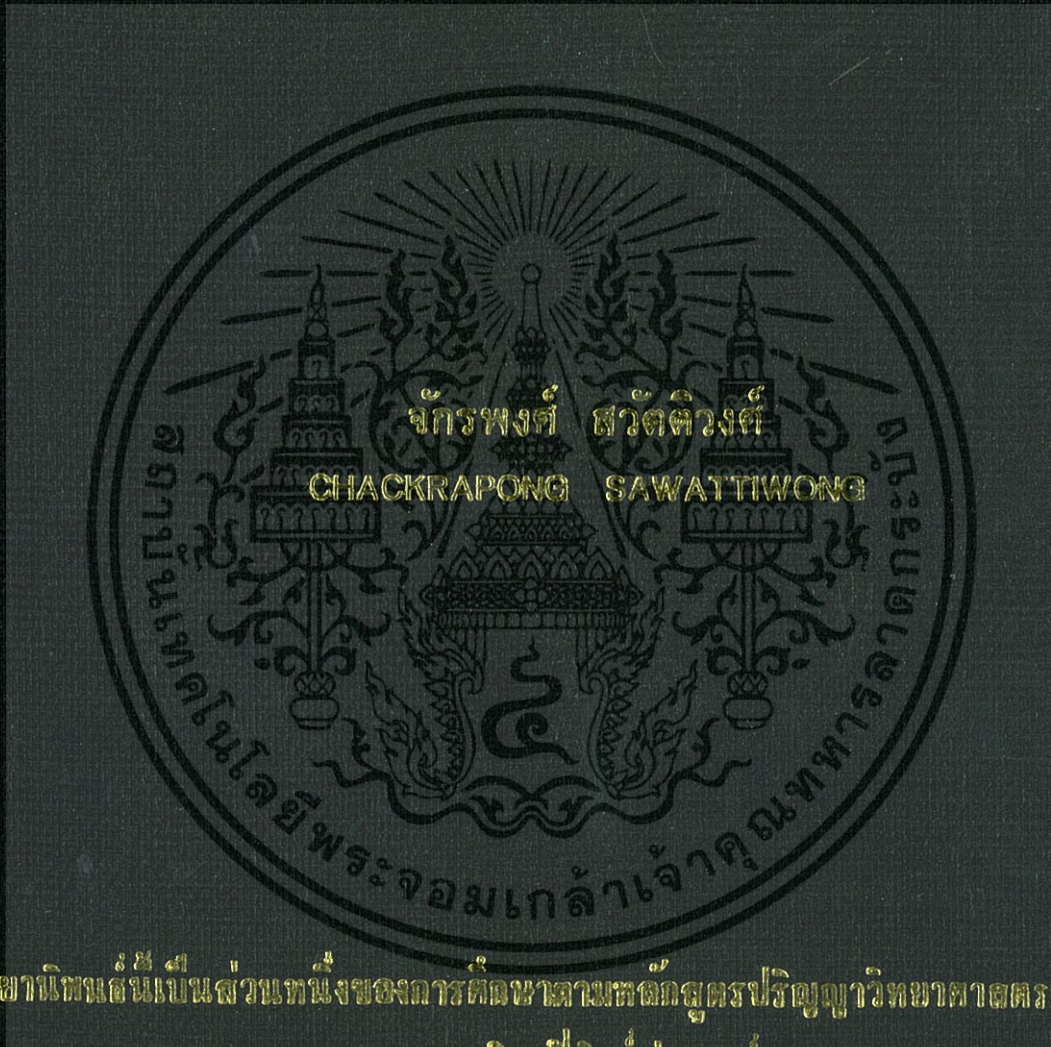


การประดิษฐ์และการศึกษาสมบัติของรอยต่อวิวิธพันธ์ระหว่างซิงค์เทลลูไรด์กับ
ทังสเตนออกไซด์ที่เจือด้วยอะตอมของ อินเดียม

FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF ZnTe/ WO₃:In
HETEROJUNCTION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2556

KMITL-2013-SC-M-013-049

การประดิษฐ์และการศึกษาสมบัติของรอยต่อวิวิธพันธุ์ระหว่างซิงค์เทลลูไรด์กับ
ทั้งสแตนออกไซด์ที่เจือด้วยอะตอมของ อินเดียม

FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF ZnTe/ WO₃:In
HETEROJUNCTION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

2556

KMITL-2013-SC-M-013-049

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF ZnTe/ WO₃:In
HETEROJUNCTION**



CHACKRAPONG SAWATTIWONG

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN APPLIED PHYSICS**

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2013

KMITL-2013-SC-M-013-049

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2013

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การประดิษฐ์และการศึกษาสมบัติของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ระหว่างซิงค์เทลลูไรด์
กับทังสเตนออกไซด์ที่เจือด้วยอะตอมของอินเดียม
Fabrication and Characterization of ZnTe/WO₃:In Heterojunction

นักศึกษา

นายจักรพงศ์ สวัสดิวงศ์

รหัสประจำตัว

53650601

ปริญญา

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

ฟิสิกส์ประยุกต์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

รศ.ดร.ฐิตินัย แก้วแดง

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.วิชิต	ศิริโชติ	
รศ.งามนิตย์	วงษ์เจริญ	
ผศ.ดร.ชัยสิงห์	ภูริรักษ์เกียรติ	
รศ.ดร.ฐิตินัย	แก้วแดง	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ 27 พฤศจิกายน พ.ศ. 2556 เวลา 13.30 – 16.30 น.
สถานที่สอบ ณ ห้อง 307 ชั้น 3 อาคารจุฬารามณเฑียรวิทยาลัย 1

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.ตฤณ อ้นะบริพัฒน์)

คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

วันที่ 17 เดือน 5 ปี พ.ศ. 56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประดิษฐ์และการศึกษาสมบัติของรอยต่อวิวิธพันธุ์ระหว่าง ZnTe กับ WO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของ In
นักศึกษา	จักรพงษ์ สวัสดิวงศ์
รหัสประจำตัว	53650601
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
พ.ศ.	2556
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. จูตินัย แก้วแดง

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ได้เคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำของ ZnTe บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ด้วยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ สำหรับเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO_3 ที่เจือด้วย In_2O_3 นี้เตรียมได้โดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็งจากการนำผงผลึกของสารประกอบ WO_3 และ In_2O_3 ที่มีความบริสุทธิ์สูง โดยสัดส่วนของสารตั้งต้นเป็นดังนี้คือ $(1-x)WO_3 + xIn_2O_3$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ทำการผสมและบดคลุกเคล้าให้เข้ากันดีแล้วจึงอัดขึ้นรูปให้เป็นแผ่นกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร และหนา 1 มิลลิเมตร จากนั้นจึงทำการเผาพูนที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมงในบรรยากาศปกติ โครงสร้างผลึกและลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe และเม็ดเซรามิกของ WO_3 ที่เจือด้วย In_2O_3 ได้รับการตรวจสอบโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดตามลำดับ ไดโอดของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ ZnTe/ WO_3 :In(4wt.%) ประดิษฐ์ได้โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิก WO_3 :In (4 wt.%) โดยจะควบคุมอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับให้มีค่าคงที่เท่ากับ 100 องศาเซลเซียสในขณะที่ทำการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe จากการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 20-300 เคลวิน พบว่าความสูงของกำแพงศักย์ที่แรงดันไบแอสเป็นศูนย์มีค่าลดลงแต่แฟกเตอร์อุดมคติมีค่าเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของพาหะอิสระของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe สามารถคำนวณได้จากการวัดความสัมพันธ์ระหว่างความจุ-แรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องโดยมีค่าประมาณ 6.87×10^{11} ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

คำสำคัญ: ZnTe, WO_3 :In, ไดโอด ZnTe/ WO_3 :In , ลักษณะเฉพาะของกระแส – แรงดันไฟฟ้า

Thesis Title	Fabrication and Characterization of ZnTe/ WO ₃ :In Heterojunction
Student	Chackrapong Sawattiwong
Student ID	53650601
Degree	Master of Science
Program	Applied Physics
Year	2013
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Thitinai Gawdeang

ABSTRACT

In this thesis, ZnTe thin films have been deposited on slide glass substrate by thermal evaporation method in vacuum. WO₃ ceramic doped with In₂O₃ in composition of (1-x) WO₃+xIn₂O₃ (0<x<0.05) 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 48 hours in air. Crystal structure and morphology of the ZnTe thin films and In₂O₃ doped WO₃ ceramic were investigated by XRD and SEM, respectively. ZnTe/WO₃:In (4wt.%) heterojunction diode was prepared by thermal evaporation ZnTe thin film on WO₃:In (4 wt.%) 1 mm thick ceramic pellet substrate. The substrate temperature was kept at 100°C during the ZnTe thin films deposition process. From the data of I-V measurements at low temperature range of 20-300 K, they reveals a decrease in the zero-bias barrier height, but an increase in the ideality factor with decrease in temperature. The carrier concentration of ZnTe thin films about 6.87x10¹¹ cm⁻³ was deduced from the C-V measurements at room temperature.

Keywords: ZnTe, WO₃:In, ZnTe/WO₃:In diode, I-V characteristics, heterojunction

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาของ รองศาสตราจารย์ ดร.ฐิตินัย แก้วแดง รองศาสตราจารย์ งามนิศย์ วงษ์เจริญ รองศาสตราจารย์ ดร.ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ และ ที่อำนวยความสะดวกในการใช้ระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในสุญญากาศ อุปกรณ์ในการวัดลักษณะเฉพาะต่าง ๆ ตลอดจนอุปการะทุนสนับสนุน และให้ความรู้และคำปรึกษาทางวิชาการที่ติดต่อมา รวมทั้งปลูกฝังคุณธรรมที่สั่งงานให้กับลูกศิษย์ทุกคน

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. วิสุทธิ ฐิตรุ่งเรือง หัวหน้าศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์น้ำปลอดประจุมานำใช้ในการวิจัย

ขอขอบคุณ คุณวรรณภา จำเนียรพีช และคุณทศพร ชันดยาภรณ์ นักศึกษาปริญญาโท ห้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุโฟโตนิกส์ สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง คุณกนกฤษณ์ ไพรวัดย์ และคุณกุลวรางค์ นุตะมาน ศิษย์เก่าปริญญาตรี ห้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุโฟโตนิกส์ สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ช่วยติดตั้งซอฟต์แวร์ในการวัดลักษณะเฉพาะกระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า และคำแนะนำในการใช้เครื่อง E4980A Agilent Precision LCR Meter สำหรับวัดค่าความนำไฟฟ้า และค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า

ขอขอบคุณครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดวิชาความรู้และประสบการณ์ให้แก่ข้าพเจ้า สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ นายเจริญ สวัสดิ์วงศ์ และนางพรรณนภา สวัสดิ์วงศ์ ที่ให้กำลังใจ แรงบันดาลใจ และสนับสนุนเรื่องการเรียนเสมอมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	XI
สารบัญรูป	XII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานโครงการวิจัย	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	7
2.1 วัสดุของแข็งสารกึ่งตัวนำ	7
2.2 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ	8
2.3 โครงสร้างผลึกของสารประกอบที่เกิดจากอะตอมของธาตุกลุ่ม II และ VI	10
2.3.1 โครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์	10
2.3.2 โครงสร้างแบบเวอริทไซต์	11
2.3.3 โครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำ	12
2.3.4 โครงสร้างแบบคิวบิกซิงค์ซัลไฟด์	12
2.3.5 โครงสร้างผลึกของ WO_3	13
2.3.6 โครงสร้างผลึกของอินเดียมทังสเตนบรอนซ์	16

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.3.7 โครงสร้างผลึกของสารประกอบ $\text{In}_6\text{WO}_{12}$	17
2.3.8 เฟสไดอะแกรมของระบบ $\text{In}_6\text{WO}_{12}$	18
2.4 ผลึกจริง	19
2.4.1 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบศูนย์มิติหรือแบบจุด	19
2.4.2 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบหนึ่งมิติหรือแบบเส้น	21
2.4.3 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบสองมิติหรือแบบระนาบ	22
2.4.3.1 เกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน	22
2.4.3.2 โครงผลึกแฝดและขอบเขตรอยต่อของโครงผลึกแฝดหรือระนาบของโครงผลึกแฝด	23
2.4.3.3 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการจัดเรียงระนาบของอะตอมผิดพลาด	24
2.5 การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	24
2.5.1 อัตราการระเหยสาร	25
2.5.2 แหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้ในการระเหยสารด้วยไฟฟ้า	25
2.5.2.1 แหล่งกำเนิดชนิดทั้งสแตน	25
2.5.2.2 แหล่งกำเนิดชนิดแผ่นโลหะทรงรูป	26
2.5.3 ความดันไอของธาตุ	27
2.5.4 การระเหยสารประกอบ	28
2.5.5 อิทธิพลของ โครงสร้างเชิงเรขาคณิตต่อระบบการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการระเหยสาร	29
2.6 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	31
2.7 รอยต่อ พี-เอ็น	34
2.7.1 บริเวณพร่องพาหะ	34

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.7.1.1 การเกิดรอยต่อฉับพลัน	34
2.7.1.2 ความจุไฟฟ้าบริเวณพร่องพาหะ	40
2.7.2 ลักษณะเฉพาะของกระแส-แรงดัน ไฟฟ้าของรอยต่อพี-เอ็น	42
2.7.3 กระบวนการเกิด – การรวมตัวของพาหะอิสระ	49
2.7.4 ความจุแพร่ซึม	53
2.8 อิทธิพลของการชดดู โมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วทำให้เกิดการรวมตัวกันของพาหะที่เนื้อสาร	56
2.9 สมบัติตัวเก็บประจุของรอยต่อ MIS ในอุดมคติ	58
2.10 ความเป็นตัวเก็บประจุของรอยต่อ MOS ในซิลิคอน	60
2.11 กัปดักประจุที่ผิวเชื่อมเชื่อมต่อ	61
2.12 การศึกษาสถานะผิวด้วยวิธีการวัดค่าความจุไฟฟ้าที่ความถี่สูงและความถี่ต่ำ	66
2.12.1 การศึกษาสถานะผิวด้วยวิธีคอนดักแตนซ์สเปกโทรสโคปี	67
2.13 อิมพีแดนซ์ของวงจร RC ต่อแบบอนุกรมและต่อแบบขนาน	69
บทที่ 3 การดำเนินการวิจัย	77
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัยที่ใช้ในการเตรียมไดโอดของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/p-WO ₃ :In โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe ลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นกระจกสไลด์และที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO ₃ :In โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	77
3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO ₃ :In จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง	77
3.1.2 การคำนวณปริมาณสารตั้งต้นเพื่อเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In _{0.04} WO ₃ จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	78
3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์	79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

- 3.1.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมไดโอดของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/n-WO₂:In โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO₃:In โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียสซึ่งสารกึ่งตัวนำ WO₃ ที่เป็นเม็ดเซรามิกนั้นจะถูกเตรียมขึ้นมาจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง 79
- 3.2 ขั้นตอนการเตรียมสารกึ่งตัวนำ WO₃ ที่เป็นเม็ดเซรามิกจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง และการเตรียมไดโอดของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe /n-WO₃:In โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe ลงบนฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO₃:In โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งสารกึ่งตัวนำ WO₃:In ที่เป็นเม็ดเซรามิกนั้นจะถูกเตรียมขึ้นมาจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง 80
- 3.2.1 ขั้นตอนในการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO₃:In จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง 80
- 3.2.2 การเตรียมไดโอดของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/n-WO₃:In โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe ลงบนฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO₃:In โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งสารกึ่งตัวนำ ZnTe ที่เป็นเม็ดเซรามิกนั้นจะถูกเตรียมขึ้นมาจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง 81
- 3.2.2.1 การเตรียมแผ่นกระจกสไลด์เพื่อใช้เป็นแผ่นฐานรองรับ 81

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.2.2.2 การเตรียมไดโอดของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/n-WO ₃ :In ตามลำดับ โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe ลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO ₃ :In โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับ ประมาณ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งสารกึ่งตัวนำ WO ₃ :In ที่เป็นเม็ดเซรามิกนั้นจะถูกเตรียมขึ้นมาจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติกิจวิธานะของแข็ง	82
3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ ของไดโอดของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe /n-WO ₃ :In ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส	85
3.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค	85
3.3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค	86
3.3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางแสง	86
3.3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า	87
3.3.4.1 การศึกษาสมบัติเฉพาะของไดโอดด้วยการวัดกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า (I-V curve) ค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า (C-V curve) แล้วต่อจากนั้นจึงนำไปศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วง 20-300 เคลวิน และอุณหภูมิสูงในช่วง 25-90 องศาเซลเซียส	87

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล	91
4.1 ลักษณะของฟิล์มบางที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่น กระจกสไลด์ของสารกึ่งตัวนำ ZnTe และสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ ของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/n-WO ₃ :In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมี ด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	91
4.2 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe ซึ่งเตรียมโดย วิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อน ในระบบสุญญากาศ	92
4.2.1 ผลการศึกษาลักษณะ โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ของเม็ดยาของสารกึ่งตัวนำ WO ₃ :In _x (0 ≤ x ≤ 0.05) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการ เกิดเป็นสารละลายของแข็งและฟิล์มบางของ ZnTe ที่เตรียมโดยวิธีการระเหย สารด้วยความร้อน	92
4.2.2 ผลการทดลองที่ได้จากการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่งกราด ของเม็ดยาของสารกึ่งตัวนำ In _x WO ₃ (0 ≤ x ≤ 0.10) ที่เตรียมจากสารตั้ง ต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	93
4.2.3 ผลการศึกษาค่าการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ ZnTe ที่เคลือบอยู่บน ฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วย ความร้อนในระบบสุญญากาศ และ การดูดกลืนแสงของเม็ดยาของสารกึ่ง ตัวนำ WO ₃ :In	94
4.3 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของเม็ดยาของสารกึ่งตัวนำ WO ₃ :In _x (0 ≤ x ≤ 0.05) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการ เกิดเป็นสารละลายของแข็ง	95

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

- 4.3.1 ผลการศึกษาลักษณะ โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $WO_3 :In_x$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งและฟิล์มบางของ ZnTe ที่เตรียม โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อน 95
- 4.3.2 ผลการทดลองที่ได้จากการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่งกราดของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}In_xO_3$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง 99
- 4.3.3 ผลการศึกษาสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของผงผลึกละเอียดของสารกึ่งตัวนำ $WO_3 :In$ (4wt. %) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง 100
- 4.3.4 ค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนของเม็ดเซรามิกที่ความถี่ในช่วง 20 เฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดอุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}In_xO_3$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง 101
- 4.4 ผลการศึกษาสมบัติไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/n- $WO_3 :In$ ซึ่งเตรียม โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ 102
- 4.4.1 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัด ที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิห้องของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/n- $WO_3 :In$ ซึ่งเตรียม โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ 102
- 4.4.2 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/n- $WO_3 :In$ ซึ่งเตรียม โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ 106

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	113
5.1 พิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่น กระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบ สุญญากาศ	113
5.2 เม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}In_xO_3$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่ เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	114
5.3 ผลจากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแส-แรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิต่ำในช่วง 20-300 เคลวินของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของ สารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/n-WO ₃ :In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อน ในระบบสุญญากาศ	115
ประโยชน์ที่ได้รับ	117
ปัญหาและข้อเสนอแนะ	118
เอกสารอ้างอิง	119
ภาคผนวก	124
ประวัติผู้เขียน	131

สารบัญตาราง

ตาราง ที่	หน้า	
2.1	แสดงระบบผลึกทั้งเจ็ดแบบในระบบสามมิติ	9
2.2	แสดงปฏิกิริยาการระเหยสารประกอบ	29
4.1	แสดงค่าคงที่โครงสร้างของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $WO_3:In$ ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง และเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $WO_3:In$ ที่เป็นแผ่นรองรับของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ $p-ZnTe/n-WO_3:In$ โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $ZnTe$ ลงบนเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $WO_3:In$ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	97
4.2	แสดงพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆที่ได้จากอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปีในช่วงความถี่ 20 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกะเฮิร์ตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิก In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	101
4.3	แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ค่าความสูงของกำแพงศักย์ และค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน และวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ $p-ZnTe/n-WO_3:In$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	109

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	แสดงสภาพนำไฟฟ้าและสภาพต้านทานไฟฟ้าของฉนวน สารกึ่งตัวนำ และตัวนำ	7
2.2	แสดงหน่วยเซลล์ในระบบสามมิติ	8
2.3	แสดงพันธะสี่หน้าหรือพันธะเตตระฮีดรัล	10
2.4	แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์	11
2.5	แสดงโครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซต์	11
2.6	แสดงโครงสร้างผลึกแบบเพชร	13
2.7	แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ของของสารกึ่งตัวนำ ZnTe	13
2.8	แสดงโครงสร้างผลึกของ WO_3 ในกรณีอุดมคติ	14
2.9	แสดงการเชื่อมต่อกันของออกตะฮีดรัลทำให้เกิดอุมง์รูปสามเหลี่ยมและอุมง์รูปหกเหลี่ยมร่วมกัน	14
2.10	แสดงเฟสของ WO_3 ที่อุณหภูมิต่ำในระดับ 5 องศาเซลวิน	15
2.11	แสดงเฟสไดอะแกรมของระบบ W-O ในอาณาบริเวณที่เกิดเป็นสารประกอบ WO_3	15
2.12	แสดงโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนัลอินเดียมทั้งสแตนบรอนซ์	16
2.13	แสดงโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลอินเดียมทั้งสแตนบรอนซ์	17
2.14	แสดงโครงสร้างผลึกของ In_2WO_6 ในระบบบรอมไบฮีดรัล	18
2.15	แสดงเฟสไดอะแกรมของระบบ In_2O_3 - WO_3 ในช่วงอุณหภูมิ 700-1400 องศาเซลเซียส จุดวงกลมที่บแสดงเฟสเดี่ยว ส่วนจุดวงกลมโปร่งแสดงเฟสผสม	19
2.16	แสดงความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบศูนย์มิติหรือแบบจุด ก. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบตำแหน่งว่าง ข. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบตัวเองแทรก ค. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบอะตอมสารเจือแทรก ง. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบอะตอมสารเจือแทนที่	20
2.17	แสดงการเกิดความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบชอตต์กีและความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบเฟรเนล	21

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.18 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการเคลื่อนที่ของโครงผลึกแบบขอบ	22
2.19 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการเคลื่อนที่ของโครงผลึกแบบสกรู	22
2.20 แสดงความไม่สมบูรณ์ของผลึกชนิดเกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน	23
2.21 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของโครงผลึกแฝดและระนาบของ โครงผลึกแฝด	23
2.22 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการจัดเรียงระนาบของอะตอมผิดลำดับ	24
2.23 แหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้ระเหยสารด้วยไฟฟ้าชนิดทั้งสแตน	26
2.24 แหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้ระเหยสารด้วยไฟฟ้าแบบต่างๆ	26
2.25 แสดงกราฟค่าความดันไอของธาตุ โดยจุดต่างๆจะสัมพันธ์กับจุดหลอมเหลว	27
2.26 แสดงกราฟค่าความดันไอของธาตุในสารกึ่งตัวนำ โดยจุดต่าง ๆ จะสัมพันธ์กับจุดหลอมเหลว	28
2.27 แสดงรูปแบบการระเหยของสารตั้งต้น	29
2.28 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากระนาบผลึก	32
2.29 แสดงวิธีการหา $\beta_{2\theta}$ เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์	34
2.30 แสดงรอยต่อพี-เอ็นฉบับพลันในสถานะสมดุลความร้อน	35
ก. การกระจายตัวของประจุบริเวณพร่องพาหะ (เส้นประแสดงถึงการประมาณค่าบริเวณพร่องพาหะ)	
ข. การกระจายตัวของสนามไฟฟ้า	
ค. การกระจายของศักย์ไฟฟ้าโดยที่ ψ_{bi} เป็นศักย์ตกคร่อมรอยต่อ	
ง. โครงสร้างแถบพลังงาน	
2.31 แสดงความกว้างของบริเวณพร่องพาหะ และความจุของบริเวณพร่องพาหะต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่กับฟังก์ชันศักย์ไฟฟ้าสุทธิ ($\psi_{bi} - V - 2kT/q$) สำหรับด้านใดด้านหนึ่งของรอยต่อฉบับพลันในสารกึ่งตัวนำชนิดอนเส้นประแสดงเงื่อนไขการเบรกดาวน	40
2.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C^2-V$ ซึ่งจะช่วยให้ได้ค่าศักย์ตกคร่อมรอยต่อและความหนาแน่นของสารเจือ	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศีกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.33	แผนภาพแถบพลังงาน กับระดับพลังงานควอไซ-เฟอร์มิสำหรับอิเล็กตรอนและโฮลและการกระจายตัวของพาหะภายใต้เงื่อนไข ก. ไบแอตตรง ข. ไบแอตกลับทาง	45
2.34	แสดงการกระจายตัวของพาหะ และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าสำหรับ ก. เจ็อนไซไบแอตตรง ข. เจ็อนไซไบแอตกลับทาง	47
2.35	แสดงลักษณะเฉพาะของกระแส-แรงดันไฟฟ้าในอุดมคติ ก. กราฟเชิงเส้น ข. กราฟกึ่งลอการิทึม	48
2.36	ลักษณะกระแส – แรงดันไฟฟ้าสำหรับไดโอดชิลิคอน ก. กระบวนการเกิด-การรวมตัวของกระแสในบริเวณพร่องพาหะ ข. บริเวณกระแสแพร่ซึม ค. บริเวณฉีดกระแสระดับสูง ง. ผลของความต้านทานอนุกรม จ. การแพร่ไหลย้อนกลับ เนื่องจากการเกิด – การรวมตัวของพาหะและผลของสถานะต่อผิวหน้าสารกึ่งตัวนำ	51
2.37	แสดงความสัมพันธ์ของความจุแพร่ซึม และความนำแพร่ซึมที่สัมพันธ์กับ $\omega\tau$ พร้อมแสดงวงจรมูลของรอยต่อพี-เอ็นภายใต้ไบแอตตรง	55
2.38	แสดงแถบพลังงานของตัวเก็บประจุ MIS ในอุดมคติที่ภาวะสมดุล ($V=0$) ก. กรณีที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิด เอ็น ข. กรณีที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิด พี	59
2.39	แสดงแถบพลังงานของตัวเก็บประจุ เอ็ม-ไอ-เอส ในอุดมคติในขณะที่มีการไบแอตเพื่อให้เกิด ก. ช่วงขุมนุ้มพาหะ ข. ช่วงพร่องพาหะ	60

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
2.40	แสดงพาหะที่เกิดการออกซิไดซ์เนื่องจากความร้อนในซิลิคอน	61
2.41	แสดงกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อในแบบสถานะผู้ให้และสถานะผู้รับ	62
2.42	ก.-ข. แสดงวงจรสมมูลที่มี C_{it} และ R_{it} ของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อร่วมอยู่ด้วย	63
	ค. แสดงวงจรสมมูลในช่วงความถี่ต่ำ	
	ง. แสดงวงจรสมมูลในช่วงความถี่สูง	
2.43	ก. แสดงอิทธิพลของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อที่มีต่อกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุกับแรงดันของรอยต่อ MIS	65
	ข. แสดงการยืดออกของแรงดันที่เพิ่มขึ้นของ Ψ_s	
2.44	แสดงกราฟความสัมพันธ์ที่ได้จากการศึกษาค่าความจุและค่าความนำทางไฟฟ้าเทียบกับแรงดันของรอยต่อ MIS	69
2.45	แสดงกราฟของโนควิสต์ที่ระบุถึงค่าอิมพีแดนซ์ของวงจร RC ต่ออนุกรมอย่างง่าย	70
2.46	แสดงวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่าย	70
2.47	แสดงกราฟของโนควิสต์ของวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่ายที่จุดสูงสุดของรูปครึ่งวงกลมเกิดขึ้น เมื่อ $\omega = 1/RC$	71
2.48	แสดงวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่าย (ก, ง) อิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี (ข, จ) และแอดมิตแตนซ์สเปกโทรสโกปี (ค, ฉ)	72
2.49	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์ของโคออร์ดิเนตตั้งฉากกับโคออร์ดิเนตเชิงขั้วมุมเฟสระหว่าง ทิศทางของ Z' และ Z'' จะขึ้นกับความถี่ที่ใช้วัดในกรณีที่เป็นตัวเก็บประจุแท้ (pure capacitor) มุมเฟส $\phi = -90$ องศา และมุมเฟสของตัวต้านทานจะมีค่าเป็นศูนย์	75
2.50	แสดงกราฟโนควิสต์ (ก) และกราฟของ โบด (ข) ของอิมพีแดนซ์ของวงจรที่มีตัวเก็บประจุของบริเวณโพลาริเซชันที่อยู่ชิดกับขั้วอิเล็กโทรด	76
3.1	แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO ₃ จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการสถานะของแข็ง	78
3.2	แสดงกราฟโปรไฟล์เตาที่ใช้ในการตั้งอุณหภูมิเตาเพื่อทำการเผาเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO ₃	81

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
3.3	ภาพถ่ายของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $WO_3:In$ ที่เตรียมจากสารตั้งต้นเป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	81
3.4	แสดงโครงสร้างของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอด p-ZnTe/n- $WO_3:In$ โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $WO_3:In$ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	85
3.5	แสดงเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทรมิเตอร์ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 advance	86
3.6	แสดงกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-5410LV	86
3.7	แสดงเครื่อง UV-VIS spectrophotometer ยี่ห้อ thermo electron corporation รุ่น Heios	87
3.8	แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมไดโอดของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/n- $WO_3:In$ ตามลำดับ โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ และที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $WO_3:In$ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส	88
3.9	แสดงอุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าความต้านทานแผ่น	88
3.10	แสดงภาพถ่ายของไดโอดสแตตที่ใช้ศึกษาสมบัติเฉพาะของไดโอดด้วยการวัดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า (I-V curve) ที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วง 20-300 เคลวิน	89
3.11	แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาสมบัติเฉพาะของไดโอดด้วยการวัดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า (C-V curve) และอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วง 20-300 เคลวิน	89
3.12	แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมอุณหภูมิในช่วง 25 – 90 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาสมบัติเฉพาะของไดโอดด้วยการวัดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับความถี่ และการวัดอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี	90

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.1	แสดงฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีสล	92
4.2	แสดงสิ่งประดิษฐ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/n-WO ₃ :In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	92
4.3	แสดงพิกความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	93
4.4	แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	93
4.5	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe ที่เคลือบอยู่บนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	94
4.6	แสดงวิธีการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe ที่เคลือบอยู่บนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	95
4.7	แสดงภาพถ่ายของเม็ดเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ In _x WO ₃ จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง ที่ผ่านการเผาผนึกที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 48 ชั่วโมง	95
4.8	แสดงพิกความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO ₃ ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิกิริยา การเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	96
4.9	พิกความเข้มเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO ₃ :In ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	97
4.10	แสดงกราฟค่าคงที่โครงผลึกของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO ₃ :In ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง	98
4.11	แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด บริเวณผิวหน้าของเม็ดเซรามิกส์ของสารกึ่งตัวนำ In _x WO ₃ (0≤x≤0.05)	99

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.12	แสดงวิธีการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานของเม็ดเซรามิกสารกึ่งตัวนำ $WO_3:In$ จากการวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืน	100
4.13	แสดงกราฟความสัมพันธ์ของค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนของเม็ดเซรามิกที่ความถี่ในช่วง 20 เฮิรตซ์ ถึง 2เมกะเฮิรตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 < x < 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง	101
4.14	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ $p-ZnTe/n-WO_3:In$	103
4.15	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 100-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ $p-ZnTe/n-WO_3:In$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	106
4.16	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\{I/(1-\exp(-qv/(kT)))\}$ กับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ $p-ZnTe/n-WO_3:In$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	106
4.17	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I$ กับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ $p-ZnTe/n-WO_3:In$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	107
4.18	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $dV/d\ln I$ กับกระแสไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ $p-ZnTe/n-WO_3:In$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	107
4.19	แสดงกราฟที่อธิบายโดยวิธีของชวงที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง $H(I)$ กับ I เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ $p-ZnTe/n-WO_3:In$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	108
4.20	แสดงกราฟที่อธิบายโดยวิธีของชวงที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง $H(I)$ กับ I เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ $p-ZnTe/n-WO_3:In$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	108

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.21	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแฟกเตอร์อุณหภูมิต่ำกับอุณหภูมิที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิโอนิกอิมิตชันและวิธีของชวงที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง $dV/d(\ln I)$ กับ T เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 20-300 เคลวินของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสาร p-ZnTe/n-WO ₃ :In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	110
4.22	แสดงกราฟอาร์เรเนียสของ $n \ln I_s$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวินของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/WO ₃ :In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ	111



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

พลังงานเป็นสิ่งที่สำคัญในการดำเนินชีวิตของมนุษย์เป็นอย่างมากตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน และได้มีการใช้พลังงานไปอย่างมากจนทำให้พลังงานที่ได้จากแหล่งพลังงานฟอสซิลนั้นกำลังจะหมดไปจากโลกในเวลาอันใกล้ และรัฐบาลกำลังเร่งหามาตรการต่าง ๆ เพื่อประหยัดพลังงาน รวมทั้งแสวงหาแหล่งพลังงานใหม่ ๆ เพื่อมาทดแทนน้ำมัน พลังงานจากแสงอาทิตย์ก็เป็นทางเลือกอีกทางหนึ่ง เนื่องจากแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานธรรมชาติที่สะอาด พบอยู่ทั่วไปและมีอยู่อย่างไม่จำกัด การนำแสงอาทิตย์มาใช้โดยสร้างสิ่งประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์นั้นก็ไม่สร้างมลภาวะเป็นพิษใดๆ ขณะใช้งาน เช่น มลพิษทางอากาศ ฝนกรด สภาวะเรือนกระจก และปัญหาโลกร้อน จึงไม่ทำลายและเป็นมิตรกับสภาพแวดล้อม ไม่ส่งผลกระทบต่อทั้งระบบนิเวศทางธรรมชาติและความเป็นอยู่ของมนุษย์ต่างจากแหล่งพลังงานชนิดอื่นๆ เช่น พลังงานจากฟอสซิลอันได้แก่ ก๊าซธรรมชาติ น้ำมัน และถ่านหินที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน แต่อย่างไรก็ตามการจะทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีการใช้งานแพร่หลายมากยิ่งขึ้นนั้น เราก็จำเป็นต้องพัฒนาให้เซลล์แสงอาทิตย์ให้มีต้นทุนการผลิตลดลง และมีประสิทธิภาพสูงขึ้น

งานวิจัยและพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ของรอยต่อพี-เอ็นของสารกึ่งตัวนำซิลิกอน เริ่มขึ้นในปี พ.ศ. 2497 หลังจากนั้นงานวิจัยก็แผ่ขยายไปสู่สารกึ่งตัวนำในกลุ่ม II-VI และ I-III-VI₂ เช่น CdTe, CdS, CuInSe₂ และ CuInGaSe₂ เป็นต้น ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์ของสารกึ่งตัวนำในกลุ่ม II-VI ชนิดแรกคือเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อวิวิธพันธุ์ (heterojunction solar cell) ของสารกึ่งตัวนำ Cu₂S/CdS ได้รับการพัฒนาขึ้นมาในเวลาใกล้เคียงกับเซลล์แสงอาทิตย์ของสารกึ่งตัวนำ Si ซึ่งปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ในท้องตลาดประดิษฐ์จากผลึกพหุพันธุ์ (polycrystalline) และอะมอร์ฟัส (amorphous) ของซิลิกอนเกือบทั้งหมด

ปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำออกไซด์ได้รับการวิจัยและพัฒนากันมากมาย เช่น p-Cu₂O/n-ZnO [1], p-Cu₂O/n-CuO [2], CuO/ZnO [3], และ p-CuO/n-Si [4] เป็นต้น เนื่องจากสารประกอบออกไซด์ส่วนใหญ่มีเสถียรภาพดีแม้ในสภาวะอุณหภูมิสูง ไม่เป็นสารพิษ ราคาข้อมเยา จึงเป็นทางเลือกใหม่ที่จะนำมาผลิตเป็นเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อทดแทนซิลิกอนที่ใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบัน จากการศึกษา

เอกสารนี้แสดงให้เห็นว่าเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

p-Cu₂O/n-ZnO มีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าสูงในระดับ 3.83 เปอร์เซ็นต์ [5] จึงเป็นแรงจูงใจให้นักวิจัยจำนวนมากมุ่งความสนใจมายังสารกึ่งตัวนำออกไซด์กันมากขึ้น อีกทั้งได้มีการประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำออกไซด์กับสารประกอบซัลไฟด์โคโรนา เช่น CuAlO₂/CdZnS [6-7], p-Cu_xSn_yS₂O/n-ZnO [8] และ CuO/CdS [9] พบว่ามีสมบัติเรียงกระแสที่ดี แต่ยังไม่มียางานเกี่ยวกับการศึกษาผลการตอบสนองต่อแสงอาทิตย์

เมื่อไม่นานมานี้ นักวิจัยได้มีการสนใจศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์และเคมี-ไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำออกไซด์ (WO₃) กันมากขึ้น สารกึ่งตัวนำชนิดนี้มีโครงสร้างผลึกแบบอโธโรมบิก มีโครงสร้างแถบพลังงานเป็นแบบตรงและมีค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ประมาณ 2.8-3.2 อิเล็กตรอนโวลต์ [10] สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นสีเขียวและช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็นได้ จึงเหมาะที่จะพัฒนาเป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ สารกึ่งตัวนำ WO₃ มีข้อดีหลายประการ เช่น ต้นทุนการผลิตเป็นผลให้มีการนำสารกึ่งตัวนำ WO₃ มาประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ เช่น อุปกรณ์โฟโตโวลตาอิก ผิวเคลือบอิเล็กโตรโครมิก (electrochromic coatings) ตัวเร่งปฏิกิริยาสารเคมี สารกึ่งตัวนำยิ่งยวดที่อุณหภูมิสูง และประยุกต์เป็นขั้วตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง เป็นต้น [11] การสังเคราะห์ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ WO₃ ให้มีโครงสร้างในระดับไมโครเมตร หรือในระดับนาโนเมตร สามารถสังเคราะห์ได้หลากหลายวิธีทั้งทางเคมี และทางฟิสิกส์ เช่น วิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ (vacuum evaporation) วิธีสปัตเตอร์ริง (sputtering) วิธีพาไอระเหยสารเคมี วิธีออกซิเดชันจากโลหะ วิธีระเหยด้วยลำอิเล็กตรอน และวิธีเคลือบด้วยไฟฟ้าในสารละลายเคมี เป็นต้น สำหรับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe เตรียมขึ้นได้จากหลายวิธี เช่น วิธีสปัตเตอร์ริง วิธีสเปรย์ไพโรไลซิส (spray pyrolysis) วิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในสุญญากาศ วิธีเคลือบด้วยไฟฟ้าในสารละลายเคมี และวิธีเคลือบฟิล์มบางในสารละลายเคมี (chemical bath deposition) เป็นต้น [12]

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการเตรียมและทำการศึกษสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ ของไดโอดของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/n-WO₃:In (4 wt.%) โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe ลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ และที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ n-WO₃:In โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ โดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ W_{1-x}In_xO₃ (0 ≤ x ≤ 0.05) นั้นจะถูกเตรียมขึ้นมาจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1.2.1 ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศและศึกษาสมบัติพื้นฐานทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe ที่เตรียมได้

1.2.2 ทำการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}In_xO_3$ ($0 \leq x \leq 0.05$) โดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารกึ่งตัวนำ WO_3 และ In_2O_3 และศึกษาสมบัติพื้นฐานทางฟิสิกส์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}In_xO_3$ ($0 \leq x \leq 0.05$)

1.2.3 ทำการประดิษฐ์ไดโอดของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/ n- $WO_3:In$ โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe ลงบนเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $WO_3:In$ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส

1.2.4 ศึกษาสมบัติพื้นฐานทางไฟฟ้ากระแสตรง ของไดโอดของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/ n- $WO_3:In$ ที่ประดิษฐ์ขึ้นได้ที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 20-300 เคลวิน

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1.3.1 ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

1.3.2 ทำการศึกษสมบัติพื้นฐานทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe ที่ถูกเคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมได้ โดยทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope: SEM) ทำการศึกษาคุณสมบัติทางแสงด้วยการวัดค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS spectrophotometer) เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน และคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g)

1.3.3 ทำการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}In_xO_3$ ($0 \leq x \leq 0.05$) โดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารกึ่งตัวนำ WO_3 และ In_2O_3

1.3.4 ทำการศึกษสมบัติพื้นฐานทางฟิสิกส์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}In_xO_3$ ($0 \leq x \leq 0.05$) โดยทำการ ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการศึกษาคูสมบัติทางแสง โดยการวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า กระแสกลับโดยการวัดอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนที่อุณหภูมิห้อง

1.3.5 ทำการประดิษฐ์ไดโอดของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/ n-WO₃:In โดยการเคลือบฟิล์มบางของ สารกึ่งตัวนำ ZnTe ลงบนเม็ดยาของสารกึ่งตัวนำ n-WO₃:In โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส

1.3.6 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสตรงของไดโอดของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/ n-WO₃:In ที่เตรียมได้โดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า (I-V curve) ในช่วง อุณหภูมิ 20-300 เคลวินและค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า (C-V curve) ที่อุณหภูมิห้อง

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานโครงการวิจัย

1.4.1 ค้นคว้าและศึกษาข้อมูลต่างๆ ตลอดจนทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมฟิล์มบางด้วย วิธีการระเหยสารเคมีในระบบสุญญากาศ พร้อมทั้งจัดหาวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ทำงานวิจัยในครั้งนี้ด้วย

1.4.2 ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

1.4.3 ทำการศึกษาคูสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe ที่ถูกเคลือบลง บนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ได้แก่ทำการศึกษาคูสมบัติเชิงจุลภาค ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จากเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ Bruker รุ่น D8 Advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ในย่าน Cu_{K_α} 1.5406 อังสตรอม โดยใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์ และความต่าง ศักย์ 25 กิโลโวลต์ ทำการศึกษาคูสมบัติเชิงมหภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่อง กราด ของ JEOL รุ่น JSM-6400 ทำการศึกษาคูสมบัติทางแสงด้วยการวัดสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน แสงด้วยเครื่องยูวี – วิสทิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS spectrophotometer) สเปกโตรโฟโต มิเตอร์ ยี่ห้อ Thermo electron corporation (He⁺ ions α) โดยใช้ความยาวคลื่นช่วง 220-1,100 นาโนเมตร เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน และคำนวณหาช่องว่างแถบ พลังงาน (E_g)

1.4.4 ทำการเตรียมเม็ดยาของสารกึ่งตัวนำ WO₃:In จากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสาร กึ่งตัวนำ WO₃ และ In₂O₃ โดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็งที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

1.4.5 ทำการศึกษาคูสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ ของเม็ดยาของสารกึ่งตัวนำ W_{1-x}In_xO₃ (0≤x≤0.05) ได้แก่การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จากเครื่อง เอกซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ Bruker รุ่น D8 Advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ในย่าน Cu_{K_α} เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5406 อังสตรอม โดยใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์ และความต่างศักย์ 25 กิโลโวลต์ ทำการศึกษา โครงสร้างผลึกเชิงมหภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของ JEOL รุ่น JSM-6400 ทำการศึกษาคุณสมบัติทางแสงด้วยการวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี – วิสทิเบลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS spectrophotometer) สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Thermo electron corporation ($He\lambda$ ions α) โดยใช้ความยาวคลื่นช่วง 220-1,100 นาโนเมตร เพื่อศึกษา ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน และคำนวณหาช่องว่างแถบ พลังงาน (E_g)

1.4.6 ทำการประดิษฐ์ไดโอดของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/ n-WO₃:In โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO₃:In โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส

1.4.7 ทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสตรงไดโอดของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/ n-WO₃:In โดยการทำให้ขั้วอิเล็กโทรด ด้วยการป้ายกาวเงินนำไฟฟ้า เป็นรูปร่างกลมให้เต็มหน้าทางด้านที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO₃:In และป้ายกาวเงินนำไฟฟ้าเป็นรูปร่างกลมให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.4 เซนติเมตรบนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe แล้วจึงนำไปศึกษาสมบัติเฉพาะของไดโอดด้วยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่า กระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า (I-V curve) ที่อุณหภูมิห้อง ในช่วง 10-300 เคลวิน และค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า (C-V curve) ที่อุณหภูมิห้อง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทำให้ทราบถึงวิธีการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ทั้งในกรณีที่ไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 100 – 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 30 นาที

1.5.2 ทำให้ทราบถึงสมบัติพื้นฐานทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe ที่ถูกเคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมได้ทั้งหมด

1.5.3 ทำให้ทราบถึงการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ W_{1-x}In_xO₃ (0 ≤ x ≤ 0.05) ซึ่งเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ W_{1-x}In_xO₃ (0 ≤ x ≤ 0.05) โดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็งจากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกของสารกึ่งตัวนำ WO₃ และ In₂O₃

1.5.4 ทำให้ทราบถึงสมบัติพื้นฐานทางฟิสิกส์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ W_{1-x}In_xO₃ (0 ≤ x ≤ 0.05)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5.5 ทำให้ทราบถึงวิธีการประดิษฐ์โคโอดของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/ n-WO₃:In โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe ลงบนเม็ดยุติของสารกึ่งตัวนำ n-WO₃:In โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส

1.5.6 ทำให้ทราบถึงสมบัติพื้นฐานทางฟิสิกส์ของโคโอดของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/n-WO₃:In ที่เตรียมได้จากฐานรองรับที่เป็นเม็ดยุติของสารกึ่งตัวนำ WO₃:In



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

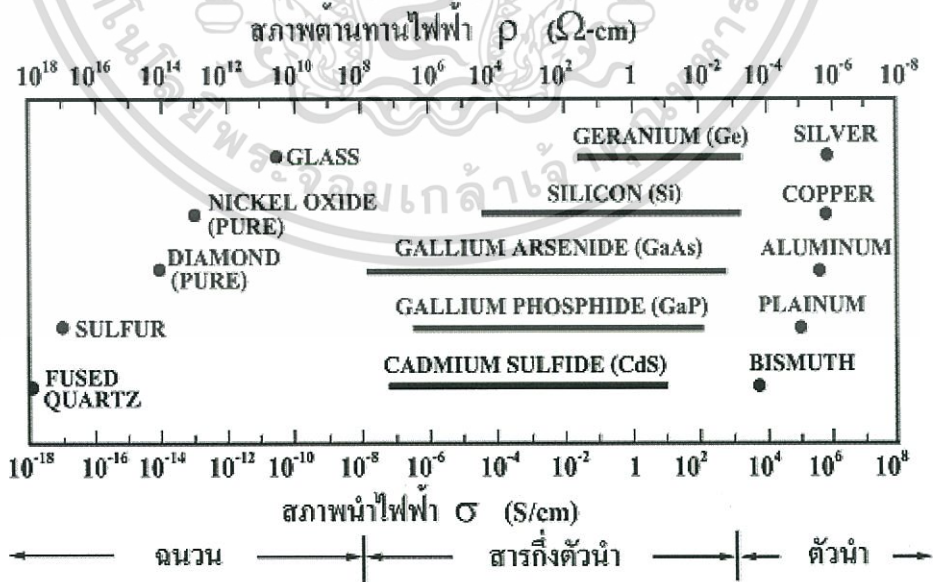
บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

