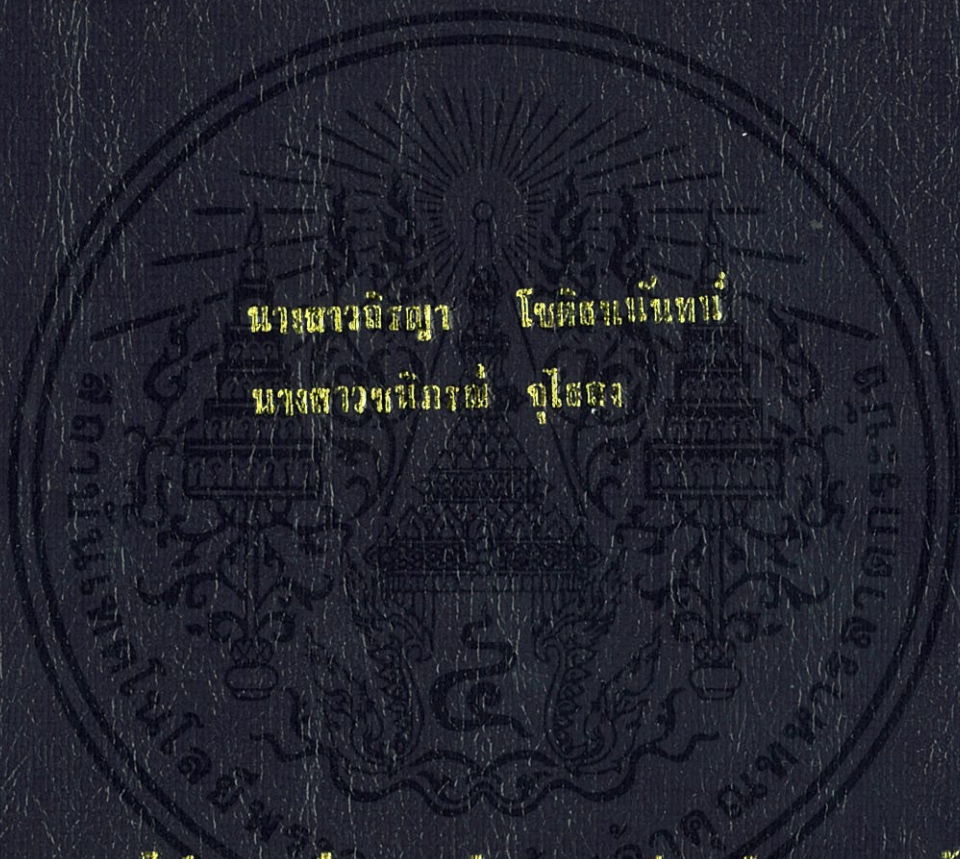


การศึกษาสมบัติของชั้นประติมากรรมที่เชื่อมกันด้วยฟิล์มบาง CAS/CdO
STUDY OF CAS/CdO HETEROJUNCTION THIN FILM DEVICE



นางสาวฉัตรภา ไชยสินธุ์
นางสาวนันทิภรณ์ ชูโชติ

โครงการพิเศษเป็นความร่วมมือของภาควิชาตามปกติกับศูนย์วิจัยเทคโนโลยีวัสดุ
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

การศึกษาสมบัติของสิ่งประดิษฐ์รอยต่ออวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบาง CdS/CuO
STUDY OF CdS/CuO HETEROJUNCTION THIN FILM DEVICE



นางสาวธิรญา โขติชนันท์
นางสาวชนิภรณ์ จุไรสง

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ขอสงวนสิทธิ์ในการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2556

STUDY OF CdS/CuO HETEROJUNCTION THIN FILM DEVICE



Miss. THIRAYA CHOTTHANANAN
Miss. CHANIPORN JUTHAISONG

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2013

| | |
|--------------------|---|
| หัวข้อโครงการพิเศษ | การศึกษาสมบัติของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบาง CdS/CuO |
| ชื่อนักศึกษา | นางสาวธิรญา โชติชนนันท์ นางสาวชนิภรณ์ จูไรสง |
| ปริญญา | วิทยาศาสตร์บัณฑิต |
| สาขาวิชา | ฟิสิกส์ |
| ปีการศึกษา | 2556 |
| อาจารย์ที่ปรึกษา | รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ |

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ได้ทำการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO และ CdS โดยมีการเตรียมด้วยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ พบว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO มีการจัดเรียงตัวของอะตอมไม่เป็นระเบียบแบบอสัณฐาน ส่วนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS เป็นผลึกพหุพันธ์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล โดยที่ระนาบการเลี้ยวเบน (002) มีความเข้มสูงที่สุด จากนั้นได้ทำการศึกษาลักษณะของพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ศึกษาลักษณะเฉพาะของการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางและได้ทำการวัดความต้านทานแผ่นของฟิล์มบาง จากนั้นจึงทำการประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuO โดยการระเหยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศให้เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO จากการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 100-300 เคลวิน สามารถคำนวณหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ แพลกเตอร์อุดมคติ และความต้านทานอนุกรม โดยอาศัยทฤษฎีเทอร์มิออนิกอิมิตชัน และวิธีของชวง ได้ทำการวัดอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuO ที่อุณหภูมิในช่วง 25-60 องศาเซลเซียส จำนวนจริงและจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนมีค่าเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิและความถี่ จากการทดลองพบว่าสิ่งประดิษฐ์สามารถประยุกต์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดต้นทุนต่ำได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาหรือจะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำสำคัญ: ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO, ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS,

รอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CuO

| | |
|----------------------|--|
| Title | STUDY OF CdS/CuO HETEROJUNCTION THIN FILM DEVICE |
| Students | Miss. Thiraya Chotthananan Miss. Chaniporn Juthaisong |
| Degree | Bachelor of Science |
| Major Program | Physics |
| Academic Year | 2013 |
| Advisor | Assoc.Prof.Ngamnit Wongcharoen |

ABSTRACT

In this special project, CuO and CdS thin films have been deposited by thermal evaporation in vacuum on slide glass substrate. The XRD analysis reveals that CuO thin films are amorphous phase. In contrast, CdS thin films are polycrystalline having a hexagonal wurtzite structure with a preferential orientation of (002) plane. The morphological, optical and electrical properties of the a- CuO and CdS thin films were investigated using SEM, optical transmission and sheet resistance measurements. The prototype of CdS/CuO heterojunction was successfully prepared by thermal evaporation of CdS thin films on CuO thin films substrate in vacuum. The obtained device exhibits a good rectifying behavior of the diode from the dark I-V characteristics. From the data of I-V measurements at low temperature range of 100-300 K, the junction barrier height, ideality factor and series resistance values can be evaluated by using thermionic emission theory and Cheung's method. Impedance spectroscopy of the device was investigated at temperature of 25-60 °C. The real and imaginary parts of the complex impedance are changed with the temperature and frequency. The experimental results suggest that the device could be used possibly a good candidate for photovoltaic devices with low thermal budget and low product cost.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Keywords : CuO thin films, CdS thin films, CdS/CuO heterojunction

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาของ รองศาสตราจารย์ ดร.จิตินัย แก้วแดง รองศาสตราจารย์ งามนิษฐ์ วงษ์เจริญ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ รองศาสตราจารย์ ดร.ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ ที่อำนวยความสะดวกในการใช้ระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในสุญญากาศ อุปกรณ์ในการวัดลักษณะเฉพาะต่างๆ ตลอดจนอุปการะทุนสนับสนุน และให้ความรู้และคำปรึกษาทางวิชาการที่ดีตลอดมา รวมทั้งปลูกฝังคุณธรรมที่งดงามให้กับลูกศิษย์ทุกคน

ขอขอบคุณศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์ และการแนะนำในการใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโทรมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance ซึ่งรังสีเอกซ์มีความยาวคลื่นในย่าน $Cu_{K\alpha}$ 1.5406 อังสตรอม ในการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค

ขอขอบคุณจักรพงษ์ สวัสดิวงศ์ และคุณทศพร ขันตยาภรณ์นักศึกษาปริญญาโทใน ห้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุโพลีเมติกส์ สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง คุณคงกฤษณ์ ไพรวัลย์ และคุณกุลวรางค์ นุตะมาน ศิษย์เก่าปริญญาตรี ห้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุโพลีเมติกส์ สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ช่วยติดตั้งซอฟต์แวร์ในการวัดลักษณะเฉพาะ กระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า และคำแนะนำในการใช้เครื่อง E4980A Agilent Precision LCR Meter สำหรับวัดค่าความนำไฟฟ้า และค่าความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำโครงการพิเศษ แนะนำการใช้อุปกรณ์ต่างๆตลอดจนให้คำแนะนำในการใช้โปรแกรมเพื่อวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลอง

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่เมตตาประสิทธิ์ประสาทวิชาและให้การอบรมสั่งสอนตั้งแต่การศึกษาระดับมัธยมศึกษาจนถึงปัจจุบัน

สุดท้ายนี้กราบขอบพระคุณพ่อ คุณแม่ และญาติพี่น้องทุกท่านที่ให้ความอุปการะทุนในการศึกษาเล่าเรียน และเป็นกำลังใจด้วยดีตลอดมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นางสาวธิรญา โชติธนนันท์

นางสาวชนิภรณ์ จุไซสง

สารบัญ

| | หน้า |
|--------------------|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย | I |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ | II |
| กิตติกรรมประกาศ | III |
| สารบัญ | IV |
| สารบัญตาราง | XI |
| สารบัญรูปภาพ | XII |

| | |
|---|----|
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย | 3 |
| 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย | 3 |
| 1.4 ขั้นตอนการดำเนินการ | 4 |
| 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ | 4 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 5 |
| 2.1 วัสดุของแข็งสารกึ่งตัวนำ | 5 |
| 2.2 โครงสร้างของผลึก | 6 |
| 2.2.1 โครงสร้างผลึกของสารประกอบที่เกิดจากอะตอมของธาตุกลุ่ม II และกลุ่ม VI | 6 |
| 2.2.1.1 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ | 7 |
| 2.2.1.2 โครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไซต์ | 8 |
| 2.2.1.3 โครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O และ CuO | 8 |
| 2.2.2 หลักเกณฑ์ในการระบุชื่อระนาบของผลึก | 11 |
| 2.2.2.1 การระบุตำแหน่ง | 11 |
| 2.2.2.2 การระบุทิศทาง | 11 |
| 2.2.2.3 การระบุชื่อระนาบ | 11 |
| 2.3 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ | 12 |
| 2.3.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก | 13 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่ควรนำเอกสารนี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| 2.3.2 การหาขนาดของเกรน | 14 |
| 2.4 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ ส่องกราด | 15 |
| 2.5 การส่งผ่านแสง | 16 |
| 2.5.1 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง | 17 |
| 2.5.2 ส่วนหางของแถบพลังงาน | 19 |
| 2.6 สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ | 20 |
| 2.6.1 การวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิค แวนเดอร์เพาว์ | 20 |
| 2.6.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง | 22 |
| 2.6.3 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว | 23 |
| 2.6.4 ปრაกฏการณ์ฮอลล์ | 25 |
| 2.6.5 การศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ | 29 |
| 2.7 สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง | 31 |
| 2.7.1 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะในช่วงกระแสกลาง | 39 |
| 2.7.2 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะในช่วงกระแสขาขึ้น | 41 |
| 2.8 รอยต่อพี-เอ็น ของสารกึ่งตัวนำ | 42 |
| 2.8.1 รอยต่อในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน | 42 |
| 2.8.2 รอยต่อแบบชั้นบันได | 44 |
| 2.8.3 รอยต่อพี-เอ็น ภายใต้สภาวะการไบอัสย้อนกลับ | 47 |
| 2.9 ค่าความจุไฟฟ้า | 48 |
| 2.10 ลักษณะกระแส-แรงดันไฟฟ้าของรอยต่อพี-เอ็น | 51 |
| 2.11 เงื่อนไขขอบเขตของความเข้มข้นของพาหะข้างน้อย | 52 |
| 2.12 การวิเคราะห์ไดโอดออคุมคติ | 53 |
| 2.12.1 ลักษณะสมบัติของไดโอดยาว | 54 |
| 2.12.2 ลักษณะสมบัติของไดโอดสั้น | 56 |
| 2.13 กระแสเนื่องจากบริเวณประจุค้าง | 58 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่... การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|-----------|
| 2.14 การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบ | 61 |
| 2.14.1 อัตรการระเหยสาร | 61 |
| 2.14.2 แหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้ในการระเหยสารด้วยไฟฟ้า | 61 |
| 2.14.2.1 แหล่งกำเนิดชนิดทังสเตน | 62 |
| 2.14.2.2 แหล่งกำเนิดชนิดแผ่นโลหะทรงรูป | 62 |
| 2.14.3 ปฏิกริยาออกซิเดชันด้วยความร้อน | 63 |
| บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย | 64 |
| 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัยมีวิธีการดำเนินงานทดลองดังนี้ | 64 |
| 3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ | 64 |
| 3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส | 65 |
| 3.2 ขั้นตอนในการเตรียมสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส | 65 |
| 3.2.1 การเตรียมแผ่นกระจกสไลด์เพื่อใช้เป็นแผ่นฐานรองรับ | 65 |
| 3.2.2 การเตรียมสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส | 66 |

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

| | | |
|----------------|--|-----------|
| 3.3 | อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO และ CdS ที่ถูกเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ และสิ่งประดิษฐ์รอยต่ออวิชพันธุของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส | 70 |
| 3.3.1 | อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค | 70 |
| 3.3.2 | อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค | 70 |
| 3.3.3 | อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางแสง | 70 |
| 3.3.4 | อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า | 71 |
| 3.3.4.1 | การศึกษาสมบัติเฉพาะของสิ่งประดิษฐ์รอยต่ออวิชพันธุของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ด้วยการวัดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า กระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า แล้วต่อจากนั้นจึงนำไปศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วง 25 – 60 องศาเซลเซียส | 71 |
| 3.4 | การวิเคราะห์การวัดค่าสัมบูรณ์ของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน | 74 |
| บทที่ 4 | ผลการวิจัยและอภิปรายผล | 79 |
| 4.1 | ลักษณะของฟิล์มบางที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ของสารกึ่งตัวนำ CdS และ CuO และสิ่งประดิษฐ์รอยต่ออวิชพันธุของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียม โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ | 79 |
| 4.2 | การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่ออวิชพันธุของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียม โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ | 80 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| 4.2.1 ผลการศึกษาโครงสร้างของผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ | 80 |
| 4.2.2 ผลการศึกษาโครงสร้างของผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่เคลือบอยู่บนกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ | 82 |
| 4.2.3 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ | 83 |
| 4.3 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ | 85 |
| 4.3.1 ผลการศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ | 85 |
| 4.3.2 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง | 88 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| 4.3.3 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมี ด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 10-300 เคลวิน | 95 |
| 4.3.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสสลับในช่วงความถี่ 10 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ | 102 |
| 4.3.5 ผลการศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ | 107 |
| 5.1 สรุปผลการทดลองของการศึกษาสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ | 111 |
| 5.1.1 ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS และ CuO ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ | 111 |
| 5.1.2 ผลการศึกษาสมบัติไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO | 112 |
| 5.1.3 ผลการศึกษาค่าความจุไฟฟ้า-ความถี่เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-60 องศาเซลเซียส ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO | 113 |
| 5.2 ประโยชน์ที่ได้รับ | 113 |
| 5.3 ปัญหาและข้อเสนอแนะ | 114 |
| เอกสารอ้างอิง | 115 |
| ภาคผนวก ตารางไฟล้มาตรฐานของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ | 119 |
| ประวัติผู้เขียน | 126 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแบบลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|---|------|
| 4.1 ผลการวัดปรากฏการณ์ของฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ | 85 |
| 4.2 ค่ากระแสไฟฟ้าอิมพัลส์ย้อนกลับ ค่าแฟกเตอร์อุณหภูมิต่ำ ค่าความสูงของกำแพงศักย์ ในขณะที่ไบแอสเป็นศูนย์ และค่าความต้านทานอนุกรม ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มิออนิกอิมิตชัน และวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ | 94 |
| 4.3 ค่ากระแสไฟฟ้าอิมพัลส์ย้อนกลับ ค่าแฟกเตอร์อุณหภูมิต่ำ ค่าความสูงของกำแพงศักย์ และค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มิออนิกอิมิตชัน และวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 10 ถึง 300 เคลวิน ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ | 97 |
| 4.4 ค่าความถี่เฉพาะ พลังงานกระตุ้น และตัวแปรต่างๆ ที่คำนวณได้จากสองวิธีของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ | 106 |
| 4.5 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงคือรั้นของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ที่ได้จากการพิกกราฟ ให้เข้ากับฟังก์ชันมัลติเพิลเอกซ์โพเนนเชียล | 109 |
| 4.6 ค่าความหนาแน่นของกักพาหะชนิดต่างๆ ที่ได้จากการวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงคือรั้นของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศความหนาแน่นของกักพาหะชนิดต่างๆ ที่ได้จากการวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงคือรั้นของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบ | 109 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารต้นฉบับที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า |
|--------|------|
| 2.1 | 5 |
| 2.2 | 6 |
| 2.3 | 7 |
| 2.4 | 8 |
| 2.5 | 9 |
| 2.6 | 10 |
| 2.7 | 10 |
| 2.8 | 12 |
| 2.9 | 13 |
| 2.10 | 14 |
| 2.11 | 15 |
| 2.12 | 16 |
| 2.13 | 16 |
| 2.14 | 18 |
| 2.15 | 19 |
| 2.16 | 21 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 2.17 การต่อขั้วเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิค แวนเดอร์เพาว์ | 21 |
| 2.18 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัด โดยตรง | 22 |
| 2.19 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว | 23 |
| 2.20 การวัดค่าความต้านทานแผ่น โดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น | 24 |
| ก. การวัดแบบสองขั้วโดยมีการเลื่อนระยะที่ขั้วหนึ่ง | |
| ข. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับระยะทางที่ได้จากการวัดชนิด เลื่อนขั้วไฟฟ้า | |
| 2.21 แผนภาพแสดงปรากฏการณ์ฮอลล์บนแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิดพี | 26 |
| 2.22 การวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์บนสารตัวอย่างที่เป็นแผ่น บางที่มีรูปทรงใดๆ | 30 |
| 2.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ กับค่ากระแสไฟฟ้า | 31 |
| 2.24 ระดับพลังงานของกึ่งตัวนำชนิดจับอิเล็กตรอน และกึ่งตัวนำชนิดจับโฮล ที่ปรากฏในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งจุดทึบและจุดโปร่ง จะแสดงแทนอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ | 32 |
| 2.25 แสดงกระแสขาขึ้นและกระแสขาลงการสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง | 36 |
| 2.26 ความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลเซชัน กับ ของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงทั้งช่วง กระแสขาขึ้นและช่วงกระแสขาลง | 36 |
| 2.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส โฟโต กับ เวลา เพื่อใช้คำนวณหาความ หนาแน่นของกึ่งตัวนำในช่วงกระแสขาลง | 39 |
| 2.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส โฟโต กับ เวลา เพื่อใช้คำนวณหาความ หนาแน่นของกึ่งตัวนำในช่วงกระแสขาขึ้น | 41 |
| 2.29 ลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดพีและชนิดเอ็น | 43 |
| ก. ขณะที่สารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดยังไม่ได้สัมผัสกันเป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์ | |
| ข. ขณะที่สารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดที่ถูกนำมาทำเป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์ | |
| ค. ขณะที่สารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดถูกนำมาทำเป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์และอยู่ใน | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รวบรวมไว้ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 2.30 ไคโอดของสารกึ่งตัวนำที่มีรอยต่อแบบพี-เอ็นที่เป็นแบบชั้นบันไดที่เป็นฟังก์ชันกับ ระยะทาง | 44 |
| ก. ความเข้มข้นสารเจือ | |
| ข. ความหนาแน่นของพาหะอิสระ | |
| ค. ประจุค้าง | |
| ง. สนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อ | |
| จ. ศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อ | |
| 2.31 โพรไฟล์ของค่าพารามิเตอร์ต่างๆในบริเวณเขตปลอดพาหะ | 49 |
| ก. แสดงความหนาแน่นอะตอมของสารเจือที่มีค่าไม่สม่ำเสมอภายในเขตปลอดพาหะ | |
| ข. ลักษณะของสนามไฟฟ้าในบริเวณเขตปลอดพาหะเมื่อแรงดันไบอัสย้อนกลับมีค่าเปลี่ยนไปเล็กน้อย | |
| 2.32 โครงสร้างของไคโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็นขณะถูกไบอัสไปหน้าด้วยแรงดัน V_a | 51 |
| 2.33 การลดลงของความหนาแน่นของโฮลส่วนเกินในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นของรอยต่อพี-เอ็นของไคโอดยาวภายใต้การฉีดพาหะระดับต่ำด้วยแรงดันไบอัสไปหน้าค่าเท่ากับ V_a | 54 |
| 2.34 กระแสโฮล (เส้นทึบ) กับกระแสอิเล็กตรอน (เส้นประ) ในเนื้อสารด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นซึ่งอยู่นอกรอยต่อพี-เอ็น ซึ่งประมาณว่าเป็นกลางทางไฟฟ้าเนื่องจากประมาณว่าไม่ได้รับผลกระทบจากแรงดันไบอัสไปหน้า V_a | 55 |
| 2.35 ความหนาแน่นของโฮลภายในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นของรอยต่อพี-เอ็นของไคโอด สั้นภายใต้การไบอัสไปหน้า V_a | 57 |
| 2.36 อัตราส่วนของ x_p/x_n เป็นฟังก์ชันกับแรงดันย้อนกลับที่ความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ค่าต่างๆของรอยต่อ $p+ -n$ | 60 |
| 2.37 แหล่งกำเนิดชนิดทั้งสแตน | 62 |
| 2.38 แหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้ระเหยสารด้วยไฟฟ้าแบบต่างๆ | 62 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 3.1 ภาพวาดสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนแผ่นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ | 69 |
| 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส | 72 |
| 3.3 อุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO และ CdS โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส | 72 |
| 3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า - แรงดันไฟฟ้า ที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วง 10 - 300 เคลวิน ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ | 73 |
| 3.5 อุปกรณ์ที่ใช้ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า และอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วง 25 - 60 องศาเซลเซียส ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO | 73 |
| 3.6 วงจรสมมูล R_p กับ C_p และแผนภาพแสดงเฟสของค่า $-X_c$ กับ R ก. วงจรสมมูล R_p กับ C_p ต่อขนานกัน ข. ค่าสัมบูรณ์ของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน | 74 |
| 3.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมบูรณ์ของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ ก. ในกรณีที่มีความจุมีค่าต่ำ ข. ในกรณีที่มีความต้านทานมีค่าต่ำมาก | 75 |
| 3.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมบูรณ์ของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ | 77 |

สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 3.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน กับ ความถี่ และจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน กับ ความถี่ | 77 |
| 3.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน กับ จำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน | 78 |
| 3.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมบูรณ์ของอิมพีแดนซ์ กับ ความถี่ | 78 |
| 4.1 फिल्मบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ | 79 |
| 4.2 फिल्मบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ | 80 |
| 4.3 फिल्मบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ | 80 |
| 4.4 พิกความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ | 81 |
| 4.5 พิกความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ | 81 |
| 4.6 ภาพถ่ายบริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดขนาดของเกรนประมาณ 100 นาโนเมตร | 82 |
| 4.7 ภาพถ่ายบริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดขนาดของเกรนประมาณ 50 นาโนเมตร | 82 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--------|------|
| 4.8 | 83 |
| 4.9 | 83 |
| 4.10 | 84 |
| 4.11 | 84 |
| 4.12 | 86 |
| 4.13 | 86 |
| 4.14 | 89 |
| 4.15 | 89 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I$ กับ V เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อ วิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-CdS/p-CuO}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการ ระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ | 90 |
| 4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $dV/d(\ln I)$ กับ I เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของ สิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-CdS/p-CuO}$ ซึ่ง เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ | 93 |
| 4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $H(I)$ กับ I เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของ สิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-CdS/p-CuO}$ ซึ่ง เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ | 94 |
| 4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่ อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 10-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-CdS/p-CuO}$ ซึ่งเตรียม โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบ สุญญากาศ | 96 |
| 4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแฟกเตอร์อุดมคติกับอุณหภูมิที่คำนวณได้จาก กลไกเทอร์มิออนิกอิมิตชันและวิธีของชวงที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง $dV/d(\ln I)$ กับ T เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 10-300 เคลวิน ของ สิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-CdS/p-CuO}$ ซึ่ง เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมี ด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ | 99 |
| 4.21 การหาค่า E_{00} โดยการพิตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแฟกเตอร์อุดมคติกับ อุณหภูมิ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 10-300 เคลวิน ของ สิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-CdS/p-CuO}$ ซึ่ง เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมี ด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ | 99 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 4.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูงกำแพงศักย์กับอุณหภูมิที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิตชันและวิธีของชวงเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 10-300 เคลวิน ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ | 100 |
| 4.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมกับอุณหภูมิที่ได้จากวิธีของ ชวงเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 10-300 เคลวิน ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมี ด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ | 100 |
| 4.24 กราฟอาร์เรเน็ยสของ $n[\ln I_s]$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 10-300 เคลวิน ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ | 101 |
| 4.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับความถี่ที่อุณหภูมิในช่วง 25 ถึง 60 องศาเซลเซียส ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ | 102 |
| 4.26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้ากับความถี่ที่อุณหภูมิในช่วง 25 ถึง 60 องศาเซลเซียส ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ | 102 |
| 4.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ที่อุณหภูมิในช่วง 25 ถึง 60 องศาเซลเซียส ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ | 103 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 4.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าจินตภาพของอิมพีแดนซ์กับความถี่ที่อุณหภูมิในช่วง 25 ถึง 60 องศาเซลเซียส ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ | 103 |
| 4.29 กราฟความสัมพันธ์ของค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนที่อุณหภูมิในช่วง 25 ถึง 60 องศาเซลเซียส ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ | 104 |
| 4.30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $-dC/d\ln f$ กับ f เพื่อหาค่า ω_0 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ | 104 |
| 4.31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(\omega_0/T^2)$ กับ $(1000/T)$ ที่ได้จากการหาค่า ω_0 ของกราฟความสัมพันธ์ของ $-dC/d\ln f$ กับความถี่เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 60 องศาเซลเซียส ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ | 105 |
| 4.32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(\omega_0/T^2)$ กับ $(1000/T)$ ที่ได้จากการหาค่า ω_0 ของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 60 องศาเซลเซียส ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ | 105 |
| 4.33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของสถานะผิวเชื่อมต่อกับช่วงอุณหภูมิในช่วง 25 ถึง 60 องศาเซลเซียสของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ | 106 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 4.34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโฟโตกับเวลาภายใต้แรงดันไบอัส -0.5 กับ 0.3 โวลต์ ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ | 107 |
| 4.35 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสออร์มัลไลซ์ขาขึ้นกับเวลา ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ | 108 |
| 4.36 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสออร์มัลไลซ์ขาลงกับเวลาของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ | 108 |
| 4.37 แผนภาพแถบพลังงานของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO | 110 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

เมื่อจำนวนประชากรมนุษย์เพิ่มมากขึ้น เป็นเหตุให้ในปัจจุบันมีแนวโน้มของความต้องการใช้พลังงานเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่เดียวกันแหล่งพลังงานบนโลกก็มีอยู่อย่างจำกัด จึงจำเป็นต้องมีการนำพลังงานทดแทนในรูปแบบต่างๆมาใช้มากขึ้นเพื่อช่วยแก้ไขปัญหาด้านพลังงานในอนาคต พลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานรูปแบบหนึ่งที่น่าสนใจเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานธรรมชาติที่สะอาดพบอยู่ทั่วไปและมีอยู่อย่างไม่จำกัด นอกจากนี้การนำแสงอาทิตย์มาใช้โดยสร้างสิ่งประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์นั้นก็ไม่สร้างมลภาวะเป็นพิษใดๆขณะใช้งาน เช่น มลพิษทางอากาศ ฝนกรด สภาวะเรือนกระจก และปัญหาโลกร้อน จึงไม่ทำลายและเป็นมิตรกับสภาพแวดล้อม ไม่ส่งผลกระทบต่อทั้งระบบนิเวศทางธรรมชาติและความเป็นอยู่ของมนุษย์ ต่างจากแหล่งพลังงานชนิดอื่นๆ เช่น พลังงานจากฟอสซิลอันได้แก่ ถ่านหิน น้ำมัน และถ่านหินที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน แต่อย่างไรก็ตามการจะทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีการใช้งานแพร่หลายมากยิ่งขึ้นนั้น เราจำเป็นต้องพัฒนาให้เซลล์แสงอาทิตย์ให้มีต้นทุนการผลิตลดลง และมีประสิทธิภาพสูงขึ้น

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำซึ่งสามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรงและไฟฟ้าที่ได้นั้นจะเป็นไฟฟ้ากระแสตรงโดยการนำสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิกอน ซึ่งมีราคาถูกที่สุดและมีมากที่สุดบนพื้นโลกมาผ่านกระบวนการทางวิทยาศาสตร์เพื่อผลิตให้เป็นแผ่นบางบริสุทธิ์ และทันทีที่แสงตกกระทบบนแผ่นเซลล์รังสีของแสงที่มีอนุภาคของพลังงานประกอบที่เรียกว่า โฟตอน จะถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำจนมีพลังงานมากพอที่จะกระโดดออกมาจากแรงดึงดูดของอะตอม และเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ดังนั้นเมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ครบวงจรจะทำให้เกิดไฟฟ้ากระแสตรงขึ้น เมื่อพิจารณาลักษณะการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์พบว่า เซลล์แสงอาทิตย์จะมีประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าสูงที่สุดในช่วงเวลากลางวัน ซึ่งสอดคล้องและเหมาะสมในการนำเซลล์แสงอาทิตย์มาใช้ผลิตไฟฟ้าเพื่อแก้ไขปัญหาด้านการขาดแคลนพลังงานไฟฟ้าในช่วงเวลากลางวัน งานวิจัยและไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้พัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ของหัวต่อพี-เอ็นของสารกึ่งตัวนำซิลิกอน เริ่มขึ้นในปี พ.ศ. 2497 หลังจาก

นั้่งงานวิจัยก็แผ่ขยายไปสู่สารกึ่งตัวนำในกลุ่ม II-VI และ I-III-VI₂ เช่น CdTe, CdS, CuInSe₂ และ CuInGaSe₂ เป็นต้น ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์ของสารกึ่งตัวนำในกลุ่ม II-VI ชนิดแรกคือเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดห้วต่ออวิวิพันธุ์ (heterojunction solar cell) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu₂S/CdS ได้รับการพัฒนาขึ้นมาในเวลาใกล้เคียงกับเซลล์แสงอาทิตย์ของสารกึ่งตัวนำ Si ซึ่งปัจจุบันเซลล์แสงอาทิตย์ในท้องตลาดประคิษฐ์จากผลึกพหุพันธุ์ (polycrystalline) และอะมอร์ฟัส (amorphous) ของซิลิกอนเกือบทั้งหมด

ไม่นานมานี้ นักวิจัยได้มีการสนใจถึงคุณสมบัติของโลหะออกไซด์ที่จะนำมาพัฒนาให้เกิดประโยชน์ยิ่งขึ้น โดยเฉพาะการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าได้รับการศึกษาอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคิวปริก (cupric oxide : CuO) ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำในกลุ่ม II-VI ที่มีโครงสร้างผลึกแบบ โมโนคลินิค (monoclinic) มีโครงสร้างแถบพลังงานเป็นแบบตรงและช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) เท่ากับ 1.2 อิเล็กตรอน โวลต์ สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นอินฟราเรด และส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็น จึงมีประโยชน์ในการนำมาสร้างชั้นหน้าต่างของเซลล์แสงอาทิตย์ การสังเคราะห์โลหะและโลหะออกไซด์ให้มีโครงสร้างในระดับไมโครเมตร หรือ ในระดับนาโนเมตร สามารถสังเคราะห์ได้หลากหลายเทคนิคทั้งเทคนิคทางเคมี และเทคนิคทางฟิสิกส์ ยกตัวอย่างเทคนิคการสังเคราะห์ภายในห้องปฏิบัติการวิจัย เช่น เทคนิคการทำให้ระเหยกลายเป็นไอ เทคนิคการสเป็คเตอร์ เทคนิคออกซิเดชัน เทคนิคการระเหยด้วยแสงเลเซอร์ และเทคนิคการใช้ปฏิกิริยาทางเคมี เป็นต้น เซลล์แสงอาทิตย์ของสารกึ่งตัวนำออกไซด์เป็นทางเลือกใหม่ที่สามารนำมาใช้แทนสารกึ่งตัวนำดั้งเดิม CIGS และ Si มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นจากสารกึ่งตัวนำดั้งเดิม CIGS และ Si ประมาณ 1.28 เปอร์เซ็นต์ จากรายงานการวิจัยการศึกษาสมบัติของรอยต่ออวิวิพันธุ์ของเซลล์แสงอาทิตย์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu₂O/ZnO ที่ให้ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์สูงถึง 30 เปอร์เซ็นต์ ช่องว่างแถบพลังงาน 1.2-1.4 อิเล็กตรอน โวลต์

ในโครงการพิเศษนี้เบื้องต้นได้ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ จากนั้นจึงทำการศึกษาสมบัติพื้นฐานต่างๆ ของฟิล์มบางที่เตรียมได้ ขั้นตอนถัดไปคือการประคิษฐ์รอยต่ออวิวิพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuO โดยการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ จากนั้นจึง

เอกสารทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสตรง โดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับการค่า

ไม่ว่ากรแรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 10-300 เคลวิน อีกทั้งยังได้ศึกษาสมบัติทาง

ไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันต่ำ โดยการวัดอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนที่อุณหภูมิสูงในช่วง 25-60 องศา

เซตเซียง จากผลการทดลองสามารถนำมาเขียน โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuO ได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาวิธีการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS และ CuO โดยการเคลือบฟิล์มบางของ สารกึ่งตัวนำ CdS และ CuO ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกใสโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ
- 1.2.2 ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ และศึกษาลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบางและขนาดของเกรนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
- 1.2.3 ศึกษาสมบัติทางแสงและสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางโดยการวัดสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง และวัดความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางด้วยวิธีสองขั้ว
- 1.2.4 ศึกษาสมบัติพื้นฐานทางฟิสิกส์ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบาง CdS/CuO และศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสตรง และกระแสสลับแรงดันต่ำที่อุณหภูมิในช่วง 10 ถึง 300 องศาเซลเซียส

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

โครงการพิเศษนี้เป็นการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS และ CuO ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกใส ด้วยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และนำฟิล์มบางที่เราเตรียมได้ไปศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์พื้นฐานต่างๆ ได้แก่ โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค ลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบาง สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงและสมบัติทางไฟฟ้า เป็นต้น ทำการประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuO โดยการระเหยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ให้เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO จากนั้นจึงทำการศึกษาลักษณะเฉพาะของกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า ในช่วงอุณหภูมิ 10 ถึง 300 เคลวิน และในขั้นตอนสุดท้ายจะเป็นการศึกษาอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนของรอยต่อวิวิธพันธุ์ในช่วงความถี่ 10 กิโลเฮิร์ต ถึง 2 เมกะเฮิร์ต และอุณหภูมิในช่วง 25 ถึง 60 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ขั้นตอนการดำเนินการ

- 1.4.1 ค้นคว้าและศึกษาข้อมูลต่างๆตลอดจนทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการระเหยสารเคมีในระบบสุญญากาศ พร้อมทั้งจัดหาวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ทำงานพิเศษในครั้งนี
- 1.4.2 ทำการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ
- 1.4.3 ศึกษาลักษณะของผิวหน้าของฟิล์มบางและขนาดของเกรนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราด (SEM)
- 1.4.4 ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางที่เตรียมได้ โดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์
- 1.4.5 ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางที่เตรียมไว้โดยวิธีการวัดความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางด้วยวิธีสองขั้ว
- 1.4.6 วัดความต้านทานไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิเพื่อหาพลังงานกระตุ้น (activation energy)
- 1.4.7 ทำการประดิษฐ์รอยต่ออวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuO และทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสตรง และไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันต่ำที่อุณหภูมิในช่วง 10-300 เคลวิน และ 25-60 องศาเซลเซียส
- 1.4.8 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ทำให้ทราบถึงหลักการ และวิธีการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS และ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ
- 1.5.2 ทำให้ทราบถึงกระบวนการประดิษฐ์รอยต่ออวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuO
- 1.5.3 ทำให้เข้าใจถึงกลไกการนำกระแสของรอยต่ออวิวิธพันธุ์ที่มีสถานะผิวเชื่อมต่อเข้ามา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

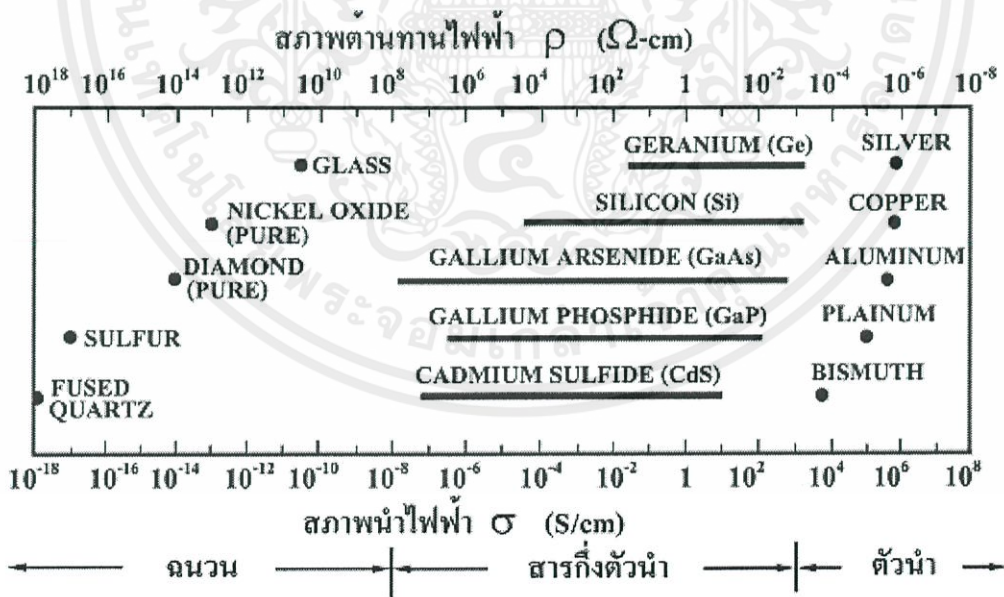
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สมบัติทางฟิสิกส์พื้นฐานของผลึกนั้นขึ้นกับลักษณะของ โครงสร้างผลึก และความไม่สมมาตรของผลึก การวัดสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆ ก็จะต้องคำนึงถึงสมบัติพื้นฐานของผลึกด้วยเพื่อให้ได้ผลการวัดที่ถูกต้อง ในบทนี้จึงจะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องต่างๆ เทคนิคการเตรียมผลึกของฟิล์มบางและเทคนิคการวัดสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆต่อไป

2.1 วัสดุของแข็งสารกึ่งตัวนำ (งามนิตย์, 2530; งามนิตย์, 2551; จูตินัย, 2530; จูตินัย, 2545)

