การสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นความเร็วสูงโดยกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์

นายมาโนทย์ มาปะโท

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2550

FABRICATION OF FAST RESPONSE HUMIDITY SENSOR BY USING X-RAY LITHOGRAPHY TECHNIQUE

Manot Mapato

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the

Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

Suranaree University of Technology

Academic Year 2007

การสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นความเร็วสูงโดยกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

_____

(รศ. ดร.กิตติ อัตถกิจมงคล)
ประธานกรรมการ

_____

(อ. ดร.นิมิต ชมนาวัง)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

_____

(ดร.ประพงษ์ คล้ายสุบรรณ์)
กรรมการ

_____

(ผศ. ดร.ธนัดชัย กุลวรวานิชพงษ์)
กรรมการ

_____

(อ. ดร.บุญเรือง มะรังศรี)
กรรมการ

_____

(ศ. ดร.ไพโรจน์ สัตยธรรม)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

_____

(รศ. น.อ. ดร.วรพจน์ ขำพิศ)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มาโนทย์ มาปะโท : การสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นความเร็วสูงโดยกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ (FABRICATION OF FAST RESPONSE HUMIDITY SENSOR BY USING X-RAY LITHOGRAPHY TECHNIQUE) อาจารย์ที่ปรึกษา : อ. ดร.นิมิต ชมนาวัง, 123 หน้า

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการออกแบบ และสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นแบบตัวเก็บประจุที่มีคุณสมบัติในการตอบสนองต่อความชื้นเร็ว สร้างโดยใช้กระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์และรังสีอัลตราไวโอเลต การออกแบบตัวตรวจรู้ ใช้การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จำลองผลตอบสนองต่อความชื้นของตัวตรวจรู้ที่มีโครงสร้างต่างกันได้แก่ โครงสร้างแบบขั้วไฟฟ้ามีรูพรุน แบบสารไวความชื้นเป็นทรงกระบอก แบบทรงลูกบาศก์ และแบบอิเล็กโทรดซี่ยาว เมื่อคำนึงถึงความเป็นไปได้ในการสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นพบว่าตัวตรวจรู้ความชื้นแบบอิเล็กโทรดซี่ยาวมีความเหมาะสมมากที่สุด ความเร็วในการตอบสนองขึ้นกับขนาดความกว้างของซี่สารไวความชื้น เมื่อซี่ของสารไวความชื้นมีความกว้างลดลง เวลาในการตอบสนองจะลดลงเช่นเดียวกัน ตัวตรวจรู้ความชื้นสร้างโดยการเคลือบสารไวแสง SU-8 ลงบนฐานนำไฟฟ้า และสร้างลวดลายของสารไวความชื้น โดยใช้การฉายรังสีอัลตราไวโอเลตผ่านหน้ากากโลหะ ที่มีช่องเปิดเป็นรูปซี่อิเล็กโทรด ซึ่งเตรียมขึ้นด้วยเทคนิคการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ และเคลือบโลหะด้านบนเป็นซี่อิเล็กโทรดโดยใช้หน้ากากตัวเดียวกัน โดยหน้ากากโลหะหลังจากใช้สร้างตัวตรวจรู้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ การทดสอบคุณสมบัติของตัวตรวจรู้ความชื้น ใช้การปรับเทียบความชื้นด้วยความชื้นจากสารละลายเกลืออิ่มตัว ผลการทดสอบคุณสมบัติของตัวตรวจรู้ความชื้นที่มีสารไวความชื้นเป็นซี่ขนาดความกว้างเท่ากับ 51 μm หนา 2 μm พบว่าตัวตรวจรู้มีค่าความจุไฟฟ้าที่ความชื้นสัมพัทธ์ 30% เท่ากับ 31 pF ความไวเท่ากับ 83 fF/%RH หรือ 2,677 ppm/%RH ค่าความผิดพลาดในการวัดความชื้นสูงสุดเท่ากับ ±5% เวลาในการดูดซึมความชื้น 0.56 วินาที คายความชื้น 1 วินาที ซึ่งเป็นผลตอบสนองที่เร็วตามความคาดหมาย ตัวตรวจรู้ความชื้นโครงสร้างนี้จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานที่ต้องการวัดความชื้นที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วได้

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนักศึกษา_____

ปีการศึกษา 2550 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา_____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม_____

MANOT MAPATO : FABRICATION OF FAST RESPONSE HUMUDITY SENSOR BY USING X-RAY LITHOGRAPHY TECHNIQUE.
THESIS ADVISOR : NIMIT CHOMNAWANG, Ph.D., 123 PP.

HUMIDITY SENSOR/X-RAY LITHOGRAPHY

This thesis presents design and fabrication of fast-response capacitive humidity sensor using X-ray and UV lithography techniques. Mathematic models based on Fick's law are used to determine the humidity response for different types of humidity sensor including long electrode, porous electrode, cylindrical and cube body. Considering possibility of structural realization, the long electrode type is the most possible form to be fabricated. Mathematic models predict that the time response would decrease if the comb width of sensitive material is reduced.

The long-electrode type sensor was fabricated by spin coating of SU-8 photoresist on a conductive substrate. The soft baked resist was patterned by exposure of UV radiation through a 250 μm-thick metal mask with comb-like aperture which was prepared by x-ray lithography technique. Aluminum film was then coated by thermal evaporation onto the UV exposed SU-8 combs underneath the aperture to form an upper electrode. After removal of the metal mask, and development of un exposed SU-8, the capacitance of fabricated sensors were calibrated against various humidity standards using saturated salt solutions. The characterization were done to find its sensitivity and response time. The experimental results showed that a sensor with 51 μm-wide and 2 μm-thick electrode has capacitance of 31 pF at relative humidity of 30%, sensitivity of 83 fF/%RH or 2,677 ppm/%RH and

maximum error of ±5%. Humidity adsorption and desorbtion time are 0.56 and 1 seconds, respectively. Good results were readily obtained from the experiment. This work provides technologies to realize a fully functioning fast response capacitive humidity sensor in the future.

School of Electrical Engineering Student's Signature _____

Academic Year 2007 Advisor's Signature _____

Co-Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการเสร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการ และการดำเนินงานวิจัยรวมถึงหน่วยงานต่าง ๆ ที่ช่วยอำนวนความสะดวกในการทำงานวิจัย อาทิ

อาจารย์ ดร.นิมิต ชมนาวัง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาแนะนำ และชี้แนะแนวทางอันเป็นประโยชน์ยิ่งต่องานวิทยานิพนธ์ รวมทั้งเป็นกำลังใจ และเป็นแบบอย่างที่ดีในการทำงานและการดำเนินงานวิจัยให้กับผู้วิจัยเสมอมา

ศาสตราจารย์ นาวาอากาศโท ดร.สราวุฒิ สุจิตจร รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติ อัตถกิจมงคล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนัดชัย กุลวรวานิชพงษ์ อาจารย์ ดร.บุญเรือง มะรังศรี และอาจารย์ ดร.เผด็จ เผ่าละออ คณาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้ให้คำปรึกษาด้านวิชาการอย่างดียิ่งตลอดมา

ดร.ประพงษ์ คล้ายสุบรรณ์ นักวิจัยประจำศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติ ที่กรุณาให้คำปรึกษาด้านวิชาการ และศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สำหรับการสนับสนุนเครื่องมือวิจัย สถานที่ทำวิจัย ตลอดจนทุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา และทุนสนับสนุนงานวิจัย

ท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่าน ที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ต่าง ๆ ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ได้ให้ความรักความอบอุ่น ความห่วงใย การอบรมเลี้ยงดู และให้การสนับสนุนทางด้านการศึกษาอย่างดียิ่งตลอดมา รวมทั้งเป็นกำลังใจให้ผู้วิจัยสามารถเผชิญกับปัญหาและอุปสรรคต่าง ๆ จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมาและตลอดไป

มาโนทย์ มาปะโท

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....ข
กิตติกรรมประกาศ.....ง
สารบัญ.....จ
สารบัญตาราง.....ซ
สารบัญรูป.....ฌ

บทที่

1 บทนำ

1.1 กล่าวนำ.....1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....4
1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น.....4
1.4 ขอบเขตงานวิจัย.....4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....4
1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....4

2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....6

2.1 ตัวตรวจรู้ความชื้นประเภทต่าง ๆ.....8
2.1.1 ตัวตรวจรู้โดยใช้เซรามิกเป็นวัสดุไวความชื้น (ceramic-based humidity sensor).....8
2.1.2 ตัวตรวจรู้ความชื้นโดยใช้วัสดุพอลิเมอร์เป็นวัสดุไวความชื้น (Polymer-based humidity sensor).....8
2.2 ผลตอบสนองทางเวลาของตัวตรวจรู้ความชื้น.....9
2.3 ตัวตรวจรู้ความชื้นตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน.....12

3 การพัฒนากระบวนการพื้นฐาน.....19

3.1 การคำนวณพลังงานแสงซินโคตรอนที่ใช้ในกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์.....19

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.1.1 สมการและขั้นตอนการคำนวณ....23
3.2.1 สมการและขั้นตอนการคำนวณ....34
3.2.2 การเตรียมส่วนฐานของหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์....35
3.2.3 การฉายแสงอัลตราไวโอเลต....38
3.2.4 การชุบโลหะเงิน....39
3.2 การสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์....34
3.3 การสร้างหน้ากากโลหะ....42
4 ทฤษฎีการคำนวณสำหรับตัวตรวจรู้ความชื้นแบบตัวเก็บประจุ....47
4.1 ความชื้น....47
4.2 ทฤษฎีและการคำนวณ....48
4.2.1 โครงสร้างแบบขั้วไฟฟ้ามีรูพรุน (Porous electrode)....49
4.2.2 ตัวตรวจรู้ความชื้นแบบทรงกระบอก (Cylindrical humidity sensor)....51
4.2.3 โครงสร้างแบบทรงลูกบาศก์ (Cube body)....52
4.2.4 แบบซี่อิเล็กโทรดที่มีความยาวมากกว่าความกว้างมาก....54
5 กระบวนการสร้างตัวตรวจรู้ความชื้น....59
5.1 การออกแบบลวดลาย....60
5.2 การสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์....62
5.3 การสร้างหน้ากากโลหะ....65
5.4 การสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นแบบตัวเก็บประจุ....69
6 การทดสอบคุณลักษณะสมบัติตัวตรวจรู้ความชื้น....76
6.1 การวัดผลตอบสนองในสภาวะอยู่ตัว....76
6.2 การวัดผลตอบสนองทางเวลา....86
7 สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ....90
7.1 บทสรุปงานวิจัย....90
7.2 ข้อเสนอแนะ....92

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

รายการอ้างอิง.....93
ภาคผนวก
ภาคผนวก ก. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....97
ภาคผนวก ข. การผสมน้ำยาชุบโลหะเงินปริมาตร 500 มิลลิลิตร.....99
ภาคผนวก ค. กระบวนการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์.....101
ภาคผนวก ง. กระบวนการสร้างหน้ากากโลหะ.....103
ภาคผนวก จ. กระบวนการสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นโดยการระเหยโลหะ
ผ่านหน้ากาก.....105
ภาคผนวก ฉ. กระบวนการสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นโดยวิธีการ lift-off.....107
ภาคผนวก ช. โปรแกรม XmaskSim.....109
ภาคผนวก ซ. โปรแกรมจำลองผลการตอบสนองของตัวตรวจรู้ความชื้น.....118
ประวัติผู้เขียน.....123

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2.1 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของหลักการวัดความชื้นแบบต่าง ๆ.....7
2.2 แสดงผลตอบสนองทางเวลาของตัวตรวจรู้ความชื้นแบบฟิล์มบาง.....11
2.3 เปรียบเทียบผลตอบสนองทางเวลาและความไวของตัวตรวจรู้ความชื้น.....16
5.1 ตัวอย่างข้อมูลการฉายรังสีเอ็กซ์เพื่อสร้างแม่พิมพ์สารไวแสงหนา 350 μm ต้องการพลังงานสะสม 5,500 mJ/cm^3.....64
6.1 ค่าความชื้นสัมพัทธ์ (%RH) ของสารละลายเกลืออิ่มตัวที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....79
6.2 ค่าความคลาดเคลื่อนของตัวตรวจรู้ความชื้นเมื่อแทนด้วยสมการรูปแบบต่างกัน.....85

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

1.1 ตัวตรวจรู้ความชื้นแบบตัวเก็บประจุอย่างง่าย....2
1.2 ตัวตรวจรู้ความชื้นแบบซี่ตัวนำ....2
1.3 ตัวตรวจรู้ความชื้นแบบซี่ตัวนำและซี่ไดอิเล็กทริก....3
2.1 ผลตอบสนองทางเวลาขาขึ้น (ดูดซึมความชื้น)
ของตัวตรวจรู้ความชื้น....10
2.2 ผลตอบสนองทางเวลาขาลง (คายความชื้น)
ของตัวตรวจรู้ความชื้น....10
2.3 ความไวของตัวตรวจรู้ความชื้น....12
2.4 เปรียบเทียบผลตอบสนองทางเวลาของตัวตรวจรู้ความชื้นแบบต่าง ๆ....17
2.5 โครงสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นแบบซี่ยาว....17
2.6 โครงสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นความเร็วสูงที่เพิ่มความไว
โดยการเพิ่มพื้นที่อิเล็กโทรด....18
3.1 แสดงการสร้างลวดลายลงบนสารไวแสงชนิดบวกและชนิดลบ....20
3.2 สเปกตรัมกำลังของแสงซินโครตรอนที่กระแสอิเล็กตรอน 40 mA....22
3.3 องค์ประกอบของระบบลำเลียงแสงซินโครตรอน BL-6 ที่ใช้สำหรับ
กระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ ณ ศูนย์ปฏิบัติการวิจัย
เครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติ....22
3.4 แม่เหล็กโค้งทั้ง 8 ตัวของวงแหวนกักเก็บอิเล็กตรอน....26
3.5 ลักษณะของแสงซินโครตรอนที่แผ่ออกมาจากแม่เหล็กโค้ง bending magnet....26
3.6 กรวยแสงที่ตกกระทบชิ้นงาน....27
3.7 ลักษณะของระบบลำเลียงแสง BL-6 ณ ศูนย์ปฏิบัติการวิจัย
เครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติ....28
3.8 สัมประสิทธิ์การดูดกลืนคลื่นแสงของอลูมิเนียม....30
3.9 สเปกตรัมพลังงานหลังจากผ่านวัสดุกรองแสงต่าง ๆ 31
3.10 แสดงพลังงานส่วนต่าง ๆ ที่คำนวณโดยใช้โปรแกรม XmaskSim....31

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

3.11 การคำนวณการส่งกำลังของแสงซินโครตรอนผ่านวัสดุกรองต่าง ๆ.....32
3.12 แผนภาพโฟลวชาร์ตแสดงการคำนวณของโปรแกรม XmaskSim.....33
3.13 ตัวตรวจรู้ความชื้นที่มีความกว้างซี่อิเล็กโทรด 40 μm
ออกแบบโดยโปรแกรม Layout Editor.....34
3.14 หน้ากากกั้นแสงอัลตราไวโอเลตที่มีลวดลายจุลภาคขนาด 40 μm
ซึ่งพิมพ์ลงบนฟิล์มใสด้วยแสงเลเซอร์ความละเอียด 3,600 จุดต่อนิ้ว.....35
3.15 การเตรียมฐานสำหรับหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์.....37
3.16 แผ่นใสที่เคลือบโลหะไทเทเนียม และเงินซึ่งใช้เป็นฐานรองรับลวดลาย
ของโลหะเงินความหนา 40 μm ในขั้นตอนต่อไป.....37
3.17 แม่พิมพ์สารไวแสงชนิดบวก.....38
3.18 กระบวนการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์.....40
3.19 แม่พิมพ์สารไวแสงที่ชุบเงินจนเต็มแล้ว.....41
3.20 หน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์หลังการล้างแม่พิมพ์สารไวแสง AZ4620 ออกแล้ว.....41
3.21 หน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์.....42
3.22 ขั้นตอนการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์แบบโลหะ.....44
3.23 หน้ากากโลหะกั้นรังสีเอ็กซ์หนา 250 μm ที่สร้างเสร็จแล้ว.....46
4.1 ตัวตรวจรู้ความชื้นแบบฟิล์มบาง (Thin film humidity sensor).....49
4.2 ตัวตรวจรู้ความชื้นแบบทรงกระบอก (Cylindrical humidity sensor).....51
4.3 ตัวตรวจรู้ความชื้นแบบทรงลูกบาศก์.....52
4.4 ตัวตรวจรู้ความชื้นแบบซี่ยาว.....54
4.5 ระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่องจำกัดโดยใช้วิธี Crank-Nicloson.....56
4.6 เปรียบเทียบผลตอบสนองทางเวลาของโครงสร้างขั้วไฟฟ้ารูพรุน
สารไวความชื้นเป็นทรงกระบอก และแบบทรงลูกบาศก์.....57
4.7 เปรียบเทียบผลตอบสนองทางเวลาของโครงสร้างสารไวความชื้นเป็น
ทรงกระบอกแบบทรงลูกบาศก์ และแบบอิเล็กโทรดซี่ยาว.....58
4.8 ผลของความกว้างของซี่สารไวความชื้นต่อการตอบสนองทางเวลา.....58

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

5.1 ตัวตรวจรู้ความชื้นแบบซี่ตัวนำวางบนชั้นไดอิเล็กทริกไวความชื้น.....59
5.2 ลวดลายตัวตรวจรู้ความชื้นที่ออกแบบโดยใช้โปรแกรม Layout Editor.....61
5.3 หน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์บนแผ่นใสเคลือบโลหะ.....62
5.4 หน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์สร้างด้วยโลหะเงินหนา 40 μm.....63
5.5 แม่พิมพ์สารไวแสงหนาสำหรับใช้สร้างหน้ากากโลหะกั้นรังสีเอ็กซ์.....65
5.6 ภาพด้านบนของแม่พิมพ์สารไวแสงหนาสำหรับใช้สร้างหน้ากากโลหะ
กั้นรังสีเอ็กซ์.....66
5.7 ภาพด้านข้างแม่พิมพ์สารไวแสงหนาสำหรับใช้สร้างหน้ากากโลหะกั้นรังสีเอ็กซ์.....66
5.8 หน้ากากโลหะกั้นรังสีเอ็กซ์หนา 250 μm.....67
5.9 ภาพด้านบนของหน้ากากโลหะกั้นรังสีเอ็กซ์หนา 250 μm.....67
5.10 ภาพพขายซี่ของหน้ากากโลหะกั้นรังสีเอ็กซ์หนา 250 μm.....68
5.11 ภาพขยายด้านบนของหน้ากากโลหะหนา 250 μm.....68
5.12 ตัวตรวจรู้ความชื้นที่สร้างโดยใช้วิธีการ lift-off.....70
5.13 การสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นโดยใช้วิธีการ lift-off.....71
5.14 ภาพขยายตัวตรวจรู้ความชื้นที่สร้างโดยใช้วิธีการ lift-off.....72
5.15 ชิ้นงานที่ติดหน้ากากโลหะหลังการเคลือบโลหะเรียบร้อยแล้ว.....72
5.16 การสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นแบบระเหยเคลือบโลหะผ่านหน้ากาก.....73
5.17 ตัวตรวจรู้ความชื้นที่สร้างจากการเคลือบขั้วโลหะผ่านหน้ากากโลหะ.....74
5.18 ตัวตรวจรู้ความชื้นที่สร้างจากการเคลือบโลหะผ่านหน้ากาก
แบบที่สามารถเชื่อมต่อสายโดยการบัดกรี.....74
6.1 โครงสร้างชุดทดสอบตัวตรวจรู้ความชื้นโดยใช้ความชื้นมาตรฐาน
จากสารละลายเกลืออิ่มตัว.....77
6.2 ชุดทดสอบตัวตรวจรู้ความชื้นโดยใช้ความชื้นมาตรฐาน
จากสารละลายเกลืออิ่มตัว.....78
6.3 วงจรอะสเตเบิล มัลติไวเบรเตอร์ (Astable multivibrator circuit).....81

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

6.4 วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันไฟฟ้าใช้ตัวกรองออปแอมป์แบบสองขั้ว
เพื่อเพิ่มความเร็วในการตอบสนองของวงจร....82
6.5 ค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ความชื้นเทียบกับค่าไอเกลืออิ่มตัวมาตรฐาน....83
6.6 ค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ความชื้นเทียบกับค่าความชื้นจาก
สารละลายเกลืออิ่มตัวเมื่อแทนชุดข้อมูลด้วยสมการเส้นตรง....83
6.7 ค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ความชื้นเทียบกับค่าไอเกลืออิ่มตัวเมื่อแทน
ชุดข้อมูลด้วยสมการเส้นโค้งกำลังสอง....84
6.8 ค่าความชื้นที่ได้จากการใช้ชุดสมการเส้นตรงที่สร้างขึ้นเทียบกับ
ค่าความชื้นจริงเพื่อใช้หาความผิดพลาดของตัวตรวจรู้ความชื้น....84
6.9 ค่าความชื้นที่ได้จากการใช้ชุดสมการเส้นโค้งกำลังสองที่สร้างขึ้นเทียบกับ
ค่าความชื้นจริงเพื่อใช้หาความผิดพลาดของตัวตรวจรู้ความชื้น....85
6.10 ชุดทดสอบผลตอบสนองทางเวลาของตัวตรวจรู้ความชื้น....87
6.11 ผลตอบสนองในการดูดซึมความชื้นเมื่อป้อนความชื้นแบบขั้นบันได....88
6.12 ผลตอบสนองในการคายความชื้นเมื่อป้อนอากาศแห้งแบบขั้นบันได....88
6.13 ผลตอบสนองในการดูดซึมความชื้นของตัวตรวจรู้เมื่อเทียบกับ
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์....89
6.14 ผลตอบสนองในการคายความชื้นของตัวตรวจรู้เมื่อเทียบกับ
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์....89
7.1 กราฟเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเวลาและความไวของตัวตรวจรู้ความชื้น
กับตัวตรวจรู้ความชื้นที่มีผู้สร้างขึ้นตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน....91

บทที่ 1

บทนำ

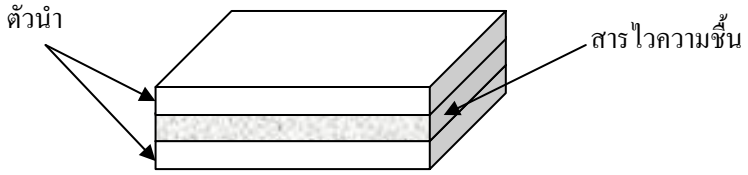
1.1 กล่าวนำ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีต่าง ๆ ได้ถูกพัฒนาขึ้นอย่างมากทำให้กระบวนการ ทั้งในอุตสาหกรรม หรือทางการเกษตร สามารถควบคุมปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อกระบวนการได้ง่าย โดยสามารถใช้เครื่องมือวัดที่มีประสิทธิภาพสูงเพื่อควบคุมปัจจัยนั้น และช่วยลดปัญหาที่จะเกิดกับกระบวนผลิต หรือการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ได้ ปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อกระบวนการอุตสาหกรรม คือ ความชื้นในอากาศ ในอุตสาหกรรมหลายประเภท โดยเฉพาะอุตสาหกรรมที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงของความชื้น ซึ่งต้องมีการควบคุมความชื้นให้เหมาะสมตลอดเวลา เพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายต่อผลิตภัณฑ์ เช่นผลิตภัณฑ์ประเภทอาหารและยา ซึ่งความชื้นมีผลโดยตรงต่อคุณภาพและระยะเวลาในการเก็บรักษา หรืออุตสาหกรรมประเภทอิเล็กทรอนิกส์ นอกจากกระบวนการทางอุตสาหกรรมแล้ว ในทางการแพทย์ยังมีการใช้ตัวตรวจรู้ความชื้นในการวินิจฉัยโรคโดยใช้ความชื้นจากลมหายใจของผู้ป่วย เทคโนโลยีการตรวจวัดความชื้นจึงได้ถูกพัฒนาขึ้นหลายรูปแบบ เพื่อให้เหมาะกับประเภทของการใช้งาน รูปแบบของการวัดความชื้นที่นิยมใช้กัน คือ แบบความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งเป็นการคิดอัตราส่วนมวลของไอน้ำในอากาศเทียบกับค่ามวลไอน้ำในอากาศสูงสุด ที่จุดอิ่มตัวที่อุณหภูมิเดียวกัน หลักการวัดความชื้นนั้นอาจใช้หลักการของตัวต้านทาน แบบตัวเก็บประจุ การเปลี่ยนแปลงทางกล หรือการเปลี่ยนแปลงความถี่ ซึ่งแบบตัวเก็บประจุ จะเป็นแบบที่นิยมใช้กันมากเนื่องจากให้ผลตอบสนองเป็นเชิงเส้น ใช้พลังงานต่ำ สร้างได้ง่าย และมีความไวสูง จุดประสงค์หลักของการพัฒนาตัวตรวจรู้ความชื้นโดยทั่วไปนั้น มีอยู่สองข้อหลัก คือ เพื่อให้ตัวตรวจรู้ความชื้นมีความไวสูง หรือเพื่อให้ตัวตรวจรู้ความชื้นมีผลตอบสนองทางเวลาเร็ว โดยแบบที่ให้ความไวสูงนั้น ส่วนใหญ่จะเป็นแบบฟิล์มบาง (Thin-film humidity sensor) สามารถแสดงโครงสร้างอย่างง่ายได้ดังรูปที่ 1.1 การเพิ่มความไวทำได้โดยการลดความหนาของชั้นฟิล์ม ตามสมการที่ (1-1) เมื่อความหนาลดลงจะทำให้ค่าความจุไฟฟ้าเมื่อเทียบกับความชื้นที่เปลี่ยนไป ($\Delta C/\%RH$) มีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนปัจจัยที่มีผลต่อการตอบสนองทางเวลาของตัวตรวจรู้ความชื้น เมื่อศึกษาแบบจำลองการแพร่ของไอน้ำเข้าสู่ชั้นไดอิเล็กทริกโดยใช้กฎการแพร่ของฟิกค์ (Fick's law) แก้สมการอนุพันธ์ จำลองผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อผลตอบสนองทางเวลา คือ ระยะทางในการแพร่ของความชื้นเข้าสู่ชั้นไดอิเล็กทริก

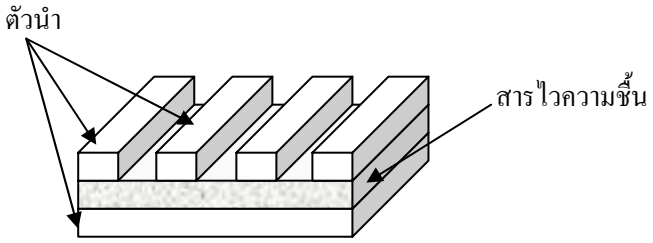
จนถึงจุดอิ่มตัว ต้องมีระยะทางในการแพร่ที่สั้นที่สุด ซึ่งโครงสร้างในรูปที่ 1.1 เมื่อให้ความชื้นแพร่เข้าทุกด้านเท่ากัน ระยะทางในการแพร่ของความชื้นจากขอบจนถึงจุดกึ่งกลางมีระยะททางมาก ทำให้โครงสร้างนี้ใช้เวลาในการตอบสนองนานมาก จึงมีแนวคิดที่จะออกแบบโครงสร้างใหม่ ใช้การลดระยะทางในการแพร่ โดยสร้างแผ่นอิเล็กโทรดด้านบนให้มีลักษณะเป็นซี่ ซึ่งระยะทางของการแพร่ จะเหลือเพียงระยะจากความหนาของฟิล์มจนถึงครึ่งหนึ่งของความกว้างของซี่ โครงสร้างแสดงได้ดังรูปที่ 1.2

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}{d} \qquad (1\text{-}1)$$

เมื่อ C คือ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ความชื้น ε_0 คือ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของสุญญากาศ ε_r คือ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของไดอิเล็กทริกไวความชื้น ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามความชื้น A คือ พื้นที่ของแผ่นเก็บประจุ และ d คือ ความหนาของชั้นไดอิเล็กทริกไวความชื้น หรือระยะห่างระหว่างแผ่นเก็บประจุ

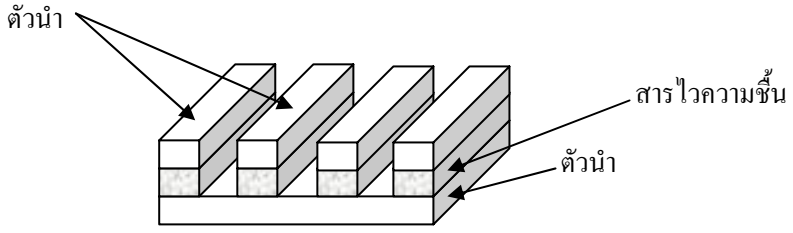


รูปที่ 1.1 ตัวตรวจรู้ความชื้นแบบตัวเก็บประจุอย่างง่าย



รูปที่ 1.2 ตัวตรวจรู้ความชื้นแบบมีซี่ตัวนำ

โครงสร้างตามรูปที่ 1.2 นี้มีข้อเสีย คือ ระยะห่างระหว่างซี่และความหนาของฟิล์มยังมีผลต่อความเร็วซึ่งถ้าความหนาของฟิล์มมากหรือระยะห่างระหว่างซี่น้อยก็จะทำให้ผลตอบสนองช้าลง โครงสร้างตามรูปที่ 1.3 นี้จะเป็นโครงสร้างที่ช่วยแก้ปัญหาจุดนี้ และยังช่วยเพิ่มพื้นผิวสำหรับให้ความชื้นแพร่เข้าสู่โครงสร้างได้มากขึ้นและผลตอบสนองทางเวลาจะขึ้นกับขนาดความกว้างของซี่เท่านั้น โครงสร้างตามรูป 1.3 นี้จากแบบจำลองทางทฤษฎี ถ้าความกว้างของซี่ลดลงสองเท่าตัวตรวจรู้ความชื้นจะให้ผลการตอบสนองทางเวลาเร็วขึ้นถึงสี่เท่า งานวิจัยนี้จึงได้นำกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอ็กซ์มาใช้ในการสร้างตัวตรวจรู้ความชื้น ซึ่งจากเทคโนโลยีที่มีอยู่ในการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ในขณะนี้ สามารถสร้างให้มีความกว้างได้ประมาณ 40 μm โดยกระบวนการสร้างจะใช้หน้ากากโลหะหนาซึ่งสร้างจากกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ เพื่อใช้สร้างลวดลายของชั้นไดอิเล็กทริกไวความชื้นโดยการฉายรังสีเอ็กซ์หรือรังสีอัลตราไวโอเลต ผ่านช่องว่างลวดลายของหน้ากากโลหะ และสร้างซี่อิเล็กโทรดโดยการเคลือบโลหะโดยใช้หน้ากากตัวเดียวกัน โดยนำหน้ากากโลหะวางบนสารไวแสงที่เคลือบบนแผ่นฐานที่เป็นตัวนำ จากนั้นฉายรังสีเอ็กซ์ หรืออัลตราไวโอเล็ต เพื่อให้เกิดลวดลายบนสารไวแสงและเคลือบโลหะทับลงไป เมื่อล้างฟิล์มสารไวแสงส่วนที่อยู่ใต้หน้ากาก และนำหน้ากากออกก็จะได้ลวดลายซี่ของชั้นไดอิเล็กทริกบนฐานตัวนำ และมีซี่โลหะทับอยู่ด้านบน ความชื้นสามารถแพร่เข้าด้านข้างของชั้นไดอิเล็กทริกทั้งสองด้าน ทำให้ตัวตรวจรู้ความชื้นที่ได้มีการตอบสนองทางเวลาเร็วขึ้น ข้อดีของการสร้างอิเล็กโทรดแบบเป็นชิ้นเดียวกันนี้ จะลดต้นทุนในการเชื่อมต่อขั้วของตัวเก็บประจุเข้าด้วยกัน และง่ายในการบรรจุลงบรรจุภัณฑ์วงจรรวม ทำให้สะดวกและช่วยลดต้นทุนในการผลิต



รูปที่ 1.3 ตัวตรวจรู้ความชื้นแบบมีซี่ตัวนำและซี่ไดอิเล็กทริก

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นความเร็วสูง โดยใช้การลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ สร้างขั้วอิเล็กโทรดวางทับชั้นของสารไวความชื้น ซึ่งจะใช้สารไวแสง SU-8 เป็นชั้นไวความชื้น โดยจะได้ตัวตรวจรู้ความชื้นแบบตัวเก็บประจุ และทำการวัดผลเพื่อทดสอบคุณลักษณะสมบัติของตัวตรวจรู้ความชื้นที่สร้างขึ้นต่อไป

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

เนื่องจากเทคโนโลยีในการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ที่มีอยู่ยังมีข้อจำกัดในการสร้างลวดลายที่เล็กมาก ๆ ทำให้ยังไม่สามารถสร้างลวดลายที่เล็กกว่า 10 μmได้ ตัวตรวจรู้ความชื้นที่สร้างขึ้น จึงมีขนาดความกว้างของซี่ไวความชื้นที่มีขนาดใหญ่กว่า 10 μm

1.4 ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบและสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นด้วยกระบวนการลิโธกราฟฟี โดยใช้สารไวแสง SU-8 เป็นสารไวความชื้น เพื่อให้ตัวตรวจรู้ความชื้นที่สร้างขึ้นมีผลการตอบสนองทางเวลาของตัวตรวจรู้ความชื้นน้อยกว่า 10 วินาที และมีค่าความคลาดเคลื่อนได้ในช่วง ±5% จากมาตรฐานการปรับเทียบความชื้นด้วยสารละลายเกลืออิ่มตัว

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

งานวิจัยนี้เป็นการสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นความเร็วสูงซึ่งสร้างโดยใช้วิธีการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ ซึ่งจะได้ตัวตรวจรู้ความชื้นที่มีผลตอบสนองทางเวลาเร็ว

1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วยเนื้อหา 7 บท ได้แก่ *บทที่ 1* เป็นบทนำกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ขอบเขต ข้อตกลงเบื้องต้น และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้ *บทที่ 2* กล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และเทคโนโลยีตัวตรวจรู้ความชื้น เปรียบเทียบให้เห็นถึงพัฒนาการของตัวตรวจรู้ความชื้นตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ที่นักวิจัยได้พัฒนามาอย่างต่อเนื่อง *บทที่ 3* กล่าวถึงการพัฒนากระบวนการสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นตั้งแต่การคำนวนพลังงานจากแสงซินโครตรอน สำหรับใช้ในกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ของระบบลำเลียงแสง BL-6 กระบวนการสร้างหน้ากาก

กั้นรั้งสีเอ็กซ์ เพื่อใช้สร้างหน้ากากโลหะหนา *บทที่ 4* เนื้อหากล่าวถึงการออกแบบสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นตั้งแต่ทฤษฎีการแพร่ การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จำลองผล เพื่อหาโครงสร้างที่เหมาะสม ตลอดจนการออกแบบโครงสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นที่จะสร้างใช้งานจริง เมื่อได้โครงสร้างที่เหมาะสม จึงเข้าสู่กระบวนการสร้างตัวตรวจรู้ความชื้น *บทที่ 5* กล่าวถึงกระบวนการสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นตามโครงสร้างที่ได้ออกแบบไว้ *บทที่ 6* เป็นการวัดผล และทดสอบคุณลักษณะสมบัติของตัวตรวจรู้ความชื้น โดยปรับเทียบตัวตรวจรู้ความชื้นตามมาตรฐานการปรับเทียบความชื้นด้วยสารละลายเกลืออิ่มตัว ทดสอบความคลาดเคลื่อนในการวัดความชื้นของตัวตรวจรู้ความชื้นที่สร้างขึ้น และผลตอบสนองทางเวลาของตัวตรวจรู้ความชื้น และใน*บทที่ 7*เป็นบทสรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ความชื้น (Humidity) เป็นปริมาณที่บ่งบอกถึงปริมาณของน้ำในสถานะแก๊ส ที่ปนอยู่ในอากาศหรือ แก๊สชนิดอื่น โดยมีหน่วยวัดเป็นความชื้นสัมบูรณ์ (Absolute humidity) หรือ ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity) ความชื้นสัมบูรณ์เป็นการวัดอัตราส่วนของมวลไอน้ำ เทียบกับมวลอากาศแห้งที่รวมตัวอยู่ในปริมาตรเดียวกัน แต่หน่วยการวัดความชื้นที่นิยมใช้มากกว่า คือ ความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งเป็นการวัดความชื้นโดยคิดอัตราส่วนมวลของไอน้ำในอากาศ เทียบกับค่ามวลไอน้ำในอากาศอิ่มตัวสูงสุดที่อุณหภูมิเดียวกัน มีหน่วยเป็น %RH ความชื้นมีผลต่อชีวิตประจำวัน ในทางอุตสาหกรรมต้องมีการควบคุมปริมาณความชื้นอย่างดี โดยเฉพาะอุตสาหกรรมอาหารและยา ความชื้นมีผลโดยตรงต่อคุณภาพ และระยะเวลาในการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์วงจรรวม และในอุตสาหกรรมอีกหลาย ๆ ประเภท นอกจากนี้ในทางการแพทย์ยังสามารถใช้ความชื้นจากลมหายใจในการวินิจฉัยโรคบางชนิดได้ หรือในเครื่องช่วยหายใจยังมีความจำเป็นในการควบคุมความชื้นให้เหมาะสมสำหรับผู้ป่วย ดังนั้น เครื่องมือวัดที่มีประสิทธิภาพจึงเป็นที่ต้องการในงานเหล่านี้ ตัวตรวจรู้ความชื้นหลากหลายชนิดได้รับการพัฒนา เพื่อให้เหมาะกับประเภทของการใช้งาน ซึ่งมีหลักการทำงานแตกต่างกันออกไป เช่น ใช้วัสดุไวความชื้น ใช้ไซโครมิเตอร์ (Psychomotor) แบบกระเปาะเปียก-แห้ง ใช้การวัดจุดน้ำค้าง ใช้การวัดอินฟาเรด (Brion, 1986) การพิจารณาเลือกใช้งานอาจเลือกจาก ขนาด น้ำหนัก ราคา ประสิทธิภาพ หรือการบำรุงรักษา ซึ่งหลักการตรวจรู้ความชื้นแต่ละวิธีก็มีข้อดีข้อเสียต่างกันไปดังแสดงในตารางที่ 2.1

นอกจากนี้ตัวตรวจรู้ความชื้นยังสามารถจำแนกตามหลักการตรวจรู้ หรือวัสดุตรวจรู้ได้ หากแบ่งตามหลักการตรวจรู้สามารถแบ่งได้เป็น ใช้การเปลี่ยนแปลงความจุไฟฟ้า (ΔC) การเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน (ΔR) การเปลี่ยนแปลงทางกล (ΔL) และการเปลี่ยนแปลงความถี่ (Δf) หรือแบ่งตามวัสดุที่ใช้เช่น พอลิเมอร์ (PMMA, Polyimide) เซรามิกรูพรุน (TiO_2-V_2O_2, $MgCr_2O_4$-TiO_2, Al_2O_3) อิเล็กโทรไลต์ (LiCl) ซิลิกอนพรุน ซึ่งแต่ละแบบจะมีหลักการตรวจรู้ต่างกัน โดยจะได้กล่าวในลำดับต่อไป

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของหลักการวัดความชื้นแบบต่าง ๆ

วิธีการวัดความชื้น	หลักการทำงาน	ข้อดี	ข้อเสีย
ใช้วัสดุไวความชื้น	อาศัยการเปลี่ยนแปลงทางกล (ขนาด ความยาว ปริมาตร ความเค้น)	-ไม่ต้องการพลังงาน -ไวต่ออุณหภูมิน้อย -ราคาถูก -ใช้งานง่าย	-ผลตอบสนองไม่เป็นเชิงเส้น -มีฮีสเทอรีซีส -ผลตอบสนองช้า
	อาศัยการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้า (ความต้านทาน ความถี่ ค่าความจุไฟฟ้า)	-ใช้งานง่าย -ราคาถูก -มีขนาดเล็ก -บำรุงรักษาง่าย	-มีฮีสเทอรีซีส -ไวต่อสิ่งสกปรก
ใช้วิธีกระเปาะเปียก-กระเปาะแห้ง	ใช้การวัดอุณหภูมิกระเปาะเปียก-แห้ง	ไม่ต้องทำการปรับเทียบ	-ต้องเปลี่ยนใส้กรองและเติมน้ำกลั่นอยู่เสมอ -ต้องการอากาศไหลผ่านด้วยอัตราการไหลสูง (3 m/s)
ใช้วิธีวัดจุดน้ำค้าง	ใช้การวัดอุณหภูมิจุดน้ำค้างด้วยการตรวจรู้การควบแน่นโดยใช้ความเย็น	-มีความแม่นยำสูง -ย่านพลวัตกว้าง -ไม่ต้องทำการปรับเทียบ	-มีขนาดใหญ่ -ราคาแพง -ใช้พลังงานสูง -ต้องมีการทำความสะอาดสม่ำเสมอ
วัดรังสีอินฟราเรด	เลือกการดูดกลืนสเปกตรัมอินฟราเรดของไอน้ำ	-ใช้ได้กับแก๊สที่กัดกร่อน -ย่านพลวัตกว้าง	-ราคาแพง -อาจเกิดการรบกวนจากแก๊สชนิดอื่น

2.1 ประเภทของตัวตรวจรู้ความชื้น

การแบ่งตัวตรวจรู้ความชื้นตามชนิดของวัสดุไวความชื้น สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิดหลัก คือ วัสดุเซรามิก และวัสดุพอลิเมอร์ ซึ่งแต่ละชนิดมีหลักการทำงานดังนี้

2.1.1 ตัวตรวจรู้โดยใช้เซรามิกเป็นวัสดุไวความชื้น (ceramic-based humidity sensor)

ตัวตรวจรู้ประเภทนี้สามารถจำแนกตามกลไกการตรวจรู้ ได้แก่ ไอออนิก อิเล็กทรอนิกส์ ความจุไฟฟ้า และของแข็ง-อิเล็กโทรไลต์ ซึ่งส่วนใหญ่จะมีข้อดี คือ มีความแข็งแรงทนทาน ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี มีเสถียรทางกายภาพ และอุณหภูมิ (Traversa, 1995) ข้อเสียของตัวตรวจรู้ความชื้นประเภทนี้ คือ ต้องมีการให้ความร้อนแก่ตัวตรวจรู้ความชื้นเพื่อให้ตัวตรวจรู้ความชื้นคืนสภาพ นอกจากนี้ตัวตรวจร์ความชื้นประเภทนี้ยังไวต่อสิ่งสกปรกด้วย

2.1.2 ตัวตรวจรู้ความชื้นโดยใช้วัสดุพอลิเมอร์เป็นวัสดุไวความชื้น (Polymer-based humidity sensor)

ตัวตรวจรู้ความชื้นประเภทนี้มีการใช้งานอย่างแพร่หลายมากกว่าวัสดุเซรามิก เนื่องจากวัสดุเซรามิกจะเน้นไปที่งานประเภทความร้อนสูง และสภาพแวดล้อมมีการกัดกร่อน ซึ่งงานโดยทั่วไปจะใช้งานที่อุณหภูมิปกติ วัสดุพอลิเมอร์ที่นำมาใช้สามารถแบ่งได้เป็นสองประเภท คือ พอลิอิเล็กโทรไลต์ และไดอิเล็กทริก ซึ่งการตรวจรู้ความชื้นจะใช้การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้า ได้แก่ ความจุไฟฟ้า ความต้านทาน คลื่นเสียงพื้นผิว (Penza, et al., 1999) และเพียโซรีซีสทีฟ โดยตัวตรวจรู้ความชื้นประเภทพอลิอิเล็กโทรไลต์ จะใช้ความนำไอออน ของวัสดุประเภทไอออนิก เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นวัสดุจะมีความนำไอออนิกเพิ่มขึ้น กลไกการตรวจรู้อาศัยอัตราเร็วของอนุภาคประจุไอออนิก ซึ่งเคลื่อนที่เนื่องจากสนามไฟฟ้าภายนอก หรือความเข้มข้นประจุพาหะ (Yamazoe, 1986) สมดุลของประจุเกิดจากการที่ไอออนเคลื่อนที่ตรงกันข้ามประจุนั้น คือ มีแรงไฟฟ้าสถิตดึงดูดกลุ่มขั้วที่อยู่กับที่ เมื่อน้ำดูดซึมผ่านวัสดุ อัตราเร็วของอนุภาคประจุที่เคลื่อนที่เนื่องจากสนามไฟฟ้าภายนอกเพิ่มขึ้น ส่งผลให้การเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นระหว่างกันในบริเวณใกล้ ๆ กันเป็นอิสระมากขึ้น ส่งผลให้ความต้านทานลดลง

ตัวตรวจรู้ความชื้นประเภทไดอิเล็กทริกใช้หลักการดูดซึมน้ำของโครงข่ายพอลิเมอร์ ซึ่งค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ของน้ำและพอลิเมอร์มีค่าต่างกันมาก คือ น้ำจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์เท่ากับ 80 ส่วนพอลิเมอร์มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสัมพัทธ์ประมาณ 5 ซึ่งเมื่อมีการดูดซึมน้ำเข้าสู่โครงสร้างของพอลิเมอร์ จะส่งผลให้ค่าไดอิเล็กทริกของพอลิเมอร์มีค่าเพิ่มขึ้น จากหลักการนี้สามารถนำไปใช้สร้างตัวตรวจรู้ความชื้นแบบตัวเก็บประจุ เนื่องจากค่าความจุไฟฟ้าจะเปลี่ยนไปตามค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสารไวความชื้น ซึ่งสามารถวัดได้ง่าย วัสดุที่นิยมใช้เป็นชั้นไดอิเล็กทริกไวความชื้น ได้แก่ พอลิอิไมด์ เนื่องจากเป็นวัสดุที่ทนทานต่อสารเคมีและการปนเปื้อน นอกจากนี้

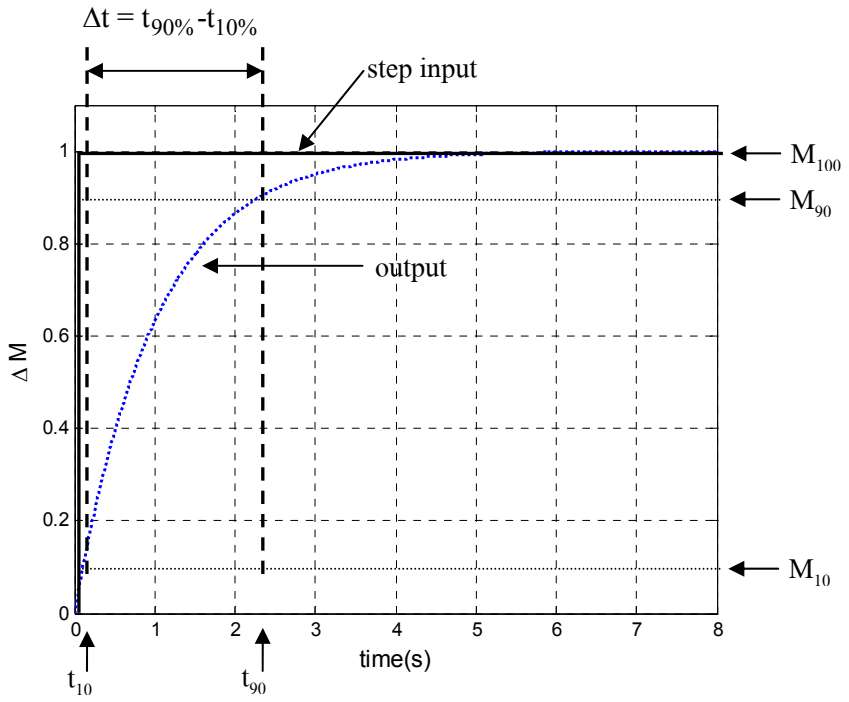
Ralston (1994) ได้นำเสนอการใช้ PMMA เป็นวัสดุไวความชื้น ซึ่งมีผลเสีย คือ มีความไม่เป็นเชิงเส้น ที่ความชื้นสูง และมีฮีสเทอรีซีสมาก

