บทที่ 5
สรุปผลการทดลอง ปัญหา และข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับระบบระเหยสาร 3 จุด โดยใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมอัตราการระเหยสาร ที่มีอยู่แล้วในห้องปฏิบัติการโซลิด-อิเล็กทรอนิกส์และได้ทำการแก้ไขปรับปรุงในบางส่วนเพื่อให้เป็นระบบที่สามารถใช้ในการระเหยสารได้อย่างมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น หลังจากนั้นจึงได้ทำการทดลองเตรียมแผ่นฟิล์มบางอินเดียมซิลิเนียม โดยการระเหยสารจาก 2 จุด เพื่อศึกษาโครงสร้างและสมบัติทางไฟฟ้าของแผ่นฟิล์มที่เตรียมได้ ผลจากงานวิจัยพอสรุปได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการศึกษาและทดสอบระบบการระเหยสาร

ระบบที่ใช้ระเหยสารเพื่อเตรียมแผ่นฟิล์มบางโดยการระเหยสารพร้อมกันทั้ง 3 จุด สามารถทำการควบคุมอัตราการระเหยสารแต่ละจุดแยกจากกันได้อย่างอิสระ และเมื่อทำการให้อุณหภูมิกับแผ่นรองรับ จะไม่ทำให้ความถี่ของผลึกควอร์ตซ์ที่ใช้เป็นมอนิเตอร์ของแต่ละจุดเปลี่ยนไปจากเดิมในกรณีที่ไม่มีการระเหยสาร ทำให้ระบบการระเหยสารมีเสถียรภาพและประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น ขณะทำการระเหยสารพบว่ามีอัตราความผิดพลาดของอัตราการระเหยอยู่ในช่วง ±1 Hz./sec. ในรายงานการวิจัยของ จิติ หนูแก้ว และสุนิตย์ โรจนสุวรรณ พบว่าแหล่งกำเนิดที่ใช้ในการระเหยสารนี้สอดคล้องกับสมมุติฐานของแหล่งกำเนิดที่เป็นแบบพื้นที่เล็กๆ และได้ทำการทดลองพบว่าผลึกควอร์ตซ์ที่เป็นมอนิเตอร์ มีค่าความไวเฉลี่ยประมาณ 75 Hz./μgm. นอกจากนี้มีรายงานการวิจัย[10] เกี่ยวกับการวัดความหนาของแผ่นฟิล์มโดยใช้ผลึกควอร์ตซ์เป็นมอนิเตอร์ เปรียบเทียบกับการวัดโดยวิธี Fizean interferometer ปรากฏว่า ค่าความหนาที่วัดโดยวิธีทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน จึงพอสรุปได้ว่าการวัดความหนาของแผ่นฟิล์มโดยวิธีใช้ผลึกควอร์ตซ์เป็นมอนิเตอร์มีความแม่นยำพอสมควร ดังนั้นเมื่อทราบค่าความไวของผลึกควอร์ตซ์ก็สามารถหาความหนาของแผ่นฟิล์มที่ระยะ 1 ต่างๆได้จากสมการ

$$t = [7172.56\times10^{2}/(1^{2}+20^{2})^{2}](\Delta f/\rho)$$

และสามารถหาค่ามวลต่อหน่วยพื้นที่ของสารที่เกาะเป็นแผ่นฟิล์มได้จากสมการ

$$dm/da = [7172.56\times10^{2}/(1^{2}+20^{2})^{2}](\Delta f)$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