วัสดุในสถานะของแข็งสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิดคือ ฉนวน สารกึ่งตัวนำ และตัวนำ ดังรูปที่ 2.1 แสดงสภาพนำไฟฟ้าของวัสดุที่สำคัญในแต่ละชนิด วัสดุที่เป็นฉนวนเช่น ผลึกควอตซ์ (fused quartz) และกระจกสไลด์ (slide glass) ที่เป็นอะมอร์ฟัส มีสภาพนำไฟฟ้าต่ำในช่วง 10^{-18} - 10^{-8} ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ส่วนวัสดุที่เป็นตัวนำเช่นอะลูมิเนียมและเงิน มีสภาพนำไฟฟ้าสูงในช่วง 10^4 - 10^6 ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ส่วนวัสดุที่เป็นสารกึ่งตัวนำจะตอบสนองต่ออุณหภูมิ การฉายแสง สนามแม่เหล็ก ซึ่งสมบัติดังกล่าวมีความสำคัญกับการนำไปประยุกต์ใช้ในงานอิเล็กทรอนิกส์



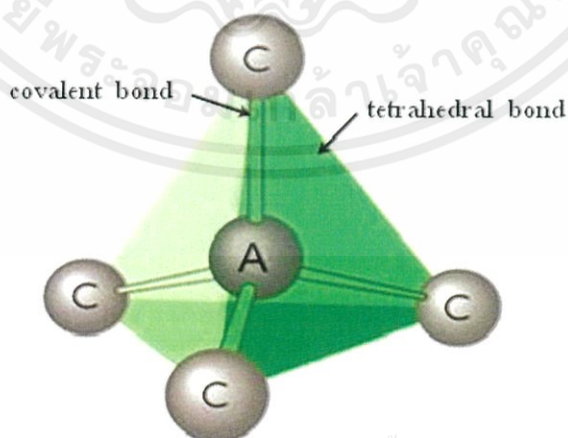
รูปที่ 2.1 สภาพนำไฟฟ้าและสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารฉนวน สารกึ่งตัวนำ และสารตัวนำ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 โครงสร้างของผลึก (งามนิตย์,2530; จูตินัย,2546; งามนิตย์,2545; จูตินัย,2550; จูตินัย, 2552; จูตินัย,2556; Kittel,2005; Runyan, 1975; สุกฤษฎ์,2547; สมเกียรติ,2542)

สารกึ่งตัวนำแต่ละชนิดจะมีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับการจัดเรียงตัวของอะตอมที่อยู่ภายในโครงผลึก การที่มีโครงผลึกที่แตกต่างกันนี้ทำให้สารกึ่งตัวนำมีสมบัติทางฟิสิกส์แตกต่างกันไปด้วย เช่น สมบัติการทางไฟฟ้า สมบัติทางแสง เป็นต้น

2.2.1 โครงสร้างผลึกของสารประกอบที่เกิดจากอะตอมของธาตุกลุ่ม II และกลุ่ม VI

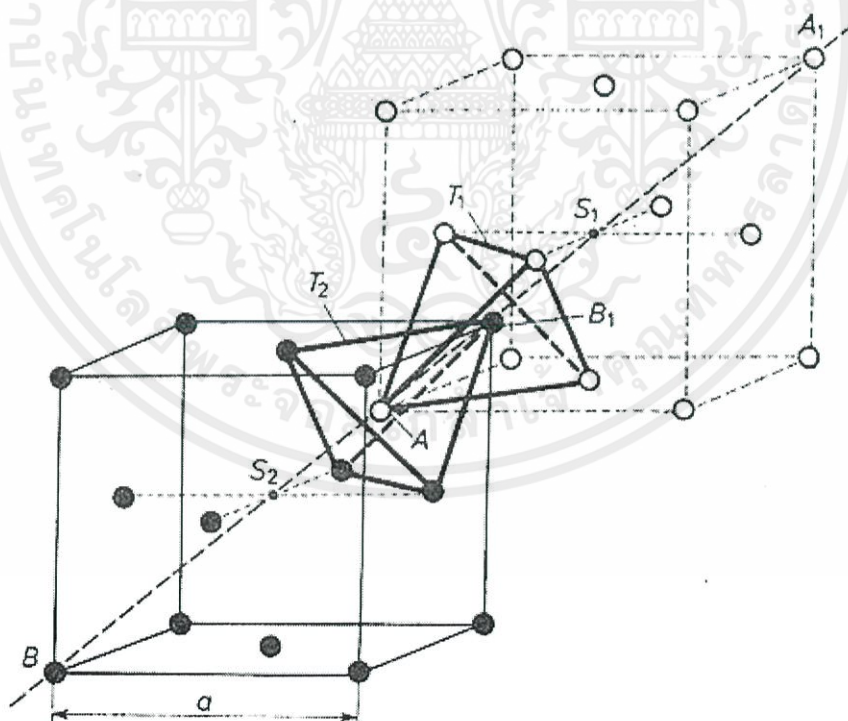
โครงผลึกคือตำแหน่งที่เป็นที่อยู่ของเบสิส (basis) ในระบบ 3 มิติ ส่วนเบสิสคืออะตอมหรือกลุ่มของอะตอมที่อยู่ภายในโครงผลึก ส่วนโครงสร้างผลึกของสารประกอบที่เกิดจากอะตอมของธาตุกลุ่ม II และกลุ่ม VI เกิดจากการสร้างพันธะเคมีระหว่างอะตอมของธาตุกลุ่ม II (อะตอม A) และกลุ่ม VI (อะตอม C) ซึ่งมีอิเล็กตรอนวาเลนซ์ต่ออะตอมเท่ากับ 4 ในโครงผลึกแต่ละอะตอม A หรืออะตอมของธาตุ C จะมีอะตอมของธาตุ C หรืออะตอมของธาตุ A ที่อยู่ใกล้เคียงที่สุดล้อมรอบอยู่ 4 อะตอม ซึ่งมีการสร้างพันธะเคมีระหว่างอะตอมเป็นแบบพันธะโควาเลนต์ (covalent bond) และมีพันธะเคมีของโมเลกุลเป็นแบบพันธะสี่หน้าหรือพันธะเตตระฮีดรัล (tetrahedral bond) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 จากลักษณะการจัดเรียงอะตอมดังกล่าวทำให้สามารถแบ่งโครงสร้างผลึกได้ 2 แบบคือ โครงสร้างแบบซิงค์เบลนด์ (zinc blende structure) และโครงสร้างแบบเวอร์ทไชท์ (wurtzite structure) ซึ่งจากการศึกษาพบว่าโครงสร้างผลึกของแคดเมียมเซลิไนด์ (CdSe) จะมีลักษณะ 2 แบบคือ เป็นคิวบิก (cubic structure) หรือแบบซิงค์เบลนด์ (zinc blende structure) และโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล หรือแบบเวอร์ทไชท์ (hexagonal structure or wurtzite)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
รูปที่ 2.2 พันธะสี่หน้าหรือพันธะเตตระฮีดรัล

2.2.1.1 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์

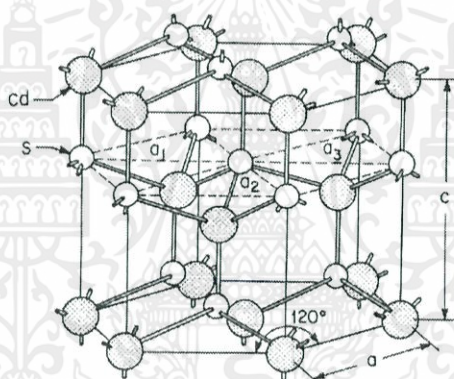
โครงสร้างผลึกแบบนี้มักพบในสารกึ่งตัวนำที่ประกอบด้วยอะตอมของธาตุสองชนิด หรือเรียกว่าเป็นสารประกอบกึ่งตัวนำเชิงคู่ (binary compound semiconductor) ได้แก่ สารประกอบของสารกึ่งตัวนำในกลุ่ม III-V เช่น GaAs และ InSb และสารประกอบของสารกึ่งตัวนำในกลุ่ม II-VI เช่น ZnSe, ZnS เป็นต้น โครงสร้างผลึกแบบนี้มีลักษณะคล้ายโครงสร้างผลึกแบบเพชร คือ อาจพิจารณาว่าเป็นโครงสร้างผลึกแบบเฟซเซนเตอร์คิวบิกสอง โครงซ้อนกันอยู่แต่โครงหนึ่งเป็นธาตุหมู่ II (หรือ III) ส่วนอีกโครงผลึกเป็นธาตุหมู่ VI (หรือ V) สำหรับสารประกอบของสารกึ่งตัวนำเชิงคู่ II-VI (หรือ III-V) ในหนึ่งหน่วยเซลล์ประกอบด้วยอะตอมสองชนิดแต่ละชนิดมีสี่อะตอม เช่นในสารกึ่งตัวนำ CdTe อะตอมของธาตุ Cd จะอยู่ที่ตำแหน่ง $(0,0,0)$, $(0,1/2,1/2)$, $(1/2,0,1/2)$ และ $(1/2,1/2,0)$ ส่วนตำแหน่งของอะตอมของธาตุ Te จะอยู่ที่ $(1/4,1/4,1/4)$, $(1/4,3/4,3/4)$, $(3/4,1/4,3/4)$ และ $(3/4,3/4,1/4)$ สารกึ่งตัวนำที่มีโครงสร้างผลึกแบบนี้ ได้แก่ ZnS, CuCl, AgI, CuF, SiC และ CdS เป็นต้น ซึ่งเป็นสารประกอบกึ่งตัวนำที่มีความสำคัญ เหมาะสมสำหรับนำมาประยุกต์เพื่อประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เชิงแสง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2.3 โครงสร้างผลึกแบบคิวบิกหรือซิงค์เบลนด์ของสารกึ่งตัวนำ CdS
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1.2 โครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไฮท์

โครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไฮท์จัดอยู่ในระบบโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล ซึ่งเกิดจากการนำโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลที่มีอะตอมของธาตุต่างๆ สองชนิดวางซ้อนเหลื่อมกันเป็นระยะ $5/8$ ตามแนวแกน c (c -axis) หนึ่งหน่วยเซลล์จะมี 8 อะตอม มีอะตอมเพื่อนบ้านอยู่ 4 อะตอม มีพันธะเคมีของโมเลกุลเป็นแบบพันธะเตตระฮีดรัล และมีพันธะเคมีระหว่างอะตอมเป็นแบบพันธะโควาเลนต์ ดังนั้นจึงมีการจัดเรียงระยะนาบของอะตอมคล้ายกับโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ แต่จะมีความแตกต่างกัน คือ ในโครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไฮท์จะมีการจัดเรียงระยะนาบของพันธะเตตระฮีดรัลเป็นแบบ ABAB... หรือ 0101... ส่วนในโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์จะมีการจัดเรียงระยะนาบของพันธะเตตระฮีดรัลแบบ ABCABC... หรือ 012012... สารที่มีโครงสร้างผลึกแบบนี้ได้แก่ CdS และ ZnS เป็นต้น



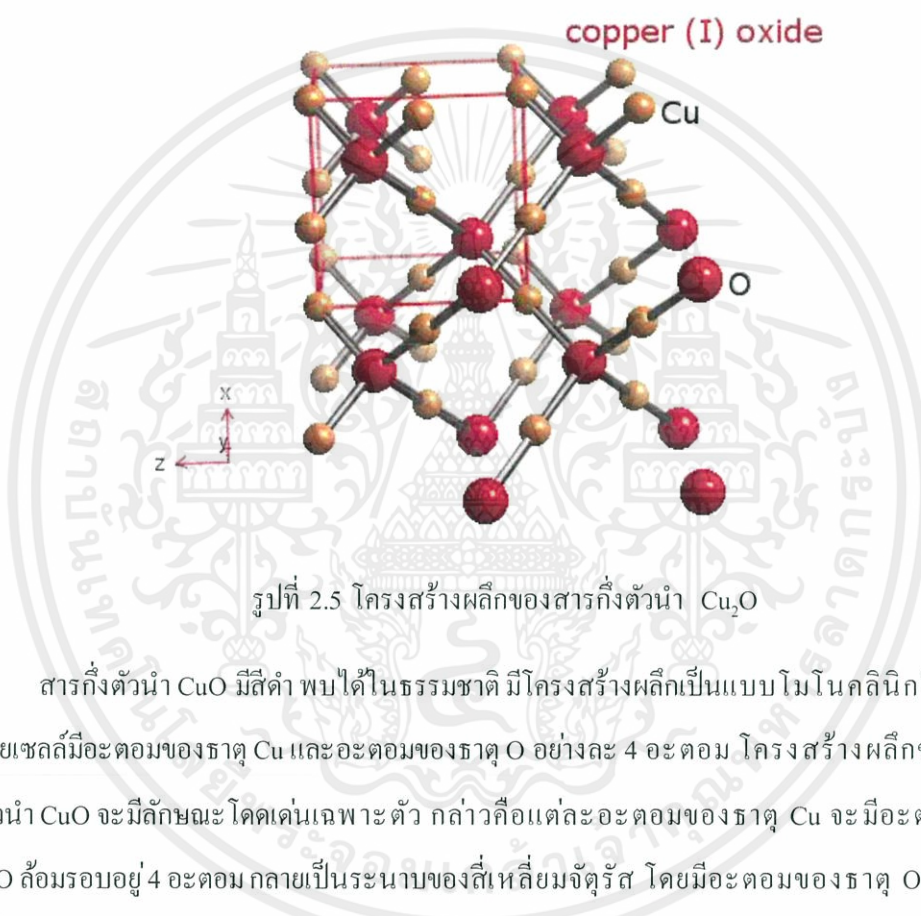
รูปที่ 2.4 โครงสร้างผลึกแบบเวอร์ทไฮท์ของสารกึ่งตัวนำ CdS

2.2.1.3 โครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O และ CuO (ฐิตินัย, 2556; Bugarinovic et al., 2011)

หนึ่งหน่วยเซลล์ของ Cu_2O จัดอยู่ในระบบคิวบิกซึ่งประกอบขึ้นจากซับแลตทิซของบอดีเซนเตอร์คิวบิก (bcc) ของอะตอมออกซิเจนกับซับแลตทิซเฟซเซนเตอร์คิวบิก (fcc) ของอะตอมของธาตุ Cu ซับแลตทิซทั้งสองจะอยู่ซ้อนกัน โดยที่ซับแลตทิซที่สองจะอยู่เยื้องไปในแนวทแยงมุมของซับแลตทิซแรกเป็นระยะ $1/4$ ของความยาวเส้นทแยงมุม ค่าที่โครงสร้างของหนึ่งหน่วยเซลล์มีค่า

เท่ากับ 4.26964 อังสตรอม ในหนึ่งหน่วยเซลล์จะมีอะตอมของธาตุ Cu จำนวน 4 อะตอม และอะตอมของธาตุ O จำนวน 2 อะตอม รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O แต่ละอะตอมของธาตุ Cu จะสร้างพันธะกับอะตอมของธาตุ O จำนวน 2 อะตอม เป็นแนวเส้นตรงแต่ละ

อะตอมของธาตุ O จะสร้างพันธะกับอะตอมของธาตุ Cu จำนวน 4 อะตอม สารประกอบสารกึ่งตัวนำ Cu_2O มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 143.09 กรัมต่อโมล มีความหนาแน่น 6.0 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จุดหลอมเหลวและจุดเดือดอยู่ที่อุณหภูมิ 1,408 และ 2,073 เคลวิน ตามลำดับ ไม่ละลายในน้ำ แต่ละลายได้ในกรดเข้มข้น สารกึ่งตัวนำ Cu_2O มีสีแดง พบได้ในธรรมชาติ มักใช้ทำสีทาบ้าน และสารกำจัดเชื้อราสารกึ่งตัวนำ Cu_2O เคยนำไปทำเป็นไดโอดก่อนที่จะถูกแทนที่ด้วยสารกึ่งตัวนำ Si

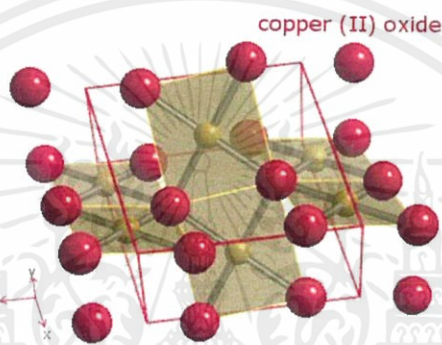


รูปที่ 2.5 โครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O

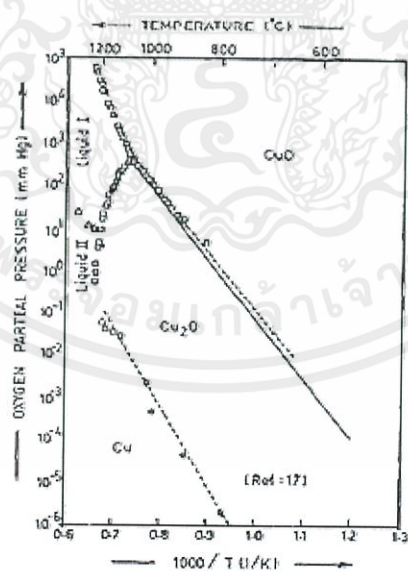
สารกึ่งตัวนำ Cu_2O มีสีแดง พบได้ในธรรมชาติ มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบโมโนคลินิกในหนึ่งหน่วยเซลล์มีอะตอมของธาตุ Cu และอะตอมของธาตุ O อย่างละ 4 อะตอม โครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O จะมีลักษณะโดดเด่นเฉพาะตัว กล่าวคือแต่ละอะตอมของธาตุ Cu จะมีอะตอมของธาตุ O ล้อมรอบอยู่ 4 อะตอม กลายเป็นระนาบของสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยมีอะตอมของธาตุ O อยู่ที่มุมของสี่เหลี่ยมจัตุรัส และแต่ละอะตอมของธาตุ O จะมีอะตอมของธาตุ Cu ล้อมรอบอยู่ 4 อะตอม ดังแสดงในรูปที่ 2.6 มวลโมเลกุลเท่ากับ 79.54 กรัมต่อโมล อุณหภูมิของจุดหลอมเหลวเท่ากับ 1,603 เคลวิน มีความเสถียรสูงแต่ขึ้นได้ง่ายที่อุณหภูมิห้อง ละลายได้อย่างช้าๆ ในสารละลายแอมโมเนีย แต่จะละลายได้อย่างรวดเร็วในสารละลายแอมโมเนียคาร์บอนेट อีกทั้งยังละลายได้ใน

กรดฟอร์มิก (formic acid) และละลายได้ในกรดอะซิติกเดือด เป็นต้น สารประกอบ CuO เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานับ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า สามารถสลายตัวเป็น สารประกอบ Cu_2O ได้ที่อุณหภูมิ 1,303 เคลวิน ในอากาศความดันปกติ ส่วนไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ ปฏิกริยารีดักชันนี้จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิลดลงเมื่ออยู่ในสุญญากาศความดันต่ำ

ก๊าซไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์สามารถรีดิวซ์สารประกอบ CuO ให้กลายเป็นโลหะ Cu ที่อุณหภูมิ 523 เคลวิน และสามารถรีดิวซ์ให้กลายเป็นสารประกอบ Cu_2O ที่อุณหภูมิ 423 เคลวิน ส่วนก๊าซแอมโมเนียสามารถรีดิวซ์สารประกอบ CuO ให้กลายเป็นสารประกอบ Cu_2O ที่อุณหภูมิ 698 - 973 เคลวิน สารประกอบ CuO มีสีดำ ใช้เป็นส่วนผสมทำเป็นไฟเบอร์และเซรามิก ตัวตรวจรู้แก๊สชนิดต่างๆและฟลักซ์สำหรับใช้เชื่อมโลหะ ใช้กำจัดเชื้อรา และเป็นส่วนผสมสำคัญในสีทาเรือเพื่อป้องกันตะไคร่น้ำ สารประกอบ CuO มีการจัดเรียงอิเล็กตรอนเป็นแบบ $3d^9$ ดังนั้นจึงมีสมบัติเป็นสารแม่เหล็กแอนติเฟอร์โรที่อุณหภูมิต่ำ (Korzavyi and Johansson, 2011)



รูปที่ 2.6 โครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O



รูปที่ 2.7 แผนภาพเฟสของสารประกอบ CuO แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันย่อย และอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับ ในการเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์ในระบบสุญญากาศ เฟสที่เกิดขึ้นได้ คือ Cu, Cu_2O และ CuO

2.2.2 หลักเกณฑ์ในการระบุชื่อระนาบของผลึก (ฐิตินัย,2531; งามนิศย์,2530; Kittel,2005; Runyan,1975; คูสิต,2535; Schroder D.K.,1990; สิทธิชัย,2551; ฐิตินัย,2551)

เนื่องจากสมบัติทางฟิสิกส์ของผลึกขึ้นกับตำแหน่งของทิศทางและระนาบของผลึก ดังนั้นจึงต้องระบุแน่นอนว่ากำลังศึกษาลักษณะส่วนใดของผลึกอยู่ การระบุลักษณะดังกล่าวจะบอกถึงตำแหน่งของทิศทางและระนาบของผลึกที่กำลังศึกษาอยู่นั้น มีเกณฑ์พื้นฐานดังนี้

2.2.2.1 การระบุตำแหน่ง

ในกรณีทั่วไปจะเขียนเป็น (x,y,z) โดยสังเกตเครื่องหมาย “;” ซึ่งคั่นอยู่ระหว่างค่าแต่ละค่า ตัวอย่างเช่น จุด $(1,2,3)$ หมายความว่า เป็นตำแหน่งอยู่ที่พิกัด $x=1, y=2, z=3$

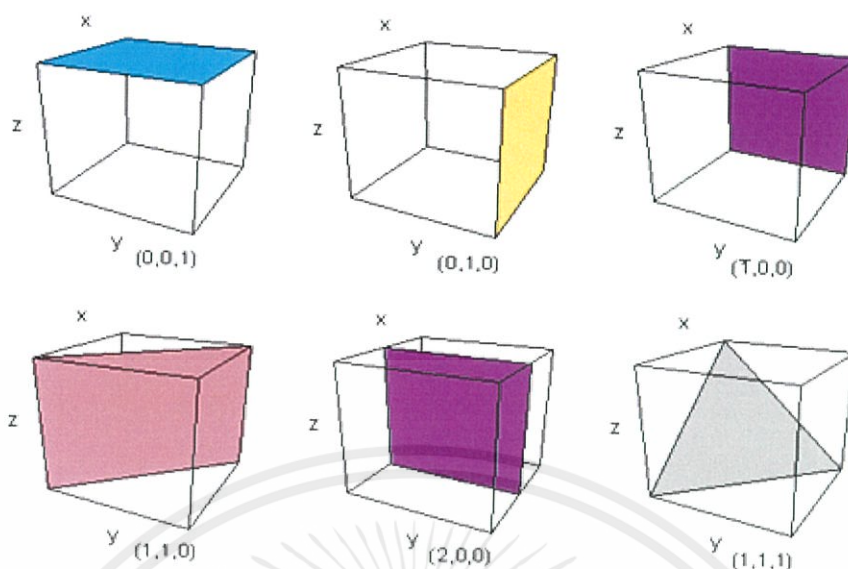
2.2.2.2 การระบุทิศทาง

ในกรณีทั่วไปจะเขียนเป็น $[u \ v \ w]$ โดยสังเกตว่าใช้วงเล็บสี่เหลี่ยม และไม่มีเครื่องหมาย “;” คั่นอยู่ระหว่างค่าแต่ละค่า ถ้าเป็นทิศทางที่เป็นวงเล็บก็จะใส่เครื่องหมาย “-” หรือ บาร์ (bar) ไว้บนตัวเลขนั้นๆ เช่น ทิศทาง $[\bar{1}2\bar{1}]$ แสดงว่าในแนวแกน z มีค่าเป็นลบ

2.2.2.3 การระบุชื่อระนาบ

การระบุชื่อระนาบ จะใช้อักษร (hkl) โดยให้สังเกตการใช้วงเล็บ และไม่มีเครื่องหมาย “;” คั่นอยู่ระหว่างค่า (hkl) เรียกว่า ดัชนีมิลเลอร์ (Miller indices) ระนาบของผลึกเป็นสิ่งที่สำคัญที่สุดในการศึกษาผลึก เพราะในแต่ละระนาบจะประกอบไปด้วยอะตอมไอออนหรือโมเลกุลเรียงตัวกันอยู่บนระนาบนั้น อาจกล่าวได้ว่าระนาบแต่ละระนาบจะมีความแตกต่างกัน เช่นเดียวกับทิศทาง จุดที่ระนาบหนึ่งๆ ตัดแกนผลึกจะได้อาจมาจากค่าส่วนกลับของดัชนีมิลเลอร์ เช่น ระนาบ (010) จะตัดแกน (x,y,z) ที่จุด $(1/0,1/1,1/0)$ หรือจุด $(\infty,1,\infty)$ นั่นเอง (ระยะอนันต์หมายถึงระนาบนั้นขนานกับแกนนั้นและไปตัดแกนนั้นที่ระยะอนันต์) ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ซึ่งสรุปความสัมพันธ์ระหว่างระนาบต่างๆ กับระยะตัดแกนอ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 การบอกชื่อระนาบต่างๆ ของผลึก

2.3 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (ฐิตินัย,2531;งามนิศย์, 2530; Kittel,2005; Runyan,1975; คูสิต,2535; Schroder D.K.,1990; สิทธิชัย,2551; ฐิตินัย, 2551; ฐิตินัย,2550; ฐิตินัย, งามนิศย์, ณัฐพร,2550; ฐิติกร,2550; เอกชัย,2552)

การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ โดยใช้รังสีเอกซ์ความยาวคลื่นเดี่ยวตกกระทบตัวอย่าง ซึ่งอาจเป็นผลึกเดี่ยวหรือผลึกพหุพันธ์ก็ได้ สารตัวอย่างจะหมุนไปเป็นมุม θ ในขณะที่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ รังสีเอกซ์จะเคลื่อนที่ไปเป็นมุม 2θ เพื่อให้การเลี้ยวเบนสอดคล้องกับกฎของแบรกก์

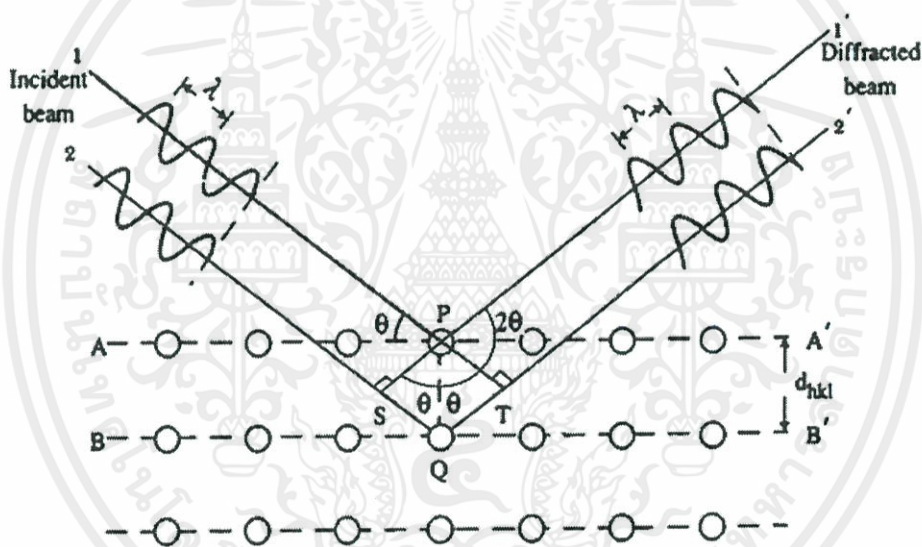
ในปี พ.ศ. 2455 (ค.ศ. 1912) W.H. Bragg และ W.L. Bragg ได้เสนอแนวคิดที่เราสามารถมองได้ว่าผลึกจัดเรียงตัวเป็น ชั้น (layer) หรือระนาบ (plane) ของอะตอมซึ่งสามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบโดยมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน ทั้งนี้ค่าคลื่นที่สะท้อนออกไปจากระนาบต่างๆ ดังกล่าวจะมีความเข้มสูงและแทรกสอดแบบเสริมกัน ถ้าหากความแตกต่างระหว่างทางเดินของคลื่นที่สะท้อนจากระนาบที่อยู่ข้างเคียง (path difference) มีค่าเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นที่ตกกระทบดังสมการ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์
- d_{hkl} คือ ระยะระหว่างระนาบที่ขนานกัน
- θ คือ มุมของรังสีสะท้อนจากระนาบแบรกก์ของรังสีเอกซ์ ซึ่งจะเท่ากับมุมของรังสีตกกระทบ
- n คือ ลำดับที่ของการเลี้ยวเบน มีค่าเป็นเลขจำนวนเต็ม คือ 1, 2, 3,...
- 2θ คือ มุมเลี้ยวเบนที่เป็นมุมระหว่างรังสีตกกระทบทำกับรังสีสะท้อน

ระนาบต่าง ๆ ของผลึกที่ก่อให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ต้องสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ เรียกว่าระนาบแบรกก์ (Bragg plane) และมุมที่รังสีสะท้อนทำกับแนวที่ขนานกับรังสีตกกระทบ เรียกว่ามุมเลี้ยวเบน (diffraction angle) ซึ่งมีค่าเป็นสองเท่าของมุมตกกระทบ (2θ) ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์

2.3.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

ข้อมูลที่ได้จากกราฟรัวการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ดังในรูปที่ 2.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์และมุมเลี้ยวเบน เรียกว่า รูปแบบการเลี้ยวเบน (diffraction pattern) ซึ่งสำหรับแต่ละธาตุหรือสารประกอบต่างชนิดกันก็จะมีรูปแบบการเลี้ยวเบนแตกต่างกันซึ่งสามารถสังเกตได้จากพีค (peak) ของการเลี้ยวเบน จากกราฟรัวการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์สามารถทำการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกได้โดยการคำนวณหาค่าคงที่ของโครงผลึก ขนาดของเกรนและไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ ความเครียดในระดับจุลภาค ได้

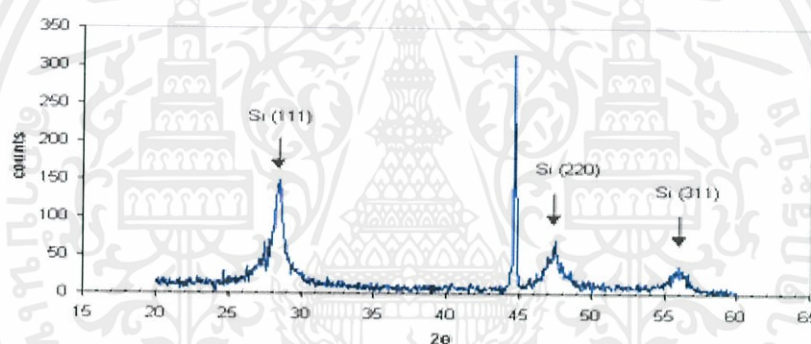
สมการสำหรับหาค่าคงที่ของโครงผลึก (lattice constant) สำหรับโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์สามารถหาได้จากสมการที่ (2.2)

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

และสำหรับโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลหาได้จากสมการที่ (2.3)

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

เมื่อ a, c คือ ค่าคงที่ของโครงผลึก
h, k, l คือ ดัชนีมิลเลอร์ที่ใช้บอกชื่อระนาบของผลึก



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างของสเปกตรัมที่ได้จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

2.3.2 การหาขนาดของเกรน

การหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์สามารถหาโดยเลือกพีคที่มีความเข้มสูงสุด ดังในรูปที่ 2.11 และใช้สมการของเชอร์เรอร์ (Scherrer) กำหนดหาขนาดของเกรนดังนี้

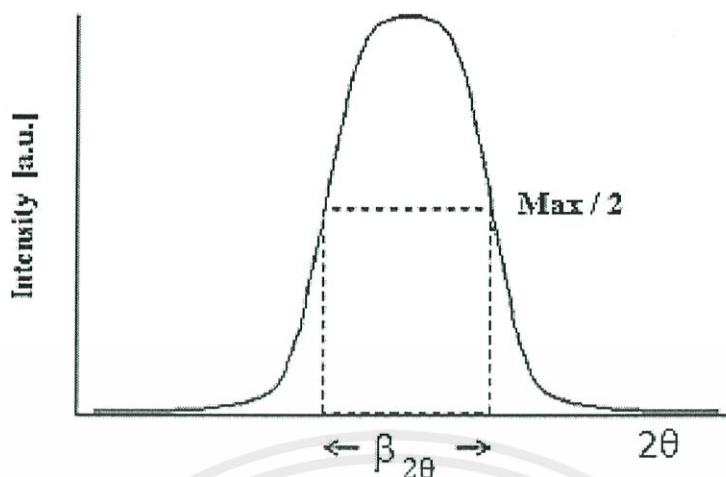
$$D = \frac{k\lambda}{\beta_{2\theta} \cos \theta} \quad (2.4)$$

เมื่อ D คือ ขนาดของเกรน

K คือ ค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับขนาดและรูปร่างของเกรน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกข้อมูลนี้ และต้องอ้างอิงถึงแหล่งที่มาของการนำข้อมูลไปใช้

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



รูปที่ 2.11 ค่า $\beta_{2\theta}$ เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

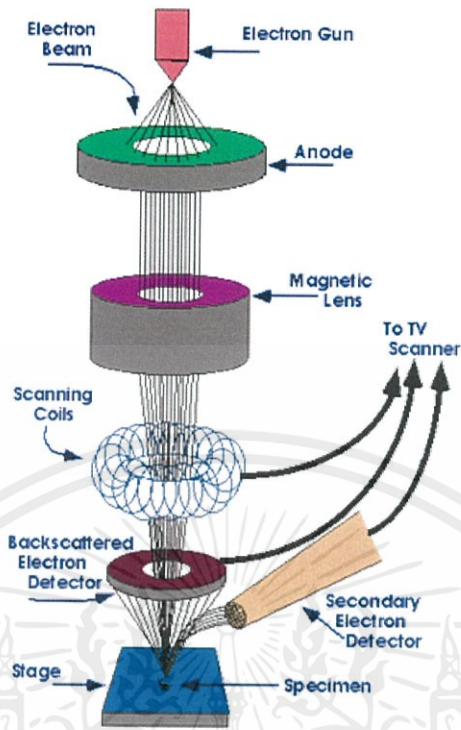
2.4 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

(Sze S.M.,1981;Kittel,2005; จูตินัย,2531; งามนิศย์,2530; คูสิต,2535; Schroder D.K.,1990; สิทธิชัย,2551; จูตินัย, 2550;งามนิศย์, 2553)

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

การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังแสดงในรูปที่ 2.12 เริ่มจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งมีหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนจากไส้หลอด กลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า พร้อมทั้งบังคับกลุ่มอิเล็กตรอนให้มีลักษณะเป็นลำ โดยลำอิเล็กตรอนจะกราดไปบนพื้นผิวของตัวอย่างโดยขดลวดสนามแม่เหล็กบนระนาบเอกซ์-วาย เพื่อทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ และจะถูกตรวจจับโดยเซนเซอร์ เพื่อแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าเพื่อส่งต่อไปให้ระบบสร้างภาพต่อไป

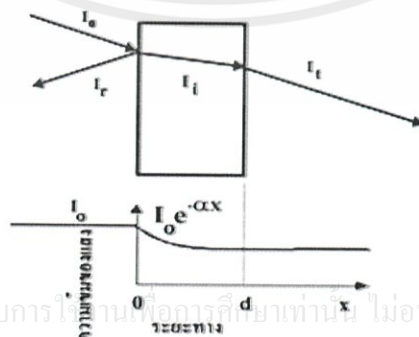
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

2.5 การส่งผ่านแสง (Kittel,2005; งามนิตย์,2530; จูตินัย,2531; งามนิตย์,2545; จูตินัย,2550; จูตินัย,2552; Runyan, 1975; สุกฤษฎ์,2547; สมเกียรติ,2542; จูตินัย,2552; วีรัชย์,2547; คุณิต, 2535)

การศึกษาวีธีวัดสเปกตรัมการสะท้อนและการส่งผ่านแสงนี้จะกล่าวถึงสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงและองค์ประกอบของการวัดสเปกตรัมการส่งผ่านแสง เมื่อแสงเดินทางไปที่กระทบฟิล์มบางแสงบางส่วนจะสะท้อนกลับที่ผิวของฟิล์มบาง บางส่วนของแสงจะเดินทางเข้าไปในแผ่นฟิล์มบางและถูกดูดกลืนดังรูปที่ 2.13



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.13 ภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มบาง

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

สัมประสิทธิ์การสะท้อนของแสงมีค่าเท่ากับ

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

หรือ

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

เพราะฉะนั้น ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางมีค่า

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

เมื่อแสงนี้เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางจะถูกดูดกลืนทำให้ความเข้มแสงภายในแผ่นฟิล์มบางลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลตามระยะทาง ดังนั้นความเข้มแสงที่ส่งผ่านฟิล์มบางมีค่าดังสมการ

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

ถ้าไม่มีการสะท้อนแสงที่ผิวด้านหลังสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของแสงจะมีค่าเท่ากับ

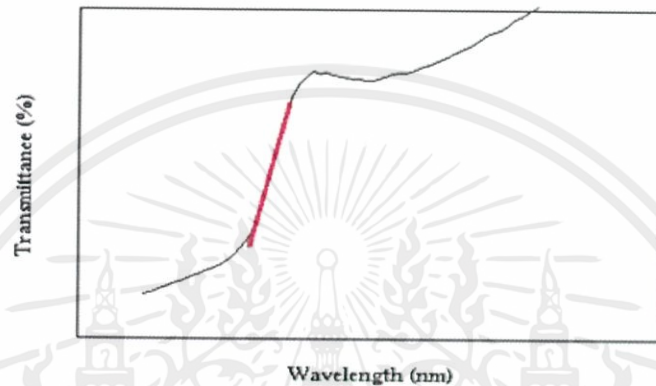
$$T = \frac{I_t}{I_0} = (1-R) e^{-\alpha d} \quad (2.9)$$

2.5.1 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง

การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำเกิดจากการที่อิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากแสงที่มี

พลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าแถบช่องว่างพลังงาน แล้วย้ายสถานะพลังงานจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปสู่แถบนำ สเปกตรัมการดูดกลืนแสงบริเวณที่พลังงานโฟตอนมีค่าน้อยจะมีลักษณะเป็นขอบ แสดงถึง

การลดลงของการดูดกลืนแสงอย่างกะทันหัน ขอบลักษณะนี้เรียกว่าขอบการดูดกลืนแสงหรือขอบการดูดกลืนพื้นฐาน (absorption edge or fundamental edge) แสดงได้ดังรูปที่ 2.14 พลังงานโฟตอนที่ขอบการดูดกลืนแสงมีค่าเท่ากับผลต่างของค่าพลังงานที่วัดจากจุดต่ำสุดของแถบความนำและจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์จุดที่เส้นตรงตัดกับแกนในแนวนอนจะให้ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) วิธีการนี้เป็นการกำหนดค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่นิยมมากที่สุด



รูปที่ 2.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นโดยเส้นทึบจะแสดงขอบการดูดกลืนพื้นฐาน

การหาค่าของช่องว่างแถบพลังงานสามารถพิจารณาจากสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (α) ของสารกึ่งตัวนำจะสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (T) จากรูปที่ 2.14 แสดงภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบจากด้านซ้ายของฟิล์มบาง (I_0) ความเข้มแสงภายในฟิล์มบางจะลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียล และมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงโดยทั่วไป (R) มีค่าน้อยมากจะได้