สมบัติทางฟิสิกส์พื้นฐานของผลึกนั้นขึ้นกับลักษณะของโครงสร้างผลึก และความไม่สมบูรณ์ของผลึก การวัดสมบัติทางไฟฟ้าต่าง ๆ ก็จะต้องคำนึงถึงสมบัติพื้นฐานของผลึกด้วยเพื่อให้ได้ผลการวัดที่ถูกต้อง ในบทนี้จึงจะได้กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องต่าง ๆ เทคนิคการเตรียมผลึกของฟิล์มบางและเทคนิคการวัดสมบัติทางไฟฟ้าต่าง ๆ ต่อไป

2.1 วัสดุของแข็งสารกึ่งตัวนำ [6,13-16]

วัสดุในสถานะของแข็งสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิด คือ ฉนวน สารกึ่งตัวนำ และตัวนำ ในรูปที่ 2.1 แสดงสภาพนำไฟฟ้าของวัสดุที่สำคัญในแต่ละชนิด วัสดุที่เป็นฉนวนเช่น ผลึกควอตซ์ (fused quartz) และกระจกสไลด์ (slide glass) ที่เป็นอะมอร์ฟัส ซึ่งมีสภาพนำไฟฟ้าต่ำอยู่ในช่วง 10^{-18} - 10^{-8} ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร และวัสดุที่เป็นตัวนำเช่นอะลูมิเนียมและเงินมีสภาพนำไฟฟ้าสูงในช่วง 10^4 - 10^6 ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ส่วนวัสดุที่เป็นสารกึ่งตัวนำมีสภาพนำไฟฟ้าอยู่ระหว่างฉนวน และตัวนำ ซึ่งสภาพนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำจะตอบสนองต่ออุณหภูมิ การฉายแสง สนามแม่เหล็ก ซึ่งสมบัติดังกล่าวมีความสำคัญกับการนำไปประยุกต์ใช้ในงานอิเล็กทรอนิกส์

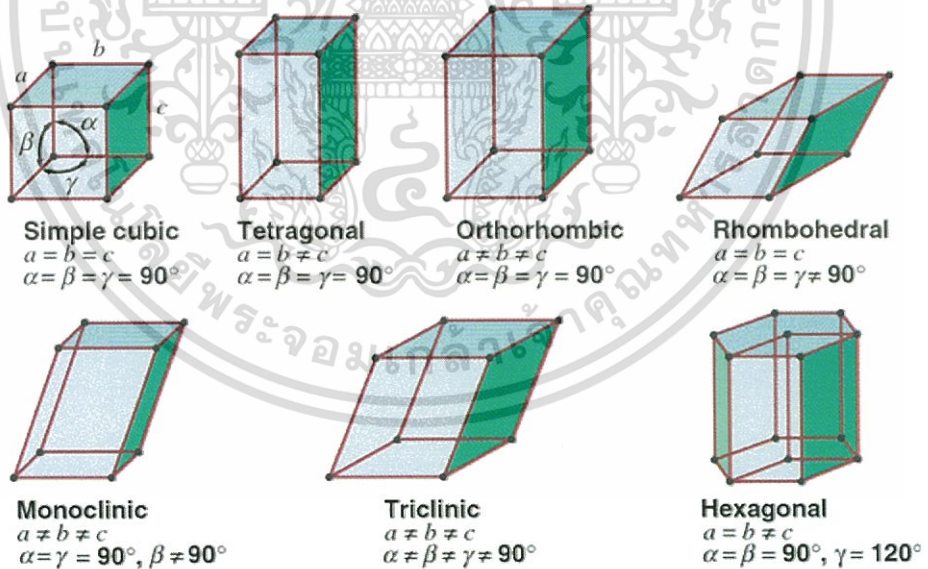


รูปที่ 2.1 แสดงสภาพนำไฟฟ้าและสภาพต้านทานไฟฟ้าของฉนวน สารกึ่งตัวนำ และตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ [6,14-23]


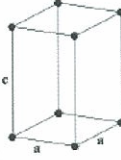




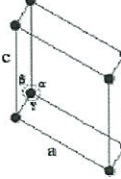
ผลึกของสารเกิดจากการที่อะตอมหรือโมเลกุลของสารชนิดนั้นมารวมกันอยู่เป็นจำนวนมาก โดยระยะห่างระหว่างอะตอมมีค่าคงที่และมีการจัดเรียงตัวกันเป็นระบบแบบรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอนเป็นระเบียบอย่างต่อเนื่องภายในหนึ่งหน่วยเซลล์ของผลึก อาจประกอบด้วยอะตอมของธาตุเพียงอะตอมเดียวไปจนถึงหลายๆ อะตอมหรือหลายๆ โมเลกุลเซลล์ที่มีปริมาตรเล็กที่สุดที่สามารถใช้เป็นตัวแทนของผลึกนั้นเรียกว่า หน่วยเซลล์ (unit cell) กล่าวคือ ถ้าเอาหน่วยเซลล์นี้มาเรียงต่อกันก็จะได้ผลึกขึ้นมา และเรียกตำแหน่งต่างๆ ของอะตอมในระบบสามมิติว่า โครงผลึกหรือแลตทิซ (lattice) ในทางทฤษฎีการกำหนดหน่วยเซลล์จะทำได้ไม่จำกัด แต่ตามปกติจะเลือกหน่วยเซลล์ที่เล็กที่สุด ที่เป็นไปได้ และมีสมมาตรค่อนข้างสูง ตัวอย่างการเลือกหน่วยเซลล์ในโครงผลึก 3 มิติ ดังรูปที่ 2.2 ในระบบสามมิติพารามิเตอร์ของโครงผลึก ได้แก่ เวกเตอร์ a b และ c และ มุม α , β และ γ ซึ่งเป็นมุมระหว่างเวกเตอร์ทั้งสาม ชนิดของโครงผลึกที่แตกต่างกันที่เป็นไปได้อาศัยอยู่เจ็ดแบบดังตารางที่ 2.1 คือ ไตรคลินิก (triclinic) โมโนคลินิก (monoclinic) ออร์โธโรมบิก (orthorhombic) เตตระโกนัล (tetragonal) คิวบิก (cubic) รอมโบฮีดรัล (rhombohedral) และเฮกซะโกนัล (hexagonal)



รูปที่ 2.2 แสดงหน่วยเซลล์ในระบบสามมิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 แสดงระบบผลึกทั้งเจ็ดแบบในระบบสามมิติ

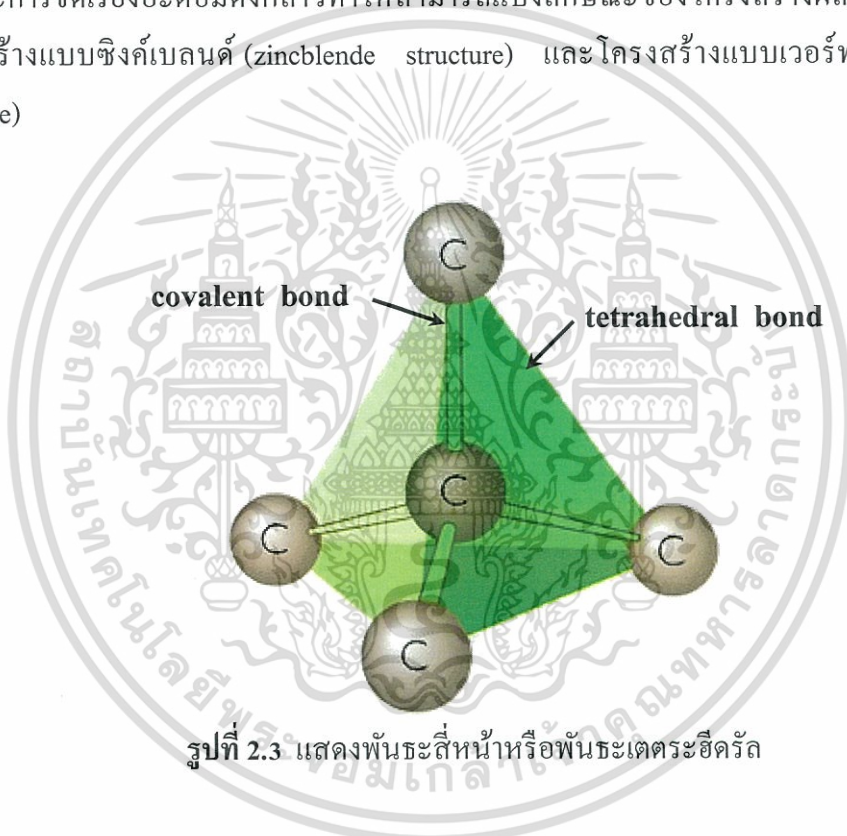
ระบบผลึก (system)	ค่าคงตัวของโครงผลึก และมุมผลึก	รูปทรงเรขาคณิต ของหน่วยเซลล์
คิวบิก (cubic)	$a = b = c,$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
เตตระโกนัล (tetragonal)	$a = b \neq c,$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
ออร์โธโรมบิก (orthorhombic)	$a \neq b \neq c,$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 โครงสร้างผลึกของสารประกอบที่เกิดจากอะตอมของธาตุกลุ่ม II และกลุ่ม VI

[6,14-37]

ผลึกของสารประกอบที่เกิดจากการสร้างพันธะเคมีระหว่างอะตอมของธาตุกลุ่ม II (อะตอม A) และกลุ่ม VI (อะตอม B) ซึ่งมีอิเล็กตรอนวาเลนซ์ต่ออะตอมเท่ากับ 4 ในโครงสร้างผลึกแต่ละอะตอม A หรืออะตอม B จะมีอะตอม B หรืออะตอม A ที่อยู่ใกล้เคียงที่สุดล้อมรอบอยู่ 4 อะตอม ซึ่งมีการสร้างพันธะเคมีระหว่างอะตอมเป็นแบบพันธะโควาเลนต์ (covalent bond) และมีพันธะเคมีของโมเลกุลเป็นแบบพันธะสี่หน้าหรือพันธะเตตระฮีดรัล (tetrahedral bond) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 จากลักษณะการจัดเรียงอะตอมดังกล่าวทำให้สามารถแบ่งลักษณะของโครงสร้างผลึกได้ 2 แบบคือ โครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์ (zincblende structure) และโครงสร้างแบบเวอร์ทไชท์ (wurtzite structure)

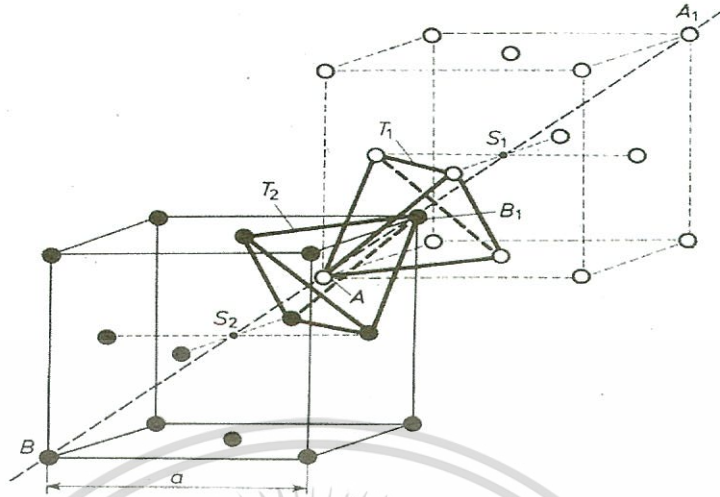


รูปที่ 2.3 แสดงพันธะสี่หน้าหรือพันธะเตตระฮีดรัล

2.3.1 โครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์

โครงสร้างซิงค์เบลนด์ ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.4 เกิดจากการซ้อนเหลื่อมกันของโครงสร้างผลึกแบบเฟสเซนเตอร์คิวบิก (face centered cubic : fcc) 2 หน่วยเซลล์ ซึ่งมีค่าคงที่ของโครงผลึกเท่ากับ a และมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ s_1 (อะตอม A : สีขาว) และมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ s_2 (อะตอม B : สีดำ) และเซลล์หน่วยจัดเรียงไปตามแนว A_1B_1 ดังนั้นจะได้ระยะ $AB = \frac{1}{4}AA_1 = \frac{1}{4}BB_1$ ฐานของพันธะสี่หน้า T_1 และ T_2 ขนานกันและหมุนทำมุม 60 องศารอบแกน A_1B_1 ระยะระหว่างอะตอมกับอะตอมเพื่อนบ้านที่ใกล้ที่สุด (nearest neighbors) มีค่าเท่ากับ $d_{AB} = \frac{\sqrt{3}}{4}a$

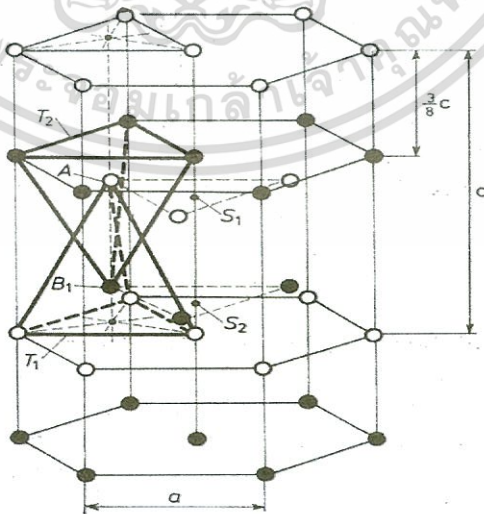
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์

2.3.2 โครงสร้างแบบเวิร์ทไซท์

โครงสร้างแบบเวิร์ทไซท์แสดงในรูปที่ 2.5 เกิดจากการซ้อนเหลื่อมกันของ โครงสร้างผลึกแบบ เฮกซะโกนัล 2 เซลล์หน่วย ซึ่งมีค่าคงที่ของโครงผลึกเท่ากับ a และ c มีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ s_1 และ s_2 เซลล์หน่วยจัดเรียงไปในแนวแกน c ระยะระหว่างอะตอมกับอะตอมเพื่อนบ้านที่ใกล้ที่สุดมีค่าเท่ากับ $d_{AB} = \frac{3}{8}c = \sqrt{\frac{3}{8}}a$ ฐานพื้นระลึหน้า T_1 และ T_2 ขนาดกันและระยะระหว่างฐานมีค่าตามแนวแกน c



รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์

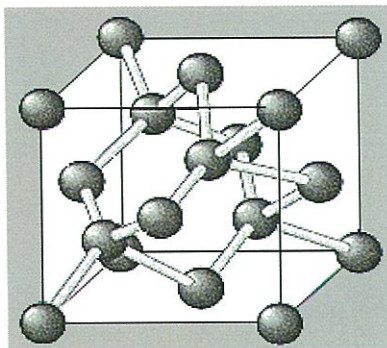
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 โครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำ ZnTe [6,14-31]

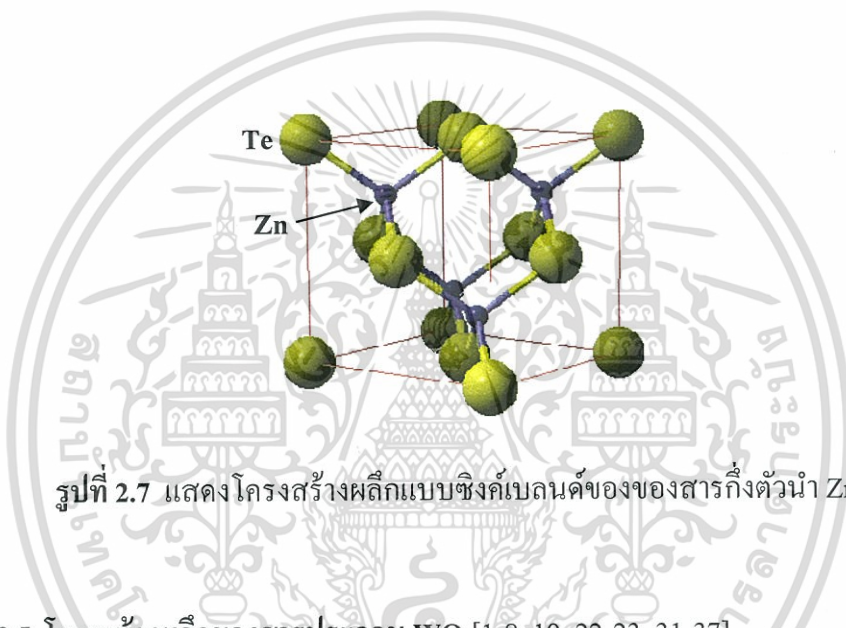
โครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำแคดเมียมซัลไฟด์ ในสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิดก็จะมีการจัดเรียงตัวของอะตอมต่างกัน จึงทำให้แสดงคุณสมบัติต่างๆ ออกมาไม่เหมือนกันนั่นเอง เช่น สมบัติทางไฟฟ้า การดูดกลืนแสง เป็นต้น ซึ่งในสารกึ่งตัวนำแคดเมียมซิงค์ซัลไฟด์จะมีลักษณะของโครงสร้างผลึกอยู่ 2 แบบด้วยกัน คือ โครงสร้างผลึกแบบคิวบิกซัลไฟด์ (cubic sulfide structure) หรือแบบซิงค์เบลนด์ และ โครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลซิงค์ซัลไฟด์ หรือแบบเวิร์ทไซท์ (hexagonal zinc sulfide structure or wurtzite)

2.3.4 โครงสร้างผลึกแบบคิวบิกซิงค์ซัลไฟด์ หรือแบบซิงค์เบลนด์

โครงสร้างผลึกแบบนี้จะมีลักษณะโครงสร้างคล้ายผลึกแบบเพชร ดังรูปที่ 2.6 โดยจะมีพันธะระหว่างอะตอมเป็นแบบเตตระฮีดรัล (tetrahedral bond) แต่จะต่างที่โครงสร้างผลึกแบบนี้จะมีอะตอมอยู่ที่ตำแหน่ง 0,0,0 และ $\frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4}$ ซึ่งเป็นอะตอมต่างชนิดกัน ดังนั้นโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ เกิดจากการนำแลตทิซผลึกย่อย (sub lattice) แบบเฟสเซนเตอร์คิวบิก ที่มีอะตอมต่างชนิดกันสองโครงสร้างผลึกมาวางซ้อนเหลื่อมกันเป็นระยะ $\frac{1}{4}$ ตามแนวเส้นทแยงมุมของลูกบาศก์ โดยที่หนึ่งเซลล์หน่วยจะมี 8 อะตอม ดังรูปที่ 2.7 ซึ่งจะประกอบไปด้วยอะตอมของธาตุสองชนิด คือ อะตอมของธาตุ Cd และอะตอมของธาตุ S ตัวอย่างผลึกที่มีโครงสร้างแบบนี้ คือ ZnTe, ZnS, CuCl, AgI, InAs, SiC และ CdS เป็นต้น ซึ่งสารกึ่งตัวนำเหล่านี้เป็นส่วนประกอบสำคัญในการประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เชิงแสง



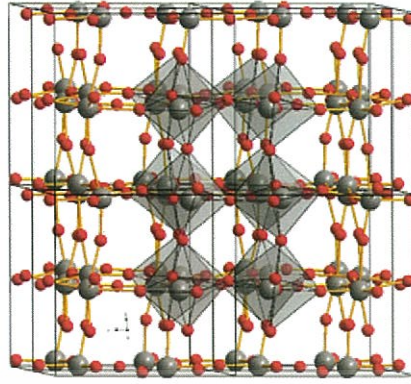
รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเพอร์



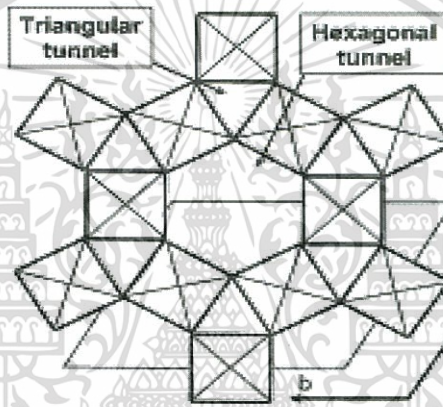
รูปที่ 2.7 แสดง โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ของของสารกึ่งตัวนำ ZnTe

2.3.5 โครงสร้างผลึกของสารประกอบ WO_3 [1-8, 19, 22-23, 31-37]

โครงสร้างผลึกของทั้งสแตนออกไซด์ในอุดมคติประกอบไปด้วยออกตะฮีดรัลจำนวนมาก ซึ่งแต่ละออกตะฮีดรัลจะเชื่อมต่อกันกลายเป็นโครงข่ายสามมิติดังแสดงในรูปที่ 2.8 โดยแต่ละออกตะฮีดรัลจะมีอะตอมของธาตุ W เป็นศูนย์กลางและมีอะตอมของธาตุ O จำนวน 6 อะตอมอยู่ล้อมรอบ การเชื่อมต่อกันของแต่ละออกตะฮีดรัลจะก่อให้เกิดเป็นอูโมงค์แนวยาวในหลายรูปแบบ เช่นอูโมงค์รูปสามเหลี่ยม อูโมงค์รูปสี่เหลี่ยม รูปที่ 2.9 แสดงให้เห็นอูโมงค์สามเหลี่ยมและอูโมงค์หกเหลี่ยมที่เกิดขึ้นร่วมกัน



รูปที่ 2.8 แสดงโครงสร้างผลึกของ WO_3 ในกรณีออคมคติ



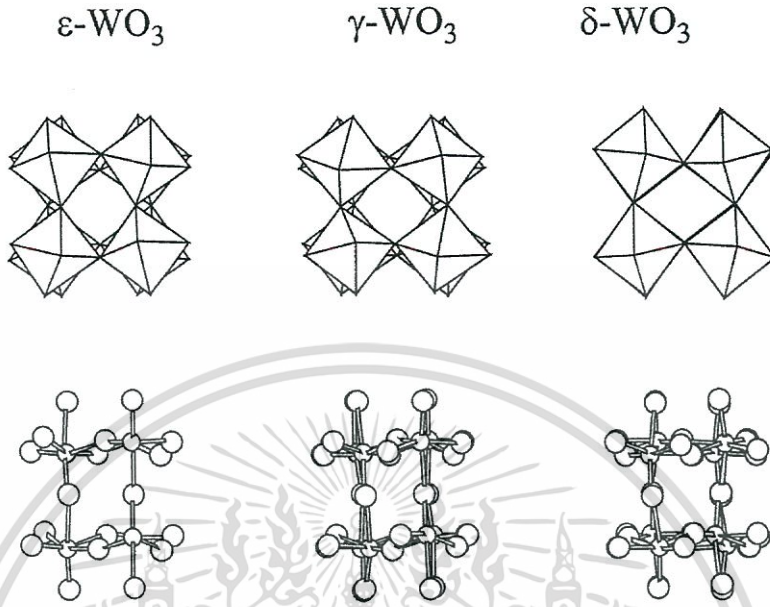
รูปที่ 2.9 แสดงการเชื่อมต่อกันของออกตะฮีดรัลทำให้เกิดรูปร่างรูปสามเหลี่ยม และรูปร่างรูปหกเหลี่ยมร่วมกัน

สารประกอบ WO_3 ในออคมคติจะมีปริมาณของอะตอมของธาตุ O เท่ากับ 75 เปอร์เซ็นต์โดยโมล แต่การเกิดแวนเดอวาลส์ของออกซิเจน จะส่งผลให้โครงสร้างผลึกเปลี่ยนแปลงไปทำให้เกิดเฟสต่างๆจำนวนมาก เช่น $\alpha-WO_x$ ($2.98 < x < 3.0$), $\beta-WO_x$ ($2.83 < x < 2.90$), $\gamma-WO_x$ ($2.66 < x < 2.72$) และ สารประกอบ WO_2 โครงสร้างผลึกของเฟสของสารประกอบ WO_3 ในออคมคติที่ไม่มีแวนเดอวาลส์ของอะตอมออกซิเจนจะมีโครงสร้างผลึกในระบบโมโนคลินิก (สเปซกรุ๊ป $P2_1/n$) ที่อุณหภูมิห้อง $a=7.297$ อังสตรอม, $b = 7.539$ อังสตรอม, $c = 7.688$ อังสตรอม , $\beta = 90.91$ แต่มีผู้พบว่าที่อุณหภูมิห้องสารประกอบ WO_3 มักจะเกิดเป็นเฟส โมโนคลินิกร่วมกับไตรคลินิก (triclinic

อย่างไรก็ตามโครงสร้างผลึกของสารประกอบ WO_3 ยังเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิอีกด้วย กล่าวคือ ในช่วง อุณหภูมิ 50 ถึง 17 องศาเซลเซียส จะมีโครงสร้างผลึกในระบบไตรคลินิก ในช่วงอุณหภูมิ 17-330 องศาเซลเซียสจะเป็นแบบโมโนคลินิก ในช่วงอุณหภูมิ 330-740 องศาเซลเซียสจะมีโครงสร้างผลึกแบบออร์โธโรมบิก แต่ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 740 องศาเซลเซียสจะเป็นแบบเตตระโกนัล

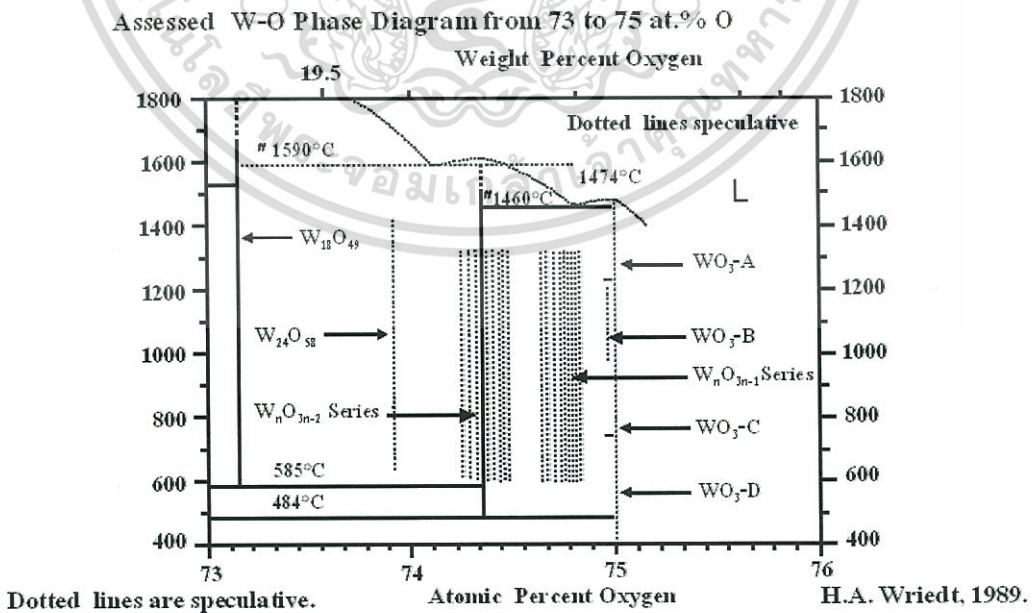
เอกสารนี้จัดทำขึ้นจากข้อมูลที่ได้รับจากแหล่งข้อมูลสาธารณะที่เปิดเผยต่อสาธารณะโดยไม่มีการแก้ไขใดๆ
 เอกสารนี้จัดทำขึ้นจากข้อมูลที่ได้รับจากแหล่งข้อมูลสาธารณะที่เปิดเผยต่อสาธารณะโดยไม่มีการแก้ไขใดๆ
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นไปได้ 3 แบบ คือ ϵ -WO₃, γ -WO₃ และ δ -WO₃ ซึ่งเกิดจากแต่ละออกตะฮีดรัลเรียงไปจากแนวแกนผลึก ดังแสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงเฟสของ WO₃ ที่อุณหภูมิต่ำ 5 องศาเซลวิน

จากการที่อะตอมออกซิเจนขาดหายไปจากโครงผลึก แต่ละออกตะฮีดรัลของสารประกอบ WO₃ ที่เคยใช้มุมเชื่อมต่อกันจะเปลี่ยนเป็นโซ่ของออกตะฮีดรัลเชื่อมต่อกันจึงส่งผลให้เกิดเฟส นอนสโตยคิโอเมตริกจำนวนมากดังแสดงในรูปที่ 2.11

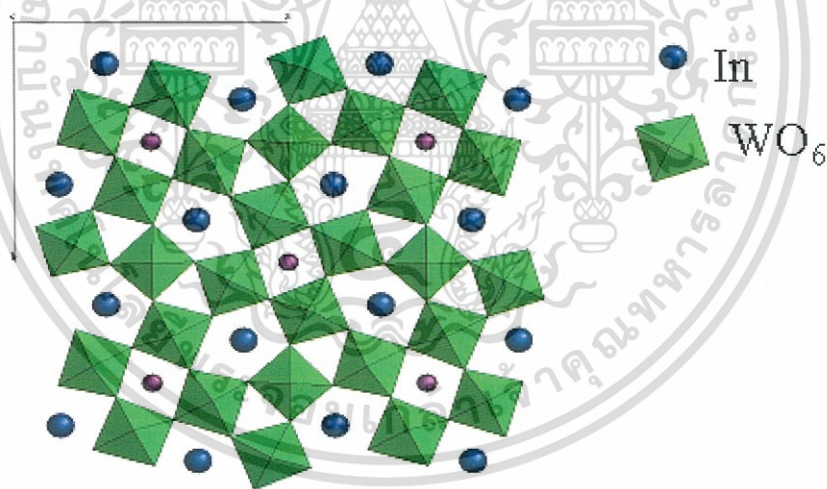


รูปที่ 2.11 แสดงเฟสไดอะแกรมของระบบ W-O ที่เกิดเป็นสารประกอบ WO₃

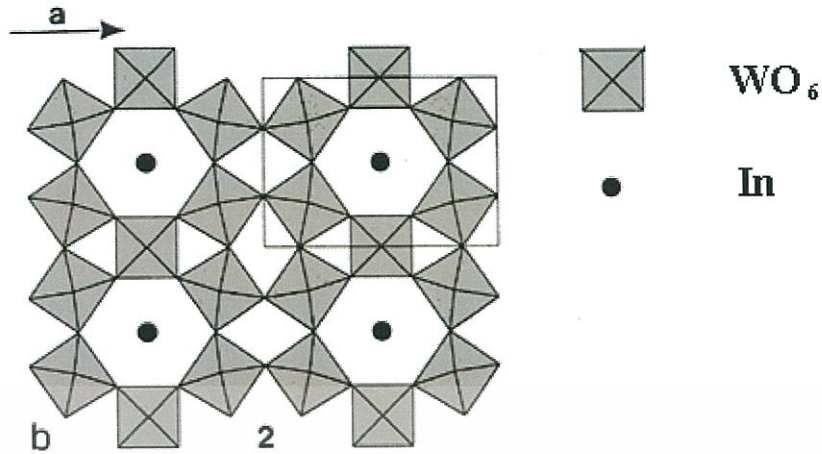
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.6 โครงสร้างผลึกของอินเดียมทังสเตนบรอนซ์ [6,22-23]

จากการที่แต่ละออกตะฮีดรัลของสารประกอบ WO_3 ใช้มุมเชื่อมต่อกันจนกลายเป็นโครงข่ายของอูโมงค์ในรูปแบบต่างๆ ที่วางภายในอูโมงค์สามารถที่จะใส่อะตอมธาตุโลหะต่างๆ เข้าไปได้ทำให้เกิดเป็นสารประกอบที่เรียกว่าทังสเตนบรอนซ์มีสูตรเคมีคือ M_xWO_3 การแทรกอะตอมโลหะเข้าไปในอูโมงค์ทำให้อูโมงค์มีสมมาตรต่างออกไปจากเดิมกลายเป็นสมมาตรแบบเตตระโกนัลกับเฮกซะโกนัล สารประกอบ $In_{0.02}WO_3$ และ $In_{0.03}WO_3$ มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเตตระโกนัลทังสเตนบรอนซ์ ลักษณะพิเศษของเตตระโกนัลทังสเตนบรอนซ์คือ อูโมงค์จะมี 3 แบบคือ สามเหลี่ยมสี่เหลี่ยมและห้าเหลี่ยมผสมผสานกันดังรูปที่ 2.12 แต่เมื่อปริมาณอะตอมของธาตุ In เพิ่มขึ้น สารประกอบจะมีสีแวววาวคล้ายโลหะและโครงสร้างผลึกจะเปลี่ยนไปเป็นเฮกซะโกนัลทังสเตนบรอนซ์ บูชาร์ดและกิลสัน (Bouchard and Gillson, 1968) พบว่า สัดส่วนโมล x สูงถึง 0.33 โครงสร้างยังคงเป็นเฮกซะโกนัลทังสเตนบรอนซ์ เอกลักษณะของเฮกซะโกนัลทังสเตนบรอนซ์คือ อูโมงค์จะเป็นรูปสามเหลี่ยม สี่เหลี่ยม และหกเหลี่ยมผสมผสานกัน แต่ละอะตอมของธาตุ In จะเข้าไปอยู่ในอูโมงค์รูปหกเหลี่ยม ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.12 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเตตระโกนัลอินเดียมทังสเตนบรอนซ์

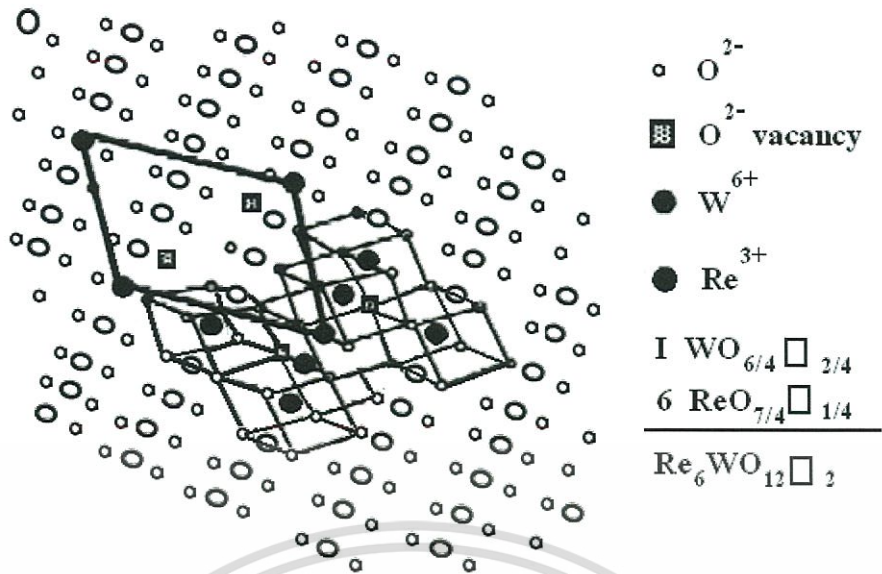


รูปที่ 2.13 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลอินเดียมทั้งสแตนบรอนซ์

2.3.7 โครงสร้างผลึกของสารประกอบ $\text{In}_6\text{WO}_{12}$ [6,22-23]

สารประกอบ $\text{In}_6\text{WO}_{12}$ มีโครงสร้างผลึกสัมพันธ์กับสารประกอบเชิงสอง (binary compounds) ที่อะตอมโลหะมีวาเลนซ์ผสมผสานหลายค่า (mixed valency) ตัวอย่างเช่นสารประกอบที่มีสูตรเคมีว่า M_7O_{12} เมื่อ M คือ อะตอมโลหะ โครงสร้างผลึกของสารประกอบ M_7O_{12} อาจเขียนให้สัมพันธ์กับโครงสร้างแบบฟลูออไรท์ที่บกพร่อง (defect fluorite structure) ได้เป็น $\text{M}_7\text{O}_{12}\text{V}_2$ เมื่อ V คือแวนเคนซีของอะตอมของธาตุออกซิเจน นั่นคือ หนึ่งหน่วยเซลล์ (unit cell) จะมีแวนเคนซี 2 แวนเคนซี โครงสร้างผลึกของสารประกอบ $\text{In}_6\text{WO}_{12}$ จะแสดงใน รูปที่ 2.14 ซึ่งหนึ่งหน่วยเซลล์จะประกอบไปด้วยลูกบาศก์ย่อย (cubic) จำนวน 7 ลูกบาศก์ที่มีขอบของลูกบาศก์ร่วมกัน (edge sharing) ลูกบาศก์ตรงกลางจะมีอะตอมของธาตุ W ปรากฏอยู่และมีแวนเคนซีของอะตอมออกซิเจนจำนวน 2 แวนเคนซีอยู่ที่มุมของลูกบาศก์ในแนวทะแยงมุม (ในทิศทาง $\langle 111 \rangle$) ซึ่งลูกบาศก์ศูนย์กลางนี้ สามารถเขียนเป็นสูตรเคมีว่า (WO_2V_2) ส่วนลูกบาศก์ย่อยอีก 6 อัน ที่ล้อมรอบลูกบาศก์ศูนย์กลาง (WO_2V_2) จะมีอะตอมของธาตุ In ปรากฏอยู่ ซึ่งแต่ละลูกบาศก์ย่อย 6 อันนี้จะมีแวนเคนซีของอะตอมออกซิเจนอยู่ที่มุมอันละ 1 แวนเคนซี (Diot et. al., 2001) และหนึ่งหน่วยเซลล์จะอยู่ในระบบรอมโบฮีดรัล (rhombohedral) ซึ่งจะแสดงด้วยเส้นทึบดังรูปที่ 2.14 โดยที่พันธะของธาตุ In จะมี 7 แขน ส่วนอะตอม W จะมี 6 แขน โครงสร้างผลึกของสารประกอบ $\text{In}_6\text{WO}_{12}$ จะเหมือนกับโครงสร้างผลึกของสารประกอบ Y_6WO_{12} และ $\text{Ho}_6\text{WO}_{12}$

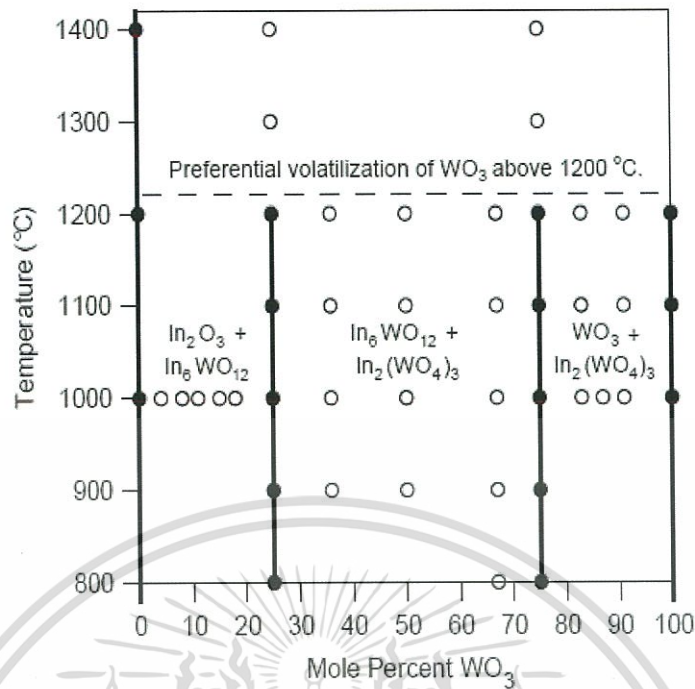
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 แสดงโครงสร้างผลึกของสารประกอบ In_6WO_{12} ในระบบบรอมโบฮีดรัล

2.3.8 เฟสโคออร์ดิเนชันของระบบ In_2O_3 - WO_3 [6,22-23]

ริชาร์ดและเอ็ดเวิร์ด (Richard and Edwards, 2004) ได้ทำการศึกษาเฟสโคออร์ดิเนชันของระบบสารประกอบ In_2O_3 - WO_3 ดังแสดงในรูปที่ 2.15 พบว่ามีสารประกอบที่เสถียร คือ $In_2(WO_4)_3$ และ In_6WO_{12} สารประกอบ $In_2(WO_4)_3$ สามารถนำไปเป็นตัวนำไฟฟ้าชนิดแคดไอออนประจุ +3 ส่วนสารประกอบ In_6WO_{12} มีศักยภาพที่จะนำไปประดิษฐ์เป็นตัวตรวจวัดนิวตริโนจากดวงอาทิตย์ ฟิล์มบางของ In_6WO_{12} สามารถเตรียมไว้โดยวิธีโซล-เจล สารประกอบ In_2O_3 เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type) เนื่องจากแวนเดอวาล์วของอะตอมออกซิเจน แต่ถ้ามีการเจือด้วยอะตอมของธาตุ Sn จะทำให้นำไฟฟ้าได้คืออย่างมาก ปัจจุบันมีการผลิตเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของสิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ สารประกอบอินเดียมทังสเตนบรอนซ์ (In_xWO_3) รู้จักกันมานานแล้วฟิล์มบางของสารประกอบ WO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ In มีศักยภาพที่จะนำไปประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์ตรวจจับแก๊สหลายชนิด เช่น NH_3 , CH_4 และ CO เป็นต้นสารประกอบของ WO_3 ในรูปของฟิล์มบางสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นหน้าต่างอัจฉริยะจอแบนแสดงผล ตัวตรวจจับแก๊สชนิดต่างเพื่อประโยชน์ต่อสิ่งแวดล้อมและเซรามิกของสารประกอบ WO_3 สามารถประดิษฐ์เป็นวาริสเตอร์แรงดันไฟต่ำมีลักษณะความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้าสูง ได้มีการศึกษาความเป็นวาริสเตอร์ของสารประกอบ WO_3 โดยการเจือด้วยอะตอมหลายชนิด เช่น Al_2O_3 , Co_3O_4 , MnO_2 , Na_2O และ Pr_6O_{12} เป็นต้น



รูปที่ 2.15 แสดงเฟสไดอะแกรมของระบบของสารประกอบ In_2O_3 - WO_3 ในช่วงอุณหภูมิ 700-1400 องศาเซลเซียสจุดวงกลมทึบแสดงเฟสเดี่ยว ส่วนจุดวงกลมโปร่งแสดงเฟสผสม

2.4 ผลึกจริง [6,14-31,35-37]

ที่ผ่านมาพิจารณาโครงสร้างผลึกในอุดมคติมาโดยตลอด แต่ในความเป็นจริงแล้วมักจะพบความไม่สมบูรณ์หรือข้อบกพร่อง(defects) ที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างผลึกเสมอซึ่งเรียกว่า ผลึกจริง (real crystal) หรือผลึกไม่สมบูรณ์ (imperfect crystal) โดยความไม่สมบูรณ์ของผลึกที่เกิดขึ้นเหล่านี้ มักจะมีผลทำให้สมบัติต่าง ๆ ของสารเปลี่ยนแปลงไปสามารถแบ่งความไม่สมบูรณ์ของผลึกตามรูปทรงเรขาคณิตและรูปร่างได้เป็น 3 แบบ ดังนี้คือ

2.4.1 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบศูนย์มิติหรือแบบจุด

ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดสามารถเกิดได้หลายลักษณะซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.16 ดังนี้

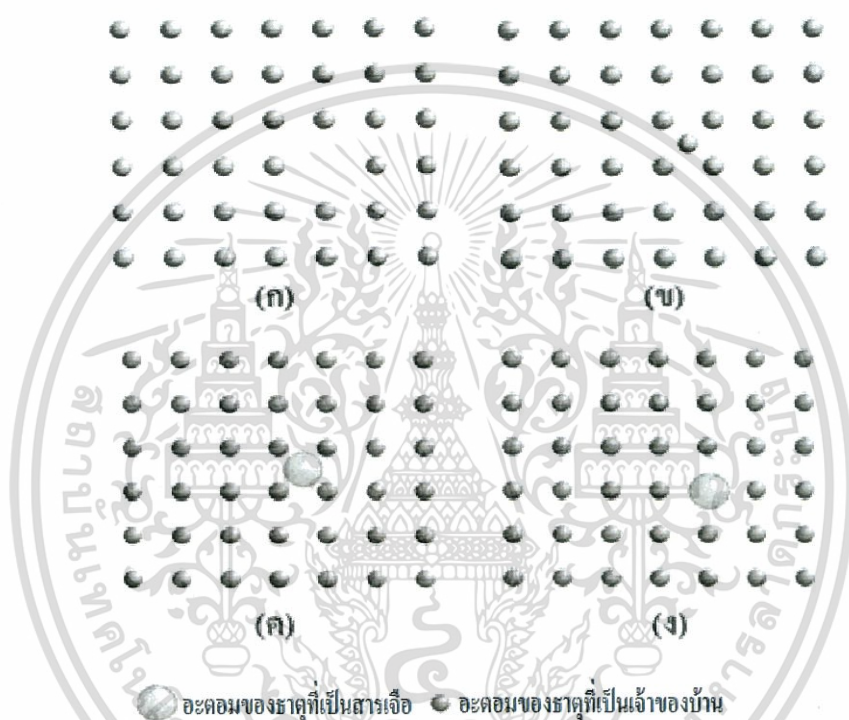
ก. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบตำแหน่งของเลททิสว่างหรือเวคเนซี(vacancy defect) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการที่อะตอมหลุดหายไปจากตำแหน่งที่ควรจะอยู่ในโครงผลึกจึงทำให้เกิดเป็นช่องว่างเกิดขึ้น

ข. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบที่อะตอมของธาตุที่เป็นเจ้าของบ้านแทรก(self interstitial) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการที่อะตอมของธาตุที่เป็นเจ้าของบ้าน (host lattice) เข้าไปแทรกตัวอยู่ในตำแหน่งที่เป็นที่ว่างระหว่างอะตอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบอะตอมของธาตุที่เป็นสารเจือแทรก (interstitial impurity atom) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุด ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการที่มีอะตอมของธาตุชนิดอื่นหรืออะตอมของธาตุที่เป็นสารเจือ (impurity atom) เข้าไปแทรกตัวอยู่ในตำแหน่งที่เป็นที่ว่างระหว่างอะตอมของโครงผลึกเจ้าของบ้าน

ง. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบอะตอมของธาตุที่เป็นสารเจือเข้าแทนที่ (substitutional impurity-atom) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการที่มีอะตอมของธาตุชนิดอื่นที่เป็นสารเจือ เข้าไปแทนที่ตำแหน่งของอะตอมของธาตุที่เป็นเจ้าของบ้าน



รูปที่ 2.16 แสดงความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบศูนย์มิติหรือแบบจุด

