

รายงานการวิจัย

เรื่อง

การเตรียมฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอม In โดยวิธีระเหยในระบบ

สุญญากาศ

Preparation of In- Doped CdS Thin Films by Thermal
Evaporation Method

โดย

นายฉัตรนัย แก้วแดง

นางงามนิตย์ แก้วแดง

นางทิพรัตน์ วงษ์เจริญ

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

งานวิจัยนี้ได้รับทุนวิจัยจากคณะวิทยาศาสตร์

ประจำปีงบประมาณ 2547

RCH

TA

418-9

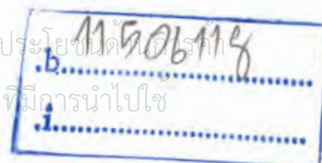
745

เลขที่.....
58930

17 ก.พ. 2549

วัน,เดือน,ปี.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น หากมีการเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ก็เนื่องจากได้รับคำแนะนำจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมพงษ์ จิตราภรณ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จงยศ อยู่ดี และดร. ชาญวิทย์ จิตบุษการ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จึงขอแสดงความขอบคุณมา ณ ที่นี้

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ อนุพงศ์ สรงประภา ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องซังสาร, กล้อง โลหะลดสัญญาณรบกวนและอิเล็กทรอนิกส์สำหรับวัดความต้านทานแผ่น

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. อารีย์ วิเชียรฉาย ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์กล้องจุลทรรศน์ และ อนุญาตให้ใช้เครื่องระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ วิชาญ เตชิตธีระ หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้กล้องดิจิทัลในการถ่ายรูปและจัดสรรเงินงบวัสดุของภาควิชา ฯ สมทบด้วย

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ อรุณี คงศักดิ์ไพศาล คุณสุรินทร์ เหล่าพระจันทร์ และคุณ กัญญา ศิริโกชน ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ให้ใช้เครื่อง ยูวี- วิสลิเบิล แบบดับเบิลบีม ยี่ห้อจัสโก้ 7600 สเปกโตรมิเตอร์ (UV / visible spectrometer JUSCO 7600) ที่มีค่าความยาวคลื่นย่านอัลตราไวโอเลต และย่านตามองเห็นในการวัดการส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ธนากร โอสดจันทร์ และ ดร. อุดม รอบคอบ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล อาจารย์เอกชัย หุ่นนิวัฒน์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ นพ ปรุฑ สุทธิศิริ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ตลอดจนขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เสรี พุฒพัฒน์ และ คุณรวมพร ทองเรือง ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ศูนย์รังสิต ที่ให้ความอนุเคราะห์และแนะนำการใช้เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรค โทมิเตอร์ในการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบาง

ขอขอบคุณ คุณ ธวัชชัย ขาวประเสริฐ และ คุณ จรินทร์ โพธิไชยะ รวมทั้งเจ้าหน้าที่ที่อาคารฝึกงาน ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่อนุญาตให้ใช้เครื่องมือประดิษฐ์อุปกรณ์ในการทดลองของงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ นางสาวพิมล ศิริพจนาวรรณ นางสาววรรณภา สัตนาโค และนายเอนก อุกฤษณ์ นุก นักศึกษาระดับปริญญาตรี ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งเป็นผู้ช่วยวิจัยในการเก็บบันทึกข้อมูลจนเสร็จสิ้นโครงการ และ

ขอขอบคุณนายวีรชัย ธิภา นายปกรณ์ สิทธิเขตต์กรณ์ นายสุกฤษฎ์ เกิดแสง นายจิตติกร จรรยาธรรม และนายอุปถัมภ์ นาครักษ์ นักศึกษาระดับปริญญาโท ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ช่วยทำรูปเล่มรายงานจนเสร็จสมบูรณ์

งานวิจัยนี้ได้รับการอุดหนุนจากคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประจำปีงบประมาณ 2547 จึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการวิจัย การเตรียมฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วยอะตอม In โดยวิธีระเหยในระบบ
สุญญากาศ

โดย นายฐิตินัย แก้วแดง
 นางงามนิษฐ์ แก้วแดง
 นางทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ

ปีงบประมาณ 2547

บทคัดย่อ

ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์และฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอินเดียม ที่ความเข้มข้นร้อยละหนึ่งต่อโมล โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ จากการศึกษา XRD พบว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้จะมีความเป็นเนื้อเดียวกัน และมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบเฮกซะโกนอล(เวิร์ทไซท์) ความหนาและอุณหภูมิในการแอนนัลที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ช่องว่างแถบพลังงานและสภาพต้านทานของฟิล์มลดลง การเจืออินเดียมจะส่งผลต่อสมบัติทางแสงและสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ จากการศึกษาพบว่าค่าของช่องว่างแถบพลังงานจะเพิ่มขึ้น แต่สภาพต้านทานจะลดลง ค่าของช่องว่างแถบพลังงานซึ่งหาได้จากการวัดค่าการ ส่งผ่านแสงโดยจะมีค่าอยู่ในช่วง 2.40 ถึง 2.55 อิเล็กตรอนโวลต์ และสภาพต้านทานของฟิล์มอยู่ ในช่วง 10^2 ถึง 10^8 โอห์ม-เซนติเมตร จากการศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอินเดียม จะสามารถหาค่าค่าแรงศักย์ที่ขอบของเกรนได้ โดยจะมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 0.122 ถึง 0.313 อิเล็กตรอนโวลต์

Project Title	Preparation of In- Doped CdS Thin Films by Thermal Evaporation Method	
Name	Mr. Thitinai	Gaewdang
	Mrs. Ngamnit	Gaewdang
	Mrs. Tiparatana	Wongchareon
Year	2004	

Abstract

CdS thin films and CdS thin films doped with indium 1 mol% have been deposited by thermal evaporation in vacuum on glass substrates. X-ray diffractometric study suggests that microstructure of films are homogeneous with a hexagonal (wurtzite) structure. Effect of increase in thickness and annealed temperatures are found to produce bandgap and resistivity decreases. Indium doping has an effect on optical and electrical properties of CdS films: energy gap increases but resistivity decreases. Values of bandgap that obtained from optical absorption measurements are range in 2.40 to 2.55 eV ,and value of resistivities are range in 10^{-2} to $10^8 \Omega\text{-cm}$. From electrical resistivity measurements depending on temperature of CdS:In thin films, the barrier height of grain boundaries ranging 0.122 to 0.313 eV were also evaluated.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 ขั้นตอนของการวิจัย	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	5
2.1 ทฤษฎีและการวิเคราะห์โครงสร้างของผลึก	5
2.1.1 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ	5
2.1.1.1 การระบุตำแหน่ง ทิศทางและระนาบของ โครงผลึก	7
2.1.1.2 โครงสร้างผลึกที่สำคัญของสารกึ่งตัวนำ	9
2.1.1.2.1 โครงสร้างผลึกแบบเพชร	10
2.1.1.2.2 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์	10
2.1.1.2.3 โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์	12
2.1.1.3 ความไม่สมบูรณ์ของผลึก	13
2.1.1.3.1 ข้อบกพร่องผลึกแบบจุด	14
2.1.1.3.2 ข้อบกพร่องผลึกเชิงเส้น	14
2.1.1.3.3 ข้อบกพร่องผลึกแบบแนวระนาบ	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.1.2 การศึกษาโครงสร้างผลึก	16
2.2 สมบัติการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ	20
2.2.1 ทฤษฎีโครงสร้างแถบพลังงาน	20
2.2.1.1 โลหะ สารกึ่งตัวนำและฉนวน	20
2.2.1.2 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ	22
2.2.2 โครงสร้างแถบพลังงานของแคดเมียมซัลไฟด์	23
2.2.3 การส่งผ่านแสง	25
2.2.4 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง	26
2.3 สมบัติทางไฟฟ้า	28
2.3.1 สภาพนำไฟฟ้า	28
2.3.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า	30
2.3.2.1 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง	30
2.3.2.2 การวัดความต้านทานจำเพาะโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น	31
2.3.2.3 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสี่ขั้วเชิงเส้น	33
2.3.3 ทฤษฎีการนำไฟฟ้าในช่วงอุณหภูมิต่างๆ	37
2.4 เทคโนโลยีสุญญากาศและเทคนิคการเคลือบฟิล์มบางโดยการระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ	38
2.4.1 ทฤษฎีจลน์ของก๊าซในอุดมคติ	38
2.4.1.1 การกระจายความเร็วของโมเลกุล	38
2.4.1.2 ความดัน	40
2.4.1.3 การชนของก๊าซบนพื้นผิว	41
2.4.2 การลำเลียงก๊าซและการปั๊ม	42
2.4.2.1 ระบบการไหลของก๊าซ	42
2.4.2.2 การนำก๊าซ	42
2.4.2.3 อัตราเร็วของการปั๊ม	43

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.4.3 ป้อนสุญญากาศ	46
2.4.3.1 ป้อนกลโรตารี	46
2.4.3.1.1 ป้อนกลโรตารีแบบแวน	46
2.4.3.1.2 ป้อนกลโรตารีแบบลูกสูบ	48
2.4.3.1.3 จังหวะของป้อน	49
2.4.3.1.4 ก๊าซบัลลาสต์	50
2.4.3.2 ป้อนไอฟุ้งกระจาย	50
2.4.4 กระบวนการเตรียมฟิล์มบางด้วยการระเหยสาร	52
2.4.4.1 อัตราการระเหยสาร	52
2.4.4.2 ความดันไอของธาตุ	53
2.4.4.3 แหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้ในการระเหยสารด้วยไฟฟ้า	54
2.4.4.3.1 แหล่งกำเนิดความร้อนชนิดลวดทั้งสแตน	54
2.4.4.3.2 แหล่งกำเนิดความร้อนชนิดแผ่น โลหะคงรูป	55
2.4.4.3.3 เตาระเหย	55
2.4.4.3.4 เป้าหลอม	55
2.4.4.3.5 การประมาณค่าอุณหภูมิของแหล่งกำเนิดความร้อนชนิดตัวต้านทาน	56
2.4.4.4 การระเหยสารประกอบ	56
2.4.4.5 อิทธิพลของโครงสร้างเชิงเรขาคณิตต่อระบบการเตรียมฟิล์มด้วยวิธีการระเหยสาร	57
บทที่ 3 วิธีการทดลอง	60
3.1 ระบบการระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ	60
3.2 การเตรียมแผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์	62
3.3 การเตรียมสารที่ใช้ในการระเหยด้วยความร้อนในสุญญากาศ	62
3.4 วิธีการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์และแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอินเดียม	63

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.5 วิธีการวัดความหนาของฟิล์มบางโดยวิธีชั่งน้ำหนัก	64
3.6 วิธีการวัดค่าความต้านทานแผ่นโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น	65
3.6.1 อุปกรณ์	65
3.6.2 วิธีการทดลอง	66
3.7 วิธีวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ	66
3.7.1.อุปกรณ์	66
3.7.2.วิธีการทดลอง	67
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	69
4.1 ลักษณะของฟิล์มบางที่เตรียมได้	69
4.2 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	72
4.3 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงเพื่อคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน	75
4.4 ผลการศึกษาค่าความต้านทานแผ่น	81
4.5 ผลการศึกษาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ	90
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	92
เอกสารอ้างอิง	94
ภาคผนวก	97
ประวัติผู้เขียน	100

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงทิศพารามิเตอร์ของหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ	6
ตารางที่ 2.2 ระบบผลึกทั้งเจ็ดแบบในระบบสามมิติ	6
ตารางที่ 2.3 ความสัมพันธ์ของดัชนีมิลเลอร์และจุดตัดแกนผลึก	9
ตารางที่ 2.4 แสดงปฏิกิริยาการระเหยสารประกอบ	57
ตารางที่ 3.1 แสดงน้ำหนักของแคดเมียมซัลไฟด์ และอินเดียมคลอไรด์ในการเตรียมแคดเมียมซัลไฟด์ เจือด้วยอินเดียม 1%	63
ตารางที่ 4.1 แสดงค่าขนาดของเกรนซึ่งคำนวณได้จากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ได้จากฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอินเดียม เมื่อไม่ได้มีการแอนนีส ที่ความหนา 150-1200 นาโนเมตร	74
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าขนาดของเกรนซึ่งคำนวณได้จากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ได้จากฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอินเดียมที่มีความหนาเท่ากัน คือ 850 นาโนเมตร เมื่อไม่ได้มีการแอนนีสและเมื่อมีการแอนนีสในช่วงอุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที	74
ตารางที่ 4.3 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน(eV)ของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์บริสุทธิ์ และฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอินเดียมเมื่อไม่ได้มีการแอนนีสและเมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที	80
ตารางที่ 4.4 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์บริสุทธิ์ และฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอินเดียม ที่มีความหนา 850 นาโนเมตรเมื่อไม่ได้มีการแอนนีสและเมื่อมีการแอนนีสในช่วงอุณหภูมิ 100 – 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที	80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง(ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 4.5 แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ และแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอินเดียมที่ความหนาต่างๆเมื่อไม่ได้มีการแอนนีสและเมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที	84
ตารางที่ 4.6 แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์และแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอินเดียม ที่มีความหนาเท่ากันคือ 850 นาโนเมตร เมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิต่างๆภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที	85
ตารางที่ 4.7 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์และฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอินเดียม ที่ความหนาต่างๆเมื่อไม่ได้มีการแอนนีสและเมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที	88
ตารางที่ 4.8 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์และแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอินเดียม ที่มีความหนาเท่ากันคือ 850 นาโนเมตร เมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิต่างๆ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที	89
ตารางที่ 4.9 แสดงค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่บริเวณขอบเขตของเกรนกับความหนาของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอินเดียม เมื่อไม่ได้มีการแอนนีส	91
ตารางที่ 4.10 แสดงค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่บริเวณขอบเขตของเกรนกับค่าอุณหภูมิแอนนีสของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์เมื่อมีการแอนนีสในช่วงอุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที ที่ความหนา 850 นาโนเมตร	91

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ	5
รูปที่ 2.2 การบอกระนาบต่างๆของผลึก	8
รูปที่ 2.3 แสดงพื้นระตศระฮีดรอน	10
รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเพชร	10
รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ของ CdS	11
รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์ของ CdS	12
รูปที่ 2.7 แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์กับซิงค์เบลนด์	13
รูปที่ 2.8 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบจุด	14
รูปที่ 2.9 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชันแบบขอบ	15
รูปที่ 2.10 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบดิสโลเคชันแบบสกรู	15
รูปที่ 2.11 แสดงเกรน และขอบเขตของเกรน	16
รูปที่ 2.12 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์	17
รูปที่ 2.13 แสดงตัวอย่างของสเปกตรัมที่ได้จาก XRD	17
รูปที่ 2.14 แสดงวิธีการหา $\beta_{2\theta}$ เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	19
รูปที่ 2.15 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานของ (ก) โลหะ (ข) ฉนวน (ค) สารกึ่งตัวนำ	21
รูปที่ 2.16 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน และการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำ ที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ (ก) ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง (ข) ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง	23

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 2.17	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำ ที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ (ก) ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง (ข) ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงในกรณีที่เกิดกระบวนการสร้างโฟนอน	23
รูปที่ 2.18	แสดง โครงสร้างแถบพลังงานแบบตรงของ CdS ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเวรีทไซท์โดยไม่คิดการค้ำปดิงระหว่างสปิน-ออร์บิท	24
รูปที่ 2.19	แสดง โครงสร้างแถบพลังงานแบบตรงของ CdS ที่มีโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์โดยไม่คิดการค้ำปดิงระหว่างสปิน-ออร์บิท	24
รูปที่ 2.20	แสดงภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบาง	25
รูปที่ 2.21	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่น โดยเส้นที่บจะแสดงขอบการดูดกลืนพื้นฐาน	27
รูปที่ 2.22	แสดงการให้แรงดันกับสารตัวอย่าง	29
รูปที่ 2.23	การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีตรง	30
รูปที่ 2.24	การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น	31
รูปที่ 2.25	แสดงการวัดความต้านทานแผ่น โดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น (ก) การวัดแบบสองขั้วโดยมีการเลื่อนระยะที่ขั้วหนึ่ง (ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับระยะทางที่ได้จากการวัดชนิดเลื่อนขั้วไฟฟ้า	33
รูปที่ 2.26	แสดงการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสี่ขั้วเชิงเส้น	34
รูปที่ 2.27	ลักษณะของขั้วไฟฟ้าทั้งสี่ที่วางเรียงในแนวเส้นตรง (ก) สำหรับสารตัวอย่างที่มีความหนามาก (ข) สำหรับสารตัวอย่างมีความหนาเท่ากับ d	36
รูปที่ 2.28	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $f(\nu)$ กับ ν ที่อุณหภูมิต่างๆ	39

สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 2.29 แสดงส่วนประกอบของ ภาชนะสุญญากาศ-ท่อ-ปั๊ม	
(ก) ผนังภาชนะไม่มีการขับก๊าซ	
(ข) ผนังภาชนะมีการขับก๊าซ	44
รูปที่ 2.30 ค่าของการนำก๊าซในท่อรูปร่างต่างๆที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส มีหน่วยเป็นลิตรต่อวินาที	45
รูปที่ 2.31 แสดงโครงสร้างของโรตารีปั๊มชนิดแวน	47
รูปที่ 2.32 แสดงจังหวะการทำงานสี่จังหวะของปั๊มชนิดแวน	47
รูปที่ 2.33 แสดงลักษณะภายในของปั๊มกลโรตารีแบบลูกสูบ	49
รูปที่ 2.34 ปั๊มกลสองจังหวะ	50
รูปที่ 2.35 ส่วนประกอบภายในของปั๊มไอฟุ้งกระจาย	51
รูปที่ 2.36 กราฟแสดงค่าความดันไอของธาตุ โดยจุดต่างๆจะสัมพันธ์กับ จุดหลอมเหลว	53
รูปที่ 2.37 กราฟแสดงค่าความดันไอของธาตุในสารกึ่งตัวนำ โดยจุดต่างๆ จะสัมพันธ์กับจุดหลอมเหลว	54
รูปที่ 2.38 แสดงแหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้ระเหยสารด้วยไฟฟ้าแบบต่างๆ	55
รูปที่ 2.39 แสดงรูปแบบการระเหยของสาร	58
รูปที่ 3.1 ภายถ่ายแสดงระบบการเตรียมฟิล์มบางในสุญญากาศ	61
รูปที่ 3.2 แสดงไดอะแกรมการวางตำแหน่งภายในภาชนะ	61
รูปที่ 3.3 แสดงหลักการวัดค่าความต้านทานแผ่นด้วยวิธีสองขั้วเชิงเส้น	65
รูปที่ 3.4 แสดงการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ	67
รูปที่ 4.1 แสดงฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์บริสุทธิ์ ที่ความหนาต่างๆ เมื่อไม่ได้มีการแอนนัล	69
รูปที่ 4.2 แสดงฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอินเดียม ที่ความหนาต่างๆ เมื่อไม่ได้มีการแอนนัล	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.3 แสดงฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์บริสุทธิ์ ที่ความหนาต่างๆ เมื่อมีการแอนนีกที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที	70
รูปที่ 4.4 แสดงฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอินเดียม ที่ความหนาต่างๆ เมื่อมีการแอนนีกที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที	70
รูปที่ 4.5 แสดงฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์บริสุทธิ์ที่มีความหนา 850 นาโนเมตร เมื่อไม่ได้มีการแอนนีกและเมื่อมีการแอนนีกในช่วงอุณหภูมิ 100–500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที	71
รูปที่ 4.6 แสดงฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอินเดียม ที่มีความหนา 850 นาโนเมตร เมื่อไม่ได้มีการแอนนีกและเมื่อมีการการแอนนีก ในช่วงอุณหภูมิ 100 – 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ 30 นาที	71
รูปที่ 4.7 แสดงสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ได้จากฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอินเดียมที่ความหนาต่างกันตั้งแต่ 150 - 1200 นาโนเมตร เมื่อไม่ได้มีการแอนนีก	72
รูปที่ 4.8 แสดงสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ได้จากฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอินเดียม ที่ความหนา 850 นาโนเมตร เมื่อไม่ได้มีการแอนนีกและเมื่อมีการแอนนีก ที่ช่วงอุณหภูมิ 100 – 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที	73
รูปที่ 4.9 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่น 400-800 นาโนเมตร ของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ ที่ความหนาต่างๆ เมื่อไม่ได้มีการแอนนีก	76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.10 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่น 400-800 นาโนเมตร ของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่ความหนาต่างๆเมื่อมีการแอนนีกัลที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที	76
รูปที่ 4.11 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่น400-800 นาโนเมตร ของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอินเดียม ที่ความหนาต่างๆ เมื่อไม่ได้มีการแอนนีกัล	77
รูปที่ 4.12 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่น 400 - 800 นาโนเมตร ของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอินเดียมที่ความหนาต่างๆ เมื่อมีการแอนนีกัลด้วยอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที	77
รูปที่ 4.13 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่น 400 - 800 นาโนเมตร ของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ ที่ความหนา 850 นาโนเมตร เมื่อไม่ได้มีการแอนนีกัล และเมื่อมีการแอนนีกัลในช่วงอุณหภูมิ100-500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที	78
รูปที่ 4.14 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่น 400 - 800 นาโนเมตร ของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอินเดียม ที่ความหนา 850 นาโนเมตร เมื่อไม่ได้มีการแอนนีกัลและเมื่อมีการแอนนีกัลในช่วงอุณหภูมิ 100 - 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศ ของก๊าซไนโตรเจน บริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที	78
รูปที่ 4.15 แสดงตัวอย่างการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนยกกำลังสอง ($\alpha h\nu$) ² กับพลังงานโฟตอน($h\nu$) ของ ฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์บริสุทธิ์ ที่ความหนา 150 นาโนเมตร เมื่อไม่ได้มีการแอนนีกัล	79

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแผ่นในขณะที่ไม่มีการฉายแสงของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์และแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอินเดียมเมื่อไม่ได้มีการแอนนัลกับความหนาของฟิล์ม	81
รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแผ่นในขณะที่ไม่มีการฉายแสงของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์กับความหนาของฟิล์มเมื่อไม่ได้มีการแอนนัล และเมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที	82
รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแผ่นในขณะที่ไม่มีการฉายแสงของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอินเดียมกับความหนาของฟิล์มบางเมื่อไม่ได้มีการแอนนัลและเมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที	82
รูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแผ่นในขณะที่ไม่มีการฉายแสงของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ และแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอินเดียม ที่ความหนาเท่ากัน คือ 850 นาโนเมตร เมื่อมีการแอนนัลในช่วงอุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที	83
รูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์กับความหนาเมื่อไม่ได้มีการแอนนัล	87
รูปที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอินเดียมกับความหนาเมื่อไม่ได้มีการแอนนัล	87
รูปที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่บริเวณขอบเขตของเกรนกับความหนาของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอินเดียมเมื่อไม่ได้มีการแอนนัล	90

บทที่ 1

บทนำ

สถานะความต้องการพลังงานในปัจจุบันเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ ดังนั้นจึงมีความพยายามที่จะหา พลังงาน มาตอบสนองความต้องการให้เพียงพอ โดยการค้นหาแหล่งพลังงานใหม่ๆ มาทดแทนพลังงานจากน้ำมัน และถ่านหินซึ่งกำลังจะหมดไป แหล่งพลังงานทางเลือกใหม่ในปัจจุบัน ได้แก่ พลังงานลม, พลังงานน้ำ, พลังงานนิวเคลียร์ และพลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลมนั้นจะขึ้นอยู่กับฤดูกาลและตำแหน่งที่ตั้ง ขณะที่ พลังงานนิวเคลียร์จะมีปัญหาในเรื่องขยะที่เป็นกากกัมมันตรังสี พลังงานน้ำจะได้มาจากแม่น้ำสายใหญ่ แต่มี ผลกระทบต่อสภาพสิ่งแวดล้อมอย่างรุนแรง ส่วนพลังงานแสงอาทิตย์ แม้จะขึ้นกับตำแหน่งที่ตั้งและ ฤดูกาล แต่สามารถใช้ได้เกือบทุกที่ทั่วโลกและไม่ทำลายสิ่งแวดล้อม ดังนั้นพลังงานแสงอาทิตย์จึงเป็น ทางเลือกที่ดีที่สุด ที่เราจะนำมาซึ่งพลังงานและเป็นมิตรกับ สิ่งแวดล้อม [1]

พลังงานแสงอาทิตย์สามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ โดยอาศัยเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งเป็น แหล่งกำเนิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าจากปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก(photovoltaic effect) สารกึ่งตัวนำที่มี โครงสร้างแบบซาลโคไพไรต์(chalcopyrite structure) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง Cu(In,Ga)Se_2 ได้รับความสนใจ เป็นพิเศษ เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบางที่อยู่ในรูปของรอยต่อวิวิธพันธ์(heterojunction) ของสาร $\text{SiO}_2/\text{ZnO}/\text{CdS}/\text{Cu(In,Ga)Se}_2/\text{Mo}$ /แผ่นรองรับที่เป็น Soda-lime glass หรือโลหะไร้สนิม ซึ่งให้ประสิทธิภาพ สูงถึง 18.8% และ 17.5% ตามลำดับ [2]

ฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์(CdS)เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ที่มีลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบ ตรง(direct bandgap) ผลึกแคดเมียมซัลไฟด์จะมีโครงสร้างได้ 2 แบบ คือ ซิงค์เบลนด์ (zincblende) ซึ่งจัดอยู่ในระบบคิวบิก (cubic) หรือเวิร์ทไซท์ (wurtzite) ซึ่งอยู่ในระบบเฮกซะโกนอล (hexagonal) และมีช่องว่าง แถบพลังงาน (energy gap) กว้างโดยมีค่าประมาณ 2.42 อิเล็กตรอน โวลต์ ด้วยคุณสมบัตินี้ทำให้ฟิล์มบาง แคดเมียมซัลไฟด์เป็นชั้นหน้าต่างรับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ดี [3] การเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การระเหยสารในระบบสุญญากาศ (thermal evaporation), สเปตเตอริง (sputtering), การเคลือบโดยวิธีไอระเหยสารเคมี (chemical vapor deposition: CVD), สเปรย์ไพโรไลซิส (spray pyrolysis) และการอบสารละลายเคมี (chemical bath deposition: CBD) เป็นต้น [3,4-7] ซึ่งการ เตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ ด้วยวิธีการระเหยสารในระบบสุญญากาศ จะสามารถลดปัญหา ข้อบกพร่องของผลึกเนื่องมาจากบรรยากาศ สามารถควบคุมความหนาของฟิล์มได้ง่ายและสามารถเตรียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟิล์มได้ครวละมาก ๆ โดยจะขึ้นอยู่กับการออกแบบหน้ากาก(mask)ของฐานรองรับ (substrate) จึงเหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในงานเกี่ยวกับการประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์แบบฟิล์มบาง

จากความพยายามที่จะพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ ชนิดฟิล์มบางของรอยต่อ CdS/CdTe, CdS/CuInSe₂, และ CdS/CuInGaSe₂ โดยมี CdS เป็นชั้นหน้าต่าง ซึ่งต้องพยายามทำให้สภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง CdS มีค่าต่ำ ๆ เพื่อให้ความต้านทานอนุกรมในเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าน้อย เนื่องจากความต้านทานอนุกรมส่งผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์อย่างมาก [8] อีกทั้งสภาพต้านทานไฟฟ้ายังขึ้นอยู่กับความหนาของฟิล์มบางด้วย [9] เมื่อไม่นานมานี้ Y. Kashiwaba และคณะ [10] ได้ประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดรอยต่อโฮโม (homojunction) ของสารกึ่งตัวนำ CdS โดยการเจือ Cu ลงในฟิล์มบาง CdS เพื่อให้มีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นชนิดพี จากนั้นจึงทำการเคลือบฟิล์มบาง CdS บริสุทธิ์ ทับลงไปอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งชนิดการนำไฟฟ้าเป็นชนิดเอ็น สืบเนื่องมาจากข้อบกพร่องผลึกชนิด แวกแคนซี (vacancy) อันเป็นสมบัติประจำตัวของสารกึ่งตัวนำ CdS จากรายงานดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าเราสามารถที่จะประดิษฐ์เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CdS ในระบบสุญญากาศได้อย่างต่อเนื่อง โดยไม่ต้องหยุดการทำงานของระบบ เพื่อนำชิ้นงานออกจากระบบสุญญากาศไปทำการเคลือบฟิล์มบางโดยวิธีอื่น ๆ อีก อันจะก่อให้เกิดสิ่งเจือปนขึ้นมาได้ อย่างน้อยที่สุดการสัมผัสกับอากาศ ก็สามารถที่จะทำให้อะตอมออกซิเจนเข้าไปเจือปนในฟิล์มบางได้ แต่ฟิล์มบางที่เตรียมได้ มักจะมีสภาพต้านทานไฟฟ้าค่อนข้างสูงประมาณ $10^6 \Omega\text{-cm}$ ซึ่งไม่ค่อยเหมาะสมกับการประดิษฐ์เป็นหน้าต่างของเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนั้นจำเป็นต้องลดสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางโดยการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่าง Cd ต่อ S หรือมีการเจืออะตอมต่าง ๆ เช่น Al, B หรือ In เป็นต้น มีผู้รายงานว่าสามารถเจือ In ลงในฟิล์มบาง CdS โดยวิธีสเปรย์ไพโรไลซิส หรือวิธีอบสารละลายเคมี [11] ส่วนฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วย In ซึ่งเตรียมโดยวิธีระเหยในระบบสุญญากาศ [12-14] ปรากฏว่าเกรนมีขนาดใหญ่กว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ CdS ที่เจือด้วย In ที่เตรียมจากวิธีอบสารละลายเคมี ดังนั้นจึงน่าสนใจที่จะพัฒนาฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วย In เพื่อลดสภาพต้านทานไฟฟ้าให้ต่ำลง โดยที่ช่องว่างแถบพลังงานไม่ควรเปลี่ยนแปลงมากนัก และชนิดการนำไฟฟ้ายังคงเป็นชนิดเอ็น

เมื่อไม่นานมานี้ K. Subbaramajah และผู้ร่วมงาน [15] ได้รายงานว่า การเจืออะตอม In ในฟิล์มบาง CdS ซึ่งเตรียมโดยวิธีอบสารละลายเคมี ส่งผลให้เกรนมีขนาดใหญ่ขึ้น ความต้านทานลดลง อีกทั้งความสามารถในการส่งผ่านแสง (transmittance) มีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงน่าสนใจที่จะพัฒนาฟิล์มบาง CdS จากวิธีระเหยในระบบสุญญากาศ และมีการเจือด้วยอะตอม In และวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่าง ๆ เพื่อศึกษากลไกการนำไฟฟ้า ซึ่งอาจจะเป็นไปตามความสัมพันธ์ของ Mott [16] หรือของ Seto [17] การแอนนิลฟิล์มบางภายในบรรยากาศก๊าซเฉื่อยส่งผลให้ค่าช่องว่างแถบพลังงานเปลี่ยนแปลงไป [18] อุณหภูมิแอนนิลที่เหมาะสมจะพิจารณาได้จาก ดัชนีคุณค่า (figure of merit) ซึ่งนิยามจาก $\Delta\rho/\Delta E_g$ [18] เมื่อ $\Delta\rho$

คือ สภาพต้านทานไฟฟ้าที่เปลี่ยนไป จากกรณีที่ยังไม่ได้แอนนihil ส่วน ΔE_g คือ ช่องว่างแถบพลังงานที่เปลี่ยนไปจากค่าที่ยังไม่ได้แอนนihil ซึ่งค่าช่องว่างแถบพลังงานที่เปลี่ยนไปตามอุณหภูมิแอนนihil นี้ เป็นผลที่มาจากขนาดของเกรนเปลี่ยนไป หรือที่รู้จักกันในนาม ผลของขนาด ควอนตัม (quantum size effect) [19]

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์และฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอินเดียม ความเข้มข้นร้อยละหนึ่งต่อโมล โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ ที่ความหนาแตกต่างกัน
2. เพื่อศึกษาวิธีการแอนนihilฟิล์มบางที่เตรียมได้ ในช่วงอุณหภูมิ 100 ถึง 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที
3. เพื่อศึกษาลักษณะของโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางที่เตรียมได้ด้วยวิธีการเลี้ยวเบน รังสีเอ็กซ์
4. เพื่อศึกษาคุณสมบัติการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางเพื่อศึกษาลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงาน และคำนวณค่าช่องว่างแถบพลังงาน
5. เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางที่เตรียมได้ โดยการวัดความต้านทานแผ่นของ ฟิล์มบางด้วยวิธีสองขั้วเชิงเส้น และวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ

ขอบเขตของการวิจัย

ในโครงการวิจัยนี้เป็นการเตรียมฟิล์มบางของสารประกอบแคดเมียมซัลไฟด์ ด้วยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ โดยจะทำการเจือด้วยอินเดียมที่ความเข้มข้นร้อยละหนึ่งต่อโมล จากนั้น จะทำการตรวจสอบลักษณะของโครงสร้างเชิงจุลภาค, สมบัติทางแสง และสมบัติทางไฟฟ้า ตามลำดับ ที่ความหนาของฟิล์มแตกต่างกัน และจะทำการเปรียบเทียบกับฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์บริสุทธิ์ที่เตรียมได้จากวิธีเดียวกัน เพื่อตรวจสอบสมบัติของฟิล์มบางที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเจือด้วยอินเดียม

ขั้นตอนของการวิจัย

1. ค้นคว้าและศึกษาข้อมูลต่างๆ ตลอดจนทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับหลักการเตรียมฟิล์มบาง ด้วยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ พร้อมทั้งจัดหาวัสดุและอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ใน โครงการงานพิเศษ
2. ทำการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์และฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอินเดียม บน กระดาษสไลด์ ที่ความหนาต่างๆ โดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. นำเอาฟิล์มบางที่เตรียมได้ทั้งกรณีที่ไม่ทำการเจือ และทำการเจือด้วยอินเดียม มาทำการแอนนัลในช่วงอุณหภูมิ 100 ถึง 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที
4. ศึกษาลักษณะของโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางที่เตรียมได้ โดยเครื่องเอ็กซ์เรย์ คิฟแฟร็กโทรมิเตอร์ แล้วนำผลที่ได้จากการศึกษามาคำนวณหาขนาดของเกรน
5. ศึกษาคุณสมบัติของการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางที่เตรียมได้ เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ แล้วนำผลที่ได้จากการศึกษามาคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน
6. ศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางที่เตรียมได้ โดยการวัดความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางด้วยวิธีสองขั้วเชิงเส้น และวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ แล้วนำผลที่ได้จากการศึกษามาคำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า และค่าแรงจูงตามลำดับ
7. สรุปและวิเคราะห์ผลจากการศึกษาของฟิล์มบางที่เตรียมได้

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย

1. คณะผู้วิจัยสามารถทราบเทคนิคการเตรียมฟิล์มบาง CdS ที่เจือด้วย In โดยการระเหยในระบบสุญญากาศบนกระจกสไลด์ เพื่อให้ได้ฟิล์มบางที่มีเฟสเดียว มีเกรนขนาดใหญ่ผิวเรียบ เนื้อแน่นสม่ำเสมอ
2. ทราบกลไกการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ ว่าจะจะเป็นไปตามความสัมพันธ์ของ Mott หรือ ของ Seto หรือไม่ อย่างไร และทราบถึงการเจืออะตอม In ในฟิล์มบาง CdS ที่มีต่อสมบัติเชิงแสง เช่น ค่าการส่งผ่านของแสง และค่าช่องว่างแถบพลังงาน เป็นต้น
3. ได้พัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CdS:In/CuInSe₂ และ CdS:In/CuInGaSe₂ ทั้งเชิงวิชาการและการประยุกต์ต่อไป

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 ทฤษฎีและการวิเคราะห์โครงสร้างของผลึก

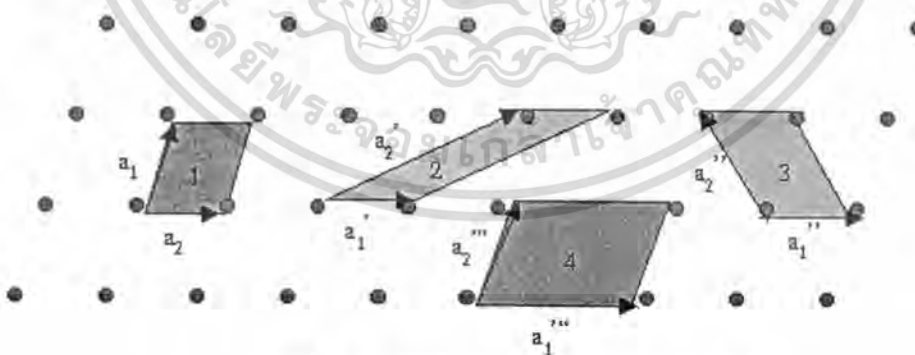
ในทางผลึกวิทยาสามารถแบ่งสสารและวัสดุที่อยู่ในสภาพของแข็งออกได้เป็นสองกลุ่มใหญ่ๆตามการจัดเรียงตัวของอะตอม ได้แก่ วัสดุที่เป็นผลึก(crystalline material) และวัสดุที่เป็นอสัณฐาน(amorphous material) ซึ่งในที่นี้จะสนใจแต่วัสดุที่เป็นผลึกเท่านั้น

2.1.1 โครงสร้างผลึกในอุดมคติ [20-22]