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

ดังนั้น

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

ที่กล่าวมา เป็นการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงจากสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง โดยไม่คิดถึงการสะท้อนของแสงสำหรับกรณีการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง เนื่องจากการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับค่าช่องว่างแถบพลังงาน ซึ่งมีลักษณะเป็นพาราโบลาช่องว่างแถบพลังงานของแผ่นฟิล์มบางประมาณได้ โดยการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ซึ่งจะถูกลดลงเมื่อแสงที่

ตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบางมีค่าพลังงาน โฟตอนสูงกว่าค่าของแถบพลังงาน ต้องห้ามที่ขอบของการ ดูดกลืนค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน จะมีค่าเป็น

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

เมื่อ A คือ ค่าคงที่ และสมการที่ (2.12) ใช้กับสารที่มีสถานะพลังงานแบบตรง

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

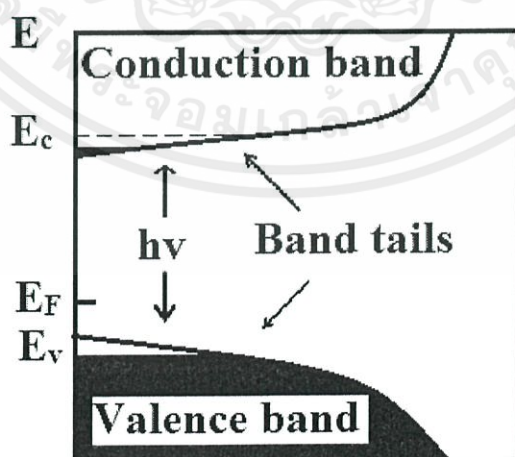
เมื่อ B คือ ค่าคงที่ และสมการที่ (2.13) ใช้กับสารที่มีสถานะพลังงานแบบเฉียง

2.5.2 ส่วนหางของแถบพลังงาน (Kittel,2005; งามนิศย์,2530; จูตินัย,2531; งามนิศย์,2545;

จูตินัย,2550; จูตินัย,2552; Runyan, 1975; สุกฤษฎ์,2547;สมเกียรติ,2542; จูตินัย,2552;

วีรัชย์,2547; คุณิต,2535)

วัสดุประเภทฟิล์มบางมักมีข้อบกพร่องของผลึกจำนวนมากระดับพลังงานของข้อบกพร่องของผลึกเหล่านี้จะมีอันตรกิริยาต่อกัน ส่งผลให้ระดับพลังงานเหล่านี้แผ่ขยายออกโดยจะไม่เป็นระดับพลังงานเฉพาะค่า (discrete level) อีกต่อไปบางครั้งก็แผ่ออกไปจรดขอบบนสุดของแถบวาเลนซ์หรือขอบล่างสุดของแถบนำซึ่งเสมือนกับว่าแถบวาเลนซ์หรือแถบนำนี้มีความหนาแน่นของสถานะทางพลังงาน (energy density of state) ยื่นเข้าไปในช่องว่างแถบพลังงานซึ่งนิยมเรียกส่วนที่ยื่นเข้าไปในแถบช่องว่างแถบพลังงานนี้ว่าส่วนหางของแถบพลังงานหรือส่วนหางของแถบพลังงานของเออร์บัค (band tail หรือ Urbach's tail) ดังแสดงดังรูป 2.15



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น $N(E)$ แสดงให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.15 ส่วนหางของแถบพลังงานซึ่งมีส่วนหางของแถบวาเลนซ์และส่วนหางของแถบนำ

ในเชิงการทดลองส่วนหางของแถบพลังงานสามารถตรวจสอบได้จากการวัดขอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซึ่งเออร์บัค (Urbach) ¹ ได้แสดงให้เห็นว่าขอบการดูดกลืนของผลึกจะเพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โพเนนเชียลกับความสัมพันธ์

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

| | | |
|-------|----------------------|---|
| เมื่อ | α_0 และ E_0 | คือ พารามิเตอร์ของผลึกแต่ละชนิด |
| | k_B | คือ ค่าของที่ของ บอลตซ์มันน์ |
| | T | คือ อุณหภูมิ (เคลวิน) |
| | σ | คือ ความชัน (steepness) ของขอบการดูดกลืนแสง |

2.6 สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ (ฐิตินัย,2549; Kittel,2005; งามนิตย์,2530; ฐิตินัย, 2531; งามนิตย์,2545; ฐิตินัย,2550; ฐิตินัย,2552; Runyan, 1975; สุกฤษฎี,2547; สมเกียรติ, 2542; ฐิตินัย,2552; วีระชัย,2547; คุสิต,2535)

จากทฤษฎีโครงสร้างแถบพลังงานสารกึ่งตัวนำประกอบไปด้วยแถบวาเลนซ์ แถบพลังงานต้องห้ามและแถบนำ สารกึ่งตัวนำมีช่องว่างแถบพลังงานไม่เกิน 3 อิเล็กตรอน โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องอิเล็กตรอนและโฮลจากภายในผลึกจะถูกกระตุ้นด้วยพลังงานจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบนำ จากนั้นจะเกิดโฮลในแถบวาเลนซ์ ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิใดๆ ของสารกึ่งตัวนำจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของพาหะ และความคล่องตัวของพาหะอิสระเหล่านี้

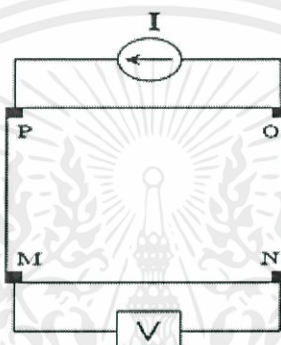
2.6.1 การวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์

วิธีการวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ดังแสดงในรูปที่ 2.16 และ 2.17 เป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับสำหรับการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของชั้นสารตัวอย่างที่เป็นฟิล์มบางที่มีความหนาสม่ำเสมอและมีรูปร่างไม่แน่นอน โดยขั้วสัมผัสจะอยู่บริเวณขอบของชั้นสารตัวอย่าง รอยต่อระหว่างขั้วสัมผัสที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะต้องไม่ขัดขวางการไหลของกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 ตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชิ้นสารตัวอย่างเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์



รูปที่ 2.17 การต่อขั้วเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์

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

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

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

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

เมื่อได้ค่า R_1 และ R_2 มาแล้วสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานแผ่นได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่ (2.17) ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด (2.17) การค้า
 $R_{sh} = f\left(\frac{\pi}{\ln 2}\right)\left(\frac{R_1 + R_2}{2}\right)$ ไม่ว่าจะตีพิมพ์ที่ไหนก็ตาม มิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ f คือ แฟกเตอร์ค่าแก้ของแวนเดอร์เพาว์ (van der Pauw correction factor)

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

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถคำนวณได้ดังนี้

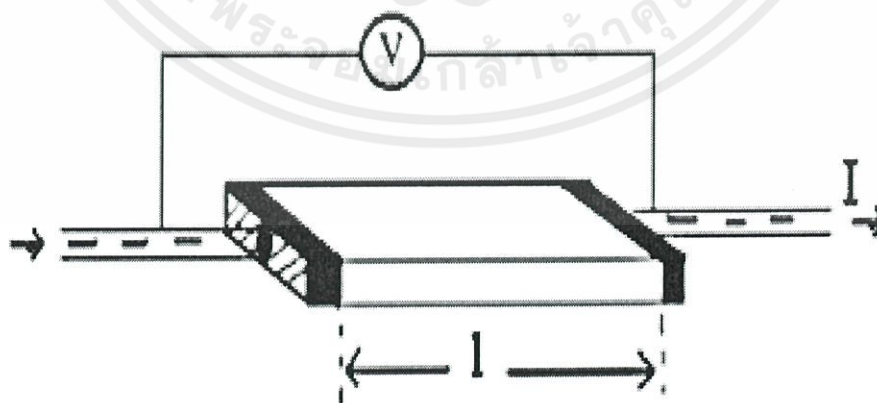
$$\rho = R_{sh} \cdot d \quad (2.19)$$

เมื่อ d คือ ความหนาของชิ้นสารตัวอย่าง

2.6.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง

โดยทั่วไปแล้วการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้ามักจะวัดความต้านทานก่อน ซึ่งเป็นวิธีวัดโดยตรงดังรูปที่ 2.18 นี้หมายถึง วัดค่าความต้านทานรวมของสสารจากนั้นมาหาค่าความยาว และพื้นที่หน้าตัดของสสารนั้น การวัดวิธีนี้จะต้องทำให้สสารที่ต้องการวัดมีรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอน เพื่อที่จะวัดค่าพื้นที่หน้าตัดและความยาวให้ได้แน่นอน เช่น แท่งกลมทรงกระบอก แท่งสี่เหลี่ยม เป็นต้น จากนั้นจึงให้กระแสไฟฟ้าเข้าไปที่ปลายด้านหนึ่ง และให้กระแสไหลออกผ่านสารตัวอย่างที่ปลายอีกด้านหนึ่ง ขณะเดียวกันก็วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จุดปลายทั้งสองนั้นพร้อมๆกัน

จากที่ทราบค่ากระแสและศักย์ไฟฟ้านี้ สามารถนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าได้ดังต่อไปนี้ เมื่อ กำหนด R เป็นความต้านทานรวมจะมีความสัมพันธ์กับความต้านทานจำเพาะและพื้นที่หน้าตัด A บริเวณที่ปล่อยกระแสไหลเข้าไป และ l เป็นระยะทางระหว่างขั้วศักย์ไฟฟ้าที่วัด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2.18 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแบบส่งเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

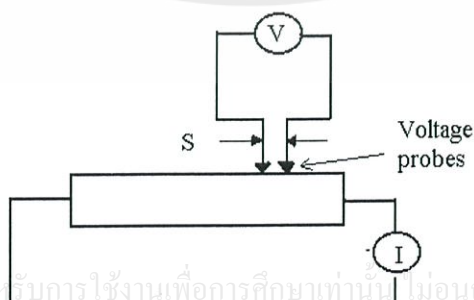
$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.20)$$

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

จะเห็นว่าวิธีนี้เป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็ว แต่ค่าที่ได้เป็นค่าโดยประมาณซึ่งต้องคำนึงถึงองค์ประกอบอื่นๆด้วย ซึ่งความถูกต้องในการวัดโดยวิธีนี้ขึ้นอยู่กับบริเวณผิวสัมผัสที่กระแสไหลเข้าและออกนั้นมีลักษณะเป็น โอห์มมิกที่ดีหรือไม่ ถ้าไม่มีคุณสมบัติโอห์มมิกที่ดีแสดงว่ามีความต้านทานที่ผิวสัมผัสทั้งสองขั้วไฟฟ้าเกิดขึ้นด้วยค่าความต้านทาน R ที่วัดได้จึงเป็นค่าความต้านทานรวมทั้งหมด ดังนั้นค่าความต้านทานจริงของสารกึ่งตัวนำจะน้อยกว่าค่าที่วัดได้แน่นอน ความถูกต้องอีกส่วนหนึ่งขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่างความต้านทานของสารที่ต้องการวัดและความต้านทานภายใน (impedance) ของโวลต์มิเตอร์ที่ใช้วัด หากความต้านทานนี้ใกล้เคียงกับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จะมีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง ซึ่งในทางปฏิบัติจะคำนึงถึงผิวสัมผัสโอห์มมิกมากกว่าความผิดพลาดของโวลต์มิเตอร์ เนื่องจากที่ผิวสัมผัสจะดีหรือไม่ (เป็น โอห์มมิกหรือไม่) นั้นตรวจสอบได้ยากมาก จึงแก้ไขด้วยการทำให้เกิดผิวสัมผัสบริเวณพื้นที่มากขึ้นเพื่อลดความต้านทานที่ผิวสัมผัสลง จากนั้นจึงวัดศักย์ไฟฟ้าด้วยโวลต์มิเตอร์ โดยเลือกโวลต์มิเตอร์ที่มีความต้านทานภายในสูงๆเท่าที่จะหาได้เพื่อลดความผิดพลาด

2.6.3 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว

การวัดด้วยวิธีนี้มีลักษณะใกล้เคียงกับวิธีวัดโดยตรงแตกต่างที่ลักษณะของขั้วไฟฟ้าของการวัดศักย์ไฟฟ้าจะวัดบนสารตัวอย่าง ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.19 วิธีการวัดชนิดนี้เป็นวิธีที่พัฒนาขึ้นจากแบบแรกเพื่อกำจัดศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อหัวท้ายของผิวสัมผัสให้น้อยลงและสามารถตรวจสอบความสกปรกบนพื้นผิวของชิ้นสารตัวอย่างได้ด้วย

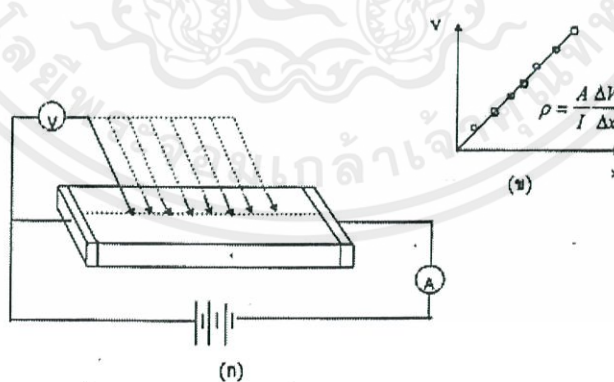


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.19 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว

ข้อจำกัดของการวัดด้วยวิธีนี้คือจะต้อง วัดบนสารตัวอย่างที่มีความหนาสม่ำเสมอ และมีรูปทรงเรขาคณิตแน่นอน โดยพยายามให้กระแสผ่านเข้าไปในสารตัวอย่างมีค่าน้อยที่สุดเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความร้อนภายในสาร เพราะค่าความต่างศักย์ที่วัดได้อาจจะไม่ถูกต้อง อีกทั้งในการวัดทุกครั้งจะต้องใช้โวลต์มิเตอร์ที่มีค่าความต้านทานภายในสูง และจุดที่ต้องการวัดศักย์ไฟฟ้าควรจะต้องอยู่ห่างจากจุดที่ปล่อยกระแสเข้าและออกพอสมควร เพื่อป้องกันสารเจือเข้าไปทำการรวมตัวกันระหว่างจุดที่ทำการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า หากมีสารเจือเข้ามารวมตัวที่บริเวณที่วัดนี้จะมีผลทำให้เกิดการรวมกับพาหะข้างน้อย (minority carriers) บริเวณนั้น ทำให้การวัดค่าความต้านทานจำเพาะที่วัดได้สูงเกินความเป็นจริง นอกจากนี้ควรคำนึงถึงความสม่ำเสมอของเส้นสมศักย์ (equi-potential lines) โดยการวัดที่บริเวณจุดที่คิดว่าเป็นเส้นสมศักย์นั้นสม่ำเสมอ (ตรงกลางของสารตัวอย่าง) สัดส่วนระหว่างระยะขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้าต่อพื้นที่ตรงจุดที่ปล่อยกระแสเข้าและออกจะต้องมีค่ามากกว่าสามเท่า $l/A > 3$ เมื่อ l คือ ระยะห่างระหว่างขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้า และ A คือ พื้นที่บริเวณให้กระแสไฟฟ้า ข้อควรคำนึงถึงอีกประการก็คือ สารที่นำมาวัดมีโครงสร้างผลึกชนิดใดเป็นรูปลูกบาศก์หรือไม่ถ้าไม่ใช่จะต้องทราบทิศทางของการวัดว่าอยู่ในทิศทางหรือระนาบใดของผลึกการวัดควรใช้วิธีจริงที่ขั้วหนึ่งไว้และเลื่อนตำแหน่งอีกขั้วหนึ่งออกไปเป็นระยะๆ โดยมีมาตราส่วนบอกระยะและนำมาเขียนกราฟดังรูปที่ 2.20 (ก) และ (ข) ความชันที่ได้จะเป็นค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าข้อดีของการวัดแบบสองขั้วในหลายๆตำแหน่งนี้จะสามารถแยกสภาพต้านทานไฟฟ้าที่สภาพผิวระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำและความต้านทานจำเพาะภายในของสารกึ่งตัวนำได้



รูปที่ 2.20 การวัดค่าความต้านทานแผ่น โดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น

- ก. การวัดแบบสองขั้วโดยมีการเลื่อนระยะที่ขั้วหนึ่ง
 ข. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับระยะทางที่ได้จากการวัดชนิดเลื่อนขั้วไฟฟ้า

2.6.4 ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Kittel,2005; งามนิศย์,2530; จูตินัย,2531; งามนิศย์,2545; จูตินัย, 2550; จูตินัย,2552; Runyan, 1975; สุกฤษฏี,2547; สมเกียรติ,2542; จูตินัย,2552; วีรัชย์,2547; คุณิต,2535)

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถเขียนในเทอมของสภาพคล่องของพาหะได้และความหนาแน่นพาหะอิสระด้วยความสัมพันธ์

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากอิเล็กตรอน

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

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากโฮล

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

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากพาหะสองชนิดคืออิเล็กตรอนและโฮลซึ่งมีปริมาณใกล้เคียงกันสภาพต้านทานไฟฟ้าที่แท้จริงคือ

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

เมื่อ n คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระ

p คือ ความหนาแน่นของโฮลอิสระ

μ_e และ μ_p คือ สภาพคล่องของอิเล็กตรอนและสภาพคล่องของโฮล

นั่นคือหากทราบสภาพต้านทานไฟฟ้า และสภาพคล่องของพาหะจะทำได้สามารถคำนวณค่าความหนาแน่นของพาหะข้างมากได้จากสมการที่ (2.25) และ (2.26) คือ

กรณีเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

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

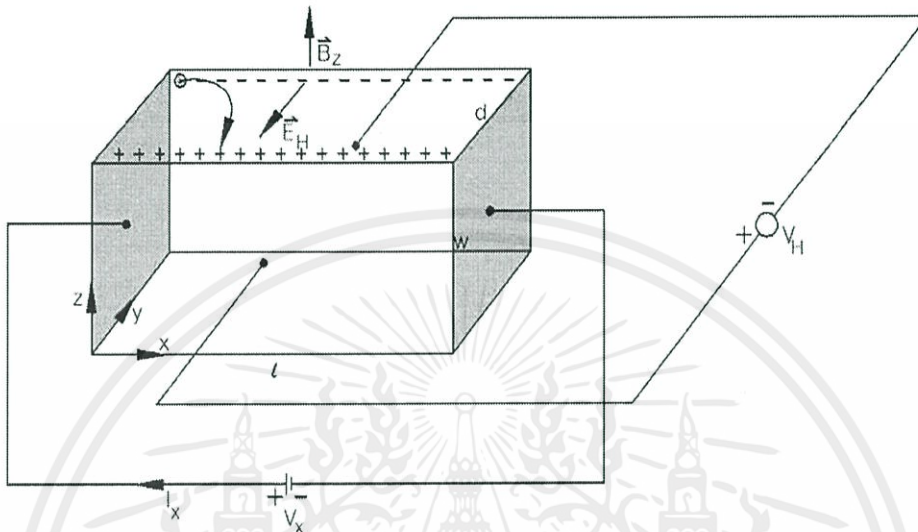
กรณีเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารทบทวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ผู้กึ่งข้อมมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราสามารถคำนวณค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า, สภาพคล่องของพาหะได้หลายวิธีวิธีที่สะดวกและมักนิยมใช้กันอย่างกว้างขวางคือ การคำนวณจากการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ ปรากฏการณ์ฮอลล์ได้ถูกค้นพบในปี พ.ศ. 2422 โดย เอ็ดวิน เฮอร์เบิร์ต ฮอลล์ (Edwin Herbert Hall)



รูปที่ 2.21 แผนภาพแสดงปรากฏการณ์ฮอลล์บนแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิดพี

พิจารณาชั้นสารกึ่งตัวนำชนิดพี ที่เป็นรูปทรงดังแสดงในรูปที่ 2.21 ซึ่งมีกระแสไฟฟ้า I ไหลผ่านในแนว x หรืออาจมองว่ามีประจุบวกเคลื่อนที่ไปในทิศ x ด้วยความเร็วลอยเลื่อน v_x เกิดเป็นกระแสไฟฟ้าในแนวทิศทาง x คือ I_x ดังสมการที่ (2.27)

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

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

จากกฎของโอห์ม

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

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

จากรูปที่ 2.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A = wd \quad (2.31)$$

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

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

ปรากฏการณ์ฮอลล์เกิดขึ้นเมื่อมีสนามแม่เหล็ก (B_z) ที่กระทำกับชิ้นสารในทิศ z อย่างสม่ำเสมอ อันตรกิริยาจากสนามแม่เหล็กมีผลทำให้แนวกระแสของ โอลเบียงเบนไปในทิศ $-y$ สะสมในบริเวณขอบด้านนอก ($y=0$) และเหนี่ยวนำให้เกิดอิเล็กตรอนขึ้นที่ขอบด้านใน (y) ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าฮอลล์ในทิศ $-y$ (Hall field: E_y หรือ E_H) และเกิดความต่างศักย์ฮอลล์ หรือเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าฮอลล์ในทิศ y (Hall voltage: V_H) ขึ้น ทำให้กลุ่มโอลเคลื่อนที่ไปด้วยแรงลอเรนตซ์ (Lorentz's force)

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

เมื่อแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่กระทำต่อ โอลมีค่าเท่ากันจะเกิดสภาวะสมดุลเชิงความร้อน หรือสภาวะคงตัว (steady state) ทำให้โอลเคลื่อนที่ในทิศ x ดังเดิม เพราะฉะนั้นจะทำให้ได้ว่า

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

หากพิจารณาสมการที่ (2.37) จะเห็นว่าสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดขึ้นเป็นปฏิภาคกับความหนาแน่นกระแสและสนามแม่เหล็ก สามารถเขียนได้ในรูปของ

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

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

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

เรียก R_H ว่าเป็นสัมประสิทธิ์ฮอลล์หรือค่าคงตัวฮอลล์ (Hall coefficient) ซึ่งนิยามว่าเป็นสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดจากความหนาแน่นกระแสของพาหะขนาด 1 หน่วย ไหลผ่านภายใต้สนามแม่เหล็กขนาด 1 หน่วย เราอาจทราบศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากสนามไฟฟ้าฮอลล์ โดยอินทิเกรต

สนามไฟฟ้าฮอลล์ ตลอดความกว้าง (w) ของแผ่นสารและเรียกความต่างศักย์นี้ว่า ความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) นั่นคือ

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

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

สัมประสิทธิ์ฮอลล์ที่ได้จากการวัด คือ

$$R_H = \frac{V_H}{I_x} \cdot \frac{d}{B_z} \quad (2.40)$$

ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนตามนิยาม คือ

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

โดยทั่วไปพาหะอิสระที่เคลื่อนที่ในสารกึ่งตัวนำมักประสบกับกลไกการกระเจิงหลายๆชนิด กลไกการกระเจิงของพาหะในสารกึ่งตัวนำจะเป็นกลไกที่ขึ้นอยู่กับพลังงานของพาหะโดยที่ช่วงเวลาปลอดการกระเจิง (τ) จะแสดงได้ดังนี้

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

เมื่อคิดผลรวมจากการกระเจิงที่ขึ้นกับพลังงานของพาหะ สัมประสิทธิ์ฮอลล์สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

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

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

เมื่อ r คือ แฟกเตอร์การกระเจิง (scattering factor) ของพาหะในปรากฏการณ์ฮอลล์ซึ่งสามารถนิยามค่า r ได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และตัว $r = \frac{\langle \tau \rangle^2}{\langle \tau^2 \rangle}$ ถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีค่า (2.45) ใช้

r มีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ขึ้นอยู่กับกลไกการกระเจิงของพาหะ เช่น การกระเจิงเนื่องจากโครงสร้างผลึกหรือการกระเจิงเนื่องจากอะตอมของสารเจือปนที่ถูกไอออไนซ์สัมประสิทธิ์ฮอลล์แปรค่าตามสนามแม่เหล็กและอุณหภูมิ ซึ่งจะมีค่าใกล้ 1 เมื่อชั้นสารอยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กความเข้มสูงมาก ดังนั้นเราทราบค่าของ r จากการทดลองด้วยความสัมพันธ์

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

ในทางปฏิบัติสนามแม่เหล็กที่ใช้วัดโดยทั่วไปมีค่าอยู่ระหว่าง 5 ถึง 10000 เกาส์ ซึ่งค่า r ในช่วงนี้มีการเปลี่ยนแปลงไม่มาก ดังนั้นอาจประมาณได้ว่าค่าคงที่

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

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

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

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

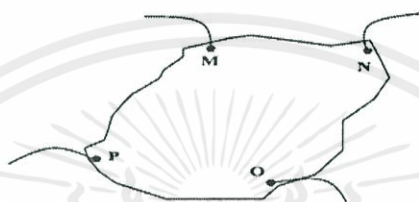
2.6.5 การศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ (Kittel, 2005; งามนิตย์, 2530; จูตินัย, 2531; งามนิตย์, 2545; จูตินัย, 2550; จูตินัย, 2552; Runyan, 1975; สุกฤษฎี, 2547; สมเกียรติ, 2542; จูตินัย, 2552; วีรชัย, 2547; คุณิต, 2535)

เทคนิคนี้ได้รับการพัฒนาขึ้นมาจากพื้นฐานของวิชาคณิตศาสตร์ คอนฟอร์มอล แมปปิง (conformal mapping) โดยนักวิทยาศาสตร์ชื่อ แวนเดอร์เพาว์ (van der Pauw) สำคัญของเทคนิคนี้อยู่ที่การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของแผ่นสารตัวอย่างรูปทรงใดๆ ซึ่งสามารถทำได้ง่ายแม้จะไม่มีจำเป็นต้องทราบลักษณะของรูปแบบการกระจายของเส้นทางเดินกระแสที่ไหล

เอกสารนี้ ภายใต้นี้ ถ้าสารตัวอย่างประพุดิตตามเงื่อนไขต่อไปนี้ นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

พิจารณาชิ้นสารรูปทรงเป็นแผ่นบางใดๆ และมีขั้วสัมผัสเล็กๆ M, N, O และ P กระจายอยู่ที่บริเวณขอบของแผ่นซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขข้างต้น



รูปที่ 2.22 การวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์บนสารตัวอย่างที่เป็นแผ่นบางที่มีรูปทรงใดๆ

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

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

สัมประสิทธิ์ฮอลล์จากเทคนิคของแวนเดอร์เพาว์ คือ

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

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

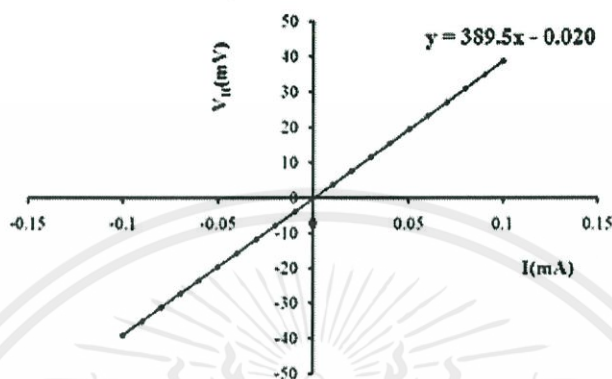
จากสมการที่ (2.5) จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารทสวงน ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

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

เมื่อทำการเขียนกราฟระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ที่ได้จากการทดลองเราจะได้ลักษณะกราฟดังรูปที่ 2.23

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



รูปที่ 2.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I)

สภาพคล่องฮอลล์สามารถคำนวณได้จาก

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

และสามารถคำนวณหาระยะทางเฉลี่ยที่ปลดการกระเจิงได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

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

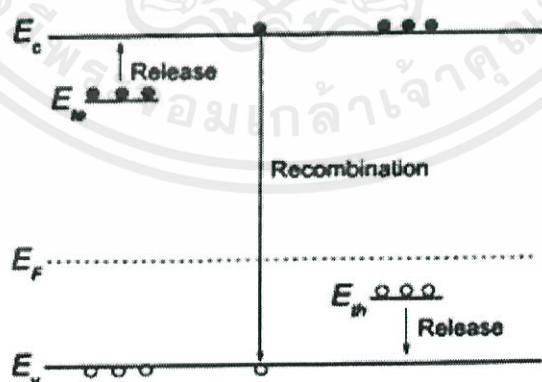
เมื่อ h คือ ค่าคงตัวของพลังค์ = 6.625×10^{-34} จูล-วินาที

ในทางปฏิบัติการเตรียมชิ้นสารให้มีรูปทรงตามเงื่อนไขทั้ง 4 ข้อดังกล่าวอาจเป็นไปได้ยาก โดยเฉพาะขนาดและตำแหน่งของขั้วสัมผัสซึ่งมักไม่เป็นจุดและไม่อยู่ที่ขอบของชิ้นสารตามทฤษฎี จึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของผลการวัด

2.7 สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง (งามนิตย์, 2556; จิตินัย, 2556)

ในสารกึ่งตัวนำมักมีข้อบกพร่องผลึกเสมอ ข้อบกพร่องผลึกมีหลายชนิด ข้อบกพร่องผลึกบางชนิดมีคุณสมบัติในการจับอิเล็กตรอนหรือโฮลอิสระได้ จึงมักเรียกว่ากับดักพาหะชนิดต่างๆ จะไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีอัตรานำไปใช้ปรากฏเป็นระดับพลังงานในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ โดยในรูปที่ 2.24 มีทั้งระดับ

พลังงานของกักตักพาหะชนิดจับโฮล (E_h) และกักตักพาหะชนิดจับอิเล็กตรอน (E_e) (Jiang, 2012) คำว่า กระบวนการปลดปล่อยพาหะ (Release) เป็นกลไกที่กักตักพาหะปล่อยอิเล็กตรอนให้กับแถบนำ และเป็นกักตักพาหะชนิดปล่อยโฮลให้กับแถบวาเลนซ์ ส่วนคำว่า กระบวนการรวมตัวของพาหะ (Recombination) เป็นกลไกที่อิเล็กตรอนในแถบนำ ทรานซิชันลงมารวมตัวกับ โฮลในแถบวาเลนซ์โดยไม่ผ่านกักตักพาหะ ขณะที่สารกึ่งตัวนำยังไม่ได้มีการฉายแสงกักตักพาหะจะมีการจับอิเล็กตรอนหรือจับโฮลอยู่ก่อนแล้ว ส่วนอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำ และ โฮลในแถบวาเลนซ์มีปริมาณน้อย สารกึ่งตัวนำจึงนำกระแสไฟฟ้าได้ไม่ดี กระแสมืด (dark current) จึงมีค่าน้อย แต่เมื่อมีการฉายแสงลงบนสารกึ่งตัวนำจะเกิดกระบวนการสร้างอิเล็กตรอน และ โฮลอิสระขึ้นในแถบนำ และแถบวาเลนซ์ตามลำดับ เนื่องจากการดูดกลืน โฟตอนที่มีพลังงานสูงเพียงพอ เมื่อไปแอสด้วยแรงดันไฟฟ้าให้กับสารกึ่งตัวนำ กระแสโฟตอนจะมีปริมาณเพิ่มขึ้น แต่เมื่อหยุดฉายแสงหรือหยุดการกระตุ้นด้วยแสง กระแสไฟฟ้าจะลดลงสู่ค่ากระแสมืดเหมือนในขณะที่ไม่มีการฉายแสง แต่บางครั้งพบว่า กักตักพาหะที่จับอิเล็กตรอนและจับโฮล มีพฤติกรรมไม่ปล่อยอิเล็กตรอนหรือโฮลออกมาทันทีอย่างปกติธรรมดา นั่นคือยังมีประจุค้างอยู่ในกักตักพาหะ ดังนั้นอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำหรือโฮลในแถบวาเลนซ์จึงยังคงปรากฏอยู่มากเพื่อทำหน้าที่ในการรักษาความเป็นกลางทางไฟฟ้าโดยปกติกลไกการปลดปล่อยพาหะ จะใช้เวลามากกว่ากลไกการรวมตัวของพาหะ แต่เนื่องจากกักตักพาหะมีการปล่อยอิเล็กตรอนและ โฮลออกมาช้ามาก ส่งผลให้กลไกการรวมตัวของพาหะ ใช้เวลายังนานขึ้นไปอีก จึงเป็นที่มาของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงคือรั้น (persistent photoconductivity)



รูปที่ 2.24 ระดับพลังงานของกักตักพาหะชนิดจับอิเล็กตรอน (E_e) และกักตักพาหะชนิดจับโฮล (E_h) ที่ปรากฏในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งจุดทึบและจุดโปร่งจะแสดงแทนอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ

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

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

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

$$v = \frac{\mu V_a}{l} \quad (2.55)$$

แทนสมการที่ (2.55) ลงใน (2.54) จะได้

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

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

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

แทนสมการที่ (2.57) ลงใน (2.56) จะได้ว่า กระแส I_i ที่เกิดจากกักตักพาหะชนิด i คือ

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

กระแสรวมทั้งหมด (I) ที่สัมพันธ์กับกักตักพาหะทุกชนิดจะเป็นดังนี้คือ

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

เมื่อ N_{ti} คือ ความหนาแน่นของกักตักพาหะต่อปริมาตรชนิดที่ i ซึ่งสามารถหาได้จากความสัมพันธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือเผยแพร่เอกสารทุกครั้งที่มีโอกาสไปใช้

$$N_{ti} = \frac{I}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{wd} \right) \exp\left(\frac{t}{\tau_i}\right) \quad (2.60)$$

สำหรับกรณีฟิล์มบางจะประมาณว่าความหนา d มีค่าน้อยมาก

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

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

เมื่อ σ_t คือ ความหนาแน่นของกักพาหะต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ แต่ถ้ากักพาหะมีหลายชนิด
กระแสรวม (I) ของฟิล์มบางที่สัมพันธ์กับกักพาหะทุกชนิดจะเป็นดังนี้ คือ

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

เมื่อ σ_{ti} คือความหนาแน่นของกักพาหะต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ชนิดที่ i ซึ่งสามารถหาได้จาก
ความสัมพันธ์

$$\sigma_{ti} = \frac{I}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{w} \right) \exp\left(\frac{t}{\tau_i}\right) \quad (2.63)$$

โดยที่

- V_a คือ แรงดันไบแอสที่ป้อนให้กับสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีหน่วยเป็นโวลต์
- μ คือ สภาพคล่องของพาหะมีหน่วยเป็น ตารางเซนติเมตรต่อโวลต์-วินาที
- w คือ ความกว้างของสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีหน่วยเป็น เซนติเมตร
- l คือ ความยาวของสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีหน่วยเป็น เซนติเมตร
- d คือ ของสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีหน่วยเป็น เซนติเมตร
- I คือ กระแสที่วัดได้จากการทดลองที่เวลา t ใดๆ
- τ_r คือ ช่วงชีวิตขาลง (decay time)
- N_{ti} คือ ความหนาแน่นของกักพาหะในชั้นสารตัวอย่างมีหน่วยเป็น
ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

σ_{ti} คือ ความหนาแน่นของกักพาหะในฟิล์มบางมีหน่วยเป็น ต่อตารางเซนติเมตร

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

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

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

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

เมื่อ

$$\text{slope} = \frac{E_t}{(1,000)k}$$

ดังนั้น

$$E_t = \frac{(1,000)k(\text{slope})}{q}$$

$$= (0.086)(\text{slope}) \text{ eV} \quad (2.65)$$

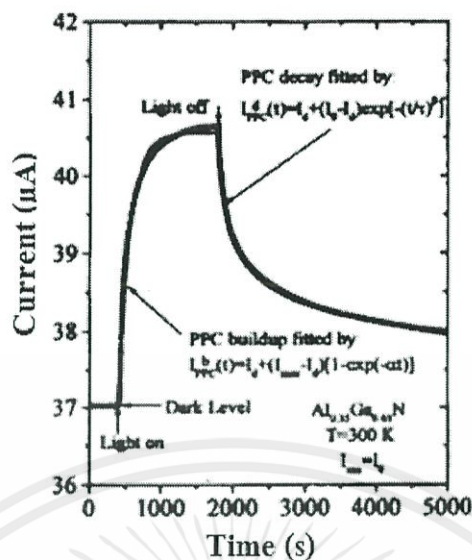
ในการศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงจะต้องมีการฉายแสงให้กับสารตัวอย่าง จะได้ว่ากระแสโฟโต (I_p) จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลา (t) ดังรูปที่ 2.25 ซึ่งจะเรียกว่าเป็นกระแสขาขึ้น (rise current) ดังความสัมพันธ์ (Ghosh, 2007)

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

เมื่อ I_o คือกระแสเริ่มต้นของกระแสขาขึ้น (เมื่อ $t = 0$) หลังจากหยุดการฉายแสง กระแสจะลดลงตามเวลา (t) ซึ่งจะเรียกว่าเป็นกระแสขาลง (decay current) จะแสดงดังความสัมพันธ์ (Ghosh, 2007)

$$I_p = I_o' \exp\left(-\frac{t}{\tau_d}\right) \quad (2.67)$$

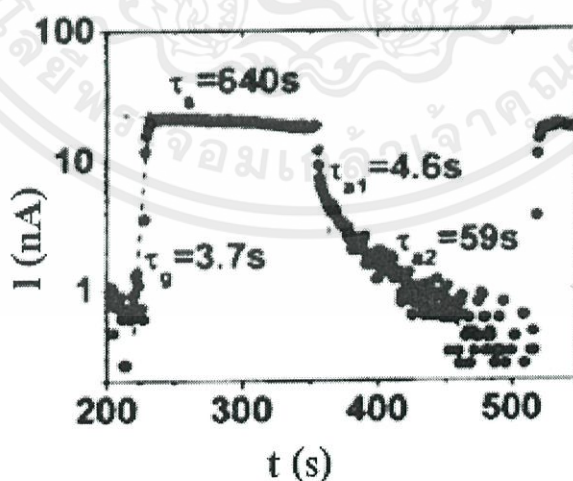
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.25 แสดงกระแสขาขึ้นและกระแสขาลงการสภานำไฟฟ้าเชิงแสง จากสมการที่ (2.66) สามารถเขียนใหม่ได้ว่า

$$\ln I_p = \ln I_{0'} - \frac{t}{\tau_d} \quad (2.68)$$

ความชันของกราฟคือ $1/\tau_d$ ดังนั้น ช่วงชีวิตขาลงจะคำนวณได้จากส่วนกลับของความชันของกราฟ $\ln I_p$ กับ t ในทำนองเดียวกันช่วงชีวิตขาขึ้นก็สามารถที่จะคำนวณได้จากความชันของกราฟ $\ln I_p$ กับ t ดังรูปที่ 2.26 ได้ด้วยเช่นเดียวกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 2.26 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโฟโต ($\ln I_p$) กับเวลา (t) ของสภานำไฟฟ้าเชิงแสงทั้งช่วงกระแสขาขึ้นและช่วงกระแสขาลง

ในทางปฏิบัติช่วงชีวิตมีได้หลายค่า เนื่องจากกับดักพาหะมีหลายชนิด ดังนั้นกระแสโฟโตवालของฟิล์มบางที่ใช้หาค่าช่วงชีวิต 2 ค่า สามารถที่จะเขียนใหม่ได้โดยอาศัยสมการที่ (2.62) และสมการที่ (2.67) ดังนี้ คือ (Huang, 2011; Gu, 2005)

$$|I_p| = e\mu \left(\frac{w}{l} \right) V_a \sigma_{t1} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{d1}}\right) + e\mu \left(\frac{w}{l} \right) V_a \sigma_{t2} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{d2}}\right) \quad (2.69)$$