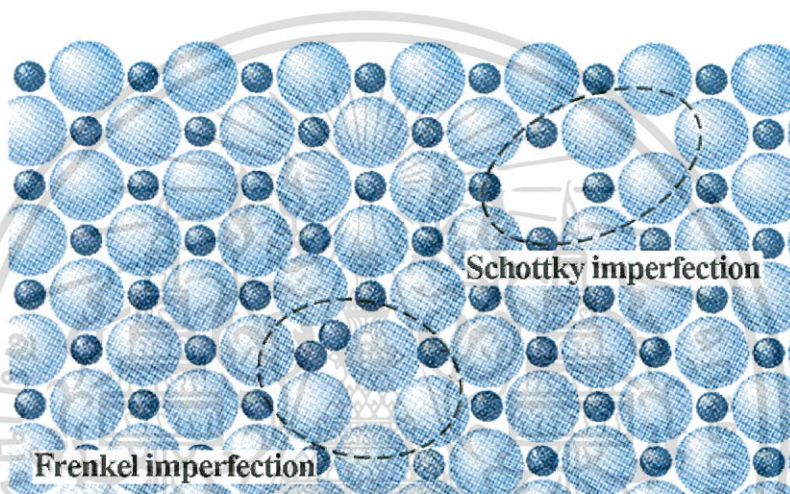
- ก. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบตำแหน่งว่าง
- ข. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบตัวเองแทรก
- ค. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบอะตอมสารเจือแทรก
- ง. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบอะตอมสารเจือแทนที่

นอกจากที่กล่าวข้างต้นแล้ว ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดยังอาจเกิดขึ้นได้ใน โครงสร้างผลึกแบบไอออนิก ซึ่งพบว่าเกิดได้ 2 ลักษณะ ดังแสดงในรูปที่ 2.17 ดังนี้

ก. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบชอตต์กี (Schottky imperfection) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบจุดที่เกิดขึ้นเนื่องจากมีไอออนที่อยู่ภายใน โครงผลึกเคลื่อนย้ายไปยังบริเวณผิวหน้าของโครงผลึกหรืออาจเกิดขึ้นเนื่องจากทั้งไอออนบวกและไอออนลบหลุดออกไปจากโครงผลึกเพื่อเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รักษาประจุของโครงผลึกให้เป็นกลางอยู่เสมอ ทำให้เกิดแวนแคนซี 2 ช่องของไอออนบวก - ไอออนลบ (cation-anion divacancy)

ข. ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบเฟรนเคิล (Frenkel imperfection) เป็นความไม่สมบูรณ์ของ ผลึกแบบจุดที่เกิดช่องว่างขึ้นเนื่องจากมีไอออนที่อยู่ภายใน โครงผลึกเคลื่อนย้ายไปยังบริเวณที่ ตำแหน่งที่ควรจะเป็นที่ว่างของ โครงผลึกหรืออาจเกิดขึ้นเนื่องจากไอออนบวกที่มีขนาดเล็กกว่า ไม่ได้หลุดหายออกไปจากโครงผลึก แต่เข้าไปแทรกตัวอยู่ในบริเวณที่ควรจะเป็นที่ว่างที่อยู่ระหว่าง ไอออนลบกับไอออนบวกอีกตัวหนึ่งทำให้เกิดตำแหน่งว่างของไอออนบวก (cation vacancy)



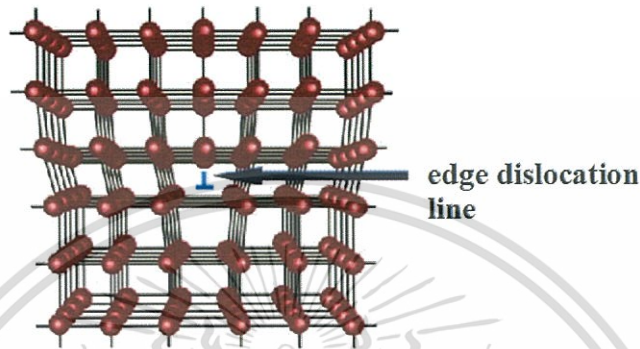
รูปที่ 2.17 แสดงการเกิดความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบชอตต์กีและความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบเฟรนเคิล

2.4.2 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบหนึ่งมิติหรือแบบเชิงเส้น

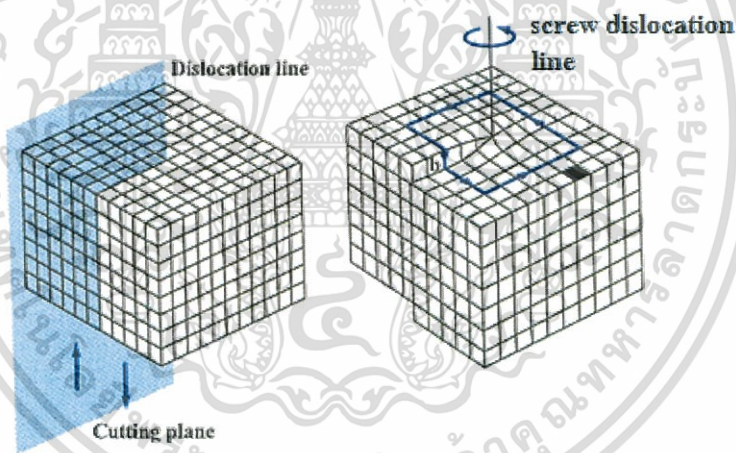
เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกในลักษณะเป็นเส้น (line imperfection) หรือสามารถเรียกได้อีก อย่างหนึ่งคือ การเคลื่อนที่ของโครงผลึก (dislocation) เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกที่เกิดจากการที่ แถวของอะตอมเกิดการบิดเบี้ยว(distortion) หรือผิดรูปไป โดยมี 2 ลักษณะดังนี้

ก. การเคลื่อนที่ของโครงผลึกแบบขอบ (edge dislocation) เกิดขึ้นเนื่องจากมีอะตอมในแถว ใดแถวหนึ่งหายไปหรือแทรกเข้ามาอยู่ผิดปกติ ก็ทำให้บริเวณขอบของโครงผลึกถูกอัดเข้ามาหรือ ดันออกไปจากแนวปกติโดยมีระนาบเลื่อนไถล (slip plane) ตั้งฉากกับทิศทางของการเลื่อนไถล (slip direction or edge dislocation line) ซึ่งขนาดของการกระจัด (displacement) นั้นเรียกว่า เฮอร์ เกอร์เวกเตอร์ (burgers vector : \vec{b}) ดังแสดงในรูปที่ 2.18

ข. การเคลื่อนที่ของโครงผลึกแบบสกรู (screw dislocation) เกิดขึ้นเนื่องจากมีอะตอมในแถวใดแถวหนึ่งของโครงผลึกผิดรูปไปแบบสกรูกว่าคือระนาบที่การเลื่อนไถล (slip plane) จะขนานกับทิศทางของการเลื่อนไถล (slip direction or screw dislocation line) ซึ่งขนาดของการกระจัดนั้นเรียกว่าเบอร์เกอร์เวกเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.18 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการเคลื่อนที่ของโครงผลึกแบบขอบ



รูปที่ 2.19 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการเคลื่อนที่ของโครงผลึกแบบสกรู

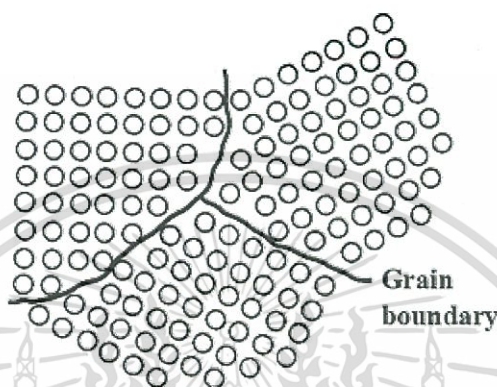
2.4.3 ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบสองมิติหรือแบบระนาบ

ความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบสองมิติหรือแบบระนาบนี้เป็นความไม่สมบูรณ์บนพื้นผิว (surface-impurity) ของผลึกสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3.1 เกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน

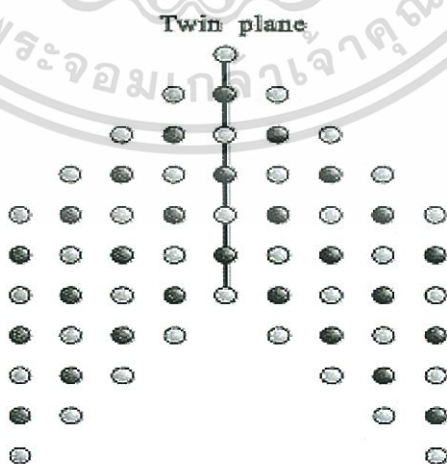
เกรน (grain) คือบริเวณเล็กๆ ที่โครงผลึกหรือหน่วยเซลล์มีการจัดเรียงตัวในทิศทางเดียวกันและตรงบริเวณขอบเขตรอยต่อระหว่างบริเวณที่โครงผลึกมีการจัดเรียงตัวในทิศทางแตกต่างกันนั้นเรียกว่า รอยต่อเกรน (grain boundary) ดังแสดงในรูปที่ 2.13 โดยที่ผลึกที่มีมากกว่าหนึ่งเกรนนั้นเรียกว่า ผลึกพหุพันธ์ (polycrystallines) ส่วนผลึกที่มีเพียงเกรนเดียวนั้นเรียกว่า ผลึกเอกพันธ์หรือผลึกเดี่ยว (single crystal)



รูปที่ 2.20 แสดงความไม่สมบูรณ์ของผลึกชนิดเกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน

2.4.3.2 ผลึกแฝดและขอบเขตรอยต่อของผลึกแฝดหรือระนาบของโครงผลึกแฝด

โครงผลึกแฝด (twin) คือบริเวณที่โครงผลึกหรือหน่วยเซลล์มีการผิดรูปไปโดยมีสมมาตรแบบกระจก โดยที่โครงผลึกที่ผิดรูปจะกลายเป็นภาพสะท้อนของโครงผลึกที่ไม่ผิดรูปและตรงบริเวณขอบเขตรอยต่อระหว่างโครงผลึกที่ผิดรูปและโครงผลึกที่ไม่ผิดรูปนี้เรียกว่า รอยต่อโครงผลึกแฝดหรือระนาบของโครงผลึกแฝด (twin boundary or twinplane) ดังแสดงในรูปที่ 2.21

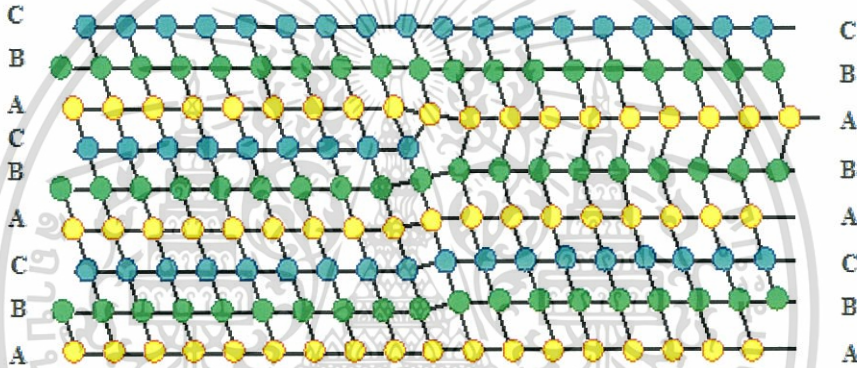


รูปที่ 2.21 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของโครงผลึกแฝดและระนาบของโครงผลึกแฝด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3.3 ความบกพร่องของผลึกแบบการจัดเรียงระนาบของอะตอมผิคลำดับ (stacking faults)

เป็นความไม่สมบูรณ์ของผลึกบนพื้นผิวที่เป็นผลมาจากการที่โครงผลึกมีการจัดเรียงระนาบของอะตอมแบบผิคลำดับ เช่น สำหรับโครงผลึกอุมคติแบบ fcc ที่มีการจัดเรียงระนาบของอะตอมที่ถูกต้องตามลำดับเป็น ABCABCABC... แต่ถ้าเป็นกรณีโครงผลึกที่ไม่สมบูรณ์จะมีการจัดเรียงระนาบของอะตอมเป็น ABCABABCA... การเกิดการจัดเรียงระนาบผิคลำดับจากตัวอย่างขึ้นอยู่กับระนาบ A ที่อยู่ถัดจากระนาบที่ 2 “B” และอาจจะอธิบายได้ว่าเป็นบริเวณที่มีระนาบที่อยู่ในโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล ไคลสแพค (hexagonal close packed : hcp) แทรกอยู่กับระนาบที่อยู่ในโครงสร้างผลึกแบบเฟสเซนเตอร์คิวบิก (fcc) ซึ่งอาจจะเกิดในระหว่างที่เกิดผลึกและอาจเป็นผลจากการเคลื่อนย้าย (partial dislocation) สองส่วนดังแสดงในรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 แสดงลักษณะความไม่สมบูรณ์ของผลึกแบบการจัดเรียงระนาบของอะตอมผิคลำดับ

2.5 การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

[19-20, 23-24, 29-30]

เทคนิคการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศนั้น ต้องเตรียมในสุญญากาศที่ระดับความดันประมาณ 10^{-5} - 10^{-7} ทอร์ วัตถุประสงค์ของการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีนี้ คือ การควบคุมการเคลื่อนย้ายอะตอมจากแหล่งกำเนิดความร้อนไปยังฐานรองรับที่ห่างออกไปแล้วเกิดเป็นฟิล์มบาง

2.5.1 อัตราการระเหยสาร

จากการทดลองของเฮิร์ตซ์ (Hertz) และนุกเซน (Knudsen) พบว่าอัตราการไหลของอะตอมหรือโมเลกุล ในสุญญากาศ จากแหล่งกำเนิดความร้อน (heat source) คือ

$$\Phi_e = \frac{3.513 \cdot 10^{22}}{(MT)^{1/2}} P_e \quad \text{โมเลกุลต่อตารางเซนติเมตร-วินาที} \quad (2.1)$$

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

$$\Gamma_e = 5.84 \cdot 10^{-2} (M/T)^{1/2} P_e \quad \text{กรัมต่อตารางเซนติเมตร-วินาที} \quad (2.2)$$

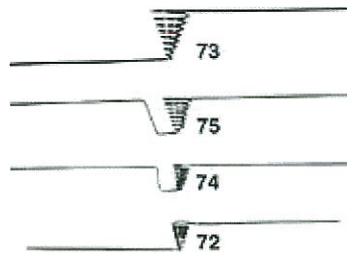
ที่ความดัน 10^{-2} ทอร์ ค่าของ Γ_e ในธาตุจำนวนมากจะมีค่าประมาณ 10^{-4} กรัมต่อตารางเซนติเมตร-วินาที ดังนั้นสิ่งที่มีอิทธิพลต่ออัตราการระเหยสาร คือ อุณหภูมิ เพราะมีผลกระทบอย่างมากต่อความดันสมดุล

2.5.2 แหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้ในการระเหยสารด้วยไฟฟ้า

ในการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการระเหยด้วยความร้อน จะต้องให้ความร้อนแก่สารกึ่งตัวนำที่ต้องการนำมาเคลือบบนผิวหน้าแผ่นฐานรอง โดยทั่วไปแล้วจะใช้ตัวต้านทานหรือขดลวดเหนี่ยวนำ เป็นแหล่งกำเนิดโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่ตัวต้านทานหรือขดลวดเหนี่ยวนำได้ แหล่งกำเนิดความร้อนมีหลายชนิด แบ่งออกได้ดังนี้

2.5.2.1 แหล่งกำเนิดชนิดถังสแตน

แหล่งกำเนิดนี้จะอยู่ในรูปพันรอบเดียวหรือหลายรอบ เป็นเกลียวทรงกระบอกหรือรูปโคน ดังแสดงในรูป 2.23 โดยขดลวดทรงกระบอกจะใช้สำหรับโลหะที่หลอมละลายได้เร็ว ส่วนขดลวดรูปโคนจะใช้ได้ดีกับโลหะที่หลอมละลายช้า ขดลวดทั้งสแตนสามารถทำงานได้จนกระทั่งอุณหภูมิ 2,200 เคลวิน เกินกว่านี้ประสิทธิภาพจะลดลง



รูปที่ 2.23 แหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้ระเหยสารชนิดทั้งสแตน

2.5.2.2 แหล่งกำเนิดชนิดแผ่นโลหะทรงรูป

แหล่งกำเนิดชนิดแผ่นโลหะทรงรูป เช่น ทั้งสแตน, แทนทาลัม และโมลิบดีนัม จะเหมือนกับอุปกรณ์ที่เป็นขดลวด คือ มีความต้านทานในตัวเองและให้ความร้อนที่ค่าแรงดันต่ำ แต่กระแสสูง แหล่งกำเนิดเหล่านี้จะถูกสร้างขึ้นมาในรูปแบบต่างๆ



รูปที่ 2.24 แหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้ระเหยสารด้วยไฟฟ้าแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.3 ความดันไอของธาตุ (vapor pressure of the elements)

ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความดันไอ แสดงได้ดังสมการ

$$\frac{dP}{dT} = \frac{\Delta H(T)}{T\Delta V} \quad (2.3)$$

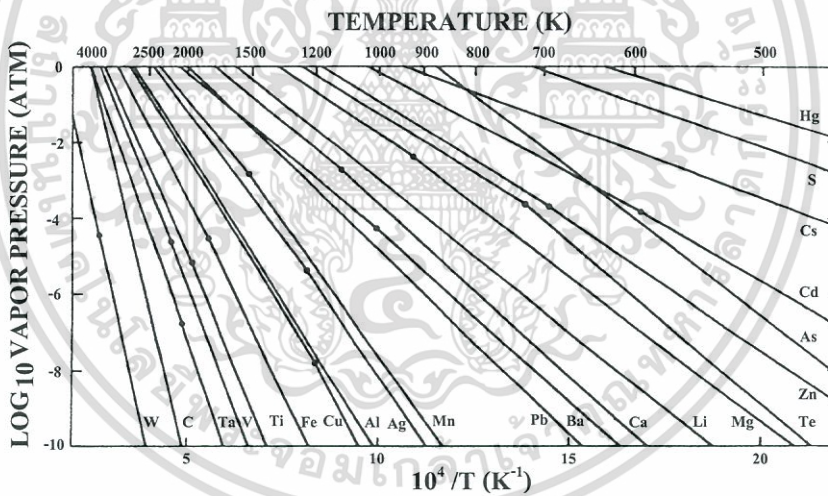
ถ้าให้ ΔV มีค่าเท่ากับปริมาตรของไอ (V_v) และเมื่อแก๊สนี้เป็นแก๊สในอุดมคติแล้ว V_v จะมีค่าเป็น RT/P ดังนั้น เขียนสมการที่ (2.3) ใหม่ได้เป็น

$$\frac{dP}{dT} = \frac{P\Delta H(T)}{RT^2} \quad (2.4)$$

ถ้าประมาณให้ $\Delta H(T)$ มีค่าเท่ากับ ΔH_c (ความร้อนของสารในการระเหย) ในกรณีนี้ จะได้

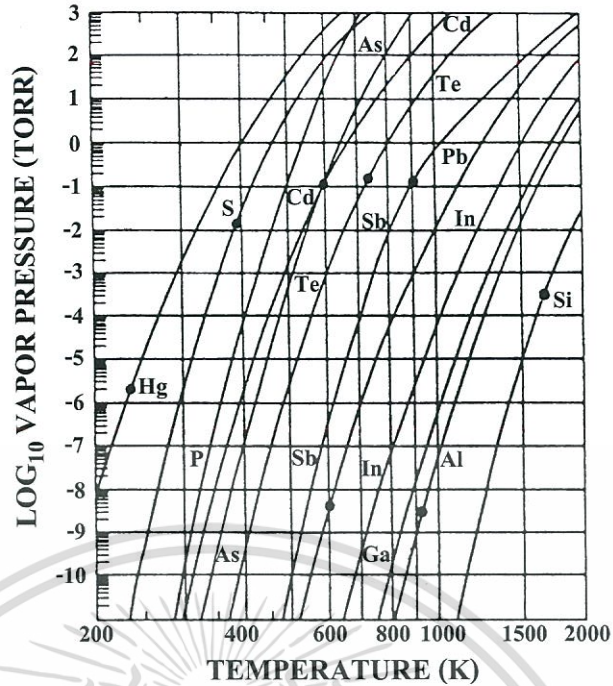
$$\ln P \approx -\frac{\Delta H_c}{RT} + I \quad \text{หรือ} \quad P = P_0 \exp\left(-\frac{\Delta H_c}{RT}\right) \quad (2.5)$$

เมื่อ I (หรือ $P_0 = \exp I$) เป็นค่าคงที่ของการอินทิเกรต



รูปที่ 2.25 แสดงกราฟค่าความดันไอของธาตุ โดยจุดต่างๆจะสัมพันธ์กับจุดหลอมเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.26 แสดงกราฟค่าความดันไอของธาตุในสารกึ่งตัวนำโดยจุดต่างๆ จะสัมพันธ์กับจุดหลอมเหลว

2.5.4 การระเหยสารประกอบ (evaporation of compound)

เนื่องจากสารประกอบจะมีไอออนขนาดใหญ่กว่าโลหะ ดังนั้นเมื่อสารประกอบระเหิดกลายเป็นไอแล้ว ส่วนประกอบของไอจะต่างไปจากสารตั้งต้นที่เป็นของแข็ง หรือของเหลว ตัวอย่างเช่น การระเหยสารประกอบกึ่งตัวนำหมู่ II-VI ได้แก่ CdS, CdTe และ CdSe เป็นต้น เมื่อระเหยเป็นไอจะเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวออก (dissociation) ดังนี้ $MX_{(s)} \rightarrow M_{(g)} + \frac{1}{2}X_{2(g)}$ โดยที่ X คือ S, Te และ Se และเมื่อเกาะลงบนผิวของฐานรองรับแล้วจะทำการจัดรูปแบบใหม่เป็น $MX_{(g)}$ เหมือนเช่นเดียวกับสารตั้งต้นในการระเหย แสดงได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงปฏิกิริยาการระเหยสารประกอบ

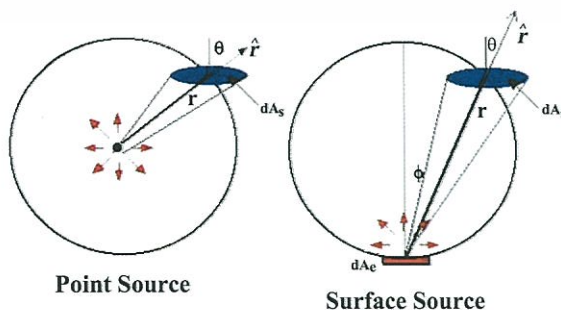
ชนิดของปฏิกิริยา	ปฏิกิริยาทางเคมี	สารตัวอย่าง
การระเหยโดยไม่มี การแตกตัว	$\text{MX}(\text{sหรือl}) \rightarrow \text{MX}(\text{g})$	SiO , GeO , SnO , AlN , CaF_2 , MgF_2
การแยกส่วนประกอบ	$\text{MX}(\text{s}) \rightarrow \text{M}(\text{s}) + 1/2 \text{X}_2(\text{g})$ $\text{MX}(\text{s}) \rightarrow \text{M}(\text{l}) + 1/n \text{X}_n(\text{g})$	Ag_2S , Ag_2Se สารกึ่งตัวนำกลุ่มIII-IV
การระเหยโดยการแตกตัว (ก) ซาลโคจีไนต์ (ข) ออกไซด์	$\text{MX}(\text{s}) \rightarrow \text{M}(\text{g}) + 1/2 \text{X}_2(\text{g})$ $\text{X} = \text{S}, \text{Se}, \text{Te}$ $\text{MO}_2(\text{s}) \rightarrow \text{MO}(\text{s}) + 1/2 \text{O}_2(\text{g})$	CdS , CdTe , CdSe SiO_2 , GeO_2 , TiO_2 , SnO_2 , ZrO_2

M = โลหะ X = อโลหะ

2.5.5 อิทธิพลของโครงสร้างเชิงเรขาคณิตต่อระบบการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการ ระเหยสาร (deposition geometry)

การเตรียมฟิล์มบางนั้นจะต้องพิจารณาประเภทของแหล่งกำเนิดสารที่ใช้ในการระเหยรวมถึง
ฐานรองรับที่อะตอมของสารจะมาตกกระทบด้วย สมมติว่าการระเหยสารเกิดขึ้นในระบบการไหล
ของโมเลกุล พิจารณาการระเหยสารจากแหล่งกำเนิดแบบจุด (point source) มวลรวมของสารจาก
การระเหย (total evaporation mass: \bar{M}_e) สามารถวัดได้จากน้ำหนักของสารก่อนและหลังระเหย
แต่เมื่อพิจารณาแหล่งกำเนิดพื้นผิว (surface source) มวลรวมของสารจากการระเหยจะหาได้จาก

$$\bar{M}_e = \int_0^t \int_{A_c} \frac{M}{N_A} \Phi_e dA_e dt = \int_0^t \int_{A_c} \Gamma_e dA_e dt \quad (2.6)$$



รูปที่ 2.27 แสดงรูปแบบการระเหยของสารตั้งต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ A_E คือ พื้นที่ผิวของสารที่ใช้ระเหยปริมาณของมวล $d\bar{M}_s$ ที่ตกลงบนฐานรองเป็นพื้นที่ dA_s จากรูปที่ 2.27 dA_c คือ พื้นที่ผิวของทรงกลม จะได้ว่า $dA_c = dA_s \cos \theta$ ดังนั้น จะมีค่าเป็น

$$d\bar{M}_s = dA_s \left(\frac{\bar{M}_c \cos \theta}{4\pi^2} \right) \quad (2.7)$$

เมื่อ r คือระยะระหว่างแหล่งกำเนิดถึงฐานรอง

เมื่อพิจารณาการระเหยสารจากแหล่งกำเนิดที่มีผิวเรียบ มวลตกกระทบลงบนพื้นที่เล็กน้อย dA_c โดยทำมุมกับพื้นผิวแหล่งกำเนิด ϕ และอยู่ห่างเป็นระยะ r จะได้

$$d\bar{M}_s(\phi, r) = (\cos \phi) d\bar{M}_s(0, r) dA_c \quad (2.8)$$

แฟกเตอร์ $\cos \phi$ เป็นฟังก์ชันของ ϕ เรียกว่า การกระจายของฟลักซ์แบบโคซายน์ (cosine flux distribution) เป็นผลมาจากระบบการไหลของโมเลกุลเพื่อประมาณค่า $\frac{d\bar{M}_s(\phi, r)}{dA_c}$ ทำการอินทิเกรตตลอดครึ่งทรงกลมรัศมี r จะได้

$$\bar{M}_c = \int_0^{\pi/2} \left(\frac{d\bar{M}_s(0, r)}{dA_c} \right) (\cos \phi) 2\pi (\sin \phi) r d\phi \quad (2.9)$$

จากการประมาณค่าอินทิเกรตข้างต้นจะพบว่า

$$\frac{d\bar{M}_s(0, r)}{dA_c} = \frac{\bar{M}_c}{\pi^2}$$

ดังนั้น

$$\frac{d\bar{M}_s(\phi, r)}{dA_c} = \frac{\bar{M}_c}{\pi^2} \cos \phi$$

จาก

$$dA_c = dA_s \cos \theta$$

จะได้

$$\frac{d\bar{M}_s(\phi, \theta, r)}{dA_s} = \frac{\bar{M}_c \cos \phi \cos \theta}{\pi^2} \quad (2.10)$$

และสามารถเขียนเป็นสมการทั่วไปได้ดังนี้ คือ

$$\frac{d\bar{M}_s(\phi, \theta, r)}{dA_s} = \bar{M}_c \frac{(n+1) \cos^n \phi \cos \theta}{2\pi^2} \quad (n \geq 0) \quad (2.11)$$

เมื่อ $n = 1$ สมการนี้จะเป็นการกระจายของฟลักซ์แบบโคซายน์ ถ้า $n > 1$ อธิบายได้ว่ามีทิศทางของฟลักซ์หลายทิศทาง (more forward directed) หรือถ้า $n < 1$ จะเกิดการกระจายแบบเอกซาร์นเป็นเอกซาร์นที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เดียวกัน (more uniform distribution) และสำหรับ $n = 0$ การกระจายของฟลักซ์จะเหมือนแหล่งกำเนิดแบบจุด

2.6 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

[6,14-31,35-37]

การศึกษาโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction) เป็นการศึกษาเพื่อยืนยันว่าฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้ มีโครงสร้างผลึกแบบใดเป็นไปตามที่ต้องการและเมื่อทราบผลแล้วจึงจะนำฟิล์มบางที่ได้ไปตรวจสอบสมบัติทางฟิสิกส์อื่นๆ ต่อไป

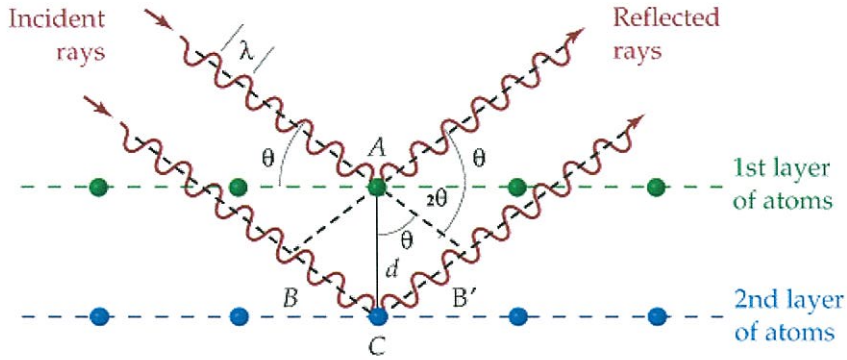
ในปี 1912 นักฟิสิกส์ชาวเยอรมันชื่อ มากซ์ ฟอน เลาเอ (Max Von Laue) ได้ค้นพบการจัดเรียงตัวของอะตอมในผลึก (มีระยะห่างระหว่างอะตอมประมาณ 10^{-10} เมตร) โดยการผ่านรังสีเอกซ์เข้าไปในผลึกแล้วศึกษาถึงวิธีการแทรกสอดของรังสีเอกซ์บนแผ่นฟิล์ม โดยสังเกตว่ารูปแบบการเลี้ยวเบนที่เกิดขึ้นเกิดจากการที่รังสีเอกซ์ถูกกระเจิงด้วยอะตอมหรือ โมเลกุลที่จัดเรียงตัวบนระนาบต่าง ๆ ของโครงผลึก

ต่อมาในปีเดียวกันนักวิทยาศาสตร์ฟิสิกส์ชาวอเมริกันชื่อ วิลเลียม เฮนรี แบรกก์ และวิลเลียม ลอร์เรนซ์ แบรกก์ (William Henry Bragg and William Lawrence Bragg) ได้เสนอแนวคิดที่เราสามารถมองได้ว่าผลึกจัดเรียงตัวเป็นชั้น (layer) หรือ ระนาบ (plane) ของอะตอมซึ่งสามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบ โดยมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อนและได้ตั้งกฎการเลี้ยวเบนของ รังสีเอกซ์ไว้ว่า รังสีเอกซ์จะแทรกสอดเสริมกันมากที่สุด เมื่อมีการกระเจิงออกจากแต่ละระนาบด้วยระยะที่แตกต่างกันเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ และกฎนี้เรียกว่ากฎของแบรกก์ (Bragg's law) ดังสมการที่ (2.12)

$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda \quad (2.12)$$

- เมื่อ d_{hkl} คือ ระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอมในผลึกที่ขนานกัน
 θ คือ มุมตกกระทบและมุมสะท้อนของรังสีเอกซ์ที่ทำกับระนาบของผลึก
 2θ คือ มุมแบรกก์หรือมุมเลี้ยวเบนซึ่งเป็นมุมที่รังสีตกกระทบทำมุมกับรังสีสะท้อน
 n คือ ลำดับที่ของการเลี้ยวเบนมีค่าตั้งแต่ 1, 2, 3, ...
 λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.28 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากระนาบผลึก

จากข้อมูลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เราสามารถนำมาหาค่าคงที่ของโครงผลึกได้ ในกรณีของผลึกที่มีโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ซึ่งจัดอยู่ในระบบคิวบิก ($a = b = c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90$ องศา) มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (2.13)$$

จากสมการที่ (2.12) เมื่อ $n = 1$ แทนใส่ในสมการที่ (2.13) จะได้ความสัมพันธ์ที่ใช้หาค่าคงที่ของโครงผลึก (a) เมื่อทราบมุมแบรกก์ (θ) ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ (λ) และดัชนีมิลเลอร์ (hkl) ดังสมการ

$$\frac{4 \sin^2 \theta}{\lambda^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (2.14)$$

ส่วนผลึกที่มีโครงสร้างแบบซัลโคไฟไรท์จัดอยู่ในระบบเตตระโกนัล ($a = b \neq c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90$ องศา) มีความสัมพันธ์ดังนี้คือ

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad (2.15)$$

ในทำนองเดียวกันจากสมการที่ (2.12) เมื่อ $n = 1$ แทนใส่ในสมการที่ (2.15) จะได้ความสัมพันธ์ที่ใช้หาค่าคงที่ของโครงผลึก (a, c) เมื่อเราทราบขนาดมุมแบรกก์ (θ) ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ (λ) และดัชนีมิลเลอร์ (hkl) ดังสมการ

$$\frac{4 \sin^2 \theta}{\lambda^2} = \frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad (2.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนั้นเรายังสามารถนำข้อมูลที่ได้นำไปหาสัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบของโครงผลึก (texture coefficient) ของระนาบ (hkl) ขนาดของเกรน ความหนาแน่นของการเคลื่อนที่ของโครงผลึก (dislocation density) ความเครียด (strain) และความน่าจะเป็นของความผิดพร่องการจัดเรียงระนาบของโครงผลึก (stacking fault probability) สัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบของโครงผลึกหาได้จากสมการ

$$TC(hkl) = \frac{\frac{I(hkl)}{I_0(hkl)}}{\frac{1}{N} \sum \frac{I(hkl)}{I_0(hkl)}} \quad (2.17)$$

- เมื่อ TC(hkl) คือ สัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบของโครงผลึก (hkl)
 I(hkl) คือ ความเข้มของพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางที่ปรากฏ
 I₀(hkl) คือ ความเข้มมาตรฐาน ASTM ของพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์
 N คือ จำนวนพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ปรากฏ

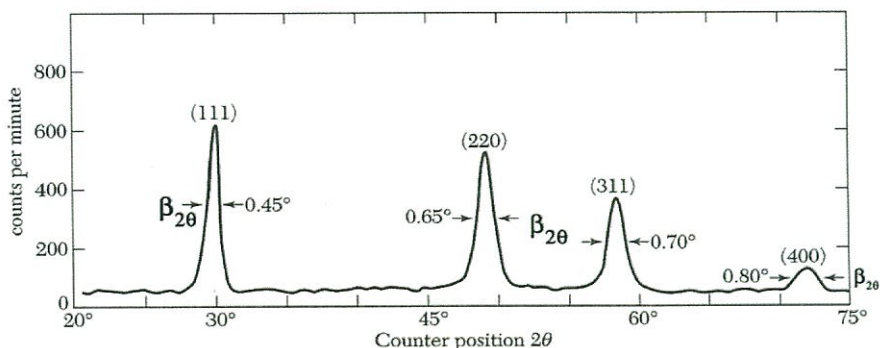
ขนาดของเกรน (D) และความเครียด (ε_s) เราสามารถหาได้จากสมการ

$$\beta = \frac{\lambda}{D \cos \theta} - \epsilon_s \tan \theta \quad (2.18)$$

ดังนั้น

$$\beta \cos \theta = \frac{\lambda}{D} - \epsilon_s \sin \theta \quad (2.19)$$

- เมื่อ D คือ ขนาดของเกรน
 β คือ ความกว้างเต็มช่วงที่ครึ่งค่าสูงสุดของพีคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (full width at half maximum : FWHM)
 θ คือ มุมตกกระทบและมุมสะท้อนของรังสีเอกซ์ที่ทำกับระนาบของผลึก
 ε_s คือ ความเครียด



รูปที่ 2.29 แสดงวิธีการหา $\beta_{2\theta}$ เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

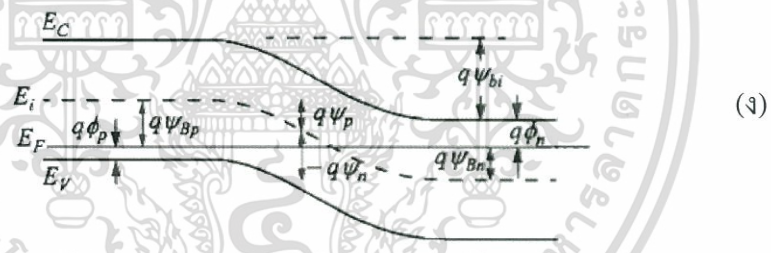
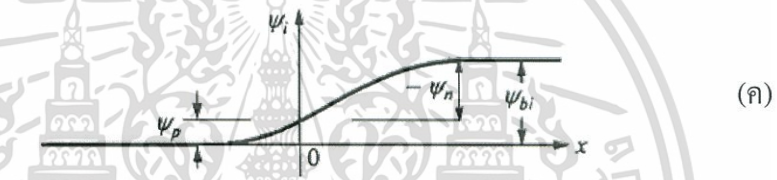
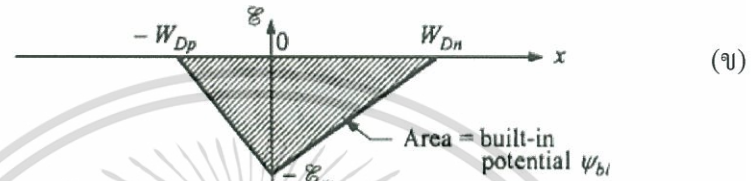
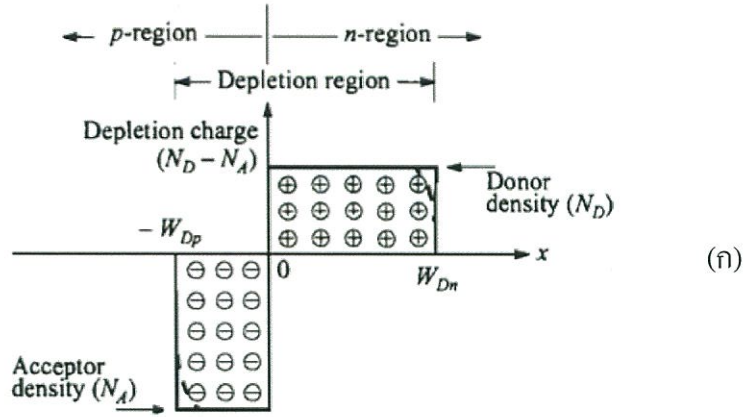
2.7 รอยต่อพี-เอ็น [6,13-14, 16, 20, 28-30,35-37]

รอยต่อพี-เอ็นมีความสำคัญเป็นอย่างมากทั้งในด้านการนำไปประยุกต์ใช้ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ทันสมัย และในการทำความเข้าใจเกี่ยวกับสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำสมัยใหม่ ทฤษฎีรอยต่อพี-เอ็นเป็นความรู้พื้นฐานที่จำเป็นสำหรับฟิสิกส์ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ทฤษฎีพื้นฐานของลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้า ในรอยต่อพี-เอ็น ได้ก่อตั้งขึ้น โดยชอกลีย์ ทฤษฎีนี้ได้รับการพัฒนาเพิ่มเติมโดย ซาห์(Sah), นอยซี(Noyce), ชอกลีย์(Shockley) และมอลล์(Moll) ลักษณะสมบัติของกระแส-แรงดันไฟฟ้าของรอยต่อพี-เอ็นที่เบี่ยงเบนไปจากกรณีอุดมคติมีสาเหตุมาจากหลายประการ เช่น การเกิดและการรวมตัวของพาหะอิสระผ่านกับดักประจุที่บริเวณพร่องพาหะ การฉีดพาหะผ่านรอยต่อในปริมาณที่สูงและความต้านทานอนุกรมเป็นต้น รอยต่อพี-เอ็นเป็นสิ่งประดิษฐ์สองขั้ว โดยที่สมบัติของรอยต่อพี-เอ็นจะขึ้นกับโปรไฟล์ของความเข้มข้นของสารเจือ รูปทรงเรขาคณิตของรอยต่อและเงื่อนไขการไบแอส รอยต่อพี-เอ็นมีสมบัติการเรียงกระแส กล่าวคือยอมให้กระแสไหลได้ทางเดียวซึ่งสามารถนำไปประดิษฐ์เป็น ไดโอดชนิดต่างๆ เช่น ซีเนอร์ไดโอด, อะวาลานซ์ไดโอด, PIN ไดโอด, วาริสเตอร์ และวาร์เรเตอร์ เป็นต้น

2.7.1 บริเวณพร่องพาหะ (depletion region)

2.7.1.1 การเกิดรอยต่อฉับพลัน (abrupt junction)

เมื่อความหนาแน่นของสารเจือในสารกึ่งตัวนำมีการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน จากสารเจือผู้รับ (N_A) ไปยังสารเจือผู้ให้ (N_D) แสดงไว้ในรูปที่ 2.30 (ก) ผลที่ได้รับทำให้เกิดรอยต่อฉับพลัน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ถ้า $N_A \gg N_D$ (หรือในทางกลับกัน) ผลที่ได้รับจากรอยต่อฉับพลันทำให้เกิด $p^+ - n$ (หรือ $n^+ - p$)



รูปที่ 2.30 แสดงรอยต่อพี-เอ็นจังก์ชันในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน
 ก. การกระจายตัวของประจุบริเวณพร่องพาหะ (เส้นประ แสดงถึงการประมาณค่าบริเวณพร่องพาหะ)
 ข. การกระจายตัวของสนามไฟฟ้า
 ค. การกระจายของศักย์ไฟฟ้าโดยที่ ψ_{bi} เป็นศักย์ตกคร่อมรอยต่อ
 ง. โครงสร้างแถบพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก่อนอื่นต้องพิจารณาสถานะสมดุลทางความร้อนที่ไม่มีแรงดันไบแอส กระแสพิคพาและกระแสแพร่ซึมของอิเล็กตรอนจะเป็นดังนี้คือ

$$J_n = 0 = q\mu_n \left(n\xi + \frac{kT}{q} \frac{dn}{dx} \right) = \mu_n n \frac{dE_F}{dx} \quad (2.20)$$

หรือ

$$\frac{dE_F}{dx} = 0. \quad (2.21)$$

กระแสของโฮลก็เป็นเช่นเดียวกัน คือ

$$J_p = 0 = \mu_p p \frac{dE_F}{dx} \quad (2.22)$$

ดังนั้นเงื่อนไขของกระแสโฮล และอิเล็กตรอนสุทธิขณะที่แรงดันไบแอสเป็นศูนย์ จะต้องกำหนดให้ระดับพลังงานเฟอร์มีคงที่ตลอด ศักย์ตกคร่อมรอยต่อหรือศักย์แพร่ซึม ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.30 (ข), 2.30 (ค) และ 2.30 (ง) มีค่าเท่ากับ

$$q\psi_{bi} = E_g - (q\phi_n + q\phi_p) = q\psi_{Bn} + q\psi_{Bp} \quad (2.23)$$

สำหรับสารกึ่งตัวนำอนดีเจนเนอเรต (non-degenerate semiconductor)

$$\begin{aligned} \psi_{bi} &= \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{n_{no}}{n_i} \right) + \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{p_{po}}{n_i} \right) \\ &= \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_D N_A}{n_i^2} \right) \end{aligned} \quad (2.24)$$

ที่สถานะสมดุลความร้อน $n_{no} p_{no} = n_{po} p_{po} = n_i^2$

$$\psi_{bi} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{p_{po}}{p_{no}} \right) = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{n_{no}}{n_{po}} \right) \quad (2.25)$$

สมการนี้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพาหะข้างมาก และพาหะข้างน้อยในสารกึ่งตัวนำแต่ละข้างของรอยต่อ ถัดไปเราจะคำนวณหาค่าสนามไฟฟ้า และการกระจายศักย์ไฟฟ้าภายในบริเวณพร่องพาหะ โดยการประมาณว่าประจุบวกและประจุลบที่อยู่เฉพาะภายในบริเวณพร่องพาหะและจะอยู่แยกกันคนละด้านของบริเวณพร่องพาหะอิสระ ส่วนบริเวณที่อยู่นอกบริเวณพร่องพาหะจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถือว่าสนามไฟฟ้ามีค่าเป็นศูนย์ ประจุลบต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ในด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพีจะต้องเท่ากับประจุบวกต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ในด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นดังสมการ

$$N_A W_{Dp} = N_D W_{Dn} \quad (2.26)$$

จากสมการปัวซอง (equation Poisson) จะได้ว่า

$$-\frac{d^2\psi_i}{dx^2} = \frac{d\xi}{dx} = \frac{\rho(x)}{\epsilon_s} = \frac{q}{\epsilon_s} [N_D^+(x) - n(x) - N_A^-(x) + p(x)] \quad (2.27)$$

ภายในบริเวณพ่วงพาหะ $n(x) \approx p(x) \approx 0$ แล้วสมมติว่าเกิดการไอออไนซ์ที่สมบูรณ์,

$$\frac{d^2\psi_i}{dx^2} \approx \frac{qN_A}{\epsilon_s} \quad \text{สำหรับ} \quad -W_{Dp} \leq x \leq 0, \quad (2.28ก.)$$

$$\frac{d^2\psi_i}{dx^2} \approx \frac{qN_D}{\epsilon_s} \quad \text{สำหรับ} \quad 0 \leq x \leq W_{Dn} \quad (2.28ข.)$$

สนามไฟฟ้าสามารถหาได้โดยการรวมสมการที่ (2.28ก) และสมการที่ (2.28ข) ที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.30(ข) :

$$\xi(x) = -\frac{qN_A(x+W_{Dp})}{\epsilon_s} \quad \text{สำหรับ} \quad -W_{Dp} \leq x \leq 0, \quad (2.29)$$

$$\begin{aligned} \xi(x) &= -\xi_m + \frac{qN_D x}{\epsilon_s} \\ &= -\frac{qN_D}{\epsilon_s}(W_{Dn} - x) \quad \text{สำหรับ} \quad 0 \leq x \leq W_{Dn} \end{aligned} \quad (2.30)$$

โดยที่ ξ_m คือ สนามไฟฟ้าสูงสุดที่ $x=0$ จะได้ว่า

$$|\xi(x)| = \frac{qN_D W_{Dn}}{\epsilon_s} = \frac{qN_A W_{Dp}}{\epsilon_s} \quad (2.31)$$

รวมสมการที่ (2.31) และ สมการที่ (2.32) อีกครั้งเพื่อหาค่าการกระจายศักย์ไฟฟ้า $\psi_i(x)$ (รูปที่ 2.22 (ค))

$$\psi_i(x) = \frac{qN_A}{2\epsilon_s}(x+W_{Dp})^2 \quad \text{สำหรับ} \quad -W_{Dp} \leq x \leq 0, \quad (2.32)$$

$$\psi_i(x) = \psi_i(0) + \frac{qN_D}{\epsilon_s}(W_{Dn} - \frac{x}{2})x \quad \text{สำหรับ} \quad 0 \leq x \leq W_{Dn} \quad (2.33)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่แต่ละด้านของบริเวณพ่องพาหะจะให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ต่างกัน เราสามารถคำนวณได้จาก

$$\psi_p = \frac{qN_A W_{Dp}^2}{2\epsilon_s}, \quad (2.34ก.)$$

$$\psi_p = \frac{qN_D W_{Dn}^2}{2\epsilon_s}, \quad (2.34ข.)$$

ศักย์ตกคร่อมรอยต่อ ψ_{bi} จะมีค่าดังนี้คือ

$$\psi_{bi} = \psi_p + |\psi_n| = \psi_i(W_{Dn}) = \frac{|\xi_m|}{2} (W_{Dp} + W_{Dn}) \quad (2.35)$$