ผลึกของสสารเกิดจากการที่อะตอมหรือโมเลกุลของสสารชนิดนั้นมารวมกันอยู่เป็นจำนวนมากโดยระยะห่างระหว่างอะตอมมีค่าคงที่และมีการจัดเรียงตัวกันเป็นระบบแบบรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอนเป็นระเบียบอย่างต่อเนื่อง ภายในหนึ่งหน่วยเซลล์ของผลึกอาจประกอบด้วยอะตอมของธาตุเพียงอะตอมเดียวไปจนถึงหลายอะตอมหรือหลายๆโมเลกุล เซลล์ที่มีปริมาตรเล็กที่สุดที่สามารถใช้เป็นตัวแทนของผลึกนั้นเรียกว่า หน่วยเซลล์ (unit cell) กล่าวคือ ถ้าเอาหน่วยเซลล์นี้มาเรียงต่อกันก็จะได้ผลึกขึ้นมา และเรียกตำแหน่งต่างๆของอะตอมในระบบสามมิติว่า แลตทิซ(Lattice)

ในทางทฤษฎีการกำหนดหน่วยเซลล์จะทำได้ไม่จำกัด แต่ตามปกติจะเลือกหน่วยเล็กที่สุด ที่เป็นไปได้ และมีสมมาตรค่อนข้างสูงตัวอย่างการเลือกหน่วยเซลล์ในโครงผลึก 2 มิติแสดงดังรูปที่ 2.1

ในระบบสองมิติแลตทิซพารามิเตอร์ ได้แก่ เวกเตอร์ \vec{a} และ \vec{b} และมุม γ ซึ่งเป็นมุมระหว่างเวกเตอร์ทั้งสอง ทั้งนี้ชนิดของแลตทิซที่แตกต่างกันที่เป็นไปได้มีเพียงห้าแบบดังตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ

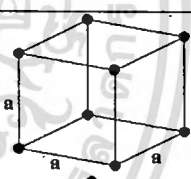
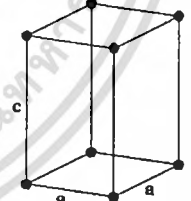
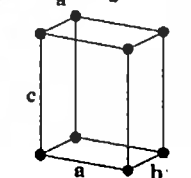
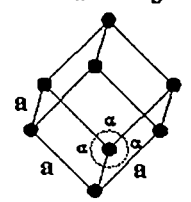
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 แลตทิซพารามิเตอร์ของหน่วยเซลล์ในระบบสองมิติ

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

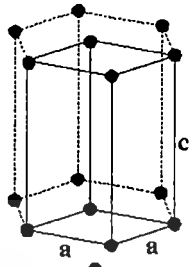
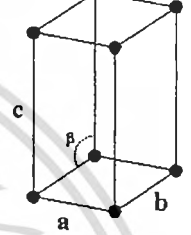
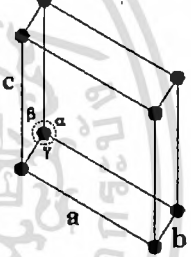
ในระบบ 3 มิติ แลตทิซพารามิเตอร์ ได้แก่ ขนาดของเวกเตอร์ \vec{a} , \vec{b} และ \vec{c} และมุม α , β และ γ ซึ่งเป็นมุมระหว่างเวกเตอร์ต่างๆ ดังตัวอย่างในตารางที่ 2.2 ทั้งนี้สามารถจัดแบ่งรูปแบบแลตทิซ ขึ้นมาโดยสามารถแบ่งออกได้เป็นสิบสี่แบบในสามมิติ ซึ่งจัดได้เป็นเจ็ดกลุ่ม คือ ไตรคลินิก (triclinic), โมโนคลินิก (monoclinic), ออร์โธโรมบิก (orthorhombic), เตตระโกนอล (tetragonal), คิวบิก (cubic), รอมโบฮีดรอล (rhombohedral), และเฮกซะโกนอล (hexagonal)

ตารางที่ 2.2 ระบบผลึกทั้งเจ็ดแบบในระบบสามมิติ

ระบบผลึก(system)	ค่าคงที่ของโครงผลึกและมุม	รูปทรงเรขาคณิตของหน่วยเซลล์
คิวบิก (cubic)	$a = b = c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
เตตระโกนอล (tetragonal)	$a = b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
ออร์โธโรมบิก (orthorhombic)	$a \neq b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
รอมโบฮีดรอล (rhombohedral)	$a = b = c, \alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 ระบบผลึกทั้งเจ็ดแบบในระบบสามมิติ (ต่อ)

ระบบผลึก(system)	ค่าคงที่ของโครงผลึกและมุม	รูปทรงเรขาคณิตของหน่วยเซลล์
เฮกซะโกนอล (hexagonal)	$a = b \neq c,$ $\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$	
โมโนคลินิก (monoclinic)	$a \neq b \neq c,$ $\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$	
ไตรคลินิก (triclinic)	$a \neq b \neq c,$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	

2.1.1.1 การระบุตำแหน่ง ทิศทางและระนาบของโครงผลึก

เนื่องจากผลึกมีสมบัติที่ขึ้นอยู่กับทิศทาง ดังนั้นจึงต้องระบุแน่นอนว่ากำลังศึกษาลักษณะ ส่วนใดของผลึกอยู่ ซึ่งการระบุลักษณะที่ว่าจะกล่าวถึง ตำแหน่ง, ทิศทาง และระนาบของผลึกที่กำลังศึกษาอยู่นั้น หลักเกณฑ์ในการระบุลักษณะพื้นฐานของผลึกมีดังนี้

1. การระบุตำแหน่ง ในกรณีทั่วไปจะเขียนเป็น x,y,z (ให้สังเกตเครื่องหมาย “ , ” ซึ่งคั่นแต่ละค่า) ตัวอย่าง จุด 1,2,3 หมายความว่า เป็นตำแหน่งอยู่ที่พิกัด $x=1, y=2$ และ $z=3$ การบอกตำแหน่ง
2. การระบุทิศทาง ในกรณีทั่วไปจะเขียนเป็น $[u \ v \ w]$ (ให้สังเกตว่าใช้วงเล็บก้ามปู และไม่มีเครื่องหมาย “ , ” คั่นระหว่างค่าแต่ละค่า)

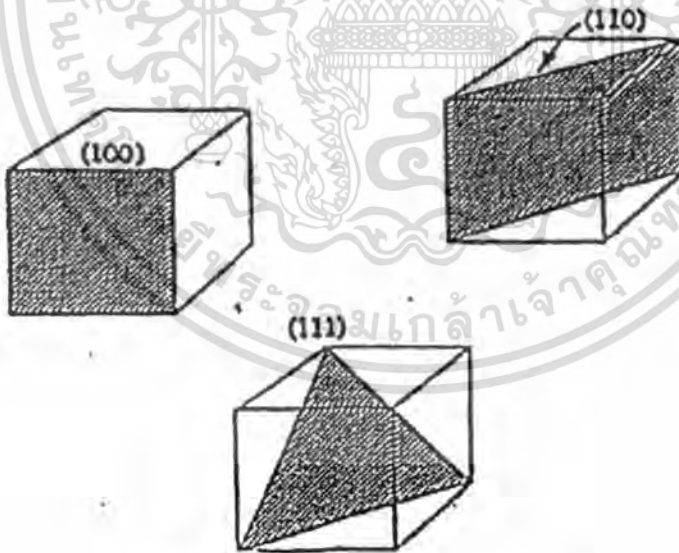
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่าง การระบุทิศทางที่ศึกษาจะใช้แนวที่ผ่านจุดเริ่มต้นของแกนผลึก คือ ที่จุด $0,0,0$ ซึ่งสามารถใช้ค่าเดียวกันนี้ระบุทุกๆแนวทิศทางที่ขนานกัน และจะใช้จุดที่เป็นค่าจำนวนเต็มที่น้อยที่สุดที่แนวนั้น ตัดผ่านเป็นตัวระบุ เช่น ทิศทาง $[111]$ มีจุดจำนวนนับไม่ถ้วนที่ทิศทางนี้ตัดผ่าน เช่น จุด $0,0,0$ จุด $1,1,1$ นอกจากนี้ยังผ่านจุด $2,2,2$ และ $\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}$ และจุดอื่นๆอีกนับไม่ถ้วน

ถ้าเป็นทิศทางที่เป็นลบก็จะใส่เครื่องหมาย “ - ” หรือ บาร์(bar) ไว้บนตัวเลขนั้นๆ เช่น ทิศทาง $[\bar{1}\bar{2}\bar{1}]$ แสดงว่าในแนวแกน z มีค่าเป็นลบ

3. การระบุระนาบ จะใช้อักษร (h k l) (ให้สังเกตการใช้วงเล็บ และไม่มีเครื่องหมาย “ , ” คั่น)

ค่า hkl เรียกว่า ดัชนีมิลเลอร์(miller indices) ระบุของผลึกเป็นสิ่งที่สำคัญที่สุดอีกประการหนึ่งในการศึกษาผลึก เพราะในแต่ละระนาบจะประกอบไปด้วยอะตอม ไอออน หรือ โมเลกุล เรียงตัวกันอยู่บนระนาบนั้น อาจกล่าวได้ว่าระนาบแต่ละระนาบจะมีความแตกต่างกันเช่นเดียวกับทิศทาง จุดที่ระนาบหนึ่งๆ ตัดแกนผลึกจะได้มาจากค่าส่วนกลับของดัชนีมิลเลอร์ เช่นระนาบ (010) จะตัดแกน $x y z$ ที่จุด $\frac{1}{0}, \frac{1}{1}, \frac{1}{0}$ หรือจุด $\infty, 1, \infty$ นั่นเอง (ระยะอนันต์หมายถึงไม่ตัดกับแกนนั้น) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 และ ตารางที่ 2.3 ซึ่งสรุปความสัมพันธ์ระหว่างระนาบต่างๆกับระยะตัดแกนอ้างอิง



รูปที่ 2.2 การบอกระนาบต่างๆของผลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 ความสัมพันธ์ของดัชนีมิลเลอร์และจุดตัดแกนผลึก

ระนาบ	ดัชนีมิลเลอร์ h k l	ระยะตัดแกนผลึก x,y,z	ส่วนกลับของดัชนีมิลเลอร์ $\frac{1}{h} \frac{1}{k} \frac{1}{l}$
(010)	0, 1, 0	$\infty, 1, \infty$	$\frac{1}{0} \frac{1}{1} \frac{1}{0}$
($\bar{1}11$)	-1, 1, 1	-1, 1, 1	$\frac{1}{-1} \frac{1}{1} \frac{1}{1}$
($\bar{1}\bar{1}\bar{1}$)	-1, -1, -1	-1, -1, -1	$\frac{1}{-1} \frac{1}{-1} \frac{1}{-1}$
(224)	2, 2, 4	0.5, 0.5, 0.25	$\frac{1}{2} \frac{1}{2} \frac{1}{4}$
(220)	2, 2, 0	0.5, 0.5, ∞	$\frac{1}{2} \frac{1}{2} \frac{1}{0}$

มีข้อสังเกตที่ควรรู้เกี่ยวกับดัชนีของระนาบเพิ่มเติมดังนี้

- สำหรับระบบเฮกซะโกนอลจะระบุดัชนีระนาบที่ต่างไปเป็น (hki) โดยที่มีกฎเกณฑ์ว่าดัชนีตัวที่สาม (หรือ i) ซึ่งเพิ่มเข้ามานั้นจะมีความสัมพันธ์กับดัชนีสองตัวแรก (h และ k) ดังนี้

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

เช่น ระนาบ(110) จะเรียกว่า ($11\bar{2}$) ในระบบเฮกซะโกนอล

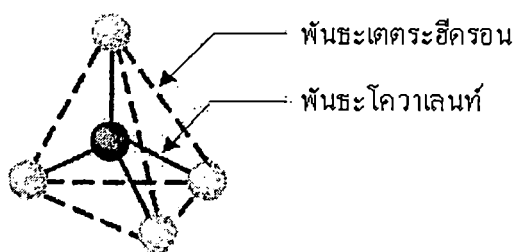
- เฉพาะระบบลูกบาศก์เท่านั้นที่จะพบว่าทิศทาง [hkl] จะตั้งฉากกับระนาบที่มีดัชนีเหมือนกัน นั่นคือระนาบ (hkl) ตัวอย่างเช่น ทิศทาง [102] จะตั้งฉากกับระนาบ (102)

2.1.1.2 โครงสร้างผลึกที่สำคัญของสารกึ่งตัวนำ

โครงสร้างแถบพลังงานของสารขึ้นอยู่กับลักษณะ โครงสร้างทางกายภาพของสารนั้นๆเรียกว่า โครงสร้างผลึก (crystal structure) ซึ่งเกิดจากการเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบของอะตอมในของแข็ง โครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำกลุ่มนี้ จะมีลักษณะคล้ายกัน คือ มีการเรียงตัวของอะตอมใน หน่วยเซลล์ของผลึกคล้ายโครงสร้างผลึกของเพชร ซึ่งมีพันธะเคมีของโมเลกุลแบบพันธะเตตระฮีดรอน ดังรูปที่

2.3

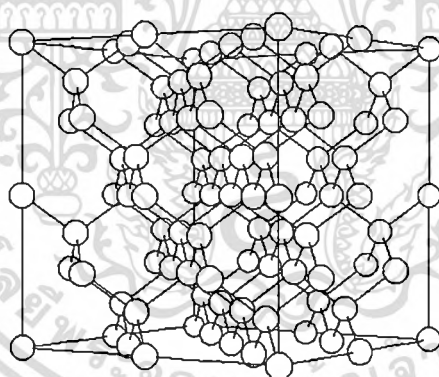
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า. ไม่ว่ากรรมใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 แสดงพันธะเตตระฮีดรอน

2.1.1.2.1 โครงสร้างผลึกแบบเพชร (diamond structure)

โครงสร้างผลึกแบบนี้เป็นโครงสร้างของธาตุในกลุ่ม IV คือ C, Si, Ge และ α -Sn อาจพิจารณาได้ว่า โครงสร้างผลึกแบบนี้เกิดจากการนำเอาโครงสร้างผลึกแบบเฟสเซนเตอร์คิวบิก(face-centered cubic lattice(fcc), $a=b=c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$) สองโครงสร้างมาวางซ้อนเหลื่อมกันเป็นระยะทาง $\frac{1}{4}$ ของเส้นทะแยงมุมโดยหนึ่งหน่วยเซลล์มีแปดอะตอม และอะตอมของโครงสร้างทั้งสองเป็นชนิดเดียวกันอยู่ที่ตำแหน่ง $000, 0 \frac{1}{2} \frac{1}{2}, \frac{1}{2} 0 \frac{1}{2}, \frac{1}{2} \frac{1}{2} 0, \frac{1}{4} \frac{1}{4} \frac{1}{4}, \frac{1}{4} \frac{3}{4} \frac{3}{4}, \frac{3}{4} \frac{1}{4} \frac{3}{4}$ และ $\frac{3}{4} \frac{3}{4} \frac{1}{4}$ แต่ละอะตอมมีพันธะกับอะตอมข้างเคียงสี่อะตอม ทำให้โครงสร้างผลึกแบบนี้เป็นรูปคิวบิกซึ่งบิดเบี้ยว ไปได้ยาก โครงสร้างผลึกแบบนี้จึงสมมาตรมากที่สุด ในจำนวนโครงสร้างผลึกทั้งหมดของกลุ่มนี้ ดังแสดงในรูปที่ 2.4

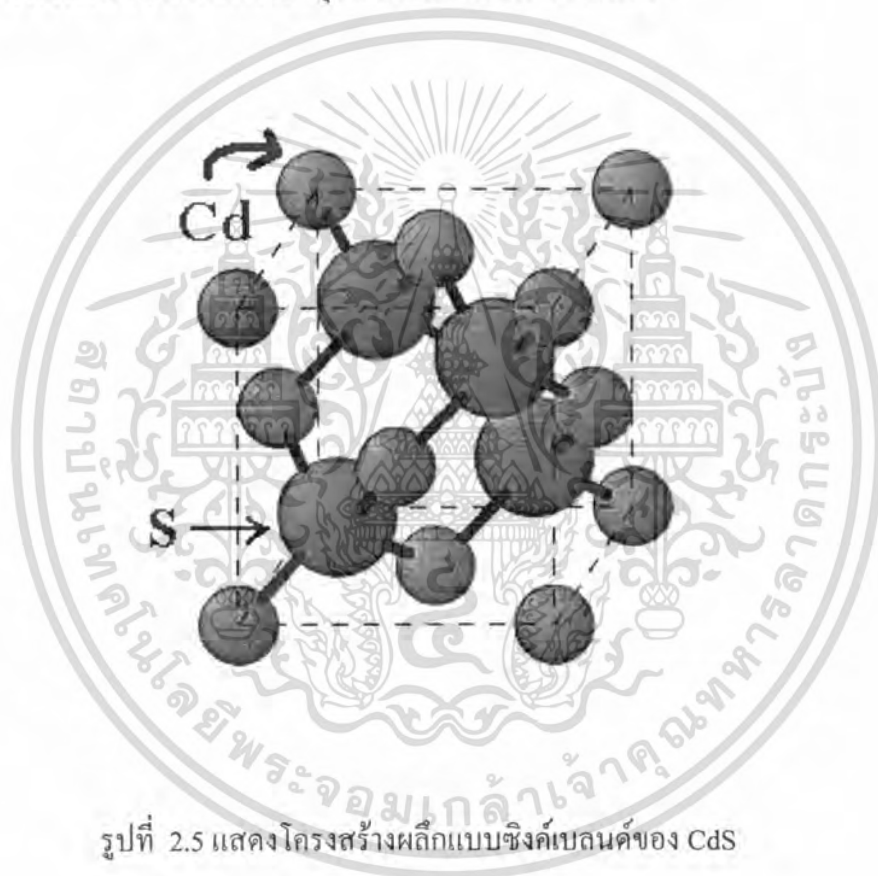


รูปที่ 2.4 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเพชร

2.1.1.2.2 โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ (zincblende structure)

โครงสร้างผลึกแบบนี้มักพบในสารกึ่งตัวนำที่ประกอบด้วยอะตอมของธาตุสองชนิด หรือเรียกว่าเป็นสารประกอบกึ่งตัวนำเชิงคู่(binary compound semiconductor) ได้แก่ สารประกอบสารกึ่งตัวนำในกลุ่ม III-V เช่น GaAs และ InSb และสารประกอบกึ่งตัวนำในกลุ่ม II-VI เช่น ZnSe, ZnS เป็นต้น โครงสร้างแบบ

นี้มีลักษณะคล้ายโครงสร้างผลึกแบบเพชร คือ อาจพิจารณาว่าเป็นโครงสร้างผลึกแบบเฟสเซนเตอร์คิวบิก สองโครงซ้อนกันอยู่แต่โครงหนึ่งเป็นธาตุหมู่ II (หรือ III) ส่วนอีกโครงผลึกเป็นธาตุหมู่ VI (หรือ V) สำหรับสารกึ่งตัวนำเชิงคู่ II-VI (หรือ III-V) ในหนึ่งหน่วยเซลล์ประกอบด้วยอะตอมสองชนิด แต่ละชนิดมีสี่อะตอม เช่นใน ZnS อะตอมของ Zn จะอยู่ที่ตำแหน่ง $000, 0\frac{1}{2}\frac{1}{2}, \frac{1}{2}0\frac{1}{2}$ และ $\frac{1}{2}\frac{1}{2}0$ ส่วนตำแหน่งของอะตอม S จะอยู่ที่ $\frac{1}{4}\frac{1}{4}\frac{1}{4}, \frac{1}{4}\frac{3}{4}\frac{3}{4}, \frac{3}{4}\frac{1}{4}\frac{3}{4}$ และ $\frac{3}{4}\frac{3}{4}\frac{1}{4}$ จึงมีความแข็งแรงน้อยกว่า และมีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าโครงสร้างผลึกแบบเพชรดังแสดงในรูปที่ 2.5 สารที่มีโครงสร้างผลึกแบบนี้ ได้แก่ ZnS, CuCl, AgI, CuF, SiC และ CdS เป็นต้น ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีความสำคัญสำหรับนำมาประยุกต์เพื่อประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เชิงแสง

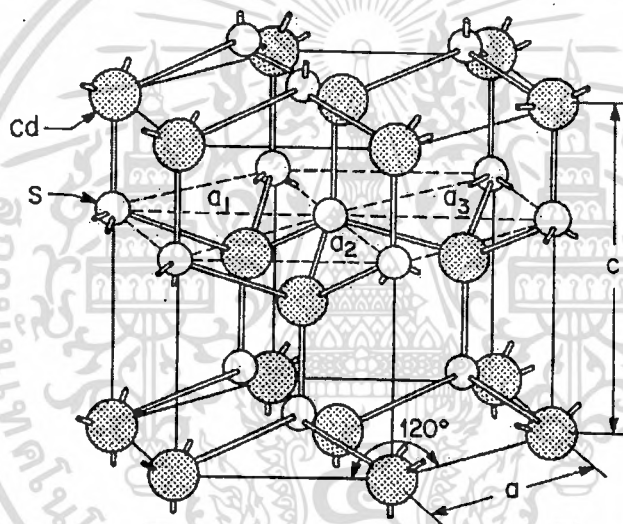


รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ของ CdS

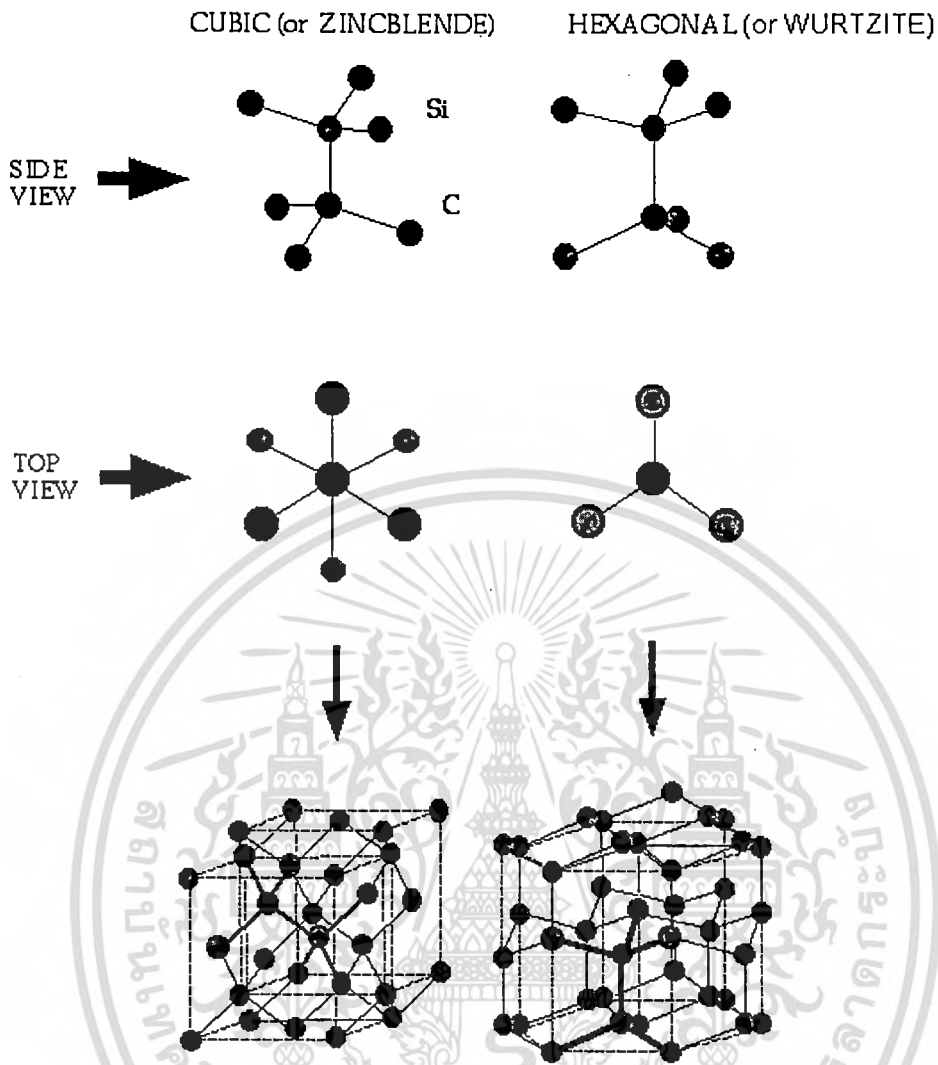
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1.2.3 โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์ (wurtzite structure)

โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งจัดอยู่ในระบบโครงสร้างผลึกแบบ เฮกซะโกนอล เกิดจากการนำโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลที่มีอะตอมของธาตุต่างๆอยู่สองชนิด วางซ้อนเหลื่อมกันเป็นระยะ $5/8$ ตามแนวแกน c หนึ่งหน่วยเซลล์จะมีแปดอะตอม มีอะตอมเพื่อนบ้านอยู่ที่อะตอมมีพันธะเคมีของโมเลกุลเป็นแบบพันธะเตตระฮีดรอน และมีพันธะเคมีระหว่างอะตอมเป็นแบบโควาเลนต์ ดังนั้นจึงมีการจัดเรียงระนาบของอะตอมคล้ายกับโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ แต่จะมีความแตกต่างกัน คือ ในโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์จะมีการจัดเรียงระนาบของพันธะเตตระฮีดรอนเป็นแบบ ABAB... หรือ 0101... ส่วนในโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์จะมีการจัดเรียงระนาบของพันธะเตตระฮีดรอนแบบ ABCABC... หรือ 012012... สารที่มีโครงสร้างผลึกแบบนี้ ได้แก่ CdS, ZnS เป็นต้น



รูปที่ 2.6 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์ของ CdS



รูปที่ 2.7 แสดงการเปรียบเทียบ โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์กับแบบซิงค์เบลนด์

2.1.1.3 ความไม่สมบูรณ์ของผลึก [21]

ที่ผ่านมาเราพิจารณาโครงสร้างผลึกในอุดมคติมาโดยตลอด แต่ในความเป็นจริงแล้ว โครงสร้างผลึกจะมีลักษณะไม่สมบูรณ์แบบโครงสร้างผลึกในอุดมคติทั้งหมด ความไม่สมบูรณ์ของผลึกนั้นมีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของสาร และในบางกรณีตัวแปรทางไฟฟ้า จะขึ้นอยู่กับความไม่สมบูรณ์ของผลึกด้วย ซึ่งความไม่สมบูรณ์หรือข้อบกพร่องของ โครงผลึกมีหลายชนิดด้วยกัน

2.1.1.3.1 ข้อบกพร่องผลึกแบบจุด (point defect)

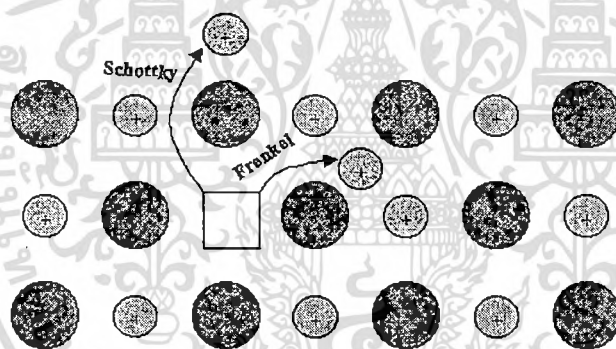
ข้อบกพร่องของผลึกแบบจุดดังแสดงในรูปที่ 2.8 นี้ จะเกี่ยวข้องกับการพิจารณาอะตอมที่ผิดเพี้ยนไปจากตำแหน่งเดิมในโครงสร้างผลึก

(ก) ข้อบกพร่องผลึกแบบแวนแคนซี(vacancy defect) ซึ่งมีลักษณะที่อะตอมหรือไอออนหลุดหายไป หรืออาจเรียกอีกอย่างว่า ข้อบกพร่องผลึกแบบชอตตี้(schottky defect)

(ข) ข้อบกพร่องผลึกแบบอินเตอร์สติเชียล(interstitial) ซึ่งเป็นลักษณะที่อะตอมบางอะตอมหรือไอออนที่ไม่อยู่ที่ตำแหน่งของโครงผลึก แต่จะเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างตำแหน่งที่เป็นที่ว่างของโครงผลึก โดยทั่วไปแล้ว รัศมีอะตอมที่เข้าไปแทรกอยู่จะมีค่าอยู่ระหว่างหรือน้อยกว่ารัศมีของอะตอมหลัก

(ค) การผิดรูปของโครงผลึกแบบเฟรนเคิล(frenkel disorder) คือ จะเกิดลักษณะ (ก) และ (ข) ร่วมกัน โดยมีจำนวนเท่าๆกัน

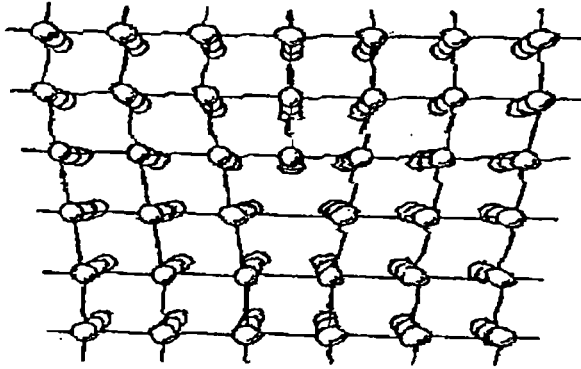
(ง) การผิดรูปของโครงผลึกแบบแอนติสตรัคเจอร์(antistructure disorder) เป็นลักษณะของอะตอม ตั้งแต่สองอะตอมขึ้นไป เข้าไปอยู่ในตำแหน่งของโครงผลึกทำให้ลักษณะของโครงผลึกไม่เป็นระเบียบ



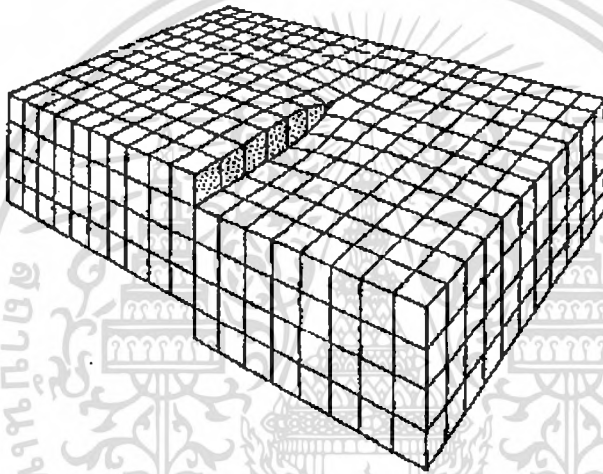
รูปที่ 2.8 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบจุด

2.1.1.3.2 ข้อบกพร่องผลึกเชิงเส้น (line defect)

ข้อบกพร่องผลึกเชิงเส้นอาจจะเรียกได้อีกอย่างว่าดิสโลเคชัน(dislocations) เกิดจากความผิดปกติของจุดของโครงผลึกตั้งแต่สองจุดขึ้นไป ขาดหายหรือเพิ่มขึ้นมาซึ่งมีผลทำให้เกิดการผิดปกติกของโครงผลึกแบบเชิงเส้น การเกิดดิสโลเคชันอาจจะแบ่งออกได้ตามลักษณะรูปร่างที่สังเกตเห็น คือ ดิสโลเคชันแบบขอบ(edge dislocations) ดังรูปที่ 2.9 และดิสโลเคชันแบบสกรู(screw dislocations) ดังรูป 2.10



รูปที่ 2.9 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบคิสโตโลเคชันแบบขอบ



รูปที่ 2.10 แสดงข้อบกพร่องผลึกแบบคิสโตโลเคชันแบบสตูร์

2.1.1.3.3 ข้อบกพร่องผลึกแบบแนวระนาบ (planar defect)

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

ข้อบกพร่องผลึกชนิดนี้มักจะเกิดขึ้นในผลึกพหุพันธ์ (polycrystallines) ที่มีหลายเกรน ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ซึ่งในแต่ละเกรนจะมีการจัดเรียงตัวของผลึกในทิศทางเดียวกัน และมีแนวแบ่งระหว่างแต่ละเกรนที่มีการจัดเรียงตัวของผลึกในทิศทางต่างกัน เรียกว่า ขอบเขตของเกรน (grain boundaries) ซึ่งเกรนและขอบเขตของเกรน จะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงฟิสิกส์ต่างๆ ไปจากผลึกในอุดมคติ



รูปที่ 2.11 แสดงเกรน และขอบเขตของเกรน

2.1.2 การศึกษาโครงสร้างผลึก [20]

การศึกษาโครงสร้างผลึกจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ โดยวิธี θ - 2θ ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ โดยใช้รังสีเอ็กซ์ความยาวคลื่นเดียวตกกระทบตัวอย่าง ซึ่งอาจเป็นผลึกเดี่ยวหรือผลึกพหุพันธ์ก็ได้ ตัวอย่างจะหมุนไปเป็นมุม θ ในขณะที่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณรังสีเอ็กซ์จะเคลื่อนที่ไปเป็นมุม 2θ เพื่อให้การเลี้ยวเบนสอดคล้องกับกฎของแบรกก์

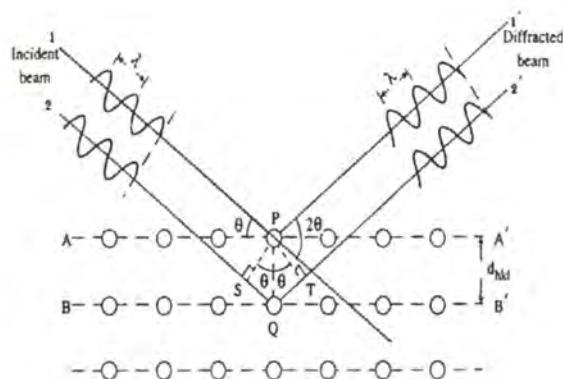
ในปี พ.ศ.2455(ค.ศ. 1912) W.H. Bragg และ W.L. Bragg ได้เสนอแนวคิดที่ว่า เราสามารถ มองได้ว่าผลึกจัดเรียงตัวเป็นชั้น(layer) หรือ ระนาบ(plane) ของอะตอมซึ่งสามารถสะท้อนคลื่นที่ ตกกระทบโดยมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน ทั้งนี้ลำคลื่นที่สะท้อนออกไปจากระนาบต่างๆ ค้างถ่วงจะมีความเข้มสูงและแทรกสอดแบบเสริม ถ้าหากความแตกต่างระหว่างทางเดิน(path difference) ของคลื่นที่สะท้อนจากระนาบที่อยู่ข้างเคียง จะมีค่าเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นที่ ตกกระทบดังสมการ

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

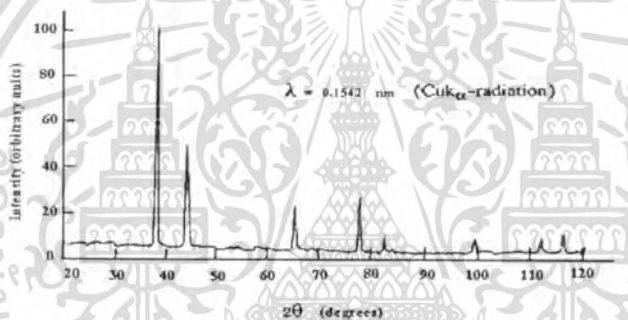
เมื่อ	d_{hkl}	คือ	ระยะระหว่างระนาบ
	θ	คือ	มุมตกกระทบและมุมสะท้อนของรังสีเอ็กซ์เมื่อเทียบกับระนาบของผลึก
	n	คือ	อันดับการเลี้ยวเบน มีค่าตั้งแต่ 1, 2, 3,...
	λ	คือ	ความยาวคลื่น

ระนาบต่างๆของผลึกไม่ได้ก่อให้เกิดการสะท้อนเสมอไป ระนาบใดที่รังสีเอ็กซ์ตกกระทบแล้วกระเจิงออกมาอย่างสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ เรียกว่าระนาบแบรกก์ (Bragg plane) และมุมที่รังสีสะท้อนทำกับแนวที่ขนานกับรังสีตกกระทบเรียกว่ามุมเลี้ยวเบน (diffraction angle) ซึ่งมีค่าเป็นสองเท่าของมุมสะท้อน ดังแสดงในรูปที่ 2.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์



รูปที่ 2.13 แสดงตัวอย่างของสเปกตรัมที่ได้จาก XRD

จากรูปที่ 2.13 กราฟ XRD แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอ็กซ์และมุมเลี้ยวเบน เรียกว่า รูปแบบการเลี้ยวเบน(diffraction pattern) ซึ่งถ้ารับธาตุหรือสารประกอบต่างชนิดกันก็จะมีรูปแบบการเลี้ยวเบนต่างกัน ซึ่งสามารถสังเกตได้จากพีก(peak)ในรูปแบบการเลี้ยวเบน สำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกนั้น สามารถทำได้โดยการคำนวณค่าคงที่ของโครงผลึก, ขนาดของเกรนและความเครียดในระดับจุลภาคได้จากสูตรดังต่อไปนี้

ค่าคงที่ของโครงผลึก(lattice constant) สำหรับ โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์หาได้จากสมการ(2.3)

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (2.3)$$

และสำหรับ โครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลหาได้จากสมการ(2.4)

$$\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \left(\frac{h^2 + hk + l^2}{a^2} \right) + \frac{l^2}{c^2} \quad (2.4)$$

