

**สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง**

**การศึกษาสมบัติของรอยต่อขดลวดคิกของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์**



๒๗.  
๒๕๓๗  
๒๕๔๙

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 76632  
วัน,เดือน,ปี..... - 3 S.ค. 2550

b..... 11850565
i.....

**โครงการพิเศษเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาดานหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์  
คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2549**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# **Characterization of Schottky Junction of CdS Thin Films**



**A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree of  
Bachelor of Science  
Department of Applied Physics  
Faculty of Science  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang**

**Academic Year 2006**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**โครงการพิเศษเรื่อง** การศึกษาสมบัติของรอยต่อรอยคดักของฟิล์มบาง CdS

**นักศึกษา** นายธนวัติ เมธิสุทธินันท์  
นายสุภชัย เค่นคำรงกุล  
นายอนุรักษ์ วิวิทย์ทรกุล

**ภาควิชา** ฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์

**สาขาวิชา** ฟิสิกส์ประยุกต์

**ปีการศึกษา** 2549

**อาจารย์ที่ปรึกษา** รศ.จางนิศย์ วงษ์เจริญ

**อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม** ผศ.ดร.ชัยสิงห์ ภูรัมย์เกียรติ

**บทคัดย่อ**

โครงการพิเศษนี้เป็นการเตรียมฟิล์มบาง CdS ด้วยวิธีอบสารละลายเคมีบนชั้นตัวนำโปร่งแสง  $\text{SnO}_2 : \text{F}$  ที่เคลือบอยู่บนกระจกใส สาระละลายเคมีได้จากการละลาย  $\text{CdSO}_4$  และ  $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$  ลงใน  $\text{NH}_3$  เจือจางส่วนอะคอมสารเจือฟลูออรีนได้จาก  $\text{NH}_4\text{F}$  ทำการเคลือบฟิล์มบางที่อุณหภูมิ  $80^\circ\text{C}$  และทำการแอนนัลฟิล์มบางที่เตรียมได้ในบรรยากาศใน โตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ  $300^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 30 นาที ทำการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางและผิวหน้าของฟิล์มบางโดยวิธีเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ และกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด คำร้องว่าแถบพลังงานของฟิล์มบาง CdS หาได้จากสเปกตรัมการส่องผ่านแสง รอยต่อรอยคดักประดิษฐ์จากการระเหยโลหะ Au , Cu และ In ในระบบสุญญากาศเคลือบลงบนฟิล์มบาง CdS ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส – ความต้านทานที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิต่ำวัดจากการป้อนกระแสด้วยเครื่อง Keithley 236 ส่วนค่ากระแสจะวัดด้วยเครื่องอิเล็กทรอนิกส์ 610 CR พารามิเตอร์ที่สำคัญต่าง ๆ เช่น แฟกเตอร์อุณหภูมิ ความสูงของกั้นพลังงาน และความต้านทานอนุกรมที่ขึ้นกับอุณหภูมิ จะหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างกระแส – ความต้านทานซึ่งกล่าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Special Project Title**                      **Characterization of Schottky Junction of CdS**

**Name**                                              **Mr.Noranit              Matesuttinun**  
                                                          **Mr.Supachai           Dendamrongkul**  
                                                          **Mr.Anurak              Viriyapatrakul**

**Department**                                      **Applied Physics Faculty of Science**  
**Program**                                              **Applied Physics**  
**Academic Year**                                      **2006**  
**Special Project Advisor**                              **Assoc.Prof. Ngammit Wongcharoen**  
**Special Project Co-Advisor**                              **Assist.Prof. Dr. Chaisingh Poo-Rakkiat**

### **Abstract**

In this special project , CdS thin films were prepared by chemical bath deposition method on transparent conducting  $\text{SnO}_2 : \text{F}$  thin.  $\text{CdSO}_4$  and  $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$  were used as precursors of Cd and S sources in  $\text{NH}_3$  dilute solution and  $\text{NH}_4\text{F}$  was used as F dopant source . During deposition process , temperature of the bath was kept at  $80^\circ\text{C}$  and the obtained films were annealed at  $300^\circ\text{C}$  in  $\text{N}_2$  atmosphere at 1 atm for 30 min. Structure and crystal morphology of the films were checked by XRD and SEM techniques. Energy gap values of the films were determined from the optical transmission spectra. Schottky contacts were made by Au , Cu and In metals evaporated in vacuum on the CdS thin films. I – V characteristics at room temperature and low temperature were investigated by using Keithley 236 as a voltage source and current was measured by Keithley 610 CR electrometer. Some important parameters such as ideality factor , barrier height and series resistance values as a function of temperature were evaporated from I – V curves.

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สามารถสำเร็จและถูกลงไปได้ด้วยความกรุณาของรองศาสตราจารย์ ดร.ฐิตินัย แก้วแดง รองศาสตราจารย์ งามนิศน์ วงษ์เจริญ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยสิงห์ ภูริภักย์เกียรติ รองศาสตราจารย์ ดร.ทิพรศน์ วงษ์เจริญและอาจารย์อัฐพร พรหมรส ที่คอยให้คำแนะนำรวมทั้งเอื้ออำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ และอุปการณ์ในการทดลองตลอดจนให้คำแนะนำคำปรึกษาทางวิชาการและการใช้ชีวิต รวมไปถึงการปลูกฝังสิ่งที่สิ่งมาให้แก่ศิษย์ทุกคนเสมอมา

ขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์คำแนะนำในการใช้เครื่องเอกซเรย์คิฟแฟร็กโครมิเตอร์ (X-ray diffractometer) ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 advance ในการศึกษาโครงสร้างผลึกซิงกูลภาค

ขอขอบคุณ รศ. วิชาญ เดชศิธีระ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์จัดสรรงบประมาณของภาควิชาเพื่อใช้ในการวิจัย

ขอขอบคุณ คุณปกรณ์ สิทธิเชตรกรรย์ คุณฐิติกร จรรยาธรรม คุณประธาน ประจวบโชค คุณอัฐวัฒน์ ทুমเมฆ และพี่ๆนักศึกษาปริญญาโททุก ๆ ท่านที่ให้ความช่วยเหลือในทุก ๆ ด้าน คอยให้คำปรึกษาทั้งในเรื่องการเรียน การงาน และชีวิตประจำวันทั่วไป ขอขอบคุณเพื่อนๆ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ทุกคนที่คอยเป็นกำลังใจด้วยดีเสมอมา และคอยช่วยเหลือกันเป็นอย่างดีและที่ขาดเสียมิได้ ขอขอบคุณผู้ร่วมทำโครงการพิเศษ ที่ให้ความร่วมมือและใส่ใจในการทำโครงการพิเศษร่วมกัน สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณครูอาจารย์ทุกท่าน ที่ได้คอยช่วยเหลือตลอดมาจนกระทั่งโครงการพิเศษนี้สำเร็จถูกลงไปได้ด้วยดีต้องขอขอบพระคุณอย่างสูงครับ

นายมนรัตน์	เมธิสุทธินันท์
นายสุภชัย	เด่นคำรงกุล
นายอนุรักษ์	วิริยภัทรกุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 โครงสร้างของผลึก.....	4
2.1.1 ชนิดการจัดเรียงตัวของอะตอมที่อยู่ภายใน โครงผลึกแบบ 3 มิติ .....	4
2.1.1.1 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์.....	4
2.1.1.2 โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซด์.....	5
2.1.2 หลักเกณฑ์ในการระบุลักษณะพื้นฐานของผลึก.....	7
2.1.3 ความไม่สมบูรณ์ของผลึก.....	8
2.1.3.1 ข้อบกพร่องผลึกแบบจุด.....	8
2.1.3.2 ข้อบกพร่องผลึกเชิงเส้น .....	9
2.1.3.3 ข้อบกพร่องผลึกแบบแนวระนาบ.....	10
2.1.4 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์.....	10
2.1.5 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก.....	11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.1.5.1 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์blend .....12	12
2.1.5.2 โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซด์.....12	12
2.2 สมบัติการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ.....12	12
2.2.1 ทฤษฎีโครงสร้างแถบพลังงาน.....12	12
2.2.1.1 โลหะ สารกึ่งตัวนำและฉนวน.....13	13
2.2.1.2 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ.....14	14
2.2.2 โครงสร้างแถบพลังงานของแคดเมียมซัลไฟด์.....16	16
2.3 การส่งผ่านแสง.....17	17
2.3.1 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง.....18	18
2.4 สมบัติทางไฟฟ้า.....20	20
2.4.1 สภาพนำไฟฟ้า.....20	20
2.4.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า.....22	22
2.4.2.1 การวัดความต้านทานจำเพาะ โดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น.....22	22
2.4.3 การนำไฟฟ้าในช่วงอุณหภูมิต่าง ๆ.....25	25
2.4.4 แถบจำลองของรอยต่อ.....26	26
2.4.5 ทฤษฎีเทอร์มิโอนิกอิมิตชัน.....27	27
2.4.6 กระแสที่เกิดจากการถอยผ่านกั้นทางศักย์ .....31	31
2.4.7 ลักษณะเฉพาะกระแส – แรงดัน.....32	32
2.4.8 รอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นในอุดมคติกรณีฟังก์ชัน งานของ โลหะ $\phi_m$ มีค่ามากกว่า $\phi_s$ ของสารกึ่งตัวนำ.....38	38
2.4.8.1 สมบัติทั่วไปของรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ.....38	38
2.4.8.2 สมบัติของรอยต่อในสถานะสมดุลความร้อน.....42	42
2.4.9 รอยต่อแบบโอห์มมิก .....44	44
2.5 การเตรียมและศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง CdS ด้วยวิธีการออบสารละลายเคมี.....47	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.5.1 กระบวนการเกิดปฏิกิริยา.....	47
2.5.2 การเกิดฟิล์มบาง Cds บนแผ่นรองรับ.....	49
2.6 การเตรียมฟิล์มบางคิงุกออกไซด์ด้วยวิธีอัลตราโซนิคสเปรย์ไพโรไลซิส.....	50
2.6.1 กระบวนการการเกิดปฏิกิริยาเคมีภายในสารละลาย.....	50
2.6.2 กระบวนการการเกิดฟิล์มบาง.....	51
2.7 เทคนิคการเคลือบฟิล์มบางโดยการระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ.....	53
2.7.1 กระบวนการเตรียมฟิล์มบางด้วยการระเหยสาร.....	53
2.7.1.1 อัตราการระเหยสาร.....	54
2.7.1.2 ความดันไอของธาตุ.....	54
2.7.1.3 แหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้ในการระเหยสารด้วยไฟฟ้า.....	56
2.7.1.3.1 แหล่งกำเนิดชนิดหลอดทังสเตน.....	56
2.7.1.3.2 แหล่งกำเนิดชนิดแผ่นโลหะคงรูป.....	56
2.7.1.3.3 เตาระเหย.....	57
2.7.1.3.4 เป้าหลอม.....	57
2.7.1.3.5 การประมาณค่าอุณหภูมิของแหล่งกำเนิดความร้อนชนิดตัวต้านทาน.....	57
2.7.2 การระเหยสารประกอบ.....	58
2.7.3 อิทธิพลของโครงสร้างเชิงเรขาคณิตต่อระบบการเตรียมฟิล์มด้วยวิธีการระเหย.....	59
บทที่3 การดำเนินงานวิจัย.....	61
3.1 การเตรียมแผ่นรองรับที่เป็นกระจกใส.....	61
3.2 วิธีการเตรียมฟิล์มบางคิงุกออกไซด์โดยการพ่นละอองสารเคมีแบบอัลตราโซนิค.....	62
3.3 วิธีการเตรียมฟิล์มบาง Cds โดยวิธีการอบสารละลายเคมี.....	62
3.4 ระบบการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ.....	63
3.4.1 วิธีการเคลือบโลหะทองคำโดยใช้วิธีระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ.....	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.5 การศึกษาสมบัติของรอยต่อขดลวดของฟิล์มบาง CdS .....	67
3.5.1 การศึกษาสมบัติของรอยต่อขดลวดของฟิล์มบาง CdS ที่อุณหภูมิห้อง.....	67
3.5.2 การศึกษาสมบัติของรอยต่อขดลวดของฟิล์มบาง CdS ที่อุณหภูมิต่ำ.....	67
3.6 ขั้นตอนการคำนวณและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	68
3.6.1 ศึกษาสมบัติของรอยต่อขดลวดของฟิล์มบาง CdS จากค่าแฟกเตอร์ดูดกลืน ( $n$ ).....	68
3.6.2 ศึกษาสมบัติของรอยต่อขดลวดของฟิล์มบาง CdS จากค่าความสูงของเส้นทรงกึ่ง.....	68
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล.....	70
4.1 ลักษณะของฟิล์มบางที่เตรียมได้.....	70
4.1.1 ฟิล์มบาง สีน ไดออกไซด์( $SnO_2$ ) ที่เตรียมได้.....	70
4.1.2 ฟิล์มบาง แคดเมียมซัลไฟด์(CdS) โดยการใช้วิธีการเคลือบโดยการอบ สารละลายที่มี.....	70
4.1.3 ฟิล์มบาง แคดเมียมซัลไฟด์(CdS) ที่เคลือบด้วย ทองแดง(Cu) และ ทองคำ(Au) ด้วยวิธีระเหยสารด้วยความร้อน.....	71
4.2 ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึก.....	72
4.3 ผลการศึกษาลักษณะ โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....	73
4.4 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงเพื่อคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน.....	74
4.5 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า.....	77
4.5.1 การศึกษาสมบัติของรอยต่อขดลวดของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับทองแดง (Cu) ในกรณีวัดที่อุณหภูมิห้อง.....	78
4.5.2 การศึกษาสมบัติของรอยต่อขดลวดของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับทองคำ (Au) ในกรณีวัดที่อุณหภูมิห้อง.....	82
4.5.3 การศึกษาสมบัติของรอยต่อขดลวดของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับ อินเดียม (In) ในกรณีวัดที่อุณหภูมิห้อง.....	86
4.5.4 การศึกษาสมบัติของรอยต่อขดลวดของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับทองแดง (Cu) ในกรณีวัดที่อุณหภูมิต่างๆ.....	91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.5.5 การศึกษาสมบัติรอยต่อขดค้ำของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับอินเดียม (In) ในกรณีวัดที่อุณหภูมิต่างๆ.....	99
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	107
5.1 สรุป.....	107
5.1.1 การศึกษาคุณสมบัติของกระแสและแรงดันของรอยต่อขดค้ำ.....	107
5.1.2 การศึกษาคุณสมบัติของกระแสและแรงดันของรอยต่อขดค้ำที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	107
5.1.3 การศึกษาคุณสมบัติของกระแสและแรงดันของรอยต่อขดค้ำที่ความสว่างต่างๆ.....	108
5.1.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อขดค้ำ.....	108
5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ.....	109
เอกสารอ้างอิง.....	110
ประวัติผู้เขียน.....	113

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงค่าความสูงของกัมพวงซอดส์ $\phi_p$ ที่วัดได้จากรอยสัมผัสระหว่างโลหะชนิดต่างๆกับสารกึ่งตัวนำทั้งซิลิกอนและแกลเลียมอาร์เซไนด์.....	40
2.2 แสดงปฏิริยาการระเหยสารประกอบ.....	58
4.1 แสดงถึงค่าแฟกเตอร์ดูดซับ ( $n$ ) ค่าความสูงของกัมพวงซอดส์ ( $\phi_p$ ) และค่าความต้านทานอนุกรม ( $r_s$ ) ของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับทองแดง (Cu) ในกรณีไม่มีการฉายแสงและกรณีมีการฉายแสง.....	81
4.2 แสดงถึงค่าแฟกเตอร์ดูดซับ ( $n$ ) ค่าความสูงของกัมพวงซอดส์ ( $\phi_p$ ) และค่าความต้านทานอนุกรม ( $r_s$ ) ของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับทองคำ (Au) ในกรณีไม่มีการฉายแสงและกรณีมีการฉายแสง.....	86
4.3 แสดงถึงค่าแฟกเตอร์ดูดซับ ( $n$ ) ค่าความสูงของกัมพวงซอดส์ ( $\phi_p$ ) และค่าความต้านทานอนุกรม ( $r_s$ ) ของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับอินเดียม (In) ในกรณีไม่มีการฉายแสงและกรณีมีการฉายแสง.....	90
4.4 แสดงถึงค่าแฟกเตอร์ดูดซับ ( $n$ ) ค่าความสูงของกัมพวงซอดส์ ( $\phi_p$ ) และค่าความต้านทานอนุกรม ( $r_s$ ) ของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับทองแดง (Cu) ในกรณีวัดที่อุณหภูมิต่างๆกัน.....	98
4.5 แสดงถึงค่าแฟกเตอร์ดูดซับ ( $n$ ) ค่าความสูงของกัมพวงซอดส์ ( $\phi_p$ ) และค่าความต้านทานอนุกรม ( $r_s$ ) ของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับอินเดียม (In) ในกรณีวัดที่อุณหภูมิ 50 - 250K.....	106

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	การจัดเรียงตัวของอะตอมของ CdS.....5
2.2	โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์ของ CdS.....6
2.3	แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์กับแบบซิงก์เบลนด์.....6
2.4	การบอกระนาบต่าง ๆ ของผลึก.....7
2.5	แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบจุด.....8
2.6	แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบคิสโตเคชันแบบขอบ.....9
2.7	แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบคิสโตเคชันแบบศกฐ.....9
2.8	แสดงเกรน และขอบเขตของเกรน.....10
2.9	แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์บนระนาบของผลึกที่ป็นไปตามกฎของแบรกก์.....11
2.10	แสดงโครงสร้างแถบพลังงาน.....13
	ก. โลหะ
	ข. สารกึ่งตัวนำ
	ค. ฉนวน
2.11	แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงาน และการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์.....15
	ก. ลักษณะแถบพลังงานแบบตรง
	ข. ลักษณะแถบพลังงานแบบเอียง
2.12	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน โฟตอนกับพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์.....15
	ก. ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง
	ข. ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบเอียงในกรณีกระบวนการสร้าง โฟนอน
2.13	แสดงโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรงของ CdS ที่มีโครงสร้างผลึกแบบ เวิร์ทไซท์ โดยไม่คิดการคัปปลิงระหว่างสปิน-ออร์บิต .....16

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.14	แสดง โครงสร้างแถบพลังงานแถบตรงของ CdS ที่มี โครงสร้างผลึกແກ່ແຈັງຕໍ່ແກບ โดยไมเคิดการคัปลั้จระหว่างสปีน-ออร์บิต .....16
2.15	แสดงภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มบาง.....17
2.16	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่น โคเซนต์ ที่บจะแสดงขอการคูกกลันพื้นฐาน.....19
2.17	แสดงการให้จ่าขแรงคันให้กับสารคัวอ่าง.....21
2.18	แสดงการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น.....23
2.19	แสดงการวัดความต้านทานแผ่น โดยวิธีสองขั้วจริงเส้น.....24
	ก. การวัดแบบสองขั้วโดยมีการเลือนระยะที่ขั้วหนึ่ง
	ข.กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับระยะทางที่ได้จากการวัดชนิดเคลื่อนขั้วไฟฟ้า
2.20	แสดงระดับพลังงานของรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น.....26
	ก. ชนิดรอยต่อขอดีคั้กมีเมื่อ $\phi_m > \chi_s$
	ข. ชนิดรอยต่อโอห้มมีกเมื่อ $\phi_m < \chi_s$
2.21	แสดงระดับพลังงานของรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดพี.....27
	ก. ชนิดรอยต่อโอห้มมีกเมื่อ $\phi_m < \chi_s$
	ข. ชนิดรอยต่อขอดีคั้กมีเมื่อ $\phi_m > \chi_s$
2.22	แสดงระดับพลังงานของรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น.....31
	ก.ขณะไม่มีการ ไบอัส สภาวะสมคูลเชิงความร้อน (thermal equilibrium)
	ข.ขณะ ไบอัสตรง(forward bias)
	ค.ขณะ ไบอัสกลับทาง(reverse bias)
2.23	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln J$ กับ $V$ ของขอดีคั้กได โอด Al/ n-InP.....33
2.24	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{J}{T^2}\right)$ กับ $\frac{10^3}{T}$ ของขอดีคั้กได โอด Al/ n-InP ที่ $V_1 = 0.3$ ....34

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.25	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\text{Log}(J)$ กับ $V$ ของขดลวดกึ่งไดโอดที่มีความต้านทานอนุกรมอยู่ด้วย.....	36
2.26	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{dV}{d(\ln I)}$ กับ $I$ ของขดลวดกึ่งไดโอด และความชันคือค่าความต้านทานอนุกรม ( $r_s$ ).....	37
2.27	แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำเอ็นในอุดมคติโดย $q\phi_n > q\phi_p$ ในขณะที่.....	38
	ก. เริ่มต้นสัมผัส	
	ข. ภายหลังจากสัมผัส	
2.28	แสดงคุณสมบัติต่างๆของรอยสัมผัสMSหรือขดลวดกึ่งไดโอดระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น.....	41
2.29	แสดงแถบพลังงานของรอยต่อแบบโฮมมิกที่กระแสไหลเกิดจากขบวนการเทอร์มิโอนิกอิมิตชันและขบวนการลดค่ากันแกงก็ทซ์.....	45
	ก. รอยต่อที่กันแกงก็ทซ์มีค่าต่ำ	
	ข. รอยต่อที่เกิดจากการได้ปมๆด้วยโลหะที่ใช้ทำขั้ว	
	ค. รอยต่อที่มีศูนย์กลางการรวมตัวระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮล	
2.30	แผนภาพแสดงกลไกในการเกิดผลึกเป็นฟิล์มบางที่เตรียมโดยใช้เทคนิคการอบสารละลายทางเคมี.....	47
	ก. กระบวนการเฮเทอโรโรจินีซ	
	ข. กระบวนการโฮโมโรจินีซ	
	ค. กระบวนการผสมระหว่างเฮเทอโรโรจินีซและโฮโมโรจินีซ	
2.31	แสดงการเกิดฟิล์ม CdS บนฐานรองรับโดยกระบวนการโฮโมโรจินีซ.....	49
2.32	แสดงการเกิดฟิล์ม CdS บนฐานรองรับโดยกระบวนการเฮเทอโรโรจินีซ.....	49
2.33	แสดงลักษณะโมเลกุลที่เกิดขึ้นภายในสารละลาย.....	50
2.34	ลักษณะของโมเลกุลของ $\text{SnO}_2$ ที่เจือปนด้วย F.....	51

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.35	51
2.36	52
ก. การเกิดปฏิกิริยาที่เกิดการสูญเสียน้ำ ข. การเกิดฟิล์มบางบนฐานรองรับ	
2.37	53
2.38	55
2.39	55
2.40	56
2.41	59
3.1	64
3.2	64
3.3	65
3.4	66
3.5	66
3.6	67
3.7	68
3.8	69
4.1	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2	71
4.3	72
4.4	72
4.5	73
4.6	74
4.7	75
4.8	76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9	แสดงกราฟหาค่า $E_g$ ของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์(CdS)โดยใช้วิธีอบสารละลายเคมี โดยใช้ฟิล์มบางทินไดออกไซด์( $SnO_2$ ) ที่เตรียมโดยวิธีการการพ่นละอองสารเคมี ด้วยอัลตราโซนิคเป็นฐานรองที่ไม่ได้ทำการแอนนีส.....76
4.10	แสดงกราฟหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) ของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) โดยใช้วิธีอบสารละลายเคมีโดยใช้ฟิล์มบางทินไดออกไซด์ ( $SnO_2$ )ที่เตรียมโดยวิธีการการพ่นละอองสารเคมีด้วยคลื่นอัลตราโซนิคเป็นฐานรองเมื่อทำการแอนนีสที่อุณหภูมิ $300^{\circ}C$ ในอากาศเป็นเวลา 30 นาที.....77
4.11	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของรอยต่อขดค้กของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับทองแดง(Cu).....78 ก. ขณะไม่ฉายแสง ข. ขณะฉายแสง
4.12	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln J$ กับความต่างศักย์ (V) ของรอยต่อขดค้กของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับทองแดง (Cu) ในกรณีไม่มีการฉายแสง.....79
4.13	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{dV}{d(\ln I)}$ กับกระแส (I) ของรอยต่อขดค้กของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับทองแดง (Cu) ในกรณีไม่มีการฉายแสง.....79
4.14	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln J$ กับ ความต่างศักย์ (V) ของรอยต่อขดค้กของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับทองแดง (Cu)ในกรณีมีการฉายแสง.....80
4.15	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{dV}{d(\ln I)}$ กับกระแส (I) ของรอยต่อขดค้กของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับทองแดง (Cu)ในกรณีมีการฉายแสง.....81
4.16	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของรอยต่อขดค้กของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับทองคำ (Au).....82 ก. ขณะฉายแสง ข. ขณะไม่ฉายแสง

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln J$ กับความต่างศักย์ (V) ของรอยต่อขอดีคึกของฟิล์มบาง แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับทองคำ (Au) ในกรณีไม่มีการฉายแสง.....	83
4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{dV}{d(\ln I)}$ กับ กระแส (I) ของรอยต่อขอดีคึกของฟิล์มบาง แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับทองคำ (Au) ในกรณีไม่มีการฉายแสง.....	84
4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln J$ กับความต่างศักย์ (V) ของรอยต่อขอดีคึกของฟิล์มบาง แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับทองคำ (Au) ในกรณีมีการฉายแสง.....	85
4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{dV}{d(\ln I)}$ กับกระแส (I) ของรอยต่อขอดีคึกของฟิล์มบาง แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับทองคำ (Au) ในกรณีมีการฉายแสง.....	85
4.21 แสดงสมบัติทาง ไฟฟ้าระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของรอยต่อขอดีคึกของฟิล์มบาง แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับอินเดียม (In).....	87
ก. ขณะไม่ฉายแสง	
ข. ขณะฉายแสง	
4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln J$ กับความต่างศักย์ (V) ของรอยต่อขอดีคึกของฟิล์มบาง แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับอินเดียม (In) ในกรณีไม่มีการฉายแสง.....	88
4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{dV}{d(\ln I)}$ และกระแส (I) ของรอยต่อขอดีคึกของฟิล์มบาง แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับอินเดียม (In) ในกรณีไม่มีการฉายแสง.....	88
4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln J$ และความต่างศักย์ (V) ของรอยต่อขอดีคึกของฟิล์มบาง แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับอินเดียม (In) ในกรณีมีการฉายแสง.....	89
4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{dV}{d(\ln I)}$ กับกระแส (I) ของรอยต่อขอดีคึกของฟิล์มบาง แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับอินเดียม (In) ในกรณีมีการฉายแสง.....	89
4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของรอยต่อขอดีคึกของฟิล์มบาง แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับทองแดง (Cu) ที่อุณหภูมิ 50 – 300 K .....	91

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.27	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของรอยต่อขอดีกรีของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับทองแดง (Cu) ที่อุณหภูมิ 50 – 300 K .....92
4.28	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln J$ กับความต่างศักย์ (V) ของรอยต่อขอดีกรีของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับทองแดง (Cu) ในกรณีวัดที่อุณหภูมิ 50 – 300 K.....94
4.29	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{dV}{d(\ln I)}$ กับกระแส (I) ของรอยต่อขอดีกรีของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับทองแดง (Cu) ในกรณีวัดที่อุณหภูมิ 50 – 250 K .....95
4.30	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแฟกเตอร์อุดมคติ ( $n_1$ ) กับอุณหภูมิของรอยต่อขอดีกรีของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับทองแดง (Cu) ในกรณีวัดที่อุณหภูมิ 50 – 250 K.... 96
4.31	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแฟกเตอร์อุดมคติ ( $n_2$ ) กับอุณหภูมิของรอยต่อขอดีกรีของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับทองแดง (Cu) ในกรณีวัดที่อุณหภูมิ 50 – 250 K.....97
4.32	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแฟกเตอร์อุดมคติ ( $n_3$ ) กับอุณหภูมิของรอยต่อขอดีกรีของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับทองแดง (Cu) ในกรณีวัดที่อุณหภูมิ 50 – 250 K.....97
4.33	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานอนุกรม ( $r$ ) กับอุณหภูมิของรอยต่อขอดีกรีของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับทองแดง (Cu) ในกรณีวัดที่อุณหภูมิ 50 – 250 K.... 98
4.34	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของรอยต่อขอดีกรีของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับอินเดียม (In) ที่อุณหภูมิ 50 – 250 K..... 99
4.35	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของรอยต่อขอดีกรีของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับอินเดียม (In) ที่อุณหภูมิ 50 – 250 K.....100
4.36	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln J$ กับ ความต่างศักย์ (V) ของรอยต่อขอดีกรีของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์(CdS) กับอินเดียม(In) ในกรณีวัดที่อุณหภูมิ 50 – 250 K.....101
4.37	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{dV}{d(\ln I)}$ กับกระแส (I) ของรอยต่อขอดีกรีของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับอินเดียม (In) ในกรณีวัดที่อุณหภูมิ 50 – 250 K.....103

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.38	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเฟกเตอร์คูณคคิ ( $n_1$ ) กับอุณหภูมิของรอยต่อซอคคักกีของฟิล์มบางแคดเมียมซัดไฟด์ (CdS) กับอินเดียม (In) ในกรณีวัดที่อุณหภูมิ 50 – 250 K.....104
4.39	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเฟกเตอร์คูณคคิ ( $n_2$ ) กับอุณหภูมิของรอยต่อซอคคักกีของฟิล์มบางแคดเมียมซัดไฟด์ (CdS) กับอินเดียม (In) ในกรณีวัดที่อุณหภูมิ 50 – 250 K.... 104
4.40	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเฟกเตอร์คูณคคิ ( $n_3$ ) กับอุณหภูมิของรอยต่อซอคคักกีของฟิล์มบางแคดเมียมซัดไฟด์ (CdS) กับอินเดียม (In) ในกรณีวัดที่อุณหภูมิ 50 – 250 K.... 105
4.41	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความค้ำทานอนุกรม ( $r$ ) กับอุณหภูมิของรอยต่อซอคคักกีของฟิล์มบางแคดเมียมซัดไฟด์ (CdS) กับอินเดียม (In) ในกรณีวัดที่อุณหภูมิ 50 – 250 K.... 105

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาโครงงานพิเศษ

การศึกษาสมบัติของรอยต่อชนิดกึ่งตัวนำมีความสำคัญต่อสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำอย่างมาก เนื่องจากรอยต่อชนิดกึ่งตัวนำเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำซึ่งเป็นรอยต่อที่ง่ายที่สุดของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ รอยต่อชนิดกึ่งตัวนำจะมีสมบัติพิเศษคือยอมให้กระแสไหลผ่านได้ทางเดียว และจะมีการฉีดพาหะข้างมากจากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะภายใต้การไบอัสตรง รอยต่อกึ่งตัวนำเป็นครั้งแรกที่ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมรวมการกรองสัญญาณของรอยต่อโลหะกับสารกึ่งตัวนำไว้ตั้งแต่ปี 1930 ตลอดเวลากว่า 30 ปีที่ผ่านมาได้มีการศึกษาอิทธิพลของสถานะทางพลังงานที่บริเวณรอยต่อ (interface states) โดยวิธีการวัดกระแสที่ไหลผ่านรอยต่อที่แรงดันไบอัสค่าต่างๆ ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิจึง พบว่าค่าแฟกเตอร์อุดมคติจะมีค่ามากกว่า 1 เสมอ ซึ่งเนื่องมาจากสาเหตุ 4 ประการ คือ

1. สถานะทางพลังงานที่บริเวณรอยต่อซึ่งขึ้นกับวิธีการประจันรูลอยต่อ
2. ปฏิกิริยาการที่กระแสไหลผ่านกันแรงกึ่งตัวนำ (recording current) ในกรณีสารกึ่งตัวนำที่มีการเจือสูง
3. กำแพงศักย์ลดลงเนื่องจากมีแรงไฟฟ้าสนาม (image force) เกิดขึ้นในขณะที่มีการใส่สนามไฟฟ้าจากภายนอก (หรือกระแสไบอัสแรงดันไบอัสตรง) เข้าไปที่บริเวณรอยต่อ (interface)
4. กระแสที่เกิดจากกระบวนการรวมตัวของพาหะ และกระแสที่เกิดจากกระบวนการการสร้างพาหะอิสระที่บริเวณประจุสะสมอยู่ (space charge region) หรือบริเวณรอยต่อนั่นเอง

ดังนั้นแฟกเตอร์อุดมคติที่วัดได้จะเป็นผลมาจากกำแพงศักย์ที่เปลี่ยนแปลงไปภายใต้การไบอัสด้วยความต่างศักย์จากภายนอก (externally applied voltage) และเป็นที่ยอมรับว่าสถานะทางพลังงานที่บริเวณรอยต่อจะมีอิทธิพลต่อสมรรถนะ ความน่าเชื่อถือ และความทนทานของรอยต่อกึ่งตัวนำ ดังนั้นการนิยามศัพท์ที่สำคัญของรอยต่อกึ่งตัวนำคือ แฟกเตอร์อุดมคติ ความสูงของกำแพงศักย์ ความต้านทานอนุกรม และความหนาแน่นของสถานะทางพลังงานที่บริเวณรอยต่อ ซึ่งการนิยามศัพท์เหล่านี้จะมีค่าขึ้นกับอุณหภูมิต่างๆ

โลหะที่ใช้ทำเป็นรอยต่อชนิดกึ่งตัวนำของซิลิคอน แกลกซ์อิมพัลส์ไฟต์ (GaS) ได้แก่ Au , Cu , Ag เป็นต้น ซึ่งกำแพงศักย์จะมีค่าอยู่ระหว่าง 4.2 – 4.7 eV ที่อุณหภูมิจึง [Pruel, 1998] ได้ทำการศึกษาสมบัติ

ของรอยต่อซอซคัลท์ Au/CdS ที่อุณหภูมิต่างๆ และพบว่าค่าแรงกักขังมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลงซึ่งฟิล์มบาง CdS ที่ใช้ศึกษาเตรียมได้จากวิธีการระเหยสาร ในระบบสุญญากาศ แต่สำหรับฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมจากวิธีการอบสารละลายเคมียังไม่ได้มีการนำมาศึกษาสมบัติของรอยต่อซอซคัลท์ที่มาก่อน ดังนั้น ในโครงการพิเศษนี้จึงน่าสนใจที่จะศึกษาสมบัติของรอยต่อซอซคัลท์ที่ได้จากการเคลือบด้วยโลหะ Au , Cu และ Zn โดยใช้วิธีการระเหยสาร ในระบบสุญญากาศ ลงบนฟิล์มบาง CdS ซึ่งเตรียมโดยวิธีการอบสารละลายเคมีลงบนฐานตัวนำโปร่งแสง  $\text{SnO}_2 : \text{F}$  ที่เคลือบบนกระจกชนิดใส จากการศึกษาสมบัติ กระแส – ความต่างศักย์ (I – V measurements) ที่อุณหภูมิต่างๆจะสามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆ ได้เช่น แฟกเตอร์อุดมคติ ความสูงของกั้นพลังงาน และพารามิตริกอนุกรม เป็นต้น

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการเตรียมฟิล์มบาง CdS ด้วยวิธีการอบสารละลายเคมี
2. เพื่อศึกษาลักษณะ โครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบาง CdS จากภาพนำเอกซเรย์จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
3. เพื่อศึกษาและวิเคราะห์โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางที่เตรียมได้ โดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-rays diffraction method)
4. ศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อซอซคัลท์ที่ได้จากการเคลือบ โลหะทองคำ , ทองแดง และ อินเดียมบนฟิล์มบาง CdS

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ในการวิจัยนี้เราจะทำการเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธีการอบสารละลายเคมี(CBD) โดยที่ใช้วิธีนี้เนื่องจากการเตรียมฟิล์มบางที่ใช้ต้นทุนในการผลิตไม่สูงจนเกินไป และให้ประสิทธิภาพที่สูง โดยนำฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมได้มาเคลือบ โดยวิธีโลหะทองคำ (Au) , โลหะอินเดียม (In) และ โลหะทองแดง (Cu) ทำการวัดลักษณะเฉพาะ ระหว่าง กระแส – ความต่างศักย์ (I – V) ทั้งที่อุณหภูมิต่างๆ และ ที่อุณหภูมิต่ำเพื่อศึกษาผลของการนำไฟฟ้าของรอยต่อ ซอซคัลท์ และนำมาคำนวณหาแฟกเตอร์อุดมคติ (ideality factor , n) และนำไปหาค่าความสูงของกั้นพลังงานต่อไปได้

#### 1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการคำนวณงาน

1. ศึกษาค้นคว้าทฤษฎี และหลักการของการเตรียมฟิล์มบางด้วย วิธีการอบสารละลายเคมี จักเตรียม วัสดุต่าง ๆ และหาเงื่อนไขที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง CdS และศึกษาวิธีการเคลือบโลหะ ทองคำด้วยวิธีต่างๆ ที่แนะนำเคลือบลงบนฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมได้
2. ทำการเคลือบฟิล์มบาง CdS บนกระจกใสโดยใช้น้ำร้อนที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ฟิล์มบางมีคุณภาพดีมีความหนาสม่ำเสมอและติดแน่นติดกับกระจกใส
3. ทำการศึกษาลักษณะโครงสร้างและบริเวณพลาสม่าของฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมได้จากภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM)
4. ทำการศึกษาและวิเคราะห์โครงสร้างเชิงจุลภาคของฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมได้ โดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์
5. ทำการเคลือบโลหะทองคำ, ทองแดง และอินเดียมลงบนฟิล์มบาง CdS โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ
6. ทำการศึกษากลไกการนำไฟฟ้าของรอยต่อ ชอตต์กี
7. ศึกษาและวัดลักษณะเฉพาะ ระหว่าง กระแส - ความต่างศักย์ ( $I - V$ ) ทั้งที่อุณหภูมิต่ำและที่อุณหภูมิห้อง
8. คำนวณหาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของรอยต่อชอตต์กีคือค่า แฟกเตอร์อุดมคติ (ideality factor), ค่าความสูงกั้นพหุศักย์ และค่าความต้านทานอนุกรม

#### 1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้ทราบถึงหลักการ และวิธีการเตรียมฟิล์มบาง CdS ด้วย วิธีการอบสารละลายเคมี
2. ทำให้ทราบถึงความรู้ในการเตรียมโลหะทองคำ (Au), ทองแดง (Cu) และอินเดียม (In) กับ CdS
3. ทำให้ทราบถึงคุณสมบัติของรอยต่อ ชอตต์กี
4. ทำให้ได้ความรู้เพิ่มเติมในการวัดค่าต่างๆ
5. ทำให้ได้ความรู้เพิ่มเติมเกี่ยวกับการศึกษาค้นคว้าทฤษฎีและเงื่อนไขการเตรียมฟิล์มบางให้มีคุณภาพดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ

ในโครงงานพิเศษนี้เป็นการเตรียมฟิล์มบาง CdS ด้วยวิธีการออบสารละลายเคมี ของบัพฟิล์มบาง  $\text{SnO}_2$  ด้วยวิธีการการพ่นละอองสารเคมีด้วยอัลตราโซนิคซึ่งจะ ได้อธิบายทฤษฎีและหลักการในส่วนที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

2.1 โครงสร้างของผลึก [งานวิจัยและคณะ, 2543; งานวิจัยและคณะ, 2546; จุติชัยและคณะ 2546; จุติชัยและคณะ, 2544; Kittel, 1971]

สารกึ่งตัวนำแต่ละชนิดจะมี โครงสร้างผลึกที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับการจัดเรียงตัวของอะตอมที่อยู่ภายใน โครงผลึก การที่มีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกันนี้ทำให้สารกึ่งตัวนำ มีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน เช่น คุณสมบัติการนำไฟฟ้า , คุณสมบัติการดูดกลืนแสง ฯลฯ

### 2.1.1 ชนิดการจัดเรียงตัวของอะตอมที่อยู่ภายในโครงผลึกแบบ 3 มิติ

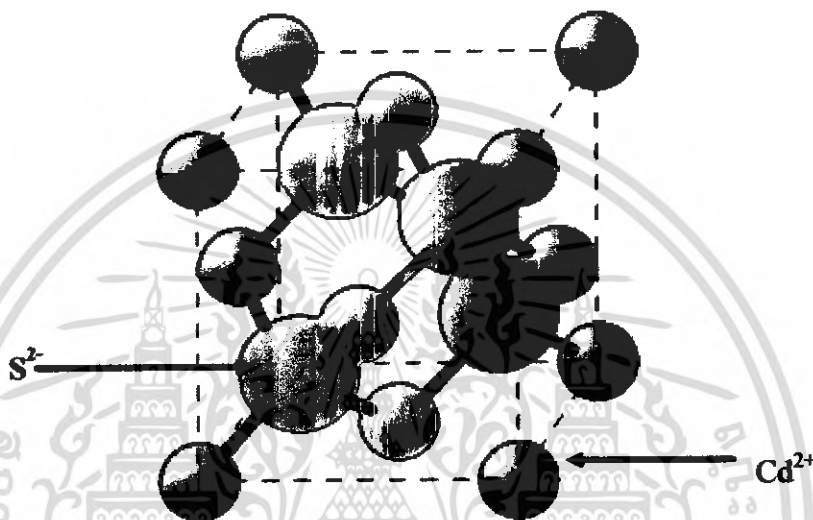
โครงผลึก คือ ตำแหน่งที่เป็นที่อยู่ของระบบบิส (basis) ในระบบ 3 มิติ ส่วนบัพสี่ คืออะตอมหรือกลุ่มของอะตอมที่อยู่ภายใน โครงผลึกซึ่งจากการศึกษาพบว่า โครงสร้างผลึกของแมกนีเซียมซัลไฟด์จะมีลักษณะ โครงสร้างอยู่ 2 แบบ คือ แบบซิงก์บลอนด์ (zincblende) และแบบเวิร์ตไซต์ (wurtzite)

#### 2.1.1.1 โครงสร้างผลึกแบบซิงก์บลอนด์ (zincblende structure)

โครงสร้างผลึกแบบนี้มักพบในสารกึ่งตัวนำที่ประกอบด้วยอะตอมของธาตุของบัพหรือเรียกว่าเป็นสารประกอบกึ่งตัวนำบิคริส (binary compound semiconductor) ได้แก่ สารประกอบสารกึ่งตัวนำในกลุ่ม III-V เช่น GaAs และ InSb และสารประกอบกึ่งตัวนำในกลุ่ม II-VI เช่น ZnSe, ZnS เป็นต้น โครงสร้างแบบนี้มีลักษณะคล้าย โครงสร้างผลึกแบบเพชร คือ อาจพิจารณาว่าเป็น โครงสร้างผลึกแบบฟลูออไรต์หรือซิลิกอนไดออกไซด์ โครงสร้างหนึ่งเป็นธาตุหมู่ II (หรือ III) ส่วนอีก โครงผลึกเป็นธาตุหมู่ VI (หรือ V) สำหรับสารกึ่งตัวนำบิคริส II-VI (หรือ III-V) ในหนึ่งหน่วยเซลล์ประกอบด้วยอะตอมของบัพและอะตอมบิ ครี่ อะตอม กั้นใน CdS อะตอมของ Cd จะอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