5.2 สรุปผลการเตรียมแผ่นฟิล์มบางอินเดียมซิลิเนียม

ในการทดลองเตรียมแผ่นฟิล์มบางอินเดียมซิลิเนียมโดยการระเหยสารอินเดียมและสารซิลิเนียมจาก 2 จุดพร้อมกัน ซึ่งได้ใช้อัตราการระเหยสาร อินเดียม:ซิลิเนียม เท่ากับ 2:3 Hz./sec. เป็นอัตราการระเหยที่ต่ำสุด เนื่องจากถ้าใช้อัตราการระเหยสูงๆ จะทำให้อุปกรณ์ต่างๆภายในระบบสุญญากาศร้อนมาก และขนาดของสาร(Grain size)ที่ระเหยขึ้นไปจับบนแผ่นกระจกสไลด์มีขนาดใหญ่ ซึ่งอาจจะมีผลในการฟอร์มตัวเป็นสารประกอบของอินเดียมซิลิเนียมได้ไม่สมบูรณ์ แต่อย่างไรก็ตาม ระบบที่ใช้ระเหยสารนี้สามารถที่จะทำการระเหยสาร โดยใช้อัตราการระเหยสารในแต่ละจุดสูงกว่านี้ได้ ทำให้ใช้เวลาในการระเหยสารน้อยลง แต่ก็อาจจะมีข้อเสียตามที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น

ในการเตรียมแผ่นฟิล์มแต่ละฟิล์ม ใช้เวลาในการระเหยสารประมาณ 2000 วินาที จะได้แผ่นฟิล์มมีความหนาประมาณ 10^3 °A. ซึ่งยังถือว่าเป็นแผ่นฟิล์มที่บางมาก เนื่องจากระบบที่ใช้ระเหยสารมีขนาดเล็กและขนาดของโบ๊ตที่ใส่สารแต่ละจุดมีขนาดเล็ก ทำให้มีข้อจำกัดในการที่จะใส่สารแต่ละจุด ซึ่งอาจจะทำให้การเตรียมฟิล์มแต่ละครั้งจะได้แผ่นฟิล์มหนาไม่มาก แต่ถ้าต้องการเตรียมแผ่นฟิล์มให้มีความหนามากๆก็สามารถทำได้ โดยใช้การระเหยสารหลายๆครั้งซ้อนทับกัน ก็จะสามารถจะเตรียมแผ่นฟิล์มที่มีความหนาตามที่ต้องการได้

5.3 สรุปผลการตรวจสอบโครงสร้างผลึกของแผ่นฟิล์มอินเดียมซิลิเนียม

แผ่นฟิล์มที่เตรียมได้ก่อนผ่านการแอนนีลจะมีสีออกน้ำตาลดำ เมื่อนำไปตรวจสอบโครงสร้างผลึกโดยวิธี XRD พบว่าไม่ปรากฏเส้นของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ แสดงว่าแผ่นฟิล์มที่ยังไม่ได้ผ่านการแอนนีลยังมีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบอสัณฐาน(Amorphous) ส่วนแผ่นฟิล์มที่ผ่านการแอนนีลที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมงแล้ว จะมีสีออกส้มแดงและมีลักษณะโปร่งแสงมากกว่าแผ่นฟิล์มก่อนผ่านการแอนนีล เมื่อนำไปตรวจสอบโครงสร้างผลึกโดยวิธี XRD จะปรากฏเส้นของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์อย่างชัดเจน จากการวิเคราะห์ผลจากการตรวจสอบโครงสร้างผลึกโดยเปรียบเทียบกับ A.S.T.M.card พบว่าแผ่นฟิล์มที่เตรียมได้เป็นสารประกอบอินเดียมซิลิไนด์ชนิดแกมมา(γ-In_2Se_3) มีโครงสร้างของผลึกเป็นแบบเฮก-ซาโกนอลและสามารถหาค่าคงที่ของแลททิชได้เป็น a = 7.13 °A., c = 19.15 °A. และจากการคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงานของแผ่นฟิล์ม พบว่ามีค่าประมาณ 0.78-1.104 eV. ได้มีรายงานการวิจัย(4) ซึ่งได้ทำการทดลองเตรียมแผ่นบางอินเดียมซิลิเนียม โดยการระเหยสาร

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

จาก 2 จุด พบว่าแผ่นฟิล์มที่เตรียมได้ จะเป็นสารประกอบของอินเดียมซิลิเนียมหลายชนิดเช่น InSe, γ-In_2Se_3, β-In_2Se_3 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการใช้อัตราการระเหยต่างๆและการให้อุณหภูมิกับแผ่นรองรับขณะทำการระเหยสาร รวมทั้งการแอนนีลแผ่นฟิล์มที่อุณหภูมิต่างๆด้วย แต่สารประกอบของอินเดียมซิลิเนียมจะมีค่าช่องว่างแถบพลังงานใกล้เคียงกันคือประมาณ 1.2-1.3 eV.[1,4]

5.4 สรุปผลการทำขั้วไฟฟ้าของแผ่นฟิล์มบางอินเดียมซิลิเนียม

จากการทดลองทำขั้วไฟฟ้าของแผ่นฟิล์มโดยใช้ทองแดง, อินเดียม, ทอง และเงิน พบว่าแผ่นฟิล์มที่ทำขั้วไฟฟ้าด้วยทองแดง จะเกิดลักษณะการพองย่นที่บริเวณขั้วไฟฟ้าของแผ่นฟิล์ม และพบว่า ทองแดงที่ทำเป็นขั้วไฟฟ้าจะทำปฏิกิริยากับอ๊อกซิเจนในอากาศเกิดเป็นอ๊อกไซด์ได้ง่าย แผ่นฟิล์มที่ทำขั้วไฟฟ้าโดยใช้อินเดียม พบว่าแผ่นฟิล์มที่ผ่านการแอนนีลแล้วอินเดียมที่ทำเป็นขั้วไฟฟ้าจะหลุดหายไป แผ่นฟิล์มที่ใช้ทองทำขั้วไฟฟ้า ตรงบริเวณขั้วไฟฟ้าแผ่นทองจะหลุดลอกออกจากแผ่นกระจกสไลด์ได้ง่ายไม่คงทนถาวร ส่วนแผ่นฟิล์มที่ใช้เงินทำขั้วไฟฟ้า ตรงบริเวณขั้วไฟฟ้าจะมีลักษณะคงทนถาวรกว่าที่ใช้ทองทำขั้วไฟฟ้า แต่ถ้าทำขั้วไฟฟ้าด้วยเงินบางมาก จะเกิดการแพร่ของสารเงินรวมตัวกับสารที่เกาะเป็นแผ่นฟิล์มตรงบริเวณที่สารเงินทับกับแผ่นฟิล์ม ซึ่งจะมีผลต่อการวัดความต้านทานของแผ่นฟิล์มขณะทำการแอนนีลแผ่นฟิล์ม สามารถสังเกตได้ที่บริเวณขั้วไฟฟ้าของแผ่นฟิล์มที่ผ่านการแอนนีลแล้วสีของสารเงินที่บริเวณขั้วไฟฟ้าจะเปลี่ยนเป็นสีเทาดำ แต่ถ้าทำขั้วไฟฟ้าด้วยเงินหนามากพอ แผ่นฟิล์มที่ผ่านการแอนนีลสีของสารเงินที่บริเวณขั้วจะไม่แตกต่างกันระหว่างส่วนของสารเงินที่ติดกับกระจกสไลด์กับสารเงินที่ทับกับสารที่เกาะเป็นแผ่นฟิล์ม

5.5 สรุปผลสมบัติทางไฟฟ้าของแผ่นฟิล์มบางอินเดียมซิลิเนียม

จากการทดลองวัดค่าความต้านทานของแผ่นฟิล์มชิ้นต่างๆ พบว่าแผ่นฟิล์มที่ผ่านการแอนนีลจะมีความต้านทานมากกว่าแผ่นฟิล์มก่อนผ่านการแอนนีล และแผ่นฟิล์มที่มีอัตราส่วนของมวลสารซิลิเนียมมาก จะมีค่าความต้านทานมากกว่าแผ่นฟิล์มชิ้นที่มีอัตราส่วนของมวลซิลิเนียมน้อยกว่า

