การเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงสำหรับประดิษฐ์เป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์ p-Cu_2O/n-Si

PREPARATION OF COPPER OXIDE THIN FILMS BY REACTIVE DC MAGNETRON SPUTTERING FOR p-Cu_2O/n-Si HETEROJUNCTION DEVICE

ปาฏิหาริย์ สมตน
เมธิชา ยาวิไชย

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงสำหรับประดิษฐ์เป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์ p-Cu_2O/n-Si

PREPARATION OF COPPER OXIDE THIN FILMS BY REACTIVE DC MAGNETRON SPUTTERING FOR p-Cu_2O/n-Si HETEROJUNCTION DEVICE


T149333

ปาฏิหาริย์ สมตน

เมธิชา ยาวิไชย

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....149333
วัน, เดือน, ปี.....12 ต.ค. 2561


12881739

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PREPARATION OF COPPER OXIDE THIN FILMS BY REACTIVE DC MAGNETRON SPUTTERING FOR p-Cu_2O/n-Si HETEROJUNCTION DEVICE

PATIHAN SOMTON
METHICHA YAWICHAI

A SPECIAL PROJECT SUBMITTE IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (APPLIED PHYSICS)
DEPARTMENT OF PHYSICS, FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ	การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงสำหรับประดิษฐ์เป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์ p-Cu_2O/n-Si Preparation of Copper Oxide Thin Films by Reactive DC Magnetron Sputtering for p-Cu_2O/n-Si Heterojunction Device
ชื่อนักศึกษา	นายปาฏิหาริย์ สมตน รหัสนักศึกษา 56051167 นางสาวเมธิชา ยาวิไชย รหัสนักศึกษา 56051196
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิสิกส์
ปีการศึกษา	2559
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์) ประจำปีการศึกษา 2559

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.ฐิตินัย แก้วแดง ประธานกรรมการ	
อ.ภารุจ บัณฑิธาดาวิทย์ กรรมการ	
ผศ.ดร.ชัยสิงห์ ภู่รักษ์เกียรติ กรรมการ	
รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ	การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงสำหรับประดิษฐ์เป็นรอยต่อวิวิธพันธุ์ p-Cu_2O/n-Si
ชื่อนักศึกษา	นายปาฏิหาริย์ สมตน รหัสนักศึกษา 56051167
	นางสาวเมธิชา ยาวิไชย รหัสนักศึกษา 56051196
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิสิกส์
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2559
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ

บทคัดย่อ

ในโครงงานพิเศษนี้ได้ทำการเตรียมอะมอร์ฟัสของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และบนแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง จากนั้นได้ทำการศึกษาผลของอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนที่มีต่อโครงสร้างผลึก สมบัติทางแสง และสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O สำหรับอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนที่ 0.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์มีขนาดของเกรน ช่องว่างแถบพลังงาน สภาพต้านทานไฟฟ้า ความหนาแน่นของโฮล และสภาพคล่องพาหะเท่ากับ 127 นาโนเมตร 2.80 อิเล็กตรอนโวลต์ 89.4 โอห์ม·เซนติเมตร 2.39×10^{18} ต่อลูกบาศก์เซนติเมตรและ 2.91 (เซนติเมตร)^2/(โวลต์·วินาที) ตามลำดับ ต่อจากนี้ได้ทำการประดิษฐ์ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) ซึ่งพารามิเตอร์ของไดโอด ได้แก่ แฟกเตอร์อุดมคติ ความสูงของกำแพงศักย์ และความต้านทานอนุกรมที่อุณหภูมิห้อง สามารถคำนวณหาค่าได้จากการวัดกระแส-แรงดันไฟฟ้าภายใต้การไบแอสตรงซึ่งมีค่าเท่ากับ 4.03 และ 0.75 อิเล็กตรอนโวลต์และ 1.70 กิโลโอห์มตามลำดับ สมบัติของสถานะผิวเชื่อมต่อของไดโอดดังกล่าวนี้สามารถศึกษาได้โดยการวัดลักษณะเฉพาะของความจุ-แรงดันไฟฟ้า และความนำ-แรงดันไฟฟ้า และค่า $\frac{G}{\omega}$ ที่เปลี่ยนแปลงตามความถี่แสดงว่าเป็นผลของการจับพาหะของสถานะผิวเชื่อมต่อ อีกทั้งความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมของไดโอดนี้มีแนวโน้มลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงนั้นสามารถประยุกต์เป็นสิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ได้

คำสำคัญ : ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O วิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง สมบัติทางแสง สมบัติทางไฟฟ้า สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Tittle	Preparation of Copper Oxide Thin Films by Reactive DC Magnetron Sputtering for p-Cu_2O/n-Si Heterojunction Device
Students	Mr. Patihan Somton Student ID 56051167
	Miss Methicha Yawichai Student ID 56051196
Degree	Bachelor of Science (Applied Physics)
Department	Physics
Faculty	Science
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
Academic Year	2016
Advisor	Assoc.Prof.Ngamnit Wongcharoen

Abstract

In this special project, Cu_2O thin films with amorphous phase were prepared on glass and n-Si (100) substrates through reactive dc magnetron sputtering. The influence of the flow rate of O_2 on the structural, optical and electrical properties of Cu_2O films was studied. At O_2 flow rate of 0.8 sccm, the average crystal size, energy gap, resistivity, hole concentration and mobility of the Cu_2O films deposited on glass substrate are 127 nm, 2.80 eV, 89.4 Ω·cm, 2.39×10^{16} cm^{-3} and 2.91 $cm^2/(V.s)$, respectively. A p-Cu_2O films/n-Si (100) substrate heterojunction diode was fabricated. The diode parameters such as ideality factor, barrier height and series resistance were determined from the forward bias I-V characteristics at 300K to be 4.03, 0.75 eV and 1.70 kΩ, respectively. The interface states properties of p-Cu_2O films/n-Si (100) substrate heterojunction diode were performed using C-V and G-V characteristics. The frequency dependence of $\frac{G}{\omega}$ could be attributed to trapping states. The series resistance of the diode was observed to be decreasing with increasing frequency. The obtained results indicate that p-Cu_2O films/n-Si (100) can be used in optoelectronic device application.

Keywords : Cu_2O thin films, Reactive dc magnetron sputtering, Optical properties, Electrical properties, Photoconductivity.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานพิเศษนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาของ รองศาสตราจารย์ ดร.ฐิตินัย แก้วแดง รองศาสตราจารย์งามนิตย์ วงษ์เจริญ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยสิงห์ ภู่รักษ์เกียรติ และอาจารย์ภารุจ บัณฑิธาดาวิทย์ ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมืออุปกรณ์ในการทดลอง ตลอดจนอุปการะทุนสนับสนุนและให้คำปรึกษาทางวิชาการที่ดีตลอดมา และให้ความรู้ ให้คำปรึกษาทางด้านวิชาการตลอดจนปลูกฝังคุณธรรม จริยธรรม ความดีให้กับลูกศิษย์ทุกคน และคอยช่วยเหลือในทุกๆ ด้านตลอดมา จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และ ขอขอบคุณวิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์ แนะนำในการใช้เครื่องมือในการวัดต่างๆ

ขอขอบคุณ นางสาวจารุวรรณ มีนาง นักศึกษาปริญญาโท และนักศึกษาปริญญาตรี ภายในห้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุโฟโตนิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำโครงงานพิเศษ แนะนำการใช้อุปกรณ์ต่างๆ ตลอดจนคำแนะนำในการใช้โปรแกรมเพื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลอง

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ทุกท่าน ที่เมตตาประสิทธิ์ประสาทวิชาตั้งแต่การศึกษาภาคบังคับจนถึงปัจจุบัน ตลอดจนขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และผู้มีพระคุณทุกท่าน ที่ให้ความอุปการะทุนในการศึกษาเล่าเรียน และเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา

ปาฏิหาริย์ สมตน
เมธิชา ยาวิไชย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญรูป	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเรื่องของลักษณะของโครงสร้างผลึก	4
2.1.1 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ	4
2.1.2 การระบุตำแหน่งทิศทางและระนาบของโครงผลึก	7
2.2 โครงสร้างผลึกของสารประกอบ Cu_2O และ CuO	9
2.2.1 ข้อบกพร่องผลึก	11
2.2.1.1 ข้อบกพร่องผลึกแบบจุด	11
2.2.1.2 ข้อบกพร่องผลึกแบบเชิงเส้น	12
2.2.1.3 ข้อบกพร่องผลึกแบบแนวระนาบ	13
2.3 การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์	14
2.4 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	15
2.5 สมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ	16
2.5.1 สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง	17
2.5.2 การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ	18
2.5.3 ส่วนหางของแถบพลังงาน	19
2.6 สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง	20
2.6.1 สมบัติการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ	20
2.6.2 สภาพนำไฟฟ้า	20
2.6.3 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า	21
2.6.3.1 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.6.3.2 การวัดความต้านทานแผ่นสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาร์ 22
2.6.3.3 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว 24
2.6.4 ปรากฏการฮอลล์ 25
2.6.5 การศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาร์ 30
2.7 สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง 32
2.7.1 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะในช่วงกระแสโฟโตขาลง 39
2.7.2 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะในช่วงกระแสโฟโตขาขึ้น 40
2.8 ฟูเรียร์แทรนฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ 41
2.9 พาหะข้างมากและพาหะข้างน้อย 42
2.9.1 สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น 43
2.9.2 สารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type semiconductor) 43
2.10 ไดโอดของสารกึ่งนำที่มีรอยต่อแบบพี-เอ็น 43
2.10.1 รอยต่อในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน 45
2.10.2 โครงสร้างและสัญลักษณ์ของไดโอด 46
2.10.3 ไดโอดอุดมคติ 46
2.11 อิมพีแดนซ์ของวงจร RC ต่อแบบอนุกรมและต่อขนาน 48
2.11.1 วงจร RC ต่อแบบอนุกรม 48
2.11.2 วงจร RC ต่อแบบขนาน 49
2.11.3 กราฟของโบด 53
2.12 หลักการสปัตเตอริง 56
2.12.1 โกล์วดิสชาร์จ 56
2.12.2 สปัตเตอริง 58
2.12.2.1 ยีลด์การสปัตเตอริง 58
2.12.2.2 ดีซีไดโอดสปัตเตอริง 59
2.12.2.3 ดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง 60
2.12.2.4 สนามแม่เหล็กที่มีผลต่อการดิสชาร์จ 63
2.13 องค์ประกอบที่สำคัญของหัวดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง 64
2.13.1 วัสดุที่ใช้สร้างหัวดีซีแมกนีตรอน 64
2.13.2 การให้ความเย็นที่เป้า 64
2.13.3 การควบคุมให้เกิดการสปัตเตอริงเฉพาะผิวเป้า 64
2.13.4 ลักษณะของสนามแม่เหล็ก 66
2.14 คุณสมบัติทางพลาสมา 68
2.14.1 หัววัดลางมัวร์ 68
2.14.2 ลักษณ์เฉพาะของกระแสและความต่างศักย์ 69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.14.2.1 อุณหภูมิอิเล็กตรอน 70
2.14.2.2 ความหนาแน่นของพลาสมา 71
2.14.2.3 ผลของสนนามแม่เหล็ก 71
2.15 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 72

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วิธีการทดลองและเครื่องมือการวิจัย 74
3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ 74
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง 74
3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) 74
3.2 ขั้นตอนการเตรียมไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O /n-Si (100) โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นกระจกสไลด์และแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง 75
3.2.1 การเตรียมแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) เพื่อเป็นแผ่นฐานรองรับ 75
3.2.2 การเตรียมแผ่นกระจกสไลด์เพื่อใช้เป็นแผ่นฐานรองรับ 78
3.2.3 การเตรียมไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O บนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นกระจกสไลด์และแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง 78
3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์และแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง 86
3.3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค 86
3.3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค 86
3.3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบาง 87
3.3.4 เครื่องมือที่ใช้ศึกษาสมบัติทางแสง 87
3.3.5 เครื่องมือที่ใช้ในการวัดสมบัติทางไฟฟ้า 88

บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1 ผลของอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนและแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

มีต่อการโกลวดิสชาร์จ 90

4.2 การศึกษาลักษณะและสมบัติพื้นฐานทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง 95

4.2.1 ลักษณะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง 95

4.3 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง 96

4.3.1 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง 96

4.3.2 ผลการศึกษาภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง 97

4.3.3 ผลการศึกษาโครงสร้างของผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) โดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง 98

4.4 การศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง 99

4.4.1 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง 99

4.4.2 ผลการศึกษาส่วนหางของแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง 104

4.5 การศึกษาสมบัติไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง 106

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.5.1 ผลการศึกษาความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O เตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง 106

4.5.2 ผลการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ของแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) และฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซี-แมกนีตรอนสปัตเตอริง 110

4.5.3 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-150 องศาเซลเซียส เพื่อหาค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง 118

4.5.4 ผลการศึกษาความต้านทานเชิงแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง 120

4.6 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์สารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O /n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง 121

4.6.1 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง 121

4.6.2 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p- Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง 129

4.6.3 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับค่าแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำp-Cu_2O /n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซี-แมกนีตรอนสปัตเตอริง 138

4.6.4 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้ากับความถี่เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.3 ถึง 0.3 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง 151

4.6.5 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้ากับความถี่เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 – 80 องศาเซลเซียสของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si(100)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง 158

บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลองของการศึกษาไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง 168

5.1.1 ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง 168

5.1.2 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซี-แมกนีตรอนสปัตเตอริง 169

5.1.2.1 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวินของไดโอดที่มี รอยต่อแบบวิวิธ-พันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง 169

5.1.2.2 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้ากับความถี่คงที่หลายๆ ค่า เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -3 ถึง 3 โวลต์ที่ อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง 170

5.1.2.3 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้ากับ ความถี่เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.3 ถึง 0.3 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง 170

5.1.2.4 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้ากับ ความถี่เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วง 25-60 องศาเซลเซียสของไดโอดที่มี รอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำp-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง 171

เอกสารอ้างอิง

ภาคผนวก ก

ภาคผนวก ข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	แสดงค่าพารามิเตอร์ของหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ	5
2.2	แสดงระบบผลึกทั้งเจ็ดแบบในระบบสามมิติ	6
2.3	แสดงความสัมพันธ์ของดัชนีมิลเลอร์ (hkl) และจุดตัดแกนผลึก (x,y,z)	8
2.4	แสดงชนิดของพาหะในสารกึ่งตัวนำทั้งชนิดพีและชนิดเอ็น	42
2.5	แสดงค่าพลังงานขีดเริ่มและค่ายีลด์ของธาตุชนิดต่างๆ	59
4.1	แสดงเงื่อนไขการเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจนที่ 0.3, 0.5, 0.8, 1.2, 1.5 และ 1.8ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	94
4.2	แสดงขนาดของเกรนและความขรุขระของพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบลงบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	98
4.3	แสดงค่าแถบพลังงาน (E_g) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่เปอร์เซนต์อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนค่าต่างๆ	103
4.4	แสดงค่าแถบพลังงานส่วนหาง (E_t) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่เปอร์เซนต์อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนค่าต่างๆ	104
4.5	ค่าความต้านทานความต้านทานแผ่นและสภาพนำไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.3, 0.5, 0.8, 1.2, 1.5 และ 1.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	109
4.6	ผลการวัดปรากฏการณ์ของฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	117
4.7	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานกระตุ้น กับ อัตราการไหลของออกซิเจนเมื่อทำการวัดค่าความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-150 องศาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	119
4.8	แสดงค่าแฟกเตอร์เรียงกระแสของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ภายใต้การฉายแสงและไม่มีการฉายแสงที่แรงดัน -3 และ 3 โวลต์	125
4.9	แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ (I_S) ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ (n) ค่าความสูงกำแพงศักย์ในขณะที่ไบแอสเป็นศูนย์ (φ_{B0}) และค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม R_S ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันและวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	129

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

4.10 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ค่าความสูงของกำแพงศักย์ และ ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันและวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวินของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง 133

4.11 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการคำนวณของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง 146

4.12 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง 156

4.13 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง 162

4.14 ค่าพลังงานกระตุ้น และ ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง 164

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	แสดงหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ	4
2.2	แสดงการบอกชื่อระนาบต่างๆของผลึก	8
2.3	โครงสร้างผลึกของสารประกอบ Cu_2O	9
2.4	โครงสร้างผลึกของสารประกอบ CuO	10
2.5	แผนภาพเฟสของระบบของสารประกอบ CuO	11
2.6	แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบจุดชนิดต่างๆ	12
2.7	แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชันแบบขอบและดิสโลเคชันแบบสกรู	13
2.8	แสดงเกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน	13
2.9	แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์	15
2.10	แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	16
2.11	แสดงแผนภาพเมื่อแสงตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มบาง	17
2.12	แสดงส่วนหางของแถบพลังงานซึ่งมีทั้งส่วนหางของแถบวาเลนซ์และส่วนหางของแถบนำ	19
2.13	แสดงการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง	22
2.14	แสดงตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชิ้นสารตัวอย่างเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์	23
2.15	แสดงการต่อขั้วเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิค แ ว น เดอร์เพาว์	23
2.16	การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว	24
2.17	การวัดค่าความต้านทานแผ่นโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น ก. การวัดแบบสองขั้วโดยมีการเลื่อนระยะที่ขั้วหนึ่ง ข. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับระยะทางที่ได้จากการวัดชนิดเลื่อนขั้วไฟฟ้า	25
2.18	แสดงแผนภาพการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์บนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำชนิดพี	26
2.19	แสดงการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์บนสารตัวอย่างที่เป็นแผ่นบางที่มีรูปทรงใดๆ	30
2.20	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) เมื่อทำการเขียนกราฟระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) กับ ค่ากระแสไฟฟ้า (I) ที่ได้	31
2.21	แสดงระดับพลังงานของกับดักพาหะชนิดจับอิเล็กตรอน (E_{te}) และ กับดักพาหะชนิดจับโฮล (E_{th}) ที่ปรากฏในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ จุดทึบและจุดโปร่งจะแสดงถึงอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ	33
2.22	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสโฟโตขาขึ้น กับ ค่ากระแสโฟโตขาลงของค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงดื้อรั้น	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.23	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ t ของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงดื้อรั้นทั้งช่วงกระแสโฟโตขาขึ้นและช่วงกระแสโฟโตขาลง	36
2.24	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ t เพื่อใช้คำนวณหาค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะในช่วงกระแสโฟโตขาลง	39
2.25	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ t เพื่อใช้คำนวณหาค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะในช่วงกระแสโฟโตขาขึ้น	40
2.26	แสดงการสร้างพันธะเคมีระหว่างอะตอมในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและชนิดพีของธาตุ Si	43
2.27	แสดงไดโอดของสารกึ่งตัวนำที่มีรอยต่อแบบพี–เอ็น	44
2.28	แสดงการเกิดบริเวณปลอดพาหะที่บริเวณรอยต่อของสารกึ่งตัวนำที่มีรอยต่อแบบพี– เอ็น	45
2.29	แสดงลักษณะของโครงสร้างอย่างง่ายและสัญลักษณ์ของไดโอดของสารกึ่งตัวนำที่มีรอยต่อแบบพี-เอ็น	46
2.30	แสดงการจ่ายแรงดันไฟฟ้าแก่ไดโอดของสารกึ่งตัวนำที่มีรอยต่อแบบพี-เอ็น ก. วงจรไดโอดแบบไบแอสตรง ข. วงจรไบแอสแบบย้อนกลับ	46
2.31	แสดงการเปิดปิดสวิตช์ของวงจรไดโอดของสารกึ่งตัวนำที่มีรอยต่อแบบพี-เอ็น ก. สภาวะนำกระแส ข. สภาวะไม่นำกระแส	47
2.32	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า (I) กับ แรงดันไฟฟ้า (V) ที่แสดงสมบัติเฉพาะทางไฟฟ้าของไดโอดของสารกึ่งตัวนำที่มีรอยต่อแบบพี-เอ็นในอุดมคติ	47
2.33	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระกระแสไฟฟ้า (I) กับ แรงดันไฟฟ้า (V) ที่แสดงสมบัติเฉพาะทางไฟฟ้าของไดโอดของสารกึ่งตัวนำที่มีรอยต่อพี-เอ็น	48
2.34	แสดงกราฟของไนควิสต์ที่ระบุถึงค่าอิมพีแดนซ์ของวงจร RC ต่ออนุกรมอย่างง่าย	49
2.35	แสดงวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่าย	49
2.36	แสดงกราฟของไนควิสต์ของวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่ายที่จุดสูงสุดของรูปครึ่งวงกลมเกิดขึ้นเมื่อ $\omega = \frac{1}{RC}$	51
2.37	แสดงวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่าย (ก,ง) กราฟของอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี (ข,จ) และกราฟของแอตมิตแตนซ์สเปกโทรสโกปี (ค,ฉ)	51
2.38	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าอิมพีแดนซ์ของโคออร์ดิเนตตั้งฉากกับโคออร์ดิเนตเชิงขั้วมุมเฟสระหว่างทิศทางของ Z' และ Z'' จะขึ้นกับค่าความถี่ที่ใช้วัดในกรณีที่เป็นตัวเก็บประจุสมบูรณ์แบบ (pure capacitor) มุมเฟส $\varphi = -90$ องศา และมุมเฟสของตัวต้านทานจะมีค่าเป็นศูนย์	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.39	แสดงกราฟโบดที่เป็นกรณี ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าอิมพีแดนซ์ (Z) และมุมเฟส ก. แสดงกราฟไนควิสต์และกราฟของโบด ข. แสดงกราฟของอิมพีแดนซ์ของวงจรที่มีตัวเก็บประจุของบริเวณโพลาไรเซชันที่อยู่ ค. ชิดกับขั้วอิเล็กโทรด	55
2.40	โครงสร้างของการโกล์วดิสชาร์จ	57
2.41	การเกิดสปัตเตอริงที่ผิวเป้า	58
2.42	การสปัตเตอริงโดยดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	60
2.43	การเคลื่อนที่เป็นเกลียววงกลมของอิเล็กตรอนที่ถูกกักเก็บไว้ที่ผิวของเป้าในเส้นทางเลื่อนลอยของสนามไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าและสนามแม่เล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกัน	62
2.44	ความต่างศักย์ของการดิสชาร์จกับสนามแม่เหล็กที่วัดในขั้วอิเล็กโทรดโคแอคเชียวทรงกระบอก	63
2.45	ลักษณะของแมกนีตรอนแบบสมมาตร	67
2.46	แสดงลักษณะของแมกนีตรอนแบบไม่สมมาตรประเภทที่ 1	68
2.47	แสดงลักษณะของแมกนีตรอนแบบไม่สมมาตรประเภทที่ 2	68
2.48	หัววัดเดี่ยวลางมัวร์ที่สอดเข้าไปในพลาสมา	69
2.49	แผนภาพลักษณะเฉพาะของกระแสกับความต่างศักย์	69
2.50	การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคิวปรัสออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีแมกนีตรอนสปัตเตอริงด้วยความถี่คลื่นวิทยุขนาดกลางและมีการแอนนีลในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 500,525, 550 และ 575 องศาเซลเซียส (a) ฟิล์มบางคิวปรัสออกไซด์ที่ถูกเตรียมด้วยอัตราส่วน 40% ของก๊าซออกซิเจนและแอนนีลที่อุณหภูมิตามที่กำหนดไว้ (b) แสดงภาพขยายของภาพ (a)	72
2.51	แสดงภาพถ่ายผิวหน้าของฟิล์มบางคิวปรัสออกไซด์ที่ถูกเตรียมด้วยอัตราส่วน 40% ของก๊าซออกซิเจนและแอนนีลที่อุณหภูมิตามที่กำหนดไว้	73
3.1	ขั้นตอนการทำความสะอาดแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) ด้วยวิธี Radio Corporation of America (RCA)	76
3.2	ขั้นตอนและกระบวนการสกัดด้วยสารละลาย KOH ที่เติม IPA	77
3.3	ขั้นตอนการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	78
3.4	(ก.) ภาพแสดงวาล์วปล่อยอากาศเข้า (ข.) ภาพแสดงคันบังคับชัตเตอร์ที่อยู่ด้านบนของห้องสุญญากาศ	79
3.5	(ก.) ภาพแสดงตำแหน่งสวิตช์ ROTARY ON (สำหรับเปิดปัมพ์กลโรตารี) TIC POWER ON (สำหรับเปิดมาตราวดความดัน) และ DIFFSTAK ON (สำหรับเปิดปัมพ์ไอฟุ้งกระจาย)	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
	(ข.) ภาพแสดงวาล์วในตำแหน่ง backing (หากโยกมาข้างหน้าจะเป็นตำแหน่ง roughing)	80
3.6	(ก) ภาพแสดง Butterfly valve ในตำแหน่ง open (ข) ภาพแสดง speedy valve	81
3.7	(ก) ภาพแสดง Regulator valve และวาล์วหัวถังก๊าซ (ข) ภาพแสดง power supply	82
3.8	(ก) ภาพแสดงสวิตซ์ของ power supply (ข) ภาพแสดงปุ่ม on เพื่อให้เครื่องเริ่มทำงาน	82
3.9	ภาพแสดงพลาสมาที่ติดในครั้งแรก	83
3.10	(ก) ภาพแสดงเครื่องควบคุมอัตราการไหลมวลก๊าซ (mass flow meter) ใช้สำหรับปรับความดันของก๊าซอาร์กอนใน chamber แบบละเอียด (ข) ภาพแสดงท่อกาซ Ar และท่อน้ำหล่อเย็นสำหรับ target	84
3.11	ภาพแสดงการเริ่มเคลือบฟิล์ม	84
3.12	แสดงแผนภาพโครงสร้างของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	85
3.13	ภาพถ่ายเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตรมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance	86
3.14	ภาพถ่ายเครื่อง Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM) รุ่น JSM-7001F	86
3.15	ภาพถ่ายเครื่อง Atomic force microscope (AFM) ยี่ห้อ Park Systems รุ่น XE-100	87
3.16	ภาพถ่ายเครื่อง UV-VIS ยี่ห้อ HITACHI U-2900 Spectrophotometer	87
3.17	ภาพถ่ายอิเล็กโตรมิเตอร์ ยี่ห้อ Keithley รุ่น 236 และซอฟแวร์ที่ใช้วัดความต้านทานแผ่น	88
3.18	ภาพถ่ายอิเล็กโตรมิเตอร์ ยี่ห้อ Keithley รุ่น 236 และซอฟต์แวร์ที่ใช้วัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง	88
3.19	ภาพถ่ายอุปกรณ์ที่ใช้วัดปรากฏการณ์ฮอลล์	89
3.20	ภาพถ่ายอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความต้านทานของฟิล์มบางที่อุณหภูมิสูง	89
4.1	แสดงภาพถ่ายของการโกลวดิสชาร์จเมื่อมีการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จจาก 300 โวลต์ เป็น 320 โวลต์ โดยให้อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 50 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ความดันตัวบนและความดันตัวล่างมีค่าคงที่เท่ากับ 2.4 $x10^{-2}$ และ 4.3$x10^{-4}$ ทอร์ตามลำดับ	91
4.2	แสดงภาพถ่ายของการโกลวดิสชาร์จเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนเข้าห้องสุญญากาศ	92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.3	แสดงภาพถ่ายของการโกลวดิสชาร์จเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 0.3, 0.5, 0.8, 1.2, 1.5 และ 1.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทีเข้าห้องสุญญากาศ	93
4.4	ภาพถ่ายฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.3, 0.5, 0.8, 1.2, 1.5 และ 1.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	95
4.5	แสดงภาพถ่ายของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	95
4.6	การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0, 0.3, 0.5, 0.8, 1.2, 1.5 และ 1.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	96
4.7	แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	97
4.8	แสดงภาพถ่ายตัดขวางซึ่งถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	98
4.9	กราฟแสดงสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจนค่าต่างๆ	99
4.10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\upsilon)^2$ กับพลังงานโฟตอน $(h\upsilon)$ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.3 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	99
4.11	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\upsilon)^2$ กับพลังงานโฟตอน $(h\upsilon)$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	100
4.12	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\upsilon)^2$ กับพลังงานโฟตอน $(h\upsilon)$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	100
4.13	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\upsilon)^2$ กับพลังงานโฟตอน $(h\upsilon)$3ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1.2 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	101

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.14	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\upsilon)^2$ กับพลังงานโฟตอน $(h\upsilon)$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	101
4.15	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\upsilon)^2$ กับพลังงานโฟตอน $(h\upsilon)$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	102
4.16	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\upsilon)^2$ กับพลังงานโฟตอน $(h\upsilon)$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.3, 0.5, 0.8, 1.2, 1.5 และ 1.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	102
4.17	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่เปอร์เซนต์อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนค่าต่างๆ	103
4.18	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln\alpha$ กับพลังงานโฟตอน $(h\upsilon)$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจนค่าต่างๆ	104
4.19	แสดวงส่วนหางของแถบพลังงานของอะมอร์ฟัสของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่มีผู้รายงานไว้ (Huang. et al., 2015)	105
4.20	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) กับค่าแถบพลังงานส่วนหาง (E_t) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่เปอร์เซนต์อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนค่าต่างๆ	105
4.21	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.3 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	106
4.22	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	106
4.23	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	107
4.24	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1.2 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	107

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.25	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	108
4.26	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	108
4.27	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.3 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	110
4.28	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.3 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	110
4.29	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	111
4.30	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	111
4.31	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	112
4.32	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	112
4.33	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1.2 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	113
4.34	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1.2 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	113
4.35	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	114

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.36	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	114
4.37	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	115
4.38	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	115
4.39	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100)	116
4.40	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100)	116
4.41	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้า ความหนาแน่นของพาหะและสภาพคล่องฮอลล์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมได้จากวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.3, 0.5, 0.8, 1.2, 1.5 และ 1.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	117
4.42	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า 1000/T กับ $\ln(R_0/R)$ เมื่อทำการวัดค่าความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-150 องศาเซลเซียสของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.3, 0.5, 0.8, 1.2, 1.5 และ 1.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	118
4.43	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโฟโต (I_p) กับเวลา (t) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมได้จากวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.3, 0.5, 0.8, 1.2, 1.5 และ 1.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที	120
4.44	แสดงภาพถ่ายของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง (ก) ไดโอดสำหรับการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยไม่มีการฉายแสง (ข) ไดโอดสำหรับการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าภายใต้การฉายแสง	122
4.45	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า (I) กับ แรงดันไฟฟ้า (V) ที่ช่วงแรงดันไฟฟ้า -3 ถึง 3 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	122

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.46	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง lnI กับ lnV เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องที่ใช้ในการอธิบายกลไกการนำกระแสไฟฟ้าแต่ละช่วงของค่าแรงดันไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	123
4.47	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง lnI กับ V เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องที่ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	123
4.48	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความหนาแน่นกระแส (J) กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า (V) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง เมื่อฉายแสงและไม่ฉายแสง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	124
4.49	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม (R_S) กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า (V) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง เมื่อฉายแสงและไม่ฉายแสง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	124
4.50	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง dV/dlnI กับ ค่า I เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	128
4.51	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง H(I) กับ ค่า I เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	128
4.52	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า (I) กับ แรงดันไฟฟ้า (V) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวินของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	130
4.53	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า lnI กับ lnV เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวินของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	130
4.54	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า lnI กับ V เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวินของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	131

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.55	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า dV/dlnI กับ I ที่อธิบายวิธีของชวงเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวินของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	131
4.56	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า H(I) กับ I โดยวิธีของชวงเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวินของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	132
4.57	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ กับ ค่าอุณหภูมิที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันและวิธีของชวงที่เป็นความสัมพันธ์ กับ ค่าอุณหภูมิ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวินของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	135
4.58	แสดงการหาค่า E_{00} โดยการฟิตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ กับ ค่าอุณหภูมิ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	135
4.59	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความสูงกำแพงศักย์ กับ ค่าอุณหภูมิที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันและวิธีของชวงที่เป็นความสัมพันธ์ กับ ค่าอุณหภูมิ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวินของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	136
4.60	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม กับ ค่าอุณหภูมิที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันและวิธีของชวงที่เป็นความสัมพันธ์ กับ ค่าอุณหภูมิ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวินของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	136
4.61	แสดงกราฟอาร์เรเนียสของ n[lnJ_S] เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si(100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	137

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.62	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า (C) กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า (V) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	138
4.63	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความนำไฟฟ้า (G) กับ แรงดันไฟฟ้า (V) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	139
4.64	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1/C^{-2}$ กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า (V) เมื่อทำการวัดในช่วงแรงดัน -3 ถึง 3 โวลต์ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	140
4.65	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1/C^{-2}$ กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า (V) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	140
4.66	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า C_{ADJ} กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า (V) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	142
4.67	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า G_{ADJ} กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า (V) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	142
4.68	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า R_S กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า (V) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	143
4.69	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า C_{OX} กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า (V) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	143
4.70	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า D_{it} กับ ความถี่เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	144
4.71	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง W_D และ Φ_B กับความถี่ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	150

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.72	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง N_D และ ψ_S กับความถี่ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	150
4.73	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.3 ถึง 0.3 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	151
4.74	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง N_{SS} กับ E_{SS}-E_V ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	152
4.75	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความนำไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.3 ถึง 0.3 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	153
4.76	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า G/ω กับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.3 ถึง 0.3 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	153
4.77	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.3 ถึง 0.3 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	154
4.78	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.3 ถึง 0.3 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	154
4.79	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพและจำนวนจริง เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.3 ถึง 0.3 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	155
4.80	แสดงผลการจำลองแบบของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	157

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.81	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 60 องศาเซลเซียสของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	158
4.82	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า –dC/dlnF กับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 60 องศาเซลเซียสของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	158
4.83	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 60 องศาเซลเซียสของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	159
4.84	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า G/ω กับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 60 องศาเซลเซียสของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	159
4.85	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 60 องศาเซลเซียสของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	160
4.86	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 60 องศาเซลเซียสของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	160
4.87	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพและจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 60 องศาเซลเซียสของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	161
4.88	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \omega_0/T^2$ กับ 1000/T ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	163
4.89	แสดงแผนภาพแถบพลังงานของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	166

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.90	แสดงแผนภาพการกระจากของประจุไฟฟ้าของรอยต่อ MOS ในอุดมคติ ภายใต้เงื่อนไข ก. ชุมนุมพาหะ (accumulation) ข. พร่องพาหะ (depletion) ค. ชั้นกลับกลาย (inversion)	167

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าได้ มีอายุการใช้งานยาวนานกว่า 20 ปี เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมไม่ต้องทำนุบำรุงมาก สามารถติดตั้งร่วมกับอาคารบ้านเรือนและสำนักงานได้ง่าย แต่อุปสรรคสำคัญของการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์คือวัตถุดิบหลักที่ใช้ยังมีราคาสูงอยู่มาก จนถึงปัจจุบันผลึกเดี่ยวซิลิคอน (Si) ยังคงเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ ซิลิคอนมีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงค่อนข้างต่ำ ถ้าต้องการให้ดูดกลืนแสงอาทิตย์อย่างมีประสิทธิภาพ ต้องใช้ความหนาอย่างน้อย 500 ไมโครเมตร แต่สำหรับเทคโนโลยีของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางต้องการให้ชั้นสารกึ่งตัวนำมีความหนาน้อยกว่า 50 ไมโครเมตร เพื่อลดต้นทุนทั้งค่าวัสดุและลดต้นทุนของกระบวนการผลิต

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางที่ประสบความสำเร็จอย่างมากคือ เซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิตจากฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe และ $CuInGaSe_2$ โดยให้ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าสูงถึง 20 เปอร์เซ็นต์ แต่เป็นที่น่าเสียดายว่าทั้งอะตอมของธาตุ Te, In และ Ga ล้วนเป็นธาตุหายาก มีราคาแพง ด้วยเหตุนี้การพัฒนาโรงไฟฟ้าขนาดเทอระวัตต์จากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ยังเป็นไปได้ยากเนื่องจากต้นทุนสูงกว่าโรงงานไฟฟ้าที่สร้างจากแหล่งพลังงานทางเลือกชนิดอื่น สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์อาจเป็นวัสดุทางเลือกชนิดใหม่สำหรับเทคโนโลยีการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ในอนาคต ธาตุโลหะที่เป็นองค์ประกอบหลักของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์นั้นมีปริมาณมากบนโลกราคาถูกและไม่ก่อมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม สามารถเตรียมให้เป็นสารประกอบออกไซด์ด้วยกระบวนการทางเคมีแบบเปียก (wet chemical process) เพื่อลดต้นทุนในการผลิต

คุณสมบัติทางแสงและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุที่จะใช้เป็นชั้นดูดกลืนแสงจะเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญ ที่กำหนดสมรรถนะของเซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพสูงสุด เมื่อคำนึงถึงคุณสมบัติทางแสงและคุณสมบัติทางไฟฟ้าดังกล่าวแล้ว สารประกอบคิวปริกออกไซด์ (CuO) กับคิวปรัสออกไซด์ (Cu_2O) ได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องจากเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างแถบพลังงานในช่วงตามองเห็นได้และย่านอินฟาเรด ได้มีการนำเอาสารประกอบ Cu_2O ไปใช้เป็นขั้วอาโนดของแบตเตอรีลิเทียมชนิดฟิล์มบางและเป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ (Jeong,2010) สารประกอบ Cu_2O ที่เตรียมจากสารละลายของคอปเปอร์อะซีเตตกับโซเดียมอะซีเตตจะเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่มีความต้านทานสูงกว่าสารกึ่งตัวนำชนิดพีถึง 2 เท่า ในเชิงทฤษฎีเซลล์แสงอาทิตย์ที่ประดิษฐ์จากสารกึ่งตัวนำ Cu_2O จะใช้ประสิทธิภาพสูงถึง 20 เปอร์เซ็นต์ (Rakhshani,1986) ดังนั้นนักวิจัยหลายกลุ่มจึงพยายามประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์โดยเลือกใช้สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นหลายชนิด เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางของรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O/ZnO ค่อนข้างโดดเด่นได้มีการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ZnO โดยวิธีอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง (RF magnetron sputtering) ให้เคลือบลงบนแผ่นสารประกอบ Cu_2O ที่เตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของแผ่นโลหะ Cu จากการศึกษาในเบื้องต้น พบว่า เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางของรอยต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O/ZnO มีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าในระดับ 3.85 เปอร์เซ็นต์ (Minami et al.,2011)

เข็มนาโน (nanotherads) และ ลวดนาโน (nanowires) ของสารประกอบ Cu_2O จะมีช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 2.6 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งมีค่าสูงกว่าช่องว่างแถบพลังงานของผลึกเดี่ยว (2.17 อิเล็กตรอนโวลต์) อย่างมาก ค่าช่องว่างแถบพลังงานที่สูงขึ้นนี้เป็นผลทางควอนตัมของขนาดอนุภาค (quantum size effect) ซึ่งเกิดจากเข็มนาโนและลวดนาโนมีขนาดเล็กมากจนประพฤติตัวคล้ายเป็นวัสดุใน 1 มิติ ทั้งสารประกอบ Cu_2O และ CuO สามารถประดิษฐ์ให้เป็นอนุภาคนาโนได้ ซึ่งวัสดุนาโนจะมีคุณสมบัติทางฟิสิกส์ที่แปลกใหม่ และน่าสนใจในเชิงการวิจัยพื้นฐาน

สำหรับสารประกอบ CuO เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี มีช่องว่างแถบพลังงานอยู่ในช่วง 1.2-1.9 อิเล็กตรอนโวลต์ เมื่อไม่นานมานี้ได้มีการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CuO ด้วยวิธีต่างๆเพื่อจุดประสงค์ที่จะนำไปประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ และเซนเซอร์แก๊ส เป็นต้น

ทั้งฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O และ CuO สามารถเตรียมได้จากหลายวิธีเช่น วิธีพาไอระเหยสารเคมี (chemical vapor deposition) วิธีออกซิเดชันด้วยความร้อน (thermal oxidation) วิธีอะโนดิกออกซิเจน (anodic oxidation) รีแอคทีฟสปัตเตอริง (reactive sputtering) วิธีเคลือบด้วยไฟฟ้า (electrodeposition) วิธีเคลือบจากสภาวะพลาสมา (plasma deposition) วิธีจุ่มในโซล-เจล (sol-gel deposition) แต่ละวิธีจะมีข้อเด่นและข้อด้อยแตกต่างกันไป จากผลการทดลองฟิล์มบางที่เตรียมได้มีเฟสของ Cu, Cu_2O ปรากฏร่วมกันเสมอ แต่สำหรับเฟสเดี่ยวของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O สามารถเตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu ในช่วงอุณหภูมิ และ ช่วงเวลาที่เหมาะสม

ในโครงงานพิเศษนี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O และทำการเตรียมไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ทำการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ และแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) ตามลำดับด้วยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง จากนั้นจึงทำการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O และไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาวิธีการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นทั้งแผ่นกระจกสไลด์และแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) ตามลำดับด้วยวิธีรีแอค-ทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง
2. เพื่อศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O
3. เพื่อประดิษฐ์ไอโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O บนแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) ด้วยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง
4. เพื่อศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) โดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า รวมทั้งวัด ค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า และค่าอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ทำการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ (Cu_2O) ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ด้วยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง
2. ทำการเคลือบฟิล์มบาง Cu_2O ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) เพื่อประดิษฐ์ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ด้วยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง
3. นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ และ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ที่เตรียมได้ไปศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ค้นคว้าและศึกษาข้อมูลต่างๆ ตลอดจนทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมฟิล์มบาง ด้วยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง พร้อมทั้งจัดหาวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ทำโครงงานพิเศษนี้ด้วย
2. ทำการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ (Cu_2O) ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ด้วยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง
3. ทำการเคลือบฟิล์มบาง Cu_2O ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) เพื่อประดิษฐ์ไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ด้วยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง
4. นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ไปศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์
5. ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) โดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า และค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า นอกจากนี้ยังวัดค่าอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีในช่วงความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 2 เมกะเฮิรตซ์ที่ค่าแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.3 ถึง 0.3 โวลต์
6. วิเคราะห์ผลการวิจัย และสรุปผลการวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้ทราบถึงหลักการ ปัจจัยหรือเงื่อนไข และวิธีการเตรียมฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์และการเตรียมไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ด้วยวิธีรีแอคทีฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง
2. ทำให้ทราบถึงวิธีการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบาง เช่น สมบัติทางแสงและสมบัติทาง ไฟฟ้า
3. ทำให้ได้ความรู้เพิ่มเติมในการศึกษาทฤษฎี และเงื่อนไขการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O และการเตรียมไดโอดที่มีรอยต่อวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ให้มีคุณภาพเพื่อสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านอื่นๆ ต่อไปได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

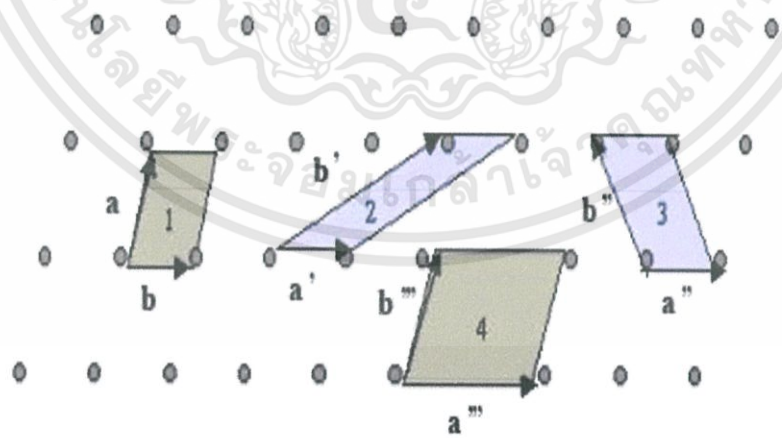
บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

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

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

2.1.1 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ

ผลึกของสารเกิดจากการที่อะตอมหรือโมเลกุลของสสารชนิดนั้นมารวมกันอยู่เป็นจำนวนมากโดยระยะห่างระหว่างอะตอมมีค่าคงที่ และมีการจัดเรียงตัวกันเป็นระบบแบบรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอนเป็นระเบียบอย่างต่อเนื่องภายในหนึ่งหน่วยเซลล์ของผลึกอาจประกอบด้วยอะตอมของธาตุเพียงอะตอมเดียวไปจนถึงหลายๆ อะตอมหรือหลายๆ โมเลกุล เซลล์ที่มีปริมาตรเล็กที่สุดที่สามารถใช้เป็นตัวแทนของผลึกนั้นเรียกว่า หน่วยเซลล์ (unit cell) กล่าวคือ ถ้าเอาหน่วยเซลล์นี้มาเรียงต่อกันก็จะได้ผลึกขึ้นมา และเรียกตำแหน่งต่างๆ ของอะตอมที่ระบบสามมิติว่าโครงผลึกหรือแลตทิซ (lattice) ในทางทฤษฎีการกำหนดหน่วยเซลล์จะทำได้ไม่จำกัด แต่ตามปกติจะเลือกหน่วยเล็กที่สุด ที่เป็นไปได้ และมีสมมาตรค่อนข้างสูง ตัวอย่างการเลือกหน่วยเซลล์ในโครงผลึก 2 มิติ ดังรูปที่ 2.1 ในระบบสองมิติ พารามิเตอร์ของโครงผลึก ได้แก่ เวกเตอร์ และ มุม γ ซึ่งเป็นมุมระหว่างเวกเตอร์ทั้งสองทั้งนี้ชนิดของโครงผลึกที่แตกต่างกันที่เป็นไปได้มีเพียง 4 แบบ ดังตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

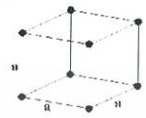
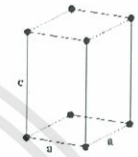
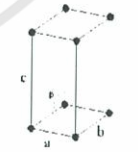
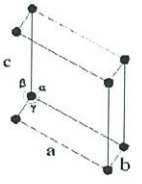
ตารางที่ 2.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ของหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ

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

ในระบบ 3 มิติพารามิเตอร์ของโครงผลึก ได้แก่ ขนาดของเวกเตอร์ มุมα ,β และ γ ซึ่งเป็นมุมระหว่างเวกเตอร์ต่างๆ ดังตัวอย่างในตารางที่ 2.2 ทั้งนี้ สามารถจัดแบ่งรูปแบบของโครงสร้างผลึกขึ้นมาโดยสามารถแบ่งออกได้เป็นสิบสี่แบบในสามมิติ ซึ่งจัดได้เป็นเจ็ดกลุ่ม คือ ไตรคลินิก (triclinic), โมโนคลินิก (monoclinic), ออร์โธรอมบิก (orthorhombic), เตตระโกนัล (tetragonal), คิวบิก (cubic), รอมโบฮีดรัล (rhombohedral) และเฮกซะโกนัล (hexagonal)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 แสดงระบบผลึกทั้งเจ็ดแบบในระบบสามมิติ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 การระบุตำแหน่งทิศทางและระนาบของโครงผลึก (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; ฐิตินัย, 2551)

เนื่องจากผลึกมีสมบัติที่ขึ้นอยู่กับทิศทาง ดังนั้นจึงต้องระบุแน่นอนว่ากำลังศึกษาลักษณะส่วนใดของผลึกอยู่ซึ่งการระบุลักษณะที่ว่าจะกล่าวถึง ตำแหน่ง ทิศทาง และระนาบของผลึกที่กำลังศึกษาอยู่นั้น

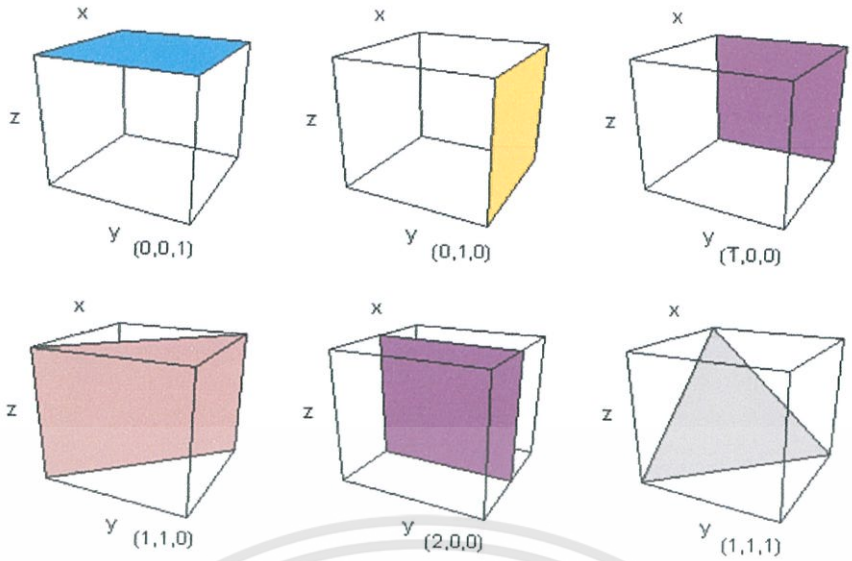
หลักเกณฑ์ในการระบุลักษณะพื้นฐานของผลึก

การระบุตำแหน่ง

1. กรณีทั่วไปจะเขียนเป็น (x,y,z) ให้สังเกตเครื่องหมาย "," ซึ่งคั่นแต่ละค่าตัวอย่างจุด (1,2,3) หมายความว่าเป็นตำแหน่งอยู่ที่พิกัด x=1, y=2 และ z=3 การบอกตำแหน่ง
2. การระบุทิศทางในกรณีทั่วไปจะเขียนเป็น [uvw] ให้สังเกตว่าใช้วงเล็บก้ามปู และไม่มีเครื่องหมาย "," คั่นระหว่างค่าแต่ละค่า ถ้าเป็นทิศทางที่เป็นลบก็จะใส่เครื่องหมาย "-" หรือบาร์ (bar) ไว้บนตัวเลขนั้นๆ เช่น ทิศทางแสดงว่าในแนวแกน z มีค่าเป็นลบ
3. การระบุชื่อระนาบของผลึกจะใช้อักษร (hkl) ให้สังเกตการใช้วงเล็บ และไม่มีเครื่องหมาย "," คั่นโดยที่หากระนาบใดตัดแกนลบก็ให้ใส่เครื่องหมาย "-" หรือบาร์ข้างบนตัวเลขดัชนีมิลเลอร์ค่า hkl เรียกว่า ดัชนีมิลเลอร์ (miller indices) ชื่อระนาบของผลึกเป็นสิ่งที่สำคัญที่สุดอีก ประการหนึ่งในการศึกษาผลึก เพราะในแต่ละระนาบจะประกอบไปด้วยอะตอม ไอออนหรือโมเลกุลเรียงตัวกันอยู่บนระนาบนั้น อาจกล่าวได้ว่าระนาบแต่ละระนาบจะมีความแตกต่างกันเช่นเดียวกับทิศทางการบอกชื่อระนาบ หรือดัชนีมิลเลอร์นั้นทำได้โดย
   3.1 กำหนดจุดที่ระนาบนั้นตัดแกนพิกัดฉากขึ้นมาเป็น (x,y,z) โดยที่หากระนาบตัดแกนใดให้ถือว่าระนาบนั้นตัดแกนนั้นที่ระยะอนันต์ (∞) และหากระนาบใดตัดแกนลบ (-) ก็ให้ใส่เครื่องหมายบาร์ (-) ข้างบนตัวเลขดัชนีนั้น
   3.2 ทำค่าจุดตัดต่างๆที่ได้จากข้อ 1 ทั้งหมดให้เป็นเศษส่วนกลับ
   3.3 ทำให้เป็นเลขจำนวนเต็มโดยการหาค่าผลคูณร่วมน้อย (ค.ร.น) ของค่าเศษส่วนที่ได้จาก ข้อ 2 ซึ่งก็จะได้ค่าตัวเลขดัชนีมิลเลอร์ (hkl) ตามลำดับ

ดังแสดงในรูปที่ 2.2 และ ตารางที่ 2.3 ซึ่งสรุปความสัมพันธ์ระหว่างระนาบต่างๆกับระยะตัดแกนอ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 แสดงการบอกชื่อระนาบต่างๆของผลึก

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

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

มีข้อสังเกตที่ควรรู้เกี่ยวกับดัชนีมิลเลอร์ที่ใช้บอกชื่อระนาบของผลึกเพิ่มเติมดังนี้

สำหรับระบบเฮกซะโกนัลจะระบุดัชนีมิลเลอร์ที่ใช้บอกชื่อระนาบที่ต่างไปเป็น (hkl) โดยที่มีกฎเกณฑ์ว่าดัชนีตัวที่สาม (หรือ i) ซึ่งเพิ่มเข้ามานั้นจะมีความสัมพันธ์กับดัชนีสองตัวแรก (h และ k) ดังนี้

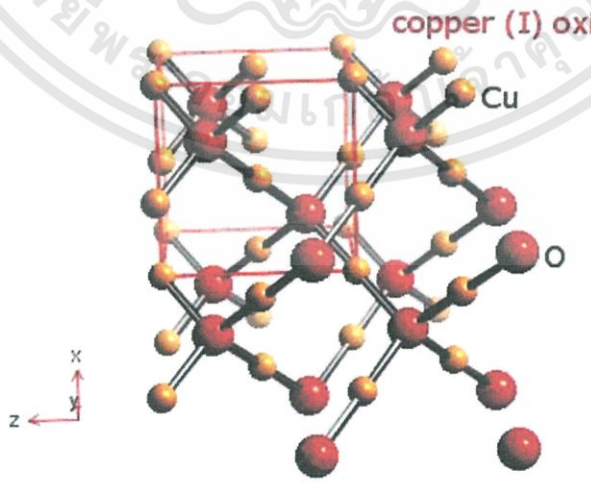
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เช่น ระนาบ (110) จะเรียกว่า ในระบบเฮกซะโกนัล เฉพาะระบบลูกบาศก์เท่านั้นที่จะพบว่าทิศทาง [hkl] จะตั้งฉากกับระนาบที่มีค่าตัวเลขดัชนีเหมือนๆกันนั่นคือ ระนาบ (hkl) ตัวอย่างเช่น ทิศทาง [102] จะตั้งฉากกับระนาบ (102) ดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง คือ วิธีการเคลือบฟิล์มบางในระบบสุญญากาศ โดยอาศัยพื้นฐานทางด้านฟิสิกส์ของพลาสมาเพื่อให้เกิดกระบวนการสปัตเตอริงขึ้นมา ดังนั้นจึงเป็นสิ่งที่สำคัญในการทำความเข้าใจในฟิสิกส์ของพลาสมา วิธีเคลือบฟิล์มบางที่เรียกว่าสปัตเตอริงและหลักการที่เกี่ยวกับหัวดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง ซึ่งจะได้อธิบายในส่วนที่มีความสอดคล้องกับงานวิจัยนี้

2.2 โครงสร้างผลึกของสารประกอบ Cu_2O และ CuO (Bugarinovic,2011; ฐิตินัย, 2556)

หนึ่งหน่วยเซลล์ของสารประกอบ Cu_2O จัดอยู่ในระบบคิวบิกซึ่งประกอบขึ้นจากซับแลตทิซของบอดีเซนเตอร์คิวบิก (BCC) ของอะตอมออกซิเจนกับซับแลตทิซเฟสเซนเตอร์คิวบิก (FCC) ของอะตอมของธาตุ Cu ซับแลตทิซทั้งสองจะอยู่ซ้อนกันโดยที่แลตทิซที่สองจะอยู่เยื้องไปในแนวทะแยงมุมของซับแลตทิซแรกเป็นระยะ 1/4 ของความยาวเส้นทะแยงมุม ค่าคงที่โครงผลึกของหนึ่งหน่วยเซลล์มีค่าเท่ากับ 4.2696 อังสตรอม ในหนึ่งหน่วยเซลล์จะมีอะตอมของธาตุ Cu จำนวน 4 อะตอม และอะตอมของ ธาตุ O จำนวน 2 อะตอมรูปที่ 2.3 แสดงโครงสร้างผลึกของสารประกอบ Cu_2O แต่ละอะตอมของธาตุ Cu จะสร้างพันธะกับอะตอมของธาตุ O จำนวน 2 อะตอม เป็นแนวเส้นตรง แต่ละอะตอมของธาตุ O จะสร้างพันธะกับอะตอมของธาตุ Cu จำนวน 4 อะตอม สารประกอบ Cu_2O มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 143.09 กรัมต่อโมล มีความหนาแน่น 0.6 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จุดหลอมเหลวและจุดเดือดอยู่ ที่อุณหภูมิ 1,408 และ 2,073 เคลวิน ตามลำดับ ไม่ละลายในน้ำ แต่ละลายได้ในกรดเข้มข้น Cu_2O มีสีแดง พบได้ในธรรมชาติ มักใช้ทำสีทาบ้านและสารกำจัดเชื้อราเคยนำไปใช้ทำเป็นไดโอดก่อนที่จะถูกแทนที่ด้วยอะตอมของธาตุ Si



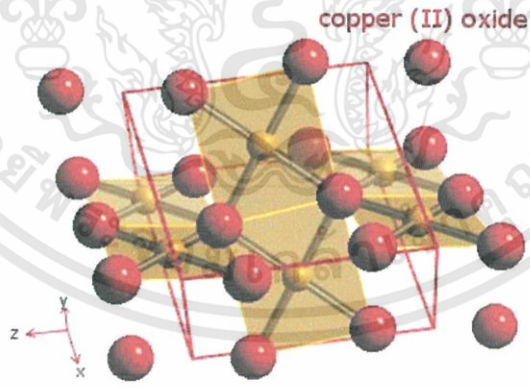
รูปที่ 2.3 โครงสร้างผลึกของสารประกอบ Cu_2O

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารประกอบ CuO มีสีดำพบได้ในธรรมชาติมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบโมโนคลินิก ในหนึ่งหน่วยเซลล์มีอะตอมของธาตุ Cu และอะตอมของธาตุ O อย่างละ 4 อะตอม โครงสร้างผลึกของสารประกอบ CuO จะมีลักษณะ โดดเด่นเฉพาะตัว กล่าวคือ แต่ละอะตอมของธาตุ Cu จะมีอะตอมของธาตุ O ล้อมรอบอยู่ 4 อะตอม กลายเป็นระนาบของสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยมีอะตอมของธาตุ O อยู่ที่มุมของสี่เหลี่ยมจัตุรัส และแต่ละอะตอมของธาตุ O จะมีอะตอมของธาตุ Cu ล้อมรอบอยู่ 4 อะตอม ดังแสดงในรูปที่2.4 มวลโมเลกุลเท่ากับ 79.54 กรัมต่อโมล อุณหภูมิของจุดหลอมเหลวเท่ากับ 16.03 เคลวิน มีความเสถียรสูงแต่ชื้นได้ที่อุณหภูมิห้อง ละลายได้อย่างช้าๆในสารละลายแอมโมเนีย แต่จะละลายได้อย่างรวดเร็ว ในสารละลายแอมโมเนียคาร์บอเนต อีกทั้งยังละลายได้ในกรดโฟมมิก (formic acid) ร้อน และละลายได้ในกรดอะซิติกเดือด สารประกอบ CuO สามารถสลายตัวเป็นสารประกอบ Cu_2O ได้ที่อุณหภูมิ 1,303 เคลวิน ในอากาศความดันปกติ ส่วนปฏิกิริยารีดักชั่นนี้จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิลดลง เมื่ออยู่ในสุญญากาศความดันต่ำ

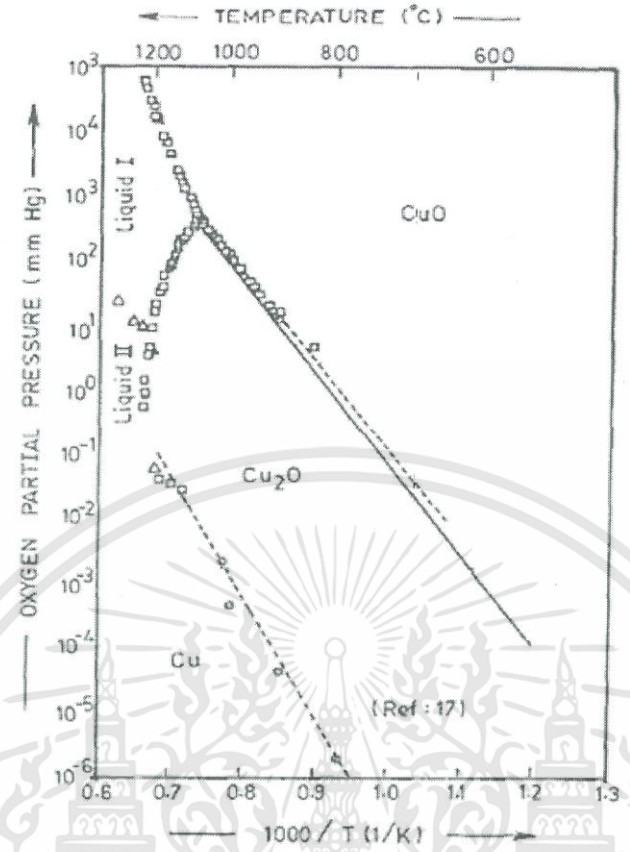
ก๊าซไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์สามารถรีดิวซ์สารประกอบ CuO ให้กลายเป็นโลหะ Cu ที่อุณหภูมิ 523 เคลวิน และสามารถรีดิวซ์ให้กลายเป็นสารประกอบ Cu_2O ที่อุณหภูมิ 423 เคลวิน ส่วนก๊าซแอมโมเนียสามารถรีดิวซ์สารประกอบ CuO ให้กลายเป็นสารประกอบ Cu_2O ที่อุณหภูมิ 698-973 เคลวิน สารประกอบ CuO ให้เป็นส่วนผสมทำไฟเบอร์และเซรามิก ตัวตรวจแก๊สรู้ชนิดต่างๆ และฟลักซ์สำหรับใช้เชื่อมโลหะใช้กำจัดเชื้อรา และเป็นส่วนผสมสำคัญในสีทาเรือ เพื่อป้องกันตะไคร่น้ำ สารประกอบ CuO มีการจัดเรียงอิเล็กตรอนเป็นแบบ $3d^9$ ดังนั้นจึงมีสมบัติเป็นสารแม่เหล็กแอนติเฟอโรที่อุณหภูมิห้อง (Korzhavyi and Johansson, 2011)