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

พิจารณารูปที่ 2.14 จะสามารถคำนวณหาขนาดของเกรน (grain size) ได้จากสมการ

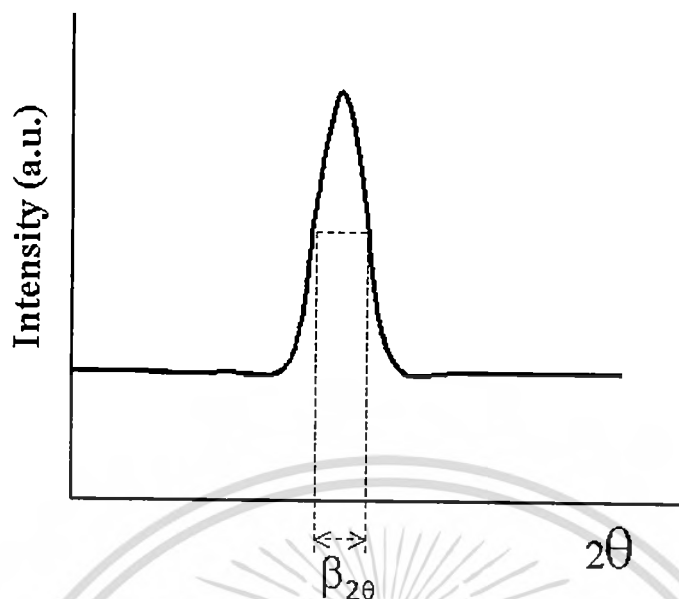
$$D = \frac{K\lambda}{\beta_{2\theta} \cos \theta} \quad (2.5)$$

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

ความเครียดในระดับจุลภาค (microstrain)

$$\varepsilon = \beta_{2\theta} \cos \theta / 4 \quad (2.6)$$

เมื่อ ε คือ ความเครียดระดับจุลภาค



รูปที่ 2.14 แสดงวิธีการหา FWHM เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

เราอาจตรวจสอบข้อมูลที่ได้จากรูปแบบการเลี้ยวเบนกับไฟล์มาตรฐานของการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์จากผงผลึก [powder diffraction file (PDF)] ซึ่งเป็นฐานข้อมูลเกี่ยวกับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของวัสดุ ซึ่งได้จากการรวบรวมรายงานการศึกษาและวิเคราะห์วัสดุด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ โดยข้อมูลส่วนใหญ่จะมาจากเอกสารทางวิชาการต่างๆ ก่อนจะตีพิมพ์ในหนังสือหรือ CD-ROM เป็นประจำทุกปี เพื่อใช้เป็นข้อมูลมาตรฐานสำหรับการอ้างอิง

บัตรข้อมูล PDF ประกอบด้วยส่วนที่สำคัญดังนี้คือ

1. เซตและหมายเลขไฟล์ (set and file number)
2. พีคที่มีความเข้มมากที่สุดสามลำดับแรก (three strongest lines)
3. พีคที่ตำแหน่งมุมต่ำที่สุด (lowest-angle line)
4. สูตรเคมีและชื่อสาร (chemical formula and name of substance)
5. ข้อมูลวิธีการเลี้ยวเบนที่ใช้ (data on diffraction method used) เช่น แหล่งกำเนิดเอ็กซ์เรย์และฟิลเตอร์ เป็นต้น
6. ข้อมูลทางผลึกวิทยา (crystallographic data) เช่น รูปร่างผลึก และขนาดหน่วยเซลล์ เป็นต้น
7. ข้อมูลทางแสงและอื่นๆ (optical and other data)
8. ข้อมูลของสารตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์ (data of specimen)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. รูปแบบการกระเจิงรังสีเอ็กซ์ของวัสดุ(diffraction pattern) จะบอกค่าความเข้มสัมพัทธ์(I/I_0) ซึ่งแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ของพิกที่มีความเข้มสูงสุด และระนาบผลึก(hkl)

2.2 สมบัติการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ [21,23]

การศึกษาสมบัติเชิงแสงของสารกึ่งตัวนำ ทำให้ทราบถึงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงาน และขนาดช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ โดยจะกล่าวถึงลักษณะของ โครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำและกระบวนการดูดกลืนแสงของอิเล็กทรอนิกส์, ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานของแคดเมียมซัลไฟด์, สเปกตรัมการส่งผ่านแสง และการคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน

2.2.1 ทฤษฎีโครงสร้างแถบพลังงาน

ในโลหะอิเล็กทรอนิกส์ที่อยู่ในวงโคจรชั้นนอกสุด เรียกว่า อิเล็กตรอนวาเลนซ์และถือว่าเป็น อิเล็กตรอนอิสระไม่ถูกยึดอยู่ที่อะตอมหนึ่งอะตอมใดโดยเฉพาะ ซึ่งไม่เหมือนกับอิเล็กตรอนใน สารกึ่งตัวนำหรือฉนวนที่ไม่เป็นอิสระ อิเล็กตรอนซึ่งทำให้เกิดกระแสอาจถูกเรียกว่าอิเล็กตรอนนำ (conduction electron) และในผลึกของแข็งอาจพิจารณาได้ว่าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่อยู่ในผลึกซึ่งมีศักย์แบบเป็นคาบ (periodic potential) อย่างสมบูรณ์ ทั้งนี้เนื่องจากระยะห่างของไอออนคอร์(ion core) มีระยะเท่ากันตลอดซึ่งเท่ากับค่าคงที่ของ โครงผลึก(lattice constant) ซึ่งจะเห็นได้ว่าพลังงานของอิเล็กตรอนซึ่งจะมีได้นั้น จะมีได้ในแถบหนึ่งแถบใดเท่านั้น คือ แถบยินยอม(allowed band) และ แถบพลังงานที่จะมีได้นี้จะถูกแบ่งกันไว้ด้วยแถบพลังงานต้องห้าม ซึ่งหมายถึงพลังงานในย่านนี้ที่อิเล็กตรอนไม่สามารถที่จะมีได้ แถบดังกล่าวถูกเรียกว่า “แถบต้องห้ามหรือช่องว่างแถบพลังงาน”(forbidden band or energy gap) ภายในแถบยินยอมหนึ่งๆ อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบนี้จะแสดงตัวเหมือนกับอิเล็กตรอนอิสระทุกประการ

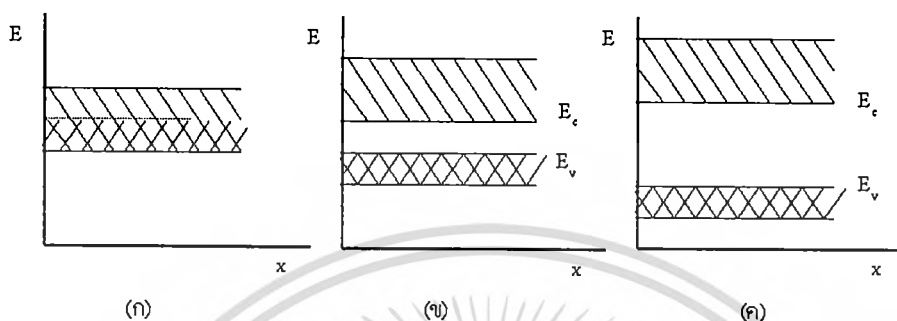
2.2.1.1 โลหะ สารกึ่งตัวนำและฉนวน

ลักษณะ โครงสร้างของแถบพลังงานของของแข็ง สามารถบ่งบอกคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของวัสดุของแข็งนั้นๆ ได้เป็นอย่างดี สภาพความนำไฟฟ้าของสารใดๆ จะมีค่ามากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับจำนวนหรือปริมาณของความหนาแน่นของประจุพาหะที่มีอยู่

กรณีที่จะมีการนำไฟฟ้าได้แล้ว จำเป็นที่จะต้องมีสถานะซึ่งว่างอยู่ในแถบพลังงาน และเมื่อมีสนามไฟฟ้า อิเล็กตรอนที่ระดับต่างๆซึ่งอยู่ใต้ระดับพลังงานที่ว่างอยู่ ก็จะได้รับพลังงาน เพิ่มขึ้น และเคลื่อนที่เข้าไปอยู่ในสถานะที่ว่างอยู่นั้น จากนั้นอิเล็กตรอนตัวอื่นๆก็จะเคลื่อนที่ตาม กันไปอย่างนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะทำให้เกิดการไหลของกระแสอิเล็กตรอนขึ้น ตัวนำที่ดีจะต้องมีพาหะซึ่งอยู่ในระดับต่างๆ ภายในแถบพลังงานซึ่งประกอบด้วยแถบพลังงานสองแถบ คือ แถบนำและแถบวาเลนซ์ซ้อน เหลื่อมกันซึ่งคือ โครงสร้างแถบพลังงานของโลหะนั่นเอง ดังรูปที่ 2.15(ก)



รูปที่ 2.15 แสดงโครงสร้างแถบพลังงาน

(ก) โลหะ

(ข) ฉนวน

(ค) สารกึ่งตัวนำ

กรณีของฉนวน แถบพลังงานจะประกอบด้วยแถบวาเลนซ์(valence band) ซึ่งเป็นแถบที่มีอิเล็กตรอนอยู่เต็ม และจะแยกจากแถบนำ(conduction band) ซึ่งเป็นแถบที่ว่าง โดยมีช่องว่างแถบพลังงานซึ่งกว้างหลายๆอิเล็กตรอนโวลต์กั้นอยู่ดังแสดงในรูปที่ 2.15(ข) และที่อุณหภูมิธรรมดาๆ อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์จะมีโอกาสน้อยมาก ที่จะมีพลังงานเพิ่มขึ้นจนสามารถข้ามช่องว่างแถบพลังงานเข้าไปอยู่ในแถบนำได้ ดังนั้นจำนวนอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำจึงมีน้อยและจำกัด แต่ถ้าหากอุณหภูมิเพิ่มขึ้นสูงๆจะทำให้ความนำเพิ่มขึ้นได้

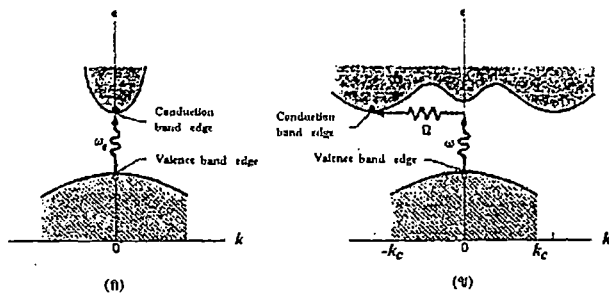
ส่วนสารกึ่งตัวนำความนำไฟฟ้าจะมีค่าอยู่ระหว่างโลหะกับฉนวน และมีโครงสร้างของแถบพลังงานดังรูปที่ 2.15(ค)หากแต่ช่องว่างแถบพลังงานมีขนาดน้อยกว่าฉนวนมาก โดยทั่วไปมักมีค่าไม่กี่อิเล็กตรอนโวลต์ และเนื่องจากว่าช่องว่างแถบพลังงานแคบกว่าของฉนวนนี้เอง จึงทำให้แม้แต่อุณหภูมิธรรมดาๆ อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบวาเลนซ์ก็สามารถที่จะข้ามช่องว่างแถบพลังงานเข้าไปอยู่ในแถบนำและทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าได้ สิ่งที่แตกต่างกันระหว่างการนำไฟฟ้าในโลหะกับสารกึ่งตัวนำ ก็คือ เมื่ออิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำ ได้รับพลังงานเพิ่มจากเดิมมากพอที่จะเข้าไปอยู่ในแถบความนำได้แล้วมันจะทิ้งให้เกิดที่ว่างในแถบวาเลนซ์ ทำให้เกิดการไหลของกระแสอันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของประจุในแถบวาเลนซ์อีกด้วย ซึ่งกระแสนี้อธิบายได้โดยการกล่าวได้ว่าเป็นการเคลื่อนที่ของโฮล และยังสามารถสรุปได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

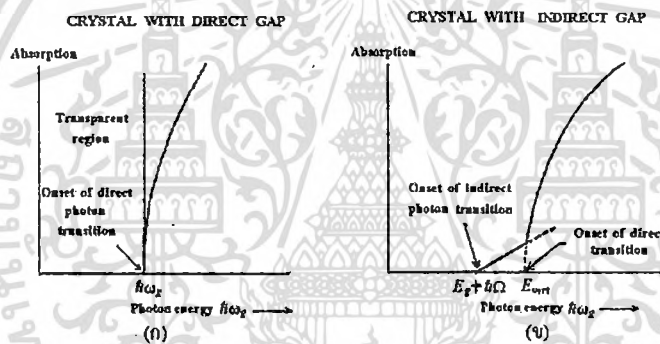
ในโลหะพาหะที่ช่วยนำกระแสไฟฟ้าก็คืออิเล็กตรอนอิสระ แต่สำหรับในกรณีสารกึ่งตัวนำ นอกจากอิเล็กตรอนในแถบนำแล้ว ยังมีโฮลในแถบวาเลนซ์ช่วยในการนำไฟฟ้า ได้อีกด้วย

2.2.1.2 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ

โดยทั่วไปลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำมีสองแบบ คือ แบบตรง(direct bandgap) และแบบเฉียง(indirect bandgap) ดังแสดงในรูปที่ 2.16(ก) และ (ข) ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง คือ โครงสร้างแถบพลังงานที่มีจุดต่ำสุดของแถบนำกับจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ อยู่ที่ตำแหน่งเวกเตอร์คลื่น (wave vector; k)ค่าเดียวกัน หรืออยู่ที่ตำแหน่งที่มีโมเมนตัมคลื่นเท่ากัน ถ้าอิเล็กตรอนได้รับพลังงานโฟตอน ที่มีค่าเท่ากับขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ($h\nu = E_g$) อิเล็กตรอนจะดูดกลืนพลังงานโฟตอนนั้นและอยู่ในสถานะถูกกระตุ้น จึงย้ายสถานะพลังงาน(transition) จากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำ กลายเป็นอิเล็กตรอนและโฮลอิสระโดยไม่มีการสูญเสียพลังงานให้แก่โครงสร้างผลึก คือ ไม่มีการสร้างหรือทำลายล้างโฟนอน(phonon creation or phonon annihilation) เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ การดูดกลืนโฟตอน(absorption coefficient) กับพลังงานโฟตอนจะได้กราฟดังรูปที่ 2.17(ก) ส่วนลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง คือ โครงสร้างแถบพลังงานที่มีจุดต่ำสุดของแถบนำ กับจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ ไม่อยู่ที่ตำแหน่งเวกเตอร์คลื่นเดียวกัน หรืออยู่ที่ตำแหน่งที่มีโมเมนตัมคลื่นเท่ากัน ดังนั้นอิเล็กตรอนต้องได้รับพลังงานโฟตอนที่มีค่ามากกว่า หรือน้อยกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงานแล้ว จะทำให้เกิดกระบวนการสร้างหรือทำลายโฟนอนเกิดขึ้น $h\nu = E_g \pm \hbar\Omega$ เมื่อ Ω คือ ค่าความถี่เชิงมุมของพลังงานโฟนอน นั่นคือ เมื่ออิเล็กตรอนที่อยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นทำให้เกิดการย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังต่ำสุดของแถบนำจะมีการปล่อยโฟนอน(emitted phonon) ที่มีความถี่เชิงมุม มีเวกเตอร์คลื่น $K \cong k_c$ ออกมา จึงเกิดการสร้างโฟนอนและสร้างอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ แสดงดังรูปที่ 2.16(ข) และเมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนจนได้กราฟดังรูป 2.17(ข)



รูปที่ 2.16 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน และการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์
 (ก) ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง
 (ข) ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง

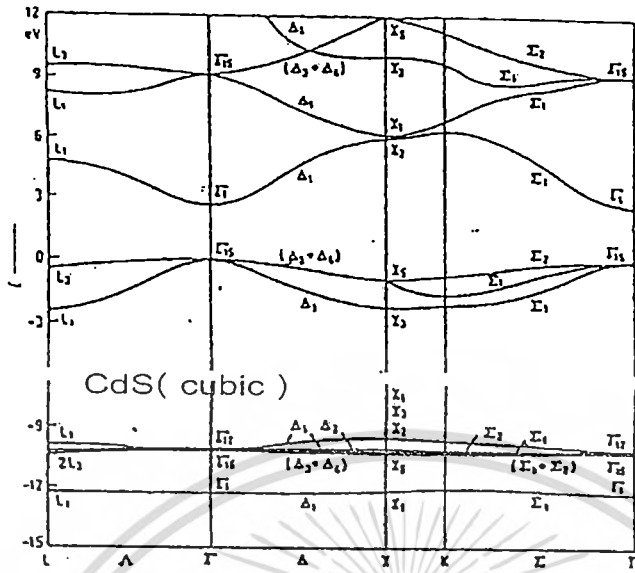


รูปที่ 2.17 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์
 (ก) ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง
 (ข) ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียงในกรณีที่เกิดกระบวนการสร้างโฟนอน

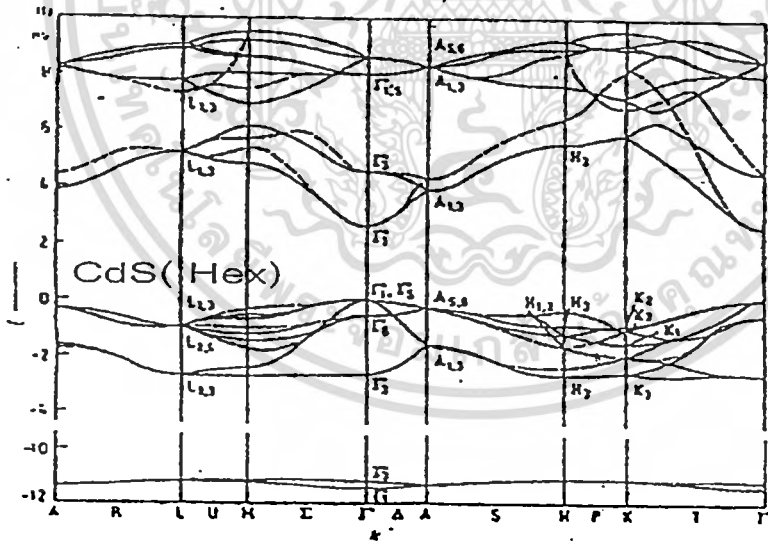
2.2.2 โครงสร้างแถบพลังงานของแคดเมียมซัลไฟด์ [21, 24]

แคดเมียมซัลไฟด์มีลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง คือ มีการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนจากตำแหน่งสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปจุดต่ำสุดของแถบนำ ซึ่งอยู่ที่เวกเตอร์คลื่นค่าเดียวกันหรือที่ตำแหน่ง Γ ของบริลลันโซนของโครงสร้างผลึกทั้งแบบซิงค์เบลนด์และเวิร์ทไซท์ ดังรูปที่ 2.18 และ 2.19 โดยที่โครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์และโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์มีค่า ช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 2.5 และ 2.501 อิเล็กตรอน โวลต์ตามลำดับที่อุณหภูมิห้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรงของ CdS ที่มีโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซต์ โดยไม่คิดการคัปปลิงระหว่างสปิน-ออร์บิต

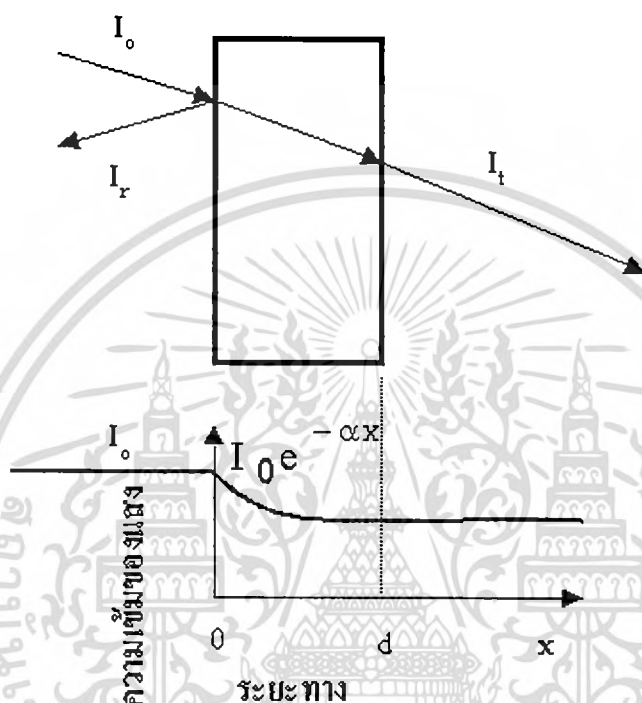


รูปที่ 2.19 แสดงโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรงของ CdS ที่มีโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ โดยไม่คิดการคัปปลิงระหว่างสปิน-ออร์บิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 การส่งผ่านแสง

การศึกษาวิธีวัดสเปกตรัมการสะท้อนและการส่งผ่านแสงนี้ จะกล่าวถึงสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง และองค์ประกอบของการวัดสเปกตรัมการส่งผ่านแสง เมื่อแสงเดินทางไปกระทบฟิล์มบาง แสงบางส่วนจะสะท้อนกลับที่ผิวของฟิล์มบาง บางส่วนของแสงจะเดินทางเข้าไปในแผ่นฟิล์มบางและถูกดูดกลืน ดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 แสดงภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มบาง

เมื่อ	I_0	คือ	ความเข้มแสงตกกระทบแผ่นฟิล์มบาง
	I_r	คือ	ความเข้มแสงสะท้อนจากฟิล์มบาง
	I_t	คือ	ความเข้มแสงส่งผ่านออกมาจากฟิล์มบาง
	I_i	คือ	ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบาง
	R	คือ	สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง(reflectivity)
	T	คือ	สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง(transmittance)
	α	คือ	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง(absorption coefficient)
	d	คือ	ระยะทางที่แสงเดินทางในแผ่นฟิล์มบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัมประสิทธิ์การสะท้อนของแสงมีค่า

$$R = \frac{I_r}{I_0} \quad (2.7)$$

หรือ

$$I_r = RI_0 \quad (2.8)$$

เพราะฉะนั้น ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางมีค่า

$$I_i = I_0 - I_r = I_0 - RI_0 = (1 - R)I_0 \quad (2.9)$$

เมื่อแสงนี้เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางจะถูกดูดกลืนทำให้ความเข้มแสงภายในแผ่นฟิล์มบาง ลดลงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลตามระยะทาง ดังนั้นความเข้มแสงที่ส่งผ่านฟิล์มบางมีค่าดังสมการ

$$I_t = I_i * e^{-\alpha d} = (1 - R)I_0 * e^{-\alpha d} \quad (2.10)$$

ถ้าไม่มีการสะท้อนแสงที่ผิวด้านหลัง สัมประสิทธิ์การส่งผ่านของแสงจะมีค่าเท่ากับ

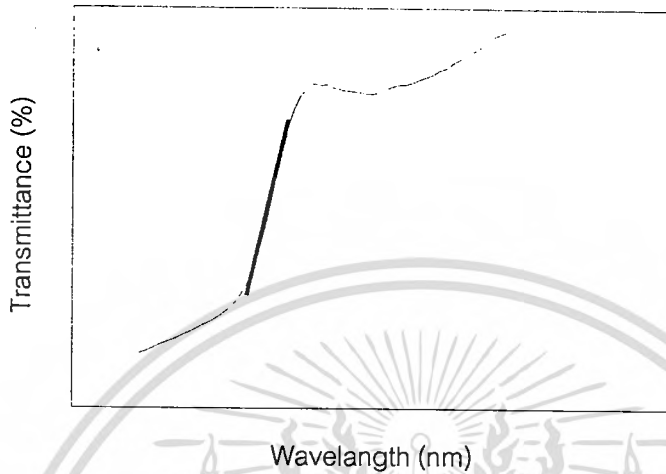
$$T = \frac{I_t}{I_0} = (1 - R)e^{-\alpha d} \quad (2.11)$$

2.2.4 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง

การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำเกิดจากการที่อิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากแสงที่มีพลังงาน โฟตอนสูงกว่าค่าแถบช่องว่างพลังงาน แล้วย้ายสถานะพลังงานจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปสู่แถบนำ สเปกตรัมการดูดกลืนแสงบริเวณที่พลังงานโฟตอนมีค่าน้อยจะมีลักษณะเป็นขอบ แสดงถึงการลดลงของการดูดกลืนแสงอย่างกะทันหัน ขอบลักษณะนี้เรียกว่าขอบการดูดกลืนแสงหรือขอบการดูดกลืน พื้นฐาน(absorption edge or fundamental edge) แสดงได้ดังรูปที่ 2.21 พลังงานโฟตอนที่ขอบ การดูดกลืนแสงมีค่าเท่ากับผลต่างของค่าพลังงานที่วัดจากจุดต่ำสุดของแถบความนำ และจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์จุดที่เส้นตรงตัดกับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แกนในแนวนอน จะให้ค่าช่องว่างแถบพลังงาน(E_g) วิธีการนี้เป็นการกำหนดค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่นิยมมากที่สุด



รูปที่ 2.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่น โดยเส้นที่บ่งชี้จะแสดงขอบการดูดกลืนพื้นฐาน

การหาค่าของช่องว่างแถบพลังงาน สามารถพิจารณาได้จากสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง(α)ของสารกึ่งตัวนำ จะสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง(T) จากรูปที่ 2.20 แสดงภาพจำลอง เมื่อแสงตกกระทบจากด้านซ้ายของฟิล์มบาง(I_0) ความเข้มแสงภายในฟิล์มบางจะลดลงแบบเอ็กโปเนนเชียล และมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงโดยทั่วไปการสะท้อน(R) มีค่าน้อยมากจะได้

$$T = e^{-\alpha d} \quad (2.12)$$

ดังนั้น

$$\alpha = -\frac{1}{d} \ln T \quad (2.13)$$

ที่กล่าวมาเป็นการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง จากสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงโดยไม่ได้คิดถึงการสะท้อนของแสง สำหรับกรณีการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเนื่องจากการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอน แสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับค่าช่องว่างแถบพลังงานซึ่งมีลักษณะเป็นพาราโบลา ช่องว่างแถบพลังงานของแผ่นฟิล์มบางประมาณได้โดยการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ซึ่งจะถูกดูดกลืนเมื่อแสงที่ตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบางมีค่าพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าของแถบพลังงานต้องห้าม ที่ขอบของการดูดกลืนค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนจะมีค่าเป็น

$$(\alpha h\nu)^2 = A(h\nu - E_g) \quad (2.14)$$

เมื่อ A คือ ค่าคงที่ และสมการที่ (2.14) ใช้กับสารที่มีสถานะพลังงานแบบตรง

$$(\alpha h\nu)^{1/2} = B(h\nu - E_g) \quad (2.15)$$

เมื่อ B คือ ค่าคงที่ และสมการที่ (2.15) ใช้กับสารที่มีสถานะพลังงานแบบเฉียง

2.3 สมบัติทางไฟฟ้า [8,25]

จากทฤษฎีแถบพลังงานนั้น สารกึ่งตัวนำที่มีขนาดช่องว่างแถบพลังงานใหญ่เกินกว่า 2 อิเล็กตรอนโวลต์ พลังงานความร้อนที่อุณหภูมิห้องไม่เพียงพอที่จะกระตุ้นให้เกิดพาหะอิสระได้ ดังนั้นพาหะอิสระของสารกึ่งตัวนำประเภทนี้จึงน้อย ส่วนใหญ่มาจากระดับพลังงานที่ปรากฏใน ช่องว่างแถบพลังงาน ซึ่งจะเป็นทั้งระดับพลังงานผู้ให้และระดับพลังงานผู้รับ หรือศูนย์กลางการรวมตัว (recombination center) ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิใดๆของสารกึ่งตัวนำ จึงขึ้นกับความหนาแน่นของพาหะอิสระเหล่านี้

2.3.1 สภาพนำไฟฟ้า

เมื่อใส่สนามไฟฟ้าเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบนำจะตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าเกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนกลายเป็นกระแสไฟฟ้า จากกฎของโอห์ม(ohm's law) สภาพนำไฟฟ้า(electrical conductivity: σ) คือ อัตราส่วนของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า(current density : J) ต่อสนามไฟฟ้า(electric field) ที่ใส่เข้าไปดังสมการ

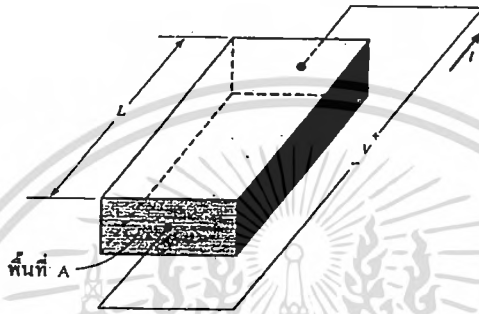
$$J = \sigma E = e(\mu_n n + \mu_p p)E \quad (2.16)$$

เมื่อ μ_n, μ_p คือ สภาพคล่องของอิเล็กตรอนและโฮล ตามลำดับ

- n คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน
- p คือ ความหนาแน่นของโฮล

ส่วนกลับของสภาพนำไฟฟ้า เรียกว่า สภาพต้านทานไฟฟ้า(resistivity: ρ) ซึ่งสามารถเขียน ได้ เป็น

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{e(\mu_n n + \mu_p p)} \tag{2.17}$$



รูปที่ 2.22 แสดงการให้แรงดันกับสารตัวอย่าง

ถ้ามีแท่งสารกึ่งตัวนำ ดังรูปที่ 2.22 ซึ่งให้แรงดันและเกิดกระแส I แล้วจะได้ว่า

$$J = \frac{I}{A} \tag{2.18}$$

และ

$$E = \frac{V}{L} \tag{2.19}$$

สามารถเขียนสมการที่(2.16) ใหม่ได้เป็น

$$\frac{I}{A} = \sigma \left(\frac{V}{L} \right) \tag{2.20}$$

หรือ

$$V = \left(\frac{L}{\sigma A} \right) I = \left(\frac{\rho L}{A} \right) I = IR \tag{2.21}$$

สมการที่ (2.21) คือ กฎของโอห์มสำหรับสารกึ่งตัวนำ ความต้านทานเป็นฟังก์ชันกับ สภาพ ความต้านทาน หรือสภาพนำไฟฟ้าพอกับมิติรูปทรงทางเรขาคณิตของสารกึ่งตัวนำ

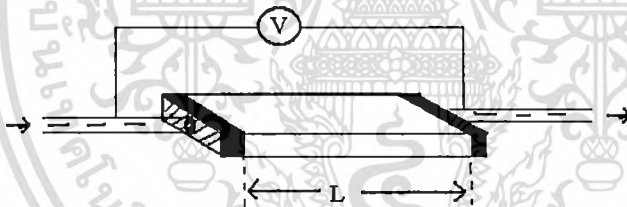
2.3.2 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า

วิธีการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำสามารถกระทำได้หลายวิธี ทั้งวิธีที่ใช้ส่วนของอุปกรณ์ต่อเข้าสัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่างและวิธีที่ไม่ต้องสัมผัสโดยตรง สำหรับวิธีที่จะกล่าวถึงในที่นี้เป็นวิธีที่ใช้การสัมผัสกับชิ้นสารตัวอย่าง ซึ่งทำโดยการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในชิ้นสารตัวอย่างแล้ววัดความต่างศักย์ระหว่างจุดสองจุดบนชิ้นสารนั้น

2.3.2.1 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง (direct resistivity method)

โดยทั่วไปแล้วการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้ามักจะวัดความต้านทานก่อน ซึ่งเป็นวิธีวัดโดยตรงนี้ หมายถึง วัดค่าความต้านทานรวมของสสารแล้วถึงมาคิดความยาว และพื้นที่หน้าตัดของสสาร ที่ต้องการ การวัดวิธีนี้จะต้องทำให้สารที่ต้องการจะวัดรูปทรงเรขาคณิตที่แน่นอน เพื่อที่จะวัดค่าพื้นที่หน้าตัดและความยาวให้ได้แน่นอน เช่น แท่งกลมทรงกระบอก แท่งสี่เหลี่ยม เป็นต้น จากนั้นถึงค่อยให้กระแสไฟฟ้าเข้าไปที่ปลายด้านหนึ่ง และให้กระแสไหลออกผ่านสารตัวอย่างที่ปลายอีกด้านหนึ่ง ขณะเดียวกันก็วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จุดปลายทั้งสองนั้นพร้อมๆกัน ซึ่งแสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ 2.23

จากค่าที่ทราบคือ กระแสและศักย์ไฟฟ้านี้ นำมาคำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้าได้ดังต่อไปนี้ เมื่อ กำหนด R เป็นความต้านทานรวมจะมีความสัมพันธ์กับความต้านทานจำเพาะและพื้นที่หน้าตัด A บริเวณที่ปล่อยกระแสไหลเข้าไปและ L เป็นระยะทางระหว่างขั้วศักย์ไฟฟ้าที่วัด



รูปที่ 2.23 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีวัดโดยตรง

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (2.22)$$

$$\rho = R * \frac{A}{L} = \left(\frac{V}{I} \right) \left(\frac{A}{L} \right) \quad (2.23)$$

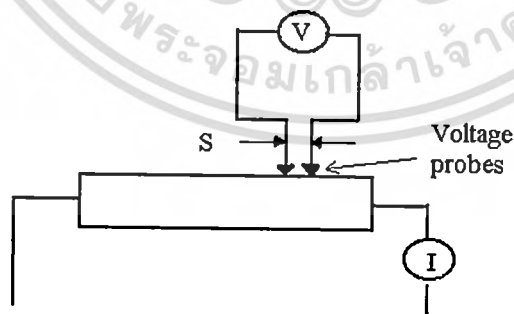
จะเห็นว่าวิธีนี้เป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็วมาก แต่ค่าที่ได้เป็นค่าประมาณซึ่งต้องคำนึงถึง อีกหลายองค์ประกอบด้วย

ถ้ากลับมาพิจารณาถึงกรณีที่วัดโดยตรงนี้ จะพบว่าความถูกต้องแน่นอนในการวัดขึ้นอยู่กับว่า บริเวณผิวสัมผัสตรงที่กระแสไหลเข้าและไหลออกนั้นมีลักษณะเป็นโอห์มมิกที่ดีหรือไม่ ถ้าไม่ได้มีคุณสมบัติโอห์มมิกที่ดี แสดงว่าจำเป็นต้องมีความต้านทานที่ผิวสัมผัสทั้งสองขั้วไฟฟ้า(หัวและท้าย) เกิดขึ้นด้วย ค่าความต้านทาน R ที่วัดได้เป็นค่าความต้านทานรวมทั้งหมด ดังนั้น ค่าความต้านทานจริงๆของ สารกึ่งตัวนำจะต้องน้อยกว่าค่าที่วัดออกมาแน่นอน ส่วนที่สองขึ้นอยู่กับความแตกต่างระหว่าง ความต้านทานของสารที่ต้องการวัดและความต้านทาน(impedance) ของโวลต์มิเตอร์ที่ใช้วัด ถ้าหากความต้านทานของทั้งสองนี้ใกล้เคียงกันความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จะไม่ถูกต้องจะมีค่าน้อยกว่าค่าที่เป็นจริงซึ่งหมายถึงความต้านทานจำเพาะของสารจะมีค่ามากกว่าค่าที่อ่านได้

ในทางปฏิบัติแล้วจะคำนึงถึงเรื่องผิวสัมผัสโอห์มมิก มากกว่าความผิดพลาดของโวลต์มิเตอร์ เพราะที่ผิวสัมผัสจะดี(กรณีเป็น โอห์มมิก) หรือไม่ดี(ไม่เป็น โอห์มมิก)นั้น จะตรวจสอบได้ยากมาก จึงแก้ไขด้วยการทำให้เกิดผิวสัมผัสบริเวณพื้นที่มาก เพื่อลดความต้านทานที่ผิวสัมผัสลง จากนั้นจึงวัดศักย์ไฟฟ้าด้วยโวลต์มิเตอร์ โดยเลือกโวลต์มิเตอร์ที่มีอิมพีแดนซ์สูงๆ(เท่าที่จะหาได้) ถ้าทำเช่นนี้ค่าของความผิดพลาดจะน้อยมาก

2.3.2.2 การวัดความต้านทานจำเพาะโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น (linear two point probes)

การวัดด้วยวิธีนี้มีลักษณะการวัดคล้ายคลึงกับการวัด โดยตรง ข้อแตกต่างตรงที่ลักษณะของขั้วไฟฟ้าของการวัดศักย์ไฟฟ้าจะวัดบนสารตัวอย่าง ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.24 วิธีการวัดชนิดนี้เป็นวิธีที่พัฒนาขึ้นจากแบบแรก เพื่อที่จะกำจัดศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อหัวท้ายของผิวสัมผัสให้น้อยลงและสามารถตรวจสอบความสกปรกบนพื้นผิวของชิ้นสารตัวอย่างได้ด้วย



รูปที่ 2.24 การวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น

ข้อจำกัดของการวัดด้วยวิธีนี้คือ จะต้องวัดบนสารตัวอย่างที่มีความหนาสม่ำเสมอและมีรูปทรงเรขาคณิตแน่นอน โดยพยายามปล่อยให้กระแสผ่านเข้าไปในสารตัวอย่างให้น้อยที่สุด เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความร้อนภายในสาร เพราะค่าความต่างศักย์ที่วัดได้อาจจะไม่ถูกต้องอีกทั้ง ในการวัดทุกครั้ง จะต้องใช้โวลต์มิเตอร์ที่มีค่าอิมพีแดนซ์สูงและจุดที่ต้องการวัดศักย์ไฟฟ้าควรจะอยู่ห่างจากจุดที่ปล่อยกระแสเข้าและออกพอสมควร เพื่อป้องกันสารเจือเข้าไปทำการรวมตัวระหว่างจุดที่กำลังจะวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า หากมีสารเจือเข้ามารวมตัวที่บริเวณที่วัดนี้จะมีผลทำให้เกิดการ รวมตัวกับพาหะข้างน้อย(minority carriers) บริเวณนั้น ทำให้การวัดค่าความต้านทานจำเพาะที่วัดได้สูงเกินความเป็นจริง นอกจากนี้ควรคำนึงถึงความสม่ำเสมอของเส้นสมศักย์(equi-potential lines) โดยการวัดที่บริเวณตรงจุดที่คิดว่าเป็นเส้นสมศักย์นั้นสม่ำเสมอ(ตรงกลางของสารตัวอย่าง) สัดส่วนระหว่างระยะขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้าต่อพื้นที่ตรงจุดที่ปล่อยกระแสเข้า-ออกจะต้องมีค่ามากกว่าสามเท่า $L/A > 3$ เมื่อ L คือ ระยะห่างระหว่างขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้า และ A คือ พื้นที่บริเวณให้กระแส ข้อที่ควรคำนึงถึงอีกประการก็คือ โครงสร้างทางผลึกว่ามีโครงสร้างชนิดใดเป็นรูปลูกบาศก์หรือไม่ ถ้าไม่ใช่จะต้องทราบทิศทางของ การวัดที่กำลังวัดอยู่ในทิศทางหรือระนาบใดของผลึก