2.2 ผลตอบสนองทางเวลาของตัวตรวจรู้ความชื้น

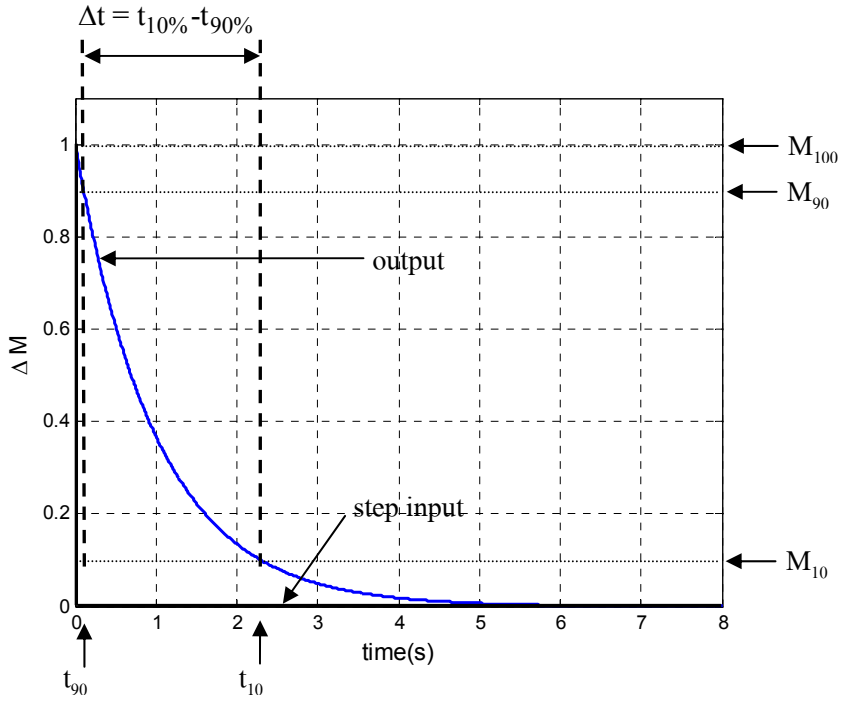
โครงสร้างของตัวตรวจรู้ความชื้นมีหลายแบบ โครงสร้างที่นิยมใช้กันแพร่หลายที่สุด คือ โครงสร้างแบบฟิล์มบาง (Thin-film humidity sensor) เนื่องจากให้ผลตอบสนองทางเวลาเร็ว มีความไวสูง มีเสถียรภาพ มีความเป็นเชิงเส้น วัสดุที่นิยมใช้ คือ พอลิอิไมด์ และอลูมิเนียมออกไซด์ คุณสมบัติที่สำคัญของตัวตรวจรู้ความชื้น คือ ความเร็วในการตอบสนองต่อความชื้น ทดสอบโดยการป้อนค่าความชื้นแบบขั้นบันได โดยทั่วไปจะใช้การเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์จาก 20% จนถึง 80% และเทียบเวลาในการตอบสนองของตัวตรวจรู้ความชื้นเมื่อมีขนาดของการตอบสนองเพิ่มขึ้นเป็น 10% และ 90% ดังรูปที่ 2.1 สามารถคิดผลตอบสนองทางเวลาแบ่งเป็น เวลาขึ้น (Rise time) และเวลาลง (Fall time) ตามสมการที่ (2-1) และ (2-2) สามารถแสดงหลักการวัสดุ ความหนาของชั้นฟิล์ม และเวลาในการตอบสนองของตัวตรวจรู้ความชื้นแบบฟิล์มบาง ที่มีผู้พัฒนาขึ้นตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ดังตารางที่ 2.2

$$\text{Rise time} = t_{M90} - t_{M10} \tag{2-1}$$

$$\text{Fall time} = t_{M90} - t_{M10} \tag{2-2}$$



รูปที่ 2.1 ผลตอบสนองทางเวลาขาขึ้น(ดูดซึมความชื้น)ของตัวตรวจรู้ความชื้น



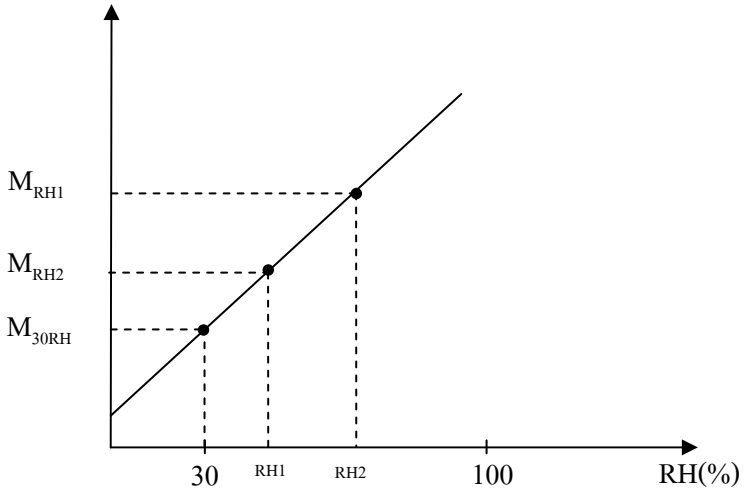
รูปที่ 2.2 ผลตอบสนองทางเวลาขาลง (คายความชื้น)ของตัวตรวจรู้ความชื้น

ตารางที่ 2.2 แสดงผลตอบสนองทางเวลาของตัวตรวจรู้ความชื้นแบบฟิล์มบาง

ปี	ผู้ประพันธ์	หลักการ	วัสดุ	ความหนาฟิล์ม (μm)	เวลาตอบสนอง (s)
1983	Hijikikawa, et al.	ความต้านทาน	พอลิเมอร์	10	100
1985	Tsuchitani, et al.	ความต้านทาน	ไอออนนิก-โคพอลิเมอร์	10	120
1985	Jadhav, et al.	ความต้านทาน	AlOx	120 nm	20
1988	Shimizu, et al.	ความจุไฟฟ้า	พอลิอิไมด์	1	15
1992	Sadaoka, et al.	แสง	พอลิเมอร์	5	60
1993	Bolzhauser, et al.	ความจุไฟฟ้า	พอลิอิไมด์	10	30
1995	Roman, et al.	ความจุไฟฟ้า	PMMA	5-10	60-120
1996	Shibata, et al.	ความจุไฟฟ้า	พอลิอิไมด์	1.3	15
2000	Kang, et al.	ความจุไฟฟ้า	พอลิอิไมด์	2	1
2001	Qui, et al.	แรงดันไฟฟ้า	พอลิอิไมด์	3.8	20
2001	Laville, et al.	ความจุไฟฟ้า	พอลิอิไมด์	0.65	1
2002	Laville, et al.	ความจุไฟฟ้า	พอลิอิไมด์, BCB	0.65	0.4
2003	Tetelin, et al.	ความจุไฟฟ้า	พอลิอิไมด์, BCB	1.6	0.4
2004	Kalkan, et al.	กระแสไฟฟ้า	ซิลิคอนนาโนเฟส	0.04-0.2	<0.2

2.3 ตัวตรวจรู้ความชื้นตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน

ตัวตรวจรู้ความชื้นที่ดีควรมีความไวสูง มีฮีสเทอรีซีสน้อย อายุการใช้งานยาวนาน ราคาถูก และมีผลตอบสนองทางเวลาเร็ว คุณสมบัติที่สำคัญของตัวตรวจรู้ความชื้น ได้แก่ ความไว และผลตอบสนองทางเวลาเ นักวิจัยได้พัฒนาตัวตรวจรู้ความชื้นในรูปแบบที่ต่างกัน ในที่นี้จะสรุปและรวบรวมตัวตรวจรู้ความชื้นตั้งแต่อดีตจนถึงปัจุบัน มุ่งเน้นไปที่ความไวและผลตอบสนองทางเวลาของตัวตรวจรู้ ซึ่งความไว คือ ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของตัวตรวจรู้ความชื้นเทียบกับความชื้นที่เปลี่ยนไป ต่อค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่ 30% ดังสมการที่ (2-3) รายละเอียดแสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ความไวของตัวตรวจรู้ความชื้น

$$\text{Sensitivity} = \frac{\Delta M}{M_{30RH}} = \frac{(M_{RH1}-M_{RH2})}{M_{30RH}} \bullet \frac{1}{(RH2-RH1)} \times 10^6 \quad \text{(ppm/\%RH)} \qquad (2\text{-}3)$$

โดยที่ Sensitivity คือ ค่าความไวของตัวตรวจรู้ความชื้น มีหน่วยเป็น ppm/%RH

ΔM คือ ความชันของกราฟที่ได้จากตัวตรวจรู้ความชื้น

M_{30RH} คือ ค่าผลตอบสนองของตัวตรวจรู้ความชื้น ที่ความชื้นสัมพัทธ์ เท่ากับ 30%

ชนิดของสัญญาณตอบสนองอาจเป็น ค่าความจุไฟฟ้า

แรงดันไฟฟ้า หรืออื่น ๆ

Seiyama (1983) สร้างตัวตรวจรู้ความชื้นโดยใช้วัสดุเซรามิก แบ่งออกเป็นแบบเซรามิกชนิดรูพรุน และแบบสารกึ่งตัวนำซึ่งใช้หลักการวัดค่าความต้านทานของที่เปลี่ยนไปของเซรามิกเมื่อได้รับความชื้น ตัวตรวจรู้มีผลตอบสนองทางเวลา 15 วินาที มีความไว 36 ppm /%RH มีค่าความต้านทานที่ความชื้นสัมพัทธ์ 30% เท่ากับ 25 MΩ Shimizu (1988) สร้างตัวตรวจรู้ความชื้นแบบดิจิตอล ใช้หลักการตรวจรู้ความชื้นแบบตัวเก็บประจุ ตัวตรวจรู้ความชื้นมีความไว 2,922 ppm/%RH มีค่าความจุไฟฟ้าที่ความชื้นสัมพัทธ์ 30% เท่ากับ 285 pF มีผลตอบสนองทางเวลา 5 วินาที Denton (1990) สร้างตัวตรวจรู้ความชื้นโดยใช้พอลิอิไมด์ เป็นวัสดุไวความชื้นและสร้างวงจรที่สามารถแปลงความถี่ไฟฟ้าเป็นแรงดัน ซึ่งตัวตรวจรู้ความชื้นนี้มีผลตอบสนองทางเวลาเท่ากับ 600 วินาที มีความไว 13,470 ppm/%RH ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ความชื้นสัมพัทธ์ 30% เท่ากับ 0.49 V Blotshauser (1991) สร้างตัวตรวจรู้ความชื้นแบบตัวเก็บประจุโดยใช้พอลิอิไมด์เป็นวัสดุไวความชื้น มีโครงสร้างอิเล็กโทรดแบบซี่หวี วัดความจุไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 30% ได้ 1.5 pF และตัวตรวจรู้ความชื้นมีความไว 2,670 ppm/%RH แต่ผลตอบสนองทางเวลาช้ามาก ต่อมาได้พัฒนาเป็นตัวตรวจรู้ความชื้นแบบเทคโนโลยี CMOS เพื่อให้สามารถแปลงค่าความจุไฟฟ้าออกมาเป็นค่ากระแสไฟฟ้า ทำให้ตัวตรวจรู้ความชื้นมีความไวเพิ่มขึ้นเป็น 5,333 ppm/%RH มีค่ากระแสไฟฟ้าที่ความชื้นสัมพัทธ์ 30% เท่ากับ 0.3 uA และเวลาในการตอบสนอง 30 วินาที

Sager (1995) สร้างตัวตรวจรู้ความชื้นโดยใช้การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกล (เปลี่ยนแปลงขนาด) ของพอลิอิไมด์เมื่อได้รับความชื้น ผลที่ได้พบว่าตัวตรวจรู้ความชื้นมีความไว 60 ppm/%RH ผลตอบสนองทางเวลาอยู่ที่ 90 วินาที Kang (2000) ได้ออกแบบโครงสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นแบบใหม่ ใช้หลักการของตัวเก็บประจุโครงสร้างของตัวตรวจรู้มีลักษณะเป็นแท่งไดอิเล็กทริกของพอลิอิไมด์ วางเรียงกันจำนวนมาก เพื่อเพิ่มความไวและมีตัวให้ความร้อน เพื่อให้ตัวตรวจรู้ความชื้นคายความชื้นเร็ว ผลที่ได้ พบว่า ตัวตรวจรู้ความชื้นนี้มีความไว 2,307 ppm/%RH มีความเร็วในการตอบสนอง 1 วินาทีมีค่าความจุไฟฟ้าที่ความชื้นสัมพัทธ์ 30% เท่ากับ 13 pF Laville (2001) สร้างตัวตรวจรู้ความชื้นแบบตัวเก็บประจุสำหรับใช้วัดความชื้นในลมหายใจ โดยใช้พอลิอิไมด์เป็นวัสดุไวความชื้น ผลตอบสนองทางเวลาของตัวตรวจรู้ความชื้นอยู่ที่ 1 วินาที เวลาในการคายความชื้นเท่ากับ 15 วินาที ตัวตรวจรู้ความชื้นมีความไว 3,166 ppm/%RH และมีค่าความจุไฟฟ้าที่ความชื้นสัมพัทธ์ 30% เท่ากับ 12 pF ต่อมาในปี 2002 ได้พัฒนาตัวตรวจรู้ความชื้นโดยติดตั้งตัวให้ความร้อนพบว่าผลตอบสนองทางเวลาลดลงอยู่ที่ 0.2 วินาที เวลาในการคายความชื้น 11 วินาที ตัวตรวจรู้ความชื้นมีความไว 3,166 ppm/%RH และมีค่าความจุไฟฟ้าที่ความชื้นสัมพัทธ์ 30% เท่ากับ 12 pF Das (2003) พัฒนาตัวตรวจรู้ความชื้น โดยใช้การวัดการเลื่อนเฟสของสัญญาณคลื่นรูปซายน์ ซึ่งจะป้อนสัญญาณเข้าสู่ตัวตรวจรู้ความชื้นแบบซิลิคอนพรุน และมีการชดเชย

ผลตอบสนองให้เป็นเชิงเส้นซึ่งผลตอบสนองทางเวลาของตัวตรวรู้ความชื้นเท่ากับ 10 วินาที โดยวัดสัญญาณออกมาในรูปแรงดันไฟฟ้า ซึ่งแรงดันไฟฟ้าที่ความชื้นสัมพัทธ์ 30% เท่ากับ 3 mV ตัวตรวจรู้ความชื้นมีความไว 333,333 ppm/%RH

Kann (2004) พัฒนาตัวตรวจรู้ความชื้นโดยใช้ฟิล์มของซิลิคอนพรุนเป็นวัสดุไวความชื้น วัดผลตอบสนองเป็นค่ากระแสไฟฟ้าโดยผลตอบสนองทางเวลาเท่ากับ 0.2 วินาทีตัวตรวจรู้ความชื้นมีความไว 360,000 ppm/%RH มีค่ากระแสที่ความชื้นสัมพัทธ์ 30% เท่ากับ 1 nA Zhang (2005) พัฒนาตัวตัวตรวจรู้ความชื้นโดยใช้ฟิล์มของ ZnO แบบเส้นนาโน (nanowires) และ ZnO แบบแท่งนาโน (nanorod) ซึ่งวัดความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไปของวัสดุเมื่อได้รับความชื้น มีความต้านทานที่ความชื้นสัมพัทธ์ 30% เท่ากับ 15 MΩ และมีความไว 20,700 ppm/%RH Packirisamy (2005) สร้างตัวตรวจรู้ความชื้น โดยวัดการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานของฟิล์มพอลิอิไมด์ ซึ่งวางบนขั้วไฟฟ้าสองขั้วผลตอบสนองทางเวลามีค่า 2 วินาที แต่มีข้อเสีย คือ ตัวตรวจรู้ความชื้นมีผลตอบสนองต่อความชื้นสัมพัทธ์ 42% ขึ้นไป จึงไม่เหมาะกับงานที่ต้องการวัดความชื้นต่ำ และผลตอบสนองของตัวตรวจรู้ความชื้นยังไม่เป็นเชิงเส้น Steele (2006) พัฒนาตัวตรวจรู้ความชื้นความเร็วสูงแบบตัวเก็บประจุ โดยใช้ฟิล์มบางของอลูมิเนียมออกไซด์เป็นวัสดุไวความชื้น ซึ่งให้ผลตอบสนองทางเวลาเพียง 42 มิลลิวินาทีโดยมีค่าความจุไฟฟ้าที่ความชื้นสัมพัทธ์ 30% เท่ากับ 55 pF และมีความไว 36,363 ppm/%RH แต่มีข้อเสีย คือ ผลตอบสนองที่ได้ไม่เป็นเชิงเส้น Liang (2006) สร้างตัวตรวจรู้ความชื้นแบบบรรจุตัวถังวงจรรวม ใช้เทคโนโลยี CMOS-MEMS มีตัวให้ความร้อน และวงจรแปลงค่าความจุไฟฟ้าให้เป็นสัญญาณความถี่ ตัวตรวจรู้ความชื้นนี้ให้ความไวเท่ากับ 321 ppm/%RH โดยที่มีค่าความถี่ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 30% เท่ากับ 51 MHz Ketthanom (2006) พัฒนาตัวตรวจรู้ความชื้นแบบเทคโนโลยีวงจรรวมโดยใช้การสปัตเตอริงพอลิอิไมด์เคลือบทับขั้วอิเล็กโทรดบนฐานรองซิลิกอน พบว่าตัวตรวจรู้ความชื้นมีผลตอบสนองที่ความชื้นสัมพัทธ์ 30% เท่ากับ 2.18 pF ตัวตรวจรู้ความชื้นมีความไว 3,810 ppm/%RH ตัวตรวจรู้มีเวลาในการดูดซึมความชื้น 1.3 วินาที มีเวลาในการคายความชื้น 247.1 วินาที

จากข้อมูลผลตอบสนองทางเวลา และความไวของตัวตรวจรู้ความชื้นที่ได้กล่าวมา สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.3 เมื่อนำข้อมูลในตารางที่ 2.3 วาดกราฟเปรียบเทียบความไว และผลตอบสนองทางเวลา พัฒนาการของตัวตรวจรู้ความชื้นจะเห็นได้ชัดเจนยิ่งขึ้นดังรูปที่ 2.4

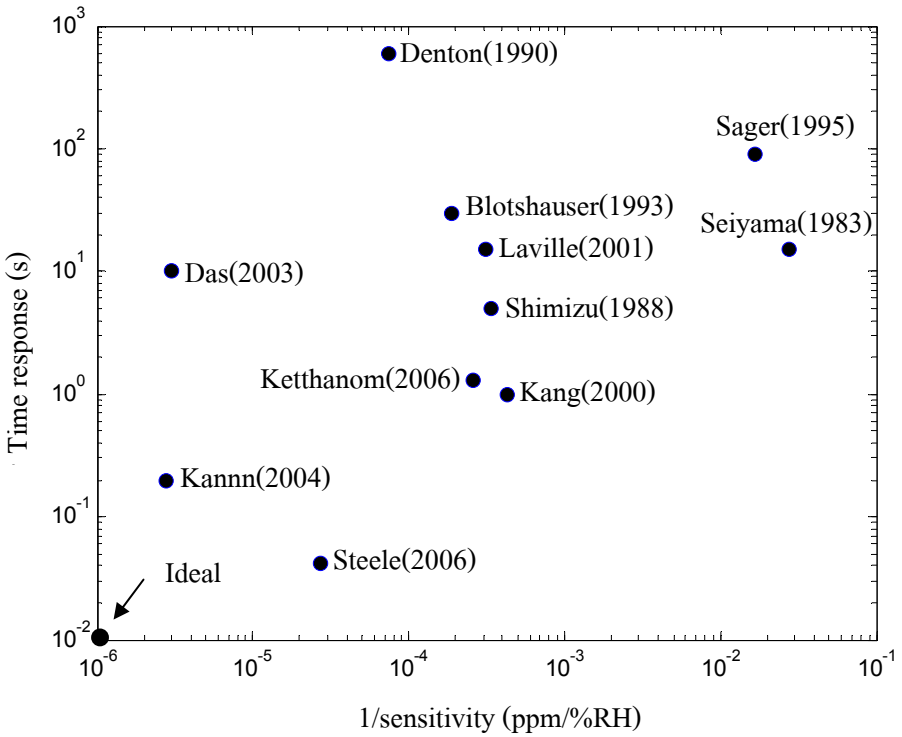
การออกแบบตัวตรวจรู้ความชื้น ต้องคำนึงถึงปัจจัยหลายประการ ซึ่งตัวตรวจรู้ความชื้นที่ดีต้องสามารถใช้งานได้กว้างขวาง สร้างได้ง่าย ไม่ต้องมีการบำรุงรักษามาก ขนาดเล็ก มีความไวสูง ทนต่อสิ่งปนเปื้อน ใช้เวลาในการดูดซึม หรือคายความชื้นน้อย และเชื่อมต่อกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ได้ง่าย ตัวตรวจรู้ความชื้นแบบตัวเก็บประจุได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย คิดเป็นจำนวนกว่าร้อยละ 75 ของตัวตรวจรู้ความชื้นในท้องตลาด (Rittersma, 2002) เนื่องจากสามารถใช้งานได้ง่าย

ผลตอบสนองทางเวลาเร็ว และเป็นเชิงเส้น ทำให้ง่ายในการนำไปใช้งาน และทนทานต่อสิ่งปนเปื้อน หลักการทำงานของตัวตรวจรู้ความชื้นแบบตัวเก็บประจุ จะใช้วัสดุไวความชื้นเป็นชั้นไดอิเล็กทริก ซึ่งค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ε_r) จะเปลี่ยนแปลงไปตามความชื้น ทำให้ค่าความจุไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปตามความชื้นด้วย ในงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นไปที่การสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นแบบตัวเก็บประจุ ที่ให้ผลตอบสนองทางเวลาเร็วขึ้น มีขนาดเล็ก และสร้างด้วยเทคโนโลยีลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ เนื่องจากต้องการลวดลายซี่อิเล็กโทรดที่มีขนาดเล็ก และมีผนังโครงสร้างของชั้นไดอิเล็กทริกไวความชื้นที่เรียบตรง

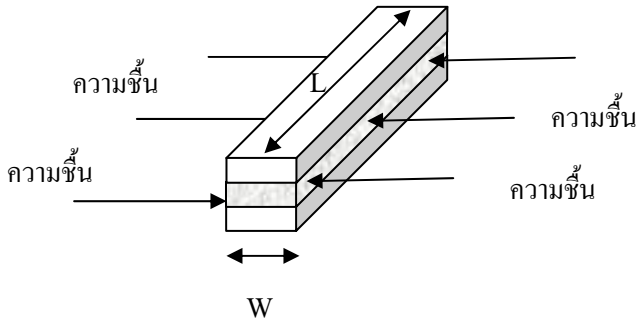
ในการออกแบบโครงสร้างตัวตรวจรู้จะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาโครงสร้างที่ให้ผลตอบสนองทางเวลาเร็วที่สุด และสามารถสร้างได้ง่ายไม่ซับซ้อน ซึ่งโครงสร้างดังรูปที่ 2.5 เป็นโครงสร้างที่ให้ผลตอบสนองทางเวลาขึ้นกับค่าความกว้างของซี่อิเล็กโทรดเท่านั้นโดยเป็นไปตามความสัมพันธ์ $t = kW^2/D$ เมื่อ t เป็นเวลาในการตอบสนอง k เป็นค่าคงที่ขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้าง W คือ ความกว้างครึ่งหนึ่งของซี่อิเล็กโทรด และ D คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไอน้ำภายในวัสดุไวความชื้น เมื่อพิจารณาจากเครื่องมืออุปกรณ์ และเทคโนโลยีที่มีอยู่ โครงสร้างนี้เหมาะสมที่จะนำมาสร้างเป็นตัวตรวจรู้ความชื้นความเร็วสูง เนื่องจากกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ สามารถสร้างชิ้นงานที่มีขนาดเล็กมาก ๆ ได้ จึงสามารถใช้สร้างตัวตรวจรู้ความชื้นที่มีผลตอบสนองทางเวลาเร็ว โดยลดความกว้างของซี่อิเล็กโทรดให้น้อยลง ถ้าต้องการเพิ่มความไวสามารถสร้างซี่อิเล็กโทรดแบบเดียวกันนี้ ขนานกันจำนวนมาก หรือทำการลดความหนาของชั้นฟิล์ม เพื่อเพิ่มความไวได้เช่นกัน ส่วนชั้นไดอิเล็กทริกจะใช้พอลิเมอร์ไวแสง SU-8 เป็นวัสดุไวความชื้น เนื่องจากเป็นวัสดุพอลิเมอร์ที่สามารถขึ้นรูปด้วยกระบวนการลิโธกราฟฟี นอกจากนี้จากผลการทดลองเบื้องต้นพอลิเมอร์ไวแสง SU-8 มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (D) สูงกว่าพอลิอิไมด์ จึงเหมาะที่จะนำพอลิเมอร์ชนิดนี้มาใช้ในโครงสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นความเร็วสูง ตัวอย่างโครงสร้างอย่างง่ายของตัวตรวจรู้ความชื้นที่มีความไวสูงขึ้น ด้วยการเพิ่มพื้นที่ของอิเล็กโทรดแสดงดังรูปที่ 2.6

ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบผลตอบสนองทางเวลาและความไวของตัวตรวจรู้ความชื้น

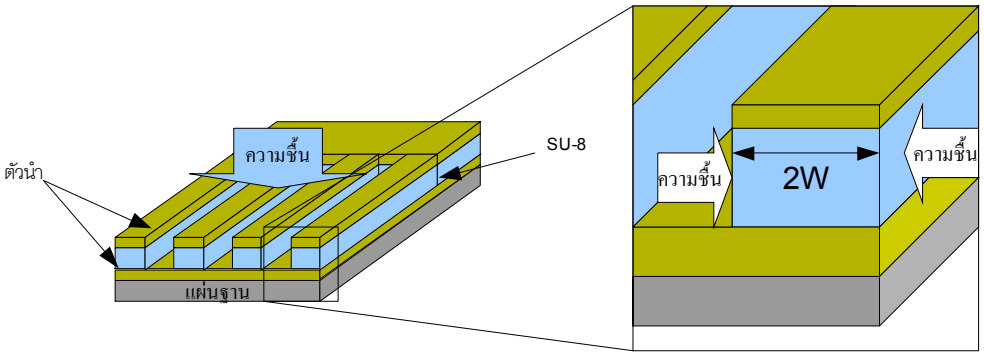
ปี	ผู้ประพันธ์	หลักการ	ความไว ppm/%RH	เวลาตอบสนอง (วินาที)
1983	Seiyama, et al.	ความต้านทาน	36	15
1988	Shimizu, et al.	ความจุไฟฟ้า	2,922	5
1990	Denton, et al.	ความจุไฟฟ้า/แรงดัน	13,470	600
1993	Blotshauser, et al.	ความจุไฟฟ้า/กระแส	5,330	30
1995	Sager, et al.	เปลี่ยนแปลงขนาด PI	60	90
1996	Lee, et al.	ทรานซิสเตอร์สนามไฟฟ้า	-	-
2000	Kang, et al.	ตัวเก็บประจุ	2,307	1
2001	Laville, et al.	ตัวเก็บประจุ	3,166	1
2002	Laville,et al.	ตัวเก็บประจุ	3,166	0.2
2003	Das, et al.	ตัวเก็บประจุ/การเลื่อนเฟส	333,333	10
2004	Kann, et al.	กระแสไฟฟ้า	360,000	0.2
2005	Zhang, et al.	ความต้านทาน	20,700	3
2005	Packirisamy, et al.	ความต้านทาน	-	2
2006	Steele.	ตัวเก็บประจุ	36,000	0.42
2006	Liang.	ความจุไฟฟ้า/ความถี่	321	-
2006	Ketthanom.	ความจุไฟฟ้า	3,810	1.3



รูปที่ 2.4 เปรียบเทียบผลตอบสนองทางเวลาและความไวของตัวตรวจรู้ความชื้นแบบต่าง ๆ



รูปที่ 2.5 โครงสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นแบบซี่ยาว



รูปที่ 2.6 โครงสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นความเร็วสูงที่เพิ่มความไวโดยการเพิ่มพื้นที่อิเล็กโทรด

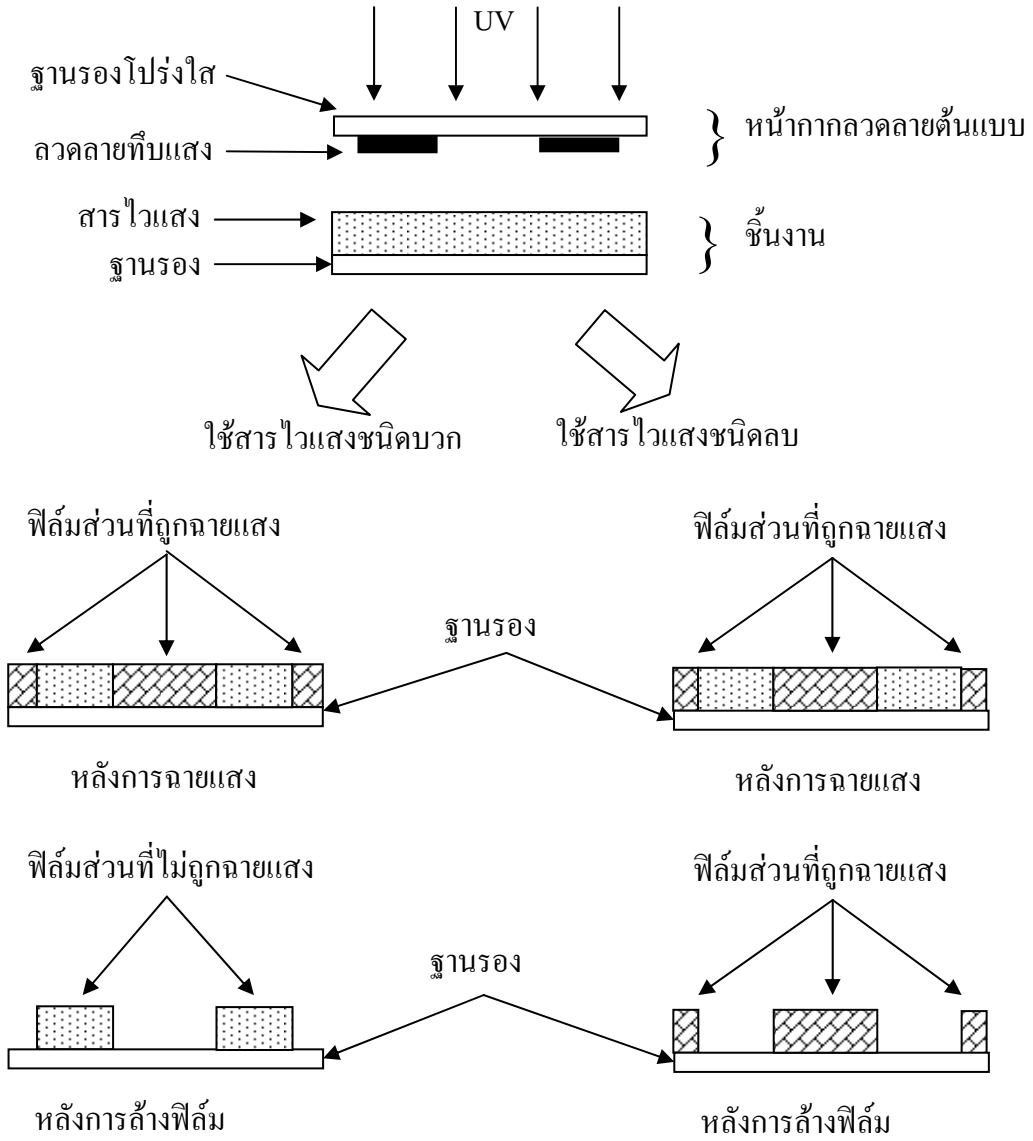
บทที่ 3

การพัฒนากระบวนการพื้นฐาน

การสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นโดยใช้กระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ มีกระบวนการและขั้นตอนต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องหลายขั้นตอน ได้แก่ การฉายรังสีเอ็กซ์เพื่อสร้างชิ้นงาน เทคนิคในการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ โดยใช้เงินเป็นวัสดุดูดกลืนรังสี การสร้างหน้ากากโลหะ เพื่อใช้สำหรับการสร้างลวดลายวัสดุไวความชื้น และขั้วอิเล็กโทรดด้วยรังสีเอ็กซ์ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.1 การคำนวณพลังงานแสงซินโคตรอนที่ใช้ในกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์

กระบวนการลิโธกราฟฟีเป็นกระบวนการในการสร้างโครงสร้างจุลภาค ซึ่งอาศัยการเกิดเงาของแสงเมื่อมีวัตถุใดมาบังแหล่งกำเนิดแสง โดยวัตถุที่ใช้มากั้นเรียกว่าหน้ากากกั้นแสง (mask) หน้ากากกั้นแสงนี้จะเป็นส่วนมีมีลวดลายจุลภาคอยู่ เมื่อฉายแสงผ่านหน้ากากกั้นแสง แสงที่ผ่านหน้ากากจะถูกฉายลงบนสารไวแสงโฟโตรีซีส (photoresist) ที่ทำหน้าที่เป็นฉากรับภาพ แสงที่ตกกระทบจะทำปฏิกิริยากับสารไวแสงทำให้เกิดเป็นลวดลายขึ้นในเนื้อสารไวแสง เมื่อล้างด้วยน้ำยาล้างฟิล์มจึงจะได้ลวดลายตามต้องการ กระบวนการดังกล่าวได้ถูกพัฒนามาเพื่อใช้ผลิตโครงสร้างขนาดจุลภาค ซึ่งมีความสูงมากกว่าเมื่อเทียบกับความกว้าง (High-aspec ratio) ทำให้สามารถสร้างชิ้นงานที่มีโครงสร้างเป็นสามมิติได้ โดยกระบวนการลิโธกราฟฟี จะใช้แหล่งกำเนิดพลังงานแสงชนิดต่าง ๆ สำหรับกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต จะใช้พลังงานแสงอัลตราไวโอเลตที่มีความยาวคลื่นในช่วง 365-405 nm สร้างลวดลายลงบนสารไวแสงโดยการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตผ่านหน้ากากโปร่งใสที่มีลวดลายจุลภาคทึบแสง สารไวแสงที่ใช้เป็นฉากรับภาพมีสองชนิด คือ สารไวแสงชนิดบวก (Possitive-photoresist) และสารไวแสงชนิดลบ (Negative-photoresist) ตัวอย่างสารไวแสงชนิดบวก ได้แก่ AZ ส่วนที่ถูกฉายด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตจะหลุดหายไปหลังล้างด้วยน้ำยาล้างฟิล์ม ส่วนสารไวแสงชนิดลบ ได้แก่ SU-8 ซึ่งส่วนที่ถูกฉายด้วยรังสี อัลตราไวโอเล็ตจะแข็งตัวเป็นโครงสร้างถาวร ส่วนบริเวณที่ไม่ถูกฉายจะสามารถล้างออกได้ด้วยน้ำยาล้างฟิล์มเช่นกัน โดยกระบวนการทั้งสองประเภทสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.1

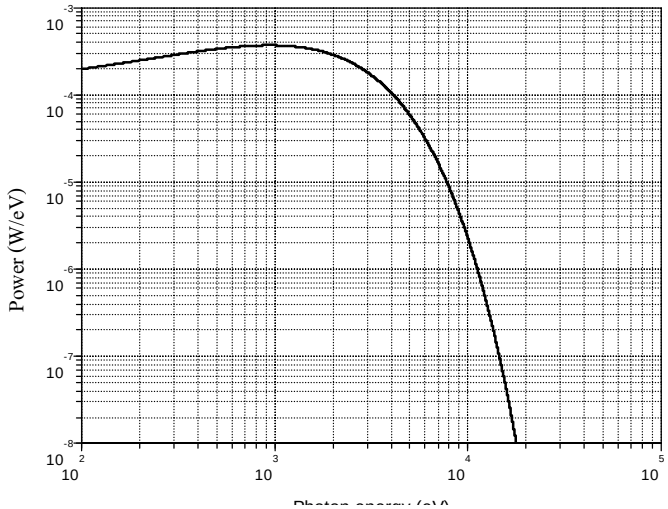


รูปที่ 3.1 การสร้างลวดลายลงบนสารไวแสงชนิดบวกและชนิดลบ

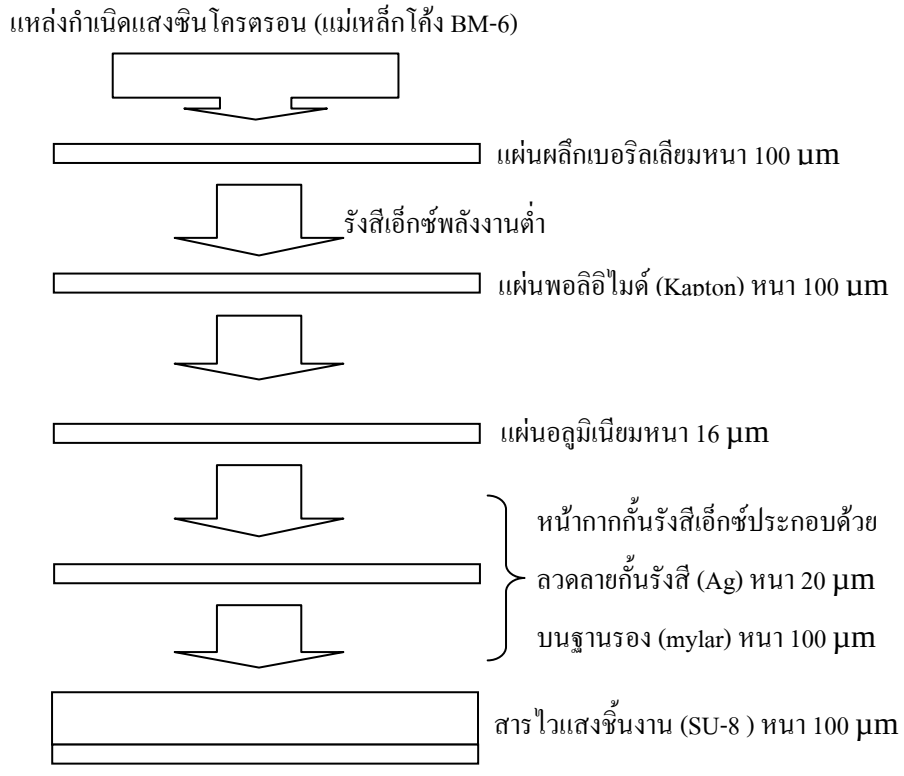
นอกจากกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตแล้ว ยังมีกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ ซึ่งมีข้อดี คือ สามารถสร้างชิ้นงานที่มีโครงสร้างสูงกว่า และชิ้นงานยังมีผนังของลวดลายโครงสร้างจุลภาคที่เรียบตรง เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ได้จากการใช้รังสีอัลตราไวโอเลต แต่การสร้างชิ้นงานด้วยรังสีเอ็กซ์นั้นจะมีต้นทุนสูงกว่า หน้ากากที่ใช้ต้องเป็นวัสดุที่รังสีเอ็กซ์ไม่สามารถผ่านได้ ซึ่งจะใช้โลหะที่มีเลขอะตอมสูง เช่น ทอง หรือเงิน โดยมีแหล่งกำเนิดพลังงานแสงจากเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน ซึ่งผลิตแสงที่มีพลังงานออกมาในช่วงกว้างดังแสดงในรูปที่ 3.2

การนำพลังงานแสงซินโครตรอนมาใช้งาน จะกรองให้เหลือเฉพาะแสงในย่านที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์สำหรับกระบวนการลิโธกราฟฟีได้ซึ่งเป็นพลังงานแสงในช่วงของรังสีเอ็กซ์พลังงานต่ำ (soft X-ray) ดังแสดงในรูปที่ 3.3 พลังงานจากรังสีเอ็กซ์ที่ชิ้นงานได้รับ จะต้องมีปริมาณที่พอเหมาะ จึงจะได้โครงสร้างจุลภาคที่ดี ถ้าพลังงานน้อยเกินไป จะทำให้โครงสร้างอ่อนตัวไม่สามารถใช้งานได้ หรือมากเกินไปจะทำให้โครงสร้างแตกร้าว หลุดร่อนจากฐานรอง นอกจากนี้ หน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์จำเป็นต้องมีความหนาเพียงพอ ที่จะกั้นรังสีเอ็กซ์มิให้ตกกระทบสารไวแสง บริเวณที่ไม่ต้องการให้เกิดการแข็งตัว พลังงานส่วนนี้ไม่สามารถวัดได้ด้วยอุปกรณ์ที่มีอยู่ จึงต้องใช้การคำนวณทางทฤษฎีเพื่อให้ทราบพลังงานที่สารไวแสงได้รับ เนื่องจากในกระบวนการสร้างชิ้นงานที่ต่างกัน จะมีการใช้วัสดุส่วนฐานรองของหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ต่างกัน วัสดุดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ต่างกัน และยังอาจมีการใส่ตัวกรองอื่น ๆ เข้าไปด้วย ทำให้สเปกตรัมพลังงานที่ออกมาเปลี่ยนแปลงไป และความหนาของชั้นตัวกรองยังมีผลให้พลังงานลดทอนลงอีก สามารถแสดงตัวอย่างลำดับชั้นของตัวกรองจนถึงชิ้นงานของระบบลำเลียงแสงซินโครตรอนที่ใช้งานจริงในกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ของระบบลำเลียงแสง BL-6 ณ ศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติ ดังรูปที่ 3.3

การคำนวณพลังงานของแสงซินโครตรอน สามารถทำได้โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปที่มีผู้สร้างไว้แล้วเช่น XOP (X-ray Oriented Programs) แต่เนื่องด้วยข้อจำกัดของ XOP ที่ไม่สามารถใช้ชั้นวัสดุกรองแสงได้เกิน 5 ชั้นทำให้ไม่สามารถใช้กับกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ของระบบลำเลียงแสง BL-6 ได้ หรือเมื่อต้องการชุดข้อมูลการจำลองผลจำนวนมากเพื่อนำมาวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ จำเป็นต้องเก็บข้อมูลจำนวนมาก ทำได้โดยการเปลี่ยนค่าในโปรแกรม XOP ซึ่งใช้เวลานานและไม่สะดวก ในส่วนนี้จึงได้ทำการพัฒนาโปรแกรมที่เขียนขึ้นเองชื่อว่าโปรแกรม XmaskSim โดยใช้ภาษา Scilab ที่เขียนได้ง่าย และสามารถคำนวณคณิตศาสตร์ขั้นสูงได้เป็นอย่างดี ผู้ใช้สามารถแก้ไขเพิ่มเติม เพื่อให้เหมาะสมกับความต้องการของงานได้ สำหรับการคำนวณบางขั้นตอนที่ยุ่งยากสามารถใช้โปรแกรม XOP ช่วยสร้างชุดข้อมูล เช่นการสร้างสเปกตรัมพลังงานที่ได้จากเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน ที่กระแสค่าต่าง ๆ เป็นต้น



รูปที่ 3.2 สเปกตรัมกำลังของแสงซินโครตรอนที่กระแสอิเล็กตรอน 40 mA



รูปที่ 3.3 องค์ประกอบของระบบลำเลียงแสงซินโครตรอน BL-6 ที่ใช้สำหรับกระบวนการ
ลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ ณ ศูนย์ปฏิบัติการวิจัย
เครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติ

3.1.1 สมการและขั้นตอนการคำนวณ

การคำนวณพลังงานของรังสีที่สารไวแสงได้รับ เริ่มจากการสร้างสเปกตรัมพลังงานของแสงซินโครตรอนด้วยโปรแกรม XOP เนื่องจากเป็นโปรแกรมที่ถูกสร้างขึ้นมา เพื่ออำนวยความสะดวกให้กับผู้ที่สนใจ สามารถนำมาใช้โดยไม่คิดมูลค่า เพื่อช่วยลดขั้นตอนในการคำนวณ จึงใช้โปรแกรม XOP ในการสร้างสเปกตรัมของแสงที่แผ่ออกมาจากระบบลำเลียงส่วนหน้า หรือ (I_{BL6}) โดยใช้พารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนที่ใช้งานอยู่จริง โดยมีพลังงานของอิเล็กตรอนในวงแหวนกักเก็บอิเล็กตรอน (E) เท่ากับ 1.2 GeV รัศมีความโค้งแม่เหล็ก (Bending magnet radius of curvature : R_{BM}) เท่ากับ 2.78 เมตร จากรัศมีความโค้งแม่เหล็ก สามารถคำนวณหาความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กได้จากสมการที่ (3-1) ซึ่งจะได้ความความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กเท่ากับ 1.44 เทสลา มุมเปิดของกรวยแสงในแนวดิ่ง (vertical opening angle from source) สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (3-2) โดยจะได้มุมเปิด เท่ากับ 0.425 mrad พลังงานคุณลักษณะ (characteristic energy : E_c) จะมีความสัมพันธ์กับค่าพลังงานของอิเล็กตรอนในวงแหวนกักเก็บอิเล็กตรอน และรัศมีความโค้งของแม่เหล็กตามสมการที่ (3-3) โดยมีพลังงาน เท่ากับ 1.378 keV กำลังงานของแสงซินโครตรอน 99% จะอยู่ในช่วงพลังงาน $0.01E_C$ ถึง $7E_C$ ในกรณีของเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน มีค่าพลังงานคุณลักษณะ 1.378 keV ดังนั้น 99% ของกำลังแสงซินโครตรอนจึงอยู่ในช่วง 13.78 eV ถึง 9.646 keV

$$\text{ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก} = \frac{3.3357 \times \mathrm{E(GeV)}}{\mathrm{R_{BM}(m)}} \tag{3-1}$$

$$\text{มุมเปิดของกรวยแสงในแนวดิ่ง} = \frac{0.51(\mathrm{mrad})}{\mathrm{E(Gev)}} \tag{3-2}$$

$$\text{พลังงานคุณลักษณะ} = \frac{2,218 \times \mathrm{E^3(GeV)}}{\mathrm{R_{BM}(m)}} \tag{3-3}$$

$$\text{ความยาวคลื่นคุณลักษณะ} = \frac{5.59 \times \mathrm{R_{BM}(m)}}{\mathrm{E^3(GeV)}} \tag{3-4}$$

อิเล็กตรอนที่โคจรในวงแหวนกักเก็บอิเล็กตรอนในแต่ละรอบ จะมีการสูญเสียพลังงานเนื่องจากการเลี้ยวเบนซึ่งถูกบังคับโดยแม่เหล็กโค้งทั้ง 8 ตัว ดังรูปที่ 3.4 โดยอิเล็กตรอนจะปล่อยพลังงานออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า พลังงานนี้เป็นพลังงานที่อิเล็กตรอนสูญเสียไปในแต่ละรอบการโคจร ซึ่งในแต่ละรอบจะถูกเลี้ยวเบน 8 ครั้ง เท่ากับจำนวนแม่เหล็กโค้ง สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (3-5) ในแต่ละรอบอิเล็กตรอนจะสูญเสียพลังงานทั้งสิ้น เท่ากับ 66 W/mA เมื่อ I(mA) คือ ค่ากระแสของวงแหวนกักเก็บอิเล็กตรอน

$$\text{Total energy loss per revolution} = \frac{\left[88.5\right] \times \left[E^4(\text{GeV})\right] \times \left[I(\text{mA})\right]}{\left[R_{BM}(\text{m})\right]} \qquad (3\text{-}5)$$

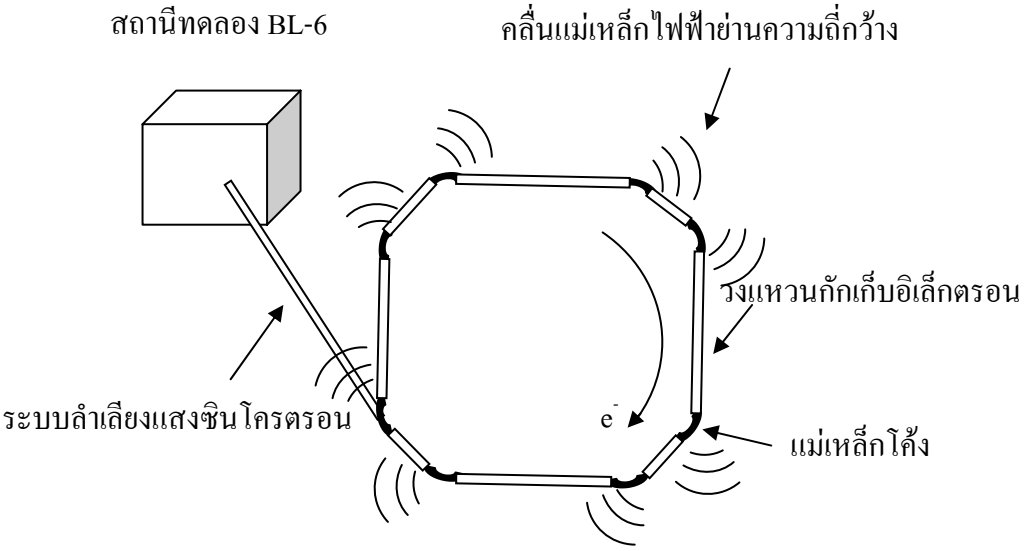
กำลังที่อิเล็กตรอนสูญเสียในแต่ละรอบการโคจร เป็นผลรวมของกำลังที่สูญเสียเมื่อผ่านแต่ละแม่เหล็กโค้ง มีกำลัง 66 W/mA ดังนั้นในแม่เหล็กโค้งแต่ละตัวจะมีกำลังสูญเสีย 8.25 W/mA แม่เหล็กแต่ละตัวมีรัศมีความโค้ง เท่ากับ 2.78 เมตร มีความยาวของแม่เหล็ก (BM path length) เท่ากับ 2.1834 เมตร หรือคิดเป็นมุมเปิด เท่ากับ 0.7854 rad ดังรูปที่ 3.5กำลัง 8.25 W/mA จะปล่อยออกมาในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตลอดทั้งความยาวของแม่เหล็กโค้ง ซึ่งมีความยาว 2.1834 เมตร แต่ในระบบลำเลียงแสง BL-6 ดังรูปที่ 3.6 จะมีหน้ากาก 1 และ 2 เป็นตัวกำหนดมุมเปิดของแสงซินโครตรอนที่จะนำไปใช้งาน โดยมีมุมเปิดสุดท้าย 5.063 mrad ซึ่งยอมให้พลังงานที่ผ่านออกมาเพียง 52.5 mW/mA หรือคิดเป็นสัดส่วนพลังงานที่ระบบลำเลียงแสงซินโครตรอนให้ผ่านออกมาสำหรับระบบลำเลียงแสง BL-6 เท่ากับ 0.63%

ระบบลำเลียงแสงประกอบด้วยชิ้นงานและวัสดุกรองแสงทั้งสิ้น 6 ชั้น ได้แก่ แผ่นผลึกเบอริลเลียม แผ่นพอลิอิไมด์ แผ่นอลูมิเนียม แผ่นฐานรองหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ ลวดลายโลหะกั้นรังสีเอ็กซ์ และฟิล์มหนาของสารไวแสงโดยลักษณะของระบบลำเลียงแสง BL-6 แสดงได้ดังรูปที่ 3.7 หน้ากาก 1 และ 2 จะเป็นตัวกำหนดมุมเปิดของกรวยแสง ระยะทางจากจุดกำเนิดแสงถึงหน้ากากตัวที่หนึ่ง (mask1) เท่ากับ 1.952 เมตร มุมเปิดในแนวนอนเท่ากับ 17.42 mrad มุมเปิดในแนวดิ่งเท่ากับ 0.425 mrad หน้ากากตัวที่สอง (mask2) มีระยะจากจุดกำเนิดแสง เท่ากับ 4.937 เมตร มุมเปิดในแนวนอน เท่ากับ 5.063 mrad มุมเปิดในแนวดิ่ง เท่ากับ 0.425 mrad หน้ากากตัวที่สองจึงเป็นตัวกำหนดมุมเปิดในแนวนอน คือ 5.063 mrad จากนั้นแสงจะเข้าสู่หน้าต่างผลึกเบอริลเลียม ซึ่งห่างจากจุดกำเนิดแสง 7.59 เมตร มีมุมเปิดในแนวนอน เท่ากับ 5.063 mrad มุมเปิดในแนวดิ่ง เท่ากับ 0.425 mrad แสงจึงสามารถลอดผ่านหน้าต่างนี้โดยที่ไม่มีการจำกัดมุมเปิด และแสงที่ผ่านไปจะเข้าสู่ชั้นตัวกรองแสง ได้แก่ แผ่นฟิล์มพอลิอิไมด์หนา 100 μm อลูมิเนียมหนา

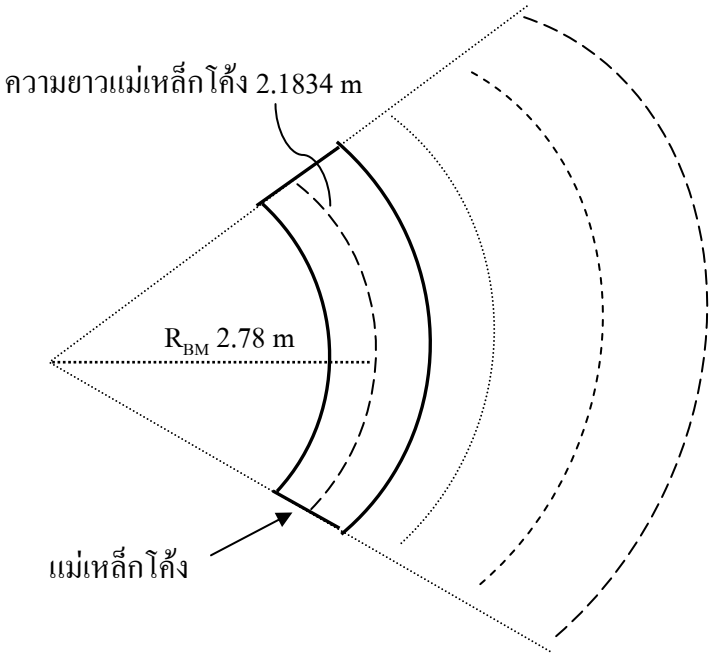
16 μm มีระยะทางจากจุดกำเนิดแสงจนถึงชิ้นงาน เท่ากับ 17.93เมตร พื้นที่ตกกระทบของแสงมีขนาด 6.917 ตารางเซนติเมตร หรือ สูง 0.762 เซนติเมตร กว้าง 9.078 เซนติเมตร ตัวอย่างการคำนวณพลังงานแสงที่ตกกระทบชิ้นงานในกรณีที่ไม่มีตัวกรอง และหน้ากากกำหนดมุมเปิดของแสง (Mask1, Mask2) เป็นดังรูปที่ 3.5

จากรูปที่ 3.6 การคำนวณพลังงานที่ตกกระทบบนชิ้นงาน หาได้จากพลังงานของแหล่งกำเนิดแสง (I_{BL}) หารด้วยพื้นที่ตกกระทบของแสง โดยสมมติว่าไม่มีชั้นตัวกรองและหน้าต่าง พื้นที่ที่ตกกระทบของแสงจะเป็นดังรูปที่ 3.5 โดยความหนาแน่นพลังงาน (power density) เป็นไปตามสมการที่ (3-7) เมื่อ I_{BL} คือ พลังงานตกกระทบที่ระนาบของชิ้นงานโดยไม่มีชั้นตัวกรองหรือหน้าต่างใด ๆ ซึ่งก็คือ พลังงานที่ออกมาจากจุดกำเนิดแสงทั้งหมด และ A_S คือ พื้นที่ที่แสงตกกระทบแต่ในระบบลำเลียงแสงที่ใช้งานจริงแสงจะถูกจำกัดมุมโดย mask1 และ mask2 ดังรูปที่ 3.7โดยมีมุมเปิด 5.063 mrad 0.425 mrad ในแนวระนาบและแนวดิ่งตามลำดับ โดยพื้นที่ที่แสงตกกระทบระนาบชิ้นงาน เท่ากับ 6.917 ตารางเซนติเมตร หรือ สูง 0.762 เซนติเมตรกว้าง 9.078 เซนติเมตร แสงที่ออกมาจึงมีลักษณะยาว จึงต้องใช้การเลื่อนชิ้นงานตัดแสงเพื่อให้ได้พื้นที่ในการฉายแสงเพิ่มขึ้น ถ้าระบบการเลื่อนชิ้นงานมีความเร็วมากพอ จะสามารถคำนวณพลังงานตกกระทบของแสงโดยใช้ระยะการเลื่อนชิ้นงาน 10 เซนติเมตร บวกกับความสูงของแสง 0.762 เซนติเมตร และคูณกับความกว้างของแสง 9.078 เซนติเมตร จะได้พื้นที่ที่แสงตกกระทบเท่ากับ 97.7 ตารางเซนติเมตร ซึ่งสามารถคำนวณความหนาแน่นพลังงานได้โดย นำพลังงานที่ถูกจำกัดด้วย mask2 หารด้วยพื้นที่ 97.7 ตารางเซนติเมตร แต่ในการใช้งานปัจจุบันจะมีข้อผิดพลาดในการคำนวณพลังงานเนื่องจาก ระบบการเลื่อนชิ้นงานยังช้ามาก การคำนวณควรใช้อัตราเร็วในการเลื่อนชิ้นงาน (cm/s) คูณกับระยะเวลาที่จุดใด ๆ บนชิ้นงานตัดผ่านแสงที่มีความสูง 0.762 เซนติเมตร ซึ่งจะช่วยให้การคำนวณพลังงานถูกต้องมากขึ้น

$$\text{ความหนาแน่นพลังงาน (power density)} = \frac{I_{BL}}{A_S}(W / cm^2) \qquad (3\text{-}7)$$



รูปที่ 3.4 แม่เหล็กโค้งทั้ง 8 ตัวของวงแหวนกักเก็บอิเล็กตรอน



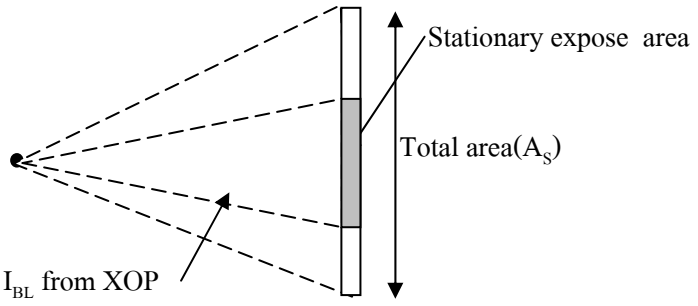
รูปที่ 3.5 ลักษณะของแสงซินโครตรอนที่แผ่ออกมาจากแม่เหล็กโค้ง bending magnet

ผลการคำนวณสเปกตรัมของแสงซินโครตรอนจากแหล่งกำเนิด BM ถูกเก็บในรูปข้อมูลจุดกำลังงาน (power) โดยมีพลังงานของอิเล็กตรอนในช่วง 100-50,000 eV ช่วงพลังงานห่างกัน 1 eV สเปกตรัมของกำลังแสงที่ได้จากโปรแกรม XOP เป็นสเปกตรัมที่แผ่ออกมาขณะค่ากระแสอิเล็กตรอนในวงกักเก็บค่าหนึ่งเท่านั้น เนื่องจากการผลิตแสงซินโครตรอน จะมีค่ากระแสอิเล็กตรอนไม่คงที่ โดยจะมีค่าลดลงจากประมาณ 130 mA ถึงประมาณ 30 mA ในแต่ละรอบ ดังนั้นข้อมูลสเปกตรัมของแสงที่ผลิตได้จะมีหลายชุด รูปที่ 3.2 แสดงสเปกตรัมของแสงซินโครตรอนขณะกระแสอิเล็กตรอนเท่ากับ 40 mA ซึ่งข้อมูลที่เก็บจะเป็นสเปกตรัมที่สามารถนำค่ากระแสในหน่วยของ mA ไปคูณเพื่อให้ได้ค่าสเปกตรัมที่ค่ากระแสใด ๆ ได้โดยตรง ซึ่งจะช่วยลดขั้นตอนในการคำนวณของโปรแกรม XmaskSim ได้

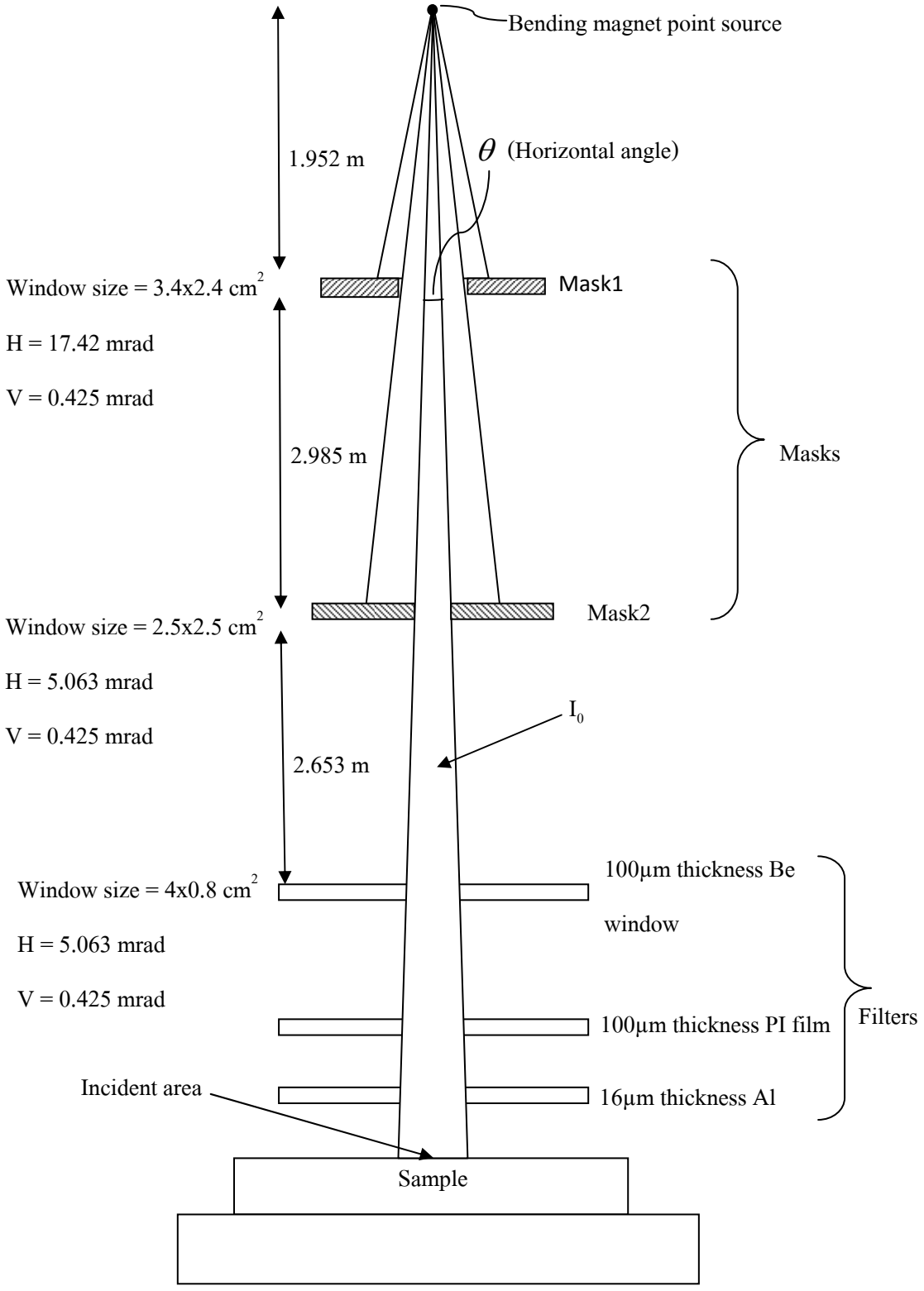
เมื่อได้สเปกตรัมแสงซินโครตรอนจากแหล่งกำเนิดแล้ว จึงใช้โปรแกรม XmaskSim คำนวณการส่งผ่านคลื่นแสง (Transmission) และดูดกลืนคลื่นแสง (Absorption) ของวัสดุโดยใช้สมการที่ (3-8) และ (3-9) ตามลำดับ ขั้นแรกจะเป็นการคำนวณกำลังของคลื่นแสงเมื่อผ่านตัวกรองชั้นต่าง ๆ จนครบทุกชั้น โดยจะใช้สมการที่ (3-8) จนได้ค่าสเปกตรัมสุดท้ายที่จะผ่านเข้าสู่สารไวแสงต่อไป

$$I(z,\hbar\omega) = I_0 e^{-\mu(\hbar\omega)z} \tag{3-8}$$

เมื่อ I_0 คือ กำลังของคลื่นแสงก่อนเข้าสู่วัสดุ สร้างโดยใช้โปรแกรม XOP เก็บไว้เป็นสเปกตรัมตามค่าพารามิเตอร์ของเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนในรูปของตาราง ค่าสเปกตรัมกำลังงานของแสงซินโครตรอน มีความสัมพันธ์กับค่าของกระแสในวงแหวนกักเก็บอิเล็กตรอนแบบเชิงเส้น ข้อมูลที่เก็บในรูปตารางจึงสามารถตัดค่าสัมประสิทธิ์กระแสออก เพื่อให้สามารถสร้างสเปกตรัมแสงซินโครตรอนที่ค่ากระแสใด ๆ ได้สะดวกขึ้น



รูปที่ 3.6 กรวยแสงที่ตกกระทบชิ้นงาน



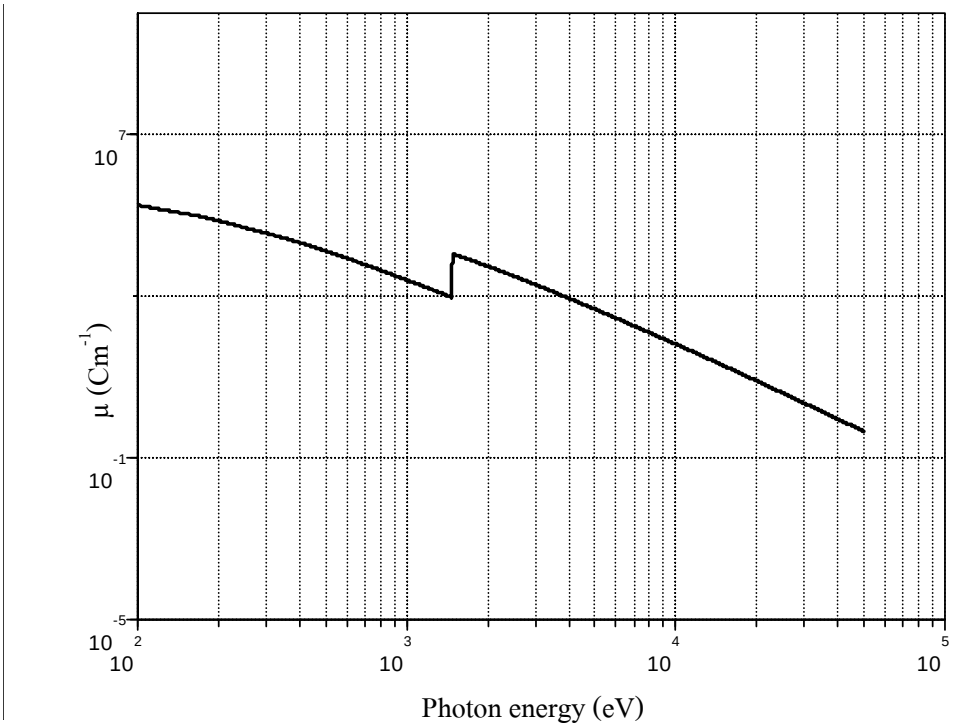
รูปที่ 3.7 ลักษณะของระบบลำเลียงแสง BL-6 ณ ศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติ

ค่าสเปกตรัมกำลังงานจะเป็นเป็นฟังก์ชันของแสงซินโครตรอนที่พลังงานต่าง ๆ หรือ $\hbar\omega$ และค่าความหนาของวัสดุกั้นคลื่นแสง z โดยที่ $\mu(\hbar\omega)$ คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีของวัสดุแต่ละชนิด มีความหนาเป็น z และมีหน่วยเป็น cm โดยตัวอย่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีของอลูมิเนียมแสดงได้ดังรูปที่ 3.8 เมื่อคำนวณตามสมการที่ (3-8) จะได้สเปกตรัมพลังงานที่ผ่านออกมาจากวัสดุ และใช้เป็น I_0 ของการคำนวณสเปกตรัมที่ผ่านตัวกรองชั้นต่อไป ทำการคำนวณจนได้สเปกตรัมที่ผ่านตัวกรองชั้นสุดท้าย ซึ่งจะใช้เป็นสเปกตรัมที่นำไปคำนวณการดูดกลืนพลังงานของสารไวแสง โดยใช้สมการที่ (3-9) ในการคำนวณพลังงานที่ถูกดูดกลืนโดยสารไวแสง ซึ่งเป็นพลังงานที่ต้องการทราบ ตัวอย่างระบบลำเลียงแสงซินโครตรอน แสดงได้ดังรูปที่ 3.9 เมื่อ $I_0e^{-\mu(\hbar\omega)z}$ คือ สเปกตรัมพลังของแสงซินโครตรอนที่ผ่านเข้าสู่เนื้อสารไวแสง ที่ความหนา z $\mu(\hbar\omega)$ คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนคลื่นแสงของสารไวแสง $Absorb(z,\hbar\omega)$ คือ สเปกตรัมการดูดกลืนพลังงานแสงซินโครตรอนในเนื้อสารไวแสงที่ความหนา Z จากนั้นจึงทำการอินทิเกรตสเปกตรัมพลังงานเพื่อให้ได้พลังงานในหน่วย W/cm โดยใช้สมการที่ (3-10)

$$Absorb(z,\hbar\omega) = \mu(\hbar\omega) I_0 e^{-\mu(\hbar\omega)z} \tag{3-9}$$

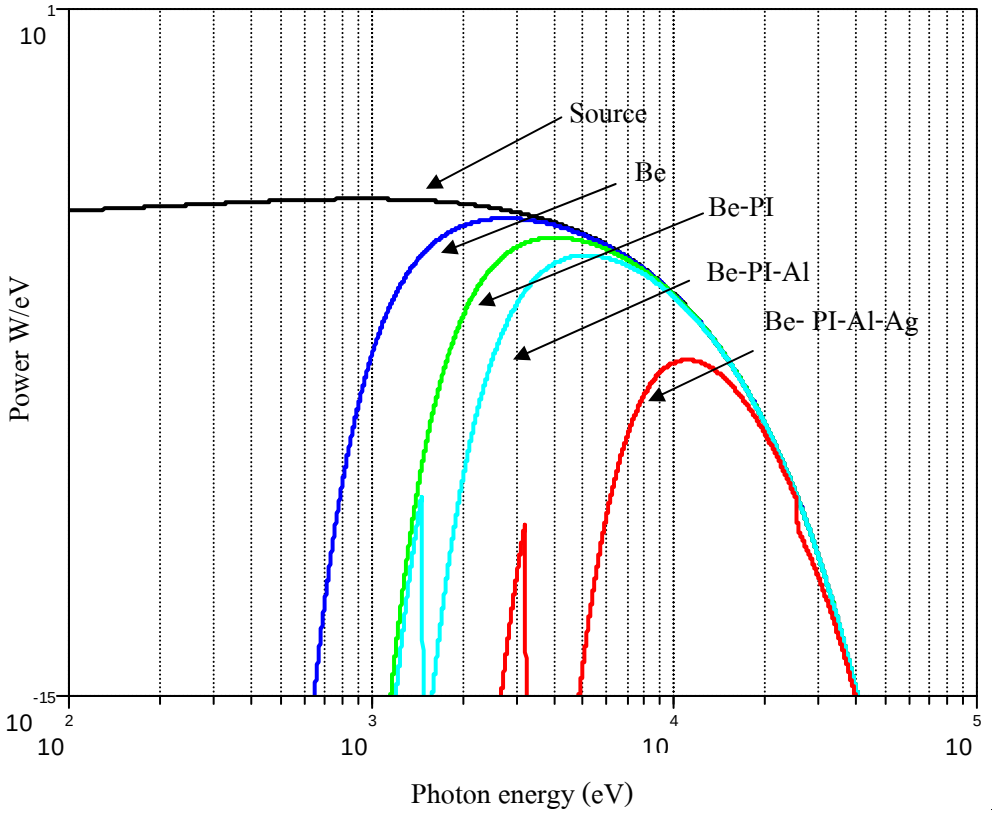
$$D(z) = \int_{E_1}^{E_2} I_0 e^{-\mu(\hbar\omega)z} \mu(\hbar\omega) d\hbar\omega \tag{3-10}$$

สมการที่ (3-10) ช่วยให้ทราบค่าพลังงานที่สารไวแสงที่ความหนาต่าง ๆ ได้รับ โดย $\mu(\hbar\omega)$ คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนคลื่นแสงของสารไวแสง E_1, E_2 คือ ช่วงพลังงานของสเปกตรัม ซึ่งในที่นี้ใช้ค่า 100-50,000 eV และ $D(z)$ คือ พลังงานที่สารไวแสงที่ความหนา z ดูดกลืน มีหน่วยเป็น W/cm สามารถสรุปการทำงานของโปรแกรมได้ดังรูปที่ 3.12 เมื่อนำโปรแกรมนี้ทดสอบใช้งานเพื่อจำลองผลการฉายรังสี โดยใช้พารามิเตอร์จากเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนทดสอบที่ค่ากระแส 60 mA ใช้ตัวกรองต่าง ๆ ตามที่ใช้ในระบบลำเลียงแสง BL-6 มีลำดับ คือ ผลึกเบอริลเลียม 100 μm พอลิอิไมด์ 100 μm อลูมิเนียม 16 μm และเงิน 30 μm สามารถแสดงสเปกตรัมพลังงานเมื่อผ่านตัวกรองชั้นต่าง ๆ ได้ดังรูปที่ 3.10 ซึ่งแสดงให้เห็นสเปกตรัมพลังงานที่เปลี่ยนไปเมื่อผ่านวัสดุชั้นต่าง ๆ สเปกตรัมพลังงานจะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ จากวิธีการคำนวณข้างต้น สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ของระบบลำเลียงแสง BL-6 ของเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน ณ ศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติได้

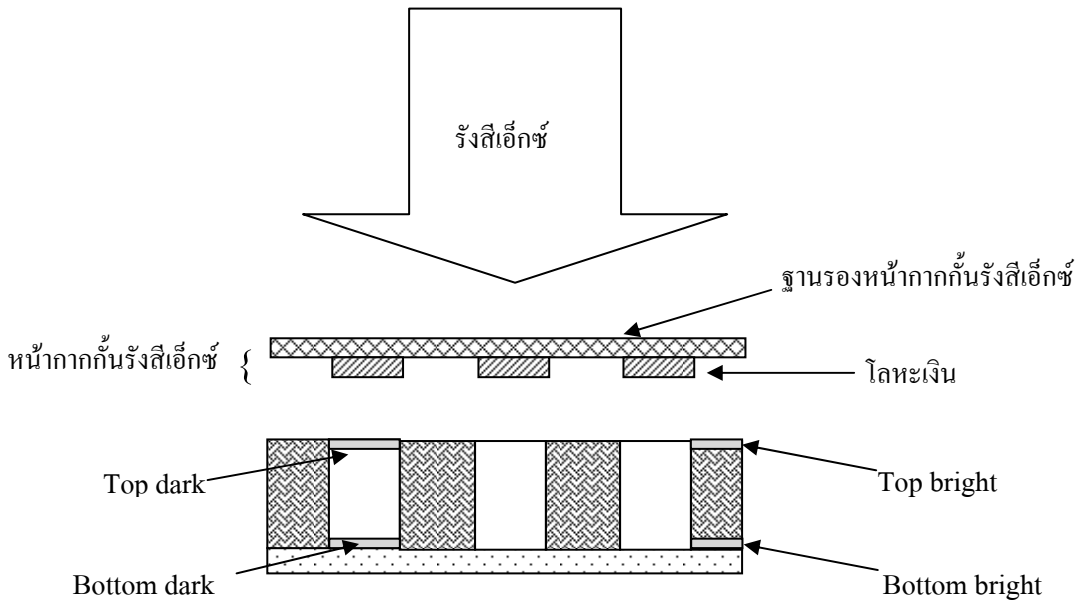


รูปที่ 3.8 สัมประสิทธิ์การดูดกลืนคลื่นแสงของอลูมิเนียม

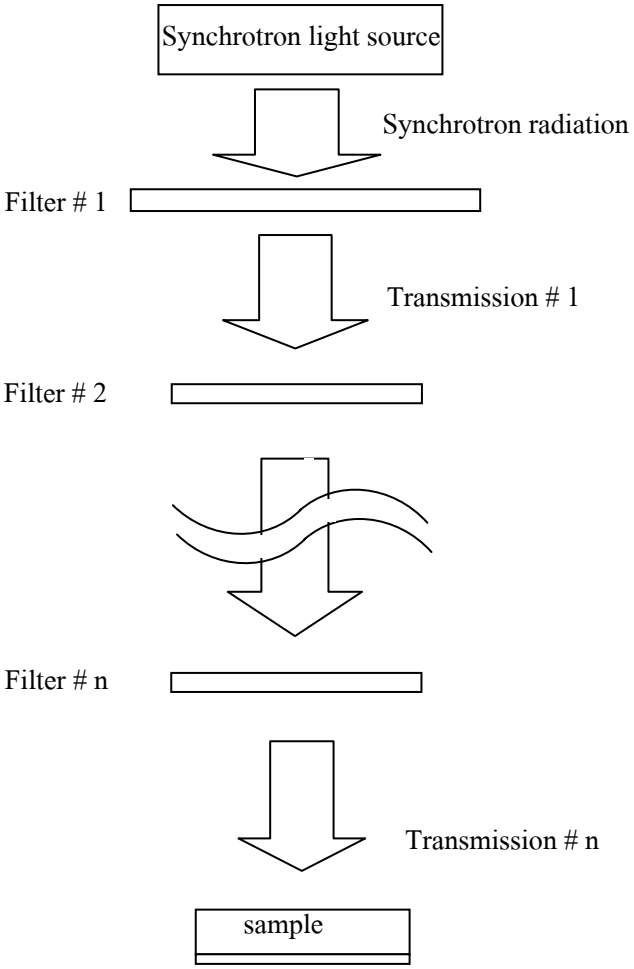
การฉายรังสีลงบนชั้นฟิล์มไวแสง กำลังงานที่สารไวแสงที่ระดับความหนาต่างกันได้รับ จะมีค่าต่างกัน โดยลดลงตามความหนาของเนื้อสารไวแสง แบบเอ็กซ์โปเนนเชียล รูปที่ 3.11 แสดงนิยามของกำลังงานที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในเนื้อสารไวแสง ซึ่งแต่ละค่ามีความสำคัญในการสร้างชิ้นงาน กำลังแสงที่ผ่านหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ออกมา จะแบ่งเป็นส่วนมืด (dark zone) ซึ่งเป็นส่วนที่มีวัสดุกั้นรังสีเอ็กซ์ และส่วนสว่าง (blight zone) ซึ่งเป็นส่วนที่รังสีเอ็กซ์สามารถผ่านได้ สำหรับส่วนมืด กำลังงานสะสมในเนื้อสารไวแสงส่วนบนสุด (top dark) ต้องไม่มากจนทำให้สารไวแสงแข็งตัว โดยวัสดุกั้นรังสีต้องมีความหนาพอที่จะให้กำลังงานส่วนนี้ไม่เกินค่าที่กำหนด และในส่วนสว่าง กำลังงานที่สารไวแสงส่วนล่างสุด (bottom blight) ได้รับต้องมีค่าพอเหมาะที่จะทำให้สารไวแสงแข็งตัว จึงจะทำให้ได้โครงสร้างที่ดี ถ้ามากเกินไปอาจทำให้โครงสร้างโก่งตัวจนหลุดจากฐาน หรือถ้าน้อยเกินไปจะทำให้สารไวแสงไม่แข็งตัวและหลุดไป นอกจากนี้ยังมีค่าความคมชัด (%contrast) คือ ค่ากำลังงานในเนื้อสารไวแสงส่วนล่างสุดของด้านสว่างต่อด้านมืด(bottom bright : bottom dark) ค่าเปอร์เซนต์ความคมชัดนี้ต้องใกล้ 100% จึงจะได้ลวดลายที่คมสวยงาม การคำนวณเหล่านี้จะใช้โปรแกรม XmaskSim ในการคำนวณ ส่วนค่าพลังงานที่เหมาะสม จะได้จากผลการทดลอง



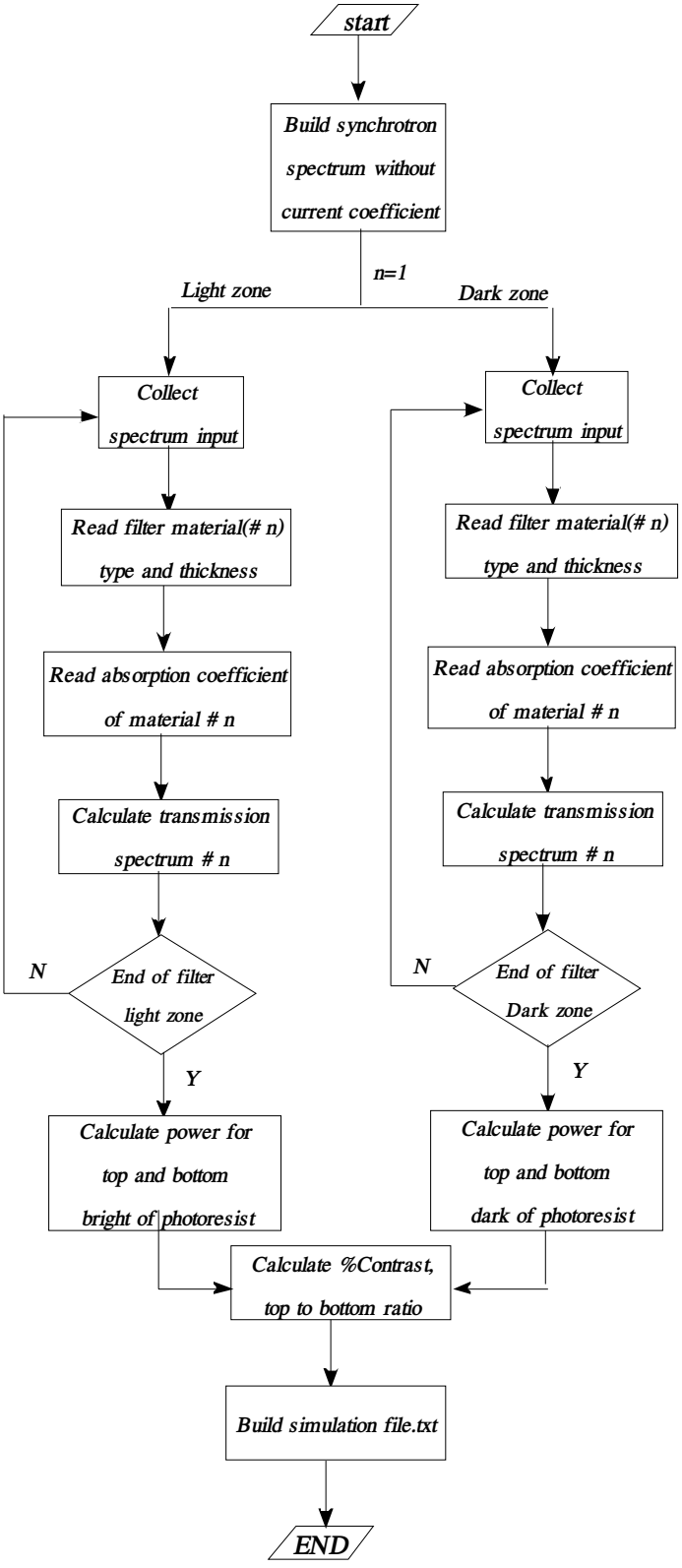
รูปที่ 3.9 สเปกตรัมพลังงานหลังจากผ่านวัสดุกรองแสงต่าง ๆ



รูปที่ 3.10 แสดงพลังงานส่วนต่าง ๆ ที่คำนวณโดยใช้โปรแกรม XmaskSim



รูปที่ 3.11 การคำนวณการส่งกำลังของแสงซินโครตรอนผ่านวัสดุกรองต่าง ๆ



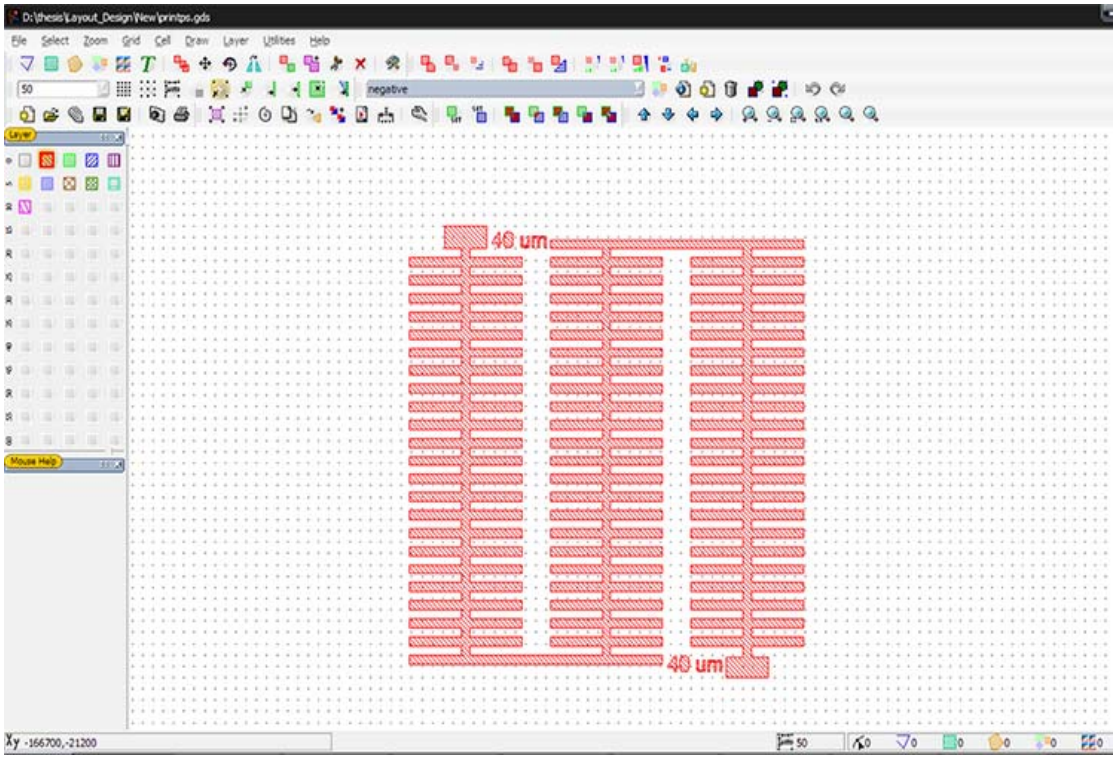
รูปที่ 3.12 แผนภาพโฟลวชาร์ตแสดงการคำนวณของโปรแกรม XmaskSim

3.2 การสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์

ในกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ สิ่งที่มีความสำคัญต่อกระบวนการ คือ หน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ ซึ่งใช้กั้นรังสีเอ็กซ์ให้เกิดเป็นเงาของลวดลายต้นแบบบนสารไวแสง วัสดุที่ใช้กั้นรังสีเอ็กซ์ ได้แก่ วัสดุที่มีเลขอะตอมสูงเช่น ทอง หรือเงิน โดยจะสร้างบนฐานที่เป็นวัสดุโปร่งรังสีเอ็กซ์ ซึ่งเปรียบได้กับกระจก หรือแผ่นใสในกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต โดยในกระบวนการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์นั้น จะใช้กระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต ในการสร้างลวดลายแม่พิมพ์สารไวแสงเพื่อชุบโลหะทองหรือเงิน โดยกระบวนการทั้งหมดมีดังนี้

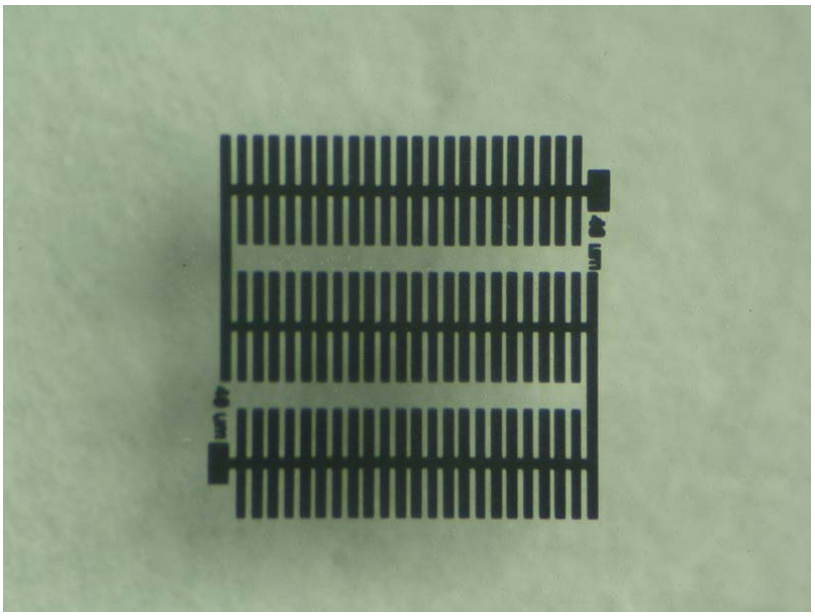
3.2.1 การออกแบบลวดลาย

ในขั้นตอนนี้เป็นการออกแบบลวดลายโครงสร้างที่จะใช้เป็นหน้ากากกั้นรังสีอัลตราไวโอเลต เพื่อใช้สร้างหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ ลวดลายนี้วาดด้วยโปรแกรม Layout Editor ซึ่งเป็นโปรแกรมที่สามารถสร้างลวดลายที่มีขนาดเล็กระดับไมโครเมตรได้ ตัวอย่างลวดลายที่วาดด้วยโปรแกรม Layout Editor แสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ตัวตรวจรู้ความชื้นที่มีความกว้างซี่อิเล็กโทรด 40 μm ออกแบบโดยโปรแกรม Layout Editor

เมื่อวาดลวดลายตัวตรวจรู้ความชื้นแล้วขั้นตอนต่อไปจึงพิมพ์ลวดลายตามที่ออกแบบลงบนฟิล์มใส ด้วยเครื่องพิมพ์เลเซอร์ความละเอียด 3,600 จุดต่อนิ้ว ซึ่งสามารถสร้างลวดลายทึบแสงที่มีขนาดเล็ก 40 μm รูปที่ 3.14 แสดงหน้ากากกั้นรังสีอัลตราไวโอเลต ซึ่งเป็นลวดลายทึบแสงบนแผ่นใส ลวดลายทึบแสงนี้จะนำไปใช้ในกระบวนการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ โดยใช้รังสีอัลตราไวโอเลต ฉายผ่านหน้ากากลงบนสารไวแสง ในที่นี้จะใช้สารไวแสงชนิดบวก AZ4620 เนื่องจากสามารถล้างออกได้ง่ายและไม่หลุดร่อนในกระบวนการชุบโลหะเงิน

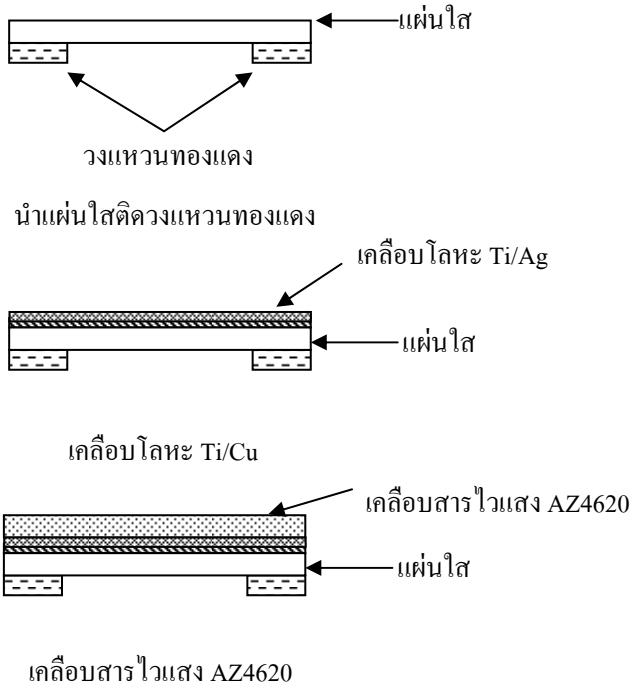


รูปที่ 3.14 หน้ากากกั้นแสงอัลตราไวโอเลตที่มีลวดลายจุลภาคขนาด 40 μm ซึ่งพิมพ์ลงบนฟิล์มใสด้วยแสงเลเซอร์ความละเอียด 3,600 จุดต่อนิ้ว

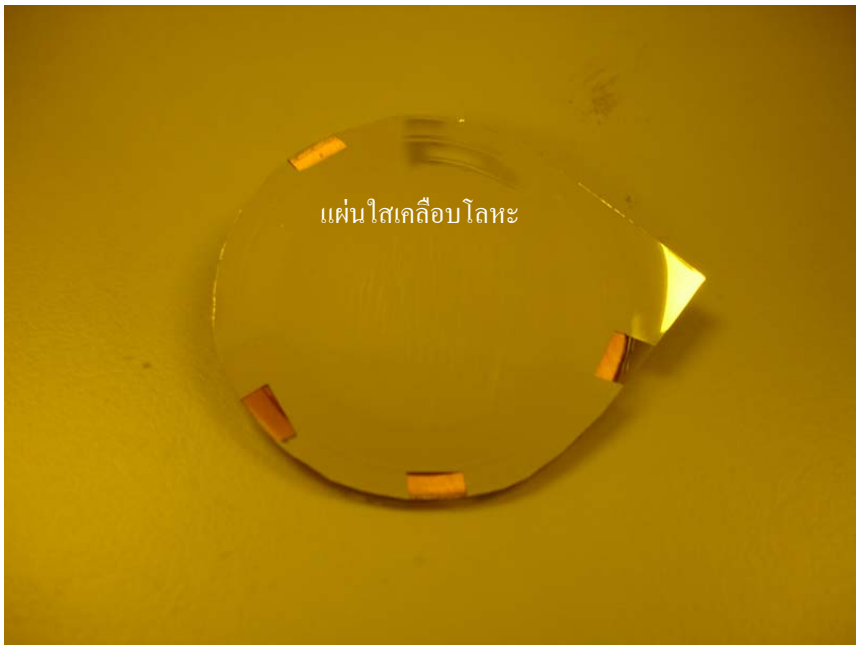
3.2.2 การเตรียมส่วนฐานของหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์

หน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์มีโครงสร้างที่สำคัญสองส่วน คือ ส่วนของฐานรอง และส่วนวัสดุดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ ส่วนฐานต้องใช้วัสดุที่โปร่งรังสีเอ็กซ์และนำไฟฟ้าได้ โดยทั่วไปจะใช้กราไฟต์เนื่องจากเป็นวัสดุที่รังสีเอ็กซ์ผ่านได้ดี และนำไฟฟ้าได้ แต่กราไฟต์ยังมีราคาแพง และหาซื้อได้ยาก จึงเลือกใช้แผ่นใสชนิดถ่ายเอกสาร เนื่องจากเป็นวัสดุที่รังสีเอ็กซ์ผ่านได้ดี มีราคาถูก และทนความร้อนได้สูง แต่แผ่นใสมีโครงสร้างที่ไม่แข็งแรง และไม่นำไฟฟ้า สามารถแก้ปัญหาได้โดยนำแผ่นใสติดกับวงแหวนเพื่อยึดแผ่นใสให้ตึงและเรียบ สามารถหยิบจับใช้งานได้ง่าย จากนั้นนำแผ่นใสเข้าสู่กระบวนการเคลือบโลหะโดยการระเหยในสุญญากาศ ซึ่งจะใช้โลหะไทเทเนียม

และเงิน เนื่องจากโลหะไทเทเนียมสามารถยึดติดกับแผ่นใสและโลหะอื่น ๆ ได้ดี หน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ที่สร้าง จะใช้เงินเป็นวัสดุกั้นรังสีเอ็กซ์ ซึ่งในขั้นตอนการชุบด้วยไฟฟ้า ถ้าชุบเงินลงบนโลหะอื่น ๆ สารละลายเงินจะกัดกร่อนจนทำให้โครงสร้างแม่พิมพ์สารไวแสงหลุดร่อนจากฐานโลหะ ไม่สามารถชุบเงินต่อไปได้ การระเหยเคลือบโลหะเงินทับลงไปก่อน จะช่วยแก้ปัญหานี้ แผนภาพการเตรียมส่วนฐานของหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์เป็นดังรูปที่ 3.15 ขั้นตอนแรก นำแผ่นใสติดกับวงแหวนโลหะเพื่อให้แผ่นใสมีความแข็งแรง ใช้สารไวแสง SU-8 2050 เป็นกาวยึด เนื่องจากสามารถทนต่อสารเคมีและความร้อนในกระบวนการได้ หลังจากทากาวที่วงแหวน และนำแผ่นใสติดเข้าไปจึงทำการอบที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส 30 นาทีและอบที่ 95 องศาเซลเซียส 3 ชั่วโมง หลังจากชิ้นงานเย็นลงนำมาฉายรังสีอัลตราไวโอเลตด้วยเครื่อง UV-PCB เป็นเวลา 30 นาที และนำไปอบที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส 30 นาที และอบที่ 95 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง นำแผ่นใสที่ติดกับวงแหวนมาล้างทำความสะอาดโดยเช็ดด้วย IPA (Isopropyl alcohol) ฉีดด้วยอะซิโตน และฉีดด้วย IPA อีกครั้ง นำไปทำความสะอาดด้วยคลื่นเสียง อัลตราโซนิกในน้ำดีไอ (DI water) ประมาณ 10 นาที เป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน และอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส 30 นาที จากนั้นนำไปเคลือบโลหะ ไทเทเนียมและเงินโดยการระเหยในสุญญากาศ ซึ่งจะได้ความหนาประมาณ 200 และ 600 อังสตรอม ตามลำดับ จากนั้นนำไปเคลือบสารไวแสงชนิดบวก AZ4620 โดยการหมุนเคลือบด้วยเครื่องหมุนเคลือบ Laurell รุ่น WS-400B-6NPP/LIT ด้วยความเร็ว 500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 วินาที ซึ่งจะได้ความหนาของสารไวแสงประมาณ 35 μm นำไปอบที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อให้สารไวแสงแข็งตัว เมื่อชิ้นงานเย็นลงจึงนำไปฉายรังสีอัลตราไวโอเลตในขั้นตอนต่อไป



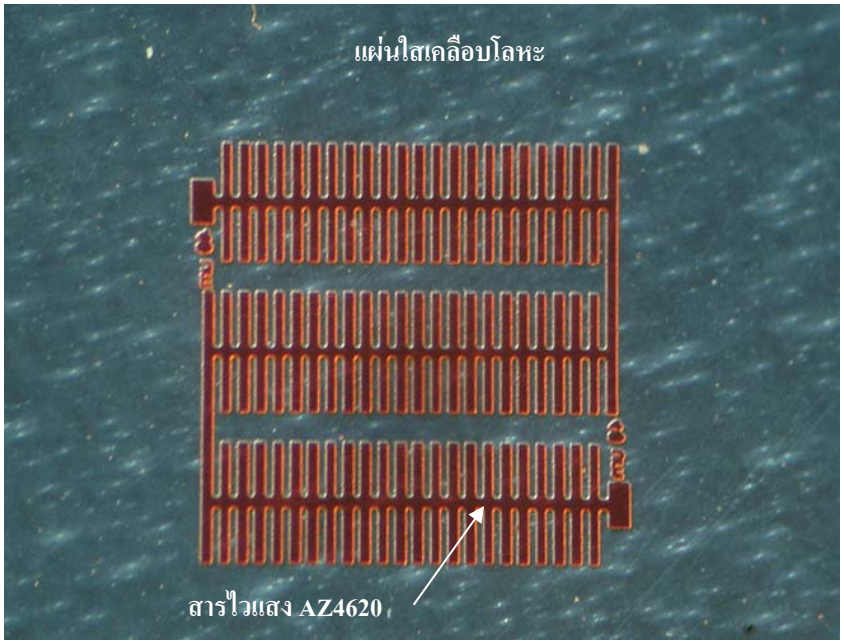
รูปที่ 3.15 การเตรียมฐานสำหรับหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์



รูปที่ 3.16 แผ่นใสที่เคลือบโลหะ ไทเทเนียม และเงินซึ่งใช้เป็นฐานรองรับลวดลายของโลหะเงิน ความหนา 40 μm ในขั้นตอนต่อไป

3.2.3 การฉายแสงอัลตราไวโอเลต

เมื่อได้แผ่นใสที่เคลือบสารไวแสงแล้ว ขั้นตอนต่อไป คือ การสร้างลวดลายลงบนแผ่นใสเคลือบโลหะ เพื่อล้างสารไวแสงให้เกิดลวดลาย และชุบโลหะเงินลงบนแผ่นใสเพื่อใช้สำหรับเป็นหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ต่อไป โดยขั้นตอนต่าง ๆ เริ่มต้นด้วยการนำหน้ากากหมึกทึบแสงวางทับบนแผ่นใสที่เคลือบสารไวแสงชนิดบวก AZ4620 โดยหันด้านที่มีหมึกเข้าหาสารไวแสง เพื่อให้ลวดลายที่ได้มีความคมชัด จากการทดสอบจะได้ลวดลายที่คมชัด เมื่อฉายแสงอัลตราไวโอเลตด้วยพลังงานประมาณ 3,700 mJ/cm^2 ขั้นตอนต่อไปเป็นการล้างฟิล์มไวแสง โดยใช้น้ำยาล้างฟิล์มผสมอัตรา 1 ส่วนต่อน้ำ 2 ส่วน ใช้เวลาล้างสารไวแสงประมาณ 20-30 นาที จากขั้นตอนนี้เนื่องจากใช้สารไวแสงชนิดบวกดังนั้นบริเวณที่มีหมึกทึบแสงกั้นอยู่ จะมีสารไวแสงเป็นแม่พิมพ์อยู่ ส่วนบริเวณที่ถูกฉายแสง เนื้อของสารไวแสงจะถูกล้างออกไป สามารถจะเติมโลหะโดยการชุบด้วยไฟฟ้าลงในหลุมนี้ เมื่อล้างสารไวแสงออกจนพื้นผิวโลหะสะอาด จึงล้างด้วยน้ำดีไอและเป่าให้แห้ง อบที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส 20 นาทีเพื่อให้สารไวแสงยึดเกาะกับฐานได้ดียิ่งขึ้น ถ้าไม่อบอาจทำให้สารไวแสงหลุดในขณะที่ชุบโลหะได้ หลังจากชิ้นงานเย็นลงจึงทำการชุบโลหะเงินให้มีลวดลายตามแบบแม่พิมพ์ต่อไป ขั้นตอนการฉายแสงและการชุบโลหะสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.18 และตัวอย่างแม่พิมพ์หลังล้างสารไวแสงแสดงได้ดังรูปที่ 3.17

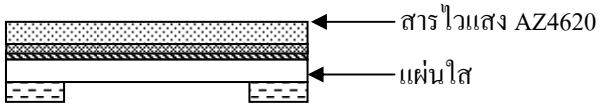


รูปที่ 3.17 แม่พิมพ์สารไวแสงชนิดบวก

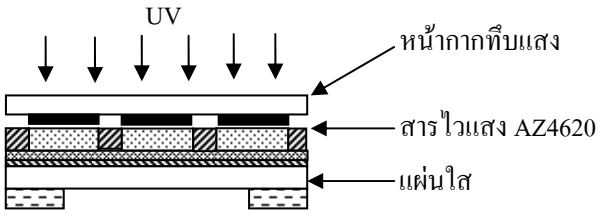
3.2.4 การชุบโลหะเงิน

ขั้นตอนต่อไปเป็นการชุบโลหะลงในแม่พิมพ์ของสารไวแสง ซึ่งโลหะที่ใช้ต้องเป็นโลหะ ที่มีเลขอะตอมสูงจึงจะกั้นรังสีเอ็กซ์ได้ ในที่นี้ใช้โลหะเงิน เนื่องจากมีต้นทุนต่ำกว่าการใช้ทองคำมาก และสามารถกั้นรังสีเอ็กซ์ได้ดีเช่นเดียวกันเพียงแต่ต้องใช้ความหนามากกว่า ขั้นตอนต่อไปนี้เป็นการเตรียมสารละลายเงินปริมาตร 500 มิลลิลิตร เริ่มจากเตรียมน้ำดีไอ ปริมาตร 300 มิลลิลิตร ลงในภาชนะที่ทำการกวนตลอดเวลา เติมโพแทสเซียมไซยาไนด์ น้ำหนัก 83.3 กรัม ทีละน้อย และทำการกวนทิ้งไว้ประมาณ 10 นาที จนกว่าโพแทสเซียมไซยาไนด์ ละลายจนหมด จากนั้น เติมโพแทสเซียมคาร์บอเนต 7.5 กรัม ลงในสารละลายและกวนจนสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน ใช้เวลาประมาณ 5 นาที จากนั้นเติมซิลเวอร์ไซยาไนด์ 80% น้ำหนัก 22.5 กรัม ลงไปทีละน้อย กวนจนสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน และกวนสารทิ้งไว้อีก 15 นาที เติมน้ำดีไอเพิ่มลงในสารละลายจนมีปริมาตร 500 มิลลิลิตร เติมผงคาร์บอน (Granular carbon) น้ำหนัก 1 กรัมลงไป แล้วกวนสารละลายต่อไปเป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นจึงหยุดการกวนสาร นำสารละลายที่ได้ลงจากเครื่องกวนสาร ปิดฝาให้สนิท ปล่อยให้สารเคมีทำปฏิกิริยากันอย่างน้อย 12 ชั่วโมง จากนั้นนำสารละลายมากรองด้วยกระดาษกรอง 3-5 ครั้ง เพื่อกรองเอาผงคาร์บอนและฝุ่นผงในสารละลายออก ขั้นตอนต่อไปทำความสะอาดสารละลายด้วยการกรองด้วยไฟฟ้า โดยนำสารละลายมาชุบด้วยไฟฟ้า ใช้โลหะตะแกรง ไทเทเนียมชุบพลาทินัม (Platinized titanium) เป็นขั้วบวก (Anode) และใช้ Stainless steel เป็นขั้วลบ (Cathode) ป้อนแรงดันคงที่ 1.5 โวลท์ เป็นเวลา 15 นาที ขั้นตอนสุดท้ายเติมสาร Silver Glo make up ปริมาตร 3 มิลลิลิตร และสาร Silver Glo 3K TY ปริมาตร 0.65 มิลลิลิตร เพื่อทำให้ผิวของโลหะเงินหลังการชุบด้วยไฟฟ้าเรียบเนียน

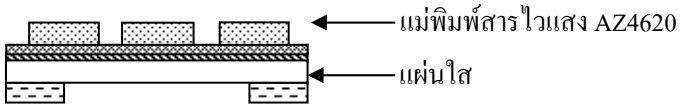
หลังจากได้สารละลายที่จะใช้สำหรับการชุบเงินแล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นการชุบเงินด้วยไฟฟ้า ใช้โลหะไทเทเนียมชุบพลาทินัม เป็นขั้วบวก (Anode) และให้ชิ้นงานเป็นขั้วลบ (Cathode) ต่อขั้วไฟฟ้าโดยจะต่อสายไฟเข้ากับแผ่นใสบริเวณที่เคลือบโลหะ โดยชิ้นงานตัวอย่างนี้มีพื้นที่ประมาณ 1 ตารางเซนติเมตร ใช้กระแสประมาณ 28 mA ใช้เวลาชุบประมาณ30 นาที โลหะเงินจึงล้นแม่พิมพ์พอดี และมีความเรียบ โดยได้ความหนาประมาณ 35 μm สามารถใช้เป็นหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์สำหรับสร้างแม่พิมพ์สารไวแสง SU-8 ได้หนาประมาณ 400 μm หลังจากชุบโลหะเงินจนเต็มแล้วถ้าใช้สารไวแสงชนิดบวก AZ4620 จะมีข้อดี คือ สามารถล้างออกได้โดยใช้อะซีโตน ซึ่งหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์หลังการชุบเงิน และล้างสารไวแสงออก สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.19 และ 3.20



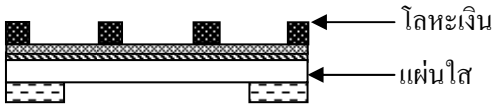
แผ่นใสเคลือบโลหะ Ti/Ag และAZ4620



ฉายแสงผ่านหน้ากากลวดลายทึบแสง



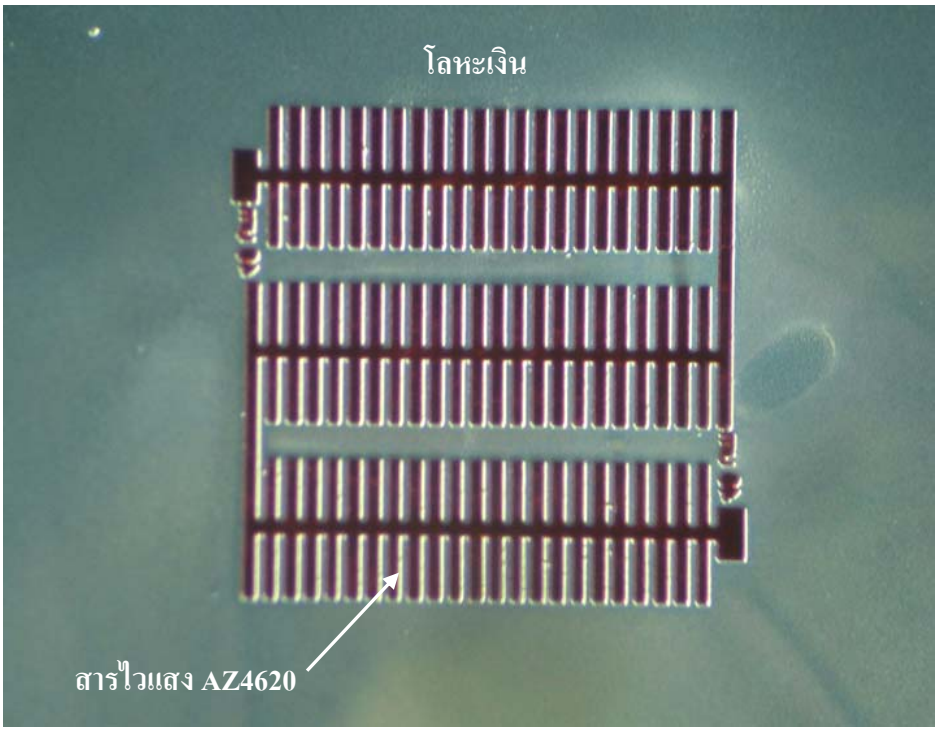
ล้างสารไวแสงให้เกิดลวดลาย



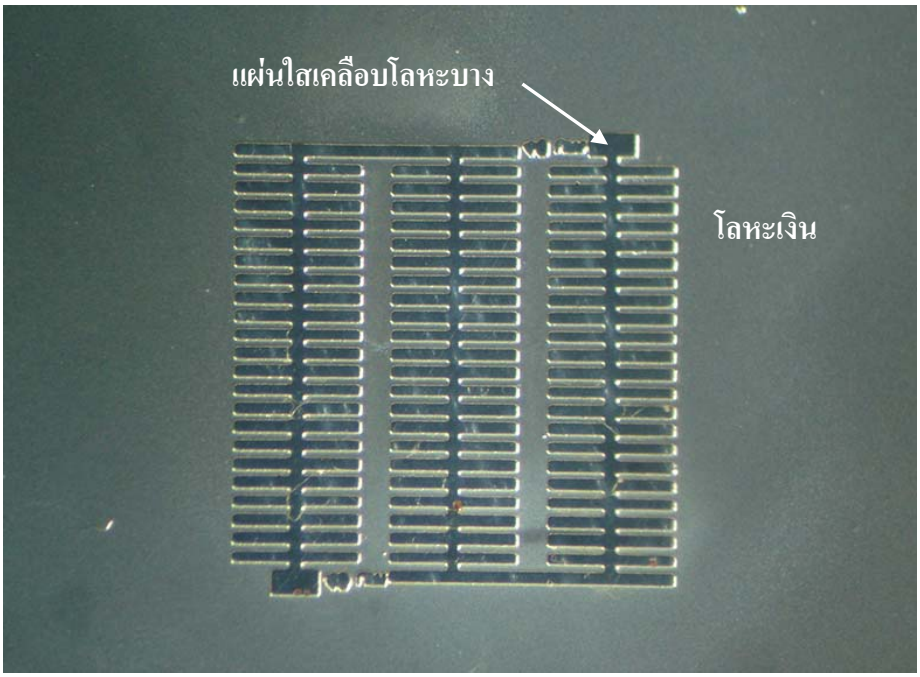
ชุบเงินจนเต็มและล้างสารไวแสง

ออกด้วยอะซิโตน

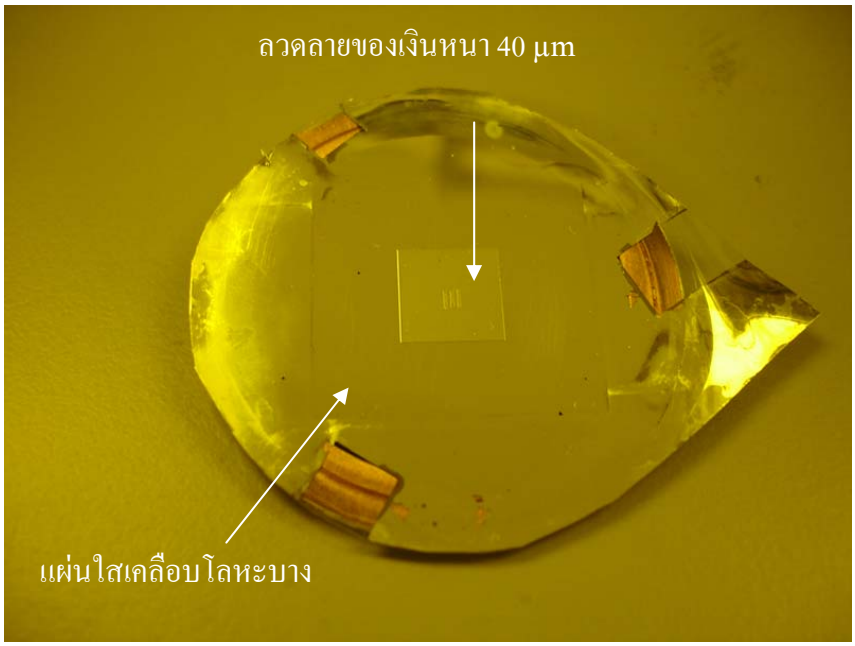
รูปที่ 3.18 กระบวนการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์



รูปที่ 3.19 แม่พิมพ์สารไวแสงที่ชุบเงินจนเต็มแล้ว



รูปที่ 3.20 หน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์หลังการล้างแม่พิมพ์สารไวแสง AZ4620 ออกแล้ว



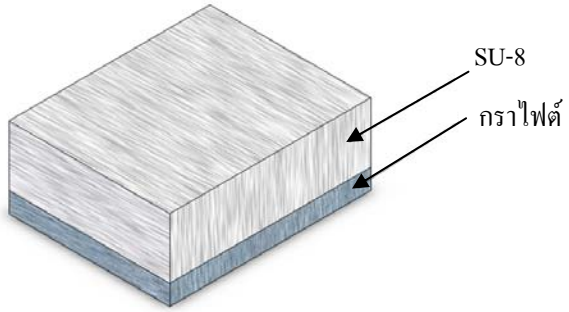
รูปที่ 3.21 หน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์

3.3 การสร้างหน้ากากโลหะ

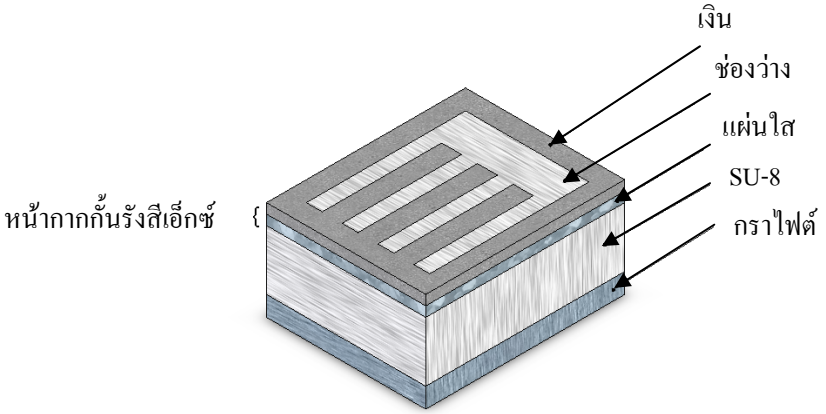
เมื่อได้หน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ซึ่งใช้เงินเป็นวัสดุกั้นรังสีเอ็กซ์แล้ว ขั้นตอนต่อไป เป็นการนำหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ไปใช้สร้างแม่พิมพ์พอลิเมอร์หนา เพื่อใช้ในการสร้างหน้ากากแบบแผ่นโลหะโดยการชุบด้วยไฟฟ้า ซึ่งเหตุที่จำเป็นต้องสร้างหน้ากากโลหะนี้ เนื่องจากโครงสร้างที่ออกแบบไว้ต้องมีโลหะทับด้านบนของชั้นไดอิเล็กทริก เพื่อเป็นแผ่นตัวนำสำหรับสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นแบบตัวเก็บประจุ โดยขั้นตอนแรกต้องเตรียมส่วนฐานของสารไวแสงหนาก่อน โดยเริ่มจากการตัดแผ่นกราไฟต์ให้มีขนาดประมาณ 1x1 นิ้วทำความสะอาดโดยคลื่นอัลตราโซนิกในน้ำดีไอ ประมาณ 2-3 ครั้ง ครั้งละประมาณ 10 นาที ทำความสะอาดด้วยคลื่นอัลตราโซนิกอีกครั้งในเมทานอล เป็นเวลา 15 นาที และทำความสะอาดโดยคลื่นอัลตราโซนิกในน้ำดีไออีกครั้ง ประมาณ 10 นาที เป่าด้วยแก๊สไนโตรเจน และอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส 30 นาที เนื่องจากแผ่น กราไฟต์มีความบางมาก จึงอาจแตกหักหรือโค้งงอได้ในขั้นตอนการหมุนเคลือบ หรืออบสารไวแสง อาจเพิ่มความแข็งแรงโดยนำกระจกสไลด์หมุนเคลือบสารไวแสง AZ1512 ด้วยความเร็ว 1,500 รอบต่อนาที และนำแผ่นกราไฟต์ติดทับลงไป อบให้แห้งด้วยอุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส 30 นาที ขั้นตอนต่อไปเป็นการเคลือบสารไวแสงชนิดหนา นำแผ่นกราไฟต์หมุนเคลือบสารไวแสง SU-8 2150 ด้วยความเร็ว 1,750 รอบต่อนาที และอบด้วยอุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส 30 นาที และต่อด้วย 95 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมงขั้นตอนนี้จะได้ความหนาของสารไวแสงประมาณ 350 µm จากนั้น นำไป

ฉายรังสีเอ็กซ์ผ่านหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ที่สร้างในขั้นตอนที่ 3.2 สารไวแสง SU-8 ที่ใช้เป็นสารไวแสงชนิดลบ ดังนั้นส่วนที่ถูกฉายด้วยแสงจะแข็งตัว การฉายรังสีเอ็กซ์ในขั้นตอนนี้ สามารถใช้การคำนวณพลังงานที่สารไวแสงได้รับ โดยใช้โปรแกรม XmaskSim ที่ได้สร้างขึ้นในหัวข้อ 3.1 จากการทดลองพบว่าพลังงานที่สารไวแสงส่วนล่างสุดได้รับ ที่ทำให้โครงสร้างแข็งตัวและยึดกับฐานได้ดี (สำหรับฐานกราไฟต์) คือ ที่ประมาณ 5,500-6,000 mJ/cm^3 หลังฉายแสงแล้วจึงอบที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ขั้นตอนนี้เป็นการสร้างพันธะภายให้กับพอลิเมอร์ สามารถสังเกตเห็นลวดลายที่เกิดขึ้นได้ชัดเจน หลังจากสารไวแสงเย็นตัวลงแล้ว จึงล้างสารไวแสงโดยใช้น้ำยา SU-8 ดีเวลอปเปอร์ สารไวแสงส่วนที่ไม่ถูกฉายด้วยรังสีเอ็กซ์จะถูกล้างออกไป เหลือเป็นแม่พิมพ์พอลิเมอร์บนฐานกราไฟต์ ซึ่งจะทำการชุบโลหะนิกเกิลลงบนกราไฟต์นี้ โดยใช้อัตรากระแสประมาณ 20 mA/cm^2 การชุบโลหะนิกเกิล จะชุบจนล้นแม่พิมพ์เพื่อให้แน่ใจว่าโลหะได้ถูกเติมจนเต็มแม่พิมพ์ทุกส่วน หลังจากนั้นจึงขัดโลหะนิกเกิลให้เรียบและขัดส่วนฐานกราไฟต์ทิ้งไป จะได้หน้ากากโลหะซึ่งยังเหลือสารไวแสงติดอยู่ในช่องว่าง สามารถกำจัดทิ้งได้โดยการใช้พลาสมาของ O_2 ผสมกับแก๊ส CF_4 โดยใช้กำลัง 200 W เป็นเวลาประมาณ 50 ชั่วโมง จะได้หน้ากากโลหะซึ่งมีลวดลายเป็นช่องว่าง ขั้นตอนการสร้างหน้ากากโลหะนี้แสดงได้ดังรูปที่ 3.22 และ 3.23

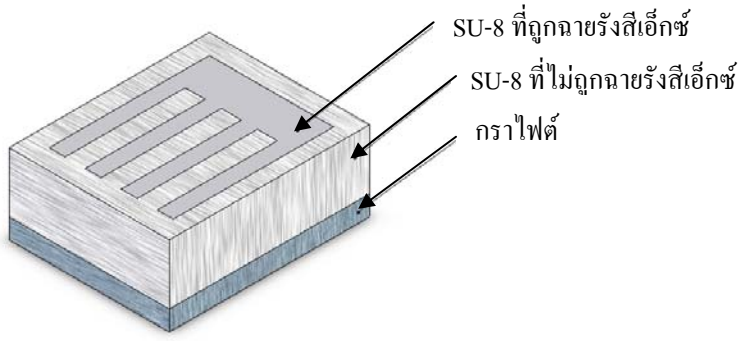
หลังจากที่ได้หน้ากากโลหะนิกเกิลแล้ว ขั้นตอนหลังจากนี้จะเป็นส่วนของการสร้างตัวตรวจรู้ความชื้น โดยใช้หน้ากากโลหะ ซึ่งสามารถใช้เป็นหน้ากากสำหรับกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ หรือรังสีอัลตราไวโอเลตได้ ซึ่งลวดลายของหน้ากากโลหะจะเป็นลวดลายของตัวตรวจรู้ที่ต้องการออกแบบสร้าง การออกแบบตัวตรวจรู้ เพื่อให้ได้โครงสร้างที่ตอบสนองต่อความชื้นเร็ว จำเป็นต้องมีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อจำลองผลหาโครงสร้างที่เหมาะสมที่จะสร้างเป็นตัวตรวจรู้ความชื้นความเร็วสูง โดยใช้หลักการแพร่ของสารในวัสดุที่เรียกว่า Fick’s law โดยรายละเอียดจะได้กล่าวในบทต่อไป



(1) เคลือบสารไวแสงลงบนแผ่นกราไฟต์

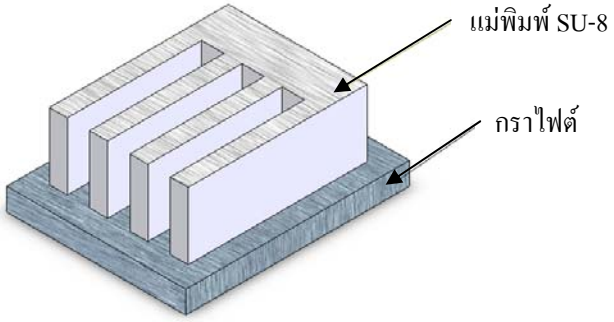


(2) ฉายรังสีเอ็กซ์ผ่านหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์

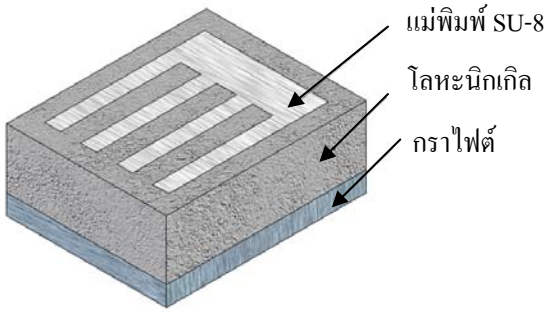


(3) นำหน้ากากออกและอบก็จะได้ลวดลายสารไวแสง

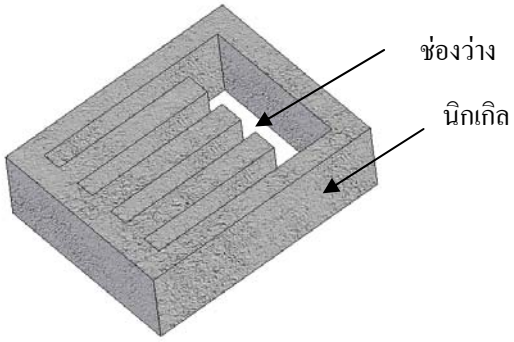
รูปที่ 3.22 ขั้นตอนการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์แบบโลหะ



(4) ล้างสารไวแสงส่วนที่ไม่ถูกฉายรังสีเอ็กซ์ออก

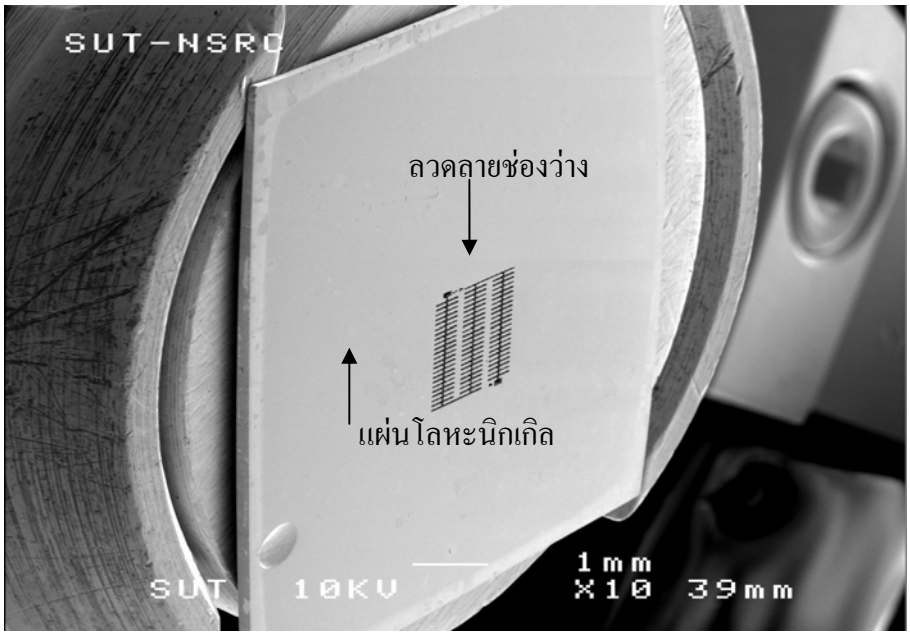


(5) ชุบโลหะนิกเกิลและเงินจนล้นและขัดให้เรียบ



(6) หน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์แบบโลหะ

รูปที่ 3.22 ขั้นตอนการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์แบบโลหะ (ต่อ)



รูปที่ 3.23 หน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์โลหะหนา 250 μm ที่สร้างเสร็จแล้ว

บทที่ 4

ทฤษฎีการคำนวณสำหรับตัวตรวจรู้ความชื้นแบบตัวเก็บประจุ

ตัวตรวจรู้ความชื้นที่สร้างในงานวิจัยนี้ มีจุดประสงค์เพื่อสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นที่ให้ผลตอบสนองทางเวลาเร็ว โดยจะใช้กระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ ในการสร้างเพื่อให้ตัวตรวจรู้ความชื้นมีขนาดเล็กสามารถบรรจุลงบนตัวถังวงจรรวมได้ นอกจากนี้ตัวตรวจรู้ความชื้นยังต้องมีความไวสูงเพื่อให้ง่ายในการวัดผล และช่วยลดต้นทุนในการสร้างวงจรที่ซับซ้อน จึงต้องมีการสร้างแบบจึงลองทางคณิตศาสตร์ของตัวตรวจรู้ความชื้น ที่มีโครงสร้างต่างกัน เพื่อให้สามารถทำนายคุณลักษณะของตัวตรวจรู้ความชื้นที่จะสร้างขึ้น และหาโครงสร้างที่เหมาะจะสร้างเป็นตัวตรวจรู้ความชื้นความเร็วสูง ด้วยการเปรียบเทียบผลการจำลองผลตอบสนองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ แล้วจึงพิจรณาความเหมาะสมของโครงสร้าง และสรุปโครงสร้างที่จะนำไปสร้างเป็นตัวตรวจรู้ความชื้นต่อไป

4.1 ความชื้น

ความชื้น (humidity) หมายถึง ปริมาณน้ำที่ปรากฏอยู่ในสถานะของแก๊สในอากาศ หรือในแก๊สชนิดอื่น รูปแบบการวัดความชื้นที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือ ความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity) ความชื้นสัมบูรณ์ (absolute humidity) และอุณหภูมิจุดน้ำค้าง (dew point temperature) โดยความชื้นสัมพัทธ์ เป็นหน่วยการวัดที่นิยมใช้กันมากที่สุด ความหมายของความชื้นสัมพัทธ์ คือ อัตราส่วนของความดันไอน้ำขณะนั้น ต่อความดันไอน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิเฉพาะ โดยทั่วไปแสดงในรูปของเปอร์เซ็นต์ดังสมการที่ (4-1)

$$RH(\%) = \frac{P_w}{P_s} \times 100 \qquad (4\text{-}1)$$

โดยที่ $RH(\%)$ คือ ความชื้นสัมพัทธ์ (%)

P_w คือ ความดันไอน้ำบางส่วน (mbar)

P_s คือ ความดันไอน้ำอิ่มตัว (mbar)

ความชื้นสัมบูรณ์ (absolute humidity) คือ อัตราส่วนมวลของไอน้ำต่อปริมาตรของอากาศหรือแก๊ส อาจเปรียบได้ว่าเป็นความหนาแน่น หรือความเข้มข้นของไอน้ำในอากาศ (Suzuki, 2004) แสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (4-2)

$$d_w = \frac{M_w}{V_w + V_g} = \frac{M_w}{V} \qquad (4\text{-}2)$$

โดยที่R d_w คือ ความชื้นสัมบูรณ์ (kg/m^3)

M_w คือ มวลของไอน้ำ (kg)

V_w คือ ปริมาตรของไอน้ำ (m^3)

V_g คือ ปริมาตรของอากาศแห้ง (m^3)

V คือ ปริมาตรของอากาศแห้งและไอน้ำรวมกัน (m^3)

อุณหภูมิจุดน้ำค้าง (dew point temperature) คือ อุณหภูมิซึ่งความดันไอน้ำจริงในอากาศหรือแก๊ส มีค่าเท่ากับความดันไอน้ำอิ่มตัว ณ อุณหภูมินี้ ซึ่งความชื้นสัมพัทธ์จะมีค่าเป็น 100% และไอน้ำเริ่มเกิดการควบแน่นกลายเป็นหยดน้ำ อากาศ หรือ แก๊สจะไม่สามารถเก็บกักปริมาณไอน้ำได้มากไปกว่านี้ ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิต่ำลงกว่าจุดนี้ ความดันไอน้ำอิ่มตัวก็จะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ ในขณะที่ความดันไอน้ำจริงยังคงเท่าเดิม ส่งผลให้ความดันไอน้ำจริงในอากาศมีค่าเกินกว่าค่าความดันไอน้ำอิ่มตัว และเกิดการควบแน่นของไอน้ำกลายเป็นหยดน้ำมากขึ้นตามลำดับ เหมือนกับปรากฏการที่มีหยดน้ำเกาะอยู่รอบ ๆ แก้ว ที่มีน้ำแข็งใส่อยู่ สามารถอธิบายได้ว่าอุณหภูมิของน้ำในแก้วมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้างของอากาศในขณะนั้น จึงทำให้เกิดการควบแน่นและกลายเป็นหยดน้ำที่ข้างแก้วและอุณหภูมิจุดน้ำค้างจะแปรเปลี่ยนตามค่าความดันในขณะนั้นด้วย

4.2 ทฤษฎีและการคำนวณ

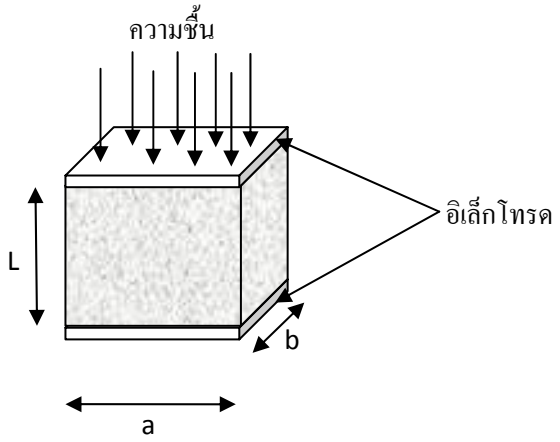
การสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นจำเป็นต้องศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเพื่อนำมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยที่ค่าความจุในสถานะอยู่ตัวสามารถคำนวณได้ตามความสัมพันธ์ $C = \varepsilon_0 \varepsilon_r A / d$ โดยที่ ε_0 คือ สภาพยอมสัมพัทธ์ของสุญญากาศ ε_r คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสาร d คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำ และ A คือ พื้นที่แผ่นตัวนำ แต่ผลตอบสนองทางเวลานั้นต้องใช้สมการการแพร่ของสารซึ่งเรียกว่า Fick' s law (Carnk ;1975) โดยจะอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์สามารถหาผลเฉลย โดยใช้วิธีผลเฉลยสมการอนุพันธ์แบบอนุกรม และนำผลเฉลยที่ได้ไปจำลองผล

โดยเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยใช้ภาษา Scilab ซึ่งจะเปรียบเทียบให้เห็นถึงการตอบสนองทางเวลาของตัวตรวจรู้ความชื้นทั้งสี่แบบ ซึ่งสมการของแต่ละแบบมีดังนี้

4.2.1 โครงสร้างแบบขั้วไฟฟ้ามีรูพรุน (Porous electrode)

โครงสร้างแบบขั้วไฟฟ้ามีรูพรุนเป็นโครงสร้างของตัวตรวจรู้ความชื้นชนิดเก็บประจุ มีลักษณะแผ่นโลหะขนานกัน โดยมีสารไดอิเล็กทริกไวความชื้นอยู่ระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสอง แผ่นโลหะตัวนำด้านบน จะมีลักษณะเป็นรูพรุน ความชื้นสามารถแพร่เข้าสู่ชั้นไดอิเล็กทริกได้โดยตรง ซึ่งโครงสร้างนี้จะตัดมาจากโครงสร้างขนาดใหญ่ พื้นที่ในการแพร่ของความชื้นจากทางด้านข้างจึงมีน้อยมากเมื่อเทียบกับด้านบน จึงสามารถตัดผลของการแพร่ความชื้นจากทางด้านข้างได้ โครงสร้างนี้ มีความกว้าง a ยาว b และสูง L ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งใช้สมการการแพร่ของสารแบบหนึ่งมิติ ดังสมการที่ (4-3) เมื่อ M คือ ความเข้มข้นของความชื้นในสารไดอิเล็กทริกพอลิเมอร์ D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ ภายในพอลิเมอร์ กำหนดขอบเขตให้ M_S คือ ความเข้มข้นของความชื้นที่ผิว กำหนดความเข้มข้นความชื้นภายในเนื้อสารเริ่มต้น $M(x,0)$ เท่ากับ 0 และความชื้นที่ผิวที่เวลาใด ๆ $M(L,t)$ เท่ากับ M_S จะได้ผลเฉลยแบบอนุกรมของสมการอนุพันธ์ดังสมการที่ (4-4)

$$\frac{\partial M(x,t)}{\partial t} = D\frac{\partial^2 M(x,t)}{\partial x^2} \tag{4-3}$$



รูปที่ 4.1 ตัวตรวจรู้ความชื้นแบบฟิล์มบาง(Thin film humidity sensor)

$$M(x,t) = M_S + \frac{2}{p}\sum_{n=1}^{\infty}\left[\frac{1}{n}M_S\left(\cos(np)\text{-}1\right)\sin\left(\frac{np(x\text{-}L)}{2}L\right)e^{\left(\text{-}\frac{n^2p^2}{4}L^2Dt\right)}\right] \tag{4-4}$$

ค่าไดอิเล็กทริก ε_r จะเปลี่ยนแปรผันตรงกับกับค่าความชื้นที่ดูดซับไว้โดยสารไวความชื้น ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (4-5)

$$\varepsilon_r\left(x,t\right) = uM\left(x,t\right) + v \tag{4-5}$$

โดยที่ v และ u เป็นค่าคงที่ขึ้นกับสารไวความชื้นโดยค่าความจุไฟฟ้าของทรงลูกบาศก์ (C) หาได้จากการอินทิเกรตตามทิศทางการแพร่ L โดยใช้สมการที่ (4-4) และ (4-5) ดังนี้

$$C\left(t\right) = \int_0^L \varepsilon_0\varepsilon_r(x,t)\frac{bdx}{d} = \frac{\varepsilon_0 b}{d}\left[\left(uM_S + v\right)L - \frac{8uM_SL}{\pi^2}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{e^{\left(\frac{-\left(2n-1\right)^2\pi^2Dt}{4L^2}\right)}}{\left(2n-1\right)^2}\right] \tag{4-6}$$

โดยที่ ε_0 คือสภาพยอมสัมพัทธ์ของสุญญากาศ ε_r คือค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสาร d คือระยะห่างระหว่างแผ่นตัวนำ และ b คือความกว้างของตัวเก็บประจุ เมื่อนำค่าความจุไฟฟ้า ณ เวลา t ใด ๆ เทียบกับค่าความจุไฟฟ้าที่สถานะอยู่ตัวจะได้

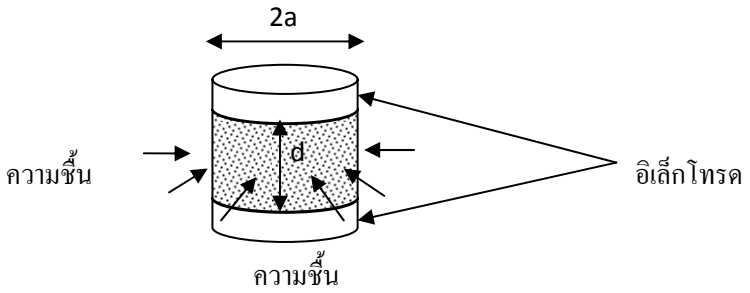
$$C_{norm} = \frac{C\left(t\right) - C_0}{C_\infty - C_0} \tag{4.7}$$

แทนค่าลงในสมการที่ (4-6) จะได้ค่าความจุไฟฟ้าที่เป็นฟังก์ชันของเวลา (C_{norm}) โดยทำให้เป็นหนึ่งหน่วยดังสมการที่ (4-8)

$$C_{norm}(t) = \frac{\displaystyle\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1-e^{\left[\frac{-\left(2n-1\right)^2\pi^2Dt}{4L^2}\right]}}{\left(2n-1\right)^2}}{\displaystyle\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{\left(2n-1\right)^2}} \tag{4.8}$$

4.2.2 โครงสร้างแบบทรงกระบอก (Cylindrical body)

การพัฒนาตัวตรวจรู้ให้มีความเร็วสูงขึ้น จำเป็นต้องมีการเพิ่มพื้นที่ผิวสำหรับการแพร่ของความชื้น และในขณะเดียวกันต้องลดระยะทางในการแพร่ของความชื้น เพื่อให้สารไวความชื้นเกิดการอิ่มตัวด้วยความชื้นเร็วที่สุด โครงสร้างที่มีคุณสมบัติดังกล่าว ได้แก่ โครงสร้างแบบทรงกระบอก ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งด้านบนและล่างจะเป็นแผ่นโลหะตัวนำ โดยความชื้นจะแพร่เข้าสู่โครงสร้างทางด้านข้างโดยรอบ โดยมีสมการอนุพันธ์ของการแพร่ของสารเข้าสู่ปริมาตรทรงกระบอกดังสมการที่ (4-9)



รูปที่ 4.2 ตัวตรวจรู้ความชื้นแบบทรงกระบอก (Cylindrical humidity sensor)

$$\frac{\partial M(r,t)}{\partial t} = \frac{D}{r}\frac{\partial}{\partial t}\left(r\frac{\partial M(r,t)}{\partial r}\right) \tag{4-9}$$

กำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น $M(r,0)=0$ และเงื่อนไขขอบเขต $M(a,t)=M_S$ จะได้ผลเฉลยของสมการดังสมการที่ (4-10) เมื่อ J_0 คือ ฟังก์ชันเบสเซลชนิดที่หนึ่งอันดับศูนย์ (Bessel function of the first kind of zero) J_1 คือ ฟังก์ชันเบสเซลชนิดที่หนึ่งอันดับหนึ่ง (Bessel function of the first kind of the first order) และ α_n คือ รากของ $J_0(a\alpha_n)=0$

ค่าความจุไฟฟ้าของปริมาตรทรงกระบอก จะคำนวณโดยการอินทิเกรตจากจุดศูนย์กลางไปยังผิวของทรงกระบอก ตามสมการที่ (4-11) และจากสมการที่ (4-11) จัดสมการให้อยู่ในรูปอัตราส่วนต่อค่าความจุไฟฟ้าในสถานะอยู่ตัวตามสมการที่ (4-7) จะได้ค่าความจุไฟฟ้าซึ่งเป็นฟังก์ชันของเวลา ($C_{norm,cyl}$) ดังสมการที่ (4-12)

$$M(r,t) = M_S\left(1-\frac{2}{a}\right)\sum_{n=1}^{\infty}\frac{e^{\left(-D\alpha_n^2 t\right)}J_0(r\alpha_n)}{\alpha_n J_1(a\alpha_n)} \tag{4-10}$$

$$C_{cyl}(t) = \int_0^a \varepsilon_0 \varepsilon_r (r,t) \frac{2\pi r dr}{d}$$
$$= \frac{2\pi\varepsilon_0 a^2}{d}\left[0.5(uM_S + v) - 2uM_s \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{\left(-Dk_n^2 t/a^2\right)}}{k_n^2}\right] \quad (4\text{-}11)$$

$$C_{Norm,cyl}(t) = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1 - e^{\left(-Dk_n^2 t/a^2\right)}}{k_n^2}}{\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{k_n^2}} \quad (4\text{-}12)$$

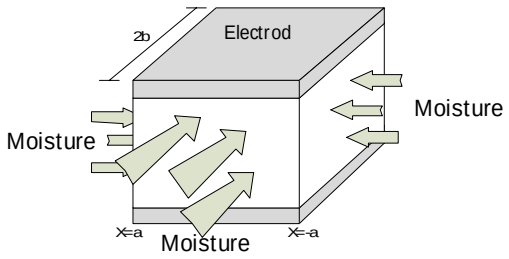
เมื่อ k_n คือ รากของสมการเบสเซลชนิดที่หนึ่งอันดับศูนย์

a คือ รัศมีของทรงกระบอก

4.2.3 โครงสร้างแบบทรงลูกบาศก์ (Cube body)

โครงสร้างตัวตรวจรู้แบบทรงลูกบาศก์ เป็นโครงสร้างทรงลูกบาศก์ที่มีความกว้าง 2a และยาว 2b ความชื้นสามารถแพร่เข้าสู่โครงสร้างทั้งสี่ด้าน จึงต้องใช้การวิเคราะห์การแพร่ของความชื้นเข้าสู่โครงสร้างแบบสองมิติ ดังรูปที่ 4.3 จากโครงสร้างแบบทรงลูกบาศก์ ความชื้นสามารถแพร่เข้าสู่โครงสร้างได้ทั้งสี่ทิศทาง กำหนดให้ความเข้มข้นความ ชื้นทั้งสี่ด้านมีค่าเท่ากัน ดังนั้นจะได้สมการการแพร่ในสองมิติดังสมการที่ (4.13)

$$\frac{\partial M(x,y,t)}{\partial t} = D\left(\frac{\partial^2 M(x,y,t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M(x,y,t)}{\partial y^2}\right) \quad (4\text{-}13)$$



รูปที่ 4.3 ตัวตรวจรู้ความชื้นแบบทรงลูกบาศก์

กำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น โดยให้ความชื้นที่จุดใด ๆ ภายในทรงลูกบาศก์เป็นศูนย์ และความเข้มข้นของความชื้นที่ผิวมีค่าเป็น M_S จะได้ผลเฉลยดังสมการที่ (4-14)

กำหนดให้ $M(x,y,0)=0$

$M(x,y,t)=M_S$

$$M(x,y,t)=M_S-M_S\frac{16}{\pi^2}\left[\sum_{m=0}^{\infty}\sum_{n=0}^{\infty}\frac{(-1)^{m+n}e^{(-\alpha_{m,n},t)}}{(2n+1)(2m+1)}\cos\left(\frac{(2m+1)\pi x}{2a}\right)\cos\left(\frac{(2n+1)\pi y}{2b}\right)\right] \tag{4-14}$$

เมื่อ $$\alpha_{m,n}=\frac{D\pi^2}{4}\left[\frac{(2m+1)^2}{a^2}+\frac{(2n+1)^2}{b^2}\right]$$

นำสมการที่ (4-14) แทนค่าลงในแบบจำลองของค่าความจุไฟฟ้า ตามสมการที่ (4-15) สามารถหาผลเฉลยของสมการได้ตามสมการที่ (4-16) จากนั้นจัดรูปสมการที่ (4-16) ให้อยู่ในรูปอัตราส่วนต่อค่าความจุไฟฟ้าในสถานะอยู่ตัว จะได้ผลเฉลยค่าความจุไฟฟ้าของทรงลูกบาศก์ที่เป็นฟังก์ชันของเวลา (C_{nor}) ดังสมการที่ (4-17)

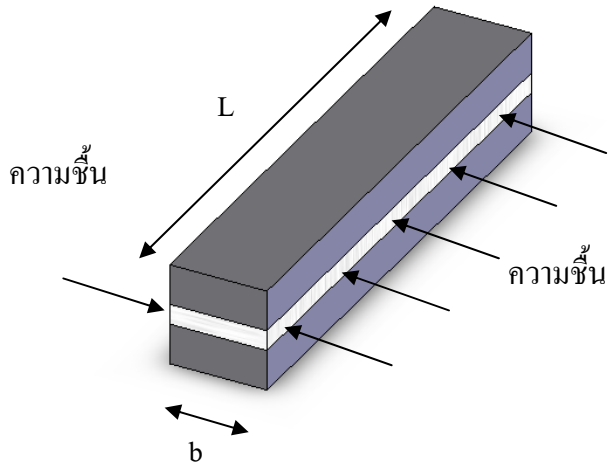
$$C=\frac{4\varepsilon_0 k_2 ab}{d}+\frac{\varepsilon_0 k_1}{d}\int_{-b}^{b}\int_{-a}^{a}M(x,y,t)\,dxdy \tag{4-15}$$

$$C=\frac{4\varepsilon_0 k_2 ab}{d}+\frac{\varepsilon_0 k_1}{d}M_S$$
$$-M_S\frac{16}{\pi^2}\sum_{0}^{\infty}\sum_{0}^{\infty}\frac{(-1)^{m+n}e^{(-\alpha_{m,n},t)}}{(2n+1)(2m+1)}\int_{-b}^{b}\int_{-a}^{a}\cos\left(\frac{(2m+1)\pi x}{2a}\right)\cos\left(\frac{(2n+1)\pi y}{2b}\right)dxdy \tag{4-16}$$

$$C_{nor}=\frac{-\sum_{0}^{\infty}\sum_{0}^{\infty}\frac{(-1)^{m+n}\,e^{(-\alpha_{m,n},t)}}{(2n+1)(2m+1)}\int_{-b}^{b}\int_{-a}^{a}\cos\left(\frac{(2m+1)\pi x}{2a}\right)\cos\left(\frac{(2n+1)\pi y}{2b}\right)dxdy}{\sum_{0}^{\infty}\sum_{0}^{\infty}\frac{(-1)^{m+n}}{(2n+1)(2m+1)}\int_{-b}^{b}\int_{-a}^{a}\cos\left(\frac{(2m+1)\pi x}{2a}\right)\cos\left(\frac{(2n+1)\pi y}{2b}\right)dxdy} \quad (4\text{-}17)$$

4.2.4 แบบซี่อิเล็กโทรดที่มีความยาวมากกว่าความกว้างมาก

การวิเคราะห์การแพร่ของตัวตรวจรู้ความชื้นแบบซี่ยาว โดยที่มีความยาวมากกว่าความกว้างมาก ๆ ดังรูปที่ 4.4 กำหนดให้ความชื้นที่แพร่เข้าสู่ด้านหน้า และด้านหลังน้อยมาก เมื่อเทียบกับด้านข้างจนสามารถละทิ้งได้ ซึ่งจะใช้การวิเคราะห์การแพร่ในหนึ่งมิติ โดยที่ความชื้นสามารถแพร่เข้าสู่โครงสร้างจากทั้งสองด้าน ระยะทางของการแพร่มีค่าเท่ากับขนาดของความกว้าง b ซึ่งจะได้สมการผลการตอบสนองทางเวลาของค่าความจุไฟฟ้าที่เป็นฟังก์ชันของเวลา ($C_{norm,long}$) ดังสมการที่ (4-18)



รูปที่ 4.4 ตัวตรวจรู้ความชื้นแบบซี่ยาว

$$C_{norm,long}(t)=1-\frac{4}{\pi}\sum_{j=0}^{N}\frac{1}{(2j+1)}\sin\frac{(2j+1)\pi x}{h}\bullet e^{\frac{-(2j+1)^2\pi^2 Dt}{h^2}} \quad (4\text{-}18)$$

นอกจากนี้ การหาผลตอบสนองต่อความชื้นของตัวตรวจรู้ความชื้น ซึ่งใช้หลักการแพร่ของ Fick's law สามารถหาผลเฉลยของสมการอนุพันธ์ย่อยได้ โดยใช้วิธีการประมาณค่าด้วยระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่องจำกัด (Finite difference) โดยใช้วิธีการของ Crank-Nicloson โดยมีการลู่เข้าแบบกำลังสอง และมีความแม่นยำกว่าแบบอื่น ๆ เนื่องจากใช้การประมาณค่าที่จุดกึ่งกลางระหว่างจุดข้อมูล มีรายละเอียดการคำนวนโดยเริ่มต้นจากสมการการแพร่ใน 1 มิติ ดังสมการที่ (4-19) ทำการประมาณค่าอนุพันธ์ของค่าความเข้มข้นความชื้นเทียบกับเวลาได้ดังสมการที่ (4-20)

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} \tag{4-19}$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} \cong \frac{M_i^{l+1} - M_i^l}{\Delta t} \tag{4-20}$$

$$\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} \cong \frac{1}{2}\left[\frac{M_i^{l+1} - 2M_i^l + M_{i-1}^l}{(\Delta x)^2} + \frac{M_{i+1}^{l+1} - 2M_i^{l+1} + M_{i-1}^{l+1}}{(\Delta x)^2}\right] \tag{4-21}$$

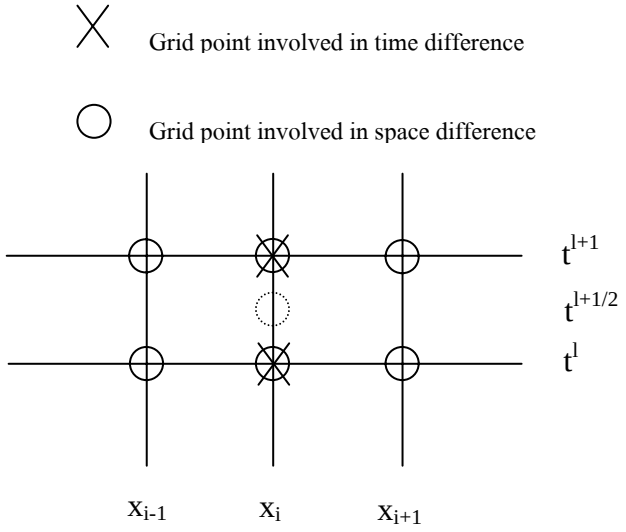
แทนค่าสมการที่ (4-20) และ (4-21) ลงในสมการที่ (4-19) จะได้ดังสมการที่ (4-22) สำหรับจุดใด ๆ ส่วนสมการที่ (4-23) และ (4-24) ใช้สำหรับจุดแรก และจุดสุดท้ายของคำตอบตามลำดับ

$$-\lambda M_{i-1}^{l+1} + 2(1+\lambda)M_i^{l+1} - \lambda M_{i+1}^{l+1} = \lambda M_{i-1}^l + 2(1-\lambda)M_i^l + \lambda M_{i+1}^l \tag{4-22}$$

$$2(1+\lambda)M_1^{l+1} - \lambda M_2^{l+1} = \lambda f_0(t^l) + 2(1-\lambda)M_1^l + \lambda f_0(t^{l+1}) \tag{4-23}$$

$$-\lambda M_{i-1}^{l+1} + 2(1+\lambda)M_m^{l+1} = \lambda f_{m+1}(t^l) + 2(1-\lambda)M_m^l + \lambda M_{m-1}^l + \lambda f_{m+1}(t^{l+1}) \tag{4-24}$$

$$\lambda = k\Delta t / (\Delta x)^2 \tag{4-25}$$



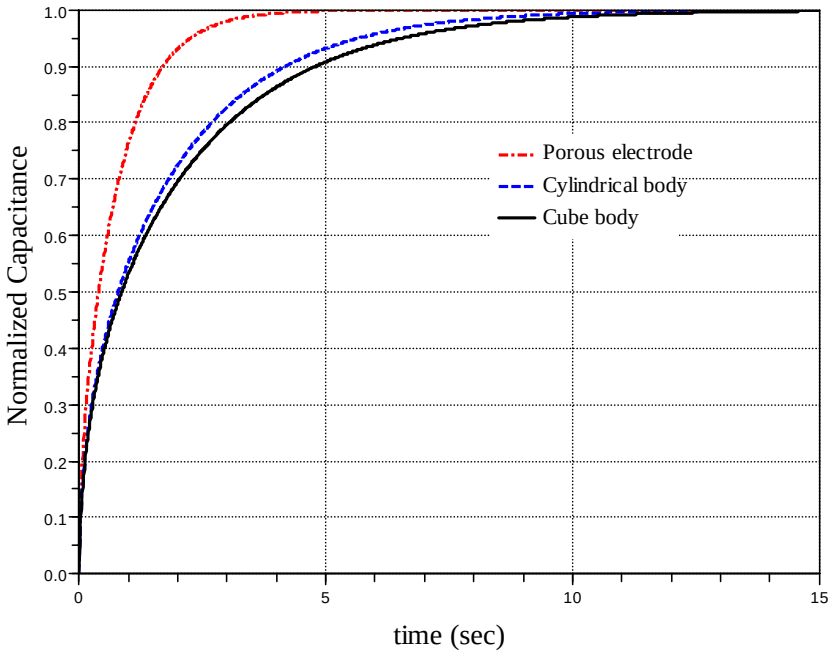
รูปที่ 4.5 ระเบียบวิธีผลต่างสืบเนื่องจำกัดโดยใช้วิธี Crank-Nicloson

เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเวลาของแต่ละโครงสร้างจะกำหนดค่าต่าง ๆ ให้สอดคล้องกันโดยให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไอน้ำในสารไดอิเล็กทริก (D) เท่ากับ $2x10^{-12} m^2/s$ ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของพอลิอิไมด์ และให้ความหนาของฟิล์มเป็น 2 μm และขนาดของทรงลูกบาศก์ กว้างและยาว 10 μm เส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลมเป็น 10 μm และแบบตัวเก็บประจุซี่ยาวให้มีความยาว L และซี่กว้าง 10 μm โดยจะเปรียบเทียบโครงสร้างสามแบบแรกก่อน ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 4.6

จากรูปที่ 4.6 จะเห็นว่าแบบความชื้นแพร่เข้าสู่ด้านบน จะมีผลตอบสนองทางเวลาเร็วที่สุด เนื่องจากฟิล์มมีความบาง จึงมีระยะทางในการแพร่สั้นกว่าแบบอื่น ทำให้ใช้เวลาน้อยที่สุด แต่ในความเป็นจริงไม่สามารถสร้างตัวเก็บประจุที่แผ่นตัวนำมีรูพรุนที่ความชื้นสามารถแพร่เข้าได้เสมือนว่าไม่มีแผ่นโลหะกั้น ดังนั้นโครงสร้างนี้จึงไม่สามารถสร้างได้ เมื่อพิจารณาโครงสร้างแบบทรงกระบอก และแบบลูกบาศก์จะพบว่าให้ผลตอบสนองใกล้เคียงกันโดยแบบทรงกระบอกจะให้ผลตอบสนองเร็วกว่าเล็กน้อย เนื่องจากความชื้นสามารถแพร่เข้าได้โดยรอบ ซึ่งแบบทรงลูกบาศก์ความชื้นสามารถแพร่เข้าสู่โครงสร้างได้โดยรอบเช่นกัน แต่จะมีบริเวณมุมที่ทำให้ระยะทางในการแพร่เพิ่มขึ้น จึงทำให้ช้ากว่าเล็กน้อย ต่อไปนำโครงสร้างแบบแท่งตัวนำยาวเปรียบเทียบกับแบบลูกบาศก์และแบบทรงกระบอกจะได้ดังรูปที่ 4.7

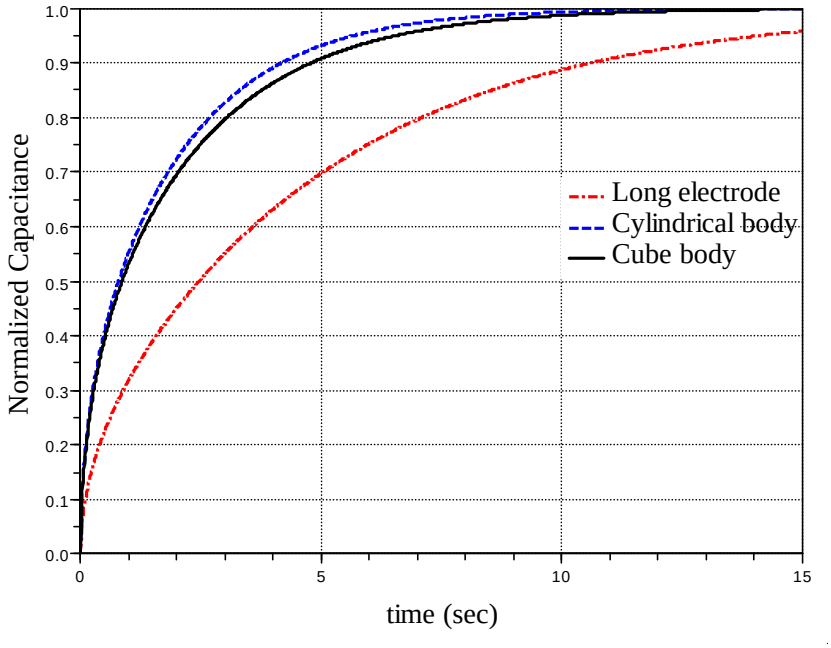
จากรูปที่ 4.7 โครงสร้างแบบทรงกระบอกจะให้ผลการตอบสนองทางเวลาที่เร็วที่สุด ส่วนโครงสร้างแบบทรงลูกบาศก์จะช้ากว่าเล็กน้อย และโครงสร้างแบบซี่ตัวนำยาวจะช้ากว่าทั้งสองแบบ เพราะไม่คิดผลการแพร่จากด้านหน้าและด้านหลัง แต่ด้วยเทคโนโลยีที่มีอยู่สามารถ

สร้างได้ง่ายกว่า เนื่องจากไม่ต้องเชื่อมต่อซี่อิเล็กโทรดในภายหลัง และสามารถออกแบบสร้างทั้งลายของชั้นไดอิเล็กทริก และซี่ตัวนำได้ในคราวเดียวโดยใช้หน้ากากตัวเดียวกัน นอกจากนี้ถ้าออกแบบให้ซี่ตัวนำมีความยาวมาก ๆ ก็จะสามารถเพิ่มความไวของตัวตรวจรู้ความชื้นได้โดยไม่มีผลต่อความเร็ว โดยผลการตอบสนองทางเวลานั้นจะเป็นฟังก์ชันของขนาดของซี่ตัวนำยกกำลังสอง ถ้าใช้กระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ สร้างขนาดความกว้างของซี่ตัวนำให้ได้เล็กลง จะสามารถสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นที่มีผลการตอบสนองที่เร็วมากขึ้นซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.8

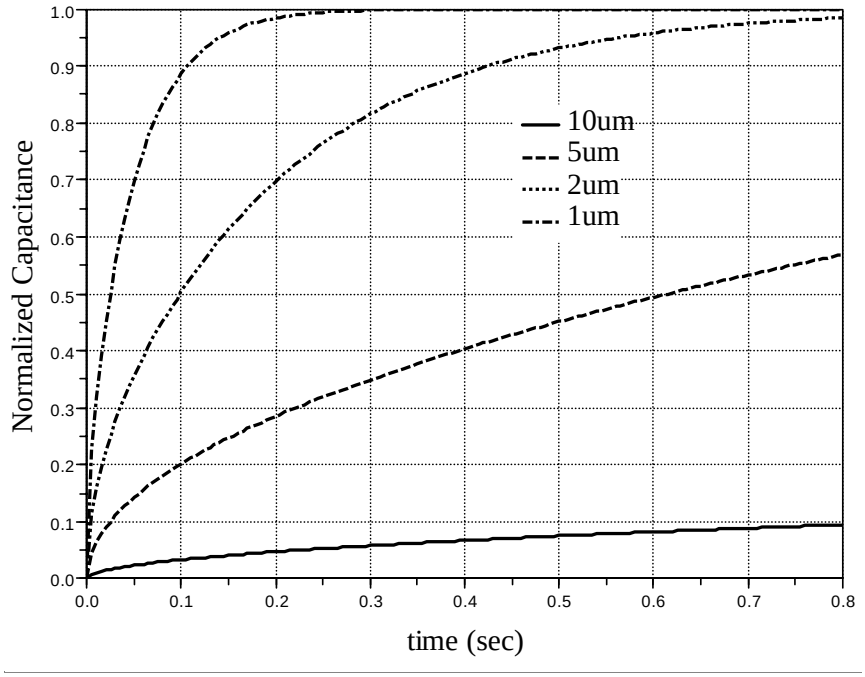


รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบผลตอบสนองทางเวลาของโครงสร้างขั้วไฟฟ้ารูพรุน สารไวความชื้นแบบทรงกระบอก และแบบสารไวความชื้นแบบทรงลูกบาศก์

เมื่อได้โครงสร้างที่เหมาะสมในการสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นขั้นตอนต่อไปเป็นการสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นด้วยเทคโนโลยีที่มีอยู่ประกอบด้วยกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต กระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ รวมไปถึงกระบวนการสร้างตัวตรวจรู้ความชื้น รายละเอียดจะได้กล่าวต่อไปในบทที่ 5 เรื่อง กระบวนการสร้างตัวตรวจรู้ความชื้น



รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบผลตอบสนองทางเวลาของโครงสร้างสารไวความชื้นเป็นทรงกระบอก แบบทรงลูกบาศก์ และแบบอิเล็กโทรดซี่ยาว

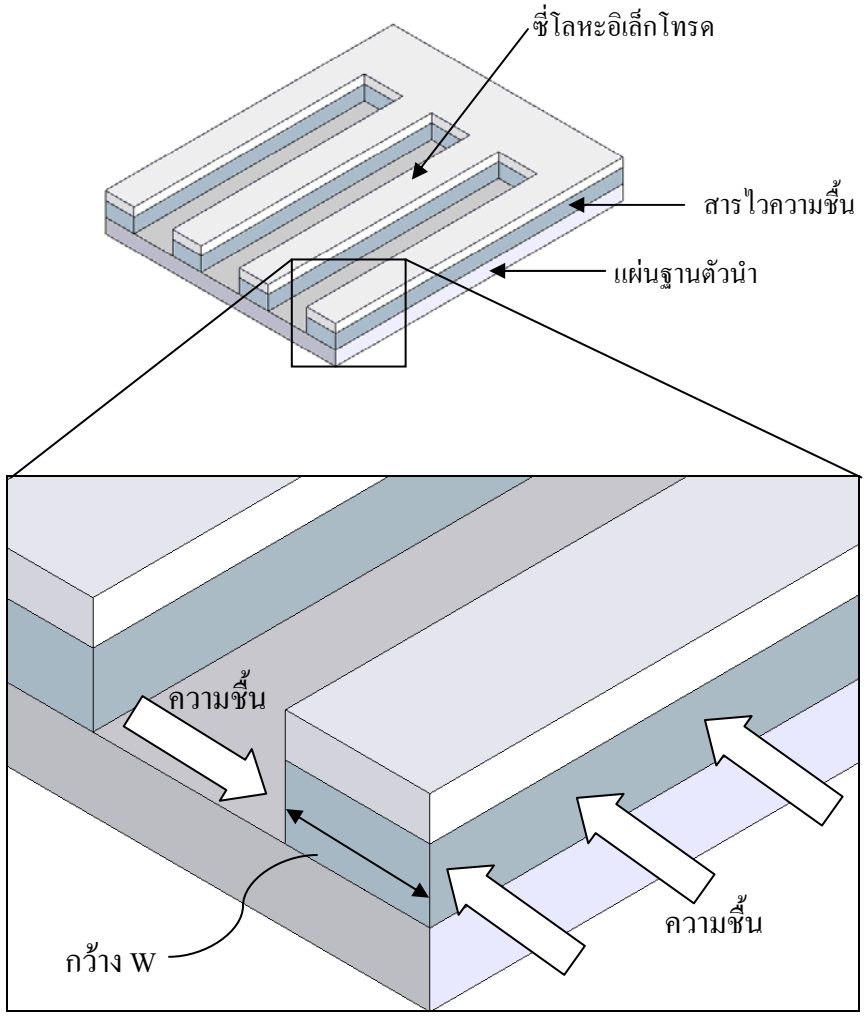


รูปที่ 4.8 ผลของความกว้างของซี่สารไวความชื้นต่อการตอบสนองทางเวลา

บทที่ 5

กระบวนการสร้างตัวตรวจรู้ความชื้น

ตัวตรวจรู้ความชื้นแบบตัวเก็บประจุที่ได้ออกแบบ และสร้างในงานวิจัยนี้ มีจุดประสงค์หลักเพื่อให้ได้ตัวตรวจรู้ความชื้นที่มีผลตอบสนองทางเวลาเร็ว โดยโครงสร้างที่ออกแบบเป็นโครงสร้างแบบซี่อิเล็กโทรด วางทับบนซี่ของไดอิเล็กทริกดังรูปที่ 5.1

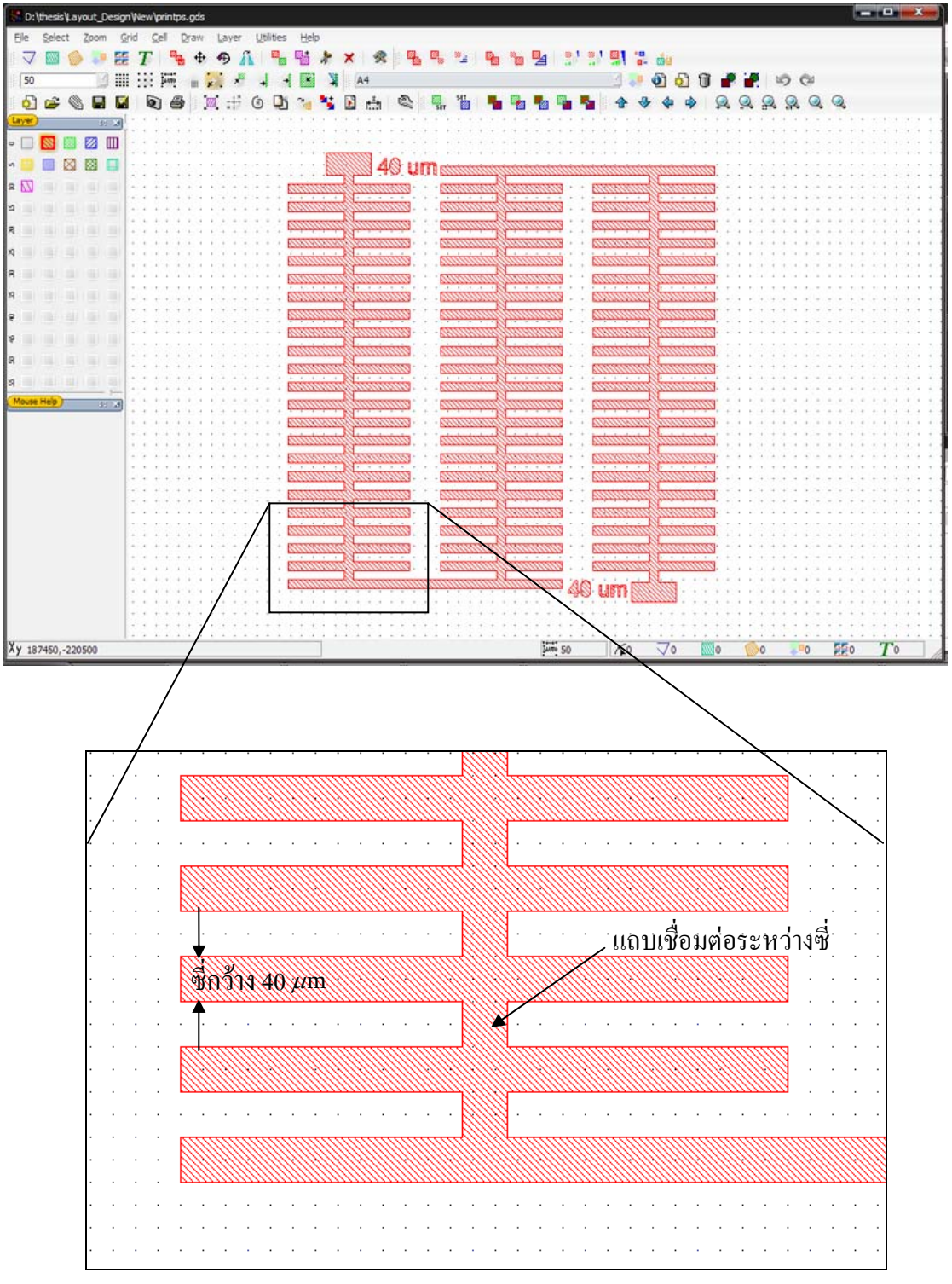


รูปที่ 5.1 ตัวตรวจรู้ความชื้นแบบซี่อิเล็กโทรดตัวนำ วางบนชั้นไดอิเล็กทริกไวความชื้น

ความไวของตัวตรวจรู้ความชื้น สามารถเพิ่มได้โดยการการลดความหนาของชั้นฟิล์ม หรือเพิ่มจำนวนซี่ของตัวตรวจรู้ความชื้น จากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อหาผลตอบสนองทางเวลาของตัวตรวจรู้ความชื้น เวลาในการตอบสนองต่อความชื้นโครงสร้างแบบอิเล็กโทรดซี่ยาวจะแปรผันตรงกับขนาดความกว้างของซี่ยกกำลังสอง ถ้าสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นให้มีขนาดซี่แคบลง จะได้ตัวตรวจรู้ความชื้นที่ให้ผลตอบสนองเร็วขึ้น กระบวนการสร้างตัวตรวจรู้จะใช้วิธีการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 3 ขั้นตอนการสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นประกอบด้วยการออกแบบลวดลาย การสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ การสร้างหน้ากากโลหะการฉายรังสีอัลตราไวโอเลต และเคลือบโลหะทับไดอิเล็กทริกไวความชื้น ซึ่งแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังนี้

5.1 การออกแบบลวดลาย

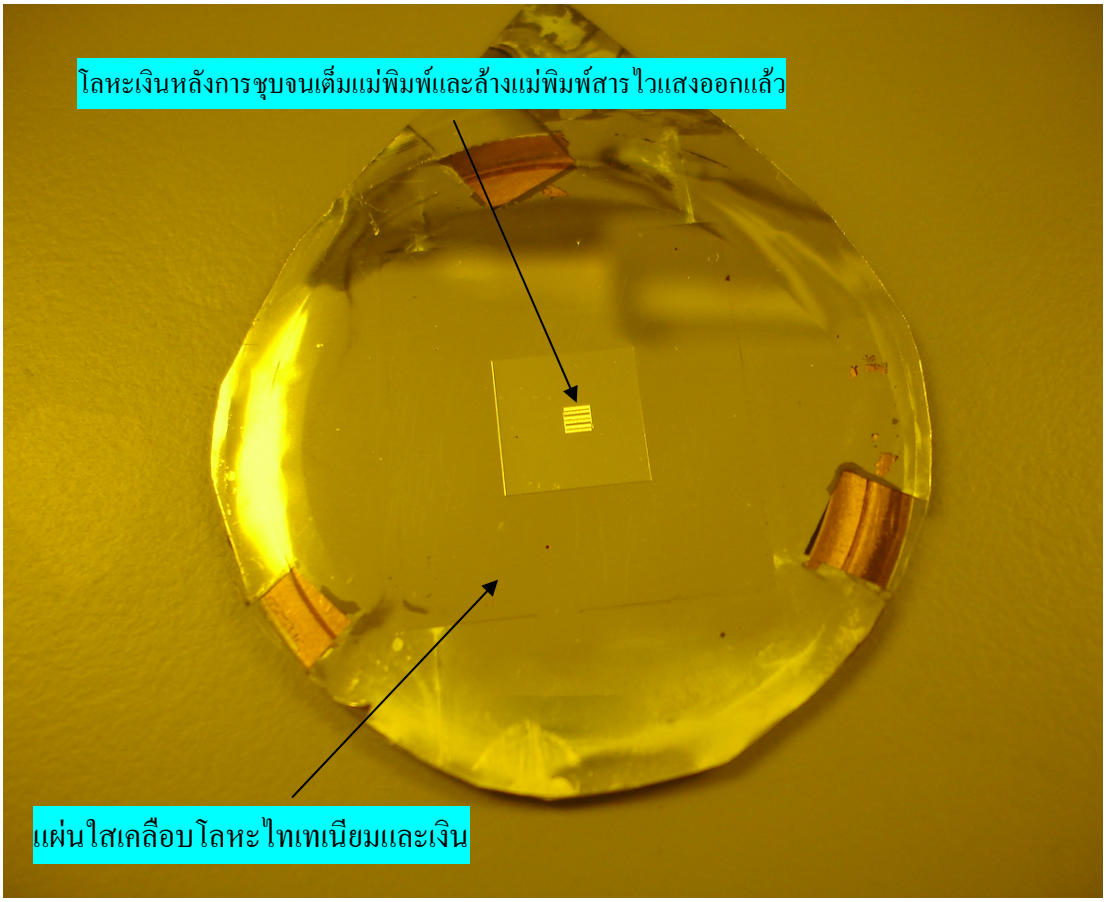
การออกแบบลวดลายของตัวตรวจรู้ความชื้นแบบตัวเก็บประจุ จากโครงสร้างของตัวตรวจรู้ความชื้นสำหรับโครงสร้างแบบอิเล็กโทรดซี่ยาวที่ได้ออกแบบไว้ ปัจจัยที่มีผลต่อความเร็ว คือ ความกว้างของซี่ไดอิเล็กทริก และตัวตรวจรู้ความชื้นยังต้องมีความไว ซึ่งสามารถเพิ่มค่าความจุไฟฟ้าได้โดยการขนานซี่ตัวนำ และซี่ทุกซี่ต้องเชื่อมต่อถึงกันเพื่อให้สามารถนำไปใช้งานได้สะดวกขึ้น การออกแบบโครงสร้างใช้โปรแกรม Layout Editor ซึ่งใช้สำหรับการออกแบบลวดลายจุลภาค โครงสร้างเป็นดังรูปที่ 5.2 โดยออกแบบให้ซี่มีความกว้าง 40 และ 60 μm เชื่อมต่อกันด้วยแถบกลางกว้างเท่ากับความกว้างของซี่ โดยแบ่งเป็นสามชุด ทุกชุดเชื่อมต่อถึงกัน และมีจุดต่อสาย (Bonding pad) จำนวนสองจุดสามารถใช้ได้ทั้งสองจุดเพื่อป้องกันกรณีที่เกิดความเสียหายกับจุดใดจุดหนึ่ง พื้นที่ทั้งหมดที่ทำให้เกิดความจุไฟฟ้าเท่ากับ 1.672 ตารางมิลลิเมตรสำหรับขั้วอิเล็กโทรดอีกขั้วหนึ่ง เป็นแผ่นกราวน์ที่เคลือบตลอดฐานรอง เมื่อใช้ค่าสภาพยอมสุญญากาศ (ε_0) เท่ากับ 8.85 pF/m หากชั้นฟิล์มสารไวความชื้นหนา 2 μm และค่าไดอิเล็กทริกของสารไวความชื้น (ε_r) เท่ากับ 4 จะได้ค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ความชื้นที่ออกแบบตามความสัมพันธ์ $C = \varepsilon_0 \varepsilon_r A / d$ เท่ากับ 29.6 pF หลังจากออกแบบลวดลายตัวตรวจรู้ความชื้นแล้วจึงพิมพ์ลวดลายบนฟิล์มใส ด้วยเครื่องพิมพ์เลเซอร์ความละเอียด 3,600 จุดต่อนิ้ว ลวดลายทึบแสงนี้จะนำไปใช้สำหรับการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ โดยใช้รังสีอัลตราไวโอเลตต่อไป



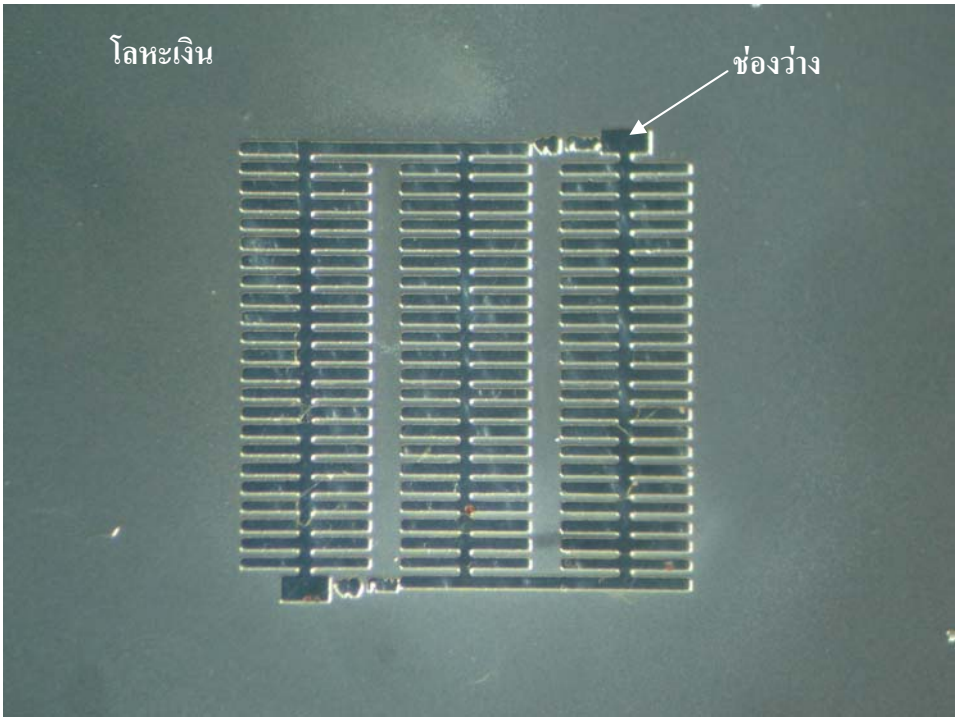
รูปที่ 5.2 ลวดลายตัวตรวจรู้ความชื้นที่ออกแบบโดยใช้โปรแกรม Layout Editor

5.2 การสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์

ลวดลายทึบแสงบนฟิล์มใสที่ได้ออกแบบไว้ เมื่อสร้างจริงจะมีขนาด 35 μm และ 51 μm สำหรับลวดลาย 40 μm และ 60 μm ตามลำดับซึ่งเกิดความคลาดเคลื่อน เนื่องจากลวดลายมีขนาดเล็กเข้าใกล้ขีดจำกัดความสามารถของเครื่องพิมพ์ ขั้นตอนต่อไปเป็นการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ โดยใช้โลหะเงินเป็นวัสดุกั้นรังสี รายละเอียดการสร้างได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3 หน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ที่สร้างขึ้นจากลวดลายที่ออกแบบเป็นดังแสดงในรูปที่ 5.3-5.4 โดยเงินมีความหนา 35 μm เป็นวัสดุกั้นรังสีเอ็กซ์ แม่พิมพ์ SU-8 ที่ได้จากกระบวนการลิโธกราฟฟี จะถูกใช้เป็นแม่พิมพ์ในการสร้างหน้ากากโลหะความหนา 250-300 μm ต่อไป



รูปที่ 5.3 หน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์บนแผ่นใสเคลือบโลหะ



รูปที่ 5.4 หน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์สร้างด้วยโลหะเงินหนา 40 μm

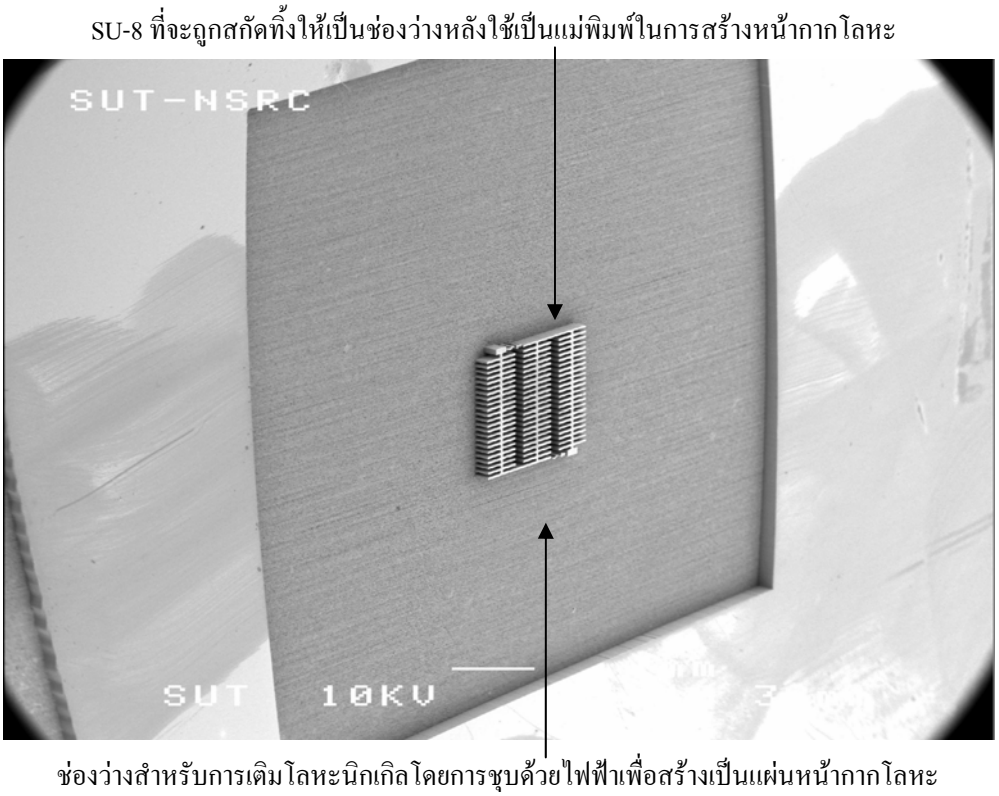
เมื่อได้หน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ขั้นตอนต่อไป คือ การนำหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ที่ได้ ไปใช้สร้างแม่พิมพ์สารไวแสงชนิดหนา โดยใช้สารไวแสงหนา 350 μm ปริมาณพลังงานของการฉายรังสีเอ็กซ์คำนวณได้จากโปรแกรม XmaskSim ซึ่งมีรายละเอียดในบทที่ 3 จำนวนชั้นตัวกรองที่มีในระบบลำเลียงแสง BL-6 ได้แก่ ผลึกเบอริลเลียม 100 μm แผ่นพอลิอิไมด์หนา 100 μm แผ่นอลูมิเนียมหนา 16 μm และแผ่นใสฐานรองหน้ากากหนา 100 μm รายละเอียดการฉายรังสีเอ็กซ์เป็นดังตารางที่ 5.1 ซึ่งประกอบไปด้วย ค่ากระแสในวงแหวนกักเก็บอิเล็กตรอน I(mA) พลังงานที่ได้รับที่บริเวณสารไวแสงส่วนบนด้านมืด (Top dark) และด้านสว่าง (Top bright) พลังงานที่ได้รับที่บริเวณสารไวแสงส่วนล่างด้านสว่าง (Bottom bright) พลังงานส่วนล่างด้านมืด (Bottom dark) ค่าอัตราส่วนพลังงานส่วนบนต่อส่วนล่าง (Top to bottom ratio) และค่าเปอร์เซนต์ความคมชัดส่วนล่าง (% Contrast) โดยรายละเอียดได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 3

ตารางที่ 5.1 ตัวอย่างข้อมูลการฉายรังสีเอ็กซ์เพื่อสร้างแม่พิมพ์สารไวแสงหนา 350 µm ต้องการพลังงานสะสม 5,500 mJ/cm^3

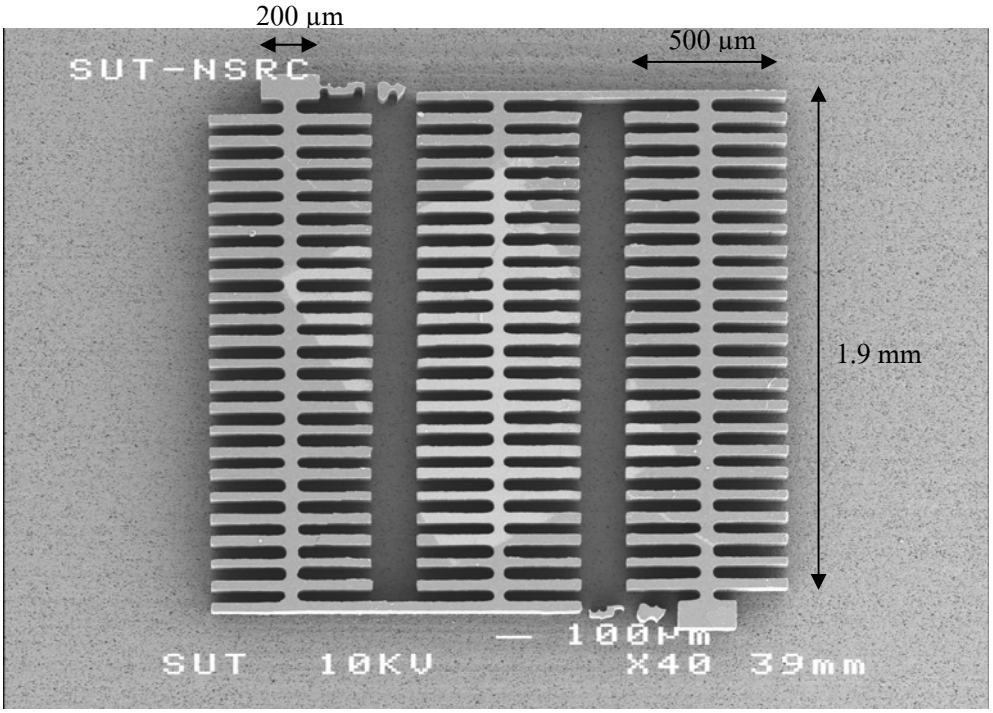
Current (mA)	Top bright (mJ/cm^3)	Accumulate top bright (mJ/cm^3)	Bottom bright (mJ/cm^3)	Accumulate bottom bright (mJ/cm^3)	Top dark (mJ/cm^3)	Accumulate top dark (mJ/cm^3)	Accumulate bottom dark (mJ/cm^3)	Contrast (%)
88.19	1,726.36	1,726.36	287.39	287.39	0.61	0.61	0.48	99.67
88.09	1,724.40	3,450.76	287.06	574.45	0.61	1.21	0.96	99.67
88.04	1,723.42	5,174.19	286.90	861.35	0.61	1.82	1.45	99.67
87.96	1,721.86	6,896.05	286.64	1,147.99	0.61	2.43	1.93	99.67
87.93	1,721.27	8,617.32	286.54	1,434.54	0.61	3.03	2.41	99.67
87.83	1,719.31	10,336.63	286.22	1,720.75	0.61	3.64	2.89	99.67
87.73	1,717.36	12,053.99	285.89	2,006.64	0.60	4.24	3.37	99.67
87.68	1,716.38	13,770.36	285.73	2,292.37	0.60	4.84	3.85	99.67
87.59	1,714.62	15,484.98	285.43	2,577.80	0.60	5.45	4.33	99.67
87.56	1,714.03	17,199.01	285.34	2,863.14	0.60	6.05	4.8	99.67
87.47	1,712.27	18,911.27	285.04	3,148.18	0.60	6.65	5.28	99.67
87.33	1,709.53	20,620.80	284.59	3,432.77	0.60	7.25	5.76	99.67
87.22	1,707.37	22,328.17	284.23	3,717.00	0.60	7.85	6.24	99.67
87.17	1,706.39	24034.56	284.07	4,001.07	0.60	8.45	6.71	99.67
87.07	1,704.44	25,739.00	283.74	4,284.81	0.60	9.05	7.19	99.67
86.98	1,702.67	27441.67	283.45	4,568.25	0.60	9.65	7.66	99.67
86.95	1,702.09	29,143.76	283.35	4,851.60	0.60	10.25	8.14	99.67
86.85	1,700.13	30,843.89	283.02	5,134.62	0.60	10.85	8.62	99.67
86.75	1698.17	32542.06	282.70	5417.32	0.60	11.45	9.09	99.67
86.70	1697.19	34239.25	282.53	**5699.85**	0.60	12.04	9.56	99.67

5.3 การสร้างหน้ากากโลหะ

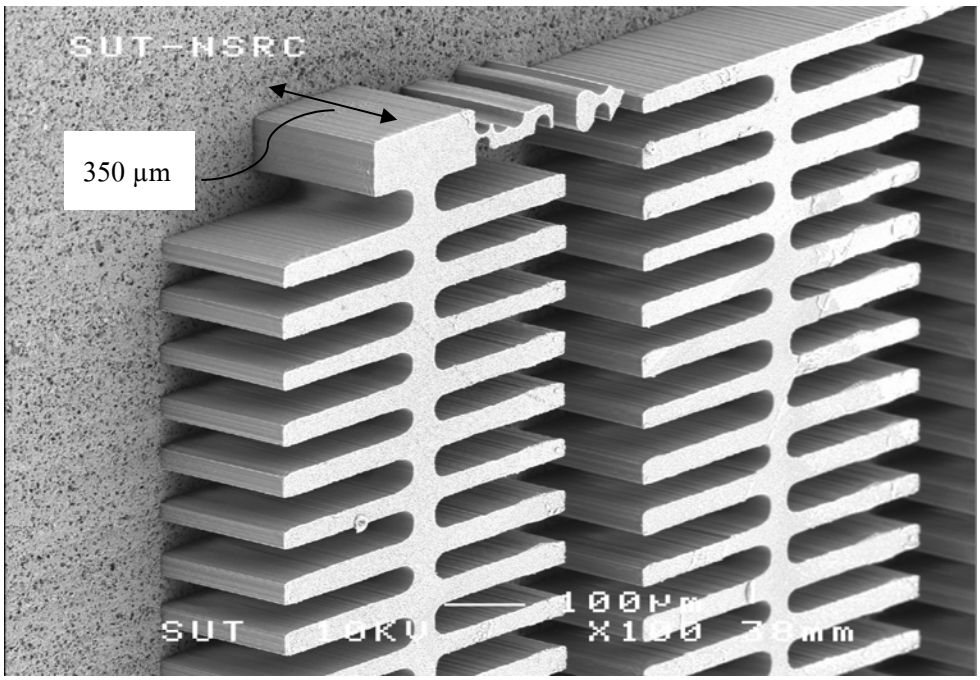
การสร้างแม่พิมพ์สารไวแสงชนิดหนา สำหรับหน้ากากโลหะกั้นรังสีเอ็กซ์ มีรายละเอียดดังได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 3 รูปของแม่พิมพ์สารไวแสงแสดงได้ดังรูปที่ 5.5-5.7 หลังจากได้แม่พิมพ์สารไวแสงชนิดหนาแล้วจึงเติมโลหะนิกเกิลลงในแม่พิมพ์ โดยการชุบด้วยไฟฟ้าจนล้นแม่พิมพ์ และส่วนที่เกินขึ้นมาจะถูกขัดทิ้งด้วยวิธีทางกล จากนั้นจึงขัดแผ่นกราไฟต์ทิ้ง จะได้หน้ากากโลหะนิกเกิลแบบหนาดังรูปที่ 5.8-5.11 มีขนาดพื้นที่ 1 ตารางมิลลิเมตร



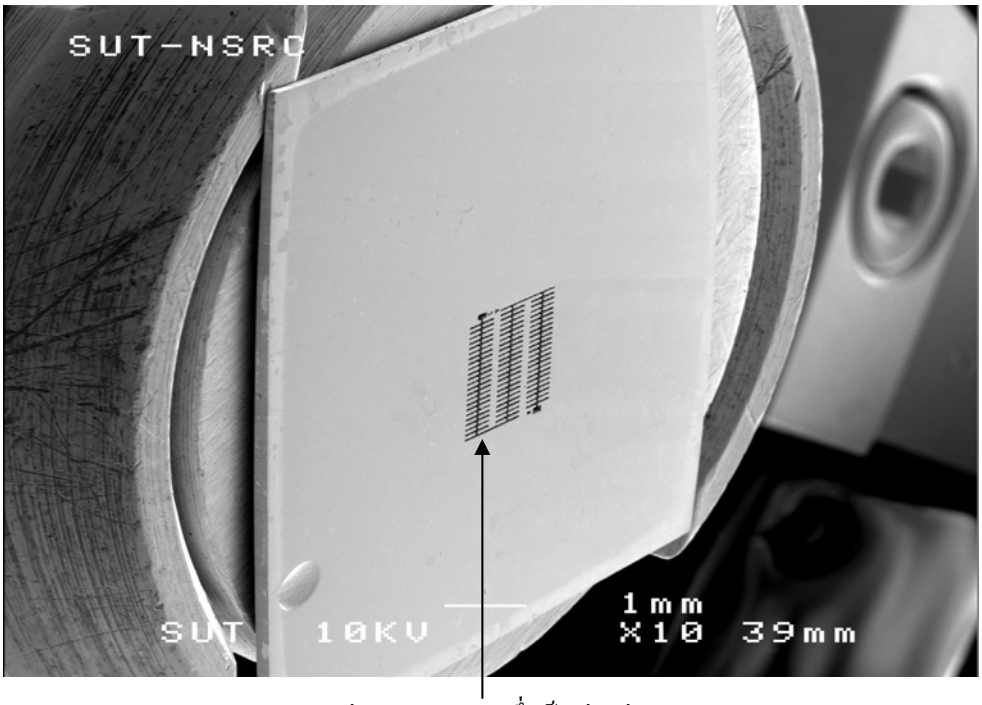
รูปที่ 5.5 แม่พิมพ์สารไวแสงหนาสำหรับใช้สร้างหน้ากากโลหะกั้นรังสีเอ็กซ์



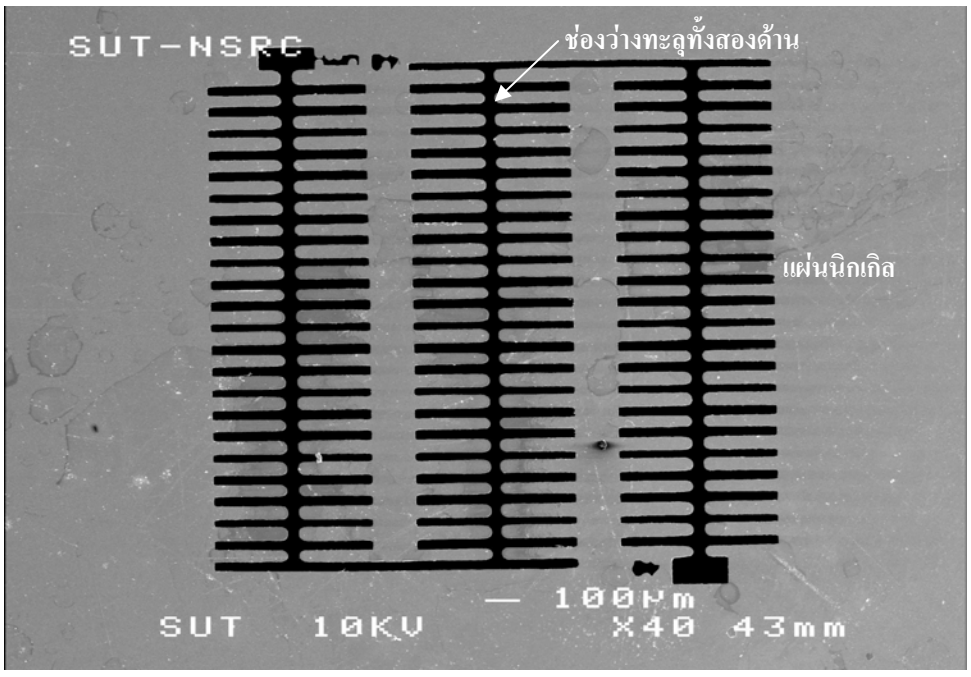
รูปที่ 5.6 ภาพด้านบนของแม่พิมพ์สารไวแสงหนาสำหรับใช้สร้างหน้ากากโลหะกั้นรังสีเอ็กซ์



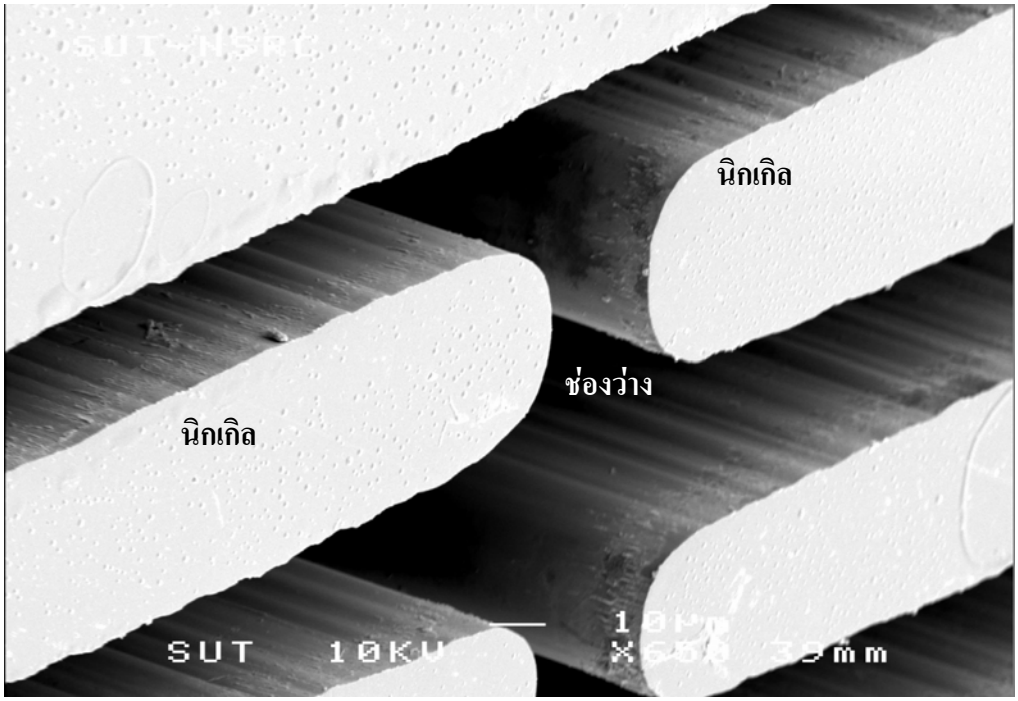
รูปที่ 5.7 ภาพด้านข้างแม่พิมพ์สารไวแสงหนาสำหรับใช้สร้างหน้ากากโลหะกั้นรังสีเอ็กซ์



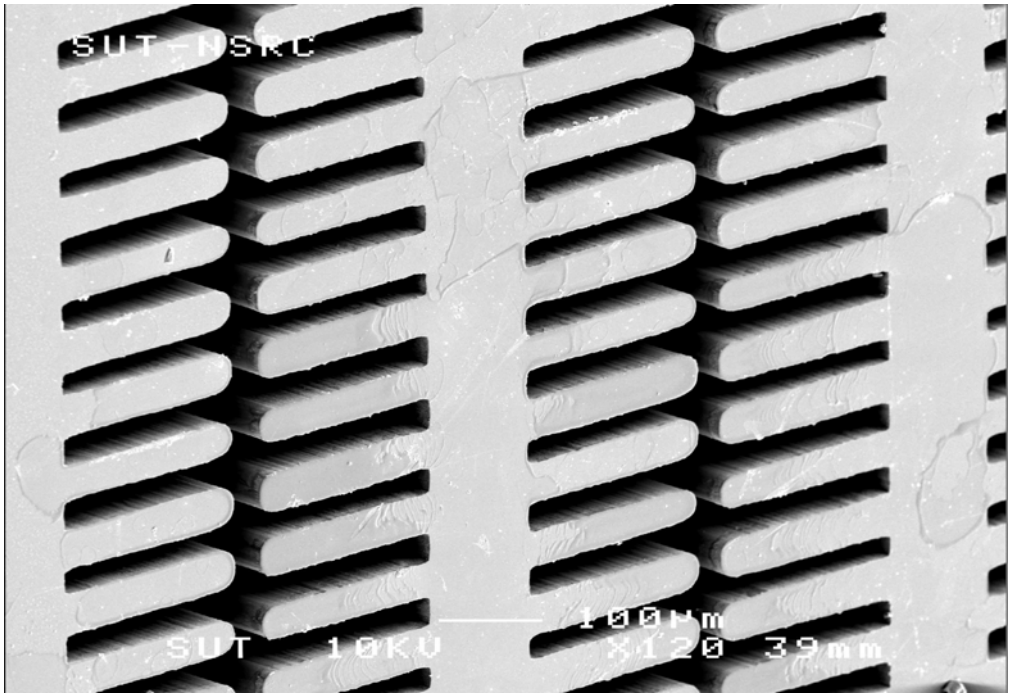
รูปที่ 5.8 หน้ากากโลหะกั้นรังสีเอ็กซ์หนา 250 μm



รูปที่ 5.9 ภาพด้านบนของหน้ากากโลหะกั้นรังสีเอ็กซ์หนา 250 μm



รูปที่ 5.10 ภาพขยายซี่ของหน้ากากโลหะกั้นรังสีเอ็กซ์หนา 250 µm



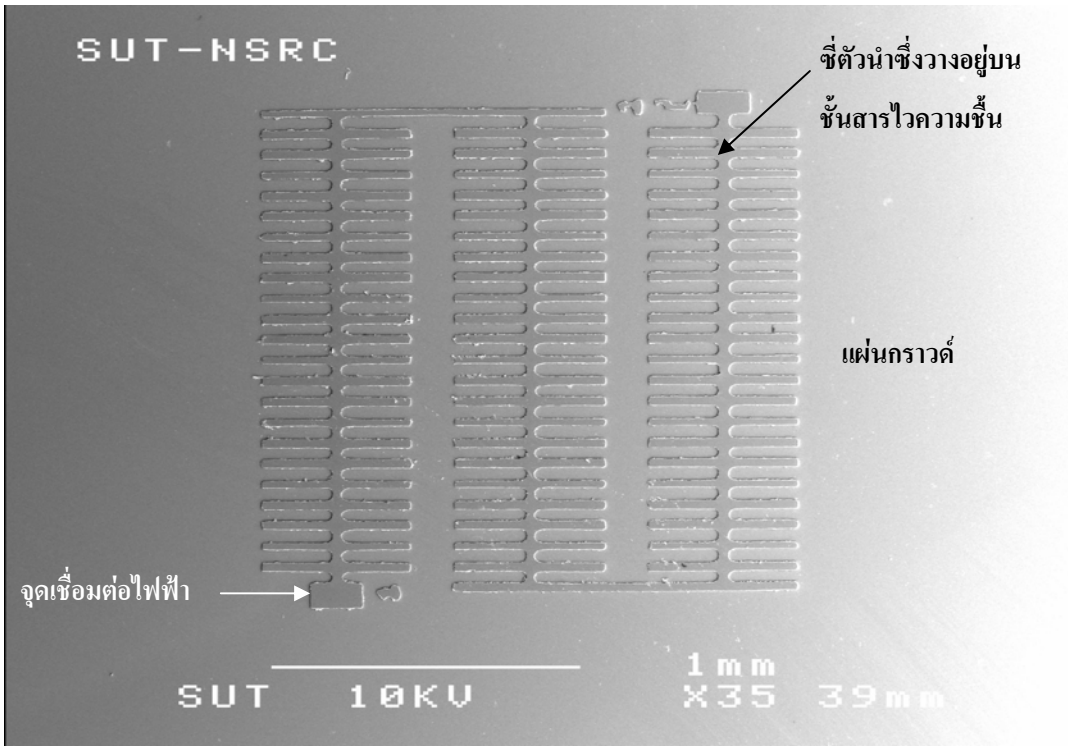
รูปที่ 5.11 ภาพขยายด้านบนของหน้ากากโลหะหนา 250 µm

5.4 การสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นแบบตัวเก็บประจุ

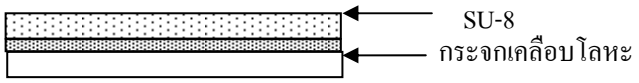
เนื่องจากความเร็วของตัวตรวจรู้ความชื้น ขึ้นกับความกว้างของซี่ ดังนั้นเมื่อสร้างหน้ากากโลหะเสร็จแล้ว จึงนำไปใช้สร้างตัวตรวจรู้ความชื้นให้มีลักษณะเป็นตัวเก็บประจุต่อไป ในขั้นตอนการสร้างมีทั้งการสร้างขั้วโลหะทับด้านบนโดยใช้วิธีการ lift-off รายละเอียดดังรูปที่ 5.13 ในวิธีการนี้จะทำการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตผ่านหน้ากากโลหะ แล้วนำหน้ากากโลหะออก จากนั้นเคลือบโลหะลงบนสารไวแสงทั้งหมด และทำการกำจัดโลหะที่อยู่บนสารไวแสงส่วนที่ไม่ถูกฉายแสง ด้วยการจุ่มในน้ำยาล้างฟิล์มไวแสง และใช้คลื่นเสียงอัลตราโซนิกช่วยให้โลหะส่วนนี้หลุดร่อนออก ตัวอย่างตัวตรวจรู้ความชื้นที่ได้จากกระบวนการ lift-off แสดงดังรูปที่ 5.13-5.14 วิธีการ lift-off นี้มีข้อเสีย คือ ต้องใช้คลื่นอัลตราโซนิกในการกำจัดโลหะส่วนที่ไม่ต้องการออก ซึ่งในขั้นตอนนี้จะทำให้ชั้นของสารไวแสงที่ใช้เป็นไดอิเล็กทริกเกิดการหลุดร่อนทำให้ได้ค่าความจุไฟฟ้าที่ไม่แน่นอน นอกจากนี้ ตัวตรวจรู้ความชื้นนี้จำเป็นต้องมีการต่อสายเพื่อประกอบเข้ากับตัวถังวงจรรวม ซึ่งในการต่อสายต้องการแผ่นโลหะที่หนาแต่วิธี lift–off ไม่สามารถกำจัดโลหะส่วนเกินที่หนาได้ จึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้สร้างตัวตรวจรู้ความชื้น

วิธีการสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นที่จะสามารถนำไปใช้งานได้ ต้องสามารถเคลือบขั้วโลหะต่อสายให้มีความหนามากๆได้ ทำให้โครงสร้างที่แข็งแรงไม่หลุดหรือร่อน ซึ่งการสร้างให้ได้ลักษณะดังกล่าว ทำได้โดยใช้การระเหยเคลือบโลหะผ่านช่องว่างของหน้ากากโลหะ เนื่องจากสามารถสร้างให้แผ่นตัวนำด้านบนมีความหนามาก ๆ ได้ เพราะโลหะจะเคลือบเฉพาะบริเวณที่ต้องการ ทำให้ไม่จำเป็นต้องกำจัดโลหะในภายหลังอีก การสร้างโดยวิธีการนี้เริ่มจากการเคลือบสารไวแสงบางลงบนฐานกระจก หรือซิลิคอนที่เคลือบโลหะ เพื่อเป็นแผ่นกราวด์ เนื่องจากต้องการชั้นฟิล์มบาง เพื่อให้ตัวตรวจรู้ความชื้นมีความไวสูง จึงใช้ SU-8 2002 เป็นชั้นไวความชื้นโดยหมุนเคลือบด้วยความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที วางบนแผ่นทำความร้อนที่อุณหภูมิคงที่ประมาณ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 นาที จะได้ความหนาประมาณ 2 μm และได้ความจุไฟฟ้าตามลวดลายที่ออกแบบประมาณ 30 pF หลังจากนั้น นำหน้ากากโลหะมาวางทับบนสารไวแสง และฉายด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต ด้วยความหนาแน่นพลังงาน 2,000 mJ/cm^2 ซึ่งปริมาณพลังงานนี้จะทำให้สารไวแสงแข็งตัว และยึดเกาะแผ่นฐานได้ดี หลังจากฉายแสงแล้วไม่ต้องนำหน้ากากออก แต่นำไปอบที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส 10 นาที และเคลือบโลหะอลูมิเนียมโดยการระเหยผ่านหน้ากากโลหะ ลงบนลวดลายที่ถูกฉายรังสีอัลตราไวโอเลตจนสารไวแสงแข็งตัวแล้ว ให้ได้ความหนาประมาณ 0.6 μm และอบซ้ำด้วยอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียสอีก 30 นาที เพื่อให้โลหะยึดเกาะลวดลายซี่อิเล็กโทรดได้ดียิ่งขึ้น รูปที่ 5.15 แสดงการติดหน้ากากโลหะลงบนชิ้นงาน เมื่อชิ้นงานเย็นลงจึงนำหน้ากากโลหะออก และล้างฟิล์มส่วนที่ไม่ถูกฉายแสงออก จะได้ลวดลายของ

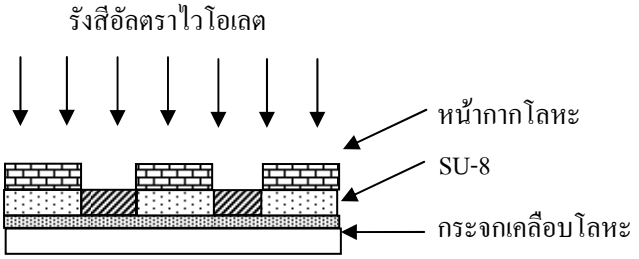
ซี่สารไวความชื้นซึ่งวางทับด้วยซี่โลหะตัวนำ ในขั้นตอนนี้อาจมีสารไวแสงตกค้างที่ผิวของแผ่นฐาน สามารถทำความสะอาดได้โดยการสกัดด้วยพลาสมาของออกซิเจน 200 W 20 นาที ขั้นตอนการสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นโดยวิธีการระเหยเคลือบโลหะผ่านหน้ากากแสดงได้ดังรูปที่ 5.16 โครงสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นที่สร้างขึ้น มีสองแบบ คือ แบบต่อสายโดยใช้เครื่องต่อสาย (wire bonder) และแบบที่สามารถบัดกรีต่อสายได้เอง เพื่อความสะดวกในการเชื่อมต่อ สำหรับการวัดทดสอบคุณสมบัติ ในการทดลองนี้จะใช้ตัวตรวจรู้ความชื้นที่ต่อสายโดยการบัดกรี โครงสร้างทั้งสองแสดงได้ดังรูปที่ 5.17-5.18



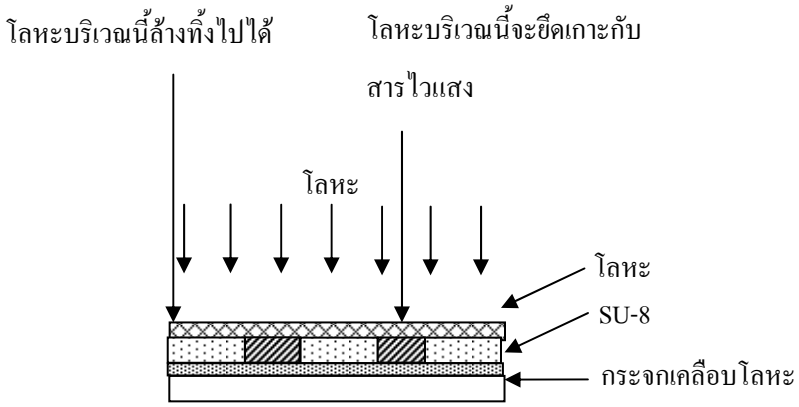
รูปที่ 5.12 ตัวตรวจรู้ความชื้นที่สร้างโดยใช้วิธีการ lift-off



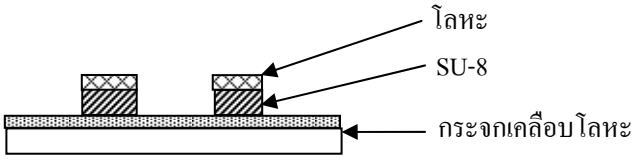
ฐานกระจกเคลือบโลหะและสารไวแสง



ฉายรังสีเอ็กซ์ผ่านหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์แบบโลหะ

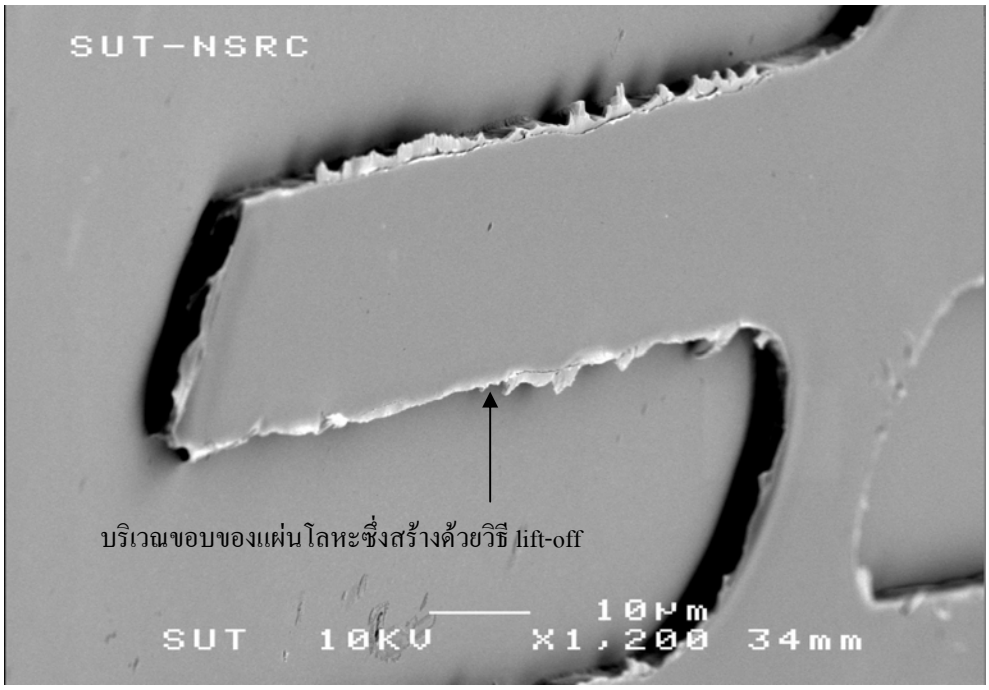


เคลือบโลหะลงบนสารไวแสงที่ฉายรังสีเอ็กซ์แล้ว

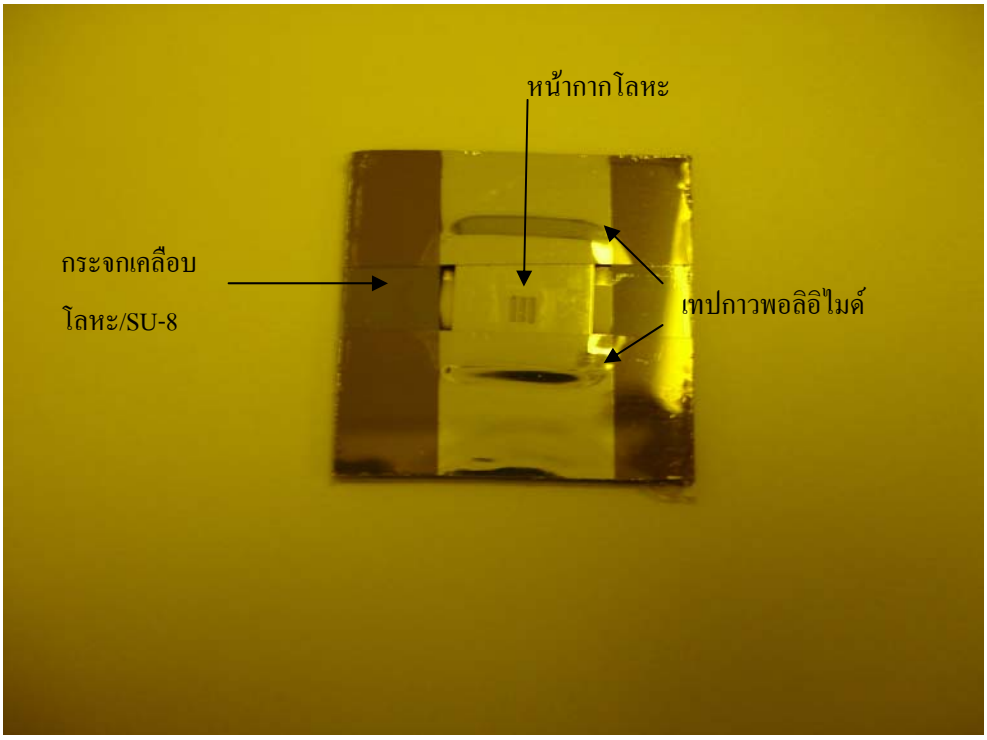


กำจัดโลหะและล้างสารไวแสงด้วยอัลตราโซนิก

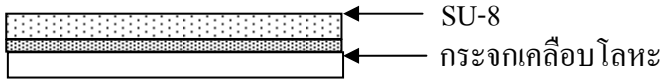
รูปที่ 5.13 การสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นโดยใช้วิธีการ lift-off



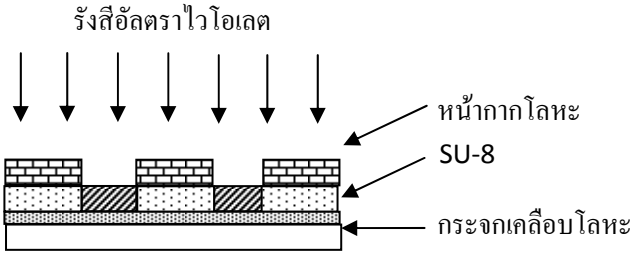
รูปที่ 5.14 ภาพขยายตัวตรวจรู้ความชื้นที่สร้างโดยใช้วิธีการ lift-off



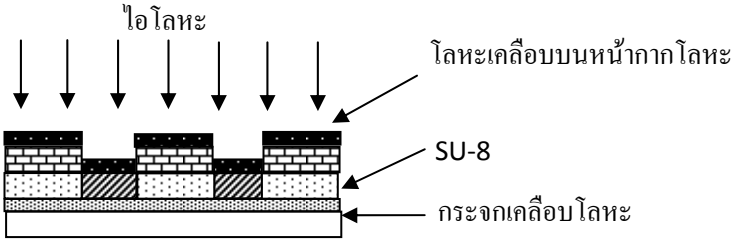
รูปที่ 5.15 ชิ้นงานที่ติดหน้ากากโลหะหลังการเคลือบโลหะเรียบร้อยแล้ว



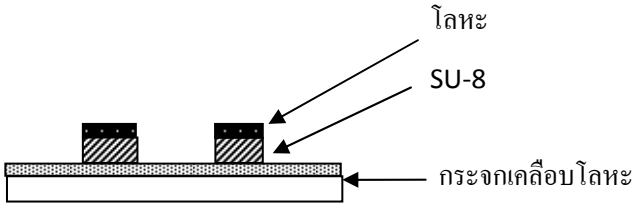
ฐานกระจกเคลือบโลหะและสารไวแสง



ฉายรังสีอัลตราไวโอเลตผ่านหน้ากากโลหะ

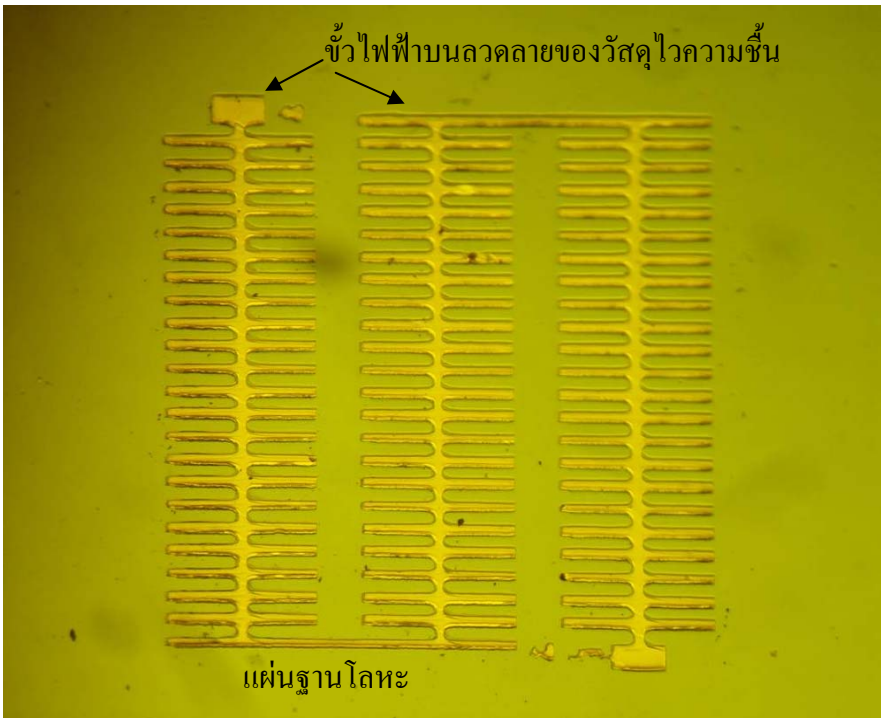


เคลือบโลหะผ่านหน้ากากทับสารไวแสงส่วนที่แข็งตัว

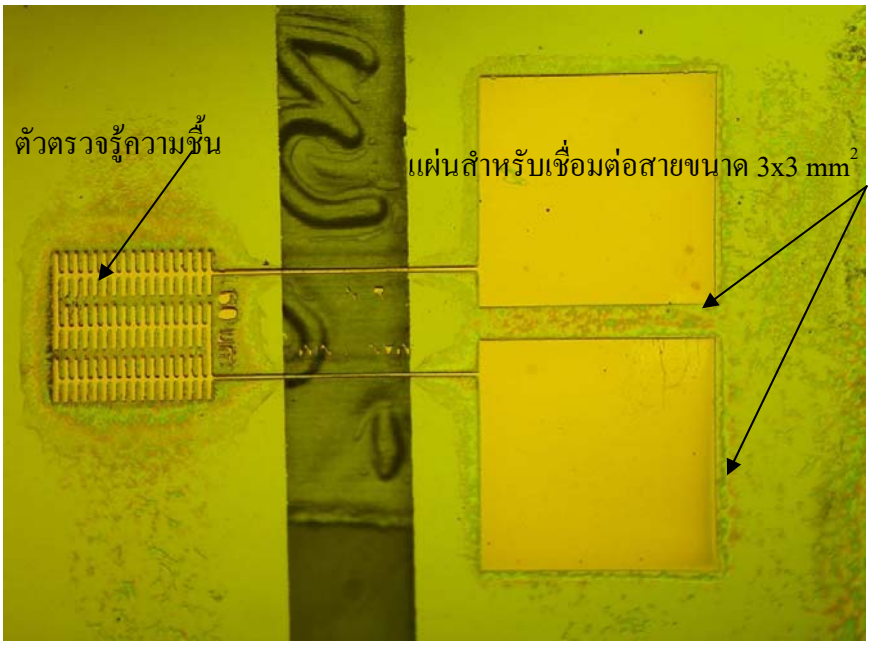


นำหน้ากากโลหะออกแล้วล้างสารไวแสงส่วนที่ไม่ถูกฉายแสงออก

รูปที่ 5.16 การสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นแบบระเหยเคลือบขั้วโลหะ
ผ่านหน้ากากโลหะ



รูปที่ 5.17 ตัวตรวจรู้ความชื้นที่สร้างจากการเคลือบขั้วโลหะผ่านหน้ากากโลหะ



รูปที่ 5.18 ตัวตรวจรู้ความชื้นที่สร้างจากการเคลือบโลหะผ่านหน้ากาก
แบบที่สามารถเชื่อมต่อสายโดยการบัดกรี

จากโครงสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นที่สร้างขึ้น ในขั้นตอนต่อไปต้องทำการปรับเทียบค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ความชื้น กับค่าความชื้นมาตรฐานของสารละลายเกลืออิ่มตัวค่าต่าง ๆ เพื่อหาค่าความไว และค่าความผิดพลาดในการวัดความชื้นของตัวตรวจรู้ความชื้นที่สร้างขึ้น แล้วจึงทดสอบผลตอบสนองทางเวลาต่อความชื้นของตัวตรวจรู้ โดยการป้อนความชื้นและอากาศแห้งแบบขั้นบันได เพื่อหาค่าผลตอบสนองเวลา ขาขึ้น และขาลง โดยรายละเอียดจะได้กล่าวในบทต่อไป

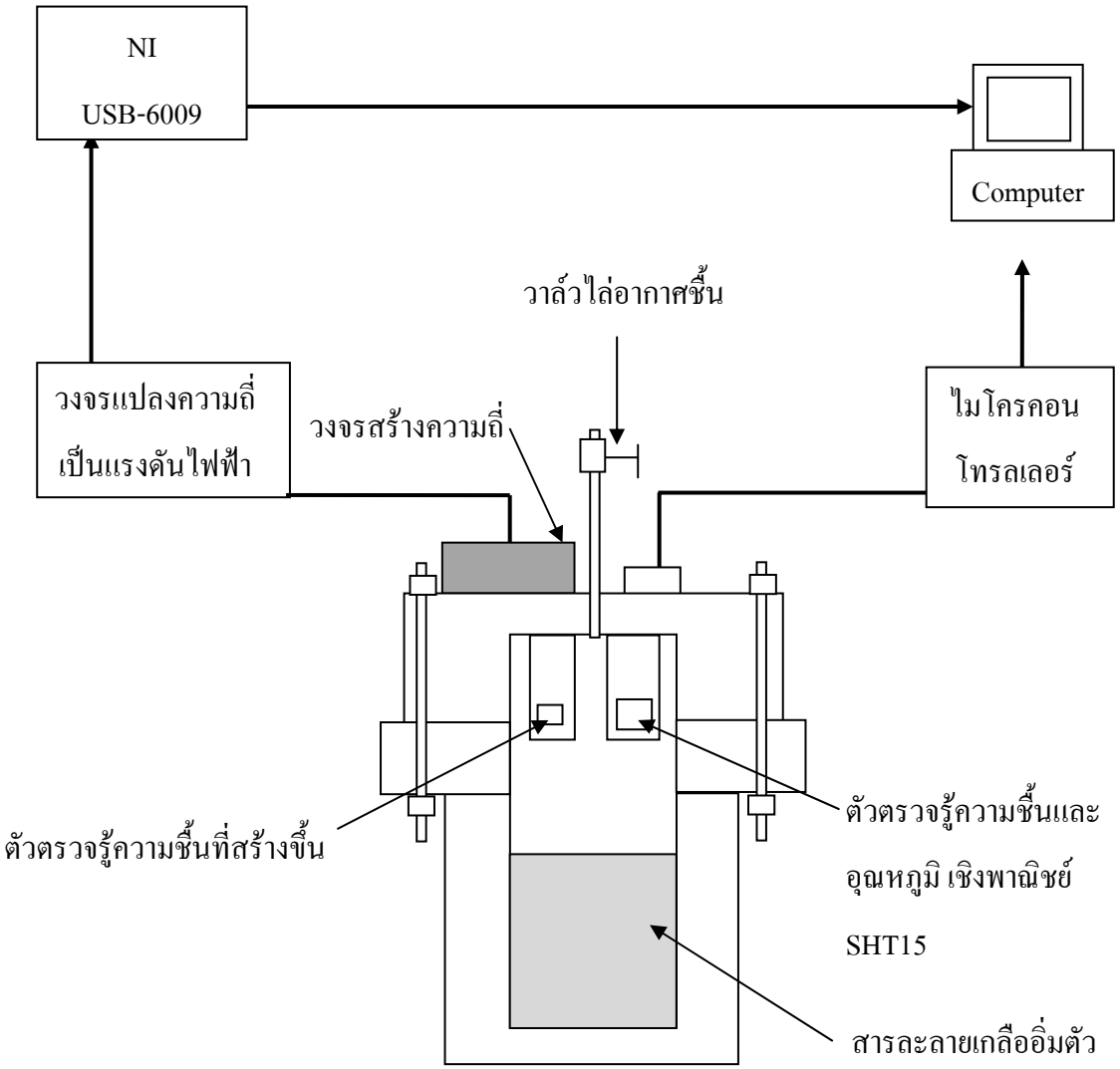
บทที่ 6
การทดสอบตัวตรวจรู้ความชื้น

การทดสอบตัวตรวจรู้ความชื้นที่สร้างขึ้น ประกอบด้วยการวัดผลตอบสนองในสภาวะอยู่ตัว (Static response) และผลตอบสนองทางพลวัต (Dynamic response) การวัดผลตอบสนองในสภาวะอยู่ตัวใช้เพื่อปรับเทียบตัวตรวจรู้ความชื้น กับความชื้นมาตรฐาน ซึ่งได้จากสารละลายเกลืออิ่มตัว อันเป็นคุณสมบัติเฉพาะของสารแต่ละชนิด ส่วนการวัดผลตอบสนองทางพลวัต หรือผลตอบสนองทางเวลา เพื่อทดสอบความเร็วในการตอบสนองของตัวตรวจรู้ต่อความชื้น ซึ่งป้อนให้กับตัวตวรจรู้ความชื้นแบบขั้นบันได โดยรายละเอียดมีดังนี้

6.1 การวัดผลตอบสนองในสภาวะอยู่ตัว

การวัดผลตอบสนองในสภาวะอยู่ตัวของตัวตรวจรู้ความชื้นมีจุดประสงค์เพื่อวัดผลการตอบสนองต่อความชื้นของตัวตรวจรู้ โดยปรับเทียบกับค่าความชื้นมาตรฐานซึ่งได้จากสารละลายเกลืออิ่มตัว เกลือแต่ละชนิดจะให้ค่าความชื้นที่ต่างกันไป และค่าของอุณหภูมิยังมีผลต่อค่าความชื้นของไอเกลืออิ่มตัวเหล่านี้ ดังนั้นจึงทำการปรับเทียบค่าความชื้นที่ค่าอุณหภูมิเดียวกัน โดยเลือกที่ค่าอุณภูมิห้องคือ 25 องศาเซลเซียส รายละเอียดค่าความชื้นสัมพัทธ์มาตรฐานจากสารละลายเกลืออิ่มตัวเป็นดังตารางที่ 6.1

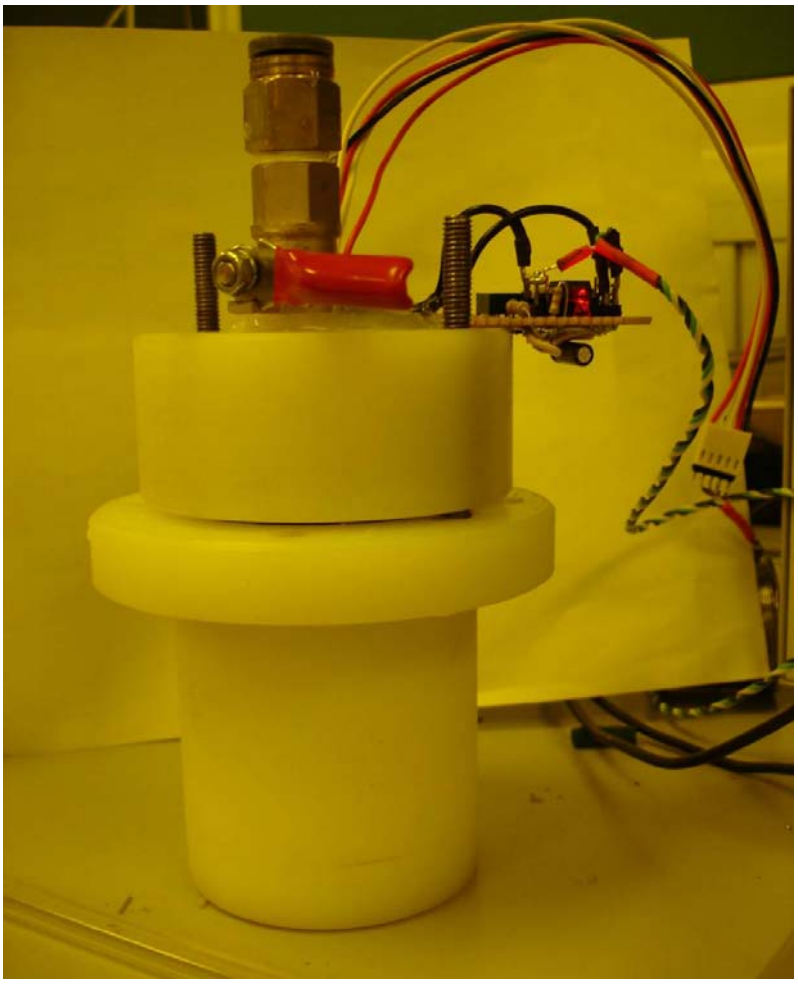
วิธีการปรับเทียบตัวตรวจรู้ด้วยความชื้นมาตรฐานจากสารละลายเกลืออิ่มตัว เริ่มจากการนำเกลือใส่ลงในภาชนะที่เป็นแก้วเช่น บีกเกอร์ เติมน้ำบริสุทธิ์ลงในภาชนะจนเกลือเปียก คนให้เกลือละลายในน้ำ เติมเกลือแล้วคนจนกระทั่งเกลือไม่สามารถละลายได้อีก จากนั้นนำบีกเกอร์ไปอุ่นเพื่อให้เกลือละลายพร้อมทั้งเติมเกลือจนกระทั่งไม่สามารถละลายได้อีก ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องจนสารละลายเกลือตกผลึก เทสารละลายเกลือที่ได้ลงในภาชนะปิดดังรูปที่ 6.1-6.2 แล้วนำตัวตรวจรู้ความชื้นบรรจุในภาชนะที่ปิดสนิท พร้อมกับตัวตรวจรู้ความชื้นอ้างอิง แล้วทิ้งไว้ประมาณ 6-12 ชั่วโมง ความชื้นภายในภาชนะจะมีค่าเท่ากับความชื้นของสารละลายเกลือนั้น ซึ่งจะแตกต่างกันขึ้นกับอุณหภูมิห้อง ซึ่งตรวจสอบได้จากตัวตรวจรู้อุณหภูมิ ขั้นตอนสุดท้ายจึงทำการวัดค่าความจุไฟฟ้าและต่อตัวตรวจรู้ความชื้นเข้ากับวงจรอะสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์แล้วทำการวัดความถี่และแรงดันไฟฟ้าจากวงจร ทำซ้ำวิธีการเดิมเพียงแต่เปลี่ยนชนิดของเกลือที่ให้ค่าความชื้นแตกต่างกันออกไป ณ อุณหภูมิคงที่