รูปที่ 2.5 แสดงแผนภาพเฟสของระบบของสารประกอบ CuO ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันย่อยและอุณหภูมิของแผ่นฐานรองรับในการเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์ในระบบสุญญากาศเฟสที่เกิดขึ้นได้ คือ Cu, Cu_2O และ CuO



รูปที่ 2.4 โครงสร้างผลึกของสารประกอบ CuO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 แผนภาพเฟสของระบบของสารประกอบ CuO

2.2.1 ข้อบกพร่องผลึก (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; ฐิตินัย, 2551)

ในความเป็นจริงแล้วโครงสร้างผลึกจะมีลักษณะไม่สมบูรณ์แบบตามโครงสร้างผลึกในอุดมคติทั้งหมดโดยเฉพาะโครงสร้างผลึกในฟิล์มบาง นอกจากจะทำให้ผลึกขาดความสม่ำเสมอแล้ว ความไม่สมบูรณ์ของผลึกยังมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบาง ได้แก่ สมบัติทางไฟฟ้า สมบัติในการทำปฏิกิริยาเคมี และพฤติกรรมในการเกิดกระบวนการต่างๆ ซึ่งตัวอย่างของข้อบกพร่องผลึกเหล่านี้คือ ข้อบกพร่องผลึกแบบแวแคนซี (vacancy defect) ข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชัน (dislocation) ตลอดจน เกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน (grain and grain boundaries)

2.2.1.1 ข้อบกพร่องผลึกแบบจุด (point defect)

ข้อบกพร่องของผลึกแบบจุดจะเกี่ยวข้องกับการพิจารณาอะตอมที่ผิดเพี้ยนไปจากตำแหน่งเดิมในโครงสร้างผลึก

1. ข้อบกพร่องผลึกแบบแวแคนซี (vacancy defect) ซึ่งมีลักษณะที่อะตอมหรือไอออนหลุดหายไปโดยที่ ถ้าหากเป็นกรณีที่เกิดจาก การที่มีอะตอมหรือไอออนหลุดหายไปจากตำแหน่งของโครงผลึกที่อยู่ภายในย้ายขึ้นไป

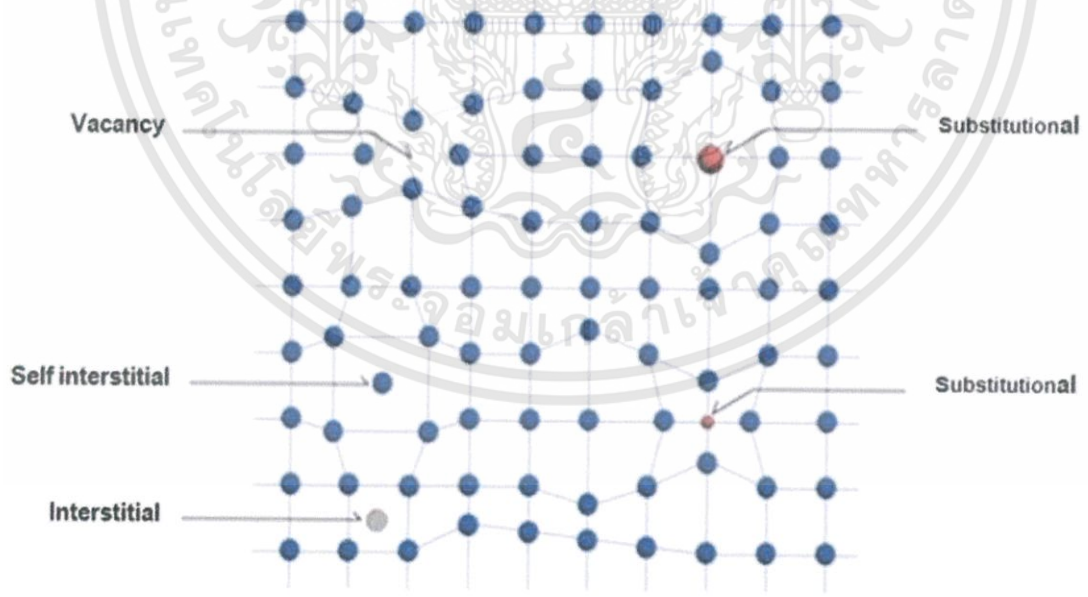
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อยู่ที่บริเวณที่ผิวหน้าของสารจะเรียกว่าข้อบกพร่องโครงผลึกแบบชอตต์กี (Schottky defect)

2. ข้อบกพร่องผลึกแบบอินเตอร์สติเชียล (interstitial defect) ซึ่งเป็นลักษณะที่อะตอมบางอะตอมหรือไอออนที่ไม่อยู่ที่ตำแหน่งของโครงผลึก แต่จะเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างตำแหน่งที่เป็นที่ว่างของโครงผลึก โดยทั่วไปแล้วรัศมีอะตอมที่เข้าไปแทรกอยู่จะเท่าหรือน้อยกว่ารัศมีของอะตอมหลัก
3. ข้อบกพร่องผลึกแบบเฟรนเคล (Frenkel defect) คือเกิดจากการที่มีอะตอมหรือไอออนหลุดหายไปจากตำแหน่งของโครงผลึกที่อยู่ภายในย้ายไปแทรกอยู่ที่ตำแหน่งที่ควรเป็นที่ว่างของโครงผลึก
4. การผิดรูปของโครงผลึกแบบแอนติสตรัคเจอร์ (antistructure disorder) เป็นลักษณะของอะตอมตั้งแต่ 2 อะตอมขึ้นไป เข้าไปอยู่ในตำแหน่งของโครงผลึกทำให้ลักษณะของโครงผลึกไม่เป็นระเบียบ

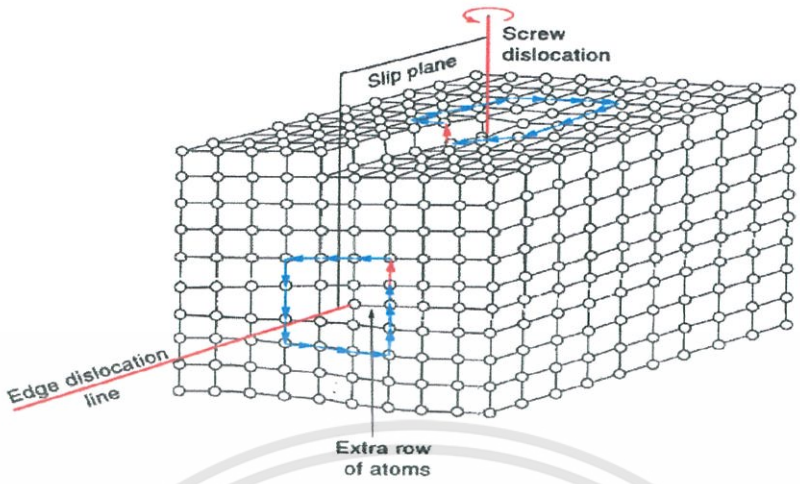
2.2.1.2 ข้อบกพร่องผลึกแบบเชิงเส้น (line defect)

ข้อบกพร่องผลึกแบบเชิงเส้นอาจจะแยกได้อีกอย่างว่า ดิสโลเคชัน เกิดจากความผิดปกติแบบจุดโครงผลึกตั้งแต่ 2 จุดขึ้นไป ซึ่งอาจขาดหายหรือเพิ่มขึ้นมาซึ่งมีผลทำให้เกิดการผิดปกติของโครงผลึกแบบเชิงเส้นการเกิดดิสโลเคชัน อาจจะแบ่งออกได้ตามลักษณะรูปร่างที่สังเกตเห็น คือ ดิสโลเคชันแบบขอบ(edge dislocations) และ ดิสโลเคชันแบบสกรู (screw dislocations) ดังรูปที่ 2.7



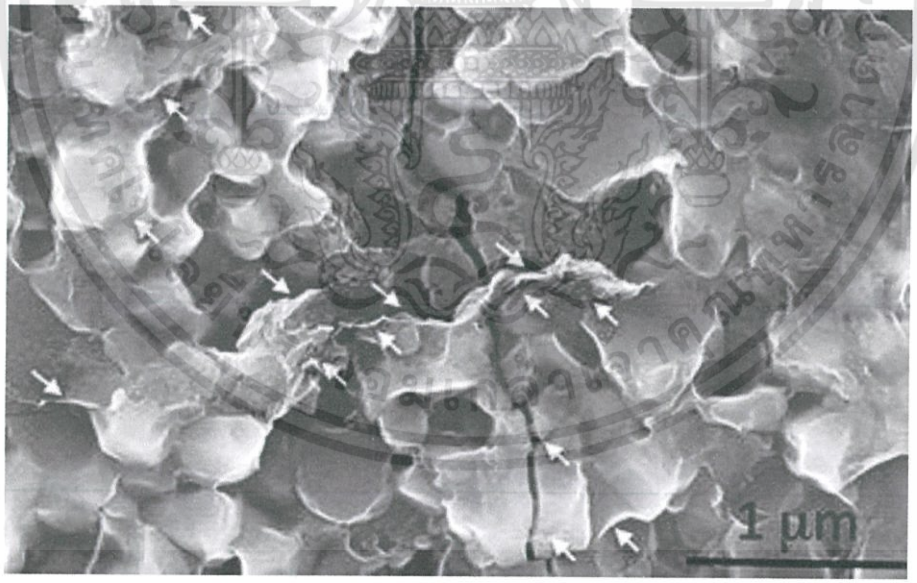
รูปที่ 2.6 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบจุดชนิดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชันแบบขอบและดิสโลเคชันแบบสกรู

ข้อบกพร่องผลึกชนิดนี้มักจะเกิดขึ้นในผลึกพหุพันธ์ (polycrystalline) ที่มีหลายเกรน ดังรูปที่ 2.8 ซึ่งในแต่ละเกรนจะมีการจัดเรียงตัวของผลึกในทิศทางเดียวกัน และมีแนวแบ่งระหว่างแต่ละเกรนที่มีการจัดเรียงตัวของผลึกในทิศทางต่างกัน เรียกว่า ขอบเขตรอยต่อของเกรน ซึ่งเกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน จะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางฟิสิกส์แตกต่างไป จากผลึกในอุดมคติ



รูปที่ 2.8 แสดงเกรนและขอบเขตรอยต่อของเกรน

2.2.1.3 ข้อบกพร่องผลึกแบบแนวระนาบ (planar defect)

เป็นลักษณะของความผิดปกติของผลึกแบบระนาบแบ่งออกเป็น สามกลุ่มใหญ่ๆ คือ การเรียงระนาบผิดลำดับ (stacking failts) ระนาบทวิน (twin planar) เกรนและขอบของเกรน (grain and grain boundaries) ข้อบกพร่องผลึกชนิดนี้มักอาจจะเกิดขึ้นในผลึกพหุพันธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(polycrystallines) ที่มีหลายเกรน ซึ่งในแต่ละเกรนจะมีการจัดเรียงตัวของผลึกในทิศทางเดียวกัน และมีแนวแบ่งระหว่างแต่ละเกรนที่มีการจัดเรียงตัวของผลึกในทิศทางต่างกันว่า ขอบเขตของเกรน ซึ่งเกรนและขอบเขตของเกรน จะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงฟิสิกส์ต่างๆ ไปจากผลึกในอุดมคติ

2.3 การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; ฐิตินัย, 2551)

การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตรมิเตอร์ โดยใช้รังสีเอกซ์ความยาวคลื่นเดียวตกกระทบตัวอย่าง ซึ่งอาจเป็นผลึกเดี่ยว หรือผลึกพหุพันธ์ก็ได้ สารตัวอย่างจะหมุนไปเป็นมุม θ ในขณะที่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณ รังสีเอกซ์จะเคลื่อนที่ไปเป็นมุม θ เพื่อให้การเลี้ยวเบนสอดคล้องกับกฎของแบรกก์

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

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

เมื่อ d_{hkl} คือ ระยะระหว่างระนาบ

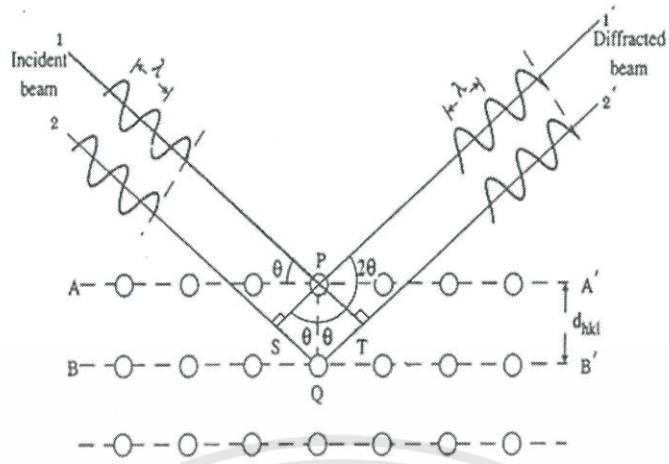
θ คือ มุมของรังสีสะท้อนจากระนาบแบรกก์ของรังสีเอกซ์ ซึ่งจะเท่ากับมุมของรังสีตกกระทบ

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

λ คือ ความยาวคลื่น

ระนาบต่าง ๆ ของผลึกที่ก่อให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ต้องสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ เรียกว่าระนาบแบรกก์ (Bragg plane) และมุมที่รังสีสะท้อนทำกับแนวที่ขนานกับรังสีตกกระทบเรียกว่า มุมเลี้ยวเบน (diffraction angle) ซึ่งมีค่าเป็นสองเท่าของมุมตกกระทบ 2θ ดังรูปที่ 2.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



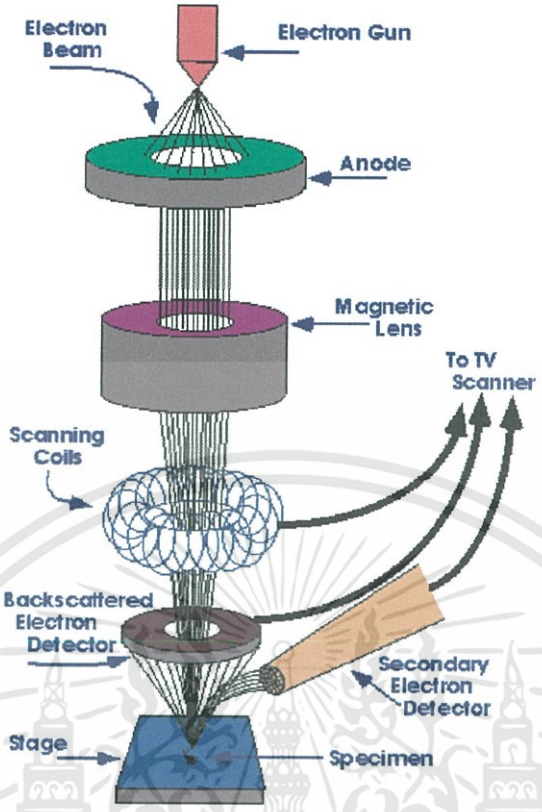
รูปที่ 2.9 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์

2.4 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; ฐิตินัย, 2551)

ในปี พ.ศ. 2478 แมก นอลล์ (Max Knoll) ได้คิดค้นหลักการ และวิธีการในการประดิษฐ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดขึ้น และต่อมา แมนเฟรด วอน อาเดนเน (Manfred Von Ardenne) ได้ประดิษฐ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเครื่องแรกสำเร็จในปี พ.ศ. 2481 โดยเครื่องมือที่ประดิษฐ์ได้นั้นยังมีกำลังขยายไม่สูงมากนัก ต่อมาในปี พ.ศ. 2498 ชาร์เลส์วิลเลียมแอ็ทเลย์ (Charles William Oatley) และทีมงานจากเคมบริดจ์ ได้สร้างกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีความละเอียดสูงถึง 250 อังสตรอม

การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดดังแสดงในรูปที่ 2.10 เริ่มจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ซึ่งมีหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนจากไส้หลอด กลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า พร้อมทั้งบังคับกลุ่มอิเล็กตรอนให้มีลักษณะเป็นลำ โดยลำอิเล็กตรอนจะกราดไปบนพื้นผิวของตัวอย่างโดยขดลวดสนามแม่เหล็กบนระนาบเอกซ์-วายเพื่อทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ อิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกตรวจจับโดยเซนเซอร์ และแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าเพื่อส่งต่อไปให้ระบบสร้างภาพต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ปัจจัยสำคัญสำหรับการใช้งาน SEM

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

ปัจจัยทั้ง 3 มีความสำคัญต่อการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วย SEM ซึ่งปัจจัยทั้ง 3 มีความสัมพันธ์กันโดย d_p แปรผันตรงกับ i_p แต่แปรผันแบบผกผันกับ α_p ตัวอย่าง เช่น เมื่อ d_p มีขนาดลดลง i_p จะมีค่าน้อยลงแต่ α_p จะมีค่ามากขึ้น

2.5 สมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ (Cullity, 1956; Kittel,1971; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; ฐิตินัย, 2551)

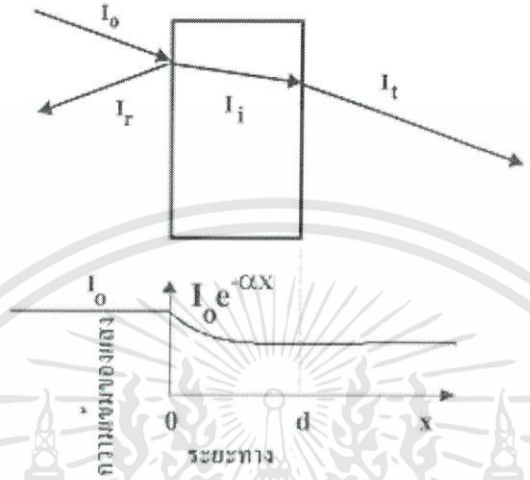
เมื่อแสงตกกระทบกับฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำพฤติกรรมทางแสงที่สังเกตได้ก็คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง ทำให้สามารถนำมาหา ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน (energy band) และหาขนาดค่าช่องว่างแถบพลังงาน (energy gap : E_g) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

2.5.1 สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง

พิจารณาการศึกษาวิธีวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง เมื่อแสงเดินทางไปกระทบฟิล์มบาง แสงบางส่วนจะสะท้อนกลับที่ผิวของฟิล์มบาง บางส่วนของแสงจะเดินทางเข้าไปในแผ่นฟิล์มบางและถูกดูดกลืน ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แสดงแผนภาพเมื่อแสงตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มบาง

วิธีการหาช่องว่างแถบพลังงาน
สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง T มีนิยามดังนี้

$$T=\frac{I_i}{I_0}=(1-R)e^{-\alpha d} \tag{2.3}$$

สัมประสิทธิ์การสะท้อน

$$R=\frac{I_r}{I_0} \tag{2.4}$$

ถ้าแสงตกกระทบฟิล์มบางในแนวตั้งฉากกับฟิล์มบางจะประมาณว่า R มีค่าคงที่ และมีค่าน้อยมาก ดังนั้นสมการจะกลายเป็น

$$T \approx e^{-\alpha d}$$

$$\alpha=\frac{1}{d}\ln\left(\frac{1}{T}\right) \tag{2.5}$$

สารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานยินยอมแบบตรง คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
149333

$$(\alpha h\nu)^2 = A(h\nu - E_g) \quad (2.6)$$

สารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานยินยอมแบบเฉียง คือ

$$(\alpha h\nu)^{1/2} = B(h\nu - E_g) \quad (2.7)$$

ที่ผ่านมาเราพิจารณาโครงสร้างผลึกในอุดมคติมาโดยตลอด แต่ในความเป็นจริงแล้วโครงสร้างผลึกจะมีลักษณะไม่สมบูรณ์แบบโครงสร้างผลึกในอุดมคติทั้งหมด ความไม่สมบูรณ์ของผลึกนั้นมีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารและในบางกรณีตัวแปรทางไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับความไม่สมบูรณ์ของผลึกด้วยซึ่งความไม่สมบูรณ์หรือข้อบกพร่องของโครงผลึกมีหลายชนิดด้วยกัน

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

2.5.2 การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ

เมื่อแสงตกกระทบสารกึ่งตัวนำ ด้วยความเข้ม I_0 แสงบางส่วนจะส่งผ่านออกไปบางส่วนถูกดูดกลืนและส่วนที่เหลือจะสะท้อนกลับมา ดังแสดงในรูปที่ 2.12 โดย

$$T+A+R=1 \quad (2.8)$$

เมื่อ T คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง
A คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง
R คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง

โดยที่

$$R=\frac{(n-1)^2+K^2}{(n+1)^2+K^2} \quad (2.9)$$

และค่าดัชนีหักเหของผลึก

$$n_c = n-iK \quad (2.10)$$

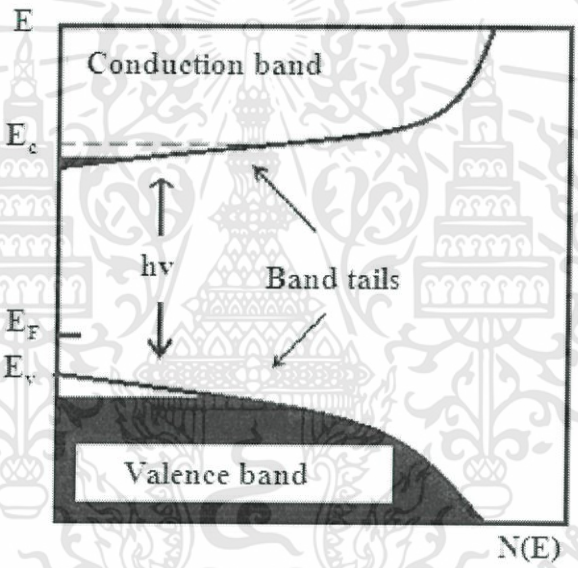
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ n คือ จำนวนจริง

K คือ จำนวนเชิงซ้อน เรียกว่า สัมประสิทธิ์การสูญเสีย (extinction coefficient) โดยทั้ง n และ K เป็นฟังก์ชันของ λ

2.5.3 ส่วนหางของแถบพลังงาน

วัสดุประเภทฟิล์มบางมักมีข้อบกพร่องของผลึกจำนวนมากระดับพลังงานของข้อบกพร่องของผลึกเหล่านี้ จะมีอันตรกิริยาต่อกันส่งผลให้ระดับพลังงานเหล่านี้แผ่ขยายออก โดยจะไม่เป็นระดับพลังงานเฉพาะค่า (discrete level) อีกต่อไปบางครั้งก็แผ่ออกไปจรดขอบบนสุดของแถบวาเลนซ์หรือขอบล่างสุดของแถบนำ ซึ่งเสมือนกับว่าแถบวาเลนซ์หรือแถบนำนี้ มีความหนาแน่นของสถานะทางพลังงาน (energy density of state) ยื่นเข้าไปในช่องว่างแถบพลังงานซึ่งนิยมเรียนส่วนที่ยื่นเข้าไปในช่องว่างแถบพลังงานนี้ส่วนหางของแถบพลังงาน (band tail หรือ Urbach's tail) ดังแสดงในรูป 2.12



รูปที่ 2.12 แสดงส่วนหางของแถบพลังงานซึ่งมีทั้งส่วนหางของแถบวาเลนซ์และส่วนหางของแถบนำ

ในเชิงการทดลองส่วนหางของแถบพลังงานสามารถตรวจสอบได้จากการวัดขอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซึ่ง เออร์บัก (Urbach) ได้แสดงให้เห็นว่าขอบการดูดกลืนผลึกจะเพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โพเนนเชียล ดังความสัมพันธ์

$$\alpha=\alpha_0 \exp\left[\frac{\sigma(E-E_0)}{k_B T}\right] \qquad (2.11)$$

เมื่อ α_0 และ E_0 เป็นพารามิเตอร์ของผลึกแต่ละชนิดส่วน k_B คือ ค่าคงตัวของโบลตซ์มันน์ T คือ อุณหภูมิ (เคลวิน) และ α คือ ค่าความชัน (steepness) ของขอบการดูดกลืนจากสมการที่ (2.10) นี้บอกเป็นนัยๆ ว่ากราฟของความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln\alpha$ กับ พลังงาน (E) จะเป็นเส้นตรงในช่วงพลังงานที่มีความต่ำกว่าขอบการดูดกลืนพื้นฐาน (หรือพิจารณาที่พลังงานต่ำกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่องว่างแถบพลังงานนั่นเอง) การลากส่วนต่อของบริเวณที่เป็นเส้นตรงที่วัดที่อุณหภูมิต่างๆ จะลู่เข้าสู่จุด (E_0,α_0) ซึ่งเรียกจุดนี้ว่า จุดสู่รวม

2.6 สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง (Cullity,1956; Kittel,1971; งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย,2550; งามนิตย์,2551; ฐิตินัย,2551)

จากทฤษฎีแถบพลังงานนั้นสารกึ่งตัวนำสามารถมีขนาดช่องว่างแถบพลังงาน ได้ใหญ่เกินกว่า 2 อิเล็กตรอนโวลต์ พลังงานความร้อนที่อุณหภูมิห้องไม่เพียงพอที่จะกระตุ้นให้เกิดพาหะอิสระได้ ดังนั้น พาหะอิสระของสารกึ่งตัวนำประเภทนี้จึงน้อยส่วนใหญ่ มาจากระดับพลังงานผู้รับหรือศูนย์กลางการรวมตัว (recombination center) ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิใดๆของสารกึ่งตัวนำจึงขึ้นกับความหนาแน่นของพาหะอิสระเหล่านี้

2.6.1 สมบัติการนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ

สมบัติการนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำขึ้นอยู่กับจำนวนพาหะอิสระเป็นสำคัญ กล่าวคือ ถ้าจำนวนอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์เพิ่มมากขึ้น สารกึ่งตัวนำนั้นจะนำไฟฟ้าได้ดียิ่งขึ้นปริมาณความหนาแน่นของพาหะอิสระในสารกึ่งตัวนำถูกกำหนดด้วยขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน, ความหนาแน่นของอะตอมของสารเจือ และอุณหภูมิเป็นสำคัญ ที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน การกระจายของพาหะอิสระ ตามระดับพลังงานของผลึกเป็นตามฟังก์ชันการกระจายแบบเฟอร์มิ-ดิเรก (Fermi-Dirac distribution) ดังสมการที่ (2.12)

$$f(E)=\frac{1}{\exp\left[\left(E-E_F\right)/kT\right]+1} \qquad (2.12)$$

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

E_F คือ ระดับพลังงานเฟอร์มิ (Fermi energy level)

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

T คือ อุณหภูมิในหน่วยของเคลวิน

2.6.2 สภาพนำไฟฟ้า

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

$$J=\sigma E=e\left(\mu_n n+\mu_p p\right)E \qquad (2.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ μ_n, μ_p คือ สภาพคล่องของอิเล็กตรอนและโฮล ตามลำดับ

n คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

p คือ ความหนาแน่นของโฮล

ค่าส่วนกลับของสภาพนำไฟฟ้า เรียกว่า ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (resistivity: ρ) ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

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

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

$$\frac{I}{A} = \sigma\left(\frac{V}{l}\right) \tag{2.15}$$

$$V = \left(\frac{l}{\sigma A}\right) I = \left(\frac{\rho l}{A}\right) I = IR \tag{2.16}$$

สมการข้างต้น คือกฎของโอห์มสำหรับสารกึ่งตัวนำ ความต้านทานเป็นฟังก์ชันกับสภาพความต้านทานหรือสภาพนำไฟฟ้า และขึ้นกับมิติรูปทรงเรขาคณิตของสารกึ่งตัวนำ

2.6.3 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า

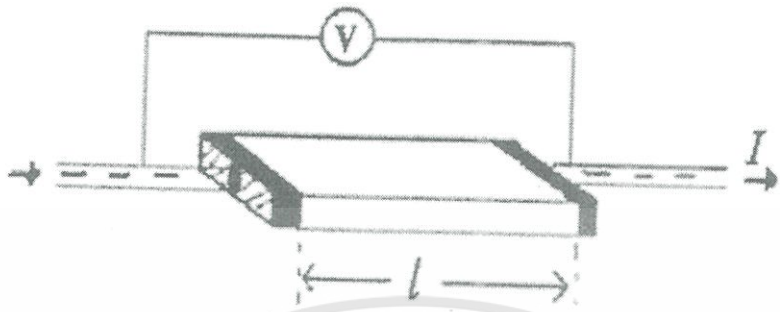
วิธีการวัดสภาพความต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำสามารถกระทำได้หลายวิธี ทั้งวิธีที่ใช้ส่วนของอุปกรณ์ต่อเข้าสัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่าง และวิธีที่ไม่ต้องสัมผัสโดยตรงสำหรับวิธีที่จะกล่าวถึงในที่นี้เป็นวิธีที่ใช้การสัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่าง ซึ่งทำได้โดยการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในชิ้นสารตัวอย่างแล้ววัดความต่างศักย์ระหว่างจุดบนชิ้นสารนั้น

2.6.3.1 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง (direct resistivity method)

โดยทั่วไปแล้วการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้ามักจะวัดความต้านทานก่อน ซึ่งเป็นวิธีวัดโดยตรงนี้หมายถึง วัดค่าความต้านทานรวมของสสารจากนั้นมาหาค่าความยาว และพื้นที่หน้าตัดของสสารนั้น การวัดวิธีนี้จะต้องทำให้สสารที่ต้องการวัดมีรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอน เพื่อที่จะวัดค่าพื้นที่หน้าตัดและความยาวให้ได้แน่นอน เช่น แท่งกลมทรงกระบอก แท่งสี่เหลี่ยม เป็นต้น จากนั้นจึงให้กระแสไฟฟ้าเข้าไปที่ปลายด้านหนึ่ง และให้กระแสไหลออกผ่านสารตัวอย่างที่ปลายอีกด้านหนึ่ง ขณะเดียวกันก็วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จุดปลายทั้งสองนั้นพร้อมๆกัน จากที่ทราบค่ากระแสและศักย์ไฟฟ้านี้ สามารถนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าได้ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อกำหนด R เป็นความต้านทานรวมจะมีความสัมพันธ์กับความต้านทานจำเพาะและพื้นที่หน้าตัด A บริเวณที่ปล่อยกระแสไหลเข้าไปและ l เป็นระยะทางระหว่างขั้วศักย์ไฟฟ้าที่วัด



รูปที่ 2.13 แสดงการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง

$$R = \rho \frac{l}{A} \tag{2.17}$$

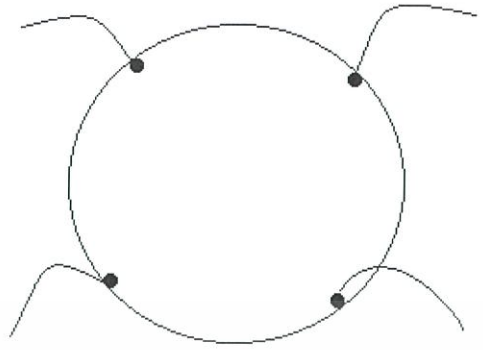
$$\rho = R \times \frac{A}{l} = \left(\frac{V}{I}\right)\left(\frac{A}{l}\right) \tag{2.18}$$

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

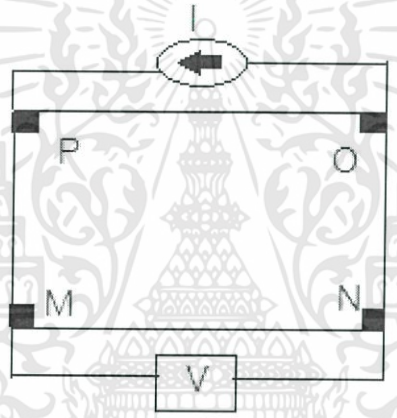
2.6.3.2 การวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์

วิธีการวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ดังแสดงในรูปที่ 2.14 และ 2.15 เป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับสำหรับการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของชิ้นสารตัวอย่างที่เป็นฟิล์มบางที่มีความหนาสม่ำเสมอ และมีรูปร่างไม่แน่นอน โดยขั้วสัมผัสจะอยู่บริเวณขอบของชิ้นสารตัวอย่าง รอยต่อระหว่างขั้วสัมผัสที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะต้องไม่ขัดขวางการไหลของกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 แสดงตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชิ้นสารตัวอย่างเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์



รูปที่ 2.15 แสดงการต่อขั้วเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์

การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถทำได้โดยจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าขั้ว P-O ทำการวัดความต่างศักย์ตกคร่อมขั้ว M-N จะทำให้ได้ค่า R_1 จากสมการที่ (2.19)

$$R_1 = \frac{V_{MN}}{I_{PO}} \tag{2.19}$$

หลังจากนั้นทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าที่ขั้ว P-M แล้วทำการวัดความต่างศักย์ตกคร่อมขั้ว O-N จะได้ค่า R_2 จากสมาการที่ (2.20)

$$R_2 = \frac{V_{ON}}{I_{PM}} \tag{2.20}$$

เมื่อได้ค่า R_1 และ R_2 มาแล้วสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานแผ่นได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_{sh} = f\left(\frac{\pi}{\ln 2}\right)\left(\frac{R_1+R_2}{2}\right) \qquad (2.21)$$

เมื่อ f คือ แฟกเตอร์ค่าแก้ของแวนเดอร์เพาว์ (Van der pauw correction factor)

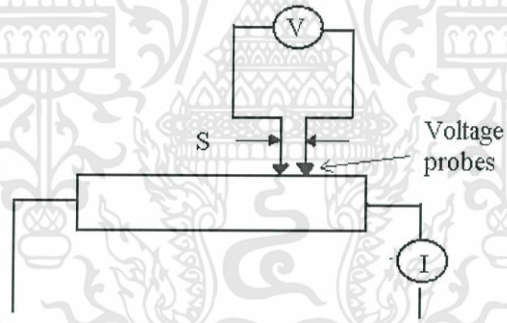
$$f = 1-\left(\frac{\ln 2}{2}\right)\left(\frac{R_1-R_2}{R_1+R_2}\right)^2 \qquad (2.22)$$

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\rho = R_{sh}d \qquad (2.23)$$

2.6.3.3 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว

การวัดด้วยวิธีนี้มีลักษณะใกล้เคียงกับวิธีวัดโดยตรงแตกต่างที่ลักษณะของขั้วไฟฟ้าของการวัดศักย์ไฟฟ้าจะวัดบนสารตัวอย่าง ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.16 วิธีการวัดชนิดนี้เป็นวิธีที่พัฒนาขึ้นจากแบบแรกเพื่อกำจัดศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อหัวท้ายของผิวสัมผัสให้น้อยลงและสามารถตรวจสอบความสกปรกบนพื้นผิวของชิ้นสารตัวอย่างได้ด้วย

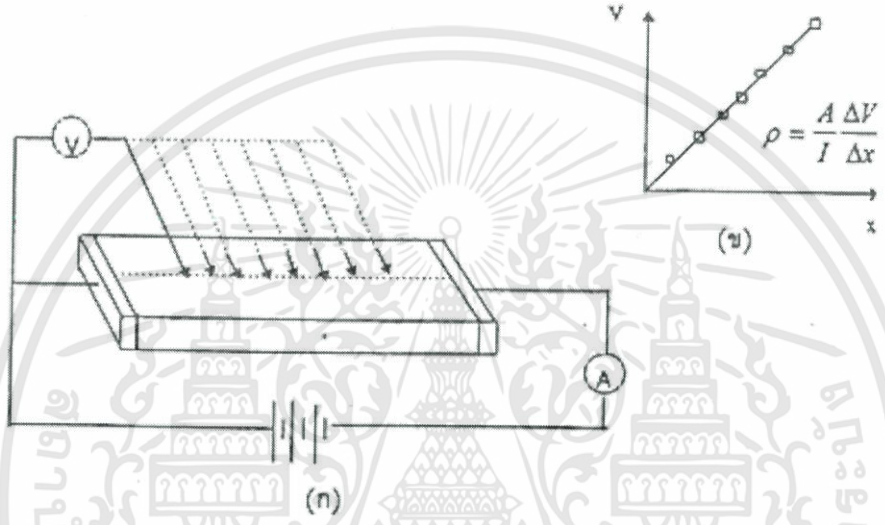


รูปที่ 2.16 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว

ข้อจำกัดของการวัดด้วยวิธีนี้คือ จะต้องวัดบนสารตัวอย่างที่มีความหนาสม่ำเสมอและมีรูปทรงเลขาคณิตแน่นอนโดยพยายามให้กระแสผ่านเข้าไปในสารตัวอย่างมีค่าน้อยที่สุดเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความร้อนภายในสาร เพราะค่าความต่างศักย์ที่วัดได้อาจจะไม่ถูกต้อง อีกทั้งในการวัดทุกครั้งจะต้องใช้โวลต์มิเตอร์ที่มีค่าความต้านทานภายในสูงและจุดที่ต้องการวัดศักย์ไฟฟ้าควรจะอยู่ห่างจากจุดที่ปล่อยกระแสเข้าและออกพอสมควร เพื่อป้องกันสารเจือเข้าไปทำการรวมตัวกันระหว่างจุดที่ทำกรวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า หากมีสารเจือเข้ามารวมตัวที่บริเวณที่วัดนี้จะมีผลทำให้เกิดการรวมตัวกับพาหะข้างน้อย (minority carriers) บริเวณนั้น ทำให้การวัดค่าความต้านทานจำเพาะที่วัดได้สูงเกินความเป็นจริง นอกจากนี้ควรคำนึงถึงความสม่ำเสมอของเส้นสมศักย์ (equi-potential line) โดยการวัดที่บริเวณจุดที่คิดว่าเป็นเส้นสมศักย์นั้นสม่ำเสมอ (ตรงกลางของสารตัวอย่าง) สัดส่วนระหว่างระยะขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้าต่อพื้นที่ตรงจุดที่ปล่อยกระแสเข้าและออกจะต้องมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่ามากกว่าสามเท่า $\frac{l}{A} > 3$ เมื่อ l คือระยะห่างระหว่างขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้า และ A คือ พื้นที่บริเวณให้กระแสไฟฟ้า ข้อควรคำนึงถึงอีกประการคือ สารที่นำมาวัดมีโครงสร้างผลึกชนิดใด เป็นรูปลูกบาศก์หรือไม่ ถ้าไม่ใช่จะต้องทราบทิศทางของการวัดว่าอยู่ในทิศทาง หรือระนาบใดของผลึก การวัดควรใช้วิธีตรึงขั้วหนึ่งไว้และเลื่อนตำแหน่งอีกขั้วหนึ่งออกไปเป็นระยะๆ โดยมีมาตราส่วนบอกระยะและนำมาเขียนกราฟ ดังรูปที่ 2.17 (ก) และ (ข) ความชันที่จะได้จะเป็นค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าข้อดีของการวัดแบบสองขั้วในหลายๆตำแหน่งนี้จะสามารถแยกสภาพต้านทานไฟฟ้าที่สภาพผิวระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำและความต้านทานจำเพาะภายในสารกึ่งตัวนำได้



รูปที่ 2.17 การวัดค่าความต้านทานแผ่นโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น
ก. การวัดแบบสองขั้วโดยมีการเลื่อนระยะที่ขั้วหนึ่ง
ข. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับระยะทางที่ได้จากการวัดชนิดเลื่อนขั้วไฟฟ้า

2.6.4 ปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall Effect)

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถเขียนในเทอมของสภาพคล่องของพาหะได้และความหนาแน่นพาหะด้วยความสัมพันธ์
กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากอิเล็กตรอน

$$\rho = \frac{1}{ne\mu_e} \qquad (2.24)$$

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากโฮล

$$\rho = \frac{1}{pe\mu_p} \qquad (2.25)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากพาหะสองชนิดคืออิเล็กตรอน และ โฮลซึ่งมีปริมาณใกล้เคียงกันสภาพต้านทานไฟฟ้าที่แท้จริงคือ

$$\rho = \frac{1}{e\left(n\mu_e + p\mu_p\right)} \tag{2.26}$$

เมื่อ n คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระ

p คือ ความหนาแน่นของโฮล

μ_e และ μ_p คือ สภาพคล่องของอิเล็กตรอนและโฮล

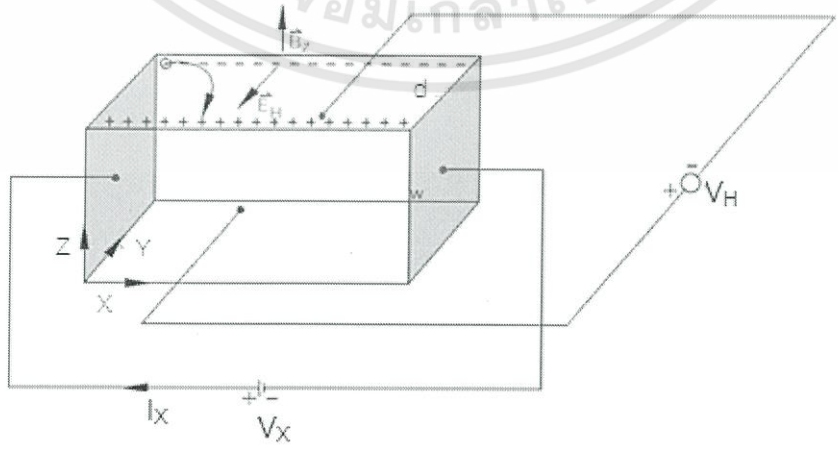
นั่นคือ หากทราบสภาพต้านทานไฟฟ้า และสภาพคล่องของพาหะจะทำให้สามารถคำนวณค่าความหนาแน่นของะพาหะข้างมากได้จากสมการที่ (2.27) และ (2.28) คือ
กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

$$n = \frac{1}{e\rho\mu_e} \tag{2.27}$$

ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอน
กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดพี

$$p = \frac{1}{e\rho\mu_p} \tag{2.28}$$

เราสามารถคำนวณหา ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ค่าสภาพคล่องของพาหะ ได้หลายวิธี วิธีที่สะดวกและมักนิยมใช้กันอย่างกว้างขวางคือ การคำนวณจากการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ ปรากฏการณ์ฮอลล์ถูกค้นพบในปี พ.ศ.2422 โดย เอ็ดวิน เฮอร์เบิร์ท (Edwin Herbert Hall)



รูปที่ 2.18 แสดงแผนภาพการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์บนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำชนิดพี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาชิ้นสารกึ่งตัวนำชนิดพีที่เป็นรูปทรงดังแสดงในรูปที่ 2.18 ซึ่งมีกระแสไฟฟ้า I ไหลผ่านในแนว x หรืออาจมองว่ามีประจุบวกเคลื่อนที่ไปในทิศ x ด้วยความเร็วลอยเลื่อน V_x เกิดเป็นกระแสไฟฟ้าในแนวทิศทาง x คือ I_x ดังสมการที่ (2.29)

จาก

$$I = nqvA \tag{2.29}$$

ดังนั้น

$$I_x = qnv_x(wd) \tag{2.30}$$

จากกฎของโอห์ม

$$V = IR \tag{2.31}$$

$$R = \frac{\rho L}{A} \tag{2.32}$$

จากรูปที่ 2.18

$$A = w \times d \tag{2.33}$$

ถ้าทราบความต่างศักย์ (V_x) ระหว่างปลายทั้งสองของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น สามารถหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าได้จากสมการที่ (2.30) และ (2.31) และ (2.33)

$$\rho = \frac{v_x}{I_x} \times \frac{A}{L} = \frac{v_x}{I_x} \times \frac{wd}{L} \tag{2.34}$$

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

$$F = q(v_x \times B_z) + qE_y \tag{2.35}$$

เมื่อแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่กระทำต่อโฮลมีค่าเท่ากันจะเกิดสภาวะสมดุลเชิงความร้อน หรือสภาวะคงตัว (steady state) ทำให้โฮลเคลื่อนที่ในทิศ x ดังเดิม เพราะฉะนั้นจะทำให้ได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_y = v_x B_x = \frac{1}{qn} \cdot \frac{I_x}{wd} \cdot B_z \tag{2.36}$$

หากพิจารณาสมการที่ (2.36) จะเห็นว่าสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดขึ้นเป็นปฏิภาคกับความหนาแน่นกระแสและสนามแม่เหล็ก สามารถเขียนได้ในรูปของ

$$E_y = R_H \cdot J_x \cdot B_z \tag{2.37}$$

เมื่อ

$$J_x = \frac{I_x}{wd} \tag{2.38}$$

แล้ว

$$R_H = \frac{E_y}{J_x B_z} = \frac{1}{qn} \tag{2.39}$$

เรียก R_H ว่าเป็นสัมประสิทธิ์ฮอลล์หรือค่าคงตัวฮอลล์ (Hall coefficient) ซึ่งนิยามว่า เป็นสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดจากความหนาแน่นกระแสของพาหะขนาด 1 หน่วยไหลผ่านภายใต้สนามแม่เหล็กขนาด 1 หน่วย

เราอาจทราบศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากสนามไฟฟ้าฮอลล์ โดยอินทิเกรตสนามไฟฟ้าฮอลล์ตลอดความกว้าง (w) ของแผ่นสารและเรียกความต่างศักย์นี้ว่า ความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) นั่นคือ

$$V_H = \int_0^w E_y dy = \int_0^w \frac{1}{qn} \times \frac{I_x B_z}{wd} dy = \frac{1}{qn} \times \frac{I_x B_z}{d} \tag{2.40}$$

สัมประสิทธิ์ฮอลล์ที่ได้จากการวัด คือ

$$R_H = \frac{V_H}{I_x} \times \frac{d}{B_z} \tag{2.41}$$

ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนตามนิยาม คือ

$$n = \frac{1}{qR_H} = \frac{I_x}{V_H} \times \frac{B_z}{qd} \tag{2.42}$$

โดยทั่วไปพาหะอิสระที่เคลื่อนที่ในสารกึ่งตัวนำ มักประสบกับกลไกการกระเจิงหลายๆ ชนิด กลไกการกระเจิงของพาหะในสารกึ่งตัวนำจะเป็นกลไกที่ขึ้นอยู่กับพลังงานของพาหะ โดยที่ช่วงเวลาการปลอดการกระเจิง (τ) จะแสดงได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\tau = \tau(E) \tag{2.43}$$

เมื่อคิดผลรวมจากการกระเจิงที่ขึ้นกับพลังงานของพาหะ สัมประสิทธิ์ฮอลล์สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

$$R_H = \frac{r}{nq} \tag{2.44}$$

กรณีสารกึ่งตัวนำชนิดพี

$$R_H = \frac{r}{pq} \tag{2.45}$$

เมื่อ r คือ แฟกเตอร์การกระเจิง (scattering factor) ของพาหะในปรากฏการณ์ฮอลล์ ซึ่งสามารถนิยม ค่า r ได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$r = \frac{\langle \tau \rangle^2}{\langle \tau^2 \rangle} \tag{2.46}$$

r มีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ขึ้นอยู่กับกลไกการกระเจิงของพาหะ เช่น การกระเจิงเนื่องจากโครงผลึก หรือการกระเจิงเนื่องจากอะตอมของสารเจือปนที่ถูกไอออไนซ์สัมประสิทธิ์ฮอลล์ แปรค่าตามสนามแม่เหล็กและอุณหภูมิ ซึ่งจะมีค่าใกล้ 1 เมื่อชิ้นสารอยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กความเข้มสูงมาก ดังนั้นเราทราบค่าของ r จากการทดลองด้วยความสัมพันธ์

$$r = \frac{R_H(B)}{R_H(B=\infty)} \tag{2.47}$$

ในทางปฏิบัติสนามแม่เหล็กที่ใช้วัดโดยทั่วไปมีค่าอยู่ระหว่าง 5 – 10000 เกาส์ ซึ่งค่า r ในช่วงนี้มีการเปลี่ยนแปลงไม่มาก ดังนั้นอาจประมาณได้ว่าเป็นค่าคงที่

จากสมการที่ (2.41) และ (2.42) สามารถนิยามค่าสภาพคล่องฮออล์ (μ_H) ได้เป็น

$$\mu_H = \left|\frac{R_H}{\rho}\right| = r_\mu \tag{2.48}$$

หรือจากสมการที่ (2.39) และ (2.44)

$$\mu_H = \frac{V_H}{I_H} \cdot \frac{d}{B_z} \cdot \frac{1}{\rho} \tag{2.49}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าสภาพคล่องฮอลล์แตกต่างจากค่าสภาพคล่องที่ได้จากการนำไฟฟ้าด้วยอัตราส่วนของ r ซึ่งมีค่ามากกว่า 1 โดยทั่วไป เพื่อลดความซับซ้อนเมื่อคำนวณความหนาแน่นของพาหะจึงมักประมาณว่า r มีค่าเท่ากับ 1 ความหนาแน่นของพาหะ ที่คำนวณจาก ปรากฏการณ์ของฮอลล์จึงอาจสูงกว่าความหนาแน่นของพาหะที่แท้จริงถึง 30 เปอร์เซ็นต์

2.6.5 การศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์

เทคนิคนี้ได้รับแวนเดอร์เพาว์ (van der pauw) สาระสำคัญของเทคนิคนี้อยู่ที่การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของแผ่นสารตัวอย่างรูปทรงใดๆ ซึ่งสามารถทำได้อย่างแม่นยำโดยไม่จะเป็นต้องทราบ ลักษณะของรูปแบบการกระจายของ เส้นทางเดินกระแสที่ไหลการพัฒนาขึ้นมาจากพื้นฐานของวิชาคณิตศาสตร์ คือ คอนฟอร์มอล แมปปิง (conformal mapping) โดยนักวิทยาศาสตร์ชื่อ แวนเดอร์เพาว์ (van der Pauw) ภายในแผ่นสาร ถ้าสารตัวอย่างประพฤติตามเงื่อนไขต่อไปนี้

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

พิจารณาชิ้นสารรูปทรงเป็นแผ่นบางใดๆ และมีขั้วสัมผัสเล็กๆ M, N, O และ P กระจายอยู่ที่บริเวณขอบของแผ่นซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขข้างต้น



รูปที่ 2.19 แสดงการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์บนสารตัวอย่างที่เป็นแผ่นบางที่มีรูปทรงใดๆ

ในการวัดสภาพคล่องฮอลล์ หากกระบวนการวัดกระทำภายใต้สนามแม่เหล็ก ความเข้ม B ที่กระทำตั้งฉากกับระนาบแผ่นสาร กระแสไฟฟ้าจ่ายเข้าในแนวทะแยงมุมขั้ว M, O และวัดความต่างศักย์จากขั้ว N, P

นิยาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_{MNOP} = \frac{V_{NP}}{I_{MO}} \tag{2.50}$$

สัมประสิทธิ์ฮอลล์จากเทคนิคของแวนเดอร์เพาว์ คือ

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

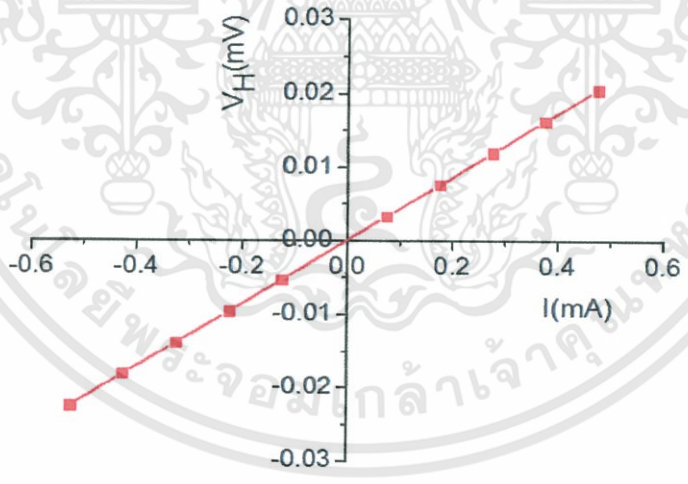
เมื่อ V_H คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์หรือผลต่างระหว่างค่า V_{NP} ในขณะที่มีสนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็ก

d คือ ความหนาของชิ้นสารตัวอย่าง

B คือ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก

จากสมการที่ (2.51) จะได้ว่า

$$R_H = \frac{V_H}{I}\left(\frac{d}{B}\right) \tag{2.52}$$



รูปที่ 2.20 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) เมื่อทำการเขียนกราฟระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) กับ ค่ากระแสไฟฟ้า (I) ที่ได้จากการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราจะได้ลักษณะกราฟดังรูปที่ 2.20 โดยที่ ความชันของกราฟที่ได้จะ มีค่าเป็น $\frac{V_H}{I}$ สภาพคล่องพาหะของฮอลล์สามารถคำนวณได้จาก

$$\mu_H = \frac{R_H}{\rho} \tag{2.53}$$

และสามารถคำนวณหาระยะทางเฉลี่ยที่ปลอดการกระเจิงได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$I = \left(\frac{h}{2e}\right)\left(\frac{3n}{\pi}\right)^{1/3} \mu_H \tag{2.54}$$

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

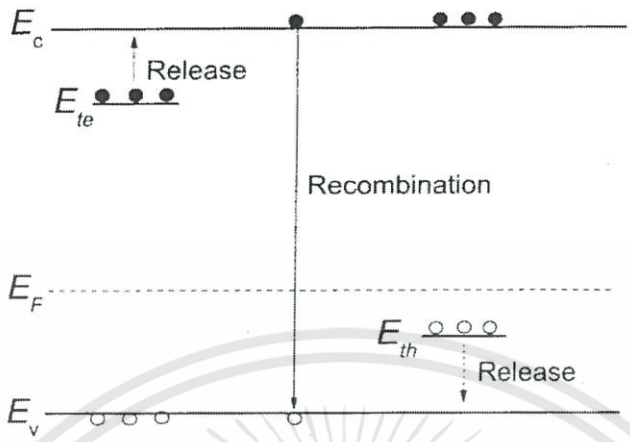
ในทางปฏิบัติการเตรียมสารให้มีรูปทรงตามเงื่อนไขทั้ง 4 ข้อดังกล่าวอาจเป็นไปได้ยาก โดยเฉพาะขนาดและตำแหน่งของขั้วสัมผัสซึ่งมักไม่เป็นจุดและไม่อยู่ที่ขอบของชิ้นสารตามทฤษฎีจึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของผลการวัด

2.7 สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง (งามนิตย์, 2556; ฐิตินัย, 2556)

ในสารกึ่งตัวนำมักมีข้อบกพร่องผลึกเสมอ ข้อบกพร่องผลึกมีหลายชนิด ข้อบกพร่องผลึกบางชนิดมีคุณสมบัติ ในการจับอิเล็กตรอนและ/หรือโฮลอิสระได้ จึงมักเรียกว่ากับดักพาหะ กับดักพาหะชนิดต่างๆ จะปรากฏเป็นระดับพลังงานในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ โดยในรูปที่ 2.28 มีทั้งระดับพลังงานของกับดักพาหะชนิดจับโฮล (E_{th}) และกับดักพาหะชนิดจับอิเล็กตรอน (E_{te}) (Jiang, 2012) คำว่าการปลดปล่อย (release) เป็นกลไกที่กับดักพาหะปล่อยอิเล็กตรอนให้กับแถบนำ และเป็นกับดักพาหะชนิดปล่อยโฮลให้กับแถบวาเลนซ์ ส่วนคำว่าการรวมตัว (recombination) เป็นกลไกที่อิเล็กตรอนในแถบนำทรานซิชันลงมารวมตัวกับโฮลในแถบวาเลนซ์โดยไม่ผ่านกับดักพาหะ ขณะที่สารกึ่งตัวนำยังไม่ได้มีการฉายแสงกับดักพาหะจะมีการจับอิเล็กตรอนหรือจับโฮลอยู่ก่อนแล้ว ส่วนอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำและโฮลในแถบวาเลนซ์มีปริมาณน้อย สารกึ่งตัวนำจึงนำกระแสไฟฟ้าได้ไม่ดี กระแสมืด (dark current) จึงมีค่าน้อย แต่เมื่อมีการฉายแสงลงบนสารกึ่งตัวนำจะเกิดกระบวนการสร้างอิเล็กตรอนและโฮลอิสระขึ้นในแถบนำและแถบวาเลนซ์ตามลำดับ เนื่องจากการดูดกลืนโฟตอนที่มีพลังงานสูงเพียงพอ เมื่อไบแอสด้วยแรงดันไฟฟ้าให้กับสารกึ่งตัวนำ กระแสโฟตอนจะมีปริมาณเพิ่มขึ้น แต่เมื่อหยุดฉายแสงหรือหยุดการกระตุ้นด้วยแสง กระแสไฟฟ้าควรลดลงสู่ค่ากระแสมืดเหมือนในขณะที่ไม่มีการฉายแสง แต่บางครั้งพบว่า กับดักพาหะที่จับอิเล็กตรอนและ/หรือจับโฮล มีพฤติกรรมไม่ปล่อยอิเล็กตรอนหรือโฮลออกมาทันทีอย่างปกติธรรมดา นั่นคือยังมีประจุค้างอยู่ในกับดักพาหะ ดังนั้นอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำและ/หรือโฮลในแถบวาเลนซ์จึงยังคงปรากฏอยู่มากเพื่อทำหน้าที่ในการรักษาความเป็นกลางทางไฟฟ้าโดยปกติกลไกการปลดปล่อยจะใช้เวลานานกว่ากลไกการรวมตัวแต่เนื่องจากกับดักพาหะมีการปล่อยอิเล็กตรอนและ/หรือโฮลออกมาช้ามาก ส่งผลให้กลไกการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รวมตัวใช้เวลายิ่งนานขึ้นไปอีก จึงเป็นที่มาของ ค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงดื้อรั้น (persistent photoconductivity)



รูปที่ 2.21 แสดงระดับพลังงานของกับดักพาหะชนิดจับอิเล็กตรอน (E_{te}) และ กับดักพาหะชนิดจับโฮล (E_{th}) ที่ปรากฏในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ จุดทึบและจุดโปร่งจะแสดงถึงอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ

กำหนดให้ชิ้นสารมีความกว้าง w ความหนา w และยาว 1 ให้กระแสไฟฟ้า (I) ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัด wd กระแสไฟฟ้า (I) จะเป็นดังสมการ

$$I = en\nu A \tag{2.55}$$

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

$$\nu = \frac{\mu V_a}{l} \tag{2.56}$$

แทนสมการที่ (2.56) ลงในสมการที่ (2.55) จะได้

$$I = en\mu n_a\left(\frac{wd}{l}\right) \tag{2.57}$$

แต่เนื่องจากความหนาแน่นของพาหะอิสระ (n) เกิดมาจากกับดักพาหะ ดังนั้น ความหนาแน่นของพาหะอิสระ (n) ที่สัมพันธ์กับกับดักพาหะชนิดที่ i ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา จะแสดงได้ ดังนี้คือ (Studenikin, 1998)

$$n = N_{ti}\exp\left(-t/\tau_i\right) \tag{2.58}$$

แทนสมการที่ (2.58) ลงในสมการที่ (2.57) จะได้ว่า กระแสไฟฟ้า I_i ที่เกิดจากกับดักพาหะชนิด i คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

กระแสไฟฟ้ารวมทั้งหมด (I) ที่สัมพันธ์กับกับดักพาหะทุกชนิดจะเป็นดังนี้ คือ

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

เมื่อ N_i คือ ความหนาแน่นของกับดักพาหะต่อปริมาตรชนิดที่ i ซึ่งสามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$N_{ti} = \frac{I}{e\mu V_a}\left(\frac{l}{wd}\right) \exp\left(t/\tau_i\right) \tag{2.61}$$

สำหรับกรณีฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ จะประมาณว่า ความหนา d มีค่า น้อยมาก ดังนั้น จากสมการที่ (2.57) จะเขียนใหม่ได้ว่า (Gu, 2005;Huang, 2011)

$$I = e\mu \left(\frac{w}{l}\right)(nd) V_a = e\mu \left(\frac{w}{l}\right) \sigma_t V_a \tag{2.62}$$

เมื่อ σ_t คือ ความหนาแน่นของกับดักพาหะต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ แต่ถ้ากับดักพาหะมีหลายชนิด กระแสรวม (I) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ ที่สัมพันธ์กับกับดักพาหะทุกชนิดจะเป็นดังนี้ คือ

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

เมื่อ σ_{ti} คือความหนาแน่นของกับดักพาหะต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ชนิดที่ i ซึ่งสามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$\sigma_{ti} = \frac{I}{e\mu V_a}\left(\frac{l}{w}\right) \exp\left(t/\tau_i\right) \tag{2.64}$$

โดยที่

V_H	คือ	แรงดันไบแอสที่ป้อนให้กับสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง มีหน่วยเป็นโวลต์
μ	คือ	สภาพคล่องของพาหะ มีหน่วยเป็น ตารางเซนติเมตรต่อ(โวลต์-วินาที)
w	คือ	ความกว้างของสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง มีหน่วยเป็น เซนติเมตร
l	คือ	ความยาวของสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีหน่วยเป็น เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

d	คือ	ของสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีหน่วยเป็น เซนติเมตร
I	คือ	กระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากการทดลองที่เวลา t ใดๆ
τ_r	คือ	ช่วงชีวิตขาลง (decay time)
N_{ti}	คือ	ค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะในชิ้นสารตัวอย่าง มีหน่วยเป็นต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
σ_{ti}	คือ	ค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะในฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ มีหน่วยเป็นต่อตารางเซนติเมตร

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

$$\tau_r = \tau_{ro} \exp\left(\frac{E_t}{kT}\right) \tag{2.65}$$

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

เมื่อ

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

ดังนั้น

$$E_t = \frac{(1000)k(\text{slope})}{q} \tag{2.66}$$

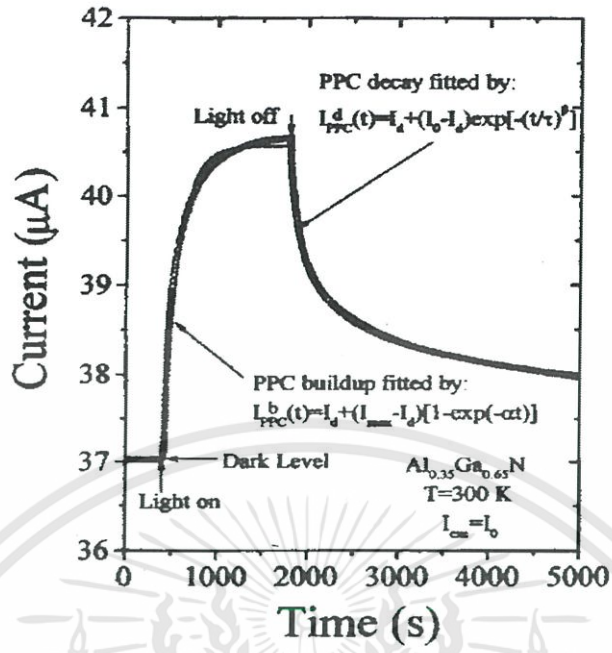
ในการศึกสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงดื้อรั้นจะต้องมีการฉายแสงให้กับสารตัวอย่าง จะได้ว่ากระแสโฟโต (I_p) จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลา (t) ดังรูปที่ 2.22 ซึ่งจะเรียกว่าเป็น กระแสโฟโตขาขึ้น (rise current) ดังความสัมพันธ์ (Ghosh, 2007)

$$I_p = I_0\left[1 - \exp\left(-t/\tau_r\right)\right] \tag{2.67}$$

เมื่อ I_0 คือกระแสเริ่มต้นของกระแสโฟโตขาขึ้น (เมื่อ t =0) หลังจากหยุดการฉายแสง กระแสโฟโตจะลงลดตามเวลา (t) ซึ่งจะเรียกว่าเป็นกระแสโฟโตขาลง (decay current) จะแสดงดังความสัมพันธ์ (Ghosh, 2007)

$$I_p = I_0 \exp\left(-t/\tau_d\right) \tag{2.68}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

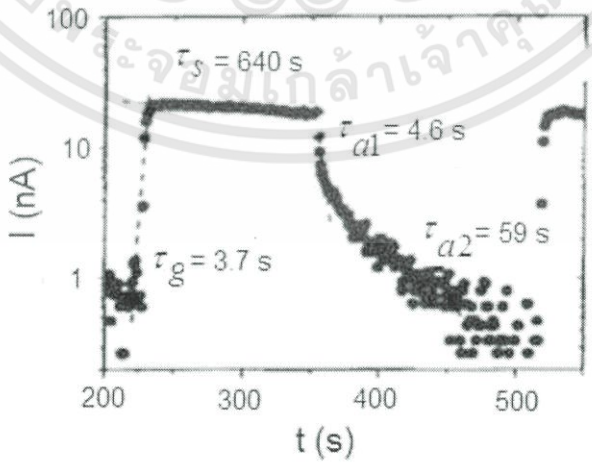


รูปที่ 2.22 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสโฟโตขาขึ้น กับ ค่ากระแสโฟโตขาลงของค่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงดื้อรั้น

จากสมการที่ (2.67-2.68) สามารถเขียนใหม่ได้ว่า

$$\ln I_p = \ln I_0 - t/\tau_d \qquad (2.69)$$

ความชันของกราฟ คือ $\frac{1}{\tau_d}$ ดังนั้น ช่วงชีวิตขาลงจะคำนวณได้จาก ส่วนกลับของความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ t ในทำนองเดียวกัน ช่วงชีวิตขาขึ้นก็สามารถที่จะคำนวณได้จากความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ t (ดังรูปที่ 2.23) ได้ด้วยเช่นเดียวกัน



รูปที่ 2.23 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ t ของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงดื้อรั้นทั้งช่วงกระแสโฟโตขาขึ้นและช่วงกระแสโฟโตขาลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางปฏิบัติช่วงชีวิตมีได้หลายค่า เนื่องจากกับดักพาหะมีหลายชนิด ดังนั้นกระแสโฟโตขาลงของฟิล์มบางที่ใช้หาค่าช่วงชีวิต 2 ค่า สามารถที่จะเขียนใหม่ได้โดยอาศัยสมการที่ (2.63) และสมการที่ (2.68) ดังนี้ คือ (Huang, 2011; Gu, 2005)

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

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

$$\left|I_p\right| = e\mu\left(\frac{w}{l}\right)V_a\sigma_{t1}\exp\left(-t/\tau_{d1}\right) + e\mu\left(\frac{w}{l}\right)V_a\sigma_{t2}\exp\left[-\left(t/\tau_{d2}\right)^{\beta}\right] \qquad (2.71)$$

จากสมการที่ (2.69) สามารถที่จะหาค่า σ_{t1} และ σ_{t2} ได้ในรูปแบบเดียวกับสมการที่ (2.71) ดังนี้คือ

$$\sigma_{t1} = \frac{I_1}{e\mu V_a}\left(\frac{l}{w}\right)\exp\left(t/\tau_{d1}\right) \qquad (2.72)$$

$$\sigma_{t2} = \frac{I_2}{e\mu V_a}\left(\frac{l}{w}\right)\exp\left(t/\tau_{d2}\right) \qquad (2.73)$$

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

$$\sigma_{t1} = \frac{I_1}{e\mu V_a}\left(\frac{l}{w}\right) \qquad (2.74)$$

และ

$$\sigma_{t2} = \frac{I_2}{e\mu V_a}\left(\frac{l}{w}\right) \qquad (2.75)$$

สมการที่ (2.71) สามารถที่จะทำนอร์มัลไลเซชัน (normalization) ได้ดังนี้ คือ

$$\left|I_p\right| = A_1\exp\left(-t/\tau_{d1}\right) + A_2\exp\left[-\left(t/\tau_{d1}\right)^{\beta}\right] \qquad (2.76)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

ในกรณีกระแสโฟโตขาขึ้น (rise current) ก็สามารถที่จะพิจารณาให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันสเตรตเอ็กซ์โพแนนเชียลได้ด้วยเช่นกัน ดังสมการ

$$\left|I_p\right| = A_1'\left[1-\exp\left(-t/\tau_{r1}\right)\right] + A_2'\left\{1-\exp\left[-\left(t/\tau_{r2}\right)^{\beta}\right]\right\} \qquad (2.77)$$

ส่วนกรณีของชิ้นสารที่เป็นเม็ดเซรามิก กระแสโฟโตขณะขาลงสามารถจะเขียนใหม่โดยอาศัยสมการที่ (2.60) และ (2.71) ได้ดังนี้คือ

$$\left|I_p\right| = e\mu\left(\frac{wd}{l}\right)V_a N_{t1}\exp\left(-t/t_{d1}\right) + e\mu\left(\frac{wd}{l}\right)V_a N_{t2}\exp\left[-\left(t/t_{d2}\right)^{\beta}\right] \qquad (2.78)$$

จากสมการที่ (2.78) สามารถที่จะหาค่า

$$N_{t1} = \frac{I_1}{e\mu V_a}\left(\frac{l}{wd}\right)\exp\left(t/\tau_{d1}\right) \qquad (2.79)$$

$$N_{t2} = \frac{I_2}{e\mu Va}\left(\frac{l}{wd}\right)\exp\left(t/\tau_{d2}\right) \qquad (2.80)$$

กับดักพาหะทั้งสองชนิดนี้สามารถที่จะจับหรือปล่อยพาหะอิสระได้อย่างเป็นอิสระซึ่งกันและกัน ถ้ากำหนดให้ I_1 และ I_2 คือกระแสเริ่มต้น (t=0) ที่เกี่ยวกับกับดักพาหะทั้งสองตามลำดับจะได้ว่า

$$N_{t1} = \frac{I_1}{e\mu V_a}\left(\frac{l}{wd}\right) \qquad (2.81)$$

$$N_{t2} = \frac{I_2}{e\mu V_a}\left(\frac{l}{wd}\right) \qquad (2.82)$$

สมการที่ (2.78) สามารถที่จะทำนอร์มัลไลเซชัน (normalization) ได้ดังนี้คือ

$$\left|I_P\right| = A_1''\exp\left(-t/\tau_{d1}\right) + A_2''\exp\left[-\left(t/\tau_{d2}\right)^{\beta}\right] \qquad (2.83)$$

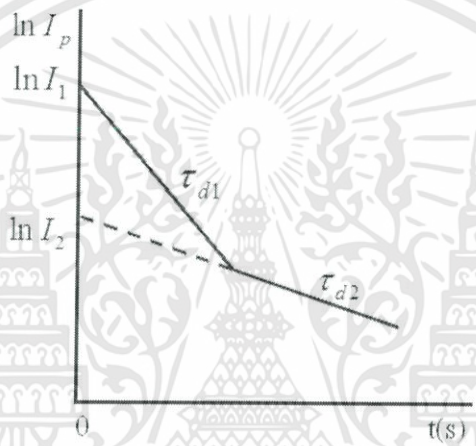
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่ง A_1'' และ A_2'' สามารถหาได้จากการฟิตกราฟของผลการทดลอง ในกรณีกระแสโฟโตขาขึ้นก็สามารถที่จะพิจารณาให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันสเตรตเอ็กซ์โพเนนเชียลได้ด้วยเช่นกันดังสมการ

$$|I_p| = A_1'''\left[1-\exp\left(-t/\tau_{d1}\right)\right] + A_2'''\left\{1-\exp\left[-\left(t/\tau_{d2}\right)^{\beta}\right]\right\} \quad (2.84)$$

2.7.1 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะในช่วงกระแสโฟโตขาลง

การหาค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะในช่วงกระแสโฟโตขาลงจะอาศัยกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ t ดังรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ t เพื่อใช้คำนวณหาค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะในช่วงกระแสโฟโตขาลง

ค่า τ_{d1} หาได้จากความชันของกราฟ

$$\ln I_p = -t/\tau_{d1} + \ln I_1 \quad (2.85)$$

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

$$\sigma_{t1} = \frac{I_1}{e\mu V_a}\left(\frac{l}{w}\right) \quad (2.86)$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\ln I_p = -t/\tau_{d2} + \ln I_2 \tag{2.87}$$

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

$$\sigma_{t2} = \frac{I_2}{e\mu V_a}\left(\frac{l}{w}\right) \tag{2.88}$$

สำหรับกรณีของความหนาแน่นพาหะของชิ้นสาร เช่น ในเม็ดเซรามิก ก็สามารถใช้สูตร

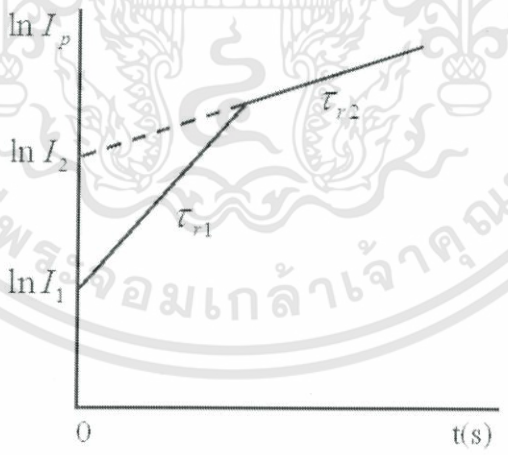
$$N_{t1} = \frac{I_1}{e\mu V_a}\left(\frac{l}{wd}\right) \tag{2.89}$$

และ

$$N_{t2} = \frac{I_2}{e\mu V_a}\left(\frac{l}{wd}\right) \tag{2.90}$$

2.7.2 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะในช่วงกระแสโฟโตขาขึ้น

การหาค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะในช่วงกระแสโฟโตขาขึ้น โดยอาศัยกราฟ $\ln I_p$ กับ t ดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $\ln I_p$ กับ t เพื่อใช้คำนวณหาค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะในช่วงกระแสโฟโตขาขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสขาขึ้นอาจแสดงได้ดังสมการง่ายๆ ดังนี้คือ

$$I = I_{max}\left[1 - \exp\left(-t/\tau_r\right)\right] \tag{2.91}$$

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

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

$$\ln\left[1 - \frac{I}{I_{max}}\right] = -t/\tau_r \tag{2.92}$$

จากสูตร

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

ถ้า $\frac{I}{I_{max}} << 1$ สมการที่ (2.92) จะประมาณได้ว่าเป็น

$$\frac{I}{I_{max}} = t/\tau_r \tag{2.93}$$

ข้อสังเกตคือสมการที่ (2.93) จะใช้ได้จริงเมื่อ $\frac{I}{I_{max}} << 1$ ก็คือช่วงแรกๆ ของกราฟ กระแสขาขึ้นส่วนช่วงท้ายๆ ของกราฟความถูกต้องจะลดลง การคำนวณหาค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะทั้งชนิดฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำและเซรามิกจะใช้สมการที่ (2.86), (2.88), (2.89) และ (2.90) ได้เช่นเดียวกับกระแสขาลง

2.8 ฟูเรียร์แทรนฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์ (Fourier Transform Infrared Spectrometer : FTIR)(งามนิตย์, 2545;ฐิตินัย, 2549;ฐิตินัย, 2550;งามนิตย์, 2551; ฐิตินัย, 2551)

FTIR เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์และตรวจสอบ โครงสร้างของพันธะเคมีระหว่างอะตอมหรือไอออนของสาร โดยการวัดการดูดกลืนรังสีที่อยู่ในช่วงอินฟราเรด ที่อยู่ในช่วงเลขคลื่น (Wave number) ประมาณ 12800 - 10 ต่อเซนติเมตร ซึ่งสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้ง ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รังสีอินฟราเรด (Infrared radiation) เป็นรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่าแต่ให้ความร้อนที่สัมผัสได้ รังสีอินฟราเรดอยู่ระหว่างช่วงคลื่นแสงตามองเห็นได้กับคลื่นไมโครเวฟ โดยช่วงของระงสีอินฟราเรดแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่

1. Near Infrared (12800-4000 ต่อเซนติเมตร)
2. Middle Infrared (4000-200 ต่อเซนติเมตร)
3. Far Infrared (200-10 ต่อเซนติเมตร)

ช่วงของรังสีอินฟราเรดที่ใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์ทางเคมี ได้แก่ช่วง Middle IR เนื่อง จากรังสีอินฟราเรดมีพลังงานค่อนข้างต่ำ เมื่อโมเลกุลของสารดูดกลืนรังสีอินฟราเรด เข้าไปจะทำให้พันธะในโมเลกุลเกิดการสั่นและการหมุน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโมเลกุล การที่โมเลกุลจะดูดกลืนรังสีอินฟราเรดได้นั้น ความถี่ของรังสีอินฟราเรดต้องเท่ากับความถี่การสั่นของโมเลกุลของสารนั้นๆซึ่งสารอินทรีย์แต่ละชนิดจะมีค่าความถี่ของการสั่นที่จำเพาะและแตกต่างกันไป ทำให้สามารถนำเทคนิคนี้มาใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างและชนิดของสารอินทรีย์ได้

2.9 พาหะข้างมากและพาหะข้างน้อย (งามนิตย์, 2530; ฐิตินัย, 2546; งามนิตย์, 2550; Kittle, 2005; Runyan, 1975; van der pauw L.J., 1958; วีรชัย, 2547; สุกฤษฎิ์, 2547; อุปถัมภ์, 2548; สมเกียรติ, 2542; ดุสิต, 2535; ดุสิต, 2542; Sze, 1981)

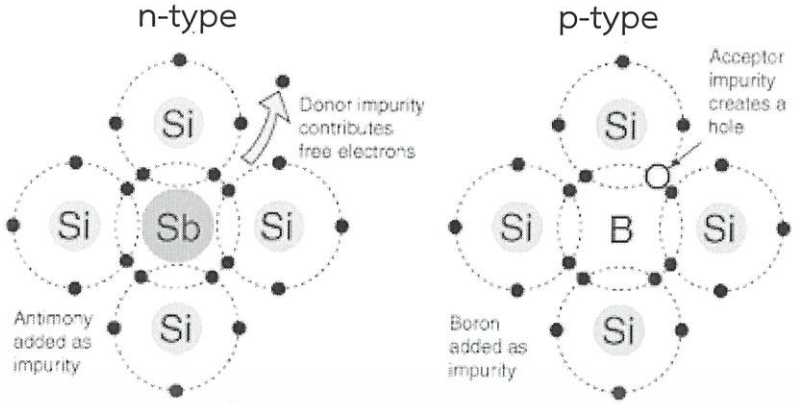
การเจือสารหมู่ 5 ลงไปในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ไม่เพียงทำให้เกิดอิเล็กตรอนเป็นพาหะนำไฟฟ้าเท่านั้น แต่ในตัวสารกึ่งตัวนำยังมีโฮลอยู่ด้วยเพียงแต่มีปริมาณน้อยกว่าอิเล็กตรอนเป็นอย่างมาก เราจึงเรียกอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น เป็นพาหะข้างมาก และเรียกโฮลเป็นพาหะข้างน้อย ส่วนกรณีสารกึ่งตัวนำชนิดพี จะเรียกโฮล เป็นพาหะข้างมากและอิเล็กตรอนเป็นพาหะข้างน้อย ตารางที่ 2.5 เป็นการสรุปชนิดของพาหะข้างมากและพาหะข้างน้อยในสารกึ่งตัวนำชนิดพีและชนิดเอ็น ตามลำดับ

ตารางที่ 2.4 แสดงชนิดของพาหะในสารกึ่งตัวนำทั้งชนิดพีและชนิดเอ็น

ชนิด	พาหะข้างน้อย	พาหะข้างมาก
สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น	โฮล	อิเล็กตรอน
สารกึ่งตัวนำชนิดพี	อิเล็กตรอน	โฮล

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์สามารถเปลี่ยนแปลงได้ด้วยการเจือจางสารที่ไม่บริสุทธิ์ลงไป ซึ่งเราเรียกว่า การโด๊ป (doping) การเจือสารปนเพียงเล็กน้อย จะเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแถบพลังงานเป็นอย่างมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) (ข)

รูปที่ 2.26 แสดงการสร้างพันธะเคมีระหว่างอะตอมในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและชนิดพีของธาตุ Si

2.9.1 สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ได้จากการเติมสารเจือที่เป็นอะตอมของธาตุหมู่ 5 ซึ่งมีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 5 ตัว เช่น อะตอมของธาตุแอนติโมนี (Sb) อาร์เซนิก (As) หรือ ฟอสฟอรัส (P) เป็นต้น ลงในอะตอมของธาตุ Ge หรืออะตอมของธาตุ Si บริสุทธิ์ ดังรูปที่ 2.26(ก) แสดงให้เห็นว่า การเติมสารเจือที่เป็นอะตอมของธาตุธาตุหมู่ 5 (แอนติโมนี) ที่ทำให้เกิดวาเลนซ์อิเล็กตรอนที่ไม่มีคู่ที่อะตอมของสารเจืออิเล็กตรอนที่ไม่มีคู่นี้ เมื่อได้รับพลังงานเพียงเล็กน้อย ก็พร้อมที่จะเป็นอิเล็กตรอนอิสระที่นำไฟฟ้าได้ สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น มีสภาพทางไฟฟ้าเป็นลบ (negative)

2.9.2 สารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type semiconductor)

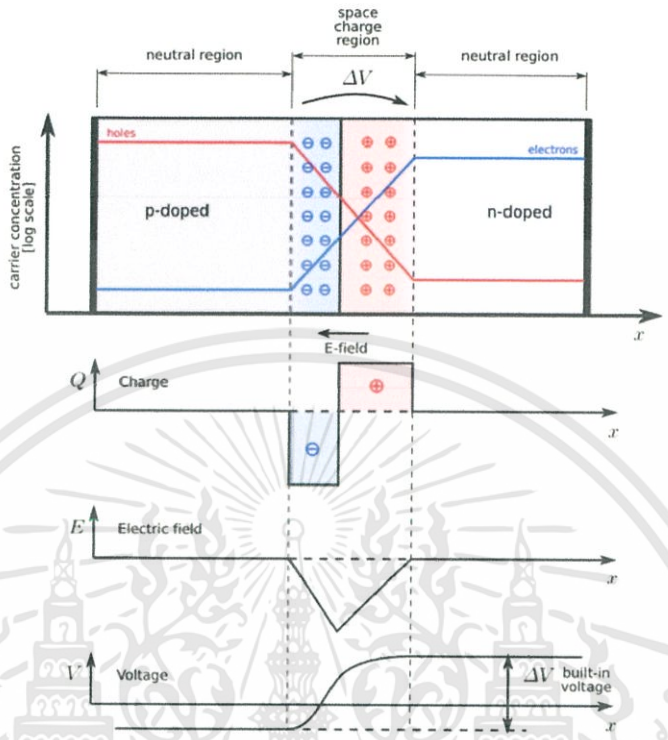
สารกึ่งตัวนำชนิดพี จะได้รับการเติมสารเจือที่เป็นอะตอมของธาตุหมู่ 3 ที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 3 ตัว ได้แก่ อะตอมของโบรอน (B) แกลเลียม (Ga) หรือ อินเดียม (In) เป็นต้น ลงในอะตอมของธาตุ Ge หรืออะตอมของธาตุ Si บริสุทธิ์ดังรูปที่ 2.26(ข) แสดงให้เห็นว่าการเติมสารเจือที่เป็นธาตุหมู่ 3

2.10 ไดโอดของสารกึ่งตัวนำที่มีรอยต่อแบบพี-เอ็น (p - n junction semiconductor)

รอยต่อพี-เอ็นของสารกึ่งตัวนำมีความสำคัญเป็นอย่างมากทั้งในด้านไปประยุกต์ใช้ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ทันสมัย และในการทำความเข้าใจเกี่ยวกันสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำสมัยใหม่ ทฤษฎีรอยต่อพี - เอ็นของสารกึ่งตัวนำเป็นพื้นฐานความรู้พื้นฐานที่จำเป็นสำหรับฟิสิกส์ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ทฤษฎีพื้นฐานของลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้า - แรงดันไฟฟ้า ในรอยต่อพี-เอ็น ของสารกึ่งตัวนำได้ก่อตั้งขึ้นโดยชอกค์เลย์ ทฤษฎีนี้ได้รับการพัฒนาเพิ่มเติมโดย ชาห์ (Sha) นอยซี (Noyce) และมอลล์ (Moll) ลักษณะสมบัติของกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของรอยต่อพี - เอ็นของสารกึ่งตัวนำที่เบี่ยงเบนไปจากกรณี อุดมคติมีสาเหตุมาจากหลายประการ เช่น การเกิดและรวมตัวของพาหะอิสระผ่านกับดักประจุบริเวณพร่องพาหะ การฉีดพาหะผ่านรอยต่อในปริมาณที่สูงและความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม เป็นต้น รอยต่อพี - เอ็น ของสารกึ่งตัวนำเป็นสิ่งประดิษฐ์สองขั้วโดยที่สมบัติของรอยต่อพี-เอ็นของสารกึ่งตัวนำจะขึ้นกับโปรไฟล์ของความเข้มข้นของสารเจือ รูปทรงเรขาคณิต ของรอยต่อและเงื่อนไขการไบแอส รอยต่อพี-เอ็น ของสารกึ่งตัวนำมีสมบัติการเรียงกระแสไฟฟ้า กล่าวคือ ยอมให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

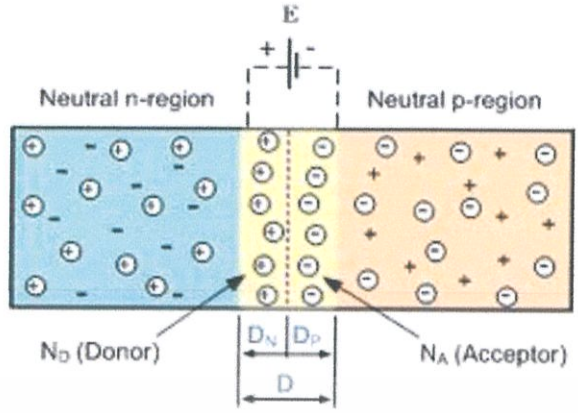
กระแสไฟฟ้าไหลได้ทางเดียว ซึ่งสามารถนำไปประดิษฐ์เป็นไดโอดต่างๆ เช่น ซีเนอร์ไดโอด อะวาลานซ์ไดโอด PIN ไดโอด วาริสเตอร์ และวาแรกเตอร์ เป็นต้น



รูปที่ 2.27 แสดงไดโอดของสารกึ่งตัวนำที่มีรอยต่อแบบพี–เอ็น

สารกึ่งตัวนำชนิดพี หรือชนิดเอ็นเพียงอย่างใดอย่างหนึ่ง จะมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าเป็นความต้านทานไฟฟ้า แต่ถ้าเราสามารถสร้างรอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำชนิดพี และชนิดเอ็นได้อิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น จะแพร่ข้ามรอยต่อไปรวมกับโฮลในชนิดพี จับเป็นพันธะที่ไม่มีพาหะนำไฟฟ้า หากทำการพิจารณาคร่าวๆ ที่ความเข้มข้นของสารเจือที่เท่ากัน อาจคิดได้ว่า อิเล็กตรอนจะรวมกับโฮลจนหมดสิ้น และทำให้พาหะไม่นำไฟฟ้าตลอดทั้งเนื้อสาร ในความเป็นจริงจะพบว่าไม่เป็นเช่นนั้น เนื่องจากอะตอมของสารเจือของธาตุในหมู่ 5 ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น เมื่อไม่มีอิเล็กตรอนใกล้ๆ ก็จะแสดงอำนาจประจุไฟฟ้าบวก และอะตอมสารเจือของธาตุในหมู่ 3 ในสารกึ่งตัวนำชนิดพี เมื่อไม่มีโฮลก็จะแสดงอำนาจประจุไฟฟ้าเป็นลบ จะสังเกตได้ว่าเกิดกำแพงสนามไฟฟ้าขัดขวางไม่ให้อิเล็กตรอนข้ามรอยต่อไปรวมกับโฮล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.28 แสดงการเกิดบริเวณปลอดพาหะที่บริเวณรอยต่อของสารกึ่งตัวนำที่มีรอยต่อแบบพี - เอ็น

การรวมตัวของอิเล็กตรอนกับโฮล จนไม่มีพาหะนำไฟฟ้า (จึงไม่นำไฟฟ้า) จะเกิดเฉพาะตรงบริเวณใกล้ๆ รอยต่อเท่านั้น บริเวณที่เกิดการรวมตัวนี้เรียกว่า บริเวณปลอดพาหะ (depletion region) ดังในรูปที่ 2.28 โดยความกว้างของบริเวณปลอดพาหะใน สภาพไร้สนามไฟฟ้าจากภายนอกจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารเจือและอุณหภูมิ

2.10.1 รอยต่อในสภาวะสมดุลเชิงความร้อน

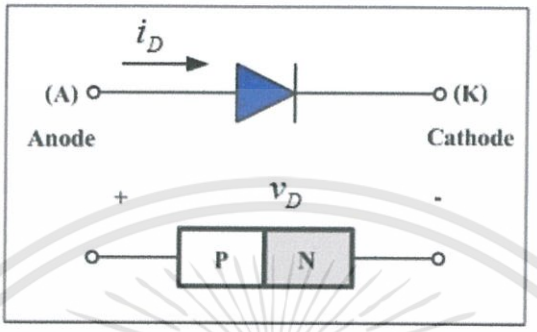
แบบจำลองของรอยต่อพี-เอ็น ของสารกึ่งตัวนำในเชิงอุดมคติจะเริ่มพิจารณาที่รอยต่อแบบโฮโม (homojunction) ซึ่งทั้งสารกึ่งตัวนำชนิดพีและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นเป็นวัสดุชนิดเดียวกัน จึงมีค่าช่องว่างแถบพลังงานเท่ากัน โดยเริ่มจากอิเล็กตรอนที่มีอยู่จำนวนมากในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะแพร่ซึมไปยังสารกึ่งตัวนำชนิดพี ซึ่งมีอิเล็กตรอนอยู่น้อยมาก ในทำนองเดียวกันโฮล ที่มีอยู่จำนวนมากในสารกึ่งตัวนำชนิดพี จะแพร่ซึมไปยังด้านเอ็น ซึ่งมีโฮลอยู่น้อยมาก การแพร่ซึมของพาหะเหล่านี้จะทำให้เนื้อสารขาดความเป็นกลางทางไฟฟ้า นั่นคือสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะสูญเสียอิเล็กตรอนอิสระไป ทำให้บริเวณสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่ใกล้รอยต่อแสดงอำนาจไฟฟ้าเป็นบวก เนื่องจากมีประจุของไอออนของอะตอมผู้ให้ถูกทิ้งไว้ สำหรับทางสารกึ่งตัวนำชนิดพีก็จะมีลักษณะคล้ายๆกัน คือ มีไอออนของอะตอมผู้รับวิ่งมีประจุเป็นลบ ปรากฏอยู่ยังมีผลให้เกิดสนามไฟฟ้าที่รอยต่อ โดยที่สนามไฟฟ้ามีทิศทางจากสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นไปทางสารกึ่งตัวนำชนิดพี ดังนั้นการแพร่ซึมของโฮลและอิเล็กตรอนจะลดลง เนื่องจากอิทธิพลของสนามไฟฟ้าที่ต้านการแพร่ซึม บริเวณรอยต่อนี้จึงปลอดพาหะอิสระและเรียกบริเวณนี้ว่า บริเวณปลอดพาหะ (depletion region) หรือบางครั้งเรียกว่า บริเวณประจุค้าง (space charge region) เนื่องจากมีประจุของไอออนสารเจืออยู่ ซึ่งเป็นประจุที่ถูกตรึงอยู่กับที่ (fixe charge) ไม่ใช่ประจุอิสระ

ปกติไดโอดเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มี 2 ขา ซึ่งมีลักษณะพิเศษคือ กระแสไหลผ่านได้ในทิศทางเดียว ซึ่งจากคุณสมบัติพิเศษนี้จึงสามารถนำไดโอดมาใช้เป็นตัวแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรง วงจรในภาครับของวิทยุ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10.2 โครงสร้างและสัญลักษณ์ของไดโอด

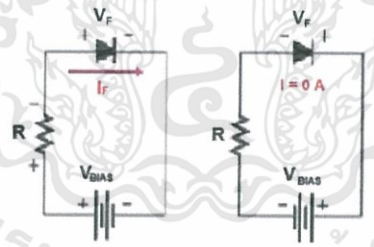
ไดโอดสามารถได้จากรอยต่อพี-เอ็น โดยการดึงขาที่ด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพี เป็นขาอาโนด (anode : A) และให้สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น เป็นขาคาโทด (cathode : K) สัญลักษณ์จะใช้ลูกศรแทนขาอาโนด โดยทิศทางของลูกศรเป็นทิศทางการไหลของกระแสสมมติ (ตรงข้างกลับทิศทางการไหลของอิเล็กตรอน) และใช้ขีดแทนขาคาโทด



รูปที่ 2.29 แสดงลักษณะของโครงสร้างอย่างง่ายและสัญลักษณ์ของไดโอดของสารกึ่งตัวนำที่มีรอยต่อแบบพี-เอ็น

2.10.3 ไดโอดอุดมคติ

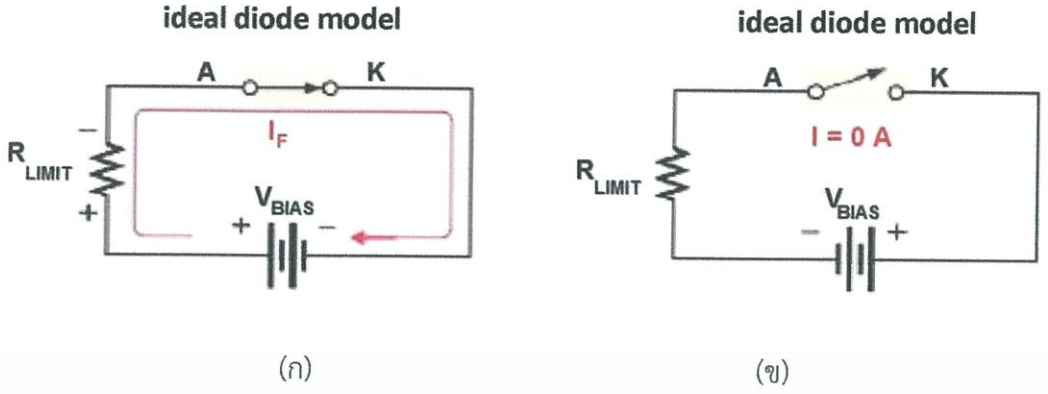
เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์การทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เราสามารถใช้แบบจำลองซึ่งเป็นวงจรไฟฟ้าแบบพื้นฐานมาแทนการทำงานของอุปกรณ์ที่เราพิจารณาอยู่ รูปที่ 2.30 ใช้เป็นภาพแสดงการไบแอสไดโอดทั้งแบบไบแอสตรงและไบแอสย้อนกลับ รูปที่ 2.31(ก) แสดงการสวิตช์ปิดวงจรแทนไดโอดเมื่อได้รับไบแอสตรง และรูปที่ 2.31(ข) ใช้สวิตช์เปิดวงจรแทนไดโอดเมื่อได้รับไบแอสย้อนกลับ



(ก) (ข)

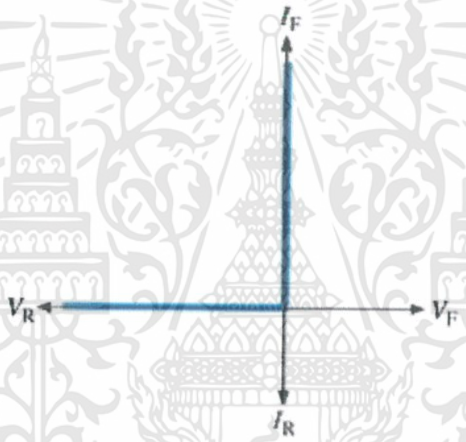
รูปที่ 2.30 แสดงการจ่ายแรงดันไฟฟ้าแก่ไดโอดของสารกึ่งตัวนำที่มีรอยต่อแบบพี-เอ็น
ก. วงจรไดโอดแบบไบแอสตรง
ข. วงจรไบแอสแบบย้อนกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) (ข)

รูปที่ 2.31 แสดงการเปิดปิดสวิตซ์ของวงจรไดโอดของสารกึ่งตัวนำที่มีรอยต่อแบบพี - เอ็น
ก. สภาวะนำกระแส
ข. สภาวะไม่นำกระแส



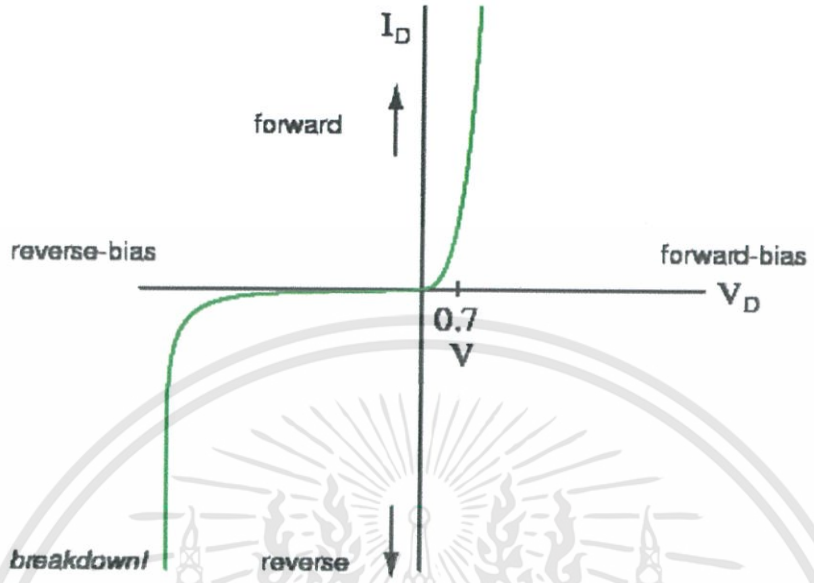
รูปที่ 2.32 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า (I) กับ แรงดันไฟฟ้า (V) ที่แสดงสมบัติเฉพาะทางไฟฟ้าของไดโอดของสารกึ่งตัวนำที่มีรอยต่อแบบพี-เอ็นในอุดมคติ

จากรูปที่ 2.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า I-V ของไดโอดอุดมคติ ซึ่งจะเห็นได้ว่าไดโอดอุดมคติไม่มีแรงดันตกคร่อมและความต้านทานไฟฟ้าเป็นศูนย์เมื่อไบแอสตรง และไดโอดอุดมคติมีกระแสรั่วไหลเป็นศูนย์และความต้านทานไฟฟ้าเป็นอนันต์เมื่อได้รับกระแสไบแอสย้อนกลับ

รูปที่ 2.33 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า I-V ของไดโอดของสารกึ่งตัวนำที่ได้จากที่มีรอยต่อแบบพี-เอ็น ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำ Si จะสังเกตได้ว่าเมื่อแรงดันไบแอสตรง V_F มีค่าเป็นบวกประมาณ 7 โวลต์กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านไดโอดไม่อย่างสะดวก เมื่อพิจารณาความชันของเส้นกราฟจะพบว่ามีความต้านทานไฟฟ้าต่ำ แต่เมื่อแรงดันไบแอสตรงต่ำกว่า 0-7 โวลต์ กระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านรอยต่อน้อยมาก หากแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมรอยต่อมีค่าน้อยกว่าศูนย์จะเป็นการให้ไบแอสย้อนกลับ กระแสที่ไหลผ่านจะเกิดจากพาหะข้างน้อย เมื่อพิจารณาความชันจะพบว่ามีความต้านทานไฟฟ้าสูงมาก แต่เมื่อให้แรงดันไบแอสย้อนกลับมีค่าต่ำมากจนถึงจุดหนึ่ง จะพบว่าจะมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านรอยต่อเป็นจำนวนมาก เราเรียกแรงดันไฟฟ้าที่จุดนี้ว่า แรงดันพังทลาย (break down voltage : V_{BR}) ผลของอุณหภูมิมีผลต่อรอยต่อดังนี้ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมรอยต่อขณะไบแอสตรงและแรงดันพังทลาย V_{BR} ขณะไบแอสย้อนกลับมีค่าลดลง กระแสไฟฟ้ารั่วไหลในกรณีที่ $V_{BR} < V < V_F$ จะเพิ่มสูงขึ้น



รูปที่ 2.33 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระกระแสไฟฟ้า (I) กับ แรงดันไฟฟ้า (V) ที่แสดงสมบัติเฉพาะทางไฟฟ้าของไดโอดของสารกึ่งตัวนำที่มีรอยต่อพี-เอ็น

2.11 อิมพีแดนซ์ของวงจร RC ต่อแบบอนุกรมและต่อแบบขนาน (ฐิตินัย, 2550; Runyan, 1975; Elangovan, 2003; Fahrenbruch, 1983; Van Der Pauw, 1958; ดุสิต, 2535; Gangopadhyay, 2004)

2.11.1 วงจร RC ต่อแบบอนุกรม

มีลักษณะคล้ายกับตัวต้านทานสองตัวต่ออนุกรมกัน อิมพีแดนซ์สุทธิจะเท่ากับผลรวมของอิมพีแดนซ์ของตัวต้านทาน (Z_R) กับอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ (Z_C) ซึ่งจะได้ว่า

$$Z_{RC} = Z_R + Z_C \tag{2.94}$$

อย่างไรก็ตามค่า Z_C จะขึ้นอยู่กับความถี่ ดังนั้นจำเป็นที่ต้องเขียนค่าของ Z_C ในรูปของจำนวนจินตภาพของเลขจำนวนเชิงซ้อนของค่าอิมพีแดนซ์ โดยที่ $j=\sqrt{-1}$ ดังนั้น

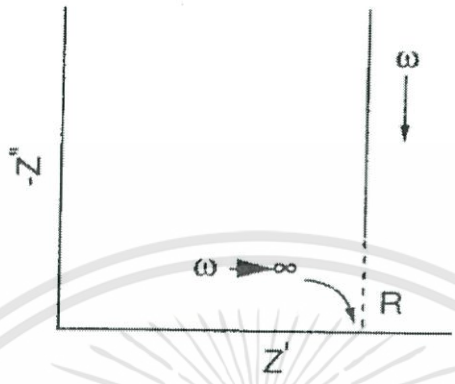
$$Z_C = \frac{1}{j\omega\omega} = \frac{-1}{\omega C}$$

และ $Z_R = R_S$ แล้วจะได้ว่า

$$Z_{RC} = R_S - \frac{j}{\omega C} \tag{2.95}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ R_S เป็นจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์ ส่วน $\frac{1}{\omega C}$ เป็นจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เมื่อความถี่เข้าใกล้อนันต์หรือกรณี C มีค่าใหญ่มาก แล้วจะได้ว่า Z_{RC} เข้าสู่ค่า R_S จากกราฟของไนควิสต์ (Nyquist plot) จุดตัดแกน Z' จะเป็นค่าของ Z_R ดังรูปที่ 2.34



รูปที่ 2.34 แสดงกราฟของไนควิสต์ที่ระบุถึงค่าอิมพีแดนซ์ของวงจร RC ต่ออนุกรมอย่างง่าย

2.11.2 วงจร RC ต่อแบบขนาน

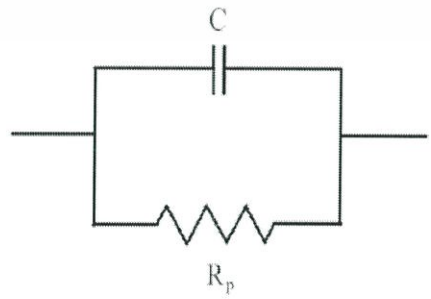
ในกรณี Z_R กับ Z_C ต่อขนานกันดังรูปที่ 2.35 แล้วอิมพีแดนซ์จะมีค่าดังนี้คือ

$$\frac{1}{Z_{RC}} = \frac{1}{Z_R} + \frac{1}{Z_C} \tag{2.96}$$

ในกรณีนี้ให้ $Z_R=Z_p$, $Z_R=R_p$ ดังรูปที่ 2.35 ดังนั้นสมการ (2.96) จะกลายเป็น

$$\frac{1}{Z_{RC}} = \frac{1}{R_P} + j\omega\omega \tag{2.97}$$

$$= \frac{(1 + j\omega\omega_P C)}{R_P} \tag{2.98}$$



รูปที่ 2.35 แสดงวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อที่จะแยกจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพออกจากกัน จำเป็นต้องใช้ค่าคอนจูเกต $(1 - j\omega R_P C)$ คูณทั้งตัวตั้งและตัวหารของสมการที่ (2.98) จะได้

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

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

ดังนั้น

$$Z_{RC} = -\left[\frac{j\omega\omega_p^2 C - R_P}{\omega 2R_p^2 C + 1}\right] \qquad (2.99)$$

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

$$= Z' - jZ''$$

โดยที่

$$Z' = \frac{R_P}{\omega^2 R_p^2 C + 1} = \frac{R_P}{(\omega\tau)^2 C + 1} \qquad (2.100)$$

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

$$= -(1 + \omega^2 C_P R_P^2)(C_P R_P^2) + (\omega C_P R_P^2)(2\omega\omega_p^2 R_p^2)$$

$$= -(C_P R_p^2) - (\omega^2 C_p^3 R_p^4) + (2\omega^2 C_p^3 R_p^4)$$

นำ $\frac{1}{C_P R_p^2}$ คูณตลอด

$$= -1(\omega^2 C_P^2 R_P^2) + (2\omega^2 C_P^2 R_P^2)$$

$$1 = (-\omega^2 + 2\omega^2) C_P^2 R_P^2$$

$$1 = \omega^2 C_P^2 R_P^2$$

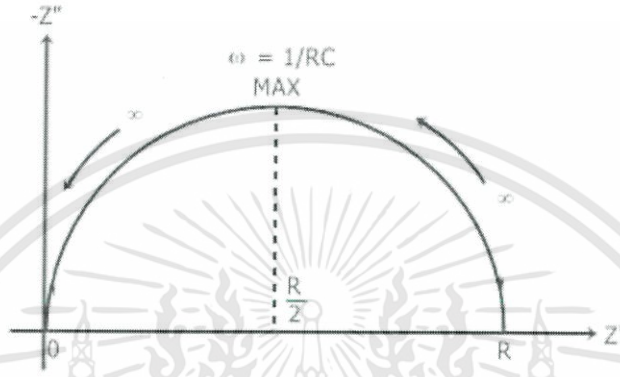
$$\omega_{max} = \frac{1}{C_P R_p}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z'' = R_P\left[\frac{\omega\tau}{(\omega\tau^2)+1}\right] \qquad (2.101)$$

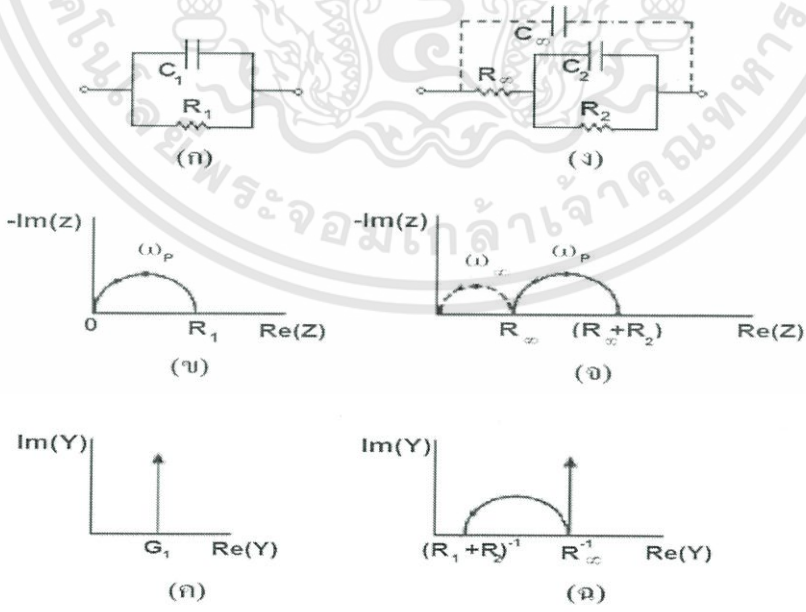
เมื่อ τ คือ ค่าคงตัวเวลา (time constant) $= R_P C$

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Z' กับ Z'' จะเรียกว่ากราฟของไนควิสต์ ซึ่งกราฟวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่ายจะแสดงดังรูปที่ 2.36



รูปที่ 2.36 แสดงกราฟของไนควิสต์ของวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่ายที่จุดสูงสุดของรูปครึ่งวงกลมเกิดขึ้นเมื่อ $\omega = \frac{1}{RC}$

วงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่ายสองรูปแบบที่แสดงตามกราฟของอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี (impedance spectroscopy) และ กราฟของแอดมิตแตนซ์สเปกโทรสโกปี (admittance spectroscopy) ดังรูปที่ 2.37



รูปที่ 2.37 แสดงวงจร RC ต่อแบบขนานอย่างง่าย (ก,ง) กราฟของอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี (ข,จ) และกราฟของแอดมิตแตนซ์สเปกโทรสโกปี (ค,ฉ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากข้อมูลการทดลองจะทำให้รู้ค่า $f_{max}=(LF)$ ที่ความถี่ต่ำ และจากจุดตัดแกน X จะได้ค่า R_1 และ R_6 เราสามารถ คำนวณหาค่า C_2 ได้จากสูตร

$$\omega_{max} R_2 C_2 = 1$$

$$C_2 = \frac{1}{\omega_{max} R_2} = \frac{1}{2\pi\pi_{max}(HF)R_2} \qquad (2.102)$$

โดยปกติค่า CPE_2 จะมากกว่า C_2 เล็กน้อย ดังนั้นเมื่อรู้ค่า C_2 แล้วก็จะทราบค่า CPE_2อย่างคร่าวๆ ได้ แล้วจะนำค่าไปใส่โปรแกรม EIS เพื่อจำลองแบบต่อไป

ในทำนองเดียวกันที่ความถี่สูง เราจะได้ค่า R_1 และจะรู้ค่า $f_{max}=(LF)$ อย่างคร่าวๆ ได้จากการจำลองแบบ ดังนั้น เราสามารถคำนวณค่า C_1 ได้จากสูตร

$$\omega_{max} R_1 C_1 = 1$$

$$C_1 = \frac{1}{\omega_{max} R_1} = \frac{1}{2\pi\pi_{max}(HF)R_1} \qquad (2.103)$$

โดยปกติค่า CPE_1 จะมากกว่า C_1 เล็กน้อย ดังนั้นเมื่อรู้ค่า C_1 แล้วก็จะทราบค่า CPE_1 อย่างคร่าวๆ ได้

อิเล็กโทรดที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าของสิ่งประดิษฐ์ที่ใช้ในการทดลองจะก่อให้เกิดความจุไฟฟ้าที่เรียกว่าความจุเรขาคณิต (geometrical capacitance : C_{geo}) ซึ่งก็คือ C_∞ ซึ่งก็คือ C_1 ในรูปที่ 2.37 ส่วนค่าความต้านทานของเนื้อสารตัวอย่าง (bulk resisitance : R_b) ซึ่งก็คือ R_∞ หรือ R_1 แล้วค่าคงตัวเวลา $\tau=R_\infty C_\infty=R_1C_1$ ความหมายของค่าคงตัวเวลานี้ก็คือ ค่าเวลาผ่อนคลายไดเล็กทริก (τ_D) ของสารตัวอย่างที่ใช้ศึกษานั่นเอง ความถี่เชิงมุม (ω) ที่ทำให้ Z" มีค่าสูงสุดคือ ω_P และจะปรากฏอยู่ที่จุดบนสุดของกราฟครึ่งวงกลมในรูปที่ 2.37(ข) ซึ่งที่จุดบนสุดนี้จะสอดคล้องกับเงื่อนไข $\omega_P\tau_D=1$ โดยทั่วไป $\tau_D < 10^{-7}$ วินาที ที่ความถี่เชิงมุมสูงสุด (ω_{max}) ของเครื่องมือที่ใช้วัดและภายใต้เงื่อนไข $\omega_{max}\tau_D \le 1$ มักจะไม่ปรากฏค่า Z" ในกราฟของอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี อย่างไรก็ตามเมื่อลดอุณหภูมิของสารตัวอย่างลงแล้ว τ_D จะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ส่วนโค้งของกราฟ (arc) ปรากฏขึ้นในอิมพีแดนซ์สเปกสโทรสโกปี แต่ถ้าอยู่ภายใต้เงื่อนไข $\omega_{max}\tau_D \le 1$ แล้วรูปครึ่งวงกลมจะปรากฏอยู่ในกราฟของอิมพีแดนซ์สเปกสโทรสโกปี สารตัวอย่างที่เป็นผลึกเดี่ยวมักไม่มีผลต่อกราฟครึ่งวงกลม แต่ถ้าเป็นผลึกพหุพันธ์มักจะมีผลต่อกราฟของอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี กล่าวคือกราฟครึ่งวงกลม จะถูกกดให้ศูนย์กลางของวงกลมต่ำลงจากเส้นแกน Z'

นอกจากกรณีที่ $R_1=R_\infty$ และ $C_1=C_\infty$ ซึ่งทำให้กราฟครึ่งวงกลม 1 อัน ถ้าอิเล็กโทรดนี้อยู่ในสารละลายเคมี ขณะที่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น เราจะให้ $R_1=R_R$ และ $C_1=C_R$ เมื่อ R_R คือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าขณะเกิดปฏิกิริยาเคมี ส่วน C_R คือ ค่าความจุไฟฟ้าของบริเวณโพลาไรเซชัน (polarization region) ในสารละลายที่อยู่ชิดกับขั้วอิเล็กโทรดซึ่งในวงจร RC ของรูปที่ 2.37(ง) ได้กำหนดให้ $R_2=R_R$ และ $C_2=C_R$ ส่วนรูปที่ 2.37(จ) จะแสดงกราฟรูปครึ่งวงกลม 2 รูป ซึ่งค่าคงที่ของเวลาคือ $R_\infty C_\infty \le R_2C_2$ และกราฟรูปครึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงกลมที่เกิดจาก R_∞ และ C_∞ จะแสดงจุดไข่ปลาดังรูปที่ 2.37(จ) ซึ่งมักจะเกิดที่ความถี่สูงมากกว่าความถี่ที่เครื่องมือทั่วไปวัดได้ ในกราฟอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี ลูกศรจะชี้ทิศทางของความถี่ของการวัดที่เพิ่มขึ้น และนิยมเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า –Im(Z) กับ Re(Z) มากกว่าที่จะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่า Im(Z) กับ Re(Z) เพื่อให้กราฟส่วนใหญ่ปรากฏใน ควอตแรนท์ที่ 1 ดังนั้น จึงเขียนความสัมพันธ์ใหม่เป็น $Z^* = Z' - jZ''$ และเขียน Im(Z*) แทน –Im(Z)

สำหรับแอตมิตแตนซ์สเปกโทรสโกปีของวงจร RC ต่อขนานของวงจรดังรูปที่ 2.37(ก) ค่าแอตมิตแตนซ์ลัพธ์ คือ ผลรวมของแอตมิตแตนซ์ของตัวต้านทาน (G_1) กับแอตมิตแตนซ์ ของตัวเก็บประจุ (ωC_1) ดังนั้นจะได้ว่า

$$Y_a = G_1 + j\omega\omega_1 \tag{2.104}$$

กราฟของสมการที่ (2.104) จะปรากฏอยู่ในรูปที่ 2.37(ค) ส่วนแอตมิตแตนซ์ของวงจร รูปที่ 2.37(ง) จะแสดงดังความสัมพันธ์

$$Y_a = j\omega\omega_\infty + \frac{j\omega\omega_2 C_2}{(R_{2}+R_\infty)+ j\omega\omega_2 R_2 R_\infty} \tag{2.105}$$

ซึ่งกราฟของสมการที่ (2.105) จะปรากฏอยู่ในรูปที่ 2.37(ฉ) อย่างไรก็ตามกราฟของความเข้าใจกลไกทางฟิสิกส์เคมีของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นขณะทำการทดลอง ดังนั้นได้มีการเพิ่มแกนที่สามขึ้นมา คือแกน logf เพื่อให้เป็น 3 มิติ

ในกรณีทั่วๆไปทั้ง Z' และ Z" จะขึ้นกับ C และ R ซึ่งทั้ง Z' และ Z" จะขึ้นอยู่กับความถี่ และพบว่า Z' และ Z" มีความสัมพันธ์ต่อกันดังนี้คือ

$$(Z'')^2 - RZ' + (Z')^2 = 0 \tag{2.106}$$

ซึ่งสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$(Z'')^2 + \left(Z' - \frac{R}{2}\right)^2 = \left(\frac{R}{2}\right)^2 \tag{2.107}$$

โดยรัศมีของครึ่งวงกลมคือ R/2 ดังปรากฏในรูปที่ 2.37 ในกรณีที่ความต้านทานอนุกรม (R_S) ของวงจรมีค่าเป็นศูนย์ เราจะได้ว่า จุดตัดแกน Z' จะอยู่ที่ 0 และ R

2.11.3 กราฟของโบด (Bode plot)

อิมพีแดนซ์ $Z^* = Z' + jZ''$ สามารถจะเขียนอยู่ในรูปแบบโคออร์ดิเนตตั้งฉาก (rectangular coordinate) และโคออร์ดิเนตเชิงเส้น (polar coordinate) โดยมีความสัมพันธ์ดังรูปที่ 2.38 ดังนี้คือ

$$\mathrm{Re}(Z) \equiv Z'' = |Z|\cos\varphi$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ

$$\mathrm{Im}(Z) \equiv Z'' = |Z|\cos\varphi$$

$$\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{Z''}{Z'}\right) \tag{2.108}$$

โดยที่โมดูลัสคือ

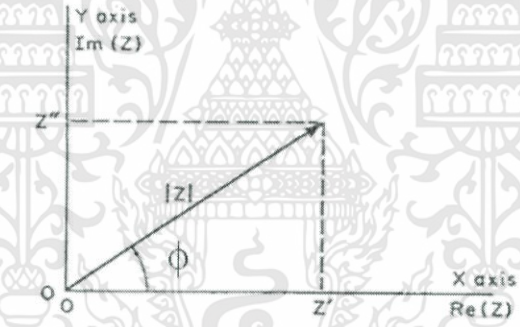
$$|Z| = \left[(Z')^2 + (Z'')^2\right]^{\frac{1}{2}} \tag{2.109}$$

จากความสัมพันธ์ของออยเลอร์ (Euler relation)

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

ดังนั้น

$$Z = |Z|\exp(j\varphi) \tag{2.110}$$

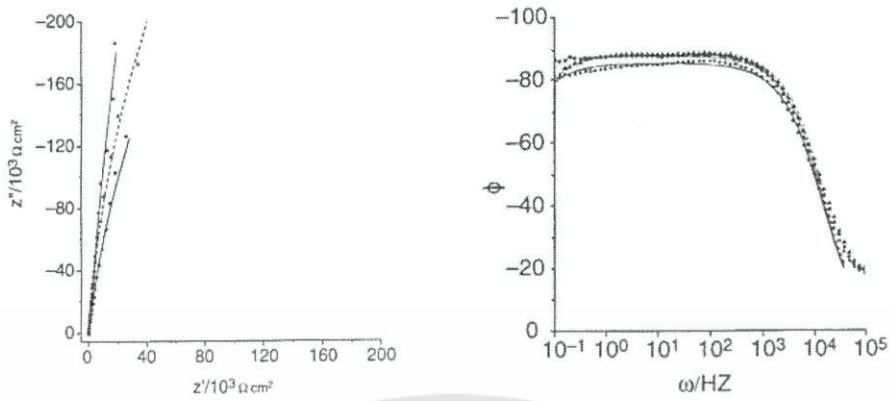


รูปที่ 2.38 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าอิมพีแดนซ์ของโคออร์ดิเนตตั้งฉาก กับโคออร์ดิเนตเชิงขั้วมุมเฟสระหว่างทิศทางของ Z' และ Z'' จะขึ้นกับค่าความถี่ที่ใช้วัดในกรณีที่เป็นตัวเก็บประจุสมบูรณ์แบบ (pure capacitor) มุมเฟส $\varphi = -90$ องศา และมุมเฟสของตัวต้านทานจะมีค่าเป็นศูนย์

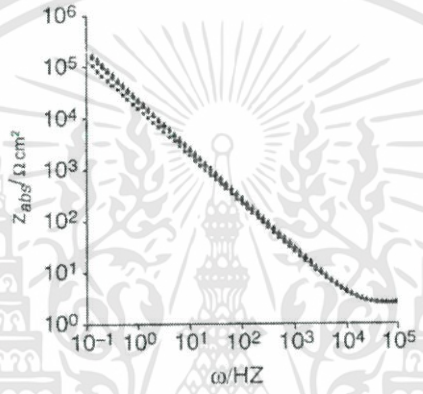
กราฟของโบดจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $|Z|$ กับค่าความถี่และมุมเฟสกับความถี่ โดยแกนความถี่จะเป็นลอการิทึม (logarithmic scale) ข้อดีของกราฟของโบด คือ น้ำหนัก (weight) ของอิมพีแดนซ์ทั้งความถี่สูงและที่ความถี่ต่ำจะมีค่าเท่ากัน ในขณะที่กราฟของไนควิสต์ค่าอิมพีแดนซ์จะไปรวมกระจุกอยู่ในย่านความถี่ค่าสูงๆ ในกรณีตัวเก็บประจุสมบูรณ์ที่ความถี่เชิงมุม $\omega \to 0$ แล้วมุมเฟส $\varphi = -90$ องศา กราฟของมุมเฟสที่วัดได้มักจะเบี่ยงเบนไปจากมุม -90 องศา

แสดงว่าไม่ใช่เป็นตัวเก็บประจุแบบสมบูรณ์ ดังนั้นพฤติกรรมที่เบี่ยงเบนไปจะถูกจำลองให้อยู่ในพจน์ของอิลิเมนต์เฟสคงที่ (constant phase element : CPE) ตัวอย่างของกราฟโบดสำหรับค่าอิมพีแดนซ์ (Z) และมุมเฟสจะแสดงดังรูปที่ 2.46 พฤติกรรมที่เปลี่ยนไปนี้จะขึ้นอยู่กับผิวหน้าของอิเล็กโทรด เช่น ความไม่เรียบของผิวหน้าอิเล็กโทรดและระดับความสมบูรณ์ของผลึกพหุพันธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก.)



(ข.)

รูปที่ 2.39 แสดงกราฟโบดที่เป็นกรณี ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าอิมพีแดนซ์ (Z) และมุมเฟส
ก. แสดงกราฟไนควิสต์และกราฟของโบด
ข. แสดงกราฟของอิมพีแดนซ์ของวงจรที่มีตัวเก็บประจุของบริเวณโพลาไรเซชันที่อยู่ชิดกับขั้วอิเล็กโทรด

ค่าอิมพีแดนซ์ของ CPE จะนิยามโดยค่าของ P และ n เมื่อ P คือค่าคงตัวที่ไม่ขึ้นอยู่กับความถี่ ส่วน n เป็นพารามิเตอร์ที่ไม่มีหน่วย และมีค่าอยู่ระหว่าง $0 \le n \le 1$ แต่โดยทั่วไป จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.8 ถึง 0.99 จำนวนจริงของ Z (CPE) จะเกี่ยวข้องกับความต้านทานไฟฟ้า (resistance) และแปรตาม ω^{-n} ส่วนจำนวนจริงจินตภาพจะเกี่ยวกับค่าความจุไฟฟ้า (capacitance) และแปรตาม ω^{-n} ด้วยเหมือนกัน ซึ่งจะแสดงได้ดังนี้คือ

$$Z(CPE) = \frac{1}{P(j\omega)^n} \qquad (2.111)$$

ส่วนความจุเนื่องจากบริเวณโพลาไรเซชันที่อยู่ชิดกับขั้วอิเล็กโทรด (double – layer capacitance : C_{dl}) จะแสดงได้ดังนี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Cd1=\sqrt{\frac{P}{R_S^{(n-1)}}} \qquad (2.112)$$

พารามิเตอร์ n จะสัมพันธ์กับมุมเฟส φ ดังนั้นคือ $\varphi = n\left(\frac{\pi}{2}\right)$ ถ้ามุมเฟส φ เข้าใกล้ 1 ก็จะประพฤติตัวเป็นตัวเก็บประจุสมบูรณ์โดยมุมเฟสมีหน่วยเป็นเรเดียน

2.12 หลักการสปัตเตอริง (ฐิตินัย, 2558; สุรสิงห์, 2545)

ดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง คือ วิธีการเคลือบฟิล์มบางในระบบสุญญากาศ โดยอาศัยพื้นฐานทางด้านฟิสิกส์ของพลาสมาเพื่อให้เกิดกระบวนการสปัตเตอริงขึ้นมา ดังนั้นจึงเป็นสิ่งสำคัญในการทำความเข้าใจในฟิสิกส์ของพลาสมา วิธีการเคลือบฟิล์มบางที่เรียกว่าสปัตเตอริง และหลักการที่เกี่ยวกับหัวดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง ซึ่งจะได้อธิบายในส่วนที่มีความสอดคล้องกับงานวิจัยนี้

2.12.1 โกล์วดิสชาร์จ

สถานะพลาสมาเกิดขึ้นได้โดยการทำให้อะตอมของก๊าซที่อยู่ในสภาะที่เป็นกลางทางไฟฟ้าเกิดการแตกตัวเป็นไอออน ซึ่งสามารถทำได้โดยอาศัยการชนด้วยอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงโดยอะตอมที่ได้รับพลังงานที่เพียงพอจะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากอะตอม เรียกว่าการแตกตัวเป็นไอออน ซึ่งพลังงานที่มีค่าน้อยที่สุดที่ทำให้อิเล็กตรอนตัวนอกสุดหลุดออกมาได้ คือพลังงานการแตกตัวเป็นไอออน โดยการแตกตัวเป็นไอออนเป็นกระบวนการสำคัญในการสร้างพลาสมาของระบบดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง สำหรับในกรณีของโลหะที่ได้รับพลังงานแล้วทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากผิวของโลหะ เรียกว่า การปลดปล่อยอิเล็กตรอน ซึ่งพลังงานที่มีค่าน้อยที่สุดที่ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาได้ คือ ค่าฟังก์ชันงาน

อะตอมใดๆ เมื่อถูกชนด้วยอะตอมที่เป็นกลาง ไอออนหรืออิเล็กตรอนจะเกิดการแลกเปลี่ยนของพลังงานระหว่างกัน ในกรณีที่อนุภาคที่เคลื่อนที่เข้าชนอะตอมคืออิเล็กตรอนและทำให้อะตอมที่ถูกชนเกิดการแตกตัวเป็นไอออน เรียกว่า การแตกตัวเป็นไอออนเนื่องจากการชนด้วยอิเล็กตรอนโดยที่อิเล็ดตรอนจะต้องมีพลังงานจลน์มากกว่าหรือเท่ากับพลังงานการแตกตัวเป็นไอออนของอะตอม ดังสมการ

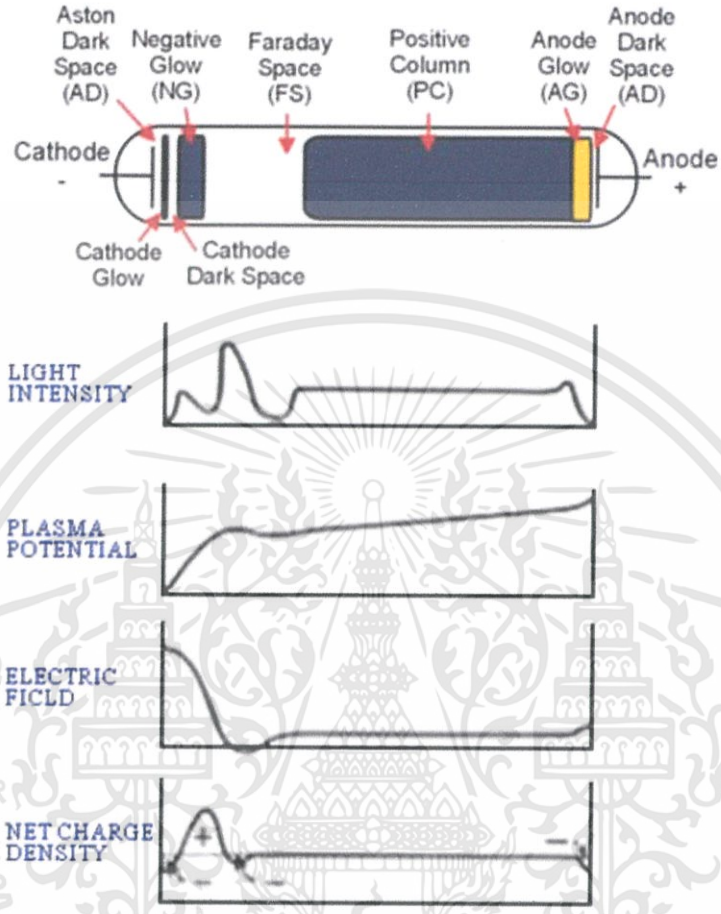
$$\frac{1}{2}mv^2 \geq W_i \qquad (2.113)$$

โดย W_i คือ พลังงานการแตกตัวเป็นไอออน
m คือ มวลของอิเล็กตรอน
v คือ ความเร็วของอิเล็กตรอน

การโกล์วดิสชาร์จ คือ การเรืองแสงของพลาสมา การโกล์วดิสชาร์จทำให้เกิดขึ้นมาได้โดยการจ่ายความต่างศักย์ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดในสภาวะความดันต่ำที่มีก๊าซกระจายอยู่ภายใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาชนะสุญญากาศ ศักย์ไฟฟ้าจะตกลงอย่างรวดเร็วในบริเวณใกล้ขั้วคาโทดและมีค่าเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆในพลาสมา และเปลี่ยนแปลงอีกครั้งในบริเวณใกล้ขั้วอาโนด ดังแสดงในรูปที่ 2.40



รูปที่ 2.40 โครงสร้างของการโกล์วดิสชาร์จ

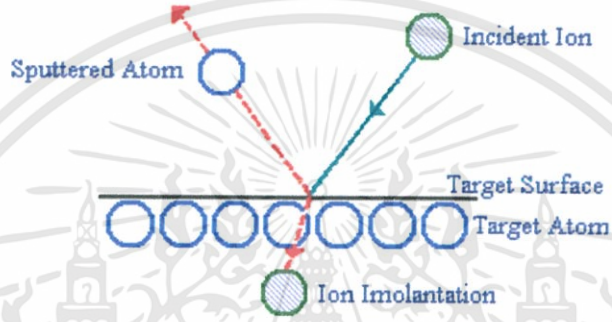
สนามไฟฟ้าในระบบจะถูกความคุมไปจนถึงชีท (sheath) ของแต่ละขั้วไฟฟ้า ซึ่งชีทก็คือความหนาแน่นของบริเวณที่แยกพลาสมาออกจากขั้วไฟฟ้า อาณาเขตของชีทจะผลักอิเล็กตรอนที่พยายามเคลื่อนที่ไปยังแต่ละขั้วอิเล็กโทรด อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นที่ขั้วคาโทดจะถูกเร่งให้เกิดการเคลื่อนที่ตามทิศทางของสนามไฟฟ้าและเกิดการชนกับอนุภาคตัวอื่นและมีการแลกเปลี่ยนพลังงาน และจะหยุดลงเนื่องจากการแพร่กระจายและการรวมตัว การโกล์วที่ทำให้การเรืองแสงเกิดขึ้นมาได้เนื่องจากอิเล็กตรอนมีพลังงานมากพอที่จะให้กำเนิดแสงที่สามารถมองเห็นได้ด้วยการชนแล้วทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนอิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าและมีการสะสมพลังงานและเกิดการชนกับอะตอมอื่นแล้วเกิดการแตกตัวเป็นไอออนโดยกระบวนการจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องอิเล็กตรอนจะมีจำนวนเพิ่มขึ้นจากการปลดปล่อยออกมาจากขั้วคาโทดซึ่งเป็นสิ่งที่สำคัญมากในการรักษาการดิสชาร์จให้สามารถมีอยู่ต่อไปได้ ลักษณะที่สำคัญหลายๆอย่างของโกล์วดิสชาร์จและให้เห็นในรูปที่ 2.40 (การเกิดสปัตเตอริงที่ผิวเป้า) การเรืองแสงในภาชนะสูญญากาศแสดงลักษณะการจัดเรียงบริเวณที่เกิดการเรืองแสงระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทรงกลมภายในภาชนะสุญญากาศที่มีการเชื่อมต่อกับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง พอการดิสชาร์จด้วยไฟฟ้ากระแสตรงถูกทำให้เกิดขึ้นและถ้าการโกล่วดิสชาร์จสามารถรักษาไส้ได้ก็จะปรากฏบริเวณการเรืองแสงและบริเวณมือในตำแหน่งที่แตกต่างกัน

2.12.2 สปัตเตอริง

สปัตเตอริงเป็นปรากฏการณีที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งในการเกิดพลาสมาเย็น ซึ่งเป็นเหตุการณ์ที่อะตอมที่ผิวเป้าถูกทำให้หลุดออกมาพร้อมกับมีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิออกมาด้วยเนื่องจากการระดมยิงของอนุภาคพลังงานสูงที่ถูกเร่งให้เคลื่อนที่เข้าชนเป้าดังแสดงในรูปที่ 2.41 (การเกิดสปัตเตอริงที่ผิวเป้า)



รูปที่ 2.41 การเกิดสปัตเตอริงที่ผิวเป้า

2.12.2.1 ยีลด์การสปัตเตอริง (sputtering yields)

ยีลด์การสปัตเตอริงนิยามด้วยปริมาณอะตอมที่ถูกสปัตเตอริงให้หลุดออกมาจากผิวเป้าต่อปริมาณไอออนที่เคลื่อนที่เข้าชน ดังแสดงในสมการที่ 2.113 ซึ่งขึ้นอยู่กับพลังงานของไอออนที่หลุดตกกระทบและอัตราส่วนระหว่างมวลของไอออนที่ตกกระทบกับอะตอมที่ถูกสปัตเตอริง

ยีลด์ของการสปัตเตอริง = อะตอมที่หลุดออกจากผิวเป้า / ไอออนที่ชนเป้า (2.114)

การสปัตเตอริงแสดงถึงลักษณะเฉพาะโดยพลังงานขีดเริ่ม (threshold energy) ซึ่งขึ้นอยู่กับไอออนที่เคลื่อนที่เข้าชนอะตอมที่ผิวเป้า ในตารางที่ 2.5 แสดงให้เห็นถึงค่าพลังงานขีดเริ่มของธาตุชนิดต่างๆและค่ายีลด์ของการสปัตเตอริงของธาตุชนิดต่างๆ ที่ถูกระดมยิงด้วยไอออนของอาร์กอนที่มีพลงงานแตกต่างกัน โดยขีดเริ่มของการสปัตเตอริง (sputtering threshold) จะอยู่ในช่วง 10-40 อิเล็กตรอนโวลต์ และที่พลังงานไอออนของอาร์กอนสูงกว่าพลังงานขีดเริ่ม ยีลด์ของการสปัตเตอริงจะเพิ่มขึ้นตามพลังงานของไอออนของอาร์กอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

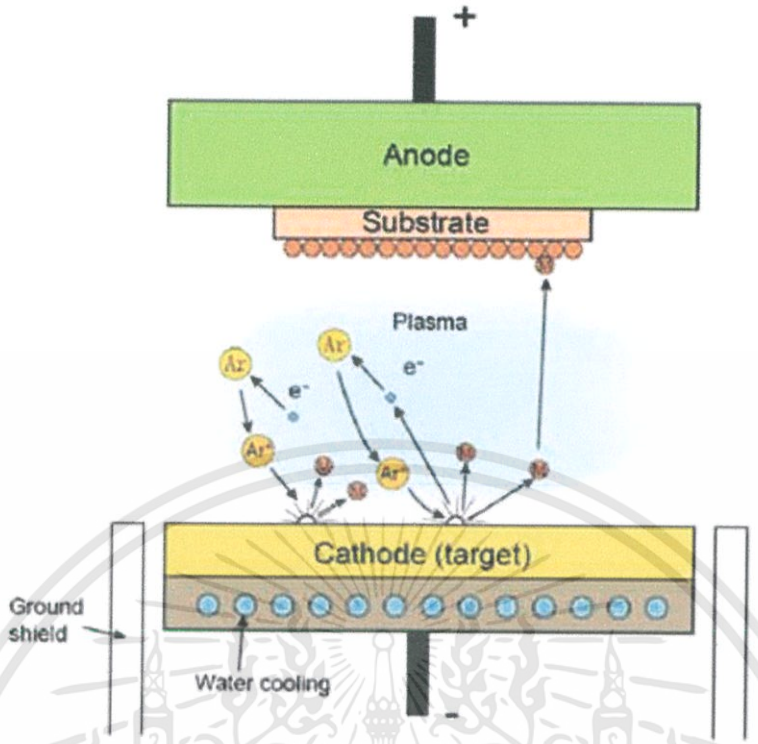
ตารางที่ 2.5 แสดงค่าพลังงานขีดเริ่มและค่ายีลด์ของธาตุชนิดต่างๆ

	Threshold	Ar^+ energy (eV)				
	(eV)	60	100	200	300	600
Ag	15	0.22	0.63	1.58	2.20	3.40
Al	13		0.11	0.35	0.65	1.24
Au	20		0.32	1.07	1.65	2.43
Be	15		0.074	0.18	0.28	0.80
Cr	22		0.30	0.67	0.87	1.30
Cu	17	0.10	0.48	1.10	1.59	2.30
Fe	20	0.064	0.20	0.53	0.76	1.26
Ge	25		0.22	0.50	0.74	1.22
Mo	24	0.027	0.13	0.40	0.58	0.93
Nb	25	0.017	0.068	0.25	0.40	0.65
Ni	21	0.067	0.28	0.66	0.95	1.52
Pd	20		0.42	1.00	1.41	2.39
Pt	25	0.032	0.20	0.63	0.95	1.56
Re	35		0.10	0.37	0.56	0.91
Si			0.07	0.18	0.31	0.53
Ta	26	0.01	0.10	0.28	0.41	0.62
Ti	20		0.081	0.22	0.33	0.58
V	23	0.03	0.11	0.31	0.41	0.70
W	33	0.008	0.068	0.29	0.40	0.62
Zr	22	0.027	0.12	0.28	0.41	0.75

2.12.2.2 ดีซีไดโอดสปัตเตอริง

ในระบบดีซีไดโอดสปัตเตอริง จะประกอบไปด้วยขั้วคาโทดและขั้วอาโนดวางอยู่ในระบบสุญญากาศ ภายใต้ความดันและศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสม โดยเป้าจะติดตั้งไว้ที่ด้านหน้าของขั้วคาโทดและแผ่นรองรับหรือชิ้นงานที่ต้องการเคลือบสารจะถูกวางอยู่ที่ขั้วอาโนด ภายในภาชนะสุญญากาศจะเต็มไปด้วยก๊าซที่ใช้ในการสปัตเตอริง โดยการดิสชาร์จจะถูกสร้างขึ้นมาระหว่างขั้วคาโทดและขั้วอาโนด โดยอาศัยการสร้างสนามไฟฟ้าช่วยในการเร่งอิเล็กตรอนให้เคลื่อนที่เข้าชนอะตอมของก๊าซที่ใช้ในการสปัตเตอริงและเกิดการแตกตัวเป็นไอออน โดยไอออนของก๊าซที่ใช้ในการสปัตเตอริงจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าไปยังขั้วคาโทดและพุ่งเข้าชนอะตอมที่ผิวของเป้าให้หลุดออกมาและเคลือบเป็นฟิล์มบางที่แผ่นรองรับหรือชิ้นงานที่เราต้องการเคลือบพร้อมกับการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิออกมาด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.42 ซึ่งอิเล็กตรอนเหล่านี้มีผลทำให้การโกล่วดิสชาร์จยังคงเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่อง เพราะว่าอิเล็กตรอนจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณที่เกิดพลาสมาและทำให้เกิดการชนกับอะตอมของก๊าซที่ใช้ในการสปัตเตอริง และเกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวกเพิ่มขึ้นมาก่อนที่อิเล็กตรอนเหล่านี้จะเคลื่อนที่ไปอยู่ที่ขั้วอาโนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.42 การสปัตเตอริงโดยดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

2.12.2.3 **ดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง**

การกำเนิดพลาสมาในวิธีดีซีสปัตเตอริง เกิดจากการใช้สนามไฟฟ้าเร่งอิเล็กตรอนให้เข้าชนอะตอมของก๊าซที่ใช้ในการสปัตเตอริงให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวกและอิเล็กตรอนโดยไอออนบวกจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าให้เคลื่อนที่เข้าชนอะตอมที่ผิวเป้าให้หลุดออกมา และมีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิออกมาภายหลังจากการชนของของไอออนบวกผิวเป้าดังนั้น ถ้าสามารถกักเก็บอิเล็กตรอนไว้ที่หน้าผิวเป้าและเพิ่มระยะทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนให้เพิ่มขึ้น ก็จะเป็นการเพิ่มโอกาสในการชนกับอะตอมของก๊าซที่ใช้ในการสปัตเตอริงให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวกมากขึ้นและถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าให้เคลื่อนที่เข้าชนเป้ามากขึ้น ผลคือทำให้อัตราการสปัตเตอริงสูงขึ้นทั้งนี้การกักเก็บอิเล็กตรอนและการเพิ่มระยะทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนให้เพิ่มขึ้นนั้นสามารถทำได้โดยการป้อนสนามแม่เหล็กในทิศทางที่เหมาะสมให้กับระบบดีซีสปัตเตอริง ทั้งนี้เมื่ออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า q เคลื่อนที่ด้วยความเร็วในทิศทางตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า B จะเกิดแรงกระทำกับอนุภาคนั้นซึ่งมีค่า

$$F = Bqv \tag{2.115}$$

โดยแรงที่กระทำกับอนุภาคมีทิศทางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กและความเร็วของการเคลื่อนที่ ซึ่งจะมีผลทำให้ประจุไฟฟ้าที่มีมวล m เกิดการเคลื่อนที่เป็นวงกลม โดยที่

$$F_B = F_C \tag{2.116}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย F_B คือ แรงเนื่องจากสนามแม่เหล็ก

F_C คือ แรงสู่ศูนย์กลางของการเคลื่อนที่

จะได้ว่า

$$qv_{\perp}B=\frac{mv_{\perp}^2}{r} \tag{2.117}$$

โดยจะได้รัศมีของการเคลื่อนที่

$$r=mv_{\perp}/Bq \tag{2.118}$$

โดยเรียกรัศมีของประจุไฟฟ้าที่มีการเคลื่อนที่เป็นวงกลมว่ารัศมีไซโคลตรอน (cyclotron radius) หรือรัศมีลาร์มอร์ (Lamor radius) โดยอิเล็กตรอนจะได้รับผลกระทบจากแรงเนื่องจากแม่เหล็กนี้อย่างมาก แต่สำหรับไอออนซึ่งมีมวลมากจะได้รับผลกระทบของแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กนี้น้อยและจาก $V=\omega r$ จะได้ความเร็วเชิงมุมของการเคลื่อนที่ของอนุภาคเป็น

$$\omega=\frac{|q|B}{m} \tag{2.119}$$

และ เมื่อพิจารณาอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจากขั้วคาโทดแล้วเคลื่อนที่ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าและ สนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกัน จากสมการของลอเรนซ์

$$m\frac{d\bar{v}}{dt}=e\left(\bar{E}+\bar{v}\times\bar{B}\right) \tag{2.120}$$

โดย e = ประจุของอิเล็กตรอน

m = มวลของอิเล็กตรอน

$\bar{v}$ = ความเร็วของอิเล็กตรอน

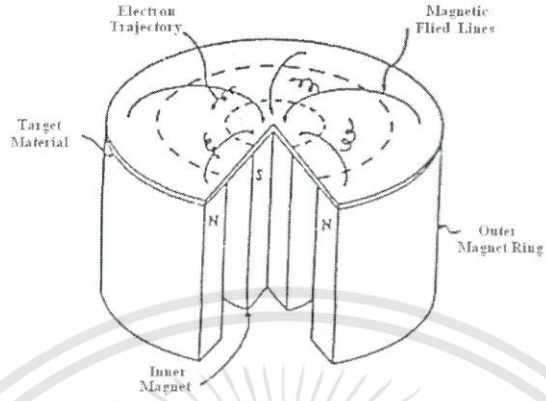
$\bar{E}$ = สนามไฟฟ้า

$\bar{B}$ = สนามแม่เหล็ก

ด้วยอิทธิพลของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกัน จะทำให้อิเล็กตรอนถูกกักเก็บไว้ที่บริเวณผิวเป้าและ มีการเคลื่อนที่เป็นรูปเกลียววงกลม ด้วยความเร็วเชิงมุม $\omega = eB/m$ ไปในเส้นทางเลื่อนลอยของสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากทิศทางของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศตั้งฉากกันด้วยความเร็ว E/B ถูกแสดงในรูปที่ 2.43 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนแบบนี้จะเพิ่มโอกาสในการชนกันระหว่างอิเล็กตรอนกับโมเลกุลของก๊าซและกระบวนการแตกตัวไปเป็นไอออนบวกสูงขึ้นบริเวณผิวเป้าและไอออนบวกที่เกิดขึ้นจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ชนเป้ามาขึ้น ซึ่งจะผลทำให้อัตราการสปัตเตอริงมีค่าสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีดีซี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไดโอดสปัตเตอริง ส่งผลให้วิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงเป็นวิธีที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มบางกันอย่างแพร่หลายในหลายงานวิจัยและในงานอุตสาหกรรม



รูปที่ 2.43 การเคลื่อนที่เป็นเกลียววงกลมของอิเล็กตรอนที่ถูกกักเก็บไว้ที่ผิวของเป้าในเส้นทางเลื่อนลอยของสนามไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าและสนามแม่เล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกัน

และจากความเร็ว v ที่เกิดขึ้นโดยการเร่งจากสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอที่เกิดจากการจ่ายความต่างศักย์ให้กับขั้วอิเล็กโทรด จะได้ว่า

$$\frac{1}{2}mv^2=|q|V \tag{2.121}$$

จะได้ว่า

$$v=\sqrt{\frac{2|qV|}{m}} \tag{2.122}$$

แทนค่า (2.121) ลงใน (2.117)

$$r=\frac{1}{B}\sqrt{\frac{2mv}{|q|}} \tag{2.123}$$

โดยจะได้ รัศมีของอนุภาคเคลื่อนที่ภายใต้อิทธิพลของแรงลอเรนซ์ในกรณีของอิเล็กตรอน จะได้ว่า

$$r=0.33\times10^{-5}\frac{\sqrt{v}}{B} \tag{2.124}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

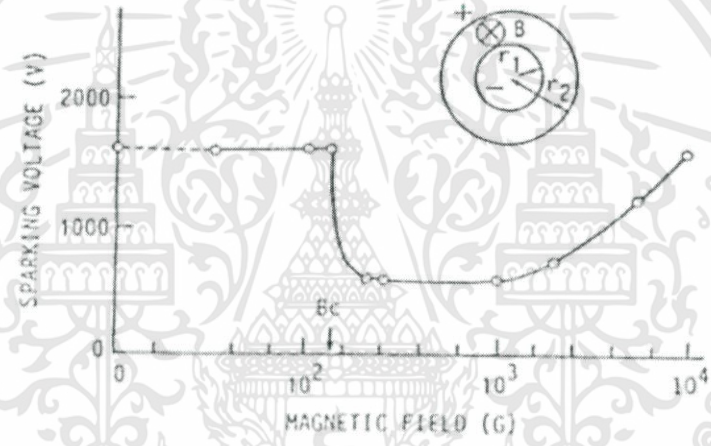
และสามารถวิเคราะห์ผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อการดิสชาร์จซึ่งพิจารณาได้จากสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งทุติผล (cut-off magnetic field) โดยสนามแม่เหล็กจะมีผลต่อการดิสชาร์จเมื่อความเข้มของสนามแม่เหล็กมีค่ามากกว่าสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งยุติผล ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ 2.125

$$B_c = \frac{1}{L}\sqrt{\frac{2mv_c}{e}} \quad \text{สำหรับขั้วอิเล็กโทรดแผ่นราบ (2.125)}$$

โดย v_c คือ ความต่างศักย์ที่จ่ายระหว่างขั้วอิเล็กโทรด

L คือ ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด

2.12.2.4 สนามแม่เหล็กที่มีผลต่อการดิสชาร์จ



รูปที่ 2.44 ความต่างศักย์ของการดิสชาร์จกับสนามแม่เหล็กที่วัดในขั้วอิเล็กโทรดโคแอคเชียวทรงกระบอก

ในรูปที่ 2.44 แสดงผลของสนามแม่เหล็กตามขวางกับความต่างศักย์ของการดิสชาร์จที่วัดในขั้วอิเล็กโทรดโคแอคเชียลทรงกระบอกซึ่งทำจากทองแดง โดยมีรัศมีภายใน 5 มิลลิเมตร และรัศมีภายนอก 15 มิลลิเมตร ที่ความดัน 40 มิลลิทอร์ โดยสนามแม่เหล็กที่มีค่าต่ำกว่าสนามแม่เหล็กที่ยุติผล (cut-off magnetic field ; B_C) อิเล็กตรอนในบริเวณขั้วคาโทดจะไปถึงขั้วอาโนดโดยปราศจากการแสดงการเคลื่อนที่เป็นรูปเกลียวกลมระหว่างขั้วอิเล็กโทรด เนื่องจากรัศมีของการเคลื่อนที่เป็นเกลียววงกลมมีค่ามากกกว่าระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดและเมื่อสนามแม่เหล็กมีค่ามากกว่าสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งยุติผล ความต่างศักย์ของการดิสชาร์จจะลดลงอย่างฉับพลัน ซึ่งเป็นผลจากการเพิ่มขึ้นของการชนระหว่างอิเล็กตรอนกับอะตอมที่เป็นกลางและการเกิดการแตกตัวเป็นไอออนเพิ่มสูงขึ้นและเมื่อสนามแม่เหล็กมีค่าสูงมากๆ ความต่างศักย์ของการดิสชาร์จจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามสนามแม่เหล็ก ซึ่งถูกทำให้เกิดขึ้นโดยการเพิ่มขึ้นของการสูญเสียพลังงานของอิเล็กตรอนที่ผ่านพ้นการชนอย่างต่อเนื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.13 องค์ประกอบที่สำคัญของหัวดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง (ฐิตินัย, 2558; สุรสิงห์, 2545)

สำหรับการออกแบบสร้างหัวแมกนีตรอนให้สามารถใช้ในการสปัตเตอริงได้อย่างมีประสิทธิภาพนั้น ควรจะคำนึงถึงองค์ประกอบที่สำคัญ ดังต่อไปนี้

2.13.1 วัสดุที่ใช้สร้างหัวดีซีแมกนีตรอน

ในการสร้างหัวดีซีแมกนีตรอนขนาดเล็กนั้น วัสดุที่เลือกควรจะมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1. เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงทนทานเหมาะสมกับการสร้างชิ้นงานขนาดเล็ก สามารถกลึงขึ้นรูปได้ดังต้องการ และเชื่อมประกอบได้โดยไม่เกิดการรั่วซึม
2. เป็นวัสดุที่มีกรายึดเกาะของก๊าซต่ำ สามารถไล่ก๊าซบนผิววัสดุภายในระบบสุญญากาศได้โดยง่าย
3. เป็นวัสดุที่มีความทนทานต่อการกัดกร่อนที่เกิดจากสารเคมี
4. เป็นวัสดุที่มีการนำไฟฟ้าที่ดี
5. เป็นวัสดุที่มีการนำความร้อนได้ดี
6. เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติไม่เป็นสารแม่เหล็ก เพราะจะไปกักกันสนามแม่เหล็กที่ผิวเป้า ให้มีค่าน้อยลง

2.13.2 การให้ความเย็นที่เป้า

พลังงานที่จ่ายเข้าไปในกระบวนการสปัตเตอริงจะทำให้ไอออนบวกที่เคลื่อนที่เข้าชนผิวเป้ามีพลังงานค่อนข้างสูง ซึ่งส่วนใหญ่จะเปลี่ยนแปลงไปอยู่ในรูปของพลังงานความร้อนที่เป้าและความร้อนที่เกิดขึ้นที่ผิวของเป้าในขณะเกิดการสปัตเตอริงอาจจะมีค่าสูงกว่าปกติ และสามารถนำไปสู่ความเสียหายของการเชื่อมต่อระหว่างเป้าและแผ่นหลังที่เป็นขั้วไฟฟ้า เป้า และ โอริง เป็นต้น ความร้อนที่มากเกินไปนี้สามารถหลีกเลี่ยงได้โดยการให้ความเย็นกับเป้าด้วยน้ำหรือของเหลวที่เหมาะสมอื่นๆ และควรระวังการรั่วซึมของน้ำ

2.13.3 การควบคุมให้เกิดการสปัตเตอริงเฉพาะผิวเป้า

บริเวณของเป้าจะถูกล้อมรอบด้วยกำบังบริเวณมือ (dark space shield) ซึ่งเรียกกันโดยทั่วไปว่ากราวด์ชีลด์ (ground shields) ประโยชน์ของกราวด์ชีลด์ก็คือควบคุมให้การระดมยิงของไอออนและการสปัตเตอริงเกิดที่เปาเท่านั้น มิฉะนั้นแผ่นหลังของเป้าและตัวยึดเป้าอาจจะถูกสปัตเตอริงออกมาด้วย และก่อให้เกิดความบริสุทธิ์ของฟิล์มที่เคลือบ ในการขัดขวางการระดมยิงของบริเวณที่ถูกป้องกัน ระยะห่างระหว่างเป้าและกราวด์ชีลด์ต้องมีค่าน้อยกว่าความหนาแน่นของบริเวณมืด (dark space thickness) เพื่อไม่ให้เกิดการโกล่วดิสชาร์จในพื้นที่ว่างนี้ในบางโอกาสพบว่าตำแหน่งที่เป็นขอบคมและสิ่งที่สกปรกชิ้นเล็กจะทำให้เกิดการโกล่วดิสชาร์จเฉพาะที่หรือการอาร์คเฉพาะที่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับการดิสชาร์จด้วยไฟฟ้ากระแสตรงนั้นของที่คมหรือสิ่งสกปรกเล็กๆต้องกำจัดออกไปเสียก่อนและเนื่องจากความหนาของบริวณมืดจะมีค่าลดลงตามความดันที่เพิ่มขึ้นดังนั้น ระยะห่างระหว่างเป้ากับกราวด์ชีลด์ควรจะมีค่าอยู่ในขีดจำกัดของความดันสูงสุดของระบบและภายใต้การจัดวางของสนามแม่เหล็กที่ตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า ความหนาของบริเวณมืดจะลดลงซึ่งแสดงให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เห็นว่าการจัดวางของสนามแม่เหล็กเป็นการเพิ่มอย่างสม่ำเสมอของความดันก๊าซในบริเวณดิสชาร์จ ดังแสดงในความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.126
ผลของสนามแม่เหล็กกับความดันยังผล (P_e) แสดงโดย

$$P_e \Big/ P \cong \left[1 + (\omega\tau)^2\right]^{1/2} \tag{2.126}$$

โดย ω คือ ความถี่ของการเคลื่อนที่เป็นเกลียววงกลมของอิเล็กตรอน
τ คือ เวลาปลอดการชนเฉลี่ย (mean free time)
P คือ ความดันของก๊าซที่ใช้ในการดิสชาร์จ

โดย

$$\omega = eB/m \text{ และ } \tau = \lambda_0 / P[2(e/m)V_0]^{1/2}$$

จะได้ว่า

$$\omega\tau \cong \lambda_0 B(e/m)^{1/2} / \sqrt{2}\, PV_0^{1/2} \tag{2.127}$$

โดย λ_0 คือ ระยะทางปลอดการชนเฉลี่ยของอิเล็กตรอนที่ความดัน 1 ทอร์
B คือ ความเข้มข้นของสนามแม่เหล็ก
e/m คือ ค่าประจุต่อมวลของอิเล็กตรอน
V_0 คือ ความต่างศักย์ที่ใช้เร่งอิเล็กตรอน

และความหนาของบริเวณมืด จะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเป็นฟังก์ชันกับความต่างศักย์ของการดิสชาร์จที่เพิ่มขึ้น ซึ่งการแปรผันแบบเอ็กโพเนนเชียลของความหนาของบริเวณมืดกับความต่างศักย์ของการดิสชาร์จขึ้นอยู่กับความดันของระบบสุญญากาศ

ความหนาของบริเวณมืดและความต่างศักย์ของการดิสชาร์จมีความสัมพันธ์ ดังแสดงในสมการที่ 2.128

$$d = cV^{-m} \tag{2.128}$$

โดย c คือ ค่าคงที่
m คือ เลขยกกำลังระหว่าง -3 และ -6

ความหนาของบริเวณมืด กระแส และความต่างศักย์ถือตามกฎของไชลด์ซึ่งอยู่ในความสัมพันธ์

$$I \alpha \frac{V^{\frac{3}{2}}}{d^2} \tag{2.129}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อการขาขึ้นกับความต่างศักย์ของบริเวณมืดถูกแทนลงในสมการ (2.127) จะได้ความสัมพันธ์

$$I\alpha k^{n} \qquad (2.130)$$

โดย k คือ ค่าคงที่ของความสัมพันธ์
n คือ ตัวเลขที่แสดงความสามารถในการกักอิเล็กตรอนโดยสนามแม่เหล็ก

2.13.4 ลักษณะของสนามแม่เหล็ก

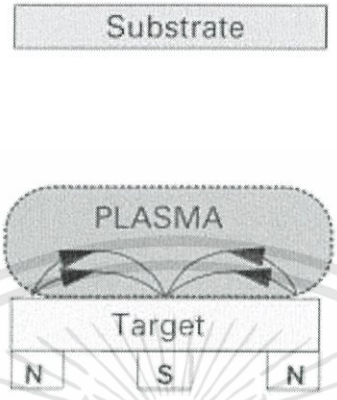
สนามแม่เหล็กในระบบดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงนั้นจะมีผลต่อลักษณะของพลาสมาที่เกิดขึ้นซึ่งจะสอดคล้องกับอัตราการเคลือบฟิล์มบางและคุณสมบัติทางด้านฟิสิกส์ของฟิล์มบางที่เคลือบโดยสามารถแบ่งลักษณะของสนามแม่เหล็กที่บริเวณผิวเป้าออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้

1. แม่เหล็กตรงกลางมีความเข้มข้นของสนามแม่เหล็กเท่ากันกับแม่เหล็กด้านนอก โดยเส้นแรงแม่เหล็กทั้งหมดจะเชื่อมปิดระหว่างแม่เหล็กตรงกลางกับแม่เหล็กด้านนอกที่บริเวณผิวเป้า ซึ่งมี ชื่อเรียกว่า แมกนีตรอนแบบสมมาตร (balanced magnetron) หรือ แมกนีตรอนแบบสามัญ (conventional magnetron)
2. แม่เหล็กตรงกลางมีความเข้มข้นของสนามแม่เหล็กมากกว่าแม่เหล็กด้านนอก โดยเส้นแรงแม่เหล็กส่วนหนึ่งจะเชื่อมปิดระหว่างแม่เหล็กตรงกลางกับแม่เหล็กด้านนอก และเส้นแรงแม่เหล็กส่วนที่เหลือจะมีทิศทางไปยังผนังของภาชนะสุญญากาศ ซึ่งมีชื่อเรียกว่า แมกนีตรอนแบบไม่สมมาตรประเภทที่ 1 (unbalanced magnetron type 1)
3. แม่เหล็กตรงกลางมีความเข้มข้นสนามแม่เหล็กน้อยกว่าแม่เหล็กด้านนอก โดยเส้นแรงแม่เหล็กส่วนหนึ่งจะเชื่อมปิดระหว่างแม่เหล็กตรงกลางกับแม่เหล็กด้านนอก และเส้นแรงส่วนหนึ่งจะมีทิศทางไปยังแผ่นรองรับ ซึ่งมีชื่อเรียกว่า แมกนีตรอนแบบไม่สมมาตรประเภทที่ 2 (unbalanced magnetron type 2)

ในกรณีดิสชาร์จของระบบดีซีแมกนีตรอนที่แม่เหล็กตรงกลางมีความเข้มข้นสนามแม่เหล็กเท่ากันกับแม่เหล็กด้านนอก โดยสนามแม่เหล็กที่ใส่เข้าไปจะทำหน้าที่กักเก็บอิเล็กตรอนไว้ที่หน้าผิวเป้าและอิเล็กตรอนเหล่านี้จะมีการเคลื่อนที่เป็นรูปเกลียววงกลมในเส้นทางเลื่อนลอยของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกันด้วยแรงลอเรนซ์ ซึ่งนำไปสู่โอกาสในการชนกับอะตอมที่เป็นกลางและเกิดกระบวนการแตกตัวเป็นไอออนบวกสูงขึ้น โดยไอออนบวกที่ถูกสร้างขึ้นจากกระบวนการแตกตัวจะถูกเร่งกลับเข้าไปยังการดิสชาร์จ และอิเล็กตรอนส่วนใหญ่จะถูกกักไว้ในเส้นทางเลื่อนลอยของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกัน ซึ่งเป็นผลให้เกิดการแตกตัวในปริมาณสูงขึ้นก่อนที่จะสูญเสียไป โดยจะทำให้พลาสมามีความหนาแน่นสูงในบริเวณผิวเป้าและจากการที่พลาสมามีความหนาแน่นสูงในบริเวณผิวเป้านั้น ฟิล์มบางที่ปลูกบนแผ่นรองรับในตำแหน่งภายในบริเวณนี้จะถูกควบคุมโดยการระดมยิงของไอออนซึ่งส่งผลกระทบอย่างมากต่อโครงสร้างและคุณสมบัติของฟิล์มบางที่ทำการปลูก สำหรับแผ่นรองรับที่วางอยู่นอกบริเวณนี้จะวางอยู่ในบริเวณที่ความหนาแน่นของพลาสมาต่ำเป็นผลให้กระแสไอออนที่แผ่นรองรับมีค่าน้อยกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

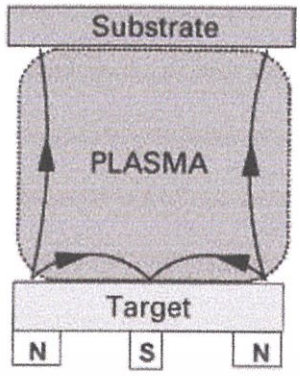
1 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตรซึ่งไม่เพียงพอที่จะปรับปรุงหรือเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของฟิล์ม ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะเคลือบฟิล์มให้หนาแน่นเต็มที่ในบริเวณกว้างหรือมีส่วนประกอบที่สมบูรณ์ในการใช้แมกนีตรอนแบบสมมาตร



รูปที่ 2.45 ลักษณะของแมกนีตรอนแบบสมมาตร

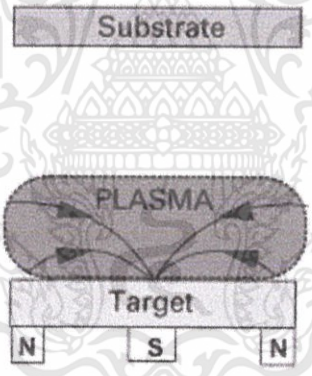
สำหรับในกรณีแม่เหล็กตรงกลางมีความเข้มของสนามแม่เหล็กน้อยกว่าแม่เหล็กด้านนอกในกรณีนี้เส้นแรงแม่เหล็กส่วนหนึ่งจะเชื่อมปิดระหว่างแม่เหล็กตรงกลางและแม่เหล็กด้านนอกและเส้นแรงแม่เหล็กส่วนที่เหลือจะมีทิศทางไปยังแผ่นรองรับ โดยอิเล็กตรอนทุติยภูมิส่วนหนึ่งที่มีพลังงานสูงที่ไม่ถูกกักเก็บไว้ในเส้นทางเลื่อนลอยของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกันจะเคลื่อนที่เป็นเกลียวงกลมตามเส้นแรงแม่เหล็กมีทิศทางไปยังแผ่นรองรับและเกิดการชนกับอะตอมที่เป็นกลางแล้วเกิดการแตกตัวเป็นไอออนในบริเวณผิวหน้าของแผ่นฐานรองรับจึงเกิดไอออนบวกเพิ่มสูงขึ้นบริเวณแผ่นรองรับซึ่งเป็นผลให้พลาสมาจะถูกกักเก็บไว้ได้น้อยลงในบริเวณผิวเป้าแต่จะมีขนาดเพิ่มขึ้นโดยวินโดวส์และซาว์ไวด์และกลุ่มนักวิจัยที่ทำการวิจัยเกี่ยวกับเรื่องนี้ได้แสดงให้เห็นต่อมาว่าที่แผ่นรองรับมีความหนาแน่นของกกระแสไอออน 5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเมตรและมากกว่านั้น ซึ่งอยู่ในระดับที่มีปริมาณสูงกว่ากรณีแมกนีตรอนแบบสมมาตร และเป็นการแสดงให้เห็นว่าแมกนีตรอนแบบไม่สมมาตรประเภทที่ 1 เป็นแหล่งกำเนิดไอออนที่มีประสิทธิภาพมากและเป็นที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในการเคลือบฟิล์มโดยวิธีสปัตเตอริงและนอกจากนี้กระแสไอออนที่แผ่นรองรับยังเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสที่เป้าและอัตราการเคลือบเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสที่เป้า ผลลัพธ์ก็คืออัตราส่วนของไอออนต่ออะตอมที่แผ่นรองรับยังมีค่าคงที่ตอมอัตราการเคลือบที่เพิ่มขึ้นและการเคลือบฟิล์มที่หนาแน่นโดยมีค่ากระแสไอออนต่อพื้นที่สูง ซึ่งมีค่ามากกว่า 2 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ของพลังงานไอออนที่ค่อนข้างต่ำ โดยมีค่าน้อยกว่า 100 อิเล็กตรอนโวลต์ เป็นที่พึงปรารถนาโดยปราศจากการนำไปสู่ความเค้นที่มากกว่าปกติ (excessive stress) และความเค้นภายใน (intrinsic stress) ซึ่งทำได้โดย แมกนีตรอนแบบไม่สมมาตรประเภทที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.46 แสดงลักษณะของแมกนีตรอนแบบไม่สมมาตรประเภทที่ 1

สำหรับในกรณีที่แม่เหล็กตรงกลางมีความเข้มของสนามแม่เหล็กมากกว่าแม่เหล็กด้านนอก ในกรณีนี้เส้นแรงแม่เหล็กส่วนหนึ่งจะเชื่อมปิดระหว่างแม่เหล็กตรงกลางและแม่เหล็กด้านนอกและเส้นแรงแม่เหล็กส่วนที่เหลือจะมีทิศทางไปยังแผ่นผนังของภาชนะสุญญากาศ ซึ่งทิศทางของอิเล็กตรอนและพลาสมาจะห่างไปจากแผ่นรองรับมีค่าต่ำซึ่งน้อยกว่า 1 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร การออกแบบในลักษณะนี้จะไม่เป็นที่นิยมใช้ เพราะการใช้ผลของกระแสไอออนต่ำที่แผ่นรองรับ



รูปที่ 2.47 แสดงลักษณะของแมกนีตรอนแบบไม่สมมาตรประเภทที่ 2

2.14 คุณสมบัติทางพลาสมา

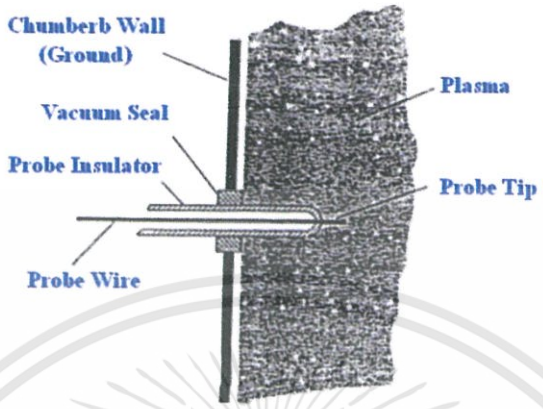
2.14.1 หัววัดลางมัวร์

หัววัดลางมัวร์เป็นขั้วไฟฟ้าที่ทำจากโลหะที่ปกคลุมด้วยฉนวน ยกเว้นที่ปลายหัววัดที่สัมผัสกับพลาสมา หัววัดทำมาจากโลหะที่มีจุดหลอมเหลวสูงเช่น ทังสเตน โมลิดินัม หรือแพทตินัม โดยจะใช้หัววัดลางมัวร์ในการวิเคราะห์พลาสมา ซึ่งเหมาะสำหรับการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของพลาสมาเย็น โดยใช้ในการตรวจสอบความหนาแน่นของพลาสมา (n) อุณหภูมิของอิเล็กตรอน (T_e) ศักย์ของพลาสมา (V_p) และศักย์ลอย (floating potential: V_f)

ในการใช้หัววัดลางมัวร์จะดำเนินการโดยการจ่ายความต่างศักย์ที่สามารถปรับค่าได้จากภายนอกให้กับหัวที่ปลายอีกด้านหนึ่งถูกสอดเข้าไปในพลาสมา ดังแสดงในรูปที่ 2.47 เมื่อปลายของหัววัดสัมผัสกับพลาสมาจะแสดงให้เห็นถึงลักษณะเฉพาะของกระแสและความต่างศักย์ที่เกิดการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

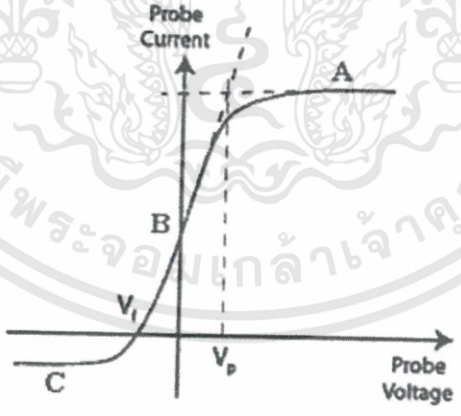
เปลี่ยนแปลงขึ้นที่หัววัดดังแสดงในรูปที่ 2.48 ซึ่งนำมาใช้วิเคราะห์ตัวแปรของพลาสมาสำหรับความต่างศักย์ที่จ่ายให้กับหัววัดจะมีลักษณะต่อเนื่องด้วยรูปร่างฟันปลา (saw tooth-shaped) ในกรณีหัววัดเดี่ยวลางมัวร์ ความต่างศักย์ที่จ่ายให้กับหัววัดจะเทียบผนังของภาชนะสุญญากาศ



รูปที่ 2.48 หัววัดเดี่ยวลางมัวร์ที่สอดเข้าไปในพลาสมา

2.14.2 ลักษณะเฉพาะของกระแสและความต่างศักย์

ในการใช้หัววัดเดี่ยวลางมัวร์วิเคราะห์พารามิเตอร์ของพลาสมา จะจ่ายความต่างศักย์ให้กับหัววัดโดยที่ปลายอีกด้านหนึ่งของหัววัดสัมผัสกับพลาสมา ลักษณะเฉพาะของกระแสและความต่างศักย์ที่หัววัดจะถูกแสดงออกมา ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.49



รูปที่ 2.49 แผนภาพลักษณะเฉพาะของกระแสกับความต่างศักย์

เมื่อความต่างศักย์ของหัววัดมีค่าเท่ากันกับศักย์ของพลาสมาที่ตำแหน่ง V_p ซึ่งไม่มีสนามไฟฟ้าอยู่รอบๆ หัววัด ตำแหน่งนี้จึงไม่เกิดพลาสมาชีทอิเล็กตรอนและไอออนขะเคลื่อนย้ายไปยังหัววัด โดยกระแสอิเล็กตรอนจะสมที่หัววัดมากกว่ากระแสของไอออนที่ตำแหน่ง V_p กระแสจะมีค่า

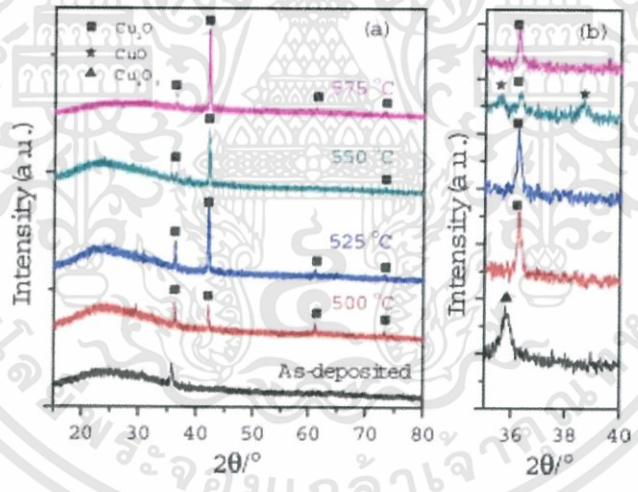
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากรัศมีลาร์มอร์ของอิเล็กตรอนมีค่าน้อยกว่าของไอออนด้วยอัตราส่วนของ m_e/m_i ดังนั้นอิเล็กตรอนจะได้รับผลกระทบจากสนามแม่เหล็กมากกว่าไอออน เพราะว่าโดยทั่วไป $r_{Li} > a$ กระแสไอออนอิ่มตัวแทบจะไม่ได้รับผลกระทบจากสนามแม่เหล็ก แต่ในทางกลับกัน กระแสอิเล็กตรอนอิ่มตัว ที่ถูกวัดโดยหัววัดที่ขนานกับสนามแม่เหล็กมีค่าลดลงอย่างมาก และกระแสอิเล็กตรอนอิ่มตัวที่วัดโดยหัววัดที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก กระแสอิเล็กตรอนอิ่มตัวจะได้รับผลกระทบน้อยมาก

2.15 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

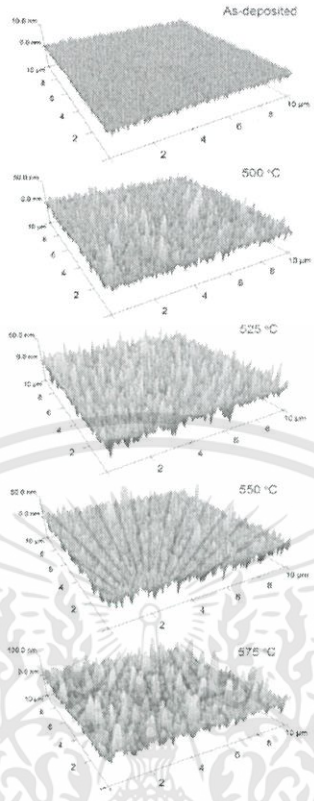
2.15.1 อิทธิพลของเฟส CuO ที่มีผลต่อสมรรถนะทางไฟฟ้าและทางแสงของฟิล์มบาง Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีแมกนีตรอนสปัตเตอริงด้วยความถี่คลื่นวิทยุขนาดกลาง (Li et al., 2015)

ในวิจัยฉบับนี้เป็นผลที่ได้จากการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคิวปรัสออกไซด์ซึ่งถูกเตรียมโดยวิธีแมกนีตรอนสปัตเตอริงด้วยความถี่คลื่นวิทยุขนาดกลางและผ่านการแอนนีลในภายหลัง โดยจะพบเฟสของคิวปริกออกไซด์จำนวนหนึ่งปรากฏอยู่ในฟิล์มตัวอย่างคิวปรัสออกไซด์ซึ่งมีอิทธิพลต่อฟิล์มบางตัวอย่างนี้ โดยผลการวิจัยนี้จะแสดงให้เห็นว่าเฟสของคิวปริกออกไซด์ส่งผลให้ค่าสภาพคล่องฮอลล์และการเปลี่ยนแปลงผิวหน้าโดยสัณฐานของฟิล์มบางลดลง



รูปที่ 2.50 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคิวปรัสออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีแมกนีตรอนสปัตเตอริงด้วยความถี่คลื่นวิทยุขนาดกลางและมีการแอนนีลในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 500, 525, 550 และ 575 องศาเซลเซียส (a) ฟิล์มบางคิวปรัสออกไซด์ที่ถูกเตรียมด้วยอัตราส่วน 40% ของก๊าซออกซิเจนและแอนนีลที่อุณหภูมิตามที่กำหนดไว้ (b) แสดงภาพขยายของภาพ (a)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.51 แสดงภาพถ่ายผิวหน้าของฟิล์มบางคิวปรัสออกไซด์ที่ถูกเตรียมด้วยอัตราส่วน 40% ของก๊าซออกซิเจนและแอนนีลที่อุณหภูมิตามที่กำหนดไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในโครงงานพิเศษนี้ได้ทำการเตรียมไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่ง p-Cu_2O/n-Si (100) โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสานกึ่งตัวนำ n-Si (100) และแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงแล้วทำการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆต่อไป

3.1 วิธีการทดลองและเครื่องมือการวิจัย (งามนิตย์, 2545; ฐิตินัย, 2546; ฐิตินัย, 2549; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, 2551; งามนิตย์, 2551; นันธิดา, 2550)

3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์

1. อะซีโตน (CH_3COOH)
2. เอทานอล (C_2H_5OH)
3. น้ำปลอดประจุ (DI water)
4. แผ่นกระจกสไลด์12 x 25 มิลลิเมตร
5. บีกเกอร์ขนาด 200 มิลลิเมตร
6. อ่างอัลตราโซนิก

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ (Cu_2O) โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

1. กระจกสไลด์ใช้เป็นแผ่นฐานรองรับฟิล์มบาง
2. อะซีโตน (CH_3COOH)
3. สำลีสำหรับการเช็ดทำความสะอาด
4. เป้าคอปเปอร์ (Cu)
5. เครื่องสปัตเตอร์

3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100)

1. แผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) ขนาด 12 x 25 ตารางมิลลิเมตร
2. ที่ตัดแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100)
3. แท่งแม่เหล็กกวนสารละลายเคมี
4. สารเคมี
   - 4.1 H_2O_2
   - 4.2 NH_4OH
   - 4.3 HCL
   - 4.4 HF
   - 4.5 KOH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 IPA
4.7 น้ำปลอดประจุ (DI Water)
4.8 น้ำยาล้างจาน

5. บีกเกอร์ขนาด 200 มิลลิลิตร
6. เทอร์โมคัปเปิล ชนิด K
7. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่งยี่ห้อ Sartorius
8. ที่ตักสาร
9. ที่คนสาร
10. แก๊สไนโตรเจน
11. เครื่องเป่าลมร้อน
12. ปากคีบ
13. เตาอบ
14. นาฬิกาจับเวลา
15. เครื่องกวนสารละลาย (magnetic stirrer)

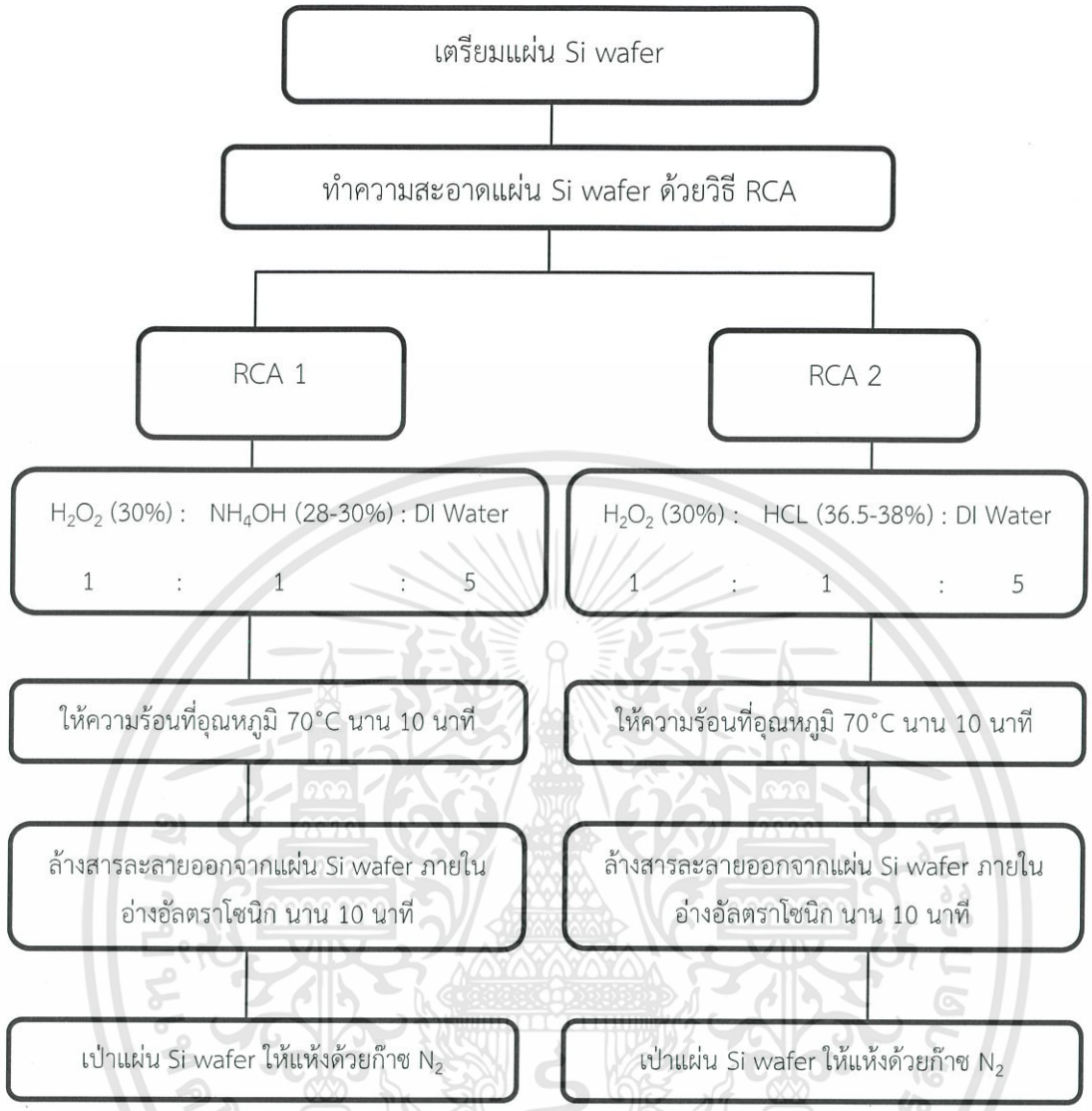
3.2 ขั้นตอนในการเตรียมไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นกระจกสไลด์และแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

3.2.1 การเตรียมแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) เพื่อเป็นแผ่นฐานรองรับ

1. ตัดแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) ขนาด 12×25 ตารางมิลลิเมตร
2. ทำการกัดผิวหน้าบนแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) ให้เป็นผิวพีระมิดแบบ Anisotropic ด้วยสารประกอบ KOH และ IPA โดยมีขั้นตอนดังนี้
   1) การทำความสะอาดแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) ด้วยกระบวนการ RCA (Radio Corporation of America) ประกอบด้วยขั้นตอน RCA 1 เพื่อกำจัดอนุภาคอินทรีย์สารออกจากผิวหน้าต่อมาผ่านขั้นตอนกำจัดโลหะออกจากผิวหน้าด้วยกระบวนการ RCA 2 ขั้นตอนของกระบวนการทำความสะอาดแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) ดังแผนภาพในรูปที่ 3.1
   2) การกำจัดชั้น native oxide ด้วยการจุ่มแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) ลงไปในกรด Hydrofluoric (HF) ประมาณ 1 นาที
   3) การกัดผิวหน้าแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) แบบ Anisotropic ด้วยสารประกอบของ KOH และ IPA เพื่อให้เกิดการก่อตัวของพีระมิดที่ผิวหนาแน่นที่สุดนั้นจะต้องมีปัจจัยของอุณหภูมิและเวลาในการสกัด

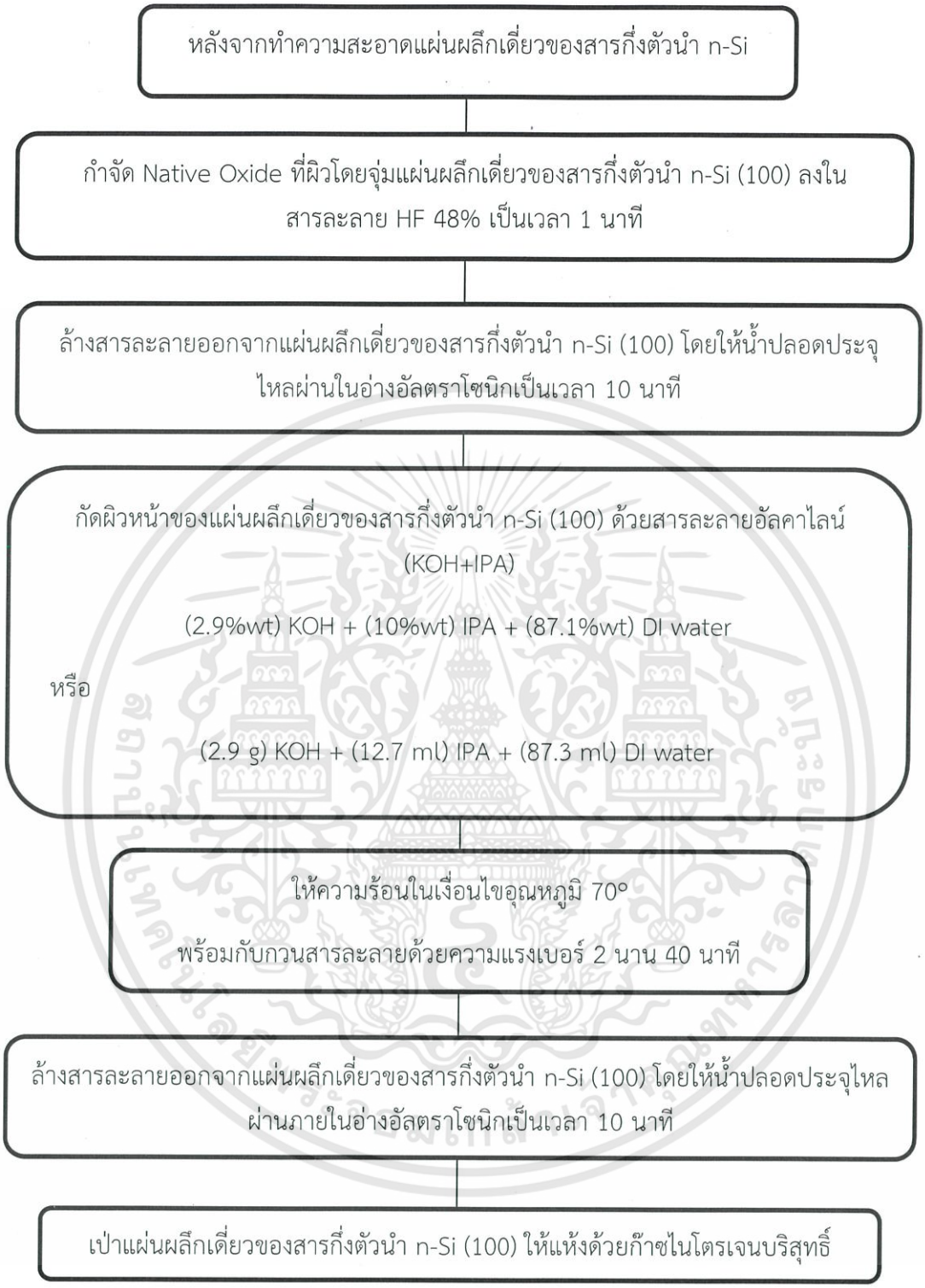
ขั้นตอนของกระบวนการกัดผิวหน้าของแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) แบบ Anisotropic ด้วยสารประกอบ KOH ที่เติม IPA แสดงในรูปที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทำความสะอาดแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) ด้วยวิธี Radio Corporation of America (RCA)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

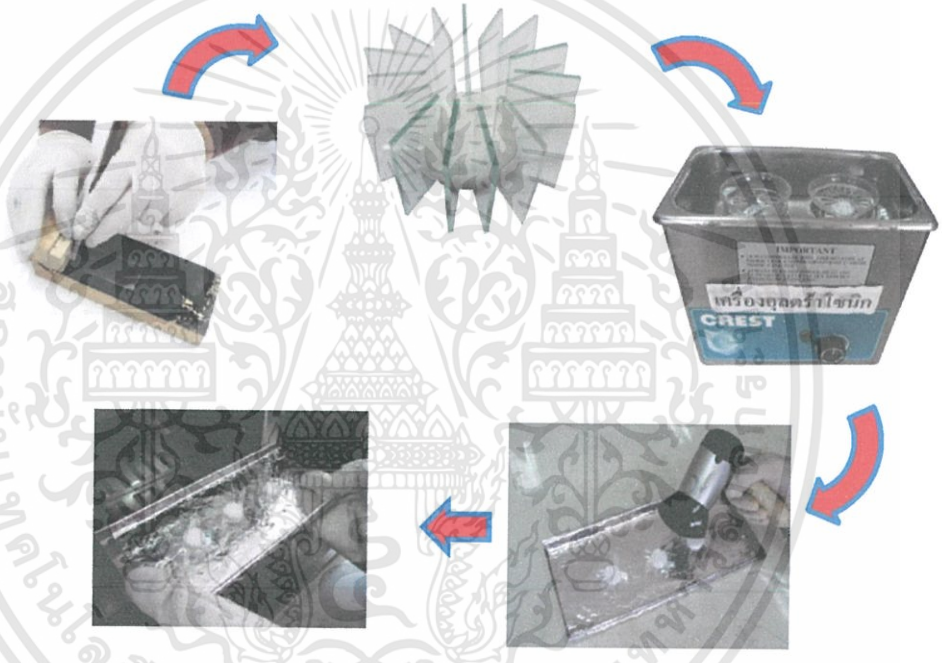


รูปที่ 3.2 ขั้นตอนและกระบวนการกัดผิวด้วยสารละลาย KOH ที่เติม IPA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 การเตรียมแผ่นกระจกสไลด์เพื่อใช้เป็นแผ่นฐานรองรับ

1. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปทำความสะอาดด้วยน้ำยาล้างจาน
2. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วยอะซิโตนในอ่างอัตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาทีจำนวน 1 ครั้ง
3. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วยเอทานอลในอ่างอัตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาทีจำนวน 1 ครั้ง
4. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ในน้ำปลอดประจุในอ่างอัตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาทีจำนวน 3 ครั้งเป่าให้แห้ง
5. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปอบในเตาที่มีอุณหภูมิประมาณ 95 องศาเซลเซียล เป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์

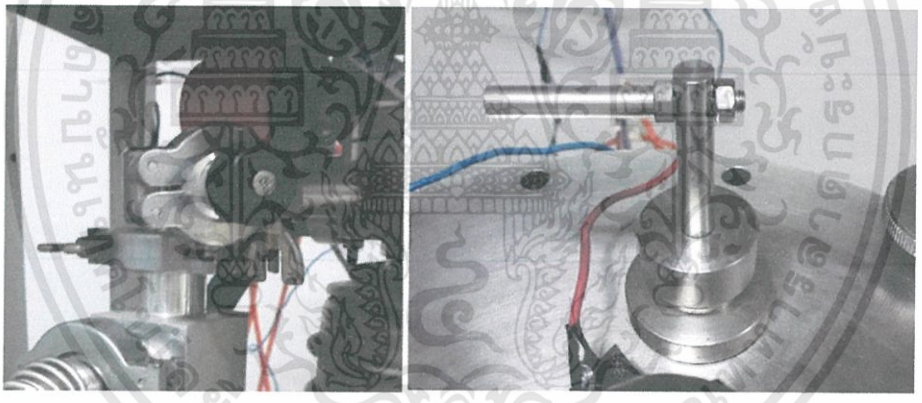
3.2.3 การเตรียมไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) โดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นกระจกสไลด์และแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O โดยวิธีการเคลือบฟิล์มบางด้วยระบบดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงมีขั้นตอนดังนี้

1. ดึงสวิตช์ปุ่มคอมเพรสเซอร์ (compressor) ที่ตู้ทำความเย็นของระบบน้ำหล่อเย็นขึ้น เพื่อทำความเย็นของน้ำไว้ แต่ยังไม่ต้องดึงสวิตช์ปุ่มปั๊มน้ำ (WATER PUMP) ขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ชั่งมวลของแผ่นรองรับเพื่อใช้คำนวณหาความหนาของฟิล์มบางและอัตราการเคลือบ (ทำในกรณีที่ต้องการคำนวณความหนาของฟิล์มและอัตราการเคลือบฟิล์ม หากไม่ต้องการสามารถทำข้ามขั้นตอนนี้ไปได้)
3. ทำความสะอาดเป้าด้วยกระดาษทราบเบอร์ละเอียด (ขัดผิวหน้าเป้าให้เรียบ) เพื่อกำจัดชั้นออกไซด์ที่ผิวเป้าซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการอาร์คขึ้นได้
4. ทำความสะอาดหัวแมกนีตรอนเพื่อป้องกันเศษผงที่ติดอยู่ระหว่างหัวแมกนีตรอนและกราวด์ชีลด์ (โลหะทรงกระบอกที่มีรูอยู่ตรงกลางซึ่งครอบหัวแมกนีตรอนและเป้าอยู่) และสาเหตุอื่นที่จะทำให้เกิดการอาร์คขึ้นได้
5. ติดตั้งเป้าทองแดงเข้ากับหัวแมกนีตรอน จากนั้นครอบด้วยกราวด์ชีลด์แล้วปรับระยะห่างระหว่างชัตเตอร์และกราวด์ชีลด์ประมาณ 3 เซนติเมตร ปิดฝาบนห้องสุญญากาศเข้ากับตัวห้องสุญญากาศให้เรียบร้อย
6. ปรับระยะระหว่างฐานรองและเป้าตามที่ต้องการ วางหน้ากากลงบนแท่งยึด วางชิ้นสารตัวอย่างที่ต้องการเคลือบฟิล์มลงบนหน้ากาก ปิดฝาหน้าห้องสุญญากาศพร้อมหมุนน็อตหางปลายึดให้แน่น
7. ปิดวาล์วปล่อยอากาศเข้า (leak valve)



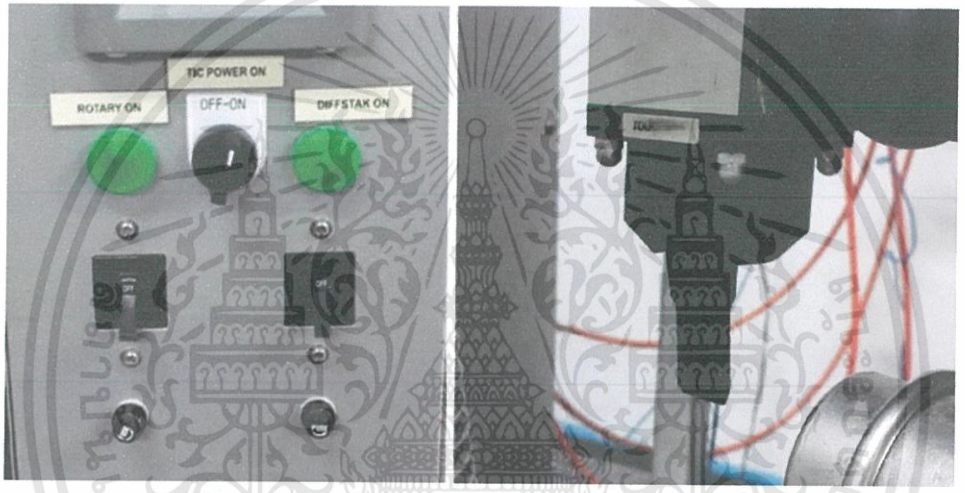
(ก.) (ข.)

รูปที่ 3.4 (ก) ภาพแสดงวาล์วปล่อยอากาศเข้า
(ข) ภาพแสดงคันบังคับชัตเตอร์ที่อยู่ด้านบนของห้องสุญญากาศ

8. ปิดชัตเตอร์ (คันบังคับอยู่ที่ด้านบนห้องสุญญากาศ) เพื่อบังเป้าเอาไว้
9. เปิดสวิตช์ตรงตำแหน่ง TIC POWER ON ไปที่ตำแหน่ง ON เพื่อทำการเปิดการทำงานมาตราวัดความดัน
10. โยกสวิตช์ตรงตำแหน่ง ROTARY ON ขึ้น เพื่อเปิดการทำงานของปั๊มกลโรตารี (rotary pump)
11. ทำการเปิดวาล์วหลัง (Backing valve) โดยปรับคันโยกวาล์วไปที่ตำแหน่ง Backing (ดันออกจากตัว) เพื่อสูบอากาศออกจากปั๊มไอฟุ้งกระจาย (Oil diffusion pump) จากนั้นรอประมาณ 5 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12. หลังจากนั้นเปิดวาล์วหลังและเปิดวาล์วหยาบ (roughing valve) โดยโยกวาล์วไปที่ตำแหน่ง roughing (ดึงเข้าหาตัว) เพื่อสูบอากาศออกจากห้องสุญญากาศ จนความดันภายในมีค่าประมาณ $3x10^{-2}$ ทอร์ เป็นการปั๊มอากาศแบบหยาบ ลดความดันในห้องสุญญากาศด้วยปั๊มกลโรตารีอย่างเดียวสำหรับ Backing valve (back up) เป็นการปั๊มอากาศแบบละเอียด ลดความดันในห้องสุญญากาศด้วย กลปั๊มโรตารีและปั๊มไอฟุ้งกระจายไปพร้อมกัน
13. เปิดสวิตช์ WATER PUMP ON ขึ้นเพื่อเริ่มจ่ายน้ำเย็นให้กับระบบเพื่อระบายความร้อน จากนั้นโยกสวิตช์ DIFFSTAK ON ขึ้น เพื่อจ่ายไฟให้กับขดลวดความร้อนของปั๊มไอฟุ้งกระจายเพื่อต้มน้ำมันให้ร้อน ให้เวลาประมาณ 15 นาที (จะใช้ไอน้ำมันร้อนไปกวาดเอาโมเลกุลของอากาศออกจากภายในห้องสุญญากาศ)

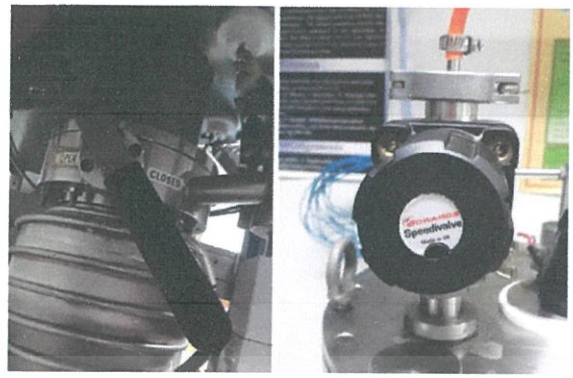


(ก.) (ข.)

รูปที่ 3.5 (ก.) ภาพแสดงตำแหน่งสวิตช์ ROTARY ON (สำหรับเปิดปั๊มพ์กลโรตารี) TIC POWER ON (สำหรับเปิดมาตราวดความดัน) และ DIFFSTAK ON (สำหรับเปิดปั๊มพ์ไอฟุ้งกระจาย (ข.) ภาพแสดงวาล์วในตำแหน่ง backing (หากโยกมาข้างหน้าจะเป็นตำแหน่ง roughing)

14. เมื่อครบ 15 นาที เปิดวาล์วหลังโดยโยกตำแหน่งไปที่ Backing และปรับคันโยกของวาล์วผีเสื้อ (butterfly valve) ไปที่ตำแหน่งเปิด (open) (ดันคันโยกออกจากตัวจนสุด) หากดันคันโยกออกจากตัวตำแหน่งของวาล์วผีเสื้อคือเปิดแต่ถ้าดึงเข้าหาตัวคือ ปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก.) (ข.)

รูปที่ 3.6 (ก) ภาพแสดง Butterfly valve ในตำแหน่ง open
(ข) ภาพแสดง speedy valve

15. เมื่อความดันในห้องสุญญากาศมีค่าอยู่ประมาณ $3x10^{-5}$ ทอร์ หรือ ต่ำกว่า จึงเริ่มป้อนก๊าซอาร์กอนเข้าสู่ห้องสุญญากาศ
   - พิรานิเกจ (pirani gauge) เป็นมาตรวัดความดันบรรยากาศต่ำ ช่วงทำงานอยู่ที่ความดันบรรยากาศต่ำถึง 10^{-3} ทอร์
   - เพนนิงเกจ (penning gauge) เป็นมาตรวัดความดันต่ำช่วงการทำงานเริ่มจาก $10^{-3} - 10^{-6}$ ทอร์
16. การป้อนอาร์กอนในช่วงแรกทำเพื่อต้องการให้ก๊าซอาร์กอนในห้องสุญญากาศให้มากที่สุดและใช้ก๊าซอาร์กอนเข้าไปแทนที่โมเลกุลของอากาศที่ยังเหลืออยู่โดยจะทำการป้อนอาร์กอนแล้วสูบออกจำนวน 3 ครั้ง เรียก กระบวนการนี้ว่า การฟลัชอาร์กอน มีขั้นตอนดังนี้
   - เปิดวาล์วที่หัวถังอาร์กอน เปิดวาล์วเรกูเลเตอร์ (Regulator) เปิดวาล์วรูเข็ม (needle valve) ปิด butterfly valve และเปิด สปีดีวาล์ว (speedy valve) เพื่อป้อนอาร์กอนเข้าสู่ห้องสุญญากาศจนได้ความดันภายในไม่เกิน $7.5x10^{2}$ ทอร์
   - ปิดสปีดีวาล์ว เปิด butterfly valve ทำการดูดอากาศออกจากห้องสุญญากาศ โดยโยกวาล์วไปที่ตำแหน่ง backing จนกระทั่งความดันลดลงเป็น $3x10^{-5}$ ทอร์ (สูบอาร์กอนครั้งที่ 1)
   - ปิด butterfly valve และ เปิด สปีดีวาล์ว เพื่อป้องอาร์กอนเข้าสู่ห้องสุญญากาศจนได้ ความดันภายในไม่เกิน $7.5x10^{2}$ ทอร์
   - ปิด สปีดีวาล์ว เปิด butterfly valve ทำการดูดอากาศออกจากห้องสุญญากาศ โดยโยกวาล์วไปที่ตำแหน่ง backing จนกระทั่งความดันลดลงเป็น $3x10^{-5}$ ทอร์ (สูบอาร์กอนครั้งที่ 2)
   - ปิด butterfly valve และ เปิด สปีดีวาล์ว เพื่อป้องอาร์กอนเข้าสู่ห้องสุญญากาศ จนได้ความดันภายในไม่เกิน $7.5x10^{2}$ ทอร์
   - ปิด สปีดีวาล์ว เปิด butterfly valve ทำการดูดอากาศออกจากห้องสุญญากาศโดยโยกวาล์วไปที่ตำแหน่ง backing จนกระทั่งความดันลดลงเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

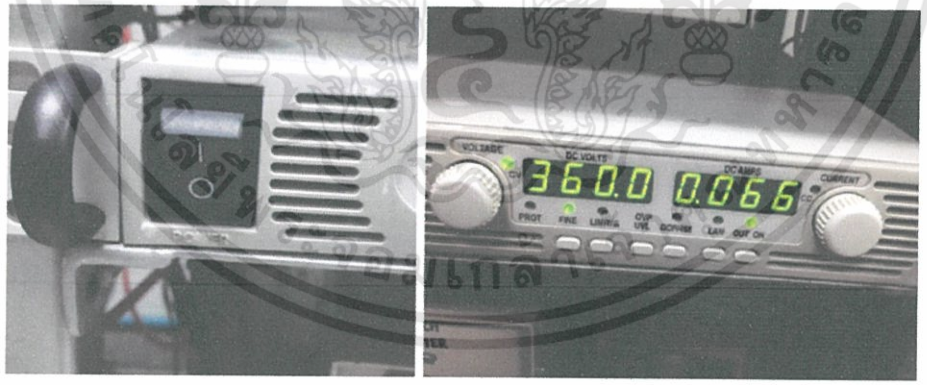
$3x10^{-5}$ ทอร์ (สูบอาร์กอนครั้งที่ 3) เสร็จขั้นตอนการฟลัชด้วยอาร์กอนเท่านั้น ขั้นตอนต่อไปเป็นการเริ่มจุดพลาสมาขึ้นมา



(ก.) (ข.)

รูปที่ 3.7 (ก) ภาพแสดง Regulator valve และวาล์วหัวถังก๊าซ
(ข) ภาพแสดง power supply

17. เปิดสปีดวาล์วเพื่อป้อนอาร์กอนอีกครั้งจนได้ความดันภายในมีค่าประมาณ $3x10^{-5}$ ทอร์
18. เปิดสวิตช์แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง
19. กดปุ่ม ON ที่ตัวแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง (ปุ่ม out on เป็นปุ่มสี่เหลี่ยมเล็กๆที่อยู่ทางขวามือสุดของเครื่อง)



(ก.) (ข.)

รูปที่ 3.8 (ก) ภาพแสดงสวิตช์ของ power supply
(ข) ภาพแสดงปุ่ม on เพื่อให้เครื่องเริ่มทำงาน

20. หมุนปุ่มเพิ่มแรงดันไฟฟ้าไปเรื่อยๆช้าจนกระทั่ง พลาสมาติด (เมื่อพลาสมาติดจะเห็นเป็นแสงสีม่วงอยู่ในห้องสุญญากาศ) ช่วงที่พลาสมาติดในครั้งแรกชัตเตอร์จะต้องปิดอยู่เพราะเป็นช่วงที่พลาสมามีสภาวะยังไม่เหมาะสม สำหรับการเคลือบฟิล์มบางบนฐานรอง เช่น แรงดันไฟฟ้ายังไม่อยู่ในช่วงที่ต้องการ ความดันก๊าซยังไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

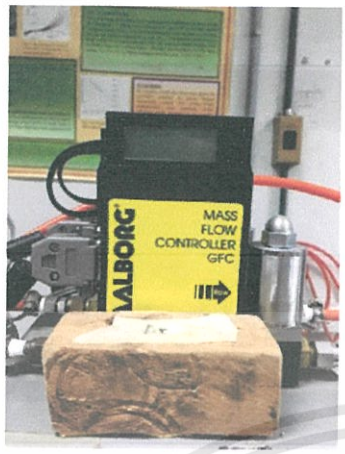
นิ่ง และผิวหน้าของเป้ายังไม่สะอาดพอ หากเคลือบบนฐานรองที่วางไว้จะส่งผลให้ฟิล์มที่ได้มีคุณภาพไม่ดี มีความต้านทานสูง ดังนั้นเมื่อพลาสมาติดในครั้งแรกจึงต้องนำชัตเตอร์มาบังไว้เมื่อพลาสมามีพลังงานและสภาวะที่เหมาะสมจึงเปิดชัดเตอร์ออก

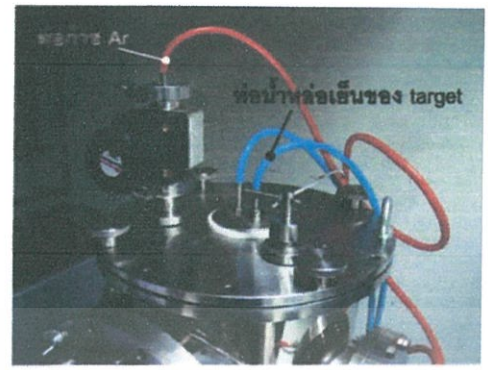


รูปที่ 3.9 ภาพแสดงพลาสมาที่ติดในครั้งแรก

21. เมื่อพลาสมาติดให้เริ่มป้อนออกซิเจนเข้าสู่ในห้องสุญญากาศ เปิดวาล์วที่หัวถังออกซิเจน เปิดวาล์วเรกูเลเตอร์ (Regulator) และเปิด สปีดีวาล์ว (speedy valve) เพื่อป้อนออกซิเจนเข้าสู่ห้องสุญญากาศ โดยป้อนออกซิเจนที่อัตราการไหลของออกซิเจนค่าต่างๆ คือ 0.3 ,0.5 ,0.8 ,1.2 ,1.5 ,1.8 และ 6 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที
22. เพิ่มแรงดันไฟฟ้าขึ้นตามที่ต้องการ ซึ่งโดยทั่วไปใช้อยู่ในช่วง 350-500 โวลต์ แปรตามค่าสปัตเตอริงยีลด์ของวัสดุแต่ละชนิด (สำหรับทองแดงจะอยู่ที่ 360-370 โวลต์) จากนั้นปรับความดันก๊าซให้คงที่หรือตามที่ต้องการ แรงดันไฟฟ้าหากมากเกินไปจะไม่ส่งผลดีต่อฟิล์มบางที่เคลือบบนฐานรองเนื่องจากอะตอมของเป้าบางส่วนชนกันเองจนไปตกนอกฐานรอง ส่วนกระแสนั้นแปรไปตามปริมาณของพลาสมาโดยอัตโนมัติ ค่ากระแสที่แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงอ่านได้นั้นบอกถึงอัตราการเคลือบฟิล์มที่เคลือบลงบนฐานรองว่ามากหรือน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

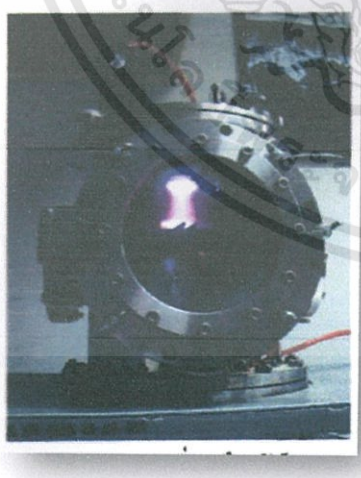




(ก) (ข)

รูปที่ 3.10 (ก) ภาพแสดงเครื่องควบคุมอัตราการไหลมวลก๊าซ (mass flow meter) ใช้สำหรับปรับความดันของก๊าซอาร์กอนใน chamber แบบละเอียด
(ข) ภาพแสดงท่อกาซ Ar และท่อน้ำหล่อเย็นสำหรับ target

23. เมื่อความดันก๊าซและแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ค่าที่ต้องการจึงจับเวลาไปอีก 15 นาที เพื่อให้เกิดการ สปัตเตอริง จนกระทั่งผิวหน้าของเป้าสะอาดเรียกขั้นตอนนี้ว่าการเตรียมตัวสปัตเตอริง (presputtering) หลังจากนั้นหมุนเปิดชัตเตอร์ออกเพื่อเริ่มการเคลือบฟิล์มตามเวลาที่ต้องการ ซึ่งต้องจดค่าต่างๆที่ใช้เอาไว้สำหรับเป็นตัวเลขอ้างอิง ตัวอย่าง เช่นการเคลือบฟิล์มบางทองแดงจะใช้ค่าต่างๆดังนี้

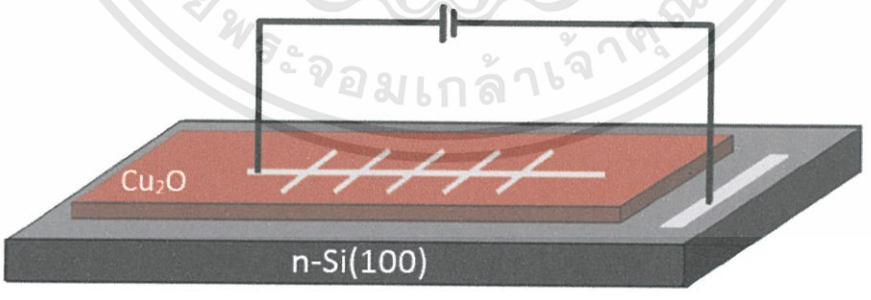


แรงดันไฟฟ้า : 360 โวลต์
กระแส :0.05 แอมป์
ความดันที่พลาสมาคงสภาพอยู่ได้ :$5x10^{-3}$ ทอร์
ระยะห่างระหว่างเป้ากับฐานรองรับ : 5-10 เซนติเมตร
เวลาในการเคลือบฟิล์ม : 30 นาที

รูปที่ 3.11 ภาพแสดงการเริ่มเคลือบฟิล์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

24. ในระหว่างการเคลือบฟิล์มจะต้องพยายามปรับค่าแรงดันไฟฟ้าและความดันก๊าซในห้องสุญญากาศให้คงที่ (ปรับความดันก๊าซอาร์กอนผ่าน mass flow meter เท่านั้น) เมื่อเคลือบฟิล์มจนได้ความหนาตามที่ต้องการแล้วให้หมุนชัตเตอร์มาที่ตำแหน่งปิดเพื่อบังการเคลือบฟิล์ม หมุนแรงดันไฟฟ้าลงจนสุด กดปุ่มสี่เหลี่ยมเล็กๆ ทางขวาของเครื่องเพื่อหยุดการทำงานของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง แล้วกดปิดสวิตช์สีดำ
25. หยุดการป้อนอาร์กอนและออกซิเจนโดยปิดสปีดีวาล์วตามด้วยเรกูเลเตอร์วาล์ว และสุดท้ายให้ปิดวาล์วหัวถังก๊าซ
26. ปิดวาล์วผีเสื้อ (ดึงคันโยกเข้าตัว)
27. โยกสวิตช์ตรงตำแหน่ง DIFFSTAK ON ลง เพื่อหยุดการจ่ายไฟฟ้าให้กับขดลวดความร้อนที่ปั๊มไอฟุ้งกระจาย
28. ปิดสวิตช์ตรงตำแหน่ง TIC POWER ON ไปที่ตำแหน่ง OFF เพื่อปิดมาตรวัดความดันทั้งหมด
29. รอประมาณ 20 นาที เพื่อให้ฐานรองมีอุณหภูมิเย็นลง จากนั้นโยกสวิตช์ WATER PUMP ON ลงเพื่อทำการหยุดจ่ายน้ำเย็นให้กับระบบ แล้วจึงปิดปั๊มโรตารี จากนั้นหมุนคลายน็อตหางปลาที่ฝาหน้าห้องสุญญากาศออกให้หมด (ที่ต้องคลายน็อตออกก่อนเนื่องจากว่าเมื่อเปิดลีควาล์ว (leak valve) เพื่อปล่อยอากาศเข้าห้องสุญญากาศ ฝาหน้าจะถูกดันออก หากไม่ถอดน็อตหางปลาออกก่อน เกลียวน็อตจะถูกดันจนแน่นทำให้หมุนน็อตออกยากในภายหลัง) หมุนลีควาล์วเพื่อปล่อยอากาศเข้าห้องสุญญากาศอย่างช้าๆแล้วจะได้ยินเสียงอากาศไหลเข้าห้องสุญญากาศสักครู่หนึ่งฝาหน้าจะเด้งออกมาเอง
30. เปิดฝาหน้าออกนำตัวอย่างที่เคลือบเสร็จแล้วออกมาชั่งมวลแผ่นรองรับหลังการเคลือบ(ทำเมื่อต้องการหาอัตราการเคลือบฟิล์ม) เช็ดทำความสะอาดภายในและฝาหน้า จากนั้นปิดให้เรียบร้อย



รูปที่ 3.12 แสดงแผนภาพโครงสร้างของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์และแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

3.3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค

เอกซ์เรดิฟแฟรกโตรมิเตอร์ (XRD) ของยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 advance ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ 1.5418 อังสตรอม ใช้กระแส 30 มิลลิแอมป์ แรงไฟฟ้าดัน 30 กิโลโวลล์ โดยที่จะวัดจากมุม 20-60 องศา



รูปที่ 3.13 ภาพถ่ายเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกโตรมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance

3.3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาค

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยายสูง (Field Emission Scanning Electron Microscope : FESEM) รุ่น JSM-7001F เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูงถึงระดับ 1,000,000 เท่า ทำให้สามารถศึกษาโครงสร้างขนาดเล็กระดับไมโครหรือนาโนได้

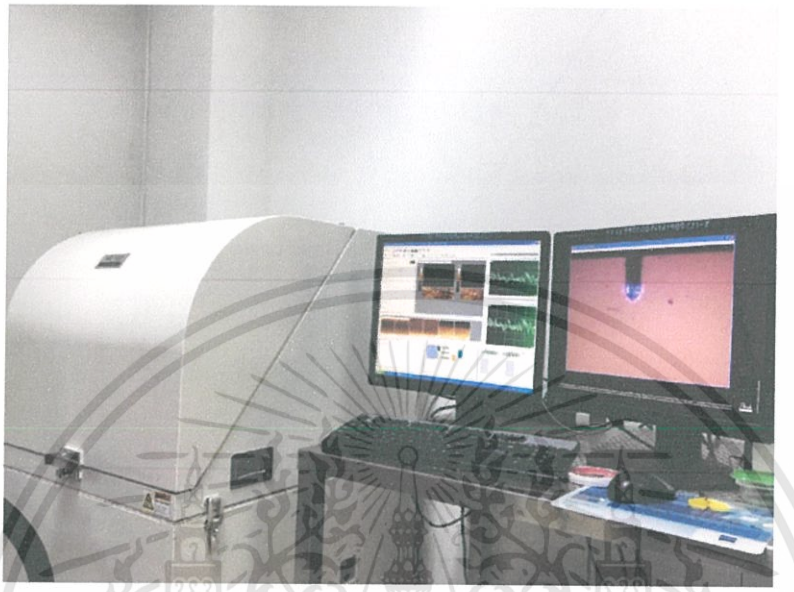


รูปที่ 3.14 ภาพถ่ายเครื่อง Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM) รุ่น JSM-7001F

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบาง

กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (Atomic force microscope : AFM) ยี่ห้อ Park Systems รุ่น XE-100 เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางในระดับนาโน



รูปที่ 3.15 ภาพถ่ายเครื่อง Atomic force microscope (AFM) ยี่ห้อ Park Systems รุ่น XE-100

3.3.4 เครื่องมือที่ใช้ศึกษาสมบัติทางแสง

เครื่องยูวี-วิสสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS spectrophotometer) ยี่ห้อ HITACHI U-2900 Spectrophotometer โดยใช้ความยาวคลื่น 200-1000 นาโนเมตร



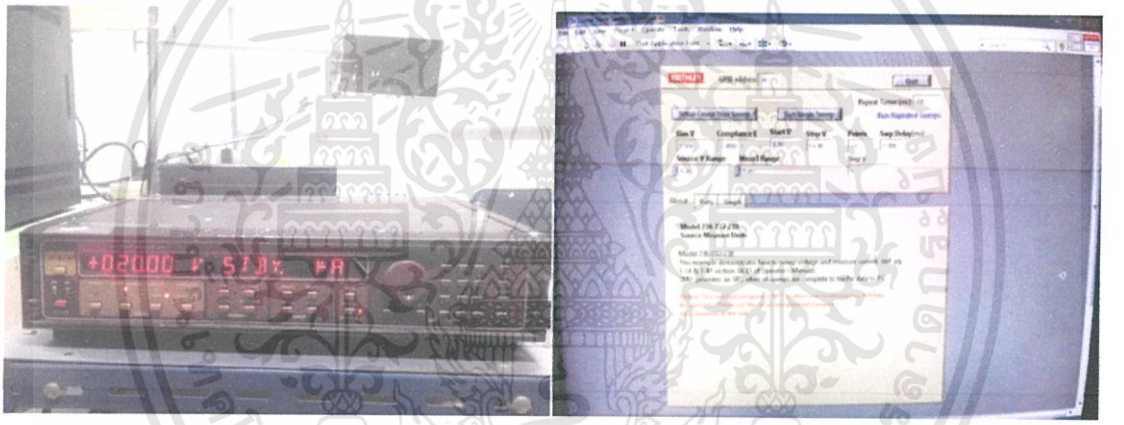
รูปที่ 3.16 ภาพถ่ายเครื่อง UV-VIS ยี่ห้อ HITACHI U-2900 Spectrophotometer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

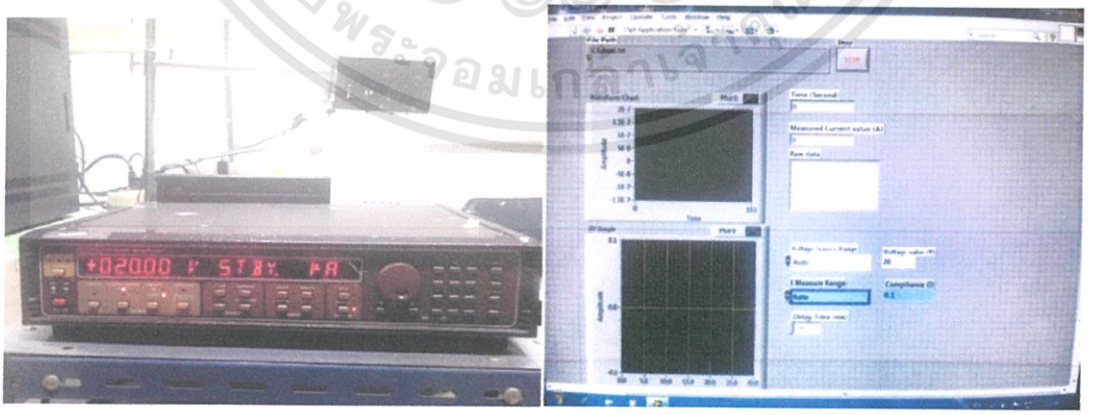
3.3.5 เครื่องมือที่ใช้ในการวัดสมบัติทางไฟฟ้า

นำไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ที่เตรียมกันได้ทั้งหมดไปทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิต่ำ 20 – 300 เคลวิน ได้แก่ นำไปศึกษากราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า แล้วต่อจากนั้นจึงนำศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง

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



รูปที่ 3.17 ภาพถ่ายอิเล็กโตรมิเตอร์ ยี่ห้อ Keithley รุ่น 236 และซอฟแวร์ที่ใช้วัดความต้านทานแผ่น



รูปที่ 3.18 ภาพถ่ายอิเล็กโตรมิเตอร์ ยี่ห้อ Keithley รุ่น 236 และซอฟต์แวร์ที่ใช้วัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.19 ภาพถ่ายอุปกรณ์ที่ใช้วัดปรากฏการณ์ฮอลล์



รูปที่ 3.20 ภาพถ่ายอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดความต้านทานของฟิล์มบางที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

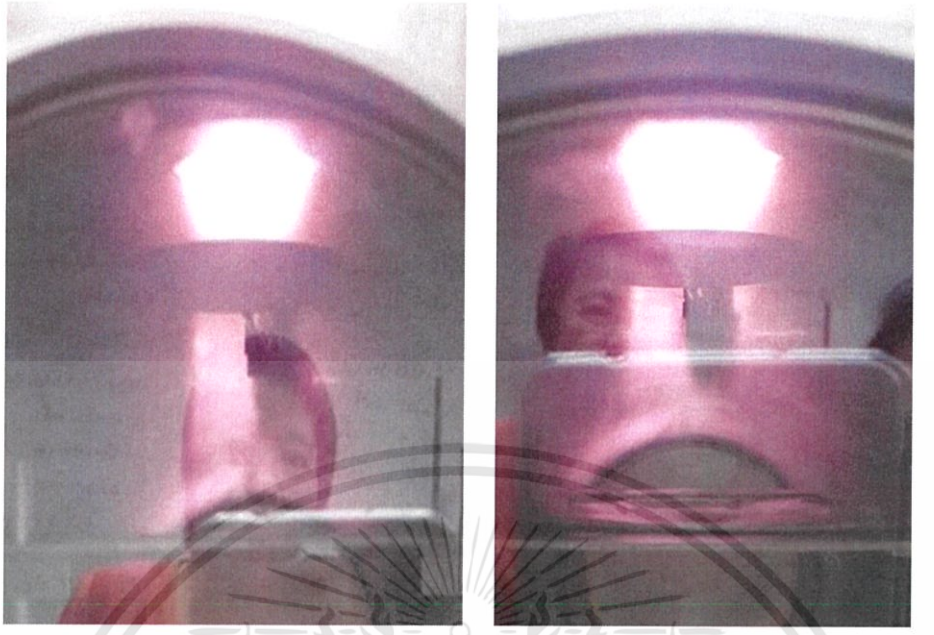
บทที่ 4
ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ในโครงงานพิเศษนี้เป็นการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยการเคลือบฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงและได้มีการศึกษาสมบัติพื้นฐานทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ทั้งที่เคลือบอยู่บนแผ่นกระจกสไลด์และที่เคลือบอยู่บนแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) ได้แก่ การศึกษาโครงสร้างผลึกจุลภาคโดยวิธีการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอกซ์ ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ศึกษาสมบัติทางแสงด้วยการวัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-VIS spectrophotometer) จากนั้นจึงทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) โดยจ่ายแรงดันไบแอสในช่วง -3 ถึง 3 โวลต์ โดยใช้ความถี่เท่ากับ 1 เมกะเฮิรตซ์ แล้วทำการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ และต่อจากนั้นจึงเขียนแผนภาพแสดงโครงสร้างแถบพลังงานของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100)

4.1 ผลของอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนและแรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโทรดที่มีต่อการโกลวดิสชาร์จ

ห้องสุญญากาศที่ใช้เคลือบฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์มีรูปร่างเป็นทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 25 เซนติเมตร และสูง 30 เซนติเมตร ติดตั้งเป้าทองแดงความบริสุทธิ์สูง (99.99%) เส้นผ่านศูนย์กลาง 5.0 เซนติเมตร ที่ขั้วแคโทด พร้อมภาคจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันไฟฟ้าสูงสุด 630 โวลต์ การเคลือบจะใช้ก๊าซอาร์กอนความบริสุทธิ์สูง (99.999%) เป็นก๊าซสปัตเตอร์และก๊าซออกซิเจนความบริสุทธิ์สูง (99.999%) เป็นก๊าซไวปฏิกิริยา ปั๊มสุญญากาศประกอบไปด้วยปั๊มแพร่ไอน้ำมันและปั๊มกลโรตารี การจ่ายก๊าซในกระบวนการเคลือบจะควบคุมด้วยเครื่องควบคุมอัตราการไหลมวลก๊าซ (mass flow meter) ยี่ห้อ AALBORG กำหนดให้ระยะห่างระหว่างเป้าสารเคลือบกับแผ่นฐานรองรับเท่ากับ 9 เซนติเมตร ความดันพื้นฐานเท่ากับ 3.0×10^{-5} ทอร์ เริ่มทำการทดลองโดยการให้อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 35 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ความดันของห้องสุญญากาศที่อ่านได้จากเกจพิรานิ (Pirani gauge) ในที่นี้จะเรียกว่าความดันตัวบน อ่านได้เท่ากับ 2.3×10^{-1} ทอร์ ส่วนความดันที่อ่านได้จากเกจเพนนิง (Penning gauge) ซึ่งในที่นี้จะเรียกว่าความดันตัวล่าง อ่านได้เท่ากับ 3.0×10^{-3} ทอร์ ทำการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าอย่างช้าๆ จนถึง 225 โวลต์ การโกลวดิสชาร์จจึงเกิดขึ้น แรงดันไฟฟ้าที่เริ่มทำให้เกิดการดิสชาร์จนี้จะเรียกว่า แรงดันพังทลายทาวน์เซนด์ (Townsend breakdown voltage) การเรืองแสงของพลาสมาให้สีม่วง รูปที่ 4.1 แสดงภาพถ่ายของการโกลวดิสชาร์จเมื่อมีการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จจาก 225 โวลต์ เป็น 300 โวลต์ เพื่อทำการเคลือบฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์ โดยให้อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 50 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ความดันตัวบนและความดันตัวล่างมีค่าคงที่เท่ากับ 2.4×10^{-2} และ 4.3×10^{-4} ทอร์ตามลำดับ

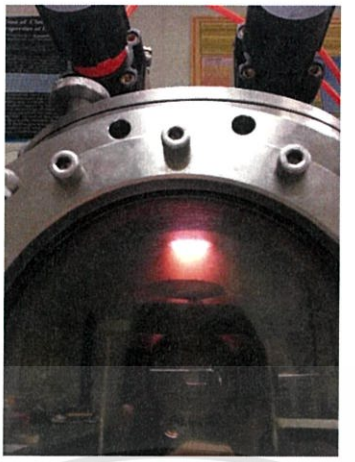
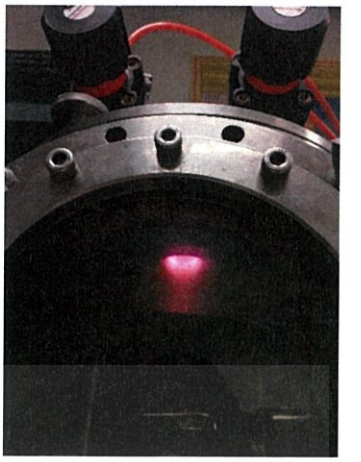
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 แสดงภาพถ่ายของการโกลวดิสชาร์จเมื่อมีการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จจาก 300 โวลต์ เป็น 320 โวลต์ โดยให้อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 50 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ความดันตัวบนและความดันตัวล่างมีค่าคงที่เท่ากับ 2.4×10^{-2} และ 4.3×10^{-4} ทอร์ ตามลำดับ

เมื่อทำการลดอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนลงต่อไปอีก พบว่าลำพลาสมาจะเรียวเล็กลง ดังนั้นจึงต้องเพิ่มแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จเพื่อทำให้ลำพลาสมาพองโตขึ้นและการโกลวดิสชาร์จจะคงตัวอยู่ได้ การลดอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนลงก็จะส่งผลให้ความดันภายในห้องสุญญากาศลดลงไปด้วย เมื่อเพิ่มแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จต่อไปอีก สีของการโกลวดิสชาร์จจะเป็นสีม่วงที่เข้มขึ้นเรื่อยๆ จนเป็นสีม่วงอมน้ำเงิน อีกทั้งขนาดของการโกลวดิสชาร์จจะใหญ่ขึ้นและสว่างมากขึ้น (ลำพลาสมาจะโตขึ้นและยืดออกมากขึ้น) ดังแสดงในภาพที่ 4.2 กระแสดิสชาร์จจะเพิ่มขึ้นตามแรงดันไฟฟ้าโกลวดิสชาร์จที่เพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Ar flow rate = 50 sccm
Voltage = 228 V

Ar flow rate = 50 sccm
Voltage = 300 V

Ar flow rate = 1.2 sccm
Voltage = 370 V

รูปที่ 4.2 แสดงภาพถ่ายของการโกลวดิสชาร์จเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนเข้าห้องสุญญากาศ

การเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงจะเริ่มจากการให้อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนเท่ากับ 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร ป้อนแรงดันไฟฟ้าอย่างช้าๆให้กับขั้วคาโทดจนกระทั่งถึง 225 โวลต์สภาพโกลวดิสชาร์จจึงเกิดขึ้น จากนั้นจึงปล่อยก๊าซออกซิเจนให้ไหลเข้าสู่ห้องสุญญากาศ ความดันในห้องสุญญากาศจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ดังนั้นจึงทำการลดอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนลง ขณะเดียวกันก็เพิ่มแรงดันไฟฟ้าดิสชาร์จขึ้น จนได้ความดันความดันที่อ่านโดยเกจพิรานิ 4.0×10^{-3}-6.0×10^{-3} ทอร์ ตามที่ต้องการ จากนั้นจะทำการเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์ด้วยอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 0.3, 0.5, 0.8 ,1.2 ,1.5 และ 1.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทีเงื่อนไขการเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงจะแสดงตามตารางที่ 4.1 และสภาพโกลวดิสชาร์จที่อัตราการไหลของออกซิเจนค่าต่างๆจะแสดงตามรูปที่ 4.3

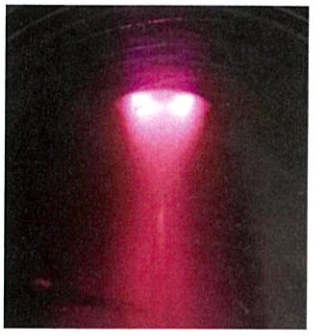
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



O_2 flow rate = 0.3 sccm



O_2 flow rate = 0.5 sccm



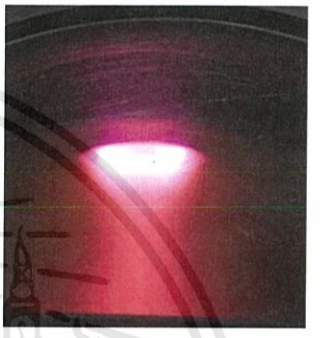
O_2 flow rate = 0.8 sccm



O_2 flow rate = 1.2 sccm



O_2 flow rate = 1.5 sccm



O_2 flow rate = 1.8 sccm

รูปที่ 4.3 แสดงภาพถ่ายของการโกลวดิสชาร์จเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 0.3, 0.5, 0.8, 1.2, 1.5 และ 1.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทีเข้าห้องสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

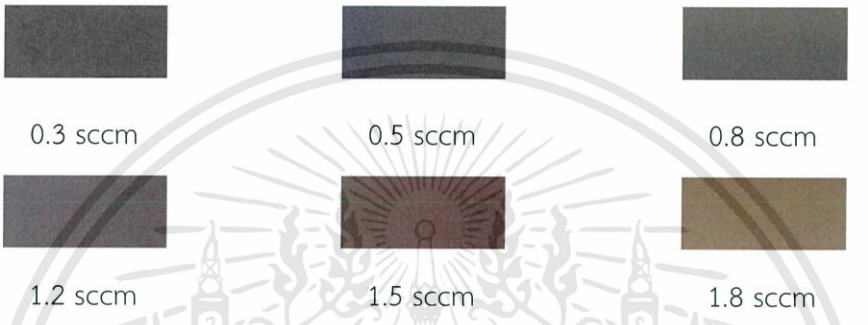
ตารางที่ 4.1 แสดงเงื่อนไขการเตรียมฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจนที่ 0.3, 0.5, 0.8, 1.2, 1.5 และ 1.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

Oxygen flow rate (sccm)	Sputtering Conditions						Film Characteristics
	Argon flow rate (sccm)	Pressure (torr)	Voltage (V)	Current (A)	Power (W)	Sputtering time (min)	
0.3	6.0	บน $=4.2\times10^{-3}$ ล่าง$=1.2\times10^{-4}$	370.0	0.021	7.7	40	ฟิล์มสีน้ำตาลเข้มออกดำ
0.5	10.0	บน $=5.4\times10^{-3}$ ล่าง$=1.5\times10^{-4}$	370.0	0.019	7.0	40	ฟิล์มสีน้ำตาลเข้มออกดำ
0.8	8.0	บน $=4.3\times10^{-3}$ ล่าง$=1.2\times10^{-4}$	370.0	0.016	5.9	40	ฟิล์มน้ำตาลเข้ม
1.2	6.0	บน $=3.8\times10^{-3}$ ล่าง$=1.2\times10^{-4}$	370.0	0.033	12.2	40	ฟิล์มสีน้ำตาลเข้ม
1.5	5.8	บน $=3.1\times10^{-3}$ ล่าง$=9.7\times10^{-5}$	370.0	0.030	11.1	40	ฟิล์มสีน้ำตาลออกแดง
1.6	6.0	บน $=4.2\times10^{-3}$ ล่าง$=1.1\times10^{-5}$	370.0	0.034	12.6	40	ฟิล์มสีน้ำตาลออกเหลือง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การศึกษาลักษณะและสมบัติพื้นฐานทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

4.2.1 ลักษณะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง



รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.3, 0.5, 0.8, 1.2, 1.5 และ 1.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

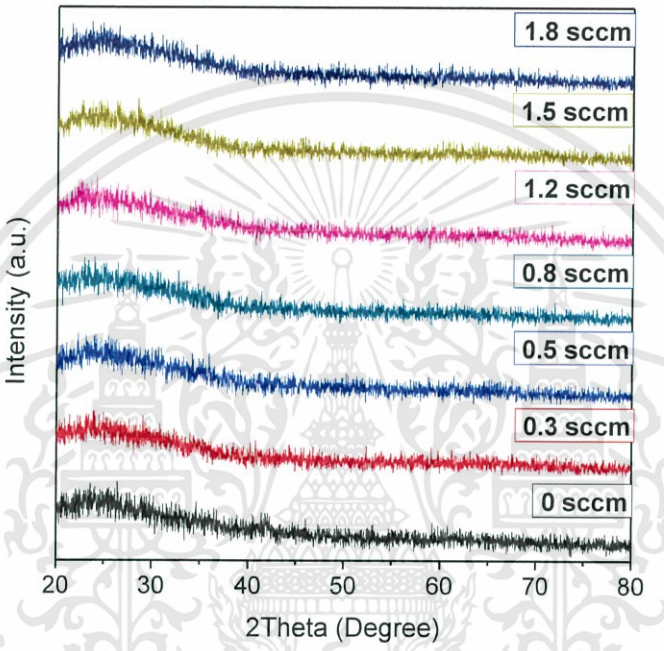


รูปที่ 4.5 แสดงภาพถ่ายของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

4.3.1 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

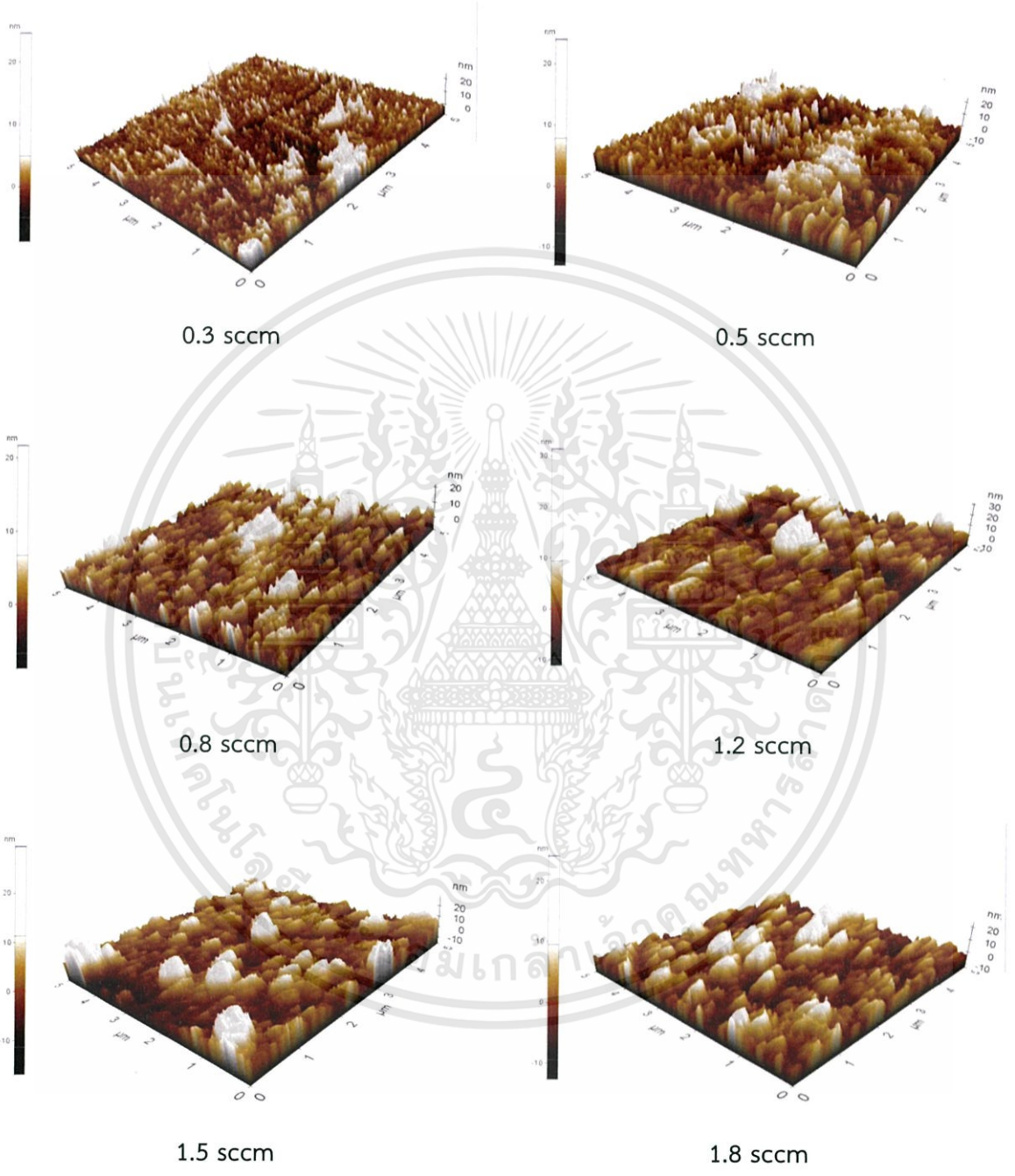


รูปที่ 4.6 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0, 0.3, 0.5, 0.8, 1.2, 1.5 และ 1.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง จะแสดงดังรูปที่ 4.6 จากรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ปรากฏระบุได้ว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ไม่ปรากฏระนาบการเลี้ยวเบนที่ทุกอัตราการไหลของออกซิเจน 0, 0.3, 0.5, 0.8, 1.2, 1.5 และ 1.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทีแสดงว่าเป็นอะมอร์ฟัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 ผลการศึกษาภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ที่เคลือบลงบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง



รูปที่ 4.7 แสดงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แสดงขนาดของเกรนและความขรุขระของพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบลงบนฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

Oxygen Flow Rate (sccm)	Grain Size (nm)	Roughness(nm)
0.3	49.0	2.510
0.5	98.0	3.983
0.8	127.0	3.408
1.2	176.0	4.836
1.5	146.0	5.754
1.8	166.0	4.829

4.3.3 ผลการศึกษาโครงสร้างของผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) โดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

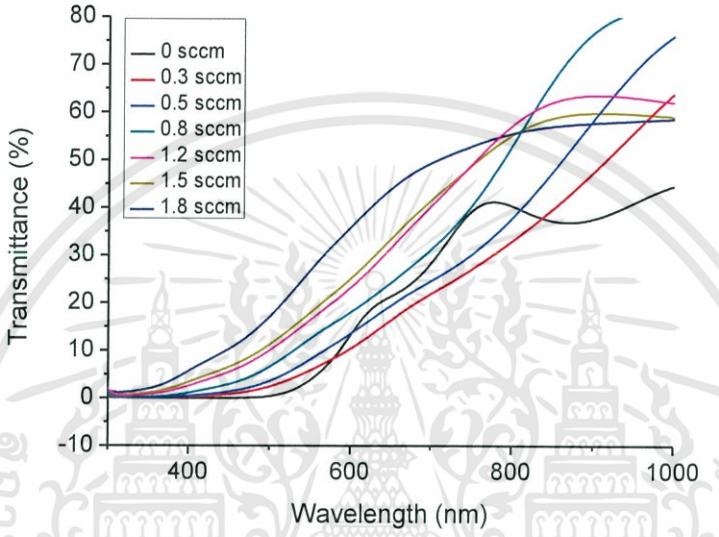


รูปที่ 4.8 แสดงภาพถ่ายตัดขวางซึ่งถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

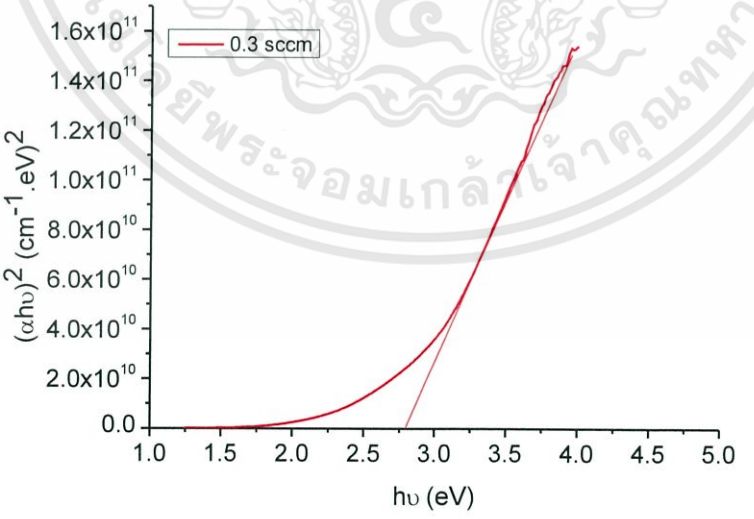
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การศึกษาสมบัติทางแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

4.4.1 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

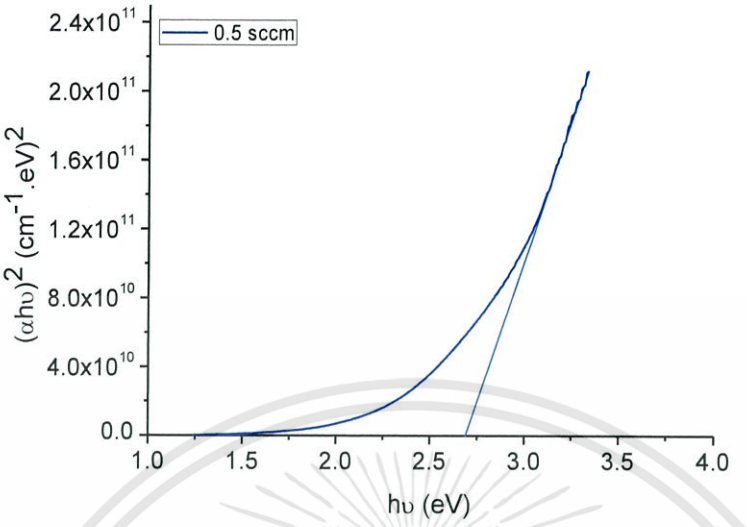


รูปที่ 4.9 กราฟแสดงสเปกตรัมการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจนค่าต่างๆ

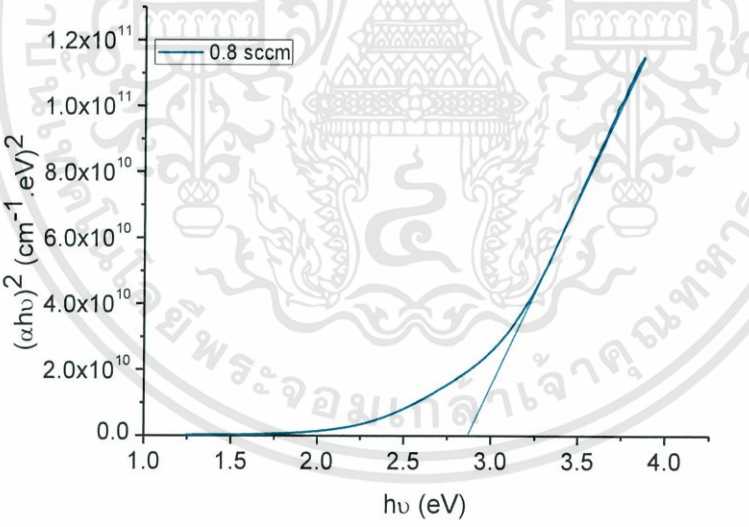


รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\upsilon)^2$ กับพลังงานโฟตอน $(h\upsilon)$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.3 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

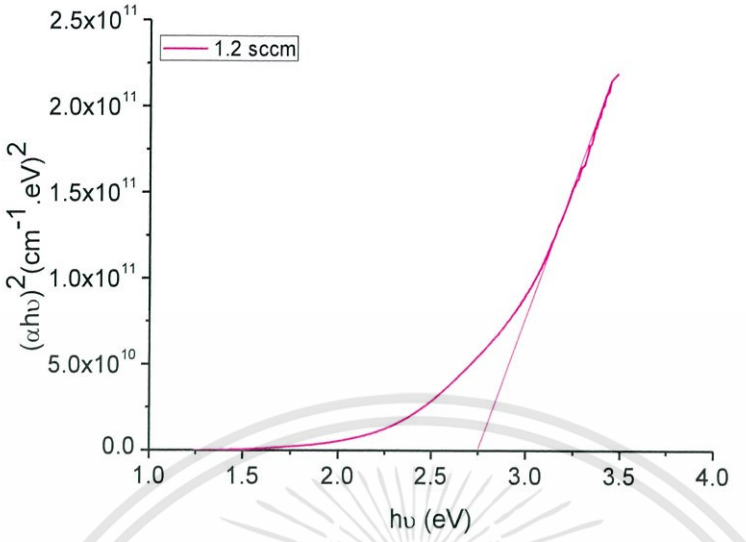


รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\upsilon)^2$ กับพลังงานโฟตอน $(h\upsilon)$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

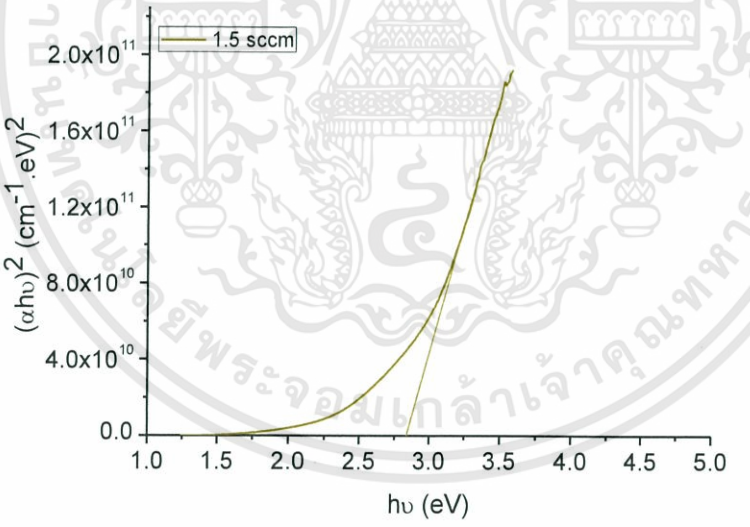


รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\upsilon)^2$ กับพลังงานโฟตอน $(h\upsilon)$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

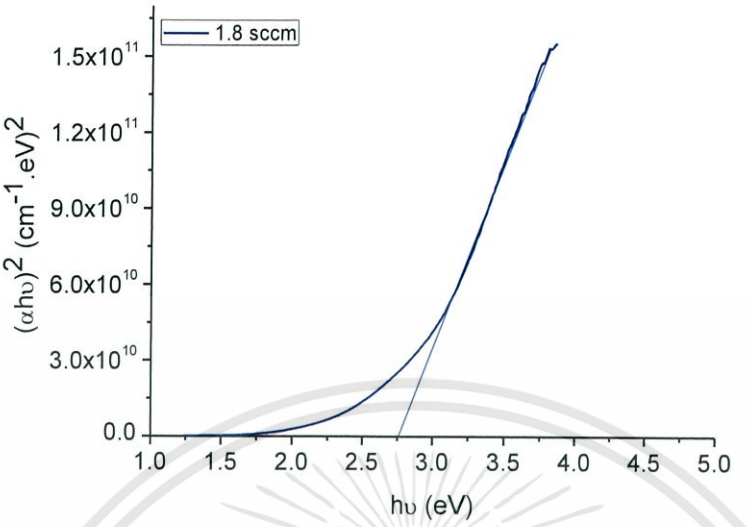


รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\upsilon)^2$ กับพลังงานโฟตอน $(h\upsilon)3$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1.2 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

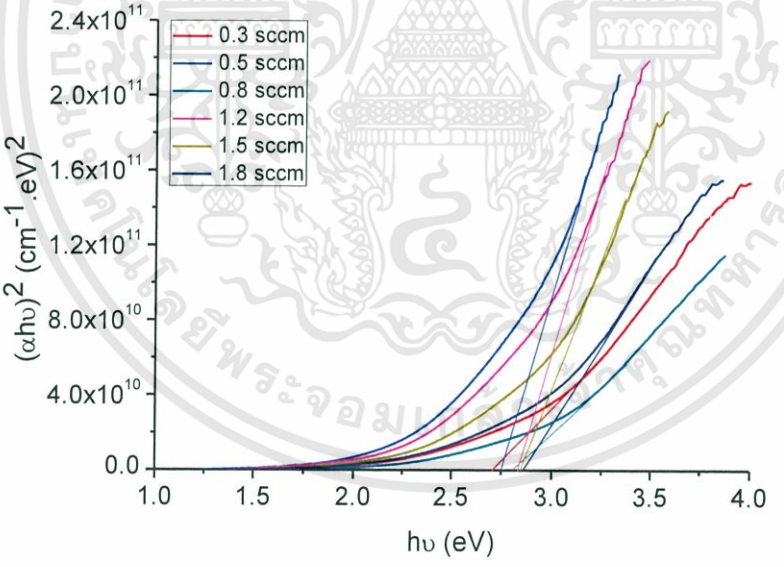


รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\upsilon)^2$ กับพลังงานโฟตอน $(h\upsilon)$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\upsilon)^2$ กับพลังงานโฟตอน $(h\upsilon)$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

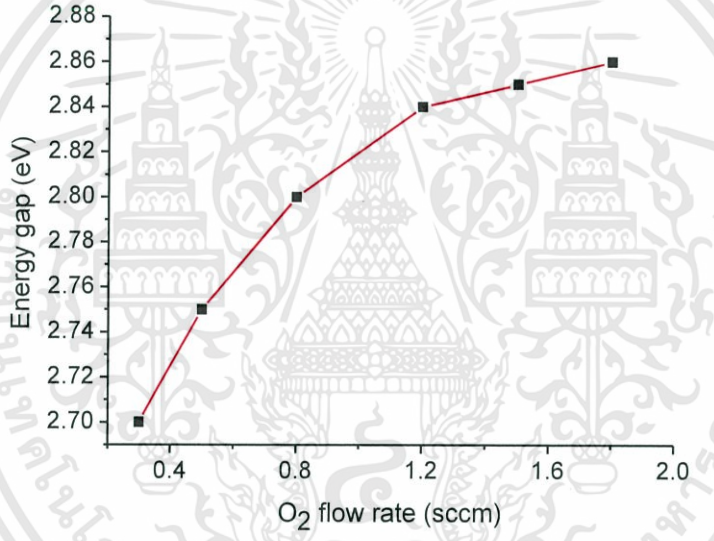


รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านทางแสง $(\alpha h\upsilon)^2$ กับพลังงานโฟตอน $(h\upsilon)$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.3, 0.5, 0.8, 1.2, 1.5 และ 1.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าแถบพลังงาน (E_g) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่เปอร์เซนต์อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนค่าต่างๆ

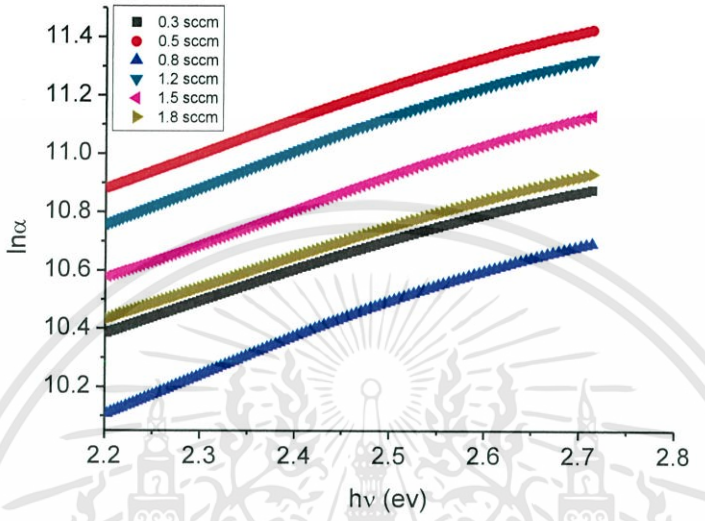
O_2 flow rate (sccm)	Energy Gap (eV)
0.3	2.70
0.5	2.75
0.8	2.80
1.2	2.84
1.5	2.85
1.8	2.86



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่เปอร์เซนต์อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 ผลการศึกษาส่วนหางของแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln\alpha$ กับพลังงานโฟตอน $(h\upsilon)$ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจนค่าต่างๆ

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าแถบพลังงานส่วนหาง (E_t) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่เปอร์เซนต์อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนค่าต่างๆ

O_2 flow rate (sccm)	E_t (ev^{-1})
0.3	1.0204
0.5	0.9174
0.8	0.8547
1.2	0.8771
1.5	0.8928
1.8	1.0101

จากรูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\ln\alpha$ กับพลังงานโฟตอน $(h\upsilon)$ สามารถนำไปหาค่า E_t ได้จากความสัมพันธ์

$$\alpha = \alpha_0 \exp\left(\frac{h\upsilon}{E_t}\right) \qquad (4.1)$$

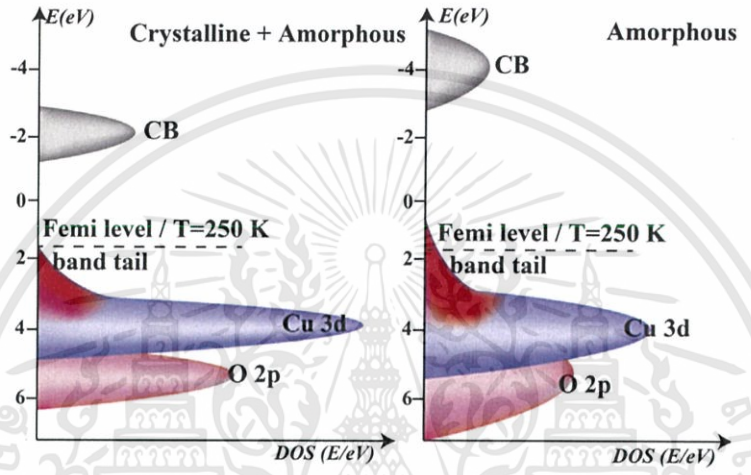
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\ln\alpha = \frac{h\upsilon}{E_t} + \ln\alpha_0 \qquad (4.2)$$

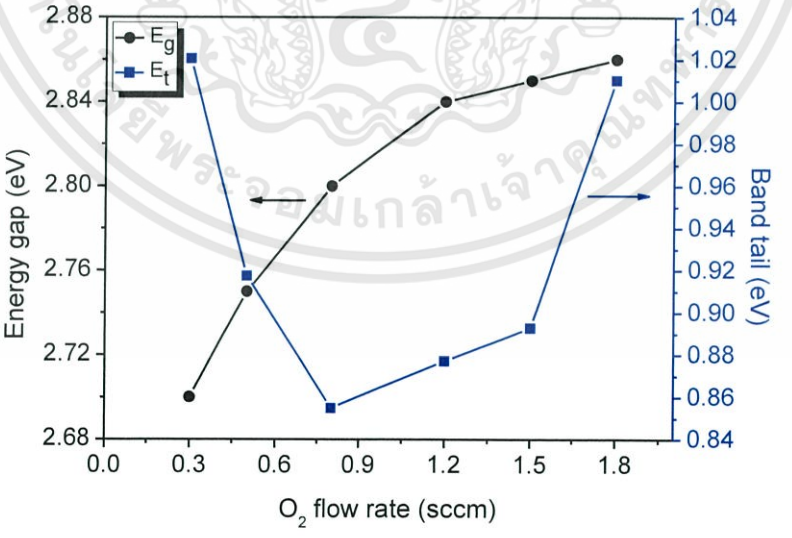
ค่าแถบพลังงานส่วนหาง (E_t) หาได้จากค่าความชันของกราฟในรูปที่ 4.18

ดังนั้น $$\text{ความชัน} = \frac{1}{E_t}$$

$$E_t = \frac{1}{\text{Slope}}$$



รูปที่ 4.19 แสดงส่วนหางของแถบพลังงานของอะมอร์ฟัสของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่มีผู้รายงานไว้ (Huang et al., 2015)

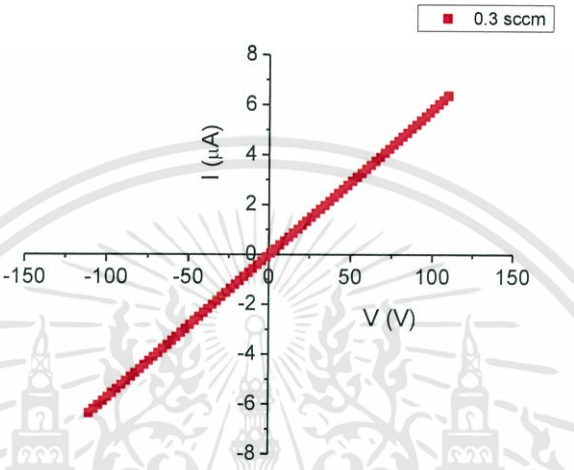


รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) กับค่าแถบพลังงานส่วนหาง (E_t) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่เปอร์เซนต์อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจนค่าต่างๆ

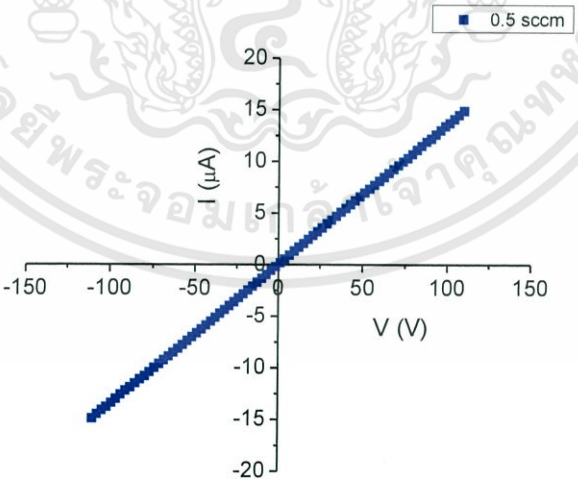
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

4.5.1 ผลการศึกษาความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

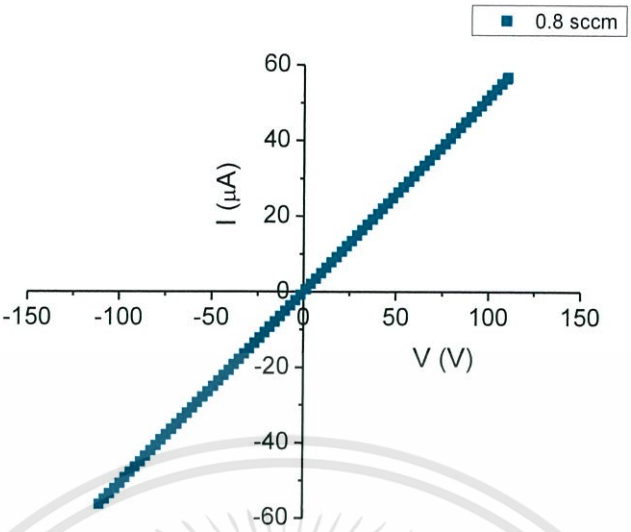


รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.3 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

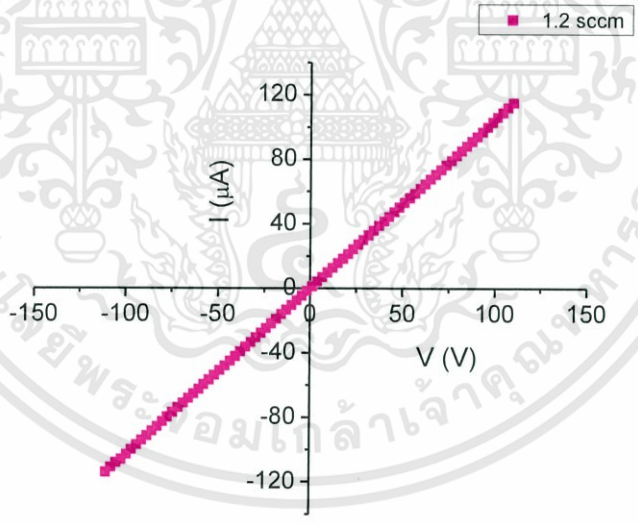


รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

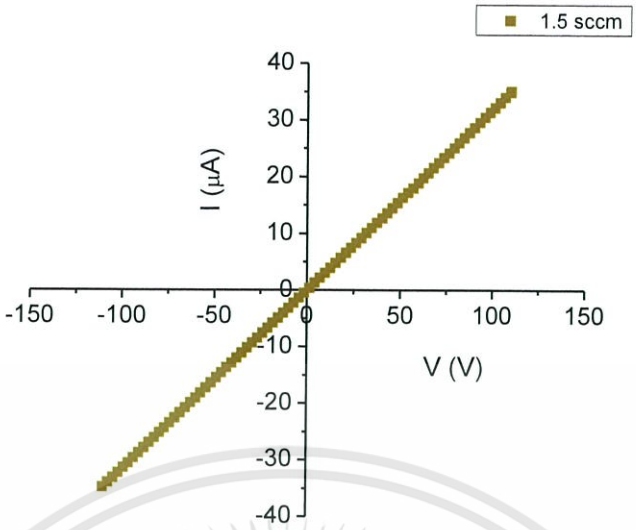


รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

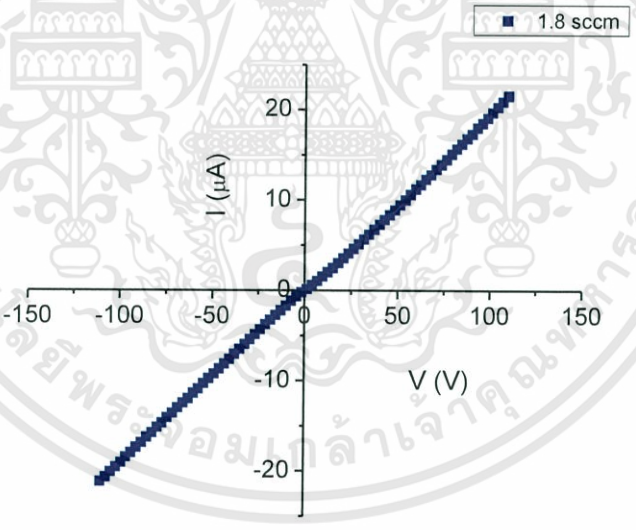


รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1.2 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที



รูปที่ 4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

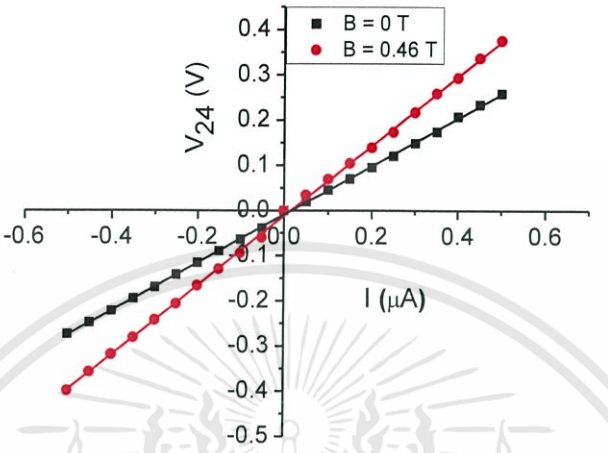
จากรูปที่ 4.21-4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความต่างศักย์ไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน0.3, 0.5, 0.8, 1.2, 1.5 และ 1.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทีจะได้ความชันของกราฟซึ่งจะนำมาหาค่าความต้านทาน (resistance) ความต้านทานแผ่น (sheet resistance) และ สภาพนำไฟฟ้า (resistivity)

ตารางที่ 4.5 ค่าความต้านทานความต้านทานแผ่นและสภาพนำไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน0.3, 0.5, 0.8, 1.2, 1.5 และ 1.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

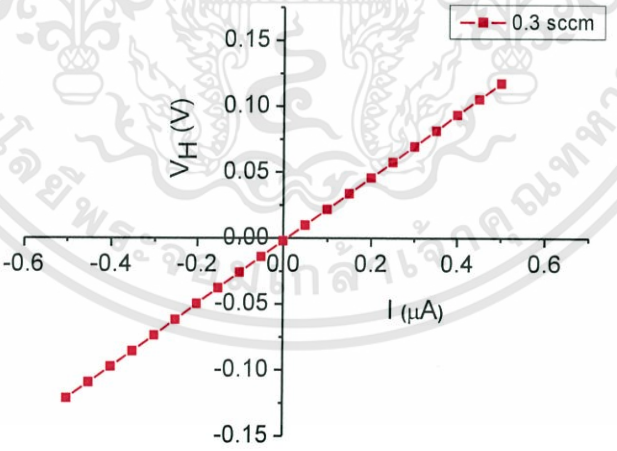
Oxygen flow rate (sccm)	Resistance (Ω)	Sheet Resistance (Ω/sq)	Resistivity (Ω.cm)
0.3	17.32×10^6	51.96×10^6	2.59×10^3
0.5	7.38×10^6	22.14×10^6	1.10×10^3
0.8	1.94×10^6	5.84×10^6	2.92×10^2
1.2	0.96×10^6	2.88×10^6	1.44×10^2
1.5	3.14×10^6	9.43×10^6	4.71×10^2
1.8	5.22×10^6	15.66×10^6	7.83×10^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.2 ผลการศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ของแผ่นลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) และฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

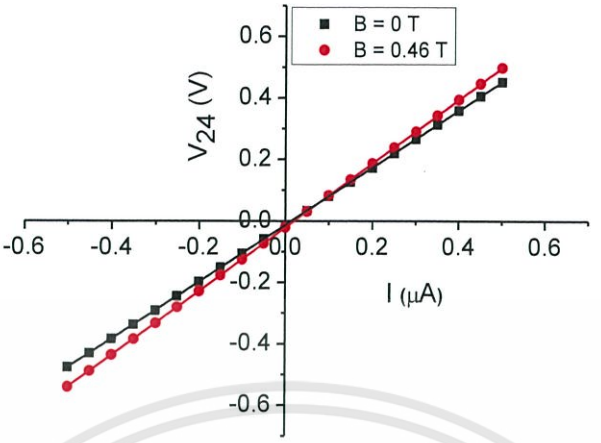


รูปที่ 4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.3 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

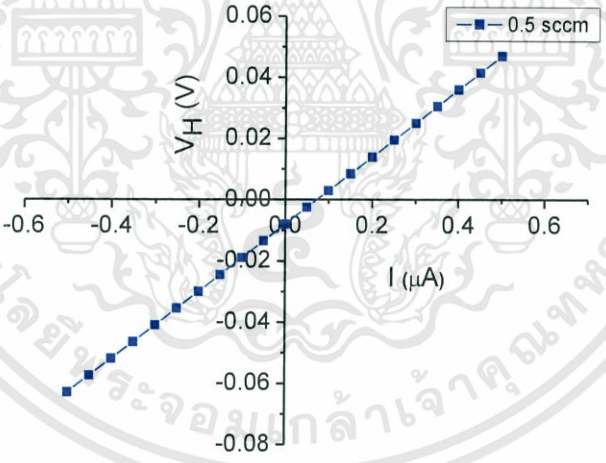


รูปที่ 4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.3 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

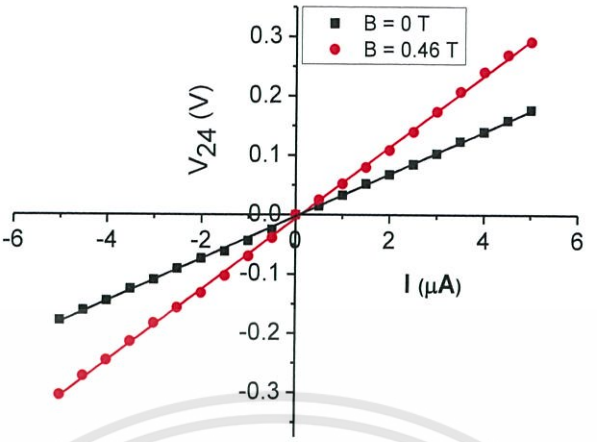


รูปที่ 4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

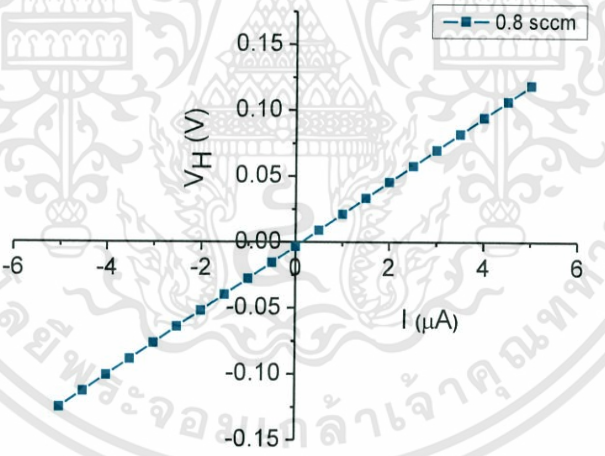


รูปที่ 4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

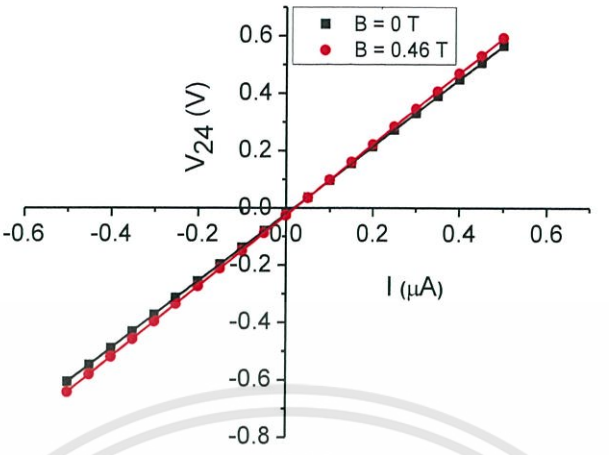


รูปที่ 4.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

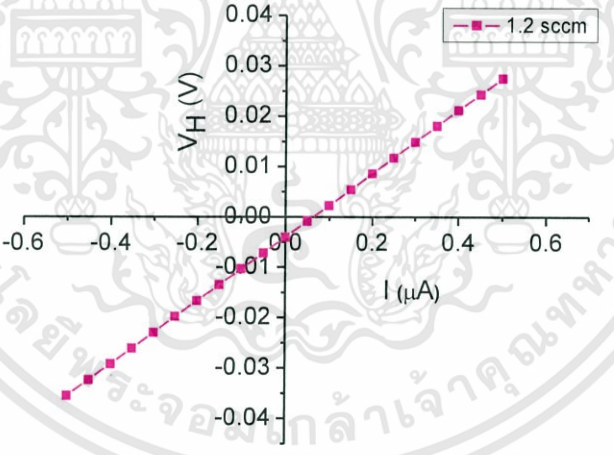


รูปที่ 4.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

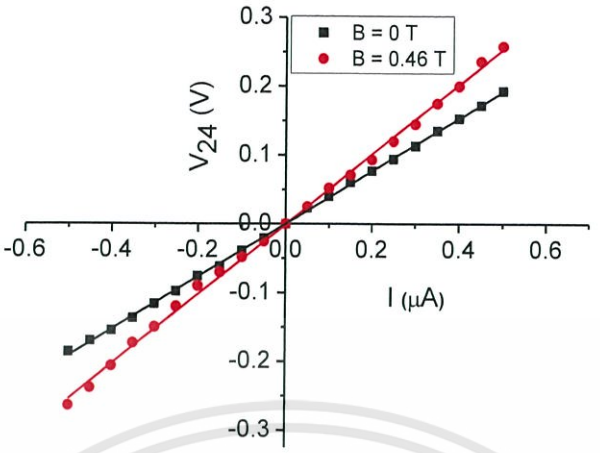


รูปที่ 4.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1.2 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

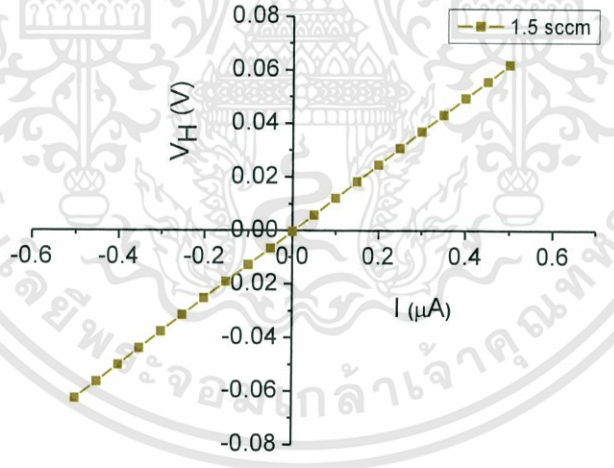


รูปที่ 4.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1.2 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

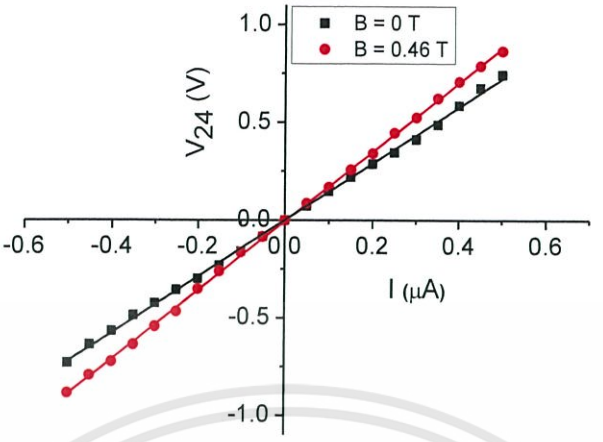


รูปที่ 4.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

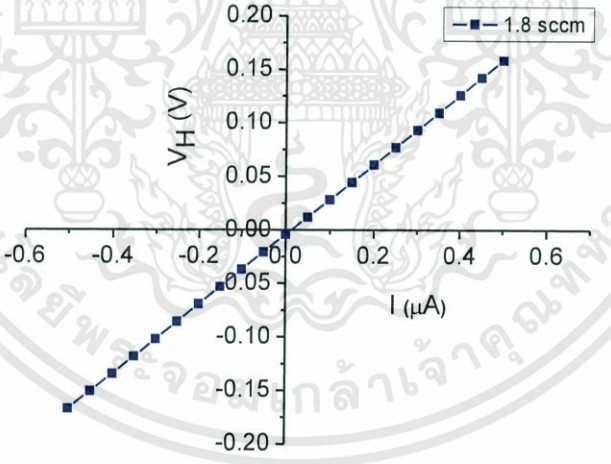


รูปที่ 4.36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

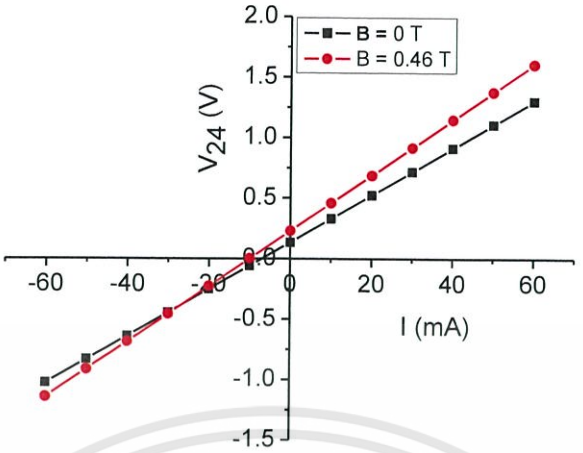


รูปที่ 4.37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

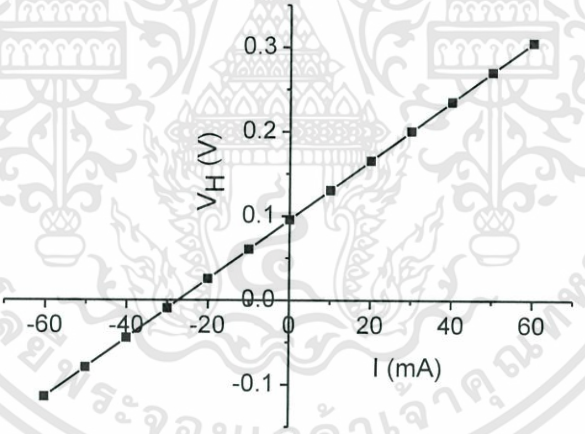


รูปที่ 4.38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 1.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100)



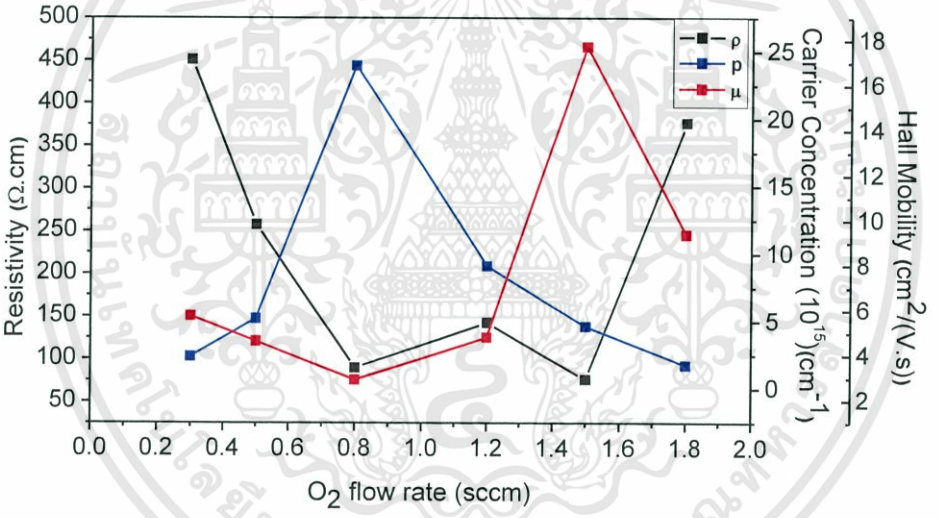
รูปที่ 4.40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็กของแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100)

จากการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ของผลึกเดี่ยว n-Si พบว่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ค่าคงที่ของฮอลล์ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและสภาพคล่องของอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ 1.60×10^{2} โอห์ม·เซนติเมตร 3.80 ลูกบาศก์ตารางเซนติเมตร/คูลอมบ์ 1.64×10^{18} ต่อลูกบาศก์เซนติเมตรและ 0.0237 (เซนติเมตร)^2/(โวลต์·วินาที) ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ผลการวัดปรากฏการณ์ของฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

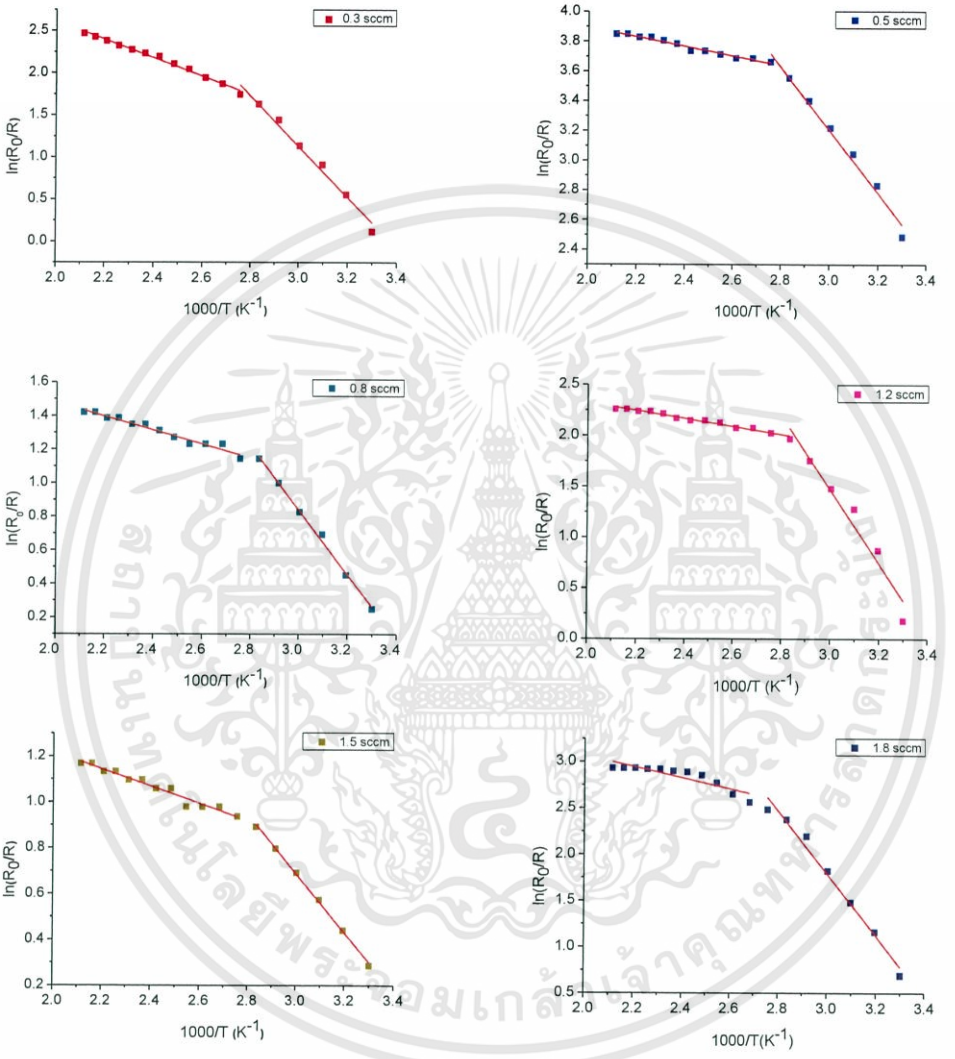
O_2 flow rate (sccm)	Sheet Resistance (Ω/sq)	Resistivity (Ω.cm)	Hall Constant (cm^3/C)	Hole Concentration (cm^{-3})	Hall Mobility ($cm^2/(V.s)$)
0.3	9.01×10^{6}	4.50×10^{2}	2.59×10^{3}	2.40×10^{15}	5.76
0.5	5.14×10^{6}	2.57×10^{2}	1.19×10^{3}	5.22×10^{15}	4.64
0.8	1.78×10^{6}	8.94×10^{1}	2.60×10^{2}	2.39×10^{16}	2.91
1.2	2.84×10^{6}	1.42×10^{2}	6.84×10^{2}	9.12×10^{15}	4.80
1.5	1.52×10^{6}	7.60×10^{1}	1.34×10^{3}	4.63×10^{15}	17.73
1.8	7.53×10^{6}	3.76×10^{2}	3.53×10^{3}	1.76×10^{15}	9.37



รูปที่ 4.41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานไฟฟ้า ความหนาแน่นของพาหะและสภาพคล่องฮอลล์ของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมได้จากวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.3, 0.5, 0.8, 1.2, 1.5 และ 1.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.3 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-150 องศาเซลเซียส เพื่อหาค่าพลังงานกระตุ้นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง



รูปที่ 4.42 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า 1000/T กับ $\ln(R_0/R)$ เมื่อทำการวัดค่าความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-150 องศาเซลเซียสของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.3, 0.5, 0.8, 1.2, 1.5 และ 1.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานกระตุ้น กับ อัตราการไหลของออกซิเจน เมื่อทำการวัดค่าความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-150 องศาเซลเซียส ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

Oxygen Flow Rate (sccm)	Activation Energy I (meV)	Activation Energy II (meV)
0.3	94.44	257.88
0.5	27.60	181.98
0.8	36.22	164.73
1.2	33.63	313.95
1.5	31.91	111.26
1.8	51.75	290.66

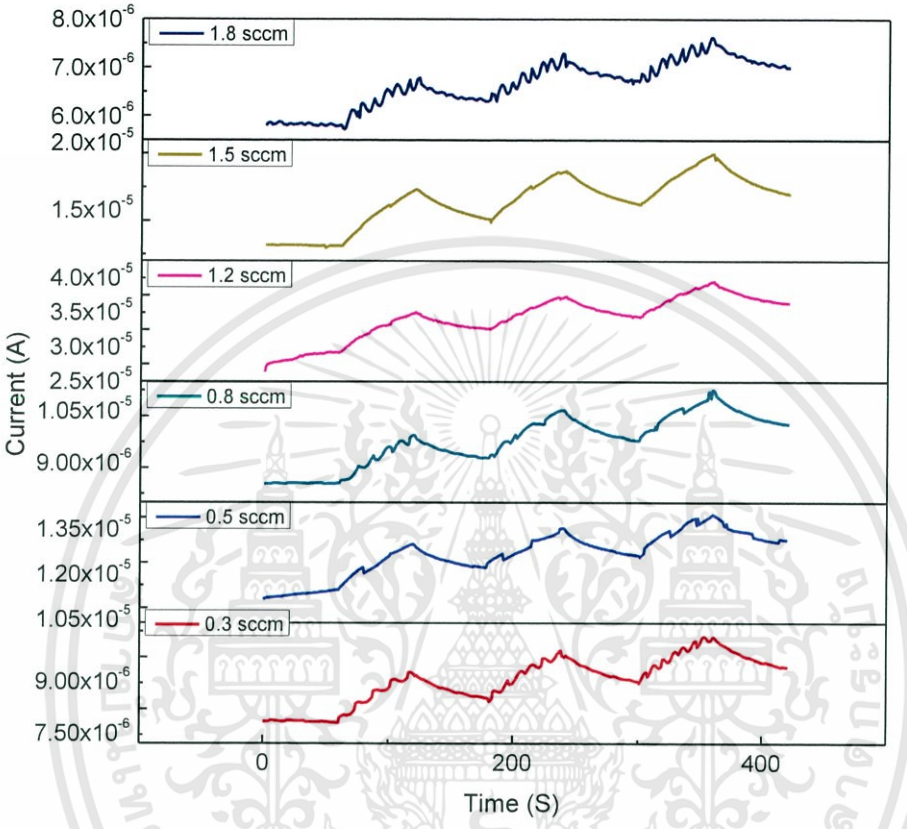
จากรูปที่ 4.42 และตารางที่ 4.7 เป็นผลที่ได้จากการวัดความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิสูงในช่วงอุณหภูมิ 25-150 องศาเซลเซียส เพื่อหาค่าพลังงานกระตุ้น (activation energy :E_a) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง พบว่าค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) จะมีสองค่าซึ่งจะเป็นค่ากำแพงศักย์ที่บริเวณขอบรอยต่อของเกรน โดยเกรนมีขนาดเล็กลง ค่าของกำแพงศักย์จะมีค่าเพิ่มขึ้นสอดคล้องกับค่าความต้านทานไฟฟ้าซึ่งอธิบายได้จากสมการ

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

จากสมการข้างต้นจะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้น กำแพงศักย์จะมีค่าลดลงส่งผลให้ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ จะนำไฟฟ้าได้ดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.4 ผลการศึกษาความต้านทานเชิงแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง



รูปที่ 4.43 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโฟโต (I_p) กับเวลา (t) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมได้จากวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.3, 0.5, 0.8, 1.2, 1.5 และ 1.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ที่อุณหภูมิห้อง ที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 20-300 เคลวิน และอุณหภูมิ 25 ถึง 80 องศาเซลเซียส ตลอดจนการศึกษาค่าความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้ากับค่าแรงดันไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง เพื่อใช้คำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณรอยต่อ เป็นต้น

4.6.1 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้าในช่วง -3 ถึง 3 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง แสดงในรูปที่ 4.44 พบว่ามีการเรียงกระแสไฟฟ้าทางเดียวเหมือนไดโอดทั่วไปโดยมีค่าแรงดันไฟฟ้าขีดเริ่ม (threshold voltage) อยู่ที่ 0.7 โวลต์

กลไกของกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ตรงบริเวณรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ในช่วงแรงดันไฟฟ้า -3 ถึง 3 โวลต์ เมื่อพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง lnI กับ lnV ในรูปที่ 4.46 พบว่ากลไกการนำไฟฟ้าแบ่งออกเป็น 3 กลไก คือ กลไกการนำไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้าง กลไกการนำไฟฟ้าชนิดเทอร์มิออนิกอิมิสชัน และ กลไกการนำไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้าง ตามลำดับ รูปที่ 4.47 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง lnV กับ V ซึ่งใช้หาค่าแฟกเตอร์อุดมคติและค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับ รูปที่ 4.50 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง dVdlnI กับ I ซึ่งใช้หาค่าแฟกเตอร์ในอุดมคติและค่าความต้านทานอนุกรม รูปที่ 4.51 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง H(I) กับ I ซึ่งใช้หาค่าความสูงของกำแพงศักย์ สำหรับค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับ ค่าแฟกเตอร์ในอุดมคติ ค่าความสูงของกำแพงศักย์ และค่าความต้านทานอนุกรมที่ได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน และวิธีการของชวง แสดงยังตารางที่ 4.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

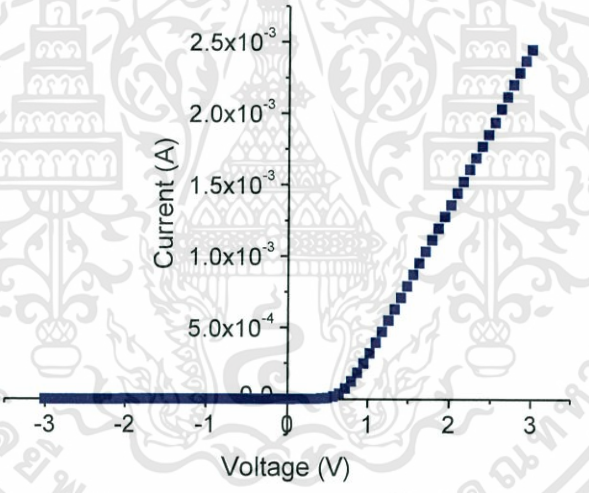


(ก)



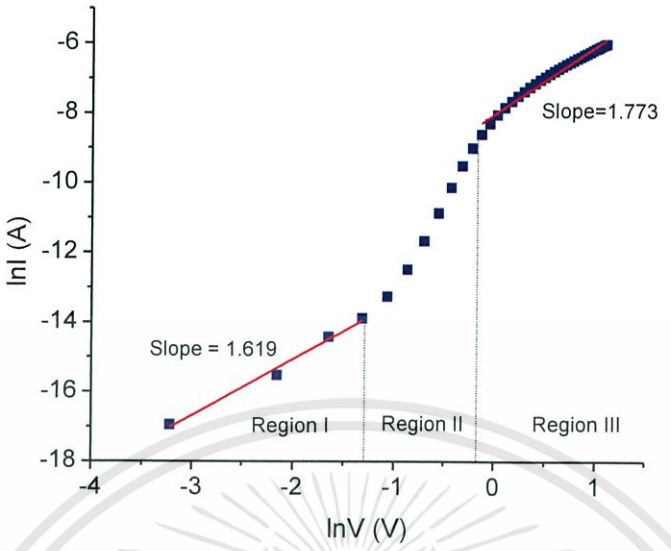
(ข)

รูปที่ 4.44 แสดงภาพถ่ายของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง
(ก) ไดโอดสำหรับการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าโดยไม่มีการฉายแสง
(ข) ไดโอดสำหรับการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าภายใต้การฉายแสง

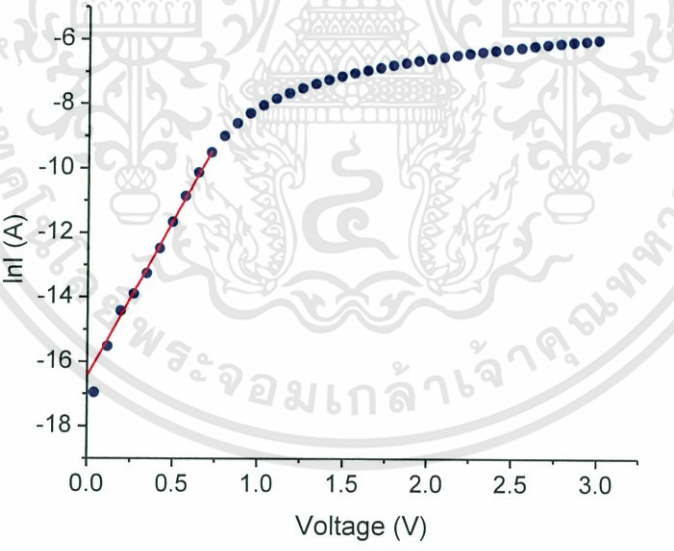


รูปที่ 4.45 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า (I) กับ แรงดันไฟฟ้า (V) ที่ช่วงแรงดันไฟฟ้า -3 ถึง 3 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

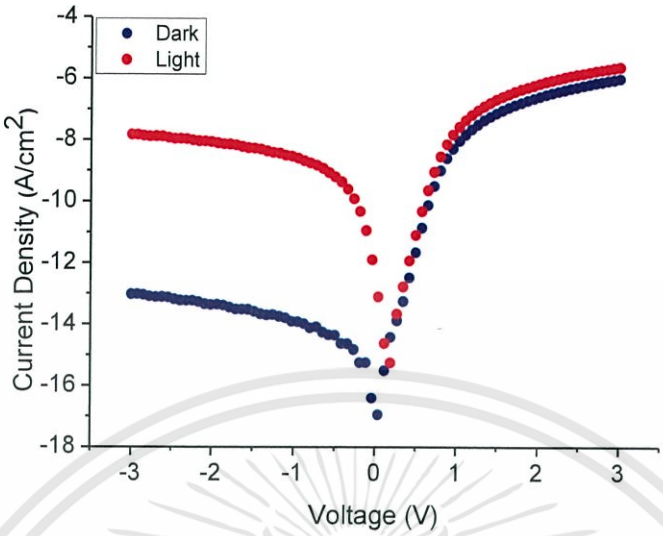


รูปที่ 4.46 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง lnI กับ lnV เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องที่ใช้ในการอธิบายกลไกการนำกระแสไฟฟ้าแต่ละช่วงของค่าแรงดันไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

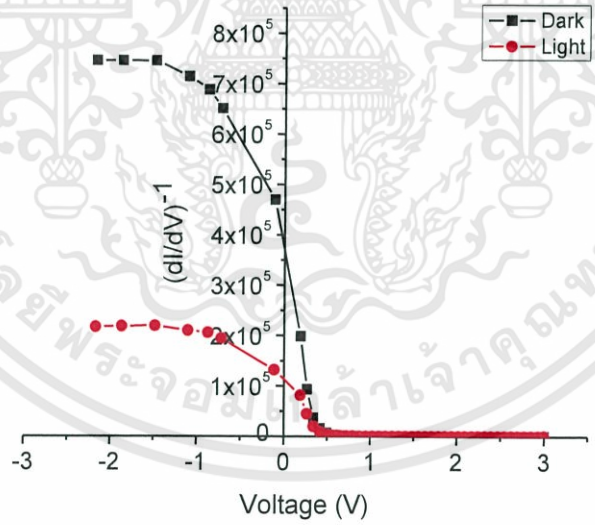


รูปที่ 4.47 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง lnI กับ V เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องที่ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.48 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความหนาแน่นกระแส (J) กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า (V) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง เมื่อฉายแสงและไม่ฉายแสง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง



รูปที่ 4.49 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต้านทานไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า (V) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง เมื่อฉายแสงและไม่ฉายแสง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แฟกเตอร์เรียงกระแส (Rectifier Factor, RF) คืออัตราส่วนระหว่างกระแสไบแอสตรงต่อกระแสไบแอสย้อนกลับดังความสัมพันธ์

$$RF = \frac{I_F}{I_R} \tag{4.3}$$

ค่าแฟกเตอร์เรียงกระแสของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ภายใต้การฉายแสงและไม่มีการฉายแสงที่แรงดัน -3 ถึง 3 โวลต์จะแสดงดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าแฟกเตอร์เรียงกระแสของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ภายใต้การฉายแสงและไม่มีการฉายแสงที่แรงดัน -3 และ 3 โวลต์

Condition	Current		RF
	I_R (A)	I_F (A)	
Dark	2.19×10^{-6}	2.45×10^{-3}	1.12×10^{3}
Illumination	4.00×10^{-4}	3.59×10^{-3}	8.98

จากรูป 4.46 คือกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมของกระแส (lnI) กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า (V) เพื่อใช้ในการคำนวณหา ค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ (I_S) และค่าแฟกเตอร์ในอุดมคติ (n) โดยอาศัยกราฟเส้นตรงช่วงที่มีการนำกระแสไฟฟ้าที่เป็นกลไกแบบเทอร์มิออนิกอิมิสชันที่พิจารณาจากช่วงของแรงดันไฟฟ้า จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าลอการิทึมของกระแส (lnI) กับ ค่าลอการิทึมของแรงดัน (lnV) ดังรูปที่ 4.46 ดังสมการ

$$I = I_S\left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right)-1\right] \tag{4.4}$$

เมื่อ I_S คือ ค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับมีค่าเท่ากับ

$$I_S = AA^{*}T^{2}\exp\left(-\frac{q\varphi_{B0}}{kT}\right)-1 \tag{4.5}$$

เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า lnI กับ V เพื่อหาค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับได้จากการลากเส้นตรงผ่านบริเวณกราฟที่เป็นกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันตัดแกน ค่า lnI โดยจุดตัดมีค่าเท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\ln I_S$ และ มีค่าความชันของกราฟเท่ากับ $\frac{q}{nkT}$ ซึ่งสามารถนำมาคำนวณหาค่าแฟกเตอร์ในอุดมคติ (n) ได้จากสมการที่ (4.5) จะได้ค่าความสูงของกำแพงศักย์คือ

$$\varphi_{B0} = \frac{kT}{q}\ln\left(\frac{AA^{*}T^{2}}{I_S}\right) \tag{4.6}$$

ค่าความสูงกำแพงศักย์ (φ_B) ของสมการที่ (4.6) จะเป็นค่าในขณะแรงดันไบแอสเป็นศูนย์ที่อุณหภูมิใดๆ และ A^{*} เท่ากับ 40.8 แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรต่อเคลวินยกกำลังสอง

นอกจากนี้ยังสามารถที่จะหา ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ (n) ของไดโอดที่ขึ้นกับแรงดันไบแอสโดยอาศัยความสัมพันธ์ดังนี้

$$n = \frac{q}{kT}\frac{dV}{d(\ln I)} \tag{4.7}$$

ในความเป็นจริงแล้วไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) มักจะมีความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม (R_S) เกิดขึ้นเสมอซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากค่าความต้านทานไฟฟ้าของเนื้อสารและที่บริเวณขั้วไฟฟ้าด้านหลัง จึงต้องทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าในช่วงแรงดันไฟฟ้ามีค่าสูงๆ (region III) เพื่อให้ความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมนั้นแสดงผลออกมา ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมมาเกี่ยวข้องจะเป็น

$$I = I_S\left\{\exp\left(\frac{q}{nkT}(V - IR_S)\right) - 1\right\} \tag{4.8}$$

เมื่อ ค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ คือ

$$I_S = AA^{*}T^{2}\exp\left(-\frac{q\varphi_{B0}}{kT}\right) \tag{4.9}$$

อาจเขียนสมการที่ (4.8) อีกรูปแบบหนึ่งได้เป็น

$$I = I_S\left\{\exp\frac{q}{nkT}(V - IR_S)\left[1 - \exp\left(\frac{-qV}{kT}\right)\right]\right\} \tag{4.10}$$

วิธีการหาค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมของชวง (Cheung's Method) พิจารณาในช่วงแรงดันไบแอสไปข้างหน้า โดยการแทนสมการที่ (4.9) ลงในสมการที่ (4.8) แล้วจะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V = IR_S + n\varphi + \frac{nkT}{q}\ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) \quad (4.11)$$

หาอนุพันธ์ของค่า V เทียบกับ ค่า lnI เพื่อหาค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม จากสมการที่ (4.11) จัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{q} + IR_S \quad (4.12)$$

ซึ่งจะสอดคล้องกับกราฟเส้นตรง จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า dV/dlnI กับ ค่า I ดังรูปที่ 4.47 โดยค่าความชันของกราฟนั้นคือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมของวงจร (R_S) และจุดตัดแกนของค่า dV/dlnI มีค่าเท่ากับ nkT/q

ส่วนการหาค่าความสูงของกำแพงศักย์นั้นจะหาได้โดยการจัดรูปของสมการที่ (4.11) ให้อยู่ในรูปฟังก์ชันของค่า H(I) ดังนี้

$$H(I) = V - n\left(\frac{kT}{q}\right)\ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) \quad (4.13)$$

แล้วสมการที่ (4.13) จะกลายเป็น

$$H(I) = n\varphi_B - IR_S \quad (4.14)$$

เมื่อทำการคำนวณค่า H(I) จากข้อมูลของ ค่ากระแสไฟฟ้า และ แรงดันไฟฟ้า แล้วนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า H(I) กับ ค่า I ก็จะได้ดังรูปที่ 4.48 โดยจะคำนวณหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ได้จากจุดตัดแกนตั้งของค่า $(n\varphi_B)$ ของกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าวแล้วนอกจากนี้ความชันของกราฟที่เขียนขึ้นในรูปของฟังก์ชันของค่า H(I) นั้นก็คือค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมเช่นเดียวกับความสัมพันธ์ในสมการที่ (4.12) ซึ่งจะส่งผลให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกัน

กลไกการนำไฟฟ้าชนิดกระแสไฟฟ้าถูกจำกัดโดยประจุค้าง (SCLC) มักจะเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ดังนี้คือ

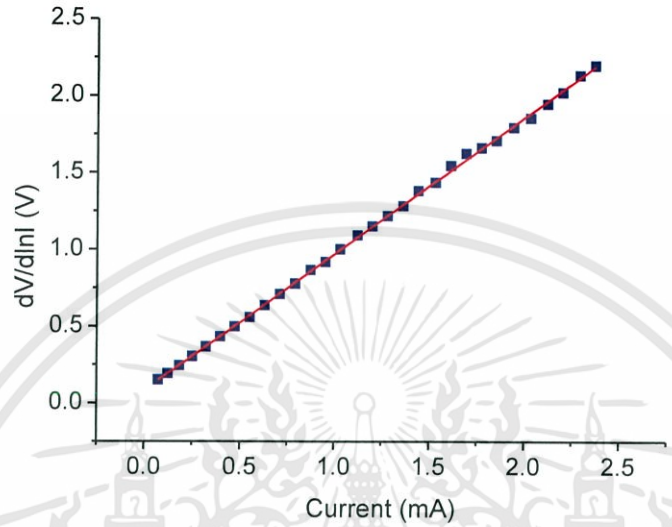
$$I = kV^m \quad (4.15)$$

$$\ln I = m\ln V + \ln k \quad (4.16)$$

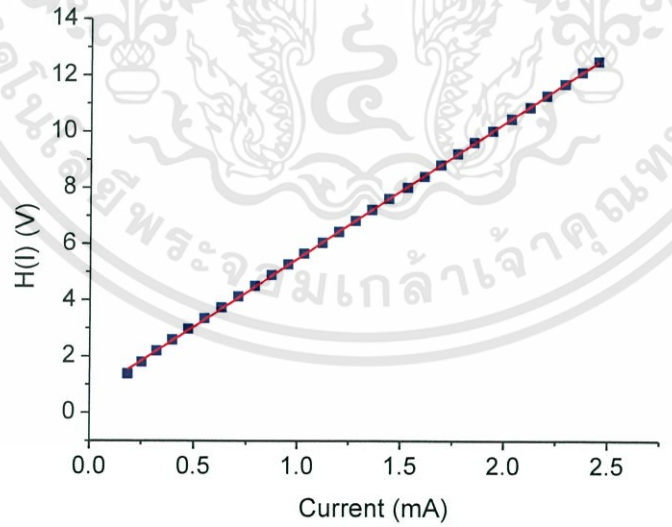
เมื่อ m คือ ค่าความชันของกราฟ ถ้า m มีค่าเท่ากับ 1.5 กลไกการนำไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้างจะเป็นไปตามกฎของ ไชด์-แลงมัวร์ (Child-Langmuir's law) แต่ถ้า m เท่ากับ 2 จะเป็นไปตามกฎของมอตต์-เกอร์นีย์ (Mott-Gurney's law) แต่ถ้า m > 2 จะหมายถึงว่ากับดักพาหะมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระดับพลังงานต่อเนื่องและมีการแจกแจงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล ซึ่งจากผลการทดลองที่แรงดันต่ำกว่า 0.25 โวลต์ ความชัน m มีค่าเท่ากับ 1.619 ส่วนแรงดันสูงกว่า 1.2 โวลต์ ความชันมีค่าเท่ากับ 1.773 แสดงว่าในเนื้อสาร n-Si มีกับดักพาหะเพียงระดับเดียว



รูปที่ 4.50 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง dV/dlnI กับ ค่า I เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง



รูปที่ 4.51 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง H(I) กับ ค่า I เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

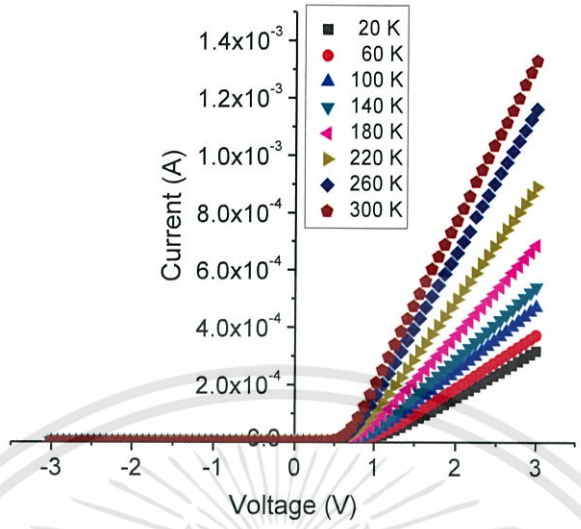
ตารางที่ 4.9 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ (I_S) ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ (n) ค่าความสูงกำแพงศักย์ในขณะที่ไบแอสเป็นศูนย์ (φ_{B0}) และค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม R_S ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันและวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

Sample	Saturation Current I_S (A)	Ideality Factor (n)		Barrier Height φ_{B0} (eV)		Series Resistance (R_S)(kΩ)	
		TE	Cheung	TE	Cheung	Cheung	Cheung
		I-V	[dV/d(lnI)-I]	I-V	H(I)-I	H(I)-I	[dV/d(lnI)-I]
Cu_2O/Si	7.69×10^{-8}	4.34	2.31	0.75	0.81	1.68	1.74

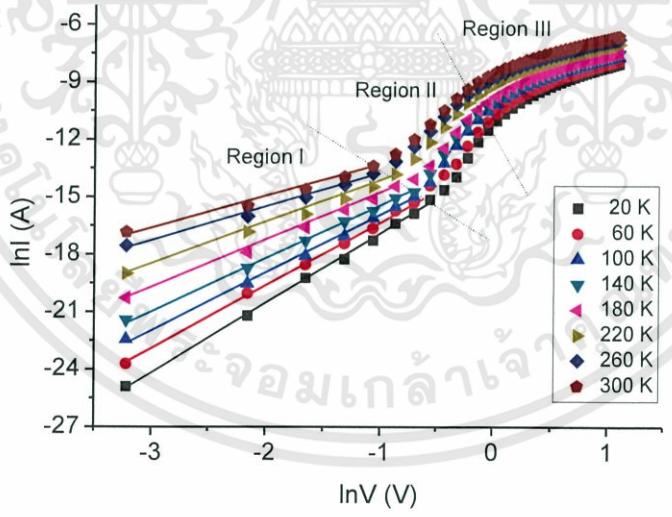
4.6.2 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) โดยวัดค่าความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้าในช่วง -3 ถึง 3 โวลต์ เมื่อทำการวัดอุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20 ถึง 300 เคลวิน พบว่าที่แรงดันไฟฟ้าเท่ากัน กระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ตรงบริเวณรอยต่อมีค่าลดลง ตามอุณหภูมิที่ลดลงแสดงดังรูปที่ 4.49 และ ค่าแรงดันไฟฟ้าขีดเริ่มของไดโอดมีค่ามากขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง การศึกษากลไกของกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ตรงบริเวณไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) สามารถศึกษาได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า lnI กับ lnV โดยสามารถแบ่งกลไกการนำไฟฟ้าได้เป็นสามช่วง กล่าวคือ Region I และ Region III เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัด โดยประจุค้างที่เกิดจากกับดักพาหะที่สถานะผิวเชื่อมต่อ (interface state) และที่กับดักพาหะในเนื้อสาร n-Si ตามลำดับ ส่วน Region II เป็นกลไกการนำกระแสชนิดเทอร์มิออนิกอิมิสชัน และสามารถหาค่าแฟกเตอร์ในอุดมคติ และ ค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า lnI กับ V เพื่อนำไปเป็นค่าเริ่มต้นในการจำลองข้อมูล และในการหาค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมจะวิธีของชวงโดยค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ค่าความสูงของกำแพงศักย์ และ ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมที่อุณหภูมิต่ำในช่วง 20-300 เคลวิน ที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน และวิธีของชวงแสดงในตารางที่ 4.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

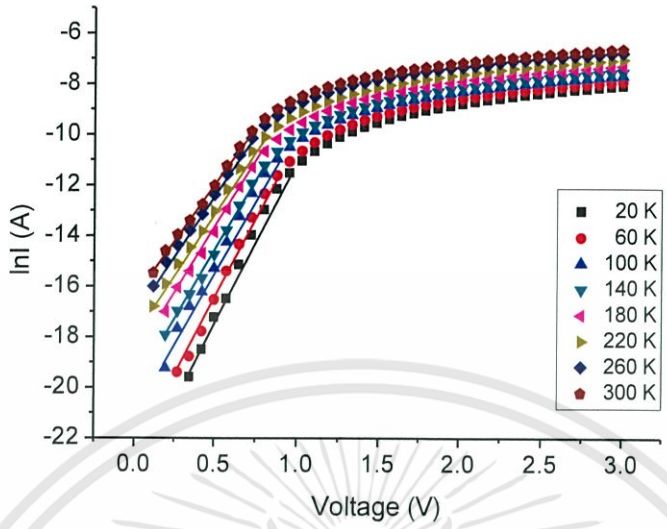


รูปที่ 4.52 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า (I) กับ แรงดันไฟฟ้า (V) เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวินของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

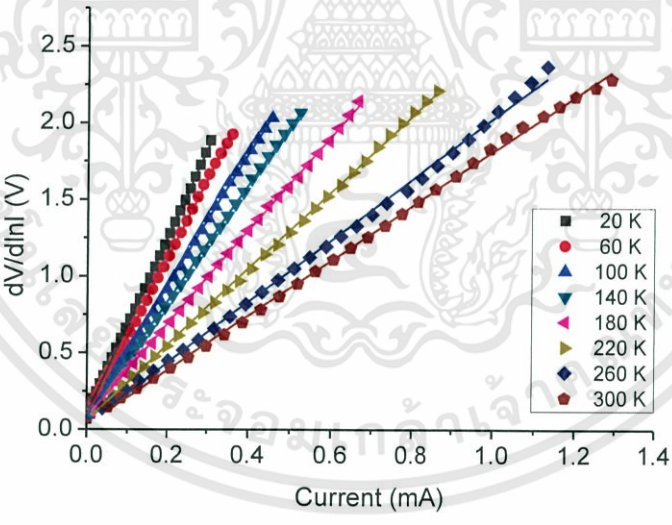


รูปที่ 4.53 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า lnI กับ lnV เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวินของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

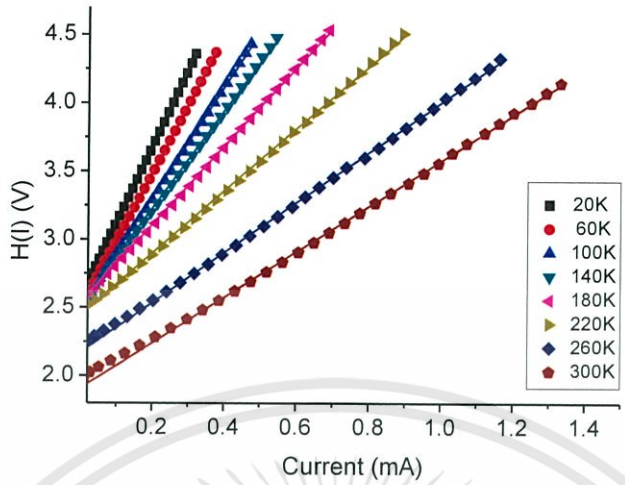


รูปที่ 4.54 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า ln| กับ V เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำ ในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวินของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง



รูปที่ 4.55 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า dV/dln| กับ I ที่อธิบายวิธีของชวงเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวินของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.56 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า H(I) กับ I โดยวิธีของชวงเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวินของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ ค่าความสูงของกำแพงศักย์ และ ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้กลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน และวิธีของชวง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวินของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

Temperature (K)	Saturation Current (I_S)	Ideality Factor (n)		Barrier Height (eV)		Series Resistance (kΩ)	
		TE	Cheung	TE	Cheung	Cheung	Cheung
		I-V	[dV/d(lnI)-I]	I-V	H(I)-I	H(I)-I	[dV/d(lnI)-I]
20	2.66×10^{-11}	41.08	52.17	0.054	0.049	5.630	5.831
40	6.87×10^{-11}	22.07	23.18	0.109	0.106	5.536	5.687
60	7.75×10^{-11}	14.19	15.45	0.168	0.161	5.007	5.185
80	5.13×10^{-10}	12.16	11.59	0.215	0.213	4.443	4.644
100	6.72×10^{-10}	9.62	9.27	0.270	0.267	4.118	4.303
120	8.98×10^{-10}	8.13	7.72	0.325	0.322	3.839	4.005
140	1.67×10^{-9}	7.32	6.62	0.376	0.375	3.632	3.798
160	2.72×10^{-9}	6.56	5.79	0.426	0.427	3.335	3.486
180	5.71×10^{-9}	6.12	5.28	0.472	0.473	2.935	3.051
200	1.00×10^{-8}	5.68	4.63	0.518	0.526	2.648	2.764
220	1.87×10^{-8}	5.40	4.21	0.562	0.571	2.338	2.461
240	3.45×10^{-8}	5.16	3.86	0.604	0.613	2.019	2.107
260	4.76×10^{-8}	4.87	3.12	0.651	0.688	1.852	1.960
280	6.17×10^{-8}	4.59	2.89	0.698	0.738	1.706	1.779
300	7.69×10^{-8}	4.34	2.31	0.746	0.815	1.687	1.743

จากผลการทดลองตารางที่ 4.10 จากผลการทดลองพบว่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับมีค่าน้อยลงตามอุณหภูมิที่ลดลง ส่วนค่าแฟกเตอร์อุดมคติที่ได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันและวิธีของชวงมีค่ามากขึ้น เมื่ออุณหภูมิลดลงและมีลักษณะไม่เป็นกราฟเชิงเส้น แสดงดังรูปที่ 4.57

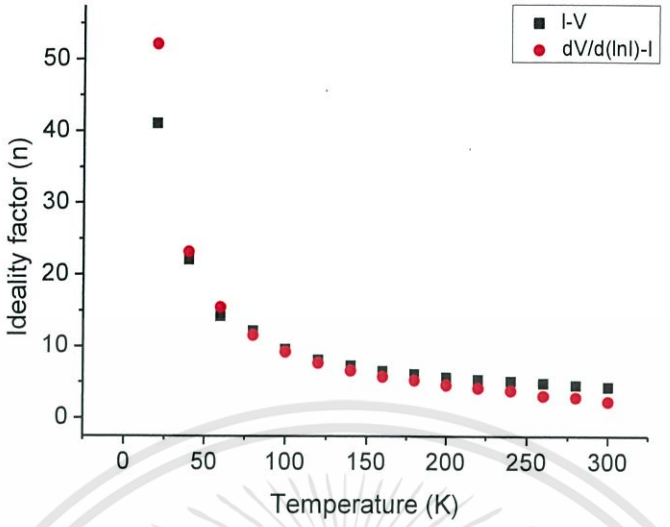
จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง lnI-lnV ที่อุณหภูมิห้อง ความชัน (m) ของ Region I และ Region III มีค่าเท่ากับ1.619 และ 1.773 ตามลำดับ กลไกการนำไฟฟ้าเป็นชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้าง ซึ่งเมื่ออุณหภูมิลดลงจาก 300 เคลวิน เป็น 20 เคลวิน ค่าความชันของ Region I จะเพิ่มขึ้นจาก 1.488 เป็น 3.535 และความชันของ Region III จะเพิ่มขึ้นจาก 1.773 เป็น 2.553 แสดงว่าในเนื้อสาร n-Si มีกับดักพาหะเพียงระดับเดียว ส่วนใน Region I กับดักพาหะมีระดับพลังงานต่อเนื่องและมีการแจกแจงแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลซึ่งเป็นคุณสมบัติของสถานะผิวเชื่อมต่อ (interface state)

ค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันและวิธีของชวงมีค่าลดลงตามอุณหภูมิที่ลดลง แสดงดังรูปที่ 4.59 ส่วนค่าความสูงกำแพงศักย์ที่ได้จากวิธีของชวงมีค่าใกล้เคียงกับกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน

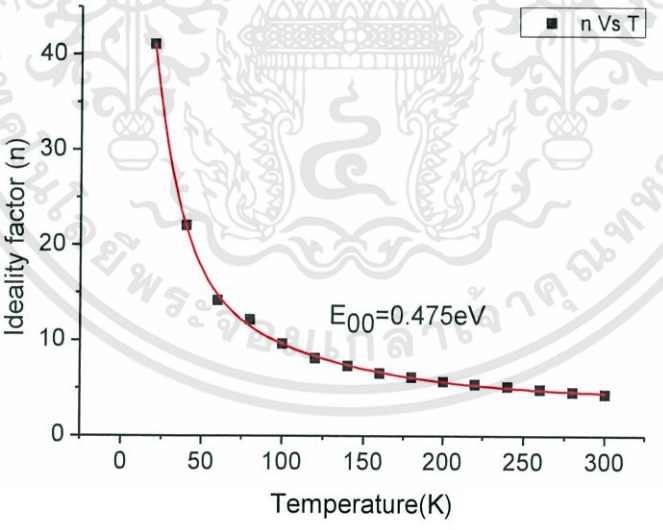
การที่ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ และ ค่าความสูงกำแพงศักย์ ที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ เนื่องจากได้ใช้การวัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ชอตต์กีมาคำนวณหาค่าตัวแปรเหล่านี้ ดังนั้นค่าของตัวแปรจะขึ้นอยู่กับปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่วัดได้ ที่อุณหภูมิมีค่าสูงจะมีพลังงานความร้อนไปกระตุ้นให้พาหะอิสระให้มีระดับพลังงานสูงและมีจำนวนมากขึ้น เมื่อมีการให้แรงดันไบแอสไปข้างหน้าหรือพลังงานกระตุ้นจากภายนอกเพียงเล็กน้อย พาหะอิสระที่มีระดับพลังงานสูงเหล่านี้ก็สามารถไหลข้ามกำแพงศักย์ที่มีค่าสูงได้ ดังนั้นจะได้ค่ากำแพงศักย์มีค่ามาก และ ค่าแฟกเตอร์อุดมคติที่เข้าใกล้หนึ่ง แต่ที่อุณหภูมิต่ำระดับพลังงานของพาหะอิสระมีค่าน้อย จึงจำเป็นต้องใช้แรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเพื่อที่พาหะจะไหลข้ามกำแพงศักย์ ซึ่งกำแพงศักย์ที่สามารถข้ามได้นั้นก็เป็นกำแพงศักย์ที่มีค่าน้อยเนื่องจากไม่มีพลังงานเพียงพอที่จะข้ามกำแพงศักย์ที่มีค่าสูงได้ ดังนั้นที่อุณหภูมิต่ำพบว่า ความสูงของกำแพงศักย์มีค่าน้อยและค่าแฟกเตอร์อุดมคติจะมีค่ามาก ที่อุณหภูมิสูงพาหะอิสระที่สามารถไหลข้ามกำแพงศักย์ที่มีค่าต่ำก็ยังมีอยู่ แต่เนื่องจากมีปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับปริมาณพาหะอิสระที่มีระดับพลังงานที่สามารถข้ามกำแพงศักย์ที่มีค่าสูงได้

ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมที่คำนวณได้จากวิธีของชวง พบว่ามีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.58 การที่ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลงนั้นมีสาเหตุมาจากการที่ค่าความหนาแน่นของพาหะอิสระลดลง ซึ่งเกิดจากการที่กับดักพาหะได้จับพาหะอิสระเอาไว้ที่บริเวณผิวรอยต่อและการที่พาหะอิสระมีพลังงานน้อยลงเมื่ออุณหภูมิมีค่าลดลงจึงทำให้พาหะอิสระอยู่กับที่ (freeze – out – carrier) การที่จะให้พาหะอิสระเคลื่อนที่ข้ามบริเวณรอยต่อ p^{+}- n ได้นั้นจำเป็นต้องให้แรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

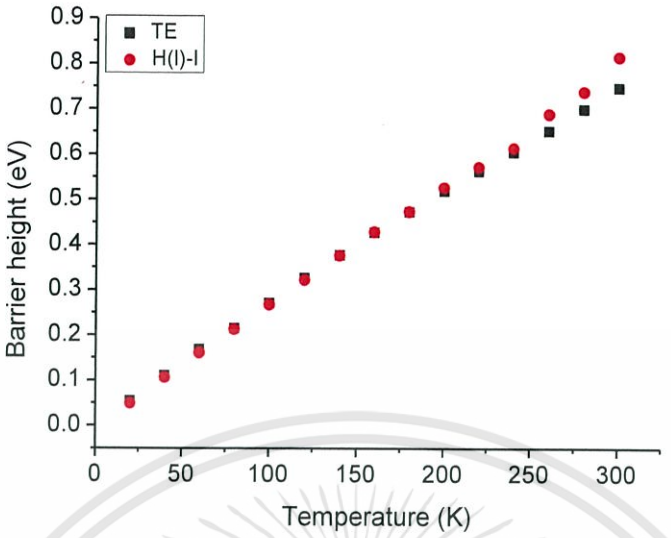


รูปที่ 4.57 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ กับ ค่าอุณหภูมิที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันและวิธีของชวงที่เป็นความสัมพันธ์ กับ ค่าอุณหภูมิ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวินของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

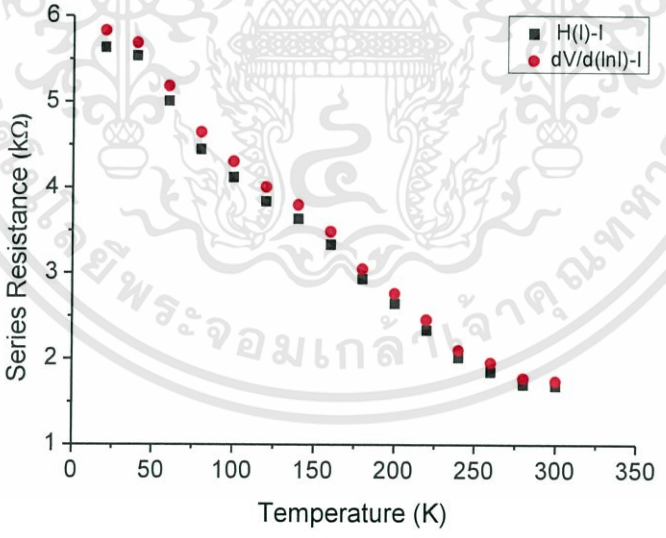


รูปที่ 4.58 แสดงการหาค่า E_{00} โดยการฟิตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ กับ ค่าอุณหภูมิ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

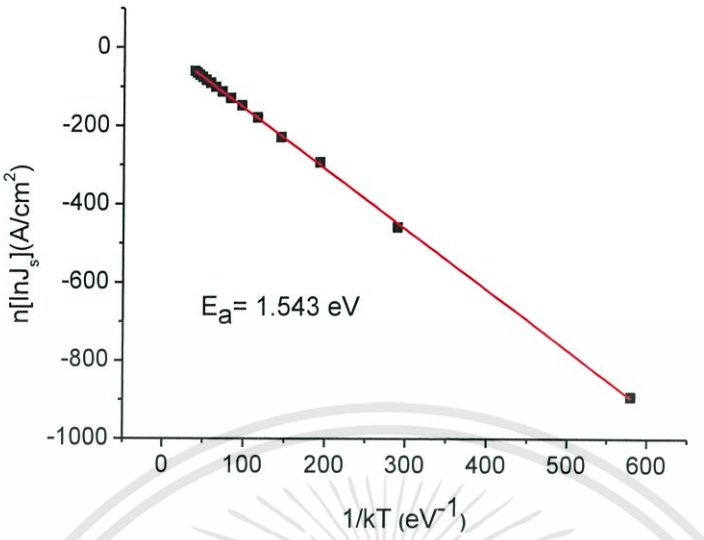


รูปที่ 4.59 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความสูงกำแพงศักย์ กับ ค่าอุณหภูมิที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันและวิธีของชวงที่เป็นความสัมพันธ์ กับ ค่าอุณหภูมิ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวินของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง



รูปที่ 4.60 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม กับ ค่าอุณหภูมิที่คำนวณได้จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันและวิธีของชวงที่เป็นความสัมพันธ์ กับ ค่าอุณหภูมิ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวินของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.61 แสดงกราฟอาร์เรเนียสของ $n[\ln J_S]$ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

จากรูปที่ 4.58 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าแฟกเตอร์อุดมคติ กับ ค่าอุณหภูมิสามารถนำไปหาค่า E_{00} ได้จากความสัมพันธ์

$$n = \frac{E_{00}}{kT}\coth\left(\frac{E_{00}}{kT}\right) \tag{4.17}$$

โดย E_{00} คือ ค่าลักษณะเฉพาะของค่าพลังงานการขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ ที่ได้จากรูปที่ 4.58 จากกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชันมีค่าเท่ากับ 0.475 อิเล็กตรอนโวลต์

จากค่าความชันของกราฟในรูปที่ 4.61 สามารถคำนวณหา ค่าพลังงานกระตุ้นของรอยต่อได้จากสมการที่ (4.17)

$$n\ln(J_S) = -E_a\left(\frac{1}{kT}\right) + n\ln(J_0) \tag{4.18}$$

พลังงานกระตุ้น E_a หาได้จากค่าความชันของกราฟในรูปที่ 4.61
ดังนั้น

ความชัน $= E_a$

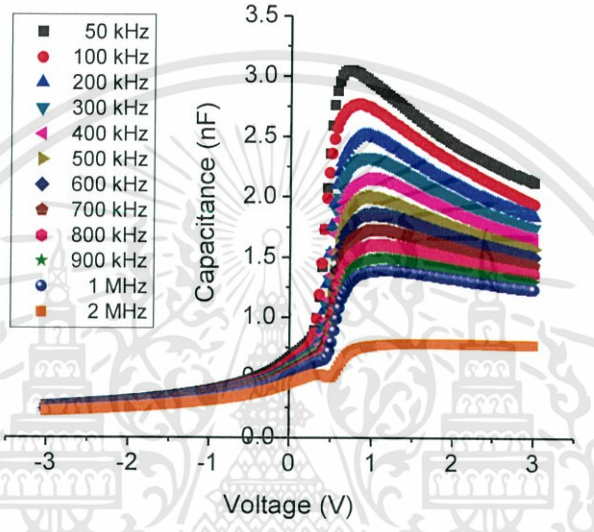
$E_a = 1.543$ อิเล็กตรอนโวลต์

จากค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) ที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 1.543 อิเล็กตรอนโวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

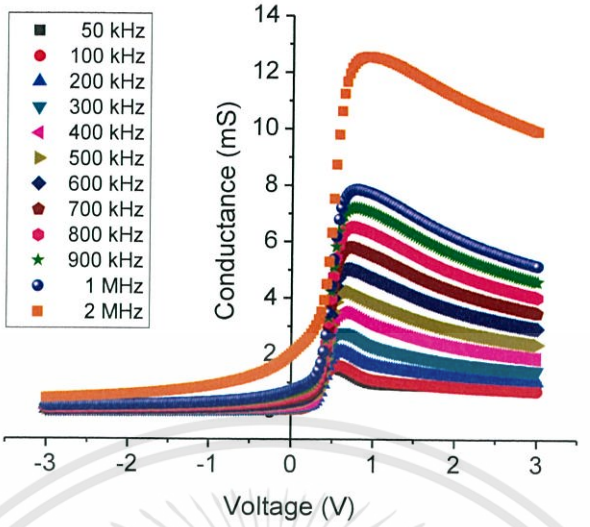
4.6.3 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

ทำการวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) แสดงได้ดังรูปที่ 4.62 พบว่าที่ แรงดันไบแอสย้อนกลับมีค่ามากขึ้นจะทำให้ค่าความจุไฟฟ้านั้นมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากความกว้างของบริเวณพร่องพาหะเพิ่มขึ้นตามแรงดันไบแอสย้อนกลับที่มากขึ้น



รูปที่ 4.62 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดในช่วงถวามถี่ 50 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 2 เมกกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

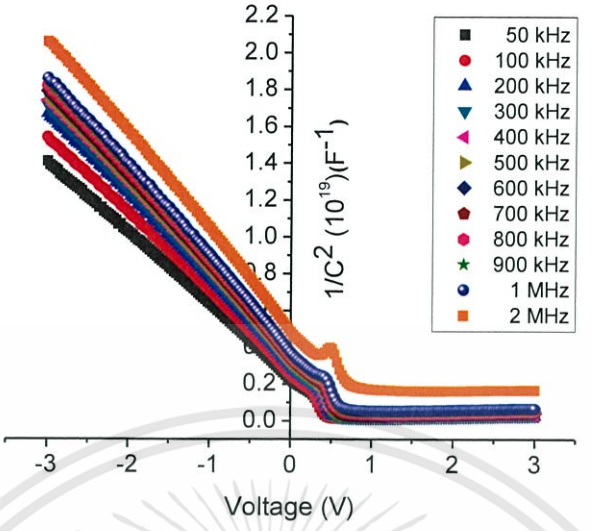
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



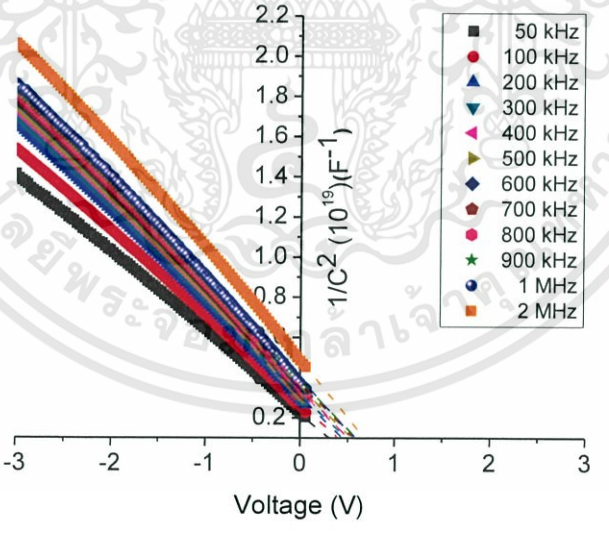
รูปที่ 4.63 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความนำไฟฟ้า กับ แรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดเมื่อทำการวัดในช่วงถวามถี่ 50 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 2 เมกกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

สำหรับกรณีไบแอสตรง โดยเฉพาะที่ความถี่ 2 เมกะเฮิรตซ์ ค่าความจุมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงค่าคงที่ แสดงว่าตรงบริเวณผิวรอยต่อมีชั้นฉนวนไฟฟ้าเกิดขึ้น อันเนื่องมาจากการเกิดชั้นบางๆของ SiO_2 ขณะทำการสปัตเตอริงเพื่อเตรียมฟิล์มบาง Cu_2O เคลือบบน n-Si (100) ดังนั้นที่แรงดันไบแอสตรงจะก่อให้เกิดเงื่อนไขสะสมพาหะ (accumulation condition) ของรอยต่อแบบ MOS ส่วนแรงดันไบแอสกลับทางจะก่อให้เกิดเงื่อนไขชั้นกลับกลาย (inversion condition) ศักย์ตกคร่อมรอยต่อและความหนาแน่นของพาหะอิสระใน n-Si สามารถคำนวณได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนกลับของค่าความจุไฟฟ้ายกกำลังสองกับแรงดันไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 4.65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.64 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1/C^{-2}$ กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 50 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 2 เมกกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง



รูปที่ 4.65 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $1/C^{-2}$ กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 50 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 2 เมกกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการหาความหนาแน่นของสถานะผิวเชื่อมต่อ (interface state density, D_{it}) สามารถหาได้จากการวัดความสัมพันธ์ระหว่างความจุกับแรงดันไฟฟ้า (C-V) และความนำไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า (G-V) ที่ความถี่ค่าต่างๆ แต่เนื่องจากมีผลของความต้านทานอนุกรม (R_s) มาเกี่ยวข้อง อย่างไรก็ตามค่า R_s นี้เปลี่ยนแปลงตามความถี่ดังสมการ

$$R_s = \frac{G_m}{G_m^2 + \omega^2 C_m^2} \tag{4.19}$$

ค่าความจุของชั้นบางๆ ของ SiO_2 ที่ได้แก้ไขผลของ R_s แล้วจะเป็นดังนี้คือ

$$C_{ox} = C_m[1 + (\frac{G_m}{\omega C_m})^2] \tag{4.20}$$

ค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้าที่ทำการแก้ไขให้ถูกต้องแล้วจะเป็น C_{ADJ} และ G_{ADJ} ดังความสัมพันธ์

$$C_{ADJ} = \frac{(G_m^2 + \omega^2 C_m^2)C_m}{a^2 + \omega^2 C_m^2} \tag{4.21}$$

$$G_{ADJ} = \frac{(G_m^2 + \omega^2 C_m^2)a}{a^2 + \omega^2 C_m^2} \tag{4.22}$$

เมื่อ

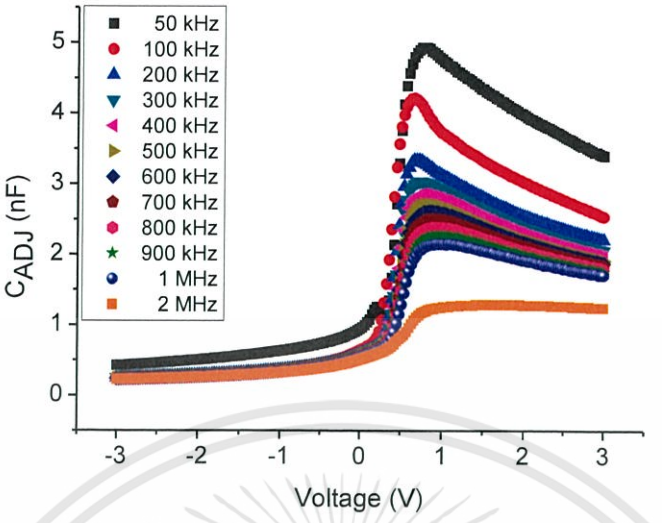
$$a = G_m - (G_m^2 + \omega^2 C_m^2)R_s$$

พีคของกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง G_{ADJ} กับ V จะแสดงถึงค่าสถานะผิวเชื่อมต่อ (D_{it}) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

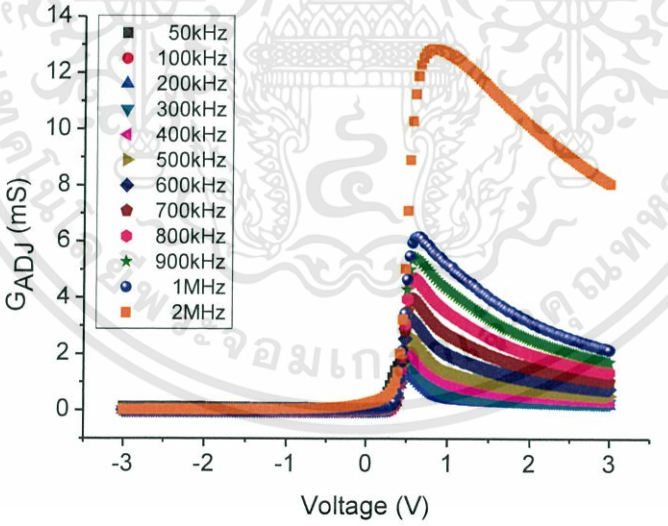
$$D_{it} = (\frac{2}{qA})[\frac{(G_{max}/\omega)}{(G_{max}/\omega)^2 C_{ox}^2 + (1 - C_m/C_{ox})^2}] \tag{4.23}$$

จากผลการทดลองพบว่า D_{it} มีค่าสูงสุดประมาณ 6.5×10^{12} ต่ออิเล็กตรอนโวลต์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้มีการรายงานไว้ แต่ข้อน่าสังเกตคือการกระจายของค่า D_{it} ที่ค่าความถี่ค่าต่างๆ คล้ายๆ กับกราฟระฆังคว่ำ โดยมีแบนด์วิดท์ (band width) ประมาณ 8×10^3 เฮิรตซ์ จึงสันนิษฐานว่าเป็นกับดักพาหะชนิดเดี่ยว (single trap) ที่เกิดขึ้นในบริเวณพร่องพาหะของรอยต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

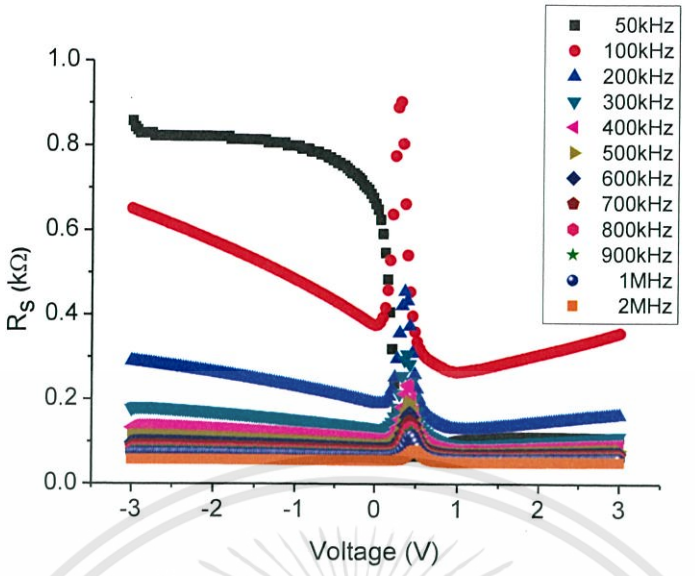


รูปที่ 4.66 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า C_{ADJ} กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 50 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 2 เมกกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

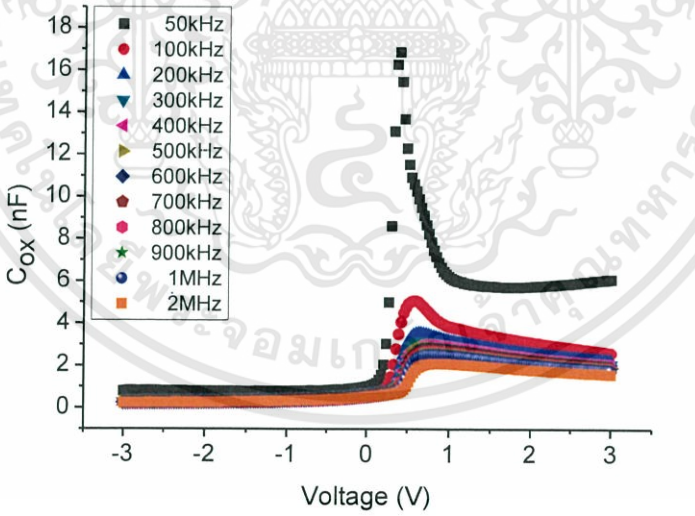


รูปที่ 4.67 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า G_{ADJ} กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 50 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 2 เมกกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

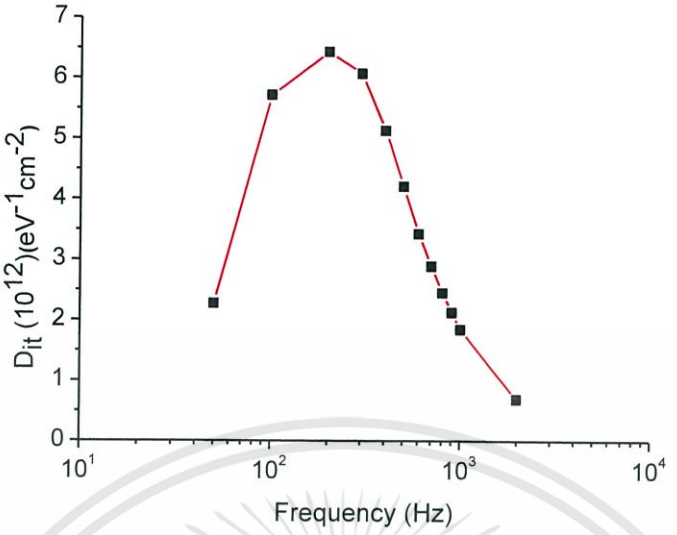


รูปที่ 4.68 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า R_S กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 50 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 2 เมกกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง



รูปที่ 4.69 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า C_{ox} กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดในช่วงความถี่ 50 กิโลเฮิรตซ์ ถึง 2 เมกกะเฮิรตซ์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.70 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า D_{it} กับ ความถี่เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

จากสมการความสัมพันธ์ของรอยต่อ p^+-n จะได้ว่า

$$\frac{1}{C^2} = \left(\frac{2}{\varepsilon_S q N_D A^2}\right)(V_{bi} - V) \qquad (4.24)$$

ความชันของกราฟ คือ $\frac{2}{q\varepsilon_S A^2 N_D}$ และ จุดตัดแกนนอนคือ V_i

ซึ่งค่า N_D คือ ความหนาแน่นของพาหะอิสระของ n-Si

ศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมรอยต่อ คือ

$$V_{bi} = V_i + kT \qquad (4.25)$$

กำแพงศักย์ คือ

$$\Phi_B(C-V) = V_{bi} + E_F - \Delta\Phi_b \qquad (4.26)$$

ระดับพลังงานเฟอร์มิ คือ

$$E_F = \frac{kT}{q}\ln\left(\frac{N_C}{N_D}\right) \qquad (4.27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนาแน่นของสถานะยังผล คือ

$$N_C = 4.82x10^{15}T^{3/2}\left(\frac{m_e^*}{m_0}\right)^{3/2} \quad (4.28)$$

โดยที่ $m_e^*(Si) = 0.19m_0$

กำแพงศักย์ที่ลดลงเนื่องจากผลของชอตต์กี คือ

$$\Delta\Phi = \left[\frac{qE_m}{4\varepsilon_S\pi}\right] \quad (4.29)$$

สนามไฟฟ้าสูงสุดในรอยต่อชอตต์กี คือ

$$E_m = \left[\frac{2qN_D V_i}{\varepsilon_S}\right]^{1/2} \quad (4.30)$$

ความกว้างของบริเวณพร่องพาหะ คือ

$$W_D = \sqrt{\frac{2\varepsilon_S(V_{bi} - V)}{qN_D}} \quad (4.31)$$

ศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มบาง คือ

$$\Psi_S = \frac{qN_D W_D^2}{2\varepsilon_S} \quad (4.32)$$

สำหรับสารกึ่งตัวนำ n-Si พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้คำนวณเป็นดังนี้

$N_C = 2.8\times10^{19}cm^{-3}$

$N_V = 1.04\times10^{19}cm^{-3}$

$m_e^* = 0.19m_0$

$\hat{I}_r = 11.7$

$\chi = 4.05eV$

$v_{th} = 2.3\times10^{7}cm/s$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ได้จากการคำนวณของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

Frequency (kHz)	V_i (V)	N_D (cm^{-3})	E_F (eV)	$\Delta\Phi_b$ (eV)	Φ_B(C-V) (eV)	W_D (cm)	ψ_S (eV)
50	0.38	6.22×10^{14}	0.277	0.010	0.673	9.17×10^{-5}	0.406
100	0.40	5.69×10^{14}	0.279	0.010	0.695	9.81×10^{-5}	0.426
200	0.51	5.33×10^{14}	0.281	0.011	0.806	1.14×10^{-4}	0.536
300	0.61	5.24×10^{14}	0.282	0.011	0.906	1.25×10^{-4}	0.636
400	0.63	5.16×10^{14}	0.282	0.011	0.927	1.28×10^{-4}	0.656
500	0.64	5.09×10^{14}	0.282	0.011	0.937	1.30×10^{-4}	0.666
600	0.65	5.05×10^{14}	0.283	0.011	0.947	1.31×10^{-4}	0.676
700	0.66	5.01×10^{14}	0.283	0.011	0.957	1.33×10^{-4}	0.686
800	0.67	4.99×10^{14}	0.283	0.011	0.968	1.34×10^{-4}	0.696
900	0.69	4.95×10^{14}	0.283	0.011	0.988	1.36×10^{-4}	0.716
1000	0.70	4.92×10^{14}	0.283	0.011	0.998	1.38×10^{-4}	0.726
2000	0.80	4.62×10^{14}	0.285	0.012	1.099	1.52×10^{-4}	0.826

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในตารางที่ 4.11

ความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ หาได้จากสมการ

$$N_d = \frac{2}{q\varepsilon_s A^2 (slope)}$$

ดังนั้น

$$N_d = \frac{2}{(1.6\times10^{-19})(11.7\times8.85\times10^{-14})(\pi\times0.15^2)^2(3.91\times10^{18})}$$

จะได้

$$N_d = 6.21\times10^{14}\,cm^{-3}$$

ระดับพลังงานเฟอมิ หาได้จากสมการ

$$E_F = \frac{kT}{q}\ln\left(\frac{N_C}{N_D}\right)$$

ดังนั้น

$$E_F = \frac{(1.38\times10^{-23})(300)}{(1.6\times10^{-19})}\ln\left(\frac{2.8\times10^{19}}{6.21\times10^{14}}\right)$$

จะได้

$$E_F = 0.277\ eV$$

ความสูงกำแพงศักย์ หาได้จากสมการ

$$\Phi_B(C\text{-}V) = V_{bi} + E_f - \Delta\Phi_B$$

ดังนั้น

$$\Phi_B(C\text{-}V) = 0.4058 + 0.2772 - 0.0102$$

จะได้

$$\Phi_B(C\text{-}V) = 0.6728\ eV$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนามไฟฟ้าสูงสุดในรอยต่อชอตต์กี หาได้จากสมการ

$$E_m = \left[\frac{2qN_D V_i}{\varepsilon_s}\right]^{\frac{1}{2}}$$

ดังนั้น

$$E_m = \left[\frac{2(1.6\times10^{-19})(6.21\times10^{14})(0.38)}{(1.03\times10^{-12})}\right]^{\frac{1}{2}}$$

จะได้

$$E_m = 8.57\times10^{3}\ \text{F/C}$$

กำแพงศักย์ที่ลดลงเนื่องจากผลของชอตต์กี หาได้จากสมการ

$$\Delta\Phi_B = \left[\frac{qE_m}{4\pi\pi_s}\right]^{\frac{1}{2}}$$

ดังนั้น

$$\Delta\Phi_B = \left[\frac{(1.6\times10^{-19})(8.57\times10^{3})}{4\pi\pi(1.0\times10^{-12})}\right]^{\frac{1}{2}}$$

จะได้

$$\Delta\Phi_B = 0.010\ \text{eV}$$

ความกว้างของบริเวณพร่องพาหะ หาได้จากสมการ

$$W_D = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s(V_{bi}-V)}{qN_D}}$$

ดังนั้น

$$W_D = \sqrt{\frac{2(1.03\times10^{-12})(0.4058-0)}{(1.6\times10^{-19})(6.21\times10^{14})}}$$

จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$W_D = 9.17\times10^{-5}\,\text{cm}$$

ศักย์ที่ผิวหน้าของฟิล์มบาง Cu_2O หาได้จากสมการ

$$\psi_s = \frac{qN_D W_D^2}{2\varepsilon_s}$$

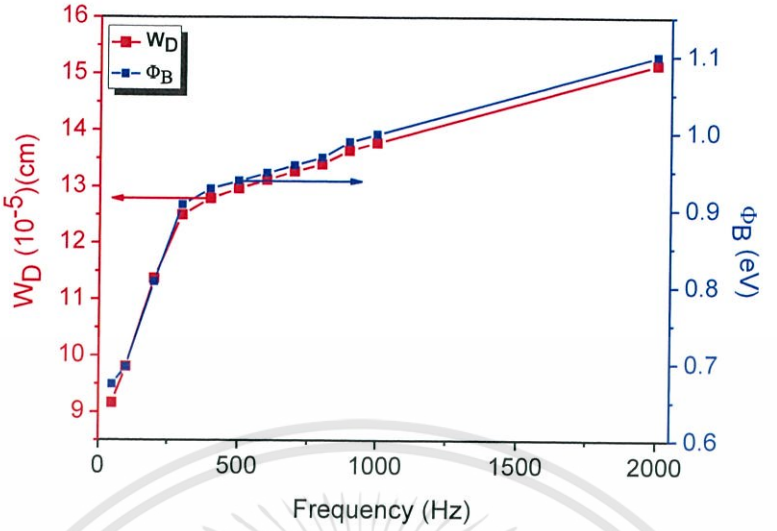
ดังนั้น

$$\psi_s = \frac{(1.6\times10^{-19})(6.21\times10^{14})(9.17\times10^{-5})^2}{2(1.03\times10^{-12})}$$

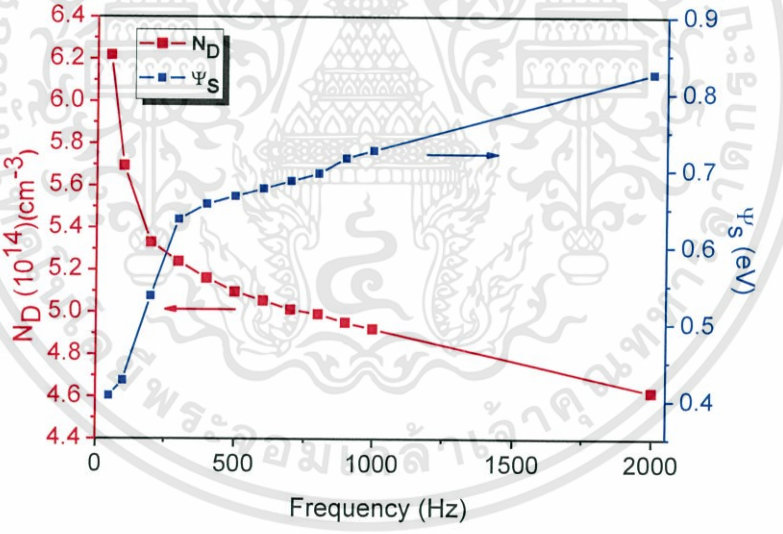
จะได้

$$\psi_s = 0.406\ \text{eV}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



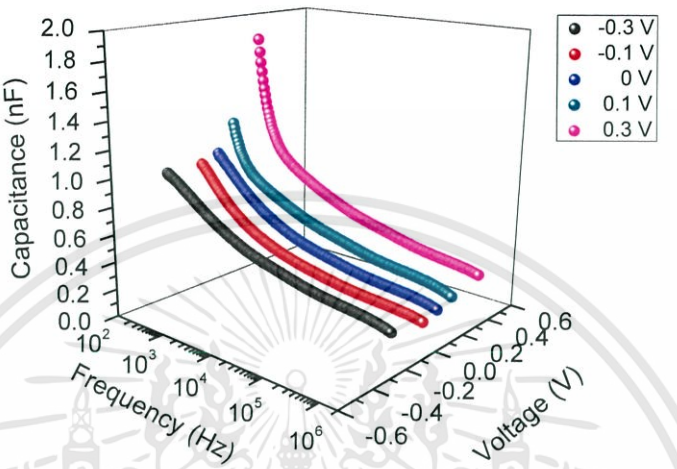
รูปที่ 4.71 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง W_D และ Φ_B กับความถี่ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง



รูปที่ 4.72 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง N_D และ Ψ_S กับความถี่ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.4 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้ากับความถี่เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.3 ถึง 0.3 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง



รูปที่ 4.73 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.3 ถึง 0.3 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

ที่ความถี่ต่ำๆ สถานะผิวเชื่อมต่อจะแสดงผลต่อการจับและปล่อยอิเล็กตรอน ดังนั้น ความจุไฟฟ้ารวม (C) ของรอยต่อพี-เอ็น ที่ความถี่ต่ำ จะเป็นดังความสัมพันธ์

$$C = C_D + C_{SS} \tag{4.33}$$

เมื่อ C_D คือ ความจุไฟฟ้าของบริเวณพร่องพาหะ (depletion region)

C_{SS} คือ ความจุไฟฟ้าของสถานะผิวเชื่อมต่อ

อย่างไรก็ตาม สถานะผิวเชื่อมต่อจะไม่ตอบสนองต่อสัญญาณไฟฟ้าที่ความถี่สูง ดังนั้น ความจุไฟฟ้ารวม (C) คือ

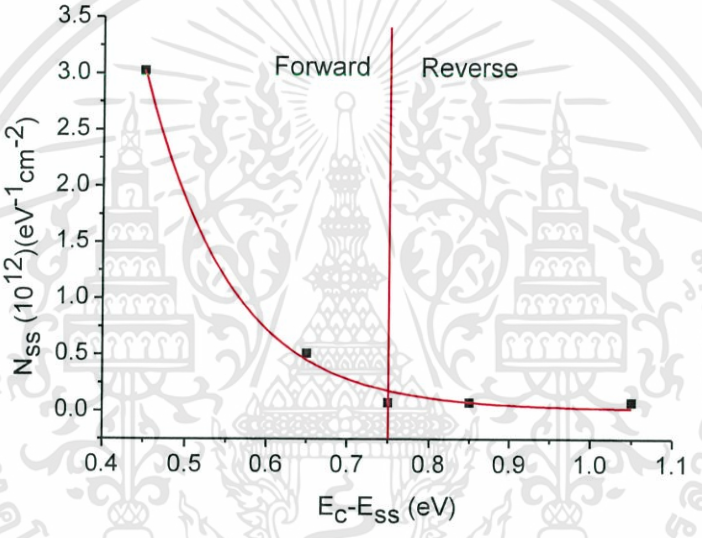
$$C = C_D \tag{4.34}$$

ความหนาแน่นของสถานะผิวเชื่อมต่อ (N_{SS}) ที่ความถี่ 20 เฮิรตซ์ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

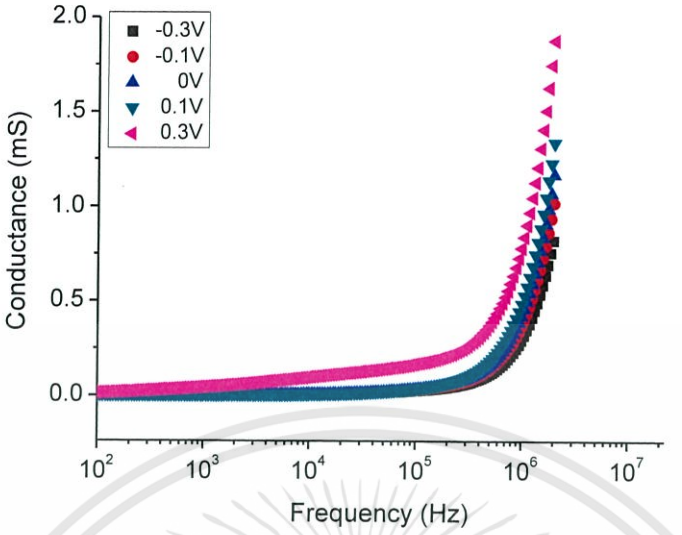
$$N_{SS} = \frac{C_{SS}}{qA} \tag{4.35}$$

เมื่อทำการไบแอสตรงให้กับไดโอดที่ได้ประดิษฐ์ขึ้นที่ขั้วสารกึ่งตัวนำ Cu_2O จะมีศักย์เป็นบวก (ซึ่งเป็นกรณีชุมนุมพาหะของรอยต่อ MOS ในอุดมคติ) ระดับเฟอร์มิจะเลื่อนขึ้นเข้าใกล้ขอบล่างสุดของแถบนำของ n-Si พบว่าความหนาแน่นของกับดักพาหะในชั้นออกไซด์บางๆจะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อทำการไบแอสกลับทาง ศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O จะเป็นลบระดับเฟอร์มิจะเลื่อนลง (ซึ่งเป็นกรณีชั้นกลับกลายของรอยต่อ MOS ในอุดมคติ) พบว่าความหนาแน่นของกับดักพาหะในชั้นออกไซด์บางๆ จะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว เร็วจนกระทั่งคงที่ค่า N_{SS} ที่สัมพันธ์กับ E_{SS}-E_C จะแสดงดังรูปที่ 4.74

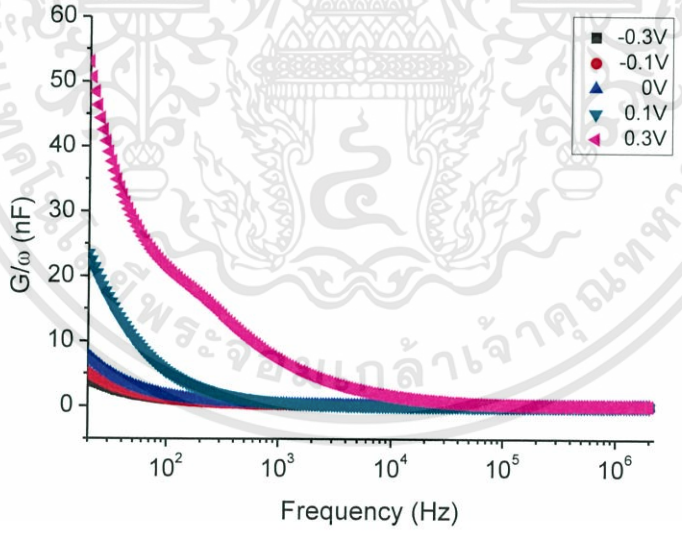


รูปที่ 4.74 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง N_{SS} กับ E_{SS}-E_C ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

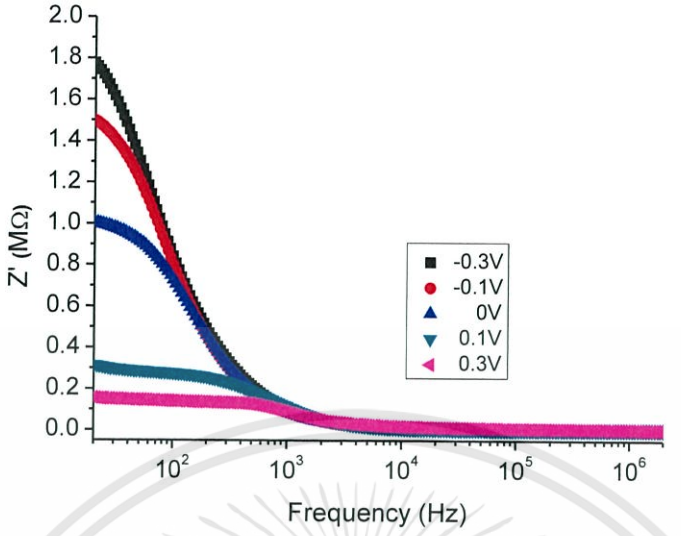


รูปที่ 4.75 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความนำไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.3 ถึง 0.3 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

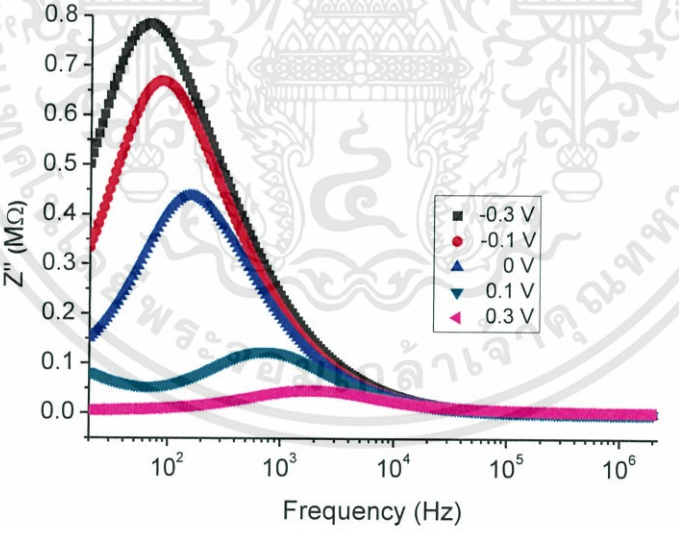


รูปที่ 4.76 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า G/ω กับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.3 ถึง 0.3 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

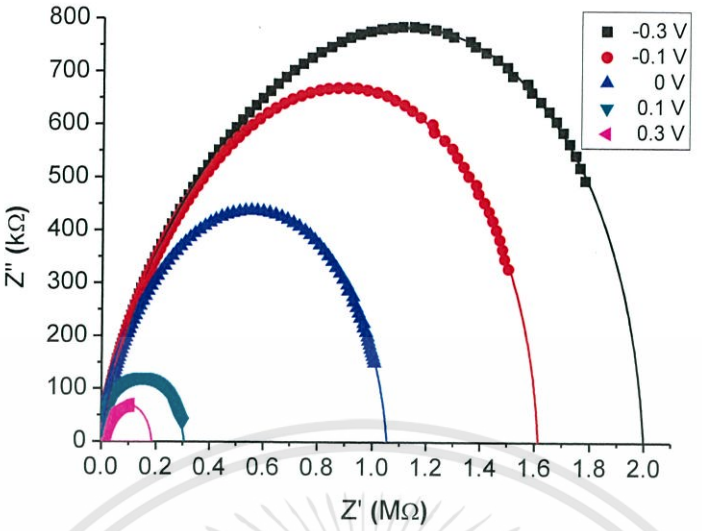


รูปที่ 4.77 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.3 ถึง 0.3 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง



รูปที่ 4.78 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.3 ถึง 0.3 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.79 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพและจำนวนจริง เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.3 ถึง 0.3 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

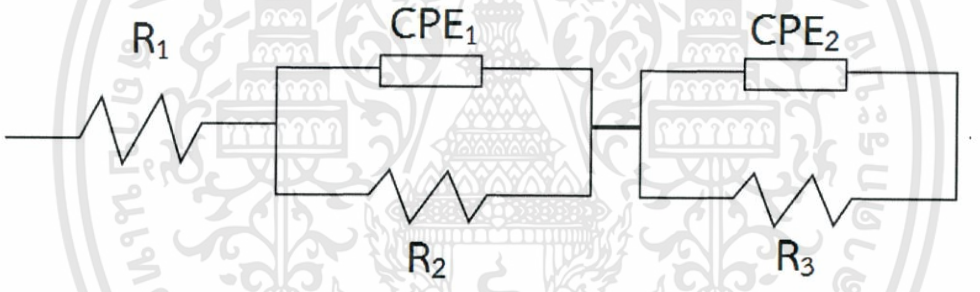
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

Voltage (V)	Simulated Parameters		Extracted Parameters						
			C_1 (F)	C_2 (F)	τ_1 (s)	τ_2 (s)	F_{max} (Hz)	ω (rad/s)	ωτ
-0.3	CPE_1	$R_1 = 1.00\times10^{6}\ \Omega$ $P_1 = 3.20\times10^{-9}$ $n_1 = 1.00$	3.20×10^{-9}	-	3.20×10^{-3}	-	63.09	396.40	1.266
	CPE_2	$R_2 = 9.90\times10^{5}\ \Omega$ $P_2 = 3.78\times10^{-9}$ $n_2 = 0.8051$	-	9.78×10^{-10}	-	9.68×10^{-4}	-	-	-
-0.1	CPE_1	$R_1 = 1.00\times10^{6}\ \Omega$ $P_1 = 2.35\times10^{-9}$ $n_1 = 0.9891$	2.20×10^{-9}	-	2.20×10^{-3}	-	75.86	476.64	1.046
	CPE_2	$R_2 = 6.14\times10^{5}\ \Omega$ $P_2 = 4.27\times10^{-9}$ $n_2 = 0.8192$	-	1.15×10^{-9}	-	7.07×10^{-4}	-	-	-
0	CPE_1	$R_1 = 3.64\times10^{5}\ \Omega$ $P_1 = 3.41\times10^{-9}$ $n_1 = 1.00$	3.41×10^{-9}	-	1.24×10^{-3}	-	118.49	744.49	0.920
	CPE_2	$R_2 = 6.92\times10^{5}\ \Omega$ $P_2 = 3.72\times10^{-9}$ $n_2 = 0.8302$	-	1.10×10^{-9}	-	7.62×10^{-4}	-	-	-
0.1	CPE_1	$R_1 = 2.89\times10^{5}\ \Omega$ $P_1 = 2.79\times10^{-9}$ $n_1 = 0.8459$	1.16×10^{-9}	-	3.36×10^{-4}	-	500.00	3141.60	1.053
	CPE_2	$R_2 = 2.16\times10^{5}\ \Omega$ $P_2 = 2.28\times10^{-9}$ $n_2 = 1$	-	2.28×10^{-9}	-	4.93×10^{-4}	-	-	-
0.3	CPE_1	$R_1 = 1.63\times10^{5}\ \Omega$ $P_1 = 1.87\times10^{-9}$ $n_1 = 0.8848$	6.51×10^{-10}	-	1.06×10^{-4}	-	1500.00	9424.78	0.999
	CPE_2	$R_2 = 2.14\times10^{4}\ \Omega$ $P_2 = 1.94\times10^{9}$ $n_2 = 0.9820$	-	2.31×10^{-9}	-	4.94×10^{-5}	-	-	-

จากตารางที่ 4.12 พบว่าเมื่อแรงดันไบแอสเพิ่มขึ้นจากการไบแอสย้อนกลับเป็นไบแอสตรง พบว่าความจุบริเวณพร่องพาหะ (C_1) มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย และเวลาผ่อนคลายของพาหะในบริเวณพร่องพาหะมีค่าลดลงด้วย แสดงว่าความกว้างของบริเวณพร่องพาหะ (depletion width) มีการเปลี่ยนแปลงตามค่าแรงดันไบแอส แต่สำหรับความจุของชั้นออกไซด์ (C_2) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อแรงดันดันไบแอสเพิ่มขึ้นจากการไบแอสย้อนกลับเป็นไบแอสตรง แสดงภายใต้สภาวะไบแอสตรง สิ่งประดิษฐ์จะอยู่ภายใต้เงื่อนไขการชุมนุมพาหะของรอยต่อ MOS ซึ่งกับดักพาหะในชั้นออกไซด์จะจับอิเล็กตรอนได้ในปริมาณที่มากขึ้น ดังนั้น C_2 จึงมีค่าเพิ่มขึ้นตามแรงดันไบแอสที่เพิ่มขึ้น แต่ τ_2 มีค่าลดลงเนื่องจาก R_3 มีค่าลดลง

จากกราฟความสัมพันธ์ $Z'' - Z'$ จะปรากฏเป็นกราฟรูปครึ่งวงกลมสองอันซ้อนกัน ขณะทำการไบแอสตรงให้กับไดโอดที่ได้ประดิษฐ์ขึ้น กราฟรูปครึ่งวงกลมจะแสดงให้เห็นสองพีคที่ความถี่ต่ำและที่ความถี่สูง ซึ่งพีคที่ความถี่ต่ำจะสัมพันธ์อยู่กับสถานะผิวเชื่อมต่อของรอยต่อชอตต์กี ส่วนพีคที่ความถี่สูงจะสัมพันธ์อยู่กับบริเวณพร่องพาหะของรอยต่อพี-เอ็น ซึ่งวงจรสมมูลสำหรับใช้ในการจำลอง (simulation) หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จะแสดงยังรูปที่ 4.80



รูปที่ 4.80 แสดงผลการจำลองแบบของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