ข้อดีของการวัดแบบสองขั้วในหลายๆตำแหน่งนี้จะสามารถแยกสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ สภาพผิวระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำและความต้านทานจำเพาะภายในของสารกึ่งตัวนำได้

สรุปข้อแนะนำในการวัดค่าความต้านทานจำเพาะแบบสองขั้วเชิงเส้น

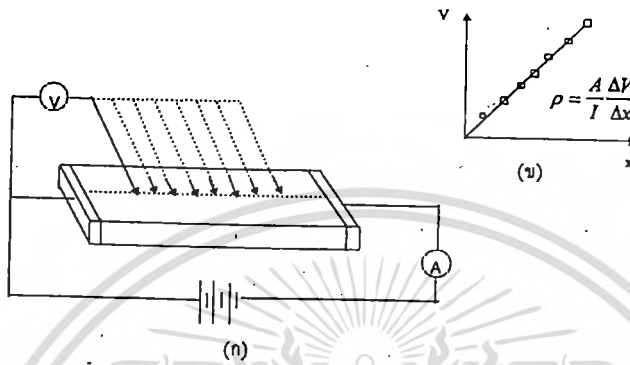
- วัดศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณกึ่งกลางของสารตัวอย่างและห่างจากบริเวณกระแสเข้า-ออกพอสมควร
- โลหะที่นำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้าที่ใช้วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าบนสารตัวอย่างนั้น จะต้องเป็นโลหะแข็งและนำไฟฟ้าได้ดี เช่น ทังสเตน เงิน พลาตินัม เป็นต้น
- ขณะที่ทำการวัดสารตัวอย่าง จะต้องทราบระนาบหรือทิศทางของผลึกสารตัวอย่าง ว่ากำลังวัดอยู่ในระนาบหรือทิศทางใดของสารตัวอย่าง
- ผลึกที่ทำการวัดจะต้องมีความสมบูรณ์ไม่เกิดขอบเขตของเกรน(grain boundaries) ที่ผิวและมีความเป็นเนื้อเดียวกันตลอดทั้งก้อนผลึก

ข้อแก้ไข

- ควรทำการวัดหลายๆจุดและต้องใช้ความระมัดระวังเพราะอาจทำให้สารตัวอย่างเกิดความเสียหายได้ซึ่งจะส่งผลไปถึงปรากฏการณ์ภายในสารตัวอย่าง
- ระยะระหว่างขั้วไฟฟ้าควรจะให้สั้นๆเพื่อจะได้วัดตรงจุดที่มีเส้นสมศักย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรรมใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- วัดบนสารตัวอย่างที่ใหญ่และมีรูปร่างทรงเรขาคณิตที่แน่นอน
- อาจจะไปด้วยวิธีที่ขั้วหนึ่งและอีกขั้วหนึ่งเลื่อนตำแหน่งออกไปเป็นระยะๆ โดยมีมาตราส่วนบอกระยะแล้วนำมาเขียนกราฟจะได้ดังรูปที่ 2.25(ก)และ(ข) ความชันที่ได้จะเป็นค่าความต้านทานจำเพาะทางไฟฟ้า



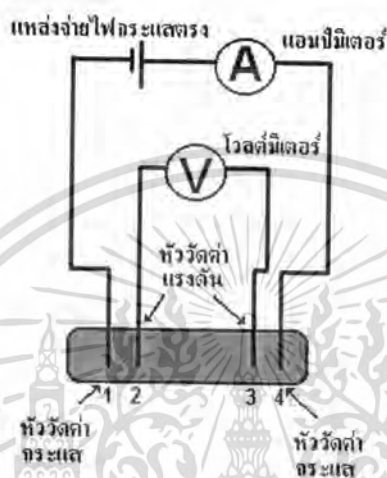
รูปที่ 2.25 แสดงการวัดความต้านทานแผ่น โดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น
 (ก) การวัดแบบสองขั้วโดยมีการเลื่อนระยะที่ขั้วหนึ่ง
 (ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับระยะทาง
 ที่ได้จากการวัดชนิดเลื่อนขั้วไฟฟ้า

2.3.2.3 การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสี่ขั้วเชิงเส้น (liner four point probes)

เป็นวิธีที่ใช้วัดความต้านทานทางไฟฟ้าจำเพาะที่แพร่หลาย และเป็นที่ยอมรับมากในวงการอุตสาหกรรม วิธีการนี้ได้ใช้กันมานาน 70 กว่าปีมาแล้ว ซึ่งปัจจุบันก็ยังนิยมใช้อยู่เป็นวิธีที่ดีและไม่ทำลายสารตัวอย่างที่นำมาวัด อันที่จริงแล้วปัญหาของสองจุดและสี่จุดคล้ายๆกันคือ ปัญหาที่ จุดสัมผัสระหว่างขั้วต่างๆ ดังนั้นวิธีสี่ขั้วในแนวเส้นตรงนี้ได้ใช้ขั้วไฟฟ้าด้านให้กระแสออกตลอดจนขั้วที่วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าจะอยู่บนผิวหน้าของสารตัวอย่าง เป็นโลหะแข็งโดยทั่วไปจะใช้เป็นเส้นลวดหรือในบางครั้งอาจจะวางขั้วห่างไปไม่เท่ากัน ในบางกรณีที่สำคัญจะต้องทราบระยะห่างระหว่างขั้วที่วัดศักย์ไฟฟ้าด้วยค่าที่แน่นอน

หากจะทำการวิเคราะห์ให้ได้มาซึ่งค่าความนำไฟฟ้าจำเพาะ พอลจะมีแนวความคิดได้ดังนี้ เนื่องจากหลักการวิเคราะห์จริงๆแล้ว จะใช้การหาศักย์ไฟฟ้าด้วยสมการของปัวซอง(poisson's equation) ในที่นี้จะกล่าวเพียงแนวความคิดที่ได้มาจากสูตรคำนวณหาความนำไฟฟ้าจำเพาะเท่านั้น

ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยทั่วไปแล้ว จะหาได้จากกระแสที่ลัดเข้าไปในสารตัวอย่างและ วัด ศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วทั้งสอง วิธีการดังกล่าวเป็นวิธีที่ทราบกันโดยทั่วไปว่ามีข้อจำกัด ในการ ฉีดกระแสจะต้องให้มีลักษณะสม่ำเสมอภายในสารตัวอย่าง จุดอ่อนนี้เองจึงได้มีการพัฒนาการ วัดความ ต้านทานจำเพาะด้วยวิธีใช้หลายขั้วไฟฟ้า ดังนั้นสูตรในการคำนวณจึงจำเป็นต้องมีการ เปลี่ยนแปลงเพื่อมีความเหมาะสมดังจะแสดงให้เห็นต่อไป



รูปที่ 2.26 แสดงการวัดสภาพต้านทาน ไฟฟ้า โดยวิธีสี่ขั้วเชิงเส้น

ในการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยวิธีสี่ขั้วไฟฟ้าเชิงเส้นนี้มีข้อจำกัดอยู่สองข้อคือ

1. ขั้วทั้งสองจะต้องมีลักษณะเหมาะสมมีพื้นที่ที่หน้าตัดตรงรอยสัมผัสสารตัวอย่างเท่าๆกันหมด ลวดที่ใช้ทำ ขั้วไฟฟ้าจะต้องเป็นโลหะมีความต้านทานไฟฟ้าน้อย
2. สารตัวอย่างตรงบริเวณที่ขั้วทั้งสองวางอยู่จะต้องสม่ำเสมอทั่วบริเวณ ไม่เกิดรูกรวงด้านในและ จะคิด ว่าการกระจายของกระแสเป็นไปในลักษณะครึ่งทรงกลม(semi sphere) โดยอาศัยหลักการ ไฟฟ้า สถิตยศาสตร์ เมื่อมีการฉีดกระแสเข้าไปที่สารตัวอย่าง จะสามารถหาศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายใน สาร ตัวอย่างที่ระยะ r ใดๆได้

$$V = \frac{K}{r} \quad (2.24)$$

เมื่อ r คือ ระยะใดๆที่จะหาศักย์เทียบกับจุดที่ให้กระแส

K คือ ค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับความเข้มของกระแสที่ฉีดเข้าไป และรูปร่างของสารตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ยังสามารถหาสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในได้จาก

$$E = -\left(\frac{\partial V}{\partial r}\right) = \frac{K}{r^2} \quad (2.25)$$

เนื่องจากขั้วทั้งสองไม่อยู่ห่างกันมาก ดังนั้นจึงคิดได้ว่าการไหลของกระแสจะมีค่าสม่ำเสมอ จาก
ความสัมพันธ์เบื้องต้นจะได้ความหนาแน่นของกระแส J คือ

$$J = qn\mu E \quad (2.26)$$

โดยคิดว่า $\left(\frac{\partial n}{\partial r}\right) = 0$ หมายความว่า ความหนาแน่นของกระแสที่เกิดจากการแพร่มีน้อยมาก และ
สม่ำเสมอที่ระยะ r โดยกำหนด n คือ ความหนาแน่นของพาหะ μ คือ สภาพคล่องของพาหะ และ q คือ
ประจุไฟฟ้า

จากสมการที่ (2.26) สามารถจัดให้อยู่ในรูปของสภาพต้านทานไฟฟ้าจะได้

$$J = (E / \rho) \quad (2.27)$$

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในขั้นต้น การกระจายของกระแสเป็นลักษณะครึ่งทรงกลม ดังนั้นจะหากระแส
รวมทั้งหมดคือ

$$I = J * A = (E / \rho) * 2\pi r^2 \quad (2.28)$$

เมื่อ A คือ พื้นที่ผิวของครึ่งทรงกลม รัศมี r

นำสมการที่ (2.25) แทนในสมการที่ (2.28) จะได้ค่าคงที่ K คือ

$$K = \left(\frac{I\rho}{2\pi}\right) \quad (2.29)$$

และนำค่าคงที่ k นี้ แทนในสมการที่ (2.24) จะได้รูปทั่วไป

$$V = (\rho I / 2\pi r) \quad (2.30)$$

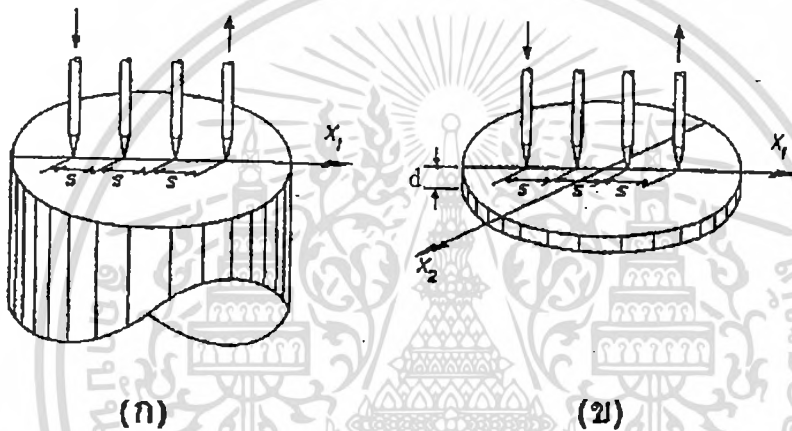
สมการที่ (2.30) เป็นสมการพื้นฐานสำหรับใช้วัดสภาพต้านทานไฟฟ้าชนิดสี่ขั้วที่คิดว่า สาร
ตัวอย่างมีขนาดใหญ่มาก ส่วนฉนวนมาใช้เป็นสารตัวอย่างที่มีขนาดบาง d จะได้สมการซึ่งแก้ไข
แล้วดังนี้

$$V = (\rho I \ln 2 / \pi d) \quad (2.31)$$

สรุปการทำสมการที่ (2.30) และ (2.31) ไปใช้งานให้พิจารณาความหนาของสารตัวอย่าง ดังแสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.27 (ก)และ(ข)

ข้อแนะนำ

ในการทดลองควรจะให้กระแสไฟฟ้าที่ผ่านเข้าไปในสารตัวอย่างที่ต้องการวัดให้น้อยที่สุด ควรจะไม่เกิน $2\pi s$ มิลลิแอมแปร์หรือน้อยกว่านี้ วิธีการสร้างเครื่องมือชนิดนี้ควรจะให้ระยะขั้วไฟฟ้าที่ใช้วัดความต่างศักย์มีค่า 0.195 เซนติเมตร ทั้งนี้เพื่อให้เทอม $2\pi s$ มีค่าเป็น 1 ดังนั้นค่า V/I ที่วัดได้



รูปที่ 2.27 ลักษณะของขั้วไฟฟ้าทั้งสี่ที่วางเรียงในแนวเส้นตรง

(ก) สำหรับสารตัวอย่างที่มีความหนามาก

(ข) สำหรับสารตัวอย่างมีความหนาเท่ากับ d

จะเป็นค่าความต้านทานจำเพาะโดยตรงในหน่วยของโอห์ม-เซนติเมตร ถ้านำไปวัดบนสารตัวอย่างที่มีขนาดเล็กก็จะเป็นค่าความต้านทานจำเพาะโดยตรงในหน่วยของโอห์ม-เซนติเมตร ถ้านำไปวัดบนสารตัวอย่างที่มีขนาดเล็กก็จะเป็นค่าความต้านทานจำเพาะโดยตรงในหน่วยของโอห์ม-เซนติเมตร

จะเห็นได้ว่าการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะชนิดสี่ขั้วเชิงเส้น มักจะใช้วัดบนสารตัวอย่างในลักษณะต่างๆ แบ่งออกได้เป็นสามประเภทใหญ่คือ

1. สารตัวอย่างมีรูปร่างทรงกระบอกตัน เช่น ผลึกที่ได้จากการปลูกโดยวิธีดึงขึ้นในแนวตั้ง
2. บนผลึกที่เป็นแผ่นบางๆ ซึ่งได้จากการตัดเป็นแผ่นเรียบรื้อแล้ว
3. บนผลึกที่มีรูปร่างเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าและมีความหนา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 ทฤษฎีการนำไฟฟ้าในช่วงอุณหภูมิต่างๆ [26-30]

ในการศึกษากลไกการนำไฟฟ้าซึ่งเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมินั้น มีที่โคเดเด่นอยู่ในแต่ละช่วงอุณหภูมิสองแบบด้วยกัน โดยในช่วงอุณหภูมิสูงการนำไฟฟ้าอธิบายได้โดยการประมาณของ Seto ในแบบจำลองนี้ประจุจะถูกดักจับไว้ที่ขอบเขตของเกรน ทำให้เกิดเขตปลอดพาหะขึ้นในบริเวณเกรน ซึ่งเป็นเหตุผลหลักที่ทำให้เกิดค่าแกงศักย์ที่ขอบเขตของเกรน หรือไม่ก็เกิดการขยายตัวของเขตปลอดพาหะหรือเพียงบางส่วน ซึ่งขึ้นกับขนาดของความหนาแน่นของระดับพลังงานของกัปกัประจุ, ระดับพลังงานของสารเจือ, ขนาดของเกรนและความยาวเดอร์บายน์ ซึ่งความสูงของค่าแกงศักย์ที่ขอบเขตของเกรนนี้จะขึ้นกับอุณหภูมิ พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าแกงศักย์จะลดลง และทำให้การนำไฟฟ้าเป็นแบบเทอร์มิโอนิกอิมิตชันซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\sigma = AT^{-1/2} \exp\left[\frac{\Phi_b}{kT}\right] \quad (2.32)$$

เมื่อ	Φ_b	คือ	ค่าค่าแกงศักย์
	A	คือ	ค่าคงที่
	T	คือ	อุณหภูมิเป็นองศาเคลวิน
	k	คือ	ค่าคงที่ของ โบลซ์ทมานน์ (Boltzmann's constant)

และในช่วงอุณหภูมิต่ำนั้นการนำไฟฟ้าอธิบายได้โดยการประมาณตามแบบจำลองของ Mott ซึ่งจำลองมาจากการนำไฟฟ้าในสารที่มีการจัดเรียงตัวแบบไม่เป็นระเบียบเช่น อะมอร์ฟัส เรียกการนำไฟฟ้าแบบการกระโดดเป็นช่วงๆ (variable-range hopping) ซึ่งจะโคเดเด่นในช่วงที่สารกึ่งตัวนำมีอุณหภูมิต่ำ เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำสารกึ่งตัวนำมีลักษณะการจัดเรียงตัวของอะตอมแบบไม่เป็นระเบียบ การนำไฟฟ้าแบบนี้โคเดเด่นในช่วงอุณหภูมิต่ำ เนื่องจากโฟนอนมีพลังงานไม่เพียงพอในการเคลื่อนย้ายไปยังอะตอมข้างเคียง และพาหะจะเคลื่อนที่ลักษณะคล้ายการกระโดดจากอะตอมเดิมไปยังอะตอมข้างเคียงที่มีระดับพลังงานเดียวกัน ซึ่งในสารกึ่งตัวนำที่เป็นผลึกพหุพันธ์นั้นที่อุณหภูมิต่ำ พาหะไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านบริเวณขอบเขตของเกรนได้ด้วยกระบวนการเทอร์มิโอนิกอิมิตชัน ซึ่งที่ขอบเขตของเกรนนั้นมีลักษณะเป็นระดับพลังงานของกัปกัประจุซึ่งเกิดจากความไม่เป็นระเบียบของอะตอม หรือความไม่สมบูรณ์ของพันธะเคมีซึ่งกระจายอยู่ในช่องว่างแถบพลังงานซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ

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

(2.33)

เมื่อ T_0 คือ อุณหภูมิเริ่มต้นเป็นองศาเคลวิน

2.4 เทคโนโลยีสุญญากาศและเทคนิคการเคลือบฟิล์มบางโดยการระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ [31-34]

2.4.1 ทฤษฎีจลน์ของก๊าซในอุดมคติ (kinetic theory of gases)

ทฤษฎีจลน์ของก๊าซเป็นทฤษฎีที่พัฒนาขึ้นเพื่ออธิบายตัวแปรในระดับมหภาคของก๊าซ เช่น ความดัน ด้วยค่าเฉลี่ยของสมบัติของโมเลกุลที่เป็นองค์ประกอบของก๊าซ โดยอาศัยหลักทางกลศาสตร์และสถิติเป็นพื้นฐานในการคำนวณ

2.4.1.1 การกระจายความเร็วของโมเลกุล (molecular velocities)

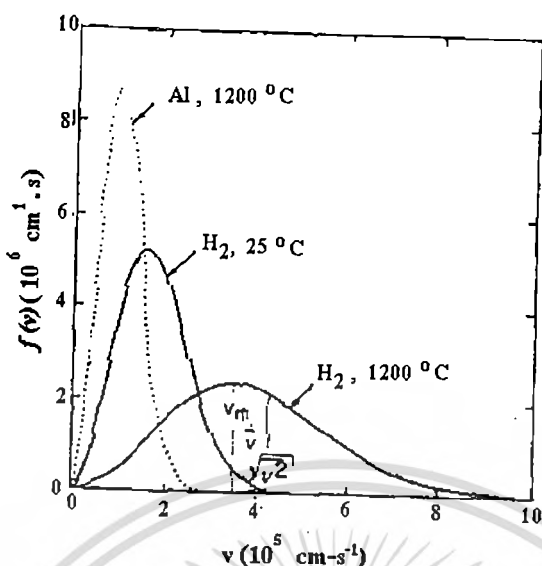
ความเร็วของแต่ละโมเลกุลของก๊าซ จะเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา เนื่องจากการชนกันระหว่างโมเลกุลหรือระหว่างโมเลกุลกับผนังภาชนะ จึงเป็นการยากที่จะทราบความเร็วของแต่ละโมเลกุล แต่สมบัติต่างๆของก๊าซไม่ว่าจะเป็นความดันหรืออุณหภูมิ ต่างก็ขึ้นกับค่าเฉลี่ยความเร็วโมเลกุล ของก๊าซ ดังนั้นเราจึงหันมาหาค่าการกระจายความเร็วโมเลกุลแทน ที่จะหาค่าความเร็วของแต่ละโมเลกุลซึ่งเป็นตามฟังก์ชันการกระจายความเร็วของ โมเลกุลของแมกเวลล์ ดังรูปที่ 2.28

แมกเวลล์ ได้ใช้ทฤษฎีความน่าจะเป็น ในการคำนวณการกระจายความเร็วของโมเลกุล ซึ่งได้เป็นกฎการกระจายความเร็วโมเลกุลดังนี้

$$f(v) = \frac{1}{n} \frac{dn}{dv} = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{M}{2RT} \right)^{3/2} v^2 \exp - \frac{Mv^2}{2RT} \quad (2.34)$$

เมื่อ	$f(v)$	คือ	ความน่าจะเป็นที่จะพบโมเลกุลที่มีความเร็วอยู่ระหว่าง v กับ $v+dv$
	n	คือ	จำนวนของ โมเลกุลต่อปริมาตร
	v	คือ	ความเร็ว (velocity)
	M	คือ	มวลโมเลกุลของก๊าซ
	T	คือ	อุณหภูมิสัมบูรณ์
	R	คือ	ค่าคงตัวของก๊าซ มีค่าเท่ากับ 8.314 จูลต่อ โมล-เคลวิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $f(v)$ กับ v ที่อุณหภูมิต่างๆ จากความสัมพันธ์ข้างต้นจุดสูงสุดของส่วนโค้ง คือ ตำแหน่งค่าความเร็วที่เป็นไปได้มากที่สุด (most probable velocity) เขียนแทนด้วย v_m โดยสามารถหาค่าได้จาก

$$\frac{df(v)}{dv} = \frac{d}{dv} \left(\frac{1}{n} \right) \left(\frac{dn}{dv} \right) = 0 \tag{2.35}$$

แทนค่าสมการ (2.35) ในสมการ (2.36) จะได้

$$v_m = \sqrt{\frac{2RT}{M}} \tag{2.36}$$

นอกจากนี้จะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นในก๊าซไฮโดรเจน การกระจายความเร็วโมเลกุลระหว่างเศษส่วนโมเลกุลที่มีความเร็วต่ำจะมีค่าน้อย ค่า v_m จะเลื่อนไปทางที่ค่า v มีค่ามากขึ้น ทั้งนี้เพราะเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น พลังงานจลน์โมเลกุลของก๊าซมีค่ามากขึ้นนั่นเอง และจะพบว่าในก๊าซต่างชนิดกันจะมีการกระจายความเร็วเหมือนหรือแตกต่างกันก็ได้ ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของมวลโมเลกุลต่ออุณหภูมิสัมบูรณ์ (M/T) ดังแสดงในรูปที่ 2.28 จะเห็นว่าในก๊าซไฮโดรเจน จะมีการกระจายความเร็วแตกต่างกับก๊าซออกซิเจน ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียสเท่ากัน

สำหรับค่าความเร็วเฉลี่ย (\bar{v}) ,กำลังสองของความเร็วเฉลี่ย (\bar{v}^2) และความเร็วรากที่สองของค่าเฉลี่ยความเร็วกำลังสอง (v_{rms}) ซึ่งเป็นค่าความเร็วสูงสุดได้จาก

$$\bar{v} = \int_0^\infty v f(v) dv / \int_0^\infty f(v) dv = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} \quad (2.37)$$

$$\bar{v}^2 = \int_0^\infty v^2 f(v) dv / \int_0^\infty f(v) dv = \frac{3RT}{M} \quad (2.38)$$

$$v_{rms} = \sqrt{\bar{v}^2} = \sqrt{\frac{3RT}{M}} \quad (2.39)$$

2.4.1.2 ความดัน(pressure)

การเคลื่อนที่ชนผนังโดยโมเลกุลก๊าซทำให้เกิดแรงกระทำต่อผนัง ค่าความดันจึงขึ้นกับจำนวนครั้งของการชน, จำนวนโมเลกุล(n), ค่าเฉลี่ยของความเร็วโมเลกุลกำลังสอง(\bar{v}^2) และอุณหภูมิ(T) ดังนั้นความดันของก๊าซ (P)จะได้ว่า

$$P = nkT = nRT / N_A = nM\bar{v}^2 / 3N_A \quad (2.40)$$

เมื่อ N_A คือ เลขอาโวกาโดร มีค่าเท่ากับ 6.022×10^{23} ต่อโมล

หน่วยและมาตราวัดความดันที่ใช้กันโดยทั่วไป

$$1 \text{ บรรยากาศ} = 1.013 \times 10^5 \text{ นิวตันต่อตารางเมตร} = 1.013 \times 10^5 \text{ ปาสกาล}$$

$$1 \text{ ทอร์} = 1 \text{ มิลลิเมตรปรอท} = 133.3 \text{ นิวตันต่อตารางเมตร} = 133.3 \text{ ปาสกาล}$$

$$1 \text{ บาร์} = 0.987 \text{ บรรยากาศ} = 750 \text{ ทอร์}$$

ค่าเฉลี่ยของระยะทางที่แต่ละโมเลกุลเคลื่อนไปได้โดยไม่ชนกับโมเลกุลอื่น เรียกว่า “ระยะปลอดการชน(mean free path; λ_{mfp})” ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของก๊าซที่ขึ้นกับความดัน ในการคำนวณค่า λ_{mfp} เราทราบว่าแต่ละโมเลกุลนั้นมีพื้นที่เป้าหมายเป็น πd_c^2 เมื่อ d_c คือเส้นผ่านศูนย์กลางของระยะการชน ถ้าสมมติว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุลหนึ่งเพิ่มขึ้นเป็น $2d_c$ ขณะที่โมเลกุลอื่นๆขนาดลดลงเป็นจุดแล้ว ระยะปลอดการชนที่เคลื่อนไปจะมีรูปแบบเป็นปริมาตรทรงกระบอกคือ $\pi d_c^2 \lambda_{mfp}$ การชนกันของอนุภาคครั้งหนึ่งจะเกิดขึ้นภายใต้เงื่อนไข $\pi d_c^2 \lambda_{mfp} n = 1$ ความถี่ของการชนสำหรับโมเลกุล 1 ตัวในก๊าซ จึงหาได้จาก

$$Z = \pi\sqrt{2}nd_c\bar{v} \quad (2.41)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นระยะปลอดการชน (λ_{mfp})

$$\lambda_{mfp} = \frac{1}{\pi \sqrt{2} n d_c^2} \quad (2.42)$$

ถ้าสำหรับบรรยากาศที่อุณหภูมิห้อง และความดันบรรยากาศ λ_{mfp} จะมีค่าประมาณ 500 อังสตรอม สมมติให้ d_c มีค่าประมาณ 5 อังสตรอม เวลาที่โมเลกุลใช้ในการปะทะกันนั้นสามารถหาได้จาก λ_{mfp} / v และภายใต้เงื่อนไขที่กล่าวมาจะทำให้เกิดการชนกันประมาณ 10^{10} ครั้งต่อวินาที ดังนั้น λ_{mfp} จะมีค่าเป็น

$$\lambda_{mfp} = 5 \times 10^{-3} / P$$

เมื่อ λ_{mfp} มีหน่วยเป็นเซนติเมตรและความดัน(P)มีหน่วยเป็นทอร์ ที่ความดัน 10^{-3} ทอร์ λ_{mfp} จะมีขนาดใหญ่ การชนของโมเลกุลจะเกิดที่ผนังของภาชนะสุญญากาศเท่านั้น

2.4.1.3 การชนของก๊าซบนพื้นผิว (gas impingement on surfaces)

ฟลักซ์การชนของก๊าซ (Φ) วัดได้จากความถี่ของโมเลกุลที่ชนพื้นผิวในแนวตั้งฉากต่อพื้นที่ต่อเวลาหาได้จาก

$$\Phi = \frac{1}{4} n \bar{v} \quad (2.43)$$

จากสมการที่ (2.40) จะได้

$$\frac{\Phi}{N_A} = \frac{P}{(2\pi MRT)^{1/2}} \quad \text{โมลต่อตารางเซนติเมตร-วินาที} \quad (2.44)$$

หรือ

$$\Phi = 3.513 \times 10^{22} \frac{P}{(MT)^{1/2}} \quad \text{โมลต่อตารางเซนติเมตร-วินาที} \quad (2.45)$$

เมื่อความดัน(P) อยู่ในหน่วยทอร์

ปริมาตรของการไหลต่อวินาที (volume flow per second; \dot{v}) สามารถหาได้จาก $(\Phi A / n)$ เมื่อคิดเวลาเป็น 1 วินาที จากสมการที่(2.40) และ สมการที่ (2.43) จะได้

$$\dot{v} = 3.64 \times 10^3 (T / M)^{1/2} A \quad \text{ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวินาที} \quad (2.46)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 การลำเลียงก๊าซและการปั๊ม (gas transport and pumping)

2.4.2.1 ระบบการไหลของก๊าซ (gas flow regimes)

เมื่อเชื่อมต่อภาชนะสุญญากาศเข้ากับปั๊มแล้วทำการดูดก๊าซออก จะทำให้ความดันในภาชนะสุญญากาศเกิดความแตกต่างกัน ส่งผลให้เกิดการไหลของก๊าซจากภาชนะสุญญากาศเข้าสู่ปั๊มที่ระดับความดันเป็นสุญญากาศสูง (high-vacuum) ความหนาแน่นของก๊าซจะมีน้อยจะทำให้เกิดการไหลในระดับโมเลกุล (molecular flow) โดยในการระเหยสารในสุญญากาศสูง (high-vacuum evaporator) และอุปกรณ์ที่ทำการวิเคราะห์ เช่น เครื่องออเจอร์อิเล็กตรอนสเปกโตรมิเตอร์ (auger electron spectrometer) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (electron microscope) ล้วนทำงานในระบบการไหลในระดับโมเลกุลทั้งสิ้น (molecular-flow regime) หมายความว่าระยะการชนกันของโมเลกุลนั้นกว้างมากเมื่อเปรียบเทียบกับระบบทฤษฎีจลน์ของก๊าซ จะช่วยทำให้มองเห็นภาพการเคลื่อนไหวของโมเลกุลก๊าซอย่างแม่นยำ ภายใต้เงื่อนไขดังกล่าว ที่ความดันสูงระยะการชนกันของโมเลกุลจะลดลง ทำให้การชนของโมเลกุลนั้นจะเกิดจากการชนกันเองมากกว่ากันชนที่ผนังของภาชนะ ในกรณีนี้จะเรียกว่าระบบการไหลของก๊าซแบบหนืด (viscous-flow regime)

ข้อแตกต่างของการไหลดูได้จากตัวเลขคนูเดเซน (Knudsen number ; Kn) หาได้จากอัตราส่วนระหว่าง ระยะปลอดการชน (λ_{mfp}) ของก๊าซและลักษณะเฉพาะของระบบ เช่น เส้นผ่านศูนย์กลางของภาชนะ หรือ ท่อ (d_p) นั่นคือ $Kn = \lambda_{mfp} / d_p$ จะได้ว่า

การไหลในระดับโมเลกุล (molecular flow)	$Kn > 1$	
การไหลในระดับกลาง (intermediate flow)	$1 > Kn > 0.01$	
การไหลแบบหนืด (viscous flow)	$Kn < 0.01$	(2.47)

2.4.2.2 การนำก๊าซ (conductance; C)

จากรูปที่ 2.29 และ 2.30 ซึ่งแสดงแสดงส่วนประกอบของ ภาชนะสุญญากาศ-ท่อ-ปั๊ม และค่าของการนำก๊าซในท่อรูปร่างต่างๆ เมื่อพิจารณาการไหลของโมเลกุลก๊าซผ่านท่อที่มีพื้นที่ A จากบริเวณที่มีความดัน P_1 ไปยังบริเวณที่มีความดัน P_2 จะได้ว่า

$$Q = C(P_1 - P_2) \quad (2.48)$$

เมื่อ Q คือ อัตราขับก๊าซ (gas throughput) มีหน่วยเป็น ความดันคูณปริมาตรต่อวินาทีเช่น ทอร์-ลิตรต่อวินาที C เป็นค่าคงที่ของการนำก๊าซมีหน่วยเป็น ลิตรต่อวินาที (liters/s) และเนื่องจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Q = Pv \quad (2.49)$$

เมื่อ v คือ ปริมาตรของการไหลต่อวินาที ดังนั้นจากสมการที่ (2.46) จะได้ว่า

$$C = 3.64(T/M)^{1/2} A \quad \text{หรือ } 11.7A \text{ ลิตรต่อวินาที}$$

เมื่ออุณหภูมิมีค่าเป็น 298 เคลวิน(25 องศาเซลเซียส)

หากนำท่อมาเชื่อมต่อกันแบบอนุกรม ค่าการนำก๊าซของระบบ (C_{sys}) จะสามารถหาได้จากความสัมพันธ์

$$\frac{1}{C_{sys}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots \quad (2.50)$$

ในทำนองเดียวกันเมื่อเชื่อมต่อกันแบบขนาน

$$C_{sys} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots \quad (2.51)$$

2.4.2.3 อัตราเร็วของการปั๊ม(pumping speed;S)

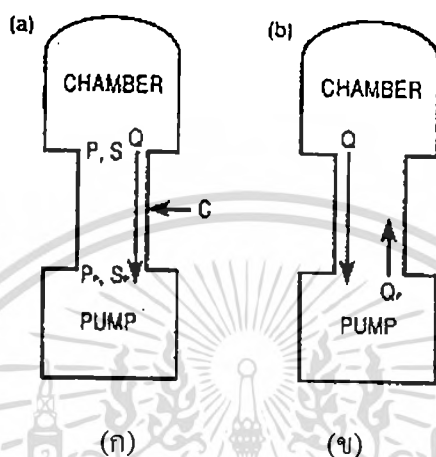
การปั๊มเป็นกระบวนการนำเอาโมเลกุลของก๊าซออกจากระบบ ผ่านการทำงานของปั๊มอัตราเร็วในการปั๊ม(S) คือ ปริมาตรของก๊าซที่ไหลผ่านระนาบของท่อต่อหน่วยเวลา เมื่อความดันที่ช่องให้ ก๊าซเข้า (pump inlet) มีค่าเป็น P ดังนั้น

$$S = q/P \quad (2.52)$$

โดยค่าของ q สามารถหาได้จากระนาบใดๆในระบบ P และ S เป็นค่าที่อ้างอิงจากปริมาณที่วัดได้จากท่อของปั๊ม แม้ว่าค่านำก๊าซและอัตราเร็วของปั๊ม จะมีหน่วยเหมือนกัน และบางครั้งอาจจะมีค่าเท่ากัน แต่ก็มีควมหมายในทางกายภาพที่แตกต่างกัน ค่าการนำก๊าซนั้นเป็นตัวบอกถึงส่วนประกอบของรูปร่างท่อจากด้านหนึ่ง ไปอีกด้านหนึ่ง ซึ่งมีค่าความดันแตกต่างกัน ส่วนความเร็วในการปั๊มจะอ้างถึงระนาบซึ่งพิจารณาในส่วนของปั๊ม ในการประยุกต์แนวคิดนี้พิจารณาที่นำก๊าซ(C) ที่เชื่อมต่ออยู่กับภาชนะสุญญากาศที่ความดัน P และปั๊มที่ความดัน P_p ดังรูปที่ 2.30 จาก $q = C(P-P_p)$ แทนค่า q จากสมการที่ (2.53) จะได้

$$S = \frac{S_p}{1 + S_p / C} \quad (2.53)$$

โดยที่ S_p คือ ความเร็วในบริเวณช่องให้ก๊าซเข้า และ S คือ ความเร็วของการบีบที่วัดจากภาชนะสุญญากาศ ถ้า $C = S_p$ แล้วจะทำให้ความเร็วที่ภาชนะสุญญากาศจะมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของความเร็วบีบ




รูปที่ 2.29 แสดงส่วนประกอบของ ภาชนะสุญญากาศ-ท่อ-ปั๊ม

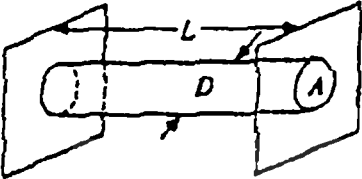
(ก) ผนังภาชนะไม่มีการจับก๊าซ

(ข) ผนังภาชนะมีการจับก๊าซ

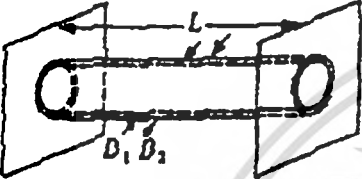
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




$$C = 3.64A \left(\frac{T}{M} \right)^{1/2} = 11.7A$$



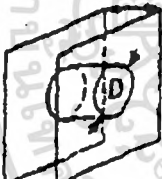
$$C = 6.18 \frac{A^2 \left(\frac{T}{M} \right)^{1/2}}{DL} = 12.2 \frac{D^3}{L}$$




$$C = 3.81 \frac{D^3 \left(\frac{T}{M} \right)^{1/2}}{L} = 12.2 \frac{(D_2 - D_1)^2 (D_2 + D_1)}{L}$$