รูปที่ 6.1 โครงสร้างชุดทดสอบตัวตรวจรู้ความชื้นโดยใช้ความชื้น
มาตรฐานจากสารละลายเกลืออิ่ม

การวัดผลตอบสนองต่อความชื้นของตัวตรวจรู้อาจกระทำในรูปของการวัดค่าความจุไฟฟ้า หรือวัดในรูปความถี่ของสัญญาณเอาท์พุตที่สัมพันธ์กับความจุไฟฟ้า หรืออาจแปลงความถี่ที่เกิดขึ้นไปเป็นแรงดันไฟฟ้าอีกต่อหนึ่ง เพื่อให้สามารถนำข้อมูลเข้าสู่ระบบคอมพิวเตอร์ได้ การเปลี่ยนค่าความจุไฟฟ้าเป็นความถี่ไฟฟ้าทำได้โดยการใช้วงจร อะสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ (Astable multivibrator circuit) ซึ่งค่าความถี่ของสัญญาณเอาท์พุตจะแปรตามค่าของความจุไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ความชื้นดังรูปที่ 6.3 แล้วทำการจดบันทึกค่าความจุไฟฟ้าจากหน้าปัทม์ของเครื่องวัด

ความจุไฟฟ้า LCR มิเตอร์ HP รุ่น 4284A Precision LCR meter ส่วนการแปลงความถี่ไปเป็นแรงดันไฟฟ้าสามารถทำได้โดยใช้วงจรในรูปที่ 6.4 ซึ่งเป็นวงจรที่ใช้เปลี่ยนค่าความถี่ที่ได้จากวงจรอะสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์เป็นค่าแรงดันไฟฟ้า



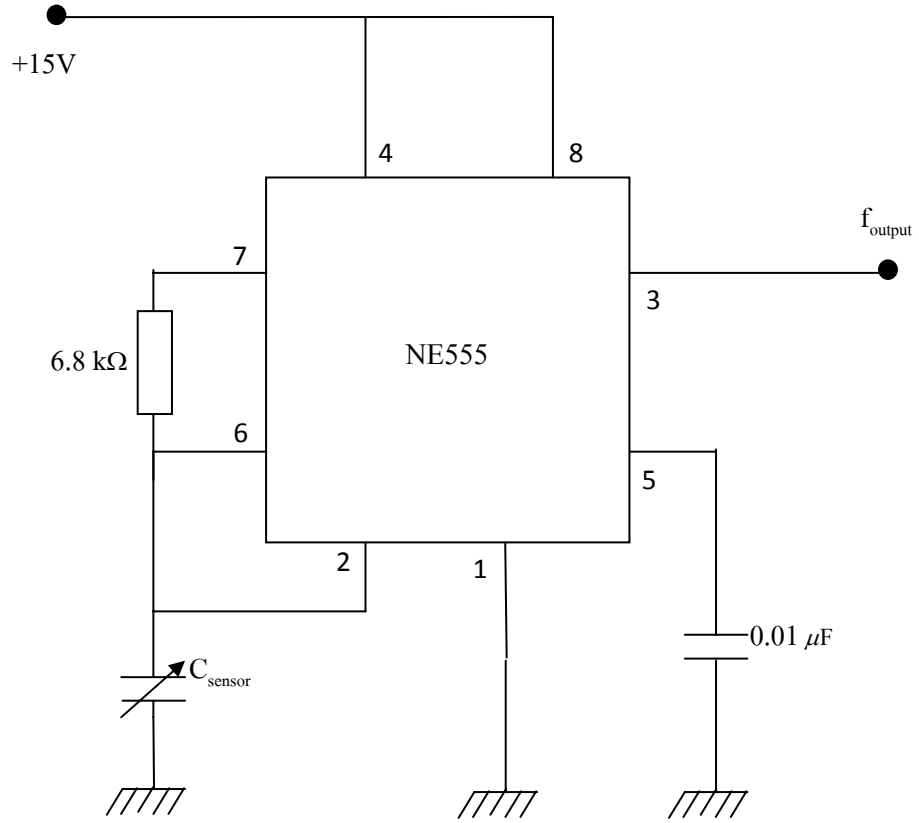
รูปที่ 6.2 ชุดทดสอบตัวตรวจรู้ความชื้นโดยใช้ความชื้นมาตรฐาน
จากสารละลายเกลืออิ่มตัว

ตารางที่ 6.1 ค่าความชื้นสัมพัทธ์ (%RH) ของสารละลายเกลืออิ่มตัวที่อุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิ (^{o}C)	Lithium Chloride (LiCl)	Potassium acetate (CH_3COOK)	Magnesium Chloride ($MgCl_2$)	Potassium carbonate (K_2CO_3)	Magnesium nitrate ($Mg(NO_3)_2$)
0	11.23 ±0.54		33.66 ±0.33	43.13 ±0.66	60.35 ±0.55
5	11.26 ±0.47		33.60 ±0.28	43.13 ±0.50	58.86 ±0.43
10	11.29 ±0.41		33.47 ±0.24	43.14 ±0.39	57.36 ±0.33
15	11.30 ±0.35	23.28 ±0.53	33.30 ±0.21	43.15 ±0.33	55.87 ±0.27
20	11.31 ±0.31	23.40 ±0.32	33.07 ±0.18	43.16 ±0.33	54.38 ±0.23
25	11.30 ±0.27	23.11 ±0.25	32.78 ±0.16	43.16 ±0.39	52.89 ±0.22
30	11.28 ±0.24	22.51 ±0.32	32.44 ±0.14	43.17 ±0.50	51.40 ±0.24
35	11.25 ±0.22	21.61 ±0.53	32.05 ±0.13		49.91 ±0.29
40	11.21 ±0.21		31.60 ±0.13		48.42 ±0.37
45	11.16 ±0.21		31.10 ±0.13		46.93 ±0.47
50	11.10 ±0.22		30.54 ±0.13		45.44 ±0.60
55	11.03 ±0.23		29.93 ±0.16		
60	10.95 ±0.26		29.26 ±0.18		
65	10.86 ±0.29		28.54 ±0.21		
70	10.75 ±0.33		27.77 ±0.25		
75	10.64 ±0.38		26.94 ±0.29		
80	10.51 ±0.44		26.05 ±0.34		
85	10.80 ±0.51		25.11 ±0.39		
90	10.23 ±0.59		24.12 ±0.46		
95	10.07 ±0.67		23.07 ±0.52		

ตารางที่ 6.1 ค่าความชื้นสัมพัทธ์ (%RH) ของสารละลายเกลืออิ่มตัวที่อุณหภูมิต่าง ๆ (ต่อ)

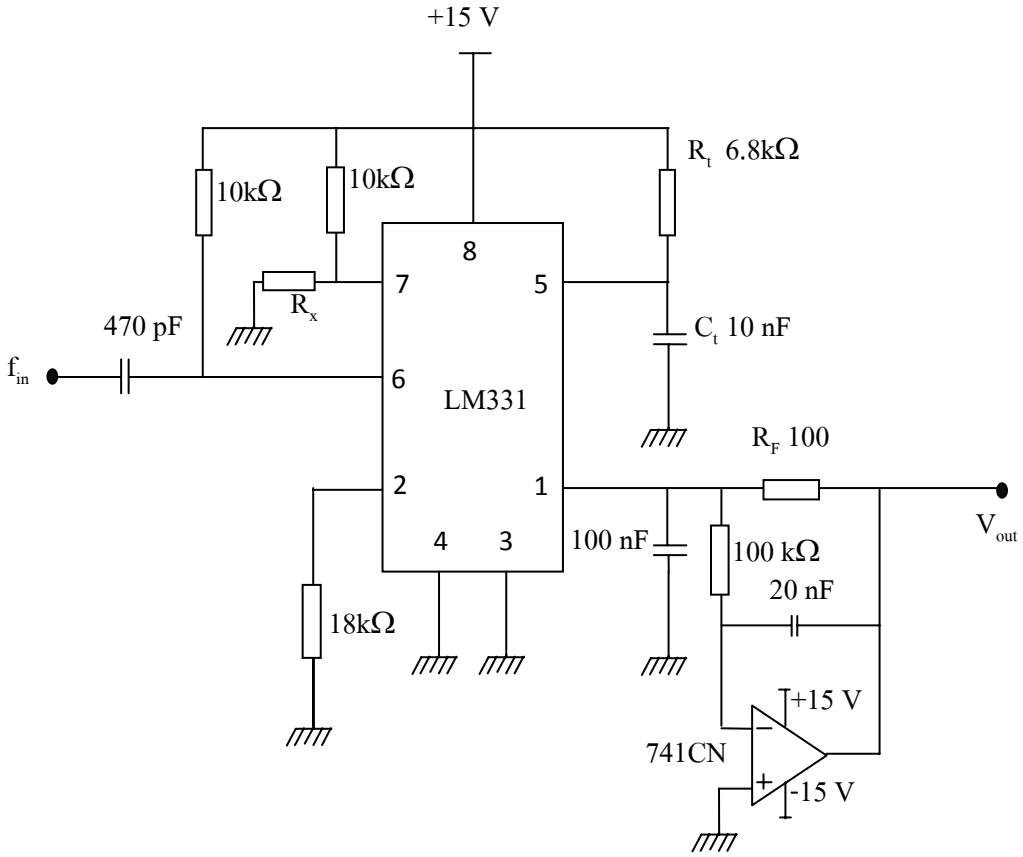
อุณหภูมิ (^{o}C)	Sodium chloride (NaCl)	Potassium Chloride (KCl)	Potassium Nitrate ($K_2(NO_3)_2$)	Potassium Sulfate (K_2SO_4)
0	75.51 ±0.34	88.61 ±0.53	96.33 ±2.90	98.77 ±1.10
5	75.65 ±0.27	87.67 ±0.45	96.27 ±2.10	98.48 ±0.91
10	75.67 ±0.22	86.77 ±0.39	95.96 ±1.40	98.18 ±0.76
15	75.61 ±0.18	85.92 ±0.33	95.41 ±0.96	97.89 ±0.63
20	75.47 ±0.14	85.11 ±0.29	94.62 ±0.66	97.59 ±0.53
25	75.29 ±0.12	84.34 ±0.26	93.58 ±0.55	97.30 ±0.45
30	75.09 ±0.11	83.62 ±0.25	92.31 ±0.60	97.00 ±0.40
35	74.87 ±0.12	82.95 ±0.25	90.79 ±0.83	96.71 ±0.38
40	74.68 ±0.13	82.32 ±0.25	89.03 ±1.20	96.41 ±0.38
45	74.52 ±0.16	81.74 ±0.28	87.03 ±1.80	96.12 ±0.40
50	74.43 ±0.19	81.20 ±0.31	84.78 ±2.50	95.82 ±0.45
55	74.41 ±0.24	80.70 ±0.35		
60	74.50 ±0.30	80.25 ±0.41		
65	74.71 ±0.37	79.85 ±0.48		
70	75.06 ±0.45	79.49 ±0.57		
75	75.58 ±0.55	79.17 ±0.66		
80	76.29 ±0.65	78.90 ±0.77		
85		78.68 ±0.89		
90		78.50 ±1.00		



รูปที่ 6.3 วงจรอะสเตเบิล มัลติไวเบรเตอร์ (Astable multivibrator circuit)

โครงสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นที่ออกแบบไว้มีค่าความจุไฟฟ้าประมาณ 30 pF หลังจากการสร้างจริง วัดค่าความจุไฟฟ้าได้ในช่วง 29.5-36.5 pF สำหรับความชื้นในช่วง 10-95% สำหรับผลตอบสนองในสภาวะอยู่ตัว เป็นดังรูปที่ 6.5 เมื่อแทนชุดข้อมูลด้วยสมการเส้นตรง โดยวิธีผลรวมค่าผิดพลาดกำลังสองเป็นดังรูปที่ 6.6 สามารถหาความไวจากความชันของสมการเส้นตรงได้เท่ากับ 83 fF/%RH หรือเมื่อเทียบกับค่าความจุไฟฟ้าที่ความชื้นสัมพัทธ์ 30% จะได้ความไวเท่ากับ 2,677 ppm/%RH สมการ (6-1) เป็นสมการเส้นตรงที่ดีที่สุด ซึ่งใช้แทนชุดข้อมูลความจุไฟฟ้าจากการวัดโดยมีค่าผลรวมความคลาดเคลื่อนกำลังสองเท่ากับ 0.9932

เมื่อแทนชุดข้อมูลด้วยสมการเส้นโค้งกำลังสอง โดยวิธีการผลรวมค่าผิดพลาดกำลังสองจะได้ดังรูปที่ 6.7 และหาความไวจากความชันเฉลี่ยของสมการเส้นโค้งได้เท่ากับ 83.6 fF/%RH หรือเมื่อเทียบกับค่าความจุไฟฟ้าที่ความชื้นสัมพัทธ์ 30% จะได้ความไวเฉลี่ยเท่ากับ 2,833 ppm/%RH สมการที่ (6-2) เป็นสมการเส้นโค้งที่ดีที่สุด ซึ่งใช้แทนชุดข้อมูลความจุไฟฟ้าจากการวัด โดยมีค่าผลรวมความคลาดเคลื่อนกำลังสองเท่ากับ 0.9929

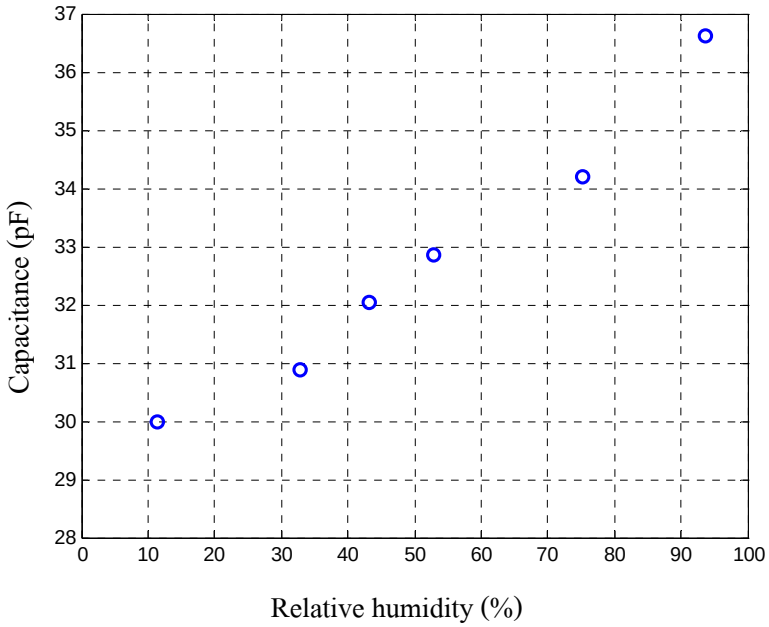


รูปที่ 6.4 วงจรแปลงความถี่เป็นแรงดันไฟฟ้าใช้ตัวกรองออปแอมป์แบบสองขั้ว
เพื่อเพิ่มความเร็วในการตอบสนองของวงจร

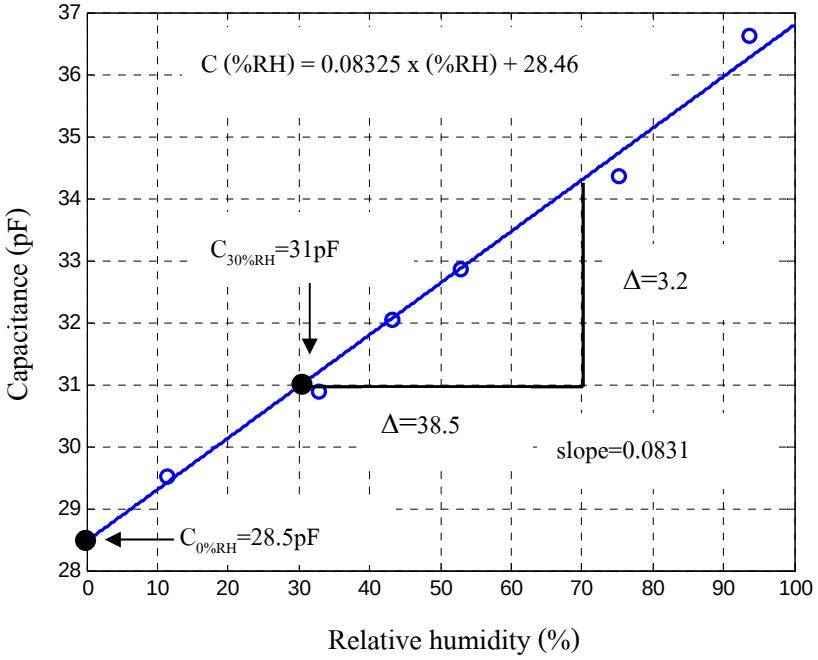
ในการใช้งานตัวตรวจรู้ความชื้น ค่าผลตอบสนองของเอาท์พุตจะอยู่ในรูปของความชื้นสัมพัทธ์ แทนที่จะเป็นค่าความจุไฟฟ้า ดังนั้นจึงวาดกราฟผลตอบสนองใหม่โดยการสลับแกนของกราฟดังรูปที่ 6.8 และ 6.9 สำหรับกรณีการแทนชุดข้อมูลด้วยสมการเส้นตรงและเส้นโค้งตามลำดับ การทำงานของเครื่องวัดความชื้นจะเริ่มจากการวัดค่าความจุไฟฟ้าจากตัวตรวจรู้แล้วแทนค่าลงในสมการแทนชุดข้อมูลดังสมการ (6-3) หรือ (6-4) แล้วจึงนำค่าที่ได้ไปแสดงผล

$$C\ (\%RH) = 0.08325 \times (\%RH) + 28.46 \qquad (6\text{-}1)$$

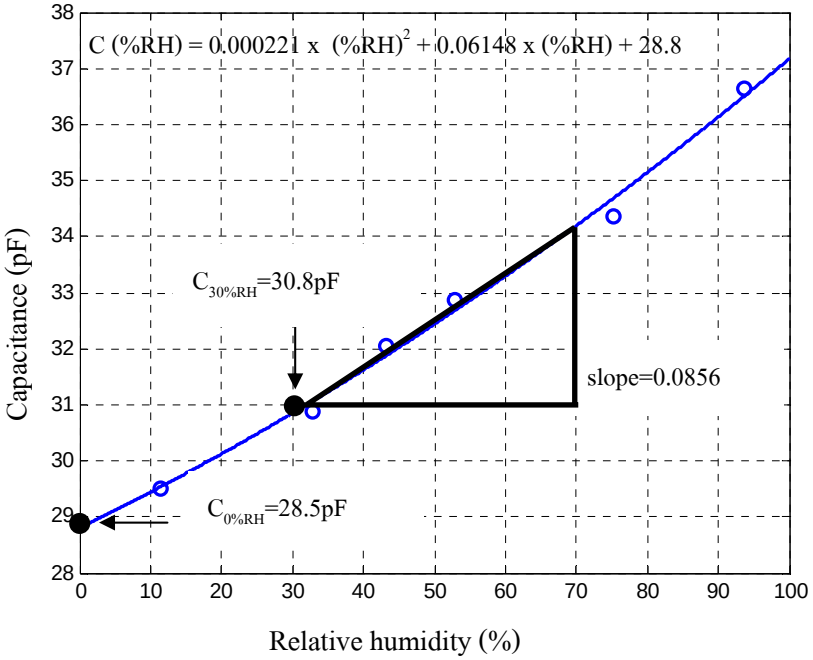
$$C\ (\%RH) = 0.000221 \times (\%RH)^2 + 0.06148 \times (\%RH) + 28.8 \qquad (6\text{-}2)$$



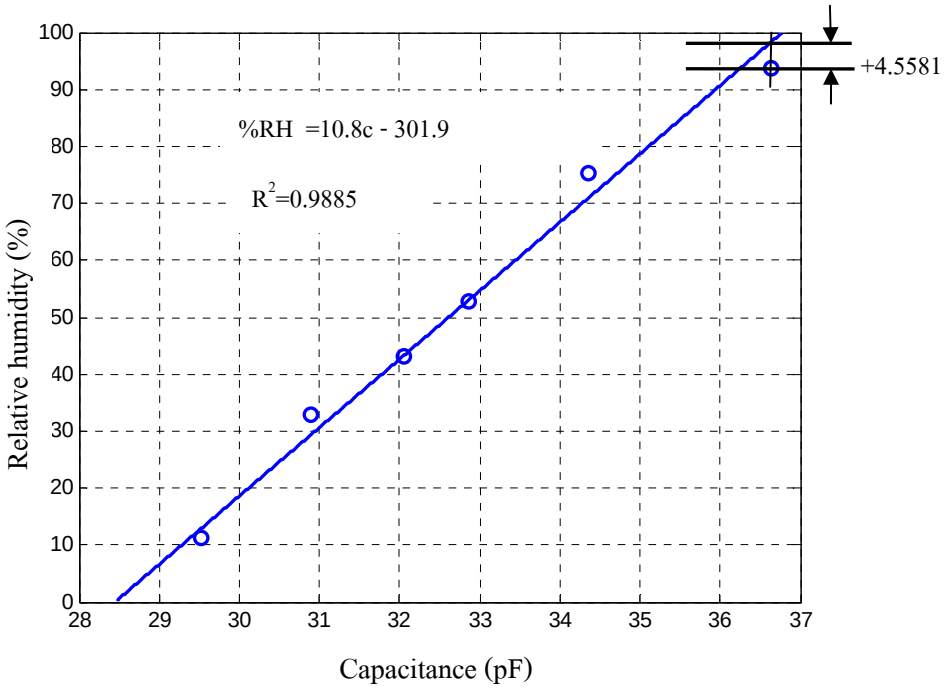
รูปที่ 6.5 ค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ความชื้นเทียบกับค่าไอเกลืออิ่มตัวมาตรฐาน



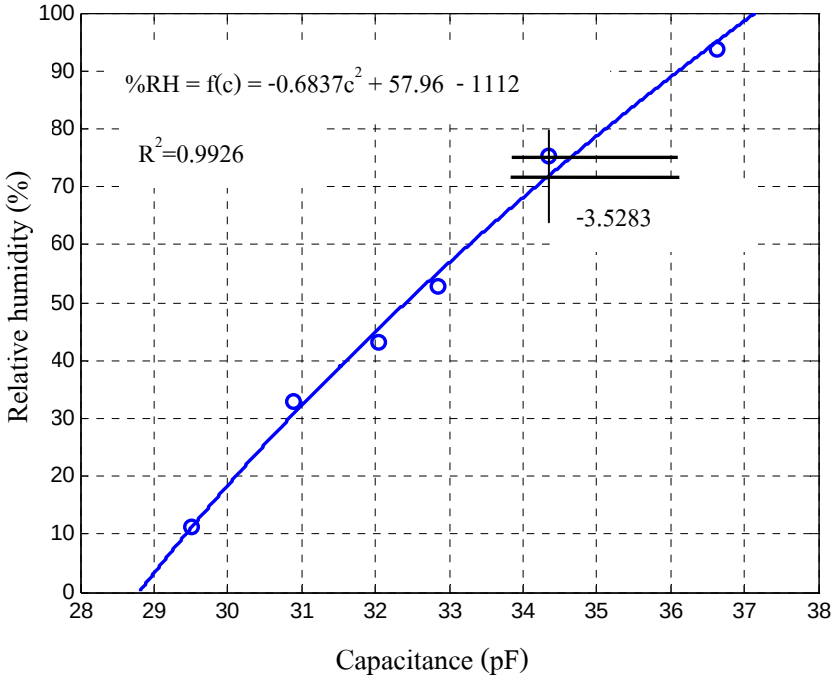
รูปที่ 6.6 ค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ความชื้นเทียบกับค่าไอเกลืออิ่มตัวเมื่อแทนชุดข้อมูลด้วยสมการเส้นตรง



รูปที่ 6.7 ค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจรู้ความชื้นเทียบกับค่าไอเกลืออิ่มตัวเมื่อแทนชุดข้อมูลด้วยสมการเส้นโค้งกำลังสอง



รูปที่ 6.8 ค่าความชื้นที่ได้จากการใช้ชุดสมการเส้นตรงที่สร้างขึ้นเทียบกับค่าความชื้นจริงเพื่อใช้หาความผิดพลาดของตัวตรวจรู้ความชื้น



รูปที่ 6.9 ค่าความชื้นที่ได้จากการใช้ชุดสมการเส้นโค้งกำลังสองที่สร้างขึ้นเทียบกับค่าความชื้นจริงเพื่อใช้หาความผิดพลาดของตัวตรวจรู้ความชื้น

$$\%RH = f(c) = 10.8c - 301.9 \quad (6\text{-}3)$$

$$\%RH = f(c) = -0.6837c^2 + 57.96 - 1112 \quad (6\text{-}4)$$

ตารางที่ 6.2 ค่าความคลาดเคลื่อนของตัวตรวจรู้ความชื้นเมื่อแทนด้วยสมการรูปแบบต่างกัน

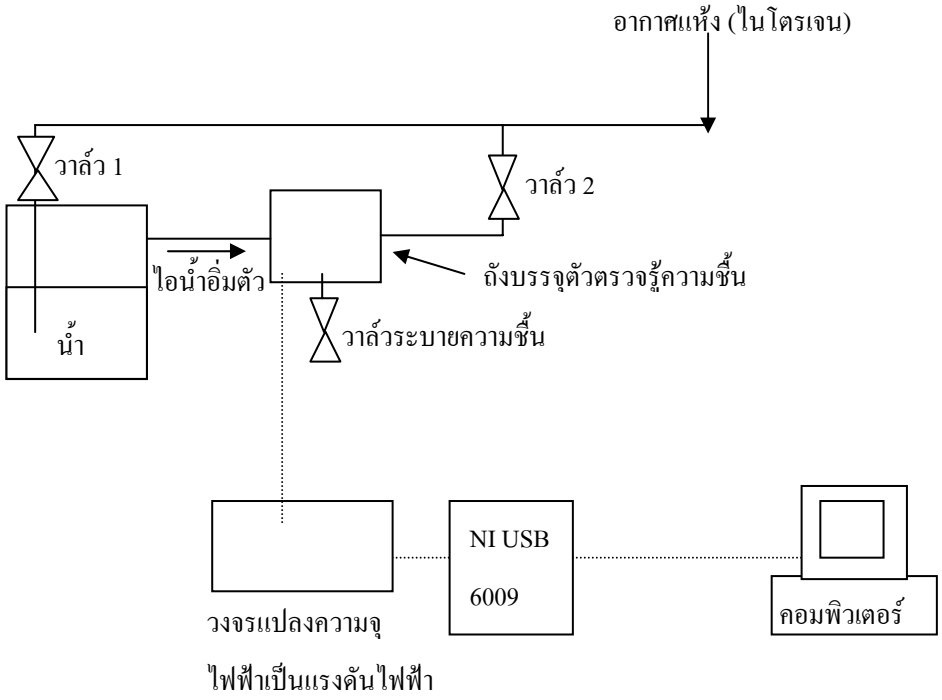
	คาวมชื้น (%RH)	93.58	75.29	52.89	43.16	32.78	11.307
ความคลาดเคลื่อนของความชื้น (%RH)	สมการเส้นตรง	+4.5581	-4.5392	-0.0371	-0.0369	-3.5908	+1.4257
	สมการกำลังสอง	1.3705	-3.5283	2.2274	2.2804	-2.1563	-0.0513

ความคลาดเคลื่อนจากการใช้สมการ (6-3) หรือ (6-4) ในการแสดงผลการวัดเมื่อเทียบกับความชื้นมาตรฐานจากสารละลายเกลืออิ่มตัวแสดงไว้ในตารางที่ 6.2 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าตัวตรวจรู้ความชื้นที่สร้างขึ้นมีความแม่น (accuracy) ในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ ±5% เมื่อได้ผลตอบสนองของตัวตรวจรู้ความชื้นในสถานะอยู่ตัว และทำการปรับเทียบกับความชื้นจากสารละลายเกลืออิ่มตัวมาตรฐานแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการวัดผลตอบสนองทางเวลา โดยการป้อนความชื้นแบบขั้นบันไดให้กับตัวตรวจรู้ความชื้น ซึ่งจะวัดเวลาเมื่อตัวตรวจรู้มีขนาดของการตอบสนองที่ 10% จนถึง 90% จะได้ ผลการตอบสนองเป็นแรงดันไฟฟ้าเทียบกับเวลา โดยใช้วงจรที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น

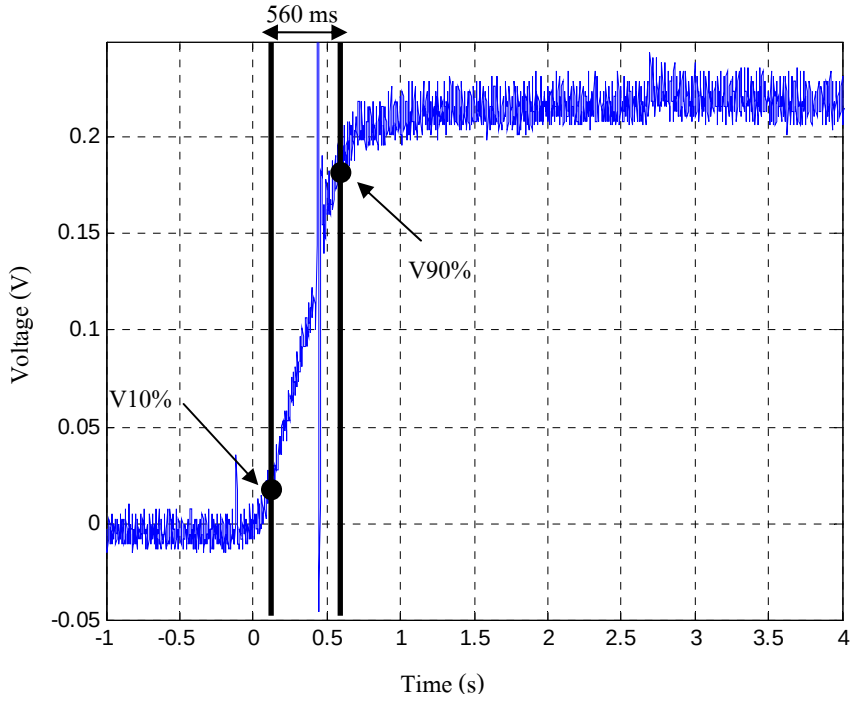
6.2 การวัดผลตอบสนองทางเวลา

เมื่อทำการวัด และปรับเทียบตัวตรวจรู้ความชื้นในสภาวะอยู่ตัวแล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นการวัดผลตอบสนองทางเวลาของตัวตรวจรู้ความชื้น โดยการป้อนความชื้นแบบขั้นบันได และเก็บข้อมูลผ่านคอมพิวเตอร์ โดยใช้โปรแกรม LabVIEW มีแผนภาพการทำงานดังรูปที่ 6.10 การทำงานของชุดทดสอบเริ่มจากการสร้างไอน้ำอิ่มตัว โดยการบรรจุน้ำในภาชนะปิดและอุ่นให้ร้อนประมาณ 40 องศาเซลเซียส โดยมีวาล์ว 1 เป็นตัวกำหนดการไหลของไอน้ำเข้าสู่ถังบรรจุตัวตรวจรู้ และวาล์ว 2 ซึ่งมีสถานะตรงกันข้ามกับวาล์ว 1 เสมอ เป็นตัวกำหนดการไล่ความชื้นออกจากถังบรรจุตัวตรวจรู้ ในสถานะเริ่มต้นจะป้อนอากาศแห้งให้กับถังบรรจุตัวตรวจรู้ความชื้น โดยเปิดวาล์ว 2 และ ปิดวาล์ว 1 เพื่อไล่ความชื้นจนกระทั่งเหลือความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 20% จึงปิดวาล์วทั้งสอง แล้วเริ่มบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากวงจร ซึ่งจะมีค่าคงที่ จากนั้นป้อนความชื้นโดยเปิดวาล์ว 1 และปิดวาล์ว 2 ทำให้อากาศแห้งเข้าไปผสมกับไอน้ำอิ่มตัว ซึ่งได้ปรับอัตราการไหลให้ได้ความชื้นสัมพัทธ์ 80% ไว้แล้ว ความชื้นจะไหลเข้าสู่ถังบรรจุตัวตรวจรู้ความชื้น แล้วผ่านออกไปทางวาล์วระบายทำให้ความชื้นสัมพัทธ์มีค่าคงที่เท่ากับ 80% ในขั้นตอนนี้ต้องบันทึกค่าแรงดันไฟฟ้าด้วยคอมพิวเตอร์ตลอด ขั้นตอนต่อไปเป็นการทดสอบการคายความชื้น โดยเป็นขั้นตอนที่ต่อเนื่องกัน ในขั้นตอนนี้ จะหยุดป้อนอากาศชื้นและป้อนอากาศแห้งเข้าไปแทนโดยปิดวาล์ว 1 และเปิดวาล์ว 2 ทำให้อากาศแห้งไหลเข้าสู่ถังบรรจุตัวตรวจรู้ ทำให้ตัวตรวจรู้ความชื้นคายความชื้นออกมา จากการการทดลองได้ผลตอบสนองในการดูดความชื้นดังรูปที่ 6.12 ซึ่งมีแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ 0.225 โวลต์ ผลตอบสนองที่ 10% เท่ากับ 0.0225 โวลต์ ที่เวลา 0.14 วินาที และผลตอบสนองที่ 90% เท่ากับ 0.2025 โวลต์ ที่เวลา 0.7 วินาที คิดเป็นความเร็วการตอบสนอง 560 ms ส่วนในรูปที่ 6.13 แสดงการคายความชื้นของตัวตรวจรู้ โดยใช้เวลาในการคายความชื้นเท่ากับ 1 วินาที จากผลการทดลองพบว่า การตอบสนองของตัวตรวจรู้ความชื้นทั้งการดูดความชื้นและคายความชื้น อยู่ในเกณฑ์ที่เร็วมาก

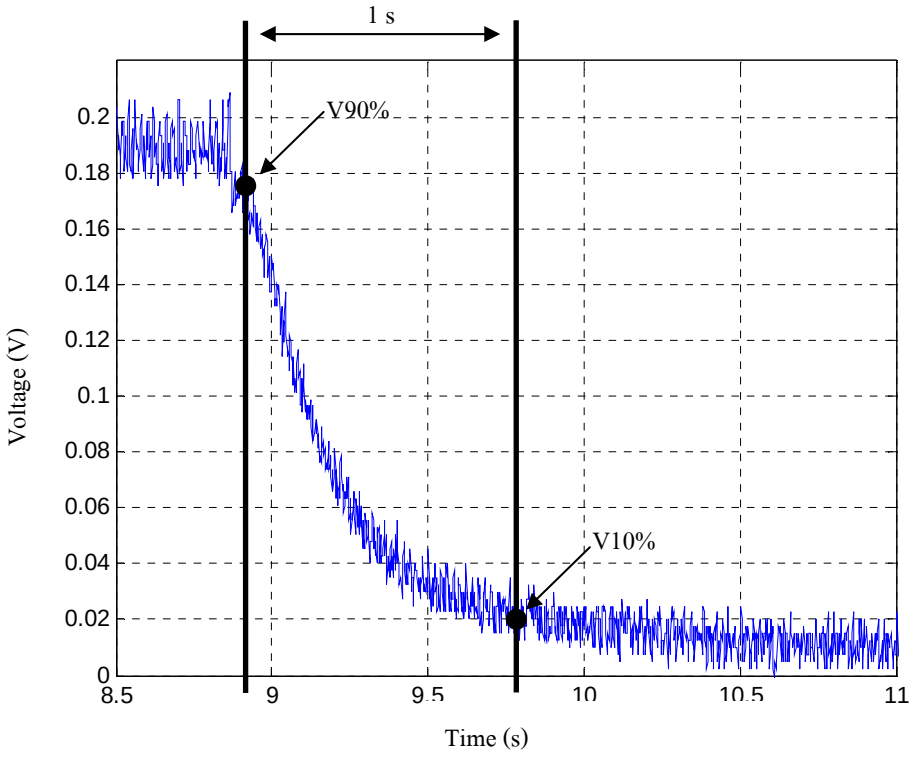
เมื่อนำผลตอบสนองที่ได้ ทั้งเวลาในการดูดความชื้น และคายความชื้น วาดกราฟเพื่อเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองทาคณิตศาสตร์ที่ได้สร้างขึ้นในบทที่ 3 ขนาดของซี่ตัวตรจรู้ความชื้นที่ออกไว้มีขนาดเท่ากับ 60 μm แต่ขนาดที่สร้างได้จริงวัดได้เท่ากับ 51 μm และใช้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของความชื้นเข้าสู่สารไวแสง SU-8 เท่ากับ 400 μm^2 พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถอธิบายผลตอบสนองทางพลวัตได้ค่อนข้างดีดังรูปที่ 6.14 และ6.15



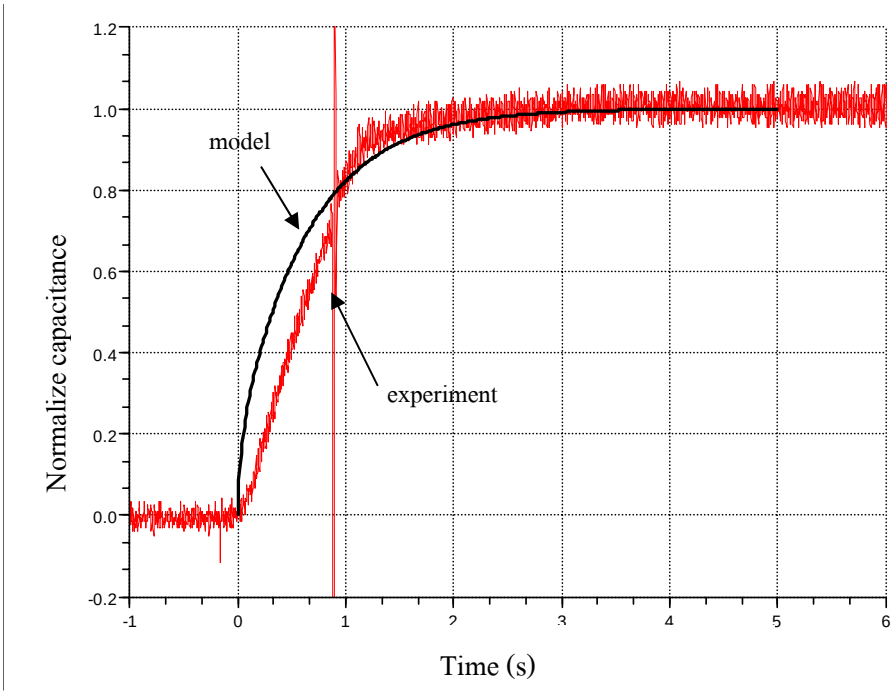
รูปที่ 6.10 ชุดทดสอบผลตอบสนองทางเวลาของตัวตรวจรู้ความชื้น



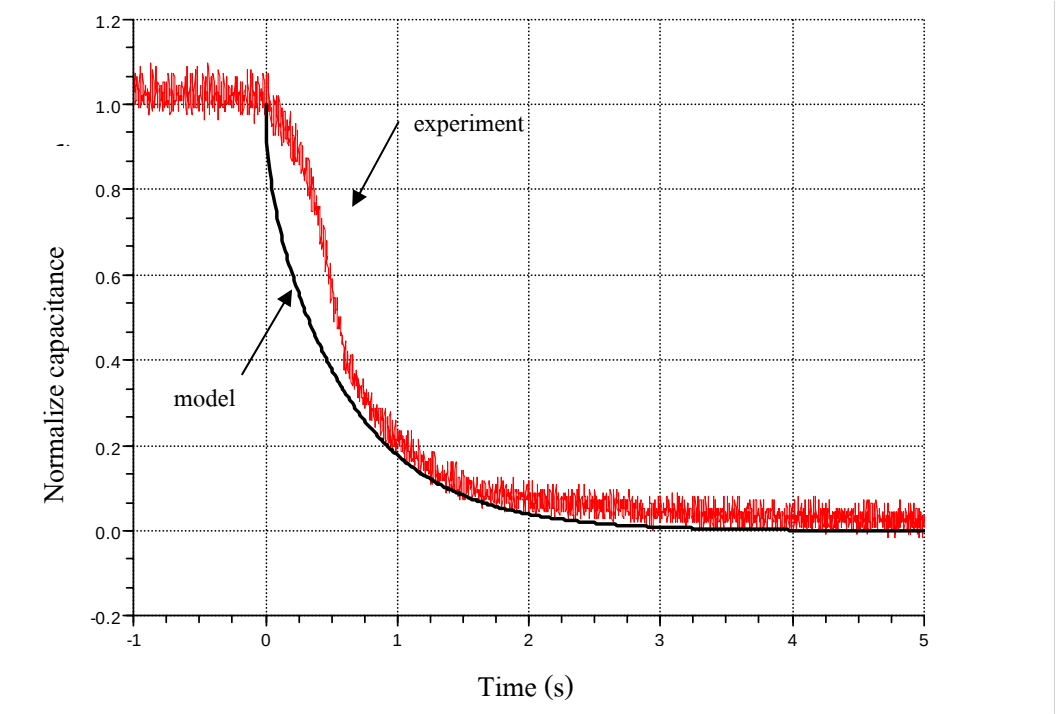
รูปที่ 6.11 ผลตอบสนองในการดูดซึมความชื้นเมื่อป้อนความชื้นแบบขั้นบันได



รูปที่ 6.12 ผลตอบสนองในการคายความชื้นเมื่อป้อนอากาศแห้งแบบขั้นบันได



รูปที่ 6.13 ผลตอบสนองในการดูดความชื้นของตัวตรวจรู้เทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์



รูปที่ 6.14 ผลตอบสนองในการคายความชื้นของตัวตรวจรู้เทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

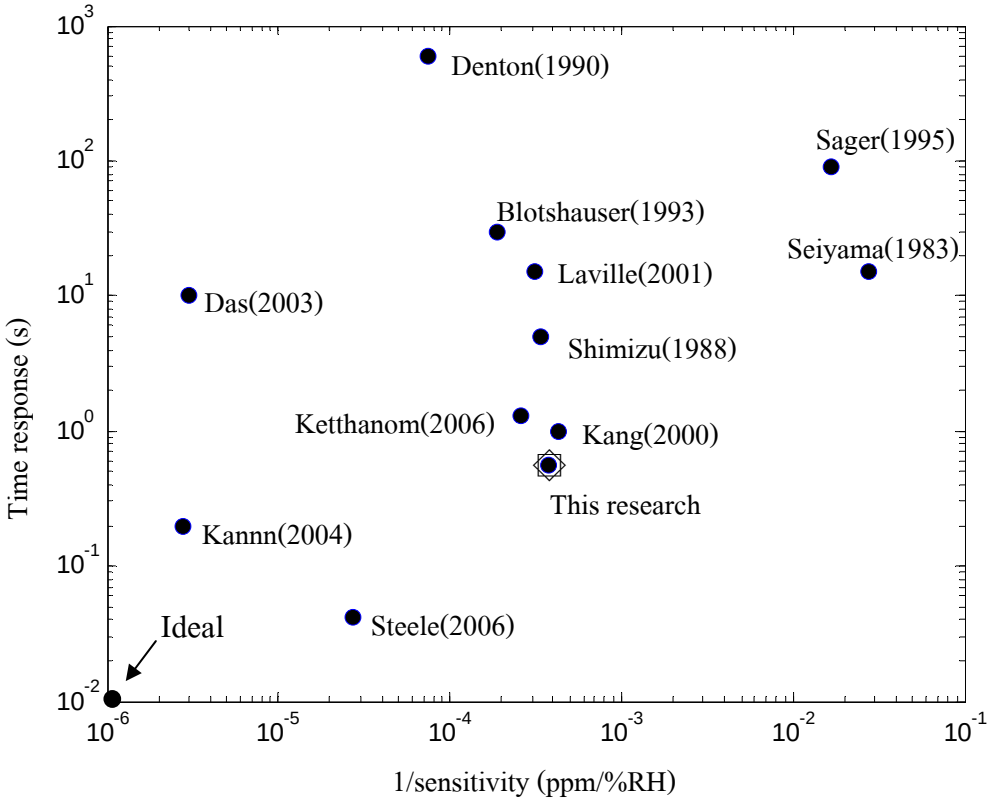
บทที่ 7

สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

7.1 บทสรุปงานวิจัย

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ นำเสนอการออกแบบ และสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นแบบตัวเก็บประจุที่มีคุณสมบัติในการตอบสนองต่อความชื้นเร็ว เนื่องจากให้ผลตอบสนองเป็นเชิงเส้น สร้างได้ง่าย และมีความไวสูง ในการออกแบบโครงสร้างของตัวตรวจรู้ สามารถใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อจำลองผลการตอบสนองต่อความชื้นของตัวตรวจรู้ ที่มีโครงสร้างต่างกัน ได้แก่ โครงสร้างแบบขั้วไฟฟ้ามีรูพรุน แบบสารไวความชื้นเป็นทรงกระบอก แบบทรงลูกบาศก์ และแบบอิเล็กโทรดซี่ยาว โครงสร้างที่มีความเหมาะสมสำหรับสร้างเป็นตัวตรวจรู้ความชื้นความเร็วสูงคือ โครงสร้างแบบสารไวความชื้นเป็นซี่ยาว และปิดทับด้วยอิเล็กโทรดโลหะที่มีลักษณะคล้ายก้างปลาเชื่อมต่อกันกับจุดเชื่อมต่อไปยังวงจรภายนอก ความไวของตัวตรวจรู้ความชื้นโครงสร้างนี้ สามารถควบคุมได้ด้วยการแปรค่าความหนาของชั้นวัสดุไวความชื้น ชั้นวัสดุไวความชื้นที่บางจะช่วยให้ตัวตรวจรู้ความชื้นมีความไวสูง ส่วนความเร็วในการตอบสนองจะขึ้นกับขนาดความกว้างของซี่อิเล็กโทรด กล่าวคือ มีค่าแปรผันตรงกับขนาดความกว้างของซี่สารไวความชื้นยกกำลังสอง เมื่อซี่ของสารไวความชื้นมีขนาดความกว้างลดลง เวลาในการตอบสนองจะลดลงเช่นเดียวกัน ในขั้นตอนการสร้างตัวตรวจรู้ สามารถสร้างลวดลายของสารไวความชื้น และอิเล็กโทรดโลหะ โดยการฉายรังสีอัลตราไวโอเลตผ่านหน้ากากโลหะ ซึ่งมีลวดลายเป็นช่องว่างตามรูปร่างของอิเล็กโทรด เพื่อให้เกิดลวดลายของสารไวความชื้นที่เป็นไดอิเล็กทริก แล้วจึงระเหยไอโลหะให้ปิดทับบนสารไวความชื้นที่แข็งตัวจากการฉายแสง ทำให้เกิดโครงสร้างอิเล็กโทรดไวความชื้นที่มีรูปร่างเหมือนกับช่องว่างในหน้ากากโลหะ หน้ากากโลหะที่ใช้สร้างอิเล็กโทรดไวความชื้นมีความหนา 250 μm สร้างโดยกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์เนื่องจากมีโครงสร้างที่สูงเมื่อเทียบกับความกว้างของลวดลาย หน้ากากโลหะมีอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างประมาณ 5 เท่า หน้ากากโลหะที่ใช้สร้างตัวตรวจรู้ความชื้นแล้ว สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก การทดสอบคุณสมบัติของตัวตรวจรู้ความชื้นที่สร้างขึ้น แบ่งเป็นการทดสอบผลตอบสนองต่อความชื้นในสถานะอยู่ตัวเพื่อศึกษาค่าความไว และค่าความผิดพลาดจากการวัดความชื้น โดยการปรับเทียบตัวตรวจรู้กับความชื้น โดยใช้ความชื้นค่ามาตรฐานจากสารละลายเกลืออิ่มตัว จากการทดสอบคุณลักษณะของตัวตรวจรู้ความชื้นที่มีขนาดความกว้างของซี่สารไวความชื้น 51 μm พบว่าตัวตรวจรู้ความชื้น

มีความไวเท่ากับ 83 fF/%RH หรือเท่ากับ 2677 ppm/%RH เมื่อเทียบกับค่าความชื้นสัมพัทธ์ 30% ซึ่งมีค่าเท่ากับ 31 pF ค่าความผิดพลาดในการวัดความชื้นสูงสุดเท่ากับ +4.55% และ -3.5283% เมื่อแทนชุดข้อมูลด้วยสมการเส้นตรงและสมการกำลังสองตามลำดับ และสามารถสรุปได้ว่าตัวตรวจรู้ความชื้นมีความแม่น ±5%RH ผลตอบสนองทางเวลาในการดูดความชื้นเท่ากับ 0.56 วินาที และเวลาในการคายความชื้น 1 วินาที ซึ่งเป็นผลตอบสนองที่เร็ว เมื่อนำค่าความไว และผลตอบสนองทางเวลาของตัวตรวจรู้ความชื้นในงานวิจัยนี้ เทียบกับตัวตรวจรู้ที่มีผู้สร้างไว้จากอดีตจนถึงปัจจุบันดังรูปที่ 7.1 กราฟในรูปมีแกนนอนแสดงค่าส่วนกลับของความไว ของตัวตรวจรู้ ซึ่งหากมีค่าเข้าใกล้ศูนย์จะบ่งชี้ว่าตัวตรวจรู้นั้น ๆ มีความไวสูง ส่วนในแกนตั้งแสดงเวลาการตอบสนองต่อความชื้นอินพุตแบบขั้นบันไดซึ่งหากมีค่าใกล้ศูนย์ จะบ่งชี้ว่าตัวตรจรู้นั้น ๆ มีความเร็วสูง โดยในอนาคตถ้าสามารถสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นที่มีความกว้างของซี่ไวความชื้นลดลงจะช่วยให้ตัวตรวจรู้ความชื้นที่สร้างขึ้นให้ผลตอบสนองเร็วขึ้นได้



รูปที่ 7.1 กราฟเปรียบเทียบผลตอบสนองทางเวลาและความไวของตัวตรวจรู้ความชื้นกับตัวตรวจรู้ความชื้นที่มีผู้สร้างขึ้นตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน

7.2 ข้อเสนอแนะ

ในการสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นความเร็ว และความไวสูง ควรลดความหนาของชั้นวัสดุไวความชื้นลง และทำให้ซี่อิเล็กโทรดมีความกว้างน้อยที่สุด เมื่อความหนาของชั้นวัสดุไวความชื้นลดลง ความต้านทานทางไฟฟ้าของโครงสร้างจะลดต่ำลงด้วย ซึ่งอาจทำให้สามารถตรวจรู้ความชื้นโดยการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงความต้านทาน ตามการแปรผันความชื้นอินพุตได้ หากสามารถทำเช่นนี้ได้ จะทำให้ตัวตรวจรู้มีการทำงานแบบเครื่องมือวัดอันดับศูนย์ ซึ่งจะมีการตอบสนองทางเวลาที่เร็วกว่าการตรวจรู้แบบตัวก็บประจุ

เมื่อชั้นไวความชื้นมีความหนาลดลงมาก ๆ จะส่งผลให้ค่าความต้านทานของชั้นไวความชื้นมีค่าลดต่ำลงมากด้วย ทำให้ตัวตรวจรู้ความชื้นแบบตัวเก็บประจุเสมือนว่ามีค่าความต้านทานที่แปรเปลี่ยนไปตามความชื้นต่อขนานอยู่ ทำให้วงจรอะสเตเบิลมัลติไวเบรเตอร์ ไม่สามารถใช้สร้างความถี่จากตัวตรวจรู้แบบตัวเก็บประจุได้ จึงเป็นข้อจำกัดหนึ่งในการสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นให้มีความไวสูง ในการพัฒนางานวิจัยในขั้นต่อไป จึงจำเป็นต้องมีวงจรที่สามารถใช้ตรวจจับค่าความจุไฟฟ้า และค่าความต้านทานที่แปรเปลี่ยนไปพร้อมกัน วงจรที่แนะนำ คือ วงจรซึ่งใช้หลักการวัดการเลื่อนเฟส และการเปลี่ยนแปลงของแอมปลิจูดของสัญญาณไซน์ ซึ่งเป็นผลมาจากค่าความจุไฟฟ้า และค่าความต้านทานที่เปลี่ยนไป ตามลำดับ จากนั้นนำสัญญาณที่ได้เปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุต โดยใช้วงจรขยายผลต่าง จากการทดสอบเบื้องต้นพบว่า วงจรนี้ช่วยให้ผลตอบสนองของตัวตรวจรู้มีค่าความไวสูงขึ้น เมื่อนำผลตอบสนองที่ได้ไปเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่สร้างขึ้นโดยวิธีการ Crank-Nicloson พบว่าสามารถทำนายผลตอบสนองทางเวลาได้ดี และเมื่อนำแบบจำลองเดียวกันนี้ ทำนายผลตอบสนองของตัวตรวจรู้ความชื้นเมื่อมีค่าความกว้างของซี่ลดลง เหลือ 25 μm 10 μm 5 μm และ 3 μm จะได้เวลาในการตอบสนองของตัวตรวจรู้ความชื้นเป็น 450 ms 75 ms 17.6 ms และ 6.312 ms ตามลำดับ ตัวตรวจรู้ความชื้นโครงสร้างนี้จึงเหมาะที่จะมีการพัฒนาให้ตอบสนองเร็วขึ้นด้วยเทคโนโลยีของกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ต่อไป

รายการอ้างอิง

Boisen, A., Thaysen, J., Jensenius, H., and Hansen, O. (2000). Environmental sensors based on micromachined cantilevers with integrated read-out. **Ultramicroscopy**. 82 (1-4) : 11-16.

Boltshauser, T., Leme, C.A., and Baltes, H. (1993). High sensitivity CMOS humidity sensors with on-chip absolute capacitance measurement system. **Sensors and Actuators B: Chemical.** 15 (1-3): 75-80. 171

Caliendo, C., Verona, E., D'Amico, A., Furlani, A., Iucci, G., and Russo, M.V. (1993). Surface acoustic wave humidity sensor. **Sensors and Actuators B: Chamical**. 16 (1-3): 288-292.

Caliendo, C., Verona, E., D'Amico, A., Furlani, A., Iucci, G., and Russo, M.V. (1994). A new surface acoustic wave humidity sensor based on a polyethynylfluorenol membrane. **Sensors and Actuators B: Chemical**. 18 (1-3):82-84.

Chomnawang, N., Cheirsirikul, S., Pengchan, W., Niemchareon, S., and Ketthanom, Ch. (2005). Application of RF Sputtered Polyimide Film in Capacitive Humidity Sensing. **Proceedings of the 19th European conference on solidstate transducers (Eurosensors XIX)**. 2(W) : (pp. WPb71). Spain, Barcelona.

Crank, J. (1975). The Mathematics of Diffusion. London**: Oxford University Press**, Ely House.

Das, J., Hossain, S.M., Chakraborty, S., and Saha, H. (2001). Role of parasitics in humidity sensing by porous silicon**. Sensors and Actuators A: Physical**. 94 (12):4452.

Erson, R. C., Muller, R. S., and Tobias, C. W. (1990). Investigations of porous silicon for vapor sensing. **Sensors and Actuators A: Physical**. 23(1-3): 835-839.

Fürjes, P., Kovács, A., DücsX, C.s., Ádám, M., Müller, B., and Mescheder, U. (2003). Porous silicon-based humidity sensor with interdigitated electrodes and internal heaters. **Sensors and Actuators B: Chemical**. 95 (1-3): 140-144.

Gerlach, G., and Sager, K. (1994). A piezoresistive humidity sensor. **Sensors and Actuators A: Physical**. 43 (1-3): 181-184.

Grange, H., Bieth, C., Boucher, H., and Delapiere, G. (1987). A capacitive humidity sensor with every fast response time and very low hysteresis. **Sensors and Actuators**. 12 (3): 291-296.

Harrey, P.M., Ramsey, B.J., Evans, P.S.A., and Harrison, D.J. (2002). Capacitive-type humidity sensors fabricated using the offset lithographic printing process. **Sensors and Actuators B: Chemical**. 87 (2) : 226-232.

Hijikagawa, M., Miyoshi, S., Sugihara, T. and Jinda, A. (1983). A thin-film resistance humidity sensor. **Sensors and Actuators**. 4 : 307-315.

Jahori, H. (2003). Development of MEMS Sensors for Measurements of Pressure, Relative Humidity, and Temperture. **Master Thesis, Faculty of Mechanical Engineering Worcester Polytechnic Institute**, Worcester, United State of America.

Kalkan, A. K., Handong, Li., O'Brien, C. J., and Fonash, S. J. (2004). A rapid response, high-sensitivity nanophase humidity sensor for respiratory monitoring. **IEEE Electron Device Letters**. 25 (8): 526 – 528.

Kang, U., and Wise, K.D.(2000). A high-speed capacitive humidity sensor with on-chip thermal reset. **IEEE Tran. Electron Devices**. 10 (2) : 702-710.

Ketthanom, Ch., Chomnawang, N., Klaitabtim, D., and Tuantranont, A. (2004). Capacitance simulation of interdigitated metallic towers for humidity sensing 173 **applications. Proceedings of the 27th Electrical Engineering Conference**. 2: (pp.297-300). Thailand, Khonkaen.

Kupta, B.D., and Ratnanjali. (2001). A novel probe for a fiber optic humidity sensor. **Sensors and Actuators B: Chemical**. 80 (2): 132-135.

Kuroiwa, T., Miyagishi, T., Ito, A., Matsuguchi, M., Sadaoka, Y., and Sakai, Y. (1995). A thin-film polysulfone-based capacitive-type relative-humidity sensor. **Sensors and Actuators B: Chemical.** 25 (1-3): 692-695.

Laville, C.,Deletage, J.Y., and Pellet, C. (2001). Humidity sensors for a pulmonary function diagnostic microsystem. **Sensors and Actuators B: Chemical**. 76 (1-3) : 304-309.

Lee, S.P., and Park, K.J. (1996). Humidity sensitive field effect transistors. **Sensors and Actuators B: Chemical**. 35 (1-3): 80-84.

Qiu, Y.Y., Leme, C.A., Alcacer, L.R., and Franca, J.E. (2001). A CMOS humidity sensor with on-chip calibration. **Sensors and Actuators A: Physical**. 92 (1-3): 80-87.

Ralston, A.R.K., Klein, C.F., Thoma, Paul, E., and Denton, D.D. (1996). A model for the relative environmental stability of a series of polyimide capacitance humidity sensors. **Sensors and Actuators B: Chemical**. 34 (1-3) : 343-348.

Rittersma, Z.M. (2002). Recent achievements in miniaturized humidity sensors a review of transduction techniques. **Sensors and Actuators A: Physical**. 96 (2-3): 196-210.

Rittersma, Z.M., Splinter, A., Bödecker, A., and Benecker, W. (2000). A novel surface-micromachined capacitive porous silicon humidity sensor. **Sensors and Actuators B: Chemical**. 68 (1-3): 210-217.

Ralston, A. R. K., Tobin, J. A., Bajikar, S. S. and Denton, D. D. (1994). Comparative performance of linear, cross-linked, and plasma-deposited PMMA capacitive humidity sensors**. Sensors and Actuators B: Chemical**. 22 (2): 139-147. 176

Sakai, Y., Sadaoka, Y., and Ikeuchi, K. (1986). Humidity sensors composed of grafted copolymers. **Sensors and Actuators**. 9 (2):125-131.

Sakai, Y., Sadaoka, Y., and Matsuguchi, M. (1996). Humidity sensors based on polymer thin films. **Sensors and Actuators B: Chemical**. 35 (1-3): 85-90.

Tetelin, A., Pellet, C., Laville, C., and N'Kaoua, G. (2003). Fast response humidity sensors for a medical microsystem. **Sensors and Actuators B: Chemical**. 91 (1-3): 211-218.

Traversa, E. (1995). Ceramic sensors for humidity detection: the state-of-the-art and future developments. **Sensors and Actuators B: Chemical**. 23 (2-3): 135-156.177

Tsuchitani, S., Sugawara, T., Kinjo, N., and OharaT. Tsunoda, S. (1988). A humidity sensor using ionic copolymer and its application to a humidity-temperature sensor module. **Sensors and Actuators**. 15 (4): 375-386.

Yamazoe, N. (1986). Humidity sensors: principles and applications. **Sensors and Actuators**. 10 : 379-398.

ภาคผนวก ก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

R. Phatthanakun, M. Mapato, W. Wanburee, S. Promwikorn, N. Chathirat, P. Songsiriritthigul, P. Klysubun and N. Chomnawang. "**Copier Transparent Support for X-ray Mask Absorber.**" International Conference on material for Advanced Technology-ICMAT, Singapore, July 1-7, 2007

ภาคผนวก ข

การผสมน้ำยาชุบโลหะเงินปริมาตร 500 มิลลิลิตร

ขั้นตอนสำหรับการเตรียมสารละลายเงินสำหรับการชุบเงินด้วยไฟฟ้าโดยจะได้ปริมาตรของสารละลาย 500 มิลลิลิตร

1. เตรียมน้ำดีไอ ปริมาตร 300 มิลลิลิตร ใช้ภาชนะที่ทำการกวนตอลอดเวลา เติม Potassium cyanide น้ำหนัก 83.3 กรัม โดยเติมลงไปทีละน้อย ทำการกวนทิ้งไว้ประมาณ 10 นาทีจนกว่า Potassium cyanide ละลายจนหมด

2. เติม Potassium carbonate 7.5 กรัม ลงในสารละลาย และกวนจนสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน ใช้เวลาประมาณ 5 นาที

3. เติม Silver cyanide 80% น้ำหนัก 22.5 กรัม ลงไปทีละน้อยและกวนจนสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน และกวนสารทิ้งไว้อีก 15 นาที

4. เติมน้ำดีไอเพิ่มลงในสารละลาย จนมีปริมาตร 500 มิลลิลิตร

5. เติมผงคาร์บอน (Granular carbon) น้ำหนัก 1 กรัมลงไปแล้วกวนสารต่อไปเป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นจึงหยุดการกวนสาร นำสารละลายที่ได้ลงจากเครื่องกวนสารปิดฝาให้สนิทและปล่อยให้สารเคมีทำปฏิกิริยากันอย่างน้อย 12 ชั่วโมง

6. นำสารละลายมากรองด้วยกระดาษกรอง 3-5 ครั้งเพื่อกรองเอาผงคาร์บอนและฝุ่นผงในสารละลายออก

7. ทำความสะอาดสารละลายขั้นสุดท้ายด้วยการกรองด้วยไฟฟ้าโดยนำสารละลายมาชุบด้วยไฟฟ้า โดยใช้โลหะ Platinized titanium เป็นขั้วบวก (Anode) และใช้ Stainless steel เป็นขั้วลบ (Cathode) โดยใช้แรงดันคงที่ 1.5 โวลต์ เป็นเวลา 15 นาที

8. เติมสาร Silver Glo make up ปริมาตร 3 มิลลิลิตร และสาร Silver Glo 3K TY ปริมาตร 0.65 มิลลิลิตร เพื่อทำให้ผิวของโลหะเงินหลังการชุบด้วยไฟฟ้าเรียบเนียน

ภาคผนวก ค

กระบวนการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์

กระบวนการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์

1. นำแผ่นใสยึดติดกับวงแหวนทองแดงโดยใช้ SU-8 50 อบที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส 30 นาที และอบที่ 95 องศาเซลเซียส 3 ชั่วโมงปล่อยให้ชิ้นงานเย็นลงช้า ๆ

2. ฉายรังสีอัลตราไวโอเลตด้วยเครื่อง UV-PCB เป็นเวลา 30 นาที และนำไปอบที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส 30 นาทีและอบที่ 95 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง

3. ตัดแยกวงแหวนออกจากกัน

4. ทำความสะอาดโดยเช็ดด้วย IPA (Isopropyl alcohol) ฉีดด้วยอะซิโตน และฉีดด้วย IPA อีกครั้งและนำไปทำความสะอาดด้วยคลื่นเสียง อัลตราโซนิกในน้ำดีไอ (DI water) ประมาณ 10 นาที เป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน และอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส 30 นาที

5. เคลือบโลหะไทเทเนียม และเงินในสุญญากาศหนา 200 และ 600 อังสตรอม ตามลำดับ

6. เคลือบสารไวแสงชนิดบวก AZ4620 โดยการหมุนเคลือบด้วยเครื่องหมุนเคลือบ Laurell รุ่น WS-400B-6NPP/LIT ด้วยความเร็ว 500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 35 วินาที ซึ่งจะได้ความหนาของสารไวแสงประมาณ 35 μm

7. อบที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมงเพื่อให้สารไวแสงแข็งตัว ปล่อยให้ชิ้นงานเย็นลงอย่างช้า ๆ

8. ฉายรังสีอัลตราไวโอเลตลงบนชิ้นงาน ผ่านหน้ากากลวดลายจุลภาคทึบแสงด้วยพลังงานประมาณ 3,700 mJ/cm^2

9. เตรียมน้ำยาล้างฟิล์ม โดยผสมอัตรา 1 ส่วนต่อน้ำ 2 ส่วน ใช้เวลาล้างสารไวแสงประมาณ 25-30 นาที

10. ล้างด้วยน้ำดีไอและเป่าให้แห้ง อบที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส 20 นาที เพื่อให้สารไวแสงยึดเกาะกับฐานได้ดียิ่งขึ้น

11. ชุบเงินด้วยไฟฟ้าด้วยสารละลายเงินที่เตรียมไว้ ใช้โลหะไทเทเนียมชุบพลาทินัม เป็นขั้วบวก (Anode) และให้ชิ้นงานเป็นขั้วลบ (Cathode) ใช้ความหนาแน่นกระแสประมาณ 28 mA/cm^2 ใช้เวลาชุบประมาณ 30 นาที จะได้โลหะเงินหนาประมาณ 35 μm

12. ล้างสารไวแสง AZ4620 ออกด้วยอะซิโตน และล้างน้ำดีไอ เป่าให้แห้ง และอบที่อุณหภูมิประมาณ 85 องศาเซลเซียส ประมาณครึ่งชั่วโมงเพื่อไล่ความชื้น

13. จะได้หน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ที่มีเงินหนา 35 μm เป็นวัสดุกั้นรังสีสามารถใช้เป็นหน้ากากสำหรับสร้างโครงสร้างจุลภาคที่มีความหนาสูงสุด 400 μm

ภาคผนวก ง

กระบวนการสร้างหน้ากากโลหะ

ขั้นตอนการสร้างหน้ากากโลหะหนา 250 μm

1. ตัดแผ่นกราไฟต์ให้มีขนาดประมาณ 1x1 นิ้วทำความสะอาดโดยคลื่นอัลตราโซนิกในน้ำดีไอประมาณ 2-3 ครั้ง ครั้งละประมาณ 10 นาที ทำความสะอาดด้วยคลื่นอัลตราโซนิกอีกครั้งในเมทานอลเป็นเวลา 15 นาที และทำความสะอาดโดยคลื่นอัลตราโซนิกในน้ำดีไออีกครั้งประมาณ 10 นาที เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน และอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส 30 นาที

2. หมุนเคลือบสารไวแสง AZ1512 ลงบนกระจกสไลด์ ด้วยความเร็ว 1,500 รอบต่อนาที และนำแผ่นกราไฟต์ติดทับลงไป อบให้แห้งด้วยอุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส 30 นาที

3. หมุนเคลือบสารไวแสง SU-8 2150 ลงบนกราไฟต์ ด้วยความเร็ว 1,750 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 วินาที และอบด้วยอุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส 30 นาที และต่อด้วย 95 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง ปล่อยให้ชิ้นงานเย็นลงอย่างช้า ๆ จะได้ความหนาของสารไวแสงประมาณ 350 μm

4. ฉายรังสีเอ็กซ์ผ่านหน้ากากกั้นรังสีเอ็กซ์ด้วยพลังงานประมาณ 5,500-6,000 mJ/cm^3

5. อบด้วยอุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส 30 นาที และต่อด้วย 95 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

6. ล้างสารไวแสงโดยใช้น้ำยา SU8 ดีเวลอปเปอร์ ใช้เวลาล้างสารไวแสงประมาณ 1 ชั่วโมง

7. ฉีดล้างด้วย IPA เป่าให้แห้ง และอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส 30 นาที

8. ทำความสะอาดพื้นผิวกราไฟต์ด้วยพลาสมาของ O_2 ด้วยกำลัง 200 W เป็นเวลา 5 นาที

9. ชุบโลหะนิกเกิลลงบนกราไฟต์ โดยใช้อัตรากระแสประมาณ 20 mA/cm^2 การชุบโลหะนิกเกิล สามารถชุบจนล้นแม่พิมพ์เพื่อให้แน่ใจว่าโลหะได้ถูกเติมจนเต็มแม่พิมพ์ทุกส่วน

10. ขัดโลหะนิกเกิลส่วนเกินให้เรียบ และขัดส่วนฐานกราไฟต์ทิ้งไป

11. กำจัดสารไวแสงในช่องว่างทิ้งได้โดยการใช้พลาสมาของ O_2 ผสมกับก๊าซ CF_4 กำลัง 200 W เป็นเวลาประมาณ 50 ชั่วโมง จะได้หน้ากากโลหะซึ่งมีลวดลายเป็นช่องว่าง สามารถนำไปใช้สร้างตัวตรวจรู้ความชื้นต่อไป

ภาคผนวก จ

กระบวนการสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นโดยใช้การเคลือบโลหะผ่านหน้ากาก

ขั้นตอนการสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นโดยวิธีการเคลือบโลหะผ่านหน้ากาก

1. ทำความสะอาดกระจกสไลด์โดยเช็ดด้วยไอโซโพพิลแอลกอฮอล์ (IPA) ฉีดล้างด้วยอะซิโตน และฉีดล้างอีกครั้งด้วย IPA ล้างด้วยน้ำดีไอ เป่าให้แห้ง

2. อบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

3. เคลือบโลหะ Ti/Cu/Ti ลงบนกระจกสไลด์ด้วยความหนาประมาณ 200 800 และ 200 อังสตรอม ตามลำดับ

4. ทำความสะอาดพื้นผิวโลหะด้วยพลาสมาของออกซิเจนกำลัง 200 W เป็นเวลา 5 นาที

5. หมุนเคลือบสารไวแสง SU-8 2002 ด้วยความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที อบให้แห้งบนแผ่นทำความร้อนอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที

6. ติดหน้ากากโลหะทับลงบนชิ้นงานที่ได้ และฉายรังสีอัลตราไวโอเลตด้วยความหนาแน่นพลังงาน 2,000 mJ/cm^2

7. อบบนแผ่นทำความร้อนด้วยอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที

8. นำชิ้นงานซึ่งยังติดหน้ากากอยู่ ไปเคลือบโลหะอลูมิเนียมโดยการระเหยในสุญญากาศด้วยความหนาประมาณ 2,000 อังสตรอม

9. อบด้วยอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้โลหะยึดติดกับชิ้นงานได้ดียิ่งขึ้น ปล่อยให้ชิ้นงานเย็นลงอย่างช้า ๆ

10. นำหน้ากากโลหะออก และล้างสารไวแสงส่วนที่ไม่ถูกฉายแสงออก จะได้โครงสร้างของตัวตรวจรู้ความชื้น ที่มีลวดลายอิเล็กโทรดวางบนลวดลายของสารไวความชื้น เพื่อนำไปวัดผลต่อไป

ภาคผนวก ฉ

กระบวนการสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นโดยใช้วิธีการ lift-off

ขั้นตอนการสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นโดยวิธีการ lift-off

1. ทำความสะอาดกระจกสไลด์โดยเช็ดด้วยไอโซโพพิลแอลกอฮอล์ (IPA) ฉีดล้างด้วยอะซิโตนและฉีดล้างอีกครั้งด้วย IPA ล้างด้วยน้ำดีไอ เป่าให้แห้ง

2. อบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

3. เคลือบโลหะ Ti/Cu/Ti ลงบนกระจกสไลด์ด้วยความหนาประมาณ 200 800 และ 200 อังสตรอม ตามลำดับ

4. ทำความสะอาดพื้นผิวโลหะด้วยพลาสมาของออกซิเจนกำลัง 200 W เป็นเวลา 5 นาที

5. หมุนเคลือบสารไวแสง SU-8 2002 ด้วยความเร็ว 3000 รอบต่อนาที อบให้แห้งบนแผ่นทำความร้อนอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที

6. ติดหน้ากากโลหะทับลงบนชิ้นงานที่ได้ และฉายรังสีอัลตราไวโอเลตด้วยความหนาแน่นพลังงาน 2,000 mJ/cm^2

7. นำหน้ากากโลหะออก และอบบนแผ่นทำความร้อนด้วยอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที

8. เคลือบโลหะอลูมิเนียม โดยการระเหยในสุญญากาศลงบนชิ้นงาน ด้วยความหนาประมาณ 2,000 อังสตรอม

9. อบด้วยอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้โลหะยึดติดกับชิ้นงานได้ดียิ่งขึ้น ปล่อยให้ชิ้นงานเนลงอย่างช้า ๆ

10. กำจัดโลหะ และล้างสารไวแสงส่วนที่ไมถูกฉายแสง โดยใช้คลื่นอัลตราโซนิก ในน้ำยาล้างฟิล์ม เป็นเวลา 30 นาที จะได้โครงสร้างของตัวตรวจรู้ความชื้น ที่มีลวดลายอิเล็กโทรดวางบนลวดลายของสารไวความชื้น ที่สร้างโดยวิธีการ lift-off เพื่อนำไปวัดผลต่อไป

ภาคผนวก ช

โปรแกรม XmaskSim

```
//*****************************************************************************************
//โปรแกรม XmaskSim สำหรับคำนวณพลังงานของแสงที่ผ่านวัสดุตัวกรองต่างๆในกระบวนการลิโธกราฟฟีด้วย
//รังสีเอ็กซ์
//โดย นายมาโนทย์ มาปะโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี พ.ศ. 2550
//File : XmaskSim.sci
//*****************************************************************************************
//Be=1   Kapton=2   Aluminium=3  Mylar=4  Graphite=5          //หมายเลขของวัสดุ
//Silver=6   Gold=7   Lead=8    Tin=9   Nickel=10  Copper=11
//SU-8=12  Si3N4=13  tungsten=14 and thickness in um
//example                                                     //ตัวอย่างการใส่วัสดุและความหนา
//    filter_light=[1 100;3 16;12 500];
// #1 is Be thickness=100um  #2 is Aluminium thickness=16um   #3 is SU-8photoresist
//    filter_dark=[1 100;6 20;12 500];
// #1 is Be thickness=100um  #2 is Silver thickness=20um   #3 is SU-8photoresist
Current=[88.19];                                            //เวกเตอร์กระแสของวงแหวนกักเก็บ
                                                            //อิเล็กตรอน
filter_light=[1 100;2 100;3 16;4  100;6  0;12 350];         //วัสดุตัวกรองและความหนาสำหรับด้าน
                                                            //สว่าง
filter_dark =[1 100;2 100;3 16;4  100;6 40;12 350];         //วัสดุตัวกรองและความหนาสำหรับด้านมืด
clc
chdir('C:\BL6data_DoseCalc\DATA');                          //ชี้ตำแหน่งที่บรรจุข้อมูลสัมประสิทธิ์การ
                                                            //ดูดกลืนแสงของวัสดุ
format('e',15);
sequence=filter_light(:,1);                                 //เวกเตอร์ที่ใช้เก็บชนิดวัสดุ
thickness=(1/10000).*filter_light(:,2);                     //เวกเตอร์ที่ใช้เก็บความหนาวัสดุ
r=length(sequence);                                         //ตัวแปรเก็บจำนวนชั้นวัสดุ
source    =fscanfMat('power.txt');                          //อ่านค่าสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสง
                                                            //ซินโครตรอน
energy=source(:,1);                                         //เก็บสเปกตรัมแสงซินโครตรอน
```

```
[a,b]=size(source) ;                                  //เก็บจำนวนจุดของสเปกตรัม
L0=source(:,2);                                       //สเปกตรัมอินพุต
for k=1:r                                             //วนลูปเพื่อคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การ
if sequence(k)==1 then                                //ดูดกลืนคลื่นแสงของวัสดุตัวกรองจนครบ
  beryllium =fscanfMat('beryllium.txt');              //ทุกชั้น สำหรับด้านสว่าง
  absorb(:,k)=beryllium(:,2);
  elseif sequence(k)== 2 then
  kapton    =fscanfMat('kapton.txt');
  absorb(:,k)=kapton(:,2);

elseif sequence(k)== 3 then
  aluminum  =fscanfMat('aluminum.txt');
  absorb(:,k)=aluminum(:,2);

elseif sequence(k)== 4 then
  graphite  =fscanfMat('graphite.txt');
  absorb(:,k)=graphite(:,2);

elseif sequence(k)== 5 then
  mylar     =fscanfMat('mylar.txt');
  absorb(:,k)=mylar(:,2);

elseif sequence(k)== 6 then
  silver    =fscanfMat('silver.txt');
  absorb(:,k)=silver(:,2);

elseif sequence(k)== 7 then
  gold      =fscanfMat('gold.txt');
  absorb(:,k)=gold(:,2);

elseif sequence(k)== 8 then
```

```
  lead     =fscanfMat('lead.txt');
  absorb(:,k)=lead(:,2);

elseif sequence(k)== 9 then
  tin      =fscanfMat('tin.txt');
  absorb(:,k)=tin(:,2);

elseif sequence(k)== 10 then
  nickel   =fscanfMat('nickel.txt');
  absorb(:,k)=nickel(:,2);

elseif sequence(k)== 11 then
  copper   =fscanfMat('copper.txt');
  absorb(:,k)=copper(:,2);

elseif sequence(k)== 12 then
  su8      =fscanfMat('su8.txt');
  absorb(:,k)=su8(:,2);

elseif sequence(k)== 13 then
  si3n4    =fscanfMat('si3n4.txt');
  absorb(:,k)=si3n4(:,2);

elseif sequence(k)== 14 then
  tungsten  =fscanfMat('tungsten.txt');
  absorb(:,k)=tungsten(:,2);
  end                                          //จบขั้นตอนการเก็บข้อมูลสัมประสิทธิ์
                                               //การดูดกลืนคลื่นแสงของวัสดุ
if k==1 then                                   //เริ่มการคำนวณสเปกตรัมคลื่นแสงที่ผ่าน
  L(:,k)=L0.*exp(-absorb(:,k)*thickness(k));   //ตัวกรองแต่ละชั้น
else
```

```
 L(:,k)=L(:,k-1).*exp(-absorb(:,k)*thickness(k));
end
end                                                          //จบการคำนวณสเปกตรัมที่ผ่านชั้นตัวกรอง
light_tran  =L(:,r-1);                                       //อ่านค่าสเปกตรัมที่ผ่านตัวกรองชั้นสุดท้าย
top_L   =absorb(:,r).*light_tran;                            //คำนวณสเปกตรัมที่ถูกดูดกลืนโดย
                                                             //สารไวแสงส่วนบน
bot_L   =absorb(:,r).*light_tran.*exp(-absorb(:,r)*thickness(r));  //คำนวณสเปกตรัมที่ถูกดูดกลืนโดย
                                                             //สารไวแสงด้านสว่างส่วนล่าง
integ_top_L=sum(top_L) - ((top_L(a))/2) - ((top_L(1))/2);    //อินทิเกรตพลังงานที่สารไวแสงด้านสว่าง
                                                             //ส่วนบนได้รับ
integ_bot_L=sum(bot_L) - ((bot_L(a))/2) - ((bot_L(1))/2);    //อินทิเกรตพลังงานที่สารไวแสงด้านสว่าง
                                                             //ส่วนล่างได้รับ
top_dose     =(1000)*integ_top_L;                            //คำนวณพลังงานที่ถูกดูดกลืนโดย
                                                             //สารไวแสงส่วนบน
bottom_dose  =(1000)*integ_bot_L;                            //คำนวณพลังงานที่ถูกดูดกลืนโดย
                                                             //สารไวแสงส่วนล่าง
toptobot_ratio=top_dose/bottom_dose;                         //คำนวณอัตราส่วนของพลังงานส่วนบน
                                                             //และส่วนล่าง
sequence=filter_dark(:,1);
thickness=(1/10000).*filter_dark(:,2);
for k=1:r                                                    //วนลูปเพื่อคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การ
 if sequence(k)==1 then                                      //ดูดกลืนคลื่นแสงจนครบทุกชั้น
 beryllium =fscanfMat('beryllium.txt');                      //สำหหรับด้านมืด
 absorb(:,k)=beryllium(:,2);

elseif sequence(k)== 2 then
 kapton    =fscanfMat('kapton.txt');
 absorb(:,k)=kapton(:,2);

elseif sequence(k)== 3 then
 aluminum  =fscanfMat('aluminum.txt');
```

```
  absorb(:,k)=aluminum(:,2);

elseif sequence(k)== 4 then
  graphite  =fscanfMat('graphite.txt');
  absorb(:,k)=graphite(:,2);

elseif sequence(k)== 5 then
  mylar     =fscanfMat('mylar.txt');
  absorb(:,k)=mylar(:,2);

elseif sequence(k)== 6 then
  silver    =fscanfMat('silver.txt');
  absorb(:,k)=silver(:,2);

elseif sequence(k)== 7 then
  gold      =fscanfMat('gold.txt');
  absorb(:,k)=gold(:,2);

elseif sequence(k)== 8 then
  lead      =fscanfMat('lead.txt');
  absorb(:,k)=lead(:,2);

elseif sequence(k)== 9 then
  tin       =fscanfMat('tin.txt');
  absorb(:,k)=tin(:,2);

elseif sequence(k)== 10 then
  nickel    =fscanfMat('nickel.txt');
  absorb(:,k)=nickel(:,2);

elseif sequence(k)== 11 then
```

```
 copper    =fscanfMat('copper.txt');
 absorb(:,k)=copper(:,2);

elseif sequence(k)== 12 then
 su8       =fscanfMat('su8.txt');
 absorb(:,k)=su8(:,2);

elseif sequence(k)== 13 then
 si3n4     =fscanfMat('si3n4.txt');
 absorb(:,k)=si3n4(:,2);

elseif sequence(k)== 14 then
 tungsten  =fscanfMat('tungsten.txt');
 absorb(:,k)=tungsten(:,2);

end                                                          //จบขั้นตอนการเก็บข้อมูลสัมประสิทธิ์
                                                             //การดูดกลืนคลื่นแสงของวัสดุ
if k==1 then                                                 //เริ่มการคำนวณสเปกตรัมคลื่นแสงที่ผ่าน
 L(:,k)=L0.*exp(-absorb(:,k)*thickness(k));                  //ตัวกรองแต่ละชั้น
else
 L(:,k)=L(:,k-1).*exp(-absorb(:,k)*thickness(k));
end
end
dark_tran   =L(:,r-1);                                       //อ่านค่าสเปกตรัมที่ผ่านตัวกรองชั้นสุดท้าย
top_D   =absorb(:,r).*dark_tran;                             //คำนวณสเปกตรัมที่ถูกดูดกลืนโดย
                                                             //สารไวแสงส่วนบน
bot_D   =absorb(:,r).*dark_tran.*exp(-absorb(:,r)*thickness(r));  //คำนวณสเปกตรัมที่ถูกดูดกลืนโดย
                                                             //สารไวแสงด้านมืดส่วนล่าง
integ_top_D=sum(top_D) - ((top_D(a))/2) - ((top_D(1))/2);
                                                             //อินทิเกรตพลังงานที่สารไวแสงด้านมืด
                                                             //ส่วนบนได้รับ
```

```
integ_bot_D=sum(bot_D) - ((bot_D(a))/2) - ((bot_D(1))/2);
                                                    //อินทิเกรตพลังงานที่สารไวแสงด้านมืด
                                                    //ส่วนล่างได้รับ
critical_dose =(1000)*integ_top_D;                  //คำนวณพลังงานที่ถูกดูดกลืนโดย
                                                    //สารไวแสงด้านมืดส่วนบน
bottom_dark   =(1000)*integ_bot_D;                  //คำนวณพลังงานที่ถูกดูดกลืนโดย
                                                    //สารไวแสงด้านมืดส่วนล่าง
contrast     =100*(bottom_dose-bottom_dark)/(bottom_dose+bottom_dark);
                                                    //คำนวณเปอร์เซนต์ค่าความคมชัด
coef=[top_dose;critical_dose;bottom_dose;bottom_dark;toptobot_ratio;contrast];
                                                    //รวมค่าที่คำนวณได้เป็นเมตริกซ์
chdir('C:\BL6data_DoseCalc\coefficient_data_scan');  //ชี้ไดเรกทอรีที่จะเก็บข้อมูล
mdelete('coeff.txt');                               //ลบแฟ้มข้อมูลเก่า
write('coeff.txt',coef);                            //เขียนแฟ้มข้อมูลใหม่
format('v',10);
dd=getdate();                                       //อ่านข้อมูลวันที่เพื่อตั้งชื่อแฟ้มข้อมูล

fil='coeff'+'_'+string(dd(6))+string(dd(2))+string(dd(1))+'_'+string(dd(7))+string(dd(8))+string(dd(9))+'.txt';
write(fil,coef);                                    //เขียนแฟ้มข้อมูล
printf('Current   TopBright   Acc.TopBright  BottomBright  …
Acc.BottomBright  Top.Dark  Acc.TopDark   Contrast    Top_to_Bottom\n')
                                                    //แสดงผลการจำลองการฉายแสง
printf('(mA/cm^3)  (mJ/cm^3)   (mJ/cm^3)    (mJ/cm^3)    …
(mJ/cm^3)     (mJ/cm^3)   (mJ/cm^3)   (percent)    ()\n\n')
AccumTop =0;AccumBot =0; AccumCrit=0;
for i=1:length(Current)                             //วนลูปเพื่อคำนวณผลการฉายแสงโดย
                                                    //กระแสเวกเตอร์
 top_dose1=(30/94.5)*Current(i)*top_dose;           //พลังงานด้านบนส่วนสว่าง
bottom_dose1=(30/94.5)*Current(i)*bottom_dose;      //พลังงานด้านล่างส่วนสว่าง
critical_dose1=(30/94.5)*Current(i)*critical_dose;  //พลังงานด้านบนส่วนมืด
AccumTop =top_dose1+AccumTop;                       //พลังงานสะสมด้านบนส่วนสว่าง
```

```
AccumBot =bottom_dose1+AccumBot;                                    //พลังงานสะสมด้านล่างส่วนสว่าง
AccumCrit=critical_dose1+AccumCrit;                                 //พลังงานสะสมด้านบนส่วนมืด
printf('%.2f    %.3f    %.3f    %.3f    %.3f    %.3f    %.3f    %.3f
%.3f\n',Current(i),top_dose1,AccumTop,bottom_dose1,AccumBot,…
critical_dose1,AccumCrit,contrast,toptobot_ratio)                   //แสดงตารางค่าที่ได้จากการคำนวณ
end                                                                 //จบโปรแกรม
```

ภาคผนวก ซ

โปรแกรมจำลองการตอบสนองความชื้นของตัวตรวจรู้ความชื้น

```
//*****************************************************************************************
//โปรแกรมจำลองผลการแพร่ใน 1 มิติ สำหรับโครงสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นแบบซี่ยาวที่มีการแพร่ของความชื้น
//สองด้าน ใช้การแก้ปัญหาด้วยวิธีการของ Crank-Nicloson
//โดย นายมาโนทย์  มาปะโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี พ.ศ. 2550
//File : CN_method.sci
//*****************************************************************************************
clear ;close ;clc
t=0:0.1:30;                                          //ช่วงเวลาในการจำลองผล
x=0:1:10;                                            //ความกว้างของซี่
D=0.835;                                             //สัมปประสิทธิ์การแพร่ความชื้น
left=1;                                              //เงื่อนไขขอบเขตด้านซ้าย
right=1;                                             //เงื่อนไขขอบเขตด้านขวา
d_t=t(2)-t(1);                                       //Δt
d_x=x(2)-x(1);                                       //Δx
if d_t>=0.5*d_x^2/D                                  //ตรวจสอบเงื่อนไขการลู่เข้า
 x_message(['Numerical Method with Crank-Nicloson …
 Unstable';'Plese decrease dt or increase dx']);
 else
lamda=D*d_t/(d_x^2);                                 //คำนวณค่า lamda
h=2*(1+lamda);
a=zeros(length(x)-2,length(x)-2);                    //ประกาศเมตริกซ์ a
b=zeros(length(x)-2,1);                              //ประกาศเมตริกซ์ b
m=zeros(length(x)-2,1);                              //ประกาศเมตริกซ์คำตอบ
as=zeros(length(x),length(t));                       //เมตริกซ์ที่ใช้เก็บคำตอบทุกช่วงเวลา
for j=1:length(t)                                    //ลูปสร้างเมตริกซ์ a และ b
for i=1:length(b)
    if i==1
        a(i,i)=h;
        a(i,i+1)=-lamda;
```

```
        b(i)=lamda*left + 2*(1-lamda)*m(i) + lamda*m(i+1) + lamda*left;
    elseif i==length(b)
        a(length(b),length(b)-1)=-lamda;
        a(length(b),length(b))=h;
        b(length(b))=lamda*right + 2*(1-lamda)*m(length(b)) + lamda*m(length(b)-1) + lamda*right;
    else
        a(i,i-1)=-lamda;
        a(i,i)=h;
        a(i,i+1)=-lamda;
        b(i)=lamda*m(i-1) + m(i)*2*(1-lamda) + lamda*m(i+1);
    end
end
m=inv(a)*b;                                          //แก้สมการหาคำตอบ
as(:,j)=[left ;m ;right];                            //รวมคำตอบเข้ากับเงื่อนไขขอบเขต
plot(x,as(:,j));                                     //วาดผลตอบสนองในหนึ่งช่วงเวลา
end
end                                                  //จบการคำนวณ

//*****************************************************************************************
//โปรแกรมจำลองผลการแพร่ใน 1 มิติ สำหรับโครงสร้างตัวตรวจรู้ความชื้นแบบทรงกระบอกที่มีการแพร่ของ
//ความชื้นโดยรอบ เทียบกับโรงสร้างขั้วไฟฟ้ามีรูพรุนหรือแบบที่มีการแพร่ใน 1 มิติโดยตรง ใช้การแก้ปัญหาด้วย
//วิธีการ analytical
//โดย นายมาโนทย์  มาปะโท สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี พ.ศ. 2550
//File : Cylidrical_body.sci
//*****************************************************************************************

clear ;close ;clc
    x=linspace(0,1000,500000);                       //ช่วงที่ใช้หาค่ารากสมการเบสเซล
    t=0:0.1:2000;                                    //ช่วงเวลาในการจำลองผล
a = 51e-6;  //(m)   Diameter of Circle               //เส้นผ่านศูนย์กลางทรงกระบอก
L =51e-6;  //(m)   thickness of film                //ความหนาฟิล์ม
```

```
D=5e-12;  //(m^2/s)  Diffusion Coefficient          //สัมประสิทธิ์การแพร่
sumpw=0;sumq=0;                                    //ค่าเริ่มต้นของผลรวม

function [sumpw,sumq]=equ(n,D,L)                   //ฟังก์ชันหาค่าผลรวมถึงอนันต์
w=(2*n-1)^2;                                       //ของโครงสร้างขั้วไฟฟ้ารูพรุน
p=1-exp( (-w*%pi*%pi*D*t) / ((L^2)) );
q=(1/w);
sumpw=sumpw+(p/w);
sumq=sumq+q;
endfunction                                        //จบฟังก์ชัน

sumupper=0;sumbelow=0;                             //ค่าเริ่มต้นของผลรวม

function [sumupper,sumbelow]=equ2(k3,D,a)          //ฟังก์ชันหาค่าผลรวมถึงอนันต์
f=( 1-exp ( -D* (((k3(j))^2)*t)/(a^2) ) )/ ( (k3(j))^2 );   //ของโครงสร้างทรงกระบอก
h=( 1 / (k3(j)^2) );
sumupper=sumupper+f;
sumbelow=sumbelow+h;
endfunction                                        //จบฟังก์ชัน
//Roots of besselj(x)=0 Calc                       //คำนวณรากของฟังก์ชันเบสเซล
y=besselj(0,x);
k=[];
s=0;
for r=1:2:(length(x)-2)
y0=besselj(0, x(r) );
y1=besselj(0, x(r+1) );
y2=besselj(0, x(r+2) );
 if y0*y2<0 then

  y=y1;
  s=s+1;
```

```
   k(s,1)=s-1;
   k(s,2)=y;
   k(s,3)= x(r+1);

 else
 end
end                                                    //จบการคำนวณรากสมการเบสเซล
uu=size(k);                                            //ขนาดของรากคำตอบสมการเบสเซล
n=uu(1,1);                                             //ตัวแปรวนลูปเท่ากับจำนวนราก
m=n;
k1=k(:,1)';k2=k(:,2)';k3=k(:,3)';                      //ตัวแปรที่ใช้เก็บคำตอบ
k4=[];
sumkn=0;
   for j=1:n                                           //คำนวณผลตอบสนองของตัวตรวจรู้
      sumkn=sumkn+(1/((k3(j))^2));                     //ความชื้นทั้งสองโครงสร้าง
      k4(j)=sumkn;
          [sumpw,sumq]=equ(j,D,L);          //Conventional Structure//
      [sumupper,sumbelow]=equ2(k3,D,a);  //Circular Structure//
   End                                                 //จบการคำนวณ
Cnorm=sumpw/sumq;                                      //ผลตอบสนองของโครงสร้างขั้วไฟฟ้า
                                                       //รูพรุน
CnormCir=sumupper/sumbelow;                            //ผลตอบสนองของโครงสร้างแบบทรง
                                                       //กระบอก
scf(2);
plot(t,Cnorm,'-.r',t,CnormCir,'--b');xgrid;            //วาดกราฟผลตอบสนองเทียบกัน
                                                       //ทั้งสองแบบ
xgrid;                                                 //ใส่กริด
legends(['Long electrode';'Cylindrical body'],[[5;4],[2;2]]);  //คำอธิบายเส้นกราฟ
```

ประวัติผู้เขียน

นายมาโนทย์ มาปะโท เกิดเมื่อวันที่ 31 มกราคม พ.ศ. 2526 ที่อำเภอขามทะเลสอ จังหวัดนครราชสีมา เริ่มการศึกษาระดับประถมศึกษาที่โรเรียนรัฐราษฎร์รังสรรค์ อำเภอขามทะเลสอ จังหวัดนครราชสีมา ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย ที่โรงเรียนขามทะเลสอวิทยา และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อ พ.ศ. 2549 และได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตในสาขาวิชาเดียวกัน โดยได้รับทุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาจากศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติ ขณะศึกษาได้ทำงานวิจัยด้านระบบกลไฟฟ้าจุลภาค (MEMS) โดยได้พัฒนาตัวตรวจรู้ความชื้นที่สร้างโดยใช้กระบวนการลิโธกราฟฟีด้วยรังสีเอ็กซ์ ผู้วิจัยมีความสนใจในการประยุกต์ใช้แสงซินโครตรอนสำหรับการผลิตโครงสร้างจุลภาคสัดส่วนสูง และมีผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษาดังภาคผนวก ก.