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

$$|I_p| = e\mu \left(\frac{w}{l} \right) V_a \sigma_{t1} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{d1}}\right) + e\mu \left(\frac{w}{l} \right) V_a \sigma_{t2} \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau_{d2}}\right)^\beta\right] \quad (2.70)$$

จากสมการที่ (2.70) สามารถที่จะหาค่า σ_{t1} และ σ_{t2} ได้ในรูปแบบเดียวกับสมการที่ (2.73) ดังนี้คือ

$$\sigma_{t1} = \frac{I_p}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{w} \right) \exp\left(\frac{t}{\tau_{d1}}\right) \quad (2.71)$$

$$\sigma_{t2} = \frac{I_p}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{w} \right) \exp\left(\frac{t}{\tau_{d2}}\right) \quad (2.72)$$

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

$$\sigma_{t1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{w} \right)$$

และ

$$\sigma_{t2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left(\frac{l}{w} \right)$$

สมการที่ (2.70) สามารถที่จะทำนอร์มัลไลเซชัน (normalization) ได้ดังนี้ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกข้อมูลนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากผู้จัดทำ

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

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

ในกรณีกระแสไฟโตขาขึ้น (rise current) ก็สามารที่จะพิจารณาให้อยู่ในรูปของฟังก์ชัน สเตรตเอ็กซ์โพเนนเชียลได้ด้วยเช่นกัน ดังสมการ

$$|I_p| = A'_1 \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_{r1}}\right) \right] + A'_2 \left\{ 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau_{r1}}\right)^\beta\right] \right\} \quad (2.74)$$

ส่วนกรณีของขั้วสาร เช่น เซรามิก กระแสไฟโตขณะขาลงสามารถจะเขียนใหม่โดยอาศัยสมการที่ (2.59) และ (2.70) ได้ดังนี้คือ

$$|I_p| = e\mu \left(\frac{wd}{1}\right) V_a N_{t1} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{d1}}\right) + e\mu \left(\frac{wd}{1}\right) V_a N_{t2} \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau_{d2}}\right)^\beta\right] \quad (2.75)$$

จากสมการที่ (2.75) สามารถที่จะหาค่า

$$N_{t1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left(\frac{1}{wd}\right) \exp\left(\frac{t}{\tau_{d1}}\right) \quad (2.76)$$

$$N_{t2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left(\frac{1}{wd}\right) \exp\left(\frac{t}{\tau_{d2}}\right) \quad (2.77)$$

กับค่าพหุทั้งสองชนิดนี้สามารถที่จะจับหรือปล่อยพาหะอิสระได้อย่างเป็นอิสระซึ่งกันและกัน ถ้ากำหนดให้ I_1 และ I_2 คือกระแสเริ่มต้น ($t = 0$) ที่เกี่ยวกับกับค่าพหุทั้งสองตามลำดับเราจะได้ว่า

$$N_{t1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left(\frac{1}{wd}\right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการที่ (2.75) สามารถที่จะทำนอร์มัลไลเซชัน (normalization) ได้ดังนี้คือ

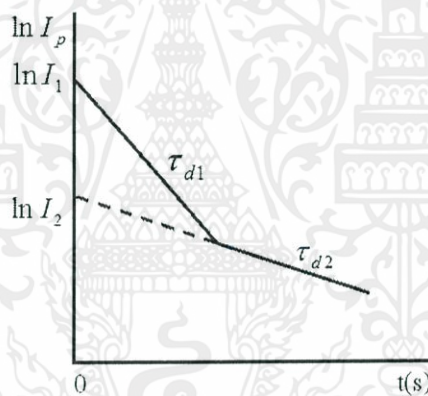
$$|I_p| = A_1'' \exp\left(-t/\tau_{d1}\right) + A_2'' \exp\left[-\left(t/\tau_{d2}\right)^\beta\right] \quad (2.78)$$

ซึ่ง A_1'' และ A_2'' สามารถหาได้จากการพีทกราฟของผลการทดลอง ในกรณีกระแสโฟโตขาขึ้น ก็สามารที่จะพิจารณาให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันสเตรตเอกซ์โพเนนเชียลได้ด้วยเช่นกันดังสมการ

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

2.7.1 วิธีกรหาค่าความหนาแน่นของกัณฑ์พาหะในช่วงกระแสขาลง

การหาค่าความหนาแน่นของกัณฑ์พาหะในช่วงกระแสขาลงจะอาศัยกราฟนอร์มัลไลเซชัน ($\ln I_p$) กับ เวลา (t) ดังรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโฟโต ($\ln I_p$) กับเวลา (t) เพื่อใช้คำนวณหาความหนาแน่นของกัณฑ์พาหะในช่วงกระแสขาลง

ค่า τ_{d1} หาได้จากความชันของกราฟ

$$\ln I_p = -t/\tau_{d1} + \ln I_1 \quad (2.80)$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน I_1 เพื่อ (1) ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า (2.81)
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาเอกสารนี้เพื่อเผยแพร่ทางออนไลน์ถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

เราสามารถหาค่า I_2 ได้จากจุดตัดแกน y (คือ $\ln I_2$) และสามารถคำนวณหาค่าความหนาแน่นของ
 กักพาหะได้ดังนี้คือ

$$\sigma_{t2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left(\frac{1}{w} \right) \quad (2.83)$$

สำหรับกรณีของความหนาแน่นของชั้นสารเช่นในเซรามิก ก็สามารถใช้สูตร

$$N_{t1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left(\frac{1}{wd} \right) \quad (2.84)$$

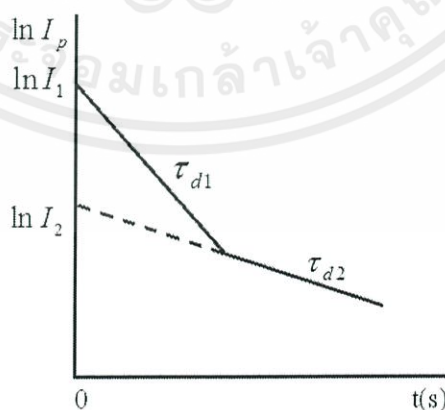
และ

$$N_{t2} = \frac{I_2}{e\mu V_a} \left(\frac{1}{wd} \right) \quad (2.85)$$

2.7.2 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกักพาหะในช่วงกระแสขาขึ้น

การหาค่าความหนาแน่นของกักพาหะในช่วงกระแสขาขึ้นจะอาศัยกราฟนอร์มัลไลเซชัน

ชัน ($\ln I_p$) กับ เวลา (t) ดังรูปที่ 2.28



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 รูปที่ 2.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแอมป์นอร์มัลไลเซชัน ($\ln I_p$) กับเวลา (t) เพื่อใช้คำนวณหา

ความหนาแน่นของกักพาหะในช่วงกระแสขาขึ้น

รูปที่ 2.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสออร์มัล ไลเซชัน ($\ln I_p$) กับเวลา (t) เพื่อใช้คำนวณหาความหนาแน่นของกักพาหะในช่วงกระแสขาขึ้น

กระแสขาขึ้นอาจแสดงได้ดังสมการง่ายๆ ดังนี้คือ

$$I = I_{\max} [1 - \exp(-t/\tau_r)] \quad (2.86)$$

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

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

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

จากสูตร

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

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

$$\frac{I}{I_{\max}} = t/\tau_r \quad (2.88)$$

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

2.8 รอยต่อพี-เอ็น ของสารกึ่งตัวนำ (p-n junction) (งามนิศย์,2530; ฐิตินัย,2546; งามนิศย์, 2545; ฐิตินัย,2550; ฐิตินัย,2552; Kittel,2005; Runyan,1975; วีรัชย์,2547; สุกฤษฎ์,2547; คูสิต, 2535)

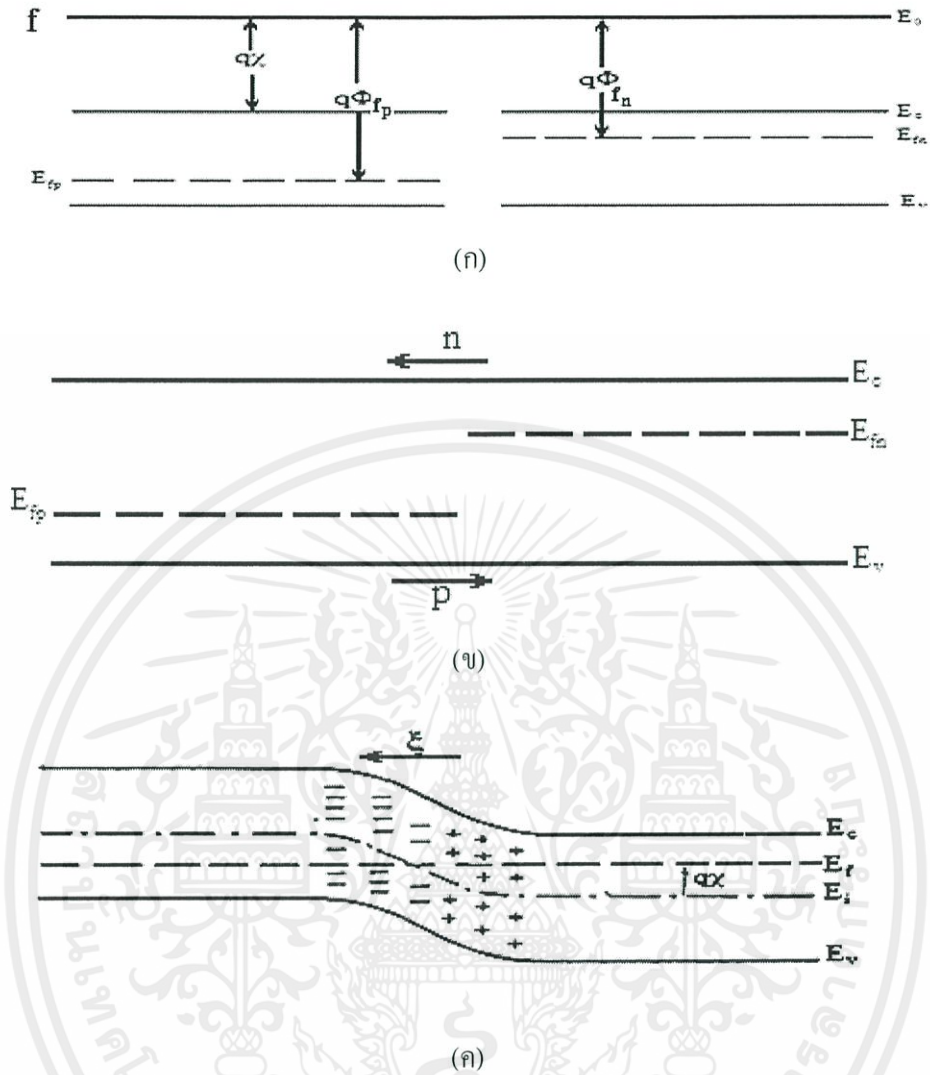
รอยต่อพี-เอ็น คือบริเวณที่ชนิดการนำไฟฟ้าของสารเปลี่ยนจากชนิดพีเป็นชนิดเอ็นหรือเปลี่ยนจากชนิดเอ็นเป็นชนิดพี โดยที่โครงสร้างของผลึกไม่มีการเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด รอยต่อพี-เอ็น เป็นส่วนที่สำคัญมากในสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำแทบทุกชนิด และคุณสมบัติของรอยต่อพี-เอ็น ดังกล่าวนี้อาจขึ้นกับกระบวนการผลิตซึ่งมีมากมายหลายแบบ วิธีการประดิษฐ์รอยต่อที่สำคัญๆ ในปัจจุบันมีดังนี้คือ วิธีการแพร่ซึม วิธีอีพิแทกซ์ (epitaxy) วิธีฝังไอออน (ion implantation) และแบบหลอมผสม (alloying) เป็นต้น

2.8.1 รอยต่อในสถานะสมดุลเชิงความร้อน

แบบจำลองของรอยต่อพี-เอ็น ในเชิงอุณหพลศาสตร์จะเริ่มพิจารณาที่รอยต่อแบบโฮโม (homo junction) ซึ่งทั้งสารกึ่งตัวนำชนิดพีและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นเป็นวัสดุชนิดเดียวกัน จึงมีค่าช่องว่างแถบพลังงานเท่ากัน โดยเริ่มจากอิเล็กตรอนที่มีอยู่จำนวนมากในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะแพร่เข้าไปยังสารกึ่งตัวนำชนิดพี ซึ่งมีอิเล็กตรอนอยู่น้อยมาก ในทำนองเดียวกัน โฮลที่มีอยู่เป็นจำนวนมากในสารกึ่งตัวนำชนิดพีจะแพร่เข้าไปยังด้านเอ็นซึ่งมีโฮลอยู่น้อยมาก การแพร่ของพาหะเหล่านี้จะทำให้เนื้อสารขาดความเป็นกลางทางไฟฟ้า นั่นคือทางสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะสูญเสียอิเล็กตรอนอิสระไป ทำให้บริเวณสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่ใกล้รอยต่อ แสดงอำนาจไฟฟ้าเป็นบวกเนื่องจากมีประจุบวกของไอออนของอะตอมผู้รับที่ถูกทิ้งไว้สำหรับทางสารกึ่งตัวนำชนิดพีก็จะมีลักษณะคล้ายๆกัน คือมีไอออนของอะตอมผู้รับซึ่งมีประจุเป็นลบปรากฏอยู่ ยังผลให้เกิดสนามไฟฟ้าที่รอยต่อโดยที่สนามไฟฟ้ามืดจากทางสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นไปทางสารกึ่งตัวนำชนิดพี ดังนั้นการแพร่ของโฮลและอิเล็กตรอนจะลดลงเนื่องจากอิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่ต้านการแพร่ซึม บริเวณรอยต่อนี้จึงปลอดจากพาหะอิสระและเรียกบริเวณนี้ว่าเขตปลอดพาหะ (depletion region) หรือบางครั้งเรียกว่าบริเวณประจุว่าง (space charge region) เนื่องจากมีประจุของไอออนสารเจืออยู่ซึ่งเป็นประจุที่ตรึงอยู่กับที่ (fixed charge) ไม่ใช่ประจุอิสระ

ลักษณะการแพร่ซึมของอิเล็กตรอนและโฮลที่รอยต่ออาจแสดงได้โดยแผนภาพลักษณะของ โครงสร้างแถบพลังงานดังรูปที่ 2.29 โดยที่รูป 2.29 (ก) แสดงลักษณะของ โครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดที่ยังไม่ได้สัมผัสกันเป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์ รูปที่ 2.29 (ข) แสดงลักษณะของ โครงสร้างแถบพลังงานของ สารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดที่ถูกนำมาทำเป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์ ซึ่งจะเกิดการแพร่ของอิเล็กตรอนและโฮล จนกระทั่งเข้าสู่สถานะสมดุลเชิงความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 2.29 (ค) โดยที่ ϕ คือ ศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อ และ ξ คือสนามไฟฟ้าที่รอยต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.29 ลักษณะของ โครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดพีและชนิดเอ็น

ก. ขณะที่สารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดยังไม่ได้สัมผัสกันเป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์

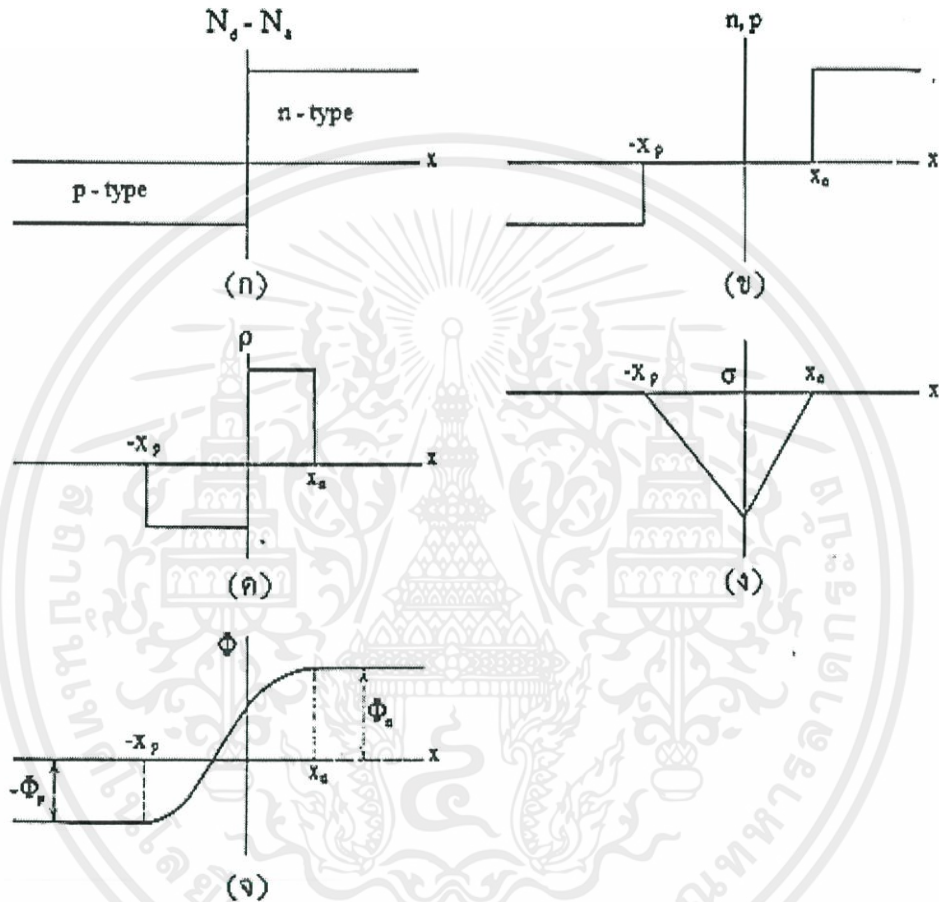
ข. ขณะที่สารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดที่ถูกนำมาทำเป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์

ค. ขณะที่สารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดถูกนำมาทำเป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์และอยู่ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.2 รอยต่อแบบขั้นบันได (step junction)

รอยต่อแบบขั้นบันไดเป็นรอยต่อในเชิงอุดมคติ ที่พิจารณาว่าปริมาณความเข้มข้นของสารเจือในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและทางสารกึ่งตัวนำชนิดพีต่างมีค่าคงที่ (แต่ค่าไม่เท่ากัน) จนกระทั่งถึงจุดเชื่อมต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นกับสารกึ่งตัวนำชนิดพี ดังแสดงในรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.30 ไดโอดของสารกึ่งตัวนำที่มีรอยต่อแบบพี-เอ็น ที่เป็นแบบขั้นบันไดที่เป็นฟังก์ชันกับระยะทาง

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 จ. ศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อ
 ไม่ว่าจะฉีดยุติทุกสิ่ง ออกทงห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประจุไฟฟ้าจะมีค่าไม่เป็นศูนย์เฉพาะที่บริเวณเขตปลอดพาหะ จะหาสนามไฟฟ้าทางสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นได้โดยใช้สมการของปัวซอง (Poisson's equation) นั่นคือ

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

แล้ว

$$\xi(x) = \frac{-qN_d}{\epsilon_s}(x_n - x); 0 < x < x_n \quad (2.90)$$

สนามไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นมีเครื่องหมายเป็นลบ แสดงว่ามีทิศไปทางซ้ายมือและสัมพันธ์กับระยะทางแบบเชิงเส้นและสิ้นสุดที่ระยะทาง x_n ดังนั้นสนามไฟฟ้าจะต้านการแพร่ซึมของอิเล็กตรอนที่จะแพร่ซึมจากขวาไปซ้าย ในทำนองเดียวกันสนามไฟฟ้าทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพีจะมีความสัมพันธ์กับระยะทางแบบเชิงเส้นดังนี้

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

ซึ่งสนามไฟฟ้าทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพีจะมีทิศต้านการแพร่ซึมของโฮลด้วยเหมือนกันที่ระยะ $x = 0$ สนามไฟฟ้าจะต้องต่อเนื่อง นั่นคือ

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

ซึ่งแสดงว่าความกว้างของเขตปลอดพาหะทั้งทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพีและทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะแปรผกผันกับความเข้มข้นของสารเจือ กล่าวคือถ้าด้านใดมีความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือสูง เขตปลอดพาหะจะยื่นเข้าไปในเนื้อสารด้านนั้นน้อย ในทางตรงกันข้าม ถ้าด้านใดมีความเข้มข้นของสารเจือต่ำ เขตปลอดพาหะส่วนใหญ่จะตกอยู่ในเนื้อสารของด้านนั้น แต่ถ้าให้ความเข้มข้นของสารเจือของอะตอมผู้ให้ทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นมีค่ามากกว่าความเข้มข้นของสารเจือของอะตอมผู้รับทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพีมากๆ สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่ถูกเจืออย่างหนัก (heavily doped n-type) จะถือได้ว่า เขตปลอดพาหะที่รอยต่อเข้าไปอยู่ในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดพี และจะเรียกรอยต่อชนิดนี้ว่า รอยต่อแบบขั้นบันไดด้านเดียว (one-sided step junction)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นสามารถหาได้โดยการอินทิเกรต สมการที่ (2.90) เทียบกับ x นั่นคือ

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

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

ในทำนองเดียวกัน ศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพี คือ

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

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

ϕ_p คือ ศักย์ไฟฟ้าในเนื้อของสารกึ่งตัวนำชนิดพีนอกเขตปลอดพาหะอิสระและมีค่าเป็นลบ ผลต่างของศักย์ไฟฟ้าระหว่าง $\phi_n - \phi_p$ จะมีค่าดังนี้ คือ

$$\phi_i = \phi_n - \phi_p = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_d}{n_i}\right) + \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_a}{n_i}\right) = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_d N_a}{n_i^2}\right) \quad (2.97)$$

และเรียก ϕ_i ว่าแรงดันในตัว (built-in potential) ซึ่งจะมีเครื่องหมายเป็นบวก

ในกรณีที่มีการเจือสารด้วยความเข้มข้นสูงมาก $\approx 10^{19}$ ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร สมการที่ (2.97) จะไม่เป็นจริงอีกต่อไป เพราะว่ากรณีที่มีการเจือสารอย่างสูง เราจะประมาณฟังก์ชันการแจกแจงของเฟอร์มิ-ดิแรค ด้วยฟังก์ชันการแจกแจงของแม็กเวลล์-โบลต์ซมานน์ไม่ได้ เนื่องจากระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำจะเลื่อนเข้าหาขอบของแถบพลังงาน (ในสารกึ่งตัวนำชนิดพีระดับเฟอร์มิจะเลื่อนเข้าหาขอบบนสุดของแถบวาเลนซ์เป็นต้น) นั่นคือระดับเฟอร์มิของสารที่ถูกเจืออย่างหนัก จะเลื่อนไปจากระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำอินทรินสิกเท่ากับ $E_g/2q$ หรือราวๆ

0.56 อิเล็กตรอน โวลต์ ใน Si ดังนั้นในรอยต่อ $p^+ - n$ ศักย์ในตัวจะมีค่าดังนี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาสาระใด ๆ ของเอกสารนี้ไปใช้

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

และที่บริเวณเขตปลอดพาหะเกือบทั้งหมดจะปรากฏในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นของหัวต่อแต่ถ้าเป็นหัวต่อพี-เอ็นปกติ จะพบว่าความกว้างของบริเวณเขตปลอดพาหะคือ

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

ซึ่งจะเห็นได้ชัดว่าความกว้างของบริเวณเขตปลอดพาหะขึ้นกับส่วนกลับของรากที่สองของความเข้มข้นของสารเจือโดยประมาณ

2.8.3 รอยต่อพี-เอ็น ภายใต้สภาวะการไบอัสย้อนกลับ (Kittel,2005; งามนิศย์,2530; จูตินัย,2531; งามนิศย์,2545; จูตินัย,2550; จูตินัย,2552; Runyan,1975; สุกฤษฎ์,2547; สมเกียรติ,2542)

ถ้าให้แรงดันไฟ V_a แกร้อยต่อในลักษณะที่ขั้วลบต่อเข้ากับสารสารกึ่งตัวนำชนิดพีและขั้วบวกต่อเข้ากับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และประมาณว่าแรงดัน V_a ทั้งหมดไปตกคร่อมอยู่ที่บริเวณรอยต่อ ดังนั้น แรงดันในตัว ϕ_i ของสมการที่ (2.100) จะถูกแทนที่ด้วย $(\phi_i - V_a)$

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

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

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

ดังนั้น

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 ค่าความจุไฟฟ้า (Kittel, 2005; งามนิศย์, 2530; จูตินัย, 2531; งามนิศย์, 2545; จูตินัย, 2550; จูตินัย, 2552; Runyan, 1975; สุกฤษฎี, 2547; สมเกียรติ, 2542; จูตินัย, 2552; วีระชัย, 2547; คุสิต, 2535)

ค่าความจุไฟฟ้าของสัญญาณขนาดเล็กต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของบริเวณรอยต่อ จะแสดงอยู่ในรูปของประจุ Q_s (ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่) ในบริเวณเขตปลอดพาหะ ดังความสัมพันธ์

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

จากนิยามของค่าความจุไฟฟ้าคือ

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

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

จะได้ว่า

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

และ

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

ในกรณีที่ $|V_a|$ มีค่ามากกว่า ϕ_i แล้วค่าความจุไฟฟ้าของรอยต่อแบบชั้นจะลดลงโดยแปรผกผันกับ

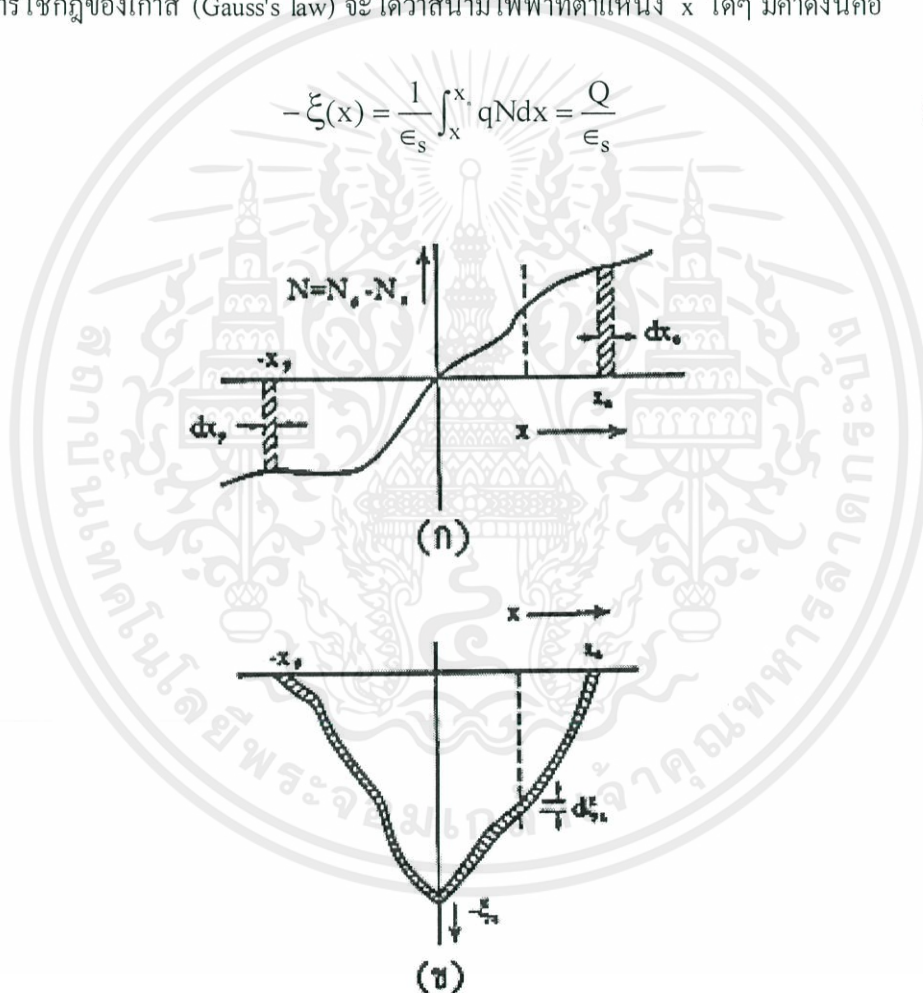
รากที่สองของ V_a ถ้าแทนสมการที่ (2.100) ลงในสมการที่ (2.105) จะได้ว่า $C = \epsilon_s / x_d$ ซึ่งเป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ความสัมพันธ์ที่รู้จักกันแพร่หลายสำหรับไฟฟ้าสถิตสัญญาณขนาดเล็ก ไม่ว่าจะคิดค่าที่ตรงกันอีกทั้งห้ามมิให้คัดแบบลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตาม ถ้าเป็นกรณีที่มีความหนาแน่นของสารเจือในบริเวณรอยต่อมีค่าไม่สม่ำเสมอ ในช่วง $-x_p$ ถึง x_n ดังรูปที่ 2.31 ประจุไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ Q ที่ปรากฏอยู่ระหว่าง x และขอบเขตบริเวณปลอดพาหะ x_n จะมีความสัมพันธ์ดังนี้

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

เมื่อ N คือค่าความหนาแน่นของประจุสุทธิ และมีค่าเท่ากับ $N_d - N_a$ แต่เนื่องจาก $\xi_x(x_n) = 0$ โดยการใช้กฎของเกาส์ (Gauss's law) จะได้ว่าสนามไฟฟ้าที่ตำแหน่ง x ใดๆ มีค่าดังนี้คือ

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



รูปที่ 2.31 โปรไฟล์ของค่าพารามิเตอร์ต่างๆในบริเวณเขตปลอดพาหะ

ก. แสดงความหนาแน่นอะตอมของสารเจือที่มีค่าไม่สม่ำเสมอภายในเขตปลอดพาหะ
 เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ข. ลักษณะของสนามไฟฟ้าในบริเวณเขตปลอดพาหะเมื่อแรงดันไบอัสย้อนกลับมีค่า
 ไม่ว่าจะฉีกใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 เปลี่ยนไปเล็กน้อย

จากรูปที่ 2.31 (ข) เมื่อแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ V_a มีค่าเปลี่ยนไป dV_a ขอบเขตของบริเวณปลอดพาหะทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะเปลี่ยนไป dx_n และประจุไฟฟ้าที่ปรากฏอยู่ในบริเวณตั้งแต่ x จนถึง x_n จะมีค่าดังนี้คือ

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

แล้วสนามไฟฟ้าที่จุด x จะเปลี่ยนไปตามความสัมพันธ์

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

แต่เนื่องจากพื้นที่กราฟ ξ_x กับ x จะสัมพันธ์กับ $\phi_i - V_a$ ดังนั้นแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปจะสอดคล้องกับพื้นที่แรเงาของรูปที่ 2.31 (ข) ดังนั้นจะได้ว่า

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

และจากนิยาม ค่าความจุไฟฟ้าของสัญญาณขนาดเล็ก คือ

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

ภายใต้สภาวะไบอัสย้อนกลับ บริเวณขอบเขตปลอดพาหะทั้งด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพีและด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะเลื่อนออกไปจากแนวเดิม สำหรับอนุพันธ์ของสมการที่ (2.29) เทียบกับ x_n คือ

$$\frac{dC}{dx_n} = \frac{\epsilon_s}{(x_n + x_p)^2} \left(1 + \frac{dx_p}{dx_n} \right) \quad (2.112)$$

แต่เนื่องจากขนาดของประจุไฟฟ้าทั้งสองข้างของบริเวณรอยต่อที่เปลี่ยนไปต่างต้องมีปริมาณที่เท่ากัน

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ศึกษาเพื่อการศึกษาเท่านั้น กรุณาอย่าให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนค่า dx_n ของสมการที่ (2.114) ลงในสมการที่ (2.108) จะได้ว่า

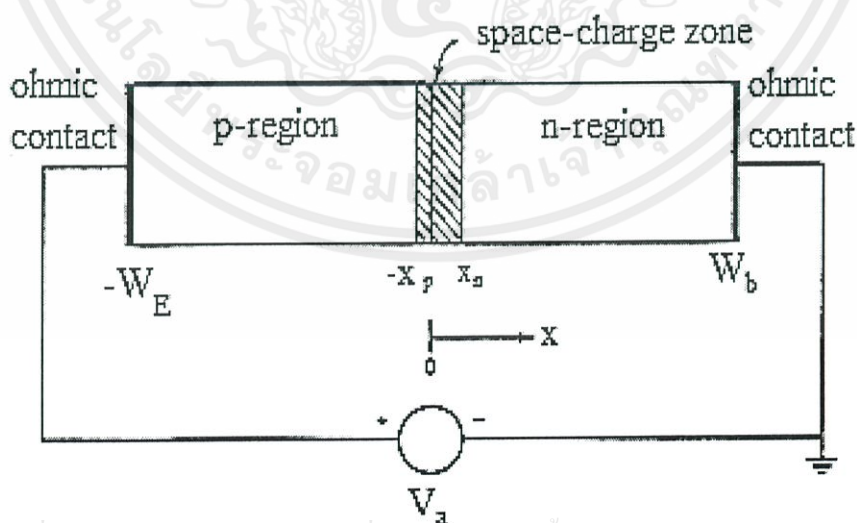
$$N(x_n) = \frac{C^2}{\epsilon_s (dC/dV_a)} \left(1 + \frac{N(x_n)}{|N(-x_p)|} \right) \quad (2.115)$$

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

2.10 ลักษณะกระแส-แรงดันไฟฟ้าของรอยต่อพี-เอ็น (Kittel, 2005; งามนิทย์, 2530; จูตินัย,

2531; งามนิทย์, 2545; จูตินัย, 2550; จูตินัย, 2552; Runyan, 1975; สุกฤษฎี, 2547; สมเกียรติ, 2542)

จากรูปที่ 2.32 แสดงการป้อนแรงดันไฟฟ้าตรง V_a ให้กับไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น ไดโอดมีพื้นที่หน้าตัด A ถ้าไม่มีการฉายแสงไปยังไดโอด กระแสที่ไหลผ่านไดโอดจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามขนาดของแรงดัน V_a แรงดันส่วนใหญ่จะตกคร่อมที่รอยต่อมากกว่าในเนื้อสารซึ่งถือว่าเป็นกลางทางไฟฟ้า (quasi-neutral region) และที่ขั้วไฟฟ้า (ohmic contact) แรงดันไฟฟ้าสุทธิที่รอยต่อจะเท่ากับ $(\phi_i - V_a)$ ถ้า V_a มีค่าเป็นบวก จะเรียกว่าการไบอัสไปหน้า แต่ถ้า V_a มีเครื่องหมายเป็นลบเรียกว่าการไบอัสย้อนกลับ กระแสที่ไหลในวงจรมีค่าน้อยมาก และกระแสจะคงที่ไม่ขึ้นกับค่า V_a ในช่วงของ V_a ขนาดหนึ่ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งรูปที่ 2.32 โครงสร้างของไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็นขณะถูกไบอัสไปหน้าด้วยแรงดัน V_a ไปใช้

2.11 เงื่อนไขขอบเขตของความเข้มข้นของพาหะข้างน้อย (Kittel, 2005; งามนิศย์, 2530;

ฐิตินัย, 2531; งามนิศย์, 2545; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2552; Runyan, 1975; สุกฤษฎี, 2547; สมเกียรติ, 2542; ฐิตินัย, 2552; วีรชัย, 2547; คุณิต, 2535)

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

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

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

ภายใต้การไบอัสด้วยแรงดันตามเงื่อนไขการฉีดพาหะระดับต่ำจะได้

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

และ

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

นิยามความหนาแน่นของอิเล็กตรอนส่วนเกิน n' และความหนาแน่นของโฮลส่วนเกิน p' ที่เกิดขึ้นคือ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

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

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แล้ว

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

และ

$$p'_n(x_n) = p_{no}(x_n) \left[\exp\left(\frac{qV_a}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.123)$$

2.12 การวิเคราะห์ที่ไดโอดอุดมคติ (Kittel,2005; งามนิศย์,2530; จูตินัย,2531; งามนิศย์,2545;

จูตินัย,2550; จูตินัย,2552; Runyan, 1975; สุกฤษฎี,2547; สมเกียรติ,2542; จูตินัย,2552; วีรัชย์, 2547; คุณิต,2535)

ในเบื้องต้นจะพิจารณาการฉีดโฮลจากด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพีข้ามรอยต่อเข้าไปในเนื้อสารชนิดสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นแล้วรวมตัวกับอิเล็กตรอน โดยผ่านศูนย์กลางการรวมตัว ดังนั้นสมการความต่อเนื่องในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นนอกรอยต่อ คือ

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

แต่จากสมการ

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

ดังนั้น

$$\frac{\partial p_n}{\partial t} = D_p \frac{\partial^2 p_n}{\partial x^2} - \frac{(p_n - p_{no})}{\tau_p} \quad (2.124)$$

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

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

ผลเฉลยของสมการที่ (2.125) คือ

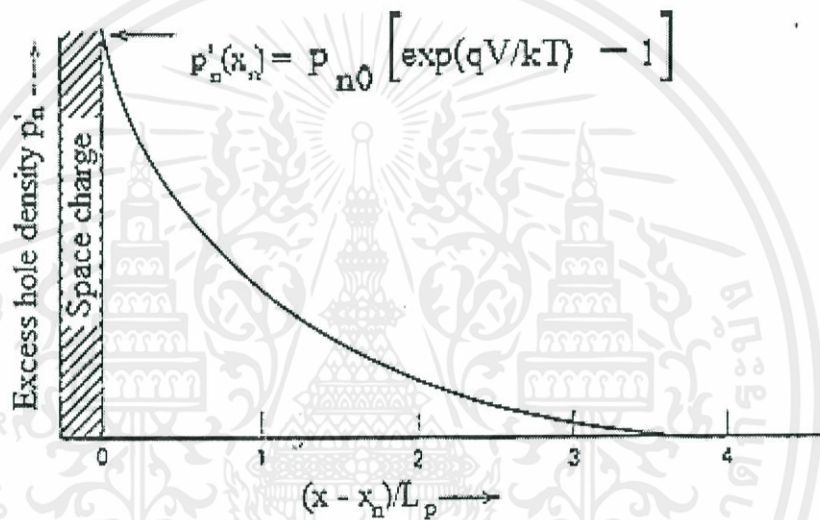
$$p'_n(x) = A \exp\left(-\frac{(x-x_n)}{\sqrt{D_p \tau_p}}\right) + B \exp\left(\frac{(x-x_n)}{\sqrt{D_p \tau_p}}\right) \quad (2.126)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.12.1 ลักษณะสมบัติของไดโอดยาว (long-base diode characteristics)

จากรูปที่ 2.33 ถ้า w_b มีความยาวมากกว่าความยาวแพร่ซึมของโฮล $L_p \equiv \sqrt{D_p \tau_p}$ ในกรณีที่โฮลที่ถูกฉีดเข้ามาในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะรวมตัวกับอิเล็กตรอนจนหมดก่อนที่จะถึงขั้วไฟฟ้า จะเรียกรูปนี้ว่าไดโอดยาว เนื่องจาก P_n' ควรจะต้องมีค่าน้อยลงตามระยะทาง x ที่เพิ่มขึ้น ด้วยเหตุผลนี้ค่าคงตัว B ในสมการที่ (2.126) จะต้องเป็นศูนย์ ดังนั้น

$$P_n'(x) = p_{no} [e^{(qV_a/kT)} - 1] e^{-(x-x_n)/L_p} \quad (2.127)$$



รูปที่ 2.33 การลดลงของความหนาแน่นของโฮลส่วนเกินในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นของรอยต่อพี-เอ็นของไดโอดยาวภายใต้การฉีดพาหะระดับต่ำด้วยแรงดันไบอัสไปหน้าค่าเท่ากับ V_a

