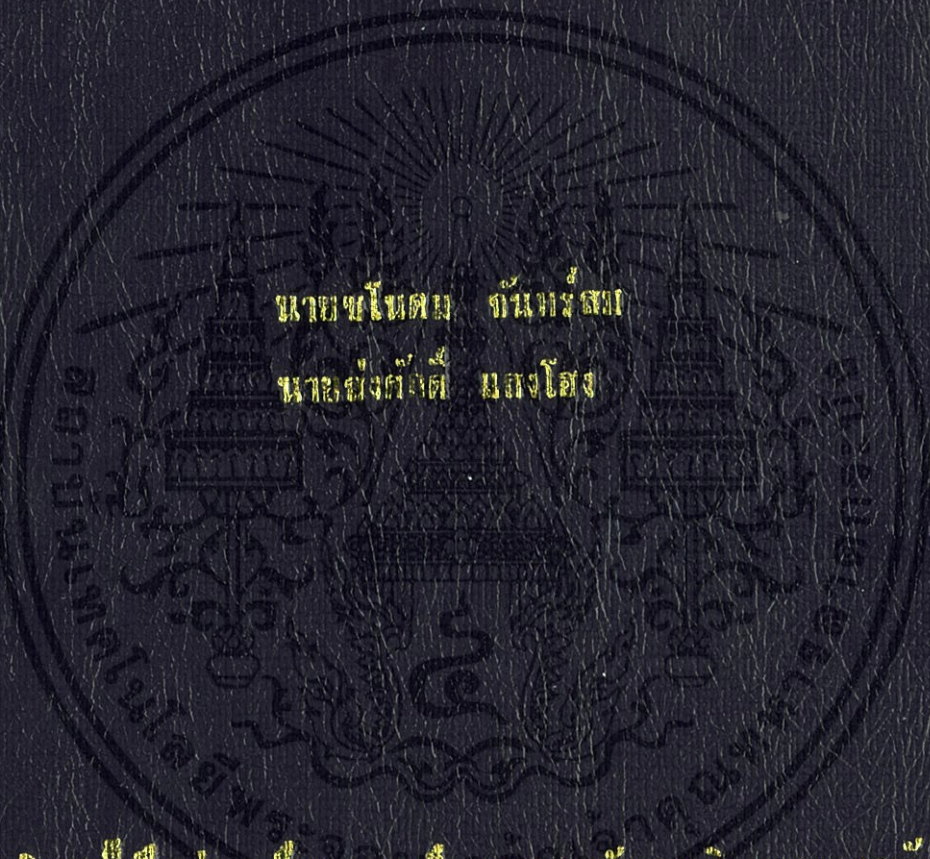


การเตรียมฟิล์มบาง S₈S โดยวิธีซัลไฟไรเซชัน
PREPARATION OF S₈S FILM FILMS BY
SULFURIZATION METHOD



นายชโยดม จันทร์สุภา
นายอังกฤตย์ มงคล

โครงการพิเศษเป็นงานหนึ่งของภาควิชาเคมีหลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

การเตรียมฟิล์มบาง SnS โดยวิธีซัลเฟอร์เซชัน

PREPARATION OF SnS THIN FILMS BY
SULFURIZATION METHOD



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2556

**PREPARATION OF SnS THIN FILMS BY
SULFURIZATION METHOD**



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

FACULTY OF SCIENCE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2013

หัวข้อโครงการพิเศษ การเตรียมฟิล์มบาง SnS โดยวิธีซัลเฟอไรเซชัน
PREPARATION OF SnS THIN FILMS BY SULFURIZATION
METHOD

ชื่อนักศึกษา นายชโนดม จันทร์สม
 นายส่งศักดิ์ แสงโฮง

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา ฟิสิกส์

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ฐิตินัย แก้วแดง

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
ประยุกต์ ประจำปีการศึกษา 2556

	คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.งามนิตย์	วงษ์เจริญ	
ผศ.ดร.ชัยสิงห์	ภูริรักษ์เกียรติ	
อ.ภารจ	บัณฑิตาวิทย์	
รศ.ดร.ฐิตินัย	แก้วแดง	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

Title	PREPARATION OF SnS THIN FILMS BY SULFURIZATION METHOD
Students	Mr. Chanodom Chansom Mr. Songsuk Sanghong
Degree	Bachelor of Science
Major Program	Physics
Academic Year	2013
Advisor	Assoc. Prof. Dr.Thitinai Geawdang

ABSTRACT

Thin films of tin sulfide have been grown by sulfurization of metallic Sn precursor at temperature of 300 – 500 °C in excess ambient of sulfur using a graphite box in N₂ atmosphere. Sulfurization temperature at 300 °C , the films were formed in SnS phase with orthorhombic structure. In contrast, the films were formed in SnS₂ phase with hexagonal structure when sulfurization temperature higher than 300 °C. From absorption spectra, direct band gap is varied between 1.7 and 2.45 eV. From the transient photoconductivity measurement, persistent photoconductivity behavior was observed in SnS films. The decay current data are better fitted with multi – exponential function resulting in the several slow decay times. Density of trap states were also observed from the rise current and decay current.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Keyword: Tin Sulfide thin films, sulfurization method, electrical properties, photoconductivity

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาของ รองศาสตราจารย์ ดร.ฐิตินัย แก้วแดง รองศาสตราจารย์ งามนิศย์ วงษ์เจริญ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยสิงห์ ภูริภักย์เกียรติและ รองศาสตราจารย์ ดร.ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ และอุปการณ์ในการทดลองตลอดจนอุปการะทุนสนับสนุนและการให้คำปรึกษาทางวิชาการที่ดีตลอดมา รวมไปถึงการปลูกฝังสิ่งที่ดีงามให้กับลูกศิษย์ทุกคน

ขอขอบคุณ ศูนย์บริการเครื่องมือวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์และการแนะนำในการใช้เครื่อง ยูวี-วิสสิเบิล แบบดับเบิลบีม สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ยี่ห้อ Thermo electron corporation รุ่น He λ ions α ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติเชิงแสง โดยการ วัดการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง ในช่วงความยาวคลื่นอัลตราไวโอเล็ตไปจนถึงย่านอินฟราเรด (ความยาวคลื่น 190 – 1100 nm) และเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance ซึ่งรังสีเอกซ์มีความยาวคลื่นในย่าน $\text{Cu}_{K\alpha}$ 1.5406 อังสตรอม

ขอขอบคุณ ห้องทดลองภาควิชาเคมีและเจ้าหน้าที่ห้องทดลองภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์และการแนะนำในการใช้เครื่อง ยูวี-วิสสิเบิล แบบดับเบิลบีมสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ SHIMADZU รุ่น UV-1800 ที่ใช้ในการศึกษาสมบัติเชิงแสง โดยการ วัดการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง ในช่วงความยาวคลื่นอัลตราไวโอเล็ตไปจนถึงย่านอินฟราเรด (ความยาวคลื่น 190- 1100 nm)

ขอขอบคุณนักศึกษานิพนธ์โทในห้องปฏิบัติการวิจัยวัสดุโฟโตนิกส์ สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำโครงการพิเศษ แนะนำการใช้อุปกรณ์ต่างๆตลอดจนให้คำแนะนำในการใช้โปรแกรมเพื่อวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลอง

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่เมตตาประสิทธิ์ประสาทวิชาและให้การอบรมสั่งสอนตั้งแต่การศึกษาภาคบังคับถึงปัจจุบัน

สุดท้ายนี้กราบขอบพระคุณ พ่อ แม่ และญาติพี่น้องทุกท่านที่ให้ความอุปการะทุนในการศึกษาเล่าเรียน และเป็นกำลังใจด้วยดีตลอดมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูง และต้องอภัยถึงเจ้าของลิขสิทธิ์ที่แท้จริง

สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย	หน้า
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	I
กิตติกรรมประกาศ	II
สารบัญ	III
สารบัญตาราง	IV
สารบัญรูป	VIII
	X

บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินการ	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 วัสดุของแข็งสารกึ่งตัวนำ	6
2.2 โครงสร้างของผลึก	7
2.2.1 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ	7
2.2.2 โครงสร้างผลึกของสารประกอบดีบุกซัลไฟด์	10
2.2.3 แผนภาพเฟสของระบบ Sn-S	13
2.3 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์	14
2.3.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก	15
2.3.2 การหาขนาดของเกรน	16
2.4 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	17
2.5 การส่งผ่านแสง	18
2.5.1 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง	20
2.5.2 ส่วนหางของแถบพลังงาน	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแบบลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6 สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ	22
2.6.1 การวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิค แวนเดอร์เพาว์	23
2.6.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง	24
2.6.3 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว	25
2.6.4 ปรากฏการณ์ฮอลล์	27
2.6.5 การศึกษาปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์	32
2.7 สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง	34
2.7.1 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะในช่วงกระแสกลาง	41
2.7.2 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะในช่วงกระแสขาขึ้น	42
2.8 หลักการสปีดเตอร์ริง	44
2.8.1 โกล์ดดิซซาร์จ	44
2.8.2 สปีดเตอร์ริง	46
2.8.2.1 ยืดการสปีดเตอร์ริง	46
2.8.2.2 ดีซีไดโอดสปีดเตอร์ริง	47
2.8.2.3 ดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริง	48
2.8.2.4 สนามแม่เหล็กที่มีผลต่อการดิซซาร์จ	52
2.8.3 องค์ประกอบที่สำคัญของหัวดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริง	52
2.8.3.1 วัสดุที่ใช้สร้างหัวดีซีแมกนีตรอน	53
2.8.3.2 การให้ความเย็นที่เป่า	53
2.8.3.3 การควบคุมให้เกิดการสปีดเตอร์ริงเฉพาะผิวเป่า	53
2.8.3.4 ลักษณะของสนามแม่เหล็ก	55
2.8.4 คุณสมบัติทางพลาสมา	58
2.8.4.1 หัววัดลามัวร์	58
2.8.4.2 ลักษณะเฉพาะของกระแสและความต่างศักย์	58
2.8.4.2.1 อุณหภูมิอิเล็กตรอน	60
2.8.4.2.2 ความหนาแน่นพลาสมา	61
2.8.4.2.3 ผลของสนามแม่เหล็ก	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาด้านนั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	62
3.1 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS โดยวิธีซัลเฟอไรเซชัน	62
3.1.1 การเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	62
3.1.2 การเตรียมฟิล์มบางของโลหะดีบุกโดยวิธีซีดีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	62
3.1.3 การเตรียมฟิล์มบางของของสารกึ่งตัวนำ SnS โดยวิธีซัลเฟอไรเซชัน	64
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	67
4.1 ลักษณะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS และ SnS ₂ ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีซัลเฟอไรเซชัน	67
4.2 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS และ SnS ₂ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีซัลเฟอไรเซชัน	68
4.3 ผลการศึกษาภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS และ SnS ₂ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีซัลเฟอไรเซชัน	71
4.4 ผลการศึกษาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและหาค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS และ SnS ₂ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีซัลเฟอไรเซชัน	72
4.5 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS และ SnS ₂ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีซัลเฟอไรเซชัน	75
4.6 ผลการศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS และ SnS ₂ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีซัลเฟอไรเซชัน	79
บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ	83
5.1 สรุปผลการวิจัย	83
5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ	84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง	85
ภาคผนวก	89
ประวัติผู้เขียน	97



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 พารามิเตอร์ของหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ	8
2.2 ระบบผลึกทั้งเจ็ดแบบในระบบสามมิติ	9
2.3 ค่าคงที่โครงสร้างผลึกของสารประกอบ SnS, SnS ₂ และ Sn ₂ S ₃ ที่อุณหภูมิห้อง	12
2.4 ค่าพลังงานยึดเหนี่ยวและค่ายึดค้ำของธาตุนิตต่างๆ	47
4.1 ขนาดของเกรนที่ได้จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS และ SnS ₂ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีการซัลเฟอไรเซชัน จากสารตั้งต้นที่เป็นฟิล์มบางของโลหะดีบุกที่เตรียมโดยวิธีดีซีแมกนีตรอนสเปคโตรริงแล้วนำมาผ่านกระบวนการซัลเฟอไรเซชัน	70
4.2 ค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS และ SnS ₂ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีซัลเฟอไรเซชัน จากสารตั้งต้นที่เป็นฟิล์มบางของโลหะดีบุกที่เตรียมโดยวิธีดีซีแมกนีตรอนสเปคโตรริง แล้วนำมาผ่านกระบวนการซัลเฟอไรเซชัน โดยใช้ซัลเฟอร์ปริมาณ 0.5 กรัม จากนั้นนำเอาฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปแอนนัลในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที	74
4.3 ค่าความต้านทานแผ่น ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าความหนาแน่นของพาหะและสภาพคล่องฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS และ SnS ₂ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีซัลเฟอไรเซชัน จากสารตั้งต้นที่เป็นฟิล์มบางของโลหะดีบุกที่เตรียมโดยวิธีดีซีแมกนีตรอนสเปคโตรริงแล้วนำมาผ่านกระบวนการซัลเฟอไรเซชัน โดยใช้ซัลเฟอร์ปริมาณ 0.5 กรัม จากนั้นนำเอาฟิล์มบางที่เตรียมได้ ไปแอนนัลในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที	75
4.4 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงคือรีนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS และ SnS ₂ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีซัลเฟอไรเซชัน จากสารตั้งต้นที่เป็นฟิล์มบางของโลหะดีบุก ที่เตรียมโดยวิธีดีซีแมกนีตรอนสเปคโตรริงแล้วนำมาผ่านกระบวนการซัลเฟอไรเซชัน โดยใช้ซัลเฟอร์ปริมาณ 0.5 กรัม จากนั้นนำเอาฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปแอนนัลในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 300 และ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที	81

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.5	82

ค่าความหนาแน่นของกัณฑ์ประจุชนิดต่างๆ ที่ได้จากการวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงคือรีนของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS และ SnS₂ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีซัลเฟอร์ไรเซชัน จากสารตั้งต้นที่เป็นฟิล์มบางของโลหะดีบุกที่เตรียมโดยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์แล้วนำมาผ่านกระบวนการซัลเฟอร์ไรเซชัน โดยใช้ซัลเฟอร์ปริมาณ 0.5 กรัม จากนั้นนำเอาฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปแอนนัลในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	สภาพนำไฟฟ้าและสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารฉนวน สารกึ่งตัวนำ และสารตัวนำ	6
2.2	หน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ	7
2.3	การบอกชื่อระนาบต่างๆ ของผลึก	8
2.4	แสดงโครงสร้างผลึกของสารประกอบ SnS , SnS_2 และ Sn_2S_3 โดยที่อะตอมตีบและอะตอมซัลเฟอร์จะแสดงด้วยอะตอมใหญ่และอะตอมเล็กตามลำดับ	11
2.5	แสดงชั้นบางๆ ของ SnS (จำนวน 2 ชั้น) ดึงดูกันด้วยแรงแวนเดอร์วาล	11
2.6	แสดงชั้นบางๆ ของ SnS_2 จำนวน 2 ชั้น ดึงดูกันด้วยแรงแวนเดอร์วาล	12
2.7	แสดงโครงสร้างผลึกแบบ CdI_2	12
2.8	แสดงแผนภูมิเฟสของระบบ Sn-S	13
2.9	การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์	15
2.10	ตัวอย่างของสเปกตรัมที่ได้จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	16
2.11	ค่า β_{20} เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	17
2.12	ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	18
2.13	ภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มบาง	19
2.14	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่นโดยเส้นทึบจะแสดงขอบการดูดกลืนพื้นฐาน	20
2.15	ส่วนหางของแถบพลังงานซึ่งมีส่วนหางของแถบวาเลนซ์และส่วนหางของแถบนำ	22
2.16	ตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชั้นสารตัวอย่างเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์	23
2.17	การต่อขั้วเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์	23
2.18	การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง	25
2.19	การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว	26
2.20	การวัดค่าความต้านทานแผ่นโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น	27
	ก. การวัดแบบสองขั้วโดยมีการเลื่อนระยะที่ขั้วหนึ่ง	
	ข. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับระยะทางที่ได้จากการวัดชนิดเลื่อนขั้วไฟฟ้า	
2.21	แผนภาพแสดงปรากฏการณ์ฮอลล์บนแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิดพี	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.22 การวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพา์บบนสารตัวอย่างที่เป็นแผ่นบางที่มีรูปทรงใดๆ	32
2.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์กับค่ากระแสไฟฟ้า	33
2.24 ระดับพลังงานของกับดักพาหะชนิดจับอิเล็กตรอน (E_u) และกับดักพาหะชนิดจับโฮล (E_h) ที่ปรากฏในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำจุดทึบและจุดโปร่งจะแสดงแทนอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ	35
2.25 แสดงกระแสขาขึ้นและกระแสขาลงการสภาวะนำไฟฟ้าเชิงแสง	38
2.26 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I_p$ กับ t ของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงทั้งช่วงกระแสขาขึ้นและช่วงกระแสขาลง	39
2.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I_p$ กับ t เพื่อใช้คำนวณหาความหนาแน่นของกับดักพาหะในช่วงกระแสขาลง	41
2.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I_p$ กับ t เพื่อใช้คำนวณหาความหนาแน่นของกับดักพาหะในช่วงกระแสขาขึ้น	43
2.29 โครงสร้างของการโกล์วดิซซาร์จ	45
2.30 การเกิดสปีดเตอร์ริงที่ผิวเป้า	46
2.31 การสปีดเตอร์ริงโดยดีซีไดโอดสปีดเตอร์ริง	48
2.32 การเคลื่อนที่เป็นเกลียววงกลมของอิเล็กตรอนที่ถูกกักเก็บไว้ที่ผิวเป้าในเส้นทางเลื่อนลอยของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกัน	50
2.33 ความต่างศักย์ของการดิซซาร์จกับสนามแม่เหล็กที่วัดในขั้วอิเล็กโทรดโคแอคเซียลทรงกระบอก	52
2.34 ลักษณะของแมกนีตรอนแบบสมมาตร	56
2.35 ลักษณะของแมกนีตรอนแบบไม่สมมาตรประเภทที่ 2	57
2.36 ลักษณะของแมกนีตรอนแบบไม่สมมาตรประเภทที่ 1	57
2.37 หัววัดเดี่ยววางมั่วที่สอดเข้าไปในพลาสมา	58
2.38 แผนภาพลักษณะเฉพาะของกระแสกับความต่างศักย์	59
3.1 ภาพถ่ายเครื่องดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริง	64
3.2 ภาพถ่ายเตาแอนนีล	66
4.1 ภาพถ่ายฟิล์มบางของโลหะดีบุกซึ่งเตรียมโดยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริง	67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2 ภาพถ่ายฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS และ SnS ₂ ซึ่งเตรียมโดยวิธีซัลเฟอไรเซชัน เมื่อมีการแอนนัลในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที	68
4.3 สเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของโลหะดีบุกซึ่งเตรียมโดยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	69
4.4 สเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS และ SnS ₂ ซึ่งเตรียมโดยวิธีซัลเฟอไรเซชัน เมื่อมีการแอนนัลในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที	69
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของผลึก a และ c เมื่อเทียบกับอุณหภูมิซัลเฟอไรเซชันของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ₂ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีซัลเฟอไรเซชัน	70
4.6 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางของโลหะดีบุกซึ่งเตรียมโดยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง	71
4.7 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS และ SnS ₂ ซึ่งเตรียมโดยวิธีซัลเฟอไรเซชัน เมื่อมีการแอนนัลในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที	72
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและความยาวคลื่นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS และ SnS ₂ ที่แอนนัลในบรรยากาศก๊าซซัลเฟอร์ที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที	73
4.9 วิธีการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS และ SnS ₂ ที่แอนนัลในบรรยากาศก๊าซซัลเฟอร์ที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที	73
4.10 การหาค่าความต้านทานแผ่นที่ได้จากการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีสองขั้วของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS และ SnS ₂ ที่แอนนัลในบรรยากาศก๊าซซัลเฟอร์ที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที	76
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับกระแสไฟฟ้า ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็ก และไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่แอนนัลในบรรยากาศก๊าซซัลเฟอร์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที	77

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับกระแสไฟฟ้า ของปรากฏการณ์ฮอลล์ ภายใต้อสนามแม่เหล็ก และไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS_2 ที่แอนนีสในบรรยากาศก๊าซซัลเฟอร์ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที	77
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์กับกระแสไฟฟ้า ของปรากฏการณ์ฮอลล์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่แอนนีสในบรรยากาศก๊าซซัลเฟอร์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที	78
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์กับกระแสไฟฟ้า ของปรากฏการณ์ฮอลล์ ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS_2 ที่แอนนีสในบรรยากาศก๊าซซัลเฟอร์ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 60 นาที	78
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟโต กับเวลาของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS และ SnS_2 ที่แอนนีสในบรรยากาศก๊าซซัลเฟอร์ ที่อุณหภูมิ 300 และ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที	79
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสออร์มัลไลซ์ขาขึ้นกับเวลา ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS และ SnS_2 ที่แอนนีสในบรรยากาศก๊าซซัลเฟอร์ ที่อุณหภูมิ 300 และ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที	80
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสออร์มัลไลซ์ขาลงกับเวลา ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS และ SnS_2 ที่แอนนีสในบรรยากาศก๊าซซัลเฟอร์ ที่อุณหภูมิ 300 และ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที	80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

เนื่องจากมีความต้องการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วทั้งภาคอุตสาหกรรม สำนักงาน และที่อยู่อาศัยของประชากรโลก แหล่งพลังงานหลักคือเชื้อเพลิงจากฟอสซิลที่ใช้ผลิตเป็น กระแสไฟฟ้ามีจำนวนจำกัด และจะหมดสิ้นไปในอนาคตอันใกล้ ดังนั้นนักวิทยาศาสตร์จึงมุ่ง แสวงหาแหล่งพลังงานอื่นมาทดแทน พลังงานจากแสงอาทิตย์ก็เป็นพลังงานทางเลือกหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจอย่างมาก เนื่องจากมีปริมาณมากมีใช้ได้ไม่หมดสิ้น เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์ สารกึ่งตัวนำที่สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้ มีอายุการใช้งาน ยาวนานกว่า 20 ปี เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ไม่ต้องทะนุบำรุงรักษามาก สามารถติดตั้งร่วมกับ อาคารบ้านเรือนและสำนักงานได้ง่าย แต่อุปสรรคสำคัญของการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์คือวัตถุดิบ หลักที่ใช้ยังมีราคาสูงอยู่มาก จนถึงปัจจุบันซิลิคอน (Si) ยังคงเป็นวัสดุหลักในการผลิตเซลล์ แสงอาทิตย์ ซิลิคอนมีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงค่อนข้างต่ำ ถ้าต้องการให้ดูดกลืนแสงอาทิตย์ อย่างมีประสิทธิภาพต้องใช้ความหนาอย่างน้อย 500 ไมโครเมตร แต่สำหรับเทคโนโลยีของเซลล์ แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางต้องการให้ชั้นสารกึ่งตัวนำมีความหนาน้อยกว่า 50 ไมโครเมตร เพื่อลด ต้นทุนทั้งค่าวัสดุและลดต้นทุนของกระบวนการผลิต

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางที่ประสบความสำเร็จอย่างมากคือ เซลล์แสงอาทิตย์ที่ผลิต จากสารกึ่งตัวนำ CdTe และ CuInGaSe₂ โดยให้ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็น พลังงานไฟฟ้าสูงถึง 20 เปอร์เซ็นต์ แต่เป็นที่น่าเสียดายว่าทั้งธาตุ Te, In และ Ga ล้วนเป็นธาตุหายาก มีราคาแพง ด้วยเหตุนี้การพัฒนาโรงไฟฟ้าขนาดเทอร์ราวัตต์จากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง ยังเป็นไปได้ยากเนื่องจากต้นทุนสูงกว่าโรงไฟฟ้าที่สร้างจากแหล่งพลังงานทางเลือกชนิดอื่น ดังนั้น จึงมีวิจัยเพื่อค้นหายาวัสดุอื่นที่มีราคาต่ำกว่าเดิม สารกึ่งตัวนำชนิดใหม่ที่เกิดจากการผสมกันของธาตุ สี่ชนิดที่หาได้ง่ายราคาไม่แพงและมีคุณสมบัติทางแสงและคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่สามารถปรับแต่ง ได้ โดยการเลือกค่าสโตยคิโอเมตริ(stoichiometry) ที่เหมาะสม ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำที่เป็น สารประกอบเชิงสี่ดังกล่าวที่โดดเด่นคือ Cu₂ZnSnS₄ (CZTS) ในเบื้องต้นได้มีการประดิษฐ์เป็นเซลล์ แสงอาทิตย์แล้วและให้ประสิทธิภาพสูงกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ ธาตุ Cu, Zn, Sn หรือสารประกอบ Cu₂, S, ZnS, SnS ล้วนหาได้ง่ายราคาไม่แพง แต่การควบคุมอัตราส่วนของแต่ละธาตุให้เหมาะสม เพื่อให้เกิดเป็นสารประกอบเชิงสี่ของเฟส Cu-Zn-Sn-S (CZTS phase) นับว่าเป็นเรื่องที่ยาก

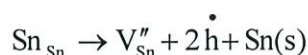
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารประกอบ SnS เป็นองค์ประกอบหลักของสารประกอบเชิงซ้อน CZTS ที่ได้รับความสนใจไม่น้อยเช่นเดียวกัน เนื่องจากหาได้ง่าย ราคาไม่แพงและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ผลิตภัณฑ์ของสารกึ่งตัวนำดีบุกโมโนซัลไฟด์ (SnS) สามารถเตรียมได้โดยวิธีบรีดจ์แมน และวิธีการพาไอระเหยสารเคมี วิธีการเคลือบด้วยชั้นอะตอมของสารตั้งต้น (atomic layer deposition) วิธีซัลโฟไรเซชันของฟิล์มดีบุก และวิธีดูดซับของชั้นไอออนสลับกันอย่างต่อเนื่อง (successive ionic layer adsorption)

ผลิตภัณฑ์นาโนรวมทั้งรูพรุนขนาดนาโนของสารประกอบ SnS เตรียมได้จากวิธีสังเคราะห์โดยใช้เทมเพลต (template synthesis) ผลิตภัณฑ์แท่งนาโนเตรียมได้จากวิธีเคลือบด้วยไฟฟ้า ผลิตภัณฑ์แผ่นนาโนเตรียมได้จากวิธีเคลือบด้วยไฟฟ้า ผลิตภัณฑ์แบบแผ่นนาโนเตรียมได้จากวิธีพ่นละอองสารเคมี (spray pyrolysis) ผลิตภัณฑ์รูปลูกไม้ขนาดนาโนเตรียมโดยวิธีไฮโดรเทอร์มัล (hydrothermal synthesis) ส่วนผลิตภัณฑ์แถบยาวขนาดนาโน (nanobelts) เตรียมได้โดยวิธีตกผลึกจากการหลอมสารละลายชนิดเกลือ (molten salt solvent method) อนุภาคเป็นรูปลูกบอล (fullerene-like nanoparticles) เตรียมได้โดยวิธีระเหยสารเคมีด้วยเลเซอร์ (laser ablation)

มีผู้รายงานว่าสามารถเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่มีเกรนในระดับไมโครเมตร และมีโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ขึ้นมาได้ ซึ่งฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่มีโครงสร้างผลึกซิงค์เบลนด์นี้จะเข้ากันได้ดีกับสารประกอบกลุ่ม II-VI และ กลุ่ม III-V ที่มีอยู่ก่อนแล้ว การเกิดกระแสไฟฟ้าในเซลล์แสงอาทิตย์ ต้องอาศัยผิวเชื่อมต่อระหว่างขั้วดูดกลืนแสงกับชั้นหน้าต่างที่สะอาดและมีข้อบกพร่องผลึกน้อย โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์จะมีช่องว่างแถบพลังงานเป็นแบบตรงและสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงมีค่าสูง ซึ่งจะส่งเสริมให้สารประกอบ SnS สามารถประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงได้

อย่างไรก็ตาม โดยส่วนใหญ่ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เตรียมได้มีช่องว่างแถบพลังงานเป็นแบบตรงและมีค่าอยู่ระหว่าง 1.30 – 1.43 อิเล็กตรอน โวลต์ ซึ่งค่าช่องว่างแถบพลังงานประมาณ 1.4 อิเล็กตรอน โวลต์นี้ สอดคล้องดีกับเงื่อนไขที่ช็อกเลย์และควายเซอร์ (Shockley - Queisser) ได้ระบุเอาไว้ว่าจะทำให้ได้เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงสุดได้ ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS มีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนสูงกว่า ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ CdTe และ CuInGaSe₂ และมีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นแบบพี ซึ่งเกิดมาจากข้อบกพร่องผลึกชนิดแวกแคนซีของอะตอมดีบุก (V_{Sn}) ดังความสัมพันธ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เกิดแวกแคนซี V_{Sn} ได้ง่ายอาจเป็นสาเหตุทำให้เซลล์แสงอาทิตย์ที่ประดิษฐ์จากฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ยังมีประสิทธิภาพได้ไม่เกิน 1.3 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสาเหตุที่แท้จริงยังไม่แน่ชัดไปใช้

ในโครงการพิเศษนี้ได้สนใจที่จะเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ด้วยวิธีซัลเฟอไรเซชันในบรรยากาศของก๊าซซัลเฟอร์ ที่อุณหภูมิต่างๆ จากนั้นจึงทำการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานทางฟิสิกส์อันได้แก่โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค โครงสร้างผลึกเชิงมหภาค คุณสมบัติทางแสงและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เตรียมได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ด้วยวิธีซัลเฟอไรเซชัน
- 1.2.2 เพื่อศึกษาและวิเคราะห์โครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ด้วยเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรค โตรมิเตอร์
- 1.2.3 เพื่อศึกษาลักษณะ โครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
- 1.2.4 เพื่อศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางที่เตรียมไว้ โดยวิธีการวัดความต้านทาน ด้วยวิธีสองขั้ว
- 1.2.5 เพื่อศึกษาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและหาค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS
- 1.2.6 เพื่อศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 เตรียมฟิล์มบางของโลหะดีบุก (Sn) ลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ด้วยวิธีการสปัตเตอร์ในในระบบสุญญากาศ ที่มีความบริสุทธิ์สูง 99.99 เปอร์เซ็นต์
- 1.3.2 นำฟิล์มบางที่เราเตรียมได้ไปผ่านกระบวนการซัลเฟอไรเซชัน โดยใช้ก๊าซไนโตรเจนเป็นตัวพาไอระเหยของก๊าซซัลเฟอร์ เพื่อทำปฏิกิริยากับฟิล์มบางของโลหะดีบุกให้กลายเป็นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 60 นาที
- 1.3.3 นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เตรียมได้ไปศึกษาคุณสมบัติทางฟิสิกส์คือ
 - ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์
 - ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
 - ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางที่เตรียมไว้ โดยวิธีการวัดความต้านทาน ด้วยวิธีสองขั้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ศึกษาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและหาค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS
- ศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS

1.4 ขั้นตอนการดำเนินการ

- 1.4.1 ค้นคว้าและศึกษาข้อมูลต่างๆ ตลอดจนทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการสเป็คเตอรียงภายในระบบสุญญากาศ พร้อมทั้งจัดหาวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ทำโครงการพิเศษ
- 1.4.2 ทำการเคลือบฟิล์มบาง ด้วยสารตั้งต้นคือ โลหะดีบุกลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ด้วยวิธีการสเป็คเตอรียงภายในระบบสุญญากาศ
- 1.4.3 นำฟิล์มบางของโลหะดีบุกที่ได้ไปเข้ากระบวนการซัลเฟอไรเซชัน โดยใช้ก๊าซไนโตรเจนเป็นตัวพาไอระเหยของก๊าซซัลเฟอร์ เพื่อทำปฏิกิริยากับฟิล์มบางของโลหะดีบุกให้กลายเป็นฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 60 นาที
- 1.4.4 ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางที่เตรียมได้ โดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์
- 1.4.5 ศึกษาลักษณะของผิวหน้าของฟิล์มบางและขนาดของเกรนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
- 1.4.6 ศึกษาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและหาค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ด้วยเครื่องยูวี-วิสทิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ในช่วงความยาวคลื่น 200 - 1000 นาโนเมตร
- 1.4.7 ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางที่เตรียมไว้ โดยวิธีการวัดความต้านทานด้วยวิธีสองขั้ว
- 1.4.8 ศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS โดยวิธีการฉายแสงตกกระทบแผ่นฟิล์มบางแล้ววัดค่ากระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา
- 1.4.9 วิเคราะห์ผลที่ได้จากการวิจัยและสรุปผลการวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ทำให้ทราบถึงหลักการและวิธีการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ด้วยวิธีซัลเฟอไรเซชัน
- 1.5.2 ทำให้ทราบถึงอิทธิพลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการซัลเฟอไรเซชัน ซึ่งจะส่งผลต่อคุณสมบัติแก่ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS
- 1.5.3 ทำให้ได้ความรู้เพิ่มเติมในการศึกษาค้นคว้าทฤษฎีและเงื่อนไขการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ให้มีคุณภาพ เพื่อสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านอื่นๆ ได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