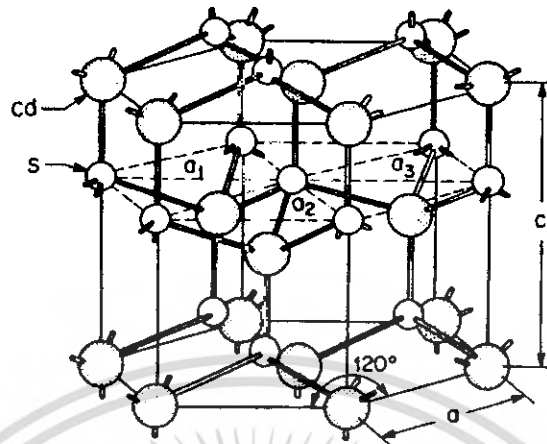
ที่ตำแหน่ง  $(0,0,0)$ ,  $(0, \frac{1}{2}, \frac{1}{2})$ ,  $(\frac{1}{2}, 0, \frac{1}{2})$  และ  $(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0)$  ส่วนตำแหน่งของอะตอม S จะอยู่ที่  $(\frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4})$ ,  $(\frac{1}{4}, \frac{3}{4}, \frac{3}{4})$ ,  $(\frac{3}{4}, \frac{1}{4}, \frac{3}{4})$  และ  $(\frac{3}{4}, \frac{3}{4}, \frac{1}{4})$  สารที่มีโครงสร้างผลึกแบบนี้ ได้แก่ ZnS, CaCl, AgI, CaF, SiC และ CdS เป็นต้น ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีความสำคัญสำหรับนำมาประยุกต์เพื่อประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จริง



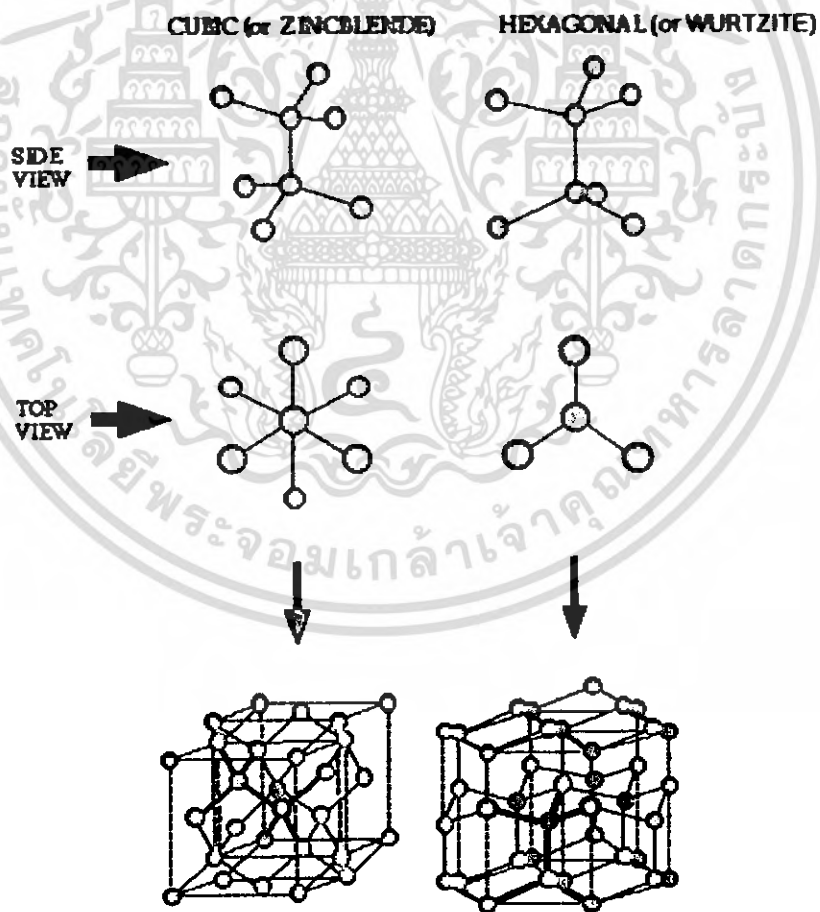
รูปที่ 2.1 แสดงการจัดเรียงตัวของอะตอมของ CdS

### 2.1.1.2 โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์ (wurtzite structure)

โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์จัดอยู่ในระบบ โครงสร้างผลึกแบบเฮกซะ โกนอลเกิดจากการนำโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะ โกนอลที่มีอะตอมของธาตุต่างๆ อยู่ตรงมุมมีความสัมพันธ์กันเป็นระยะ  $\frac{5}{8}$  ตามแนวแกน c (c-axis) ทิศหนึ่งจะบรรจุอะตอม 8 อะตอม มีอะตอมเพื่อนบ้านอยู่ 4 อะตอม มีพันธะเคมีของโมเลกุลเป็นแบบพันธะโควาเลนต์ และมีพันธะเคมีระหว่างอะตอมเป็นแบบโคเวเลนต์ ดังนั้นจึงมีการจัดเรียงระนาบของอะตอมคล้ายกับ โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ แต่จะมีความแตกต่างกัน คือ ใน โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์จะมีการจัดเรียงระนาบของพันธะโควาเลนต์เป็นแบบ ABAB... หรือ 0101... ส่วนใน โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์จะมีการจัดเรียงระนาบของพันธะโควาเลนต์เป็นแบบ ABCAEC... หรือ 012012... สารที่มีโครงสร้างผลึกแบบนี้ ได้แก่ CdS, ZnS เป็นต้น



รูปที่ 2.2 โครงสร้างผลึกแบบวูร์ทไซต์ของ CdS



รูปที่ 2.3 แสดงการเปรียบเทียบ โครงสร้างผลึกแบบวูร์ทไซต์กับแบบซิงค์เบลนด์

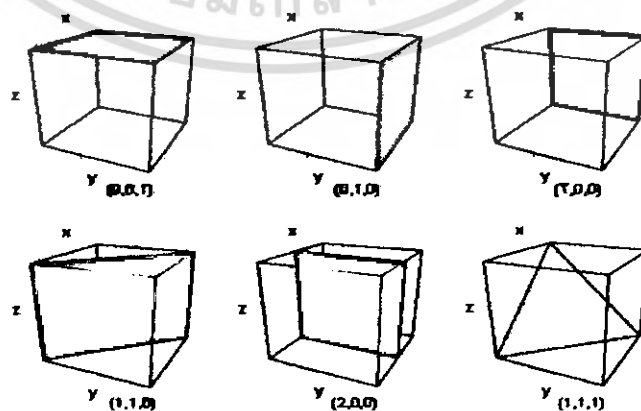
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 หลักเกณฑ์ในการระบุตำแหน่งระนาบของผลึกมีดังนี้

1. การระบุตำแหน่งในกรณีทั่วไปจะเขียนเป็น  $(x,y,z)$  ซึ่งภาคเครื่องหมาย “,” ซึ่งกันแต่ละค่า
2. การระบุทิศทางในกรณีทั่วไปจะเขียนเป็น  $[h\ v\ w]$  ซึ่งภาคที่ใช้วงเล็บกำกับ และไม่มีเครื่องหมาย “,” กันระหว่างค่าแต่ละค่า

**ตัวอย่าง** การระบุทิศทางที่ศึกษาจะใช้แนวที่ผ่านจุดเริ่มต้นของแกนผลึก คือ ที่จุด  $(0,0,0)$  ซึ่งสามารถใช้ค่าเดียวกันนี้ระบุทุกๆแนวทิศทางที่ขนานกัน และจะใช้จุดที่เป็นค่าจำนวนเต็มทีมน้อยที่สุดที่แนวนั้นตัดผ่านเป็นลัทธิ เช่น ทิศทาง  $[111]$  มีจุดจำนวนนับไม่ถ้วนที่ทิศทางนี้ตัดผ่าน เช่น จุด  $(0,0,0)$  จุด  $(1,1,1)$  นอกจากนี้ยังผ่านจุด  $(2,2,2)$  และ  $(1/2,1/2,1/2)$  และจุดอื่นๆอีกนับไม่ถ้วนถ้าเป็นทิศทางที่เป็นลบก็จะใส่เครื่องหมาย “-” หรือ บาร์ (bar) ไว้หน้าตัวเลขนั้นเช่น ทิศทาง  $[\bar{1}2\bar{1}]$  แสดงว่าในแกน  $z$  มีค่าเป็นลบ

3. การระบุระนาบ จะใช้อักษร  $(h\ k\ l)$  ให้สังเกตการใช้วงเล็บ และ ไม่มีเครื่องหมาย “,” กัน ค่า  $(h\ k\ l)$  เรียกว่า ดัชนีมิลเลอร์ (Miller indices) ระนาบของผลึกเป็นสิ่งที่สำคัญที่สุดอีกประการหนึ่งในการศึกษาผลึก เพราะในแต่ละระนาบจะประกอบไปด้วยอะตอม ไอออน หรือ โมเลกุล เรียงตัวกันอยู่บนระนาบนั้น อาจกล่าวได้ว่าระนาบแต่ละระนาบจะมีความแตกต่างกันเช่นเดียวกับทิศทาง จุดที่ระนาบหนึ่งๆ ตัดแกนผลึกจะได้มาจากค่าส่วนกลับของดัชนีมิลเลอร์ เช่น ระนาบ  $(010)$  จะตัดแกน  $(x,y,z)$  ที่จุด  $(1/0,1/1,1/0)$  หรือ จุด  $(\infty, 1, \infty)$  นั่นเอง (ระระอนันต์ หมายถึงระนาบนั้นขนานกับแกนนั้นและไปตัดแกนนั้นที่ระระอนันต์) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งสรุปความสัมพันธ์ระหว่างระนาบต่างๆกับระระอนันต์



รูปที่ 2.4 การบอกระนาบต่าง ๆ ของผลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

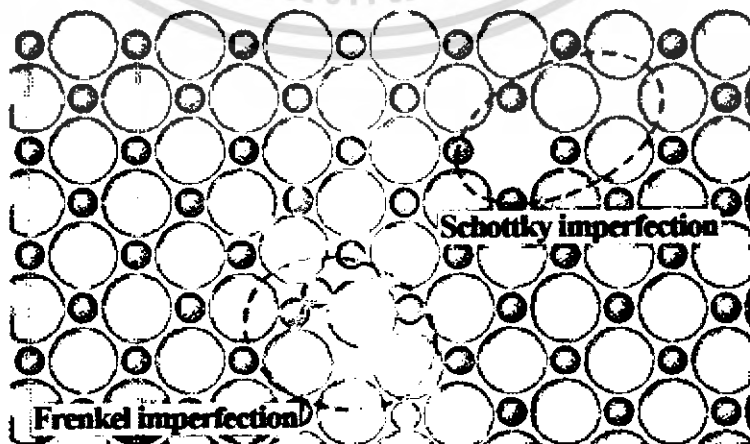
### 2.1.3 ความไม่สมบูรณ์ของผลึก

ที่ผ่านมาเราพิจารณาโครงสร้างผลึกในอุดมคติมาโดยตลอด แต่ในความเป็นจริงแล้ว โครงสร้างผลึกจะมีลักษณะ ไม่สมบูรณ์แบบ โครงสร้างผลึกในอุดมคติทั้งหมด ความไม่สมบูรณ์ของผลึกนั้นมีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทาง ไฟฟ้าของสารและ ในบางกรณีตัวแปรทาง ไฟฟ้า จะขึ้นอยู่กับความ ไม่สมบูรณ์ของผลึกด้วย ซึ่งความ ไม่สมบูรณ์หรือข้อบกพร่องของ โครงผลึกมีหลายชนิดด้วยกัน

#### 2.1.3.1 ข้อบกพร่องผลึกแบบจุด (point defect)

ข้อบกพร่องของผลึกแบบจุด ดังแสดงในรูปที่ 2.5 นี้จะเกี่ยวข้องกับ การพิจารณาอะตอมที่ ผิดเพี้ยน ไปจากตำแหน่งเดิมใน โครงสร้างผลึก

1. ข้อบกพร่องผลึกแบบความขาด (vacancy defect) ซึ่งมีลักษณะที่อะตอมหรือไอออน หลุดหายไป หรืออาจเรียกอีกอย่างว่า ข้อบกพร่องผลึกแบบรอยค้ำ (schottky defect)
2. ข้อบกพร่องผลึกแบบอินเทอร์สติเชียล (interstitial) ซึ่งเป็นลักษณะที่อะตอมบาง อะตอมหรือ ไอออนที่ไม่อยู่ที่ตำแหน่งของ โครงผลึก แต่จะเข้าไปแทรกอยู่ระหว่าง ตำแหน่งที่เป็นที่ว่างของ โครงผลึก โครงสร้างไปแล้วรั่วมีอะตอมที่เข้าไปแทรกอยู่จะมี ค่าอยู่ระหว่างหรือน้อยกว่ารั่วมีของอะตอมหลัก
3. การผิดรูปของโครงผลึกแบบฟรอนเคล (frenkel disorder) คือ จะเกิดลักษณะ (ก) และ (ข) ร่วมกัน โดยมีจำนวนเท่าๆกัน
4. การผิดรูปของโครงผลึกแบบเฮลิคัลดิสอร์เดอร์ (helical disorder) เป็นลักษณะ ของอะตอม ตั้งแต่สองอะตอมขึ้นไป เข้าไปอยู่ในตำแหน่งของ โครงผลึกทำให้ ลักษณะของ โครงผลึก ไม่เป็นระเบียบ

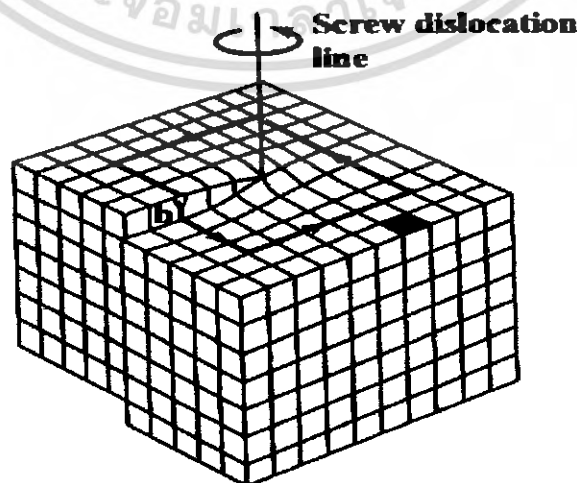


รูปที่ 2.5 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบจุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.3.2 ข้อบกพร่องผลึกเชิงเส้น (Line defect)

ข้อบกพร่องผลึกเชิงเส้นอาจเรียกรวมได้อีกอย่างว่าดิสโลเคชัน(dislocations) เกิดจากความผิดปกติของชุดของโครงผลึกตั้งแต่สองชุดขึ้นไป ขาดหายหรือเพิ่มขึ้นมาซึ่งมีผลทำให้เกิดการผิดปกติของโครงผลึกแบบเชิงเส้น การเกิดดิสโลเคชันอาจแบ่งออกได้ตามลักษณะรูปร่างที่สังเกตเห็น คือ ดิสโลเคชันแบบขอบ(edge dislocations) ดังรูปที่ 2.6 และดิสโลเคชันแบบสกรู(screw dislocations) ดังรูป 2.7



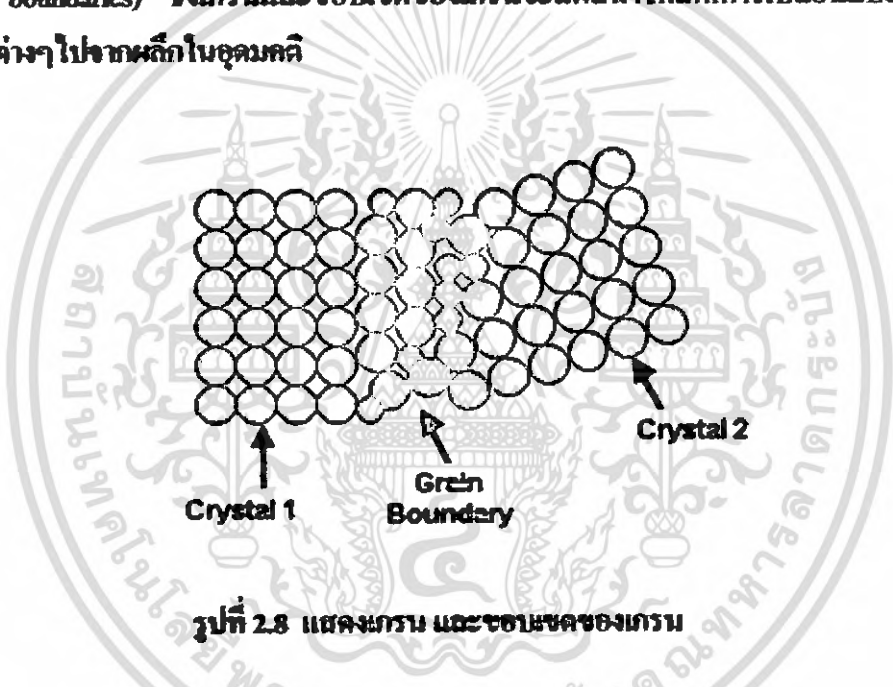
รูปที่ 2.7 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชันแบบสกรู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3.3 ข้อบกพร่องผลึกแบบแนวระนาบ (planar defect)

เป็นลักษณะของความผิดปกติของผลึกแบบระนาบแบ่งออกได้เป็นสามกลุ่มใหญ่ๆ คือการเรียงระนาบผิดปกติ (stacking faults), ระนาบทวิน (twin planes), และเกรนและขอบของเกรน (grain and grain boundaries)

ข้อบกพร่องผลึกชนิดนี้มักจะมีเกิดขึ้นในผลึกทหุพันธ์ (polycrystallines) ที่มีหลายเกรน ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ซึ่งในแต่ละเกรนจะมีการจัดเรียงตัวของผลึกในทิศทางเดียวกัน และมีแนวแบ่งระหว่างแต่ละเกรนที่มีการจัดเรียงตัวของผลึกในทิศทางต่างกัน เรียกว่า ขอบเขตของเกรน (grain boundaries) ซึ่งเกรนและขอบเขตของเกรนจะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสมบัติจริงที่สังเกตต่างๆ ไปจากผลึกในอุดมคติ



2.1.4 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงรูควภาคด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์

การศึกษาโครงสร้างผลึกจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์โดยวิธี  $\theta-2\theta$  คือแฟรงก์ ไครมเมอร์ โคโลใช้รังสีเอ็กซ์ความยาวคลื่นเดียวตกกระทบผิวอย่างหนึ่งอาจเป็นผลึกเดี่ยวหรือผลึกทหุพันธ์ก็ได้ ตัวอย่างจะหมุนไปเป็นมุม  $\theta$  ในขณะที่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณรังสีเอ็กซ์จะเคลื่อนที่ไปเป็นมุม  $2\theta$  เพื่อให้การเลี้ยวเบนสอดคล้องกับกฎของแบรกก์

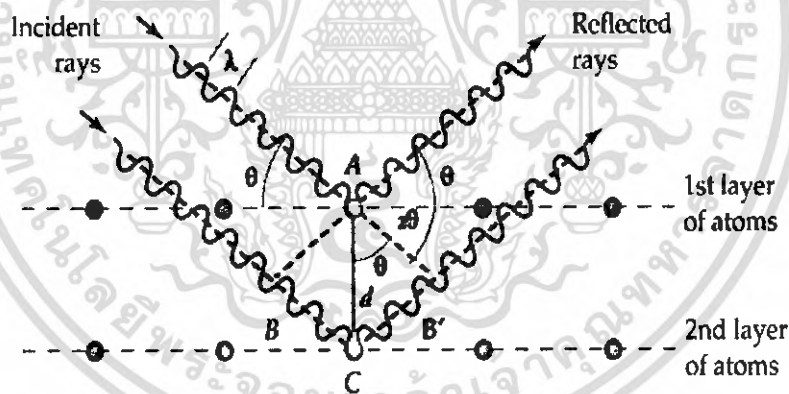
ในปี ค.ศ. 1912 W.H. Bragg และ W.L. Bragg ได้เสนอแนวคิดว่า เราสามารถมองได้ว่าผลึกจัดเรียงตัวเป็นชั้น (layer) หรือ ระนาบ (plane) ของอะตอมซึ่งสามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบโดยมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อนซึ่งนี้ถ้าคลื่นที่สะท้อนออกไปจากระนาบต่างๆดังกล่าวจะมี

ความเข้มสูงและแทรกสอดบนผิวมัน ถ้าหากความแตกต่างระหว่างทางเดินของคลื่นที่สะท้อนจากระนาบที่อยู่ข้างเคียงจะมีค่าเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นที่ ตกกระทบจึงเกิดการ

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

- เมื่อ  $\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์  
 $d_{hk}$  คือ ระยะระหว่างระนาบที่ขนานกัน  
 $\theta$  คือ มุมที่สะท้อนจากระนาบซึ่งจะเท่ากับมุมตกกระทบ  
 $n$  คือ ลำดับที่ของการเลี้ยวเบน มีค่าเป็นเลขจำนวนเต็ม คือ 1, 2, 3,...

ระนาบต่างๆของผลึก ไม่ได้ก่อให้เกิดการสะท้อนเสมอไประนาบใดที่รังสีเอ็กซ์ตกกระทบแล้วจะจึงออกมาอย่างสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ เรียกว่าระนาบแบรกก์ (Bragg plane) และมุมที่รังสีสะท้อนทำกับแนวที่ขนานกับรังสีตกกระทบเรียกว่ามุมเลี้ยวเบน (diffraction angle) ซึ่งมีค่าเป็นสองเท่าของมุมสะท้อน ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์

### 2.1.5 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

ข้อมูลที่ได้จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ใน โครงสร้างผลึกสามารถนำไปคำนวณค่าคงที่ โครงผลึกได้ โดยพิจารณาได้ในแต่ละ โครงผลึกดังนี้

### 2.1.5.1 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์บลende

โครงสร้างผลึกแบบซิงค์บลอนด์ จัดอยู่ในรูปผลึกแบบคิวบิก (cubic) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่โครงสร้างผลึก ค่าคัมมิตัลเลอร์ และระยะระหว่างระนาบที่ขนานกันคิงสมการ

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

### 2.1.5.2 โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์

โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์ทำได้จากสมการ

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

เมื่อ a, c คือ ค่าคงที่ของโครงสร้างผลึก  
(h k l) คือ คัมมิตัลเลอร์ที่บอกรหัสของระนาบของผลึก

2.2 สมบัติการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ [งานวิจัยและคณะ, 2543 ; งานวิจัยและคณะ, 2546 ; ฐิติชัยและคณะ, 2546 ; ฐิติชัยและคณะ, 2544 ; Kuntz, 1971 ]

การศึกษาสมบัติเชิงแสงของสารกึ่งตัวนำทำให้ทราบถึงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานและขนาดช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ โดยจะกล่าวถึงลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำและกระบวนการดูดกลืนแสงของอิเล็กทรอนิกส์ , ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของเซมิคอนดักเตอร์ , สมบัติการแผ่รังสีและการคำนวณขนาดช่องว่างแถบพลังงาน

#### 2.2.1 ทฤษฎีโครงสร้างแถบพลังงาน

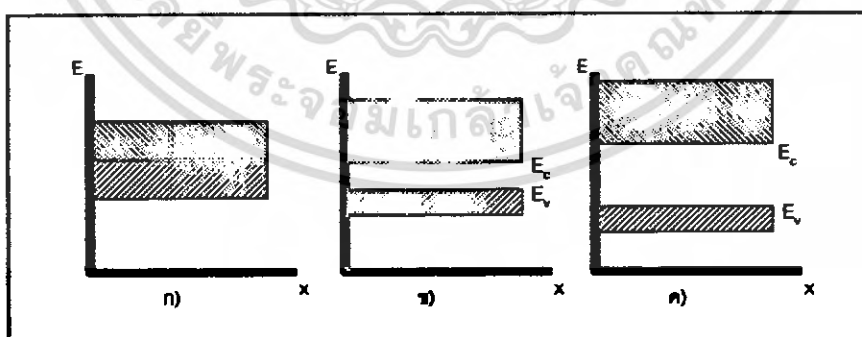
ในโลหะอิเล็กตรอนที่อยู่ในช่วงโคจรรัศมีนอกสุด เรียกว่า วาเลนซ์อิเล็กตรอนและถือว่าเป็นอิเล็กตรอนอิสระ ไม่ถูกยึดอยู่ที่อะตอมหนึ่งอะตอมใด โดยเฉพาะซึ่งไม่เหมือนกับอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำหรือฉนวนที่ไม่เป็นอิสระอิเล็กตรอนซึ่งทำให้เกิดกระแสจาก เรียกว่า ตัวนำอิเล็กตรอนตัวนำ (conduction electron) และ ในผลึกของแข็งฮาซิทิวรา ได้ว่าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อยู่ในผลึกซึ่งมีศักย์เป็นคาบ (periodic potential) อย่างสมบูรณ์ ทั้งนี้เนื่องจากระยะห่างของไอออนคอร์ (ion core) มีระยะเท่ากันตลอดซึ่งเท่ากับค่าคงที่ของโครงผลึก (lattice constant) ซึ่งจะเห็นได้ว่าพลังงานของอิเล็กตรอนซึ่งจะมีได้มันจะมีได้ในแถบหนึ่งแถบใดเท่านั้นคือ แถบอินชอน (allowed band) และแถบพลังงานที่จะมีได้มันจะถูกบ่งกั้นไว้ด้วยแถบพลังงานต้องห้ามซึ่งหมายถึงพลังงานในย่านนี้อิเล็กตรอนไม่สามารถที่จะมีได้ แถบดังกล่าวถูกเรียกว่า “แถบต้องห้ามหรือช่องว่างแถบพลังงาน” (forbidden band or energy gap) ภายในแถบอินชอนหนึ่ง ๆ อิเล็กตรอนที่อยู่ภายในจะแสดงตัวเหมือนกับอิเล็กตรอนอิสระทุกประการ

### 2.2.1.1 โครงสร้างแถบพลังงานของ โดระ สารกึ่งตัวนำและฉนวน

ลักษณะ โครงสร้างของแถบพลังงานของของแข็งสามารถบอกคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของวัสดุของแข็งนั้นๆ ได้เป็นอย่างดี ผลการคำนวณนำไฟฟ้าของสารใดๆ จะมีค่ามากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับจำนวนหรือปริมาณของความหนาแน่นของประจุพาหะที่มีอยู่กรณีที่จะมีการนำไฟฟ้าได้แล้ว จำนวนที่จะต้องมีส่วนที่ว่างอยู่ในแถบพลังงาน และเมื่อมีสนามไฟฟ้า อิเล็กตรอนที่ระดับต่างๆ ซึ่งอยู่ได้ระดับพลังงานที่ว่างอยู่ก็จะได้รับพลังงาน เพิ่มขึ้นและเคลื่อนที่เข้าไปอยู่ในสถานะที่ว่างอยู่ ณ จากนั้นอิเล็กตรอนตัวอื่นๆ ก็จะเคลื่อนที่ตาม กัน ไปอย่างนี้จะทำให้เกิดการไหลของกระแส อิเล็กตรอนขึ้น ตัวนำที่ดีจะต้องมีพาหะซึ่งอยู่ในระดับต่างๆ ภายในแถบพลังงานซึ่งประกอบด้วย แถบพลังงานสองแถบ คือ แถบนำและแถบวาเลนซ์ ซึ่งชนกันหรือทับกันซึ่งคือ โครงสร้างแถบพลังงานของโลหะนั่นเอง ดังรูปที่ 2.10 (ก)

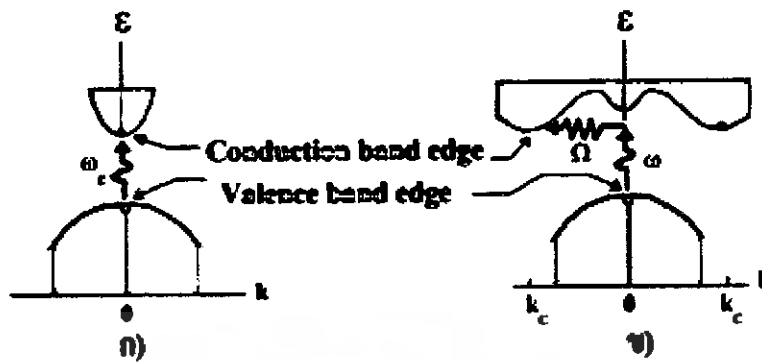


รูปที่ 2.10 แสดง โครงสร้างแถบพลังงาน

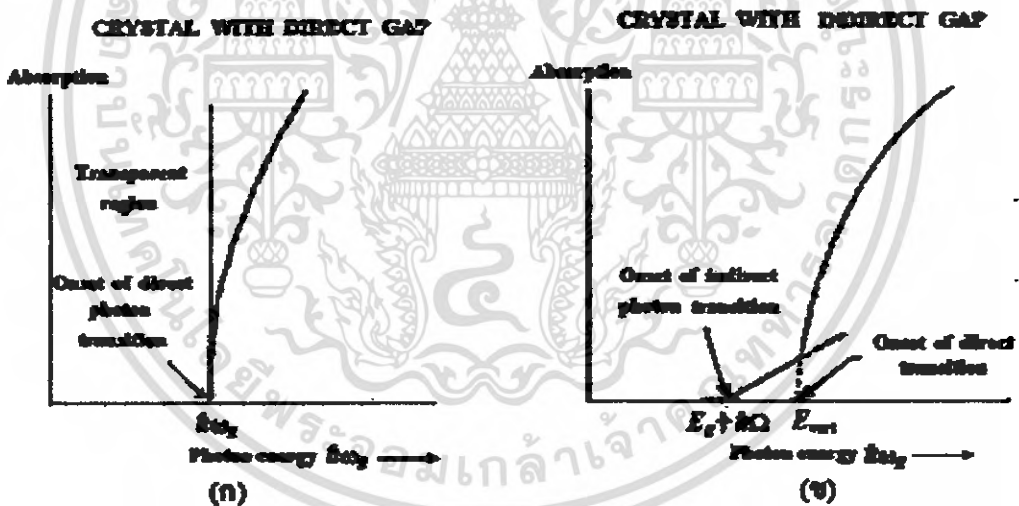
- ก. โลหะ
- ข. สารกึ่งตัวนำ
- ค. ฉนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.1.2 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำมีสองแบบคือแบบตรง (direct band gap) และแบบอ้อม (indirect band gap) ดังแสดงในรูปที่ 2.11(ก)และ (ข) ลักษณะโครงสร้างแถบ พลังงานแบบตรง คือ โครงสร้างแถบพลังงานที่มีจุดต่ำสุดของแถบนำกับจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์อยู่ที่ตำแหน่งเวกเตอร์คลื่น (wave vector ; $k$ ) ค่าเดียวกับหรืออยู่ที่ตำแหน่งที่มีโมเมนตัมคลื่นเท่ากันถ้าอิเล็กตรอนได้รับพลังงาน โฟตอนที่มีค่าเท่ากับขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ( $h\nu = E_g$ ) อิเล็กตรอนจะถูกกระตุ้นพลังงาน โฟตอนนั้นและอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นจึงข้ามสถานะพลังงาน(transition) จากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำกลายเป็นอิเล็กตรอนและ โฮลอิสระ โดยไม่มีการสูญเสียพลังงานให้แก่โครงสร้างผลึกคือ ไม่มีการสร้างหรือทำลายล้าง โฟนอน (phonon creation or phonon annihilation) เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ การดูดกลืน โฟตอน (absorption coefficient) กับพลังงาน โฟตอนจะ ได้กราฟดังรูปที่ 2.12 (ก) ส่วนลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแบบอ้อม คือ โครงสร้างแถบพลังงานที่มีจุดต่ำสุดของแถบนำกับจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ ไม่อยู่ที่ตำแหน่งเวกเตอร์คลื่นเดียวกันหรืออยู่ที่ตำแหน่งที่มีโมเมนตัม คลื่นเท่ากัน ดังนั้นอิเล็กตรอนจึงได้รับพลังงาน โฟตอนที่มีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงานแล้วจะทำให้เกิดกระบวนการสร้างหรือทำลาย โฟนอนเกิดขึ้น $h\nu = E_g \pm \hbar\Omega$ เมื่อ $\Omega$ คือ ค่าความถี่เชิงมุมของพลังงาน โฟนอนนั้นคือ เมื่ออิเล็กตรอนที่อยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นทำให้เกิดการข้ามสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำจะมีการปล่อยโฟนอน (emitted phonon) ที่มีความถี่เชิงมุมมีเวกเตอร์คลื่น $k \cong k_c$ ออกมา จึงเกิดการสร้าง โฟนอนและสร้างอิเล็กตรอนและ โฮลอิสระแสดงดังรูปที่ 2.11(ข) และเมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน โฟตอนกับพลังงาน โฟตอนจน ได้กราฟดังรูป 2.12 (ข)



รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงาน และการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์  
 ก. ลักษณะแถบพลังงานแถบตรง  
 ข. ลักษณะแถบพลังงานแถบเอียง



รูปที่ 2.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์  
 ก. ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแถบตรง  
 ข. ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานแถบเอียงในกรณีกระบวนการสร้างโฟนอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



2.3 การส่งผ่านแสง [จากภิญโญและคณะ, 2543 ; จากภิญโญและคณะ, 2546 ; อูทินันท์และคณะ, 2546 ; อูทินันท์และคณะ, 2544 ]

การศึกษาวิธีวัดผลปฏิกิริยาสะท้อนและการส่งผ่านแสงนี้จะกล่าวถึงสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงและองค์ประกอบของการวัดผลปฏิกิริยาการส่งผ่านแสง เมื่อแสงเดินทาง ไปกระทบฟิล์มบาง แสงบางส่วนจะสะท้อนกลับที่ผิวของฟิล์มบาง บางส่วนของแสงจะเดินทางเข้าไปในแผ่นฟิล์มบาง และถูกดูดกลืนดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 แสดงภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบถึงบนแผ่นฟิล์มบาง

เมื่อ	$I_0$	คือ	ความเข้มแสงตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบาง
	$I_r$	คือ	ความเข้มแสงสะท้อนจากฟิล์มบาง
	$I_t$	คือ	ความเข้มแสงส่งผ่านออกมาจากฟิล์มบาง
	$I_1$	คือ	ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบาง
	R	คือ	สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง (reflectivity)
	T	คือ	สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (transmittance)
	$\alpha$	คือ	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (absorption coefficient)
	d	คือ	ระยะทางที่แสงเดินทางในแผ่นฟิล์มบาง

76632

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัมประสิทธิ์การสะท้อนของแสงมีค่า

$$R = \frac{I_r}{I_0} \quad (2.4)$$

หรือ

$$I_r = RI_0 \quad (2.5)$$

เพราะฉะนั้น ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางมีค่า

$$I_t = I_0 - I_r = I_0 - RI_0 = (1 - R)I_0 \quad (2.6)$$

เมื่อแสงนี้เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางจะถูกดูดกลืนทำให้ความเข้มแสงภายในแผ่นฟิล์มบางลดลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลตามระยะทาง ดังนั้นความเข้มแสงที่ส่งผ่านฟิล์มบางมีค่าดังสมการ

$$I_t = I_0 e^{-\alpha d} = (1 - R)I_0 e^{-\alpha d} \quad (2.7)$$

ถ้าไม่มีการสะท้อนแสงที่ผิวด้านหลังสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของแสงจะมีค่าเท่ากับ

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

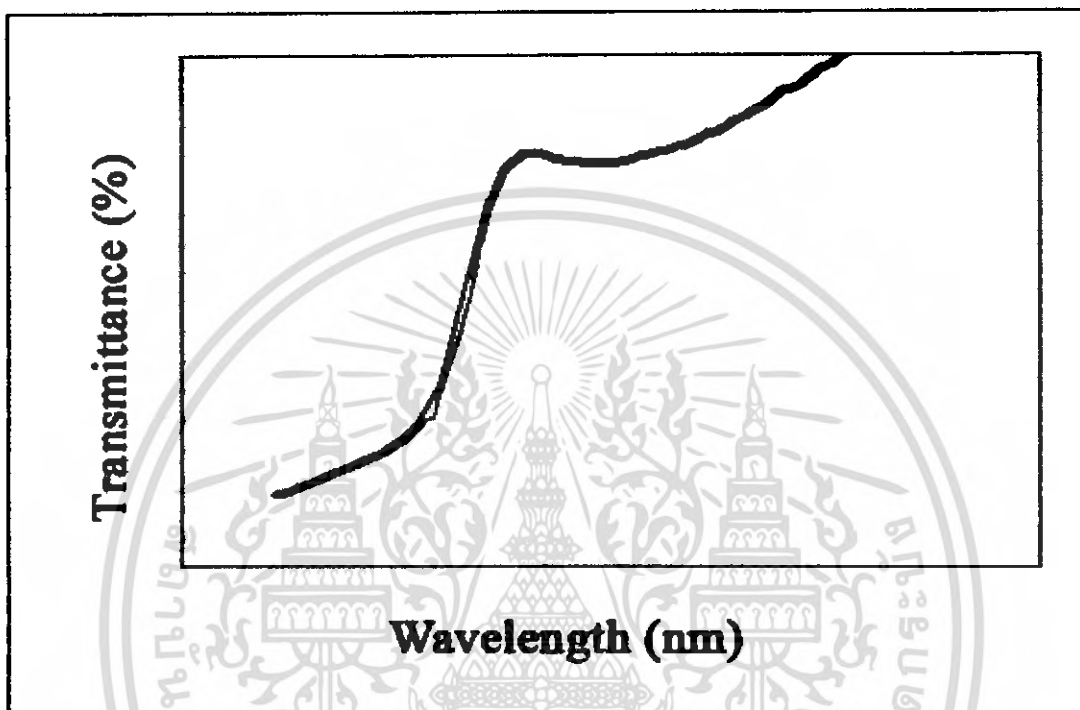
### 2.3.1 การหาค่าของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของแสง

การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำเกิดจากการที่อิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากแสงที่มีพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าแถบช่องว่างพลังงาน แล้วย้ายสถานะพลังงานจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปอยู่แถบนำ ผลปรากฏการดูดกลืนแสงบริเวณที่พลังงานโฟตอนมีค่าน้อยจะมีลักษณะเป็นขอบ แสดงถึงการลดลงของการดูดกลืนแสงอย่างกะทันหัน ขอบลักษณะนี้เรียกว่าขอบการดูดกลืนแสงหรือขอบการดูดกลืนพื้นฐาน (absorption edge or fundamental edge) แสดงได้ดังรูปที่ 2.16 พลังงานโฟตอนที่ขอบการดูดกลืนแสงมีค่าเท่ากับผลต่างของค่าพลังงานที่วัดจากจุดต่ำสุดของแถบความนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจุดสูงสุดของแถบความถี่จุดที่เส้นตรงลัดกับแกน ในแนวนอนจะให้ค่าช่องว่างแถบพลังงาน

(E<sub>g</sub>) วิธีการนี้เป็นการกำหนดค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่นิยมมากที่สุด



รูปที่ 2.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่น โดยเส้นที่ จะแสดงขอบการดูดกลืนพื้นฐาน

การหาค่าของช่องว่างแถบพลังงานสามารถพิจารณาได้จากสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ( $\alpha$ ) ของสารกึ่งตัวนำจะสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง ( $T$ ) จากรูปที่ 2.15 แสดงภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบบนจากด้านซ้ายของผิวบาง ( $I_0$ ) ความเข้มแสงภายในฟิล์มบางจะลดลงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล และมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง โดยทั่วไป ( $R$ ) มีค่าน้อยมากจะได้

$$T = e^{-\alpha d} \quad (2.9)$$

ดังนั้น

$$\alpha = -\frac{1}{d} \ln T \quad (2.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่กล่าวมาเป็นการคำนวณหาตัวประสิทธิ์การดูดกลืนแสงจากตัวประสิทธิ์การส่งผ่านแสง โดยไม่คิดถึงการสะท้อนของแสงสำหรับกรณีการคำนวณตัวประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเนื่องจากการ ีายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนแสดงเป็นการที่ความถี่ของแสงที่ตกกระทบบนตัวประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับค่าช่องว่างแถบพลังงาน ซึ่งมีลักษณะเป็นตารางในตารางว่างแถบพลังงานของแผ่นฟิล์มบาง ประมาณ ได้โดยการคำนวณตัวประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ซึ่งจะถูกดูดกลืนเมื่อแสงที่ตกกระทบบน แผ่นฟิล์มบางมีค่าพลังงาน โฟตอนสูงกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานต้องห้ามที่ขอบของการดูดกลืนค่า ตัวประสิทธิ์การดูดกลืนจะมีค่าเป็น

$$(\alpha h\nu)^2 = A(h\nu - E_g) \quad (2.11)$$

เมื่อ A คือ ค่าคงที่ และสมการที่ (2.11) ใช้กับสารที่มีสถานะพลังงานแบบตรง

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

เมื่อ B คือ ค่าคงที่ และสมการที่ (2.15) ใช้กับสารที่มีสถานะพลังงานแบบอ้อม

2.4 สมบัติทางไฟฟ้า [งานวิจัยและคณะ, 2543 ; งานวิจัยและคณะ, 2546 ; ฐิติพันธ์และคณะ, 2546 ; ฐิติพันธ์และคณะ, 2544 ; Kittel, 1971 ; Gray, W.R., 1975]

จากทฤษฎีแถบพลังงานนั้นสารกึ่งตัวนำที่มีขนาดช่องว่างแถบพลังงานใหญ่เกินกว่า 2 อิเล็กตรอน โวลต์ พลังงานความร้อนที่อุณหภูมิต่ำไม่เพียงพอที่จะกระตุ้นให้เกิดพาหะอิสระ ได้ ดังนั้นพาหะอิสระของสารกึ่งตัวนำประเภทนี้จึงน้อยส่วนใหญ่มากจากระดับพลังงานที่ปรากฏใน ช่องว่างแถบพลังงาน ซึ่งจะเป็นทั้งระดับพลังงานผู้ให้และระดับพลังงานผู้รับหรือศูนย์กลางการ รวมตัวของพาหะ (recombination center) ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำของสารกึ่งตัวนำจึง ขึ้นกับความหนาแน่นของพาหะอิสระเหล่านี้

#### 2.4.1 สภาพนำไฟฟ้า

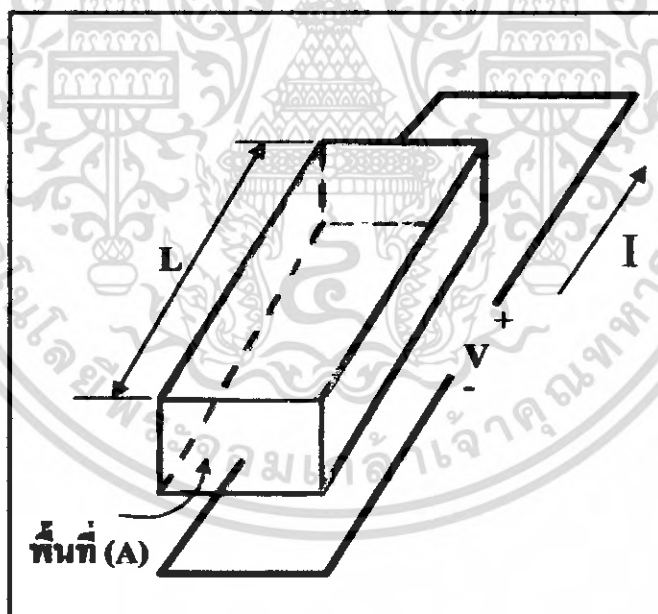
เมื่อใส่สนามไฟฟ้าเข้าไปในสารกึ่งตัวนำอิเล็กตรอนที่อยู่แถบนำจะตอบสนองต่อ สนามไฟฟ้าเกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนกลายเป็นกระแสไฟฟ้าจากกฎของ โทม์ (Ohm's law) สภาพนำไฟฟ้า (electrical conductivity:  $\sigma$ ) คือ อัตราส่วนของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (current density : J) ต่อสนามไฟฟ้า (electric field) ที่ใส่เข้าไปในสมการ

$$J = \sigma E = e(\mu_n n + \mu_p p)E \quad (2.13)$$

เมื่อ  $\mu_n, \mu_p$  คือ สภาพคล่องของอิเล็กตรอนและโฮล ตามลำดับ  
 $n$  คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน  
 $p$  คือ ความหนาแน่นของโฮล

ส่วนกลับของสภาพนำไฟฟ้า เรียกว่า สภาพต้านทานไฟฟ้า (resistivity:  $\rho$ ) ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{e(\mu_n n + \mu_p p)} \quad (2.14)$$



รูปที่ 2.17 แสดงการให้กระแสแรงดันให้กับสารตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้ามีแท่งสารกึ่งตัวนำ ดังรูปที่ 2.17 ซึ่งให้แรงดันและเกิดกระแส  $I$  แล้วจะได้ว่า

$$J = \frac{I}{A} \quad (2.15)$$

และ

$$E = \frac{V}{L} \quad (2.16)$$

สามารถเขียนสมการที่(2.16) ใหม่ได้เป็น

$$\frac{I}{A} = \sigma \left( \frac{V}{L} \right) \quad (2.17)$$

หรือ

$$V = \left( \frac{L}{\sigma A} \right) I = \left( \frac{\rho L}{A} \right) I = IR \quad (2.18)$$

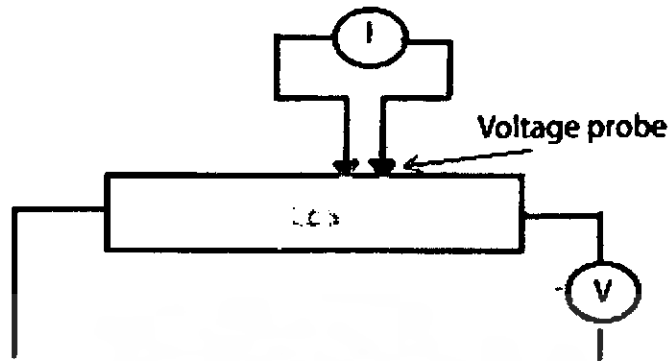
สมการที่ (2.18) คือ กฎของ โອห์มสำหรับสารกึ่งตัวนำ

#### 2.4.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า

วิธีการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำสามารถกระทำได้หลายวิธีทั้งวิธีที่ใช้ส่วนของอุปกรณ์ต้องเข้าสัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่างและวิธีที่ไม่ต้องสัมผัส โดยตรงสำหรับวิธีที่จะกล่าวถึงในที่นี้เป็นวิธีที่ใช้การสัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่าง ซึ่งทำโดยการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในชิ้นสารตัวอย่างแล้ววัดความต่างศักย์ระหว่างจุดสองจุดบนชิ้นสารนั้น

##### 2.4.2.1 การวัดความต้านทานอัมมิตาโอะวิธีของอัมมิตาโอะ

การวัดด้วยวิธีนี้มีลักษณะการวัดค่าสอดคล้องกับการวัด โดยตรงข้อแตกต่างตรงที่ลักษณะของขั้วไฟฟ้าของการวัดคือขั้วไฟฟ้าจะวัดบนสารตัวอย่าง ดังแสดงให้ทึบในรูปที่ 2.18 วิธีการวัดชนิดนี้เป็นวิธีที่พัฒนาขึ้นจากแบบแรก เมื่อที่จะกำจัดขั้วไฟฟ้าที่รอยต่อตัวทำของผิวสัมผัสให้น้อยลง และสามารถตรวจสอบความตกปรกบนผิวของชิ้นสารตัวอย่าง ได้ด้วย



รูปที่ 2.18 แสดงการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้วจริงเส้น

ข้อจำกัดของการวัดด้วยวิธีนี้ คือ จะต้องวัดบนสายตัวอย่างที่มีความหนาสม่ำเสมอและมีรูปทรงเรขาคณิตแน่นอน โดยพยายามปล่อยให้กระแสผ่านเข้าไปในสายตัวอย่างให้น้อยที่สุดเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความร้อนภายในสายเพราะค่าความต้านทานที่วัดได้อาจจะไม่ถูกต้องอีกทั้งในการวัดทุกครั้งจะต้องใช้โวลต์มิเตอร์ที่มีค่าอิมพีแดนซ์สูงและจุดที่ต้องการวัดก็ไฟฟ้าควรจะอยู่ห่างจากจุดที่ปล่อยกระแสเข้าและออกของสายเพื่อป้องกันสายเชื่อมเข้าไปค่าการรวมตัวระหว่างจุดที่กำลังจะวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า หากมีสายเชื่อมเข้ามาในตัวที่บริเวณที่วัดนี้จะมีผลทำให้เกิดการรวมตัวกับพาหะข้างน้อย (minority carriers) ในบริเวณนั้น ทำให้การวัดค่าความต้านทานเฉพาะที่วัดได้สูงเกินความเป็นจริง นอกจากนี้ควรคำนึงถึงความสม่ำเสมอของเส้นสมศักย์ (equip-potential lines) โดยการวัดที่บริเวณตรงจุดที่คิดว่ามันเป็นเส้นสมศักย์นั้นสม่ำเสมอ (ตรงกลางของสายตัวอย่าง) อัตราส่วนระหว่างระยะขั้วที่วัดก็ไฟฟ้าต่อเส้นที่ตรงจุดที่ปล่อยกระแสเข้า-ออกจะต้องมีค่ามากกว่าสามเท่า  $L/A > 3$  เมื่อ  $L$  คือ ระยะห่างระหว่างขั้วที่วัดก็ไฟฟ้า และ  $A$  คือ เส้นที่บริเวณให้กระแส ข้อที่ควรคำนึงถึงอีกประการก็ คือ โครงสร้างตามะฉนวนมีโครงสร้างชนิดใดเป็นรูปลูกบาศก์หรือไม่ ถ้าไม่ใช่จะต้องทราบทิศทางของการวัดว่ากำลังวัดอยู่ในระนาบหรือระนาบใดของผลึก

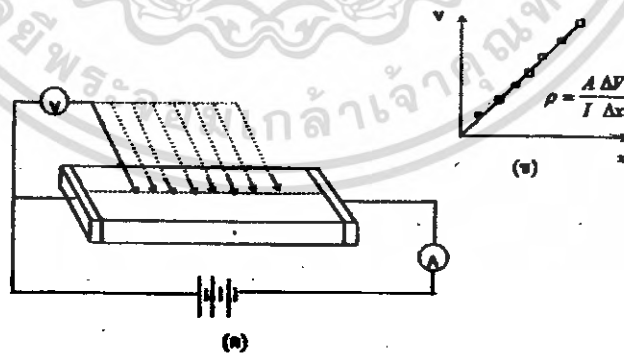
ข้อดีของการวัดแบบสองขั้วในหลายๆตำแหน่งนี้จะสามารถแยกสภาพต้านทานไฟฟ้าที่สภาพผิวระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำและรวมกันต้านทานเฉพาะภายในของสารกึ่งตัวนำได้

**สรุปข้อแนะนำในการวัดค่าความต้านทานของโลหะ**

- วัดค้ำขี้ไฟฟ้าที่บริเวณกึ่งกลางของสารตัวอย่างและห่างจากบริเวณกระแสเข้า-ออกของขดลวด
- โลหะที่นำมาใช้เป็นขี้ไฟฟ้าที่ใช้วัดความต้านทานขี้ไฟฟ้าบนสารตัวอย่างนั้น จะต้องเป็นโลหะแข็งและนำไฟฟ้าได้ดี เช่น ทองแดง เงิน แตะตะกั่ว เป็นต้น
- ขณะที่ทำการวัดสารตัวอย่าง จะต้องทราบระนาบหรือทิศทางของผลึกสารตัวอย่าง ว่ากำลังวัดอยู่ในระนาบหรือทิศทางใดของสารตัวอย่าง
- ผลึกที่ทำการวัดจะต้องมีความสมบูรณ์ ไม่ะกักขอบเขตของเกรน (grain boundaries) ที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันตลอดทั้งก้อนผลึก

**ข้อแก้ไข**

- ควรทำการวัดหลายๆจุดและต้องใช้ความระมัดระวังเพราะอาจทำให้สารตัวอย่างเกิดความเสียหายได้ซึ่งจะส่งผลไปถึงปรากฏการณ์ภายในสารตัวอย่าง
- ระยะระหว่างขี้ไฟฟ้าควรจะให้สั้นๆเพื่อจะได้วัดตรงจุดที่มีเส้นขนานกับ
- วัดบนสารตัวอย่างที่ใหญ่และมีรูปร่างทรงเรขาคณิตที่แน่นอน
- อาจจะไปวัดวิธีครั้งที่ขี้ไฟฟ้านั้นจะอีกขี้ไฟฟ้านั้นเมื่อขนาดของขี้ไฟฟ้านั้นออกไปเป็นระยะๆ โดยมีการคำนวณของกระแสที่นำมาใช้จนกระทั่งจะได้ดังรูปที่ 2.19 (ก) และ (ข) ความชันที่ได้จะเป็นค่าความต้านทานจำเพาะทางขี้ไฟฟ้า



**รูปที่ 2.19 แสดงการวัดความต้านทานแผ่น โดยวิธีสองขี้จริงเส้น**

ก. การวัดแบบสองขี้ โดยมีกระแสที่ขี้หนึ่ง

ข. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับระยะทางที่ได้จากการวัดชนิดเลื่อนขี้ไฟฟ้า

2.4.3 การนำไฟฟ้าในช่องอุณหภูมิต่ำ ๆ (จากนิลย์และคณะ, 2543 ; งามนิคย์และคณะ, 2546 ; อุตินัยและคณะ, 2545 ; อุตินัยและคณะ, 2544 ; Kittel, 1971 ; Ruyya, W.R., 1975)

ในการศึกษากลไกการนำไฟฟ้าซึ่งเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมินั้น มีที่โดดเด่นอยู่ในแต่ละช่วงอุณหภูมิ 2 แบบด้วยกัน โดยในช่วงอุณหภูมิต่ำการนำไฟฟ้าอธิบายได้โดยการประมาณของ Seto ในแบบจำลองนี้ประจุจะถูกตรึงไว้ที่ระนาบผลของกรน ทำให้เกิดเขตปลอดพาหะขึ้นในบริเวณกรนซึ่งเป็นเหตุผลที่ทำให้เกิดการกีดกันที่ระนาบผลของกรน หรือไม่เกิดการขยายตัวของเขตปลอดพาหะหรือเพียงบางช่วง ซึ่งขึ้นกับขนาดของควมหนาแน่นของระดับพลังงานของกักตักประจุ, ระดับพลังงานของสารเจือ, ขนาดของกรนและความยาวเดออบายส์ ซึ่งความสูงของกักตักที่ขยับที่ขอบเขตของกรนก็จะขึ้นกับอุณหภูมิเพราะเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นกักตักจะลดลง และทำให้การนำไฟฟ้าเป็นแบบเทอร์มิ โอนิกอิมิตชันซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\sigma = AT^{-1/2} \exp\left[\frac{-\phi_B}{k_B T}\right] \tag{2.19}$$

เมื่อ	$\phi_B$	คือ	ค่าคงที่
	A	คือ	ค่าคงที่
	T	คือ	อุณหภูมิเป็นเคลวิน
	$k_B$	คือ	ค่าคงที่ของ โบลต์ซมันน์ (Boltzmann) = $1.38 \times 10^{-23}$ J/K

ในช่วงอุณหภูมิต่ำนั้น การนำไฟฟ้าอธิบายได้โดยการประมาณตามแบบจำลองของ Mott ซึ่งจำลองมาจากการนำไฟฟ้าในสารที่มีการกระจายตัวของระดับพลังงานไม่เป็นระเบียบ เช่น อะมอร์ฟัส หรือการนำไฟฟ้าแบบการกระโดดเป็นช่วง ๆ (variable-range hopping) ซึ่งจะโดดเด่นในช่วงที่ สารกึ่งตัวนำมีอุณหภูมิต่ำ เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำการกีดกันมีลักษณะการกระจายตัวของระดับพลังงานไม่เป็นระเบียบการนำไฟฟ้าแบบนี้โดดเด่นในช่วงอุณหภูมิต่ำ เนื่องจากโฟนอนมีพลังงานไม่เพียงพอในการเคลื่อนย้ายไปยังอะตอมข้างเคียง และเพราะฉะนั้นที่ลักษณะการกระโดดจากอะตอมเดิมไปยังอะตอมข้างเคียงที่มีระดับพลังงานเดียวกัน ซึ่งในสารกึ่งตัวนำที่เป็นผลึกพหุคูณนั้นที่อุณหภูมิต่ำ พาหะไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านบริเวณขอบเขตของกรนได้ด้วยกระบวนการเทอร์มิ โอนิกอิมิตชัน ซึ่งที่ขอบเขตของกรนนั้นมีลักษณะเป็นระดับพลังงานของกักตักประจุซึ่งเกิดจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

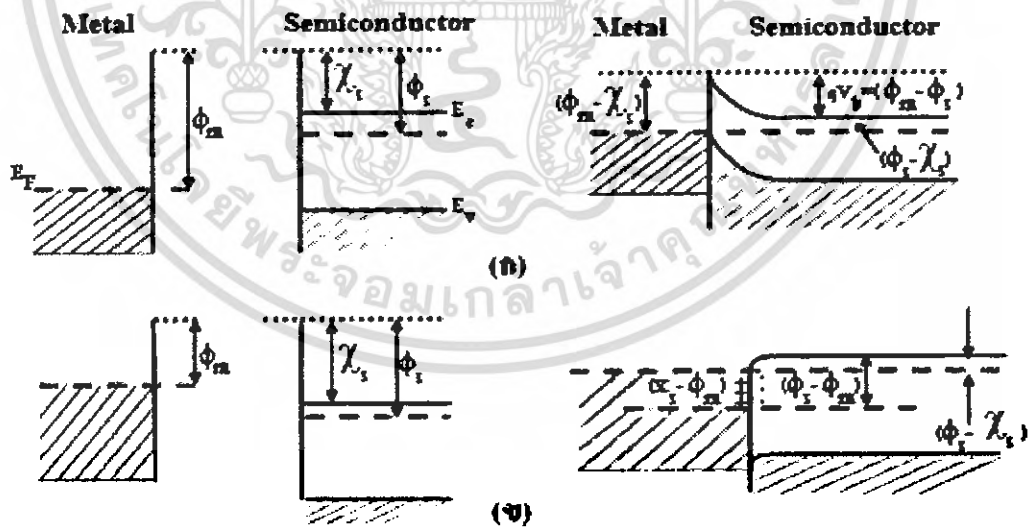
ความไม่เป็นระเบียบของอะตอมหรือความไม่สมบูรณ์ของสัณฐานเคมี ซึ่งกระจัดอยู่ในช่องว่าง แถบพลังงานซึ่งมีความสัมพันธ์เชิงตรรกะ

$$\sigma T^{1/2} = A \exp \left[ - \left( \frac{T_0}{T} \right)^{1/4} \right] \tag{2.20}$$

เมื่อ  $T_0 = \frac{k_B^4 T^5}{\phi_B^4}$  (2.21)

**2.4.4 แบบจำลองของรอยต่อ**

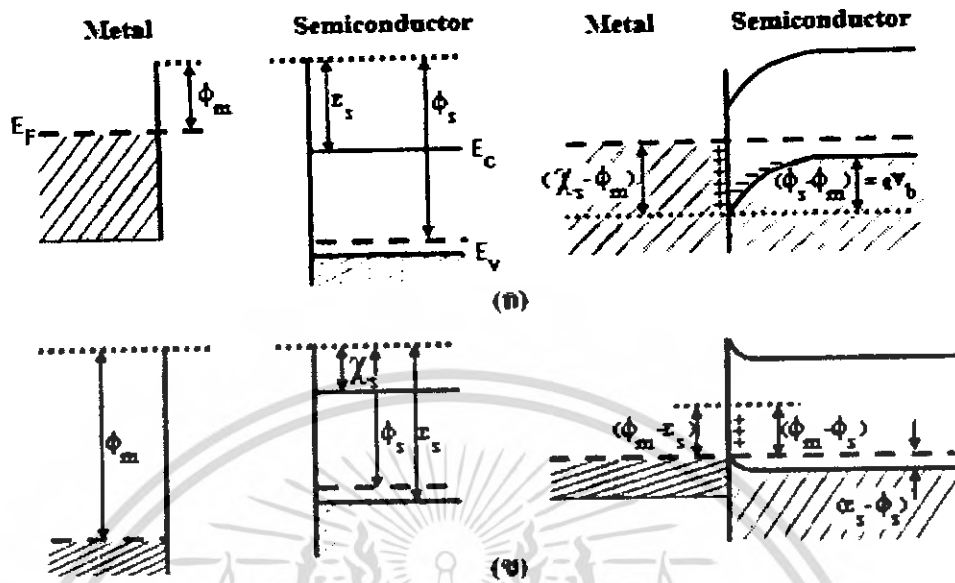
ถ้าแรงดึงดูดที่เกิดขึ้นที่รอยต่อระหว่าง โลหะกับสารกึ่งตัวนำเป็นค่าซึ่งมาจากความแตกต่างระหว่างค่าฟังก์ชัน  $\phi_m$  ของโลหะกับค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี  $\chi_s$  ของสารกึ่งตัวนำค่าแรงดึงดูดที่เกิดขึ้นที่รอยต่อระหว่าง โลหะกับสารกึ่งตัวนำจะมีค่าเท่ากับ  $(\phi_m - \chi_s)$



รูปที่ 2.20 แสดง โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น

- ก. ชนิดรอยต่อชอตคกีเมื่อ  $\phi_m > \chi_s$
- ข. ชนิดรอยต่อโอห์มิกเมื่อ  $\phi_m < \chi_s$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.21 แสดง โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดที

ก. ชนิดรอยต่อโอห์มิกเมื่อ  $\phi_m < \chi_s$

ข. ชนิดรอยต่อของคัลคัมเมื่อ  $\phi_m > \chi_s$

2.4.5 ทฤษฎีเทอร์มิโอนิกอินิเชียชัน [Langner และคณะ, 2543]

เป็นทฤษฎีที่อธิบายพฤติกรรมของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนผ่านกำแพงกั้นตรงรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ

1. กำแพงกั้น ( $\phi_b$ ) จะต้องมีค่ามากกว่า  $kT$
2. ระบายที่ขนานกับรอยต่อจะตั้งอยู่ในสภาวะสมดุลเชิงความร้อนซึ่งทำให้การไหลของกระแสสุทธิในแนวที่ตั้งฉากกับระนาบดังกล่าวมีที่นั่น
3. การที่มีกระแสสุทธิไหลจะไม่ใช่ผลกระทบต่อสภาวะสมดุลเชิงความร้อนดังกล่าว

ถ้ารอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นมีกำแพงกั้นเกิดขึ้น อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อนี้ได้ต้องมีพลังงานสูงกว่าค่ากำแพงกั้น ดังนั้นความหนาแน่นของกระแสจากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะ ( $J_{s \rightarrow m}$ ) สามารถหาได้จากความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงกว่า  $E_f + \phi_b$  และเคลื่อนที่ไปในแกน  $x$  ดังสมการ

$$J_{S \rightarrow M} = \int_{E_F + qV_n}^{\infty} qv_x dn \quad (2.22)$$

$$\begin{aligned} v_x &= \text{ความเร็วลอยเลื่อน (drift velocity)} \\ dn &= N_C(E)f(E)dE \\ &= \text{ความหนาแน่นของ } \bar{e} \text{ ที่มีพลังงานในช่วง } E \text{ ถึง } E+dE \\ N_C &= \text{ความหนาแน่นของสถานะพลังงาน (density of state)} \end{aligned} \quad (2.23)$$

$$= \frac{1}{2\pi^2} \left( \frac{2m_e}{\hbar^2} \right)^{3/2} (E - E_C)^{1/2} \quad (2.24)$$

$$f(E) = \frac{1}{\left[ \exp(E - E_F / k_B T) + 1 \right]} \quad (2.25)$$

เมื่ออุณหภูมิไม่สูงมากนัก  $E - E_F \gg k_B T$  ซึ่ง  $\exp(E - E_F / k_B T) \gg 1$   
สมการ (2.25) จะกลายเป็น

$$f(E) = \exp\left[-(E - E_F) / k_B T\right] \quad (2.26)$$

แทน (2.24) และ (2.26) ลงใน (2.23) จะได้

$$dn = \frac{(4\pi 2m_e)^{3/2}}{h^3} (E - E_F)^3 \exp\left[-(E - E_C + qV_n) / k_B T\right] dE \quad (2.27)$$

โดยที่  $qV_n = E_C - E_F$   
ถ้าสมมติว่าพลังงานทั้งหมดของอิเล็กตรอนที่อยู่เหนือขอบล่างของแถบนำคือพลังงานจลน์

$$\begin{aligned} E - E_C &= \frac{1}{2} m_e v^2 \\ dE &= m_e v dv \end{aligned} \quad (2.28)$$

$$(E - E_C)^{1/2} = v(m_e / 2)^{1/2} \quad (2.29)$$

แทนสมการ(2.28)และ(2.29) ลงใน (2.27) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$dn = 2 \left( \frac{m_e}{h} \right)^3 \exp(-qV_n / k_B T) \exp(-m_e v^2 / 2k_B T) 4\pi v^2 dv \quad (2.30)$$

$$\text{จาก } v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2 \quad (2.31)$$

$$\text{และ } 4\pi v^2 dv = dv_x dv_y dv_z \quad (2.32)$$

แทนค่าสมการ(2.31)และ(2.32)ลงใน(2.30) แล้วจึงแทน (2.30) ลงใน (2.22) จะได้

$$\begin{aligned} J_{x \rightarrow n} &= 2q \left( \frac{m_e}{h} \right)^3 \exp(-qV_n / k_B T) \int_{v_{n,x}}^{\infty} v_x \exp(-m_e v_x^2 / 2k_B T) dv_x \\ &\quad \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-m_e v_y^2 / 2k_B T) dv_y \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-m_e v_z^2 / 2k_B T) dv_z \\ &= \left( \frac{4\pi q m_e k_B^2}{h^3} \right) T^2 \exp(-qV_n / k_B T) \exp(-m_e v_{n,x}^2 / 2k_B T) \end{aligned} \quad (2.33)$$

เมื่อ  $v_{n,x}$  = ความเร็วค่าสุดของอิเล็กตรอนที่สามารถไหลข้ามกั้นเพนงกัทซ์ได้

$$\frac{1}{2} m_e v_{n,x}^2 = q(V_n - V) \quad (2.34)$$

เมื่อ  $V$  คือ แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไป (applied voltage),  $V_n$  คือค่ากั้นเพนงกัทซ์ (built-in potential)  
แทนสมการ(2.34) ลงในสมการ (2.33) จะได้

$$\begin{aligned} J_{x \rightarrow n} &= \left( \frac{4\pi q m_e k_B^2}{h^3} \right) T^2 \exp[-q(V_n + V_{bi}) / k_B T] \exp(qV / k_B T) \\ &= A^* T^2 \exp(-q\phi_b / k_B T) \exp(qV / k_B T) \end{aligned} \quad (2.35)$$

$$\text{โดยที่ } A^* = \frac{4\pi q m_e k_B^2}{h^3}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับกรณีที่เกิดกระแสไหลจากโลหะมายังสารกึ่งตัวนำ กำหนดศักย์นี้จะไม่ขึ้น อยู่กับแรงดันที่จ่ายเข้าไป แก่สารจากภายนอก ดังนั้น

$$J_{M \rightarrow S} = -A^* T^2 \exp(-q\phi_b / k_b T) \quad (2.36)$$

ดังนั้นความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าทั้งหมดที่ผ่านรอยต่อ คือ

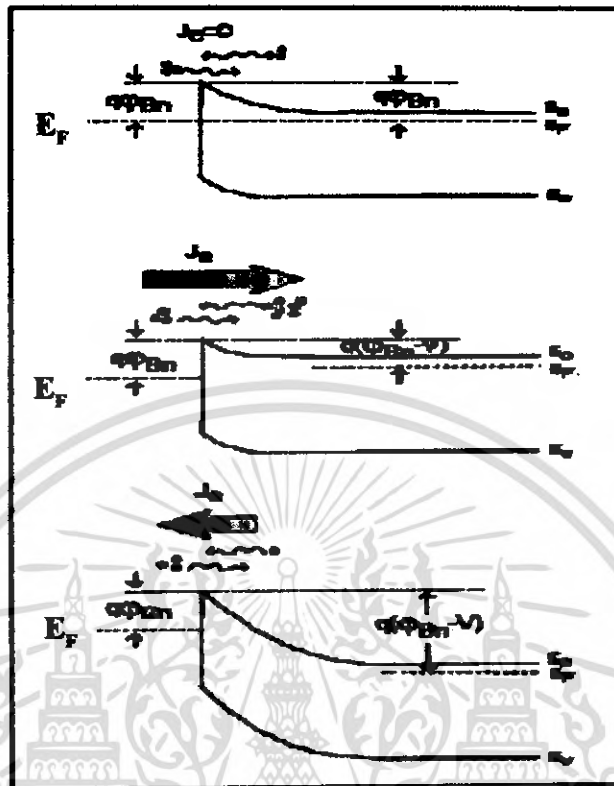
$$\begin{aligned} J &= J_{M \rightarrow S} + J_{S \rightarrow M} \\ &= A^* T^2 \exp(-q\phi_b / k_b T) [\exp(qv / k_b T) - 1] \\ J &= J_0 [\exp(qv / k_b T) - 1] \end{aligned} \quad (2.37)$$

เมื่อ

$$J_0 = A^* T^2 \exp(-q\phi_b / k_b T) \quad (2.38)$$

= ความหนาแน่นของกระแสรีชาร์ดสัน (Richardson current density)

$$\begin{aligned} I_0 &= J_0 A \\ &= AA^* T^2 \exp(-q\phi_b / k_b T) \end{aligned} \quad (2.39)$$



รูปที่ 2.22 แสดงระดับพลังงานของรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น  
 ก. ขณะ ไม่มีการ ไบอัส สถานะสมดุลเชิงความร้อน (thermal equilibrium)  
 ข. ขณะ ไบอัสตรง (forward bias)  
 ค. ขณะ ไบอัสกลับทาง (reverse bias)

2.4.6 กระแสที่เกิดจากการทะลุผ่านกำแพงกั้น (Tunneling current)

สารกึ่งตัวนำที่มีการโด๊ปเบาๆ หรือในสภาวะอุณหภูมิต่ำ กระแสส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นจะได้ จากอิเล็กตรอนลอดผ่าน (tunnel) กำแพงกั้น ความหนาแน่นของกระแสที่ไหลจากสารกึ่งตัวนำ ไปยังโลหะ ( $J_s \rightarrow \mu$ ) จะแสดงอยู่ในรูปของสมการเทอร์มินัลโตนิกอิมิตชันและลอดผ่านกำแพงกั้น ความหนาแน่นของกระแสสุทธาก็คือ

$$J = J_s [\exp(qV / nk_B T) - 1] \tag{2.40}$$

เมื่อ  $V \gg k_B T/q$  สมการนี้จะกลายเป็น

$$J \approx J_S \exp(qV / nk_B T) \quad (2.41)$$

เมื่อ  $J_S$  คือ ความหนาแน่นของกระแสอิ่มตัว

และ  $n$  คือ แฟกเตอร์อุดมคติ (ideality factor) ซึ่งมีค่าขึ้นจาก

$$n = q / k_B T \frac{\partial V}{\partial (\ln J)} \quad (2.42)$$

สำหรับในทางปฏิบัติแฟกเตอร์อุดมคติจะมีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ซึ่งจะมีค่าใกล้ 1 เมื่อมีการได้ปสิ่งเจือปนน้อยๆ และที่อุณหภูมิสูงๆ และจะมีค่ามากขึ้นเมื่อมีการได้ปสิ่งเจือปนมากๆ และที่อุณหภูมิต่ำๆ

ถ้าหากว่าความหนาแน่นของกระแสส่วนใหญ่อุบัติจากขบวนการลอคผ่านกำแพงกักขังความหนาแน่นของกระแสดังกล่าวนี้จะอยู่ในรูป

$$J_s \approx \exp(-\phi_B / E_{\infty}) \quad (2.43)$$

เมื่อ

$$E_{\infty} = \frac{h}{4\pi} [N_D / (\epsilon_S m_e)]^{1/2} \quad (2.44)$$

นั่นคือ ความหนาแน่นของกระแสจะแปรผันตามความหนาแน่นของสิ่งเจือปนที่ถูกได้ป ( $N_D$ )

#### 2.4.7 ลักษณะเฉพาะกระแส - แรงดัน (I - V characteristics)

ความสูงของกำแพงกักขัง ของรอยต่อจอร์คลีนิกชันมาจากค่าความหนาแน่นของกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ ( $J$ ) ซึ่งค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับนี้หาได้จากสมการเริ่มต้นจากส่วนที่เป็นจริงเข้าไปติดกับแกน  $u$  ( $J$ ) โดยนิยามบนเป็นแกนแรงดัน ( $V$ ) ซึ่งความสูงของกำแพงกักขังสามารถคำนวณได้จากค่า  $J_S$  ดังนี้คือ

$$\phi_B = \frac{k_B T}{q} \ln \left( \frac{A T^2}{J_s} \right) \quad (2.45)$$

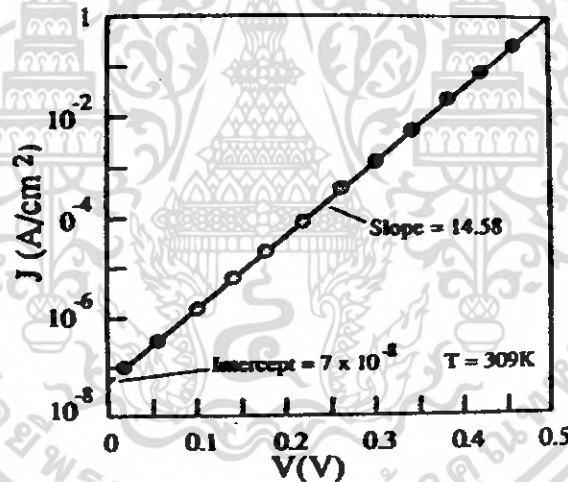
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\phi_s$  ที่ได้จึงเป็นค่าความสูงของกั้นพหุศักย์ที่แรงดัน  $V = 0$  ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นมักจะมีค่าต่ำกว่า  $\frac{kT}{q}$

กราฟความสัมพันธ์ของ  $\ln(J)$  กับ  $V$  ของขอลคักโค ไดโอด  $Al_p-nP$  ที่ได้จากการทดลองจะแสดงดังรูปที่ (2.23) ซึ่งจากความชันจะ ได้  $n = 1.12$  ที่  $V = 0$  เมื่อ  $J_s = 7 \times 10^{-8} \text{ A/cm}^2$  ส่วนความสูงของกั้นพหุศักย์คำนวณได้จากสมการ(2.45) มีค่าเท่ากับ  $0.81 \text{ V}$  เมื่อ  $A^* = 10.7 \text{ A/cm}^2\text{K}^2$

ในกรณี  $V \gg \frac{k_B T}{q}$  สมการ (2.40) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น [Schroder, 1998]

$$\ln\left(\frac{J}{T^2}\right) = \ln A^* - \frac{q(\phi_B - \frac{V}{n})}{k_B T} \tag{2.46}$$

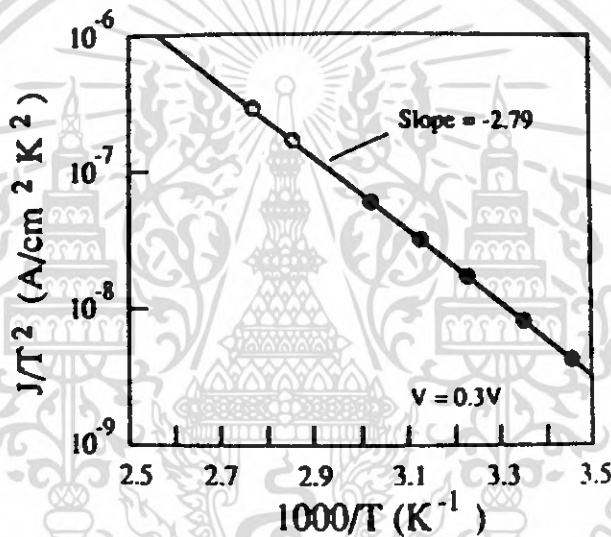


รูปที่ 2.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln J$  กับ  $V$  ของขอลคักโค ไดโอด  $Al_p-nP$

บางครั้งจะเรียกกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln\left(\frac{J}{T^2}\right)$  กับ  $\frac{1}{T}$  ที่แรงดันไบอัสตรงค่าๆหนึ่ง ( $V_1$ ) ว่าเป็นกราฟความหนาแน่นกระแสริชาร์ดสัน (Richardson plot) ซึ่งความชันมีค่าเท่ากับ  $-\frac{q}{k_B}\left(\phi_B - \frac{V_1}{n}\right)$  และจุดตัดแกนตั้งคือ  $\ln(A^*)$  ดังรูปที่ 2.24 อย่างก็ตามจะต้องมีการลากส่วนต่อออกไปเพื่อให้แกนตั้งเพื่อหาค่า  $\ln(A^*)$  ซึ่งจะเป็นสาเหตุทำให้ค่า  $A^*$  ที่ได้มีค่าความคลาดเคลื่อนสูง สำหรับค่าความสูงของกั้นพหุศักย์จะหาได้จากความสัมพันธ์

$$\phi_B = \frac{V_1}{n} - \frac{k_B}{q} \left( \frac{\Delta \left( \frac{\ln J}{T^2} \right)}{\Delta \left( \frac{1}{T} \right)} \right) \quad (2.47)$$

จากรูปที่ 2.24 จะคำนวณหาค่า  $\phi_B$  ได้โดยใช้ค่า  $n = 1.12$  ที่  $V_1 = 0.3$  V และ  $\phi_B$  ที่คำนวณได้เท่ากับ 0.82 eV ซึ่งจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้จากสมการที่ (2.45) ที่คำนวณได้เท่ากับ 0.81 eV



รูปที่ 2.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln \left( \frac{J}{T^2} \right)$  กับ  $\frac{10^3}{T}$  ของขอตักโคโดค Al/n-InP ที่  $V_1 = 0.3$  V

จากกราฟของวีราร์ดสันจะได้ว่า  $\phi_B$  จะไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ T แต่ในความเป็นจริงค่า  $\phi_B$  อาจจะขึ้นกับอุณหภูมิ ดังนั้นสามารถเขียนได้ใหม่ว่า

$$\phi_B(T) = \phi_B(0) - \xi T \quad (2.48)$$

เมื่อ  $\xi$  เป็นค่าคงที่ ดังนั้น สมการที่ (2.46) จะเขียนใหม่ได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

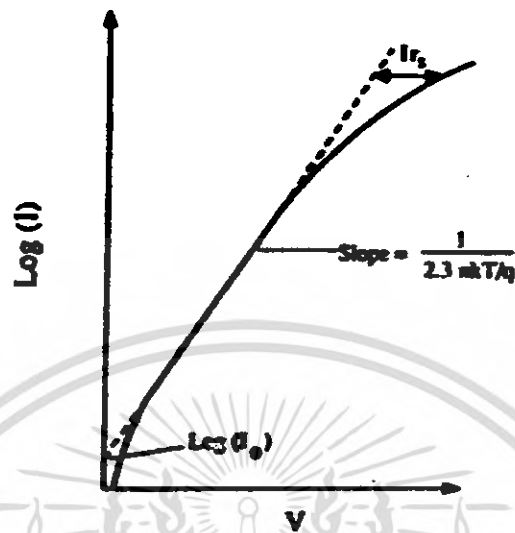
$$\ln\left(\frac{J}{T^2}\right) = \ln A^* + \frac{q\xi}{k_B} - \frac{q\left(\phi_B(0) - \frac{V}{n}\right)}{k_B T} \quad (2.49)$$

จากสมการที่ (2.49) นี้จะได้ค่ากำหนดที่อยู่ที่อุณหภูมิศูนย์เคลวิน  $\phi_B(0)$  และจุดศักย์แถบคั้งจะมีค่าของคงที่  $\xi$  อยู่ด้วย บางครั้งในการทดลองวัดด้วยมิเตอร์จะไม่เป็นจริงดังเนื่องจากมีกลไกการนำกระแสอื่นๆ ที่นอกเหนือไปจากกลไกการเกิดกระแสแถบพาหุอิเล็กตรอน (thermionic emission current) ซึ่งจะส่งผลให้  $n$  มีค่ามากกว่า 1 กราฟของปริมาตรคั้งที่ไม่เป็นจริงดังนี้จะเกิดขึ้นได้เมื่อความสูงของกำแพงศักย์และค่าประจุรวมคั้งขึ้นกับอุณหภูมิด้วย ดังนั้นค่า  $\phi_B$  และ  $A^*$  ที่คำนวณได้จะถูกคล้อยได้ยาก อย่างไรก็ตามกราฟของความหนาแน่นกระแสปริมาตรคั้งสามารถเป็นจริงดังได้เมื่อเขียนอยู่ในรูปความสัมพันธ์  $n \ln\left(\frac{J}{T^2}\right)$  กับ  $\frac{1}{T}$

ถ้าประมาณว่าทั้ง  $I_0$  และ  $n$  เป็นค่าคงที่ตลอดช่วงของกระแสที่วัดได้กราฟของความสัมพันธ์  $nJ$  และ  $V_s$  จะเป็นจริงดังเมื่อ  $V_s$  คือแรงดันคั้งรวมไดโอด แต่นี้มีความค้ำทานแบบอนุกรมเข้ามาเกี่ยวข้องด้วยแรงคั้งรวมไดโอดจะเป็น  $V_s = V - I r_s$  เมื่อ  $V$  คือแรงคั้งรวมทั้งไดโอด ชั้นแผ่นรองรับและความค้ำทานที่รอยต่อระหว่างซิลิโคนกับสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างกระแส - แรงคั้งที่ไดโอด คือ

$$I = I_0 \left[ \exp \frac{q(V - I r_s)}{n k_B T} - 1 \right] \quad (2.50)$$

กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $nJ$  กับ  $V$  จะเป็นจริงดังในช่วง  $V \gg \frac{k_B T}{q}$  และ  $I r_s \ll V$  ส่วนค่ากระแสที่เบี่ยงเบนไปจากจริงดังที่กระแสคั้งจะมีค้ำมาจากการค้ำ  $-1$  ในสมการที่ (2.50) สำหรับค่ากระแสที่เบี่ยงเบนไปจากจริงดังที่ค่ากระแสสูงๆ ก็เนื่องมาจากความค้ำทานอนุกรมที่เกิดขึ้น ถ้าลากเส้นค้ำของส่วนที่เป็นจริงดังไปถึงแกนคั้งจะได้ค่า  $nJ_0$  ที่  $V = 0$  ส่วนค่า  $n$  จะได้จากความชันของเส้นตรง



รูปที่ 2.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\text{Log}(I)$  กับ  $V$  ของขดัก์ไดโอดที่มีความต้านทานอนุกรม ( $r_s$ ) อยู่ด้วย

ความต้านทานพลศาสตร์ (dynamic resistance,  $r$ ) หาได้จากความสัมพันธ์

$$r = \frac{dV}{dI}$$

โดยที่

$$\frac{dV}{dI} = \frac{nk_B T}{qI_0} \exp\left[\frac{-q}{nk_B T}(V - I r_s)\right] + r_s,$$

$$\frac{dV}{dI} = \frac{nk_B T}{qI} + r_s,$$

$$I \frac{dV}{dI} = \frac{nk_B T}{q} + I r_s, \quad (2.51)$$

ที่  $V$  ค่าสูงๆ พจน์แรกของสมการที่ (2.51) สามารถตัดทิ้งได้ กราฟของความสัมพันธ์

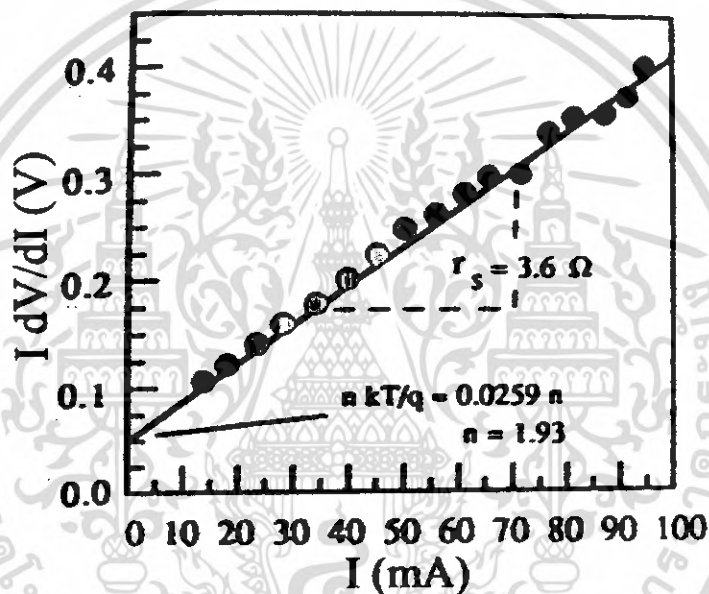
ระหว่าง  $I \frac{dV}{dI}$  กับ  $I$  จะได้จุดตัดแกนตั้งคือ  $\frac{nk_B T}{q}$  และความชันคือ  $r_s$  ดังแสดงในรูปที่ 2.26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการที่ (2.51) อาจเขียนใหม่ได้เป็น

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = Ir_s + \frac{nk_B T}{q} \quad (2.52)$$

ซึ่งจากกราฟความชันสัมพันธ์  $\frac{dV}{d(\ln I)}$  กับ  $I$  จะได้ว่าความชันคือ  $r_s$  นั่นเอง

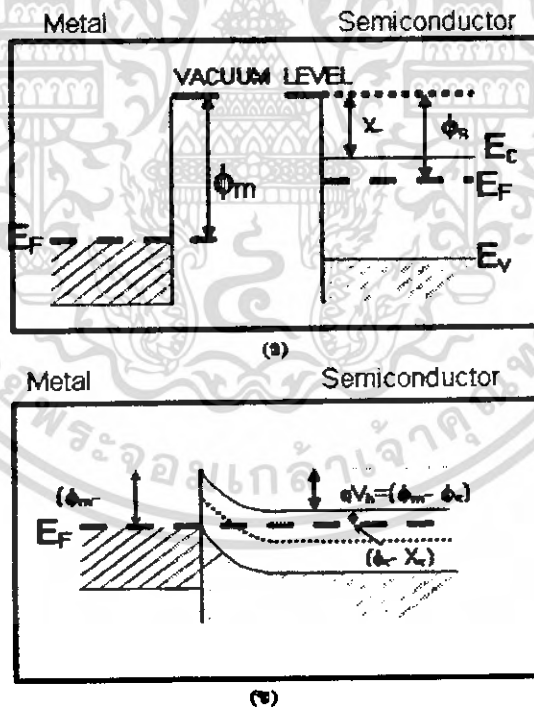


รูปที่ 2.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\frac{dV}{d(\ln I)}$  กับ  $I$  ของขดคัลทิโคโอด และความชันคือค่าความต้านทานอนุกรม ( $r_s$ )

2.4.8 รอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นในอุดมคติกรณีฟังก์ชันงานของ โลหะ  $\phi_M$  มีค่ามากกว่า  $\phi_S$  ของสารกึ่งตัวนำ

2.4.8.1 สมบัติทั่วไปของรอยต่อระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ

ลักษณะแถบพลังงานของโลหะและของสารกึ่งตัวนำในอุดมคติ ซึ่ง  $\phi_M > \phi_S$  ในสภาวะก่อนการสัมผัสหรือเมื่อเริ่มสัมผัส จะแสดงได้ดังในรูปที่ 2.27(ก) จะเห็นว่าแถบพลังงานมีลักษณะเป็นแถบราบปกติ แต่ภายหลังจากการสัมผัสจะมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น เนื่องจากค่าฟังก์ชันงานของสารทั้งสองไม่เท่ากัน โดยฟังก์ชันงานของโลหะ  $\phi_M$  มีค่ามากกว่า  $\phi_S$  ของสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นจะเห็นว่า ระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำอยู่สูงกว่าระดับเฟอร์มิของโลหะ จึงทำให้เกิดมีการถ่ายเทประจุพาหะระหว่างสารทั้งสอง กล่าวคืออิเล็กตรอนจากด้านสารกึ่งตัวนำจะเคลื่อนที่แพร่เข้าไปทางด้านโลหะ ทั้งให้เกิด ไอออนบวกของอะตอมสารเจือผู้ให้ ( $N_D^+$ ) ปรากฏอยู่บริเวณรอยต่อด้านสารกึ่งตัวนำ และกลายเป็นบริเวณปลอดพาหะมีความกว้างเท่ากับ  $w$



รูปที่ 2.27 แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อระหว่าง โลหะและสารกึ่งตัวนำอื่น

ในอุดมคติโดย  $\phi_M > \phi_S$  ในขณะที

ก. เริ่มต้นสัมผัสและ

ข. ภายหลังจากสัมผัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำซึ่งเคลื่อนที่แพร่เข้าไปในโลหะ จะไปสะสมอยู่ในโลหะเฉพาะบริเวณผิวสัมผัสเท่านั้น ไม่ได้กระจายเข้าไปในส่วนใดของโลหะ (เนื่องจากเป็นกรณีของโลหะ ในอุดมคติ ซึ่งมีความต้านทานเป็นศูนย์ และไม่มีสนามไฟฟ้าหรือแรงดันตกคร่อม) ประจุบวกที่เกิดจากไอออนบวกของอะตอมผู้ให้อันแปลผลภาวะ จะมีค่าเท่ากับประจุลบซึ่งสะสมอยู่ที่ผิวสัมผัสทางด้านโลหะ และประจุบวกเหล่านี้ จะทำให้มีสนามไฟฟ้าภายในเกิดขึ้นที่บริเวณปกคลุมพาหะด้านสารกึ่งตัวนำ สนามไฟฟ้าดังกล่าวนี้ จะมีทิศทางกลับสารกึ่งตัวนำไปยังด้านโลหะ เป็นทิศทางที่ต่อต้านการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากด้านสารกึ่งตัวนำ ไม่ให้แพร่เข้าไปยังด้านโลหะ อย่างไรก็ตาม ในช่วงเวลาระยะๆ สนามไฟฟ้านี้จะมีค่าที่แท้จริง ไม่สามารถต่อต้านการแพร่ของอิเล็กตรอนได้ทั้งหมด การแพร่ของอิเล็กตรอนจึงยังคงสามารถดำเนินต่อไปได้ แต่เมื่อเวลาผ่านไป สนามไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งในที่สุดก็จะมีค่าพอที่จะหยุดยั้งการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ได้อย่างสมบูรณ์ ขณะนี้เราจะต้องเข้าสู่ภาวะสมดุลความร้อน ซึ่งกระแสสุทธิที่ไหลผ่านรอยต่อมีค่าเป็นศูนย์ สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในบริเวณปกคลุมพาหะด้านสารกึ่งตัวนำสามารถสังเกตเห็นได้จากผลการงอโค้งของแถบพลังงานด้านสารกึ่งตัวนำ ในช่วง  $W$  ดังแสดงในรูปที่ 2.27(ข) ซึ่งเหมือนกับในกรณีของรอยต่อพี-เอ็น ขนาดความกว้าง  $W$  ของบริเวณปกคลุมพาหะนี้ อาจคำนวณได้จากสมการความกว้างของบริเวณปกคลุมพาหะที่รอยต่อพี-เอ็นตามสมการที่ (2.53) และสามารถให้การกระจายของรอยต่อแบบ  $p^+ - n$  มาพิจารณาได้ โดยพิจารณาว่าประจุลบที่สะสมอยู่ในด้านโลหะ จะมีลักษณะเป็นแผ่นประจุ (sheet of charge) หรือคล้ายกับว่า  $x_p \ll x_n$  นอกจากนี้คุณสมบัติความจุไฟฟ้าที่รอยต่อหาได้จากสมการ

$$C_j = \frac{\epsilon}{W} A \quad \text{ฟารัด}$$

ในภาวะสมดุลความร้อน ระดับเฟอร์มิของสารทั้งสอง จะปรับอยู่ในระดับเดียวกันโดยตลอด การงอโค้งของแถบพลังงานด้านสารกึ่งตัวนำบริเวณรอยต่อกับโลหะ มีความหมายว่ามีศักย์สัมผัส (contact potential :  $V_c$ ) หรือกำแพงศักย์ (potential barrier) เกิดขึ้นในด้านสารกึ่งตัวนำและทำหน้าที่ป้องกันการแพร่ของอิเล็กตรอนในแถบนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำไม่ให้เข้าไปในด้านโลหะ การงอโค้งของแถบพลังงานในสารกึ่งตัวนำจะมีผลทำให้เกิดการงอโค้งของระดับพลังงานภายในด้านสารกึ่งตัวนำด้วย เนื่องจากค่าอิเล็กตรอนแอฟฟิไนตี้  $q\chi_n$  ต้องมีค่าคงที่ การงอโค้งของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำจะมีค่ามากที่สุด ที่ตำแหน่งผิวสัมผัสกับโลหะ ดังนั้นสนามไฟฟ้าที่จุดนี้จะมีค่ามากที่สุด ขณะที่รอยต่อหรือแรงดันภายในรอยต่อ  $V_{bi}$  ซึ่งเป็นกำแพงศักย์ของอิเล็กตรอนจากด้านสารกึ่งตัวนำ มีค่าเท่ากับผลต่างระหว่างฟังก์ชันงานของโลหะและของสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นกำแพงศักย์ของอิเล็กตรอนด้านสารกึ่งตัวนำ คือ

$$qV_n = q(\phi_m - \phi_s) \quad (2.53)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้แล้ว ในรูปที่ 2.27 (ข) จะเห็นว่าความสูงของกำแพงกั้นของอิลีกตรอนด้านโลหะซึ่งจะเคลื่อนที่ไปด้านสารกึ่งตัวนำ มีค่าเท่ากับ  $(\phi_M - \chi_s)q$  เรนหรือกำแพงนี้ว่า กำแพงพลังงานศักย์ที่ผิว (surface potential energy barrier) หรือ “กำแพงชอตคกี” หรือ “ชอตคกีแบริเออร์” (Schottky barrier) และเขียนแทนทั่ว  $q\phi_B$  ดังนั้น กำแพงกั้นของอิลีกตรอนด้านโลหะ คือ

$$q\phi_B = q(\phi_M - \chi_s) \tag{2.54}$$

ซึ่งจะมีค่าคงที่สำหรับสารแต่ละชนิด ดังแสดงในตารางที่ 2.1 และพิจารณาว่าเป็นกำแพงกั้นของอิลีกตรอนในโลหะที่มีพลังงานระดับเฟอร์มิ จากสมการที่ (2.53) และสมการที่ (2.54) สามารถเขียนสมการความสัมพันธ์ของ  $V_M$  และ  $\phi_B$  ได้ดังนี้

$$V_M = \phi_B - \phi_D \tag{2.55}$$

โดยที่

$$\phi_D = (E_C - E_{FS})/q \tag{2.56}$$

ดังนั้นสมการที่ (2.55) เขียนใหม่ได้ว่า

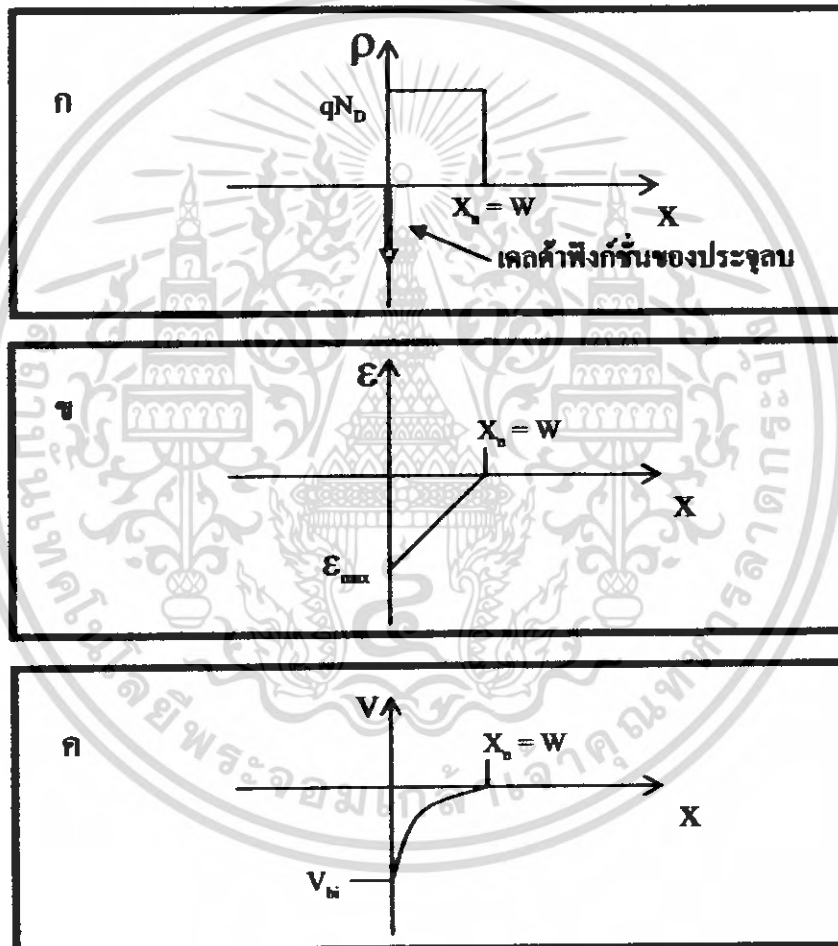
$$qV_M = q\phi_B - (E_C - E_{FS}) \tag{2.57}$$

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าความสูงของกำแพงชอตคกี  $\phi_B$  ที่วัดได้จากรอยต่อระหว่างโลหะชนิดต่างๆ กับสารกึ่งตัวนำทั้งซิลิกอนและแกเลียมอาร์เซไนด์

Semiconductor	Al	Au	W	PtSi
Si(N)	0.72 eV	0.80 eV	0.67 eV	0.85 eV
Si(P)	0.58 eV	0.34 eV	0.45 eV	-
GaAs(N)	0.80 eV	0.90 eV	0.80 eV	-

และจากสมการที่ (2.55) จะเห็นว่าลักษณะตกอินในสารกึ่งตัวนำมีค่าน้อยกว่ากันของขดคัก  
หรือ  $V_{bi} < q\phi_s$  การกระจายความหนาแน่นของประจุไฟฟ้า สนามไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อ  
เขียนแสดงได้ดังในรูปที่ 2.28(ก), 2.28(ข) และ 2.28(ค) ตามลำดับ

โลหะ	สารกึ่งตัวนำชนิดอื่น
------	----------------------



รูปที่ 2.28 แสดงคุณสมบัติต่าง ๆ ของรอยต่อแบบ MS หรือ ขดคักโคโอระหว่างโลหะและสาร  
กึ่งตัวนำชนิดอื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.8.2 สมบัติของรอยต่อในสถานะระงับความร้อน [Schroder, 1998 ]

ในสถานะสมดุลความร้อน การกระจายความหนาแน่นของประจุไฟฟ้า ที่บริเวณรอยต่อสามารถวิเคราะห์ได้โดยพิจารณาว่า ที่บริเวณปลอดพาหะด้านอื่นในช่วง  $0 < x < x_p$  จะมีประจุไฟฟ้าบวกเนื่องจากไอออนบวกของอะตอมจึงให้ประจุอยู่ และคล้ายกับว่ารอยต่อนี้ไม่มีด้านที่แต่มีโลหะมาแทน และประจุไฟฟ้าลบเนื่องจากอิเล็กตรอนที่สะสมทางด้านโลหะจะกระจุกอยู่ในบริเวณผิวสัมผัสไม่กระจายออกเป็นบริเวณกว้าง ดังนั้นบริเวณปลอดพาหะทางด้านโลหะจึงไม่มีความกว้างของบริเวณปลอดพาหะของอะตอมรวม  $W$  มีค่าเท่ากับความกว้างของบริเวณปลอดพาหะด้านอื่น หรือ  $W = x_p$  และการกระจายของประจุไฟฟ้าลบในด้านโลหะลักษณะนี้ พิจารณาว่าเป็นแบบ "เดลต้าฟังก์ชัน" ( $\delta$ -function) ดังแสดงในรูป 2.99ก. และอาจเขียนได้ว่า ความหนาแน่นประจุไฟฟ้าบวกที่ด้านอื่น

$$\rho \cong qN_D \quad \text{ในช่วง } 0 < x < x_p$$

$$\rho \cong 0 \quad \text{ในช่วง } x > x_p$$

และเนื่องจากประจุไฟฟ้าลบในโลหะกระจายแบบ เดลต้าฟังก์ชัน ดังนั้น สนามไฟฟ้าที่ด้าน โลหะจึงมีค่าเป็นศูนย์ หรือ

$$\epsilon = 0$$

นั่นคือ ศักย์ไฟฟ้าใน โลหะมีค่าคงที่เท่ากับหมด หรือ  $V =$  ค่าคงที่ ดังนั้นการวิเคราะห์สมบัติด้าน โลหะจึงไม่จำเป็น สำหรับการกระจายสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าในบริเวณปลอดพาหะ ทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น หาได้ดังนี้

จากสมการ Poisson's:

$$\frac{d\epsilon}{dx} = \frac{\rho}{\epsilon}$$

พิจารณาในช่วง  $0 < x < x_p$  ซึ่ง  $\rho \cong qN_D$

ดังนั้น

$$\frac{d\epsilon}{dx} = \frac{qN_D}{\epsilon} \tag{2.58}$$

โดยอาศัยเทคนิคการแยกตัวแปรและการอินทิเกรต เทียบกับสมการที่ (2.58) จากจุด  $x$  ใดๆ ในบริเวณปลอดพาหะ ถึงจุด  $x = W$  หรือ  $x = x_p$  ซึ่งที่จุดนี้สนามไฟฟ้า  $\epsilon(w) = 0$

จะได้ว่า

$$\int_{\epsilon(x)}^0 d\epsilon = \int_x^{x_p} \frac{qN_D}{\epsilon} dx \tag{2.59}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{ดังนั้น} \quad -(V_m \pm V_o) = -\frac{qN_D}{2\epsilon} W^2 \quad (2.66)$$

$$\text{หรือ} \quad W = \left[ \frac{2\epsilon}{qN_D} (V_m \pm V_o) \right]^{1/2} \quad (2.67)$$

สมการที่ (2.65) เป็นสมการที่แสดงขนาดความกว้างของบริเวณปลอดประจุของรอยต่อกึ่งตัวนำ-กึ่งตัวนำ ซึ่งรูปร่างสมการจะคล้ายกับกรณีของรอยต่อ  $p^+ - n$  กรณีที่รอยต่อได้รับไบอัสตรง  $V_o$  เทอมในวงเล็บเล็กจะถูกลบทิ้ง ( $V_m - V_o$ ) และกรณีไบอัสย้อนกลับจะถูกลบทิ้ง ( $V_m + V_o$ ) และจะมีผลให้ความกว้างของบริเวณปลอดประจุเปลี่ยนแปลงขึ้นหรือลงกับกรณีของรอยต่อที่อื่น

#### 2.4.9 รอยต่อแบบโฮล์มมิก (Schottky, 1953)

ในการศึกษาสมบัติเชิงไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ สิ่งสำคัญคือ ต้องมีการต่อขั้วไฟฟ้าออกจากสารกึ่งตัวนำ รอยต่อระหว่างโลหะที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้ากับสารกึ่งตัวนำจะมีความต้านทานน้อย เมื่อเทียบกับความต้านทานของชั้นสารกึ่งตัวนำ เนื่องจากความต่างศักย์ที่ให้กับอุปกรณจะ ได้ไม่ตกคร่อมที่รอยต่อมากนัก ลักษณะที่บ่งบอกสมบัติของรอยต่อแบบโฮล์มมิก คือค่าความต้านทานจำเพาะของรอยต่อ ( specific contact resistance,  $R_c$  ) ซึ่งมีสมการดังนี้

$$R_c \equiv \left( \frac{\partial J}{\partial V} \right)^{-1}_{V=0} \quad (2.68)$$

สำหรับรอยต่อแบบโฮล์มมิกของสารกึ่งตัวนำที่มีการ ไล่ป้อน กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านรอยต่อจะมาจากขบวนการเทอร์มิโอนิกอิมิชัน ค่าความต้านทานจำเพาะของรอยต่อจะเป็นไปตามสมการ

$$R_c = \frac{k_B}{qA^*T} \exp(\phi_B / k_B T) \quad (2.69)$$

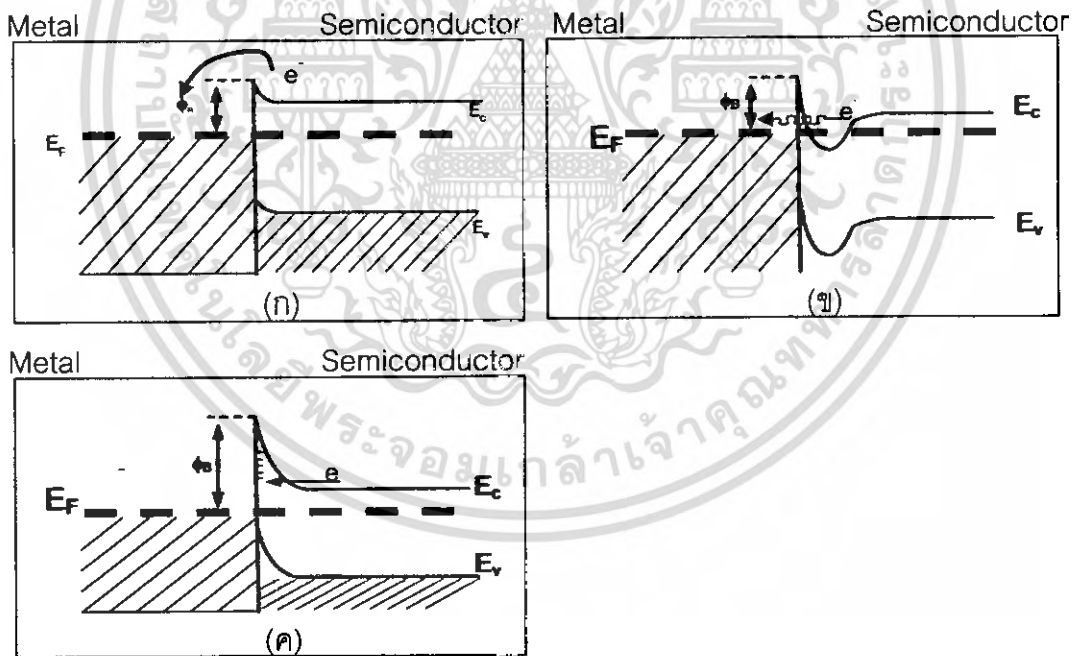
ฉะนั้นถ้ากำหนดศักย์ มีค่าน้อยจะทำให้ความต้านทานจำเพาะของรอยต่อมีค่าน้อยด้วย สำหรับรอยต่อแบบโฮล์มมิกของสารกึ่งตัวนำที่มีการ ไล่ป้อน ค่าแรงผลักจะแคบขึ้นดังนั้นกระแสที่ไหลผ่านรอยต่อส่วนใหญ่จะมาจากขบวนการออกผ่านกำแพงศักย์ ดังรูปที่ 2.29(จ) ความต้านทานจำเพาะของรอยต่อจะเป็นไปตามสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Rc \approx \exp\left[4\pi\left(\frac{e_s m_e}{h}\right)^{1/2} (\phi_B / N_D)^{1/2}\right] \quad (2.70)$$

นั่นคือ ความต้านทานจำเพาะของรอยต่อจะมีค่าน้อยลงในขณะที่ความหนาแน่นของสิ่งเจือปน ( $N_D$ ) เพิ่มขึ้น

ทั้งกรรมวิธีการ ไลป์บรอกซ์ด้วยโลหะที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้า และการเลือกใช้โลหะที่เหมาะสม เพื่อให้ได้กัมพงกัตต์ที่มีค่าต่ำ อันจะทำให้ความต้านทานจำเพาะของรอยต่อมีค่าน้อย ซึ่งจะเป็นรอยต่อแบบโฮล์มิกที่ดี นอกจากนี้แล้ว รั่วของแถบโฮล์มิกยังทำได้จากการเตรียมรอยต่อที่มีข้อบกพร่องของผลึกเป็นจำนวนมากพอสมควร ซึ่งจะก่อกำเนิดข้อบกพร่องผลึกเหล่านี้จะเป็นศูนย์กลางการรวมตัว (recombination center) ระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮล์ ซึ่งจะทำให้มีกระแสไฟฟ้าผ่านรอยต่อได้



รูปที่ 2.29 แสดงแถบพลังงานของรอยต่อแบบโฮล์มิกที่กระแสไหลเกิดจากขบวนการเทอร์มิโอนิกอิมิग्रัน และขบวนการลดระงำกัมพงกัตต์

- ก. รอยต่อที่กัมพงกัตต์มีค่าต่ำ
- ข. รอยต่อที่เกิดจากการ ไลป์บรอกซ์ด้วยโลหะที่ใช้ทำขั้ว
- ค. รอยต่อที่มีศูนย์กลางการรวมตัวระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับในทางปฏิบัติการเรียนรู้แค่เพียงค่าความต้านทานจำเพาะของรอยต่อเท่านั้น ไม่สะดวกในการนำไปใช้งานแต่ถ้ารู้ทั้งความสูงของกัมพังก์และค่าความหนาแน่นของกระแส ที่มากที่สุด โดสที่รอยต่อยังไม่แสดงผลในการชะขวางการไหลของกระแส (nonblocking contact) ในช่วงของอุณหภูมิที่ใช้งานจะเหมาะสมต่อการบอกลักษณะของรอยต่อแบบโฮล์มิกมากกว่าการให้ค่าความต้านทานจำเพาะของรอยต่อ

การที่จะเลือกใช้โลหะที่เหมาะสมกับสารกึ่งตัวนำของทรานซิสเตอร์ให้มีความสูงของกัมพังก์ที่มีค่าแน่นอนหาไม่ง่ายนัก หรือการที่จะทำให้ได้ฉนวนชั้นฉนวนที่รองผลึกอันเหมาะสมที่รอยต่อนั้นเป็นการยากที่จะควบคุมได้ ดังนั้นไม่ทราบถึงขนาดที่แท้จริง

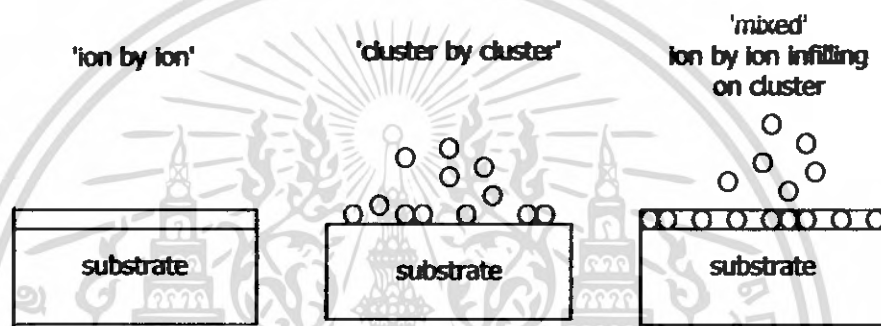
ดังนั้นเราจะเลือกใช้วิธีการได้มากมาย ด้วยโลหะหรือโลหะชนิดที่เป็นอัลลอยด์ โดยคำนึงถึงชนิดของสารกึ่งตัวนำเพื่อให้ได้เป็น  $M-n-n$  หรือ  $M-p-p$

สมบัติของโลหะที่จะนำมาใช้ทำรอยต่อแบบ โฮล์มิกที่ควรพิจารณาประกอบอีกด้วยคือ

1. เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี
2. ยึดติดกับอุปกรณถึงประคินฐ์ได้ดี
3. ไม่เสื่อมคุณภาพได้ง่าย ในสภาวะแวดล้อมที่ใช้งาน
4. เชื่อมต่อสะดวกกับอุปกรณภายนอกได้ง่าย

2.5 การเตรียมและศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง CdS ด้วยวิธีการอานสารละลายเคมี [งานวิจัยและ  
คณะ, 2543 ; งานวิจัยและคณะ, 2546 ; ฐิติชัยและคณะ, 2546 ; ฐิติชัยและคณะ, 2544]

ฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมโดยวิธีการอานสารละลายเคมีสารตั้งต้นประกอบด้วยแคดเมียมซัลไฟด์ (CdSO<sub>4</sub>) ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดของแคดเมียมไอออน (Cd<sup>2+</sup>) ไทโอยูเรีย (SC(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>) ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดของซัลเฟอร์ไอออน (S<sup>2-</sup>) และแอมโมเนีย (NH<sub>3</sub>) โดยเลือกใช้ความเข้มข้นของสารตั้งต้นให้เหมาะสม ได้ค่า pH ประมาณ 10-11 และอุณหภูมิประมาณ 80-90°C โดยในกระบวนการเคลือบฟิล์มบาง CdS คาดว่าจะเกิดปฏิกิริยาดังนี้

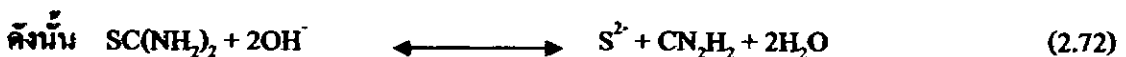
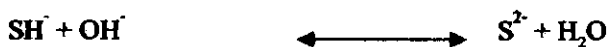


รูปที่ 2.30 แผนภาพแสดงกลไกในการเกิดผลึกเป็นฟิล์มบางที่เตรียมโดยใช้เทคนิคการอานสารละลายทางเคมี

- ก. กระบวนการเฮเทอโรจีเนียส
- ข. กระบวนการโฮโมจีเนียส
- ค. กระบวนการผสมระหว่างเฮเทอโรจีเนียสและโฮโมจีเนียส

2.5.1 กระบวนการเกิดปฏิกิริยา

ฟิล์มบาง CdS เกิดจากกลไกการเคลื่อนที่ของแคดเมียมในสารละลาย NH<sub>3</sub> โดยเกิดปฏิกิริยาดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก (2.71) เกลือ  $\text{CdSO}_4$  แยกตัวให้  $\text{Cd}^{2+}$  จะรวมตัวกับแอมโมเนีย  $\text{NH}_3$  กลายเป็นไอออนเชิงซ้อนที่เรียกว่าแคดเมียมเตตระแอมมีน (Cadmium Tetraammine Complex ion;  $\text{Cd}(\text{NH}_3)_4^{2+}$ ) จากนั้นแยกตัวให้  $\text{Cd}^{2+}$  แล้วรวมตัวกับ  $\text{S}^{2-}$  มากกว่าค่าผลของความสามารถในการละลาย (solubility product;  $K_{sp}$ ) ของ  $\text{CdS}$  ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $7.1 \times 10^{-28}$  ก็ปรากฏผลลดยึดของแคดเมียมซัลไฟด์ขึ้นในการละลาย

โดยปกติ  $\text{NH}_3$  จะทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมความเข้มข้นของ  $\text{Cd}^{2+}$  ดังนั้นจึงนิยมใช้  $\text{NH}_3$  ที่มีความเข้มข้นมากเพื่อไม่ให้ความเข้มข้นของ  $\text{Cd}^{2+}$  และ  $\text{S}^{2-}$  มีค่าเกินกว่าค่าผลของความสามารถในการละลายของ  $\text{Cd}(\text{OH})_2$  ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $1.2 \times 10^{-16}$  เพราะจะทำให้เกิดเป็นผลลดยึดของ  $\text{Cd}(\text{OH})_2$  แทนที่จะเป็น  $\text{CdS}$  ดังสมการ (2.73)



การเกิดที่สัมพันธ์กับ  $\text{CdS}$  ประกอบด้วยสามภาคใกล้เคียงกัน คือ

1. การจับ  $\text{Cd}(\text{OH})_2$  ที่ผิวแผ่นรองรับ



ซึ่งปฏิกิริยาสามารถค้นกลับได้ความเข้มข้นของ  $\text{NH}_3$  ประมาณ 0.8 – 2.5 โมลาร์

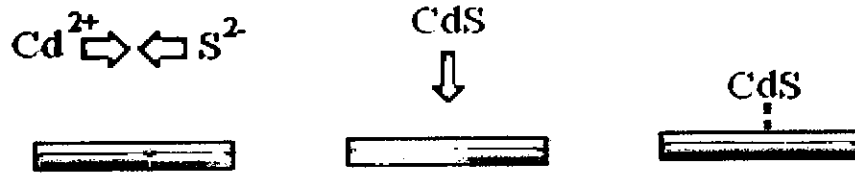
2. การจับไทโอไซริเอธาไ่ว์โคทำให้เกิดองค์ประกอบเชิงซ้อนที่ไม่เสถียร



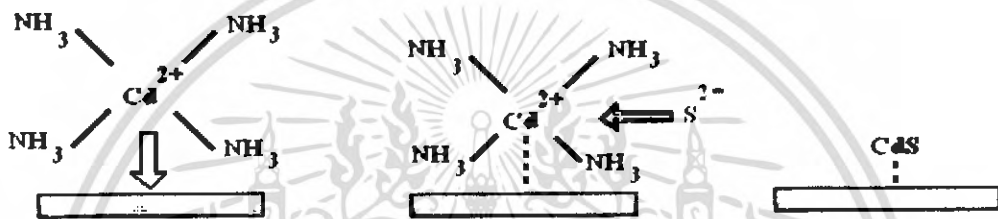
3. การเกิด  $\text{CdS}$  และการเกิดที่อุทกใหม่โดยการแตกตัวขององค์ประกอบเชิงซ้อน



การเกิดที่สัมพันธ์กันในสมการ (2.72) ถึง (2.73) เรียกว่า การตกผลึกแบบ โฮโมจีนีอัส (homogenous precipitation) หรือการตกผลึกแบบกลุ่มก้อนต่อกัน (cluster by cluster) ดังแสดงตามรูปที่ 2.31 ส่วนสมการ (2.74) ถึง (2.77) เรียกว่าแบบเฮเทอโรจีนีอัส (heterogenous precipitation) หรือการตกผลึกแบบ ไอออนต่อไอออน (ion by ion) ดังแสดงตามรูปที่ 2.32



รูปที่ 2.31 แสดงการเกิดฟิล์ม CdS บนฐานรองรับโดยกระบวนการไฮโดรเจเนซิส



รูปที่ 2.32 แสดงการเกิดฟิล์ม CdS บนฐานรองรับโดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลไฮโดรเจเนซิส

2.5.2 การเกิดฟิล์มบาง CdS บนฐานรองรับ

เนื่องจากความสามารถในการละลายของ CdS มีค่าต่ำ ดังนั้นการควบคุมการตกผลึกสามารถทำได้โดยการควบคุม  $Cd^{2+}$  คือองค์ประกอบเชิงซ้อน (complex agent) ซึ่งในที่นี้จะใช้  $NH_3$  เพื่อควบคุมความเข้มข้นของ  $Cd^{2+}$  โดยให้  $NH_3$  รวมตัวกับ  $Cd^{2+}$  กลายเป็นไอออนเชิงซ้อนดังสมการ (2.72) ถึง (2.77) ซึ่งไอออนเชิงซ้อนจะแตกตัวให้ไอออนอิสระดังสมการ



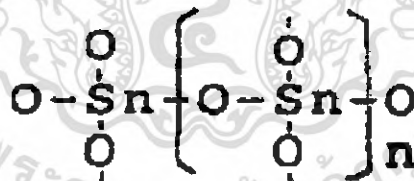
เมื่อพิจารณาค่าของ  $K_c$  และค่าคงที่สมดุล  $K_c$  จะเห็นว่า CdS สามารถตกผลึกได้ง่าย โดยทั่วไปการเกิดฟิล์มบาง CdS มักเกิดชนิด แบบ ไฮโดรเจเนซิส และ แบบไฮโดรเทอร์มอลไฮโดรเจเนซิส ซึ่งการเกิดแบบไฮโดรเจเนซิสมักจะพบมากในช่วงท้ายของการเกิดฟิล์มบางมีผลทำให้ฟิล์มบางมีคุณภาพลดลง กล่าวคือ โปร่งแสงน้อยลง และมีความหนาไม่สม่ำเสมอ ผิวค้ำบนออกหูดกร่อนได้ง่าย

## 2.6 การเตรียมฟิล์มบางคิบุกออกไซด์ด้วยวิธีการพ่นละอองสารเคมีด้วยคลื่นอัลตราโซนิก [ฐิติชัย และคณะ, 2546]

การพ่นละอองสารเคมีด้วยคลื่นอัลตราโซนิก (ultrasonic spray pyrolysis) คือ กรรมวิธีแบบหนึ่งที่ใช้ในการปลูกฟิล์มบางโดยการพ่นละอองสารเคมีลงบนฐานรองที่ถูกให้ความร้อนละอองสารจะไปก่อตัวเป็นฟิล์มบางบนกระจกใส

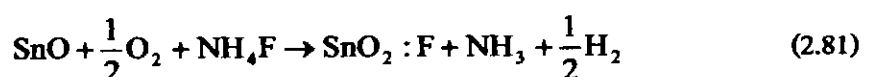
### 2.6.1 กระบวนการเกิดปฏิกิริยาเคมีในสารละลาย

ในการเตรียมฟิล์มบางคิบุกออกไซด์ด้วยวิธีการพ่นละอองสารเคมีสารตั้งต้นที่เป็นสารละลายจะอยู่ในรูปพอลิเมอร์  $\text{Sn-O}$  ดังที่แสดงในรูปที่ 2.33 ซึ่งกระบวนการในการเกิดปฏิกิริยาเคมีจะเป็นไปตามสมการที่ (2.79) และ (2.80)

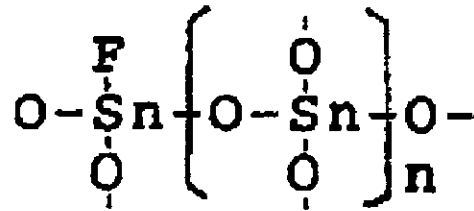


รูปที่ 2.33 แสดงลักษณะ โมเลกุลที่เกิดขึ้นภายในสารละลาย

กรณีที่มีการเจือด้วยอะตอมของฟลูออรีน(F) อะตอมของฟลูออรีนจะเข้าไปแทนที่ออกซิเจนบางตัวในโมเลกุลของ  $\text{SnO}_2$  จะทำให้เกิดเป็น  $\text{SnO}_2 : \text{F}$  ดังรูปที่ 2.34 การเกิดปฏิกิริยานั้นจะเป็นไปตามสมการที่ (2.81)



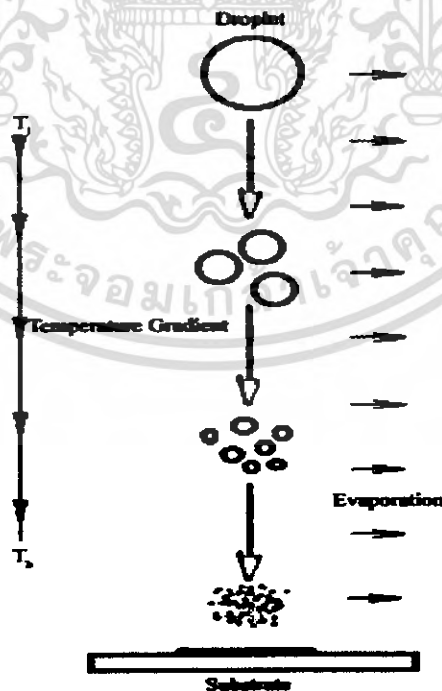
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.34 ลักษณะของโมเลกุลของ  $\text{SnO}_2$  ที่เชื่อมด้วย F

### 2.6.2 กระบวนการการเกิดฟิล์มบาง

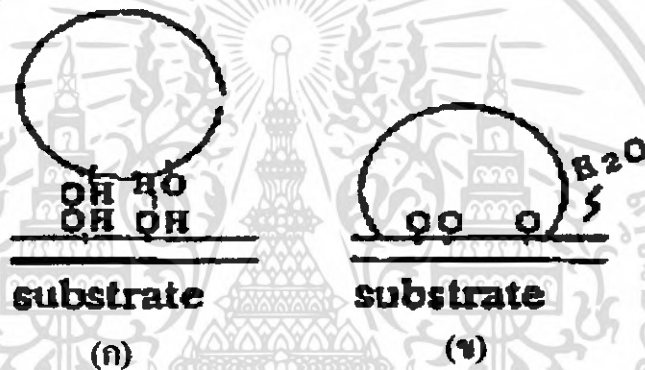
เมื่อสารละลายถูกทำให้กลายเป็น โนเดกุลขนาดเล็ก โดยวิธีการ ใช้คลื่นอัลตราโซนิค ช่วยหรือวิธีการ ใช้ลมอัดก็ตามนั้น เมื่อหยดของสารละลายเข้าใกล้ฐานรองรับมากขึ้น อุณหภูมิ บริเวณใกล้กับฐานรองรับก็จะมีค่าสูงขึ้นด้วย เนื่องจากมีการให้ความร้อนกับฐานรองรับ ซึ่งผล ของอุณหภูมิที่สูงขึ้นนี้จะส่งผลให้ขนาดของหยดของสารละลายมีขนาดเล็กลงด้วย เนื่องจากเมื่อ หยดของสารละลายได้รับความร้อนจะทำให้สารละลายบางส่วนมีการระเหยออกไปทำให้หยด ของสารละลายมีขนาดเล็กลง ดังที่แสดงรูปที่ 2.35



รูปที่ 2.35 แสดงการลดลงของขนาดของหยดสารละลายตามระยะทางจากฐานรองรับ

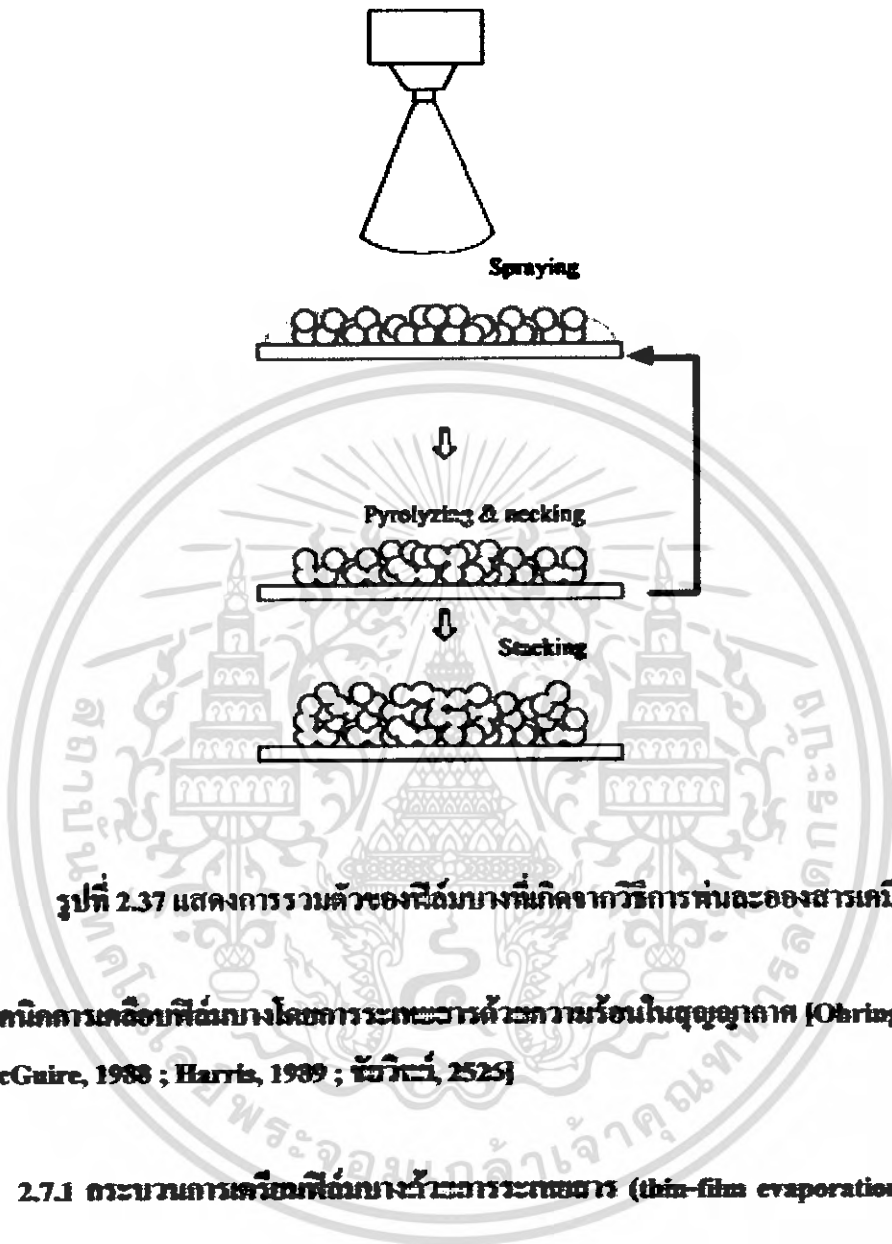
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อหยดของสารละลายกลองบนพื้นผิวของฐานรองรับ หยดของสารละลายจะเกิดปฏิกิริยาการสูญเสียน้ำ (dehydration) ดังแสดงในรูปที่ 2.36 (ก) และจะเกาะกันแผ่นของฐานรองรับดังรูปที่ 2.36(ข) เมื่อปริมาณของหยดสารละลายที่จับอยู่บนพื้นผิวของฐานรองรับมีปริมาณที่มากพอ อีกทั้งยังได้รับความร้อนจากแผ่นฐานรองรับทำให้แต่ละหยดของสารละลายที่เกาะอยู่บนพื้นผิวของฐานรองรับนั้นเกิดการเชื่อมต่อกันและมีปริมาณมากขึ้นจะทำให้เกิดการรวมตัวกันขึ้นเป็นเนื้อฟิล์มในที่สุดซึ่งกระบวนการดังกล่าวแสดงในรูปที่ 2.37



รูปที่ 2.36 แสดงแบบจำลองการเกิดฟิล์มบางบนผิวของฐานรองรับ

- ก. การเกิดปฏิกิริยาที่เกิดการสูญเสียน้ำ  
 ข. การเกิดฟิล์มบางบนฐานรองรับ



รูปที่ 2.37 แสดงการรวมตัวของฟิล์มบางที่เกิดจากวิธีการระเหยของสารเคมี

2.7 เทคนิคการเคลือบฟิล์มบางโดยการระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ [Ohring, 2002 ; McGuire, 1988 ; Harris, 1989 ; ชัยวัฒน์, 2525]

### 2.7.1 กระบวนการเคลือบฟิล์มบางด้วยการระเหยสาร (thin-film evaporation processes)

การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีการระเหยสาร จะทำกันในสุญญากาศที่ระดับความดันประมาณ  $10^{-3}$  ถึง  $10^{-7}$  ทอร์ วัตถุประสงค์ของการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีนี้ คือ การควบคุมการเคลื่อนย้ายอะตอมจากแหล่งกำเนิดความร้อน ไปยังแผ่นรองรับ (substrate) ที่ห่างออกไป แล้วทับถมกันเกิดเป็นฟิล์มบาง วิธีการเคลือบฟิล์มบางด้วยการระเหยสารนั้นมีด้วยกันหลายวิธี แต่ในที่นี่จะกล่าวถึงเพียง การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อน (thermal evaporation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.7.1.1 อัตราการระเหยสาร (the physics and chemistry of evaporation)

จากการทดลองของเฮิร์ตและนูเดนเซน (Hertz and Knudsen) อัตราการไหลของอะตอมหรือโมเลกุลในสุญญากาศ จากแหล่งกำเนิดความร้อน (heat source) คือ

$$\Phi_e = \frac{3.513 \cdot 10^{22}}{(MT)^{1/2}} P_e \quad \text{โมลต่อตารางเซนติเมตร-วินาที} \quad (2.82)$$

โดยที่  $\Phi_e$  คือ ฟลักซ์ของจำนวนอะตอมหรือโมเลกุลของสารที่ระเหยต่อหน่วยพื้นที่ต่อเวลา

$P_e$  คือ ความดันสมดุล (equilibrium pressure)

$M$  คือ มวลโมเลกุล

$T$  คือ อุณหภูมิในหน่วยเคลวิน

เมื่อ  $P_e$  มีหน่วยเป็นทอร์ อัตราการระเหยมวลสาร (mass evaporation rate) สามารถหาได้จาก

$$\Gamma_e = 5.84 \cdot 10^{-2} (M/T)^{1/2} P_e \quad \text{กรัมต่อตารางเซนติเมตร-วินาที} \quad (2.83)$$

โดยที่  $\Gamma_e$  คือ มวลของอัตราการระเหยสาร

ที่ความดัน  $10^{-2}$  ทอร์ค่าของ  $\Gamma_e$  ในธาตุจำนวนมากจะมีค่าประมาณ  $10^{-4}$  กรัมต่อตารางเซนติเมตร-วินาที ดังนั้นสิ่งที่มิอิทธิพลต่ออัตราการระเหย คือ อุณหภูมิ เพราะจะมีผลกระทบมากต่อความดันสมดุล

### 2.7.1.2 ความดันไอของธาตุ (vapor pressure of the elements) [Ohring, 2002]

ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความดันไอ แสดงได้ดังสมการ

$$\frac{dP}{dT} = \frac{\Delta H(T)}{T\Delta V} \quad (2.84)$$

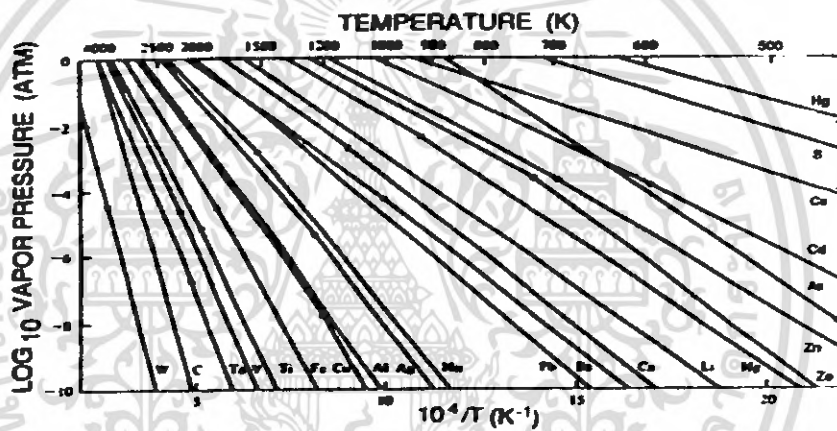
ถ้าให้  $\Delta V$  มีค่าเท่ากับปริมาตรของไอ ( $V$ ) และก๊าซนี้เป็นก๊าซในอุดมคติแล้ว  $V$  จะมีค่าเป็น  $RT/P$  ดังนั้น เขียนสมการที่ (2.81) ใหม่ให้เป็น

$$\frac{dP}{dT} = \frac{P\Delta H(T)}{RT^2} \quad (2.85)$$

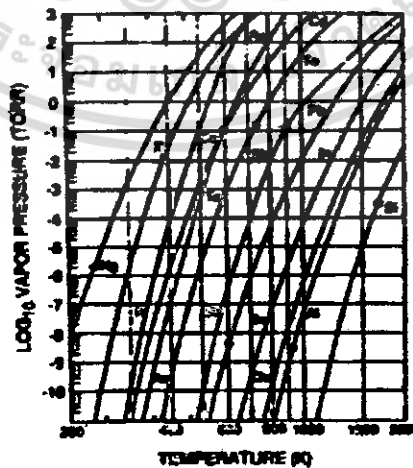
จากการประมาณค่า  $\Delta H(T)$  มีค่าเท่ากับ  $\Delta H_c$  (ความร้อนของสารในการระเหิด) ในกรณีนี้จะได้

$$\ln P \cong -\frac{\Delta H_c}{RT} + I \quad \text{หรือ} \quad P = P_0 \exp\left(-\frac{\Delta H_c}{RT}\right) \quad (2.86)$$

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



รูปที่ 2.38 กราฟแสดงค่าความดันไอของธาตุ โดยจุดต่าง ๆ จะสัมพันธ์กับจุดหลอมเหลว



รูปที่ 2.39 กราฟแสดงค่าความดันไอของธาตุในสารกึ่งตัวนำ จุดต่าง ๆ จะสัมพันธ์กับจุดหลอมเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**2.7.1.3 แหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้ในเตาระเหยสารด้วยไฟฟ้า (electrically heated evaporation source)**

ในการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีระเหยสารด้วยความร้อน จะต้องให้ความร้อนแก่สารถึงตัวนำ ที่ต้องการนำมาเคลือบผิวแผ่นรองรับ โดยทั่วไปแล้วจะใช้ตัวนำทาทนหรือขดลวดแทนที่ขดลวด เป็นแหล่งกำเนิด โดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าซึ่งจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่ตัวนำทาทนหรือขดลวด แทนที่ขดลวดได้ แหล่งกำเนิดความร้อนมีหลายชนิด แบ่งออกได้ดังนี้

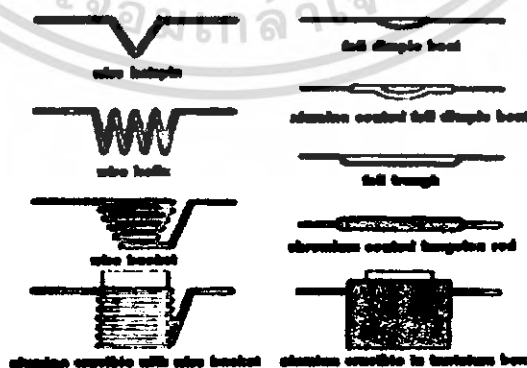
**2.7.1.3.1 แหล่งกำเนิดความร้อนลวดตะกั่ว (tungsten wire source)**

แหล่งกำเนิดชนิดนี้จะอยู่ในรูปของขดลวดพันรอบเคียวหรือพันหลอดรอบ เป็นเกลียว ทรงกระบอกหรือรูปโคน โดยขดลวดชนิดนี้ใช้สำหรับโลหะที่หลอมละลายได้เร็ว ส่วนขดลวดรูปโคนจะใช้ได้ดีกับโลหะที่หลอมละลายช้า ขดลวดทั้งชนิดสามารถทำงานได้ จนกระทั่งอุณหภูมิ 2200 เคลวิน เกินกว่าที่ประสิทธิภาพจะลดลง

**2.7.1.3.2 แหล่งกำเนิดความร้อนแผ่นโลหะทรงรูป (refractory metal sheet source)**

แหล่งกำเนิดชนิดแผ่นโลหะทรงรูป เช่น ทั้งชนิด, แทนทาลัม และ โมลิบดีนัม จะเหมือนกับ อุปกรณ์ที่เป็นขดลวด คือ มีความต้านทานในตัวเอง และ ให้ความร้อนที่ค่าแรงดันค่าแอมป์กระแสสูง แหล่งกำเนิดเหล่านี้จะถูกสร้างขึ้นมาในรูปต่างๆ กัน ดังรูปที่ 2.40

**Resistance Heated Evaporation Sources**



**รูปที่ 2.40 แสดงแหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้ระเหยสารด้วยไฟฟ้าในแบบต่าง ๆ**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.7.1.3.3 เตาระเหิด (sublimation furnaces)

ในการระเหิด ซัลไฟด์, ซีลีไนด์ และสารประกอบออกไซด์บางชนิด จะต้องใช้เตาระเหิด อุปกรณ์ในการระเหิดสารที่เป็นผงหรือผงอัดเม็ด (pellet) จะมีการใช้แผ่นตะแกรง (baffle) เพื่อหลีกเลี่ยงการกระเด็นหลุดออกมาของอนุภาค เนื่องมาจากการหมุนเวียนของก๊าซที่อัดแน่นภายใน แหล่งกำเนิดเพื่อป้องกันอนุภาค ไปเกาะติดกับผนังรอรอบ ซึ่งแผ่นตะแกรงจะยอมให้โมเลกุล หรือ อะตอมของสารเท่านั้นผ่านไปได้

### 2.7.1.3.4 แก๊สหลอด (crucible source)

แหล่งกำเนิดความร้อนชนิดนี้จะมีลักษณะเป็นถ้วยทรงกระบอก ซึ่งสร้างมาจาก โบรอน , ไนไตรท์ , แกรไฟต์ , ออกไซด์ และ โลหะทนความร้อนสูง เป็นต้น ด้วยจะได้รับความร้อนจาก ขดลวดทั้งสแตนเลสซึ่งล้อมรอบอยู่โดยรอบถ้วย

### 2.7.1.3.5 การประมาณค่าอุณหภูมิของแหล่งกำเนิดความร้อนชนิดตัวต้านทาน (estimating the temperature of resistance heaters)

ในการออกแบบตัวกำเนิดความร้อนด้วยไฟฟ้า สำหรับระบบการระเหิดสาร การประมาณค่าอุณหภูมิของขดลวดความร้อนเป็นสิ่งสำคัญ เราได้สมมติฐานของความสัมพันธ์ระหว่าง กำลังไฟฟ้า (P) ของแหล่งจ่ายกับอุณหภูมิของขดลวด กำลังไฟฟ้า P มีค่าเป็น  $I^2 R$  หรือ  $V^2/R$  โดยที่ I, V และ R คือ กระแส, แรงดัน และ ความต้านทานไฟฟ้า ตามลำดับ สำหรับขดลวดความยาว L และพื้นที่ตัดขวางเป็น  $A_c$  กำลังไฟฟ้าสามารถเขียนอยู่ในรูป

$$P = i^2 R = i^2 \rho(0) [T/T(0)]^n L/A_c \quad (2.87)$$

สมการนี้สมมติว่าค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า  $\Delta(T)$  ของโลหะสามารถประมาณได้จาก อุณหภูมิ T ดังความสัมพันธ์  $\rho(T) = \rho(0) [T/T(0)]^n$  โดยที่  $\rho(0)$  คือ ค่าของสภาพต้านทานที่ อุณหภูมิอ้างอิง T (OK) และ n คือ ค่าคงที่โดยทั่วไปจะมีค่าเข้าใกล้ 1 หรือจะสามารถประมาณค่า อุณหภูมิจากกำลังไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไปแล้วถ้าให้ค่าของแรงเสียดทานความร้อนที่ผิว ในกรณีนี้จะขึ้นอยู่กับ กฎของสเตฟาน-โบลซ์มานน์ (Stefan - Boltzmann law) ซึ่งแสดงได้ดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_r = \epsilon \sigma A_s [T^4 - T(0)^4] \quad (2.88)$$

โดยที่ $P_r$	คือ	ค่ากำลังการแผ่รังสี (radiated power)
$\epsilon$	คือ	ค่าการปล่อยพลังงานรังสีจากผิวหน้า
$\sigma$	คือ	ค่าคงที่ของสเตฟาน = $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$
$A_s$	คือ	พื้นที่ผิวของเซลล์

โดยสมการที่ (2.87) และ (2.88) นี้เหมาะสำหรับเซลล์ความร้อนที่มีลักษณะเป็นแผ่นตรงมากกว่าแบบขด

### 2.7.2 การระเหยสารประกอบ (evaporation of compound)

เนื่องจากสารประกอบจะมีไอออนขนาดใหญ่กว่าโลหะ ดังนั้นเมื่อระเหิดกลายเป็นไอแล้ว ส่วนประกอบของไอจะค้ำงไปจากสารตั้งต้นที่เป็นของแข็งหรือของเหลว สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.2 เช่น สารประกอบของสารกึ่งตัวนำหมู่ II-VI ได้แก่ CdS, CdTe และ CdSe เป็นต้น เมื่อระเหิดเป็นไอจะเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวออก (dissociation) ดังนี้  $\text{MX(s)} \rightarrow \text{M(g)} + \frac{1}{2} \text{X}_2(\text{g})$  โดยที่ X(s) คือ S, Se และ Te และเมื่อเกาะลงบนผิวของรูบนรองรับแล้วจะทำการจัดรูปแบบใหม่เป็น MX(s) เหมือนเดิมเช่นเดียวกับสารตั้งต้นในตารางระเหย

ตารางที่ 2.2 แสดงปฏิกิริยาการระเหยสารประกอบ

ชนิดของปฏิกิริยา	ปฏิกิริยาเคมี	ตัวอย่าง
การระเหยโดยไม่มีการแตกตัว	$\text{MX (s หรือ l)} \rightarrow \text{MX (g)}$	SiO, GeO, SnO, AlN, CaF <sub>2</sub> , MgF <sub>2</sub>
การแยกส่วนประกอบ	$\text{MX(s)} \rightarrow \text{M(s)} + \frac{1}{2} \text{X}_2(\text{g})$	Ag <sub>2</sub> S, Ag <sub>2</sub> Se
	$\text{MX(s)} \rightarrow \text{M(l)} + \frac{1}{n} \text{X}_2(\text{g})$	สารกึ่งตัวนำกลุ่ม 3, 5
การระเหยโดยการแตกตัว ก. ซาล์โคจีไนต์	$\text{MX(s)} \rightarrow \text{M(s)} + \frac{1}{2} \text{X}_2(\text{g})$ X = S, Se, Te	CdS, CdSe, CdTe
ข. ออกไซด์	$\text{MO}_2(\text{s}) \rightarrow \text{MO(s)} + \frac{1}{2} \text{O}_2(\text{g})$	SiO <sub>2</sub> , GeO <sub>2</sub> , TiO <sub>2</sub> , SnO <sub>2</sub> , ZrO <sub>2</sub>

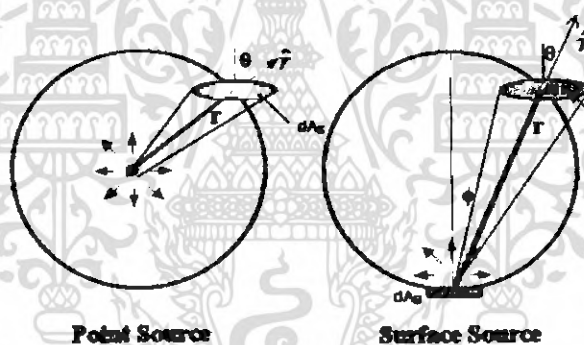
M = โลหะ, X = อโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.3 อิทธิพลของโครงสร้างและทิศทางของระบบการระเหยที่ล้มด้วยวิธีการระเหย (deposition geometry)

การเตรียมฟิล์มบางนั้นจะต้องพิจารณาประเภทของแหล่งกำเนิดสารที่ใช้ในการระเหย รวมถึงฐานรองที่อะตอมของสารจะมาตกกระทบบ้าง สมมติว่าการระเหยสารเกิดขึ้นในระบบการไหลของโมเลกุล พิจารณาการระเหยสารจากแหล่งกำเนิดแบบจุด (point source) มวลรวมของสารจากการระเหย (total evaporation mass,  $M_e$ ) สามารถวัดได้จากน้ำหนักของสารก่อนและหลังระเหย แต่เมื่อพิจารณาแหล่งกำเนิดจากพื้นผิว (surface source) มวลรวมของสารจากการระเหยจะหาได้จาก

$$\overline{M}_e = \int_0^t \int_{A_e} \frac{M}{N_A} \Phi_e dA_e dt = \int_0^t \int_{A_e} \Gamma_e dA_e dt \tag{2.89}$$



รูปที่ 2.41 แสดงรูปแบบการระเหยของสาร

โดยที่  $A_e$  คือ พื้นที่ผิวของสารที่ระเหย ปริมาณของมวล  $dM_e$  ที่ตกลงบนฐานรองเป็นพื้นที่  $dA_s$  จากรูปที่ 2.38  $\Delta dA_s$  คือ พื้นที่ผิวของทรงกลม จะได้ว่า  $dA_s = dA_e \cos \theta$  ดังนั้น จะมีค่าเป็น

$$d\overline{M}_s = dA_s \left[ \frac{\overline{M}_e \cos \theta}{4\pi r^2} \right] \tag{2.90}$$

เมื่อ  $r$  คือ ระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดถึงฐานรอง

เมื่อพิจารณาการระเหยสารจากแหล่งกำเนิดที่มีผิวเรียบ มวลตกกระทบบนพื้นที่เล็กน้อย  $dA_s$  โดยทำมุมกับพื้นผิวแหล่งกำเนิด  $\phi$  และอยู่ห่างเป็นระยะ  $r$  จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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

จากการประมาณค่าอินทิเกรตข้างต้นจะพบว่า

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

ดังนั้น

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

จาก  $dA_c = dA_s \cos \theta$  จะได้

$$\frac{d\overline{M}_s(\phi, \theta, r)}{dA_s} = \frac{\overline{M}_c \cos \phi \cos \theta}{\pi r^2} \quad (2.91)$$

และสามารถเขียนเป็นสมการทั่วไปได้ดังนี้ คือ

$$\frac{d\overline{M}_s(\phi, \theta, r)}{dA_s} = \overline{M}_c \frac{(n+1) \cos^n \phi \cos \theta}{2\pi r^2}, n \geq 0 \quad (2.92)$$

เมื่อ  $n = 1$  สมการนี้จะเป็นการกระจายของฟลักซ์แบบโคซายน์ ถ้า  $n > 1$  อธิบายได้ว่ามีทิศทางของฟลักซ์หลายทิศทาง (more forward directed) หรือถ้า  $n < 1$  จะเกิดการกระจายแบบเคียวกัน (more uniform distribution) และสำหรับ  $n=0$  การกระจายของฟลักซ์จะเหมือนแหล่งกำเนิดแบบจุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินงานวิจัย

ในการทดลองนี้เราได้ทำการทดลองเราจะทำการเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธีการออบสารละลายเคมี (CBD) บนกระจกที่เคลือบด้วยทินออกไซด์ และนำฟิล์มบาง CdS ที่เตรียมได้มาเคลือบโลหะโดยใช้วิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ โดยใช้สารตั้งต้นเป็นโลหะทองคำ (Au), อินเดียม (In) และ ทองแดง (Cu) จากนั้นนำฟิล์มที่เคลือบโลหะมาใส่ในของรอตต่อชุดคัท โดยใช้วิธีการวัดแบบ 2 ชั้นจะขึ้น และการวัดที่อุณหภูมิค่า

#### 3.1 การเตรียมแผ่นรองรับที่เป็นกระจกใส [สุจินต์และคณะ, 2546 ; งามเกียรติและคณะ, 2543 ; สุจินต์และคณะ, 2544 ; งามเกียรติและคณะ, 2545]

ในการเตรียมแผ่นรองรับที่เป็นกระจกใสที่ทำการกัดผิวกรดกัดแก้วมีขั้นตอนในการเตรียมดังนี้

1. นำแผ่นกระจกใส ไปทำความสะอาดด้วยน้ำยาล้างจาน
2. กัดแผ่นกระจกใสด้วยไตรคลอโรเอทิลีน (TCE)
3. ล้างแผ่นกระจกใสด้วยอะซิโตน
4. ล้างแผ่นกระจกใสด้วยเอทานอล
5. นำแผ่นกระจกใส ไปกัดผิวกรดกัดแก้วด้วยไฮโดรฟลูออริกเจือจางความเข้มข้น 10% เป็นเวลา 10 นาที แล้วล้างด้วยน้ำเปล่าจนสะอาด
6. กัดแผ่นกระจกใส ในน้ำปดจนประจุแล้วเสร็จอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาที จำนวน 3 ครั้ง
7. นำแผ่นกระจกใส ไปอบในเตาที่มีอุณหภูมิประมาณ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

3.2 วิธีการเตรียมฟิล์มบางคัลบูมออกไซด์โดยวิธีการแผ่นและของสารเคมีแบบอัตรารีโคโนกราฟี [กรมวิทย์และคณะ, 2543 ; Lee , 2004]

1. เตรียมสารละลายคัลบูมเข้มข้น 0.2 โมลาร์ โดยชั่งสารตั้งต้นทินไดคลอไรด์ไดไฮเดรต ( $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) 4.513 กรัม ละลายด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ปริมาตร 8 มิลลิลิตร
2. ชั่งแอมโมเนียมฟลูออไรด์ ( $\text{NH}_4\text{F}$ ) โดยใช้อัตราส่วนฟลูออรีนต่อคัลบูมต่างๆ กัน ดังตารางที่ 3.1 ละลายแอมโมเนียมฟลูออไรด์ในสารละลายจากข้อ 1
3. เติมน้ำกลอสประจุให้ได้ปริมาตรรวมเป็น 50 มิลลิลิตร
4. เติมน้ำกลอสให้ปริมาตรรวมเป็น 200 มิลลิลิตร
5. นำไปอุ่นที่อุณหภูมิ  $90^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 15 นาที
6. ให้อุณหภูมิกับฐานรองรับอยู่ที่  $400^\circ\text{C}$
7. ปรับค่าความดันของก๊าซไนโตรเจน
8. เปิดเครื่องกำเนิดคลื่นอัลตราโซนิกเป็นเวลา 20 นาที

3.3 วิธีการเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธีการอานสารละลายเคมี [สุทินชัยและคณะ, 2546 ; Schroder , 1998]

ในการเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธีการอานสารละลายเคมี ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1. ชั่งสารตั้งต้นเกลือแคดเมียมซัลเฟต [ $\text{CdSO}_4 \cdot 8/3\text{H}_2\text{O}$ ] ความเข้มข้น 0.01 โมล 0.3848 กรัม , ไทโอซิวรีน [ $\text{SC}(\text{NH}_2)_2$ ] ความเข้มข้น 0.05 โมล 0.5709 กรัม และแอมโมเนียมฟลูออไรด์ [ $\text{NH}_4\text{F}$ ] 0.0031, 0.0164, 0.0329, 0.0493, 0.0657 กรัม ตามลำดับ และเตรียมแอมโมเนียม ปริมาตร 17.0 ml ตามลำดับ
2. ละลายเกลือแคดเมียมซัลเฟตและแอมโมเนียมฟลูออไรด์ลงในน้ำกลอสประจุ 10 ml ที่อุณหภูมิห้อง
3. ละลายเกลือ ไทโอซิวรีนลงในน้ำกลอสประจุ 10 ml ที่อุณหภูมิห้อง
4. นำกระจกใสที่ตัดด้วยผงคาร์บอนไดออกไซด์ในบีกเกอร์ที่มีน้ำกลอสประจุอยู่ประมาณ 100 ml ซึ่งรออยู่ในอ่างปรับอุณหภูมิ  $50^\circ\text{C}$
5. เปิดสวิทซ์เตาให้หมุนแก๊สแก๊สออกซิเจนตลอดเวลา
6. เทสารละลายแคดเมียมซัลเฟต 10 ml ตามด้วยแอมโมเนียม, ไทโอซิวรีนและแอมโมเนียมฟลูออไรด์ ที่เตรียมไว้ลงในบีกเกอร์ตามลำดับ

7. เมื่อสารละลายเริ่มเปลี่ยนสีให้วัดค่า pH ของสารละลาย ซึ่งจะมีค่าอยู่ที่ประมาณ 11 จากนั้นรอประมาณ 1 ชั่วโมง โดยระหว่างนั้นให้ควบคุมอุณหภูมิของอ่างอาบน้ำสารละลายเคมี และควบคุมอัตราการหมุนของแท่นอีกให้มีความเร็วที่สม่ำเสมอ เมื่อเวลาผ่านไป 1 ชั่วโมงให้นำเอาออกจากบีกเกอร์จะพบว่าฟิล์มบางจะเคลือบติดอยู่บนแผ่นกระจกไฮโดร นอกจากนี้ยังมีตะกอนของแคลเซียมซิงค์ซัลไฟด์ เกาะอยู่ที่ผิวหน้าของฟิล์มบางและตกตะกอนอยู่ที่ก้นของบีกเกอร์
8. นำแผ่นกระจกที่เคลือบฟิล์มบางใส่ลงในน้ำปอลดประจุแล้วนำไปแช่ด้วย เครื่องอัลตราโซนิกประมาณ 30 นาที จากนั้นเปลี่ยนน้ำปอลดประจุ แล้วทำการแช่อีก 2 ครั้ง เพื่อขจัดตะกอนที่อยู่ผิวหน้าของฟิล์มบางออกให้หมด
9. นำฟิล์มบางที่ได้มาเคลือบอีก 7 ครั้ง ตามขั้นตอนที่ 1-9 หลังจากความแล้วมาฉายาให้แห้งด้วยไนโตรเจนบริสุทธิ์ และเก็บในถุงที่ปิดสนิทอย่างดี
10. นำฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปวัดการแผ่รังสีของรังสีเอ็กซ์
11. นำฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปวัดการส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่น 400-800 นาโนเมตร
12. นำฟิล์มบางที่เตรียมได้มาวัดผิวหน้าด้วยกล้อง SEM
13. นำฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปวัดค่าความต้านทานแผ่น

#### 3.4 ระบบการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ [สิงหาคม, 2539 ; ฐิติพันธ์และคณะ, 2544]

ในการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ สิ่งจำเป็นที่สุดก็คือระบบการระเหยสารซึ่งเป็นสุญญากาศ โครงสร้างประกอบของระบบการระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศประกอบด้วย

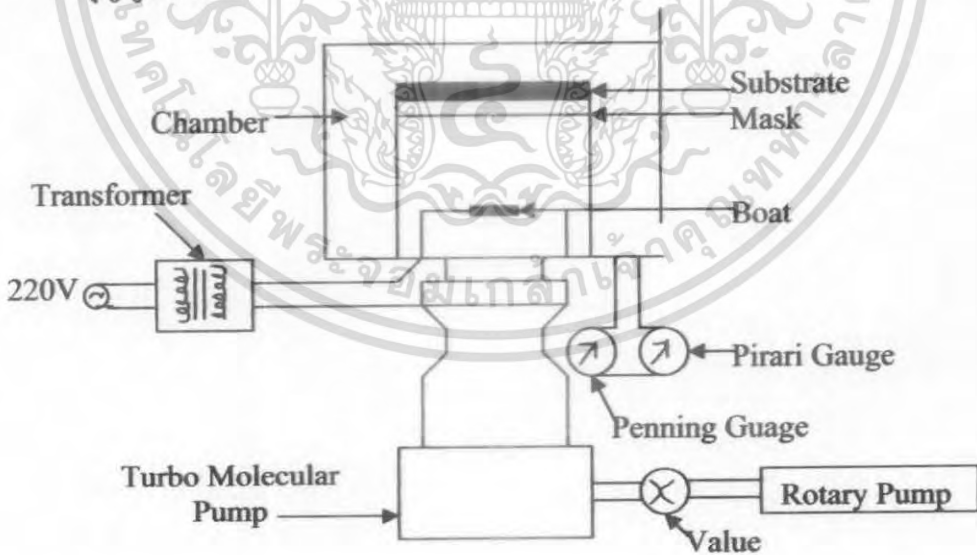
1. ภาชนะสุญญากาศ(chamber)ทำหน้าที่เป็นห้องสุญญากาศให้แก่ระบบการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ
2. ภาชนะหลอมสาร ทำหน้าที่รองรับและให้ความร้อนแก่สารที่ใช้ในการระเหย
3. ฐานรองรับกระจกไฮโดรทำหน้าที่รองรับไฮดรอกซ์ที่ระเหยขึ้นมาและคิดเป็นฟิล์มบาง
4. รัศเตอร์ ทำหน้าที่ปิดกั้นไฮดรอกซ์ของสาร
5. หม้อแปลงโวลต์ต่ำกระแสสูง ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายไฟให้แก่ภาชนะหลอมสารเพื่อใช้ในการระเหยซึ่งเป็นแบบที่ให้อาตม์ระเหยเป็นระงับต่ำ แต่จะให้กระแสสูง
6. มวรีมอค ทำหน้าที่ควบคุมกำลังไฟให้แก่หม้อแปลงโวลต์ต่ำกระแสสูง
7. เกจวัดความดัน ทำหน้าที่วัดความดันในสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. ปัมพ์กลโรตารี ทำหน้าที่ลดความดันในระบบขั้นต้น สามารถลดความดันได้ต่ำสุดประมาณ  $10^{-2}$  ถึง  $10^{-3}$  มิลลิบาร์
9. ปัมพ์เทอร์โบ ทำหน้าที่ลดความดันในสถานะ โดยทำงานร่วมกับปัมพ์กลโรตารีสามารถลดความดันได้ต่ำสุดประมาณ  $10^{-5}$  มิลลิบาร์
10. เครื่องทำความเย็นทำหน้าที่ให้ความเย็นแก่ปัมพ์เทอร์โบเพื่อระบายความร้อน



รูปที่ 3.1 ภาพถ่ายแสดงระบบการเตรียมฟิล์มบาง โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

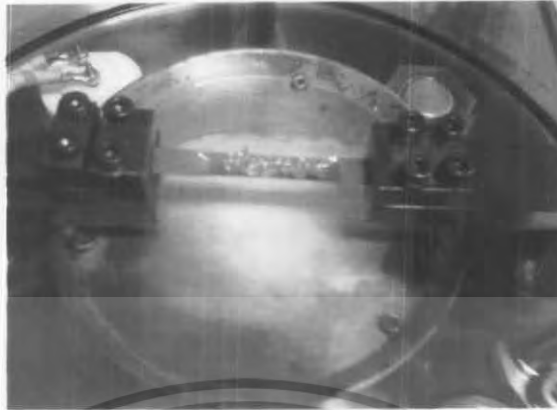


รูปที่ 3.2 แสดงแผนภาพของระบบการเตรียมฟิล์มบาง โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**3.4.1 วิธีการผลิตโลหะโดยใช้วิธีระเหิดสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ**  
**ระบบระเหิดสารด้วยความร้อนในสุญญากาศแสดงในรูปที่ 3.1 - 3.6 โดยมีขั้นตอนในการ**  
**เตรียมฟิล์มดังนี้**

1. ทำความสะอาดระบบสุญญากาศโดยการกำจัดฝุ่นและสิ่งสกปรกต่างๆและระบายไขมันด้วยอะซิโตนและเอทธานอล
2. ทำการติดตั้งระบบต่างๆภายในระบบสุญญากาศให้เสร็จสมบูรณ์
3. นำโลหะที่จะเคลือบเพื่อเป็นสารตั้งต้น ในการทำรอยต่อรอยคดกั๊ใส่ลงในภาชนะระเหิดสารซึ่งเป็นโลหะทั้งสามชนิดรูปที่ 3.3
4. นำกระจกใสที่เตรียมเอาไว้แล้ว วางบนหน้าฉากซึ่งทำมาจากแผ่นอลูมิเนียมชนิดรูปที่ 3.4 เจาะเป็นช่อง ตามแบบและขนาดที่ต้องการ หลังจากนั้นปิดฝาห้องสุญญากาศให้เรียบร้อย
5. ตรวจสอบระบบระเหิดสารว่าวาล์วจะเปิดและวาล์วปล่อยอากาศเข้าไปให้อยู่ตำแหน่งที่ปิดแล้ว
6. สับสวิทช์ไปที่ วาล์วอากาศ(ventilate) และเปิดปั๊มที่กล ไรครี รอจนความดันอยู่ในย่าน  $2 \times 10^{-2}$  มิลลิบาร์
7. เปิดปั๊มที่ทอร์โบ รอจนกระทั่งความดันอยู่ที่ประมาณ  $4 \times 10^{-3}$  มิลลิบาร์
8. เปิดสวิทช์แหล่งกำเนิดกระแสไฟให้กับภาชนะระเหิดสารตั้งต้น
9. เริ่มทำการระเหิดสาร โดยมีกระแสไฟที่เคลือบด้วย CAS เป็นแผ่นรองรับ โดยเพิ่มแรงดันอย่างช้าๆ จนกระทั่งค่ากระแสอยู่ที่ประมาณ 130 A (ประมาณ 40-50V) เมื่อได้ความหนาของฟิล์มตามต้องการแล้วให้ค่อยๆ ลดกระแสลงจนมาเป็น 0 A
10. ปิดสวิทช์แหล่งกำเนิดกระแสไฟให้กับภาชนะระเหิดสารตั้งต้น
11. ปิดปั๊มที่ทอร์โบ
12. ปิดปั๊มที่กล ไรครี
13. เปิดวาล์วปล่อยอากาศเข้าภายในห้องสุญญากาศ(chamber)
14. นำกระจกใสที่เคลือบออกมา
15. นำสไลด์ที่เคลือบแล้วไปวัดสมบัติความเป็นรอยต่อรอยคดกั๊ด้วยวิธีสองขั้วเรียงเส้นดังรูปที่ 3.7



รูป 3.3 แสดงสารตั้งต้นโลหะ Au ที่อยู่ในภาชนะระเหยสารตั้งต้นสำหรับนำมาเคลือบลงบนฟิล์มบาง CdS โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ



รูป 3.4 แสดงหน้ากระจกที่มาจากแผ่นอลูมิเนียม



รูป 3.5 แสดงการวางฟิล์มบาง CdS ที่เคลือบอยู่บนกระจกสไลด์ ลงบนหน้ากระจกที่มาจากแผ่นอลูมิเนียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูป 3.6 แสดงการจ่ายแรงดันเพื่อเอาสารตั้งต้นให้ระเหยไปเคลือบลงบนฟิล์มบาง CdS

3.5 การศึกษาสมบัติของรอยต่อชนิดกึ่งของฟิล์มบาง CdS [สุทินัยและคณะ, 2546 ; Schroder, 1998 ; Gunal, and Parlak, 1997 ]

#### 3.5.1 การศึกษาสมบัติของรอยต่อชนิดกึ่งของฟิล์มบาง CdS ที่อุณหภูมิห้อง

1. นำฟิล์มบางที่ทำการสร้างรอยต่อมาวัดค่ากระแสและความต้านทานของรอยต่อชนิดกึ่งบนฟิล์มบางที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้เครื่อง Keithley รุ่น 23 โดยใช้วิธีการวัดแบบ 2 ขั้ว เซิงเส้น ดังที่แสดงในรูปที่ 3.7
2. ปรับเพิ่มค่าแรงดันจากเครื่องจ่ายไฟด้วยแหล่งจ่ายกระแสตรงคงที่ของ Keithley รุ่น 236 และอ่านค่ากระแสที่วัดได้จากเครื่อง Keithley โดยทำการวัดทุก 0.01 V
3. บันทึกค่ากระแสและความต้านทานเพื่อใช้ในการคำนวณและวิเคราะห์ผลต่อไป

#### 3.5.2 การศึกษาสมบัติของรอยต่อชนิดกึ่งของฟิล์มบาง CdS ที่อุณหภูมิต่ำ

1. นำฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่ต้องการศึกษาสมบัติขณะทำการลดอุณหภูมิ วางลงบนหัวโคร โอสแมท นำแท่นโคร โอสแมทเลื่อนเข้าสู่ระบบสุญญากาศ ทำการอีแวค-รีฟิล (evac-refill) โดยการดูดอากาศภายในห้องแก้วควอทซ์ออกเป็นเวลาประมาณ 2 ชั่วโมง และตรวจสอบความเรียบร้อยของระบบ
2. เริ่มปรับอุณหภูมิต่ำสุดไปที่ 50 K พร้อมกับปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ต้องการวัดด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. วัดค่ากระแสและความต่างศักย์ของรอยต่อชอตต์กีบนฟิล์มบาง ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 50 K , 100 K , 150 K , 200 K และ 250 K โดยใช้เครื่องอิเล็กทรอนิกส์ของ Keithley รุ่น 236 โดยใช้วิธีการวัดแบบ 2 ขั้วเชิงเส้น โดยทำการวัดทุก 0.01 V และทำซ้ำทุก ๆ ค่าอุณหภูมิ
4. บันทึกค่ากระแสและความต่างศักย์เพื่อใช้ในการคำนวณและวิเคราะห์ผลต่อไป



รูป 3.7 แสดงการติดตั้งสารตัวอย่างเพื่อวัดสมบัติทางไฟฟ้าด้วยวิธีสองขั้วเชิงเส้น

### 3.6 ขั้นตอนการคำนวณและวิเคราะห์ผลของการทดลอง

#### 3.6.1 ศึกษาสมบัติของรอยต่อชอตต์กีของฟิล์มบาง CdS จากค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ( $n$ )

1. จากกราฟ I-V นำไปหาค่า  $J$  จากสมการหาพื้นที่ของวงกลม  $2\pi r^2$  โดย  $r$  คือรัศมี มีค่า 1 mm.
2. นำค่าพื้นที่ของวงกลมไปหารกับค่า  $I$  จะได้ค่า  $J$
3. แปลงค่า  $J$  เป็น mA หาร \* 1000
4. จากนั้นทำการคูณ  $\ln J$  เข้าไปทุกค่าของ  $J$
5. นำค่า  $\ln J$  ไปเขียนกราฟ  $\ln J$  กับ  $V$  แล้วหาความชันนำไปหาค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ( $n$ ) จาก

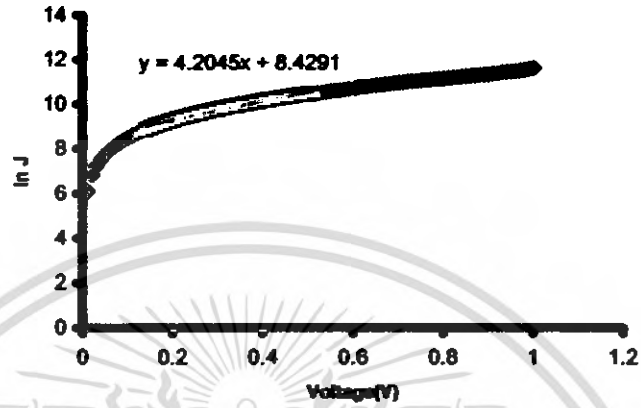
$$n = \frac{q}{kT} \left( \frac{1}{\text{slope}} \right)$$

#### 3.6.2 ศึกษาสมบัติของรอยต่อชอตต์กีของฟิล์มบาง CdS จากค่าความสูงของกั้นพหุศักย์

1. คำนวณค่า  $\ln J$  เพื่อนำไปเขียนกราฟระหว่าง  $\ln J$  กับค่าความต่างศักย์ ( $V$ ) ดังแสดงในรูปที่ 3.8
2. จากนั้นหาค่าความชันโดยใช้สมการ  $y = mx + c$  โดยค่า  $c$  ที่คำนวณได้คือค่า  $\ln J_0$
3. นำค่า  $J_0$  ที่ได้ไปคำนวณหาค่าความสูงของกั้นพหุศักย์ ( $\phi_b$ ) จากสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\phi_B = \frac{k_B T}{q} \ln \left( \frac{A^* T^2}{J_s} \right)$$



รูปที่ 3.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\ln J$  กับค่าแรงดัน (V) เพื่อหาค่า  $J_s$  เพื่อนำได้  
คำนวณหาค่าความสูงของกัมมันตรังสี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผล

#### 4.1 ลักษณะของฟิล์มบางที่เตรียมได้

##### 4.1.1 ฟิล์มบาง ทินไดออกไซด์ ( $\text{SnO}_2$ ) ที่เตรียมได้

จากการสังเกตการเตรียมฟิล์มบางทินไดออกไซด์ ( $\text{SnO}_2$ ) ที่เตรียมโดยวิธีการการพ่นละอองสารเคมีด้วยคลื่นอัลตราโซนิคพบว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้มีลักษณะยึดเกาะกับกระจกสไลด์ได้ดี ไม่มีสีใสออกรุ้ง ๆ จะเห็นว่ามีความเรียบสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงภาพฟิล์มบาง ทิน ไดออกไซด์ ( $\text{SnO}_2$ ) ที่เตรียมได้โดยวิธีการการพ่นละอองสารเคมีด้วยคลื่นอัลตราโซนิค

##### 4.1.2 ฟิล์มบาง แคดเมียมซัลไฟด์ ( $\text{CdS}$ ) โดยการใช้วิธีการเคลือบโดยการอาบสารละลายเคมี

ฟิล์มบาง แคดเมียมซัลไฟด์ ( $\text{CdS}$ ) ที่ได้จากการเคลือบโดยการอาบสารละลายเคมีโดยใช้ฟิล์มบาง ทินไดออกไซด์ ( $\text{SnO}_2$ ) ที่เตรียมได้โดยวิธีการการพ่นละอองสารเคมีด้วยอัลตราโซนิคเป็นฐานรองจากการสังเกตพบว่าฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ ( $\text{CdS}$ ) ที่เตรียมได้มีคุณสมบัติทางที่ดียึดเกาะบนฐานรองฟิล์มบางทินไดออกไซด์ ( $\text{SnO}_2$ ) ที่เตรียมโดยวิธีการพ่นละอองสารเคมีด้วยอัลตราโซนิคได้ดี มีสีเหลืองอมส้มมีความสม่ำเสมอดีเกือบทั้งแผ่นดังแสดงในรูปที่ 4.2



**รูปที่ 4.2** แสดงภาพถ่ายฟิล์มบาง แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) ที่เตรียมได้โดยใช้วิธีอบสารละลายเคมีโดยใช้ฟิล์มบางทिनไดออกไซด์ (SnO<sub>2</sub>) ที่เตรียมโดยวิธีการพ่นละอองสารเคมีด้วยอัลตราโซนิคเป็นฐานรอง

#### **4.1.3** ฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) ที่เคลือบด้วยทองแดง (Cu) และทองคำ (Au) ด้วยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

จากการสังเกตฟิล์มบาง แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) ที่ถูกเคลือบด้วยทองแดง (Cu) และทองคำ (Au) ด้วยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ เพื่อสร้างเป็นรอยต่อชนิดกึ่งพวกรอยต่อที่เตรียมได้มีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) ได้ดังรูปที่ 4.3 และ 4.4



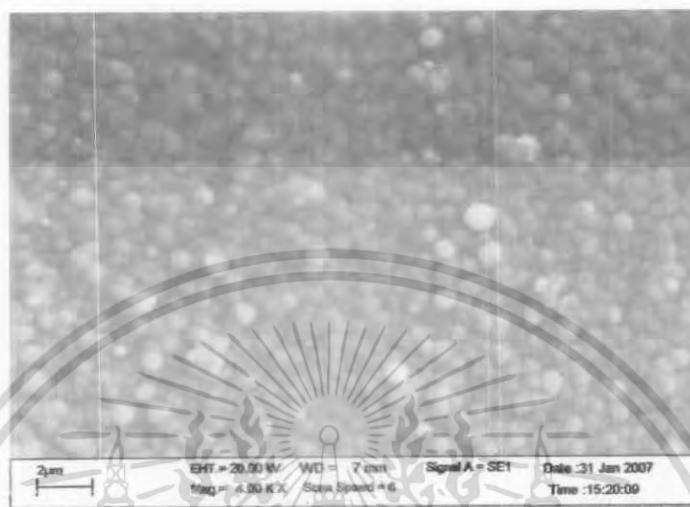
**รูปที่ 4.3** แสดงภาพถ่ายฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) ที่เคลือบโดยวิธีการอบสารละลายเคมีที่เคลือบสารทองคำ (Au) โดยใช้วิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเพื่อทำเป็นรอยต่อขอตัก

**รูปที่ 4.4** แสดงภาพถ่ายฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) ที่เคลือบโดยวิธีการอบสารละลายเคมีที่เคลือบสารทองแดง (Cu) โดยใช้วิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศเพื่อทำเป็นรอยต่อขอตัก

#### 4.2 ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึก

การศึกษาภาพถ่ายพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) ที่เตรียมด้วยวิธีการอบสารละลายเคมีทำให้เห็นขนาดเกรนชัดเจน โดยใช้กำลังขยายที่ 4000 เท่า จะเห็น โครงผลึกเป็นลักษณะเม็ดกลม ดังแสดงไว้ดังรูปที่ 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

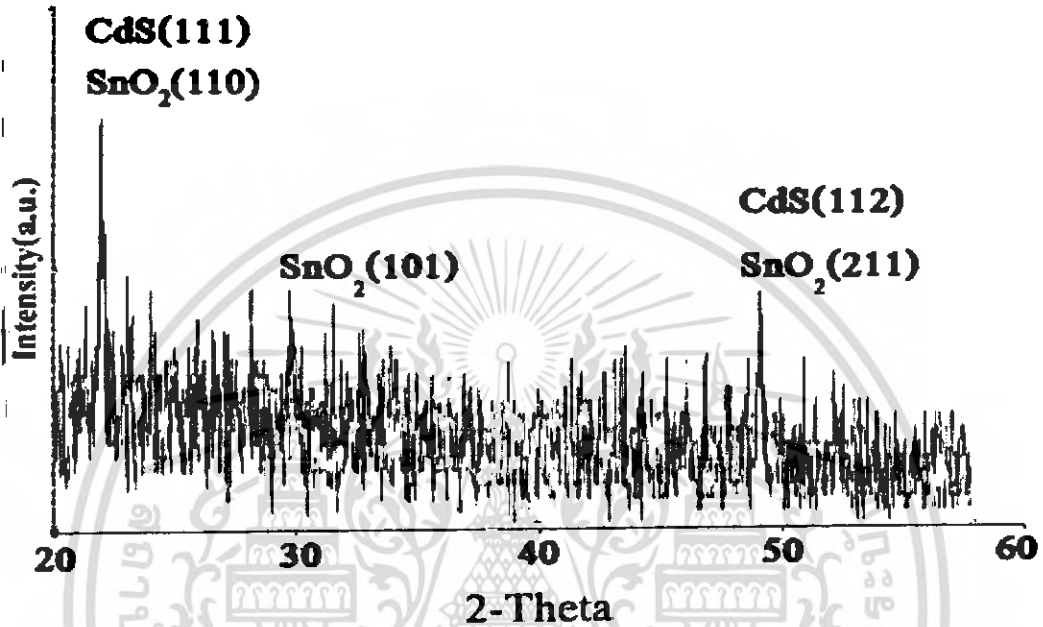


รูปที่ 4.5 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) ที่เตรียมได้โดยใช้วิธีออบสารละลายเคมีโดยใช้ฟิล์มบางทินไดออกไซด์ ( $\text{SnO}_2$ ) ที่เตรียมโดยวิธีการการท่นละอองสารเคมีด้วยคลื่นอัลตราโซนิกเป็นฐานรองโดยใช้กำลังขยายที่ 4000 เท่า

#### 4.3 ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

เนื่องจากเราต้องการทราบถึงลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาควรรวมถึงพิสูจน์ว่าฟิล์มบางที่ปลูกได้นั้นเป็นสารแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) โดยได้ใช้ฟิล์มบาง ทินไดออกไซด์ ( $\text{SnO}_2$ ) เป็นฐานรองจริงหรือไม่ ดังนั้นเราจึงนำฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปทำการศึกษาลักษณะเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์กับโครงสร้างผลึก เพื่อศึกษาลักษณะของพีคที่ปรากฏและนำไปเปรียบเทียบกับพีคมาตรฐาน เพื่อพิจารณาว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้นั้น มีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบใด เมื่อพิจารณา ดังแสดงในรูปที่ 4.6 เป็นรูปกราฟแสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์กับระนาบผลึกของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) โดยได้ใช้ฟิล์มบาง ทินไดออกไซด์ ( $\text{SnO}_2$ ) เป็นฐานรอง ปรากฏว่าแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) โดยได้ใช้ฟิล์มบาง ทินไดออกไซด์ ( $\text{SnO}_2$ ) เป็นฐานรอง มีความเป็นผลึกที่ค่อนข้างดีเมื่อสังเกตได้จากพีคที่มีความชัดเจน โดยโครงสร้างผลึกที่เด่นชัดที่สุด คือ CdS (111),  $\text{SnO}_2$  (110)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

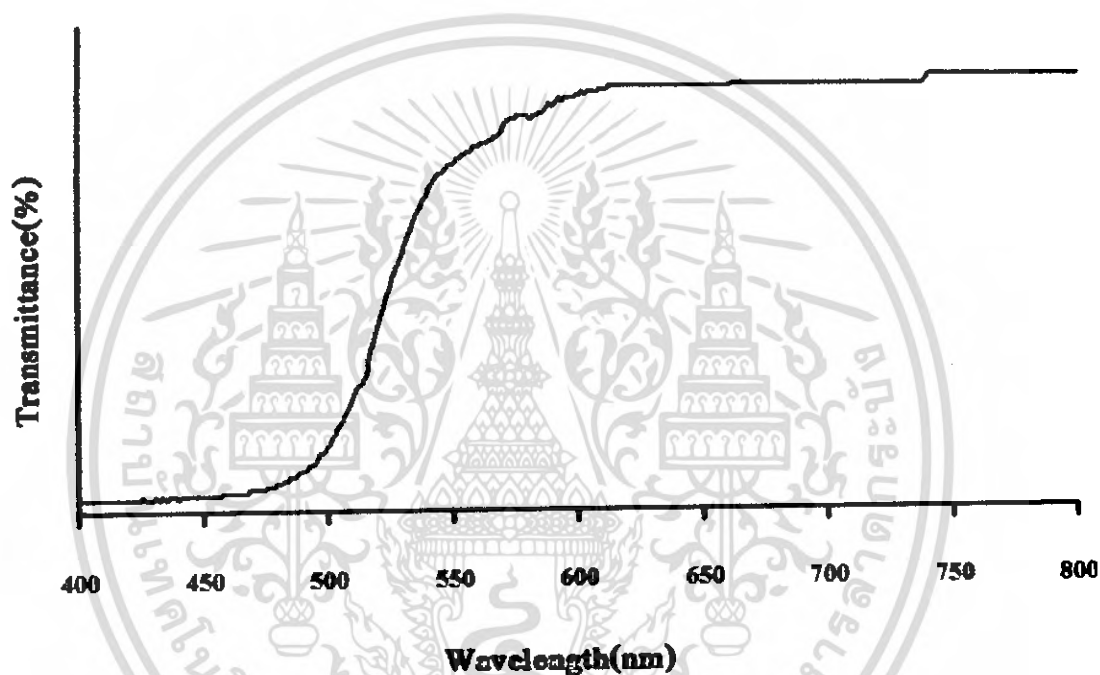


รูปที่ 4.6 แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางแคadmiumซัลไฟด์ (CdS) ที่เตรียมโดยวิธีอบสารละลายเคมีบนฐานรองที่เป็นฟิล์มบางทินไดออกไซด์ (SnO<sub>2</sub>) ที่เตรียมโดยวิธีการพ่นละอองสารเคมีด้วยคลื่นอัลตราโซนิค

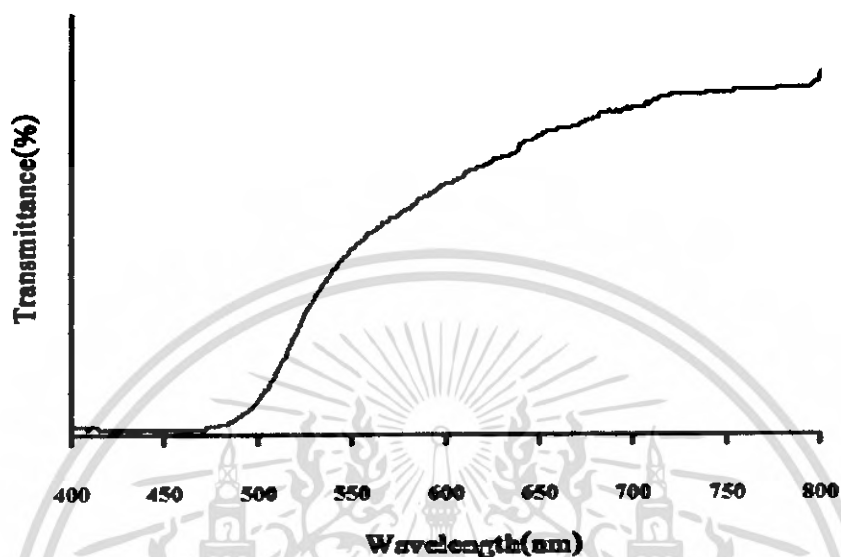
#### 4.4 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงเพื่อคำนวณค่าช่องว่างแถบพลังงาน

การศึกษาการส่งผ่านของฟิล์มบางแคadmiumซัลไฟด์ (CdS) โดยได้ใช้ฟิล์มบาง ทินไดออกไซด์ (SnO<sub>2</sub>) เป็นฐานรอง สามารถตรวจสอบด้วยวิธีสเปกโตรสโกปีแบบคั่นเบี่ยงนึ่งสเปกโตรมิเตอร์ที่ข้อจัดได้ 7800 โดยเลือกค่าความยาวคลื่นในช่วง 320-1000 นาโนเมตร ปรากฏว่าฟิล์มบางแคadmiumซัลไฟด์ (CdS) โดยได้ใช้ฟิล์มบาง ทินไดออกไซด์ (SnO<sub>2</sub>) เป็นฐานรองสามารถส่งผ่านแสงได้ในที่ความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร ซึ่งสามารถส่งผ่านแสงได้ดีในจุดที่ค่าความเข้มของการเจือ และแคadmiumซัลไฟด์ (CdS) โดยได้ใช้ฟิล์มบางทินไดออกไซด์ (SnO<sub>2</sub>) เป็นฐานรองที่ได้ทำการทดลองที่ 300 องศาเซลเซียส ปรากฏว่าสามารถส่งผ่านแสงได้ดีในความยาวคลื่น 500 นาโนเมตรเช่นกันดังแสดงในรูปที่ 4.7 และ 4.8 และจากนั้นนำไปใช้สมการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E<sub>g</sub>) โดยฟิล์มบางแคadmiumซัลไฟด์ (CdS) โดยได้ใช้

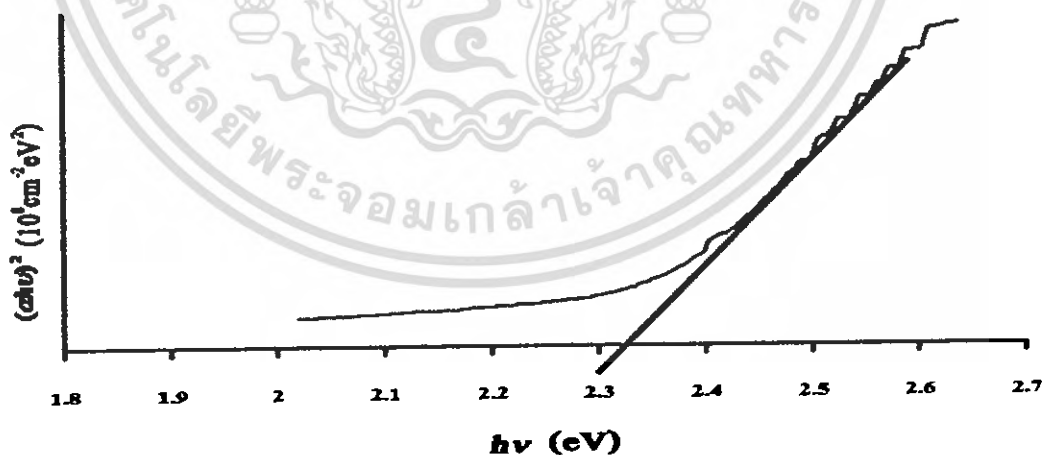
ฟิล์มบางทिनไดออกไซด์ ( $\text{SnO}_2$ ) เป็นฐานรองที่ไม่ได้แอนนิตคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงานได้ประมาณ 2.32 eV ส่วนฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) โดยได้ใช้ฟิล์มบางทिनไดออกไซด์ ( $\text{SnO}_2$ ) เป็นฐานรองที่ได้ทำการแอนนิตที่ 300 องศาเซลเซียสคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงานได้ประมาณ 2.34 eV ดังที่แสดงในรูปที่ 4.9 และ 4.10



รูปที่ 4.7 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) โดยใช้วิธีอบสารละลายเคมีโคโธฟิล์มบางทिनไดออกไซด์ ( $\text{SnO}_2$ ) ที่เตรียมโคโธวิธีการการทันตะของสารเคมีเคียวอัคราโรนิกเป็นฐานรองเมื่อไม่ได้ทำการแอนนิต

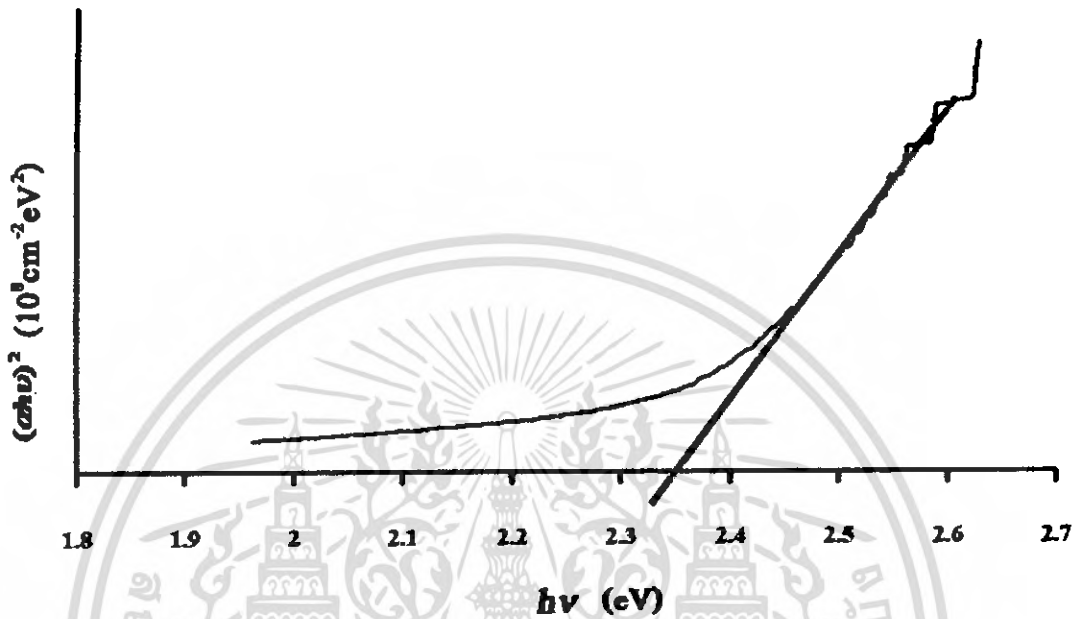


รูปที่ 4.8 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) โดยวิธีออบสการละลายเคมีโดยใช้ฟิล์มบางทินไดออกไซด์ ( $\text{SnO}_2$ ) ที่เตรียมโดยวิธีการการพ่นละอองสารเคมีด้วยคลื่นอัลตราโซนิคเป็นฐานรองเมื่อทำการแอนนิงที่อุณหภูมิ  $300^\circ\text{C}$  ในอากาศเป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ 4.9 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) ของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) โดยวิธีออบสการละลายเคมีโดยใช้ฟิล์มบางทินไดออกไซด์ ( $\text{SnO}_2$ ) ที่เตรียมโดยวิธีการการพ่นละอองสารเคมีด้วยคลื่นอัลตราโซนิคเป็นฐานรองเมื่อไม่ได้ทำการแอนนิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



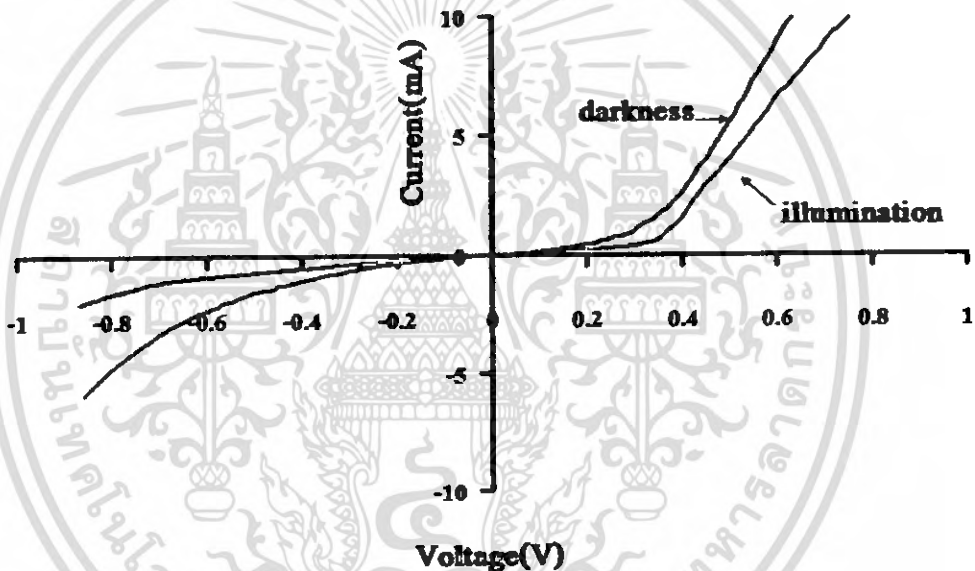
รูปที่ 4.10 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_g$ ) ของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) โดยใช้วิธีอนุกรมลาซาลงคัม โดยได้ใช้ฟิล์มบางทินไดออกไซด์ ( $\text{SnO}_2$ ) ที่เคลือบโดยวิธีการการพ่นละอองสารเคมีด้วยคลื่นอัลตราโซนิคเป็นฐานรองเมื่อทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ  $300^\circ\text{C}$  ในอากาศเป็นเวลา 30 นาที

#### 4.5 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า

จากการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าโดยเป็นการศึกษาคุณสมบัติของคัพที่ระหว่างรอยต่อของแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับทองคำ (Au) และ แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับทองแดง (Cu) โดยใช้วิธีการวัดกระแสและความต้านทาน จากนั้นนำมาเขียนกราฟเพื่อหาค่าค่าคงที่ ( $\phi$ ) ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ( $n$ ) ค่าความต้านทานอนุกรม ( $r$ ) โดยคำนวณในสถานะร้อน ใจ ปรน จานตงและ ไม่งานเสงวัดที่อุณหภูมิต่างๆกัน โดยได้นำมาเปรียบเทียบกับฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เคลือบด้วยอินเดียม ( $\text{CdS}/\text{In}$ ) ที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิต่างๆ

#### 4.5.1 การศึกษาสมบัติของรอยต่อของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับทองแดง (Cu) ในกรณีวัดที่อุณหภูมิห้อง

ทำการศึกษาสมบัติของรอยต่อของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับทองแดง (Cu) โดยได้ทำการเขียนกราฟ ระหว่างค่ากระแสและแรงดัน โดยพล ได้ทำการวัดที่ขณะฉายแสง และไม่ฉายแสง โดยเมื่อวัดขณะ ไม่ฉายแสงฟิล์มบางที่ทำกรทดลองจะมีจุดทำงานอยู่ที่ 0.27 V และเมื่อฉายแสงจะมีจุดทำงานเพิ่มขึ้นอยู่ที่ 0.33 V โดยผลการทดลองที่ได้แสดงในรูปที่ 4.11

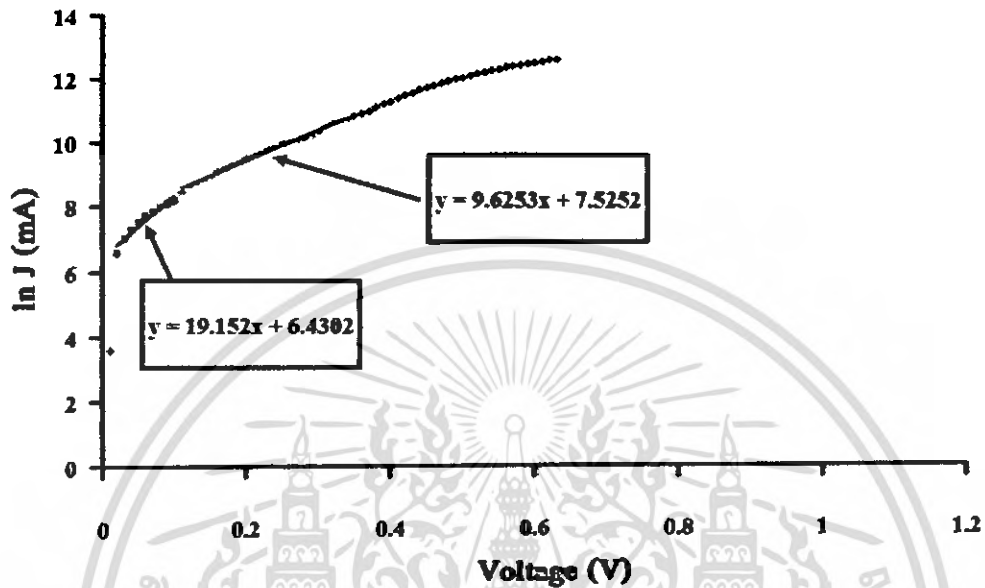


รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของรอยต่อรอยต่อของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับทองแดง (Cu)

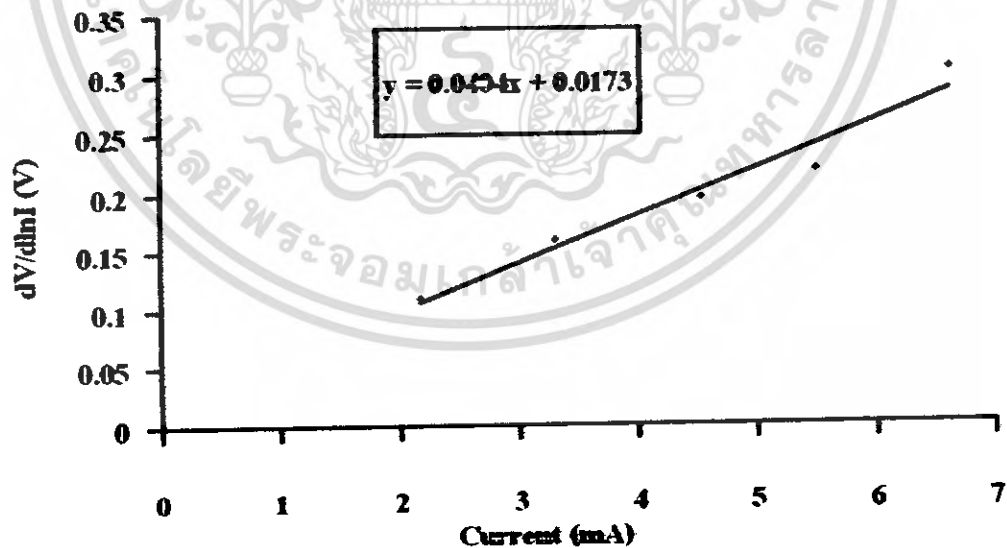
ก. ขณะไม่ฉายแสง

ข. ขณะฉายแสง

และจากการคำนวณหาค่าพื้นที่เฟอร์มิอุมคิตี ( $\eta$ ) และค่าความสูงของกั้นพลังงาน ( $\phi_b$ ) ในกรณีไม่มีการฉายแสง โดยนำค่าที่ได้ไปเขียนกราฟระหว่าง  $\eta$  กับความต่างศักย์ (V) เพื่อที่จะหาค่าพื้นที่เฟอร์มิอุมคิตี ( $\eta$ ) ดังที่แสดงในรูปที่ 4.12 จากกราฟจะหาค่าพื้นที่เฟอร์มิอุมคิตี ( $\eta$ ) และค่าความสูงของกั้นพลังงาน ( $\phi_b$ ) และนำค่า  $\frac{dV}{d(\ln I)}$  กับกระแส (I) มาเขียนกราฟดังที่แสดงในรูปที่ 4.13 ก็จะได้อ่านค่าความชันอนุกรม ( $r$ ) ที่แสดงในตารางที่ 4.1



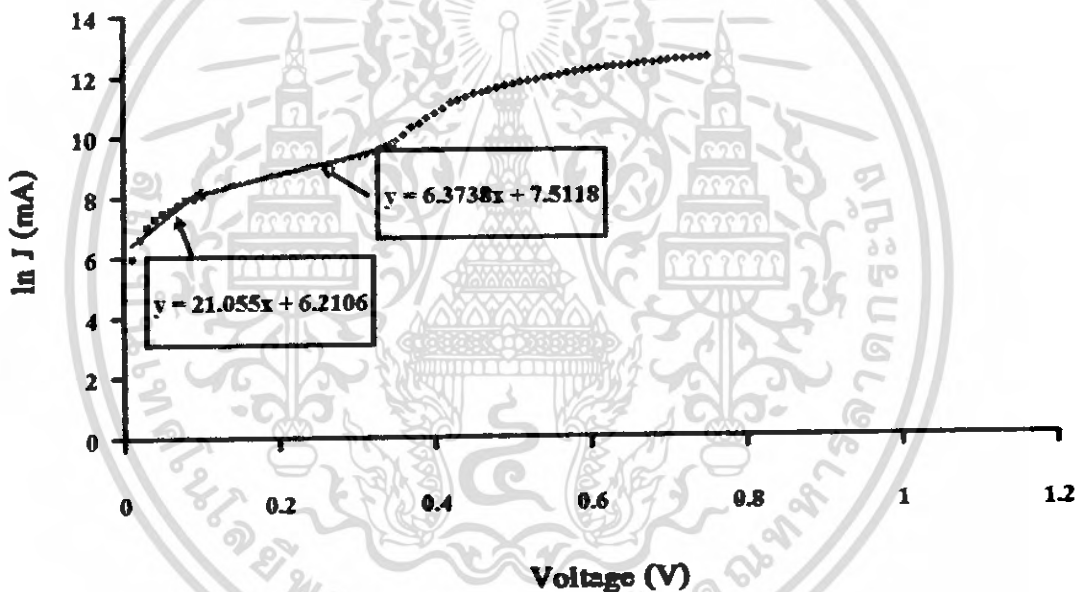
รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln J$  กับความต่างศักย์ (V) ของรอยต่อขดตึกของฟิล์มบาง แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับทองแดง (Cu) ในกรณีไม่มีการฉายแสง



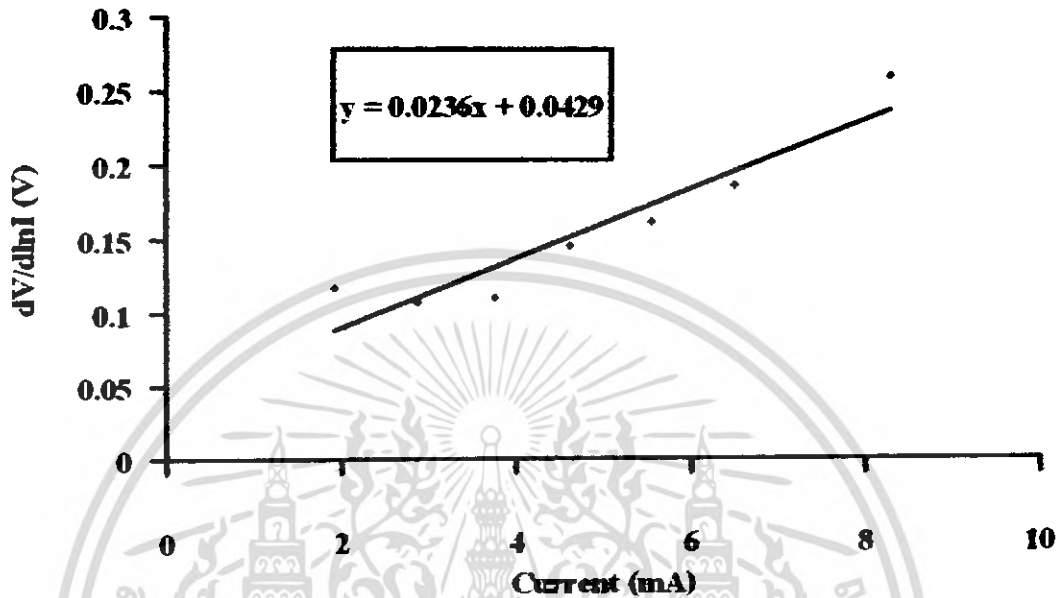
รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\frac{dV}{d(\ln I)}$  กับกระแส (I) ของรอยต่อขดตึกของฟิล์มบาง แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับทองแดง (Cu) ในกรณีไม่มีการฉายแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจากการคำนวณหาค่าแฟกเตอร์อุณหภูมิ ( $\alpha$ ) และค่าความสูงของกัมพงศักดิ์ ( $\phi_b$ ) ในกรณีมีการฉายแสง โดยนำค่าที่ได้ไปเขียนกราฟระหว่างความถี่ ( $\nu$ ) และ  $\ln J$  เพื่อที่จะหาค่าแฟกเตอร์อุณหภูมิ ( $\alpha$ ) ดังที่แสดงในรูป 4.14 จากการคำนวณหาค่าแฟกเตอร์อุณหภูมิ ( $\alpha$ ) และค่าความสูงของกัมพงศักดิ์ ( $\phi_b$ ) และนำค่า  $\frac{dV}{d(\ln I)}$  กับ กระแส ( $I$ ) มาเขียนกราฟดังที่แสดงในรูปที่ 4.15 ก็จะได้ค่าความต้านอนุกรม ( $r_s$ ) ดังที่แสดงในตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln J$  กับ ความถี่ ( $\nu$ ) ของรอยต่อชนิดพีเอ็นบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับทองแดง (Cu) ในกรณีมีการฉายแสง



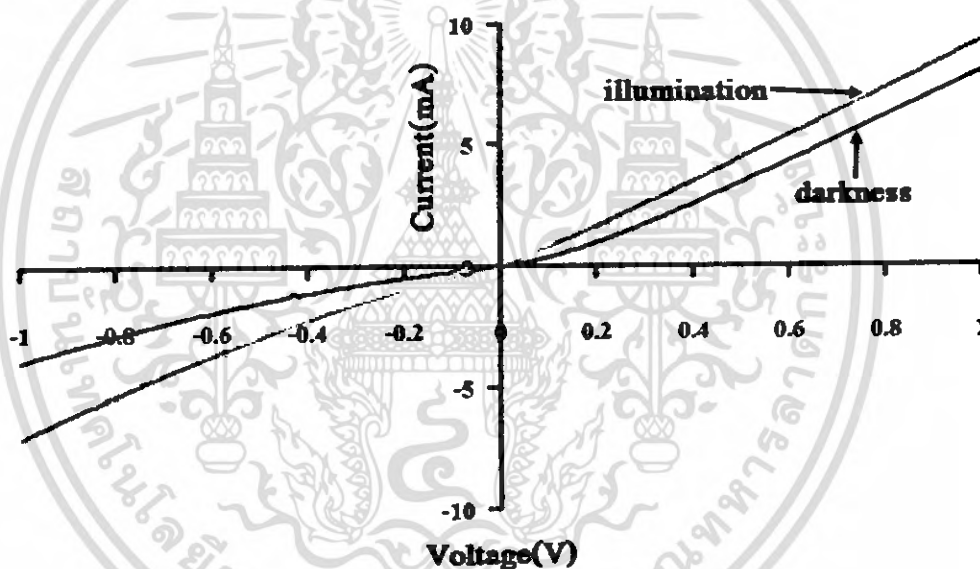
รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\frac{dV}{d(\ln I)}$  กับกระแส (I) ของรอยต่อขดคัสกีของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับทองแดง (Cu) ในกรณีที่มีการฉายแสง

ตารางที่ 4.1 แสดงถึงค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ( $n$ ) ค่าความสูงของก้ำแพงกักซ์ ( $\phi_b$ ) และค่าความต้านทานอนุกรม ( $r_s$ ) ของรอยต่อขดคัสกีของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับทองแดง (Cu) ในกรณี ไม่มีการฉายแสงและกรณีที่มีการฉายแสง

ฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับทองแดง (Cu)	ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ( $n$ )		ค่าความสูงของก้ำแพงกักซ์, $\phi_b$ (eV)	ความต้านทานอนุกรม, $r_s$ ( $\Omega$ )
	$n_1$	$n_2$		
กรณีฉายแสง	1.835	6.063	0.317	23.6
กรณีไม่ฉายแสง	2.017	4.015	0.317	40.4

#### 4.5.2 การศึกษาสมบัติของรอยต่อของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับทองคำ (Au) ในกรณีวัดที่อุณหภูมิห้อง

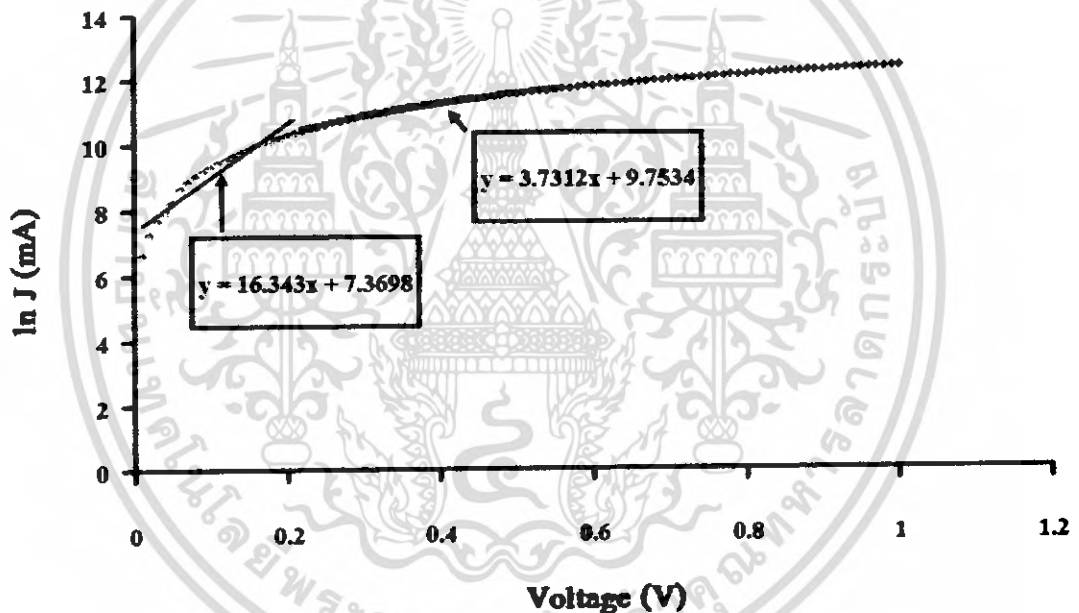
นักการศึกษาสมบัติของรอยต่อของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับทองคำ (Au) โดยได้ทำการเขียนกราฟ ระหว่างค่ากระแสและแรงดัน โดยพล็อตได้ทำการวัดที่ขณะฉายแสง และไม่ฉายแสง โดยวัดขณะ ไม่ฉายแสงที่ฟิล์มบางที่ทำการทดลองจะมีจุดทำงานอยู่ที่ 0.17 V และมีอัตราแสงจุดทำงานจะค่ามากจนไม่สามารถวัดได้. โดยผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.16



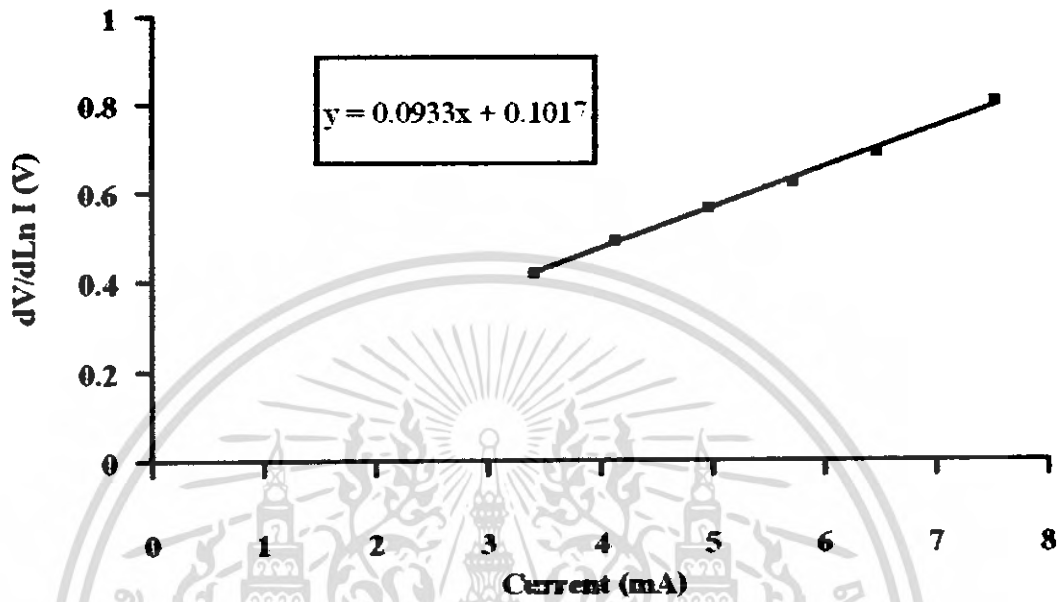
รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของรอยต่อของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับทองคำ (Au)

- ก. ขณะฉายแสง
- ข. ขณะไม่ฉายแสง

และจากการคำนวณหาค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ( $n$ ) และค่าความสูงของกัมแพงค์กีย์ ( $\phi_b$ ) ของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับทองคำ (Au) ในกรณีไม่มีการฉายแสง โดยนำค่าที่ได้ไปเขียนกราฟระหว่าง ความต่างศักย์ (V) และ  $\ln J$  เพื่อที่จะหา ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ( $n$ ) ดังที่แสดงในรูป 4.17 และจากการคำนวณเราจะได้ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ( $n$ ) และค่าความสูงของกัมแพงค์กีย์ ( $\phi_b$ ) และนำค่า  $\frac{dV}{d(\ln I)}$  กับ กระแส (I) มาเขียนกราฟดังที่แสดงในรูปที่ 4.18 ก็จะได้ค่าความต้านอนุกรม ( $r_s$ ) ดังที่แสดงในตารางที่ 4.2

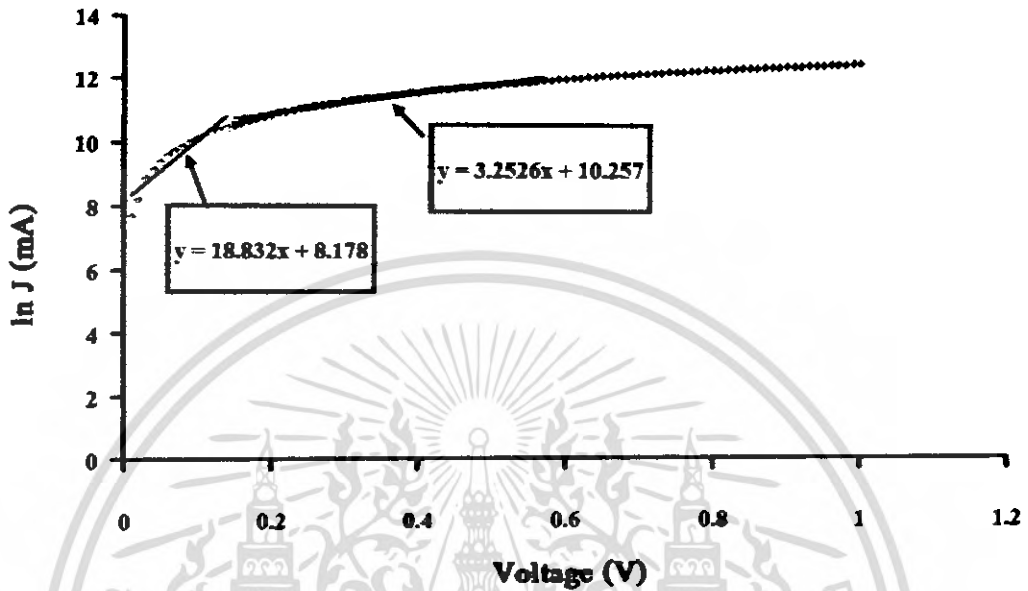


รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln J$  กับความต่างศักย์ (V) ของรอยต่อขอดีคัสต์ของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับทองคำ (Au) ในกรณีไม่มีการฉายแสง

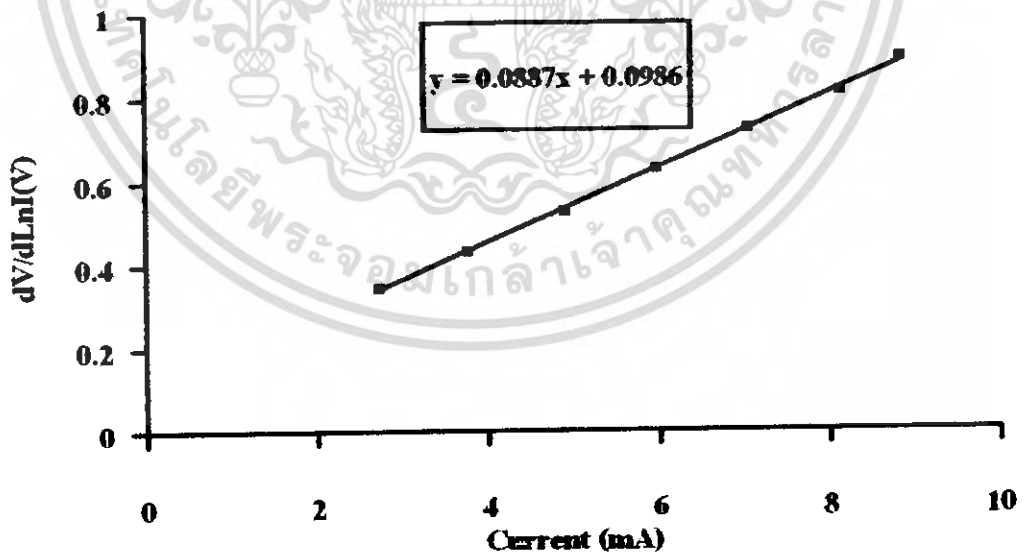


รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\frac{dV}{d(\ln I)}$  กับ กระแส (I) ของรอยต่อขดคัสกีของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับทองคำ (Au) ในกรณีที่มีการฉายแสง

จากการคำนวณหาค่าแทนแฟกเตอร์อุดมคติ ( $n$ ) และค่าความสูงของกั้นเพนดิกซ์ ( $\phi_p$ ) ของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับทองคำ (Au) ในกรณีที่มีการฉายแสง โดยนำค่าที่ได้ไปเขียนกราฟระหว่าง  $\ln J$  กับความต่างศักย์ (V) เพื่อที่จะหาค่าแทนแฟกเตอร์อุดมคติ ( $n$ ) ดังที่แสดงในรูป 4.19 และจากการคำนวณเราจะได้ค่าแทนแฟกเตอร์อุดมคติ ( $n$ ) และค่าความสูงของกั้นเพนดิกซ์ ( $\phi_p$ ) และนำค่า  $\frac{dV}{d(\ln I)}$  กับกระแส (I) มาเขียนกราฟดังที่แสดงในรูปที่ 4.20 ก็จะได้อัตราการผันแปร ( $r$ ) ดังที่แสดงในตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln J$  กับความต่างศักย์ (V) ของรอยต่อขดคดักของฟิล์มบาง แคลคิเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับทองคำ ( $Au$ ) ในกรณีมีการฉายแสง



รูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\frac{dV}{d(\ln I)}$  กับกระแส (I) ของรอยต่อขดคดักของฟิล์มบาง แคลคิเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับทองคำ ( $Au$ ) ในกรณีมีการฉายแสง

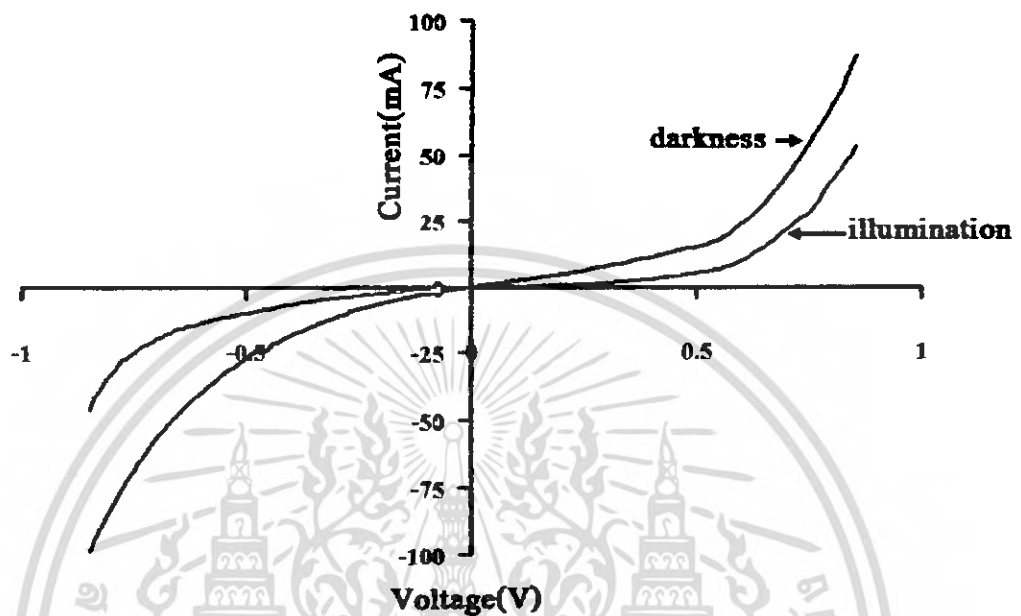
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.2** แสดงถึงค่าแฟกเตอร์อุณหคลิ ( $n$ ) ค่าความสูงของกัมแพงศักย์ ( $\phi_b$ ) และค่าความต้านทานอนุกรม ( $r_s$ ) ของรอยต่อรอยคดักของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับทองคำ (Au) ในกรณีที่มีการฉายแสงและกรณีที่มีการฉายแสง

ฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์(CdS) กับทองคำ(Au)	ค่าแฟกเตอร์อุณหคลิ ( $n$ )		ค่าความสูงของกัมแพงศักย์, $\phi_b$ (eV)	ความต้านทานอนุกรม, $r_s$ ( $\Omega$ )
	$n_1$	$n_2$		
กรณีฉายแสง	2.365	10.358	0.355	88.7
กรณีไม่ฉายแสง	2.052	11.882	0.357	93.3

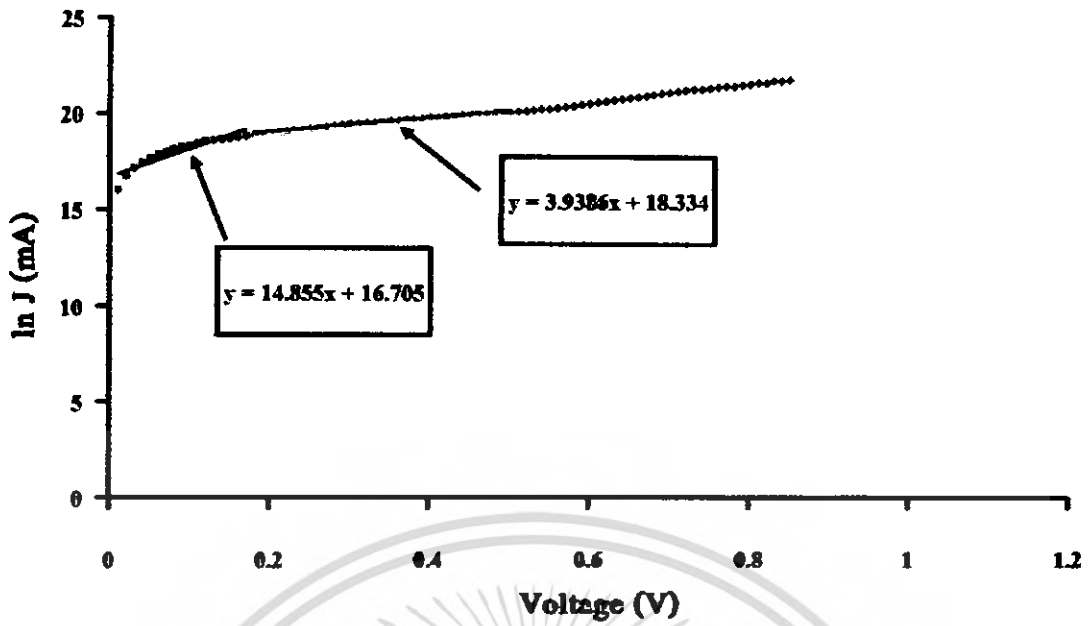
**4.5.3 การศึกษาสมบัติรอยต่อรอยคดักของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับ อินเดียม (In) ในกรณีวัดที่อุณหภูมิห้อง**

ทำการศึกษาศสมบัติรอยต่อรอยคดักของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับกับ อินเดียม (In) โดยได้ทำการเขียนกราฟ ระหว่างค่ากระแสและแรงดัน โดยพล ได้ทำการวัดที่ขั้วฉายแสง และไม่ฉายแสง โดยวัดขณะไม่ฉายแสงฟิล์มบางที่ทำการทดลองจะมีจุดทำงานอยู่ที่ 0.43 V และมีอฉายแสงจะมีจุดทำงานเพิ่มขึ้นอยู่ที่ 0.52 V โดยผลการทดลองที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.21

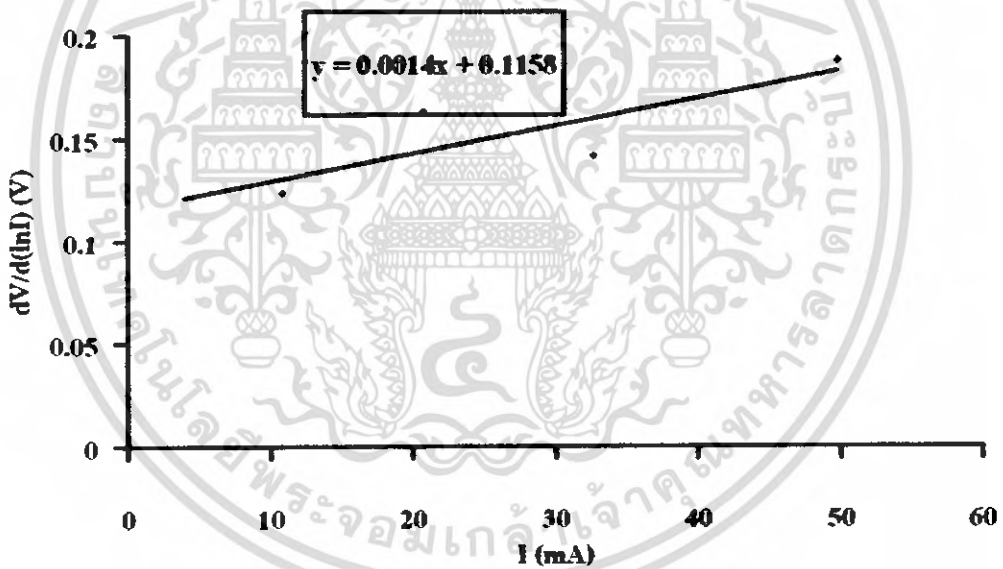


รูปที่ 4.21 แสดงสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของรอยต่อของฟิล์มบางของแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับอินเดียม (In)  
 ก. ขณะไม่เจือแสง  
 ข. ขณะเจือแสง

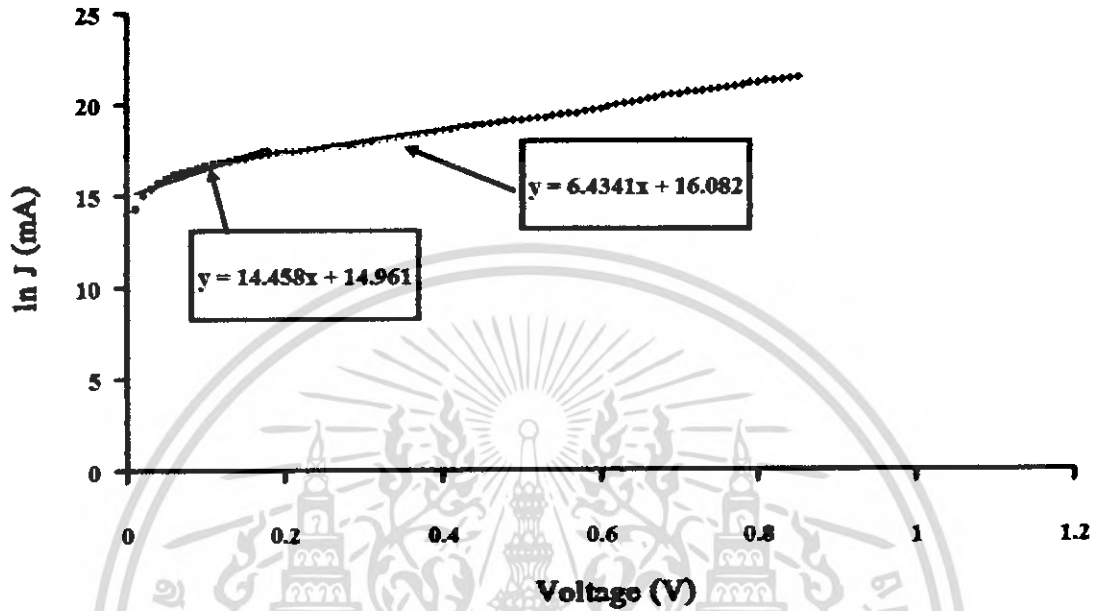
และจากการคำนวณหาค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ( $n$ ) และค่าความสูงของกั้นแพนดักซ์ ( $\phi_b$ ) ของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับอินเดียม (In) ในกรณีไม่มีกระแสแสง โดยนำค่าที่ได้ไปเขียนกราฟระหว่างความต่างศักย์ (V) และ  $\ln I$  เพื่อที่จะหาค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ( $n$ ) ดังที่แสดงในรูป 4.22 และนำค่า  $\frac{dV}{d(\ln I)}$  กับกระแส ( $I$ ) มาเขียนกราฟดังที่แสดงในรูปที่ 4.23 ก็จะได้ค่าความต้านอนุกรม ( $r_s$ ) และในกรณีมีการเจือแสงดังที่แสดงในรูปที่ 4.24 และ 4.25 โดยจากการคำนวณจะหาค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ( $n$ ) ค่าความสูงของกั้นแพนดักซ์ ( $\phi_b$ ) และ ค่าความต้านอนุกรม ( $r_s$ ) ดังที่แสดงในตารางที่ 4.3



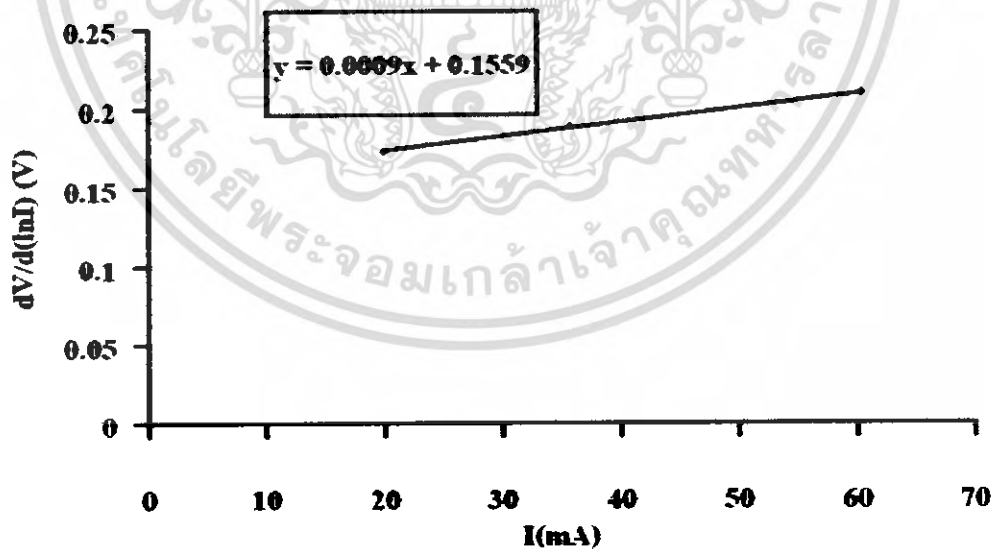
รูปที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln J$  กับความต่างศักย์ (V) ของรอยต่อขดคัสต์ของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับอินเดียม (In) ในกรณีไม่มีการฉายแสง



รูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\frac{dV}{d(\ln I)}$  และกระแส (I) ของรอยต่อขดคัสต์ของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับอินเดียม (In) ในกรณีไม่มีการฉายแสง



รูปที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln J$  และความต่างศักย์ (V) ของรอยต่อขดคัก์ของฟิล์มบาง แคลเซียมซัลไฟด์ (CdS) กับอินเดียม (In) ในกรณีมีการฉายแสง



รูปที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\frac{dV}{d(\ln I)}$  กับกระแส (I) ของรอยต่อขดคัก์ของฟิล์มบาง แคลเซียมซัลไฟด์ (CdS) กับอินเดียม (In) ในกรณีมีการฉายแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

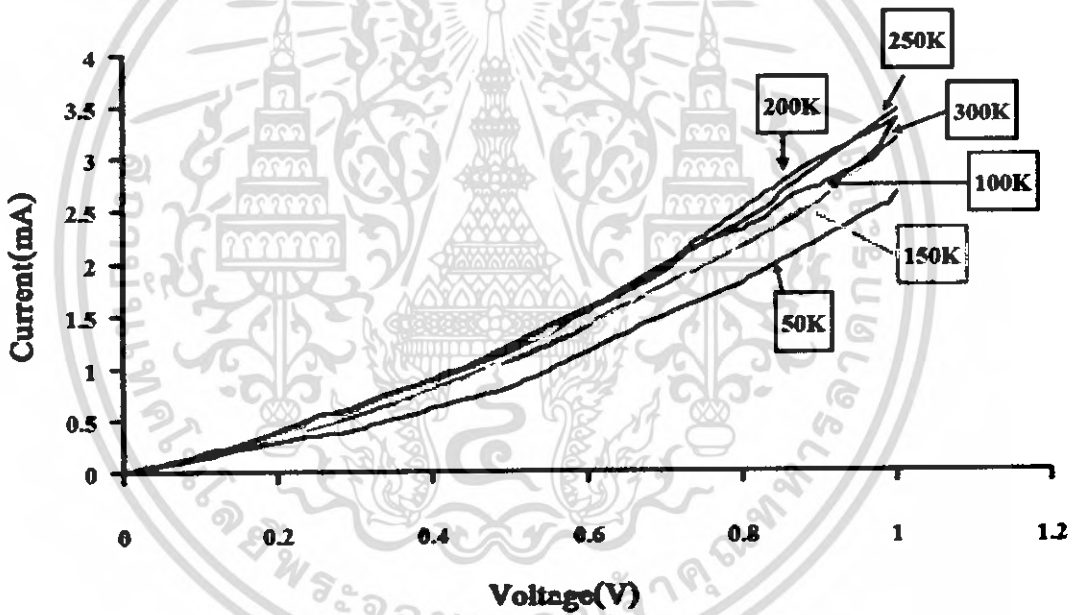
**ตารางที่ 4.3** แสดงถึงค่าแฟกเตอร์ดูดกลืน ( $n$ ) ค่าความสูงของกัมพวงทักซ์ ( $\phi_b$ ) และค่าความต้านทานอนุกรม ( $r_s$ ) ของรอยต่อรอยต่อที่ของฟิล์มบางกอมมิสชันซิลิโคน (Cds) กับอินเดียม (In) ในกรณีที่ไม่มีการฉายแสงและการฉีกการฉายแสง

ฟิล์มบางแคดเมียมซิลิโคน (Cds) กับอินเดียม (In)	ค่าแฟกเตอร์ดูดกลืน ( $n$ )		ค่าความสูงของกัมพวงทักซ์, $\phi_b$ (eV)	ความต้านทานอนุกรม, $r_s$ ( $\Omega$ )
	$n_1$	$n_2$		
กรณีฉายแสง	2.673	6.007	0.295	9.0
กรณีไม่ฉายแสง	2.602	9.812	0.293	14.0

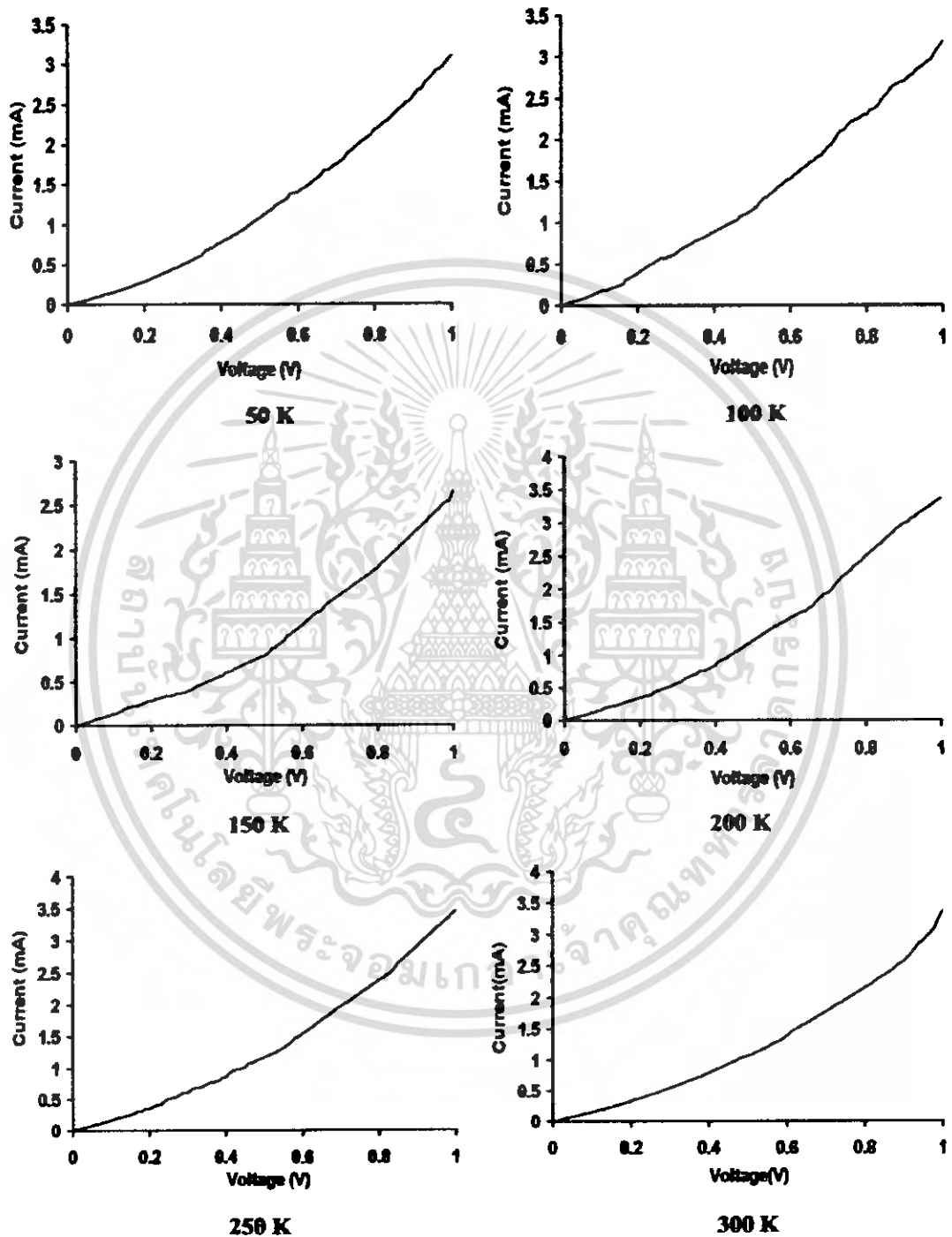
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**4.5.4 การศึกษาสมบัติของรอยต่อของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับทองแดง (Cu) ในกรณีวัดที่อุณหภูมิต่างๆ**

ทำการศึกษาสมบัติของรอยต่อของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับทองแดง (Cu) ที่อุณหภูมิต่างๆกัน โดยได้ทำการเขียนกราฟ ระหว่างกระแสและแรงดัน โดยพล็อตได้ทำการวัดกัน แล้วนำมาเขียนกราฟที่จะแสดงในรูปที่ 4.26 จะเห็นได้ว่าเมื่อได้ทำการลดอุณหภูมิของจุดกำเนิดของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับทองแดง (Cu) ก็จะมีแรงดัน และจากรูปที่ 4.26 เมื่อนำไปคำนวณหาค่าแฟกเตอร์อุดมคติ (n) ค่าความสูงของกั้นประจุ ( $\phi_b$ ) และค่าความต้านทานอนุกรม (r) ที่อุณหภูมิต่างๆ กันได้



**รูปที่ 4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของรอยต่อของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับทองแดง (Cu) ที่อุณหภูมิต่างๆ 50 – 300 K**

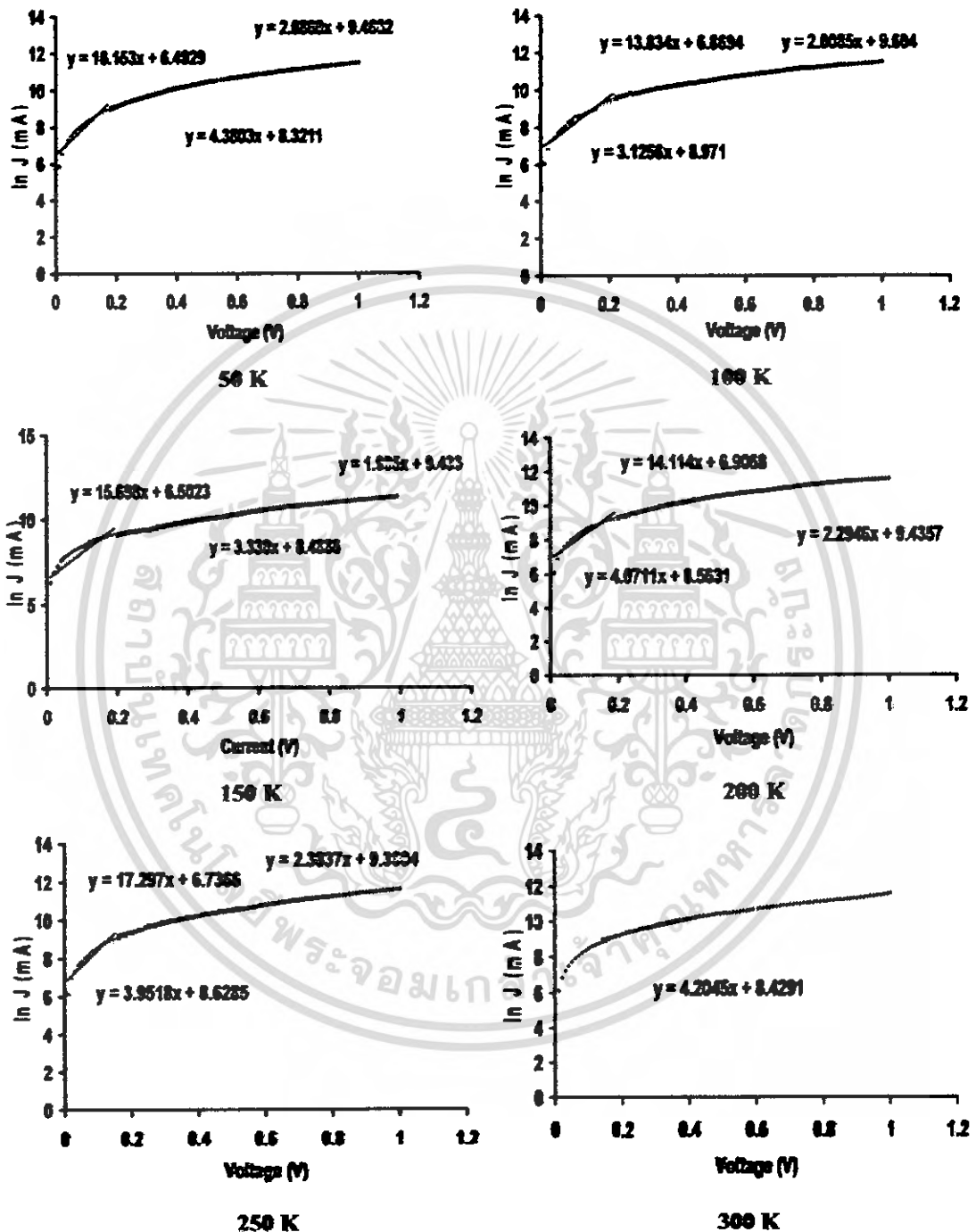


**รูปที่ 4.27** แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความเข้มของรอยต่อของฟิล์มบาง แคลเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับอุณหภูมิ (Ca) ที่อุณหภูมิ 50 – 300 K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

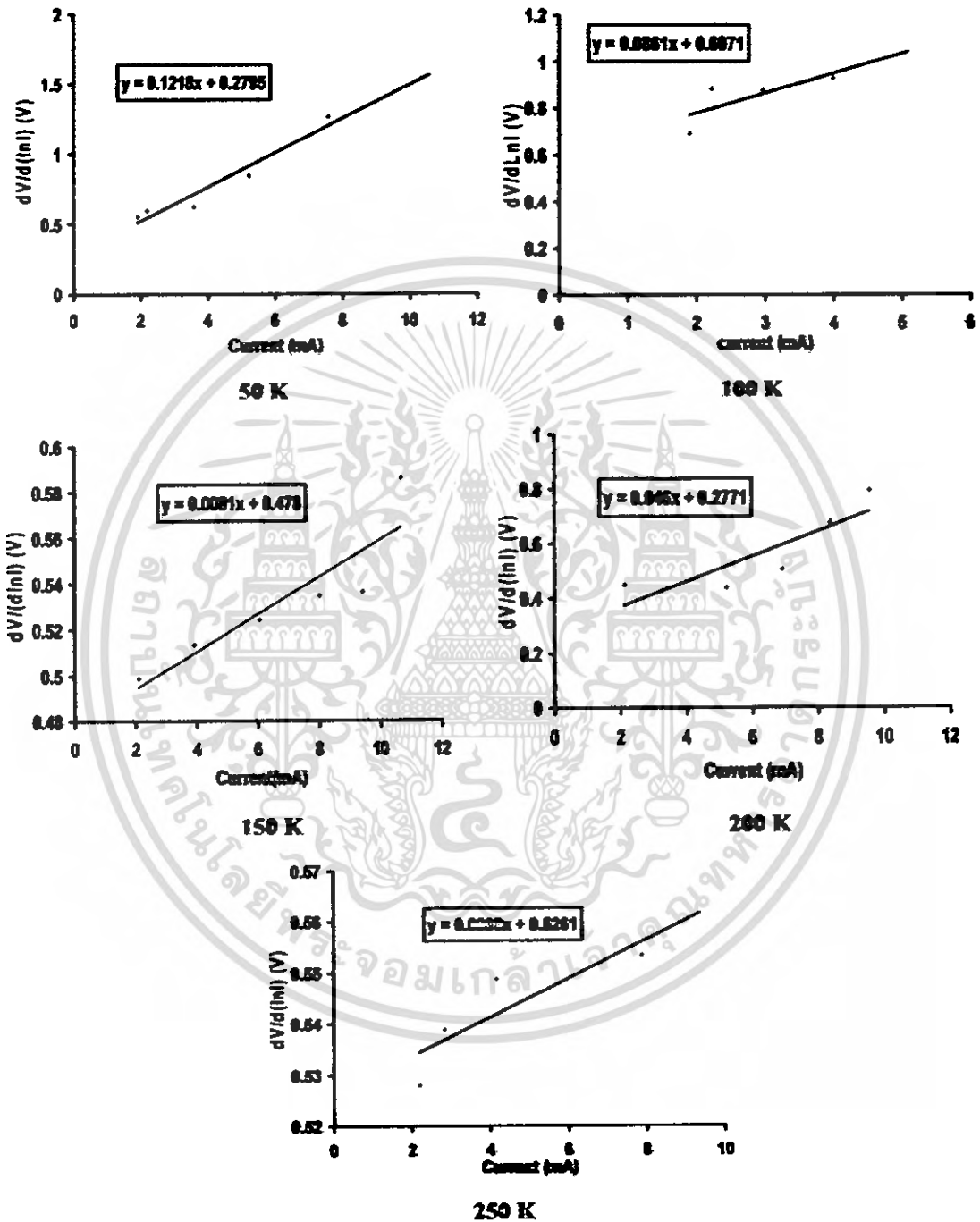
และจากการคำนวณหาค่าแฟกเตอร์อุณหภูมิ ( $n$ ) และค่าความสูงของกัมแพงศักดิ์ ( $\phi_p$ ) ของฟิล์มบางแคคเมียมซัลไฟด์ (CAS) กับทองแดง (Cu) ที่อุณหภูมิต่างๆ กัน โดยนำค่าที่ได้ไปเขียนกราฟระหว่าง ความต่างศักย์ (V) และ  $\ln I$  เพื่อที่จะหาค่าแฟกเตอร์อุณหภูมิ ( $n$ ) โดยเราสามารถหาค่าแฟกเตอร์อุณหภูมิ ( $n$ ) ได้ 3 ค่าดังที่แสดงในรูป 4.28 และ โดยจากการคำนวณเราจะได้อ่านค่าแฟกเตอร์อุณหภูมิ ( $n$ ) ทั้ง 3 ค่า ค่าความสูงของกัมแพงศักดิ์ ( $\phi_p$ ) และนำค่า  $\frac{dV}{d(\ln I)}$  กับ กระแส (I) มาเขียนกราฟดังที่แสดงในรูปที่ 4.29 ก็จะได้ค่าความต้านอนุกรม ( $r$ ) ดังที่แสดงในตารางที่ 4.4 และเขียนกราฟค่าความสัมพันธ์ระหว่างแฟกเตอร์อุณหภูมิ ( $n$ ) ทั้ง 3 ค่าและค่าอุณหภูมิ (T) ดังแสดงในรูปที่ 4.30 ถึง 4.32 และเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านอนุกรม ( $r$ ) กับค่าอุณหภูมิ (T) ดังแสดงในรูปที่ 4.33





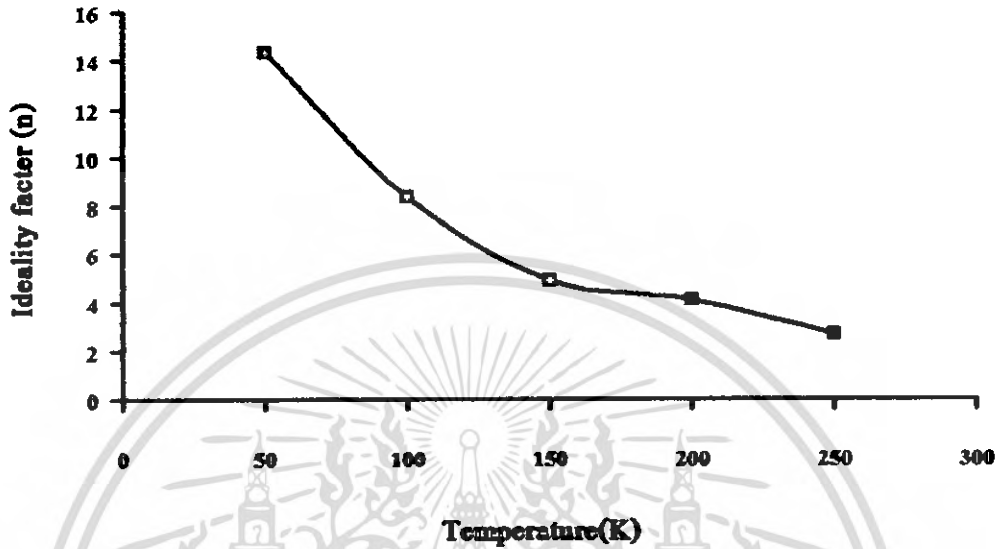
รูปที่ 4.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln J$  กับความต่างศักย์ (V) ของรอยต่อชนิดคึกของฟิล์มบาง แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับทองแดง (Cu) ในกรณีวัดที่อุณหภูมิ 50 – 300 K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

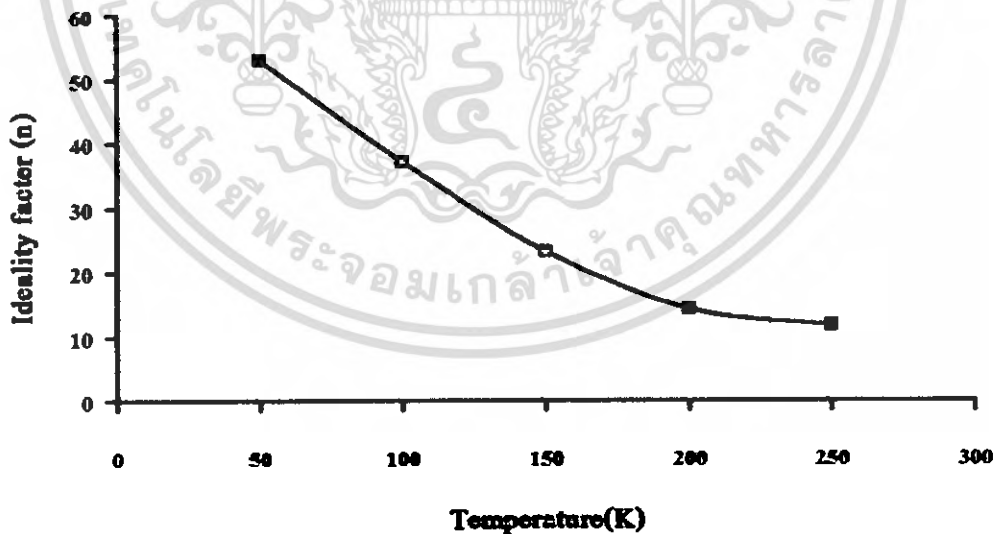


**รูปที่ 4.29** แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\frac{dV}{d(\ln I)}$  กับกระแส (I) ของรอยต่อขดคัสกีของฟิล์มบาง แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับทองแดง (Cu) ในกรณีวัดที่อุณหภูมิตั้งแต่ 50 – 250 K

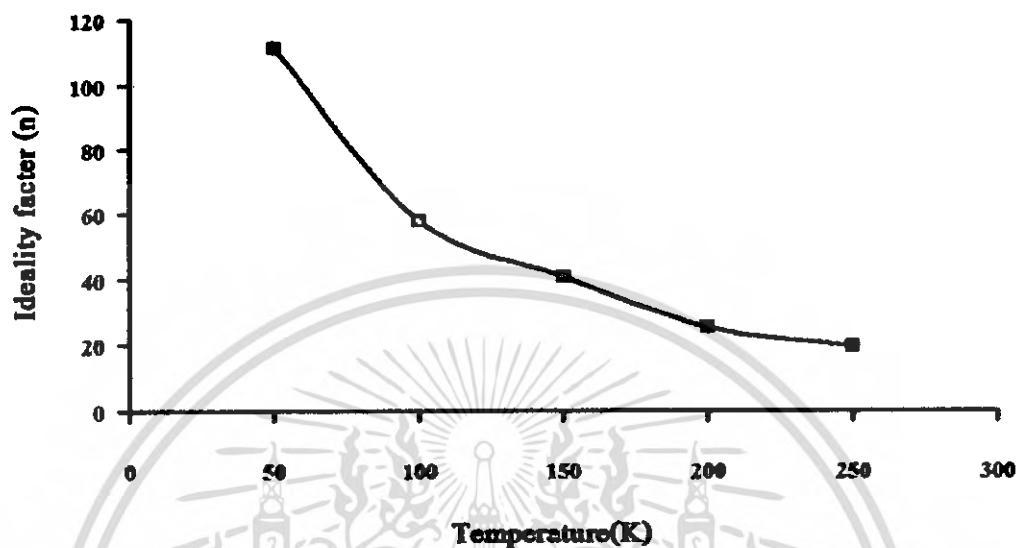
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



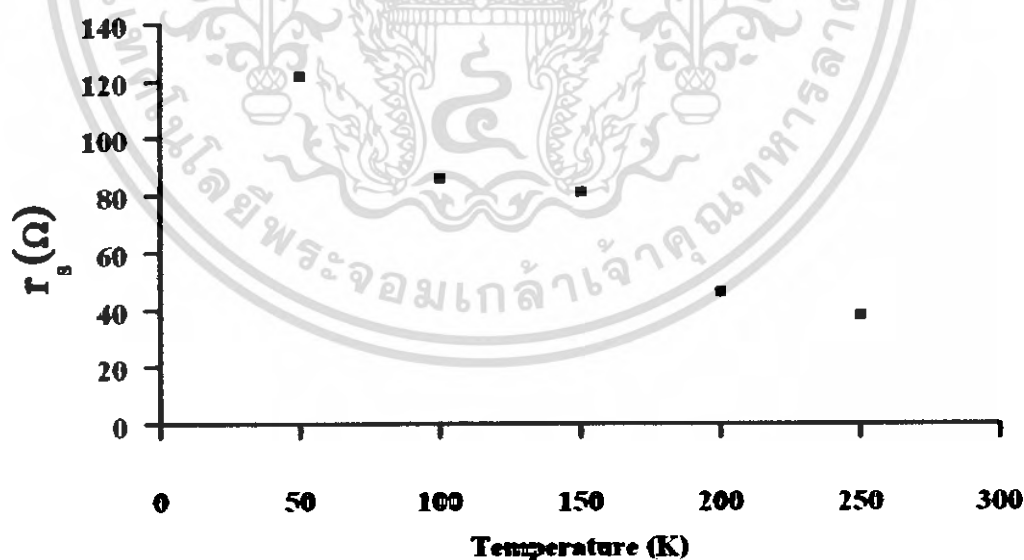
รูปที่ 4.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแฟกเตอร์อุดมคติ ( $n$ ) กับอุณหภูมิของรอยต่อฮอจคัทกีของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับทองแดง ( $Cu$ ) ในกรณีวัดที่อุณหภูมิ 50 – 250 K



รูปที่ 4.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแฟกเตอร์อุดมคติ ( $n$ ) กับอุณหภูมิของรอยต่อฮอจคัทกีของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับทองแดง ( $Cu$ ) ในกรณีวัดที่อุณหภูมิ 50 – 250 K



รูปที่ 4.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแฟกเตอร์อุดมคติ ( $n$ ) กับอุณหภูมิของรอยต่อขดคัทึกของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับเทลลูไรด์ ( $CdTe$ ) ในกรณีวัดที่อุณหภูมิ 50 – 250 K



รูปที่ 4.33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานอนุกรม ( $r_s$ ) กับอุณหภูมิของรอยต่อขดคัทึกของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับเทลลูไรด์ ( $CdTe$ ) ในกรณีวัดที่อุณหภูมิ 50 – 250 K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

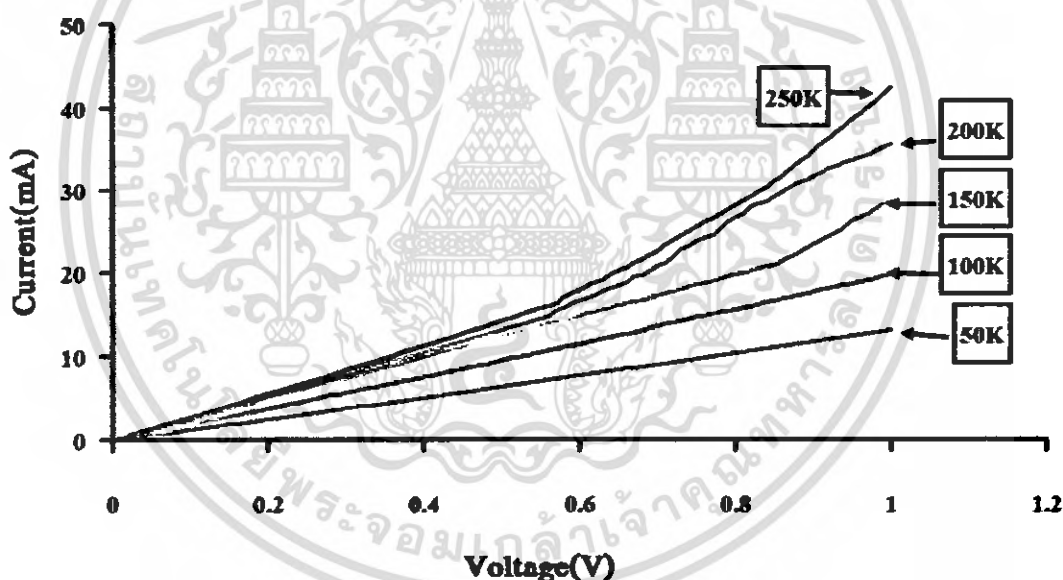
**ตารางที่ 4.4** แสดงถึงค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ( $n$ ) ค่าความสูงของกัมพงศักดิ์ ( $\phi_s$ ) และค่าความต้านทานอนุกรม ( $r_s$ ) ของรอยต่อขดลวดของเว็บบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับทองแดง (Cu) ในกรณีวัดที่อุณหภูมิต่างๆกัน

อุณหภูมิขดลวด (K)	ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ( $n$ )			ค่าความสูงของ กัมพงศักดิ์, $\phi_s$ (eV)	ความต้านทาน อนุกรม, $r_s$ ( $\Omega$ )
	$n_1$	$n_2$	$n_3$		
300	2.018	4.015	-	0.317	-
250	2.681	11.736	19.456	0.309	38.0
200	4.107	14.240	25.264	0.3098	46.0
150	4.923	23.156	40.574	0.310	81.0
100	8.381	37.094	57.726	0.309	86.1
50	14.355	52.938	111.130	0.310	121.8

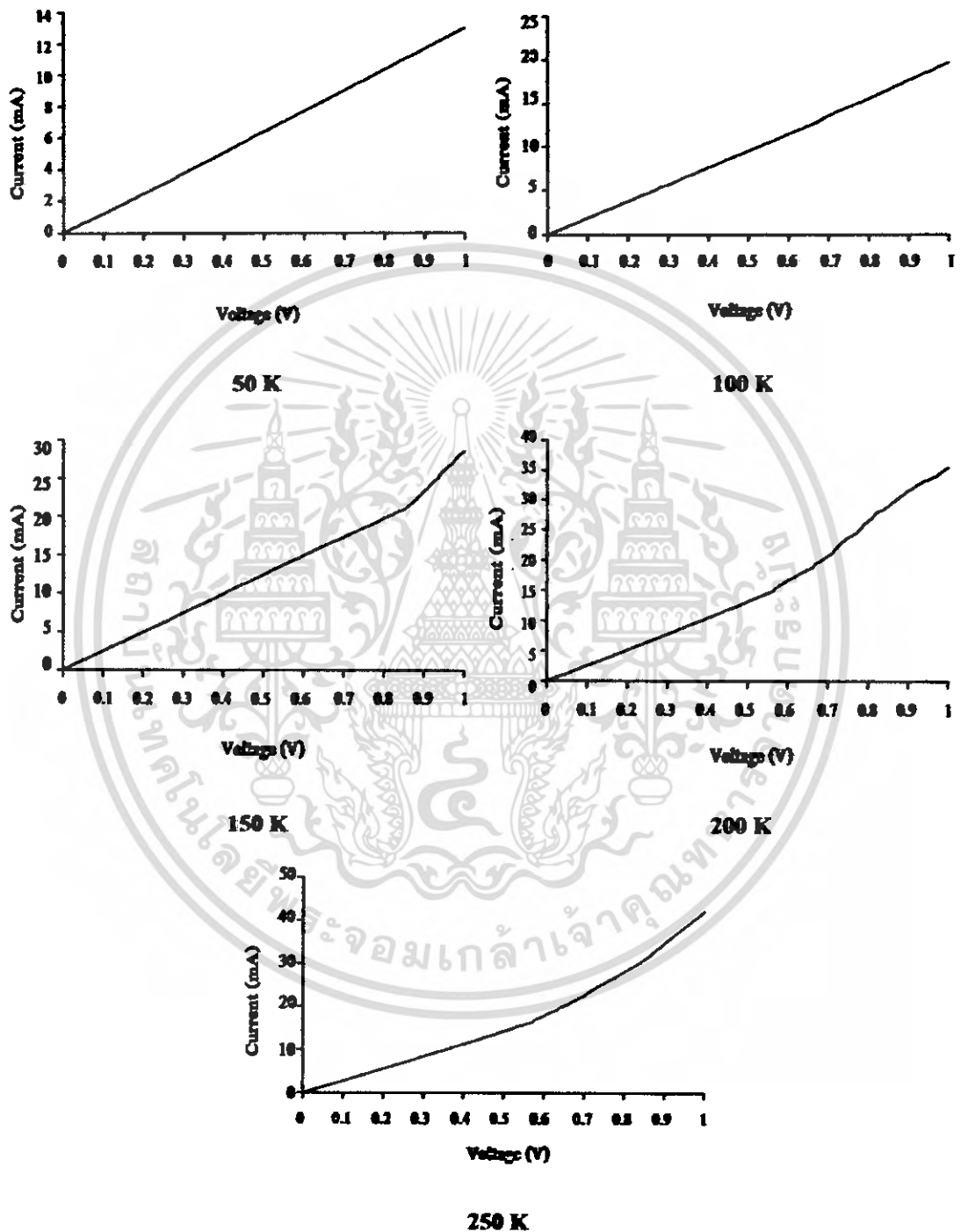
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**4.5.5 การศึกษาสมบัติของรอยต่อของวงจรรอยต่อของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับอินเดียม (In) ในกรณีวัดที่อุณหภูมิต่างๆ**

ทำการศึกษาสมบัติของรอยต่อของวงจรรอยต่อของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับอินเดียม (In) ที่อุณหภูมิต่างๆกัน โดยได้ทำการเขียนกราฟ ระหว่างค่ากระแสตรงแรงดัน โดยพล็อตได้ทำการวัดกัน แล้วนำมาพล็อตกราฟดังแสดงในรูปที่ 4.34 จะเห็นได้ว่าเมื่อได้ทำการลดอุณหภูมิลงจุดทำงานของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับอินเดียม (In) ก็จะเพิ่มขึ้นตาม และจากรูปที่ 4.34 เมื่อนำไปคำนวณหาค่าแฟกเตอร์อุดมคติ (n) ค่าความสูงของกั้นวงจรรอยต่อ ( $\phi_{bn}$ ) และค่าความต้านทานอนุกรม ( $r_s$ ) ที่อุณหภูมิต่างๆ กันได้



**รูปที่ 4.34** แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของรอยต่อของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับอินเดียม (In) ที่อุณหภูมิต่างๆ 50 – 250 K



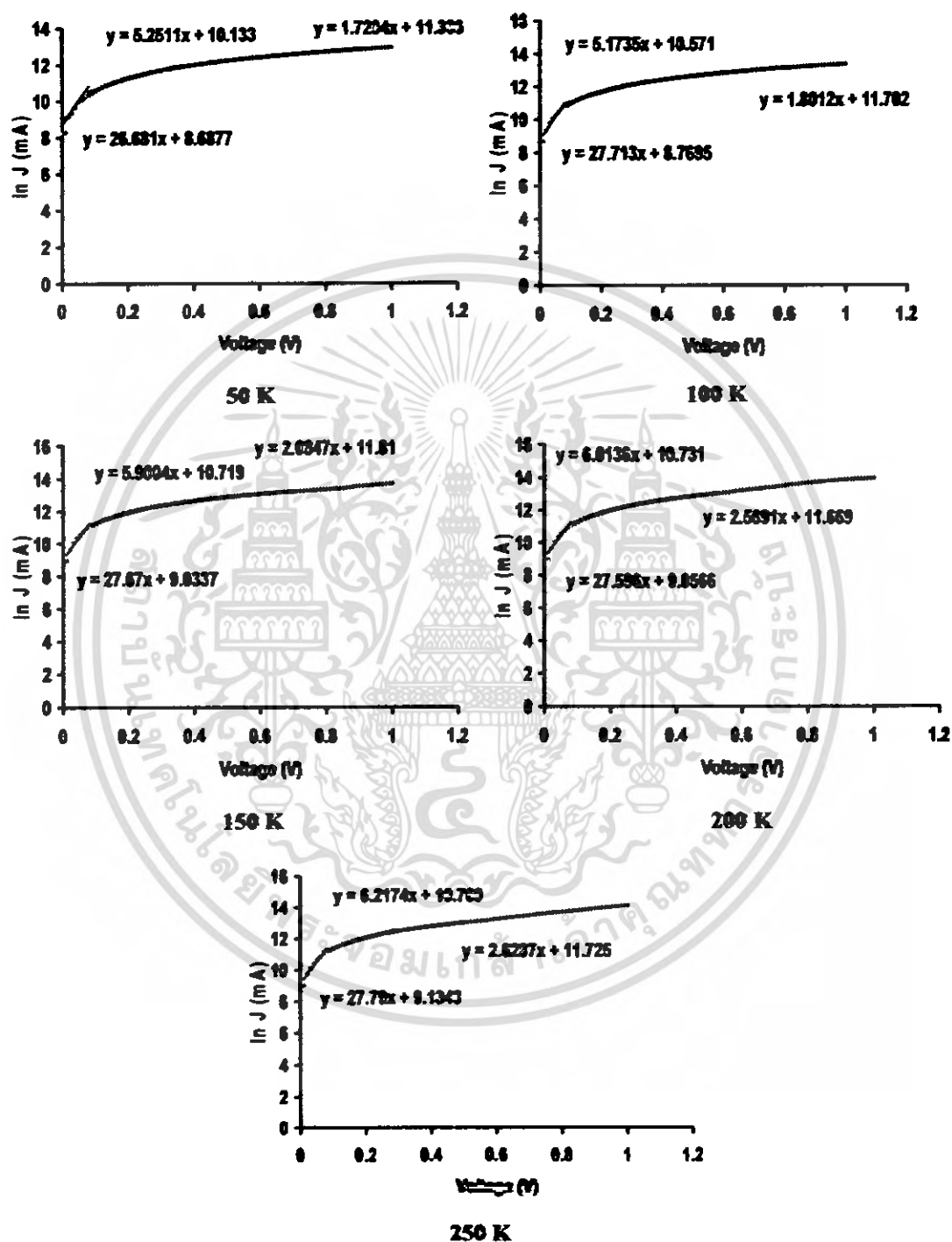
**รูปที่ 4.35** แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ของรอยต่อขดคัทกีของฟิล์มบาง แคลคิเมอซัลไฟด์ (CdS) กับอินเดียม ( $I_n$ ) ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 50 – 250 K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจากการคำนวณหาค่าแฟกเตอร์อุณหภูมิ ( $\alpha$ ) และค่าความสูงของกัมพังก์ (  $\phi_p$  ) ของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับอินเดียม ( $\text{In}$ ) ที่อุณหภูมิต่างๆกัน โดยนำค่าที่ได้ไปเขียนกราฟระหว่าง  $\ln J$  กับความต่างศักย์ ( $V$ ) เพื่อที่จะหาค่าแฟกเตอร์อุณหภูมิ ( $\alpha$ ) ได้ 3 ค่าดังที่แสดงในรูป 4.36 และจากการคำนวณเราจะหาค่าแฟกเตอร์อุณหภูมิ ( $\alpha$ ) ทั้ง 3 ค่ากับค่าความสูงของกัมพังก์ ( $\phi_p$ ) และนำค่า  $\frac{dV}{d(\ln I)}$  กับกระแส ( $I$ ) มาเขียนกราฟดังที่แสดงในรูปที่ 4.37 ก็จะได้ค่าความต้านอนุกรม ( $r$ ) ดังที่แสดงในตารางที่ 4.5 และเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแฟกเตอร์อุณหภูมิ ( $\alpha$ ) กับอุณหภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 4.38 ถึง 4.40 และเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านอนุกรม ( $r$ ) กับอุณหภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 4.41

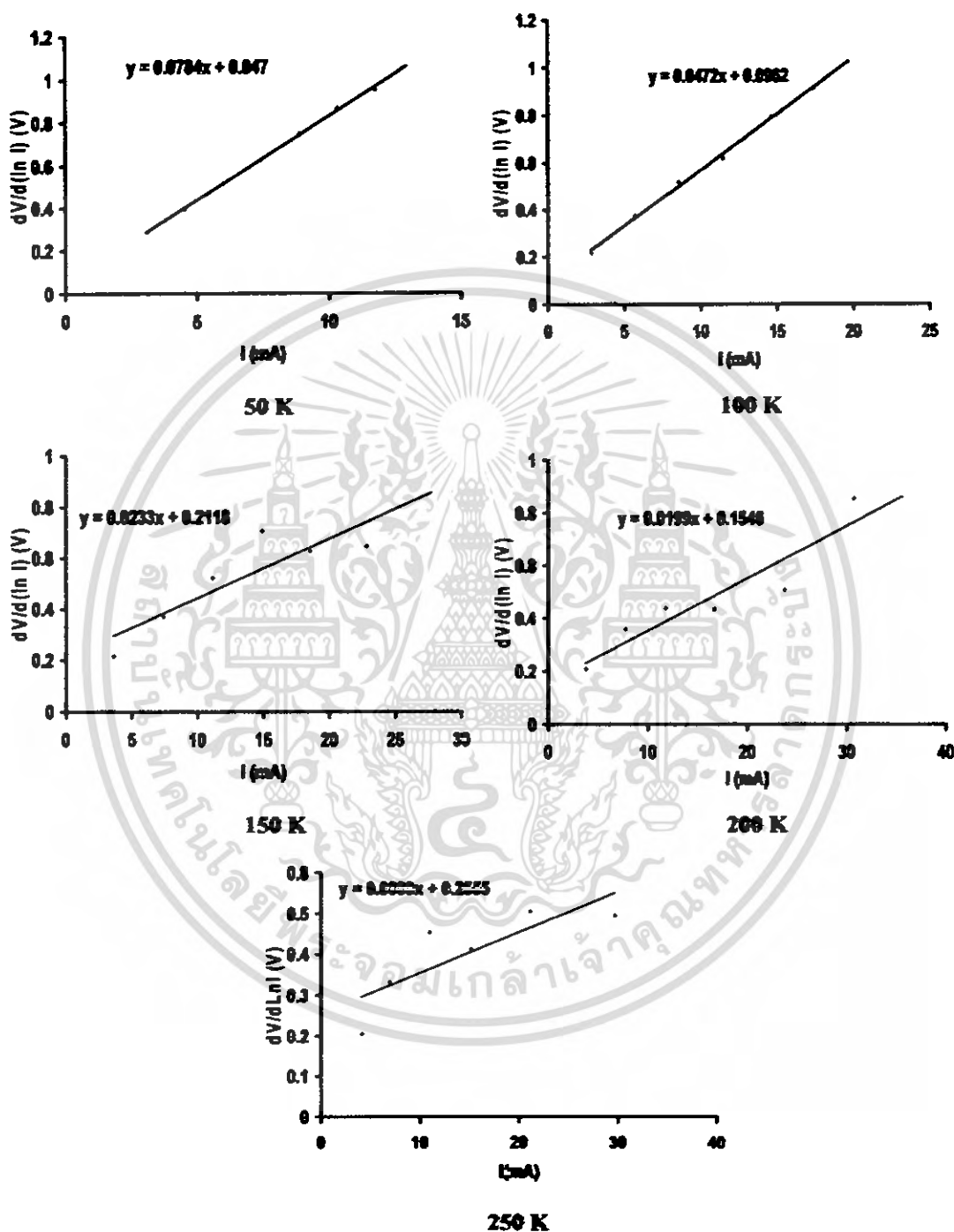


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln J$  กับ ความต่างศักย์ (V) ของรอยต่อชนิดคัสของฟิล์มบาง แกลกนีสซัลไฟด์ (CdS) กับอินเดียม ( $\ln$ ) ในกรณีวัดที่อุณหภูมิ 50 – 250K

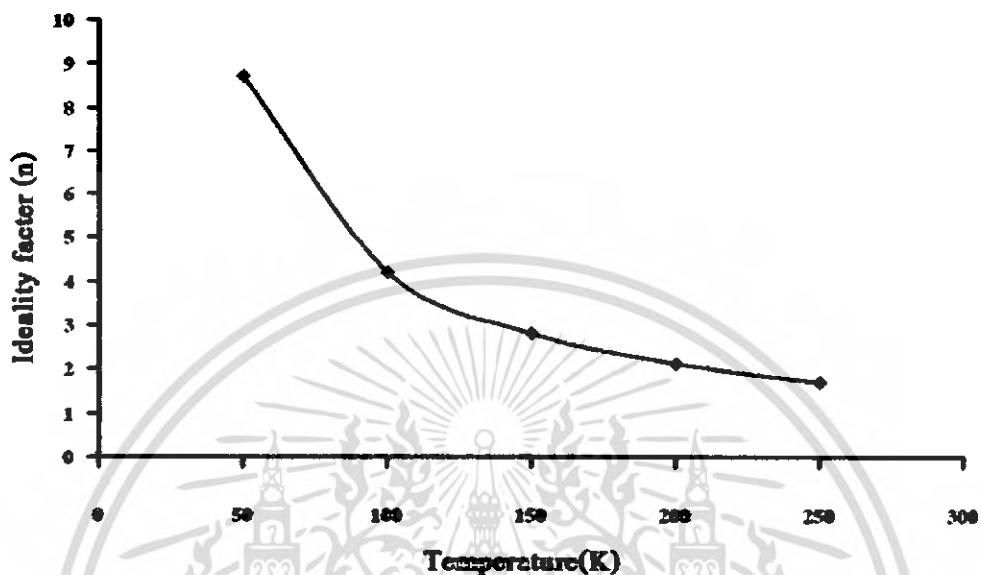
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



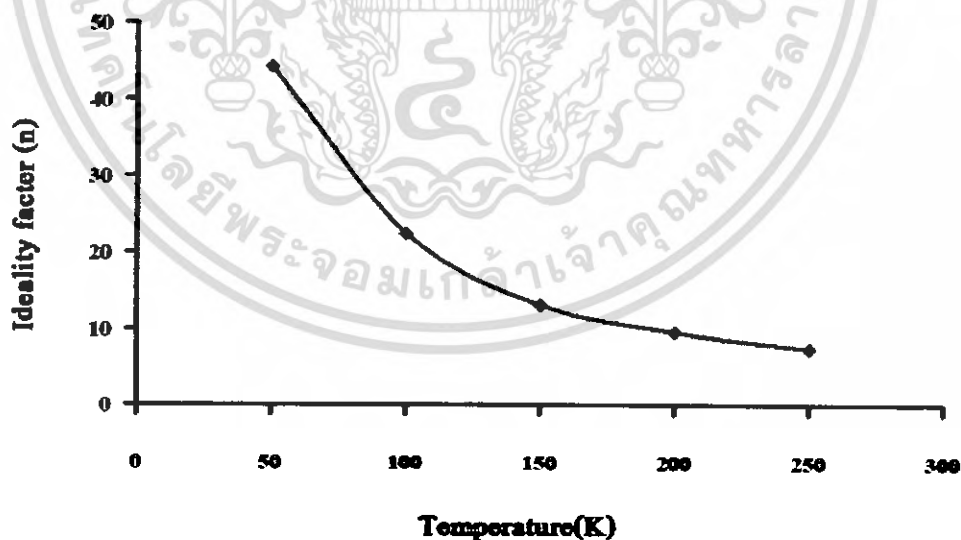
รูปที่ 4.37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\frac{dV}{d(\ln I)}$  กับกระแส ( $I$ ) ของรอยต่อขดคัทึกของฟิล์มบาง

แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับอินเดียม (In) ในกรณีวัดที่อุณหภูมิ 50 – 250 K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

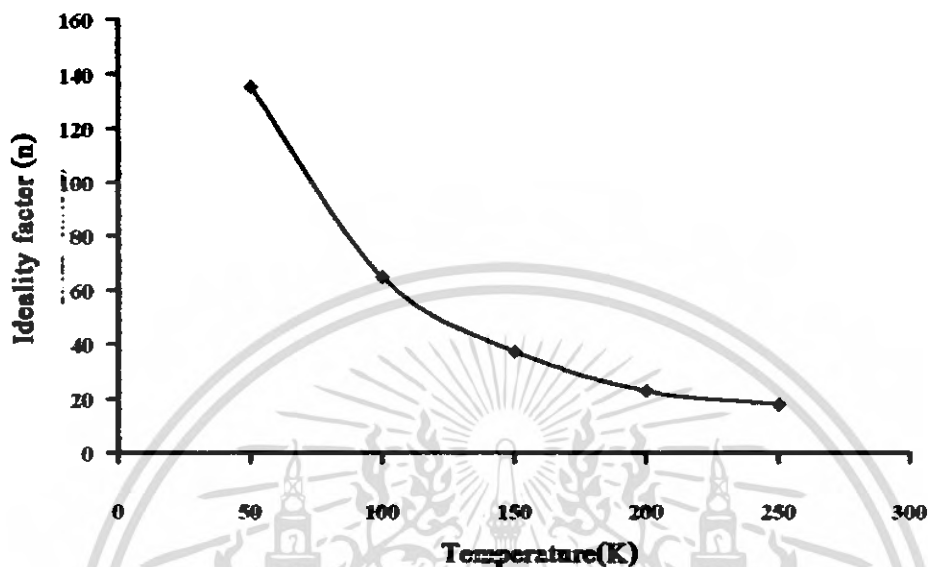


รูปที่ 4.38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแฟกเตอร์อุดมคติ ( $n$ ) กับอุณหภูมิของรอยต่ออานอค์ทีของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับอินเดียม ( $In$ ) ในกรณีวัดที่อุณหภูมิ 50–250 K

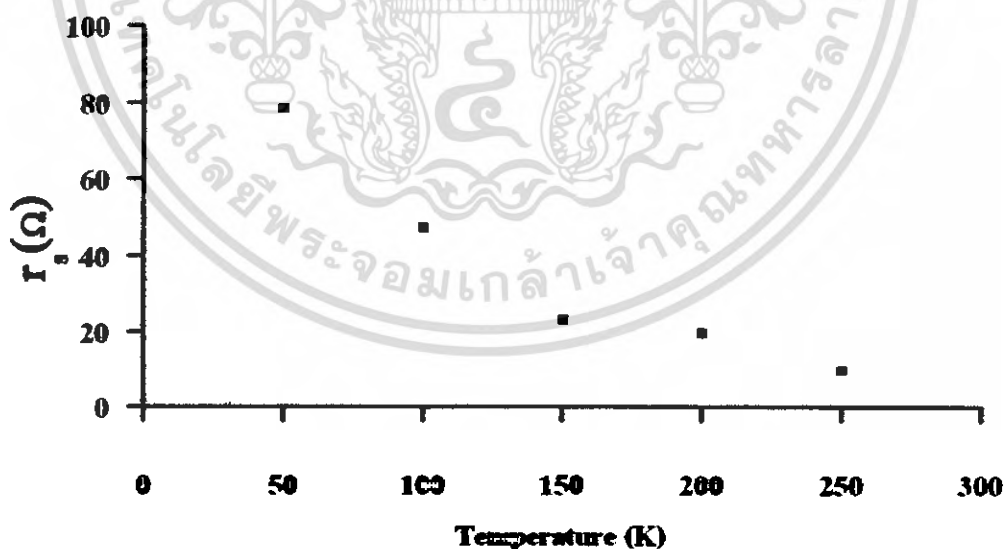


รูปที่ 4.39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแฟกเตอร์อุดมคติ ( $n$ ) กับอุณหภูมิของรอยต่ออานอค์ทีของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับอินเดียม ( $In$ ) ในกรณีวัดที่อุณหภูมิ 50–250 K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.40 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแฟกเตอร์อุดมคติ ( $n$ ) กับอุณหภูมิของรอยต่อรอยต่อคักกีของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับอินเดียม (In) ในกรณีวัดที่อุณหภูมิ 50 – 250 K



รูปที่ 4.41 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานอนุกรม ( $r$ ) กับอุณหภูมิของรอยต่อรอยต่อคักกีของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) กับอินเดียม (In) ในกรณีวัดที่อุณหภูมิ 50 – 250 K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตารางที่ 4.5** แสดงถึงค่าแฟกเตอร์อุณหภูมิ ( $n$ ) ค่าความสูงของกัมพงศ์ ( $\phi_B$ ) และค่าความต้านทานอนุกรม ( $r_s$ ) ของรอยต่อชอคคีย์ของฟิล์มบางแมกนีเซียมซัลไฟด์ (CAS) กับอินเดียม ( $In$ ) ในกรณีวัดที่อุณหภูมิ 50 – 250 K

อุณหภูมิขณะวัด (K)	ค่าแฟกเตอร์อุณหภูมิ ( $n$ )			ค่าความสูงของ กัมพงศ์, $\phi_B$ (eV)	ความต้านทาน อนุกรม, $r_s$ ( $\Omega$ )
	$n_1$	$n_2$	$n_3$		
250	1.669	7.459	17.642	0.304	9.9
200	2.101	9.639	22.564	0.304	19.9
150	2.794	13.099	37.077	0.304	23.3
100	4.184	22.410	64.369	0.304	47.2
50	8.691	44.159	134.785	0.305	78.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุป

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของรอยต่อรอยค้ำที่ระหว่าง CdS กับ Ag, In และ Cu ที่อุณหภูมิต่างๆ โดยทำการวัดค่ากระแสและแรงดันเมื่อทำการเขียนกราฟระหว่างกระแสและแรงดันเพื่อหาค่าแรงดันเปิดของรอยค้ำ (n) เพื่อหาค่ากำหนดแรงค้ำของฝั่งโลหะ โดยได้ทำการศึกษาเป็นขั้นตอนดังนี้

##### 5.1.1 การศึกษาสมบัติของกระแสและแรงดันของรอยต่อรอยค้ำ

จากการทดลองวัดค่ากระแสและแรงดันให้กับฟิล์มบาง CdS และวัดค่า กระแสที่ไหลผ่านฟิล์มบาง CdS ที่รอยต่อของโลหะทั้งสามชนิดพบว่ามีความเป็น โด โดคก่าคือ มีสมบัติของการเรียงกระแสแต่ภายใต้การ โยอถกถกถกถก จะมีความเป็น โด โดคค่า ไม่มีลักษณะมีกระแสรั่วก่อนใช้งาน

##### 5.1.2 การศึกษาสมบัติของกระแสและแรงดันของรอยต่อรอยค้ำที่อุณหภูมิต่าง ๆ

จากการทดลองวัดค่ากระแสและแรงดันที่อุณหภูมิต่าง ๆ พบว่าเมื่ออุณหภูมิต่ำลงปริมาณพาหะจะมีค่าลดลงส่งผลให้กระแสที่ผ่านรอยค้ำก็จะมีอุณหภูมิต่ำลงฟิล์มบาง CdS จะมีความต้านทานในเนื้อฟิล์มสูงขึ้นส่งผลให้ปริมาณกระแสที่ไหลผ่าน ได้มีค่าที่น้อย ดังนั้นจุดเริ่มนำกระแส (onset) ของโด โดคค่าจะมีค่าที่สูงขึ้นด้วย

ส่วนค่าการมีรอยค้ำที่ทำการทดลองที่อุณหภูมิต่ำจะทำให้ค่าแรงค้ำของรอยค้ำมีค่ามากขึ้น นั่นเพราะที่อุณหภูมิต่ำจะเกิดพฤติกรรมกับลักษณะที่บริเวณรอยต่อ (surface/interface trap) ของอิเล็กตรอนอย่างเด่นชัดนั้นคืออุณหภูมิต่ำจะเกิดสถานะพลังงานที่บริเวณรอยต่อจะมีอิทธิพลต่อการนำกระแสของโด โดคค่าส่งผลให้ค่าแรงค้ำของรอยค้ำมีค่าสูงขึ้น และค่าความสูงของกำแพงกั้นเมื่ออุณหภูมิต่ำมีค่าใกล้เคียงค่าที่อุณหภูมิต่ำที่อุณหภูมิต่ำเนื่องจากกลไกการ โดของอิเล็กตรอนแบบลดค่ากั้นกำแพงกั้นค่ามากกว่าลด โดแบบอื่น ซึ่งลด โดการ โดแบบลดค่ากั้นกำแพงกั้นนั้น ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิต่ำในความเป็นจริงนั้นกำแพงกั้นจะมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อย แต่ที่ค่าจากการทดลอง ไม่เป็นไปตามทฤษฎีนั้นอาจเป็นเพราะมีลักษณะที่รอยค้ำที่รอยต่อส่งผลให้กลไกการนำ โดที่เปลี่ยนแปลงไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.1.3 การศึกษาสมบัติของกระแสและแรงดันของฟิล์มบาง CdS ในการฉายแสงและไม่ฉายแสง

จากการทดลองวัดค่ากระแสและแรงดันของฟิล์มบาง CdS ในขณะฉายแสงและไม่ฉายแสง พบว่าฟิล์มบาง CdS มีการตอบสนองต่อแสง โดยแสงที่เราใช้ฉายมีความเข้มแสงประมาณ 1000 ลักซ์ พบว่าในขณะฉายแสงจะทำให้จุดทำงานมีค่าลดลง เนื่องจากเมื่อฉายแสง ไปยังฟิล์มบาง CdS จะทำให้เกิดปรากฏการณ์โฟโตคอนดักติวิตี (photoconductivity) นั่นคือเมื่อมีพลังงานโฟตอน  $h\nu \geq E_g$  ไปกระตุ้นอิเล็กตรอนให้เคลื่อนย้ายจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบนำ ได้จึงขึ้นส่งผลให้การนำไฟฟ้าดีขึ้น

### 5.1.4 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของวงจรรอชุดคัท

จากการทดลองวัดค่ากระแสและแรงดันของฟิล์มบาง CdS ในขณะฉายแสงและไม่ฉายแสง และนำค่าที่ได้มาคำนวณเพื่อหาค่าความต้านทานอนุกรม( $r_s$ ) พบว่าความต้านทานอนุกรมของฟิล์มบาง CdS ในขณะฉายแสงมีค่าลดลงเนื่องจากเมื่อฟิล์มบาง ได้รับการฉายแสงมี โฟตอนมาตกกระทบทำให้สภาวะอิสระเพิ่มมากขึ้นการนำไฟฟ้าดีขึ้นส่งผลให้ความต้านทานในเนื้อฟิล์มมีค่าน้อยลง

จากนั้นได้ทำการทดลอง โดยการวัดค่ากระแสและแรงดันที่อุณหภูมิต่าง ๆ พบว่าเมื่ออุณหภูมิต่ำลง จะทำให้ค่าความต้านทานอนุกรมมีค่าสูงขึ้น เพราะว่าที่อุณหภูมิต่ำจะมีค่าเฟอร์มิอุลคมคิมิสูงเนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำจะมีกระบวนการกับดักที่บริเวณรอยต่อ (surface/interface trap) ของอิเล็กตรอนอย่างเด่นชัดส่งผลให้ความต้านทานอนุกรมมีค่ามากขึ้น

## 5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

จากการทดสอบสมบัติรอยต่อของฟิล์มบาง CdS ที่สร้างรอยต่อระหว่างทองคำ (Au) , ทองแดง (Cu) และอินเดียม (In) ได้พบปัญหาและข้อผิดพลาดบางประการที่สามารถนำไปปรับปรุงการทดลองเพื่อให้ได้ผลการทดลองที่เร็วขึ้น โดยข้อเสนอแนะมีดังนี้

1. ในการเตรียมฟิล์มบาง CdS ไม่ควรทิ้งระยะเวลาในการปลูกสารนานจนเกินไปควรที่จะทำให้ต่อเนื่องกัน หรือ ไม่ก็ให้เก็บไว้ในที่ไม่วิเคราะห์เพื่อที่จะไม่ให้เกิดชั้น ออกไซด์ ซึ่งเป็นสาเหตุหลักในการทำให้สมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อของฟิล์มบางเสื่อมสภาพไป
2. ในขณะที่ทำการปลูกฟิล์มบางด้วยวิธีการอบสารละลายเคมีควรที่จะควบคุมอุณหภูมิ ในขณะที่เตรียมฟิล์มบางให้คงที่และการกวนสารให้สม่ำเสมอขึ้นเพื่อที่จะให้ได้ฟิล์มบางที่มีคุณภาพดีและหนาสม่ำเสมอ
3. ในการสร้างรอยต่อระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำสมควรที่จะปลูกชั้นโลหะให้มีความหนาจนพอสมควรเพื่อที่จะเกิดรอยต่อของฟิล์มบางและ ในขณะที่วัดสมบัติทางไฟฟ้าให้วัดจะได้ไม่ทะลุชั้น โลหะลงไป
4. กรณีวัดที่อุณหภูมิค่าให้ที่กวนเร็วใช้เครื่องวัดให้คั่นองจากในขณะที่เครื่องคำนวณจะเกิดการกั้นระเหิดจนทำให้การวัดเกิดความคลาดเคลื่อนขึ้นได้

เลขทงศ์ รักรธรรม และอภิรัตน์ มีนุชอ, 2547, การศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่เตรียม โดยการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ, โครงการพิเศษตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

Dhage, S. R., Choube, V. and Ravi, V. Nonlinear I-V characteristics of doped SnO, 2004, *Mater.Sci & Eng.B*, 110:168-171.

Schroder D.K., 1975, *Semiconductor Material and Device Characterization.*, New York:Mc Graw-Hill.

Prathap P., Subbaiah Y.P.V., Devika M.and Ramakrishna Reddy K.T.,2006 , “Optical Properties of  $In_2O_3$  Films Prepared by Spray Pyrolysis”, *Material Chemistry and Physics*, vol 100,pp.375-379.

คูสิด เครื่องาน, 2539, เซลล์แสงอาทิตย์. ถึงประคินรู้ออปโตอิเล็กทรอนิกส์, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, หน้า 589-590

Contreras, M.A., Egas, B., Ramanathan, K., Hiltner, J., Swartzlande, A., Hasoon, F. and Norfi, R., 1999, *Prog. Photovoltaics* 7 (4): 311 - 313.

Abelas, F., 1972, *Optical Properties of  $Se^{1-2}$* , London, North – Holland, pp. 23–40.Runyun.

W.R., 1975, *Semiconductor Measurement and Instrumentation*, New York, Mc Grew Hill, Bombay, pp.67 – 91

อารีชัย วิเชียรฉาย, 2543, เครื่องมือและการวัดทางฟิสิกส์ของสารกึ่งตัวนำ, เอกสารประกอบการเรียน, คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

- วีรชัย ลิภา, 2545, การศึกษาสมบัติฟิล์มบาง CdS-ZnS ซึ่งเตรียมโดยวิธีอบสารละลายทางเคมี, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- Kumar, V., Singh, V., Sharma, S. K. and Sharma T. P., 1998, Structural and optical properties of sintered  $Cd_{1-x}Zn_xS$  films, *Opt. Mater.*, 11: 29-34
- Cullity, B. D., 1956, *Element of X – rays Diffraction*. Addison-Wesley Publishing Company Inc.: pp 9-14.
- Kittel, C., 1971, *Introduction of Solid State Physics*. 4<sup>th</sup> Ed. Newyork: John Wiley & Sons Inc.: pp 4-32,46-48,56-60,364-365,540-552,611-612.
- สิงห์เดช แดงจวง, 2539, การเตรียมฟิล์มบางของอินเดียมซัลไฟด์ด้วยวิธีสปเรย์ทางเคมี โดยเทคนิคการเคลือบแบบอบสารละลายทางเคมี, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- Runya, W. R., 1975, *Semiconductor Measurement and Instrumentation*, 3<sup>rd</sup> Ed. Newyork: McGraw-Hill, Bombay.
- Garadkar, K.M.; Hankare, P.P. and Patil R.K., 1999, Effect of indium doping on structural, optical and electrical properties of  $Cd_{1-x}Hg_xS$  thin films., *Mater.Chem.Phys.*, 58.:64-70.
- Ramaiah, K.S., 1999, Electrical properties of In doped CdS thin films., *J.Mater.Sci.Mater.Elec.*, 10:291-294.
- Garcia-Cuencu, M.V.; Morenza, J.L. and Codina, J.M., 1987, Electrical condition in polycrystalline CdS films:I.theory., *J.Phys.D:Appl.Phys.*, 20:51-957.
- Garcia-Cuencu, M.V. ; Morenza, J.L. ; Bertran, E. and Lousa, A., 1987, Electrical condition in polycrystalline CdS films:II. comparison of theory and experiment., *J.Phys.D:Appl.Phys.*, 20 :958-962.
- Gunal I. and Parlak M., 1997, Current transport mechanisms in low resistive CdS thin films., *J.Mater.Sci.Mater.Elec.*, 8 :9-13.
- Schroder D.K., 1998, *Semiconductor Material and Characterization*, 2<sup>nd</sup> Ed. Newyork: John Wiley & Sons Inc.
- วิรุฬห์ มังคละวิรัช และ สุวิทย์ ปุณณชัยยะ, 2543, องค์คุณทรานซิสเตอร์อินเดียม, วารสารเครื่องมือวิจัย วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, ปีที่ 1, ฉบับที่ 2, พฤษภาคม, หน้า 129-165

## เอกสารอ้างอิง

- Lee, J.H., 2004, Raman scattering and photoluminescence analysis of B-doped CdS thin films, *Thin Solid Films*, 451-452:170-174
- Lee, J. H., Yi, J. S., Yang, K. J, Park, J.H. and Oh, R. D., 2003, Electrical and optical propoties of Boron doped CdS thin films prepared by chemical bath deposition. *Thin Solid Films*, 431-432:344-348.
- Lee, J. H., Song, Wc., Yi, J. S., Yang, K. J., Han, W. D. and Hwang, J., 2003, Growth and properties of the  $Cd_{1-x}Zn_xS$  thin film for solar cell application *Thin Solid Films*, 431-432:349-357.
- งามนิศ์ แก้วแดง, จูตินัย แก้วแดง, ทิพรศน์ วงษ์เจริญ และรัชสิงห์ ภูริกษ์เกียรติ, 2543, การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง  $Cd_{1-x}Zn_xS$  เพื่อประคินธุ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานวิจัยเสนอคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- จูตินัย แก้วแดง, งามนิศ์ แก้วแดง, ทิพรศน์ วงษ์เจริญ และ รัชสิงห์ ภูริกษ์เกียรติ, 2546, การประคินธุ์ฟิล์มบาง  $Cd_{1-x}Zn_xS$  ที่มี Zn ในปริมาณสูงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานการวิจัยเสนอคณะวิทยาศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- Kittel, C., 1971, *Introduction of Solid State Physics*. 4<sup>th</sup> Ed. Newyork: John Wiley & Sons Inc.: pp 4-32,46-48,56-60,364-365,540-552,611-612.
- Runya, W. R., 1975, *Semiconductor Measurement and Instrumentation*, 3<sup>rd</sup> Ed. Newyork: McGraw-Hill, Bombay
- จูตินัย แก้วแดง,งามนิศ์ วงษ์เจริญและทิพรศน์ วงษ์เจริญ, 2544, การเตรียมฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วย In โดยวิธีระเหยในระบบสุญญากาศ, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- งามนิศ์ วงษ์เจริญ ,จูตินัย แก้วแดง,ทิพรศน์ วงษ์เจริญและรัชสิงห์ ภูริกษ์เกียรติ, 2546, การประคินธุ์ฟิล์มบาง CdS โดยวิธีทางเคมีแบบ สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์,รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

## ประวัติผู้เขียน

นายธนวัติ เมธิสุทธินันท์ เกิดเมื่อวันที่ 1 ตุลาคม พ.ศ. 2528 เป็นคนกรุงเทพฯ โดยกำเนิด สำเร็จการศึกษาระดับเตรียมอุดมศึกษา ณ โรงเรียน อนุชนที่รัฐธารามวิทาศคม และได้เข้ารับการศึกษาระดับอุดมศึกษา ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ใน คณะวิทยาศาสตร์ สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ ในปีการศึกษา 2546

นายสุกษัย เค่นคำรงกุล เกิดเมื่อวันที่ 25 กันยายน พ.ศ. 2527 เป็นคนกรุงเทพฯ โดยกำเนิด สำเร็จการศึกษาระดับเตรียมอุดมศึกษา ณ โรงเรียน วัชรราชบพิตร และได้เข้ารับการศึกษาระดับอุดมศึกษา ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ใน คณะวิทยาศาสตร์ สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ ในปีการศึกษา 2546

นายอนุรักษ์ วิริยภัทรกุล เกิดเมื่อวันที่ 4 ตุลาคม พ.ศ. 2527 เป็นคนกรุงเทพฯ โดยกำเนิด สำเร็จการศึกษาระดับเตรียมอุดมศึกษา ณ โรงเรียน ทวีธาภิเศก และได้เข้ารับการศึกษาระดับอุดมศึกษา ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ใน คณะวิทยาศาสตร์ สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ ในปีการศึกษา 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้