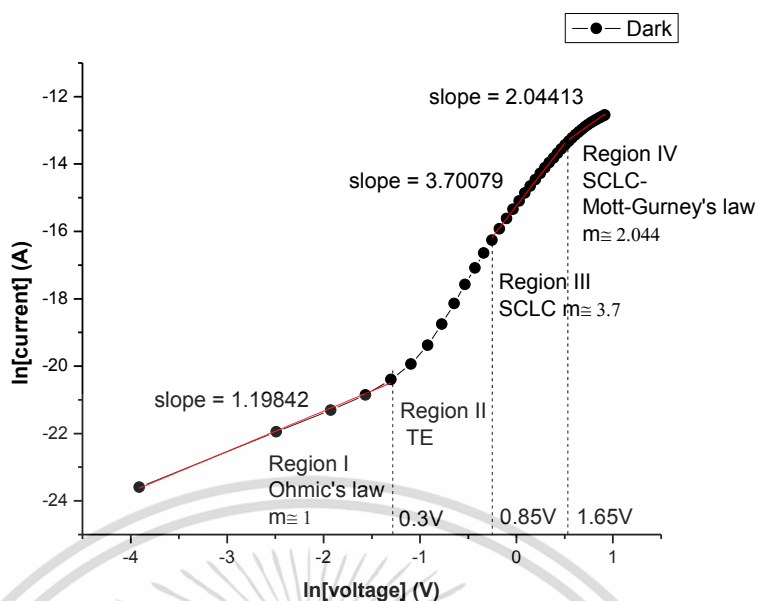
กลไกของกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ตรงบริเวณรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te ในช่วงแรงดัน -2.5 ถึง 2.5 โวลต์ เมื่อพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I$ กับ $\ln V$ ในรูปที่ 4.55 พบว่ากลไกการนำไฟฟ้าแบ่งออกเป็น 4 กลไก คือ บริเวณที่ 1 ในช่วงแรงดันน้อยกว่า 0.3 โวลต์ กลไกการนำไฟฟ้าจะเป็นไปตามกฎของโอห์ม บริเวณที่ 2 ในช่วงแรงดัน 0.3 ถึง 0.85 โวลต์ กลไกการนำไฟฟ้าชนิดเทอร์มิออนิกอิมมิสชัน บริเวณที่ 3 ในช่วงแรงดัน 0.85 ถึง 1.65 โวลต์ กลไกการนำกระแสเป็นแบบกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้างชนิดกักตักพาหะมีระดับพลังงานต่อเนื่องและมีการแจกแจงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล และบริเวณที่ 4 ในช่วงแรงดันมากกว่า 1.65 โวลต์ กลไกการนำกระแสเป็นแบบกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้างชนิด Mott-Gurney's law ตามลำดับ รูปที่ 4.56 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I$ กับ V ซึ่งใช้หาค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับ ค่าความสูงของกำแพงศักย์ และค่าแฟกเตอร์อุดมคติ รูปที่ 4.57 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $dV/d\ln I$ กับ I ซึ่งใช้หาค่าแฟกเตอร์ในอุดมคติและค่าความต้านทานอนุกรม ส่วนรูปที่ 4.58 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $H(I)$ กับ I และรูปที่ 4.59 แสดงกราฟความสัมพันธ์แสดงกราฟวิธีของนอร์ด ที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง $F(V)$ กับแรงดันไฟฟ้า ใช้หาค่าความสูงของกำแพงศักย์และค่าความต้านทานอนุกรม สำหรับค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับ ค่าแฟกเตอร์ในอุดมคติ ค่าความสูงของกำแพงศักย์ และค่าความต้านทานอนุกรมที่ได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมมิสชัน วิธีการของชวง และวิธีการของนอร์ด แสดงดังตารางที่ 4.17



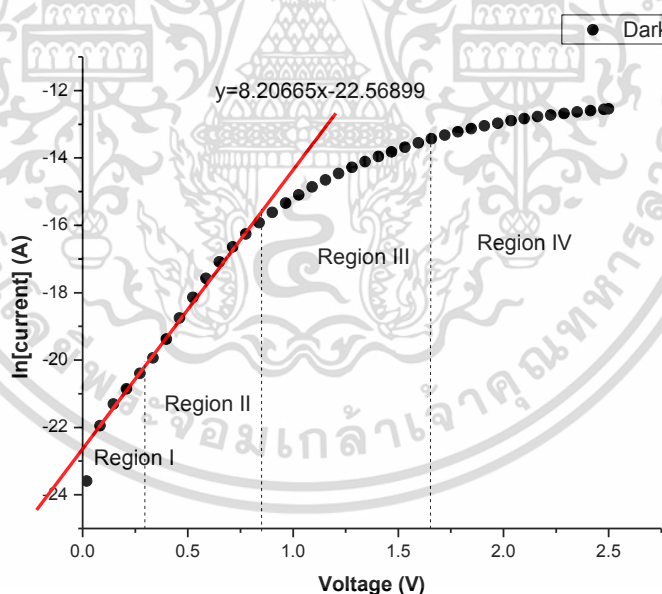
รูปที่ 4.53 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า (I) กับ แรงดันไฟฟ้า (V) ที่ช่วงแรงดันไฟฟ้า -2.5 ถึง 2.5 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.54 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความหนาแน่นกระแส (J) กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า (V) ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

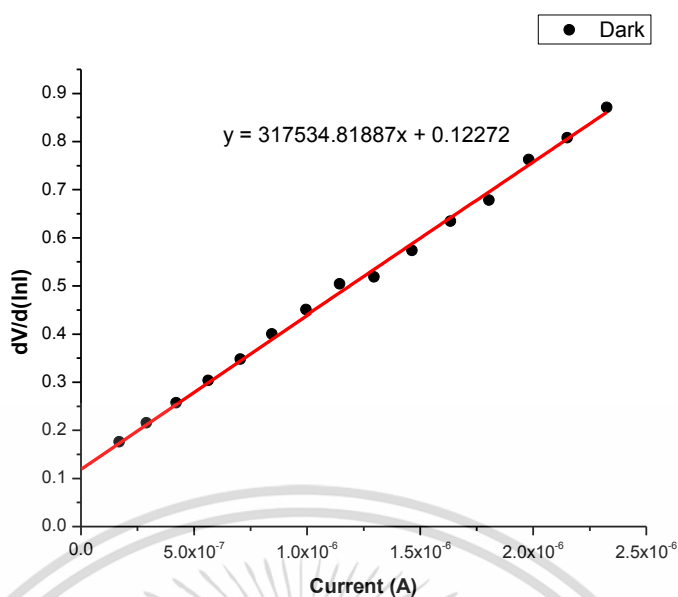


รูปที่ 4.55 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I$ กับ $\ln V$ ที่อุณหภูมิห้อง เพื่อใช้อธิบายกลไกการนำกระแสไฟฟ้าในแต่ละช่วงของค่าแรงดัน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/ $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Te}$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิดภายในระบบสุญญากาศ

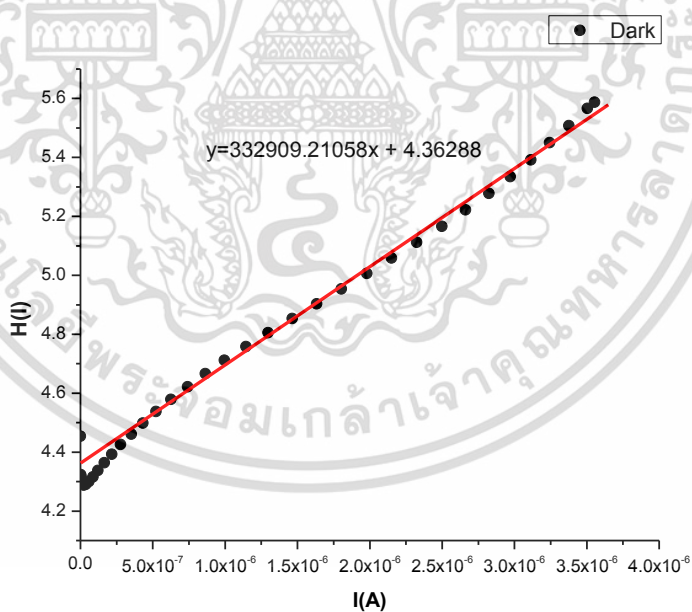


รูปที่ 4.56 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I$ กับ V ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/ $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Te}$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะเวลาประชิดภายในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

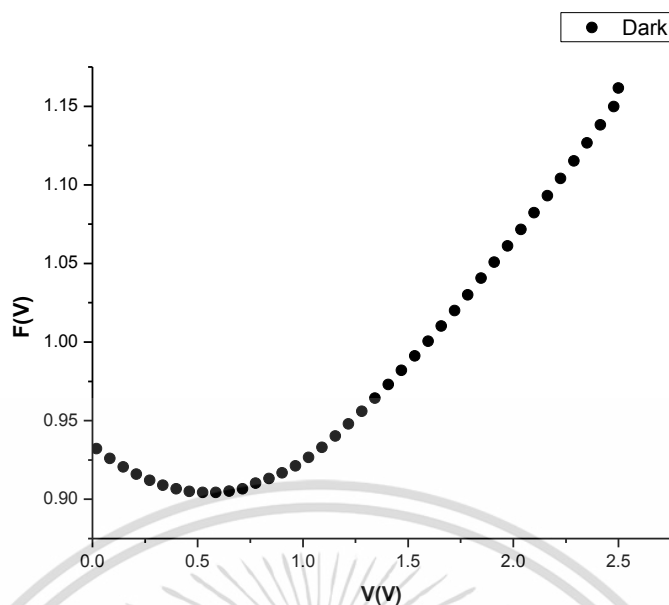


รูปที่ 4.57 แสดงกราฟวิธีของช่วงที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง $dV/d(\ln I)$ กับกระแสไฟฟ้า ขณะไม่มีการฉายแสง ที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/ $Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

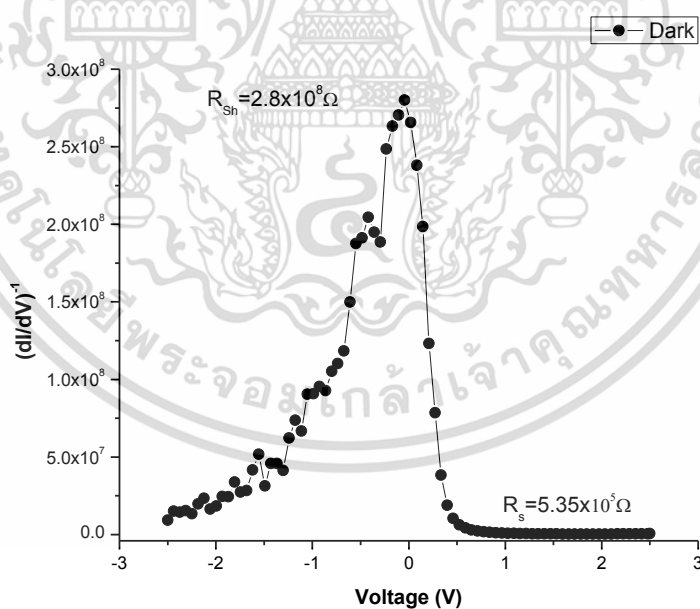


รูปที่ 4.58 แสดงกราฟวิธีของช่วงที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง $H(I)$ กับกระแสไฟฟ้า ขณะไม่มีการฉายแสง ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/ $Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.59 แสดงกราฟวิธีของนอร์ด ที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง $F(V)$ กับแรงดันไฟฟ้าช่วง -2.5 ถึง 2.5 โวลต์ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/ $Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.60 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $(dI/dV)^{-1}$ กับแรงดันไฟฟ้า ขณะไม่มีการฉายแสงที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/ $Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมของกระแส ($\ln I$) กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า (V) เพื่อใช้ในการคำนวณหา ค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ (I_s) และค่าแฟกเตอร์ในอุดมคติ (n) โดยอาศัยกราฟเส้นตรงช่วงที่มีการนำกระแสไฟฟ้าที่เป็นกลไกแบบเทอร์มิออนิกอิมิสชันที่พิจารณาจากช่วงของแรงดันไฟฟ้า จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าลอการิทึมของกระแส ($\ln I$) กับ ค่าลอการิทึมของแรงดัน ($\ln V$) ดังรูปที่ 4.56 ดังสมการ

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

เมื่อ I_s คือ ค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับมีค่าเท่ากับ

$$I_s = AA^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_{B0}}{kT}\right) - 1 \quad (4.2)$$

เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln I$ กับ V เพื่อหาค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับได้จากการลากเส้นตรงผ่านบริเวณกราฟที่เป็นกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันตัดแกน ค่า $\ln I$ โดยจุดตัดมีค่าเท่ากับ $\ln I_s$ และ มีค่าความชันของกราฟเท่ากับ $\frac{q}{nkT}$ ซึ่งสามารถนำมาคำนวณหาค่าแฟกเตอร์ในอุดมคติ (n) ได้จากสมการที่ (4.5) จะได้ค่าความสูงของกำแพงศักย์คือ

$$\phi_{B0} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{AA^* T^2}{I_s}\right) \quad (4.3)$$

ค่าความสูงกำแพงศักย์ (ϕ_B) ของสมการที่ (4.6) จะเป็นค่าในขณะแรงดันไบแอสเป็นศูนย์ที่อุณหภูมิใดๆ และ A^* เท่ากับ 126.96 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรต่อเคลวินยกกำลังสอง นอกจากนี้ยังสามารถที่จะหา ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ (n) ของไดโอดที่ขึ้นกับแรงดันไบแอสโดยอาศัยความสัมพันธ์ดังนี้

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

ในความเป็นจริงแล้วไดโอดที่มีรอยต่อแบบบิวริวิพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te มักจะมีความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม (R_s) เกิดขึ้นเสมอซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากค่าความต้านทานไฟฟ้าของเนื้อสารและที่บริเวณขั้วไฟฟ้าด้านหลัง จึงต้องทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าในช่วงแรงดันไฟฟ้ามีค่าสูงๆ (region III) เพื่อให้ความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมนั้นแสดงผลออกมา ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบบิวริวิพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te ที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมมาเกี่ยวข้องจะเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เมื่อ ค่ากระแสไฟฟ้าอิมิตัวย้อนกลับ คือ

$$I_s = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_{B0}}{kT}\right) \quad (4.6)$$

อาจเขียนสมการที่ (4.8) อีกรูปแบบหนึ่งได้เป็น

$$I = I_s \left\{ \exp\frac{q}{nkT}(V - IR_s) \left[1 - \exp\left(-\frac{qV}{kT}\right) \right] \right\} \quad (4.7)$$

วิธีการหาค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมของวง (Cheung's Method) พิจารณาในช่วงแรงดันไบแอสไปข้างหน้า โดยการแทนสมการที่ (4.3) ลงในสมการที่ (4.2) แล้วจะได้ว่า

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

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

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

ซึ่งจะสอดคล้องกับกราฟเส้นตรง จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $dV/d\ln I$ กับ ค่า I ดังรูปที่ 4.47 โดยค่าความชันของกราฟนั้นคือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมของวงจร (R_s) และจุดตัดแกนของค่า $dV/d\ln I$ มีค่าเท่ากับ nkT/q