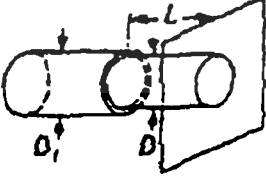
$$C = 9.70 \frac{b^2 c^2 \left(\frac{T}{M} \right)^{1/2}}{(b+c)L} = 31.1 \frac{b^2 c^2}{(b+c)L}$$



$$C = 2.85 D^2 \left(\frac{T}{M} \right)^{1/2} \left(\frac{1}{1 + 3L/4D} \right) = 9.14 \frac{D^2}{1 + 3L/4D}$$



$$C = 3.64 \left(\frac{T}{M} \right)^{1/2} \left(\frac{A}{1 - (A/A_0)} \right) = \frac{11.7A_0}{1 - A_0/A_1}$$



$$C = 3.81 \frac{D^3 \left(\frac{T}{M} \right)^{1/2}}{L} \left(\frac{1}{1 + \frac{4D}{3L} \left(1 - \frac{D^2}{D_1^2} \right)} \right) = \frac{12.2D^3}{L \left[1 + \frac{4D}{3L} \left(1 - \frac{D^2}{D_1^2} \right) \right]}$$

รูปที่ 2.30 ค่าของการนำก๊าซในท่อรูปร่างต่างๆที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส มีหน่วยเป็นลิตรต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3 ปั๊มสุญญากาศ(vacuum pump)

ปั๊มสุญญากาศสามารถแบ่งออกได้สองส่วน คือปั๊มแบบเคลื่อนย้ายก๊าซ (gas-transfer pumps) และปั๊มแบบกักเก็บก๊าซ (entrapment pumps) โดย ปั๊มแบบเคลื่อนย้ายก๊าซนี้จะนำเอาโมเลกุลของก๊าซออกจากปริมาตรของปั๊มและนำเข้าสู่ขั้นตอนการอัดให้มีปริมาตรเล็กลงก่อนขับออกไป ส่วนปั๊มแบบเก็บกักก๊าซนั้นจะกักเก็บโมเลกุลของก๊าซเอาไว้ที่ผิวภายในปั๊ม โดยการควบแน่นให้เป็นของเหลว ในที่นี้จะกล่าวถึงปั๊มสุญญากาศแบบเคลื่อนย้ายก๊าซ ซึ่งแบ่งย่อยออกได้อีกสองประเภท คือ

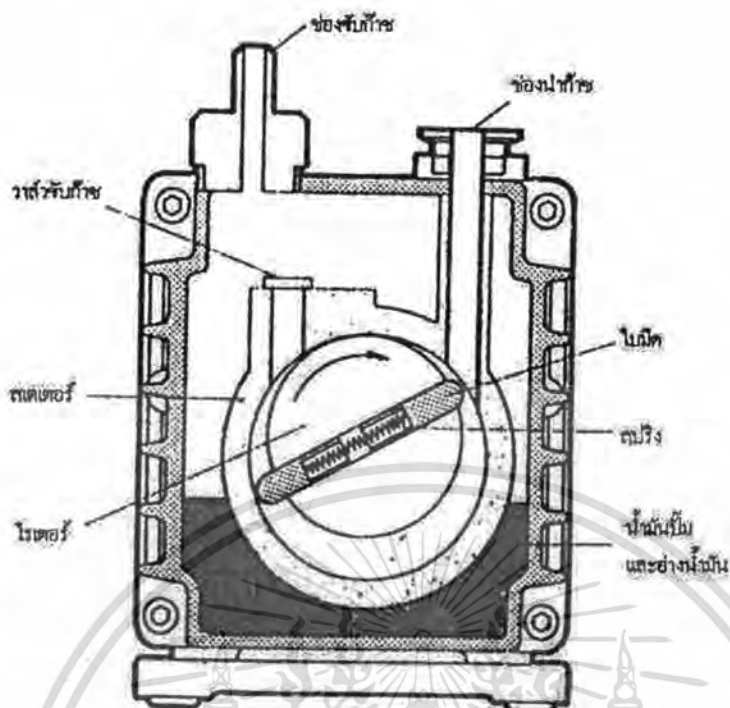
1. ปั๊มที่เคลื่อนย้ายก๊าซโดยการแทนที่(positive displacement pumps) โดยก๊าซจะถูกแยกออก (isolate) จากช่องนำอากาศเข้า (inlet port) แล้วเคลื่อนเข้าสู่ช่องอากาศออก(outlet port) และจะมีการอัดให้มีปริมาตรของก๊าซเล็กลงก่อนขับออกไป ตัวอย่างของปั๊มประเภทนี้ เช่น ปั๊มกลโรตารี(rotary mechanical pumps)
2. ไคเนติกปั๊ม(kinetic pumps) โดยปั๊มจะทำงานโดยให้โมเมนตัมแก่โมเลกุลก๊าซในลักษณะ ที่ทำให้ก๊าซถูกเคลื่อนย้ายจากช่องนำอากาศเข้า ไปยังช่องนำอากาศออกของปั๊ม อย่างต่อเนื่อง ตัวอย่างของปั๊มประเภทนี้ เช่น ปั๊มไอฟุ้งกระจาย (diffusion pumps)

2.4.3.1 ปั๊มกลโรตารี (rotary mechanical pump)

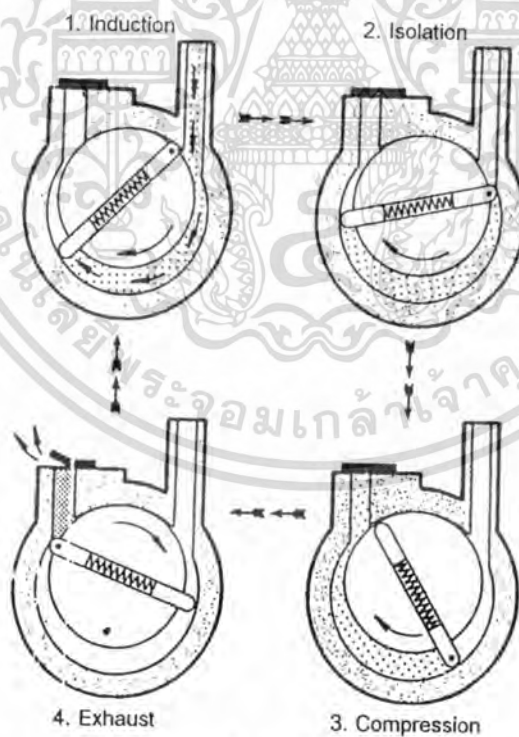
ปั๊มกลเป็นปั๊มที่ใช้ในการสร้างสุญญากาศขั้นต้น สามารถสร้างสุญญากาศได้ประมาณ 10^{-3} ทอร์แบ่งออกได้สองประเภท คือ

2.4.3.1.1 ปั๊มกลโรตารีแบบแวน(rotary vane pumps)

ปั๊มประกอบด้วยภาชนะทำด้วยโลหะเป็นรูปทรงกระบอกกลวง เรียกว่า สเตเตอร์(stator) ภายในทรงกระบอกกลวงมีแท่งโลหะรูปทรงกระบอกหมุนได้โดยมอเตอร์ไฟฟ้า เรียกว่า โรเตอร์(rotor) แกนของโรเตอร์อยู่ในตำแหน่งที่ทำให้แต่ละผิวของสเตเตอร์พอดี มีช่องห่างเพียง 0.001 นิ้ว โรเตอร์จะถูกเจาะเป็นร่องเพื่อติดแวน(vane)สองอัน โดยแวนสองอันนี้จะถูกคั่นด้วยสปริงให้แตะกับผิวสเตเตอร์ ตลอดเวลาความเร็วของปั๊มชนิดนี้ (S_p) มีค่าอยู่ในช่วง 10 ถึง 200 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง(หรือ 2.8 ถึง 55 ลิตรต่อวินาที) โครงสร้างของปั๊มแสดงได้ดังรูปที่ 2.31 และรูปที่ 2.32



รูปที่ 2.31 แสดงโครงสร้างของโรตารีปั๊มชนิดแวน



รูปที่ 2.32 แสดงจังหวะการทำงานสี่จังหวะของปั๊มชนิดแวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำงานของปั๊มกลโรตารีชนิดแวน

1. โรเตอร์จะหมุนตามเข็มนาฬิกา ทำให้ก๊าซถูกดูดออกจากภาชนะสุญญากาศเข้าสู่ปั๊มทางช่องอากาศเข้า เรียกว่า การดูดอากาศเข้า (induction)
2. โรเตอร์จะหมุนต่อไป ทำให้ก๊าซถูกกวนพาให้เคลื่อนที่โดยการแทนที่ (isolation)
3. เมื่อโรเตอร์หมุนไปเกือบ 180 องศา ก๊าซจะถูกอัดจนมีปริมาตรเล็กลง (compression) ทำให้ความดันของก๊าซที่ตำแหน่งนี้เพิ่มขึ้น เหนือกว่าความดันบรรยากาศภายนอก
4. เนื่องจากความดันของก๊าซภายในปั๊มสูงกว่าบรรยากาศภายนอก ดังนั้นก๊าซจะถูกขับออกไป (exhaust) แล้วเริ่มต้นขบวนการแรกอีกครั้งหนึ่งเป็นเช่นนี้เรื่อยไป

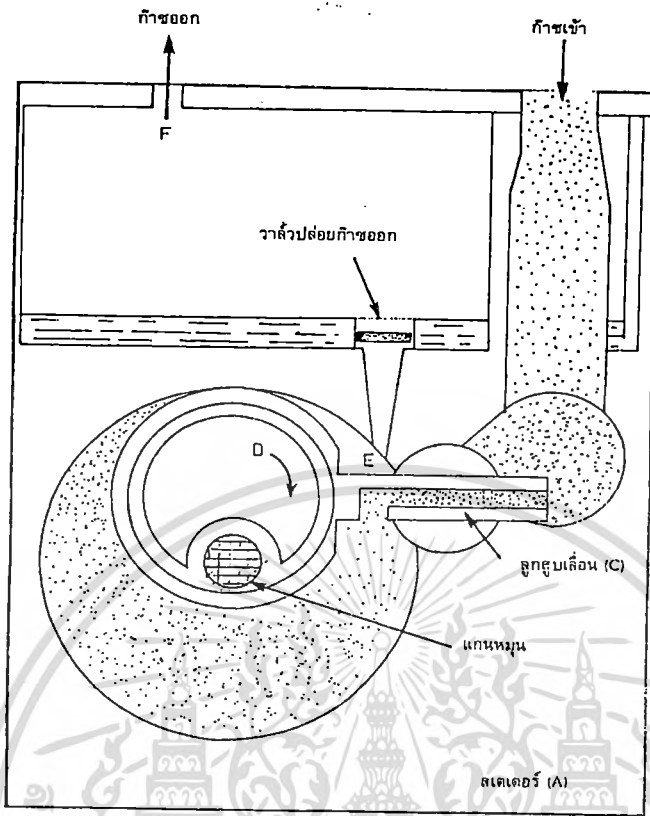
ประสิทธิภาพของปั๊มขึ้นอยู่กับ

1. ผิวของสเตเตอร์ และ โรเตอร์จะต้องสะอาด มันเรียบและที่ซึลด้านบนจะต้องไม่สึกกร่อนง่าย
2. การซีลระหว่างสเตเตอร์กับ โรเตอร์ อาศัยน้ำมันเป็นตัวซีลหล่อลื่นและระบายความร้อน
3. ก๊าซที่อัดเพื่อขับออกจากปั๊มอาจมีไอน้ำปะปนอยู่ ไอน้ำหรือ ไข่ของเหลวนี้อาจจะละลายที่ความดันสูง จึงไม่ถูกขับออกโดยง่าย แต่จะถูกนำกลับเข้าไปในห้องสเตเตอร์ได้อีก ทำให้ประสิทธิภาพปั๊ม ลดลง วิธีแก้ไขให้ใช้ก๊าซบัลลาสต์ (gas ballast) ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป
4. การรั่วของก๊าซที่ถูกอัดที่ซึลตอนบน และซีลระหว่างแวนกับสเตเตอร์

2.4.3.1.2 ปั๊มกลโรตารีแบบลูกสูบ (rotary piston pump)

ปั๊มกลโรตารีแบบลูกสูบจะมีความเร็วในการปั๊มสูงกว่าปั๊มแบบแวน คือมีค่าความเร็วในการปั๊ม (S_p) ประมาณ 30 ถึง 1500 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง (หรือ 8.3 ถึง 416 ลิตรต่อวินาที) ลักษณะภายในของปั๊มแสดงดังรูปที่ 2.33 โดยปั๊มกลโรตารีแบบลูกสูบนี้นี้ ประกอบด้วยสเตเตอร์ (A) ซึ่งมีช่องให้ก๊าซเข้าและช่องขับก๊าซออก แกนเสียบโรตารี (rotary plunger) จะยึดอยู่เหนือแกน B และจะต่อกับวาล์วลูกสูบเลื่อน C ได้ ลูกสูบหรือแกนเสียบประกอบด้วยสองส่วน ส่วนล่างกลมภายใน D ต่อกับแกน และกล่องทรงกระบอก E ซึ่งจะมีขนาดพอเหมาะเข้ากับ D เมื่อโรเตอร์หมุนไปเรื่อยๆ สเตเตอร์จะเกิดการเคลื่อนไหวยกกลับไปกลับมา ทำให้วาล์ว C เลื่อนเปิดให้ก๊าซไหลเข้ามาอยู่ในช่องสเตเตอร์ เมื่อแกนเสียบเลื่อนวาล์วให้ปิด ปั๊มจะถูกตัดขาดจากภาชนะสุญญากาศและก๊าซภายในสเตเตอร์จะถูกอัดให้ออกทางวาล์ว F

ประสิทธิภาพของปั๊มจะดีถ้าผิวภายในเรียบ สะอาดและใช้น้ำมันเป็นตัวซีลและใช้ก๊าซบัลลาสต์ช่วยในการขับน้ำและไข่ของเหลวที่ละลายน้ำอยู่ในน้ำมันออกจากตัวปั๊ม

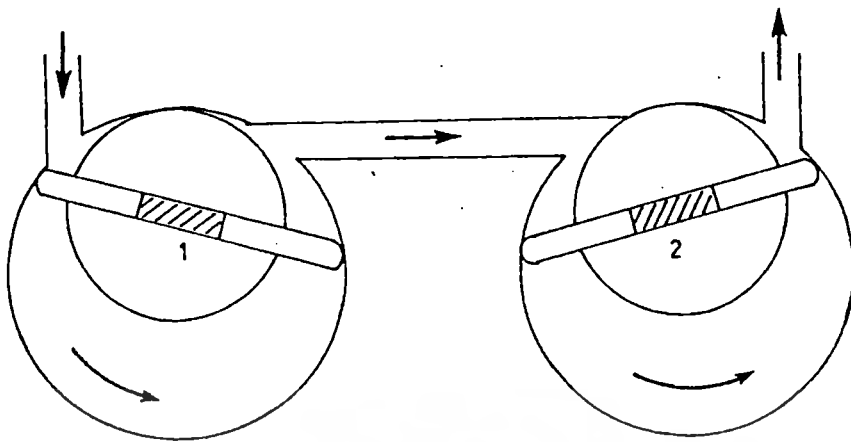


รูปที่ 2.33 แสดงลักษณะภายในของปั๊มกลโรตารีแบบลูกสูบ

2.4.3.1.3 จังหวะของปั๊ม(stages)

ปั๊มกลที่มีโรเตอร์ตัวเดียวหมุนอยู่ในสเตเตอร์ เรียกว่า ปั๊มจังหวะเดียว (single stage pumps) จะเห็นว่าก๊าซที่ถูกอัดด้านช่องขับก๊าซ อาจรั่วผ่านซีลกลับเข้าไปด้านความดันต่ำที่ต่อกับภาชนะสุญญากาศได้อีก จึงไม่อาจใช้ปั๊มนี้อัดความดันได้ดีนัก เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน ปั๊มแบบนี้จะมีสเตเตอร์สองตัวต่อกัน ดังรูปที่ 2.34 และโรเตอร์สองตัวจะหมุนโดยใช้แกนร่วมกัน ก๊าซที่ถูกดึงออกจากภาชนะสุญญากาศ จะถูกอัดให้มีความดันปานกลางโดยใช้จังหวะที่หนึ่ง จากนั้นจังหวะที่สองจะอัดก๊าซให้มีความดันบรรยากาศเพื่อขับออกจากตัวปั๊ม น้ำหรือไอของของเหลวที่ละลายอยู่ในน้ำมันปั๊มในจังหวะแรกจะถูกขจัดออกโดยจังหวะที่สอง ก่อนที่มันจะไหลกลับไปยังจังหวะที่หนึ่ง โดยปั๊มกลสองจังหวะนี้สามารถทำสุญญากาศได้ถึง 10^{-4} ทอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.34 ปั๊มกลสองจังหวะ(two-stage pumps)

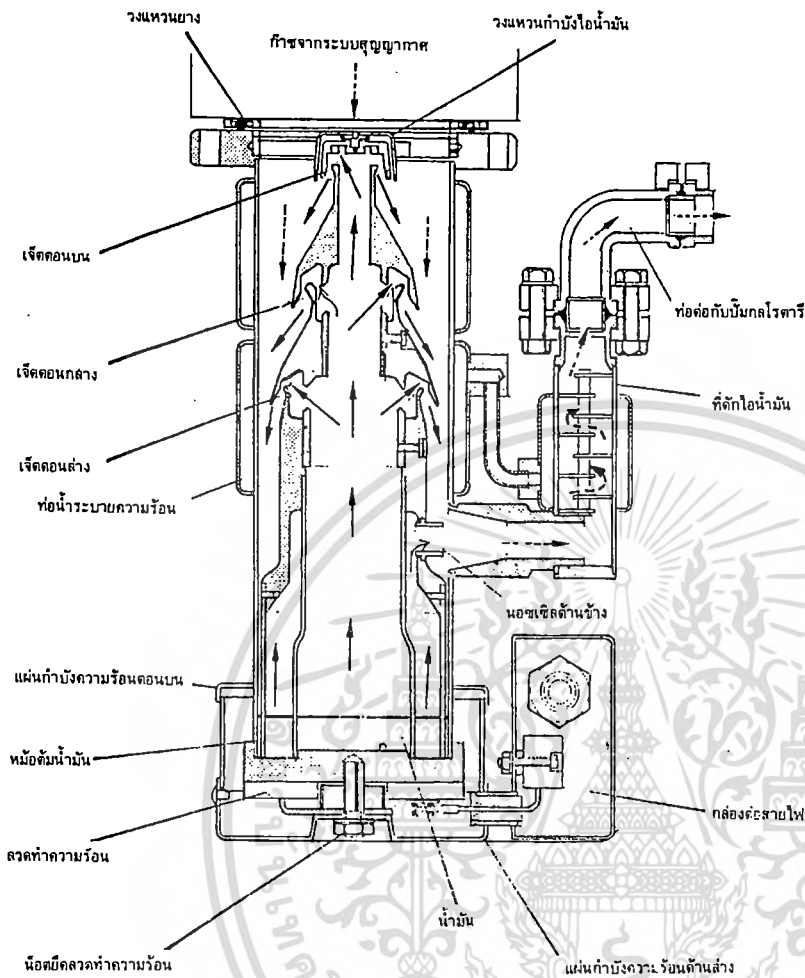
2.4.3.1.4 ก๊าซบัลลาสต์ (gas ballast)

ก๊าซบัลลาสต์ คือ วิธีการจัดไอน้ำหรือไอของของเหลวที่ละลายอยู่ในน้ำมันปั๊ม โดยการเพิ่มความดันก๊าซรวมให้สูงกว่าความดันไอย่อยของน้ำหรือไอของของเหลว ซึ่งทำได้โดยเปิดวาล์วให้อากาศภายนอกไหลเข้าไปในส่วนของสเตเตอร์ที่เป็นช่วงอัดของปั๊ม อากาศจะผสมกับไอของของเหลว ที่กำลังถูกอัดจะมีความดันเท่ากับความดันบรรยากาศ ความดันย่อยของของเหลวจะลดลง เมื่อความดันย่อยลดลงไอของของเหลวจะไม่ควบแน่นในน้ำมัน แต่จะถูกขับออกไปพร้อมกับก๊าซและอากาศ

2.4.3.2 ปั๊มไอฟุ้งกระจาย(diffusion pumps)

เป็นปั๊มสุญญากาศสูงสามารถสร้างสุญญากาศได้ถึงระดับ 10^{-10} ทอร์ ปั๊มไอฟุ้งกระจายนี้จะเริ่มทำงานได้ที่ระดับความดันประมาณ 10^{-2} ถึง 10^{-3} ทอร์ ดังนั้นจึงนิยมใช้ปั๊มกลโรตารีทำงานควบคู่กันไปด้วย หลักการทำงานของปั๊มชนิดนี้คือ น้ำมันซึ่งอยู่ที่ก้นท่อเหล็กรูปทรงกระบอก จะถูกเผาให้ร้อนด้วยขดลวดไฟฟ้าจนเดือด น้ำมันหรือปรอทจะระเหยกลายเป็นไอลอยตัวขึ้นไปตามช่องกลวง ดังรูปที่ 2.35 ไอน้ำมันจะปะทะกับช่องเจ็ตที่ระดับต่างๆกัน ถูกบังคับให้เปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ ประกอบกับ ส่วนบนของท่อทรงกระบอกจะถูกระบายความร้อนด้วยน้ำ เมื่อไอน้ำมันสูญเสียพลังงานความร้อน ทำให้พลังงานจลน์ลดลงมันจะตกลงมา เกิดการปะทะกับ โมเลกุลของก๊าซที่ผิวตอนบน ทำให้โมเลกุลของก๊าซเคลื่อนที่ในทิศทางจากบนลงล่าง เสมือนว่าหยดไอน้ำมันปริมาณมาก กวาดโมเลกุลของก๊าซ ลงมาเป็นจังหวะพร้อมๆกัน โมเลกุลของก๊าซที่มาออกอยู่ด้านล่างจะทำให้ความดันของก๊าซส่วนล่าง มากกว่าส่วนบน และปั๊มกลโรตารีจะดึงออกจากปั๊มไอฟุ้งกระจาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.35 ส่วนประกอบภายในของปั๊มไอฟุ้งกระจาย

ในรูปที่ 2.35 เป็นปั๊มไอฟุ้งกระจายที่มีช่องเจ็ทสามชั้น(3 stages) ด้านบนต่อกับระบบสุญญากาศ โดยมีวงแหวน(guard ring) กำบังไม่ให้ไอน้ำเคลื่อนเข้าสู่ระบบสุญญากาศเกิดปรากฏการณ์ไหลย้อนกลับ(back streaming) จึงต้องมีแผ่นตะแกรง(baffle)คอดักไอน้ำเอาไว้ ก๊าซจะถูก ปั๊มออกทางข้อต่อท้าย (backing connection) กับปั๊มกลโรตารี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.4 กระบวนการเตรียมฟิล์มบางด้วยการระเหยสาร(thin-film evaporation processes)

การเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการระเหยสาร จะทำกันในสุญญากาศที่ระดับความดันประมาณ 10^{-5} ถึง 10^{-7} ทอร์ วัตถุประสงค์ของการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีนี้ คือ การควบคุมการเคลื่อนย้ายอะตอมจากแหล่งกำเนิดความร้อน ไปยังแผ่นรองรับ(substrate)ที่ห่างออกไป แล้วทับถมกันเกิดเป็นฟิล์มบาง วิธีการเตรียมฟิล์มบางด้วยการระเหยสารนั้นมีด้วยกันหลายวิธี แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงเพียง การเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อน (thermal evaporation)

2.4.4.1 อัตราการระเหยสาร (the physics and chemistry of evaporation)

จากการทดลองของเฮิร์ตซและนูดเซน(Hertz and Knudsen) อัตราการไหลของอะตอมหรือ โมเลกุล ในสุญญากาศ จากแหล่งกำเนิดความร้อน(heat source) คือ

$$\Phi_e = \frac{3.513 * 10^{22}}{(MT)^{1/2}} P_e \quad \text{โมเลกุลต่อตารางเซนติเมตร-วินาที} \quad (2.54)$$

โดยที่ Φ_e คือ ฟลักซ์ของจำนวนอะตอมหรือโมเลกุลของสารที่ระเหยต่อหน่วยพื้นที่ต่อเวลา

P_e คือ ความดันสมดุล(equilibrium pressure)

M คือ มวลโมเลกุล

T คือ อุณหภูมิในหน่วยเคลวิน

เมื่อ P_e มีหน่วยเป็นทอร์ อัตราการระเหยมวลสาร (mass evaporation rate) สามารถหาได้จาก

$$\Gamma_e = 5.84 * 10^{-2} (M/T)^{1/2} P_e \quad \text{กรัมต่อตารางเซนติเมตร-วินาที} \quad (2.55)$$

โดยที่ Γ_e คือ มวลของอัตราการระเหยสาร

ที่ความดัน 10^{-2} ทอร์ค่าของ Γ_e ในธาตุจำนวนมากจะมีค่าประมาณ 10^{-4} กรัมต่อตารางเซนติเมตร-วินาที ดังนั้นสิ่งที่มีอิทธิพลต่ออัตราการระเหยสาร คือ อุณหภูมิ เพราะจะมีผลกระทบมากต่อความดันสมดุล

2.4.4.2 ความดันไอของธาตุ(vapor pressure of the elements)

ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ และความดันไอ แสดงได้ดังสมการ

$$\frac{dP}{dT} = \frac{\Delta H(T)}{T\Delta V} \quad (2.56)$$

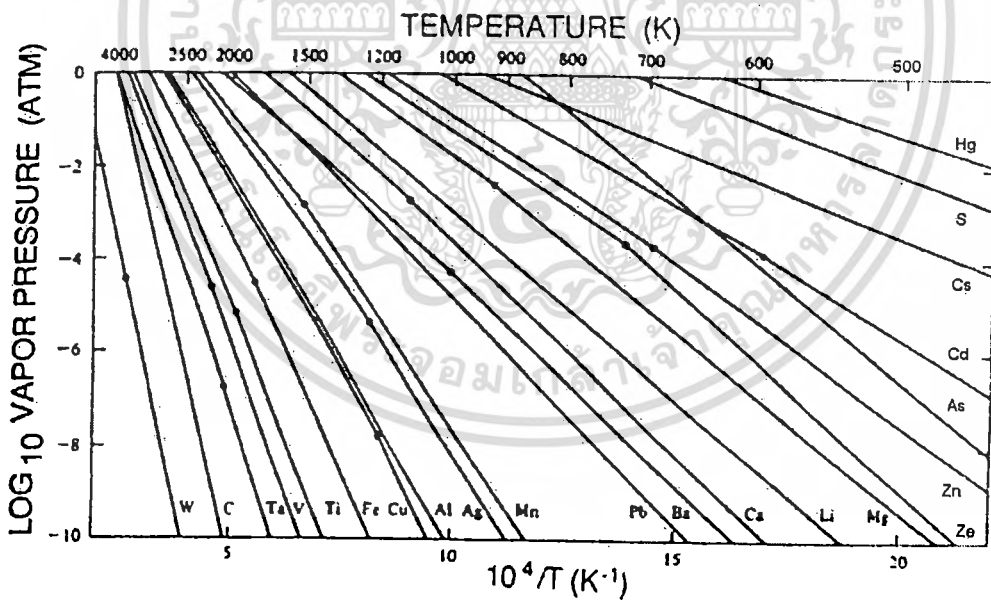
ถ้าให้ ΔV มีค่าเท่ากับปริมาตรของไอ (V_v) และก๊าซนี้เป็นก๊าซในอุดมคติแล้ว V_v จะมีค่าเป็น RT/P ดังนั้น เขียนสมการที่ (2.56) ใหม่ได้เป็น

$$\frac{dP}{dT} = \frac{P\Delta H(T)}{RT^2} \quad (2.57)$$

จากการประมาณค่า $\Delta H(T)$ มีค่าเท่ากับ ΔH_e (ความร้อนของสารในการระเหย) ในกรณีนี้ จะได้

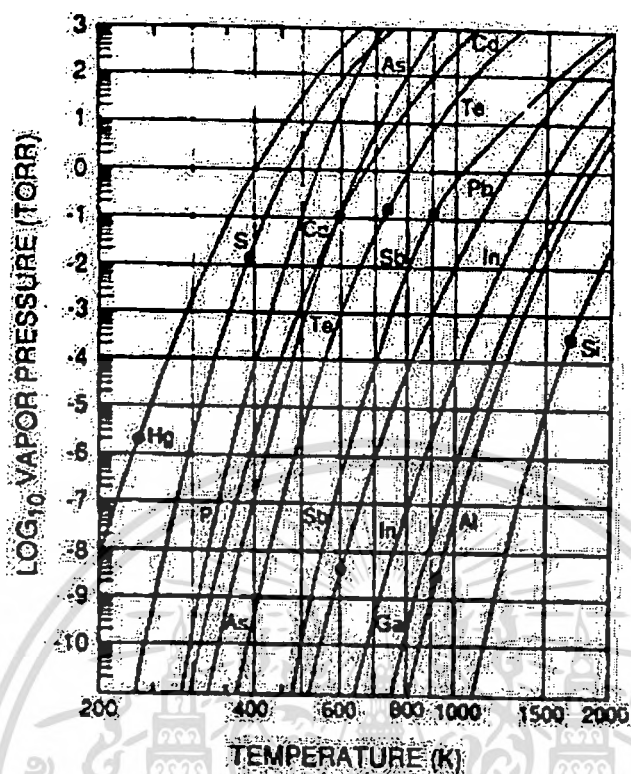
$$\ln P \cong -\frac{\Delta H_e}{RT} + I \quad \text{หรือ} \quad P = P_0 \exp -\frac{\Delta H_e}{RT} \quad (2.58)$$

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



รูปที่ 2.36 กราฟแสดงค่าความดันไอของธาตุ โดยจุดต่างๆจะสัมพันธ์กับ จุดหลอมเหลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.37 กราฟแสดงค่าความดันไอของธาตุในสารกึ่งตัวนำโดยจุดต่างๆจะสัมพันธ์กับจุดหลอมเหลว

2.4.4.3 แหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้ในการระเหยสารด้วยไฟฟ้า (electrically heated evaporation source)

ในการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีระเหยสารด้วยความร้อน จะต้องให้ความร้อนแก่สารกึ่งตัวนำที่ต้องการนำมาเคลือบผิวแผ่นรองรับ โดยทั่วไปแล้วจะใช้ตัวต้านทานหรือขดลวดเหนี่ยวนำ เป็นแหล่งกำเนิด โดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าซึ่งจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่ตัวต้านทาน หรือขดลวดเหนี่ยวนำได้ แหล่งกำเนิดความร้อนมีหลายชนิด แสดงได้ดังรูปที่ 2.38 โดยสามารถจำแนกออกได้ดังนี้

2.4.4.3.1 แหล่งกำเนิดความร้อนชนิดลวดทังสเตน (tungsten wire source)

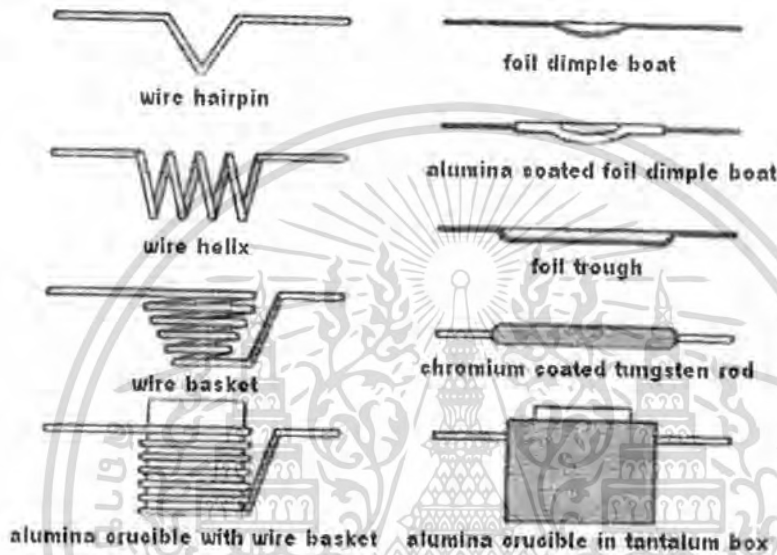
แหล่งกำเนิดความร้อนชนิดนี้จะอยู่ในรูปของขดลวดพันรอบเดียว หรือพันหลายรอบเป็นเกลียวทรงกระบอกหรือรูปโคน โดยขดลวดเกลียวทรงกระบอกจะใช้สำหรับโลหะที่หลอมละลายได้เร็ว ส่วนขดลวดรูปโคนจะใช้ได้ดีกับโลหะที่หลอมละลายช้า ขดลวดทังสเตนสามารถทำงานได้จนกระทั่งอุณหภูมิ 2200 เคลวิน เกินกว่านี้ประสิทธิภาพจะลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.4.3.2 แหล่งกำเนิดความร้อนชนิดแผ่นโลหะคงรูป (refractory metal sheet source)

แหล่งกำเนิดความร้อนชนิดแผ่นโลหะคงรูป เช่น ทังสเตน, แทนทาลัม และ โมลิบดีนัม จะเหมือนกับอุปกรณ์ที่เป็นขดลวด คือ มีความต้านทานในตัวเอง และให้ความร้อนที่ค่าแรงดันต่ำ แต่กระแสสูง แหล่งกำเนิดความร้อนเหล่านี้จะถูกสร้างขึ้นมาในรูปร่างต่างๆกัน ดังรูปที่ 2.38

Resistance Heated Evaporation Sources



รูปที่ 2.38 แสดงแหล่งกำเนิดความร้อนที่ใช้ระเหยสารด้วยไฟฟ้าแบบต่างๆ

2.4.4.3.3 เตาระเหิด (sublimation furnaces)

ในการระเหย ซัลไฟด์, ซีลีไนด์ และสารประกอบออกไซด์บางชนิด จะต้องใช้เตาระเหิด อุปกรณ์ในการระเหยสารที่เป็นผงหรือผงอัดเม็ด (pellet) จะมีการใช้แผ่นตะแกรง (baffle) เพื่อหลีกเลี่ยงการกระเด็นหลุดออกมาของอนุภาค เนื่องมาจากการหมุนเวียนของก๊าซที่อัดแน่นภายในแหล่งกำเนิด เพื่อป้องกันอนุภาคไปเกาะติดกับแผ่นรองรับ ซึ่งแผ่นตะแกรงจะยอมให้โมเลกุล หรืออะตอมของสารเท่านั้นผ่านไปได้

2.4.4.3.4 เบ้าหลอม (crucible source)

แหล่งกำเนิดความร้อนชนิดนี้จะมีลักษณะเป็นถ้วยทรงกระบอก ซึ่งสร้างมาจากโบรอน ไนไตรต์, แกรไฟต์, ออกไซด์และโลหะทนความร้อนสูง เป็นต้น ด้วยจะได้รับความร้อนจากขดลวดทังสเตนซึ่งล้อมรอบอยู่โดยรอบด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.4.3.5 การประมาณค่าอุณหภูมิของแหล่งกำเนิดความร้อนชนิดตัวต้านทาน(estimating the temperature of resistance heaters) [31]

ในการออกแบบตัวกำเนิดความร้อนด้วยไฟฟ้า สำหรับระบบการระเหยสาร การประมาณค่าอุณหภูมิของขดลวดความร้อนเป็นสิ่งสำคัญ ภายใต้สมมติฐานของความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้า(P) ของแหล่งจ่ายกับอุณหภูมิของขดลวด กำลังไฟฟ้า P มีค่าเป็น I^2R หรือ V^2/R โดยที่ I, V และ R คือ กระแส, แรงดัน และความต้านทานไฟฟ้า ตามลำดับ สำหรับขดลวดความยาว L และ พื้นที่ตัดขวางเป็น A_c กำลังไฟฟ้าสามารถเขียนอยู่ในรูป

$$P = i^2 R = i^2 \rho(0) [T / T(0)]^n L / A_c \quad (2.59)$$

สมการนี้สมมติว่าค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า $\rho(T)$ ของโลหะสามารถประมาณได้จาก อุณหภูมิ T ดังความสัมพันธ์ $\rho(T) = \rho(0) [T / T(0)]^n$ โดยที่ $\rho(0)$ คือ ค่าของสภาพต้านทานที่อุณหภูมิอ้างอิง $T(0)$ และ n คือ ค่าคงที่โดยทั่วไปจะมีค่าเข้าใกล้ 1 หรือจะสามารถประมาณค่าอุณหภูมิจากกำลังไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไปแล้วทำให้ขดลวดแผ่รังสีความร้อนที่ผิว ในกรณีนี้จะเป็นไปตามกฎของ สเตฟาน-โบลซ์ทมาน (Stefan - Boltzmann law) ซึ่งแสดงได้ดังสมการ

$$P_r = \epsilon \sigma A_s [T^4 - T(0)^4] \quad (2.60)$$

โดยที่ P_r	คือ	ค่ากำลังการแผ่รังสี (radiated power)
ϵ	คือ	ค่าการปล่อยพลังงานรังสีจากผิวหน้า
σ	คือ	ค่าคงที่ของสเตฟาน = $5.67 \cdot 10^{-8}$ วัตต์ต่อตารางเมตร-เคลวิน ⁴
A_s	คือ	พื้นที่ผิวของขดลวด

โดยสมการที่(2.59) และ (2.60) นี้ เหมาะสำหรับขดลวดความร้อนที่มีลักษณะเป็นเส้นตรง มากกว่าแบบขด

2.4.4.4 การระเหยสารประกอบ (evaporation of compound)

เนื่องจากสารประกอบจะมีไอออนขนาดใหญ่กว่าโลหะ ดังนั้นเมื่อระเหิดกลายเป็นไอแล้ว ส่วนประกอบของไอจะต่างไปจากสารตั้งต้นที่เป็นของแข็งหรือของเหลว สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.4 เช่น สารประกอบของสารกึ่งตัวนำหมู่ II-VI ได้แก่ CdS, CdTe และ CdSe เป็นต้น เมื่อระเหยเป็นไอจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดปฏิกิริยาการแตกตัวออก (dissociation) ดังนี้ $MX_{(s)} \rightarrow M_{(g)} + \frac{1}{2} X_{2(g)}$ โดยที่ X คือ S, Se และ Te และเมื่อเกาะลงบนผิวของฐานรองรับแล้วจะทำการจัดรูปแบบใหม่เป็น $MX_{(s)}$ เหมือนเดิม เช่นเดียวกับสารตั้งต้นในการระเหย

ตารางที่ 2.4 แสดงปฏิกิริยาการระเหยสารประกอบ

ชนิดของปฏิกิริยา	ปฏิกิริยาทางเคมี	ตัวอย่าง
การระเหยโดยไม่มีการแตกตัว	$MX_{(sหรือl)} \rightarrow MX_{(g)}$	SiO, GeO, SnO, AlN, CaF ₂ , MgF ₂
การแยกส่วนประกอบ	$MX_{(s)} \rightarrow M_{(s)} + \frac{1}{2} X_{2(g)}$ $MX_{(s)} \rightarrow M_{(l)} + \frac{1}{n} X_n(g)$	Ag ₂ S, Ag ₂ Se สารกึ่งตัวนำกลุ่ม 3, 5
การระเหยโดยการแตกตัว (ก) ซาล์โคจีไนต์	$MX_{(s)} \rightarrow M_{(s)} + \frac{1}{2} X_{2(g)}$ X = S, Se, Te	CdS, CdSe, CdTe
(ข) ออกไซด์	$MO_2(s) \rightarrow MO_{(s)} + \frac{1}{2} O_2(g)$	SiO ₂ , GeO ₂ , TiO ₂ , SnO ₂ , ZrO ₂

M = โลหะ, X = อโลหะ

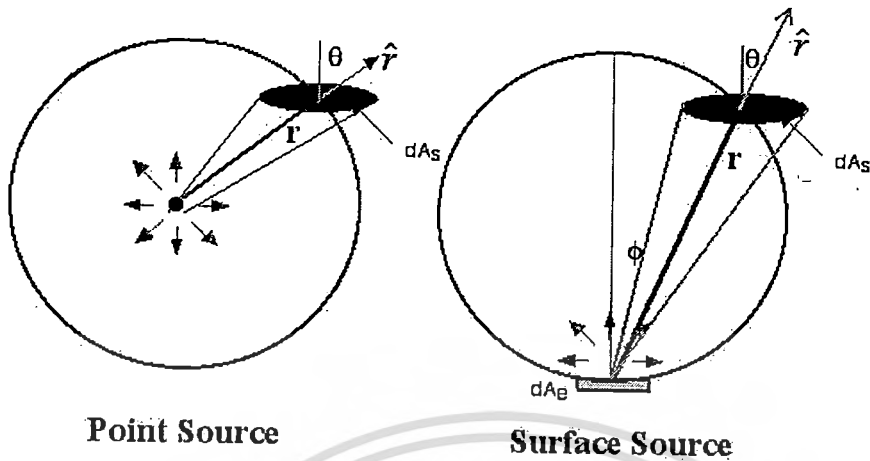
2.4.4.5 อิทธิพลของโครงสร้างเชิงเรขาคณิตต่อระบบการเตรียมฟิล์มด้วยวิธีการระเหยสาร

(deposition geometry)

การเตรียมฟิล์มบางนั้นจะต้องพิจารณาประเภทของแหล่งกำเนิดสารที่ใช้ในการระเหย รวมถึงฐานรองที่จะตอมของสารจะมากตกกระทบด้วย สมมติว่าการระเหยสารเกิดขึ้นในระบบการไหลของโมเลกุล พิจารณาการระเหยสารจากแหล่งกำเนิดแบบจุด(point source) มวลรวมของสารจากการระเหย(total evaporation mass, \bar{M}_e) สามารถวัดได้จากน้ำหนักของสารก่อนและหลังระเหย แต่เมื่อพิจารณาแหล่งกำเนิดจากพื้นผิว(surface source) มวลรวมของสารจากการระเหยจะหาได้จาก

$$\bar{M}_e = \int_0^t \int_{A_e} \frac{M}{N_A} \Phi_e dA_e dt = \int_0^t \int_{A_e} \Gamma_e dA_e dt \quad (2.61)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.39 แสดงรูปแบบการระเหยของสาร

โดยที่ A_E คือ พื้นที่ผิวของสารที่ใช้ระเหย ปริมาณของมวล $d\bar{M}_s$ ที่ตกลงบนฐานรองเป็นพื้นที่ dA_s จากรูปที่ 2.39 dA_c คือ พื้นที่ผิวของทรงกลม จะได้ว่า $dA_c = dA_s \cos \theta$ ดังนั้น จะมีค่าเป็น

$$d\bar{M}_s = dA_s \left(\frac{\bar{M}_e \cos \theta}{4\pi r^2} \right) \quad (2.62)$$

เมื่อ r คือ ระยะระหว่างแหล่งกำเนิดถึงฐานรอง

เมื่อพิจารณาการระเหยสารจากแหล่งกำเนิดที่มีผิวเรียบ มวลตกกระทบบนพื้นที่เล็กน้อย dA_c โดยทำมุมกับพื้นผิวแหล่งกำเนิด ϕ และอยู่ห่างเป็นระยะ r จะได้

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

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

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

จากการประมาณค่าอินทิเกรตข้างต้นจะพบว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น

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

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

จาก $dA_c = dA_s \cos \theta$ จะได้

$$\frac{d\bar{M}_s(\phi,\theta,r)}{dA_s} = \frac{\bar{M}_e \cos \phi \cos \theta}{\pi r^2} \quad (2.63)$$

และสามารถเขียนเป็นสมการทั่วไปได้ดังนี้ คือ

$$\frac{d\bar{M}_s(\phi,\theta,r)}{dA_s} = \bar{M}_e \frac{(n+1) \cos^n \phi \cos \theta}{2\pi r^2}, n \geq 0 \quad (2.64)$$

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

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

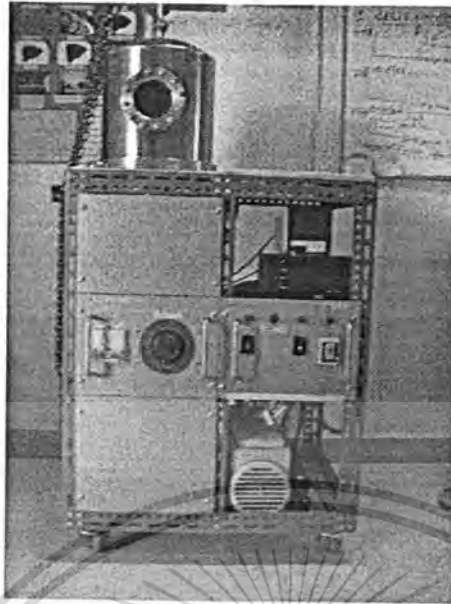
ในโครงการวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอินเดียม โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ และศึกษาคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางที่มีความหนาแตกต่างกัน เปรียบเทียบกับฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์บริสุทธิ์ที่ได้จากวิธีเดียวกัน คุณสมบัติต่างๆที่ทำการศึกษาได้แก่ การศึกษาลักษณะโครงสร้างของผลึกจุลภาคด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์, การศึกษาการส่งผ่านแสงเพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของฟิล์มบาง, คำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) จากข้อมูลของการส่งผ่าน และการหาค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้นเพื่อศึกษาการตอบสนองต่อแสงของฟิล์มบาง ตลอดจนการวัดสภาพต้านทาน ไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ เพื่อคำนวณหาค่ากัมพงศักย์ที่บริเวณขอบเขตของเกรนได้

3.1 ระบบการระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ

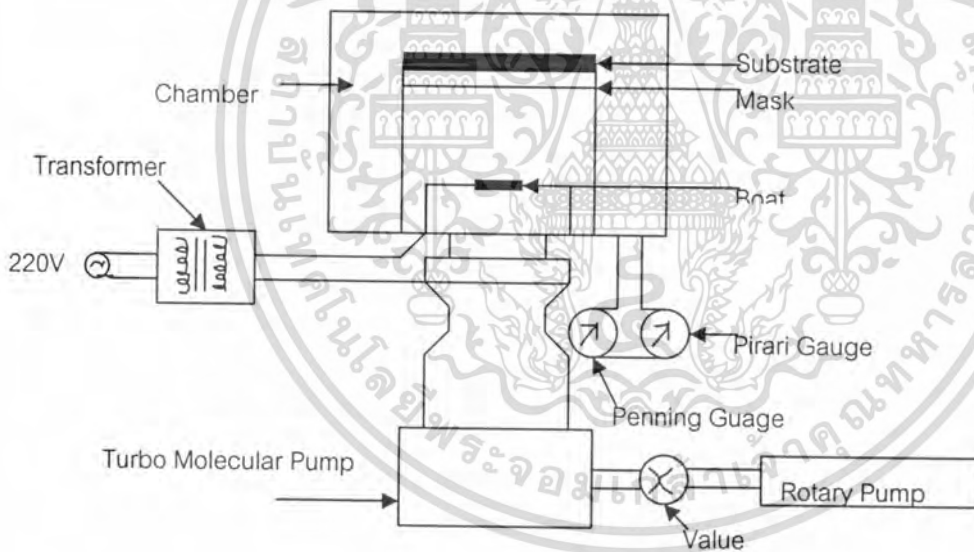
ในการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ สิ่งจำเป็นที่สุดก็คือระบบการระเหยสารซึ่งเป็นสุญญากาศ โดยระบบการระเหยสารจะประกอบไปด้วย

1. ภาชนะสุญญากาศ ทำหน้าที่เป็นห้องสุญญากาศให้แก่ระบบระเหยสารด้วยความร้อน
2. เบ้าหลอมสาร ทำหน้าที่รองรับและให้ความร้อนแก่สารที่จะใช้ทำการระเหย
3. ฐานรอง มักเป็นกระจกสไลด์ ทำหน้าที่รองรับโอของสารที่ระเหยขึ้นมาเกาะติดเป็นฟิล์มบาง
4. ชัตเตอร์ ทำหน้าที่ปิดกั้นไอระเหยของสาร
5. หม้อแปลงโวลต์ต่ำกระแสสูง ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายไฟให้แก่เบ้าหลอมสาร เพื่อใช้ในการระเหยซึ่งเป็นแบบที่ให้เอาท์พุทเป็นแรงดันไฟฟ้าต่ำ แต่เอาท์พุทที่เป็นกระแสมีค่าสูง
6. แวริแอก ทำหน้าที่ควบคุมกำลังไฟฟ้าของหม้อแปลง โวลต์ต่ำกระแสสูง
7. เกจวัดความดัน ทำหน้าที่วัดความดันภายในระบบสุญญากาศ
8. ปัมกลโรตารี ทำหน้าที่ลดความดันภายในระบบขั้นต้น สามารถลดความดันได้ต่ำสุดประมาณ 10^{-2} ถึง 10^{-3} มิลลิบาร์
9. ปัมเทอร์โบโมเลกูลาร์ ทำหน้าที่ลดความดันภายในภาชนะ โดยจะทำงานร่วมกับปัมกลโรตารี สามารถลดความดันลงมาได้ต่ำถึงประมาณ 10^{-5} มิลลิบาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 แสดงภาพถ่ายระบบการเตรียมฟิล์มบางในสุญญากาศ



รูปที่ 3.2 แสดงไดอะแกรมการวางตำแหน่งภายในภาชนะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การเตรียมแผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ [8]

ในการเตรียมแผ่นรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ที่ทำการกัดด้วยกรดกัดแก้วมีขั้นตอนในการเตรียมดังนี้

1. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปทำความสะอาดด้วยน้ำยาล้างจาน
2. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วยไตรคลอโรเอททีลีน(TCE)
3. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วยอะซิโตน
4. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ด้วยเอทานอล
5. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปกัดด้วยกรดกัดแก้วเจือจางความเข้มข้น 10% เป็นเวลา 10 นาที แล้วล้างด้วยน้ำปลอดประจุ
6. ล้างแผ่นกระจกสไลด์ในน้ำปลอดประจุด้วยเครื่องอัลตราโซนิค เป็นเวลา 10 นาที จำนวนสามครั้ง
7. นำแผ่นกระจกสไลด์ไปอบในเตาที่มีอุณหภูมิประมาณ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

หลังจากทำการอบแผ่นกระจกสไลด์แล้ว ก็จะได้แผ่นรองรับที่ทำการกัดด้วยกรดกัดแก้ว เพื่อนำไปใช้ในการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ด้วยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนต่อไป

3.3 การเตรียมสารที่ใช้ในการระเหยด้วยความร้อนในสุญญากาศ

การเตรียมฟิล์มแคดเมียมซัลไฟด์ ใช้สารตั้งต้นที่เป็นผลึกแคดเมียมซัลไฟด์บริสุทธิ์ 99.999% ส่วนการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์เจือด้วยอินเดียม 1% เตรียมได้โดยวิธีดังนี้คือ

1. ทำการบดผลึกแคดเมียมซัลไฟด์บริสุทธิ์ให้ละเอียด นำไปชั่งน้ำหนักตามอัตราส่วนที่คำนวณไว้ ดังตารางที่ 3.1
2. นำผงแคดเมียมซัลไฟด์บริสุทธิ์ที่ชั่งแล้วไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
3. นำผงอินเดียมคลอไรด์ไปชั่งตามอัตราส่วนที่คำนวณไว้ดังตารางที่ 3.1
4. นำผงแคดเมียมซัลไฟด์บริสุทธิ์ที่อบไว้แล้ว มาบดผสมกับผงอินเดียมคลอไรด์ที่ชั่งเตรียมไว้ให้ เข้ากันแล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
5. นำผงแคดเมียมซัลไฟด์บริสุทธิ์ผสมอินเดียมคลอไรด์ที่อบแล้วนำไปอัดเป็นเม็ด ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร ด้วยความดันสูงประมาณ 3.8 เมกกะปาสกาล
6. นำมาตัดให้ได้ขนาดพอดีกับภาชนะระเหยสาร แล้วนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการทำการระเหยสารต่อไป

หมายเหตุ : ถ้าทำการอัดเม็ดสารทิ้งไว้นาน ก่อนทำการระเหยควรจะทำกรอบเม็ดสารก่อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 แสดงน้ำหนักของแคดเมียมซัลไฟด์และอินเดียมคลอไรด์ในการเตรียมแคดเมียมซัลไฟด์
เจือด้วยอินเดียม 1%

น้ำหนักทั้งหมด(กรัม)	แคดเมียมซัลไฟด์(กรัม)	อินเดียมคลอไรด์(กรัม)
1.0000	0.9898	0.0953
2.0000	1.9797	0.0306

3.4 วิธีการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์และแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอินเดียม

ระบบระเหยสารด้วยความร้อนในสุญญากาศ แสดงในรูปที่ 3.1-3.2 โดยมีขั้นตอนในการเตรียมฟิล์มดังนี้

1. ทำความสะอาดระบบสุญญากาศ โดยการกำจัดฝุ่นและสิ่งสกปรกต่างๆและคราบไขมันด้วย อะซีโตน และเอทานอล
2. ทำการติดตั้งระบบต่างๆ ภายในระบบสุญญากาศให้เสร็จสมบูรณ์
3. นำผลึกแคดเมียมซัลไฟด์บริสุทธิ์ใส่ลงในภาชนะระเหยสารซึ่งเป็นโลหะทั้งสแตน
4. นำกระจกสไลด์ที่เตรียมเอาไว้แล้ว วางลงบนหน้ากอกซึ่งทำจากแผ่นอลูมิเนียม เจาะเป็นช่องตามแบบและขนาดที่ต้องการ หลังจากนั้นปิดฝาห้องสุญญากาศให้เรียบร้อย
5. ตรวจสอบระบบระเหยสารว่าวาล์วหลักและวาล์วปล่อยอากาศเข้า ให้อยู่ในตำแหน่งที่ปิดเรียบร้อย
6. สับสวิทช์ไปที่ วาล์วหยาบ(roughing) และเปิดปั๊มกลโรตารี (ยี่ห้อ Edwards ชนิด Two stage รุ่น RV8) รอนความดันอยู่ในระดับ 10^{-2} มิลลิบาร์
7. แล้วเปิดปั๊มเทอร์โบโมเลกูลาร์ รอนกระทั่งความดันอยู่ที่ ระดับ 10^{-5} มิลลิบาร์
8. เริ่มทำการระเหยสาร โดยมีกระจกสไลด์เป็นแผ่นรองรับ โดยการเปิดสวิทช์แบริแอคแล้วเพิ่มแรงดันอย่างช้าๆ จนกระทั่งค่ากระแสอยู่ที่ประมาณ 130 แอมแปร์ (อัตราการเคลือบอยู่ที่ประมาณ 88 นาโนเมตรต่อนาที)
9. เมื่อได้ความหนาของฟิล์มตามที่ต้องการแล้ว ให้ปิดแบริแอค
10. ปิดปั๊มเทอร์โบโมเลกูลาร์ โดยใช้เวลาประมาณ 30 นาที
11. ปิดปั๊มกลโรตารี
12. เปิดวาล์วปล่อยอากาศเข้าภายในห้องสุญญากาศ (chamber)
13. นำกระจกสไลด์ที่เคลือบแล้วออกมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

14. ในการเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอินเดียม ทำเหมือนกันกับขั้นตอนที่ 1-13 เพียงแต่ในขั้นตอนที่ 3 ให้ใส่เม็ดแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอินเดียมแล้วแทน
15. นำฟิล์มที่ได้ทั้งหมดมาคำนวณหาความหนาด้วยวิธีชั่งน้ำหนัก
16. นำฟิล์มบางที่เตรียมได้ทุกความหนา ไปทำการแอนนیلที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที
17. นำฟิล์มบางที่เตรียมได้ทั้งหมด ไปศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ จากเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Philips รุ่น PW1830 โดยใช้ความยาวคลื่นในย่าน CuK_α มีค่าเท่ากับ 1.5418 อังสตรอม ความต่างศักย์ 25 กิโลโวลต์ และกระแสไฟฟ้า 30 มิลลิแอมป์
18. นำฟิล์มบางที่เตรียมได้ทั้งหมด ไปศึกษาคุณสมบัติทางแสง ด้วยการวัดค่าการส่งผ่านแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสทิเบิล แบบดับเบิลบีม สเปกโตรมิเตอร์ ยี่ห้อจัสโก้ 7800 (UV/visible spectrometer JASCO 7800) โดยใช้ความยาวคลื่นในช่วง 400-1000 นาโนเมตร เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างของ แถบพลังงาน และคำนวณหาช่องว่างแถบพลังงาน
19. นำฟิล์มบางที่เตรียมได้ทั้งหมด ไปศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้า ด้วยการวัดค่าความต้านทานของฟิล์มบาง ด้วยวิธีสองขั้วเชิงเส้น ทั้งกรณีที่มีการฉายแสงจากหลอดฮาโลเจน ELH ที่มีกำลังไฟฟ้า 300 วัตต์ ที่ความเข้มแสงประมาณ 95000 ลักซ์ และกรณีที่ไม่มีการฉายแสง เพื่อศึกษาการตอบสนองต่อแสงของฟิล์มบาง เมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิต่างๆ

3.5 วิธีการวัดความหนาของฟิล์มบางโดยวิธีชั่งน้ำหนัก

ความหนาที่แตกต่างกันของฟิล์มบางขึ้นอยู่กับเวลาที่ใช้ในการเตรียม หากใช้เวลานานขึ้นฟิล์มก็จะมีค่าความหนามากขึ้น โดยอัตราการระเหยของสารจากภาชนะระเหยนั้น สามารถประมาณได้จากสมการ (2.54)

$$\Phi_e = \frac{3.513 \cdot 10^{22}}{(MT)^{1/2}} P_e \quad \text{โมเลกุลต่อตารางเซนติเมตร-วินาที} \quad (3.1)$$

และอัตราการระเหยมวลสารจากสมการ(2.55)

$$\Gamma_e = 5.84 \cdot 10^{-2} (M/T)^{1/2} P_e \quad \text{กรัมต่อตารางเซนติเมตร-วินาที} \quad (3.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนาของฟิล์มบางที่ได้จากการเตรียมดังวิธีนี้ สามารถประมาณได้จากมวลของสารที่เกาะบนฐานรอง ซึ่งหาได้จากผลต่างของน้ำหนักฐานรองก่อนและหลังขบวนการระเหยสาร โดยความหนาของฟิล์มจะประมาณได้จากสมการ

$$\text{ความหนา}(t) = \text{มวลสาร} / (\text{พื้นที่หน้าตัดของฐานรอง} \times \text{ความหนาแน่นของสาร}) \quad (3.3)$$

จากนั้นทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการเตรียม กับความหนาที่ได้เพื่อหาอัตราการเตรียมฟิล์มบาง จากนั้นนำฟิล์มบางที่ได้มาตรวจสอบคุณสมบัติต่างๆ ดังที่กล่าวมาข้างต้น เพื่อหาเงื่อนไขของความหนาที่เหมาะสมที่จะทำให้ได้ฟิล์มบางที่มีคุณภาพดี เหมาะสำหรับการใช้งานทางด้านเซลล์แสงอาทิตย์ โดยทำการวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆเปรียบเทียบกันระหว่างฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์บริสุทธิ์ และฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอินเดียม

3.6 วิธีการวัดค่าความต้านทานแผ่นโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น

3.6.1 อุปกรณ์

1. กาวเงินนำไฟฟ้า
2. แบตเตอรี่ 1.5 โวลต์ จำนวน 22 ก้อน
3. อิเล็กโตรมิเตอร์ Keithley 610 CR
4. มัลติมิเตอร์
5. หลอดฮาโลเจน 500 วัตต์
6. ลักซ์มิเตอร์



รูปที่ 3.3 แสดงหลักการวัดค่าความต้านทานแผ่นด้วยวิธีสองขั้วเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.2 วิธีการทดลอง

- นำฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์และแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอินเดียม ทั้งในกรณีที่ไม่ได้มีการ แอนนีสและแอนนีสที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส และฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์และแคดเมียมซัลไฟด์เจือด้วยอินเดียมที่มีความหนาประมาณ 850 นาโนเมตรทั้งในกรณีที่ไม่ได้มีการแอนนีสและแอนนีสที่อุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียส ซึ่งการแอนนีสทำภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที มาทำรอยต่อโดยใช้กาวเงินนำไฟฟ้าแถมบนผิวหน้าของฟิล์มบาง โดยแบ่งระยะห่างระหว่างจุดที่แถมให้เท่ากันจำนวน 2 จุด ดังแสดงในรูปที่ 3.3
- ต่อวงจรดังรูปที่ 3.3
- จ่ายแรงดันให้แก่วงจรแล้ววัดค่ากระแสที่ได้ โดยทำการวัดประมาณ 10 ค่า
- ทำการทดลองเหมือนข้อที่ 3 แต่สลับขั้วแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า
- ทำซ้ำข้อที่ 3 และ 4 แต่มีการฉายแสงจากหลอดฮาโลเจนที่ความเข้มแสงประมาณ 95000 ลักซ์ ให้แก่ฟิล์มบาง
- นำข้อมูลที่ได้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์ ซึ่งสามารถหาค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางได้จากสมการ

$$R_s = \frac{V}{I} \left(\frac{W}{L} \right) \quad (3.4)$$

เมื่อ	W	คือ	ความกว้างของฟิล์มบาง
	L	คือ	ระยะห่างระหว่างขั้วทั้งสอง
	V/I	คือ	ความชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์

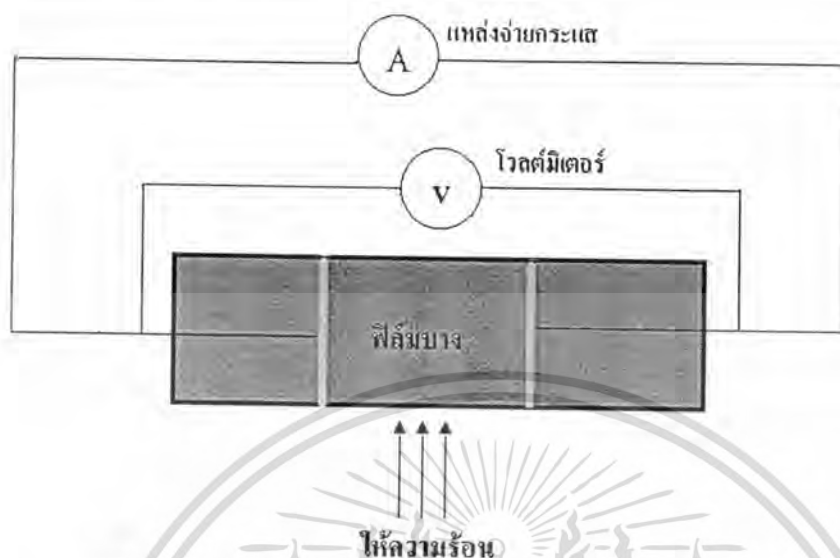
3.7 วิธีการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ

3.7.1. อุปกรณ์

- ตัวอย่างฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอินเดียม ที่ทำรอยต่อด้วยกาวเงินนำไฟฟ้า แถมตามแบบที่ทำการวัดความต้านทานสองขั้วเชิงเส้น
- แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง
- มัลติมิเตอร์
- เตาให้ความร้อนแก่ฟิล์มบาง
- เครื่องควบคุมอุณหภูมิ PROG controller ยี่ห้อ SHIMADEN รุ่น FP 21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. เทอร์โมมิเตอร์ Type K ยี่ห้อ Digicon รุ่น DP-50A



รูปที่ 3.4 แสดงการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ

3.7.2. วิธีการทดลอง

ในการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆนั้น ฟิล์มบางตัวอย่างจะวางอยู่บนเตาให้ความร้อนซึ่งควบคุมอุณหภูมิโดย PROG controller ยี่ห้อ SHIMADEN รุ่น FP 21

1. ต่อดวงจรดังรูปที่ 3.4
2. วัดกระแสจากแหล่งจ่ายให้กระแสคงที่
3. ให้ความร้อนแก่ตัวอย่างที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส แล้วทำการวัดความต่างศักย์คร่อมตัวอย่าง
4. ทำซ้ำข้อที่ 3. โดยเพิ่มอุณหภูมิครั้งละ 10 องศาเซลเซียส
5. จากค่าอุณหภูมิและความต่างศักย์ที่วัดได้เมื่อกระแสคงที่จะนำมาหาค่าค่าคงที่บริเวณขอบเขตของเกรนได้โดย

- คำนวณสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆได้จาก

$$\sigma = \frac{1}{R_s t} \quad (3.5)$$

เมื่อ R_s คือ ความต้านทานแผ่นที่อุณหภูมิต่างๆ

t คือ ความหนาของฟิล์มบางตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- นำค่าที่ได้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(\sigma T^{1/2})$ กับ $1000/T$ เมื่อ T คือ อุณหภูมิเป็น องศาเคลวิน ซึ่งสามารถหาค่าค่าแกงศักย์ที่บริเวณขอบเขตของเกรนได้จากความสัมพันธ์ของ Seto

$$\sigma = AT^{-1/2} \exp\left(\frac{-\Phi_b}{kT}\right) \quad (3.6)$$

- เมื่อ
- A คือ ค่าคงที่
 - k คือ ค่าคงที่ของโบลซ์ทมานน์
 - Φ_b คือ ค่าค่าแกงศักย์ที่บริเวณขอบเขตของเกรน



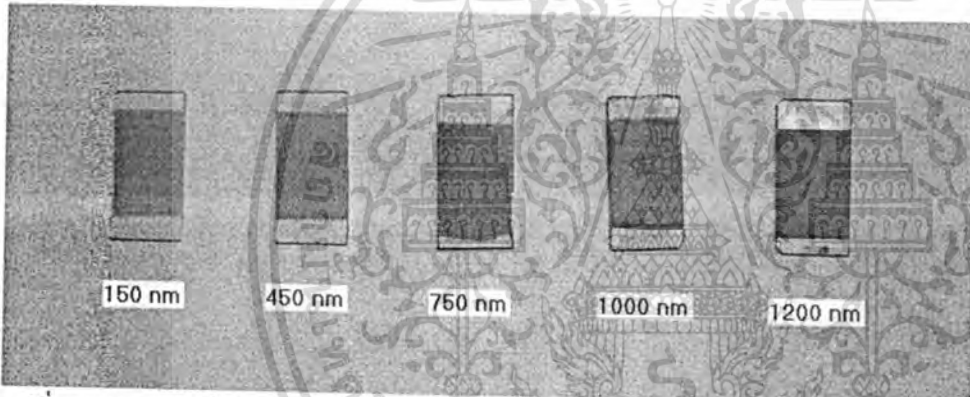
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

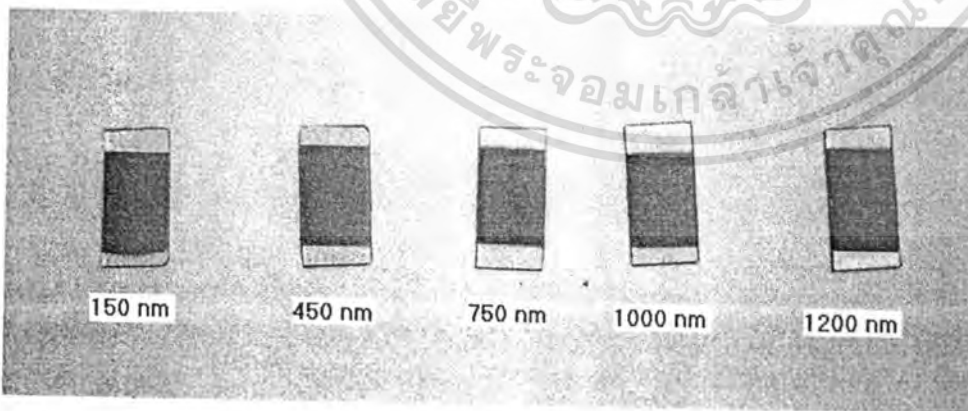
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ลักษณะของฟิล์มบางที่เตรียมได้

การเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์และแคดเมียมซัลไฟด์เจืออินเดียม โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศนั้น พบว่าฟิล์มที่ได้จะยึดเกาะกับกระจกสไลด์ดี และเมื่อส่องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์จะเห็นว่าฟิล์มมีความเรียบสม่ำเสมอตลอดทั่วทั้งแผ่น ฟิล์มที่ความหนาแตกต่างกันก็จะมีสีแตกต่างกัน โดยจะมีสีเหลืองจนถึงเหลืองส้มเมื่อความหนาเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นได้ดังรูป 4.1-4.2 ซึ่งจากรูป จะเห็นได้ว่าที่ความหนา 1200 นาโนเมตรของฟิล์มบางทั้งสองชุดจะมีสีเข้มมากที่สุดคือ สีเหลืองส้ม และที่ความหนา 150 นาโนเมตรจะมีสีอ่อนที่สุดคือ สีเหลืองเข้ม



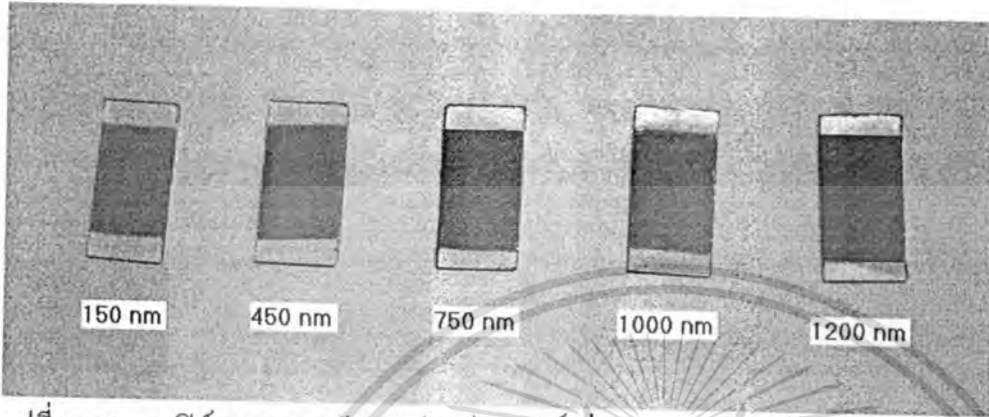
รูปที่ 4.1 แสดงฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์บริสุทธิ์ ที่ความหนาต่างๆ เมื่อไม่ได้มีการแอนนัล



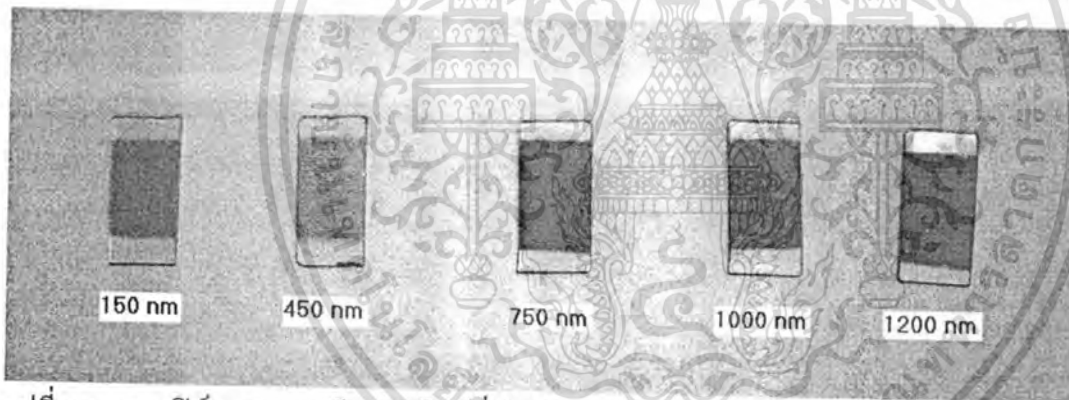
รูปที่ 4.2 แสดงฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอินเดียม ที่ความหนาต่างๆ เมื่อไม่ได้มีการแอนนัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการแอนนัลฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์และแคดเมียมซัลไฟด์เจืออินเดียม ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที ลักษณะสีของฟิล์มจะไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงเท่าใดนักเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มชุดที่ไม่ได้แอนนัล แสดงได้ดังรูปที่ 4.3 – 4.4



รูปที่ 4.3 แสดงฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์บริสุทธิ์ ที่ความหนาต่างๆ เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

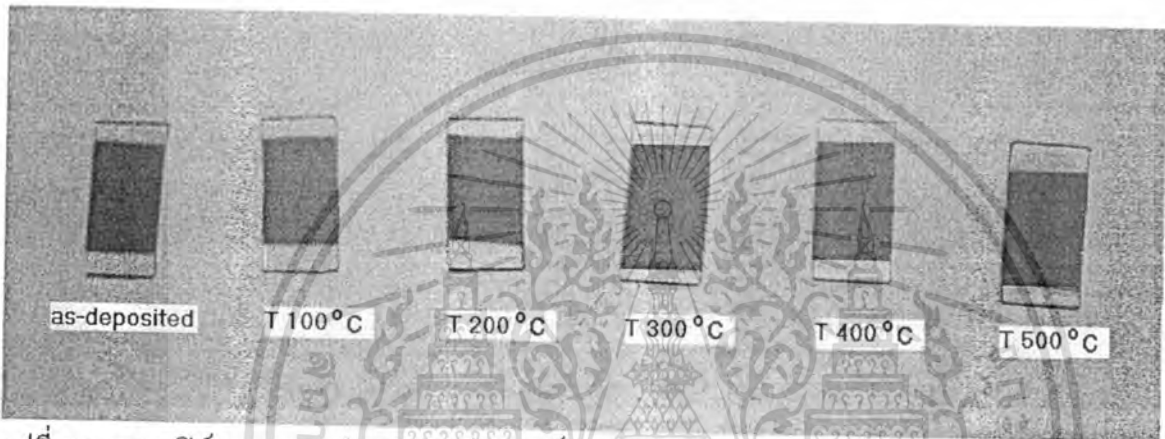


รูปที่ 4.4 แสดงฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอินเดียม ความหนาต่างๆ เมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

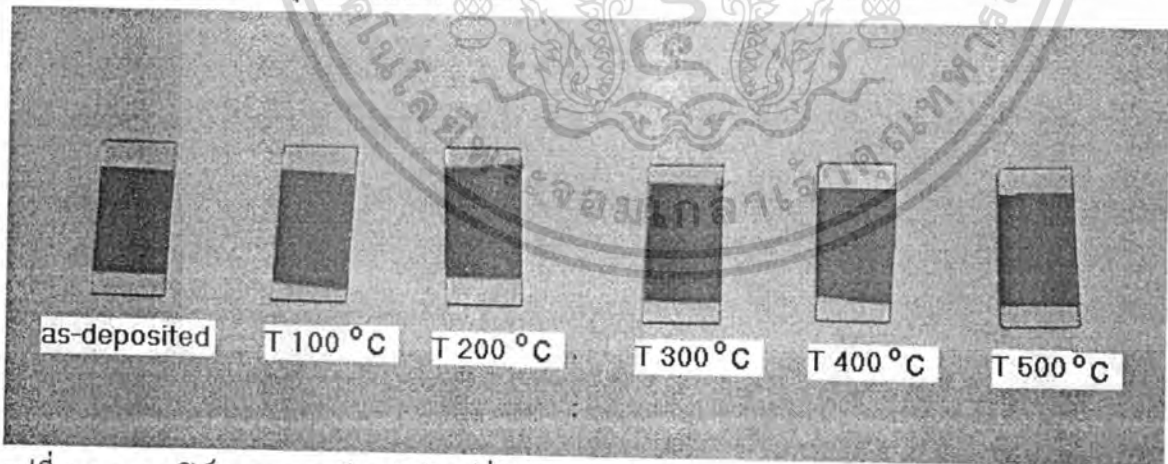
นอกจากนี้เมื่อเรานำเอาฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์และแคดเมียมซัลไฟด์เจืออินเดียม ที่มีความหนาเท่ากันคือ 850 นาโนเมตร ไปแอนนัลที่อุณหภูมิ 100, 200, 300, 400 และ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที สีของฟิล์มก็จะไม่มีความแตกต่างกันมากนัก โดยจะมีสีเหลืองส้มเหมือนกัน แสดงได้ดังรูปที่ 4.5 – 4.6 การที่สีของฟิล์มบางไม่ค่อยมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการแอนนัลนั้น อาจเกิดเนื่องจากฟิล์มได้รับความร้อนสูงขณะทำการเตรียม โดยวิธีระเหยสารด้วยความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อยู่แล้ว ซึ่งขณะระเหยสารนั้นความร้อนของภาชนะระเหยสารที่เป็นโลหะทั้งสแตนสูงถึง 1160 องศาเซลเซียส และกระจกสไลด์ซึ่งเป็นฐานรองรับของฟิล์มบางอยู่ห่างจากภาชนะระเหยสารประมาณ 11 เซนติเมตรเท่านั้น จึงคล้ายกับว่าฟิล์มได้รับการแอนนีสไปพร้อมๆกับการเตรียมฟิล์มอยู่แล้วด้วยอุณหภูมิสูง ดังนั้นเมื่อทำการแอนนีสจึงไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก โดยจากรูป 4.1 และ 4.2 สังกเกตได้ว่าถ้าฟิล์มยังมีความหนามากขึ้นสีก็จะเข้มมากยิ่งขึ้น เนื่องจากฟิล์มที่มีความหนามากจะใช้เวลาในการเตรียมมากกว่า จึงได้รับความร้อนนานกว่าฟิล์มที่บางและมีสีเข้มกว่าซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของผู้อื่นที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่มาแล้ว [3,11-14]



รูปที่ 4.5 แสดงฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์บริสุทธิ์ ความหนา 850 นาโนเมตร เมื่อไม่ได้มีการแอนนีสและเมื่อมีการแอนนีสในช่วงอุณหภูมิ 100 – 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

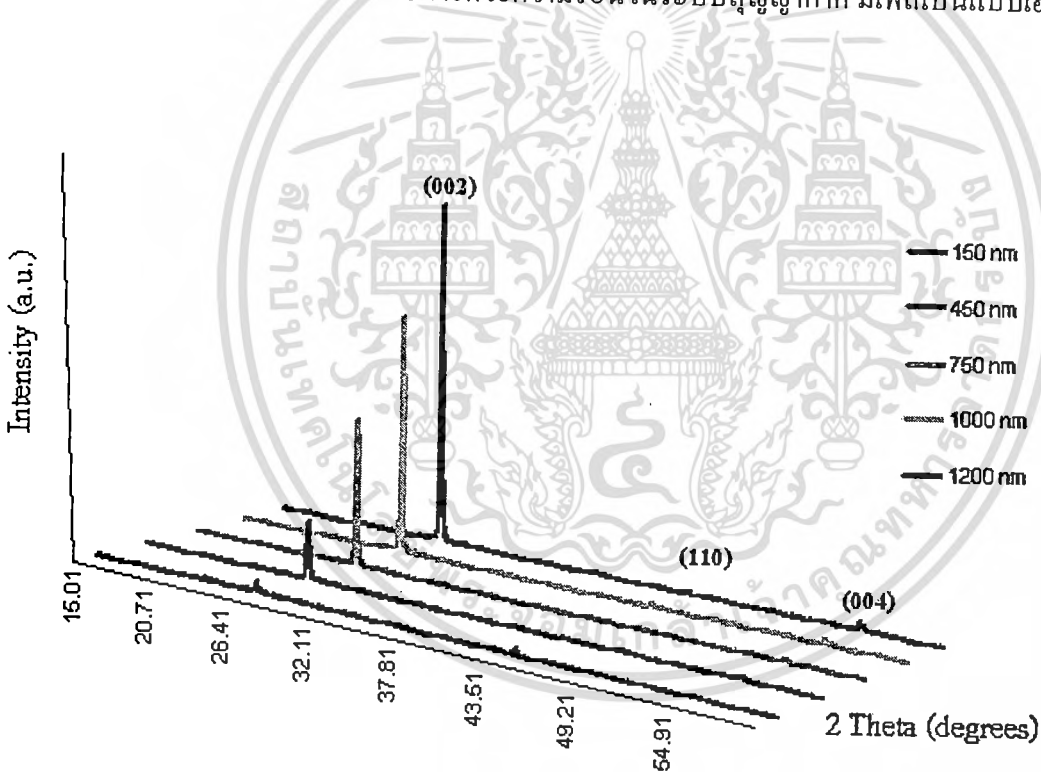


รูปที่ 4.6 แสดงฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอินเดียมความหนา 850 นาโนเมตรเมื่อไม่ได้มีการแอนนีสและเมื่อมีการแอนนีสในช่วงอุณหภูมิ 100 – 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

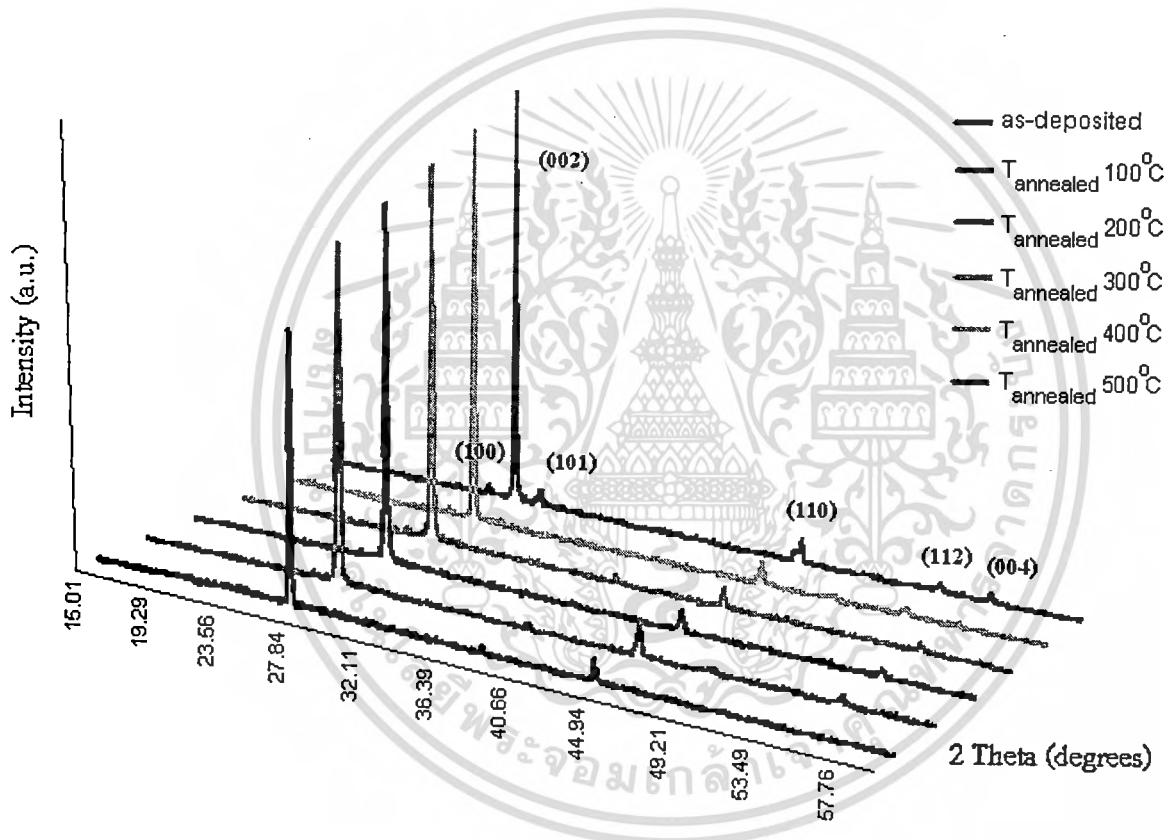
4.2 ผลการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

เนื่องจากเราต้องการทราบถึงลักษณะโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์เจือด้วยอินเดียมที่เคลือบบนกระจกสไลด์ ดังนั้นเราจึงนำฟิล์มบางที่เตรียมได้ไปทำการศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เพื่อศึกษาลักษณะของฟิสิกที่ปรากฏขึ้นและนำไปเปรียบเทียบกับพิกมาตราฐาน เพื่อพิจารณาว่าฟิล์มบางบนกระจกสไลด์ที่เตรียมได้ มีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบใด พิจารณารูปที่ 4.7 ซึ่งแสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์เจือด้วยอินเดียม เมื่อไม่มีการแอนนیل ที่ความหนาต่างกันตั้งแต่ 150-1200 นาโนเมตร ปรากฏว่าฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์เจือด้วยอินเดียมที่เตรียมด้วยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศนี้ มีความเป็นผลึกที่ดีสังเกตได้จากลักษณะของฟิสิกซึ่งมีความคมชัด และความคมชัดจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อความหนาของฟิล์มบางเพิ่มขึ้น โดยโครงสร้างผลึกที่สังเกตได้จะมีระนาบที่เด่นชัด คือ (002), (110) และ (004) ซึ่งทำให้เข้าใจได้ว่า ฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอินเดียมด้วยวิธีระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ มีเฟสเป็นแบบเฮกซะโกนอล



รูปที่ 4.7 แสดงสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ได้จากฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอินเดียมที่มีความหนาต่างกันตั้งแต่ 150-1200 นาโนเมตร เมื่อไม่ได้มีการแอนนิล

และเมื่อพิจารณารูปที่ 4.8 แสดงการเติบโตเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอินเดียมเมื่อไม่มีแอนนีสและเมื่อได้รับการแอนนีสในช่วงอุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที ที่ความหนาเท่ากัน คือ 850 นาโนเมตร พบว่า หลังจากให้อุณหภูมิในการแอนนีสเพิ่มมากขึ้นขนาดของพิกที่ระนาบ (002) มีความคมชัดมากขึ้น และเมื่ออุณหภูมิแอนนีสเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดพิกที่เพิ่มขึ้นที่ระนาบ(100), (101), (110), (112) และ(004) ซึ่งทำให้เชื่อมั่นได้ว่าฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอินเดียม เมื่อได้รับการแอนนีสแล้วจะทำให้ความเป็นผลึกสมบูรณ์ขึ้นและมีเฟสเป็นเฮกซะโกนอล ซึ่งผลการทดลองที่ได้นี้สอดคล้องกันกับผลงานวิจัยของผู้อื่นที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่มาแล้ว [3,11-14]



รูปที่ 4.8 แสดงสเปกตรัมการเติบโตเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ได้จากฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอินเดียมที่ความหนา 850 นาโนเมตร เมื่อไม่ได้มีการแอนนีสและ เมื่อมีการแอนนีสในช่วงอุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียสภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

- ตารางที่ 4.1 แสดงค่าขนาดของเกรนซึ่งคำนวณได้จากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ได้จากฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอินเดียมที่มีความหนา 150-1200 นาโนเมตร เมื่อไม่ได้มีการแอนนัล

ความหนา(nm)	ขนาดของเกรน(nm)
150	32
450	35
750	39
1000	46
1200	51

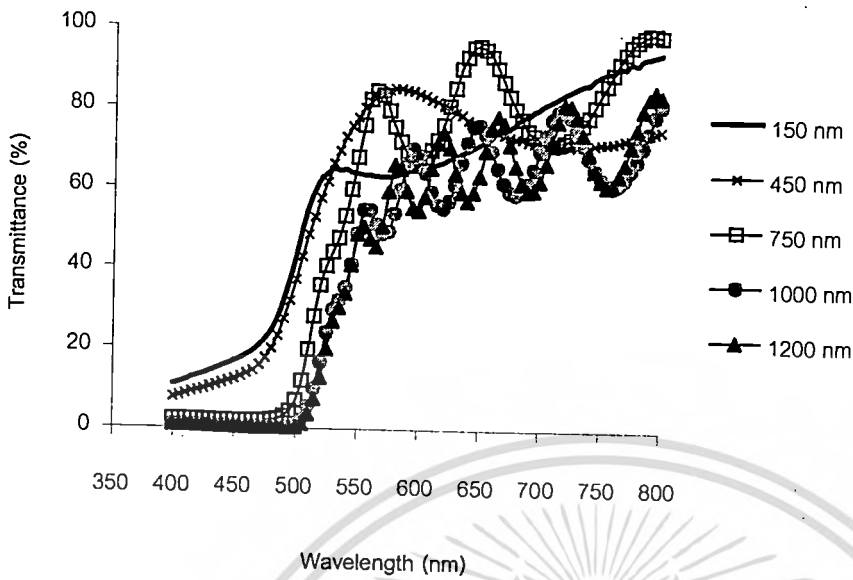
- ตารางที่ 4.2 แสดงค่าขนาดของเกรนซึ่งคำนวณได้จากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ได้จากฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอินเดียม ที่ความหนาเท่ากันคือ 850 นาโนเมตร เมื่อไม่ได้มีการแอนนัลและเมื่อมีการแอนนัลในช่วงอุณหภูมิ 100 - 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

อุณหภูมิแอนนัล($^{\circ}\text{C}$)	ขนาดของเกรน(nm)
ไม่มีกรแอนนัล	41
100	47
200	47
300	52
400	49
500	62

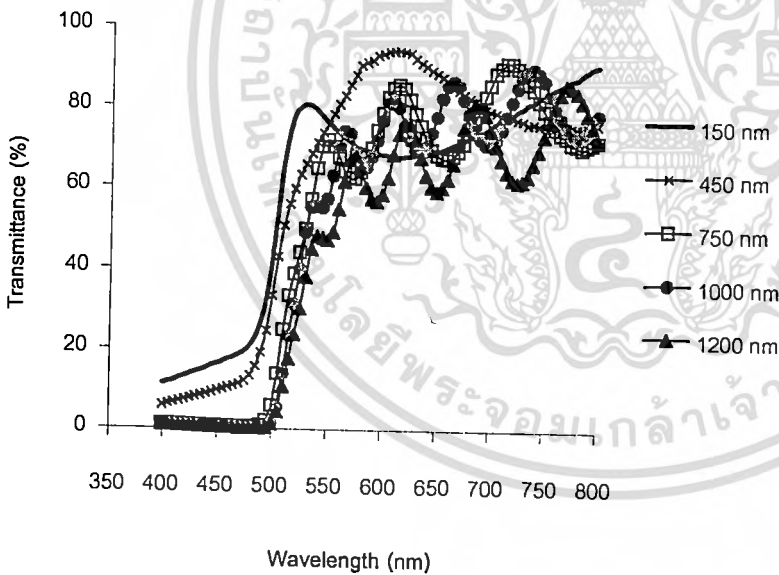
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการศึกษาการส่งผ่านแสงเพื่อคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน

การศึกษากการส่งผ่านแสงของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ และแคดเมียมซัลไฟด์เจือด้วยอินเดียม ที่ความหนาต่างๆ ทั้งกรณีที่มีการแอนนีกัลและไมแอนนีกัลด้วยอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที สามารถตรวจสอบด้วยเครื่องยูวีวิสิเบิลแบบดับเบิลบีม สเปกโตรมิเตอร์ ยี่ห้อ จัสโก้ 7800 โดยเลือกค่าความยาวคลื่นในช่วง 400-800 นาโนเมตร พบว่าฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่ไม่ได้แอนนีกัลนั้น แสงที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 460 นาโนเมตร จะสามารถส่งผ่านออกมาได้ดีในทุกๆ ความหนาและสำหรับฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่ได้รับการแอนนีกัลนั้น พบว่าแสงที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 480 นาโนเมตร จะสามารถส่งผ่านได้ดี ส่วนฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์เจือด้วยอินเดียมที่ แอนนีกัลและไม่ได้แอนนีกัลนั้น แสงจะสามารถส่งผ่านได้ดีที่ความยาวคลื่นมากกว่า 480 และ 460 นาโนเมตร ตามลำดับ นอกจากนี้แล้วยังพบว่าเมื่อความหนาของฟิล์มเพิ่มมากขึ้น ขอบของการดูดกลืนพื้นฐานมีแนวโน้มที่จะเคลื่อนไปยังทิศที่มีความยาวคลื่นมากขึ้น ทั้งกรณีฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือ และไม่เจืออินเดียม รวมทั้งกรณีที่มีการแอนนีกัลและไมแอนนีกัลด้วย และเมื่อนำเอาฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือและไม่เจืออินเดียมมาทำการแอนนีกัลในช่วงอุณหภูมิ 100 – 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที โดยฟิล์มมีความหนาเท่ากันคือ 850 นาโนเมตร พบว่าฟิล์มบางที่เจือด้วยอินเดียม นั้นแนวโน้มของขอบการดูดกลืนพื้นฐาน จะเคลื่อนไปยังทิศที่มีความยาวคลื่นมากขึ้นคล้ายกับกรณีของความหนา แต่ในฟิล์มแคดเมียมซัลไฟด์บริสุทธิ์ที่แอนนีกัลในช่วงอุณหภูมิ 300 – 500 องศาเซลเซียส ขอบการดูดกลืนพื้นฐานจะเลื่อนไปในทิศทางที่มีความยาวคลื่น สั้นกว่า ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.9 – 4.14

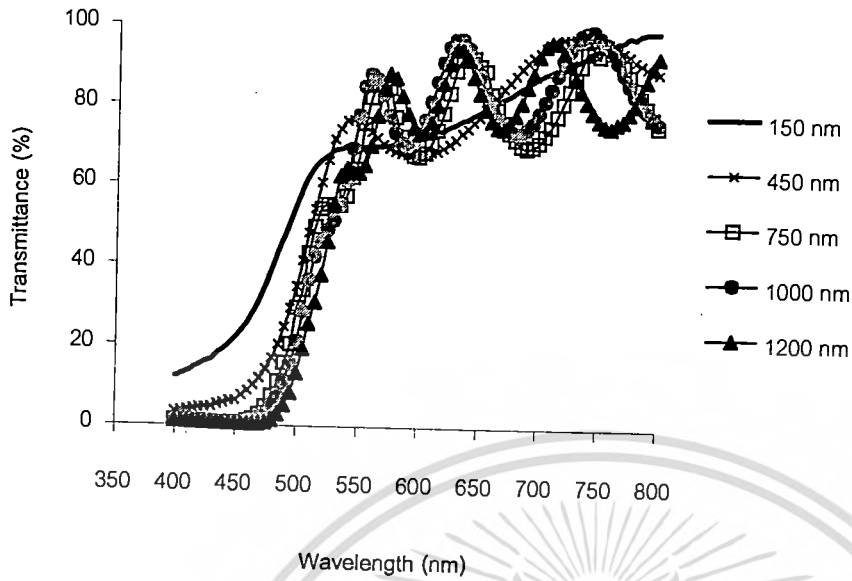


รูปที่ 4.9 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่น 400-800 นาโนเมตร ของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ ที่ความหนาต่างๆ เมื่อไม่ได้มีการแอนนีส

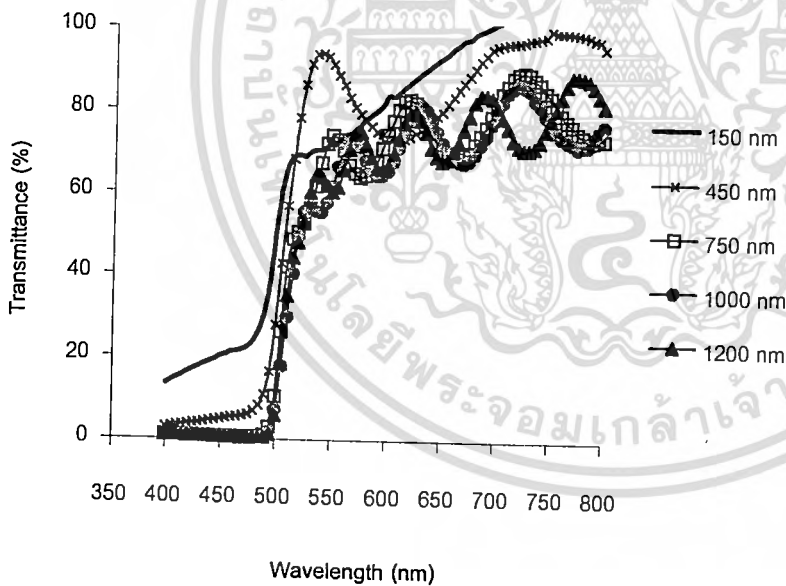


รูปที่ 4.10 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่น 400-800 นาโนเมตรของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ ที่ความหนาต่างๆ เมื่อมีการแอนนีสด้วยอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

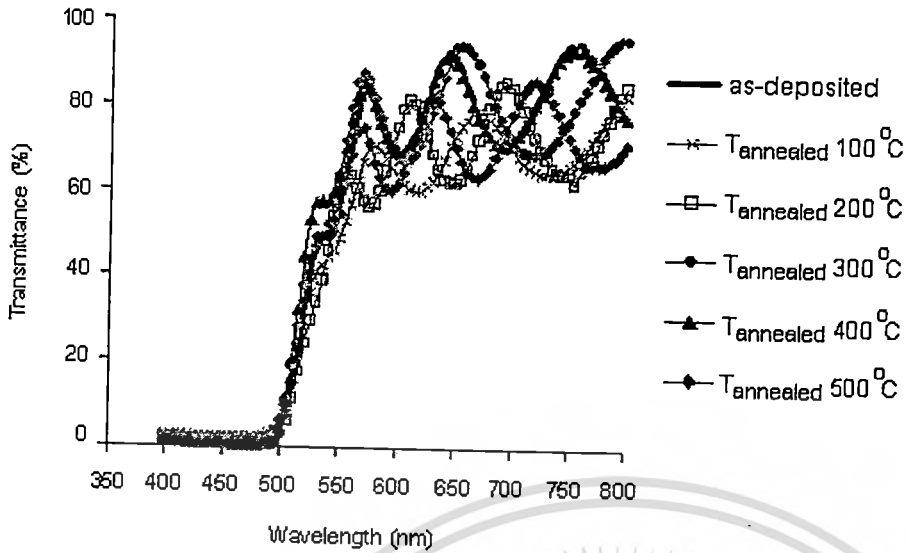


รูปที่ 4.11 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่น 400-800 นาโนเมตร ของฟิล์มบาง แคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอินเดียม ที่ความหนาต่างๆ เมื่อไม่ได้มีการแอนนัล



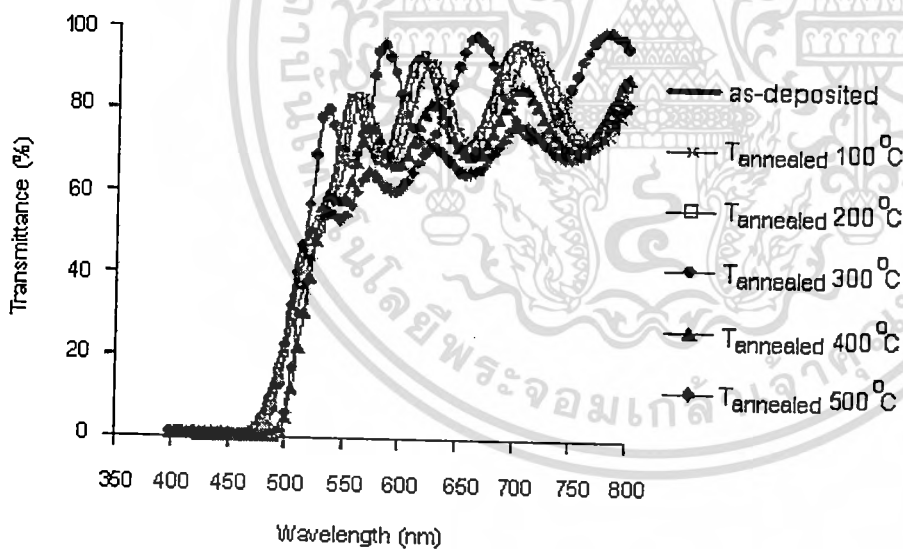
รูปที่ 4.12 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่น 400-800 นาโนเมตรของฟิล์มบาง แคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอินเดียม ที่ความหนาต่างๆ เมื่อมีการแอนนัลด้วยอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13

แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่น 400-800 นาโนเมตรของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ ที่ความหนา 850 นาโนเมตร เมื่อไม่ได้มีการแอนนีสและเมื่อมีการแอนนีสในช่วงอุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

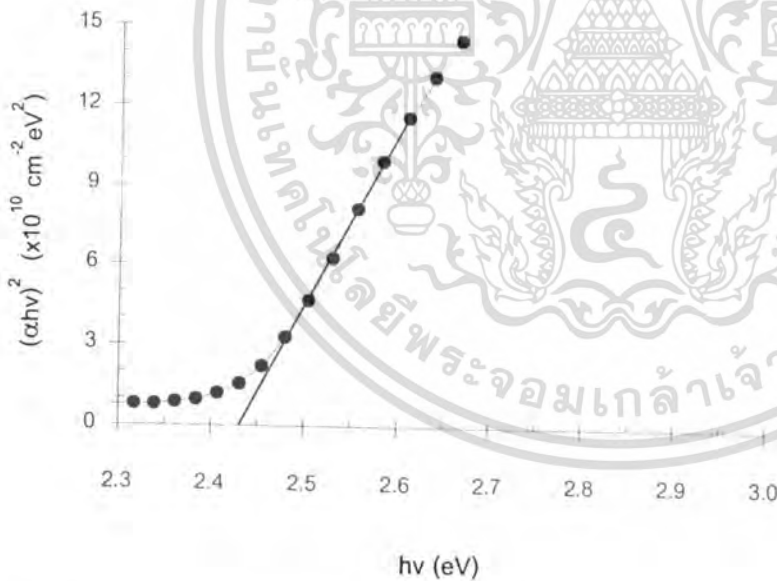


รูปที่ 4.14

แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่น 400-800 นาโนเมตรของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอินเดียมที่ความหนา 850 นาโนเมตร เมื่อไม่ได้มีการแอนนีสและเมื่อมีการแอนนีสในช่วงอุณหภูมิ 100 - 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขั้นตอนต่อมาเมื่อนำข้อมูลจากรูปที่ 4.9 – 4.14 มาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง(α) ของฟิล์มบางตามสมการ(2.13) แล้วนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ การดูดกลืนแสงยกกำลังสอง ($\alpha h\nu$)² กับพลังงาน โฟตอน($h\nu$) แสดงตัวอย่างได้ดังรูปที่ 4.15 พบว่ากราฟที่ได้มีลักษณะเป็นแบบเชิงเส้น แสดงให้เห็นว่าลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของฟิล์มบางที่เตรียมได้เป็นแบบตรง และขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน(E_g) สามารถหาได้จากการประมาณค่าโดย ลากส่วนต่อจากบริเวณที่เป็นเชิงเส้นไปตัดแกนของพลังงานโฟตอน ($\alpha = 0$ ดังสมการ 2.14) จุดตัดที่ได้คือค่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน โดยค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ และฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์เจือด้วยอินเดียมที่มีความหนาต่างๆแสดงได้ดังตารางที่ 4.3 จากตารางที่ 4.3 ทำให้ทราบว่าเมื่อทำการเจืออินเดียมจะทำให้ค่าช่องว่างแถบพลังงานเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ฟิล์มบางที่ทำการแอนนัลจะมีค่าช่องว่างแถบพลังงานต่ำกว่าฟิล์มบางที่ไม่ได้แอนนัลอีกด้วย ตารางที่ 4.4 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางทั้งสอง ซึ่งมีความหนาเท่ากันคือ 850 นาโนเมตร โดยค่าช่องว่างแถบพลังงานมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิแอนนัลเพิ่มขึ้น ยกเว้นในฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์บริสุทธิ์ที่แอนนัลด้วยอุณหภูมิ 300–500 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.15 แสดงตัวอย่างการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนยกกำลังสอง ($\alpha h\nu$)² กับพลังงาน โฟตอน($h\nu$) ของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์บริสุทธิ์ ที่ความหนา 150 นาโนเมตร เมื่อไม่ได้มีการแอนนัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงาน(eV)ของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์บริสุทธิ์และฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอินเดียมเมื่อไม่ได้มีการแอนนัลและเมื่อมีการแอนนัลที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

Thickness (nm)	As-deposited		T _{anneal} 500°C	
	CdS	CdS:In	CdS	CdS:In
150	2.44	2.51	2.45	2.46
450	2.43	2.51	2.45	2.46
750	2.42	2.52	2.45	2.46
1000	2.42	2.52	2.44	2.46
1200	2.42	2.48	2.43	2.46

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์บริสุทธิ์ และฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอินเดียมความหนา 850 นาโนเมตรเมื่อไม่ได้มีการแอนนัลและเมื่อมีการแอนนัลในช่วงอุณหภูมิ 100 – 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

T _{anneal} (°C)	E _g (eV)	
	CdS	CdS : In
as-deposited	2.43	2.55
100	2.40	2.53
200	2.41	2.52
300	2.42	2.50
400	2.44	2.45
500	2.44	2.45

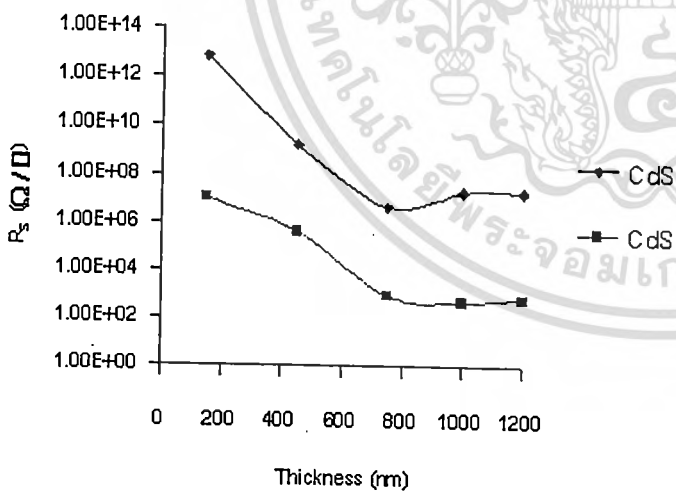
เมื่อนำเอาข้อมูลของค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางทั้งสองชนิดมารวมกัน จะมีค่าอยู่ในช่วง 2.40 – 2.55 อิเล็กตรอนโวลต์ โดยค่าช่องว่างแถบพลังงานมีแนวโน้มลดลง เมื่อความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้นหรืออุณหภูมิที่ใช้ในการแอนนัลเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของผู้อื่นที่ได้ผ่านการตีพิมพ์เผยแพร่มาแล้ว [3,11-14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

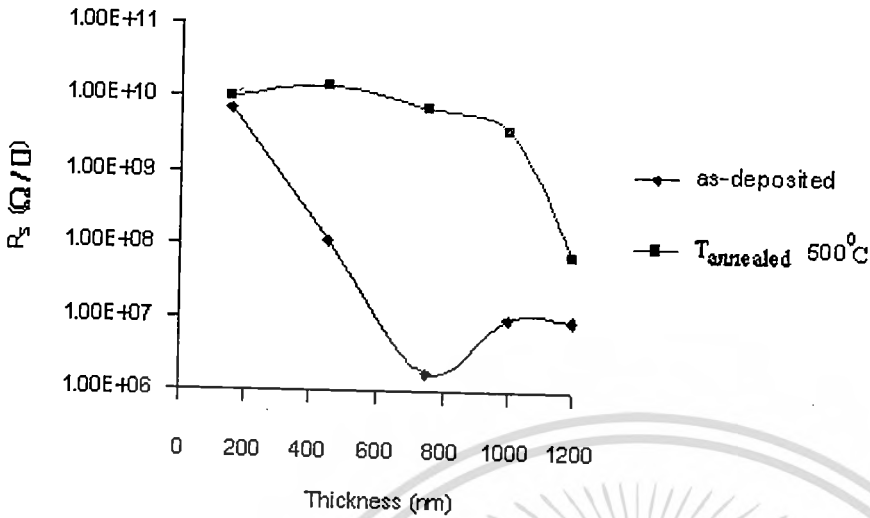
4.4 ผลการศึกษาค่าความต้านทานแผ่น

พิจารณาผลการทดลองวัดค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์และแคดเมียมซัลไฟด์เจือด้วยอินเดียมโดยวิธีสองขั้วเชิงเส้น พบว่าฟิล์มบางที่ทำการแอนนัลและไม่ได้แอนนัลเมื่อฉายแสงให้แก่ฟิล์มบางแล้ว ทำให้ค่าความต้านทานแผ่นมีค่าลดลงจากก่อนการฉายแสง เนื่องจากแสงกระตุ้นให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากแถบวาเลนซ์กลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระ แสดงว่าเมื่อฉายแสงให้แก่ฟิล์มบางแล้ว จะทำให้มีอิเล็กตรอนอิสระมากขึ้นจึงทำให้ฟิล์มบางนำไฟฟ้าได้ดีขึ้น

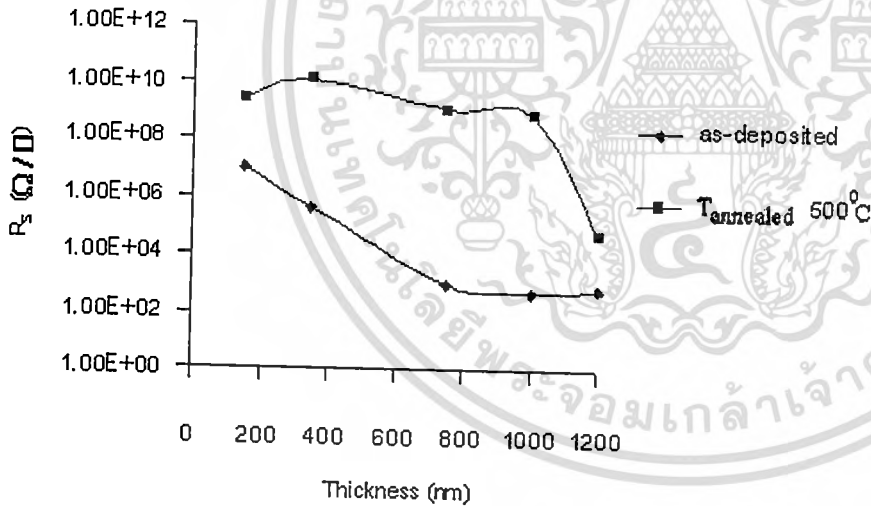
พิจารณารูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์และแคดเมียมซัลไฟด์เจือด้วยอินเดียมกับความหนาของฟิล์ม ทำการวัดขณะไม่ฉายแสงพบว่าเมื่อฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ถูกเจือด้วยอินเดียมทำให้ความต้านทานแผ่นลดลง และเมื่อความหนาของฟิล์มบางเพิ่มมากขึ้นค่าความต้านทานแผ่นลดลงจนถึงที่ความหนาประมาณ 750 นาโนเมตร หลังจากนั้นสภาพต้านทานแผ่นจะมีค่าคงที่เมื่อความหนาเพิ่มมากขึ้น พิจารณาจากรูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแผ่นฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์กับความหนาของฟิล์ม ทำการวัดขณะไม่ฉายแสงที่ไม่ได้แอนนัลและแอนนัลที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสในบรรยากาศไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที และรูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานแผ่นฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์เจือด้วยอินเดียมกับความหนาของฟิล์มทำการวัดขณะไม่ฉายแสงที่ไม่ได้แอนนัลและแอนนัลที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสในบรรยากาศไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที พบว่าเมื่อทำการแอนนัลค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มทั้งสองชนิดมีค่าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแผ่นในขณะที่ไม่มีการฉายแสงของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ และแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอินเดียมเมื่อไม่ได้มีการแอนนัลกับความหนาของฟิล์ม

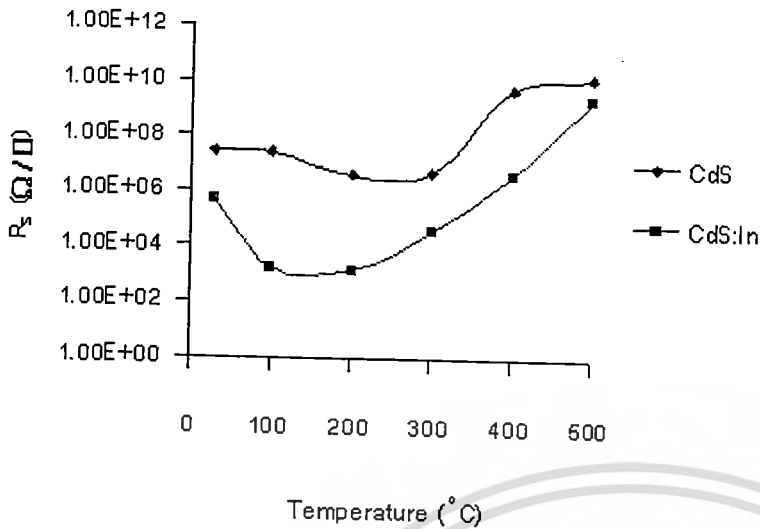


รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแผ่นในขณะที่ไม่มีการฉายแสงของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์กับความหนาของฟิล์ม เมื่อไม่ได้มีการแอนนีสและเมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที



รูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแผ่นในขณะที่ไม่มีการฉายแสงของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอินเดียมกับความหนาของฟิล์มบางเมื่อไม่ได้มีการแอนนีสและเมื่อมีการแอนนีส ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานแผ่นในขณะที่ไม่มีการฉายแสงของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์และแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอินเดียมที่มีความหนาเท่ากันคือ 850 นาโนเมตรเมื่อมีการแอนนัลในช่วงอุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

