

การเพิ่มความไวของเซ็นเซอร์สายใยแก้วนำแสงชนิด ฟาบริ-เปอร์ต์ ด้วยเทคนิค
ระบบไฟฟ้าเครื่องกลจุลภาค

นางสาวภาวรัตน์ หาดทวยกาญจน์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2558

**SENSITIVITY IMPROVEMENT OF FABRY-PEROT
FIBER OPTIC SENSORS USING MEMS BASED
TECHNIQUES**



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Telecommunication Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2015

การเพิ่มความไวของเซ็นเซอร์สายใยแก้วนำแสงชนิด ฟาบริ-เปอร์ต์ ด้วยเทคนิคระบบ
ไฟฟ้าเครื่องกลจุลภาค

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รศ. ดร.มนต์ทิพย์ภา อูฑารสกุล)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.รังสรรค์ ทองทา)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(รศ. ดร.พีระพงษ์ อูฑารสกุล)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ชฎารัตน์ หาดทวยกาญจน์ : การเพิ่มความไวของเซ็นเซอร์สายใยแก้วนำแสงชนิด ฟาบริ-เปโรต์ ด้วยเทคนิคระบบไฟฟ้าเครื่องกลจุลภาค (SENSITIVITY IMPROVEMENT OF FABRY-PEROT FIBER OPTIC SENSORS USING MEMS BASED TECHNIQUES)
อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ ทองทา, 91 หน้า.

เทคนิคฟาบริ-เปโรต์ (Fabry-Perot) เป็นเทคนิคที่นำมาใช้ในการวัดระยะของการเกิดการแทรกสอดกันของแสงซึ่งมีความไวสูง การขยับด้วยระยะเพียงเล็กน้อยก็จะส่งผลให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงได้ แต่ข้อเสียของเทคนิคนี้คือไม่สามารถหาและกำหนดจุดเริ่มต้นได้ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงทำการปรับปรุงแก้ไขในส่วนของการทำให้ตัวสะท้อนแสงนั้นสามารถขยับและเคลื่อนที่ได้ด้วยโครงสร้างที่เป็นตัวขับเคลื่อนไฟฟ้าสถิตแบบซี่หวี (Comb-Drives actuators) ขับเคลื่อนโดยการป้อนแรงดันไฟฟ้า กระบวนการสร้างนั้นจะทำการสร้างโครงสร้างด้วยกระบวนการลิโธกราฟี (Lithography process) จากห้องปฏิบัติการสถานีทดลองระบบลำเลียงแสง 6a (Beamline 6a : DXL) ของสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) ด้วยเทคนิคระบบไฟฟ้าเครื่องกลจุลภาค (Micro-Electro-Mechanical System : MEMS) ซึ่งเทคนิคดังกล่าวนี้เหมาะสำหรับการสร้างชิ้นงานที่มีขนาดเล็กในระดับไมโครเมตร ในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้สารไวแสงชนิดลบ (SU-8 photoresist) เป็นวัสดุพอลิเมอร์สำหรับนำมาเป็นโครงสร้างพื้นฐานของตัวขับเคลื่อนไฟฟ้าสถิตแบบซี่หวี มีคานยึดแบบตรง (Fixed-Fixed flexures) เป็นโครงสร้างแกนกลางของชิ้นงาน และซี่ฟันในการขับเคลื่อนมีทั้งหมด 80 ซี่ สามารถเคลื่อนที่ได้ในระยะทาง 2.2 ไมโครเมตรเมื่อทำการป้อนแรงดันไฟฟ้า 250 โวลต์

CHADARAT HARDTAWAIKARN : SENSITIVITY IMPROVEMENT OF
FABRY-PEROT FIBER OPTIC SENSORS USING MEMS BASED
TECHNIQUES. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. RANGSAN TONGTA,
Ph.D., 91 PP.

FABRY-PEROT/LITHOGRAPHY PROCESS/COMB-DRIVES ACTUATORS/
SU-8 PHOTORESIST/MEMS/FIBER OPTIC/SYNCHROTRON LIGHT

Fabry-Perot is a sensor technique used for measure small change of distance by interference of two light waves. The light inside the fiber optic is partially reflected at the end of the fiber optic while the rest will leave the fiber optic then reflected by a mirror back into the fiber optic. Since the phase difference between two light waves cannot practically determine in advance, Fabry-Perot technique has difficulty to setup a starting point. This thesis proposes a Comb-Drives actuator with a reflector to preset the starting point. The sensitivity of the sensor can be improved when the starting point is set at around the middle between maximum and minimum of the interference. The structure is built by X-ray lithography process. Negative photoresist called SU-8 photoresist is a polymer material used for infrastructure of the Comb-Drives actuator, fabricated in the beamline 6a station (DXL) at the Synchrotron Light Research Institute (SLRI) Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) Lab. Comb-Drives with 80 teeth can travel over a distance of 2.2 micrometers when the input voltage is 250 volts. The sensor can create interference of 2.1 dB and the midpoint can be easily setup.

School of Telecommunication Engineering Student's Signature _____

Academic Year 2015

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการสำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการและการดำเนินงานวิจัย รวมถึงหน่วยงานต่าง ๆ ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการทำวิจัย อาทิเช่น

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ ทองทา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ และชี้แนะแนวทางอันเป็นประโยชน์ยิ่งต่องานวิทยานิพนธ์ รวมถึงช่วยตรวจทานและแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้ จนทำให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมทั้งเป็นกำลังใจ และเป็นแบบอย่างที่ดีในการดำเนินชีวิตหลาย ๆ ด้านให้กับผู้วิจัยเสมอมา

รองศาสตราจารย์ ดร.มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล รองศาสตราจารย์ ดร.พีระพงษ์ อุฑารสกุล และอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่านที่กรุณาให้คำแนะนำและคำปรึกษาทางด้านวิชาการ

ดร.รุ่งเรือง พัฒนากุล นักวิทยาศาสตร์ระบบลำเลียงแสง และคุณชาญวุฒิ ศรีผึ้ง วิศวกรประจำสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) ที่กรุณาให้คำแนะนำและคำปรึกษาทางด้านกระบวนการลิโธกราฟีและสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) สำหรับการสนับสนุนเครื่องมือวิจัย และสถานที่ทำวิจัยตลอดระยะเวลาที่ทำวิจัย

ท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่าน ที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ทางด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่าน ที่ให้ความรัก ความอบอุ่น ความห่วงใย การอบรมเลี้ยงดู และให้การสนับสนุนทางการศึกษาอย่างดียิ่งมาโดยตลอด รวมทั้งเป็นกำลังใจให้ผู้วิจัยสามารถเผชิญกับปัญหาและอุปสรรคต่าง ๆ จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมาและตลอดไป

ชฎารัตน์ หาดทวยกาญจน์

สารบัญ

		หน้า
บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....		ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....		ข
กิตติกรรมประกาศ.....		ค
สารบัญ.....		ง
สารบัญตาราง.....		ช
สารบัญรูป.....		ซ
บทที่		
1	บทนำ	1
	1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
	1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	5
	1.3 ข้อตกลงเกี่ยวกับงานวิจัยเบื้องต้น.....	5
	1.4 ขอบเขตของการทำวิจัย.....	5
	1.5 แนวทางในการดำเนินงานวิจัย.....	5
	1.5.1 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	5
	1.5.2 สถานที่ในการทำวิจัย.....	5
	1.5.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัย.....	6
	1.6 ระเบียบวิธีในการดำเนินงานวิจัย.....	6
	1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
	1.8 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์.....	7
2	ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	8
	2.1 ระบบไฟฟ้าเครื่องกลจุลภาค (Micro-Electro-Mechanical System).....	8
	2.2 ทฤษฎีฟาบริ-เปโรต์ (Fabry-Perot).....	8
3	กระบวนการพื้นฐานที่ใช้ในงานวิจัย	11
	3.1 กระบวนการลิโธกราฟี (Lithography process).....	11
	3.1.1 กระบวนการลิโธกราฟีด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต (Ultra-violet Lithography).....	11

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า	
3.1.2	กระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์ (Deep X-ray Lithography).....	13
3.2	สารไวแสง (Photoresist).....	15
3.2.1	การหมุนเคลือบสารไวแสงด้วยเครื่องหมุนเคลือบ (Spinner)....	18
3.2.2	การหยอดสารไวแสง.....	22
3.3	การสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์ (X-ray Mask).....	23
3.3.1	การออกแบบลวดลายชิ้นงานด้วย โปรแกรม Layout Editor®.....	24
3.3.2	การเตรียมฐานรองหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์ (Substrate).....	25
3.3.3	กระบวนการลิโธกราฟีด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต.....	26
3.3.4	กระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (Electroplating).....	27
3.4	กระบวนการเคลือบโลหะด้วยเทคนิคสปัตเตอริง (Sputtering).....	29
3.5	การสร้างลวดลายบนแผ่นวงจรพิมพ์ (Print Circuit Board : PCB).....	31
3.6	ระบบลำเลียงแสงซินโครตรอน (Synchrotron Light).....	33
4	ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	36
4.1	ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับสายใยแก้วนำแสง.....	36
4.1.1	โครงสร้างของสายใยแก้วนำแสง.....	36
4.1.2	ประเภทของสายใยแก้วนำแสง.....	37
4.1.3	ข้อดี – ข้อเสียของสายใยแก้วนำแสง.....	39
4.2	ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับตัวขับเคลื่อนทางไฟฟ้าสถิตแบบซีวีและ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	40
4.3	คานยืด (Spring).....	41
4.3.1	คานยืดแบบตรง (Fixed-Fixed flexures).....	41
4.3.2	คานยืดแบบก้ามปู (Crab-leg flexures).....	42
4.3.3	คานยืดแบบพับ (Folded flexures).....	43
4.3.4	คานยืดแบบขด (Serpentine flexures).....	44
4.4	การออกแบบโครงสร้างตัวขับเคลื่อนทางไฟฟ้าสถิตแบบซีวี.....	45
5	กระบวนการพัฒนาและการสร้างตัวขับเคลื่อนทางไฟฟ้าสถิตแบบซีวี.....	49
5.1	การออกแบบตัวขับเคลื่อนทางไฟฟ้าสถิตแบบซีวี.....	49

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.2	การสร้างตัวขับเคลื่อนไฟฟ้าสถิตแบบชี้หัว.....	51
5.2.1	สร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์.....	51
5.2.2	สร้างตัวขับเคลื่อนไฟฟ้าสถิตแบบชี้หัว.....	52
5.2.3	ย้ายฐานรองของชิ้นงาน.....	52
5.2.4	เชื่อมต่อสายไฟให้กับชิ้นงาน.....	52
5.3	รูปแบบของตัวขับเคลื่อนไฟฟ้าสถิตแบบชี้หัวที่เคยมีการสร้างขึ้น ในงานวิจัย.....	54
5.3.1	โครงสร้างแบบที่ 1.....	54
5.3.2	โครงสร้างแบบที่ 2.....	55
5.3.3	โครงสร้างแบบที่ 3.....	56
5.3.4	โครงสร้างแบบที่ 4.....	57
6	การทดสอบและผลการทดสอบ.....	59
6.1	การทดสอบการเคลื่อนที่.....	59
6.2	การทดสอบการแทรกสอดกันของแสง.....	61
7	สรุปผลของงานวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	73
7.1	สรุปผลของงานวิจัย.....	73
7.2	ข้อเสนอแนะ.....	74
	รายการอ้างอิง.....	75
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก โปรแกรมแบบจำลองผลทางคณิตศาสตร์.....	76
	ภาคผนวก ข บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	82
	ประวัติผู้เขียน.....	91

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
3.1	แสดงความหนาของสารไวแสงชนิดลบตระกูล 3000 และเวลาที่ใช้ในการอบ หลังจากทำการหมุนเคลือบสารไวแสง.....	19
4.1	ข้อดี – ข้อเสียของสายใยแก้วนำแสง.....	39
4.2	แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้างแบบตรงที่ทำให้ระยะของ การเคลื่อนที่เท่ากับ 1 ไมโครเมตร.....	45
5.1	แสดงค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้างตัวจับเร้าทางไฟฟ้าสถิต แบบซีทีวี.....	49
5.2	เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการจำลองทางคณิตศาสตร์กับค่าพารามิเตอร์ที่ วัดได้จริง.....	54
6.1	แสดงผลการทดลองครั้งที่ 1.....	64
6.2	แสดงผลการทดลองครั้งที่ 2.....	65
6.3	แสดงผลการทดลองครั้งที่ 3.....	67
6.4	แสดงผลการทดลองครั้งที่ 4.....	69

สารบัญรูป

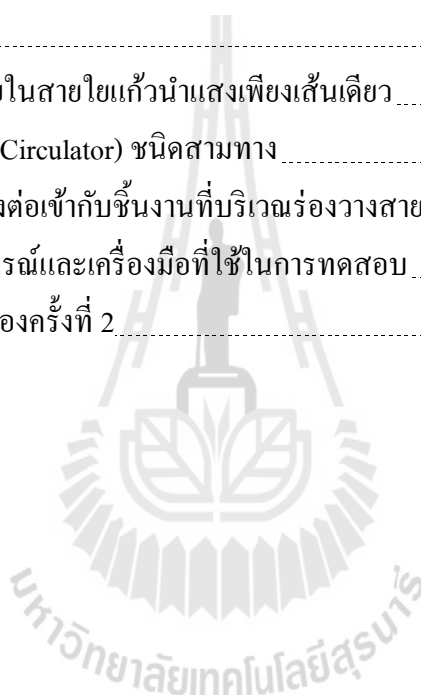
รูปที่		หน้า
1.1	การเกิดการสะท้อนกลับของคลื่นแสง.....	2
1.2	การเปรียบเทียบของการเกิดการแทรกสอดกันของสัญญาณสองสัญญาณ.....	2
1.3	กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของเฟส กรณีที่เฟสทั้งสองมีขนาดที่เท่ากัน.....	3
1.4	แสดงตำแหน่งของจุดเริ่มต้นที่มีผลกับค่าความไว.....	4
3.1	เครื่องฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต.....	12
3.2	เครื่องฉายรังสีเอกซ์ ตั้งอยู่ที่ห้องปฏิบัติการสถานีทดลองระบบลำเลียงแสง 6a ณ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน.....	13
3.3	หน้าต่างโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมการฉายรังสีเอกซ์.....	14
3.4	มุมมองจากทางด้านข้างของกระบวนการลิโธกราฟีผ่านสารไวแสงชนิดลบ.....	15
3.5	มุมมองจากทางด้านบนของกระบวนการลิโธกราฟีผ่านสารไวแสงชนิดบวก.....	16
3.6	มุมมองจากทางด้านบนของกระบวนการลิโธกราฟีผ่านสารไวแสงชนิดลบ.....	17
3.7	แสดงการเปรียบเทียบความหนาของสารไวแสงกับความเร็วต่อรอบที่ใช้ใน การหมุนเคลือบของสารไวแสงชนิดลบตระกูล 3000.....	19
3.8	เครื่องหมุนเคลือบสารไวแสง (Spinner).....	20
3.9	กระบวนการขั้นตอนการหมุนเคลือบสารไวแสงชนิดลบด้วยเครื่องหมุนเคลือบ (Spinner).....	21
3.10	เครื่องให้ความร้อนแก่ชิ้นงานที่ได้นำมาใช้งาน.....	22
3.11	แสดงการหยอดสารไวแสงชนิดลบบนแผ่นให้ความร้อน.....	23
3.12	หน้าต่างโปรแกรม Layout Editor [®] ที่ใช้ในการออกแบบลวดลาย.....	24
3.13	แผ่นฟิล์มบางที่ได้จากการออกแบบด้วยโปรแกรม Layout Editor.....	25
3.14	แผ่นกราฟที่ถูกยึดติดกับกระจกด้วยเทปกั้นความร้อน.....	26
3.15	มุมมองจากทางด้านข้างของกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า.....	27
3.16	ภาพจำลองอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า.....	28
3.17	แบบจำลองภาพแสดงการทำงานของกระบวนการเคลือบโลหะด้วยเทคนิคสปีดเทอริง.....	29
3.18	มุมมองจากทางด้านข้างของกระบวนการเคลือบโลหะด้วยเทคนิคสปีดเทอริง.....	30
3.19	เครื่องเคลือบโลหะชนิดต่าง ๆ.....	30

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.20	แผ่นวงจรพิมพ์เปล่าที่นำมาใช้งาน 31
3.21	เครื่องฉายแสงแผ่นวงจรพิมพ์ด้วยหลอดอัลตราไวโอเล็ต 33
3.22	ระบบของท่อลำเลียงแสงออกจากวงแหวนอิเล็กทรอนิกส์มายังแต่ละสถานีทดลอง 34
3.23	แบบจำลองการทำงานของเครื่องสแกนภายในห้องปฏิบัติการสถานีทดลอง ระบบลำเลียงแสง 6a (Beamline 6a : DXL) 35
3.24	ห้องปฏิบัติการสถานีทดลองระบบลำเลียงแสง 6a 35
4.1	แสดง โครงสร้างของสายใยแก้วนำแสงจากมุมมองทางด้านบน 37
4.2	แสดง โครงสร้างของสายใยแก้วนำแสงชนิดโหมคเดียวจากมุมมองทางด้านข้าง 38
4.3	แสดง โครงสร้างของสายใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมคจากมุมมองทางด้านข้าง 39
4.4	คานยึดแบบตรง (Fixed-Fixed flexures) 42
4.5	คานยึดแบบก้ามปู (Crab-leg flexures) 43
4.6	คานยึดแบบพับ (Folded flexures) 43
4.7	คานยึดแบบขด (Serpentine flexures) 45
4.8	กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้ากับจำนวนซี่ของตัวขั้วเร้าเมื่อกำหนดให้เคลื่อนที่ใน ระยะทาง 1 ไมโครเมตร 46
4.9	แสดงค่าระยะทางของการเคลื่อนที่เปรียบเทียบกับค่าแรงดันแรงดันไฟฟ้าเมื่อกำหนดให้มี ซี่ฟันของตัวขั้วเร้าเท่ากับ 74 ซี่ 47
4.10	แสดงค่าระยะทางในการเคลื่อนที่เปรียบเทียบกับค่าแรงดันแรงดันไฟฟ้าเมื่อกำหนดให้มีซี่ ฟันของตัวขั้วเร้าเท่ากับ 30 ซี่ 48
5.1	แสดงการออกแบบโครงสร้างตัวขั้วเร้าทางไฟฟ้าสถิตแบบซี่หิวด้วย โปรแกรม Layout Editor® 50
5.2	ภาพขยายโครงสร้างแสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่นำมาใช้ในการออกแบบ 51
5.3	โครงสร้างตัวขั้วเร้าทางไฟฟ้าสถิตแบบซี่หิวเมื่อเชื่อมต่อสายไฟ 53
5.4	หน้ากากกันรังสีเอกซ์โครงสร้างแบบที่ 1 55
5.5	หน้ากากกันรังสีเอกซ์โครงสร้างแบบที่ 2 56
5.6	หน้ากากกันรังสีเอกซ์โครงสร้างแบบที่ 3 57
5.7	หน้ากากกันรังสีเอกซ์โครงสร้างแบบที่ 4 58

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.1 ภาพขยายแสดงระยะห่างสายใยแก้วนำแสงกับตัวสะท้อนแสง ก่อนและหลังจากการ ป้อนแรงดันไฟฟ้า.....	60
6.2 กล้องจุลทรรศน์โอลิมปัสรุ่นBX51 (Olympus BX51) และ โอลิมปัสรุ่นDB21 (Olympus DP21).....	61
6.3 ค่าการสูญเสียภายในสายใยแก้วนำแสงเพียงเส้นเดียว.....	62
6.4 ตัวแยกสัญญาณ (Circulator) ชนิดสามทาง.....	62
6.5 สายใยแก้วนำแสงต่อเข้ากับชิ้นงานที่บริเวณร่องวางสาย.....	63
6.6 ภาพรวมของอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ.....	63
6.7 กราฟผลการทดลองครั้งที่ 2.....	71



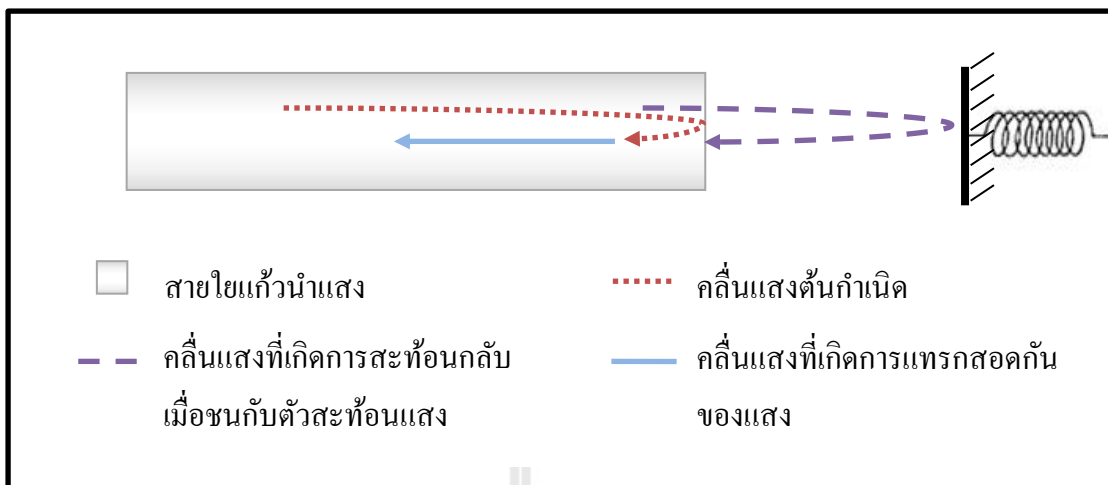
บทที่ 1

บทนำ

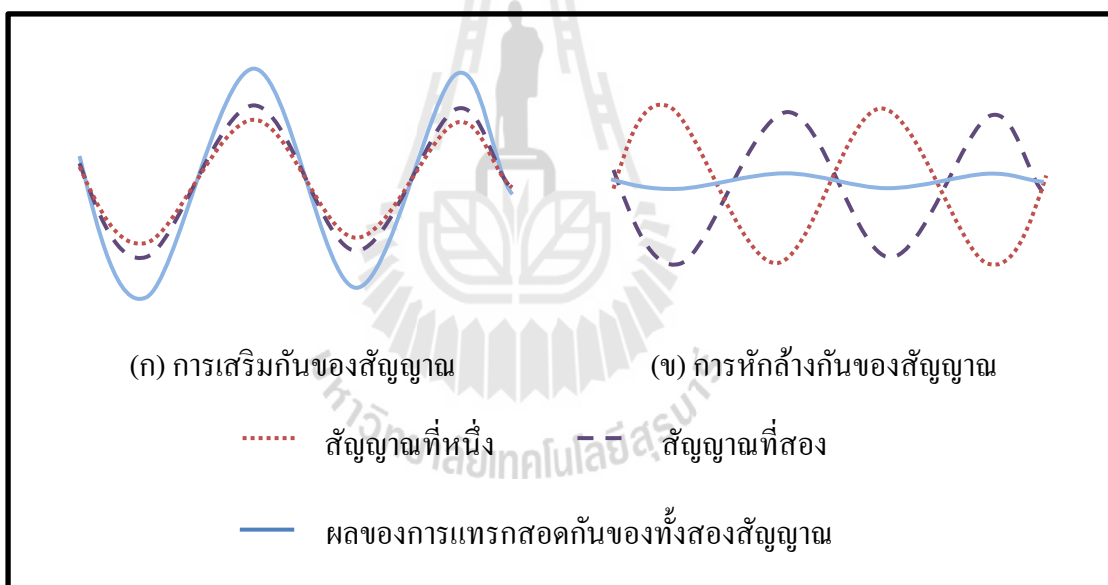
วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จัดทำขึ้นเพื่อสร้างตัวขับเคลื่อนไฟฟ้าสถิตแบบซี่หวี (Comb-Drives actuators) โดยการประยุกต์ใช้งานเทคนิคระบบไฟฟ้าเครื่องกลจุลภาค (Micro-Electro-Mechanical System : MEMS) ที่มีโครงสร้างขนาดเล็กในระดับไมโครเมตร และกระบวนการลิโธกราฟี (Lithography process) เพื่อให้โครงสร้างตัวขับเคลื่อนไฟฟ้าสถิตแบบซี่หวีสามารถขับเคลื่อนและนำมาทดสอบการเกิดการแทรกสอดกันของแสงตามหลักการของฟาบริ-เปโรต์ (Fabry-Perot) ซึ่งเป็นไปตามวัตถุประสงค์และข้อตกลงของการวิจัย วิทยานิพนธ์ฉบับนี้อยู่ภายใต้ขอบเขตที่มีแนวทางการวิจัยดังต่อไปนี้

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

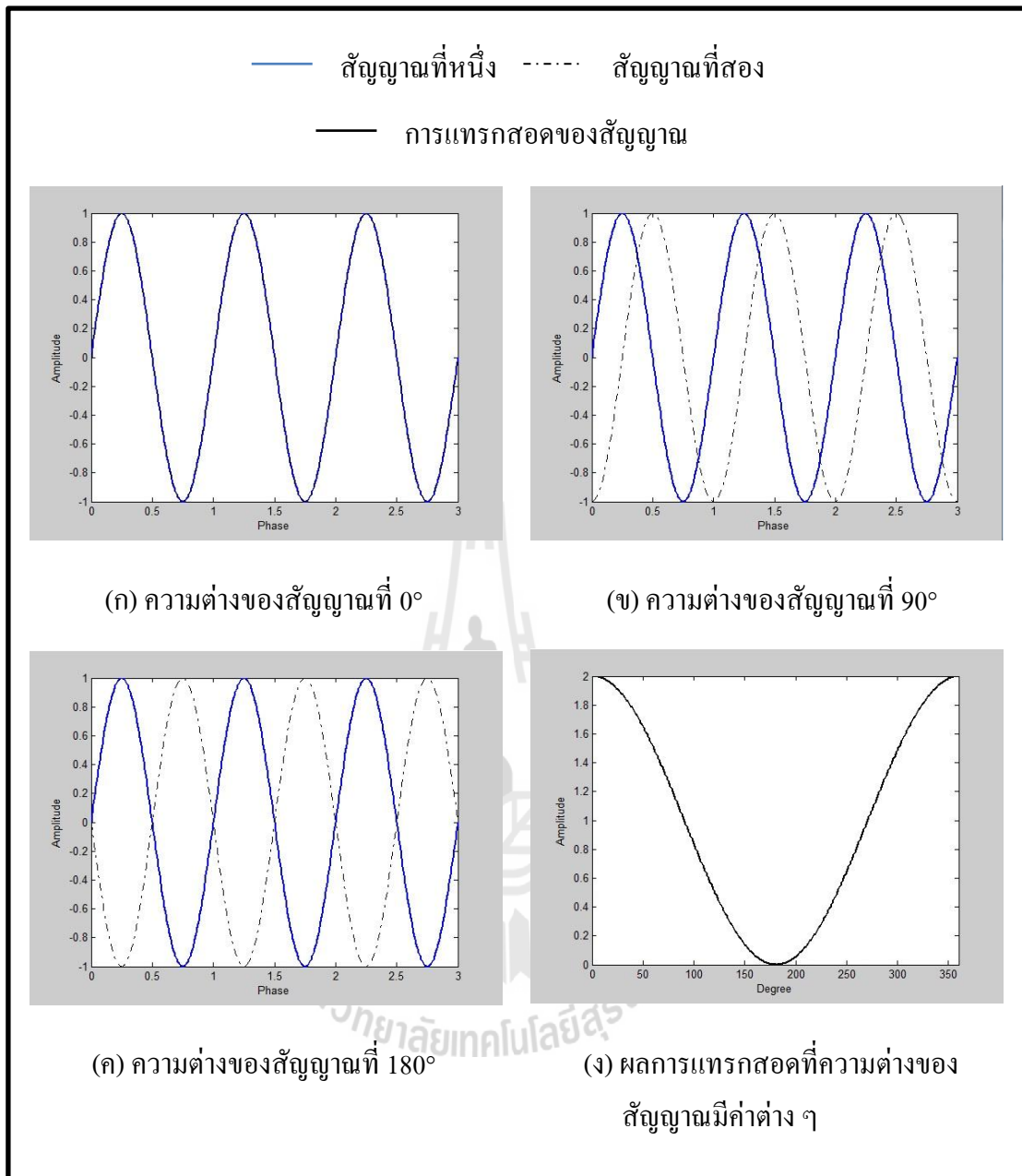
โครงสร้างตัวขับเคลื่อนไฟฟ้าสถิตแบบซี่หวีเป็นส่วนประกอบในโครงสร้างของชิ้นงานที่สามารถทำให้เกิดการเคลื่อนที่ได้ โดยมีทฤษฎีของฟาบริ-เปโรต์ (Fabry-Perot) มาเป็นตัวทดสอบซึ่งฟาบริ-เปโรต์นั้น เป็นชื่อที่ใช้เรียกของหลักการการสะท้อนแสง โดยเมื่อคลื่นแสงถูกปล่อยออกมาจากต้นกำเนิดแสงจะเกิดการชนกันกับตัวสะท้อนแสงแล้วกลับเข้าไปยังต้นกำเนิดของแสง โดยเทคนิคที่นำมาใช้ในการตรวจจับคลื่นแสงนี้เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ (Interferometer) และจากทฤษฎีพื้นฐานของสายใยแก้วนำแสง เมื่อทำการปล่อยคลื่นแสงออกไปจากแหล่งกำเนิดจนถึงปลายสายจะมีคลื่นแสงถูกส่งออกไปนอกปลายสายใยแก้วนำแสง แต่ก็ยังคงมีคลื่นแสงส่วนหนึ่งเกิดการสะท้อนกลับเข้ามาภายในสายใยแก้วนำแสงเหมือนเดิม ดังที่แสดงให้เห็นในรูปที่ 1.1 จะเห็นได้ว่าสัญญาณของคลื่นแสงที่ถูกสะท้อนกลับไปในนั้นจะเกิดการแทรกสอดกันของแสง (Interference) กับสัญญาณของคลื่นแสงที่เกิดการสะท้อนกลับภายในตัวมันเองจากนั้นนำหลักการพื้นฐานของคลื่นแสงทั้งสองคลื่นมาบวกกันในวิธีที่ทำให้เกิดผลรวม แล้วดูจากค่าผลต่างของสัญญาณเพื่อที่จะนำมาวิเคราะห์หาสถานะต้นกำเนิดของคลื่นแสงนั้นได้ เพราะเนื่องจากว่าการนำคลื่นแสงที่มีลักษณะในการปล่อยคลื่นแสงออกมาด้วยระยะทางที่มีความแตกต่างกัน รูปแบบผลลัพธ์จะสามารถอธิบายได้โดยดูจากสัญญาณของคลื่นแสงที่แตกต่างกันของคลื่นแสงทั้งสอง โดยคลื่นแสงที่มีสัญญาณเดียวกัน (In phase) จะมีการเสริมกัน แต่ถ้าหากคลื่นแสงทั้งสองนั้นมีสัญญาณที่ตรงข้ามกัน (Out of phase) จะเกิดการหักล้างกัน ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 1.2 จึงได้นำหลักการดังกล่าวนี้มาทำการประยุกต์ใช้เพื่อทำการหาสถานะต้นกำเนิดแสงได้



รูปที่ 1.1 การเกิดการสะท้อนกลับของคลื่นแสง

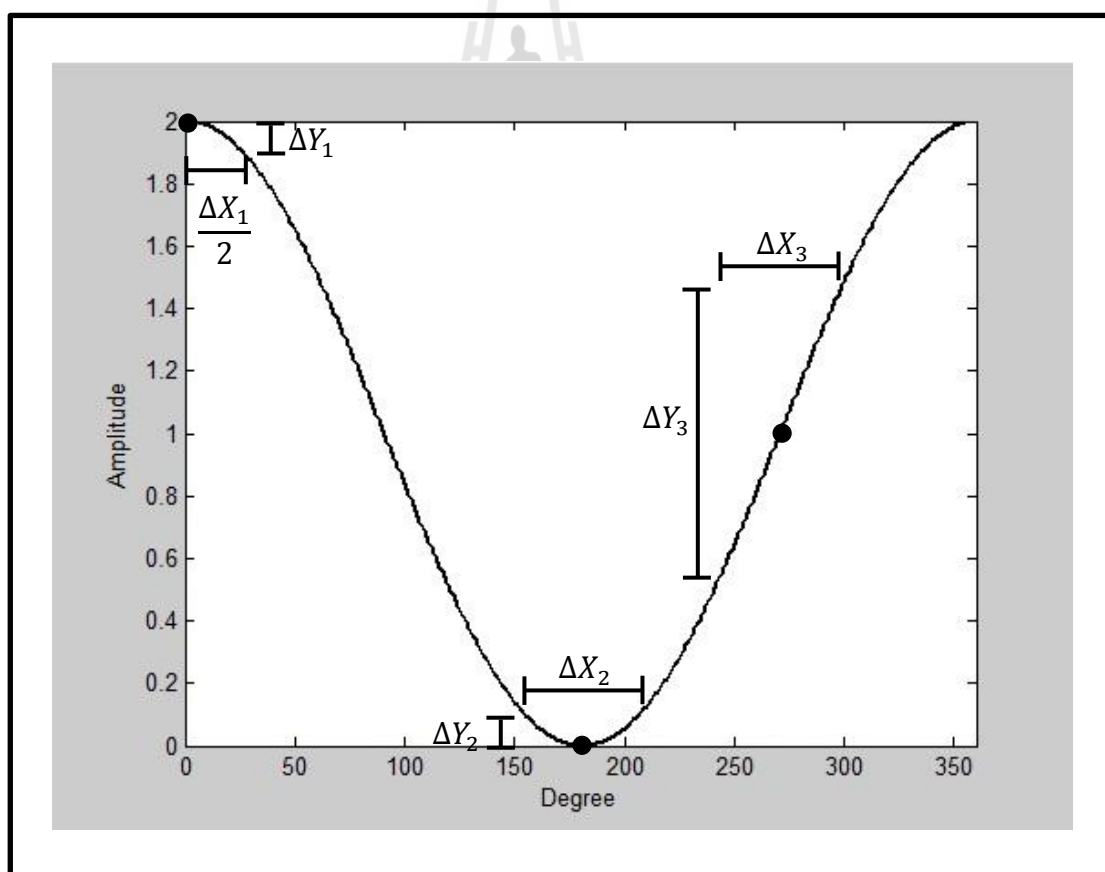


รูปที่ 1.2 การเปรียบเทียบของการเกิดการแทรกสอดกันของสัญญาณสองสัญญาณ



รูปที่ 1.3 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ กรณีที่สัญญาณทั้งสองมีขนาดที่เท่ากัน

จากข้อมูลข้างต้นอาจจะดูเหมือนว่าหลักการของฟาบรี-เปโรต์นั้นเป็นเรื่องที่ง่ายและไม่มี ความซับซ้อนแต่จริง ๆ แล้วหลักการของฟาบรี-เปโรต์นั้นมักจะพบปัญหาเกี่ยวกับระยะในการ สะท้อนกลับของคลื่นแสงหลังจากเกิดการชนกันกับตัวสะท้อนแสง ซึ่งส่วนใหญ่ตัวสะท้อนแสง ดังกล่าวมักจะถูกวางตัวให้อยู่กับที่ ไม่สามารถทำให้เคลื่อนที่ไปมาได้ ส่งผลทำให้เกิดปัญหาในการ วิเคราะห์หาระยะทางที่เหมาะสมที่จะทำให้ได้ผลรวมของสัญญาณที่มีลักษณะของการเกิดที่เสริม กันหรือหักล้างกันของสัญญาณ ในการวิจัยนี้จึงทำการปรับปรุงแก้ไขในส่วนของตัวสะท้อนแสงให้ สามารถขยับและเคลื่อนที่ไปมาได้เพื่อทำการหาจุดเริ่มต้นที่มีความเหมาะสมในการเกิดความไวที่ดี ที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 1.4 ซึ่งค่าความไวที่มีความเหมาะสมนั้นควรมีค่า ΔY ที่มีค่ามาก โดยจะเห็น ได้ว่าตำแหน่งของจุดที่อยู่ด้านบนบนสุดและด้านล่างสุดของกราฟ มีค่าความไวที่น้อย จึงต้องทำการ เลื่อนตำแหน่งเพื่อเพิ่มความไวให้มีค่ามากขึ้น คือบริเวณตำแหน่งกลางของกราฟ



รูปที่ 1.4 แสดงตำแหน่งของจุดเริ่มต้นที่มีผลกับค่าความไว

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 นำเทคนิคฟาบรี-เปโรต์ (Fabry-Perot) มาประยุกต์ใช้ในการสร้างเซ็นเซอร์ด้วยเทคนิคกระบวนการลิโธกราฟี (Lithography process) โดยมีตัวขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้าสถิตแบบซี่หวี (Comb-Drives actuators) เป็นตัวขับเคลื่อนชิ้นงาน
- 1.2.2 พัฒนาการความรู้ใหม่ในกระบวนการผลิตด้วยเทคนิคระบบไฟฟ้าเครื่องกลจุลภาค (Micro-Electro-Mechanical System : MEMS) เพื่อลดต้นทุนในการผลิต

1.3 ข้อตกลงเกี่ยวกับงานวิจัยเบื้องต้น

วัสดุนำแสงที่จะนำมาใช้กับกระบวนการสร้างเซ็นเซอร์สายใยแก้วนำแสงชนิดฟาบรี-เปโรต์ด้วยเทคนิคระบบไฟฟ้าเครื่องกลจุลภาคคือ สารไวแสง (Photoresist) ซึ่งเป็นสารไวแสงชนิดลบ (Negative photoresist : SU-8) เคลือบโลหะ

1.4 ขอบเขตของการทำวิจัย

สร้างและทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ที่นำตัวขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้าสถิตแบบซี่หวีมาใช้ในการหาตำแหน่งของการเกิดการแทรกสอดของแสงที่เหมาะสม

1.5 แนวทางในการดำเนินงานวิจัย

1.5.1 วิธีการดำเนินงานวิจัย

ทำการศึกษาหลักการการทำงานของฟาบรี-เปโรต์ (Fabry-Perot) และกระบวนการสร้างอุปกรณ์ในระดับไมโครเมตรด้วยกระบวนการลิโธกราฟี (Lithography process) โดยศึกษาทั้งการใช้งานคลื่นแสงในย่านแสงอัลตราไวโอเล็ต (Ultra-violet : UV) และคลื่นแสงในย่านรังสีเอกซ์ (Deep X-ray Lithography) จากนั้นจึงทำการศึกษาข้อมูลและโครงสร้างของตัวขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้าสถิตแบบซี่หวี (Comb-Drives actuators) แล้วทำการออกแบบโครงสร้างของชิ้นงานด้วยโปรแกรม Layout Editor® จากนั้นจึงทำการสร้างโครงสร้างโดยใช้กระบวนการลิโธกราฟี และในขั้นตอนกระบวนการสุดท้ายจะเป็นการทดสอบและปรับปรุงแก้ไขกระบวนการทำงานทั้งหมด

1.5.2 สถานที่ในการทำวิจัย

ห้องปฏิบัติการสถานีทดลองระบบลำเลียงแสง 6a (Beamline 6a : DXL) สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) 111 หมู่ที่ 6 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา รหัสไปรษณีย์ 30000

- 1.5.3 เครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัย
1. คอมพิวเตอร์
 2. โปรแกรม Layout Editor[®] เพื่อใช้สำหรับออกแบบลวดลาย
 3. ห้องสะอาด (Cleanroom) และอุปกรณ์
 4. เครื่องฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต (Ultra-violet : UV)
 5. รังสีเอกซ์ (X-ray) ที่ได้จากเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน
 6. เครื่องชุบโลหะด้วยไฟฟ้า
 7. เครื่องเคลือบโลหะสเปตเตอริง (Sputtering)

1.6 ระเบียบวิธีในการดำเนินงานวิจัย

- 1.6.1 ออกแบบลวดลายโครงสร้างของหน้ากากด้วยโปรแกรม Layout Editor[®]
- 1.6.2 สร้างหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์ด้วยเทคนิคระบบไฟฟ้าเครื่องกลจุลภาค โดยใช้กระบวนการลิโธกราฟีด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต จากนั้นจึงทำการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า
- 1.6.3 สร้างโครงสร้างชิ้นงานโดยใช้เทคนิคระบบไฟฟ้าเครื่องกลจุลภาคด้วยกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์
- 1.6.4 ทดสอบและแก้ไขการทำงานของอุปกรณ์ เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการสะท้อนแสงสูงสุด

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.7.1 พัฒนาการความรู้ใหม่ในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนระบบไฟฟ้าเครื่องกลจุลภาค ให้สามารถผลิตชิ้นงานได้ในปริมาณที่มากขึ้น
- 1.7.2 สร้างอุปกรณ์เซ็นเซอร์สายใยแก้วนำแสงชนิดฟาบรี-เปโรต์ ด้วยเทคนิคระบบไฟฟ้าเครื่องกลจุลภาคที่มีต้นทุนต่ำด้วยกระบวนการลิโธกราฟีด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต (Ultra-violet : UV)
- 1.7.3 พัฒนาเทคนิคการสร้างตัวขับเคลื่อนไฟฟ้าสถิตแบบซี่หวี (Comb-Drives actuators)
- 1.7.4 พัฒนาผลงานเกี่ยวกับทฤษฎีฟาบรี-เปโรต์ โดยใช้เทคนิคจากกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์ (Deep X-ray Lithography) ที่ได้มาจากเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน

1.8 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์

เนื้อหาในวิทยานิพนธ์นี้จะประกอบไปด้วย 7 บท ดังนี้

บทที่ 1 บทนำ เป็นการกล่าวถึงความจำเป็นและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย ข้อตกลงเกี่ยวกับงานวิจัยเบื้องต้น ขอบเขตของการทำวิจัย แนวทางในการดำเนินงานวิจัย ระเบียบวิธีในการวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

บทที่ 2 ปรัชญาบรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เป็นการศึกษเกี่ยวกับทฤษฎีและข้อมูลเพิ่มเติมที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการสร้างตัวขับเคลื่อนไฟฟ้าสถิตแบบซีทีวีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบไฟฟ้าเครื่องกลจุลภาค

บทที่ 3 กระบวนการพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย กล่าวถึงกระบวนการพื้นฐานที่นำมาใช้ในการออกแบบและใช้ในการสร้างโครงสร้างตัวขับเคลื่อนไฟฟ้าสถิตแบบซีทีวี

บทที่ 4 ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในบทนี้จะศึกษาทฤษฎีพื้นฐานที่นำมาใช้ ได้แก่ ทฤษฎีของสายใยแก้วนำแสง และทฤษฎีเกี่ยวกับตัวขับเคลื่อนไฟฟ้าสถิตแบบซีทีวี รวมไปถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำมาใช้ในการคำนวณในการสร้าง

บทที่ 5 กระบวนการพัฒนาและการสร้างตัวขับเคลื่อนไฟฟ้าสถิตแบบซีทีวี จะเป็นการกล่าวถึงลักษณะการออกแบบรวมไปถึงขั้นตอนกระบวนการสร้าง และยังสามารถกล่าวถึงโครงสร้างของชิ้นงานที่เคยทำมาก่อนหน้านี้เพื่อพัฒนาให้มาเป็นตัวขับเคลื่อนไฟฟ้าสถิตแบบซีทีวีที่ใช้ในงานวิจัย

บทที่ 6 การทดสอบและผลการทดสอบ

บทที่ 7 สรุปผลของงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

ภาคผนวก ก. จะกล่าวถึงข้อมูล โปรแกรมที่นำมาใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำการออกแบบและสร้างในงานวิจัย

ภาคผนวก ข. เป็นบทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์และเผยแพร่

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ระบบไฟฟ้าเครื่องกลจุลภาค (Micro-Electro-Mechanical System)

ระบบไฟฟ้าเครื่องกลจุลภาค หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Micro-Electro-Mechanical System (MEMS) เป็นอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็กในระดับไมโครเมตร (สิบยกกำลังลบหกเมตร) ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนของการขับเคลื่อนโดยใช้ไฟฟ้าและส่วนของกลไกที่สามารถเคลื่อนที่หรือถูกกระทำ ซึ่งทั้งสองส่วนนี้ถูกสร้างขึ้นโดยใช้เทคโนโลยีการผลิตวงจรรวม (Integrated circuit : IC) เช่นเดียวกับการผลิตวงจรรีเอเล็กทรอนิกส์ ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคระบบไฟฟ้าเครื่องกลจุลภาคเป็นเทคโนโลยีสมัยใหม่ที่กำลังเติบโตอย่างสูงและต่อเนื่องในปัจจุบัน โดยมักจะนำไปใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องมือเซ็นเซอร์ (Sensor) และตัวขับเคลื่อน (Actuator) เทคโนโลยียานยนต์ เทคโนโลยีทางการแพทย์และชีวภาพ การสื่อสารโทรคมนาคม เครื่องมือวัดทางอุตสาหกรรม และยังสามารถใช้ในการวัดค่าต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิ ตัวตรวจรู้ความชื้น ตัวตรวจรู้ความดัน ตัวตรวจรู้ความเร่ง ตัวตรวจรู้ความเครียด เป็นต้น จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าระบบไฟฟ้าเครื่องกลจุลภาคนั้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานกับอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญและมีความจำเป็นต่อชีวิตประจำวันทั้งสิ้น นอกจากนี้แล้วลักษณะของโครงสร้างยังมีขนาดเล็ก จึงทำให้ได้เปรียบในเรื่องของต้นทุนทางการผลิตที่มีต้นทุนต่ำ

2.2 ทฤษฎีฟาบรี-เปโรต์ (Fabry-Perot)

เทคนิคฟาบรี-เปโรต์จะนำมาใช้ในการหาระยะที่มีความเหมาะสมในการเกิดการแทรกสอดของแสงที่มีความไวสูง หากตัวสะท้อนแสงมีการเคลื่อนที่เพียงเล็กน้อยก็จะทำให้ผลของการแทรกสอดมีการเปลี่ยนแปลง แต่ปัญหาที่มักจะมีคือตัวสะท้อนแสงนั้นจะถูกวางตัวให้อยู่กับที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ไปมาได้ ทำให้ไม่ทราบลักษณะของการเกิดการแทรกสอด ในงานวิจัยนี้จึงทำการแก้ไขปัญหาดังกล่าว ด้วยการนำเทคนิคระบบไฟฟ้าเครื่องกลจุลภาคเข้ามาประยุกต์ใช้เพื่อช่วยในการสร้างตัวสะท้อนแสงให้สามารถเกิดการเคลื่อนที่และขยับไปมาได้ โดยใช้กระบวนการลิโธกราฟีเข้ามาช่วยในการสร้างโครงสร้างของชิ้นงาน เนื่องจากกระบวนการดังกล่าวสามารถสร้างโครงสร้างที่มีขนาดเล็ก ๆ ในระดับไมโครเมตรขึ้นมาได้ และกระบวนการลิโธกราฟีเริ่มเป็นที่รู้จัก และได้มีการนำมาประยุกต์ใช้กับงานทางด้านโทรคมนาคมอย่างแพร่หลาย ซึ่งจะเห็นได้จากงานปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

Gabriel M. Rebeiz (2003) เป็นหนังสือที่ประกอบไปด้วยเนื้อหาที่มีความเกี่ยวข้องและอธิบายเกี่ยวกับทฤษฎีของโครงสร้างคานยัดที่มี 4 ชนิด ได้แก่ คานยัดแบบตรง คานยัดแบบก้ำมปู คานยัดแบบพับ และคานยัดแบบขด นอกจากนี้แล้วยังมีสมการที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการคำนวณเพื่อที่จะนำไปใช้ในการออกแบบและสร้าง โครงสร้างของคานยัดแต่ละชนิด ซึ่ง โครงสร้างของคานยัดแต่ละชนิดมีคุณสมบัติและความเหมาะสมในการนำไปใช้งานที่แตกต่างกัน

Yu Fan and Mojtabakahrizi (2003) ในส่วนของงานวิจัยนี้จะเป็นการยกตัวอย่างที่ได้นำเทคนิคฟาบรี-เปโรต์ไปใช้งาน ซึ่งพบได้อย่างแพร่หลาย เช่น ใช้งานเป็นเซ็นเซอร์เพื่อวัดงานทางด้านเครื่องจักรกล เช่น เซ็นเซอร์เพื่อวัดความดัน และเซ็นเซอร์เพื่อวัดทางด้านชีวเคมี และนอกจากนั้นแล้วยังมีการกล่าวถึงการทำงานที่เกี่ยวข้องกับสายใยแก้วนำแสงที่นำมาใช้งานร่วมกับเทคนิคระบบไฟฟ้าเครื่องกลจุลภาค มีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Micro-Opto-Electro-Mechanical-System หรือ MOEMS จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั้นจะสังเกตเห็นได้ว่าการนำเทคนิคฟาบรี-เปโรต์ไปใช้งานส่วนใหญ่ นั้น มักจะนำไปใช้กับงานในลักษณะของเซ็นเซอร์เป็นส่วนใหญ่

VitorioArrivabeni Longo de Almeida, Paulo Henrique de godoy, Emilio Carlos Nelli Silva, Ricardo Cury Ibrahim (2004) เป็นการศึกษาค้นคว้าที่เน้นในเรื่องของการออกแบบและสร้าง โครงสร้างตัวขับเร้าทางไฟฟ้าสถิตแบบซีวีวี ในกระบวนการสร้างนั้นจะใช้สารไวแสงชนิดบวก (Positive photoresist : AZ-4620) มาใช้งาน เพื่อเป็นการลดต้นทุนในการผลิต ในส่วนของกระบวนการสร้างนั้นจะถูกสร้างขึ้นมาด้วยการใช้กระบวนการชุบโลหะทางไฟฟ้า โลหะที่ใช้ในการชุบคือ ทองแดงและนิกเกิล แต่ฐานรองของชิ้นงานที่ใช้เป็นซิลิกอนและอลูมิเนียม

Ming Li, Ming Wang (2006) ในงานวิจัยนี้จะเป็นการศึกษาเกี่ยวกับการวัดค่าความดันด้วยการใช้เซ็นเซอร์ โดยมีสองเทคนิคที่นำมาสร้างร่วมกันคือ เทคนิคระบบไฟฟ้าเครื่องกลจุลภาค (MEMS) และฟาบรี-เปโรต์ (Fabry-Perot) นอกจากนี้แล้วยังมีการนำเครื่องมือวัดความดันและเครื่องสเปกตรัมเพิ่มเข้ามาเพื่อช่วยในการบ่อนค่าและยังได้ดูการสะท้อนและการเลื่อนของสัญญาณอีกด้วย โดยส่วนของกระบวนการสร้าง โครงสร้างจะทำการเคลือบโครงสร้างด้วยซิลิกอนเพื่อทำให้เกิดการตอบสนองและความอ่อนไหวของความดัน ซึ่งผลที่ได้จะแสดงออกมาในรูปแบบ highlinear มีความดันอยู่ในช่วง 0.2-1.0 Mpa และมีความไวอยู่ที่ 10.07 nm/Mpa

G.C. Hill, R. Melamnd, F.E. Declercq, A.A. Davenport, I.H. Chan, P.G. Hartwell, B.L. Pruitt (2007) ในงานวิจัยนี้จะเป็นการสร้างโครงสร้างเซ็นเซอร์เพื่อที่จะนำมาวัดค่าความดัน โดยในการออกแบบนั้นจะใช้งานสารไวแสงชนิดลบ (Negative photoresist : SU-8) มาทำการผลิตโครงสร้างชิ้นงาน แต่ในส่วนของการสะท้อนแสง ก็ยังคงใช้โลหะเพื่อทำหน้าที่ให้เกิดการสะท้อนแสง ทำการสร้างโครงสร้างด้วยกระบวนการลิโธกราฟีด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต ทำให้เห็นว่าการใช้งานด้วยกระบวนการลิโธกราฟีด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตนั้น จะให้ชิ้นงานที่มีความเรียบมากยิ่งขึ้น จากนั้นทำการเปรียบเทียบการวัดความดันระหว่างการเคลือบชิ้นงานด้วยไทเทเนียมกับ

ชิ้นงานที่เคลือบด้วยทองคำ โดยทำการทดลองในจำนวนชั่วโมงที่แตกต่างกัน ซึ่งผลที่ได้คือ ทองคำ จะให้ค่าความดันที่มีค่าที่เกิดการเปลี่ยนแปลงที่น้อยกว่า

David Hays, AnisZribi, Shankar Chandrasekaran, ShivappaGoravar, SandipMaity, Leonard R. Douglas, Kevin Hsu, and Ayan Banerjee (2010) ได้มีการศึกษาและเน้นในเรื่องเกี่ยวกับการปรับจูนตัวขับเร้าที่มีขนาดเล็ก ๆ โดยมีอ้างอิงถึงหลักการทำงานของฟาบริ-เปโรต์ (Fabry-Perot Interferometer) เพื่อมาทำการเปรียบเทียบการวางตัวของตัวขับเร้าในสองลักษณะคือแบบขนานและแบบอนุกรม โดยการเปรียบเทียบนั้นจะใช้ค่าพีแวนส์ที่มีประสิทธิภาพมากกว่า และในการทดลองยังได้พบว่า การเคลือบตัวสะท้อนแสงด้วยทองคำจะทำให้เกิดการสะท้อนที่สูงกว่า (Highly reflective) โดยในการวิจัยนี้จะนำอุปกรณ์ที่เป็นตัวกรองแสงของเส้นใยแก้วนำแสงมารวมกับเทคนิคระบบไฟฟ้าเครื่องกลจุลภาค (Micro-Electro-Mechanical System : MEMS)



บทที่ 3

กระบวนการพื้นฐานที่ใช้ในงานวิจัย

ในการสร้างและการพัฒนาอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับระบบไฟฟ้าเครื่องกลจุลภาค (MEMS) นั้นใช้เทคนิคและกระบวนการที่ซับซ้อน เพื่อทำการสร้างชิ้นงานในส่วนต่าง ๆ โดยการขึ้นรูปของโครงสร้างชิ้นงานและหน้ากากกันรังสีเอกซ์ (X-ray Mask) มักนิยมใช้กระบวนการลิโธกราฟี (Lithography process) มาเป็นกระบวนการสร้างพื้นฐาน นอกจากนั้นแล้วยังมีกระบวนการเคลือบโลหะด้วยเทคนิคสปัตเตอริง (Sputtering) เข้ามาช่วยเพื่อให้โครงสร้างของชิ้นงานสามารถสะท้อนแสงและนำไฟฟ้าได้

3.1 กระบวนการลิโธกราฟี (Lithography process)

กระบวนการลิโธกราฟี (Lithography process) หมายถึง กระบวนการถ่ายทอดลวดลายจากลวดลายแม่แบบด้วยการฉายแสงผ่านหน้ากากกันแสง (Mask) โดยถ่ายทอดลงบนฐานรอง (Substrate) ที่ทำการเคลือบด้วยสารเคมี สารเคมีดังกล่าวนั้นจะต้องมีคุณสมบัติทางกายภาพจะมีการเปลี่ยนแปลงสภาพไปจากเดิมเมื่อมีแสงมาตกกระทบ และเรียกสารเคมีดังกล่าวนี้ว่า สารไวแสง (Photoresist) สารไวแสงทำหน้าที่เป็นพื้นที่ในการรับแสง จากนั้นนำไปทำให้เกิดความร้อนด้วยการอบในเตาอบเพื่อให้บริเวณที่ถูกฉายแสงนั้นเกิดการทำปฏิกิริยาส่งผลให้เห็นลวดลายขึ้นมา แล้วจึงนำไปล้างในส่วนที่ไม่ต้องการออกด้วยน้ำยาล้างสารไวแสง (Developer photoresist) ลวดลายของชิ้นงานจะปรากฏขึ้นอย่างชัดเจน ส่วนลวดลายนั้นมีความเหมือนหรือตรงกันข้ามกับลวดลายแม่แบบนั้นก็จะขึ้นอยู่กับวิธีการเลือกใช้งานของแต่ละชนิดของสารไวแสง ซึ่งจะอธิบายเรื่องสารไวแสงนี้ในหัวข้อถัดไป

กระบวนการลิโธกราฟีจะเกิดขึ้นได้ ก็ต่อเมื่อมีแสงมาตกกระทบลงบนสารไวแสง ซึ่งแสงที่ได้กล่าวถึงในข้างต้นนั้นจะหมายถึง แสงที่อยู่ในย่านแสงอัลตราไวโอเล็ต (Ultra-violet : UV) และแสงที่อยู่ในย่านรังสีเอกซ์ (X-ray)

3.1.1 กระบวนการลิโธกราฟีด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต (Ultra-violet Lithography)

ถือว่าเป็นกระบวนการพื้นฐานขั้นตอนแรกที่นำมาใช้ในงานวิจัยเพื่อที่จะสร้างหน้ากากคูดซ์รังสีเอกซ์ ซึ่งแสงอัลตราไวโอเล็ต (Ultra-violet : UV) เรียกชื่อสั้น ๆ ว่า แสงยูวี และยังมีอีกชื่อหนึ่งที่คนไทยรู้จักและมักเรียกกันคือ แสงเหนือม่วง โดยแสงอัลตราไวโอเล็ตนั้นเป็นส่วนหนึ่งของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า แต่เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นที่ดวงตาของมนุษย์สามารถรับรู้ความรู้สึกได้ ซึ่งอยู่ในช่วงย่านความถี่ 100 – 400 นาโนเมตร แต่ในการทำวิจัยนี้ใช้เพียง

แค่ช่วงย่านความถี่ 350 – 400 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงที่ทำปฏิกิริยาได้ดีกับสารไวแสงและเป็นสารไวแสงที่มีความหนาค่อนข้างน้อยหรือมีความหนา 5 – 100 ไมโครเมตร ในการกำหนดเพื่อให้ได้ความหนาของชั้นสารไวแสงตามที่ต้องการดังกล่าวจำเป็นต้องใช้วิธีการหมุนเคลือบด้วยเครื่องหมุนเคลือบ (Spinner)

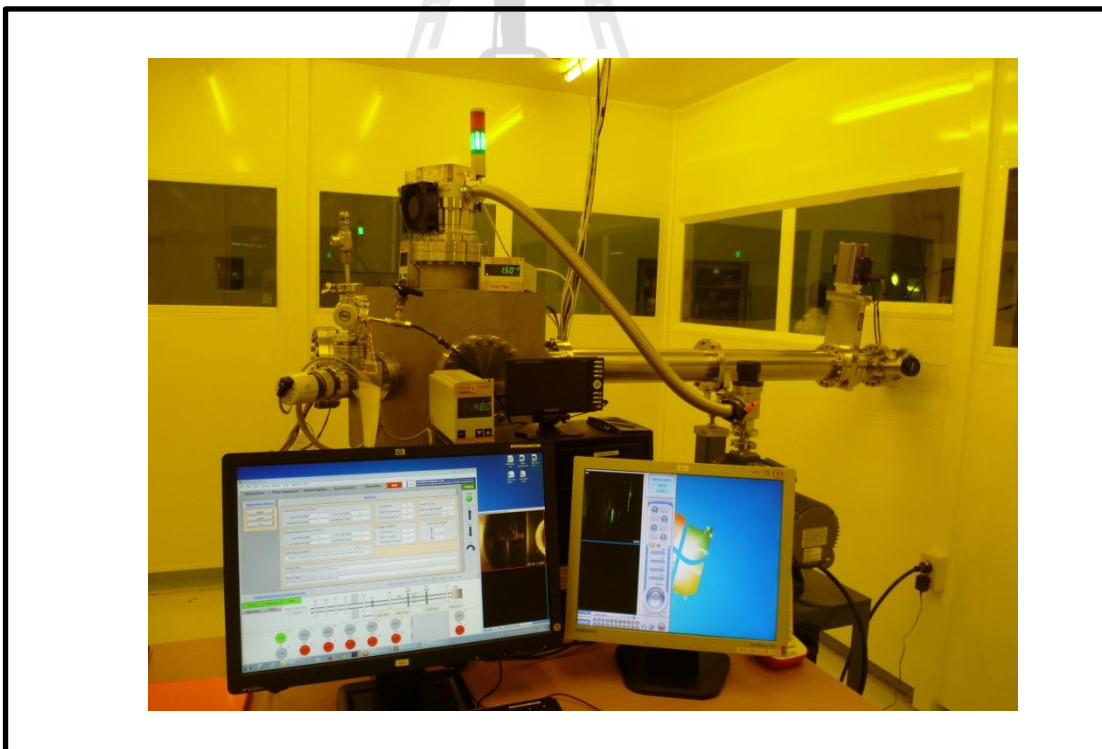
กระบวนการลิโธกราฟีด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต มีขั้นตอนการสร้างคือ นำแม่แบบมาประกบกับสารไวแสงที่ถูกเคลือบบนฐานรอง โดยแม่แบบที่นำมาใช้ในการถ่ายทอดลวดลายนั้นเป็นแผ่นฟิล์มบางที่ได้จากการออกแบบด้วยโปรแกรม Layout Editor[®] จากนั้นก็ทำการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต เวลาที่ใช้ในการฉายแสงนั้นจะขึ้นอยู่กับความหนาของสารไวแสง หลังจากทำการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตแล้วต้องนำชิ้นงานดังกล่าวไปอบเพื่อให้สารไวแสงนั้นเกิดลวดลาย แล้วจึงล้างสารไวแสงในส่วนที่ไม่ต้องการออกด้วยน้ำยาล้างสารไวแสง (Developer photoresist)



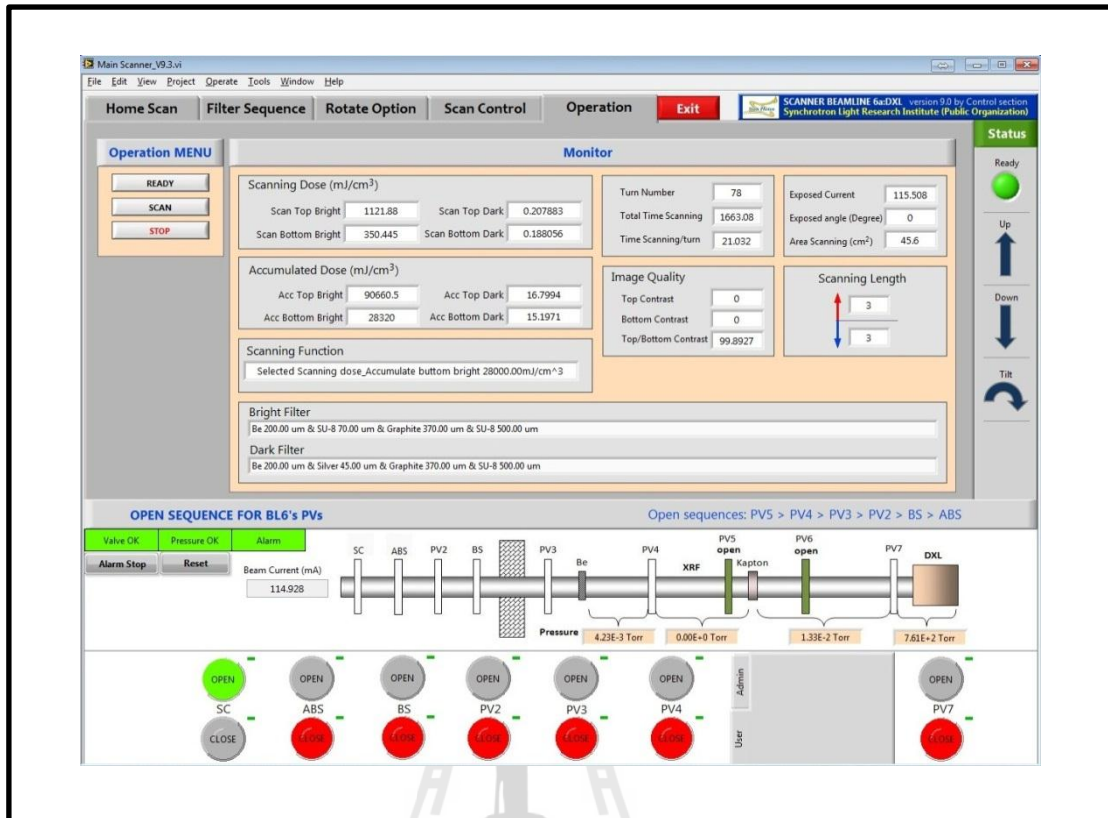
รูปที่ 3.1 เครื่องฉายแสงอัลตราไวโอเล็ต

3.1.2 กระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์ (Deep X-ray Lithography)

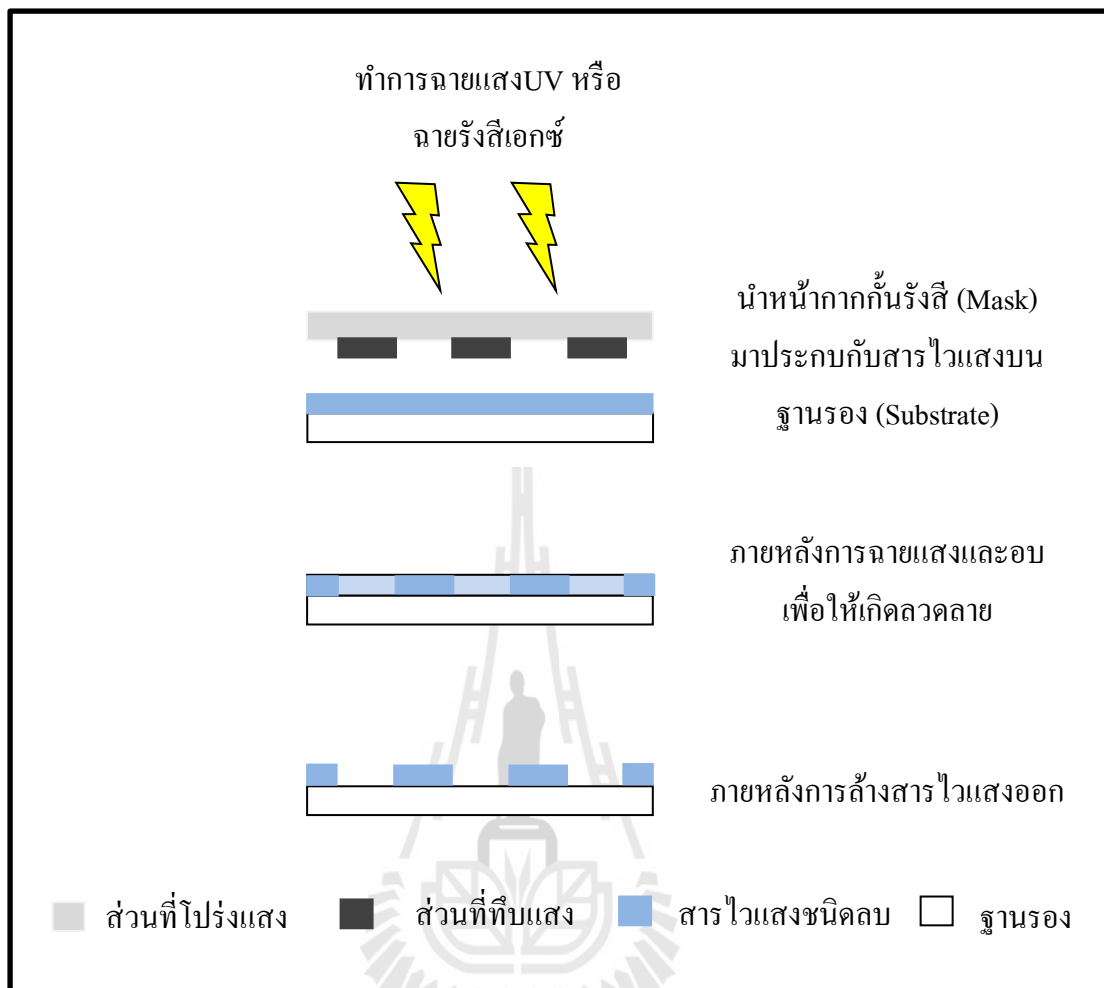
กระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์จะมีลักษณะของขั้นตอนที่คล้าย ๆ กับกระบวนการลิโธกราฟีด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต แต่จะมีความแตกต่างกันในส่วนของย่านความถี่ที่นำมาใช้งาน รังสีเอกซ์ที่นำมาใช้งานนี้ได้มาจากเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนซึ่งจะมีคุณสมบัติคือ มีพลังงานที่สูงสามารถสร้างลวดลายที่มีสัดส่วนสูงหรือมีความหนาเกิน 100 ไมโครเมตรได้ คุณสมบัตินี้จึงเป็นข้อดีที่เหมาะสมนำมาสร้างโครงสร้างชิ้นงานที่เกี่ยวกับงานทางด้านระบบไฟฟ้า เครื่องกลจุลภาคได้เป็นอย่างดี ในส่วนของหน้ากากกันรังสีเอกซ์นั้นจะถูกสร้างมาจากกระบวนการลิโธกราฟีด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตซึ่งลวดลายของชิ้นงานต้องอยู่ในรูปของวัสดุคูดกลืนรังสีเอกซ์ วัสดุคูดกลืนรังสีเอกซ์นี้ได้แก่ เงิน นิกเกิล หรือทองคำ ก็ได้ ซึ่งทองคำนั้นมีคุณสมบัติที่คูดกลืนรังสีเอกซ์ได้ดีที่สุดแต่ก็มีราคาแพงที่สุดเช่นกัน และคุณสมบัติอีกอย่างของฐานรองหน้ากากกันรังสีเอกซ์นั้นก็คือ ต้องมีความโปร่งแสงต่อรังสีเอกซ์ ได้แก่ กราไฟท์แข็ง กราไฟท์อ่อน กระฉก แผ่นใส เป็นต้น



รูปที่ 3.2 เครื่องฉายรังสีเอกซ์ ตั้งอยู่ที่ห้องปฏิบัติการสถานีทดลองระบบลำเลียงแสง 6a ณ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน



รูปที่ 3.3 หน้าต่างโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมการฉายรังสีเอกซ์



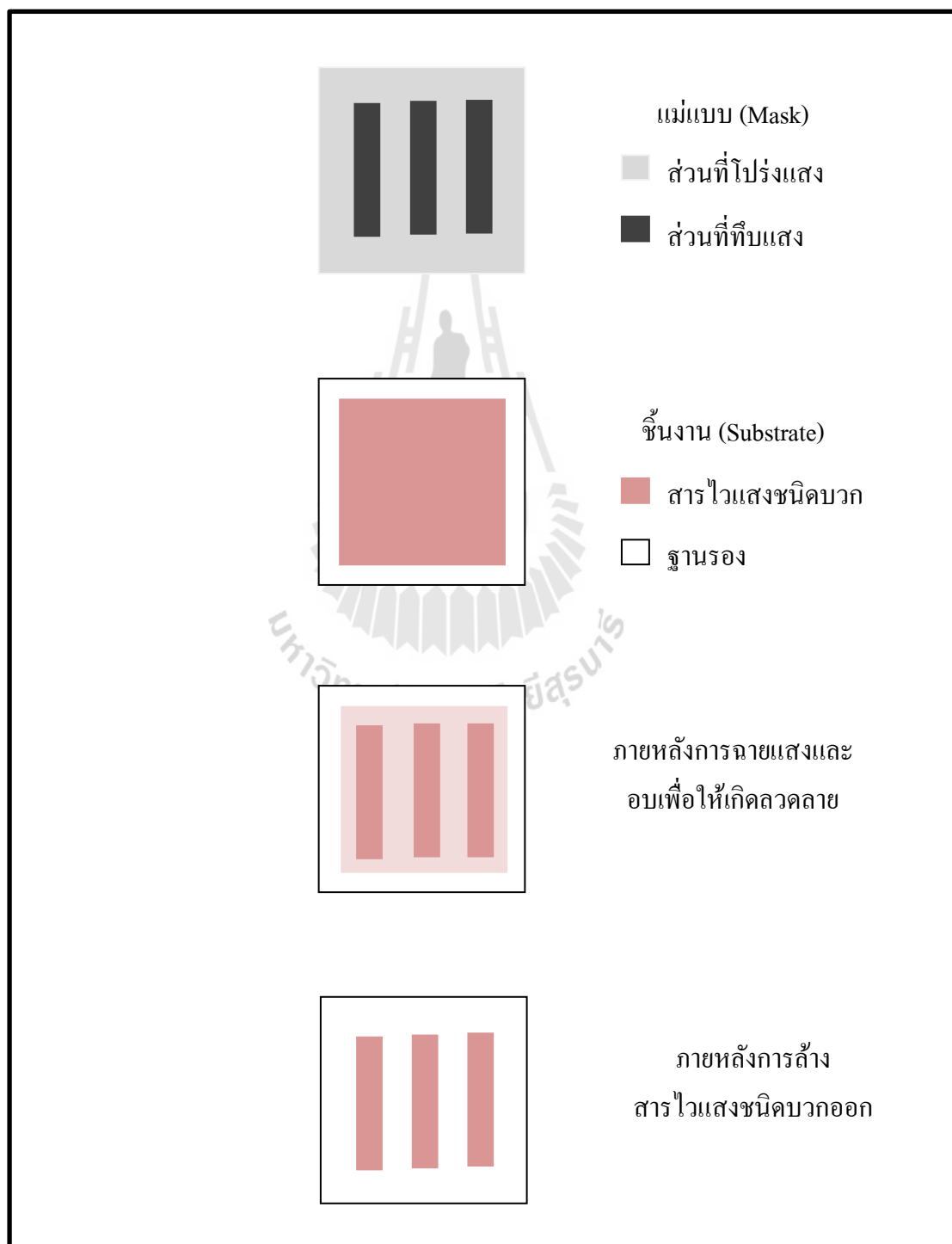
รูปที่ 3.4 มุมมองจากทางด้านข้างของกระบวนการลิโธกราฟีผ่านสารไวแสงชนิดลบ

3.2 สารไวแสง (Photoresist)

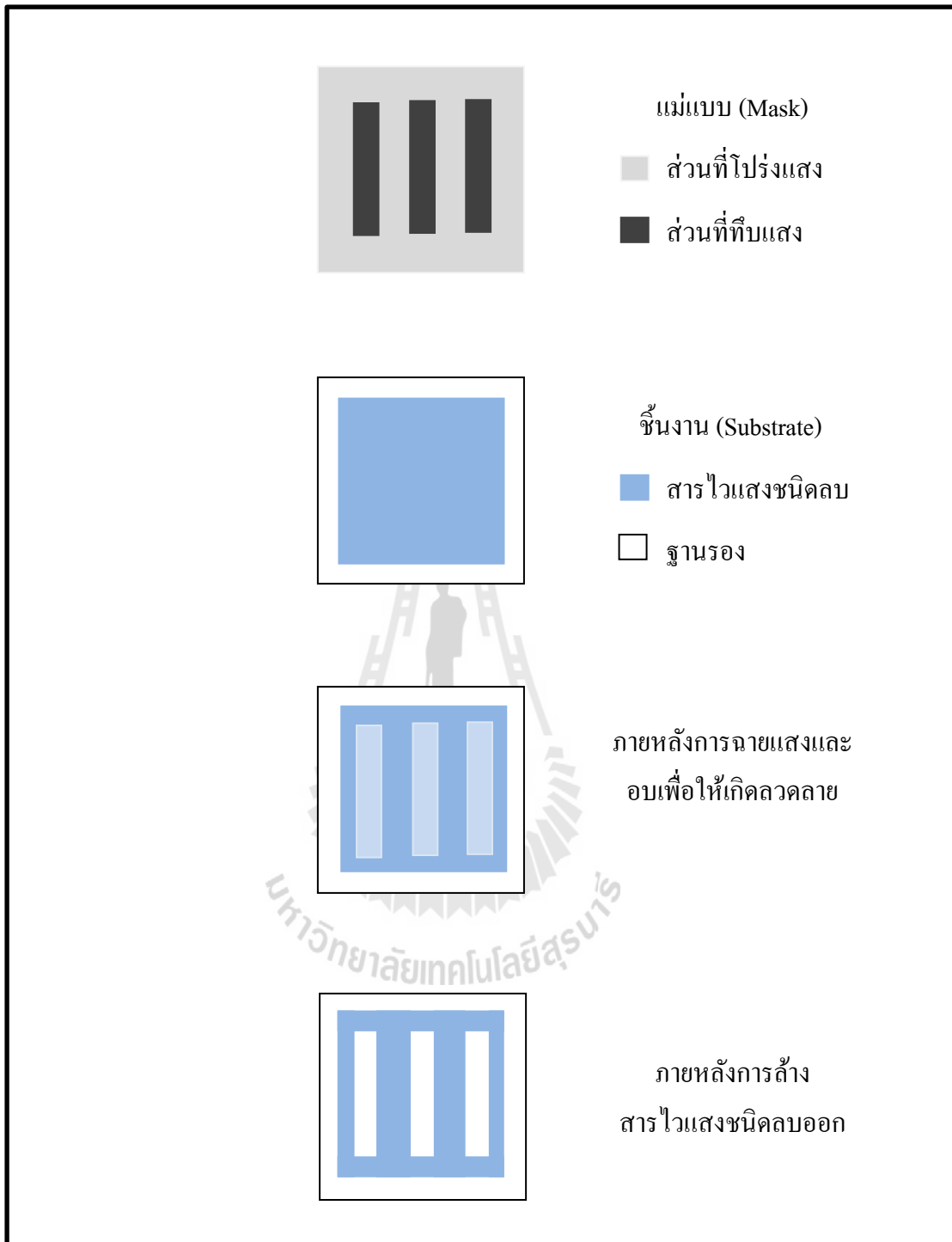
สารไวแสงเป็นพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่มีการจำแนกแบ่งออกตามลักษณะทางกายภาพที่มีการเปลี่ยนแปลงไปคือ สารไวแสงชนิดบวก (Positive photoresist) และสารไวแสงชนิดลบ (Negative photoresist) สารไวแสงทั้งสองชนิดมีความแตกต่างกันทางกายภาพและลักษณะการนำไปใช้งาน โดยสารไวแสงชนิดบวกเมื่อมีแสงมาตกกระทบจะไม่เกิดการแข็งตัวของสารไวแสงเมื่อนำน้ำยาล้างสารไวแสงมาล้างออกพบว่าในส่วนที่โดนแสงนั้นสามารถล้างออกไปได้ แต่มีข้อจำกัดในเรื่องของความหนา ซึ่งความหนาของสารไวแสงชนิดบวกมีความหนาไม่มากนักจึงทำให้สามารถล้างออกได้ง่าย ส่วนสารไวแสงชนิดลบจะมีลักษณะที่ตรงกันข้ามกับสารไวแสงชนิดบวกคือเมื่อโดนแสงจะเกิดการแข็งตัวขึ้น เมื่อนำน้ำยาล้างสารไวแสงมาล้างทำให้ส่วนที่ไม่โดนแสงสามารถล้างออกไปได้ เนื่องจากว่าสารไวแสงชนิดลบมีความเหนียวที่มากกว่าสารไวแสงชนิดบวกจึงทำให้สามารถสร้างชิ้นงานที่มีความหนาได้มากกว่าสารไวแสงชนิดบวก แต่ส่งผลให้มีปัญหาในเรื่องของการล้าง

ที่ต้องใช้เวลาในการล้างค่อนข้างนานกว่า ตัวอย่างสารไวแสงชนิดบวกที่นำมาใช้งานคือ AZ photoresist และสารไวแสงชนิดลบคือ SU-8 photoresist

รูปที่ 3.5 และรูปที่ 3.6 จะเป็นเปรียบเทียบให้เห็นถึงขั้นตอนของการสร้างชิ้นงานด้วยกระบวนการลิโธกราฟีผ่านสารไวแสงชนิดบวกและสารไวแสงชนิดลบตามลำดับ



รูปที่ 3.5 มุมมองจากทางด้านบนของกระบวนการลิโธกราฟีผ่านสารไวแสงชนิดบวก

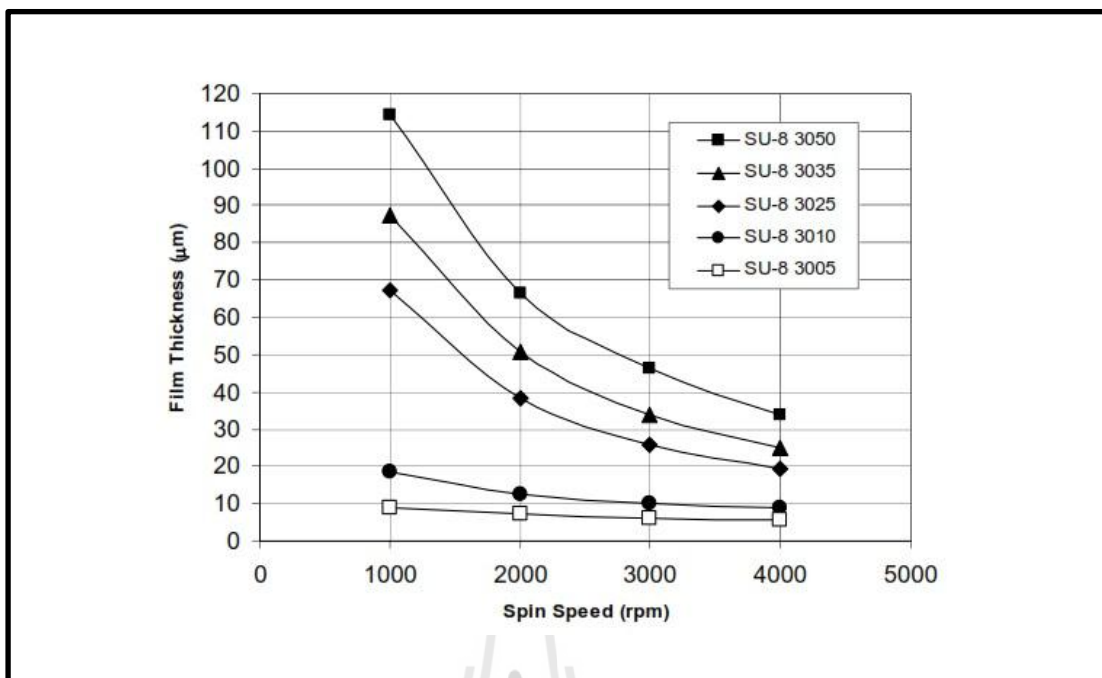


รูปที่ 3.6 มุมมองจากทางด้านบนของกระบวนการลิโธกราฟีผ่านสารไวแสงชนิดลบ

สารไวแสงที่จะนำมาใช้ในงานวิจัยนี้จะใช้สารไวแสงชนิดลบ (SU-8 photoresist) เพราะต้องการสร้างชิ้นงานที่มีลักษณะสัดส่วนสูงมากกว่า 100 ไมโครเมตร ดังนั้นสารไวแสงชนิดลบจึงเหมาะที่จะนำมาใช้มากกว่าสารไวแสงชนิดบวก ซึ่งในหัวข้อถัดไปนั้นจะเป็นการอธิบายเกี่ยวกับกระบวนการขั้นตอนของการเตรียมสารไวแสงให้อยู่บนฐานรองเพื่อนำไปใช้งานสำหรับกระบวนการลิโธกราฟีซึ่งจะมี 2 ขั้นตอนหลัก ๆ คือ การหมุนเคลือบสารไวแสงด้วยเครื่องหมุนเคลือบ (Spinner) และการหยอดสารไวแสง

3.2.1 การหมุนเคลือบสารไวแสงด้วยเครื่องหมุนเคลือบ (Spinner)

เครื่องหมุนเคลือบหรือ Spinner เป็นเครื่องมือที่ช่วยในการกำหนดความหนาของสารไวแสง ในกระบวนการนี้ถือว่าเป็นขั้นตอนที่ทำได้ง่ายและมีความแม่นยำมากในเรื่องของการกำหนดความหนาของสารไวแสง โดยสิ่งที่จะนำมาใช้ในการกำหนดความหนาของสารไวแสงคือชนิดของสารไวแสงที่นำมาใช้งานและความเร็วต่อรอบที่ใช้ในการหมุนเคลือบ สามารถอ้างอิงได้จากข้อมูลที่ได้แสดงในรูปที่ 3.7 แต่ก็จะขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ในการหมุนเคลือบและอุณหภูมิสภาพแวดล้อม เมื่อทำการหมุนเคลือบเสร็จแล้วให้นำชิ้นงานนั้นมาอบตามความหนาของสารไวแสงซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 3.1 แสดงความหนาของสารไวแสงชนิดลบ (SU-8 ตระกูล 3000) ที่เลือกนำมาใช้งานและเวลาที่ต้องใช้ในการอบเพื่อให้สารไวแสงนั้นอยู่ตัวหลังจากทำการหมุนเคลือบสารไวแสงเสร็จแล้วและพร้อมที่จะนำไปใช้ในกระบวนการต่อไป รูปที่ 3.9 จะเป็นการอธิบายขั้นตอนของการหมุนเคลือบสารไวแสงด้วยเครื่องหมุนเคลือบ



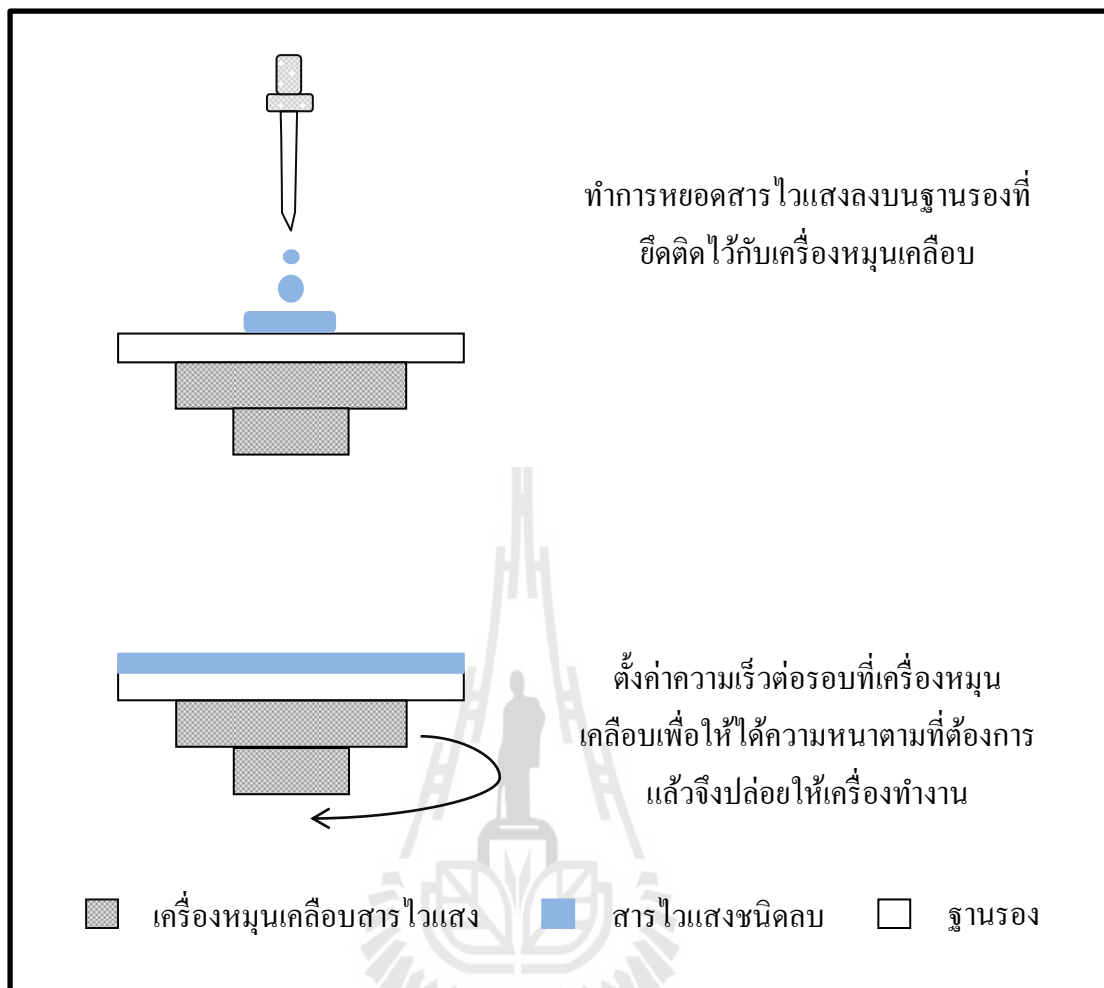
รูปที่ 3.7 แสดงการเปรียบเทียบความหนาของสารไวแสงกับความเร็วดังรอบที่ใช้ในการหมุนเคลือบของสารไวแสงชนิดลบตระกูล 3000

ตารางที่ 3.1 แสดงความหนาของสารไวแสงชนิดลบตระกูล 3000 และเวลาที่ใช้ในการอบหลังจากทำการหมุนเคลือบสารไวแสง

ความหนาของสารไวแสง (ไมโครเมตร)	เวลาที่ใช้ในการอบหลังจากหมุนเคลือบ (นาที)
4 – 10	2 – 3
8 – 15	5 – 10
20 – 50	10 – 15
30 – 80	10 – 30
40 – 100	15 – 45



รูปที่ 3.8 เครื่องหมุนเคลือบสารไวแสง (Spinner)



รูปที่ 3.9 กระบวนการขั้นตอนการหมุนเคลือบสารไวแสงชนิดลบด้วยเครื่องหมุนเคลือบ (Spinner)

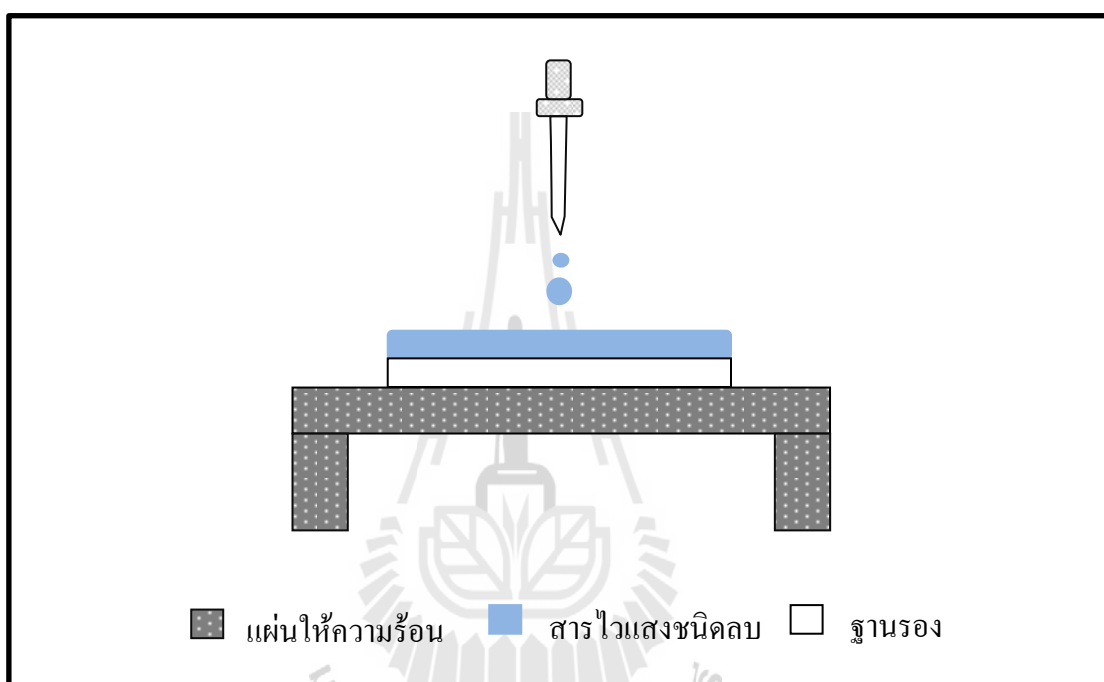


รูปที่ 3.10 เครื่องให้ความร้อนแก่ชิ้นงานที่ได้นำมาใช้งาน

3.2.2 การหยุดสารไวแสง

การหยุดสารไวแสงจะนำไปใช้ในกรณีของกระบวนการที่ต้องการความหนาของสารไวแสงมากกว่า 200 ไมโครเมตรขึ้นไป กระบวนการที่ใช้ต้องการความหนาของสารไวแสงดังกล่าวคือ ขั้นตอนของกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์ ซึ่งมีขั้นตอนในการหยุดสารไวแสงดังนี้ นำฐานรองมาวางบนแผ่นให้ความร้อน (Hot Plates) แล้วกำหนดให้อุณหภูมิเริ่มต้นที่ 65 องศาเซลเซียส จากนั้นค่อย ๆ เริ่มทำการหยุดสารไวแสงให้ทั่วฐานรอง ในขั้นตอนนี้ควรระมัดระวังเพราะอาจทำให้เกิดฟองอากาศได้ หากเกิดฟองอากาศขึ้นกับชิ้นงานให้นำวัสดุที่มีขนาดเล็กและแหลม เช่น ไม้จิ้มฟันหรือเข็มฉีดยา มาจิ้มฟองอากาศนั้นให้แตก เพราะเนื่องจากว่าหากมีฟองอากาศอยู่บนชิ้นงานจะส่งผลเสียทำให้ชิ้นงานเกิดเป็นช่องว่าง ลวดลายในบริเวณนั้นอาจจะเกิดความเสียหาย ชิ้นงานที่ได้ก็จะไม่เป็นไปตามแม่แบบ เมื่อทำการหยุดสารไวแสงเสร็จเรียบร้อยแล้วให้

เพิ่มอุณหภูมิไปที่ 95 องศาเซลเซียส ทิ้งไว้เป็นเวลา 15 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นบนแผ่นให้ความร้อน การกำหนดความหนาของสารไวแสงนั้นจะขึ้นอยู่กับประสบการณ์ในการหยอดของผู้หยอด หากทำการหยอดสารไวแสงได้ความหนาที่มากเกินไปความต้องการสามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าวด้วยการนำกระดาษทรายมาขัดสารไวแสงทิ้งไป แต่ข้อเสียคือ ผิวสัมผัสของชิ้นงานจะมีความขรุขระไม่เรียบเนียน



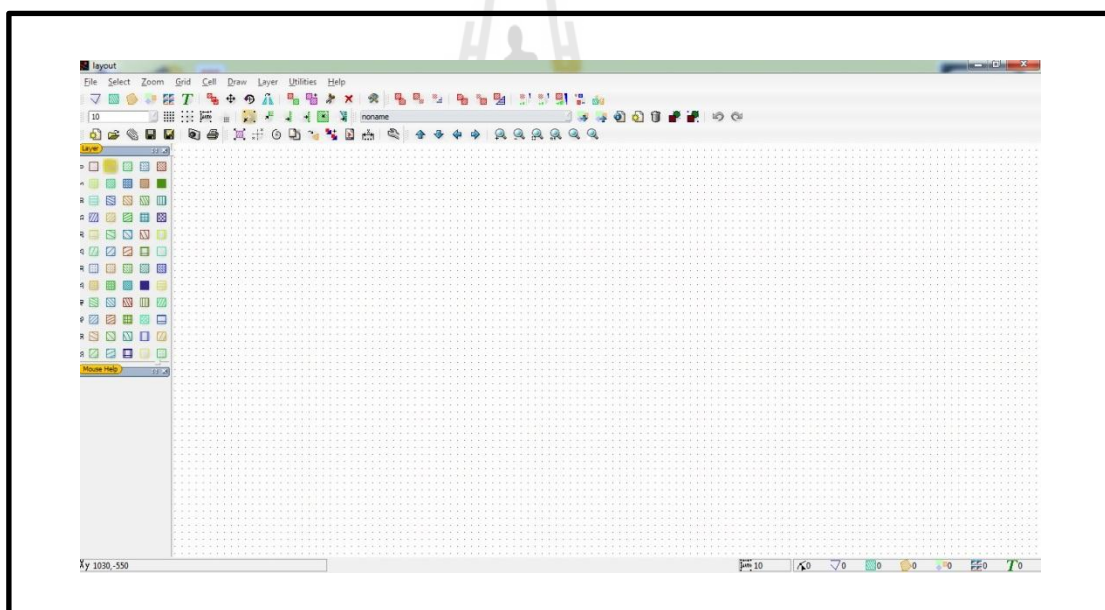
รูปที่ 3.11 แสดงการหยอดสารไวแสงชนิดลบบนแผ่นให้ความร้อน

3.3 การสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์ (X-ray Mask)

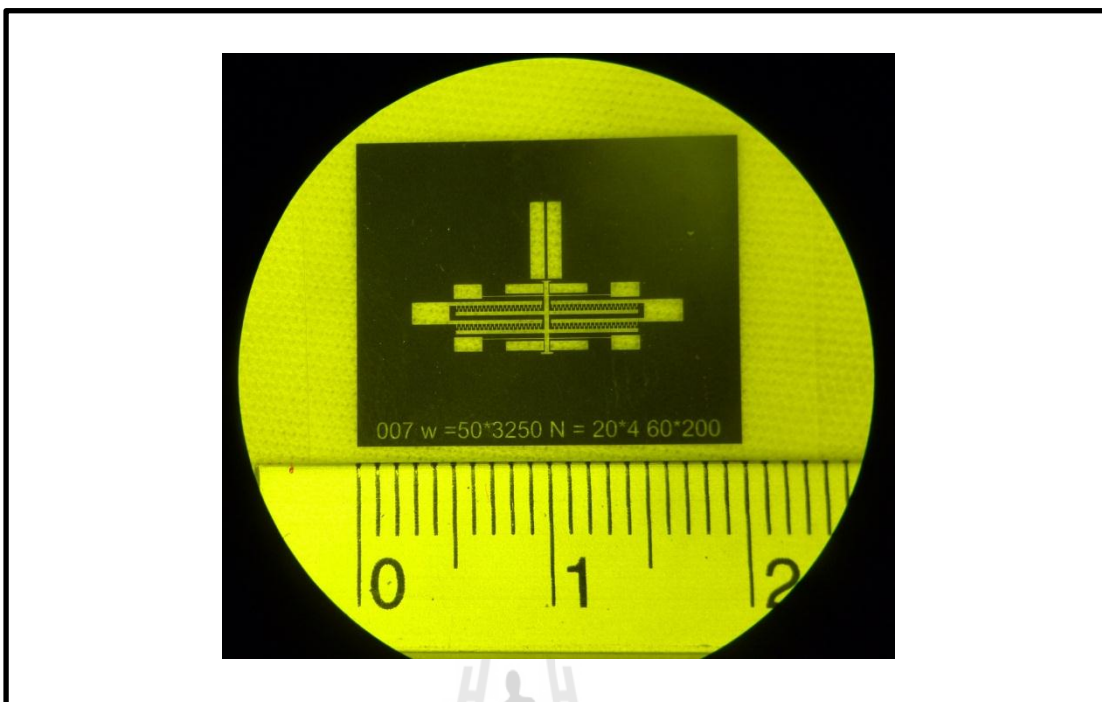
หน้ากากกันรังสีเอกซ์ (X-ray Mask) เป็นสิ่งที่สำคัญมากสำหรับกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์ เพราะเนื่องจากว่าหน้ากากกันรังสีเอกซ์นี้นำมาใช้เป็นแม่แบบเพื่อใช้ในการถ่ายทอดลวดลาย โดยหน้ากากกันรังสีเอกซ์นั้นจะประกอบไปด้วย 2 ส่วนที่สำคัญคือ ส่วนที่หนึ่งเป็นส่วนที่แสงสามารถทะลุผ่านออกไปได้และส่วนที่สองเป็นส่วนที่แสงไม่อาจทะลุผ่านออกไปได้ สิ่งนี้นำมาใช้ในการคัดลอกรังสีเอกซ์เพื่อไม่ให้รังสีเอกซ์ทะลุผ่านไปได้ นั่นต้องเป็นสิ่งที่มีลักษณะทึบแสง ได้แก่ ทองคำ เงิน อลูมิเนียม นิเกิล เป็นต้น และนอกจากนั้นหน้ากากกันรังสีเอกซ์จะต้องสามารถทนความร้อนได้ ขั้นตอนกระบวนการสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์นี้จะถูกสร้างในกระบวนการลิโธกราฟีด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต โดยมีขั้นตอนการสร้างจะแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน คือ การออกแบบลวดลายแม่แบบด้วยโปรแกรม Layout Editor® การเตรียมฐานรอง กระบวนการลิโธกราฟีด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตและกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (Electroplating)

3.3.1 การออกแบบลวดลายชิ้นงานด้วยโปรแกรม Layout Editor®

โปรแกรม Layout Editor® เป็นโปรแกรมที่ใช้สำหรับการออกแบบลวดลาย 2 มิติของวงจรชิ้นงาน โดยโปรแกรมนี้เหมาะที่จะนำมาใช้ในการออกแบบลวดลายชิ้นงานเพราะเนื่องจากว่าโปรแกรมห้สามารถสร้างลวดลายชิ้นงานที่มีขนาดเล็กในระดับไมโครเมตรได้ นอกจากนี้ยังมีคำสั่งในการใช้งานที่ไม่ยุ่งยากและซับซ้อน สามารถเรียนรู้การออกแบบและสร้างลวดลายชิ้นงานได้อย่างรวดเร็ว เมื่อทำการออกแบบเสร็จแล้วขั้นตอนต่อไปก็คือ นำลวดลายชิ้นงานที่ได้ออกแบบไปทำการพิมพ์ลงบนแผ่นพิมพ์ไอส์ด้วยเครื่องพิมพ์เลเซอร์ที่มีความละเอียดถึง 3600 จุดต่อตารางนิ้ว ซึ่งมีความละเอียดมากพอที่จะสร้างลวดลายชิ้นงานที่มีขนาดเล็กที่สุดได้ถึง 30 ไมโครเมตร นอกจากโปรแกรม Layout Editor® นี้แล้ว ยังมีโปรแกรม Solid Work ที่สามารถนำมาใช้งานในการออกแบบลวดลายชิ้นงานได้เช่นเดียวกัน



รูปที่ 3.12 หน้าต่างโปรแกรม Layout Editor® ที่ใช้ในการออกแบบลวดลาย



รูปที่ 3.13 แผ่นฟิล์มบางที่ได้จากการออกแบบด้วยโปรแกรม Layout Editor®

3.3.2 การเตรียมฐานรองหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์ (Substrate)

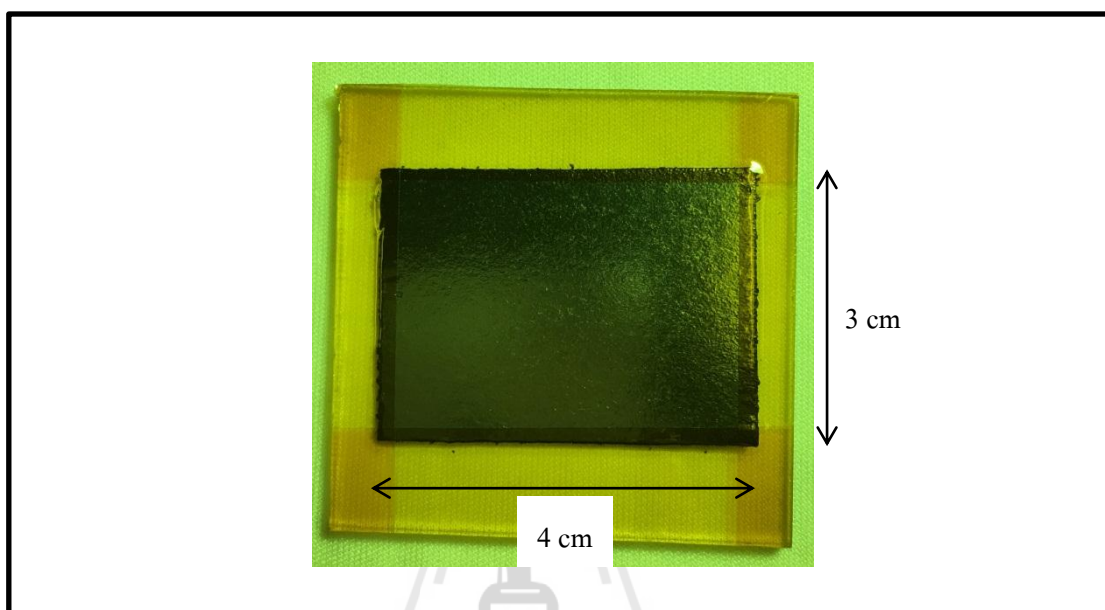
การเตรียมฐานรองนี้ถือว่าเป็นขั้นตอนพื้นฐานของกระบวนการสร้าง โดยฐานรองนี้จะต้องเป็นวัสดุโปร่งแสงหรือมีความสามารถในการให้รังสีเอกซ์ทะลุผ่านไปได้และยังต้องมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าได้ดีอีกด้วย ในงานวิจัยนี้เลือกใช้แผ่นกราฟไฟท์มาเป็นฐานรองของหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์ ก่อนที่จะนำแผ่นกราฟไฟท์มาใช้งานต้องทำการรีดและทาบเพื่อให้แผ่นกราฟไฟท์มีความหนาแน่นลดลง ซึ่งขั้นตอนการเตรียมฐานรองหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์นั้นจะมีขั้นตอนดังนี้

1. นำแผ่นกราฟไฟท์ที่ทำการรีดและทาบแล้วมาทำการตัดให้มีขนาด 3 x 4 เซนติเมตร แล้วติดลงบนกระจกใสด้วยเทปกั้นความร้อน (Polyimide tape : PI tape) ดังรูปที่ 3.14 ข้อดีของเทปกั้นความร้อนคือไม่ทำให้เกิดคราบติดกับชิ้นงานและสามารถทนความร้อนได้ดี

2. ทำความสะอาดแผ่นกราฟไฟท์ด้วยสารละลายไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (Isopropyl alcohol : IPA) เช็ดจนกระทั่งแผ่นกราฟไฟท์สะอาดและไม่มีคราบดำ จากนั้นจึงเป่าด้วยแก๊สไนโตรเจน (N_2) และอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อทำการไล่ความชื้นออกจากแผ่นกราฟไฟท์

3. เมื่อแผ่นกราฟไฟท์เย็นตัวลงแล้วให้นำไปทำการหมุนเคลือบสารไวแสงด้วยเครื่องหมุนเคลือบ (Spinner) โดยสารไวแสงที่นำมาใช้งานคือสารไวแสงชนิดลบ SU-8 เบอร์ 3050 ซึ่งความหนาที่ใช้ในการทำโครงสร้างของหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์จะมีความหนาเท่ากับ 60 ไมโครเมตร ทำการตั้งค่าเครื่องหมุนเคลือบดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 ใช้ความเร็วอยู่ที่ 500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 วินาที ขั้นตอนที่ 2 ใช้ความเร็วอยู่ที่ 2000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 วินาที หลังจากทำการ

หมุนเคลือบเสร็จแล้วควรทิ้งให้สารไวแสงอยู่ตัวสักครู่ จากนั้นนำไปวางที่แผ่นให้ความร้อนแล้วค่อย ๆ เพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งอุณหภูมิอยู่ที่ 95 องศาเซลเซียส ทิ้งไว้เป็นเวลา 45 นาที เพื่อให้สารไวแสงเกิดการแข็งตัวและพร้อมจะนำไปใช้งานในกระบวนการต่อไป



รูปที่ 3.14 แผ่นกราฟิที่ถูกยึดติดกับกระจกด้วยเทปกั้นความร้อน

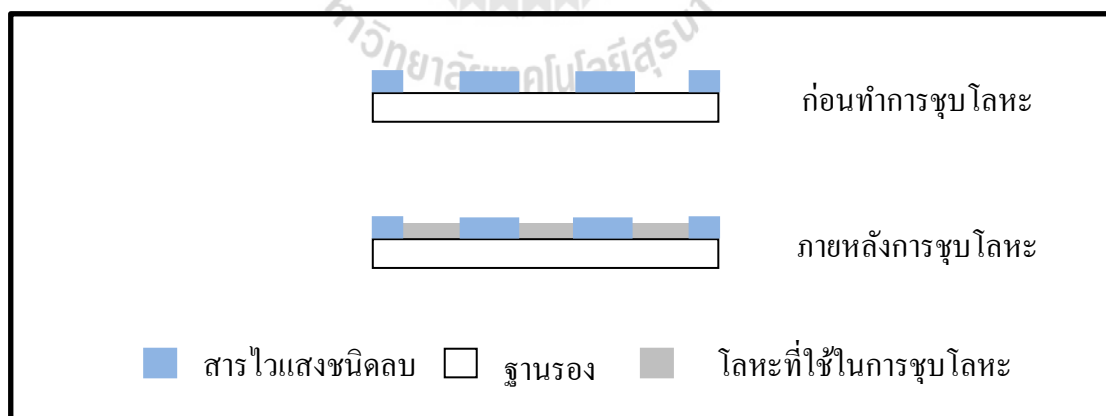
3.3.3 กระบวนการลิโธกราฟีด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต

เมื่อดำเนินการในส่วนของการหมุนเคลือบสารไวแสงเสร็จเรียบร้อยแล้ว โดยขั้นตอนของการทำงานมีดังนี้

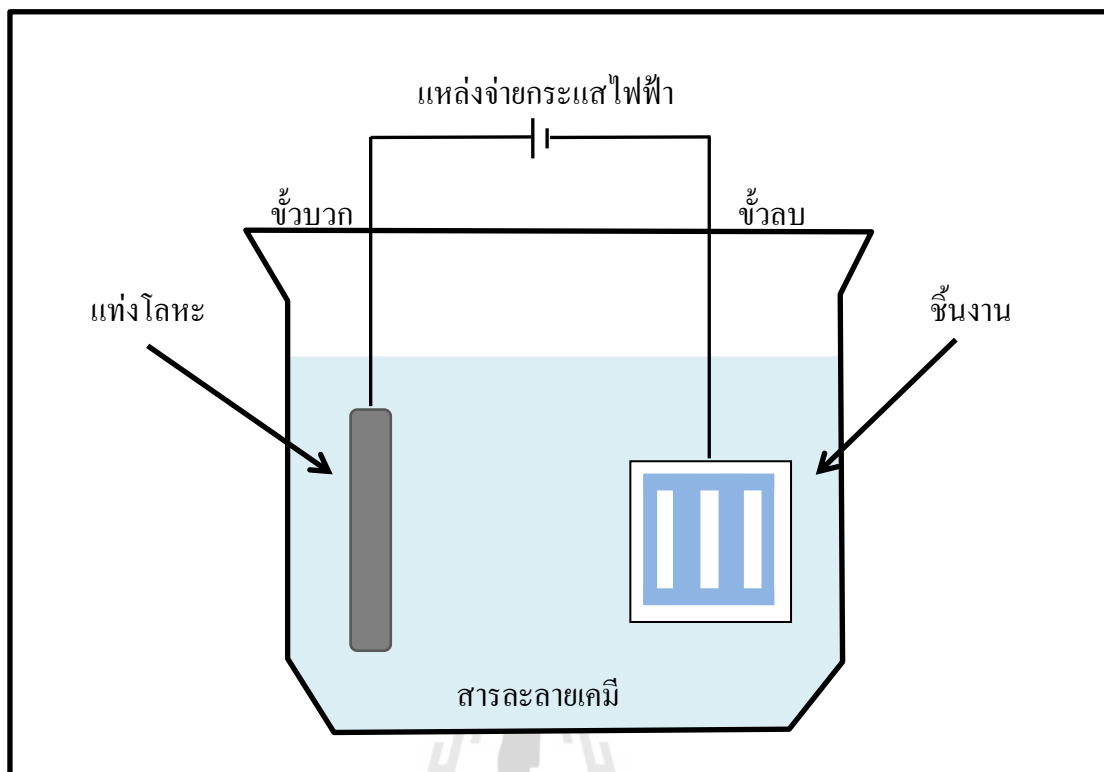
1. นำชิ้นงานที่ได้มาจากกระบวนการเตรียมฐานรองชิ้นงานที่กล่าวไปแล้วข้างต้นมาทำการประกบกับแผ่นฟิล์มบางเพื่อที่จะถ่ายทอดลวดลายจากแผ่นฟิล์มบางลงบนสารไวแสงด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต ซึ่งแสงอัลตราไวโอเล็ตที่นำมาใช้งานนี้จะมีค่าพลังงานอยู่ที่ 3,700 มิลลิจูลต่อตารางเซนติเมตร โดยค่าพลังงานนี้จะลดลงตามอายุการใช้งานของหลอดอัลตราไวโอเล็ต จากนั้นจะปล่อยให้แสงอัลตราไวโอเล็ตฉายแสงโดนชิ้นงานเวลา 30 วินาที สำหรับความหนา 60 ไมโครเมตร
2. ทำการอบชิ้นงานดังกล่าวด้วยอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที แล้วปล่อยให้ชิ้นงานนั้นเย็นภายในเตาอบ การอบครั้งนี้จะทำให้เห็นลวดลายเกิดขึ้นบนสารไวแสง
3. เมื่อชิ้นงานเย็นแล้ว จึงนำไปล้างสารไวแสงในส่วนที่ไม่ได้โดนแสงออกด้วยน้ำยาล้างสารไวแสง (SU-8 developer) จนกระทั่งได้ลวดลายของชิ้นงานตามแม่แบบ แล้วเป่าด้วยแก๊สไนโตรเจนให้แห้ง

3.3.4 กระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (Electroplating)

การชุบโลหะด้วยไฟฟ้าหรือ Electroplating เป็นการเติมโลหะเข้าไปในบริเวณพื้นที่สัมผัสที่มีการนำไฟฟ้าได้ จึงนำหลักการนี้มาทำการชุบโลหะให้กับหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์ที่มีฐานรองเป็นแผ่นกราฟไฟท์ซึ่งมีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ โดยวัสดุที่ใช้ในการชุบโลหะนั้นต้องมีคุณสมบัติในการดูดกลืนรังสีเอกซ์ ไม่ให้รังสีเอกซ์สามารถทะลุผ่านออกไปได้ กระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเป็นขั้นตอนต่อจากกระบวนการลิโทกราฟีด้วยแสงอัลตราไวโอเลตหลังจากการทำกราดังสารไวแสงออกแล้ว จะเห็นว่าลวดลายของชิ้นงานนั้นมีส่วนที่ถูกล้างออกไป ในส่วนดังกล่าวนั้นถูกแทนที่ด้วยโลหะที่เกิดจากกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า การชุบโลหะด้วยไฟฟ้านอกจากจะทำหน้าที่ดูดกลืนรังสีเอกซ์แล้วยังเป็นการเพิ่มความคงทนแข็งแรงให้กับชิ้นงานอีกด้วย โลหะที่มักจะนำมาใช้ในการชุบโลหะได้แก่ เงิน นิกเกิล ทองคำ ทองแดง เป็นต้น การทำงานของกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าจะใช้สารละลายเคมีเป็นตัวกลาง สารละลายเคมีดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่ต้องการนำมาชุบ จากนั้นนำแท่งโลหะมาแช่ในสารละลายเคมีและต่อเข้ากับขั้วแอโนด (Anode) ส่วนขั้วแคโทด (Cathode) จะต่อเข้ากับชิ้นงานที่ต้องการชุบโลหะ จากนั้นทำการป้อนกระแสไฟฟ้าที่มีค่ากระแสไฟฟ้าคงที่เข้าไปในระหว่างการชุบโลหะ หากต้องการให้การชุบโลหะนั้นมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นอาจใช้วงจรที่เป็นสัญญาณพัลส์ (Pulse plating) หรือการใช้เครื่องปั๊มของเหลวกับอุปกรณ์ทำความร้อนต่อเพิ่มในวงจรเพื่อเป็นการช่วยการกระตุ้นและหมุนเวียนของสารละลายเคมีในขณะที่ทำการชุบโลหะ



รูปที่ 3.15 มุมมองจากทางด้านข้างของกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า



รูปที่ 3.16 ภาพจำลองอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

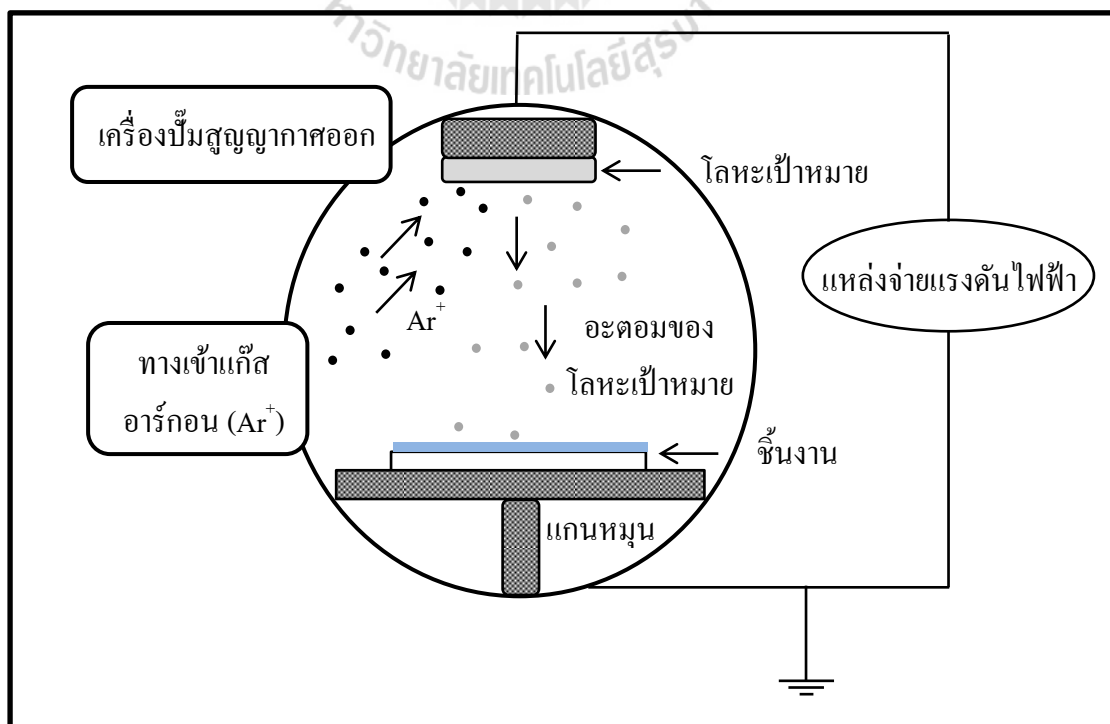
ในส่วนของงานวิจัยนี้ใช้โลหะเงินมาเป็นวัสดุคูดกลืนแสง เนื่องจากโลหะเงินเป็นโลหะที่มีต้นทุนต่ำ ใช้เวลาในการเตรียมสารละลายเคมีที่ใช้เวลาน้อย และยังมีคุณสมบัติที่สามารถกั้นรังสีเอกซ์ได้ดี ขั้นตอนในการทำการชุบโลหะมีดังนี้

1. นำน้ำยาชุบโลหะเงินมาทำการกวนเปล่าเป็นเวลา 10 นาที
2. จากนั้นนำโลหะไทเทเนียมที่ทำการชุบด้วยแพลทินัม (Platinized titanium) มาจุ่มในสารละลายเคมี แล้วทำการต่อสายไฟเข้ากับแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ขั้วบวก (Anode)
3. ก่อนที่จะนำชิ้นงานไปจุ่มในสารละลายเคมี ควรนำชิ้นงานมาจุ่มในน้ำสะอาด (DI water) ก่อนเพื่อเป็นการช่วยให้ชิ้นงานนั้นสามารถนำไฟฟ้าได้ทั่วทั้งชิ้นงาน จากนั้นจึงย้ายชิ้นงานมาจุ่มในสารละลายเคมีและต่อสายไฟเข้ากับแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าที่ขั้วลบ (Cathode)
4. ค่อย ๆ เพิ่มกระแสไฟฟ้าขึ้นจนกระทั่งกระแสไฟฟ้าอยู่ที่ 1 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร การใช้กระแสไฟฟ้าต่ำ ๆ นั้นเพื่อให้ได้โลหะเงินที่มีความเรียบเนียนและเกิดชั้นสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน เวลาที่ใช้ในการชุบโลหะนั้นจะขึ้นอยู่กับความหนาของโครงสร้างที่ทำจากสารไวแสงไม่ควรให้ความหนาของโลหะมากกว่าสารไวแสง จึงต้องคอยหมั่นดูในขณะที่ทำการชุบโลหะระวังไม่ให้เกิดการล้นหรือใต้ขอบขึ้นมาและควรให้ความหนาของโลหะมากกว่า 10 ไมโครเมตร เพื่อคูดกลืนรังสีเอกซ์ได้ โดยงานวิจัยนี้จะทำการชุบโลหะเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการวัดค่าความหนาของโลหะด้วยเครื่อง Veeco ผลที่ได้คือมีโลหะที่มีความหนา 40 ไมโครเมตร

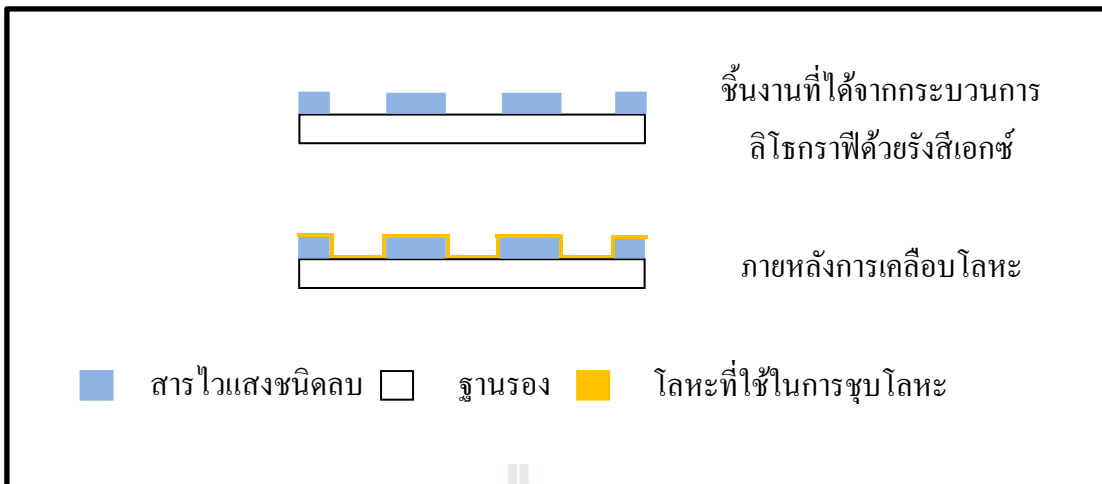
เครื่อง Veeco เป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับการวัดหาความต่างระดับของวัตถุที่มีความหนาต่างกัน เพื่อหาผลต่างความหนาของชิ้นงาน

3.4 กระบวนการเคลือบโลหะด้วยเทคนิคสปัตเตอริง (Sputtering)

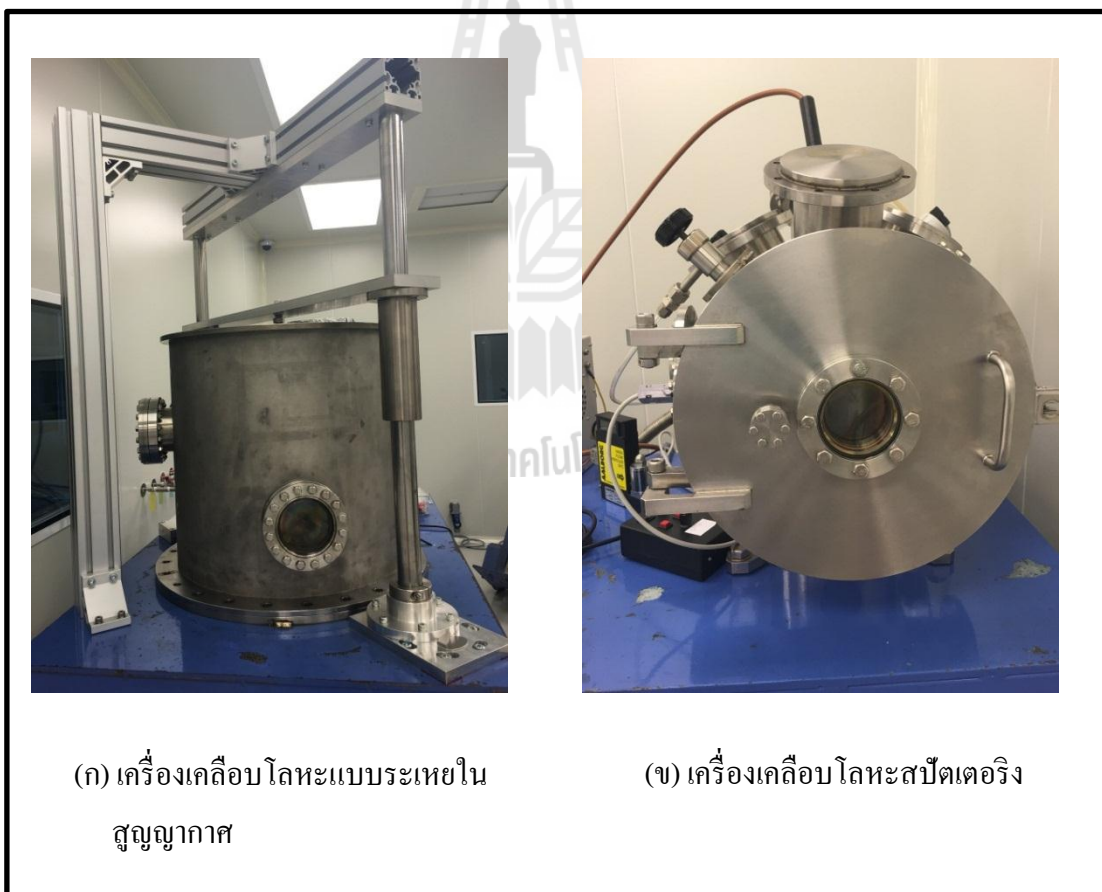
กระบวนการเคลือบโลหะเป็นกระบวนการที่เน้นไปในลักษณะของการนำไปใช้งานที่มีความแตกต่างกันเช่น การเคลือบโลหะเพื่อให้ชิ้นงานนั้นสามารถนำไฟฟ้าได้ (Electrical conductivity) เพื่อให้ชิ้นงานเกิดการสะท้อนแสง (Reflectivity) เพื่อเพิ่มความทนทานต่อแรงบิด (Torque tolerance) เพิ่มความทนทานต่อสารเคมี (Chemical resistance) และเพื่อเป็นการเพิ่มความแข็งแรงให้กับชิ้นงาน (Hardness) เป็นต้น การเคลือบโลหะนั้นจะมีอยู่ 2 แบบคือ กระบวนการเคลือบโลหะด้วยเทคนิคสปัตเตอริง (Sputtering) และกระบวนการเคลือบโลหะแบบระเหยในสุญญากาศ (Thermal evaporator) โดยในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้งานกระบวนการเคลือบโลหะด้วยเทคนิคสปัตเตอริง เนื่องจากสามารถเคลือบผิวชิ้นงานได้ครอบคลุมกว่า เพราะมีแกนหมุนช่วยในการทำงาน หลักการทำงานของกระบวนการเคลือบโลหะด้วยเทคนิคสปัตเตอริงนั้นจะอาศัยการสร้างพลาสมาของแก๊สเฉื่อยอาร์กอน (Ar^+) แล้วเกิดการเหนี่ยวนำให้มีการพุ่งชนกับโลหะเป้าหมาย ทำให้อะตอมของโลหะเป้าหมายเกิดการกระเจิงออกมาแล้วเคลือบไปบนผิวของชิ้นงาน โลหะเป้าหมายที่มักนิยมนำมาใช้ ได้แก่ เงิน ทองคำ ทองแดง ไททาเนียม และอลูมิเนียม เป็นต้น ซึ่งความหนาที่ได้จากการเคลือบโลหะด้วยเทคนิคสปัตเตอริงจะมีความหนาอยู่ในระดับนาโนเมตร



รูปที่ 3.17 แบบจำลองการทำงานของกระบวนการเคลือบโลหะด้วยเทคนิคสปัตเตอริง



รูปที่ 3.18 มุมมองจากทางด้านข้างของกระบวนการเคลือบโลหะด้วยเทคนิคสปัตเตอร์ริง

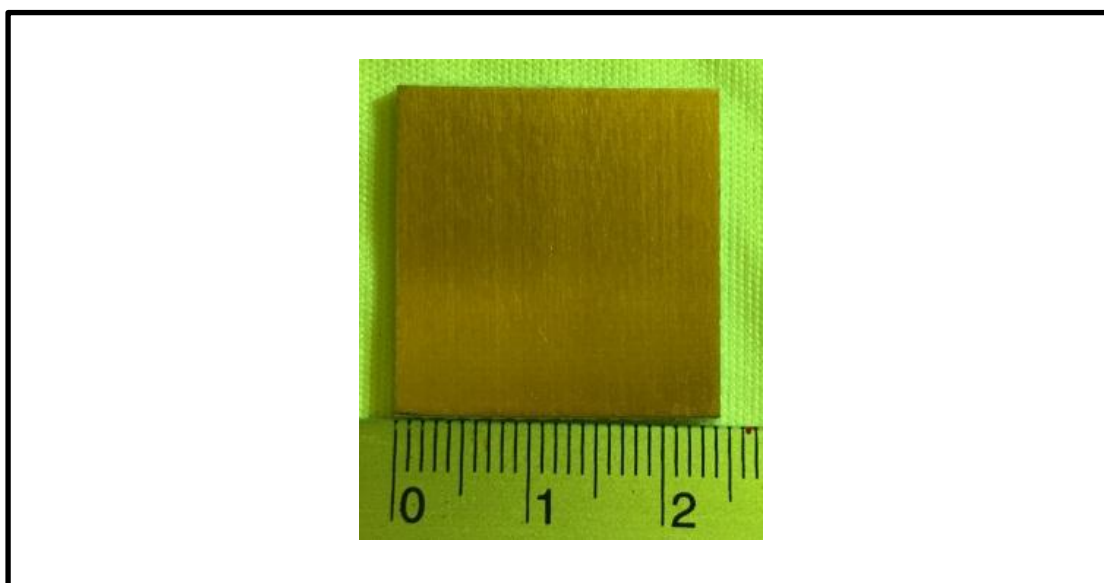


รูปที่ 3.19 เครื่องเคลือบโลหะชนิดต่าง ๆ

3.5 การสร้างลวดลายบนแผ่นวงจรพิมพ์ (Print Circuit Board : PCB)

แผ่นวงจรพิมพ์ (Print Circuit Board : PCB) หรือแผ่นพีซีบี ส่วนประกอบพื้นฐานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ใช้เป็นทางเดินของสัญญาณไฟฟ้าในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ เพื่อให้เชื่อมต่อกันได้ภายในวงจรตามที่เรารู้จักได้ ออกแบบไว้ แผ่นวงจรพิมพ์นั้นจะประกอบไปด้วยแผ่นฐาน (Substrate) ที่ทำจากฉนวนบาง ๆ อัดยึตรวมกันด้วยพลาสติกประเภทเทอร์โมเซตติง (Thermosetting plastic) เพื่อเป็นตัวรองรับแผ่นตัวนำที่ใช้ในการเชื่อมต่อสัญญาณไฟฟ้าระหว่างอุปกรณ์ โดยในส่วนของวัสดุที่นิยมนำมาใช้ทำฐานรอง ได้แก่ กระจกซิปินอลติกอัด อีพ็อกซีไฟเบอร์กลาส เป็นต้น แผ่นวงจรพิมพ์มีอยู่ 2 ประเภท คือ แผ่นวงจรพิมพ์อเนกประสงค์และแผ่นวงจรพิมพ์เปล่า แผ่นวงจรพิมพ์อเนกประสงค์ (Universal PCB Board) จะมีลักษณะที่เป็นรูเรียงกัน เวลาที่จะนำไปใช้งานนั้นก็เพียงแค่เพิ่มใส่ขาอุปกรณ์แล้วก็นำสายทองแดงมาเชื่อมต่อเข้าด้วยกันตามการออกแบบที่จะนำไปใช้งาน ส่วนแผ่นวงจรพิมพ์เปล่านั้น จะเป็นแผ่นทองแดงต้องทำการออกแบบลวดลายก่อนแล้วจึงทำการสกัดทองแดงในส่วนที่ไม่ต้องการออกด้วยสารเคมี ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้แผ่นวงจรพิมพ์แบบแผ่นวงจรพิมพ์เปล่ามาเป็นฐานรองของโครงสร้างตัวขับเร้าทางไฟฟ้าสถิตแบบซีทีวีในขั้นตอนสุดท้ายแทนการใช้แผ่นกราฟไฟท์ ซึ่งมีขั้นตอนในการทำดังนี้

1. เตรียมแผ่นวงจรพิมพ์โดยตัดให้ได้ขนาด 2.5 x 2.5 เซนติเมตร แล้วใช้กระดาษทรายที่มีความหยาบมาขัดเพื่อเป็นการเปิดหน้าผิว และขัดซ้ำอีกครั้งด้วยกระดาษทรายที่มีความละเอียด เพื่อให้ผิวของทองแดงมีความเรียบเนียนขึ้น จากนั้นนำแผ่นวงจรพิมพ์มาทำความสะอาดด้วยไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (IPA) เพื่อล้างคราบไขมันที่อยู่บริเวณผิวทองแดงออกไป แล้วเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน (N_2) และอบในเตาอบเพื่อไล่ความชื้นในแผ่นวงจรพิมพ์



รูปที่ 3.20 แผ่นวงจรพิมพ์เปล่าที่นำมาใช้งาน

2. นำแผ่นไคร์ฟิล์ม (Dry film) มาตัดให้มีขนาดใหญ่กว่าแผ่นวงจรพิมพ์ จากนั้นลอกแผ่นพลาสติก (Cover Sheet) ที่อยู่ติดกับแผ่นไคร์ฟิล์มด้านบนออกแล้วนำไปติดกับแผ่นวงจรพิมพ์ ในขั้นตอนี้ควรทำด้วยความระมัดระวังเพื่อป้องกันการเกิดฟองอากาศ แล้วนำไปรีดซ้ำอีกครั้งด้วยเครื่องรีดแผ่นใสที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส จนกระทั่งไม่มีฟองอากาศเพราะฟองอากาศจะทำให้แผ่นไคร์ฟิล์มไม่เกาะติดกับแผ่นวงจรพิมพ์ ส่งผลให้ลวดลายในบริเวณนั้นเกิดความเสียหายได้

3. จากนั้นนำแผ่นฟิล์มบางที่ได้จากการออกแบบลวดลายด้วยโปรแกรม Layout Editor[®] มาประกบวางทับบนแผ่นวงจรพิมพ์ แล้วนำเข้าเครื่องฉายแสงด้วยหลอดอัลตราไวโอเล็ตเป็นเวลา 2 นาที เพื่อทำการถ่ายทอดลวดลายตามแม่แบบ

4. ผสมน้ำยาล้างแผ่นไคร์ฟิล์ม (Dry film developer) โดยการนำผงล้างปริมาณ 1 กรัมต่อน้ำสะอาด 100 มิลลิกรัม จากนั้นกวนน้ำจนผงน้ำยาล้างแผ่นไคร์ฟิล์มละลายจนหมด

5. ลอกแผ่นพลาสติกที่อยู่ด้านบนของแผ่นไคร์ฟิล์มออกแล้วนำไปแช่ในน้ำยาล้างแผ่นไคร์ฟิล์มที่ทำการเตรียมไว้ในขั้นตอนที่ 4 ใช้ฟองน้ำค่อย ๆ ลูบบริเวณผิวให้ลวดลายชิ้นงานเริ่มปรากฏและแผ่นไคร์ฟิล์มละลายออกจนหมด ล้างด้วยน้ำสะอาดอีกครั้งและเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน

6. เตรียมน้ำยาคัดแผ่นวงจรพิมพ์โดยเตรียมใสในภาชนะ แล้วนำแผ่นวงจรพิมพ์ที่ได้จากขั้นตอนที่ 5 มาใส่ แล้วทำการเขย่าน้ำยาคัด เพื่อให้ในส่วนของทองแดงที่เราไม่ต้องการถูกสกัดทิ้งออกจนหมด เมื่อหมดแล้วให้ล้างด้วยแอซีโทน (Acetone) อีกครั้งเพื่อให้แผ่นไคร์ฟิล์มอ่อนตัวและหลุดออกมา นำกระดาษทรายที่มีความละเอียดมาขัดที่ผิวของแผ่นวงจรพิมพ์เพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีแผ่นไคร์ฟิล์มนั้นตกค้างอยู่ จากนั้นจึงทำการล้างด้วยน้ำสะอาดเป่าให้แห้งและอบในเตาอบเพื่อไล่ความชื้นอีกครั้ง

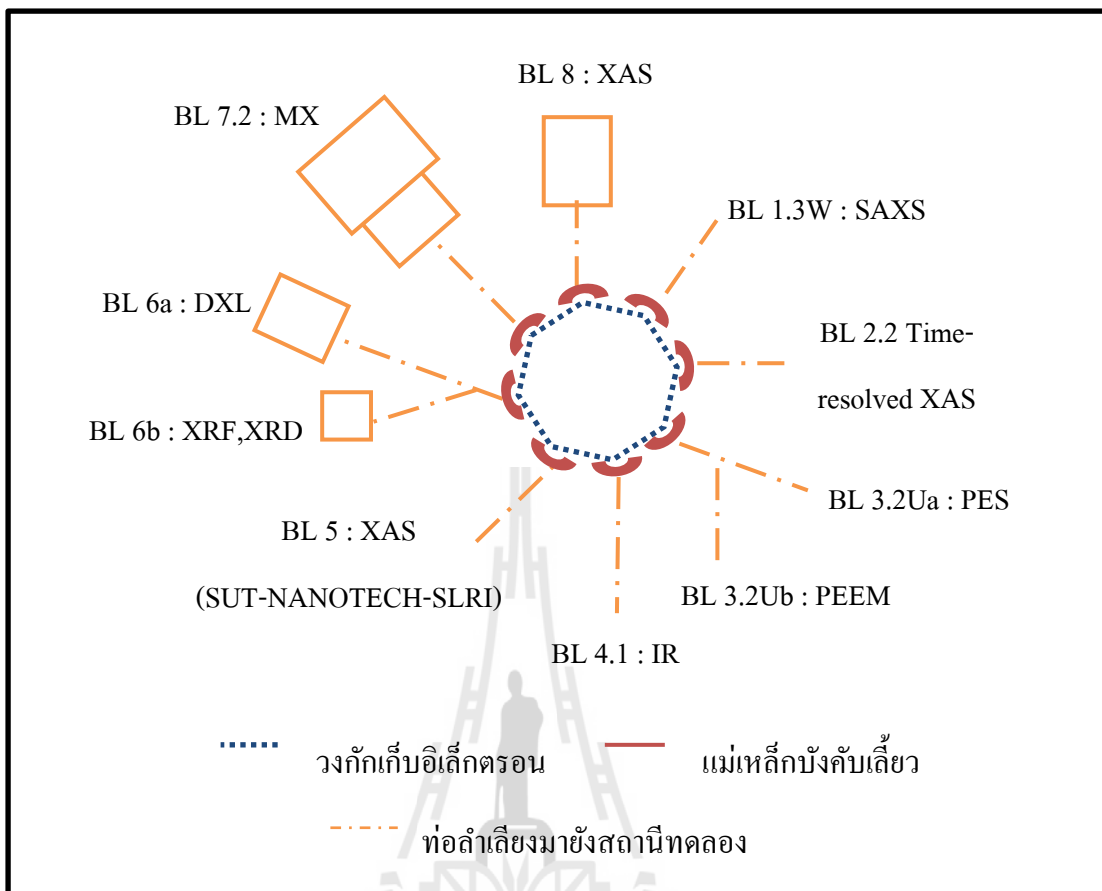


รูปที่ 3.21 เครื่องฉายแสงแผ่นวงจรมิพด้วยหลอดอัลตราไวโอเลต

3.6 ระบบลำเลียงแสงซินโครตรอน (Synchrotron Light)

ระบบลำเลียงแสง (Beamline) เป็นกลุ่มอุปกรณ์ที่นำส่งแสงซินโครตรอนจากวงกักเก็บอิเล็กตรอนไปยังสถานีทดลอง ระบบลำเลียงแสงประกอบด้วยท่อสุญญากาศ (Vacuum tube) กระจกรวมแสง (collimating mirror) ระบบคัดเลือกพลังงานแสง (monochromator) กระจกโฟกัสแสง (focusing mirror) ระบบสลิต (slit system) และอุปกรณ์อื่น ๆ สำหรับการปรับแต่งลักษณะแสงให้ได้ตามความต้องการ ที่ปลายระบบลำเลียงแสงจะมีสถานีทดลองซึ่งมีระบบวัดสำหรับเทคนิคการทดลองเฉพาะด้าน

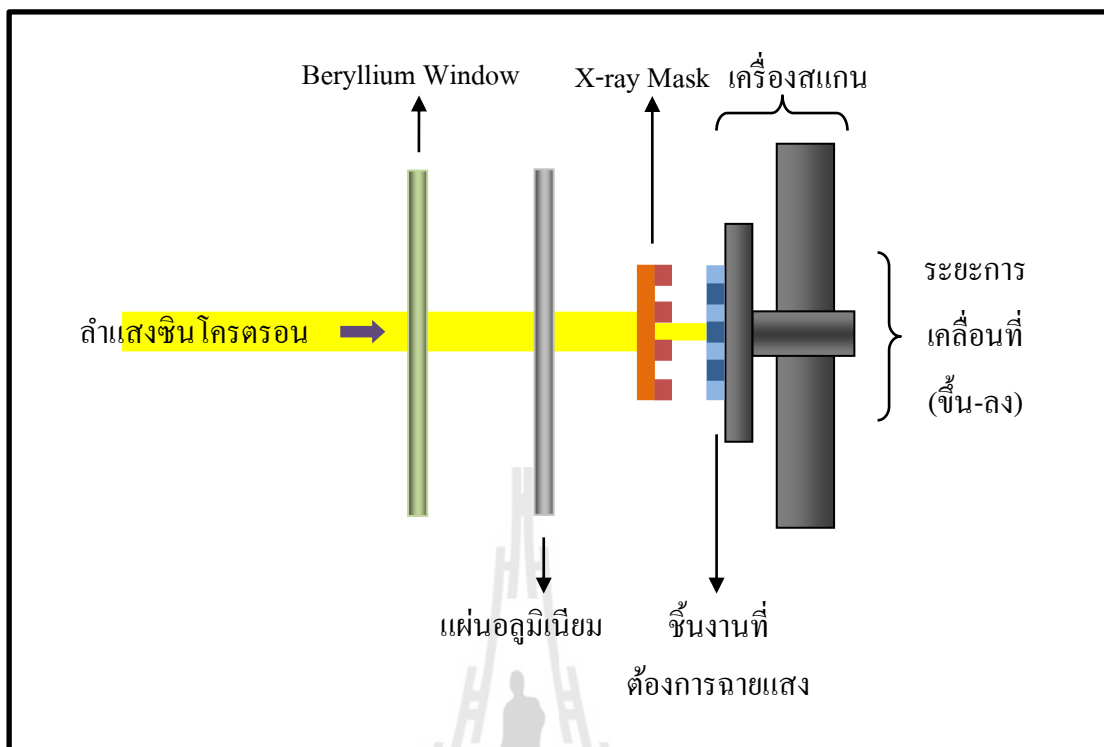
แสงซินโครตรอนเป็นแสงที่มีความเข้มสูงมีค่าพลังงานที่ต่อเนื่อง ครอบคลุมช่วงพลังงานกว้างตั้งแต่ช่วงพลังงานอินฟราเรดจนถึงรังสีเอกซ์ ทำให้นำมาประยุกต์ใช้งานได้อย่างหลากหลาย และสามารถสร้างโครงสร้างที่มีขนาดเล็กในระดับไมโครเมตรได้ จึงเหมาะกับงานวิจัยที่ต้องการสร้างชิ้นงานที่มีชิ้นส่วนขนาดเล็กและซับซ้อน ระบบลำเลียงแสงซินโครตรอนเป็นระบบลำเลียงแสงที่อยู่ในห้องปฏิบัติการแสงสยาม (Siam Photon Laboratory : SPL) ตั้งอยู่ที่สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) อ.เมือง จ.นครราชสีมา ซึ่งเป็นห้องปฏิบัติการเพื่อพัฒนางานวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน



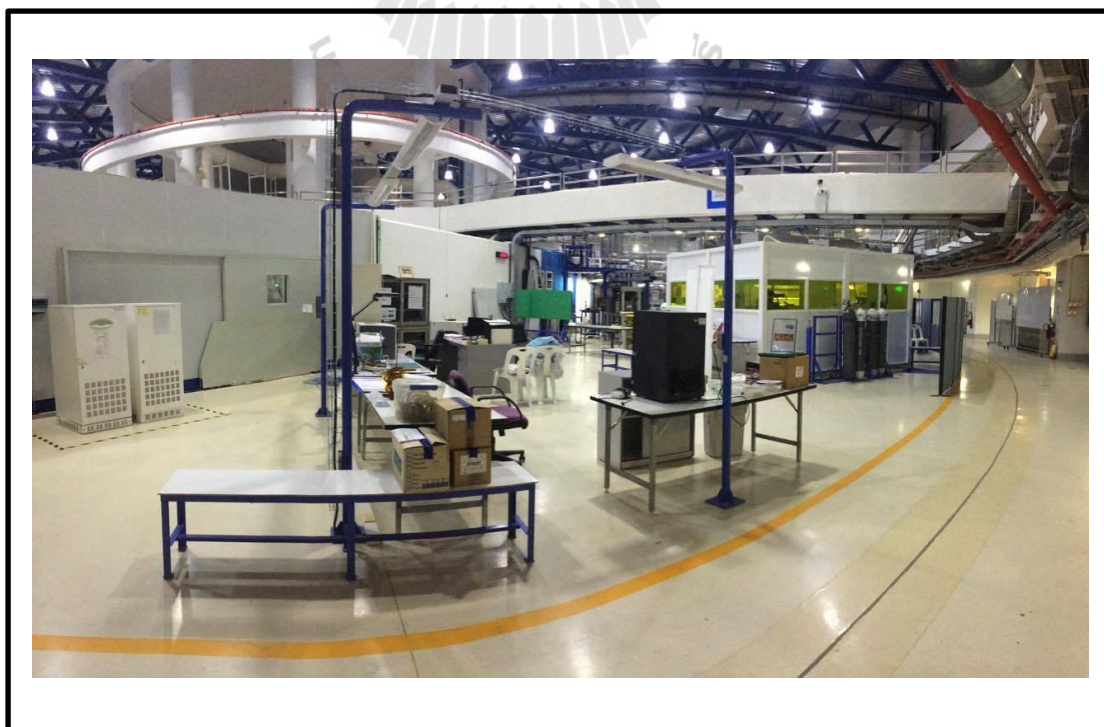
รูปที่ 3.22 ระบบของท่อลำแสงแสงออกจากวงแหวนอิเล็กตรอนมายังแต่ละสถานีทดลอง

ในรูปที่ 3.22 จะเป็นการอธิบายการเคลื่อนที่และการเกิดการเลี้ยวโค้งของอิเล็กตรอนโดยการใช้สนามแม่เหล็กและอธิบายในส่วนของการทำงานของท่อลำแสงแสงที่ทำการลำแสงแสงออกมาจากวงกักเก็บอิเล็กตรอนแล้วถูกลำแสงมายังสถานีทดลองต่าง ๆ

ในงานวิจัยนี้จะใช้ระบบลำแสงซินโครตรอนจากวงแหวนกักเก็บอิเล็กตรอนที่ถูกปล่อยออกมาจากแม่เหล็กโค้ง BM-6 และถูกกรองเพื่อมาใช้งานช่วงของรังสีเอกซ์ในกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์ (Deep X-ray lithography : DXL) ที่ห้องปฏิบัติการสถานีทดลองระบบลำแสงแสง 6a (Beamline 6a : DXL) แสงที่ออกมาจะผ่านการกรองด้วยฟิลเตอร์ฟลูออไรด์เบริลเลียม (Beryllium) ที่มีความหนา 100 ไมโครเมตร เพื่อใช้ตัดแสงในย่านอื่นออกให้เหลือเพียงแค่อานของรังสีเอกซ์เข้าสู่ท่อลำแสง เมื่อมองจากทางด้านหน้าของรังสีเอกซ์ที่ออกมาจากระบบท่อลำแสงแสงจะพบว่ารังสีเอกซ์นั้นจะมีลักษณะแบนยาวและมีขนาดที่คงที่ โดยมีขนาดความยาว 87.2 มิลลิเมตร และขนาดความสูง 7.4 มิลลิเมตร ซึ่งเห็นได้ว่ารังสีเอกซ์นั้นมีขนาดของลำแสงที่เล็กส่งผลทำให้ชิ้นงานโดนรังสีเอกซ์ได้ไม่ทั่วถึง ดังนั้นในการอบรังสีเอกซ์จึงต้องมีเครื่องสแกนยึดติดกับชิ้นงาน โดยเครื่องสแกนจะติดตั้งในลักษณะตั้งฉากกับลำแสงเพื่อให้ชิ้นงานอบรังสีเอกซ์อย่างทั่วถึง ดังแสดงในรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 แบบจำลองการทำงานของเครื่องสแกนภายในห้องปฏิบัติการสถานีทดลองระบบลำเลียงแสง 6a (Beamline 6a : DXL)



รูปที่ 3.24 ห้องปฏิบัติการสถานีทดลองระบบลำเลียงแสง 6a

บทที่ 4

ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในงานวิจัยนี้ต้องการสร้างโครงสร้างตัวซ้ำเร้าทางไฟฟ้าสถิตแบบชี้หิวที่มีโครงสร้างขนาดเล็กและสามารถเคลื่อนที่ได้ จึงต้องมีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model) สำหรับการออกแบบอุปกรณ์หรือเครื่องมือเพื่อนำไปจำลองกระบวนการทำงานที่มีลักษณะของโครงสร้างที่แตกต่างกันไป เพื่อหาโครงสร้างที่มีความเหมาะสมและนำไปใช้ในการออกแบบสร้างเป็นโครงสร้างเส้นเซอร์สายใยแก้วนำแสงชนิดฟาบรี-เปโรต์

4.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับสายใยแก้วนำแสง

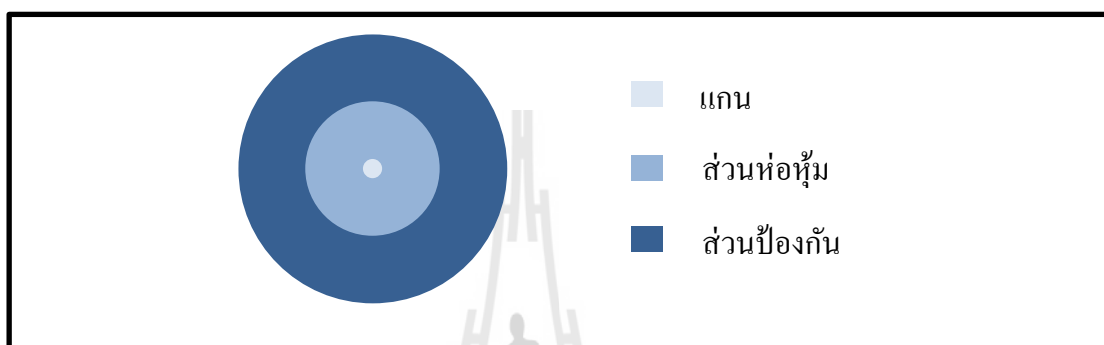
สายใยแก้วนำแสงหรืออีกชื่อหนึ่งที่นิยมเรียกกันคือไฟเบอร์ออปติก (Fiber Optic Cable) ถูกค้นพบตั้งแต่ปี พ.ศ. 2413 โดยนักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษชื่อ จอห์น ทินดัล (John Tyndall) หลังจากนั้นก็ได้ทำการศึกษาต่อเป็นเวลานานจนกระทั่งปี พ.ศ. 2509 ได้มีนักวิทยาศาสตร์ชื่อ ฮอคแคม (G.A. Hockham) และ เกา (C.C. Kao) หลังจากนั้นก็ได้มีการพัฒนาเรื่อยมาจนทำให้ในปัจจุบันสายใยแก้วนำแสงมีการส่งผ่านคลื่นแสงได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีการสูญเสียต่ำ สายใยแก้วนำแสงทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการส่งสัญญาณคือต้องสามารถนำส่งสัญญาณแสงจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งได้โดยที่มีการสูญเสียของสัญญาณแสงที่น้อยมาก สายใยแก้วนำแสงนั้นทำมาจากแก้วที่มีความบริสุทธิ์สูงมากหรืออาจทำมาจากพลาสติกที่มีคุณภาพสูง สามารถยืดหยุ่นและโค้งงอได้ โดยทั่วไปแล้วสายใยแก้วนำแสงมีลักษณะเป็นเส้นยาวและมีขนาดเล็กมาก ถ้าหากเปรียบเทียบกับแล้วจะมีขนาดเทียบเท่ากับขนาดของเส้นผมของมนุษย์ นอกจากนั้นคุณสมบัติของสายใยแก้วนำแสงยังเป็นไดอิเล็กทริก (Dielectric) ใส หมายความว่าไม่เป็นตัวนำไฟฟ้า การใช้งานของสายใยแก้วนำแสง ได้แก่ การนำไปใช้งานในการเชื่อมต่อระบบเครือข่ายในตึกสูง ๆ นำไปใช้ในระบบการรับส่งสัญญาณภาพหรือวีดีโอ และการเชื่อมต่อสัญญาณที่มีระยะทางไกล เป็นต้น

4.1.1 โครงสร้างของสายใยแก้วนำแสง

สายใยแก้วนำแสงทำจากแก้วหรือพลาสติกจึงมีความเปราะบางอาจเกิดการแตกหักได้ง่าย จำเป็นต้องมีตัวช่วยในการห่อหุ้มเพื่อเสริมให้สายใยแก้วนำแสงมีความแข็งแรง โดยสายใยแก้วนำแสงนั้นจะประกอบไปด้วยส่วนสำคัญคือ

1. แกน (Core) เป็นส่วนที่อยู่ตรงกลางหรือชั้นในสุดของสายใยแก้วนำแสง และเป็นส่วนที่แสงใช้ในการเดินทางผ่าน

2. ส่วนห่อหุ้มหรือเคลดดิ้ง (Cladding) เป็นส่วนที่ทำการห่อหุ้มในส่วนบริเวณของแกนเอาไว้ ในส่วนนี้จะมีค่าดัชนีการหักเหที่น้อยกว่าในส่วนของแกน เพื่อให้แสงที่เดินทางภายในแกนสะท้อนอยู่แค่ภายในแกนตามกฎของการสะท้อนกลับหมดโดยใช้หลักการของมุมวิกฤต
3. ส่วนป้องกัน (Coating/Buffer) เป็นชั้นที่อยู่ถัดจากส่วนห่อหุ้มทำหน้าที่ป้องกันแสงจากภายนอกมารบกวนแสงที่อยู่ภายในแกนเส้นใยแก้วนำแสง



รูปที่ 4.1 แสดง โครงสร้างของสายใยแก้วนำแสงจากมุมมองทางด้านบน

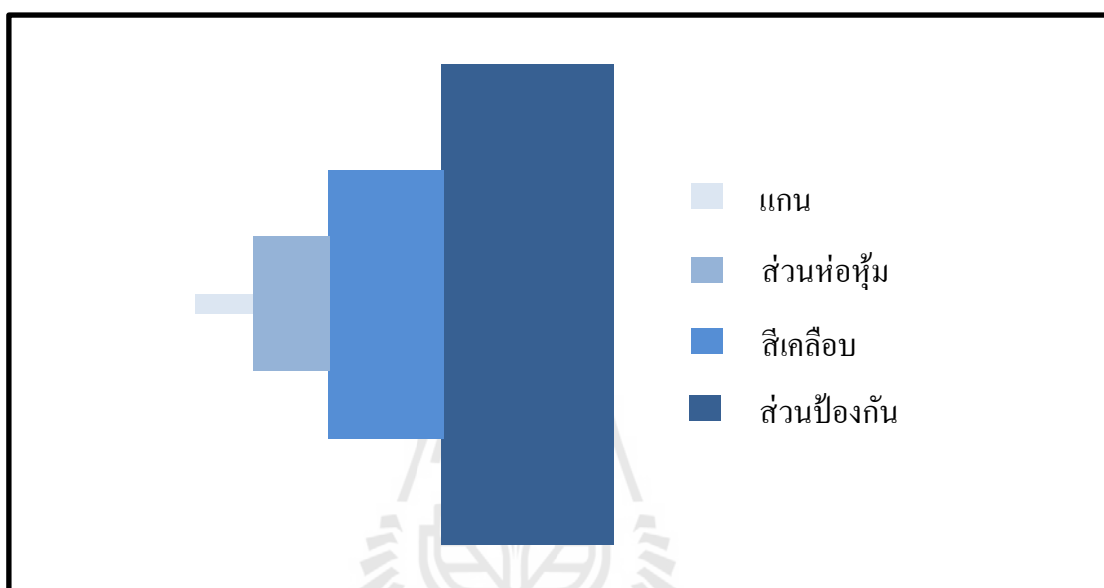
ในส่วนของโครงสร้างนั้นค่าดัชนีการหักเหของแกนจะต้องมีค่าที่น้อยกว่าค่าดัชนีการหักเหของส่วนห่อหุ้มเล็กน้อยประมาณ 0.2 ~ 3% เพื่อป้องกันแสงจากแกนออกไปภายนอก จึงสามารถทำให้แสงที่ป้อนเข้าไปในแกนถูกขังหรือเคลื่อนที่ไปตามแกนของเส้นใยแก้วนำแสงโดยอาศัยปรากฏการณ์สะท้อนกลับหมดของแสง

4.1.2 ประเภทของสายใยแก้วนำแสง

สายใยแก้วนำแสงสามารถแบ่งตามความสามารถในการนำแสงออก คือ สายใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียว (Single-mode optical fibers : SM) และสายใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมด (Multimode optical fibers : MM)

1. สายใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียว (Single-mode optical fibers : SM) เป็นการนำแสงที่บีบลำแสงให้พุ่งตรงไปตามท่อแก้ว โดยมีการกระจายแสงออกทางด้านข้างน้อยที่สุด สายใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียวจึงเป็นสายใยแก้วนำแสงที่มีกำลังการสูญเสียทางแสงน้อยที่สุด เหมาะสำหรับการใช้ในระยะทางไกล ๆ โครงสร้างของสายใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียวจะประกอบไปด้วย 4 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 ส่วนของแกนจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางอยู่ที่ 8 – 10 ไมโครเมตร ส่วนที่ 2 ส่วนห่อหุ้ม มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 125 ไมโครเมตร ส่วนที่ 3 สีเคลือบ ทำหน้าที่เป็นตัวบ่งบอกเพื่อแยกว่าสายใยแก้วนำแสงเป็นสายลำดับที่เท่าไรเมื่อนำสายใยแก้วนำแสงมารวมกันทำให้สามารถแยกสายได้ถูกต้อง ในส่วนนี้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 250 ไมโครเมตร และส่วนสุดท้ายจะเป็นพลาสติกหุ้มเพื่อป้องกันการกระแทกจะมีเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 400 – 900 ไมโครเมตร สายใย

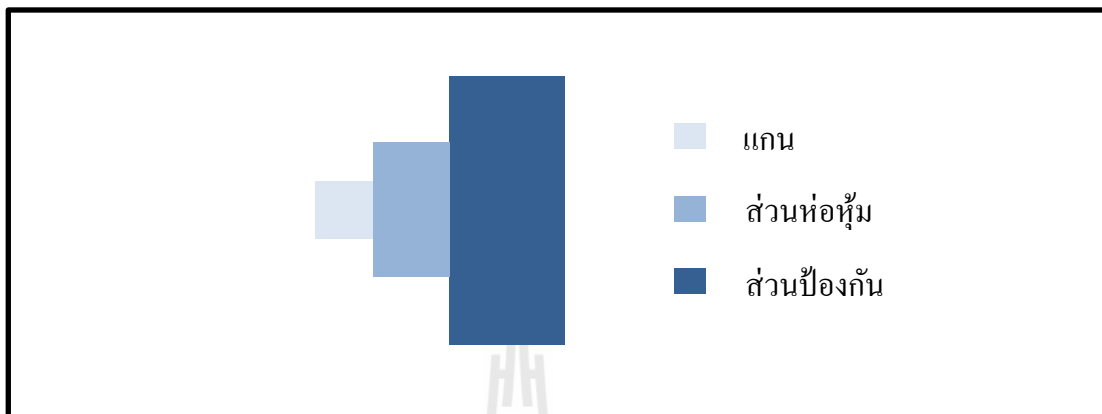
แก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวที่นิยมนำมาใช้งานมีขนาด 9/125 ซึ่งหมายความว่า ขนาดแกนจะมีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 9 ไมโครเมตร และส่วนห่อหุ้มจะมีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 125 ไมโครเมตร จะเห็นได้ว่าขนาดของแกนมีขนาดเล็กมาก ทำให้แสงที่เดินทางออกไปนั้นมีความเป็นระเบียบขึ้น ส่งผลให้เกิดการสูญเสียที่น้อยลง ข้อดีของสายใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวคือ สามารถทำงานได้ที่ความยาวคลื่น 1310 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงที่มีการลดทอนของแสงน้อยที่สุด



รูปที่ 4.2 แสดงโครงสร้างของสายใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยวจากมุมมองทางด้านข้าง

2. สายใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมด (Multimode optical fibers : MM) เป็นสายใยแก้วนำแสงที่มีลักษณะการกระจายแสงออกทางด้านข้างได้ ดังนั้นจึงต้องสร้างให้มีค่าดัชนีการหักเหของแสงกับอุปกรณ์ฉาบผิวที่สัมผัสกับส่วนห่อหุ้มให้สะท้อนกลับหมด การให้ดัชนีหักเหของแสงมีลักษณะทำให้แสงเลี้ยวเบนที่น้อยเราเรียกแบบนี้ว่า แบบเกรดอินเด็กซ์ (Grade Index) และการให้แสงสะท้อนโดยไม่ปรับคุณสมบัติของแท่งแก้วให้แสงค่อยเลี้ยวเบนเรียกแบบนี้ว่า สเต็ปอินเด็กซ์ (Step Index) ซึ่งคุณสมบัติของสายใยแก้วนำแสงแบบสเต็ปอินเด็กซ์จะมีค่าการสูญเสียสูงกว่าแบบเกรดอินเด็กซ์ สายใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมดที่นิยมนำมาใช้งานจะมีขนาด 50/125 หรือ 62.5/125 ซึ่งหมายความว่า ขนาดแกนมีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 50 ไมโครเมตรหรือ 62.5 ไมโครเมตร ตามลำดับ และมีส่วนห่อหุ้มที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 125 ไมโครเมตร โดยจะเห็นได้ว่าสายใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมดมีขนาดแกนที่ใหญ่กว่าสายใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยว ทำให้แสงนั้นเดินทางกระจัดกระจายเกิดการหักล้างกันส่งผลทำให้มีการสูญเสียของแสงมากส่งข้อมูลออกไปได้ไม่ไกลมากนักเหมาะสำหรับใช้เพียงแคภายในอาคารเท่านั้น แต่ข้อดีของสายใย

แก้วนำแสงชนิดหลายโหมดคือ ราคาถูก เพราะขนาดของแกนที่มีขนาดใหญ่ทำให้สามารถผลิตได้ง่ายกว่า



รูปที่ 4.3 แสดงโครงสร้างของสายใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมดจากมุมมองทางด้านข้าง

4.1.3 ข้อดี - ข้อเสียของสายใยแก้วนำแสง

สายใยแก้วนำแสงนั้นมีทั้งข้อดีและข้อเสีย ซึ่งพอจะสรุปได้ได้ตามตารางที่ 4.1 ดังนี้

ตารางที่ 4.1 ข้อดี – ข้อเสียของสายใยแก้วนำแสง

ข้อดี	ข้อเสีย
<ul style="list-style-type: none"> - ใช้เป็นเซ็นเซอร์เพื่อวัดสิ่งที่มีความไวสูง วัดความเครียด ความเค้นได้ - เป็นไดอิเล็กทริกใส ไม่นำไฟฟ้า - ไม่มีการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า - มีขนาดเล็ก และ น้ำหนักเบา 	<ul style="list-style-type: none"> - เครื่องมือที่ใช้กับสายใยแก้วนำแสงมีราคาแพง - มีความเปราะบางและแตกหักง่ายเพราะทำจากแก้ว

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เลือกใช้งานสายใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียว (Single-mode optical fibers : SM) ที่มีขนาดแกน 9 ไมโครเมตรและส่วนห่อหุ้ม 125 ไมโครเมตร ทำงานที่ความยาวคลื่น 1310 นาโนเมตร และใช้หัวเชื่อมต่อแบบFC (FC connector) เป็นหัวเชื่อมต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดแสง (Light wave multimeter) ยี่ห้อ Hewlett Packard รุ่น 8153A

4.2 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับตัวขับเคลื่อนไฟฟ้าสถิตแบบซี่หวีและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ตัวขับเคลื่อนไฟฟ้าสถิตแบบซี่หวีหรือ Comb-Drive actuators เป็นส่วนหนึ่งของระบบไฟฟ้าเครื่องกลจุลภาค ซึ่งในปัจจุบันนี้ได้รับความนิยมอย่างมากในสายงานเกี่ยวกับด้านอุตสาหกรรม นอกจากนั้นยังสามารถประยุกต์ใช้งานกับสายงานอื่น ๆ ได้ ตัวขับเคลื่อนไฟฟ้าสถิตแบบซี่หวีมีหน้าที่เป็นตัวขับเคลื่อนให้โครงสร้างชิ้นงานนั้นสามารถเคลื่อนที่ได้ ระยะเวลาในการเคลื่อนที่จะอยู่ในระดับไมโครเมตร โดยการที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่นั้นต้องทำการป้อนแรงดันไฟฟ้าขั้วบวกเข้ากับขั้วที่อยู่กับที่ของชิ้นงาน และทำการต่อกราวด์ให้กับขั้วของชิ้นงานที่สามารถเคลื่อนที่ได้ จากนั้นทำการป้อนแรงดันไฟฟ้าเพื่อให้เกิดค่าความต่างศักย์ของไฟฟ้าขึ้นระหว่างขั้วทั้งสองและกลายเป็นประจุไฟฟ้าขึ้น ทำให้สามารถเกิดแรงไฟฟ้าสถิตขึ้นในทิศทางของแนวแกน X ซึ่งแรงที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วนั้นสามารถอธิบายได้ตามสมการที่ 4.1 ในส่วนของรูปแบบลักษณะของตัวขับเคลื่อนไฟฟ้าสถิตแบบซี่หวีนั้นจะมีลักษณะ โครงสร้างที่เป็นซี่หวีอยู่หลาย ๆ คู่ สลับกันไปมา การสลับกันนี้เองทำให้เกิดค่าความต่างศักย์ของไฟฟ้าเมื่อทำการป้อนแรงดัน

$$F = \frac{1}{2} \cdot \frac{Nt\epsilon_0\epsilon_r V^2}{g} \quad (4.1)$$

โดยที่ g	คือ ช่องว่างระหว่างขั้วไฟฟ้าสองขั้ว
N	คือ จำนวนซี่ของตัวขับเคลื่อน
t	คือ ความหนาของตัวขับเคลื่อน
ϵ_0	คือ ค่าสภาพยอมของอากาศ มีค่าเท่ากับ 1
ϵ_r	คือ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ มีค่าเท่ากับ 8.845×10^{-12} F/m
V	คือ แรงดันไฟฟ้า

ส่วนที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของตัวขับเคลื่อนไฟฟ้าสถิตแบบซี่หวีนั้นเป็น โครงสร้างที่ลอยอยู่ในอากาศโดยมีคานทำหน้าที่ในการค้ำยันให้โครงสร้างนั้นสามารถลอยตัวอยู่ได้ และคานยึดยังทำหน้าที่เปรียบเสมือนกับสปริงที่ต้องคอยดึงให้ส่วนที่เคลื่อนที่นั้นกลับมายังตำแหน่งเดิมได้เมื่อหยุดทำการกระตุ้นตัวขับเคลื่อน ดังสมการที่ 4.2 ตามกฎของฮุก (Hooke's Law) ซึ่งสมการดังกล่าวนี้เป็นสมการที่นำไปใช้ในการคำนวณหาค่าแรงดึงกลับ โดยคิดค่าคงที่ของสปริง

$$F_s = K_x x \quad (4.2)$$

โดยที่ F_s	คือ แรงปฏิกิริยาหรือแรงดึงกลับของสปริง
K_x	คือ ค่าคงที่ของสปริง (Spring stiffness) ในแนวแกน X
x	คือ ระยะของการเคลื่อนที่

เมื่อนำสมการที่ 4.2 มาแทนค่าลงในสมการที่ 4.1 จะได้สมการใหม่เกิดขึ้นดังที่ได้แสดงในสมการที่ 4.3 โดยสมการดังกล่าวนี้เป็นสมการที่ใช้ในการคำนวณเพื่อใช้ในการหาจำนวนซี่ของตัวขับเคลื่อนไฟฟ้าสถิตแบบซี่หวี โดยระยะทางที่ใช้ในการเคลื่อนที่เป็นตัวแปร

$$x = \frac{1}{2} \cdot \frac{Nt\epsilon_0\epsilon_r V^2}{gK_x} \quad (4.3)$$

4.3 คานยึด (Spring)

คานยึดทำหน้าที่ใช้ในการค้ำยันให้โครงสร้างนั้นสามารถลอยตัวอยู่บนอากาศได้เพื่อให้โครงสร้างเกิดการเคลื่อนที่และยังทำหน้าที่เหมือนสปริงคอยดึงส่วนที่ทำการเคลื่อนที่ให้กลับมายังตำแหน่งเริ่มต้นก่อนที่จะทำการกระตุ้นตัวขับเคลื่อน การทำให้โครงสร้างลอยตัวได้นั้นคานยึดต้องมีความยืดหยุ่นมากพอที่จะทำให้โครงสร้างนั้นสามารถเคลื่อนที่ไปในทิศทางที่เราต้องการได้ หากคานยึดมีความยืดหยุ่นน้อยไปหรือแข็งมากไปต้องใช้แรงในการขับเคลื่อนที่มากขึ้นเช่นกันเพื่อทำให้เกิดการเคลื่อนที่ได้ ส่งผลไปยังการจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ต้องจ่ายค่าแรงดันไฟฟ้าที่มากขึ้นเพื่อให้โครงสร้างเกิดการเคลื่อนที่ได้ โดยทั่วไปโครงสร้างของคานยึดมีอยู่ 4 ประเภทหลัก ๆ ได้แก่ คานยึดแบบตรง คานยึดแบบก้ำกั้ว คานยึดแบบพับ และคานยึดแบบขด โดยคานยึดแต่ละประเภทยังมีสมการที่ใช้ในการออกแบบที่มีความซับซ้อนและมีความยากในการออกแบบที่แตกต่างกันออกไป โดยลักษณะการนำไปใช้งานนั้นก็มีความแตกต่างกันเช่นกัน ยิ่งหากมีการออกแบบที่ง่าย ๆ ไม่ยุ่งยากซับซ้อนระยะทางที่ใช้ในการเคลื่อนที่นั้นก็จะมีระยะทางที่น้อยด้วย

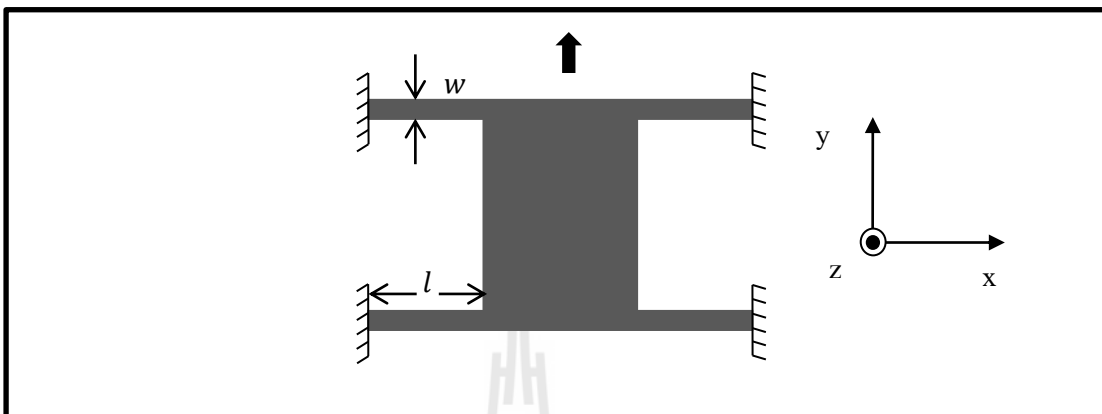
4.3.1 คานยึดแบบตรง (Fixed-Fixed flexures)

คานยึดแบบตรงเป็นคานยึดที่มีลักษณะการออกแบบที่ไม่มีความซับซ้อนยุ่งยาก เป็นคานยึดที่มีแขนยื่นออกมาจากแกนกลางในลักษณะที่เป็นเส้นตรง คานยึดแบบตรงนี้เป็นคานยึดที่มีความยืดหยุ่นน้อยที่สุด เหมาะที่จะนำไปใช้งานกับโครงสร้างที่ต้องการการเคลื่อนที่ค่อนข้างน้อย ในสมการที่ 4.4 เป็นสมการที่นำมาใช้ในการคำนวณหาค่าคงที่ของสปริงของคานยึดแบบตรง

$$K = 4Ew\left(\frac{t}{l}\right)^3 \quad (4.4)$$

โดยที่ E	คือ ค่าความยืดหยุ่นของวัสดุ (Young's modulus) มีค่าเท่ากับ 2 GPa
w	คือ ความกว้างของคานยึด

- t คือ ความหนาของคานยึด
 l คือ ความยาวของคานยึด



รูปที่ 4.4 คานยึดแบบตรง (Fixed-Fixed flexures)

4.3.2 คานยึดแบบก้ามปู (Crab-leg flexures)

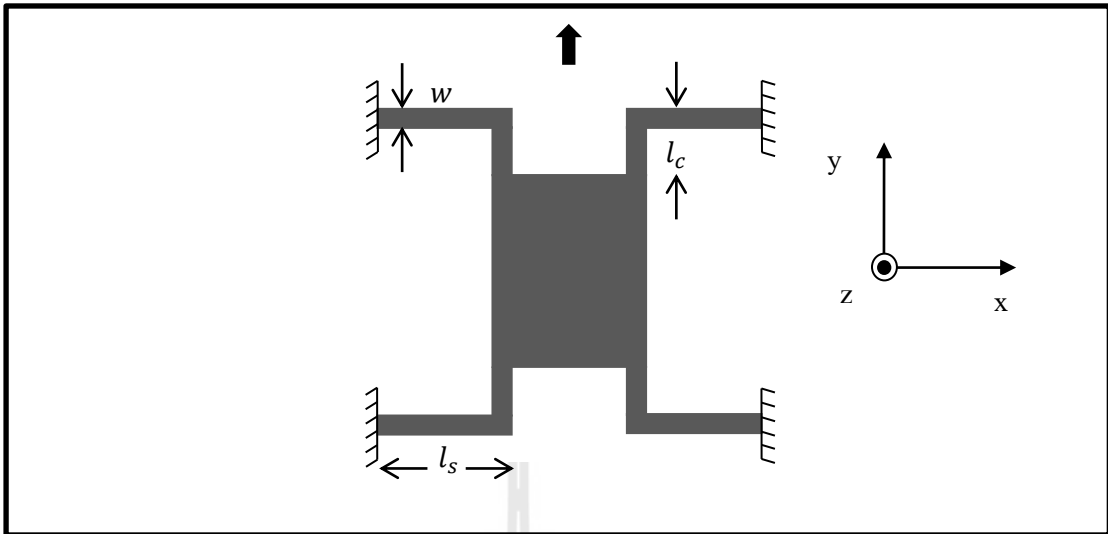
คานยึดแบบก้ามปูมีลักษณะคล้าย ๆ กับคานยึดแบบตรง แต่มีความต่างกันบริเวณแกนที่เชื่อมต่อกับแกนกลางที่มีลักษณะงอเล็กน้อยก่อนแล้วค่อยเหยียดตรงเพื่อเป็นการเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับคานยึด เมื่อมีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นก็ส่งผลทำให้มีการเคลื่อนที่ที่เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน สามารถหาค่าคงที่ของสปริงได้ตามสมการที่ 4.5 และสมการที่ 4.6

$$K = \frac{4Ew\left(\frac{t}{l_c}\right)^3}{1 + \frac{l_s}{l_c}\left[\left(\frac{l_s}{l_c}\right)^2 + 12\frac{1+\nu}{1+\left(\frac{w}{t}\right)^2}\right]} \quad (4.5)$$

ถ้า $l_s \gg l_c$ จะได้ว่า

$$K \approx 4Ew\left(\frac{t}{l_s}\right)^3 \quad (4.6)$$

- โดยที่ l_c คือ ความยาวของคานยึดส่วนแรก
 l_s คือ ความยาวของคานยึดส่วนที่สอง

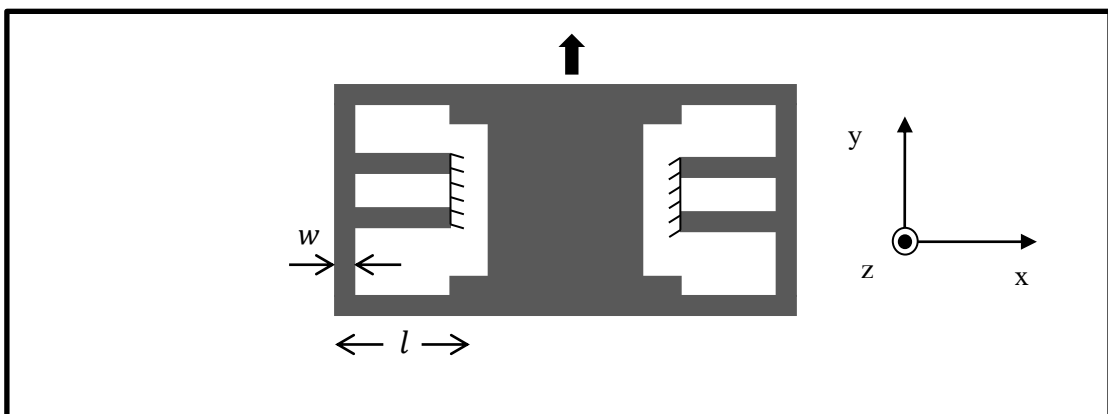


รูปที่ 4.5 คานยึดแบบก้ามปู (Crab-leg flexures)

4.3.3 คานยึดแบบพับ (Folded flexures)

คานยึดแบบพับมีลักษณะ โครงสร้างที่ออกแบบค่อนข้างซับซ้อนและซ้อนทับกัน ไปมา มีความแข็งแรงของโครงสร้างมาก แต่มีปัญหาในการสร้างโครงสร้างเพราะมีความละเอียดในการออกแบบไม่เหมาะที่จะนำมาใช้สำหรับสร้าง โครงสร้างตัวขับเคลื่อนไฟฟ้าสถิตแบบซีวีสมการที่ 4.7 เป็นสมการที่นำมาใช้ในการคำนวณหาค่าคงที่ของสปริงของคานยึดแบบพับในกรณีที่มีโครงสร้างที่แข็งแรงมาก

$$K \approx 2Ew\left(\frac{t}{l}\right)^3 \quad (4.7)$$



รูปที่ 4.6 คานยึดแบบพับ (Folded flexures)

4.3.4 คานยัดแบบขด (Serpentine flexures)

คานยัดแบบขดมีโครงสร้างในส่วนของแขนที่มีลักษณะขดไปมาและมีโครงสร้างที่มีความยืดหยุ่นมากที่สุด จำนวนการขดของแขนนั้นก็ขึ้นอยู่กับความต้องการของระยะทางที่เกิดการเคลื่อนที่ ยิ่งมีขดมากระยะทางก็จะเพิ่มมากขึ้น ดูได้จากสมการที่ 4.8 สมการการหาค่าคงที่ของสปริงของคานยัดแบบขด

$$K \approx \frac{48GJ}{l_a^2 \left(\frac{GJ}{EI_x} l_a + l_b \right) n^3} \quad (4.8)$$

โดยที่ G	คือ ค่ามอดูลัสของการบิด (Torsion modulus)
J	คือ ค่าคงที่ของการบิด (Torsion constant)
l_a	คือ ความกว้างของคานยัด
l_b	คือ ความยาวของคานยัด
I_x	คือ โมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of inertia) ของสปริง
n	คือ จำนวนขดของคานยัด

ซึ่งค่ามอดูลัสของการบิด (Torsion modulus) หาได้จาก

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (4.9)$$

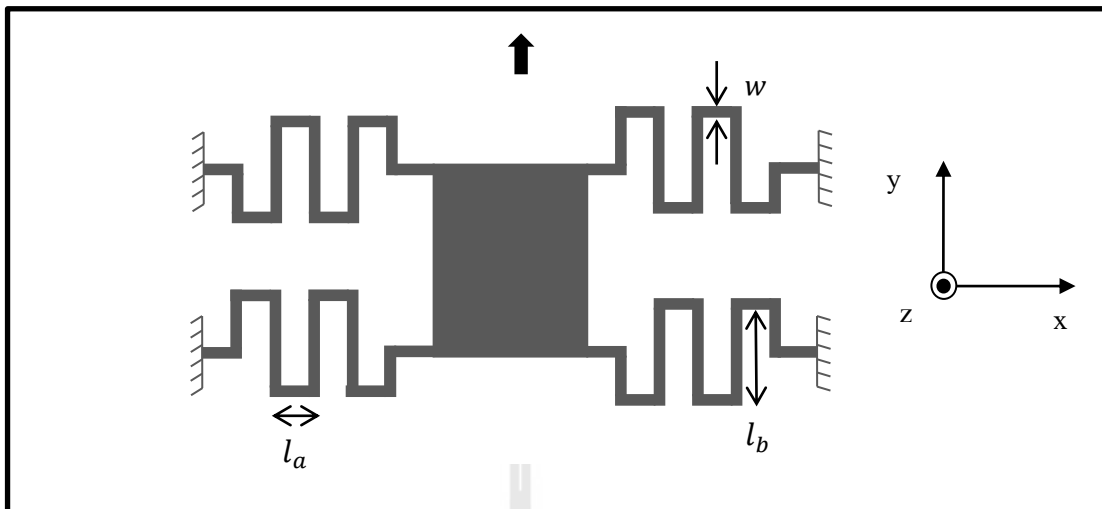
โดยที่ ν คือ ค่าอัตราส่วนของปัวซอง (Poisson ratio) มีค่าคงที่เท่ากับ 0.22

ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of inertia) ของสปริงมีค่าเท่ากับ

$$I_x = \frac{wt^3}{12} \quad (4.10)$$

และค่าคงที่ของการบิด (Torsion constant) หาได้จาก

$$J = \frac{1}{3} t^3 w \left(1 - \frac{192}{\pi^5} \frac{t}{w} \sum_{i=1, i \text{ odd}}^{\infty} \frac{1}{i^5} \tanh\left(\frac{i\pi w}{2t}\right) \right) \quad (4.11)$$



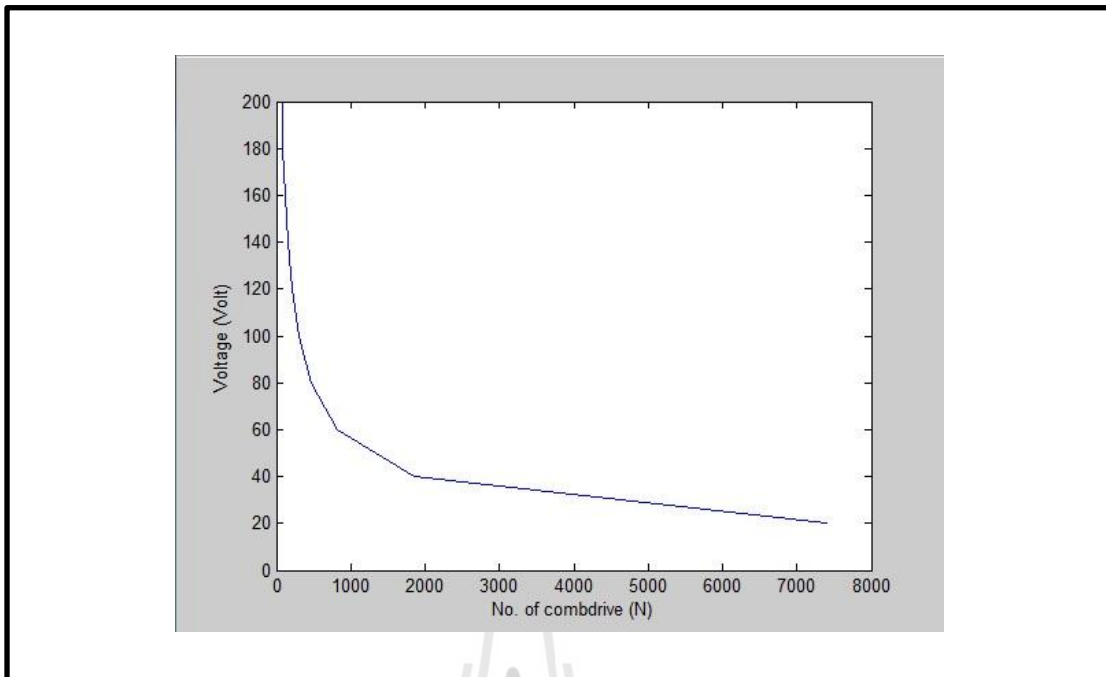
รูปที่ 4.7 คานยึดแบบขด (Serpentine flexures)

4.4 การออกแบบโครงสร้างตัวขับเคลื่อนไฟฟ้าสถิตแบบซีหวี

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาเกี่ยวกับสายใยแก้วนำแสงที่มีความยาวคลื่นในช่วง 1310 นาโนเมตร ดังนั้นการออกแบบเพื่อให้ตัวขับเคลื่อนไฟฟ้าสถิตแบบซีหวีทำการขับเคลื่อนนั้นควรอยู่ในช่วงไม่เกิน 1 ไมโครเมตร จึงเลือกใช้คานยึดแบบตรงที่มีความยืดหยุ่นน้อย จากนั้นทำการกำหนดค่าระยะของการเคลื่อนที่ 1 ไมโครเมตรเป็นหลัก และกำหนดค่าพารามิเตอร์ตามตารางที่ 4.2 แล้วแทนค่าลงในสมการการคำนวณสมการที่ 4.3 และสมการที่ 4.4 เพื่อหาจำนวนซี่ฟันของตัวขับเคลื่อนไฟฟ้าสถิตแบบซีหวี

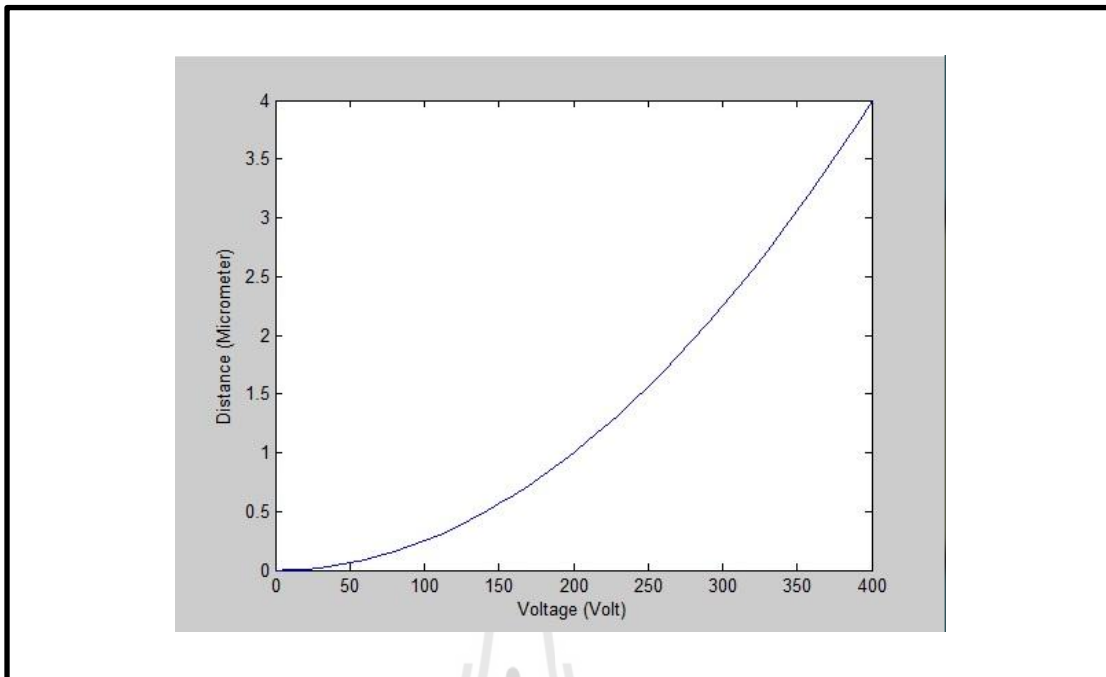
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้างแบบตรงที่ทำให้ระยะของการเคลื่อนที่เท่ากับ 1 ไมโครเมตร

พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	ขนาด
ระยะของการเคลื่อนที่	x	1 ไมโครเมตร
ความหนาของชิ้นงาน	t	150 ไมโครเมตร
ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์	ϵ_0	$8.845 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N.m}^2$
ค่าสภาพยอมของอากาศ	ϵ_r	1
ช่องว่างระหว่างขั้วไฟฟ้าสองขั้ว	g	50 ไมโครเมตร
ค่าความยืดหยุ่นของวัสดุ	E	2 GPa
ความกว้างของคานยึด	w	50 ไมโครเมตร
ความยาวของคานยึด	l	3250 ไมโครเมตร



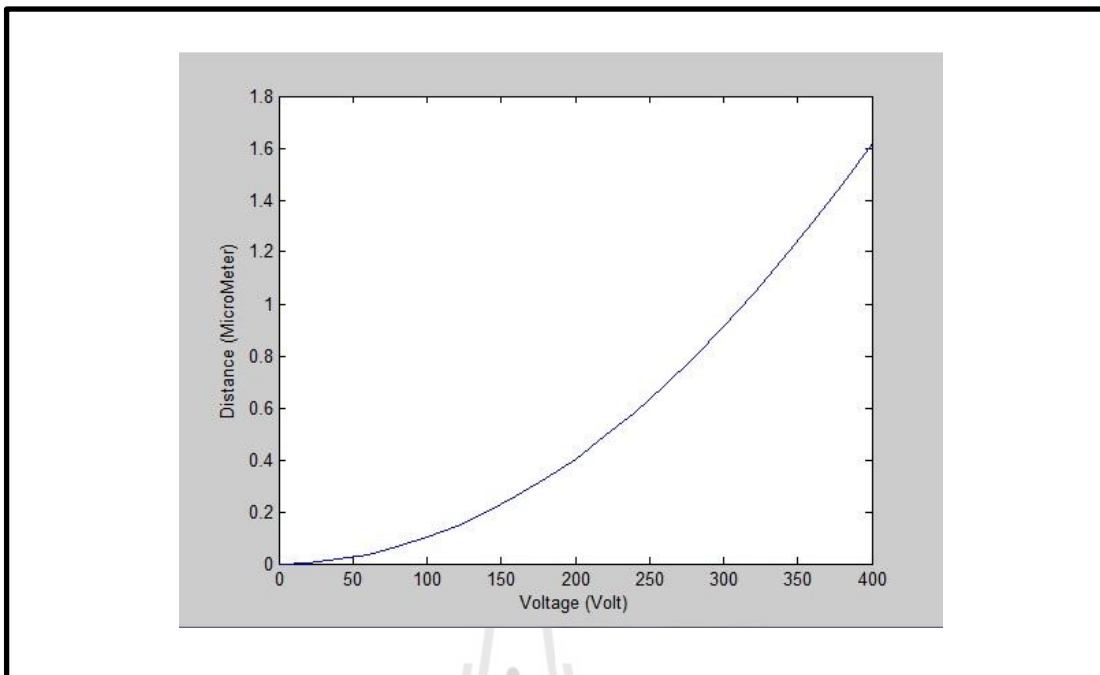
รูปที่ 4.8 กราฟเปรียบเทียบค่าแรงดันไฟฟ้ากับจำนวนซี่ของตัวขับเร้าเมื่อกำหนดให้เคลื่อนที่ในระยะทาง 1 ไมโครเมตร

จากรูปที่ 4.8 สามารถอธิบายได้ว่าถ้ากำหนดให้ระยะทางของการเคลื่อนที่นั้นมีค่าเท่ากับ 1 ไมโครเมตรต้องใช้แรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้นและจำนวนซี่ของตัวขับเร้าก็จะยิ่งใช้ในปริมาณที่น้อยลง ถ้าใช้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่น้อย ส่งผลในเรื่องของการออกแบบที่ต้องมีโครงสร้างที่มีขนาดใหญ่เพราะเนื่องจากจำนวนของซี่ฟันที่มีจำนวนมาก เพื่อทำการลดขนาดของโครงสร้างให้มีขนาดเล็กลง จึงต้องกำหนดให้ค่าแรงดันไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 200 โวลต์ ทำการออกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใหม่เพื่อหาจำนวนซี่ฟันของตัวขับเร้าทางไฟฟ้าสถิตแบบซี่หวี ผลที่ได้คือ ใช้ซี่ฟันของตัวขับเร้าจำนวน 74 ซี่ ที่แรงดันไฟฟ้า 200 โวลต์ และค่าคงที่ของสปริงแบบตรงมีค่าเท่ากับ 39.33 นิวตันต่อเมตร



รูปที่ 4.9 แสดงค่าระยะทางของการเคลื่อนที่เปรียบเทียบกับค่าแรงดันไฟฟ้าเมื่อกำหนดให้มีซี่ฟันของตัวจับเร้าเท่ากับ 74 ซี่

จากรูปที่ 4.9 เป็นการเปรียบเทียบเมื่อกำหนดให้ค่าจำนวนซี่ฟันของตัวจับเร้าอยู่ที่ 74 ซี่ ที่ค่าแรงดัน 200 โวลต์ จะได้ระยะทางในการเคลื่อนที่เท่ากับ 1 ไมโครเมตร และจะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มค่าแรงดันให้มีค่าเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้ระยะทางมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วยเช่นกัน



รูปที่ 4.10 แสดงค่าระยะทางในการเคลื่อนที่เปรียบเทียบกับค่าแรงดันแรงดันไฟฟ้าเมื่อกำหนดให้มี
ซีพินของตัวขั้วเร้าเท่ากับ 30 ซี

ถ้าทำการกำหนดให้ใช้จำนวนซีพินของตัวขั้วเร้าลดลงมีค่าเท่ากับ 30 ซี ผลที่ได้จะเกิดตามรูป
ที่ 4.10 สังเกตเห็นได้ว่าต้องใช้แรงดันไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ เพื่อให้ได้ระยะทางที่มากขึ้น ใน
งานวิจัยนี้ต้องการให้มีระยะทางในการเคลื่อนที่เท่ากับ 1 ไมโครเมตร จึงต้องใช้แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ
ถึง 320 โวลต์ ในการขับเคลื่อน โครงสร้างตัวขั้วเร้าทางไฟฟ้าสถิตแบบซีพิน

บทที่ 5

กระบวนการพัฒนาและการสร้างตัวขั้วเร้าทางไฟฟ้าสถิตแบบชี้หวี

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำให้ทราบค่าพารามิเตอร์ที่นำมาใช้ในการสร้าง โครงสร้าง ตัวขั้วเร้าทางไฟฟ้าสถิตแบบชี้หวี จากนั้นนำค่าดังกล่าวมาทำการสร้างโดยใช้กระบวนการสร้าง พื้นฐานที่ได้ศึกษามา ซึ่งมีการแก้ไขปัญหา ปรับปรุงและพัฒนาการสร้าง โครงสร้างตัวขั้วเร้าทาง ไฟฟ้าสถิตแบบชี้หวีที่พบระหว่างการศึกษามาเพื่อให้ได้โครงสร้างของตัวขั้วเร้าทางไฟฟ้าสถิตแบบชี้ หวีที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในงานวิจัยนี้

5.1 การออกแบบตัวขั้วเร้าทางไฟฟ้าสถิตแบบชี้หวี

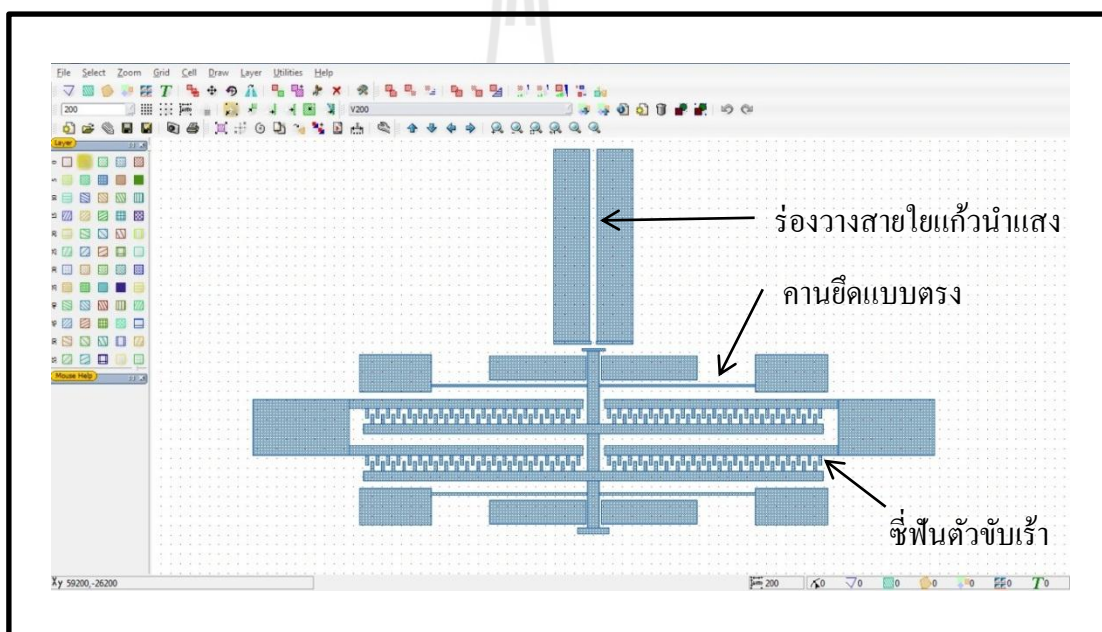
ทำการออกแบบ โครงสร้างตัวขั้วเร้าทางไฟฟ้าสถิตแบบชี้หวีด้วยโปรแกรม Layout Editor[®] โดยการออกแบบนั้นจะใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ได้มาจากทฤษฎีพื้นฐานและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 4 ซึ่งจากการศึกษาและเลือกใช้งาน โครงสร้างตัวขั้วเร้าทางไฟฟ้าสถิต แบบชี้หวีพอจะสรุปค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้ดังแสดงให้เห็นในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดที่ใช้ในการออกแบบ โครงสร้างตัวขั้วเร้า ทางไฟฟ้าสถิตแบบชี้หวี

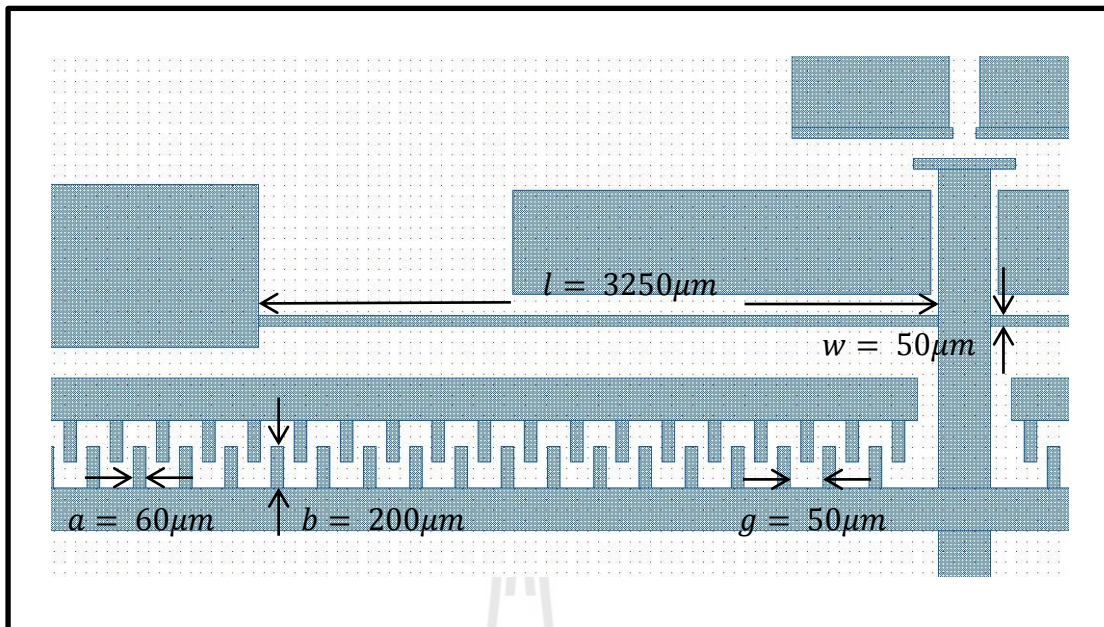
พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	ขนาด
ระยะของการเคลื่อนที่	x	1 ไมโครเมตร
จำนวนชี้ของตัวขั้วเร้า	n	80 ชี้
ความกว้างของชี้ตัวขั้วเร้า	a	60 ไมโครเมตร
ความยาวของชี้ตัวขั้วเร้า	b	200 ไมโครเมตร
ความหนาของชั้นงาน	t	150 ไมโครเมตร
ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์	ϵ_0	$8.845 \times 10^{-12} \text{ c}^2/\text{N.m}^2$
ค่าสภาพยอมของอากาศ	ϵ_r	1
แรงดันไฟฟ้า	V	200 โวลต์

ตารางที่ 5.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้างตัวขั้วเร้า
ทางไฟฟ้าสถิตแบบซีวีวี (ต่อ)

พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	ขนาด
ช่องว่างระหว่างขั้วไฟฟ้าสองขั้ว	g	50 ไมโครเมตร
ค่าคงที่ของสปริง	K_x	39.33 นิวตันต่อเมตร
ค่าความยืดหยุ่นของวัสดุ	E	2 GPa
ความกว้างของคานยึด	w	50 ไมโครเมตร
ความยาวของคานยึด	l	3250 ไมโครเมตร



รูปที่ 5.1 แสดงการออกแบบโครงสร้างตัวขั้วเร้าทางไฟฟ้าสถิตแบบซีวีวีด้วย
โปรแกรม Layout Editor®



รูปที่ 5.2 ภาพขยายโครงสร้างแสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่นำมาใช้ในการออกแบบ

5.2 การสร้างตัวขับเคลื่อนไฟฟ้าสถิตแบบซีวี

การสร้างตัวขับเคลื่อนไฟฟ้าสถิตแบบซีวีจะสร้างด้วยกระบวนการลิโทกราฟีโดยใช้สารไวแสงชนิดลบ (SU-8 photoresist) และใช้กระบวนการพื้นฐานต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 และในกระบวนการสร้างนี้ทำการสร้างที่ห้องปฏิบัติการสถานีทดลองระบบลำเลียงแสง 6a (Beamline 6a : DXL) ณ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) โดยขั้นตอนการสร้างสามารถอธิบายได้ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

5.2.1 สร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์

1. ทำการออกแบบลวดลายโครงสร้างตัวขับเคลื่อนไฟฟ้าสถิตแบบซีวีด้วยโปรแกรม Layout Editor[®] และนำไปพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์เลเซอร์ที่มีความละเอียดลงบนแผ่นฟิล์มบางเพื่อใช้เป็นแม่แบบในการถ่ายทอดลวดลาย

2. เตรียมฐานรองที่มีแผ่นกราฟิ์ขนาด 3 x 4 เซนติเมตร ที่ทำการหมุนเคลือบสารไวแสงชนิดลบที่มีความหนา 60 ไมโครเมตร

3. นำฐานรองมาประกบกับแผ่นฟิล์มบางเพื่อนำไปถ่ายทอดลวดลายด้วยกระบวนการลิโทกราฟีด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตเป็นเวลา 30 วินาที จากนั้นนำไปล้างส่วนที่ไม่ต้องการออกด้วยน้ำยาล้างสารไวแสง (SU-8 Developer)

4. เมื่อชิ้นงานแห้งแล้วให้นำไปเดิมด้วยโลหะเงินให้หนาประมาณ 40 ไมโครเมตร ด้วยกระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าก็จะเป็นอันเสร็จสิ้นกระบวนการสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์

5.2.2 สร้างตัวจับเร้าทางไฟฟ้าสถิตแบบชี้หวี

ขั้นตอนนี้ทำต่อจากกระบวนการสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์ มีขั้นตอนการทำงานดังนี้

1. เตรียมฐานรองชิ้นงานที่มีแผ่นกราฟไฟท์ขนาด 3 x 4 เซนติเมตร ด้วยวิธีการหยอดสารไวแสง เพื่อให้ความหนาของสารไวแสงมีค่าเท่ากับ 250 ไมโครเมตร
2. นำฐานรองมาประกบกับหน้ากากกันรังสีเอกซ์แล้วนำเข้าเครื่องฉายรังสีเอกซ์ทำการตั้งค่าและควบคุมระบบการทำงานผ่านโปรแกรมฉายรังสีเอกซ์ โดยทำการฉายรังสีเอกซ์เมื่อค่ากระแสไฟฟ้าอยู่ในช่วง 110 – 120 มิลลิแอมป์ และกำหนดปริมาณรังสีเอกซ์ที่ฉายลงบนชิ้นงานมีค่าเท่ากับ 28000 มิลลิจูลต่อตารางเซนติเมตร จากนั้นนำมาวางบนแผ่นให้ความร้อนเพื่อให้เกิดลวดลายขึ้น แล้วทำการล้างสารไวแสงในส่วนที่ไม่ต้องการออก
3. จากนั้นนำชิ้นงานไปทำการเคลือบโลหะด้วยทองคำเพื่อให้โครงสร้างตัวจับเร้าทางไฟฟ้าสถิตแบบชี้หวีเกิดการสะท้อนแสงและเกิดการนำไฟฟ้าด้วยกระบวนการเคลือบโลหะด้วยเทคนิคสปีดเทอริง

5.2.3 ย้ายฐานรองของชิ้นงาน

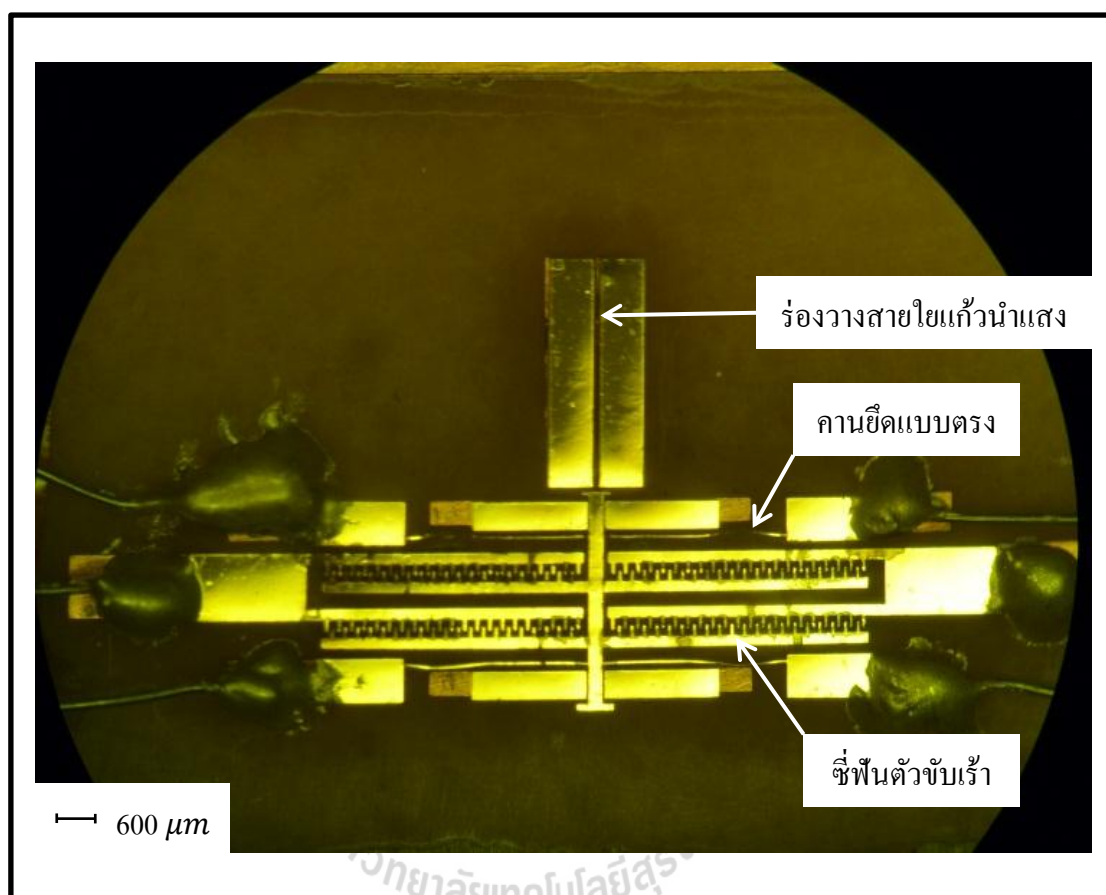
ทำการเปลี่ยนฐานรองของชิ้นงานจากแผ่นกราฟไฟท์เป็นแผ่นวงจรพิมพ์เปล่า โดยนำแผ่นวงจรพิมพ์เปล่ามาทำการสกัดทองแดงออกให้เหลือเพียงจุดที่ทำการเชื่อมต่อตัวนำไฟฟ้าและส่วนที่เป็นโครงสร้างของคานยึดที่ไม่ลอยในอากาศ โดยขั้นตอนในการทำมีดังนี้

1. นำชิ้นงานที่ทำการเคลือบทองคำเรียบร้อยแล้วมาถนอมด้วยสารไวแสงแล้วนำกระจกสะอาดอีกแผ่นมาประกบ รอจนกระทั่งสารไวแสงแข็งตัวแล้วทำการขัดแผ่นกราฟไฟท์ทิ้งด้วยกระดาษทรายที่มีความหยาบจนกระทั่งในส่วนของแผ่นกราฟไฟท์หมดจึงนำกระดาษทรายที่มีความละเอียดมาขัดเพื่อให้ผิวบริเวณดังกล่าวเรียบเนียนขึ้น
2. เตรียมฐานรองขนาด 2.5 x 2.5 เซนติเมตร ที่ทำจากแผ่นวงจรพิมพ์ที่สกัดทองแดงในส่วนที่ไม่ต้องการออก จากนั้นทาควาอีพ็อกซี่ (Epoxy) ในบริเวณส่วนที่ต้องการให้โครงสร้างติดกับฐานรอง ข้อควรระวังในขั้นตอนนี้คืออย่าทาควาอีพ็อกซี่มากเกินไปเพราะควาอีพ็อกซี่ในส่วนที่เกินมาจะไหลออกไปโดนส่วนอื่น ๆ ได้
3. นำชิ้นงานที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 มาประกบกับฐานรองที่ได้จากขั้นตอนที่ 2
4. เมื่อควาอีพ็อกซี่แห้งดีแล้วให้ทำการล้างสารไวแสงที่ทำการถมไว้ออกก็จะได้โครงสร้างของชิ้นงานบนฐานรองแผ่นวงจรพิมพ์

5.2.4 เชื่อมต่อสายไฟให้กับชิ้นงาน

ต่อจากขั้นตอนที่แล้วเมื่อได้ชิ้นงานที่อยู่บนฐานรองแผ่นวงจรพิมพ์ให้ทำการทดสอบว่าวงจรนั้นเกิดการลัดวงจรหรือไม่ หากไม่เกิดการลัดวงจรให้นำสายไฟมาทำการเชื่อมต่อ โดยให้ขั้วบวกเป็นขั้วที่ต่อเข้ากับโครงสร้างที่อยู่กับที่ และขั้วลบต่อเข้ากับโครงสร้างในส่วนที่สามารถขยับได้ การต่อสายไฟเข้ากับโครงสร้างของชิ้นงานนี้จะใช้กาวเงินเป็นตัวเชื่อมต่อ กาวเงินนั้นมีคุณสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้าเพื่อเชื่อมให้สายไฟกับวงจรสามารถเชื่อมโยงถึงกันได้ ในการ

เชื่อมต่อโครงสร้างตัวขั้วเร้าทางไฟฟ้าสถิตแบบชี้หิวนี้ไม่เหมาะที่ใช้การเชื่อมต่อด้วยวิธีการบัดกรี เนื่องจากว่าโครงสร้างในงานวิจัยนี้มีขนาดที่ค่อนข้างเล็กในระดับไมโครเมตร การเชื่อมต่อด้วยวิธีการบัดกรีนี้อาจทำให้ชิ้นงานเกิดความเสียหายขึ้นได้



รูปที่ 5.3 โครงสร้างตัวขั้วเร้าทางไฟฟ้าสถิตแบบชี้หิวหลังจากเชื่อมต่อสายไฟ

เมื่อทำการสร้างโครงสร้างตัวขั้วเร้าทางไฟฟ้าสถิตแบบชี้หิวเสร็จแล้ว จึงนำโครงสร้างที่ได้มาทำการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ในส่วนต่าง ๆ โดยทำการเปรียบเทียบขนาดของโครงสร้างที่ได้ทำการจำลองทางคณิตศาสตร์กับขนาดของโครงสร้างที่ได้จากการสร้างจริง ดังที่แสดงในตารางที่ 5.2

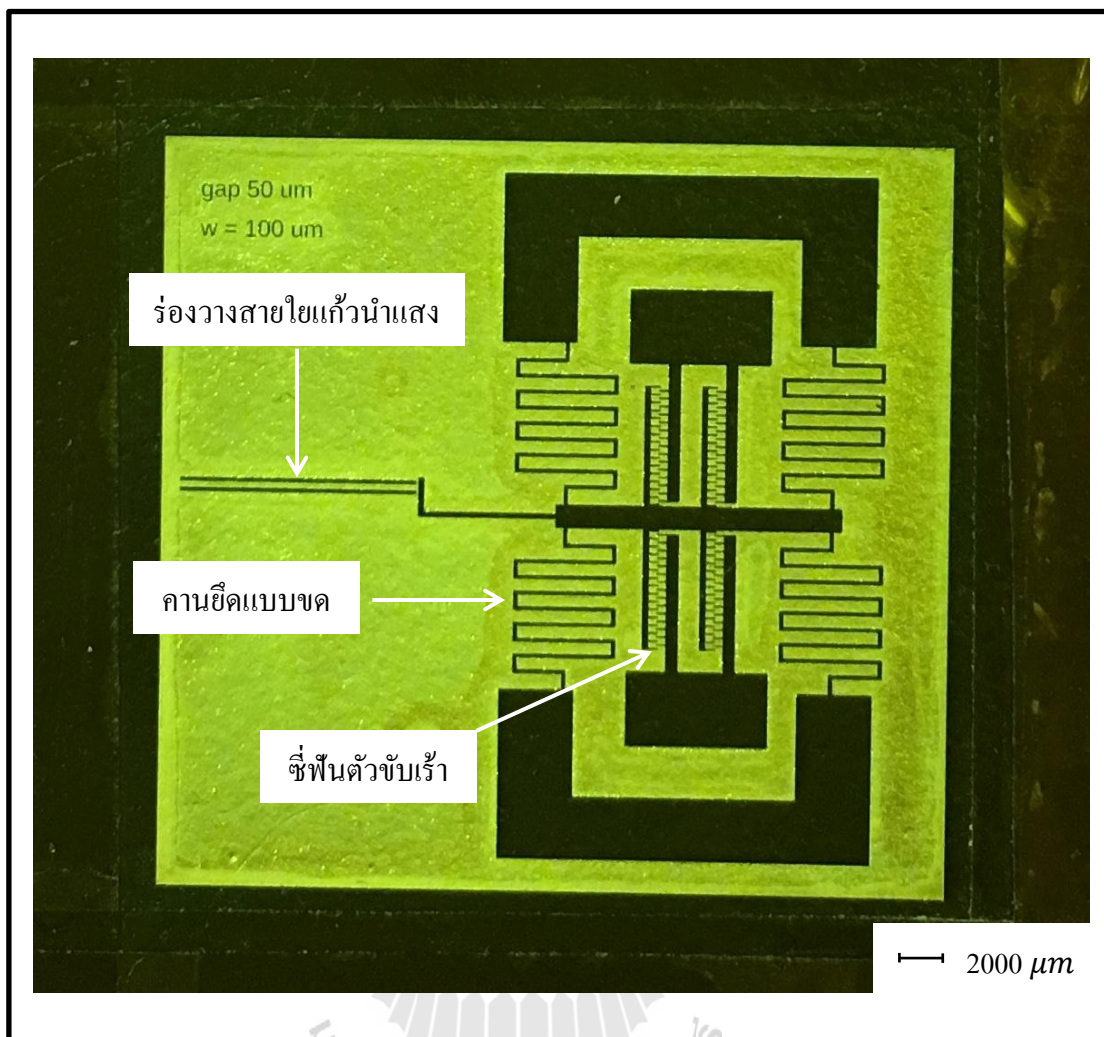
ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการจำลองทางคณิตศาสตร์กับค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้จริง

พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	ขนาดจากการจำลองทางคณิตศาสตร์	ขนาดที่ได้จริง
จำนวนซี่ของตัวขับเคลื่อน	n	80 ซี่	80 ซี่
ความกว้างของซี่ตัวขับเคลื่อน	a	60 ไมโครเมตร	51 ไมโครเมตร
ความยาวของซี่ตัวขับเคลื่อน	b	200 ไมโครเมตร	198 ไมโครเมตร
ความหนาของชิ้นงาน	t	150 ไมโครเมตร	200 ไมโครเมตร
ช่องว่างระหว่างขั้วไฟฟ้าสองขั้ว	g	50 ไมโครเมตร	58 ไมโครเมตร
ความกว้างของคานยึด	w	50 ไมโครเมตร	41 ไมโครเมตร
ความยาวของคานยึด	l	3250 ไมโครเมตร	3240 ไมโครเมตร

5.3 รูปแบบของตัวขับเคลื่อนทางไฟฟ้าสถิตแบบซี่หวีที่เคยมีการสร้างขึ้นในงานวิจัย

5.3.1 โครงสร้างแบบที่ 1

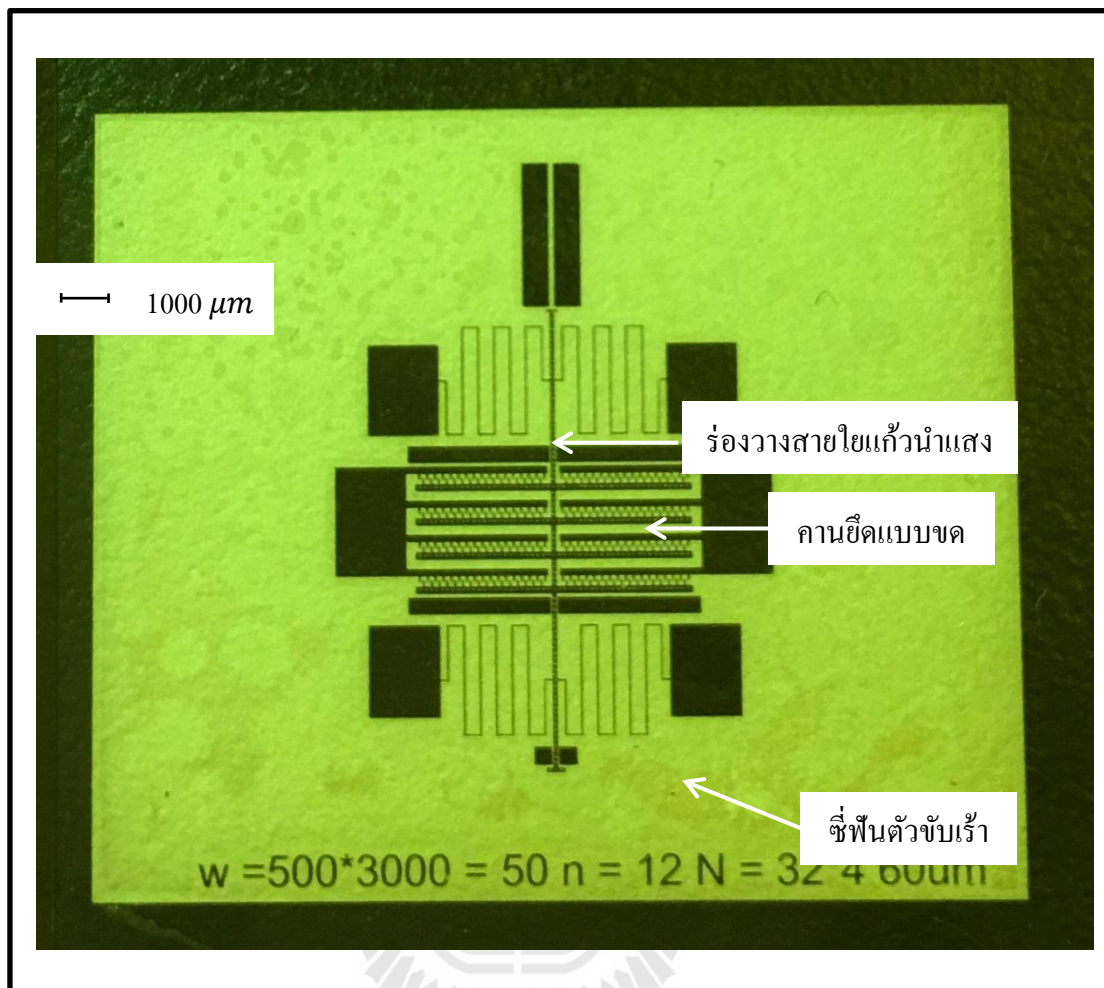
โครงสร้างนี้เป็นโครงสร้างแบบแรกที่ได้ทำการออกแบบและทำการสร้าง โดยลักษณะการออกแบบนั้นเลือกใช้โครงสร้างคานยึดแบบขด จำนวน 4 ขดและวางไว้ทั้ง 4 ด้านและมีชุดซี่ฟันที่ใช้ขับเคลื่อน 4 ชุด ชุดละ 15 ซี่ ผลที่ได้คือ โครงสร้างมีลักษณะที่ใหญ่ทำให้แรงที่ใช้ในการขับเคลื่อนนั้นไม่พอ จึงส่งผลทำให้โครงสร้างนี้ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้



รูปที่ 5.4 หน้ากากกันรังสีเอกซ์โครงสร้างแบบที่ 1

5.3.2 โครงสร้างแบบที่ 2

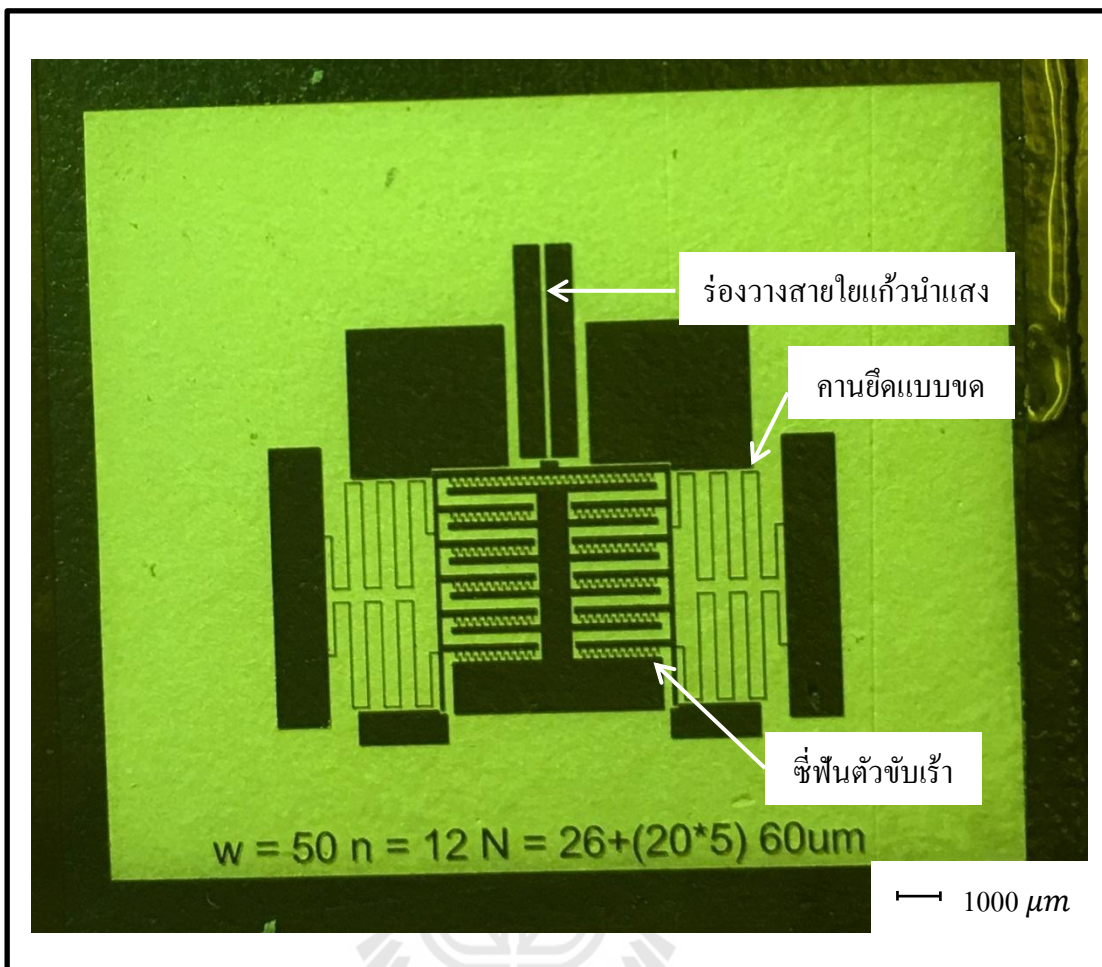
โครงสร้างแบบที่ 2 เป็นการปรับปรุงในส่วนของโครงสร้างแบบที่ 1 โดยลดจำนวนของขดสปริงให้มีจำนวนน้อยลงเหลือเพียง 3 ขดและวางไว้ทั้ง 4 ด้าน ในส่วนของซี่ฟันนั้นได้เพิ่มซี่ฟันให้มีมากขึ้นเพื่อที่จะเพิ่มแรงในการขับเคลื่อนเป็น 4 ชุด ชุดละ 32 ซี่ แต่ปัญหาที่พบคือโครงสร้างไม่มีความสมดุลกัน เมื่อทำการย้ายฐานรองจะพบว่าโครงสร้างที่เป็นแกนกลางของโครงสร้างบริเวณตรงกลางในส่วนที่ลอยอยู่ในอากาศนั้นเกิดการโก่งตัวขึ้น เพราะขนาดแกนกลางของโครงสร้างมีขนาดที่เล็กเกินไป



รูปที่ 5.5 หน้ากากกั้นรังสีเอกซ์โครงสร้างแบบที่ 2

5.3.3 โครงสร้างแบบที่ 3

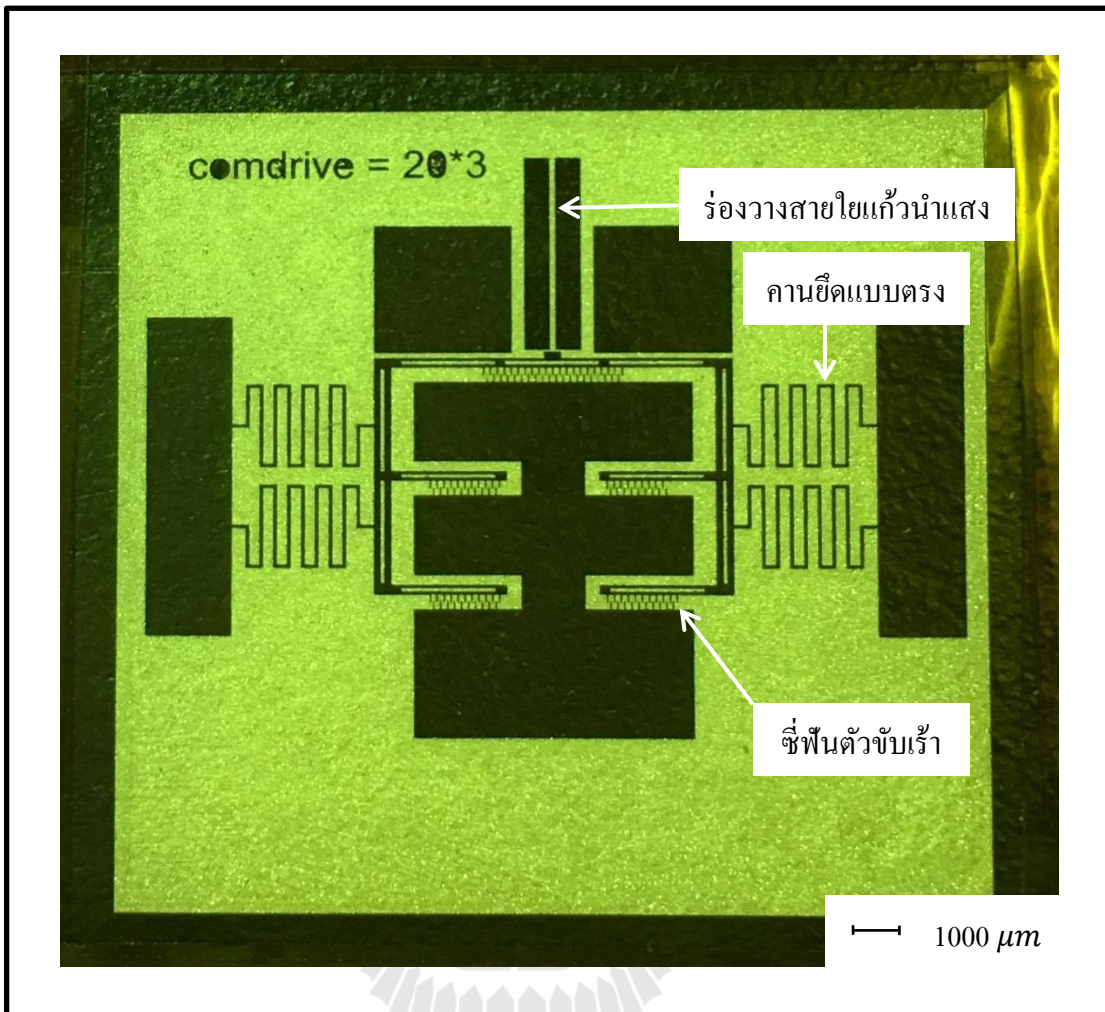
โครงสร้างแบบที่ 3 ทำการเพิ่มขนาดของแกนกลางให้มีขนาดใหญ่ขึ้นและใช้เป็นส่วนที่อยู่กับที่ จึงทำการเปลี่ยนการจัดวางตัวของซี่ฟันใหม่ โดยใช้ซี่ฟันจำนวน 5 ชุด ชุดละ 20 ซี่ และมีเพิ่มขึ้นมาอีก 1 แถว ในช่วงบนของแกนกลางมีจำนวนซี่ฟันเท่ากับ 26 ซี่ ผลในการทดสอบที่ได้นั้นสามารถทำให้โครงสร้างนี้มีการเคลื่อนที่ได้ถึง 100 ไมโครเมตร ด้วยการจ่ายค่าแรงดันไฟฟ้า 120 โวลต์



รูปที่ 5.6 หน้ากากกันรังสีเอกซ์โครงสร้างแบบที่ 3

5.3.4 โครงสร้างแบบที่ 4

จากโครงสร้างที่แล้วต้องการปรับปรุงให้มีการเคลื่อนที่ให้มีระยะทางที่น้อยกว่าเดิม จึงทำการปรับปรุงให้มีซี่ฟันลดลงโดยใช้ซี่ฟันจำนวน 4 ชุด ชุดละ 10 ซี่ และเพิ่มอีกหนึ่งแถวจำนวน 20 ซี่ และในส่วนของโครงสร้างมีการเจาะรูเพิ่มขึ้นเพื่อช่วยให้โครงสร้างมีน้ำหนักเบา ผลที่ได้คือโครงสร้างไม่สามารถขยับได้ เนื่องจากมีซี่ฟันที่มีจำนวนน้อยไปไม่เพียงพอกับการขับเคลื่อน จึงต้องเปลี่ยนประเภทของคานยึดมาใช้คานยึดแบบตรง ดังที่ได้ออกแบบในโครงสร้างสุดท้ายที่อยู่ในผลงานวิจัย



รูปที่ 5.7 หน้ากากกันรังสีเอกซ์โครงสร้างแบบที่ 4

บทที่ 6

การทดสอบและผลการทดสอบ

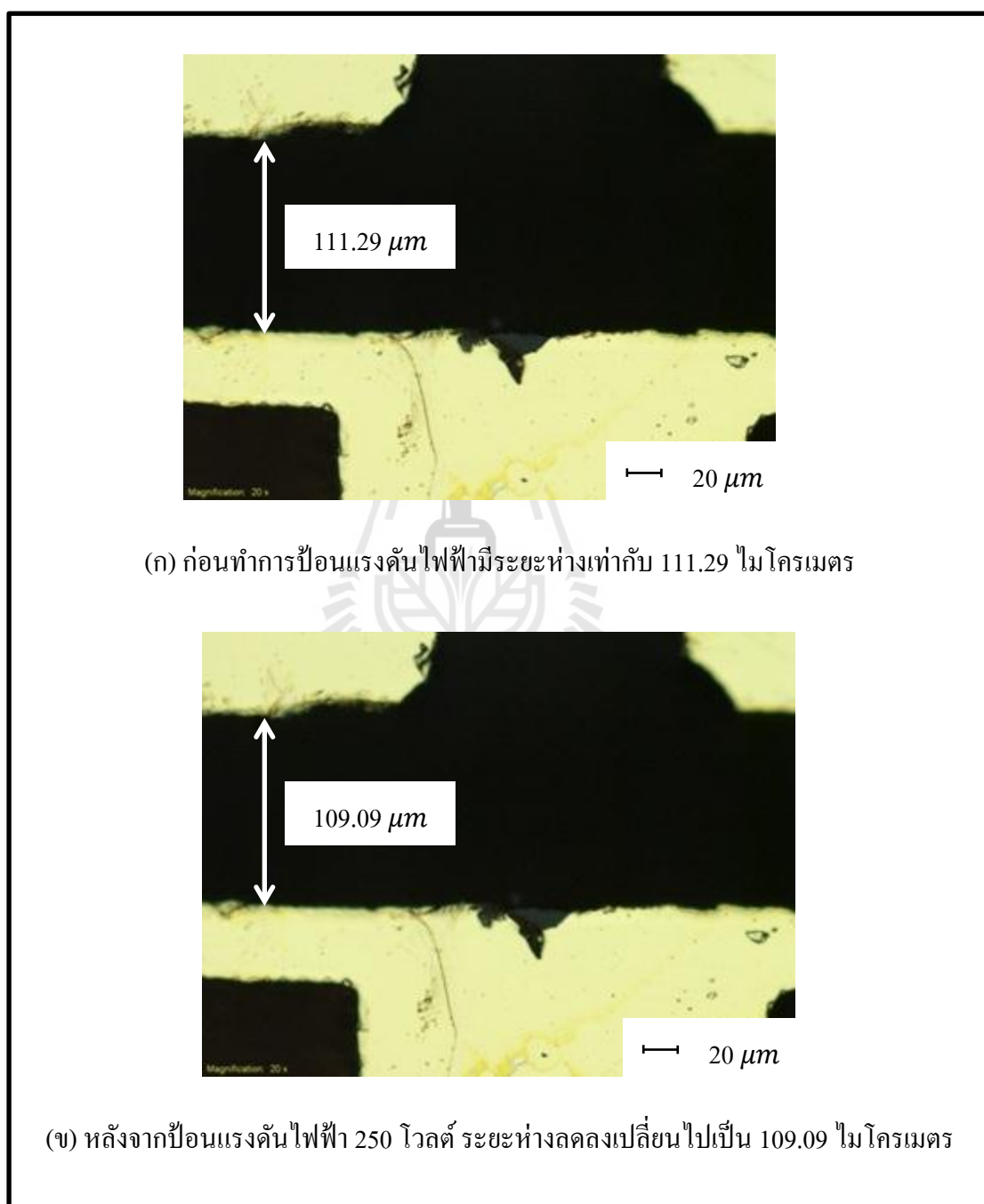
ทำการทดสอบการทำงานของตัวขับเร้าทางไฟฟ้าสถิตแบบซีหิวที่ได้จากการออกแบบด้วยกระบวนการที่ผ่านมา โดยในงานวิจัยนี้ต้องการปรับปรุงพัฒนาให้ตัวสะท้อนแสงที่ติดอยู่กับโครงสร้างตัวขับเร้าทางไฟฟ้าสถิตแบบซีหิวนั้นสามารถขยับได้ จึงทำการทดสอบด้วยการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับโครงสร้างเพื่อให้ส่วนที่เกิดการเคลื่อนที่นั้นทำงาน จากนั้นจึงทำการทดสอบเรื่องการเกิดการแทรกสอดกันของแสง และทำการเก็บผลที่ได้จากทดสอบในแต่ละขั้นตอน

6.1 การทดสอบการเคลื่อนที่

ในการทดสอบการเคลื่อนที่นั้นทำการทดสอบด้วยการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับโครงสร้างตัวขับเร้าทางไฟฟ้าสถิตแบบซีหิวที่ได้ผ่านกระบวนการย้ายฐานรองชิ้นงานจากแผ่นกราฟท์มาเป็นแผ่นวงจรพิมพ์และทำการเชื่อมต่อสายไฟเข้ากับชิ้นงานเรียบร้อยแล้ว โดยการป้อนแรงดันไฟฟ้าที่มีขั้วบวกเข้ากับขั้วของชิ้นงานที่อยู่กับที่ และทำการต่อขั้วลบเข้ากับขั้วของชิ้นงานที่ทำหน้าที่ในการเคลื่อนที่ไปมาได้ แรงดันไฟฟ้าที่ใช้มีลักษณะเป็นพัลส์ที่จ่ายแรงดันไฟฟ้าได้ตั้งแต่ 0 – 350 โวลต์ ในการทดสอบนั้นจะค่อย ๆ เพิ่มค่าแรงดันไฟฟ้าขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งตัวขับเร้าทางไฟฟ้าสถิตแบบซีหิวขยับ ในงานวิจัยนี้ใช้กล้อง โอลิมปัสรุ่น BX51 (Olympus BX51) ที่มีกำลังขยายของเลนส์ x5 x10 x20 x40 และ x100 เท่า และใช้โอลิมปัสรุ่น DB21 (Olympus DP21) มาประกอบเพื่อใช้ในการหาระยะทางของชิ้นงานในการวิเคราะห์สังเกตการเปลี่ยนแปลงและใช้อ่านค่าระยะทางในการเคลื่อนที่ผ่านโปรแกรม Stream start ในการทดสอบนี้ใช้กำลังขยายของเลนส์ x20 เท่า ซึ่งผลที่ได้นั้นแสดงในรูปที่ 6.1 แสดงการเปรียบเทียบระยะทางก่อนทำการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับโครงสร้างและภายหลังจากการป้อนแรงดันไฟฟ้า 250 โวลต์ ผลที่ได้คือ เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 250 โวลต์ตัวขับเร้าทางไฟฟ้าสถิตแบบซีหิวสามารถขยับเคลื่อนที่ทำให้ระยะห่างระหว่างสายใยแก้วนำแสงกับตัวสะท้อนแสงมีระยะทางลดลง ซึ่งผลต่างของระยะทางที่วัดค่าได้นั้นมีค่าเท่ากับ 2.2 ไมโครเมตร

เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ทำให้เห็นได้ว่า ในการออกแบบหากต้องการทำให้ตัวขับเร้าทางไฟฟ้าสถิตแบบซีหิวสามารถเคลื่อนที่ได้ที่ระยะทาง 1 ไมโครเมตร ต้องใช้แรงดันไฟฟ้าในการขับเคลื่อน 200 โวลต์ แต่ในการปฏิบัติจริงต้องใช้แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 250 โวลต์ ถึงสามารถมองเห็นระยะทางที่มีการเปลี่ยนแปลงและผลต่างของระยะทางที่เปลี่ยนแปลงไปมีค่าเท่ากับ 2.2 ไมโครเมตร ดังนั้นการอ่านค่าระยะทางที่มีขนาด 1

ไมโครเมตรนั้นเป็นสิ่งที่ทำได้อย่างจำกัดมากสำหรับอุปกรณ์ที่มีอยู่เนื่องจากเครื่องมือที่ใช้ั้นเหมาะกับการใช้งานที่มีระยะ 10 ไมโครเมตรขึ้นไป ถ้านำมาใช้กับการวัดระยะ 1 ไมโครเมตรจะทำให้การอ่านค่านั้นทำได้ยาก



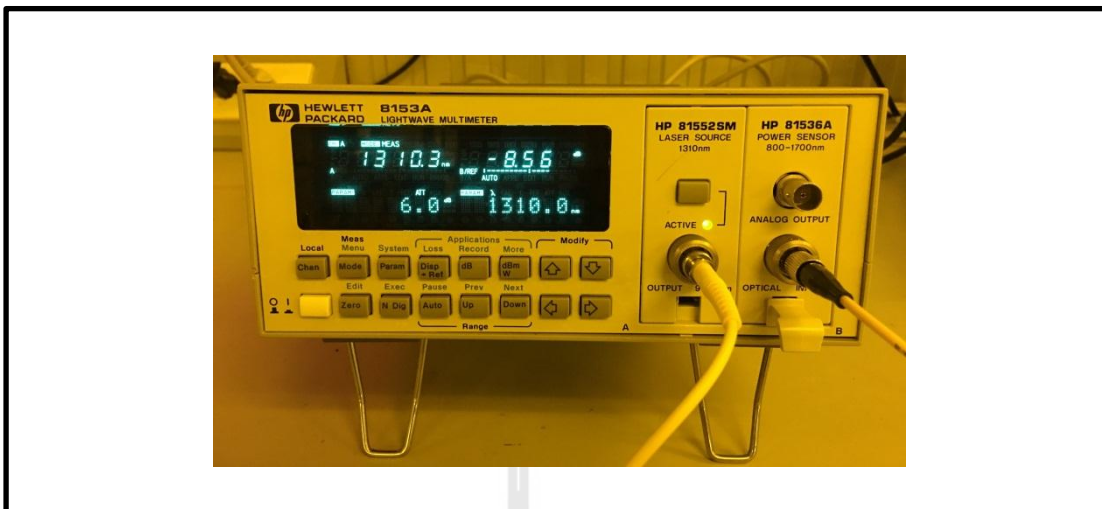
รูปที่ 6.1 ภาพขยายแสดงระยะห่างสายใยแก้วนำแสงกับตัวสะท้อนแสง ก่อนและหลังจากการป้อนแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 6.2 กล้องจุลทรรศน์โอลิมปัสรุ่นBX51 (Olympus BX51)
และ โอลิมปัสรุ่นDB21 (Olympus DP21)

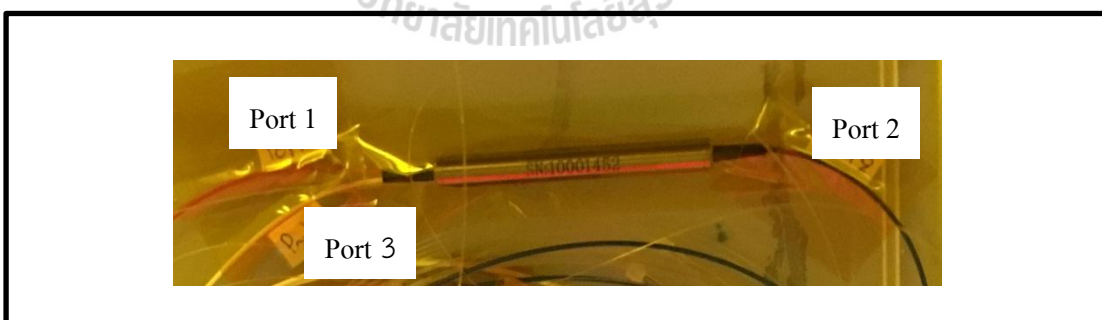
6.2 การทดสอบการแทรกสอดกันของแสง

จากที่ได้ทำการทดสอบการเคลื่อนที่ของตัวขยับเร้าทางไฟฟ้าสถิตแบบซีหิวแล้วนั้นต่อไปเป็นขั้นตอนของการทดสอบการสะท้อนกลับของแสงเพื่อสังเกตการเกิดการแทรกสอดของแสง (Interference) โดยการทำทดสอบนั้นจะใช้เครื่องกำเนิดแสง (Light wave multimeter) ยี่ห้อ Hewlett Packard รุ่น 8153A เป็นแหล่งกำเนิดแสง รับส่งแสงที่มีความยาวคลื่น 1310 นาโนเมตร มีการเพิ่มค่าลดทอนของสัญญาณ (Attenuation) เท่ากับ 6 dB เข้าไปด้วย จากนั้นทำการทดสอบค่าความสูญเสียภายในสายใยแก้วนำแสงเพียงเส้นเดียว ผลที่ได้คือมีค่าการสูญเสียภายในสายส่งเส้นเดียวอยู่ที่ -8.56 dB ดังที่แสดงในรูปที่ 6.4

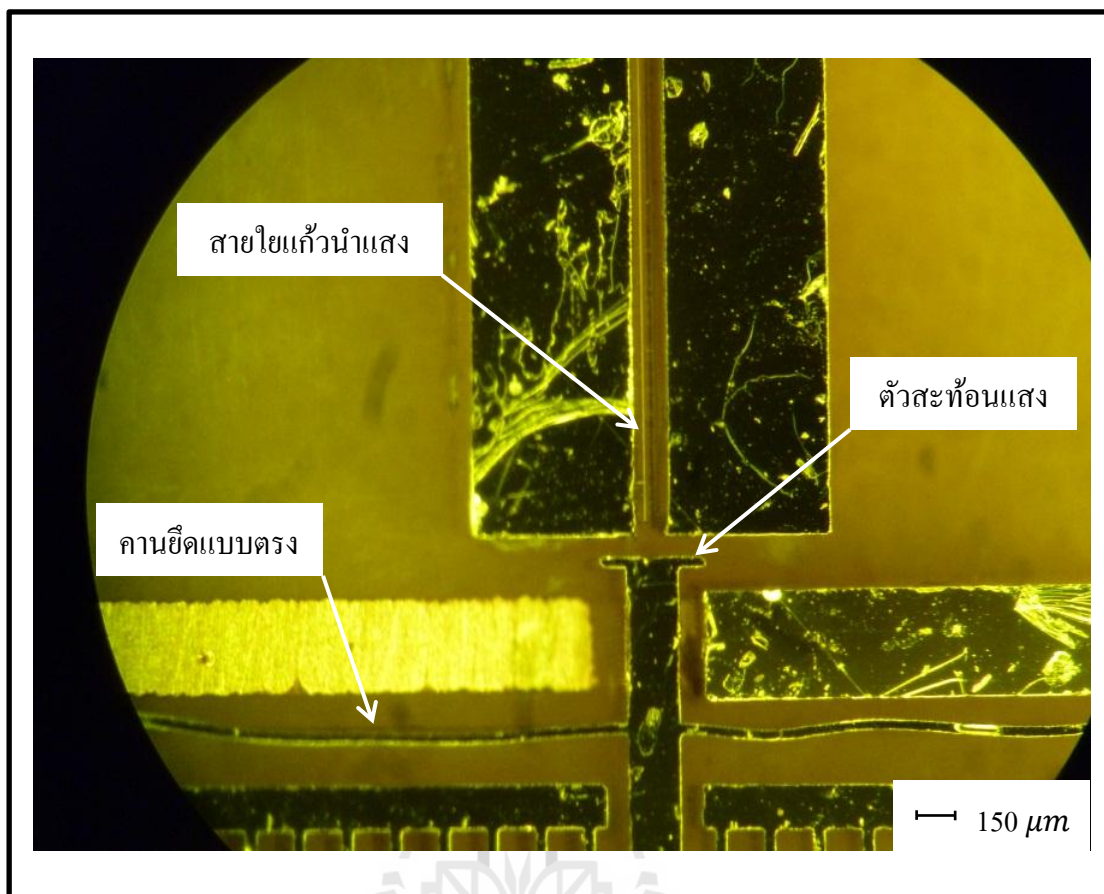


รูปที่ 6.3 ค่าการสูญเสียภายในสายใยแก้วนำแสงเพียงเส้นเดียว

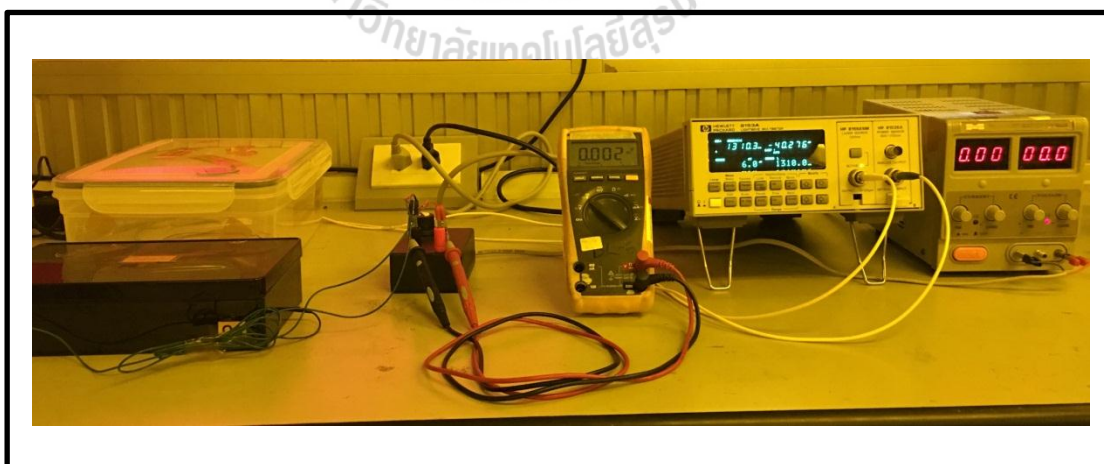
จากนั้นจึงทำการเก็บค่าผลการทดลองการเกิดการแทรกสอดของแสงโดยการต่ออุปกรณ์นั้นจะใช้ ตัวแยกสัญญาณ (Circulator) ชนิดสามทางเข้ามาช่วย ดังแสดงในรูปที่ 6.4 โดยขาที่ 1 (Port 1) จะต่อเข้ากับเครื่องกำเนิดแสงที่ช่องทางออกของแสง (Output 9/125 μm) ขาที่ 2 (Port 2) เป็นสายใยแก้วนำแสงที่ต่อเข้ากับชิ้นงานบริเวณที่เป็นร่องไว้สำหรับวางสายใยแก้วนำแสงดังแสดงไว้ในรูปที่ 6.5 และขาที่ 3 (Port 3) เชื่อมต่อกับเข้ามายังช่องนำแสงเข้าของเครื่องกำเนิดแสง (Optical Input) เพื่อทำการอ่านค่าการแทรกสอดกันของแสง



รูปที่ 6.4 ตัวแยกสัญญาณ (Circulator) ชนิดสามทาง



รูปที่ 6.5 สายใยแก้วนำแสงต่อเข้ากับชิ้นงานที่บริเวณร่องวางสาย



รูปที่ 6.6 ภาพรวมของอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

ในการตั้งค่าเครื่องกำเนิดแสงนั้นทำการตั้งค่าความยาวคลื่นทั้งภาครับและภาคส่งมีค่าเท่ากับ 1310 นาโนเมตร จากนั้นทำการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าเข้ากับโครงสร้างของชิ้นงานแล้วทำการเก็บค่าที่ได้จากการทดลอง ซึ่งมีค่าเป็นไปตามตารางที่ 6.1, 6.2, 6.3 และ 6.4 ตามลำดับ

ตารางที่ 6.1 แสดงผลการทดลองครั้งที่ 1

แรงดัน (Volt)	เวลาที่เริ่มเก็บผลทำการทดลอง (dB)						
	เริ่มต้น	นาทิตี่ 1	นาทิตี่ 2	นาทิตี่ 3	นาทิตี่ 4	นาทิตี่ 5	ค่าเฉลี่ยนาทิตี่ 1 – 5
0	-39	-39	-39	-38	-38	-38	-38.4
45	-37	-37	-37	-37	-37	-38	-37.2
63	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-36
80	-36	-36	-36	-36	-37	-37	-36.4
106	-37	-36	-36	-36	-36	-36	-36
120	-37	-38	-39	-39	-38	-38	-38.4
140	-36	-38	-39	-39	-38	-37	-38.2
164	-38	-37	-36	-36	-36	-36	-36.2
188	-37	-36	-37	-37	-34	-35	-35.8
206	-33	-33	-32	-33	-34	-35	-33.4
224	-33	-31	-32	-32	-33	-33	-32.2
240	-31	-32	-33	-34	-34	-33	-33.2
292	-35	-34	-34	-34	-34	-34	-34

ตารางที่ 6.2 แสดงผลการทดลองครั้งที่ 2

แรงดัน (Volt)	เวลาที่เริ่มเก็บผลทำการทดลอง (dB)											
	เริ่มต้น	นาทิตี่ 1	นาทิตี่ 2	นาทิตี่ 3	นาทิตี่ 4	นาทิตี่ 5	นาทิตี่ 6	นาทิตี่ 7	นาทิตี่ 8	นาทิตี่ 9	นาทิตี่ 10	ค่าเฉลี่ยนาทิตี่เริ่มต้นและนาทิตี่ 1 – 5
0	-41	-40	-40	-40	-40	-40	-42	-42	-41	-40	-39	-40.1667
66	-39	-39	-40	-40	-41	-41	-41	-41	-41	-40	-39	-40
88	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-40	-40	-40	-39
106	-40	-40	-40	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-40.5
130	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-41
151	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-41	-40	-40	-41
170	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-39	-39	-39	-39	-40
181	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39
191	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-39	-39	-39	-38
199	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-39	-39	-39	-39	-39	-38
210	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38
223	-38	-37	-37	-37	-37	-37	-38	-38	-39	-39	-39	-37.1667

ตารางที่ 6.2 แสดงผลการทดลองครั้งที่ 2 (ต่อ)

แรงดัน (Volt)	เวลาที่เริ่มเก็บผลทำการทดลอง (dB)											
	เริ่มต้น	นาที่ที่ 1	นาที่ที่ 2	นาที่ที่ 3	นาที่ที่ 4	นาที่ที่ 5	นาที่ที่ 6	นาที่ที่ 7	นาที่ที่ 8	นาที่ที่ 9	นาที่ที่ 10	ค่าเฉลี่ยนาที่เริ่มต้นและนาที่ที่ 1 – 5
236	-39	-39	-39	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-39.5
252	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-41	-41	-41	-41	-41	-40
278	-40	-39	-39	-39	-39	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-39
296	-38	-38	-38	-40	-40	-39	-38	-38	-39	-40	-40	-38.8333
307	-40	-39	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38	-38.5



ตารางที่ 6.3 แสดงผลการทดลองครั้งที่ 3

แรงดัน (Volt)	เวลาที่เริ่มเก็บผลทำการทดลอง (dB)											
	เริ่มต้น	นาทีกี่ 1	นาทีกี่ 2	นาทีกี่ 3	นาทีกี่ 4	นาทีกี่ 5	นาทีกี่ 6	นาทีกี่ 7	นาทีกี่ 8	นาทีกี่ 9	นาทีกี่ 10	ค่าเฉลี่ยนาทีกี่เริ่มต้นและนาทีกี่ 1 – 5
0	-34	-34	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33
52	-32	-33	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32
90	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32
118	-32	-32	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-34	-34	-33.2857
143	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34
160	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33
169	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-33	-33	-33	-33	-34	-32.8571
182	-34	-34	-34	-34	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-34	-33.1429
204	-34	-34	-34	-34	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33
226	-34	-34	-35	-34	-34	-34	-34	-33	-33	-33	-33	-33.4286
230	-33	-33	-33	-33	-33	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-33.8571
239	-34	-34	-34	-34	-34	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33.1429

ตารางที่ 6.3 แสดงผลการทดลองครั้งที่ 3 (ต่อ)

แรงดัน (Volt)	เวลาที่เริ่มเก็บผลทำการทดลอง (dB)											
	เริ่มต้น	นาทีกี่ 1	นาทีกี่ 2	นาทีกี่ 3	นาทีกี่ 4	นาทีกี่ 5	นาทีกี่ 6	นาทีกี่ 7	นาทีกี่ 8	นาทีกี่ 9	นาทีกี่ 10	ค่าเฉลี่ยนาทีกี่เริ่มต้นและนาทีกี่ 1 – 5
255	-33	-33	-33	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34
261	-34	-34	-34	-33	-34	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33
286	-33	-33	-33	-34	-33	-34	-34	-34	-34	-34	-34	-34
303	-34	-34	-34	-34	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33	-33



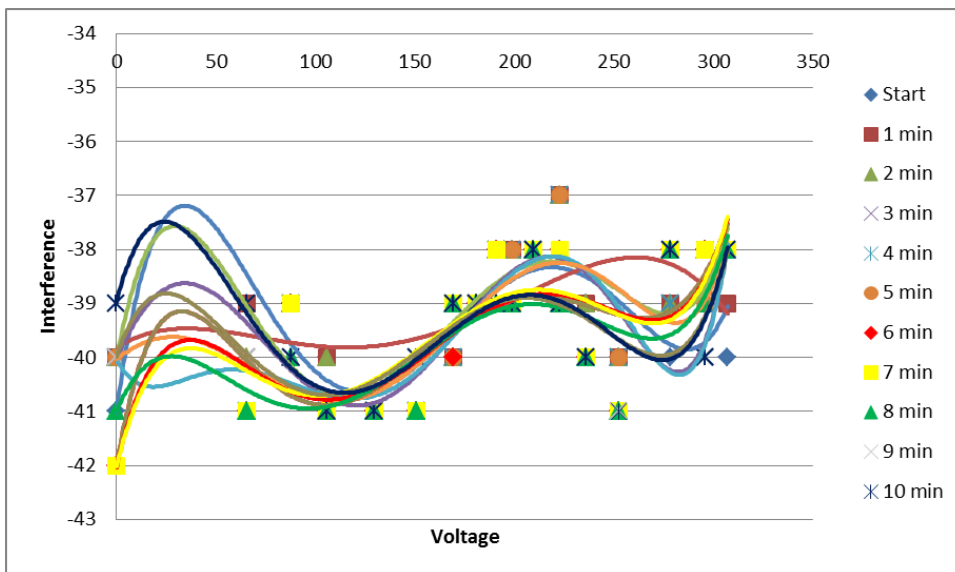
ตารางที่ 6.4 แสดงผลการทดลองครั้งที่ 4

แรงดัน (Volt)	เวลาที่เริ่มเก็บผลทำการทดลอง (dB)											
	เริ่มต้น	นาทีกี่ 1	นาทีกี่ 2	นาทีกี่ 3	นาทีกี่ 4	นาทีกี่ 5	นาทีกี่ 6	นาทีกี่ 7	นาทีกี่ 8	นาทีกี่ 9	นาทีกี่ 10	ค่าเฉลี่ยนาทีกี่เริ่มต้นและนาทีกี่ 1 – 5
0	-39	-39	-38	-38	-38	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-38.4
63	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-40	-40	-40	-40	-40	-39
102	-40	-40	-40	-40	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-40	-39.6
124	-39	-39	-39	-39	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-39.4
150	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40
163	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40
180	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39
194	-39	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-39	-40
206	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-40	-39	-39	-39	-39	-39
216	-39	-38	-38	-38	-38	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-38.2
228	-40	-40	-40	-40	-40	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39.8
243	-38	-39	-39	-39	-39	-40	-40	-40	-40	-40	-39	-39.2

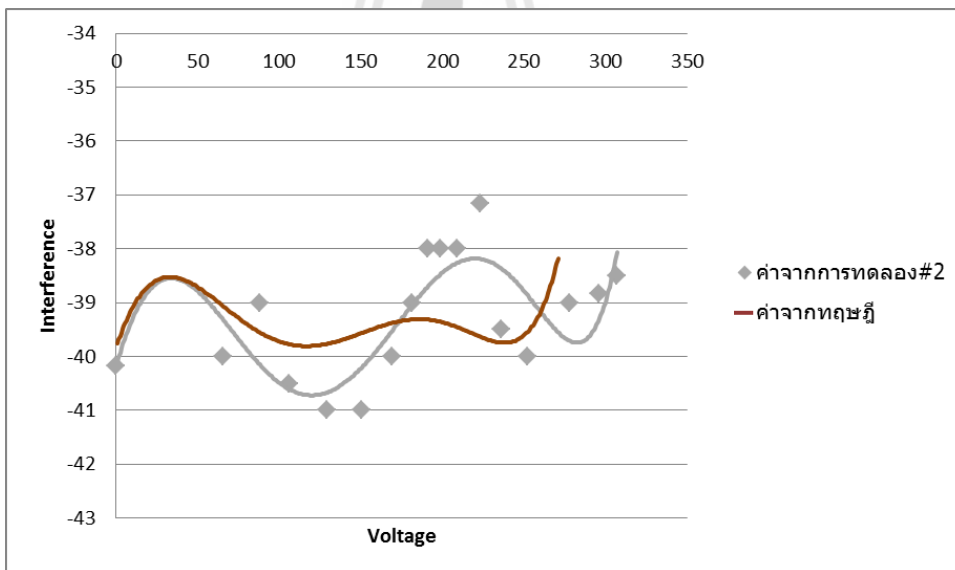
ตารางที่ 6.4 แสดงผลการทดลองครั้งที่ 4 (ต่อ)

แรงดัน (Volt)	เวลาที่เริ่มเก็บผลทำการทดลอง (dB)											
	เริ่มต้น	นาทิตี่ 1	นาทิตี่ 2	นาทิตี่ 3	นาทิตี่ 4	นาทิตี่ 5	นาทิตี่ 6	นาทิตี่ 7	นาทิตี่ 8	นาทิตี่ 9	นาทิตี่ 10	ค่าเฉลี่ยนาทิตี่เริ่มต้นและนาทิตี่ 1 – 5
249	-39	-39	-38	-38	-39	-39	-39	-40	-39	-39	-39	-38.6
260	-38	-39	-39	-40	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39.2
268	-39	-40	-40	-40	-40	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39.8
285	-38	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39
299	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-38	-38	-39	-39	-39
316	-38	-38	-38	-39	-39	-39	-39	-39	-39	-40	-40	-38.6





(ก) กราฟเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้ากับค่าการแทรกสอดกันของแสงที่เวลาต่าง ๆ



(ข) กราฟเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยการแทรกสอดกันของแสงในช่วงเวลาเริ่มต้นและช่วงเวลาที่ 1 - 5 กับค่าที่ได้จากทฤษฎี

รูปที่ 6.7 กราฟผลการทดลองครั้งที่ 2

ผลการทดลองที่ได้จากการทดลองครั้งที่ 1 แสดงในตารางที่ 6.1 ในการทดลองใช้แรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 0 – 292 โวลต์ ทำการเพิ่มค่าแรงดันไฟฟ้าขึ้นครั้งละประมาณ 20 โวลต์ ทำการเก็บผลการทดลองทุก ๆ 1 นาที ตั้งแต่เริ่มการทดลองจนถึงนาทีที่ 5 จากนั้นนำค่าที่ได้จากการทดลองตั้งแต่นาทีที่ 1 จนถึงนาทีที่ 5 ของแต่ละค่าแรงดันไฟฟ้ามาทำการหาค่าแล้วเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากทฤษฎี ผลที่ได้คือ การเปลี่ยนแปลงความไวทำให้ได้ค่าแอมพลิจูดเท่ากับ 5.65 dB ผลที่ได้จากการทดลองมีแนวโน้มตามผลของทฤษฎีแต่ในช่วงท้ายยังไม่สมบูรณ์นักอาจเป็นเพราะการเพิ่มแรงดันไฟฟ้าที่มีระยะห่างกว้างเกินไปในการเก็บผล

ผลการทดลองที่ได้จากการทดลองครั้งที่ 2 แสดงในตารางที่ 6.2 ใช้แรงดันไฟฟ้าในการทดลองตั้งแต่ 0 – 307 โวลต์ ใช้เวลาในการเก็บผลการทดลองนานขึ้นคือ ตั้งแต่เริ่มการทดลองจนถึงนาทีที่ 10 เก็บผลทุก ๆ 1 นาที แล้วทำการเปรียบเทียบค่าที่เวลาต่าง ๆ กัน ดังรูปที่ 6.7 (ก) ผลที่ได้คือกราฟที่ได้จะมีลักษณะแนวโน้มที่สอดคล้องตามกัน จากนั้นนำค่าที่ได้จากการทดลองตั้งแต่นาทีเริ่มต้นจนถึงนาทีที่ 5 มาทำการเฉลี่ยแล้วเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากทฤษฎี แสดงในรูปที่ 6.7 (ข) ซึ่งเห็นได้ว่ากราฟที่ได้จากการทดลองมีลักษณะที่คล้ายตามผลที่ได้จากทฤษฎี โดยผลที่ได้จากการทดลองพบว่า การเปลี่ยนแปลงความไวทำให้ได้ค่าแอมพลิจูดที่มีค่าต่างกันเท่ากับ 2.1 dB

ผลการทดลองที่ได้จากการทดลองครั้งที่ 3 แสดงในตารางที่ 6.3 จากนั้นป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับโครงสร้างตัวขับเร้าทางไฟฟ้าสถิตแบบซีวีตั้งแต่ 0 – 303 โวลต์ ทำการเก็บค่าผลการทดลองตั้งแต่เริ่มทำการทดลองจนถึงนาทีที่ 10 เก็บผลทุก ๆ 1 นาที นำค่าที่ได้จากการทดลองนาทีที่ 4 – 10 มาทำการเฉลี่ย ซึ่งเห็นได้ว่าค่าที่ได้จากการทดลองนั้นมีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก มีความแตกต่างกันน้อย นอกจากนั้นยังพบว่า การเปลี่ยนแปลงความไวทำให้ได้ค่าแอมพลิจูดที่มีค่าต่างกันเท่ากับ 1.8

ผลการทดลองที่ได้จากการทดลองครั้งที่ 4 แสดงในตารางที่ 6.4 ทำการป้อนค่าแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 0 – 316 โวลต์ และเก็บค่าผลการทดลองตั้งแต่เริ่มการทดลองจนถึงนาทีที่ 10 จากนั้นนำค่าผลการทดลองนาทีที่ 1 ถึงนาทีที่ 5 มาทำการหาค่าเฉลี่ย ค่าที่ได้มีค่าเฉลี่ยที่มีลักษณะที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองครั้งที่ 3 คือมีลักษณะใกล้เคียงกัน มีความแตกต่างกันน้อย ค่าเปลี่ยนแปลงความไวทำให้ได้ค่าแอมพลิจูดที่มีค่าต่างกันเท่ากับ 0.7 dB

การที่มีค่าการเปลี่ยนแปลงความไวที่มีค่าแอมพลิจูดที่มาก จะทำให้เห็นว่าช่วงที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้หาจุดเริ่มต้นนั้นก็จะมีช่วงที่กว้างเช่นกัน ดังนั้นผลการทดลองครั้งที่ 2 มีลักษณะของกราฟที่ได้จากการทดลองที่มีลักษณะที่สอดคล้องกับค่าที่ได้จากทฤษฎีที่สุด และมีค่าการเปลี่ยนแปลงความไวที่มีค่าแอมพลิจูดมากที่สุด คือ 2.1 dB

บทที่ 7

สรุปผลของงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผลของงานวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการสร้างตัวขับเคลื่อนไฟฟ้าสถิตแบบซี่หวี (Comb-Drives actuators) มาทำการขับเคลื่อนให้ตัวสะท้อนแสงสามารถเคลื่อนที่ได้ ส่งผลให้ระยะห่างระหว่างตัวสะท้อนแสงกับสายใยแก้วนำแสงเกิดการเปลี่ยนแปลง จากนั้นจึงทำการหาจุดที่มีความเหมาะสมของการเกิดการแทรกสอดกันของแสง ในงานวิจัยนี้ใช้เทคนิคของฟาบริ-เปโรต์ (Fabry-Perot) มาทำการสร้างโครงสร้างตัวขับเคลื่อนไฟฟ้าสถิตแบบซี่หวี โดยใช้เทคนิคระบบไฟฟ้าเครื่องกลจุลภาค (Micro-Electro-Mechanical System : MEMS) ด้วยกระบวนการลิโธกราฟีด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต (Ultra-violet Lithography) และกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์ (Deep X-ray Lithography) ที่ได้จากเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนผ่านห้องปฏิบัติการสถานีทดลองระบบลำแสง 6a (Beamline 6a : DXL) ณ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) โดยในงานวิจัยนี้ใช้โครงสร้างกานยึดแบบตรงที่มีโครงสร้างมาจากสารไวแสงชนิดลบ (SU-8 photoresist) เคลือบด้วยทองคำผ่านกระบวนการเคลือบโลหะด้วยเทคนิคสปัตเตอร์ริง (Sputtering) เพื่อให้โครงสร้างของชิ้นงานนั้นสามารถนำไฟฟ้าและเกิดการสะท้อนแสง มีตัวขับเคลื่อนไฟฟ้าสถิตแบบซี่หวีซึ่งมีจำนวนซี่ฟันที่สามารถเคลื่อนที่ได้ทั้งหมด 80 ซี่ ทำหน้าที่ในการขับเคลื่อนให้โครงสร้างของชิ้นงานเคลื่อนที่ได้ในระยะทาง 2.2 ไมโครเมตร ด้วยการจ่ายแรงดันไฟฟ้า 250 โวลต์

จากนั้นทำการทดสอบค่าความสูญเสียภายในสายส่งเส้นเดียวโดยมีเครื่องกำเนิดแสง (Light wave multimeter) เป็นแหล่งกำเนิดแสง รับส่งแสงในช่วงความยาวคลื่น 1310 นาโนเมตร ผลที่ได้จากการทดสอบคือ -8.56 dB

ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงความไวเพื่อสังเกตค่าแอมพลิจูดของสัญญาณ จากการทำการทดลองทั้งหมด 4 ครั้ง ผลที่ได้คือ ในการทดลองครั้งที่ 2 โดยการนำผลการทดลองตั้งแต่วันที่เริ่มต้นจนถึงวันที่ 5 มาทำการเฉลี่ยแล้วเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากทฤษฎี ซึ่งลักษณะของกราฟที่ได้มีความสอดคล้องกับค่าที่ได้จากทฤษฎีมากที่สุด และมีค่าการเปลี่ยนแปลงความไวที่มีค่าแอมพลิจูดเท่ากับ 2.1 dB

7.2 ข้อเสนอแนะ

ในการทำงานวิจัยครั้งนี้จะพบปัญหามากมายในขณะที่ทำการวิจัยหลายอย่าง และได้มีการทำการแก้ปัญหาไปแล้วบางส่วน แต่ก็ยังพบปัญหาอื่น ๆ อีก ได้แก่ ปัญหาที่เกิดจากการออกแบบโครงสร้างขนาดที่ทำการจำลองกับขนาดที่ได้ออกมาจริงนั้นไม่เท่ากัน และ โครงสร้างนี้จะใช้ระยะในการเคลื่อนที่ที่มากเกินไป ซึ่งมีระยะที่ใช้ในการเคลื่อนที่เกือบเท่ากับขนาดของความยาวคลื่น ทำให้การอ่านค่านั้นหยابเกินไป ปัญหาที่สองคือปัญหาเกี่ยวกับการควบคุมแรงดันไฟฟ้า ซึ่งแรงดันไฟฟ้าที่นำมาใช้นั้นมีความไม่แน่นอนเนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมแรงดันมีลักษณะเป็นป้อนหมุน ทำให้ความแม่นยำในการเพิ่มค่าแรงดันไฟฟ้าแต่ละช่วงนั้นไม่แน่นอน ส่งผลทำให้การอ่านค่าผลของการแทรกสอดที่ได้นั้นเกิดความผิดพลาดได้ ควรปรับปรุงเครื่องป้อนแรงดันไฟฟ้าให้มีความเสถียรและมีความแม่นยำมากกว่านี้ และในส่วนของการสร้างโครงสร้างนั้น ต้องใช้ความชำนาญในการสร้างอย่างมากเพราะเทคโนโลยีที่ใช้เกี่ยวกับเทคนิคระบบไฟฟ้า เครื่องกลจุลภาคยังเป็นเทคโนโลยีที่ยังใหม่ อาจจะมีการลองผิดลองถูกบ้างในการทดลองเพื่อให้ได้ผลที่มีตรงตามวัตถุประสงค์ในการสร้างของแต่ละขั้นตอน อีกทั้งในการสร้างด้วยกระบวนการนี้เป็นการสร้างชิ้นงานที่มีขนาดเล็กอาจทำให้เกิดการผิดพลาดได้ค่อนข้างง่าย



รายการอ้างอิง

- พิทยา คีเกล้า. 2552. การพัฒนามอเตอร์จุลภาคแบบไฟฟ้าสถิต. วิทยานิพนธ์ มหาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สาขาวิชาไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 169 น.
- รุ่งลดา ฉิมช่าง. 2556. อุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงแบบ 2x2 ด้วยหลักการระบบกลไฟฟ้าจุลภาคสำหรับเส้นใยแก้วนำแสงโหมดเดียว. วิทยานิพนธ์ มหาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สาขาวิชาโทรคมนาคม ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 107 น.
- วินัย วันบุรี. 2550. การพัฒนากระบวนการผลิตโครงสร้างจุลภาคโดยวิธีการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์. วิทยานิพนธ์ มหาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สาขาวิชาไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 96 น.
- David Hays, Anis Zribi, Shankar Chandrasekaran, ShivappaGoravar, SandipMaity, Leonard R. Douglas, Kevin Hsu, and Ayan Banerjee. (2010). **A Hybrid MEMS-Fiber Optic Tunable Fabry-Perot Filter**. Journal of microelectromechanical systems, Vol.19, No.2, April 2010, pp. 419-429.
- Gabriel M. Rebeiz. (2003). **RF MEMS, Theory, design and technology**. Wiley-Interscience, Hoboken, NJ, USA, 2003, pp. 21-57.
- G.C. Hill, R. Melamud, F.E. Declercq, A.A. Davenport, I.H. Chan, P.G. Hartwell, B.L. Pruitt. (2007). **SU-8 MEMS Fabry-Perot pressure sensor**. Elsevier B.V. All rights reserved, 2007, pp. 52-62.
- Ming Li, Ming Wang. (2006). **Optical MEMS pressure sensor based on Fabry-Perot interferometry**. Optical Society of America, Vol.14, No.4, February 2006, pp. 1497-1504
- Ville kaajakari. (2009). **Practical MEMS : Design of microsystems, accelerometers, gyroscopes, RF MEMS, and microfluidic systems**. Ville kaajakari, March 17, 2009, pp. 1-11.
- VitorioArrivabeni Longo de Almeida, Paulo Henrique de godoy, Emilio Carlos Nelli Silva, RicardoCury Ibrahim. (2004). **Microgrippers Driven by Electrostatic Comb Drive Actuators**. ABCM Symposium Series in Mechatronics, Vol.1, 2004, pp. 682-687.
- Yu Fan and Mojtabakahrizi. (2003). **An optical MEMS sensor system**. CCECE 2003 CCGEI 2003, May 2003, pp. 315-318.



ภาคผนวก ก

โปรแกรมแบบจำลองผลทางคณิตศาสตร์

โปรแกรมจำลองผลการเปลี่ยนแปลงทางสัญญาณ

```

close all
clear all
clc

t0 = 3; //ระยะเวลาทั้งหมด 3 วินาที
ts = 0.01; //ความละเอียดในการพลอตกราฟ
t = [0:ts:t0]
f0 = 1; //ความถี่
d = 2*pi/360; //สัญญาณที่เลื่อนไป ต่อ 1 องศา

m = sin(2*pi*f0.*t); //สัญญาณที่หนึ่ง
figure(1)
axis([0 0.2 -2 2])
plot(t,m(1:length(t)), 'LineWidth', 2)
hold on

m_Phase = sin(2*pi*f0.*t - d*90); //สัญญาณที่สอง
plot(t,m_Phase(1:length(t)), '-.', 'Color', 'black')
xlabel('Phase')
ylabel('Amplitude')

```

โปรแกรมจำลองผลทางคณิตศาสตร์ของโครงสร้างคานายึดแบบขด

close all

clear all

clc

$E_0 = 8.85e-12;$ //ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์
 $E_r = 1;$ //ค่าสภาพยอมของอากาศ
 $E = 2e9;$ //ค่าความยืดหยุ่นของวัสดุ
 $v = 0.22;$ //ค่าอัตราส่วนของปัวซอง
 $g = 50e-6;$ //ช่องว่างระหว่างขั้วไฟฟ้าสองขั้ว
 $w = 50e-6;$ //ความกว้างของคานายึด
 $t = 150e-6;$ //ความหนาของคานายึด
 $La = 500e-6;$ //ความกว้างของคานายึด
 $Lb1 = 2500e-6;$ //ความยาวของคานายึด
 $n = 12;$ //จำนวนขดของคานายึด
 $N = 60;$ //จำนวนซี่ฟัน

-----หาค่าคงที่ของการบิด (Torsion constant :J) -----

$i = 1:2:100;$
 $A = ((1./(i.^5)).*\tanh((\pi*t.*i)/(2*w)));$
 $B = \text{sum}(A);$
 $C = (1-((192/\pi^5)*(w/t))*B);$
 $J = (1/3)*(w^3)*t*C$
 $\%figure(1)$
 $\%plot(i,A)$
 $\%xlabel('i'); ylabel('A');$

-----หาค่ามอดูลัสของการบิด (Torsion modulus :G) -----

$I_y = (t*(w^3))/12$
 $G = E/(2*(1+v))$

----- หาค่าคงที่ของสปริงในแนวแกน X (K_x) -----

$$K = (48*G*J)/(La^2*(((G*J*La)/(E*I_y))+Lb1)*n^3)$$

----- ทหาระยะของการเคลื่อนที่ (x) -----

$$V = 0:1:200; \quad // \text{แรงดันไฟฟ้า}$$

$$X = (N*t*Eo*Er.*(V.^2))/(2*K1*g)$$

figure(2)

plot(X,V)

xlabel('Distance (Meter)'); ylabel('Voltage (Volt)');

----- หาจำนวนซี่ฟัน (N) -----

$$V = 200; \quad // \text{แรงดันไฟฟ้า}$$

$$N = (X*2*K1*g)/(t*Eo*Er.*(V.^2))$$

figure(2)

plot(N,V)

xlabel('No. of Comb-Drive (N)'); ylabel('Voltage (Volt)');



โปรแกรมจำลองผลทางคณิตศาสตร์ของโครงสร้างคานายึดแบบตรง

close all

clear all

clc

$E_0 = 8.85e-12;$

//ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์

$E_r = 1;$

//ค่าสภาพยอมของอากาศ

$E = 2e9;$

//ค่าความยืดหยุ่นของวัสดุ

$v = 0.22;$

//ค่าอัตราส่วนของปัวซอง

$g = 50e-6;$

//ช่องว่างระหว่างขั้วไฟฟ้าสองขั้ว

$w = 50e-6;$

//ความกว้างของคานายึด

$t = 150e-6;$

//ความหนาของคานายึด

$L = 3250e-6;$

//ความยาวของคานายึด

$V = 0:20:400;$

//แรงดันไฟฟ้า

----- หาค่าคงที่ของสปริงในแนวแกน X (K_x) -----

$K = 4 * E * w * ((t/L)^3)$

----- หาระยะของการเคลื่อนที่ (x) -----

$N = 74;$

//จำนวนซี่ฟัน

$X = (N * t * E_0 * E_r * (V.^2)) / (2 * K * g)$

figure(1)

plot(V,X*10^6)

xlabel('Voltage (Volt)'); ylabel('Distance (MicroMeter)');

----- หางำนวนซี่ฟัน (N) -----

X = 1e-6;

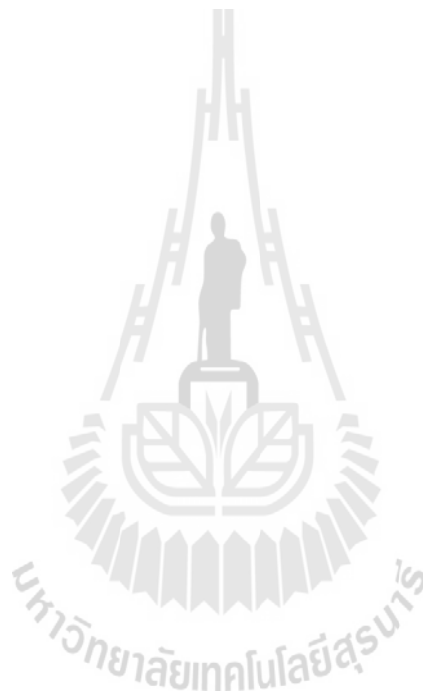
//ระยะของการเคลื่อนที่

$N = (X^2 * K * g) / (t * E_0 * E_r * (V.^2))$

figure(2)

plot(N,V)

xlabel('No. of Comb-Drive (N)'); ylabel('Voltage (Volt)');





ภาคผนวก ข

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

ชฎารัตน์ หาดทวยกาญจน์, รุ่งลดา นิมข้าง, สมปอง สุขประสงค์, รุ่งเรือง พัฒนากุล และ รังสรรค์ ทองทา (2556). การออกแบบและการสร้างระบบไฟฟ้าเครื่องกลจุลภาค (MEMS) อุปกรณ์เซนเซอร์สำหรับฟาบรี-เปโรต์อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ด้วยเทคนิคเอกซ์เรย์ลิโธกราฟี. การประชุมวิชาการ งานวิจัย และพัฒนาเชิงประยุกต์ ครั้งที่ 5 (ECTI – CARD 2013), นครราชสีมา, ไทย, 8-10 พฤษภาคม 2556, หน้า 575–580.

C. Hardtawaikarn, C. Sriphung, R. Phatthanakun, R. Tongta. (2016). **Sensitivity improvement of Fabry-Perot fiber optic sensors using MEMS based techniques.** Thailand synchrotron conference and exhibition 2016, 26-28 February 2016, p. 111



Paper ID: 1234

การออกแบบและการสร้างระบบไฟฟ้าเครื่องกลจุลภาค(MEMS) อุปกรณ์ชุดเซยเฟสสำหรับฟาบรี-เปโรต์อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ด้วย เทคนิคเอกซ์เรย์ลิโธกราฟี

ชฎารัตน์ หาดทวยกาญจน์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
chadarat.aa@gmail.com

รุ่งลดา ฉิมข้าง
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
yui.tce13@gmail.com

สมปอง สุขประสงค์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
sompong.ee@gmail.com

รุ่งเรือง พัฒนากุล

สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน)

rungrueang@slri.or.th

รังสรรค์ ทองทา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

tongta@sut.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้งานเทคนิคกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์ โดยกล่าวถึงการออกแบบและขั้นตอนสร้างโครงสร้างชิ้นงานที่มีตัวขับเคลื่อนไฟฟ้าสถิตแบบซีวี คานยึดแบบขด และตัวสะท้อนแสง ตัวขับเคลื่อนไฟฟ้าสถิตแบบซีวีสามารถเคลื่อนที่ได้ คานยึดแบบขดทำหน้าที่เป็นสปริงดึงโครงสร้างชิ้นงานให้กลับมามีตำแหน่งเดิม และตัวสะท้อนแสงทำหน้าที่สะท้อนแสงที่ถูกส่งออกมาให้เกิดการสะท้อนกลับเข้ามาในสายใยแก้วนำแสง นอกจากนี้แล้วยังมีการนำเทคนิคการเคลือบฟิล์มบางโลหะมาเคลือบชิ้นงาน เพื่อให้ชิ้นงานสามารถนำไฟฟ้าและเกิดการสะท้อนแสงได้ สารไวแสงที่นำมาใช้ในการสร้าง คือสารไวแสงชนิดลบ (SU-8 photoresist) ซึ่งจะกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คือคานยึดแบบขด มีความกว้างของตัวคานยึด 500 ไมโครเมตร และความยาว 2500 ไมโครเมตร และตัวขับเคลื่อนไฟฟ้าสถิตแบบซีวีจะมีซี่แต่ละซี่ที่มีความกว้าง 50 ไมโครเมตร และความยาว 250 ไมโครเมตร จากนั้นป้อนแรงดัน 200 โวลต์เพื่อให้ได้ระยะการเคลื่อนที่ 10 นาโนเมตร

Abstract

This article present the technical process of deep X-ray lithography process that discusses about design and fabrication of comb-drive. The comb-drive is composed of comb teeth, suspension spring and reflecting mirror. The comb teeth comprise fixed part and movable part. The suspension springs function to force movable parts moving back and forward. The reflecting mirror acts a mirror to reflect light from source back into fiber optic. In

addition, sputtering technique is used for coating conductive thin films to conduct the electricity on the structure. Photoresist used for constructing the comb-drive is negative photoresist which is specific the size of parameters as follow Serpentine spring. The width of spring is 500 micrometers and the length is 2500 micrometers. Each tooth of the comb-drive actuators is 50 micrometers in width and 250 micrometers in length which can make the moving distance of 10 nanometers.

คำสำคัญ

เทคนิคฟาบรี-เปโรต์, ลิโธกราฟี, ตัวขับเคลื่อนไฟฟ้าสถิตแบบซีวี, สารไวแสงชนิดลบ, แสงซินโครตรอน

1. บทนำ

สายใยแก้วนำแสงชนิด ฟาบรี-เปโรต์ (Fabry-Perot) หรืออินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ (Interferometer) เป็นชื่อเรียกของหลักการที่มีต้นกำเนิดแสงทำการปล่อยคลื่นแสงผ่านทางสายใยแก้วนำแสง แล้วคลื่นแสงนั้นเกิดการชนกับตัวสะท้อนแสงที่ด้านปลายสายใยแก้วนำแสง เกิดการสะท้อนกลับของแสงเข้ามายังสายใยแก้วนำแสงเช่นเดิม ภายในสายใยแก้วนำแสงยังมีการสะท้อนกลับที่ปลายสายของตัวมันเองอีกด้วย ทำให้คลื่นแสงทั้งสองส่วนเกิดการแทรกสอดกันของแสงภายในสายใยแก้วนำแสง ดังนั้นจึง

นำหลักการดังกล่าวนี้มาปรับใช้เพื่อคุณรวมเฟสของคลื่นแสงทั้งสองส่วน ถ้าระยะระหว่างปลายสายใยแก้วนำแสงกับตัวสะท้อนแสงมีการเปลี่ยนแปลงก็จะส่งผลทำให้ผลรวมของเฟสที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงด้วยเช่นกัน หลักการของสายใยแก้วนำแสงชนิดพาราเร-ไบริดจ์นั้นส่วนใหญ่จะนำมาประยุกต์ใช้งานทางด้านเซ็นเซอร์เพื่อวัดค่าเช่น อุณหภูมิ ความดัน ความเครียด เป็นต้น [1-2] ปัญหาที่มักพบคือ ตัวสะท้อนแสงจะถูกวางตัวให้อยู่กับที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ [3] ค่าผลรวมของเฟสจึงมีค่าคงที่ไม่สามารถวิเคราะห์ได้ว่าผลรวมของเฟสที่ได้นั้นอยู่ตำแหน่งใดของเฟสต้นกำเนิด บทความนี้จึงได้ปรับปรุงแก้ไขปัญหาการขยับตัวสะท้อนแสงโดยเพิ่มตัวขยับเข้ามาในโครงสร้างของชิ้นงาน

ในส่วนขอเทคนิคกระบวนการลิโธกราฟี [4]

(Lithography process) หมายถึงกระบวนการถ่ายทอดลวดลายจากลวดลายต้นแบบด้วยการฉายแสงผ่านหน้ากากดูซ์แสง (Mask) ถ่ายทอดลงบนฐานรองที่เคลือบด้วยสารเคมีที่มีคุณสมบัติทางกายภาพจะเปลี่ยนแปลงสภาพไปจากเดิมเมื่อมีแสงมาตกกระทบ เทคนิคกระบวนการลิโธกราฟีมี 2 ขั้นตอนคือ กระบวนการลิโธกราฟีด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต และกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์ กระบวนการลิโธกราฟีเป็นกระบวนการที่ใช้ในการสร้างชิ้นงานที่มีขนาดเล็กๆ สามารถถ่ายทอดลวดลายชิ้นงานที่มีขนาดในระดับไมโครเมตรได้ โดยเฉพาะรังสีเอกซ์ที่ได้มาจากเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนที่มีความเข้มสูงและมีค่าพลังงานที่ต่อเนื่อง ครอบคลุมช่วงพลังงานกว้างตั้งแต่ช่วงพลังงานอินฟราเรดจนถึงรังสีเอกซ์ ซึ่งเหมาะกับระบบไฟฟ้าเครื่องกลจุลภาค (Micro-electro-mechanical system : MEMS) ที่เป็นระบบหรืออุปกรณ์ที่มีขนาดเล็กในระดับไมโครเมตรและมีสัดส่วนความสูงต่อความกว้างมาก

ตัวขยับเร้าทางไฟฟ้าสถิตแบบซีวีเป็นส่วนหนึ่งของระบบไฟฟ้าเครื่องกลจุลภาค ทำหน้าที่ในการขยับตัวสะท้อนแสงให้เกิดการเคลื่อนที่ด้วยการควบคุมค่าแรงดันในวงจร ทำให้ระยะห่างระหว่างตัวสะท้อนแสงกับปลายสายใยแก้วนำแสงเกิดการเปลี่ยนแปลงเพื่อหาสถานะของจุดกำเนิดแสงได้ ข้อดีของการสร้างด้วยกระบวนการลิโธกราฟีคือ สามารถสร้างชิ้นงานที่มี

ขนาดเล็กและมีความละเอียดในการสร้างชิ้นงาน เพราะการขยับตัวสะท้อนแสงนั้นต้องการความละเอียด หากเพียงแคขยับตัวสะท้อนแสงเล็กน้อย ค่าของผลรวมเฟสก็จะเกิดการเปลี่ยนแปลง

2. ขั้นตอนการออกแบบ

การออกแบบแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักๆคือ การออกแบบคานยึดและการออกแบบตัวขยับเร้าทางไฟฟ้าสถิตแบบซีวี จากนั้นนำทั้งสองส่วนนี้รวมกัน โปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบ คือโปรแกรมเอ็เอทอิติเตอร์เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบลายชิ้นงานในลักษณะ 2 มิติ สามารถออกแบบลวดลายในระดับไมโครเมตรได้ และเป็นโปรแกรมที่ใช้งานง่าย ไม่ยุ่งยากซับซ้อน

2.1 การออกแบบคานยึด

โดยทั่วไปคานยึดทำหน้าที่เป็นตัวค้ำยันให้โครงสร้างสามารถลอยตัวในอากาศได้และทำหน้าที่เปรียบเหมือนสปริงที่คอยดึงส่วนที่เคลื่อนที่ให้กลับมายังตำแหน่งเดิมได้เมื่อถูกกระตุ้นจากตัวขยับเร้า คานยึดมีทั้งหมด 4 ประเภท ได้แก่คานยึดแบบตรง คานยึดแบบก้ามปู คานยึดแบบพับ และคานยึดแบบซด [5-6] คานยึดแต่ละประเภทจะมีการออกแบบและคุณสมบัติที่แตกต่างกัน ในบทความเลือกใช้คานยึดแบบซด เนื่องจากว่าคานยึดแบบซดมีลักษณะที่มีความยืดหยุ่นมากมีขนาดที่เล็กและยังลดการเกิดปัญหาหักและบิดตัวของคานยึด โดยมีสมการที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้างชิ้นงานคือ

$$F_s = k_x x \quad 1$$

กรณี n เป็นจำนวนคู่

$$k_x = \frac{48EI_{z,b}\{(3\bar{a} + b)n - b\}}{a^2n\{(3\bar{a}^2 + 4\bar{a}b + b^2)n^3 - 2b(5\bar{a} + 2b)n^2 + (5b^2 + 6\bar{a}b - 9\bar{a}^2)n - 2b^2\}} \quad 2$$

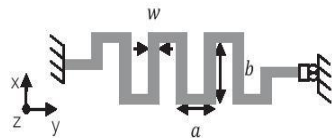
กรณี n เป็นจำนวนคี่

$$k_x = \frac{48EI_{z,b}}{a^2n\{(\bar{a} + b)n^2 - 3bn + 2b\}} \quad 3$$

$$\tilde{a} = \frac{I_z b a}{I_z a} \quad 4$$

$$I_z = \frac{t w^3}{12} \quad 5$$

โดยค่า F_s คือแรงปฏิกิริยาหรือแรงดึงกลับของสปริง ค่า k_x คือค่าคงที่สปริงในแนวแกน X ส่วนค่า x คือระยะของการเคลื่อนที่ ค่า n คือจำนวนขดของคานยึด ค่า E คือค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) ส่วนค่า I_z , $I_z a$, $I_z b$ คือโมเมนต์คดของความเฉื่อย ของคานช่วง a และคานช่วง b ตามลำดับ ค่า t คือความหนาของชิ้นงาน ค่า w คือความกว้างของคานยึด ค่า a คือความยาวของคานยึดช่วง a และค่า b คือความยาวของคานยึดช่วง b



รูปที่ 1 พารามิเตอร์ต่างๆของคานยึดแบบขด

2.2 การออกแบบตัวขับเคลื่อนทางไฟฟ้าสถิตแบบซีวี

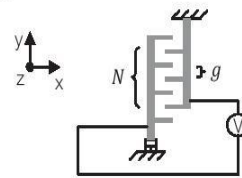
ตัวขับเคลื่อนทางไฟฟ้าสถิตแบบซีวี หรือ Comb-drive actuator ทำหน้าที่เป็นตัวขับเคลื่อนให้ชิ้นงานสามารถเคลื่อนที่ไปมาได้ ซึ่งประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือส่วนที่สามารถเคลื่อนที่ได้และส่วนที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ โดยส่วนที่เคลื่อนที่ได้นั้นจะมีโครงสร้างที่ลอยอยู่ในอากาศมีคานยึดทำหน้าที่ค้ำยันให้โครงสร้างลอยตัว การทำงานของตัวขับเคลื่อนทางไฟฟ้าสถิตแบบซีวีจะทำการโดยการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับโครงสร้าง เมื่อทำการต่อวงจรจะเกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้นระหว่างทั้งสองขั้ว เกิดเป็นแรงไฟฟ้าสถิตส่งผลให้ชิ้นงานสามารถเคลื่อนที่ได้ สมการที่ใช้ในการออกแบบชิ้นงานเพื่อหาระยะการเคลื่อนที่คือ

$$F = \frac{\partial U}{\partial g} = \frac{N t \epsilon_0 \epsilon_r V^2}{2g} \quad 6$$

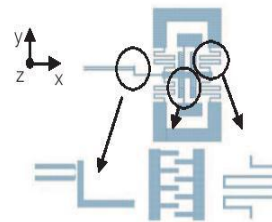
นำสมการที่ 1 มาเทียบกับสมการที่ 6 จะได้ว่า

$$x = \frac{N t \epsilon_0 \epsilon_r V^2}{2g k_x} \quad 7$$

โดยที่ค่า U คือค่าพลังงานที่สัมพันธ์กับแรงดัน (V) ที่ป้อนเข้าไป ค่า g คือช่องว่างระหว่างขั้วไฟฟ้าสองขั้ว ค่า N คือจำนวนซี่ของตัวขับเคลื่อน ค่า ϵ_0 คือค่าสภาพยอม (permittivity) ของอากาศว่างมีค่าเท่ากับ 8.854×10^{-12} F/m ส่วนค่า ϵ_r คือค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ ซึ่งในที่นี้คืออากาศมีค่าเท่ากับ 1 และ V คือแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 2 พารามิเตอร์ต่างๆของตัวขับเคลื่อนทางไฟฟ้า



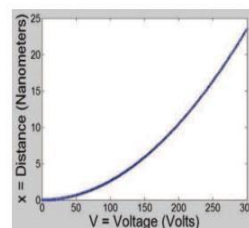
(ก) (ข) (ค)

(ก) ภาพขยายสายใยแก้วนำแสงและตัวสะท้อนแสง

(ข) ภาพขยายตัวขับเคลื่อนทางไฟฟ้าสถิตแบบซีวี

(ค) ภาพขยายคานยึดแบบขด

รูปที่ 3 ไลยหน้าภาคดูดซับแสงที่ออกแบบด้วยโปรแกรมเลย์เอาต์อิติเตอร์



รูปที่ 4 ผลการคำนวณระยะการเคลื่อนที่จากสมการที่ 7

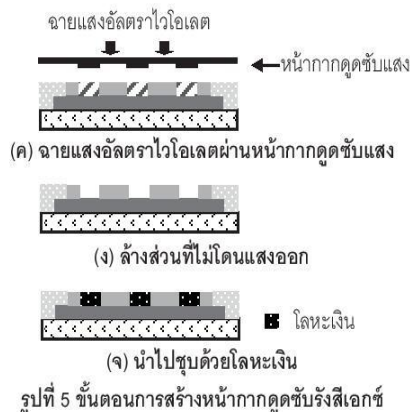
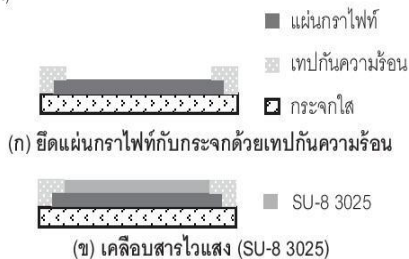
3. ขั้นตอนการสร้าง

ขั้นตอนจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่หนึ่งการสร้างหน้าภาคดูดซับรังสีเอกซ์โดยใช้กระบวนการลิโธกราฟีด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต

และส่วนที่สองการสร้างชิ้นงานโดยใช้กระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์

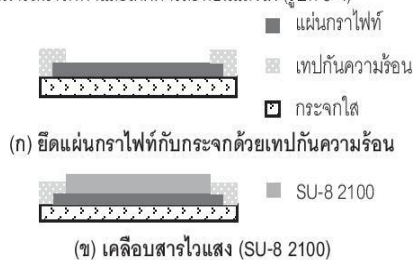
3.1 ขั้นตอนการสร้างหน้ากากดูดซับรังสีเอกซ์ด้วยกระบวนการลิโธกราฟีด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต

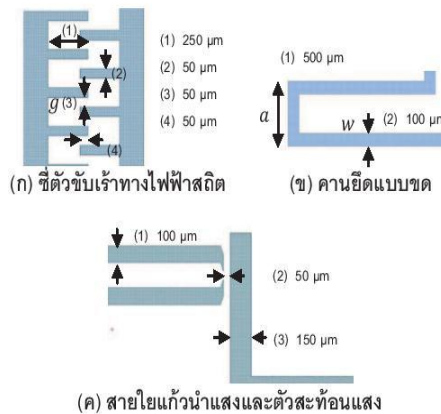
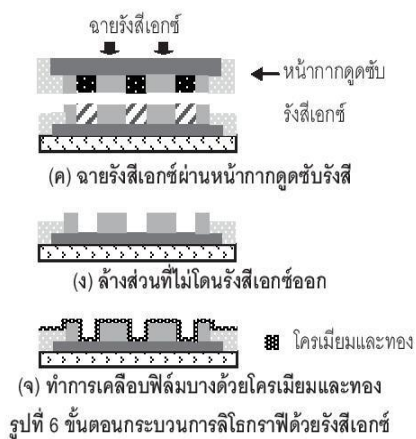
ในบทความนี้ใช้แผ่นกราฟไฟเป็นฐานรองชิ้นงานเพราะมีคุณสมบัติที่รังสีเอกซ์สามารถทะลุผ่านได้ ง่ายต่อการใช้งาน ทำการตัดแผ่นกราฟไฟให้ได้ขนาด 1x1 นิ้ว แล้วยึดติดกับกระจกใสด้วยเทปกั้นความร้อน (Polyimide tape : PI tape) (รูปที่ 5 ก) ทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นกราฟไฟด้วยลำสีสะอาด ชุบไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (IPA) เป่าชิ้นงานให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน (N₂) อบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที เพื่อไล่ความชื้นออกจากแผ่นกราฟไฟ หน้ากากดูดซับรังสีเอกซ์จะใช้สารไวแสงที่มีความหนา 30 ไมโครเมตร จึงใช้การเคลือบสารไวแสงชนิดลบ (Negative photoresist : SU-8 3025) ด้วยเครื่องหมุนเคลือบ (Spinner) (รูปที่ 5 ข) ตั้งค่าความเร็วรอบ 500 rpm เป็นเวลา 5 วินาที และ 3000 rpm เป็นเวลา 30 วินาที อบที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 90 นาที เพื่อให้สารไวแสงเกิดการแข็งตัว แล้วฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตผ่านหน้ากากดูดซับ นำชิ้นงานมาอบอีกครั้งเพื่อให้เกิดลวดลายบนสารไวแสง โดยอบที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที (รูปที่ 5 ค) ต่อจากนั้นทำการล้างสารไวแสงในส่วนที่ไม่โดนแสงออกด้วยน้ำยาล้างสารไวแสง (SU-8 developer) เป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน (รูปที่ 5 ง) ในส่วนที่ถูกล้างออกไปนั้นเติมให้เต็มด้วยการนำไปชุบโลหะเงินด้วยไฟฟ้า (Electroplating) (รูปที่ 5 จ)



3.2 ขั้นตอนการสร้างชิ้นงานด้วยกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์

เตรียมแผ่นกราฟไฟเช่นเดียวกับขั้นตอนแรก (รูปที่ 6 ก) แต่ใช้สารไวแสงที่มีความหนาเกิน 300 ไมโครเมตร จึงต้องทำการหยอดสารไวแสงแทนการใช้เครื่องหมุนเคลือบและใช้สารไวแสงชนิดลบ (SU-8 2100) (รูปที่ 6 ข) เมื่อหยอดสารไวแสงเรียบร้อยแล้วให้อบที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 15 ชั่วโมง จากนั้นนำไปฉายรังสีเอกซ์โดยใช้หน้ากากดูดซับรังสีเอกซ์ที่ได้จากขั้นตอนที่แล้วมาเป็นต้นแบบในการถ่ายทอดลวดลาย (รูปที่ 6 ค) อบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที ปลดยंत्रังไว้ให้เย็นแล้วล้างสารไวแสงในส่วนที่ไม่โดนแสงออกเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน (รูปที่ 6 ง) ทำความสะอาดผิวหน้าของชิ้นงานอีกครั้งด้วยเครื่องพลาสมา แล้วทำการเคลือบฟิล์มบางโลหะด้วยเทคนิคสปัตเตอร์ริง (Sputtering technique) โลหะที่ใช้เคลือบคือโครเมียม (Cr) และทอง (Au) เพื่อให้ชิ้นงานนั้นสามารถนำไฟฟ้าและเกิดการสะท้อนแสงได้ (รูปที่ 6 จ)

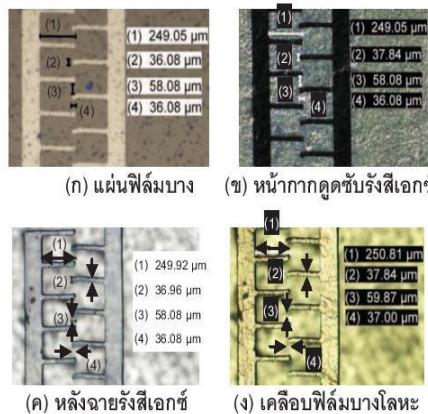




รูปที่ 7 ลวดลายที่ออกแบบด้วยโปรแกรมเลย์เอาต์อิติเตอร์

4. ผลการทดสอบ

การทดสอบได้ทำการเปรียบเทียบขนาดลายชิ้นงานใน 5 ลักษณะ คือลายชิ้นงานที่ออกแบบด้วยโปรแกรมเลย์เอาต์อิติเตอร์ ลายชิ้นงานบนแผ่นฟิล์มบาง ลายชิ้นงานบนหน้ากากดูดซับรังสีเอ็กซ์ ลายชิ้นงานหลังจากฉายรังสีเอ็กซ์ และลายชิ้นงานที่เคลือบฟิล์มบางโลหะด้วยเทคนิคสปีดเตอริง โดยเปรียบเทียบตำแหน่งที่ทำการวัดลายชิ้นงานทั้งหมด 3 ส่วน คือซีดีตัวขับเจ้าทางไฟฟ้าสถิต คานยึดแบบขด และสายใยแก้วนำแสงกับตัวสะท้อนแสง ค่าที่ได้จะทำการบันทึกลงในตารางที่ 1 ส่วนตารางที่ 2 จะเป็นค่าความคลาดเคลื่อนในแต่ละตำแหน่งเมื่อทำการถ่ายทอดลวดลายออกไป มีทั้งหมด 4 แบบ โดยยึดลายชิ้นงานที่ออกแบบจากโปรแกรมเลย์เอาต์อิติเตอร์เป็นหลักเปรียบเทียบกับลายชิ้นงานที่ได้สร้างขึ้นมาจริง



รูปที่ 8 ซีดีตัวขับเจ้าทางไฟฟ้าสถิต

ตำแหน่งที่ทำการวัดค่า	ซีดีตัวขับเจ้าทางไฟฟ้าสถิต (ไมโครเมตร)				คานยึด (ไมโครเมตร)		สายใยแก้วนำแสงกับตัวสะท้อนแสง (ไมโครเมตร)		
	ความยาว	ความกว้าง	ระยะห่างซี่	ระยะเหลี่ยมซ้อน	ความยาว	ความกว้าง	สายใยแก้วนำแสง	ระยะห่างทั้งสอง	ตัวสะท้อนแสง
โปรแกรมเลย์เอาต์อิติเตอร์	250	50	50	50	500	100	100	50	150
แผ่นฟิล์มบาง	249.05	36.08	58.08	36.08	494.56	93.28	97.68	72.16	126.72
หน้ากากดูดซับรังสีเอ็กซ์	249.05	37.84	58.08	36.08	494.56	93.28	97.68	72.16	126.72
หลังจากฉายรังสีเอ็กซ์	249.92	36.96	58.96	36.08	495.56	95.04	99.46	73.04	127.63
เคลือบฟิล์มบางโลหะ	250.81	37.84	59.87	37.00	496.32	96.80	100.32	71.28	129.36

ตารางที่ 1 ขนาดของพารามิเตอร์ในแต่ละตำแหน่งของลวดลายชิ้นงาน

ตำแหน่งที่ทำการวัดค่า	ซีตัวชี้เร้าทางไฟฟ้าสถิต (%)				คานยัด (%)		สายใยแก้วนำแสงกับตัวสะท้อนแสง (%)		
	ความยาว	ความกว้าง	ระยะห่างซี่	ระยะเหลื่อมซี่	ความยาว	ความกว้าง	สายใยแก้วนำแสง	ระยะห่างระหว่างซี่สอง	ตัวสะท้อนแสง
แผ่นฟิล์มบาง	-0.38	-27.84	16.16	-27.84	-1.08	-6.72	-2.32	44.32	-15.52
หน้ากากดูดซับรังสีเอกซ์	-0.38	-24.32	16.16	-27.84	-1.08	-4.08	0.32	44.36	-15.52
หลังจากฉายรังสีเอกซ์	-0.03	-26.08	17.92	-27.84	-1.08	-4.96	-0.54	46.08	-14.92
เคลือบฟิล์มบางโลหะ	0.32	-24.32	19.74	-26	-0.73	-3.2	0.32	42.56	-13.76

*หมายเหตุ ผลในตารางคือค่าผิดพลาดที่ได้มาจากการเปรียบเทียบกับการออกแบบด้วยโปรแกรมเลย์เอาต์อิตติเตอร์

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนในแต่ละตำแหน่ง

5. สรุป

ในบทความนี้จะกล่าวถึงการออกแบบโครงสร้างและขั้นตอนการสร้างระบบไฟฟ้าเครื่องกลจุลภาค (MEMS) อุปกรณ์ชุดเซนเซอร์สำหรับฟารี-เปโรต์อิตติเตอร์เฟอโรอิเล็กทริกด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ลิโธกราฟี โครงสร้างจะประกอบด้วยตัวชี้เร้าทางไฟฟ้าสถิตแบบซีวี คานยัดแบบชด และตัวสะท้อนแสง ใช้โปรแกรมเลย์เอาต์อิตติเตอร์เป็นโปรแกรมออกแบบลวดลายและทำการสร้างด้วยกระบวนการลิโธกราฟี จากตารางที่ 1 และ 2 การเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนจะเห็นได้ว่าชิ้นงานที่ออกแบบด้วยโปรแกรมเลย์เอาต์อิตติเตอร์กับแผ่นฟิล์มบาง ได้ค่าความคลาดเคลื่อนที่มีเปอร์เซ็นต์มาก เป็นเพราะการพิมพ์ลายลงบนแผ่นฟิล์มยังขาดประสิทธิภาพและความละเอียดในการพิมพ์ ส่งผลให้ลายชิ้นงานมีขนาดคลาดเคลื่อนตามไปด้วย แต่เมื่อนำแผ่นฟิล์มบางมาทำการถ่ายทอดลวดลายผ่านกระบวนการลิโธกราฟีด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตเพื่อให้ได้หน้ากากดูดซับรังสีเอกซ์ จะมีค่าความคลาดเคลื่อนที่น้อยลง แต่ค่าความคลาดเคลื่อนจะเพิ่มมากขึ้นในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางโลหะ เพราะชิ้นงานได้ถูกทำการเคลือบโครเมียมและทองทำให้ชิ้นงานมีความหนาเพิ่มขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) ที่ช่วยเหลือสนับสนุนทางด้านเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย คุณชานวูฒิศรีผิง ตำแหน่งวิศวกรอิเล็กทรอนิกส์ที่คอยช่วยเหลือให้คำปรึกษาและมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่สนับสนุนในการทำวิจัยให้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Yu Fan and Mojtabakahrizi, "An optical MEMS sensor system," CCECE 2003 CCGEI 2003, May 2003, pp.315-318.
- [2] Ming Li, Ming Wang, "Optical MEMS pressure sensor based on Fabry-Perot interferometry," Optical Society of America, Vol.14, No.4, February 2006, pp.1497-1504.
- [3] G.C. Hill, R. Melamud, F.E. Declercq, A.A. Davenport, I.H. Chan, P.G. Hartwell, B.L. Pruitt, "SU-8 MEMS Fabry-Perot pressure sensor," Elsevier B.V. All rights reserved, 2007, pp.52-62.
- [4] Ville kaajakari, "Practical MEMS : Design of microsystems, accelerometers, gyroscopes, RF MEMS, and microfluidic systems," March 17, 2009, pp.1-11.
- [5] Gabriel M. Rebeiz, "RF MEMS, Theory, design and technology," Wiley-Interscience, Hoboken, NJ, USA, 2003, pp.21-57.
- [6] Gary Keith Fedder, "Simulation of Microelectromechanical Systems," University of California at Berkeley, pp.104-109.

Sensitivity improvement of Fabry-Perot fiber optic sensors using MEMS based Techniques

88TH SUT ANNIVERSARY
UNIVERSITY OF INNOVATION

C. Hardtawakarn¹, C. Sripung², R. Phatthanakun² and R.Tongta¹

¹School of Telecommunication Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, University Avenue, Muang District, Nakhon Ratchasima, 30000 Thailand

²Synchrotron Light Research Institute III University Avenue Muang District Nakhon Ratchasima, 30000 Thailand

Email: chardtaw@gmail.com

I. Abstract

This article presents the technique of deep X-ray lithography process discussing about design and fabrication of comb-drive. The comb-drive is composed of comb teeth, suspension spring and reflecting mirror. The comb teeth comprise fixed part and movable part. The suspension springs function to force movable parts moving back and forward. The reflecting mirror acts as a mirror to reflect light from source back into fiber optic. In addition, sputtering technique is used for coating conductive thin films to conduct the electricity on the structure of comb drive. Photoresist used for constructing the comb-drive is negative photoresist which is specific the size of parameters as follow Fixed-fixed spring. The width of spring is 50 micrometers and the length is 3250 micrometers. Each tooth of the comb-drive actuators is 50 micrometers in width and 150 micrometers in length which can make the moving distance of 10 nanometers.

Keywords : *Fabry-Perot, Interferometer, fiber optic sensor, X-ray lithography*



II. Introduction

Optical fiber Fabry-Perot type or Interferometer is to source emitting light through fiber optic and then the light collides with a reflector at the end of the fiber optic. The reflection of the light is reflected back to the end of its own. Both the light from source and reflector, are combined with each other occurring the waves in phase and out of phase. Therefore, this principle applies to use the wave that is in phase. If the distance between the tip of the fiber optic and reflector is changed, it will result in different phase as well.

Lithography process is a process transmitting patterns on a mask to the base coated with the photoresist by projecting light through it. The chemical property of photoresist will change when the light is exposed on. Photoresist can be divided into two types. The positive photoresist will be reacted when the light hits in some areas where we can wash it by using developer solution and there will be left only area where is not exposed. Another type is the negative photoresist. Its properties are in contrast to the positive one. Unexposed areas can be washed by developer solution and then it will be left only the exposed areas. There are two different techniques of lithography process used, the Ultra-violet (UV) Lithography and X-ray Lithography process. X-ray light obtained from synchrotron source is in high energy. Thus, photoresist structures can be created in high aspect ratio.

Micro-Electro Mechanical system (MEMS) is a very small device in micrometer or one of a million of meter. It is composed of electric part to move another part which use some mechanical system to move. This system can be fabricated by integrated circuit technology. Micro-Electro-Mechanical system is the modern technology and has been continuously popular. It is interested and widespread all around the world due to the demand of small, inexpensive and high-performance devices.



III. Design process

A. Flexure spring constants

In general, the lever acts as a prop to be floating in the air and act like a spring that pulls forward the motion to return to the original position. In the article selection Fixed-fixed flexure. The equation used to design is

$$F = k_x \cdot x \tag{1}$$

$$k = 4Ew \left(\frac{t}{l} \right)^3 \tag{2}$$

where F is reaction force or the restoring force of the spring, k_x is spring constant in the x-direction, x is the displacement of the movable comb, E is the Young modulus of the beam material, w is the width of the beam, t is the thickness of the beam and l is the length of the beam.

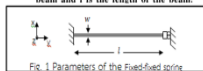


Fig. 1 Parameters of the Fixed-fixed spring

B. Comb-drive actuator

Comb-drive actuator serving to drive the workpiece can move around. The comb-drive actuator consists of two parts that are fixed and movable parts. The equation used to design components for a range of motion is

$$F = \frac{\partial U}{\partial g} = \frac{N \epsilon_0 \epsilon_r V^2}{2g} \tag{3}$$

By replacing Eq. 1 in Eq.3.

$$x = \frac{N \epsilon_0 \epsilon_r V^2}{2g k_x} \tag{4}$$

where U is the energy associated with voltage (V) input, g is the gap between the fingers, N is the number of fingers, ϵ_0 is the permittivity of free space value is 8.854×10^{-12} F/m, ϵ_r is the permittivity of air value is 1 and V is voltage

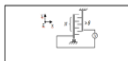


Fig. 2 Parameters of the comb-drive actuator

IV. Fabrication process

A. Fabrication of X-ray mask with Ultra-violet (UV) Lithography process

Prepare a 1"x1" graphite substrate. First, clean graphite substrate by cotton ball moistened with isopropyl alcohol (IPA). After that, drying it by nitrogen gas (N₂). Baked it in oven at 90 °C for 30 minutes. Spin coat with negative photoresist (SU-8 3028) by spinner machine at 500 rpm for 5 seconds and at 3000 rpm for 30 seconds respectively. Then bake it in oven at 95 °C for 90 minutes and let it cool down in the oven. Project UV through photo mask, develop by using photoresist solution SU-8 developer. The piece is passed absorber material electroplating.

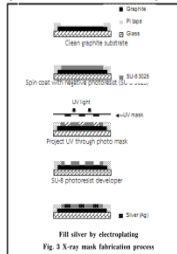


Fig. 3 X-ray mask fabrication process

B. Fabrication of X-ray Lithography process

Prepare a sheet of graphite, as well as the first step. But the photoresist with a thickness less than 300 micrometers must be drops of photoresist using spin coating with negative photoresist (SU-8 2100). Project X-ray to the piece through X-ray mask and bake again at 95 °C for 30 minutes and let it cool down in the oven. Develop the piece by SU-8 developer solution. The piece is coated thin gold film by sputtering machine.

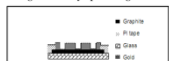


Fig. 4 Finally fabrication of X-ray lithography process and coated thin film

V. Conclusion

This article discusses the design and fabrication of Micro-electro-mechanical systems (MEMS). The MEMS structure is composed of the comb-drive actuator, fixed-fixed flexures and reflector fabricated by X-ray lithography process. The design parameters are the width of the beam 50 micrometers, length of the beam 3250 micrometers, and comb-drive actuator the comb with a width of 50 micrometers and length is 150 micrometers applying the input voltage 200 volt to get the range of motion of 10 nanometers.

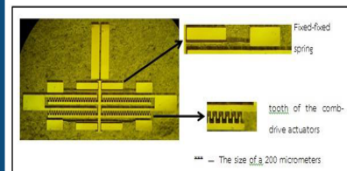


Fig. 5 The images of real workpiece

VI. REFERENCES

- Gabriel M. Rebeiz, "RF MEMS. Theory, design and technology," Wiley-Interscience, Hoboken, NJ, USA, 2003, pp.21-57.
- G.C. Hill, R. Melamad, F.E. Declercq, A.A. Davenport, I.H. Chan, P.G. Hartwell, B.L. Pruitt, "SU-8 MEMS Fabry-Perot pressure sensor," Elsevier B.V. All rights reserved, 2007, pp.82-82.
- Ming Li, Ming Wang, "Optical MEMS pressure sensor based on Fabry-Perot interferometry," Optical Society of America, Vol.14, No.4, February 2006, pp.1497-1504.
- Ville kaajakari, "Practical MEMS : Design of microsystems, accelerometers, gyroscopes, RF MEMS, and microfluidic systems," March 17, 2009, pp.1-11



ประวัติผู้เขียน

นางสาวชฎารัตน์ หาดทวยกาญจน์ เกิดเมื่อวันที่ 18 กันยายน พ.ศ. 2531 ที่อำเภอเมือง จังหวัดสกลนคร ปีพ.ศ. 2538 เริ่มการศึกษาระดับประถมศึกษาที่โรงเรียนอนุบาลสกลนคร พ.ศ. 2544 ได้เข้าศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลายจากโรงเรียนสกลราชวิทยานุกูล ตำบลธาตุเชิงชุม อำเภอเมือง จังหวัดสกลนคร และปีพ.ศ. 2553 ได้สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโทรคมนาคม) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา จากนั้นปีพ.ศ. 2554 เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต วิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ขณะศึกษาได้ทำงานวิจัยทางด้านระบบไฟฟ้าเครื่องกลจุลภาค (MEMS) โดยทำการออกแบบและสร้างโครงสร้างตัวขั้วรีทางไฟฟ้าสถิตแบบชี้หัว โดยการใช้กระบวนการลิโธกราฟี ณ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งมีผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะที่ทำการศึกษาดังที่แสดงไว้ในภาคผนวก ข