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

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

แล้วสมการที่ (4.10) จะกลายเป็น

$$H(I) = n\phi_B - IR_s \quad (4.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการคำนวณค่า $H(I)$ จากข้อมูลของ ค่ากระแสไฟฟ้า และ แรงดันไฟฟ้า แล้วนำมาเขียนกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $H(I)$ กับ ค่า I ก็จะได้ดังรูปที่ 4.55 โดยจะคำนวณหาค่าความสูงของกำแพง ศักย์ได้จากจุดตัดแกนตั้งของค่า $(n\phi_B)$ ของกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าวแล้วนอกจากนี้ความชันของ กราฟที่เขียนขึ้นในรูปของฟังก์ชันของค่า $H(I)$ นั่นก็คือค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมเช่นเดียวกับ ความสัมพันธ์ในสมการที่ (4.6) ซึ่งจะส่งผลให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกัน

กลไกการนำไฟฟ้าชนิดกระแสไฟฟ้าถูกจำกัดโดยประจุค้าง (SCLC) มักจะเขียนความสัมพันธ์ ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ดังนี้คือ

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

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

เมื่อ m คือ ค่าความชันของกราฟ ถ้า m มีค่าเท่ากับ 1.5 กลไกการนำไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดย ประจุค้างจะเป็นไปตามกฎของ ไชด์-แลงมัวร์ (Child-Langmuir's law) แต่ถ้า m เท่ากับ 2 จะ เป็นไปตามกฎของมอตต์-เกอร์นีย์ (Mott-Gurney's law) แต่ถ้า $m > 2$ จะหมายถึงว่ากับดักพาหะมี ระดับพลังงานต่อเนื่องและมีการแจกแจงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล ซึ่งจากผลการทดลองที่แรงดันต่ำกว่า 0.3 โวลต์ ความชัน m มีค่าเท่ากับ 1.198 ส่วนแรงดันสูงกว่า 1.65 โวลต์ ความชันมีค่าเท่ากับ 2.044 แสดงว่าในเนื้อสาร $p\text{-Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Te}$ มีกับดักพาหะเพียงระดับเดียว

จากรูปที่ 4.53 จุดตัดแกน y ; $\ln I_s = -22.56899$

$$I_s = 1.58 \times 10^{-10}$$

สามารถหาค่า I_s ได้ ดังนี้ $\phi_B = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{AA^*T^2}{I_s} \right)$

$$\text{แทนค่า จะได้ } \phi_B = \frac{1.38 \times 10^{-23} \times 300}{1.6 \times 10^{-19}} \ln \left(\frac{\pi \times 0.1^2 \times 120 \times 1.058 \times 300^2}{1.58 \times 10^{-10}} \right)$$

$$\phi_B = 0.915 \text{ eV}$$

$$\text{Slope} = 8.20665; \quad n = \frac{q}{kT} \left(\frac{dV}{d \ln I} \right)$$

$$\text{แทนค่า จะได้ } n = \frac{1.6 \times 10^{-19}}{1.38 \times 10^{-23} \times 300} \left(\frac{1}{8.20665} \right)$$

$$n = 4.7093$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.54 แสดงกราฟความสัมพันธ์ $\frac{dV}{d(\ln I)} - I$

$$\text{จุดตัดแกน } y; \frac{nkT}{q} = 0.12272$$

$$n = \frac{q}{kT} (0.12272)$$

$$n = \frac{1.6 \times 10^{-19}}{1.38 \times 10^{-23} \times 300} (0.12272)$$

$$n = 4.743$$

จากรูปที่ 4.55 กราฟความสัมพันธ์ $H(I) - I$

$$\text{จุดตัดแกน } y; n\phi_B = 4.36288$$

$$n = \frac{1.6 \times 10^{-19}}{1.38 \times 10^{-23} \times 300} \left(\frac{1}{8.20665} \right)$$

$$\phi_B = \frac{4.36288}{\frac{1.6 \times 10^{-19}}{1.38 \times 10^{-23} \times 300} \left(\frac{1}{8.20665} \right)} = 0.926$$

จากรูปที่ 4.56 จากกราฟความสัมพันธ์ $F(V) = \frac{V}{\gamma} - \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I(V)}{AA^*T^2} \right)$ สามารถคำนวณหา ϕ_B ได้

$$\text{จากสมการ } \phi_B = F(V_{\min}) + \frac{V_{\min}}{\gamma} - \frac{kT}{q}$$

$$\phi_B = 0.90 + \frac{(0.59)}{5} - \frac{1.38 \times 10^{-23} \times 300}{1.6 \times 10^{-19}}$$

$$\phi_B = 0.992$$

จากสมการ $F(V_{\min}) = \frac{V_{\min}}{\gamma} - \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I(V_{\min})}{AA^*T^2} \right)$ สามารถคำนวณหา $I(V_{\min})$ ได้ดังนี้

$$0.90 = \frac{0.59}{5} - \frac{1.38 \times 10^{-23} \times 300}{1.6 \times 10^{-19}} \ln \left(\frac{I(V_{\min})}{\pi \times 0.1^2 \times 120 \times 1.058 \times 300^2} \right)$$

$$0.90 = 0.118 - 0.025875 \ln \left(\frac{I(V_{\min})}{\pi \times 0.1^2 \times 120 \times 1.058 \times 300^2} \right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$0.90 - 0.118 = -0.025875 \ln \left(\frac{I(V_{\min})}{\pi \times 0.1^2 \times 120 \times 1.058 \times 300^2} \right)$$

$$0.782 = -0.025875 \ln \left(\frac{I(V_{\min})}{\pi \times 0.1^2 \times 120 \times 1.058 \times 300^2} \right)$$

$$\frac{0.782}{-0.025875} = \ln \left(\frac{I(V_{\min})}{\pi \times 0.1^2 \times 120 \times 1.058 \times 300^2} \right)$$

$$-30.22 = \ln \left(\frac{I(V_{\min})}{\pi \times 0.1^2 \times 120 \times 1.058 \times 300^2} \right)$$

$$e^{-30.22} = \frac{I(V_{\min})}{\pi \times 0.1^2 \times 120 \times 1.058 \times 300^2}$$

$$I(V_{\min}) = e^{-30.22} \times \pi \times 0.1^2 \times 120 \times 1.058 \times 300^2$$

$$I(V_{\min}) = 2.695 \times 10^{-8} \text{ A}$$

จากสมการ $R_s = \frac{(r-n) kT}{I(V_{\min}) - q}$ สามารถคำนวณหา R_s ได้ดังนี้

$$R_s = \frac{(5 - 4.71) \cdot 1.38 \times 10^{-23} \times 300}{2.695 \times 10^{-8} - 1.6 \times 10^{-19}}$$

$$R_s = 2.78 \times 10^5 \Omega$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

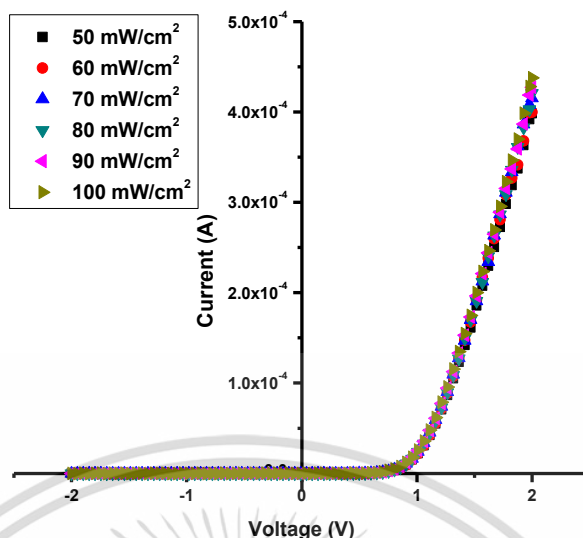
ตารางที่ 4.17 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ (I_s) ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ (n) ค่าความสูงของกำแพงศักย์ (Φ_B) และค่าความต้านทานอนุกรม (R_s) ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/ $Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ ขณะไม่มีการฉายแสง ที่อุณหภูมิห้อง

Saturation Current I_s (A)	Ideality Factor, n		Barrier Height, Φ_B (eV)			Series Resistance, R_s (k Ω)		
	TE	Cheung	TE	Cheung	Norde	Cheung		Norde
	I-V	dV/d(lnI)-I	I-V	H(I)-I	F(V)-V	H(I)-I	dV/d(lnI)-I	F(V)-V
1.58×10^{-10}	4.709	4.743	0.915	0.926	0.992	3.33×10^5	3.18×10^5	2.78×10^5

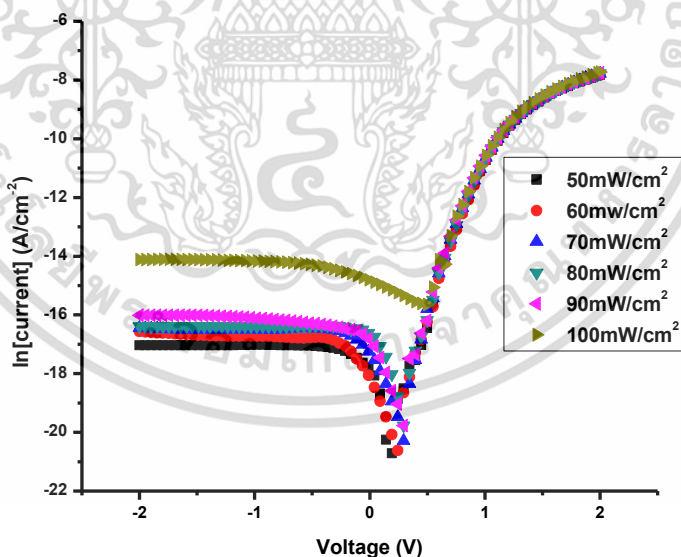
4.18.2 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า กับค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่ภายใต้การฉายแสงที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ ในช่วงความเข้มแสง 50 - 100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้าในช่วง -2.0 ถึง 2.0 โวลต์ เมื่อวัดภายใต้การฉายแสงที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ ในช่วง 50-100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ พบว่ามีการเรียงกระแสไฟฟ้าทางเดียวเหมือนไดโอดทั่วไปโดยมีค่าแรงดันไฟฟ้าขีดเริ่มอยู่ที่ 1.0 โวลต์

กลไกของกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ตรงบริเวณรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te ในช่วงแรงดัน -2.0 ถึง 2.0 โวลต์ เมื่อพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I$ กับ $\ln V$ ในรูปที่ 4.63 พบว่ากลไกการนำไฟฟ้าแบ่งออกเป็น 3 กลไก คือ บริเวณที่ 1 ในช่วงแรงดันน้อยกว่า 1.2 โวลต์ กลไกการนำไฟฟ้าชนิดเทอร์มิออนิกอิมิสชัน บริเวณที่ 2 ในช่วงแรงดัน 1.2 ถึง 1.7 โวลต์ กลไกการนำกระแสเป็นแบบกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้างชนิดกักพาหะมีระดับพลังงานต่อเนื่องและมีการแจกแจงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล และบริเวณที่ 3 ในช่วงแรงดันมากกว่า 1.7 โวลต์ กลไกการนำกระแสเป็นแบบกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้างชนิด Mott-Gurney's law ตามลำดับ รูปที่ 4.64 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I$ กับ V ซึ่งใช้หาค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับ ค่าความสูงของกำแพงศักย์ และค่าแฟกเตอร์ในอุดมคติ รูปที่ 4.65 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $dV/d\ln I$ กับ I ซึ่งใช้หาค่าแฟกเตอร์ในอุดมคติและค่าความต้านทานอนุกรม ส่วนรูปที่ 4.66 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $H(I)$ กับ I และรูปที่ 4.67 แสดงกราฟความสัมพันธ์แสดงกราฟวิธีของนอร์ด ที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง $F(V)$ กับแรงดันไฟฟ้า ใช้หาค่าความสูงของกำแพงศักย์และค่าความต้านทานอนุกรม สำหรับค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับ ค่าแฟกเตอร์ในอุดมคติ ค่าความสูงของกำแพงศักย์ และค่าความต้านทานอนุกรมที่ได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน วิธีการของชวง และวิธีการของนอร์ด แสดงดังตารางที่ 4.20

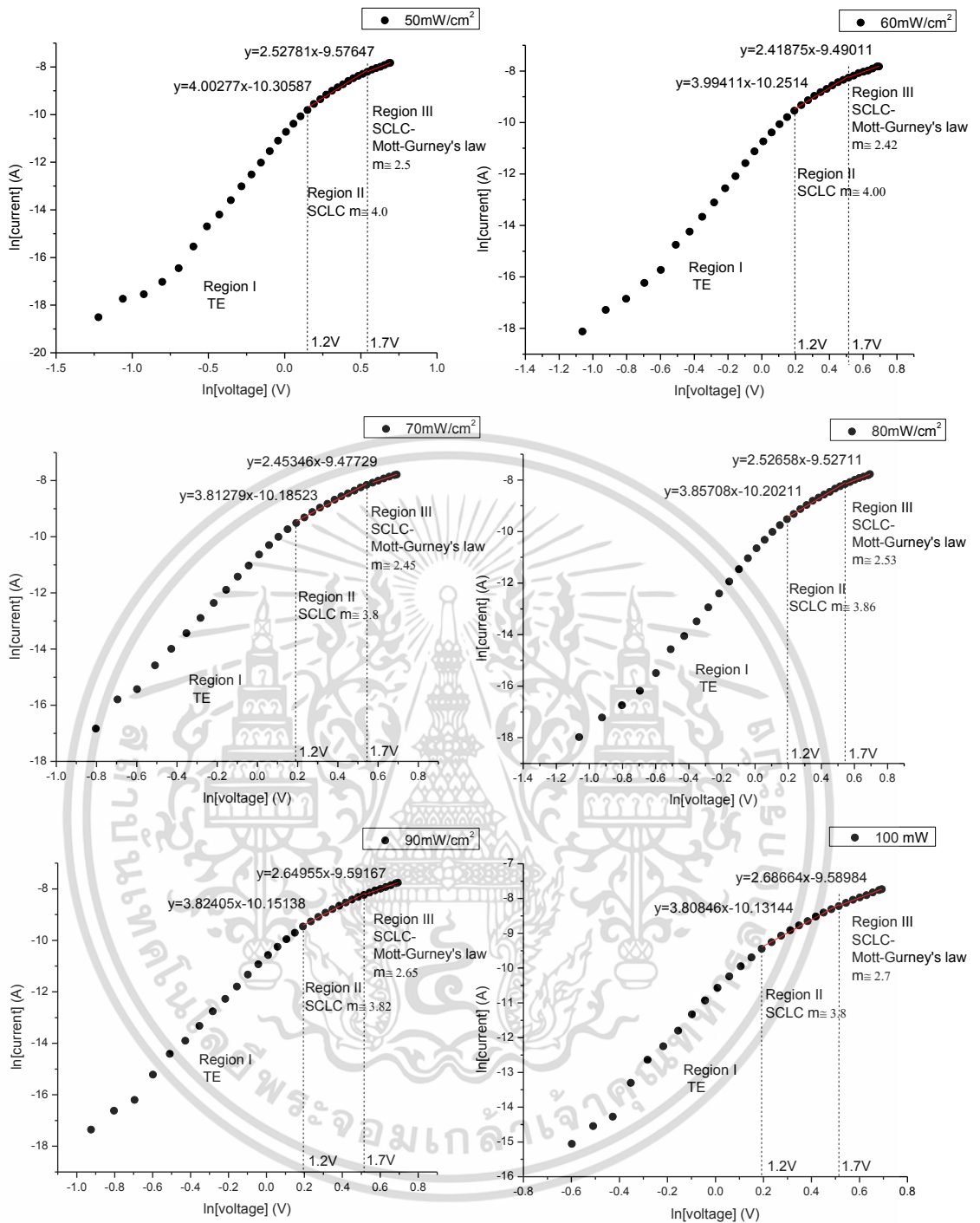


รูปที่ 4.61 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า (I) กับ แรงดันไฟฟ้า (V) ที่ช่วง แรงดันไฟฟ้า -2.0 ถึง 2.0 โวลต์ เมื่อวัดภายใต้การฉายแสงที่มีความเข้มแสงค่าต่างๆ ในช่วง 50-100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบาง ของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนใน ระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

