บทที่ 5
สรุปผลการทดลอง ปัญหาและข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการสร้างระบบควบคุมการระเหยสาร 3 จุด โดยคอมพิวเตอร์ ระบบควบคุมได้ผ่านการทดสอบการทำงาน และรู้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เป็นอย่างดี จากนั้นจึงได้ทำการเตรียมแผ่นฟิล์ม $CuInSe_2$ เพื่อตรวจสอบโครงสร้างผลึก และทำการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้า

ผลจากงานวิจัย สรุปได้ดังนี้ :-

5.1 สรุปผลระบบควบคุมการระเหยสาร 3 จุด โดยคอมพิวเตอร์

สมมติฐานของแหล่งกำเนิดในการระเหยสารของระบบจะสอดคล้อง กับ สมมติฐานของแหล่งกำเนิดที่เป็นพื้นที่เล็ก ๆ (Small area sources) การควบคุมอัตราการระเหยของระบบ สามารถทำการควบคุมอัตราการระเหยแต่ละจุด พร้อมกัน โดยแยกอิสระทั้ง 3 จุด สามารถมองเห็นอัตราการระเหย ขณะทำการทดลองอย่างชัดเจน จากกราฟที่ปรากฏบนจอภาพของคอมพิวเตอร์ ซึ่งความผิดพลาดของอัตราการระเหยมีเพียง + 1 Hz./sec.

การวัดความหนาของแผ่นฟิล์ม ในระยะต่าง ๆ กระทำได้ เมื่อทราบค่าความถี่ที่เปลี่ยนไปของคริสตอล โดยแทนการค่าในสมการ $t = [(7172)/(1^2+20^2)^2(\Delta f/P)]$ ซึ่งเป็นการวัดค่าความหนาของแผ่นฟิล์มที่อุณหภูมิห้องเท่านั้น การวัดความหนาของแผ่นฟิล์มโดยใช้คริสตอลเป็นมอนิเตอร์ (Monitor) นี้ได้มีรายงานการวิจัย[16] ทำการทดลองเปรียบเทียบค่าความหนาของแผ่นฟิล์ม กับการวัดโดยวิธี Fizean Interferometer ซึ่งเป็นการวัดความหนาทางแสง ผลจากรายงานปรากฏว่า ค่าที่วัดได้ใกล้เคียงกัน จึงพอสรุปได้ว่า การวัดความหนาของแผ่นฟิล์มโดยวิธีนี้มีความแม่นยำพอสมควร และเป็นที่ใช้ในงานวิจัยเกี่ยวกับฟิล์มบางโดยทั่วไป

การเตรียมแผ่นฟิล์ม $CuInSe_2$ จากการระเหย Cu, In และ Se จาก 3 จุด พร้อมกัน ได้กระทำที่อัตราการระเหย Cu : In : Se เท่ากับ 2 : 4 : 4 Hz./sec.

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

ซึ่งเป็นอัตราสูงสุดที่ทำได้ของระบบ ถ้าต้องการอัตราการระเหยสูงกว่านี้ จะต้องทำการสร้างหม้อแปลงให้กระแสสูงมากกว่าเดิม โดยเฉพาะจุดที่ใช้ระเหยสาร Cu ส่วนอุณหภูมิแผ่นรองรับสามารถควบคุมอุณหภูมิได้สูงสุดไม่เกิน 250°C เพราะหากอุณหภูมิสูงกว่านี้จะทำให้การทำงานของคริสตอลเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ

เนื่องจากระบบสุญญากาศมีขนาดเล็ก ขณะทำการทดลองเป็นเวลานาน จะทำให้ระบบร้อนมาก มีผลทำให้ระบบควบคุมการระเหยสารทำงานผิดพลาดและเสียหายได้ แต่อย่างไรก็ตาม การเตรียมแผ่นฟิล์มที่มีความหนามาก ๆ กระทำได้โดยใช้วิธีการระเหยสาร 2-3 ครั้งซ้อนทับกัน เพื่อให้ได้ค่าความหนาตามที่ต้องการ

ระบบควบคุมการระเหยสารที่ได้พัฒนาขึ้นมานี้ คาดว่า จะเตรียมแผ่นฟิล์มได้ผลดี เพราะสามารถควบคุมอัตราการระเหยสารแต่ละจุด และสามารถอ่านค่าความหนาในระยะต่างๆ ของแผ่นฟิล์มได้ โดยที่มีค่าผิดพลาดน้อยมากที่อุณหภูมิห้อง