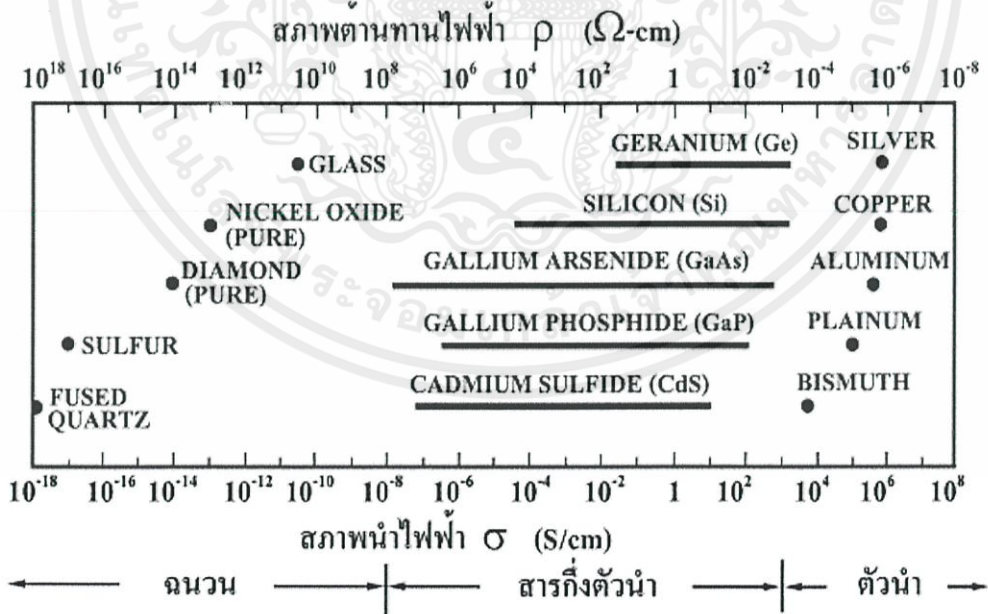
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สมบัติทางฟิสิกส์พื้นฐานของผลึกนั้นขึ้นกับลักษณะของโครงสร้างผลึก การวัดสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆ ก็จะต้องคำนึงถึงสมบัติพื้นฐานของผลึกด้วยเพื่อให้ได้ผลการวัดที่ถูกต้อง ในบทนี้จึงจะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องต่างๆ เทคนิคการเตรียมผลึกของฟิล์มบางและเทคนิคการวัดสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆ ต่อไป

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

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



เอกสารนี้เป็นรูปที่ 2.1 สภาพนำไฟฟ้าและสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารฉนวน สารกึ่งตัวนำ และตัวนำ ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

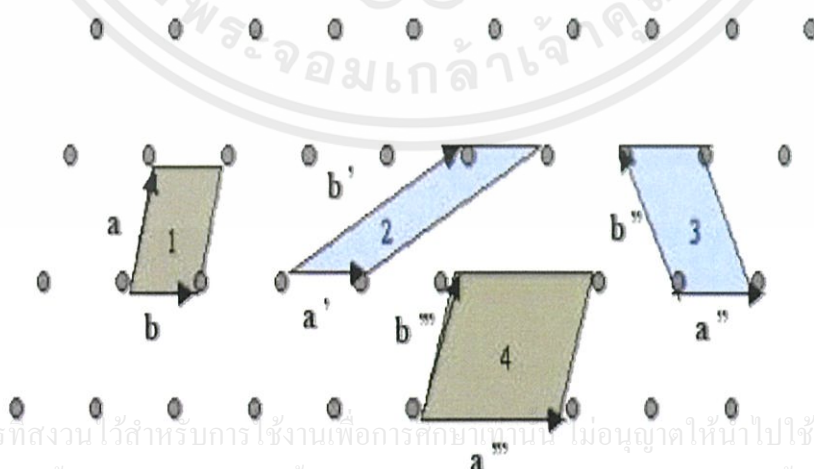
2.2 โครงสร้างของผลึก (งามนิตย์, 2530; จูตินัย, 2546; งามนิตย์, 2545; จูตินัย, 2550; จูตินัย, 2552; Kittel, 2005; Runyan, 1975; สุกฤษฎ์, 2547; สมเกียรติ, 2542)

สารกึ่งตัวนำแต่ละชนิดจะมีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับการจัดเรียงตัวของอะตอมที่อยู่ภายในโครงผลึก การที่มีโครงผลึกที่แตกต่างกันนี้ทำให้สารกึ่งตัวนำมีสมบัติทางฟิสิกส์แตกต่างกันไปด้วย เช่น สมบัติการทางไฟฟ้า สมบัติทางแสง เป็นต้น

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

2.2.1 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ (Cullity, 1956; Kittel, 1971; งามนิตย์, 2531; งามนิตย์, 2545; จูตินัย, 2549; จูตินัย, 2550; งามนิตย์, 2551; จูตินัย, 2551)

ผลึกของสารเกิดจากการที่อะตอมหรือโมเลกุลของสารชนิดนั้นมารวมกันอยู่เป็นจำนวนมากโดยระยะห่างระหว่างอะตอมมีค่าคงที่และมีการจัดเรียงตัวกันเป็นระบบแบบรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอนเป็นระเบียบอย่างต่อเนื่องภายในหนึ่งหน่วยเซลล์ของผลึกอาจประกอบด้วยอะตอมของธาตุเพียงอะตอมเดียวไปจนถึงหลายๆ อะตอมหรือหลายๆ โมเลกุล เซลล์ที่มีปริมาตรเล็กที่สุดที่สามารถใช้เป็นตัวแทนของผลึกนั้นเรียกว่า หน่วยเซลล์ (unit cell) กล่าวคือ ถ้าเอาหน่วยเซลล์นี้มาเรียงต่อกันก็จะได้ผลึกขึ้นมา และเรียกตำแหน่งต่างๆ ของอะตอมที่ระบบสามมิติว่า โครงผลึกหรือ แลตทิซ (lattice) ในทางทฤษฎีการกำหนดหน่วยเซลล์จะทำได้ไม่จำกัด แต่ตามปกติจะเลือกหน่วยเล็กที่สุดที่เป็นไปได้ และมีสมมาตรค่อนข้างสูง ตัวอย่างการเลือกหน่วยเซลล์ในโครงผลึก 2 มิติ ดังรูปที่ 2.2 ในระบบสองมิติพารามิเตอร์ของโครงผลึก ได้แก่ เวกเตอร์ a และ b และ มุม γ ซึ่งเป็นมุมระหว่างเวกเตอร์ทั้งสอง ทั้งนี้ชนิดของโครงผลึกที่แตกต่างกันที่เป็นไปได้มีเพียงห้าแบบดังตารางที่ 2.1



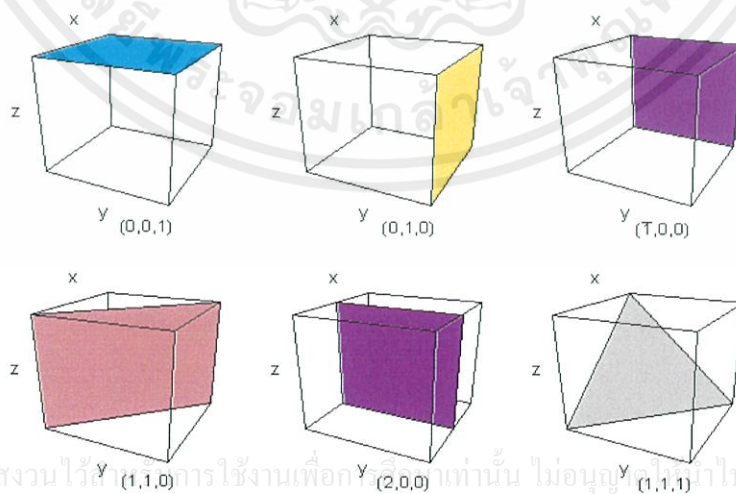
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.2 หน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ

ตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์ของหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ

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

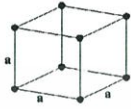
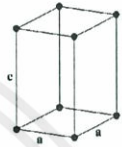
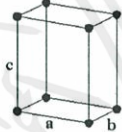

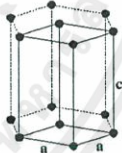
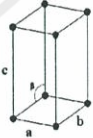
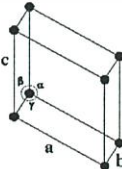
ในระบบ 3 มิติพารามิเตอร์ของโครงผลึก ได้แก่ ขนาดของเวกเตอร์ \vec{a} , \vec{b} และ \vec{c} และ มุม α , β และ γ ซึ่งเป็นมุมระหว่างเวกเตอร์ต่างๆ ดังตัวอย่างในตารางที่ 2.2 ทั้งนี้สามารถจัดแบ่งรูปแบบของโครงสร้างผลึกขึ้นมาโดยสามารถแบ่งออกได้เป็นสิบสี่แบบในสามมิติ ซึ่งจัดได้เป็นเจ็ดกลุ่ม คือ ไตรคลินิก (triclinic), โมโนคลินิก (monoclinic), ออร์โธโรมบิก (orthorhombic), เตตระโกนัล (tetragonal), คิวบิก (cubic), รอมโบอีดรัล (rhombohedral) และเฮกซะโกนัล (hexagonal)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.3 การบอกชื่อระนาบต่างๆ ของผลึก

ตารางที่ 2.2 ระบบผลึกทั้งเจ็ดแบบในระบบสามมิติ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับเอาไว้ใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติ ไปมอบเอาดูให้ว่าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

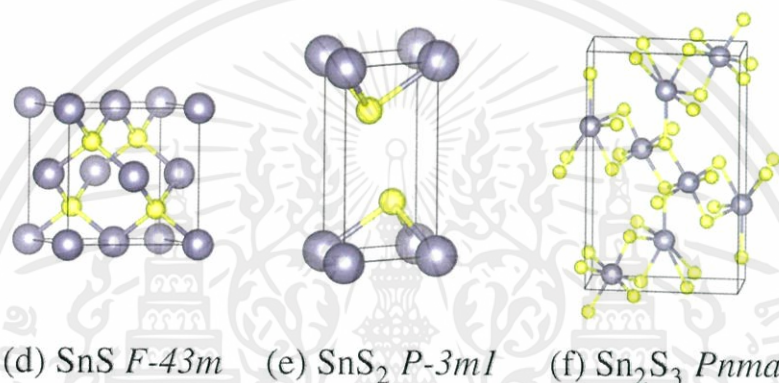
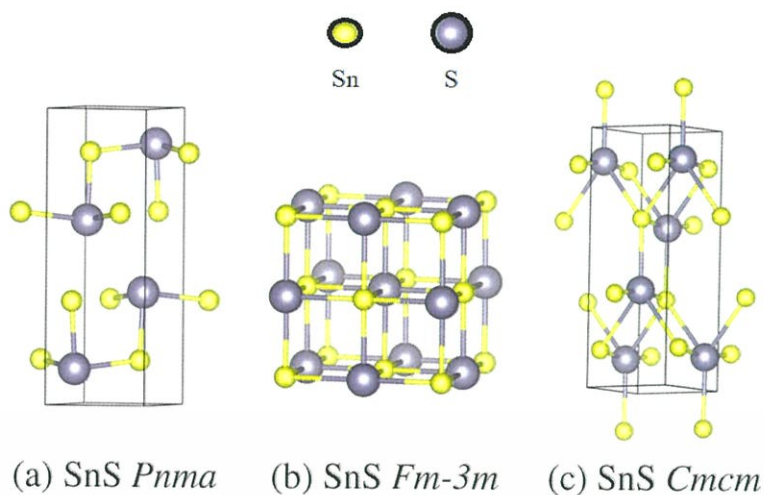
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 โครงสร้างผลึกของสารประกอบดีบุกซัลไฟด์ (Blitskan, 2005; งามนิตย์, 2530; จูตินัย, 2546; งามนิตย์, 2545; จูตินัย, 2550; จูตินัย, 2552; Kittel, 2005; Runyan, 1975; ศุภฤกษ์, 2547; สมเกียรติ, 2542)

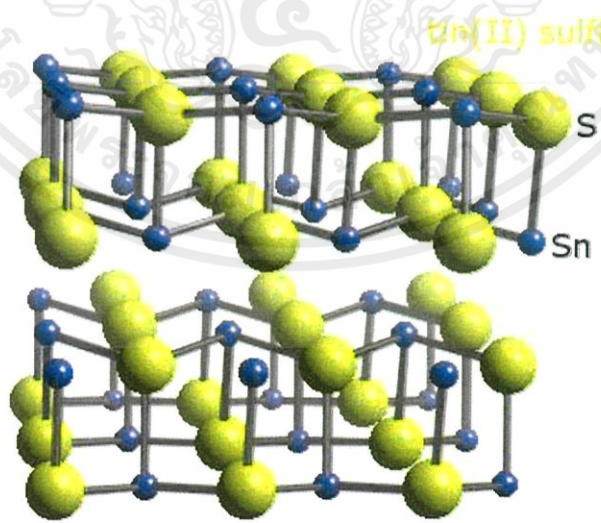
สารประกอบ SnS มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบออร์โธโรมบิกมีกลุ่มปริภูมิ(space group) เป็น Pnma ไอออน Sn^{2+} จะสร้างพันธะกับไอออน S^{2-} จำนวน 3 ไอออน ส่วนวาเลนซ์อิเล็กตรอน $5s^2$ ของอะตอมของธาตุ Sn จะไม่สร้างพันธะ (lone pair) ดังนั้นพันธะระหว่างไอออน Sn^{2+} กับ ไอออน S^{2-} จะมีรูปทรงเป็นแบบเตตระโกนัล (tetragonal geometry) ค่าคงที่โครงสร้างผลึกของหนึ่งหน่วยเซลล์จะแสดง ดังตารางที่ 2.3 อะตอมของธาตุ Sn กับอะตอมของธาตุ S จะสร้างพันธะพันธะต่อเนื่องกันกลายเป็นแผ่นบางซ้อนกันเป็นชั้นๆ ซึ่งแต่ละชั้นจะดึงดูดกันด้วยแรงแวนเดอร์วาล (van der Waals) ดังรูปที่ 2.5 และ 2.6 เฟสอื่นๆ ของสารประกอบ SnS ที่เกิดขึ้นได้อีกเช่น เฟสรีกซอลต์ (rocksalts) เฟสออร์โธโรมบิก ที่อุณหภูมิสูง และเฟสซิงค์เบลนด์ เป็นต้น

โครงสร้างผลึกของสารประกอบ SnS, SnS_2 และ Sn_2S_3 จะแสดงดังรูปที่ 2.4 สารประกอบ SnS_2 มีโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล ไอออน Sn^{4+} แต่ละไอออนจะสร้างพันธะกับไอออน S^{2-} จำนวน 6 ไอออน กลายเป็นรูปทรงเรขาคณิตแบบออกตะฮีดรัล ในหนึ่งหน่วยเซลล์จะมีชั้นบางๆ ของสารประกอบ SnS_2 จำนวน 3 ชั้น การจัดเรียงอะตอมของธาตุ Sn กับอะตอมของธาตุ S ที่แตกต่างกันในแต่ละชั้น ส่งผลให้เกิดเป็นโครงสร้างผลึกได้หลากหลาย (polytype) เช่นมีโครงสร้างเป็นแบบเตตระโกนัล และมีกลุ่มปริภูมิเป็นแบบ Pnma ไอออน Sn^{4+} จะสร้างพันธะกับ ไอออน S^{2-} จำนวน 6 ไอออน กลายเป็นรูปทรงเรขาคณิตแบบออกตะฮีดรัล แต่ละออกตะฮีดรัลจะเชื่อมต่อกันเป็นสายโซ่ยาวของสารประกอบ Sn_2S_3 โดยไอออน Sn^{4+} จะอยู่ในแกนกลางของสายโซ่ ส่วนไอออน Sn^{2+} จะสร้างพันธะกับไอออน S^{2-} จำนวน 6 ไอออน แต่มีรูปทรงเรขาคณิตเป็นแบบ ไตรโกนัลปิรามิด (trigonal-pyramidal geometry) ซึ่งจะมีลักษณะพิเศษคือมีรูปร่างเป็นแบบปิรามิดฐานสามเหลี่ยมสองรูปที่เอายอดปลายแหลมเชื่อมต่อกัน ค่าคงที่ โครงสร้างผลึกของเฟสของสารประกอบ SnS, SnS_2 และ Sn_2S_3 ทั้งที่ได้จากการทดลองและที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีจะแสดงดังตารางที่ 2.3 ส่วนกลุ่มปริภูมิของสารประกอบ SnS ที่รู้จักกันดี ได้แก่ Pnma, Fm3m, Cmc, F43m จะสัมพันธ์กับเฟสออร์โธโรมบิกที่อุณหภูมิต่ำ, รีกซอลต์, ออร์โธโรมบิก ที่อุณหภูมิสูง และเฟสซิงค์เบลนด์ตามลำดับ (Burton and Walsh, 2012)

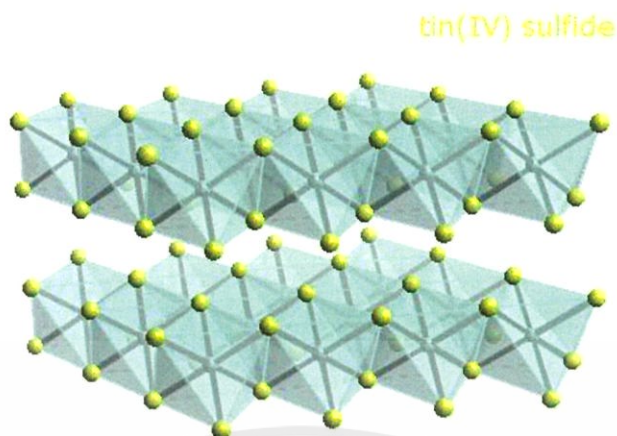
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



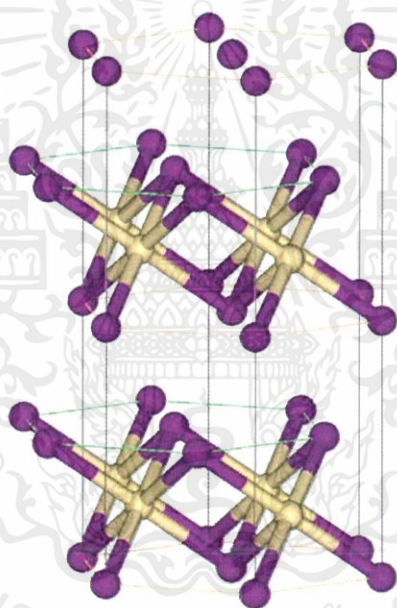
รูปที่ 2.4 โครงสร้างผลึกของสารประกอบ SnS, SnS₂ และ Sn₂S₃ โดยที่อะตอมคีนุกและอะตอมซัลเฟอร์จะแสดงด้วยอะตอมใหญ่และอะตอมเล็กตามลำดับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 รูปที่ 2.5 ระนาบ ของสารประกอบ SnS (จำนวน 2 ระนาบ) ดึงดูดกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์
 ไม่ว่าจะฉีกใดๆทางสั้น อีกทางหนึ่งมีให้คิดแบบลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 ระนาบของสารประกอบ SnS_2 (จำนวน 2 ชั้น) ดึงดูดกันด้วยแรงแวนเดอร์วาล



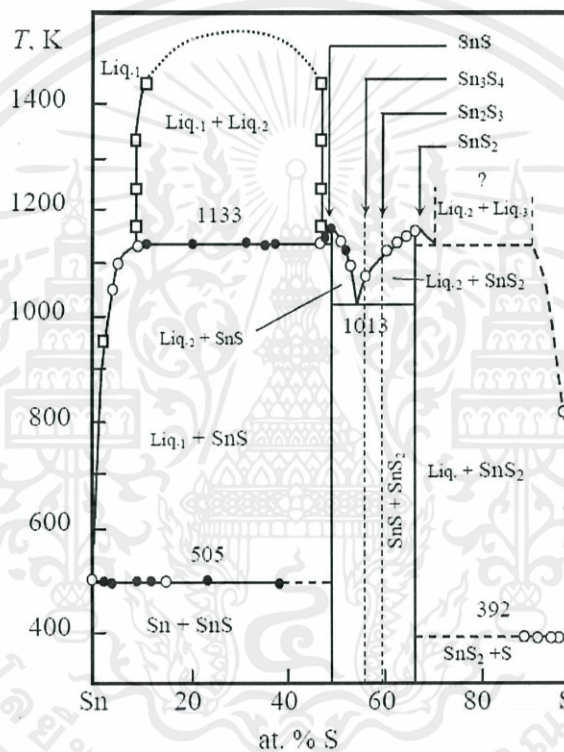
รูปที่ 2.7 โครงสร้างผลึกของสารประกอบ CdI_2

ตารางที่ 2.3 ค่าคงที่โครงสร้างผลึกของสารประกอบ SnS , SnS_2 และ Sn_2S_3 ที่อุณหภูมิห้อง

phase	space group	experimental parameters			ref	relaxed parameters (% error)		
		a	b	c		a	b	c
SnS	<i>Pnma</i>	11.32	4.05	4.24	43	11.11 (1.89)	3.99 (1.52)	4.24 (0.10)
SnS	<i>Fm3m</i>	5.8	5.8	5.8	45	5.75 (0.87)	5.75 (0.87)	5.75 (0.87)
SnS	<i>F43m</i>	5.845	5.845	5.845	26	6.43 (10.0)	6.43 (10.0)	6.43 (10.0)
SnS_2	<i>P3m1</i>	3.64	3.64	5.89	46	3.66 (0.44)	3.67 (0.80)	6.06 (2.75)
Sn_2S_3	<i>Pnma</i>	8.87	3.75	14.02	12	8.80 (0.83)	3.77 (0.66)	13.83 (1.36)
SnO	<i>P4/nmm</i>	3.80	3.80	4.82	47	3.81 (0.26)	3.81 (0.26)	4.76 (1.09)
SnO_2	<i>P42/mnm</i>	4.74	4.74	3.19	48	4.77 (0.72)	4.77 (0.72)	3.22 (0.97)

2.2.3 แผนภาพเฟสของระบบ Sn-S

จากแผนภาพเฟสของ Sn-S ดังรูปที่ 2.8 พบว่าสารประกอบ SnS กับ SnS₂ มีอุณหภูมิของจุดหลอมเหลวระบุได้แน่ชัด (congruent melting point) ในบรรยากาศของก๊าซเฉื่อยที่มีความดันปกติ จุดหลอมเหลวของสารประกอบ SnS จะอยู่ที่อุณหภูมิ 1153 เคลวิน ส่วนจุดเดือดอยู่ที่อุณหภูมิ 1503 เคลวิน สารประกอบ SnS สามารถที่จะเปลี่ยนจากเฟสอุณหภูมิต่ำ (α -phase) กลุ่มปริภูมิ Pnma ไปเป็นเฟสอุณหภูมิสูง (β -phase) กลุ่มปริภูมิ Cmcn ได้การเปลี่ยนเฟสดังกล่าวเกิดการเลื่อนตำแหน่งของอะตอมของธาตุ Sn และ S ในแนวแกนผลึก[100]



รูปที่ 2.8 แผนภูมิเฟสของระบบของสารประกอบ Sn-S

สารประกอบ SnS₂ มีสีเหลืองทองแวววาวค่อนข้างนึ่ม สามารถทำเป็นแผ่นทองคำเปลวได้ สารประกอบ SnS₂ เสถียรที่อุณหภูมิห้องในบรรยากาศปกติ ไม่ละลายน้ำ แต่สามารถละลายในสารละลายซัลเฟอร์ของโลหะอัลคาไล (sulphur solution of alkali metals) และแอมโมเนียซัลเฟต แต่เมื่อเผาในอากาศของสารประกอบ SnS₂ จะกลายเป็นสารประกอบ SnS₂ จะกลายเป็นสารประกอบ SnO₂ ได้อย่างสมบูรณ์ แต่ชนิดการนำไฟฟ้าของสารประกอบ SnS₂ จะเป็นชนิดอิน

ซึ่งต่างจากสารประกอบ SnS ที่มีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นแบบพี

มีนักวิจัยบางคนยืนยันว่าเฟสของสารประกอบ Sn₂S₃ และ Sn₃S₄ สามารถเกิดขึ้นได้ ดัง

แสดงในแผนภาพเฟสในรูปที่ 2.8 สำหรับทางซีกซ้ายมือของแผนภาพเฟสจะแสดงชั้นของโดเมน

จำนวน 3 ชั้น ซึ่งอยู่ในช่วง 10-40 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอมของธาตุ S เส้นโมโนเทคติก (monotectic horizontal line) จะอยู่ที่อุณหภูมิ 1133 เคลวิน ส่วนด้านบนสุดของโดเมนที่ 3 จะอยู่ที่อุณหภูมิ 1523 เคลวิน สำหรับโดเมนที่ 2 สารประกอบของเหลวจะอยู่ในช่วง 70-90 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอมของธาตุ S จุดยูเทคติก (eutectic) ระหว่างสารประกอบ SnS กับ SnS₂ จะอยู่ที่ 55 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอมของ S และจุดหลอมเหลวจะอยู่ที่ 1013 เคลวิน จากแผนภาพเฟสจะเห็นได้ชัดเจนว่า สารประกอบ SnS ไม่เป็นไปตามสโตยเคมีตรีอย่างแท้จริง เนื่องจากสารประกอบนี้สามารถมีอะตอมของธาตุ S ส่วนเกินได้ถึง 0.05 เปอร์เซ็นต์โดยอะตอม แสดงว่าอัตราส่วนของอะตอมของธาตุ Sn กับ S จะมีค่าต่ำกว่าหนึ่งเล็กน้อย นั่นคือแวนแวนซ์ V_{Sn} จะเกิดขึ้นเสมอ ส่งผลให้สารกึ่งตัวนำ SnS มีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นชนิดพี

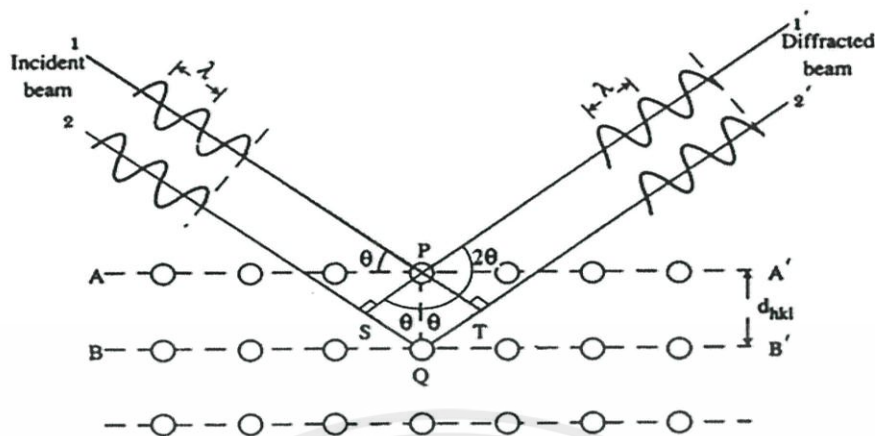
2.3 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (ฐิตินัย, 2531; งามนิทย์, 2530; Kittel, 2005; Runyan, 1975; ดุสิต, 2535; Schroder D.K., 1990; สิทธิชัย, 2551; ฐิตินัย, 2551; ฐิตินัย, 2550; ฐิตินัย, งามนิทย์, ณัฐพร, 2550; ฐิติกร, 2550; เอกชัย, 2552)

การศึกษาโครงสร้างผลึกจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์โดยวิธี θ - 2θ ดิฟแฟรกโตรมิเตอร์ โดยใช้รังสีเอกซ์ความยาวคลื่นเดี่ยวตกกระทบตัวอย่างซึ่งอาจเป็นผลึกเดี่ยวหรือผลึกพหุพันธ์ก็ได้ ตัวอย่างจะหมุนไปเป็นมุม θ ในขณะที่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณรังสีเอกซ์จะเคลื่อนที่ไปเป็นมุม 2θ เพื่อให้การเลี้ยวเบนสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ ในปี ค.ศ. 1912 แบรกก์ (Bragg) ได้เสนอแนวคิดที่ว่า เราสามารถมองได้ว่าผลึกจัดเรียงตัวเป็นชั้น (layer) หรือระนาบ (plane) ของอะตอมซึ่งสามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบ โดยมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน ทั้งนี้ลำคลื่นที่สะท้อนออกไปจากระนาบต่างๆ ดังกล่าวจะมีความเข้มสูงและแทรกสอดแบบเสริม ถ้าหากความแตกต่างระหว่างทางเดินของคลื่นที่สะท้อนจากระนาบที่อยู่ข้างเคียงจะมีค่าเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นที่ตกกระทบดังสมการของแบรกก์ (Bragg's equation) ดังนี้

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

เมื่อ	λ	คือ	ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์
	d_{hkl}	คือ	ระยะระหว่างระนาบที่ขนานกัน
	θ	คือ	มุมที่สะท้อนจากระนาบซึ่งจะเท่ากับมุมตกกระทบ
	n	คือ	ลำดับที่ของการเลี้ยวเบน มีค่าเป็นเลขจำนวนเต็ม คือ 1, 2, 3, ...

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส. 20 ไว้ส. คือ บ. มุมเลี้ยวเบนที่เป็นมุมระหว่างรังสีตกกระทบทำกับรังสีสะท้อน ซึ่งด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์

ระนาบต่างๆ ของผลึก ไม่ได้ก่อให้เกิดการสะท้อนเสมอไป ระนาบใดที่รังสีเอกซ์ตกกระทบแล้วกระเจิงออกมาอย่างสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ เรียกว่าระนาบแบรกก์ (Bragg plane) และมุมที่รังสีสะท้อนทำกับแนวที่ขนานกับรังสีตกกระทบเรียกว่ามุมเลี้ยวเบน (diffraction angle) ซึ่งมีค่าเป็นสองเท่าของมุมสะท้อน 2θ ดังแสดงในรูปที่ 2.9

2.3.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

ข้อมูลที่ได้จากกราฟรัวการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ดังในรูปที่ 2.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์และมุมเลี้ยวเบน เรียกว่า รูปแบบการเลี้ยวเบน (diffraction pattern) ซึ่งสำหรับแต่ละธาตุหรือสารประกอบต่างชนิดกันก็จะมีรูปแบบการเลี้ยวเบนแตกต่างกันซึ่งสามารถสังเกตได้จากพีค (peak) ของการเลี้ยวเบน จากกราฟรัวการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์สามารถทำการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกได้โดยการคำนวณหาค่าคงที่ของโครงผลึก ขนาดของเกรนและความเครียดในระดับจุลภาคได้

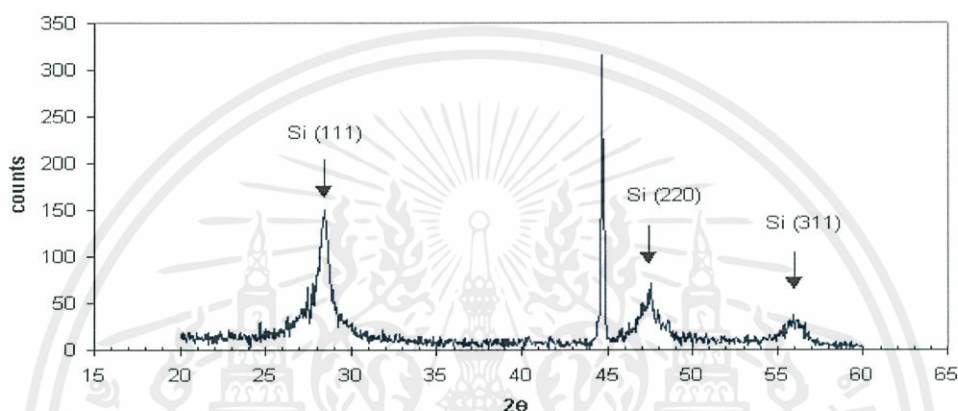
สมการสำหรับหาค่าคงที่ของโครงผลึก (lattice constant) สำหรับโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์สามารถหาได้จากสมการที่ (2.2)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ และสำหรับโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลหาได้จากสมการที่ (2.3) ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างของสเปกตรัมที่ได้จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

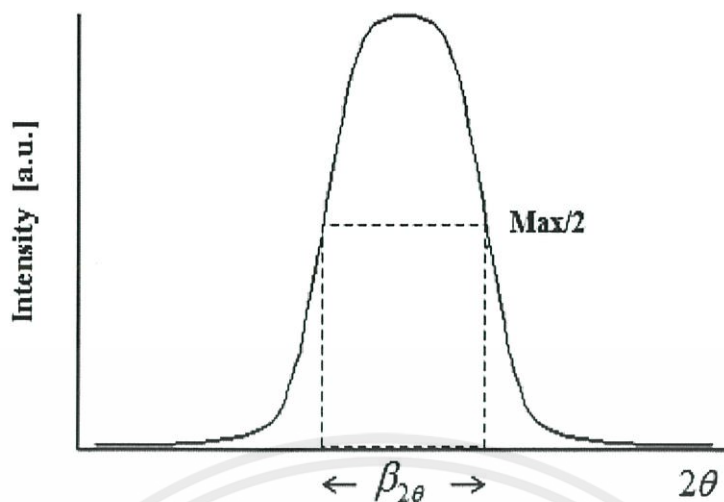
2.3.2 การหาขนาดของเกรน

การหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์สามารถหาโดยเลือกพีคที่มีความเข้มสูงสุด ดังในรูปที่ 2.7 และใช้สมการของเชอร์เรอร์ (Scherrer) กำหนดหาขนาดของเกรนดังนี้

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

เมื่อ D คือ ขนาดของเกรน
K คือ ค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับขนาดและรูปร่างของเกรน
 $\beta_{2\theta}$ คือ ระยะความกว้างของพีคที่ความเข้มที่ค่าเป็นครึ่งหนึ่งของความเข้มสูงสุด (full width at half-maximum of the diffraction peak)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



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

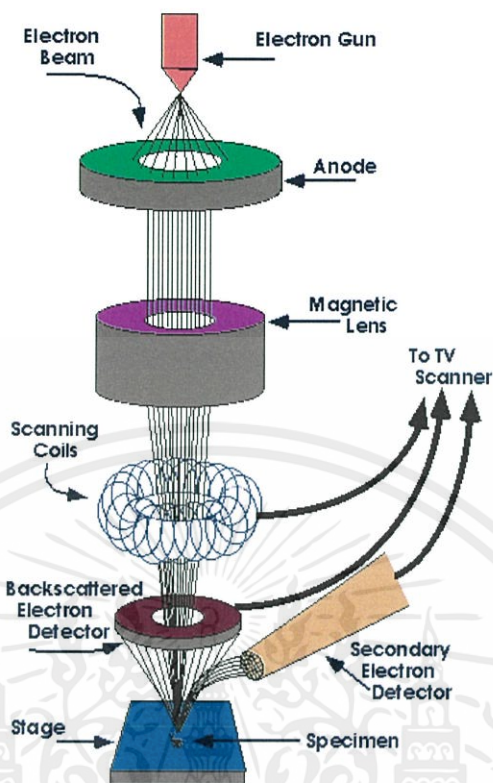
2.4 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

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

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

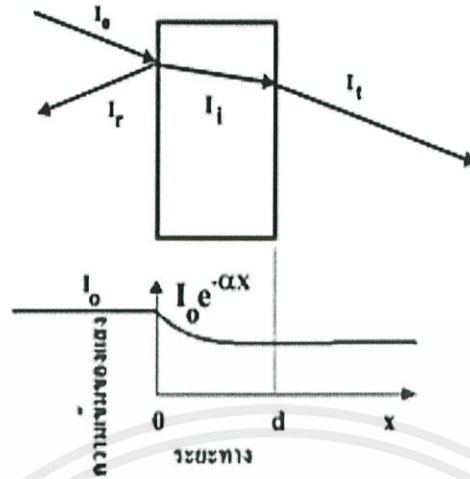


รูปที่ 2.12 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

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

การศึกษาวิธีวัดสเปกตรัมการสะท้อนและการส่งผ่านแสงนี้จะกล่าวถึงสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงและองค์ประกอบของการวัดสเปกตรัมการส่งผ่านแสง เมื่อแสงเดินทางไปกระทบฟิล์มบาง แสงบางส่วนจะสะท้อนกลับที่ผิวของฟิล์มบาง บางส่วนของแสงจะเดินทางเข้าไปในแผ่นฟิล์มบางและถูกดูดกลืนดังรูปที่ 2.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 ภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบาง

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

สัมประสิทธิ์การสะท้อนของแสงมีค่าเท่ากับ

$$R = \frac{I_r}{I_0} \tag{2.5}$$

หรือ
$$I_x = RI_0 \tag{2.6}$$

เพราะฉะนั้น ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางมีค่า

$$I_i = I_0 - I_r = I_0 - RI_r = (1 - R)I_0 \tag{2.7}$$

เมื่อแสงนี้เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางจะถูกดูดกลืนทำให้ความเข้มแสงภายในแผ่นฟิล์มบางลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลตามระยะทาง ดังนั้นความเข้มแสงที่ส่งผ่านฟิล์มบางมีค่าดังสมการ

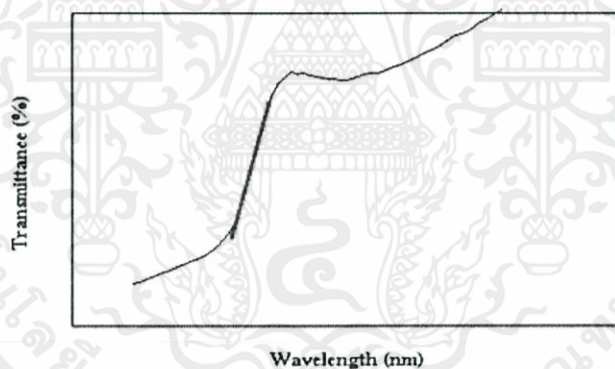
$$I_t = I_i e^{-\alpha d} = (1 - R) I_0 e^{-\alpha d} \tag{2.8}$$

ถ้าไม่มีการสะท้อนแสงที่ผิวด้านหลังสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของแสงจะมีค่าเท่ากับ

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

2.5.1 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง

การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำเกิดจากการที่อิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากแสงที่มีพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าแถบช่องว่างพลังงาน แล้วย้ายสถานะพลังงานจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปสู่แถบนำ สเปกตรัมการดูดกลืนแสงบริเวณที่พลังงานโฟตอนมีค่าน้อยจะมีลักษณะเป็นขอบ แสดงถึงการลดลงของการดูดกลืนแสงอย่างกะทันหัน ขอบลักษณะนี้เรียกว่าขอบการดูดกลืนแสงหรือขอบการดูดกลืนพื้นฐาน (absorption edge or fundamental edge) แสดงได้ดังรูปที่ 2.14 พลังงานโฟตอนที่ขอบการดูดกลืนแสงมีค่าเท่ากับผลต่างของค่าพลังงานที่วัดจากจุดต่ำสุดของแถบความนำและจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์จุดที่เส้นตรงตัดกับแกนในแนวอนจะให้ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) วิธีการนี้เป็นการกำหนดค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่นิยมมากที่สุด



รูปที่ 2.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่น โดยเส้นทึบจะแสดงขอบการดูดกลืนพื้นฐาน

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

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

ไม่ว่ากรณีดังนั้น จึงได้หาค่า $\alpha = -\frac{1}{d} \ln T$ ซึ่งอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีก (2.11) ใช้

ที่กล่าวมา เป็นการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงจากสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง โดยไม่คิดถึงการสะท้อนของแสงสำหรับกรณีการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง เนื่องจากการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับค่าช่องว่างแถบพลังงาน ซึ่งมีลักษณะเป็นพาราโบลาช่องว่างแถบพลังงานของแผ่นฟิล์มบางประมาณได้ โดยการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ซึ่งจะถูกดูดกลืนเมื่อแสงที่ตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบางมีค่าพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าของแถบพลังงานต้องห้ามที่ขอบของการดูดกลืนค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนจะมีค่าเป็น

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

เมื่อ A คือ ค่าคงที่ และสมการที่ (2.12) ใช้กับสารที่มีสถานะพลังงานแบบตรง

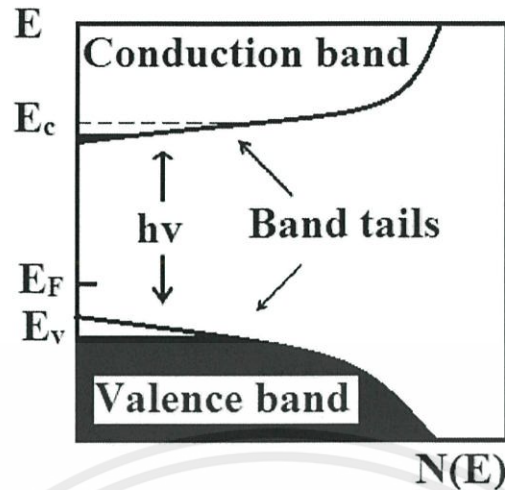
$$(\alpha hv)^{1/2} = B(hv - E_g) \quad (2.13)$$

เมื่อ B คือ ค่าคงที่ และสมการที่ (2.13) ใช้กับสารที่มีสถานะพลังงานแบบเฉียง

2.5.2 ส่วนหางของแถบพลังงาน (Kittel, 2005; งามนิตย์, 2530; จูตินัย, 2531; งามนิตย์, 2545; จูตินัย, 2550; จูตินัย, 2552; Runyan, 1975; สุกฤษฎี, 2547; สมเกียรติ, 2542; จูตินัย, 2552; วีรัชย์, 2547; คุสิต, 2535)

วัสดุประเภทฟิล์มบางมักมีข้อบกพร่องของผลึกจำนวนมากระดับพลังงานของข้อบกพร่องของผลึกเหล่านี้จะมีอันตรกิริยาต่อกันส่งผลให้ระดับพลังงานเหล่านี้แผ่ขยายออกโดยจะไม่เป็นระดับพลังงานเฉพาะค่า (discrete level) อีกต่อไปบางครั้งก็แผ่ออกไปจรดขอบบนสุดของแถบวาเลนซ์หรือขอบล่างสุดของแถบนำซึ่งเสมือนกับว่าแถบวาเลนซ์หรือแถบนำมีความหนาแน่นของสถานะทางพลังงาน (energy density of state) ยื่นเข้าไปในช่องว่างแถบพลังงานซึ่งนิยมเรียกส่วนที่ยื่นเข้าไปในแถบช่องว่างแถบพลังงานนี้ว่าส่วนหางของแถบพลังงานหรือส่วนหางของแถบพลังงานของเออร์บัค (band tail หรือ Urbach's tail) ดังแสดงดังรูป 2.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 ส่วนหางของแถบพลังงานซึ่งมีส่วนหางของแถบวาเลนซ์และส่วนหางของแถบนำ

ในเชิงการทดลองส่วนหางของแถบพลังงานสามารถตรวจสอบได้จากการวัดขอบการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซึ่งเออร์บัค (Urbach) ได้แสดงให้เห็นว่าขอบการดูดกลืนของผลึกจะเพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โพเนนเชียลดังความสัมพันธ์

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

เมื่อ α_0 และ E_0 คือ พารามิเตอร์ของผลึกแต่ละชนิด

k_B คือ ค่าของที่ของโบลตซ์มันน์

T คือ อุณหภูมิ (เคลวิน)

σ คือ ความชัน (steepness) ของขอบการดูดกลืนแสง

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

จากทฤษฎีโครงสร้างแถบพลังงานสารกึ่งตัวนำประกอบไปด้วยแถบวาเลนซ์ แถบพลังงานต้องห้ามและแถบนำ สารกึ่งตัวนำมีช่องว่างแถบพลังงานไม่เกิน 3 อิเล็กตรอน โวลต์ ที่อุณหภูมิห้อง อิเล็กตรอนและโฮลจากภายในผลึกจะถูกกระตุ้นด้วยพลังงานจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบนำ จากนั้นจะเกิดโฮลในแถบวาเลนซ์ ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิใด ๆ ของสารกึ่งตัวนำจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของพาหะ และความคล่องตัวของพาหะอิสระเหล่านี้

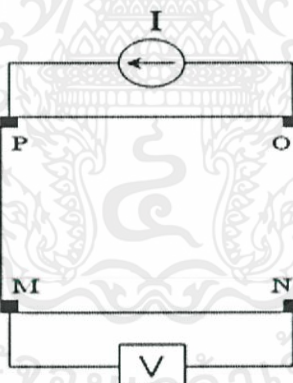
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.1 การวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์

วิธีการวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์ดังแสดงในรูปที่ 2.16 และ 2.17 เป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับสำหรับการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของชิ้นสารตัวอย่างที่เป็นฟิล์มบางที่มีความหนาสม่ำเสมอและมีรูปร่างไม่แน่นอน โดยขั้วสัมผัสจะอยู่บริเวณขอบของชิ้นสารตัวอย่าง รอยต่อระหว่างขั้วสัมผัสที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะต้องไม่ขัดขวางการไหลของกระแส



รูปที่ 2.16 ตำแหน่งของจุดสัมผัสบนชิ้นสารตัวอย่างเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์



รูปที่ 2.17 การต่อขั้วเพื่อวัดความต้านทานแผ่นและวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอก $R_1 = \frac{V_{MN}}{I_{PO}}$ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกา (2.15) ไปใช้

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

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

เมื่อได้ค่า R_1 และ R_2 มาแล้วสามารถคำนวณหาค่าความต้านทานแผ่นได้ดังนี้

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

เมื่อ f คือ แฟกเตอร์ค่าแก้ของแวนเดอร์เพาว์ (van der Pauw correction factor)

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

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถคำนวณได้ดังนี้

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

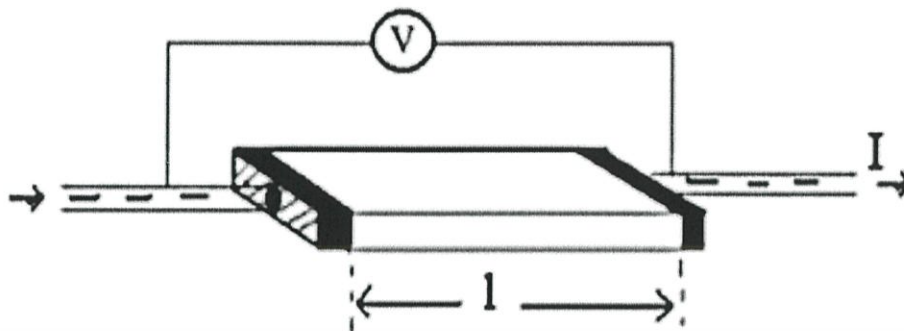
เมื่อ d คือ ความหนาของชั้นสารตัวอย่าง

2.6.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง

โดยทั่วไปแล้วการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้ามักจะวัดความต้านทานก่อน ซึ่งเป็นวิธีวัดโดยตรงดังรูปที่ 2.18 นี้ หมายถึง วัดค่าความต้านทานรวมของสสารจากนั้นมาหาค่าความยาว และพื้นที่หน้าตัดของสสารนั้น การวัดวิธีนี้จะต้องทำให้สสารที่ต้องการวัดมีรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอน เพื่อที่จะวัดค่าพื้นที่หน้าตัดและความยาวให้ได้แน่นอน เช่น แท่งกลมทรงกระบอก แท่งสี่เหลี่ยม เป็นต้น จากนั้นจึงให้กระแสไฟฟ้าเข้าไปที่ปลายด้านหนึ่ง และให้กระแสไหลออกผ่านสารตัวอย่างที่ปลายอีกด้านหนึ่ง ขณะเดียวกันก็วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จุดปลายทั้งสองนั้นพร้อมๆ กัน

จากที่ทราบค่ากระแสและศักย์ไฟฟ้านี้ สามารถนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าได้ดังต่อไปนี้ เมื่อ กำหนด R เป็นความต้านทานรวมจะมีความสัมพันธ์กับความต้านทานจำเพาะและพื้นที่หน้าตัด A บริเวณที่ปล่อยกระแสไหลเข้าไปและ l เป็นระยะทางระหว่างขั้วศักย์ไฟฟ้าที่วัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง

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

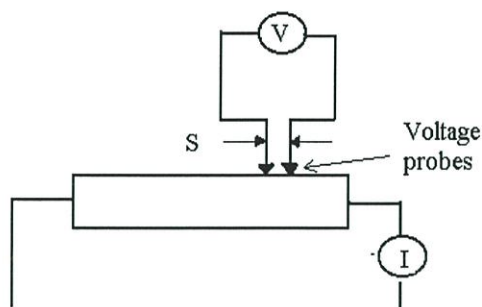
$$\rho = R * \frac{A}{l} = \left(\frac{V}{I} \right) \left(\frac{A}{l} \right) \quad (2.21)$$

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

2.6.3 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว

การวัดด้วยวิธีนี้มีลักษณะใกล้เคียงกับวิธีวัดโดยตรงแตกต่างที่ลักษณะของขั้วไฟฟ้าของการวัดศักย์ไฟฟ้าจะวัดบนสารตัวอย่าง ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.19 วิธีการวัดชนิดนี้เป็นวิธีที่พัฒนาขึ้นจากแบบแรกเพื่อกำจัดศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อหัวท้ายของผิวสัมผัสให้น้อยลงและสามารถตรวจสอบความสกปรกบนพื้นผิวของชิ้นสารตัวอย่างได้ด้วย

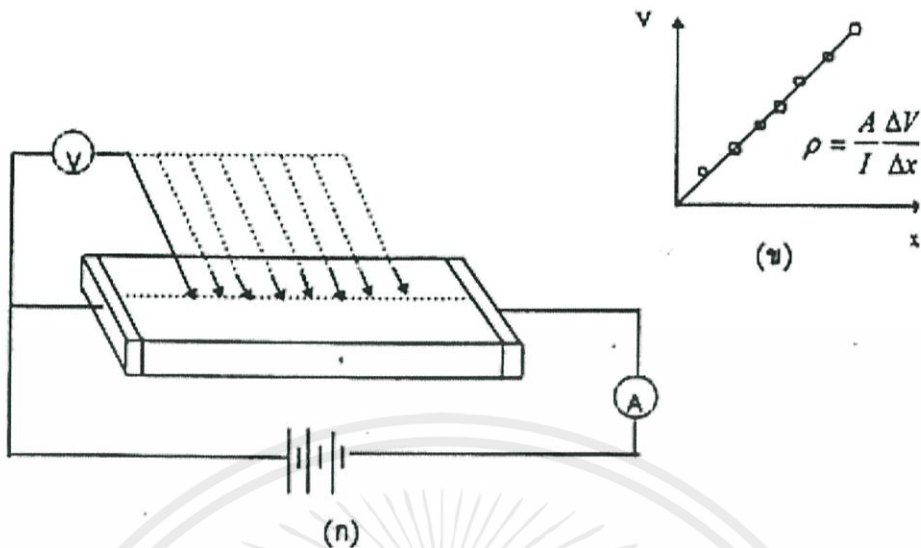
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้ว

ข้อจำกัดของการวัดด้วยวิธีนี้คือจะต้องวัดบนสารตัวอย่างที่มีความหนาสม่ำเสมอและมีรูปทรงเรขาคณิตแน่นอน โดยพยายามให้กระแสผ่านเข้าไปในสารตัวอย่างมีค่าน้อยที่สุดเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความร้อนภายในสาร เพราะค่าความต่างศักย์ที่วัดได้อาจจะไม่ถูกต้อง อีกทั้งในการวัดทุกครั้งจะต้องใช้โวลต์มิเตอร์ที่มีค่าความต้านทานภายในสูง และจุดที่ต้องการวัดศักย์ไฟฟ้าควรจะอยู่ห่างจากจุดที่ปล่อยกระแสเข้าและออกพอสมควร เพื่อป้องกันสารเจือเข้าไปทำการรวมตัวกันระหว่างจุดที่ทำการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า หากมีสารเจือเข้ามารวมตัวที่บริเวณที่วัดนี้จะมีผลทำให้เกิดการรวมกับพาหะข้างน้อย (minority carriers) บริเวณนั้น ทำให้การวัดค่าความต้านทานจำเพาะที่วัดได้สูงเกินความเป็นจริง นอกจากนี้ควรคำนึงถึงความสม่ำเสมอของเส้นสมศักย์ (equi-potential lines) โดยการวัดที่บริเวณจุดที่คิดว่าเป็นเส้นสมศักย์นั้นสม่ำเสมอ (ตรงกลางของสารตัวอย่าง) สัดส่วนระหว่างระยะขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้าต่อพื้นที่ตรงจุดที่ปล่อยกระแสเข้าและออกจะต้องมีค่ามากกว่าสามเท่า $V/A > 3$ เมื่อ 1 คือ ระยะห่างระหว่างขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้า และ A คือ พื้นที่บริเวณให้กระแสไฟฟ้า ข้อควรคำนึงถึงอีกประการก็คือ สารที่นำมาวัดมีโครงสร้างผลึกชนิดใด เป็นรูปลูกบาศก์หรือไม่ ถ้าไม่ใช่จะต้องทราบทิศทางของการวัดว่าอยู่ในทิศทางหรือระนาบใดของผลึกการวัดควรใช้วิธีตั้งขั้วหนึ่งไว้และเลื่อนตำแหน่งอีกขั้วหนึ่งออกไปเป็นระยะๆ โดยมีมาตราส่วนบอกระยะและนำมาเขียนกราฟดังรูปที่ 2.20 (ก) และ (ข) ความชันที่ได้จะเป็นค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าข้อดีของการวัดแบบสองขั้วในหลายๆ ตำแหน่งนี้จะสามารถแยกสภาพต้านทานไฟฟ้าที่สภาพผิวระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำและความต้านทานจำเพาะภายในของสารกึ่งตัวนำได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 การวัดค่าความต้านทานแผ่น โดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น
 ก. การวัดแบบสองขั้วโดยมีการเลื่อนระยะที่ขั้วหนึ่ง
 ข. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับระยะทางที่ได้จากการวัดชนิดเลื่อนขั้วไฟฟ้า

2.6.4 ปรัชญาการโฮลล์ (Kittel, 2005; งามนิตย์, 2530; จูตินัย, 2531; งามนิตย์, 2545; จูตินัย, 2550; จูตินัย, 2552; Runyan, 1975; สุกฤษฎี, 2547; สมเกียรติ, 2542; จูตินัย, 2552; วีรัชย์, 2547; ดุสิต, 2535)

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าสามารถเขียนในเทอมของสภาพคล่องของพาหะได้และความหนาแน่นพาหะอิสระด้วยความสัมพันธ์

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากอิเล็กตรอน

$$\rho = \frac{1}{ne\mu_e} \tag{2.22}$$

กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากโฮล

$$\rho = \frac{1}{pe\mu_p} \tag{2.23}$$

เอกสารนี้กรณีกระแสไฟฟ้าเกิดจากพาหะสองชนิดคืออิเล็กตรอนและโฮลซึ่งมีปริมาณใกล้เคียงกันสภาพ
 ไม่ว่ากรณีต้านทานไฟฟ้าที่แท้จริงคือหัดดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เมื่อ n คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระ

p คือ ความหนาแน่นของโฮลอิสระ

μ_e และ μ_p คือ สภาพคล่องของอิเล็กตรอนและสภาพคล่องของโฮล

นั่นคือหากทราบสภาพต้านทานไฟฟ้า และสภาพคล่องของพาหะจะทำให้สามารถคำนวณค่าความหนาแน่นของพาหะข้างมากได้จากสมการที่ (2.25) และ (2.26) คือ

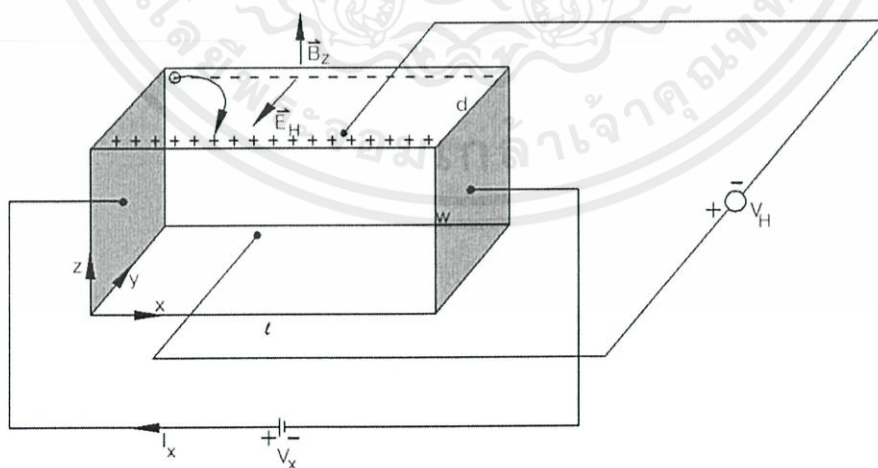
กรณีเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

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

กรณีเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี

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

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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สนับสนุนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่เอามาเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
รูปที่ 2.21 แผนภาพแสดงปรากฏการณ์ฮอลล์บนแผ่นสารกึ่งตัวนำชนิดพี
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาชิ้นสารกึ่งตัวนำชนิดพี ที่เป็นรูปทรงดังแสดงในรูปที่ 2.21 ซึ่งมีกระแสไฟฟ้า I ไหลผ่านในแนว x หรืออาจมองว่ามีประจุบวกเคลื่อนที่ไปในทิศ x ด้วยความเร็วลอยเลื่อน v_x เกิดเป็นกระแสไฟฟ้าในแนวทิศทาง x คือ I_x ดังสมการที่ (2.28)

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

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

จากกฎของโอห์ม

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

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

จากรูปที่ 2.21

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

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

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

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

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

เมื่อแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่กระทำต่อโฮลมีค่าเท่ากันจะเกิด

สภาวะสมดุลเชิงความร้อน หรือสภาวะคงตัว (steady state) ทำให้โฮลเคลื่อนที่ในทิศ $-x$ ดังเดิม เพราะฉะนั้นจะทำให้ได้ว่า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

หากพิจารณาสมการที่ (2.37) จะเห็นว่าสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดขึ้นเป็นปฏิภาคกับความหนาแน่นกระแสและสนามแม่เหล็ก สามารถเขียนได้ในรูปของ

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

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

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

เรียก R_H ว่าเป็นสัมประสิทธิ์ฮอลล์หรือค่าคงตัวฮอลล์ (Hall coefficient) ซึ่งนิยามว่าเป็นสนามไฟฟ้าฮอลล์ที่เกิดจากความหนาแน่นกระแสของพาหะขนาด 1 หน่วยไหลผ่านภายใต้สนามแม่เหล็กขนาด 1 หน่วย เราอาจทราบศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากสนามไฟฟ้าฮอลล์ โดยอินทิเกรตสนามไฟฟ้าฮอลล์ ตลอดความกว้าง (w) ของแผ่นสารและเรียกความต่างศักย์นี้ว่า ความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) นั่นคือ

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

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

สัมประสิทธิ์ฮอลล์ที่ได้จากการวัด คือ

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

ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนตามนิยาม คือ

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

โดยทั่วไปพาหะอิสระที่เคลื่อนที่ในสารกึ่งตัวนำ มักประสบกับกลไกการกระเจิงหลายๆ ชนิด กลไกการกระเจิงของพาหะในสารกึ่งตัวนำจะเป็นกลไกที่ขึ้นอยู่กับพลังงานของพาหะ โดยที่ช่วงเวลาปลอดการกระเจิง (τ) จะแสดงได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นว่าเป็นประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ กรุณาแจ้งให้ทราบเพื่อตัดแบบลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เมื่อคิดผลรวมจากการกระเจิงที่ขึ้นกับพลังงานของพาหะ สัมประสิทธิ์ฮอลล์สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

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

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

เมื่อ r คือ แฟกเตอร์การกระเจิง (scattering factor) ของพาหะในปรากฏการณ์ฮอลล์ซึ่งสามารถนิยามค่า r ได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

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

r มีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2 ขึ้นอยู่กับกลไกการกระเจิงของพาหะ เช่น การกระเจิงเนื่องจากโครงผลึกหรือการกระเจิงเนื่องจากอะตอมของสารเจือปนที่ถูกไอออนไนซ์สัมประสิทธิ์ฮอลล์แปรค่าตามสนามแม่เหล็กและอุณหภูมิ ซึ่งจะมีค่าใกล้ 1 เมื่อขึ้นสารอยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กความเข้มสูงมาก ดังนั้นเราทราบค่าของ r จากการทดลองด้วยความสัมพันธ์

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

ในทางปฏิบัติสนามแม่เหล็กที่ใช้วัดโดยทั่วไปมีค่าอยู่ระหว่าง 5 ถึง 10000 เกาส์ ซึ่งค่า r ในช่วงนี้มีการเปลี่ยนแปลงไม่มาก ดังนั้นอาจประมาณได้ว่าค่าคงที่จากสมการที่ (2.42) และ (2.43) สามารถนิยามสภาพคล่องฮอลล์ (μ_H) ได้เป็น

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

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

สภาพคล่องฮอลล์แตกต่างจากสภาพคล่องที่ได้จากการนำไฟฟ้าด้วยอัตราส่วนของ r ซึ่งมีค่ามากกว่า 1 โดยทั่วไปเพื่อลดความซับซ้อนเมื่อคำนวณความหนาแน่นของพาหะจึงมักประมาณไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ว่า r มีค่าเท่ากับ 1 ความหนาแน่นของพาหะที่คำนวณจากปรากฏการณ์ฮอลล์ จึงอาจสูงกว่าความหนาแน่นของพาหะที่แท้จริงถึง 30 เปอร์เซ็นต์

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

เทคนิคนี้ได้รับการพัฒนาขึ้นมาจากพื้นฐานของวิชาคณิตศาสตร์ คอนฟอร์มอลแมปปิง (conformal mapping) โดยนักวิทยาศาสตร์ชื่อ แวนเดอร์เพาว์ (van der Pauw) สำคัญของเทคนิคนี้อยู่ที่การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของแผ่นสารตัวอย่างรูปร่างใดๆ ซึ่งสามารถทำได้อย่างแม่นยำโดยไม่จำเป็นต้องทราบลักษณะของรูปแบบการกระจายของเส้นทางเดินกระแสที่ไหลภายในแผ่นสาร ถ้าสารตัวอย่างประพฤติตามเงื่อนไขต่อไปนี้

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

พิจารณาชิ้นสารรูปร่างเป็นแผ่นบางใดๆ และมีขั้วสัมผัสเล็กๆ M, N, O และ P กระจายอยู่ที่บริเวณขอบของแผ่นซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขข้างต้น



รูปที่ 2.22 การวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ด้วยเทคนิคแวนเดอร์เพาว์บนสารตัวอย่างที่เป็นแผ่นบางที่มีรูปร่างใดๆ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอก $R_{MNOP} = \frac{V_{NP}}{I_{MO}}$ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีก (2.49) ไปใช้