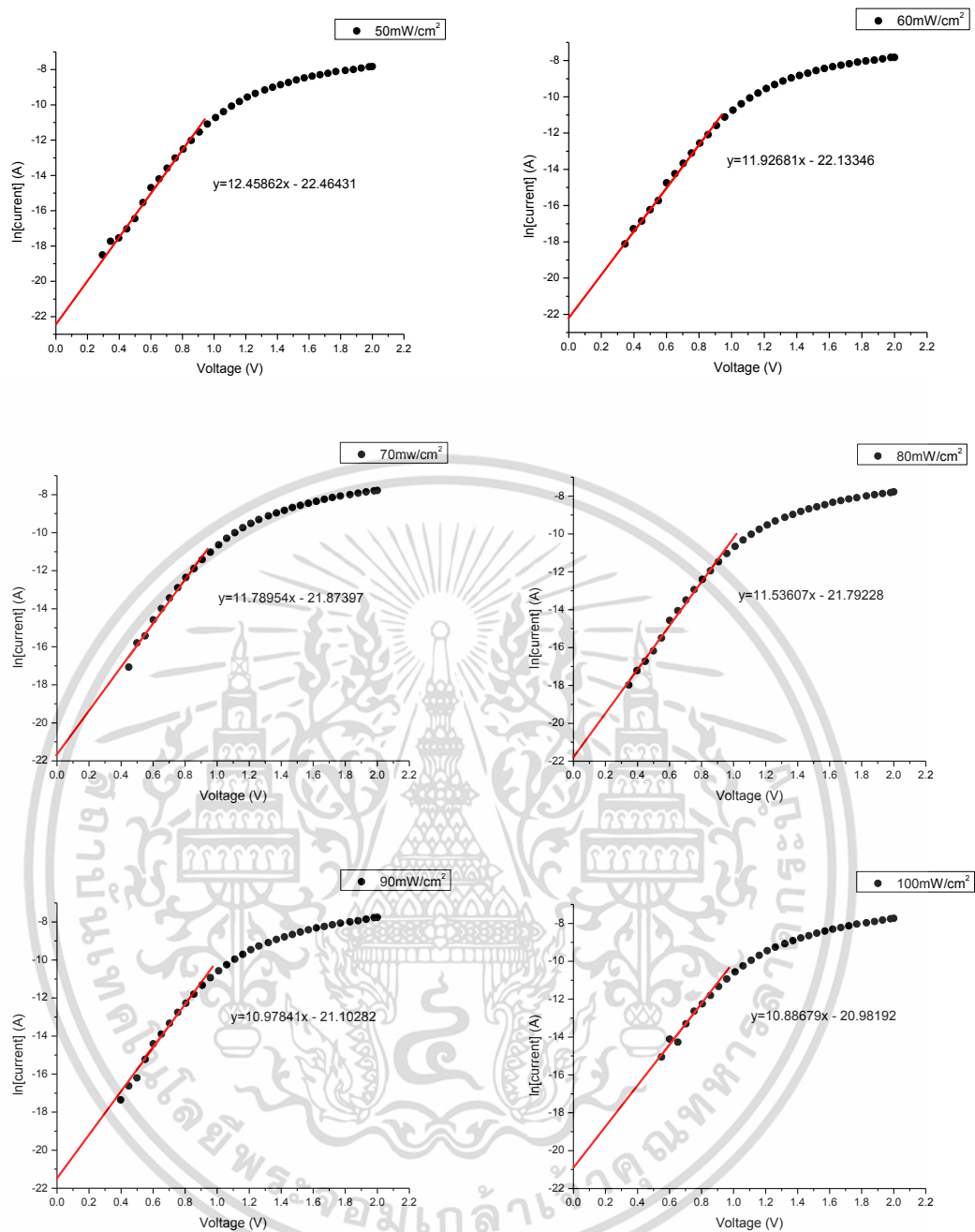


รูปที่ 4.62 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความหนาแน่นกระแส (J) กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า (V) ที่ ภายใต้การฉายแสงที่มีความเข้มแสงค่าต่างๆ ในช่วง 50-100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te ที่ เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.63 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I$ กับ $\ln V$ ที่ภายใต้การฉายแสงที่มีความเข้มค่าต่างๆ ตั้งแต่ช่วง 50-100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร เพื่อใช้อธิบายกลไกการนำกระแสไฟฟ้าในแต่ละช่วงของค่าแรงดัน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{ITO}/\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Te}$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.64 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I$ กับ V ที่ภายใต้การฉายแสงที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ ในช่วง 50-100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{ITO}/\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Te}$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อน ในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

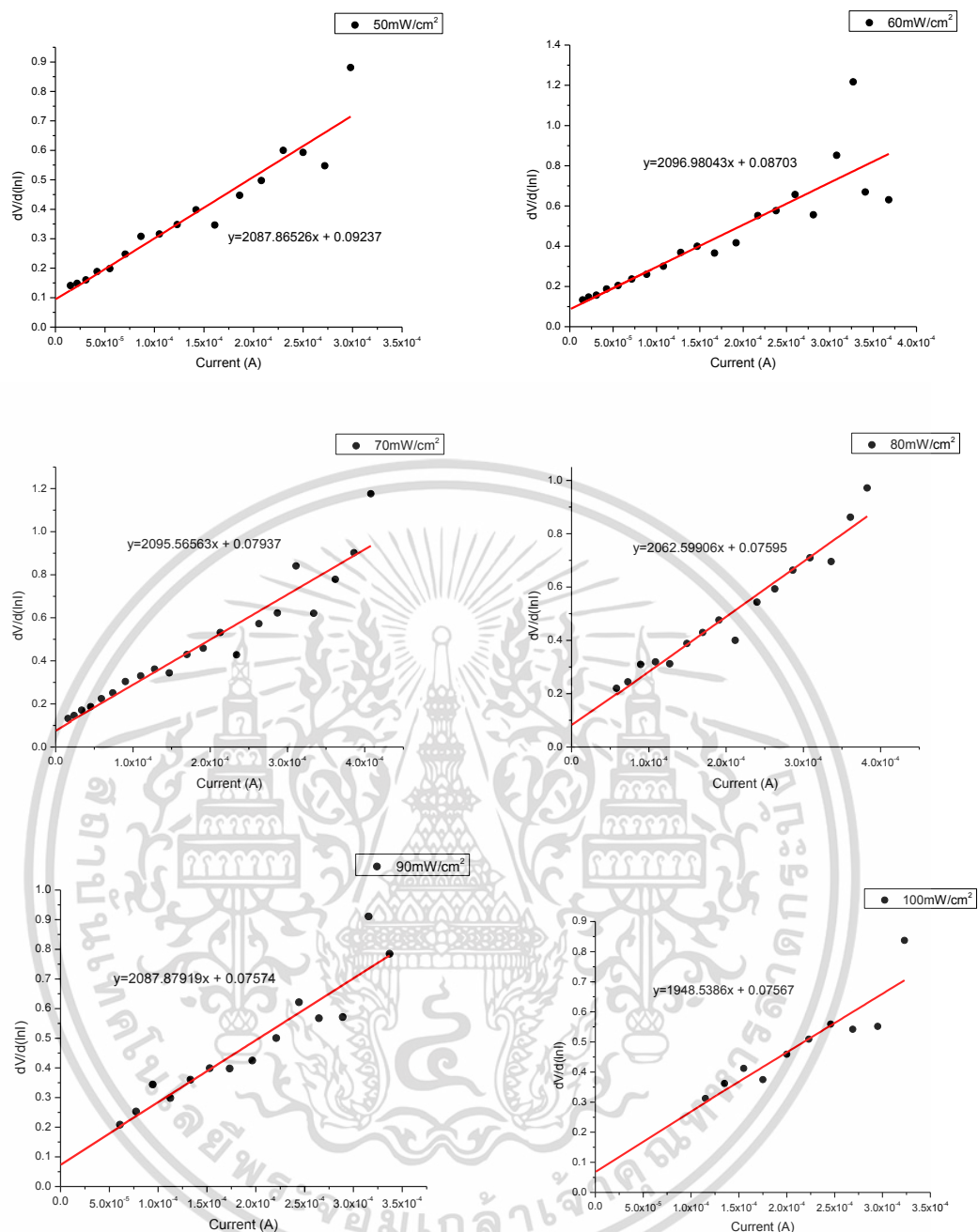
ตารางที่ 4.18 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ (I_s) ค่าแฟกเตอร์อุณหคณิต (n) ค่าความสูงของกำแพงศักย์ (Φ_B) และค่าความต้านทานอนุกรม (R_s) ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ ภายใต้การฉายแสงที่มีความเข้มแสงค่าต่างๆ ในช่วง 50-100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

Illumination Intensity (mW/cm ²)	Thermionic Emission (TE)		
	I_s (A)	n	Φ_{BO} (eV)
50	2.94×10^{-10}	3.330	0.899
60	2.92×10^{-10}	3.325	0.899
70	3.59×10^{-10}	3.288	0.894
80	2.98×10^{-10}	3.275	0.899
90	3.03×10^{-10}	3.227	0.898
100	1.33×10^{-10}	2.925	0.919

ตารางที่ 4.19 แสดงค่ากระแสลัดวงจร และ แรงดันวงจรเปิด ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ ภายใต้การฉายแสงที่มีความเข้มแสงค่าต่างๆ ในช่วง 50-100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ที่อุณหภูมิห้อง

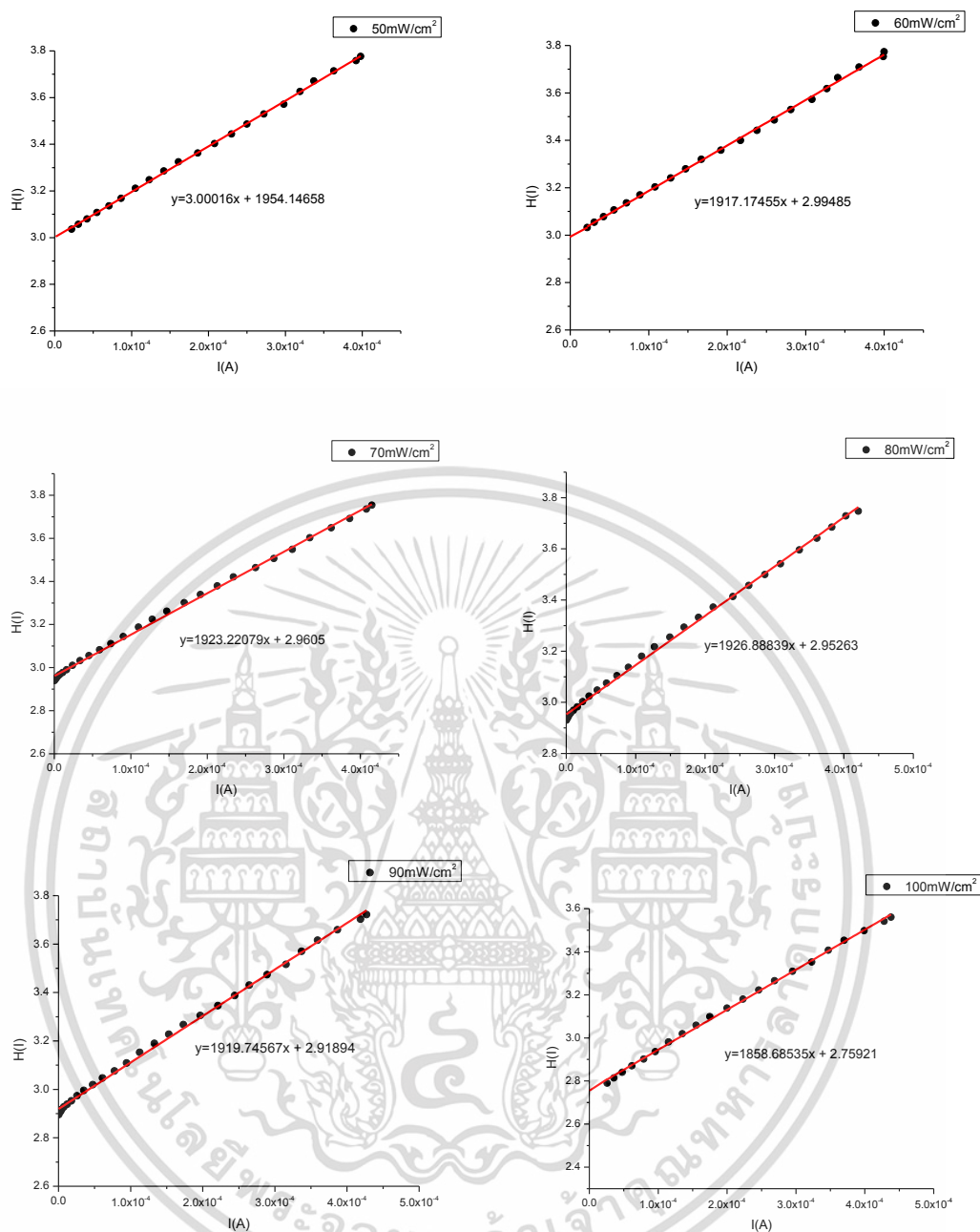
Illumination Intensity (mW/cm ²)	I_{sc} (A)	V_{oc} (V)
50	1.34×10^{-8}	0.193
60	1.72×10^{-8}	0.244
70	3.07×10^{-8}	0.295
80	4.75×10^{-8}	0.295
90	5.97×10^{-8}	0.295
100	3.70×10^{-7}	0.499

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



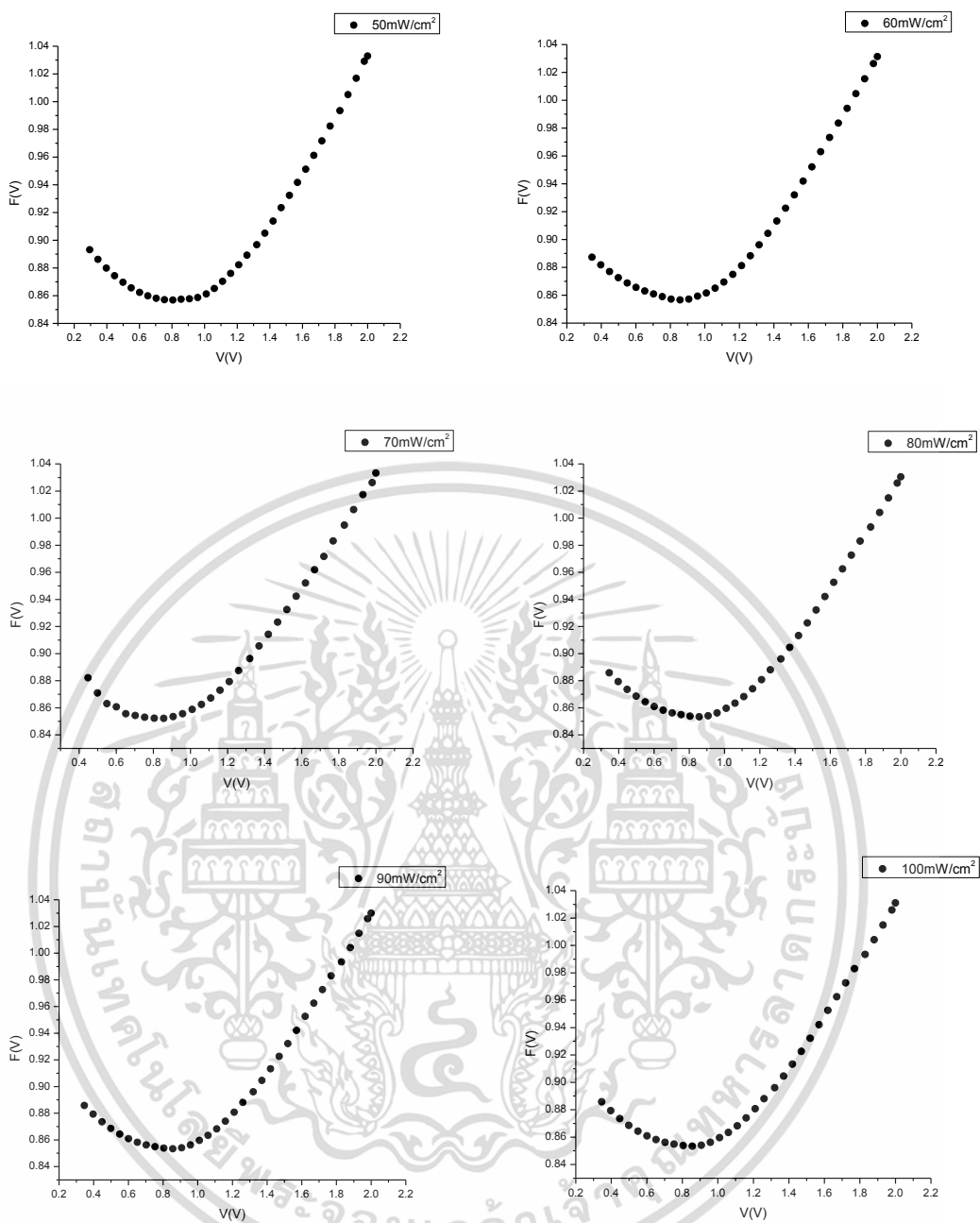
รูปที่ 4.65 แสดงกราฟวิธีของช่วงที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง $dV/d(\ln I)$ กับกระแสไฟฟ้า ที่ภายใต้ การฉายแสงที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ ในช่วง 50-100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ของ ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te ที่เตรียม โดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.66 แสดงกราฟวิธีของช่วงที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง $H(I)$ กับกระแสไฟฟ้า ที่ภายใต้การฉายแสงที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ ในช่วง 50-100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.67 แสดงกราฟวิธีของนอร์ด ที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง $F(V)$ กับแรงดันไฟฟ้าช่วง -2.0 ถึง 2.0 โวลต์ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{ITO}/\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Te}$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

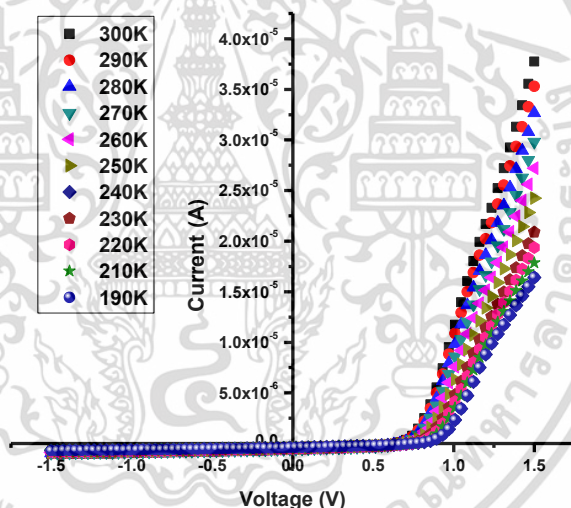
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Illumination Intensity (mW/cm ²)	Thermionic Emission (TE)			Cheung's Method				Nord's Method		I _{sc} (A)	V _{oc} (V)
	I _s (A)	N	ϕ _{B0} (eV)	$\frac{dV}{d \ln I} - I$		H(I)-I		ϕ _{B0} (eV)	R _s (kΩ)		
				n	R _s (kΩ)	ϕ _{B0} (eV)	R _s (kΩ)				
50	2.94×10 ⁻¹⁰	3.330	0.899	3.570	2.088	0.901	1.954	1.031	6.29	1.34×10 ⁻⁸	0.193
60	2.92×10 ⁻¹⁰	3.325	0.899	3.363	2.097	0.901	1.917	1.031	4.73	1.72×10 ⁻⁸	0.244
70	3.59×10 ⁻¹⁰	3.288	0.894	3.067	2.096	0.900	1.923	1.028	4.65	3.07×10 ⁻⁸	0.295
80	2.98×10 ⁻¹⁰	3.275	0.899	2.935	2.063	0.902	1.926	1.028	4.55	4.75×10 ⁻⁸	0.295
90	3.03×10 ⁻¹⁰	3.227	0.898	2.927	2.088	0.905	1.919	1.025	4.48	5.97×10 ⁻⁸	0.295
100	1.33×10 ⁻¹⁰	2.925	0.919	2.924	1.949	0.943	1.859	1.005	2.74	3.70×10 ⁻⁷	0.499

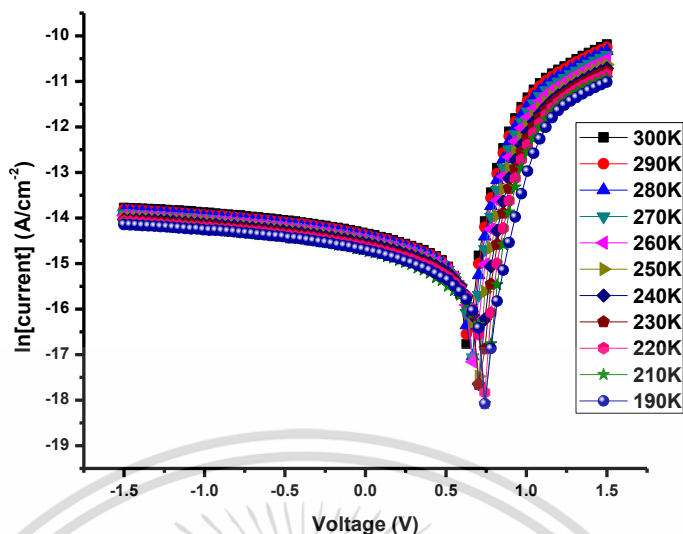
ตารางที่ 4.20 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ (I_s) ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ (n) ค่าความสูงของกำแพงศักย์ (ϕ_B) ค่าความต้านทานอนุกรม (R_s) ค่ากระแสลัดวงจร และ แรงดันวงจรเปิด ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนใน ระยะเวลาประชิดภายในระบบสุญญากาศ ภายใต้การฉายแสงที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ ในช่วง 50-100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

4.18.3 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 190-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

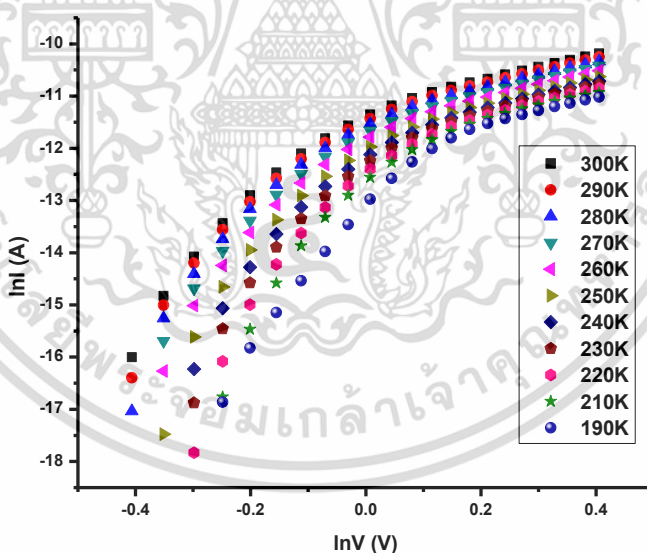
ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te โดยวัดค่าความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ในช่วง -1.5 ถึง 1.5 โวลต์ เมื่อทำการวัดอุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 190 ถึง 300 เคลวิน พบว่าที่แรงดันเท่ากัน กระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ตรงบริเวณรอยต่อมีค่าลดลง ตามอุณหภูมิที่ลดลงดังรูปที่ 4.68 และค่าแรงดันไฟฟ้าขีดเริ่มของไดโอดมีค่ามากขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง การศึกษากลไกของกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ตรงบริเวณไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te สามารถศึกษาได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln I$ กับ $\ln V$ โดยสามารถแบ่งกลไกการนำไฟฟ้าได้เป็น 2 ช่วง กล่าวคือ บริเวณที่ 1 กลไกการนำไฟฟ้าชนิดเทอร์มิออนิกอิมิสชัน บริเวณที่ 2 กลไกการนำกระแสเป็นแบบกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้างชนิดกับดักพาหะมีระดับพลังงานต่อเนื่องและมีการแจกแจงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล ตามลำดับ



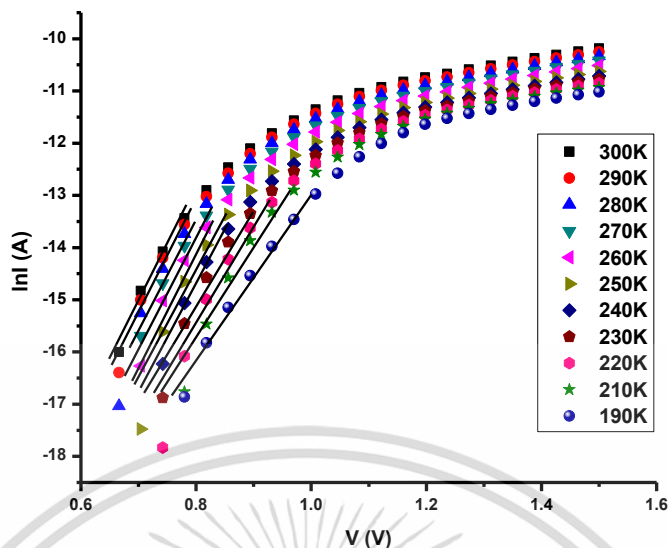
รูปที่ 4.68 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า (I) กับ แรงดันไฟฟ้า (V) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 190-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ



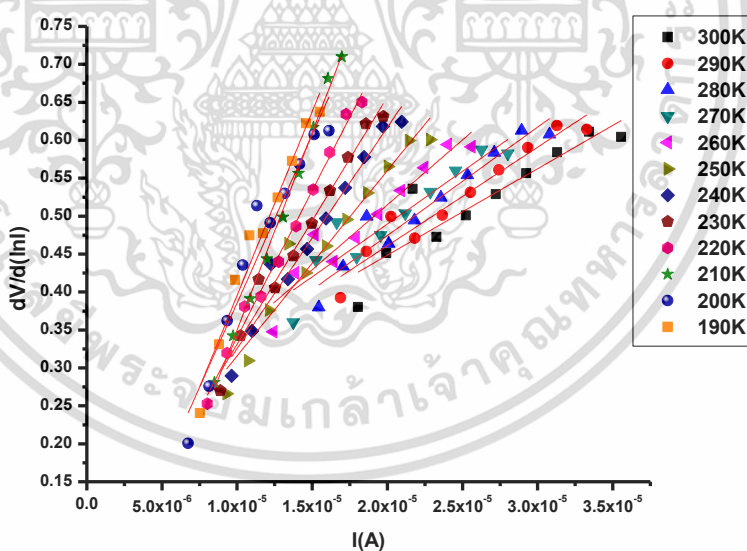
รูปที่ 4.69 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความหนาแน่นกระแส (J) กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า (V) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วง 190-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/ $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Te}$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ



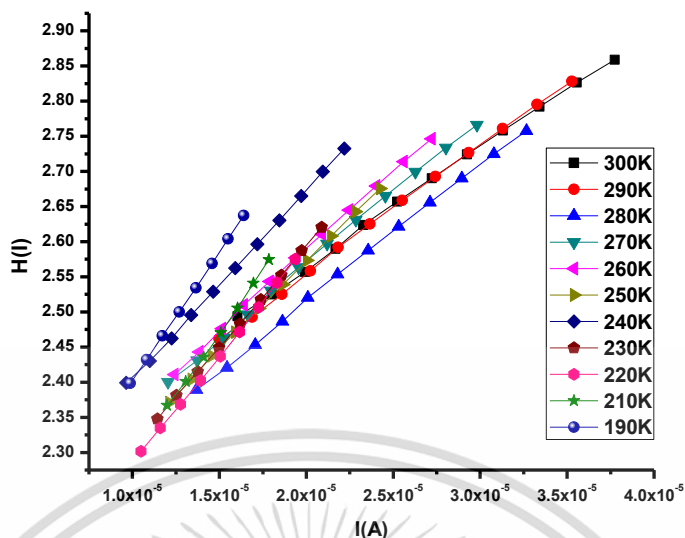
รูปที่ 4.70 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I$ กับ $\ln V$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วง 190-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/ $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Te}$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ



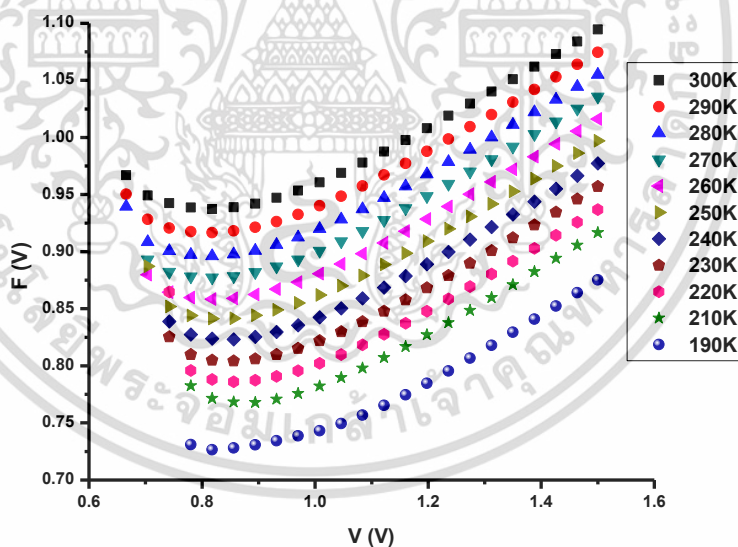
รูปที่ 4.71 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I$ กับ V เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วง 190-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/ $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Te}$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.72 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $dV/d(\ln I)$ กับ I เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วง 190-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/ $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Te}$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



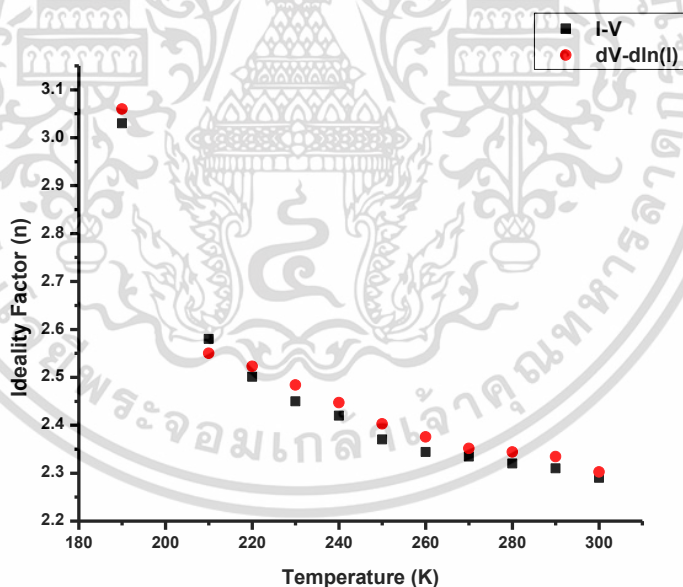
รูปที่ 4.73 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $H(I)$ กับ I เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วง 190-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/ $Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ



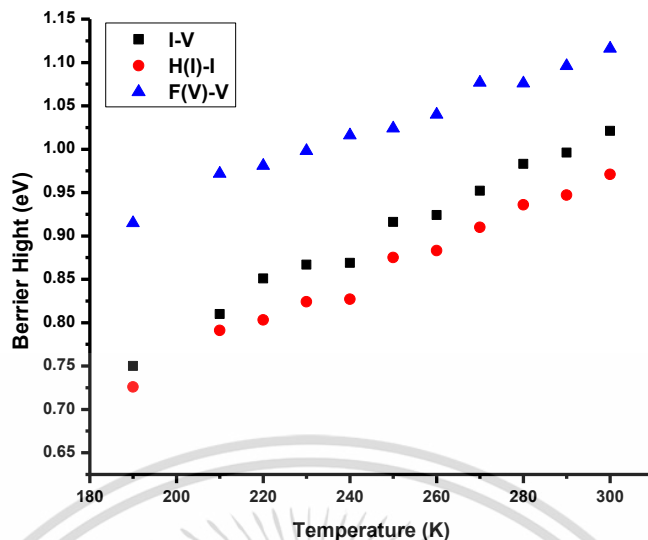
รูปที่ 4.74 แสดงกราฟวิธีของนอร์ด ที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง $F(V)$ กับแรงดันไฟฟ้าช่วง -1.5 ถึง 1.5 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วง 190-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/ $Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

ตารางที่ 4.21 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ (I_s) ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ (n) ค่าความสูงของกำแพงศักย์ (Φ_B) และค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม (R_s) ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน วิธีของชวง และวิธีของนอร์ด เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอดของฟิล์มบาง ITO/Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te

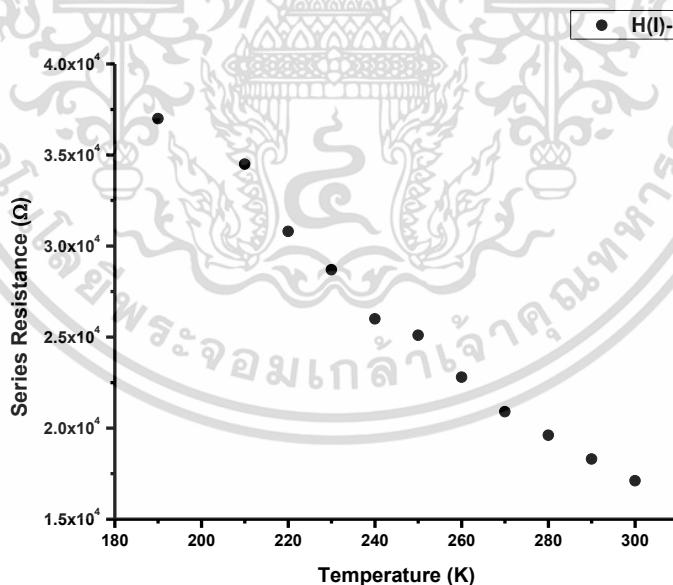
T(K)	Saturation Current, I_s (A)	Ideality factor, n		Barrier Height, Φ_B (eV)			Series Resistance, R_s (Ω)		
		TE	Cheung	TE	Cheung	Norde	Cheung	Cheung	Norde
		I-V	dV/d(lnI)-I	I-V	H(I)-I	F(V)-V	H(I)-I	dV/d(lnI)-I	F(V)-V
300	2.60×10^{-12}	2.29	2.30	1.021	0.971	1.116	1.71×10^4	1.74×10^4	1.02×10^5
290	1.68×10^{-12}	2.31	2.33	0.996	0.947	1.096	1.83×10^4	1.79×10^4	1.21×10^5
280	6.62×10^{-13}	2.32	2.34	0.983	0.936	1.076	1.96×10^4	1.92×10^4	1.54×10^5
270	5.17×10^{-13}	2.33	2.35	0.952	0.910	1.077	2.09×10^4	2.05×10^4	1.69×10^5
260	3.45×10^{-13}	2.34	2.38	0.924	0.883	1.040	2.28×10^4	2.29×10^4	2.08×10^5
250	8.76×10^{-14}	2.37	2.40	0.916	0.875	1.024	2.51×10^4	2.31×10^4	3.63×10^5
240	1.35×10^{-13}	2.42	2.45	0.869	0.827	1.016	2.60×10^4	2.32×10^4	4.05×10^5
230	2.17×10^{-14}	2.45	2.48	0.867	0.824	0.998	2.87×10^4	2.34×10^4	4.25×10^5
220	6.59×10^{-15}	2.50	2.52	0.851	0.803	0.981	3.08×10^4	2.37×10^4	6.60×10^5
210	6.60×10^{-15}	2.58	2.55	0.810	0.791	0.972	3.55×10^4	2.40×10^4	6.69×10^5
190	8.11×10^{-15}	3.03	3.06	0.726	0.672	0.915	3.70×10^4	2.41×10^4	7.67×10^5



รูปที่ 4.75 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแฟกเตอร์อุดมคติ กับ อุณหภูมิ ที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน และวิธีของชวง ที่เป็นความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 190-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระบะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

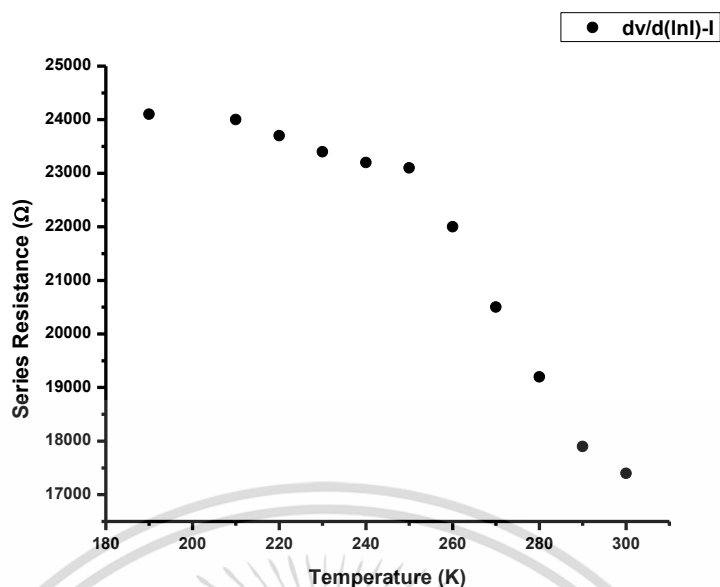


รูปที่ 4.76 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูงกำแพงศักย์ กับ อุณหภูมิ ที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน วิธีของชวง และวิธีของนอร์ด ที่เป็นความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 190-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

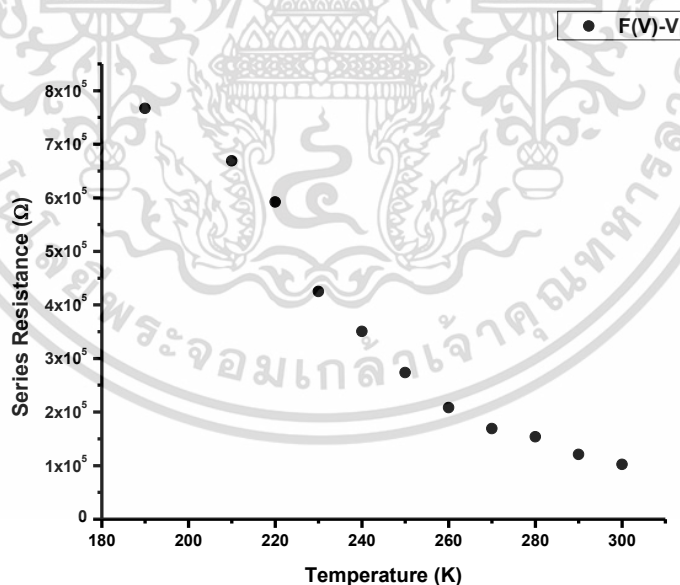


รูปที่ 4.77 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม กับ อุณหภูมิ ที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน ที่เป็นความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 190-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

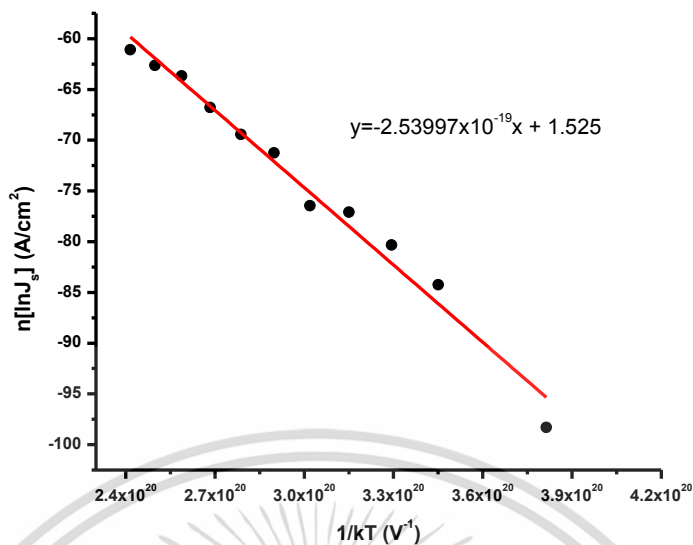


รูปที่ 4.78 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม กับ อุณหภูมิ ที่คำนวณได้จากวิธีของชวง ที่เป็นความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 190-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/ $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Te}$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.79 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม กับ อุณหภูมิ ที่คำนวณได้จากวิธีของนอร์ด ที่เป็นความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 190-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/ $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Te}$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.80 แสดงกราฟอาร์เนี่ยสของ $n \ln(J_s)$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 190-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/ $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Te}$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

จากค่าความชันของกราฟในรูปที่ 4.73 สามารถคำนวณหา ค่าพลังงานกระตุ้นของ รอยต่อได้จากสมการ (4.15)

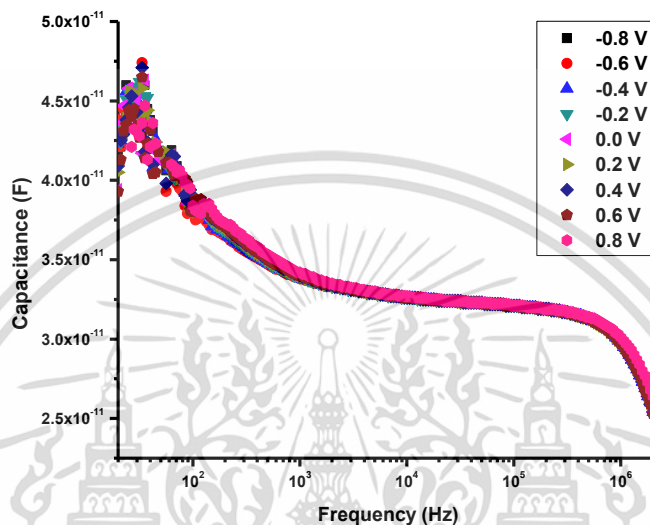
$$n \ln(J_s) = -E_a \left(\frac{1}{kT} \right) + n \ln(J_0) \quad (4.14)$$

จะได้

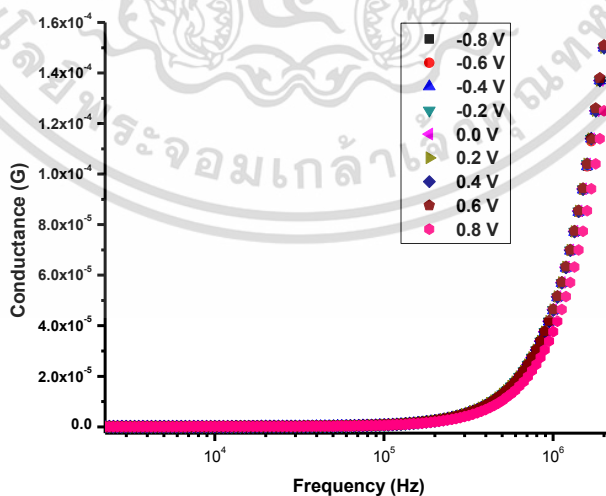
ค่าพลังงานกระตุ้น $E_a = 2.539$ อิเล็กตรอนโวลต์

4.18.4 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสสลับในช่วงความถี่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

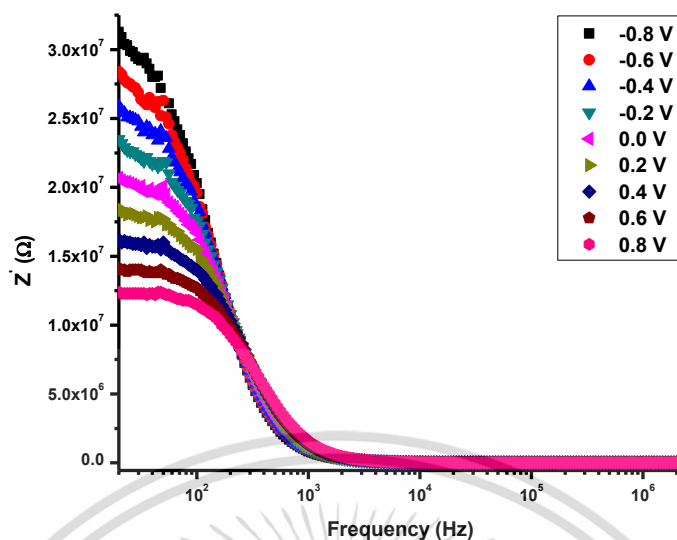
ผลการศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปี เมื่อทำการวัดที่แรงดันไบแอสในช่วง -0.8-0.8 โวลต์ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te