ξ_m สามารถคำนวณได้จาก :

$$|\xi_m| = \sqrt{\frac{2qN_A \psi_p}{\epsilon_s}} = \sqrt{\frac{2qN_D \psi_n}{\epsilon_s}} \quad (2.36)$$

จากสมการที่ (2.36) และสมการที่ (2.26) บริเวณพ่องพาหะสามารถคำนวณได้ดังนี้ :

$$W_{Dp} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s \psi_{bi}}{q} \frac{N_D}{N_A(N_A + N_D)}} \quad (2.37ก.)$$

$$W_{Dn} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s \psi_{bi}}{q} \frac{N_A}{N_D(N_A + N_D)}} \quad (2.37ข.)$$

$$W_{Dp} + W_{Dn} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \left(\frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right) \psi_{bi}} \quad (2.38)$$

จากสมการที่ (2.39ก.), (2.39ข.) และ (2.40) สามารถอนุมานได้ดังนี้

$$\frac{|\psi_n|}{\psi_{bi}} = \frac{W_{Dn}}{W_{Dp} + W_{Dn}} = \frac{N_A}{N_A + N_D} \quad (2.39ก.)$$

$$\frac{|\psi_p|}{\psi_{bi}} = \frac{W_{Dp}}{W_{Dp} + W_{Dn}} = \frac{N_D}{N_A + N_D} \quad (2.39ข.)$$

สำหรับรอยต่อฉับพลันด้านใดด้านหนึ่ง ($p^+ - n, n^+ - p$) ในกรณีนี้สมการที่ (2.25) จะใช้ในการคำนวณหาค่าศักย์ตกคร่อมรอยต่อ โดยที่ศักย์ตกคร่อมรอยต่อและบริเวณพ่องพาหะจะปรากฏอยู่ในบริเวณสารกึ่งตัวนำที่มีสารเจือปนน้อยๆ เมื่อลดรูปสมการที่ (2.38) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$W_D = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s \psi_{bi}}{qN}} \quad (2.40)$$

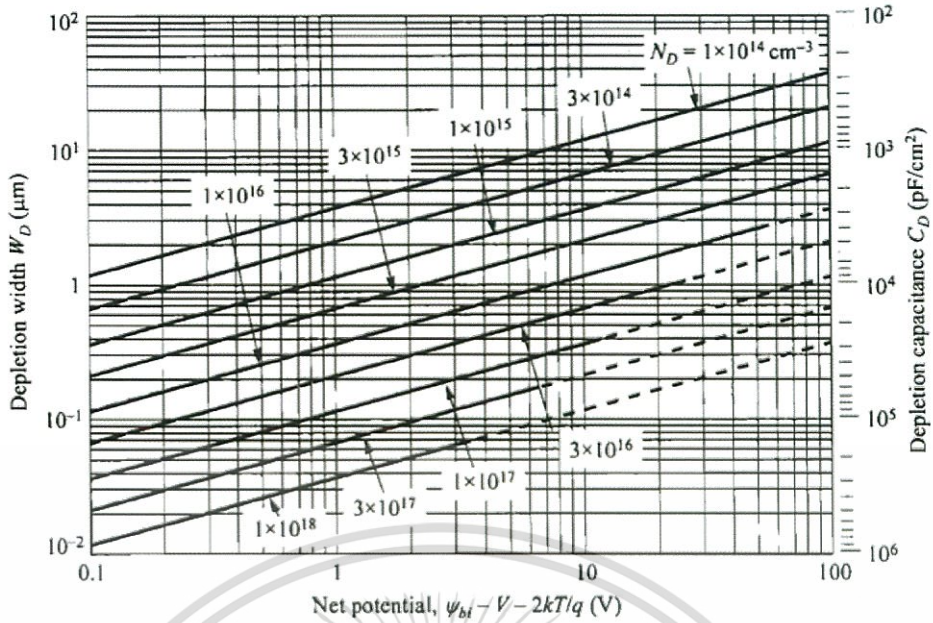
ที่ N คือ N_D หรือ N_A โดยที่ $N_A \gg N_D$ หรือในทางตรงข้ามกัน, และ

$$\psi_i(x) = |\xi_m| \left(x - \frac{x^2}{2W_D} \right) \quad (2.41)$$

การอธิบายดังกล่าวข้างต้นนี้อาศัยการประมาณว่าประจุบวก และประจุลบจะปรากฏอยู่เฉพาะในบริเวณพ่องพาหะเท่านั้น แต่ถ้าต้องการความถูกต้องมากขึ้นเราจำเป็นต้องพิจารณาการกระจายของความหนาแน่นของพาหะข้างมากเพิ่มเติมเข้าไปในสมการปัวซอง เช่น ด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพี จะมีความหนาแน่นของประจุเป็น $\rho \approx -q[N_A - p(x)]$ ส่วนด้านเอ็นจะมีความหนาแน่นของประจุเป็น $\rho \approx q[N_D - n(x)]$ ความกว้างของบริเวณพ่องพาหะ สามารถหาได้จากสมการที่ (2.38) โดยการแทนที่ ψ_{bi} ด้วย $(\psi_{bi} - 2kT/q)$ โดยที่ $2kT/q$ เป็นแฟกเตอร์ค่าแก้ไข ซึ่งเกี่ยวข้องกับส่วนหางของการกระจายของพาหะข้างมาก เช่น พาหะข้างมากเป็นอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และพาหะข้างมากเป็นโฮลในสารกึ่งตัวนำชนิดพี ที่อยู่ใกล้ขอบบริเวณพ่องพาหะ โดยที่ kT/q เป็นแฟกเตอร์ค่าแก้ไขของแต่ละด้านของสารกึ่งตัวนำ ค่าความกว้างของบริเวณพ่องพาหะที่สภาวะสมดุลความร้อน สำหรับรอยต่อฉับพลันที่ด้านใดด้านหนึ่งจะเป็น

$$W_D = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s \left(\psi_{bi} - \frac{2kT}{q} \right)}{qN}} \quad (2.42)$$

นอกจากนี้เมื่อ V คือ แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับรอยต่อพี-เอ็น, ค่าศักย์ไฟฟ้าสถิตในรอยต่อพี-เอ็นจะเป็น $(\psi_{bi} - V)$ เมื่อ V มีค่าเป็นบวกสำหรับไบแอสตรง และเป็นลบสำหรับไบแอสกลับทาง แทนค่า ψ_{bi} ด้วย $(\psi_{bi} - V)$ ลงในสมการที่ (2.42) จะได้ค่าความกว้างของบริเวณพ่องพาหะเป็นฟังก์ชันกับแรงดันไฟฟ้า ผลที่ได้ของรอยต่อฉับพลันเฉพาะด้านใดด้านหนึ่งในสารกึ่งตัวนำซิลิคอนแสดงไว้ในรูปที่ 2.31



รูปที่ 2.31 แสดงความกว้างของบริเวณพร่องพาหะ และความจุของบริเวณพร่องพาหะต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่กับฟังก์ชันศักย์ไฟฟ้าสุทธิตามสมการ $(\psi_{bi} - V - 2kT/q)$ สำหรับด้านใดด้านหนึ่งของรอยต่อพี-เอ็นในสารกึ่งตัวนำซิลิคอนเส้นประแสดงเงื่อนไขการเบรกดาวน์

ศักย์ไฟฟ้าสุทธิที่ไบแอสเป็นศูนย์สำหรับสารกึ่งตัวนำซิลิคอนจะมีค่าประมาณ 0.8 โวลต์ และสำหรับแกลเลียมอาร์เซไนด์ประมาณ 1.3 โวลต์ ศักย์ไฟฟ้าสุทธิจะลดลงภายใต้ไบแอสตรง และจะเพิ่มขึ้นภายใต้ไบแอสกลับทาง ผลดังกล่าวนี้ใช้ร่วมกับสารกึ่งตัวนำแกลเลียมอาร์เซไนด์ เนื่องจากทั้งซิลิคอน และแกลเลียมอาร์เซไนด์มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสถิตเท่ากัน ความกว้างของบริเวณพร่องพาหะของสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นๆ เช่น เยอรมันเนียม ต้องคูณแฟกเตอร์ค่าแก้ไขของซิลิคอนเข้าไปด้วย $\sqrt{\epsilon_s(Ge) / \epsilon_{s(Si)}} (=1.16)$ การคำนวณง่ายๆ ดังกล่าวนี้สามารถนำไปใช้กับรอยต่อพี-เอ็นชนิดพลันของสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นๆ ได้

2.7.1.2 ความจุไฟฟ้าบริเวณพร่องพาหะ (depletion-layer capacitance)

ความจุไฟฟ้าบริเวณพร่องพาหะต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ถูกกำหนดเป็น $C_D = dQ_D / dV = \epsilon_s / W_D$ ที่ dQ_D คือ ประจุบริเวณพร่องพาหะที่เพิ่มขึ้นของรอยต่อด้านใดด้านหนึ่งเมื่อ dV เพิ่มขึ้น, ค่าความจุไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่จะได้

$$C_D = \frac{\epsilon_s}{W_D} = \sqrt{\frac{q\epsilon_s N}{2}} \left(\psi_{bi} - V - \frac{2kT}{q} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (2.43)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ V เป็นบวกสำหรับไบแอสตรง และเป็นลบสำหรับไบแอสกลับทาง ผลที่ได้จากความจุไฟฟ้าบริเวณพร่องพาหะแสดงไว้ในรูปที่ 2.32 จากสมการที่ (2.45) จะได้

$$\frac{1}{C_D^2} = \frac{2}{q\epsilon_s N} \left(\psi_{bi} - V - \frac{2kT}{q} \right), \quad (2.44)$$

$$\frac{d(1/C_D^2)}{dV} = -\frac{2}{q\epsilon_s N} \quad (2.45)$$

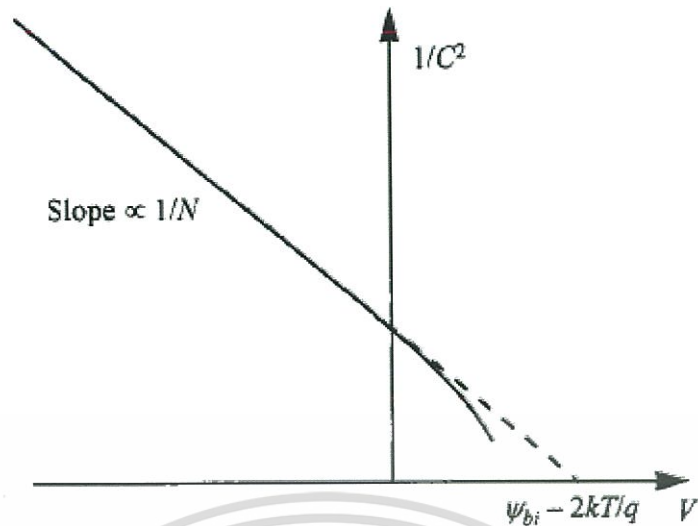
จากสมการที่ (2.44) และ (2.45) นำไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C^2$ กับ V (รูปที่ 2.24) ค่าความชันที่ได้บ่งบอกถึงความหนาแน่นของสารเจือ และที่ $1/C^2=0$ จุดตัดแกน x คือ $\psi_{bi} - 2kT/q$ สำหรับไบแอสตรงจะมีความจุแพร่ซึม (diffusion capacitance) เพิ่มขึ้นมานอกเหนือจากที่มีความจุของบริเวณพร่องพาหะ ศักย์ไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำและข้อมูลความจุแรงดันไฟฟ้า จะไม่เปลี่ยนแปลงตามโปรไฟล์ของสารเจือที่ระยะทางน้อยกว่าความยาวเดอบายซึ่งความยาวเดอบาย (Debye length : L_D) คือ ลักษณะเฉพาะของความยาวของสารกึ่งตัวนำ มีนิยามดังนี้คือ

$$L_D = \sqrt{\frac{\epsilon_s kT}{q^2 N}} = \sqrt{\frac{\epsilon_s}{qN\beta_{th}}} \quad (2.46)$$

ความยาวเดอบายให้แนวคิดถึงขีดจำกัดสำหรับการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าที่ตอบสนองต่อการเปลี่ยนโปรไฟล์ของสารเจืออย่างฉับพลัน พิจารณาที่ปริมาณการเจือเพิ่มขึ้นทีละน้อยๆ ลงในสารกึ่งตัวนำ (ΔN_D), ศักย์ไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปคือ $\Delta\psi_i(x)$ แล้ว

$$n = N_D \exp\left(\frac{\Delta\psi_i q}{kT}\right) \quad (2.47)$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \Delta\psi_i}{dx^2} &= -\frac{q}{\epsilon_s} (N_D + \Delta N_D - n) = -\frac{qN_D}{\epsilon_s} \left[1 + \frac{\Delta N_D}{N_D} - \exp\left(\frac{\Delta\psi_i q}{kT}\right) \right] \\ &\approx -\frac{qN_D}{\epsilon_s} \left[1 + \frac{\Delta N_D}{N_D} - \left(1 + \frac{\Delta\psi_i q}{kT} \right) \right] \approx \frac{q^2 N_D}{\epsilon_s kT} \Delta\psi_i \end{aligned} \quad (2.48)$$



รูปที่ 2.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C^2$ - V ซึ่งจะทำให้ได้ค่าศักย์ตกคร่อมรอยต่อและความหนาแน่นของสารเจือ

2.7.2 ลักษณะเฉพาะของกระแส-แรงดันไฟฟ้าของรอยต่อพี-เอ็น

2.7.2.1 สมการของชอกล์เลย์ในกรณีอุดมคติ

ลักษณะเฉพาะของกระแส-แรงดันไฟฟ้าในกรณีอุดมคติจะอยู่บนพื้นฐานของสมมติฐาน 4 ข้อดังนี้คือ

1. มีการประมาณว่าบริเวณพ่องพาหะเป็นแบบฉับพลัน กล่าวคือ เกิดศักย์ตกคร่อมรอยต่อเนื่องจากประจุของอะตอมผู้ให้และอะตอมผู้รับที่ถูกไอออนไนซ์ และแรงดันไบแอสจะตกคร่อมที่บริเวณรอยต่อนี้ ส่วนนอกบริเวณพ่องพาหะจะเป็นกลางทางไฟฟ้า
2. การประมาณแบบโบลตซ์มันน์จะยังใช้ได้
3. การฉีดกระแสอยู่ในระดับต่ำ กล่าวคือ ความหนาแน่นของพาหะข้างน้อยจะมีค่าต่ำกว่าความหนาแน่นของพาหะข้างมาก
4. ไม่มีกระแสที่เกิดจากกลไกการเกิด-การรวมตัวของพาหะ ในบริเวณพ่องพาหะ ดังนั้น ประมวลกระแสของอิเล็กตรอนและโฮลจะมีค่าคงที่ตลอดช่วงบริเวณพ่องพาหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อันดับแรกเราพิจารณาความสัมพันธ์ของโบลตซ์มันน์ที่สถานะสมดุลเชิงความร้อน จะได้

$$n = n_i \exp\left(\frac{E_F - E_i}{kT}\right) \quad (2.49ก.)$$

$$p = n_i \exp\left(\frac{E_i - E_F}{kT}\right) \quad (2.49ข.)$$

ที่สถานะสมดุลความร้อน ผลลัพธ์ของค่า pn จากสมการข้างต้นจะเท่ากับ n_i^2 เมื่อมีการป้อนแรงดัน ไฟฟ้าให้กับรอยต่อ ความหนาแน่นของพาหะข้างน้อยของรอยต่อทั้งสองมีการเปลี่ยนแปลง และผลลัพธ์ของค่า pn ไม่เท่ากับ n_i^2 เราจึงกำหนดระดับควอซี-เฟอร์มิ (quasi-Fermi) ได้ดังนี้

$$n = n_i \exp\left(\frac{E_{Fn} - E_i}{kT}\right) \quad (2.50ก.)$$

$$p = n_i \exp\left(\frac{E_i - E_{Fp}}{kT}\right) \quad (2.50ข.)$$

ที่ E_{Fn} และ E_{Fp} คือ ระดับควอซี-เฟอร์มิสำหรับอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ ดังนั้นจากสมการที่ (2.50ก.) และ (2.50ข.) เราจะได้

$$E_{Fn} = E_i + kT \ln\left(\frac{n}{n_i}\right), \quad (2.51ก.)$$

$$E_{Fp} = E_i - kT \ln\left(\frac{p}{n_i}\right) \quad (2.51ข.)$$

ผลลัพธ์ของค่า pn กลายเป็น

$$pn = n_i^2 \exp\left(\frac{E_{Fn} - E_{Fp}}{kT}\right) \quad (2.52)$$

สำหรับไบแอสตรง, $(E_{Fn} - E_{Fp}) > 0$ และ $pn > n_i^2$; สำหรับไบแอสกลับทาง $(E_{Fn} - E_{Fp}) < 0$ และ $pn < n_i^2$

จากสมการที่ (2.50ก.) และความจริงที่ว่า $\xi \equiv \nabla E_i / q$ เราจะได้

$$\begin{aligned} J_n &= q\mu_n \left(n\xi + \frac{kT}{q} \nabla n \right) = \mu_n n \nabla E_i + \mu_n kT \left[\frac{n}{kT} (\nabla E_{Fn} - \nabla E_i) \right] \\ &= \mu_n n \nabla E_{Fn} \end{aligned} \quad (2.53)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทำนองเดียวกัน

$$J_p = \mu_p p \nabla E_{Fp} \quad (2.54)$$

ดังนั้นความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าอิเล็กตรอนและโฮล จะแปรตรงกับเกรเดียนต์ของระดับควอไซ-เฟอร์มิของอิเล็กตรอนและโฮล, ถ้า $E_{Fn} = E_{Fp} =$ ค่าคงที่ (สมมูลความร้อน) แล้ว $J_n = J_p = 0$

การกระจายของศักย์ไฟฟ้าในอุดมคติ และความหนาแน่นของพาหะในรอยต่อพี-เอ็น ภายได้เงื่อนไขการไบแอสตรงและการไบแอสกลับทางแสดงในรูปที่ 2.33 ระดับ E_{Fn} และ E_{Fp} ที่เปลี่ยนแปลงตามระยะทางจะสัมพันธ์กับความหนาแน่นของพาหะดังแสดงในสมการที่ (2.51ก.) และ (2.51ข.) ในบริเวณพ่องพาหะระดับ E_{Fn} และ E_{Fp} จะยังคงที่ เนื่องจากความหนาแน่นของพาหะในบริเวณพ่องพาหะนี้ยังคงมีปริมาณสูงอยู่มาก อีกทั้งกระแสของพาหะจะมีค่าคงที่ ดังนั้นเกรเดียนต์ของระดับควอไซ-เฟอร์มิจะต้องมีค่าน้อยลง ยิ่งไปกว่านั้นความกว้างของบริเวณพ่องพาหะสั้นกว่าระยะการแพร่ซึม ดังนั้นระดับเฟอร์มิที่ลดค่าลงในบริเวณพ่องพาหะจะไม่มีนัยสำคัญ

แรงดันไบแอสที่ป้อนให้กับรอยต่อจะแสดงดังสมการ

$$qV = E_{Fn} - E_{Fp} \quad (2.55)$$

รวมสมการที่ (2.55) เข้ากับสมการที่ (2.52) เราจะได้ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่ขอบ ($x = -W_{DP}$) ของบริเวณพ่องพาหะในด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-side) ดังสมการ

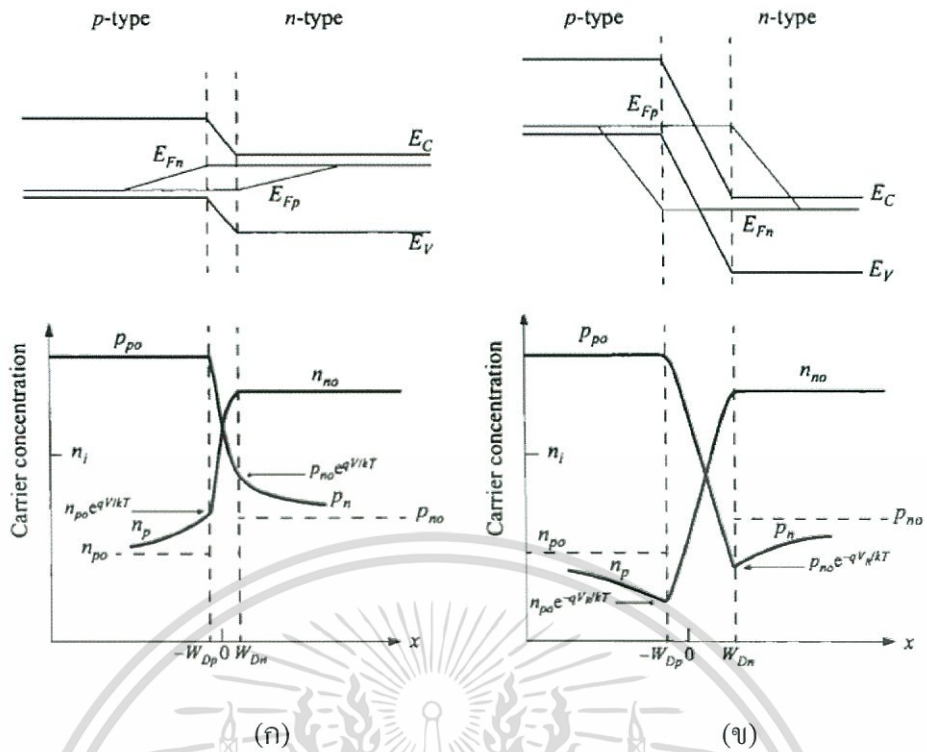
$$n_p(-W_{DP}) = \frac{n_i^2}{p_p} \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) \approx n_{po} \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) \quad (2.56ก.)$$

ที่ $p_p \approx p_{po}$ สำหรับการฉีดพาหะในระดับต่ำ (low level injection) และ n_{po} คือความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อนด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-side)

ในทำนองเดียวกันความหนาแน่นของโฮลที่ขอบ ($x = W_{Dn}$) ของบริเวณพ่องพาหะในด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-side) ดังสมการ

$$p_n(W_{Dn}) = p_{no} \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) \quad (2.56ข.)$$

เงื่อนไขขอบเขตดังกล่าวข้างต้นมีความสำคัญมากต่อสมการกระแส-แรงดันไฟฟ้าของกรณีอุดมคติ



รูปที่ 2.33 แผนภาพแถบพลังงาน กับระดับพลังงานควอซี-เฟอร์มิสำหรับอิเล็กตรอนและโฮล และการกระจายตัวของพาหะภายใต้เงื่อนไข
 ก. ไบแอสตรง
 ข. ไบแอสกลับทาง

สมการต่อเนื่องที่ได้จากเงื่อนไขสถานะคงตัว (steady-state) ในรอยต่อทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นคือ

$$-U + \mu_n \xi \frac{dn_n}{dx} + \mu_n n_n \frac{d\xi}{dx} + D_n \frac{d^2 n_n}{dx^2} = 0 \tag{2.57ก.}$$

$$-U + \mu_p \xi \frac{dp_n}{dx} + \mu_p p_n \frac{d\xi}{dx} + D_p \frac{d^2 p_n}{dx^2} = 0 \tag{2.57ข.}$$

ในสมการนี้ U คือ อัตราการรวมตัวจากเงื่อนไขความเป็นกลางทางไฟฟ้า ความหนาแน่นของพาหะข้างมากจะเกิดการปรับตัวดังเช่น $(n_n - n_{no}) = (p_n - p_{no})$ ซึ่งเป็นไปตาม $dn_n/dx = dp_n/dx$ นำ $\mu_p p_n$ คูณกับสมการที่ (2.57ก.) และ $\mu_n n_n$ คูณกับสมการที่ (2.57ข.) แล้วนำไปใช้รวมกับความสัมพันธ์ของไอส์ไตน์ $D = (kT/q)\mu$ จะได้

$$-\frac{p_n - p_{no}}{\tau_p} - \frac{n_n - p_n}{(n_n / \mu_p) + (p_n / \mu_n)} \frac{d\xi}{dx} + D_a \frac{d^2 p_n}{dx^2} = 0 \tag{2.58}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่ง

$$D_a = \frac{n_n + p_n}{(n_n / D_p) + (p_n / D_n)} \quad (2.59)$$

สัมประสิทธิ์การแพร่ของพาหะคู่ (ambipolar) คือ

$$\tau_p = \frac{p_n - p_{no}}{U} \quad (2.60)$$

จากข้อสมมติฐานการฉีดกระแสระดับต่ำ [$p_n \ll (n_n \approx n_{no})$] ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น สมการที่ (2.58) ลดรูปสมการลงจะได้

$$-\frac{p_n - p_{no}}{\tau_p} - \mu_p \xi \frac{dp_n}{dx} + D_p \frac{d^2 p_n}{dx^2} = 0 \quad (2.61)$$

ถ้าไม่คิดพจน์ $\mu_p p_n d\xi / dx$ แล้วสมการที่ (2.59) ก็เหมือนกับสมการที่ (2.57ข.) ภายใต้เงื่อนไขการฉีดกระแสระดับต่ำ นอกบริเวณพร่องพาหะจะไม่มีสนามไฟฟ้า, จากสมการที่ (2.61) จะได้

$$\frac{d^2 p_n}{dx^2} - \frac{p_n - p_{no}}{D_p \tau_p} = 0 \quad (2.62)$$

จากสมการที่ (2.62) กับเงื่อนไขขอบเขตของสมการที่ (2.56ข.) และ $p_n(x = \infty) = p_{no}$, จะได้ว่า

$$p_n(x) - p_{no} = p_{no} \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \exp\left(-\frac{x - W_{Dn}}{L_p}\right) \quad (2.63)$$

ซึ่ง

$$L_p \equiv \sqrt{D_p \tau_p} \quad (2.64)$$

ที่ $x = W_{Dn}$ กระแสแพร่ซึมของโฮลคือ

$$J_p = -qD_p \left. \frac{dp_n}{dx} \right|_{W_{Dn}} = \frac{qD_p p_{no}}{L_p} \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.65ก.)$$

ในทำนองเดียวกันกระแสแพร่ซึมของอิเล็กตรอนในด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพีคือ

$$J_n = qD_n \left. \frac{dn_p}{dx} \right|_{-W_{Dn}} = \frac{qD_n n_{po}}{L_n} \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.65ข.)$$

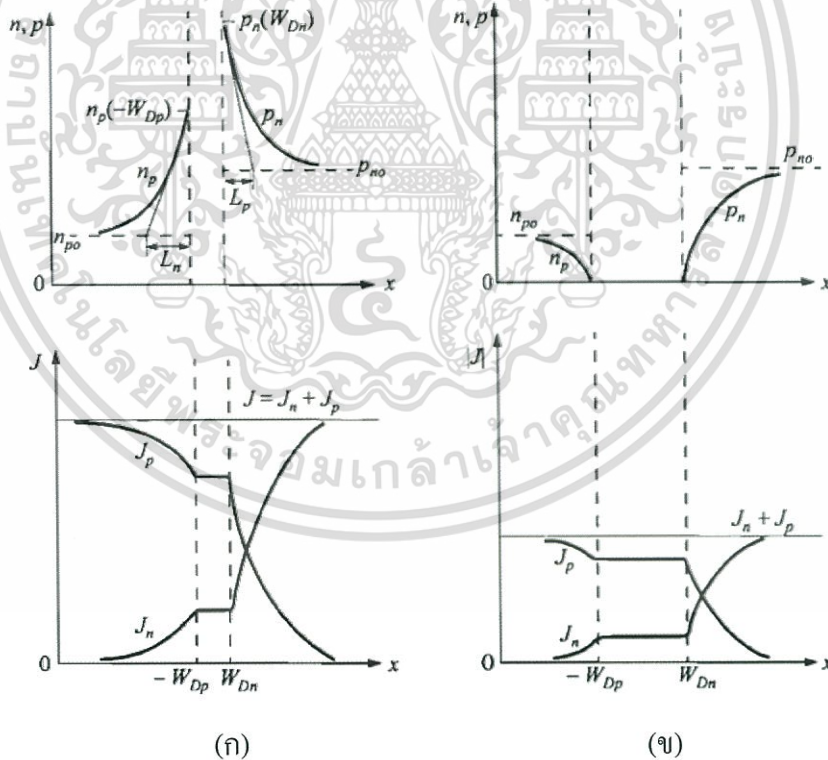
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนาแน่นของพาหะข้างน้อย และความหนาแน่นของกระแสภายใต้ไบแอสตรง และไบแอสกลับทาง แสดงไว้ในรูปที่ 2.34 เป็นที่น่าสนใจที่จะต้องกล่าวว่าการแสโวลจะถูกฉีดจากด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพีไปด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น แต่ขนาดของกระแสโวลจะถูกกำหนดโดยพารามิเตอร์ D_p, L_p และ p_{no} ที่อยู่ในด้านเอ็น ส่วนการฉีดกระแสอิเล็กตรอนก็คล้ายคลึงกับกระแสโวลเช่นเดียวกัน

ผลรวมของกระแสโวลและอิเล็กตรอนได้จากการนำสมการที่ (2.65ก.) และ (2.65ข.) มารวมกันจะได้

$$J = J_p + J_n = J_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.66)$$

$$J_0 = \frac{qD_p p_{no}}{L_p} + \frac{qD_n n_{po}}{L_n} \equiv \frac{qD_p n_i^2}{L_p N_D} + \frac{qD_n n_i^2}{L_n N_A} \quad (2.67)$$



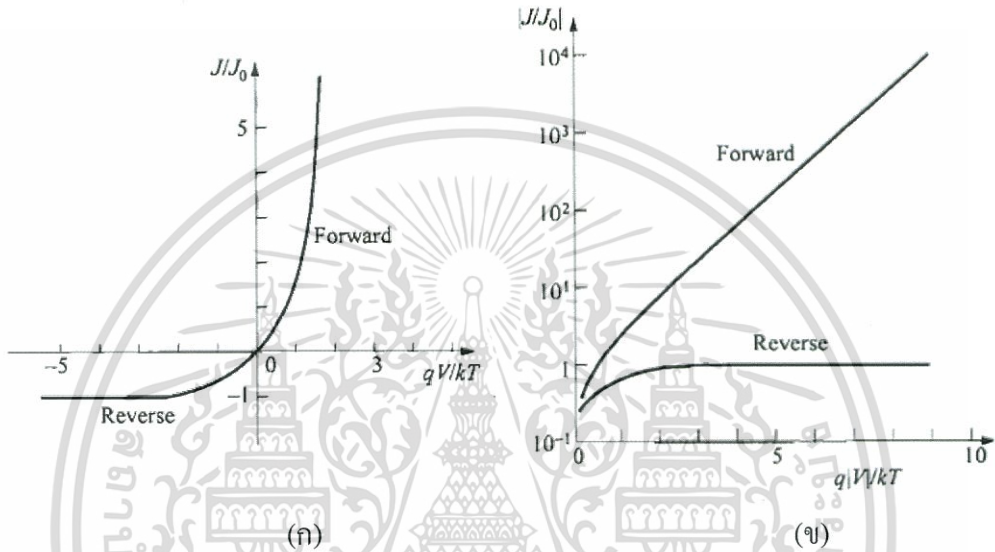
รูปที่ 2.34 แสดงการกระจายตัวของพาหะ และความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าสำหรับ

ก. เจ็อนไซไบแอสตรง

ข. เจ็อนไซไบแอสกลับทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการที่ (2.66) เป็นสมการที่มีชื่อเสียงของชอกล์เลย์ซึ่งเป็นกฎของไดโอดอุดมคติ ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันไฟฟ้าในอุดมคติแสดงไว้ในรูปที่ 2.35 (ก) และ 2.35 (ข) โดยเขียนกราฟแบบเชิงเส้นและแบบกึ่งลอการิทึมตามลำดับ ทางด้านไบแอสตรง (แรงดันไฟบวกทางด้านพี) สำหรับ $V > 3kT/q$ จากรูปที่ 2.35 (ข) อัตราการเพิ่มขึ้นของกระแสจะเป็นแบบเชิงเส้นที่ 300 เคลวิน ที่ทุกๆ 10 มิลลิแอมป์, แรงดันจะเท่ากับ 59.5 มิลลิโวลต์ ($2.3kT/q$) ส่วนทางด้านไบแอสกลับทางกระแสอิ่มตัวที่ $-J_0$



รูปที่ 2.35 แสดงลักษณะเฉพาะของกระแส-แรงดันไฟฟ้าในอุดมคติ

ก. กราฟเชิงเส้น

ข. กราฟกึ่งลอการิทึม

พิจารณาผลของอุณหภูมิที่มีต่อความหนาแน่นของกระแสอิ่มตัว J_0 พจน์ที่ 1 และพจน์ที่ 2 ของสมการที่ (2.69) มีลักษณะคล้ายกันดังนั้นเราจะพิจารณาเฉพาะพจน์ที่ 1 เท่านั้นก็เป็นการเพียงพอ สำหรับกรณีรอยต่อ $p^+ - n$ แล้ว $p_{no} \gg n_{po}$, ปริมาณ n_i, D_p, p_{no} และ $L_p (\equiv \sqrt{D_p \tau_p})$ จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ถ้า D_p / τ_p แปรตรงกับ T^γ ที่ γ เป็นค่าคงที่แล้ว

$$J_0 \approx \frac{qD_p p_{no}}{L_p} \approx q \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} \frac{n_i^2}{N_D} \propto T^{\gamma/2} \left[T^3 \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right) \right] \propto T^{(3+(\gamma/2))} \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right) \quad (2.68)$$

การขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของ $T^{(3+(\gamma/2))}$ ไม่สำคัญเท่าไรนักเมื่อเทียบกับพจน์เอกโพเนนเชียล ความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง J_0 กับ $\frac{1}{T}$ จะได้ค่าช่องว่างแถบพลังงาน E_g และคาดว่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขณะไบแอสกลับทาง, $|J_R| \approx J_0$ ค่ากระแสจะเพิ่มขึ้นแบบ $\exp(-E_g / kT)$ ตามอุณหภูมิ และในขณะไบแอสตรง $J_F \approx J_0 \exp(qV / kT)$ ค่ากระแสจะเพิ่มขึ้นแบบ $\exp[-(E_g - qV) / kT]$

2.7.3 กระบวนการเกิด – การรวมตัวของพาหะอิสระ (generation - recombination process)

ในหัวข้อนี้จะพิจารณาการเกิดกระแสของพาหะอิสระภายใต้เงื่อนไขไบแอสกลับทาง เนื่องจากขณะไบแอสกลับทางจะมีปริมาณพาหะอิสระน้อยมาก ($pn \leq n_i^2$) กระบวนการเกิดพาหะอิสระจึงมาจากกลไกการปลดปล่อยอิเล็กตรอนและปลดปล่อยโฮลออกมาจากกับดักประจุ อัตราการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลได้จากทฤษฎีของชอกส์เลย์-รีค-ฮอลล์ (SRH relation) โดยมีเงื่อนไขว่า $p \leq n_i$ และ $n \leq n_i$ และจะได้อัตราการทรานซิชันสุทธิ (net transition rate) คือ

$$U = - \left\{ \frac{\sigma_p \sigma_n v_{th} N_t}{\sigma_n \exp[(E_t - E_i) / kT] + \sigma_p \exp[(E_i - E_t) / kT]} \right\} n_i \equiv - \frac{n_i}{\tau_g} \quad (2.69)$$

เมื่อ σ_n และ σ_p คือ พื้นที่ภาคตัดขวางของการจับอิเล็กตรอนและการจับโฮลตามลำดับ ส่วน τ_g คือ ช่วงชีวิตของการเกิดพาหะ (generation time)

$$\begin{aligned} \tau_g &= \frac{1 + (n/n_i)}{\sigma_p v_{th} N_t} + \frac{1 + (p/n_i)}{\sigma_n v_{th} N_t} \\ &= \left(1 + \frac{n}{n_i}\right) \tau_p + \left(1 + \frac{p}{n_i}\right) \tau_n \end{aligned}$$

โดยที่ $\tau_p = \frac{1}{\sigma_p v_{th} N_t}$ และ $\tau_n = \frac{1}{\sigma_n v_{th} N_t}$ ซึ่งเป็นช่วงชีวิตของโฮลและช่วงชีวิตของอิเล็กตรอนตามลำดับ N_t คือ ความหนาแน่นของกับดักประจุ ส่วน v_{th} คือ ความเร็วเฉลี่ยของพาหะเนื่องจากพลังงานความร้อน ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ได้จากกระบวนการเกิดพาหะในบริเวณพร่องพาหะสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$J_{ge} = \int_0^{W_D} q|U|dx \approx q|U|W_D \approx \frac{qn_i W_D}{\tau_g} \quad (2.70)$$

เมื่อ W_D คือ ความกว้างของบริเวณพร่องพาหะ ถ้าช่วงชีวิตของการเกิดพาหะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิเล็กน้อย แล้วจะได้ว่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากกระบวนการเกิดพาหะจะขึ้นกับอุณหภูมิตามค่า n_i ดังนั้นที่อุณหภูมิใดๆ τ_{ge} จะแปรตามความกว้างของบริเวณพร่องพาหะซึ่งจะขึ้นกับแรงดันไบแอส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับรอยต่อฉับพลัน

$$J_{ge} \propto (\psi_{bi} + V)^{1/2} \quad (2.71)$$

สำหรับรอยต่อเชิงเส้น

$$J_{ge} \propto (\psi_{bi} + V)^{1/3} \quad (2.72)$$

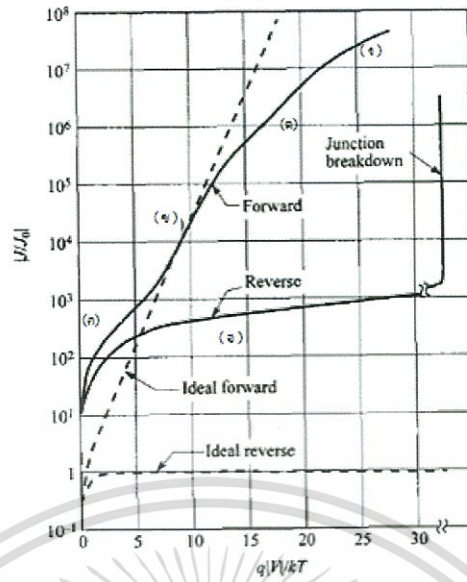
กระแสรวมขณะไบแอสกลับทาง (สำหรับ $p_{no} \gg n_{po}$ และ $|V| > 3kT/q$) สามารถหาได้จากผลรวมของกระแสแพร่ซึ่งมีอยู่นอกบริเวณพร่องพาหะกับกระแสที่เกิดจากกระบวนการเกิดพาหะในบริเวณพร่องพาหะ

$$J_R = q \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p} \frac{n_i^2}{N_D} + \frac{qn_i W_D}{\tau_g}} \quad (2.73)$$

สำหรับสารกึ่งตัวนำที่ n_i มีค่ามาก (เช่น เยอรมันเนียม) กระแสแพร่ซึ่งจะมีบทบาทโดดเด่นที่อุณหภูมิห้อง และกระแสไบแอสกลับทางจะเป็นไปตามสมการชอคเลย์ แต่ถ้า n_i มีค่าน้อยๆ (เช่น ซิลิคอน) กระบวนการเกิดพาหะจะมีบทบาทโดดเด่นดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.36 เส้นโค้ง (จ) แต่ถ้าอุณหภูมิสูงเพียงพอกระแสแพร่ซึ่งจะมีบทบาทโดดเด่น

ภายใต้ไบแอสตรงกระบวนการเกิด - การรวมตัวของพาหะในบริเวณพร่องพาหะเป็นกระบวนการจับพาหะผ่านกับดักประจุ เราจะได้กระแสที่เกิดจากกระบวนการรวมตัวของพาหะนอกเหนือไปจากกระแสแพร่ซึ่ง เมื่อแทนสมการที่ (2.52) ลงในสมการที่ (2.69) จะได้

$$U = - \left\{ \frac{\sigma_p \sigma_n v_{th} N_i n_i^2 [\exp(qV/kT) - 1]}{\sigma_n \{n + n_i \exp[(E_t - E_i)/kT]\} + \sigma_p \{p + n_i \exp[(E_i - E_t)/kT]\}} \right\} \quad (2.74)$$



รูปที่ 2.36 ลักษณะกระแส - แรงดันไฟฟ้าสำหรับไดโอดซิลิคอน

- ก. กระบวนการเกิด-การรวมตัวของกระแสในบริเวณพร่องพาหะ
- ข. บริเวณกระแสแพร่ซึม
- ค. บริเวณฉีดกระแสระดับสูง
- ง. ผลของความต้านทานอนุกรม
- จ. การแพร่ไหลย้อนกลับ เนื่องจากการเกิด - การรวมตัวของพาหะและผลของสถานะต่อผิวหน้าสารกึ่งตัวนำ

ภายใต้สมมติฐาน $E_i = E_i$ และ $\sigma_n = \sigma_p = \sigma$ สามารถลดรูปสมการที่ (2.76) ได้ดังนี้

$$U = \frac{\sigma v_{th} N_i n_i^2 [\exp(qV/kT) - 1]}{n + p + 2n_i}$$

$$= \left\{ \frac{\sigma v_{th} N_i n_i^2 [\exp(qV/kT) - 1]}{n_i \left\{ \exp[(E_{Fn} - E_i)/kT] + \exp[(E_i - E_{Fp})/kT] + 2 \right\}} \right\} \quad (2.75)$$

U มีค่าสูงสุดอยู่ในบริเวณพร่องพาหะ เมื่อ E_i อยู่ที่ระดับครึ่งทางระหว่าง E_{Fn} และ E_{Fp} ดังนั้นตัวหารของสมการที่ (2.77) กลายเป็น $2n_i [\exp(qV/2kT) + 1]$ ที่ $V > kT/q$ จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$U \approx \frac{1}{2} \sigma v_{th} N_i n_i \exp\left(\frac{qV}{2kT}\right) \quad (2.76)$$

และ

$$J_{re} = \int_0^{W_D} qU dx \approx \frac{qW_D}{2} \sigma v_{th} N_i n_i \exp\left(\frac{qV}{2kT}\right) \approx \frac{qW_D n_i}{2\tau} \exp\left(\frac{qV}{2kT}\right) \quad (2.77)$$

สมการที่ (2.77) เป็นการประมาณว่าบริเวณพ่องพาหะเกือบทั้งหมดมีอัตราการรวมตัวของพาหะได้สูงสุด ซึ่งจะได้อ่า J_{re} สูงเกินความเป็นจริง ดังนั้นสมการที่ (2.78) จะให้ผลน่าเชื่อถือมากกว่าดังนี้ คือ

$$J_{re} = \int_0^{W_D} qU dx = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{kT n_i}{\tau \xi_0} \exp\left(\frac{qV}{2kT}\right) \quad (2.78)$$

ที่ ξ_0 คือ สนามไฟฟ้าที่บริเวณที่มีอัตราการรวมตัวสูงสุดจะมีค่าเท่ากับ

$$\xi_0 = \sqrt{\frac{qN(2\psi_B - V)}{\epsilon_s}} \quad (2.79)$$

ในทำนองเดียวกันกระแสที่เกิดจากกระบวนการรวมตัวของพาหะภายใต้สภาวะไบแอสตรงจะแปรตรงกับ n_i ผลรวมของกระแสไบแอสตรงสามารถหาได้จากผลรวมของสมการที่ (2.68) และสมการที่ (2.78) สำหรับรอยต่อ $p^+ - n$ ($p_{no} \gg n_{po}$) และ $V \gg kT/q$

$$J_F = q \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p} \frac{n_i^2}{N_D} \exp\left(\frac{qV}{kT}\right)} + \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{kT n_i}{\tau_p \xi_0} \exp\left(\frac{qV}{2kT}\right) \quad (2.80)$$

ผลการทดลองทั่วไปสามารถแสดงในรูปแบบดังนี้ คือ

$$J_F \propto \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \quad (2.81)$$

โดยที่แฟกเตอร์ในอุดมคติมีค่าเท่ากับ 2 เมื่อมีกระบวนการรวมตัวของพาหะโดดเด่นกว่า (รูปที่ 2.28, เส้นโค้ง (ก)) และแฟกเตอร์ในอุดมคติมีค่าเท่ากับ 1 เมื่อมีกระแสแพร่ซึมโดดเด่นกว่า (รูปที่ 2.28, เส้นโค้ง (ข)) เมื่อกระแสของการรวมตัวของพาหะและกระแสแพร่ซึมมีค่าใกล้เคียงกันดังนั้นค่าแฟกเตอร์ในอุดมคติจะมีค่าระหว่าง 1 และ 2

2.7.4 ความจุแพร่ซึม (diffusion capacitance)

ค่าความจุของบริเวณพ่องพาหะที่ศึกษามาก่อนหน้าจะถือว่าเป็นความจุทั้งหมดของรอยต่อพี-เอ็นเมื่อได้รับการไบแอสกลับทาง แต่ถัารรอยต่อพี-เอ็นได้รับการไบแอสตรง จะมีค่าความจุกอีกส่วนหนึ่งเพิ่มเติมเข้ามา เนื่องจากพาหะข้างน้อยซึ่งจะเรียกความจุนี้ว่าความจุแพร่ซึม หรือกล่าวได้อีกอย่างหนึ่ง ความจุแพร่ซึมเกิดจากการฉีดประจุของพาหะข้างน้อยผ่านรอยต่อ ส่วนความจุที่วัดภายใต้ไบแอสกลับทางจะเป็นความจุของประจุค้างในบริเวณพ่องพาหะ เมื่อทำการป้อนสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับขนาดเล็ก (small ac signal) ให้กับรอยต่อพร้อมกับแรงดันไฟตรงขนาด V_0 และความหนาแน่นของกระแสไฟตรงขนาด J_0 เราจะได้ว่าแรงดันรวมและความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ารวมจะนิยามดังนี้ คือ

$$V(t) = V_0 + V_1 \exp(j\omega t) \tag{2.82}$$

$$J(t) = J_0 + J_1 \exp(j\omega t) \tag{2.83}$$

ที่ V_1 และ J_1 คือ แรงดันและกระแสของสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับขนาดเล็กตามลำดับ จากแอมพลิจูดแทนซ์ J_1 / V_1 จะได้ค่าความนำแพร่ซึม และความจุแพร่ซึมดังสมการ

$$Y \equiv \frac{J_1}{V_1} \equiv G_d + j\omega C_d \tag{2.84}$$

ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและ โฮลที่ขอบของบริเวณพ่องพาหะสามารถหาได้จากสมการที่ (2.56ก.) และ (2.56ข.) โดยการแทน V_0 ด้วย $V_0 + V_1 \exp(j\omega t)$

สำหรับรอยต่อของสารกึ่งตัวนำทางด้านชนิดเอ็น (n-side) เมื่อ $V_1 \ll V_0$ จะได้ว่า

$$p_n(W_{Dn}) = p_{no} \exp\left\{ \frac{q[V_0 + V_1 \exp(j\omega t)]}{kT} \right\} \approx p_{no} \exp\left(\frac{qV_0}{kT}\right) + \frac{p_{no}qV_1}{kT} \exp\left(\frac{qV_0}{kT}\right) \exp(j\omega t) \approx p_{no} \exp\left(\frac{qV_0}{kT}\right) + \tilde{p}_n(t) \tag{2.85}$$

ส่วนรอยต่อของสารกึ่งตัวนำทางด้านชนิดพี (p-side) จะให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนดังสมการ

$$n_p(W_{Dp}) \approx n_{po} \exp\left(\frac{qV_0}{kT}\right) + \tilde{n}_p(t) \tag{2.86}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พจน์แรกของสมการที่ (2.85) คือ ความหนาแน่นของโฮลเนื่องจากแรงดันไบแอสตรง (V_0) ส่วนพจน์ที่สองเป็นความหนาแน่นของโฮลเนื่องจากสัญญาณไฟฟ้าสลับ จากสมการความต่อเนื่อง (continuity equation) ที่กล่าวว่า

$$\frac{\partial p_n}{\partial t} = G_p - \frac{p_n - p_{no}}{\tau_p} - p_n \mu_p \frac{\partial \xi}{\partial x} - \mu_p \xi \frac{\partial p_n}{\partial x} + D_p \frac{\partial^2 p_n}{\partial x^2} \quad (2.87)$$

แทน \tilde{p}_n ลงในสมการความต่อเนื่องนี้ โดยกำหนดให้ $G = \xi = \frac{d\xi}{dx} = 0$ แล้วจะได้ว่า

$$j\omega \tilde{p}_n = -\frac{\tilde{p}_n}{\tau_p} + D_p \frac{d^2 \tilde{p}_n}{dx^2} \quad (2.88)$$

หรือ

$$\frac{d^2 \tilde{p}_n}{dx^2} - \frac{\tilde{p}_n}{D_p \tau_p (1 + j\omega \tau_p)} = 0 \quad (2.89)$$

สมการที่ (2.89) จะสอดคล้องกับสมการที่ (2.64) ถ้ากำหนดให้ช่วงชีวิตพาหะเป็นดังนี้

$$\tau_p^* = \frac{\tau_p}{1 + j\omega \tau_p} \quad (2.90)$$

และสามารถหาความหนาแน่นของกระแสได้จากสมการที่ (2.67) และจัดสมการให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสม

$$J = \left(q p_{no} \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p^*}} + q n_{po} \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n^*}} \right) \exp \left\{ \frac{q [V_0 + V_1 \exp(j\omega t)]}{kT} \right\} \\ \approx \left(q p_{no} \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p^*}} + q n_{po} \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n^*}} \right) \left[\exp \left(\frac{q V_0}{kT} \right) \right] \left[1 + \frac{q V_1}{kT} \exp(j\omega t) \right] \quad (2.91)$$

ความหนาแน่นไฟฟ้ากระแสสลับ J_1 คือ

$$J_1 = \left(\frac{q D_p p_{no} \sqrt{1 + j\omega \tau_p}}{L_p} + \frac{q D_n n_{po} \sqrt{1 + j\omega \tau_n}}{L_n} \right) \left[\exp \left(\frac{q V_0}{kT} \right) \right] \frac{q V_1}{kT}$$

ค่า J_1 / V_1 ทั้ง G_d และ C_d สามารถหาค่าได้และพบว่าทั้งสองค่านี้ขึ้นอยู่กับความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับความสัมพันธ์ที่ความถี่ต่ำ ($\omega\tau_p, \omega\tau_n \ll 1$) ความนำแพร่ซึม (G_{d0}) หาได้จาก

$$G_{d0} = \frac{q}{kT} \left(\frac{qD_p p_{no}}{L_p} + \frac{qD_n n_{po}}{L_n} \right) \exp\left(\frac{qV_0}{kT}\right) \quad \text{โอห์มต่อตารางเซนติเมตร} \quad (2.92)$$

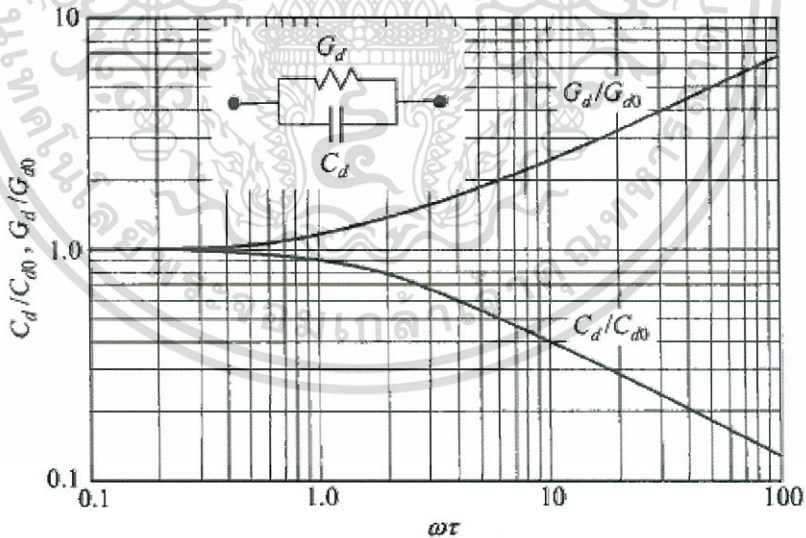
ที่ความถี่ต่ำความจุแพร่ซึมสามารถคำนวณได้โดยใช้การประมาณค่า $\sqrt{1+j\omega\tau} \approx (1+0.5j\omega\tau)$

$$C_{d0} = \frac{q^2}{2kT} (L_p p_{no} + L_n n_{po}) \exp\left(\frac{qV_0}{kT}\right) \quad \text{ฟารัดต่อตารางเซนติเมตร} \quad (2.93)$$

ค่าความจุแพร่ซึมนี้จะแปรตามแรงดันไบแอสตรงสำหรับรอยต่อ $n^+ - p$ จะได้ว่า

$$C_{d0} = \frac{qL_n^2}{2kTD_n} J_F \quad (2.94)$$

ความจุแพร่ซึมและความนำแพร่ซึมที่ขึ้นอยู่กับความถี่จะแสดงไว้ในรูปที่ 2.37 ซึ่งแกนนอนจะเป็นค่า $\omega\tau$



รูปที่ 2.37 แสดงความสัมพันธ์ของความจุแพร่ซึม และความนำแพร่ซึมที่สัมพันธ์กับ $\omega\tau$ พร้อมแสดงวงจรสมมูลของรอยต่อพี-เอ็นภายใต้ไบแอสตรง

วงจรสมมูลของไฟฟ้ากระแสลับแอดมิตแตนซ์จะแสดงไว้ในรูปที่ 2.37 ด้วย เพื่อแสดงว่า

ค่าความจุแพร่ซึมจะลดลงเมื่อความถี่ที่เพิ่มขึ้น สำหรับความถี่สูงๆ C_d จะสัมพันธ์กับ $\omega^{-1/2}$ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ความจุแพร่ซึมยังแปรตามไฟฟ้ากระแสตรง $\propto \exp(qV_0/kT)$ เพราะฉะนั้น C_d จึงมีความสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความถี่ต่ำ และภายใต้สภาวะไบแอสตรง

2.8 อิทธิพลของการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วทำให้เกิดการรวมตัวกันของพาหะที่เนื้อสาร [6, 13-14, 16, 19-20, 28, 30-37]

อัตราการรวมตัวของพาหะ (R) ของกลไกการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วเกิดจากการรวมตัวของพาหะ สามารถเขียนได้ดังความสัมพันธ์ต่อไปนี้คือ

$$R = \frac{np - n_i^2}{\gamma_p(n + n^*) + \gamma_n(p + p^*)} \quad (2.95)$$

เมื่อ

$$n^* = N_C \exp[-(E_C - E_T)/kT]$$

และ

$$p^* = N_V \exp[-(E_T - E_V)/kT]$$

ซึ่ง N_C และ N_V คือ ความหนาแน่นยังผลของสถานะของแถบนำและแถบวาเลนซ์ตามลำดับ E_T คือ ระดับพลังงานของกัณฑ์ประจวบ, n และ p คือความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ, n_i คือ ความหนาแน่นพาหะของสารกึ่งตัวนำอินทรีนสิก แล้วความน่าจะเป็นหรือภาคตัดขวางของการจับอิเล็กตรอน หรือ โฮล (electron/hole cross section: $\gamma_{n/p}$) จะแสดงได้ดังความสัมพันธ์

$$\gamma_{n/p} = 1/[s_{n/p}(1+\Gamma)] \quad (2.96)$$

หรือ

$$\gamma_{n/p} = \frac{\tau_{n/p}}{1+\Gamma}$$

เมื่อ $s_{n/p}$ คือ ความเร็วในการรวมตัวที่บริเวณผิวรอยต่อของอิเล็กตรอน หรือ โฮล, $\tau_{n/p}$ คือ ค่าชีวิตของอิเล็กตรอนและ โฮลอิสระ ส่วน Γ คือ แฟกเตอร์ค่าแก้ (correction factor) ของการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วทำให้เกิดการรวมตัวของพาหะที่เนื้อสาร จะแสดงได้ดังความสัมพันธ์ต่อไปนี้คือ

$$\Gamma = 2(3\pi)^2 \left[\frac{1}{3kT} \left(\frac{qV_b(x)}{kT} \right) \left(\frac{E_{00}}{kT} \right)^2 \right]^2 \exp \left[\left(\frac{qV_b(x)}{3kT} \right) \left(\frac{E_{00}}{kT} \right)^2 \right] \quad (2.97)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การโค้งงอของแถบพลังงาน สามารถแสดงได้ด้วยสมการพาราโบลา ดังนี้คือ

$$V_b(x) = \frac{qN_A}{2\epsilon_s}(W-x)^2 = \frac{\epsilon_s}{2qN_A}|F(x)|^2 \quad (2.98)$$

เมื่อ $F(x)$ คือ สนามไฟฟ้าท้องถิ่น (local electrical field) ที่ตำแหน่งกับดักประจุ

W คือ ความกว้างของบริเวณเขตปลอดพาหะที่อยู่ในเนื้อสารของตัวดุกกลืนแสง

จากแนวความคิดของ วอลเตอร์ และผู้ร่วมงาน การกระจายตัวแบบเอกซ์โพเนนเชียลของศูนย์กลางการรวมตัวจะแสดงได้ดังนี้คือ

$$dN_T(\eta) = (kT^*)^{-1} \exp\left(\frac{-\eta}{kT^*}\right) d\eta \quad (2.99)$$

เมื่อ kT^* คือ พลังงานลักษณะเฉพาะของการกระจายตัวของกับดักประจุ และ $\eta = E_v - \frac{E_T}{\eta}$ หรือ

$$\eta = E_T - E_c$$

โดยที่ความหนาแน่นของกับดักประจุจะมีค่าสูงสุด เมื่ออยู่ชิดกับขอบของแถบวาเลนซ์ หรือชิดกับขอบของแถบนำ จากการอินทิเกรตสมการที่ (2.92) ร่วมกับสมการที่ (2.99) จะได้ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นของกระแสที่เกิดจากการชูดูโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วทำให้เกิดการรวมตัวของพาหะในเนื้อสารตัวดุกกลืนแสงดังนี้คือ

$$J = J_{00} \exp\left(\frac{-E_g}{kT}\right) \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \quad (2.100)$$

ซึ่ง J_{00} จะมีค่าขึ้นกับอุณหภูมิเพียงเล็กน้อย ส่วนแฟกเตอร์อุณหคณิตของไดโอด (n) จะมีค่าดังนี้

$$\frac{1}{n} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{E_{00}^2}{3(kT)^2} + \frac{T}{T^*}\right) \quad (2.101)$$

จากสมการที่ (2.101) นี้ใช้แสดงค่าแฟกเตอร์อุณหคณิตของไดโอด (n) ของกลไกการนำกระแสที่เกิดจากการชูดูโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วทำให้เกิดการรวมตัวของพาหะในเนื้อสารตัวดุกกลืนแสงที่มีกับดักกระจายตัวแบบเอกซ์โพเนนเชียล พิจารณาเงื่อนไขขีดจำกัดกล่าวคือ

$T^* \rightarrow \infty$ กลไกการนำกระแสจะกลายเป็นการชูดูโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์แล้วเกิดการรวมตัว เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของพาหะโดยผ่านกับดักประจุระดับพลังงานลึก ซึ่งมีระดับพลังงานอยู่ที่บริเวณกึ่งกลางช่องว่างพลังงาน แต่ถ้ากรณี $E_{00} \rightarrow 0$ จะได้ว่า $\frac{1}{n} = (1 + \frac{T}{T^*})/2$ ซึ่งสอดคล้องกับกลไกการรวมตัวของพาหะตามทฤษฎีของ ซอกค์เลย์-ริด-ฮอลล์ โดยผ่านกับดักประจุที่มีการกระจายแบบเอกซ์โพเนนเชียลซึ่งหมายความว่าปรากฏการณ์การชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์จะไม่มีส่วนร่วมในการนำกระแส นอกจากนี้ยังได้ว่าภายใต้การฉายแสงให้กับรอยต่อวิวิธพันธุ์ แรงดันวงจรถัด (V_{oc}) สามารถจะแสดงได้ดังความสัมพันธ์ต่อไปนี้คือ

$$V_{oc} \approx \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{J_{sc}}{J_0}\right) = \frac{E_a}{q} - \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{J_{00}}{J_{sc}}\right) \quad (2.102)$$

เมื่อ J_{sc} คือ ความหนาแน่นกระแสลัดวงจร ถ้าประมาณว่าทั้ง n , J_{sc} และ J_{00} ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ กราฟของความสัมพันธ์ระหว่าง V_{oc} และ T ควรจะเป็นเส้นตรงโดยมีความชันคือ $-\frac{nk}{q} \ln\left(\frac{J_{00}}{J_{sc}}\right)$ และจุดตัดแกน V_{oc} (เมื่อ $T = 0$ เคลวิน) คือค่า E_a/q ในกรณีของการรวมตัวกันของพาหะโดยผ่านสถานะผิวรอยต่อโดยไม่มีกลไกการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์เข้ามาเกี่ยวข้องและความสูงของกำแพงศักย์ยังขึ้นกับความแรงของสนามไฟฟ้าจะได้ว่า $E_a = \phi_b^p$ ซึ่ง ϕ_b^p ก็คือ ϕ_b^f นั่นเอง เมื่อ ϕ_b^f คือ กำแพงศักย์ของแถบพลังงานแบนราบ (flat band barrier) ในทำนองเดียวกันเราสามารถหาค่าช่องว่างพลังงานของตัวดูดกลืนแสงได้จากการเขียนกราฟระหว่าง V_{oc} กับ T ซึ่ง V_{oc} นี้จะต้องเป็นไปตามกลไกการรวมตัวของพาหะในบริเวณเขตปลอดพาหะของทฤษฎี ซอกค์เลย์-ริด-ฮอลล์

อย่างไรก็ตามเมื่อมีกลไกการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์เข้ามาเกี่ยวข้อง แฟกเตอร์อุดมคติของไดโอดจะขึ้นกับอุณหภูมิ ส่งผลให้ความสัมพันธ์ระหว่าง V_{oc} กับ T ในสมการ (2.102) ไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นจึงต้องใช้สมการที่ (2.102) ในการหาค่าพลังงานกระตุ้น (E_a)

2.9 สมบัติทางไฟฟ้าของตัวเก็บประจุชนิดที่มีรอยต่อแบบ MIS ในอุดมคติ [6-14, 16, 20, 28, 30-37]

โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อระหว่างโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ (MIS) ในอุดมคติของสารกึ่งตัวนำทั้งชนิดเอ็นและทั้งชนิดพีขณะที่ยังไม่มีกรไบแอตสกระแสดังรูปที่ 2.38 ค่าความจุของรอยต่อแบบ MIS ในอุดมคติเกิดจากประจุที่ผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำตรงบริเวณที่เชื่อมต่อกับชั้นฉนวนภายใต้การไบแอตหรือไม่มีกรไบแอต ประจุที่ผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำนี้จะมีปริมาณเท่ากับประจุที่ผิวหน้าของขั้วโลหะที่ตรงบริเวณเชื่อมต่อกับชั้นฉนวนแต่ชนิดของประจุจะตรงกันข้าม ซึ่ง

จะถือว่าไม่มีสถานะผิวเชื่อมต่อหรือประจุใดๆปรากฏในชั้นฉนวน อีกทั้งถือว่าภายใต้แรงดันเอกซาร์นี้ไม่มีสถานะพื้นผิวหรือการเรียงใหม่เพื่อให้เกิดขั้วเท่านั้น เมื่ออยู่ใต้เงื่อนไขประจักษ์ตามการคำนวณ ไม่ว่าจะเป็นกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไบแอสจะไม่มีพาหะใดๆไหลข้ามชั้นฉนวนได้ซึ่งจะประมาณว่าชั้นฉนวนมีค่าความต้านทานเป็นอนันต์ เพื่อให้ง่ายจะประมาณได้ว่าผลต่างระหว่างค่าฟังก์ชันงาน (work function) ของโลหะกับสารกึ่งตัวนำมีค่าเป็นศูนย์จากรูปที่ 2.30 จะเขียนออกเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้ คือ

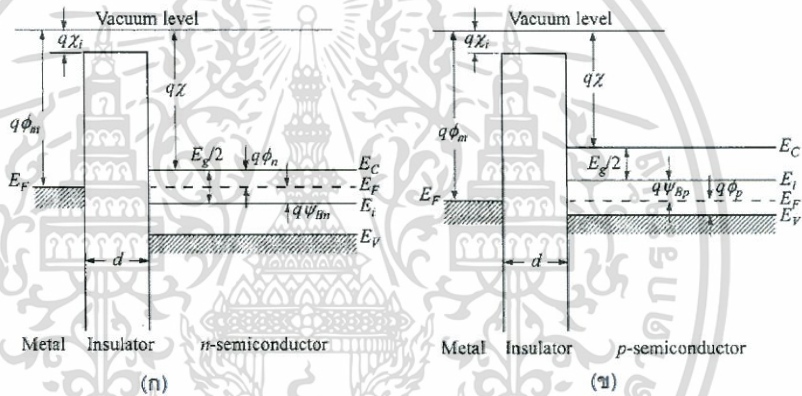
$$\phi_{ms} = \phi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} - \psi_{Bn} \right) = \phi_m - (\chi + \phi_n) = 0 \quad \text{กรณีของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (2.103 ก.)}$$

$$\phi_{ms} = \phi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} - \psi_{Bp} \right) = \phi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{q} - \phi_p \right) = 0 \quad \text{กรณีของสารกึ่งตัวนำชนิดพี (2.103 ข.)}$$

เมื่อ χ, χ_i คือ อิเล็กตรอนอัฟฟินิตีของสารกึ่งตัวนำและชั้นฉนวน

ψ_{Bn}, ψ_{Bp} คือ แรงดันเฟอร์มีที่อ้างอิงจากระดับกึ่งกลางของแถบช่องว่างพลังงาน

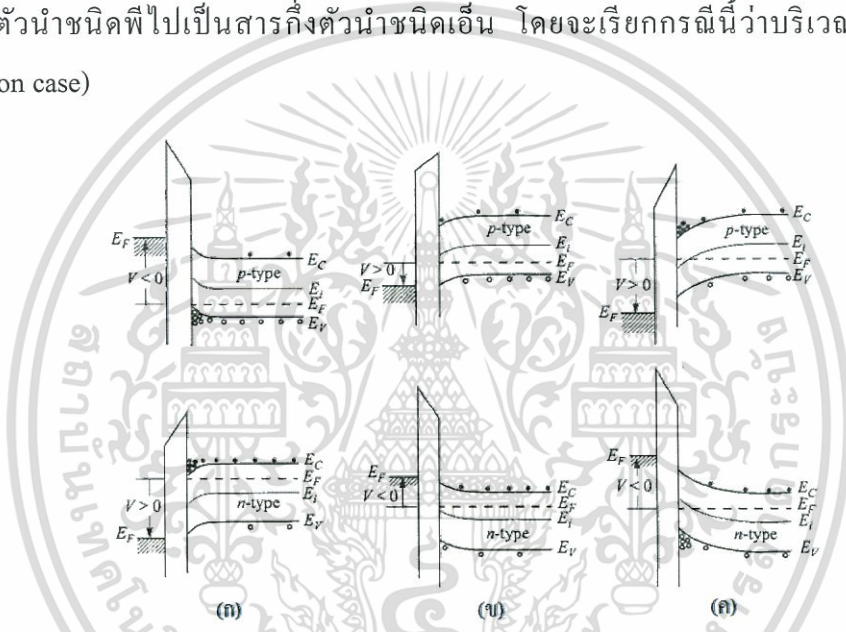
ϕ_n, ϕ_p คือ แรงดันเฟอร์มีที่อ้างอิงจากระดับขอบแถบพลังงาน



รูปที่ 2.38 แสดงแถบพลังงานของตัวเก็บประจุแบบ MIS ในอุดมคติที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน เมื่อไม่มีการจ่ายแรงดันไฟฟ้า ($V=0$)
 ก. กรณีที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น
 ข. กรณีที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี

เมื่อทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับตัวเก็บประจุแบบ MIS พาหะที่บริเวณผิวเชื่อมต่อของสารกึ่งตัวนำและฉนวนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นโดยแบ่งได้เป็น 3 ลักษณะดังที่แสดงอยู่ในรูปที่ 2.39 (ก) โดย กรณีแรกตามรูปที่ 2.39(ก) เมื่อทำการจ่ายแรงดันไฟลบให้กับขั้วโลหะ ($V<0$) จะทำให้พาหะข้างมากหรือ โฮลจะถูกเหนี่ยวนำจนเกิดการขมูมนกันที่บริเวณผิวเชื่อมต่อของฉนวนกับสารกึ่งตัวนำ ทำให้ระดับพลังงานเฟอร์มี (E_F) ของด้านโลหะเลื่อนสูงขึ้นจากสภาวะสมดุล ซึ่งจะส่งผลให้แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำเกิดการโค้งงอขึ้นเนื่องจากการขมูมนของโฮลที่บริเวณผิวเชื่อมต่อโดยกรณีนี้จะเรียกว่าบริเวณขมูมนพาหะ (accumulation case) ส่วนในกรณีที่สองถ้าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขั้วโลหะเป็นไฟบวก ($V>0$) จะส่งผลให้พาหะข้างน้อยหรืออิเล็กตรอนถูกเอกสตรีนเป็นเอกสตรีนที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหนี่ยวนำให้มาชุมนุมกันที่บริเวณผิวเชื่อมต่อแทนที่โฮลซึ่งจะมีความหนาแน่นลดลง ทำให้แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำโค้งตัวลง จนระดับพลังงานเฟอร์มิชนิคอินทรินสิค (E_i) เข้าใกล้ระดับพลังงานเฟอร์มิ (E_F) ของสารกึ่งตัวนำมากขึ้นซึ่งจะเรียกว่าบริเวณพร่องพาหะ (depletion case) ดังรูปที่ 2.39(ข) และสุดท้ายถ้าทำการจ่ายแรงดันไฟบวกให้กับขั้วโลหะมากขึ้นไปอีก แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำจะโค้งงอลงมากขึ้น จนกระทั่งระดับพลังงานเฟอร์มิชนิคอินทรินสิค (E_i) เลื่อนลงจนอยู่ต่ำกว่าระดับพลังงานเฟอร์มิ (E_F) ของสารกึ่งตัวนำ จะส่งผลให้อิเล็กตรอนชุมนุมกันที่บริเวณผิวเชื่อมต่อมากขึ้นดังที่แสดงในรูปที่ 2.39(ค)ซึ่งจะทำให้มีสมบัติการนำไฟฟ้าเป็นแบบชนิดเอ็น โดยบริเวณดังกล่าวนี้ไม่ได้เกิดจากอิทธิพลของสารเจือเลย แต่เกิดการกลับกลาย (inversion) จากสารกึ่งตัวนำชนิดพีไปเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น โดยจะเรียกกรณีนี้ว่าบริเวณชั้นกลับกลาย (inversion case)



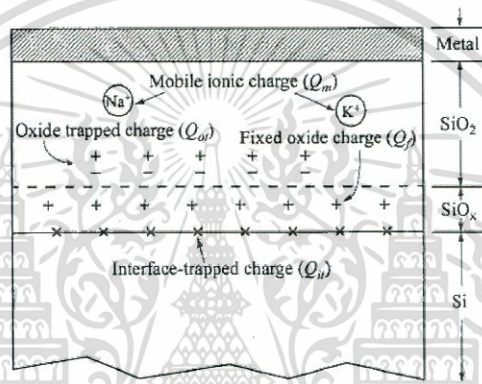
รูปที่ 2.39 แสดงแถบพลังงานของตัวเก็บประจุแบบ MIS ในอุดมคติในขณะที่มีการไบแอสเพื่อให้เกิด

- ก. บริเวณชุมนุมพาหะ
- ข. บริเวณพร่องพาหะ
- ค. บริเวณชั้นกลับกลาย

2.10 ความเป็นตัวเก็บประจุของรอยต่อแบบ MOS ในซิลิคอน[6,13-14, 16, 20-23,28,30-37]

ความเป็นตัวเก็บประจุในรอยต่อของ โลหะ-ออกไซด์-ซิลิคอน (MOS) สามารถอธิบายได้ผ่านทางแบบจำลองของกัณฑ์ประจุและพาหะดังที่แสดงอยู่ในรูปที่ 2.40 ความหนาแน่นของกัณฑ์ประจุที่ผิวเชื่อมต่อ (D_{it}) และประจุค้างภายในกัณฑ์ (Q_{it}) ที่อยู่บริเวณผิวสัมผัสของ Si-SiO₂ โดยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พาหะได้มีการย้ายที่อยู่ไปยังระดับพลังงานต่างๆ ที่อยู่ภายในช่องว่างแถบพลังงานเป็นระยะเวลาสั้นๆ ประจุ Q_{it} จะถูกกำหนดจากระดับพลังงานเฟอร์มิที่ขึ้นกับการไบแอสแรงดัน กับดักประจุที่ผิว เชื่อมต่อนั้นอาจเกิดได้จากอะตอมซิลิคอนส่วนเกินที่ได้จากการสลายพันธะระหว่างซิลิคอนกับ ไฮโดรเจน รวมไปถึงอะตอมของออกซิเจนส่วนเกินและสารเจือ ประจุที่ตรึงอยู่ในชั้นออกไซด์ (Q_o) จะพบมากในบริเวณที่ใกล้กับผิวเชื่อมต่อและสามารถเคลื่อนที่ได้เมื่อมีการจ่ายสนามไฟฟ้า ประจุ ค้างที่เป็นผลมาจากกับดักในชั้นออกไซด์ (Q_{ot}) ถูกสร้างขึ้นมาจากการแผ่รังสีของรังสีเอกซ์ หรือการ ฉีคลิเล็กตรอนร้อนซึ่งกับดักประจุเหล่านี้จะกระจายตัวอยู่ทั่วทั้งบริเวณของชั้นออกไซด์



รูปที่ 2.40 แสดงพาหะที่เกิดการออกซิไดซ์เนื่องจากความร้อนในซิลิคอน

2.11 กับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อ [6,13-14, 16, 20-23,28,30-37]

กับดักที่ผิวเชื่อมต่อจะแสดงลักษณะถึงความเป็นอะตอมผู้ให้ (donor) ถ้ามีการเปลี่ยนแปลง จากสถานะที่เป็นกลางทางไฟฟ้าไปเป็นประจุบวก (+) โดยการปล่อยอิเล็กตรอนออกไป และ เช่นเดียวกับลักษณะของอะตอมผู้รับ (accepter) จะมีการรับเอาอิเล็กตรอนเข้ามาจนเปลี่ยนลักษณะ ทางไฟฟ้าจากเป็นกลางทางไฟฟ้าไปเป็นประจุลบ (-) ฟังก์ชันการแจกแจงของกับดักประจุที่ผิว เชื่อมต่อสามารถเขียนได้ 2 กรณี ได้แก่

สำหรับกรณีที่เป็นกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อแบบอะตอมผู้ให้

$$F_{SD}(E_t) = \left[1 - \frac{1}{1 + (1/g_D) \exp[(E_t - E_F)/kT]} \right]$$

$$= \frac{1}{1 + g_D \exp[(E_F - E_t)/(kT)]} \quad (2.104 \text{ ก.})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

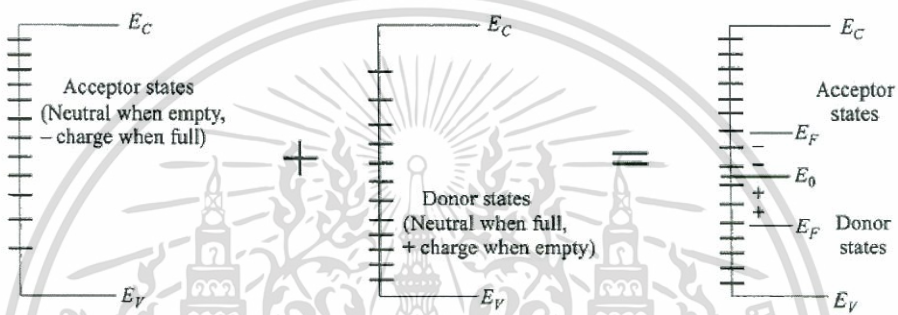
สำหรับกรณีที่เป็นกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อแบบอะตอมผู้รับ

$$F_{SA}(E_i) = \frac{1}{1 + g_A \exp[(E_i - E_F) / kT]} \quad (2.104 \text{ ข.})$$

เมื่อ E_i คือ ระดับพลังงานของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อ

g_D คือ สภาพซ้อนสถานะของสถานะพื้นของอะตอมผู้ให้

g_A คือ สภาพซ้อนสถานะของสถานะพื้นของอะตอมผู้รับ



รูปที่ 2.41 แสดงกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อในแบบสถานะของอะตอมผู้ให้และสถานะของอะตอมผู้รับ

จากรูปที่ 2.41 ได้แสดงถึงแผนภาพอย่างง่ายของความหนาแน่นกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อทั้งในกรณีแบบที่เป็นอะตอมผู้ให้และอะตอมผู้รับและระดับพลังงานที่เป็นกลางทางไฟฟ้าคือ E_0

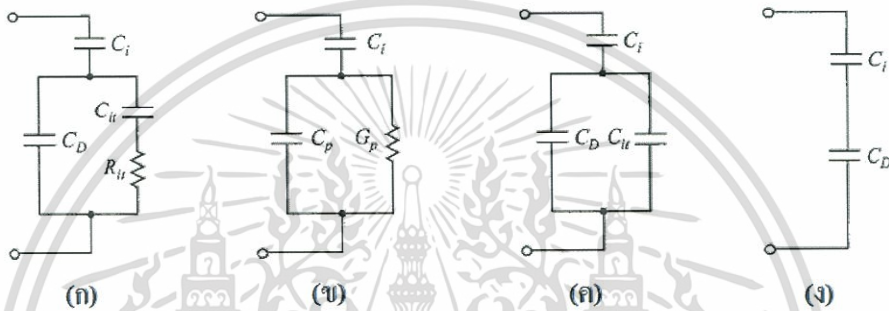
ในการคำนวณความหนาแน่นประจุในกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อภายใต้อุณหภูมิห้อง โอกาสการจับประจุของกับดักประจุจะมีค่าเป็น 0 และ 1 เมื่อระดับพลังงานของกับดักประจุอยู่สูงกว่าและอยู่ต่ำกว่าระดับพลังงานเฟอร์มี (E_F) ตามลำดับ ดังนั้นจะได้ว่า

$$\begin{aligned} Q_{it} &= -q \int_{E_0}^{E_F} D_{it} dE && \text{เมื่อ } E_F \text{ อยู่สูงกว่า } E_0 \\ &= +q \int_{E_F}^{E_0} D_{it} dE && \text{เมื่อ } E_F \text{ อยู่ต่ำกว่า } E_0 \end{aligned} \quad (2.105)$$

ซึ่งความหนาแน่นของประจุสุทธิดังกล่าวจะมีหน่วยเป็น คูลอมบ์ต่อตารางเซนติเมตร เนื่องจากระดับพลังงานของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อนั้นมีการกระจายตัวพาดผ่านแถบช่องว่างพลังงาน โดยจะศึกษาได้จากสมการการกระจายตัวของความหนาแน่นของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อ

$$D_{it} = \frac{1}{q} \frac{dQ_{it}}{dE} \quad (2.106)$$

สมการที่ (2.106) นี้ใช้คำนวณหาความหนาแน่นของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อโดยการวัด Q_{it} ที่เปลี่ยนแปลงไปตามระดับพลังงานเฟอร์มิ (E_F) หรือ ศักย์ไฟฟ้าที่ผิวหน้า (ψ_s) ที่เปลี่ยนไป



รูปที่ 2.42 แสดงวงจรสมมูลของรอยต่อแบบ MOS ในกรณีที่มีกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อ
 ก.,ข. แสดงวงจรสมมูลที่มี C_{ii} และ R_{ii} ของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อร่วมอยู่ด้วย
 ค. แสดงวงจรสมมูลในช่วงความถี่ต่ำ
 ง. แสดงวงจรสมมูลในช่วงความถี่สูง

เมื่อมีการจ่ายแรงดันให้กับรอยต่อระดับพลังงานเฟอร์มิจะเลื่อนขึ้นหรือลงเมื่อเทียบกับระดับพลังงานของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อ การเปลี่ยนแปลงปริมาณประจุของระดับพลังงานของกับดักประจุนี้ จะส่งผลให้กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าตัวเก็บประจุกับแรงดัน (C-V) ของ MIS แตกต่างไปจากอุดมคติ วงจรสมมูลพื้นฐานนี้มีกับดักประจุร่วมอยู่ด้วยจะแสดงดังรูปที่ 2.42(ก) โดยที่ C_i และ C_D เป็นความจุของชั้นฉนวน และความจุของชั้นพร่องพาหะของสารกึ่งตัวนำ C_{ii} และ R_{ii} คือค่าความจุและความต้านทานที่เกี่ยวข้องกับกับดักประจุซึ่งกับดักประจุนี้จะเป็นฟังก์ชันกับพลังงาน ผลคูณของ $C_{ii}R_{ii}$ จะนิยามว่าเป็นช่วงชีวิตของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อ (τ_{ii}) ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดพฤติกรรมการตอบสนองต่อความถี่ของกับดักประจุ เนื่องจาก C_p และ G_p จะต่อขนานกัน ทั้ง C_p และ G_p จะขึ้นกับความถี่ด้วยเช่นเดียวกัน โดยที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

$$C_p = C_D + \frac{C_{ii}}{1 + \omega^2 \tau_{ii}^2} \quad (2.107)$$

และ

$$\frac{G_p}{\omega} = \frac{C_{ii} \omega \tau_{ii}}{1 + \omega^2 \tau_{ii}^2} \quad (2.108)$$

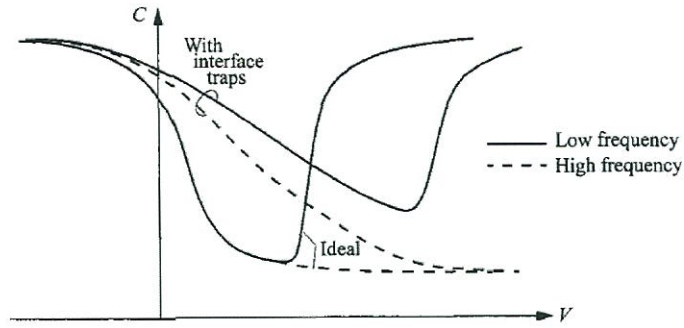
สิ่งที่น่าสนใจเป็นพิเศษคือในช่วงความถี่ต่ำ R_{ii} ของวงจรสมมูลในรูปที่ 2.34(ก) จะกำหนดให้มีค่าเป็นศูนย์แล้ว C_D จะขนานกับ C_{ii} ส่วนในช่วงความถี่สูงจะสามารถตัด C_{ii} และ R_{ii} ออกไปได้ หรือพิจารณาว่าเป็นวงจรเปิด ซึ่งจะบอกเป็นนัยว่ากับดักประจุนั้นไม่มีความสามารถในการตอบสนองที่ความถี่สูงๆ ได้ โดยสมการผลรวมของค่าความจุในตอนท้ายจะเขียนได้สองลักษณะได้แก่

$$\text{ผลรวมของค่าความจุที่ความถี่ต่ำ (C}_{LF}\text{)} \quad C_{LF} = \frac{C_i(C_D + C_{ii})}{C_i + C_D + C_{ii}} \quad (2.109)$$

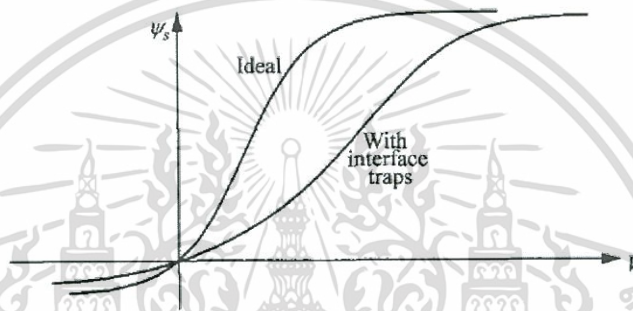
$$\text{ผลรวมของค่าความจุที่ความถี่สูง (C}_{HF}\text{)} \quad C_{HF} = \frac{C_i C_D}{C_i + C_D} \quad (2.110)$$

รูปที่ 2.43 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเก็บประจุ (C) กับแรงดัน (V) ทั้งที่ความถี่สูงและที่ความถี่ต่ำทั้งในกรณีที่มีกับดักประจุและไม่มีกับดักประจุ กับดักประจุจะส่งผลให้กราฟ C-V ยึดออกไปทางด้านแรงดันที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากมีประจุส่วนเกินที่ถูกจับอยู่ภายในกับดักประจุ ดังนั้นจะต้องใช้แรงดันที่มากขึ้นเพื่อให้ได้ศักย์ไฟฟ้าที่ผิวหน้า (ψ_s) เหมือนกับกรณีที่ไม่มีกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อ ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนว่า ψ_s ในรูปที่ 2.43(ข.) จะยึดออกไปทางด้านแรงดันที่เพิ่มขึ้น จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\psi_s - V$ สามารถนำไปคำนวณหา D_{ii} ได้ อีกทั้งยังเห็นได้ว่าในกรณีที่มีกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อจะเกิดผลต่างระหว่างค่า C ของความถี่สูงกับความถี่ต่ำที่บริเวณแรงดันก่อนเกิดเป็นชั้นกลับกลายอย่างแรง (strong inversion) ซึ่งผลต่างของ C นี้จะแปรตรงกับปริมาณของ D_{ii}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

- รูปที่ 2.43** แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเก็บประจุ (C) และแรงดันไฟฟ้า (V) ทั้งที่ความถี่สูงและที่ความถี่ต่ำ ทั้งในกรณีที่มีกับดักประจุและไม่มีกับดักประจุ
- ก. แสดงอิทธิพลของกับดักประจุที่ผิวเชื่อมต่อที่มีต่อกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุกับแรงดันของรอยต่อ MIS
- ข. แสดงการยืดออกของแรงดันที่เพิ่มขึ้นของ ψ_s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.12 การศึกษาสถานะผิวด้วยวิธีการวัดค่าความจุไฟฟ้าที่ความถี่สูงและความถี่ต่ำ [6,13-14, 16, 20-23, 28, 30-37]

วิธีการนี้มีจุดเด่นคือไม่จำเป็นต้องใช้การคำนวณในเชิงทฤษฎีที่ยุ่งยากและใช้ได้กับการเจือสารอย่างไม่สม่ำเสมอ จากสมการค่าความจุที่ความถี่สูงและความถี่ต่ำในสมการที่ (2.121) และสมการที่ (2.120) จะเขียนได้ว่า

$$C_{it} = \left(\frac{1}{C_{LF}} - \frac{1}{C_i} \right)^{-1} - C_D$$

$$= \left(\frac{1}{C_{LF}} - \frac{1}{C_i} \right)^{-1} - \left(\frac{1}{C_{HF}} - \frac{1}{C_i} \right)^{-1} \quad (2.111)$$

โดยกำหนดให้ ผลต่างของค่าความจุทางไฟฟ้า $\Delta C \equiv C_{LF} - C_{HF}$ และเมื่อใช้ความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกับค่าประจุที่ผิวเชื่อมต่อ $D_{it} = C_{it} / q^2$ จะได้ว่า

$$D_{it} = \frac{C_i}{q^2} \left[\left(\frac{1}{\Delta C / C_i + C_{HF} / C_i} - 1 \right)^{-1} - \left(\frac{1}{C_{HF} / C_i} - 1 \right)^{-1} \right]$$

$$= \frac{\Delta C}{q^2} \left[\left(1 - \frac{C_{HF} + \Delta C}{C_i} \right)^{-1} - \left(1 - \frac{C_{HF}}{C_i} \right)^{-1} \right] \quad (2.112)$$

ในสมการนี้ได้แสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นของกับดักประจุนั้นแปรผันตามผลต่างของค่าความจุทางไฟฟ้า (ΔC) ถ้าสามารถหาค่าสเปกตรัมทางพลังงานของ D_{it} ได้ก็สามารถที่จะหาค่า ψ_s ได้จากการอินทิเกรตค่าความจุไฟฟ้าทั้งที่ความถี่ต่ำหรือที่ความถี่สูงอย่างใดอย่างหนึ่งก็ได้

2.12.1 การศึกษาสถานะพีดด้วยวิธีคอนดักแตนซ์สเปกโตรสโคปี

เนื่องจากอิทธิพลของตัวเก็บประจุภายในชั้นออกไซด์ส่งผลให้การศึกษาสมบัติเฉพาะของพีดเชื่อมต่อนั้นเป็นไปได้ยาก เนื่องด้วยค่าความจุและค่าความเหนี่ยวนำต่างก็เป็นฟังก์ชันของความถี่และแรงดันซึ่งเกี่ยวข้องกับกับดักประจุที่พีดเชื่อมต่อ ความแตกต่างของของค่าความจุที่วัดได้ในย่านความถี่ที่แตกต่างกันนั้นมีค่าน้อยมากเมื่อนำมาคำนวณแล้วจะทำให้มีโอกาสผิดพลาดสูงจึงเป็นการยากที่จะนำมาใช้คำนวณหาค่ากับดักประจุที่พีดเชื่อมต่อ แต่ผลที่ได้จากการวัดค่าความเหนี่ยวนำไฟฟ้ามีความแม่นยำและน่าเชื่อถือมากกว่า ในรูปที่ 2.44 ได้แสดงผลที่ได้จากการวัดค่าความจุและความเหนี่ยวนำที่ความถี่ 5 และ 100 กิโลเฮิร์ตซ์ พบว่าค่าความจุกระจายตัวสูงสุดอยู่เพียงแค่ 14 เปอร์เซ็นต์ ส่วนพีดค่าความเหนี่ยวนำนั้นเปลี่ยนแปลงมากกว่าอย่างเห็นได้ชัดเจนในช่วงความถี่เดียวกัน

จากภาพวงจรสมมูลในรูปที่ 2.42(ก) ความจุของฉนวน C_i ที่ได้จากการวัดในช่วงที่มีการชูนุ่มพาดอย่างมาก ค่าความต้านทานจินตภาพของความจุ (capacitive reactance) ของชั้นฉนวนจะถูกนำเอาไปหักออกจากค่าอิมพีแดนซ์ สุดท้ายแล้ววงจรสมมูลจะเป็น C_D ต่อขนานกันกับ R_{ii} C_{ii} สำหรับค่า $\frac{G_p}{\omega}$ ในสมการที่ (2.108) จะไม่มีพจน์ C_D ปรากฏอยู่นั้นคือ $\frac{G_p}{\omega}$ จะสัมพันธ์กับกับดักประจุที่พีดเชื่อมต่อโดยตรง การเปลี่ยนค่าแอดมิตแตนซ์ที่วัดได้ของกับดักประจุที่พีดเชื่อมต่อให้เป็นค่าคอนดักแตนซ์จะแสดงได้ดังสมการ

$$\frac{G_p}{\omega} = \frac{\omega C_i^2 G_m}{G_m^2 + \omega^2 (C_i + C_m)^2} = \frac{C_{ii} \omega \tau_{ii}}{1 + \omega^2 \tau_{ii}^2} \quad (2.113)$$

เมื่อทำการไบแอสแรงดันจะสามารถวัดค่า $\frac{G_p}{\omega}$ ที่สัมพันธ์กับความถี่ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{G_p}{\omega}$ และ ω จะมีค่าสูงสุดเมื่อ $\omega \tau_{ii} = 1$ จุดที่ค่า $\frac{G_p}{\omega}$ สูงสุดจะมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของ C_{ii} ดังนั้นจากวงจรสมมูลได้มีการแก้ไขโดยการหักค่า C_i ออกไปจะได้ C_{ii} และ $\tau_{ii} (= R_{ii} C_{ii})$ เมื่อรู้ค่า C_{ii} แล้วจะสามารถคำนวณหาค่าความหนาแน่นของกับดักประจุที่พีดเชื่อมต่อได้มาจากการใช้ความสัมพันธ์ $D_{ii} = C_{ii} / q^2$ แล้วจะได้ว่า

$$D_{it} = \frac{2}{q} \left(\frac{G_p}{\omega} \right)_{\max} \quad (2.114)$$

โดยที่ $\frac{G_p}{\omega}$ จะมีหน่วยเป็นฟารัดต่อลูกบาศก์เซนติเมตร สมการที่ (2.114) นี้ เป็นการหาค่าความหนาแน่นของกับดักประจุที่มีระดับพลังงานเดียว (single trap) แต่โดยทั่วไปแล้วกับดักประจุก็มีระดับพลังงานจำนวนมากกระจายอยู่ในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ความหนาแน่นของกับดักประจุที่มีระดับพลังงานต่อเนื่องกัน (continuum of interface traps) จะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$\frac{G_p}{\omega} = \frac{qD_{it}}{2\omega\tau_{it}} \ln(1 + \omega^2\tau_{it}^2) \quad (2.115)$$

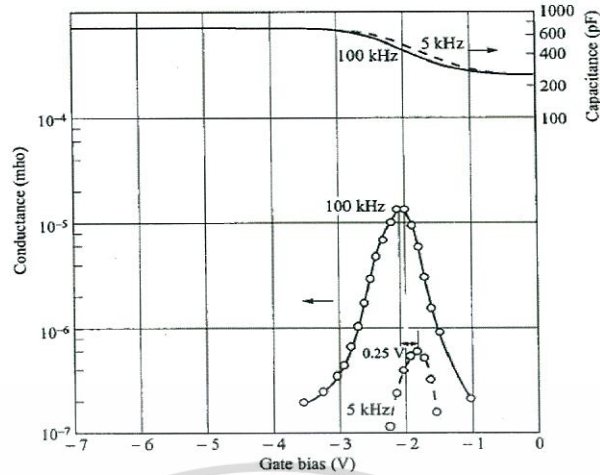
ซึ่ง $\frac{G_p}{\omega}$ จะมีค่าสูงสุดเมื่อ $\omega\tau_{it} = 1.98$ และจากความสัมพันธ์ $D_{it} = C_{it} / q^2$ จะได้ว่า

$$D_{it} = \frac{\left(\frac{G_p}{\omega} \right)_{\max}}{0.402q} \approx \frac{2.5}{q} \left(\frac{G_p}{\omega} \right)_{\max} \quad (2.116)$$

และ
$$\tau_{it} = (\sigma_T v_{th} N_{C,V})^{-1} \exp\left(\frac{E_T}{kT}\right) \quad (2.117)$$

เมื่อ σ_T คือพื้นที่ภาคตัดขวางของการจับประจุของกับดักประจุมีค่าประมาณ 10^{-15} ต่อตารางเซนติเมตร ส่วน v_{th} คือความเร็วเฉลี่ยของพาหะอิสระเนื่องจากความร้อน มีค่าประมาณ 10^7 เซนติเมตรต่อวินาที และ $N_{C,V}$ คือค่าขั้วผลของความหนาแน่นของสถานะพลังงานในแถบนำหรือแถบวาเลนซ์ สำหรับ E_T คือระดับพลังงานของกับดักประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.44 แสดงกราฟความสัมพันธ์ที่ได้จากการศึกษาค่าความจุและค่าความเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า เทียบกับแรงดันขอรอยต่อแบบ MIS

2.13 อิมพีแดนซ์ของวงจร RC ต่อแบบอนุกรมและต่อแบบขนาน [6-7,13-14, 16, 19-23, 28, 30-39]

2.13.1 วงจร RC ต่อแบบอนุกรม

มีลักษณะคล้ายกับตัวต้านทานสองตัวต่ออนุกรมต่อกัน อิมพีแดนซ์ลัพธ์จะเท่ากับ ผลรวมของอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทาน (Z_R) กับอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ (Z_C) ซึ่งจะได้ว่า

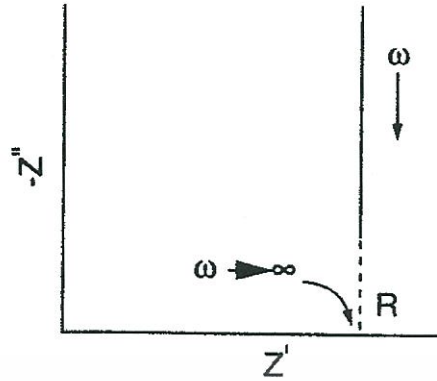
$$Z_{RC} = Z_R + Z_C \quad (2.118)$$

อย่างไรก็ตามค่า Z_C จะขึ้นอยู่กับความถี่ ดังนั้นจำเป็นต้องเขียนค่าของ Z_C ในรูปของจำนวนจินตภาพของเลขจำนวนเชิงซ้อนของค่าอิมพีแดนซ์ โดยที่ $j = \sqrt{-1}$ ดังนั้น $Z_C = 1/j\omega C = -j/\omega C$ และ $Z_R = R_S$ แล้วจะได้ว่า

$$Z_{RC} = R_S - j/\omega C \quad (2.119)$$

โดยที่ R_S เป็นจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์ส่วน $1/\omega C$ เป็นจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์ เมื่อความถี่เข้าใกล้อนันต์หรือกรณี C มีค่าใหญ่มาก แล้วจะได้ว่า Z_{RC} เข้าสู่ค่า R_S จากกราฟของ ไนควิสต์ (Nyquist plot) จุดตัดแกน Z' จะเป็นค่าของ Z_R ดังรูปที่ 2.45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.45 แสดงกราฟของไนควิสต์ที่ระบุถึงค่าอิมพีแดนซ์ของวงจร RC ต่ออนุกรมอย่างง่าย

2.13.2 วงจร RC ต่อแบบขนาน

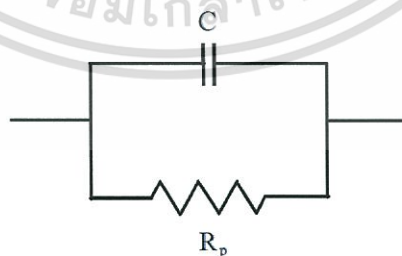
ในกรณี Z_R กับ Z_C ต่อขนานกันดังรูปที่ 2.46 แล้วอิมพีแดนซ์จะมีค่าดังนี้คือ

$$\frac{1}{Z_{RC}} = \frac{1}{Z_R} + \frac{1}{Z_C} \quad (2.120)$$

ในกรณีนี้ให้ $Z_R = R_p$ ดังรูปที่ 2.46 ดังนั้นสมการที่ (2.131) จะกลายเป็น

$$\frac{1}{Z_{RC}} = \frac{1}{R_p} + j\omega C \quad (2.121)$$

$$= \frac{(1 + j\omega R_p C)}{R_p} \quad (2.122)$$



รูปที่ 2.46 แสดงวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่าย

เพื่อที่จะแยกจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพออกจากกัน จำเป็นต้องใช้ค่าคอนจูเกต $1 - j\omega R_p C$ คูณทั้งตัวตั้งและตัวหารของสมการที่ (2.100) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{1}{Z_{RC}} = \frac{(j\omega R_P C + 1)(j\omega R_P C - 1)}{R_P(j\omega R_P C - 1)}$$

$$= - \left[\frac{\omega^2 R_P^2 C^2 + 1}{R_P(j\omega R_P C - 1)} \right]$$

ดังนั้น

$$Z_{RC} = - \left[\frac{j\omega R_P^2 C - R_P}{\omega^2 R_P^2 C^2 + 1} \right] \quad (2.123)$$

$$Z_{RC} = \frac{R_P}{\omega^2 R_P^2 C^2 + 1} - j \left(\frac{\omega R_P^2 C}{\omega^2 R_P^2 C^2 + 1} \right)$$

$$= Z' - jZ''$$

โดยที่

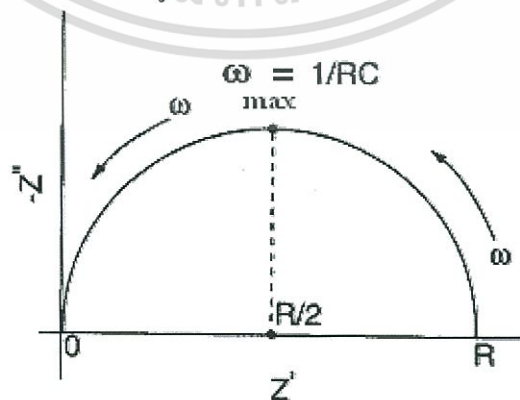
$$Z' = \frac{R_P}{\omega^2 R_P^2 C^2 + 1} = \frac{R_P}{(\omega\tau)^2 + 1} \quad (2.124)$$

และ

$$Z'' = \frac{\omega R_P^2 C}{\omega^2 R_P^2 C^2 + 1} = R_P \left[\frac{\omega\tau}{(\omega\tau)^2 + 1} \right] \quad (2.125)$$

เมื่อ $\tau = R_P C =$ ค่าคงตัวเวลา (time constant)

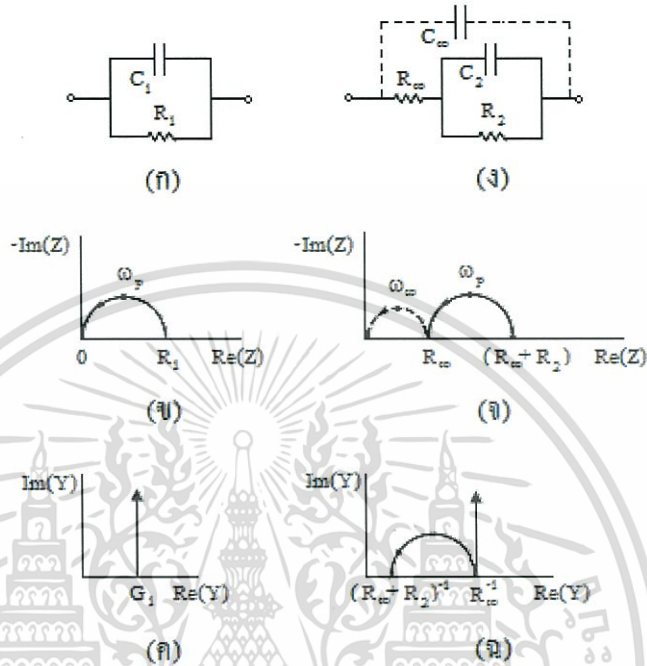
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Z' กับ Z'' จะเรียกว่า กราฟของไนควิสต์ ซึ่งกราฟวงจรร C ต่อแบบขนานอย่างง่ายจะแสดงดังรูปที่ 2.47



รูปที่ 2.47 แสดงกราฟของไนควิสต์ของวงจรร C ต่อแบบขนานอย่างง่ายที่จุดสูงสุดของรูปครึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่วงกลมเกิดขึ้นเมื่อ $\omega = 1/RC$ เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่ายสองรูปแบบที่แสดงอยู่ในแบบอิมพีแดนซ์ สเปกโตรสโคปี (impedance spectroscopy) และแอดมิตแตนซ์สเปกโตรสโคปี (admittance spectroscopy) จะปรากฏอยู่ในรูปที่ 2.48



รูปที่ 2.48 แสดงวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่าย (ก, ง) อิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี (ข, จ) และแอดมิตแตนซ์สเปกโตรสโคปี (ค, ฉ)

อิเล็กโทรดที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์ที่ใช้ในการทดลองจะก่อให้เกิดความจุไฟฟ้าที่เรียกว่า ความจุเรขาคณิต (geometrical capacitance : C_{geo}) ซึ่งก็คือ C_{∞} หรือ C_1 ในรูปที่ 2.48 ส่วนความต้านทานของเนื้อสารตัวอย่าง (bulk resistance: R_b) ตัวอย่าง ซึ่งก็คือ R_{∞} หรือ R_1 แล้วค่าคงตัวเวลา $\tau = R_{\infty}C_{\infty} = R_1C_1$ ความหมายของค่าคงตัวเวลานี้ก็คือ ค่าเวลาผ่อนคลายไดอิเล็กทริก (τ_D) ของสารตัวอย่างที่ใช้ศึกษานั้นเอง ความถี่เชิงมุม (ω) ที่ทำให้ Z'' มีค่าสูงสุด คือ ω_p และจะปรากฏอยู่ที่จุดบนสุดของกราฟครึ่งวงกลมในรูปที่ 2.48(ข) ซึ่งที่จุดบนสุดนี้จะสอดคล้องกับเงื่อนไข $\omega_p\tau_D = 1$ โดยทั่วไป $\tau_D < 10^{-7}$ วินาที ที่ความถี่เชิงมุมสูงสุด (ω_{max}) ของเครื่องมือที่ใช้วัดและภายใต้เงื่อนไข $\omega_{max}\tau_D \leq 1$ มักจะไม่ปรากฏค่า Z'' ในกราฟของอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี อย่างไรก็ตามเมื่อลดอุณหภูมิของสารตัวอย่างลงแล้ว τ_D จะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ส่วนโค้งของกราฟ (arc) ปรากฏขึ้นในอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี แต่ถ้าอยู่ภายใต้เงื่อนไข $\omega_{max}\tau_D \geq 1$ แล้วรูปครึ่งวงกลมจะปรากฏอยู่ในกราฟของอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี สารตัวอย่างที่เป็นผลึกเดี่ยวมักไม่มีผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อกราฟครึ่งวงกลม แต่ถ้าเป็นผลึกพหุพันธ์มันจะมีผลต่อกราฟของอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี กล่าวคือ กราฟครึ่งวงกลมจะถูกกดให้จุดศูนย์กลางของวงกลมต่ำลงจากเส้นแกน Z'

นอกจากกรณีที่มี $R_1 = R_\infty$ และ $C_1 = C_\infty$ ซึ่งทำให้ได้กราฟครึ่งวงกลม 1 อัน ถ้าอิลเล็กโทรดนี้อยู่ในสารละลายเคมี ขณะที่ปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น เราจะให้ $R_1 = R_R$ และ $C_1 = C_R$ เมื่อ R_R คือ ความต้านทานขณะเกิดปฏิกิริยาเคมี ส่วน C_R คือ ความจุไฟฟ้าของบริเวณโพลาไรเซชัน (polarization region) ในสารละลาย ที่อยู่ชิดกับขั้วอิลเล็กโทรด ซึ่งในวงจร RC ของรูปที่ 2.48(ง) ได้กำหนดให้ $R_2 = R_R$ และ $C_2 = C_R$ ส่วนรูปที่ 2.48(จ) จะแสดงกราฟรูปครึ่งวงกลม 2 ซึ่งค่าคงตัวเวลาคือ $R_\infty C_\infty \leq R_2 C_2$ และกราฟรูปครึ่งวงกลมที่เกิดจาก R_∞ และ C_∞ จะแสดงจุดไข่วัดดังรูปที่ 2.48(จ) ซึ่งมักจะเกิดขึ้นที่ความถี่สูงมากกว่าความถี่ที่เครื่องมือทั่วไปวัดได้ ในกราฟอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี ลูกศรจะชี้ทิศทางของความถี่ของการวัดที่เพิ่มขึ้น และนิยมเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $-\text{Im}(Z)$ กับ $\text{Re}(Z)$ มากกว่าที่จะเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง $\text{Im}(Z)$ กับ $\text{Re}(Z)$ เพื่อให้กราฟส่วนใหญ่ปรากฏในควอดแดรนต์ที่ 1 ดังนั้นจึงเขียนความสัมพันธ์ใหม่เป็น $Z^* = Z' - jZ''$ และเขียน $\text{Im}(Z^*)$ แทน $-\text{Im}(Z)$

สำหรับแอดมิตแตนซ์สเปกโตรสโคปีของวงจร RC ต่อขนานของวงจรดังรูปที่ 2.48(ก) ค่าแอดมิตแตนซ์ลัพธ์คือผลรวมของแอดมิตแตนซ์ของตัวต้านทาน (G_1) กับแอดมิตแตนซ์ของตัวเก็บประจุ (ωC_1) ดังนั้นจะได้ว่า

$$Y_a = G_1 + j\omega C_1 \quad (2.126)$$

กราฟของสมการที่ (2.126) จะปรากฏอยู่ในรูปที่ 2.48(ค) ส่วนแอดมิตแตนซ์ของวงจรรูปที่ 2.48(ง) จะแสดงถึงความสัมพันธ์

$$Y_a = j\omega C_\infty + \frac{[1 + j\omega R_2 C_2]}{[(R_2 + R_\infty) + j\omega C_2 R_2 R_\infty]} \quad (2.127)$$

ซึ่งกราฟของสมการที่ (2.127) จะปรากฏอยู่ในรูปที่ 2.48(ฉ) อย่างไรก็ตามกราฟของรูปที่ 2.48(ข), (ค), (จ) และ (ฉ) ไม่แสดงตัวแปรค่าความถี่เอาไว้ ซึ่งความถี่เป็นตัวแปรที่สำคัญของความเข้าใจกลไกฟิสิกส์เคมีของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นขณะทำการทดลอง ดังนั้นได้มีการเพิ่มแกนที่สามขึ้นมา คือแกน $\log f$ เพื่อให้เป็น 3 มิติ

ในกรณีทั่วไปทั้ง Z' และ Z'' จะขึ้นกับ C และ R ซึ่งทั้ง Z' และ Z'' จะขึ้นอยู่กับความถี่ และพบว่า Z' กับ Z'' มีความสัมพันธ์ต่อกันดังนี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$(Z'')^2 - RZ' + (Z')^2 = 0 \quad (2.128)$$

ซึ่งสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$(Z'')^2 + \left(Z' - \frac{R}{2}\right)^2 = \left(\frac{R}{2}\right)^2 \quad (2.129)$$

โดยรัศมีของครึ่งวงกลมคือ $R/2$ ดังปรากฏในรูปที่ 2.48 ในกรณีที่ความต้านทานอนุกรม (R_s) ของวงจรมีค่าเป็นศูนย์ เราจะได้ว่า จุดตัดแกน Z' จะอยู่ที่ 0 และ R

2.13.3 กราฟของโบท (Bode plot)

อิมพีแดนซ์ $Z = Z' + jZ''$ สามารถเขียนอยู่ในแบบพิกัดตั้งฉาก (rectangular coordinate) และพิกัดเชิงเส้น (polar coordinate) โดยมีความสัมพันธ์ดังรูปที่ 2.49 ดังนี้คือ

$$\text{Re}(Z) \equiv Z' = |Z| \cos \phi$$

และ

$$\text{Im}(Z) \equiv Z'' = |Z| \sin \phi$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{Z''}{Z'} \right)$$

(2.130)

โดยที่โมดูลัสคือ

$$|Z| = \left[(Z')^2 + (Z'')^2 \right]^{1/2}$$

(2.131)

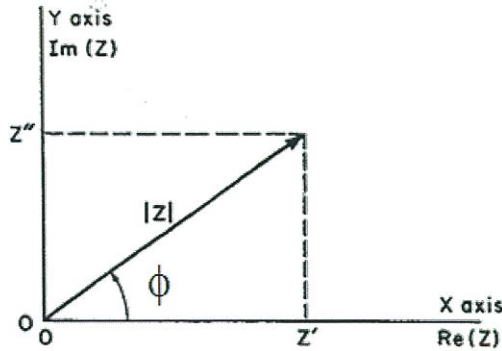
จากความสัมพันธ์ของออยเลอร์ (Euler relation)

$$\exp(j\phi) = \cos \phi + j \sin \phi$$

ดังนั้น

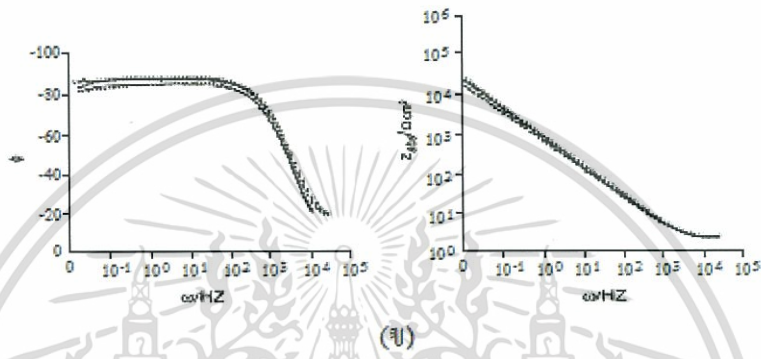
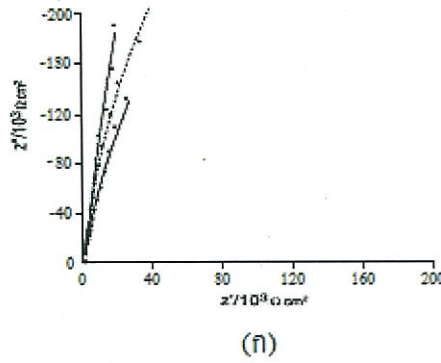
$$Z = |Z| \exp(j\phi) \quad (2.132)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.49 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์ของโคออร์ดิเนตตั้งฉากกับโคออร์ดิเนตเชิงขั้ว มุมเฟสระหว่าง ทิศทางของ Z' และ Z'' จะขึ้นกับความถี่ที่ใช้วัดในกรณีที่เป็นตัวเก็บประจุแท้ (pure capacitor) มุมเฟส $\phi = -90$ องศา และมุมเฟสของตัวต้านทานจะมีค่าเป็นศูนย์

กราฟของโบดจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $|z|$ กับความถี่และมุมเฟสกับความถี่ โดยแกนความถี่จะเป็นสเกลลอการิทึม (logarithmic scale) ข้อดีของกราฟของโบดคือ น้ำหนัก (weight) ของอิมพีแดนซ์ทั้งความถี่สูงและที่ความถี่ต่ำจะมีค่าเท่ากัน ในขณะที่กราฟของไนควิสต์ค่าอิมพีแดนซ์จะไปรวมกระจุกอยู่ในย่านความถี่ค่าสูงๆ ในกรณีตัวเก็บประจุสมบูรณ์ที่ความถี่เชิงมุม $\omega \rightarrow 0$ แล้วมุมเฟส $\phi = -90$ องศา กราฟของมุมเฟสที่วัดได้มักจะเบี่ยงเบนไปจากมุม -90 องศา แสดงว่าไม่ใช่เป็นตัวเก็บประจุแบบสมบูรณ์ ดังนั้นพฤติกรรมที่เบี่ยงเบนไปจะถูกจำลองให้อยู่ในพจน์ของอีลีเมนต์เฟสคงตัว (constant phase element: CPE) ตัวอย่างของกราฟโบดสำหรับอิมพีแดนซ์ (Z) และมุมเฟสจะแสดงดังรูปที่ 2.50 พฤติกรรมที่เปลี่ยนไปนี้จะขึ้นอยู่กับผิวหน้าของอิเล็กโทรด เช่นความไม่เรียบของผิวหน้าอิเล็กโทรดและระดับความสมบูรณ์ของผลิตภัณฑ์



รูปที่ 2.50 แสดงกราฟไนควิสต์(ก) และกราฟของ โบด(ข) ของอิมพีแดนซ์ของวงจรที่มีตัวเก็บประจุของบริเวณ โพลาริเซชันที่อยู่ชิดกับขั้วอิเล็กโทรด

ค่าอิมพีแดนซ์ของ CPE จะนิยามโดยค่าของ P และ n เมื่อ P คือ ค่าคงตัวที่ไม่ขึ้นอยู่กับความถี่ ส่วน n เป็นพารามิเตอร์ที่ไม่มีหน่วยและมีค่าอยู่ระหว่าง $0 \leq n \leq 1$ แต่โดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.8 ถึง 0.99 จำนวนจริงของ $Z(CPE)$ จะเกี่ยวข้องกับความต้านทาน และแปรตาม ω^{-n} ส่วนจำนวนจินตภาพจะเกี่ยวกับค่าความจุไฟฟ้า และแปรตาม ω^{-n} ด้วยเหมือนกัน ซึ่งจะแสดงได้ดังนี้คือ

$$Z(CPE) = \frac{1}{P(i\omega)^n} \tag{2.133}$$

ส่วนความจุสองชั้น (double-layer capacitance: C_{dl}) เนื่องจากบริเวณ โพลาริเซชันที่อยู่ชิดกับขั้วอิเล็กโทรดจะแสดงได้ดังนี้คือ

$$C_{dl} = n \sqrt[n]{\frac{P}{R_s(n-1)}} \tag{2.134}$$

พารามิเตอร์ P จะสัมพันธ์กับมุมเฟส ϕ ดังนี้คือ $\phi = n \left(\frac{\pi}{2} \right)$ ถ้ามุมเฟส ϕ เข้าใกล้ 1 ก็จะมีประพจน์ตัวเป็นตัวเก็บประจุสมบูรณ์โดยที่มุมเฟสมีหน่วยเป็นเรเดียน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมไดโอดของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/n-WO₃:In โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ W_{1-x}In_xO₃ (0≤x≤0.05) โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ W_{1-x}In_xO₃ (0≤x≤0.5) ที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำนั้นจะถูกเตรียมขึ้นมาจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายสถานะของแข็ง และได้ทำการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe ที่ถูกเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับในกรณีที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ เมื่อไม่มีการแอนนีสและมีการแอนนีสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัยที่ใช้ในการเตรียมไดโอดของสารกึ่งตัวนำ

p-ZnTe/ n-WO₃:In โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe ลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ W_{1-x}In_xO₃ (0≤x≤0.05) โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศมีวิธีการดำเนินงานทดลองดังนี้[6-7,15-23,35-37]

3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ W_{1-x}In_xO₃ (0≤x≤0.5) เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

1. สารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ WO₃และInO₃ ที่มีน้ำหนักประมาณ 4 กรัมเพื่อใช้สำหรับทำเป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO₃:In
2. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่งของ sartorius
3. อุปกรณ์บดสารครกอาเกต (agate mortar)
4. เครื่องอัดเม็ดสารตั้งต้น
5. เครื่องควบคุมอุณหภูมิเตาในการเผาสาร
6. เตาเผาสาร
7. ครุชิวิล
8. เครื่องอัดไฮดรอลิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}In_xO_3$ ($0 \leq x \leq 0.5$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

3.1.2 การคำนวณปริมาณสารตั้งต้นเพื่อเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $In_{0.04}WO_3$ จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง[6-7, 19, 22-23]

ทำการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $In_{0.04}WO_3$ ต่อไปนี้

มวลโมเลกุลของผงผลึกของสารประกอบ $WO_3 = 231.8482$ กรัม

มวลโมเลกุลของผงผลึกของสารประกอบ $In_2O_3 = 277.6382$ กรัม

$$\begin{aligned} \text{มวลโมเลกุลของผงผลึกของสารประกอบ } In_{0.04}WO_3 & \\ &= 231.8482 + 0.002(277.6382) \\ &= 237.4010 \text{ กรัม/โมล} \end{aligned}$$

ถ้าต้องการเตรียมผงผลึกของสารประกอบ $WO_3 : 0.004 In_2O_3$ จำนวน 4 กรัม

$$\begin{aligned} \text{ต้องใช้ผงผลึกของสารประกอบ } In_2O_3 &= \frac{(0.002)(277.6382)(4)}{237.4010} \\ &= 0.0936 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ต้องใช้ผงผลึกของสารประกอบ } WO_3 &= \frac{(231.8482)(4)}{237.4010} \\ &= 3.9064 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

ดังนั้นปริมาณสารตั้งต้นที่ต้องใช้คือสารประกอบ In_2O_3 จำนวน 0.0936 กรัม และสารประกอบ WO_3 จำนวน 3.9064 กรัม

3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์

1. แผ่นกระจกสไลด์ขนาด 9×9 ตารางมิลลิเมตร
2. บีกเกอร์ขนาด 200 มิลลิลิตร
3. เครื่องสั่นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค
4. เครื่องเป่าลมร้อน
5. แก๊สไนโตรเจน
6. นาฬิกาจับเวลา
7. ปากกิบ
8. เตาอบ
9. สารเคมี
 - 9.1 น้ำยาล้างจาน
 - 9.2 น้ำปลอดประจุ
 - 9.3 อะซีโตน
 - 9.4 เอทานอล

3.1.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมไดโอดของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/n-WO₃:In โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO₃:In โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO₃:In นั้นถูกเตรียมขึ้นมาจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

1. ระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่ออกแบบ ที่สามารถลดความดันได้ต่ำถึงระดับ 5×10^{-6} มิลลิบาร์
2. สารตั้งต้นที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO₃:In ที่เตรียมได้เพื่อนำไปใช้ทำเป็นแผ่นฐานรองรับของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe
3. สารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ ZnTe ที่เตรียมไว้แล้วหนัก 0.3 กรัม
4. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่งของ sartorius
5. เมทธานอล
6. อุปกรณ์บดสาร ครกอาเกต
7. เตาเผาสาร
8. กรูชิวีล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

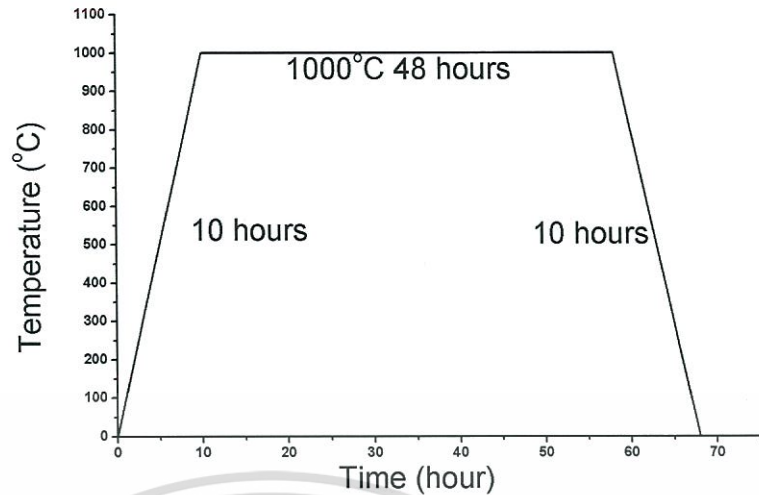
3.2 ขั้นตอนการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}In_xO_3$ ($0 \leq x \leq 0.5$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็ง และการเตรียมไดโอดของสารกึ่งตัวนำ $n-WO_3:In/p-ZnTe$ โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $ZnTe$ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $WO_3:In$ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส [6,15-20,35-37]

3.2.1 ขั้นตอนในการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}In_xO_3$ ($0 \leq x \leq 0.05$)

จากสารตั้งต้นที่เป็นผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

1. นำผลึกของสารประกอบ WO_3 และสารประกอบ In_2O_3 ตามปริมาณที่คำนวณไว้แล้วนำมาบดรวมกันในครกกา เททให้เป็นผงละเอียดคล้ายแป้งเป็นเวลา 2 ชั่วโมง
2. เมื่อบดแล้วนำไปอัดเม็ดจะทำการอัดเม็ดโดยใช้แรงอัด 4 ตันด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก โดยเพิ่มแรงอัดทีละ 1 ตัน แล้วทิ้งไว้ 10 วินาที จากนั้นจึงเพิ่มแรงอัดไปจนถึง 4 ตัน และตอนเอาเม็ดผลึกออกจากโมลด์อัดเม็ดจะใช้แรงอัดครั้งละประมาณ 0.5 ตัน
3. นำเม็ดของสารที่ได้นำมาใส่ในครุชเชิล ปิดฝาให้มิดชิดแล้วนำเข้าเตาเผา
4. ในการเผาภายใต้บรรยากาศนั้นจะทำการเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 100 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง จนกระทั่งถึง 1,000 องศาเซลเซียส จึงแช่ทิ้งไว้นาน 48 ชั่วโมง แล้วลดอุณหภูมิลงด้วยอัตรา 100 องศาเซลเซียส ต่อชั่วโมงจนถึงอุณหภูมิจึงปิดเตา นำออกมาทำการวิเคราะห์สมบัติเชิงฟิสิกส์ และทำการเตรียมไดโอดต่อไป

เม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $In_{0.04}WO_3$ ที่เตรียมได้ขณะยังไม่มี การเผาจะมีสีเขียวอ่อนๆ แต่เมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศเป็นเวลา 48 ชั่วโมง เม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $In_{0.04}WO_3$ ที่ยังไม่มี การเผายังคงมีสีเขียวอ่อน ส่วนที่มีการเติมสารเจือแล้วจะมีสีเขียวเข้ม ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 แสดงกราฟโปรไฟล์เตาที่ใช้ในการตั้งอุณหภูมิเตาเพื่อทำการเผาเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}In_xO_3$ ($0 \leq x \leq 0.5$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

รูปที่ 3.3 ภาพถ่ายของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}In_xO_3$ ($0 \leq x \leq 0.5$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

3.2.2 ขั้นตอนในการเตรียมไดโอดของสารกึ่งตัวนำ $p-ZnTe/n-WO_3:In$ โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $ZnTe$ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $WO_3:In$ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}In_xO_3$ ($0 \leq x \leq 0.05$) นั้นถูกเตรียมขึ้นมาจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

3.2.2.1 การเตรียมแผ่นกระจกสไลด์เพื่อใช้เป็นแผ่นฐานรองรับ

1. นำแผ่นกระจกสไลด์ขนาด 25×75 ตารางมิลลิเมตร ไปแช่ในน้ำที่ผสมน้ำยาล้างจานเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อทำการล้างคราบไขมันและสิ่งสกปรก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ภายในหน่วยงานเท่านั้น ไม่สามารถเผยแพร่หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปแช่ในอะซีโตนเป็นเวลา 10 นาที
4. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปแช่ในเอทานอลเป็นเวลา 10 นาที
5. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วยน้ำปอดคประจุ 3 ครั้ง ๆ ละ 10 นาที
6. ทำการเป่าแห้งแผ่นกระจกสไลด์ด้วยเครื่องเป่าลมร้อนและทำการตัดเป็นแผ่นเล็กมีขนาด 9×9 ตารางมิลลิเมตร
7. ทำการล้างด้วยน้ำปอดคประจุเป็นเวลา 10 นาที โดยขั้นตอนในข้อ 2-7 จะนำบีกเกอร์ไปใส่ในเครื่องสั่นด้วยคลื่นอัลตราโซนิก
8. ทำการเป่าแห้งด้วยเครื่องเป่าลมร้อน
9. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่ได้จากในข้อ 8 นำไปอบแห้งที่ 95 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที

3.2.2.2 การเตรียมไดโอดของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/n- $\text{WO}_3:\text{In}$ ตามลำดับ โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{W}_{1-x}\text{In}_x\text{O}_3$ ($x=0.04$) โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{W}_{1-x}\text{In}_x\text{O}_3$ ($x=0.04$) นั้นถูกเตรียมขึ้นมาจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

1. ทำความสะอาดระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในสุญญากาศโดยทำการจัดตั้งป็นเบื่อนต่าง ๆ เช่น คราบไขมันและผงฝุ่นด้วยอะซีโตนและเมทานอล
2. ทำการติดตั้งชุดอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อนสุญญากาศให้ครบถ้วน
3. ทำการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{W}_{1-x}\text{In}_x\text{O}_3$ ($x=0.04$) โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งสารกึ่งตัวนำ $\text{W}_{1-x}\text{In}_x\text{O}_3$ ($x=0.04$) ที่เป็นเม็ดเซรามิกนั้นจะถูกเตรียมขึ้นมาจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาสถานะของแข็งโดยเริ่มจากการนำสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกของสารประกอบ ZnTe ตามลำดับมาบดให้ละเอียดมีปริมาณ 1 กรัม แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เวลา 1 ชั่วโมงเพื่อไล่ความชื้นออกให้หมดมาเป็นสารตั้งต้นที่บรรจุใส่ลงไปในเบ้าภาชนะระเหยสาร(boat)ที่ทำด้วยโลหะทังสเตน

4. นำแผ่นฐานรองรับทั้งในกรณีที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และที่เป็นเม็ดยาของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}In_xO_3$ ($x=0.04$) ที่ทำการเตรียมไว้แล้วตามลำดับมาวางลงบนหน้ากาก (mask) ซึ่งทำจากแผ่นอลูมิเนียมเจาะเป็นช่องตามแบบและขนาดที่ต้องการ หลังจากนั้นปิดห้องสุญญากาศ (ภาชนะสุญญากาศ) ให้เรียบร้อย
5. ตรวจสอบระบบระเหยสารเคมีว่าวาล์วสุบอากาศออกและวาล์วปล่อยอากาศเข้าให้อยู่ในตำแหน่งที่ปิดเรียบร้อย
6. ทำการเปิดปั๊มกลโรตารีจากนั้นเปิดวาล์วสุบอากาศออกจนได้ความดันประมาณ 3×10^{-2} มิลลิบาร์ แล้วจึงเปิดปั๊มเทอร์โบโมเลกูลาร์จนได้ความดันตามต้องการในการทดลองนี้ใช้ความดันประมาณ 5×10^{-5} มิลลิบาร์
7. ทำการเปิดแผ่นกั้นการระเหย (shutter) แล้วเริ่มทำการระเหยสารเคมีโดยมีแผ่นกระจกสไลด์เป็นแผ่นฐานรองรับ โดยการเปิดสวิทซ์เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 10 โวลต์ 200 แอมแปร์ จากนั้นทำการปรับศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าอย่างช้าๆ จนกระทั่งได้ค่ากระแสอยู่ที่ประมาณ 60 แอมแปร์แล้วแช่พัก ลักประมาณ 5 นาที เพื่อให้ความดันไออิ่มตัว ต่อจากนั้นจึงค่อยๆ เพิ่มกระแสต่อไปอย่างช้าๆ จนถึง 100 - 130 แอมแปร์ จนได้ความหนาประมาณ 500 - 800 นาโนเมตร ซึ่งรวมแล้วทั้งหมดจะใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางประมาณ 30 นาที
8. เมื่อได้ความหนาของฟิล์มตามที่ต้องการแล้ว ให้ปิดแผ่นกั้นการระเหยและทำการปิดแบริเอคโดยค่อยๆ ลดกระแสลงอย่างช้าๆ จนกระทั่งเป็นศูนย์
9. ต่อจากนั้นรอให้ระบบทำงานต่อไปอีกประมาณ 45 นาที เพื่อให้อุณหภูมิของห้องสุญญากาศลดลงแล้วจึงปิดปั๊มเทอร์โบโมเลกูลาร์ จากนั้นให้ระบบทำงานต่อไปอีกประมาณ 1 ชั่วโมงแล้วปิดวาล์วสุบอากาศและปั๊มกลโรตารี
10. รอจนอุณหภูมิภายในห้องสุญญากาศมีอุณหภูมิเท่ากับภายนอก จึงค่อยทำการเปิดวาล์วปล่อยอากาศเข้าภายในห้องสุญญากาศอย่างช้าๆ โดยใช้เวลาประมาณ 15 นาที
11. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่ถูกเคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe เป็น

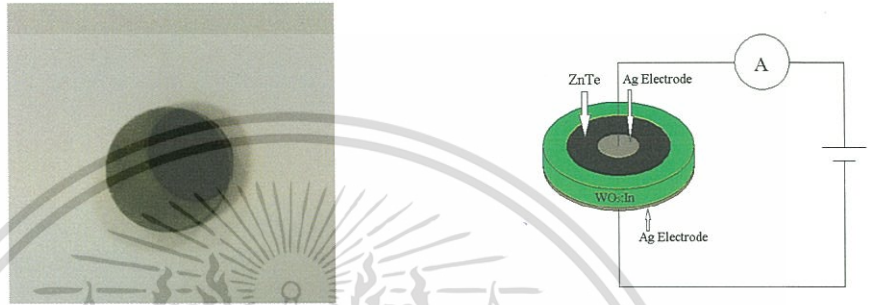
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับที่เรียบร้อยแล้วออกมาจากห้องสุญญากาศ นำไปตรวจสมบัติผิวหน้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์ หลังจากนั้นจึงนำไปเก็บไว้ในภาชนะ
ควบคุมความชื้น

12. ทำการแอนนัลฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe ที่ถูกเคลือบลงบนแผ่น
ฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมได้ทั้งหมด ภายใต้บรรยากาศ
ของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30
นาที่ และเมื่อเตาเย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้องจึงปิดเตา
13. ศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe ที่ถูก
เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ทั้งในกรณีที่ไม่มีการ
แอนนัลและมีการแอนนัล ที่เตรียมได้ทั้งหมด ได้แก่ทำการศึกษา
โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จากเครื่องเอกซ์
เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ Bruker รุ่น D8 Advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์
ในย่าน Cu K_α 1.5406 อังสตรอม โดยใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์ และ
ความต่างศักย์ 25 กิโลโวลต์ ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค จาก
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของ JEOL รุ่น JSM-6400
ทำการศึกษาคูสมบัติทางแสง ด้วยการวัดค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสง
ด้วยเครื่องยูวี-วิสทิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ยี่ห้อ
Thermo electron corporation ($\text{He } \lambda$ ions α) โดยใช้ความยาวคลื่นช่วง
190-1100 นาโนเมตร เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน และ
คำนวณหาช่องว่างแถบพลังงาน (E_g)
14. ศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆของไดโอดของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/n-
 $\text{WO}_3:\text{In}$ ที่เตรียมได้ทั้งหมด ได้แก่ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค
ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จากเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์
Bruker รุ่น D8 Advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ในย่าน Cu K_α 1.5406
อังสตรอม โดยใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์ และความต่างศักย์ 25 กิโลโวลต์
ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน
แบบส่องกราดของ JEOL รุ่น JSM-6400ทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า
ต่างๆที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิในช่วง 10-300 เคลวิน โดยการทำขั้ว
อิเล็กโทรด ด้วยการป้ายกาวเงินนำไฟฟ้า เป็นรูปวงกลมให้เต็มหน้า
ทางด้านที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $\text{W}_{1-x}\text{In}_x\text{O}_3$ ($x=0.04$) และป้าย
กาวเงินนำไฟฟ้าเป็นรูปวงกลมให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.4
เซนติเมตรทางด้านที่เป็นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe แล้วจากนั้นจึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานวิจัยภายในเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่างค่า กระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า (I-V curve) ค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า (C-V curve) ค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า (C-V curve) แล้วต่อจากนั้นจึงนำไปศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วง 20-300 เคลวิน ต่อไป



รูปที่ 3.4 แสดงแผนภาพของสิ่งประดิษฐ์ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/n- WO₃:In โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO₃:In โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ

ZnTe ที่ถูกเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ และ ของไดโอดของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/n-WO₃:In (4wt%) ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส [6-7,15-23,35-37]

3.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe ที่ถูกเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ และ ของไดโอดของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/n-WO₃:In ที่เตรียมได้ทั้งหมด ไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จากเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ Bruker รุ่น D8 Advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ในย่าน Cu_{K α} 1.5406 อังสตรอม โดยใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์ และความต่างศักย์ 25 กิโลโวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 แสดงเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตรมิเตอร์ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 advance

3.3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe ที่ถูกเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ และของไดโอดของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/n-WO₃:In ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope: SEM) ของ JEOL รุ่น JSM-6400



รูปที่ 3.6 แสดงกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-5410LV

3.3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางแสง

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe ที่ถูกเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ที่เตรียมได้ทั้งหมด ไปศึกษาคุณสมบัติทางแสง ด้วยการวัดค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS spectrophotometer) สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ยี่ห้อ Thermo electron corporation ($He\ \lambda\ \text{ions}\ \alpha$) โดยใช้เวลาความยาวคลื่นช่วงไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

220-1100 นาโนเมตร เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน และคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g)



รูปที่ 3.7 แสดงเครื่อง UV-VIS spectrophotometer ยี่ห้อ thermo electron corporation รุ่น Heios

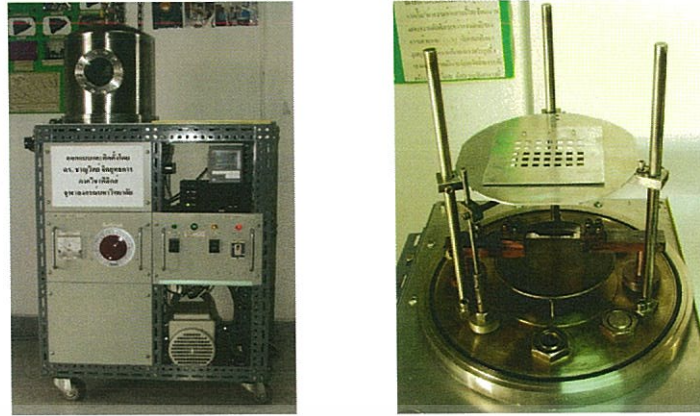
3.3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า

นำไดโอดของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/n-WO₃:In ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิในช่วง 20-300 เคลวิน ได้แก่ นำไปศึกษาสมบัติเฉพาะของไดโอดด้วยการวัดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า กระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า (I-V curve) ค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า (C-V curve) แล้วต่อจากนั้นจึงนำไปศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วง 20-300 เคลวิน

3.3.4.1 การศึกษาสมบัติเฉพาะของไดโอดด้วยการวัดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า กระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า (I-V curve) ค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า (C-V curve) แล้วต่อจากนั้นจึงนำไปศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วง 20-300 เคลวิน และอุณหภูมิสูงในช่วง 25-90 องศาเซลเซียส

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมโคโอดของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/n-WO₃:In ตามลำดับ โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe ลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ และที่เป็นเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ W_{1-x}In_xO₃ (0 ≤ x ≤ 0.05) โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.9 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าความต้านทานแผ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 แสดงภาพถ่ายของไคโอสแตตที่ใช้ศึกษาสมบัติเฉพาะของไคโอตด้วยการวัดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า (I-V curve) ที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วง 20-300 เคลวิน



รูปที่ 3.11 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาสมบัติเฉพาะของไคโอตด้วยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า (C-V curve) และอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วง 20-300 เคลวิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติเฉพาะของไดโอดด้วยการวัดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับความถี่ และการวัดอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีที่อุณหภูมิ 25-90 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองและอภิปรายผล

ในวิทยานิพนธ์นี้ ได้ทำการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}In_xO_3$ ($0 \leq x \leq 0.05$) โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง เพื่อเป็นแผ่นฐานรองรับในการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เพื่อประดิษฐ์เป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/n- $WO_3:In$ ได้มีการศึกษาสมบัติพื้นฐานทางฟิสิกส์ของทั้งฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe ที่เคลือบบนแผ่นกระจกสไลด์ และ สมบัติของเม็ดเซรามิก $W_{1-x}In_xO_3$ ($0 \leq x \leq 0.05$) อันได้แก่ ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ และ โครงสร้างผลึกมหภาคโดยการถ่ายภาพถ่ายภาพกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ทำการศึกษาโดยการหาสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง การดูดกลืนแสง เพื่อหาช่องว่างแถบพลังงานของสาร จากนั้นจึง ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกระแส กับแรงดันไฟฟ้า ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/n- $WO_3:In$ ที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 20 – 300 องศาเซลวิน เพื่อคำนวณพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆของรอยต่อวิวิธพันธุ์ ได้แก่ ค่าความสูงของกำแพงศักย์ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ค่าความต้านทานอนุกรม ได้ทำการวัดความสัมพันธ์ระหว่างความจุกับแรงดันไฟฟ้า เพื่อคำนวณหา ค่าความหนาแน่นของโฮลของสารกึ่งตัวนำ ZnTe

4.1 ลักษณะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และเคลือบอยู่บนเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}In_xO_3$ ($x=0.04$) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์มีสีดำนวล ผิวหน้าเรียบ สะท้อนแสงและยึดติดแน่นกับกระจกสไลด์ได้ดี ส่วนเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}In_xO_3$ ($x=0.04$) นั้นมีสีเขียวเมื่อทำการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe ลงบนเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}In_xO_3$ ($x=0.04$) จะเห็นว่า มีฟิล์มบางสีดำนวลเคลือบอยู่บนเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}In_xO_3$ ($x=0.04$)



รูปที่ 4.1 แสดงฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อไม่มีการแอนนีก

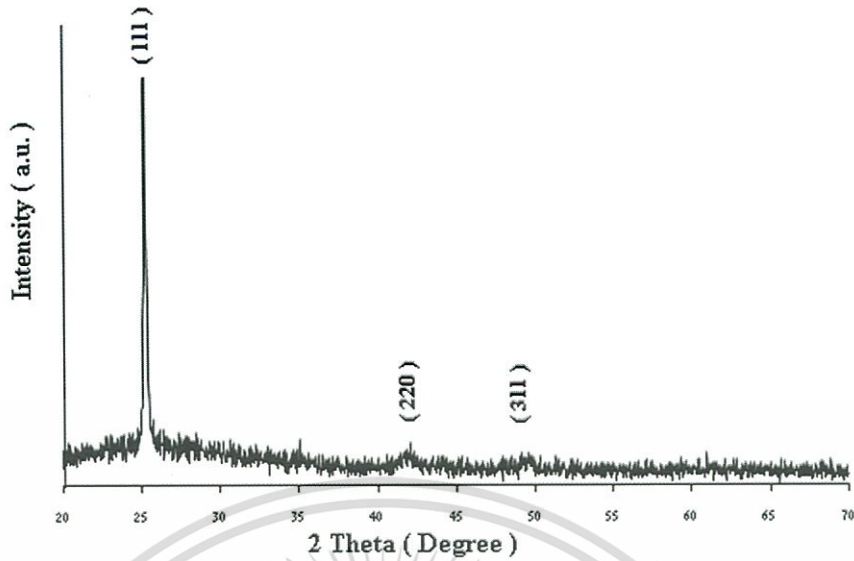


รูปที่ 4.2 ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe ที่เคลือบอยู่บน $WO_3:In$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

4.2 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

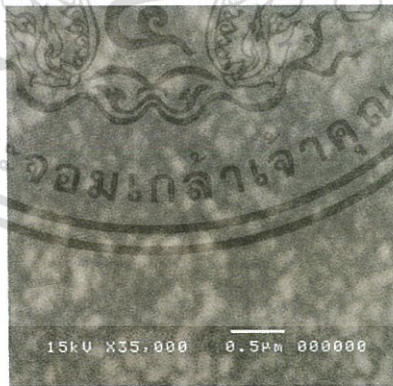
4.2.1 ผลการศึกษาโครงสร้างของผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

การศึกษาสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ ZnTe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ 100 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.3 แสดงพีคความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

4.2.2 ผลการศึกษาโครงสร้างของผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe ที่เคลือบอยู่บนกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

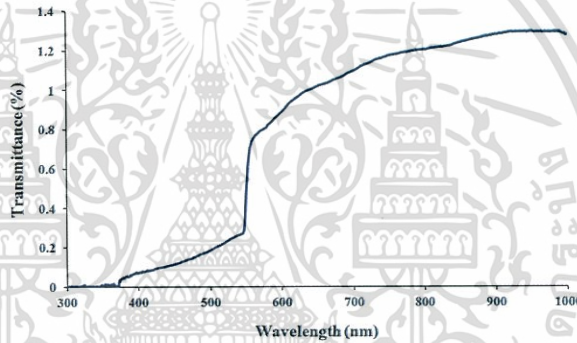


รูปที่ 4.4 แสดงภาพถ่ายบริเวณผิวหน้าของสารตัวอย่างที่เตรียมได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

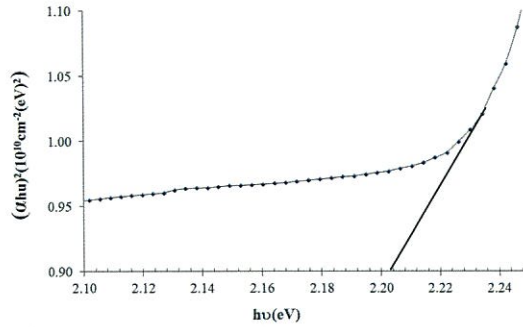
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ ZnTe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

จากการศึกษาสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ ZnTe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ที่ไม่มีการแอนนีส พิจารณาที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำของ ZnTe จะมีการส่งผ่านแสงมากที่สุดที่ประมาณ 1.4 เปอร์เซ็นต์ เมื่อนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงกับพลังงานโฟตอน แล้วลากส่วนต่อของเส้นตรงให้ตัดแกนพลังงานของโฟตอน โดยที่จุดตัดแกนคือค่าช่องว่างแถบพลังงาน ซึ่งแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.5 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe ที่เคลือบอยู่บนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

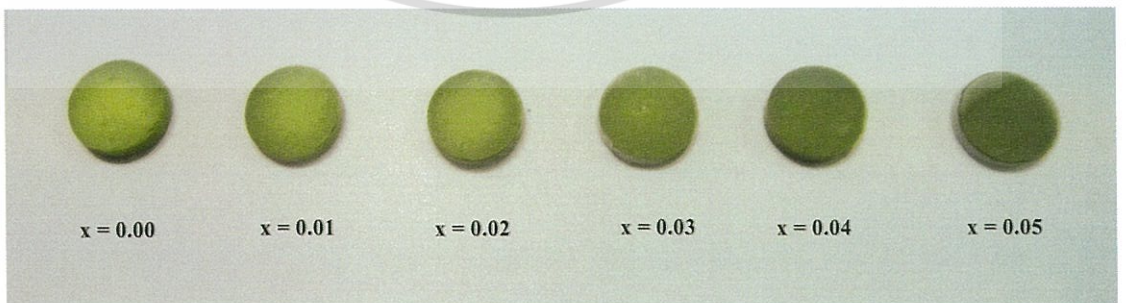


รูปที่ 4.6 แสดงวิธีการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe ที่เคลือบอยู่บนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

4.3 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}In_xO_3$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

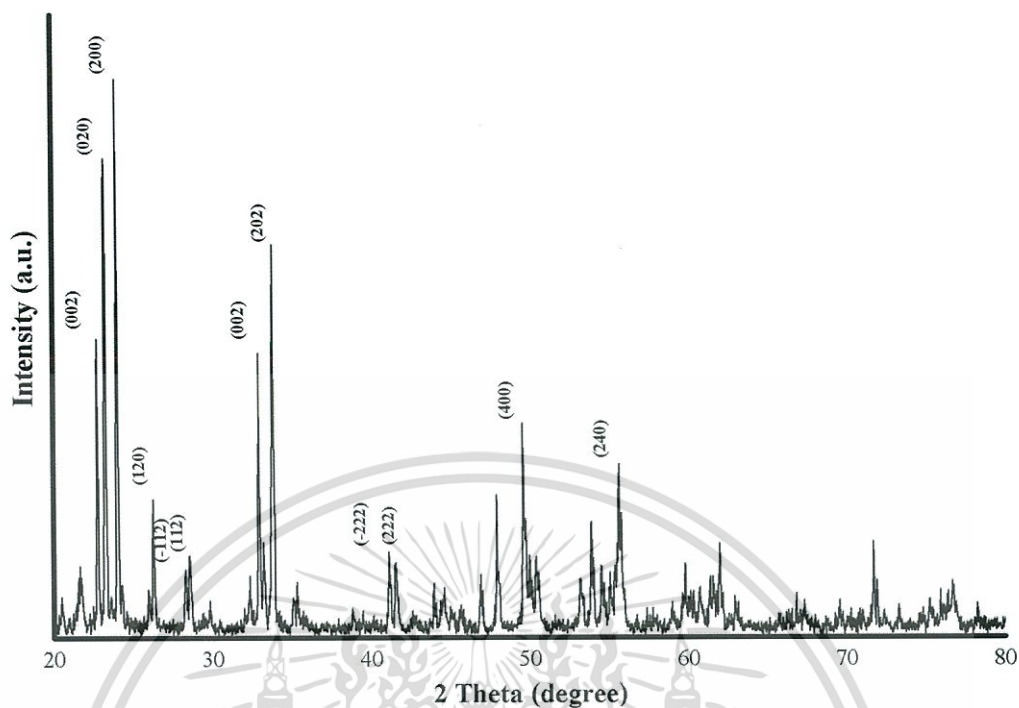
4.3.1 ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}In_xO_3$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็งและฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อน

เม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}In_xO_3$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมได้ขณะนี้ยังไม่มีผลการเผาสีจะเป็นมีสีเขียวอ่อนๆ แต่เมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศเป็นเวลา 48 ชั่วโมง เม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}In_xO_3$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่ยังไม่มีผลการเผายังคงมีสีเขียวอ่อน ส่วนที่มีการเผอะตอมของสารเจือแล้วจะมีสีเขียวเข้ม ดังรูปที่ 4.7



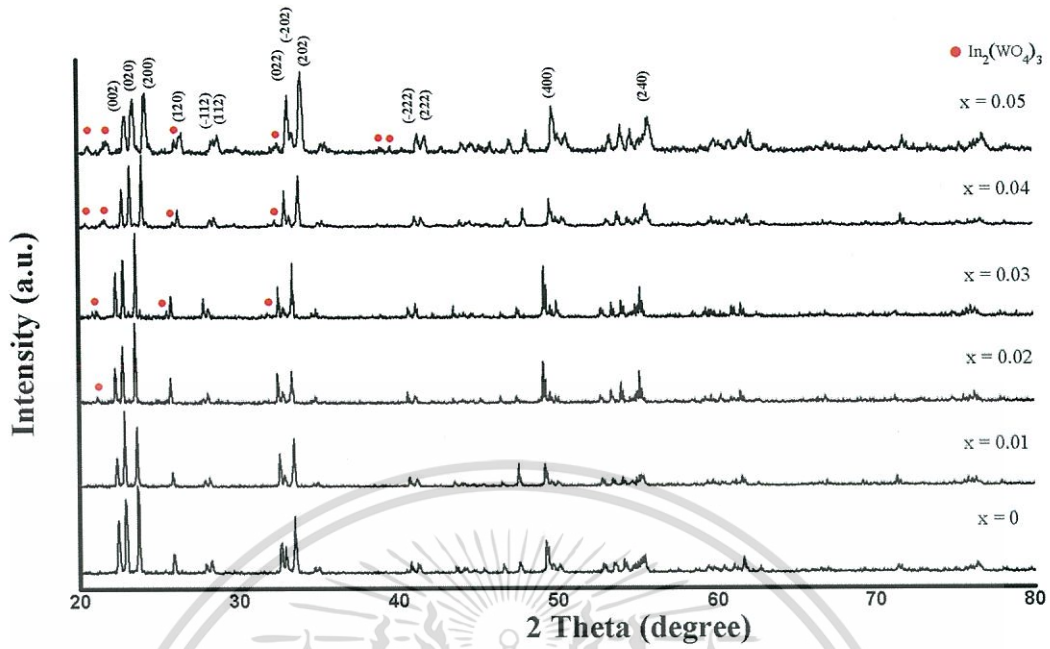
รูปที่ 4.7 แสดงภาพถ่ายของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}In_xO_3$ ($0 \leq x \leq 0.05$) จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกที่เตรียมโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง ที่ผ่านการเผานึกที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 48 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 แสดงพิกัดความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO_3 ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

จากรูปที่ 4.8 นั้นแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากเครื่องเอกซเรย์คิฟแฟรกโตรมิเตอร์ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance ซึ่งรังสีเอกซ์มีค่าความยาวคลื่น 1.5406 อังสตรอม ที่มุม 2θ เท่ากับ 20-80 องศา ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO_3 จะปรากฏระนาบ (200) ที่ตำแหน่งพิกัดมุม 2θ ประมาณ 23 องศา ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีความเข้ม สูงสุดของโครงสร้างผลึกแบบ โมโนคลินิก (200)

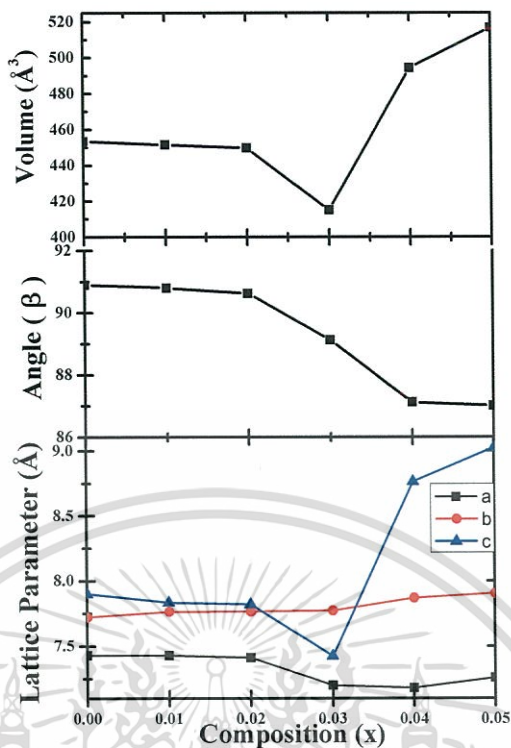


รูปที่ 4.9 พิกัดความเข้มเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}In_xO_3$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติกรการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าคงที่โครงสร้างผลึกของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}In_xO_3$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติกรการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

Composition (x) of $WO_3:In$	Lattice Parameter(Å)			$\beta(\theta)$	Volume (Å ³)
	a	b	c		
0	7.430	7.722	7.898	90.9	453.51
0.01	7.429	7.762	7.831	90.8	451.52
0.02	7.412	7.763	7.816	90.6	449.70
0.03	7.201	7.770	7.420	89.1	415.11
0.04	7.181	7.867	8.761	87.1	494.31
0.05	7.259	7.902	9.022	87.0	516.8

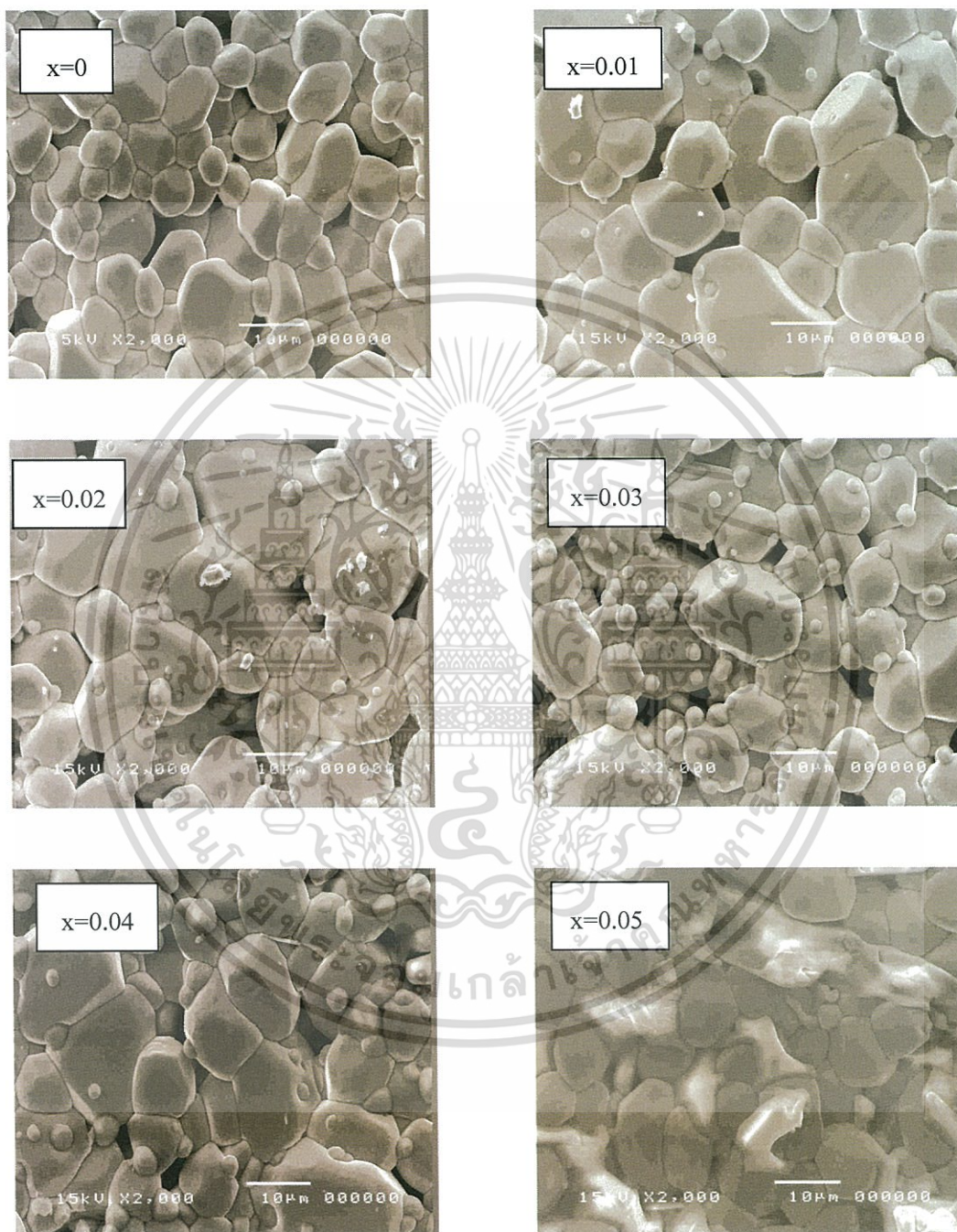
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 แสดงกราฟค่าคงที่โครงสร้างของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}In_xO_3$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 ผลการทดลองที่ได้จากการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}In_xO_3$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

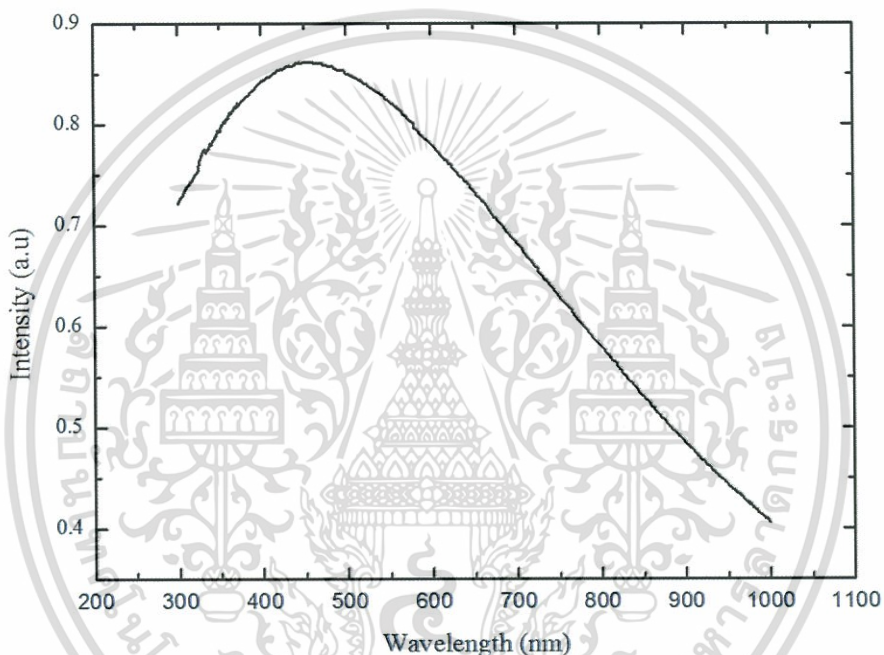


รูปที่ 4.11 แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด บริเวณผิวหน้าของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}In_xO_3$ ($0 \leq x \leq 0.05$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

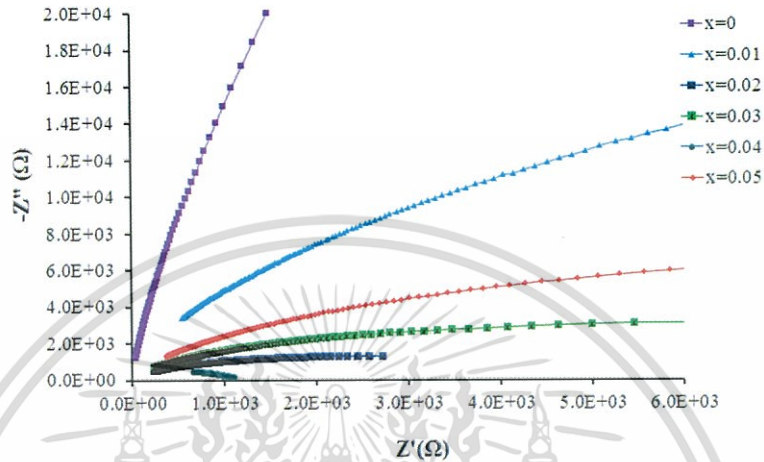
4.3.3 ผลการศึกษาสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของผงผลึกละเอียดของสารกึ่งตัวนำ $\text{WO}_3:\text{In}$ (4wt.%) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก โดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

จากการศึกษาสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของผงผลึกละเอียดของสารกึ่งตัวนำ $\text{WO}_3:\text{In}$ (4wt. %) ที่ละลายในอะซิโตนพบว่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงมีค่าสูงสุดที่มีความยาวคลื่น 450 นาโนเมตร ดังปรากฏในรูป 4.12 ซึ่งความยาวคลื่นค่านี้จะสอดคล้องกับค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำของ $\text{WO}_3:\text{In}$ (4wt. %) โดยมีค่าเท่ากับ 2.76 อิเล็กตรอนโวลต์



รูปที่ 4.12 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของผงผลึกละเอียดของสารกึ่งตัวนำของ $\text{WO}_3:\text{In}$ (4wt.%) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งเพื่อนำไปหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน

4.3.4 ค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนของเม็ดเซรามิกที่ความถี่ในช่วง 20 เฮิรตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิรตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}In_xO_3$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง



รูปที่ 4.13 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนของเม็ดเซรามิกที่ความถี่ในช่วง 20 เฮิรตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิรตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}In_xO_3$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

ตารางที่ 4.2 แสดงพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆที่ได้จากอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีในช่วงความถี่ 20 เฮิรตซ์ถึง 2 เมกะเฮิรตซ์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}In_xO_3$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

Composition (x) of $W_{1-x}In_xO_3$	Parameters				
	$R_s(\Omega)$	$R_p(\Omega)$	$C_p(pF)$	$f_{max}(Hz)$	$\omega_{max} R_p C_p$
0	200	640,000	1.13	20,020	0.91
0.01	80	69,500	4.04	60,019	1.05
0.02	10	4,000	31.20	120,020	0.94
0.03	20	7,500	17.20	110,000	0.90
0.04	30	1,070	8.73	1,950,000	1.14
0.05	100	20,000	15.00	60,019	1.13

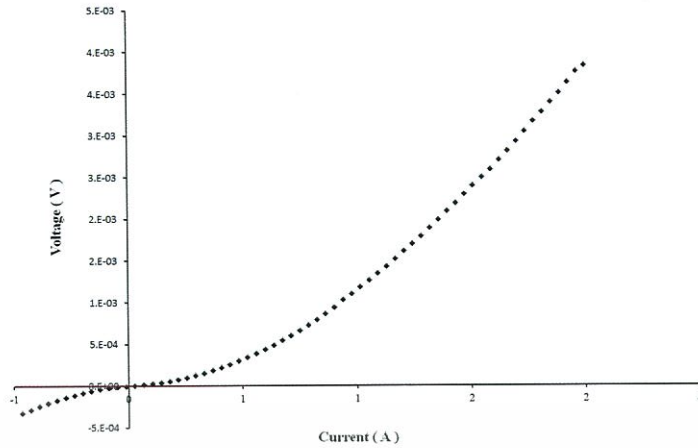
4.4 ผลการศึกษาสมบัติไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/n-WO₃:In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/n-WO₃:In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ แล้วทำการวัดค่าความ สัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า ที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20 – 300 เคลวิน ตลอดจนการศึกษาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำ เพื่อคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ เช่น ความหนาแน่นของอะตอมผู้รับแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณรอยต่อ และความหนาแน่นของสถานะผิวเชื่อมต่อ เป็นต้น

4.4.1 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิห้องของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/n-WO₃:In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/n-WO₃:In โดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสกับแรงดันไฟฟ้าในช่วง - 1.00 ถึง 2.00 โวลต์ เมื่อการวัดที่อุณหภูมิต่ำปรากฏในรูป 4.14 พบว่า มีการเรียงกระแส ไฟฟ้าทางเดียวเหมือนไดโอด โดยมีค่าแรงดันขีดเริ่ม (working voltage) ที่ 0.8 โวลต์

กลไกของกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ตรงบริเวณรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/n-WO₃:In ที่ช่วงแรงดันไฟฟ้า -1.00 ถึง 2.00 โวลต์ เมื่อพิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I$ กับ $\ln V$ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/n-WO₃:In ที่อุณหภูมิต่ำพบว่า ที่แรงดันไฟฟ้าน้อยกว่า 0.2 โวลต์ เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าเป็นไปตามกลไกของโอห์ม ส่วนที่ช่วงแรงดันระหว่าง 0.2 ถึง 0.5 เป็นกลไกการนำกระแสแบบ เทอร์มิออนิก อิมิสชัน และช่วงแรงดันไฟฟ้ามากกว่า 0.5 โวลต์ เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้าง (space charge limit current) เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I$ กับ V ดังรูปที่ 4.17 เพื่อหาค่าแฟกเตอร์ในอุดมคติ และค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับ และนำไปใช้เป็นค่าเริ่มต้นในการจำลองข้อมูล เพื่อนำผลมาเทียบกับผลจากการวัดค่ากระแสและแรงดันในช่วงการไหลแบบเทอร์มิออนิก อิมิสชัน ซึ่งจะใช้ในการหาค่าแฟกเตอร์ไดโอดในอุดมคติ การหาค่าความต้านทานอนุกรมด้วยวิธีของช่วงนั้น จะเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $dV/d\ln(I)$ กับ I ดังรูปที่ 4.18 ซึ่งกราฟนี้จะได้อ่านค่าความต้านทานอนุกรม กับค่าแฟกเตอร์ในอุดมคติของไดโอด และจากกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่าง $H - I$ ดังรูปที่ 4.19 จะได้อ่านค่าแกงศักย์ที่ไบแอสเป็นศูนย์



รูปที่ 4.14 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/n-WO₃:In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

จากรูป 4.17 คือกราฟแสดงความสัมพันธ์ค่าลอการิทึมของกระแส และแรงดันไฟฟ้าเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับ (I_s) และค่าแฟกเตอร์ในอุดมคติ (n) โดยอาศัยกราฟเส้นตรงช่วงที่มีการนำกระแสที่เป็นกลไกแบบเทอร์มอฮอนิก อิมิตชันดังสมการ

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

เมื่อ I_s คือ กระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับมีค่าเท่ากับ

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

เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I$ กับ v เพื่อหาค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับได้จากการลากเส้นตรงผ่านบริเวณกราฟที่เป็นกลไกเทอร์มอฮอนิกอิมิตชันตัดแกน $\ln I$ โดยจุดตัดมีค่าเท่ากับ $\ln I_s$ และความชันของกราฟเท่ากับ $\frac{q}{nkT}$ ซึ่งสามารถนำมาคำนวณหาแฟกเตอร์อุดมคติ (n) ได้จากสมการที่ 4.2 จะได้ค่าความสูงของกำแพงศักย์คือ

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

ความสูงกำแพงศักย์ ϕ_{B0} ของสมการที่ (4.3) จะเป็นค่าในขณะแรงดันไบแอสเป็นศูนย์ที่อุณหภูมิเอกสารนี้เป็นใดๆ และ A^* เท่ากับ 19.8 แอมแปร์ต่อ (ตารางเซนติเมตร – เคลวินยกกำลังสอง) ประโยชน์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ยังสามารถที่จะหาแฟกเตอร์อุณหภูมิต่อ (n) ของไดโอดที่ขึ้นกับแรงดันไบแอสโดยอาศัยความสัมพันธ์ดังนี้

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

ในความเป็นจริงแล้วสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/n-WO₃:In มักจะมีความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม (R_s) เกิดขึ้นเสมอ ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากความต้านทานของเนื้อสารและขั้วไฟฟ้าด้านหลัง จึงต้องทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าในช่วงแรงดันสูงๆ (Region III) เพื่อให้ความต้านทานอนุกรมนั้นแสดงผลออกมา ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/n-WO₃:In ที่มีความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมมาเกี่ยวข้องจะเป็น

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

เมื่อ กระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ คือ

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

อาจเขียนสมการที่ (4.5) อีกรูปหนึ่งได้เป็น

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

วิธีการหาค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมของชวง (Cheung's Method) พิจารณาในช่วงแรงดันไบแอสไปข้างหน้าโดยการแทนสมการที่ (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 V เทียบกับ lnI เพื่อหาค่าความต้านทานอนุกรม จากสมการที่ (4.8) จัดรูปใหม่ได้เป็น

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจะสอดคล้องกับกราฟเส้นตรงจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $dV/d(\ln I)$ กับ I ดังรูปที่ 4.15 และรูปที่ 4.20 โดยความชันของกราฟนั้นคือค่าความต้านทานอนุกรมของวงจรถ (R_s) และจุดตัดแกน $dV/d(\ln I)$ มีค่าเท่ากับ nkT/q

ส่วนการหาความสูงของกำแพงศักย์นั้นจะหาได้โดยการจัดรูปของสมการที่ 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 $H(I)$ จากข้อมูลของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าแล้วนำมาวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $H(I)$ กับ I ก็จะได้ผลดังรูปที่ 4.18 และรูปที่ 4.19 โดยจะคำนวณหา ค่าความสูงของกำแพงศักย์ได้จากจุดตัดแกนตั้ง ($n\phi_B$) ของกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าวแล้ว นอกจากนี้ความชันของกราฟที่เขียนขึ้นในรูปของฟังก์ชัน $H(I)$ นั้นก็คือค่าความต้านทานอนุกรม เช่นเดียวกับความสัมพันธ์ในสมการที่ (4.9) ซึ่งจะส่งผลให้ค่าความต้านทานอนุกรมที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกัน

กลไกการนำไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้าง (SCLC) มักจะเขียนความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า ดังนี้คือ

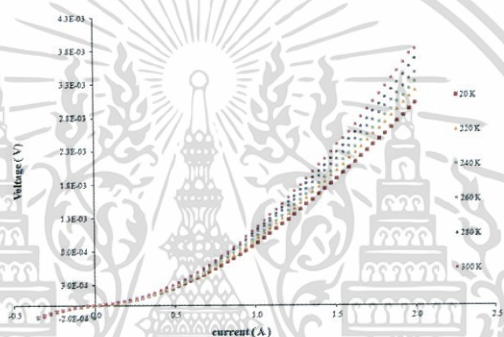
$$I = kV^m \quad (4.12)$$

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

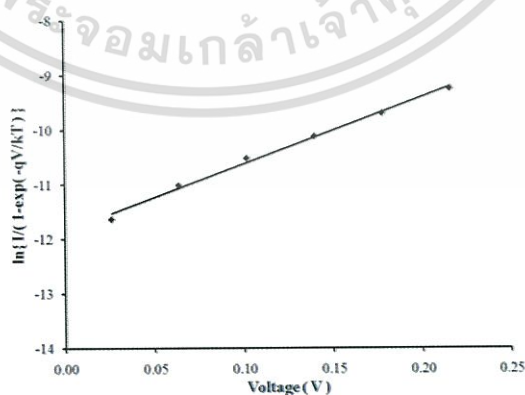
เมื่อ m คือความชันของกราฟ ถ้า m มีค่าเท่ากับ 1.5 กลไกการนำไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัด โดยประจุค้างจะเป็นไปตามกฎของ ไชล์-แลงมัวร์ (Child-Langmuir's law) แต่ถ้า m เท่ากับ 2 จะเป็นไปตามกฎของ มอตต์-เกอร์นีย์ (Mott-Gurney's law) แต่ถ้า $m > 2$ จะหมายถึงว่ากับดักประจุ มีระดับพลังงานต่อเนื่องและมีการแจกแจงแบบเอกซ์โพเนนเชียล ซึ่งจากผลการทดลองได้ค่า m เท่ากับ 2.42 แสดงว่ากับดักประจุมีระดับพลังงานต่อเนื่องและมีการแจกแจงแบบเอกซ์โพเนนเชียล

4.4.2 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิ ต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวินของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/n-WO₃:In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/n-WO₃:In โดยวัดค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าช่วง -0.5 ถึง 2.0 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ ต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20 – 300 เคลวิน พบว่าที่แรงดันไฟฟ้าเท่ากัน กระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ ตรงบริเวณรอยต่อมีค่าลดลงตามอุณหภูมิที่ลดลง แสดงดังรูปที่ 4.3 และค่าแรงดันขีดเริ่มของไดโอด มีค่ามากขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลงตั้งแต่ 0.7 – 1.0 โวลต์

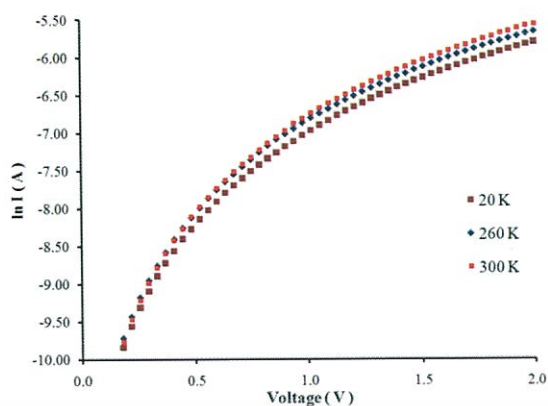


รูปที่ 4.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัด อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 100-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/n-WO₃:In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบ สุญญากาศ

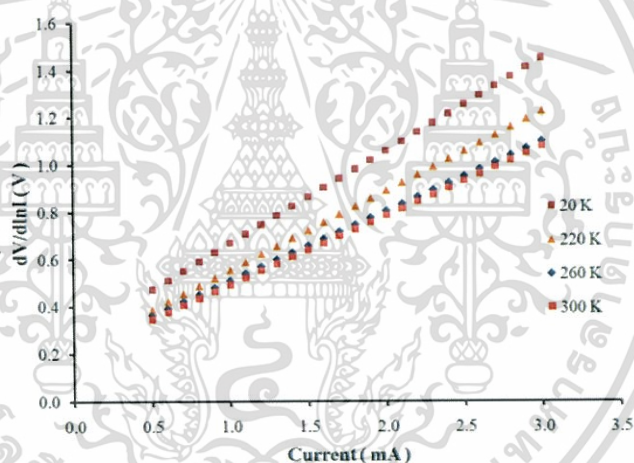


รูปที่ 4.16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\{I/(1-\exp(-qV/(kT)))\}$ กับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัด ที่อุณหภูมิห้อง ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/n-WO₃:In ซึ่งเตรียมโดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เพื่อให้หน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

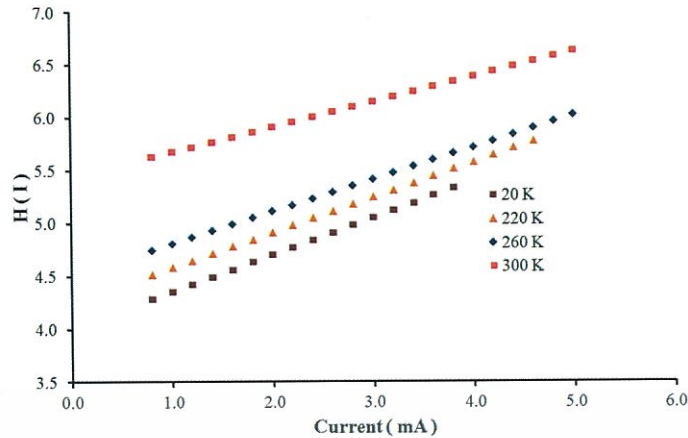


รูปที่ 4.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I$ กับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/n-WO₃:In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

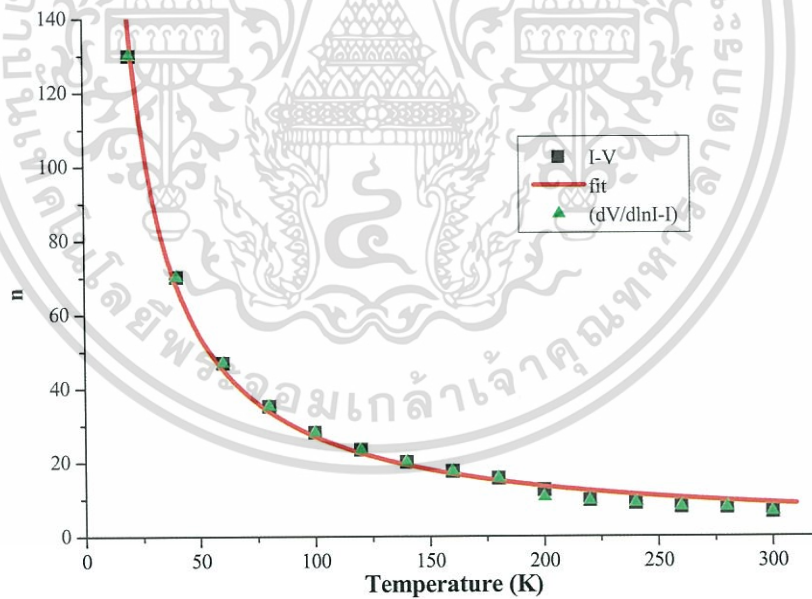


รูปที่ 4.18 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $dV/d\ln I$ กับกระแสไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วง 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/n-WO₃:In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 แสดงกราฟที่อธิบายโดยวิธีของชวงที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง $H(I)$ กับ I เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-ZnTe}/n\text{-WO}_3:\text{In}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแฟกเตอร์อุดมคติ กับอุณหภูมิที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิตชันและวิธีของชวงที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง $dV/d(\ln I)$ กับ T เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ 20-300 เคลวินของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-ZnTe}/n\text{-WO}_3:\text{In}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบ

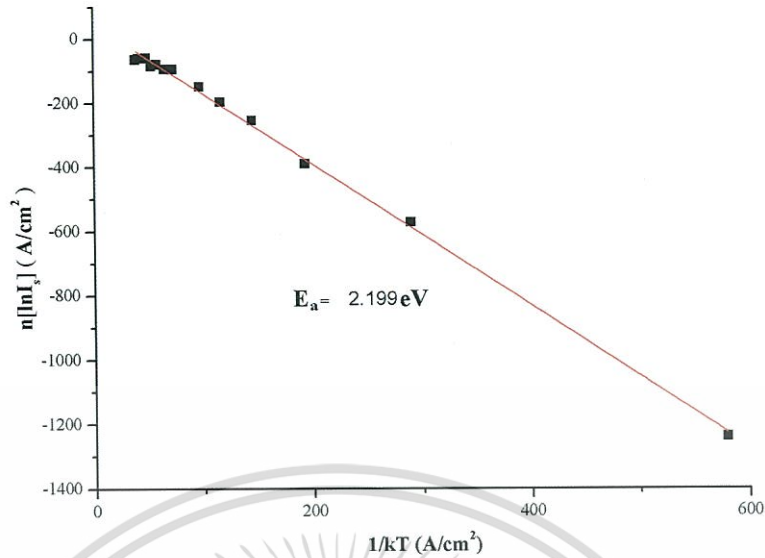
สุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ (I_s) ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ (n) ค่าความสูงของกำแพงศักย์ในขณะที่ไบแอสเป็นศูนย์ (ϕ_{B0}) และค่าความต้านทานอนุกรม (R_s) ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มิออนิกอิมิตชัน และวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/n-WO₃:In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

T (K)	I_s ($\times 10^{-5}$ A)	Ideality Factor		Barrier Height (eV)		Series Resistance (Ω)	
		I-V	$\left(\frac{dV}{d \ln I}\right) - I$	I - V	H(I) - I	H(I) - I	$\left(\frac{dV}{d \ln I}\right) - I$
20	1.02	107.787	130.002	0.031	0.032	396.770	389.460
40	1.12	50.235	70.261	0.067	0.063	388.550	382.248
60	1.14	34.301	47.013	0.104	0.105	381.248	368.090
80	1.15	22.405	35.260	0.143	0.138	378.513	365.323
100	1.22	17.310	28.208	0.182	0.174	365.285	361.042
120	1.27	13.181	23.507	0.222	0.219	358.067	354.616
140	1.29	8.775	20.149	0.263	0.252	354.372	353.813
160	1.35	9.589	17.630	0.304	0.292	353.373	352.269
180	1.36	8.385	15.738	0.346	0.328	338.416	338.549
200	1.38	7.084	10.647	0.388	0.497	333.069	336.263
220	1.40	7.563	9.583	0.430	0.546	328.273	327.532
240	1.47	5.280	8.962	0.472	0.464	319.926	309.367
260	1.48	5.410	7.916	0.515	0.540	316.633	302.596
280	1.58	5.425	7.793	0.558	0.547	305.201	275.527
300	1.65	5.837	6.528	0.602	0.636	276.789	228.379

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 แสดงกราฟอาร์เรเนียสของ $n \ln I_s$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/n-WO₃:In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

จากผลการทดลองพบว่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับมีเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ส่วนค่าแฟกเตอร์ในอุดมคติที่ได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันและวิธีของช่วงลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นและมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นแสดงดังรูป 4.20 เมื่อนำกราฟความสัมพันธ์ไปเทียบเคียงกับสมการที่ 4.14 เพื่อหาค่าลักษณะเฉพาะของพลังงานการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ (E_{00}) มีค่าเท่ากับ 0.206 อิเล็กตรอน โวลต์

$$n = \frac{E_{00}}{kT} \coth\left(\frac{E_{00}}{kT}\right) \quad (4.14)$$

และจากทฤษฎีเทอร์มิออนิกฟิลด์อิมิสชันจะได้ว่า

$$E_{00} = \frac{q\hbar}{2} \left[\frac{N_D}{m^* \epsilon_S} \right] \quad (4.15)$$

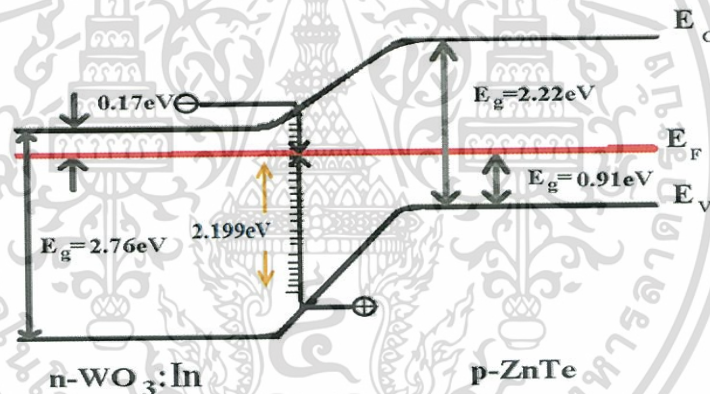
และคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้นจากสมการ

$$n \ln(J_0) = \frac{-E}{kT} + n \ln(J_{00}) \quad (4.16)$$

และจากค่าความชันของกราฟในรูปที่ 4.21 จะทำให้ทราบถึงค่าพลังงานกระตุ้นของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/n-WO₃:In มีค่าเท่ากับ 2.199 อิเล็กตรอน โวลต์ ส่วน E_{00} ที่คำนวณได้มีค่าสูงกว่า 25 มิลลิอิเล็กตรอน โวลต์ แสดงว่าที่อุณหภูมิต่ำมากนั้นกลไกการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ของโฮลโดดเด่นกว่ากลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันจากนั้น โฮลกับอิเล็กตรอนจะรวมตัวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การที่ค่าแฟกเตอร์อุดมคติและค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ เนื่องจากใช้วัสดุกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์มาคำนวณหาค่าตัวแปรเหล่านี้โดยอาศัยทฤษฎีเทอร์มิออนิกอิมิตชัน ดังนั้นค่าของตัวแปรจะขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสที่วัดได้ ที่อุณหภูมิสูงพลังงานความร้อนจะกระตุ้นพาหะอิสระให้มีพลังงานสูงและมีจำนวนมากขึ้น เมื่อมีการให้แรงดันไบแอสไปหน้าพาหะอิสระที่มีระดับพลังงานสูงเหล่านี้ก็สามารถข้ามกำแพงศักย์ที่มีค่าสูงได้ ดังนั้นจะได้ค่ากำแพงศักย์ที่มากและค่าแฟกเตอร์อุดมคติที่เข้าใกล้หนึ่ง แต่ที่อุณหภูมิต่ำพาหะอิสระจะมีพลังงานต่ำ จึงจำเป็นต้องใช้แรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเพื่อที่จะข้ามกำแพงศักย์ ขณะเมื่อป้อนแรงดันไบแอสข้างหน้าให้เพิ่มมากขึ้น กลไกการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์จะโดดเด่นขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิต่ำลง กลไกเทอร์มิออนิกอิมิตชันจะลดความโดดเด่นลง และในทางกลับกัน กลไกการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์จะโดดเด่นมากขึ้น จึงเสมือนว่าพาหะอิสระสามารถไหลข้ามรอยต่อได้เนื่องจากความสูงของกำแพงศักย์ลดลง ส่วนค่าแฟกเตอร์ในอุดมคติ (α) จะมีค่าสูงขึ้น ซึ่งจะแสดงว่าการนำกระแสผ่านรอยต่อที่ช่วงอุณหภูมิต่ำสอดคล้องกับกลไกเทอร์มิออนิกอิมิตชันน้อยลง [38]



รูปที่ 4.22 แสดงแผนภาพการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ของโฮลแล้วเกิดการรวมตัวของโฮลกับอิเล็กตรอนที่บริเวณพร่องพาหะของรอยต่อวิธีพันธุของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/n-WO₃:In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

รูปที่ 4.23 แสดงผลของการศึกษาค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของรอยต่อวิธีพันธุของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/n-WO₃:In โดยจ่ายแรงดันไบแอสในช่วง -0.5 ถึง 1 โวลต์ที่ความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ภายใต้อุณหภูมิห้อง พบว่าเมื่อแรงดันไบแอสย้อนกลับมีค่ามากขึ้นจะทำให้ค่าความจุไฟฟ้านั้นลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากความกว้างของบริเวณพร่องพาหะเพิ่มขึ้นตามแรงดันเมื่อมีการไบแอสย้อนกลับมากขึ้น และสำหรับกรณีไบแอสไปหน้าความกว้างของบริเวณพร่องพาหะจะลดลง ซึ่งจะส่งผลให้ค่าความจุไฟฟ้ามีค่ามากขึ้นจนถึงจุดสูงสุดค่าหนึ่ง จากนั้นค่าความจุไฟฟ้าจะมีค่าลดลง

เอกสารนี้เป็นเนื่องจากการคิดพาหะอิสระจำนวนมากผ่านรอยต่อจนเสมือนว่ารอยต่อ พี-เอ็นหายไปชั่วคราว ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของรูปที่ 4.23 นำมาเขียนใหม่ให้อยู่ในรูปของส่วนกลับของค่าความจุไฟฟ้ายกกำลังสองกับแรงดันไฟฟ้า จะสามารถหาค่าศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมรอยต่อ (V_{bi}) และความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ (N_D) ได้จากสมการดังนี้ [33]

$$\frac{1}{C^2} = \left(\frac{2}{\epsilon_s q N_A A^2} \right) \left(V_{bi} - \frac{kT}{q} - V \right) \quad (4.17)$$