สัมประสิทธิ์ฮอลล์จากเทคนิคของแวนเดอร์เพาว์ คือ

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

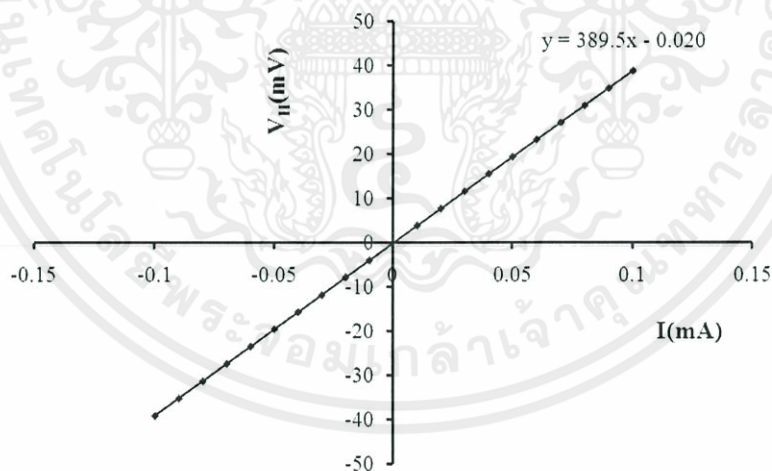
- เมื่อ V_H คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์หรือผลต่างระหว่างค่า V_{NP} ในขณะที่มีสนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็ก
- d คือ ความหนาของชิ้นสารตัวอย่าง
- B คือ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก

จากสมการที่ (2.50) จะได้ว่า

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

เมื่อทำการเขียนกราฟระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I) ที่ได้จากการทดลองเราจะได้ลักษณะกราฟดังรูปที่ 2.23 โดยที่ความชันของกราฟที่ได้จะเป็นค่า

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



รูปที่ 2.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) กับค่ากระแสไฟฟ้า (I)

สภาพคล่องฮอลล์สามารถคำนวณได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ $\mu_H = \frac{R_H}{\rho}$ ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด (2.52) การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และสามารถคำนวณหาระยะทางเฉลี่ยที่ปลอดภัยได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

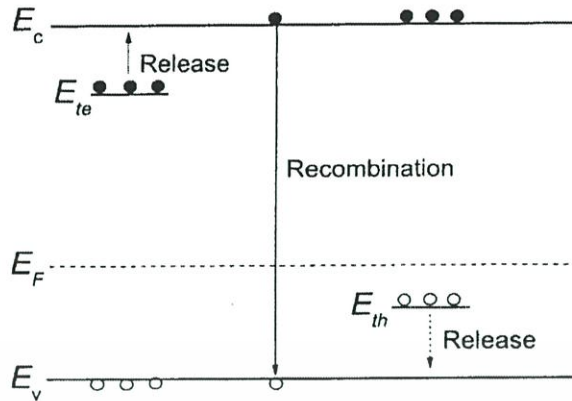
$$l = \left(\frac{h}{2e} \right) \left(\frac{3n}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \mu_H \quad (2.53)$$

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

ในทางปฏิบัติการเตรียมชิ้นสารให้มีรูปทรงตามเงื่อนไขทั้ง 4 ข้อดังกล่าวอาจเป็นไปได้ยาก โดยเฉพาะขนาดและตำแหน่งของขั้วสัมผัสซึ่งมักไม่เป็นจุดและไม่อยู่ที่ขอบของชิ้นสารตามทฤษฎี จึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของผลการวัด

2.7 สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง (งามนิตย์, 2556; ฐิตินัย, 2556)

ในสารกึ่งตัวนำมักมีข้อบกพร่องผลึกเสมอ ข้อบกพร่องผลึกมีหลายชนิด ข้อบกพร่องผลึกบางชนิดมีคุณสมบัติในการจับอิเล็กตรอนและ/หรือโฮลอิสระได้ จึงมักเรียกว่ากับดักพาหะ กับดักพาหะชนิดต่างๆ จะปรากฏเป็นระดับพลังงานในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ โดยในรูปที่ 1 มีทั้งระดับพลังงานของกับดักพาหะชนิดจับโฮล (E_{h}) และกับดักพาหะชนิดจับอิเล็กตรอน (E_{e}) (Jiang, 2012) คำว่า การปลดปล่อยพาหะ (Release) เป็นกลไกที่กับดักพาหะปล่อยอิเล็กตรอนให้กับแถบนำและเป็นกับดักพาหะชนิดปล่อยโฮลให้กับแถบวาเลนซ์ ส่วนคำว่า กระบวนการรวมตัวของพาหะ (Recombination) เป็นกลไกที่อิเล็กตรอนในแถบนำทรานซิชันลงมารวมตัวกับโฮลในแถบวาเลนซ์โดยไม่ผ่านกับดักพาหะ ขณะที่สารกึ่งตัวนำยังไม่ได้มีการฉายแสงกับดักพาหะจะมีการจับอิเล็กตรอนหรือจับโฮลอยู่ก่อนแล้ว ส่วนอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำและโฮลในแถบวาเลนซ์มีปริมาณน้อย สารกึ่งตัวนำจึงนำกระแสไฟฟ้าได้ไม่ดี กระแสมืด (dark current) จึงมีค่าน้อย แต่เมื่อมีการฉายแสงลงบนสารกึ่งตัวนำจะเกิดกระบวนการสร้างอิเล็กตรอนและโฮลอิสระขึ้นในแถบนำและแถบวาเลนซ์ตามลำดับ เนื่องจากการดูดกลืนโฟตอนที่มีความถี่สูงเพียงพอ เมื่อไบแอสด้วยแรงดันไฟฟ้าให้กับสารกึ่งตัวนำ กระแสโฟตอนจะมีปริมาณเพิ่มขึ้น แต่เมื่อหยุดฉายแสงหรือหยุดการกระตุ้นด้วยแสง กระแสไฟฟ้าควรลดลงสู่ค่ากระแสมืดเหมือนในขณะที่ไม่มีการฉายแสง แต่บางครั้งพบว่า กับดักพาหะที่จับอิเล็กตรอนและ/หรือจับโฮล มีพฤติกรรมไม่ปล่อยอิเล็กตรอนหรือโฮลออกมาทันทีอย่างปกติธรรมดา นั่นคือยังมีประจุค้างอยู่ในกับดักพาหะ ดังนั้นอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำและ/หรือโฮลในแถบวาเลนซ์จึงยังคงปรากฏอยู่มากเพื่อทำหน้าที่ในการรักษาความเป็นกลางทางไฟฟ้า โดยปกติกระบวนการปลดปล่อยพาหะจะใช้เวลาานกว่ากระบวนการรวมตัวของพาหะแต่เนื่องจากกับดักพาหะมีการปล่อยอิเล็กตรอนและ/หรือโฮลออกมาช้ามาก ส่งผลให้กระบวนการรวมตัวของพาหะใช้เวลายังนานขึ้นไปอีก จึงเป็นที่มาของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงคือรั้น (persistent photoconductivity)



รูปที่ 2.24 ระดับพลังงานของกักพาหะชนิดจับอิเล็กตรอน (E_{te}) และกักพาหะชนิดจับโฮล (E_{tr}) ที่ปรากฏในช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ จุดทึบและจุดโปร่งจะแสดงแทนอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ

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

$$I = envA \tag{2.54}$$

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

$$v = \frac{\mu V_a}{l} \tag{2.55}$$

แทนสมการที่ (2.55) ลงใน (2.54) จะได้

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

แต่เนื่องจากความหนาแน่นของพาหะอิสระ (n) เกิดมาจากกักพาหะ ดังนั้นความหนาแน่นของพาหะอิสระ (n) ที่สัมพันธ์กับกักพาหะชนิดที่ i ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา จะแสดงได้ดังนี้คือ (Studenikin, 1998)

$$n = N_i \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \tag{2.57}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

กระแสรวมทั้งหมด (I) ที่สัมพันธ์กับกับดักพาหะทุกชนิดจะเป็นดังนี้คือ

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

เมื่อ N_{ii} คือ ความหนาแน่นของกับดักพาหะต่อปริมาตรชนิดที่ i ซึ่งสามารถหาได้จาก ความสัมพันธ์

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

สำหรับกรณีฟิล์มบาง จะประมาณว่า ความหนา d มีค่าน้อยมาก ดังนั้น จากสมการที่ (2.56) จะเขียนใหม่ได้ว่า (Gu, 2005; Huang, 2011)

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

เมื่อ σ_t คือ ความหนาแน่นของกับดักพาหะต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ แต่ถ้ากับดักพาหะมีหลายชนิด กระแสรวม (I) ของฟิล์มบางที่สัมพันธ์กับกับดักพาหะทุกชนิดจะเป็นดังนี้ คือ

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

เมื่อ σ_{ii} คือความหนาแน่นของกับดักพาหะต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ชนิดที่ i ซึ่งสามารถหาได้จากความสัมพันธ์

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

โดยที่

V_a คือ แรงดันไบแอสที่ป้อนให้กับสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีหน่วยเป็น โวลต์
 μ คือ สภาพคล่องของพาหะมีหน่วยเป็น ตารางเซนติเมตรต่อโวลต์-วินาที

- w คือ ความกว้างของสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีหน่วยเป็น เซนติเมตร
 l คือ ความยาวของสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีหน่วยเป็น เซนติเมตร
 d คือ ของสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองมีหน่วยเป็น เซนติเมตร
 I คือ กระแสที่วัดได้จากการทดลองที่เวลา t ใดๆ
 τ_r คือ ช่วงชีวิตขาลง (decay time)
 N_{ii} คือ ความหนาแน่นของกัมมันตภาพในชั้นสารตัวอย่างมีหน่วยเป็น ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
 σ_{ii} คือ ความหนาแน่นของกัมมันตภาพในฟิล์มบางมีหน่วยเป็น ตารางเซนติเมตร

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

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

$$\begin{aligned} \ln \tau_r &= \ln \tau_{r0} + \left(\frac{E_t}{k}\right) \left(\frac{1}{T}\right) \\ &= \ln \tau_{r0} + \frac{E_t}{(1,000 \text{ k})} \left(\frac{1,000}{T}\right) \end{aligned}$$

เมื่อ

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

ดังนั้น

$$\begin{aligned} E_t &= \frac{(1,000)k(\text{slope})}{q} \\ &= (0.086)(\text{slope}) \quad \text{อิเล็กตรอนโวลต์} \end{aligned} \quad (2.65)$$

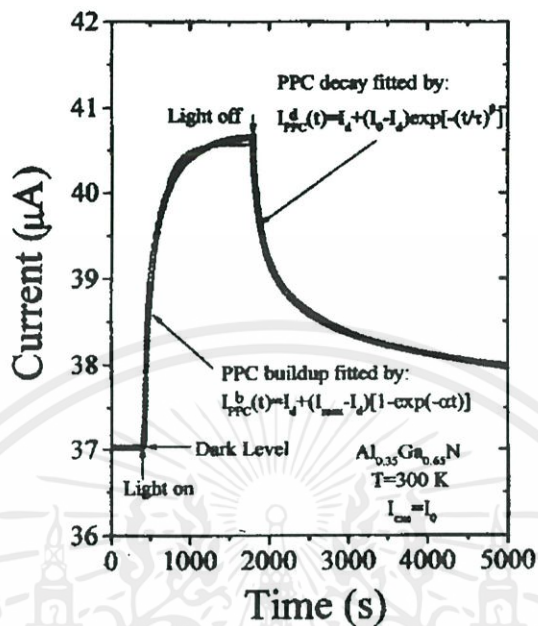
ในการศึกษาพาไฟฟ้าเชิงแสงจะต้องมีการฉายแสงให้กับสารตัวอย่าง จะได้ว่ากระแสโฟโต (I_p) จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลา (t) ดังรูปที่ 2.25 ซึ่งจะเรียกว่าเป็นกระแสขาขึ้น (rise current) ดังความสัมพันธ์ (Ghosh, 2007)

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

เมื่อ I_0 คือกระแสเริ่มต้นของกระแสขาขึ้น (เมื่อ $t=0$) หลังจากหยุดการฉายแสง กระแสจะลดลงตามเวลา (t) ซึ่งจะเรียกว่าเป็นกระแสขาลง (decay current) จะแสดงถึงความสัมพันธ์ (Ghosh, 2007)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้อ่านเพื่อการศึกษานานาชาติ ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_p = I_o \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_d}\right) \quad (2.67)$$



รูปที่ 2.25 แสดงกระแสขาขึ้นและกระแสขาลงการสภาวะนำไฟฟ้าเชิงแสง

จากสมการที่ (2.66) สามารถเขียนใหม่ได้ว่า

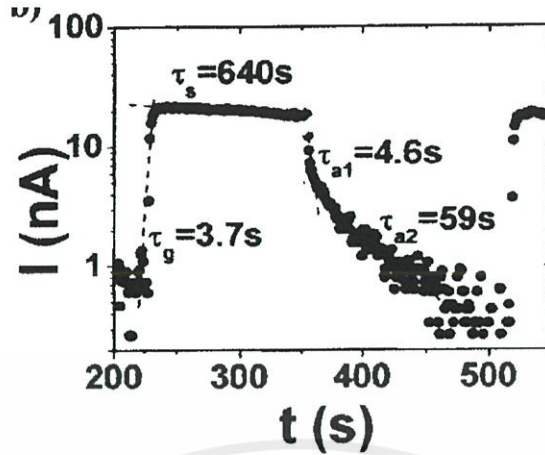
$$\ln I_p = \ln I_o - \frac{t}{\tau_d} \quad (2.68)$$

ความชันของกราฟคือ $\frac{1}{\tau_d}$ ดังนั้น ช่วงชีวิตขาลงจะคำนวณได้จากส่วนกลับของความชันของกราฟ

$\ln I_p$ กับ t ในทำนองเดียวกันช่วงชีวิตขาขึ้นก็สามารถที่จะคำนวณได้จากความชันของกราฟ

$\ln I_p$ กับ t (ดังรูปที่ 2.26) ได้ด้วยเช่นเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.26 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I_p$ กับ t ของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงทั้งช่วงกระแสขาขึ้น และช่วงกระแสขาลง

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

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

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

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

จากสมการที่ (2.70) สามารถที่จะหาค่า σ_{t1} และ σ_{t2} ได้ในรูปแบบเดียวกับสมการที่ (2.63) ดังนี้คือ

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานวิจัยทางวิชาการเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต
 กับดักพาหะทั้งสองชนิดนี้สามารถที่จะจับหรือปล่อยพาหะอิสระได้อย่างซึ่งกันและกัน ถ้า
 กำหนดให้ I_1 และ I_2 คือกระแสเริ่มต้น ($t=0$) ที่เกี่ยวกับกับดักพาหะทั้งสองตามลำดับ เราจะได้ว่า

$$\sigma_{t1} = \frac{I_p}{e\mu V_a} \left(\frac{1}{w} \right)$$

และ

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

สมการที่ (2.70) สามารถที่จะทำออร์มัลไลเซชัน (normalization) ได้ดังนี้ คือ

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

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

ในกรณีกระแสไฟโตขาขึ้น (rise current) ก็สามารที่จะพิจารณาให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันสเตรตเอ็กซ์โพเนนเชียลได้ด้วยเช่นกัน ดังสมการ

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

ส่วนกรณีของขึ้นสาร เช่น เซรามิก กระแสไฟโตขณะกลางสามารถจะเขียนใหม่โดยอาศัยสมการที่ (2.59) และ (2.70) ได้ดังนี้คือ

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

จากสมการที่ (2.75) สามารถที่จะหาค่า

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

กับศักยพหะทั้งสองชนิดนี้สามารถที่จะจับหรือปล่อยพาหะอิสระได้อย่างเป็นอิสระซึ่งกันและกัน ถ้ากำหนดให้ I_1 และ I_2 คือกระแสเริ่มต้น ($t=0$) ที่เกี่ยวกับกับศักยพหะทั้งสองตามลำดับเราจะได้ว่า

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

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

สมการที่ (2.75) สามารถที่จะทำนอร์มัลไลเซชัน (normalization) ได้ดังนี้คือ

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

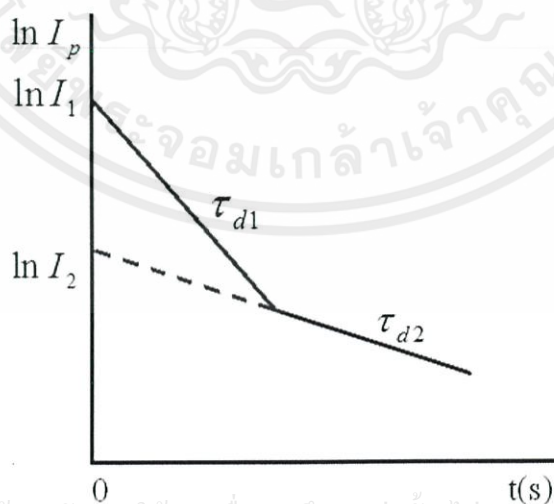
ซึ่ง A_1'' และ A_2'' สามารถหาได้จากการพิศกรรพของผลการทดลอง ในกรณีกระแสโฟโตขาขึ้นก็สามารถที่จะพิจารณาให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันสเตรตเอ็กซ์โพเนนเชียลได้ด้วยเช่นกัน ดังสมการ

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

2.7.1 วิธีกรรหาค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะในช่วงกระแสขาลง

กรรหาค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะในช่วงกระแสขาลงจะอาศัยกรรพ $\ln I_p$ กับ t ดัง

รูปที่ 2.27



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรรใช้งานเพื่อกรรศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านกรรค้า
รูปที่ 2.27 กรรพความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I_p$ กับ t เพื่อใช้กรรหากรรหาค่าความหนาแน่นของกับดัก
พาหะในช่วงกระแสขาลง

ค่า τ_{d1} หาได้จากความชันของกราฟ

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

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

$$\sigma_{t1} = \frac{I_1}{e\mu V_a} \left(\frac{1}{w} \right) \quad (2.81)$$

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

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

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

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

สำหรับกรณีของความหนาแน่นของชั้นสารเช่นในเซรามิก ก็สามารถใช้สูตร

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

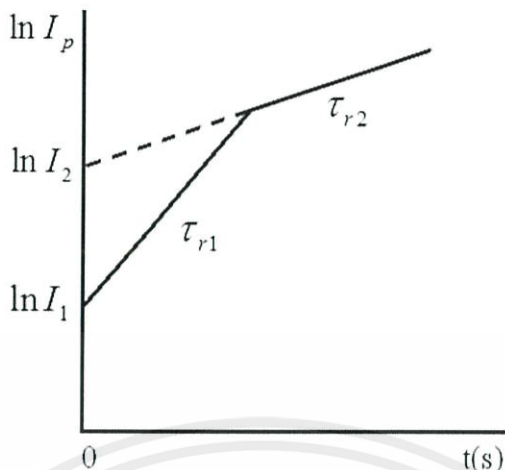
และ

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

2.7.2 วิธีการหาค่าความหนาแน่นของกัมมันตภาพในช่วงกระแสขาขึ้น

การหาค่าความหนาแน่นของกัมมันตภาพในช่วงกระแสขาขึ้น โดยอาศัยกราฟ $\ln I_p$ กับ t

เอกสารนี้จัดทำขึ้นโดยมูลนิธิส่งเสริมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีในพระบรมราชูปถัมภ์ เพื่อสนับสนุนการดำเนินงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln I_p$ กับ t เพื่อใช้คำนวณหาความหนาแน่นของกัณฑ์พาหะในช่วงกระแสขาขึ้น

กระแสขาขึ้นอาจแสดงได้ดังสมการง่ายๆ ดังนี้คือ

$$I = I_{\max} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_r}\right) \right] \tag{2.86}$$

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

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

$$\ln \left[1 - \frac{I}{I_{\max}} \right] = -\frac{t}{\tau_r} \tag{2.87}$$

จากสูตร

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

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

$$\frac{I}{I_{\max}} = \frac{t}{\tau_r} \tag{2.88}$$

ข้อสังเกตคือสมการที่ (2.88) จะใช้ได้จริงเมื่อ $\frac{I}{I_{\max}} \ll 1$ ก็คือช่วงแรกๆ ของกราฟกระแส

ขาขึ้น ส่วนช่วงท้ายๆ ของกราฟความถูกต้องจะลดลง การคำนวณหาค่าความหนาแน่นของกัณฑ์พาหะทั้งชนิดฟิล์มบางและเซรามิกจะใช้สมการที่ (2.81), (2.83), (2.84) และ (2.85) ได้เช่นเดียวกับกระแสขาลง

2.8 หลักการสเปกตรัม (ฐิตินัย, 2556; ชัยวิทย์, 2526; ธนุสิทธิ์, 2538)

ดีซีแมกนีตรอนสเปกตรัม คือวิธีการเคลือบฟิล์มบางในระบบสุญญากาศ โดยอาศัยพื้นฐานทางด้านฟิสิกส์ของพลาสมาเพื่อให้เกิดกระบวนการสเปกตรัมขึ้นมา ดังนั้นจึงเป็นสิ่งสำคัญในการทำความเข้าใจในฟิสิกส์ของพลาสมา วิธีการเคลือบฟิล์มบางที่เรียกว่าสเปกตรัมและหลักการที่เกี่ยวกับหัวดีซีแมกนีตรอนสเปกตรัม ซึ่งจะได้อธิบายในส่วนที่มีความสอดคล้องกับงานวิจัยนี้

2.8.1 โกลว์ดิสชาร์จ

สถานะพลาสมาเกิดขึ้นได้โดยการทำให้อะตอมของก๊าซที่อยู่ในสภาวะที่เป็นกลางทางไฟฟ้าเกิดการแตกตัวเป็นไอออน ซึ่งสามารถทำได้โดยอาศัยการชนด้วยอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูง โดยอะตอมที่ได้รับพลังงานที่เพียงพอจะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากอะตอม เรียกว่าการแตกตัวเป็นไอออน ซึ่งพลังงานที่มีค่าน้อยที่สุดที่ทำให้อิเล็กตรอนตัวนอกสุดหลุดออกมาได้ คือ พลังงานการแตกตัวเป็นไอออน โดยการแตกตัวเป็นไอออนเป็นกระบวนการสำคัญในการสร้างพลาสมาของระบบดีซีแมกนีตรอนสเปกตรัม สำหรับในกรณีของโลหะที่ได้รับพลังงานแล้ว ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากผิวของโลหะ เรียกว่า การปลดปล่อยอิเล็กตรอน ซึ่งพลังงานที่มีค่าน้อยที่สุดที่ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาได้ คือ ค่าฟังก์ชันงาน

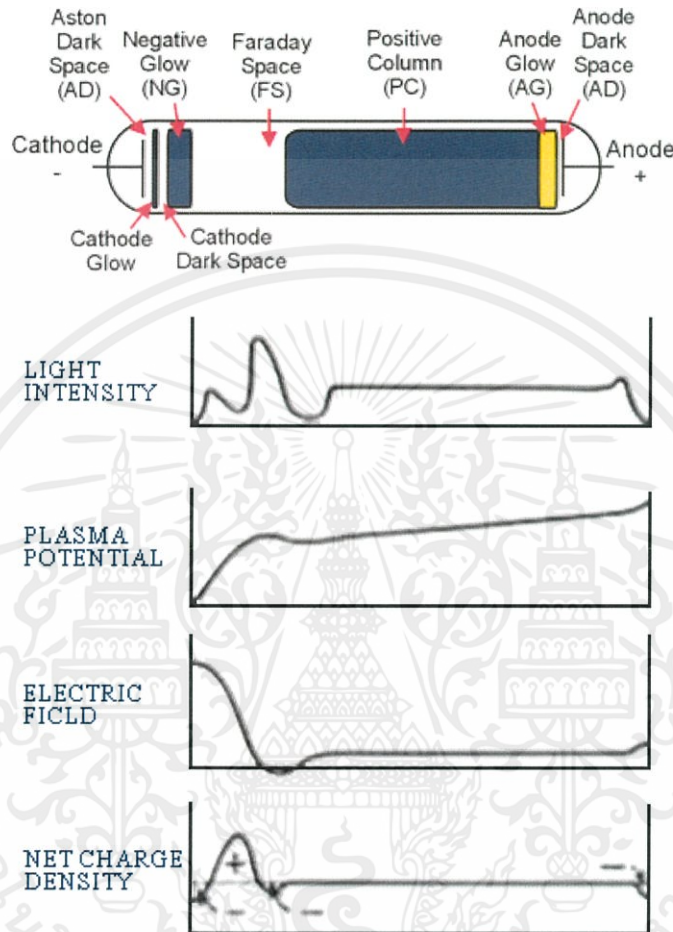
อะตอมใดๆ เมื่อถูกชนด้วยอะตอมที่เป็นกลาง ไอออนหรืออิเล็กตรอนจะเกิดการแลกเปลี่ยนของพลังงานระหว่างกัน ในกรณีที่อนุภาคที่เคลื่อนที่เข้าชนอะตอมคืออิเล็กตรอน และทำให้อะตอมที่ถูกชนเกิดการแตกตัวเป็นไอออน เรียกว่า การแตกตัวเป็นไอออนเนื่องจากการชนด้วยอิเล็กตรอน (electron impact ionization) โดยที่อิเล็กตรอนจะต้องมีพลังงานจลน์มากกว่าหรือเท่ากับพลังงานการแตกตัวเป็นไอออนของอะตอม ดังสมการ

$$\frac{1}{2}mv^2 \geq W_i \quad (2.89)$$

โดย W_i คือ พลังงานการแตกตัวเป็นไอออน
 m คือ มวลของอิเล็กตรอน
 v คือ ความเร็วของอิเล็กตรอน

การ โกลว์ดิสชาร์จก็คือการเรืองแสงของพลาสมา การ โกลว์ทำให้เกิดขึ้นมาได้โดยการจ่าย
 เอกสารนี้มีความต่างศักย์ระหว่างขั้วอิเล็กโทรมโนในสภาวะความดันต่ำที่มีก๊าซกระจายอยู่ภายในภาชนะ
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สุญญากาศ ศักย์ไฟฟ้าจะตกลงอย่างรวดเร็วในบริเวณใกล้ขั้วคาโทดและมีค่าเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ ในพลาสมา และเปลี่ยนแปลงอีกครั้งในบริเวณใกล้ขั้วแอโนดดังแสดงในรูปที่ 2.29



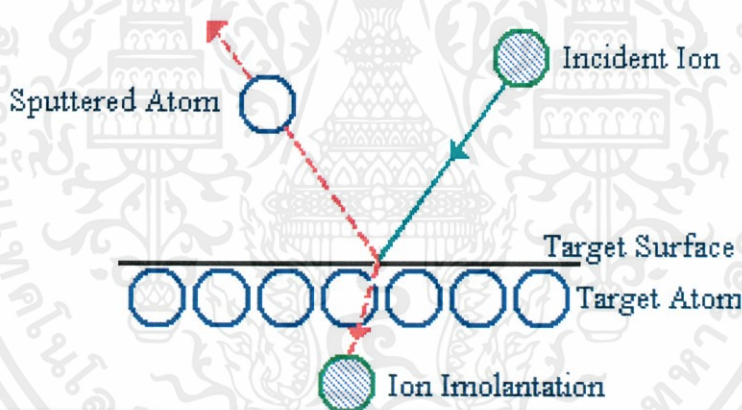
รูปที่ 2.29 โครงสร้างของการ โกลว์ดิสชาร์จ

สนามไฟฟ้าในระบบจะถูกควบคุมไปจนถึงชีท (sheath) ของแต่ละขั้วไฟฟ้า ซึ่งชีทก็คือความหนาแน่นของบริเวณที่แยกพลาสมาออกจากขั้วไฟฟ้า อาณาเขตของชีทจะผลักอิเล็กตรอนที่พยายามเคลื่อนที่ไปยังแต่ละขั้วอิเล็กโทรด อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นที่ขั้วคาโทดจะถูกเร่งให้เกิดการเคลื่อนที่ตามทิศทางของสนามไฟฟ้าและเกิดการชนกับอนุภาคตัวอื่นและมีการแลกเปลี่ยนพลังงานและจะหยุดลงเนื่องจากการแพร่กระจายและการรวมตัว การโกลว์ที่ทำให้การเรืองแสงเกิดขึ้นมาได้เนื่องจากอิเล็กตรอนมีพลังงานมากพอที่จะให้กำเนิดแสงที่สามารถมองเห็นได้ด้วยการชนแล้วทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน อิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าและมีการสะสมพลังงานและเกิดการชนกับอะตอมอื่นแล้วเกิดการแตกตัวเป็นไอออน โดยกระบวนการจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง อิเล็กตรอนจะมีจำนวนเพิ่มขึ้นจากการปลดปล่อยออกมาจากขั้วคาโทด ซึ่งเป็นสิ่งที่สำคัญมากใน

การรักษาการดิสรจาร์จให้สามารถมีอยู่ต่อไปได้ ลักษณะที่สำคัญหลายๆ อย่างของโกลด์ดิสรจาร์จ แสดงให้เห็นในรูปที่ 2.29 การเรืองแสงในสถานะสุญญากาศแสดงลักษณะการจัดเรียงบริเวณที่เกิด การเรืองแสงระหว่างขั้วอิเล็กโทดทรงกลมภายในสถานะสุญญากาศที่มีการเชื่อมต่อกับ แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง พอการดิสรจาร์จด้วยไฟฟ้ากระแสตรงถูกทำให้เกิดขึ้นและถ้าการ โกลด์ดิสรจาร์จสามารถรักษาไว้ได้ก็จะปรากฏบริเวณการเรืองแสงและบริเวณมืดในตำแหน่งที่ แตกต่างกัน

2.8.2 สเป็คเตอริง

สเป็คเตอริง เป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งในการเกิดพลาสมาเย็น (cold plasma) ซึ่งเป็นเหตุการณ์ที่อะตอมที่ผิวเป้าถูกทำให้หลุดออกมาพร้อมกับมีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) ออกมาด้วย เนื่องจากการระดมยิงของอนุภาคพลังงานสูงที่ถูกเร่งให้ เคลื่อนที่เข้าชนเป้า ดังแสดงในรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.30 การเกิดสเป็คเตอริงที่ผิวเป้า

2.8.2.1 ยี่ลัดการสเป็คเตอริง (sputtering yields)

ยี่ลัดของการสเป็คเตอริง นิยามด้วยปริมาณอะตอมที่ถูกสเป็คเตอริงให้หลุดออกมาจากผิว เป้าต่อปริมาณไอออนที่เคลื่อนที่เข้าชน ดังแสดงในสมการที่ 2.90 ซึ่งขึ้นอยู่กับพลังงานของไอออน ที่ตกกระทบและอัตราส่วนระหว่างมวลของไอออนที่ตกกระทบกับอะตอมที่ถูกสเป็คเตอริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของกรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์
 ยี่ลัดของการสเป็คเตอริง = อะตอมที่หลุดออกจากผิวเป้า / ไอออนที่ชนเป้าไปใช้ประจุ (2.90) ้านการค้ำ
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น ถือว่าทั้งนี้ไม่มีให้คำปรึกษาแนะนำ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งเพื่อการนำไปใช้
 การสเป็คเตอริงแสดงถึงลักษณะเฉพาะโดยพลังงานขีดเริ่ม (threshold energy) ซึ่งขึ้นอยู่กับ
 ไอออนที่เคลื่อนที่เข้าชนอะตอมที่ผิวเป้า ในตารางที่ 2.4 แสดงให้เห็นถึงค่าพลังงานขีดเริ่มของธาตุ

ชนิดต่างๆ และค่ายึดของการสปัตเตอริงของธาตุชนิดต่างๆ ที่ถูกระดมยิงด้วยไอออนของอาร์กอนที่มีพลังงานแตกต่างกัน โดยขีดเริ่มของการสปัตเตอริง (sputtering threshold) จะอยู่ในช่วง 10-40 อิเล็กตรอน โวลต์ และที่พลังงานไอออนของอาร์กอนสูงกว่าพลังงานขีดเริ่ม ยึดของการสปัตเตอริงจะเพิ่มขึ้นตามพลังงานของไอออนของอาร์กอน

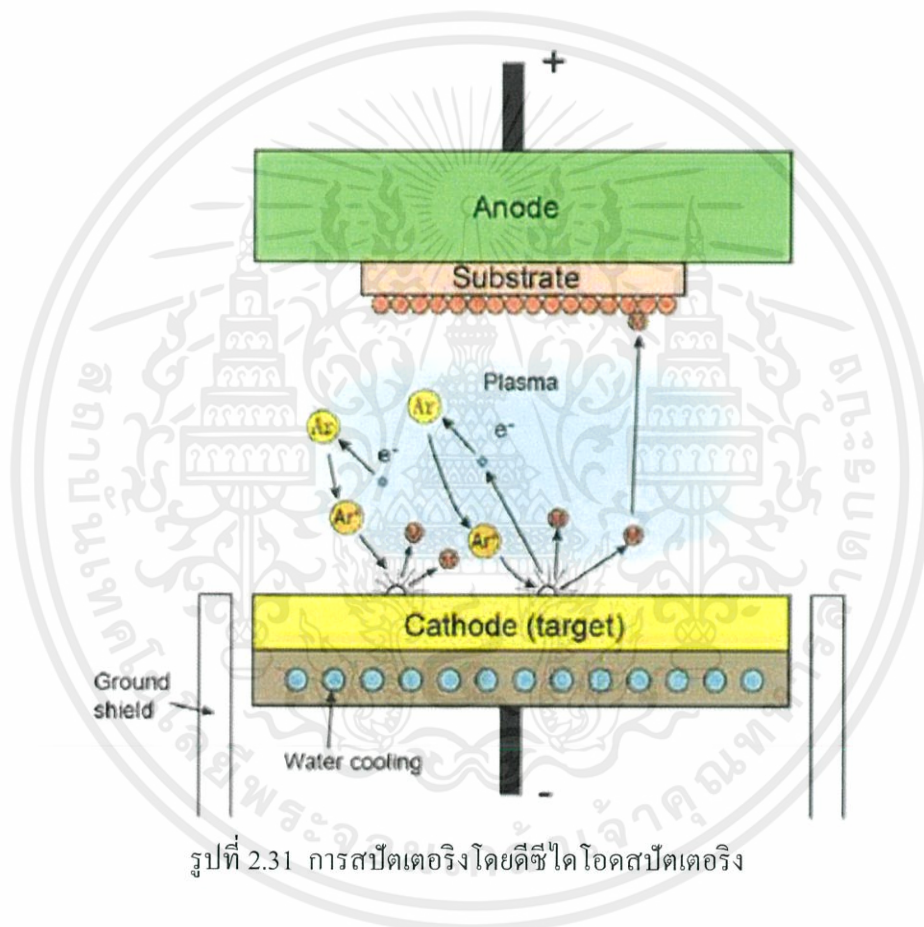
ตารางที่ 2.4 ค่าพลังงานขีดเริ่มและค่ายึดของการสปัตเตอริงของธาตุชนิดต่างๆ

	Theshold (eV)	Ar ⁺ energy (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

2.8.2.2 ดีซีไดโอดสปัตเตอริง

ในระบบดีซีไดโอดสปัตเตอริงจะประกอบไปด้วยขั้วคาโทดและขั้วแอโนดวางอยู่ในระบบสุญญากาศภายใต้ความดันและศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสม โดยเป้าจะติดตั้งไว้ที่ด้านหน้าของขั้วคาโทด และแผ่นรองรับหรือชิ้นงานที่ต้องการเคลือบสารจะถูกวางอยู่ที่ขั้วแอโนด ภายในภาชนะสุญญากาศจะเต็มไปด้วยก๊าซที่ใช้ในการสปัตเตอริง โดยการดีสชาร์จจะถูกสร้างขึ้นระหว่างขั้วคาโทดและขั้วแอโนด โดยอาศัยการสร้างสนามไฟฟ้าช่วยในการเร่งอิเล็กตรอนให้เคลื่อนที่เข้าชน

อะตอมของก๊าซที่ใช้ในการสปัตเตอริงและเกิดการแตกตัวเป็นไอออน โดยไอออนของก๊าซที่ใช้ในการสปัตเตอริงจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าไปยังขั้วคาโทดและพุ่งเข้าชนอะตอมที่ผิวเป้าให้หลุดออกมาและเคลือบเป็นฟิล์มบางที่แผ่นรองรับหรือชิ้นงานที่เราต้องการเคลือบพร้อมกับมีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิออกมาด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.31 ซึ่งอิเล็กตรอนเหล่านี้มีผลทำให้การโก้วล็ดิสซาร์จยังคงเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่อง เพราะว่อิเล็กตรอนจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณที่เกิดพลาสมาและทำให้เกิดการชนกับอะตอมของก๊าซที่ใช้ในการสปัตเตอริง และเกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวกเพิ่มขึ้นมา ก่อนที่อิเล็กตรอนเหล่านี้จะเคลื่อนที่ไปอยู่ที่ขั้วอโนด



รูปที่ 2.31 การสปัตเตอริงโดยดีซีไดโอดสปัตเตอริง

2.8.2.3 ดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

การกำเนิดพลาสมาในวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงเกิดจากการใช้สนามไฟฟ้าเร่งอิเล็กตรอนให้เข้าชนอะตอมของก๊าซที่ใช้ในการสปัตเตอริงให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวกและอิเล็กตรอน โดยไอออนบวกจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าให้เคลื่อนที่เข้าชนอะตอมที่ผิวเป้าให้หลุดออกมาและมีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิออกมาภายหลังจากการชนของไอออนบวกที่ผิวเป้า ดังนั้นถ้าสามารถกักเก็บอิเล็กตรอนไว้ที่หน้าผิวเป้า และเพิ่มระยะทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนให้เพิ่มขึ้นก็จะเป็นการเพิ่มโอกาสในการชนกับอะตอมของก๊าซที่ใช้ในการสปัตเตอริงให้เกิดการ

แตกตัวเป็นไอออนบวกมากขึ้นและถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าให้เคลื่อนที่เข้าชนเป้ามากขึ้น ผลคือทำให้อัตราการสปีดเตอริงสูงขึ้น ทั้งนี้การกักเก็บอิเล็กตรอนและการเพิ่มระยะทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนให้เพิ่มขึ้นนั้นสามารถทำได้โดยการป้อนสนามแม่เหล็กในทิศทางที่เหมาะสมให้กับระบบดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง ทั้งนี้เมื่ออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า q เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v_{\perp} ในทิศทางตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า B จะเกิดแรงกระทำกับอนุภาคนั้น ซึ่งมีค่า

$$F = Bqv_{\perp} \quad (2.91)$$

โดยแรงที่กระทำกับอนุภาคมีทิศทางตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กและความเร็วของการเคลื่อนที่ ซึ่งจะมีผลทำให้ประจุไฟฟ้าที่มีมวล m เกิดการเคลื่อนที่เป็นวงกลม โดยที่

$$F_B = F_C \quad (2.92)$$

โดย F_B คือ แรงเนื่องจากสนามแม่เหล็ก

F_C คือ แรงสู่ศูนย์กลางของการเคลื่อนที่

จะได้ว่า

$$qv_{\perp}B = \frac{mv_{\perp}^2}{r} \quad (2.93)$$

โดยจะได้รัศมีของการเคลื่อนที่

$$r = mv_{\perp}/Bq \quad (2.94)$$

โดยเรียกรัศมีของประจุไฟฟ้าที่มีการเคลื่อนที่เป็นวงกลมว่ารัศมีไซโคลตรอน (cyclotron radius) หรือรัศมีลาร์มอร์ (larmor radius) โดยอิเล็กตรอนจะได้รับผลกระทบจากแรงเนื่องจากแม่เหล็กนี้ แต่สำหรับไอออนซึ่งมีมวลมากจะได้รับผลกระทบของแรงเนื่องจากสนามแม่เหล็กนี้น้อย

และจาก $v = \omega r$ จะได้ความเร็วเชิงมุมของการเคลื่อนที่ของอนุภาคเป็น

$$\omega = \frac{|q|B}{m} \quad (2.95)$$

และเมื่อพิจารณาอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจากขั้วคาโทดแล้วเคลื่อนที่ภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกัน จากสมการของลอเรนซ์

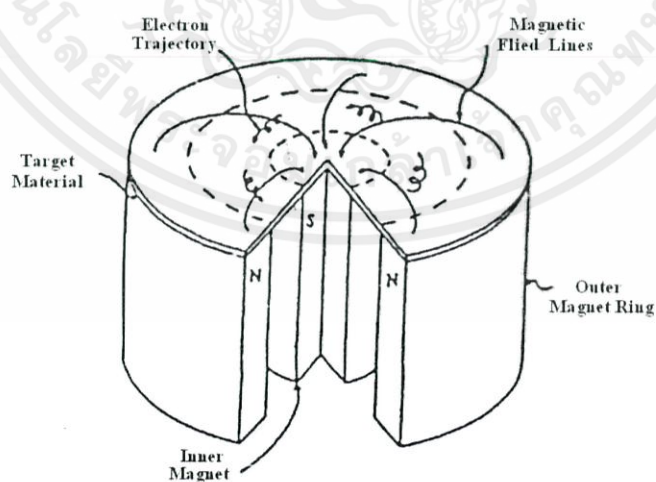
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาและใช้งานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (2.96)$$

- โดย
- e = ประจุของอิเล็กตรอน
 - m = มวลของอิเล็กตรอน
 - \vec{v} = ความเร็วของอิเล็กตรอน
 - \vec{E} = สนามไฟฟ้า
 - \vec{B} = สนามแม่เหล็ก

ด้วยอิทธิพลของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกันจะทำให้ อิเล็กตรอนถูกกักเก็บไว้ที่บริเวณผิวเป้าและมีการเคลื่อนที่เป็นรูปเกลียววงกลม ด้วยความเร็วเชิงมุม $\omega = eB/m$ ไปในเส้นทางเลื่อนลอยของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกัน ($\vec{E} \times \vec{B}$ drift path) ที่เกิดขึ้นและจุดศูนย์กลางของการเคลื่อนที่เป็นวงกลมแบบเลื่อนลอยใน ทิศทางของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกันด้วยความเร็ว E/B ถูกแสดงในรูป 2.32 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนแบบนี้จะเพิ่มโอกาสในการชนกันระหว่าง อิเล็กตรอนกับโมเลกุลของก๊าซและเกิดกระบวนการแตกตัวเป็นไอออนบวกสูงขึ้นบริเวณผิวเป้า และไอออนบวกที่เกิดขึ้นจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ชนเป้าหมายมากขึ้น ซึ่งจะเป็นผลทำให้อัตราการ สปีดเตอริงมีค่าสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีดีซีโคโอดสปีดเตอริง ส่งผลให้วิธีดีซีแมกนีตรอน สปีดเตอริงเป็นวิธีที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มบางกันอย่างแพร่หลายในงานวิจัยและในงาน อุตสาหกรรม



เอกสารนี้เป็นรูปที่ 2.32 การเคลื่อนที่เป็นเกลียววงกลมของอิเล็กตรอนที่ถูกกักเก็บไว้ที่ผิวเป้าในเส้นทางด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น เลื่อนลอยของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกันมีการนำไปใช้

และจากความเร็ว v ที่เกิดขึ้น โดยการเร่งจากสนามไฟฟ้าที่สม่ำเสมอที่เกิดจากการจ่ายความต่างศักย์ให้กับขั้วอิเล็กโทรด จะได้ว่า

$$\frac{1}{2}mv^2 = |q|V \quad (2.97)$$

จะได้ว่า

$$v = \sqrt{\frac{2|qV|}{m}} \quad (2.98)$$

แทนค่า (2.98) ลงใน (2.94) จะได้

$$r = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2mv}{|q|}} \quad (2.99)$$

โดยจะได้รัศมีของอนุภาคเคลื่อนที่ภายใต้อิทธิพลของแรงลอเรนซ์ ในกรณีของอิเล็กตรอน จะได้ว่า

$$r = 0.33 \times 10^{-5} \frac{\sqrt{V}}{B} \quad (2.100)$$

และสามารถวิเคราะห์ผลของสนามแม่เหล็กที่มีต่อการดิสรจาร์จ ซึ่งพิจารณาได้จากสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งคัทออฟ (cut-off magnetic field; B_c) โดยสนามแม่เหล็กจะมีผลต่อการดิสรจาร์จเมื่อความเข้มของสนามแม่เหล็กมีค่ามากกว่าสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งคัทออฟ ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ 2.101

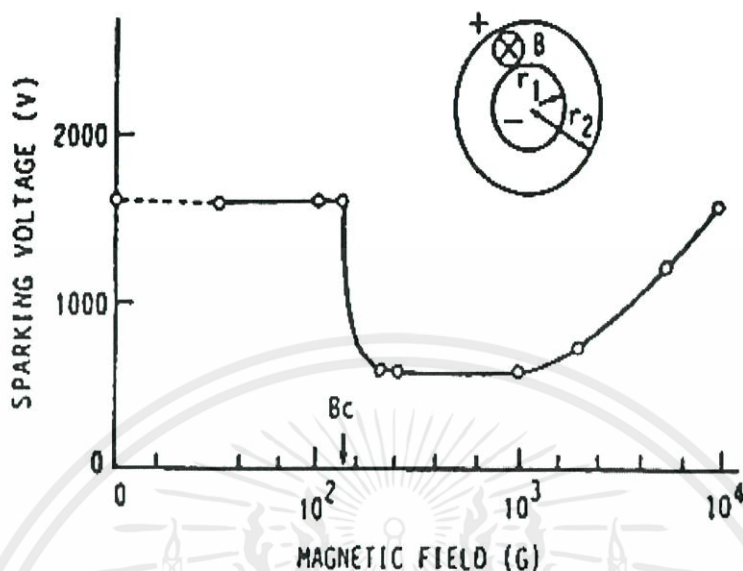
$$B_c = \frac{1}{L} \sqrt{\frac{2mV_c}{e}} \quad \text{สำหรับขั้วอิเล็กโทรดแผ่นราบ} \quad (2.101)$$

โดย V_c คือ ความต่างศักย์ที่จ่ายระหว่างขั้วอิเล็กโทรด

L คือ ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.2.4 สนามแม่เหล็กที่มีผลต่อการดิซชาร์จ



รูปที่ 2.33 ความต่างศักย์ของการดิซชาร์จกับสนามแม่เหล็กที่วัดในขั้วอิเล็กโทรมอดโคแอคเซียลทรงกระบอก

ในรูปที่ 2.33 แสดงผลของสนามแม่เหล็กตามขวางกับความต่างศักย์ของการดิซชาร์จที่วัดในขั้วอิเล็กโทรมอดโคแอคเซียลทรงกระบอกซึ่งทำจากทองแดง โดยมีรัศมีภายใน 5 มิลลิเมตร และรัศมีภายนอก 15 มิลลิเมตร ที่ความดัน 40 มิลลิทอร์ โดยสนามแม่เหล็กที่มีค่าต่ำกว่าสนามแม่เหล็กที่ยุติผล (cut-off magnetic field; B_c) อิเล็กตรอนในบริเวณขั้วคาโทดจะไปถึงขั้วแอโนดโดยปราศจากการแสดงการเคลื่อนที่เป็นรูปเกลียวกลมระหว่างขั้วอิเล็กโทรมอด เนื่องจากรัศมีของการเคลื่อนที่เป็นเกลียววงกลมมีค่ามากกว่าระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรมอดและเมื่อสนามแม่เหล็กมีค่ามากกว่าสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งยุติผล ความต่างศักย์ของการดิซชาร์จจะลดลงอย่างฉับพลัน ซึ่งเป็นผลจากการเพิ่มขึ้นของการชนระหว่างอิเล็กตรอนกับอะตอมที่เป็นกลางและการเกิดการแตกตัวเป็นไอออนเพิ่มขึ้น และเมื่อสนามแม่เหล็กมีค่าสูงมากๆ ความต่างศักย์ของการดิซชาร์จจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามสนามแม่เหล็ก ซึ่งถูกทำให้เกิดขึ้นโดยการเพิ่มขึ้นของการสูญเสียพลังงานของอิเล็กตรอนที่ผ่านพ้นการชนอย่างต่อเนื่อง

2.8.3 องค์ประกอบที่สำคัญของหัวดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ในการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูง และจะดำเนินการแก้ไขทันที

สำหรับการออกแบบสร้างหัวแมกนีตรอนให้สามารถใช้ในการสปีดเตอริงได้อย่างมีประสิทธิภาพนั้น ควรจะคำนึงถึงองค์ประกอบที่สำคัญ ดังต่อไปนี้

2.8.3.1 วัสดุที่ใช้สร้างหัวดีซีแมกนีตรอน

ในการสร้างหัวดีซีแมกนีตรอนขนาดเล็กนั้น วัสดุที่เลือกใช้ควรมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1. เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงทนทานเหมาะสมกับการสร้างชิ้นงานขนาดเล็ก สามารถถึงขั้นรูปได้ดังต้องการ และเชื่อมประกอบได้โดยไม่เกิดการร้าวซึม
2. เป็นวัสดุที่มีการยึดเกาะของก๊าซต่ำ สามารถไล่ก๊าซบนผิววัสดุภายในระบบ สูญญากาศได้โดยง่าย
3. เป็นวัสดุที่มีความทนทานต่อการกัดกร่อนที่เกิดจากสารเคมี
4. เป็นวัสดุที่มีการนำไฟฟ้าที่ดี
5. เป็นวัสดุที่มีการนำความร้อนที่ดี
6. เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติไม่เป็นสารแม่เหล็ก เพราะจะไปกักกันสนามแม่เหล็กที่ผิวเป้าให้มีค่าน้อยลง

2.8.3.2 การให้ความเย็นที่เป้า

พลังงานที่จ่ายเข้าไปในกระบวนการสเปกโตรริงจะทำให้ไอออนบวกที่เคลื่อนที่เข้าชนผิวเป้ามีพลังงานค่อนข้างสูง ซึ่งส่วนใหญ่จะเปลี่ยนแปลงไปอยู่ในรูปของพลังงานความร้อนที่เป้าและความร้อนที่เกิดขึ้นที่ผิวเป้าในขณะที่เกิดการสเปกโตรริงอาจจะมีค่าสูงกว่าปกติ และสามารถนำไปสู่ความเสียหายของการเชื่อมต่อระหว่างเป้าและแผ่นหลังที่เป็นขั้วไฟฟ้า เป้า และโอรัง เป็นต้น ความร้อนที่มากเกินไปนี้สามารถหลีกเลี่ยงได้โดยการให้ความเย็นกับเป้าด้วยน้ำหรือของเหลวที่เหมาะสมอื่นๆ และควรระวังในการรื้อซ่อมออกมาของน้ำ

2.8.3.3 การควบคุมให้เกิดการสเปกโตรริงเฉพาะผิวเป้า

บริเวณของเป้าจะถูกล้อมรอบด้วยกำแพงบริเวณมืด (dark space shield) ซึ่งเรียกกันโดยทั่วไปว่ากราวด์ชิลด์ (ground shields) ประโยชน์ของกราวด์ชิลด์ก็คือควบคุมให้การระดมยิงของไอออนและการสเปกโตรริงเกิดที่เป้าเท่านั้น มิฉะนั้นแผ่นหลังของเป้าและตัวยึดเป้าอาจจะถูกสเปกโตรริงออกมาด้วย และก่อให้เกิดความไม่บริสุทธิ์ของฟิล์มที่เคลือบในการขัดขวางการระดมยิงของบริเวณที่ถูกป้องกัน ระยะห่างระหว่างเป้าและกราวด์ชิลด์ต้องมีค่าน้อยกว่าความหนาของบริเวณมืด (dark space thickness) เพื่อไม่ให้เกิดการโกล์วดิสชาร์จในพื้นที่ว่างนี้ ในบางโอกาสพบว่าตำแหน่งที่เป็นขอบคมและสิ่งสกปรกชิ้นเล็กๆ จะทำให้เกิดการโกล์วดิสชาร์จเฉพาะที่หรือการอาร์คเฉพาะที่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับการดิสชาร์จด้วยไฟฟ้ากระแสดรจนั้น ขอบที่คมหรือสิ่งสกปรกเล็กๆ ต้องกำจัดออกไปเสียก่อน และเนื่องจากความหนาของบริเวณมืดจะมีค่าลดลงตามการก้าว

ไม่ว่ากรณีใดก็ตาม ความดันที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นระยะห่างระหว่างเป้าและกราวด์ชิลด์ควรมีค่าอยู่ในขีดจำกัดของเป้า

ความดันสูงสุดของระบบและภายใต้การจัดวางของสนามแม่เหล็กที่ตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า ความหนาของบริเวณมีดจะลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการจัดวางของสนามแม่เหล็กเป็นการเพิ่มอย่าง สม่าเสมอของความดันก๊าซในบริเวณดิสชาร์จ์ ดังแสดงในความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.102

ผลของสนามแม่เหล็กกับความดันยังผล (P_e) แสดงโดย

$$p_e/p \cong [1 + (\omega\tau)^2]^{1/2} \quad (2.102)$$

โดย ω คือ ความถี่ของการเคลื่อนที่เป็นเกลียววงกลมของอิเล็กตรอน
 τ คือ เวลาปลอดการชนเฉลี่ย (mean free time)
 p คือ ความดันของก๊าซที่ใช้ในการดิสชาร์จ์

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

$$\omega\tau \cong \lambda_0 B(e/m)^{1/2} / \sqrt{2} p V_0^{1/2} \quad (2.103)$$

โดย λ_0 คือ ระยะทางปลอดการชนเฉลี่ยของอิเล็กตรอนที่ความดัน 1 ทอรั
 B คือ ความเข้มข้นของสนามแม่เหล็ก
 e/m คือ ค่าประจุมวลของอิเล็กตรอน
 V_0 คือ ความต่างศักย์ที่ใช้เร่งอิเล็กตรอน

และความหนาของบริเวณมีดจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเป็นฟังก์ชันกับความต่างศักย์ของการดิสชาร์จ์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งการแปรผันแบบเอกโปเนนเชียลของความหนาของบริเวณมีดกับความต่าง ศักย์ของการดิสชาร์จ์ขึ้นอยู่กับความดันของระบบสุญญากาศ

ความหนาของบริเวณมีดและความต่างศักย์ของการดิสชาร์จ์มีความสัมพันธ์กันดังแสดงใน สมการที่ (2.104)

$$d = cV^{-m} \quad (2.104)$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ความหนาของบริเวณมีด กระแส และความต่างศักย์คือตามกฎของซิลด์ ซึ่งอยู่ใน ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ผู้ก้ทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ ความสัมพันธ์

$$I \propto \frac{V^{\frac{3}{2}}}{d^2} \quad (2.105)$$

เมื่อการขึ้นกับความต่างศักย์ของบริเวณมีดถูกแทนลงในสมการ(2.104) จะได้ความสัมพันธ์

$$I \propto kV^n \quad (2.106)$$

โดย k คือ ค่าคงที่ของความสัมพันธ์

n คือ ตัวเลขที่แสดงความสามารถในการกักอิเล็กตรอนโดยสนามแม่เหล็ก

2.8.3.4 ลักษณะของสนามแม่เหล็ก

สนามแม่เหล็กในระบบดีซีแมกนีตรอนสเปดเตอร์นั้นจะมีผลต่อลักษณะของพลาสมาที่เกิดขึ้น ซึ่งจะสอดคล้องกับอัตราการเคลือบฟิล์มและคุณสมบัติทางด้านฟิสิกส์ของฟิล์มบางที่เคลือบ โดยสามารถแบ่งลักษณะของสนามแม่เหล็กที่บริเวณผิวเป้าออกเป็น 3 ประเภท ดังนี้

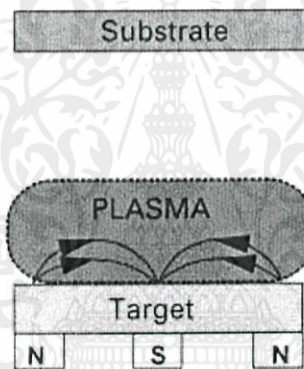
1. แม่เหล็กตรงกลางมีความเข้มข้นของสนามแม่เหล็กเท่ากับแม่เหล็กด้านนอก โดยเส้นแรงแม่เหล็กทั้งหมดจะเชื่อมปิดระหว่างแม่เหล็กตรงกลางกับแม่เหล็กด้านนอกที่บริเวณผิวเป้า ซึ่งมีชื่อเรียกว่า แมกนีตรอนแบบสมมาตร (balanced magnetron) หรือแมกนีตรอนแบบสามัญ (conventional magnetron)

2. แม่เหล็กตรงกลางมีความเข้มข้นของสนามแม่เหล็กมากกว่าแม่เหล็กด้านนอก โดยเส้นแรงแม่เหล็กส่วนหนึ่งจะเชื่อมปิดระหว่างแม่เหล็กตรงกลางกับแม่เหล็กด้านนอก และเส้นแรงแม่เหล็กส่วนที่เหลือจะมีทิศทางไปยังผนังของภาชนะสุญญากาศ ซึ่งมีชื่อเรียกว่า แมกนีตรอนแบบไม่สมมาตรประเภทที่ 1 (unbalanced magnetron type 1)

3. แม่เหล็กตรงกลางมีความเข้มข้นของสนามแม่เหล็กน้อยกว่าแม่เหล็กด้านนอก โดยเส้นแรงแม่เหล็กส่วนหนึ่งจะเชื่อมปิดระหว่างแม่เหล็กตรงกลางกับแม่เหล็กด้านนอก และเส้นแรงแม่เหล็กส่วนที่เหลือจะมีทิศทางไปยังแผ่นรองรับ ซึ่งมีชื่อเรียกว่า แมกนีตรอนแบบไม่สมมาตรประเภทที่ 2 (unbalanced magnetron type 2)

ในกรณีดีสชาร์จของระบบดีซีแมกนีตรอนที่แม่เหล็กตรงกลางมีความเข้มข้นของสนามแม่เหล็กเท่ากับแม่เหล็กด้านนอก โดยสนามแม่เหล็กที่ใส่เข้าไปจะทำหน้าที่กักเก็บอิเล็กตรอนไว้ที่หน้าผิวเป้าและอิเล็กตรอนเหล่านี้จะมีการเคลื่อนที่เป็นรูปเกลียววงกลมในเส้นทางเลือนลอยของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกันด้วยแรงลอเรนซ์ ซึ่งนำไปสู่โอกาสในการชนกับอะตอมที่เป็นกลางและเกิดกระบวนการแตกตัวเป็นไอออนบวกสูงขึ้น โดยไอออนบวกที่ถูกสร้างขึ้นจากกระบวนการแตกตัวจะไม่ถูกกักโดยสนามแม่เหล็กและจะถูกเร่งโดยสนามไฟฟ้าไปยังเป้าที่ขั้วคาโทด และเคลื่อนที่เข้าชนกับอะตอมที่ผิวเป้าทำให้เกิดการ

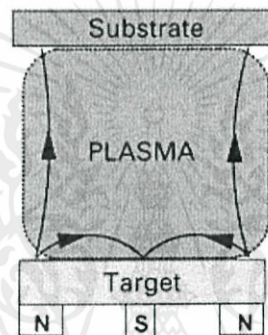
สปัตเตอร์ริงของเป้าและมีการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิออกมาด้วย โดยอิเล็กตรอนทุติยภูมิเหล่านี้จะถูกเร่งกลับเข้าไปยังการดิซชาร์จ และอิเล็กตรอนส่วนใหญ่จะถูกกักไว้ในเส้นทางเคลื่อนที่ของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกัน ซึ่งเป็นผลให้เกิดการแตกตัวในปริมาณสูงขึ้นก่อนที่จะสูญเสียไป โดยจะทำให้พลาสมามีความหนาแน่นสูงในบริเวณผิวเป้า และจากการที่พลาสมามีความหนาแน่นสูงในบริเวณผิวเป้า นั้น ฟิล์มบางที่ปลุกบนแผ่นรองรับในตำแหน่งภายในบริเวณนี้จะถูกควบคุมโดยการระดมยิงของไอออนซึ่งส่งผลกระทบต่อโครงสร้างและคุณสมบัติของฟิล์มบางที่ทำการปลุก สำหรับแผ่นรองรับที่วางอยู่นอกบริเวณนี้จะวางอยู่ในบริเวณที่ความหนาแน่นของพลาสมาต่ำ เป็นผลให้กระแสไอออนที่แผ่นรองรับมีค่าน้อยกว่า 1 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งไม่เพียงพอที่จะปรับปรุงหรือเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของฟิล์ม ดังนั้นจึงเป็นการยากที่จะเคลือบฟิล์มให้หนาแน่นเต็มที่ในบริเวณกว้างหรือมีส่วนประกอบที่สมบูรณ์ในการใช้แมกนีตรอนแบบสมมาตร



รูปที่ 2.34 ลักษณะของแมกนีตรอนแบบสมมาตร

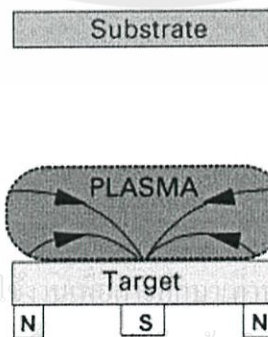
สำหรับในกรณีแม่เหล็กตรงกลางมีความเข้มของสนามแม่เหล็กน้อยกว่าแม่เหล็กด้านนอก ในกรณีนี้เส้นแรงแม่เหล็กส่วนหนึ่งจะเชื่อมปิดระหว่างแม่เหล็กตรงกลางและแม่เหล็กด้านนอก และเส้นแรงแม่เหล็กส่วนที่เหลือจะมีทิศทางไปยังแผ่นรองรับ โดยอิเล็กตรอนทุติยภูมิส่วนหนึ่งที่มีพลังงานสูงที่ไม่ถูกกักเก็บไว้ในเส้นทางเคลื่อนที่ของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางที่มีทิศทางตั้งฉากกันจะเคลื่อนที่เป็นเกลียววงกลมตามเส้นแรงแม่เหล็กที่มีทิศทางไปยังแผ่นรองรับและเกิดการชนกับอะตอมที่เป็นกลางแล้วเกิดการแตกตัวเป็นไอออนในบริเวณผิวหน้าของแผ่นฐานรองรับ จึงเกิดไอออนบวกเพิ่มสูงขึ้นบริเวณแผ่นรองรับ ซึ่งเป็นผลให้พลาสมาจะถูกกักเก็บไว้ได้น้อยลงในบริเวณผิวเป้า แต่จะมีขนาดเพิ่มขึ้นโดยมีทิศทางไปยังแผ่นรองรับ ซึ่งเป็นผลให้กระแสไอออนมีค่าสูง โดยได้รับจากพลาสมาที่เกิดขึ้น โดยวินโดวส์และซาว์ไวด์ และกลุ่มนักวิจัยที่ทำการวิจัยเกี่ยวกับเรื่องนี้ได้แสดงให้เห็นต่อมาว่าที่แผ่นรองรับมีความหนาแน่นของกระแสไอออน 5 มิลลิแอมป์ต่อตารางเมตรและมากกว่านั้น ซึ่งอยู่ในระดับที่มีปริมาณสูงกว่ากรณี

แมกนีตรอนแบบสมมาตร และเป็นการแสดงให้เห็นว่าแมกนีตรอนแบบไม่สมมาตรประเภทที่ 2 เป็นแหล่งกำเนิดไอออนที่มีประสิทธิภาพมากและเป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวางในการเคลือบฟิล์มโดยวิธีสปัตเตอร์ริง และนอกจากนี้กระแสไอออนที่แผ่นรองรับยังเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสที่เป้า และอัตราการเคลือบเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสที่เป้า ผลลัพธ์ก็คืออัตราส่วนของไอออนต่ออะตอมที่แผ่นรองรับยังมีค่าคงที่ตามอัตราการเคลือบที่เพิ่มขึ้น และการเคลือบฟิล์มที่หนาแน่นโดยมีค่ากระแสไอออนต่อพื้นที่สูง ซึ่งมีค่ามากกว่า 2 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตรของพลังงานไอออนที่ค่อนข้างต่ำ โดยมีค่าน้อยกว่า 100 อิเล็กตรอนโวลต์ เป็นที่พึงปรารถนาโดยปราศจากการนำไปสู่ความเค้นที่มากกว่าปกติ (excessive stress) และความเค้นภายใน (intrinsic stress) ซึ่งทำได้โดย แมกนีตรอนแบบไม่สมมาตรประเภทที่ 2



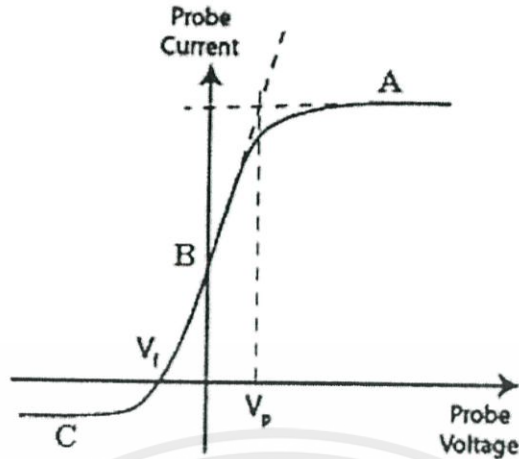
รูปที่ 2.35 ลักษณะของแมกนีตรอนแบบไม่สมมาตรประเภทที่ 2

สำหรับในกรณีแม่เหล็กตรงกลางมีความเข้มของสนามแม่เหล็กมากกว่าแม่เหล็กด้านนอก ในกรณีนี้เส้นแรงแม่เหล็กส่วนหนึ่งจะเชื่อมปิดระหว่างแม่เหล็กตรงกลางและแม่เหล็กด้านนอก และเส้นแรงแม่เหล็กส่วนที่เหลือจะมีทิศทางไปยังแผ่นผนังของภาชนะสุญญากาศ ซึ่งทิศทางของอิเล็กตรอนและพลาสมาจะห่างไปจากแผ่นรองรับ เป็นผลให้ความหนาแน่นของพลาสมาในบริเวณแผ่นรองรับมีค่าต่ำ ซึ่งน้อยกว่า 1 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร การออกแบบในลักษณะนี้จะไม่เป็นที่ยอมรับ เพราะการให้ผลของกระแสไอออนต่ำที่แผ่นรองรับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.36 ลักษณะของแมกนีตรอนแบบไม่สมมาตรประเภทที่ 1



รูปที่ 2.38 แผนภาพลักษณะเฉพาะของกระแสกับความต่างศักย์

เมื่อความต่างศักย์ของหัววัดมีค่าเท่ากับศักย์ของพลาสมาที่ตำแหน่ง V_p ซึ่งไม่มีสนามไฟฟ้าอยู่รอบๆ หัววัด ตำแหน่งนี้จึงไม่เกิดพลาสมาชิต อิเล็กตรอนและไอออนจะเคลื่อนย้ายไปยังหัววัด โดยกระแสอิเล็กตรอนจะสะสมที่หัววัดมากกว่ากระแสของไอออน ที่ตำแหน่ง V_p กระแสจะมีค่า

$$I_p = \frac{1}{4} eAn_e \left(\frac{8kT_e}{\pi m_e} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.107)$$

เมื่อความต่างศักย์ของหัววัดมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าตำแหน่ง V_p ในบริเวณ A จะเข้าสู่บริเวณกระแสอิเล็กตรอนอิ่มตัว (I_{sc})

เมื่อความต่างศักย์ของหัววัดมีค่าลดต่ำกว่าตำแหน่ง V_p ในบริเวณ B อิเล็กตรอนจะถูกผลักออกจากหัววัดเพิ่มขึ้น มีเพียงแต่อิเล็กตรอนที่มีพลังงานเพียงพอที่จะสามารถเคลื่อนที่ไปยังหัววัด กระแสอิเล็กตรอนจะมีค่า

$$I_e = eAn_e \left(\frac{kT_e}{2\pi m_e} \right)^{\frac{1}{2}} \exp\left(\frac{-e(V_p - V)}{kT_e} \right) \quad (2.108)$$

เมื่อความต่างศักย์ของหัววัดลดลงจนมาอยู่ที่ตำแหน่งของศักย์ลอย (V_p) กระแสอิเล็กตรอนและกระแสไอออนที่หัววัดจะมีค่าเท่ากัน และกระแสรวมที่หัววัดมีค่าเป็นศูนย์

เมื่อความต่างศักย์ของหัววัดมีค่าต่ำกว่าตำแหน่ง V_p ในบริเวณนี้จะมีสนามไฟฟ้าอยู่รอบๆ หัววัดและจะสร้างพลาสมาชิตขึ้นมา อิเล็กตรอนจะถูกผลักออกไปจากหัววัดส่วนไอออนซึ่งเคลื่อนที่แบบสุ่มผ่านขอบชิตจะถูกสะสมไว้ที่หัววัด และเข้าสู่บริเวณกระแสไอออนอิ่มตัว (I_{is}) ในบริเวณ C โดยกระแสไอออน จะมีค่า

$$I_i = -\frac{1}{2} e A n_i \left(\frac{kT_e}{m_i} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.109)$$

2.8.4.2.1 อุณหภูมิอิเล็กตรอน (T_e)

เมื่อหาอัตราการเปลี่ยนแปลงลอการิทึมของกระแสอิเล็กตรอนในสมการที่ (2.108) ก็จะสามารถทำการวิเคราะห์หาค่าออกมาได้ ดังนี้

$$\frac{d \ln I_e}{dV} = \frac{e}{kT_e} \quad (2.110)$$

หรือจะหาค่าจากการรวมสมการที่ (2.108) สำหรับกระแสอิเล็กตรอนและสมการที่ (2.109) สำหรับกระแสไอออน ซึ่งจะได้ว่า

$$I = -\frac{1}{2} e A n_i \left(\frac{kT_e}{m_i} \right)^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{4} e A n_e \left(\frac{8kT_e}{\pi m_e} \right)^{\frac{1}{2}} \exp\left(\frac{-e(V_p - V)}{kT_e} \right) \quad (2.111)$$

จากการแจกแจงความเร็วอิเล็กตรอนของแมกเวลล์-โบลซ์มันน์ ค่า $n_i = n_e = n$ จะได้ว่า

$$I = \frac{1}{2} e A n \left(\frac{kT_e}{m_i} \right)^{\frac{1}{2}} \left[-1 + \left(\frac{2m_i}{\pi m_e} \right)^{\frac{1}{2}} \exp\left(\frac{-e(V_p - V)}{kT_e} \right) \right] \quad (2.112)$$

ที่ตำแหน่ง V_f กระแสที่หัววัดจะมีค่าเป็นศูนย์ ($I=0$)

$$I = 0 = \frac{1}{2} e A n \left(\frac{kT_e}{m_i} \right)^{\frac{1}{2}} \left[-1 + \left(\frac{2m_i}{\pi m_e} \right)^{\frac{1}{2}} \exp\left(\frac{e(V_f - V_p)}{kT_e} \right) \right] \quad (2.113)$$

จะได้ว่า

$$\frac{kT_e}{e} = \frac{2(V_p - V_f)}{\ln\left(\frac{2m_i}{\pi m_e} \right)} \quad (2.114)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพียงอย่างเดียวเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้อัปโหลดขึ้นระบบคลังความรู้ของมหาวิทยาลัยราชภัฏวชิรวิทยาดอนเมือง
หน่วยของ kT_e/e คือ โวลต์ ดังนั้น สามารถหา kT_e ได้ในหน่วยอิเล็กตรอนโวลต์

2.8.4.2.2 ความหนาแน่นพลาสมา

ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (n_e) และความหนาแน่นของไอออน (n_i) ที่อยู่ในสถานะเป็นกลางทางไฟฟ้าของพลาสมา จะมีค่าเท่ากัน $n_e \approx n_i \approx n_p$ โดย n_p คือความหนาแน่นของพลาสมา (n_p) โดยสามารถหาค่าความหนาแน่นพลาสมาได้ จากสมการ

$$n_p = \frac{I_{is}}{0.6Ae} \left(\frac{m_i}{kT_e} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.115)$$

โดย A คือ พื้นที่ของหัววัดที่สัมผัสกับพลาสมา
 I_{is} คือ กระแสไอออนอิมิต์
 m_i คือ มวลของไอออน

2.8.4.2.3 ผลของสนามแม่เหล็ก

ลักษณะเฉพาะของกระแสกับความต่างศักย์ที่ได้จากหัววัดอยู่ในกรณีที่มีการเคลื่อนที่ของอนุภาคในพลาสมาถูกควบคุมด้วยสนามไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว ถ้าสนามแม่เหล็กถูกนำเข้ามาในพลาสมา อิเล็กตรอนและไอออนจะไม่เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงตามทิศทางของสนามไฟฟ้า แต่จะเคลื่อนที่เป็นวงกลมเนื่องจากอิทธิพลของสนามแม่เหล็ก โดยการเคลื่อนที่เป็นวงกลมรอบเส้นแรงแม่เหล็กด้วยรัศมีลาร์มอร์ $r = mv_{\perp}/eB$ เป็นผลให้การเคลื่อนที่ของอนุภาคข้ามผ่านเส้นแรงแม่เหล็ก จะถูกควบคุมอย่างรุนแรง ในขณะที่การเคลื่อนที่ตามเส้นแรงแม่เหล็กแทบจะไม่มีผลกระทบ โดยผลรวมของสนามแม่เหล็กสามารถละลายได้ในกรณีที่ $r \gg a$ เมื่อ a คือขนาดของหัววัด

เนื่องจากรัศมีลาร์มอร์ของอิเล็กตรอนมีค่าน้อยกว่าของไอออนด้วยอัตราส่วนของ m_e/m_i ดังนั้นอิเล็กตรอนจะได้รับผลกระทบจากสนามแม่เหล็กมากกว่าไอออน เพราะฉะนั้นโดยทั่วไป $r_{Li} > a$ กระแสไอออนอิมิต์แทบจะไม่ได้รับผลกระทบจากสนามแม่เหล็ก แต่ในทางกลับกัน กระแสอิเล็กตรอนอิมิต์ ที่ถูกวัดโดยหัววัดที่ขนานกับสนามแม่เหล็กมีค่าลดลงอย่างมาก และกระแสอิเล็กตรอนอิมิต์ที่วัดโดยหัววัดที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก กระแสอิเล็กตรอนอิมิต์จะได้รับผลกระทบน้อยมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS โดยวิธีซัลเฟอไรเซชัน

3.1.1 การเตรียมแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ (งามนิตย์, 2530; ฐิตินัย, 2530)

1. ทำความสะอาดแผ่นกระจกสไลด์ด้วยน้ำยาล้างจาน
2. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปทำความสะอาดด้วยน้ำปลอดประจุที่ล้างในอ่างอัลตราโซนิค เป็นเวลา 10 นาที 3 ครั้ง
3. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วยอะซิโตน ในอ่างอัลตราโซนิค เป็นเวลา 10 นาที
4. ล้างกระจกสไลด์ด้วยเอทานอล ในอ่างอัลตราโซนิค เป็นเวลา 10 นาที
5. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปทำความสะอาดด้วยน้ำปลอดประจุที่ล้างในอ่างอัลตราโซนิค อีกครั้ง เป็นเวลา 10 นาที 3 ครั้ง
6. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
7. บรรจุแผ่นกระจกสไลด์ในถุงเพื่อนำไปใช้สำหรับการเตรียมฟิล์มบางของโลหะดีบุกเคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ โดยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงต่อไป

3.1.2 การเตรียมฟิล์มบางของโลหะดีบุกโดยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง (ฐิตินัย, 2556; ภารุจ, 2539)

1. ทำความสะอาดกระจกสไลด์ และแผ่นสแตนเลสด้วยอะซิโตนเพื่อกำจัดไขมันและเช็ดทำความสะอาดให้แห้ง
2. วางกระจกสไลด์ลงบนที่วางชิ้นงานในภาชนะสุญญากาศ จัดตำแหน่งของท่อก๊าซอาร์กอนให้อยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้อง โดยใช้ท่อก๊าซอาร์กอนอยู่ด้านบนใกล้กับเป่าสารเคลือบ
3. ปิดฝาด้านบนของภาชนะสุญญากาศให้สนิท ต้องระวังการบิดเบี้ยวของยางวงแหวน (o-ring)
4. เริ่มทำการสูบอากาศออกนอกภาชนะสุญญากาศ ตามขั้นตอนการเปิดเครื่อง
5. ทำการสูบอากาศออกจากห้องสุญญากาศด้วยปั๊มคิฟฟิวชันและปั๊มกลโรตารีจนกระทั่งความดันลงต่ำลงถึงระดับ 10^{-5} ทอร์ จากนั้นจึงค่อยๆ ป้อนแก๊สอาร์กอนเข้าสู่ระบบผ่านทางวาล์วเข็ม ส่งผลให้ความดันในห้องสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการดำเนินงานวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้เพื่อการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังขอสงวนสิทธิ์ในข้อมูลและเนื้อหาที่ปรากฏในเอกสารฉบับนี้ไว้ด้วย

ค่อยๆเพิ่มขึ้น สเตลความดันตัวบนจะอ่านได้เท่ากับ 1.0×10^{-1} ทอร์ และสเตลตัวล่างจะอ่านได้ในระดับ 10^{-5} ทอร์

6. เปิดสวิตช์แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงแรงดันสูง ค่อยๆ ปรับแรงดันไฟตรงให้เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนถึงประมาณ 220-250 โวลต์ พลาสมาจะเริ่มปรากฏให้เห็นเป็นสีม่วง
7. ค่อยๆ ปรับแรงดันไฟตรงให้เพิ่มขึ้นต่อไปอีกและลดปริมาณการไหลของก๊าซอาร์กอนลงอีก จุดประสงค์เพื่อให้กระแสเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ และพลาสมาจะเริ่มจุดติดที่กระแสประมาณ 0.04 แอมแปร์ แต่ถ้ากระแสเกิน 0.1 แอมแปร์แล้ว พลาสมาจะดับ
8. ถ้าพลาสมาดับเราจะต้องเริ่มต้นใหม่ตามข้อที่ 5
9. ปรับแรงดันไฟตรงให้เพิ่มขึ้นต่อไปอีกอย่างช้าๆ จนถึง 420 โวลต์ ในขณะเดียวกัน ต้องลดความดันแก๊สลงให้สเตลตัวบนอ่านได้เป็น 3.7×10^{-3} ทอร์ ทำการเปิดชัตเตอร์เพื่อเริ่มเคลือบฟิล์มบางโลหะดีบุกลงบนแผ่นฐานรองรับ ใช้เวลาในการเคลือบฟิล์มบาง เป็นเวลา 10 นาที การเลือกใช้แรงดันไฟตรง 420 โวลต์ และความดันแก๊ส 3.7×10^{-3} ทอร์ นับว่าเป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ฟิล์มบางของโลหะดีบุกที่มีคุณภาพดี ผิวหน้าเรียบเป็นมันวาว มีรูพรุนน้อย
10. เมื่อทำการทดลองจนครบกำหนดเวลาที่ตั้งไว้ ปิดแหล่งจ่ายไฟของการสปีดเตอร์ริง แล้วรอนกระแทงห้องสุญญากาศเย็นลง แล้วจึงปิดสวิตช์ชัตเตอร์ของปั๊มคิฟิวชัน รอนกระแทงปั๊มคิฟิวชันเย็นแล้วจึงปิดสวิตช์ปั๊มกลโรตารีขึ้นไปก็คือ เปิดลิควาล์วเพื่อให้อากาศภายนอกเข้าสู่ระบบจนเราสามารถเปิดฝาภาชนะสุญญากาศออกได้ แล้วหยิบชิ้นงานออกมาข้างนอก
11. ก่อนนำชิ้นงานใหม่ใส่ลงในภาชนะสุญญากาศเพื่อทำการทดลองครั้งต่อไป ต้องทำความสะอาดภาชนะสุญญากาศและเป่าสารเคลือบ ถ้าไม่ทำความสะอาดก่อน อาจทำให้เกิดความไม่สม่ำเสมอหรือเกิดร่องรอยที่ทำให้ผิวหน้าของชิ้นงานไม่เรียบในการทดลองครั้งต่อไปได้
12. เมื่อใส่ชิ้นงานใหม่เรียบร้อยแล้ว ปิดฝาของภาชนะสุญญากาศแล้วเริ่มทำการสูบล้างอากาศออกอีกครั้งเพื่อทำการทดลองครั้งต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 ภาพถ่ายเครื่องดิวซ์แมกนีตรอนสเปดเตอริง

3.1.3 การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS โดยวิธีซัลเฟอร์ไรเซชัน (งามนิตย์, 2530; จูตินัย, 2530)

ฟิล์มบางของโลหะดีบุกที่ได้จากการเตรียมโดยวิธีดิวซ์แมกนีตรอนสเปดเตอริง จะถูกนำมาผ่านกระบวนการซัลเฟอร์ไรเซชัน โดยใช้ซัลเฟอร์บริสุทธิ์ 99.99 เปอร์เซ็นต์ ประมาณ 0.5 กรัม บรรจุในกล่องกราไฟต์ แล้วทำการแอนนัล ที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส

วิธีการเตรียมพร้อมเตาแอนนัล

1. เปิดวาล์วที่ถังก๊าซไนโตรเจนก่อนให้วาล์วละเอียดอยู่ที่ 50 กิโลปาสกาล
2. ตรวจสอบวาล์วหมายเลข 1, 2, 3 และ 4 ให้อยู่ในตำแหน่งปิด
3. เสียบปลั๊กไฟปั๊มกลโรตารีเพื่อให้ปั๊มทำงาน ตรวจสอบสายขั้วระบายอากาศ เสียบออกสู่ภายนอกห้อง จากนั้นจึงค่อยๆ เปิดวาล์วหมายเลข 4 ช้าๆ เพื่อดูดอากาศออกจากหลอดแก้วให้หมด แล้วจึงปิดวาล์วหมายเลข 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ โดยเปิดวาล์วหมายเลข 1 ช้าๆ โดยให้สเกลใน G1 ไม่เกิน 4 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว การคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้า (ไม่เช่นนั้นหลอดชนิดกึ่งตัวนำอาจจะระเบิดได้) ให้วาล์วหมายเลข 2 อยู่ในตำแหน่งเปิดสูงสุดเสมอ

5. พยายามปรับวาล์วหมายเลข 1 ให้ก๊าซไนโตรเจนไหลช้าๆ โดยดูจากสเกลใน G3 เพิ่มขึ้นเต็มสเกล แล้วจึงปิดวาล์วหมายเลข 1
6. ทำการดูอากาศออกจากท่อแก้วโดยการเปิดวาล์วหมายเลข 4 รอให้สเกล G3 ลดลงต่ำสุด (เท่ากับ -30 มิลลิเมตรปรอท)
7. ปิดวาล์วหมายเลข 4
8. เริ่มทำซ้ำตามข้อ 3, 4 และ 5 ตามลำดับ อีก 2 ครั้ง เพื่อให้แน่ใจว่าไม่มี O_2 เหลืออยู่ (ถ้าเหลืออยู่ก็ควรจะน้อยมากๆ)
9. ปิดวาล์วหมายเลข 4
10. เปิดวาล์วหมายเลข 1 ให้แก๊สไหลเข้าไปในท่อแก้วจนความดันในสเกล G3 เพิ่มขึ้นเต็มสเกล และเปิดวาล์ว V3 ให้อยู่ในตำแหน่งสูงสุด ให้สังเกต ฟองอากาศปุดขึ้นอย่างช้าๆ ถ้าฟองอากาศปุดขึ้นเร็วมากให้ลดอัตราการไหลเข้าของแก๊สโดยปรับที่วาล์วหมายเลข 1 โดยที่สเกล G1 ต้องไม่เกิน 4 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว
11. คอยตรวจสอบวาล์วหมายเลข 1 อย่างสม่ำเสมอเพื่อไม่ให้สเกล G1 เพิ่มขึ้นสูงเกินไปหรือลดต่ำจนเกินไปจากนั้นจึง เพิ่มอุณหภูมิให้แก่เตาตามต้องการ เพื่อเป็นการรักษาอุณหภูมิของเตาให้คงที่ จะต้องใช้ เซรามิกไฟเบอร์รอดที่หัวเตา และท้ายเตา เพื่อป้องกันการไหลของลมเย็นเข้าไปในเตา
12. กด โหมด (mode) ให้ไฟขึ้นที่โหมดแล้วก็กดปุ่มขึ้นลงเพื่อเลือกอุณหภูมิที่ต้องการ
13. ใช้เวลาแอนนูลประมาณ 60 นาที เมื่อครบกำหนดแล้วให้ปิดสวิทช์ (power off) ของแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า (power supply) แล้วเอาเซรามิกไฟเบอร์ออก (สวมถุงมือและหน้ากาก)
14. เมื่ออุณหภูมิลดลงต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส ทำการปิดวาล์วทุกตัว
15. จากนั้นรอให้เตาเย็นลงถึงอุณหภูมิห้อง นำฟิล์มบางของสารตัวอย่างออกจากเตาแอนนูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 ภาพถ่ายระบบเตาเอนนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ในโครงการพิเศษนี้ได้ทำการเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบลงบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีซัลเฟอร์ไอเซชัน เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 60 นาที จะทำการศึกษาสมบัติเชิงไฟฟ้า และสมบัติเชิงแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS และ SnS₂

4.1 ลักษณะของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS และ SnS₂ ที่เคลือบบนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ ซึ่งเตรียมโดยวิธีซัลเฟอร์ไอเซชัน

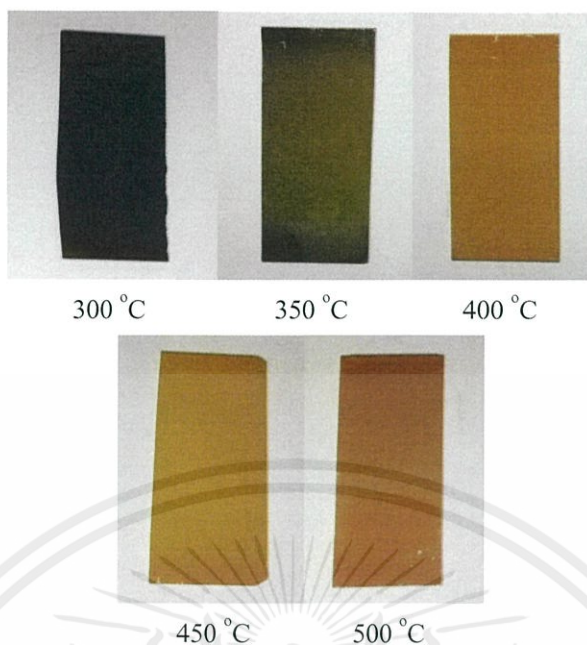
ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS และ SnS₂ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีซัลเฟอร์ไอเซชัน จากสารตั้งต้นที่เป็นฟิล์มบางของโลหะดีบุกที่เตรียมโดยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงแล้วนำมาผ่านกระบวนการซัลเฟอร์ไอเซชัน โดยใช้ซัลเฟอร์ปริมาณ 0.5 กรัม จากนั้นนำเอาฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปใส่ในกล่องกราไฟต์ ที่มีซัลเฟอร์ปริมาณ 0.5 กรัมบรรจุอยู่ แล้วจึงเอาไปใส่ในเตาแอนนัลในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที ภาพถ่ายของฟิล์มบางของโลหะดีบุกจะแสดงดังรูปที่ 4.1 ภาพถ่ายของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS และ SnS₂ จะแสดงดังรูปที่ 4.2



Sn

รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายฟิล์มบางของโลหะดีบุกซึ่งเตรียมโดยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง

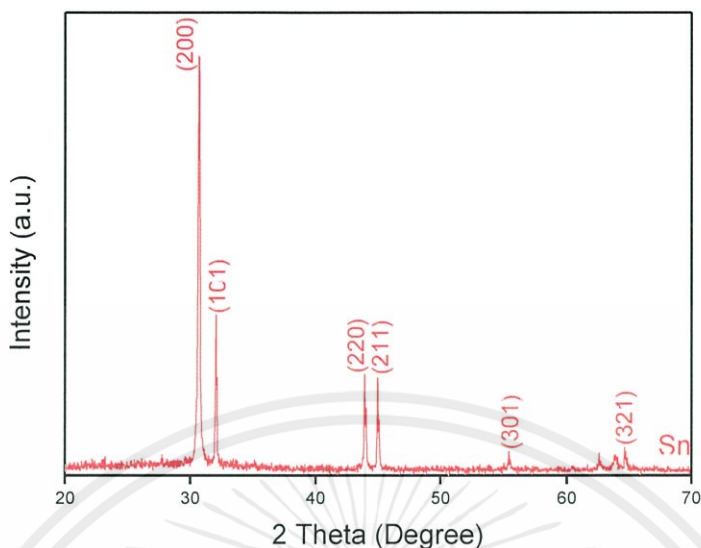
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



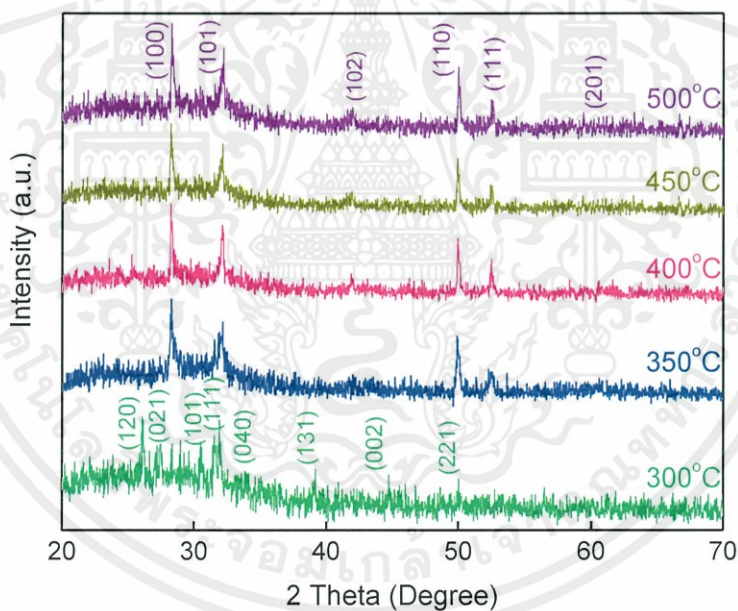
รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS และ SnS₂ ซึ่งเตรียมโดยวิธีซัลเฟอร์ไอเซชัน เมื่อมีการแอนนีสในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที

4.2 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS และ SnS₂ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีซัลเฟอร์ไอเซชัน

การศึกษากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีซัลเฟอร์ไอเซชัน จากสารตั้งต้นที่เป็นฟิล์มบางของโลหะดีบุกที่เตรียมโดยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริงแล้วนำมาผ่านกระบวนการซัลเฟอร์ไอเซชัน จากการศึกษาสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง ของโลหะดีบุกผลปรากฏว่าพบระนาบการเลี้ยวเบน โครงผลึกคือระนาบ (200), (101), (220), (211), (301) และ (321) จะแสดงดังรูปที่ 4.3 และสเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่อุณหภูมิแอนนีส 300 องศาเซลเซียส ผลปรากฏว่าพบระนาบโครงสร้างผลึกคือระนาบ (120), (021), (101), (111), (040), (131), (002) และ (221) ที่อุณหภูมิแอนนีส 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส ผลปรากฏว่าพบระนาบโครงสร้างผลึกคือระนาบ (100), (101), (102), (110), (111) และ (201) ซึ่งสอดคล้องกับโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS₂ จะแสดงดังรูปที่ 4.4 ผลของการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เมื่อคำนวณขนาดของเกรน ซึ่งจะได้ค่าดังตารางที่ 4.1 โดยจะเห็นได้ว่าขนาดของเกรนจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่ออุณหภูมิแอนนีสเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.3 สเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของโลหะดีบุกซึ่งเตรียมโดยวิธี ดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง

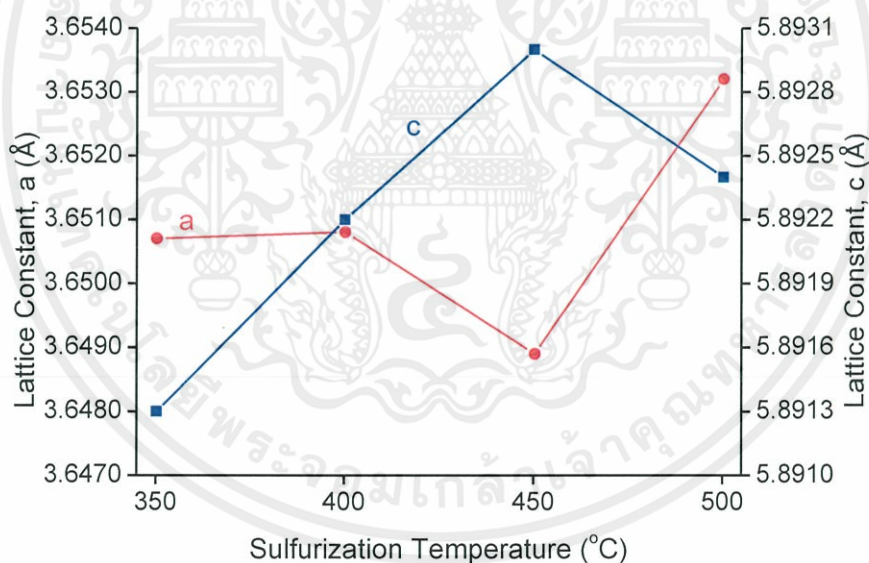


รูปที่ 4.4 สเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS และ SnS₂ ซึ่งเตรียมโดยวิธีซัลเฟอโรเซชัน เมื่อมีการแอนนیلในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 60 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ขนาดของเกรนที่ได้จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS และ SnS₂ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีซัลเฟอร์ไรเซชัน จากสารตั้งต้นที่เป็นฟิล์มบางของโลหะดีบุกที่เตรียมโดยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอร์ริงแล้วนำมาผ่านกระบวนการซัลเฟอร์ไรเซชัน

Annealing Temperature (°C)	Lattice Constant (Å)		Grain Size (nm.)
	a	c	
as-deposited	5.80081	3.20540	72.417
300	3.69695	5.98780	-
350	3.65070	5.89131	36.289
400	3.65078	5.89220	60.485
450	3.64894	5.89304	64.227
500	3.65319	5.89241	91.188

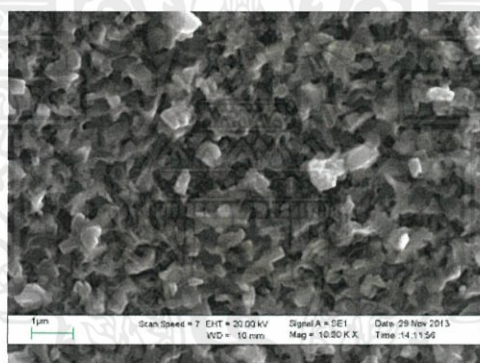


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของผลึก a และ c เมื่อเทียบกับอุณหภูมิซัลเฟอร์ไรเซชันของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS₂ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีซัลเฟอร์ไรเซชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

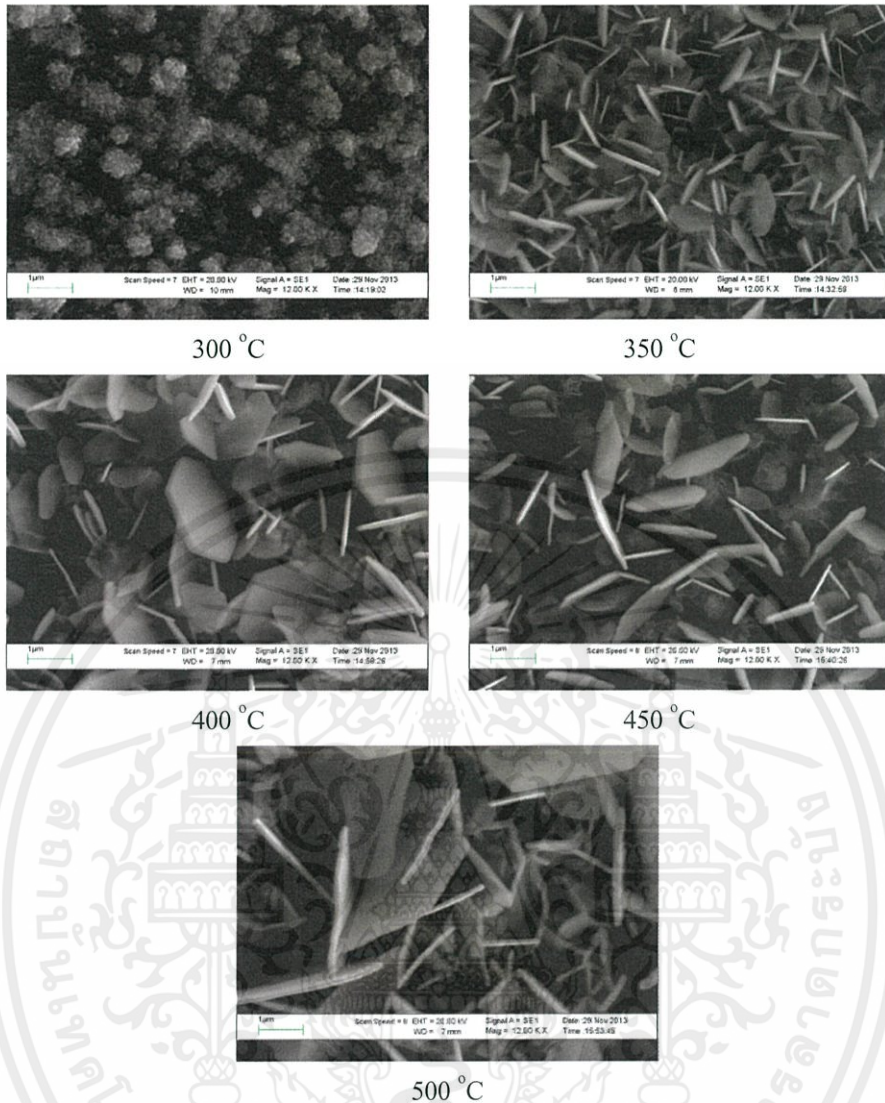
4.3 ผลการศึกษาภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS และ SnS₂ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีซัลเฟอไรเซชัน

การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS และ SnS₂ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีซัลเฟอไรเซชัน จากสารตั้งต้นที่เป็นฟิล์มบางของโลหะดีบุกที่เตรียมโดยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงแล้วนำมาผ่านกระบวนการซัลเฟอไรเซชัน จากการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบางโลหะดีบุกพบว่ามีลักษณะคล้ายแผ่นข้าวโพดทอด (corn flakes) กระจายอยู่บนผิวหน้าฟิล์มบางของโลหะดีบุก จะแสดงดังรูปที่ 4.6 และโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS พบว่าที่อุณหภูมิแอนนีสล 300 องศาเซลเซียส มีลักษณะเป็นกลุ่มของเกรน (cluster) กระจายอยู่บนผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS และที่อุณหภูมิแอนนีสล 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส มีลักษณะเป็นแผ่นรูปหกเหลี่ยมบางๆ ออกขึ้นมาจากผิวหน้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS₂ จะแสดงดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางของโลหะดีบุกซึ่งเตรียมโดยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

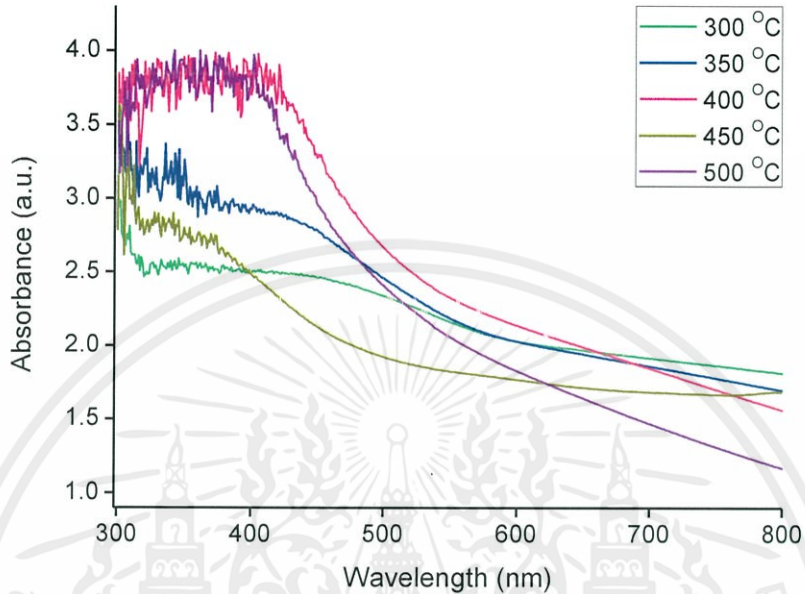


รูปที่ 4.7 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS และ SnS₂ ซึ่งเตรียมโดยวิธีซัลโฟไรเซชัน เมื่อมีการแอนนีย์ลในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 60 นาที

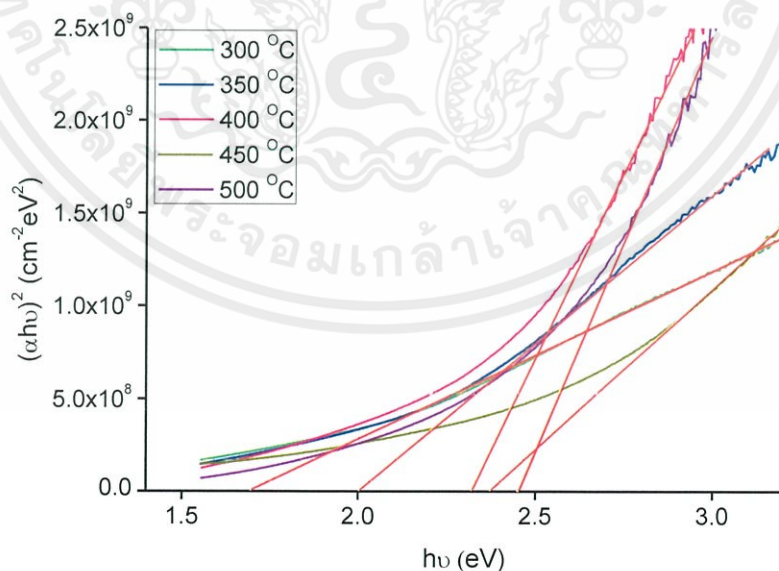
4.4 ผลการศึกษาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS และ SnS₂ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีซัลโฟไรเซชัน

จากผลการศึกษาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS และ SnS₂ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีซัลโฟไรเซชัน พบว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานมีค่าอยู่ในช่วง 1.7 - 2.45 อิเล็กตรอน โวลต์ ซึ่งค่าช่องว่างแถบพลังงาน

จะมากขึ้นตามอุณหภูมิการแอนนัล จากความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและความยาวคลื่นพบว่าเมื่อความยาวคลื่นเพิ่มขึ้นจะมีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงลดลง



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและความยาวคลื่นของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS และ SnS₂ ที่แอนนัลในบรรยากาศก๊าซซัลเฟอร์ที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที



รูปที่ 4.9 วิธีการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS และ SnS₂ ที่แอนนัลในบรรยากาศก๊าซซัลเฟอร์ที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที

ค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS และ SnS₂ สามารถหาได้จากสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง โดยอาศัยความสัมพันธ์

$$\alpha = 2.303 \left(\frac{A}{d} \right)$$

เมื่อ A คือสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง และ d คือความหนาของฟิล์มบาง (มีหน่วยเป็นเซนติเมตร) ซึ่งค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS และ SnS₂ จะแสดงดังตาราง ที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS และ SnS₂ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีซัลเฟอร์ไรเซชัน จากสารตั้งต้นที่เป็นฟิล์มบางของโลหะดีบุกที่เตรียมโดยวิธีดีซีแมกนีตรอนสเปคเตอรริงแล้วนำมาผ่านกระบวนการซัลเฟอร์ไรเซชัน โดยใช้ซัลเฟอร์ปริมาณ 0.5 กรัม จากนั้นนำเอาฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปแอนนัลในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที

Annealing Temperature (°C)	Energy Gap (eV)
300	1.70
350	2.00
400	2.30
450	2.35
500	2.45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

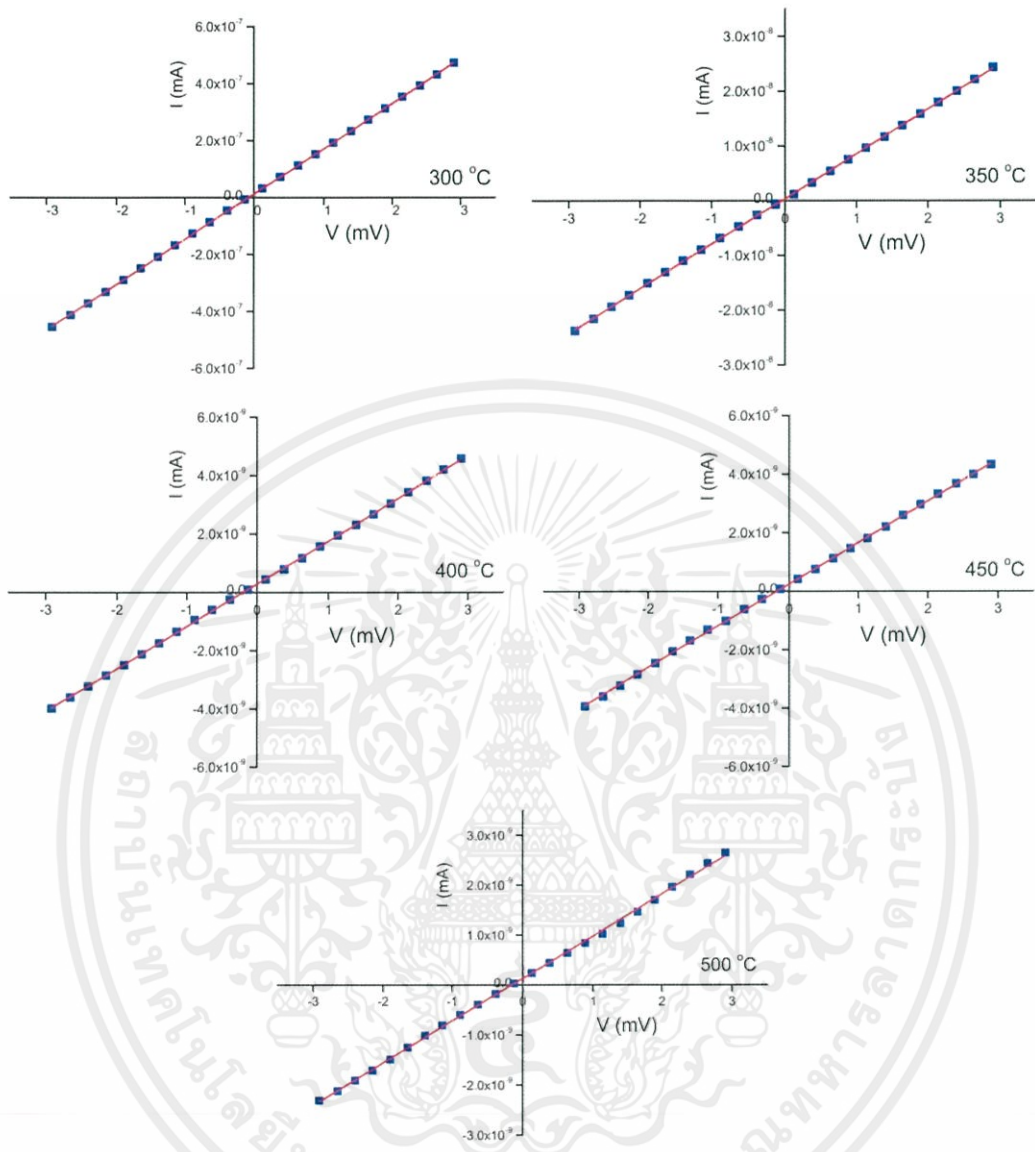
4.5 ผลการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS และ SnS₂ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีซัลเฟอร์ไรเซชัน

โดยได้นำฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS และ SnS₂ ไปทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า คือ ความต้านทานแผ่น สภาพต้านทานไฟฟ้า และสภาพคล่องของพาหะโดยปรากฏการของฮอลล์ พบว่าค่าความต้านทานแผ่นมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิแอนนัลสูงขึ้น

ตารางที่ 4.3 ค่าความต้านทานแผ่น ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าความหนาแน่นของพาหะและสภาพคล่องฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS และ SnS₂ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีซัลเฟอร์ไรเซชัน จากสารตั้งต้นที่เป็นฟิล์มบางของโลหะดีบุกที่เตรียมโดยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงแล้วนำมาผ่านกระบวนการซัลเฟอร์ไรเซชัน โดยใช้ซัลเฟอร์ปริมาณ 0.5 กรัม จากนั้นนำเอาฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปแอนนัลในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 60 นาที

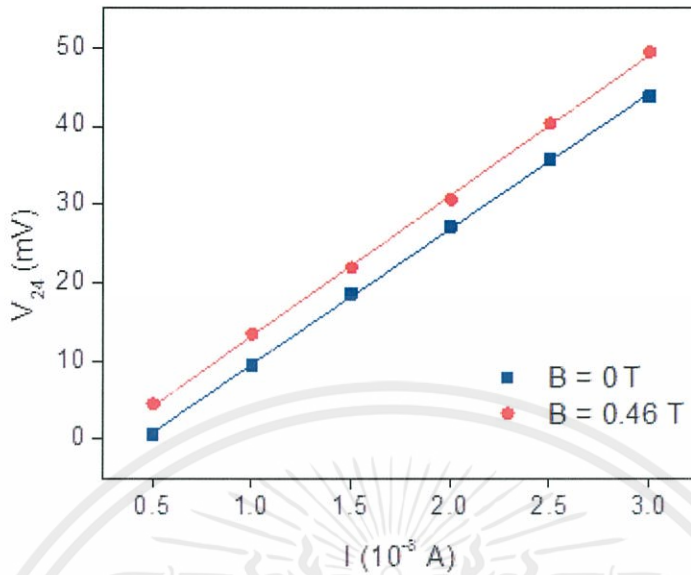
Annealing Temperature (°C)	Sheet Resistance (Ω)	Resistivity (Ω.cm)	Hall Coefficient (cm ² /C)	Hole Concentration (cm ⁻³)	Hall Mobility (cm ² V ⁻¹ s ⁻¹)
300	1.28×10 ⁷	6.42×10 ²	6.15×10 ²	1.02×10 ¹⁶	0.96
350	2.48×10 ⁷	1.24×10 ³	2.26×10 ⁴	2.72×10 ¹⁴	18.24
400	2.76×10 ⁹	-	-	-	-
450	2.96×10 ⁹	-	-	-	-
500	3.26×10 ⁹	-	-	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

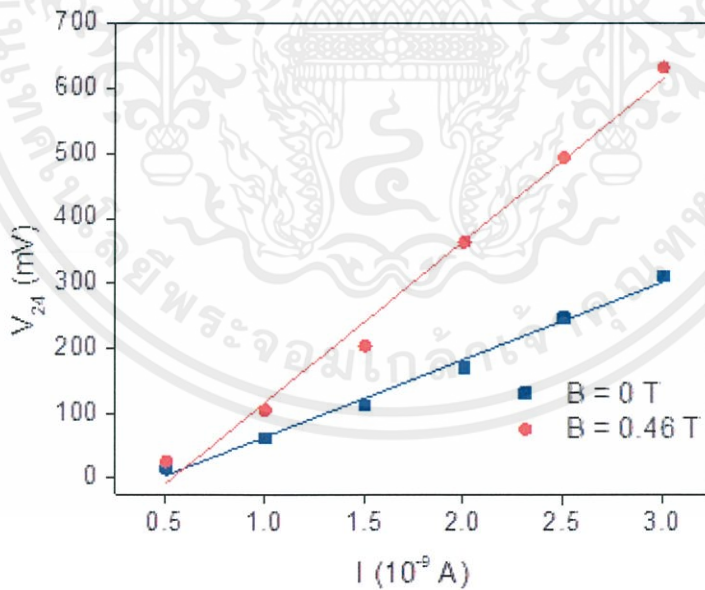


รูปที่ 4.10 การหาค่าความต้านทานแผ่น (R_{sh}) ที่ได้จากการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีสองขั้วของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS และ SnS₂ ที่แอนนีลในบรรยากาศก๊าซซัลเฟอร์ ที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็ก และไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่แอนนีกัลในบรรยากาศก๊าซซัลเฟอร์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที

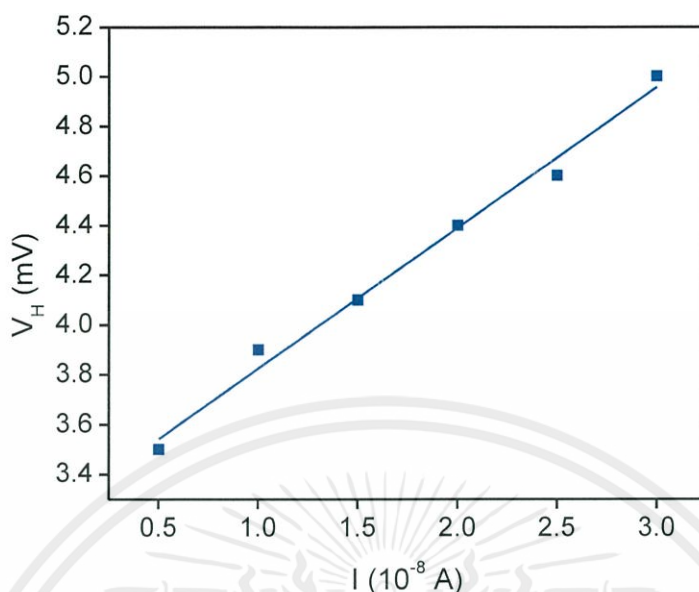


รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ (V_{24}) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์

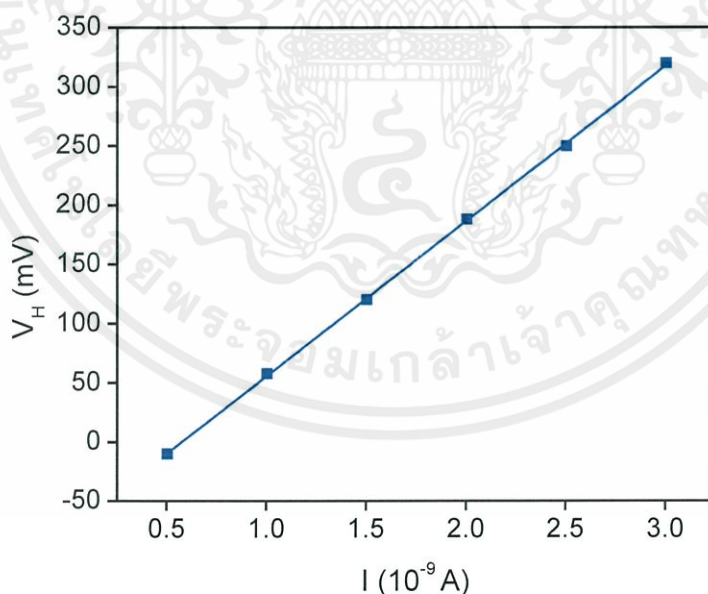
ฮอลล์ภายใต้สนามแม่เหล็ก และไม่มีสนามแม่เหล็กของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS₂ ที่แอนนีกัลในบรรยากาศก๊าซซัลเฟอร์ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับเอาไว้ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่แอนนีสในบรรยากาศก๊าซซัลเฟอร์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที

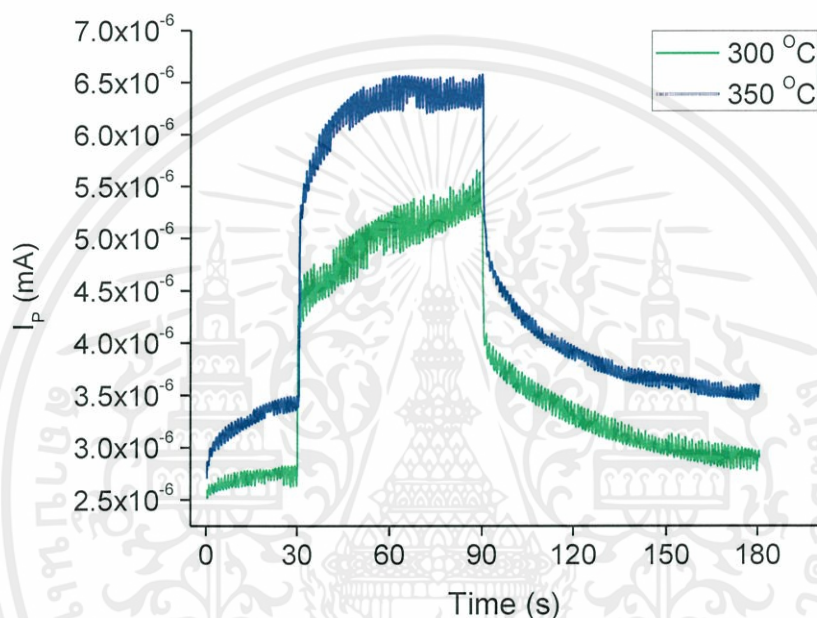


รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าฮอลล์ (V_H) กับกระแสไฟฟ้า (I) ของปรากฏการณ์ฮอลล์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS_2 ที่แอนนีสในบรรยากาศก๊าซซัลเฟอร์ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

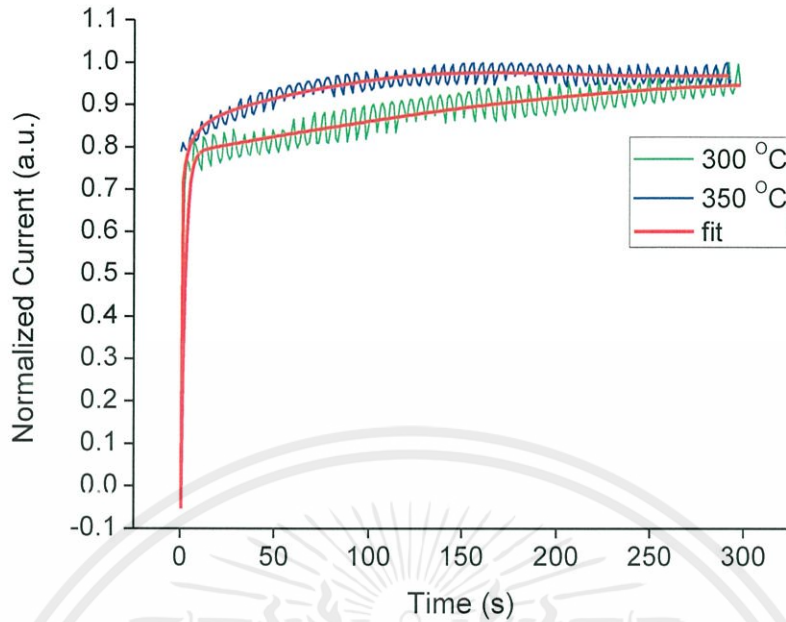
4.6 ผลการศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS และ SnS₂ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ซึ่งเตรียมโดยวิธีซัลเฟอร์ไอเซชัน

การศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS และ SnS₂ เมื่อนำไปหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโฟโต (I_p) กับเวลา (Time) จะทำให้ทราบให้ทราบค่า A , β และ τ ดังตารางที่ 4.4

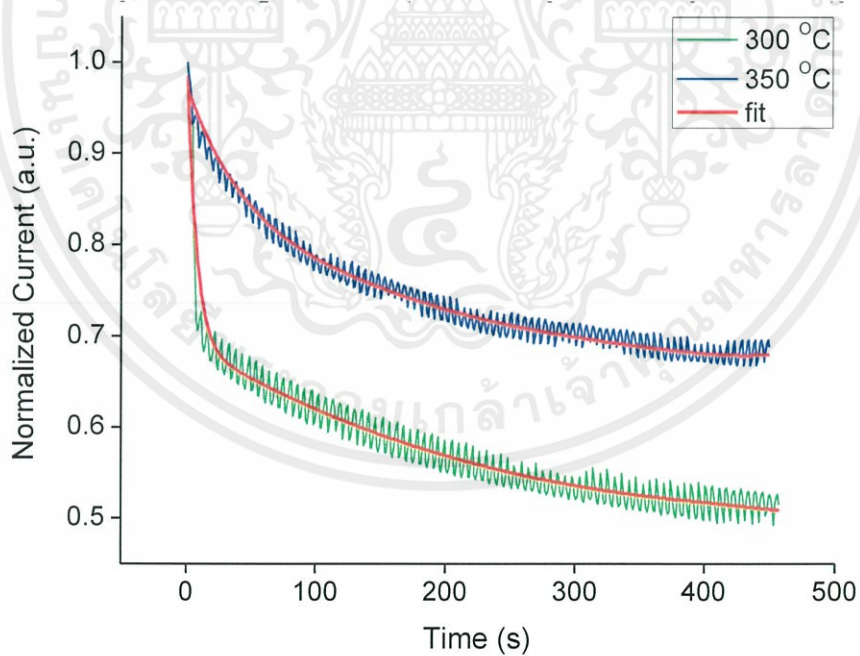


รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสโฟโต (I_p) กับเวลา (Time) ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS และ SnS₂ ที่แอนนีสในบรรยากาศก๊าซซัลเฟอร์ที่อุณหภูมิ 300 และ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสออร์มัลไลซ์ขาขึ้นกับเวลา ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS และ SnS₂ ที่แอนนีกัลในบรรยากาศก๊าซซัลเฟอร์ ที่อุณหภูมิ 300 และ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสออร์มัลไลซ์ขาลงกับเวลา ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS และ SnS₂ ที่แอนนีกัลในบรรยากาศก๊าซซัลเฟอร์ ที่อุณหภูมิ 300 และ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.4 พบว่าเมื่อเวลาผ่านไปหลังจากที่ฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ได้รับแสงยูวี จะพบว่าค่าช่วงชีวิตของพาหะ (τ_p) จะมีค่าเพิ่มมากขึ้น

ตารางที่ 4.4 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงดอร์รันของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS และ SnS₂ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์โดยวิธีซัลเฟอไรเซชัน จากสารตั้งต้นที่เป็นฟิล์มบางของโลหะดีบุก ที่เตรียมโดยวิธีดีซีแมกนีตรอนสเปคเตอรริงแล้วนำมาผ่านกระบวนการซัลเฟอไรเซชัน โดยใช้ซัลเฟอร์ปริมาณ 0.5 กรัม จากนั้นนำเอาฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปแอนนัลในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 300 และ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที

Condition		Annealing Temperature					
		300 °C			350 °C		
		A	β	τ (s)	A	β	τ (s)
Rise	1 st Term	4.47E-6	-	2.25	-6.70E-4	-	175.13
	2 nd Term	-5.02E-5	-	950.09	5.35E-2	-	409.83
	3 rd Term	2.87E-3	-	973.39	-1.48E-1	-	558.66
	4 th Term	-7.13E-3	0.79	2716.65	1.02	-	1523.62
	5 th Term	-	-	-	-1.75	-	2559.73
	6 th Term	-	-	-	4.36	-	33222.04
	7 th Term	-	-	-	4.40E-1	-	19383
	8 th Term	-	-	-	9.30E-6	0.07	7172.93
Decay	1 st Term	1.66E-6	-	22.01	4.38E-5	-	114.02
	2 nd Term	7.74E-6	-	534.76	-4.70E-2	-	448.43
	3 rd Term	-1.24E-5	-	1076.35	2.30E-1	-	632.91
	4 th Term	8.59E-6	0.74	3211.78	6.91	-	1476.77
	5 th Term	-	-	-	-6.33	-	1352.64
	6 th Term	-	-	-	-1.63	-	4858.33
	7 th Term	-	-	-	0.86	0.83	10162.65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.5 พบว่าเมื่อค่าความหนาแน่นของกับดักพาหะเพิ่มมากขึ้น จะทำให้ค่าช่วงชีวิตของพาหะ (τ_d) มีค่าลดน้อยลงและจากการสังเกตค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่อุณหภูมิต่างๆ จะพบว่า ค่ากระแสที่วัดได้จากฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ที่อุณหภูมิต่างๆ จะพบว่า ค่ากระแสที่วัดได้จากฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS₂ ที่อุณหภูมิต่างๆ จะพบว่าการนำกระแสไฟฟ้าได้ดีกว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS₂ ที่อุณหภูมิต่างๆ เนื่องจากค่าความต้านทานของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS มีค่าต่ำกว่าของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS₂

ตารางที่ 4.5 ค่าความหนาแน่นของพาหะประจุชนิดต่างๆ ที่ได้จากการวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงด้วยวิธีของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS และ SnS₂ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีซัลเฟอร์ไอโซเซชัน จากสารตั้งต้นที่เป็นฟิล์มบางของโลหะดีบุกที่เตรียมโดยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงแล้วนำมาผ่านกระบวนการซัลเฟอร์ไอโซเซชัน โดยใช้ซัลเฟอร์ปริมาณ 0.5 กรัม จากนั้นนำเอาฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปแอนนัลในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิต่างๆ 300 และ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที

Decay Component						
No. of term	Annealing Temperature 300 °C			Annealing Temperature 350 °C		
	I_0 (A)	τ_d (s)	σ_i (cm ⁻²)	I_0 (A)	τ_d (s)	σ_i (cm ⁻²)
1 st Term	5.63E-06	22.01	2.29E+10	5.17E-06	114.02	2.17E+10
2 nd Term	4.35E-06	534.75	1.76E+10	4.83E-06	448.43	2.03E+10
3 rd Term	4.09E-06	1076.35	1.66E+10	4.68E-06	632.91	1.97E+10
4 th Term	3.37E-06	3211.78	1.37E+10	4.33E-06	1476.77	1.82E+10
5 th Term	-	-	-	4.26E-06	1352.64	1.79E+10
6 th Term	-	-	-	3.84E-06	4858.33	1.61E+10
7 th Term	-	-	-	3.66E-06	10162.65	1.54E+10

***หมายเหตุ

แรงดัน (V_a) = 30 โวลต์

สภาพคล่องพาหะ (μ) ของ SnS = 20 ตารางเซนติเมตรต่อโวลต์-วินาที

ที่กรณี 300 องศาเซลเซียส $l = 0.475$ เซนติเมตร, $w = 1.22$ เซนติเมตร

ที่กรณี 350 องศาเซลเซียส $l = 0.460$ เซนติเมตร, $w = 1.14$ เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

โครงการพิเศษนี้ได้ทำการเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS และ SnS₂ ที่เคลือบอยู่บนแผ่นฐานรองรับที่เป็นแผ่นกระจกสไลด์ โดยวิธีซัลเฟอไรเซชัน จากสารตั้งต้นที่เป็นฟิล์มบางของโลหะดีบุกที่เตรียมโดยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงแล้วนำมาผ่านกระบวนการซัลเฟอไรเซชัน โดยใช้ซัลเฟอร์ปริมาณ 0.5 กรัม จากนั้นนำเอาฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปแอนนัลในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าที่อุณหภูมิแอนนัล 300 และ 350 องศาเซลเซียส ฟิล์มบางที่ได้จะมีสีดำ และเมื่ออุณหภูมิแอนนัล 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส จะมีสีเหลืองส้ม จากการผลของการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ที่อุณหภูมิแอนนัล 300 องศาเซลเซียส เมื่อนำไปเทียบกับไฟล์มาตรฐาน JCPDS No. 65-3766 พบว่าตรงกับระนาบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS ซึ่งมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบออร์โธโรมบิก ที่อุณหภูมิแอนนัล 350, 400, 450 และ 500 องศาเซลเซียส เมื่อนำไปเทียบกับไฟล์มาตรฐาน JCPDS No. 40-1467 พบว่าตรงกับระนาบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS₂ ซึ่งมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเฮกซะโกนอล จากการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางพบว่าเมื่ออุณหภูมิแอนนัลสูงขึ้น จะมีความต้านทานแผ่นมากขึ้น จากการศึกษาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและหาค่าช่องว่างแถบพลังงานพบว่าฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS มีค่าช่องว่างแถบพลังงาน ประมาณ 1.7 อิเล็กตรอนโวลต์ ส่วนฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS₂ จะมีช่องว่างแถบพลังงานสูงขึ้นจาก 2.0 เป็น 2.45 อิเล็กตรอนโวลต์ เมื่ออุณหภูมิแอนนัลเพิ่มขึ้นจาก 350 เป็น 500 องศาเซลเซียส จากการศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาภายใต้การฉายแสงจากหลอดไฟฮาโลเจนและขณะหยุดการฉายแสง พบว่าช่วงชีวิตของพาหะทั้งขณะกระแสาขาขึ้นและกระแสดาลงสามารถคำนวณได้จากการพิกกราฟด้วยมัลติเพิลเอ็กซ์โพเนนเชียลฟังก์ชัน ซึ่งจะได้ช่วงชีวิตค่อนข้างยาวจำนวนหลายค่า รวมทั้งความหนาแน่นของกับดักพาหะก็สามารถคำนวณหาได้จากกระแสาขาขึ้นและกระแสดาลงเช่นเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ปัญหาและข้อเสนอนะ

ในการเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ SnS โดยวิธีซัลโฟไรเซชัน พบปัญหาและเทคนิคบางประการที่สามารถนำไปปรับปรุงการทดลอง เพื่อให้ผลลัพธ์ออกมาดีที่สุด ปัญหาและข้อเสนอนะมีดังนี้

- 5.1 การเตรียมฟิล์มบางของโลหะดีบุก โดยวิธีการดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง ต้องใช้ความดันภายในระบบสุญญากาศและจ่ายแรงดันให้กับเป้าที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ฟิล์มบางที่ไม่มีรูพรุน
- 5.2 ก่อนและหลังการเตรียมฟิล์มบางของโลหะดีบุก โดยวิธีการดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริงต้องเช็ดทำความสะอาดระบบห้องสุญญากาศให้สะอาด เพื่อที่จะไม่มีการปนเปื้อนระหว่างการเตรียมฟิล์มบาง
- 5.3 ในการวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ควรวัดขั้วไฟฟ้าให้มีขนาดเล็กและอยู่ที่มุมทั้งสี่ของสี่เหลี่ยมจัตุรัสของฟิล์มบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

งามนิตย์ วงษ์เจริญ, 2531. การศึกษารอยต่อแบบโลหะ-ฉนวน-สารกึ่งตัวนำ ของคอปเปอร์อินเดียม ไดซัลไฟด์, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.2530.

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

จิตินัย แก้วแดง งามนิตย์ วงษ์เจริญ และ ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ. 2556. การประดิษฐ์และการศึกษาสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางรอยต่ออวิวิธพันธุ์ CdS/CuO , รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

งามนิตย์ วงษ์เจริญ, จิตินัย แก้วแดง, ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ, 2543. การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

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

งามนิตย์ วงษ์เจริญ, จิตินัย แก้วแดง, ณัฐพร พรหมรส และ ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ, 2551. การเตรียมฟิล์มบาง $CdTe$ โดยวิธีระเหิดในระยะประชิดเพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

จิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ และ ชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ. การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี Zn เพื่อประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2545.

จิตินัย แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ และชัยสิงห์ ภูริรักษ์เกียรติ. ประดิษฐ์ฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ ที่มี Zn ในปริมาณสูงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2546.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิศย์ วงษ์เจริญ และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. การเตรียมฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอม In โดยระเหยในระบบสุญญากาศ, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะ วิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2547.

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิศย์ วงษ์เจริญ และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. การประดิษฐ์ฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่เจือด้วยอะตอมฟลูออรีนสำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะ วิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2549.

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิศย์ วงษ์เจริญ และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ. การประดิษฐ์ฟิล์มหนา CuAlO_2 เพื่อเป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2550.

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิศย์ วงษ์เจริญ และ ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ, 2549. การประดิษฐ์ฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่เจือด้วยอะตอมฟลูออรีนสำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานการวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิศย์ วงษ์เจริญ และ ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ, 2550. การประดิษฐ์ฟิล์มหนา CuAlO_2 เพื่อเป็นชั้นดูดกลืนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ฐิตินัย แก้วแดง, งามนิศย์ วงษ์เจริญ และ ณัฐพร พรหมรส, 2551. การเตรียมฟิล์มบาง CdS โดยวิธีออบสารละลายเคมีภายใต้คลื่นไมโครเวฟเพื่อประดิษฐ์เป็นหน้าต่างรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชัยวิทย์ ศิลาวัชานา. ฟิสิกส์และเทคโนโลยีของระบบสุญญากาศ. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: การพิมพ์, 2526.

คูสิต เครื่องงาม, 2535. โพลีเทคนิคฟิสิกส์, กรุงเทพมหานคร. ซีเอ็ดยูเคชั่น

คูสิต เครื่องงาม, 2542. สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ฟิสิกส์ เทคโนโลยี และการใช้งานเล่ม 1, กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ธนุสิทธิ์ บุรินทร์ประ โคน, 2538. การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประธาน ประจวบโชค, 2550. การเตรียมและการศึกษาสมบัติของสารกึ่งตัวนำ CuAlO_2 ชนิดพี, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พงษ์รินทร์ เปี่ยมพงษ์สานต์, ภัทรพร แสนคำ และศุภิกา โล่สกุลชัย, 2550. การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางดีบุกซัลไฟด์ที่เตรียมโดยวิธีพ่นละอองสารเคมี, โครงการงานพิเศษหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ วิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ภารุจ บัณฑิตธาตวิทย์, 2539. สภาวะความดันแก๊สที่เหมาะสมสำหรับการเคลือบฟิล์มบางไทเทเนียมไนไตรด์ด้วยวิธีสปัตเตอร์ริง, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

วีรชัย ลิภา, 2547. การศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง CdS-ZnS ซึ่งเตรียมโดยวิธีอบสารละลายเคมี, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สุกฤษฎี เกิดแสง, 2547. การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบางสารกึ่งตัวนำสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ CdTe, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สมเกียรติ สุภเดช, 2542. เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์, แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

อุปถัมภ์ นาครักษ์, 2548. การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางดีบุกออกไซด์ที่เจือด้วยฟลูออรีนและพลวงซึ่งเตรียมโดยวิธีพ่นละอองสารเคมี, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

Biswajit Ghosh, Rupanjali Bhattacharjee, Pushan Banerjee, Subrata Das. 2011. Structural and optoelectronic properties of vacuum evaporated SnS thin films annealed in argon ambient. *Applied Surface Science*. 257:3670-3676.

Bletskan, D.I., 2005. Phase equilibrium in binary systems $A^{IV}B^{VI}$. *J. Ovonic Res.* 1(5):61-69

Burton, L.A. and Walsh, A., 2012. Phase stability at the earth-abundant tin sulfides SnS, SnS₂, and Sn₂S₃. *J. Phys. Chem. C*. 116:24262-24267.

Ghaffarzadeh, K. Nathan, A. and Robertson, J. 2010. Persistent Photoconductivity in Hf-In-Zn-O Thin Film Transistors. *Appl. Phys. Lett.* 97, 143510-1- 143510-3.

Ghosh, R. and Basak, D. 2007. Electrical and Ultraviolet Photoresponse Properties of Quasialigned ZnO Nanowires/p-Si Heterojunction. *App. Phys. Lett.* 90, 243106-1-243106-3.

Gu, G., Kane, M.G., Doty, J.E. and Firester, A.H. 2005. Electron Traps and Hysteresis in Pentacene-Based Organic Thin Film Transistors. *Appl. Phys. Lett.* 87, 243512-1-243512-3.

- Guo, L., Wang, X., Feng, L. Zheng, X. and Chen, G. 2013. Temperature Sensitive Photoconductivity Observed in InN Lays. Appl. Phys. Lett.102, 072103-1- 072103-3.
- Huang, B.C. and Lin, Y.L. 2011. Effect of the Induced Electron Traps by Oxygen Plasma Treatment on Transfer Characteristics of Organic Thin Film Transistors. Appl. Phys. Lett.99, 113301-1-113301-3.
- Johnson, C., Lin, J.Y. and Jiang, H.X. 1996. Metastability and Persistent Photoconductivity in Mg-Doped p-Type GaN. Appl. Phys. Lett. 68(13), 1808-1810.
- Jiang, F., Shen, H. and Wang, W. 2012. Optical and Electrical Properties of $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ Film Prepared by Sulfurization Method. J. Elec. Matter. 41(8), 2204-2209.
- Kittel C. 2005. Introduction to Solid State Physics.8th Edition. United States of America : John Wiley&Sons Inc.
- Lin, J.H., Zeng, J.J., Su, Y.C. and Lin, Y.J. 2012. Current Transport Mechanism of Heterojunction Diodes Based on the Reduced Graphene Oxide-Based Polymer Composite and n-Type Si. Appl. Phys. Lett. 100, 153509-1- 153509-4.
- Lin, Y.J., Luo, J. and Hung, H.C. 2013. Electronic Transport and Schottky Barrier of p-CuAlO₂ Schottky Diodes. 102.,193511- 1193511-3.
- Luo, J. Adler, A.U., Mason, T.O. and Buchholz, D. 2013. Transient Photoresponse in Amorphous In-Ga-Zn-O Thin Films Under Stretched Exponential Analysis, J. Appl. Phys. 113, 153709-1-153709-8.
- Miles, R.W., Ogah, E.O., Guillaume Zoppi, Forbes, I. 2009. Thermally evaporated thin films of SnS for application in solar cell devices. Thin Solid Films. 517:4702-4705
- Ren, S.T., Zhao, F. and Chen Q. 2012. Slow-Rise and Fast Drop Current Feature of Ultraviolet Response Spectra for ZnO-Nanowire Film Modulated by Water Molecules. Chin. Phys. B, 21(3), 038104-1- 038140-7.
- Studenikin, S.A., Geleco, N. and Cocivera, M. 1998. Optical and Electrical Properties of Undoped ZnO Films Grown by Spray Pyrolysis of Zinc Nitrate Solution. J. Appl. Phys. 83(4), 2104-2111.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของ SnS_2
ไฟล์มาตรฐาน JCPDS No. 40-1467

Pattern : 40-1467		Radiation = 1.540600	Quality : Indexed				
Sn S ₂			2th	l	h	k	l
Tin Sulfide			28.227	75	1	0	0
			30.278	10	0	0	2
			32.113	100	1	0	1
			41.867	75	1	0	2
			46.134	5	0	0	3
			49.961	90	1	1	0
			52.455	90	1	1	1
			54.972	20	1	0	3
Lattice : Hexagonal	Mol. weight = 182.81		58.357	75	2	0	0
S.G. : P-3m1 (164)	Volume [CD] = 67.97		59.557	20	1	1	2
a = 3.64780	Dx = 4.466		60.634	90	2	0	1
	Dm = 3.400		62.985	10	0	0	4
c = 5.89800			67.143	75	2	0	2
Z = 1			70.359	20	1	1	3
			77.475	20	2	0	3
			80.353	75	2	1	0
			82.352	90	2	1	1
			84.378	10	1	1	4
			88.189	75	2	1	2
			94.029	90	3	0	0
			95.944	75	3	0	1
			97.956	20	2	1	3
GENERAL COMMENTS : 2H polytype. SAMPLE PREPARATION : Prepared by chemical transport. Single-crystals ground with silicon.							
*J. Appl. Crystallogr., volume 22, page 622, (1989) primary reference : Palosz, B., Saljo, E.							
Radiation : CuK α 1		Filter : Monochromator crystal					
Lambda : 1.54056		d-sp : Guinier					
SS/FOM : F22= 51(0.0161,27)		Internal standard : Si					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของ SnS

ไฟล์มาตรฐาน JCPDS No. 65-3766

PDF#65-3766: QM=Star/Calculated; d=Other/Unknown; I=(Unknown)												PDF Card					
Tin Sulfide																	
SnS																	
Radiation=CuKα1				Lambda=1.5406				Filter=									
Calibration=				d-Cutoff=				I/c(RIR)=4.4									
Ref= Level-1 PDF																	
Orthorhombic, Pbnm(62)																	
Cell=4.334x11.2x3.987<90x90x90>																	
Density(c)=5.174 Density(r)= Mwt= Vol= Z=4 mp=																	
Pearson=																	
Ref= Ibid.																	
Strong Line: 2.84/X 3.25/7 3.43/7 2.80/7 2.93/5 1.88/5 2.31/4 4.04/3																	
158 Lines, Wavelength to Compute Theta = 1.54056A(Cu), I%-Type = (Unknown)																	
#	d(A)	I(I)	h	k	l	#	d(A)	I(I)	h	k	l	#	d(A)	I(I)	h	k	l
1	5.6000	0.2	0	2	0	44	1.3583	4.6	3	0	1	87	1.0355	1.3	3	7	1
2	4.0419	34.0	1	1	0	45	1.3473	5.0	3	1	1	88	1.0278	5.2	4	2	1
3	3.4274	69.6	1	2	0	46	1.3322	0.6	2	6	1	89	1.0257	4.1	1	9	2
4	3.2479	71.9	0	2	1	47	1.3209	3.0	0	8	1	90	1.0129	0.1	2	8	2
5	2.9343	64.5	1	0	1	48	1.2988	9.4	1	6	2	91	1.0110	5.2	2	5	3
6	2.8385	100.0	1	1	1	49	1.2931	2.5	0	2	3	92	1.0054	0.2	3	8	0
7	2.8000	68.5	0	4	0	50	1.2872	3.2	2	7	0	93	0.9967	1.3	0	0	4
8	2.5991	0.2	1	2	1	51	1.2838	1.7	3	4	0	94	0.9950	2.2	1	7	3
9	2.3519	0.7	1	4	0	52	1.2764	1.5	3	3	1	95	0.9912	2.8	3	6	2
10	2.3070	40.8	1	3	1	53	1.2706	2.3	1	0	3	96	0.9813	0.1	0	2	4
11	2.2914	4.2	0	4	1	54	1.2625	10.6	1	8	1	97	0.9781	1.1	3	0	3
12	2.1670	2.2	2	0	0	55	1.2391	0.1	1	2	3	98	0.9749	3.8	3	8	1
13	2.1275	19.7	2	1	0	56	1.2273	3.0	2	5	2	99	0.9678	0.6	2	6	3
14	2.0257	30.8	1	4	1	57	1.2249	2.4	2	7	1	100	0.9654	0.2	2	10	1
15	2.0210	15.5	2	2	0	58	1.2221	5.9	3	4	1	101	0.9639	0.8	0	8	3
16	1.9935	23.9	0	0	2	59	1.2141	1.0	3	5	0	102	0.9619	0.6	1	11	1
17	1.9899	19.2	1	5	0	60	1.2028	3.0	1	3	3	103	0.9571	1.1	1	2	4
18	1.8770	46.0	0	2	2	61	1.2006	3.2	0	4	3	104	0.9526	2.4	1	10	2
19	1.8742	19.8	2	3	0	62	1.1961	2.2	1	9	0	105	0.9490	1.6	2	9	2
20	1.8026	1.4	2	2	1	63	1.1759	0.1	2	8	0	106	0.9462	0.6	3	3	3
21	1.7879	5.4	1	1	2	64	1.1635	2.2	3	1	2	107	0.9443	0.9	3	7	2
22	1.7805	17.4	1	5	1	65	1.1614	1.1	3	5	1	108	0.9429	0.2	3	9	0
23	1.7232	13.9	1	2	2	66	1.1571	2.8	1	4	3	109	0.9409	2.4	1	8	3
24	1.7144	15.8	1	6	0	67	1.1535	1.5	2	6	2	110	0.9390	4.2	0	4	4
25	1.6961	9.8	2	3	1	68	1.1457	11.6	0	8	2	111	0.9371	1.0	4	6	0
26	1.6905	12.4	0	6	1	69	1.1425	4.1	3	6	0	112	0.9333	0.4	0	12	0
27	1.6295	1.1	1	3	2	70	1.1272	5.0	2	8	1	113	0.9246	0.4	2	7	3
28	1.6240	18.8	0	4	2	71	1.1200	0.1	0	10	0	114	0.9234	1.7	3	4	3
29	1.5744	1.8	1	6	1	72	1.1163	2.0	3	3	2	115	0.9215	1.2	2	11	0
30	1.5575	4.5	2	5	0	73	1.1104	0.2	2	2	3	116	0.9177	0.2	1	4	4
31	1.5207	0.3	1	4	2	74	1.1077	0.3	1	8	2	117	0.9122	6.0	1	12	0
32	1.5010	0.1	1	7	0	75	1.1052	2.4	1	5	3	118	0.9088	0.6	0	12	1
33	1.4671	0.9	2	0	2	76	1.0983	0.1	3	6	1	119	0.9055	0.1	2	0	4
34	1.4547	8.7	2	1	2	77	1.0841	4.4	2	3	3	120	0.9026	1.2	2	1	4
35	1.4507	14.7	2	5	1	78	1.0828	1.4	0	6	3	121	0.9013	1.3	4	4	2
36	1.4328	2.9	3	1	0	79	1.0813	3.9	2	7	2	122	0.8979	0.8	2	11	1
37	1.4192	0.1	2	2	2	80	1.0783	6.2	4	1	0	123	0.8939	0.1	2	2	4
38	1.4143	0.3	2	6	0	81	1.0723	0.7	3	7	0	124	0.8912	0.8	1	5	4
39	1.4083	4.9	1	5	2	82	1.0638	0.1	4	2	0	125	0.8902	0.2	2	10	2
40	1.4047	6.5	1	7	1	83	1.0502	0.4	1	6	3	126	0.8894	3.0	1	12	1
41	1.4000	10.0	0	8	0	84	1.0464	0.1	1	10	1	127	0.8875	0.6	1	11	2
42	1.3655	7.8	2	3	2	85	1.0417	6.2	2	9	1	128	0.8852	0.6	3	10	0
43	1.3626	3.9	0	6	2	86	1.0369	1.0	3	5	2	129	0.8800	2.8	2	8	3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PDF#65-3766: QM=Star/Calculated; d=Other/Unknown; #=(Unknown)												PDF Card					
Tn Sulfide																	
SnS																	
#	d(A)	l(f)	h	k	l	#	d(A)	l(f)	h	k	l	#	d(A)	l(f)	h	k	l
130	0.8761	0.1	4	5	2	140	0.8395	0.8	2	5	4	150	0.8193	0.1	4	3	3
131	0.8753	0.1	4	7	1	141	0.8378	3.8	2	9	3	151	0.8182	1.4	3	1	4
132	0.8664	0.1	3	8	3	142	0.8365	1.4	2	11	2	152	0.8172	0.1	4	9	0
133	0.8642	1.2	5	1	0	143	0.8345	1.4	3	7	3	153	0.8147	2.6	2	6	4
134	0.8617	2.2	1	6	4	144	0.8323	0.5	3	11	0	154	0.8120	3.2	0	8	4
135	0.8584	3.2	5	2	0	145	0.8305	5.8	4	2	3	155	0.8107	0.3	5	4	1
136	0.8523	0.3	3	9	2	146	0.8296	0.2	1	12	2	156	0.8090	1.0	3	10	2
137	0.8481	0.3	4	6	2	147	0.8280	1.4	5	4	0	157	0.8044	0.1	4	4	3
138	0.8470	0.1	5	0	1	148	0.8266	0.2	1	13	1	158	0.8016	1.1	3	8	3
139	0.8450	2.8	1	13	0	149	0.8260	0.6	5	3	1						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Rise 300 °C

General model:

$$f(x) = a*(1-\exp(-x/2.055899523))+b*(1-\exp(-x/950.0990099))+c*(1-\exp(-x/973.3962264))+d*(1-\exp(-x/2716.653083))^g$$

Coefficients

(with 95% confidence bounds):

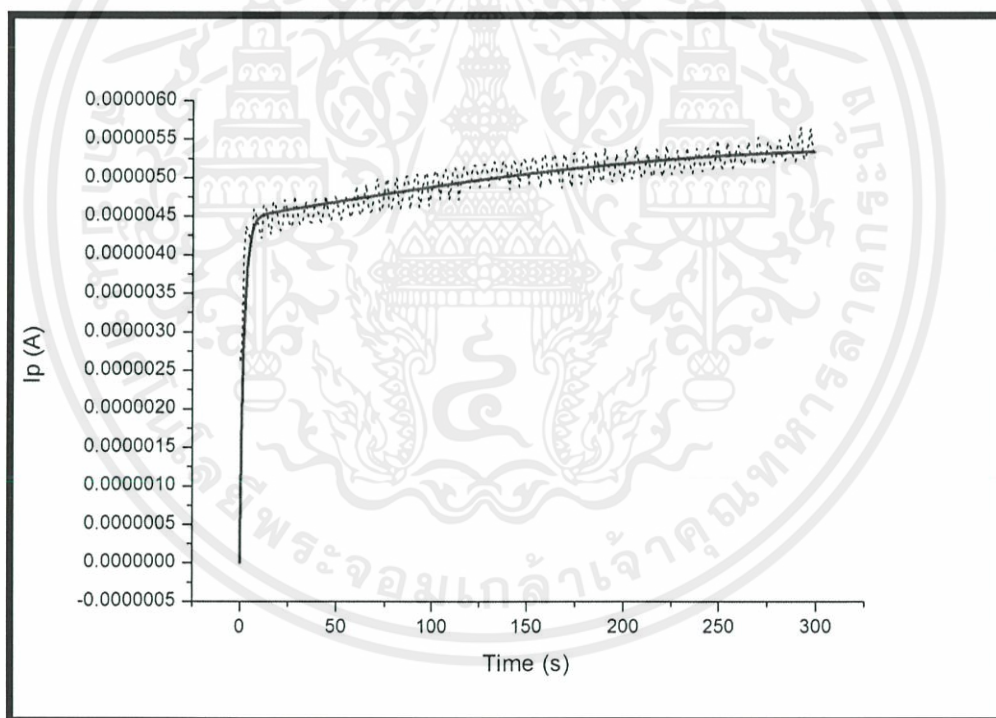
$$a = 4.471e-006 \quad (4.315e-006, 4.626e-006)$$

$$b = -5.02e-005 \quad (-0.02473, 0.02463)$$

$$c = 0.002876 \quad (-7.161, 7.167)$$

$$d = -0.007131 \quad (-19.14, 19.12)$$

$$g = 0.1737 \quad (-246.2, 246.5)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Rise 350 °C

General model:

$$f(x) = a*(1-\exp(-x/175.1313485))+b*(1-\exp(-x/409.8360656))+ \\ c*(1-\exp(-x/558.6592179))+d*(1-\exp(-x/1523.623787))+ \\ e*(1-\exp(-x/2559.731331))+f*(1-\exp(-x/33222.0395))+ \\ g*(1-\exp(-x/19383.00033))+h*(1-\exp(-x/7172.932223))^s$$

Coefficients

(with 95% confidence bounds):

$$a = -0.0006704 \text{ } (-0.009365, 0.008024)$$

$$b = 0.05356 \text{ } (-1.23, 1.337)$$

$$c = -0.148 \text{ } (-4.311, 4.015)$$

$$d = 1.02 \text{ } (-38.71, 40.75)$$

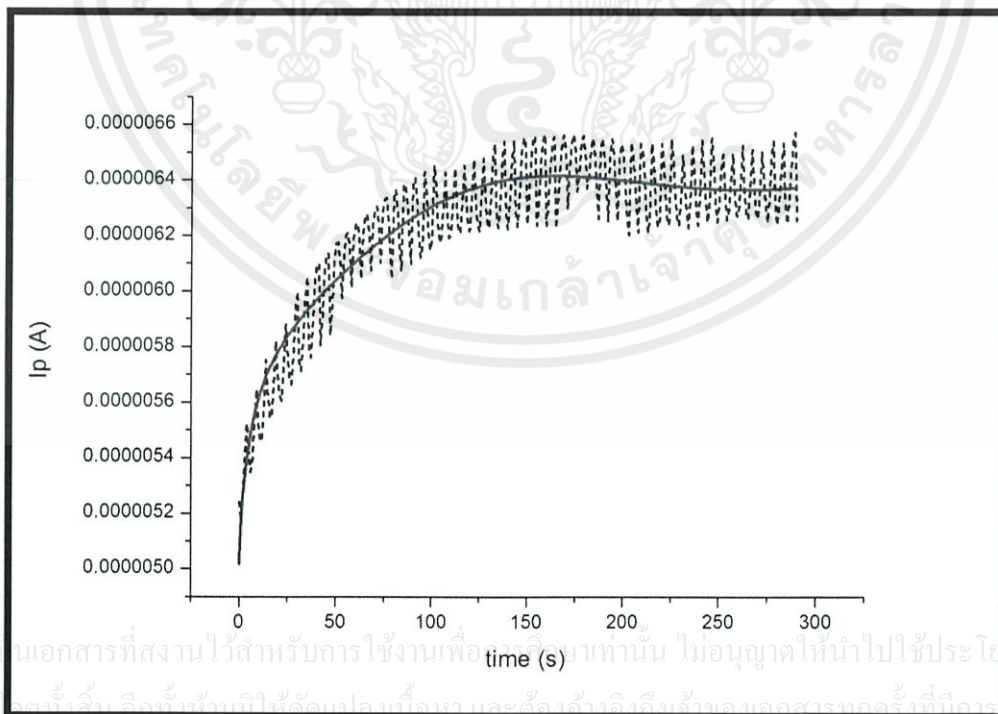
$$e = -1.754 \text{ } (-76.93, 73.42)$$

$$f = 4.362 \text{ } (-1226, 1235)$$

$$g = 0.4405 \text{ } (-767.7, 768.6)$$

$$h = 9.302e-006 \text{ } (4.803e-006, 1.38e-005)$$

$$s = 0.07461 \text{ } (0.01342, 0.1358)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ

Decay 300 °C

Generalmodel:

$$f(x) = (a*\exp(-x/7.01673272))+(b*\exp(-x/534.7593583))+ \\ (c*\exp(-x/1076.353272))+(d*\exp(-x/3211.788549)^g)$$

Coefficients

(with 95% confidence bounds):

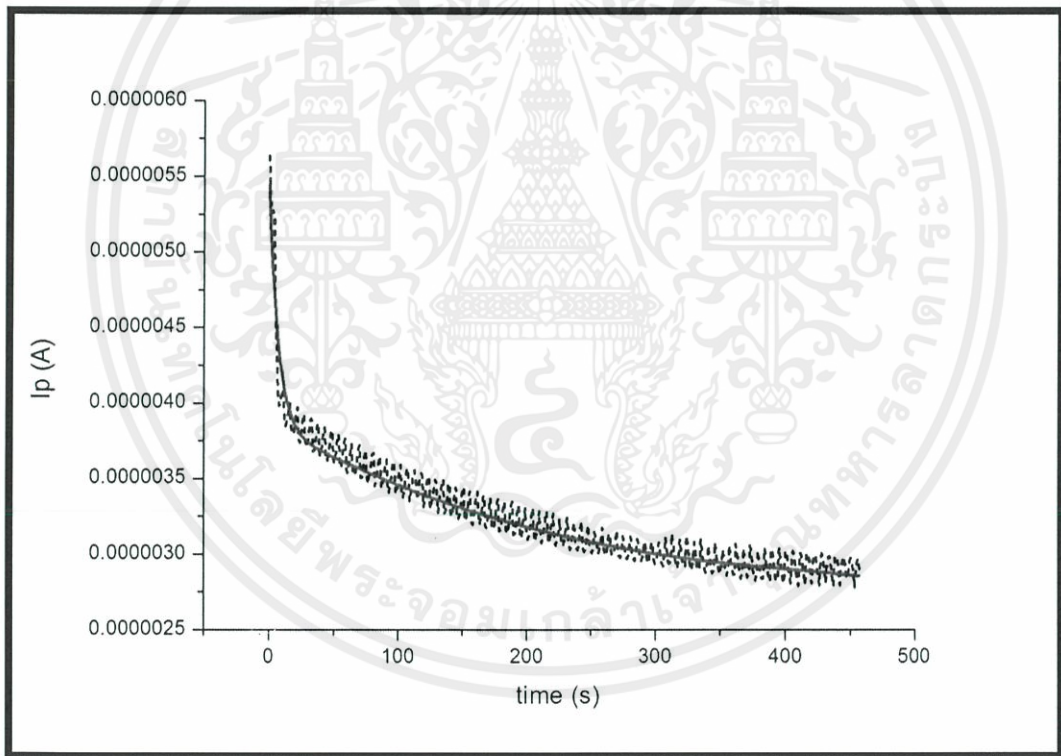
$$a = 1.66e-006 (1.544e-006, 1.776e-006)$$

$$b = 7.741e-006 (-1.078e-005, 2.626e-005)$$

$$c = -1.245e-005 (-9.51e-005, 7.019e-005)$$

$$d = 8.597e-006 (-5.558e-005, 7.277e-005)$$

$$g = 0.7407 (-9.795, 11.28)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Decay 350 °C

General model:

$$f(x) = (a \cdot \exp(-x/114.0250855)) + (b \cdot \exp(-x/448.4304933)) + (c \cdot \exp(-x/632.9113924)) + (d \cdot \exp(-x/1476.77549)) + (e \cdot \exp(-x/1352.641845)) + (f \cdot \exp(-x/4858.331066)) + (g \cdot \exp(-x/10162.65327))^s$$

Coefficients

(with 95% confidence bounds):

$$a = 4.383e-005 \quad (3.586e-005, 5.18e-005)$$

$$b = -0.04708 \quad (-0.05456, -0.0396)$$

$$c = 0.2346 \quad (0.1989, 0.2704)$$

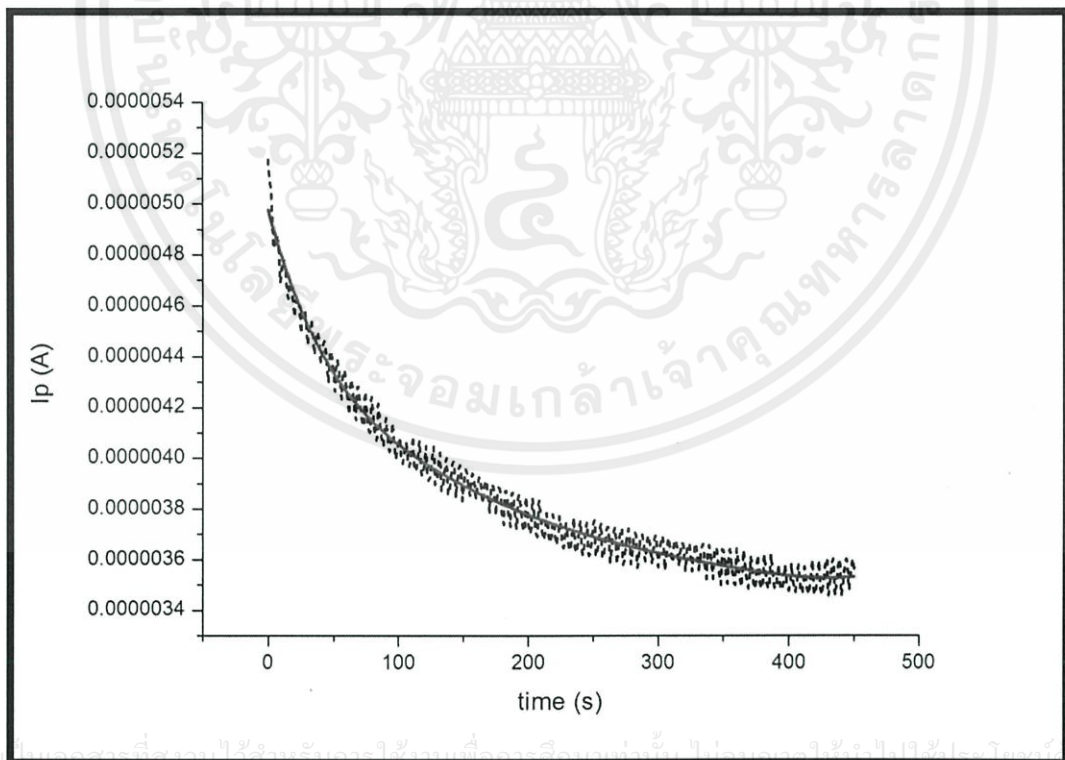
$$d = 6.91 \quad (5.992, 7.827)$$

$$e = -6.33 \quad (-7.178, -5.481)$$

$$f = -1.635 \quad (-2.365, -0.905)$$

$$g = 0.8673 \quad (0.2068, 1.528)$$

$$s = 0.8318 \quad (0.1312, 1.532)$$



เอกสารนี้... การค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อผู้เขียน นายชโนคม จันทรสม
 เกิดเมื่อ วันที่ 1 กันยายน พ.ศ.2534
 ภูมิลำเนา จังหวัดเชียงราย
 ประวัติการศึกษา ปี พ.ศ.2552 จบการศึกษาระดับมัธยมปลาย
 โรงเรียนเทศบาล 6 นครเชียงราย
 ปี พ.ศ.2553 เข้ารับการศึกษาอุดมศึกษา หลักสูตรฟิสิกส์ประยุกต์
 สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อผู้เขียน นายสังศักดิ์ แสงโฮง
 เกิดเมื่อ วันที่ 28 กันยายน พ.ศ.2534
 ภูมิลำเนา จังหวัดขอนแก่น
 ประวัติการศึกษา ปี พ.ศ.2552 จบการศึกษาระดับมัธยมปลาย
 โรงเรียนขอนแก่นวิทยายน
 ปี พ.ศ.2553 เข้ารับการศึกษาอุดมศึกษา หลักสูตรฟิสิกส์ประยุกต์
 สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้