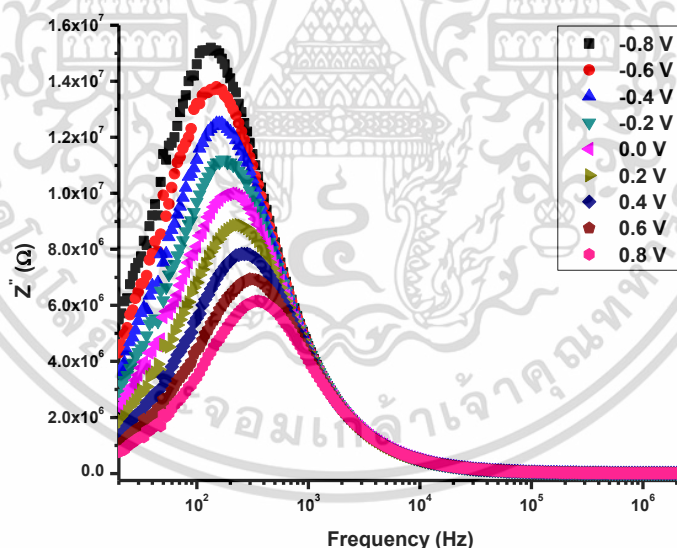
รูปที่ 4.81 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับความถี่ ที่แรงดันไบแอสในช่วง -0.8-0.8 โวลต์ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ



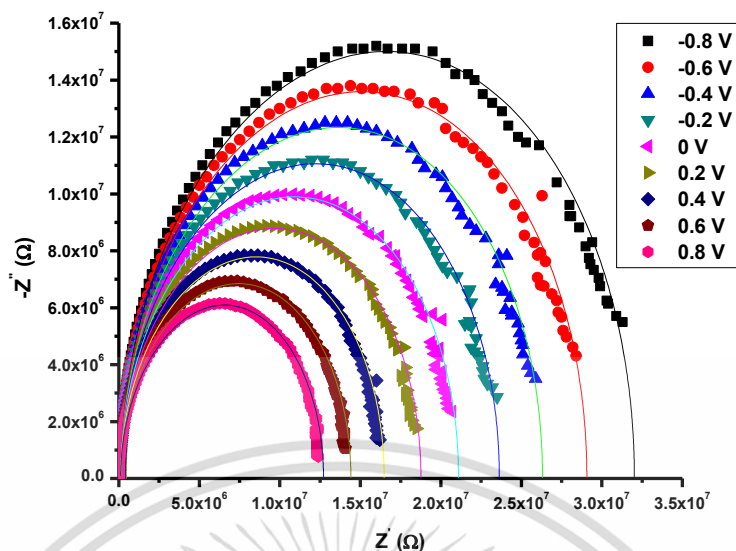
รูปที่ 4.82 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้ากับความถี่ ที่แรงดันไบแอสในช่วง -0.8-0.8 โวลต์ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ



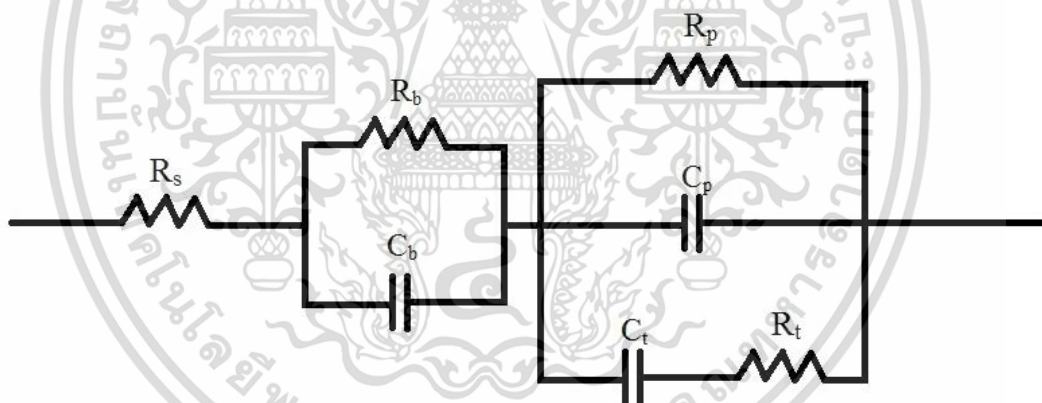
รูปที่ 4.83 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ ที่แรงดันไบแอสในช่วง $-0.8-0.8$ โวลต์ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/ $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Te}$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.84 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ ที่แรงดันไบแอสในช่วง $-0.8-0.8$ โวลต์ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/ $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Te}$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.85 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ที่แรงดันไบแอสในช่วง $-0.8-0.8$ โวลต์ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ITO/ $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Te}$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.86 แสดงวงจรสมมูลสำหรับการจำลอง (simulation) หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

ผลการจำลองแบบโดยใช้วงจรสมมูลดังรูปที่ 4.86 จะแสดงในตารางที่ 4.22 ความหนาแน่นของกักตักพาหะสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ [36]

$$N_t = \frac{C_t^2}{q\epsilon_s A^2} \quad (4.15)$$

เมื่อ C_t คือ ความจุของกักตักพาหะ ส่วน $\tau_t = R_t C_t$, $\tau_p = R_p C_p$ และ $\tau_b = R_b C_b$ ความต้านทานของขั้วไฟฟ้าด้านหลัง (R_b) มีค่าสูงมากในระดับเมกะโอห์ม เนื่องจากมาจากพื้นที่ของรอยต่อเล็กเกินไป เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนความต้านทานชั้นที่มีค่าระดับเมกะโอห์มซึ่งนับว่าเป็นสิ่งที่ดีเพราะจะส่งผลให้กระแสในตัวย้อนกลับลดลง

เมื่อแรงดันไบแอสเพิ่มขึ้นจาก -0.8 เป็น 0.8 โวลต์ ความต้านทานชั้นที่ลดลง ส่วนความจุไฟฟ้าของบริเวณพร่องพาหะมีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับลักษณะเฉพาะของรอยต่อชอตต์กีทั่วไป ส่วนความหนาแน่นกับดักพาหะมีค่าลดลงแสดงว่าเป็นกับดักพาหะชนิดต่อเนื่องและความต้านทานของกับดักพาหะก็มีแนวโน้มลดลงด้วย ดังนั้นแรงดันไบแอสไปทำให้ระดับเฟอร์มิเปลี่ยนแปลงได้ กับดักพาหะนี้ประพฤติตัวเป็นสถานะผิวเชื่อมต่อโดยที่ระดับพลังงานของผิวเชื่อมต่ออยู่สูงกว่าขอบบนสุดของแถบวาเลนซ์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Te}$ จะแสดงได้ถึงความสัมพันธ์

$$E_{ss} - E_v = q(\phi_B - V) \quad (4.16)$$

ความหนาแน่นของสถานะผิวเชื่อมต่อมีค่ามากเมื่อระดับพลังงาน E_{ss} เข้าใกล้แถบวาเลนซ์ และความหนาแน่นของสถานะผิวเชื่อมต่อจะมีค่าลดลงเกือบเป็นเชิงเส้น เมื่อระดับพลังงาน E_{ss} เลื่อนออกห่างจากแถบวาเลนซ์เข้าสู่กึ่งกลางแถบพลังงาน อีกทั้งความจุของสถานะผิวเชื่อมต่อก็มีแนวโน้มลดลงเช่นกัน เมื่อแรงดันไบแอสมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงว่าความจุของสถานะผิวเชื่อมต่อสัมพันธ์โดยตรงกับความหนาแน่นของสถานะผิวเชื่อมต่อ อย่างไรก็ตามความต้านทานของสถานะผิวเชื่อมต่อและ τ_s มีค่าลดลงไม่มากนักตามแรงดันไบแอสที่เพิ่มขึ้น การที่ τ_s มีค่าลดลง แสดงว่าสถานะผิวเชื่อมต่อในระดับพลังงานที่ลึกมีความสามารถจับอิเล็กตรอนอิสระได้น้อยลงเมื่อเทียบกับสถานะผิวเชื่อมต่อที่อยู่ระดับตื้น ซึ่งอยู่ใกล้แถบวาเลนซ์

ตารางที่ 4.22 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีของไดโอด ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

Bias Voltage (V)	Ex tracted Parameters										
	R_s ($\times 10^3 \Omega$)	R_b ($\times 10^6 \Omega$)	R_p ($\times 10^6 \Omega$)	R_t ($\times 10^6 \Omega$)	C_b ($\times 10^{-11} F$)	C_p ($\times 10^{-11} F$)	C_t ($\times 10^{-12} F$)	τ_b ($\times 10^{-3} s$)	τ_p ($\times 10^{-4} s$)	τ_t ($\times 10^{-5} s$)	N_t ($\times 10^{11} cm^{-2} \cdot eV^{-1}$)
-0.8	1.24	25.01	6.91	2.34	5.68	6.95	7.86	1.42	4.81	1.84	4.05
-0.6	1.24	22.17	6.80	2.22	5.89	6.99	7.64	1.31	4.75	1.69	3.83
-0.4	1.23	20.35	5.87	1.89	5.72	7.23	7.43	1.16	4.24	1.41	3.62
-0.2	1.23	17.85	5.68	1.89	5.90	7.31	6.83	1.05	4.15	1.29	3.07
0.0	1.23	15.98	5.09	1.88	5.41	7.20	4.77	0.87	3.66	0.90	1.49
0.2	1.23	13.57	5.02	1.88	5.73	7.78	4.55	0.77	2.72	0.86	1.36
0.4	1.23	13.00	3.37	1.87	5.02	8.71	3.15	0.68	2.93	0.59	0.65
0.6	1.23	11.62	2.69	1.60	4.80	9.45	2.79	0.56	2.54	0.45	0.51
-0.8	1.23	10.95	1.66	1.40	4.52	10.70	2.38	0.49	1.78	0.33	0.37

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้เป็นการสรุปผลการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ และผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธ์ของสารกึ่งตัวนำ $ITO/Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te$ ที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 20-300 เคลวินตามลำดับ

5.1 ผลการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ พบว่าลักษณะของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($x = 0-0.6$) มีสีดำ และเมื่อมีการเพิ่มเศษส่วนโมล $x=0.8$ พบว่าฟิล์มบางมีลักษณะเป็นสีส้ม มีขอบสีส้ม เมื่อเพิ่มปริมาณของ $ZnTe$ เป็น 100 เปอร์เซ็นต์จะได้ฟิล์มบางมีสีส้ม ลักษณะการยึดเกาะของฟิล์มบางทั้งหมดกับแผ่นรองรับยึดเกาะได้ดี มีผิวเรียบสม่ำเสมอ ไม่มีรูพรุน

การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ด้วยสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์พบระนาบที่สำคัญอยู่ 3 ระนาบ ได้แก่ ระนาบ (111), (220) และ (300) ซึ่งปรากฏอยู่ในช่วง 20-50 องศา โดยระนาบ (111) เป็นระนาบที่โดดเด่น ตำแหน่งของมุมเลี้ยวเบนจะเคลื่อนไปทางค่ามุมที่สูงขึ้นตามความเข้มข้นของอะตอม Zn ที่เพิ่มขึ้น และค่าคงที่โครงสร้างผลึก (a) จะลดลงตามความเข้มข้นของอะตอมของธาตุ Zn ที่เพิ่มขึ้น และลดลงอย่างเป็นเชิงเส้นเกือบเป็นไปตามกฎของเวการ์ต (Vegard) มีการปรากฏตัวของระนาบ (200) ซึ่งระนาบนี้จะพบในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $ZnTe$ แต่ไม่พบในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe$ ในกรณีของเศษส่วนโมลอะตอมของธาตุ Zn ที่ $x \geq 0.4$ มีพีคสอดคล้องกับระนาบ (200) ซึ่งโครงสร้างผลึกจะมีเฟสคล้ายคลึงกับ $ZnTe$ ในขณะที่พบว่าไม่มีพีคใหม่ปรากฏให้เห็นพีคที่โดดเด่นก็จะมีค่าความเข้มของสัญญาณที่ลดลงเป็นไปตามค่าสัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบ (texture coefficient)

การศึกษาลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$) โดยการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำมีความเรียบสม่ำเสมอ ไม่มีรอยแตกขนาดเล็ก และสามารถมองเห็นขนาดของเกรนได้อย่างชัดเจน โดยที่ของเกรนจะเล็กลงตามปริมาณ Zn ที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังทำการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางพบว่าค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์อะตอมของ Zn เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของค่า x เมื่อพิจารณาถึงสัดส่วนร้อยละทางเคมีของฟิล์มบางที่เตรียมได้เมื่อเทียบกับสตอยคิโอเมตรีของผลึกสารตั้งต้นมีอะตอม Zn ส่วนเกิน (excess Zn) ยกเว้นในฟิล์มบาง $CdTe$ มีอะตอม Cd ส่วนเกิน (excess Cd) ยิ่งไปกว่านั้นได้ทำการวัดจำนวนโฟโตมิชชันเพื่อใช้วิเคราะห์ธาตุของฟิล์ม

บางจากผลการตรวจสอบพบธาตุ Cd คือ $Cd 3d_{5/2}$ และ $Cd 3d_{3/2}$ ที่พลังงานประมาณ 405 และ 485 eV ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบธาตุ Zn ที่พลังงานประมาณ 1021 eV ซึ่งสอดคล้องกับค่าที่รายงานไว้สำหรับธาตุ Zn ในฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xTe$ นอกจากนี้ยังพบธาตุ Se ที่พลังงานประมาณ 495 eV ซึ่งสอดคล้องกับค่าที่รายงานไว้สำหรับธาตุ Se ในฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xTe$ อย่างไรก็ตามการพบธาตุ Se ในฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xTe$ นี้ อาจเกิดจากการปนเปื้อนของสารตั้งต้นหรือจากการเกิดออกไซด์ของฟิล์มบางได้

411 eV ตามลำดับ ธาตุ Te คือ Te $3d_{5/2}$ (metal), Te $3d_{5/2}$ (TeO₂), Te $3d_{3/2}$ (metal) และ Te $3d_{3/2}$ (TeO₂) ที่พลังงานประมาณ 572, 576, 582 และ 586 eV ตามลำดับ ธาตุ Zn คือ Zn $2p_{3/2}$ และ Zn $2p_{1/2}$ ที่พลังงานประมาณ 1021 และ 1044 eV ตามลำดับ

จากการศึกษาสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง Cd_{1-x}Zn_xTe (0 ≤ x ≤ 1) พบว่า เมื่อค่าเศษส่วนโดยโมลอะตอมของธาตุ Zn เพิ่มขึ้น ทำให้ขอบการดูดกลืนเลื่อนไปทางด้านความยาวคลื่นที่ลดลง ซึ่งจะบ่งบอกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานเพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของช่องว่างแถบพลังงานเป็นผลมาจาก การใส่อะตอม Zn เข้าไปแทนที่อะตอม Cd ในโครงสร้างผลึกของ CdTe ค่าช่องว่างแถบพลังงานในช่วงองค์ประกอบ Zn ระหว่าง 0.2 และ 0.8 มีค่าที่ใกล้เคียงกันกับค่าช่องว่างแถบพลังงานของ CdTe เสมือนว่าฟิล์มบางมีความเข้มข้นของ Zn ที่ต่ำ ซึ่งไม่สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์จาก EDS ที่รายงานว่ามีความเข้มข้นของสังกะสีมากกว่าสโตยคิโอเมตริ ซึ่งในความเป็นจริงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุจากเทคนิค EDS นั้นสามารถเชื่อถือได้ แต่เหตุที่ค่าช่องว่างพลังงานเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยนั้นเป็นเพราะว่าที่ระดับความลึกค่าต่างๆฟิล์มบางมีองค์ประกอบไม่คงที่ เชื่อว่าส่วนล่างสุดของฟิล์มบางจะมีองค์ประกอบเป็นเฟส CdTe เนื่องจาก CdTe ระเหิดได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า ZnTe