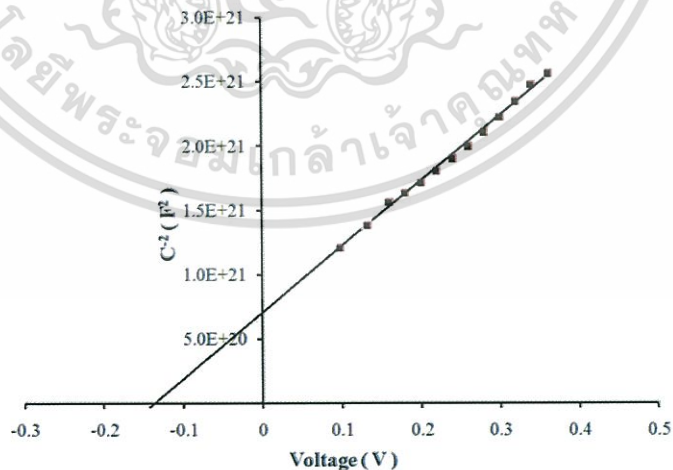
โดยจากความสัมพันธ์ในสมการที่ (4.16) จะเลือกเอาส่วนที่เป็นเส้นตรงในช่วงไบแอสแรงดันย้อนกลับตั้งแต่ -1 ถึงช่วง 0.3 โวลต์โดยประมาณ แล้วทำการลากเส้นตรงจนตัดผ่านแกน x จะทำให้ได้ค่า V_i แล้วนำมาหาศักย์ตกคร่อมรอยต่อจากความสัมพันธ์

$$V_{bi} = V_i + \frac{kT}{q} \quad (4.18)$$

ส่วนความหนาแน่นของอะตอมผู้รับมีค่าเท่ากับ 6.87×10^{11} ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร สามารถคำนวณหาได้จากความชันของสมการที่ (4.16) คือ

$$\text{ความชัน} = \frac{2}{q \epsilon_s N_A A^2} \quad (4.19)$$

เมื่อ ϵ_s คือเพอร์มิตติวิตี (permittivity) ของสารกึ่งตัวนำ สำหรับกรณีของสารกึ่งตัวนำ ZnTe จะมีค่า $\epsilon_s = \epsilon_r \epsilon_o$ โดยที่ ϵ_r คือค่าคงที่ไดอิเล็กตริกซึ่งมีค่าเท่ากับ 9.67



รูปที่ 4.23 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C^2$ กับ V ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/n-WO₃:In ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็นสามส่วนใหญ่ๆคือ ส่วนที่ 1 จะเป็นการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศเคลือบกระจกสไลด์ โดยไม่ได้ให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับส่วนที่ 2 จะเป็นการเตรียมเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO_3 ที่เจือด้วย In_2O_3 โดยวิธีปฏิกิริยาการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง และในส่วนที่ 3 จะเป็นการประดิษฐ์ไดโอดของรอยต่อวิวิธพันธุ์ ของสารกึ่งตัวนำของ p-ZnTe/n- WO_3 :In(4wt.%) โดยได้มีการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแส - แรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วง 10 ถึง 300 เคลวิน เพื่อคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ดังกล่าว รวมทั้งยังได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ความจุ-แรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ เพื่อคำนวณหาค่าความหนาแน่นของพาหะอิสระของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe

5.1 ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ มีสีดำ มันวาวสะท้อนแสง และติดแน่นกับแผ่นฐานรองรับได้ดี แม้ว่าจะไม่ได้ให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับ ฟิล์มบางที่เตรียมได้มีความหนาราว 500 นาโนเมตร ไม่มีรูพรุนให้สังเกตได้ จากการศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์พบว่าพีคของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ ปรากฏเด่นชัดที่สุดที่มุม $2\theta=25.28$ องศา ส่วนพีคการเลี้ยวเบนที่มีความเข้มน้อยกว่าจะปรากฏที่มุม 42.10 และ 49.70 องศา ตามลำดับ ซึ่งพีคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ดังกล่าว สอดคล้องดีกับระนาบ (111) , (220) และ (311) ของโครงผลึกแบบซิงค์เบลนด์ตามลำดับ[40] จากภาพถ่าย SEM แสดงให้เห็นว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe มีเกรนขนาดเล็กและสม่ำเสมอในราวประมาณ 60 นาโนเมตร จากสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe สามารถนำไปคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ได้ว่ามีค่าเท่ากับ 2.22 อิเล็กตรอนโวลต์และเป็นแถบพลังงานแบบตรง

5.2 เม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $W_{1-x}In_xO_3$ ($0 \leq x \leq 0.05$) ที่เตรียมจากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึกโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็ง

เม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO_3 ที่เจือด้วย In_2O_3 โดยสัดส่วนของสารตั้งต้นคือ $W_{1-x}In_xO_3$ ($0 \leq x \leq 0.05$) เตรียมได้จากสารตั้งต้นที่เป็นผงผลึก WO_3 และ In_2O_3 ความบริสุทธิ์สูงโดยวิธีปฏิบัติการเกิดเป็นสารละลายของแข็งที่ อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 48 ชั่วโมงในอากาศเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO_3 ที่ไม่ได้เจือ In_2O_3 มีสีเขียวอ่อนและมีความแข็ง แต่สีของเม็ดเซรามิกจะมีแนวโน้มเป็นสีเขียวเข้มขึ้นตามปริมาณสารเจือที่เพิ่มขึ้น จากการศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์พบว่า เซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO_3 ที่ไม่ได้เจือและที่เจือด้วย In_2O_3 มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบโมโนคลินิกและค่าคงที่โครงสร้างผลึก a , b , c มุม β และปริมาตรของหนึ่งหน่วยเซลล์มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณของสารเจือ แต่สำหรับกรณีเม็ดเซรามิกที่มีปริมาณสารเจือ $x \geq 0.02$ จะปรากฏฟิสิกการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของเฟส $In_2(WO_4)_3$ แผลงร่วมอยู่ด้วย [41] ซึ่งความเข้มของฟิสิกของเฟสแผลงนี้จะเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารเจือ x ที่เพิ่มขึ้น จากภาพถ่าย SEM แสดงให้เห็นว่าเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO_3 ที่ไม่ได้เจือด้วย In_2O_3 มีเกรนสองประเภทคือเกรนขนาดโตกับเกรนขนาดเล็ก เกรนขนาดโตมีขนาดประมาณ 10 ไมโครเมตร ส่วนเกรนขนาดเล็กมีขนาดประมาณ 4 ไมโครเมตร แต่เมื่อมีการเจือด้วย In_2O_3 จะเกิดเกรนประเภทที่สามซึ่งมีขนาดเล็กมากในราว 1 ไมโครเมตรเกิดขึ้นโดยมักจะเกาะติดบนผิวของเกรนขนาดโตเสมอ และขนาดของเกรนประเภทที่สามนี้มีแนวโน้มใหญ่ขึ้นตามปริมาณสารเจือ In_2O_3 ที่เพิ่มขึ้น ในทำนองเดียวกันเกรนประเภทที่สองก็มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วยเช่นเดียวกัน ส่วนเกรนประเภทที่หนึ่งกลับมีขนาดลดลงเมื่อปริมาณสารเจือ $x \geq 0.03$ และเป็นที่น่าสังเกตว่าช่องว่างระหว่างเกรน (void) มีค่าลดลงเมื่อปริมาณสารเจือ $x \geq 0.04$ และแทบไม่ปรากฏช่องว่างระหว่างเกรนเลยเมื่อปริมาณสารเจือ $x = 0.05$ จากการวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (absorbance) ของผงผลึก $WO_3:In$ (4 wt.%) ที่ละลายอยู่ในอะซิโตนระบุได้ว่าช่องว่างแถบพลังงานมีค่าประมาณ 2.76 อิเล็กตรอนโวลต์ ได้ทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสสลับของเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO_3 ที่เจือด้วย In_2O_3 โดยการวัดอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนความถี่ในช่วง 100 เฮิร์ตซ์ – 2 เมกกะเฮิร์ตซ์ และอุณหภูมิห้อง และจากการจำลองแบบ (simulation) โดยอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ พบว่าเมื่อปริมาณสารเจือ $x = 0.04$ ความต้านทานขนาน (R_p) มีค่าต่ำสุดซึ่งมีความหมายว่าเม็ดเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ WO_3 ที่เจือด้วย In_2O_3 ในปริมาณ $x=0.04$ โมล จะมีความต้านทานไฟฟ้าต่ำสุด และความถี่ผ่อนคลาย (relaxation frequency) จะมีค่าสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 ผลจากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแส-แรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิ ต่ำในช่วง 20-300 เคลวิน ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-ZnTe}/n\text{-WO}_3\text{:In}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบ สุญญากาศ

ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-ZnTe}/n\text{-WO}_3\text{:In}$ (4 wt.%) โดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.5 ถึง 2.0 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง พบว่ามีการเรียงกระแสไฟฟ้าทางเดียวเหมือนไดโอด โดยมีค่าแรงดันขีดเริ่ม (threshold voltage) อยู่ที่ 0.8 โวลต์ แต่เนื่องจากค่าความหนาแน่นของพาหะอิสระของสารกึ่งตัวนำ WO_3 และของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe อยู่ในระดับ 10^{13} และ 10^{11} ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ ดังนั้นจะประมาณได้ว่ารอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-ZnTe}/n\text{-WO}_3\text{:In}$ (4 wt.%) เป็นแบบรอยต่อ $p\text{-}n^+$ ซึ่งกลไกการนำกระแสจะอธิบายได้เช่นเดียวกับรอยต่อชนิดที่ 1 โดยบริเวณพร่องพาหะอิสระตรงบริเวณรอยต่อเกือบทั้งหมดจะปรากฏอยู่ในเนื้อสารกึ่งตัวนำ ZnTe

พิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I$ กับ $\ln V$ ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ $p\text{-ZnTe}/n\text{-WO}_3\text{:In}$ (4 wt.%) ที่อุณหภูมิห้องพบว่าที่แรงดันไฟฟ้าน้อยกว่า 0.02 โวลต์ กลไกการนำกระแสไฟฟ้าเป็นไปตามกฎของโอห์ม ส่วนที่ช่วงแรงดันไฟฟ้า 0.02 ถึง 0.60 โวลต์ เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าเป็นไปตามกลไกเทอร์มิโอนิกอิมิสชัน และช่วงแรงดันไฟฟ้ามากกว่า 0.20 โวลต์เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุล้าที่เกิดจากกับดักประจุในเนื้อสารที่มีการแจกแจงแบบเอกซ์โพเนนเชียลเมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I$ กับ V จะได้ค่าแฟกเตอร์อุดมคติและค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับและนำไปใช้เป็นตัวเริ่มต้นในการจำลองข้อมูลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อหาค่าแฟกเตอร์อุดมคติและค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับที่น่าเชื่อถือยิ่งขึ้น การหาค่าความต้านทานอนุกรมด้วยวิธีของชวงนั้นจะเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง dV/dnI กับ I ซึ่งจากกราฟนี้จะหาค่าแฟกเตอร์อุดมคติและค่าความต้านทานอนุกรม และจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $H(I)$ กับ I จะหาค่าความสูงกำแพงศักย์ที่แรงดันไบแอสเป็นศูนย์

ที่อุณหภูมิห้อง ค่าแฟกเตอร์ในอุดมคติและความสูงกำแพงศักย์มีค่าเท่ากับ 5.837 และ 0.602 อิเล็กตรอนโวลต์ตามลำดับ และเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่างในช่วง 10 ถึง 300 เคลวินพบว่า ความสูงของกำแพงศักย์จะมีค่าลดลงตามอุณหภูมิ แต่ค่าแฟกเตอร์ในอุดมคตินั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิต่ำลง โดยการที่ค่าแฟกเตอร์อุดมคติและค่าความสูงกำแพงศักย์ที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากได้ใช้การวัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์มาคำนวณหาค่าตัวแปรเหล่านี้ ดังนั้นค่าของตัวแปรจะขึ้นอยู่กับปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่วัดได้ ที่อุณหภูมิสูงจะมีพลังงานความร้อนไปกระตุ้นพาหะอิสระให้มีระดับพลังงานสูงและมีจำนวนมากขึ้น เมื่อมีการให้แรงดันไบแอสไปหน้าประจุอิสระที่มีระดับพลังงานสูงเหล่านี้ก็สามารถข้ามกำแพงศักย์ที่มีค่าสูงได้ ดังนั้นจะได้กำแพงศักย์ที่มีค่ามากและค่าแฟกเตอร์อุณหภูมิต่ำที่เข้าใกล้หนึ่ง แต่ที่อุณหภูมิต่ำระดับพลังงานของพาหะอิสระมีค่าน้อย จึงจำเป็นต้องใช้แรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเพื่อจะข้ามกำแพงศักย์ ขณะเมื่อป้อนแรงดันไบแอสไปข้างหน้าให้เพิ่มมากขึ้น กลไกการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์จะโดดเด่นขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิต่ำลงกลไกเทอร์มออิเล็กทริกจะลดความโดดเด่นลงและในทางกลับกันกลไกการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์จะโดดเด่นมากยิ่งขึ้น จึงเสมือนว่าพาหะอิสระสามารถไหลข้ามรอยต่อได้เนื่องจากความสูงของกำแพงศักย์ลดลง ส่วนค่าแฟกเตอร์ในอุณหภูมิต่ำ (n) จะมีค่าสูงขึ้นซึ่งจะแสดงว่าการนำกระแสผ่านรอยต่อที่ช่วงอุณหภูมิต่ำสอดคล้องกับกลไกเทอร์มออิเล็กทริกที่น้อยลง

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแฟกเตอร์อุณหภูมิต่ำกับอุณหภูมิที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มออิเล็กทริกและวิธีของชวงเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 10-300 เคลวิน สามารถคำนวณหาค่าลักษณะเฉพาะของพลังงานการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ (E_{00}) ได้ และมีค่าเท่ากับ 0.206 อิเล็กตรอน โวลต์ซึ่งมีค่ามากกว่าพลังงานความร้อนของอุณหภูมิต่ำ (0.025 อิเล็กตรอน โวลต์) แสดงว่ากลไกการชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์มีความโดดเด่นกว่ากลไกเทอร์มออิเล็กทริก อีกทั้งได้คำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้นจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $n(\ln I_s)$ กับ $1/kT$ ที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 10 ถึง 100 เคลวิน พบว่ามีค่าเท่ากับ 2.199 อิเล็กตรอน โวลต์ ซึ่งสอดคล้องดีกับแผนภาพแถบพลังงานของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/n-WO₃:In (4 wt.%) และความหมายของค่าพลังงานกระตุ้นที่คำนวณได้นี้คือระยะห่างระหว่างระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในแถบนำกับระดับพลังงานของโฮลในแถบวาเลนซ์ที่ซึ่งโฮลได้ชดเชยโมเมนต์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ก่อนที่จะไปรวมกับอิเล็กตรอนในแถบนำโดยผ่านทางสถานะผิวเชื่อมต่อ

ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไบแอสในช่วง -0.2 ถึง 0.4 โวลต์ เมื่อใช้ความถี่ 1 เมกกะเฮิรตซ์และทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/n-WO₃:In (4 wt.%) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C^2$ กับ V จุดตัดที่ได้จากกราฟคือ V_i ซึ่งสามารถนำไปหาแรงดันตกคร่อมรอยต่อ (V_{bi}) ได้ และความชันนี้สามารถใช้คำนวณหาความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ (N_a) พบว่าแรงดันตกคร่อมรอยต่อมีค่าประมาณ 0.15 โวลต์ และความหนาแน่นของอะตอมผู้รับเท่ากับ 6.87×10^{11} ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (โดยใช้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ϵ_s ของ ZnTe เท่ากับ 9.67)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประโยชน์ที่ได้รับ

จากการศึกษาสมบัติของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอด p-ZnTe/n-WO₃:In (4 wt.%) ทำให้ผู้วิจัยได้รับประโยชน์อย่างมาก อาทิเช่น ต้องมีการศึกษาค้นคว้าหาข้อมูลเพิ่มเติม รวมทั้งรวบรวมข้อมูลที่ได้เพื่อทำความเข้าใจให้เพียงพอสำหรับทำงานวิจัย ต้องมีเวลาเอาใจใส่ในงานวิจัย มีความพยายามและอดทน ตั้งมั่นที่จะทำงานวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เพราะงานวิจัยค่อนข้างที่ซับซ้อน และต้องอาศัยประสบการณ์ในการทำงานวิจัยเป็นอย่างยิ่ง

จากการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ทำให้ผู้วิจัยทราบถึงวิธีการหาค่าคงที่ของโครงผลึก และขนาดของเกรนจากค่า FWHM ของพีคการเลี้ยวเบน จากการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ทำให้ผู้วิจัยทราบถึงลักษณะผิวหน้าและขนาดของเกรนของฟิล์มบางและของเซรามิก

จากการวัดสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnTe ด้วยเครื่องยูวี-วิสิตีเบลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ทำให้ทราบถึงวิธีการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบาง ส่วนการวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของผลึก WO₃:In (4 wt.%) ใช้สำหรับหาค่าช่องว่างแถบพลังงานของผลึกของเซรามิกส์

จากการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าทำให้ทราบถึงหลักการวัดความสัมพันธ์กระแส-แรงดันไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/n-WO₃:In (4 wt.%) ซึ่งมีกลไกการนำไฟฟ้าที่แตกต่างกันในแต่ละช่วงแรงดันไบแอสตรง จากนั้นคำนวณหาพารามิเตอร์ที่สำคัญ เช่น แฟกเตอร์อุดมคติ, ความสูงกำแพงศักย์และความต้านทานอนุกรม เป็นต้น

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับแรงดันไบแอสในช่วง -0.2 ถึง 0.4 โวลต์ เมื่อใช้ความถี่ 1 เมกะเฮิร์ตซ์และทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ p-ZnTe/n-WO₃:In (4 wt.%) จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C^2$ กับ V จุดตัดที่ได้จากกราฟคือ V_i ซึ่งสามารถนำไปหาแรงดันตกคร่อมรอยต่อ (V_{bi}) ได้ และความชันนี้สามารถใช้ในการคำนวณหาความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ (N_a) ได้

ปัญหาและข้อเสนอแนะ

จากการประดิษฐ์และศึกษาสมบัติของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอด p-ZnTe/n-WO₃:In (4 wt.%) ได้มีปัญหาดังต่อไปนี้เกิดขึ้น และได้ให้ข้อเสนอแนะไว้ดังนี้คือ

1. ควรเช็ดทำความสะอาดระบบระบายสารด้วยความร้อนในสุญญากาศทุกครั้งเมื่อทำงานเสร็จ เนื่องจากฟิล์มบางที่เคลือบอยู่ภายในระบบสุญญากาศจะดูดซับอะตอมออกซิเจนและความชื้น เมื่อทิ้งระบบไว้นานย่อมส่งผลให้ชั้นออกไซด์ที่สะสมไว้หนาขึ้นทำให้ระบบสุญญากาศออกได้ช้าในการทำงานครั้งต่อไป

2. ในการประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์มักจะประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำหลายชั้น ดังนั้นต้องมีการวางแผนที่จะทำงานให้ต่อเนื่องกันจนได้สิ่งประดิษฐ์ในขั้นตอนสุดท้าย เพื่อลดผลกระทบจากสถานะผิวรอยต่อที่เกิดจากสภาพแวดล้อม

3. หัววัดความหนาของฟิล์มบางควรปรับระดับให้มีระดับเดียวกับหน้ากากอะลูมิเนียมระเหยสารเคมีเพื่อให้ได้ค่าเฉลี่ยของความหนาของฟิล์มบางที่ใกล้เคียงความจริงมากที่สุด

4. ในการวัดสมบัติทางไฟฟ้า ผู้วิจัยพบว่าต้องทำขั้วไฟฟ้าให้มีขนาดเล็กและสม่ำเสมอ โดยกาวเงินที่ใช้ต้องมีคุณสมบัติในด้านความเงาที่เหมาะสมเพื่อแก้ไขปัญหาการแพรอย่างรวดเร็วของกาวเงินในเนื้อฟิล์มบาง

เอกสารอ้างอิง

- [1] Samarasekara, P., 2010. "Characterization of Low Cost p-Cu₂O/n-CuO Junction" **GESJ:Physics**,2(4):1-8.
- [2] Wijesundera, R., Hidaka, M., Koga, K., Choi, J.Y. and Sung, N.E., 2010 "Structure and Electronics Properties of Electrodeposited Heterojunction of CuO/Cu₂O" **Ceramics-Silikaty**, 54(1):19-25.
- [3] Dandeneau, C.S., Jeon, Y.H., Shelton, C.T., Plant, T.K., Cann, D. and Gibbons, B. 2009. "Thin Films Chemical Sensors based on p-CuO/n-ZnO Heterocontacts" **Thin Solid Films**, 517:4448-4454.
- [4] Gao, F., Liu, X.J., Zhang, J.S., Song, M.Z. and Li, N. 2012. "Photovoltaic Properties of the p-CuO/n-Si Heterojunction Prepared Through Reactive Magnetron sputtering", **J. Appl. Phys.**, III: 084507.
- [5] Minami, T., Nishi, Y., Miyata, T. and Nomoto, J.I. 2011."High Efficiency Oxide Solar Cells with ZnO/Cu₂O Heterojunction Fabrication on Thermally Oxidized Cu₂O Sheet" **Appl. Phys. Express**, 4:062301.
- [6] ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, อัญญาพร อริยฤทธิ์, อติสร นพรุจกุล, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิงห์ ภูรักษาเกียรติ 2554 "ลักษณะเฉพาะของกระแส – แรงดันไฟฟ้าที่ขึ้นกับอุณหภูมิของไดโอดรอยต่ออวิวิพพันธุ์ CdZnS/CuAlO₂" วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี) ปีที่ 3 (ฉบับพิเศษที่2) มีนาคม 2554: 12-22.
- [7] อติสร นพรุจกุล "สมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่ออวิวิพพันธุ์ CdS กับ CuAlO₂ วิจัยนิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2555.
- [8] Nakashima, Y. and Ichimura, M. 2012 "Electrochemical Deposition of Cu_xSn_yS_zO Thin Films and Their Application for Heterojunction Solar Cells" **International Journal of Photoenergy**, 2012:1-8.
- [9] วรรณภา จำเียรพีช "การศึกษาสมบัติของรอยต่ออวิวิพพันธุ์ของ ไดโอด CdS/CuO" สาขาวิชาฟิสิกส์ ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2555.

- [10] Gonzalez- Borrero, P.P. et al., 2010: "Optical Band-Gap Determination of Nanostructured WO₃ Film" **Appl. Phys. Lett.**, 96:061909.
- [11] Patel, K.J., Panchal, C.J., Kheraj, V.A. and Desai, M.S., 2009. "Growth, Structural, Electrical and Optical Properties of the Thermally Evaporated Tungsten Trioxide (WO₃) Thin films" **Mater.Chem. Phys.**, 114:475-478.
- [12] Balu et al., 2010. "Effect of Thickness on the Microstructural, Optoelectronic and Morphological Properties of Electron Beam Evaporated ZnTe Films" **J. Alloys and Compounds**, 502:434-438.
- [13] Sze S.M. **Semiconductor Devices Physics and Technology**. 2nd ed. United States of America : John Wiley & Sons. 2002.
- [14] Kittel C. **Introduction to Solid State Physics**. 8th ed. United States of America : John Wiley & Sons. 2005.
- [15] จูตินัย แก้วแดง. "การเตรียมและศึกษาสมบัติของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมไดซีลีไนด์" วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2530.
- [16] งามนิตย์ วงษ์เจริญ. "การศึกษารอยต่อแบบโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ ของคอปเปอร์อินเดียมไดซีลีไนด์" วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2530.
- [17] งามนิตย์ วงษ์เจริญ, จูตินัย แก้วแดง, ชัยสิงห์ ภูรักษาเกียรติ และ ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. "การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง Cd_{1-x}Zn_xS เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์" รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2545.
- [18] งามนิตย์ วงษ์เจริญ, จูตินัย แก้วแดง, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และ ณัฐพร พรหมรส. "การเตรียมฟิล์มบาง CdTe โดยวิธีระเหิดสารในระยะประชิดเพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์" รายงานการวิจัย เสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2551.
- [19] งามนิตย์ วงษ์เจริญ, จูตินัย แก้วแดง และ ณัฐพร พรหมรส. "การประดิษฐ์ฟิล์มบาง CdO ที่เจือด้วยอะตอม Al สำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์" รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2553.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [20] จูตินัย แก้วแดง, งามนิศย์ วงษ์เจริญ, ณัฐพร พรหมรส และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. “การพัฒนา
ขั้วไฟฟ้าด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CdS/CdTe” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะ
วิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2552.
- [21] จูตินัย แก้วแดง, งามนิศย์ วงษ์เจริญ และ ณัฐพร พรหมรส “การเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธีอาบ
สารละลายเคมีภายใต้คลื่นไมโครเวฟเพื่อประดิษฐ์เป็นหน้าต่างรับแสงของเซลล์
แสงอาทิตย์” รายงานการวิจัย เสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
เจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2551.
- [22] จูตินัย แก้วแดง, งามนิศย์ วงษ์เจริญ และ ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ “การประดิษฐ์ฟิล์มบางคินุก
ออกไซด์ที่เจือด้วยอะตอมฟลูออรีนสำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์”
รายงานการวิจัย เสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง. 2549.
- [23] จูตินัย แก้วแดง, งามนิศย์ วงษ์เจริญ และ ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ “การประดิษฐ์ฟิล์มบาง CuAlO_2
เพื่อเป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์” รายงานการวิจัย เสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2550.
- [24] ปกรณ์ สิทธิเชตรกรณ์. “การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางคอปเปอร์อินเดียมไคซีลีไนต์ที่เตรียมได้
จากกระบวนการซีลีไนเซชัน” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2550.
- [25] สุกฤษฎ์ เกิดแสง. “การเตรียมและศึกษาสมบัติของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์
CdTe” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัยสถาบัน
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2547.
- [26] จูติกร จรรยาธรรม. “การศึกษาเชิงเปรียบเทียบสมบัติของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ ที่เตรียมโดย
เทคนิคที่ต่างกัน” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิต
วิทยาลัยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2550.
- [27] อดุลย์ หาญวังม่วง. “การศึกษาสมบัติฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารใน
ระยะประชิด” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2550.
- [28] เอกชัย วิลามาศ. “การเตรียมและการศึกษาสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางของ รอยต่อ
วิวิธพันธ์ CdS/CdTe” วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิต
วิทยาลัยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2552.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [29] ไกรศักดิ์ ยืนยง “การศึกษาข้อสัมผัสอินทรีย์ของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์” วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2553.
- [30] สุริยา มีเปี่ยมสมบูรณ์ “การประดิษฐ์ฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์เพื่อประยุกต์เป็นชนิดที่กึ่งไดโอด” วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2553.
- [31] Sze, S.M. and Kwok, K.N. Physics of Semiconductor Devices, John Wiley & Sons, Inc., 2007
- [32] Nicollian, E.H. and Brews, J.R. Mos (Metal Oxide Semiconductor) Physics and Technology, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1982.
- [33] Schroder, D.K. Semiconductor Material and Device Characterization, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1990.
- [34] Barsoukov, E. and macdonald, J.R. Impedance Spectroscopy Theory, Experiment and Applications, John Wiley & Sons, Inc., 2005.
- [35] จูตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ “การประดิษฐ์และการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง CdS_xTe_{1-x} เพื่อประยุกต์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2556.
- [36] งามนิตย์ วงษ์เจริญ, จูตินัย แก้วแดง, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ “ การประดิษฐ์ฟิล์มบาง $CuInSe_2$ โดยวิธีซีดีในเซชันเพื่อประยุกต์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2555.
- [37] จูตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ “การประดิษฐ์ขั้วไฟฟ้าด้านหลังชนิดใหม่ที่เหมาะสมกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดของฟิล์มบาง $CdS/CdTe$ ” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2554.
- [38] Jasennek, A., Rau, U., Nadenau, V. and Schock, H.W., 2000, “Electronic properties of $CuGaSe_2$ Based Heterojunction Solar Cells, Part II Detect Spectroscopy” **J. Appl. Phys.** 87:594-602.
- [39] Friesen, G., Ozsar, M.E. and Dunlop, E.D. 2000, “Impedance Model for CdTe Solar Cells Exhibiting Constant Phase Element Behavior” **Thin Solid Films**, 361-362:303-308.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [40] Balu et al. 2010, Effect of Thickness on the Micro Structural, Optoelectronic an Mophological Properties of Electron Beam Evaporated ZnTe Films” **J. Alloys & Compounds**. 502:434-438.
- [41] Richard, A.P. and Edwards, D.D., 2004. “Sub solidus Phase Relations and Crystal Structures of the Mixed-Oxide Phases in the In_2O_3 - WO_3 System” **J. Solid State Chem.**, 177: 2740-2748.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Indexing of X-ray diffraction pattern for $\text{In}_6\text{WO}_{12}$

$2\text{-}\theta$ ($^\circ$)	d (\AA)	I (%)	I_{PDF} (%)	Rhombohedral hkl	Hexagonal hkl
22.559	3.9382	8.5	7.9	1 1 0	0 1 2
23.761	3.7416	9.3	8.8	$\bar{1}$ 1 1	0 2 1
29.441	3.0313	2.3	0.9	2 0 0	2 0 2
29.881	2.9878	31.8	31.3	1 1 1	0 0 3
30.400	2.9379	100	100	0 $\bar{1}$ 2	2 1 1
32.620	2.7429	3.3	2.9	2 1 1	3 0 0
35.101	2.5544	35.5	40.1	2 1 1	1 2 2
35.441	2.5307	4.9	4.0	0 1 2	1 1 3
44.522	2.0334	54.7	2.3	0 1 3	3 1 2
46.140	1.9657	2.4	3.4	2 2 0	0 2 4
50.198	1.8159	13.9	23.1	3 1 0	2 1 4
50.844	1.7943	17.1	23.6	1 2 3	4 1 0
52.623	1.7378	3.5	4.6	1 2 3	2 3 2
59.541	1.5513	5.7	0.4	0 2 3	1 2 5
59.717	1.5472	3.8	8.9	$\bar{4}$ 1 1	5 0 2
60.126	1.5376	10.8	—	0 $\bar{1}$ 4	1 4 3
60.302	1.5336	7.5	18.6	1 3 3	2 4 1
60.580	1.5272	4.9	10.6	4 0 0	4 0 4
63.323	1.4675	4.0	7.1	0 2 4	4 2 2
63.502	1.4638	3.2	—	1 2 4	5 1 1

* PDF #74-1410.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern:37-242		Radiation=1.540600		Quality:Indexed		
In _{0.02} WO ₃ Indium Tungsten Oxide		2th	l	h	k	l
		23.055	100	0	0	2
		23.861	55	0	2	0
		24.115	76	2	0	0
		26.757	2	2	0	1
		28.734	28	1	1	2
		33.492	31	0	2	2
		34.194	39	2	2	0
		35.648	2	1	2	2
		41.658	23	2	2	2
		44.591	13	1	2	3
		45.122	5	1	3	2
		45.407	7	3	1	2
		47.130	15	0	0	4
		48.880	5	0	4	0
		49.406	11	4	0	0
		50.438	19	1	1	4
		53.605	10	0	2	4
		54.716	6	0	4	2
		55.216	15	4	0	2
		55.600	13	4	2	0
		57.937	3	3	3	2
		59.519	7	2	2	4
		60.638	6	2	4	2
		60.983	11	4	2	2
		62.471	11	3	1	4
Lattice :Orthombic S.G. : (0)		Mol. Weight=234.14				
		Volume[CD]=422.21				
a=7.36700		Dx=0.921				
b=7.44100						
c=7.70200						
a/b=0.99006						
c/b=1.03508						
SAMPLE PREPARTION :Prepared from In WO ₃ or In ₂ O ₃ , WO ₃ and WO ₂ . A preliminary for 4 days at 837 K was followed by heating to 1273K for 7 days						
GENERAL COMMENTS : Orthorhombic tungsten bronze.						
*J.Solid State Chem., volume54, page 365, (1984) primary reference: Ekstrom,t.,Parmentier,M.,Watts,K.,Tilley,R.						
Radiation :		Fitter:Not specified				
SS/FOM: F25=7(0.0340,99)		d-sp:Not Given				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern:72-683		Radiation=1.540600		Quality: Calculated		
		2th	l	h	k	l
In ₂ O ₃ Indium Oxide		22.347	3	0	1	2
		32.613	100	1	1	0
		37.664	<1	1	1	3
		39.894	2	2	0	2
		45.606	<1	0	2	4
		51.209	4	2	1	1
		52.442	<1	1	2	2
		58.197	4	3	0	0
		60.581	<1	1	2	5
		64.593	<1	2	0	8
		68.325	<1	2	2	0
		69.150	<1	2	1	7
		71.421	<1	2	2	3
		71.872	1	1	3	1
		72.889	<1	3	1	2
		76.904	<1	1	3	4
		*76.904	<1	0	2	10
		79.871	<1	3	1	5
		82.151	<1	0	4	2
		86.048	<1	4	0	4
		*86.048	<1	2	1	10
Lattice :Rhombohedral S.G. : R-3c (167)		Mol. Weight =277.64 Volume[CD] =378.33				
a =5.48700 c =14.51000		Dx =7.312 Dm =7.310 l/lcor =0.62				
Z=6						
ICSD COLLECTION CODE :016086 TEMPERATURE FACTOR :ATF TEST FROM ICSD : CALC. DENSITY UNUSUAL BUT TOLERABLE.						
*calculate from ICSD using POWD-12++, (1997) primary reference:						
Radiation : SS/FOM : F25=7(0.0340,99)		Fitter :Not specified d-sp :Not Given				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern : 74-1410		Radiation = 1.540600		Quality : Calculated						
In ₆ WO ₁₂		2th	l	h	k	l				
Indium Tungsten Oxide		14.645	1	0	1	0				
Lattice : Rhombohedral		18.722	<1	-1	1	0				
S.G. : R-3 (148)		22.637	8	1	1	0				
a = 6.22770		23.851	9	-1	1	1				
Alpha = 99.01		29.536	1	0	2	0				
Z = 1		29.964	31	1	1	1				
Mol. Weight = 1064.76		30.493	100	-1	2	0				
Volume[CD] = 694.55		32.726	3	-2	1	1				
Dx = 7.637		35.200	40	-2	-1	1				
Dm = 7.500		37.967	4	1	2	0				
I/Icor = 10.46		40.898	<1	-2	2	0				
ICSD COLLECTION CODE : 027197		41.862	1	1	2	1				
TEMPERATURE FACTOR : ATF		44.658	2	-1	3	0				
TEST FROM ICSD : Calc. density unusual but tolerable.		44.959	5	0	3	0				
		45.335	2	-3	1	1				
		46.224	3	2	2	0				
		48.821	<1	-2	2	2				
		49.103	1	-1	3	1				
		49.454	1	-2	3	0				
		50.288	23	1	3	0				
		50.977	24	-3	2	1				
		52.332	2	2	2	1				
		52.735	5	-2	3	1				
		56.070	<1	1	3	1				
		57.028	<1	-3	2	2				
		57.784	1	-3	-2	1				
		58.412	<1	-3	3	0				
		59.650	9	2	3	0				
		60.266	19	-1	4	0				
		60.573	11	-3	3	1				
		61.302	2	0	4	0				
		62.266	2	2	2	2				
		63.463	7	-2	4	0				
		63.997	2	-4	2	1				
		64.705	1	-1	4	1				
		65.641	1	2	3	1				
		66.456	1	1	4	0				
		66.805	2	-3	3	2				
		67.036	1	-2	4	1				
		68.587	<1	-4	2	2				
		69.724	1	-3	-3	1				
		70.574	<1	-3	4	0				
		71.248	1	-3	-3	2				
		71.810	<1	-4	3	1				
		72.143	1	3	3	0				
		72.925	2	-4	-2	1				
		74.422	4	-4	-2	2				
		75.302	<1	2	4	0				
		76.619	<1	-3	3	3				
		76.893	1	-4	3	2				
		77.546	1	-1	5	0				
		78.360	1	3	3	1				
		79.175	<1	0	5	0				
		79.501	1	-5	2	1				
		79.717	1	-2	5	0				
		81.174	1	-4	4	0				
		81.440	3	2	4	1				
		82.247	2	-1	1	5				
		83.053	5	-4	4	1				
		83.694	1	-2	5	1				
		84.549	4	1	5	0				
		85.297	1	-4	-3	2				
		85.618	4	-3	5	0				
		86.099	<1	-5	3	1				
		87.534	1	3	4	0				
		88.171	1	3	3	2				
		88.654	<1	-4	4	2				
		88.866	2	-3	5	1				
		89.770	1	-3	4	3				
Radiation : CuKα1										
Filter : Not specified										
Lambda : 1.54060										
d-sp : Calculated spacings										

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern : 72-1465		Radiation = 1.540600				Quality : Calculate				
WO ₃		2th	l	h	k	l	2th	l	h	k
Tungsten Oxide		16.475	1	0	1	1	62.312	12	3	4
		16.904	<1	1	0	1	*62.312	12	-3	1
		*16.904	<1	1	1	0	63.345	4	-4	1
		20.391	1	-1	1	1	*63.345	4	3	1
		20.609	1	1	1	1	63.479	2	-3	4
		23.147	100	0	0	2	64.038	<1	-4	3
Lattice : Monoclinic		23.612	78	0	2	0	64.297	<1	1	5
S.G. : P21/n (14)		24.370	97	2	0	0	*64.297	<1	4	1
Mol. Weight = 231.85		26.029	1	0	1	2	64.765	<1	-5	0
Volume[CD] = 422.11		26.619	15	1	2	0	64.910	<1	3	3
Dx = 7.297		27.130	<1	2	1	0	65.026	<1	5	1
a = 7.30000		28.643	16	-1	1	2	65.185	<1	5	0
b = 7.53000		28.959	14	1	1	2	65.597	<1	0	2
Beta = 90.90		*28.959	14	-1	2	1	66.055	1	-2	3
c = 7.68000		29.404	1	-2	1	1	*66.055	1	-5	1
a/b = 0.96946		29.713	<1	2	1	1	66.310	1	-3	2
Z = 8		33.303	50	0	2	2	66.491	<1	-2	4
l/lcor = 5.63		33.585	24	-2	0	2	*66.491	<1	5	1
		34.189	47	2	0	2	66.721	2	2	3
		*34.189	47	2	2	0	*66.721	2	-1	2
		35.429	4	-1	2	2	67.161	3	-3	4
		35.691	5	1	2	2	*67.161	3	1	2
		*35.691	5	-2	1	2	67.305	2	3	2
		36.061	<1	-2	2	1	*67.305	3	3	4
		36.214	<1	2	1	2	*67.656	3	-4	3
		36.319	<1	2	2	1	68.120	1	1	5
		37.066	<1	0	1	3	68.320	<1	4	3
		37.382	<1	1	0	3	*68.320	<1	-2	5
		38.611	<1	-3	0	1	68.518	<1	2	5
		38.953	<1	-1	1	3	68.936	1	5	2
		*38.953	<1	3	0	1	69.613	1	-5	1
		39.315	<1	1	1	3	69.932	2	0	4
		39.655	<1	-1	3	1	*69.932	2	-5	2
ICSD COLLECTION CODE : 017003		39.774	<1	1	3	1	70.424	1	5	2
SpACE GROUP AS REPORTED BY ICSD : ICSD SG : P121/N1		40.494	1	-3	1	1	*70.424	1	5	1
IT is:		40.845	<1	3	1	1	70.595	2	-4	0
14 SG short form: P21/n		41.467	16	-2	2	2	71.124	2	-1	4
REMARKS FROM ICSD : REM REF.		41.925	17	2	2	2	71.446	1	1	4
TEST FROM ICSD : At least one TF missing.		42.679	<1	0	2	3	*71.446	1	2	2
REMARKS FROM ICSD : REM TEM Mentioned		43.018	1	0	3	2	71.883	2	-4	1
		44.290	4	3	2	0	*71.883	2	4	0
		44.750	3	1	2	3	72.017	4	4	4
		*44.750	3	-1	3	2	*72.017	4	0	3
		44.966	3	1	3	2	72.272	2	2	5
		45.405	5	-3	1	2	72.714	2	-3	3
		46.044	3	3	1	2	73.140	<1	4	1
		*46.044	3	3	2	1	*73.140	<1	-3	4
		47.312	9	0	4	4	73.407	1	-5	2
		48.308	9	0	4	0	*73.407	1	-3	1
		48.923	<1	0	1	4	73.669	2	-4	3
		49.939	18	4	0	0	*73.669	2	3	3
		*49.939	18	1	4	0	73.886	1	3	4
		50.260	4	2	3	2	74.008	1	0	0
		*50.260	4	-3	2	2	*74.008	1	-1	5
		50.397	11	-1	1	4	74.201	1	5	2
		50.792	10	1	1	4	*74.201	1	-5	0
*Calculated from ICSD using POWD-12++, (1997) primary reference :		*50.792	10	3	2	2	74.565	<1	4	3
		50.912	6	0	3	3	*74.565	<1	3	1
		51.436	<1	-1	4	1	74.968	1	-2	4
		*51.436	<1	4	1	0	75.252	1	5	3
		51.533	<1	1	4	1	*75.252	1	0	1
		52.235	<1	3	0	3	75.610	3	2	4
		*52.235	<1	3	3	0	*75.610	3	-4	2
		52.326	<1	-1	3	3	75.727	1	0	6
		52.682	<1	1	3	3	76.333	3	-1	1
		52.756	<1	-4	1	1	76.493	3	-4	4
		52.882	<1	-3	1	3	76.802	4	1	1
		*53.539	9	0	2	4	*76.802	4	4	2
		53.737	5	3	1	3	77.041	5	1	6
		54.223	8	0	4	2	77.176	<1	2	3
		54.828	8	2	4	0	77.846	<1	-2	5
Radiation : CuKa1		54.924	5	-1	2	4	78.182	<1	-1	6
Filter : Not specified		*54.924	5	-2	1	4	78.260	<1	1	6
Lambda : 1.54060		55.359	7	1	2	4	*78.260	<1	2	5
d-sp : Calculated spacings		*55.359	7	-4	0	2	78.573	2	6	0
		55.689	6	-1	4	2	78.791	1	-2	0
		55.878	10	1	4	2	78.943	1	3	5
		55.952	14	4	2	0	*78.943	1	0	2
		56.097	13	4	0	2	79.148	<1	-5	2
		*56.097	13	-2	4	1	79.577	<1	-5	3
		56.804	<1	-4	1	2	79.722	<1	2	0
		56.948	<1	-2	3	3	*79.794	<1	6	1
		57.151	<1	-4	2	1	80.012	<1	-1	2
		57.271	<1	-3	2	3	*80.012	<1	-2	1
		57.492	<1	2	3	3	80.443	1	0	6
		*57.492	<1	4	1	2	*80.443	1	1	2
		57.680	1	-3	3	2	80.732	<1	0	4
		58.219	1	3	3	2	*80.732	<1	-6	1
		59.303	3	-2	2	4	80.942	1	2	1
		60.009	3	2	2	4	*80.942	1	2	6
		60.120	4	-2	4	2	81.097	1	0	5
		60.471	4	2	4	2	81.336	1	-3	4
		60.683	3	0	3	4	81.657	2	-1	6
		61.007	7	-4	2	2	*81.657	2	-4	3
		*61.007	7	0	4	3	81.811	2	-1	4
		61.701	7	4	2	2	*81.811	2	1	6
		61.883	5	1	0	5	82.031	1	-2	6
		61.964	4	-1	3	4	82.260	1	3	4
							*82.260	1	-1	5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern: 45-1298		Radiation =1.540600				Quality: High
Cu _{1.50} Zn _{0.30} Te		2th	l	h	k	l
Copper Zinc Telluride		25.143	100	1	1	1
		29.150	60	2	0	0
		41.705	40	2	2	0
		49.355	80	3	1	1
		60.459	30	4	0	0
		68.482	20	4	2	0
Lattice: Face-centered cubic		Mol. Weight=242.53 Volume[CD]=229.22 Dx=7.028				
S.G.: Fm3m (225)						
a=6.12000	Z=4					
TEMP. OF DATA COLLECTION : High temperature phase.						
TEMP. OF DATA COLLECTION : Transforms to orthorhombic cell below 803 K.						
*Private Communnication, (1994) primary reference : Asadov, Yu., Academy of Sciences of Azer., Baku, Azerbaijan. *Izv. Akad. Nauk SSSR, Neorg. Mater., volume 29, page 330, (1993) powerdata : Asadov, Yu. et al.						
Radiation : CrK α		Filter : Bata				
Lambda : 1.54180		d-sp: Diffractometer				
SS/FOM: F6=49(0.0154,8)						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern: 75-2085		Radiation =1.540600		Quality: Calculated																
ZnTe		2th	l	h	k	l														
Zinc Telluride		25.395	100	1	1	1														
		29.406	8	2	0	0														
		42.070	59	2	2	0														
		49.782	36	3	1	1														
		52.157	2	2	2	2														
		61.010	8	4	0	0														
		67.168	12	3	3	1														
		69.156	2	4	2	0														
		76.880	12	4	2	2														
		82.509	7	5	1	1														
Lattice: Monoclinic cubic		Mol. Weight =192.98																		
S.G.: P21/n (14)		Volume[CD] =223.65																		
a =6.07000		Dx = 5.731																		
		Dm = 5.540																		
	Z = 4	I/I_{cor} = 13.96																		
ICSD COLLECTION CODE : 031843																				
REMARKS FROM ICSD : PICT.																				
TEST FROM ICSD : Calc. density unusual but tolerable.																				
TEST FROM ICSD : No R value given.																				
TEST FROM ICSD : At least one TF missing.																				
*calculate from ICSD using POWD-12++, (1997) primary reference:																				
*Nor. Geol. Tidsskr., volume 8, page 302, (1926) : Zachariasen, W.H.																				
Radiation : CuK α 1	Fitter : Not specified																			
Lambda : 1.54060	d-sp : Calculated spacings																			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Te		2th	l	h	k	l
Tellurium		23.028	14	1	0	0
		27.568	100	0	1	1
		38.278	37	1	0	2
		40.453	22	1	1	0
		43.358	9	1	1	1
		45.945	7	0	0	3
Lattice : Hexagonal		47.059	2	2	0	0
S.G. : P3121 (152)		49.655	14	2	0	1
		51.279	5	1	1	2
a =4.45600		52.000	2	1	0	3
c =5.92100		56.918	9	0	2	2
		62.852	9	1	1	3
Z = 3		63.757	5	2	1	0
		65.900	6	1	2	1
		67.746	5	0	1	4
		67.877	3	0	2	3
ICSD COLLECTION CODE : 065692		72.135	4	2	1	2
TEMPERATURE FACTOR :ATF		73.572	1	3	0	0
		75.585	2	3	0	1
		77.330	1	1	1	4
		81.524	2	0	3	2
		81.973	3	2	0	4
		82.095	5	2	1	3
		85.752	2	1	0	5
		87.494	<1	2	2	0
		89.434	1	2	2	1
* Calculated From ICSD using POWD- 12++, (1997) primary reference:						
*Acta Crystalllogr., Sec. C., volume 45, page 941, (1989) : Adenis, C., Langer, V., Lindqvist, O.						
Radiation :CuKα1		Fitter :Not specified				
Lambda :1.54060		d-sp : Calculated spacings				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน	นายจักรพงษ์ สวัสดิวงศ์
เกิดเมื่อ	วันที่ 10 มีนาคม พ.ศ. 2529
ภูมิลำเนา	จังหวัดสระบุรี
การศึกษา	2550 ปริญญาตรี สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ หลักสูตรฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2556 ปริญญาโท สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้