เมื่อ R_1 คือ ความต้านทานอนุกรมที่มีผลมาจากความต้านทานของเนื้อสารกึ่งตัวนำ รวมทั้งความต้านทานของผิวสัมผัสที่ขั้วไฟฟ้า

CPE_1 คือ อีลิเมนต์เฟสคงที่ (constant phase element) ของรอยต่อพี-เอ็น

R_2 คือ ความต้านทานชันท์ของรอยต่อพี-เอ็น

CPE_2 คือ อีลิเมนต์เฟสคงที่ของชั้นออกไซด์

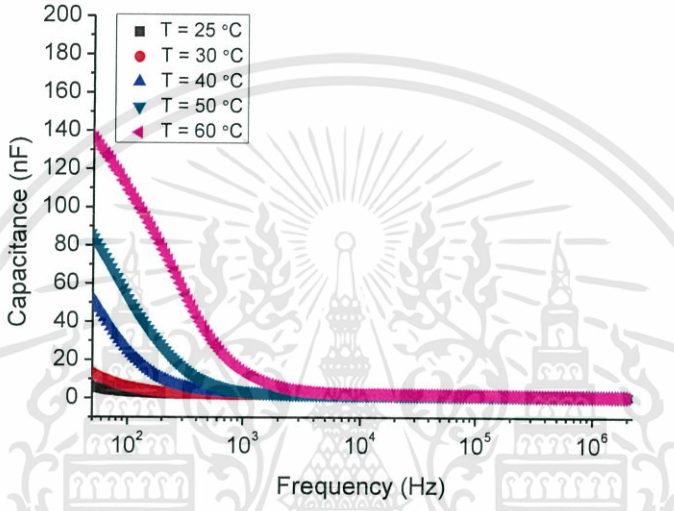
R_3 คือ ความต้านทานชันท์ของชั้นออกไซด์

จากการจำลองแบบพบว่า ที่ความถี่ต่ำกราฟของการจำลองแบบไม่แนบสนิทดีกับกราฟ $Z'' - Z'$ ที่ได้จากการทดลอง ซึ่งเป็นผลมาจากการมีสถานะผิวเชื่อมต่อในชั้น SiO_2 บางๆที่เกิดระหว่างรอยต่อของสารกึ่งตัวนำของ Cu_2O กับ n-Si (100) อีกทั้งสถานะผิวเชื่อมต่อนี้เป็นระดับพลังงานที่ต่อเนื่อง ดังนั้นจึงไม่สามารถเลือกวงจรสมมูลที่ใช้จำลองแบบกับสถานะผิวเชื่อมต่อได้ ส่วน

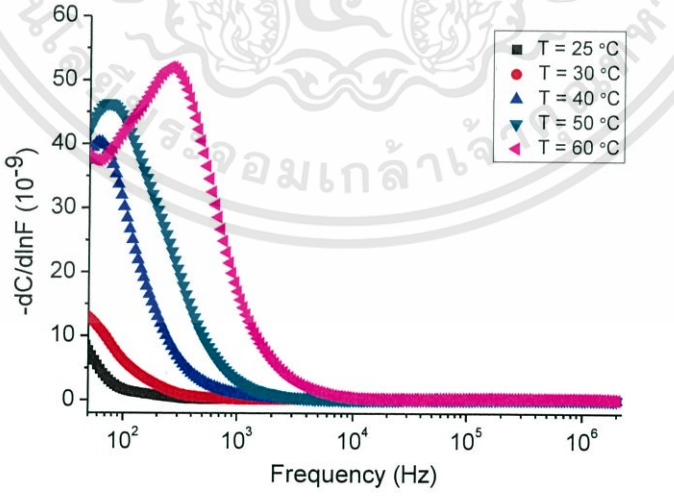
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ความถี่สูงกราฟของการจำลองแบบแนบสนิทดีกับกราฟ $Z'' - Z'$ ที่ได้จากการทดลอง แสดงว่าเป็นค่าของบริเวณพร่องพาหะที่ปรากฏอยู่ในเนื้อสารของ n-Si (100) ซึ่งต่ออนุกรมอยู่กับชั้น SiO_2 บางๆ

4.6.5 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้าและความนำไฟฟ้ากับความถี่เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 – 60 องศาเซลเซียสของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

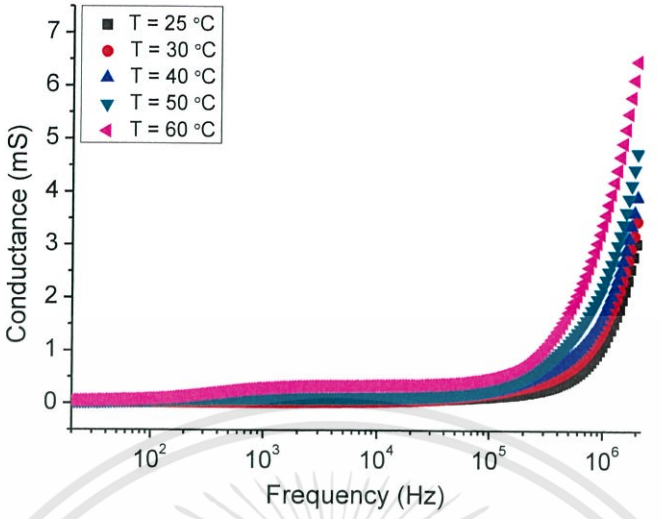


รูปที่ 4.81 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 60 องศาเซลเซียสของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

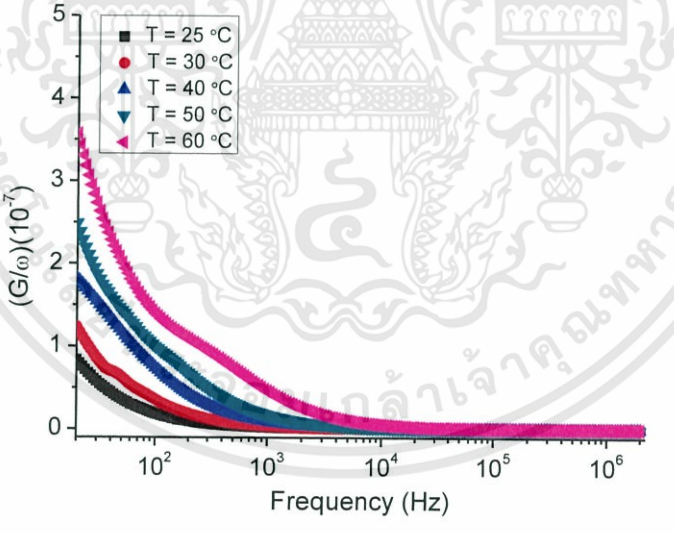


รูปที่ 4.82 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า –dC/dlnF กับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 60 องศาเซลเซียสของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

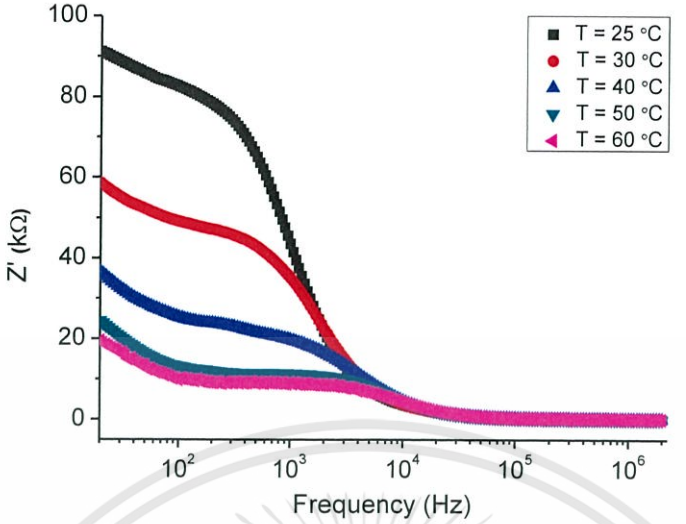


รูปที่ 4.83 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความนำไฟฟ้ากับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 60 องศาเซลเซียสของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

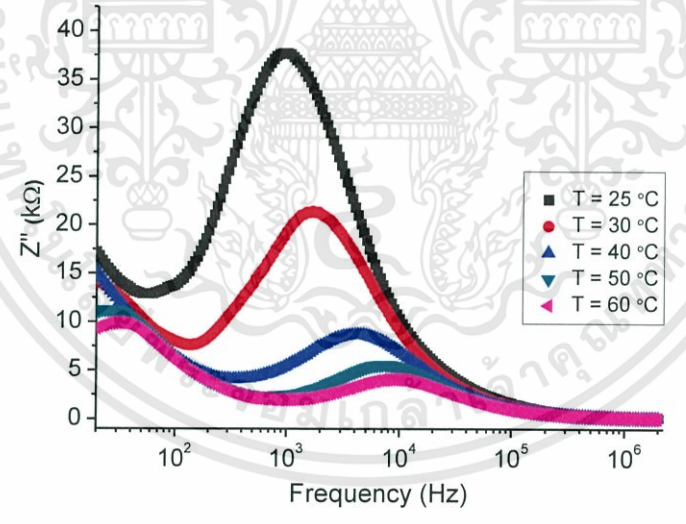


รูปที่ 4.84 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า G/ω กับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 60 องศาเซลเซียสของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

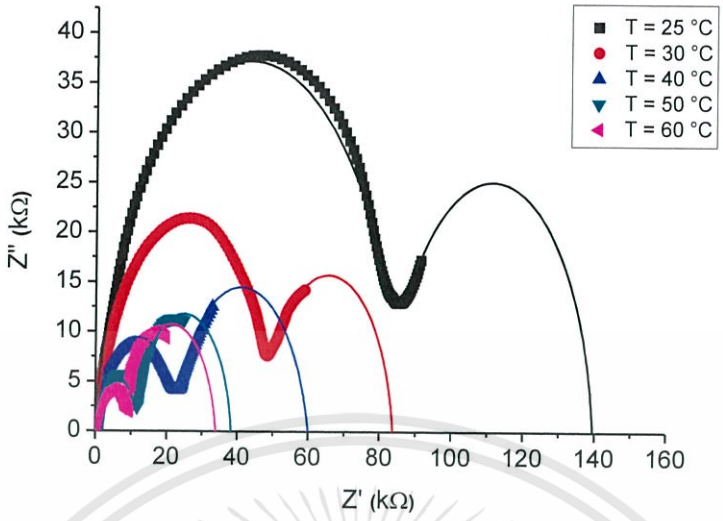


รูปที่ 4.85 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 60 องศาเซลเซียสของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง



รูปที่ 4.86 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 60 องศาเซลเซียสของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.87 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจินตภาพและจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนกับความถี่ เมื่อทำการวัดในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 60 องศาเซลเซียสของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.13 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

Temperature (°C)	Simulated Parameters		Extracted Parameters						
			C_1 (F)	C_2 (F)	τ_1(s)	τ_2(s)	F_{max} (Hz)	ω (rad/s)	ωτ
25	CPE_1	R_1 = 85105 Ω P_1 = 3.82×10^{-9} n_1 = 0.9156	1.82×10^{-9}	-	1.55×10^{-4}	-	1096.50	6889.51	1.068
	CPE_2	R_2 = 36878 Ω P_2 = 4.11×10^{-7} n_2 = 0.9986	-	4.08×10^{-7}	-	1.51×10^{-2}	10.96	68.86	1.038
30	CPE_1	R_1 = 48395 Ω P_1 = 4.47×10^{-9} n_1 = 0.9037	1.82×10^{-9}	-	8.82×10^{-5}	-	1737.80	10918.92	0.962
	CPE_2	R_2 = 35162 Ω P_2 = 5.65×10^{-7} n_2 = 0.9072	-	3.78×10^{-7}	-	1.33×10^{-2}	12.02	75.52	1.005
40	CPE_1	R_1 = 22224 Ω P_1 = 6.52×10^{-9} n_1 = 0.8709	1.76×10^{-9}	-	3.91×10^{-5}	-	4365.20	27427.36	1.072
	CPE_2	R_2 = 37680 Ω P_2 = 6.72×10^{-7} n_2 = 0.8276	-	3.12×10^{-7}	-	1.18×10^{-2}	14.45	90..81	1.069
50	CPE_1	R_1 = 11257 Ω P_1 = 2.71×10^{-9} n_1 = 0.9590	1.73×10^{-9}	-	1.96×10^{-5}	-	8317.60	52261.02	1.023
	CPE_2	R_2 = 26996 Ω P_2 = 4.41×10^{-7} n_2 = 0.9115	-	2.87×10^{-7}	-	7.75×10^{-3}	19.05	119.72	0.928
60	CPE_1	R_1 = 8540Ω P_1 = 3.37×10^{-9} n_1 = 0.9490	1.92×10^{-9}	-	1.64×10^{-5}	-	9463.00	59457.78	0.975
	CPE_2	R_2 = 25308Ω P_2 = 5.50×10^{-7} n_2 = 0.8928	-	3.29×10^{-7}	-	8.34×10^{-3}	17.38	109.20	0.910

พลังงานกระตุ้นหาได้จากความสัมพันธ์

$$\omega_0 = \xi_0 T^2 \exp\left(\frac{-E_a}{kT}\right) \tag{4.36}$$

จัดรูปแบบใหม่จะได้ว่า

$$\ln\left(\omega_0 / T^2\right) = \frac{-E_a}{k}\left(\frac{1}{T}\right) + \ln\xi_0 \tag{4.37}$$

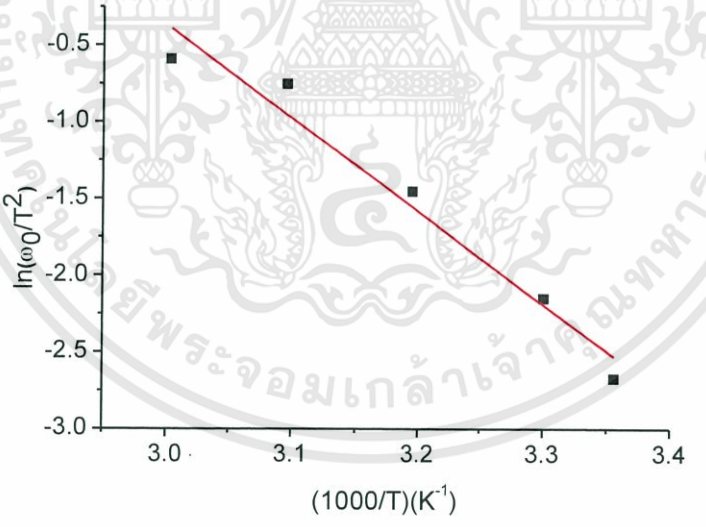
และหาค่า σ_T ได้จากความสัมพันธ์

$$\sigma_T = \frac{\xi_0}{2v_{th}N_C} \tag{4.38}$$

เมื่อ ξ_0 คือ พารามิเตอร์ของการปล่อยอิเล็กตรอนออกจากกับดักประจุ

σ_T คือ พื้นที่ภาคตัดขวางในการจับอิเล็กตรอนของประจุ

v_{th} คือ ความเร็วของอิเล็กตรอนเนื่องจากพลังงานความร้อน = 2.30×10^7 เซนติเมตร/วินาที



รูปที่ 4.88 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\omega_0/T^2$ กับ $1000/T$ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.14 ค่าพลังงานกระตุ้น และ ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

Method	Temperature (°C)	ω_0	E_a (eV)	ξ_0 ($s^{-1}K^{-2}$)	σ_t (cm^2)
$Z^{'}$-$Z^{''}$	25	-	0.523	5.375×10^{7}	7.803×10^{-20}
	30	-			
	40	374.916			
	50	472.005			
	60	1581.178			
	70	1774.100			
	80	2233.482			

ช่องว่างแถบพลังงานแบบตรง (direct energy gap) ของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O มีค่าเท่ากับ 2.51 อิเล็กตรอนโวลต์ จากข้อมูลดังกล่าวนี้สามารถนำไปเขียนโครงสร้างแถบพลังงานของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ได้ โดยมีศักย์ไฟฟ้าตกคร่อมรอยต่อ (built-in potential) ซึ่งประมาณได้จากจุดตัดแกน x ของกราฟ $1/C^2$ กับ V ที่ความถี่ 1 เมกะเฮิรตซ์ ค่ายังผลของความหนาแน่นของสถานะพลังงานในแถบวาเลนซ์ของ Cu_2O คือ

$$N_v = 2[\frac{2\pi m_h^* kT}{h^2}]^{3/2}.$$

$$= 4.83\times10^{15}T^{3/2}[\frac{m_h^*}{m_o}]^{3/2}$$

มวลยังผลของโฮลในแถบวาเลนซ์ของ Cu_2O มีค่ากับ $0.34m_0$ ดังนั้น N_V ที่อุณหภูมิห้องจะมีค่าดังนี้คือ

$$N_v = (4.83\times10^{15})(300)^{3/2}[\frac{0.34m_o}{m_o}]^{3/2}$$

$$= 4.98\times10^{18} \text{ ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร}$$

จากการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ พบว่าความหนาแน่นของโฮลในฟิล์มบาง Cu_2O มีค่าประมาณ 1×10^{16} ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ดังนั้นระดับเฟอร์มิที่อุณหภูมิห้องสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E_F - E_V = kT\ln(\frac{N_V}{N_a})$$

$$= (0.0258)\ln[\frac{4.98\times10^{18}}{1\times10^{16}}]$$

$$= 0.16 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

ส่วนค่ายังผลของความหนาแน่นของสถานะพลังงานในแถบนำ (N_c) และในแถบวาเลนซ์ของสารกึ่งตัวนำ Si เท่ากับ 2.8×10^{19} และ 1.04×10^{19} ต่อลูกบาศก์เซนติเมตรตามลำดับ ดังนั้นระดับเฟอร์มิที่อุณภูมิห้องของ Si สามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์

$$E_C - E_F = kT\ln(\frac{N_C}{N_d}) \quad (4.39)$$

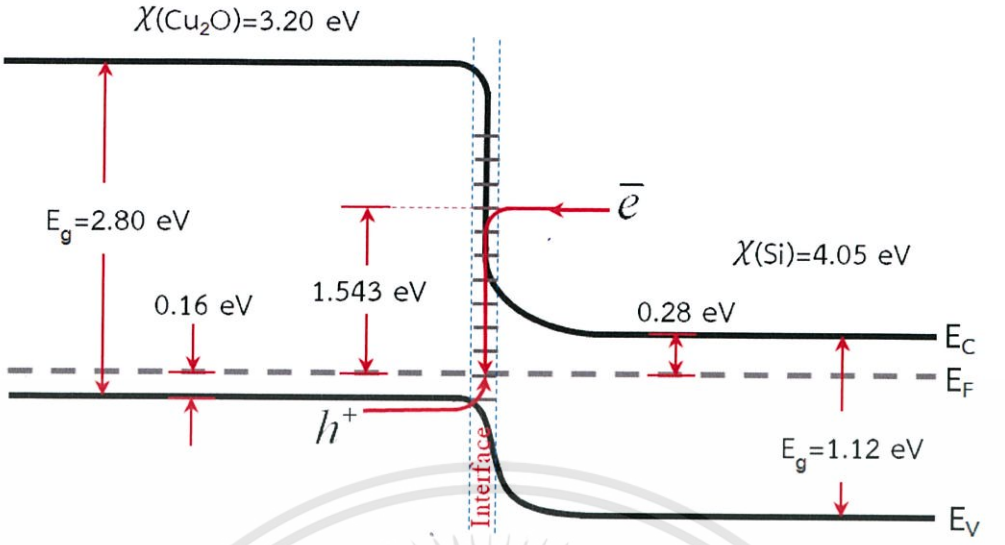
จากการวัดความสัมพันธ์ระหว่างความจุ-แรงดันไฟฟ้า พบว่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในแถบนำของ n-Si มีค่าประมาณ 1.0×10^{14} ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ดังนั้นระดับเฟอร์มิของ n-Si คือ

$$E_C - E_F = (0.0258)\ln[\frac{2.8\times10^{19}}{6.21\times10^{14}}]$$

$$= 0.28 \text{ อิเล็กตรอนโวลต์}$$

จากข้อมูลดังกล่าวสามารถที่จะนำไปเขียนแผนภาพแถบพลังงานของรอยต่อวิวิธพันธุ์ระหว่าง p-Cu_2O/n-Si (100) ได้ดังนี้คือ

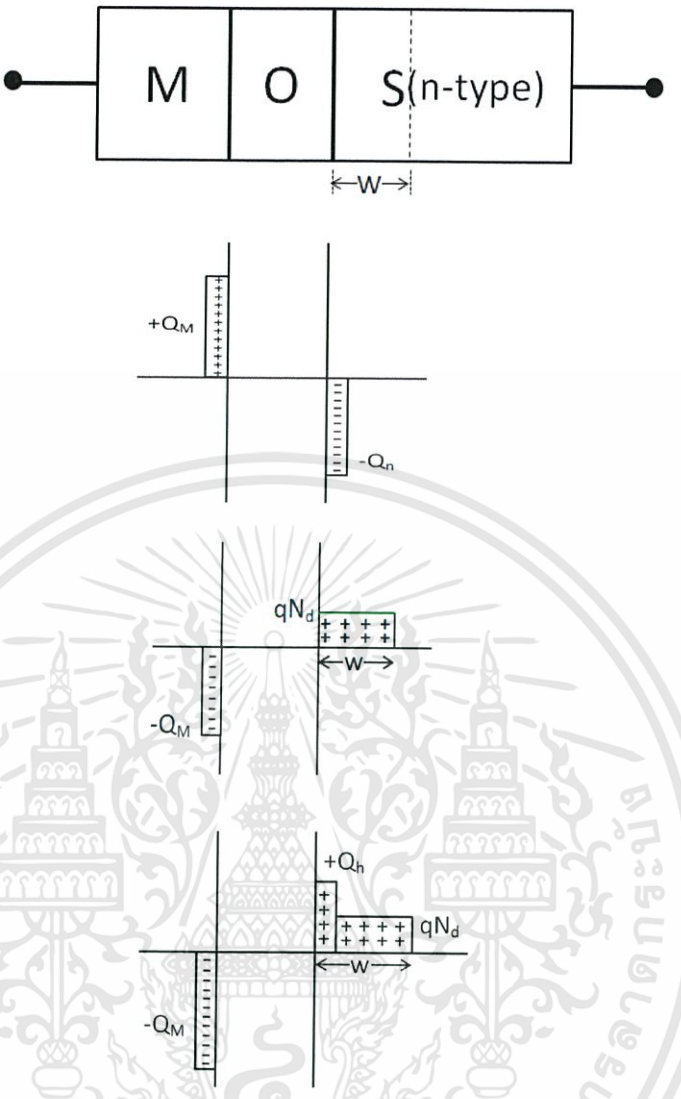
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.89 แสดงแผนภาพแถบพลังงานของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

จากแผนภาพแถบพลังงานพบว่าพาหะที่ไหลข้ามรอยต่อภายใต้แรงดันไบแอสตรงส่วนใหญ่เป็นกระแสโฮลซึ่งการไหลจากด้าน p-Cu_2O ผ่านกำแพงศักย์สูงประมาณ 0.6 อิเล็กตรอนโวลต์ ค่าความสูงกำแพงศักย์นี้สอดคล้องดีกับศักย์ตกคร่อมรอยต่อวิวิธพันธุ์ที่วัดจากวิธีความจุ-แรงดันไฟฟ้า ส่วนอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำ n-Si จะแสดงปรากฏการณ์ขุดอุโมงค์ทะลุผ่านกำแพงศักย์ แล้วเข้ารวมตัวกับโฮลที่ระดับเฟอร์มิ โดยมีพลังงานกระตุ้นเท่ากับ 1.543 อิเล็กตรอนโวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.90 แสดงแผนภาพการกระจากของประจุไฟฟ้าของรอยต่อ MOS ในอุดมคติ ภายใต้เงื่อนไข
ก. ชุมนุมพาหะ (accumulation)
ข. พร่องพาหะ (depletion)
ค. ชั้นกลับกลาย (inversion)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในบทที่ 5 นี้เป็นการสรุปผลการดำเนินงานวิจัยในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นทั้งแผ่นกระจกสไลด์แผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) โดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง จากนั้นทำการศึกษาสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ ทำการวิเคราะห์ผลและสรุปผลพร้อมทั้งรายงานปัญหาที่พบ และข้อเสนอแนะ เพื่อเป็นแนวทางในการทำการวิจัยต่อไป

5.1 สรุปผลการทดลองของการศึกษาไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

5.1.1 ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับทั้งที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์และแผ่นผลึกเดี่ยวของสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอค-ทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.3, 0.5, 0.8, 1.2 ,1.5 และ 1.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที มีลักษณะเป็นสีน้ำตาลอ่อนจนถึงน้ำตาลเข้มและมีคุณสมบัติยึดติดกับแผ่นฐานรองรับได้ดี และสามารถประดิษฐ์เป็นไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O /n-Si (100) ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 6.0 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ซึ่งฟิล์มที่ได้มีลักษณะเป็นสีน้ำตาลเข้มออกดำมีคุณสมบัติยึดติดกับแผ่นฐานรองรับได้ดี

การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ด้วยวิธีการวัดสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์พบว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.3, 0.5, 0.8, 1.2 ,1.5 และ 1.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทีนั้นไม่ปรากฏระนาบใดๆ แสดงให้เห็นว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เตรียมขึ้นในอัตราการไหลของออกซิเจน 0.3, 0.5, 0.8, 1.2 ,1.5 และ 1.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาทีนั้นเป็นอะมอร์ฟัส

การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) พบว่าผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O มีกลุ่มก้อนของเกรนกระจายอยู่บนผิวหน้าของฟิล์มบางอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งลักษณะของเกรนที่พบมีขนาดเล็กใกล้เคียงกันในทุกอัตราการไหลของออกซิเจน

การศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงพบว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานสามารถคำนวณได้จากค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.3, 0.5, 0.8, 1.2 ,1.5 และ 1.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ซึ่งค่าช่องว่างแถบพลังงานที่ได้มีค่าเท่ากับ 2.70, 2.75, 2.80, 2.84, 2.85 และ 2.86 อิเล็กตรอนโวลต์ ตามลำดับ

การศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอค-ทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง พบว่าค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่าอยู่ในช่วง 10^1-10^2 โอห์ม-เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีแนวโน้มลดลงจนมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 7.601×10^{1} โอห์ม-เซนติเมตร ที่อัตราการไหลของออกซิเจนเท่ากับ 1.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

จากปรากฏการณ์ฮอลล์ พบว่าค่าสัมประสิทธ์ของฮอลล์และสภาพคล่องของฮอลล์มีแนวโน้มที่แปรผกผันกัน โดยที่ปริมาณค่าความหนาแน่นของพาหะนั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนกระทั่งมีค่าสูงสุดที่อัตราการไหลของออกซิเจน 0.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที แต่เมื่ออัตราการไหลของออกซิเจนเพิ่มขึ้นค่าปริมาณความหนาแน่นของพาหะจะมีแนวโน้มลดลง

5.1.2 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

5.1.2.1 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20-300 เคลวิน ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง ทำได้โดยการวัดค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง และที่อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้แรงดันไฟฟ้าในช่วง -3 ถึง 3 โวลต์พบว่ามีการเรียงกระแสไฟฟ้าแบบไดโอดทั่วไป โดยมีค่าแรงดันไฟฟ้าขีดเริ่ม (threshold voltage) อยู่ที่ 0.7 โวลต์ ซึ่งกลไกการนำกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ตรงบริเวณไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O /n-Si (100) ที่ช่วงแรงดันไฟฟ้า -0.5 ถึง 1.0 โวลต์ พิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า ln$I$ กับ ln$V$ ของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ที่อุณหภูมิห้อง พบว่าแรงดันไฟฟ้าน้อยกว่า 0.14 โวลต์ กลไกการนำไฟฟ้าเป็นไปตามความสัมพันธ์ $I = k V^{m}$ โดยที่ m มีค่าเท่ากับ 1.619 ซึ่งเป็นกลไกการนำไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัด โดยประจุค้างที่เกิดจากกับดักพาหะในชั้นออกไซด์บางๆ ตรงบริเวณรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O กับ n-Si (100) ที่มีการกระจายแบบเอกซ์โพเนนเชียล ส่วนช่วงแรงดันไฟฟ้า 0.14 ถึง 0.60 โวลต์ กลไกการนำไฟฟ้าเป็นไปตามกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน และช่วงแรงดันไฟฟ้ามากกว่า 0.60 โวลต์ เป็นไปตามกลไกการนำไฟฟ้าชนิดถูกจำกัดโดยประจุค้างที่เกิดจากกับดักพาหะชนิดระดับพลังงานเดี่ยว (single trap) ที่ปรากฏในเนื้อสารกึ่งตัวนำ n-Si (100) เนื่องจากความชัน m มีค่าเท่ากับ 1.773 เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า ln$I$ กับ V จะได้ค่าแฟกเตอร์อุดมคติและค่ากระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับ และนำไปใช้เป็นค่าเริ่มต้นในการจำลองข้อมูล การหาค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรมด้วยวิธีของชวงนั้นได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $dV/d\ln I$ กับ I ซึ่งจากกราฟนี้จะได้ค่าแฟกเตอร์อุดมคติและค่าความต้านทานไฟฟ้าอนุกรม และจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า $H(I)$ กับ I จะได้ค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่แรงดันไบแอสเป็นศูนย์

ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) โดยวัดความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า กับ แรงดันไบแอสช่วง -0.5 ถึง 1.0 โวลต์ เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิต่ำในช่วงอุณหภูมิ 20–300 เคลวิน พบว่าที่ค่าแรงดันไฟฟ้าเท่ากัน กระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลให้อิเล็กตรอนมีพลังงานสูงมากขึ้น และ แรงดันไฟฟ้าขีดเริ่มของไดโอดมีค่ามากขึ้น เมื่ออุณหภูมิลดลง การศึกษากลไกของกระแสไฟฟ้าที่ไหลข้ามกำแพงศักย์ตรงบริเวณไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ที่ช่วงอุณหภูมิ 20–300 เคลวิน พบว่าที่อุณหภูมิ 20 เคลวิน ที่แรงดันไฟฟ้าน้อยกว่า 0.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โวลต์ (region I) เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าที่เป็นกลไกการนำไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้างที่มีการกระจายแบบเอกซ์โพเนนเชียล เนื่องจากความชัน m มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 1.488 เป็น 3.535 เมื่ออุณหภูมิลดลงจาก 300 เคลวินเป็น 20 เคลวินส่วนช่วงแรงดันไฟฟ้า 0.15 - 0.45 โวลต์ (region II) เป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าที่เป็นไปตามกลไกเทอร์มิออนิกอิมิสชัน และที่แรงดันไฟฟ้ามากกว่า 0.45 โวลต์ (region III) จะเป็นกลไกการนำกระแสไฟฟ้าชนิดกระแสถูกจำกัดโดยประจุค้างที่เกิดจากกับดักประจุในชนิดระดับพลังงานเดี่ยว เนื่องจากความชัน m มีค่าเพิ่มจาก 1.773 เป็น 2.553 เมื่ออุณหภูมิลดลงจาก 300 เคลวิน เป็น 20 เคลวิน จากผลการทดลองพบว่า กระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับมีค่าน้อยลงตามอุณหภูมิที่ลดลงและมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น

5.1.2.2 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้า และ ความนำไฟฟ้า กับ ความถี่คงที่หลายๆ ค่า เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -3 ถึง 3 โวลต์ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้า กับ ค่าแรงดันไฟฟ้าเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องเมื่อนำมาเขียนใหม่ให้อยู่ในรูปส่วนกลับของค่าความจุไฟฟ้ายกกำลังสอง กับ ค่าแรงดันไฟฟ้า โดยเลือกช่วงที่มีความสัมพันธ์ที่มีลักษณะเป็นกราฟเชิงเส้นแล้วลากเส้นตรงลงมาตัดแกนของค่าแรงดันไฟฟ้า โดยจุดตัดแกนของค่าแรงดันไฟฟ้า คือ V_i ซึ่งก็คือ ค่าศักย์ตกคร่อมของรอยต่อ (V_{bi}) ได้ส่วนความชันของกราฟสามารถนำมาใช้ในการคำนวณหาค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ (N_d) ได้

5.1.2.3 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้า และ ความนำไฟฟ้า กับความถี่เมื่อทำการไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.3 ถึง 0.3 โวลต์ ที่อุณหภูมิห้องของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้า และ ความนำไฟฟ้า กับความถี่เมื่อไบแอสแรงดันไฟฟ้าในช่วง -0.3 ถึง 0.3 โวลต์ พบว่ากับดักนั้นจะอยู่กันอย่างหนาแน่นที่บริเวณขอบล่างของแถบนำแล้วจะค่อยๆ ลดลงที่ค่าระดับพลังงานค่าห่างจากแถบนำมากขึ้น และยังพบว่าแรงดันไฟฟ้านั้นมีอิทธิพลต่อระดับเฟอร์มิซึ่งจะเลื่อนขึ้นตามค่าแรงดันที่ไบแอสที่ขั้วของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O เป็นบวก (ซึ่งเป็นกรณีชุมนุมพาหะของรอยต่อ MOS ในอุดมคติ) และระดับเฟอร์มิจะเลื่อนลงตามแรงดันไบแอสที่ขั้วของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O เป็นลบ (ซึ่งเป็นกรณีชั้นกลับกลายของรอยต่อ MOS อุดมคติ) และ ณ จุดที่ระดับเฟอร์มิพาดผ่านนั้นจะส่งผลให้กับดักที่อยู่บริเวณนั้นแสดงอิทธิพลออกมาโดยการจับพาหะที่อยู่บริเวณระดับพลังงานเฟอร์มิและถ้าต้องการให้กับดักประจุที่บริเวณผิวเชื่อมต่อนั้นทำการคายประจุออกมาต้องทำการป้อนความถี่ค่าหนึ่งที่สอดคล้องกับความถี่เฉพาะของกับดักนั้น

จากการศึกษาค่าอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีที่แรงดันไบแอส -0.3 ถึง 0.3 โวลต์ ในช่วงความถี่ 20 เฮิรตซ์ถึง 2 เมกะเฮิรตซ์ พบว่าค่าจำนวนจริงของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนมีแนวโน้มลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้นจาก 20 เฮิรตซ์ เป็น 2 เมกะเฮิรตซ์ ส่วนพีคของจำนวนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เชิงซ้อนมีขนาดลดลงและเลื่อนไปทางความถี่ที่เพิ่มขึ้น จากการฟิตกราฟอิมพีแดนซ์ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรสมมูล RC อย่างง่ายจำนวน 2 อันต่ออนุกรมกัน การแทนที่ความจุ (C) ด้วย CPE เหมาะสมกว่า ทำให้ฟิตกราฟได้ง่ายกว่าและพบว่า CPE_1 เป็นของบริเวณพร่องพาหะของรอยต่อวิวิธพันธุ์ ส่วน CPE_2 เป็นของชั้นออกไซด์บางๆ

5.1.2.4 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้า และความนำไฟฟ้า กับความถี่เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิสูงในช่วง 25-60 องศาเซลเซียสของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้า และ ความนำไฟฟ้า กับความถี่เมื่อทำการไบแอสแรงดันอุณหภูมิสูงในช่วง 25-60 องศาเซลเซียสพบว่าเมื่อมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าความถี่เฉพาะของกับดักประจุที่บริเวณผิวเชื่อมต่อจะเลื่อนออกไปทางความถี่ที่สูงขึ้น และค่าพลังงานกระตุ้นที่คำนวณได้นั้นมีค่าเท่ากับ 0.523 อิเล็กตรอนโวลต์ สรุปว่าพลังงานกระตุ้นนี้คือระดับพลังงานของกับดักพาหะชนิดระดับพลังงานเดี่ยวที่ปรากฏในเนื้อสารของผลึกเดี่ยว n-Si (100) พารามิเตอร์ของการปล่อยอิเล็กตรอนออกจากกับดักประจุเท่ากับ 5.38×10^{7} ต่อวินาทีต่อเคลวินยกกำลังสองและพื้นที่ของศูนย์กลางการจับพาหะมีค่าเท่ากับ 7.80×10^{-20} ตารางเซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

ขวัญกมล สุวรรณเทศ. 2557. "กลไกการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x}." โครงงานพิเศษตามหลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

งามนิตย์ วงษ์เจริญ. 2531. "การศึกษารอยต่อแบบโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ ของคอปเปอร์อินเดียมไดซีลีไนด์." วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

งามนิตย์ วงษ์เจริญ และฐิตินัย แก้วแดง. 2553. "การประดิษฐ์ฟิล์มบาง CdO ที่เจือด้วย Al สำหรับขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์." รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2556. "ความไม่เป็นเชิงเส้นทางไฟฟ้าของเซรามิกของสารกึ่งตัวนำ $In_xWO_3 (0 \leq x \leq 0.05)$ และการประยุกต์." รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2551. "การเตรียมฟิล์มบาง CdTe โดยวิธีระเหิดในระยะประชิดเพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์." รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

งามนิตย์ วงษ์เจริญ ฐิตินัย แก้วแดง และ ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2558. "การเตรียมฟิล์มบาง CuO โดยวิธีปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะ Cu ที่ได้จากการสปัตเตอริงเพื่อประยุกต์ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์." รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง, ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ และชัยสิงห์ ภู่รักษ์เกียรติ. 2543. "การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์." รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ฐิตินัย แก้วแดง, ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ และชัยสิงห์ ภู่รักษ์เกียรติ. 2545. "การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์." รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฐิตินัย แก้วแดง. 2530."การเตรียมและศึกษาสมบัติของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์อินเดียมไดซีลีไนด์." วิทยานิพนธ์ วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ฐิตินัย แก้วแดง. 2545."เอกสารประกอบการสอนวิชา ฟิสิกส์ของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ." ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฐิตินัย แก้วแดง และงามนิตย์ วงษ์เจริญ. 2544. "เอกสารประกอบการสอนวิชา ฟิสิกส์และเทคโนโลยีของเซลล์แสงอาทิตย์." ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2549. "การประดิษฐ์ฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่เจือด้วยอะตอมฟลูออรีนสำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์." รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฐิตินัย แก้วแดง และงามนิตย์ วงษ์เจริญ. 2551. “การเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธีอาบสารละลายเคมีภายใต้คลื่นไมโครเวฟเพื่อประดิษฐ์เป็นหน้าต่างรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฐิตินัย แก้วแดง งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2552. “การพัฒนาขั้วไฟฟ้าด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CdS/CdTe.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ และทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2554. “การประดิษฐ์ขั้วไฟฟ้าด้านหลัง ชนิดใหม่ที่เหมาะสมกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CdS/CdTe.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฐิตินัย แก้วแดง งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2557. “การประดิษฐ์และการศึกษาสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS/CuO.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิงห์ ภู่รักษ์เกียรติ. 2558.“การเตรียมฟิล์มบาง CuO โดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีสปัตเตอริงเพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อวิวิธ พันธุ์ CdS/CuO.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิงห์ ภู่รักษ์เกียรติ. 2545.“การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี Zn เพื่อประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิงห์ ภู่รักษ์เกียรติ. 2546.“การประดิษฐ์ฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี Zn ในปริมาณสูงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์.” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ภารุจ บัณฑิธาดาวิทย์. 2539.“สภาวะความดันแก๊สที่เหมาะสมสำหรับการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ด้วยวิธีสปัตเตอริง.” วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

วรรณนิศา สุขกรี, วลัยพัชร ใจเรือน และ ศวิตา ทัศนิยม. 2556. “การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางคอปเปอร์ออกไซด์ที่เตรียมได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยความร้อนของฟิล์มโลหะCu.” โครงงานพิเศษตามหลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สุรสิงห์ ไชยคุณ, นิรันดร์ วิทิตอนันนต์, สกุล ศรีญาณลักษณ์ และ จักรพันธ์ ถาวรธิรา. 2545.“การออกแบบและการสร้างอันบาลานซ์แมกนีตรอนคาโทด สำหรับระบบสปัตเตอริง.” รายงานวิจัยเสนอต่อกองทุนตันตราภรณ์ มหาวิทยาลัยบูรพา จังหวัด ชลบุรี

พรหมพร ชอุ่มชัยศิริ, สุธินี สุรเกษมสวัสดิ์. 2558. “การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำคอปเปอร์ออกไซด์โดยวิธีรีแอ็คทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง.” โครงงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

จีร์ปภัส ด้วงสะดี, วรารัตน์ สวัสดี. 2557. “การศึกษาสมบัติรอยต่อวิวิธพันธุ์ของสารกึ่งตัวนำ p-SnS/n-Si ที่เตรียมโดยวิธีการระเหิดสารเคมีในระยะประชิด.” โครงงานพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิภรณ์ จุไธสง. 2559. “การประดิษฐ์และการศึกษาสมบัติของรอยต่อวิวิธพันธุ์ระหว่างฟิล์มบางของซิงค์ซีลีไนด์กับผลึกเดี่ยวซิลิคอน.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

นพณัฐ เดชะคำภู. 2559. “โครงสร้างผลึก สมบัติทางแสง และสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ $Cd_{1-x}Zn_xSe$ ที่เตรียมโดยวิธีระเหิดสารเคมีในระยะประชิด.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

อดิศร นพรุจิกุล. 2555. “สมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อวิวิธพันธุ์ CdS กับ $CuAlO_2$.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

Aradhakrishnan, A. Baskaran Beena, B. 2014. “Structural and Optical Absorption Analysis of CuO Nanoparticles.”Ind. J. Adv. Chem. Sci, 2(2):158-161.

Arockiasamy, J.S.K. and Irudayaraj, J. 2016. “Natural Dye Sensitized CuO Nanorods for Luminescence Applications.” *Ceramics International.* 42:6198-6205.

Chen, A. Long, H. Li, X. Li, Y. Yang, G. and Lu, P. 2009. “Controlled Growth and Characteristics of Single-Phase Cu_2O and CuO Films by Pulsed Laser Deposition.” Vacuum. 83:927-930.

Fterich, M. Nasr, F.B. Lefi, R. Toumi, M. and Guermazi, S. 2016. “Effects of Concentration of Hexamethylenetetramine in Structure, Microstructure and Optical Properties of CuO Nanoparticles Synthesized by Hydrothemal Route.” *Mater. Sci. Semicon. Processing.* 43:114-122.

Gan, J. Venkatachalapathy, Svensson, B.G. and Monakhov, E.V. 2015. “Influence of Target Power on Properties of Cu_xO Thin Films Prepared by Reactive Radio Frequency Magnetron Sputtering.” Thin Solid Films, 594 Part B :250-255.

Guo, D. Wang, L. Du, Y. Ma, Z. and Shen, L. 2015. “Preparation of Octahedral Cu_2O Nanoparticles by a Green Route.” *Mater. Lett.* 160:541-543.

Gao, F. Liu, X.J. Zhang, J.S Sond, M.Z. and Li, N. 2012. “Photovoltaic Properties of the p-CuO/n-Si Heterojunction Prepared Through Reactive Magnetron Sputtering.” *Journal of Applied Physics111.* 3 : 084507.

Guo, L. Zhao, M. Zhuang, D.M. Cao, M. Ouyang, L. Li, X. Sun, R. and Gao, Z. 2015. “Influences of Cuo Phase on Electrical and Optical Performance of Cu_2O Films Prepared by Middle Frequency Magnetron Sputtering.” *Applied Surface Science.* 359 : 36-40.

Huang, Q. Li, J. and Bi, X. 2015. “The Improvemenent of Hole Transport Property and Optical Band Gap for Amorphous Cu_2O Films.” J. Alloys compd. 647:585-589.

Kardarian, K. Nunes, D. Sberna, P.M. Ginsburg, A. Keller, D.A. Pinto, J.V. Deuermeier, J. Anderson, A.Y. Zaban, A. Martins, R. and Fortunato, E. 2016. “Effect of Mg Doping on Cu_2O Thin Films and Their Behavior on the TiO_2/Cu_2O Heterojunction Solar Cells.” *Sol. Energy & Sol. Cells.* 147:27-36.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Kaviyarasan, K. Anandan, S. Mangalaraja, R.V. Sivasankar, T. and Ashokkumar, M. 2016. "Sonochemical Synthesis of Cu_2O Nanocubes for Enhanced Chemiluminescence Applications." *Ultrasonics Sonochemistry.* 29:388-393.

Mageshwari, K. and Park J. 2016. "Photoresponse Characteristics of p-Si/n-$Cu_xIn_{1-x}O$ Heterojunction Diode Prepared by Sol-Gel Spin Coating." *Material Science in Semiconductor Processing.* (46): 46-52.

Ooi, P.K. Ng, S.S. Abdullah, M.J. Abu Hassan, H. and Hassan, Z. 2013. Effects of Oxygen Percentage on the Growth of Copper Oxide Thin Films by Reactive Radio Frequency Sputtering." Mater. Chem Phys. 140:243-248.

Yakuphanoglu, F. 2010. "Electrical Characterization and Device CharacteriZation of ZnO Microring Shaped Films by Sol-Gel method." *Journal of Alloys and Compounds.* 507: 184-189.

Zhu, H. Zhang, J. Li, C. Pan, F. Wang, T. and Huang, B. 2009. "Cu_2O Thin Films Deposited by Reactive Direct Current Magnetron Sputtering." *Thin Solid Films.* 517: 5700-5704.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

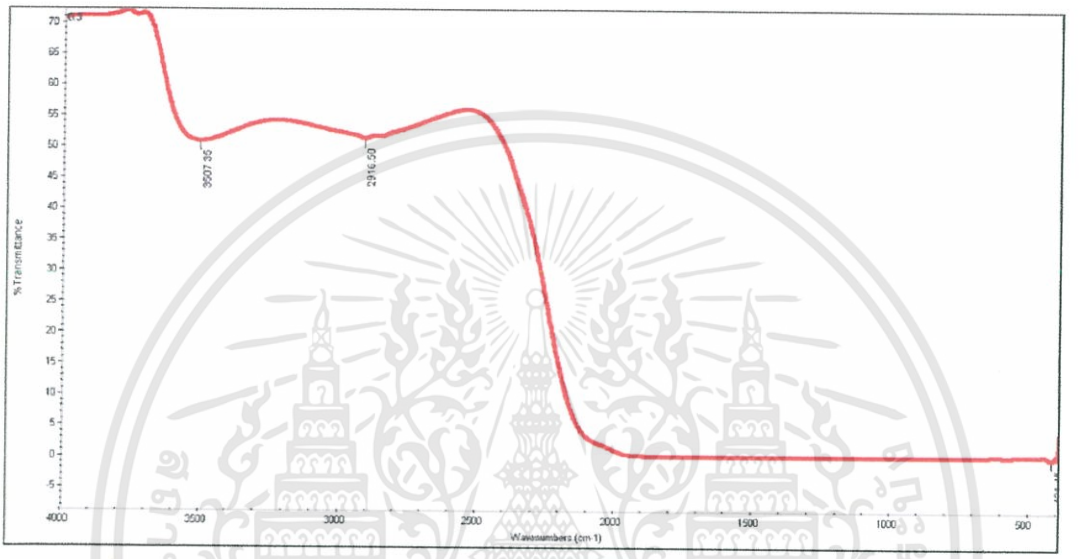
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

การวัดการดูดกลืนแสงของสารในช่วงอินฟาเรด (FTIR) ของ Cu_2O

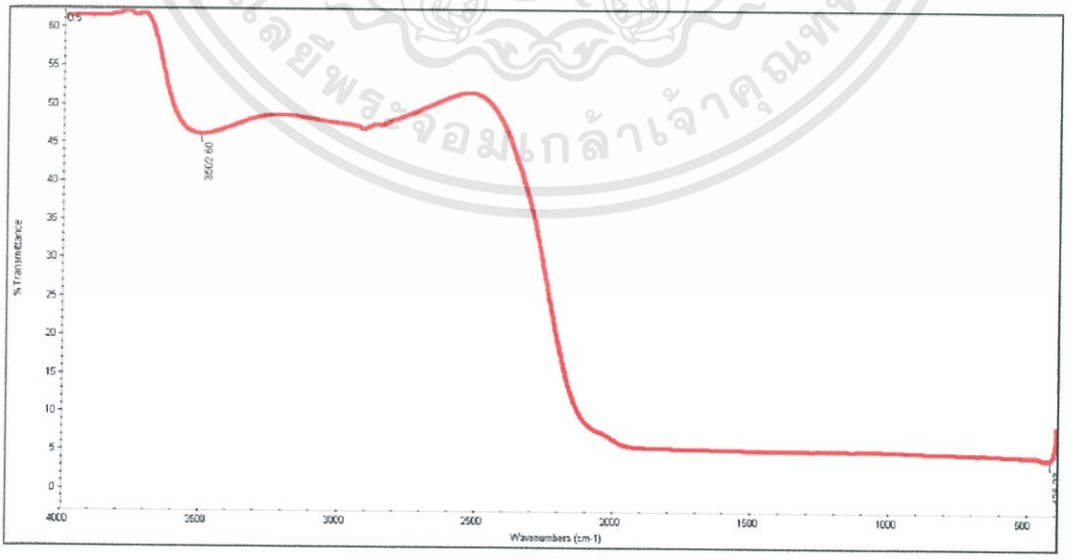
ข้อมูลการวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณสารโดยการวัดการดูดกลืนแสงของสารในช่วงอินฟาเรด (FTIR) ของ Cu_2O

0.3 sccm



รูปแสดงผลการการวัดการดูดกลืนแสงของสารในช่วงอินฟาเรด (FTIR) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 0.3 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

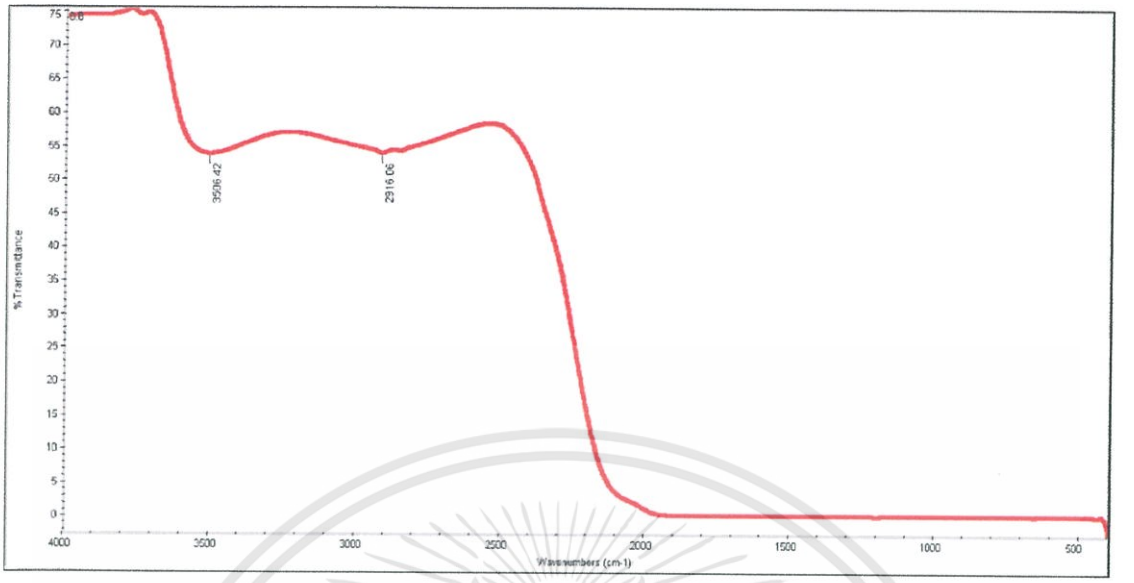
0.5 sccm



รูปแสดงผลการการวัดการดูดกลืนแสงของสารในช่วงอินฟาเรด (FTIR) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 0.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

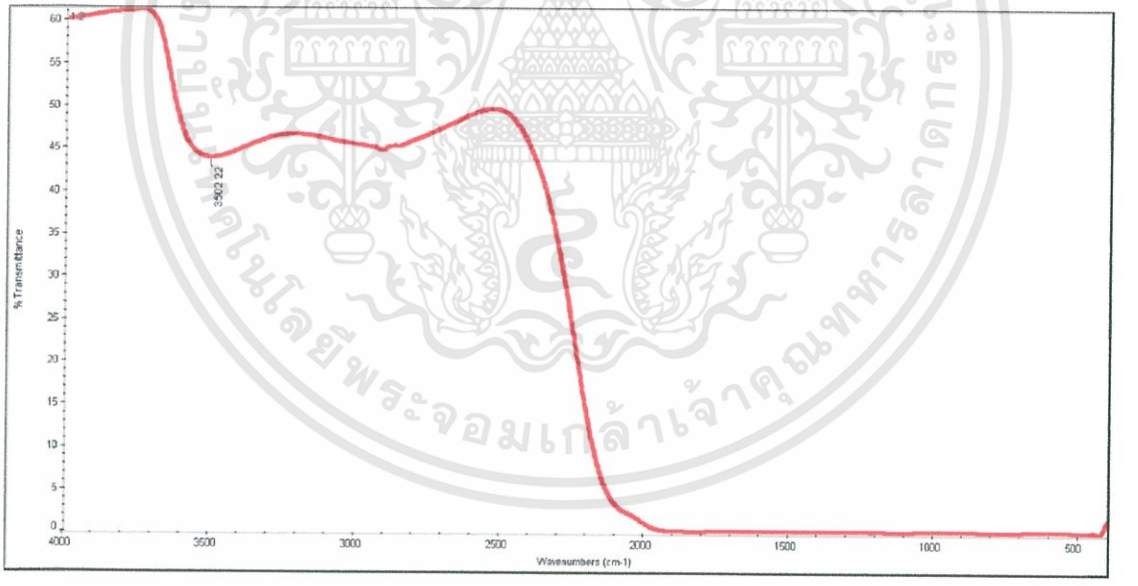
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0.8 sccm



รูปแสดงผลการการวัดการดูดกลืนแสงของสารในช่วงอินฟาเรด (FTIR) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 0.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

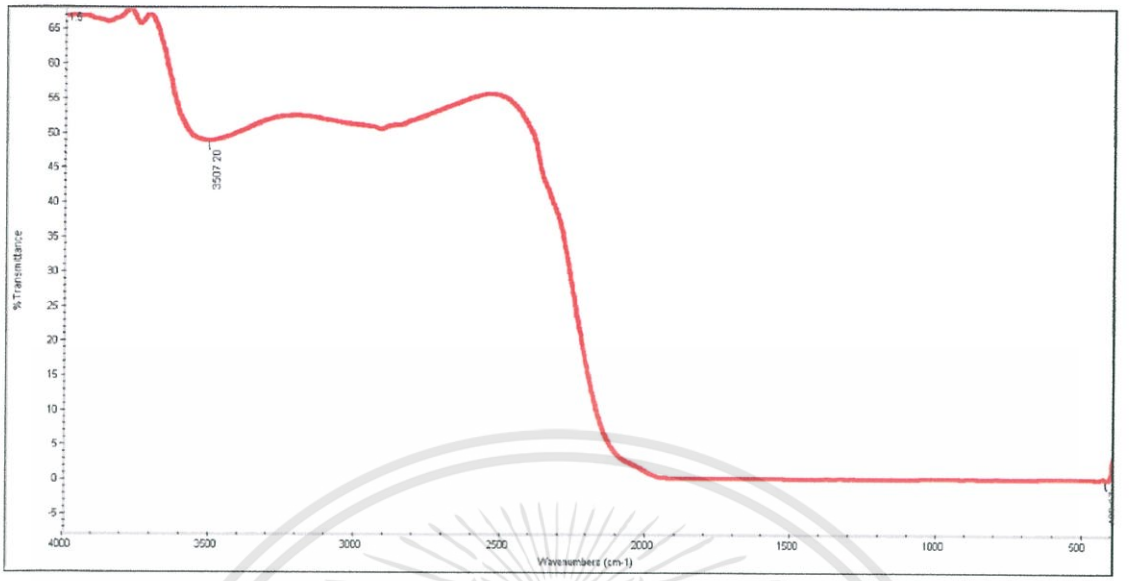
1.2 sccm



รูปแสดงผลการการวัดการดูดกลืนแสงของสารในช่วงอินฟาเรด (FTIR) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1.2 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

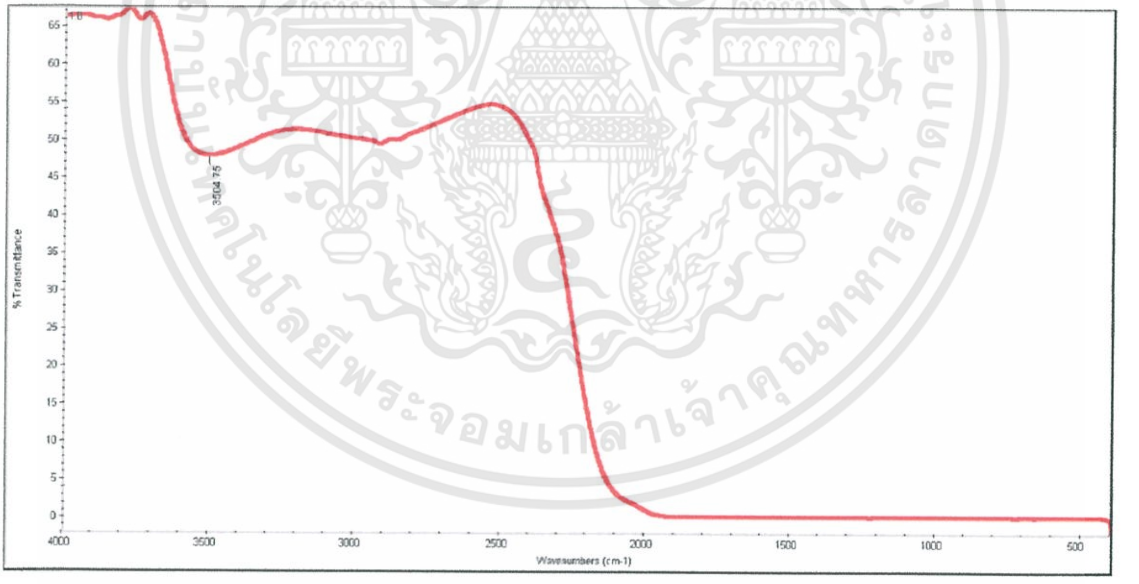
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 sccm



รูปแสดงผลการการวัดการดูดกลืนแสงของสารในช่วงอินฟาเรด (FTIR) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

1.8 sccm



รูปแสดงผลการการวัดการดูดกลืนแสงของสารในช่วงอินฟาเรด (FTIR) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ Cu_2O ที่อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข
การศึกษาการทำขั้วไฟฟ้ารับแสง

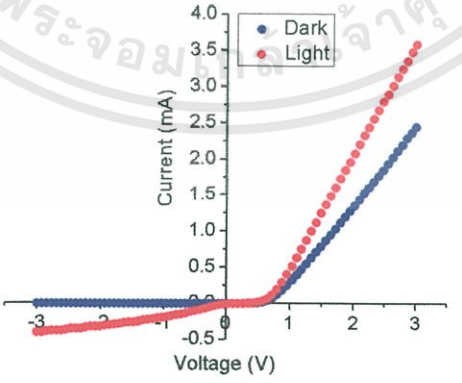
เมื่อทำการทดสอบหรือจำลองการทำงานของรอยต่อพี-เอ็นแล้วการสร้างขั้วไฟฟ้ากริดด้านบนของเซลล์แสงอาทิตย์รับแสงมีความสำคัญมากต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ ลักษณะของขั้วไฟฟ้าด้านรับแสงจะเป็นลวดลายที่เว้นช่องว่างไว้เพื่อให้แสงตกกระทบผิวหน้ามากที่สุด ซึ่งจะแบ่งเส้นขั้วไฟฟ้าออกเป็น 2 ชนิด

1. เส้นฟิงเกอร์ (Fingers) คือ เส้นที่มีขนาดเล็กและมีจำนวนมากจะทำหน้าที่ในการรวบรวมกระแสไฟฟ้าเพื่อผลิตอิเล็กตรอนไปยังเส้นบัสบาร์
2. เส้นบัสบาร์ (Bus bar) คือ เส้นที่มีขนาดใหญ่และมีจำนวนไม่มากมักจะออกแบบตั้งฉากกับเส้นฟิงเกอร์จะทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าศูนย์รวมและเพื่อต่อสายไปยังเซลล์อื่นๆ

ระยะห่างของเส้นฟิงเกอร์ และเส้นบัสบาร์แต่ละเส้นอาจมีค่าคงที่ หรือเปลี่ยนแปลงตามความเหมาะสมของขนาดแผ่นเซลล์



รูปของแม่พิมพ์ที่ใช้ในการพิมพ์ลาย (print screen) ขั้วไฟฟ้า



รูปแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากระแสไฟฟ้า (I) กับ แรงดันไฟฟ้า (V) ที่ช่วงแรงดันไฟฟ้า -3 ถึง 3 โวลต์ เมื่อทำวัดที่อุณหภูมิห้องภายใต้การฉายแสงและไม่ฉายแสงของไดโอดที่มีรอยต่อแบบวิวิธพันธุ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ p-Cu_2O/n-Si (100) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการรีแอคทีฟดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน นางสาวเมธิชา ยาวิไชย
เกิดเมื่อ วันที่ 7 กันยายน 2537
ภูมิลำเนา จังหวัดสระแก้ว
ประวัติการศึกษา ปี พ.ศ. 2555 จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย
โรงเรียนสระแก้ว
ปี พ.ศ. 2556 เข้ารับการศึกษาระดับอุดมศึกษา หลักสูตรฟิสิกส์ประยุกต์
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อผู้เขียน นายปาฏิหาริย์ สมตน
เกิดเมื่อ วันที่ 23 สิงหาคม 2537
ภูมิลำเนา จังหวัดยโสธร
ประวัติการศึกษา ปี พ.ศ. 2555 จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย
โรงเรียนยโสธรพิทยาคม
ปี พ.ศ. 2556 เข้ารับการศึกษาระดับอุดมศึกษา หลักสูตรฟิสิกส์ประยุกต์
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้