จากรูปที่ 4.19 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของฟิล์มแคดเมียมซัลไฟด์ และฟิล์มแคดเมียมซัลไฟด์เจือด้วยอินเดียม กับอุณหภูมิในการแอนนัลขณะไม่ฉายแสง โดยเปรียบเทียบที่ฟิล์มบางทั้งสองชนิดมีความหนาเท่ากันคือ 850 นาโนเมตร ทำการแอนนัลในบรรยากาศไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ปรากฏว่ากรณีฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์บริสุทธิ์ ค่าความต้านทานแผ่นจะลดลงเล็กน้อยในขณะที่อุณหภูมิแอนนัลเพิ่มจาก 100 เป็น 300 องศาเซลเซียส แต่เมื่ออุณหภูมิแอนนัลสูงกว่า 300 องศาเซลเซียส ค่าความต้านทานแผ่นจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเมื่อ ฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์บริสุทธิ์นี้ อยู่ภายใต้การฉายแสง ค่าความต้านทานแผ่นจะลดลงอย่างมาก อย่างไรก็ตามค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางที่แอนนัลที่อุณหภูมิต่างๆ จะมีแนวโน้มในลักษณะเดียวกับตอนที่ฉายแสง สำหรับกรณีฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอินเดียม ค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางที่ได้รับการแอนนัล จะมีแนวโน้มเช่นเดียวกับฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์บริสุทธิ์ที่ไม่ได้แอนนัล ต่างกันเพียงแต่ค่าความต้านทานแผ่นจะเริ่มมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิแอนนัลสูงกว่า 200 องศาเซลเซียส ดังในกรณีของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์บริสุทธิ์ จากผลการทดลองที่ได้พบว่าสอดคล้องกับผลงานวิจัยของผู้อื่นที่ผ่านการตีพิมพ์เผยแพร่มาแล้ว [5-7, 17-19]

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์และแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอินเดียมที่ความหนาต่างๆ เมื่อไม่ได้มีการแอนนีสและเมื่อมีการแอนนีสที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

ความ หนา (nm)	ค่าความต้านทานแผ่น(□□sq)							
	แคดเมียมซัลไฟด์				แคดเมียมซัลไฟด์เจือด้วยอินเดียม			
	ไม่แอนนีส		แอนนีส		ไม่แอนนีส		แอนนีส	
	ไม่ฉายแสง	ฉายแสง	ไม่ฉายแสง	ฉายแสง	ไม่ฉายแสง	ฉายแสง	ไม่ฉายแสง	ฉายแสง
150	6.8×10^{12}	7.1×10^9	3.5×10^{10}	1.0×10^{10}	1.0×10^7	1.1×10^5	2.3×10^9	4.9×10^8
450	1.7×10^9	1.1×10^8	2.4×10^{10}	1.4×10^{10}	4.0×10^5	4.4×10^4	1.1×10^{10}	2.9×10^9
750	4.2×10^6	1.8×10^6	1.2×10^{11}	7.4×10^9	9.8×10^2	5.8×10^2	1.2×10^9	2.8×10^8
1000	8.9×10^6	1.1×10^6	3.0×10^{10}	3.7×10^9	5.1×10^2	4.0×10^2	7.7×10^8	3.6×10^8
1200	1.5×10^7	1.7×10^6	1.0×10^9	7.3×10^7	6.5×10^2	5.0×10^2	5.3×10^4	4.9×10^4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

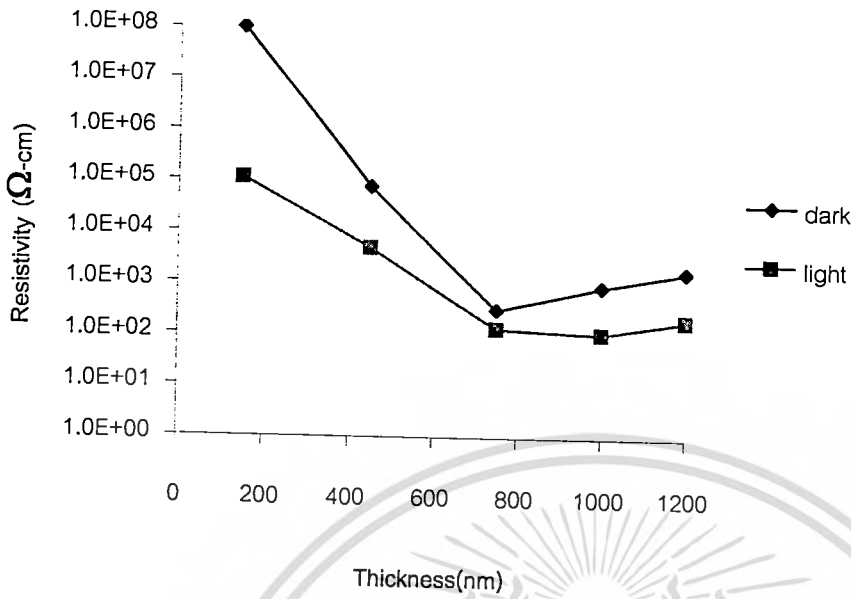
ตารางที่ 4.6 แสดงค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์และแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอินเดียม ที่ความหนา 850 นาโนเมตร เมื่อมีการแอนนیلที่อุณหภูมิต่างๆ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

อุณหภูมิแอนนิล (°C)	ค่าความต้านทานแผ่น(Ω/sq)			
	แคดเมียมซัลไฟด์		แคดเมียมซัลไฟด์เจือด้วยอินเดียม	
	ไม่ฉายแสง	ฉายแสง	ไม่ฉายแสง	ฉายแสง
ไม่แอนนิล	2.6×10^7	8.7×10^5	4.4×10^5	1.3×10^4
100	2.2×10^7	2.8×10^5	1.7×10^3	8.4×10^2
200	3.6×10^6	1.6×10^5	1.5×10^3	6.5×10^2
300	5.1×10^6	1.0×10^5	3.9×10^4	1.1×10^3
400	5.0×10^9	2.0×10^8	3.8×10^6	8.2×10^5
500	1.3×10^{10}	6.6×10^9	2.0×10^9	2.8×10^8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

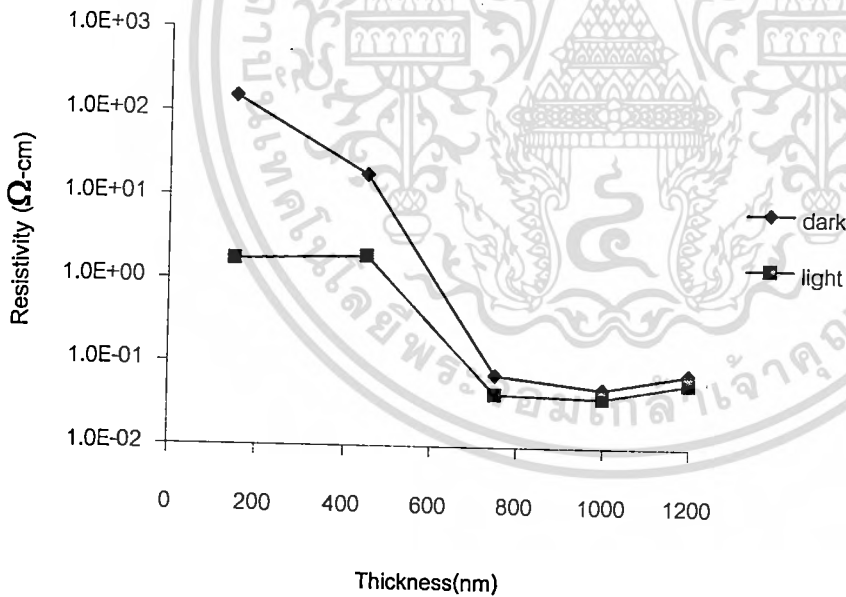
พิจารณาจากรูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์กับความหนาที่ไม่มีการแอนนีกัลพบว่า ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่าลดลงเมื่อความหนาเพิ่มมากขึ้นถึงที่ความหนาประมาณ 750 นาโนเมตร หลังจากนั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งมีแนวโน้มเดียวกันทั้งขณะที่ไม่มีการฉายแสงและมีการฉายแสง และเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์กับความหนาที่ไม่มีการแอนนีกัล พบว่ามีค่าแนวโน้มเดียวกัน

และเมื่อพิจารณารูปที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอินเดียมกับความหนาที่ไม่มีการแอนนีกัล พบว่า ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าลดลงเมื่อความหนาเพิ่มมากขึ้นถึงที่ความหนา 750 นาโนเมตร หลังจากนั้นจะมีลักษณะคงที่ซึ่งมีแนวโน้มเดียวกันทั้งขณะที่ไม่มีการฉายแสงและมีการฉายแสง ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของผู้อื่นที่ผ่านการตีพิมพ์เผยแพร่มาแล้ว[17] โดยทั่วไปสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางมักขึ้นอยู่กับสมบัติของเกรน กล่าวคือถ้าเกรนมีขนาดเล็กขอบเขตของเกรนจะมีปริมาณมาก ดังนั้นพาหะจะถูกกระเจิงที่ขอบของเกรนสูง ทำให้สภาพคล่องตัวของพาหะลดลง นอกจากนี้ที่ว่างระหว่างเกรนจะประพฤติตัวเป็นกับดักอิเล็กตรอน และเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอินเดียมกับความหนาที่ไม่มีการแอนนีกัล พบว่ามีแนวโน้มเดียวกันและถ้าเปรียบเทียบกับระหว่างฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์กับฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์เจือด้วยอินเดียม พบว่าที่ความหนาเดียวกันฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอินเดียมจะมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำกว่า เนื่องจากอินเดียมที่เจือลงไปจะเป็นผู้ให้อิเล็กตรอนอิสระจึงทำให้สภาพนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อความหนาเพิ่มมากขึ้นค่า สภาพต้านทานไฟฟ้าจะคงที่ เนื่องจากจำนวนขอบเขตของเกรนค่อนข้างคงที่ สังเกตได้ว่าถ้า ความหนาของฟิล์มบางทั้ง 2 ชนิดเกินกว่า 750 นาโนเมตรแล้ว ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าขณะไม่มีการฉายแสงและที่มีการฉายแสงมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก หรือการตอบสนองต่อแสงน้อยลง เนื่องจากที่สภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำนั้นอิเล็กตรอนอิสระจะมีมากอยู่แล้ว ซึ่งอิเล็กตรอนเหล่านี้มาจากสารเจือ และเมื่อทำการฉายแสงไปกระตุ้นให้อิเล็กตรอนหลุดจากกับดักหรือเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลอิสระ จึงไม่มีผลให้พาหะอิสระเพิ่มขึ้นจากเดิมมากนัก ซึ่งทำให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าไม่ลดลงมากหลังจาก ฉายแสงต่างจากฟิล์มที่มีความหนาน้อยกว่า 750 นาโนเมตร ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของผู้อื่นที่ผ่านการตีพิมพ์เผยแพร่มาแล้ว [5-7, 17-19]



รูปที่ 4.20

แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์กับความหนาเมื่อไม่ได้มีการแอนนีกัล



รูปที่ 4.21

แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอินเดียมกับความหนา เมื่อไม่ได้มีการแอนนีกัล

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์และฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอินเดียมที่ความหนาต่างๆ เมื่อไม่ได้มีการแอนนีกัลและการแอนนีกัลที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์เป็นเวลา 30 นาที

ความ หนา (nm)	ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า(Ω -cm)							
	แคดเมียมซัลไฟด์				แคดเมียมซัลไฟด์เจือด้วยอินเดียม			
	ไม่แอนนีกัล		แอนนีกัล		ไม่แอนนีกัล		แอนนีกัล	
	ไม่ฉาย แสง	ฉาย แสง	ไม่ฉาย แสง	ฉาย แสง	ไม่ฉาย แสง	ฉายแสง	ไม่ฉาย แสง	ฉายแสง
150	1.0×10^8	1.1×10^5	5.2×10^5	1.5×10^5	150	1.7	3.4×10^4	7.4×10^3
450	7.6×10^4	4.9×10^3	1.1×10^6	6.3×10^5	18	1.9	4.9×10^5	1.3×10^5
750	315	135	9.0×10^6	5.5×10^5	7.3×10^{-2}	4.3×10^{-2}	9.0×10^4	2.2×10^4
1000	890	110	3.0×10^6	3.7×10^5	5.1×10^{-2}	4.0×10^{-2}	7.7×10^4	3.6×10^4
1200	1.8×10^3	204	1.2×10^5	8.7×10^3	7.8×10^{-2}	6.0×10^{-2}	6.4	5.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์และแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอินเดียมที่มีความหนาเท่ากันคือ 850 นาโนเมตร เมื่อมีการแอนนีกัลที่อุณหภูมิต่างๆ ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

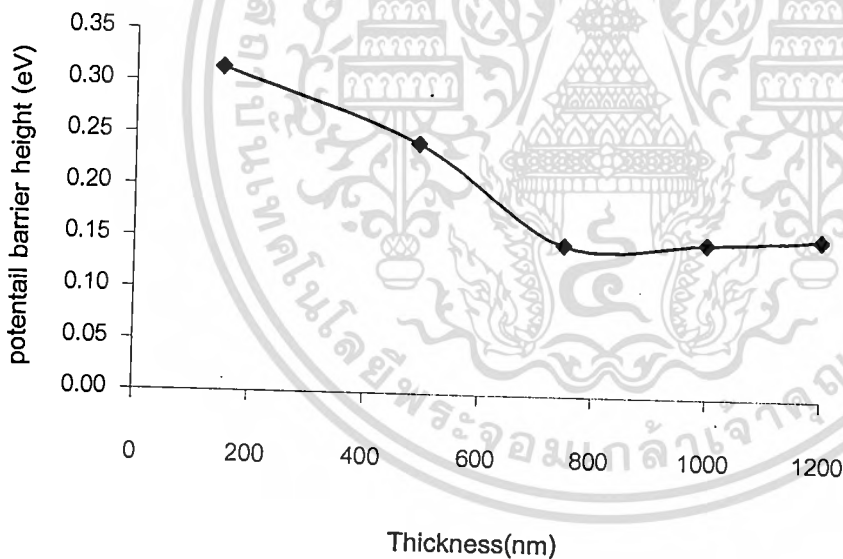
อุณหภูมิ แอนนีกัล (°C)	ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า(Ω -cm)			
	แคดเมียมซัลไฟด์		แคดเมียมซัลไฟด์ เจืออินเดียม	
	ไม่ฉายแสง	ฉายแสง	ไม่ฉายแสง	ฉายแสง
30	2.2×10^3	73.9	37.9	1.1
100	1.9×10^3	21.2	0.1	0.1
200	306	14.2	0.1	0.05
300	443.5	8.6	3.3	0.1
400	4.3×10^5	1.7×10^4	330.6	69.8
500	1.1×10^6	5.6×10^5	1.8×10^5	2.3×10^4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 ผลการศึกษาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ

ในการศึกษาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ ในการทดลองนี้เราทำศึกษาเพื่อที่หาค่ากำแพงศักย์ที่ขอบเขตของเกรน เฉพาะตัวอย่างที่เป็นฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอินเดียมเมื่อไม่มีการแอนนีส และฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์เจือด้วยอินเดียมที่มีการแอนนีสในช่วงอุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาทีเท่านั้น

จากการศึกษาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ ในการทดลองนี้ ช่วงอุณหภูมิที่ทำการศึกษาคือ 25-120 องศาเซลเซียส ปรากฏว่ามีกลไกการนำไฟฟ้าที่โดดเด่นเพียงแบบเดียวเท่านั้นที่สามารถอธิบายได้ดีกับผลการทดลองของช่วงอุณหภูมินี้ นั่นก็คือกลไกการนำไฟฟ้าแบบเทอร์มิโอนิกอิมิสชัน ที่ความหนาของฟิล์มบางตัวอย่างเพิ่มมากขึ้น พบว่าค่ากำแพงศักย์ที่บริเวณขอบเขตของเกรนมีค่าลดลงและเมื่อถึงความหนาที่ 750 นาโนเมตร พบว่า คือ กำแพงศักย์จะมีค่าคงที่ ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับค่าความต้านทานแผ่นและค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า ซึ่งค่ากำแพงศักย์ที่บริเวณขอบเขตของเกรนซึ่งขึ้นกับความหนาของฟิล์มบางเป็นดังความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.22 และมีค่าดังตารางที่ 4.9



รูปที่ 4.22

แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่บริเวณขอบเขตของเกรนกับความหนาของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอินเดียม เมื่อไม่ได้มีการแอนนีส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 แสดงค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่บริเวณขอบเขตของเกรนกับความหนาของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เจือด้วยอินเดียม เมื่อไม่ได้มีการแอนนیل

ความหนา (nm)	ความสูงของกำแพงศักย์ (eV)
150	0.313
491	0.242
750	0.147
1000	0.150
1200	0.156

สำหรับในกรณีฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์เจือด้วยอินเดียมที่มีการแอนนیلในช่วงอุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนบริสุทธิ์ที่มีความหนาเท่ากับคือ 850 นาโนเมตร ปรากฏว่าค่ากำแพงศักย์สอดคล้องกับค่าความต้านทานแผ่นและค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าในกรณีเดียวกัน แสดงได้ดังตารางที่ 4.10 ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของผู้อื่นที่ผ่านการตีพิมพ์เผยแพร่มาแล้ว [5-7, 17-19]

ตารางที่ 4.10 แสดงค่าความสูงของกำแพงศักย์ที่บริเวณขอบเขตของเกรนกับค่าอุณหภูมิแอนนิลของฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่มีความหนา 850 นาโนเมตรเมื่อมีการแอนนิลในช่วงอุณหภูมิ 100 –500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ เป็นเวลา 30 นาที

อุณหภูมิแอนนิล (°C)	ความสูงของกำแพงศักย์ (eV)
30	0.160
100	0.129
200	0.122
300	0.160
400	0.180
500	0.220

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศนั้น ลักษณะของฟิล์มที่ได้จะยึดเกาะกับฐานรองได้ดี เมื่อทำการศึกษาคู่ด้วย XRD พบว่าโครงสร้างของฟิล์มที่เตรียมได้จะเป็นแบบเฮกซะโกนอลและมีความเป็นเนื้อเดียวกัน ความหนาของฟิล์มที่เพิ่มขึ้นจะ ส่งผลให้ค่าช่องว่างแถบพลังงานลดลง และคุณสมบัติการนำไฟฟ้าดีขึ้น เนื่องจากความเป็นผลึกของฟิล์ม สมบูรณ์ขึ้นจำนวนขอบของเกรนลดลง เกรนมีขนาดใหญ่ขึ้น นอกจากนี้อุณหภูมิในการแอนนัล ที่เพิ่มขึ้นก็จะส่งผลกระทบต่อค่าช่องว่างแถบพลังงานและคุณสมบัติทางไฟฟ้า คล้ายกันกับการเพิ่มขึ้นของความหนา โดยเมื่ออุณหภูมิแอนนัลอยู่ในช่วง 100 – 300 องศาเซลเซียส ค่าความต้านทานแผ่น ของฟิล์มจะมีค่าลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น แต่หลังจากนั้นคือที่อุณหภูมิมากกว่า 400 องศาเซลเซียส ค่าความต้านทานแผ่นจะมีค่าเพิ่มขึ้น การเจือด้วยอินเดียมจะทำให้ฟิล์มที่ได้มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าดีขึ้น โดยจะช่วยลดค่าความต้านทานแผ่นของฟิล์มลง แต่จะทำให้ค่าช่องว่างแถบพลังงานเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์บริสุทธิ์ เมื่อนำเอาฟิล์มบางที่เจือด้วยอินเดียมไปแอนนัล พบว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานจะลดลง แต่ค่าความต้านทานแผ่นกลับเพิ่มขึ้น โดยค่าช่องว่างแถบ พลังงานสามารถหาได้จากการวัดค่าการดูดกลืนแสง และมีค่าอยู่ในช่วง 2.40 ถึง 2.55 อิเล็กตรอน โวลต์ โดยฟิล์มบางที่เตรียมได้ทั้งหมดมีลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานเป็นแบบตรง ส่วนค่าสภาพต้านทานจะมีค่าอยู่ในช่วง 10^{-2} ถึง 10^8 โอห์ม-เซนติเมตร จากการศึกษาสภาพต้านทานไฟฟ้าในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 120 องศาเซลเซียส เพื่อหาค่าค่าแกงศักย์บริเวณขอบของเกรน พบว่ามีกลไกการนำไฟฟ้าเป็นแบบเทอร์มิโอนิกอิมิสชัน เมื่อความหนาของฟิล์มหรืออุณหภูมิที่ใช้ในการแอนนัลเพิ่มขึ้นค่าของค่าแกงศักย์จะมีค่าลดลงสอดคล้องกันกับค่าของสภาพต้านทานไฟฟ้า โดยจะมีค่าอยู่ในช่วง 0.122 ถึง 0.313 อิเล็กตรอน โวลต์

ปัญหาและข้อเสนอแนะ

ในการเตรียมฟิล์มบางฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศนั้น พบปัญหาและเทคนิคบางประการที่สามารถนำไปปรับปรุงการทดลอง เพื่อให้ผลลัพธ์ออกมาดีที่สุด ปัญหาและข้อเสนอแนะมีดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- คุณภาพของฟิล์มบางขึ้นอยู่กับวิธีการกัดผิวหน้าของกระจกสไลด์ด้วยกรด HF เจือจาง ดังนั้น เวลากัดผิวหน้าต้องระวังไม่ให้กระจกสไลด์ซ้อนทับกัน มิฉะนั้นกระจกสไลด์จะถูกกัดไม่สม่ำเสมอทั่วแผ่น
- ในการเตรียมเม็ดสาร ถ้าเตรียมทิ้งไว้นานจะทำให้เกิดความชื้นภายในเม็ดสารส่งผลให้เวลาทำการระเหยเม็ดสารจะกระเด็นออกจากเบ้าหลอม
- ในกรณีที่ฟิล์มบางมาก การหาความหนาโดยการชั่งน้ำหนักจะทำได้ยาก เนื่องจากความละเอียดของเครื่องชั่งไม่มากพอ
- ควรมีการศึกษาปรากฏการณ์ของฮอลล์(Hall effect) เพื่อทราบข้อมูลที่สำคัญของ ฟิล์มบาง เช่น ความหนาแน่นของพาหะอิสระ, สภาพความคล่องตัวของพาหะและชนิดการนำไฟฟ้าของสาร เป็นต้น
- ควรมีการวัดความหนาด้วยวิธีอื่นเพื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้ว่ามีความน่าเชื่อถือได้มากน้อยเพียงใด
- ในระบบสุญญากาศระบบหนึ่งๆ เราควรใช้กับการระเหยสารที่เป็นชนิดเดียวเท่านั้น เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของสารต่างชนิดกัน และควรมีระบบในการควบคุมความหนาของฟิล์มบางด้วย
- ในขณะที่ทำการเตรียมฟิล์มบาง ควรให้อุณหภูมิกับฐานรองรับด้วย เพื่อให้ฟิล์มมีการยึดเกาะที่ดีและมีความสมบูรณ์ของผลึกมากยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. A.S. Gilmore, Studies of the Basic Electronic Properties of CdTe and CdS Thin Films and CdTe/CdS Solar Cells. Thesis Proposal Colorado School of Mines. 2000.
2. J.R. Tuttle, A. Szalaj and J. Keane, A 15.2% AMO/1433 W/KG Thin-Film Cu(In,Ga)Se₂ Solar Cell for Space Applications. 28th IEEE Photovoltaics Specialists Conference, September 15-22, 2000.
3. H. Chavez, M. Jordan, J.C. McClure, G. Lush, and V.P. Singn, Physical and Electrical Characterization of CdS Films Deposition by Vacuum Evaporation, Solution Growth and Spray Pyrolysis. J.Mater.Sci:Mater Elec. Vol.8, 1997, pp. 151-154.
4. H. Oumous, and H. Hadiri, Optical and Electrical Properties of Annealed CdS Thin Films Obtained from a Chemical Solution. Thin Solid Films. Vol. 386, 2001, pp. 87-90.
5. กามนิตย์ แก้วแดง, จิตินัย แก้วแดง, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และชัยสิงห์ ภูรัศม์เกียรติ, “การเตรียมและการศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง Cd_{1-x}Zn_xS เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2543
6. กามนิตย์ แก้วแดง, จิตินัย แก้วแดง และทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ “การเตรียมฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2545
7. จิตินัย แก้วแดง, กามนิตย์ แก้วแดง, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และชัยสิงห์ ภูรัศม์เกียรติ “การประดิษฐ์ฟิล์มบาง Cd_{1-x}Zn_xS ที่มี Zn ในปริมาณสูงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์” รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2546
8. S.M. Sze, “Physics of Semiconductor Devices”, John Wiley & Sons, 2nd Edn. New York, 1981, pp. 805-808.
9. G.S. Shahane and L.P. Deshmukh, “Structural and Electrical Transport Properties of CdS_{0.9}Se_{0.1}:In Thin Films : Effect of Film Thickness”, *Mat. Chem. Phys.*, Vol.70, 2001, pp. 112-116.
10. Y. Kashiwaba, K. Isojima and K. Ohta “Improvement in the Efficiency of Cu-doped CdS/Non-doped CdS Photovoltaic Cells Fabricated by an All-Vacuum Process” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, Vol. 75, 2003, pp. 253-259.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11. K.S. Ramaiah , “Electrical Properties of In Doped CdS Thin Films”, *J. Mater. Sci., Mater. Electron.*, Vol.10, 1999 , pp. 291-294.
12. I. Gunal and H. Mamikoglu, “Some Properties of CdS:In Thin Films”, *Thin Solid Films*, Vol.185, 1990, pp.1-4.
13. M.V. Garcia – Cuenca, J.L. Morenza and J. Esteve, “Structural and Electrical Properties of CdS:In Thin Films”, *J. Appl. Phys.*, Vol.56, 1984, pp. 1738-1741.
14. P.C. Mathur, B.R. Sethi, P.K. Gayal and O.P. Sharma, “Influence of Thermal Annealing on In doped CdS Thin Films Prepared by Thermal Evaporation”, *J. Appl. Phys.*, Vol.52, 1981, pp. 7237-7240.
15. K. SubbaRamaiah and V. Suntara Raja, “Some Properties of Chemical Bath Deposited CdS:In Thin Films” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, Vol.32, 1994, pp. 1-5.
16. U.S. Jadhar, S.S. Kale and C.D. Lokhande, “Effect of Cd:S Ratio on the Photoconductivity Properties of Chemically Deposited CdS Films”, *Mat. Chem. Phys.*, Vol.69, 2001, pp. 125-132.
17. H. Oumous, H. Hadiri, “Optical and Electrical properties of Annealed CdS Thin Films Obtained from a Chemical Solution”, *Thin Solid Films*, Vol.386, 2001, pp. 87-90.
18. S.A. Tomas, O. Vigil, J.J. Alvarado-Gil, R. Lozado-Moralas and O. Zelaya-Angel , “Influence of Thermal Annealings in Different Atmosphere on the Band-Gap Shift and Resistivity of Chemical Bath Deposited CdS Thin Films”, *J. Appl. Phys.*, Vol.78(4), 1995, pp. 2204-2007.
19. M. Ichimura, F. Goto and E. Arai, “Structural and Optical Characterization on CdS Films Grown by Photochemmical Deposition”, *J. Appl. Phys.*, Vol.85 (10), 1999, pp. 7411-7417.
20. B.D. Cullity 1956. Elements of X-rays Diffraction. Addison-Wesley Publishing Company Inc. 1956, pp. 9-14.
21. C. Kittel, Introduction to Solid State Physics. 4th ed. New York:John Wiley&Sons Inc.1971, pp. 4-32, 46-48, 56-60, 364-365, 540-552, 611-612.
22. บัญชา ชนบุญสมบัติ การศึกษาวัสดุโดยเทคนิคไฟฟ้าพลาสมา. ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ:สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น):2544, หน้า 9, 12-15, 25.

23. สิงหเดช แต่งจวง. 2539. การเตรียมฟิล์มบางแคดเมียมซัลไฟด์สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ โดยเทคนิคการเคลือบแบบออบสารละลายเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาฟิสิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2539.
24. F. Abelas, in *Optical Properties of Solids*, North-Holland, London, 1972, pp.23-40,
25. W.R. Runyan, *Semiconductor Measurement and Instrumentation*. New York. :Mc-GrawHill:Bombary, 1975.
26. K.M. Garadkar, P.P. Hankare, and R.K. Patil Effect of Indium Doping on Structural, Optical and Electrical Properties of $Cd_{0.95}Hg_{0.05}S$ Thin Films. *Mater.Chem.Phys.* Vol. 58, 1999.:64-70.
27. Ramaiah, K.S. 1999. Electrical Properties of In Doped CdS Thin Films. *J.Mater.Sci.Mater. Elec.* Vol. 10 ,pp. 291-294.
28. Garcia-Cuencu, M.V.; Morenza, J.L. and Codina, J.M. Electrical Conduction in Polycrystalline CdS Films: I. Theory. *J.Phys.D:Appl.Phys.* Vol. 20, 1987, pp.951-957.
29. M.V. Garcia-Cuencu, J.L. Morenza, E. Bertran, and A. Lousa, 1987. Electrical Conduction in Polycrystalline CdS Films: II. Comparison of Theory and Experiment. *J.Phys.D:Appl.Phys.* Vol. 20, 1987, pp. 958-962.
30. I. Gunal, I. and M. Parlak, Current Transport Mechanisms in Low Resistive CdS Thin Films. *J.Mater.Sci.Mater.Elec.* Vol.8, 1997, pp.9-13.
31. M. Ohring, 2002. *Materials Science of Thin Films Deposition and Structure*. 2nd ed. San Diego, CA: Academic Press, 2002, pp.58-69, 71, 97-101, 106-109, 118-121.
32. G.E. McGuire, *Semiconductor Materials and Process Technology Handbook*. Park Ridge, NJ: Noyes, 1988, pp.340-343, 349.
33. N.S. Harris, N.S. *Modern Vacuum Practice*. London: McGraw-Hill.: 1989, pp.71-73, 76-77, 114, 118-120.
34. ชัยวิทย์ ศิวาวัชฌนาไนย ฟิสิกส์และเทคโนโลยีระบบสุญญากาศ. กรุงเทพฯ: สสมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น): 2526, หน้า 9-15, 25-26.
35. C.D. Lokhande, A.U. Ubale, and P.S. Patil, Thickness Dependent Properties of Chemically Deposited Bi_2S_3 Thin Films. *Thin Solid Films*. Vol.302, 1997 pp.1-4.

ภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติหัวหน้าโครงการวิจัย

1. ชื่อผู้ขอรับทุน (ภาษาไทย) นายฐิตินัย แก้วแดง
(ภาษาอังกฤษ) Mr. Thitinai Gaewdang
2. ตำแหน่งและสถานที่ทำงานปัจจุบัน
รองศาสตราจารย์ ระดับ 9 ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เขตลาดกระบัง
กรุงเทพฯ 10520 โทร. 737-3000 ต่อ 6213, 6214
3. ประวัติการศึกษา
วท.บ. (ฟิสิกส์) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ
วท.ม. (ฟิสิกส์) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ
ปริญญาเอก มหาวิทยาลัยบอร์โด 1 ประเทศฝรั่งเศส
4. ประสบการณ์ในการวิจัย
 - 4.1 การปลูกผลึกของสารกึ่งตัวนำ และสารประกอบอ็อกไซด์ ด้วยวิธีบริดจ์แมน-สโตคบาร์เกอร์ ,
วิธี CVD และวิธีหลอมฟลักซ์
 - 4.2 การเตรียมฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำด้วยวิธีระเหยในระบบสุญญากาศและวิธีการอบ
สารละลายเคมี
 - 4.3 การศึกษาสมบัติพื้นฐาน เช่น คุณสมบัติเชิงไฟฟ้า คุณสมบัติเชิงแสง เป็นต้น
5. ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์ออกเผยแพร่ในวารสารและถึงตีพิมพ์ต่าง ๆ
 - 5.1 Ng. Gaewdang, T. Gaewdang, C. Poo-Rakkiat and A. Nakaruk "Optoelectronic Properties of
Fluorine Doped Tin Oxide Thin Films Prepared by Spray Pyrolysis Deposition Technique"
The International Conference on Smart Materials SmartMat'04, 1-3 December 2004,
Imperial Mae Ping Hotel, Chiang Mai, Thailand, p.62.
 - 5.2 Ng. Gaewdang, T. Gaewdang and A. Nakaruk "Studies on the Electrical and Optical
Properties of SnO₂:F Thin Films Prepared by Intermittent Spray Pyrolysis Method" 30th
Congress on Science and Technology of Thailand, 19-21 October 2004, Impact Exhibition
and Convention Center, Muang Thong Thani, Nonthaburi, Thailand, p.152
 - 5.3 Ng. Gaewdang, T. Gaewdang, S. Kirtsaeng, P. Sittiketkorn and T. Chanyatham "Some
Properties of Cadmium Telluride Thin Films Grown by Thermal Evaporation" 30th Congress
on Science and Technology of Thailand, 19-21 October 2004, Impact Exhibition and
Convention Center, Muang Thong Thani, Nonthaburi, Thailand, p.158.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 5.4 Ng. Gaewdang, T. Gaewdang, S. Kirtsaeng, P. Sittiketkorn and T. Chanyatham "Growth and Some Properties of CdTe Thin Films by Thermal Evaporation" The Third Thailand Materials Science and Technology Conference (MSAT III), 10-11 August 2004, Bangkok, Thailand, pp.264-266.
- 5.5 Gaewdang, T. Gaewdang, N. Promros, A. Nakaruk, W. Lipar and T. Chanyatham "Photochemical Deposition CdS Thin Films for Photovoltaic Applications" The First National Conference on Optics and Applications (NCOA-1), 9 January 2004, Bangkok, Thailand, pp.75-79.
- 5.6 Ng. Gaewdang, T. Gaewdang, S. Kirtsaeng, P. Sittiketkorn and A. Nakaruk "Characterization of CdS Thin Films Grown by Thermal Evaporation Method" The First National Conference on Optics and Applications (NCOA-1), 9 January 2004, Bangkok, Thailand, pp.80-83.
- 5.7 Ng. Gaewdang and T. Gaewdang "Thickness Dependence of Structural, Optical and Electrical Properties of CdS and CdS:In Films Prepared by Thermal Evaporation" Technical Digest of the International PVSEC-14, Bangkok, Thailand. 2004, pp.581-582.
- 5.8 Gaewdang, T. Gaewdang and W. Lipar "Some Characterization of Chemical Bath Co-Deposited CdS- ZnS Thin Films" Technical Digest of the International PVSEC-14, Bangkok, Thailand. 2004, pp.583-584.
- 5.9 Ng. Gaewdang and T. Gaewdang CdS Thin Films Deposited by a Modified Chemical Bath Deposition Method KMITL Science Journal, Vol.3, No.3, 2003, pp.21-29.
- 5.10 Ng. Gaewdang, W. Lipar, T. Gaewdang and T. Wongcharoen "Photoluminescence of Chemical Bath Co-Deposited CdS-ZnS Thin Films" 29th Congress on Science and Technology of Thailand, 20-22 October 2003, Khonkaen University
- 5.11 Ng. Gaewdang, W. Lipar, T. Chanyatham, T. Gaewdang and T. Wongcharoen "Some Properties of Chemical Bath Co-Deposited CdS-ZnS Thin Films" 29th Congress on Science and Technology of Thailand, 20-22 October 2003, Khonkaen University
- 5.12 Ng. Gaewdang, T. Gaewdang, T. Wongcharoen and P. Sittiketkorn "Preparation of Zinc Sulfide Thin Films for Solar Cell Applications" 29th Congress on Science and Technology of Thailand, 20-22 October 2003, Khonkaen University
- 5.13 Ng. Gaewdang and T. Gaewdang "Properties of Cadmium Sulfide Thin Films Prepared by Photochemical Deposition Technique at Room Temperature" Third International Conference

- on Inorganic Materials, 7-10 September 2002, Steigenberger Hotel, Konstanz, Germany, p.40
- 5.14 Ng. Gaewdang, T. Gaewdang and N. Promros, "Structural and Optical Properties of CdS Thin Films Prepared by Photochemical Deposition Technique" The second Thailand Materials Science and Technology Conference, MSAT II: Materials Science and Technology for a Sustainable Development of Thailand, 6-7 August 2002 Kasertsart University , Bangkok.
- 5.15 Ng. Gaewdang and T. Gaewdang "Fabrication of CuInSe₂ Single Crystals From Melt Growth by Directional Freezing Method" 1st International Symposium on Optical and Quantum Technology, 7-8 December, 2001 Faculty of Science, KMITL, Bangkok, Thailand. pp.46-50.
- 5.16 Ng.Gaewdang and T. Gaewdang "Process and Characterization of Cadmium Sulfide Thin Films Suitable for Solar Cell Applications" 24th Electrical Engineering Conference (EECON-24), 22-23 November 2001, Faculty of Engineering , KMITL, Bangkok ,Thailand. pp.632-636.
- 5.17 Gaewdang and Ng. Gaewdang, "Properties of Cadmium Sulfide Thin Films Prepared by Chemical Bath Deposition Method", Journal of Science Khonkaen University, Vol. 28, No. 1, 2000, pp.44-52.
- 5.18 T. Gaewdang and Ng. Gaewdang "Preparation of Indium Tungstate Single Crystals by Chemical Vapor Method", Journal of King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang , Vol. 8 , No. 1 , 2000 ; pp. 33 – 36.
- 5.19 Ng. Gaewdang, T. Gaewdang, C. Poo-Rakkiat and A. Nakaruk "Optoelectronic Properties of Fluorine Doped Tin Oxide Thin Films Prepared by Spray Pyrolysis Deposition Technique" The International Conference on Smart Materials SmartMat'04, 1-3 December 2004, Imperial Mae Ping Hotel, Chiang Mai, Thailand, p.62.