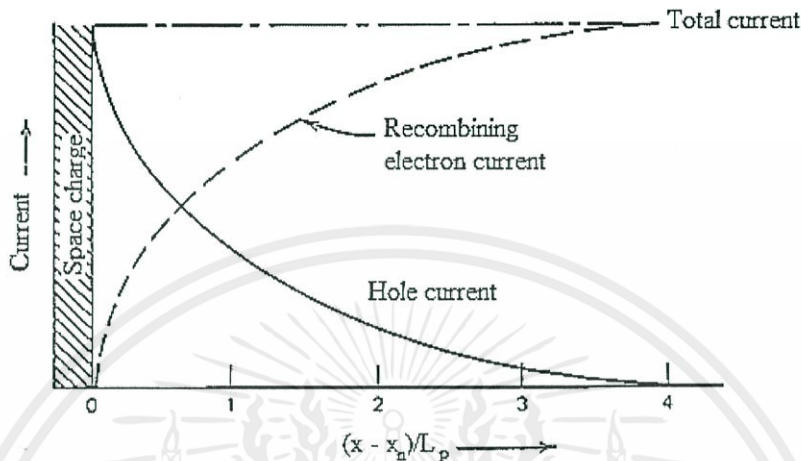
ความหนาแน่นของกระแสโฮลที่ไหลในเนื้อสาร จะคิดเฉพาะกระแสที่มาจากกลไกการแพร่ซึมเท่านั้น เนื่องจากถือว่าแรงดันตกคร่อมในเนื้อสารมีค่าน้อยมาก สนามไฟฟ้าจึงมีค่าเป็นศูนย์ จะได้ว่า

$$J_p(x) = -qD_p \frac{dp_n}{dx} = qD_p \frac{p_{no}}{L_p} [e^{(qV_a/kT)} - 1] e^{-(x-x_n)/L_p},$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือเผยแพร่ข้อมูลต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= qD_p \frac{n_i^2}{N_d L_p} [e^{(qV_a/kT)} - 1] e^{-(x-x_n)/L_p}, \quad (2.128)$$

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



รูปที่ 2.34 กระแสโฮล (เส้นทึบ) กับกระแสอิเล็กตรอน (เส้นประ) ในเนื้อสารด้านสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น ซึ่งอยู่นอกรอยต่อพี-เอ็น ซึ่งประมาณว่าเป็นกลางทางไฟฟ้า (quasi-neutral region) เนื่องจากประมาณว่าไม่ได้รับผลกระทบจากแรงดันไบอัสไปหน้า V_a

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

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

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

$$J_t = J_p(x_n) + J_n(-x_p) = qn_i^2 \left(\frac{D_p}{N_d L_p} + \frac{D_n}{N_a L_n} \right) \left[e^{(qV/kT)} - 1 \right]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= J_0 [e^{(qV/kT)} - 1] \tag{2.130}$$

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

และเรียก J_0 ว่าความหนาแน่นของกระแสอิ่มตัว

2.12.2 ลักษณะสมบัติของไดโอดสั้น

ถ้าทั้ง W_B และ W_E ต่ำกว่า ความยาวแพร่ซึมของ โฮล L_p และของอิเล็กตรอน L_n จะมีเพียงบางส่วนของพาหะข้างน้อยที่สูญหายไปในเรื่องสาร เนื่องจากการรวมตัวกับพาหะข้างมากในเรื่องสารเหล่านั้น แล้วพาหะข้างน้อยนี้จะเกิดการรวมตัวกันหมดที่ขั้วไฟฟ้าที่ตำแหน่ง W_B และ W_E สำหรับไดโอดสั้น จากการกระจายพจน์ในสมการที่ (2.126) ด้วยอนุกรมเทย์เลอร์ จะได้ว่า

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

ที่ขั้วไฟฟ้า ณ ที่ตำแหน่ง

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

หรือ

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

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

ที่ตำแหน่ง $x = x_n$ จะได้ว่า

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

และที่ตำแหน่ง $x = x_n$ นี้สมการที่ (2.133) และสมการที่ (2.131) ต้องมีค่าเท่ากัน นั่นคือ

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

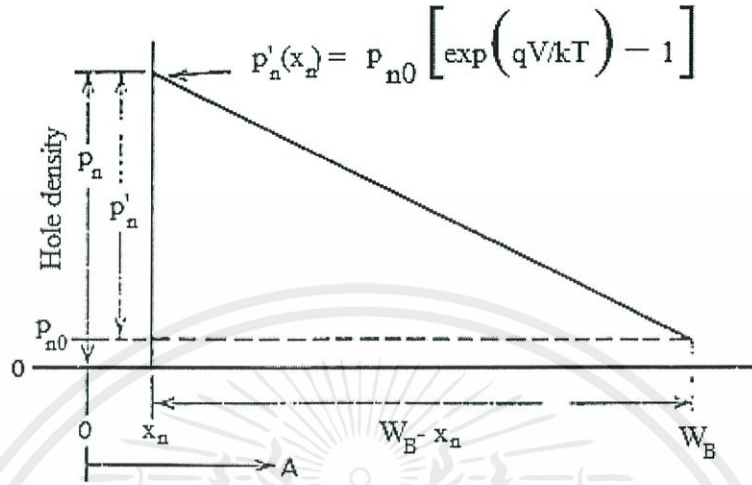
แล้ว

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

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

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

เมื่อ $W_B' = W_B - x_n$ ความเข้มข้นของโฮลส่วนเกินจะลดลงแบบเชิงเส้นกับระยะทางที่เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.35



รูปที่ 2.35 ความหนาแน่นของโฮลภายในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นของรอยต่อพี-เอ็น ของไดโอดสั้นภายใต้การไบอัสไปหน้า V_a

จะหาความหนาแน่นของกระแสโฮล จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
 J_p &= -qD_p \frac{dp}{dx} = qD_p \frac{p_{n0}}{W_B'} [e^{(qV_a/kT)} - 1] \\
 &= qD_p \frac{n_i^2}{N_d W_B'} [e^{(qV_a/kT)} - 1]
 \end{aligned}
 \tag{2.136}$$

ในทำนองเดียวกันสามารถที่จะหาความหนาแน่นของกระแสอิเล็กตรอนที่ฉีดเข้าไปในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ดังสมการ

$$J_n = qD_n \frac{n_i^2}{N_a W_E'} [e^{(qV_a/kT)} - 1]
 \tag{2.137}$$

ความหนาแน่นกระแสสุทธิในไดโอดสั้นคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เมื่อ
$$J_0 = qn_i^2 \left(\frac{D_p}{N_d W_B} + \frac{D_n}{N_a W_E} \right)$$

ในทางปฏิบัติไดโอดที่ใช้งานจริงอาจจะเป็นรูปแบบการผสมของไดโอดสั้นกับไดโอดยาวก็ได้ซึ่งการหาค่ากระแสอิ่มตัวและ โวลต์สามารถนำเอาผลที่ได้จากการวิเคราะห์ไดโอดยาวและไดโอดสั้นมาประยุกต์ใช้ได้ทันที จากสมการที่ (2.130) และสมการที่ (2.138) ภายใต้การไบอัสไปหน้า กระแสจะเพิ่มขึ้นอย่างมากตามค่าของ V_a เนื่องจากการฉีดพาหะข้างมากข้ามรอยต่อ แต่ภายใต้การไบอัสย้อนกลับจะมีกระแสอิ่มตัวปริมาณเล็กน้อยไหลผ่านไดโอด เนื่องจากการฉีดพาหะข้างน้อยข้ามรอยต่อ โดยที่กระแสอิ่มตัวนี้ไม่ขึ้นกับแรงดันย้อนกลับ

2.13 กระแสเนื่องจากบริเวณประจุค้าง (space-charge-region currents) (Kittel,2005; งามนิทย์,2530; จูตินัย,2531; งามนิทย์,2545; จูตินัย,2550; จูตินัย,2552; Runyan,1975; สุกฤษฎี, 2547; สมเกียรติ,2542; จูตินัย,2552; วีรัชย์,2547; คุณิต,2535)

ในกรณีไดโอดอุดมคติซึ่งมีลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ดังสมการที่ (2.130) และสมการที่ (2.138) นั้นยังไม่ได้อธิบายถึงผลของกระแสที่อาจลดลงภายใต้การไบอัสไปหน้า เนื่องจากพาหะอิสระสูญหายไปบางส่วนซึ่งเกิดจากกลไกการรวมตัวผ่านศูนย์กลางการรวมตัวในบริเวณประจุค้างในทางกลับกันพาหะอาจถูกสร้างขึ้นได้ภายใต้การไบอัสย้อนกลับ ยังผลให้กระแสอิ่มตัวมีค่ามากกว่าค่าที่ได้ในสมการของไดโอดอุดมคติ

จากทฤษฎีของช็อกเลย์-ฮอลล์-รีด สามารถจะหาอัตราการเกิด-การรวมตัวสุทธิ จะได้ว่า

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

ความหนาแน่นของกระแสเนื่องจากพาหะที่เกิดหรือรวมตัวในบริเวณประจุค้างคือ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าประมาณว่า $E_i \approx E_{i,p} = n = n_i \exp(qV_a / 2kT)$ แล้วแก้สมการ (2.139) จะกลายเป็น

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

แทนสมการที่ (2.142) ลงในสมการที่ (2.141) จะได้

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

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

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

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

ภายใต้การไบอัสกลับทางตัวเศษของสมการที่ (2.139) จะมีค่าเป็น $-n_i^2$ ยังผลให้ U มีค่าเป็นลบ แสดงว่ามีการเกิดพาหะสุทธิ (net generation) ขึ้นในบริเวณประจุก้าง บริเวณความกว้าง x_i ซึ่งมีค่าน้อยกว่าและอยู่ภายในบริเวณประจุก้าง x_d เท่านั้นที่จะมีการเกิดพาหะสุทธิอย่างมีประสิทธิภาพ และต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไข $p = n \ll n_i$ ซึ่งจะทำให้ U ของสมการที่ (2.139) กลายเป็น

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีก (2.144) ใช้

$$J_g = \frac{qn_i x_i}{2\tau_0}$$

โดยประมาณว่าศูนย์กลางการเกิด การรวมตัวจะอยู่ที่บริเวณ E_i ซึ่งจะให้ประสิทธิภาพสูงสุด สำหรับรอยต่อ $p^+ - n$ บริเวณประจุค้างจะอยู่ในเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ความกว้างของบริเวณประจุค้าง x_d และบริเวณ x_i ซึ่งจะมีอัตราการเกิดพาหะสูงสุดจะแสดงได้ดังความสัมพันธ์

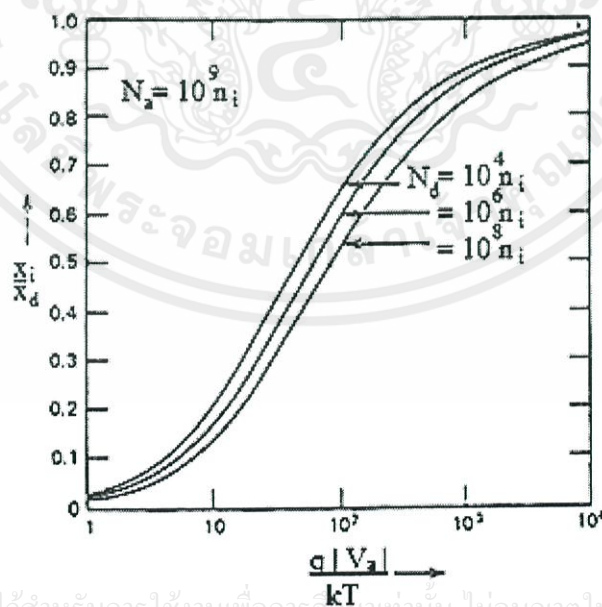
$$x_d = \left[\frac{2\epsilon_s}{qN_d} (\phi_i - V_a) \right]^{\frac{1}{2}}$$

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

และ

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

ซึ่ง V_a คือแรงดันไบอัส ($V_a < 0$) ในกรณีไบอัสย้อนกลับ ทั้ง x_d และ x_i จะขึ้นกับรากที่สองของแรงดันไบอัสย้อนกลับ ความแตกต่างระหว่าง x_d และ x_i จะมิต่ำลง เมื่อแรงดันย้อนกลับมีค่ามาก รูปที่ 2.36 อัตราส่วนของ x_i/x_d ที่เป็นฟังก์ชันกับแรงดันย้อนกลับที่ความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ค่าต่างๆของรอยต่อแบบชั้นบันไดด้านเดียว $p^+ - n$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีรูปที่ 2.36 อัตราส่วนของ x_i/x_d เป็นฟังก์ชันกับแรงดันย้อนกลับที่ความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ค่าใช้

ต่างๆของรอยต่อ $p^+ - n$

2.14 การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ (จูตินัย, 2556)

เทคนิคการเตรียมฟิล์มบาง โดยวิธีการระเหยด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศนั้น เป็นวิธีการเตรียมฟิล์มบางวิธีหนึ่งของการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการระเหยสารซึ่งต้องเตรียมในสุญญากาศที่ระดับความดันประมาณ 10^{-5} - 10^{-7} ทอร์ วัตถุประสงค์ของการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีนี้คือการควบคุมการเคลื่อนย้ายอะตอมจากแหล่งกำเนิดความร้อน ไปยังฐานรองรับที่ห่างออกไปแล้ว เกิดเป็นฟิล์มบาง

2.14.1 อัตราการระเหยสาร

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

$$\Phi_e = \frac{3.513 * 10^{22}}{(MT)^{1/2}} P_e \quad \text{โมเลกุลต่อตารางเซนติเมตร-วินาที} \quad (2.147)$$

| | | |
|----------------|-----|--|
| เมื่อ Φ_e | คือ | ฟลักซ์ของจำนวนอะตอมหรือโมเลกุลของสารที่ระเหยต่อหน่วยพื้นที่ต่อเวลา |
| P_e | คือ | ความดันสมดุล (equilibrium pressure) มีหน่วยเป็นทอร์ |
| M | คือ | มวลโมเลกุล |
| T | คือ | อุณหภูมิในหน่วยเคลวิน |

อัตราการระเหยมวลสาร (mass evaporation rate: Γ_e) สามารถหาได้จาก

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

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

2.14.2 แหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้ในการระเหยสารด้วยไฟฟ้า

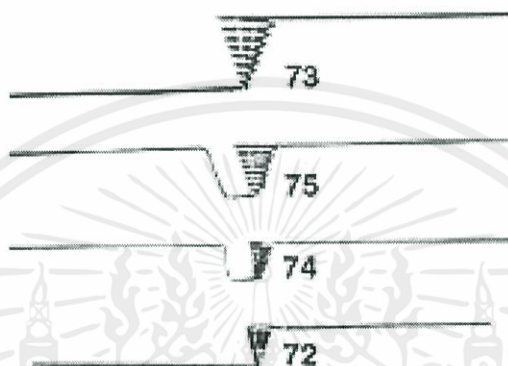
ในการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการระเหยด้วยความร้อนจะต้องให้ความร้อนแก่สารกึ่งตัวนำ

ที่ต้องการนำมาเคลือบบนผิวหน้าแผ่นฐานรองโดยทั่วไปแล้วจะใช้ตัวต้านทานหรือขดลวดเหนี่ยวนำ เป็นแหล่งกำเนิดโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่ตัวต้านทานหรือขดลวดเหนี่ยวนำได้ แหล่งกำเนิดความร้อนมีหลายชนิด แบ่งออกได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแบบลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.14.2.1 แหล่งกำเนิดชนิดทั้งสแตน

แหล่งกำเนิดนี้จะอยู่ในรูปพันรอบเดียวหรือหลายรอบเป็นเกลียวทรงกระบอกหรือรูปโคน โดยขดลวดทรงกระบอกจะใช้สำหรับโลหะที่หลอมละลายได้เร็ว ส่วนขดลวดรูปโคนจะใช้ได้ดีกับโลหะที่หลอมละลายช้า ขดลวดทั้งสแตนสามารถทำงานได้จนกระทั่งอุณหภูมิ 2,200 เคลวิน เกินกว่านี้ประสิทธิภาพจะลดลง

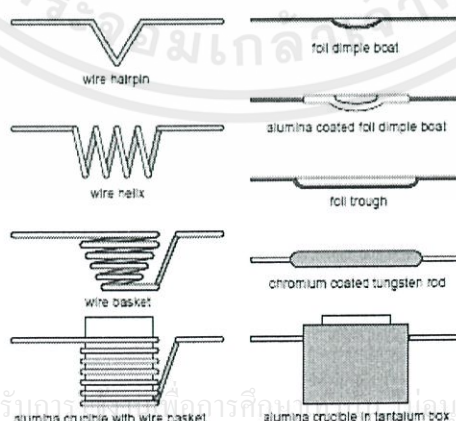


รูปที่ 2.37 แหล่งกำเนิดชนิดทั้งสแตน

2.14.2.2 แหล่งกำเนิดชนิดแผ่นโลหะทรงรูป

แหล่งกำเนิดชนิดแผ่นโลหะทรงรูป เช่น ทั้งสแตน แทนทาลัม และ โมลิบดีนัมจะเหมือนกับอุปกรณ์ที่เป็นขดลวดคือ มีความต้านทานในตัวเองและให้ความร้อนที่ค่าแรงดันต่ำแต่กระแสสูง แหล่งกำเนิดเหล่านี้จะถูกสร้างขึ้นมาในรูปแบบต่างๆ

Resistance Heated Evaporation Sources



รูปที่ 2.38 แหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้ระเหยสารด้วยไฟฟ้าแบบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาค้นคว้าเพื่อการศึกษาค้นคว้าโดยญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.14.3 ปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อน (thermal oxidation) (ฐิตินัย, 2556)

ผลึกพหุพันธ์ของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O สามารถเกิดได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของ โลหะ Cu โดยอาศัยความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 1,273 - 1,773 เคลวิน และในช่วงเวลานานหลายนาที่จนถึงหลายชั่วโมงขึ้นอยู่กับความหนาของสารตั้งต้น มูซาและเพื่อนร่วมงาน (Musa et al., 1998) ทำการเตรียมสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนในเตาเผาที่ความดันบรรยากาศปกติโดยใช้แผ่นโลหะ Cu เป็นสารตั้งต้น ใส่อุณหภูมิในช่วง 473 - 1,323 เคลวิน พบว่าเฟสของสารประกอบ Cu_2O เกิดขึ้นก่อนแต่เมื่อเวลาผ่านไปจะเกิดเฟสของสารประกอบ CuO ตามมา ภายหลัง การเกิดเฟสของสารประกอบ CuO จากปฏิกิริยาออกซิเดชันที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1,273 เคลวิน สามารถอธิบายได้ดังสมการ



สำหรับเฟสของสารประกอบ CuO ที่ไม่ต้องการ สามารถที่จะกำจัดออกได้โดยการกัดออกด้วยสารละลายของ FeCl_3 , HCl และสารละลายของ HNO_3 กับ NaCl ฟิล์มบางที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 1,323 เคลวิน พบว่าเป็นเฟสเดียวของสารประกอบ Cu_2O โดยการตรวจสอบด้วย XRD และ SEM ส่วนฟิล์มบางที่เตรียมได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1,313 เคลวิน จะเกิดเป็นเฟสผสมของสารประกอบ Cu_2O และ ของสารประกอบ CuO เสมอ แสดงว่ายิ่งอุณหภูมิของปฏิกิริยาออกซิเดชันมีค่าต่ำลงปริมาณของเฟสของสารประกอบ Cu_2O ที่เกิดขึ้นก็จะยิ่งลดลงด้วยจากข้อบ่งชี้ทางอุณหพลศาสตร์ระบุได้ว่า การระงับเฟสของสารประกอบ CuO ไม่ให้เกิดขึ้นร่วมกับเฟสของสารประกอบ Cu_2O อยู่ที่อุณหภูมิ 1,313 เคลวิน ปฏิกิริยาออกซิเดชันที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1,313 เคลวิน จะเกิดเฟสของสารประกอบ Cu_2O ขึ้นก่อน จากนั้นจะค่อยๆ กลายเป็นของสารประกอบ CuO โดยขึ้นกับอุณหภูมิและช่วงเวลาที่ใช้ ฟิล์มบางที่เตรียมได้โดยยังไม่ได้แอนนัลจะมีสภาพต้านทานไฟฟ้าค่อนข้างสูงในระดับ 2×10^3 โอห์ม-เซนติเมตร และสภาพคล่องของพาหะมีค่าประมาณ 75 ตารางเซนติเมตรต่อโวลต์-วินาที แต่เมื่อนำไปแอนนัลในบรรยากาศก๊าซ HCl เพื่อทำการเจือด้วยอะตอม Cl สภาพต้านทานไฟฟ้าจะลดลงและสภาพคล่องของพาหะจะเพิ่มขึ้นเป็น 130 ตาราง

เซนติเมตรต่อโวลต์-วินาที จากภาพถ่าย SEM จะเห็นว่า การแอนนัลส่งผลให้เนื้อฟิล์มแน่นขึ้นและเกรนมีขนาดโตขึ้นซึ่งเหมาะสมที่จะนำไปประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นกระจกสไลด์ของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ โดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส และได้ทำการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัย มีวิธีการดำเนินงานทดลองดังนี้ (ฐิตินัย, 2545; ฐิตินัย, 2546; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2552; งามนิตย์, 2551)

3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์

1. แผ่นกระจกสไลด์ขนาด 12×15 ตารางมิลลิเมตร
2. บีกเกอร์ขนาด 200 มิลลิลิตร
3. เครื่องสั่นด้วยคลื่นอัลตราโซนิก
4. เครื่องเป่าลมร้อน
5. แก๊สไนโตรเจน
6. นาฬิกาจับเวลา
7. ปากคีบ
8. เตาอบ
9. สารเคมี
 - 9.1 น้ำยาล้างจาน
 - 9.2 น้ำปลออดประจุ
 - 9.3 อะซิโตน
 - 9.4 เอทานอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิธีพ่นชั้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส

1. ระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ
2. กระจกสไลด์ที่เคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เตรียมไว้เพื่อนำไปใช้ทำเป็นแผ่นฐานรองรับของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS
3. สารตั้งต้นที่เป็นผงของ Cu_2O ปริมาณ 0.4 กรัม และ CdS ปริมาณ 0.6 กรัม
4. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่งของ sartorius
5. เตาเผาสาร

3.2 ขั้นตอนในการเตรียมสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิธีพ่นชั้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส (ฐิตินัย, 2545; ฐิตินัย, 2546; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2552; งามนิตย์, 2551)

3.2.1 การเตรียมแผ่นกระจกสไลด์เพื่อใช้เป็นแผ่นฐานรองรับ

1. นำแผ่นกระจกสไลด์ขนาด 25×75 ตารางมิลลิเมตร ไปแช่ในน้ำที่ผสมน้ำยาล้างจานเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อทำการล้างคราบไขมันและสิ่งสกปรก
2. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วยน้ำปอดคประจุ
3. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปแช่ในอะซิโตนเป็นเวลา 10 นาที
4. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปแช่ในเอทานอลเป็นเวลา 10 นาที
5. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วยน้ำปอดคประจุ 3 ครั้งๆละ 10 นาที
6. ทำการเป่าแห้งแผ่นกระจกสไลด์ด้วยเครื่องเป่าลมร้อนและทำการตัดเป็นแผ่นเล็กมี

ขนาด 12×15 ตารางมิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และสงวนสิทธิ์ในเนื้อหาและข้อมูลทั้งหมดไว้เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยและพัฒนาเท่านั้น ผู้ใช้ต้องรับผิดชอบต่อการใช้งานโดยไม่ผิดกฎหมาย

7. ทำการล้างด้วยน้ำปอดคประจุเป็นเวลา 10 นาที ตามขั้นตอนในข้อ 2-7 และจะนำปิกเกอร์ไปใส่ในเครื่องสั่นด้วยคลื่นอัลตราโซนิค
8. ทำการเป่าแห้งด้วยเครื่องเป่าลมร้อนและนำแผ่นสไลด์ไปอบแห้งเป็นเวลา 30 นาที

3.2.2 การเตรียมสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส

1. ทำความสะอาดระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในสุญญากาศโดยทำการขจัดสิ่งปนเปื้อนต่างๆ เช่น คราบไขมันและผงฝุ่นด้วยอะซิโตนและเมทานอล
2. ทำการติดตั้งชุดอุปกรณ์ต่างๆ ภายในระบบระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในสุญญากาศ ให้ครบถ้วน
3. ทำการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ โดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส โดยเริ่มจากการนำสารตั้งต้นที่ Cu_2O ปริมาณ 0.4 กรัมแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศเป็นเวลา 1 ชั่วโมงเพื่อไล่ความชื้นออกให้หมดมาเป็นสารตั้งต้นที่บรรจุใส่ลงในภาชนะระเหยสาร (boat) ที่ทำจากโลหะโมลิบดีนัมเคลือบด้วยอลูมินา
4. นำแผ่นฐานรองรับกรณีที่เป็นกระจกสไลด์ที่ได้เตรียมไว้แล้วมาวางลงบนหน้ากาก (mask) ซึ่งทำจากแผ่นอลูมิเนียมจะเป็นช่องตามแบบและขนาดที่ต้องการ หลังจากนั้นปิดห้องสุญญากาศ (ภาชนะสุญญากาศ) ให้เรียบร้อย
5. ตรวจสอบระบบระเหยสารเคมีว่าวาล์วสุบอากาศออกและวาล์วปล่อยอากาศเข้าให้อยู่ในตำแหน่งที่ปิดเรียบร้อย
6. ทำการเปิดปั๊มกลโรตารีจากนั้นเปิดวาล์วสุบอากาศออกจนได้ความดันประมาณ 9×10^{-2} มิลลิบาร์ แล้วจึงเปิดปั๊มเทอร์โบจนได้ความดันตามต้องการในการทดลองนี้ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ถูกเปลวไฟมา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ ใช้ ความดันช่วง 5×10^{-5} ถึง 2×10^{-6} มิลลิบาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่หรือใช้เพื่อวัตถุประสงค์อื่นใดได้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์

7. ทำการเปิดแผ่นกั้นการระเหย (shutter) แล้วเริ่มทำการระเหยสารเคมี โดยมีแผ่นกระจกสไลด์เป็นแผ่นฐานรองรับ โดยการเปิดสวิตช์เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 10 โวลต์ 200 แอมแปร์ จากนั้นทำการปรับศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าอย่างช้าๆ จนกระทั่งได้ค่ากระแสอยู่ที่ประมาณ 60 แอมแปร์ แล้วแช่พักสักประมาณ 5 นาที เพื่อให้ความดันไออิ่มตัว ต่อจากนั้นจึงค่อยๆ เพิ่มกระแสต่อไปอย่างช้าๆ จนถึง 100-130 แอมแปร์จนได้ความหนาของฟิล์มบางประมาณ 500 - 800 นาโนเมตร ซึ่งรวมแล้วทั้งหมดจะใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางประมาณ 30 นาที
8. เมื่อได้ความหนาของฟิล์มตามที่ต้องการแล้วให้ปิดแผ่นกั้นการระเหย และทำการปิดวารีแอกโดยค่อยๆ ลดกระแสลงอย่างช้าๆ จนกระทั่งเป็นศูนย์
9. ต่อจากนั้นรอให้ระบบทำงานต่อไปอีกประมาณ 45 นาที เพื่อให้อุณหภูมิของห้องสุญญากาศลดลงแล้วจึงปิดปั๊มเทอร์โบ จากนั้นให้ระบบทำงานต่อไปอีกประมาณ 1 ชั่วโมงแล้วปิดวาล์วสูบอากาศและปั๊มกลโรตารี
10. รอจนอุณหภูมิภายในห้องสุญญากาศมีอุณหภูมิเท่ากับภายนอก จึงค่อยทำการเปิดวาล์วปล่อยอากาศเข้าภายในห้องสุญญากาศอย่างช้าๆ โดยใช้เวลาประมาณ 15 นาที
11. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่ถูกเคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO เป็นที่เรียบร้อยแล้วออกมาจากห้องสุญญากาศ นำไปตรวจสอบสภาพผิวหน้าของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์
12. ทำการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ โดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส โดยเริ่มจากการนำสารตั้งต้นที่เป็นผง CdS ปริมาณ 0.6 กรัมแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศเป็นเวลา 1 ชั่วโมงเพื่อไล่ความชื้นออกให้หมดมาเป็นสารตั้งต้นที่บรรจุใส่ลงในเบ้าภาชนะระเหยสาร (boat) ที่ทำด้วยทั้งสแตน
13. นำแผ่นฐานรองรับทั้งในกรณีที่เป็นกระจกสไลด์และที่เป็นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO มาวางลงบนหน้ากาก (mask) ซึ่งทำจากแผ่นอลูมิเนียมเจาะเป็นช่องตามแบบและขนาดที่ต้องการ หลังจากนั้นปิดห้องสุญญากาศ (ภาชนะสุญญากาศ) ให้เรียบร้อย

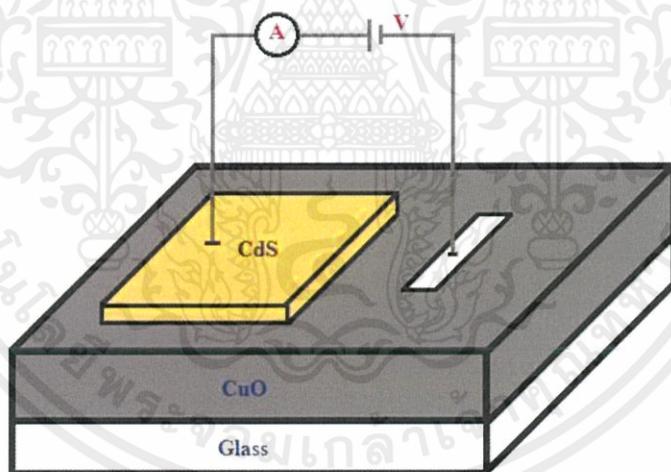
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่...
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้...
 การค้า

14. ตรวจสอบระบบระเหยสารเคมีว่าวาล์วสูบอากาศออกและวาล์วปล่อยอากาศเข้าให้อยู่ในตำแหน่งที่ปิดเรียบร้อย
15. ทำการเปิดปั๊มกลโรตารีจากนั้นเปิดวาล์วสูบอากาศออกจนได้ความดันประมาณ 9×10^{-2} มิลลิบาร์ แล้วจึงเปิดปั๊มเทอร์โบจนได้ความดันตามต้องการในการทดลองนี้ ใช้ความดันช่วง 5×10^{-5} ถึง 2×10^{-6} มิลลิบาร์
16. ทำการเปิดแผ่นกั้นการระเหย (shutter) แล้วเริ่มทำการระเหยสารเคมีโดย มีแผ่นกระจกสไลด์เป็นแผ่นฐานรองรับ โดยการเปิดสวิตซ์เครื่องกำเนิดไฟฟ้า 10 โวลต์ 200 แอมแปร์ จากนั้นทำการปรับศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าอย่างช้าๆ จนกระทั่งได้ค่ากระแสอยู่ที่ประมาณ 60 แอมแปร์ แล้วแช่พักสักประมาณ 5 นาที เพื่อให้ความดันไออิ่มตัว ต่อจากนั้นจึงค่อยๆเพิ่มกระแสต่อไปอย่างช้าๆจนถึง 100-130 แอมแปร์ จนได้ความหนาของฟิล์มบางประมาณ 500-800 นาโนเมตร ซึ่งรวมแล้วทั้งหมดจะใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบางประมาณ 30 นาที
17. เมื่อได้ความหนาของฟิล์มตามที่ต้องการแล้วให้ปิดแผ่นกั้นการระเหยและทำการปิดวาล์วแอคโดยค่อยๆลดกระแสลงอย่างช้าๆจนกระทั่งเป็นศูนย์
18. ต่อจากนั้นรอให้ระบบทำงานต่อไปอีกประมาณ 45 นาที เพื่อให้อุณหภูมิของห้องสุญญากาศลดลงแล้วจึงปิดปั๊มเทอร์โบ จากนั้นให้ระบบทำงานต่อไปอีกประมาณ 1 ชั่วโมง แล้วปิดวาล์วสูบอากาศและปั๊มกลโรตารี
19. รอจนอุณหภูมิภายในห้องสุญญากาศมีอุณหภูมิเท่ากับภายนอกจึงค่อยทำการเปิดวาล์วปล่อยอากาศเข้าภายในห้องสุญญากาศอย่างช้าๆ โดยใช้เวลาประมาณ 15 นาที
20. นำแผ่นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่ถูกเคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS อีกหนึ่งชั้นเป็นที่เรียบร้อยแล้วออกมาจากห้องสุญญากาศ นำไปตรวจสอบสภาพผิวหน้าของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์หลังจากนั้นจึงนำไปเก็บไว้ในภาชนะควบคุมความชื้น
21. นำแผ่นกระจกสไลด์ที่ถูกเคลือบด้วยฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS เป็นที่เรียบร้อยแล้วแล้วออกมาจากห้องสุญญากาศ นำไปตรวจสอบสภาพผิวหน้าของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์
22. ศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่เตรียมได้ทั้งหมด ได้แก่ ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่กล้องจุลทรรศน์ ารใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น

จุลภาค ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ จากเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ Bruker รุ่น D8 Advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ในย่าน 1.5406 อังสตรอม โดยใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์ และความต่างศักย์ 25 กิโลโวลต์, ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) ของ JEOL รุ่น JSM-6400, ทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิในช่วง 10 - 300 เคลวิน โดยการทำให้ขั้วเล็กโทรด ด้วยการป้ายกาวเงินนำไฟฟ้าเป็นรูปวงกลมให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.4 เซนติเมตรทางด้านที่เป็น CdS/CuO แล้วจากนั้นจึงนำไปศึกษาสมบัติเฉพาะของไดโอดด้วยการวัดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า กระแสไฟฟ้า- แรงดันไฟฟ้า (I-V curve) แล้วต่อจากนั้นจึงนำไปศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปีโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วง 25 - 60 องศาเซลเซียส ต่อไป



รูปที่ 3.1 ภาพวาด สิ่งประดิษฐ์รอยต่ออิมพีแดนซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนแผ่นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO

โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารทสวงวน ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO และ CdS ที่ถูกเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ และ สิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่เตรียม โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่ แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส (ฐิตินัย, 2545; ฐิตินัย, 2546; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2552; งามนิศย์, 2551)

3.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO และ CdS ที่ถูกเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็น กระจกสไลด์ และสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่เตรียมได้ทั้งหมด ไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จาก เครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ Bruker รุ่น D8 Advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ในย่าน $Cu_{K\alpha}$ 1.5406 อังสตรอม โดยใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์ และความต่างศักย์ 25 กิโลโวลต์

3.3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO และ CdS ที่ถูกเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็น กระจกสไลด์ และสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่เตรียมได้ทั้งหมด ไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราด (scanning electron microscope: SEM) ของ JEOL รุ่น JSM-6400

3.3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางแสง

นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO และ CdS ที่ถูกเคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็น กระจกสไลด์และสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่เตรียมได้ทั้งหมด ไปศึกษาคุณสมบัติทางแสง ด้วยการวัดค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงด้วยเครื่องยว วิ-วิสตีเบลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS spectrophotometer) ยี่ห้อ Thermo electron corporation ($He\ \lambda\ ions\ \alpha$) โดยใช้ความยาวคลื่นช่วง 190 - 1100 นาโนเมตรเพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้าง แถบพลังงาน และคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า

นำสิ่งประดิษฐ์รอยต่ออิมพีแดนซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่เตรียมได้ทั้งหมดไปทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิในช่วง 10 - 300 เคลวิน ได้แก่ นำไปศึกษาสมบัติเฉพาะของไดโอดด้วยการวัดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า กระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า (I-V curve) แล้วต่อจากนั้นจึงนำไปศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปีโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ที่อุณหภูมิต่างๆในช่วง 25 – 60 องศาเซลเซียส

3.3.4.1 การศึกษาสมบัติเฉพาะของสิ่งประดิษฐ์รอยต่ออิมพีแดนซ์ของฟิล์มบางของสาร

กึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ด้วยการวัดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า กระแสไฟฟ้า – แรงดันไฟฟ้า (I - V curve) แล้วต่อจากนั้นจึงนำไปศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปีโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วง 25 – 60 องศาเซลเซียส (จูติ นัย , 2 5 4 5; จูตินัย,2546; จูตินัย, 2549; จูตินัย, 2550; จูตินัย, 2552; งามนิศย์, 2551; งามนิศย์, 2553)

- เครื่อง Precision LCR meter ของ Agilent รุ่น E4980A ใช้สัญญาณไฟสลับ (ac signal) เท่ากับ 0.5 โวลต์
- มัลติมิเตอร์ รุ่น METEC 8007
- เครื่องทำความเย็น ไครโอจินิกและไครโอสเตต ยี่ห้อLeybold รุ่นRW2
- เครื่องควบคุมอุณหภูมิ PL รุ่น MODEL 9700
- กาวเงินนำไฟฟ้าใช้ทำเป็นขั้วอิเล็กทรอนิกส์ โดยอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
- สายไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

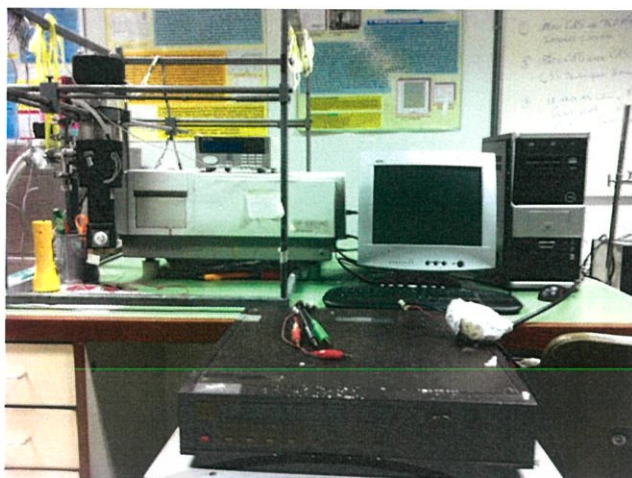


รูปที่ 3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียม สิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิ ธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.3 อุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าความต้านทาน แผ่นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO และ CdS โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยการให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับประมาณ 100 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า (I-V curve) ที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วง 10 - 300 เคลวิน ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

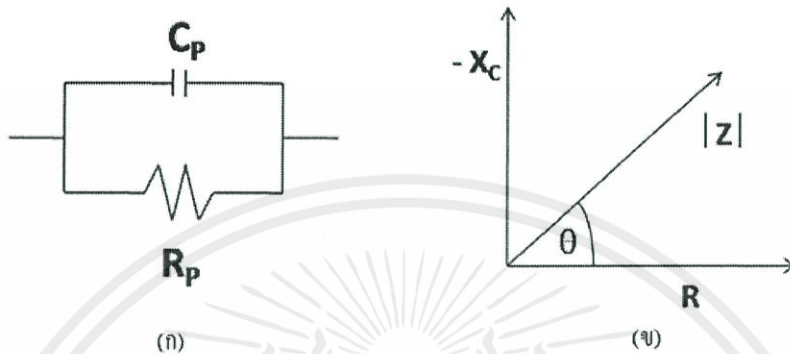


รูปที่ 3.5 อุปกรณ์ที่ใช้ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า (I-V curve) และอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ที่อุณหภูมิต่างๆ ในช่วง 25 - 60 องศาเซลเซียส ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การวิเคราะห์การวัดค่าสัมบูรณ์ของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน (ฐิตินัย, 2545; ฐิตินัย, 2546; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2552; งามนิศย์, 2551)

วงจรสมมูลที่เหมาะสมในการอธิบายสมบัติของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน (Z) ของสารกึ่งตัวนำ CdS คือ ความต้านทาน R_p ต่อขนานกับความจุ C_p ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 วงจรสมมูล R_p กับ C_p และแผนภาพแสดงเฟสของค่า $-X_c$ กับ R

ก. วงจรสมมูล R_p กับ C_p ต่อขนานกัน

ข. ค่าสัมบูรณ์ของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน

ค่าจินตภาพแห่งความจุ (capacitive reactance, X_c) คือ

$$X_c = \frac{1}{\omega C_p} \quad (3.1)$$

มุมเฟส θ จะหาได้จากความสัมพันธ์

$$\tan \theta = \frac{|X_c|}{R_p} = \frac{1}{\omega C_p R_p} \quad (3.2)$$

การสูญเสียพลังงานไปในวงจรจะแสดงผ่านทางแฟกเตอร์สูญเสีย (dissipation factor, D) คือ

$$D = \tan \theta = \frac{1}{\omega C_p R_p} \quad (3.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
จะเห็นว่าเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นแล้วแฟกเตอร์สูญเสียจะมีค่าลดลงและแฟกเตอร์คุณภาพ (quality factor, Q) คือ

$$Q = \frac{1}{D} = \omega C_p R_p \quad (3.4)$$

ในทางปฏิบัติฟังก์ชันที่ควรวัด คือ $C_p - D, C_p - Q, C_p - G$ และ $C_p - R_p$ โดยที่ G คือ ความนำไฟฟ้า ซึ่ง

$$G = \frac{1}{R_p} \quad (3.5)$$

โดยทั่วไปที่ความถี่ใดๆค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน Z^* จะเป็นคังสมการ

$$Z^* = Z' - jZ'' \quad (3.6)$$

และ

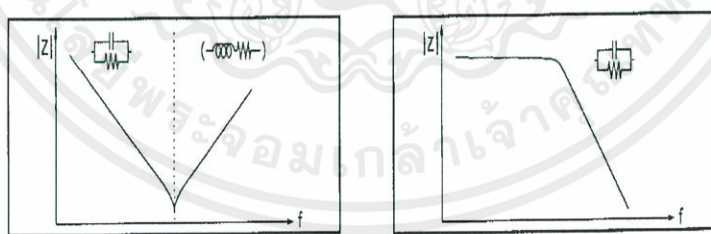
$$D = \frac{Z'}{Z''} \quad (3.7)$$

เมื่อ

$$Z' = \frac{R_p}{1 + \omega^2 C_p^2 R_p^2} \quad (3.8)$$

$$Z'' = \frac{\omega C_p R_p^2}{1 + \omega^2 C_p^2 R_p^2} \quad (3.9)$$

ความสัมพันธ์ระหว่าง $|Z|$ กับ ความถี่ จะแสดงได้ดังรูปที่ 3.7



Small C (ก)

Large R (ข)

รูปที่ 3.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมบูรณ์ของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่

ก. ในกรณีที่ความจุ (C) มีค่าต่ำ

ข. ในกรณีที่ความต้านทาน (R) มีค่าต่ำมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยปกติสภาพนำไฟฟ้ากระแสสลับจะสอดคล้องกับสมการของจอนเชอร์ (Jonscher expression) ซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$G(\omega) = G_{dc} + A\omega^n \quad (3.10)$$

เมื่อ n คือ เลขยกกำลัง

จำนวนจริง (Z') และจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน คือ

$$Z' = \frac{R_p}{1 + \omega^2 C_p^2 R_p^2}$$

และ

$$Z'' = \frac{-\omega C_p R_p^2}{1 + \omega^2 C_p^2 R_p^2}$$

ซึ่งค่า R_p จะคำนวณได้จากจุดตัดแกน Z' ของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Z' กับ $-Z''$ ส่วนค่าความจุ C_p จะคำนวณได้จากความถี่ที่จุดสูงสุดของครึ่งวงกลม (semi-circular) ในกรณีอุดมคติที่จุดสูงสุดของครึ่งวงกลมคือ $Z' = -Z''$ ดังนั้นจะได้ว่า

$$\frac{R_p}{1 + \omega^2 C_p^2 R_p^2} = \frac{\omega C_p R_p^2}{1 + \omega^2 C_p^2 R_p^2}$$

$$C_p = \frac{1}{\omega R_p} \quad (3.11)$$

ในทำนองเดียวกันเวลาผ่อนคลาย (relaxation time, τ) จะคำนวณได้จากความถี่สูงสุดของครึ่งวงกลม

$$\tau = \frac{1}{\omega_{max}} = C_p R_p$$

หรือ

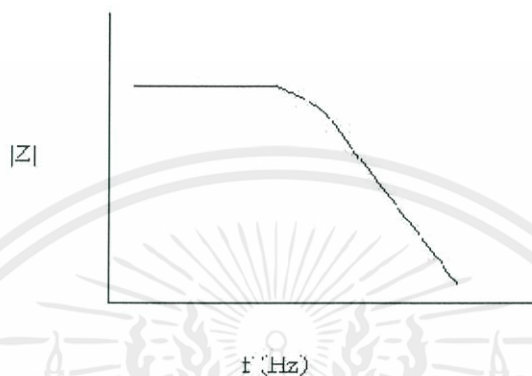
$$\omega_{max} C_p R_p = 1 \quad (3.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากค่า Z' และ Z'' จากสมการที่ (3.8) และ (3.9) จะได้ว่า

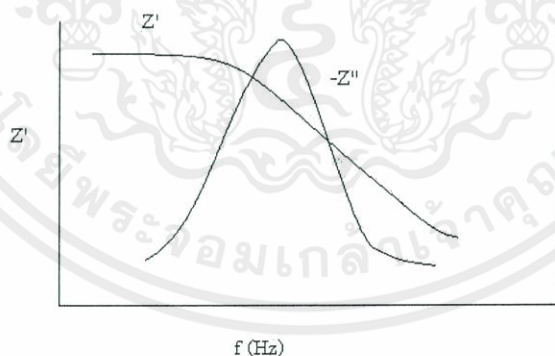
$$|Z| = \sqrt{(Z')^2 + (Z'')^2} \quad (3.13)$$

กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $|Z|$ กับ f จะเขียนได้ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมบูรณ์ของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ($|Z|$) กับความถี่ (f)

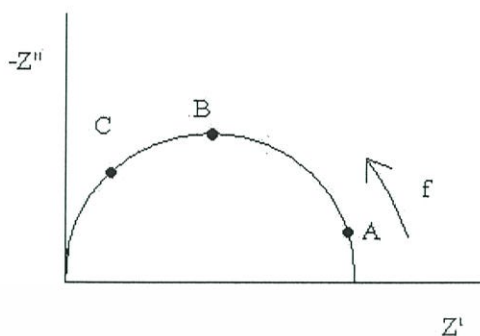
แต่ถ้าเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน (Z') กับความถี่ (f) และจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ($-Z''$) กับ ความถี่ (f) จะได้กราฟดังรูป 3.9



รูปที่ 3.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน (Z') กับความถี่ (f) และจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ($-Z''$) กับความถี่ (f)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

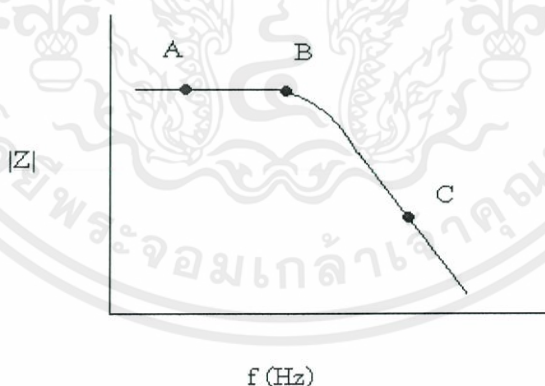
และถ้าเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Z' กับ $-Z''$ จะได้กราฟดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน (Z') กับจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ($-Z''$)

- ที่ความถี่ต่ำ (ที่บริเวณจุด A) Z' จะมีค่ามาก ส่วน $-Z''$ จะมีค่าน้อย
- ที่ความถี่ของจุดสูงสุด (ที่บริเวณจุด B) Z' จะมีค่าลดลง ส่วน $-Z''$ จะมีค่าเพิ่มขึ้นและในกรณีอุดมคติจะได้ว่า $Z' = -Z''$
- ที่ความถี่สูงขึ้น (ที่บริเวณจุด C) ทั้ง Z' และ $-Z''$ จะมีค่าลดลงอีก

และถ้านำมาเขียนกราฟ $|Z|$ กับ f จะได้ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมบูรณ์ของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน ($|Z|$) กับความถี่ (f)

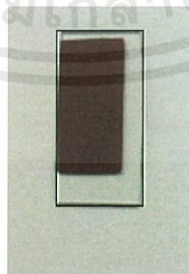
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

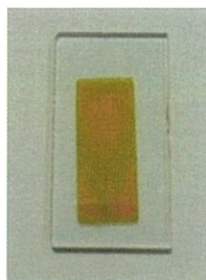
ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO โดยใช้วิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ นำสิ่งประดิษฐ์รอยต่อแบบพี-เอ็นมาทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า โดยการวัดค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 10 - 300 เคลวิน และวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับความถี่ในช่วง 20 เฮิรตซ์ ถึง 2 เมกกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 25 - 60 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษาพฤติกรรมของกัปดักพาหะที่บริเวณผิวเชื่อมต่อของสารกึ่งตัวนำ n-CdS กับ p-CuO

4.1 ลักษณะของฟิล์มบางที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ของสารกึ่งตัวนำ CdS และ CuO และสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ มีสีเทาแดงทึบเป็นมันวาวยึดติดกับแผ่นกระจกสไลด์ได้ดี ส่วนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS นั้นมีลักษณะเป็นสีเหลืองส้ม เมื่อทำการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO จะเห็นว่าฟิล์มบางซ้อนกันอยู่สองชั้น



รูปที่ 4.1 ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.2 พิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



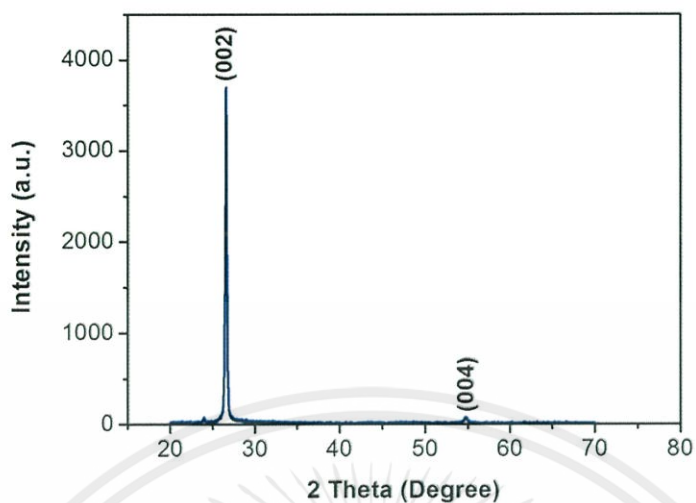
รูปที่ 4.3 พิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

4.2 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่ออวิวิหพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียม โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

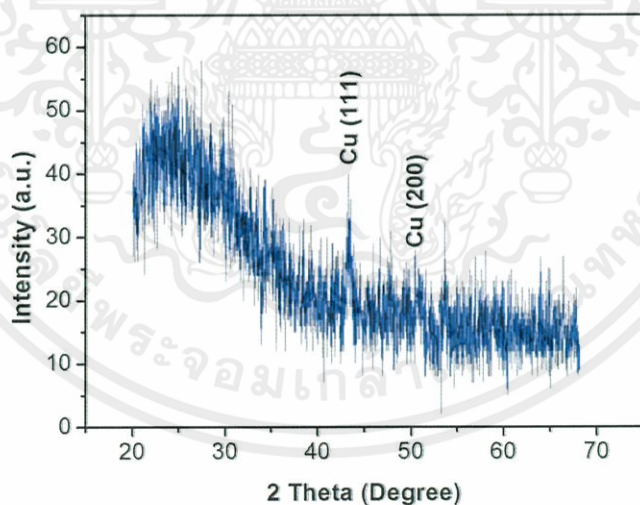
4.2.1 ผลการศึกษาโครงสร้างของผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่ออวิวิหพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

การศึกษาศเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของสิ่งประดิษฐ์รอยต่ออวิวิหพันธ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ 100 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



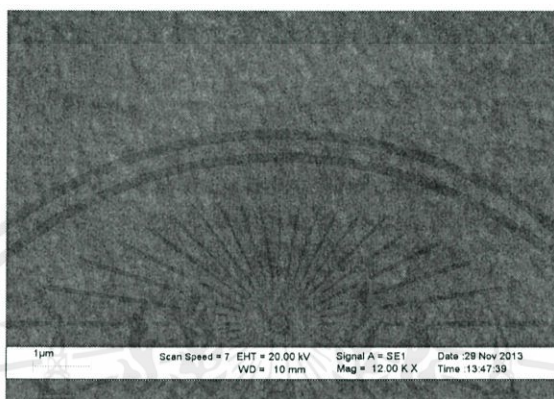
รูปที่ 4.4 พิกัดความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



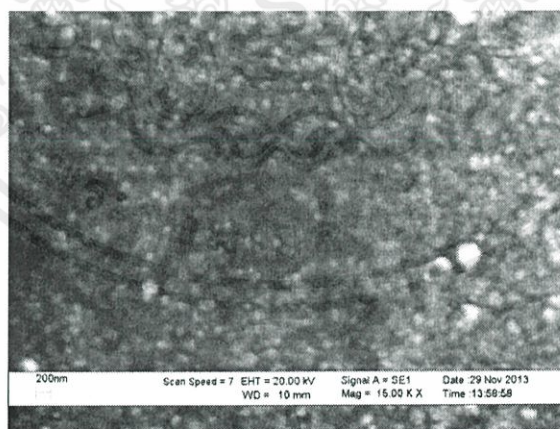
รูปที่ 4.5 พิกัดความเข้มการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ผลการศึกษาโครงสร้างของผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิธีพ่นชั้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่เคลือบอยู่บนกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

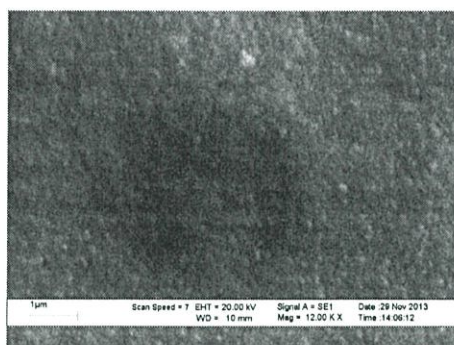


รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายบริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดขนาดของเกรนประมาณ 100 นาโนเมตร



รูปที่ 4.7 ภาพถ่ายบริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ซึ่งถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดขนาดของเกรนประมาณ 50 นาโนเมตร

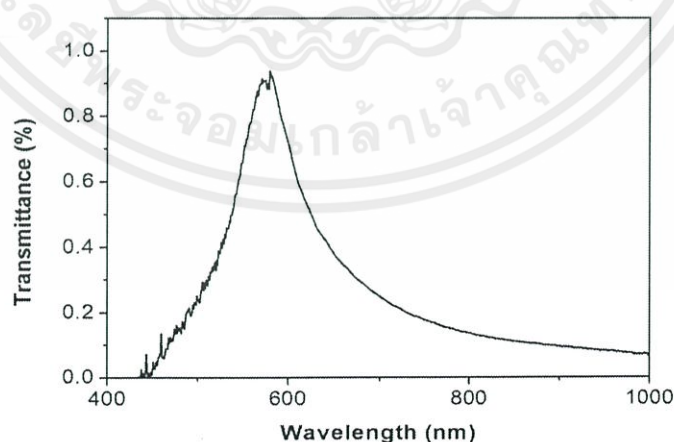
เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่ควรฉีกขาดหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต



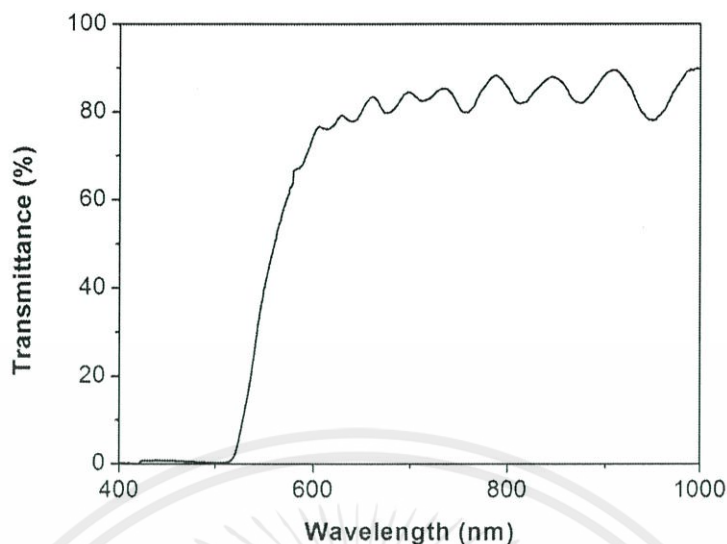
รูปที่ 4.8 ภาพถ่ายบริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบอยู่บน CuO ซึ่งถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดขนาดของเกรนประมาณ 250 นาโนเมตร

4.2.3 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

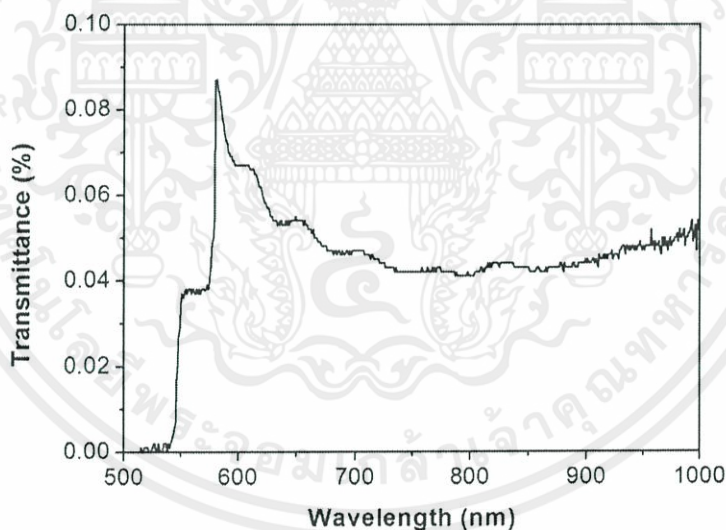
จากการศึกษาสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ พบว่าขอบการดูดกลืนจะปรากฏที่ความยาวคลื่นประมาณ 550 และ 580 นาโนเมตร ซึ่งสอดคล้องกับค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS และ CuO ตามลำดับ



รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO พิจารณาที่ความยาวคลื่น 400-1000 นาโนเมตร



รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS พิจารณาที่ความยาวคลื่น 400 – 1000 นาโนเมตร



รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นแสงของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO พิจารณาที่ความยาวคลื่น 500-1000 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศแล้วทำการวัดค่าความ สัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า ที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 10 – 300 เคลวิน ตลอดจนการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับความถี่ และวัดค่าอิมพีแดนซ์ที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 25 – 60 องศาเซลเซียส เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆ

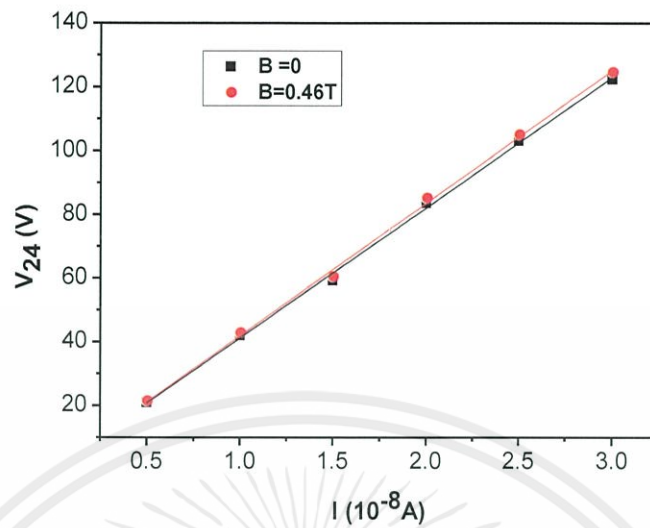
4.3.1 ผลการศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO จะแสดงในตารางที่ 4.1 รูปที่ 4.12 และ รูปที่ 4.13

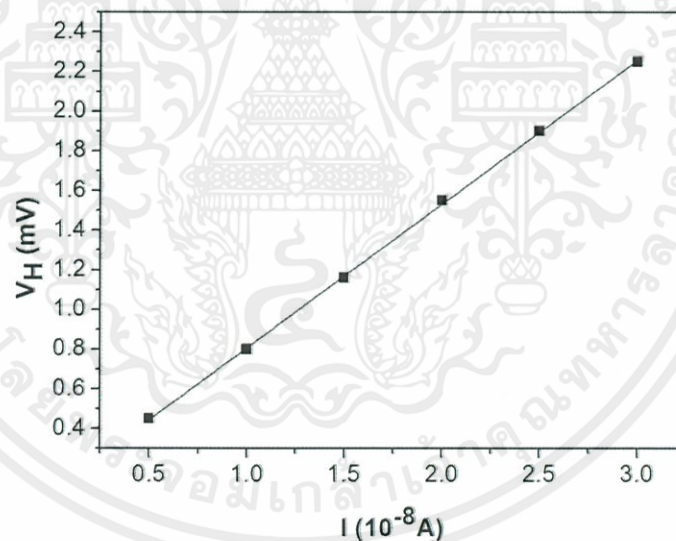
ตารางที่ 4.1 ผลการวัดปรากฏการณ์ของฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

| Temperature (C°) | Current (I) (10^{-8} A) | V_{24} (B=0 T) | V_{24}' (B=4600 G) | V_H (mV) |
|------------------|----------------------------|------------------|----------------------|------------|
| 300° | 0.5 | 20.95 | 21.4 | 0.45 |
| | 1.0 | 42.00 | 42.8 | 0.80 |
| | 1.5 | 59.24 | 60.4 | 1.16 |
| | 2.0 | 83.55 | 85.1 | 1.55 |
| | 2.5 | 103.10 | 105.0 | 1.90 |
| | 3.0 | 122.35 | 124.6 | 2.25 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับ กระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามเหล็กของฟิล์มบาง CuO



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้า (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็ก และไม่มีสนามเหล็กของฟิล์มบาง CuO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆได้ ดังนี้

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า สามารถคำนวณได้โดย

$$\rho = \frac{10^7 \times 0.4 \times 5 \times 10^{-5}}{0.4} = 500 \text{ โอห์ม-เซนติเมตร}$$

ค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์ สามารถคำนวณได้โดย

$$R_H = 10^6 \left(\frac{V_H}{I} \right) \frac{d}{B} = 10^6 \left(0.7251 \times \frac{10^{-3}}{10^{-8}} \right) \left(\frac{5 \times 10^{-5}}{4600} \right)$$

$$R_H = 7.88 \times 10^2 \text{ ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อคูลอมบ์}$$

จากค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์สามารถนำมาคำนวณหาความหนาแน่นของพาหะ ได้ดังนี้

$$n = \frac{1}{qR_H} = \frac{1}{1.6 \times 10^{-19} (7.88 \times 10^2)}$$

$$n = 7.93 \times 10^{15} \text{ ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร}$$

และจากค่าสัมประสิทธิ์ของฮอลล์และค่าสภาพนำไฟฟ้าสามารถนำมาคำนวณหาความคล่องตัวของพาหะ ได้ดังนี้

$$\mu_H = \frac{R_H}{\rho} = \frac{7.88 \times 10^2}{500}$$

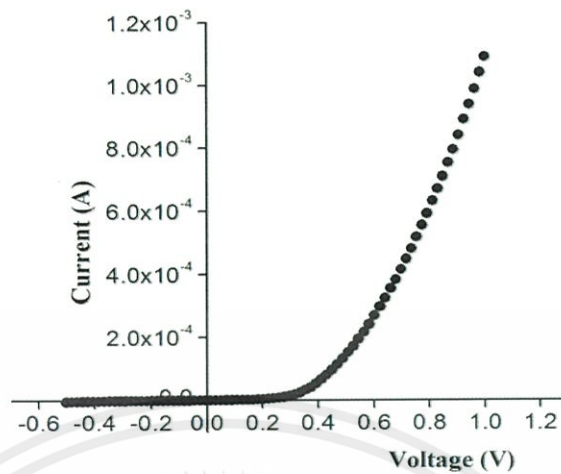
$$\mu_H = 1.58 \text{ ตารางเซนติเมตรต่อ(โวลต์-วินาที)}$$

และจากค่าศักย์ไฟฟ้าของฮอลล์ยืนยันได้ว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO มีชนิดการนำไฟฟ้า
 เอกสารนี้เป็นเอกสารทสวงน ไวสำหรับกร ใช้งานเพื่การศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำ ไปใช้ประ โยชนด้านการค้า
 เป็นแบบพี (p-type)
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งนี้ สสทสห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

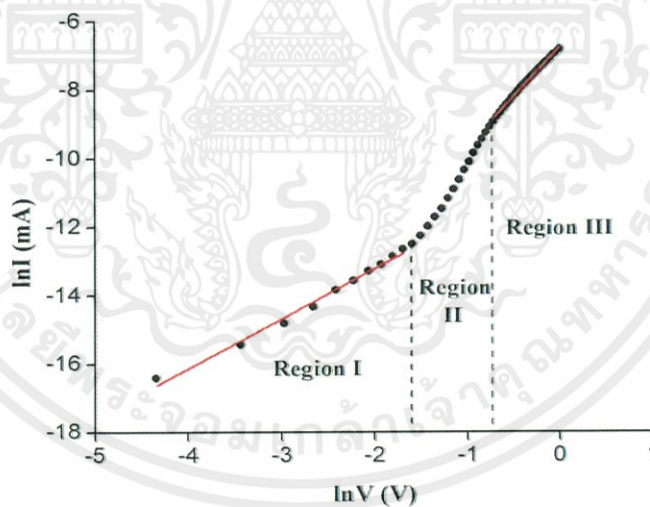
4.3.2 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์ รอยต่อวิวิพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหย สารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง

ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อวิวิพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.5 ถึง 1.0 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องดังปรากฏในรูปที่ 4.14 พบว่ามีการเรียงกระแสไฟฟ้าทางเดียวเหมือนไดโอด โดยมีค่าแรงดันขีดเริ่ม (threshold voltage) อยู่ที่ 0.5 โวลต์ แต่เนื่องจากค่าความหนาแน่นของพาหะอิสระของ CuO และของ CdS อยู่ในระดับ 10^{16} และ 10^{13} ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ ดังนั้นจะประมาณได้ว่ารอยต่อวิวิพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO เป็นแบบรอยต่อ $p^+ - n$ ซึ่งกลไกการนำกระแสจะอธิบายได้เช่นเดียวกับรอยต่อขอตติ์โดยบริเวณพร่องพาหะอิสระตรงบริเวณรอยต่อเกือบทั้งหมดจะปรากฏอยู่ตรงเนื้อสารกึ่งตัวนำ CdS

กลไกของกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ตรงบริเวณรอยต่อวิวิพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่ช่วงแรงดันไฟฟ้า -0.5 ถึง 1.0 โวลต์ พิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I$ กับ $\ln V$ ของรอยต่อวิวิพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่อุณหภูมิห้องพบว่า ที่แรงดันไฟฟ้าน้อยกว่า 0.15 โวลต์ เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าเป็นไปตามกฎของโอห์ม ส่วนที่ช่วงแรงดันไฟฟ้า 0.15 ถึง 0.45 โวลต์ เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าเป็นไปตามกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน และช่วงแรงดันไฟฟ้ามากกว่า 0.45 โวลต์ เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้างที่เกิดจากกับดักประจุในเนื้อสารที่มีการแจกแจงแบบเอกซ์โพเนนเชียล ดังรูปที่ 4.15 เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I$ กับ V ดังรูปที่ 4.16 เพื่อหาค่าแฟกเตอร์อุดมคติและค่ากระแสไฟฟ้าอิมิตัวย้อนกลับและนำไปใช้เป็นค่าเริ่มต้นในการจำลองข้อมูล เพื่อมาเทียบกับผลจากการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าในช่วงการไหลของกระแสไฟฟ้าข้ามรอยต่อพี-เอ็น ที่เป็นกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.14 เพื่อใช้ช่วยหาค่ากระแสไฟฟ้าอิมิตัวย้อนกลับและแฟกเตอร์อุดมคติให้ถูกต้องยิ่งขึ้น การหาค่าความต้านทานอนุกรมด้วยวิธีของ ชวงนั้น จะเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $dV/d\ln I$ กับ I ดังรูปที่ 4.17 ซึ่ง จาก กราฟ นี้ จะ ได้ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติและค่าความต้านทานอนุกรม และจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $H(I)$ กับ I ดังรูปที่ 4.18 จะ ได้ค่าความสูงกำแพงศักย์ที่แรงดันไบแอสเป็นศูนย์ สำหรับค่ากระแสไฟฟ้าอิมิตัวย้อนกลับ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ค่าความสูงกำแพงศักย์ และค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมที่ได้จาก กลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน และวิธีของชวงจะแสดงในตารางที่ 4.2

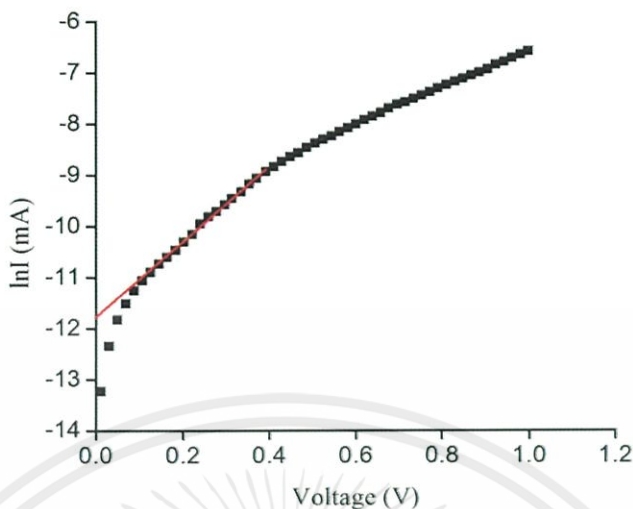


รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.15 กราฟที่ใช้ในการอธิบายกลไกการนำกระแสไฟฟ้าแต่ละช่วงแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I$ กับ V เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของรอยต่อ
 ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-CdS}/p\text{-CuO}$ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการ
 ระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

จากรูป 4.15 จะเห็นได้ว่ากลไกการนำกระแสไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $n\text{-CdS}/p\text{-CuO}$ แบ่งออกเป็น 3 บริเวณอย่างชัดเจนกล่าวคือ บริเวณที่ 1 จะอยู่ในช่วงแรงดัน -0.5 ถึง 0.15 โวลต์ ซึ่งกลไกการนำไฟฟ้าจะเป็นไปตามกฎของโอห์ม บริเวณที่ 2 จะอยู่ในช่วงแรงดัน 0.15 ถึง 0.45 โวลต์ ซึ่งกลไกการนำไฟฟ้าจะเป็นแบบเทอร์มิออนิกอิมิตชัน ส่วนบริเวณที่ 3 จะอยู่ในช่วงแรงดัน 0.45 ถึง 1.0 โวลต์ ซึ่งกลไกการนำไฟฟ้าจะเป็นแบบกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้าง

จากรูป 4.16 คือกราฟความสัมพันธ์ค่าลอการิทึมของกระแสและแรงดันไฟฟ้าเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับ (I_s) และค่าแฟกเตอร์ในอุดมคติ (n) โดยอาศัยกราฟเส้นตรงช่วงที่มีการนำกระแสที่เป็นกลไกแบบเทอร์มิออนิกอิมิตชันดังสมการ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 เมื่อ I_s คือ กระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับมีค่าเท่ากับ
 ไม่ว่าจะฉีกใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I$ กับ V เพื่อหาค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับได้จากการลากเส้นตรงผ่านบริเวณกราฟที่เป็นกลไกเทอร์มิออนิกอิมิตชันตัดแกน $\ln I$ 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) จะเป็นค่าในขณะแรงดันไบแอสเป็นศูนย์ที่อุณหภูมิใดๆ และ A^* เท่ากับ 19.8 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรต่อเคลวินยกกำลังสอง

นอกจากนี้ยังสามารถที่จะหาแฟกเตอร์อุดมคติ (n) ของไดโอดที่ขึ้นกับแรงดันไบแอสโดยอาศัยความสัมพันธ์ดังนี้

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

ในความเป็นจริงแล้วสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO มักจะมีความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม (R_s) เกิดขึ้นเสมอ ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากความต้านทานของเนื้อสารและขั้วไฟฟ้าด้านหลัง จึงต้องทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าในช่วงแรงดันสูงๆ (Region III) เพื่อให้ความต้านทานอนุกรมนั้นแสดงผลออกมา ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของรอยต่อวิวิพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่มีความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมมาเกี่ยวข้องจะเป็น

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

เมื่อ กระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและเอกรสิทธิ์ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

อาจเขียนสมการที่ (4.5) อีกรูปหนึ่งได้เป็น

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

วิธีการหาค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมของวง (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 $\ln I$ เพื่อหาค่าความต้านทานอนุกรม จากสมการที่ (4.8) จัดรูปใหม่ได้เป็น

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

ซึ่งจะสอดคล้องกับกราฟเส้นตรงจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $dV/d(\ln I)$ กับ I ดังรูปที่ 4.17 โดยความชันของกราฟนั้นคือค่าความต้านทานอนุกรมของวงจร (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

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

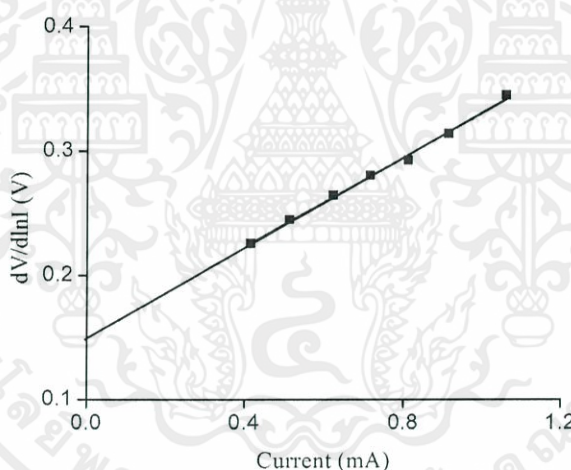
เมื่อทำการคำนวณค่า $H(I)$ จากข้อมูลของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าแล้วนำมาวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $H(I)$ กับ I ก็จะได้ผลดังรูปที่ 4.18 โดยจะคำนวณหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ได้จากจุดตัดแกนตั้ง ($n\Phi_B$) ของกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าวแล้ว นอกจากนี้ความชันของกราฟที่เขียนขึ้นในรูปของฟังก์ชัน $H(I)$ นั้นก็คือค่าความต้านทานอนุกรมเช่นเดียวกับความสัมพันธ์ในสมการที่ (4.9) ซึ่งจะส่งผลให้ค่าความต้านทานอนุกรมที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกัน

กลไกการนำไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้าง (SCLC) มักจะเขียนความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า ดังนี้คือ

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

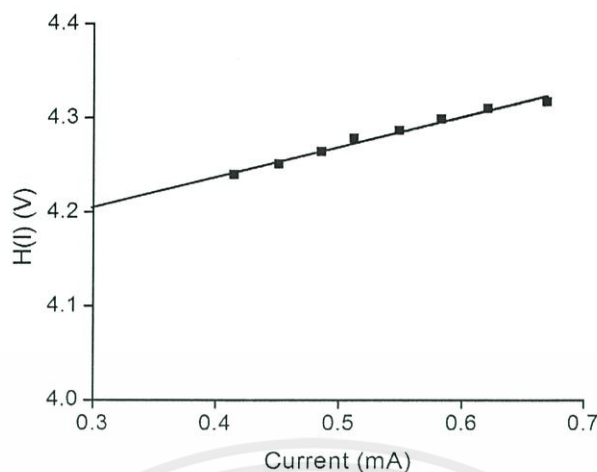
$$\ln I = m \ln V + \ln k \quad (4.13)$$

เมื่อ m คือความชันของกราฟ ถ้า m มีค่าเท่ากับ 1.5 กลไกการนำไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัด โดยประจุค้างจะเป็นไปตามกฎของ ไชด์-แลงมัวร์ (Child-Langmuir's law) แต่ถ้า m เท่ากับ 2 จะเป็นไปตามกฎของมอตต์-เกอร์นีย์ (Mott-Gurney's law) แต่ถ้า $m > 2$ จะหมายถึงว่ากับดักประจุมีระดับพลังงานต่อเนื่องและมีการแจกแจงแบบเอกซ์โพเนนเชียล ซึ่งจากผลการทดลองได้ค่า m เท่ากับ 2.03 แสดงว่ากับดักประจุเป็นไปตามกฎของมอตต์-เกอร์นีย์



รูปที่ 4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $dV/d(\ln I)$ กับ I เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $H(I)$ กับ I เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

ตารางที่ 4.2 ค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ (I_s) ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ (n) ค่าความสูงของกำแพงศักย์ ในขณะที่ไบแอสเป็นศูนย์ (ϕ_{B0}) และค่าความต้านทานอนุกรม (R_s) ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มิออนิกอิมิตชัน และวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

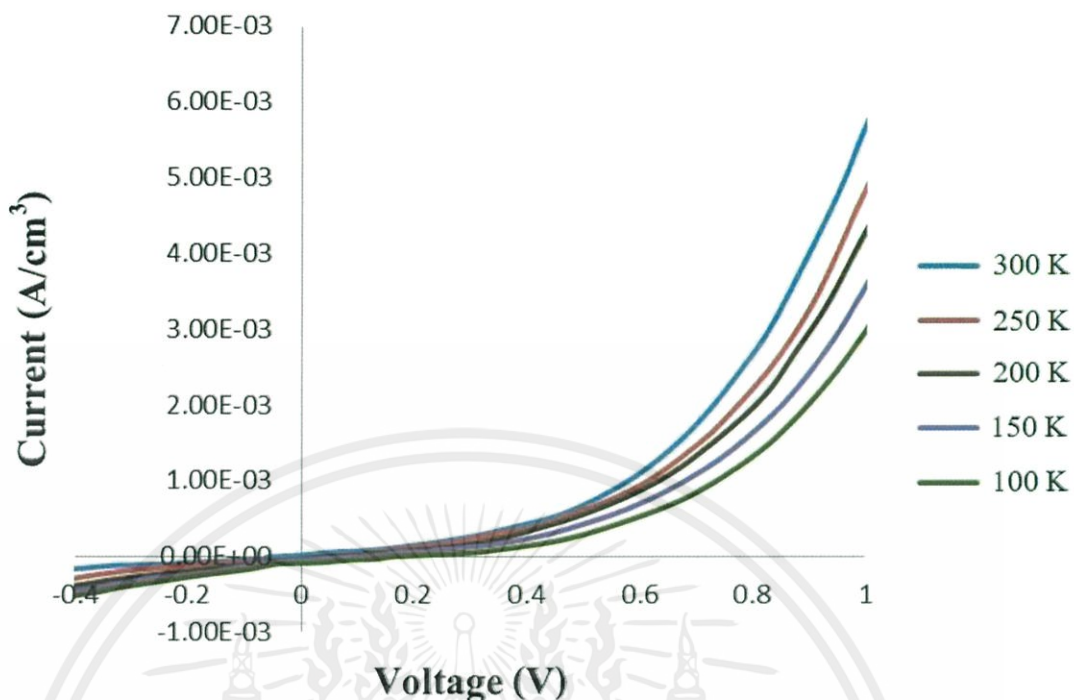
| Sample | Saturation Current I_s (A) | Ideality Factor n | | Barrier Height Φ_{B0} (eV) | | Series Resistance R_s (Ω) | |
|---------|------------------------------|---------------------|-------------------|---------------------------------|----------|--------------------------------------|-------------------|
| | | TE | Cheung | TE | Cheung | Cheung | Cheung |
| | | I-V | $[dV/d(\ln I)]-I$ | I-V | $H(I)-I$ | $H(I)-I$ | $[dV/d(\ln I)]-I$ |
| CdS/CuO | 7.41×10^{-6} | 5.19 | 5.79 | 0.534 | 0.709 | 0.31 | 0.18 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์ รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหย สารเคมี ด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วง อุณหภูมิ 10-300 เคลวิน

ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยวัดค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าช่วง -0.5 ถึง 1.0 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 10 ถึง 300 เคลวิน พบว่าที่แรงดันไฟฟ้าเท่ากัน กระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ตรงบริเวณรอยต่อมีค่าลดลงตามอุณหภูมิที่ลดลง แสดงดังรูปที่ 4.19 และค่าแรงดันขีดเริ่มของไดโอดมีค่ามากขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลงจาก 0.5 เป็น 0.4 โวลต์ การศึกษากลไกของกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ตรงบริเวณรอยต่อ แบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่ช่วงแรงดันไฟฟ้า -0.5 ถึง 1.0 โวลต์ ที่อุณหภูมิต่ำ พบว่าที่แรงดันไฟฟ้าน้อยกว่า 0.15 โวลต์ เป็นกลไกการนำไฟฟ้าที่เป็นไปตามกฎ ของโอห์ม ส่วนช่วงแรงดันไฟฟ้า 0.15 ถึง 0.45 โวลต์เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าเป็นไปตาม กลไกเทอร์มิออนิกอิมิตชัน และที่แรงดันไฟฟ้าบริเวณมากกว่า 0.45 โวลต์ จะเป็นกลไกการนำไฟฟ้า ชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้างที่เกิดจากกับดักประจุในเนื้อสารที่มี การแจกแจงแบบเอกซ์ โปเนนเชียล เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I$ กับ V เพื่อหาค่าแฟกเตอร์อุดมคติและค่า กระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ แล้วนำไปใช้เป็นตัวเริ่มต้นในการจำลองข้อมูล เพื่อเทียบกับผลจาก การวัดค่าความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าในช่วงการไหลของกระแสไฟฟ้าข้าม รอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่เป็นกลไกเทอร์มิออนิกอิมิตชันเพื่อใช้ช่วยหาค่า กระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ และ แฟกเตอร์อุดมคติให้ถูกต้องยิ่งขึ้น การหาค่าความต้านทานไฟฟ้า ออนุกรมจะใช้วิธีของชวง โดยค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ค่าความสูงของ กำแพงศักย์ และค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 10 ถึง 300 เคลวิน ที่คำนวณได้ จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิตชันและวิธีของชวง แสดงในตารางที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 10-300 เคลวิน ของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ค่าความสูงของกำแพงศักย์และค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มิโอนิกกิมิสชันและวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 10 ถึง 300 เคลวินของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

| Temperature (K) | Saturation Current(I_s) (A) | Ideality Factor (n) | | Barrier Height (eV) | | Series Resistance (Ω) | |
|--------------------|---------------------------------------|------------------------|-----------------|------------------------|--------|--------------------------------|-----------------|
| | | TE | Cheung | TE | Cheung | Cheung | Cheung |
| | | I-V | $dV/d(\ln I)-I$ | I-V | H(I)-I | H(I)-I | $dV/d(\ln I)-I$ |
| 10 | 1.99E-04 | 94.03 | 89.61 | 0.375 | 0.381 | 6.98 | 5.07 |
| 20 | 2.18E-04 | 51.17 | 63.38 | 0.376 | 0.386 | 5.73 | 4.20 |
| 40 | 2.32E-04 | 24.16 | 23.12 | 0.385 | 0.401 | 4.41 | 3.32 |
| 60 | 2.49E-04 | 17.92 | 13.86 | 0.401 | 0.410 | 3.70 | 2.83 |
| 80 | 2.67E-04 | 14.24 | 11.01 | 0.408 | 0.415 | 3.25 | 2.56 |
| 100 | 2.77E-04 | 11.95 | 9.35 | 0.418 | 0.426 | 2.99 | 2.39 |
| 120 | 2.96E-04 | 10.91 | 8.05 | 0.429 | 0.435 | 2.83 | 2.23 |
| 140 | 3.07E-04 | 10.13 | 7.79 | 0.435 | 0.447 | 2.70 | 2.11 |
| 160 | 3.12E-04 | 9.61 | 7.27 | 0.446 | 0.453 | 2.35 | 1.84 |
| 180 | 3.19E-04 | 9.35 | 6.75 | 0.458 | 0.468 | 2.06 | 1.52 |
| 200 | 3.23E-04 | 8.05 | 6.75 | 0.464 | 0.475 | 1.70 | 1.24 |
| 220 | 3.31E-04 | 7.53 | 6.49 | 0.475 | 0.483 | 1.57 | 1.08 |
| 240 | 3.37E-04 | 7.27 | 5.97 | 0.490 | 0.498 | 1.38 | 0.81 |
| 260 | 3.76E-04 | 6.75 | 5.71 | 0.495 | 0.503 | 1.06 | 0.47 |
| 280 | 4.19E-04 | 5.71 | 5.19 | 0.504 | 0.514 | 0.87 | 0.30 |
| 300 | 5.08E-04 | 5.19 | 4.15 | 0.520 | 0.534 | 0.31 | 0.18 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ การใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่าจะในรูปแบบใดก็ตาม อีกทั้งยังมีที่ต้นแบบสิ่งนี้อาจ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

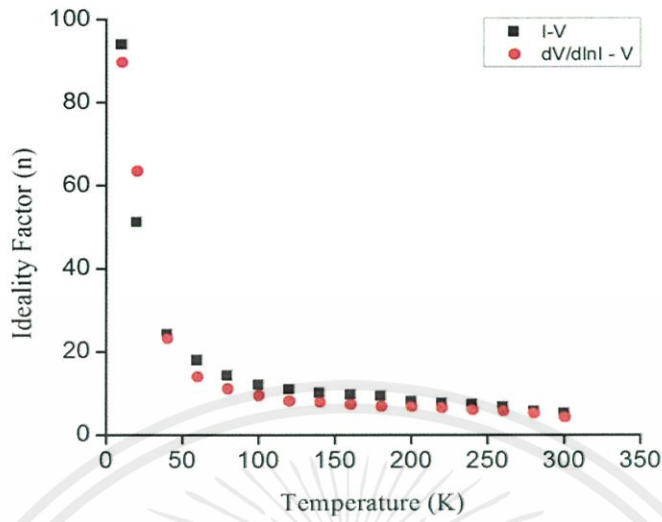
จากผลการทดลองพบว่ากระแสไฟฟ้าอิมตัวย้อนกลับมีค่าน้อยลงตามอุณหภูมิที่ลดลง ส่วนค่าแฟกเตอร์อุดมคติที่ได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิตชันและวิธีของชวงมีค่ามากขึ้น เมื่ออุณหภูมิลดลงและมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น แสดงดังรูปที่ 4.20

ค่าความสูงกำแพงศักย์ที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิตชันและวิธีของชวงมีค่าน้อยลงตามอุณหภูมิที่ลดลงเหมือนกัน แสดงดังรูปที่ 4.22 ส่วนค่าความสูงกำแพงศักย์ที่ได้จากวิธีของชวงมีค่าใกล้เคียงกับกลไกเทอร์มิออนิกอิมิตชัน

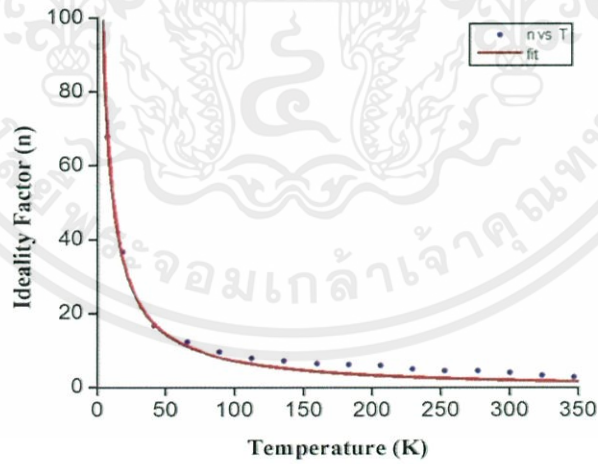
การที่ค่าแฟกเตอร์อุดมคติและค่าความสูงกำแพงศักย์ที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ เนื่องจากได้ใช้การวัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ขอตักก็มาคำนวณหาค่าตัวแปรเหล่านี้ ดังนั้นค่าของตัวแปรจะขึ้นอยู่กับปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่วัดได้ ที่อุณหภูมิสูงจะมีพลังงานความร้อนไปกระตุ้นให้พาหะอิสระให้มีระดับพลังงานสูงและมีจำนวนมากขึ้น เมื่อมีการให้แรงดันไบอัสไปหน้าหรือพลังงานกระตุ้นจากภายนอกเพียงเล็กน้อย พาหะอิสระที่มีระดับพลังงานสูงเหล่านี้ก็สามารถข้ามกำแพงศักย์ที่มีค่าสูงได้ ดังนั้นจะได้ค่ากำแพงศักย์ที่มากและค่าแฟกเตอร์อุดมคติที่เข้าใกล้หนึ่ง แต่ที่อุณหภูมิต่ำระดับพลังงานของพาหะอิสระมีค่าน้อย จึงจำเป็นต้องใช้แรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเพื่อจะข้ามกำแพงศักย์ ซึ่งกำแพงศักย์ที่สามารถข้ามได้นั้นก็เป็นกำแพงศักย์ที่มีค่าน้อยเนื่องจากไม่มีพลังงานเพียงพอที่จะข้ามกำแพงศักย์ที่มีค่าสูงได้ ดังนั้นที่อุณหภูมิต่ำจึงมีความสูงของกำแพงศักย์น้อยและค่าแฟกเตอร์อุดมคติจะมีค่ามาก ที่อุณหภูมิสูงพาหะอิสระที่สามารถข้ามกำแพงศักย์ที่มีค่าต่ำก็ยังมีอยู่ แต่เนื่องจากมีปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับปริมาณพาหะอิสระที่มีระดับพลังงานที่สามารถข้ามกำแพงศักย์ที่มีค่าสูงได้

ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมที่คำนวณได้จากวิธีของชวง พบว่ามีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.23 การที่ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลงนั้น มีสาเหตุมาจากการที่ความหนาแน่นของพาหะอิสระลดลง ซึ่งเกิดจากการที่กับดักพาหะได้จับพาหะอิสระเอาไว้ที่บริเวณผิวรอยต่อและการที่พาหะอิสระมีพลังงานน้อยลงเมื่ออุณหภูมิลดลงจึงทำให้พาหะอิสระอยู่กับที่ (freeze - out - carrier) การที่จะให้พาหะอิสระเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อ $p^+ - n$ ได้นั้นจำเป็นต้องให้แรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

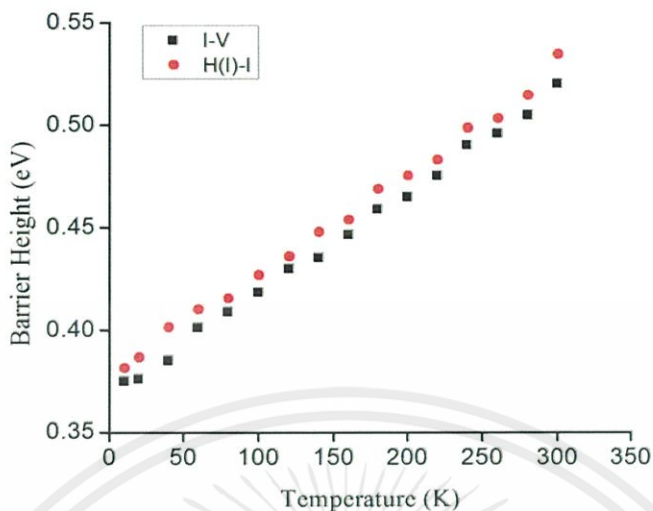


รูปที่ 4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแฟกเตอร์อุดมคติกับอุณหภูมิที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิตชันและวิธีของชวงที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง $dV/d(\ln I)$ กับ T เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 10-300 เคลวิน ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิชนันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมี ด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

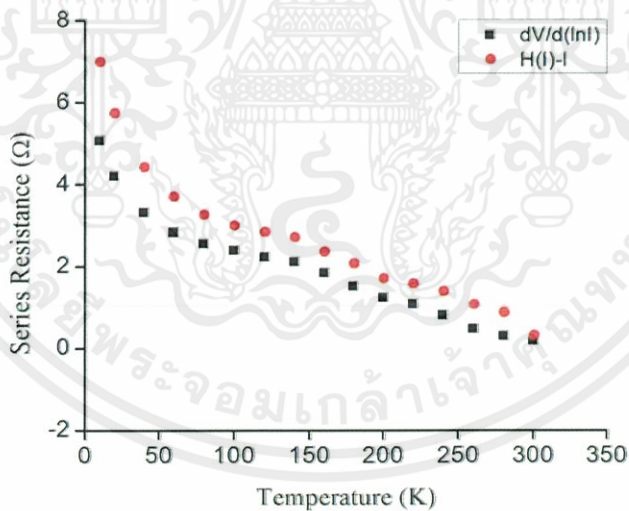


รูปที่ 4.21 การหาค่า E_{00} โดยการพิตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแฟกเตอร์อุดมคติกับอุณหภูมิ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 10-300 เคลวิน ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิชนันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมี ด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้เพื่อวัตถุประสงค์อื่นใด
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



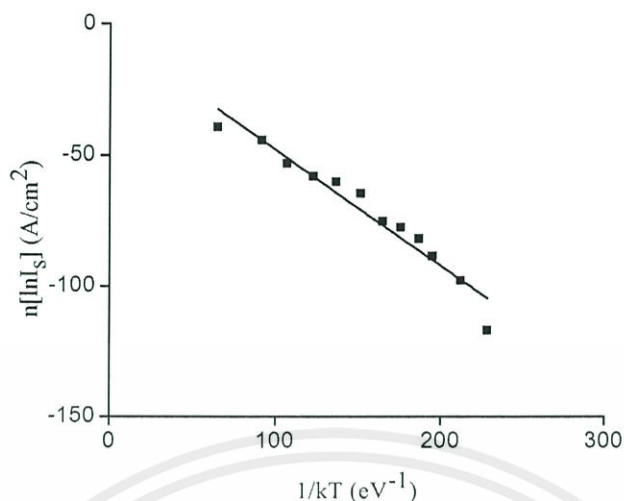
รูปที่ 4.22 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูงกำแพงศักย์กับอุณหภูมิที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิตชันและวิธีของชวงเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 10-300 เคลวิน ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมกับอุณหภูมิที่ได้จากวิธีของชวงเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 10-300 เคลวิน ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการ

ระเหยสารเคมี ด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 กราฟอาร์เรเนียสของ $n \ln I_s$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 10-300 เคลวิน ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

จากค่าความชันของกราฟในรูปที่ 4.24 สามารถคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้นของรอยต่อได้จาก สมการที่ (4.14)

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

พลังงานกระตุ้น E_a หาได้จากความชันของรูปที่ 4.24

ดังนั้น

$$\text{ความชัน} = E_a$$

จะได้

$$E_a = 0.4431 \text{ อิเล็กตรอน โวลต์}$$

จากผลการทดลองพบว่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ส่วนค่าแฟกเตอร์อุดมคติที่ได้จากกลไกเทอร์มิโอนิกอิมิสชัน และวิธีของชวงมีค่าลดลง เมื่อ

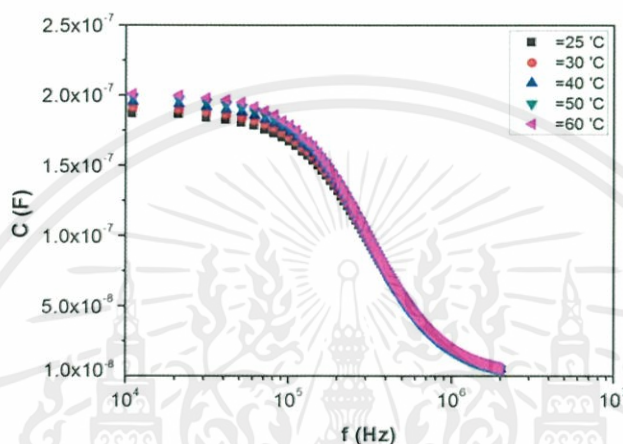
อุณหภูมิเพิ่มขึ้น และมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น แสดงดังรูปที่ 4.20 และเมื่อนำกราฟความสัมพันธ์ไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรถูกนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะพิมพ์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

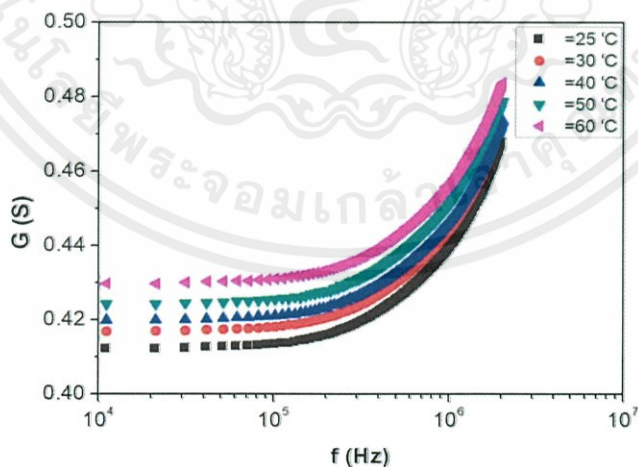
กำแพงศักย์ (E_{00}) พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.4431 อิเล็กตรอน โวลต์

4.3.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้ากระแสสลับในช่วงความถี่ 10 กิโลเฮิร์ตซ์ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์
ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่ง
เตรียมโดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

ผลการศึกษาอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปี เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิในช่วง 25 ถึง 60 องศาเซลเซียส ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO

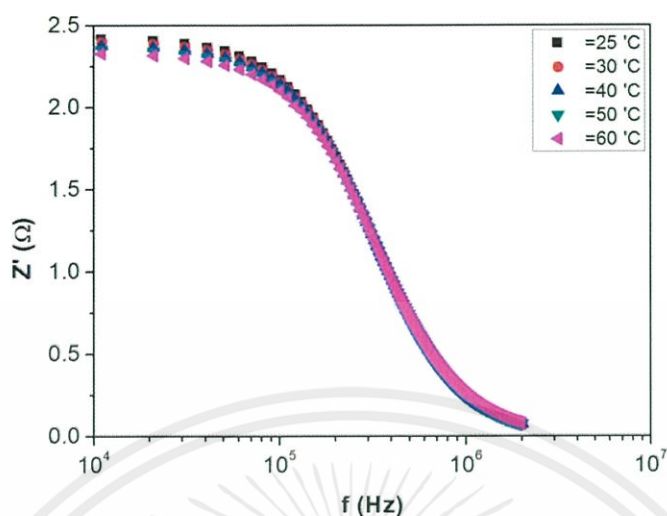


รูปที่ 4.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับความถี่ที่อุณหภูมิในช่วง 25 ถึง 60 องศาเซลเซียส ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

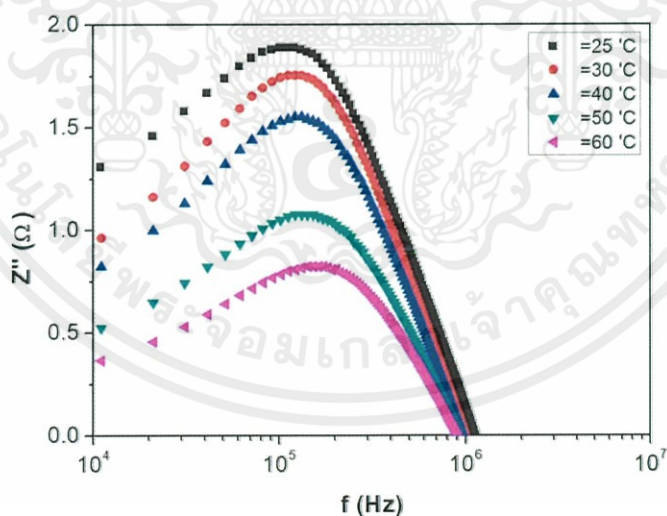


รูปที่ 4.26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้ากับความถี่ที่อุณหภูมิในช่วง 25 ถึง 60

องศาเซลเซียส ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

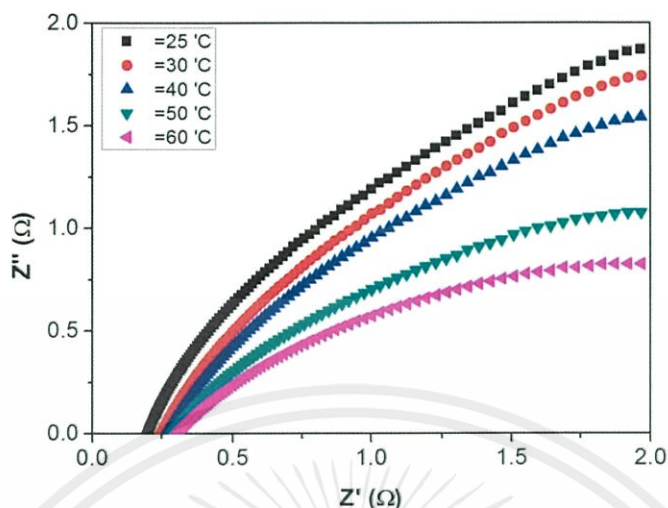


รูปที่ 4.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ที่อุณหภูมิในช่วง 25 ถึง 60 องศาเซลเซียส ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

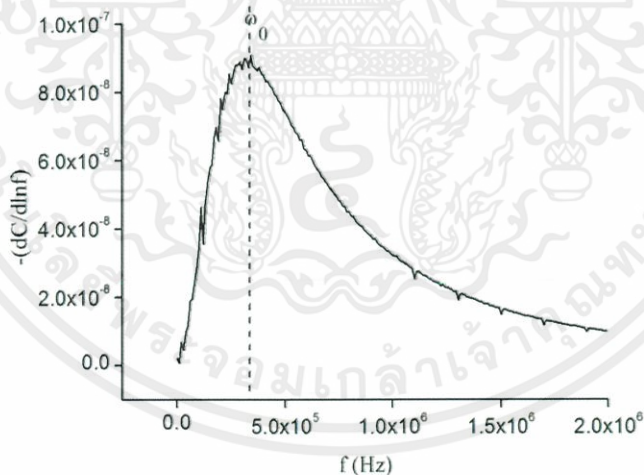


รูปที่ 4.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าจินตภาพของอิมพีแดนซ์กับความถี่ที่อุณหภูมิในช่วง 25 ถึง 60 องศาเซลเซียส ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษามาก่อน ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

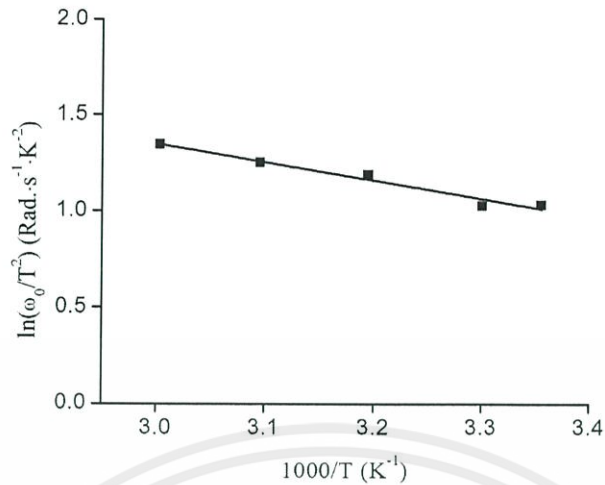


รูปที่ 4.29 กราฟความสัมพันธ์ของค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนที่อุณหภูมิในช่วง 25 ถึง 60 องศาเซลเซียส ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

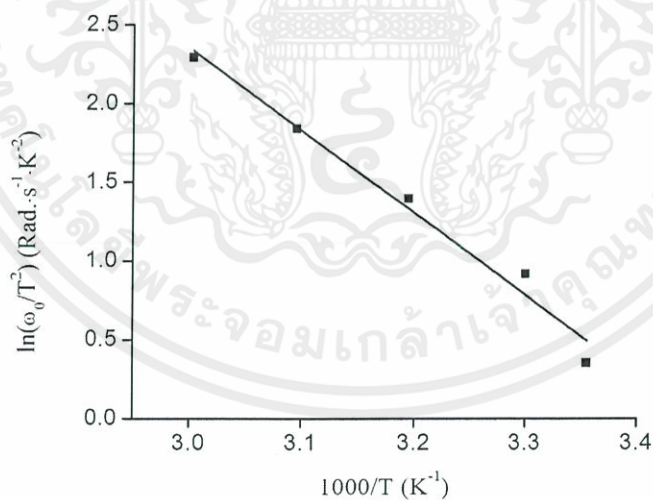


รูปที่ 4.30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $-dC/d\ln f$ กับ f เพื่อหาค่า ω_0 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

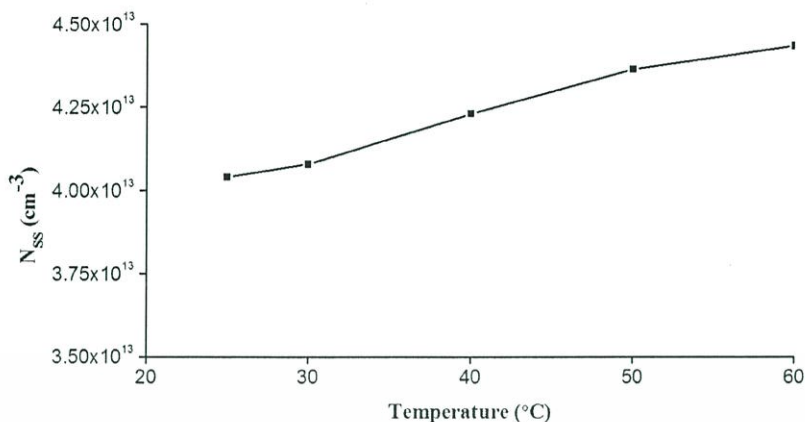


รูปที่ 4.31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(\omega_0/T^2)$ กับ $(1000/T)$ ที่ได้จากการหาค่า ω_0 ของกราฟความสัมพันธ์ของ $-dC/d\ln f$ กับความถี่เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 60 องศาเซลเซียส ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln(\omega_0/T^2)$ กับ $(1000/T)$ ที่ได้จากการหาค่า ω_0 ของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 60 องศาเซลเซียส ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของสถาบันที่ทำการศึกษานี้ไปและจะนำไปใช้ในเอกสารค่า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.33 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของสถานะผิวเชื่อมต่อกับช่วงอุณหภูมิ ในช่วง 25 ถึง 60 องศาเซลเซียสของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

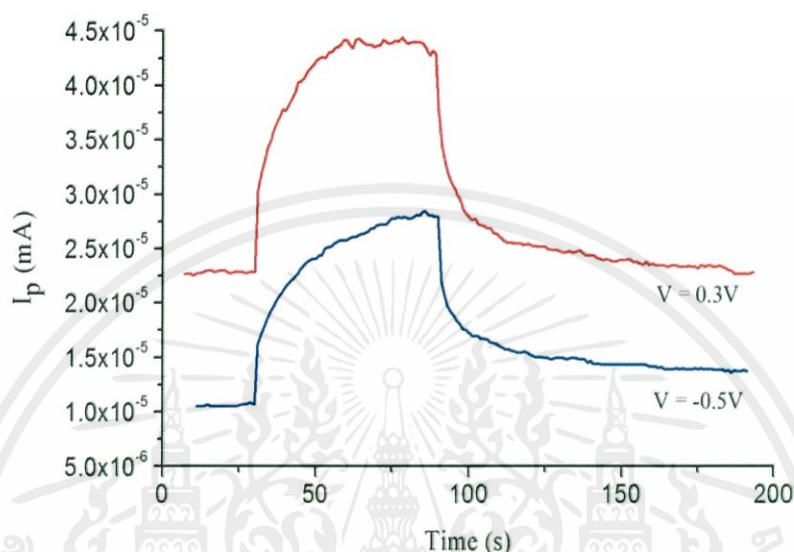
จากกราฟความสัมพันธ์ $\ln(\omega_0/T^2)$ กับ $(1000/T)$ สามารถคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) และพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ค่าความถี่เฉพาะ พลังงานกระตุ้น และตัวแปรต่างๆ ที่คำนวณได้จากสองวิธีของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

| Method | T (°C) | ω_0 (rad/s) | E_a (eV) | ξ_0 (s ⁻¹ K ⁻²) | σ_T (cm ⁻²) |
|--------------|--------|--------------------|------------|--|--------------------------------|
| (-dC/dlnf)-f | 25 | 340,830 | 0.082 | 66.6 | 2.6×10^{-24} |
| | 30 | 320,840 | | | |
| | 40 | 320,840 | | | |
| | 50 | 290,855 | | | |
| | 60 | 310,845 | | | |
| Z'-Z'' | 25 | 100,950 | 0.466 | 1.16×10^6 | 4.54×10^{-18} |
| | 30 | 110,945 | | | |
| | 40 | 510,745 | | | |
| | 50 | 120,940 | | | |
| | 60 | 110,045 | | | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามทำซ้ำและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

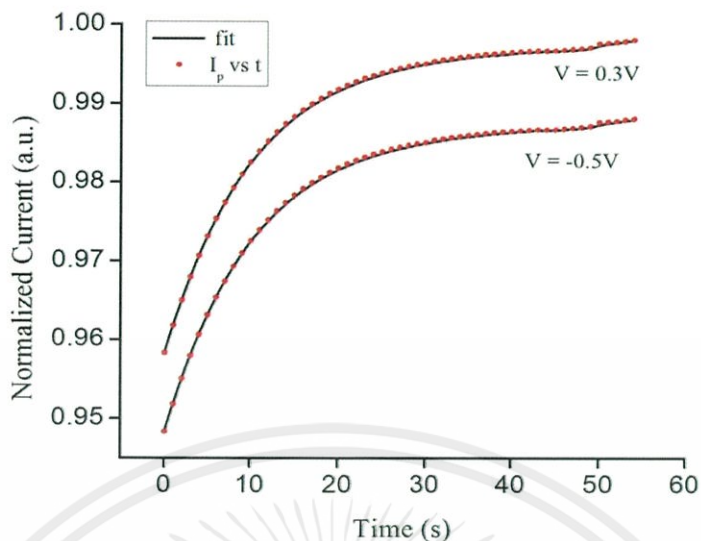
4.3.5 ผลการศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงของสิ่งประดิษฐ์รอยต่ออวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



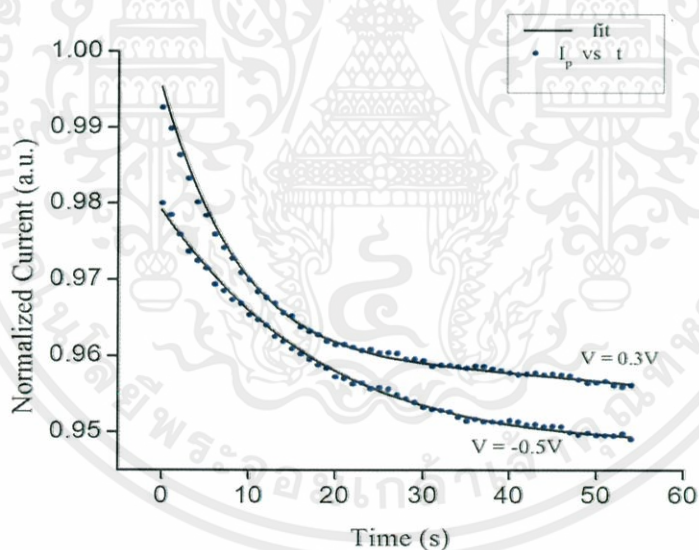
รูปที่ 4.34 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโฟโตกับเวลาภายใต้แรงดันไบอัส -0.5 กับ 0.3 โวลต์ ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่ออวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

จากกราฟในรูปที่ 4.34 เมื่อนำไปหาความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I_p$ กับ t ของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงทั้งช่วงกระแสขาขึ้นและช่วงกระแสขาลงทำให้ทราบค่าช่วงชีวิตพาหะได้ จากนั้นจึงนำค่าช่วงชีวิตพาหะนี้ไปเป็นค่าเริ่มต้นในการพล็อตกราฟโดยใช้มัลติเพิลเอกซ์โพเนนเชียลฟังก์ชัน เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.5 และพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสออร์มัลไลซ์กับเวลาของกระแสโฟโตขาขึ้นและขาลงจะแสดง ดังรูปที่ 4.35 และ รูปที่ 4.36 ตามลำดับ ส่วนตารางที่ 4.6 จะแสดงค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะของสิ่งประดิษฐ์รอยต่ออวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ในช่วงกระแสขาลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.35 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสออร์มัลไลซ์ขาขึ้นกับเวลาของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อ
วิธีพันธุของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหย
สารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูปที่ 4.36 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสออร์มัลไลซ์ขาลงกับเวลาของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อ
วิธีพันธุของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหย
สารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงคือรีนของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ที่ได้จากการพีคกราฟ ให้เข้ากับฟังก์ชันมัลติเพิลเอกซ์โพเนนเชียล

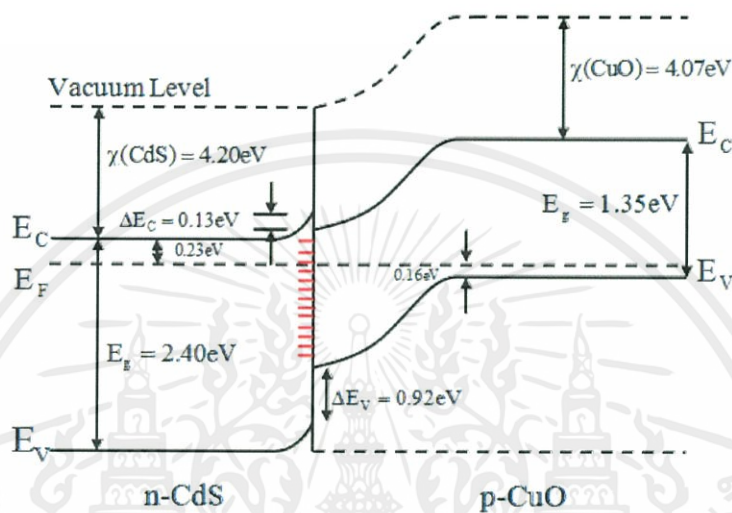
| Rise Time (s) | Bias Voltage (V) | | Decay Time (s) | Bias Voltage (V) | |
|----------------------|--|--|----------------------|--|--|
| | -0.5 | 0.3 | | -0.5 | 0.3 |
| 1 st Term | $A_1 = 5.06$ $\tau_{r1} = 42.03$ | $A_1 = 4.52$ $\tau_{r1} = 38.05$ | 1 st Term | $A_1 = 0.15$ $\tau_{d1} = 42.90$ | $A_1 = 0.05$ $\tau_{d1} = 50.45$ |
| 2 nd Term | $A_2 = -142.40$ $\tau_{r2} = 125.78$ | $A_1 = 4.52$ $\tau_{r1} = 38.05$ | 2 nd Term | $A_2 = -1.01$ $\tau_{d2} = 268.10$ | $A_2 = -0.04$ $\tau_{d2} = 423.73$ |
| 3 rd Term | $A_3 = 356.30$ $\tau_{r3} = 233.10$ | $A_3 = 42.90$ $\tau_{r3} = 180.18$ | 3 rd Term | $A_3 = -6.13$ $\tau_{d3} = 900.90$ | $A_3 = 0.03$ $\tau_{d3} = 578.03$ |
| 4 th Term | $A_4 = -3680$ $\tau_{r4} = 980.39$ $\beta = 0.136$ | $A_4 = -667.50$ $\tau_{r4} = 862.06$ $\beta = 0.135$ | 4 th Term | $A_4 = 7.96$ $\tau_{d4} = 1156.07$ $\beta = 0.700$ | $A_4 = 0.94$ $\tau_{d4} = 2832.86$ $\beta = 0.089$ |

ตารางที่ 4.6 ความหนาแน่นของกับดักพาหะชนิดต่างๆ ที่ได้จากการวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงคือรีนของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

| Sample Conditions | | Bias Voltage (V) | | |
|-------------------|----------------------|-----------------------------------|----------|----------|
| | | -0.5 | 0.3 | |
| Decay Component | 1 st Term | I_1 (A) | 2.15E-05 | 3.48E-05 |
| | | τ_{r1} | 42.90 | 50.45 |
| | | σ_{t1} (cm ⁻²) | 3.02E+13 | 8.16E+13 |
| | 2 nd Term | I_2 (A) | 1.72E-05 | 2.72E-05 |
| | | τ_{r2} | 268.10 | 423.73 |
| | | σ_{t2} (cm ⁻²) | 2.42E+13 | 6.38E+13 |
| | 3 rd Term | I_3 (A) | 1.53E-05 | 2.65E-05 |
| | | τ_{r3} | 900.90 | 578.03 |
| | | σ_{t3} (cm ⁻²) | 2.15E+13 | 6.21E+13 |
| | 4 th Term | I_4 (A) | 1.50E-05 | 2.40E-05 |
| | | τ_{r4} | 1156.07 | 2832.86 |
| | | σ_{t5} (cm ⁻²) | 2.11E+13 | 5.63E+13 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตซึ่งมีการนำไปใช้

จากข้อมูลการทดลองที่ผ่านมาทั้งหมด ได้แก่ ค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS และ CuO และพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS/CuO สามารถนำมาเขียนโครงสร้างแถบพลังงานของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ได้ดังรูปที่ 4.37



รูปที่ 4.37 แผนภาพแถบพลังงานของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ ๓

สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะสรุปผลการดำเนินงานวิจัยตั้งแต่การประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ และทำการวัดสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆของฟิล์มบาง และทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศโดยให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับ 100 องศาเซลเซียส

5.1 สรุปผลการทดลองของการศึกษาสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่เตรียมได้โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนภายในระบบสุญญากาศ

5.1.1 ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS และ CuO ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศที่เคลือบอยู่บนกระจกสไลด์ เมื่อให้อุณหภูมิแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกแผ่นสไลด์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส ใช้กระแสไฟฟ้าประมาณ 70 -80 แอมแปร์ เป็นเวลา 30 นาที พบว่าลักษณะฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ที่อยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ผิวหน้าฟิล์มบางมีลักษณะทึบแสงมีความมันเงายึดติดกับกระจกสไลด์ได้ดี ส่วนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS นั้นมีลักษณะเป็น สีเหลืองส้ม เมื่อทำการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ลงบนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO จะเห็นว่าฟิล์มบางซ้อนกันอยู่สองชั้น

การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ด้วยสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์พบว่าระนาบเลี้ยวเบนเด่นชัดที่สุดที่มุม 26.55 องศา เมื่อนำระนาบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางมาเทียบกับไฟล์มาตรฐาน JCPDS No 15-770 พบว่าเป็นระนาบ (002) ของโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล

เอกสารนี้ สำหรับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ไม่ปรากฏฟิสิกการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของระนาบผลึกของงานการค่า
ไม่ว่ากรณีใด CuO แต่คิดว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้เป็นอะมอร์ฟัส และมีเกรนเล็กมากของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.2 ผลการศึกษาสมบัติไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์รอยต่ออวิวิพพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO

ผลของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าช่วง -0.5 ถึง 1 โวลต์ ของรอยต่ออวิวิพพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่อุณหภูมิห้องมีสมบัติการเรียงกระแสไฟฟ้า และค่าแรงดันซีดเริ่มอยู่ที่ 0.5 โวลต์ ค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ 7.41×10^{-6} แอมแปร์ ส่วนค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ที่หาได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันและวิธีของชวงมีค่าใกล้เคียงกันคือ 5.19 และ 5.79 ตามลำดับ ส่วนค่าความสูงของกำแพงศักย์และค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมที่หาได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันกับวิธีของชวงมีค่าใกล้เคียงกันคือ 0.534 และ 0.709 อิเล็กตรอน โวลต์ 0.31 และ 0.18 โอห์ม ตามลำดับ

ผลของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าในช่วง 0 ถึง 1.0 โวลต์ ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่ออวิวิพพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่อุณหภูมิค่าในช่วงอุณหภูมิ 10 ถึง 300 เคลวิน พบว่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับมีค่าแปรตรงตามอุณหภูมิ ส่วนค่าแฟกเตอร์อุดมคติที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันและวิธีของชวง มีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น จากการหาค่าลักษณะเฉพาะของพลังงานการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ (E_{00}) พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.084 อิเล็กตรอน โวลต์ ค่าความสูงกำแพงศักย์ที่ได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันและวิธีของชวง มีค่าแปรตรงตามอุณหภูมิ และค่าความสูงกำแพงศักย์ที่ได้จากวิธีของชวงใกล้เคียงกับกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมที่ได้จากวิธีของชวงมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และวิธีของชวงที่มีความสัมพันธ์ $dV/d(\ln I) - I$ สามารถอธิบายความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมได้ดีที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.3 ผลการศึกษาค่าความจุไฟฟ้า-ความถี่เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-60 องศาเซลเซียส โดยใช้ความถี่ 10 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO

ผลการศึกษาค่าความจุไฟฟ้า-ความถี่เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิ 25 - 60 องศาเซลเซียส โดยใช้ความถี่ 10 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิร์ตซ์ ของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ซึ่งเราจะได้ค่าความถี่เฉพาะ ω_0 ที่สอดคล้องกับจุดเปลี่ยนโค้งของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับความถี่ และ ω_0 มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น และยังสามารถคำนวณหา ค่าพลังงานกระตุ้นได้ซึ่งมีค่าเท่ากับ 82 มิลลิอิเล็กตรอน โวลต์ และเรายังได้ทำการวัดค่าความจุไฟฟ้า-ความถี่ ที่อุณหภูมิในช่วง 25 ถึง 60 องศาเซลเซียส ความหนาแน่นของกักพาหะมีค่าเท่ากับ 4.05×10^{13} ต่อตารางเซนติเมตรที่อุณหภูมิห้อง สามารถคำนวณได้จากการวัดค่าความจุไฟฟ้า-ความถี่ ซึ่งความหนาแน่นของกักพาหะนี้ มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

5.2 ประโยชน์ที่ได้รับ

ได้เรียนรู้ถึงวิธีการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS กับ CuO ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ได้ศึกษาลักษณะของเกรนที่ได้จากภาพถ่ายกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราดและได้ศึกษาสมบัติเชิงแสง โดยการวัดสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางเพื่อคำนวณหาขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน การประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เมื่อให้อุณหภูมิแก่แผ่นฐานรองรับเท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

ได้เรียนรู้วิธีการวัดคุณสมบัติต่างๆของสิ่งประดิษฐ์รอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ n-CdS/p-CuO โดยได้ทำการวัดกระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า การวัดค่าอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน และการวัดความจุไฟฟ้า-ความถี่ เพื่อใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ค่าความสูงกำแพงศักย์ ค่าแพกเตอร์อูดมคติ ค่าความหนาแน่นของกักพาหะ ค่าพลังงานกระตุ้น เป็นต้น ซึ่งสิ่งนี้เองทำให้ในอนาคตเราสามารถนำค่าเหล่านี้มาใช้ เพื่อประโยชน์ในการศึกษาขั้นสูงต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

1. การเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกใสควรระวังอย่าให้ผิวหน้าเป็นรอยเพราะจะทำให้ฟิล์มบางที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกไม่สม่ำเสมอ หรือเคลือบไม่ติดทั้งแผ่น
2. ต้องการทำความสะอาดระบบประเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศทุกครั้งเมื่อทำงานเสร็จหรือก่อนใช้งาน เพื่อที่ไม่ได้มีสารอื่นมาปนเปื้อนระหว่างการเตรียมฟิล์มบาง
3. การวัดอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับในระบบประเหยสารเคมีด้วยความร้อนในสุญญากาศ ต้องให้ปลายเทอร์โมคัปเปิลสัมผัสกับแผ่นฐานรองรับ เพื่อให้เครื่องควบคุมอุณหภูมิจ่ายกระแสแก่แผ่นฐานรองรับให้ได้อุณหภูมิที่ถูกต้องตามที่ต้องการ และจะไม่เกิดความเสียหายกับฟิล์มบางที่เคลือบกับแผ่นฐานรองรับที่เตรียมไว้แล้วหรือที่กำลังเตรียมใหม่
4. หัววัดความหนาของฟิล์มบางควรอยู่ระดับเดียวกับหน้ากากอะลูมิเนียมเพื่อที่จะได้ค่าความหนาของชั้นฟิล์มที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด
5. การระเหยสารเคมีขึ้นไปเคลือบยังแผ่นฐานรองรับควรใช้อัตราการระเหยที่เหมาะสมซึ่งขึ้นกับชนิดสารเคมีที่ใช้
6. การวัดค่าต่างๆที่ความถี่ต่ำต้องมีระบบกันสัญญาณรบกวนที่ดีเพราะเวลาวัดค่าไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ต่ำมีสัญญาณรบกวนมากเกินไป
7. ควรจะทำการวัดความจุไฟฟ้า-ความถี่ และอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปี ที่อุณหภูมิสูงเนื่องจากอุณหภูมิที่ทำการวัดต่ำมีค่าข้อมูลน้อยเกินไปที่จะหาค่าพลังงานกระตุ้นที่ถูกต้องได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- ไกรศักดิ์ ยืนยง. 2553. การศึกษาชั้นสัมผัสไอหุ้มมิกของฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์. วิทยานิพนธ์
วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ. 2530. การศึกษารอยต่อแบบโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ ของคอปเปอร์-
อินเดียม ไดซีลีไนด์. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- งามนิตย์ วงษ์เจริญ, จูตินัย แก้วแดง และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2556. ความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้า
ของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ In_xWO_3 ($0 \leq x \leq 0.05$) และการประยุกต์ รายงานวิจัยเสนอ
ต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- จักรพงษ์ สวัสดิวงศ์. 2556. การประดิษฐ์และการศึกษาสมบัติของรอยต่อวิวิธพันธุ์ระหว่างซิงค์เทล
ไรด์กับทังสเตนออกไซด์ที่เจือด้วยอะตอมของอินเดียม. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร
มหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- จูตินัย แก้วแดง. 2530. การเตรียมและศึกษาสมบัติของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมไดซีลีไนด์.
วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- จูตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ. 2545. การเตรียม
และการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ ที่มี Zn เพื่อประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์,
รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง.
- จูตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ. 2546. การ
ประดิษฐ์ฟิล์มบาง $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ ที่มี Zn ในปริมาณสูงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์. รายงานวิจัย
เสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- จูตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2549. การประดิษฐ์ฟิล์มบางดีบุก
ออกไซด์ที่เจือด้วยอะตอมฟลูออรีนสำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์.
รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง.
- จูตินัย แก้วแดง งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2556. การประดิษฐ์และการศึกษา
สมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CuO รายงานวิจัยเสนอต่อ
คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- สุริยา มีเปี่ยมสมบูรณ์. 2553. การประดิษฐ์ฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์เพื่อประยุกต์เป็นขอตัก
โคโอด. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ
ทหารลาดกระบัง.

- สุกฤษฎี เกิดแสง. 2547. การเตรียมและศึกษาสมบัติของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ CdTe. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- สุริยา มีเปี่ยมสมบูรณ์. 2553. การประดิษฐ์ฟิล์มบางแคดเมียมเทลลูไรด์เพื่อประยุกต์เป็นขอตักกิโอโดด. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- สมเกียรติ สุขเดช. 2542. เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์, แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- นิโลบล แก้วพ่วง, นิสานาลัย ชัยชนะ, ชุตติกาญจน์ ชุมล้า. 2554. ลักษณะของกระแส-แรงดันไฟฟ้า ที่ขึ้นกับอุณหภูมิของไดโอดรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CuCrO₂. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- วรรณภา จำเนียรพีช. 2555. การศึกษาสมบัติของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของไดโอด CdS/CuO. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- วารภรณ์ บุญเกื้อ. 2554. สมบัติของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CdS/CdTe. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- เมธิรา ร่วมสุข. 2555. สมบัติเชิงแสงของฟิล์มบาง CuInSe₂ ที่เจือด้วย Na ซึ่งเตรียมโดยวิธีการระเหยในระบบสุญญากาศ. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- เอกชัย วิลามาศ. 2552. การเตรียมและการศึกษาสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางของรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CdTe. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- อัฐพร อริยฤทธิ์. 2553. การศึกษาสมบัติรอยต่อวิวิธพันธุ์ Cd_{0.6}Zn_{0.4}S/CuAlO₂. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- อดิศร นพจรจุล. 2555. สมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS กับ CuAlO₂. วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- Barsoukov E., Macdonald J.R. 2005. Impedance Spectroscopy Theory Experiment and Application. 2nd Edition. New Jersey : John Wiley&Sons Inc. Hoboken.
- Bugarinovic, N. et al. 2011. Cuprous Oxide as an Active Material for Solar Cells in Solar Cells- New Aspects and Solution. Edited by Leonoid A. Kosyachenko: Intech Open Science

- Ghaffarzadeh, K. Nathan, A. and Robertson, J. 2010. Persistent Photoconductivity in Hf-In-Zn-O Thin Film Transistors. *Appl. Phys. Lett.* 97, 143510-1- 143510-3.
- Ghosh, R. and Basak, D. 2007. Electrical and Ultraviolet Photoresponse Properties of Quasialigned ZnO Nanowires/p-Si Heterojunction. *App. Phys. Lett.* 90, 243106-1-243106-3.
- Gu, G., Kane, M.G., Doty, J.E. and Firester, A.H. 2005. Electron Traps and Hysteresis in Pentacene-Based Organic Thin Film Transistors. *Appl. Phys. Lett.* 87, 243512-1-243512-3.
- Guo, L., Wang, X., Feng, L. Zheng, X. and Chen, G. 2013. Temperature Sensitive Photoconductivity Observed in InN Lays. *Appl. Phys. Lett.* 102, 072103-1- 072103-3.
- Huang, B.C. and Lin, Y.L. 2011. Effect of the Induced Electron Traps by Oxygen Plasma Treatment on Transfer Characteristics of Organic Thin Film Transistors. *Appl. Phys. Lett.* 99,113301-1-113301-3
- Jeong, S. 2010. Thin Zinc Oxide and Cuprous Oxide Films for Photovoltaic Applications. Dissertation Submitted to the Faculty of the Graduate School of the University of Minnesota, USA.
- Jiang, F., Shen, H. and Wang, W. 2012. Optical and Electrical Properties of $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ Film Prepared by Sulfurization Method. *J. Elec. Matter.* 41(8), 2204-2209.
- Jiban Podder¹, Ryohei Kobayashi¹, Masaya Ichimura. 2005. Photochemical Deposition of Cu_xS Thin Films from Aqueous Solutions. *Thin Solid Films.* Vol. 472. pp. 71-75
- Johnson, C., Lin, J.Y. and Jiang, H.X. 1996. Metastability and Persistent Photoconductivity in Mg-Doped p-Type GaN. *Appl. Phys. Lett.* 68(13), 1808-1810.
- Kittel C. 2005. *Introduction to Solid State Physics.* 8th Edition. United States of America : John Wiley&Sons Inc.
- Korzhavyyi, P.A. and Johansson, B. 2011. Literature Review on the Properties of Cuprous Oxide Cu_2O and the Process of Copper Oxidation. Technical Report Submitted to Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- Lin, J.H., Zeng, J.J., Su, Y.C. and Lin, Y.J. 2012. Current Transport Mechanism of Heterojunction Diodes Based on the Reduced Graphene Oxide-Based Polymer Composite and n-Type Si. *Appl. Phys. Lett.* 100, 153509-1- 153509-4.
- Lin, Y.J., Luo, J. and Hung, H.C. 2013. Electronic Transport and Schottky Barrier of p-CuAlO₂ Schottky Diodes. *102.*,193511- 1193511-3.

- Luo, J. Adler, A.U., Mason, T.O. and Buchholz, D. 2013. Transient Photoresponse in Amorphous In-Ga-Zn-O Thin Films Under Stretched Exponential Analysis, *J. Appl. Phys.* 113, 153709-1- 153709-8.
- Minami, T., Nish, Y., Miyata, T. and Nomoto, J. 2011. High Efficiency Oxide Solar Cells with ZnO/Cu₂O Heterojunction Fabricated on Thermally Oxidized Cu₂O Sheets. *Appl. Phys. Express.* 4, 02301-062304.
- Muhibbullah, M. 2012. Deposition of Copper Oxide Thin Films by Chemical Techniques. Thesis for Doctor of Engineering Nagoya Institute of Technology, Japan.
- Rakhshani, A.E. 1986. Preparation, Characteristics and Photovoltaic Properties of Cuprous Oxide-A Review. *Solid State Elec.* 29(1), 7-17.
- Ren, S.T., Zhao, F. and Chen Q. 2012. Slow-Rise and Fast Drop Current Feature of Ultraviolet Response Spectra for ZnO-Nanowire Film Modulated by Water Molecules. *Chin. Phys. B*, 21(3), 038104-1- 038140-7.
- Runyan, W.R., 1975. *Semiconductor Measurement and Instrument*, 3rd Edition, New York: Mc.Graw-Hill.
- Studenikin, S.A., Geleco, N. and Cocivera, M. 1998. Optical and Electrical Properties of Undoped ZnO Films Grown by Spray Pyrolysis of Zinc Nitrate Solution. *J. Appl. Phys.* 83(4), 2104-2111.
- Sze S.M. 2007. *Semiconductor Devices Physics and Technology*, 3rd Edition. United States of America : John Wiley&Sons Inc.
- Yan Han., Yaping Wang., Wenhong Gao., Yijing Wang., Lifang Jiao., Huatang Yuan., Shuangxi Liu. 2011. Synthesis of Novel CuS with Hierarchical Structures and Its Application in Lithium-Ion Batteries. *Powder Technology*, Vol. 212.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางไฟล์มาตรฐานของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

| Pattern : 75-1546 | | Radiation = 1.540600 | Quality : Calculated | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|----------------------|----------------------|---|---|---|--------|-----|---|---|---|--------|----|---|---|---|--------|----|---|---|---|--------|----|---|---|---|--------|---|---|---|---|--------|---|---|---|---|--------|----|---|---|---|--------|---|---|---|---|--------|----|---|---|---|--------|---|---|---|---|
| <p style="text-align: center;">Cd S</p> <p>Cadmium Sulfide</p> <hr/> <p>Lattice : Face-centered cubic Mol. weight = 144.47</p> <p>S.G. : F-43m (216) Volume [CD] = 197.14</p> <p>a = 5.82000 Dx = 4.868</p> <p style="text-align: center;">Z = 4 <i>I</i>/<i>I</i>_{cor} = 14.05</p> <hr/> <p>ICSD COLLECTION CODE : 031075 TEST FROM ICSD : No R value given. TEST FROM ICSD : At least one TF missing.</p> <p>*Calculated from ICSD using POWD-12+, (1997) primary reference : *Z. Kristallogr., Kristallgeom., Kristallphys., Kristallchem., volume 62, page 260, (1925) : Ulrich, F., Zachariasen, W.</p> <hr/> <p>Radiation : CuKα1 Filter : Not specified</p> <p>Lambda : 1.54060 d-sp : Calculated spacings</p> | <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;">2th</th> <th style="text-align: left;">l</th> <th style="text-align: left;">h</th> <th style="text-align: left;">k</th> <th style="text-align: left;">i</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>26.505</td><td>100</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>30.699</td><td>22</td><td>2</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>43.969</td><td>47</td><td>2</td><td>2</td><td>0</td></tr> <tr><td>52.076</td><td>33</td><td>3</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>54.579</td><td>5</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>63.932</td><td>6</td><td>4</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>70.468</td><td>11</td><td>3</td><td>3</td><td>1</td></tr> <tr><td>72.585</td><td>5</td><td>4</td><td>2</td><td>0</td></tr> <tr><td>80.842</td><td>10</td><td>4</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>86.902</td><td>7</td><td>5</td><td>1</td><td>1</td></tr> </tbody> </table> | 2th | l | h | k | i | 26.505 | 100 | 1 | 1 | 1 | 30.699 | 22 | 2 | 0 | 0 | 43.969 | 47 | 2 | 2 | 0 | 52.076 | 33 | 3 | 1 | 1 | 54.579 | 5 | 2 | 2 | 2 | 63.932 | 6 | 4 | 0 | 0 | 70.468 | 11 | 3 | 3 | 1 | 72.585 | 5 | 4 | 2 | 0 | 80.842 | 10 | 4 | 2 | 2 | 86.902 | 7 | 5 | 1 | 1 |
| 2th | l | h | k | i | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 26.505 | 100 | 1 | 1 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 30.699 | 22 | 2 | 0 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 43.969 | 47 | 2 | 2 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 52.076 | 33 | 3 | 1 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 54.579 | 5 | 2 | 2 | 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 63.932 | 6 | 4 | 0 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 70.468 | 11 | 3 | 3 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 72.585 | 5 | 4 | 2 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 80.842 | 10 | 4 | 2 | 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 86.902 | 7 | 5 | 1 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

| Pattern : 80-1268 | | Radiation = 1.540600 | | Quality : Calculated | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|--|---|-----------------------------|---|---|---|---|--------|---|---|---|---|--------|----|---|---|---|--------|----|----|---|---|--------|-----|---|---|---|--------|----|---|---|---|--------|---|----|---|---|--------|----|----|---|---|--------|---|---|---|---|--------|----|---|---|---|--------|---|---|---|---|--------|----|---|---|---|--------|----|----|---|---|--------|----|---|---|---|--------|----|----|---|---|--------|---|---|---|---|--------|----|---|---|---|--------|----|----|---|---|--------|----|----|---|---|--------|---|---|---|---|--------|----|---|---|---|--------|---|---|---|---|--------|---|----|---|---|--------|----|---|---|---|--------|---|----|---|---|--------|---|----|---|---|--------|---|---|---|---|--------|---|---|---|---|--------|---|---|---|---|--------|---|----|---|---|--------|---|----|---|---|--------|----|---|---|---|--------|---|----|---|---|---|--|--|---|
| Cu O Copper Oxide | | <table border="1"> <thead> <tr> <th>2th</th> <th>l</th> <th>h</th> <th>k</th> <th>j</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>32.548</td><td>7</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>35.466</td><td>37</td><td>0</td><td>0</td><td>2</td></tr> <tr><td>35.566</td><td>92</td><td>-1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>38.769</td><td>100</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>38.974</td><td>29</td><td>2</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>46.277</td><td>2</td><td>-1</td><td>1</td><td>2</td></tr> <tr><td>48.743</td><td>28</td><td>-2</td><td>0</td><td>2</td></tr> <tr><td>51.419</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td></tr> <tr><td>53.534</td><td>10</td><td>0</td><td>2</td><td>0</td></tr> <tr><td>58.773</td><td>1</td><td>0</td><td>2</td><td>1</td></tr> <tr><td>58.776</td><td>14</td><td>2</td><td>0</td><td>2</td></tr> <tr><td>61.567</td><td>19</td><td>-1</td><td>1</td><td>3</td></tr> <tr><td>65.870</td><td>14</td><td>0</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>66.292</td><td>14</td><td>-3</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>67.987</td><td>9</td><td>1</td><td>1</td><td>3</td></tr> <tr><td>68.175</td><td>16</td><td>2</td><td>2</td><td>0</td></tr> <tr><td>68.951</td><td><1</td><td>-2</td><td>2</td><td>1</td></tr> <tr><td>71.725</td><td><1</td><td>-3</td><td>1</td><td>2</td></tr> <tr><td>72.498</td><td>6</td><td>3</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>73.045</td><td><1</td><td>2</td><td>2</td><td>1</td></tr> <tr><td>75.059</td><td>5</td><td>0</td><td>0</td><td>4</td></tr> <tr><td>75.298</td><td>8</td><td>-2</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>79.812</td><td><1</td><td>0</td><td>2</td><td>3</td></tr> <tr><td>80.191</td><td>2</td><td>-2</td><td>0</td><td>4</td></tr> <tr><td>82.397</td><td>4</td><td>-3</td><td>1</td><td>3</td></tr> <tr><td>83.184</td><td>4</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>83.701</td><td>4</td><td>3</td><td>1</td><td>2</td></tr> <tr><td>83.701</td><td>4</td><td>4</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>86.602</td><td>1</td><td>-4</td><td>0</td><td>2</td></tr> <tr><td>86.811</td><td>1</td><td>-2</td><td>2</td><td>3</td></tr> <tr><td>88.096</td><td><1</td><td>1</td><td>1</td><td>4</td></tr> <tr><td>89.877</td><td>5</td><td>-1</td><td>3</td><td>1</td></tr> </tbody> </table> | | 2th | l | h | k | j | 32.548 | 7 | 1 | 1 | 0 | 35.466 | 37 | 0 | 0 | 2 | 35.566 | 92 | -1 | 1 | 1 | 38.769 | 100 | 1 | 1 | 1 | 38.974 | 29 | 2 | 0 | 0 | 46.277 | 2 | -1 | 1 | 2 | 48.743 | 28 | -2 | 0 | 2 | 51.419 | 1 | 1 | 1 | 2 | 53.534 | 10 | 0 | 2 | 0 | 58.773 | 1 | 0 | 2 | 1 | 58.776 | 14 | 2 | 0 | 2 | 61.567 | 19 | -1 | 1 | 3 | 65.870 | 14 | 0 | 2 | 2 | 66.292 | 14 | -3 | 1 | 1 | 67.987 | 9 | 1 | 1 | 3 | 68.175 | 16 | 2 | 2 | 0 | 68.951 | <1 | -2 | 2 | 1 | 71.725 | <1 | -3 | 1 | 2 | 72.498 | 6 | 3 | 1 | 1 | 73.045 | <1 | 2 | 2 | 1 | 75.059 | 5 | 0 | 0 | 4 | 75.298 | 8 | -2 | 2 | 2 | 79.812 | <1 | 0 | 2 | 3 | 80.191 | 2 | -2 | 0 | 4 | 82.397 | 4 | -3 | 1 | 3 | 83.184 | 4 | 2 | 2 | 2 | 83.701 | 4 | 3 | 1 | 2 | 83.701 | 4 | 4 | 0 | 0 | 86.602 | 1 | -4 | 0 | 2 | 86.811 | 1 | -2 | 2 | 3 | 88.096 | <1 | 1 | 1 | 4 | 89.877 | 5 | -1 | 3 | 1 | <table border="1"> <tr> <td> Lattice : Monoclinic S.G. : C2/c (15) a = 4.68330 b = 3.42080 c = 5.12940 a/b = 1.36907 c/b = 1.49947 </td> <td> Mol. weight = 79.55 Volume [CD] = 81.03 Dx = 6.520 Beta = 99.57 Z = 4 l/for = 4.00 </td> </tr> </table> | | Lattice : Monoclinic S.G. : C2/c (15) a = 4.68330 b = 3.42080 c = 5.12940 a/b = 1.36907 c/b = 1.49947 | Mol. weight = 79.55 Volume [CD] = 81.03 Dx = 6.520 Beta = 99.57 Z = 4 l/for = 4.00 |
| 2th | l | h | k | j | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 32.548 | 7 | 1 | 1 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 35.466 | 37 | 0 | 0 | 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 35.566 | 92 | -1 | 1 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 38.769 | 100 | 1 | 1 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 38.974 | 29 | 2 | 0 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 46.277 | 2 | -1 | 1 | 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 48.743 | 28 | -2 | 0 | 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 51.419 | 1 | 1 | 1 | 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 53.534 | 10 | 0 | 2 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 58.773 | 1 | 0 | 2 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 58.776 | 14 | 2 | 0 | 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 61.567 | 19 | -1 | 1 | 3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 65.870 | 14 | 0 | 2 | 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 66.292 | 14 | -3 | 1 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 67.987 | 9 | 1 | 1 | 3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 68.175 | 16 | 2 | 2 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 68.951 | <1 | -2 | 2 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 71.725 | <1 | -3 | 1 | 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 72.498 | 6 | 3 | 1 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 73.045 | <1 | 2 | 2 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 75.059 | 5 | 0 | 0 | 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 75.298 | 8 | -2 | 2 | 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 79.812 | <1 | 0 | 2 | 3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 80.191 | 2 | -2 | 0 | 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 82.397 | 4 | -3 | 1 | 3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 83.184 | 4 | 2 | 2 | 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 83.701 | 4 | 3 | 1 | 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 83.701 | 4 | 4 | 0 | 0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 86.602 | 1 | -4 | 0 | 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 86.811 | 1 | -2 | 2 | 3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 88.096 | <1 | 1 | 1 | 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 89.877 | 5 | -1 | 3 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Lattice : Monoclinic S.G. : C2/c (15) a = 4.68330 b = 3.42080 c = 5.12940 a/b = 1.36907 c/b = 1.49947 | Mol. weight = 79.55 Volume [CD] = 81.03 Dx = 6.520 Beta = 99.57 Z = 4 l/for = 4.00 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ICSD COLLECTION CODE : 069094 TEMPERATURE FACTOR : ATF REMARKS FROM ICSD : REM TEM 11. REMARKS FROM ICSD : REM RVP. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| *Calculated from ICSD using POWD-12++, (1997) primary reference : *J. Solid State Chem., volume 89, page 184, (1990) : Brese, N.E., O'Keeffe, M., Ramakrishna, B.L., von Dreele, R.B. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Radiation : CuKα1 Lambda : 1.54060 | | Filter : Not specified d-sp : Calculated spacings | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Rise (-0.5V)

General model:

$$f(x) = (a*(1-\exp(-x/42.03446826)))+(b*(1-\exp(-x/125.7861635)))+(c*(1-\exp(-x/233.1002331)))+(d*(1-\exp(-x/980.3921569)^f)+0.948795104$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

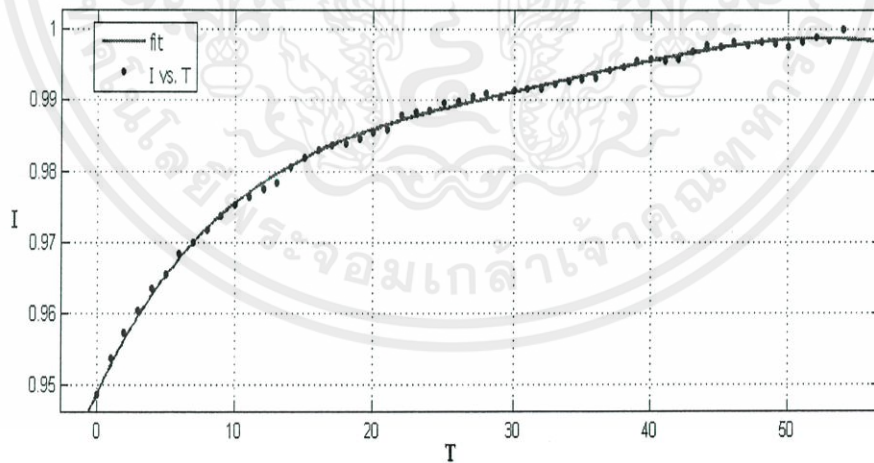
$$a = 5.488 \quad (-4.99, 15.97)$$

$$b = -167.7 \quad (-1348, 1013)$$

$$c = 465.7 \quad (-6546, 7478)$$

$$d = -866.8 \quad (-2.737e+04, 2.563e+04)$$

$$f = 0.8948 \quad (-50.15, 51.94)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Decay (-0.5 V)

General model:

$$f(x) = (a*(\exp(-x/32.41491086)))+(b*(\exp(-x/143.2664756)))+(c*(\exp(-x/819.6721311)))+(d*(\exp(-x/469.4835681)^f))$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

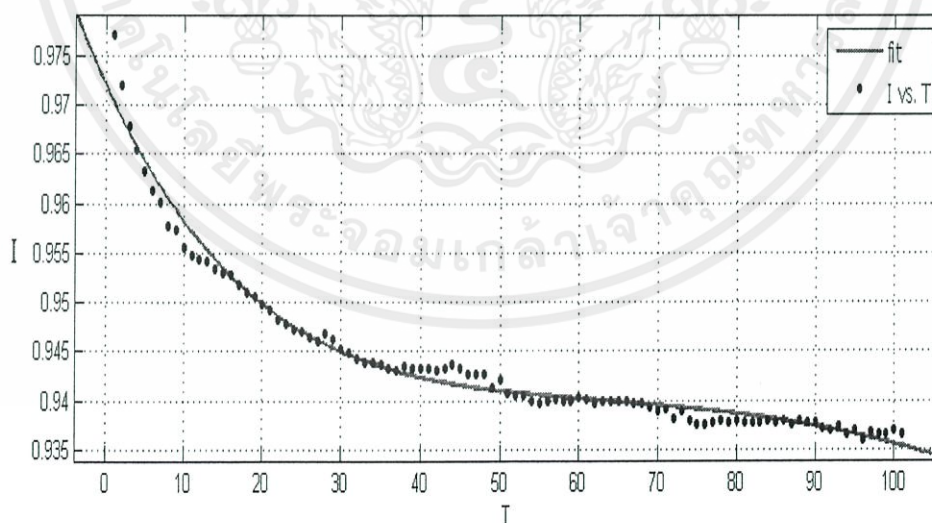
$$a = 0.1078 \quad (0.0392, 0.1765)$$

$$b = -0.5303 \quad (-2.434, 1.374)$$

$$c = 1.571 \quad (-12.84, 15.98)$$

$$d = -0.1767 \quad (-12.75, 12.4)$$

$$f = -0.4932 \quad (-52.09, 51.11)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

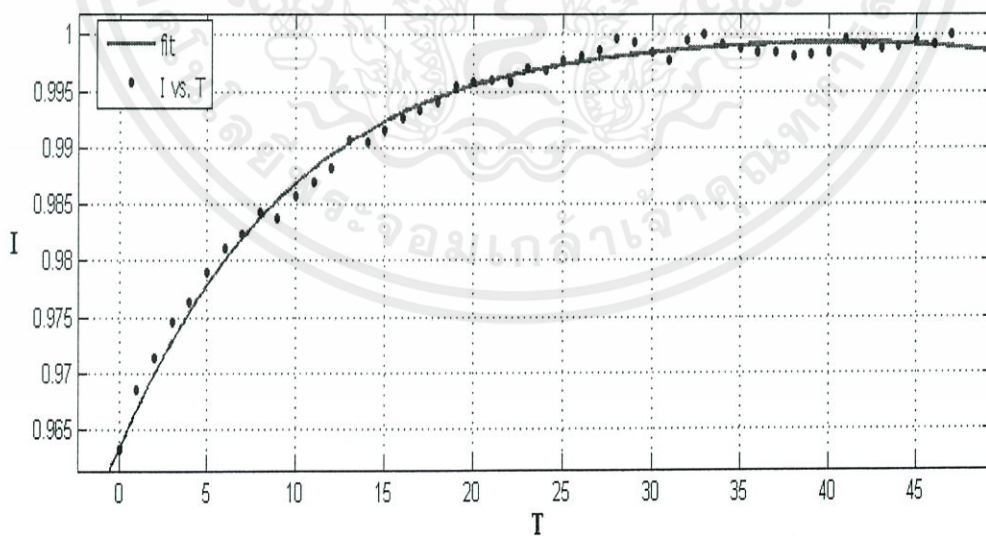
Rise (0.3 V)

General model:

$$f(x) = (a*(1-\exp(-x/38.05175038)))+(b*(1-\exp(-x/60.16847172)))+(c*(1-\exp(-x/180.1801802)))+(d*(1-\exp(-x/862.0689655)^f))+0.963312142$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

$$\begin{aligned} a &= 4.972 \quad (-13.93, 23.87) \\ b &= -16.69 \quad (-132.2, 98.85) \\ c &= 48.85 \quad (-1140, 1237) \\ d &= -861 \quad (-8.259e+05, 8.242e+05) \\ f &= 0.1209 \quad (-120.9, 121.2) \end{aligned}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Decay (0.3 V)

General model:

$$f(x) = (a * (\exp(-x/10.77934677))) + (b * (\exp(-x/47.34848485))) + (c * (\exp(-x/138.121547))) + (d * (\exp(-x/490.1960784)^f))$$

Coefficients (with 95% confidence bounds):

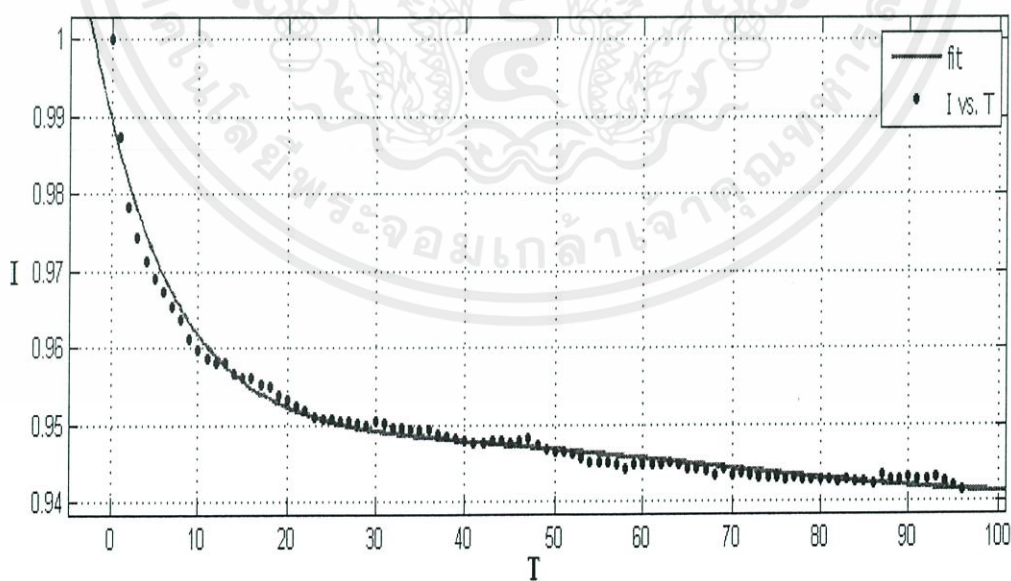
$$a = 0.05997 \quad (0.04895, 0.07099)$$

$$b = -0.1519 \quad (-0.2645, -0.03937)$$

$$c = 0.4293 \quad (0.07999, 0.7785)$$

$$d = 0.6523 \quad (0.4058, 0.8988)$$

$$f = -0.694 \quad (-1.539, 0.1515)$$

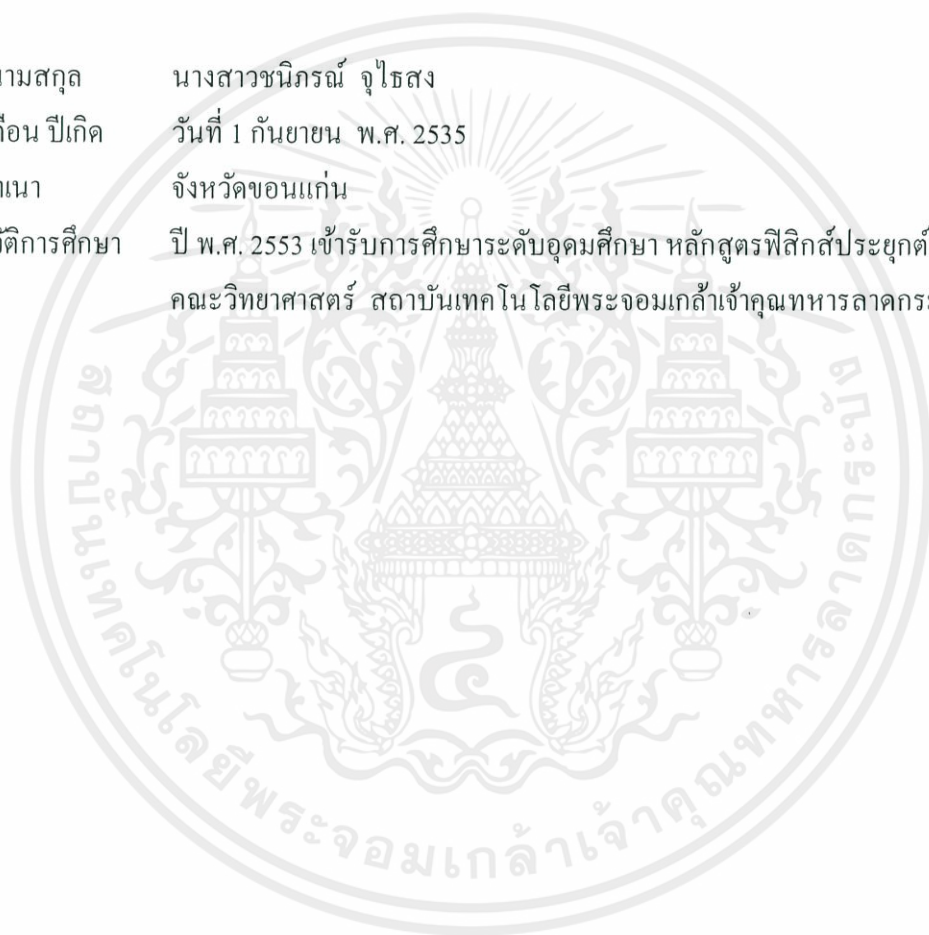


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นางสาวถิรญา โชติชนันท์
 วัน เดือน ปีเกิด วันที่ 7 กันยายน พ.ศ. 2534
 ภูมิลำเนา จังหวัดกรุงเทพมหานคร
 ประวัติการศึกษา ปี พ.ศ. 2553 เข้ารับการศึกษาระดับอุดมศึกษา หลักสูตรฟิสิกส์ประยุกต์
 คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อ-นามสกุล นางสาวชนิภรณ์ จุไรสง
 วัน เดือน ปีเกิด วันที่ 1 กันยายน พ.ศ. 2535
 ภูมิลำเนา จังหวัดขอนแก่น
 ประวัติการศึกษา ปี พ.ศ. 2553 เข้ารับการศึกษาระดับอุดมศึกษา หลักสูตรฟิสิกส์ประยุกต์
 คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้