จากการศึกษารามานสเปกโทรสโกปีของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cd_{1-x}Zn_xTe (0 ≤ x ≤ 1) พบโหมด Te(A1) phonon ที่เลขคลื่นประมาณ 116 cm⁻¹ ในทุกสัดส่วนโมลอะตอม x สำหรับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe และในกรณีของฟิล์มบางที่ผ่านปฏิกิริยาของแข็งทั้งหมดจะพบโหมดโฟนอน CdTe(1TO) + Te(E) ที่เลขคลื่นประมาณ 137 cm⁻¹ การปรากฏของพีดโหมดโฟนอน CdTe(1LO) ถูกพบในฟิล์มที่มีสัดส่วนโมลอะตอม x ในช่วง 0 ≤ x ≤ 0.4 ที่เลขคลื่นประมาณ 160 cm⁻¹ และจะหายไปเมื่อ x มีค่ามากกว่า 0.4 ในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe ปรากฏโหมดโฟนอน Te(E) ที่เลขคลื่น 137 cm⁻¹ และโหมดโฟนอน ZnTe(1LO) ที่เลขคลื่น 198 cm⁻¹

จากการศึกษาฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cd_{1-x}Zn_xTe (0 ≤ x ≤ 1) มีการดูดกลืนแสงที่เด่นชัดที่ ๓ ตำแหน่งเลขคลื่นประมาณ 550 และ 825 cm⁻¹ สารกึ่งตัวนำ ZnTe เนื่องจากว่าความยาวพันธะของ Zn-Te สั้นกว่า Cd-Te จะสังเกตได้ว่าตำแหน่งเลขคลื่นของพีดแรกจะเลื่อนไปทางพลังงานที่ลดลง เลื่อนจาก 553 cm⁻¹ ในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ไปยัง 542 cm⁻¹ ในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe

จากการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าพบว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cd_{1-x}Zn_xTe (0 ≤ x ≤ 1) มีความนำไฟฟ้ามากที่สุด เมื่อเศษส่วนโดยโมลอะตอม x=0.8 และฟิล์มบาง Cd_{1-x}Zn_xTe มีความคล่องของพาหะมากที่สุด เมื่อเศษส่วนโดยโมลอะตอม x=0.6

การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิสูงในช่วง 25-200 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาหาค่าพลังงานกระตุ้น (E_g) พบว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cd_{1-x}Zn_xTe ที่ x=0.0 และ x=1.0 มีค่าพลังงานกระตุ้นจำนวน 1 ค่า ในขณะที่กรณีของ x=0.2-0.6 มีค่าพลังงานกระตุ้นอยู่จำนวน 2 ค่า

การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cd_{1-x}Zn_xTe (0 ≤ x ≤ 1) จะพบลักษณะกลไกการนำไฟฟ้าอยู่ 3 ลักษณะ ในช่วงอุณหภูมิสูง (ในช่วงอุณหภูมิ 200-300 เคลวิน โดยประมาณ) จะมีกลไกการนำไฟฟ้าแบบพาหะอิสระเคลื่อนที่ข้ามกำแพงศักย์เนื่องจากในช่วงอุณหภูมินี้มีพลังงานมากพอที่จะสามารถกระตุ้นให้พาหะข้ามผ่านกำแพงศักย์ได้ ต่อมาในช่วงอุณหภูมิต่ำ (ในช่วงอุณหภูมิ 145-195 เคลวิน โดยประมาณ) จะเป็นกลไกการนำไฟฟ้าเป็นแบบการกระโดดระหว่างสถานะพลังงานท้องถิ่นในระยะ

ไม่คงที่ (Mott-VRH) สุดท้ายคือในช่วงอุณหภูมิต่ำมาก (70-130 เคลวิน โดยประมาณ) ในช่วงอุณหภูมินี้โอเล็กตรอนที่ระดับเฟอร์มิเกิดอันตรกิริยาต่อกัน เป็นผลทำให้ความหนาแน่นของระดับพลังงานของพาหะแยกออกจากกัน เกิดเป็นช่องว่างคูลอมบ์ กลไกการนำไฟฟ้าในลักษณะนี้จะจะเป็นไปตามแบบจำลองของเอฟโรส-ชลอสกี (ES-VRH)

5.2 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

5.2.1 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ที่ภายใต้การฉายแสงที่มีความเข้มค่าต่างๆ ในช่วง 50-100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร และอุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 190-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ ทำได้โดยการวัดค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้แรงดันไฟฟ้าในช่วง -2.5 ถึง 2.5 โวลต์ ในช่วง -2.0 ถึง 2.0 โวลต์ ในกรณีที่ถูกภายใต้การฉายแสงที่มีความเข้มแสงค่าต่างๆ ในช่วง 50-100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร และในช่วง -1.5 ถึง 1.5 โวลต์ ในกรณีที่วัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 190-300 เคลวิน เมื่อวัดไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te ที่อุณหภูมิห้องพบว่าการเรียงกระแสไฟฟ้าแบบไดโอดทั่วไป โดยมีค่าแรงดันไฟฟ้าซีดเริ่มอยู่ที่ 1.1 โวลต์ ซึ่งรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te เป็นแบบรอยต่อ p-n ซึ่งกลไกการนำกระแสจะอธิบายได้เช่นเดียวกับรอยต่อขอตต์ก็โดยบริเวณพร่องพาหะตรงบริเวณรอยต่อเกือบทั้งหมดจะปรากฏอยู่ในเนื้อสารกึ่งตัวนำ CdZnTe โดยสามารถคำนวณหาค่าแฟกเตอร์ในอุดมคติเท่ากับ 4.71 และความสูงกำแพงศักย์ 0.92 อิเล็กตรอนโวลต์ เมื่อทำการวัดภายใต้การฉายแสงที่มีความเข้มแสงค่าต่างๆ ในช่วง 50-100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร พบว่า ค่าแฟกเตอร์ในอุดมคติ และ ค่าความต้านทานอนุกรม มีค่าลดลง ส่วนค่าความสูงกำแพงศักย์เปลี่ยนแปลงไม่มากนักค่อนข้างจะคงที่ ในขณะที่ค่ากระแสลัดวงจรมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มแสงที่เพิ่มขึ้น และเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 190-300 เคลวิน พบว่าที่ค่าแรงดันไฟฟ้าเท่ากัน กระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลให้อิเล็กตรอนมีพลังงานสูงมากขึ้น จึงทำให้มีปริมาณอิเล็กตรอนไหลข้ามกำแพงศักย์ได้มากขึ้น ส่วนแรงดันไฟฟ้าซีดเริ่มของไดโอดจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลง ซึ่งบ่งบอกว่ากำแพงศักย์มีค่าลดลงที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากว่าที่อุณหภูมิต่ำลงปริมาณพาหะที่สามารถไหลข้ามผ่านกำแพงศักย์จะมีปริมาณลดลง พาหะไม่ได้ไหลข้ามผ่านกำแพงศักย์แต่ทะลุผ่านกำแพงศักย์ออกไป จึงเหมือนว่าระยะความสูงของกำแพงศักย์สั้นลง ส่วนค่าแฟกเตอร์อุดมคติ และค่าความต้านทานอนุกรมจะมีค่ามากขึ้นตามอุณหภูมิที่ลดลง กลไกของกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ตรงบริเวณไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te สามารถแบ่งกลไกการนำไฟฟ้าได้เป็น 2 ช่วง กล่าวคือ บริเวณที่ 1 กลไกการนำไฟฟ้าชนิดเทอร์มิออนิกอิมิสชัน บริเวณที่ 2 กลไกการนำกระแสเป็นแบบกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้างชนิดกักตักพาหะมีระดับพลังงานต่อเนื่องและมีการแจกแจงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง เมื่อนำมาเขียนใหม่ให้อยู่ในรูปส่วนกลับของค่าความจุไฟฟ้ายกกำลังสอง กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า โดยเลือกช่วงที่มีความสัมพันธ์ที่มีลักษณะเป็นกราฟเชิงเส้นแล้วลากส่วนต่อเส้นตรงลงมาตัดแกนของค่าแรงดันไฟฟ้า โดยจุดตัดแกนของค่าแรงดันไฟฟ้า คือ V_i สามารถนำไปคำนวณหา ค่าศักย์ตกคร่อมของรอยต่อ (V_{bi}) ได้เท่ากับ 0.98 อิเล็กตรอนโวลต์ ส่วนความชันของกราฟสามารถนำมาใช้ในการคำนวณหาค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ (N_A) ได้ เท่ากับ 2.61×10^{15} ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

5.2.2 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้า และ ความนำไฟฟ้า กับ ความถี่เมื่อทำการไบแอสด้วยแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.8 ถึง 0.8 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ ITO/Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระยะประชิดภายในระบบสุญญากาศ

พบว่ากับดักนั้นจะอยู่กันอย่างหนาแน่นที่บริเวณขอบบนของแถบวาเลนส์แล้วจะค่อยๆ ลดลงเกือบเป็นเชิงเส้นเมื่อระดับพลังงานออกห่างจากแถบวาเลนส์มากขึ้น และยังพบว่าแรงดันไฟฟ้านั้นมีอิทธิพลต่อระดับเฟอร์มิซึ่งจะเลื่อนขึ้นตามค่าแรงดันไบแอสกลับทางและระดับเฟอร์มิจะเลื่อนลงตามแรงดันไบแอสตรงที่ป้อนเข้าไปและ ณ จุดที่ระดับเฟอร์มิพาดผ่านนั้นจะส่งผลให้กับดักที่อยู่บริเวณนั้นแสดงอิทธิพลออกมาโดยการจับพาหะที่อยู่บริเวณระดับพลังงานเฟอร์มิและถ้าต้องการให้กับดักประจุที่บริเวณผิวเชื่อมต่อนั้นทำการคายประจุออกมาต้องทำการป้อนความถี่ค่าหนึ่งที่สอดคล้องกับความถี่เฉพาะของกับดักนั้นๆ

จากการศึกษาค่าอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีที่แรงดันไบแอส -0.8 ถึง 0.8 โวลต์ ในช่วงความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ พบว่าค่าจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนมีแนวโน้มลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นจาก 20 เฮิร์ตซ์ เป็น 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ส่วนฟิสิกของจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนมีขนาดลดลงและเลื่อนไปทางความถี่ที่เพิ่มขึ้น

จากวงจรสมมูลสามารถจำลองแบบหาค่าความหนาแน่นของสถานะผิวเชื่อมต่อได้ พบว่ามีค่าอยู่ในระดับ 10^{11} ต่อตารางเซนติเมตรต่ออิเล็กตรอนโวลต์ และความหนาแน่นของสถานะผิวเชื่อมต่อนี้มีแนวโน้มลดลงเกือบเป็นเชิงเส้นเมื่อระดับพลังงาน E_{ss} เลื่อนออกห่างจากแถบวาเลนส์ อีกทั้งความจุของสถานะผิวเชื่อมต่อนี้มีแนวโน้มลดลง เมื่อแรงดันไบแอสเพิ่มขึ้น แสดงว่าความจุของสถานะผิวเชื่อมต่อสัมพันธ์โดยตรงกับความหนาแน่นของสถานะผิวเชื่อมต่อ สำหรับค่าคงที่ของเวลา (τ_i) มีค่าลดลงแสดงว่าสถานะผิวเชื่อมต่อในระดับพลังงานที่ลึกมีความสามารถจับอิเล็กตรอนอิสระได้ลดลง

5.3 ข้อเสนอแนะ

- 5.3.1 ควรลดความต้านทานของขั้วไฟฟ้าด้านหลัง โดยการเพิ่มพื้นที่ของรอยต่อให้โตขึ้นอีก แต่ต้องไม่มีผลกระทบต่อรอยต่อขอตต์ก็
- 5.3.2 ควรลดความหนาแน่นของสถานะผิวเชื่อมต่อโดยการลดอุณหภูมิของการประดิษฐ์รอยต่อขอตต์ก็
- 5.3.3 ควรลดความต้านทานของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{0.6}\text{Zn}_{0.4}\text{Te}$ โดยการเจือด้วยอะตอมของธาตุที่เหมาะสม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Zhou, C., Chung, H., Wang, X. and Bermel, P. (2016). "Design of CdZnTe and Crystalline Silicon Tandem Junction Solar Cells" *IEEE J. Photovolt.* 6:301-308.
- [2] Khosroabadi, S., K. 2014. "Design of a high efficiency ultrathin CdS/CdTe solar cell using back surface field and backside distributed Bragg reflector." *Optical Society of America.* 22:S3.
- [3] Imamzai, M., A., A. 2013. "Numerical Modeling and Analysis of CdS/Cd_{1-x}Zn_xTe Solar Cells as a Function of CdZnTe Doping." Lifetime and Thickness. *IEEE.* 0:87-89.
- [4] ฐิตินัย แก้วแดงม งามนิตย์ แก้วแดง, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ. 2546. "การประดิษฐ์ฟิล์มบาง Cd_{1-x}Zn_xS ที่มี Zn ในปริมาณสูง สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์." รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [5] ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ. 2556. "การประดิษฐ์ฟิล์มบาง CdS_xTe_{1-x} เพื่อประยุกต์ใช้เป็นเซลล์แสงอาทิตย์." รายงานวิจัยต่อเสนอคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [6] งามนิตย์ แก้วแดง, ฐิตินัย แก้วแดง, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ. 2545. "การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง Cd_{1-x}Zn_xS เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์." รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [7] งามนิตย์ แก้วแดง, ฐิตินัย แก้วแดง, ณัฐพร พรหมรส และ ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ, 2551. "การเตรียมฟิล์มบาง CdTe โดยวิธีระเหิดในระยะประชิดเพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์." รายงานวิจัยเสนอต่อวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [8] สุกฤษฏ์ เกิดแสง. 2547. "การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ CdTe." วิทยานิพนธ์ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [9] อุดลย์ หาญวังม่วง. 2550. "การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดในระยะประชิด" วิทยานิพนธ์ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [10] ฐิติกร จรรยาธรรม. 2549. "การศึกษาเชิงเปรียบเทียบสมบัติของฟิล์มบาง Cd_{1-x}Zn_xS ที่เตรียมโดยเทคนิคที่ต่างกัน" วิทยานิพนธ์ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [11] ปกรณ์ สิทธิเชตรกรณ์. 2549. "ศึกษาสมบัติของฟิล์มบางคอปเปอร์อินเดียมไดซีลีไนต์ที่เตรียมได้จากกระบวนการซีลีไนเซชัน" วิทยานิพนธ์ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [12] ประธาน ประจวบโชค. 2550. "การเตรียมและการศึกษาของสารกึ่งตัวนำ CuAlO₂ ชนิดพี" วิทยานิพนธ์ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

- [13] ไกรศักดิ์ ยืนยง. 2553. “การศึกษาชั้นสัมผัสไอโธรมิกของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์” วิทยานิพนธ์ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [14] ชนิภรณ์ จุไรสง, วริญา โชติชนันท์. 2556. “การศึกษาสมบัติของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบาง CdS/CuO.” โครงการพิเศษตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [15] กัญญาณาคย์ วิเศษไวยาหาร, จิราพัชร ลอยลม. 2558. “การศึกษาลักษณะเฉพาะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุดีบุกซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหิดเคมีในระยะประชิด” โครงการพิเศษตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [16] ดุสิต ถ้อมมัน, ทิฆัมพร จันทร์เพ็ญ. 2558. “การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $(\text{CdS})_{1-x}(\text{ZnTe})_x$ ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ” โครงการพิเศษตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [17] นพรัฐ เดชะคำภ. 2559. “โครงสร้างผลึก สมบัติทางแสง และสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Se}$ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด” วิทยานิพนธ์ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [18] ปาฏิหาริย์ สมตน, เมธิชา ยาวิไชย. 2559. “การเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์โดยวิธีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงสำหรับประดิษฐ์เป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์ p-Cu₂O/n-Si” โครงการพิเศษตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [19] จีร์ภักดิ์ ด้วงสะดี, วรารัตน์ สวัสดิ์. 2557. “การศึกษาสมบัติรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด” โครงการพิเศษตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [20] Khomyak, V.V., Ilashchuk, M.I., Parfenyuk, O.A. and Shteplyuk I.I. (2013). “Fabrication and electrical characterization of the anisotype n-ZnO/p-CdTe heterostructures for solar cell applications” *J. Appl. Phys.* 144(22):223715-1-223715-5
- [21] Aranovich, J.A., Golmayo, D., Fahrenbruch, A. L., and Bube, R.H. (1980). “Photovoltaic properties of ZnO/CdTe heterojunctions prepared by spray pyrolysis.” *J. Appl. Phys.* 51(8):4260-4268.
- [22] Centre de Recherches, N., Strasbourg, 67037., Cedex and France. (1985). “A review of ohmic and rectifying contacts on cadmium telluride.” *Solid State Electronics.* 28(7):689-706.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [23] Zelaya-Angel, O., Becerril, M., Mendoza-Alvarez, J.G., Tirado, L. and Navarro-Contreras, H.J. (2004). "On the bowing parameter in $Cd_{1-x}Zn_xTe$ " *Appl. Phys.* 95(62):84-6288.
- [24] Lv, B., Huang, L., Fu, M., Zhang, F.M. and Wu, X.S. (2015). "Effects of oxidation and $CdCl_2$ treatment on the electronic properties of CdTe polycrystalline films" *Mater. Chem. Phys.* 165:49-54.
- [25] Feng, X, Singh, K., Bhavanam, S., Palekis, V., Morel, D.L. and Ferekides, C. (2013). "Preparation and characterization of ZnTe as an interlayer for CdS/CdTe substrate thin film solar cells on flexible substrates." *Thin Solid Films.* 535:202-205.
- [26] Mohanty, D., Su, P.Y., Wang, G.C., Lu, T.M. and Bhat, I.B. (2016). "Effect of $CdCl_2$ heat treatment on ZnTe back electron reflector layer in thin film CdTe solar cells." *Sol. Energy.* 135:209-214.
- [27] Zakria, M., Mahmood, A., Shah, A., Raza, Q., Khan, T.M. and Ahmed, E. (2012). "Tunability of physical properties of (Cd:Zn)S thin film by Close Space Sublimation Process (CSSP)." *Prog. Nat. Sci.* 22(4):281-287.
- [28] Khan, M.A., Shah, N.A., Ali A., Basharat M., Hannan M.A. and Maqsood A. (2009). "Fabrication and characterization of Cd-enriched CdTe thin films by close spaced sublimation" *J. Coat. Technol. Res.* 6(2):251-256.
- [29] Olusola, O.I., Madugu, M.L., Abdul-Manaf, N.A. and Dharmadasa, I.M. (2016). "Growth and characterisation of n- and p-type ZnTe thin films for applications in electronic devices" *Curr. Appl. Phys.* 16:120-130.
- [30] Prabakar, K., Narayandass, Sa.K., Mangalaraj and D. (2003). "Structural, optical and Raman scattering studies on polycrystalline $Cd_{0.8}Zn_{0.2}Te$ thin films prepared by vacuum evaporation." *Physica B.* 328:355-362.
- [31] Chander, S. and Dhaka, M.S. (2017). "Thermal annealing induced physical properties of electron beam vacuum evaporated CdZnTe thin films." *Thin Solid Films.* 625:131-137.
- [32] Phuruangrat, A., Mad-ahin, S., Yayapao, O., Thongtem, S. and Thongtem, T. (2015). "Photocatalytic degradation of organic dyes by UV light, catalyzed by nanostructured Cd-doped ZnO synthesized by a sonochemical method" *Res. Chem. Intermed.* 41:9757-9772.
- [33] Sharma, K., Al-Kabbi, A.S. and Saini, G.S.S. (2012). "Electrical conduction mechanism in nanocrystalline CdTe (nc-CdTe) thin films" *Appl. Phys. A.* 108:911-920.

- [34] Guo, J., Zhan, G., Lin, J., Yang, B., Xu, B., Feng, J., Chen, X. and Yang, C. (2015). "Hopping conduction in zirconium oxynitrides thin film deposited by reactive magnetron sputtering" *Physica B*. 475:86-89.
- [35] Nazrul Islam, Md., Ram, S.K. and Kumar, S. (2009). "Mott and Efros-Shklovskii hopping conduction in porous silicon nanostructures" *Physica E*. 41:1025-1028.
- [36] Burtone, L., Ray, D., Leo, K. and Riede, M. (2012). "Impedance Model of Trap States for Characterization of Organic Semiconductor Devices." *J. Appl. Phys.* III:064503-1-064503-5.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

Pattern : 15-770		Radiation = 1.540600		Quality : Indexed		
Cd Te		2th	l	h	k	l
Cadmium Telluride		23.759	100	1	1	1
		39.312	60	2	2	0
		46.434	30	3	1	1
		56.821	6	4	0	0
		62.353	10	3	3	1
		71.216	10	4	2	2
		76.300	4	5	1	1
		84.469	2	4	4	0
		89.412	4	5	3	1
		97.443	4	6	2	0
		102.400	2	5	3	3
		110.837	1	4	4	4
		116.146	2	5	5	1
		125.593	4	6	4	2
		131.817	4	7	3	1
Lattice : Face-centered cubic		Mol. weight = 240.01				
S.G. : F-43m (216)		Volume [CD] = 272.22				
a = 6.48100		Dx = 5.856				
Z = 4		l/lcor = 6.50				
<p>COLOR : Black SAMPLE SOURCE OR LOCALITY : Sample was obtained from Semi-Elements Inc., Saxonburg, Pennsylvania, USA. ANALYSIS : Spectrographic analysis; 0.01-0.1% Sr; 0.0001-0.001% each of Ba, Fe, and Pb TEMP. OF DATA COLLECTION : Pattern taken at 25 C.</p>						
<p>CAS: 1306-25-8 *Natl. Bur. Stand. (U.S.) Monogr. 25, volume 3, page 21, (1964) primary reference :</p>						
Radiation : CuK α 1		Filter : Beta				
Lambda : 1.54050		d-sp : Not given				
SS/FOM : F15= 31(0.0230,21)		Internal standard : W				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

Pattern : 15-746		Radiation = 1.540600	Quality : High				
Zn Te Zinc Telluride		2th 25.259 29.248 41.806 49.498 51.847 60.634 66.747 68.739 76.401 81.969 91.117 96.624 98.462 105.956 111.718 113.709 121.983 128.702 141.669 151.645	I 100 10 80 35 4 8 14 4 10 8 4 6 2 6 4 2 2 4 6 8 6	h 1 2 2 3 2 4 3 4 4 5 4 5 6 4 2 4 5 6 7	k 1 0 2 1 2 0 3 2 2 1 3 0 0 3 4 4 5 4 6 7	l 1 0 0 1 2 0 1 0 2 1 0 0 1 3 2 4 1 2 1	
Lattice : Face-centered cubic S.G. : F-43m (216) a = 6.10260	Mol. weight = 192.98 Volume [CD] = 227.27 Dx = 5.640 Z = 4 l/cor = 9.30						
COLOR : Reddish brown SAMPLE SOURCE OR LOCALITY : Sample was obtained from Semi-Elements, Inc., Saxtonburg, PA, USA ANALYSIS : Spectrographic analysis: 0.01-0.1% of Si; 0.001-0.01% each of Al, Ba, Fe, and Mg. TEMP. OF DATA COLLECTION : Pattern taken at 25 C.							
CAS: 1315-11-3 *Natl. Bur. Stand. (U.S.) Monogr. 25, volume 3, page 68, (1964) primary reference :							
Radiation : CuKα1 Lambda : 1.54050 SS/FOM : F20=121(0.0079,21)	Filter : Beta d-sp : Not given Internal standard : W						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

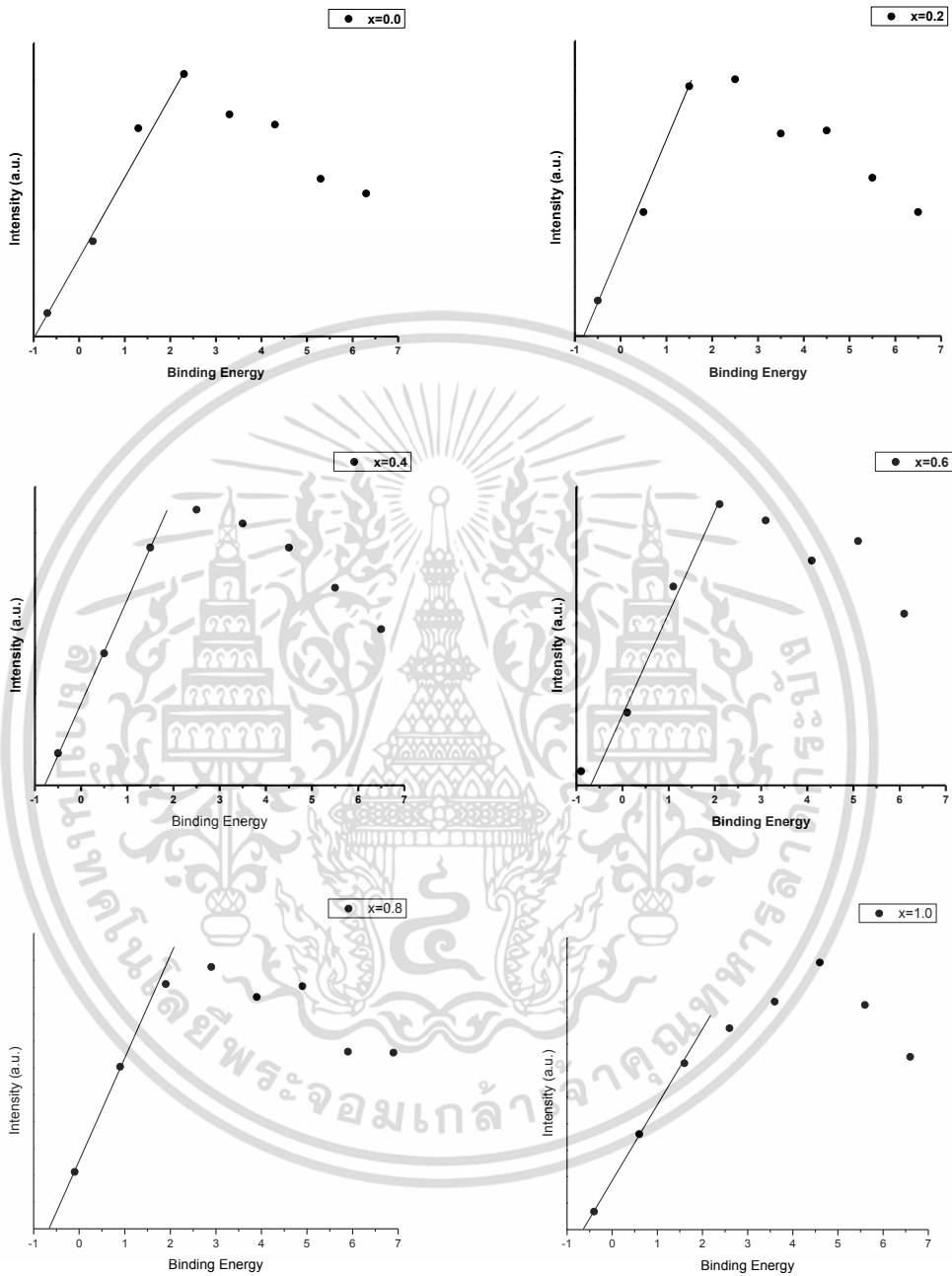
ภาคผนวก ค

Pattern : 75-2086		Radiation = 1.54060		Quality : Calculated		
Cd Te		2th	l	h	k	l
Cadmium Telluride		24.027	100	1	1	1
		27.814	<1	2	0	0
		39.741	66	2	2	0
		46.977	38	3	1	1
		49.201	<1	2	2	2
		57.460	9	4	0	0
		63.177	13	3	3	1
		65.017	<1	4	2	0
		72.132	15	4	2	2
		77.280	8	5	1	1
		85.655	4	4	4	0
Lattice : Face-centered cubic S.G. : F-43m (216)		Mol. weight = 240.01 Volume [CD] = 263.37				
a = 6.41000 Z = 4		Dx = 6.053 Dm = 6.200 l/lcor = 15.88				
ICSD COLLECTION CODE : 031844 TEST FROM ICSD : Calc. density unusual but tolerable. TEST FROM ICSD : No R value given. TEST FROM ICSD : At least one TF missing.						
*Calculated from ICSD using POWD-12++ (1997) primary reference : *Nor. Geol. Tidsskr., volume 8, page 302, (1926) : Zachariasen, W.H.						
Radiation : CuKa1 Lambda : 1.54060		Filter : Not specified d-sp : Calculated spacings				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

กราฟ E_{VBM} ของ $Cd_{1-x}Zn_xTe$ ($0 \leq x \leq 1$)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Composition (x)	E_{VBO} (eV)
0.0	-1.00
0.2	-0.85
0.4	-0.80
0.6	-0.65
0.8	-0.60
1.0	-0.60



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวกัญญ์กนิษฐ์ จันทร์ครบ
วัน เดือน ปีเกิด	3 ตุลาคม 2534
ที่อยู่ปัจจุบัน	24 ซ.หทัยราษฎร์ 19 ถ.หทัยราษฎร์ แขวงมีนบุรี เขตมีนบุรี กทม. 10510
ประวัติการศึกษา	2559 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผลงานทางวิชาการ	Characterization of $Cd_{1-x}Zn_xTe$ Thin films prepared by close spaced sublimation method วารสารของการประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 43 (วทท 43)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้