ขณะทำการแอนนีลแผ่นฟิล์ม พบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของแผ่นฟิล์มกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะมีลักษณะของรูปกราฟคล้ายกันในกรณีที่ใช้เงื่อนไขการเตรียมแผ่นฟิล์มและทำขั้วไฟฟ้าของแผ่นฟิล์มเหมือนกัน แผ่นฟิล์มที่ผ่านการแอนนีลที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่าค่าความต้านทานของแผ่นฟิล์มจะเปลี่ยนแปลงอย่างมากกับอุณหภูมิ โดยที่ค่าความต้านทานจะแปรผันแบบผกผันกับอุณหภูมิ ซึ่งเป็นไปตามสมการ Arrhenius คือ $\sigma=\sigma_o \exp{-E/KT}$

เมื่อ E เป็นพลังงานกระตุ้น(Activation energy) และจากการทดลองคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงานของแผ่นฟิล์มชิ้นต่างๆ พบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง 0.78-1.104 eV. เมื่อทดลองฉายแสงให้ตกกระทบแผ่นฟิล์มพบว่าค่าความต้านทานของแผ่นฟิล์มจะมีค่าลดลง เมื่อแสงที่ตกกระทบแผ่นฟิล์มมีความเข้มของแสงมากขึ้น และเมื่อทำการวัดการนำกระแสไฟฟ้าของแผ่นฟิล์มแต่ละชิ้น พบว่ามีการนำกระแสไฟฟ้าแบบโอห์มมิค กล่าวคือ ค่ากระแสจะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับค่าความต่างศักย์แผ่นฟิล์มทุกชิ้น เมื่อทำการตรวจสอบสมบัติของสารกึ่งตัวนำโดยวิธีใช้ขั้วความร้อน พบว่าแผ่นฟิล์มแสดงสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

5.6 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

ปัญหาและข้อเสนอแนะในการทำวิจัยพอสรุปได้ดังนี้

5.6.1 ปัญหาและข้อเสนอแนะของระบบระเหยสารและระบบควบคุมการระเหยสาร

ปัญหา

1. ระบบไฟฟ้าของมหาวิทยาลัยมักจะขัดข้องบ่อย และมีค่าแรงเคลื่อนไม่ค่อยคงที่ ทำให้ระบบควบคุมอัตราการระเหยสารผิดพลาดได้ เนื่องจากต้องใช้เวลาในการระเหยสารแต่ละครั้งเป็นเวลานาน
2. ผลึกควอร์ตซ์ที่ใช้เป็นมอนิเตอร์ ถ้ามีการระเหยสารขึ้นไปเกาะมาก จะทำให้อัตราการเปลี่ยนความถี่ผิดพลาดได้ง่าย
3. ถ้ามีสัญญาณรบกวนกับระบบไฟฟ้าขณะทำการระเหยสาร จะทำให้การควบคุมอัตราการระเหยผิดพลาดได้ง่าย

ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีระบบไฟฟ้าที่สามารถรักษาระดับของแรงเคลื่อนไฟฟ้าให้คงที่ สำหรับใช้กับระบบระเหยสารและระบบควบคุมการระเหยสารโดยเฉพาะ
2. ควรทำการเปลี่ยนผลึกควอร์ตซ์เมื่อความถี่มีค่าลดลงจากเดิมมาก
3. ขณะทำการระเหยสาร ไม่ควรจะใช้เครื่องใช้ไฟฟ้าอื่นที่จะทำให้เกิดสัญญาณรบกวนกับระบบไฟฟ้าที่จ่ายให้กับระบบที่ใช้ระเหยสารและระบบควบคุมการระเหยสาร

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

6.5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะในการเตรียมแผ่นฟิล์ม

ปัญหา

1. แผ่นฟิล์มที่เตรียมได้แต่ละครั้งมีความหนาน้อย เนื่องจากโบ๊ตที่ใส่สารในแต่ละจุดมีขนาดเล็ก ถ้าจะทำแผ่นฟิล์มให้มีความหนามากๆ จะต้องทำการระเหยสารหลายๆครั้งซ้อนทับกัน
2. ถ้าใช้โบ๊ตเซรามิกขนาดใหญ่ การควบคุมอัตราการระเหยจะมีค่าผิดพลาดมาก
3. ถ้าใช้อัตราการระเหยสารสูงๆ สารที่หลอมเหลวอยู่ภายในโบ๊ตอาจจะกระเด็นหลุดออกมานอกโบ๊ตได้ง่าย

ข้อเสนอแนะ

1. ควรจะใช้โบ๊ตโลหะที่สามารถใส่สารจำนวนมากได้ ซึ่งจะทำให้สามารถเตรียมแผ่นฟิล์มที่มีความหนามากๆตามที่ต้องการได้โดยไม่ต้องทำการระเหยสารหลายครั้งซ้อนทับกันหลายครั้ง
2. ก่อนทำการระเหยสารเพื่อเตรียมแผ่นฟิล์ม ควรมีการให้อุณหภูมิกับสารที่อยู่ภายในโบ๊ต เพื่อทำให้สารภายในโบ๊ตมีการหลอมเหลวเป็นเนื้อก้อนเดียวกันก่อนซึ่งเป็นการไล่สิ่งเจือปนบริเวณผิวนอกของสารด้วย และเพื่อป้องกันไม่ให้สารที่จะหลอมละลายไม่พร้อมกันกระเด็นหลุดออกไปนอกโบ๊ตได้ง่าย

5.6.3 ปัญหาและข้อเสนอแนะในการทำขั้วของแผ่นฟิล์ม

ปัญหา

1. สารที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าของแผ่นฟิล์มแต่ละชนิด จะทำให้ขั้วไฟฟ้าของแผ่นฟิล์มมีลักษณะแตกต่างกัน ซึ่งสารบางชนิดจะไม่เหมาะสมที่จะใช้ทำเป็นขั้วไฟฟ้าให้กับแผ่นฟิล์ม
2. ถ้าทำขั้วไฟฟ้าบางมาก จะเกิดการหลุดลอกและชำรุดได้ง่ายในขณะต่อขั้วไฟฟ้า

ข้อเสนอแนะ

1. ควรทำการทดลองใช้สารชนิดต่างๆทำขั้วไฟฟ้า เพื่อที่จะใช้เป็นแนวทางในการเลือกใช้สารสำหรับทำขั้วไฟฟ้า และควรจะทำขั้วไฟฟ้าให้หนา

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

5.6.4 ปัญหาและข้อเสนอแนะการศึกษาโครงสร้างและสมบัติของฟิล์ม

ปัญหา

1. แผ่นฟิล์มที่เตรียมได้จะมีสมบัติเปลี่ยนไป เมื่อทิ้งให้สัมผัสกับอากาศเป็นเวลานาน ก่อนที่จะทำการแอนนีลแผ่นฟิล์ม
2. ข้อจำกัดของห้องปฏิบัติการวิจัย ซึ่งยังขาดเครื่องฉายรังสีเอ็กซ์ ทำให้ไม่สามารถทำการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของแผ่นฟิล์มได้อย่างต่อเนื่อง

ข้อเสนอแนะ

1. แผ่นฟิล์มที่เตรียมได้ควรรีบทำการแอนนีลทันที ไม่ควรทิ้งให้สัมผัสอากาศเป็นเวลานาน
2. ควรมีการวัดค่าช่องว่างแถบพลังงานของแผ่นฟิล์มโดยวิธีอื่นเช่นวิธีทางแสง เพื่อเปรียบเทียบผลจากการหาโดยวิธีวัดความต้านทานกับอุณหภูมิ ซึ่งจะเป็นวิธีที่สะดวกรวดเร็วและได้ค่าที่ถูกต้องแม่นยำกว่า

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved