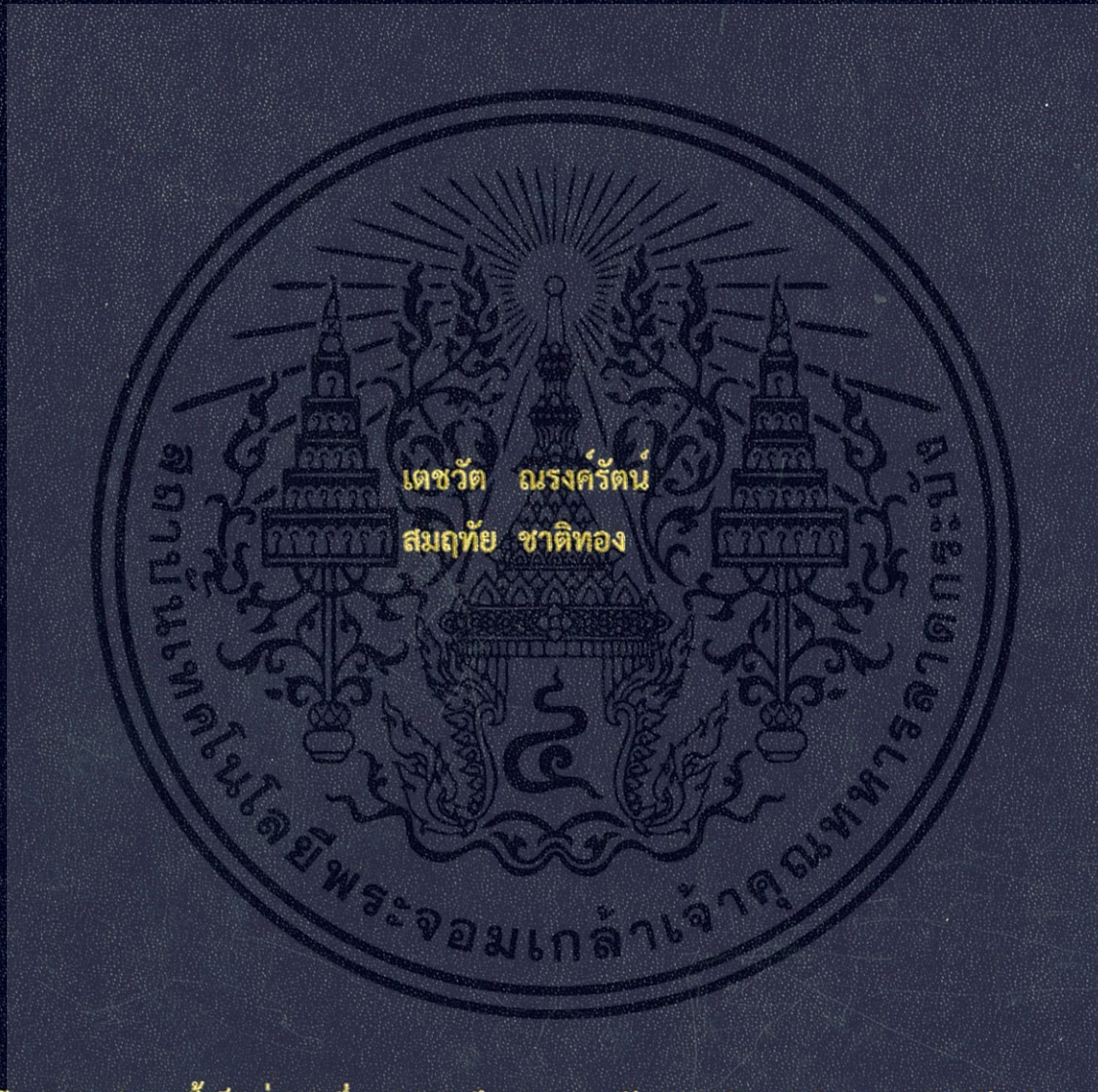


สมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ระหว่างฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe
กับเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO₃
ELECTRICAL PROPERTIES OF CdTe / WO₃ HETEROJUNCTION



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ ภาควิชาฟิสิกส์
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2557

สมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ระหว่างฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe
กับเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO₃
ELECTRICAL PROPERTIES OF CdTe / WO₃ HETEROJUNCTION



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีสืบค้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และเผยแพร่ไปยังถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

ELECTRICAL PROPERTIES OF CdTe / WO₃ HETEROJUNCTION



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE
IN APPLIED PHYSICS

DEPARTMENT OF PHYSICS
FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น

หัวข้อโครงการพิเศษ สมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ระหว่างฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe กับเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO₃
ELECTRICAL PROPERTIES OF CdTe / WO₃ HETEROJUNCTION

ชื่อนักศึกษา นายเตชวัต ฌรงค์รัตน์ รหัสนักศึกษา 54050525
นางสาวสมฤทัย ชาติทอง รหัสนักศึกษา 54050607

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต ฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชา ฟิสิกส์
ปีการศึกษา 2557
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ฟิสิกส์ประยุกต์
ประจำปีการศึกษา 2557

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.จิตินัย แก้วแดง	
อ.ภารุจ บัณฑิตธาดาวิทย์	
ผศ.ดร.ชัยสิงห์ ภูวรักษ์เกียรติ	
รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือทำซ้ำของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	สมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ระหว่างฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe กับเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO ₃		
ชื่อนักศึกษา	นายเดชาวัต	ณรงค์รัตน์	รหัสนักศึกษา 54050525
	นางสาวสมฤทัย	ชาติทอง	รหัสนักศึกษา 54050607
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต ฟิสิกส์ประยุกต์		
ภาควิชา	ฟิสิกส์		
ปีการศึกษา	2557		
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ		

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ได้เคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำของ CdTe บนแผ่นรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ด้วยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และบนแผ่นรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO₃ ที่เจือด้วย In₂O₃ ที่เตรียมได้โดยวิธีปฏิบัติกิจวิธานะของแข็งจากการนำผงผลึกของสารประกอบ WO₃ และ In₂O₃ 4 เปอร์เซ็นต์โดยมวลอะตอม ทำการผสมและบดคลุกเคล้าให้เข้ากันดี แล้วจึงอัดขึ้นรูปให้เป็นแผ่นกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร และหนา 1 มิลลิเมตร จากนั้นจึงทำการเผาผลึกที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในบรรยากาศปกติ ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe/WO₃:In (4 at.%) ประดิษฐ์ได้โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิก WO₃:In (4 at.%) และทำการแอนนัลในบรรยากาศแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิในช่วง 250-400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที โครงสร้างผลึกและลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe และไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe/WO₃:In (4 at.%) ได้รับการตรวจสอบโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านตามลำดับ และทำการวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ด้วยเครื่องยูวี-วิสสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ในช่วงความยาวคลื่น 400-1000 นาโนเมตร จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า พบว่าไดโอดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้มีลักษณะสมบัติเรียงกระแสที่ดี พารามิเตอร์ต่างๆของไดโอดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำได้แก่ ความสูงของกำแพงศักย์ แพลกเตอร์ในอุดมคติ และ ความต้านทานอนุกรม ที่อุณหภูมิห้องมีค่าเท่ากับ 0.706 อิเล็กตรอนโวลต์ 5.381 และ 11x10³ โอห์ม จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า สามารถคำนวณหา ค่าความหนาแน่นของโฮล ในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ได้เท่ากับ 2.33x10¹³ ลูกบาศก์เซนติเมตร

คำสำคัญ : ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe, เม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO₃:In, ลักษณะเฉพาะของค่ากระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า, ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe/WO₃:In

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น มิใช่เอกสารฉบับสมบูรณ์หรือการตีพิมพ์
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	ELECTRICAL PROPERTIES OF CdTe / WO ₃ HETEROJUNCTION		
Students	Mr.Techawat Narongrat	Students ID	54050525
	Miss.Somruthai Chatthong	Students ID	54050607
Degree	Bachelor of Science in Applied Physics		
Department	Physics		
Academic Year	2014		
Advisor	Assoc.Prof. Ngamnit Wongcharoen		

ABSTRACT

In this special project, CdTe thin films have been deposited on slide glass substrate by thermal evaporation method in vacuum. WO₃ ceramic doped with 4 at.% In₂O₃ were prepared by solid state reaction method from the mixture of high purity grade of WO₃ and In₂O₃ powders. The mixed powders were ground and press into pellet form of 1 mm thick and 10 mm diameter and subsequently sintered at 1,000°C for 24 hours in air. CdTe/WO₃:In (4 at.%) heterojunction diode was prepared by thermal evaporation CdTe thin film on WO₃:In (4 at.%) 1 mm thick ceramic pellet substrate. The diode was annealed in pure nitrogen atmosphere at temperature ranging 250-400°C for 30 min. Crystal structure and morphology of the CdTe thin films and CdTe/WO₃:In (4 at.%) heterojunction diode were investigated by XRD and SEM, respectively. The transmission spectra of CdTe thin films have been studied by UV-VIS spectrophotometer with the wavelength range 400-1000 nm. The obtained device exhibits a good rectifying behavior from I-V characteristics. Various junction parameters such as barrier height, ideality factor and series resistance were calculated using I-V data and observed to be 0.706 eV, 5.381 and $11 \times 10^3 \Omega$ at room temperature, respectively. From C-V characteristics, the hole concentration in CdTe thin films was calculated to be $2.33 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ at room temperature.

Keywords : CdTe thin films, WO₃:In ceramic, I-V characteristics, CdTe/WO₃:In heterojunction diode

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาของ รองศาสตราจารย์ ดร. จูตินัย แก้วแดง รองศาสตราจารย์ งามนิത്യ วงษ์เจริญ รองศาสตราจารย์ ดร. ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ ที่อำนวยความสะดวกในการใช้ระบบเผยแพร่สารเคมีด้วยความร้อนในสุญญากาศ อุปกรณ์ในการวัดลักษณะเฉพาะต่างๆ ตลอดจนอุปการะทุนสนับสนุนและให้ความรู้และคำปรึกษาทางวิชาการที่ติดต่อมา รวมทั้งปลูกฝังคุณธรรมที่งดงามให้กับลูกศิษย์ทุกคน

ขอขอบคุณ คุณทศพร ชันตยาภรณ์, คุณชนิภรณ์ จุไรสง, คุณนพณัฐ เตชะคำภู นักศึกษาปริญญาโท ห้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุโฟโตนิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ช่วยให้คำแนะนำในการใช้อุปกรณ์ต่างๆ ตลอดจนให้คำแนะนำในการใช้โปรแกรมเพื่อวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลอง

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และอบรมสั่งสอนตั้งแต่การศึกษาภาคบังคับจนถึงปัจจุบัน

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่และผู้มีพระคุณทุกท่าน ที่ให้การอุปการะทุนในการศึกษาเล่าเรียน และเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา

นายเตชวัต

ณรงค์รัตน์

นางสาวสมฤทัย

ชาติทอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินการงานวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเรื่องของลักษณะของโครงสร้างผลึก	6
2.1.1 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ	6
2.1.2 หลักเกณฑ์ในการระบุลักษณะพื้นฐานของผลึก	9
2.1.2.1 การระบุตำแหน่ง	9
2.1.2.2 การระบุทิศทาง	9
2.1.2.3 การระบุชื่อระนาบ	9
2.1.3 โครงสร้างผลึกแคดเมียมเทลลูไรด์	10
2.1.4 โครงสร้างผลึกของสารประกอบ WO_3	11
2.1.5 โครงสร้างผลึกของอินเดียมทังสเตนบรอนซ์	13
2.1.6 เฟสไดอะแกรมของระบบ $In_2O_3-WO_3$	14
2.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์	15
2.2.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก	16
2.2.2 การหาขนาดของเกรน	17
2.3 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน	
แบบส่องกราด	18
2.4 สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.1 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากการวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง	20
2.4.2 ส่วนหางของแถบพลังงาน	21
2.5 สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ	22
2.5.1 การวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์	22
2.5.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง	24
2.5.3 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว	25
2.5.4 ปรากฏการณ์ฮอลล์	26
2.5.5 การศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์	30
2.6 สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง	32
2.6.1 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกักพาหะในช่วงกระแสขาลง	38
2.6.2 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกักพาหะในช่วงกระแสขาขึ้น	39
2.7 รอยต่อของสารกึ่งตัวนำที่เป็นแบบพี-เอ็น	40
2.7.1 รอยต่อของสารกึ่งตัวนำที่เป็นแบบพี-เอ็น เมื่ออยู่ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน	40
2.7.2 รอยต่อของสารกึ่งตัวนำที่เป็นแบบชั้นบันได	43
2.7.3 รอยต่อของสารกึ่งตัวนำที่เป็นแบบพี-เอ็น ภายใต้สภาวะการไบอัสย้อนกลับ	45
2.8 ค่าความจุไฟฟ้า	46
2.9 ลักษณะเฉพาะของค่ากระแสไฟฟ้า – แรงดันไฟฟ้า ของรอยต่อของสารกึ่งตัวนำที่เป็นแบบพี-เอ็น	48
2.10 เงื่อนไขขอบเขตของความเข้มข้นของพาหะข้างน้อย	49
2.11 การวิเคราะห์ไดโอดอุดมคติ	50
2.11.1 ลักษณะสมบัติของไดโอดยาว	51
2.11.2 ลักษณะสมบัติของไดโอดสั้น	52
2.12 กระแสเนื่องจากบริเวณประจุค้าง	54
2.13 การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	57
2.13.1 อัตราการระเหยสาร	57
2.13.2 แหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้ในการระเหยสารด้วยไฟฟ้า	57
2.13.2.1 แหล่งกำเนิดชนิดทั้งสแตน	57
2.13.2.2 แหล่งกำเนิดชนิดแผ่นโลหะค้ำรูป	58
2.14 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำเอกสารไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ได้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.14.1 การประดิษฐ์ไดโอดโปร่งแสงที่มีรอยต่อแบบบิวริทพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ NiV/p-SrCu ₂ O ₂ /n-AZO/ITO/Alkali-free glass โดยวิธีอาร์เอฟ แมกนีตรอน สปีดเตอริง	58
2.14.2 การตอบสนองต่อแสงของไดโอดที่มีรอยต่อแบบบิวริทพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu ₂ O/i-ZnO/n-ZnO/ITO/Glass Substrate	61
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	64
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัย ที่ใช้ในการเตรียมไดโอดของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO ₃ :In โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ W _{1-x} In _x O ₃ (4 at.%) โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ มีวิธีการดำเนินงานดังนี้	64
3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ W _{1-x} In _x O ₃ (4 at.%) เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	64
3.1.2 การคำนวณปริมาณสารตั้งต้นเพื่อเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In _{0.04} W _{0.96} O ₃ (4 at.%) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	65
3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์	65
3.1.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมไดโอดที่มีรอยต่อแบบบิวริทพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO ₃ :In โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO ₃ :In โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ซึ่งเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO ₃ :In นั้นถูกเตรียมขึ้นมาจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	66
3.2 ขั้นตอนการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ W _{1-x} In _x O ₃ (4 at.%) จากสารตั้งต้นเป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง และการเตรียมไดโอดของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO ₃ :In โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO ₃ :In โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	67
3.2.1 ขั้นตอนในการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ W _{1-x} In _x O (4 at.%) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่เนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.2.2	ขั้นตอนในการเตรียมไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO ₃ :In โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO ₃ :In โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศซึ่งเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ W _{1-x} In _x O ₃ (4 at.%) นั้นถูกเตรียมขึ้นมาจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	68
3.2.2.1	การเตรียมแผ่นกระจกสไลด์เพื่อใช้เป็นแผ่นฐานรองรับ	68
3.2.2.2	การเตรียมไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO ₃ :In โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO ₃ :In โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ซึ่งเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO ₃ :In เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	68
3.3	อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่ถูกเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ และของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO ₃ :In (4 at.%) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	71
3.3.1	อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค	71
3.3.2	อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค	71
3.3.3	อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางแสง	71
3.3.4	อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า	71
3.3.4.1	การศึกษาสมบัติเฉพาะของไดโอดด้วยการวัดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า – แรงดันไฟฟ้า (I – V curve) จากนั้นจึงนำไปศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี โดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษายเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	74
4.1 ลักษณะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO ₃ :In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	74
4.2 ผลการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	75
4.2.1 ผลการศึกษาโครงสร้างของผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	75
4.2.2 ผลการศึกษาโครงสร้างของผลึกเชิงมหภาค ด้วยวิธีการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	77
4.2.3 ผลการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	78
4.3 ผลการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO ₃ :In เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	81
4.3.1 ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO ₃ :In ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งและฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO ₃ :In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติ ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.2 ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคและการสังเกตภาคตัดขวาง ตรงบริเวณผิวรอยต่อ ด้วยวิธีการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของ ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO ₃ :In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการ ระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	83
4.4 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ซึ่ง เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	85
4.4.1 ผลการศึกษา ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ของฟิล์มบางของสาร กึ่งตัวนำ CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อน ในระบบสุญญากาศ	85
4.4.2 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO ₃ :In ซึ่งเตรียมโดย วิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	87
4.4.3 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 200 - 300 เคลวิน ของ ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO ₃ :In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อน ในระบบสุญญากาศ	95
4.4.4 ผลการศึกษาสภาพต้านทานเชิงแสงดีอาร์นของไดโอดที่มีรอยต่อแบบ วิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO ₃ :In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	98
4.4.5 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln(R_0/R)$ กับ $1000/T$ เมื่อทำ การวัดที่อุณหภูมิสูง ในช่วงอุณหภูมิ 30 - 185 องศาเซลเซียส ของ เม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO ₃ :In จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดย วิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	101

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.4.6 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(R_0/R)$ กับ $1000/T$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูง ในช่วงอุณหภูมิ 140 - 220 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	101
4.4.7 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสสลับในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ - 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO ₃ :In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	102
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	106
5.1 ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกใสที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	106
5.2 ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO ₃ :In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	107
5.3 สมบัติทางไฟฟ้า ที่ทำการศึกษาโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า ในช่วง -0.5 ถึง 1.5 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง และอุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 200-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO ₃ :In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	107
5.4 ข้อเสนอแนะ	109
เอกสารอ้างอิง	110
ภาคผนวก	114
ภาคผนวก ก	115
ภาคผนวก ข	118

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆของหนึ่งหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ	7
2.2 แสดงระบบผลึกทั้งเจ็ดแบบในระบบสามมิติ	8
2.3 แสดงสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดโปร่งแสงที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{NiV/p-SrCu}_2\text{O}_2/\text{n-AZO/ITO/Alkali-free glass}$	59
2.4 แสดงค่าแรงดันขีดเริ่ม (V_{th}), กระแสอิ่มตัว (I_0), แฟกเตอร์อุดมคติ (n), แฟกเตอร์การกรองกระแสไฟฟ้า (R.F.) ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{p-Cu}_2\text{O/i-ZnO/n-ZnO/ITO/Glass Substrate}$	62
4.1 แสดงค่าคงที่โครมพลิกและขนาดของเกรน ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนیل และมีการแอนนิลที่อุณหภูมิต่างๆ ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที	76
4.2 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนิล และมีการแอนนิลที่อุณหภูมิต่างๆ ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	81
4.3 แสดงค่าคงที่โครมพลิกของเม็ดของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{WO}_3:\text{In}$ ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	83
4.4 แสดงผลการวัดปรากฏการณ์ของฮอลล์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนิล	85
4.5 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ (I_s) ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ (n) ค่าความสูงของกำแพงศักย์ในขณะที่ไบแอสเป็นศูนย์ (ϕ_{b0}) และค่าความต้านทานอนุกรม (R_s) ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน และ วิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{p-CdTe/n-WO}_3:\text{In}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนิล	93
4.6 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ (I_s) ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ (n) ค่าความสูงของกำแพงศักย์ในขณะที่ไบแอสเป็นศูนย์ (ϕ_{b0}) และค่าความต้านทานอนุกรม (R_s) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 200-300 เคลวิน ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน และวิธีของชวง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{p-CdTe/n-WO}_3:\text{In}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมี	

เอกสารนี้เป็นด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนิล นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ 97 ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.7 แสดงค่าความหนาแน่นของพาหะชนิดต่างๆที่ได้จากการวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงดอร์ัน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO ₃ :In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนัล	100
4.8 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่สำคัญ ค่าของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงดอร์ันที่ได้จากการปรับผลการทดลอง ที่อุณหภูมิห้อง ให้เข้ากับฟังก์ชันมัลติเพิลเอ็กซ์โพเนนเชียลของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO ₃ :In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนัล	100
4.9 แสดงพารามิเตอร์ต่างๆที่สำคัญ ที่ได้จากการศึกษาค่าอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีเมื่อในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ ทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO ₃ :In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนัล	105

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า	
2.1	แสดงหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ	6
2.2	แสดงการบอกชื่อระนาบต่างๆของผลึก	10
2.3	แสดงโครงสร้างแบบซิงค์แบลนด์ของผลึกแคดเมียมเทลลูไรด์	10
2.4	แสดงโครงสร้างผลึกของ WO_3 ในกรณีอุดมคติ	11
2.5	แสดงการเชื่อมต่อกันของออกตะฮีดรัดทำให้เกิดอุโมงค์รูปสามเหลี่ยมและอุโมงค์รูปหกเหลี่ยมร่วมกัน	11
2.6	แสดงเฟสโครงสร้างผลึกของสารประกอบ WO_3 ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 5 องศาเซลวิน	12
2.7	แสดงเฟสโตอะแกรมของระบบ W-O ที่เกิดเป็นสารประกอบ WO_3	13
2.8	แสดงโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนัลอินเดียมทั้งสเดนบรอนซ์	13
2.9	แสดงโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลอินเดียมทั้งสเดนบรอนซ์	14
2.10	แสดงเฟสโตอะแกรมของระบบของสารประกอบ $In_2O_3-WO_3$ ในช่วงอุณหภูมิ 700-1400 องศาเซลเซียส จุดวงกลมทึบแสดงเฟสเดี่ยว ส่วนจุดวงกลมโปร่งแสดงเฟสผสม	15
2.11	แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์	16
2.12	แสดงตัวอย่างของสเปกตรัมที่ได้จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	17
2.13	แสดงค่า $\beta_{2\theta}$ เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	17
2.14	แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	18
2.15	แสดงภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มบาง	19
2.16	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง กับความยาวคลื่น โดยเส้นทึบจะแสดงขอบการดูดกลืนพื้นฐาน	20
2.17	แสดงส่วนหางของแถบพลังงานซึ่งมีส่วนหางของแถบวาเลนซ์และส่วนหางของแถบนำ	22
2.18	แสดงตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชั้นสารตัวอย่างเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์	23
2.19	แสดงการต่อขั้วเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์	23
2.20	แสดงการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด
ไม่ว่ากรณีใดๆ หากมีข้อผิดพลาดประการใด ขออภัยเป็นอย่างสูงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการแก้ไข

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า	
2.21	แสดงการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว	25
2.22	แสดงการวัดค่าความต้านทานแผ่นโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น	26
	ก. การวัดแบบสองขั้วโดยมีการเคลื่อนระยะที่ขั้วหนึ่ง	
	ข. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับระยะทางที่ได้จากการวัดชนิดเลื่อนขั้วไฟฟ้า	
2.23	แสดงแผนภาพของปรากฏการณ์ฮอลล์บนแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิดพี	27
2.24	แสดงการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพา์บนสารตัวอย่างที่เป็นแผ่นบางที่มีรูปทรงใดๆ	30
2.25	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I)	31
2.26	แสดงระดับพลังงานของกักตักพาหะชนิดจ็อบิเล็กตรอน (E_{e0}) และกักตักพาหะชนิดจ็อบโฮล (E_{h0}) ที่ปรากฏในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำซึ่งจุดที่บและจุดโปร่งจะแสดงแทนอิเล็กตรอนและโฮล ตามลำดับ	33
2.27	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสขาขึ้นและกระแสขาลง กับช่วงเวลาการตอบสนองต่อแสงของค่าสภาพการนำไฟฟ้าเชิงแสง	35
2.28	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสโฟโต (I_{lp}) กับ เวลา (t) ของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงทั้งช่วงกระแสขาขึ้นและช่วงกระแสขาลง	36
2.29	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสโฟโต (I_{lp}) กับ เวลา (t) เพื่อใช้คำนวณหาความหนาแน่นของกักตักพาหะในช่วงกระแสขาลง	38
2.30	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสแอร์มีลโลเซชัน (I_{nlp}) กับ เวลา (t) เพื่อใช้คำนวณหาความหนาแน่นของกักตักพาหะในช่วงกระแสขาขึ้น	39
2.31	แสดงลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงาน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำที่เป็นแบบพี-เอ็น	42
	ก. ขณะที่สารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดยังไม่สัมผัสกันเป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์	
	ข. ขณะที่สารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดที่ถูกนำมาทำเป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์	
	ค. ขณะที่สารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดถูกนำมาทำเป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์และอยู่ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.32 แสดงไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำที่เป็นแบบพี-เอ็น ในกรณีที่เป็นแบบชั้นบันไดที่เป็นฟังก์ชันกับระยะทาง ก. ความเข้มข้นสารเจือ ข. ความหนาแน่นของพาหะอิสระ ค. ประจุค้าง ง. สนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อ จ. ศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อ	43
2.33 แสดงโพรไฟล์ของค่าพารามิเตอร์ต่างๆในบริเวณเขตปลอดพาหะ ก. แสดงการกระจายความหนาแน่นอะตอมของสารเจือที่มีค่า ไม่สม่ำเสมอภายในเขตปลอดพาหะ ข. ลักษณะของสนามไฟฟ้าในบริเวณเขตปลอดพาหะ เมื่อแรงดันไฟฟ้าไบอัสย้อนกลับมีค่าเปลี่ยนไปเล็กน้อย	47
2.34 แสดงโครงสร้างของไดโอดของสารกึ่งตัวนำที่มีรอยต่อแบบพี-เอ็น ขณะถูกไบอัสไปหน้าด้วยแรงดัน V_a	49
2.35 แสดงการลดลงของค่าความหนาแน่นของโฮลส่วนเกินในเนื้อสาร กึ่งตัวนำชนิดเอ็นของไดโอดของสารกึ่งตัวนำที่มีรอยต่อเป็นแบบพี-เอ็น ในกรณีที่เป็นไดโอดยาวที่อยู่ภายใต้การฉีดพาหะระดับต่ำด้วยแรงดัน ไบอัสไปหน้าค่าเท่ากับ V_a	51
2.36 แสดงกระแสโฮล (เส้นทึบ) กับ กระแสอิเล็กตรอน (เส้นประ) ในเนื้อสาร ด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นซึ่งอยู่นอกรอยต่อพี-เอ็นซึ่งประมาณว่าเป็นกลาง ทางไฟฟ้า (quasi-neutral region) เนื่องจากประมาณว่าไม่ได้รับผลกระทบ จากแรงดันไบอัสไปหน้า V_a	52
2.37 แสดงค่าความหนาแน่นของโฮลภายในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นของไดโอด ของสารกึ่งตัวนำที่มีรอยต่อเป็นแบบพี-เอ็น ในกรณีที่เป็นไดโอดสั้นที่อยู่ ภายใต้การไบอัสไปข้างหน้า V_a	53
2.38 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าอัตราส่วนของ x_i / x_d ที่เป็นฟังก์ชัน กับแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับที่ความหนาแน่นของสารเจือของอะตอมผู้ให้ ค่าต่างๆ ของรอยต่อ $p^+ - n$	56
2.39 แสดงแหล่งกำเนิดชนิดทั้งสอง	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า	
2.40	แสดงแหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้ระเหยสารด้วยไฟฟ้าแบบต่างๆ	58
2.41	แสดงแผนภาพของโครงสร้างของไดโอดโปร่งแสงที่มีรอยต่อแบบ วิธีพันธุของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $NiV/p-SrCu_2O_2/n-AZO/ITO/Alkali-free\ glass$	59
2.42	แสดงสเปกตรัมของค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของไดโอด โปร่งแสงที่มีรอยต่อแบบวิธีพันธุของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $NiV/p-SrCu_2O_2/n-AZO/ITO/Alkali-free\ glass$	60
2.43	แสดงลักษณะเฉพาะของกราฟ I-V ของไดโอดโปร่งแสงที่มีรอยต่อ แบบวิธีพันธุของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $NiV/p-SrCu_2O_2/n-AZO/ITO/Alkali-free\ glass$	60
2.44	แสดงแผนภาพโครงสร้างของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิธีพันธุของฟิล์มบาง ของสารกึ่งตัวนำ $p-Cu_2O/i-ZnO/n-ZnO/ITO/Glass\ Substrate$	61
2.45	แสดงพีคของสเปกตรัมที่ได้จากการศึกษาปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนของ รังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $n-ZnO$ และ $i-ZnO$	62
2.46	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า I กับ V ที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอด ที่มีรอยต่อแบบวิธีพันธุของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p-Cu_2O/i-ZnO/n-ZnO/ITO/Glass\ Substrate$	62
2.47	แสดงแผนภาพลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานของไดโอดที่มีรอยต่อ แบบวิธีพันธุของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p-Cu_2O/i-ZnO/n-ZnO/ITO/Glass\ Substrate$	63
3.1	แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}In_xO_3$ (4 at.%) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยา การเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	65
3.2	แสดงกราฟโปรไฟล์เตาที่ใช้ในการตั้งอุณหภูมิเตาเพื่อทำการเผาเม็ดเซรามิก ของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}In_xO_3$ (4 at.%) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	67
3.3	แสดงภาพถ่ายของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}In_xO_3$ (4 at.%) ที่เตรียม จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า	
3.4	แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO ₃ :In โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ W _{1-x} In _x O ₃ (4 at.%) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	72
3.5	แสดงอุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	72
3.6	แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO ₃ :In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	73
3.7	แสดงอุปกรณ์ที่ใช้วัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า – แรงดันไฟฟ้า และค่าอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับ ความถี่ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO ₃ :In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	73
4.1	แสดงฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนیل	74
4.2	แสดงฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เคลือบอยู่บนเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO ₃ :In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	75
4.3	แสดงที่ความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนิล และมีการแอนนิลที่อุณหภูมิต่างๆ ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4	77
4.5	79
4.6	80
4.7	82
ก.	
ข.	
4.8	82
4.9	83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.10	แสดงภาพถ่าย SEM ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $WO_3:In$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส และมีการแอนนีสที่อุณหภูมิต่างๆ ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที	84
4.11	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ ในขณะที่ไม่มีการจ่ายสนามแม่เหล็ก และมีการจ่ายสนามแม่เหล็ก ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe เมื่อไม่มีการแอนนีส	86
4.12	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe เมื่อไม่มีการแอนนีส	86
4.13	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n- $WO_3:In$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	88
4.14	แสดงกราฟที่ใช้ในการอธิบายกลไกการนำกระแสไฟฟ้าแต่ละช่วง แรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n- $WO_3:In$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	89
4.15	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า lnI กับ V เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n- $WO_3:In$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	89
4.16	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $dV/d(lnI)$ กับ I เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n- $WO_3:In$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $H(I)$ กับ I เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-CdTe}/n\text{-WO}_3:\text{In}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	93
4.18 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า C กับ V ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-CdTe}/n\text{-WO}_3:\text{In}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	94
4.19 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $1/C^2$ กับ V ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-CdTe}/n\text{-WO}_3:\text{In}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	95
4.20 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 200 – 300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-CdTe}/n\text{-WO}_3:\text{In}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	96
4.21 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสโฟโต กับ เวลา ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-CdTe}/n\text{-WO}_3:\text{In}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	98
4.22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าลือกาลิทึมธรรมชาติของกระแสโฟโต กับ เวลา ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-CdTe}/n\text{-WO}_3:\text{In}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	98
4.23 แสดงการพิตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสออร์มัลไลซ์ขาขึ้น กับ เวลา ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-CdTe}/n\text{-WO}_3:\text{In}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	99

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.24 แสดงกราฟพิตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสแอมป์ต่อไมล์ของเซลล์แสงอาทิตย์กับ เวลา ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO ₃ :In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	99
4.25 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln(R_0/R)$ กับ $1000/T$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูง ในช่วงอุณหภูมิ 30-185 องศาเซลเซียสของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO ₃ :In จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งเมื่อไม่มีการแอนนีส	101
4.26 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln(R_0/R)$ กับ $1000/T$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูง ในช่วงอุณหภูมิ 140-220 องศาเซลเซียสของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	102
4.27 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับความถี่ ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ - 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO ₃ :In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	103
4.28 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความนำไฟฟ้า กับ ความถี่ ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ - 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO ₃ :In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	103
4.29 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของ ค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ - 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO ₃ :In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส	104

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.30	แสดงกราฟความสัมพันธ์ของค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ - 2 เมกะเฮิรตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของ ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO ₃ :In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อน ในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีสล	104
4.31	แสดงแผนภาพของลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของไดโอดที่มี รอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO ₃ :In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อน ในระบบสุญญากาศ	105



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พลังงานเป็นสิ่งสำคัญในการดำเนินชีวิตของมนุษย์เป็นอย่างมากตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน และได้มีการใช้พลังงานไปอย่างมากมาย จนทำให้พลังงานที่ได้จากแหล่งพลังงานธรรมชาติ เช่น ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ น้ำมัน นั้นกำลังจะหมดไปจากโลกในเวลาอันใกล้ ทำให้มนุษย์ต้องหาแหล่งพลังงานใหม่ๆ เพื่อมาทดแทนพลังงาน ซึ่งพลังงานจากแสงอาทิตย์ก็เป็นทางเลือกอีกทางหนึ่ง เนื่องจากแสงอาทิตย์เป็นพลังงานธรรมชาติที่สะอาด พบอยู่ทั่วไปและมีอยู่อย่างไม่จำกัด การนำแสงอาทิตย์มาใช้โดยสร้างสิ่งประดิษฐ์ของแสงอาทิตย์นั้นก็ไม่ใช่สร้างมลภาวะเป็นพิษใดๆ ไม่ส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศทางธรรมชาติและความเป็นอยู่ของมนุษย์อีกด้วย

งานวิจัยและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ของรอยต่อพี-เอ็นของสารกึ่งตัวนำซิลิกอน เริ่มขึ้นในปี พ.ศ.2497 หลังจากนั้นงานวิจัยก็แพร่ขยายไปสู่สารกึ่งตัวนำในกลุ่ม II-VI และ I-III-VI₂ เช่น CdTe, CdS, CuInSe₂ และ CuInGaSe₂ เป็นต้น ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์ของสารกึ่งตัวนำในกลุ่ม II-VI ชนิดแรกคือ เซลล์ของแสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อพี-เอ็น (heterojunction solar cell) ของสารกึ่งตัวนำ Cu₂S/CdS ได้รับการพัฒนามาในเวลาใกล้เคียงกับเซลล์แสงอาทิตย์ของสารกึ่งตัวนำ Si ซึ่งปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ในท้องตลาดประดิษฐ์จากผลึกพหุ (polycrystalline) และอะมอร์ฟัส (amorphous) ของซิลิกอนเกือบทั้งหมด

ปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อพี-เอ็นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำออกไซด์ ได้รับการวิจัยและพัฒนามากมาย เช่น p-Cu₂O/n-ZnO, p-Cu₂O/n-CuO, Cu₂O/n-ZnO, และ p-Cu₂O/n-Si เป็นต้น เนื่องจากสารประกอบออกไซด์ส่วนใหญ่มีเสถียรภาพดีแม้ในสภาวะอุณหภูมิสูง ไม่เป็นสารพิษ ราคาข้อมเยา ง่ายเป็นทางเลือกใหม่ที่จะนำมาผลิตเป็นเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อทดแทนซิลิกอนที่ใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบัน จากการศึกษาเบื้องต้นพบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อพี-เอ็นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu₂O/n-ZnO มีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าสูงในระดับ 3.83 เปอร์เซ็นต์ จึงเป็นแรงจูงใจให้นักวิจัยจำนวนมากมุ่งความสนใจยังสารกึ่งตัวนำออกไซด์กันมากขึ้น อีกทั้งได้มีการประดิษฐ์รอยต่อพี-เอ็นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำออกไซด์กับสารประกอบซัลโคไนด์ เช่น CuAlO₂/CdZnS, p-Cu₂Sn_yS₂O/n-ZnO และ CuO/CdS พบว่ามีสมบัติเรียงกระแสที่ดี แต่ยังไม่มียุทธศาสตร์เกี่ยวกับการศึกษาผลการตอบสนองต่อแสงอาทิตย์

เมื่อไม่นานนี้ นักวิจัยได้มีการสนใจศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์และเคมี-ไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำทั้งสแตนออกไซด์ (WO₃) กันมากขึ้น สารกึ่งตัวนำชนิดนี้มีโครงสร้างผลึกแบบออร์โทโรมบิก มีโครงสร้างแถบพลังงานเป็นแบบตรงและมีค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ประมาณ 2.8-3.2 อิเล็กตรอนโวลต์ สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นสีเขียวและช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็นได้ จึงเหมาะที่จะพัฒนาเป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ สารกึ่งตัวนำ WO₃ มีข้อดีหลายประการ เช่น ต้นทุนการผลิตต่ำ มีเสถียรภาพสูง ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม เป็นผลให้มีการนำสารกึ่งตัวนำ WO₃ มาประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ เช่น อุปกรณ์โฟโตโวลตาอิก ฟิล์มเคลือบฟิล์มบางแบบอิเล็กทรอนิกส์

(electrochromic coatings) ตัวเร่งปฏิกิริยาสารเคมี สารกึ่งตัวนำยิ่งยวดที่อุณหภูมิสูง และประยุกต์เป็นขั้วตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง เป็นต้น การสังเคราะห์ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ WO_3 ให้มีโครงสร้างในระดับไมโครเมตร หรือนาโนเมตร สามารถสังเคราะห์ได้หลากหลายวิธีทั้งทางเคมีและทางฟิสิกส์ เช่น วิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ (vacuum evaporation) สเปตเตอร์ริง (sputtering) วิธีพาโอระเหยสารเคมี วิธีออกซิเดชันจากโลหะ วิธีระเหยด้วยลำอิเล็กตรอน และวิธีเคลือบด้วยไฟฟ้าในสารละลายเคมี เป็นต้น สำหรับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe เตรียมขึ้นได้จากหลายวิธี เช่น วิธีสเปรย์ไพโรไลซิส (spray pyrolysis) วิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในสุญญากาศ วิธีเคลือบด้วยไฟฟ้าในสารละลายเคมี และวิธีเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีอบสารละลายเคมี (chemical bath deposition) เป็นต้น

ในโครงการพิเศษนี้ได้ทำการเตรียมและทำการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n- WO_3 :In โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ และที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO_3 :In ซึ่งเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}In_xO_3$ (4 at.%) นั้นจะถูกเตรียมขึ้นมาจากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ WO_3 และ In_2O_3 ที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง ต่อจากนั้นจึงทำการปรับปรุงประสิทธิภาพของไดโอด โดยทำการแอนนัลไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n- WO_3 :In ที่เตรียมได้ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 250 - 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 30 นาที ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาวิธีการเตรียมไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n- WO_3 :In โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ และที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO_3 :In โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ซึ่งเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO_3 :In นั้นจะถูกเตรียมขึ้นมาจากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารประกอบ WO_3 และ In_2O_3 ที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง ต่อจากนั้นจึงทำการปรับปรุงประสิทธิภาพของไดโอดโดยทำการแอนนัลไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n- WO_3 :In ที่เตรียมได้ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 250, 300, 350, 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 30 นาที ต่อไป
2. เพื่อศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n- WO_3 :In ที่เตรียมได้ทั้งหมด ได้แก่ ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscop:SEM) ทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ โดยการทำให้ขั้วเล็กโทรด ด้วยการป้ายกาวเงินนำไฟฟ้าเป็นรูปวงกลมทางด้านที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO_3 :In และป้ายกาวเงินนำไฟฟ้าเป็นรูปวงกลมให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.2 เซนติเมตร ทางด้านที่เป็นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe แล้วจากนั้นจึงนำไปศึกษาสมบัติเฉพาะกระแสกับแรงดันไฟฟ้า (I-V curve), ค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า (C-V curve) แล้วต่อจากนั้นจึงนำไปศึกษา

อิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปี โดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ต่อไป

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe โดยทำการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ลงบนฐานแผ่นรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อน ความร้อนในระบบสุญญากาศ
2. ทำการศึกษาสมบัติพื้นฐานทางฟิสิกส์ต่างๆ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่ถูกเคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมได้ โดยทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ทำการศึกษาสมบัติทางแสง ด้วยการวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV - VIS spectrophotometer) เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน และคำนวณช่องว่างแถบพลังงาน (E_g)
3. ทำการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $WO_3:In$ จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ WO_3 และ In_2O_3 โดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง
4. ทำการศึกษาสมบัติพื้นฐานทางฟิสิกส์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $WO_3:In$ โดยทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ทำการศึกษาคุณสมบัติทางแสง โดยการวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง และศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสสลับโดยการวัดอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน
5. ทำการประดิษฐ์ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n- $WO_3:In$ โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $WO_3:In$ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ
6. ทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสตรงของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n- $WO_3:In$ ที่เตรียมได้โดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า - แรงดันไฟฟ้า (I-V curve) และค่าความจุไฟฟ้า - แรงดันไฟฟ้า (C-V curve) อุ่มทงุมิต่างๆ

1.4 ขั้นตอนการดำเนินการงานวิจัย

1. ค้นคว้าและศึกษาข้อมูลต่างๆตลอดจนทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการระเหยสารเคมีในระบบสุญญากาศ พร้อมทั้งจัดหาวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ทำงานวิจัยครั้งนี้ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และสงวนไว้เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่หรือใช้เพื่อการค้าโดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

2. ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ลงบนแผ่นรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ
3. ทำการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่ถูกเคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ได้แก่ทำการศึกษาคross-section ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จากเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟร็กโทรมิเตอร์ Bruker รุ่น D8 Advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ในย่าน $Cu_{K\alpha}$ 1.5406 อังสตรอม โดยใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์ และความต่างศักย์ 25 กิโลโวลต์ ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ LEO รุ่น LEO 1455 VP ทำการศึกษาสมบัติทางแสงด้วยการวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงด้วยเครื่องยูวี - วิสสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ยี่ห้อ Thermoelectroncorporation ($He\lambda$ ions α) โดยใช้ความยาวคลื่นช่วง 220-1,100 นาโนเมตร เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน และคำนวณหา ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g)
4. ทำการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $WO_3:In$ จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ WO_3 และ In_2O_3 โดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็งที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
5. ทำการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}In_xO_3$ (4 at.%) โดยทำการศึกษาคross-section ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จากเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟร็กโทรมิเตอร์ Bruker รุ่น D8Advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ในย่าน $Cu_{K\alpha}$ 1.5406 อังสตรอมโดยใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์ และความต่างศักย์ 25 กิโลโวลต์ ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ LEO รุ่น LEO 1455 VP ทำการศึกษาคุณสมบัติทางแสงด้วยการวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง ด้วยเครื่องยูวี-วิสสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ยี่ห้อ hermoelectroncorporation ($He\lambda$ ions α) โดยใช้คลื่นความยาวช่วงคลื่น 220 - 1,100 นาโนเมตร เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน และคำนวณหา ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g)
6. ทำการประดิษฐ์ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n- $WO_3:In$ โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $WO_3:In$ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ โดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 40 องศาเซลเซียส
7. ทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสตรงไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n- $WO_3:In$ โดยการทำขั้วอิเล็กโทรด ด้วยการป้ายกาวเงินนำไฟฟ้าเป็นรูปวงกลมให้เต็มหน้าทางด้านที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $WO_3:In$ และป้ายกาวเงินนำไฟฟ้า เป็นรูปวงกลมให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.2 เซนติเมตร บนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe แล้วจึงนำไปศึกษาสมบัติเฉพาะของไดโอดด้วยการวัดความสัมพันธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่ควรนำข้อมูลไปใช้ในการค้า

ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า ที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 200-300 เคลวิน และค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า (C-V curve) ที่อุณหภูมิต้อง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้ทราบถึงวิธีการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่ถูกเคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ทั้งในกรณีที่ไม่มีการแอนนیلและมีการแอนนิลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 250-400 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 30 นาที
2. ทำให้ทราบถึงสมบัติพื้นฐานทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่ถูกเคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมได้ทั้งหมด
3. ทำให้ทราบถึงการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $WO_3:In$ จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ WO_3 และ In_2O_3 โดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง
4. ทำให้ทราบถึงสมบัติพื้นฐานทางฟิสิกส์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $WO_3:In$
5. ทำให้ทราบถึงวิธีการประดิษฐ์ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n- $WO_3:In$ โดยทำการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $WO_3:In$ ด้วยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ
6. ทำให้ทราบถึงสมบัติพื้นฐานทางฟิสิกส์ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n- $WO_3:In$ ที่เตรียมได้จากฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $WO_3:In$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

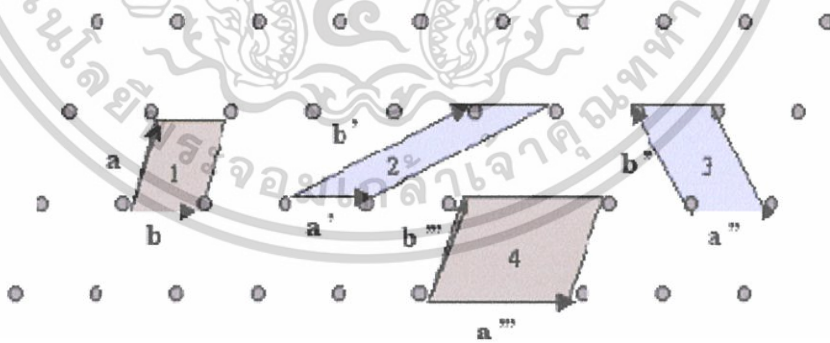
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเรื่องของลักษณะของโครงสร้างผลึก (Runyan, 1975; Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2531; งามนิตย์, 2545; จูตินัย, 2549; จูตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; จูตินัย, 2551)

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

2.1.1 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ

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



รูปที่ 2.1 แสดงหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

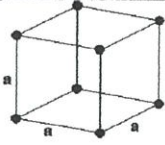
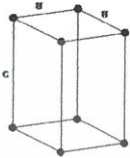
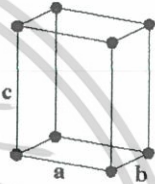


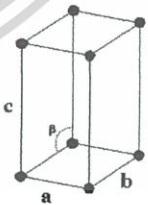
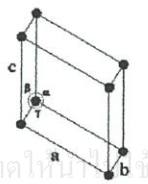
ตารางที่ 2.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆของหนึ่งหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ

ชนิดของโครงผลึกสองมิติ	ค่าคงที่ของ โครงผลึก	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 ทั้งนี้สามารถจัดแบ่งรูปแบบของโครงสร้างผลึกขึ้นมาโดยสามารถแบ่งออกได้เป็นสิบสี่แบบในสามมิติ ซึ่งจัดได้เป็นเจ็ดกลุ่มคือ ไตรคลินิก (triclinic), โมโนคลินิก (monoclinic), ออร์โธโรมบิก (orthorhombic), เตตระโกนัล (tetragonal), คิวบิก (cubic), รอมโบฮีดรัล (rhombohedral) และเฮกซะโกนัล (hexagonal)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 แสดงระบบผลึกทั้งเจ็ดแบบในระบบสามมิติ

ระบบผลึก	ค่าคงที่ของโครงผลึกและมุมผลึก	รูปทรงเลขาคณิตของหน่วยเซลล์
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 ไม่อนุญาตให้ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

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

เนื่องจากผลึกมีสมบัติที่ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของทิศทาง และระนาบของผลึก ดังนั้นจึงต้องระบุแน่นอนว่ากำลังศึกษาลักษณะส่วนใดของผลึกอยู่ การระบุลักษณะดังกล่าวจะบอกถึงตำแหน่งของทิศทางและระนาบของผลึกที่กำลังศึกษาอยู่นั้น มีเกณฑ์พื้นฐานดังนี้

2.1.2.1 การระบุตำแหน่ง

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

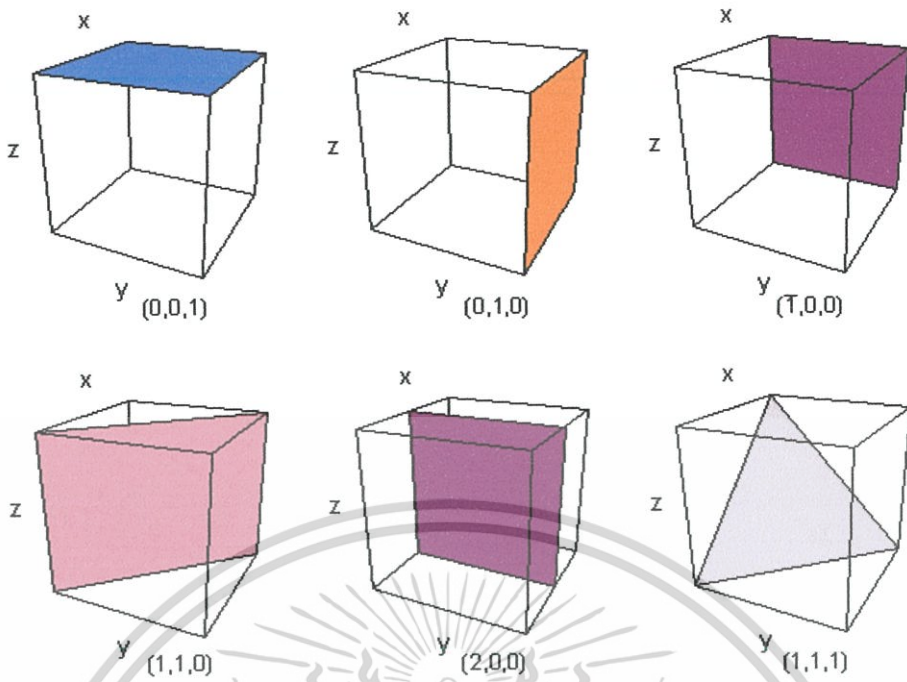
2.1.2.2 การระบุทิศทาง

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

2.1.2.3 การระบุชื่อระนาบ

การระบุชื่อระนาบของผลึกจะใช้อักษร (hkl) ให้สังเกตการใช้วงเล็บ และไม่มีเครื่องหมาย “ , ” คั่นอยู่ระหว่างค่า (hkl) เรียกว่า ดัชนีมิลเลอร์ (miller indices) ระนาบของผลึกเป็นสิ่งสำคัญที่สุดอีกประการหนึ่งในการศึกษาผลึก เพราะในแต่ละระนาบจะประกอบไปด้วย อะตอม ไอออน หรือ โมเลกุล เรียงตัวกันอยู่บนระนาบนั้น อาจกล่าวได้ว่าระนาบแต่ละระนาบจะมีความแตกต่างกันเช่นเดียวกับทิศทาง จุดที่ระนาบหนึ่งๆ ตัดแกนผลึกจะได้มาจากค่าส่วนกลับของดัชนีมิลเลอร์ เช่น ระนาบ (010) จะตัดแกน (x,y,z) ที่จุด $(1/0,1/1,1/0)$ หรือจุด $(\infty,1,\infty)$ นั่นเอง (ระยะอนันต์หมายถึงระนาบนั้นขนานกับแกนนั้นและไปตัดแกนนั้นที่ระยะอนันต์) ดังแสดงในรูป 2.2 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระนาบต่างๆ กับระยะตัดแกนอ้างอิง

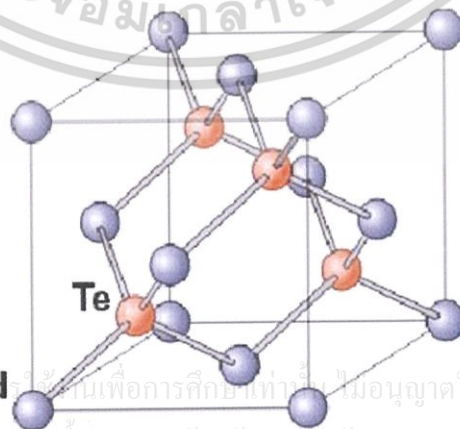
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 แสดงการบอกชื่อระนาบต่างๆของผลึก

2.1.3 โครงสร้างผลึกแคดเมียมเทลลูไรด์

ผลึกแคดเมียมเทลลูไรด์เป็นสารประกอบกึ่งตัวนำหมู่ 2-6 มีโครงสร้างแบบซิงค์แบลนด์ มีค่าคงตัวของโครงสร้างผลึกเท่ากับ 6.481 อังสตรอม และมีค่าความหนา 6.2 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีจุดหลอมเหลว 1040 องศาเซลเซียส เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 1.50 อิเล็กตรอนโวลต์ มีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงในย่านความยาวคลื่นแสงที่ตามองเห็น สำหรับแคดเมียมเทลลูไรด์ที่มีความหนาในระดับไมครอนสามารถดูดกลืนพลังงานโฟตอนได้มากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ผลึกแคดเมียมเทลลูไรด์เสถียรที่อุณหภูมิสูงกว่า 500 องศาเซลเซียส ดังนั้นผลึกแคดเมียมเทลลูไรด์จึงเหมาะกับการนำมาใช้เป็นชั้นดูดกลืนพลังงานโฟตอนในเซลล์แสงอาทิตย์ ดังรูปที่ 2.3

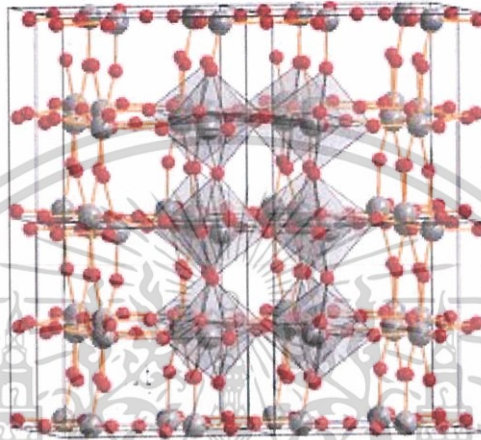


รูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างแบบซิงค์แบลนด์ของผลึกแคดเมียมเทลลูไรด์

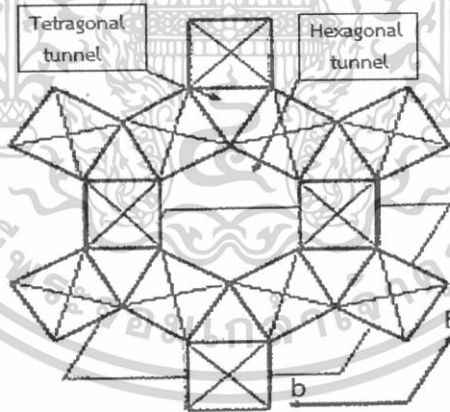
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ **Cd** ใช้สำหรับการศึกษาระดับปริญญาโท ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4 โครงสร้างผลึกของสารประกอบ WO_3

โครงสร้างผลึกของทั้งสเดนออกไซด์ในอุดมคติประกอบไปด้วยออกตะฮีดรัลจำนวนมากซึ่งแต่ละออกตะฮีดรัลจะไข่มุมเชื่อมต่อกันกลายเป็นโครงข่ายสามมิติดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยแต่ละออกตะฮีดรัลจะมีอะตอมของธาตุ W เป็นศูนย์กลางและมีอะตอมของธาตุ O จำนวน 6 อะตอมอยู่ล้อมรอบ การเชื่อมต่อกันของแต่ละออกตะฮีดรัลจะก่อให้เกิดเป็นอุโมงค์แนวยาวในหลายรูปแบบเช่น อุโมงค์รูปสามเหลี่ยม อุโมงค์รูปสี่เหลี่ยม รูปที่ 2.5 แสดงให้เห็นอุโมงค์สามเหลี่ยมและอุโมงค์หกเหลี่ยมเกิดขึ้นร่วมกัน



รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างผลึกของ WO_3 ในกรณีอุดมคติ

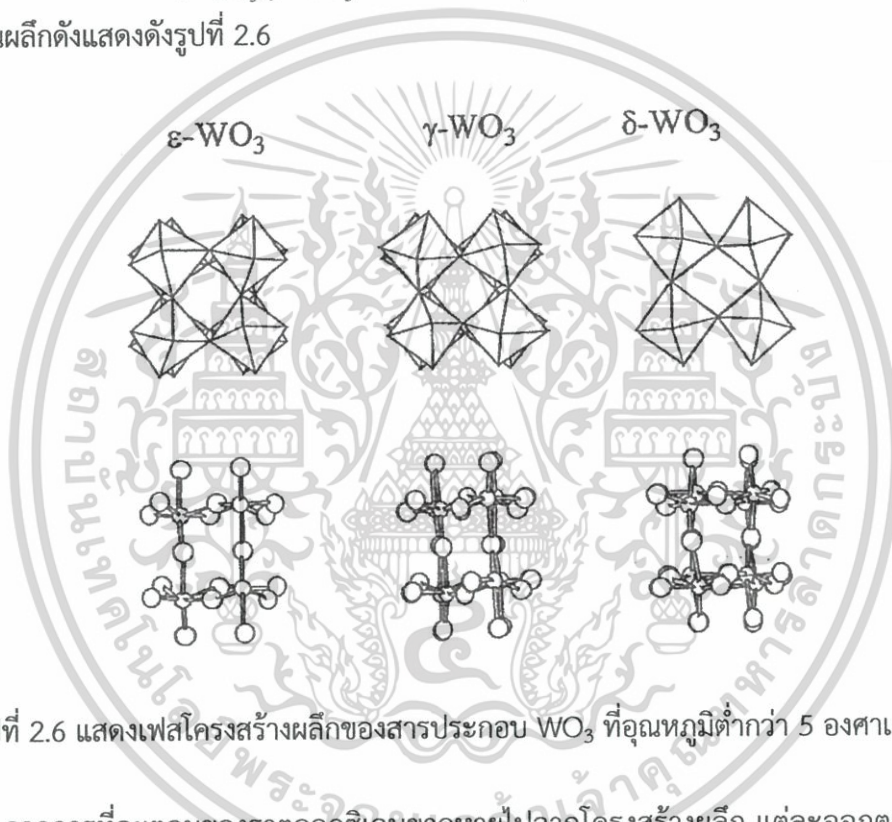


รูปที่ 2.5 แสดงการเชื่อมต่อกันของออกตะฮีดรัลทำให้เกิดอุโมงค์รูปสามเหลี่ยมและอุโมงค์รูปหกเหลี่ยมร่วมกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารประกอบของ WO_3 ในกรณีอุดมคติจะมีปริมาณของอะตอมของธาตุ O เท่ากับ 75 เปอร์เซ็นต์โดยมวล แต่การเกิดแวแคนซีออกซิเจน จะส่งผลให้โครงสร้างผลึกเปลี่ยนแปลงไปทำให้เกิดเฟสต่างๆ จำนวนมากเช่น $\alpha-WO_x$ ($2.98 < x < 3.0$), $\beta-WO_x$ ($2.83 < x < 2.90$), $\gamma-WO_x$ ($2.66 < x < 2.72$) และ

สารประกอบ WO_2 โครงสร้างผลึกของเฟสของสารประกอบ WO_3 ในอุดมคติที่ไม่มีแนวแกนซีของอะตอมออกซิเจนจะมีโครงสร้างผลึกในระบบโมโนคลินิก (สเปซกรุป $P2_1$) ที่อุณหภูมิห้อง $a = 7.297$ อังสตรอม, $b = 7.539$ อังสตรอม, $c = 7.688$ อังสตรอม, $\beta = 90.91$ แต่มีผู้พบว่าที่อุณหภูมิห้อง สารประกอบ WO_3 มักจะเกิดเป็นเฟสโมโนคลินิกร่วมกับ ไตรคลีนิก (triclinic)

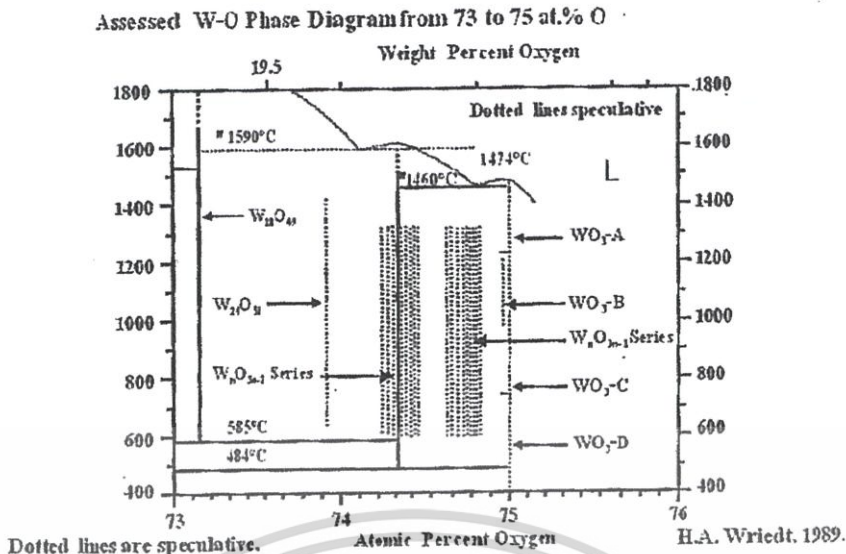
อย่างไรก็ตามโครงสร้างผลึกของสารประกอบ WO_3 ยังเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิอีกด้วย กล่าวคือในช่วง อุณหภูมิต่ำ 50 ถึง 17 องศาเซลเซียส จะมีโครงสร้างผลึกในระบบไตรคลีนิก ในช่วงอุณหภูมิ 17-330 องศาเซลเซียสจะเปลี่ยนเป็นแบบโมโนคลินิก ในช่วงอุณหภูมิ 330-740 องศาเซลเซียสจะมีโครงสร้างผลึกแบบออร์โธโรมบิก แต่ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 740 องศาเซลเซียสจะเป็นแบบเตตระโกนัล จากข้อมูลล่าสุด พบว่าโครงสร้างผลึกของสารประกอบ WO_3 ที่อุณหภูมิต่ำกว่าระดับ 5 องศาเซลวิน เป็นไปได้ 3 แบบคือ $\epsilon-WO_3$, $\gamma-WO_3$ และ $\delta-WO_3$ ซึ่งเกิดจากแต่ละออกตะฮีดรัลเอียงไปจากแนวแกนผลึกดังแสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงเฟสโครงสร้างผลึกของสารประกอบ WO_3 ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 5 องศาเซลวิน

จากการที่อะตอมของธาตุออกซิเจนขาดหายไปจากโครงสร้างผลึก แต่ละออกตะฮีดรัลของสารประกอบ WO_3 ที่เคยใช้มุมเชื่อมต่อกันจะเปลี่ยนเป็นใช้ขอบของออกตะฮีดรัลเชื่อมต่อกันจึงส่งผลให้เกิดเฟสอนสตอยคิโอเมตริกจำนวนมากดังรูปที่ 2.7

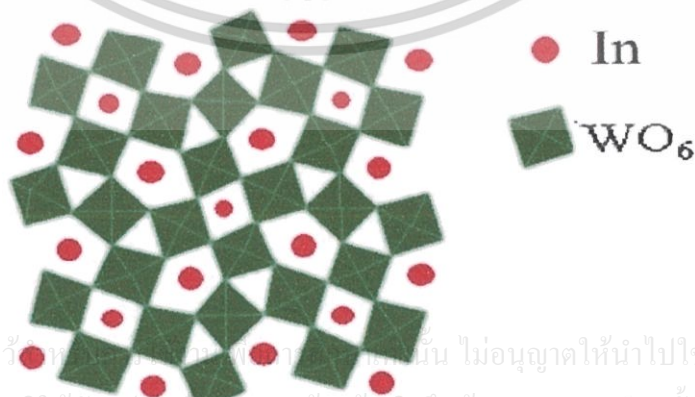
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 แสดงเฟสไดอะแกรมของระบบ W-O ที่เกิดเป็นสารประกอบ WO_3

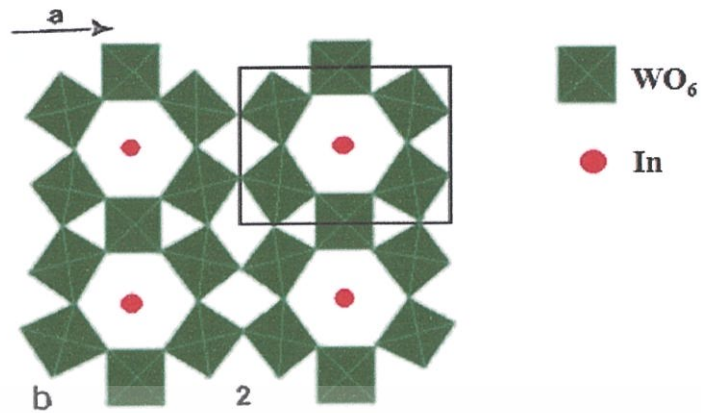
2.1.5 โครงสร้างผลึกของอินเดียมทังสเตนบรอนซ์

จากการที่แต่ละออกตะฮีดริลของสารประกอบ WO_3 ใช้มุมเชื่อมต่อกันจนกลายเป็นโครงข่ายของอูโมงค์ในรูปแบบต่างๆ ที่ว่างภายในอูโมงค์สามารถที่จะใส่อะตอมธาตุโลหะต่างๆ เข้าไปได้ทำให้เกิดเป็นสารประกอบที่เรียกว่าทังสเตนบรอนซ์มีสูตรเคมีคือ M_xWO_3 การแทรกอะตอมโลหะเข้าไปในอูโมงค์ทำให้อูโมงค์มีสมมาตรต่างออกไปจากเดิมกลายเป็นสมมาตรแบบเตตระโกนัลกับเฮกซะโกนัล สารประกอบ $In_{0.02}WO_3$ และ $In_{0.03}WO_3$ มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเตตระโกนัลทังสเตนบรอนซ์ ลักษณะพิเศษของเตตระโกนัลทังสเตนบรอนซ์คือ อูโมงค์จะมี 3 แบบคือ สามเหลี่ยมสี่เหลี่ยม และห้าเหลี่ยมผสมผสานกันดังรูปที่ 2.8 แต่เมื่อปริมาณอะตอมของธาตุ In เพิ่มขึ้นสารประกอบจะมีสีแวววาวคล้ายโลหะและโครงสร้างผลึกจะเปลี่ยนไปเป็นเฮกซะโกนัลทังสเตนบรอนซ์ บูชาร์ดและกิลสัน (Bouchard and Gillson, 1968) พบว่า สัดส่วนโมล x สูงถึง 0.33 โครงสร้างยังคงเป็นเฮกซะโกนัลทังสเตนบรอนซ์ เอกลักษณะของเฮกซะโกนัลทังสเตนบรอนซ์คืออูโมงค์จะเป็นรูปสามเหลี่ยม สี่เหลี่ยม และหกเหลี่ยมผสมผสานกันแต่ละอะตอมของธาตุ In จะเข้าไปอยู่ในอูโมงค์รูปหกเหลี่ยม ดังรูปที่ 2.9



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้... ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า... ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.8 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนัลอินเดียมทังสเตนบรอนซ์

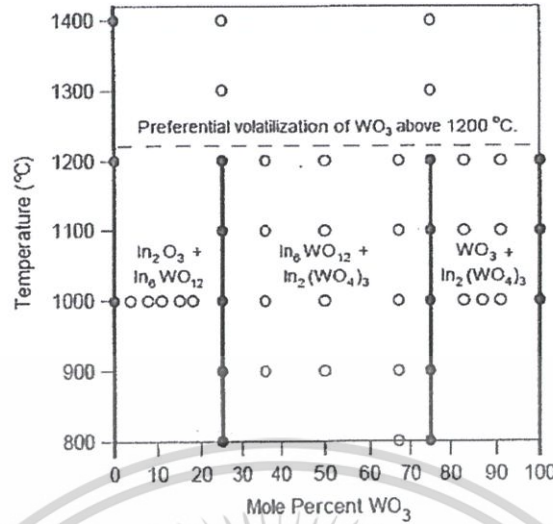


รูปที่ 2.9 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลอินเดียมทังสเตนบรอนซ์

2.1.6 เฟสไดอะแกรมของระบบ $\text{In}_2\text{O}_3\text{-WO}_3$

ริชาร์ดและเอ็ดเวิร์ด (Richard and Edwards, 2004) ได้ทำการศึกษาเฟสไดอะแกรมของระบบสารประกอบ $\text{In}_2\text{O}_3\text{-WO}_3$ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 พบว่ามีสารประกอบที่เสถียรคือ $\text{In}_2(\text{WO}_4)_3$ และ $\text{In}_6\text{WO}_{12}$ สารประกอบ $\text{In}_2(\text{WO}_4)_3$ สามารถนำไปเป็นตัวนำไฟฟ้าชนิดแคตไอออนประจุ +3 ส่วนสารประกอบ $\text{In}_6\text{WO}_{12}$ มีศักยภาพที่จะนำไปประดิษฐ์เป็นตัวตรวจวัดนิวตรินจากดวงอาทิตย์ ฟิล์มบางของสารประกอบ $\text{In}_6\text{WO}_{12}$ สามารถเตรียมไว้โดยวิธีโซล-เจล สารประกอบ In_2O_3 เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type) เนื่องจากแวนแคนซีของอะตอมออกซิเจน แต่ถ้ามมีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Sn จะทำให้นำไฟฟ้าได้อย่างดีมาก ปัจจุบันมีการผลิตเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของสิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ สารประกอบอินเดียมทังสเตนบรอนซ์ (In_xWO_3) รู้จักกันมานานแล้วฟิล์มบางของสารประกอบ WO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ In มีศักยภาพที่จะนำไปประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์ตรวจจับแก๊สหลายชนิด เช่น NH_3 , CH_4 และ CO เป็นต้นสารประกอบของ WO_3 ในรูปของฟิล์มบางสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นหน้าต่างอัจฉริยะจอแบนแสดงผล ตัวตรวจจับแก๊สชนิดต่างเพื่อประโยชน์ต่อสิ่งแวดล้อมและเซริกของสารประกอบ WO_3 สามารถประดิษฐ์เป็นวาริสเตอร์แรงดันไฟฟ้าต่ำมีลักษณะความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้าสูง ได้มีการศึกษาความเป็นวาริสเตอร์ของสารประกอบ WO_3 โดยการเจือด้วยอะตอมหลายชนิด เช่น Al_2O_3 , Co_3O_4 , MnO_2 , Na_2O และ Pr_6O_{12} เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 แสดงเฟสไดอะแกรมของระบบของสารประกอบ $\text{In}_2\text{O}_3\text{-WO}_3$ ในช่วงอุณหภูมิ 700-1400 องศาเซลเซียส จุดวงกลมที่แสดงเฟสเดียว ส่วนจุดวงกลมโปร่งแสดงเฟสผสม

2.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; ฐิตินัย, 2551)

การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตรมิเตอร์ โดยใช้รังสีเอกซ์ความยาวคลื่นเดี่ยวตกกระทบตัวอย่าง ซึ่งอาจเป็นผลึกเดี่ยวหรือผลึกพหุพันธ์ก็ได้ สารตัวอย่างจะหมุนไปเป็นมุม θ ในขณะที่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ รังสีเอกซ์จะเคลื่อนที่ไปเป็นมุม 2θ เพื่อให้การเลี้ยวเบนสอดคล้องกับกฎของแบรกก์

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

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

เมื่อ d_{hkl} คือ ระยะระหว่างระนาบที่ขนานกัน

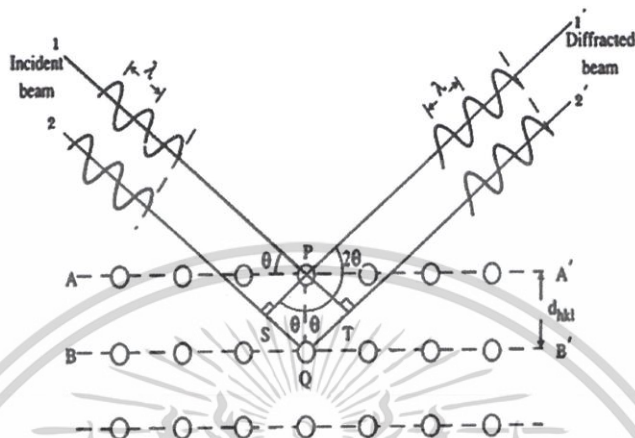
θ คือ มุมของรังสีสะท้อนจากระนาบแบรกก์ของรังสีเอกซ์ซึ่งจะเท่ากับมุมของรังสีตกกระทบ

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

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

θ คือ มุมเลี้ยวเบนที่เป็นมุมระหว่างรังสีตกกระทบทำกับรังสีสะท้อน

ระนาบต่าง ๆ ของผลึกที่ก่อให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ต้องสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ เรียกว่าระนาบแบรกก์ (Bragg plane) และมุมที่รังสีสะท้อนทำกับแนวที่ขนานกับรังสีตกกระทบเรียกว่ามุมเลี้ยวเบน (diffraction angle) ซึ่งมีค่าเป็นสองเท่าของมุมตกกระทบ (2θ) ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์

2.2.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

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

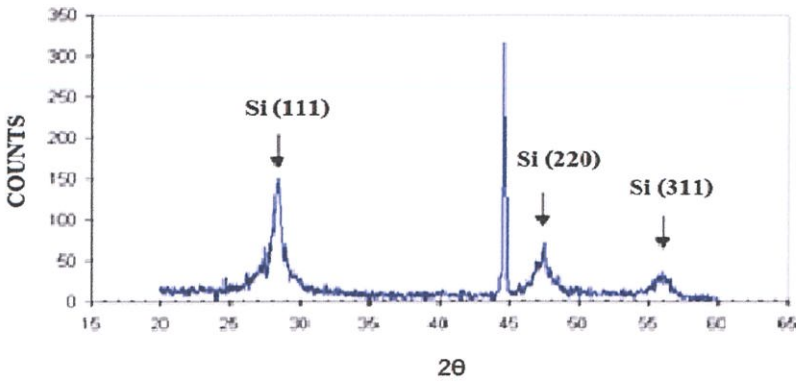
สมการสำหรับหาค่าคงที่ของโครงผลึก (lattice constant) สำหรับโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์สามารถหาได้จากสมการที่ (2.2)

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

และสำหรับโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลหาได้จากสมการที่ (2.3)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารเพื่อการเรียนการสอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 h, k, l คือ ดัชนีมิลเลอร์ที่บอกชื่อระนาบของผลึก
 ไม่ว่าจะดีใจเพียงใด ก็ยังมีเหตุผลเบื้องหน้าที่ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 แสดงตัวอย่างของสเปกตรัมที่ได้จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

2.2.2 การหาขนาดของเกรน

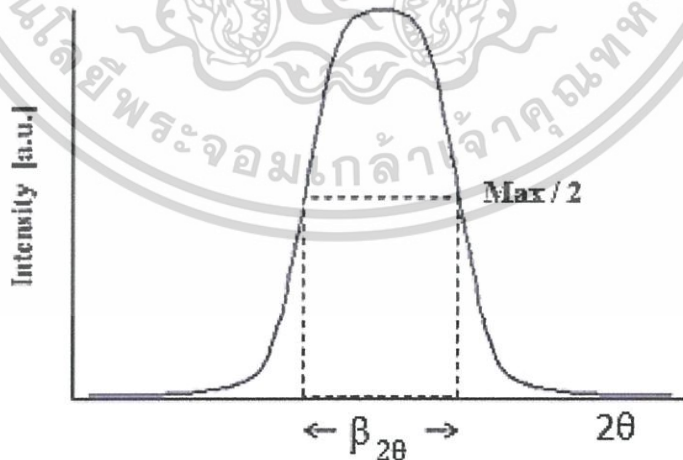
การหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์สามารถหาโดยเลือกพีคที่มีความเข้มสูงสุด ดังในรูปที่ 2.13 และใช้สมการของเชอร์เรอร์ (Scherer) คำนวณหาขนาดของเกรนดังนี้

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

เมื่อ D คือ ขนาดของเกรน

k คือ ค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับขนาดและรูปร่างของเกรน

$\beta_{2\theta}$ คือ ระยะเวลากว้างของพีคที่ความเข้มที่ค่าเป็นครึ่งหนึ่งของความเข้มสูงสุด (full width at half-maximum of the diffraction peak)



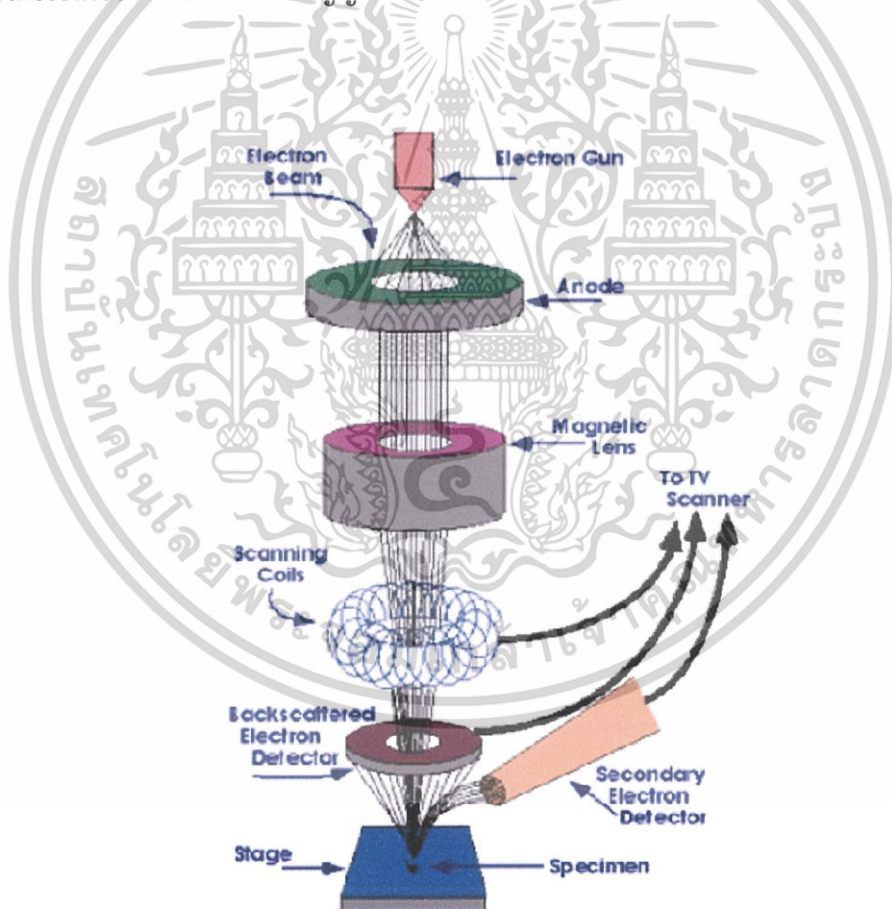
รูปที่ 2.13 แสดงค่า $\beta_{2\theta}$ เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Sze S.M., 1981; Kittel, 2005; ฐิตินัย, 2531; งามนิตย์, 2530; ดุสิต, 2535; Schroder D.K., 1990; สิทธิชัย, 2551; ฐิตินัย, 2550; งามนิตย์, 2553)

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

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

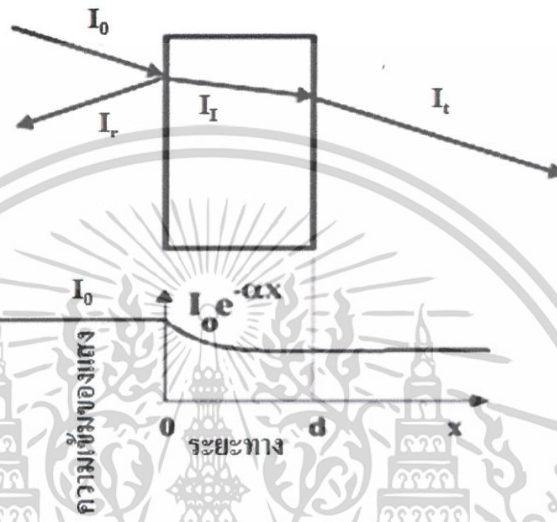


รูปที่ 2.14 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

พิจารณาการศึกษาวิธีวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงและค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง เมื่อแสงเดินทางไปกระทบฟิล์มบางแสงบางส่วนจะสะท้อนกลับที่ผิวของฟิล์มบาง บางส่วนของแสงจะเดินทางเข้าไปในแผ่นฟิล์มบางและถูกดูดกลืนดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 แสดงภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มบาง

- เมื่อ I_0 คือ ความเข้มแสงตกกระทบแผ่นฟิล์มบาง
 I_r คือ ความเข้มแสงสะท้อนจากฟิล์มบาง
 I_t คือ ความเข้มแสงส่งผ่านออกมาจากฟิล์มบาง
 I_i คือ ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบาง
 R คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง (reflectivity)
 T คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (transmittance)
 α คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (absorption coefficient)
 d คือ ระยะทางที่แสงเดินทางในแผ่นฟิล์มบาง

สัมประสิทธิ์การสะท้อนของแสงมีค่าเท่ากับ

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

หรือ

$$I_r = RI_0 \quad (2.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า
 ไม่ว่าจะตีพิมพ์หรือเผยแพร่ในรูปแบบใดก็ตาม หากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 เพราะฉะนั้น ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางมีค่า

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

เมื่อแสงนี้เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางจะถูกดูดกลืนทำให้ความเข้มแสงภายในแผ่นฟิล์มบางลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลตามระยะทาง ดังนั้นความเข้มแสงที่ส่งผ่านฟิล์มบางมีค่าดังสมการ

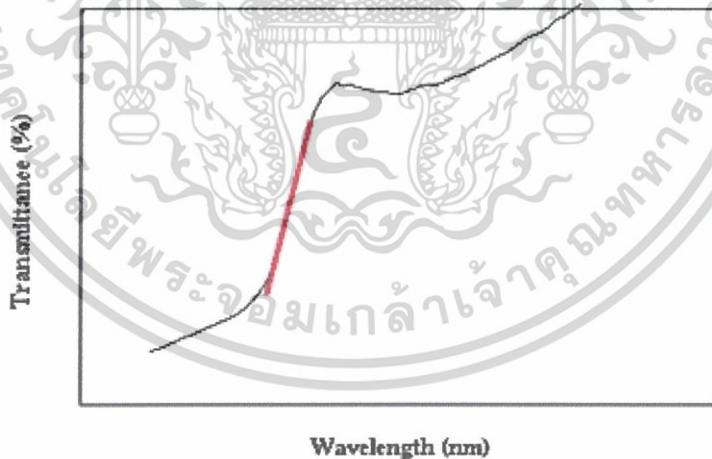
$$I_t = I_i e^{-\alpha d} = (1 - R) I_0 e^{-\alpha d} \quad (2.8)$$

ถ้าไม่มีการสะท้อนแสงที่ผิวด้านหลังสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของแสงจะมีค่าเท่ากับ

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

2.4.1 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากการวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง

การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำเกิดจากการที่อิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากแสงที่มีพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าแถบช่องว่างพลังงาน แล้วย้ายสถานะพลังงานจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปสู่แถบนำ สเปกตรัมการดูดกลืนแสงบริเวณที่พลังงานโฟตอนมีค่าน้อยจะมีลักษณะเป็นขอบ แสดงถึงการลดลงของการดูดกลืนแสงอย่างกระทันหัน ขอบลักษณะนี้เรียกว่าขอบการดูดกลืนแสงหรือขอบการดูดกลืนพื้นฐาน (absorption edge or fundamental edge) แสดงได้ดังรูปที่ 2.16 พลังงานโฟตอน ที่ขอบการดูดกลืนแสงมีค่าเท่ากับผลต่างของค่าพลังงานที่วัดจากจุดต่ำสุดของแถบความนำ และ จุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์จุดที่เส้นตรงตัดกับแกนในแนวนอนจะให้ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) วิธีการนี้เป็นการกำหนดค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่นิยมมากที่สุด



รูปที่ 2.16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง กับ ความยาวคลื่น โดยเส้นที่บจะแสดงขอบการดูดกลืนพื้นฐาน

การหาค่าของช่องว่างแถบพลังงานสามารถพิจารณาจากสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (α) ของสารกึ่งตัวนำจะสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (T) จากรูปที่ 2.16 แสดงภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบจากด้านซ้ายของฟิล์มบาง (I_0) ความเข้มแสงภายในฟิล์มบางจะลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียล และมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงโดยทั่วไป (R) มีค่าน้อยมากจะได้

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

ดังนั้น

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

ที่กล่าวมา เป็นการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงจากสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง โดยไม่คิดถึงการสะท้อนของแสงสำหรับกรณีการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง เนื่องจาก การย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง กับค่าช่องว่างแถบพลังงาน ซึ่งมีลักษณะเป็นพาราโบลาช่องว่างแถบพลังงานของแผ่นฟิล์มบาง ประมาณได้โดยการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ซึ่งจะถูดูดกลืนเมื่อแสงที่ตกกระทบบน แผ่นฟิล์มบางมีค่าพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าของแถบพลังงานต้องห้ามที่ขอบของการดูดกลืนค่า สัมประสิทธิ์การดูดกลืนจะมีค่าเป็น

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

เมื่อ A คือ ค่าคงที่ และสมการที่ (2.12) ใช้กับสารที่มีสถานะพลังงานแบบตรง

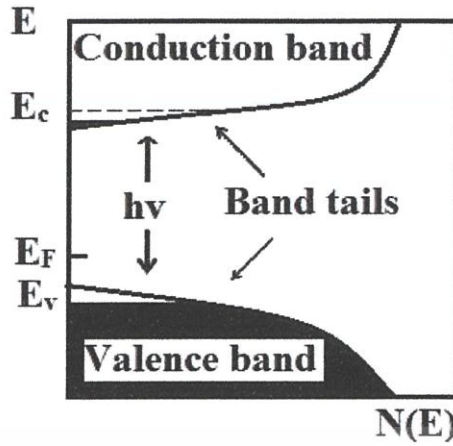
$$(\alpha hv)^{1/2} = B(hv - E_g) \quad (2.13)$$

เมื่อ B คือ ค่าคงที่ และสมการที่ (2.13) ใช้กับสารที่มีสถานะพลังงานแบบเฉียง

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

วัสดุประเภทฟิล์มบางมักมีขอบพร่องของผลึกจำนวนมากระดับพลังงานของขอบกพร่องของผลึกเหล่านี้จะมีอันตรกิริยาต่อกันส่งผลให้ระดับพลังงานเหล่านี้แผ่ขยายออกโดยจะไม่เป็น ระดับพลังงานเฉพาะค่า (discrete level) อีกต่อไปบางครั้งก็แผ่ออกไปจรดขอบบนสุดของแถบวาเลนซ์ หรือขอบล่างสุดของแถบนำซึ่งเสมือนกับว่าแถบวาเลนซ์หรือแถบนำนี้มีความหนาแน่น ของสถานะทางพลังงาน (energy density of state) ยื่นเข้าไปในช่องว่างแถบพลังงานซึ่งนิยมเรียก ส่วนที่ยื่นเข้าไปในแถบช่องว่างแถบพลังงานนี้ว่าส่วนหางของแถบพลังงานหรือส่วนหางของ เอร์บัค (band tail หรือ Urbach's tail) ดังแสดงดังรูป 2.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 แสดงส่วนหางของแถบพลังงานซึ่งมีส่วนหางของแถบวาเลนซ์และส่วนหางของแถบนำ

ในเชิงการทดลองส่วนหางของแถบพลังงานสามารถตรวจสอบได้จากการวัดขอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซึ่งเออร์บัค (Urbach) ได้แสดงให้เห็นว่าขอบการดูดกลืนแสงของผลึกจะเพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โพเนนเชียลดังความสัมพันธ์

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

เมื่อ α_0 และ E_0 คือ พารามิเตอร์ของผลึกแต่ละชนิด

k_B คือ ค่าของที่ของโบลต์ซมันน์

T คือ อุณหภูมิ (เคลวิน)

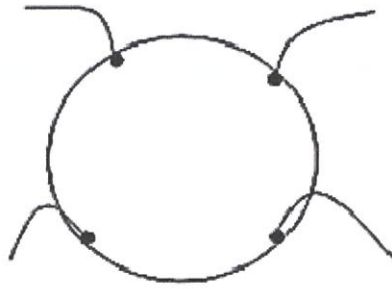
σ คือ ความชัน (steepness) ของขอบการดูดกลืนแสง

2.5 สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ (ฐิตินัย, 2549; Kittel, 2005; งามนิตย์, 2530; ฐิตินัย, 2531; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2552; Runyan, 1975; สุกฤษฏี, 2547; สมเกียรติ, 2542; ฐิตินัย, 2552; วีรชัย, 2547; ดุสิต, 2535)

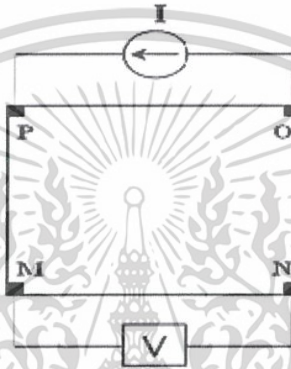
จากทฤษฎีโครงสร้างแถบพลังงานสารกึ่งตัวนำประกอบไปด้วยแถบวาเลนซ์ แถบพลังงานต้องห้ามและแถบนำ สารกึ่งตัวนำมีช่องว่างแถบพลังงานไม่เกิน 3 อิเล็กตรอนโวลต์ที่อุณหภูมิห้อง อิเล็กตรอนและโฮลจากภายในผลึกจะถูกกระตุ้นด้วยพลังงานจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบนำ จากนั้นจะเกิดโฮลในแถบวาเลนซ์ ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิใดๆ ของสารกึ่งตัวนำจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของพาหะ และความคล่องตัวของพาหะอิสระเหล่านี้

2.5.1 การวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์

วิธีการวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ดังแสดงในรูปที่ 2.18 และ 2.19 เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมสำหรับการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า ของชิ้นสารตัวอย่างที่เป็นฟิล์มบางที่มีความหนาสม่ำเสมอและมีรูปร่างไม่แน่นอน โดยขั้วสัมผัสจะอยู่บริเวณขอบของชิ้นสารตัวอย่าง รอยต่อระหว่างขั้วสัมผัสที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะต้องไม่ขัดขวางการไหลของกระแส



รูปที่ 2.18 แสดงตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชิ้นสารตัวอย่างเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์



รูปที่ 2.19 แสดงการต่อขั้วเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์

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

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

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

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

เมื่อได้ค่า R_1 และ R_2 มาแล้วสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานแผ่นได้ดังนี้

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

เมื่อ f คือ แฟกเตอร์ค่าแก้ของแวนเดอร์เพาว์ (vander Pauw correction factor) โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาดังกล่าวไปใช้ประโยชน์ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำ

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

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถคำนวณได้ดังนี้

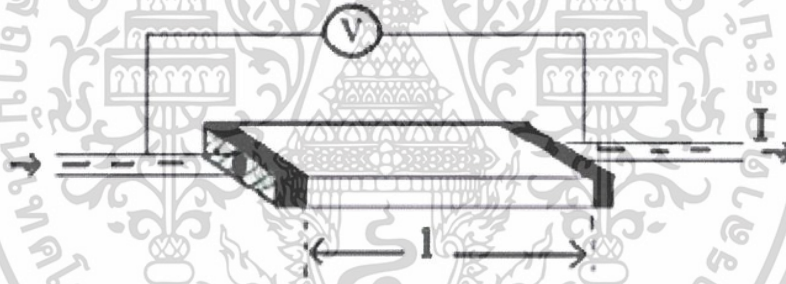
$$\rho = R_s d \quad (2.19)$$

เมื่อ d คือ ความหนาของชิ้นสารตัวอย่าง

2.5.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง

โดยทั่วไปแล้วการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้ามักจะวัดความต้านทานก่อนซึ่งเป็นวิธีวัดโดยตรงดังรูปที่ 2.20 นี้หมายถึง วัดค่าความต้านทานรวมของสสารจากนั้นมาหาค่าความยาว และพื้นที่หน้าตัดของสสารนั้น การวัดวิธีนี้จะต้องทำให้สสารที่ต้องการวัดมีรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอน เพื่อที่จะวัดค่าพื้นที่หน้าตัดและความยาวให้ได้แน่นอน เช่น แท่งกลมทรงกระบอก แท่งสี่เหลี่ยม เป็นต้น จากนั้นจึงให้กระแสไฟฟ้าเข้าไปที่ปลายด้านหนึ่ง และให้กระแสไหลออกผ่านสารตัวอย่างที่ปลายอีกด้านหนึ่ง ขณะเดียวกันก็วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จุดปลายทั้งสองนั้นพร้อมๆกัน

จากที่ทราบค่ากระแสและศักย์ไฟฟ้านี้สามารถนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าได้ดังต่อไปนี้เมื่อกำหนด R เป็นความต้านทานรวมจะมีความสัมพันธ์กับความต้านทานจำเพาะและพื้นที่หน้าตัด A บริเวณที่ปล่อยกระแสไหลเข้าไป และ l เป็นระยะระหว่างระหว่างขั้วศักย์ไฟฟ้าที่วัด



รูปที่ 2.20 แสดงการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง

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

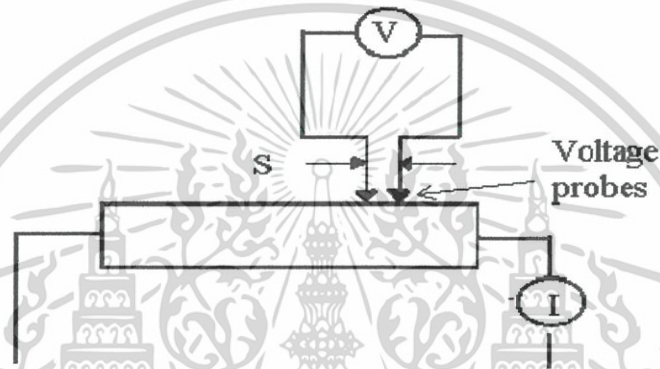
$$\rho = R * \frac{A}{l} = \left(\frac{V}{I} \right) \left(\frac{A}{l} \right) \quad (2.21)$$

จะเห็นว่าวิธีนี้เป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็ว แต่ค่าที่ได้เป็นค่าโดยประมาณซึ่งต้องคำนึงถึงองค์ประกอบอื่นๆด้วย ซึ่งความถูกต้องในการวัดโดยวิธีนี้ขึ้นอยู่กับบริเวณผิวสัมผัสที่กระแสไหลเข้าและออกนั้นมีลักษณะเป็นโอห์มมิกที่ดีหรือไม่ถ้าไม่มีคุณสมบัติโอห์มมิกที่ดีแสดงว่ามีความต้านทานที่ผิวสัมผัสทั้งสองขั้วไฟฟ้าเกิดขึ้นด้วยค่าความต้านทาน R ที่วัดได้จึงเป็นค่าความต้านทาน รวมทั้งหมด ดังนั้นค่าความต้านทานจริงของสารกึ่งตัวนำจะน้อยกว่าค่าที่วัดได้แน่นอน ความ ถูกต้องอีกส่วนหนึ่งขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างความต้านทานของสารที่ต้องการวัดและความต้านทานภายใน (impedance) ของโวลต์มิเตอร์ที่ใช้วัดหากความต้านทานนี้ใกล้เคียงกันความต่าง ศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จะมีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง ซึ่งในทางปฏิบัติจะคำนึงถึงผิวสัมผัสโอห์มมิก มากกว่าความผิดพลาด

ของโวลต์มิเตอร์ เนื่องจากที่ผิวสัมผัสจะดีหรือไม่ (เป็นโอห์มมิกหรือไม่) นั้น ตรวจสอบได้ยากมากจึงแก้ไขด้วยการทำให้เกิดผิวสัมผัสบริเวณพื้นที่มากขึ้นเพื่อลดความต้านทานที่ผิวสัมผัสลงจากนั้นจึงวัดศักย์ไฟฟ้าด้วยโวลต์มิเตอร์ โดยเลือกโวลต์มิเตอร์ที่มีความต้านทาน ภายในสูงๆเท่าที่จะหาได้เพื่อลดความผิดพลาด

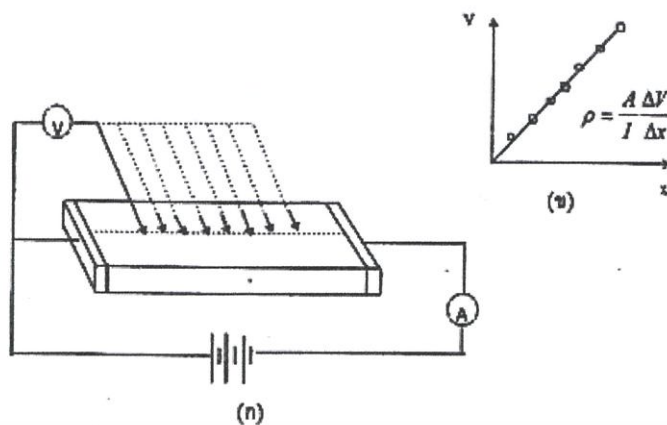
2.5.3 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว

การวัดด้วยวิธีนี้มีลักษณะใกล้เคียงกับวิธีวัดโดยตรงแตกต่างที่ลักษณะของขั้วไฟฟ้าของการวัด ศักย์ไฟฟ้าจะวัดบนสารตัวอย่าง ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.21 วิธีการวัดชนิดนี้เป็นวิธีที่พัฒนาขึ้น จากแบบแรกเพื่อกำจัดศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อหัวท้ายของผิวสัมผัสให้น้อยลงและสามารถตรวจสอบ ความสกปรกบนพื้นผิวของชิ้นสารตัวอย่างได้ด้วย



รูปที่ 2.21 แสดงการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว

ข้อจำกัดของการวัดด้วยวิธีนี้คือจะต้องวัดบนสารตัวอย่างที่มีความหนาสม่ำเสมอ และมีรูปทรงเรขาคณิตแน่นอนโดยพยายามให้กระแสผ่านเข้าไปในสารตัวอย่างมีค่าน้อยที่สุดเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความร้อนภายในสาร เพราะค่าความต่างศักย์ที่วัดได้อาจจะไม่ถูกต้อง อีกทั้งในการวัดทุกครั้งจะต้องใช้โวลต์มิเตอร์ที่มีค่าความต้านทานภายในสูง และจุดที่ต้องการวัดศักย์ไฟฟ้าควรจะต้องอยู่ห่างจากจุดที่ปล่อยกระแสเข้าและออกพอสมควร เพื่อป้องกันสารเจือเข้าไปทำการรวมตัวกันระหว่างจุดที่ทำการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า หากมีสารเจือเข้ามารวมตัวที่บริเวณที่วัดนี้จะมีผลทำให้เกิดการรวมกับพาหะข้างน้อย (minority carriers) บริเวณนั้น ทำให้การวัดค่าความต้านทานจำเพาะที่วัดได้สูงเกินความเป็นจริงนอกจากนี้ควรคำนึงถึงความสม่ำเสมอของเส้นสมศักย์ (equi-potential lines) โดยการวัดที่บริเวณจุดที่คิดว่าเป็นเส้นสมศักย์นั้นสม่ำเสมอ (ตรงกลางของสารตัวอย่าง) สัดส่วนระหว่างระยะห่างของแต่ละขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้าต่อพื้นที่ตรงจุดที่ปล่อยกระแสเข้าและออกจะต้องมีค่ามากกว่าสามเท่า $l/A > 3$ เมื่อคือ l ระยะห่างระหว่างขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้า และ A คือ พื้นที่บริเวณให้กระแสไฟฟ้า ข้อควรคำนึงถึงอีกประการก็คือ สารที่นำมาวัดมีโครงสร้างผลึกชนิดใดเป็นรูปลูกบาศก์หรือไม่ถ้าไม่ใช่จะต้องทราบทิศทางของการวัดว่าอยู่ในทิศทางหรือระนาบใดของผลึกการวัดควรใช้วิธีที่ตรงที่ขั้วหนึ่งไว้ และเลื่อนตำแหน่งอีกขั้วหนึ่งออกไปเป็นระยะๆโดยมีมาตราส่วนบอกระยะและนำมาเขียนกราฟดังรูปที่ 2.22 (ก) และ (ข) ความชันที่ได้จะเป็นค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าข้อดีของการวัดแบบสองขั้วในหลายๆตำแหน่งนี้จะสามารถแยกสภาพต้านทานไฟฟ้าที่สภาพผิวระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำและความต้านทานจำเพาะภายในของสารกึ่งตัวนำได้



รูปที่ 2.22 แสดงการวัดค่าความต้านทานแผ่นโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น

ก. การวัดแบบสองขั้วโดยมีการเลื่อนระยะที่ขั้วหนึ่ง

ข. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับระยะทางที่ได้จากการวัดชนิดเลื่อนขั้วไฟฟ้า

2.5.4 ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Kittel, 2005; งามนิศย์, 2530; ฐิตินัย, 2531; งามนิศย์, 2545; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2552; Runyan, 1975; สุกฤษฏ์, 2547; สมเกียรติ, 2542; ฐิตินัย, 2552; วีรัชย์, 2547; ดุสิต, 2535)

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถเขียนในเทอมของสภาพคล่องของพาหะได้ และความหนาแน่นพาหะอิสระด้วยความสัมพันธ์

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากอิเล็กตรอน

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

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากโฮล

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

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากพาหะสองชนิดคืออิเล็กตรอนและโฮล ซึ่งมีปริมาณใกล้เคียงกันสภาพต้านทานไฟฟ้าที่แท้จริงคือ

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

เมื่อ n คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระ

ρ คือ ความหนาแน่นของโฮลอิสระ

μ_e และ μ_p คือ สภาพคล่องของอิเล็กตรอนและสภาพคล่องของโฮล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ห้ามนำไปใช้เพื่อการค้า
 นั่นคือหากทราบค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า และสภาพคล่องของพาหะจะทำให้สามารถคำนวณ ค่าการนำ
 ไม่ว่าจะรู้ค่าความหนาแน่นของพาหะข้างมากได้จากสมการที่ (2.25) และ (2.26) คือ

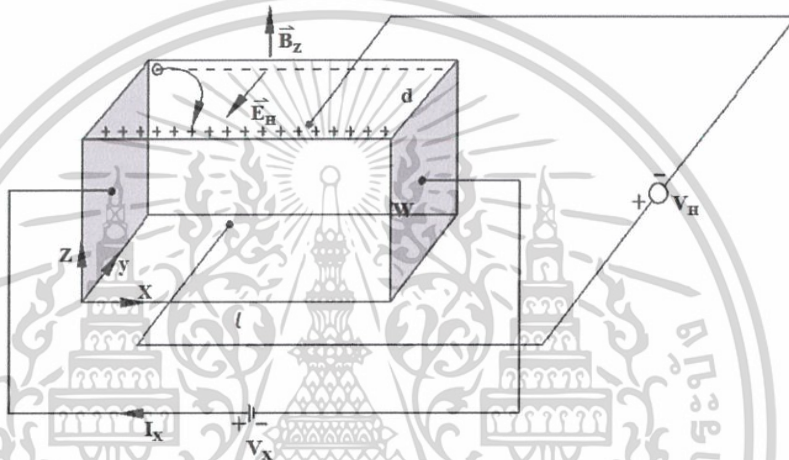
กรณีเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

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

กรณีเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี

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

เราสามารถคำนวณค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า, สภาพคล่องของพาหะได้หลายวิธีวิธีที่ สะดวกและมักนิยมใช้กันอย่างกว้างขวางคือ การคำนวณจากการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ปรากฏการณ์ฮอลล์ได้ถูกค้นพบในปี พ.ศ. 2422 โดย เอ็ดวินเฮอร์เบิร์ต ฮอลล์ (Edwin Herbert Hall)



รูปที่ 2.23 แสดงแผนภาพของปรากฏการณ์ฮอลล์บนแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิดพี

พิจารณาชิ้นสารกึ่งตัวนำชนิดพี ที่เป็นรูปทรงดังแสดงในรูปที่ 2.23 ซึ่งมีกระแสไฟฟ้า I ไหลผ่านในแนว x หรืออาจมองว่ามีประจุบวกเคลื่อนที่ไปในทิศ x ด้วยความเร็วลอยเลื่อน v_x เกิดเป็นกระแสไฟฟ้าในแนวทิศทาง x คือ I_x ดังสมการที่ (2.27)

$$\text{จาก} \quad I = nqvA \quad (2.27)$$

$$\text{ดังนั้น} \quad I_x = qnV_x(wd) \quad (2.28)$$

จากกฎของโอห์ม

$$V = IR \quad (2.29)$$

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

จากรูปที่ 2.22

$$A = w.d \quad (2.31)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเชิงการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ขอสงวนสิทธิ์ในข้อความนี้ไว้
ถ้าทราบความต่างศักย์ (V_x) ระหว่างปลายทั้งสองของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น สามารถหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าได้จากสมการที่ (2.29) และ (2.30) และ (2.31)

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

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

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

เมื่อแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่กระทำต่อโฮลมีค่าเท่ากันจะเกิดสถานะสมดุลเชิงความร้อน หรือสถานะคงตัว (steady state) ทำให้โฮลเคลื่อนที่ในทิศ x ดังเดิม เพราะฉะนั้นจะทำให้ได้ว่า

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

หากพิจารณาสมการที่ (2.37) จะเห็นว่าสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดขึ้นเป็นปฏิภาคกับความหนาแน่นกระแสและสนามแม่เหล็กสามารถเขียนได้ในรูปของ

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

เมื่อ

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

แล้ว

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

เรียก R_H ว่าเป็นสัมประสิทธิ์ฮอลล์หรือค่าคงตัวฮอลล์ (Hall coefficient) ซึ่งนิยามว่าเป็นสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดจากความหนาแน่นกระแสของพาหะขนาด 1 หน่วย ไหลผ่านภายใต้สนามแม่เหล็ก ขนาด 1 หน่วย เราอาจทราบศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากสนามไฟฟ้าฮอลล์ โดยอินทิเกรตสนามไฟฟ้าฮอลล์ตลอดความกว้าง (w) ของแผ่นสารและเรียกความต่างศักย์นี้ว่าความต่าง ศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) นั่นคือ

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

$$= \frac{1}{qn} \frac{I B_z}{d} \quad (2.39)$$

สัมประสิทธิ์ฮอลล์ที่ได้จากการวัด คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อ $R_H = \frac{V_H}{I_x} \frac{d}{B_z}$ ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำ (2.40)

ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนตามนิยาม คือ

$$n = \frac{1}{qR_H} = \frac{1}{V_H} \frac{B_z}{qd} \quad (2.41)$$

โดยทั่วไปพาหะอิสระที่เคลื่อนที่ในสารกึ่งตัวนำมักประสบกับกลไกการกระเจิงหลายๆชนิด กลไกการกระเจิงของพาหะในสารกึ่งตัวนำจะเป็นกลไกที่ขึ้นอยู่กับพลังงานของพาหะโดยที่ช่วงเวลาปลอดการกระเจิง (τ) จะแสดงได้ดังนี้

$$\tau = \tau(E) \quad (2.42)$$

เมื่อคิดผลรวมจากการกระเจิงที่ขึ้นกับพลังงานของพาหะสัมประสิทธิ์ฮอลล์สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\text{สัมประสิทธิ์ฮอลล์กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น} \quad R_H = \frac{r}{nq} \quad (2.43)$$

$$\text{สัมประสิทธิ์ฮอลล์กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดพี} \quad R_H = \frac{r}{pq} \quad (2.44)$$

เมื่อ r คือ แฟกเตอร์การกระเจิง (scattering factor) ของพาหะในปรากฏการณ์ฮอลล์ซึ่งสามารถนิยามค่า r ได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$r = \frac{\langle r \rangle^2}{\langle r^2 \rangle} \quad (2.45)$$

r มีค่าอยู่ ระหว่าง 1 ถึง 2 ขึ้นอยู่กับกลไกการกระเจิงของพาหะเช่นการกระเจิงเนื่องจากโครงผลึกหรือการกระเจิงเนื่องจากอะตอมของสารเจือปนที่ถูกไอออนในซึ่สัมประสิทธิ์ฮอลล์แปรค่าตามสนามแม่เหล็กและอุณหภูมิ ซึ่งจะมีค่าใกล้ 1 เมื่อขึ้นสารอยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กความเข้มสูงมาก ดังนั้นเราทราบค่าของ r จากการทดลองด้วยความสัมพันธ์

$$r = \frac{R_H(B)}{R_H(B = \infty)} \quad (2.46)$$

ในทางปฏิบัติสนามแม่เหล็กที่ใช้วัดโดยทั่วไปมีค่าอยู่ ระหว่าง 5 ถึง 10000 เกาส์ ซึ่งค่า r ในช่วงนี้มีการเปลี่ยนแปลงไม่มากดังนั้นอาจประมาณได้ว่าค่าคงที่

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

$$\mu_H = \left| \frac{R_H}{\rho} \right| = r_\mu \quad (2.47)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมิให้คัดลอกเนื้อหา และข้อมูลอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ หรือ จากสมการที่ (2.42) และ (2.48) $\mu_H = \frac{V_H}{I_x} \frac{d}{B_z} \frac{1}{\rho} \quad (2.48)$

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

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

เทคนิคนี้ได้รับการพัฒนาขึ้นมาจากพื้นฐานของวิชาคณิตศาสตร์ คอนฟอร์มอลแมปปีง (conformal mapping) โดยนักวิทยาศาสตร์ชื่อ แวนเดอร์เพาว์ (van der Pauw) สำคัญของเทคนิคนี้คือการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของแผ่นสารตัวอย่างรูปทรงใดๆ ซึ่งสามารถทำได้ง่ายแม่นยำโดยไม่จำเป็นต้องทราบลักษณะของรูปแบบการกระจายของเส้นทางเดินกระแสที่ไหลภายในแผ่นสารถ้าสารตัวอย่างประพฤติตามเงื่อนไขต่อไปนี้

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

พิจารณาชิ้นสารรูปทรงเป็นแผ่นบางใดๆ และมีขั้วสัมผัสเล็กๆ M, N, O และ P กระจายอยู่ที่บริเวณขอบของแผ่นซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขข้างต้น



รูปที่ 2.24 แสดงการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์บนสารตัวอย่างที่เป็นแผ่นบางที่มีรูปทรงใดๆ

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

$$\text{นิยาม} \quad R_{MNOP} = \frac{V_{NP}}{I_{MO}} \quad (2.49)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุผลเบื้องหลังเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เมื่อ V_H คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์หรือผลต่างระหว่างค่า V_{NP} ในขณะที่มี สนามแม่เหล็ก และไม่มีสนามแม่เหล็ก

d คือ ความหนาของชิ้นสารตัวอย่าง

B คือ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก

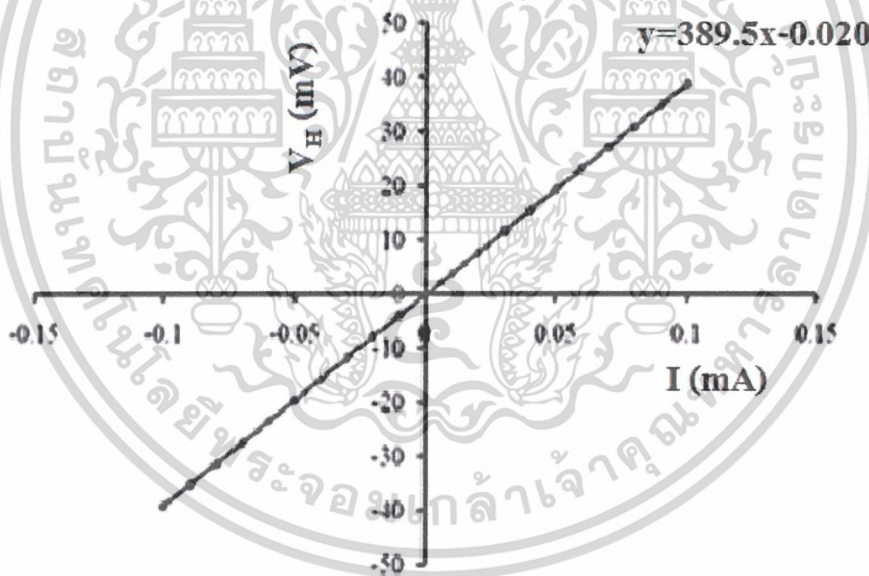
จากสมการที่ (2.50) จะได้ว่า

$$R_H = \left(\frac{V_H}{I} \right) \left(\frac{d}{B} \right) \quad (2.51)$$

เมื่อทำการเขียนกราฟระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ที่ได้จากการทดลองเราจะได้ลักษณะกราฟดังรูปที่ 2.25

โดยที่ความชันของกราฟที่ได้จะเป็นค่า

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



รูปที่ 2.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I)

สภาพคล่องฮอลล์สามารถคำนวณได้จาก

$$\mu_H = \frac{R_H}{\rho} \quad (2.52)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะในรูปแบบการพิมพ์หรือการเผยแพร่ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ลดทอนการกระเจิงได้จากความสัมพันธ์นี้ รังที่มีกรนำไปใช้

$$1 = \left(\frac{h}{2e} \right) \left(\frac{3n}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \mu_H \quad (2.53)$$

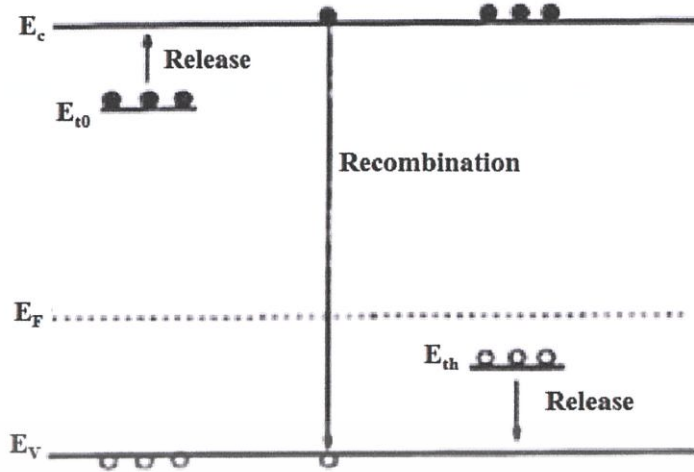
เมื่อ h คือ ค่าคงตัวของพลังค์ = 6.625×10^{-34} จูล-วินาที

ในทางปฏิบัติการเตรียมชิ้นสารให้มีรูปทรงตามเงื่อนไขทั้ง 4 ข้อดังกล่าวอาจเป็นไปได้ยาก โดยเฉพาะขนาดและตำแหน่งของข้อสัมผัสซึ่งมักไม่เป็นจุดและไม่อยู่ที่ขอบของชิ้นสารตามทฤษฎี จึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของผลการวัด

2.6 สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง (จามนิตย์, 2556; ฐิตินัย, 2556)

ในสารกึ่งตัวนำมักมีข้อบกพร่องผลึกเสมอ ข้อบกพร่องผลึกมีหลายชนิด ข้อบกพร่องผลึก บางชนิดมีคุณสมบัติในการจับอิเล็กตรอนหรือโฮลอิสระได้ จึงมักเรียกว่ากับดักพาหะชนิดต่างๆ จะปรากฏเป็นระดับพลังงานในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ โดยในรูปที่ 2.26 มีทั้งระดับพลังงานของกับดักพาหะชนิดจับโฮล (E_{th}) และกับดักพาหะชนิดจับอิเล็กตรอน (E_{te}) (Jiang, 2012) คำว่ากระบวนการปลดปล่อยพาหะ (release) เป็นกลไกที่กับดักพาหะปล่อยอิเล็กตรอนให้กับแถบนำ และเป็นกับดักพาหะชนิดปล่อยโฮลให้กับแถบวาเลนซ์ ส่วนคำว่ากระบวนการรวมตัวของพาหะ (recombination) เป็นกลไกที่อิเล็กตรอนในแถบนำทรานซิชันลงมารวมตัวกับโฮลในแถบวาเลนซ์โดยไม่ผ่านกับดักพาหะ ขณะที่สารกึ่งตัวนำยังไม่ได้มีการฉายแสงกับดักพาหะจะมีการจับอิเล็กตรอนหรือจับโฮลอยู่ก่อนแล้ว ส่วนอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำ และโฮลในแถบวาเลนซ์มีปริมาณน้อย สารกึ่งตัวนำจึงนำกระแสไฟฟ้าได้ไม่ดี กระแสมืด (dark current) จึงมีค่าน้อย แต่เมื่อมีการฉายแสงลงบนสารกึ่งตัวนำจะเกิดกระบวนการสร้างอิเล็กตรอน และโฮลอิสระขึ้นในแถบนำและแถบวาเลนซ์ตามลำดับ เนื่องจากการดูดกลืนโฟตอนที่ให้พลังงานสูงเพียงพอเมื่อไบแอสด้วยแรงดันไฟฟ้าให้กับสารกึ่งตัวนำ กระแสไฟฟ้าจะลดลงสู่ค่ากระแสมืดเหมือนในขณะที่ไม่มีการฉายแสงแต่บางครั้งพบว่า กับดักพาหะที่จับอิเล็กตรอนและจับโฮล มีพฤติกรรมไม่ปล่อยอิเล็กตรอนหรือโฮลออกมาทันทีอย่างปกติธรรมดา นั่นคือยังมีประจุค้างอยู่ในกับดักพาหะ ดังนั้นอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำหรือโฮลในแถบวาเลนซ์จึงยังคงปรากฏอยู่มากเพื่อทำหน้าที่ในการรักษาความเป็นกลางทางไฟฟ้าโดยปกติกลไกการปลดปล่อยพาหะ จะใช้เวลานานกว่ากลไกการรวมตัวของพาหะ แต่เนื่องจากกับดักพาหะมีการปล่อยอิเล็กตรอนและโฮลออกมาช้ามาก ส่งผลให้กลไกการรวมตัวของพาหะใช้เวลายาวนานขึ้นไปอีก จึงเป็นที่มาของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงดื้อรั้น (persistent photoconductivity)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.26 แสดงระดับพลังงานของกักตักพาหะชนิดจับอิเล็กตรอน (E_{th}) และกักตักพาหะชนิดจับโฮล (E_{th}) ที่ปรากฏในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำซึ่งจุดทึบและจุดโปร่งจะแสดงแทนอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ

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

$$I = envA \quad (2.54)$$

และจากความสัมพันธ์ $\mu = V/\xi$ และ $\xi = V/l$ ดังนั้นจะได้ว่า

$$V = \frac{\mu V_a}{1} \quad (2.55)$$

แทนสมการที่ (2.55) ลงใน (2.54) จะได้

$$I = en\mu V_a \left(\frac{wd}{1} \right) \quad (2.56)$$

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

$$n = N_{ii} \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \quad (2.57)$$

แทนสมการที่ (2.57) ลงใน (2.56) จะได้ว่ากระแส I_i ที่เกิดจากกักตักพาหะชนิด i คือ

$$I_i = e\mu N_{ii} V_a \left(\frac{wd}{1} \right) \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \quad (2.58)$$

กระแสรวมทั้งหมด (I) ที่สัมพันธ์กับกักตักพาหะทุกชนิดจะเป็นดังนี้คือ

$$I = e\mu \left(\frac{wd}{1} \right) V_a \sum_i \left(\sigma_{ii} \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \right) \quad (2.59)$$

เมื่อ N_i คือ ความหนาแน่นของกักพาหะต่อปริมาตรชนิดที่ i ซึ่งสามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$N_i = \frac{I}{e\mu V_a} \left(\frac{1}{wd} \right) \exp\left(-t/\tau_i\right) \quad (2.60)$$

สำหรับกรณีฟิล์มบางจะประมาณว่าความหนา d มีค่าน้อยมาก

ดังนั้น จากสมการที่ (2.56) จะเขียนใหม่ได้ว่า (Gu, 2005; Huang, 2011)

$$\begin{aligned} I &= e\mu \left(\frac{w}{1} \right) (nd) V_a \\ &= e\mu \left(\frac{w}{1} \right) \sigma_t V_a \end{aligned} \quad (2.61)$$

เมื่อ σ_t คือ ความหนาแน่นของกักพาหะต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ แต่ถ้ากักพาหะมีหลายชนิด กระแสรวม (I) ของฟิล์มบางที่สัมพันธ์กับกักพาหะทุกชนิดจะเป็นดังนี้คือ t

$$I = e\mu \left(\frac{w}{1} \right) V_a \sum_i \left(\sigma_{ti} \exp\left(-t/\tau_i\right) \right) \quad (2.62)$$

เมื่อ σ_{ti} คือความหนาแน่นของกักพาหะต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ชนิดที่ i ซึ่งสามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$\sigma_{ti} = \frac{I}{e\mu V_a} \left(\frac{1}{W} \right) \exp\left(-t/\tau_i\right) \quad (2.63)$$

โดยที่

- V_a คือ แรงดันไบแอสที่ป้อนให้กับสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีหน่วยเป็นโวลต์
- μ คือ สภาพคล่องของพาหะมีหน่วยเป็น ตารางเซนติเมตรต่อโวลต์-วินาที
- W คือ ความกว้างของสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีหน่วยเป็น เซนติเมตร
- 1 คือ ความยาวของสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีหน่วยเป็น เซนติเมตร
- d คือ ของสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีหน่วยเป็น เซนติเมตร
- I คือ กระแสที่วัดได้จากการทดลองที่เวลา t ใดๆ
- τ_r คือ ช่วงชีวิตขาลง (decay time)
- N_{ii} คือ ความหนาแน่นของกักพาหะในชั้นสารตัวอย่างมีหน่วยเป็น ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
- σ_{ii} คือ ความหนาแน่นของกักพาหะในฟิล์มบางมีหน่วยเป็น ต่อตารางเซนติเมตร

ช่วงชีวิตขาลงจะมีค่าสั้นลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเนื่องจากมีโฟนอนเข้ามาาร่วมด้วยในกระบวนการทรานซิชันระหว่างระดับพลังงานต่างๆ ดังความสัมพันธ์ (Studenikin, 1998; Johnson, 1996)

$$\tau_r = \tau_{r0} \exp\left(\frac{E_t}{kT}\right) \quad (2.64)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและข้อมูลใดๆของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \ln \tau_{ro} + \left(\frac{E_t}{1000k} \right) \left(\frac{1000}{T} \right)$$

เมื่อ $\text{ความชัน} = \frac{E_t}{1000k}$

ดังนั้น $E_t = \frac{(1000)k(\text{ความชัน})}{q}$

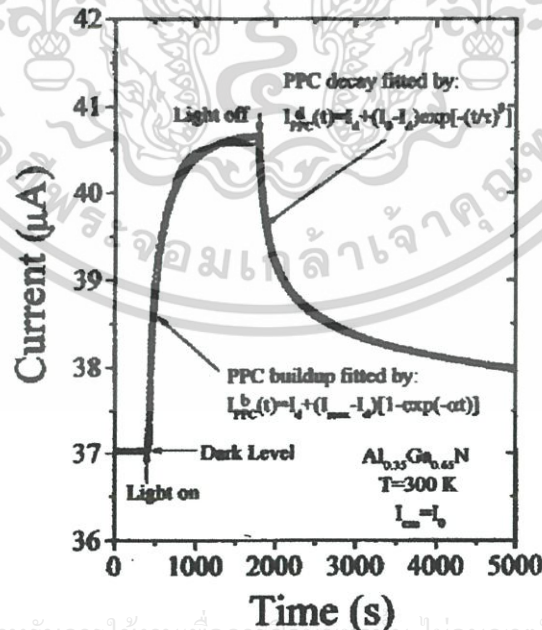
$$= (0.086)(\text{ความชัน}) \text{ อิเล็กตรอนโวลต์} \quad (2.65)$$

ในการศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงจะต้องมีการฉายแสงให้กับสารตัวอย่าง จะได้ว่ากระแสโฟโต (I_p) จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลา (t) ดังรูปที่ 2.27 ซึ่งจะเรียกว่าเป็นกระแสขาขึ้น (rise current) ดังความสัมพันธ์ (Ghosh, 2007)

$$I_p = I_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \right] \quad (2.66)$$

เมื่อ I_0 คือกระแสเริ่มต้นของกระแสขาขึ้น (เมื่อ $t = 0$) หลังจากหยุดการฉายแสงกระแสจะลดลงตามเวลา (t) ซึ่งจะเรียกว่าเป็นกระแสขาลง (decay current) จะแสดงดังความสัมพันธ์ (Ghosh, 2007)

$$I_p = I_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \quad (2.67)$$

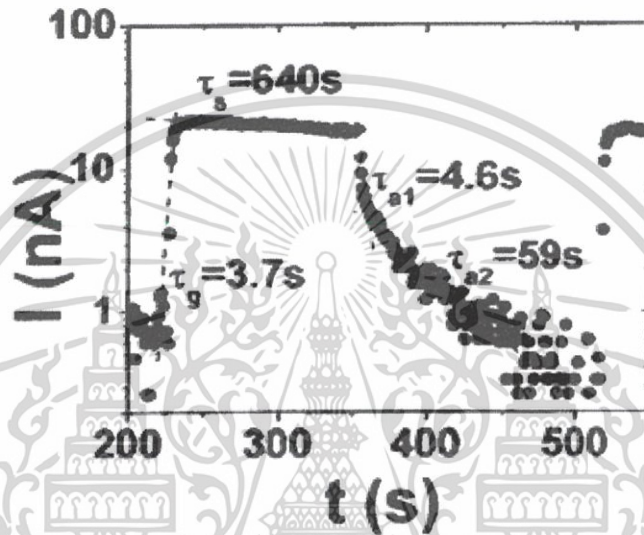


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะรูปที่ 2.27 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสขาขึ้นและกระแสขาลง กับ ช่วงเวลาการตอบสนองต่อแสงของค่าสภาพการนำไฟฟ้าเชิงแสง

จากสมการที่ (2.66) สามารถเขียนใหม่ได้ว่า

$$\ln I_p = \ln I_0 - \frac{t}{\tau_d} \quad (2.68)$$

ความชันของกราฟคือ $1/\tau_d$ ดังนั้น ช่วงชีวิตขาลงจะคำนวณได้จากส่วนกลับของความชันของกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln I_p$ กับ t ในทำนองเดียวกันช่วงชีวิตขาขึ้นก็สามารถที่จะคำนวณได้จากความชันของกราฟ $\ln I_p$ กับ t ดังรูปที่ 2.28 ได้ด้วยเช่นเดียวกัน



รูปที่ 2.28 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟโต ($\ln I_p$) กับ เวลา (t) ของค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงทั้งช่วงกระแสขาขึ้นและช่วงกระแสขาลง

ในทางปฏิบัติช่วงชีวิตมีได้หลายค่าเนื่องจากกับดักพาหะมีหลายชนิด ดังนั้นกระแสไฟโตขาลงของฟิล์มบางที่ใช้หาค่าช่วงชีวิต 2 ค่าสามารถที่จะเขียนใหม่ ได้โดยอาศัยสมการที่ (2.62) และสมการที่ (2.68) ดังนี้คือ (Huang, 2011; Gu, 2005)

$$|I_p| = e\mu \left(\frac{W}{1} \right) V_a \sigma_{n1} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{d1}}\right) + e\mu \left(\frac{W}{1} \right) V_a \sigma_{n2} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{d2}}\right) \quad (2.69)$$

เพื่อให้ τ_{d1} และ τ_{d2} มีค่าถูกต้องมากขึ้น อาจดัดแปลงสมการที่ (2.69) ให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันสเตรตเอกซ์โพเนนเชียล (stretched exponential function) ดังนี้คือ (Ghaffarzadeh, 2010; Luo, 2013; Guo, 2013)

$$|I_p| = e\mu \left(\frac{W}{1} \right) V_a \sigma_{n1} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{d1}}\right) + e\mu \left(\frac{W}{1} \right) V_a \sigma_{n2} \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau_{d2}}\right)^\beta\right] \quad (2.70)$$

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ จากสมการที่ (2.70) สามารถที่จะหาค่า σ_{n1} และ σ_{n2} ได้ในรูปแบบเดียวกับสมการที่ (2.73) ดังนี้คือ

$$\sigma_{r1} = \frac{I_p}{e\mu V_a} \left(\frac{1}{W} \right) \exp\left(-t/\tau_{d1}\right) \quad (2.71)$$

$$\sigma_{r2} = \frac{I_p}{e\mu V_a} \left(\frac{1}{W} \right) \exp\left(-t/\tau_{d2}\right) \quad (2.72)$$

กับดักพาหะทั้งสองชนิดนี้สามารถที่จะจับหรือปล่อยพาหะอิสระ ได้อย่างเป็นอิสระซึ่งกันและกัน ถ้า กำหนดให้ I_1 และ I_2 คือกระแสค่าเริ่มต้น ($t = 0$) ที่เกี่ยวกับกับดักพาหะทั้งสองตามลำดับ เราจะได้ว่า

$$\sigma_{r1} = \frac{I_p}{e\mu V_a} \left(\frac{1}{W} \right)$$

และ
$$\sigma_{r2} = \frac{I_p}{e\mu V_a} \left(\frac{1}{W} \right)$$

สมการที่ (2.70) สามารถที่จะทำนอร์มัลไลเซชัน (normalization) ได้ดังนี้คือ

$$|I_p| = A_1 \exp\left(-t/\tau_{d1}\right) + A_2 \exp\left[-\left(t/\tau_{d2}\right)^\beta\right] \quad (2.73)$$

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

ในกรณีกระแสไฟโตขาขึ้น (rise current) ก็สามารถที่จะพิจารณาให้อยู่ ในรูปของฟังก์ชัน สเตรตเอกซ์โพเนนเชียลได้ด้วยเช่นกันดังสมการ

$$|I_p| = A_1 \exp\left[1 - \exp\left(-t/\tau_{d1}\right)\right] + A_2 \exp\left[-\left(t/\tau_{d2}\right)^\beta\right] \quad (2.74)$$

ส่วนกรณีของขึ้นสารเช่น เซรามิก กระแสไฟโตขณะชาลงสามารถจะเขียนใหม่โดยอาศัยสมการที่ (2.59) และ (2.70) ได้ดังนี้คือ

$$|I_p| = e\mu \left(\frac{Wd}{1} \right) V_a N_{r1} \exp\left(-t/\tau_{d1}\right) + e\mu \left(\frac{Wd}{1} \right) V_a N_{r2} \exp\left[-\left(t/\tau_{d2}\right)^\beta\right] \quad (2.75)$$

จากสมการที่ (2.75) สามารถที่จะหาค่า

$$N_{r1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left(\frac{1}{Wd} \right) \exp\left(t/\tau_{d1}\right) \quad (2.76)$$

$$N_{r2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left(\frac{1}{Wd} \right) \exp\left(t/\tau_{d2}\right) \quad (2.77)$$

กับดักพาหะทั้งสองชนิดนี้สามารถที่จะจับหรือปล่อยพาหะอิสระ ได้อย่างเป็นอิสระซึ่งกันและกัน ถ้า กำหนดให้ I_1 และ I_2 คือกระแสเริ่มต้น ($t = 0$) ที่เกี่ยวกับกับดักพาหะทั้งสองตามลำดับ เราจะได้ว่า

$$N_{r1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left(\frac{1}{Wd} \right)$$

$$N_{r2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left(\frac{1}{Wd} \right)$$

สมการที่ (2.75) สามารถที่จะทำนอร์มัลไลเซชัน (normalization) ได้ดังนี้คือ

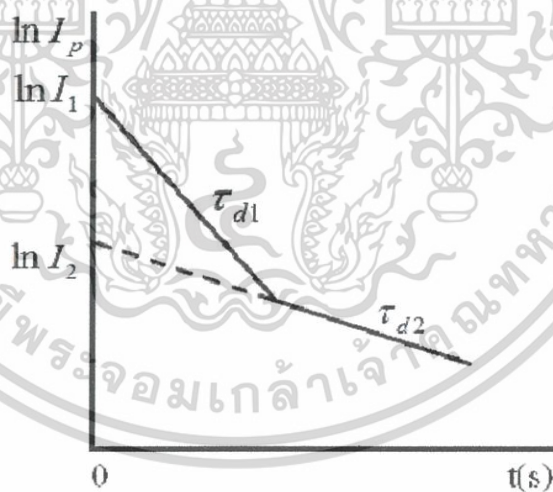
$$|I_p| = A_1'' \exp \left[1 - \exp \left(-\frac{t}{\tau_{d1}} \right) \right] + A_2'' \exp \left[- \left(\frac{t}{\tau_{d2}} \right)^\beta \right] \quad (2.78)$$

ซึ่ง A_1'' และ A_2'' สามารถหาได้จากการฟิตกราฟของผลการทดลอง ในกรณีกระแสโฟโตชาขึ้น ก็สมการที่จะพิจารณาให้อยู่ ในรูปของฟังก์ชันสเตรตเอกซ์โพเนนเชียลได้ด้วยเช่นกันดังสมการ

$$|I_p| = A_1'' \exp \left[1 - \exp \left(-\frac{t}{\tau_{d1}} \right) \right] + A_2'' \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{t}{\tau_{d2}} \right)^\beta \right] \right\} \quad (2.79)$$

2.6.1 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกักพาหะในช่วงกระแสกลาง

การหาค่าความหนาแน่นของกักพาหะในช่วงกระแสกลางจะอาศัยกราฟนอร์มัลไลเซชัน ($\ln I_p$) กับเวลา (t) ดังรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.29 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสโฟโต ($\ln I_p$) กับ เวลา (t) เพื่อใช้คำนวณหาความหนาแน่นของกักพาหะในช่วงกระแสกลาง

ค่า τ_{d1} หาได้จากค่าความชันของกราฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (2.80) การคำนวณค่า I_1 ได้จากจุดตัดแกน y (คือ $\ln I_1$) และสามารถคำนวณหาค่าความหนาแน่นของ

กักพาหะของฟิล์มบางได้ดังนี้คือ

$$\sigma_{r1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left(\frac{1}{W} \right) \quad (2.81)$$

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

$$\ln I_p = -\frac{t}{\tau_{d2}} + \ln I_2 \quad (2.82)$$

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

$$\sigma_{r2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left(\frac{1}{W} \right) \quad (2.83)$$

สำหรับกรณีของความหนาแน่นของชั้นสารเช่นในเซรามิก ก็สามารถใช้สูตร

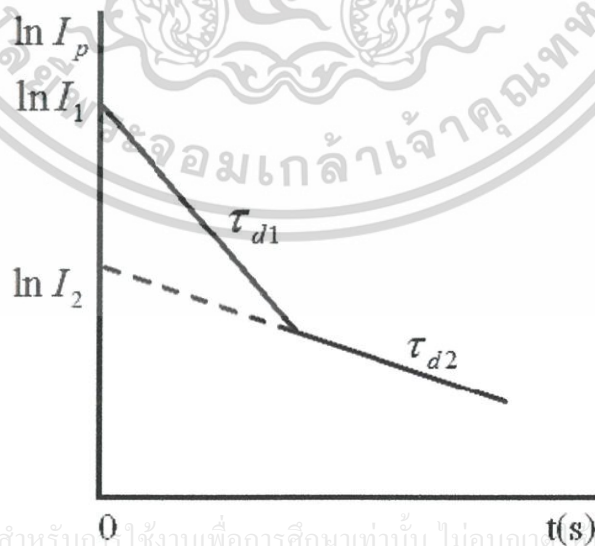
$$N_{r1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left(\frac{1}{Wd} \right) \quad (2.84)$$

และ

$$N_{r2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left(\frac{1}{Wd} \right) \quad (2.85)$$

2.6.2 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกักพาหะในช่วงกระแสขาขึ้น

การหาค่าความหนาแน่นของกักพาหะในช่วงกระแสขาขึ้นจะอาศัยกราฟออร์มัลไลเซชัน ($\ln I_p$) กับเวลา (t) ดังรูปที่ 2.30



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะรูปที่ 2.30 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสออร์มัลไลเซชัน ($\ln I_p$) กับ เวลา (t) เพื่อใช้คำนวณหาค่าความหนาแน่นของกักพาหะในช่วงกระแสขาขึ้น

กระแสขาขึ้นอาจแสดงได้ดังสมการง่ายๆ ดังนี้คือ

$$I = I_{\max} \left[1 - \exp\left(-t/\tau_{d1}\right) \right] \quad (2.86)$$

$$\frac{I}{I_{\max}} = 1 - \exp\left(-t/\tau_{d1}\right)$$

จากสูตร

$$1 - \frac{I}{I_{\max}} = \exp\left(-t/\tau_{d1}\right)$$

$$\ln\left[1 - \frac{I}{I_{\max}}\right] = -t/\tau_{d1} \quad (2.87)$$

จากสูตร

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

ถ้า $\frac{I}{I_{\max}} \ll 1$ สมการที่ (2.87) จะประมาณได้ว่าเป็น

$$\frac{I}{I_{\max}} = -t/\tau_{d1} \quad (2.88)$$

ข้อสังเกตคือสมการที่ (2.88) จะใช้ได้จริงเมื่อ $I/I_{\max} \ll 1$ ก็คือช่วงแรกๆ ของกราฟกระแสขาขึ้น ส่วนช่วงท้ายๆ ของกราฟความถูกต้องจะลดลง การคำนวณหาค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะทั้งชนิดฟิล์มบางจะใช้สมการที่ (2.81), (2.83), (2.84) และ (2.85) ได้เช่นเดียวกับกระแสขาลง

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

รอยต่อของสารกึ่งตัวนำที่เป็นแบบพี-เอ็น คือบริเวณที่ชนิดการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำเปลี่ยนจากชนิดพีเป็นชนิดเอ็นหรือ เปลี่ยนจากชนิดเอ็นเป็นชนิดพี โดยที่โครงสร้างของผลึกไม่มีการเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด รอยต่อของสารกึ่งตัวนำที่เป็นแบบพี-เอ็น เป็นส่วนที่สำคัญมากในสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำแทบทุกชนิด และคุณสมบัติของ รอยต่อของสารกึ่งตัวนำที่เป็นแบบพี-เอ็น ดังกล่าวนี้อาจขึ้นกับกระบวนการผลิตซึ่งมีมากมายหลายแบบ วิธีการประดิษฐ์รอยต่อ ที่สำคัญๆ ในปัจจุบันมีดังนี้คือ วิธีการแพร่ซึม วิธีอีพิแทกซี (epitaxy) วิธีฝังไอออน (ion implantation) และแบบหลอมผสม (alloying) เป็นต้น

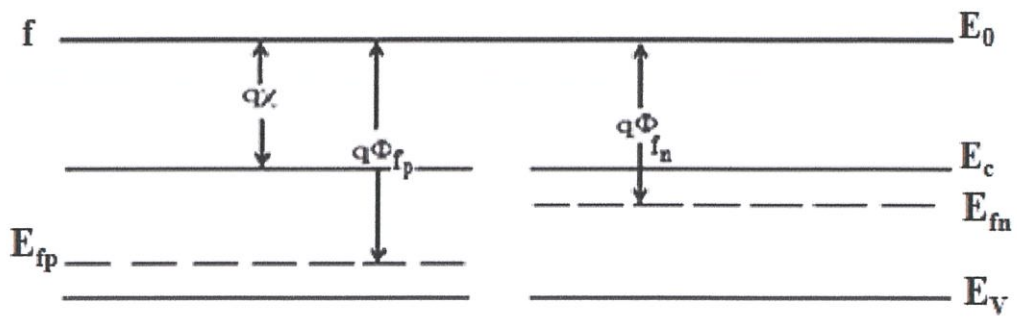
2.7.1 รอยต่อของสารกึ่งตัวนำที่เป็นแบบพี-เอ็น เมื่ออยู่ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน

แบบจำลองของรอยต่อของสารกึ่งตัวนำที่เป็นแบบพี-เอ็น ในเชิงอุดมคติ จะเริ่มพิจารณาในกรณีที่เป็นรอยต่อแบบโฮโม (homo junction) ซึ่งทั้งสารกึ่งตัวนำชนิดพีและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นเป็นวัสดุชนิดเดียวกัน จึงมีค่าช่องว่างแถบพลังงานเท่ากัน โดยเริ่มจากอิล็กตรอนที่มีอยู่จำนวนมากในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะแพร่ซึมไปยังสารกึ่งตัวนำชนิดพี ซึ่งมีอิล็กตรอนอยู่น้อยมาก ในทำนอง

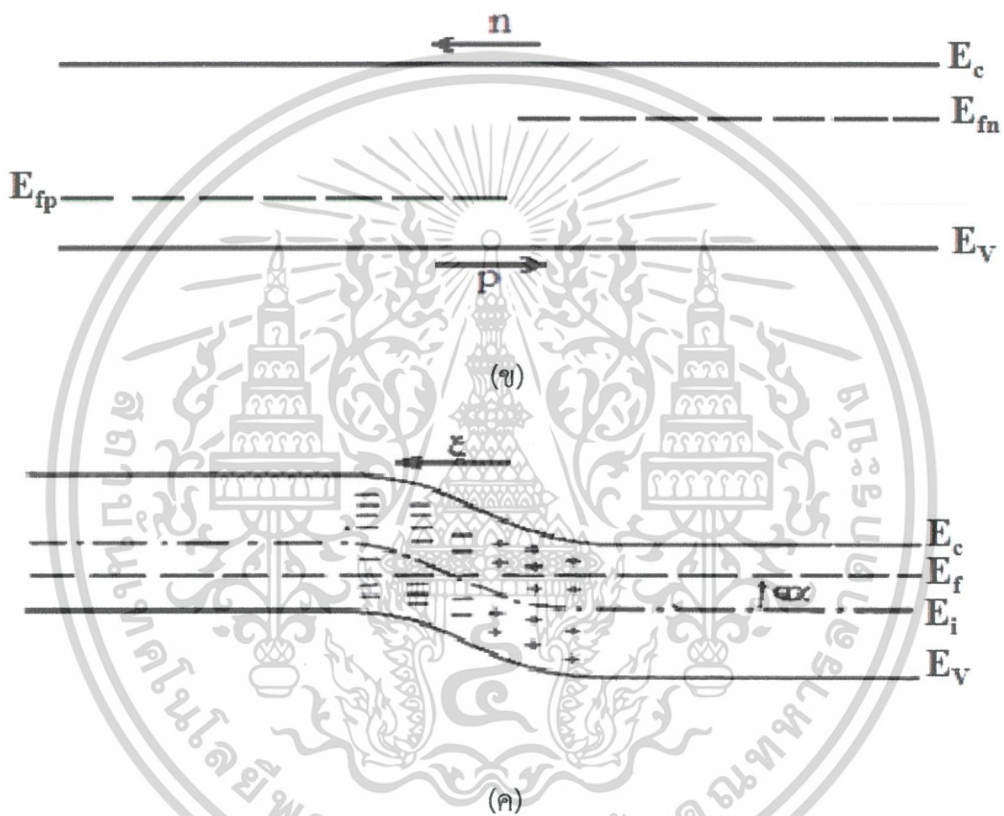
เดียวกันโฮลที่มีอยู่เป็นจำนวนมากในสารกึ่งตัวนำชนิดพีจะแพร่เข้าไปยังด้านเอ็นซึ่งมีโฮลอยู่น้อยมาก การแพร่ซึมของพาหะเหล่านี้จะทำให้เนื้อสารขาดความเป็นกลางทางไฟฟ้านั้นคือทางสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะสูญเสียอิเล็กตรอนอิสระไป ทำให้บริเวณสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่ใกล้รอยต่อ แสดงอำนาจไฟฟ้าเป็นบวกเนื่องจากมีประจุบวกของไอออนของอะตอมผู้ให้ถูกทิ้งไว้ สำหรับทางสารกึ่งตัวนำชนิดพีก็จะมีลักษณะคล้ายๆกัน คือมีไอออนของอะตอมผู้รับซึ่งมีประจุเป็นลบปรากฏอยู่ ยังส่งผลให้เกิดสนามไฟฟ้าที่รอยต่อโดยที่สนามไฟฟ้ามักมีทิศจากทางสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นไปทางสารกึ่งตัวนำชนิดพี ดังนั้นการแพร่ซึมของโฮลและอิเล็กตรอนจะลดลงเนื่องจากอิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่ต้านการแพร่ซึม บริเวณรอยต่อนี้จึงปลอดจากพาหะอิสระและเรียกบริเวณนี้ว่าเขตปลอดพาหะ (depletion region) หรือบางครั้งเรียกว่า บริเวณประจุค้าง (space charge region) เนื่องจากมีประจุของไอออนสารเจืออยู่ซึ่งเป็นประจุที่ถูกตรึงอยู่กับที่ (fixed charge) ไม่ใช่ประจุอิสระ

ลักษณะการแพร่ซึมของอิเล็กตรอนและโฮลที่รอยต่ออาจแสดงได้โดยแผนภาพลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานดังรูปที่ 2.31 โดยที่รูป 2.31 (ก) แสดงลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดที่ยังไม่ได้สัมผัสกันเป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์ รูปที่ 2.31 (ข) แสดงลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดที่ถูกนำมาทำเป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์ ซึ่งจะเกิดการแพร่ของอิเล็กตรอนและโฮล จนกระทั่งเข้าสู่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 2.31 (ค) โดยที่ ϕ คือศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อ และ ξ คือสนามไฟฟ้าที่รอยต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

(ค)

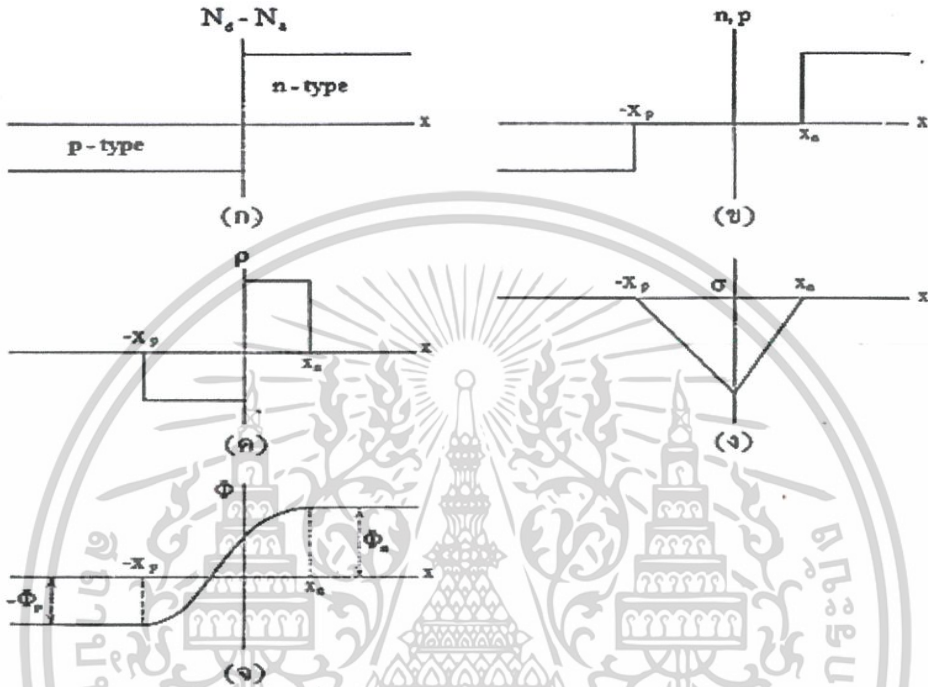
รูปที่ 2.31 แสดงลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำที่เป็นแบบพี-เอ็น

- ก. ขณะที่สารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดยังไม่ได้สัมผัสกันเป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์
- ข. ขณะที่สารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดที่ถูกนำมาทำเป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์
- ค. ขณะที่สารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดถูกนำมาทำเป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์และอยู่ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.2 รอยต่อของสารกึ่งตัวนำที่เป็นแบบชั้นบันได

รอยต่อแบบชั้นบันได (step junction) เป็นรอยต่อในเชิงอุดมคติ ที่พิจารณาว่าปริมาณความเข้มข้นของสารเจือในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและทางสารกึ่งตัวนำชนิดพีต่างมีค่าคงที่ (แต่ค่าไม่เท่ากัน) จนกระทั่งถึงจุดเชื่อมต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นกับสารกึ่งตัวนำชนิดพี ดังแสดงในรูปที่ 2.32



รูปที่ 2.32 แสดงไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธ์ของสารกึ่งตัวนำที่เป็นแบบพี-เอ็น ในกรณีที่ เป็นแบบชั้นบันไดที่เป็นฟังก์ชันกับระยะทาง
 ก. ความเข้มข้นสารเจือ
 ข. ความหนาแน่นของพาหะอิสระ
 ค. ประจุค้าง
 ง. สนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อ
 จ. ศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อ

ประจุไฟฟ้าจะมีค่าไม่เป็นศูนย์เฉพาะที่บริเวณเขตปลอดพาหะ จะหาสนามไฟฟ้าทางสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นได้โดยใช้สมการของปัวซอง (Poisson's equation) นั่นคือ

$$\frac{d^2\phi}{dx^2} = \frac{-d^2\xi}{dx} = \frac{-qN_d}{\epsilon_s} \tag{2.89}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าแล้ว $\xi(x) = \frac{-qN_d}{\epsilon_s}(x_n - x); 0 < x < x_n$ (2.90) ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ สนามไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นมีเครื่องหมายเป็นลบ แสดงว่ามีทิศไปทางซ้ายมือและสัมพันธ์กับระยะทางแบบเชิงเส้นและสิ้นสุดที่ระยะทาง x_n ดังนั้นสนามไฟฟ้าจะต้านการแพร่ซึมของ

อิเล็กตรอนที่จะแพร่ซึมจากขวาไปซ้าย ในทำนองเดียวกันสนามไฟฟ้าทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพี จะมีความสัมพันธ์กับระยะทางแบบเชิงเส้นดังนี้

$$\xi(x) = \frac{-qN_a}{\epsilon_s}(x - x_p); x_p < x < 0 \quad (2.91)$$

ซึ่งสนามไฟฟ้าทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพีจะมีทิศทางการแพร่ซึมของโฮลด้วยเหมือนกันที่ระยะ $x = 0$ สนามไฟฟ้าจะต้องต่อเนื่อง นั่นคือ

$$N_a x_p = N_d x_n \quad (2.92)$$

ซึ่งแสดงว่าความกว้างของเขตปลอดพาหะทั้งทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพีและทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะแปรผกผันกับความเข้มข้นของสารเจือ กล่าวคือถ้าด้านใดมีความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือสูง เขตปลอดพาหะจะยื่นเข้าไปในเนื้อสารด้านนั้นน้อย ในทางตรงกันข้าม ถ้าด้านใดมีความเข้มข้นของสารเจือต่ำ เขตปลอดพาหะส่วนใหญ่จะตกอยู่ในเนื้อสารของด้านนั้น แต่ถ้าให้ความเข้มข้นของสารเจือของอะตอมผู้ให้ทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นมีค่ามากกว่าความเข้มข้นของสารเจือของอะตอมผู้รับทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพีมากๆ สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่ถูกเจืออย่างหนัก (heavily doped n-type) จะถือได้ว่าเขตปลอดพาหะที่รอยต่อเข้าไปอยู่ในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดพี และจะเรียกรอยต่อชนิดนี้ว่ารอยต่อแบบชั้นบันไดด้านเดียว (one-sided step junction)

ศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นสามารถหาได้โดยการอินทิเกรต สมการที่ (2.90) เทียบกับ x นั่นคือ

$$\phi(x) = \frac{-qN_d}{\epsilon_s}(x_n - x)^2; 0 < x < x_n \quad (2.93)$$

โดยที่

$$\phi_n = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_d}{n_i}\right) \quad (2.94)$$

ในทำนองเดียวกันศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพี คือ

$$\phi(x) = \phi_p + \frac{qN_a}{\epsilon_s}(x - x_p)^2; -x_p < x < 0 \quad (2.95)$$

โดยที่

$$\phi_p = \frac{-kT}{q} \ln\left(\frac{N_a}{n_i}\right) \quad (2.96)$$

คือ ศักย์ไฟฟ้าในเนื้อของสารกึ่งตัวนำชนิดพีนอกเขตปลอดพาหะอิสระและมีค่าเป็นลบ ผลต่างของศักย์ไฟฟ้าระหว่าง $\phi_n - \phi_p$ จะมีค่าดังนี้คือ

$$\phi_i = \phi_n - \phi_p = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_d}{n_i}\right) + \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_a}{n_i}\right) = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_d N_a}{n_i}\right) \quad (2.97)$$

และเรียก ϕ_i ว่าแรงดันในตัว (built-in potential) ซึ่งจะมีเครื่องหมายเป็นบวก

ในกรณีที่มีการเจือสารด้วยความเข้มข้นสูงมาก 10^{19} ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร สมการที่ (2.97) จะไม่เป็นจริงอีกต่อไป เพราะว่ากรณีที่มีการเจือสารอย่างสูง เราจะประมาณฟังก์ชันการแจกแจงของ

เฟอร์มิ-ดิแรก ด้วยฟังก์ชันการแจกแจงของแม็กเวลล์-โบลต์ซมานน์ไม่ได้ เนื่องจากระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำจะเลื่อนเข้าหาขอบของแถบพลังงาน (ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี ระดับเฟอร์มิจะเลื่อนเข้าหาขอบบนสุดของแถบวาเลนซ์ เป็นต้น) นั่นคือระดับเฟอร์มิของสารที่ถูกเจืออย่างหนัก จะเลื่อนไปจากระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำอินทรีนสิกเท่ากับ $E_g/2q$ หรือราวๆ 0.56 อิเล็กตรอนโวลต์ ในอะตอมของธาตุ Si ดังนั้นในรอยต่อของสารกึ่งตัวนำที่เป็นแบบ $p^+ - n$ ศักย์ในตัวจะมีค่าดังนี้คือ

$$|\phi_i| = 0.56 + \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_d}{n_i} \right) \quad (2.98)$$

และที่บริเวณเขตปลอดพาหะเกือบทั้งหมดจะปรากฏในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นของหัวต่อแต่ถ้าเป็นหัวต่อพี-เอ็นปกติ จะพบว่าความกว้างของบริเวณเขตปลอดพาหะคือ

$$x_p + x_n = \left[\frac{2\epsilon_s}{q} \phi_i \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right) \right]^{1/2} \quad (2.99)$$

ซึ่งจะเห็นได้ชัดว่าความกว้างของบริเวณเขตปลอดพาหะขึ้นกับส่วนกลับของรากที่สองของความเข้มข้นของสารเจือโดยประมาณ

2.7.3 รอยต่อของสารกึ่งตัวนำที่เป็นแบบพี-เอ็น ภายใต้สภาวะการไบอัสย้อนกลับ (Kittel, 2005; งามนิตย์, 2530; ฐิตินัย, 2531; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2552; Runyan, 1975; สุกฤษฎ์, 2547; สมเกียรติ, 2542)

ถ้าให้แรงดันไฟ V_a แก่รอยต่อในลักษณะที่ขั้วลบต่อเข้ากับสารสารกึ่งตัวนำชนิดพีและขั้วบวกต่อเข้ากับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และประมาณว่าแรงดัน V_a ทั้งหมดไปตกคร่อมอยู่ที่บริเวณรอยต่อดังนั้น แรงดันในตัว ϕ_i ของสมการที่ (2.100) จะถูกแทนที่ด้วย $(\phi_i - V_a)$

$$x_d = x_p + x_n = \left[\frac{2\epsilon_s}{q} \phi_i \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right) (\phi_i - V_a) \right]^{1/2} \quad (2.100)$$

ถ้า V_a มีค่ามากกว่า ϕ_i แล้วความกว้างของเขตบริเวณเขตปลอดพาหะจะแปรผันตรงกับรากที่สองของ V_a จากรูปที่ 2.17 (ง) สนามไฟฟ้ามีค่าสูงสุดเมื่อ

$$\frac{1}{2} \mathcal{E}_{\max} x_d = (\phi_i - V_a)$$

ดังนั้น

$$\mathcal{E}_{\max} = \frac{2(\phi_i - V_a)}{x_d} \quad (2.101)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 ค่าความจุไฟฟ้า (Kittel, 2005; งามนิศย์, 2530; ฐิตินัย, 2531; งามนิศย์, 2545; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2552; Runyan, 1975; สุกฤษฏี, 2547; สมเกียรติ, 2542; ฐิตินัย, 2552; วีระชัย, 2547; ดุสิต, 2535)

ค่าความจุไฟฟ้าของสัญญาณขนาดเล็กต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของบริเวณรอยต่อจะแสดงอยู่ในรูปของประจุ Q_s (ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่) ในบริเวณเขตปลอดพาหะ ดังความสัมพันธ์

$$\phi_s = qN_d x_n = qN_a x_p \quad (2.102)$$

จากนิยามของค่าความจุไฟฟ้าคือ

$$C = \frac{dQ}{dV_a} = qN_d \frac{dx_n}{dV_a} = qN_a \frac{dx_p}{dV_a} \quad (2.103)$$

แต่เนื่องจาก $x_p = (N_d/N_a)$ และ $x_d = x_n + x_p$ รวมทั้งพิจารณาสมการที่ (2.100) จะได้ว่า

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

และ

$$C = \left[\frac{\epsilon_s}{2q \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right) (\phi_i - V_a)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.105)$$

ในกรณีที่ $|V_a|$ มีค่า มากกว่า ϕ_i แล้วค่า ความจุไฟฟ้าของรอยต่อแบบชั้นจะลดลงโดยแปรผกผันกับรากที่สองของ V_a ถ้าแทนสมการที่ (2.100) ลงในสมการที่ (2.105) จะได้ว่า $C = \epsilon_s/x_d$ ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ที่รู้จักกันแพร่หลายสำหรับไฟฟ้าสถิตสัญญาณขนาดเล็ก

อย่างไรก็ตาม ถ้าเป็นกรณีที่ความหนาแน่นของสารเจือในบริเวณรอยต่อมีค่าไม่สม่ำเสมอในช่วง $-x_p$ ถึง x_n ดังรูปที่ 2.33 ประจุไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ Q ที่ปรากฏอยู่ระหว่าง x และขอบเขตบริเวณปลอดพาหะ x_n จะมีความสัมพันธ์ดังนี้

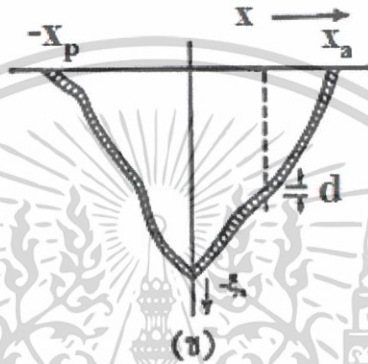
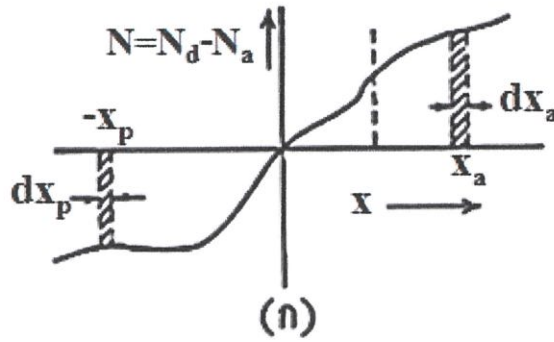
$$Q = q \int_x^{x_n} N dx \quad (2.106)$$

เมื่อ N คือค่าความหนาแน่นของประจุสุทธิ และมีค่าเท่ากับ $N_d - N_a$ แต่เนื่องจาก $\xi_x(x_n) = 0$

โดยการใช้กฎของเกาส์ (Gauss's law) จะได้ว่าสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่ง x ใดๆ มีค่าดังนี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

$$\xi(x) = \frac{1}{\epsilon_s} \int_x^{x_n} q N dx = \frac{q}{\epsilon_s} \quad \text{ถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการ} \quad (2.107)$$



รูปที่ 2.33 แสดงโปรไฟล์ของค่าพารามิเตอร์ต่างๆในบริเวณเขตปลอดพาหะ

- ก. แสดงการกระจายความหนาแน่นอะตอมของสารเจือที่มีค่าไม่สม่ำเสมอภายในเขตปลอดพาหะ
- ข. ลักษณะของสนามไฟฟ้าในบริเวณเขตปลอดพาหะเมื่อแรงดันไบอัสย้อนกลับมีค่าเปลี่ยนไปเล็กน้อย

จากรูปที่ 2.33 (ข) เมื่อแรงดันไฟ้ออนกลับ V_a มีค่าเปลี่ยนไป dV_a ขอบเขตของบริเวณปลอดพาหะทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะเปลี่ยนไป dx_n และประจุไฟฟ้าที่ปรากฏอยู่ในบริเวณ ตั้งแต่ x จนถึง x_n จะมีค่าดังนี้คือ

$$dQ = qN(x_n)dx_n \quad (2.108)$$

แล้วสนามไฟฟ้าที่จุด x จะเปลี่ยนไปตามความสัมพันธ์

$$-d\xi_x = \frac{dQ}{\epsilon_s} = \frac{q}{\epsilon_s} N(x_n)dx_n \quad (2.109)$$

แต่เนื่องจากพื้นที่กราฟ ξ_x กับ x จะสัมพันธ์กับ $\phi_i - V_a$ ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปจะ สอดคล้องกับพื้นที่แรเงาของรูปที่ 2.33 (ข) ดังนั้นจะได้ว่า

$$dV_a \approx -x_d d\xi_x = \frac{x_d}{\epsilon_s} dQ \quad (2.110)$$

และจากนิยาม ค่าความจุไฟฟ้าของสัญญาณขนาดเล็ก คือ

$$C = \frac{dQ}{dV_a} = \frac{\epsilon_s}{x_d} \quad (2.111)$$

ภายใต้สภาวะไบอัสย้อนกลับ บริเวณขอบเขตปลอดพาหะทั้งด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพีและด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะเลื่อนออกไปจากแนวเดิม สำหรับอนุพันธ์ของสมการที่ (2.30) เทียบกับ x_n คือ

$$\frac{dC}{dx_n} = \frac{\epsilon_s}{(x_n + x_p)} \left(1 + \frac{dx_p}{dx_n} \right) \quad (2.112)$$

แต่เนื่องจากขนาดของประจุไฟฟ้าทั้งสองข้างของบริเวณรอยต่อที่เปลี่ยนไปต่างต้องมีปริมาณที่เท่ากัน

นั่นคือ
$$|dQ| = |qN(-x_p)dx_p| = qN(x_n)dx_n \quad (2.113)$$

และ
$$\frac{dC}{dx_n} = \frac{-C^2}{\epsilon_s} \left(1 + \frac{N(x_n)}{|N(-x_p)|} \right) \quad (2.114)$$

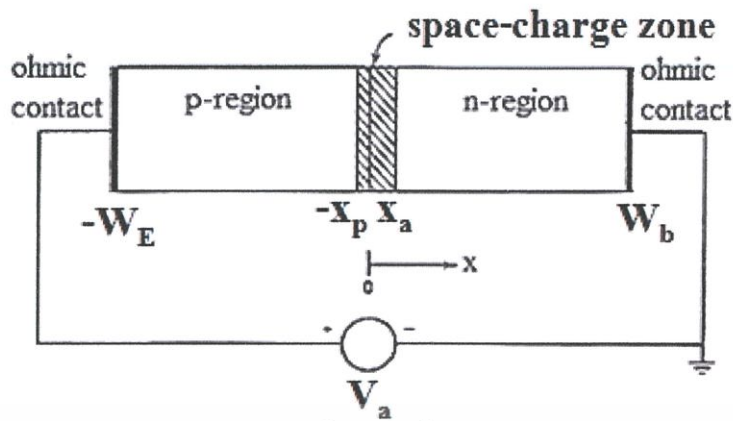
แทนค่า dx_n ของสมการที่ (2.114) ลงในสมการที่ (2.108) จะได้ว่า

$$N(x_n) = \frac{C^2}{\epsilon_s (dC/dV_a)} \left(1 + \frac{N(x_n)}{|N(-x_p)|} \right) \quad (2.115)$$

ถ้าด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพีถูกเจืออย่างหนัก แล้วพจน์ขวามือในวงเล็บของสมการที่ (2.114) จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งจะกลายเป็นการหาค่าความเข้มข้นสารเจือของรอยต่อแบบขั้นข้างเดียว (one sided step junction)

2.9 ลักษณะเฉพาะของค่ากระแสไฟฟ้า - แรงดันไฟฟ้า ของรอยต่อของสารกึ่งตัวนำที่เป็นแบบพี-เอ็น (Kittel, 2005; งามนิตย์, 2530; ฐิตินัย, 2531; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2552; Runyan, 1975; สุกฤษฎ์, 2547; สมเกียรติ, 2542)

จากรูปที่ 2.34 แสดงการป้อนแรงดันไฟตรง V_a ให้กับไดโอดชนิดของสารกึ่งตัวนำที่มีรอยต่อแบบพี-เอ็น ไดโอดมีพื้นที่หน้าตัด A ถ้าไม่มีการฉายแสงไปยังไดโอด กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านไดโอดจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามขนาดของแรงดัน V_a แรงดันส่วนใหญ่จะตกคร่อมที่รอยต่อมากกว่าในเนื้อสารซึ่งถือว่าเป็นกลางทางไฟฟ้า (quasi-neutral region) และที่ขั้วไฟฟ้า (ohmic contact) แรงดันไฟฟ้าสุทธิที่รอยต่อจะเท่ากับ $(\phi_i - V_a)$ ถ้า V_a มีค่าเป็นบวก จะเรียกว่าการไบอัสไปหน้า แต่ถ้า V_a มีเครื่องหมายเป็นลบเรียกว่าการไบอัสย้อนกลับ กระแสที่ไหลในวงจรจะมีค่าน้อยมาก และกระแสจะคงที่ไม่ขึ้นกับค่า V_a ในช่วงของ V_a ขนาดหนึ่ง



รูปที่ 2.34 แสดงโครงสร้างของไดโอดของสารกึ่งตัวนำที่มีรอยต่อแบบพี-เอ็น ขณะถูกไบอัสไปหน้า ด้วยแรงดัน V_a

2.10 เงื่อนไขขอบเขตของความเข้มข้นของพาหะข้างน้อย (Kittel, 2005; งามนิทย์, 2530; ฐิตินัย, 2531; งามนิทย์, 2545; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2552; Runyan, 1975; สุกฤษฎ์, 2547; สมเกียรติ, 2542; ฐิตินัย, 2552; วีรัชย์, 2547; ดุสิต, 2535)

ภายใต้เงื่อนไขการฉีดกระแสระดับต่ำ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่ขอบของเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่ติดกับรอยต่อพี-เอ็น คือที่ระยะ x_n จะเท่ากับค่าความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือไม่ว่าจะอยู่ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อนหรือภายใต้การไบอัสก็ตาม นั่นคือ $(x_n) = N_d(x_n)$ ในทำนองเดียวกันความหนาแน่นของโฮลที่ขอบของเนื้อสารชนิดกึ่งตัวนำชนิดพีที่ระยะ $-x_p$ จะมีค่า $n_{po}(-x_p) = N_a(-x_p)$ ดังนั้นจะสรุปได้ว่า

$$\begin{aligned} n_{po}(-x_p) &= n_{no}(-x_n) \exp\left(\frac{-q\phi_i}{kT}\right) \\ &= N_d(x_n) \exp\left(\frac{-q\phi_i}{kT}\right) \end{aligned} \quad (2.116)$$

$$\begin{aligned} p_{no}(x_n) &= p_{po}(-x_{pn}) \exp\left(\frac{-q\phi_i}{kT}\right) \\ &= N_a(-x_p) \exp\left(\frac{-q\phi_i}{kT}\right) \end{aligned} \quad (2.117)$$

ภายใต้การไบอัสด้วยแรงดันตามเงื่อนไขการฉีดพาหะระดับต่ำ จะได้

$$n_p(-x_p) = N_d(x_n) \exp\left[\frac{-q\phi_i - V_a}{kT}\right] \quad (2.118)$$

$$p_n(x_n) = N_a(-x_p) \exp\left[\frac{-q\phi_i - V_a}{kT}\right] \quad (2.119)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ขอสงวนสิทธิ์ในนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้ง และอีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นิยามความหนาแน่นของอิเล็กตรอนส่วนเกิน และความหนาแน่นของโฮลส่วนเกิน p' ที่เกิดขึ้น คือ

$$n' \equiv n - n_0 \quad (2.120)$$

$$p' \equiv p - p_0 \quad (2.121)$$

แล้ว

$$n'_p(-x_p) = n_{p_0}(-x_p) \left[\exp\left(\frac{-qV_a}{kt}\right) - 1 \right] \quad (2.122)$$

และ

$$p'_n(x_n) = p_{n_0}(x_n) \left[\exp\left(\frac{-qV_a}{kt}\right) - 1 \right] \quad (2.123)$$

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

ในเบื้องต้นจะพิจารณาการฉีดโฮลจากด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพีข้ามรอยต่อเข้าไปในเนื้อสาร ของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นแล้วรวมตัวกับอิเล็กตรอนโดยผ่านศูนย์กลางการรวมตัว ดังนั้นสมการ ความต่อเนื่องในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นนอกรอยต่อคือ

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

แต่จากสมการ

$$U = p'_n / \tau_p = (p_n - p_{n_0}) / \tau_p$$

ดังนั้น

$$\frac{\partial p_n}{\partial t} = D_p \frac{\partial^2 p_n}{\partial x^2} - \left(\frac{p_n - p_{n_0}}{\tau_p} \right) \quad (2.124)$$

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

$$0 = D_p \frac{d^2 p'_n}{dx^2} - \frac{p'_n}{\tau_p} \quad (2.125)$$

ผลเฉลยของสมการที่ (2.126) คือ

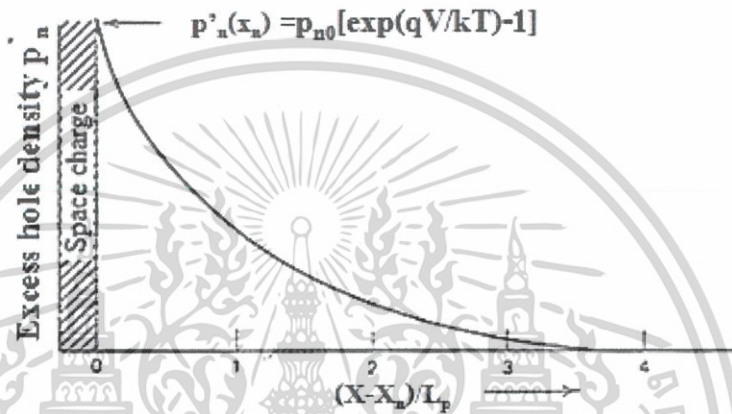
$$p'_n(x) = A \exp\left(-\frac{(x-x_n)}{\sqrt{D_p \tau_p}}\right) + B \exp\left(\frac{(x-x_n)}{\sqrt{D_p \tau_p}}\right) \quad (2.126)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.11.1 ลักษณะสมบัติของไดโอดยาว (long-base diode characteristics)

จากรูปที่ 2.34 ถ้า W_B มีความยาวมากกว่าความยาวแพร่ซึมของโฮล $L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$ ในกรณีที่โฮลที่ถูกฉีดเข้ามาในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะรวมตัวกับอิเล็กตรอนจนหมดก่อนที่จะถึงขั้วไฟฟ้า จะเรียกกรณีนี้ว่าไดโอดยาว เนื่องจาก p'_n ควรจะต้องมีค่าน้อยลงตามระยะทาง x ที่เพิ่มขึ้น ด้วยเหตุผลนี้ค่าคงตัว B ในสมการที่ (2.126) จะต้องเป็นศูนย์ ดังนั้น

$$p'_n(x) = p_{n0} \left[e^{(qV/kT)} - 1 \right] e^{-(x-x_n)/L_p} \quad (2.127)$$



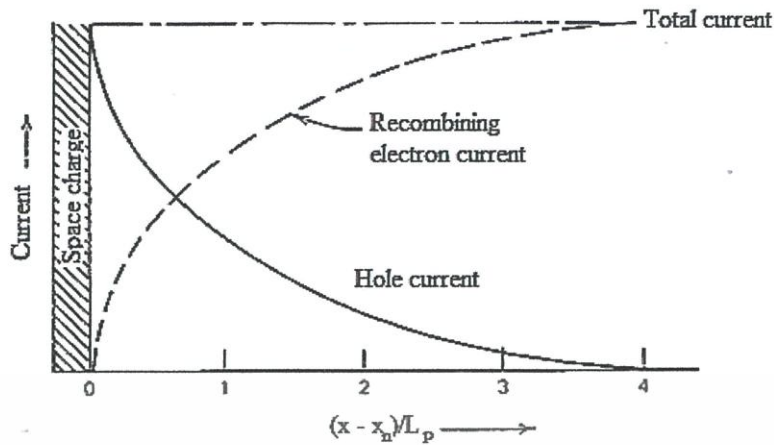
รูปที่ 2.35 แสดงการลดลงของค่าความหนาแน่นของโฮลส่วนเกินในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ของไดโอดของสารกึ่งตัวนำที่มีรอยต่อแบบพี-เอ็น ในกรณีที่เป็ไดโอดยาวที่อยู่ภายใต้การฉีดพาหะระดับต่ำด้วยแรงดันไบอัสไปหน้าค่าเท่ากับ V_a

ความหนาแน่นของกระแสโฮลที่ไหลในเนื้อสาร จะคิดเฉพาะกระแสที่มาจากกลไกการแพร่ซึมเท่านั้น เนื่องจากถือว่าแรงดันตกคร่อมในเนื้อสารมีค่าน้อยมาก สนามไฟฟ้าจึงมีค่าเป็นศูนย์ จะได้ว่า

$$\begin{aligned} J_p(x) &= -qD_p \frac{d^2 p'_n}{dx^2} = qD_p \frac{p_{n0}}{L_p} \left[e^{(qV_a/kT)} - 1 \right] e^{-(x-x_n)/L_p} \\ &= qD_p \frac{n_i^2}{N_d L_p} \left[e^{(qV_a/kT)} - 1 \right] e^{-(x-x_n)/L_p} \end{aligned} \quad (2.128)$$

กระแสโฮลจะมีค่าสูงสุดที่ระยะ $x = x_n$ เมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นแล้วความหนาแน่นของโฮลจะ ลดลง เนื่องจากรวมตัวกับอิเล็กตรอน แต่กระแสสุทธิจะต้องคงที่เสมอ ดังนั้นกระแสอิเล็กตรอน จะต้องมีการเพิ่มขึ้นเมื่อระยะทาง x เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.36 แสดงกระแสโฮล (เส้นทึบ) กับ กระแสอิเล็กตรอน (เส้นประ) ในเนื้อสารด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นซึ่งอยู่นอกรอยต่อพี-เอ็น ซึ่งประมาณว่าเป็นกลางทางไฟฟ้า (quasi-neutral region) เนื่องจากประมาณว่าไม่ได้รับผลกระทบจากแรงดันไบอัสไปหน้า V_a

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

$$J_n = qD_n \frac{n_i^2}{N_a L_n} \left[e^{(qV_a/kT)} - 1 \right] e^{-(x-x_n)/L_p} \quad (2.129)$$

โดยที่ x ในสมการที่ (2.130) จะมีเครื่องหมายเป็นลบ นั่นคือกระแสอิเล็กตรอนจะลดลงเมื่อ x ออกห่างจากรอยต่อพี-เอ็น ไปสู่เนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดพีมากขึ้น กระแสสุทธิจะหาได้จากการนำเอาสมการที่ (2.128) รวมกับสมการที่ (2.129) นั่นคือ

$$\begin{aligned} J_t &= J_p(x_n) + J_n(-x_p) \left(\frac{D_p}{N_d L_p} + \frac{D_n}{N_a L_n} \right) \left[e^{(qV_a/kT)} - 1 \right] \\ &= J_0 \left[e^{(qV_a/kT)} - 1 \right] \end{aligned} \quad (2.130)$$

เมื่อ

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

และเรียกว่าความหนาแน่นของกระแสอิ่มตัว J_0

2.11.2 ลักษณะสมบัติของไดโอดสั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสาร ถ้าทั้ง W_B และ W_E สั้นกว่าความยาวแพร่ซึมของโฮล L_p และของอิเล็กตรอน L_n จะมีเพียงบางส่วนของพาหะข้างน้อยที่สูญหายไปเนื้อสาร เนื่องจากการรวมตัวกับพาหะข้างมากในเนื้อสารเหล่านั้น แล้วพาหะข้างน้อยนี้จะเกิดการรวมตัวกันหมดที่ชั่วไฟฟ้าที่ตำแหน่ง W_B และ $-W_E$ สำหรับไดโอดสั้น จากการกระจายพจน์ในสมการที่ (2.126) ด้วยอนุกรมเทย์เลอร์จะได้ว่า

$$p'_n(x) = A' + B' \frac{(x - x_n)}{L_p} \quad (2.131)$$

ที่ขั้วไฟฟ้า ณ ที่ตำแหน่ง $x = W_B, p'_n(W_B) = 0$

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

$$B' = \frac{-A' L_p}{(W_B - L_n)} \quad (2.132)$$

ที่ตำแหน่ง $x = x_n$ จะได้ว่า $p'_n(x_n) = p_{no} [e^{(qV_a/kT)} - 1]$ (2.133)

และที่ตำแหน่ง $x = x_n$ นี้สมการที่ (2.134) และสมการที่ (2.132) ต้องมีค่าเท่ากัน นั่นคือ

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

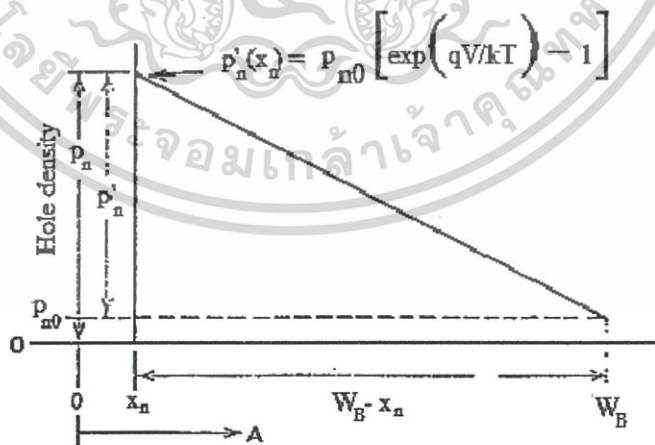
แล้ว

$$A' = p_{no} [e^{(qV_a/kT)} - 1] \quad (2.134)$$

แทนสมการที่ (2.132) และสมการที่ (2.134) ลงในสมการที่ (2.131) จะได้

$$p'_n(x) = p_{no} [e^{(qV_a/kT)} - 1] \left(1 - \frac{x - x_n}{W_B - x_n} \right) \quad (2.135)$$

เมื่อ $W_B = W_B - x_n$ ความเข้มข้นของโฮลส่วนเกินจะลดลงแบบเชิงเส้นกับระยะทางที่เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.37



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2.37 แสดงค่าความหนาแน่นของโฮลภายในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นของไดโอดของสารกึ่ง
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ขอสงวนสิทธิ์ในคดีนี้สงวนลิขสิทธิ์ และสงวนลิขสิทธิ์ของเอกสารที่กรณีนี้นำไปใช้
ตัวนำที่มีรอยต่อแบบพี-เอ็น ในกรณีที่เป็นไดโอดสั้นที่อยู่ภายใต้การไบอัสไปข้างหน้า V_a

จะหาความหนาแน่นของกระแสโฮล จะได้ว่า

$$\begin{aligned} J_p &= -qD_p \frac{dp}{dx} = qD_p \frac{p_{no}}{W'_B} \left[e^{(qV_a/kT)} - 1 \right] \\ &= qD_p \frac{n_i^2}{N_d W'_B} \left[e^{(qV_a/kT)} - 1 \right] \end{aligned} \quad (2.136)$$

ในทำนองเดียวกันสามารถที่จะหาความหนาแน่นของกระแสอิเล็กตรอนที่ฉีดเข้าไปในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ดังสมการ

$$J_n = qD_n \frac{n_i^2}{N_d W'_B} \left[e^{(qV_a/kT)} - 1 \right] \quad (2.137)$$

ความหนาแน่นกระแสสุทธิในไดโอดสั้นคือ

$$\begin{aligned} J_t &= qn_i^2 \left(\frac{D_p}{N_d W'_B} + \frac{D_n}{N_d W'_E} \right) \left[e^{(qV_a/kT)} - 1 \right] \\ &= J_0 \left[e^{(qV_a/kT)} - 1 \right] \end{aligned} \quad (2.138)$$

เมื่อ

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

ในทางปฏิบัติไดโอดที่ใช้งานจริง อาจจะเป็นรูปแบบการผสมไดโอดสั้นกับไดโอดยาวก็ได้ ซึ่งการหาค่ากระแสอิเล็กตรอนและโฮลสามารถนำเอาผลที่ได้จากการวิเคราะห์ไดโอดยาวและไดโอดสั้นมาประยุกต์ใช้ได้ทันที จากสมการที่ (2.130) และสมการที่ (2.138) ภายใต้การไบอัสไปหน้า กระแสจะเพิ่มขึ้นอย่างมากตามค่าของ V_a เนื่องจากการฉีดพาหะข้างมากข้ามรอยต่อแต่ภายใต้การไบอัสย้อนกลับจะมีกระแสอิมิตัวปริมาณเล็กน้อยไหลผ่านไดโอด เนื่องจากการฉีดพาหะข้างน้อยข้ามรอยต่อ โดยที่กระแสอิมิตัวนี้ไม่ขึ้นกับแรงดันย้อนกลับ

2.12 กระแสเนื่องจากบริเวณประจุค้าง (space-charge-region currents) (Kittel, 2005; งามนิธย์, 2530; ฐิตินัย, 2531; งามนิธย์, 2545; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2552; Runyan, 1975; สุกฤษฏี, 2547; สมเกียรติ, 2542; ฐิตินัย, 2552; วีรัชย์, 2547; คุสิต, 2535)

ในกรณีไดโอดอุดมคติซึ่งมีลักษณะสมบัติเฉพาะของความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า - แรงดันไฟฟ้า ดังสมการที่ (2.130) และสมการที่ (2.139) นั้นยังไม่ได้คิดถึงผลของกระแสที่อาจจะลดลงภายใต้การไบอัสไปข้างหน้า เนื่องจากพาหะในทางกลับกันพาหะอาจจะสร้างขึ้นได้ภายใต้การไบอัสย้อนกลับ ยังผลให้กระแสอิมิตัวมีค่ามากกว่าค่าที่ได้ในสมการของไดโอดอุดมคติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปใช้เพื่อวัตถุประสงค์อื่นใดโดยไม่ได้รับอนุญาตจากผู้นิพนธ์

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกหนึ่งท่านมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ จากทฤษฎีของซ็อกเลย์-ฮอลล์-ริต สามารถจะหาอัตราการเกิด-การรวมตัว จะได้ว่า

$$U = n_i^2 \frac{|e^{(qV_a/kT)} - 1|}{\left[p + n + 2n_i \cosh\left(\frac{E_i - E_i}{kT}\right) \tau_0 \right]} \quad (2.139)$$

ความหนาแน่นของกระแสเนื่องจากพาหะที่เกิดหรือรวมตัวในบริเวณประจุก้างคือ

$$J_r = q \int_{-x_p}^{x_n} U dx \quad (2.140)$$

ถ้าประมาณว่า $E_i \approx E_i$, $p = n = n_i \exp(qV_a/2kT)$ แล้วสมการ (2.139) จะกลายเป็น

$$U = \frac{n_i^2 |e^{(qV_a/kT)} - 1|}{2n_i [e^{(qV_a/kT)} + 1] \tau_0} \quad (2.141)$$

แทนสมการที่ (2.142) ลงในสมการที่ (2.141) จะได้

$$\begin{aligned} J_r &= \frac{qx'n_i^2 |e^{(qV_a/kT)} - 1|}{2n_i [e^{(qV_a/kT)} + 1] \tau_0} \\ &\approx \frac{qx'n_i}{2\tau_0} \exp(qV_a/2kT) \end{aligned} \quad (2.142)$$

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

$$\frac{J_i}{J_r} = \frac{2n_i}{x_d} \left[\frac{L_n}{x_d} + \frac{L_p}{N_d} \right] \exp(qV_a/2kT) \quad (2.143)$$

ในสารกึ่งตัวนำที่มีข้อบกพร่องหรือตำหนิในผลึกน้อย ค่าความยาวแพร่ซึมจะยิ่งมากขึ้นยังส่งผลให้ J_i ยิ่งเด่นกว่า J_r ในกรณีไดโอดหัวต่อด้านเดียวที่มี $L_n = 60$ ไมโครเมตร, $x_d = 0.25$ ไมโครเมตร, $N_a = 10^{16}$ ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และ J_r เมื่อ V_a มากกว่า 0.375 โวลต์

ภายใต้การไบอัสกลับทาง ตัวเศษของสมการที่ (2.140) จะมีค่าเป็น $-n_i^2$ ยังส่งผลให้ U มีค่าเป็นลบ แสดงว่ามีการเกิดพาหะสุทธิ (net generation) ขึ้นในบริเวณประจุก้าง บริเวณความกว้าง x , ซึ่งมีค่าน้อยกว่าและอยู่ภายในบริเวณประจุก้าง x_d เท่านั้นที่จะมีการเกิดพาหะสุทธิอย่างมีประสิทธิภาพและต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไข $p = n \ll n_i$, ซึ่งจะทำให้ U ของสมการที่ (2.139) กลายเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่า U ลงในสมการที่ (2.140) จะได้ว่า

$$J_g = \frac{qn_i x_i}{2\tau_0} \quad (2.144)$$

โดยประมาณว่าศูนย์กลางการเกิดการรวมตัวจะอยู่ที่บริเวณ E_i ซึ่งจะให้ประสิทธิภาพสูงสุด สำหรับรอยต่อ $p^+ - n$ บริเวณประจุค้างจะอยู่ในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ความกว้างของบริเวณประจุค้าง x_d และบริเวณ x_i ซึ่งจะมีอัตราการเกิดพาหะสูงสุด จะแสดงได้ถึงความสัมพันธ์

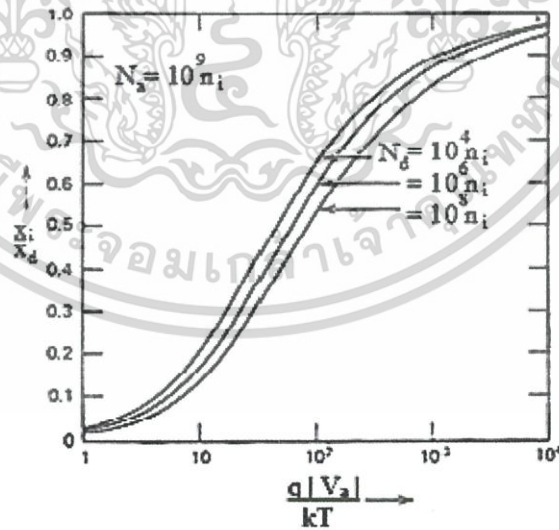
$$x_d = \left[\frac{2\epsilon_s}{qN_d} (\phi_i - V_a) \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$x_d = \left[\frac{2\epsilon_s kT}{q^2 N_d} \left(\ln \left(\frac{N_d N_a}{n_i^2} \right) - \frac{qV_a}{kT} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.145)$$

และ

$$x_i = \left(\frac{2\tau_0 kT}{q^2 N_a} \right)^{\frac{1}{2}} \left[\left(\ln \left(\frac{N_d}{n_i} \right) - \frac{qV_a}{kT} \right)^{\frac{1}{2}} - \left(\ln \frac{N_d}{n_i} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (2.146)$$

ซึ่ง V_a คือแรงดันไบอัส ($V_a < 0$ ในกรณีไบอัสย้อนกลับ) ทั้ง x_d และ x_i จะขึ้นกับรากที่สองของแรงดันไบอัสย้อนกลับ ความต่างระหว่าง x_d และ x_i จะมีค่าน้อยลง เมื่อแรงดันย้อนกลับมีค่ามาก รูปที่ 2.38 แสดงอัตราส่วนของ x_i / x_d ที่เป็นฟังก์ชันกับแรงดันย้อนกลับที่ความเข้มข้นเจือผู้ให้ค่าต่างๆ ของรอยต่อแบบขั้วด้านเดียว $p^+ - n$



รูปที่ 2.38 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าอัตราส่วนของ x_i/x_d ที่เป็นฟังก์ชัน กับ แรงดันไฟฟ้าย้อนกลับที่ความหนาแน่นของสารเจือของอะตอมผู้ให้ค่าต่างๆ ของรอยต่อแบบ $p^+ - n$ ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

2.13 การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ (จิตินัย, 2556)

เทคนิคการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศนั้น เป็นวิธีการเตรียมฟิล์มบางวิธีหนึ่งของการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการระเหยสารซึ่งต้องเตรียมใน สุญญากาศที่ระดับความดันประมาณ $10^{-5} - 10^{-7}$ ทอร์ วัตถุประสงค์ของการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีนี้คือการควบคุมการเคลื่อนย้ายอะตอมจากแหล่งกำเนิดความร้อนไปยังฐานรองรับที่ห่างออกไปแล้ว เกิดเป็นฟิล์มบาง

2.13.1 อัตราการระเหยสาร

จากการทดลองของเฮิร์ตซ์ (Hertz) และนูดเซน (Knudsen) พบว่าอัตราการไหลของอะตอม หรือโมเลกุลในสุญญากาศจากแหล่งกำเนิดความร้อน (heat source) คือ

$$\phi_e = \frac{3.1513 \times 10^{22}}{(MT)^{1/2}} P_e \quad \text{โมเลกุลต่อตารางเซนติเมตร-วินาที} \quad (2.147)$$

เมื่อ ϕ_e คือ ฟลักซ์ของจำนวนอะตอมหรือโมเลกุลของสารที่ระเหยต่อหน่วยพื้นที่ต่อเวลา

P_e คือ ความดันสมดุล (equilibrium pressure) มีหน่วยเป็นทอร์

M คือ มวลโมเลกุล

T คือ อุณหภูมิในหน่วยเคลวิน

อัตราการระเหยมวลสาร (mass evaporation rate: Γ_e) สามารถหาได้จาก

$$\Gamma_e = 5.84 \times 10^{-2} (M/T)^{1/2} P_e \quad \text{กรัมต่อตารางเซนติเมตร-วินาที} \quad (2.148)$$

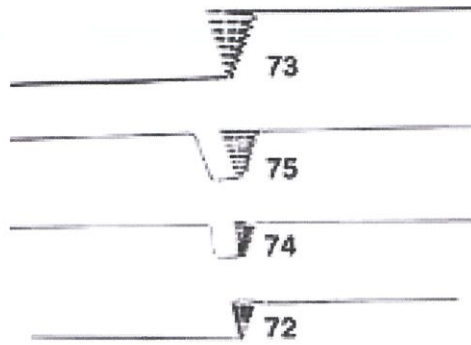
ที่ความดัน 10^{-2} ทอร์ ค่าของ Γ_e ในอัตราจำนวนมากจะมีค่าประมาณ 10^{-4} กรัมต่อตารางเซนติเมตร-วินาที ดังนั้นสิ่งที่มีอิทธิพลต่ออัตราการระเหยสารคือ อุณหภูมิ เพราะมีผลกระทบอย่างมากต่อความดันสมดุล

2.13.2 แหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้ในการระเหยสารด้วยไฟฟ้า

ในการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการระเหยด้วยความร้อนจะต้องให้ความร้อนแก่สารกึ่งตัวนำ ที่ต้องการนำมาเคลือบบนผิวหน้าแผ่นฐานรองโดยทั่วไปแล้วจะใช้ตัวต้านทานหรือขดลวดเหนี่ยวนำ เป็นแหล่งกำเนิดโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่ตัวต้านทานหรือขดลวดเหนี่ยวนำได้ แหล่งกำเนิดความร้อนมีหลายชนิด แบ่งออกได้ดังนี้

2.13.2.1 แหล่งกำเนิดชนิดทั้งสแตน

แหล่งกำเนิดนี้จะอยู่ในรูปพันรอบเดี่ยวหรือหลายรอบเป็นเกลียวทรงกระบอกหรือรูปโคน โดยขดลวดทรงกระบอกจะใช้สำหรับโลหะที่หลอมละลายได้เร็วส่วนขดลวดรูปโคนจะใช้ได้ดีกับโลหะที่หลอมละลายช้า ขดลวดทั้งสแตนสามารถทำงานได้จนกระทั่งอุณหภูมิ 2,200 เคลวิน เกินกว่านี้ประสิทธิภาพจะลดลง



รูปที่ 2.39 แสดงแหล่งกำเนิดชนิดทั้งสแตน

2.13.2.2 แหล่งกำเนิดชนิดแผ่นโลหะคงรูป

แหล่งกำเนิดชนิดแผ่นโลหะคงรูป เช่น ทังสเตน แทนทาลัม และโมลิบดีนัมจะเหมือนกับอุปกรณ์ที่เป็นขดลวดคือ มีความต้านทานในตัวเองและให้ความร้อนที่ค่าแรงดันต่ำแต่กระแสสูง แหล่งกำเนิดเหล่านี้จะถูกสร้างขึ้นมาในรูปแบบต่างๆ



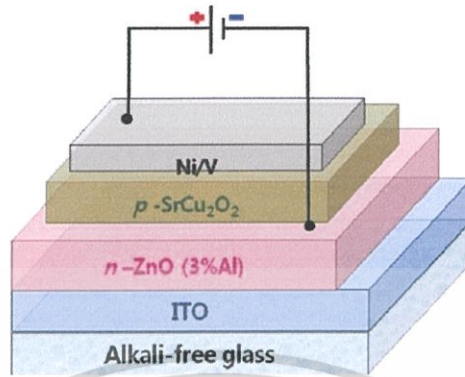
รูปที่ 2.40 แสดงแหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้ระเหยสารด้วยไฟฟ้าแบบต่างๆ

2.14 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Kim et al, 2011; P. Lv et al, 2012)

2.14.1 การประดิษฐ์ไดโอดโปร่งแสงที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ NiV/p-SrCu₂O₂/n-AZO/ITO/Alkali - free glass โดยวิธีอาร์เอฟ แมกนีตรอน สปีดเตอริง (Kim, et al, 2011)

คิมและผู้ร่วมงาน (2011) ทำการสร้างชั้นฟิล์มบางของไดโอดโปร่งแสงที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ NiV/p-SrCu₂O₂/n-AZO/ITO/Alkali - free glass โดยวิธีอาร์เอฟ แมกนีตรอน สปีดเตอริง โดยมีชั้นของฟิล์มบาง ITO เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง ส่วนชั้นหน้าต่างๆคือฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnO ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Al ในปริมาณ 3 เปอร์เซ็นต์โดยมวล ซึ่งประดิษฐ์ด้วยวิธีอาร์เอฟ แมกนีตรอน สปีดเตอริง ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SrCu₂O₂ มีชนิดการ

นำไฟฟ้าเป็นแบบพี ก็ประดิษฐ์โดยวิธีอาร์เอฟ แมกนีตรอน สปีดเตอริง เช่นเดียวกัน โดยชั้นไฟฟ้าด้านบนเป็นโลหะ Ni-V ไดโอดโปร่งแสงนี้จะแสดงในรูปที่ 2.41

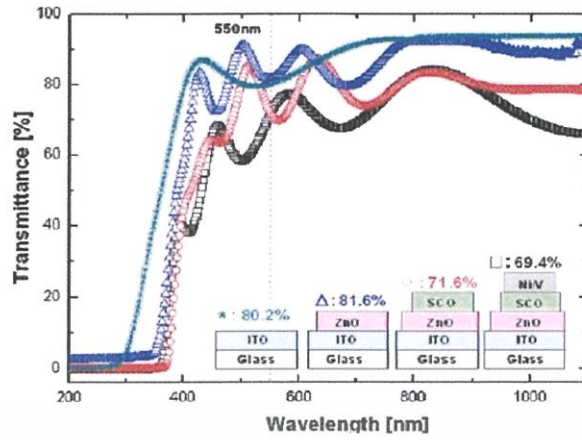


รูปที่ 2.41 แสดงแผนภาพของโครงสร้างของไดโอดโปร่งแสงที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ NiV/p-SrCu₂O₂/n-AZO/ITO/Alkali - free glass

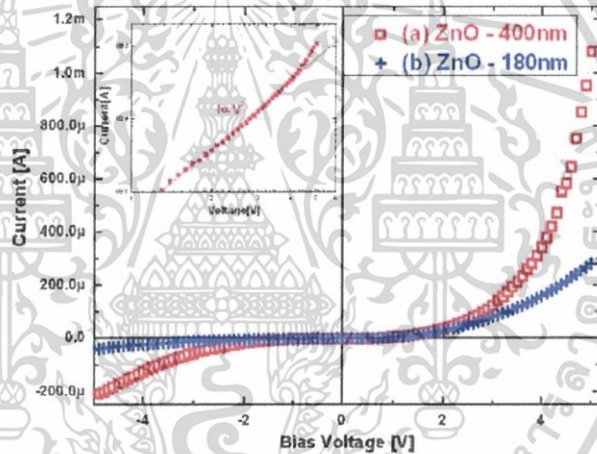
จากนั้นนำไปศึกษาโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction) ศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของแต่ละชั้น โดยปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect) โดยใช้วิธี แวนเดอร์ เพาว์, ศึกษาสเปกตรัมการส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่นจาก 200-1100 นาโนเมตร ด้วย สเปกโทรโฟโตมิเตอร์

ตารางที่ 2.3 แสดงสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดโปร่งแสงที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ NiV/p-SrCu₂O₂/n-AZO/ITO/Alkali - free glass

Target	Ni/V	SCO	ZnO (3% Al)		ITO
			230 nm	400 nm	
การนำไฟฟ้า [S/cm]	176	0.078	0.12	0.43	469.8
สภาพคล่องตัว [cm ² /V-s]	3.21	3.34	5.72	6	1.97
ความเข้มข้นของพาหะ [cm ³]	3.43×10^{20}	1.45×10^{17}	1.35×10^{17}	4.49×10^{17}	1.49×10^{21}
ค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์	-0.018	+42.92	-46.26	- 13.91	- 0.004



รูปที่ 2.42 แสดงสเปกตรัมของค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของไดโอดโปร่งแสงที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ NiV/p-SrCu₂O₂/n-AZO/ITO/Alkali - free glass



รูปที่ 2.43 แสดงลักษณะเฉพาะของกราฟ I-V ของไดโอดโปร่งแสงที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ NiV/p-SrCu₂O₂/n-AZO/ITO/Alkali - free glass

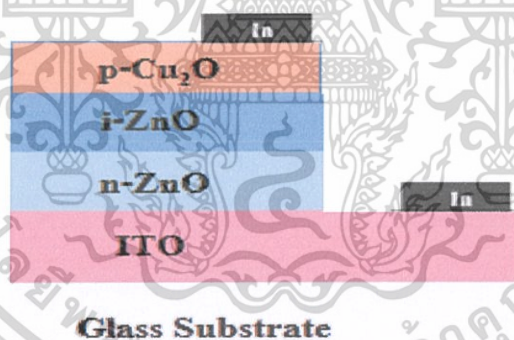
ไดโอดโปร่งแสงที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ NiV/p-SrCu₂O₂/n-AZO/ITO/Alkali - free glass (3 เปอร์เซ็นต์ Al-doped ZnO) มีความโปร่งแสงสูง ถูกประดิษฐ์โดยอาร์เอฟ แมกนีตรอน สปีดเตอริง บนกระจกสไลด์ ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 500 องศา ตามที่กล่าวมา มีความโปร่งแสงสูงมากประมาณ 69 เปอร์เซ็นต์ ที่ 550 นาโนเมตร จากการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ พบว่าสภาพนำไฟฟ้า สภาพคล่องตัวและความเข้มข้นของพาหะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-AZO มีค่าเท่ากับ 0.43 ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร 6 ตารางเซนติเมตรต่อโวลต์วินาที 10¹⁷ ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ ส่วนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SrCu₂O₂ เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี มีค่าเท่ากับ 0.078 ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร 3.3 ตารางเซนติเมตรต่อโวลต์วินาที, และ 10¹⁷ ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

ลักษณะกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า I-V แสดงพฤติกรรมการเรียงกระแสในช่วงแรงดันไฟฟ้า -5 ถึง 5 โวลต์ อีกทั้งได้แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างค่า I กับ V^2 เป็นแบบเชิงเส้น แสดงว่ากระแสถูกจำกัดการไหลโดยประจุค้าง ประจุค้างเหล่านี้เกิดขึ้นในชั้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SrCu_2O_2 การศึกษาโดยการวัดสมบัติความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า เป็นสิ่งที่จำเป็นในการทำงาน

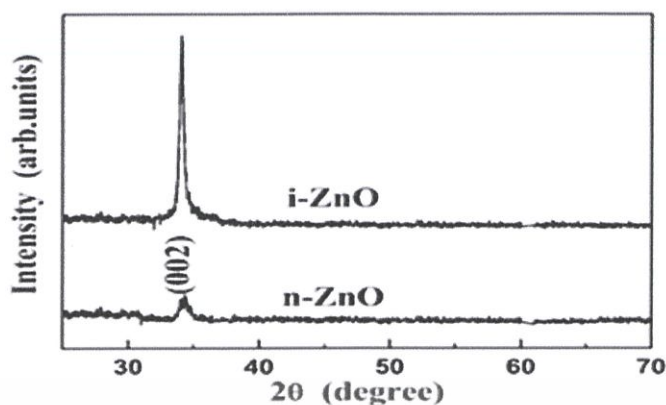
2.14.2 การตอบสนองต่อแสงของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{p-Cu}_2\text{O/i-ZnO/n-ZnO/ITO/Glass Substrate}$ (P. Lv, et al, 2012)

พีเวและผู้ร่วมงาน (2012) ทำการเตรียมฟิล์มบางของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{p-Cu}_2\text{O/i-ZnO/n-ZnO/ITO/Glass Substrate}$ โดยวิธีการสปัตเตอร์แมกนีตรอน สปัตเตอร์ริง โดยถูกประดิษฐ์บนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$ (ITO) ฟิล์มบางของตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง ITO ที่ถูกเคลือบโดยวิธีดีซี แมกนีตรอน สปัตเตอร์ริง บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnO และ ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ i-ZnO ถูกสปัตเตอร์ด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (RF) ที่ใช้แผ่นสารประกอบ ZnO เป็นเป้า (ที่มีความบริสุทธิ์ 99.99 เปอร์เซ็นต์) ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{p-Cu}_2\text{O}$ ถูกเคลือบโดยวิธีดีซี แมกนีตรอน สปัตเตอร์ริง โดยใช้เป้าที่เป็นแผ่นของสารประกอบ Cu_2O (ที่มีความบริสุทธิ์ 99.99 เปอร์เซ็นต์) ภายในระบบสุญญากาศ ที่มีค่าความดันเท่ากับ 4.0×10^{-4} ปาสกาล ดังรูปที่ 2.44

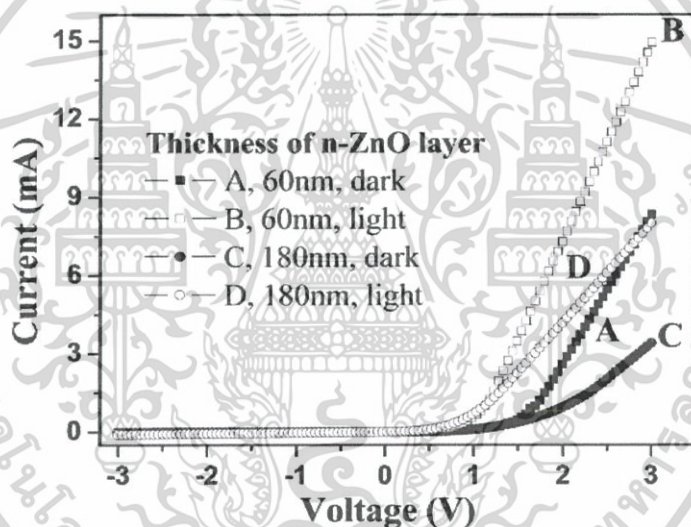


รูปที่ 2.44 แสดงแผนภาพโครงสร้างของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{p-Cu}_2\text{O/i-ZnO/n-ZnO/ITO/Glass Substrate}$

จากนั้นนำไปศึกษาโครงสร้างผลึกและสมบัติทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnO และฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ i-ZnO โดยที่ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ศึกษาสเปกตรัมการส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่นจาก 200-900 นาโนเมตร ด้วย สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ขั้วไฟฟ้าอินเดียมถูกนำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้า แล้วศึกษาสมบัติเฉพาะของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า I-V ของไดโอด ที่อุณหภูมิห้องและในขณะที่มีการฉายแสงด้วยหลอดไฟฮาโลเจน (100 วัตต์)



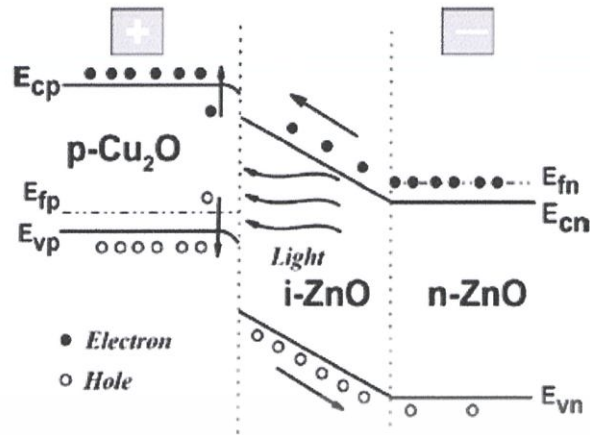
รูปที่ 2.45 แสดงพีคของสเปกตรัมที่ได้จากการศึกษาปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnO และ i-ZnO



รูปที่ 2.46 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า I กับ V ที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu₂O/i-ZnO/n-ZnO/ITO/Glass Substrate

ตารางที่ 2.4 แสดงค่าแรงดันขีดเริ่ม (V_{th}), กระแสอิ่มตัว (I_0), แฟกเตอร์อุดมคติ (n), แฟกเตอร์การกรองกระแสไฟฟ้า (R.F.) ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu₂O/i-ZnO/n-ZnO/ITO/Glass Substrate

เส้นโค้งที่วัด	V_{th} (V)	I_0 (μ A)	n	R.F.(\pm 3V)
A	1.54	2.6	7.6	3206
B	1.02	48.7	9.9	306
C	1.76	7.9	11.4	431
D	0.90	98.3	14.1	81



รูปที่ 2.47 แสดงแผนภาพลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงาน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu₂O/i-ZnO/n-ZnO/ITO/Glass Substrate

ไดโอดที่มีที่ม รอยต่อ แบบ วิวิธ พันธุ์ ของ ฟิล์ม บาง ของ สาร กึ่ง ตัว นำ p-Cu₂O/i-ZnO/n-ZnO/ITO/Glass Substrate จะมีรอยต่อแบบ n-i-p ถูกเคลือบอยู่บนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำโปร่งแสง ITO โดยวิธีแมกนีตรอน สเป็คเตอริ่ง ผลจากพีคของสเปคตรัมที่ได้จากการศึกษาปรากฏการณ์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ แสดงให้เห็นว่าค่าเฉลี่ยขนาดของเกรนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnO และ i-ZnO เป็น 12.8 นาโนเมตร และ 22.5 นาโนเมตร ตามลำดับ ช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnO และ i-ZnO เป็น 3.37 อิเล็กตรอนโวลต์ และ 3.47 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ ลักษณะเฉพาะของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า I-V ของรอยต่อวิวิธพันธุ์นี้ แสดงพฤติกรรมไดโอดและมีความไวต่อแสง แพกเตอร์อุดมคติ(n) มีค่าประมาณ 7.6 สำหรับรอยต่อวิวิธพันธุ์ที่มีความหนาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnO เท่ากับ 60 นาโนเมตร และ 11.4 สำหรับในกรณีที่มีความหนาฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnO 180 นาโนเมตร การที่ค่า n มีค่าสูงนั้น แสดงว่าเกิดเนื่องจากมีกลไกขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ จะช่วยทำให้พาหะอิสระสามารถไหลผ่านฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ i-ZnO ได้ง่ายโดยอาศัยข้อบกพร่องผลึกที่บริเวณผิวเชื่อมต่อระหว่างฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ i-ZnO กับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu₂O ซึ่งประพฤติกรรมเป็นกับดักพาหะ รอยต่อวิวิธพันธุ์นี้ มีความไวแสงภายใต้การฉายแสงโดยหลอดฮาโลเจน I_p และ I_d โดยที่จะมีค่ามากในรอยต่อวิวิธพันธุ์ที่มีฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnO ที่บางกว่า รอยต่อวิวิธพันธุ์ที่มีฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnO หนากว่าจะมีความไวแสงที่สูงขึ้นจาก 135 มากกว่า รอยต่อวิวิธพันธุ์ที่มีฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-ZnO บางกว่า ลักษณะเฉพาะของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า I-V ของรอยต่อวิวิธพันธุ์เหล่านี้สามารถอธิบายได้ด้วยแผนภาพโครงสร้างแถบพลังงาน ดังแสดงในรูปที่ 2.47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมโคโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO₃:In โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ W_{1-x}In_xO₃ (4 at.%) โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ซึ่งเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ W_{1-x}In_xO₃ (4 at.%) นั้นจะเตรียมขึ้นจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ In₂O และ สารประกอบ WO₃ โดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง และได้ทำการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ และ เม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO₃:In ทั้งในกรณีที่ไม่มีการแอนนัลและการแอนนัลภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 250-400 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 30 นาที

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัย ที่ใช้ในการเตรียมโคโอดของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO₃:In โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ W_{1-x}In_xO₃ (4 at.%) โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ มีวิธีการดำเนินงานดังนี้ (งามนิศย์, 2556; ฐิตินัย, 2557; นพณัฐ, 2556)

3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ W_{1-x}In_xO₃ (4 at.%) เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

1. สารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ WO₃ และ In₂O₃ ที่มีน้ำหนักประมาณ 3 กรัม เพื่อใช้สำหรับทำเป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO₃:In จำนวน 3 เม็ด
2. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่งของ Sartorius
3. อุปกรณ์บดสารครกอาเกต (agate mortar)
4. เครื่องอัดเม็ดสารตั้งต้น
5. เครื่องควบคุมอุณหภูมิเตาในการเผาสาร
6. เตาเผาสาร
7. ครูซิเบิล
8. เครื่องอัดไฮดรอลิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}In_xO_3$ (4 at.%) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

3.1.2 การคำนวณปริมาณสารตั้งต้นเพื่อเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $In_{0.04}W_{0.96}O_3$ (4 at.%) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

ทำการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $In_{0.04}W_{0.96}O_3$ ต่อไปนี้
 มวลโมเลกุลของผงผลึกของสารประกอบ WO_3 = 231.8482 กรัม
 มวลโมเลกุลของผงผลึกของสารประกอบ In_2O_3 = 277.6382 กรัม
 มวลโมเลกุลของผงผลึกของสารประกอบ $In_{0.04}W_{0.96}O_3$
 $= (0.04)(114.82) + (0.96)(183.85) + (3)(15.9994)$
 $= 229.087$ กรัม

ถ้าต้องการเตรียมผงผลึกของสารประกอบ $WO_3 \cdot 0.04 In_2O_3$ จำนวน 3 กรัม

$$\begin{aligned} \text{ต้องใช้ผงผลึกของสารประกอบ } In_2O_3 &= \frac{(0.04)(277.6382)(3)}{(229.087)} \\ &= 0.0728 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ต้องใช้ผงผลึกของสารประกอบ } WO_3 &= \frac{(231.8482)(3)(0.96)}{(229.087)} \\ &= 2.9147 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

ดังนั้นปริมาณสารตั้งต้นที่ต้องใช้คือสารประกอบ In_2O_3 จำนวน 0.0728 กรัม และสารประกอบ WO_3 จำนวน 2.9147 กรัม

3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์

1. แผ่นกระจกสไลด์ขนาด 9x9 ตารางมิลลิเมตร
2. ปีกเกอร์ขนาด 200 มิลลิเมตร
3. เครื่องสั่นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค
4. เครื่องเป่าลมร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น ขอสงวนสิทธิ์ในนามของสถาบันวิจัยและพัฒนา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ก๊าซไนโตรเจน
6. นาฬิกาจับเวลา
7. ปากคืบ
8. เต้าอบ
9. สารเคมี
 - 9.1 น้ำยาล้างจาน
 - 9.2 น้ำปลอดประจุ
 - 9.3 อะซีโตน
 - 9.4 เอทานอล

3.1.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO₃:In โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเมตเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO₃:In โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ซึ่งเมตเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO₃:In นั้นถูกเตรียมขึ้นมาจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติกริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

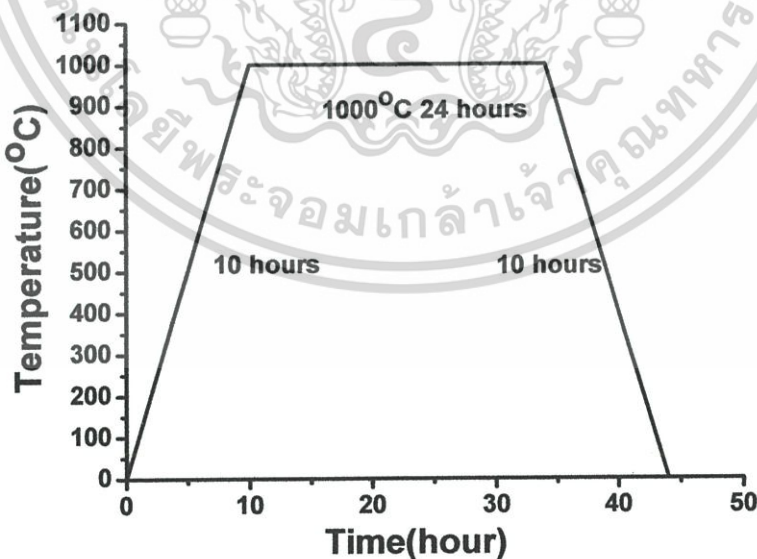
1. ระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ที่สามารถลดความดันได้ต่ำถึงระดับ 5×10^{-6} มิลลิบาร์
2. สารตั้งต้นที่เป็นเมตเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO₃:In ที่เตรียมได้เพื่อนำไปใช้ทำเป็นแผ่นฐานรองรับของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe
3. สารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ CdTe ที่เตรียมไว้แล้วหนัก 0.5 กรัม
4. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่งของ Sartorius
5. เมทธานอล
6. อุปกรณ์บดสาร ครกอาเกต
7. เต้าเผาสาร
8. ครุชชีเบล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

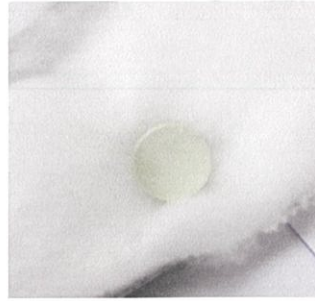
3.2 ขั้นตอนการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}In_xO_3$ (4 at.%) จากสารตั้งต้นเป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง และการเตรียมไดโอดของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n- $WO_3:In$ โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $WO_3:In$ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ (งามนิตย์, 2556; ฐิตินัย, 2557; นพณัฐ, 2556)

3.2.1 ขั้นตอนในการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}In_xO_3$ (4 at.%) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

1. นำผงผลึกของสารประกอบ WO_3 และสารประกอบ In_2O_3 ตามปริมาณที่คำนวณไว้ จากนั้นนำมาบดรวมกันในครกอากาศให้เป็นผงละเอียดคล้ายแป้ง เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
2. เมื่อบดแล้วนำมาอัดเม็ดจะทำการอัดเม็ดโดยใช้แรงอัด 5 ตัน ด้วยเครื่องอัดไฮโดลิก โดยเพิ่มแรงอัดทีละ 1 ตัน แล้วทิ้งไว้ 20 วินาที จากนั้นจึงเพิ่มแรงอัดไปจนถึง 5 ตัน เมื่อเอาเม็ดผงผลึกออกจากโมลอัดเม็ดจะใช้แรงดันครั้งละประมาณ 0.5 ตัน
3. นำเม็ดของสารที่ได้มาใส่ครูซิเบิล ปิดฝาให้มิดชิดแล้วนำเข้าเตาเผา
4. ในการเผาภายใต้บรรยากาศนั้น จะทำการเพิ่มอุณหภูมิ โดยทำการเพิ่มด้วยอัตรา 100 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง จนกระทั่งถึง 1,000 องศาเซลเซียส จึงแช่ทิ้งไว้วันาน 24 ชั่วโมง แล้วลดอุณหภูมิลงด้วยอัตรา 100 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง จนถึงอุณหภูมิต้องจึงปิดเตา นำเอามาทำการวิเคราะห์สมบัติเชิงฟิลิกส์ และทำการเตรียมไดโอดต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 3.2 แสดงกราฟโปรไฟล์เตาที่ใช้ในการตั้งอุณหภูมิเตาเพื่อทำการเผาเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}In_xO_3$ (4 at.%) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



รูปที่ 3.3 แสดงภาพถ่ายของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}In_xO_3$ (4 at.%) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

3.2.2 ขั้นตอนในการเตรียมไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n- $WO_3:In$ โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ลงบนแผ่นฐานรองรับ ที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $WO_3:In$ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศซึ่งเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}In_xO_3$ (4 at.%) นั้นถูกเตรียมขึ้นมาจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

3.2.2.1 การเตรียมแผ่นกระจกสไลด์เพื่อใช้เป็นแผ่นฐานรองรับ

1. นำแผ่นกระจกสไลด์ขนาด 25x75 ตารางมิลลิเมตร ไปแช่ในน้ำที่ผสมน้ำยาล้างจานเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อทำการล้างคราบไขมันและสิ่งสกปรก
2. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วยน้ำปilotประจุ
3. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปแช่ในอะซิโตนเป็นเวลา 10 นาที
4. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปแช่ในเอทานอลเป็นเวลา 10 นาที
5. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วยน้ำปilotประจุ 3 ครั้งๆละ 10 นาที
6. ทำการเป่าแผ่นกระจกสไลด์ให้แห้งด้วยเครื่องเป่าลมร้อน และทำการตัดเป็นแผ่นเล็กมีขนาด 9x9 ตารางมิลลิเมตร
7. ทำการล้างด้วยน้ำปilotประจุเป็นเวลา 10 นาที ตามขั้นตอนในข้อ 2-7 และนำปิกเกอร์ไปใส่ในเครื่องสั่นด้วยคลื่นอัลตราโซนิก
8. ทำการเป่าแห้งด้วยเครื่องเป่าลมร้อน
9. นำแผ่นกระจกสไลด์ ที่ได้จากใน ข้อ 8 นำไปอบแห้ง ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

3.2.2.2 การเตรียมไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n- $WO_3:In$ โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $WO_3:In$ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ซึ่งเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $WO_3:In$ เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์ใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้าม

1. ทำความสะอาดระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในสุญญากาศ โดยขจัดสิ่งปนเปื้อนต่างๆ เช่น คราบไขมันและผงฝุ่นด้วยอะซิโตน และ เมทานอล

2. ทำการติดตั้งชุดอุปกรณ์ต่างๆ ภายในระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในสุญญากาศให้ครบถ้วน
3. ทำการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}In_xO_3$ (4 at.%) โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ให้ละเยียมปริมาณ 0.5 กรัม เป็นสารตั้งต้นที่บรรจุใส่ลงไปในภาชนะระเหยสาร (boat) ที่ทำด้วยโลหะทั้งสแตน
4. นำแผ่นฐานรองรับทั้งในกรณีที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ และที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}In_xO_3$ (4 at.%) ที่ทำการเตรียมไว้แล้ว ตามลำดับมาวางลงบนหน้ากาก (mask) ซึ่งทำจากแผ่นอลูมิเนียมเจาะเป็นช่องตามแบบและขนาดที่ต้องการหลังจากนั้นปิดห้องสุญญากาศ (ภาชนะสุญญากาศ) ให้เรียบร้อย
5. ตรวจสอบระบบระเหยสารเคมีว่าวาล์วสุบอากาศออกและวาล์วปล่อยอากาศเข้าให้อยู่ในตำแหน่งที่ปิดเรียบร้อยแล้ว
6. ทำการเปิดปั๊มกลโรตารี จากนั้นเปิดวาล์วสุบอากาศออก จนได้ความดันประมาณ 9×10^{-2} มิลลิบาร์ แล้วจึงเปิดปั๊มเทอร์โบ จนได้ความดันตามต้องการในการทดลองนี้ใช้ความดันช่วง 3×10^{-5} มิลลิบาร์
7. ทำการเปิดแผ่นกั้นการระเหย (shutter) แล้วเริ่มทำการระเหยสารเคมี โดยมีแผ่นกระจกสไลด์เป็นแผ่นฐานรองรับ โดยการเปิดสวิทซ์เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 10 โวลต์ 200 แอมแปร์ จากนั้นทำการปรับศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าอย่างช้าๆจนกระทั่งได้ค่ากระแสอยู่ที่ประมาณ 60 แอมแปร์ แล้วแช่พักสักประมาณ 5 นาที เพื่อให้ความดันไออิ่มตัวต่อ จากนั้นจึงค่อยๆเพิ่มกระแสต่อไปอย่างช้าๆจนถึง 80-90 แอมแปร์ จนได้ ความหนาของฟิล์มบางตามต้องการ ซึ่งรวมทั้งหมดจะใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางประมาณ 30 นาที
8. เมื่อได้ความหนาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ตามที่ต้องการแล้ว ให้ปิดแผ่นกั้นการระเหย และทำการปิดวาล์วแอคโดยค่อยๆลดกระแสลงอย่างช้าๆ จนกระทั่งเป็นศูนย์
9. ต่อจากนั้นรอให้ระบบทำงานต่อไปอีกประมาณ 45 นาที เพื่อให้อุณหภูมิของห้องสุญญากาศลดลงแล้วจึงปิดปั๊มเทอร์โบ จากนั้นให้ระบบทำงานต่อไปอีกประมาณ 1 ชั่วโมง แล้วปิดวาล์วสุบอากาศ และปั๊มกลโรตารี
10. รอจนอุณหภูมิภายในห้องสุญญากาศมีอุณหภูมิเท่ากับภายนอก จึงค่อยทำการเปิดวาล์วปล่อยอากาศเข้าภายในห้องสุญญากาศอย่างช้าๆ โดยใช้เวลาประมาณ 15 นาที
11. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่ถูกเคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe เป็นที่เรียบร้อยแล้ว แล้วออกมาจากห้องสุญญากาศนำไปตรวจสอบสภาพผิวหน้า

ของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์ หลังจากนั้นจึงนำไปเก็บไว้ในภาชนะ
ควบคุมความชื้น

12. ทำการแอนนัลฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่ถูกเคลือบลงบนแผ่นฐาน
รองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมได้ทั้งหมด ภายใต้บรรยากาศของ
ก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิ 250, 300, 350, 400 องศาเซลเซียส
เป็นเวลา 30 นาที และเมื่อเตาเย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้องจึงปิดเตา
13. ศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่ถูก
เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ทั้งในกรณีที่ไม่มีการ
แอนนัล และมีการแอนนัล ที่เตรียมได้ทั้งหมด ได้แก่ ทำการศึกษา
โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จากเครื่องเอกซ์
เรย์ดิฟแฟรคโตรมิเตอร์ Bruker รุ่น D8 Advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์
ในย่าน 1.5406 อังสตรอม โดยใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์ และ
ความต่างศักย์ 25 กิโลโวลต์, ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วย
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ LEO รุ่น LEO 1455 VP
ทำการศึกษาสมบัติทางแสง ด้วยการวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงด้วย
เครื่องยูวี-วิสลิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ
Thermo electron corporation ($He \lambda$ ions α) โดยใช้ความยาวคลื่น
ช่วง 400-1000 นาโนเมตร เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน และ
คำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g)
14. ศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของ
ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO₃:In ที่เตรียมได้ทั้งหมด ได้แก่
ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จาก
เครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคโตรมิเตอร์ Bruker รุ่น D8 Advance ความยาว
คลื่นรังสีเอกซ์ในย่าน 1.5406 อังสตรอม โดยใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์
และความต่างศักย์ 25 กิโลโวลต์, ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค
ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ LEO รุ่น LEO 1455
VP ทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิในช่วง 200-300
เคลวิน โดยการทำให้ขั้วอิเล็กโทรด ด้วยการป้ายกาวเงินนำไฟฟ้าเป็นรูป
วงกลมให้เต็มหน้าทางด้านที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ W_{1-x}In_xO₃
(4 at.%) และป้ายกาวเงินนำไฟฟ้าเป็นรูปวงกลม ให้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง
ประมาณ 0.2 เซนติเมตร ทางด้านที่เป็นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe
แล้วจากนั้นจึงนำไป ศึกษาสมบัติเฉพาะของไดโอดด้วยการวัด
กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า - แรงดันไฟฟ้า (I-V curve)
ค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า (C-V curve) แล้วต่อจากนั้นจึงนำไปศึกษา
อิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปี โดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์
เชิงซ้อนกับความถี่ต่อไป

3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่ถูกเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ และของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO₃:In (4 at.%) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ (งานนิตย, 2556; จิตินัย, 2557; นพณัฐ, 2556)

3.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่ถูกเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO₃:In ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จากเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟร็กโทรมิเตอร์ Bruker รุ่น D8 Advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ในย่าน Cu_{K α} 1.5406 อังสตรอม โดยใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์ และความต่างศักย์ 25 กิโลโวลต์

3.3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่ถูกเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO₃:In ที่เตรียมได้ทั้งหมด ไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดยี่ห้อ LEO รุ่น LEO 1455 VP

3.3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางแสง

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่ถูกเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO₃:In ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาสมบัติทางแสง ด้วยการวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง ด้วยเครื่อง ยูวี-วิสสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Thermo electron corporation (He λ ions α) โดยใช้ความยาวคลื่นช่วง 200 – 1100 นาโนเมตรเพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานและคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g)

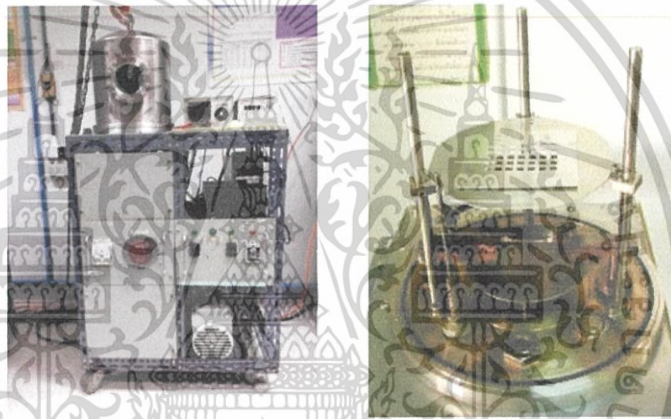
3.3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า

นำไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO₃:In ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิในช่วง 200-300 เคลวิน ได้แก่ นำไปศึกษาสมบัติเฉพาะของไดโอด ด้วยการวัดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า (I-V curve) แล้วต่อจากนั้นจึงนำไปศึกษาค่าอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี โดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4.1 การศึกษาสมบัติเฉพาะของไดโอดด้วยการวัดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า (I-V curve) จากนั้นจึงนำไปศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี โดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่

- เครื่อง precision LCR meter ของ Agilent รุ่น E4980A ใช้สัญญาณไฟสลับ(ac signal) เท่ากับ 0.5 โวลต์
- มัลติมิเตอร์รุ่น METEC 8007
- เครื่องทำความเย็นโครโอจินิกและโครโอสแตตยี่ห้อ Leybold รุ่น RW2
- เครื่องควบคุมอุณหภูมิ PL รุ่น MODEL 9700
- กาวเงินนำไฟฟ้าใช้ทำเป็นขั้วอิเล็กโทรดโดยอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที
- สายไฟ

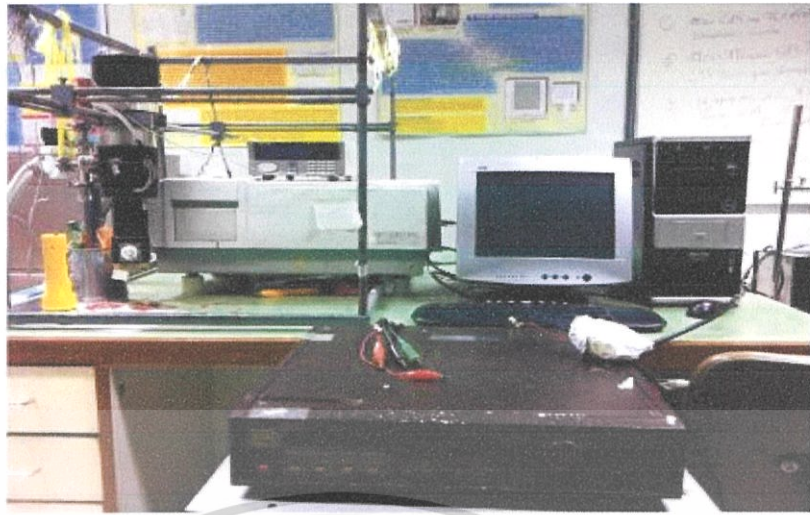


รูปที่ 3.4 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO₃/In โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ W_{1-x}In_xO₃ (4 at.%) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

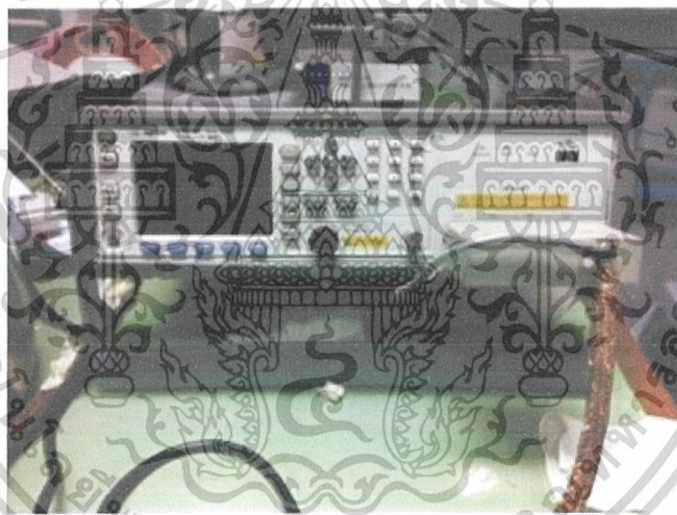


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีรูปที่ 3.5 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 3.6 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า ที่อุณหภูมิต่างๆ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO₃/In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 3.7 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้วัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า และ ค่าอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี โดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน กับ ความถี่ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO₃/In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

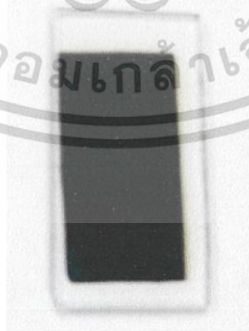
บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

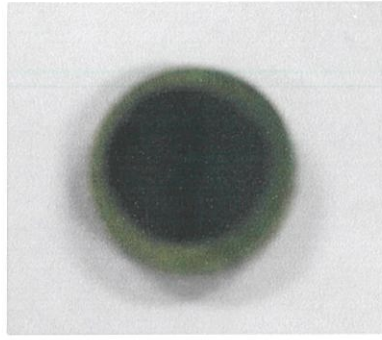
โครงการพิเศษนี้ ได้ทำการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{WO}_3:\text{In}$ โดยวิธีปฏิบัติการ เกิดเป็นสารละลายของแข็ง เพื่อเป็นแผ่นฐานรองรับในการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เพื่อประดิษฐ์เป็นไดโอดที่มีรอยต่อแบบ วิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{p-CdTe/n-WO}_3:\text{In}$ ได้มีการศึกษาสมบัติพื้นฐานทางฟิสิกส์ทั้ง ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นกระจกสไลด์และบนของเม็ดเซรามิกของสารกึ่ง ตัวนำ $\text{WO}_3:\text{In}$ ได้แก่ ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ และ โครงสร้างผลึกเชิงมหภาคจากการถ่ายภาพถ่ายภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ทำการศึกษาโดยการหาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง เพื่อหาค่า ช่องว่างแถบพลังงานของสาร จากนั้นจึงทำการศึกษาวัดค่าความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{p-CdTe/n-WO}_3:\text{In}$ ที่ อุณหภูมิต่างๆ เพื่อคำนวณหาพารามิเตอร์ต่างๆที่สำคัญของไดโอด ได้แก่ ค่าความสูงของกำแพงศักย์ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ค่าความต้านทานอนุกรม ได้ทำการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า เพื่อคำนวณหา ค่าความหนาแน่นของโฮลของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe

4.1 ลักษณะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่ เป็นแผ่นกระจกสไลด์และเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{WO}_3:\text{In}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธี การระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์มีสีดำ คล้ำผิวหน้าเรียบ สะท้อนแสงและยึดติดกับกระจกสไลด์ได้ดี ส่วนเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{WO}_3:\text{In}$ นั้นมีสีขาว เมื่อทำการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ลงบนเม็ดเซรามิกของสาร กึ่งตัวนำ $\text{WO}_3:\text{In}$ จะเห็นว่าฟิล์มบางสีดำคล้ำ



รูปที่ 4.1 แสดงฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจก สไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการค้า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่... ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น แอนนี่ล ห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



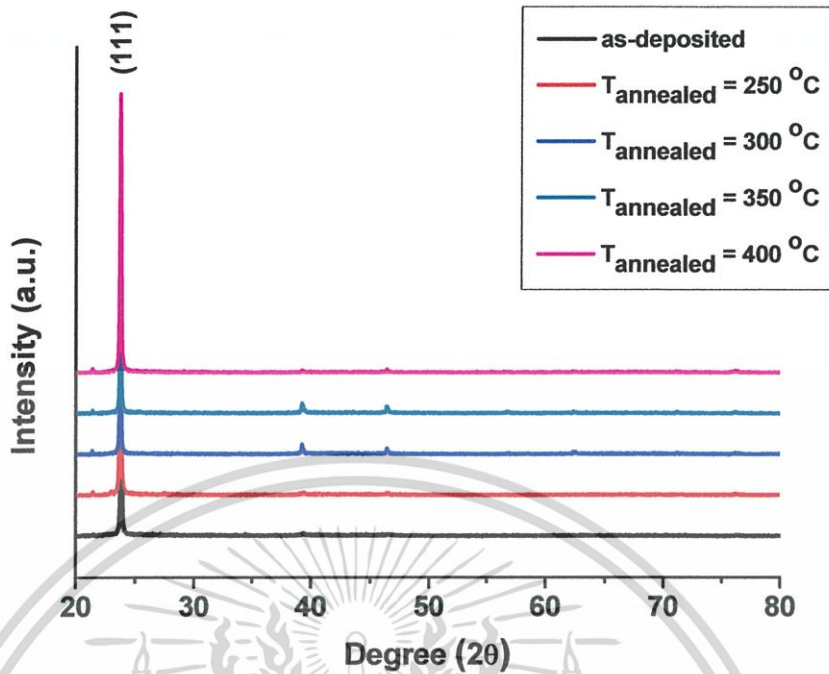
รูปที่ 4.2 แสดงฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เคลือบอยู่บนเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{WO}_3:\text{In}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

4.2 ผลการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

4.2.1 ผลการศึกษาโครงสร้างของผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

การศึกษาพีคความเข้มที่ได้จากสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในสุญญากาศ พบว่าระนาบโครงผลึก (111) เต็มชัดที่สุดที่มุม $2\theta \approx 23.80$ องศา จึงแสดงว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบซิงค์เบลนด์ดังแสดงในรูปที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 แสดงพิกัดความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสที่อุณหภูมิต่างๆ ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าคงที่โครงผลึกและขนาดของเกรน ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อไม่มีการแอนนีส และมีการแอนนีสที่อุณหภูมิต่างๆ ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

Annealing Temperature (°C)	Lattice Constant (Å)	Grain Size (nm)	
	a	XRD	SEM
as-deposited	6.47	51.06	54
250	6.47	56.77	58
300	6.33	66.54	66
350	6.33	63.42	64
400	6.47	63.92	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

4.2.2 ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค ด้วยวิธีการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.4 แสดงภาพถ่าย SEM ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อที่ไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสที่อุณหภูมิต่างๆ ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

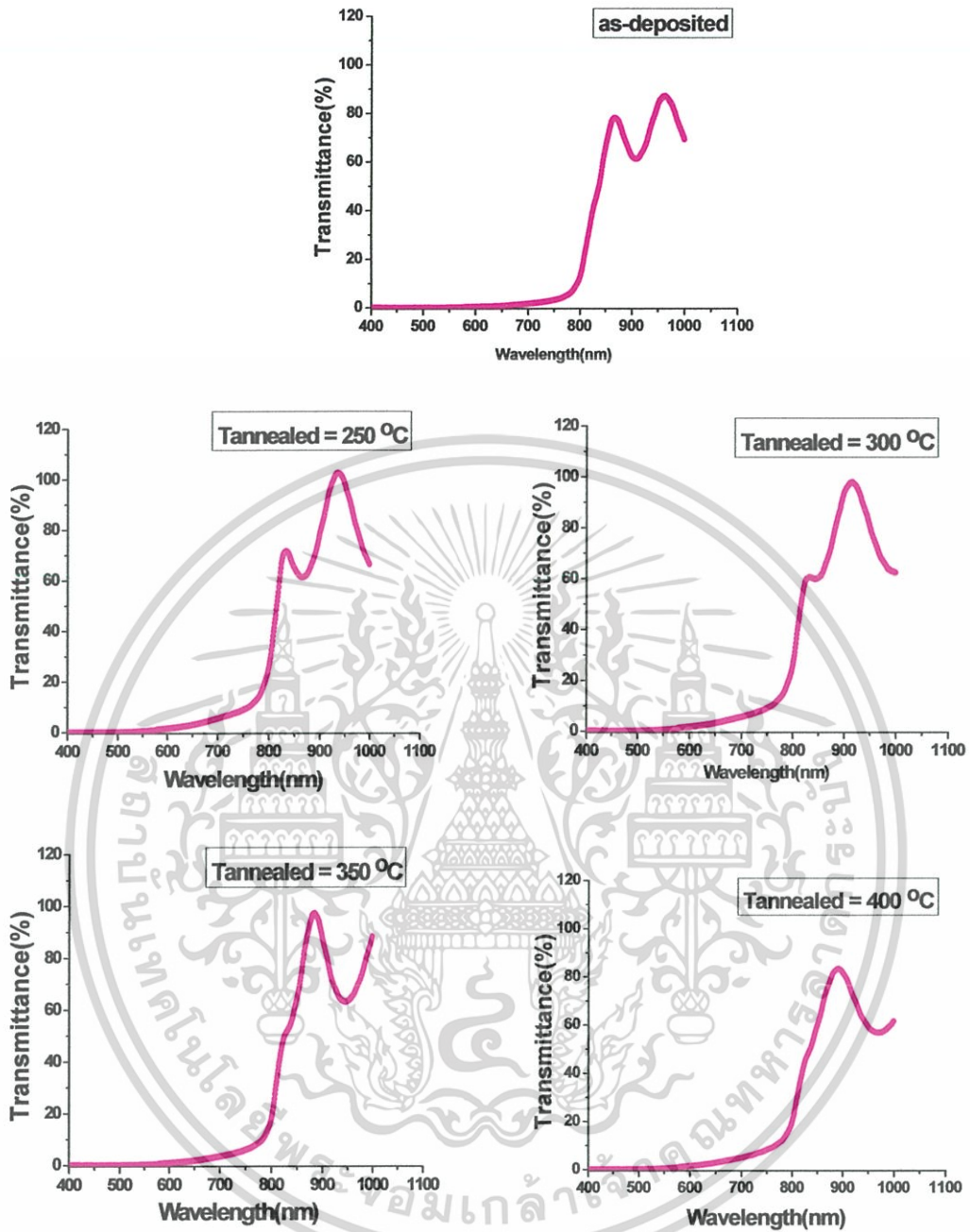
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 ผลการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

จากการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนیلและการแอนนิลที่อุณหภูมิ 250, 300, 350 และ 400 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที พิจารณาที่ความยาวคลื่น 400-1000 นาโนเมตร และนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง กับพลังงานโฟตอน แล้วลากส่วนต่อของกราฟบริเวณที่เป็นเส้นตรงให้ตัดแกนพลังงานของโฟตอนโดยที่จุดตัดแกนคือค่าช่องว่างแถบพลังงาน ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6

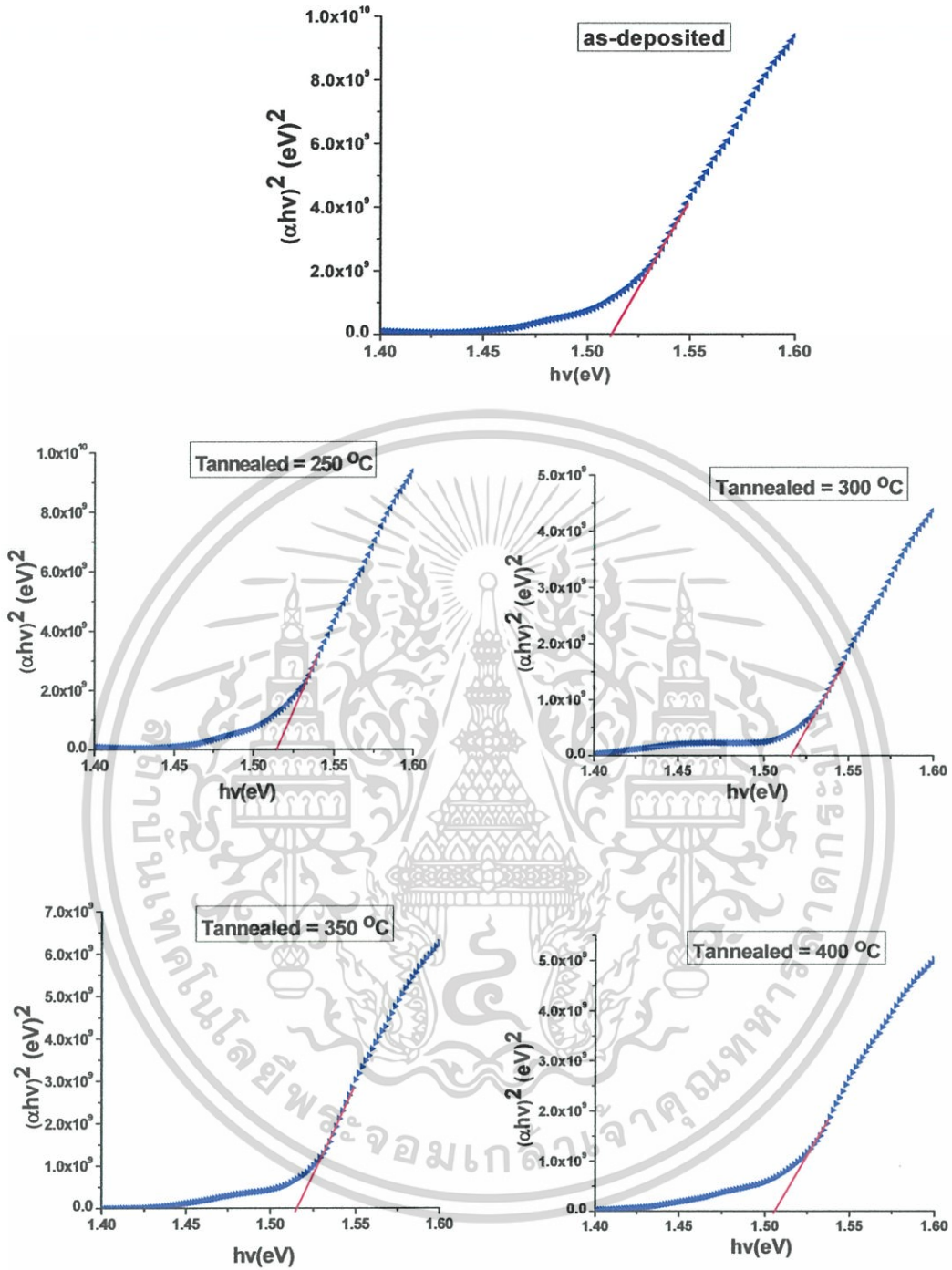


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 แสดงกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง กับ ความยาวคลื่นแสง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส และมีการแอนนีสที่อุณหภูมิต่างๆ ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 แสดงวิธีการหา ค่าช่องว่างแถบพลังงาน ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส และมีการแอนนีสที่อุณหภูมิต่างๆ ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส และมีการแอนนีสที่อุณหภูมิต่างๆ ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

Annealing Temperature (°C)	Energy Gap (E_g) (eV)
as-deposited	1.512
250	1.512
300	1.515
350	1.518
400	1.512

4.3 ผลการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $WO_3:In$ เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

4.3.1 ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $WO_3:In$ ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งและฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $WO_3:In$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

เม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $WO_3:In$ ที่เตรียมได้ขณะยังไม่มีการเผาจะมีสีเขียวอ่อนๆ แต่เมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะมีสีเขียวเข้ม ดังแสดงในรูปที่ 4.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

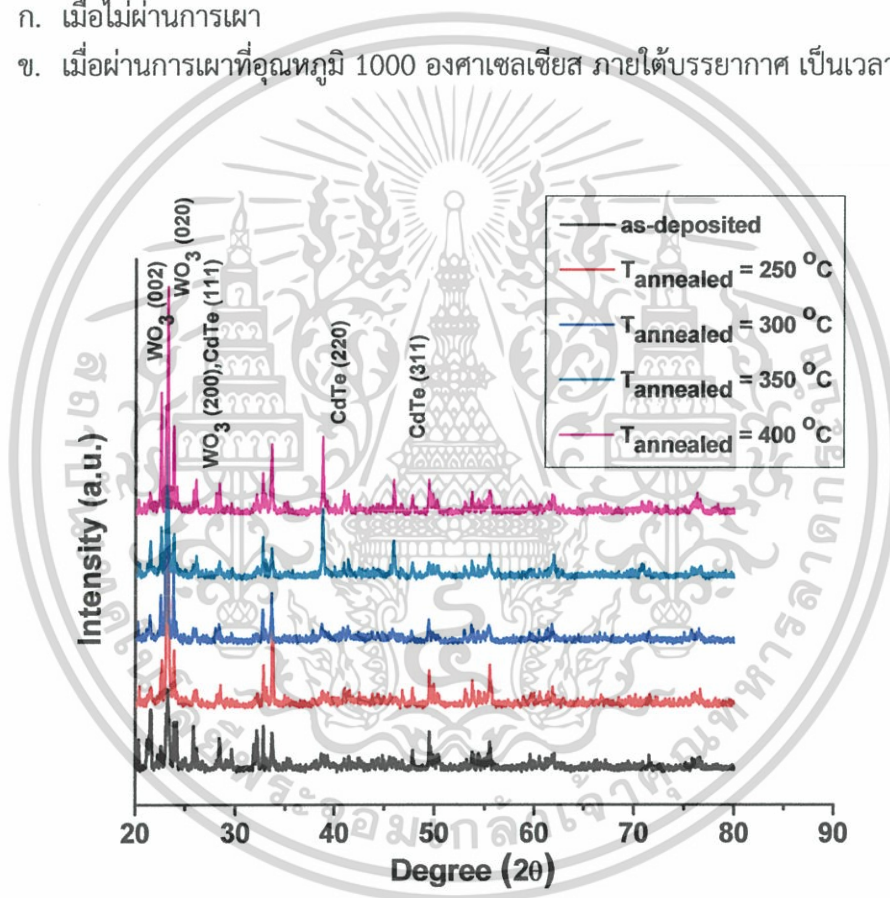


(ข)

รูปที่ 4.7 แสดงภาพถ่ายของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{WO}_3:\text{In}$ ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

ก. เมื่อไม่ผ่านการเผา

ข. เมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง



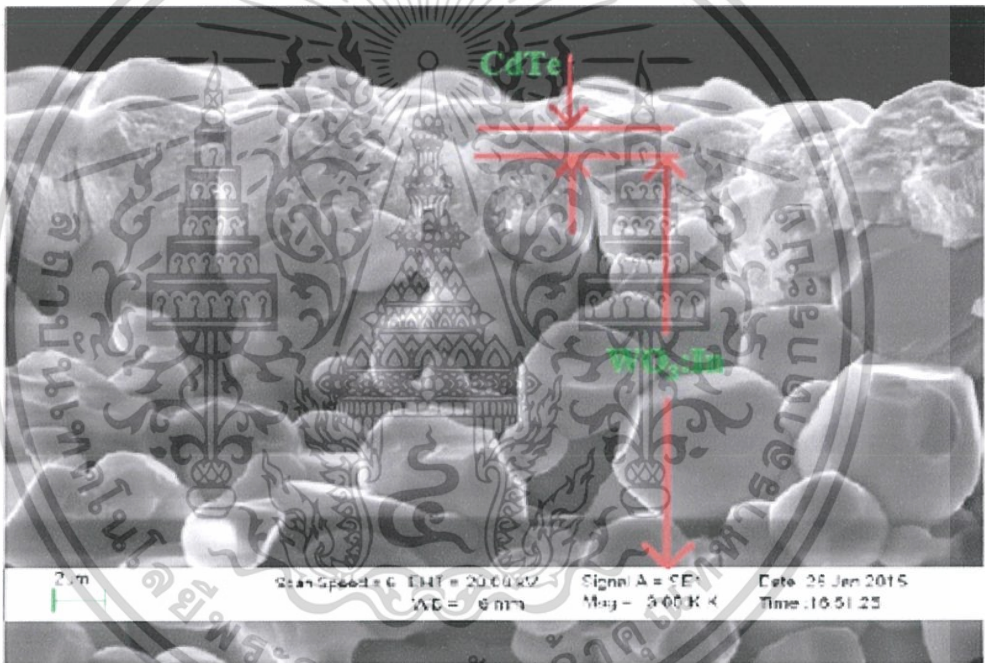
รูปที่ 4.8 แสดงพิคความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-CdTe}/n\text{-WO}_3:\text{In}$ ซึ่งเตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนัล และมีการแอนนัลที่อุณหภูมิต่างๆ ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าคงที่โครงสร้างผลึกของเม็ดของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{WO}_3:\text{In}$ ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

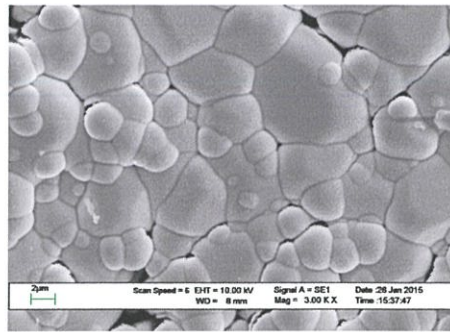
Composition (x) of $\text{W}_{1-x}\text{In}_x\text{O}_3$	Lattice Parameter (Å)			$\beta(\theta)$	Volume (Å)
	a	b	c		
0.04	7.309	7.557	7.707	91.021	425.622

4.3.2 ผลการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคและการสังเกตภาคตัดขวางตรงบริเวณผิวรอยต่อ ด้วยวิธีการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์เล็กตรอนแบบส่องกราดของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{p-CdTe/n-WO}_3:\text{In}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

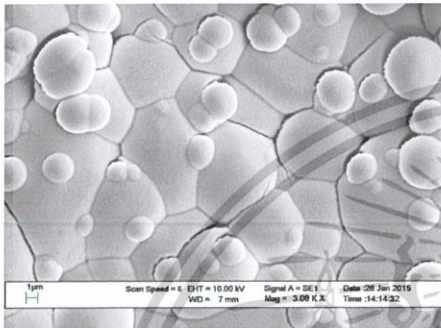
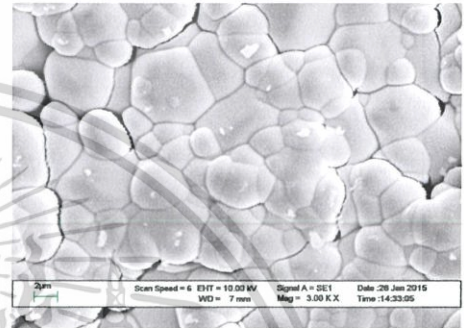
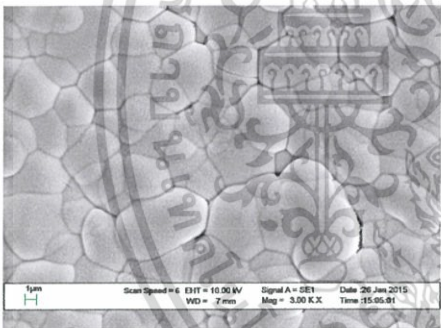
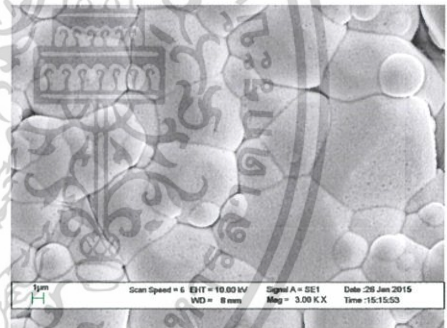


รูปที่ 4.9 แสดงภาคตัดขวางที่ได้จากภาพถ่าย SEM ตรงบริเวณผิวรอยต่อของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $\text{p-CdTe/n-WO}_3:\text{In}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



as-deposited

 $T_{\text{annealed}} = 250^{\circ}\text{C}$  $T_{\text{annealed}} = 300^{\circ}\text{C}$  $T_{\text{annealed}} = 350^{\circ}\text{C}$  $T_{\text{annealed}} = 400^{\circ}\text{C}$

รูปที่ 4.10 แสดงภาพถ่าย SEM ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดยาเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{WO}_3:\text{n}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส และมีการแอนนีสที่อุณหภูมิต่างๆ ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมี ด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ แล้วทำการวัดค่าความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 200-300 เคลวิน ตลอดจนการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า ที่อุณหภูมิห้อง และ วัดค่าอิมพีแดนซ์ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ - 2 เมกะเฮิรตซ์ เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ

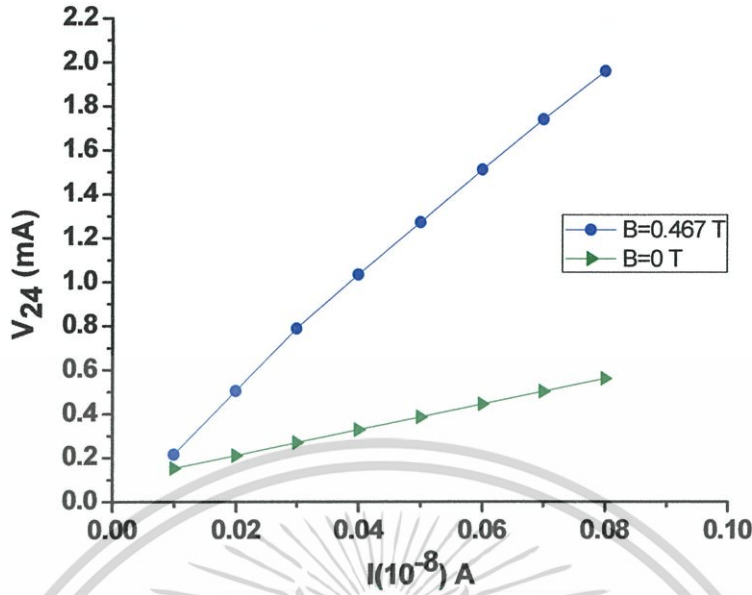
4.4.1 ผลการศึกษา ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe จะแสดงในตารางที่ 4.4

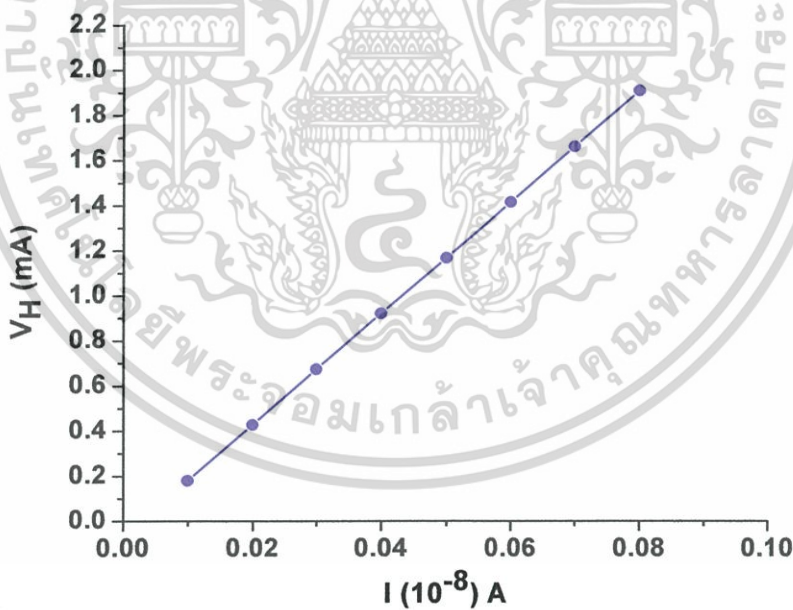
ตารางที่ 4.4 แสดงผลการวัดปรากฏการณ์ของฮอลล์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนัล

Temperature (K)	Current (I) (10^{-8} A)	V_{24} (V) (B = 0 T)	V_{24} (V) (B = 0.046 T)	V_H (V)
300	1.0	0.15309	0.21580	0.06271
	2.0	0.21128	0.50378	0.29250
	3.0	0.26947	0.78744	0.51797
	4.0	0.32766	1.08351	0.75585
	5.0	0.38586	1.26997	0.88411
	6.0	0.44405	1.50976	1.06571
	7.0	0.50224	1.73842	1.23618
	8.0	0.56043	1.95741	1.39698

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ (V_{24}) กับ กระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ ในขณะที่ไม่มีการจ่ายสนามแม่เหล็ก และ มีการจ่ายสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe เมื่อไม่มีการแอนนีล



รูปที่ 4.12 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (V_H) กับ กระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe เมื่อไม่มีการแอนนีล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe เมื่อไม่มีการ แอนนีล

สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆได้ ดังนี้

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า สามารถคำนวณได้โดย

$$\begin{aligned}\rho &= R_{sh} d \\ &= (29.713 \times 10^5)(0.265) = 7.87 \times 10^5 \text{ โอห์ม-เซนติเมตร}\end{aligned}$$

ค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ สามารถคำนวณได้โดย

$$\begin{aligned}R_H &= (10^6) \left(\frac{V_H}{I} \right) \left(\frac{d}{B} \right) \\ &= \frac{(10^6)(2.47 \times 10^7)(5 \times 10^{-5})}{4600} \\ &= 2.68 \times 10^5 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อคูลอมบ์}\end{aligned}$$

จากค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ สามารถนำมาคำนวณหา ค่าความหนาแน่นของพาหะ ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}n &= \frac{1}{qR_H} = \frac{1}{(1.6 \times 10^{-19})(2.68 \times 10^5)} \\ n &= 2.33 \times 10^{13} \text{ ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร}\end{aligned}$$

และจากค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ และ ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า สามารถนำมาคำนวณหา ค่าสภาพคล่องตัวของพาหะ ได้ดังนี้

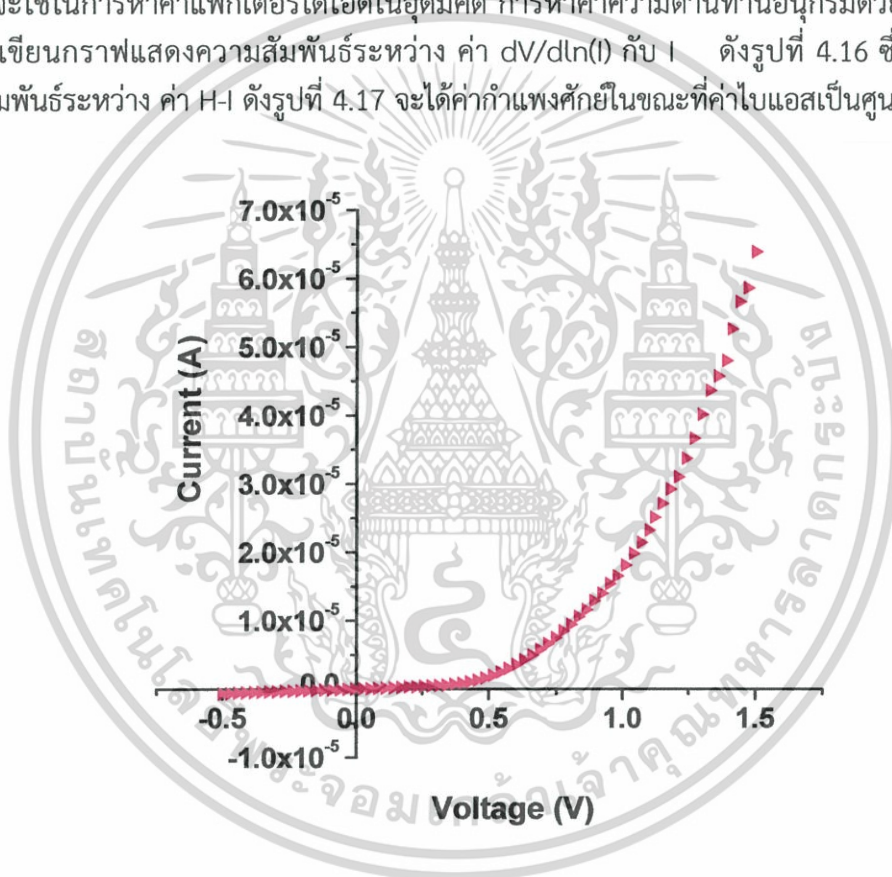
$$\begin{aligned}\mu_H &= R_{Hp} = \frac{2.68 \times 10^5}{7.87 \times 10^5} \\ &= 0.34 \text{ ตารางเซนติเมตรต่อ (โวลต์-วินาที)}\end{aligned}$$

และจากค่าศักย์ไฟฟ้าของฮอลล์ ยืนยันได้ว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe มีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นชนิดพี (p-type)

4.4.2 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO₃:In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

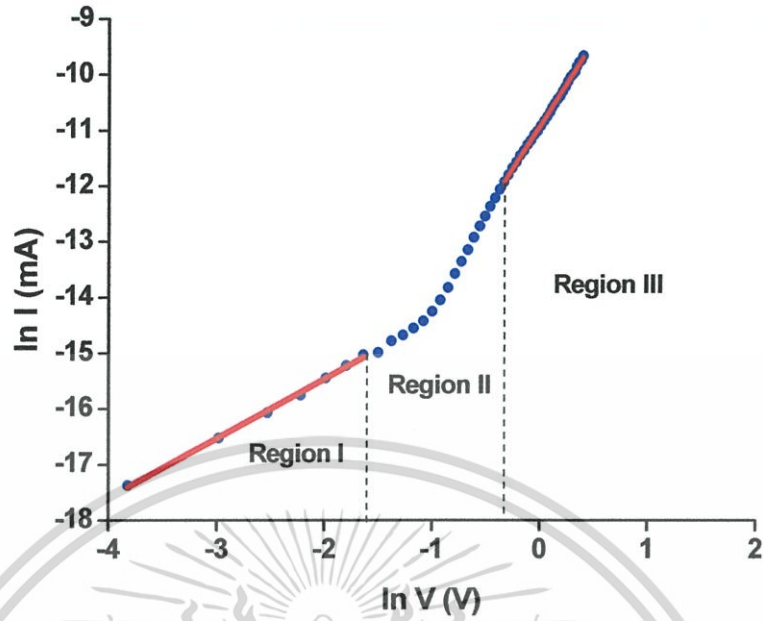
ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO₃:In โดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า ในช่วง 0.5 ถึง 1.5 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ดังปรากฏในรูปที่ 4.13 พบว่ามีการเรียงกระแสไฟฟ้าทางเดียวเหมือนไดโอดทั่วไป โดยมีค่าแรงดันไฟฟ้าขีดเริ่ม (threshold voltage) อยู่ที่ 0.4 โวลต์

กลไกของกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ ตรงบริเวณรอยต่อวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO₃:In ที่ช่วงแรงดันไฟฟ้า -0.5 ถึง 1.5 โวลต์ เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln I$ กับ $\ln V$ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO₃:In ที่อุณหภูมิห้อง พบว่า ที่แรงดันไฟฟ้าน้อยกว่า 0.2 โวลต์ เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าเป็นไปตามกฎของโอห์ม ส่วนที่ช่วงแรงดันไฟฟ้าระหว่าง 0.2 - 0.7 โวลต์ เป็นกลไกการนำกระแสแบบ เทอร์มออิเล็กทริก และช่วงแรงดันไฟฟ้ามากกว่า 0.7 โวลต์ เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้า ชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้าง (space charge limit current) เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I$ กับ V ดังรูปที่ 4.15 เพื่อหาค่าแพกเตอร์ไดโอดในอุดมคติ และ ค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับ แล้วนำไปใช้เป็นค่าเริ่มต้นในการจำลองข้อมูลเพื่อนำผลการคำนวณที่ได้มาเทียบ กับ ผลการคำนวณที่ได้จากการวัด ค่ากระแสไฟฟ้า และ แรงดันไฟฟ้า ในช่วงการไหลแบบเทอร์มออิเล็กทริก ซึ่งจะใช้ในการหาค่าแพกเตอร์ไดโอดในอุดมคติ การหาค่าความต้านทานอนุกรมด้วยวิธีของช่วงนั้น จะเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $dV/d\ln(I)$ กับ I ดังรูปที่ 4.16 ซึ่งจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $H-I$ ดังรูปที่ 4.17 จะได้ค่ากำแพงศักย์ในขณะที่ค่าไบแอสเป็นศูนย์

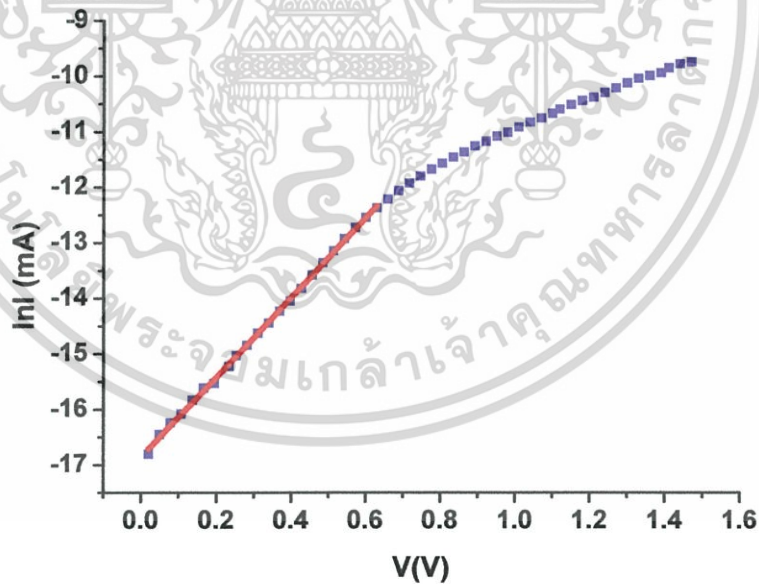


รูปที่ 4.13 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO₃:In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 แสดงกราฟที่ใช้ในการอธิบายกลไกการนำกระแสไฟฟ้าแต่ละช่วงของค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO₃:In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส



รูปที่ 4.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I$ กับ V เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่
 เอกสารนี้เป็นเอกสาร
 มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO₃:In ซึ่งเตรียมโดย
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น
 วิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส

จากรูป 4.14 จะเห็นได้ว่ากลไกการนำกระแสไฟฟ้า ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบบิวริวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO₃:In แบ่งออกเป็น 3 บริเวณอย่างชัดเจนคือ บริเวณที่ 1 จะอยู่ในช่วงแรงดันไฟฟ้า 0.02 ถึง 0.2 โวลต์ ซึ่งกลไกการนำไฟฟ้าจะเป็นไปตามกฎของโอห์มบริเวณที่ 2 จะอยู่ในช่วงแรงดันไฟฟ้า 0.2 ถึง 0.7 โวลต์ ซึ่งกลไกการนำไฟฟ้าจะเป็นแบบเทอร์มิออนิกอิมิสชัน ส่วนบริเวณที่ 3 จะอยู่ในช่วงแรงดันไฟฟ้า 0.7 ถึง 1.5 โวลต์ ซึ่งกลไกการนำไฟฟ้าจะเป็นแบบกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้าง

จากรูปที่ 4.15 คือกราฟแสดงความสัมพันธ์ค่าลอคาลิเทียมของ ค่ากระแสไฟฟ้า และ แรงดันไฟฟ้า เพื่อใช้ในการคำนวณหา ค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับ (I_s) และ ค่าแฟกเตอร์ในอุดมคติ (n) โดยอาศัยกราฟเส้นตรงในช่วงที่มีการนำกระแสไฟฟ้าที่เป็นกลไกแบบเทอร์มิออนิก อิมิสชัน ดังสมการ

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

เมื่อ I_s คือ ค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับมีค่าเท่ากับ

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

เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I$ กับ V เพื่อหาค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ ได้จากการลากเส้นตรงผ่านบริเวณกราฟที่เป็นกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันตัดแกน $\ln I$ โดยจุดตัดกราฟมีค่าเท่ากับ $\ln I_s$ และ ค่าความชันของกราฟเท่ากับ $\frac{q}{nkT}$ ซึ่งสามารถนำมาคำนวณหา ค่าแฟกเตอร์ในอุดมคติ (n) ได้จากสมการที่ 4.2 จะได้ ค่าความสูงของกำแพงศักย์คือ

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

ความสูงของกำแพงศักย์ ϕ_{B0} ของสมการที่ (4.3) จะเป็นค่าในขณะแรงดันไบแอสเป็นศูนย์ที่อุณหภูมิห้องและ ค่า A^* เท่ากับ 44.4 แอมแปร์ต่อ (ตารางเซนติเมตร -เคลวินยกกำลังสอง)

นอกจากนี้ยังสามารถที่จะหา ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ (n) ของไดโอดที่ขึ้นกับแรงดันไบแอสโดยอาศัยความสัมพันธ์ดังนี้

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

ในความเป็นจริงแล้วไดโอดที่มีรอยต่อแบบบิวริวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO₃:In มักจะมีความต้านทานไฟฟ้านุกรม (R_s) เกิดขึ้นเสมอ ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากความต้านทานของเนื้อสารและขั้วไฟฟ้าด้านหลัง จึงต้องทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าในช่วงแรงดันไฟฟ้าค่าสูงๆ เพื่อให้ความต้านทานนุกรมนั้นแสดงผลออกมา ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบบิวริวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO₃:In ที่มีความต้านทานไฟฟ้านุกรม มาเกี่ยวข้องจะเป็น

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

เมื่อ กระแสไฟฟ้าอิมิต์ย้อนกลับ คือ

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

อาจเขียนสมการที่ (4.5) อีกรูปหนึ่งได้เป็น

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

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

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

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

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

ซึ่งจะสอดคล้องกับกราฟเส้นตรง จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $dV/d(\ln I)$ กับ I ดังรูปที่ 4.16 โดย ค่าความชันของกราฟนั้นคือ ค่าความต้านทานอนุกรมของวงจร (R_s) และ จุดตัดแกน $dV/d(\ln I)$ มีค่าเท่ากับ nkT/q

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

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

แล้วสมการที่ (4.10) จะกลายเป็น

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

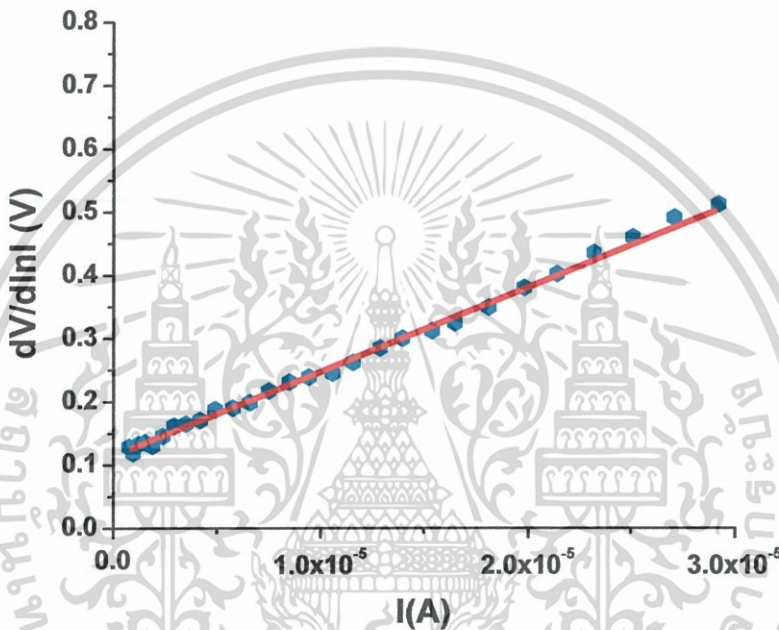
เมื่อทำการคำนวณค่า $H(I)$ จากข้อมูลของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าแล้วนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $H(I)$ กับ I ก็จะได้ผลดังรูปที่ 4.17 โดยจะคำนวณหา ค่าความสูงของกำแพงศักย์ได้จากจุดตัดแกนตั้ง ($n\phi_B$) ของกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าว นอกจากนี้ ค่าความชันของกราฟที่เขียนขึ้นในรูปของ ฟังก์ชัน $H(I)$ นั่นก็คือ ค่าความต้านทานอนุกรมเช่นเดียวกับความสัมพันธ์ในสมการที่ (4.9) ซึ่งจะส่งผลให้ค่าความต้านทานอนุกรม (R_s) ที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกัน

กลไกการนำไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้าง (SCLC) มักจะเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า ดังนี้คือ

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

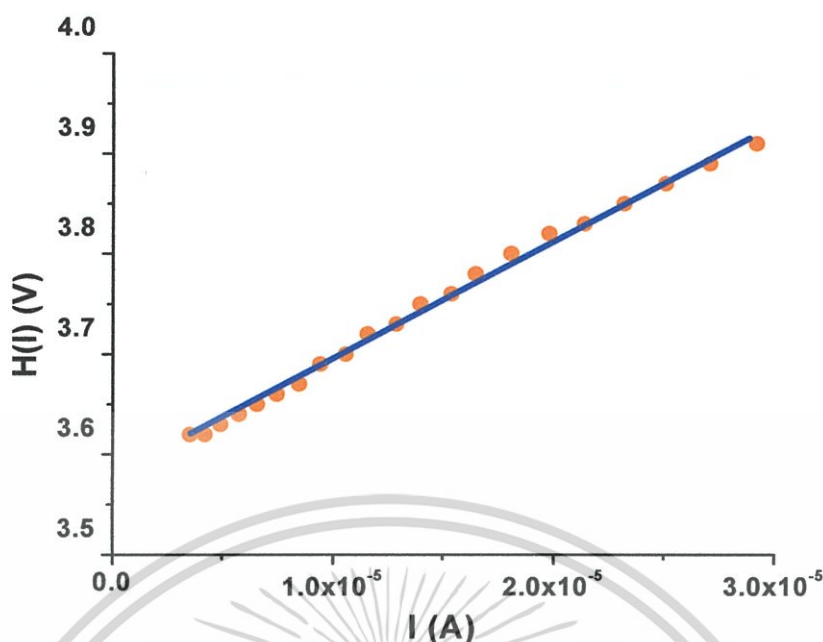
$$\ln I = m \ln V + \ln k \quad (4.13)$$

เมื่อ m คือ ค่าความชันของกราฟ ถ้า m มีค่าเท่ากับ 1.5 กลไกการนำไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัด โดยประจุค้างจะเป็นไปตามกฎของ ไซต์-แลงมัวร์ (Child-Langmuir's law) แต่ถ้า m เท่ากับ 2 จะเป็นไปตามกฎของ มอตต์-เกอร์นีย์ (Mott-Gurney's law) แต่ถ้า $m > 2$ จะหมายถึงว่า กับดักประจุมีระดับพลังงานต่อเนื่องและมีการแจกแจงแบบเอกซ์โพเนนเชียล ซึ่งจากผลการทดลองได้ค่า m เท่ากับ 2.6 แสดงว่ากับดักประจุมีระดับพลังงานต่อเนื่องและมีการแจกแจงแบบเอกซ์โพเนนเชียล



รูปที่ 4.16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $dV/d(\ln I)$ กับ I เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของ ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-CdTe}/n\text{-WO}_3/\text{In}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

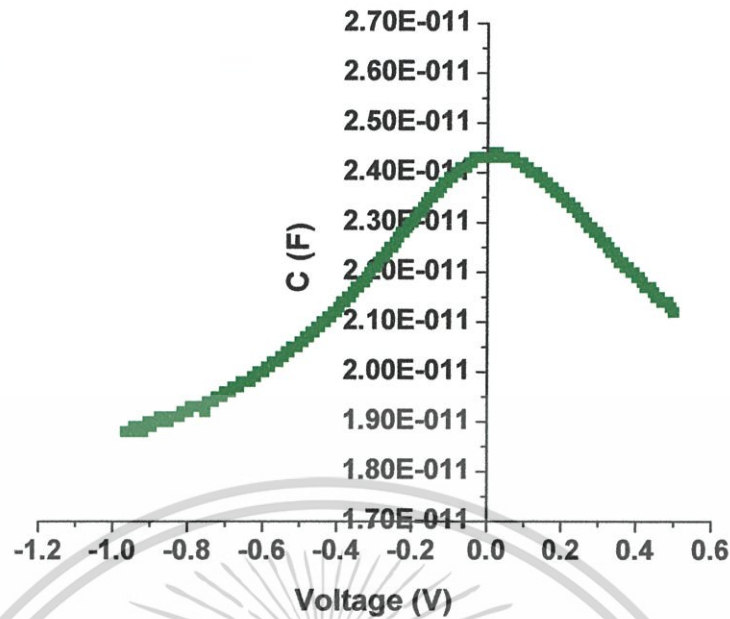


รูปที่ 4.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $H(I)$ กับ I เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-CdTe}/n\text{-WO}_3:\text{In}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนัล

ตารางที่ 4.5 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ (I_s) ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ (n) ค่าความสูงของกำแพงศักย์ในขณะไบแอสเป็นศูนย์ (ϕ_{BO}) และ ค่าความต้านทานอนุกรม (R_s) ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน และ วิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-CdTe}/n\text{-WO}_3:\text{In}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนัล

T (K)	Saturation Current I_s (A)	Ideality Factor (n)		Barrier Height ϕ_{BO} (eV)		Series Resistance R_s (Ω)	
		TE	Cheung	TE	Cheung	Cheung	Cheung
		I-V	$\left(\frac{dV}{d \ln I}\right)_{-I}$	I-V	$H(I)-I$	$H(I)-I$	$\left(\frac{dV}{d \ln I}\right)_{-I}$
300	3.96×10^{-8}	5.381	3.574	0.706	0.667	14×10^3	11×10^3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า C กับ V ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO₃:In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนัล

จากรูปที่ 4.19 แสดงผลการศึกษารูปความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า โดยจ่ายแรงดันไบแอสในช่วง -0.5 ถึง 1 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO₃:In พบว่าเมื่อแรงดันไบแอสย้อนกลับมีค่ามากขึ้นจะทำให้ค่าความจุไฟฟ้านั้นลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากความกว้างของบริเวณพร่องพาหะเพิ่มขึ้นตามแรงดันเมื่อมีการไบแอสย้อนกลับมากขึ้น และ สำหรับกรณีไบแอสไปข้างหน้า ความกว้างของบริเวณพร่องพาหะจะลดลง ซึ่งจะส่งผลให้ค่าความจุไฟฟ้ามีค่ามากขึ้นจนถึงจุดสูงสุดค่าหนึ่ง จากนั้นค่าความจุไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเนื่องจากการฉีดพาหะอิสระจำนวนมากผ่านรอยต่อจนเสมอว่ารอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO₃:In หายไปในช่วงขณะ

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า ที่แสดงในรูปที่ (4.14) นำมาเขียนใหม่ให้อยู่ในรูปของ ส่วนกลับของค่าความจุไฟฟ้ายกกำลังสอง กับ แรงดันไฟฟ้า จะสามารถหา ค่าศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมรอยต่อ (V_{bi}) และ ความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ (N_D) ได้จากสมการดังนี้

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

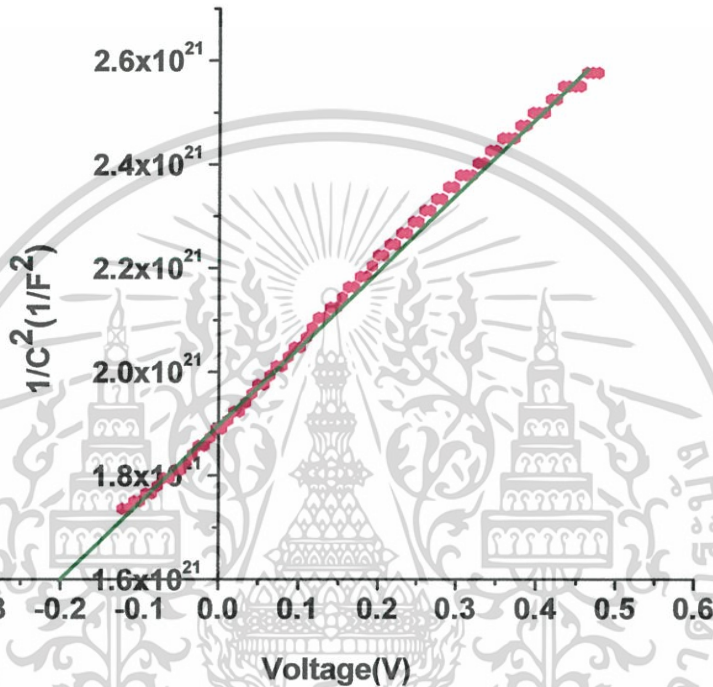
โดยที่จะเอาส่วนที่เป็นเส้นตรงในช่วงไบแอสแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับตั้งแต่ -1 ถึงช่วง 0.3 โวลต์ โดยประมาณแล้วทำการลากเส้นตรงไปตัดผ่านแกน x จะทำให้ได้ค่า V_i แล้วนำมาหา ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมตรงบริเวณรอยต่อจากความสัมพันธ์

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

ส่วนความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ มีค่าเท่ากับ 2.71×10^{11} ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร สามารถคำนวณได้จาก ค่าความชันของกราฟ ตามสมการที่ (4.16) คือ

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

เมื่อ ϵ_s คือเพอร์มิตติวิตี (permittivity) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งสำหรับกรณีที่เป็นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe จะมีค่า $\epsilon_s = \epsilon_r \epsilon_0$ โดยที่ ϵ_r คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกซึ่งมีค่าเท่ากับ 10.20

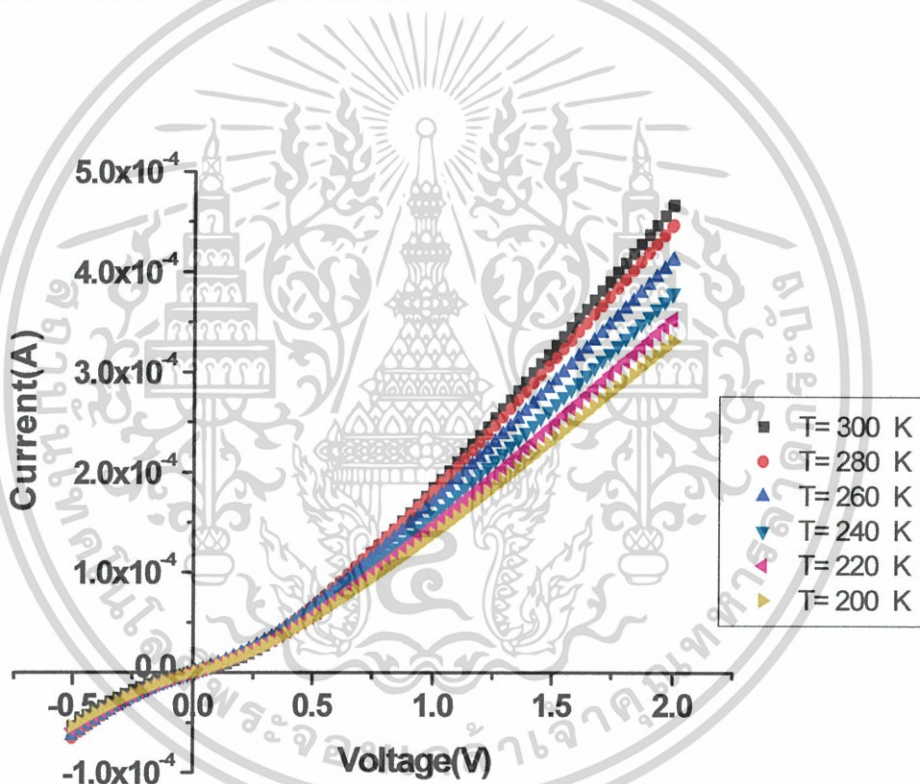


รูปที่ 4.19 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $1/C^2$ กับ V ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO₃:In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส

4.4.3 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 200-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO₃:In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO₃:In โดยวัด ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า ในช่วง -0.5 ถึง 2.0 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 200 ถึง 300 เคลวิน พบว่าที่ค่าแรงดันไฟฟ้าเท่ากัน ในกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ตรงบริเวณรอยต่อมีค่าลดลงตามค่าอุณหภูมิที่ลดลง ดังแสดงดังรูปที่ 4.20 การศึกษากลไกของกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ตรงบริเวณรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO₃:In ที่ช่วงแรงดันไฟฟ้า -0.5 ถึง 2.0 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้อง พบว่าที่ค่าแรงดันไฟฟ้าน้อยกว่า 0.15 โวลต์ เป็นกลไกการนำไฟฟ้าที่เป็นไป

ตามกฎของโอห์ม ส่วนช่วงแรงดันไฟฟ้า 0.15 ถึง 0.45 โวลต์ เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าเป็นไปตามแบบกลไกเทอร์มियोอิมมิสชัน และ ที่แรงดันไฟฟ้าบริเวณมากกว่า 0.45 โวลต์ จะเป็นกลไกการนำไฟฟ้าแบบชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้างที่เกิดจากกับดักประจุในเนื้อสารที่มีการแจกแจงแบบเอกซ์โพเนนเชียล เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I$ กับ V เพื่อหาค่าแฟกเตอร์อุณหภูมิและ ค่ากระแสไฟฟ้าอิมิตัวย้อนกลับ แล้วนำไปใช้เป็นค่าเริ่มต้นในการจำลองข้อมูลเพื่อเปรียบเทียบกับผลการคำนวณที่ได้จากการวัดค่าความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า ในช่วงการไหลของกระแสไฟฟ้าข้ามกำแพงศักย์ตรงบริเวณรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO₃:In ที่เป็นกลไกเทอร์มियोอิมมิสชัน เพื่อใช้ช่วยหาค่ากระแสไฟฟ้าอิมิตัวย้อนกลับ และ แฟกเตอร์อุณหภูมิให้ถูกต้องยิ่งขึ้น การหาค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมจะใช้วิธีของชวง โดยที่ค่ากระแสไฟฟ้าอิมิตัวย้อนกลับ ค่าแฟกเตอร์อุณหภูมิ ค่าความสูงของกำแพงศักย์ และค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 200 ถึง 300 เคลวิน ที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มियोอิมมิสชันและวิธีของชวง แสดงในตารางที่ 4.6



รูปที่ 4.20 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 200 – 300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO₃:In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส

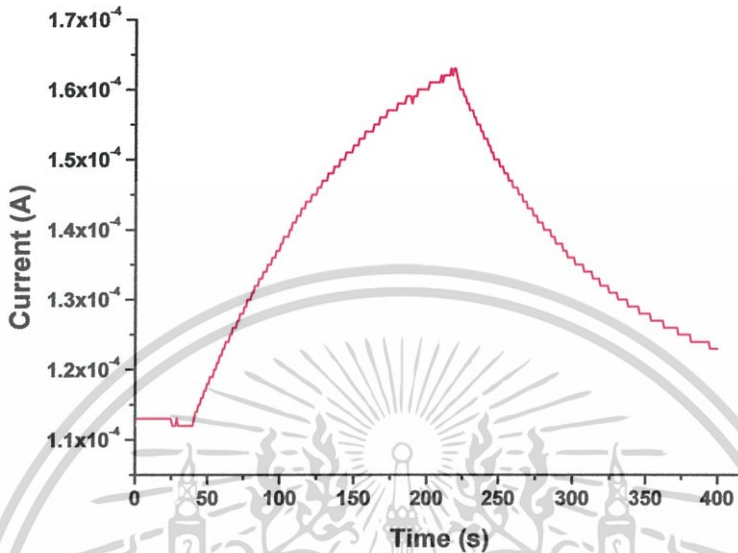
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ (I_s) ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ (n) ค่าความสูงของกำแพงศักย์ในขณะที่ไบแอสเป็นศูนย์ (ϕ_{BO}) และค่าความต้านทานอนุกรม (R_s) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 200-300 เคลวิน ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มิโอนิกอิมิสชัน และวิธีของชวง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO₃:In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนัล

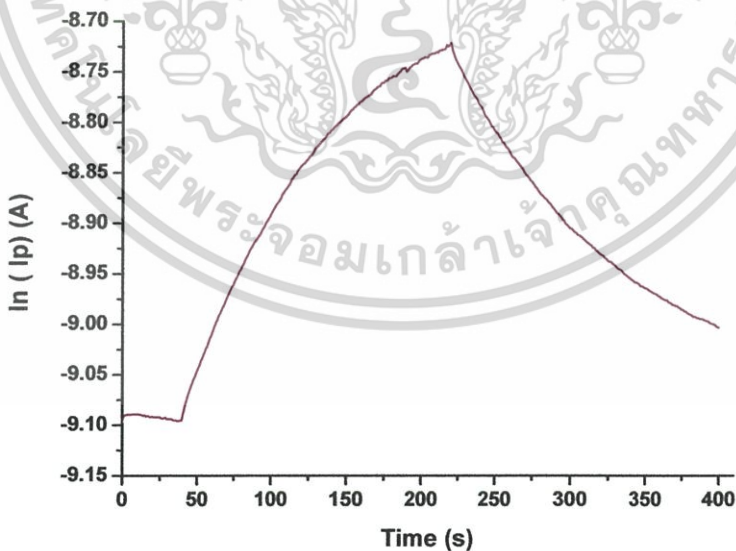
T (K)	Saturation Current I_s ($\times 10^{-6}$ A)	Ideality Factor (n)		Barrier Height ϕ_{BO} (eV)		Series Resistance R_s (Ω)	
		TE	Cheung	TE	Cheung	Cheung	Cheung
		I-V	$\left(\frac{dV}{d\ln I}\right)^{-1}$	I-V	H(I)-I	H(I)-I	$\left(\frac{dV}{d\ln I}\right)^{-1}$
200	2.07	6.039	6.828	0.348	0.562	4.725	4.886
220	2.04	5.483	6.030	0.387	0.617	4.457	4.502
240	2.0	5.026	5.48	0.427	0.675	4.199	4.085
260	1.92	4.289	4.715	0.473	0.728	3.827	3.661
280	1.88	3.916	3.972	0.514	0.786	3.603	3.301
300	1.69	3.421	3.531	0.557	0.850	3.364	3.052

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

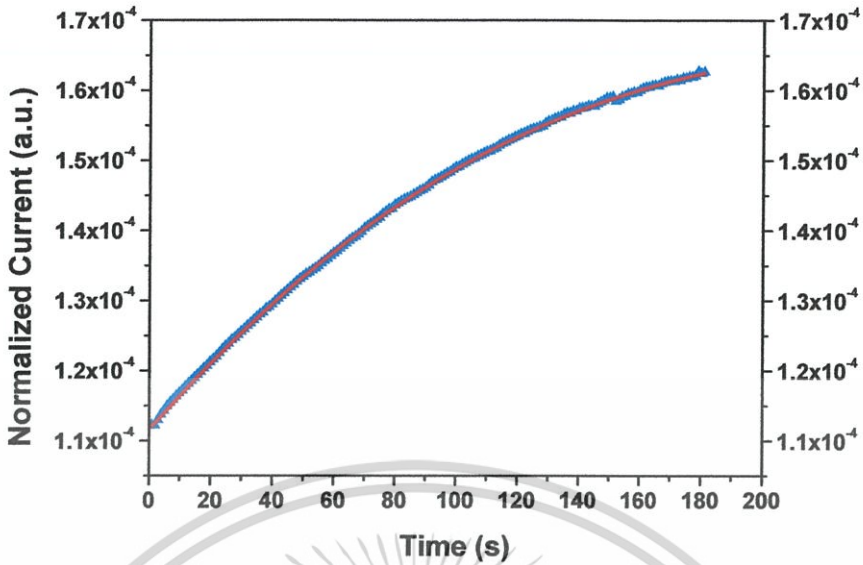
4.4.4 ผลการศึกษาสภาพต้านทานเชิงแสงที่ร้อนของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO₃:In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



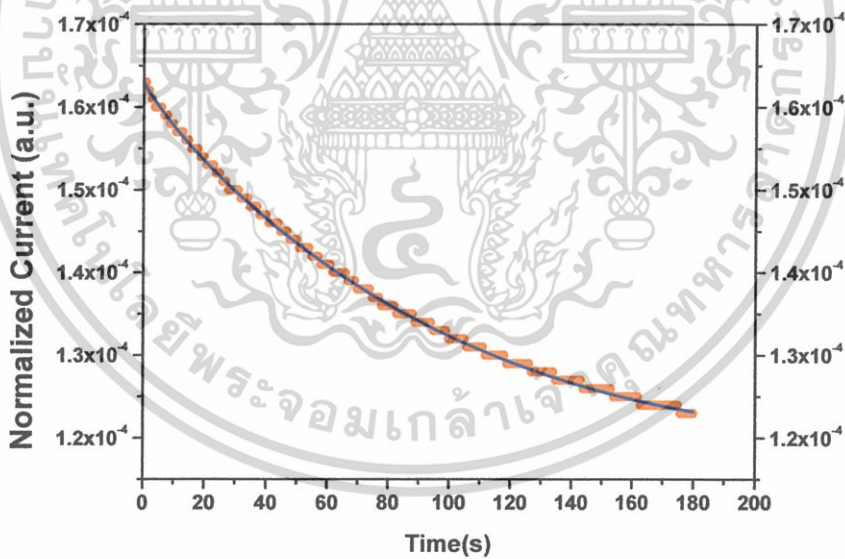
รูปที่ 4.21 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟโต กับ เวลา ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO₃:In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีสล



รูปที่ 4.22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าลอการิทึมธรรมชาติของกระแสไฟโต กับ เวลา ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO₃:In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีสล



รูปที่ 4.23 แสดงการพิตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสออร์มัลไลซ์ขาขึ้น กับ เวลา ของไดโอด ที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO₃:In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนัล



รูปที่ 4.24 แสดงการพิตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสออร์มัลไลซ์ขาลง กับ เวลา ของไดโอด ที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO₃:In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าความหนาแน่นของพาหะชนิดต่างๆ ที่ได้จากการวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงตัวร้อนของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO₃:In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนیل

Composition (x)	Decay Component					
	1 st Term		2 nd Term		3 rd Term	
	I ₀ (A) (10 ⁻⁴)	N _t (cm ⁻³) (10 ¹²)	I ₀ (A) (10 ⁻⁴)	N _t (cm ⁻³) (10 ¹²)	I ₀ (A) (10 ⁻⁴)	N _t (cm ⁻³) (10 ¹²)
p-CdTe/n-WO ₃ :In	1.510	1.602	1.370	1.454	1.280	1.358

หมายเหตุ : N_t สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ $N_t = \left(\frac{I_0}{q\mu V_a} \right) \left(\frac{l}{wd} \right)$

แรงดันไฟฟ้า (V_a) = 15 โวลต์

สภาพคล่องของพาหะ (μ) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe
= 0.34 ตารางเซนติเมตร (โวลต์-วินาที)

พื้นที่หน้าตัด (wd) ของไดโอดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ = $\pi r^2 = \pi(0.5)^2$

ความหนาของเม็ดเซรามิก = 0.2 เซนติเมตร

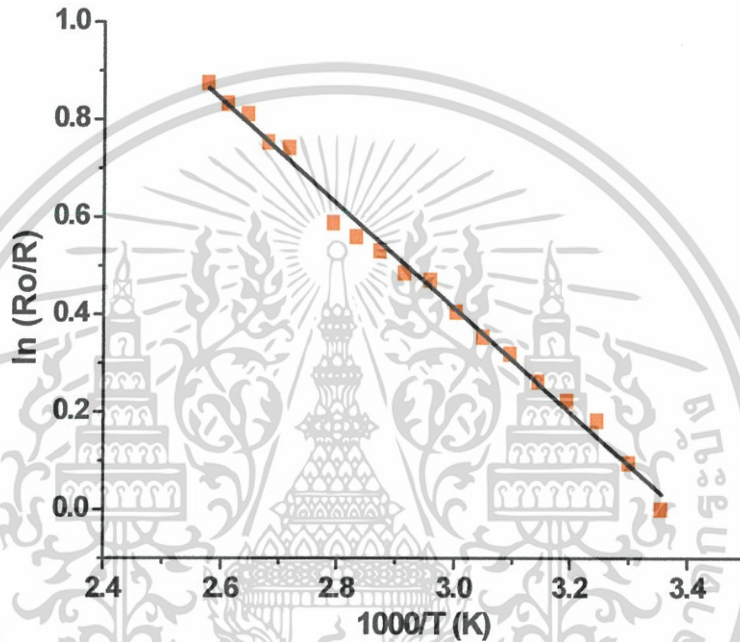
ตารางที่ 4.8 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่สำคัญ ค่าของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงตัวร้อนที่ได้จากการปรับผลการทดลอง ที่อุณหภูมิห้อง ให้เข้ากับฟังก์ชันมัลติเพิลเอ็กซ์โพเนนเชียล ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO₃:In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนิล

	Rise Time (s)				Decay Time (s)		
	1 st Term	2 nd Term	3 th Term	4 th Term	1 st Term	2 nd Term	3 th Term
τ_{ri}	361.0966	381.6794	571.4286	900.9009	359.712	515.464	1119.24
A_i	0.01627	-0.02056	0.00488	-0.0004781	0.00537	-0.01307	0.007852
β				0.276			1.56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.5 ผลการศึกษากราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln(R_0/R)$ กับ $1000/T$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูง ในช่วงอุณหภูมิ 30 – 185 องศาเซลเซียส ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $WO_3:In$ จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

จากกราฟรูปที่ 4.25 สามารถคำนวณหา ค่าพลังงานกระตุ้น ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $WO_3:In$ ได้จาก ค่าความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln(R_0/R)$ กับ $1000/T$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 30 - 185 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 0.092 อิเล็กตรอนโวลต์

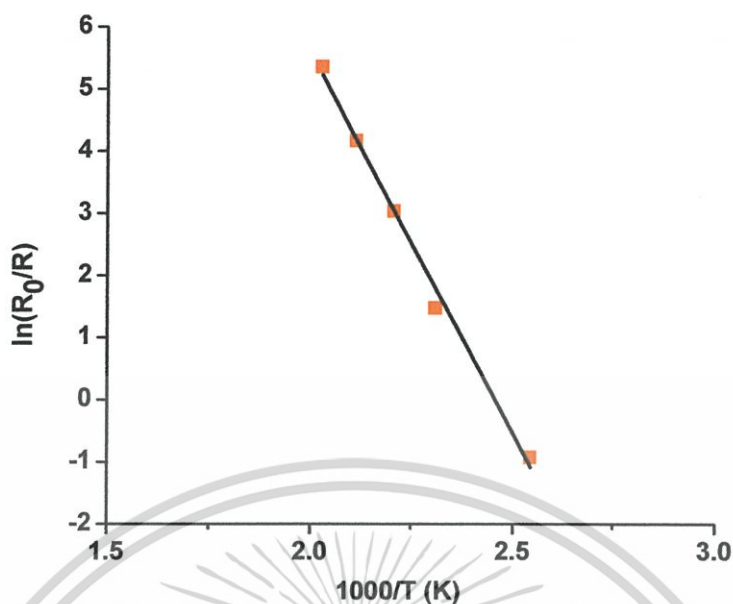


รูปที่ 4.25 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln(R_0/R)$ กับ $1000/T$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูง ในช่วงอุณหภูมิ 30-185 องศาเซลเซียส ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $WO_3:In$ จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง เมื่อไม่มีการแอนนีส

4.4.6 ผลการศึกษากราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln(R_0/R)$ กับ $1000/T$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูง ในช่วงอุณหภูมิ 140-220 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

จากกราฟรูปที่ 4.26 สามารถคำนวณหา ค่าพลังงานกระตุ้น ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $CdTe$ ได้จาก ค่าความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln(R_0/R)$ กับ $1000/T$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 140 ถึง 220 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 0.45 อิเล็กตรอนโวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

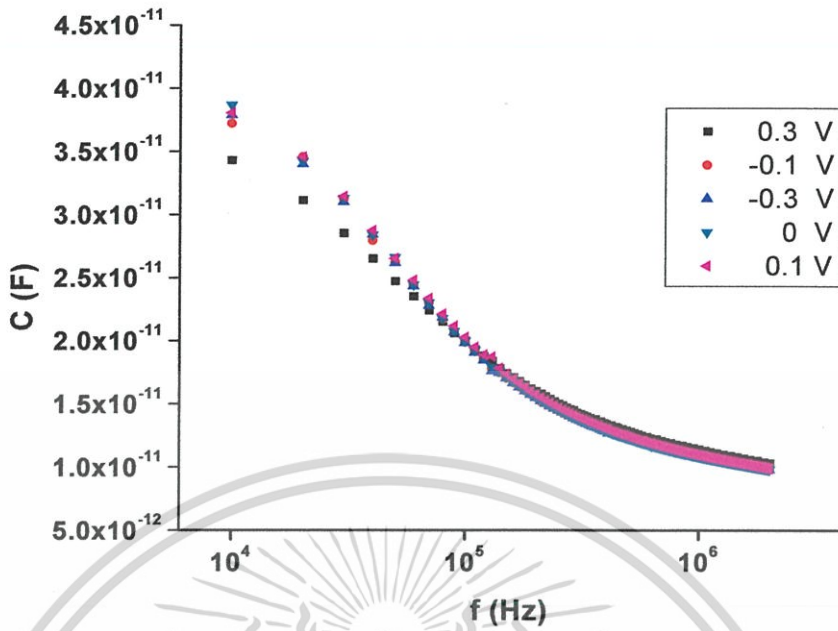


รูปที่ 4.26 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln(R_0/R)$ กับ $1000/T$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูง ในช่วงอุณหภูมิ 140-220 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส

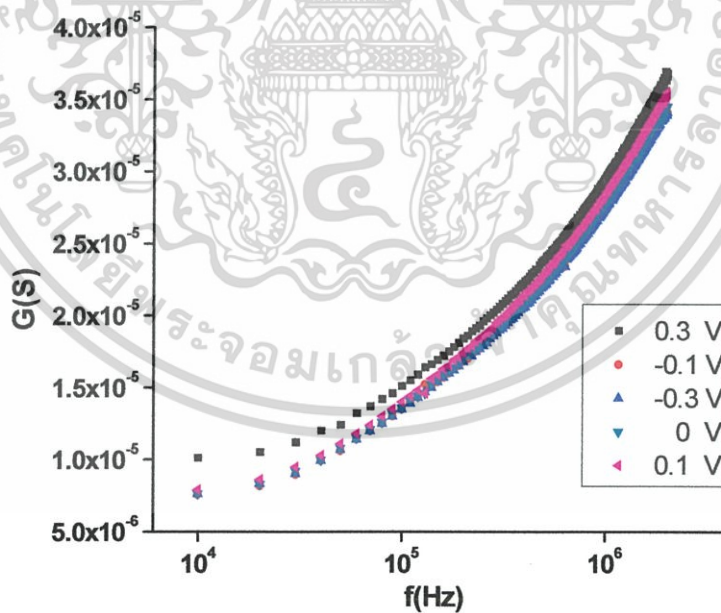
4.4.7 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสสลับ ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ - 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO₃:In ซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

ผลการศึกษาค่าอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ - 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO₃:In

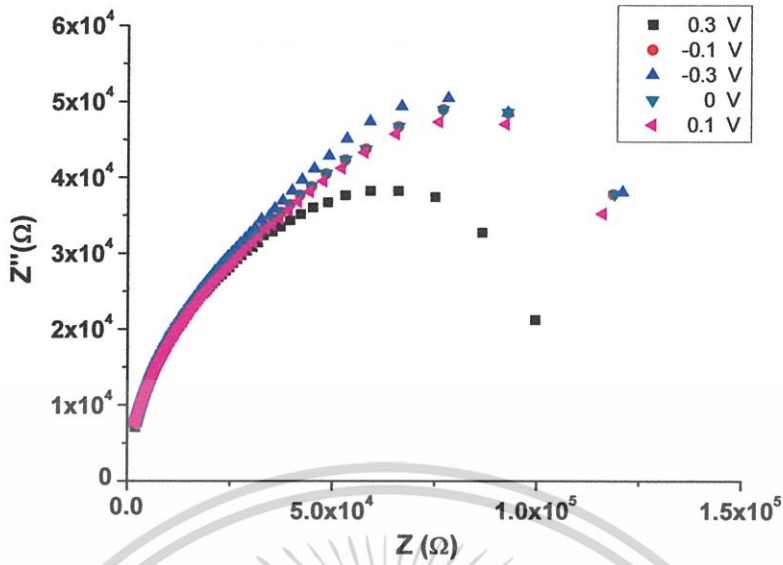
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



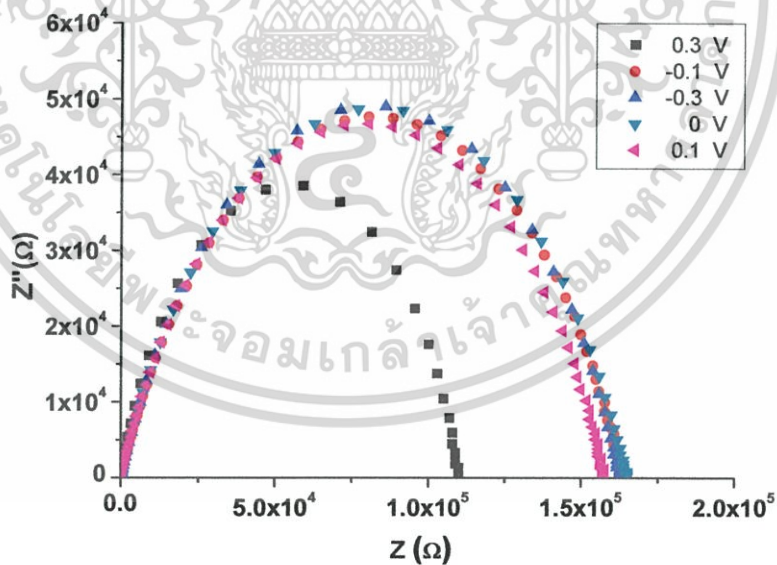
รูปที่ 4.27 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ ความถี่ ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ - 2 เมกะเฮิรตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบ วิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO₃:In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการ ระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนัล



รูปที่ 4.28 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความนำไฟฟ้า กับ ความถี่ ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ - 2 เมกะเฮิรตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบ วิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO₃:In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการ ระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนัล



รูปที่ 4.29 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของ ค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ - 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบ วิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO₃:In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหย สารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส

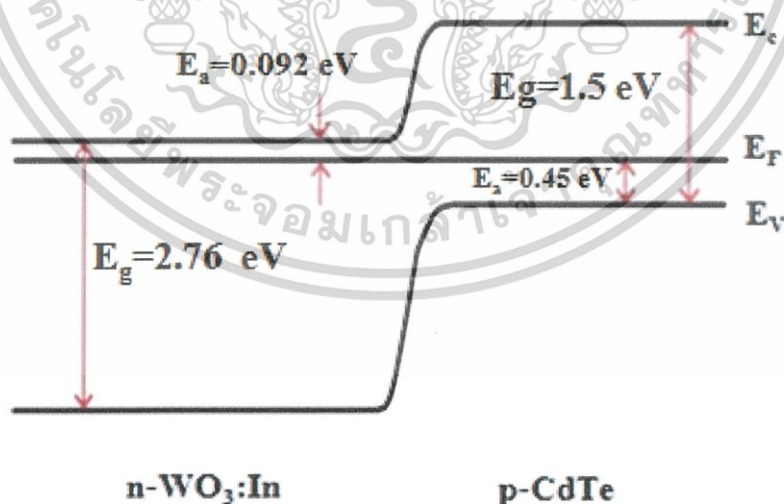


รูปที่ 4.30 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของ ค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ - 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบ วิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO₃:In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหย สารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีส

ตารางที่ 4.9 แสดงพารามิเตอร์ต่างๆที่สำคัญ ที่ได้จากการศึกษาค่าอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี ในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ - 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO₃:In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนัล

Voltage (V)	Parameters						
	R _s (Ω)	R _p (Ω)	p	n	C _p (F)	f _{max} (Hz)	$\omega_{max} RC_p$
0.3	100	11.00×10 ⁴	11.50×10 ⁻¹⁰	0.779	9.01×10 ⁻¹¹	5.91×10 ⁴	3.68
0.1	105	15.80×10 ⁴	11.20×10 ⁻¹⁰	0.680	1.92 ×10 ⁻¹¹	7.70 ×10 ⁴	1.47
0	108	16.49×10 ⁴	11.00×10 ⁻¹⁰	0.680	1.91 ×10 ⁻¹¹	8.00 ×10 ⁴	1.58
-0.1	110	16.60×10 ⁴	10.98×10 ⁻¹⁰	0.670	1.58 ×10 ⁻¹¹	8.04 ×10 ⁴	1.32
-0.3	113	16.90×10 ⁴	9.89×10 ⁻¹⁰	0.680	1.36 ×10 ⁻¹¹	8.59 ×10 ⁴	1.24

จากข้อมูลของผลการทดลองที่ผ่านมาทั้งหมด ได้แก่ ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ค่าพลังงานกระตุ้น ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO₃:In และ ค่าพลังงานกระตุ้น ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe สามารถนำมาเขียนโครงสร้างแถบพลังงานของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO₃:In ได้ดังรูปที่ 4.31



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.31 แสดงแผนภาพของลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO₃:In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในโครงการพิเศษนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็นสามส่วนใหญ่ๆคือ ส่วนแรกเป็นการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยไม่ได้ให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับ ส่วนที่สองเป็นการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO_3 ที่เจือด้วย In_2O_3 จากสารกึ่งตัวนำที่เป็นผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง และส่วนสุดท้ายเป็นการประดิษฐ์ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n- $WO_3:In$ จากนั้นได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า - แรงดันไฟฟ้า ที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วงอุณหภูมิ 200-300 เคลวิน เพื่อคำนวณค่านวนหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่สำคัญของไดโอดดังกล่าว รวมทั้งยังทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า - แรงดันไฟฟ้า ที่อุณหภูมิห้อง เพื่อคำนวณหาค่าความหนาแน่นของพาหะอิสระของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe

5.1 ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ มีสีดำ มีนวลวสะท้อนแสงและติดแน่นกับแผ่นฐานรองรับได้ดี แม้ว่าจะไม่ได้ให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับ ทั้งกรณีที่ไม่มีการแอนนีสและในกรณีที่มีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 250, 300, 350 และ 400 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

จากการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคโดยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ พบว่าพีคความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ปรากฏเด่นชัดที่สุดที่มุม $2\theta \approx 23.80$ องศา ส่วนพีคความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่มีความเข้มน้อยกว่าจะปรากฏที่มุม 39.30 และ 46.40 องศา ตามลำดับ ซึ่งพีคความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ดังกล่าวสอดคล้องกับระนาบ (111), (220), (311) ของโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ตามลำดับ

จากการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นการศึกษาถึงลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ เมื่อไม่มีการแอนนีส และ มีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 250, 300, 350 และ 400 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที พบว่าอุณหภูมิแอนนีสมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของเกรน กล่าวคือทำให้เกรนมีขนาดโตขึ้นตามอุณหภูมิแอนนีสที่เพิ่มขึ้น คือจาก 50 นาโนเมตร เป็น 66 นาโนเมตร

ผลการศึกษาสเปกตรัมของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ พบว่าขอบการดูดกลืนแสงอยู่ที่ความยาวคลื่นประมาณ 800 นาโนเมตร และสามารถนำไปคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) มีค่าเท่ากับ 1.5 อิเล็กตรอนโวลต์

5.2 ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO₃:In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

การเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO₃:In ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสถานะของแข็ง เม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO₃:In ที่ได้นั้นพบว่าเป็นสีเขียวเข้ม และต่อจากนั้นได้ทำการเตรียมไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO₃:In โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO₃:In โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อทำการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ลงบนเม็ดเซรามิกจะพบว่าฟิล์มบางสีดำปรากฏ

การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO₃:In ทั้งกรณีที่ไม่มีการแอนนیلและมีการแอนนิลที่อุณหภูมิ 250, 300, 350 และ 400 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที พบว่ามีพีคความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่มุม $2\theta \approx 23.80, 39.31, 46.43$ องศา สอดคล้องกับระนาบ (111), (220), (311) ของโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ ซึ่งเป็นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ส่วนพีคความเข้มของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่เหลือจะสอดคล้องกับระนาบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO₃:In ที่มีโครงสร้างผลึกแบบโมโนคลินิก จะปรากฏที่มุม $2\theta \approx 23.11, 23.58, 24.34$ องศา ซึ่งสอดคล้องกับระนาบ (002), (020), (200) ตามลำดับ

การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค และ การสังเกตภาคตัดขวางตรงบริเวณผิวรอยต่อของไดโอดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO₃:In ซึ่งเตรียมได้จากการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO₃:In โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ พบว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe มีความหนาประมาณ 1 ไมโครเมตร แต่ไม่สามารถเห็นขนาดเกรนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ได้ ส่วนเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO₃:In มีขนาดเกรนประมาณ 6 ไมโครเมตร

5.3 สมบัติทางไฟฟ้า ที่ทำการศึกษาโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า ในช่วง -0.5 ถึง 1.5 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง และ อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 200-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO₃:In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า โดยวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า ในช่วง -0.5 ถึง 1.5 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO₃:In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ พบว่ามีการเรียงกระแสไฟฟ้าทางเดียวเหมือนไดโอด โดยมีค่าแรงดันขีดเริ่ม (threshold voltage) อยู่ที่ 0.4 โวลต์ แต่เนื่องจาก ค่าความหนาแน่นของพาหะอิสระของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO₃:In และ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe อยู่ในระดับ 10^{11} และ 10^{13} ลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ ดังนั้นจะประมาณได้ว่าไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO₃:In เป็นรอยต่อแบบ p-n⁺ ซึ่งกลไกการนำกระแสจะอธิบายได้

เช่นเดียวกับรอยต่อขอตดก็โดยบริเวณพร่องพาหะอิสระตรงบริเวณรอยต่อเกือบทั้งหมดจะปรากฏอยู่ในเนื้อของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe

พิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I$ กับ $\ln V$ ที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO₃:In พบว่า ส่วนที่ช่วงแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่า 0.2 โวลต์ เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าเป็นไปตามกฎของโอห์ม ส่วนที่ช่วงแรงดันระหว่าง 0.2 ถึง 0.7 โวลต์ เป็นกลไกการนำกระแสแบบ เทอร์มियोอนิกอิมิสชัน และที่ช่วงแรงดันไฟฟ้ามากกว่า 0.7 โวลต์ เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้า ชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้าง (space charge limit current) ที่เกิดจากกับดักประจุในเนื้อสารที่มีการแจกแจงแบบเอกซ์โพเนนเชียล เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I$ กับ $\ln V$ จะได้ ค่าแพกเตอร์อุดมคติ และ ค่ากระแสไฟฟ้าอิมิตวย้อนกลับ และนำไปใช้เป็นค่าเริ่มต้นในการจำลองข้อมูลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อหา ค่าแพกเตอร์อุดมคติ และ ค่ากระแสไฟฟ้าอิมิตวย้อนกลับ ที่น่าเชื่อถือยิ่งขึ้น การหา ค่าความต้านทานอนุกรม ด้วยวิธีของชวงนั้นจะเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $dV/d\ln I$ กับ I ซึ่งจากกราฟนี้จะได้ ค่าแพกเตอร์อุดมคติ และ ค่าความต้านทานอนุกรม และจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $H(I)$ กับ I จะได้ ค่าความสูงของกำแพงศักย์ในขณะที่แรงดันไบแอสเป็นศูนย์

ที่อุณหภูมิห้อง ค่าแพกเตอร์ในอุดมคติ และ ค่าความสูงกำแพงศักย์มีค่าเท่ากับ 5.381 และ 0.706 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ และ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆในช่วง 200-300 เคลวิน พบว่า ค่าความสูงของกำแพงศักย์จะมีค่าลดลงตามอุณหภูมิ แต่ค่าแพกเตอร์ในอุดมคตินั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลง โดยการที่ค่าแพกเตอร์อุดมคติ และ ค่าความสูงกำแพงศักย์ ที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ เกิดเนื่องจากได้ใช้การวัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์มาคำนวณหาตัวแปรเหล่านี้ ดังนั้นค่าของตัวแปรจะขึ้นอยู่กับปริมาณของค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้ ที่อุณหภูมิสูงจะมีพลังงานความร้อนไปกระตุ้นพาหะอิสระให้มีระดับพลังงานสูงและมีจำนวนมากขึ้น เมื่อมีการให้แรงดันไบแอสไปหน้า ประจุมิที่มีระดับพลังงานสูงเหล่านี้ก็สามารถไหลข้ามกำแพงศักย์ที่มีค่าสูงได้ ดังนั้นจะได้ค่ากำแพงศักย์ที่มีค่ามาก และ ค่าแพกเตอร์อุดมคติ มีค่าเข้าใกล้หนึ่ง แต่ที่อุณหภูมิต่ำระดับพลังของของพาหะอิสระมีค่าน้อย จึงจำเป็นต้องใช้ค่าแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเพื่อจะไหลข้ามกำแพงศักย์ ขณะเมื่อป้อนแรงดันไบแอสไปข้างหน้าให้มากขึ้น กลไกการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์จะโดดเด่นขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิลดต่ำลง กลไกเทอร์มियोอนิกอิมิสชันจะลดความโดดเด่นลง และในทางกลับกัน กลไกการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์จะโดดเด่นมากยิ่งขึ้น จึงเสมือนว่ามีพาหะอิสระสามารถไหลข้ามรอยต่อได้เนื่องจากค่าความสูงของกำแพงศักย์ลดลง ส่วนค่าแพกเตอร์อุดมคติ (n) จะมีค่าสูงขึ้นซึ่งจะแสดงว่าการนำกระแสไฟฟ้าผ่านรอยต่อที่ช่วงอุณหภูมิต่ำจะสอดคล้องกับกลไกเทอร์มियोอนิกอิมิสชันน้อยลง

ผลการศึกษากราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ แรงดันไบแอส ในช่วง -1.2 ถึง 0.6 โวลต์ โดยใช้ความถี่ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n-WO₃:In จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $1/C^2$ กับ V จุดตัดที่ได้จากกราฟคือ ค่า V_i ซึ่งสามารถนำไปหา ค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมรอยต่อ (V_{bi}) ได้ และ จากค่าความชันของกราฟนี้สามารถใช้คำนวณหา ค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้รับได้เท่ากับ 2.71×10^{11} ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln(R_0/R)$ กับ $1000/T$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูง ในช่วงอุณหภูมิ 30-185 องศาเซลเซียส ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO₃:In จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก ที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง สามารถคำนวณหา ค่าพลังงานกระตุ้น

ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{WO}_3:\text{In}$ ได้จากความชันของกราฟ มีค่าเท่ากับ 0.092 อิเล็กตรอนโวลต์ และ จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln(R_0/R)$ กับ $1000/T$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูง ในช่วงอุณหภูมิ 140-220 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ สามารถคำนวณหา ค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe ได้จากค่าความชันของกราฟ มีค่าเท่ากับ 0.45 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งสอดคล้องกับแผนภาพของลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n- $\text{WO}_3:\text{In}$

5.4 ข้อเสนอแนะ

1. ต้องทำความสะอาดระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศทุกครั้งเมื่อทำงานเสร็จหรือก่อนใช้งาน เพื่อที่ไม่ให้มีสารมาปนเปื้อนระหว่างการเคลือบฟิล์ม
2. เตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ด้วยความระมัดระวังไม่ให้ผิวหน้าเป็นรอยเพราะจะทำให้ฟิล์มบางที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ไม่เรียบสม่ำเสมอ หรือเคลือบไม่ติดทั้งแผ่น
3. การเตรียมเม็ดเซรามิกเพื่อใช้เป็นแผ่นฐานรองรับในระเหยสารเคมีด้วยความร้อนระบบสุญญากาศ ควรจะวางแผนการทำงานล่วงหน้า เพราะถ้าเม็ดเซรามิกที่ผ่านการเผาแล้ว เมื่อโดนอากาศจะเกิดการร่อนแตกได้
4. การระเหยสารเคมีขึ้นไปเคลือบยังแผ่นฐานรองรับควรใช้อัตราการระเหยที่เหมาะสมซึ่งขึ้นกับชนิดสารเคมีที่ใช้
5. ควรทำการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้า ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n- $\text{WO}_3:\text{In}$ โดยทันทีเพื่อหลีกเลี่ยงการแพร่เข้าหากันของอะตอม ที่อยู่ตรงบริเวณรอยต่อ ซึ่งจะส่งผลทำให้ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-CdTe/n- $\text{WO}_3:\text{In}$ เสื่อมคุณภาพได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- กัลยา เกื่อนวิสัย, ลัดดาวรรณ นะเป่า, ศิวพร สนวนอยู่. 2550. “การศึกษาสมบัติเชิงไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ $\text{CuAl}_{1-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$.” โครงการพิเศษ วิทยาศาสตร์บัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ. 2530. “การศึกษารอยต่อแบบ โลหะ - ฉนวน - สารกึ่งตัวนำ ของ คอปเปอร์ - อินเดียมไดซัลไฟด์.” วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, จูตินัย แก้วแดง และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2556. “ความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้าของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0.00 \leq x \leq 0.05$) และการประยุกต์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- จักรพงษ์ สวัสดิวัตน์. 2556. “การประดิษฐ์และการศึกษาสมบัติของรอยต่อวิวิธพันธุ์ระหว่าง ซิงค์เทลลูไรด์กับทังสเตนออกไซด์ที่เจือด้วยอะตอมของอินเดียม.” วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ชนิภรณ์ จุไรสง, ธิรญา โชติธนนันท์. 2556. “การศึกษาสมบัติของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบาง CdS/CuO .” โครงการพิเศษ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- จูตินัย แก้วแดง. 2530. “การเตรียมและศึกษาสมบัติของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์.” วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- จูตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิทธิ์ ภูริรักษ์เกียรติ. 2545. “การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ ที่มี Zn เพื่อประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- จูตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิทธิ์ ภูริรักษ์เกียรติ. 2546. “การประดิษฐ์ฟิล์มบาง $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ ที่มี Zn ในปริมาณสูงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- จูตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2549. “การประดิษฐ์ฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่เจือด้วยอะตอมฟลูออรีนสำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- จูตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2557. “การประดิษฐ์และการศึกษาสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CuO .” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และชัยสิทธิ์ ภูริรักษ์เกียรติ. 2558. “การเตรียมฟิล์มบาง CuO โดยวิธีแอ็คทีฟสปัตเตอร์ริง เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CuO.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

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

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

วีรชัย ลิภา. 2546. “การศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง CdS-ZnS ซึ่งเตรียมโดยวิธีอบสารละลายเคมี.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

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

สมเกียรติ ศุภเดช. 2542. *เคมีคอนดักเตอร์ฟิล์มบาง, แผนกดาราศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.*

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

สุรียา มีเปี่ยมสมบูรณ์. 2553. “การประดิษฐ์ฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์เพื่อประยุกต์เป็นขอตดักไดโอด.” วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

อดุลย์ หาญวังม่วง. 2550. “การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดในระยะประชิด.” วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

Bouchard, R.J. and Gillson, J.L. 1968. “Hexagonal Indium Tungsten Bronze.” *Inorganic Chemistry*. 7(5) : 969-972.

Cullity, B.D. 1956. *Element of X-Ray Diffraction*. Addison-Wesley Publishing Company.

Diot, N. Larcher, O. Marchand, R. Kempf, J.Y. and Macaudiere, P. 2001. “Rare Earth and Tungsten Oxynitrides with a Defect Fluorite-Type Structure as New Pigments.” *J. Alloys Comp.* 323-324 : 45-48

- Gao, L. Wang, X. Feng, L. Zheng, X. and Chen, G. 2013. "Temperature Sensitive Photoconductivity Observed in InN Layers." *App. Phys. Lett.* 102 : 072103-1 - 072103-3
- Ghaffarzadeh, K. Nathan, A. and Robertson, J. 2010. "Persistent Photoconductivity in Hf-In-Zn-O Thin Film Transistors." *Appl. Phys. Lett.* 97 : 143510-1 - 143510-3.
- Ghosh, R. and Basak, D. 2007. "Electrical and Ultraviolet Photoresponse Properties of Quasialigned ZnO Nanowires/p-Si Heterojunction." *App. Phys. Lett.* 90 : 243106-1 - 243106-3.
- Gu, G. Kane, M.G. Doty, J.E. and Firester, A.H. 2005. "Electron Traps and Hysteresis in Pentacene-Based Organic Thin Film Transistors." *App. Phys. Lett.* 87 : 243512-1 - 243512-3.
- Huang, B.C. and Lin, Y.L. 2010. "Effect of the Induced Electron Traps by Oxygen Plasma Treatment on Transfer Characteristics of Organic Thin Film Transistors." *App. Phys. Lett.* 99 : 113301-1 - 113301-3.
- Jiang, F. Shen, H. Liu, B. Lin, h. and Shen, Z. 2011. "Preparation and Properties of SnS Films Grown by Two-Stage Process." *Appl. Surf. Sci.* 257 : 4901-4905
- Kim, S., Seok, H., Lee, M., Choi, D., & Chai, K., 2012. "Fabrication of transparent p-n junction diode based on oxide semiconductors deposited by RF magnetron sputtering." *Ceramics International*, 38S. S623-S626.
- Kittel C. 2005. **Introduction to Solid State Physics, 8th Edition.** United States of America : John Wiley&Sons Inc.
- Luo, J. Adler, A.U. Mason, T.O. and Buchholz, D. 2013. "Transient Photoresponse in Amorphous In-Ga-Zn-O Thin Films Under Stretched Exponential Analysis." *J. Appl. Phys.* 113 : 153709-1 - 153709-8.
- Lv, P., Lin, L., Zheng, W., Zheng, M., & Lai, F., 2013. "Photosensitivity of ZnO/Cu₂O thin film heterojunction." *Optik*. 124. 2654-2657.
- Richard, A.P. and Edwards, D.D. 2004. "Sub solidus Phase Relation and Crystal Structures of the Mixed-Phases in the In₂O₃-WO₃ System." *J. Solid State Chem.* 177 : 2740-2748.
- Runyan, W.R., 1975. **Semiconductor Measurement and Instrument, 3rd Edition,** New York: Mc.Graw-Hill.
- Schroder D.K., 1998. **Semiconductor Material and Characterization, 2nd ed.** Newyork: John Wiley & Sons Inc.

Studenikin, S.A. Geleco, N. and Cocivera, M. 1998. "Optical and Electrical Properties of Undoped ZnO Films Grown by Spray Pyrolysis of Zinc Nitrate Solution." *J. Appl. Phys.* 83(4) : 2104-2111.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

Pattern: 49-337		Radiation = 1.54060		Quality: Indexed	
$\text{In}_2\text{W}_3\text{O}_{12}$		2 θ	<i>h</i>	<i>k</i>	<i>l</i>
Indium Tungsten Oxide		13.240	20	0	2
		14.576	40	1	1
		18.404	2	0	2
		18.661	30	1	2
		*18.661	30	2	0
		19.595	50	0	2
		20.815	70	2	1
		21.697	40	1	2
		21.880	20	2	1
		21.971	100	0	1
		22.062	100	1	0
		22.740	20	0	2
		23.037	10	2	0
		23.891	40	1	3
		24.619	70	1	2
		26.357	70	2	2
		26.662	30	0	4
		27.158	20	2	2
		28.937	40	2	3
		29.549	30	2	2
		29.864	5	1	4
		30.109	30	1	3
		32.252	20	1	3
		32.503	00	0	2
		32.668	00	3	1
		32.632	10	2	0
		33.697	10	2	3
		33.819	10	3	2
Lattice: Orthorhombic Mol. weight = 973.18 S.G.: (0) Volume [Cof] = 1220.20 a = 9.46700 D _r = 1.324 b = 9.63500 c = 13.34900 a/b = 0.98484 c/b = 1.38547		SAMPLE PREPARATION: A stoichiometric mixture of In ₂ O ₃ and W ₂ O ₃ was annealed at 1000 C for 50 hours in air. UNIT CELL DATA: Reference reports: a=9.501, b=9.664, c=13.36. GENERAL COMMENTS: Cell parameters generated by least squares refinement.			
*Vestn. Masic Univ. Ser. Mat., Metall., Astron., Fiz., Khim., page 114. (1967) primary references: Tunov, V., Kovba, L.					
Radiation: CuK α Filter: Monochromator crystal Lambda: 1.54180 d-sp: Guinier SS/POM: FZ7=19(0.0250,57) External standard: Go					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ

Pattern : 83-950		Radiation = 1.540600					Quality : Calculated				
W O ₃		2th	l	h	k	i	2th	l	h	k	i
Tungsten Oxide		16 454	<1	0	1	1	63 282	5	3	1	4
		16 854	<1	1	0	1	63 424	3	-3	-4	1
		*16 854	<1	1	1	0	64 215	<1	1	5	1
		20 375	<1	-1	1	1	*64 215	<1	4	3	1
		20 591	<1	0	1	1	64 338	<1	0	0	1
		23 117	98	0	0	2	64 756	<1	-5	0	1
		23 583	96	0	2	0	64 846	<1	3	3	3
		24 367	100	2	0	0	65 172	<1	5	0	1
		25 996	1	0	1	2	65 505	<1	0	2	5
		26 593	19	1	2	0	65 979	1	-2	3	4
		28 614	17	-1	1	2	66 249	1	-3	2	4
		28 927	17	1	1	2	66 414	<1	-2	4	3
		*28 927	17	-1	2	1	*66 272	2	-2	3	4
		29 698	<1	2	1	1	66 538	2	-1	2	5
		33 261	36	0	2	2	67 099	3	-3	4	2
		33 565	24	-2	0	2	*67 099	3	-1	2	5
		34 167	57	2	0	2	67 235	2	3	2	4
		*34 167	57	2	2	0	67 589	3	3	4	2
		35 390	6	-1	2	2	*67 589	3	-4	3	2
		35 650	7	1	2	2	68 031	1	1	5	2
		*35 650	7	-2	1	2	68 272	<1	4	3	2
		36 036	<1	-2	2	1	*68 272	<1	-2	5	1
		36 185	1	2	1	2	68 437	<1	2	5	2
		36 292	<1	2	1	1	68 915	1	5	2	1
		36 962	<1	-1	0	3	69 594	1	-5	2	2
		37 018	<1	0	1	3	69 835	2	0	4	4
		37 337	<1	1	0	3	70 397	1	5	2	1
		37 627	<1	0	3	1	70 548	2	-4	0	4
		38 604	<1	-3	0	1	70 548	2	-2	2	5
		38 908	<1	3	1	0	71 029	1	-1	4	4
		*38 908	<1	-1	1	3	71 348	1	1	2	4
		38 965	<1	3	0	1	71 348	1	2	2	5
		39 267	<1	1	1	3	71 822	2	-2	4	0
		39 729	1	3	1	1	71 822	2	-2	5	2
		40 483	<1	-3	1	1	71 965	4	0	3	5
		40 831	<1	3	1	1	71 965	4	4	4	0
		41 432	13	-2	2	2	72 182	3	2	5	2
		41 886	14	2	2	2	72 641	2	-3	3	4
		42 624	<1	0	2	3	*72 641	2	0	5	3
		42 954	1	0	3	2	73 077	<1	4	1	4
		43 697	<1	2	3	0	*73 077	<1	-3	4	3
		44 270	4	3	2	0	73 380	1	-3	1	5
		*44 270	4	-1	2	3	73 380	1	-5	2	2
		44 698	4	-1	2	3	73 587	2	-4	3	3
		*44 698	4	-1	3	2	73 587	2	3	3	4
		44 912	4	1	3	2	73 806	1	3	4	3
		45 364	-5	-3	1	2	74 165	1	5	2	2
		*45 364	5	2	3	1	*74 165	1	-5	0	3
		45 737	<1	3	2	1	74 876	1	-2	4	4
		46 017	4	3	1	2	75 141	1	0	1	6
		*46 017	4	3	2	1	75 552	2	2	4	4
		47 250	9	0	0	4	*75 552	2	2	4	4
		48 247	9	0	4	0	76 224	4	-5	3	1
		48 658	1	0	1	4	*76 224	4	-1	1	6
		49 933	25	4	0	0	76 434	4	-4	4	2
		*49 933	25	1	4	0	76 690	5	1	1	6
		50 230	5	2	3	2	76 794	3	4	2	4
		*50 230	5	-3	2	2	76 794	3	-2	3	5
		50 336	13	-1	1	4	76 936	6	1	6	0
		50 728	11	1	1	4	77 054	4	-3	2	5
		50 816	7	3	2	2	77 611	<1	2	3	5
		*50 816	7	0	3	3	78 153	<1	1	6	1
		51 374	<1	-3	0	3	78 153	<1	2	5	3
		*51 374	<1	-1	4	1	78 392	<1	-3	5	2
		51 471	<1	1	4	1	78 562	2	6	0	0
		*51 471	<1	4	1	0	78 562	2	0	2	6
		52 156	<1	3	0	3	78 853	1	0	2	6
		52 330	<1	3	3	0	*78 853	1	3	5	2
		*52 330	<1	-1	3	3	79 109	<1	-5	2	3
		52 615	<1	1	3	3	79 536	1	-2	0	6
		52 745	<1	-4	1	1	79 780	<1	6	1	0
		52 947	<1	3	1	3	79 907	<1	-1	2	6
		53 467	11	0	2	4	*79 907	<1	-2	1	6
		*53 467	11	-2	0	4	80 302	1	5	3	2
		53 560	6	-3	3	1	*80 302	1	1	2	6
		54 153	8	0	4	2	80 557	<1	0	4	5
		54 235	6	2	0	4	80 837	1	2	1	6
		54 772	9	2	4	0	80 837	1	2	6	0
		54 962	5	-2	1	4	80 979	1	0	5	4
		55 343	8	-4	0	2	81 245	2	6	1	1
		55 621	7	-1	4	2	*81 245	2	-3	4	4
		55 804	9	0	4	2	81 543	3	-1	6	2
		55 933	16	4	2	0	81 696	3	-1	4	5
		56 074	13	4	0	2	*81 696	3	1	6	2
		*56 074	13	-2	4	1	81 925	2	-2	6	1
		56 259	4	2	4	1	82 160	1	1	5	4
		56 785	<1	-4	1	2	*82 160	1	3	4	4
		56 888	<1	-2	3	3	82 421	1	1	5	4
		57 130	<1	-4	2	1	82 768	1	-6	0	2
		57 835	2	-3	3	2	82 874	1	4	3	4
		58 170	1	3	3	2	83 049	1	4	5	0
		59 238	3	-2	2	4	*83 049	1	4	4	3
		59 998	4	2	2	4	83 127	1	-3	3	5
		60 055	5	-2	4	2					
		60 402	4	2	4	2					
		60 601	3	0	3	4					
		60 979	6	0	4	3					
		*60 979	6	-4	2	2					
		61 667	7	4	2	2					
		61 895	6	-1	3	4					
		62 264	12	3	4	0					
		*62 264	12	-3	1	4					
		63 282	5	-4	1	3					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern : 15-770		Radiation = 1540600					Quality : Indexed	
Cd Te		2θ	I	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		D_x = 5.856						
Z = 4		f/vol = 6.50						
<p>COLOR : Black SAMPLE SOURCE OR LOCALITY : Sample was obtained from Semi-Elements Inc., Saxtonburg, 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: 1306-25-3 *Natl. Bur. Stand. (U.S.) Monogr. 25, volume 3, page 21 (1964) primary reference:</p>								
<p>Radiation : CuKα1 Filter : Beta Lambda : 1.54050 d-sp : Not given SS/FOM : F15= 31(0.0230,21) Internal standard : W</p>								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

Rise

General model:

$$f(x) = a*(1-\exp(-x/361.0966))+b*(1-\exp(-x/381.6794))+c*(1-\exp(-x/571.4286))+d*(1-\exp(-x/900.9009))^g$$

Coefficients

(with 95% confidence bounds):

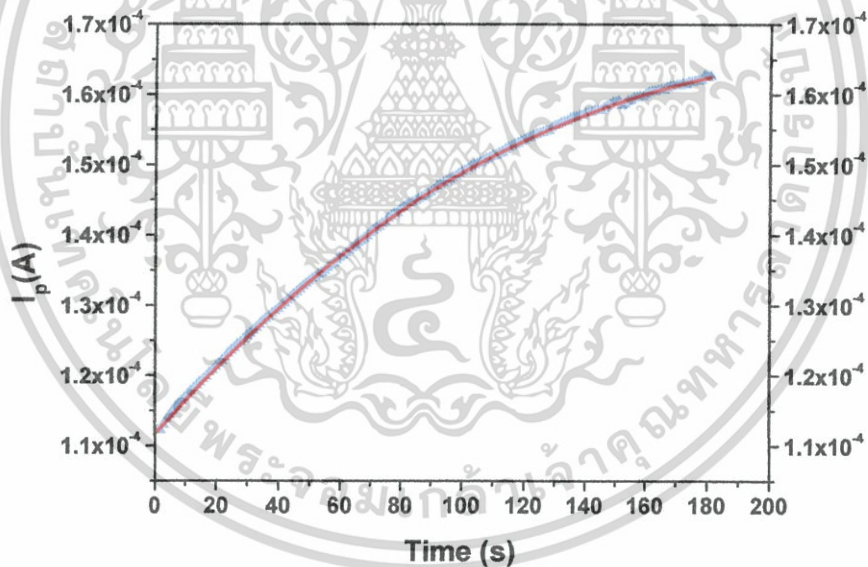
$$a = 0.01627 \quad (-0.9602, 0.9927)$$

$$b = -0.02056 \quad (-1.3, 1.259)$$

$$c = 0.00488 \quad (-0.4413, 0.4511)$$

$$d = -0.0004781 \quad (-0.1434, 0.1424)$$

$$g = 0.276 \quad (-165.9, 166.4)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Decay

General model:

$$f(x) = (a \cdot \exp(-x/359.712)) + (b \cdot \exp(-x/515.464)) + (c \cdot \exp(-x/1119.24))^g$$

Coefficients

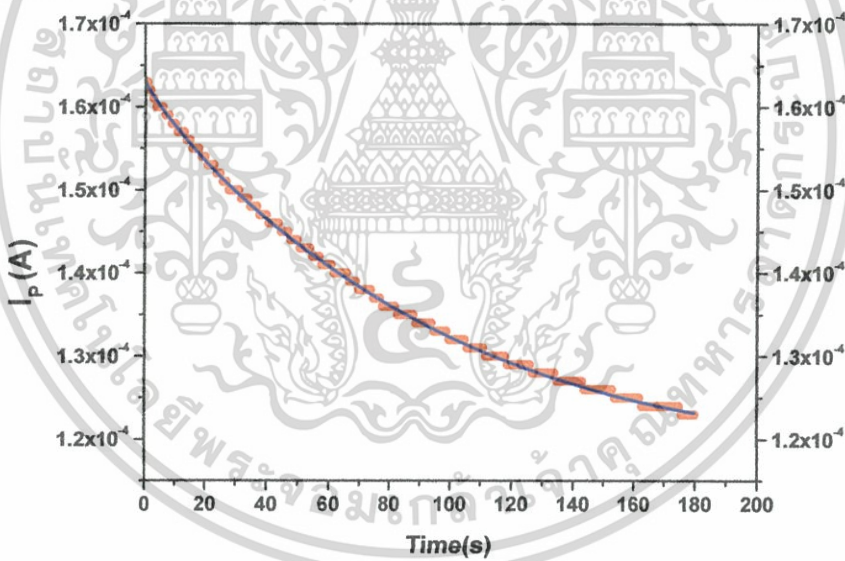
(with 95% confidence bounds):

$$a = 0.00537 \quad (-0.06152, 0.07226)$$

$$b = -0.01307 \quad (-0.414, 0.3878)$$

$$c = 0.007852 \quad (-0.3262, 0.3419)$$

$$g = 1.56 \quad (-16.46, 19.58)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นาย เตชวัต ฌรงค์รัตน์
วัน เดือน ปีเกิด 2 มิถุนายน 2535
ที่อยู่ปัจจุบัน 24 ถนน ประชาวิถี ต.โคกสำโรง อ.โคกสำโรง จ.ลพบุรี 15120
การศึกษา ปี พ.ศ. 2554 เข้ารับการศึกษาระดับอุดมศึกษา ปริญญาตรี สาขาฟิสิกส์
ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง

ชื่อ-นามสกุล นางสาว สมฤทัย ชาดิทอง
วัน เดือน ปีเกิด 24 ธันวาคม 2535
ที่อยู่ปัจจุบัน 5 ม.4 ต.ลาดบัวขาว อ.บ้านโป่ง จ.ราชบุรี 70110
การศึกษา ปี พ.ศ. 2554 เข้ารับการศึกษาระดับอุดมศึกษา ปริญญาตรี สาขาฟิสิกส์
ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้