5.2 สรุปผลการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของแผ่นฟิล์ม $CuInSe_2$

แผ่นฟิล์มที่เตรียมได้ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.12 เมื่อนำไปตรวจสอบโครงสร้างผลึกโดยวิธี XRD พบว่าแผ่นฟิล์มที่ 1 และ 2 ไม่ปรากฏเส้นของการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ให้เห็น สาเหตุเพราะมีค่าความหนาของแผ่นฟิล์มน้อย แต่เมื่อใช้อัตราการระเหยสาร Cu : In : Se เป็น 2 : 4 : 4 Hz./sec. และแผ่นฟิล์มมีความหนาเพิ่มขึ้น ตามการทดลองแผ่นฟิล์มที่ 3 และ 4 จะเริ่มปรากฏเส้นการเลี้ยวเบนให้เห็น เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับเส้นมาตรฐานของผลึก $CuInSe_2$ แบบชาลโคไพไรท์ พบว่า เส้น (112)(220, 204) และ(116,312) ปรากฏให้เห็นค่อนข้างชัดเจน เส้นเหล่านี้จะปรากฏในโครงสร้างของผลึกที่เป็นได้ทั้งแบบชาล-โคไพไรท์ และสฟาเลอไรท์ เส้นที่แสดงว่าเป็นชาลโคไพไรท์ จะเป็นเส้น(103)(211) และ (213)[19] คาดว่าแผ่นฟิล์มที่มีความหนามากกว่านี้ อีกทั้งเตรียมโดยใช้อัตราการระเหยของ Cu:In:Se เป็น 2:4:6 Hz./sec. และผ่านการแอนนีลที่อุณหภูมิ 400°C.เป็นเวลา 1(1/2) ชั่วโมง จะเห็นเส้นของการเลี้ยวเบนชัดเจนขึ้น

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

5.3 สรุปผลสมบัติทางไฟฟ้าของแผ่นฟิล์ม $CuInSe_2$

สมบัติทางไฟฟ้า ขณะที่ทำการแอนนีลพบว่า การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของแผ่นฟิล์มกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น จะมีรูปแบบเส้นกราฟที่คล้ายกัน ไม่ว่าทำการแอนนีลที่อุณหภูมิใดก็ตาม ดังกราฟรูปที่ 4.17 และ 4.18 แต่ในที่นี้เงื่อนไขในการเตรียมแผ่นฟิล์มจำเป็นต้องเหมือนกัน อาจไม่เท่ากันเฉพาะในส่วนความหนา การแอนนีลแผ่นฟิล์มควรกระทำในสุญญากาศ เพื่อไม่ให้อากาศเข้าทำปฏิกริยากับแผ่นฟิล์ม เพราะไม่เช่นนั้นคุณสมบัติของแผ่นฟิล์มจะเปลี่ยนไป และในการแอนนีลแผ่นฟิล์มไม่สามารถกระทำในอุณหภูมิที่สูงกว่า 450°C เพราะจะทำให้กระจกสไลด์อ่อนตัวทำให้เกิดความเสียหายแก่แผ่นฟิล์ม

แผ่นฟิล์มที่ผ่านการแอนนีลที่อุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 1 (1/2) ชั่วโมง พบว่าความต้านทานของแผ่นฟิล์มเปลี่ยนแปลงอย่างมาก กับอุณหภูมิ โดยค่าความต้านทานจะแปรผกผันกับอุณหภูมิ (°K) ดังกราฟรูปที่ 4.22 ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้ เป็นไปตามสมการ Arrhenius คือ

$$\sigma = \sigma_o \exp^{-E/KT}$$

เมื่อ E เป็นพลังงานกระตุ้น (Activation energy) จากผลการทดลองคำนวณค่า E_g จากกราฟ จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.8-1.1 eV. และผลจากการทดลองฉายแสงปรากฏว่าแผ่นฟิล์มมีความไวต่อแสง ดังกราฟรูปที่ 4.24 ในส่วนการวัดการนำกระแสไฟฟ้าของแผ่นฟิล์มพบว่า กระแสจะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับความต่างศักย์ ซึ่งเป็นการนำกระแสแบบโอห์มมิค และเมื่อทำการตรวจสอบสมบัติของสารกึ่งตัวนำ ผลเป็นชนิดพี

5.4 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

ปัญหาและข้อเสนอแนะในการทำวิจัยมีดังนี้

5.4.1 ปัญหาของระบบควบคุมการระเหยสาร 3 จุด โดยคอมพิวเตอร์

1. การให้อุณหภูมิแผ่นรองรับ ไม่สามารถให้อุณหภูมิเกิน 250°C ได้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

เพราะจะทำให้ความถี่คริสตอลเปลี่ยนไป มีผลทำให้ระบบควบคุมทำงานผิดพลาด

2. อัตราการระเหยสูงสุดมีค่าเท่ากับ 2 : 4 : 4 Hz./sec. ซึ่งไม่สามารถเตรียมแผ่นฟิล์มที่หนาได้ในช่วงเวลาสั้น จำเป็นต้องทำการระเหยสารซ้อนทับกัน 2-3 ครั้ง จึงจะได้แผ่นฟิล์มที่มีความหนาตามที่ต้องการ

5.4.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรใช้ฉนวนกั้นความร้อนรองฐานยึดคริสตอล เพื่อไม่ให้อุณหภูมิของแผ่นรองรับมีผลต่อความถี่คริสตอล เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 250°C

2. ควรมีการสร้างหม้อแปลงใหม่ ที่ให้กระแสมากกว่าเดิม เพื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้าในการระเหยสารให้ได้อัตราการระเหยเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะจุดที่ 1 ที่ใช้ระเหยสาร Cu

5.4.3 ปัญหาการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของแผ่นฟิล์มโดยวิธี XRD

1. แผ่นฟิล์มที่เตรียมได้ มีความหนาน้อย ไม่สามารถทำให้เห็นเส้นของการเลี้ยวเบนที่เด่นชัด

2. ข้อจำกัดของห้องปฏิบัติการวิจัย ซึ่งยังขาดเครื่องฉายรังสีเอ็กซ์ (XRD) ไม่สามารถวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของแผ่นฟิล์มได้อย่างต่อเนื่อง

5.4.4 ข้อเสนอแนะ

1. ควรเตรียมแผ่นฟิล์มที่มีความหนามีค่าเป็นไมครอน เพื่อจะได้เห็นเส้นการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เด่นชัดขึ้น

5.4.5 ปัญหาการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของแผ่นฟิล์ม

1. แผ่นรองรับฟิล์มที่เป็นกระจกสไลด์ ไม่สามารถทำการแอนนีลให้มีอุณหภูมิสูงกว่า 450°C ได้ เพราะทำให้กระจกสไลด์เกิดการอ่อนตัว มีผลทำให้แผ่นฟิล์มเสียหาย

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2. แผ่นฟิล์มที่เตรียมได้ คุณสมบัติจะเปลี่ยนไป เมื่อทิ้งสัมผัสกับอากาศเป็นเวลานาน ก่อนการแอนนีล

3. แผ่นฟิล์มที่ผ่านการแอนนีลมีความไวต่อแสง หากทิ้งสัมผัสกับอากาศเป็นเวลานาน คุณสมบัติความไวต่อแสงจะเปลี่ยนไป ซึ่งจะมีความไวน้อยลง

5.4.6 ข้อเสนอแนะ

1. ควรเปลี่ยนแผ่นรองรับฟิล์มใหม่ ที่ทนอุณหภูมิสูงกว่า 450°C เช่น กระจกสไลด์ชนิด Corning glass ฯลฯ

2. แผ่นฟิล์มที่เตรียมได้ควรรีบทำการแอนนีลทันทีไม่ควรทิ้งไว้เป็นระยะเวลานาน เพราะจะทำปฏิกริยากับอากาศทำให้คุณสมบัติของแผ่นฟิล์มเปลี่ยนไป

3. แผ่นฟิล์มที่ผ่านการแอนนีล และมีความไวต่อแสง ควรรีบพ่นสเปรย์พลาสติกฉาบแผ่นฟิล์มไว้ เพื่อไม่ให้ทำปฏิกริยากับอากาศ เพราะจะทำให้คุณสมบัติความไวต่อแสงของแผ่นฟิล์มลดน้อยลง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved