

อุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงแบบ 2x2 ด้วยหลักการระบบกลไฟฟ้าจุลภาคสำหรับ
เส้นใยนำแสงโหมดเดียว



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2556

**A MEMS BASE 2x2 OPTICAL SWITCH FOR SINGLE
MODE OPTICAL FIBERS**



Runglada Chimchang

**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 2013

อุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงแบบ 2x2 ด้วยหลักการระบบกลไฟฟ้าอุณหภูมิต่ำสำหรับ
เส้นใยนำแสงโหมดเดียว

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รศ. ดร.พีระพงษ์ อุฑารสกุล)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.รังสรรค์ ทองทา)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(อ. ดร.นิมิต ชมนาวัง)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

รุ่งลดา นิมซ้าง : อุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงแบบ 2x2 ด้วยหลักการระบบกลไฟฟ้าจุลภาคสำหรับ
เส้นใยนำแสงโหมดเดียว (A MEMS BASE 2x2 OPTICAL SWITCH FOR SINGLE
MODE OPTICAL FIBERS) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์. ดร.รังสรรค์ ทองทา,
107 หน้า.

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการออกแบบ การสร้าง และการทดสอบอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงสำหรับ
ประยุกต์ใช้งานกับสายใยแก้วนำแสงแบบโหมดเดียว โครงสร้างของอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงสร้างจาก
วัสดุพอลิเมอร์ที่เป็นสารไวแสงชนิดลบ SU-8 ด้วยเทคนิคเอกซ์เรย์ลิโธกราฟีจากระบบลำเลียงแสง
6a : DXL ของสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) จากนั้นทำการเคลือบโลหะโครเมียม
และทองคำลงบนโครงสร้างเพื่อให้เกิดการนำไฟฟ้าและสามารถสะท้อนแสงได้ อุปกรณ์สวิตช์เชิง
แสงของงานวิจัยนี้มีกระจกจุลภาคและตัวขับเคลื่อนไฟฟ้าสถิตแบบซีวีเป็นส่วนใหญ่ประกอบหลัก ตัว
ขับเคลื่อนไฟฟ้าสถิตแบบซีวีประกอบด้วยซีวีที่ถูกยึดติดให้อยู่กับที่และซีวีที่เคลื่อนที่ได้ 128 ซีวี
เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้า 190 V ส่วนที่เคลื่อนที่ได้จะสามารถเคลื่อนที่ได้ 100 μm โดยส่วนปลายของ
ชุดซีวีที่เคลื่อนที่ได้จะมีกระจกจุลภาคขนาดความกว้าง 22.91 μm หนา 356 μm ติดอยู่เมื่อส่ง
สัญญาณแสงที่มีความยาวคลื่น 1310 nm การสูญเสียทางแสงเนื่องจากการสวิตช์ที่น้อยที่สุดในขณะ
สวิตช์เปิดและสวิตช์ปิดมีค่าต่างกัน 16.20 dB

RUNGLADA CHIMCHANG : A MEMS BASE 2x2 OPTICAL SWITCH
FOR SINGLE MODE OPTICAL FIBERS. THESIS ADVISOR :
ASST. PROF. RANGSAN TONGTA, Ph.D., 107 PP.

OPTICAL SWITCH/MICROMIRROR/COMB-DRIVE ACTUATOR/MEMS/LIGA

This research project presents the design, fabrication and measurement results of optical switch for single mode optical fiber. The optical switch is fabricated by using X-ray lithography technique in beamline 6a : DXL at the Synchrotron Light Research Institute (SLRI). All structures of the optical switch are fabricated by SU-8 photoresist coated with chromium and gold thin film for electrical conduction and optical reflection, respectively. A mirror which is attached to the end of moving part is used for reflect light from optical fiber. The mirror is 22.91 μm wide and 356 μm thick. A comb drive actuator in moving path has 128 fingers. It can travel 100 μm for 190-V electric step signal. At a wavelength of 1310 nm, the difference of 16.20 dB was obtained between switch on and switch off state.

School of Telecommunication Engineering Student's Signature _____

Academic Year 2013

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการสำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ช่วยเหลือ อย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการ และการดำเนินงานวิจัย รวมถึงหน่วยงานต่าง ๆ ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัย อาทิ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ ทองทา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ และชี้แนะแนวทางอันเป็นประโยชน์ยิ่งต่องานวิทยานิพนธ์ รวมถึงช่วยตรวจทานและแก้ไข รายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้ จนทำให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมทั้งเป็นกำลังใจ และเป็นแบบอย่างที่ดี ในการดำเนินชีวิตหลาย ๆ ด้านให้กับผู้วิจัยเสมอมา

รองศาสตราจารย์ ดร.พีระพงษ์ อุฑารสกุล อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม และอาจารย์ ดร.นิมิต ชมนาวัง อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่กรุณาให้คำแนะนำและคำปรึกษาทางด้านวิชาการ

ดร.รุ่งเรือง พัฒนากุล นักวิทยาศาสตร์ระบบลำเลียงแสง และคุณชาญวุฒิ ศรีผึ้ง วิศวกรประจำสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) ที่กรุณาให้คำแนะนำและคำปรึกษาทางด้านการบวนการลิโธกราฟี

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษา เงินอุดหนุนการทำวิทยานิพนธ์และการนำเสนองานวิจัย

สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) สำหรับการสนับสนุนเครื่องมือวิจัย และสถานที่ทำวิจัยตลอดระยะเวลาที่ทำวิจัย

ท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่าน ที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ทางด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่าน ที่ให้ความรัก ความอบอุ่น ความห่วงใย การอบรมเลี้ยงดู และให้การสนับสนุนทางการศึกษาอย่างดียิ่งมาโดยตลอด รวมทั้งเป็นกำลังใจที่ยิ่งใหญ่ในยามที่ผู้วิจัยท้อ ช่วยให้มีพลังเข้มแข็งพร้อมเผชิญกับปัญหาและอุปสรรคต่าง ๆ จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดา มารดาและญาติพี่น้องซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ผู้สอนที่เคารพทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยทั้งในอดีตและปัจจุบันจนสำเร็จการศึกษาไปได้ด้วยดี

รุ่งลดา นิมซ่าง

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 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น.....	2
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย.....	2
1.5.1 แนวทางการดำเนินงานวิจัย.....	2
1.5.2 สถานที่ทำการวิจัย.....	3
1.5.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.7 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์.....	3
2 ปรัชญาวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ระบบกลไฟฟ้าอุตสาหกรรม.....	5
2.2 อุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสง.....	6
3 กระบวนการพื้นฐานทางระบบกลไฟฟ้าอุตสาหกรรม.....	13
3.1 กระบวนการลิโธกราฟี.....	13
3.2 การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า.....	14
3.3 การเคลือบโลหะด้วยการสเป็คเตอรिंग.....	16

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4	การเตรียมสารไวแสง.....	17
3.5	การสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์.....	20
3.6	การสร้างลวดลายบนแผ่นวงจรพิมพ์.....	24
4	การออกแบบและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	27
4.1	ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับสายใยแก้วนำแสง.....	27
4.1.1	โครงสร้างสายใยแก้วนำแสง.....	29
4.1.2	ชนิดของสายใยแก้วนำแสง.....	30
4.1.1.1	สายใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยว (Multi mode optical fibers).....	30
4.1.1.2	สายใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมด (Multi mode optical fibers).....	32
4.1.3	หัวเชื่อมต่อ (Connector).....	35
4.2	ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับตัวขับเคลื่อนไฟฟ้าสถิต และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	37
4.2.1	ตัวขับเคลื่อนไฟฟ้าสถิตแบบซี่หวี (Electrostatic comb-drive actuator).....	38
4.2.2	ตัวขับเคลื่อนไฟฟ้าสถิตแบบแผ่นคู่ขนาน (Electrostatic parallel plate actuator).....	49
4.3	การออกแบบโครงสร้างอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสง.....	53
5	กระบวนการพัฒนาอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสง.....	57
5.1	การสร้างอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสง.....	57
5.2	รูปแบบของอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงที่มีการสร้างขึ้นในงานวิจัย.....	67
6	การทดสอบและผลการทดสอบ.....	72
6.1	การเชื่อมต่อสายอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสง.....	72
6.1.1	เชื่อมต่อตัวขับเคลื่อนไฟฟ้าสถิตกับแหล่งจ่ายแรงดันสูง.....	72
6.1.2	เชื่อมต่อสายใยแก้วนำแสงกับอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสง.....	74

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

6.2	การทดสอบการเคลื่อนที่.....	75
6.3	การทดสอบการสวิตซ์แสง.....	78
6.4	แนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสง.....	83
7	สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	84
7.1	สรุปงานวิจัย.....	84
7.2	ข้อเสนอแนะ.....	85
	รายงานอ้างอิง.....	86
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. โปรแกรมแบบจำลองผลทางคณิตศาสตร์.....	88
	ภาคผนวก ข. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	95
	ประวัติผู้เขียน.....	107

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	เปรียบเทียบประสิทธิภาพของอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงของ Raanan กับ DiCon.....7
2.2	ผลการจำลองค่าการสะท้อนแสงของโลหะชนิดต่าง ๆ ที่ความยาวคลื่น 1310 nm.....8
2.3	ค่าคุณลักษณะเฉพาะของอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงของ Cornel Marxer.....8
2.4	ค่าคุณลักษณะเฉพาะของอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงของ Ho Nam Khon.....10
4.1	โครงสร้างของสายใยแก้วนำแสงชนิดโหมคเดียว.....31
4.2	คุณลักษณะเฉพาะของสายใยแก้วนำแสงชนิดโหมคเดียว.....31
4.3	โครงสร้างของสายใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมคแบบ Step index.....32
4.4	คุณลักษณะเฉพาะของสายใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมคแบบ Step index.....33
4.5	โครงสร้างของสายใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมคแบบ Graded index.....34
4.6	คุณลักษณะเฉพาะของสายใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมคแบบ Graded index.....35
4.7	คุณสมบัติของหัวต่อชนิดต่าง ๆ.....35
4.8	สัญลักษณ์ของอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสง.....54
5.1	ขนาดพารามิเตอร์ของอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงที่ออกแบบและได้จากการวัด.....65
6.1	ค่าการรับส่งแสงผ่านตัวกลางที่เป็นอากาศ.....79
6.2	ค่าการสูญเสียของแสงเนื่องจากการรับส่งแสงผ่านตัวกลางที่เป็นอากาศ เทียบกับการส่งผ่านสายใยแก้วนำแสงโดยตรง.....80
6.3	ค่าการรับส่งแสงผ่านการสะท้อนจากกระจกจุลภาค.....81
6.4	ค่าการสูญเสียของแสงเนื่องจากการสะท้อนของกระจกจุลภาค เทียบกับการส่งผ่านอากาศ.....81

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	อุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงของ Koji Akimoto.....6
2.2	อุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงของ Raanan A. Miller.....7
2.3	อุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงของ Cornel Marxer.....8
2.4	อุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงของ Hiroshi Toshiyoshi.....9
2.5	อุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงของ Shi-Sheng Lee.....10
2.6	อุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงของ Ho Nam Khon.....11
2.7	อุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงของ Chang-Hyeon Ji.....11
3.1	เปรียบเทียบการใช้สารไวแสงสองชนิดในกระบวนการลิโธกราฟี.....14
3.2	การชุบโลหะเงินด้วยไฟฟ้า.....15
3.3	เครื่องเคลือบโลหะแบบสปัตเตอร์.....16
3.4	การเตรียมสารไวแสงด้วยการหมุนเคลือบ.....17
3.5	การเตรียมสารไวแสงด้วยการหยด.....18
3.6	กระบวนการหล่อสารไวแสงจากผงแห้งและอุปกรณ์.....19
3.7	ชั้นของสารไวแสงหลังการเตรียมสารไวแสง.....19
3.8	กระบวนการสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์สำหรับสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสง.....20
3.9	ฐานรองสำหรับสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์.....21
3.10	ลวดลายหลังฉายแสงสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์สำหรับ สร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงที่มีตัวขั้วเร้าแบบซีหวี.....22
3.11	หน้ากากกันรังสีเอกซ์ที่ผ่านการชุบโลหะเงินด้วยไฟฟ้า สำหรับสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงที่มีตัวขั้วเร้าแบบซีหวี.....23
3.12	แผ่นวงจรพิมพ์.....24
3.13	ติดแผ่นฟิล์มไวแสงบนแผ่นวงจรพิมพ์.....25
3.14	ฉายแสงอัลตราไวโอเลตบนฟิล์มไวแสง.....25
3.15	ฐานรองอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสง.....26

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 สายใยแก้วนำแสง.....	28
4.2 ส่วนประกอบของสายใยแก้วนำแสง.....	29
4.3 ขนาดของสายใยแก้วนำแสง.....	29
4.4 โครงสร้างโดยทั่วไปของสายใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดี่ยว.....	30
4.5 โครงสร้างโดยทั่วไปของสายใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมดแบบ Step index.....	32
4.6 สเปคตรัมการลดทอนสัญญาณของสายใยแก้วนำแสง ชนิดหลายโหมดแบบ Step index.....	33
4.7 โครงสร้างโดยทั่วไปของสายใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมดแบบ Graded index.....	34
4.8 ลักษณะของแผ่นตัวนำคู่ขนาน.....	38
4.9 ลักษณะโครงสร้างของตัวขับเร้าแบบชี้หัว.....	38
4.10 โมเดลของตัวขับเร้าแบบชี้หัว.....	39
4.11 ลักษณะแรงที่เกิดบนคานสปริงแบบ fixed-fixed beam.....	40
4.12 คานสปริงแบบ fixed-fixed beams.....	41
4.13 คานสปริงแบบ folded beam.....	41
4.14 คานสปริงแบบ serpentine beam.....	42
4.15 กราฟแรงดันไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ต้องป้อนให้ตัวขับเร้าเมื่อเทียบกับจำนวนชี้หัว.....	45
4.16 กราฟแรงดันไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ต้องป้อนให้ตัวขับเร้าเมื่อเทียบกับ ระยะห่างระหว่างชี้หัวทั้งสองขั้ว.....	46
4.17 กราฟแรงดันไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ต้องป้อนให้ตัวขับเร้า เมื่อเทียบกับความสูงของชี้หัว.....	47
4.18 กราฟแรงดันไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ต้องป้อนให้ตัวขับเร้า เมื่อเทียบกับระยะที่ชี้หัวเคลื่อนที่.....	48
4.19 ลักษณะโครงสร้างของตัวขับเร้าแบบแผ่นคู่ขนาน.....	49
4.20 โมเดลของตัวขับเร้าแบบแผ่นคู่ขนาน.....	50
4.21 กราฟแรงดันไฟฟ้าแบบคิดที่เกิดขึ้นในตัวขับเร้า เมื่อเทียบกับจำนวนแผ่นตัวนำ.....	52

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.22 โครงสร้างด้านบนของอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสง.....	53
4.23 โครงสร้างสามมิติของอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสง.....	53
4.24 ขนาดพารามิเตอร์ของอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสง.....	55
5.1 กระบวนการสร้างอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสง.....	58
5.2 สารไวแสงบนฐานรองกราไฟต์.....	59
5.3 ฉายรังสีเอกซ์.....	60
5.4 โครงสร้างอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงที่ได้จากการฉายรังสีเอกซ์.....	60
5.5 โครงสร้างอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงที่ผ่านการเคลือบโลหะแล้ว.....	61
5.6 โครงสร้างอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงที่ถูกเคลือบด้วยสารไวแสง.....	62
5.7 โครงสร้างอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงก่อนและหลังขัดกราไฟต์.....	62
5.8 เชื่อมต่อ โครงสร้างอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงกับแผ่นวงจรพิมพ์.....	63
5.9 โครงสร้างอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงที่ติดอยู่บนแผ่นวงจรพิมพ์.....	64
5.10 ขนาดโครงสร้างอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงที่สร้าง ได้จริง.....	65
5.11 กราฟเปรียบเทียบผลการจำลองการตอบสนองของตัวขับเร้าทางไฟฟ้าสถิต ที่ออกแบบกับที่สร้าง ได้จริง.....	66
5.12 โครงสร้างอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงที่มีตัวขับเร้าทางไฟฟ้าสถิตแบบชี้หัว และมีสปริงแบบ fixed-fixed beam.....	67
5.13 โครงสร้างอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงที่มีตัวขับเร้าทางไฟฟ้าสถิตแบบชี้หัว และมีสปริงแบบ serpentine beam 8 ขด วางตัวตั้งฉากกับระจกจุดภาค.....	68
5.14 โครงสร้างอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงที่มีตัวขับเร้าทางไฟฟ้าสถิตแบบชี้หัว และมีสปริงแบบ serpentine beam 12 ขด วางตัวตั้งฉากกับระจกจุดภาค.....	69
5.15 โครงสร้างอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงที่มีตัวขับเร้าทางไฟฟ้าสถิตแบบแผ่นคู่ขนาน และมีสปริงแบบ serpentine beam 12 ขด วางตัวขนานกับระจกจุดภาค.....	69
5.16 โครงสร้างอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงที่มีตัวขับเร้าทางไฟฟ้าสถิตแบบแผ่นคู่ขนาน และมีสปริงแบบ serpentine beam 12 ขด.....	70

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.17 โครงสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงที่มีตัวขับเร้าทางไฟฟ้าสถิตแบบซีทีวี และมีสปริงแบบ serpentine 12 ขด วางตัวตั้งฉากกับระจกจุลภาค.....	71
6.1 เชื่อมต่อสายทองแดงกับขั้วตัวขับเร้าทางไฟฟ้าสถิต.....	73
6.2 เชื่อมสายของอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงกับแหล่งจ่ายแรงดันสูง.....	73
6.3 เชื่อมต่อสายใยแก้วนำแสงกับอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสง.....	74
6.4 กราฟผลการจำลองการตอบสนองของโครงสร้าง อุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงที่สร้างได้จริง.....	75
6.5 ชุดขับอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงในงานวิจัย.....	76
6.6 ทดสอบการเคลื่อนที่ของตัวขับเร้าทางไฟฟ้าสถิตแบบซีทีวี.....	77
6.7 วัดค่ากำลังของแสงที่ส่งออกมาจากแหล่งจ่ายสัญญาณแสง.....	78
6.8 เชื่อมต่อสายใยแก้วนำแสงของอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสง กับแหล่งจ่ายสัญญาณแสง.....	79
6.9 ทดสอบการรับส่งแสงผ่านตัวกลางซึ่งเป็นอากาศ.....	79
6.10 ทดสอบการรับส่งแสงโดยการสะท้อนจากระจกจุลภาค.....	80
6.11 พื้นผิวบริเวณผนังด้านข้างของระจกจุลภาค.....	82
6.12 โครงสร้างระจกจุลภาคที่เหมาะสม.....	83

บทที่ 1

บทนำ

เนื้อหาในบทนี้เป็น การอธิบายถึงความเป็นมาและเหตุจูงใจสำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ซึ่งประกอบด้วย ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของงานวิจัย แนวทางการดำเนินงานวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการสื่อสารทางแสงโดยผ่านใยแก้วนำแสงกำลังเป็นที่นิยมอย่างมาก อันเนื่องมาจากสามารถส่งข้อมูลไปได้ในระยะเวลาที่ไกลมากโดยใช้ตัวทวนสัญญาณน้อยเพราะมีการสูญเสียสัญญาณต่ำกว่าสัญญาณไฟฟ้า อีกทั้งสามารถส่งข้อมูลด้วยอัตราเร็วสูง ที่สำคัญการลักลอบขโมยสัญญาณจากระบบใยแก้วนำแสงนั้นเป็นเรื่องที่ทำได้ยาก จึงทำให้ได้รับการยอมรับและใช้งานกันอย่างแพร่หลาย แต่โดยปกติแล้วการสื่อสารผ่านใยแก้วนำแสงจะเป็นแบบจุดต่อจุด (point to point) หากต้องการสื่อสารแบบหนึ่งจุดต่อหลายจุด (point to multipoint) จะต้องใช้สายใยแก้วนำแสงหลายเส้น ด้วยเหตุนี้จึงมีการสร้างอุปกรณ์ที่จะมาทำหน้าที่เป็นตัวสวิตช์แสงเพื่อลดจำนวนการใช้สายใยแก้วนำแสงให้น้อยลง

ระบบกลไฟฟ้าจุลภาค หรือ Micro-Electro-Mechanical System (MEMS) เป็นอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็กระดับไมโครเมตร หรือ 1 ในล้านของเมตร ประกอบด้วยส่วนที่ใช้ไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อน และส่วนที่ใช้กลไกบางอย่างทำให้เคลื่อนที่ อาจสร้างขึ้นโดยใช้เทคโนโลยีการผลิตวงจรรวม (Integrated Circuit Technology : IC) เทคนิคการปลูกสาร เทคนิคการกัดกำจัด และเทคนิคการสร้างรูปแบบด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี ระบบกลไฟฟ้าจุลภาคเป็นเทคโนโลยีสมัยใหม่ที่เติบโตอย่างสูงและต่อเนื่อง ในปัจจุบันได้รับความสนใจและก้าวล้ำไปอย่างมากทั่วโลก อันเนื่องมาจากความต้องการอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็ก สมรรถนะสูง และราคาถูกลง โดยเทคโนโลยีดังกล่าวได้ถูกนำไปใช้ประโยชน์ในสาขาต่าง ๆ มากมาย อาทิเช่น เทคโนโลยียานยนต์นำไปผลิตอุปกรณ์วัดความเร่งและอุปกรณ์วัดความดัน เทคโนโลยีการแพทย์และชีวภาพนำไปผลิตตัวตรวจรู้ (Sensors) และตัวขับเคลื่อน (Actuators) ชนิดต่าง ๆ เทคโนโลยีการสื่อสารโทรคมนาคมนำไปผลิตอุปกรณ์ที่ใช้ในการสื่อสารทางแสง ดังนั้นจึงได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการสร้างอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงโดยใช้เทคนิคเอ็กซ์เรย์ลิโธกราฟีสำหรับใช้เป็นตัวเปลี่ยนทิศทางแสงขึ้น

กระจกแนวตั้งที่วางในแนวตั้งฉากกับพื้นผิวของชิพกำลังเป็นที่น่าสนใจในระบบเชิงแสง จุลภาค การติดตั้งใยแก้วนำแสงและเลเซอร์ไดโอดให้อยู่ในแนวขนานกับระนาบของตัวชิพเป็นเรื่องที่ทำได้ง่าย นอกจากนี้การสร้างกระจกที่วางตัวในแนวตั้งให้มีคุณภาพเชิงแสงที่สูงนั้นยังคงเป็นงานที่ทำหาย เทคนิคการสร้างมากมายได้ถูกวิจัยขึ้น

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นในเรื่องการพัฒนากระบวนการสร้าง การผลิตอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงแบบไฟฟ้าสถิต ด้วยเทคโนโลยีการผลิตโครงสร้างจุลภาคสัดส่วนสูง โดยใช้รังสีเอกซ์ เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์และใช้ประโยชน์ อีกทั้งเพื่อเป็นการลดต้นทุนในการผลิตอีกด้วย

อุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงของงานวิจัยนี้ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ กระจกจุลภาคทำหน้าที่เป็นตัวเปลี่ยนทิศทางของแสง และส่วนที่สองคือตัวขับเคลื่อนไฟฟ้าสถิตทำหน้าที่ขับเคลื่อนกระจกจุลภาคให้สามารถเคลื่อนที่ได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 นำเทคนิคซินโครตรอนเอกซ์เรย์ลิโธกราฟีมาประยุกต์ใช้ในการสร้างอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสง

1.2.2 พัฒนาเทคนิคการเคลือบทองคำลงบนกระจกจุลภาคเพื่อให้เกิดการสะท้อนแสง

1.2.3 พัฒนาองค์ความรู้ใหม่ในกระบวนการผลิตระบบกลไฟฟ้าจุลภาคเชิงแสง เพื่อลดต้นทุนในการผลิต

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

โครงสร้างอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงสร้างจากพอลิเมอร์ซึ่งเป็นสารไวแสงชนิดลบ (SU-8) เคลือบโลหะ

1.4 ขอบเขตการวิจัย

สร้างอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงโดยใช้กระบวนการลิโธกราฟี

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

1.5.1 แนวทางการดำเนินงานวิจัย

- 1) สํารวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์
- 2) ศึกษากระบวนการผลิตโครงสร้างระบบกลไฟฟ้าจุลภาค
- 3) ออกแบบอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงแบบไฟฟ้าสถิต

- 4) สร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงแบบไฟฟ้าสถิต
- 5) พัฒนาและปรับปรุงกระบวนการสร้างและการผลิตอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงแบบไฟฟ้าสถิต
- 6) ทดสอบการทำงาน วิเคราะห์ สรุปผลและเก็บรวบรวมข้อมูลที่ได้จากการสร้างและทดสอบการทำงาน

1.5.2 สถานที่ทำการวิจัย

ห้องปฏิบัติการ Beam Line 6a : DXL สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) 111 หมู่ที่ 6 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

1.5.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

- 1) โปรแกรมออกแบบลวดลาย Layout Editor
- 2) โปรแกรมเมทแลบ (MATLAB)
- 3) ห้องสะอาด (Clean room) และอุปกรณ์
- 4) เครื่องฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ต
- 5) รังสีเอกซ์จากเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน
- 6) เครื่องเคลือบโลหะแบบการสปัตเตอร์ริง

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.6.1 อุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงที่สร้างจากเทคนิคซินโครตรอนเอกซ์เรย์ลิโธกราฟี
- 1.6.2 พัฒนาเทคนิคการเคลือบทองคำลงบนกระจกจุลภาคเพื่อให้เกิดการสะท้อนแสง
- 1.6.3 พัฒนาองค์ความรู้ใหม่ในกระบวนการผลิตระบบกลไฟฟ้าจุลภาค

1.7 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 7 บท

บทที่ 1 เป็นบทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ขอบเขตงานวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตงานวิจัย วิธีดำเนินงานวิจัยและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

บทที่ 2 กล่าวถึงการปรัทัศนัวรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงแบบไฟฟ้าสถิตในระบบกลไฟฟ้า

บทที่ 2

ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ระบบกลไฟฟ้าจุลภาค

การพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านระบบกลไฟฟ้าจุลภาค (MEMS) เริ่มได้รับความสนใจอย่างมากในปัจจุบัน เป็นศาสตร์ที่รวบรวมเอาความรู้และวิชาการหลากหลายสาขาทั้งด้านไฟฟ้า เครื่องกล วัสดุศาสตร์ ชีววิทยา เคมี ฟิสิกส์ รวมทั้งด้านระบบการวัดและระบบควบคุม ผสมผสานเข้าด้วยกันอย่างลงตัว เพื่อสร้างหรือผลิตอุปกรณ์ขนาดเล็กในระดับไมโครเมตรถึงมิลลิเมตรที่มีความสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เทคโนโลยีดังกล่าวถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในด้านอุตสาหกรรม ยานยนต์ การแพทย์ อิเล็กทรอนิกส์ ระบบควบคุม ระบบการสื่อสาร ดังตัวอย่างเช่น ตัวตรวจจับความชื้น ตัวตรวจจับความดัน ตัวตรวจจับความเร่งสำหรับรถจักรยานยนต์และระบบความปลอดภัย อุปกรณ์วัดความโน้มเอียงสำหรับเครื่องบิน เป็นต้น อุปกรณ์ที่ได้กล่าวมาส่วนใหญ่แล้วเป็นสิ่งที่มีความจำเป็นและสำคัญต่อชีวิตประจำวันทั้งสิ้น

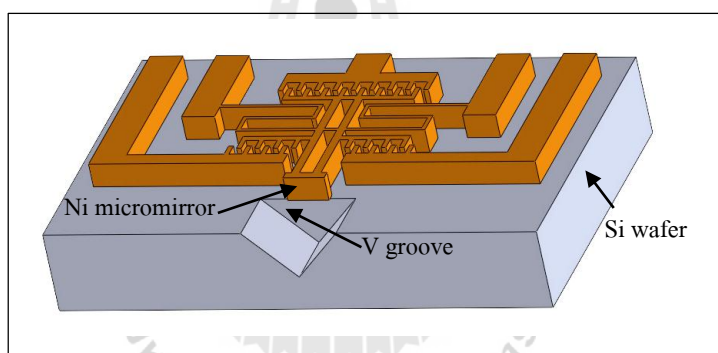
การสร้างหรือผลิตอุปกรณ์ทางระบบกลไฟฟ้าจุลภาคนั้นใช้เทคนิคการสร้างพื้นฐานจากการสร้างวงจรรวม (Integrated Circuit : IC) จึงทำให้ได้ขนาดของอุปกรณ์ที่เล็ก ส่วนระบบการผลิตชิ้นส่วนขนาดใหญ่จะใช้เทคนิคการสร้างที่ได้แก่ การกลึง การหล่อ การเจาะ การกัด การรีด หรือการอัด เพื่อขึ้นรูปชิ้นงาน เทคนิคหรือวิธีการดังกล่าวไม่สามารถสร้างโครงสร้างให้มีขนาดเล็กลงได้ เพราะมีขีดจำกัดทางด้านรูปร่าง และสิ่งนี้เองที่เป็นข้อได้เปรียบของระบบกลไฟฟ้าจุลภาค เนื่องจากสามารถสร้างชิ้นงานขนาดเล็กและซับซ้อน ได้มากกว่า ทำให้ลดต้นทุนการผลิต รวมถึงความสะดวกต่อการนำไปประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์อื่น

ปัจจุบันอุปกรณ์ที่เป็นระบบกลไฟฟ้าจุลภาค (Micro-electromechanical system : MEMS) คือหนึ่งในอุปกรณ์ที่เติบโตเร็วที่สุดในสายอุตสาหกรรม การประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ นั้นได้เพิ่มมากขึ้นตลอดเวลา ซึ่งล้วนแล้วแต่เป็นชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์ที่มีความสำคัญและต้องการความแม่นยำในการทำงานที่สูง (G. Somlay et al., 2007) ตัวขับเคลื่อนจุลภาค (Microactuator) ก็ถูกใช้อย่างกว้างขวางในการขับเคลื่อนโครงสร้างต่าง ๆ ในระบบกลไฟฟ้าจุลภาค การกระตุ้นตัวขับเคลื่อนจุลภาคนั้นสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใช้ฟิล์มเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric films), การใช้หลักการในการขยายตัวของโลหะเนื่องจากอุณหภูมิ (Thermal expansion), การใช้หลักการของโลหะอัลลอยด์ที่คืนรูปได้ (Shape memory alloy) และการใช้หลักการของไฟฟ้าสถิต (Electrostatic forces) เป็นต้น

2.2 อุปกรณ์สวิตช์เชิงแสง

อุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงของงานวิจัยนี้จะสามารถทำงานได้ต้องประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน ส่วนที่หนึ่งคือกระจกจุลภาคทำหน้าที่เป็นตัวเปลี่ยนทิศทางของแสง และส่วนที่สองคือตัวขับเร้าจุลภาคทำหน้าที่ขับเคลื่อนกระจกจุลภาคให้สามารถเคลื่อนที่ได้ ในอดีตที่ผ่านมาได้มีการนำเสนองานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงในงานวิจัยหลายชิ้นดังนี้

Koji Akimoto (1997) ได้ประดิษฐ์กระจกจุลภาคจากนิเกิลที่มีตัวขับเร้าทางไฟฟ้าสถิตแบบซีฮวีเป็นตัวขับเคลื่อน โดยใช้เทคนิคการสกัดพื้นผิวนิกเกิล ซึ่งมีทั้งสร้างแม่พิมพ์ด้วยสารไวแสงและการชุบโลหะนิกเกิลด้วยไฟฟ้า กระจกจุลภาคนิกเกิลนี้มีความสูง $19\ \mu\text{m}$ กว้าง $50\ \mu\text{m}$ อุปกรณ์นี้มีความสามารถวัดคุณลักษณะเฉพาะทั้งทางแสงและทางกล การสะท้อนแสงของกระจกจุลภาควัดได้จากการใช้สายใยแก้วนำแสงแบบ hemi-spherical-end ซึ่งเหมาะสมจะไปใช้วัดวัตถุที่มีขนาดเล็กมาก ๆ ระยะทางสูงสุดในการเคลื่อนที่คือ $5.5\ \mu\text{m}$ วัดผลของการสะท้อนได้ประมาณ 63%

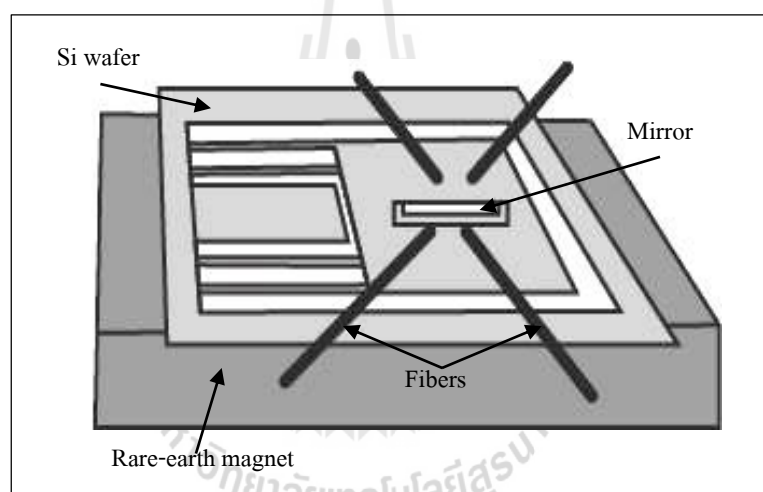


รูปที่ 2.1 อุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงของ Koji Akimoto

Raanan A. Miller (1997) ได้ออกแบบและสร้างอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงแบบ 2x2 สำหรับสายใยแก้วนำแสงแบบหลายโหมดซึ่งประกอบด้วยกระจกจุลภาคขนาดกว้าง $5\ \mu\text{m}$ ยาว $3\ \text{mm}$ และสูง $500\ \mu\text{m}$ ขับเคลื่อนด้วยตัวขับเร้าแบบแม่เหล็กไฟฟ้าในลักษณะขึ้นลงตามแนวแกน z ควบคุมการทำงานจากชุดขดลวดทองแดงและสปริงที่ติดอยู่บนแผ่นซิลิคอน (Silicon) และถูกกระตุ้นจากสนามแม่เหล็กภายนอกของแม่เหล็กโลกที่หายาก มีประสิทธิภาพในการทำงานสูงมากเมื่อเทียบกับอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงแบบ DiCon

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงของ Raanan กับ DiCon

	อุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงของ Raanan	อุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงแบบ DiCon
Switching Time	10 ms	20 ms
Switching Current	20-30 mA	130 mA
Switching power	17-38 mW	650 mW
Switch Size	< 1cm ³	23 cm ³
Insertion Loss	0.062–3 dB	0.5–1 dB
Loopback Path Loss	2.5–11 dB	2–6 dB
Bypass Path Loss	2.3–2.5 dB	0.5 dB



รูปที่ 2.2 อุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงของ Raanan A. Miller

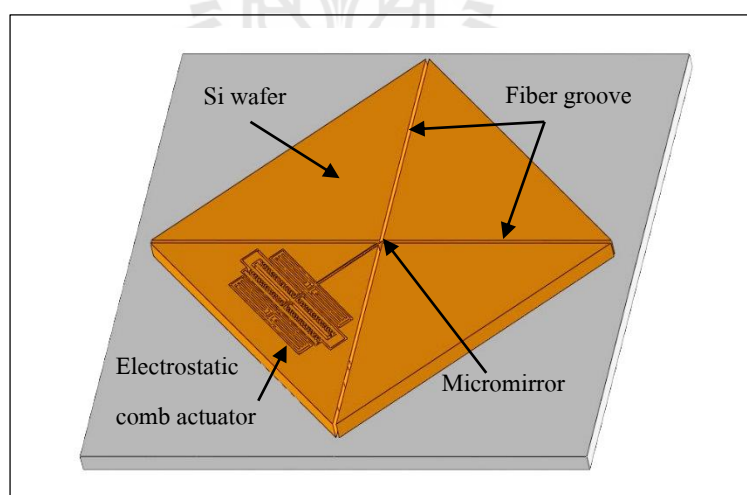
Cornel Marxer (1999) ได้สร้างอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงแบบ 2x2 สำหรับสายใยแก้วนำแสงแบบ โหมดเดี่ยว อุปกรณ์นี้มีส่วนประกอบหลักในการทำงานอยู่สองส่วน ได้แก่ กระจกจุลภาคแนวตั้งที่คอยทำหน้าที่สวิตช์แสง และตัวขับเคลื่อนไฟฟ้าสถิตแบบซีวีทีทำหน้าที่เป็นตัวขับเคลื่อนกระจกจุลภาคให้เคลื่อนที่เข้าออกระหว่างทางเดินแสงของสายใยแก้วนำแสงสองคู่ ใช้เทคนิคขึ้นรูปโครงสร้างโดยการสกัดพื้นผิวซิลิคอนเชิงลึก และมีการเคลือบโลหะหลายชนิดเพื่อให้กระจกจุลภาคเกิดการสะท้อนแสง กระจกจุลภาคนี้มีความสูง 75 μm และมีความกว้างน้อยที่สุด 2.3 μm ตัวขับเคลื่อนสามารถเคลื่อนที่ได้ 20 μm เมื่อป้อนแรงดัน 60 V

ตารางที่ 2.2 ผลการจำลองค่าการสะท้อนแสงของโลหะชนิดต่าง ๆ ที่ความยาวคลื่น 1310 nm

	ทองคำ	อลูมิเนียม	นิกเกิล	โครเมียม
การสะท้อน	97.5%	97%	72.1%	63%
ความหนาของโลหะ	170 nm	100 nm	270 nm	320 nm

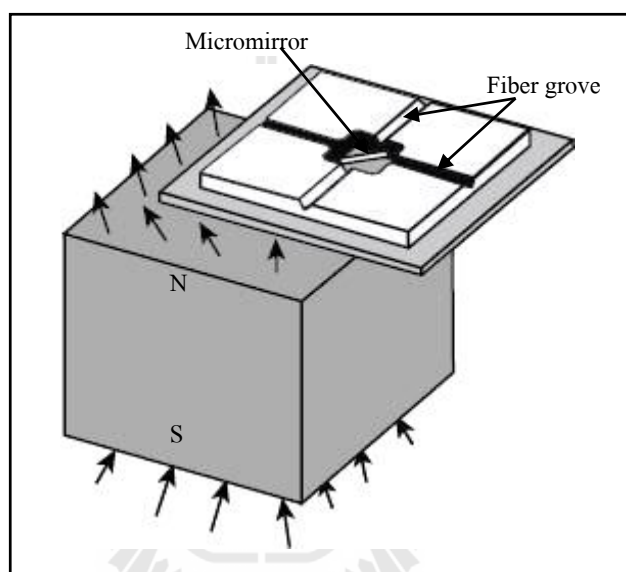
ตารางที่ 2.3 ค่าคุณลักษณะเฉพาะอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงของ Cornell Marxer

	Switch off	Switch on
Insertion loss	1.2 dB	1.8 dB
Crosstalk attenuation	<-66 dB	<-50 dB
Backreflection attenuation	<-40 dB	<-33 dB
Switching speed	<1 ms	
Driving voltage	5 V CMOS	
Supply voltage (power)	5 V (70 mW)	



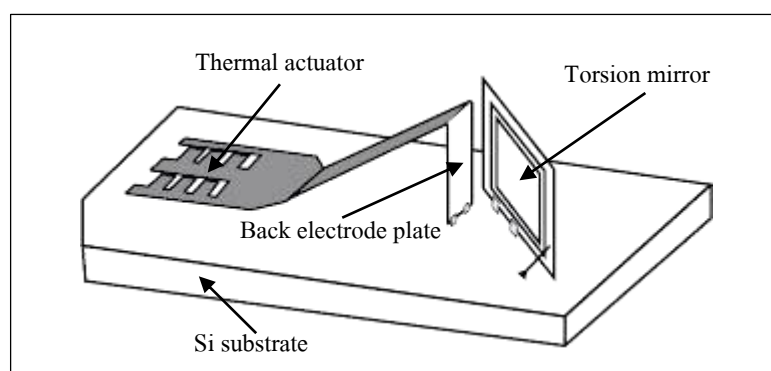
รูปที่ 2.3 อุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงของ Cornell Marxer

Hiroshi Toshiyoshi (1999) ได้สร้างอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงสำหรับสายใยแก้วนำแสงแบบหลายโหมด ที่มีกระจกบิตขนาดเล็กทำหน้าที่เป็นตัวสวิตช์แสงและถูกขับเคลื่อนด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า อาศัยเทคนิคการขึ้นรูปด้วยการกัดพื้นผิวซิลิคอน กระจกขนาดเล็กนี้เป็นทองคำ ติดอยู่กับคานบิตที่เคลือบฟิล์มแม่เหล็ก FeNiCo คานบิตนี้จะถูกควบคุมการทำงานด้วยสนามแม่เหล็กที่เกิดจากแม่เหล็กไฟฟ้า ทำให้สามารถบิตไปรอบ ๆ แกนได้ เวลาในการสวิตช์ 10-25 ms การสูญเสียจากการสะท้อน -2.5 dB และการสูญเสียจากการส่ง -0.83 dB



รูปที่ 2.4 อุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงของ Hiroshi Toshiyoshi

Shi-Sheng Lee (1999) ออกแบบและสร้างอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงแบบ 2x2 ด้วยระบบกลไฟฟ้าจุลภาคสำหรับสายใยแก้วนำแสงโหมดเดียว กระจกบิตจุลภาคแนวตั้งถูกสร้างขึ้นจากกระบวนการกัดพื้นผิว (Surface-micromachined) ควบคุมการทำงานด้วยตัวขับเคลื่อนที่ใช้หลักการในการขยายตัวของโลหะเนื่องจากอุณหภูมิ เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้า 80 V จะทำให้กระจกบิตเป็นมุม 45 องศา เวลาในการสวิตช์น้อยกว่า 400 μ s ค่าการสูญเสียทางแสงเนื่องจากการแทรกสอดได้ 1.25 dB

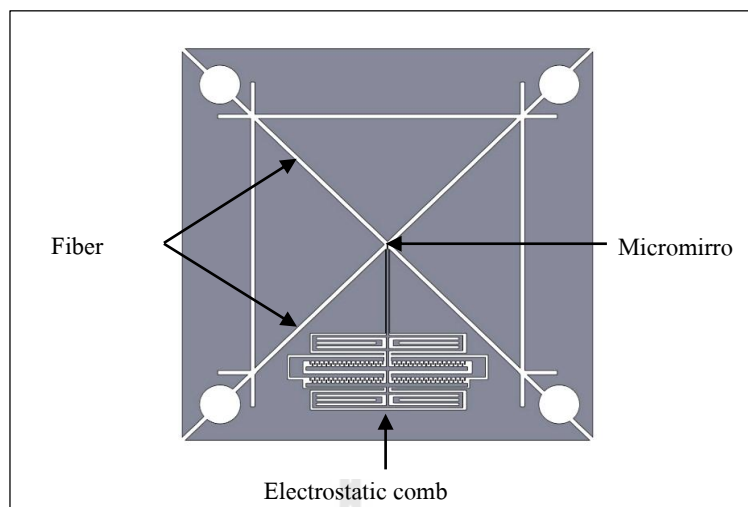


รูปที่ 2.5 อุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงของ Shi-Sheng Lee

Ho Nam Khon (2004) ได้ออกแบบและสร้างอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงแบบ 2x2 สำหรับประยุกต์ในการเพิ่มลดทางแสงที่มีการสูญเสียต่ำ ของสายใยแก้วนำแสงแบบปลายแบน (Flat-ended fiber) และสายใยแก้วนำแสงแบบปลายเฉียง (Beveled-ended fiber) มีกระจกจุลภาคเป็นตัวสวิตช์แสง และถูกขับเคลื่อนด้วยตัวขับเคลื่อนไฟฟ้าสถิตแบบซีอีวี อุปกรณ์นี้ถูกสร้างขึ้นจากกระบวนการสกัดพื้นผิวซิลิคอนด้วยไอออนเชิงลึก (Silicon deep reactive ion etch : DRIE) เคลื่อนที่ไปได้ระยะทาง 40 μm ด้วยแรงดัน 24 V วัดค่า TDL (Time dependent loss), PDL (Polarization dependent loss) และ WDL (Wavelength dependent loss) ที่ Pi (Input port), Po (Output port), Pa (Add port) และ Pd (Drop port) ได้ดังนี้

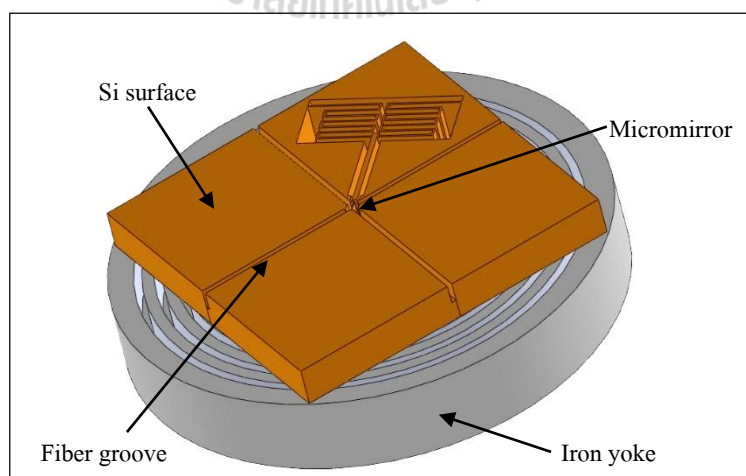
ตารางที่ 2.4 ค่าคุณลักษณะเฉพาะอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงของ Ho Nam Khon

Optical Characteristics	Flat-ended fiber				Beveled-ended fiber			
	Switch off		Switch on		Switch off		Switch on	
	Pi-Po	Pa-Pd	Pa-Po	Pi-Pd	Pi-Po	Pa-Pd	Pa-Po	Pi-Pd
TDL (dB)	0.06	0.02	0.24	0.33	0.01	0.04	0.01	0.03
PDL (dB)	0.13	0.05	0.28	0.41	0.05	0.05	0.03	0.05
WDL (dB)	0.48	1.11	0.61	1.24	0.28	0.68	0.71	0.24
Extinction ratio	-	-	-	-	-	-	31	32
Response time	5 ms							



รูปที่ 2.6 อุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงของ Ho Nam Khon

Chang-Hyeon Ji (2004) ได้ออกแบบและสร้างอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงแบบ 2x2 ด้วยระบบกลไฟฟ้าจุลภาค ประกอบด้วยกระจกจุลภาคเคลือบทองคำที่สร้างขึ้นจากกระบวนการสกัดพื้นผิวซิลิคอนด้วยไอออนเชิงลึก ที่อยู่บนส่วนปลายของคานบีด ควบคุมการเคลื่อนที่ด้วยแรงแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเกิดจากขดลวดเหล็ก กระจกจุลภาคนี้มีความกว้าง $2\ \mu\text{m}$ ทดสอบการทำงานที่ความยาวคลื่น $1550\ \text{nm}$ มีค่าการสูญเสียจากการแทรกสอด $0.2\text{-}0.8\ \text{dB}$ และการสูญเสียจากการโพลาไรซ์ $0.02\text{-}0.2\ \text{dB}$ เวลาในการสวิตช์คือ $1\ \text{ms}$



รูปที่ 2.7 อุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงของ Chang-Hyeon Ji

จากงานวิจัยที่ได้ทำการสำรวจพบว่ากระบวนการสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสง มีรูปแบบการสร้างที่หลากหลายได้แก่ การสร้างชิ้นงานด้วยการสกัดฐานรองเป็น โครงสร้างลงไปหรือเรียกว่า Bulk micromachining และสร้างชิ้นงานด้วยงานสร้างลวดลายบนพื้นผิวของฐานรองหรือเรียกว่า Surface micromachining ซึ่งแต่ละวิธีก็มีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน การสร้างชิ้นงานด้วยการสกัดฐานรอง ส่วนใหญ่แล้วจะเป็นวัสดุประเภทซิลิคอนต้องใช้อุปกรณ์และเครื่องมือราคาสูง แต่มีความแม่นยำในการสร้าง การควบคุมอัตราการเกิดหรือการสกัดค่อนข้างแม่นยำ ส่วนอีกวิธีคือสร้างชิ้นงานบนพื้นผิวซึ่งวัสดุและอุปกรณ์ราคาไม่แพงมาก

สำหรับงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นในเรื่องของการพัฒนากระบวนการสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงด้วยเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค โดยใช้กระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์ เนื่องจากรังสีเอกซ์มีค่าของพลังงานที่สูงกว่ารังสีอัลตราไวโอเล็ตหลายเท่าทำให้ได้ชิ้นงานจากกระบวนการฉายแสงที่มีผนังเรียบตรงและตั้งฉากกับฐานรอง อันเป็นข้อดีของการสร้างโครงสร้างด้วยรังสีเอกซ์ ซึ่งจะช่วยให้สามารถสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงที่มีแรงขับที่สูงขึ้น โดยใช้แรงดันขับเคลื่อนน้อยและมีพื้นผิวสำหรับสวิตซ์แสงที่เรียบขึ้นเมื่อเทียบกับการผลิตด้วยเทคนิคดั้งเดิม โดยในขั้นตอนนี้จะเน้นการแก้ปัญหากระบวนการผลิตให้สามารถผลิตอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงให้สามารถเคลื่อนที่ได้จริงและสวิตซ์แสงได้ก่อนแล้วจึงปรับปรุงคุณลักษณะการทำงานให้ดียิ่งขึ้นในโอกาสต่อไป



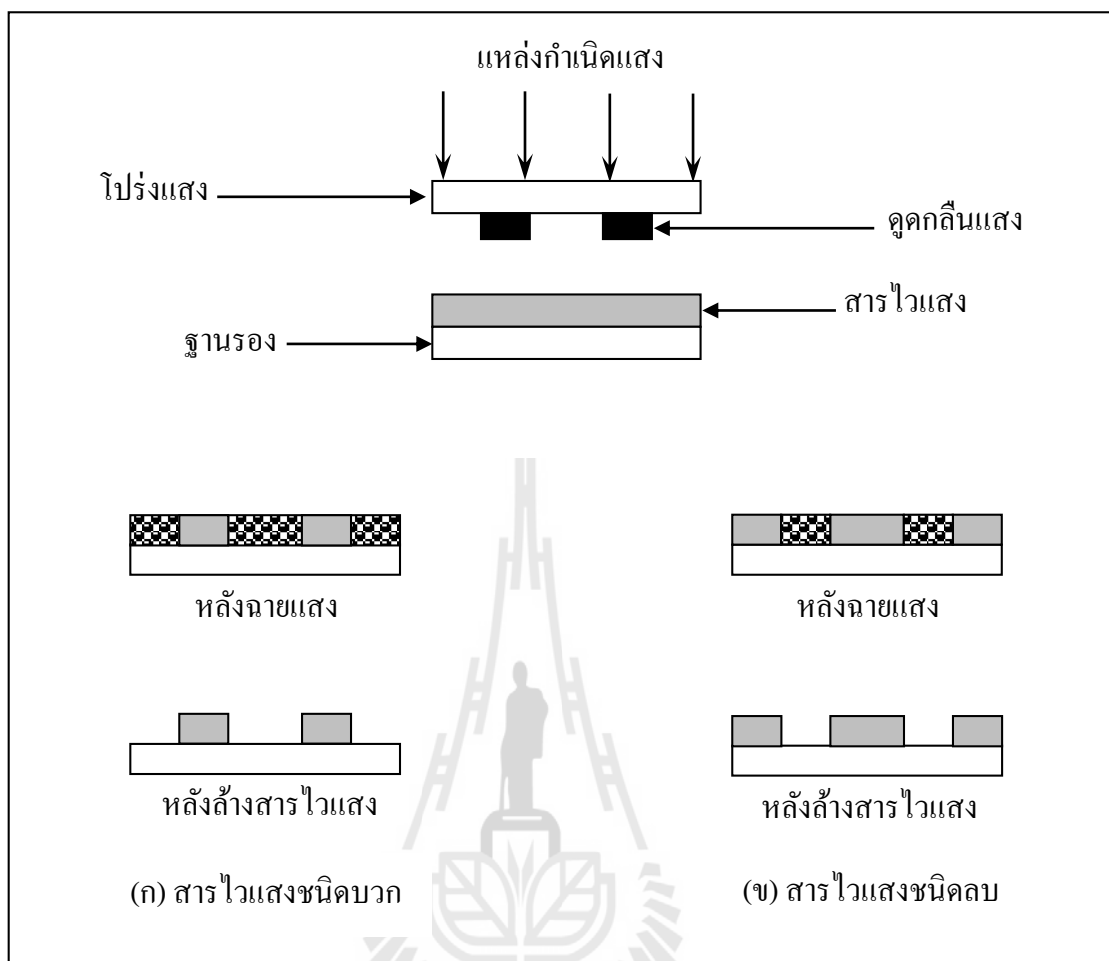
บทที่ 3

กระบวนการพื้นฐานในการผลิตระบบกลไฟฟ้าจุลภาค

การสร้างและการพัฒนาอุปกรณ์ทางด้านระบบกลไฟฟ้าจุลภาค โดยพื้นฐานนิยมใช้กระบวนการลิโธกราฟี เนื่องจากกระบวนการดังกล่าวเป็นกระบวนการมาตรฐานสำหรับสร้างวงจรรวม (Integrated circuit : IC) ซึ่งประกอบด้วยการฉายแสง การล้างสารไวแสง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้กระบวนการลิโธกราฟีในการผลิตอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงแบบไฟฟ้าสถิต นอกจากนี้ยังมีการใช้เทคนิคอื่นร่วมด้วย คือ การเคลือบโลหะด้วยเทคนิคสปัตเตอริง (Sputtering) เพื่อให้อุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงสามารถสะท้อนแสงและนำไฟฟ้าได้

3.1 กระบวนการลิโธกราฟี

กระบวนการลิโธกราฟี (Lithography process) เป็นกระบวนการที่สำคัญในเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค คือการใช้กระบวนการทางเคมีในการถอดแบบลวดลายจากลวดลายต้นแบบที่มีลักษณะเป็นลายเส้นที่บ่งชี้แสงลงบนพื้นผิวเรียบ ซึ่งอาจจะเป็นการสร้างลวดลายลงบนวัสดุต่าง ๆ ที่มีลักษณะเป็นพื้นผิวเรียบ ในกระบวนการถอดแบบจะใช้สารเคมีที่เรียกว่าสารไวแสง (Photoresist) เป็นวัสดุในการถอดแบบ คุณสมบัติทางกายภาพของสารไวแสงคือจะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีแสงมาตกกระทบ สารไวแสงสามารถจำแนกได้เป็นสองชนิด คือ สารไวแสงชนิดบวก (Positive photoresist) จะมีคุณสมบัติที่เมื่อมีแสงมาตกกระทบในบริเวณใดบริเวณนั้นจะสามารถล้างออกได้ด้วยน้ำยาดีเวลอปเปอร์เหลือไว้เฉพาะบริเวณที่ไม่มีแสงมาตกกระทบ และอีกชนิดหนึ่งได้แก่สารไวแสงชนิดลบ (Negative photoresist) ซึ่งจะมีคุณสมบัติที่ตรงข้ามกับสารไวแสงชนิดบวก กล่าวคือบริเวณใดที่ไม่มีแสงมาตกกระทบจะถูกล้างออกได้ด้วยน้ำยาดีเวลอปเปอร์ เหลือไว้เฉพาะบริเวณที่มีแสงมาตกกระทบเท่านั้น จากคุณสมบัติของสารไวแสงทั้งสองชนิดทำให้สามารถสร้างลวดลายในกระบวนการลิโธกราฟีออกมาได้สองแบบขึ้นอยู่กับทางเลือกใช้สารไวแสงนั่นเอง ส่วนแสงที่ใช้ในการฉายลงบนสารไวแสงนั้นจะเป็นแสงที่อยู่ในย่านแสงอัลตราไวโอเล็ต (Ultra-violet : UV) ซึ่งกระบวนการลิโธกราฟีทั้งกระบวนการ โดยสังเขปสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบให้เห็นข้อแตกต่างระหว่างการใช้สารไวแสงชนิดบวก (ก) และการใช้สารไวแสงชนิดลบ (ข)

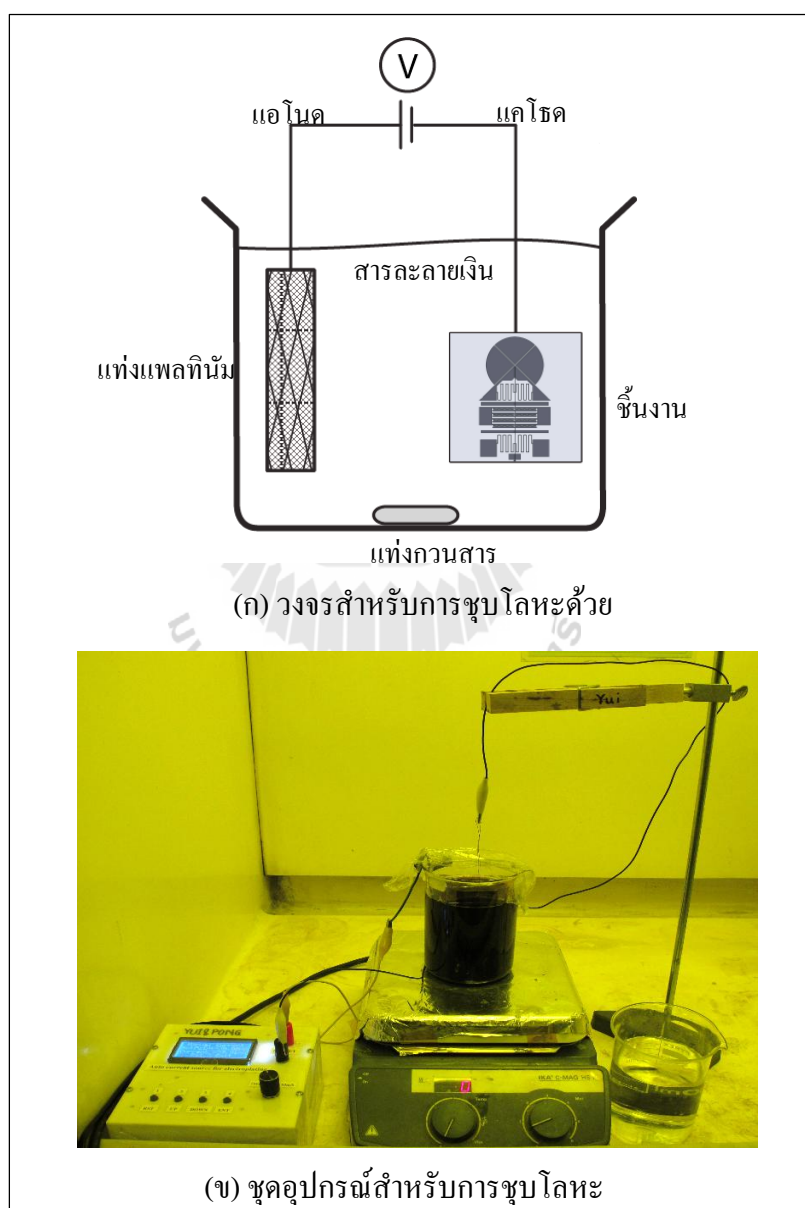


รูปที่ 3.1 เปรียบเทียบการใช้สารไวแสงสองชนิดในกระบวนการลิโธกราฟี

3.2 การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

หลังจากสร้างลวดลายลงบนฐานรองด้วยกระบวนการลิโธกราฟีแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการเติมโลหะเข้าไปในช่องว่างของสารไวแสงเพื่อเป็นสำหรับหน้ากากกันรังสีเอกซ์ สำหรับอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงในงานวิจัยนี้จะต้องมีการเติมวัสดุเคลือบรังสีเอกซ์ ซึ่งจะใช้โลหะเงินเป็นลวดลายสำหรับเคลือบรังสีเอกซ์ อยู่บนแผ่นกราฟไฟต์ซึ่งมีคุณสมบัติโปร่งแสงต่อรังสีเอกซ์ การเติมโลหะเงินลงบนฐานรองเพื่อใช้เป็นลวดลายกันรังสีเอกซ์นั้นจะใช้วิธีการชุบด้วยไฟฟ้า (Electroplating) ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายต่อการสร้างชิ้นงานและราคาถูก โดยใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมีซึ่งไอออนของโลหะที่เป็นขั้วแอโนด (Anode) จะผ่านสารละลายมาเคลือบบนชิ้นงานซึ่งเป็นขั้วแคโทด (Cathode) โดยป้อนกระแสไฟฟ้าคงที่ การชุบโลหะด้วยไฟฟ้าให้มีความสม่ำเสมอจะขึ้นอยู่กับการรักษาความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าให้เหมาะสมตลอดกระบวนการ ในรูปที่ 3.2 เป็นตัวอย่างวงจรสำหรับชุบเงิน

ด้วยไฟฟ้าซึ่งในทางปฏิบัติอาจจะมีอุปกรณ์อื่นเข้ามาเสริมเพื่อให้ชิ้นงานมีคุณภาพดีขึ้น เช่น วงจรสร้างสัญญาณพัลส์ (Pulse plating) หรือใช้ปั๊มของเหลวช่วยให้เกิดการหมุนเวียนของสารละลาย หรือแม้แต่อุปกรณ์ทำความร้อนให้สารละลายมีอุณหภูมิที่เหมาะสม จากรูปที่ 3.2 อุปกรณ์สำหรับชุบโลหะเงิน ประกอบด้วย ชุดแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง สารละลาย และชิ้นงาน การต่อวงจรทำได้โดยนำชิ้นงานต่อเข้ากับแคโทดและแผ่นแพลตตินัมต่อเข้ากับแอโนด เมื่อเกิดกระแสไหลเงินจะก่อตัวที่ผิวของชิ้นงานจนได้ความหนาตามต้องการจึงหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้า

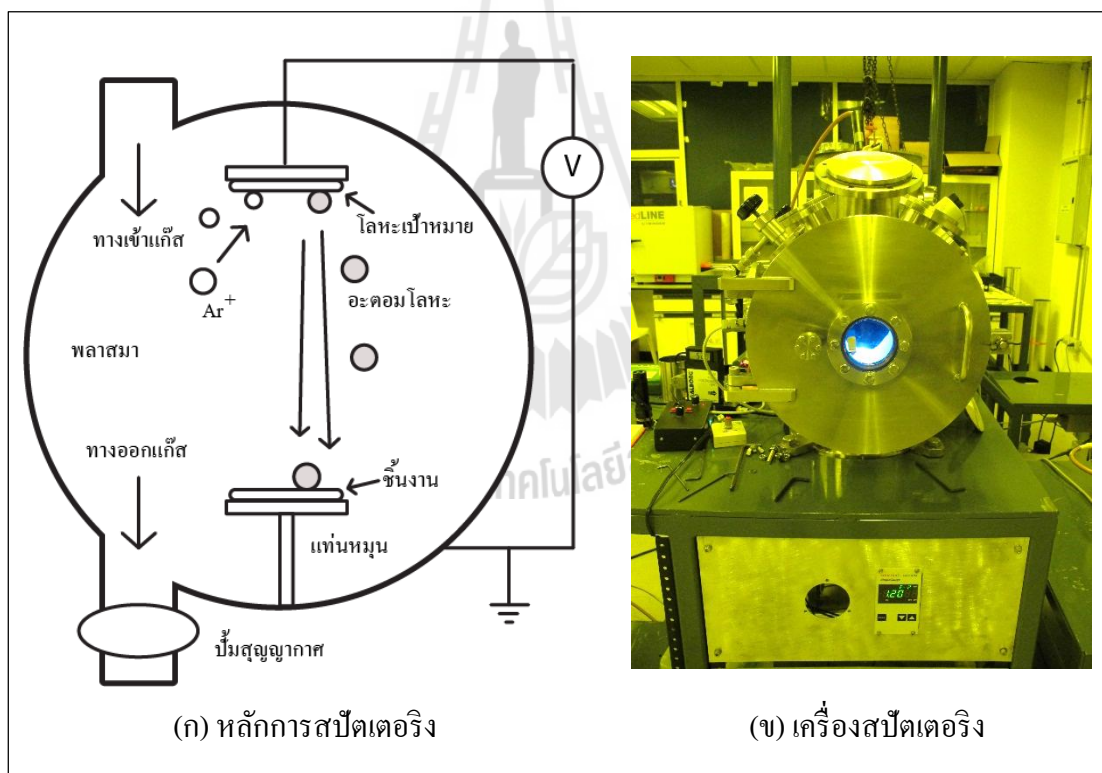


รูปที่ 3.2 การชุบโลหะเงินด้วยไฟฟ้า

3.3 การเคลือบโลหะด้วยการสปัตเตอริง

เทคนิคการเคลือบโลหะส่วนใหญ่แล้วเน้นเคลือบวัสดุที่เป็นฉนวนให้สามารถนำไฟฟ้าได้ ซึ่งจะได้ความหนาในระดับนาโนเมตร ในงานวิจัยนี้จะเสนอกระบวนการเคลือบโลหะด้วยเทคนิคการสปัตเตอริง มีหลักการดังนี้

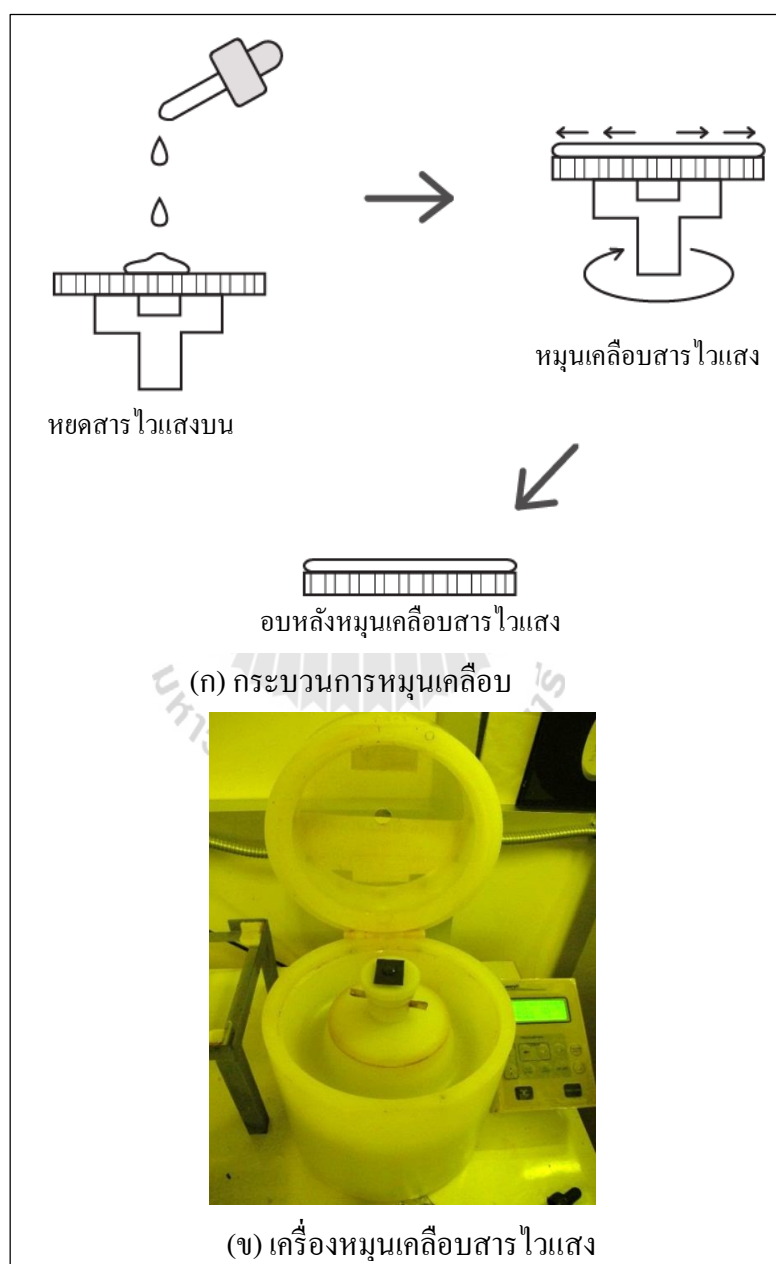
การสปัตเตอริง (Sputtering) อาศัยหลักการสร้างพลาสมาของแก๊สเฉื่อย Ar^+ และเหนี่ยวนำให้พุ่งเข้าชนโลหะเป้าหมาย (พิทยา ดิกกล้า, 2009) อะตอมของโลหะเป้าหมายจะกระเจิงออกมาเคลือบบนชิ้นงาน การสปัตเตอริงแบ่งออกเป็น 2 ชนิด การสร้างพลาสมาด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC sputtering) เหมาะสำหรับวัสดุเป้าหมายที่เป็นโลหะและการสร้างพลาสมาด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (RF sputtering) เหมาะสำหรับวัสดุเป้าหมายที่เป็นตัวนำหรือฉนวนดังรูปที่ 3.3 ระบบเคลือบวัสดุด้วยวิธีสปัตเตอริง



รูปที่ 3.3 เครื่องเคลือบโลหะแบบสปัตเตอริง

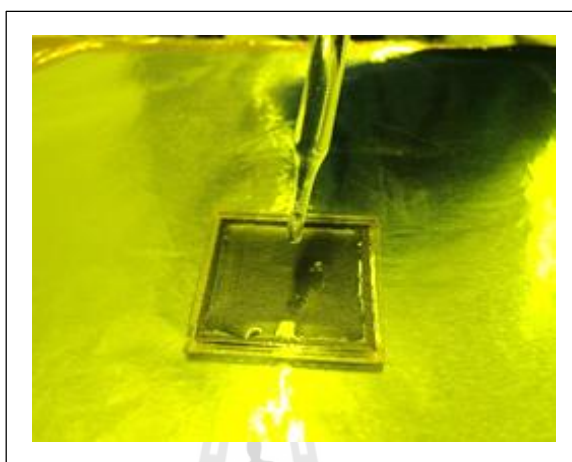
3.4 การเตรียมสารไวแสง

จากตัวอย่างของสารไวแสงซึ่งเป็นวัสดุสำหรับการสร้างลวดลายขึ้นงาน หรือสร้างเป็นแม่พิมพ์มีสองชนิดคือชนิดลบและชนิดบวก การเตรียมสารไวแสงสำหรับกระบวนการลิโธกราฟีสามารถเตรียมได้จากการหมวนเคลือบ การหยด หรือการหล่อจากผงสารไวแสง ในรูปที่ 3.4 เป็นขั้นตอนการหมวนเคลือบสารไวแสงชนิดลบ SU-8 และเครื่องเครื่องสำหรับหมวนเคลือบสารไวแสง



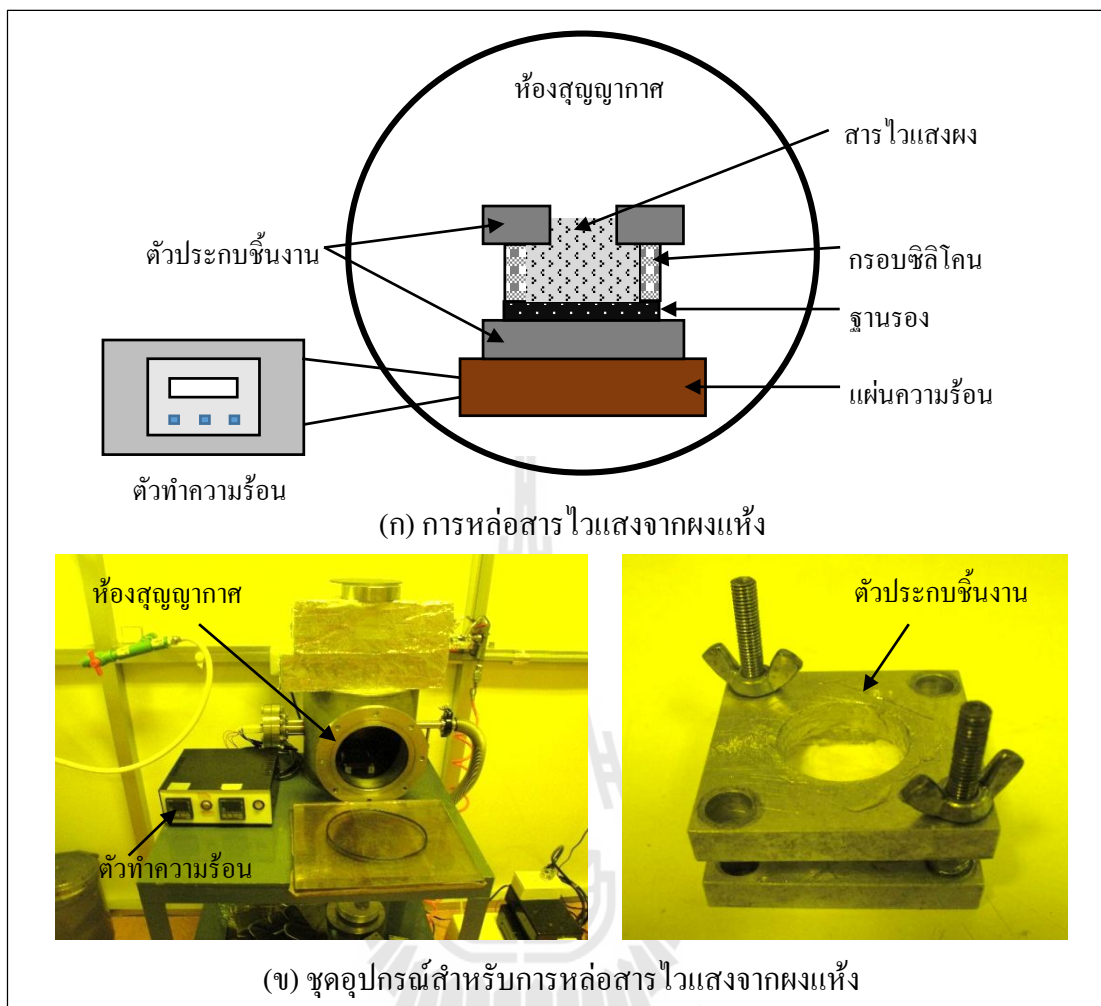
รูปที่ 3.4 การเตรียมสารไวแสงด้วยการหมวนเคลือบ

นอกจากการเตรียมสารไวแสงด้วยวิธีหมุนเคลือบแล้ว ยังสามารถใช้วิธีหยดสารไวแสงได้ด้วย ซึ่งวิธีนี้เป็นการนำสารไวแสงแบบเหลวมาหยดลงบนวัสดุที่ใช้เป็นฐานรอง ดังรูปที่ 3.5 ซึ่งข้อดีของวิธีการนี้คือการเตรียมสารไวแสงไม่ยุ่งยาก

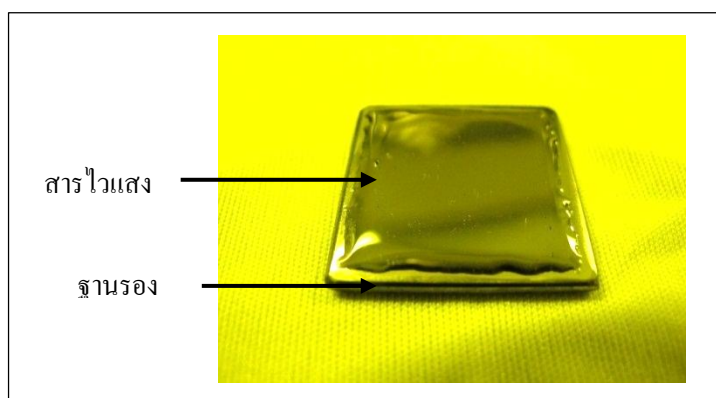


รูปที่ 3.5 การเตรียมสารไวแสงด้วยการหยด

วิธีการเตรียมสารไวแสงอีกวิธีหนึ่งคือ การหล่อสารไวแสงจากผงแห้ง ซึ่งสารไวแสงชนิดผงแห้งนี้ได้มาจากการนำสารไวแสงชนิดเหลวไปผ่านกระบวนการให้ความร้อนแล้วนำมาบดให้เป็นผง จากนั้นนำสารไวแสงผงไปผ่านความร้อนในห้องสุญญากาศ โดยรูปที่ 3.6 เป็นระบบการหล่อสารไวแสงผงเพื่อใช้เป็นวัสดุสำหรับสร้างลวดลายที่เน้นความสูงของโครงสร้างชิ้นงาน เหมาะกับกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์ และรูปที่ 3.7 คือชั้นของสารไวแสงหลังจากการหล่อผงแห้ง



รูปที่ 3.6 กระบวนการหลอ่สารไวแสงจากผงแห้งและอุปกรณ์

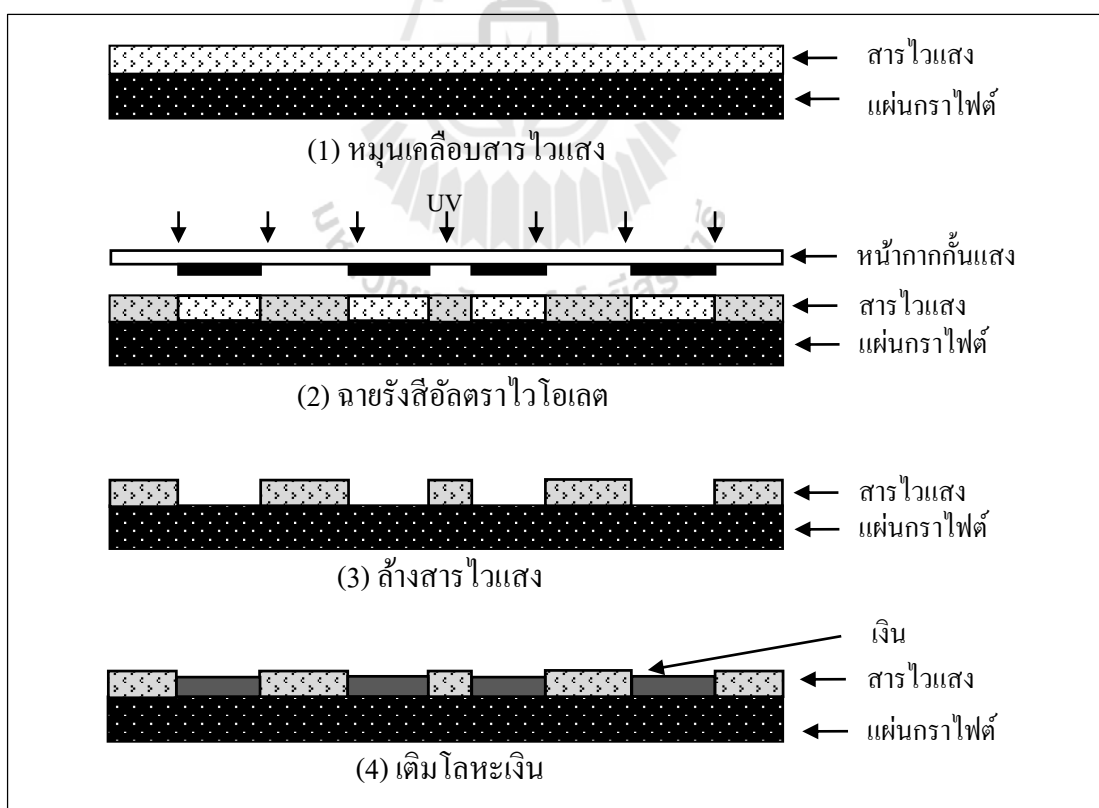


รูปที่ 3.7 ชั้นของสารไวแสงหลังจากการเตรียมสารไวแสง

3.5 การสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์

ในกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์นั้น สิ่งหนึ่งที่มีความสำคัญต่อกระบวนการอย่างมากคือ หน้ากากกันรังสีเอกซ์ (วินัย วันบุรี, 2007) ซึ่งทำหน้าที่เป็นลวดลายต้นแบบ ในกรณีการ ลิโธกราฟีด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต ลวดลายต้นแบบหรือหน้ากากกันแสงจะเป็นลวดลายที่อยู่ในรูปของหมึกที่บดแสงที่อยู่บนวัสดุโปร่งแสง อาจจะเป็นลวดลายบนแผ่นใสหรือบนกระจกก็ได้ แต่ในกรณีของหน้ากากกันรังสีเอกซ์นั้น ลวดลายจะต้องเป็นวัสดุที่สามารถดูดกลืนรังสีเอกซ์ได้ดี และอยู่บนวัสดุที่มีความโปร่งแสงได้ดีด้วยเช่นกัน ซึ่งวัสดุที่สามารถดูดกลืนรังสีเอกซ์ได้ดีนั้นก็ ได้แก่ ทองคำ เงิน อลูมิเนียม เป็นต้น การสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์มีขั้นตอนดังต่อไปนี้ รูปที่ 3.8

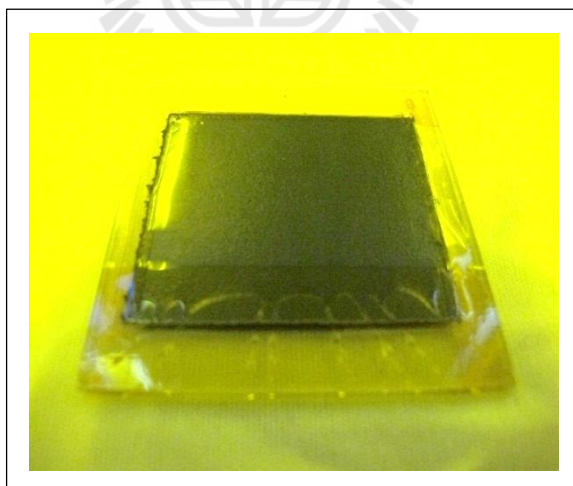
1. หมุนเคลือบสารไวแสงลงบนแผ่นกราฟไฟต์ (Graphite) ที่ทำความสะอาดแล้ว
2. ฉายรังสีอัลตราไวโอเล็ตผ่านหน้ากากกันรังสีเพื่อให้เนื้อสารไวแสงบริเวณที่ถูกแสงทำปฏิกิริยาและเกิดลวดลาย
3. ล้างสารไวแสงบริเวณที่ไม่แข็งตัวทิ้ง
4. ชุบโลหะเงินเพื่อเป็นวัสดุดูดซับรังสีเอกซ์ด้วยไฟฟ้า



รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์

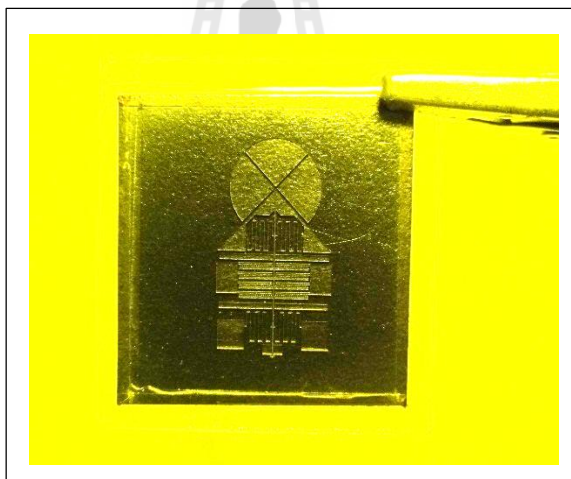
การสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำไปสร้างลวดลายของอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงให้สามารถขึ้นรูปด้วยสารไวแสงชนิดลบ SU-8 ที่มีอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างมาก ๆ ได้ โดยงานวิจัยนี้หน้ากากกั้นรังสีเอกซ์จะถูกสร้างขึ้นจากสารไวแสงชนิดลบ SU-8 ซึ่งจะอยู่บนฐานรองกราฟไฟต์และมีวัสดุสำหรับดูดกลืนรังสีเอกซ์เป็นโลหะเงิน

การสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์สำหรับสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงนั้น สามารถแสดงให้เห็นถึงขั้นตอนและผลการสร้างอย่างละเอียดได้ดังนี้ เริ่มจากยึดแผ่นกราฟไฟต์กับกระจกด้วยเทปกั้นความร้อน (PI tape) แล้วทำความสะอาดแผ่นกราฟไฟต์โดยการเช็ดด้วยสำลีชุบไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (Isopropyl alcohol) แล้วเช็ดด้วยสำลีอีกครั้ง หลังจากนั้นเป่าด้วยแก๊สไนโตรเจน แล้วนำไปวางบนแผ่นความร้อน (Hot plate) ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เพื่อไล่ความชื้น ต่อจากนั้นทำการเคลือบสารไวแสงชนิดลบ SU-8 เบอร์ 3050 ลงบนฐานรองกราฟไฟต์ดังกล่าว ด้วยเครื่องหมุนเคลือบ Laurell รุ่น WS-400B-6NPP/LIT ที่ความเร็ว 500 rpm เป็นเวลา 5 วินาที แล้วหมุนต่อเนื่องอีกด้วยความเร็ว 2000 rpm เป็นเวลา 30 วินาที ซึ่งจะได้ความหนาประมาณ 60 μm จากนั้นนำไปวางบนแผ่นความร้อนที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เสร็จแล้วปิดสวิตซ์แผ่นความร้อนแล้วปล่อยให้เย็นลงจนถึงอุณหภูมิห้องที่ประมาณ 26.6 องศาเซลเซียส อีก 1 ชั่วโมง จะได้ฐานรองสำหรับสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์ ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ฐานรองสำหรับสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์

หลังจากหมุนเคลือบสารไวแสงบนแผ่นกราฟต์เรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อมาคือการฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตจากเครื่อง Quintel Q4000 ที่ความเข้มแสง 19.75 mw/cm^3 ผ่านหน้ากากกันแสงที่อยู่ในรูปหมึกทึบแสง เป็นเวลา 15 วินาที ซึ่งจะได้พลังงานสะสมตกกระทบเนื้อสารไวแสงเท่ากับ 296.25 mJ/cm^2 จากนั้นนำมาวางบนแผ่นความร้อนที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้สารไวแสงบริเวณที่ทำปฏิกิริยากับแสงแข็งตัว จากนั้นจึงปิดสวิตช์แผ่นความร้อนแล้วปล่อยให้ชิ้นงานให้ค่อย ๆ เย็นตัวลง ต่อจากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ไปแช่สารละลาย SU-8 developer เป็นเวลา 15 นาที เพื่อให้สารไวแสงบริเวณที่ไม่แข็งตัวหลุดออก จากนั้นฉีดล้างชิ้นงานด้วยไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์เพื่อตรวจสอบสารไวแสงที่ยังตกค้างอยู่ ซึ่งหากมีสารไวแสงตกค้างก็จะเกิดคราบขาวขึ้นก็ให้นำไปแช่ในสารละลาย SU-8 developer ต่อจนกว่าสารไวแสงที่ตกค้างจะออกจนหมด จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้มาเป่าด้วยแก๊สไนโตรเจนเบา ๆ จนแห้ง ก็จะได้ชิ้นงานสำหรับนำไปเติมวัสดุชั้นรังสีเอกซ์ต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ลวดลายหลังฉายแสงของหน้ากากกันรังสีเอกซ์
สำหรับอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสง

เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการลิโทกราฟีแล้ว กระบวนการต่อมาคือการเติมวัสดุคูดซ์บรังสีเอกซ์ โดยการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าในสารละลายเงินสำเร็จรูป โดยใช้แท่งแพลทินัม (Platinum) ต่อกับแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าขั้วบวก (Anode) แล้วจุ่มลงไปนในสารละลายเงินที่เตรียมไว้ และให้ชิ้นงานที่ต้องการเติมโลหะต่อกับขั้วลบ (Cathode) แล้วจุ่มลงไปนในสารละลายเงินที่เตรียมไว้เช่นกัน แต่ก่อนจะจุ่มชิ้นงานลงไปนในสารละลายนั้นจะต้องนำชิ้นงานไปจุ่มในน้ำสะอาด (DI water) เพื่อให้ชิ้นงานสามารถนำไฟฟ้าได้ถ่วงถึงทั้งชิ้นเสียก่อน จากนั้นจ่ายกระแสไฟฟ้าด้วยความหนาแน่นกระแส

20 mA/cm² เป็นเวลา 10 นาที แล้วลดความหนาแน่นกระแสลงจนเหลือ 10 mA/cm² และทำการชุบโลหะต่อเนื่องไปอีกเป็นเวลา 5 ชั่วโมง จากนั้นให้ปรับลดกระแสไฟฟ้าลงจนเหลือ 0 mA ต่อจากนั้นนำชิ้นงานออกจากสารละลายแล้วจุ่มล้างด้วยน้ำสะอาด แล้วจึงเป่าชิ้นงานให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน จากนั้นนำชิ้นงานดังกล่าวไปวัดความหนาของโลหะเงินด้วยเครื่อง veeco WYKO NT1100 ซึ่งจากกระบวนการดังกล่าวจะทำให้ได้หน้ากากกั้นรังสีเอกซ์ที่มีความหนาของโลหะเงินอยู่ที่ 40 μm ดังรูปที่ 3.11



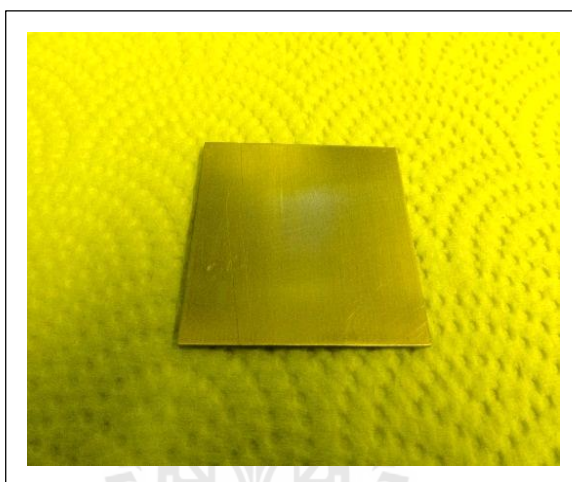
รูปที่ 3.11 หน้ากากกั้นรังสีเอกซ์สำหรับอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสง

หลังจากได้หน้ากากกั้นรังสีเอกซ์แล้ว ขั้นตอนต่อไปคือนำหน้ากากเหล่านี้ไปใช้ในกระบวนการลิโทกราฟีด้วยรังสีเอกซ์ เพื่อเป็นลวดลายต้นแบบสำหรับขึ้นรูปโครงสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสง ซึ่งจะกล่าวถึงกระบวนการสร้างอย่างละเอียดในบทที่ 5 ต่อไป

3.6 การสร้างลวดลายบนแผ่นวงจรพิมพ์

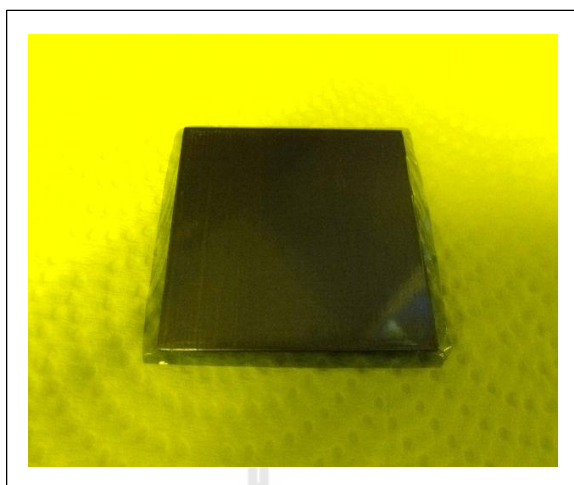
การสร้างลวดลายบนแผ่นวงจรพิมพ์ (PCB) สำหรับใช้เป็นฐานรองโครงสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เชิงแสงมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ตัดแผ่นวงจรพิมพ์ขนาด 2x2 นิ้ว จากนั้นใช้กระดาษทรายละเอียดเบอร์ 800 ขัดผิวหน้าแผ่นวงจรพิมพ์บริเวณที่เป็นทองแดงจนใส แล้วนำไปล้างด้วยน้ำสะอาดหลังจากนั้นเป่าด้วยแก๊สไนโตรเจนจนแห้ง จะได้แผ่นวงจรพิมพ์ดังรูปที่ 3.12



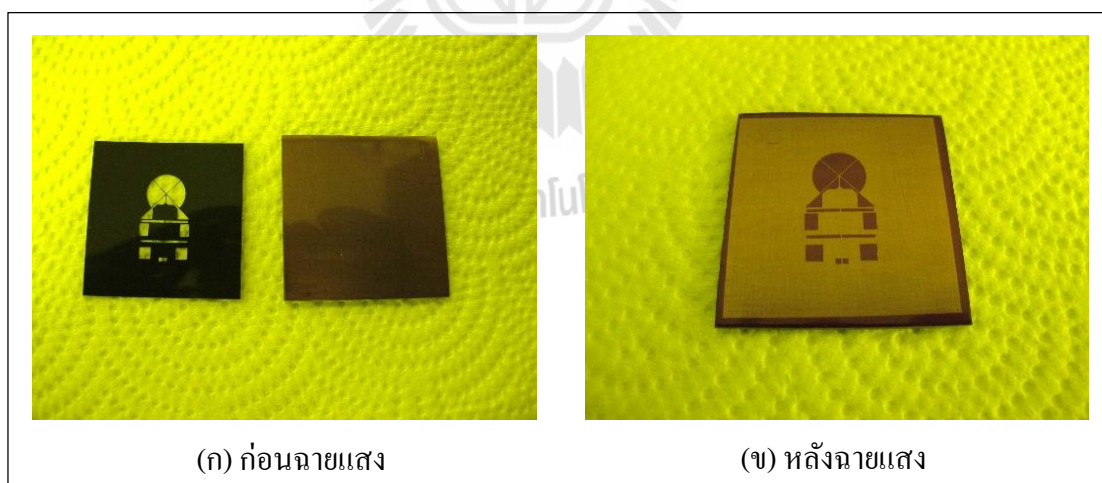
รูปที่ 3.12 แผ่นวงจรพิมพ์

2. ตัดฟิล์มไวแสง (Dry film) ให้ใหญ่กว่าแผ่นวงจรพิมพ์เล็กน้อย จากนั้นลอกแผ่นพลาสติก (Cover sheet) ที่ติดอยู่ด้านในแผ่นฟิล์มไวแสงออก แล้วนำฟิล์มไวแสงดังกล่าวไปติดกับแผ่นวงจรพิมพ์ที่เตรียมไว้ โดยการนำไปรีดด้วยเครื่องรีดแผ่นใสที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส จนไม่มีฟองอากาศ ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ติดแผ่นฟิล์มไวแสงบนแผ่นวงจรพิมพ์

3. ฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตลงบนฟิล์มไวแสงผ่านหน้ากากกันแสงหมึกที่บดด้วยเครื่องฉายแสงหลอดอัลตราไวโอเล็ตเป็นเวลา 2 นาที จากนั้นลอกแผ่นพลาสติกที่ติดอยู่อีกด้านของแผ่นฟิล์มไวแสงออก ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 ฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตบนฟิล์มไวแสง

4. ผสมน้ำยาล้างฟิล์มไวแสงโดยใช้ผงดีเวลอปเปอร์ (Developer) 1 กรัม ต่อน้ำสะอาด 100 มิลลิลิตร คนจนผงดีเวลอปเปอร์ละลาย จากนั้นนำแผ่นวงจรพิมพ์ที่ผ่านการฉายแสงแล้วลงไปแช่ในน้ำยาล้างฟิล์มไวแสงที่เตรียมไว้ โดยในขณะที่แช่ให้ใช้ฟองน้ำถูบผิวหน้าแผ่นวงจรพิมพ์เบา ๆ จนกระทั่งเห็นลวดลายเด่นชัด ไม่มีส่วนของฟิล์มไวแสงที่ไม่ต้องการตกค้างอยู่ หลังจากนั้นนำมาล้างน้ำสะอาดแล้วเป่าด้วยแก๊สไนโตรเจนจนแห้ง

5. นำแผ่นวงจรพิมพ์ที่ได้จากข้อ 4 ไปแช่ในน้ำยากัดทองแดงและเขย่าภาชนะไปมาเบา ๆ พร้อมทั้งตรวจสอบว่าพื้นผิวทองแดงในส่วนที่ไม่ต้องการถูกกัดออกจนหมดแล้ว จากนั้นนำไปล้างด้วยน้ำสะอาด เสร็จแล้วจึงใช้กระดาษทรายละเอียดเบอร์ 1200 ขัดฟิล์มไวแสงที่ปกคลุมลายเส้นออกจนเห็นลายเส้นที่เป็นทองแดงอย่างชัดเจน แล้วจึงล้างด้วยน้ำสะอาดอีกครั้งแล้วเป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน ก็จะได้ฐานรองสำหรับ โครงสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 ฐานรองอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสง

หลังจากได้ฐานรองจากแผ่นวงจรพิมพ์แล้ว ขั้นตอนต่อไปก็นำแผ่นวงจรพิมพ์นี้ไปใช้เป็นฐานรองโครงสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสง ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดต่าง ๆ ในบทที่ 5 ต่อไป

บทที่ 4

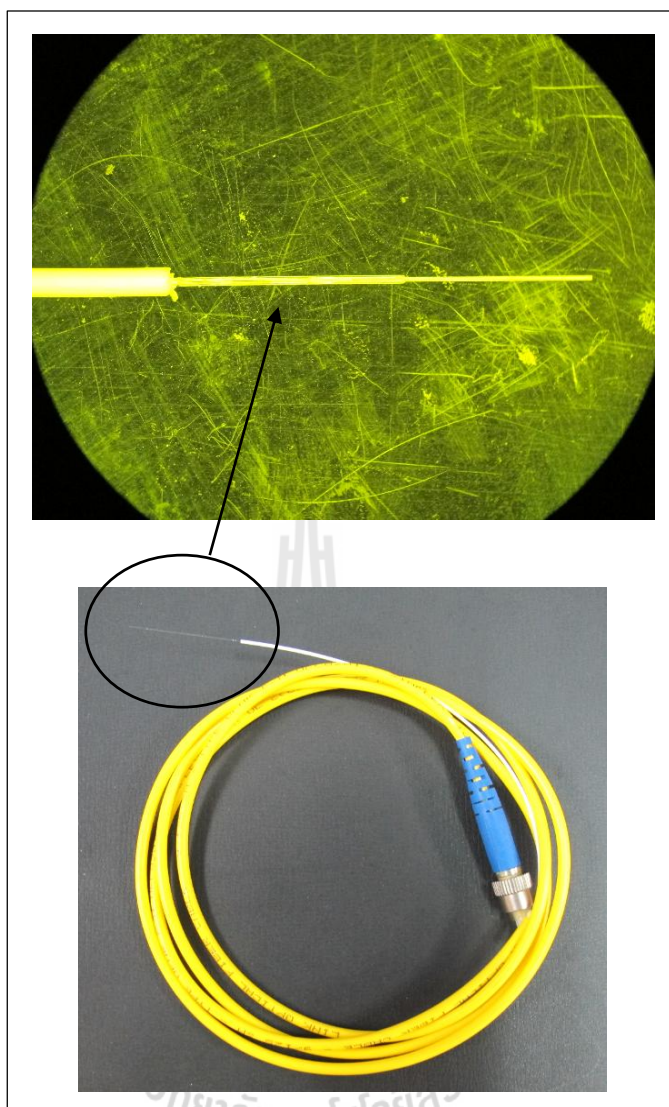
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model) เป็นสิ่งสำคัญสำหรับการออกแบบอุปกรณ์หรือเครื่องมือ เพื่อจำลองระบบการทำงานของอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นอีกทั้งยังมีประโยชน์ต่อการวิเคราะห์ผล การทดสอบและการควบคุมระบบอีกด้วย แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถหาได้จากทฤษฎีการวิเคราะห์ทฤษฎีซึ่งทำให้ได้มาซึ่งฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) จากนั้นนำฟังก์ชันถ่ายโอนดังกล่าวไปหาค่าพารามิเตอร์ของระบบด้วยการวัดพร้อมกับการนำผลที่ได้เปรียบเทียบกับผลการจำลองเพื่อทำการปรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ให้สอดคล้องกับระบบจริงต่อไป

การออกแบบอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงในงานวิจัยนี้จะเริ่มต้นจากการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและโครงสร้างที่เหมาะสมจากงานวิจัยต่าง ๆ แล้วทำการปรับปรุงขนาดโครงสร้างตลอดจนกระบวนการสร้างให้เหมาะสมกับอุปกรณ์และเครื่องมือที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการ

4.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับสายใยแก้วนำแสง

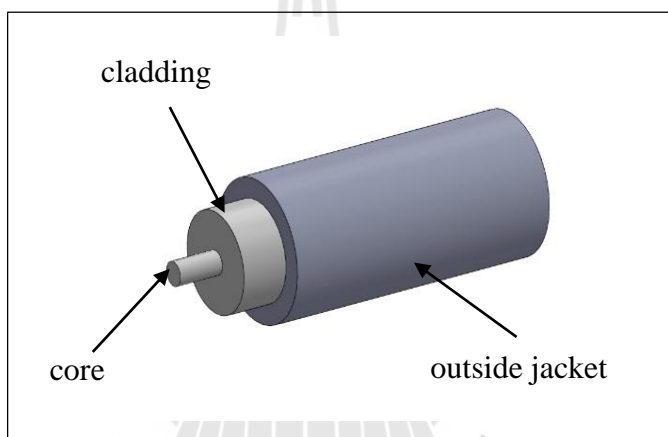
สายใยแก้วนำแสง (Optical fibers) คือ สายนำสัญญาณข้อมูลที่ใช้หลักการทางแสง กล่าวคือ ใช้กับสัญญาณข้อมูลที่อยู่ในรูปของคลื่นแสงเท่านั้น ตัวแก้วนำแสงอาจทำจากแก้วหรือพลาสติก โดยสัญญาณข้อมูลจะถูกเปลี่ยนเป็นคลื่นแสงแล้วส่งให้เดินทางสะท้อนภายในสายใยแก้วเรื่อยไปจนถึงผู้รับที่ปลายทาง สายใยแก้วนำแสงมีคุณสมบัติที่ดีกว่าสายทั่วไปหลายประการ เช่น มีขนาดเล็กส่งผ่านข้อมูลได้ครั้งละมาก ๆ สัญญาณข้อมูลมีโอกาสดูดทอนน้อยมาก ทำให้การสื่อสารมีประสิทธิภาพและมีความปลอดภัย ส่วนข้อจำกัดคือเมื่อสายใยแก้วขาดหรือแตกหักจำเป็นต้องอาศัยอุปกรณ์พิเศษในการซ่อมแซม ซึ่งยุ่งยากและมีค่าใช้จ่ายสูงกว่าแบบอื่น ลักษณะของสายใยแก้วนำแสงแสดงดังรูปที่ 4.1



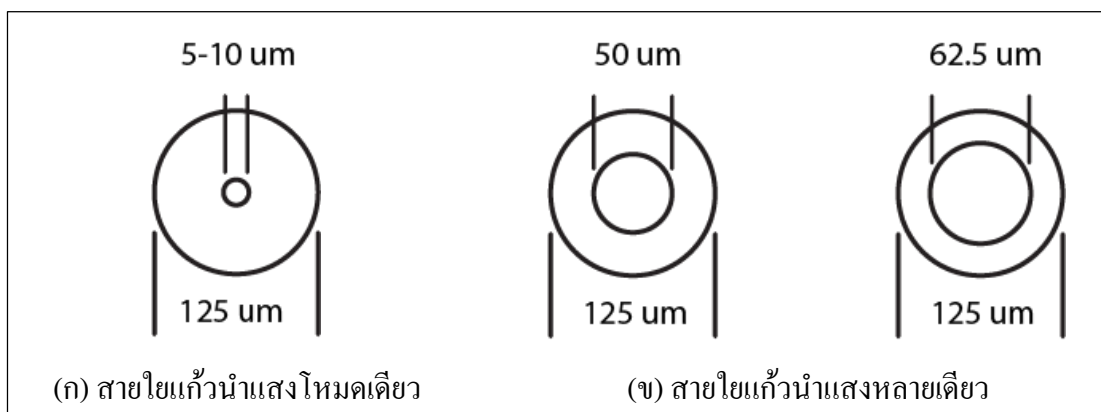
รูปที่ 4.1 สายใยแก้วนำแสง

4.1.1 โครงสร้างของสายใยแก้วนำแสง

สายใยแก้วนำแสงประกอบด้วยส่วนที่สำคัญด้วยกัน 3 ส่วน ดังรูปที่ 4.2 ได้แก่ ส่วนที่แสงเดินทางผ่านเรียกว่า core, ส่วนที่หุ้ม core อยู่เรียกว่า cladding ซึ่งทั้ง core และ cladding มีคุณสมบัติเป็น dielectric ใส 2 ชนิด (dielectric หมายถึงสารที่ไม่เป็นตัวนำไฟฟ้า เช่น แก้ว พลาสติก) ซึ่งการที่แสงจะเดินทางไปใน core ได้นั้นจะต้องทำให้ค่าดัชนีการหักเหของ cladding มีค่าน้อยกว่าค่าดัชนีการหักเหของ core เล็กน้อยประมาณ 2~3% และอาศัยปรากฏการณ์สะท้อนกลับหมดของแสงจึงจะสามารถทำให้แสงที่ป้อนเข้าไปใน core เดินทางไปได้ และส่วนสุดท้ายคือ buffer coating ทำหน้าที่ป้องกันส่วน core และ cladding ในปัจจุบันขนาดของสายใยแก้วนำแสงที่ใช้อยู่ได้แก่ 9/125 50/125 และ 62.5/125 ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.2 ส่วนประกอบของสายใยแก้วนำแสง



รูปที่ 4.3 ขนาดของสายใยแก้วนำแสง

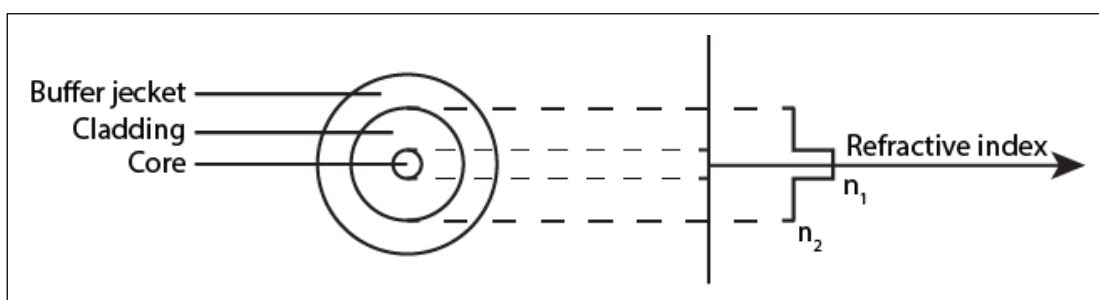
4.1.2 ชนิดของสายใยแก้วนำแสง

สายใยแก้วนำแสงสามารถแบ่งแยกได้ตามคุณสมบัติของตัวนำแสง ว่ามีลักษณะการส่งทะลุผ่านของแสงเป็นแบบใด โดยสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบคือ แบบโหมดเดียว และแบบหลายโหมด

4.1.2.1 สายใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียว (Single mode optical fibers)

สายใยแก้วนำแสงชนิดนี้สามารถที่จะสร้างให้มี index profile ได้ทั้งแบบ step index และ graded index แต่เนื่องจากการสร้างสายใยแก้วนำแสงแบบโหมดเดียวที่มี index profile แบบ graded index มีราคาแพงอีกทั้งคุณสมบัติที่ได้จากการมี index profile แบบ graded index ก็ไม่มีประโยชน์ต่อระบบการสื่อสารด้วย ดังนั้นในปัจจุบันสายใยแก้วนำแสงแบบโหมดเดียวที่สร้างขึ้นในเชิงพาณิชย์จึงมีแต่แบบ step index เท่านั้น

สายใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียวแบบ step index นี้เหมาะสำหรับงานที่ต้องการแบนด์วิดท์ (Bandwidth) กว้างและการส่งข้อมูลในระยะทางไกล (Long-Haul) โดยทั่วไปสายใยแก้วนำแสงชนิดนี้จะสร้างจากแก้วซิลิกา (Silica) เพื่อให้มีการลดทอนสัญญาณต่ำ ถึงแม้ว่าสายใยแก้วนำแสงแบบโหมดเดียวจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ core เล็ก แต่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ cladding ก็จะต้องมีขนาดใหญ่กว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ core อย่างน้อย 10 เท่า เพื่อหลีกเลี่ยงการสูญเสียจากการเลี้ยวเบนของสนามไฟฟ้าอย่างรวดเร็ว ดังนั้นเมื่อรวมขนาดของ buffer coating ด้วยแล้วขนาดโดยรวมของสายใยแก้วนำแสงแบบโหมดเดียวก็จะใกล้เคียงกับสายใยแก้วนำแสงชนิดอื่น โครงสร้างโดยทั่วไปของสายใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียวแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 โครงสร้างโดยทั่วไปของสายใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียว

ตารางที่ 4.1 โครงสร้างของสายใยแก้วนำแสงชนิดโหมคเดียว

โครงสร้าง	
เส้นผ่านศูนย์กลางของ core	5 ถึง 10 μm โดยปกติอยู่ที่ประมาณ 8.5 μm
เส้นผ่านศูนย์กลางของ cladding	โดยทั่วไปมีขนาด 125 μm
เส้นผ่านศูนย์กลาง buffer coating	250 ถึง 1000 μm
Numerical Aperture	0.08 ถึง 0.15 โดยทั่วไปมีค่าประมาณ 0.1

ตารางที่ 4.2 คุณลักษณะเฉพาะของสายใยแก้วนำแสงชนิดโหมคเดียว

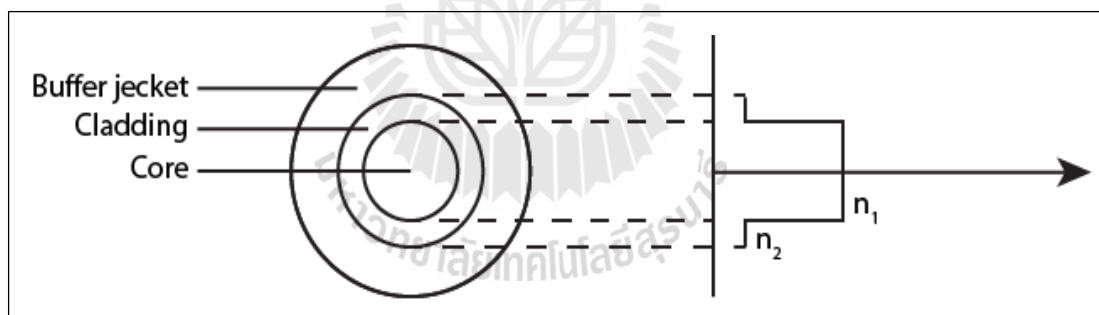
คุณลักษณะทางประสิทธิภาพ	
การลดทอนสัญญาณ	2 ถึง 5 dB/km โดยที่ความยาวคลื่น 850 nm จะมีการลดทอนประมาณ 1 dB/km และมีการลดทอนโดยเฉลี่ย 0.35 และ 0.21 dB/km ที่ความยาวคลื่น 1310 nm และ 1550 nm ตามลำดับ
แบนด์วิดท์	มากกว่า 500 MHz·km ในทางทฤษฎีแบนด์วิดท์ จะถูกจำกัดโดยความยาวคลื่นและ material dispersion โดยจะมีค่าประมาณ 40 GHz ที่ความยาวคลื่น 850 nm ในทางปฏิบัติแล้วแบนด์วิดท์ ที่มากกว่า 10 GHz จะต้องใช้ความยาวคลื่น 1310 nm
การใช้งาน	เหมาะกับระบบที่ต้องการแบนด์วิดท์สูงและระยะทางไกลมาก โดยจะใช้ LD เป็นอุปกรณ์กำเนิดสัญญาณแสง

4.1.2.2 สายใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมด (Multi mode optic fibers)

สายใยแก้วนำแสงชนิดนี้ส่วนใหญ่จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ core ประมาณ 50 หรือ 62.5 μm และเมื่อรวมกับ cladding จะทำให้มีขนาดประมาณ 125 μm เนื่องจากขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของ core มีขนาดใหญ่ ดังนั้นแสงที่ตกกระทบบที่ด้านปลาย input ของสายจะมีมุมตกกระทบที่แตกต่างกันหลายค่า และจากหลักการสะท้อนกลับหมดของแสงที่เกิดขึ้นภายในส่วนของ core ทำให้มีแนวของลำแสงเกิดขึ้นหลายโหมด โดยแต่ละโหมดใช้ระยะเวลาในการเดินทางที่แตกต่างกัน อันเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการแตกกระจายของแสง (Mode dispersion) สายใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมดมี 2 แบบได้แก่ Step index และ Grade index

1. สายใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมดแบบ Step index

สายใยแก้วนำแสงชนิดนี้อาจจะสร้างจากแก้วหลาย ๆ ชนิดปนกันหรือแก้วซิลิกาก็ได้ โดยจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางของ core ขนาดใหญ่เพื่อประสิทธิภาพในการเชื่อมต่อ (Coupling) สัมพันธ์กับแหล่งกำเนิดแสงแบบ Incoherent เช่น LED คุณลักษณะทางประสิทธิภาพของสายใยแก้วนำแสงชนิดนี้จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามสารที่ใช้สร้างและกระบวนการในการเตรียมสาร ซึ่งโครงสร้างโดยทั่วไปของสายใยแก้วนำแสงชนิดนี้แสดงให้ดูดังรูปที่ 4.5



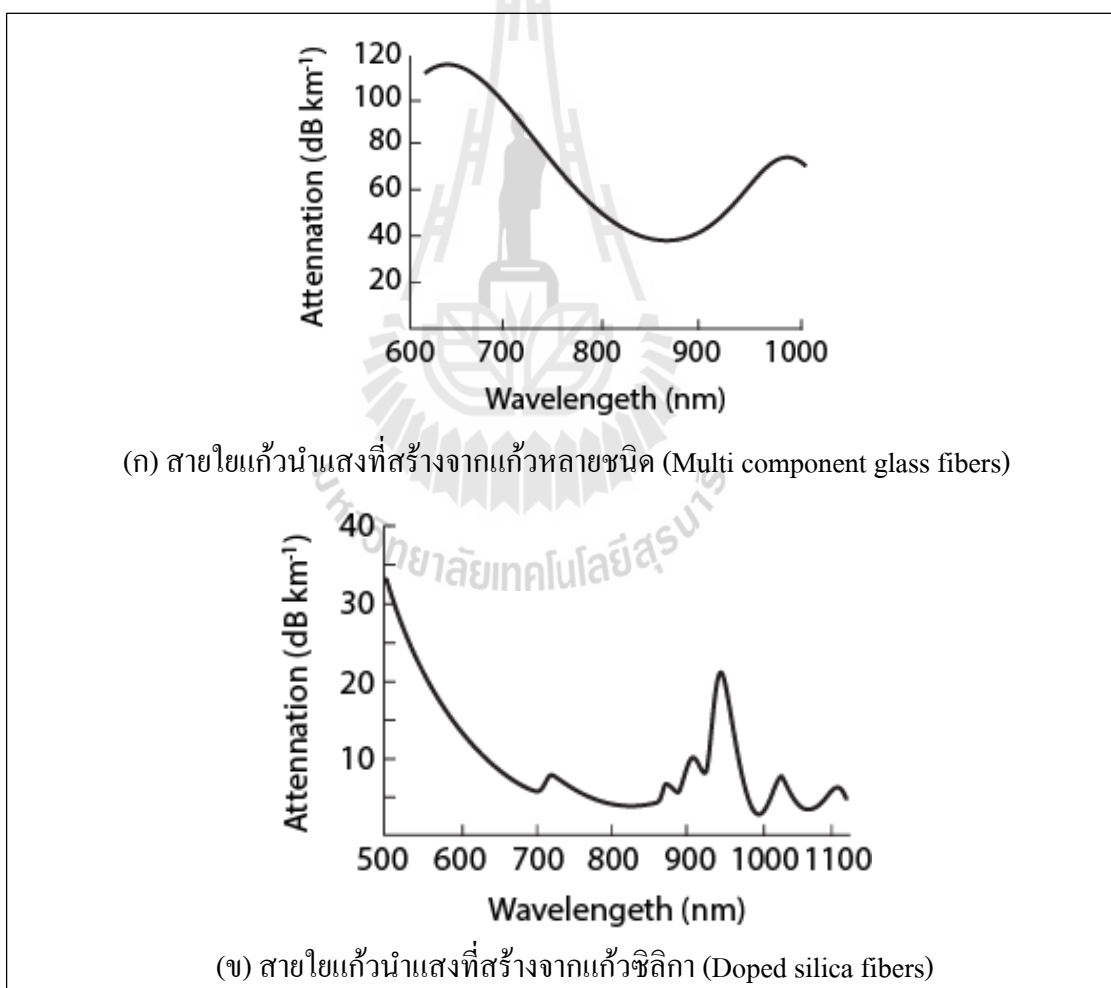
รูปที่ 4.5 โครงสร้างโดยทั่วไปของสายใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมดแบบ Step index

ตารางที่ 4.3 โครงสร้างของสายใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมดแบบ Step index

โครงสร้าง	
เส้นผ่านศูนย์กลางของ core	50 ถึง 400 μm สร้างของเส้นใยแสง
เส้นผ่านศูนย์กลางของ clad	125 ถึง 500 μm
เส้นผ่านศูนย์กลางของ buffer coating	250 ถึง 1000 μm
Numerical Aperture	0.16 ถึง 0.5

ตารางที่ 4.4 คุณลักษณะเฉพาะของสายใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมดแบบ Step index

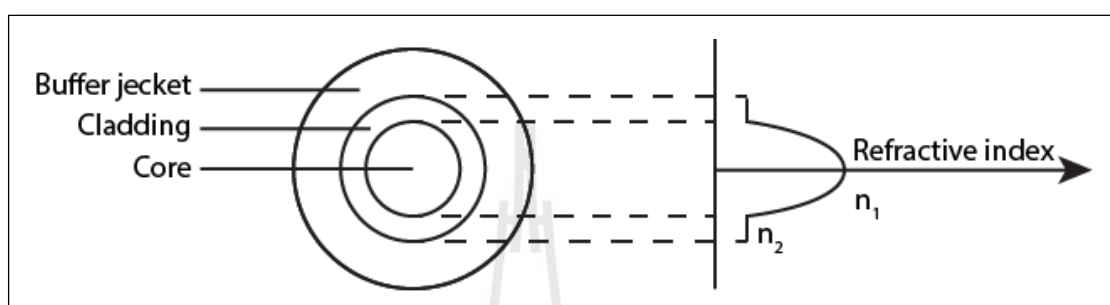
คุณลักษณะทางประสิทธิภาพ	
การลดทอนสัญญาณ	2.6 ถึง 50 dB/km ที่ความยาวคลื่น 850 nm ถูกจำกัดโดยการดูดกลืนและการกระจาย ส่วนการลดทอนที่ความยาวคลื่นอื่นแสดงให้ดูจากรูปที่ 4.6
แบนด์วิดท์	6 ถึง 50 MHz·km
การใช้งาน	เหมาะที่สุดสำหรับใช้ในโครงข่ายแบบ Short-Haul ที่มีแบนด์วิดท์จำกัด และใช้กับงานที่ราคาไม่สูง



รูปที่ 4.6 สเปกตรัมการลดทอนสัญญาณของสายใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมดแบบ Step index

2. สายใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมดแบบ Graded index

สร้างจากแก้วหลายชนิดปนกันหรือแก้วซิลิกาก็ได้เช่นเดียวกับชนิดหลายโหมดแบบ Step index แต่จะแตกต่างกันตรงสารที่นำมาใช้จะต้องมีความบริสุทธิ์มากกว่าเพื่อลดการสูญเสียที่จะเกิดขึ้น จึงทำให้สายใยแก้วนำแสงชนิดนี้มีประสิทธิภาพดีกว่าสายใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมดแบบ Step index โครงสร้างโดยทั่วไปของสายชนิดนี้แสดงให้ดูดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 โครงสร้างโดยทั่วไปของสายใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมดแบบ Graded index

ตารางที่ 4.5 โครงสร้างของสายใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมดแบบ Graded index

โครงสร้าง	
เส้นผ่านศูนย์กลางของ core	30 ถึง 100 μm
เส้นผ่านศูนย์กลางของ clad	100 ถึง 150 μm
เส้นผ่านศูนย์กลางของ buffer coating	250 ถึง 1000 μm
Numerical Aperture	0.2 ถึง 0.3

ตารางที่ 4.6 คุณลักษณะเฉพาะของสายใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมดแบบ Graded index

คุณลักษณะทางประสิทธิภาพ	
การลดทอนสัญญาณ	2 ถึง 10 dB/km ที่ความยาวคลื่น 850 nm ถูกจำกัดโดยการกระจาย ส่วนการลดทอนสัญญาณ โดยเฉลี่ยที่ความยาวคลื่น 1310 nm มีค่าเท่ากับ 0.4 และ 0.25 dB/km ตามลำดับ
แบนด์วิธ	300 MHz·km ถึง 3 GHz·km
การใช้งาน	เหมาะสมที่สุดสำหรับใช้ใน โครงข่ายแบบ Medium-Haul ที่มีแบนด์วิธปานกลางถึงสูง ซึ่งใช้ LED หรือ LD เป็นอุปกรณ์กำเนิดสัญญาณแสง

4.1.3 หัวเชื่อมต่อ (Connector)

การเชื่อมต่อสายใยแก้วนำแสงสามารถทำได้โดยการใช้หัวเชื่อมต่อแบบสำเร็จรูป ซึ่งจะทำให้มีความสะดวกในการถอดได้ตามความจำเป็น หัวเชื่อมต่อสำหรับสายใยแก้วนำแสงมีหลายชนิด ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 คุณสมบัติของหัวเชื่อมต่อชนิดต่าง ๆ

Connector	Insertion Loss	Repeatability	Fiber Type	Application
FC Connector	0.50-1.00 dB	0.20 dB	Single Mode (SM) Multi Mode (MM)	Datacom, Telecom
ST Connector	0.40 dB (SM) 0.50 dB (MM)	0.40 dB (SM) 0.20 dB (MM)	Single Mode (SM) Multi Mode (MM)	Inter-Building, Intra-Building, Security, Navy
SC Connector	0.20-0.45 dB	0.10 dB	Single Mode (SM) Multi Mode (MM)	Datacom
LC Connector	0.15 dB (SM) 0.10 dB (MM)	0.20 dB	Single Mode (SM) Multi Mode (MM)	High Density Interconnection
FDDI Connector	0.20-0.70 dB	0.20 dB	Single Mode (SM) Multi Mode (MM)	Fiber Optic Network

1. หัวต่อแบบเอฟซี (FC Connector)

หัวต่อชนิดนี้ได้รับการออกแบบโดยบริษัท เอ็นทีที (NTT) แห่งญี่ปุ่น ได้รับความนิยมมากที่สุดในญี่ปุ่นรวมทั้งสหรัฐและยุโรป ส่วนมากหัวต่อแบบนี้จะถูกนำไปใช้งานทางด้านเครือข่ายโทรศัพท์เนื่องจากอาศัยการขันเกลียวเพื่อยึดติดกับหัวปรับ ข้อดีของหัวต่อประเภทนี้ ได้แก่ การเชื่อมต่อที่แน่นหนา แต่ข้อเสียคือการเข้าหัวสายเชื่อมต่ออาจต้องเสียเวลามาก

2. หัวต่อแบบเอสที (ST Connector)

หัวต่อชนิดนี้ออกแบบโดย AT&T สำหรับการเชื่อมต่อสายใยแก้วนำแสงภายในอาคารสำนักงาน เครือข่าย LAN หัวต่อแบบเอสทีเหมาะสำหรับงานที่ต้องการถอดเปลี่ยนหัวต่ออย่างรวดเร็ว ถูกนำมาใช้งานสำหรับสายใยแก้วนำแสงชนิดโหมคเดียวและชนิดหลายโหมคมากที่สุด โดยที่หัวต่อประเภทนี้มีอัตราการสูญเสียกำลังแสงเพียงแค่น้อยกว่า 0.5 dB เท่านั้น วิธีการเชื่อมต่อก็เพียงสอดเข้าไปที่รูหัวต่อแล้วบิดตัวเพื่อให้เกิดการล็อก จึงเพิ่มความทนทานทำให้ไม่เกิดปัญหาเนื่องจากการสั่นสะเทือน ปัจจุบันถูกนำมาใช้กับระบบ LAN ในอาคารสำนักงาน (Indoor fiber optic)

3. หัวต่อแบบเอสซี (SC Connector)

หัวต่อชนิดนี้ได้รับการออกแบบครั้งแรกโดยบริษัท เอ็นทีที (NTT) แห่งญี่ปุ่น หัวต่อชนิดนี้ใช้งานง่ายเพียงดันหัวต่อเข้าไปก็ใช้งานได้แล้ว หัวต่อชนิดนี้ได้ถูกออกแบบมาใช้แทนหัวต่อแบบเอฟซีในงานด้านสื่อสาร และหัวต่อเอสทีในงานด้านเครือข่ายคอมพิวเตอร์อีกด้วย จึงใช้งานได้หลากหลาย ข้อดีของหัวต่อชนิดนี้คือรูสอดของเส้นใยนำแสงมีขนาดพอดีกับความโตของเส้นใยนำแสง มีวิธีการผลิตที่ละเอียดอ่อนเที่ยงตรง การลดทอนสัญญาณเส้นใยนำแสงแบบโหมคเดียวมีค่าประมาณ 0.25 dB และอาจมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง 0-0.6 dB ขณะที่เอาหัวต่อเสียบต่อกัน หัวต่อแบบเอสซีเป็นของใหม่เพิ่งนำออกมาวางตลาดในอเมริกา มีใช้ประมาณ 1% ของที่ติดตั้งทั้งหมด แต่ขณะนี้ได้รับความนิยมมากขึ้นเนื่องจากใช้งานง่าย เป็นแบบถอดเข้าออกได้ และในขณะที่เอาหัวต่อกันก็ไม่ต้องหมุนหรือบิด แต่ใช้การเสียบต่อตรง ๆ นอกจากนี้หัวต่อแบบเอสซียังเป็นชนิดปรับแกนเส้นใยนำแสงได้ด้วย

4. หัวต่อแบบแอลซี (LC Connector)

หัวต่อแบบนี้เป็นหัวเชื่อมต่อที่ใช้งานง่าย สะดวก ราคาไม่แพง มีทั้งแบบโหมคเดียวและแบบหลายโหมค มักใช้ในการรับส่งข้อมูลที่มีความเร็วสูงมากเช่น GBIC, Gigabit Speed Fast Ethernet Converter หรือเชื่อมต่ออุปกรณ์ทางแสง (Optical module) ภายในองค์กร มีขนาดหน้าตัด 9/125

5. หัวต่อแบบเอฟดีดีไอ (FDDI Connector)

ออกแบบโดย American National Standards Institute (ANSI) สำหรับใช้งานบนเครือข่าย FDDI โดยเฉพาะ

4.2 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับตัวขับเคลื่อนไฟฟ้าสถิตและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

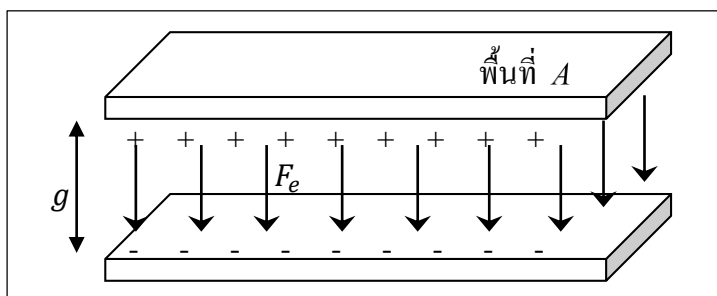
ปัจจุบันอุปกรณ์ที่เป็นระบบกลไฟฟ้าจุลภาคคือหนึ่งในอุปกรณ์ที่มีการเติบโตเร็วที่สุดในสายอุตสาหกรรม การประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ ได้เพิ่มมากขึ้นตลอดเวลา ซึ่งล้วนแล้วแต่เป็นชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์ที่มีความสำคัญและต้องการความแม่นยำในการทำงานสูง จึงได้มีการนำตัวขับเคลื่อนจุลภาค (Microactuator) ใช้ในการขับเคลื่อนโครงสร้างต่าง ๆ อย่างกว้างขวาง การกระตุ้นตัวขับเคลื่อนจุลภาคสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใช้ฟิล์มเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric films), การใช้หลักการในการขยายตัวของโลหะเนื่องจากอุณหภูมิ (Thermal expansion), การใช้หลักการของโลหะอัลลอยด์ที่คืนรูปได้ (Shape memory alloy) และการใช้หลักการของไฟฟ้าสถิต (Electrostatic forces) เป็นต้น

โครงสร้างพื้นฐานที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบเป็นอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงนั้น จะใช้โครงสร้างตัวขับเคลื่อนแบบไฟฟ้าสถิตที่อาศัยแรงทางไฟฟ้าสถิตในการขับเคลื่อนโครงสร้าง การที่จะหาแรงทางไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นนั้น จะเริ่มโดยอ้างอิงจากกฎของคูลอมบ์ (Coulomb's law) คือขนาดของแรงที่เกิดขึ้นแปรผันตรงกับผลคูณของประจุทั้งสอง และแปรผกผันกับกำลังสองของระยะห่างระหว่างประจุทั้งสอง, ประจุชนิดเดียวกันแรงที่เกิดขึ้นคือแรงผลัก ประจุต่างชนิดกันแรงที่เกิดขึ้นคือแรงดึงดูด และทิศของแรงอยู่ในแนวเส้นตรงที่เชื่อมระหว่างประจุทั้งสอง ดังนั้นแรงที่กระทำระหว่างประจุสองประจุในอากาศว่างจึงเป็นดังสมการดังสมการที่ 4.1

$$F_e = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon_0 \epsilon_r R^2} \quad (4.1)$$

โดยที่ F_e คือ แรงไฟฟ้าสถิต มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)
 Q_1, Q_2 คือ ประจุไฟฟ้าแบบจุด มีหน่วยเป็น คูลอมบ์ (C)
 R คือ ระยะทางระหว่างประจุ Q_1 และ Q_2
 ϵ_0 คือ ค่า permittivity ของสุญญากาศ มีค่าเท่ากับ 8.85×10^{-12} F/m
 ϵ_r คือ ค่า permittivity ของวัสดุฉนวนที่กั้นระหว่างขั้วทั้งสอง

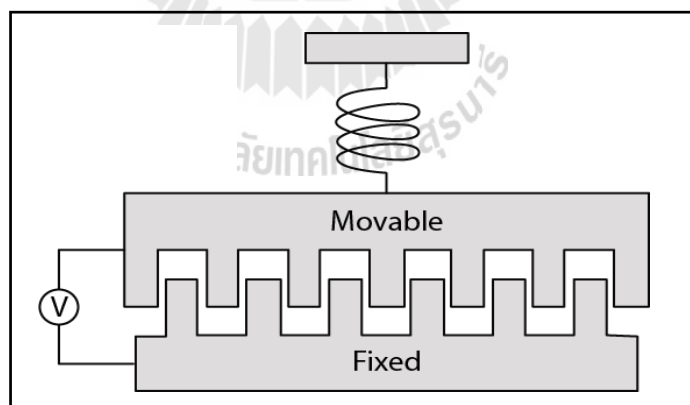
ในตัวขับเคลื่อนแบบไฟฟ้าสถิตนั้น แรงที่เกิดขึ้นจะอยู่ในลักษณะแรงไฟฟ้าสถิตของแผ่นตัวนำสองแผ่นวางขนานกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.8 โดยมีแผ่นตัวนำที่มีพื้นที่ A วางห่างกันสม่ำเสมอด้วยระยะทาง d และมีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์อยู่ระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสอง



รูปที่ 4.8 ลักษณะของแผ่นตัวนำคู่ขนาน

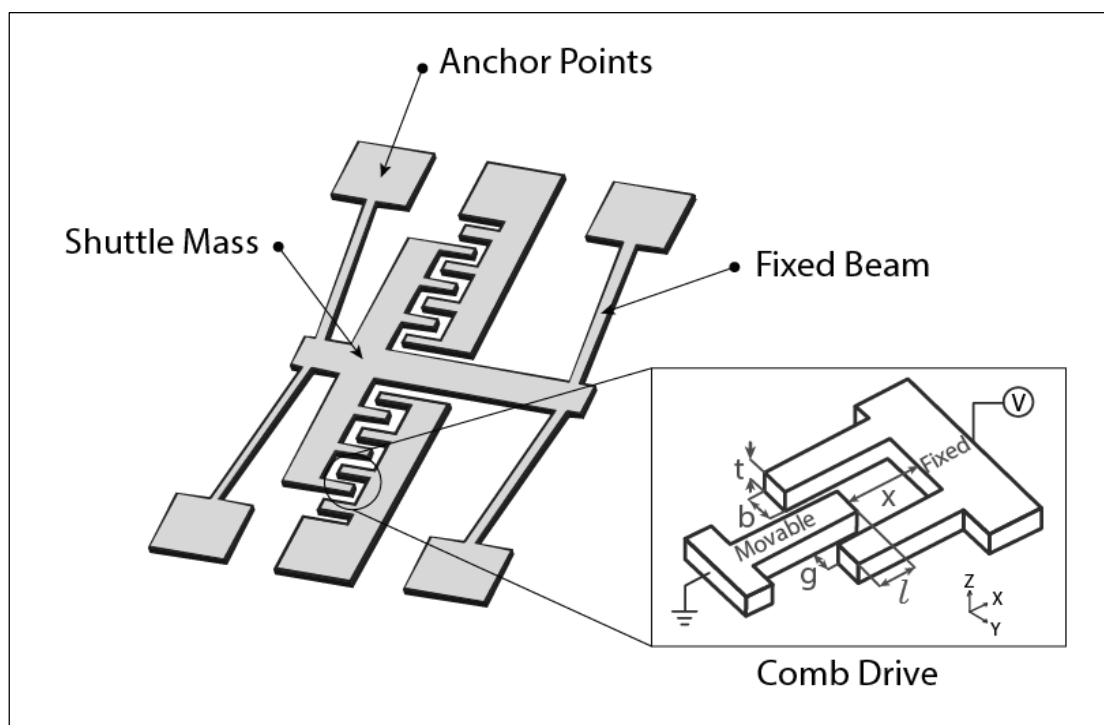
4.2.1 ตัวขับเคลื่อนทางไฟฟ้าสถิตแบบซี่หวี (Electrostatic comb-drive actuator)

ตัวขับเคลื่อนทางไฟฟ้าสถิตที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือ ตัวขับเคลื่อนแบบซี่หวี โครงสร้างจะประกอบไปด้วยซี่หวีหลายคู่ (Toshiki Hirano, 1992) ซึ่งแต่ละคู่ของซี่หวีจะอยู่ในลักษณะของแผ่นตัวนำคู่ขนาน มีส่วนประกอบหลัก 2 ส่วน คือส่วนที่อยู่กับที่และส่วนที่เคลื่อนที่ได้ โดยส่วนที่เคลื่อนที่นั้นจะมีสปริงติดอยู่ด้วย ดังรูปที่ 4.9 ลักษณะการขับเคลื่อนของตัวขับเคลื่อนแบบซี่หวีจะใช้หลักการของไฟฟ้าสถิต เมื่อมีการป้อนไฟฟ้าให้กับระบบ ส่วนที่เคลื่อนที่จะเคลื่อนเข้าหาส่วนคงที่ และเมื่อตัดไฟฟ้าออก สปริงจะทำหน้าที่ดึงส่วนที่เคลื่อนที่ได้กลับมายังจุดเดิม



รูปที่ 4.9 โครงสร้างของตัวขับเคลื่อนแบบซี่หวี

ตัวขับเคลื่อนทางไฟฟ้าสถิตแบบซีพวีจะสามารถทำงานได้เมื่อทำการป้อนแรงดันไฟฟ้าเข้ากับขั้วของส่วนที่อยู่กับที่ (Fixed) และต่อกราวด์เข้ากับขั้วของส่วนที่เคลื่อนที่ได้ (Movable) ซึ่งจะให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วทั้งสองและจะกลายเป็นประจุไฟฟ้า ทำให้เกิดแรงไฟฟ้าสถิตขึ้นในทิศทางแนวแกน x ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 โมเดลของตัวขับเคลื่อนแบบซีพวี

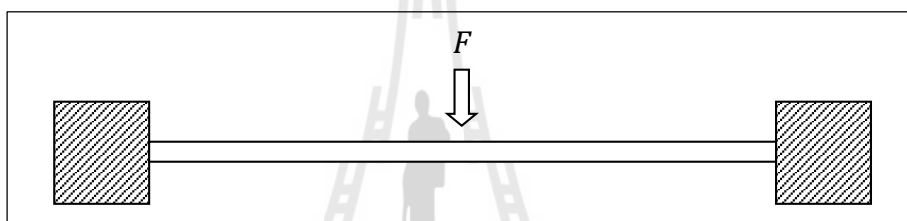
แรงไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นระหว่างซีพวีนั้น สามารถอธิบายได้ดังสมการที่ 4.2

$$F_e = \frac{1}{2} \cdot \frac{Nt\epsilon_0\epsilon_r V^2}{g} \quad (4.2)$$

โดยที่	F_e	คือ แรงไฟฟ้าสถิต มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)
	N	คือ จำนวนซี่ของตัวขับเคลื่อน
	t	คือ ความหนาของขั้วไฟฟ้า
	ϵ_0	คือ ค่า permittivity สัมบูรณ์ มีค่าคงที่เท่ากับ 8.85×10^{-12} F/m

- ϵ_r คือ ค่า permittivity ของวัสดุฉนวนที่กั้นระหว่างขั้วทั้งสอง
- V คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าขั้วเคลื่อน
- g คือ ขนาดระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองขั้ว

การเคลื่อนที่ของตัวขับเร็ว ในส่วนที่เคลื่อนที่ได้จะถูกทำให้ลอยอยู่ในอากาศโดยมีคานซึ่งทำหน้าที่ค้ำยันให้โครงสร้างลอยตัวได้ ทั้งยังทำหน้าที่เหมือนสปริงคอยดึงส่วนที่เคลื่อนที่ได้ให้กลับมายังตำแหน่งเริ่มต้นเมื่อหยุดการกระตุ้นตัวขับเร็ว พิจารณาส่วนของสปริงในโครงสร้าง จากรูปที่ 4.11 สปริงเป็นแบบ fixed-fixed beams และแรงที่กระทำกับสปริงจะอยู่บริเวณจุดกึ่งกลางคานพอดี



รูปที่ 4.11 ลักษณะแรงที่เกิดบนคานสปริงแบบ fixed-fixed beam

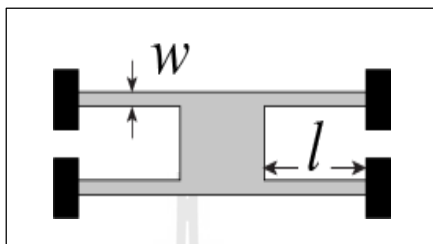
อ้างอิงจากกฎของฮุก (Hooke's law) ค่าแรงในการดึงกลับของสปริงสามารถคิดได้จากค่า stiffness ของคานที่ทำหน้าที่เป็นสปริงดังกล่าว และสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการได้ดังสมการที่ 4.3

$$F_s = k \cdot x \quad (4.3)$$

- โดยที่
- F_s คือ แรงปฏิกิริยาหรือแรงดึงกลับของสปริง มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)
- k คือ ค่าคงที่สปริง (spring stiffness)
- x คือ ระยะของการเคลื่อนที่

โดยคานที่ค้ำให้โครงสร้างลอยตัวอยู่บนอากาศนั้น ต้องมีความยืดหยุ่นมากพอที่จะทำให้โครงสร้างสามารถเคลื่อนที่ในทิศทางที่ต้องการได้ หากคานมีความยืดหยุ่นน้อยหรือแข็งมากไป จะยิ่งทำให้ต้องใช้แรงอย่างมากในการทำให้โครงสร้างนั้นเคลื่อนที่ และจะส่งผลให้ต้องป้อนแรงดัน

ให้กับตัวขับเร็วมากขึ้นอีกด้วย ดังนั้นการออกแบบลักษณะของคานสปริงดังกล่าวจึงมีความสำคัญ (Gabriel M. Rebeize, 2003) ในการออกแบบตัวขับเร็วแบบซีวีจะมีคานสปริงที่นิยมใช้อยู่ 3 แบบ ได้แก่ คานสปริงแบบ fixed-fixed beams ดังรูปที่ 4.12, คานสปริงแบบ folded beam ดังรูปที่ 4.13 และคานสปริงแบบ serpentine beam ดังรูปที่ 4.14

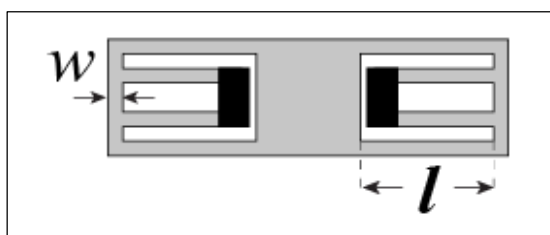


รูปที่ 4.12 คานสปริงแบบ fixed-fixed beams

ซึ่งสามารถหาค่าคงที่สปริงของคานแบบ fixed-fixed beams ได้จากสมการที่ 4.4

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

โดยที่	k	คือ ค่าคงที่สปริงมี หน่วยเป็น นิวตันต่อเมตร (N/m)
	E	คือ ค่าความยืดหยุ่นของวัสดุ (Young's modulus)
	w	คือ ความกว้างของสปริง
	t	คือ ความสูงของสปริง
	l	คือ ความยาวของสปริง

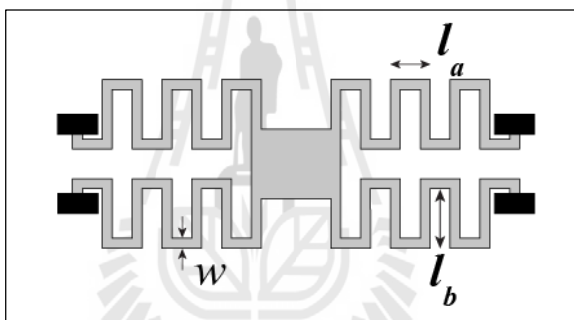


รูปที่ 4.13 คานสปริงแบบ folded beam

ซึ่งสามารถหาค่าคงที่สปริงของคานแบบ folded beam ได้จากสมการที่ 4.5

$$k \approx 2Ew\left(\frac{t}{l}\right)^3 \quad (4.5)$$

โดยที่	k	คือ ค่าคงที่สปริง หน่วยเป็น นิวตันต่อเมตร (N/m)
	E	คือ ค่าความยืดหยุ่นของวัสดุ (Young's modulus)
	w	คือ ความกว้างของสปริง
	t	คือ ความสูงของสปริง
	l	คือ ความยาวของสปริง



รูปที่ 4.14 คานสปริงแบบ serpentine beam

ซึ่งสามารถหาค่าคงที่สปริงของคานแบบ serpentine beam ได้จากสมการที่ 4.6

$$k \approx \frac{48GJ}{l_a^2 \left(\frac{GJ}{El_x} l_a + l_b \right) n^3} \quad (4.6)$$

โดยที่	k	คือ ค่าคงที่สปริง หน่วยเป็น นิวตันต่อเมตร (N/m)
	G	คือ ค่ามอดูลัสของการบิด (Torsion modulus)
	J	คือ ค่าคงที่ของการบิด (Torsion constant)
	l_a	คือ ความกว้างของสปริง

I_b	คือ ความยาวของสปริง
E	คือ ค่าความยืดหยุ่นของวัสดุ (Young's modulus)
I_x	คือ โมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of inertia) ของสปริง
n	คือ จำนวนขดของสปริง

โดยสามารถหาค่ามอดูลัสของการบิดได้จากสมการที่ 4.7

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (4.7)$$

โดยที่	E	คือ ค่าความยืดหยุ่นของวัสดุ (Young's modulus)
	ν	คือ ค่าอัตราส่วนของปัวซอง (Poisson's ratio)

สามารถหาโมเมนต์ความเฉื่อยของสปริงได้จากสมการที่ 4.8

$$I_x = \frac{wt^3}{12} \quad (4.8)$$

โดยที่	I_x	คือ โมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of inertia) ของสปริง
	w	คือ ความกว้างของสปริง
	t	คือ ความสูงของสปริง

และสามารถหาค่าคงที่ของการบิดได้จากสมการที่ 4.9

$$J = \frac{1}{3}t^3w \left(1 - \frac{192}{\pi^5} \frac{t}{w} \sum_{i=1, \text{odd}}^{\infty} \frac{1}{i^5} \tanh\left(\frac{i\pi w}{2t}\right) \right) \quad (4.9)$$

ในสภาพสมดุล แแรง F_e และแรง F_s จะมีค่าเท่ากัน ซึ่งการเคลื่อนที่ในแนวแกน x สามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ 4.10

$$x = \frac{F_s}{k_x}$$

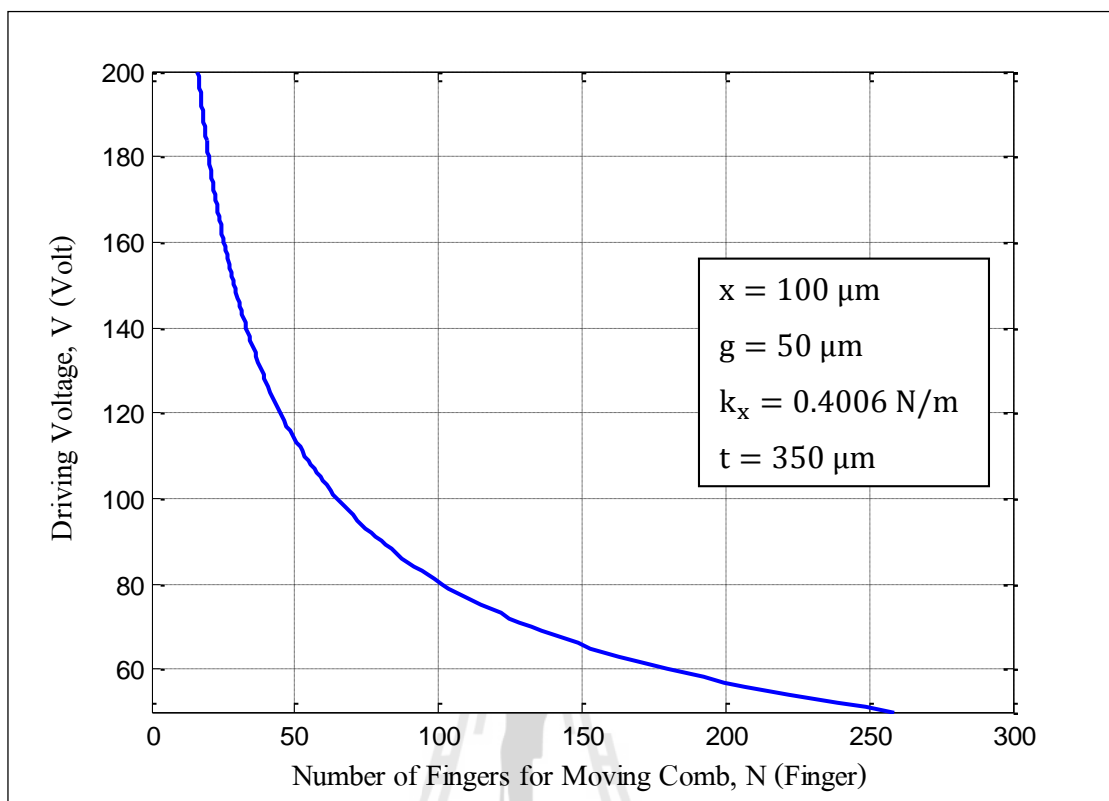
$$x = \frac{Nt\varepsilon_0\varepsilon_r V^2}{gk_x} \quad (4.10)$$

หรือสามารถหาแรงดันไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ป้อนให้ตัวขับเร้าได้จากสมการที่ 4.11

$$V^2 = \frac{xgk_x}{Nt\varepsilon_0\varepsilon_r} \quad (4.11)$$

โดยที่	V	คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าขับเคลื่อน มีหน่วยเป็น โวลต์ (V)
	x	คือ ระยะของการเคลื่อนที่
	g	คือ ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าสองขั้ว
	k_x	คือ ค่าคงที่สปริงที่จำนวนขดของสปริงเพิ่มขึ้นในแนวแกน x
	N	คือ จำนวนซี่ที่เคลื่อนที่ของตัวขับเร้า
	t	คือ ความสูงของขั้วไฟฟ้า
	ε_0	คือ ค่า permittivity สัมบูรณ์ มีค่าเท่ากับ 8.85×10^{-12} F/m
	ε_r	คือ ค่า permittivity ของวัสดุฉนวนที่กั้นระหว่างขั้วทั้งสอง

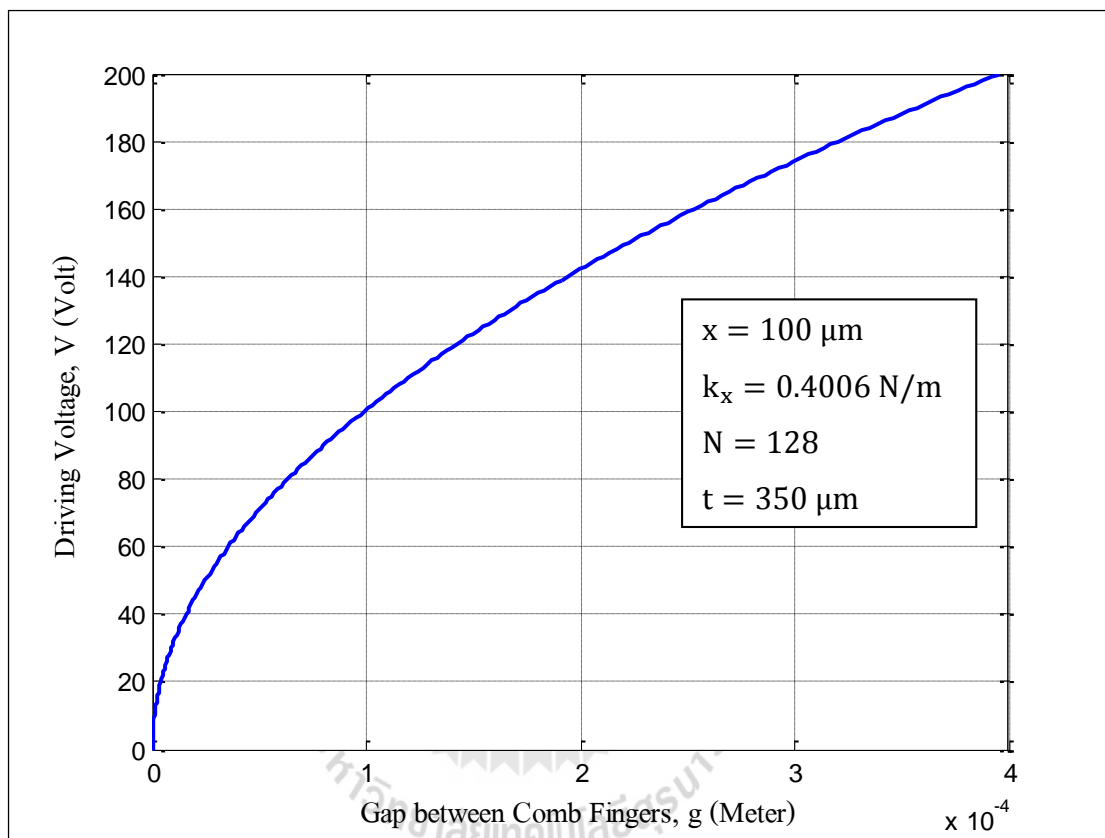
จากสมการที่ 4.11 ที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นว่าเมื่อออกแบบตัวขับเร้าทางไฟฟ้าสถิตให้เป็นตัวขับเร้าแบบซี่หวีและมีคานสปริงแบบ serpentine beam แล้วกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ให้คงที่ ๆ ค่า ๆ หนึ่ง การเพิ่มจำนวนของซี่หวีนั้นจะทำให้สามารถลดค่าแรงดันไฟฟ้าขับเคลื่อน (driving voltage) ที่ต้องป้อนให้กับตัวขับเร้าได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 แรงดันไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ต้องป้อนให้ตัวจับเร็วเมื่อเทียบกับจำนวนซี่หวี

ในกรณีของรูปที่ 4.15 นั้น ใช้แรงดันไฟฟ้าขับเคลื่อนในการป้อนให้กับอุปกรณ์เพียง 80 V ก็จะสามารถทำให้ซี่หวีเคลื่อนที่ไปได้ระยะทางถึง 100 μm หากเพิ่มจำนวนซี่หวีในการออกแบบให้มีจำนวน 100 ซี่

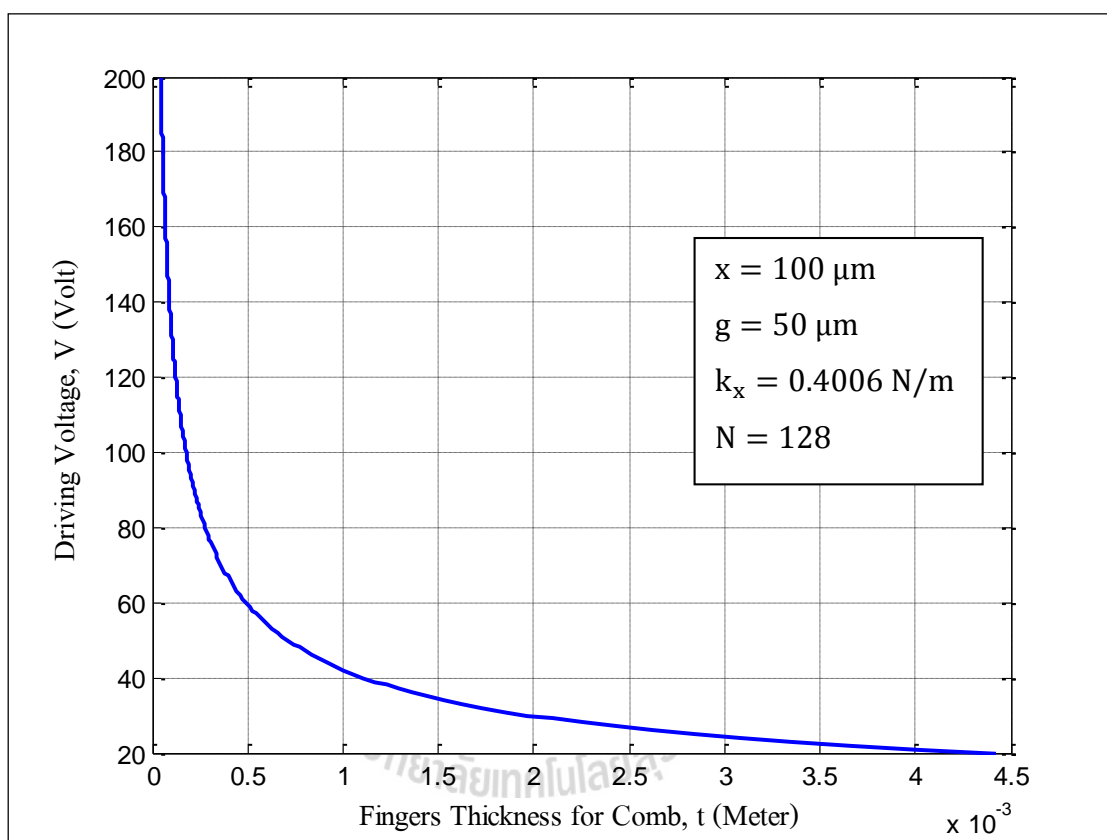
เช่นเดียวกัน จากสมการที่ 4.11 จะเห็นว่า หากลดขนาดของระยะห่างระหว่างซี่หวีแต่ ละซี่ให้ยิ่งน้อยลง ก็จะสามารถลดแรงดันไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ต้องป้อนให้กับตัวขับเคลื่อนน้อยลงไป ด้วย ดังแสดงได้ในรูปที่ 4.16 ซึ่งในกรณีนี้ อาจมีข้อจำกัดเรื่องการออกแบบ รวมถึงกระบวนการใน การสร้างตัวขับเคลื่อนเองก็มีส่วนในการกำหนดขนาดของช่องว่างที่น้อยสุดที่สามารถสร้างได้ด้วย



รูปที่ 4.16 แรงดันไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ต้องป้อนให้ตัวขับเคลื่อนเมื่อเทียบกับ ระยะห่างระหว่างซี่หวีทั้งสองข้าง

จากรูปที่ 4.16 นั้นจะเห็นว่า ใช้แรงดันไฟฟ้าขับเคลื่อนในการป้อนให้กับอุปกรณ์เพียง 65 V ก็จะสามารถทำให้ซี่หวีเคลื่อนที่ไปได้ระยะทางถึง 100 μm หากลดระยะห่างระหว่างซี่หวีใน การออกแบบให้เหลือเพียง 50 μm

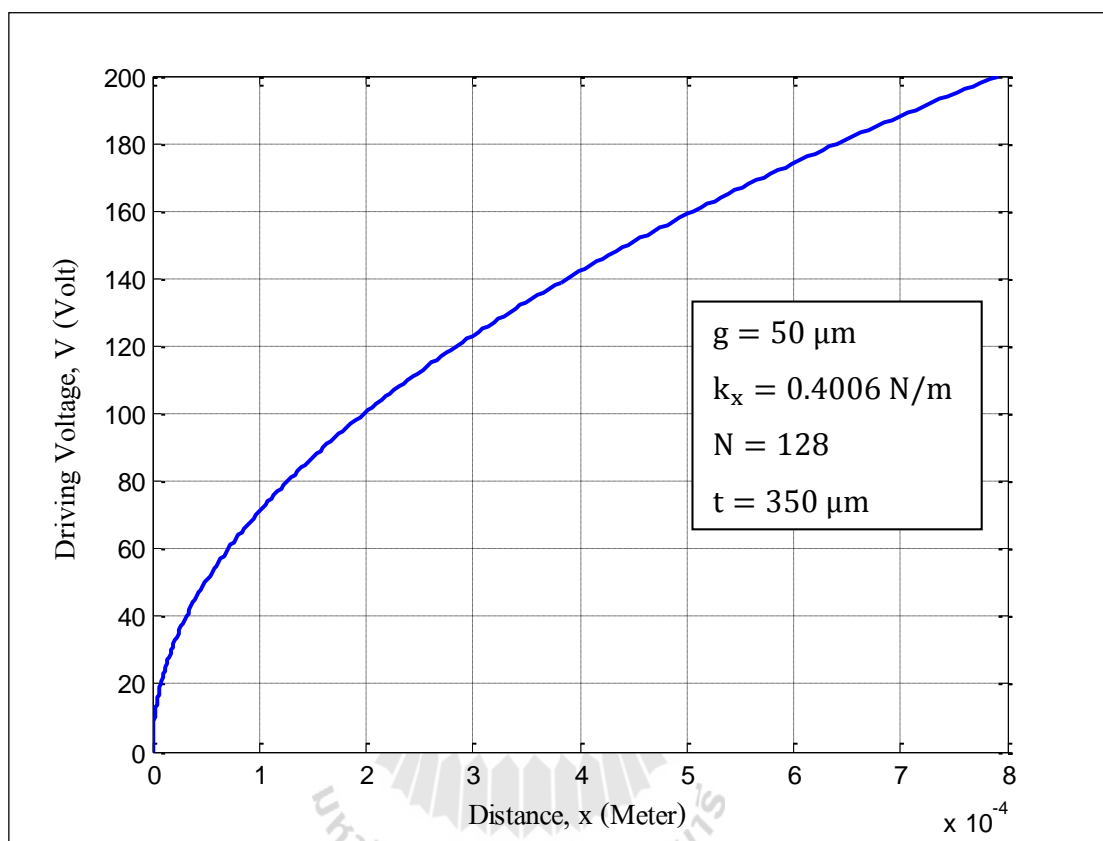
เนื่องจากการสร้างตัวขับเคลื่อนด้วยกระบวนการเอกซ์เรย์ลิโธกราฟีที่พัฒนาขึ้นในสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) นั้น สามารถสร้างโครงสร้างที่มีความหนามากกว่า $500 \mu\text{m}$ ได้ โดยใช้สารไวแสง SU-8 คู่กับการฉายรังสีเอกซ์ ณ BL6 ของสถาบันวิจัย ซึ่งจะทำให้สามารถเพิ่มความสูงของซี่หวีของตัวขับเคลื่อนได้ โดยรูปที่ 4.17 จะแสดงการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ป้อนให้กับตัวขับเคลื่อน เมื่อเทียบกับความสูงของซี่หวีที่เปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 4.17 แรงดันไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ต้องป้อนให้ตัวขับเคลื่อนเมื่อเทียบกับความสูงของซี่หวี

จากรูปที่ 4.17 จะเห็นว่า ใช้แรงดันไฟฟ้าขับเคลื่อนในการป้อนให้กับอุปกรณ์เพียง 60 V ก็จะสามารถทำให้ซี่หวีเคลื่อนที่ไปได้ระยะทางถึง $100 \mu\text{m}$ หากเพิ่มความสูงของซี่หวีในการออกแบบให้มีค่า $500 \mu\text{m}$

และจากสมการที่ 4.11 เช่นเดียวกัน จะเห็นว่าเมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ค่าต่าง ๆ ให้คงที่ ๆ ค่า ๆ หนึ่ง หากต้องการให้ซี่หวีมีระยะการเคลื่อนที่ ๆ มากขึ้น ก็จะต้องเพิ่มแรงดันไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ป้อนให้กับตัวขับเร้าให้สูงขึ้นตามไปด้วย ดังแสดงได้ในรูปที่ 4.18

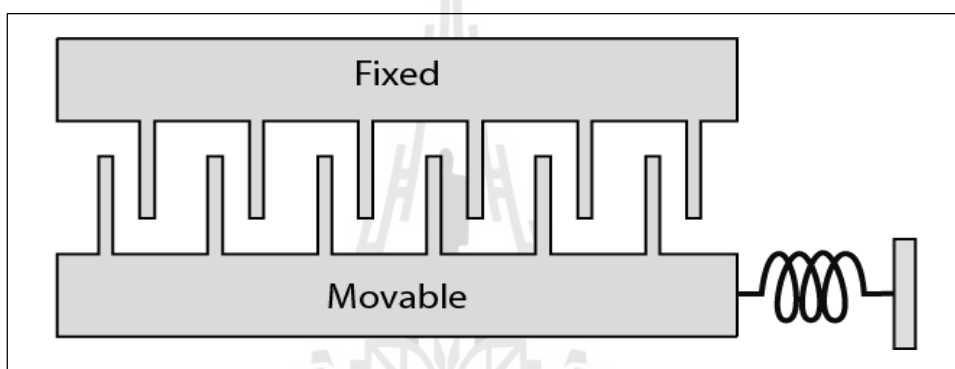


รูปที่ 4.18 แรงดันไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ต้องป้อนให้ตัวขับเร้าเมื่อเทียบกับระยะที่ซี่หวีเคลื่อนที่

จากรูปที่ 4.18 จะเห็นว่าใช้แรงดันไฟฟ้าขับเคลื่อนในการป้อนให้กับอุปกรณ์ 100 V จะสามารถทำให้ซี่หวีเคลื่อนที่ไปได้ระยะทางถึง 200 μm เลยทีเดียว

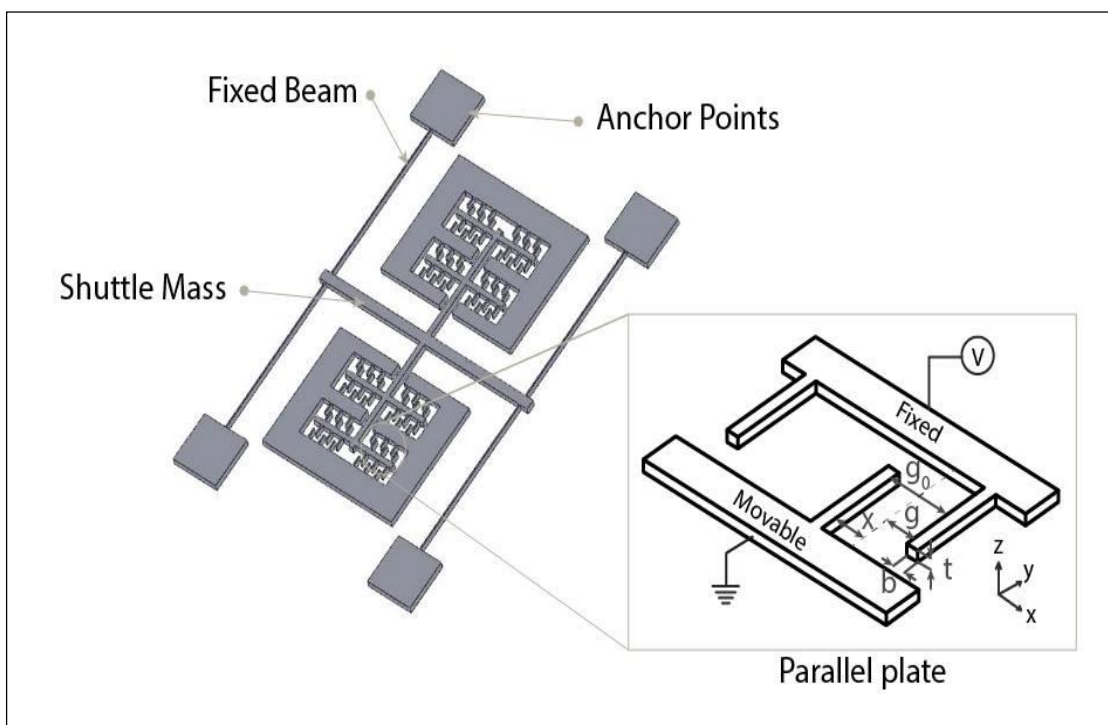
4.2.2 ตัวขับเคลื่อนทางไฟฟ้าสถิตแบบแผ่นคู่ขนาน (Electrostatic parallel plate actuator)

ตัวขับเคลื่อนทางไฟฟ้าสถิตแบบแผ่นคู่ขนาน เป็นตัวขับเคลื่อนทางไฟฟ้าสถิตอีกชนิดหนึ่งที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลาย (Gregory N. Nielson, 2006) มีโครงสร้างและหลักการทำงานคล้ายกับตัวขับเคลื่อนแบบซีห์วี นั่นก็คือมีส่วนประกอบหลัก 2 ส่วน คือส่วนที่อยู่กับที่และส่วนที่สามารถเคลื่อนที่ได้ โดยส่วนที่เคลื่อนที่ได้นั้นจะมีสปริงติดอยู่ด้วย ดังรูปที่ 4.19 ลักษณะการขับเคลื่อนของตัวขับเคลื่อนแบบแผ่นคู่ขนานนี้จะใช้หลักการของไฟฟ้าสถิตเช่นเดียวกับตัวขับเคลื่อนแบบซีห์วี เมื่อมีการป้อนไฟฟ้าให้กับระบบ ส่วนที่เคลื่อนที่จะเคลื่อนเข้าหาส่วนคงที่ และเมื่อตัดไฟฟ้าออก สปริงจะทำหน้าที่ดึงส่วนที่เคลื่อนที่ได้กลับมายังจุดเดิม



รูปที่ 4.19 ลักษณะโครงสร้างของตัวขับเคลื่อนแบบแผ่นคู่ขนาน

เมื่อทำการป้อนแรงดันไฟฟ้าเข้ากับขั้วของส่วนที่อยู่กับที่ (fixed) และต่อกราวด์เข้ากับขั้วของส่วนที่เคลื่อนที่ได้ (movable) ซึ่งจะทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วทั้งสองและจะกลายเป็นประจุไฟฟ้า ทำให้เกิดแรงไฟฟ้าสถิตขึ้นในทิศทางแนวแกน x ดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 โมเดลของตัวขับเคลื่อนแบบแผ่นคู่ขนาน

กรณีนี้ประจุบนแผ่นตัวเก็บประจุคือ

$$Q = V \cdot C = \frac{V \epsilon_0 \epsilon_r A}{g} \quad (4.12)$$

ในกรณีนี้แรงไฟฟ้าสถิต (F_e) ที่เกิดขึ้นบนแผ่นตัวเก็บประจุจะเท่ากับแรงสปริง (F_s)

$$F_e = \frac{Q^2}{2\epsilon_0 \epsilon_r A} = \frac{V^2 \epsilon_0 \epsilon_r A}{2g^2} = k \cdot x = F_s \quad (4.13)$$

เราจะเห็นว่า x เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างแผ่น นั่นคือ

$$g = g_0 - x \quad (4.14)$$

ดำเนินการแก้สมการหาแรงดันไฟฟ้าขับเคลื่อนจะได้

$$V = \sqrt{\frac{2kx}{NA\epsilon_0\epsilon_r}}(g_0 - x) \quad (4.15)$$

โดยที่	V	คือ ค่าแรงดัน ไฟฟ้าขับเคลื่อน มีหน่วยเป็น โวลต์ (V)
	k	คือ ค่าคงที่สปริง (spring stiffness)
	ϵ_0	คือ ค่า permittivity สัมบูรณ์ มีค่าเท่ากับ 8.85×10^{-12} F/m
	ϵ_r	คือ ค่า permittivity ของวัสดุฉนวนที่กั้นระหว่างขั้วทั้งสอง
	A	คือ พื้นที่ผิวบริเวณที่เกิดประจุไฟฟ้า
	N	คือ จำนวนแผ่นตัวนำที่เคลื่อนที่ของตัวขั้วเร้า
	g_0	คือ ระยะห่างเริ่มต้นระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองขั้ว
	x	คือ ระยะที่แผ่นตัวนำเคลื่อนที่

การเคลื่อนที่ของตัวขั้วเร้าแบบแผ่นคู่ขนานจะมีหลักการทำงานคล้ายกันกับตัวขั้วเร้าแบบซี่หวี คือในส่วนที่เคลื่อนที่ได้จะถูกทำให้ลอยอยู่ในอากาศ โดยมีคานซึ่งทำหน้าที่ค้ำยันให้โครงสร้างลอยตัวได้ ทั้งยังทำหน้าที่เหมือนสปริงคอยดึงส่วนที่เคลื่อนที่ได้ให้กลับมายังตำแหน่งเริ่มต้นเมื่อหยุดการกระตุ้นตัวขั้วเร้า

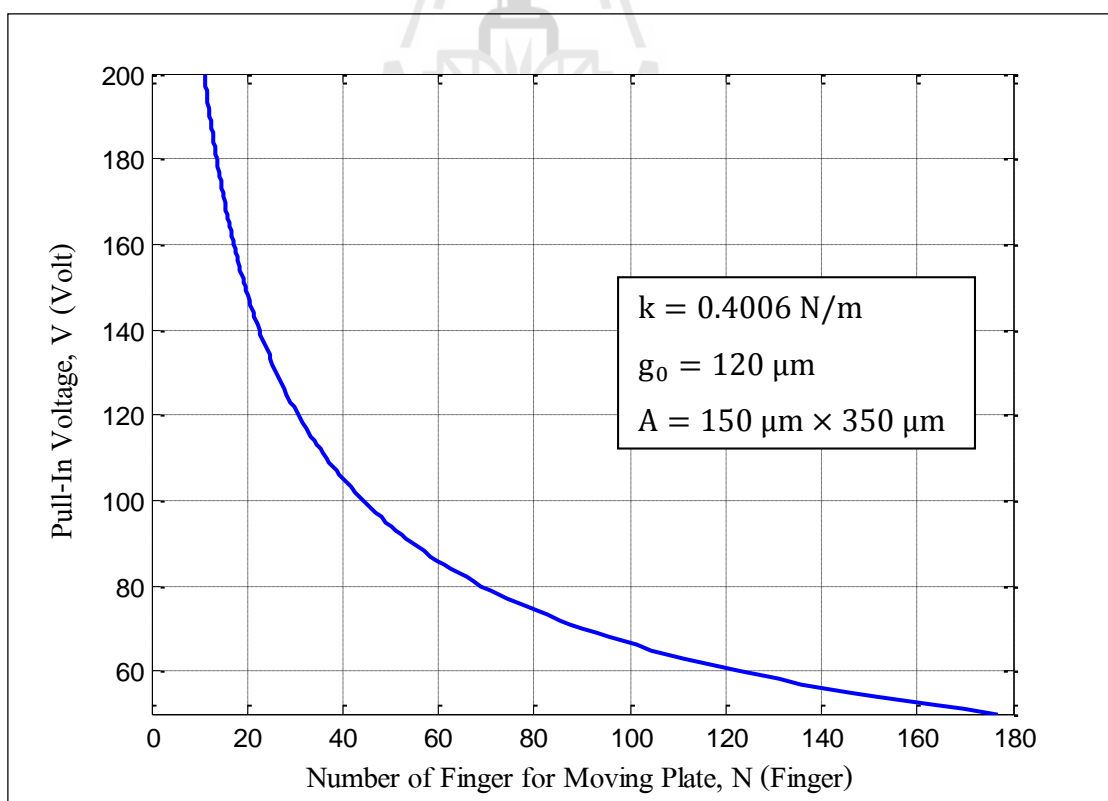
เมื่อ k เป็นค่าคงที่สปริงของระบบ จะมีตำแหน่ง 2 ตำแหน่งที่แรงไฟฟ้าสถิตเท่ากับ elastic restoring force ซึ่งจะขึ้นอยู่กับค่าคงที่ (stiffness) ของสปริง, ระยะห่างระหว่างแผ่นเริ่มต้นและความเข้มสนามไฟฟ้า โดยที่ตำแหน่งแรกจะอยู่ในตำแหน่งสมดุลที่มีเสถียรภาพ ซึ่งแผ่นตัวนำไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ได้จะสามารถคืนตัวกลับเมื่อเคลื่อนที่หรือถูกดึงไปเล็กน้อย ในขณะที่ตำแหน่งที่สองเป็นสมดุลที่ไม่มีเสถียรภาพ คือเมื่อความเข้มสนามไฟฟ้ามากขึ้นเพียงเล็กน้อยจะทำให้แผ่นตัวนำไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ได้ถูกดึงลงมาติดกับฐานทันที เรียกลักษณะการเกิดปรากฏการณ์นี้ว่า pull-in ซึ่งสามารถหาแรงดันไฟฟ้าแบบติด (pull-in voltage) ได้จากสมการ

$$V_{pi} = \sqrt{\frac{8kg_0^3}{27\epsilon_0\epsilon_r NA}} \quad (4.16)$$

โดยที่	V_{pi}	คือ ค่าแรงดัน ไฟฟ้าแบบติด มีหน่วยเป็น โวลต์ (V)
--------	----------	---

k	คือ ค่าคงที่สปริง
g_0	คือ ระยะห่างเริ่มต้นระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองขั้ว
ϵ_0	คือ ค่า permittivity สัมบูรณ์ มีค่าคงที่เท่ากับ 8.85×10^{-12} F/m
ϵ_r	คือ ค่า permittivity ของวัสดุฉนวนที่กั้นระหว่างขั้วทั้งสอง
N	คือ จำนวนแผ่นตัวนำที่เคลื่อนที่ของตัวขับเคลื่อน
A	คือ พื้นที่ผิวบริเวณที่เกิดประจุไฟฟ้า

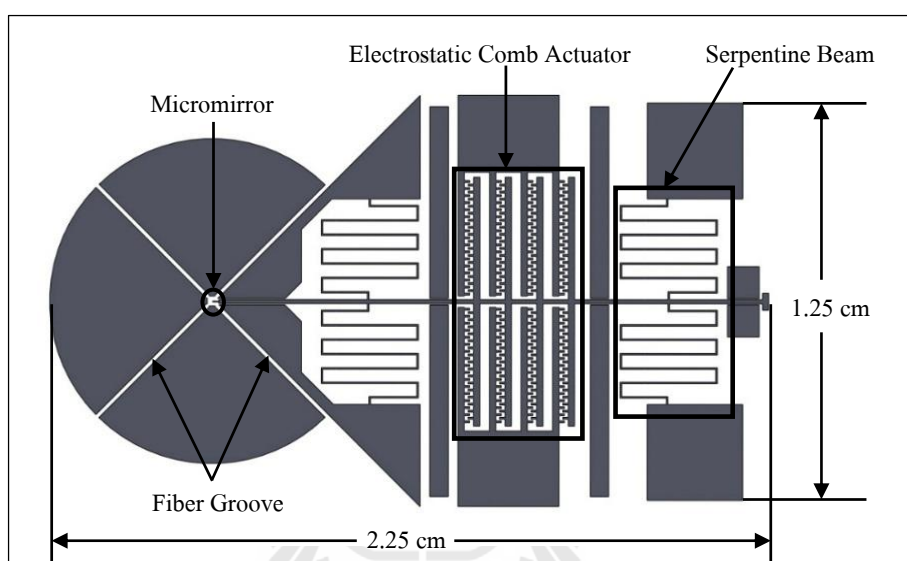
จากสมการที่ 4.16 ที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นว่าเมื่อออกแบบตัวขับเคลื่อนทางไฟฟ้าสถิต ให้เป็นตัวขับเคลื่อนแบบแผ่นคู่ขนานและมีคานสปริงแบบ serpentine beam แล้วกำหนดค่าพารามิเตอร์ค่าต่างๆ ให้คงที่ ๆ ค่า ๆ หนึ่ง การเพิ่มจำนวนของแผ่นตัวนำนั้นจะทำให้แรงดันไฟฟ้าแบบติด ที่ทำให้แผ่นตัวนำทั้งสองถูกดึงมาชนกันมีค่าลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.21 โดยหากระยะห่างเริ่มต้นของแผ่นตัวนำทั้งสองมีค่า $120 \mu\text{m}$ และออกแบบตัวขับเคลื่อนให้มีแผ่นตัวนำที่เคลื่อนที่ได้มีจำนวน 120 แผ่น แรงดันไฟฟ้าแบบติดที่จะทำให้แผ่นตัวนำถูกดึงมาชนกันจะมีค่า 60 V นั่นเอง



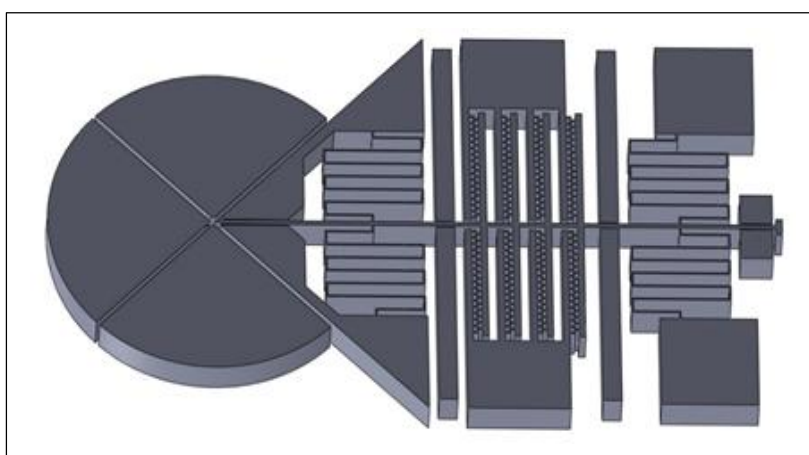
รูปที่ 4.21 แรงดันไฟฟ้าแบบติดที่เกิดขึ้นในตัวขับเคลื่อนเมื่อเทียบกับจำนวนแผ่นตัวนำ

4.3 การออกแบบโครงสร้างอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสง

การออกแบบอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงในงานวิจัยนี้ได้คำนึงถึงขนาดโครงสร้าง วัสดุ กระบวนการสร้าง รวมถึงระยะเวลาในการสร้าง ให้สอดคล้องกับเครื่องมือและอุปกรณ์ที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการ อุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงในงานวิจัยนี้มีส่วนประกอบที่สำคัญด้วยกัน 2 ส่วน ได้แก่ กระจกจุลภาคทำหน้าที่เป็นตัวเปลี่ยนทิศทางของแสง และตัวขับเคลื่อนเร้าจุลภาคทำหน้าที่ควบคุมการเคลื่อนที่ของกระจกจุลภาค ดังรูปที่ 4.22 และ 4.23



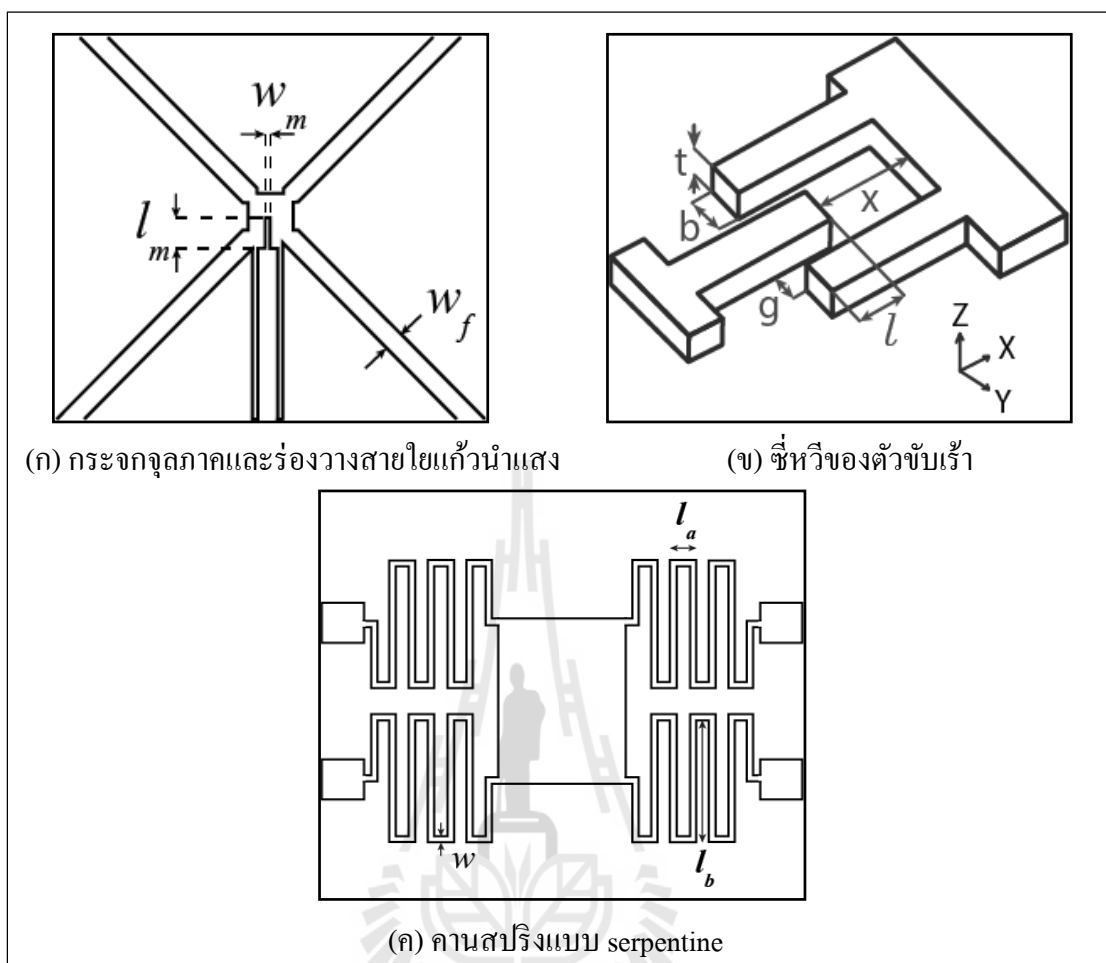
รูปที่ 4.22 โครงสร้างด้านบนของอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสง



รูปที่ 4.23 โครงสร้างสามมิติของอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสง

ตารางที่ 4.8 สัญลักษณ์ของอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสง

Parameter	Symbol	Size
Spring wide	w	50 μm
Thickness	t	350 μm
Gap distance	g	50 μm
Length (a)	l_a	500 μm
Length (b)	l_b	3000 μm
Number of meander	n	12
Comb wide	b	50 μm
Number of moving comb or plate	N	128
Spring constant	k	-
Torsion modulus	G	-
Torsion constant	J	-
Moment of inertia	I_x	-
Young's modulus	E	2 GPa
Moving distance	x	100 μm
Poisson's ratio	ν	0.22
Mirror wide	w_m	30 μm
Length of mirror	l_m	200 μm
Groove of optical fiber	w_f	130 μm
Starting gab of plate	g_0	120 μm



รูปที่ 4.24 ขนาดพารามิเตอร์ของอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสง

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า การสร้างอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงโดยทั่วไปจะมีขนาดของระยะห่างระหว่างโครงสร้างที่เล็กที่สุดอยู่ในช่วง $1-10 \mu\text{m}$ อันเนื่องมาจากมีกระบวนการสร้างฟิล์มที่สามารถควบคุมได้อย่างแม่นยำ อีกทั้งยังมีเครื่องมือและอุปกรณ์ที่สามารถกัดเนื้อวัสดุเพื่อขึ้นรูปหรือทำลายให้ความแม่นยำตรง นั่นก็หมายถึงค่าใช้จ่ายในการสร้างชิ้นงานก็ต้องสูงตามไปด้วย การออกแบบขนาดโครงสร้างต่าง ๆ ในงานวิจัยนี้มีข้อจำกัดทางด้านการสร้างฟิล์มต้นแบบสำหรับเป็นหน้ากากกันแสง ซึ่งขนาดโครงสร้างที่เล็กที่สุดที่มีความแม่นยำและสามารถสร้างได้นั้นจะอยู่ในช่วง $30-35 \mu\text{m}$ ทำให้อุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงที่จะออกแบบต้องปรับขนาดโครงสร้างให้ใหญ่ขึ้น โดยมีโครงสร้างส่วนที่เล็กหรือแคบที่สุดอยู่ในช่วง $30-35 \mu\text{m}$ และเมื่อโครงสร้างมีขนาดใหญ่ขึ้นแล้วจึงจำเป็นต้องสร้างโครงสร้างให้สูงขึ้นตามไปด้วย เพื่อเป็นการชดเชยระยะห่างระหว่างโครงสร้าง เนื่องด้วยเหตุผลในเรื่องของแรงขับเคลื่อน (Driving force) เพราะหากซีพียูอยู่

ห่างกันเกินไป จะทำให้ต้องใช้แรงในการขับเคลื่อนมาก หมายถึงต้องสามารถหาแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่มีแรงดันสูงมากพอตัวขับเคลื่อนแล้วจึงจะเกิดการเคลื่อนที่ได้ ซึ่งเป็นการเพิ่มต้นทุนสำหรับซื้อแหล่งจ่ายดังกล่าว และสิ่งสำคัญอีกประการหนึ่งคืออันตรายที่เกิดจากไฟฟ้าแรงสูงต่อผู้ทดลองเอง อีกทั้งอุปกรณ์อาจจะได้รับความเสียหาย ดังนั้นจึงต้องทำการชดเชยโครงสร้างของอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงด้วยการสร้างโครงสร้างให้มีความสูงมากกว่าความกว้าง เรียกว่า กระบวนการสร้างโครงสร้างจุลภาคสัดส่วนสูง (High aspect ratio micromachining) ซึ่งต้องอาศัยกระบวนการลิโทกราฟีด้วยรังสีเอกซ์ เนื่องจากรังสีเอกซ์มีพลังงานสูงทำให้โครงสร้างที่ได้มีผนังตั้งฉากกับฐานรองและเรียบคม และอีกเหตุผลที่โครงสร้างของอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงมีขนาดใหญ่คือ ปัจจุบันกระบวนการสร้างและพัฒนาอุปกรณ์ต่าง ๆ ยังอยู่ในช่วงเริ่มต้นของการพัฒนา ดังนั้นจึงจำเป็นต้องสร้างโครงสร้างที่มีขนาดใหญ่เนื่องจากสามารถสร้างได้ง่ายกว่าโครงสร้างขนาดเล็ก เพื่อเป็นการเรียนรู้และฝึกฝนให้เกิดความเข้าใจและหาแนวทางการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ให้เป็นมาตรฐานสำหรับการรองรับการสร้างอุปกรณ์ที่ต้องการ โครงสร้างที่ขนาดเล็กต่อไป



บทที่ 5

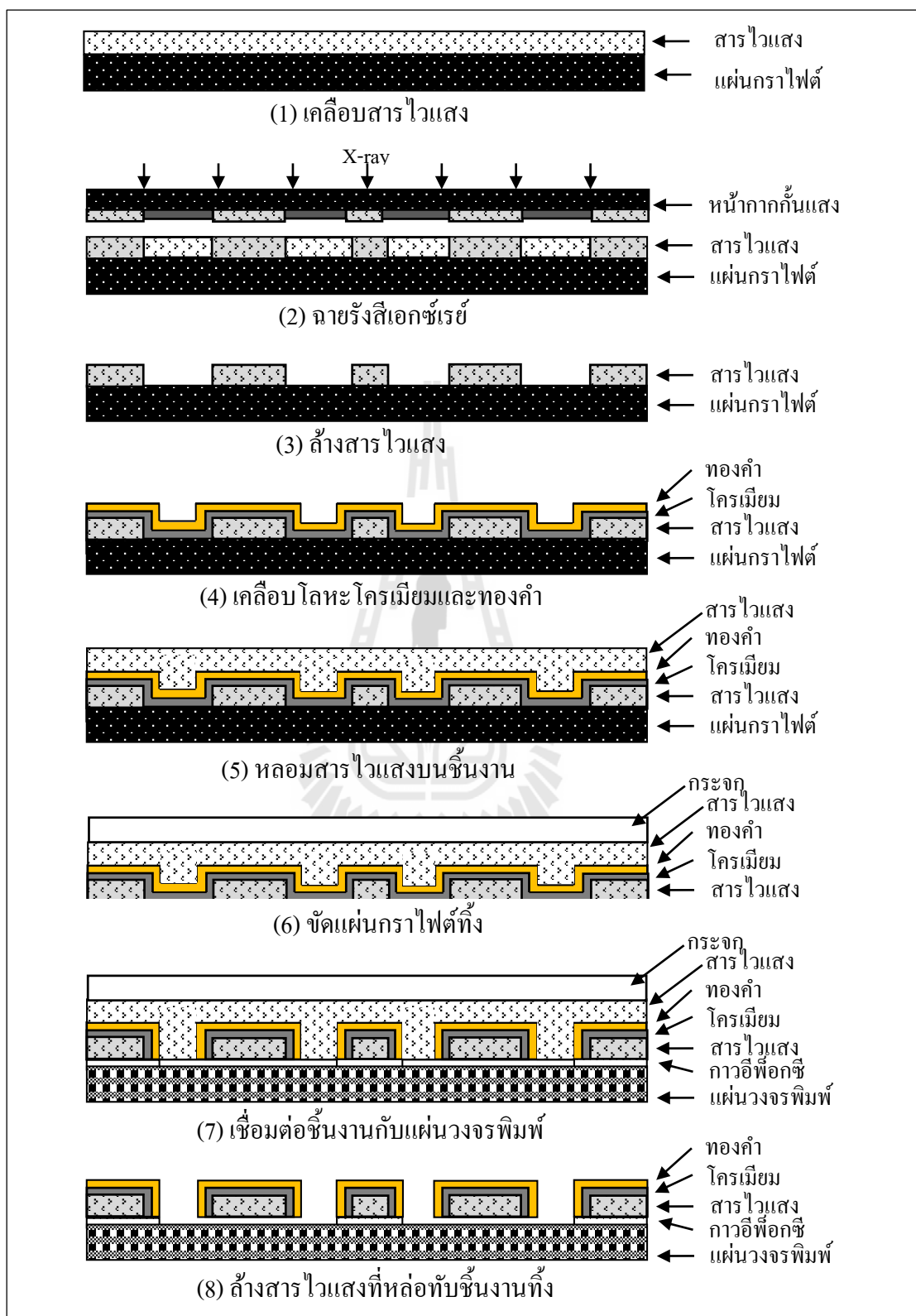
กระบวนการพัฒนาอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสง

หลังจากได้ศึกษากระบวนการพื้นฐานจากบทที่ 3 และ ในบทที่ 4 เป็นเรื่องเกี่ยวกับการออกแบบอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงพร้อมกับได้ทำการจำลองระบบพลวัต ในบทนี้จะนำเสนอการผลิต การพัฒนา และการแก้ปัญหาระหว่างการสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงด้วยเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค โดยใช้กระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์ รวมถึงกระบวนการอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับระบบกลไฟฟ้าจุลภาค

5.1 การสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสง

ในงานวิจัยนี้ได้มีการออกแบบและสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงขึ้นหลากหลายรูปแบบ มีทั้งการปรับเปลี่ยนชนิดของตัวขับเร้า เพิ่มลดขนาดของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ปรับเปลี่ยนลักษณะการวางตัวของสปริง ตลอดจนเพิ่มลดจำนวนขดของสปริงเพื่อให้ได้มาซึ่งอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงที่มีโครงสร้างที่เหมาะสมและสามารถทำงานได้อย่างสมบูรณ์ที่สุด

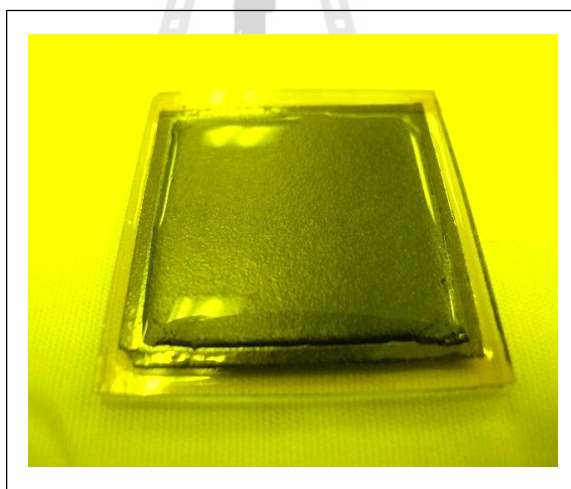
อุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงของงานวิจัยนี้ จะมีโครงสร้างเป็นพอลิเมอร์ซึ่งเป็นสารไวแสงแบบลบ SU-8 ที่ผ่านกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์จนเกิดลวดลายเป็นโครงสร้างอยู่บนแผ่น กราไฟต์ จากนั้นทำการเคลือบโลหะ โครเมียมและทองคำเพื่อให้โครงสร้างดังกล่าวเกิดการนำไฟฟ้าและสามารถสะท้อนแสงได้ การสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงมีขั้นตอนการสร้างดังนี้ รูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ขั้นตอนการสร้างอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสง

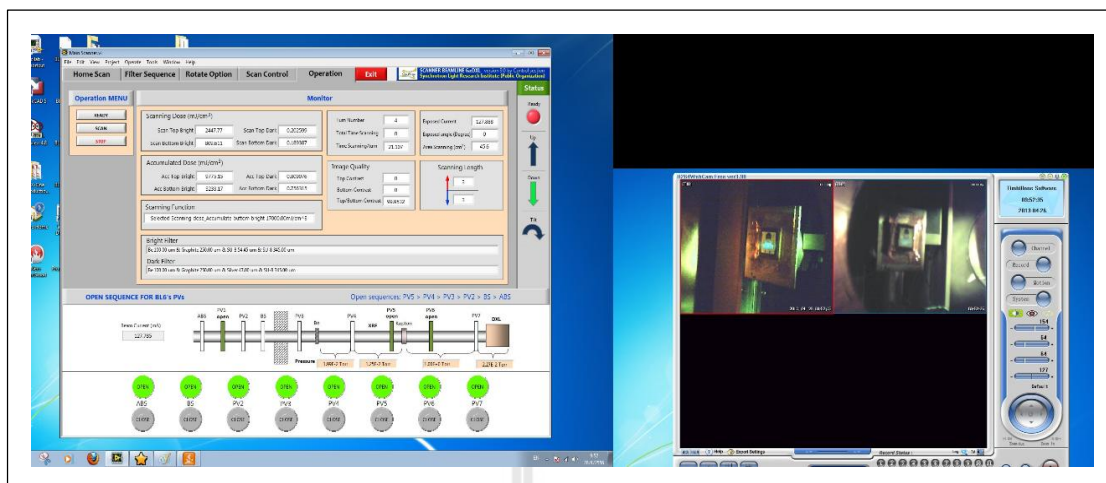
สำหรับขั้นตอนการสร้างอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสง สามารถอธิบายได้โดยละเอียดดังต่อไปนี้

1. ยึดแผ่นกราฟไฟต์กับกระจกด้วยเทปกั้นความร้อน แล้วทำความสะอาดแผ่นกราฟไฟต์โดยการเช็ดด้วยสำลีชุบไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ จากนั้นเช็ดด้วยสำลีอีกครั้ง หลังจากนั้นเป่าด้วยแก๊สไนโตรเจน แล้วนำไปวางบนแผ่นความร้อนเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นจะทำการเคลือบสารไวแสงชนิดลบ SU-8 เบอร์ 2100 ด้วยการหยดสารไวแสงลงบนฐานรองกราฟไฟต์ที่ยังวางอยู่บนแผ่นความร้อนดังกล่าว จนได้ความหนาของสารไวแสงประมาณ 300-400 μm จากนั้นให้ความร้อนอย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง แล้วจึงปิดสวิตช์แผ่นความร้อนและปล่อยให้ชิ้นงานค่อย ๆ เย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิห้องที่ประมาณ 26.6 องศาเซลเซียส อีก 1 ชั่วโมง จากนั้นนำมาวัดความหนาอีกครั้งหนึ่งด้วยดิจิตอลไมโครมิเตอร์ ถ้าสารไวแสงที่ได้มีความหนามากเกินไปให้ใช้กระดาษทรายละเอียดเบอร์ 1200 และ 3000 ขัดตามลำดับจนได้ความหนาตามที่ต้องการ แล้วจะได้ฐานรองสำหรับสร้างโครงสร้างอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสง ดังรูปที่ 5.2



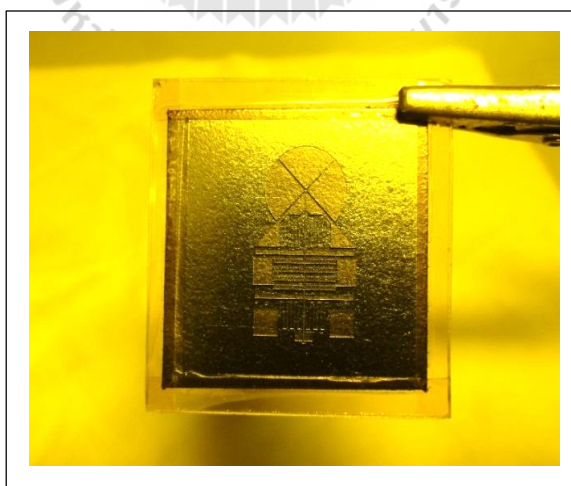
รูปที่ 5.2 สารไวแสงบนฐานรองกราฟไฟต์สำหรับสร้างโครงสร้างอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสง

2. นำสารไวแสงที่ได้จากข้อ 1 มาฉายรังสีเอกซ์ผ่านหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์ ที่กระแสลำอิเล็กตรอน 116.185 mA จนได้พลังงานสะสม 28000 mJ/cm^2 (Acc.BottomBright) ซึ่งจะใช้เวลาในการฉายรังสีเอกซ์ 10 นาที ดังรูปที่ 5.3 จากนั้นนำชิ้นงานดังกล่าวมาวางบนแผ่นความร้อนที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้สารไวแสงบริเวณที่ทำปฏิกิริยากับแสงแข็งตัว



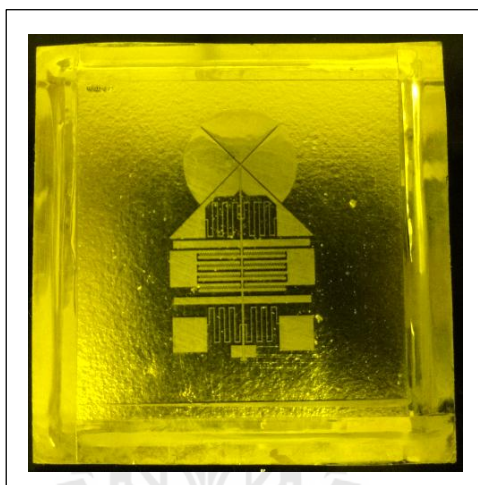
รูปที่ 5.3 ฉายรังสีเอกซ์

3. ล้างสารไวแสงในส่วนที่ไม่ทำปฏิกิริยากับแสงโดยการแช่ลงไปในสารละลาย SU-8 developer เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นให้ฉีดล้างชิ้นงานด้วยไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์เพื่อตรวจสอบให้แน่ใจว่าไม่มีสารไวแสงในส่วนที่ไม่ต้องการตกค้างอยู่ จากนั้นนำชิ้นงานที่ล้างสารไวแสงตกค้างออกหมดแล้วมาเป่าเบา ๆ ด้วยแก๊สไนโตรเจนจนแห้ง ก็จะได้โครงสร้างของอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสง ดังรูปที่ 5.4



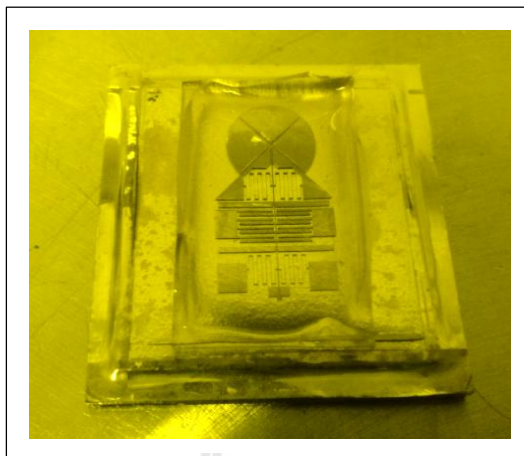
รูปที่ 5.4 โครงสร้างอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงที่ได้จากการฉายรังสีเอกซ์

4. นำโครงสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงที่ได้จากการฉายรังสีเอกซ์ มาทำการเคลือบโลหะโครเมียมด้วยเครื่องสปัตเตอร์ริงที่ความดัน 1.28×10^{-2} torr, กำลัง 200 W และอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน 55 SCCM เป็นเวลา 9 นาที ซึ่งจะได้ความหนาของโครเมียม $0.25 \mu\text{m}$ หลังจากนั้นเคลือบโลหะทองคำทับบนโครเมียมด้วยเครื่องสปัตเตอร์ริงที่ความดัน 1.56×10^{-2} torr, กำลัง 150 W และอัตราการไหลของแก๊สอาร์กอน 65 SCCM เป็นเวลา 2 นาที ซึ่งจะได้ความหนาของทองคำ $0.1 \mu\text{m}$ ดังรูปที่ 5.5 เพื่อให้โครงสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงดังกล่าวสามารถนำไฟฟ้าและสะท้อนแสงได้



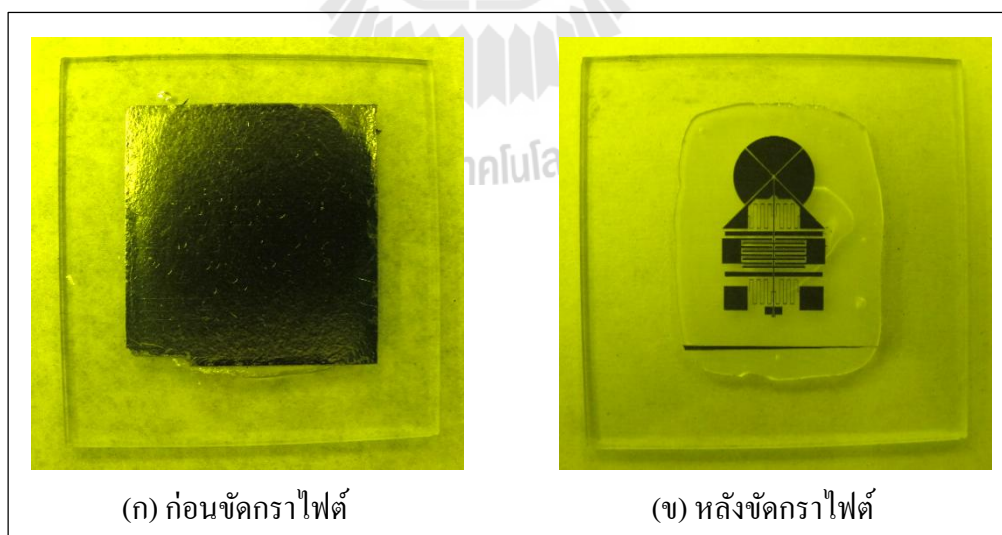
รูปที่ 5.5 โครงสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงที่ผ่านการเคลือบโลหะ

5. หลอม SU-8 พงแห้งบนโครงสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงที่ผ่านการเคลือบโลหะแล้ว ด้วยวิธีการเตรียมสารไวแสงแบบพงแห้ง ให้ได้ความหนาประมาณ $500 \mu\text{m}$ ซึ่งจะได้โครงสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงที่ถูกเคลือบด้วยสารไวแสงแล้ว ดังรูปที่ 5.6



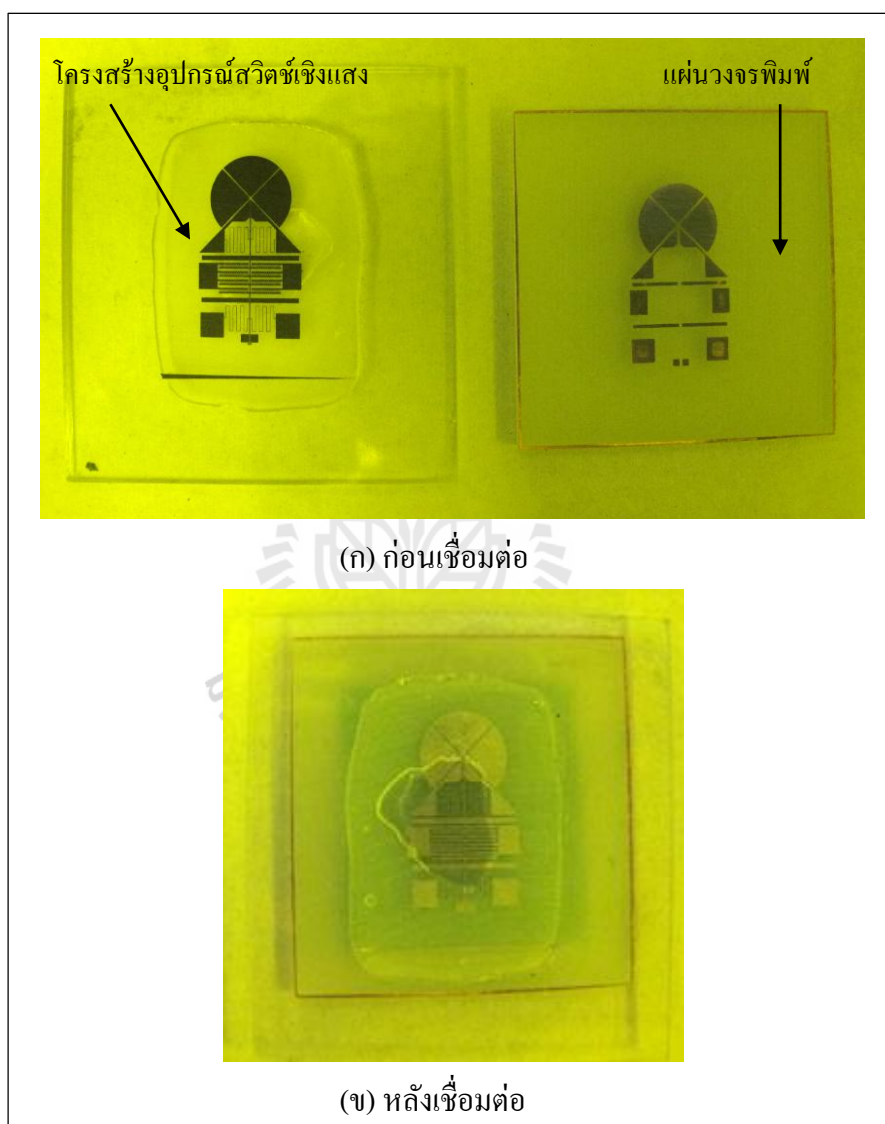
รูปที่ 5.6 โครงสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงที่ถูกเคลือบด้วยสารไวแสง

6. ประกอบสารไวแสงที่เคลือบโครงสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงดังกล่าวกับกระจกให้แนบสนิทด้วยการให้ความร้อน หลังจากนั้นขัดกราไฟต์ด้วยกระดาษทรายเบอร์ 400 และ 800 ตามลำดับ จนแผ่นกราไฟต์หลุดออกหมดและพื้นผิวโครงสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงเรียบ ซึ่งจะได้อุปกรณ์ตามรูปที่ 5.7



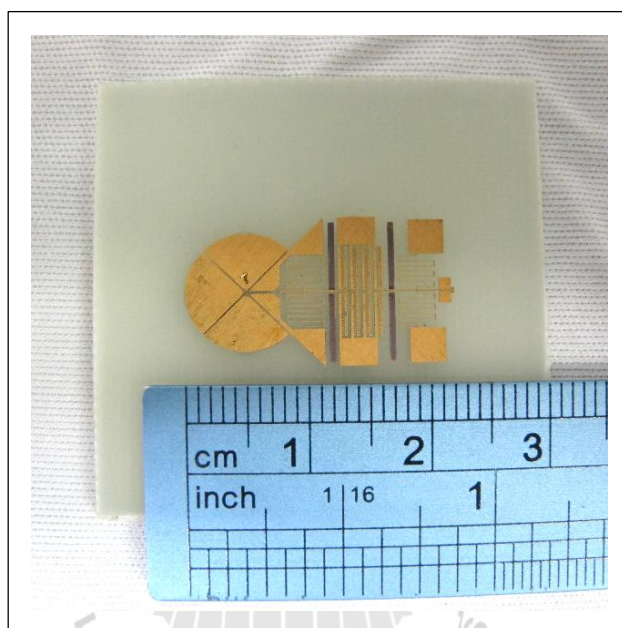
รูปที่ 5.7 โครงสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงก่อนและหลังขัดกราไฟต์

7. เชื่อมต่อ โครงสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงที่ขั้วคราไฟต์ออกแล้วลงบนฐานรองแผ่นวงจรพิมพ์ด้วยกาวอีพ็อกซี (Epoxy) โดยผสมกาวอีพ็อกซีในอัตราส่วน 1 : 1 แล้วทาโครงสร้างของอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงบริเวณที่ต้องการให้ติดอยู่กับแผ่นวงจรพิมพ์ จากนั้นประกบโครงสร้างของชิ้นงานกับแผ่นวงจรพิมพ์ดังกล่าวให้ลวดลายตรงกันที่สุด เสร็จแล้วปล่อยให้กาวแข็งตัว จะได้ชิ้นงานตามรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.8 เชื่อมต่อ โครงสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงกับแผ่นวงจรพิมพ์

8. ล้างสารไวแสงที่เคลือบอยู่บนโครงสร้างอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงออกด้วยสารละลาย SU-8 developer จนสารไวแสงที่เคลือบอยู่หลุดออกจากโครงสร้างอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงจนหมด (โดยในขั้นตอนนี้กระจกที่ติดอยู่กับสารไวแสงจะหลุดออกมาด้วย) รวมระยะเวลาการล้างสารไวแสงจนกระจกหลุดออกมาใช้เวลา 4 ชั่วโมง หลังจากนั้นฉีดล้างชิ้นงานด้วยไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์เพื่อตรวจสอบสารไวแสงที่ตกค้างอยู่ จากนั้นเป่าแห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน จะได้โครงสร้างอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงที่ติดอยู่บนแผ่นวงจรพิมพ์ดังรูปที่ 5.9



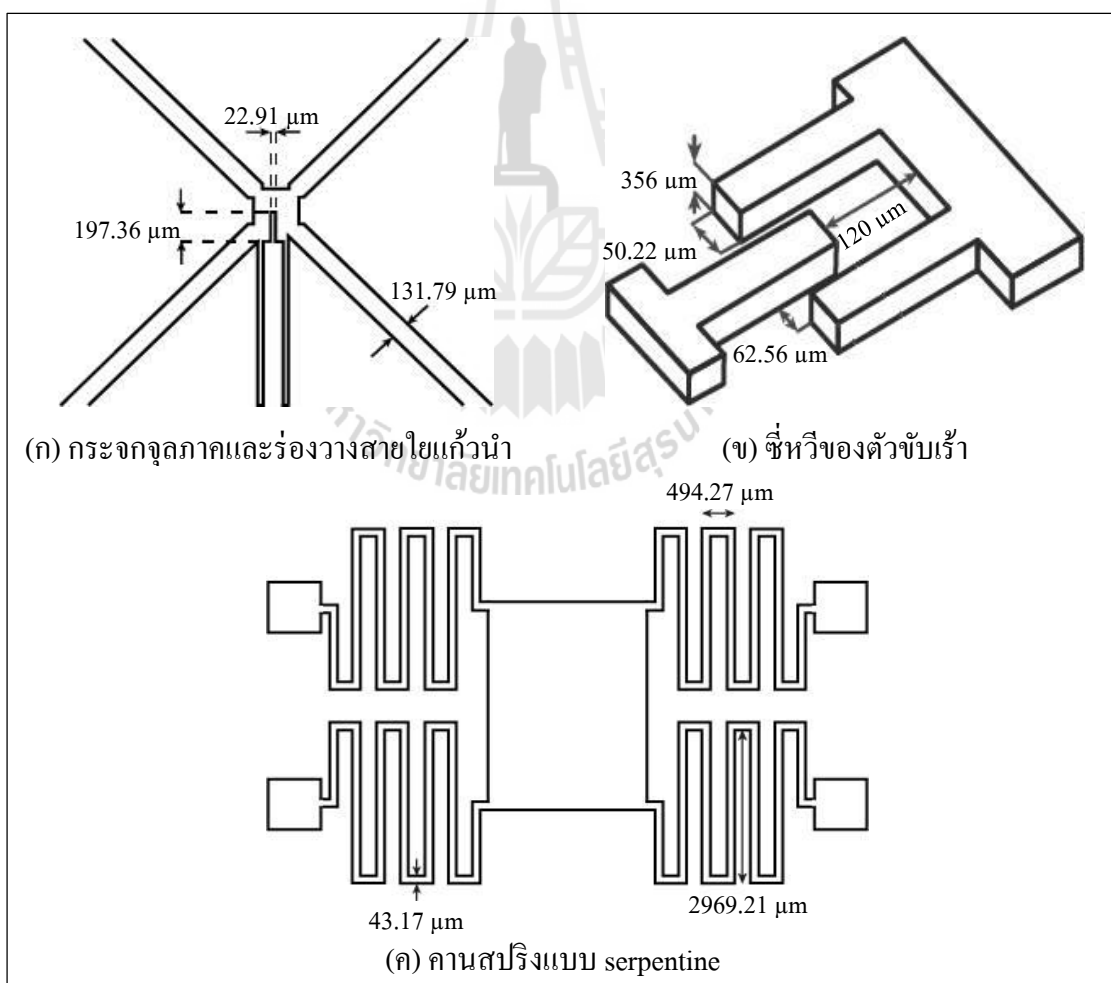
รูปที่ 5.9 โครงสร้างอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงที่ติดอยู่บนแผ่นวงจรพิมพ์

หลังจากได้โครงสร้างของอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงที่สมบูรณ์แล้วได้ จึงนำโครงสร้างดังกล่าวไปวัดขนาดจริงที่สร้างได้ด้วยกล้อง JEM 2010 light microscope ซึ่งจะได้อ่านค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ขนาดพารามิเตอร์ของอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงที่ออกแบบ (ตามตารางที่ 4.8) และได้จากการสร้างจริง

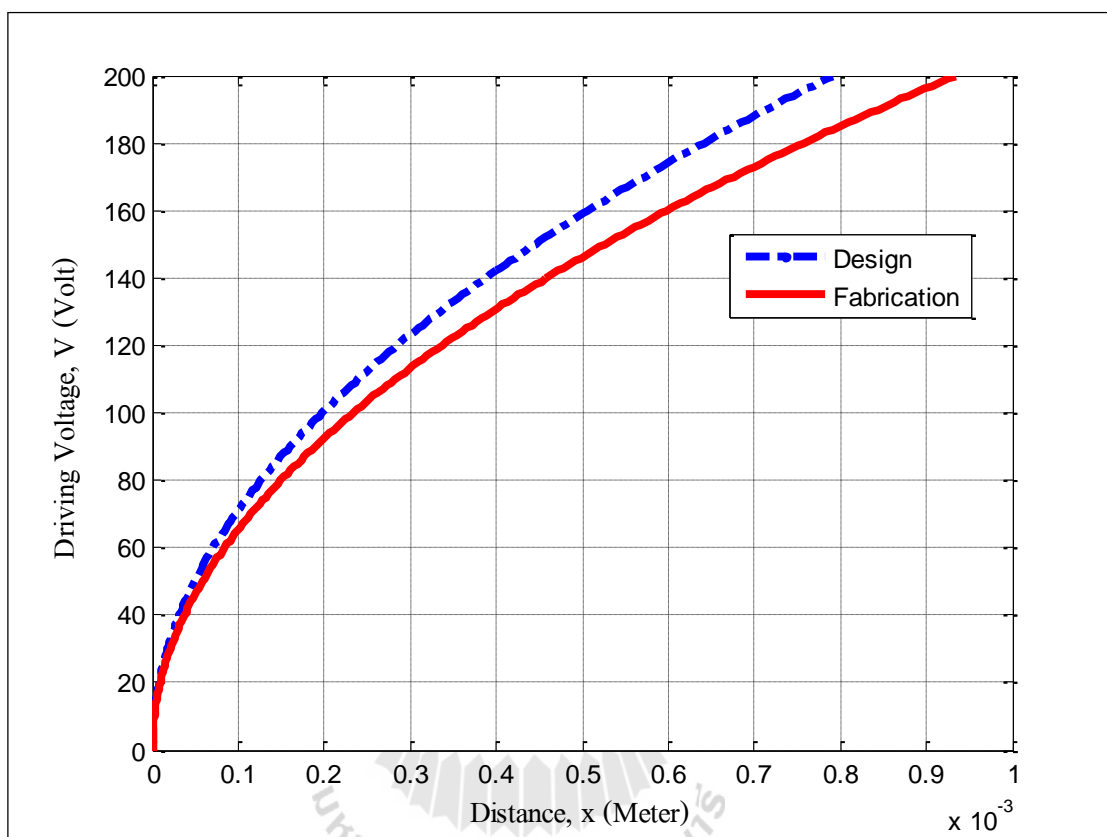
พารามิเตอร์	w_m	l_m	w_f	l_a	l_b	w	g	b	t
ออกแบบ (μm)	30	200	130	500	3000	50	50	50	350
สร้างจริง (μm)	22.91	197.36	131.79	494.27	2969.21	43.17	62.56	50.22	356

จากตารางที่ 5.1 จะเห็นได้ว่าขนาดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้จากการออกแบบและจากการสร้างโครงสร้างจริง มีค่าใกล้เคียงกันมาก แสดงให้เห็นว่าการสร้างโครงสร้างจากกระบวนการ เอกซ์เรย์ลิโธกราฟี ทำให้ได้โครงสร้างที่มีขนาดใกล้เคียงกับการออกแบบสูงมากนั่นเอง



รูปที่ 5.10 ขนาดโครงสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงที่สร้างได้จริง

เมื่อได้ขนาดพารามิเตอร์ของอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงที่สมบูรณ์แล้ว ต่อไปเป็นการจำลองการตอบสนองต่อแรงดันอินพุต โดยเปรียบเทียบการจำลองผลการตอบสนองระหว่างโครงสร้างที่ออกแบบและโครงสร้างที่สร้างสำเร็จ ดังรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.11 เปรียบเทียบผลการจำลองการตอบสนองของตัวขับเร้าทางไฟฟ้าสถิต ที่ออกแบบกับที่สร้างได้จริง

จากผลการจำลองพบว่า แรงดันขับเคลื่อนของตัวขับเร้าทั้งที่ได้จากการออกแบบ และที่ได้จากการสร้างโครงสร้างจริงมีค่าต่างกันเล็กน้อย โดยหากต้องการให้ชี้หัวเคลื่อนที่ไปได้ระยะทางที่เท่ากัน แรงดันขับเคลื่อนที่ต้องป้อนให้กับ โครงสร้างของตัวขับเร้าที่สร้างจริงจะมีค่าต่ำกว่า โครงสร้างตัวขับเร้าที่ได้จากการออกแบบ จากรูปที่ 5.11 ถ้าต้องการให้ชี้หัวของตัวขับเร้าเคลื่อนที่ไปได้ระยะทาง 200 μm โครงสร้างตัวขับเร้าที่ออกแบบจะต้องป้อนแรงดันขับเคลื่อน 100 V ส่วนโครงสร้างตัวขับเร้าที่สร้างจริงจะต้องป้อนแรงดันขับเคลื่อน 90 V จึงจะเคลื่อนที่ได้ตามระยะที่กำหนด

5.2 รูปแบบของอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงที่มีการสร้างขึ้นในงานวิจัย

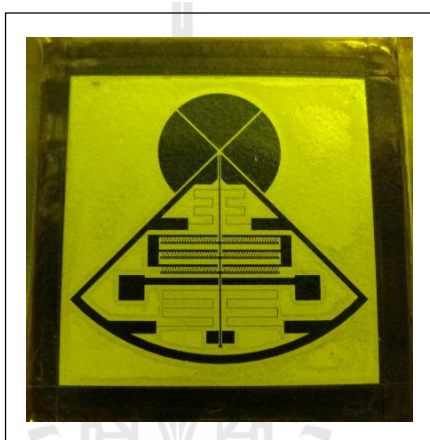
หลังจากการนำเสนอโครงสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงที่มีความสมบูรณ์ที่สุดไปแล้ว ในหัวข้อนี้จะเป็นการนำเสนอลักษณะโครงสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงรูปแบบต่าง ๆ ที่ได้มีการออกแบบและสร้างขึ้นในงานวิจัยนี้



รูปที่ 5.12 โครงสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงที่มีตัวขับเร้าทางไฟฟ้าสถิตแบบซีหวี และมีคานสปริงแบบ fixed-fixed beam

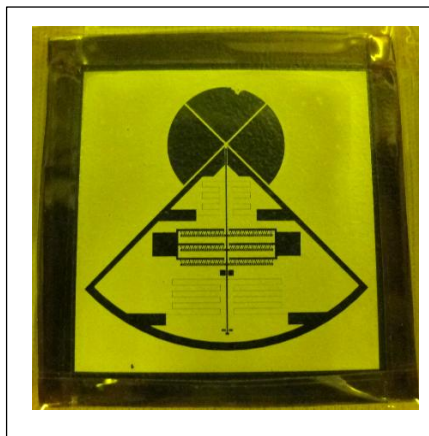
จากรูปที่ 5.12 โครงสร้างของอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงนี้จะมีตัวขับเร้าทางไฟฟ้าสถิตเป็นแบบซีหวี จะเห็นว่าจากลักษณะของโครงสร้างตัวขับเร้านี้มีจำนวนซีหวีน้อยมาก คือมีซีหวีทั้งหมด 26 คู่ และมีสปริงเป็นแบบ fixed-fixed beam ซึ่งเมื่อนำมาขึ้นรูปโครงสร้างและทดสอบการทำงาน ผลปรากฏว่าตัวขับเร้าไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ เนื่องจากซีของตัวขับเร้ามีจำนวนน้อยเกินไป อีกทั้งสปริงก็มีความยืดหยุ่นค่อนข้างน้อยนั่นเอง

อุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงรูปแบบต่อมาเป็นอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงที่มีตัวขับเร้าทางไฟฟ้าสถิตเป็นแบบซี่หวี และมีสปริงเป็นแบบ serpentine ซึ่งวางตัวตั้งฉากกับระจกจุดภาค ดังรูปที่ 5.13 โดยโครงสร้างแบบนี้มีจำนวนซี่ตัวขับเร้าทั้งหมด 180 คู่ มีขนาดความกว้างของซี่ 30 μm มีขนาดของช่องว่างระหว่างซี่ 30 μm และมีสปริงทั้งหมด 6 ชุด โดยที่สปริงส่วนบนกับส่วนล่างจะมีขนาดไม่เท่ากัน เมื่อทำการสร้างและทดสอบการทำงานของอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงแบบนี้ ผลปรากฏว่าตัวขับเร้าสามารถเคลื่อนที่ได้ แต่เคลื่อนที่ไปได้ระยะทางเพียงเล็กน้อยก็เกิดการลัดวงจรของซี่หวีที่อยู่ติดกัน จึงไม่สามารถใช้งานได้



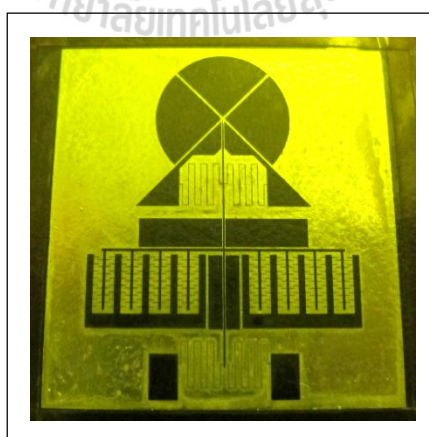
รูปที่ 5.13 โครงสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงที่มีตัวขับเร้าทางไฟฟ้าสถิตแบบซี่หวี และมีคานสปริงแบบ serpentine 8 ชุด วางตัวตั้งฉากกับระจกจุดภาค

โครงสร้างแบบต่อมามีลักษณะตัวขับเร้าทางไฟฟ้าสถิตเป็นแบบซี่หวีเช่นกัน และมีสปริงเป็นแบบ serpentine ซึ่งวางตัวตั้งฉากกับระจกจุดภาค โดยโครงสร้างแบบนี้มีจำนวนซี่หวีของตัวขับเร้าที่สามารถเคลื่อนที่ได้ทั้งหมด 180 คู่ มีขนาดความกว้างของซี่ 30 μm มีขนาดของช่องว่างระหว่างซี่ 30 μm และมีสปริงทั้งหมด 12 ชุด ดังรูปที่ 5.14 สปริงส่วนบนกับส่วนล่างของโครงสร้างนี้มีขนาดไม่เท่ากัน เมื่อทำการสร้างและทดสอบการทำงานของอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงแบบนี้ ผลปรากฏว่าตัวขับเร้าสามารถเคลื่อนที่ได้ แต่เคลื่อนที่ไปได้ระยะทางเพียงเล็กน้อยก็เกิดการลัดวงจรของซี่หวีที่อยู่ติดกัน จึงไม่สามารถใช้งานได้เช่นเดียวกับโครงสร้างในรูปที่ 5.13



รูปที่ 5.14 โครงสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงที่มีตัวขั้วเร้าทางไฟฟ้าสถิตแบบซี่หวี
และมีคานสปริงแบบ serpentine 12 ขด วางตัวตั้งฉากกับกระจกจุลภาค

จากปัญหาการเคลื่อนที่ที่ได้ระยะทางน้อยเกินไปของโครงสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงที่มีตัวขั้วเร้าแบบซี่หวีดังรูปที่ 5.13 และ 5.14 ทำให้ต้องออกแบบโครงสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงใหม่ โดยเปลี่ยนตัวขั้วเร้าทางไฟฟ้าสถิตจากแบบซี่หวีเป็นแบบแผ่นคู่ขนาน ซึ่งจากผลการจำลองทางคณิตศาสตร์ของตัวขั้วเร้าทางไฟฟ้าสถิตแบบแผ่นคู่ขนานในบทที่ 4 จะเห็นได้ว่า ยิ่งตัวขั้วเร้ามีจำนวนแผ่นตัวนำที่เคลื่อนที่ได้มาก แรงดันไฟฟ้าแบบติดที่จะดึงให้แผ่นตัวนำเคลื่อนที่มาชนกันก็จะยิ่งต่ำ



รูปที่ 5.15 โครงสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงที่มีตัวขั้วเร้าทางไฟฟ้าสถิตแบบแผ่นคู่ขนาน
และมีคานสปริงแบบ serpentine 12 ขด วางตัวขนานกับกระจกจุลภาค

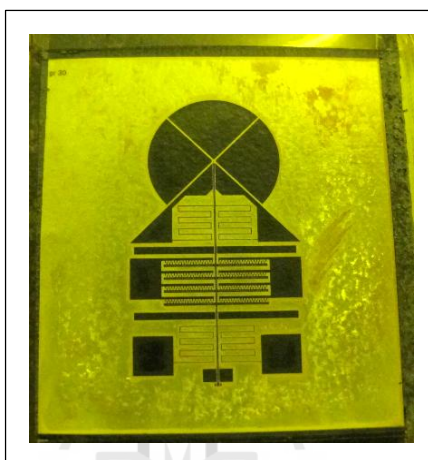
จากรูปที่ 5.15 ตัวขั้วเร้าทางไฟฟ้าสถิตจะเป็นแบบแผ่นคู่ขนาน มีแผ่นตัวนำที่สามารถเคลื่อนที่ได้จำนวน 112 แผ่น มีสปริงเป็นแบบ serpentine วางตัวขนานกับกระจกจุลภาคทั้งหมด 12 ชุด โดยที่สปริงส่วนบนและส่วนล่างมีขนาดเท่ากัน เมื่อนำมาสร้างและทดสอบการทำงานผลปรากฏว่า ตัวขั้วเร้าไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ และโครงสร้างบริเวณแผ่นตัวนำมีการ โกงตัวขึ้นมาอย่างชัดเจน เนื่องจากโครงสร้างบริเวณดังกล่าวมีน้ำหนักมากกว่าบริเวณอื่น

สำหรับโครงสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงที่มีตัวขั้วเร้าเป็นแบบแผ่นคู่ขนานที่มีการสร้างขึ้นในงานวิจัยนี้อีกสองแบบก็คือ ตัวขั้วเร้าแบบแผ่นคู่ขนานที่มีแผ่นตัวนำ 120 คู่ โดยมีสปริงแบบ serpentine วางตัวขนานกับกระจกจุลภาค ดังรูป 5.16(ก) และอีกแบบหนึ่งคือ ตัวขั้วเร้าแบบแผ่นคู่ขนานที่มีแผ่นตัวนำ 120 คู่ โดยมีสปริงแบบ serpentine วางตัวตั้งฉากกับกระจกจุลภาค ดังรูปที่ 5.16(ข) ซึ่งปัญหาของโครงสร้างแบบนี้ก็เหมือนกันกับ โครงสร้างในรูป 5.15 นั่นคือ เกิดการ โกงตัวอย่างชัดเจนบริเวณ โครงสร้างแผ่นตัวนำ ทำให้ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้



รูปที่ 5.16 โครงสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงที่มีตัวขั้วเร้าทางไฟฟ้าสถิตแบบแผ่นคู่ขนาน และมีคานสปริงแบบ serpentine 12 ชุด

โครงสร้างแบบสุดท้ายที่มีการพัฒนาในงานวิจัยนี้คือ อุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงที่มีตัวขับเร้าทางไฟฟ้าสถิตเป็นแบบซี่หวีซึ่งมีซี่หวีที่เคลื่อนที่ได้ 128 ซี่ และมีสปริงแบบ serpentine 12 ขด วางตัวตั้งฉากกับกระจกจุลภาค ดังรูปที่ 5.17 เมื่อทำการทดสอบการทำงานของโครงสร้างแบบนี้ผลที่ได้คือเมื่อทำการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับตัวขับเร้า ตัวขับเร้าสามารถเคลื่อนที่ไปข้างหน้าได้ แต่เมื่อหยุดป้อนแรงดันไฟฟ้า ตัวขับเร้าไม่กลับมาอยู่ในตำแหน่งเริ่มต้น เนื่องจากสปริงอาจมีความอ่อนตัวเกินไป



รูปที่ 5.17 โครงสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงที่มีตัวขับเร้าทางไฟฟ้าสถิตแบบซี่หวี และมีคานสปริงแบบ serpentine 12 ขด วางตัวตั้งฉากกับกระจกจุลภาค

เมื่อได้โครงสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงที่เสร็จสมบูรณ์แล้ว ต่อไปก็จะเป็นการทดสอบการทำงานของอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสง โดยรายละเอียดต่าง ๆ เกี่ยวกับการทดลองจะกล่าวถึงในบทต่อไป

บทที่ 6

การทดสอบและผลการทดสอบ

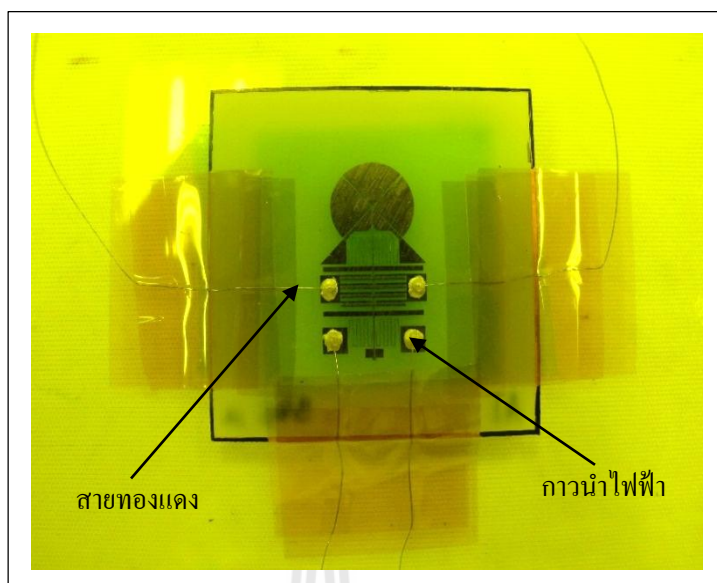
หลังจากได้ทำการสร้างและพัฒนาโครงสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงจนได้รูปแบบที่เหมาะสม พร้อมทั้งจำลองผลเพื่อศึกษาพฤติกรรมการตอบสนองของระบบ ต่อไปจะเป็นการนำเสนอวิธีการทดสอบอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงที่ได้จากการสร้าง โดยจะเริ่มต้นจากการการเชื่อมต่อสายไฟกับโครงสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงและแหล่งจ่ายแรงดันสูง จากนั้นป้อนแรงดันไฟฟ้าเข้าที่ขั้วของตัวขับเร้าเพื่อเป็นการกระตุ้นตัวขับเร้า แล้วปรับแรงดันเพิ่มขึ้น ไปเรื่อย ๆ จนตัวขับเร้าสามารถเคลื่อนที่ได้ ต่อจากนั้นจะเป็นการทดสอบการสวิตซ์แสงจากกระจกจุลภาคของแสงที่เดินทางจากสายใยแก้วนำแสงแบบโหมดเดียว

6.1 การเชื่อมสายอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสง

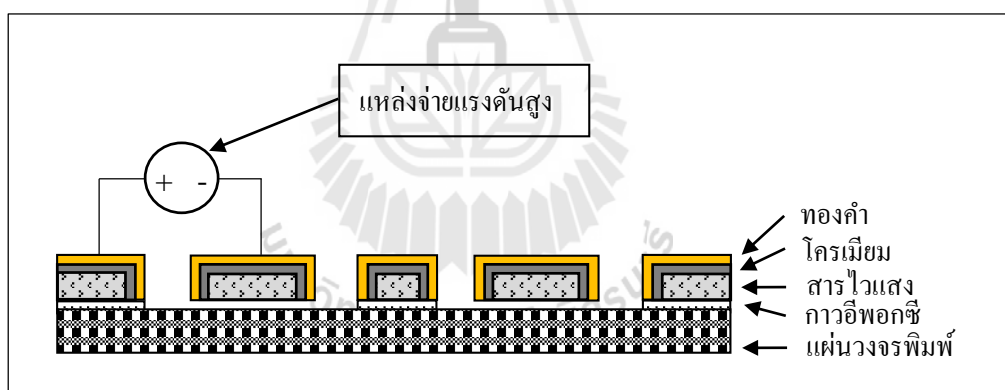
6.1.1 เชื่อมต่อตัวขับเร้าทางไฟฟ้าสถิตกับแหล่งจ่ายแรงดันสูง

เมื่อสร้างโครงสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงจนเสร็จสมบูรณ์ และนำโครงสร้างดังกล่าวยึดติดบนแผ่นวงจรพิมพ์เรียบร้อยแล้ว สิ่งที่ต้องดำเนินการต่อไปคือ การเชื่อมต่อตัวขับเร้าทางไฟฟ้าสถิตกับแหล่งจ่ายแรงดันสูง เนื่องจากอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงที่สร้างขึ้นมีโครงสร้างเป็นพอลิเมอร์เคลือบโลหะนำไฟฟ้าและมีขนาดของจุดเชื่อมต่อค่อนข้างเล็ก หากจะทำการบัดกรีหรือใช้เครื่องเชื่อมสายมาเชื่อมต่อโดยตรงนั้นเป็นสิ่งที่ค่อนข้างลำบาก อีกทั้งโครงสร้างยังไม่แข็งแรงนัก ดังนั้นการเชื่อมต่อตัวขับเร้าทางไฟฟ้าสถิตกับแหล่งจ่ายแรงดันสูงจึงต้องใช้การเชื่อมต่อสายทองแดงกับขั้วของตัวขับเร้าด้วยกาวนำไฟฟ้า

จากรูปที่ 6.1 มีการเชื่อมต่อสายทองแดงกับตัวขับเร้าทางไฟฟ้าสถิตอยู่ 4 จุด คือ จุดที่เป็นโครงสร้างของตัวขับเร้าที่ลอยอยู่ในอากาศ 2 จุด กับจุดที่เป็นโครงสร้างของตัวขับเร้าที่ติดอยู่บนแผ่นวงจรพิมพ์ 2 จุด



รูปที่ 6.1 เชื่อมต่อสายทองแดงกับขั้วตัวขับเร้าทางไฟฟ้าสถิต

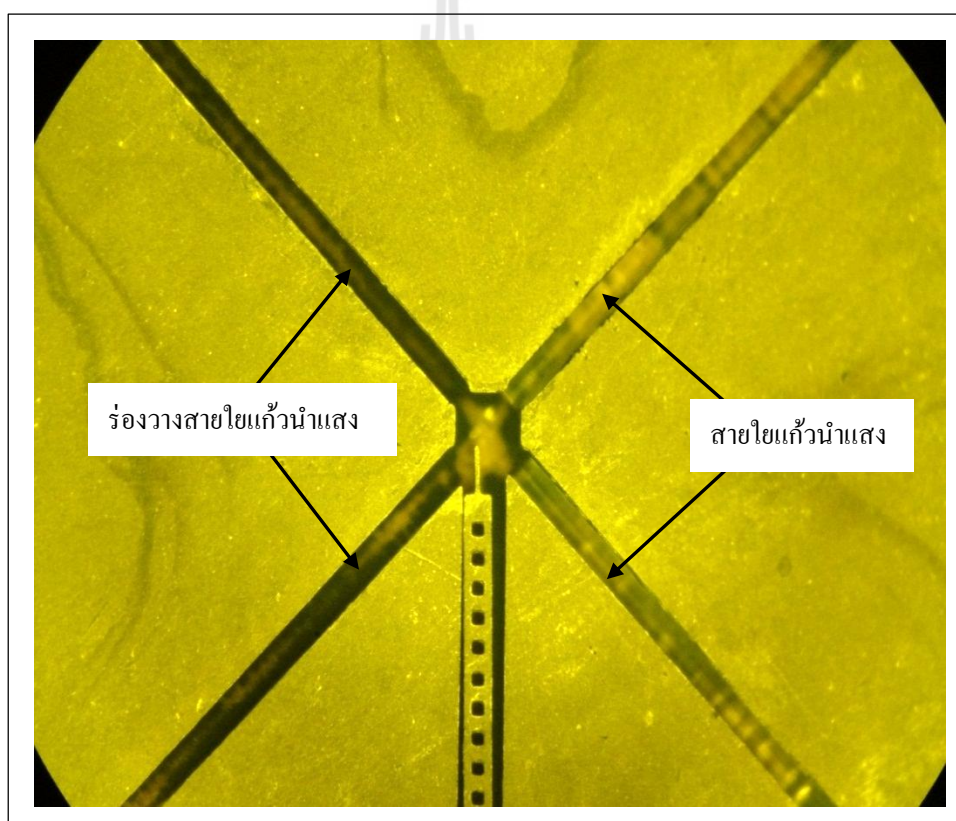


รูปที่ 6.2 เชื่อมสายของอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงกับแหล่งจ่ายแรงดันสูง

รูปที่ 6.2 เป็นการแสดงภาพตัดขวางการเชื่อมต่อตัวขับเร้าทางไฟฟ้าสถิตกับแหล่งจ่ายแรงดันสูง โดยต่อไฟบวกเข้าที่ขั้วของตัวขับเร้าในส่วนที่ติดอยู่บนแผ่นวงจรพิมพ์ และต่อไฟลบเข้าที่ขั้วของตัวขับเร้าในส่วนที่ลอยอยู่ในอากาศ

6.1.2 เชื่อมต่อสายใยแก้วนำแสงกับอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสง

อุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงมีหน้าที่เปลี่ยนทิศทางของแสง ดังนั้นหัวใจหลักอีกอย่างหนึ่งของอุปกรณ์นี้คือกระจกจุดภาค ซึ่งทำหน้าที่สะท้อนแสงที่เดินทางจากสายใยแก้วนำแสงเส้นหนึ่งด้วยมุม 90 องศา เพื่อไปเข้าสายใยแก้วนำแสงอีกเส้นหนึ่ง งานวิจัยนี้ได้ออกแบบให้มีร่องสำหรับวางสายใยแก้วนำแสงขึ้นด้วย เพื่อเป็นแนวทางในการจัดวางสายใยแก้วนำแสงให้วางท่ามุมที่เหมาะสมกับกระจกจุดภาค การวางสายใยแก้วนำแสงลงในร่องที่เตรียมไว้จะต้องอาศัยตัวเชื่อมต่อที่จะยึดให้สายอยู่ในร่อง ดังรูปที่ 6.3 โดยในที่นี้จะใช้กาวอีพ็อกซีโกลีโธมาเป็นตัวเชื่อม เนื่องจากกาวอีพ็อกซีโกลีโธมีความแข็งแรงแต่ก็มีความยืดหยุ่นมากกว่ากาวชนิดอื่น อีกทั้งหาซื้อได้ง่าย

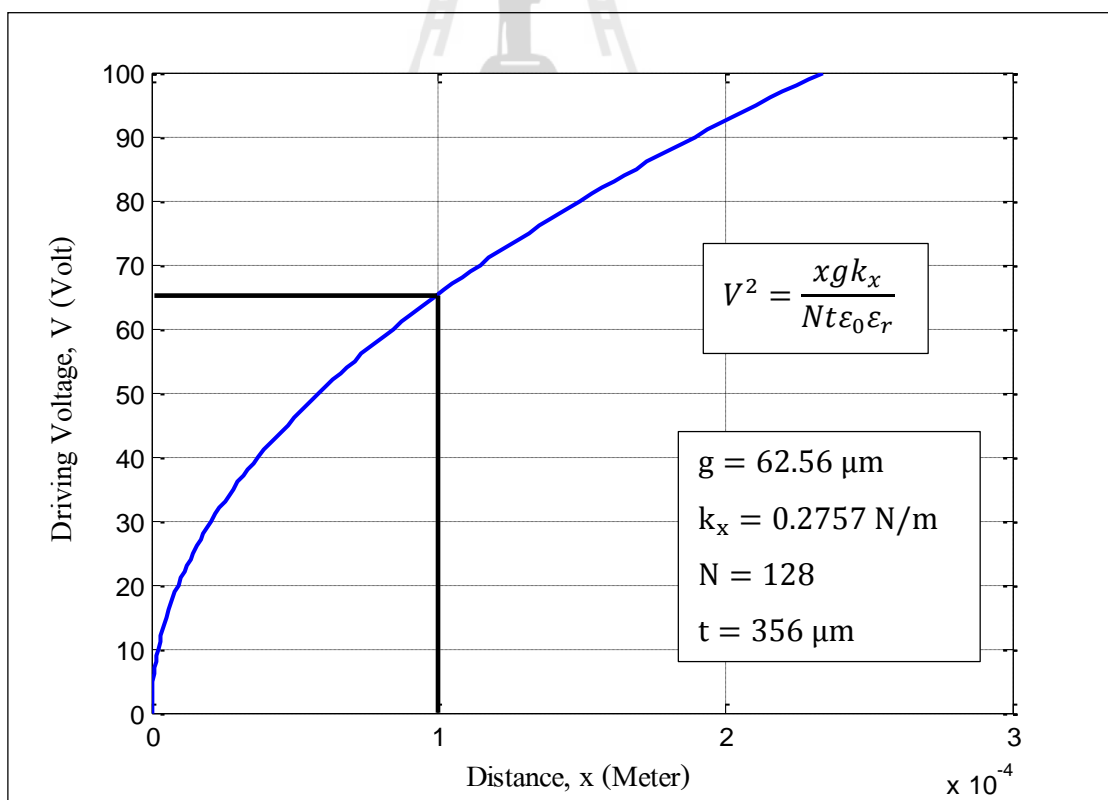


รูปที่ 6.3 เชื่อมต่อสายใยแก้วนำแสงกับอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสง

6.2 การทดสอบการเคลื่อนที่

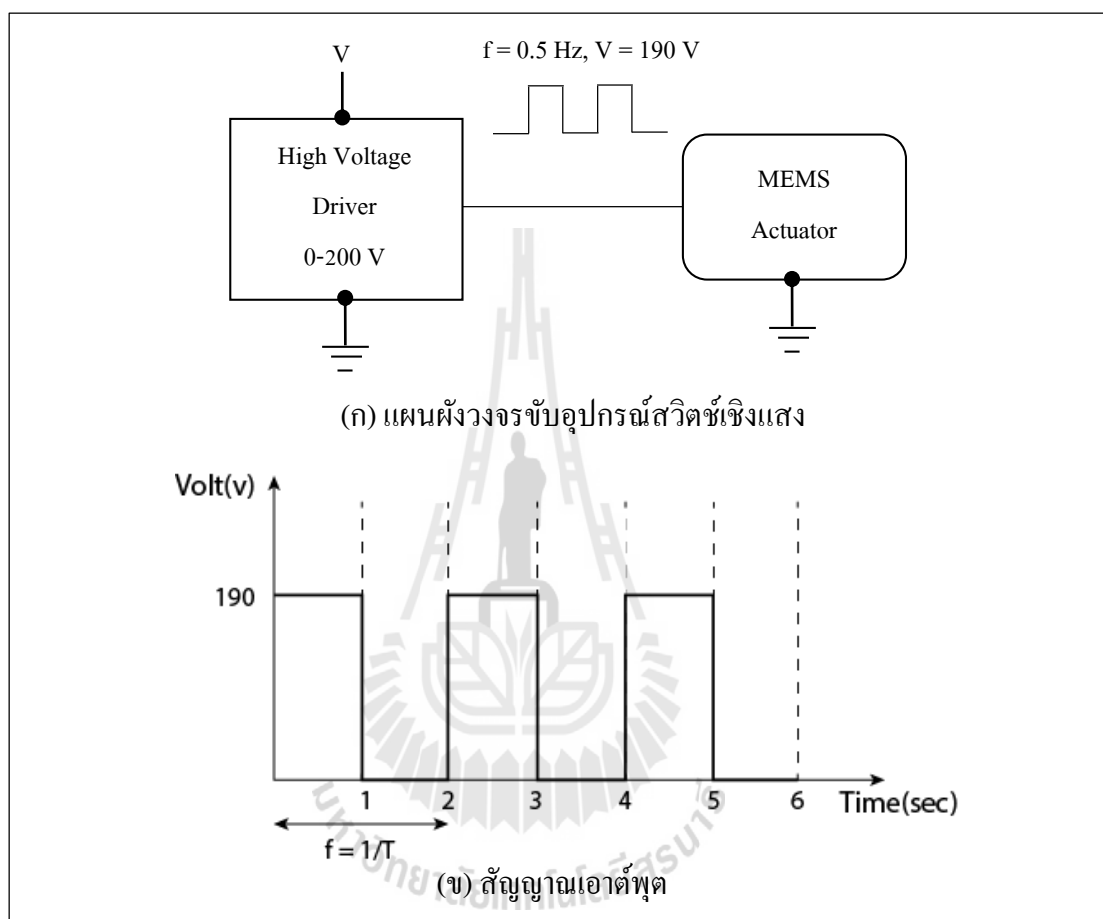
การกระตุ้นอุปกรณ์ประเภทไฟฟ้าสถิตโดยทั่วไปแล้วจะใช้แรงดันสำหรับความคุมที่มีค่าสูง แต่มีค่ากระแสที่ต่ำ โดยมากอุปกรณ์ประเภทนี้จะมีลักษณะเป็นตัวเก็บประจุ การทดสอบการทำงานของอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงจะเริ่มจากการป้อนแรงทางกล ด้วยการใช้อุปกรณ์ปลายแหลมสะกิดที่ชี้หัวของตัวขับเคลื่อนส่วนที่ลอยจากฐาน ให้เกิดการเคลื่อนไปมาเพื่อสังเกตว่าชี้หัวสามารถเคลื่อนที่ได้โดยอิสระไม่สัมผัสกับชี้หัวส่วนที่ติดกับฐาน ผลการทดสอบดังกล่าวพบว่าชี้หัวของตัวขับเคลื่อนของงานวิจัยนี้สามารถขยับได้อย่างอิสระ จากนั้นทำการทดสอบขั้นที่สองด้วยการใช้แก๊สไนโตรเจนความดันประมาณ 1.5 psi เป่าบริเวณชี้หัวของตัวขับเคลื่อนเกิดการเคลื่อนที่

วิธีต่อมาเป็นวิธีที่สำคัญที่สุดคือ การป้อนแรงดันไฟฟ้าแก่ตัวขับเคลื่อนให้เกิดแรงไฟฟ้าสถิตที่ชี้หัวของตัวขับเคลื่อนเกิดการเคลื่อนที่ รูปที่ 6.4 เป็นการนำขนาดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงที่สร้างขึ้นจริง มาจำลองหาผลตอบสนองการทำงานของตัวขับเคลื่อน โดยจากกราฟจะเห็นว่าเมื่อป้อนแรงดันขับเคลื่อน 65 V ชี้หัวของตัวขับเคลื่อนจะเคลื่อนที่ได้ 100 μm



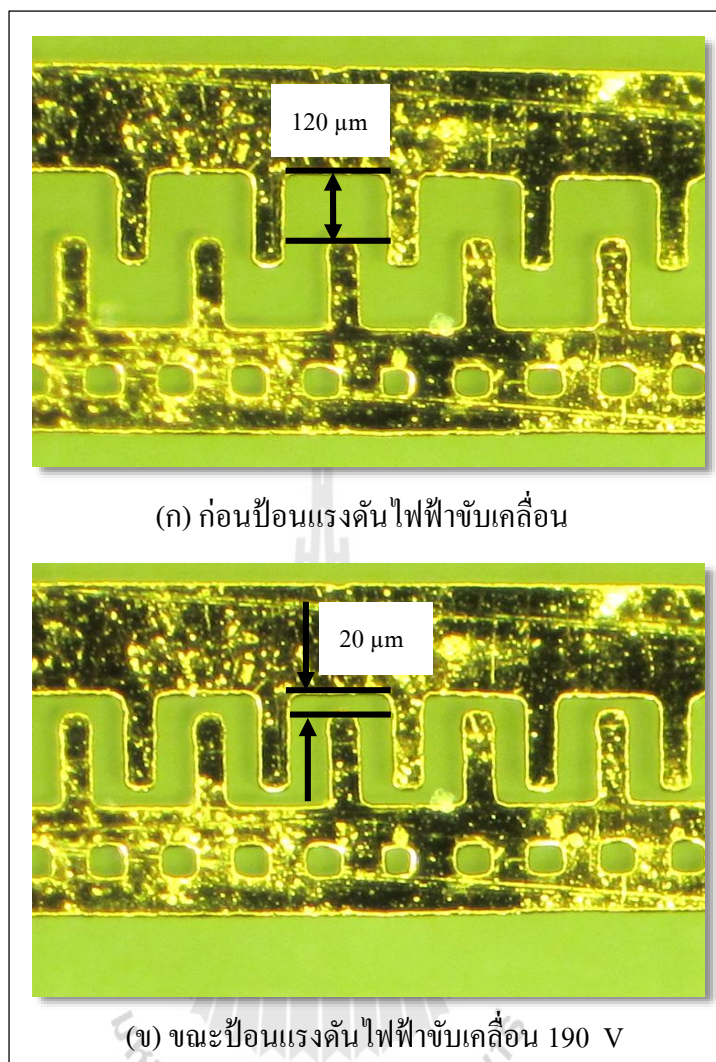
รูปที่ 6.4 ผลการจำลองการตอบสนองของโครงสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงที่สร้างขึ้นได้จริง

การควบคุมตัวขับเร้าในงานวิจัยนี้จะใช้สัญญาณพัลส์ที่มีแรงดัน 0 ถึง 200 V ความถี่ 0.5 Hz ป้อนให้กับอุปกรณ์ ซึ่งรูปที่ 6.5 เป็นแผนผังของวงจรขับและลักษณะสัญญาณพัลส์ที่เกิดจากแหล่งจ่ายแรงดันสูง



รูปที่ 6.5 ชุดขับอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงในงานวิจัย

ในการทดสอบจะทำการปรับค่าแรงดันเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนกว่าตัวขับเร้าจะสามารถเคลื่อนที่ได้ระยะทางที่ต้องการคือ 100 μm เมื่อปรับแรงดันเพิ่มขึ้นจนถึง 190 V พบว่าตัวขับเร้าสามารถเคลื่อนที่ได้ตามระยะทางที่ต้องการ 100 μm



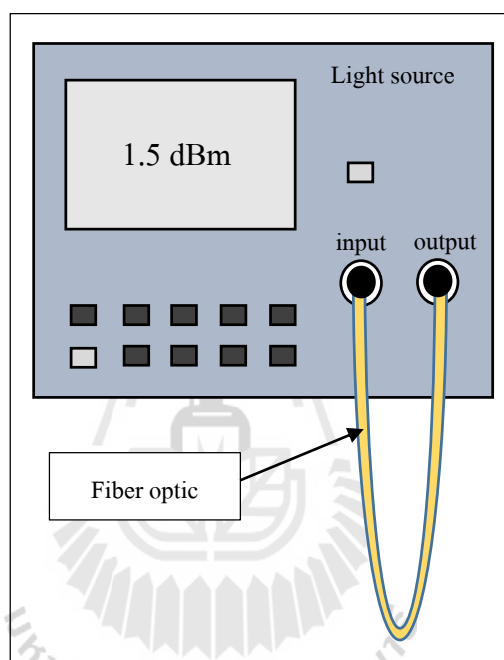
รูปที่ 6.6 ทดสอบการเคลื่อนที่ของตัวขั้วเร้าทางไฟฟ้าสถิตแบบซี่หวี

โดยรูปที่ 6.6(ก) เป็นลักษณะการวางตัวของซี่หวีเมื่อไม่มีการป้อนแรงดันไฟฟ้า ซึ่งระยะห่างระหว่างซี่หวีมีขนาด $120\ \mu\text{m}$ และในรูปที่ 6.6(ข) เป็นลักษณะการเคลื่อนที่ของซี่หวีเมื่อมีการป้อนแรงดันไฟฟ้า ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้า $190\ \text{V}$ ระยะห่างระหว่างซี่หวีจะมีขนาดแคบลง โดยมีขนาดเหลือเพียง $20\ \mu\text{m}$

เปรียบเทียบการจำลองผลตอบสนองทางคณิตศาสตร์ของโครงสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงที่สร้างขึ้นกับการทดสอบจริงพบว่า หากต้องการให้ซี่หวีเคลื่อนที่ไปได้ระยะทาง $100\ \mu\text{m}$ ผลการจำลองบอกว่าต้องป้อนแรงดัน $65\ \text{V}$ แต่ในการทดสอบจริงต้องป้อนแรงดันถึง $190\ \text{V}$ ซึ่งมีค่าสูงกว่าผลการจำลองทางคณิตศาสตร์ 3 เท่า ซี่หวีของตัวขั้วเร้าจึงจะสามารถเคลื่อนที่ได้ระยะทางที่กำหนด

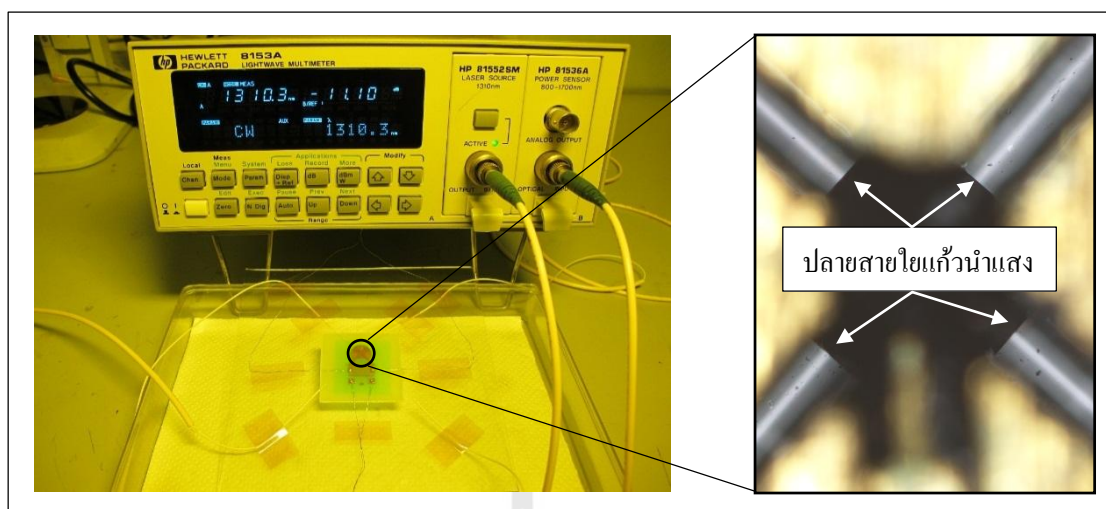
6.3 การทดสอบการสวิตช์แสง

ทดสอบการสวิตช์แสงด้วยกระจกจุลภาคของอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงที่มีโครงสร้างเป็น โพลีเมอร์เคลือบโลหะทองคำ โดยใช้แหล่งกำเนิดแสง (Lightwave multimeter) ยี่ห้อ HP รุ่น Hewlett Packard 8153A ความยาวคลื่น 1310 nm เริ่มต้นการทดลองโดยการ วัดค่ากำลังของแสงที่เครื่องสามารถส่งได้ด้วยการรับส่งแสงโดยตรงผ่านสายใยแก้วนำแสงเส้นเดียว ดังรูปที่ 6.7 ซึ่งสามารถวัดค่ากำลังแสงได้ 1.5 dBm

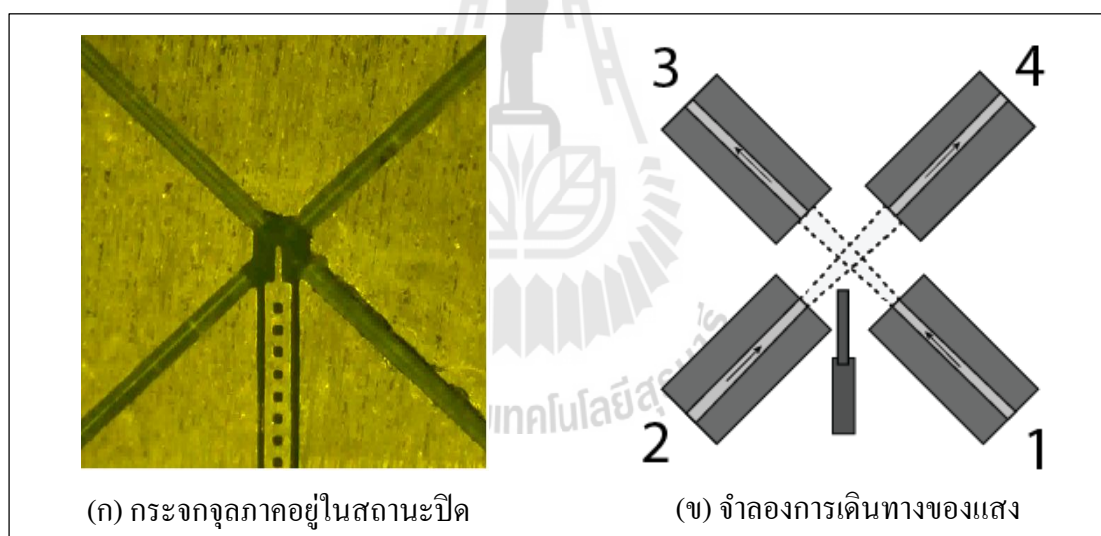


รูปที่ 6.7 วัดค่ากำลังของแสงที่ส่งออกมาจากแหล่งจ่ายสัญญาณแสง

ต่อจากนั้นเชื่อมต่อสายใยแก้วนำแสงของอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงกับแหล่งจ่ายสัญญาณแสง ดังรูปที่ 6.8 แล้วทดลองส่งสัญญาณแสงระหว่างสายใยแก้วนำแสงสองเส้นผ่านตัวกลางซึ่งเป็น อากาศ ดังรูปที่ 6.9 และทำการวัดค่ากำลังของแสงที่สามารถรับส่งได้ ซึ่งจะได้ผลการทดสอบดัง ตารางที่ 6.1



รูปที่ 6.8 เชื่อมต่อสายใยแก้วนำแสงของอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงกับแหล่งจ่ายสัญญาณแสง



(ก) กระจกจุกถูกปิดอยู่ในสถานะปิด

(ข) จำลองการเดินทางของแสง

รูปที่ 6.9 ทดสอบการรับส่งแสงผ่านตัวกลางซึ่งเป็นอากาศ

ตารางที่ 6.1 ค่าการรับส่งแสงผ่านตัวกลางที่เป็นอากาศ หน่วย dBm

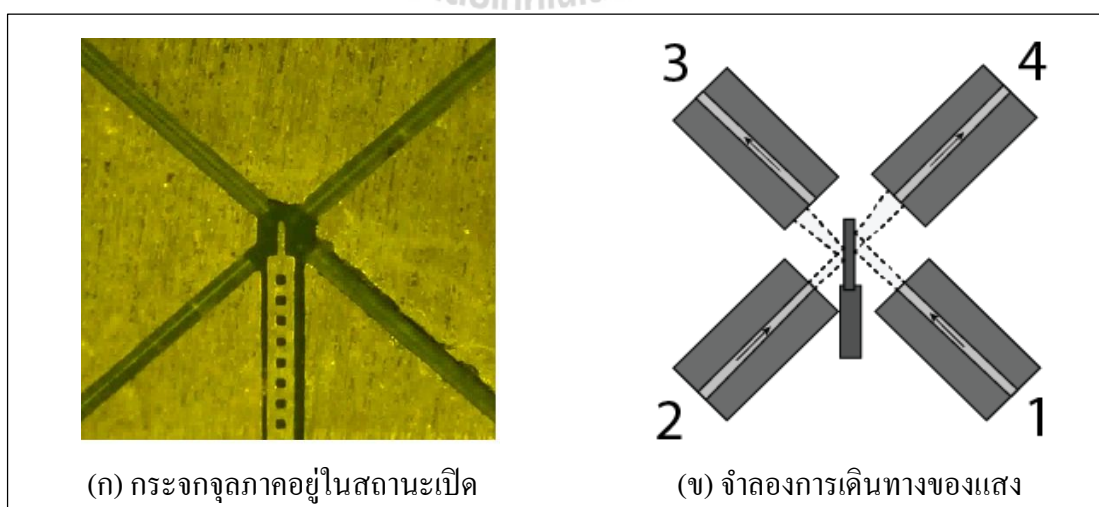
Input Port	Output Port (dBm)			
	1	2	3	4
1	-	-39.64	-11.17	-38.79
2	-38.55	-	-38.55	-17.81

ตารางที่ 6.2 ค่าการสูญเสียของแสงเนื่องจากการส่งแสงผ่านตัวกลางที่เป็นอากาศเทียบกับการส่งผ่านสายใยแก้วนำแสงโดยตรง หน่วย dB

Input Port	Output Port (dB)			
	1	2	3	4
1	-	-41.14	-12.67	-40.29
2	-40.05	-	-40.05	-19.32

จากตารางที่ 6.2 เมื่อส่งสัญญาณแสงจากสายใยแก้วนำแสงเส้นที่ 1 ผ่านตัวกลางซึ่งเป็นอากาศ พบว่าสายใยแก้วนำแสงเส้นที่ 3 สามารถวัดค่าแสงที่รับได้ดีที่สุด -11.17 dBm โดยคิดเป็นค่าการสูญเสียของแสงเนื่องจากการส่งผ่านอากาศเมื่อเทียบกับการส่งผ่านสายใยแก้วนำแสงโดยตรงได้ -12.67 dB และเมื่อส่งสัญญาณแสงจากสายใยแก้วนำแสงเส้นที่ 2 ผ่านตัวกลางซึ่งเป็นอากาศนั้น พบว่าสายใยแก้วนำแสงเส้นที่ 4 สามารถวัดค่าของแสงที่รับได้ดีที่สุด -17.81 dBm คิดค่าการสูญเสียของแสงเนื่องจากการส่งผ่านอากาศเมื่อเทียบกับการส่งผ่านสายใยแก้วนำแสงโดยตรงได้ -19.32 dB

ต่อมาเป็นการทดสอบการรับส่งแสงผ่านการสวิตช์แสงจากกระจกจุดภาค ดังรูปที่ 6.10 โดยให้สายใยแก้วนำแสงเส้นที่ 1 เป็นตัวส่งสัญญาณแสง และวัดค่าแสงที่รับได้ของสายใยแก้วนำแสงเส้นที่ 2, 3 และ 4 จากนั้นให้สายใยแก้วนำแสงเส้นที่ 2 เป็นตัวส่งสัญญาณแสง และวัดค่าแสงที่รับได้ของสายใยแก้วนำแสงเส้นที่ 1, 3 และ 4 ตามลำดับ โดยการทดสอบจะแบ่งออกเป็นเมื่อกระจกจุดภาคอยู่ในสถานะเปิดและกระจกจุดภาคอยู่ในสถานะปิด ซึ่งจะได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 6.3



รูปที่ 6.10 ทดสอบการรับส่งแสงโดยการสะท้อนจากกระจกจุดภาค

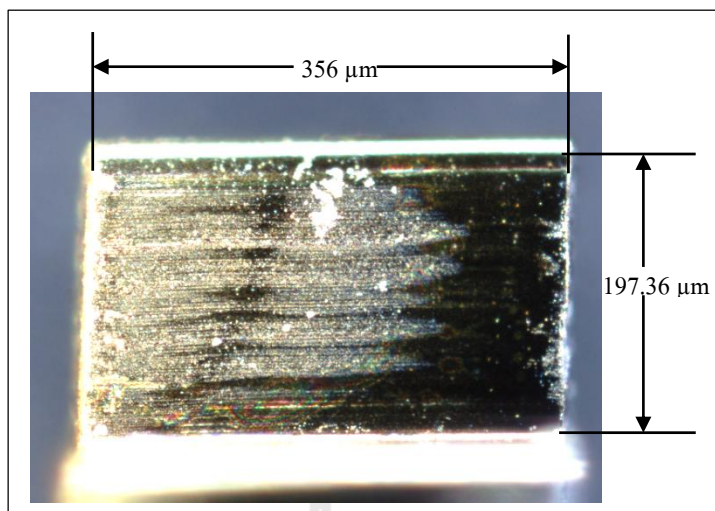
ตารางที่ 6.3 ค่าการรับส่งแสงผ่านการสะท้อนจากกระจกจุลภาค หน่วย dBm

Input Port	Output Port (dBm)							
	Switch on				Switch off			
	1	2	3	4	1	2	3	4
1	-	-38.42	-38.22	-22.22	-	-38.42	-11.17	-38.42
2	-38.30	-	-37.64	-38.73	-38.34	-	-38.44	-17.81

ตารางที่ 6.4 ค่าการสูญเสียของแสงเนื่องจากการสะท้อนของกระจกจุลภาคเทียบกับการส่งผ่านอากาศ หน่วย dB

Input Port	Output Port (dB)							
	Switch on				Switch off			
	1	2	3	4	1	2	3	4
1	-	-27.25	-27.05	-11.05	-	-27.25	0	-27.25
2	-20.49	-	-19.82	-20.92	-20.53	-	-20.63	0

จากตารางที่ 6.3 และ 6.4 จะเห็นว่าเมื่อกระจกจุลภาคอยู่ในสถานะเปิดคือมีกระจกจุลภาคเข้าไปขวางทางเดินของแสง จะเห็นว่าเมื่อส่งสัญญาณแสงจากสายใยแก้วนำแสงเส้นที่ 1 แล้วแสงเกิดการสะท้อนจากกระจกจุลภาคพบว่าสายใยแก้วนำแสงเส้นที่ 4 สามารถวัดค่าของแสงที่รับได้ดีที่สุดที่ -22.22 dBm โดยคิดค่าการสูญเสียของแสงเนื่องจากการสวิตช์จากกระจกจุลภาคเทียบกับการส่งผ่านอากาศได้ -11.05 dB และเมื่อส่งสัญญาณแสงจากสายใยแก้วนำแสงเส้นที่ 2 แล้วแสงเกิดการสะท้อนจากกระจกจุลภาคพบว่าไม่มีสายใยแก้วนำแสงที่สามารถรับแสงที่สะท้อนจากกระจกจุลภาคได้เลย จากค่าการสูญเสียของแสงเนื่องจากการสวิตช์ของการรับส่งแสงระหว่างสายใยแก้วนำแสงเส้นที่ 1 กับ 4 จะเห็นว่ามีความต่างสูง น่าจะมีสาเหตุมาจากผนังด้านข้างของกระจกจุลภาคบริเวณที่เกิดการสะท้อนแสงมีผิวค่อนข้างขรุขระ ดังรูปที่ 6.11 จึงทำให้เมื่อแสงเดินทางมาตกกระทบที่ผิวของกระจกจุลภาค มุมของแสงที่สะท้อนจากกระจกจุลภาคจึงอาจมีขนาดไม่ตรงกับ core ของสายใยแก้วนำแสงเส้นที่ 4 จึงทำให้สายใยแก้วนำแสงเส้นที่ 4 รับแสงได้น้อยนั่นเอง



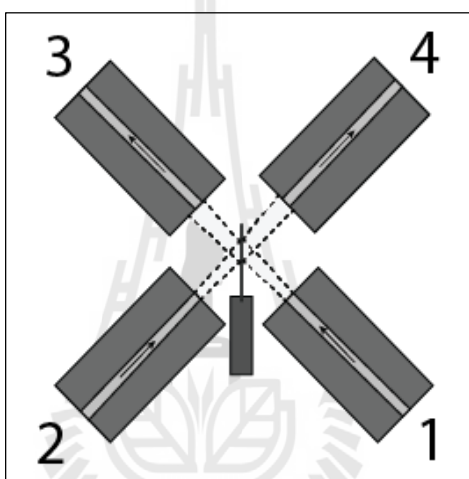
รูปที่ 6.11 พื้นผิวบริเวณผนังด้านข้างของกระจกจุลภาค

เมื่อกระจกจุลภาคอยู่ในสถานะปิดคือไม่มีกระจกจุลภาคขวางทางเดินของแสง พบว่าเมื่อส่งสัญญาณแสงจากสายใยแก้วนำแสงเส้นที่ 1 สายใยแก้วนำแสงเส้นที่ 2 และ 4 ไม่สามารถรับแสงได้เลย ส่วนสายใยแก้วนำแสงเส้นที่ 3 สามารถรับแสงได้เท่ากับกรณีที่ส่งแสงผ่านอากาศนั่นคือ -11.17 dBm และเมื่อส่งสัญญาณแสงจากสายใยแก้วนำแสงเส้นที่ 2 สายใยแก้วนำแสงเส้นที่ 1 และ 3 ก็ไม่สามารถรับแสงได้เลย แต่สายใยแก้วนำแสงเส้นที่ 4 สามารถรับแสงได้เท่ากับกรณีที่ส่งแสงผ่านอากาศซึ่งก็คือ -17.81 dBm

จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงของงานวิจัยนี้สามารถสวิตซ์แสงได้เพียงด้านเดียว เนื่องจากกระจกจุลภาคที่สร้างขึ้นมีขนาดความกว้างถึง 22.91 μm ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่า core ของสายใยแก้วนำแสงแบบโหมคเดี่ยว ที่มีขนาดเพียง 9 μm ทำให้เมื่อกระจกจุลภาคเคลื่อนที่เข้าไปขวางทางเดินของแสง แสงที่เดินทางจากสายใยแก้วนำแสงเส้นที่ 2 แล้วสะท้อนกับกระจกจุลภาคจึงมีขนาดของมุมไม่ตรงกับ core ของสายใยแก้วนำแสงเส้นที่ 3 ทำให้สายใยแก้วนำแสงเส้นที่ 3 ไม่สามารถรับแสงที่สะท้อนจากกระจกจุลภาคได้นั่นเอง

6.4 แนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสง

เนื่องจากกระจุกจุลภาคของงานวิจัยนี้มีขนาดใหญ่ ทำให้ไม่สามารถสวิตช์แสงพร้อมกันทั้งสองทางได้ ดังนั้นหากต้องการให้อุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงแบบ 2x2 สามารถทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ จะต้องสร้างโครงสร้างของกระจุกจุลภาคให้มีขนาดความกว้างน้อยกว่า $10\ \mu\text{m}$ อุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงก็จะสามารถสวิตช์แสงได้พร้อมทั้งสองทางได้ ดังรูปที่ 6.12 ซึ่งจะเห็นว่ากระจุกจุลภาคมีขนาดความกว้างน้อยกว่า core ของสายใยแก้วนำแสง ทำให้แสงที่สะท้อนจากกระจุกจุลภาคมีขนาดของมุมที่พอดีในการสวิตช์แสงพร้อมกันทั้งสองทาง



รูปที่ 6.12 โครงสร้างกระจุกจุลภาคที่เหมาะสม

และหากต้องการให้การสูญเสียของแสงเนื่องจากการสวิตช์มีค่าลดลง ก็ต้องสร้างกระจุกจุลภาคให้พื้นผิวของผนังด้านข้างบริเวณที่ใช้ในการสะท้อนแสงมีความเรียบมากกว่านี้

บทที่ 7

สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาการสร้างอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงสำหรับใช้งานกับเส้นใยนำแสงแบบโหมดเดี่ยวที่มีขนาดของ core 9 μm และมีขนาดของ core เมื่อรวมกับ cladding เท่ากับ 125 μm อุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงถูกสร้างขึ้นจากกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีอัลตราไวโอเลตและรังสีเอกซ์จากระบบลำเลียงแสง 6a : DXL ของสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) เพื่อเป็นต้นแบบสำหรับองค์ความรู้ใหม่ในการพัฒนาการสร้างอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสง ตัวขับเคลื่อนไฟฟ้าสถิตหรือแม้แต่อุปกรณ์ในระบบกลไฟฟ้าจุลภาคให้ดียิ่งขึ้น โดยเริ่มตั้งแต่การศึกษาลักษณะโครงสร้าง วัสดุที่ใช้ในการสร้างจนถึงกระบวนการสร้าง พร้อมทั้งทำการออกแบบ สร้างและพัฒนา รูปแบบโครงสร้างอย่างต่อเนื่อง อุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงของงานวิจัยนี้มีโครงสร้างเป็นสารไวแสงแบบลบ SU-8 เคลือบด้วยโลหะโครเมียมและทองคำ มีตัวขับเคลื่อนไฟฟ้าสถิตแบบซี่หวีซึ่งมีจำนวนซี่ที่สามารถเคลื่อนที่ได้ทั้งหมด 128 ซี่ ทำหน้าที่ขับเคลื่อนกระจกจุลภาคขนาดความกว้าง 22.91 μm สูง 356 μm ให้เคลื่อนที่เข้าออกระหว่างทางเดินแสงของสายใยแก้วนำแสงสองคู่ อีกทั้งมีสปริงแบบ serpentine ทำหน้าที่ดึงโครงสร้างตัวขับเคลื่อนให้กลับมายังจุดเริ่มต้นเมื่อไม่มีการป้อนแรงดันไฟฟ้า

ทดสอบการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงพบว่า กระจกจุลภาคสามารถเคลื่อนที่ได้ระยะทาง 100 μm เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับตัวขับเคลื่อน 190 V ทดสอบการรับส่งแสงที่ความยาวคลื่น 1310 nm วัดกำลังแสงที่แหล่งกำเนิดแสงส่งผ่านสายใยแก้วนำแสงเส้นเดียวได้ 1.5 dBm เมื่อทดลองส่งสัญญาณแสงระหว่างสายใยแก้วนำแสงสองเส้น โดยมีตัวกลางเป็นอากาศพบว่าสามารถวัดค่าการรับแสงได้ดีที่สุด -11.17 dBm ซึ่งคิดเป็นค่าการสูญเสียทางแสงผ่านอากาศเมื่อเทียบกับการส่งผ่านสายใยแก้วนำแสงโดยตรงได้ -12.67 dB จากนั้นทดสอบการรับส่งแสงผ่านการสวิตช์จากกระจกจุลภาคพบว่า เมื่อกระจกจุลภาคอยู่ในสถานะสวิตช์เปิด (switch on) สามารถวัดค่าการรับแสงที่ดีที่สุดได้ -22.22 dBm และเมื่อกระจกจุลภาคอยู่ในสถานะสวิตช์ปิด (switch off) สามารถวัดค่าแสงที่รับได้ดีที่สุดได้เท่ากับ -38.42 dBm ซึ่งค่าการสูญเสียทางแสงผ่านการสวิตช์ด้วยกระจกจุลภาคระหว่างสถานะสวิตช์เปิดกับสวิตช์ปิดมีค่าต่างกัน 16.20 dB

7.2 ข้อเสนอแนะ

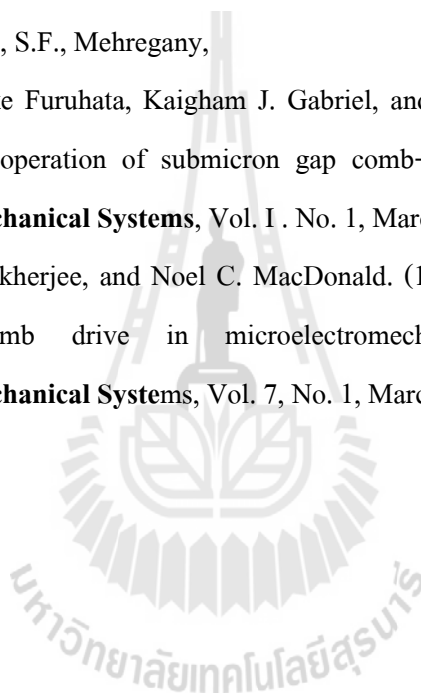
อุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้ยังเกิดปัญหาต่าง ๆ ในขณะที่ทำการวิจัยหลายอย่าง ได้แก่ โครงสร้างของชิ้นงานเกิดการหลุดจากฐานเนื่องจากได้รับพลังงานจากการอาบรังสีมากเกินไป ทำให้ต้องปรับค่าพลังงานสะสมในสารไวแสงที่เกิดจากการฉายรังสีเอกซ์ที่เหมาะสม ซึ่งจะไม่ทำให้ชิ้นฐานหลุดออกจากฐาน ปัญหาต่อมาคือปัญหาในการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์ ในกระบวนการชุบโลหะเงินด้วยไฟฟ้าของขั้นตอนการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์นั้น มักจะเกิดการแทรกตัวของโลหะด้านล่างสารไวแสงทำให้บดบังลวดลายบริเวณฐานของชิ้นงาน หรือโลหะเกิดการก่อตัวบนแผ่นกราฟไฟอย่างไม่สม่ำเสมอ บางพื้นที่เกิดการก่อตัวขึ้นเร็วกว่าพื้นที่อื่น ๆ จนไปปกคลุมลวดลายบางส่วน of ชิ้นงาน ทำให้ลวดลายเกิดการผิดเพี้ยน ทำการแก้ไขโดยปรับค่ากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมที่โลหะจะก่อตัวขึ้นได้อย่างสม่ำเสมอ และไม่ควรรใช้กระแสไฟฟ้าในการชุบโลหะสูงเกินไป เนื่องจากจะเกิดฟองขึ้นบริเวณพื้นผิวของแผ่นกราฟไฟทำให้บริเวณนั้นไม่มีโลหะมาเกาะ

ปัญหาที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งที่เกิดขึ้นในงานวิจัยนี้คือ การบิดเบี้ยว โกง งอของโครงสร้าง เนื่องจากโครงสร้างของอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงในงานวิจัยนี้เป็นพอลิเมอร์ ข้อดีของพอลิเมอร์คือน้ำหนักเบา แต่ข้อเสียคือเปราะบางและเสียรูปได้ง่ายเมื่อได้รับอุณหภูมิที่สูงหรือต่ำเกินไป ซึ่งบ่อยครั้งที่เกิดปัญหานี้ขึ้นระหว่างการทำวิจัย วิธีแก้ไขคือพยายามควบคุมอุณหภูมิในทุกขั้นตอนของการสร้างโครงสร้างอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงให้มีความเหมาะสมตลอดเวลา คือพยายามไม่ให้อุณหภูมิมีการเพิ่มขึ้นหรือลดลงเร็วเกินไป เพื่อลดโอกาสที่โครงสร้างชิ้นงานจะเกิดการผิดรูปเสียหาย

รายการอ้างอิง

- พิทยา ดิกล้ำ. 2552. การพัฒนามอเตอร์จุลภาคแบบไฟฟ้าสถิต. วิทยานิพนธ์ มหามบัณฑิต สาขาวิชาไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 169 น.
- วินัย วันบุรี. 2550. การพัฒนากระบวนการผลิตโครงสร้างจุลภาคโดยวิธีการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอ็กซ์. วิทยานิพนธ์ มหามบัณฑิต สาขาวิชาไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 96 น.
- Chang-Hyeon Ji, Youngjoo Yee, Junghoon Choi, Seong-Hyok Kim, and Jong-Uk Bu. (2004). Electromagnetic 2x2 mems optical switch. **IEEE Journal Of Selected Topics In Quantum Electronics**, Vol. 10, No. 3, May/June 2004, pp. 545-550.
- Cornel Marxer and Nicolaas F. de Rooij. (1999). Micro-opto-mechanical 2x2 switch for single mode fibers based on plasma-etched silicon mirror and electrostatic actuation. **Journal of Lightwave Technology**, Vol. 17, No. 1, January 1999, pp. 2-6.
- Gabriel M. Rebeiz. **RF mems: theory, design, and technology**. A John Wiley & Sons Publication. Copyright 2003 John Wiley & Sons, Inc.
- Gregory N. Nielson and George Barbastathis. (2006). Dynamic pull-in of parallel-plate and torsional electrostatic mems actuators. **Journal of Microelectromechanical Systems**, Vol. 15, No. 4, August 2006, pp. 811-821.
- Hiroshi Toshiyoshi, Daisuke Miyauchi, and Hiroyuki Fujita. (1999). Electromagnetic torsion mirrors for self-aligned fiber-optic crossconnectors by silicon micromachining. **IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics**, VOL. 5, NO. 1, January/February 1999, pp. 10-17.
- Ho Nam Kwon and Jong-Hyun Lee. (2004). A micromachined 2x2 optical switch aligned with bevel-ended fibers for low return loss. **Journal of Microelectromechanical Systems**, Vol. 13, No. 2, April 2004, pp. 258-263.
- Koji Akimoto, Yuji Uenishi, Kazuharu Honma, S hinji Nagaoka. (1997). Evaluation of comb-drive nickel micromirror for fiber optical communication. **IEEE MEMS** : 66-71

- Raanan A. Miller, Yu-Chong Tai, Guoda Xu, John Bartha, and Freddie Lin. (1997). An Electromagnetic mems 2 x 2 fiber optic bypass switch. **International Conference on Solid-State Sensors and Actuators**, Chicago, June 16-19, 1997, pp. 89-92.
- Shi-Sheng Lee, Long-Sun Huang, Chang-Jin Kim, and Ming C. Wu. (1999). Free-space fiber-optic switches based on mems vertical torsion mirrors. **Journal of Lightwave Technology**, Vol. 17, No. 1, January 1999, pp. 7-13.
- Somlay, G., Szucs, Z., Poppe, A., and Rencz, M. (2007). Simulation of a comb drive for fracture lifetime measurements. Excerpt from the **Proceedings of the COMSOL Users Conference**. Bart, S.F., Mehregany,
- Toshiki Hirano, Tomotake Furuhashi, Kaigham J. Gabriel, and Hiroyuki Fujita. (1992). Design, fabrication, and operation of submicron gap comb-drive microactuators. **Journal of Microelectromechanical Systems**, Vol. 1, No. 1, March 1992, pp. 52-59.
- Wenjing Ye, Subrata Mukherjee, and Noel C. MacDonald. (1998). Optimal shape design of an electrostatic comb drive in microelectromechanical systems. **Journal of Microelectromechanical Systems**, Vol. 7, No. 1, March 1998, pp. 16-26.





ภาคผนวก ก

โปรแกรมแบบจำลองผลทางคณิตศาสตร์

โปรแกรมจำลองผลระบบพลวัตของตัวขับเคลื่อนไฟฟ้าสถิตด้วยการคำนวณเชิงวิเคราะห์

```

close all
clear all
clc
%-----Comb-Drive Actuator-----
w = 50e-6; //ความกว้างของซี่หวี
t = 350e-6; //ความสูงของซี่หวี
n = 12; //จำนวนขดของสปริง
N = 128; //จำนวนซี่ของตัวขับเคลื่อน
E = 2e9; //ค่าความยืดหยุ่นของวัสดุ
v = 0.22; //ค่าอัตราส่วนของปัวซอง
Eo = 8.85e-12; //ค่า permittivity ของอากาศ
Er = 1; //ค่า permittivity ของวัสดุฉนวนที่กั้นระหว่างขั้วทั้งสอง
g = 50e-6; //ระยะห่างระหว่างซี่หวี
G = E/(2*(1+v)); //ค่ามอดูลัสของการบิด
i = 1:2:100;
V = 0:1:200; //ขนาดพารามิเตอร์ของแรงดัน
% -----Find J-----
A = sum((1./i.^5).*tanh((pi*w.*i)/(2*t)));
B = (1-((192/pi^5)*(t/w))*A);
J = (1/3)*(t^3)*w*B; //ค่าคงที่ของการบิด
% -----Find K-----
La = 500e-6; //ความกว้างของสปริง
Lb = 3000e-6; //ความยาวของสปริง
Ix = (w*(t^3))/12; //โมเมนต์ความเฉื่อยของสปริง
K = (48*G*J)/(La^2*(((G*J*La)/(E*Ix))+Lb)*n^3); //ค่าคงที่สปริง
% -----Find X-----
X = (N*t*Eo*Er.*(V.^2))/((K)*g); //ระยะเคลื่อนที่ของซี่หวี

```

```

% -----Find N-----
X = 100e-6; //ระยะเคลื่อนที่ของซี่หวี
N = (K*X*g) ./ (t*Eo*Er.*(V.^2)); //จำนวนซี่หวี
% -----Find g-----
X= 100e-6; //ระยะเคลื่อนที่ของซี่หวี
g = (N*t*Eo*Er.*(V.^2))/(K*X); //ระยะห่างระหว่างซี่หวี
% -----Find t-----
X = 100e-6; //ระยะเคลื่อนที่ของซี่หวี
t = (K*X*g) ./ (N*Eo*Er.*(V.^2)); //ความสูงของซี่หวี
%-----figure-----
figure(1) //กราฟที่ 1
plot(N,V) //แสดงจำนวนซี่หวีกับขนาดแรงดันไฟฟ้า
xlabel('Number of Fingers for Moving Comb, N'); //แสดงชื่อแกน
ylabel('Driving Voltage, V (Volt)'); //แสดงชื่อแกน
figure(2) //กราฟที่ 2
plot(g,V) //แสดงระยะห่างระหว่างซี่หวีกับขนาดแรงดันไฟฟ้า
xlabel('Gap between Comb Fingers, g (um)'); //แสดงชื่อแกน
ylabel('Driving Voltage, V (Volt)'); //แสดงชื่อแกน
figure(3) //กราฟที่ 3
plot(t,V) //แสดงความสูงของซี่หวีกับขนาดแรงดันไฟฟ้า
xlabel('Fingers Thickness for Comb, t (Meter)'); //แสดงชื่อแกน
ylabel('Driving Voltage, V (Volt)'); //แสดงชื่อแกน
Figure(4) //กราฟที่ 4
plot(X,V) //แสดงระยะการเคลื่อนที่ของซี่หวีกับขนาดแรงดันไฟฟ้า
xlabel('Distance, x (Meter)'); //แสดงชื่อแกน
ylabel('Driving Voltage, V (Volt)'); //แสดงชื่อแกน

```



```

%-----Parallel Plate Actuator-----

g_0 = 120e-6;           //ค่าระยะห่างเริ่มต้นระหว่างแผ่นตัวนำ
A_w = 150e-6;          //ค่าความกว้างแผ่นตัวนำ
A_h = 350e-6;          //ค่าความยาวแผ่นตัวนำ
V = 50:1:200;          //ค่าพารามิเตอร์ของแรงดันไฟฟ้า
w = 50e-6;             //ความกว้างของสปริง
t = 350e-6;            //ความสูงของสปริง
n = 12;                //จำนวนขดของสปริง
E = 2e9;               //ค่าความยืดหยุ่นของวัสดุ
v = 0.22;              //ค่าอัตราส่วนของปัวซอง
Eo = 8.85e-12;         //ค่า permittivity ของอากาศ
Er = 1;                //ค่า permittivity ของวัสดุฉนวนที่กั้นระหว่างขั้วทั้งสอง
G = E/(2*(1+v));      //ค่ามอดูลัสของการบิด
i = 1:2:100;

% -----Find J-----
A = sum((1./(i.^5)).*tanh((pi*w.*i)/(2*t)));
B = (1-((192/pi^5)*(t/w))*A);
J = (1/3)*(t^3)*w*B;   //ค่าคงที่ของการบิด
% -----Find K-----
La = 500e-6;           //ความกว้างของสปริง
Lb = 3000e-6;          //ความยาวของสปริง
Ix = (w*(t^3))/12;     //โมเมนต์ความเฉื่อยของสปริง
K = (48*G*J)/(La^2*(((G*J*La)/(E*Ix))+Lb)*n^3); //ค่าคงที่สปริง
% -----Find N-----
A = A_w * A_h;         //พื้นที่แผ่นตัวนำ
N = (8*K*g_0^3) ./ (27*Eo*Er*A*(V.^2)); //จำนวนแผ่นตัวนำ
figure(5)              //กราฟที่ 5
plot(N,V)              //แสดงจำนวนแผ่นตัวนำกับขนาดแรงดันไฟฟ้า
xlabel('Number of Finger for Moving Plate, N'); //แสดงชื่อแกน
ylabel('Pull-In Voltage, V (Volt)');           //แสดงชื่อแกน

```

```

%-----Compare comb-drive between design with fabrication-----

n = 12; //จำนวนขดของสปริง
N = 128; //จำนวนซี่ของตัวจับเร้า
E = 2e9; //ค่าความยืดหยุ่นของวัสดุ
v = 0.22; //ค่าอัตราส่วนของปัวซอง
Eo = 8.85e-12; //ค่า permittivity ของอากาศ
Er = 1; //ค่า permittivity ของวัสดุฉนวนที่กั้นระหว่างขั้วทั้งสอง
wd = 50e-6; //ความกว้างของซี่หวี
td = 350e-6; //ความสูงของซี่หวี
gd = 50e-6; //ระยะห่างระหว่างซี่หวี
wf = 43.17e-6; //ความกว้างของซี่หวี
tf = 356e-6; //ความสูงของซี่หวี
gf = 62.56e-6; //ระยะห่างระหว่างซี่หวี
G = E/(2*(1+v)); //ค่ามอดูลัสของการบิด
i = 1:2:100;

% -----Find Jd-----
Ad = sum((1./(i.^5)).*tanh((pi*wd.*i)/(2*td)));
Bd = (1-((192/pi^5)*(td/wd))*Ad);
Jd = (1/3)*(td^3)*wd*Bd; //ค่าคงที่ของการบิด

% -----Find Kd-----
Lad = 500e-6; //ความกว้างของสปริง
Lbd = 3000e-6; //ความยาวของสปริง
Ixd = (wd*(td^3))/12; //โมเมนต์ความเฉื่อยของสปริง
Kd = (48*G*Jd)/(Lad^2*(((G*Jd*Lad)/(E*Ixd))+Lbd)*n^3); //ค่าคงที่สปริง

% -----Find Xd-----
Vd = 0:1:200; //ขนาดพารามิเตอร์ของแรงดัน
Xd = (N*td*Eo*Er.*(Vd.^2))/((Kd)*gd); //ระยะเคลื่อนที่ของซี่หวี

% -----Find Jf-----
Af = sum((1./(i.^5)).*tanh((pi*wf.*i)/(2*tf)));
Bf = (1-((192/pi^5)*(tf/wf))*Af);

```

```

Jf = (1/3)*(tf^3)*wf*Bf; //ค่าคงที่ของการบิด
% -----Find Kf-----
Laf = 494.27e-6; //ความกว้างของสปริง
Lbf = 2969.21e-6; //ความยาวของสปริง
Ixf = (wf*(tf^3))/12; //โมเมนต์ความเฉื่อยของสปริง
Kf = (48*G*Jf)/(Laf^2*(((G*Jf*Laf)/(E*Ixf))+Lbf)*n^3) //ค่าคงที่สปริง
% -----Find Xf-----
Vf = 0”1”200; //ขนาดพารามิเตอร์ของแรงดัน
Xf = (N*tf*Eo*Er.*(Vf.^2))/((Kf)*gf); //ระยะเคลื่อนที่ของซี่หวี
Figure(6) //กราฟที่ 6
plot(Xd,Vd, '-.b') //แสดงระยะการเคลื่อนที่ของซี่หวีกับขนาดแรงดันไฟฟ้า
hold on //ให้คงเส้นกราฟเส้นเดิมไว้
plot(Xf,Vf, 'r') //แสดงระยะการเคลื่อนที่ของซี่หวีกับขนาดแรงดันไฟฟ้า
xlabel('Distance, x (Meter)'); //แสดงชื่อแกน
ylabel('Driving Voltage, V (Volt)'); //แสดงชื่อแกน
legend('Design','Fabrication'); //แสดงชื่อเส้นกราฟ

```

```

%-----comb-drive fabricated-----

n = 12; //จำนวนขดของสปริง
N = 128; //จำนวนซี่ของตัวจับเร้า
E = 2e9; //ค่าความยืดหยุ่นของวัสดุ
v = 0.22; //ค่าอัตราส่วนของปัวซอง
Eo = 8.85e-12; //ค่า permittivity ของอากาศ
Er = 1; //ค่า permittivity ของวัสดุฉนวนที่กั้นระหว่างขั้วทั้งสอง
wf = 43.17e-6; //ความกว้างของซี่หวี
tf = 356e-6; //ความสูงของซี่หวี
gf = 62.56e-6; //ระยะห่างระหว่างซี่หวี
G = E/(2*(1+v)); //ค่ามอดูลัสของการบิด
i = 1:2:100;

% -----Find Jf-----
Af = sum((1./i.^5)).*tanh((pi*wf.*i)/(2*tf));
Bf = (1-((192/pi^5)*(tf/wf))*Af);
Jf = (1/3)*(tf^3)*wf*Bf; //ค่าคงที่ของการบิด

% -----Find Kf-----
Laf = 494.27e-6; //ความกว้างของสปริง
Lbf = 2969.21e-6; //ความยาวของสปริง
Ixf = (wf*(tf^3))/12; //โมเมนต์ความเฉื่อยของสปริง
Kf = (48*G*Jf)/(Laf^2*(((G*Jf*Laf)/(E*Ixf))+Lbf)*n^3) //ค่าคงที่สปริง

% -----Find Xf-----
Vf = 0:1:200; //ขนาดพารามิเตอร์ของแรงดัน
Xf = (N*tf*Eo*Er.*(Vf.^2))/((Kf)*gf); //ระยะเคลื่อนที่ของซี่หวี
Figure(7) //กราฟที่ 6
plot(Xf,Vf) //แสดงระยะการเคลื่อนที่ของซี่หวีกับขนาดแรงดันไฟฟ้า
xlabel('Distance, x (Meter)'); //แสดงชื่อแกน
ylabel('Driving Voltage, V (Volt)'); //แสดงชื่อแกน

```



ภาคผนวก ข

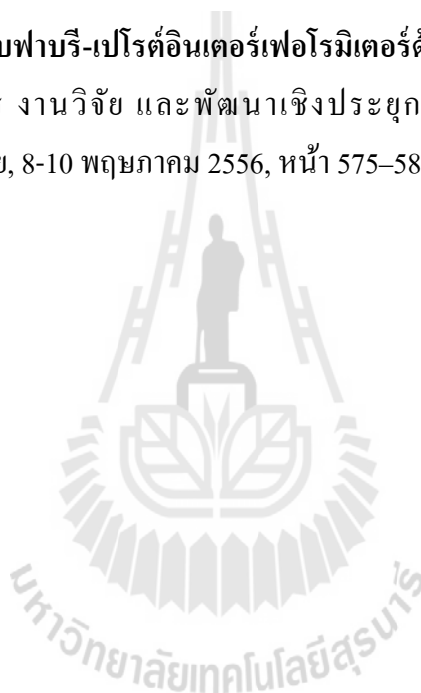
บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

R. Chimchang, R. Tongta, and R. Phatthanakun, (2012) **Vertical Micromirror Fabrication by X-ray Lithography for Single Mode Optical Fiber Switching Applications**. WASET International Conference on Electrical, Computer, Electronics and Communication Engineering (ICECECE 2012), Tokyo, Japan, 29-30 May, pp. 925-928.

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



Vertical Micromirror Fabrication by X-ray Lithography for Single Mode Optical Fiber Switching Applications

R. Chimchang, R. Tongta, R. Phatthanakun

Abstract—In this paper, design and fabrication of vertical micromirror for optical switching applications of single mode optical fibers are proposed. The structure of micromirror will be created from negative photoresist (SU-8) on X-ray lithography using X-ray from synchrotron light source. The properties of X-ray from synchrotron light source are high-energy electrons which can construct materials that have a high aspect ratio. In addition, the technique of gold coating of reflective material has been used for change direction of light between two pairs of optical fibers. At a wavelength of 1310 nm with minimum average loss of 5.305 dB is obtained.

Keywords—vertical micromirror, negative photoresist, X-ray lithography

I. INTRODUCTION

NOWADAYS, optical communication through fiber optic is very popular because it can send data, at high speed, to a very long distance while using a few repeaters. Optical signal in fiber optic has less attenuation compare to electrical signal. In addition, stealing signal from optical fiber system is difficult, so it is the most widely accepted and used. Generally, optical fiber communication is a point to point connection. If we want to communicate from point to multipoint, we have to use more optical fiber line. For this reason, there is a fabrication device that acts as a light switch in order to reduce the number of fiber optic cables to a minimum. For all of these reasons, we decided to study about fabrication of vertical micromirror using X-Ray lithography technique for optical fiber switching.

Vertical micromirror placed at 90 degree on a chip's surface are highly interesting in terms of micro-optical systems. Installation of optical fiber and laser diode in parallel with plane of the chip is not difficult [1]. On the other hand, making of high quality optical fiber micromirror is very challenging. For these reasons, plenty of making techniques are made.

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, growth technique, etching technique and lithography technique.

R. Chimchang is with the School of Telecommunication Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, 111 University Avenue, Muang District, NakhonRatchasima 30000, Thailand (corresponding author to provide phone: 08-3937-2378; e-mail: yui.tce13@gmail.com).

R. Tongta, was with the School of Telecommunication Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, 111 University Avenue, Muang District, NakhonRatchasima 30000, Thailand (phone: 044-224-320; e-mail: tongta@sut.ac.th).

R. Phatthanakun is with the Synchrotron Light Research Institute (Public Organization), 111 University Avenue, Muang District, NakhonRatchasima 30000, Thailand (phone: 044-217-040 Ext. 1410; e-mail: rungrueang@sri.or.th).

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. This technology has been utilized in various fields. Automotive technology is used MEMS to creating speed metering devices and pressure metering devices. In medical technology and biotechnology is used MEMS to produce different types of sensors and actuators and in the telecommunications technology is used MEMS to produce manufacturing devices in optical communications.

II. UV LITHOGRAPHY, X-RAY LITHOGRAPHY AND SPUTTERING PROCESS

A. UV Lithography process

Lithography process is a chemical process to reproduce pattern from the original pattern, which is in opaque lines, to a flat surface [2]. It may create pattern in flat surface materials. In reproduction process, we use chemical called photoresist to reproduce the pattern. The chemical property of photoresist will change when the light is exposed on it. Photoresist can be divided into two types. Positive type photoresist will be featured when the light hits in some areas where we can wash it by using developer solution and there will be left only area where the light is not affected. Another type is negative type photoresist, its properties are in contrast to the positive type, unexposed area can be washed by developer solution and then it will be left only the exposed areas. According to the properties of two types of photoresist, we can create patterns for UV lithography process in two ways depending on the type of photoresist. The light projecting to photoresist is the light in ultra-violet (UV) range. The concise overview of lithography process can be explained in Fig. 1 comparison chemical property between positive and negative photoresist.

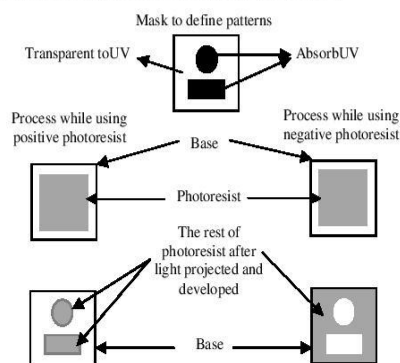


Fig. 1 Reproducing patterns by using lithography process

B. X-ray Lithography process

Another process used in this research is X-ray lithography process which is in the same way as lithography process but the difference is the process using light in X-ray range instead of UV range [3]. Moreover, the properties of X-ray obtained from synchrotron source are in high energy. Thus, we can create 3D patterns in high aspect ratio. We can coat photoresist more than 1 millimeter thick, and we are able to create patterns in width of 30 micrometers. So, this process is suitable to produce micro-electro-mechanical system products.

III. FABRICATION OF X-RAY MASK AND CREATING MICROMIRRORS STRUCTURE

In X-ray lithography process, the important factor which has high effects to the process is the X-ray mask since it acts like original patterns. In lithography process using UV, original patterns or mask are the patterns in opaque ink form area situated on transparent material like transparent film or glass. In case of X-ray mask, patterns are in the form of material, which will absorb X-ray, and have to be on a high performance transparent material as well. Generally, we use absorber material such as gold lead or silver, its good properties to absorb X-ray, to be patterns placed on a thin graphite sheet or on transparent film in X-ray transparent type.

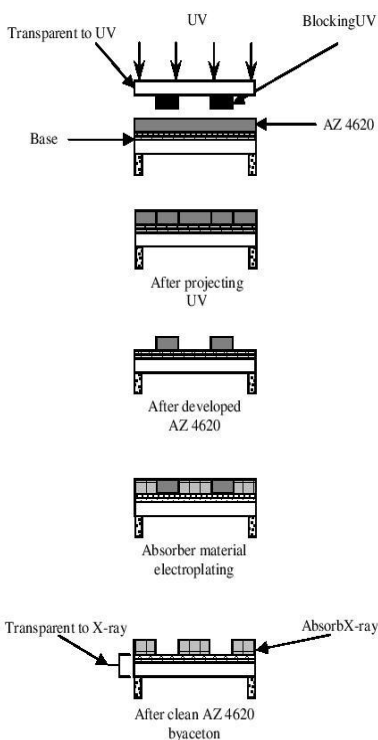


Fig. 2 Cross section of reproducing patterns by UV lithography process for producing X-ray mask

A. Fabrication of X-ray mask

Transparent film was attached by copper ring using epoxy glue. When the glue dried out, cut the transparent sheet by the edge of copper ring, and then coat the sheet with titanium and silver using evaporation processes.

Positive photoresist was spin coating (AZ 4620) on transparent sheet coated with metals. Project UV through photo mask, develop by using photoresist solution AZ developer. The concise overview of UV lithography process for producing X-ray mask is explained in Fig. 2. The piece is passed absorber material electroplating and then clean it by acetone. We can get an X-ray mask as in Fig. 3 and 4.

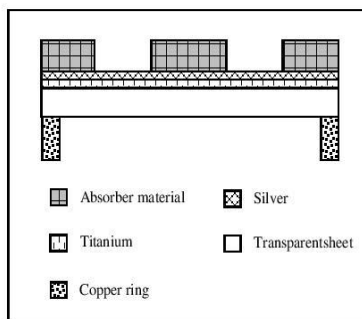


Fig. 3 Cross section of X-ray mask

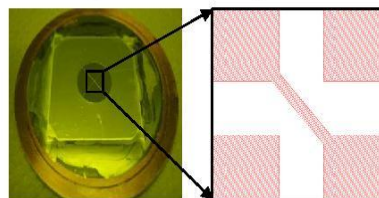


Fig. 4 X-ray mask

B. The process of creating micromirrors structure

Prepare a 1"x1" glass. First, clean and then coat it with titanium. Spin coat with negative photoresist (SU8 2100) by spinner machine at 500 rpm for 5 seconds and at 1500 rpm for 30 seconds respectively. Then bake it in oven at 95°C for 2.30 hours and let it cool down in the oven. 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 and bake again (Hard bake) at 95°C for 30 minutes. The piece is coated thin gold film by sputtering machine at base pressure 5.15×10^{-4} torr, operate passure 1.20×10^{-2} torr and power 100 watts for 60 seconds. So it acts as reflective glass. The concise overview of X-ray lithography process is explained in Fig. 5. Finally, we can get a micromirror as shown in Fig. 6 and 7.

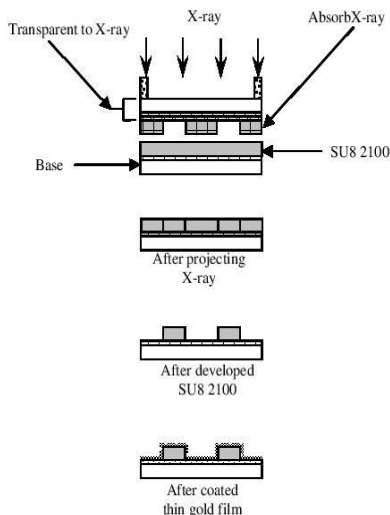


Fig. 5 Cross section of reproducing patterns by X-ray lithography process

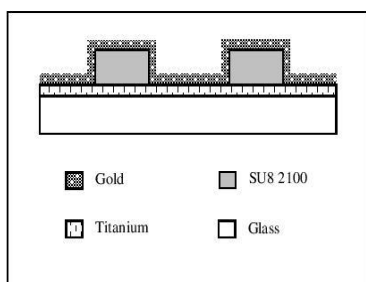


Fig. 6 Cross section of micromirror structure

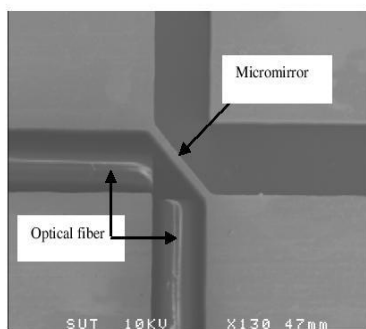


Fig. 7 Structure of micromirror

IV. RESULT AND MEASURING RESULT

After measured the structure of produced micromirror, it was measured 234 micrometers thick, 36 micrometers wide and 184 micrometers long. The groove placing optical fiber

was measured 138 micrometers for wide. That was the transmission of the light through the micromirror's structure produced from negative photoresist (SU-8). A 1310 nanometer wavelength light source were projected through an optical fiber line and to another line is receiver. Two line are placed at 90 degree together. The end of these lines plug into LightwaveMultimeter (Fig. 8). After we measured 20 times, we have found that the average loss of signal is 5.305 dB.

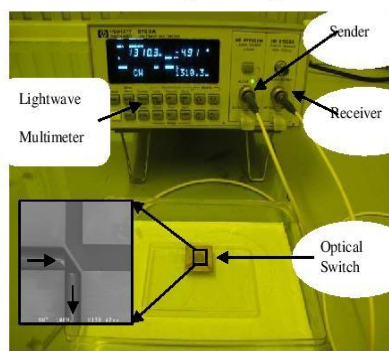


Fig. 8 Transmission of the light test

V. CONCLUSION

This paper proposed steps of micromirror fabrication for single mode optical fiber switching. The structure of micromirror is produced from negative photoresist (SU-8) by X-ray lithography process, then coated with thin gold film to reflect the light, and changed the direction of the light between optical fiber lines. After measured micromirror, it is 234 micrometers thick, 36 micrometers wide and 184 micrometers long. The groove to place optical fiber is measured 138 micrometers width, which is a little bigger than a 125 micrometers diameter optical fiber. When using light source which has 1310 nanometers wavelength to send data through an optical fiber line and use another line, placed at 90 degree to the first line, to a receiver. The end of these 2 lines are plugged into the lightwavemultimeter. The result, the average loss of signal is 5.305 dB.

Problems and obstacles occurred during the test is deviation of original patterns so the size of produced piece is not conformed to our design. The problems were caused by insufficient size of the groove to place optical fiber make placing the optical fiber line at the proper angle.

The next step will focus on electrostatic comb drive actuators from X-ray lithography process controlled by electrostatic. These electrostatic actuators will be the moveable micromirror driver moving into the light path to optical switching and moving out when optical switching is not necessary.

ACKNOWLEDGMENT

Express greatest gratefulness to Dr. NimitChomnawang of Suranaree University of Technology. Also best appreciation to Beamline 6a Deep X-ray Lithography (DXL) of the Synchrotron Light Research Institute (Public Organisation).

REFERENCES

- [1] C. Marxer, C. Thio, M.-A. Grébillat, N. F. de Rooij, R. Batting, O. Anthamatten, B. Valk, and P. Vogel. "Vertical Mirrors Fabricated by Deep Reactive Ion Etching for Fiber-Optic Switching Applications", *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol.6, no.3, pp. 277-285, Sep.2003.
- [2] O.V. Makarova, R. Divan, J. Tucek, K. Kreischer, P.T. Amstutz, D.C. Mancini, C.-M. Tang. "Fabrication of Solid Copper 220 GHz Folded Waveguide Circuits by UV Lithography", 2010 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC), pp. 183-184, 2010.
- [3] R. Phatthanakun, M. Mapato, W. Wanburee, S. Promwikorn, N. Chathirat, P. Songsiririthigul, P. Klysubun and N. Chomnawang. "Copier Transparency as a Transparent Support for X-ray Mask Absorber." International Conference on Materials for Advanced Technologies – ICMAT, Singapore, July 1-7, 2007.



Ms. Runglada Chimchang was graduated in Bachelor of Telecommunication Engineering from Suranaree University of Technology. She is now studying master degree in Telecommunication Engineering. Research topics of interest are about optical fibers applications.



Assist. Prof. Dr. Rangsang Tongta was graduated in Bachelor of Electrical engineering from KhonKaen University, also Master degree and Ph.D in Electrical engineering from Florida Institute of Technology, USA. He is now assistant professor at telecommunication engineering department, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology.



Dr. Rungruang Phatthanakun is a beamline scientist at the Beamline 6a: Deep X-ray Lithography (DXL), Synchrotron Light Research Institute (Public Organization), THAILAND. He received his master and doctor degree from Suranaree University of Technology, Thailand, in 2006 and 2009, respectively. His research interests include X-ray LIGA application, MEMS fabrication and simulation.

Paper ID: 1234

การออกแบบและการสร้างระบบไฟฟ้าเครื่องกลจุลภาค(MEMS) อุปกรณ์ชุดเซนเซอร์สำหรับฟาบรี-เปโรต์อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ด้วย เทคนิคเอกซ์เรย์ลิโธกราฟี

ชฎารัตน์ หาดทวยกาญจน์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
chadarat.oa@gmail.com

รุ่งลดา ฉิมช้าง
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 โดยกล่าวถึงการออกแบบและขั้นตอนการสร้างโครงสร้างชิ้นงานที่มีตัวขับเคลื่อนไฟฟ้าสถิตแบบซีทีวี คานยึดแบบขด และตัวสะท้อนแสง ตัวขับเคลื่อนไฟฟ้าสถิตแบบซีทีวี คานยึดแบบขด และตัวสะท้อนแสงที่ทำหน้าที่ขับเคลื่อนโครงสร้างชิ้นงานให้สามารถเคลื่อนที่ได้ คานยึดแบบขดทำหน้าที่เป็นสปริงดึงโครงสร้างชิ้นงานให้กลับมามีตำแหน่งเดิม และตัวสะท้อนแสงทำหน้าที่สะท้อนแสงที่ถูกส่งออกมาให้เกิดการสะท้อนกลับเข้ามาในสายใยแก้วนำแสง นอกจากนี้แล้วยังมีการนำเทคนิคการเคลือบฟิล์มบางโลหะมาเคลือบชิ้นงาน เพื่อให้ชิ้นงานสามารถนำไฟฟ้าและเกิดการสะท้อนแสงได้ สารไวแสงที่นำมาใช้ในการสร้าง คือสารไวแสงชนิดลบ (SU-8 photoresist) ซึ่งจะกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ คือคานยึดแบบขด มีความกว้างของตัวคานยึด 500 ไมโครเมตร และความยาว 2500 ไมโครเมตร และตัวขับเคลื่อนไฟฟ้าสถิตแบบซีทีวีจะมีซี่แต่ละซี่ที่มีความกว้าง 50 ไมโครเมตร และความยาว 250 ไมโครเมตร จากนั้นป้อนแรงดัน 200 โวลต์ เพื่อให้ได้ระยะการเคลื่อนที่ 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, ตัวขับเคลื่อนไฟฟ้าสถิตแบบซีทีวี, สารไวแสงชนิดลบ, แสงซินโครตรอน

1. บทนำ

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

นำหลักการดังกล่าวนี้มาปรับใช้เพื่อดูผลรวมเฟสของคลื่นแสงทั้งสองส่วน ถ้าระยะระหว่างปลายสายใยแก้วนำแสงกับตัวสะท้อนแสงมีการเปลี่ยนแปลงก็จะส่งผลทำให้ผลรวมของเฟสที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงด้วยเช่นกัน หลักการของสายใยแก้วนำแสงชนิดฟาบรี-เปโรต์นั้นส่วนใหญ่จะนำมาประยุกต์ใช้งานทางด้านเซ็นเซอร์เพื่อวัดค่าเช่น อุณหภูมิ ความดัน ความเครียด เป็นต้น [1-2] ปัญหาที่มักพบคือ ตัวสะท้อนแสงจะถูกวางตัวให้อยู่กับที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ [3] ค่าผลรวมของเฟสจึงมีค่าคงที่ไม่สามารถวิเคราะห์ได้ว่าผลรวมของเฟสที่ได้นั้นอยู่ตำแหน่งใดของเฟสต้นกำเนิด บทความนี้จึงได้ปรับปรุงแก้ไขปัญหาการขยับตัวสะท้อนแสงโดยเพิ่มตัวขยับเข้ามามีในโครงสร้างของชิ้นงาน

ในส่วนของเทคนิคกระบวนการลิโธกราฟี [4] (Lithography process) หมายถึงกระบวนการถ่ายทอดลวดลายจากลวดลายต้นแบบด้วยการฉายแสงผ่านหน้ากากดูดซับแสง (Mask) ถ่ายทอดลงบนฐานรองที่เคลือบด้วยสารเคมีที่มีคุณสมบัติทางกายภาพจะเปลี่ยนแปลงสภาพไปจากเดิมเมื่อมีแสงมาตกกระทบ เทคนิคกระบวนการลิโธกราฟีมี 2 ขั้นตอนคือ กระบวนการลิโธกราฟีด้วยแสงอัลตราไวโอเลต และกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์ กระบวนการลิโธกราฟีเป็นกระบวนการที่ใช้ในการสร้างชิ้นงานที่มีขนาดเล็กๆ สามารถถ่ายทอดลวดลายชิ้นงานที่มีขนาดในระดับไมโครเมตรได้ โดยเฉพาะรังสีเอกซ์ที่ได้มาจากเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนที่มีความเข้มสูงและมีค่าพลังงานที่ต่อเนื่อง ครอบคลุมช่วงพลังงานกว้างตั้งแต่ช่วงพลังงานอินฟราเรดจนถึงรังสีเอกซ์ ซึ่งเหมาะกับระบบไฟฟ้าเครื่องกลจุลภาค (Micro-electro-mechanical system : MEMS) ที่เป็นระบบหรืออุปกรณ์ที่มีขนาดเล็กในระดับไมโครเมตรและมีสัดส่วนความสูงต่อความกว้างมาก

ตัวขยับร้าวทางไฟฟ้าสถิตแบบซีทิวเป็นส่วนหนึ่งของระบบไฟฟ้าเครื่องกลจุลภาค ทำหน้าที่ในการขยับตัวสะท้อนแสงให้เกิดการเคลื่อนที่ด้วยการควบคุมค่าแรงดันในวงจร ทำให้ระยะห่างระหว่างตัวสะท้อนแสงกับปลายสายใยแก้วนำแสงเกิดการเปลี่ยนแปลงเพื่อหาสถานะของจุดกำเนิดแสงได้ ข้อดีของการสร้างด้วยกระบวนการลิโธกราฟีคือ สามารถสร้างชิ้นงานที่มี

ขนาดเล็กและมีความละเอียดในการสร้างชิ้นงาน เพราะการขยับตัวสะท้อนแสงนั้นต้องการความละเอียด หากเพียงแคขยับตัวสะท้อนแสงเล็กน้อย ค่าของผลรวมเฟสก็จะเกิดการเปลี่ยนแปลง

2. ขั้นตอนการออกแบบ

การออกแบบแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักๆคือ การออกแบบคานยึดและการออกแบบตัวขยับร้าวทางไฟฟ้าสถิตแบบซีทิว จากนั้นนำทั้งสองส่วนนี้รวมกัน โปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบ คือโปรแกรมเลย์เอาต์อิติเตอร์เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบลายชิ้นงานในลักษณะ 2 มิติ สามารถออกแบบลวดลายในระดับไมโครเมตรได้ และเป็นโปรแกรมที่ใช้งานง่าย ไม่ยุ่งยากซับซ้อน

2.1 การออกแบบคานยึด

โดยทั่วไปคานยึดทำหน้าที่เป็นตัวค้ำยันให้โครงสร้างสามารถลอยตัวในอากาศได้และทำหน้าที่เปรียบเหมือนสปริงที่คอยดึงส่วนที่เคลื่อนที่ให้กลับมายังตำแหน่งเดิมได้เมื่อถูกกระตุ้นจากตัวขยับร้าว คานยึดมีทั้งหมด 4 ประเภท ได้แก่คานยึดแบบตรง คานยึดแบบก้ามปู คานยึดแบบพับ และคานยึดแบบขด [5-6] คานยึดแต่ละประเภทจะมีการออกแบบและคุณสมบัติที่แตกต่างกัน ในบทความเลือกใช้คานยึดแบบขด เนื่องจากคานยึดแบบขดมีลักษณะที่มีความยืดหยุ่นมากมีขนาดที่เล็กและยังลดการเกิดปัญหาหักและบิดตัวของคานยึด โดยมีสมการที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้างชิ้นงานคือ

$$F_s = k_x x \quad 1$$

กรณี n เป็นจำนวนคู่

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

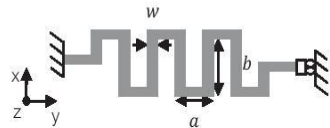
กรณี n เป็นจำนวนคี่

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

$$\bar{a} = \frac{I_{z,b}a}{I_{z,a}} \quad 4$$

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

โดยที่ค่า F_s คือแรงปฏิกิริยาหรือแรงดึงกลับของสปริง ค่า k_x คือค่าคงที่สปริงในแนวแกน X ส่วนค่า x คือระยะของการเคลื่อนที่ ค่า n คือจำนวนชุดของคานยึด ค่า E คือค่ามอดุลัสของยัง (Young's modulus) ส่วนค่า $I_z, I_{z,a}, I_{z,b}$ คือโมเมนต์ดัดของความเฉื่อย ของคานช่วง a และคานช่วง b ตามลำดับ ค่า t คือความหนาของชิ้นงาน ค่า w คือความกว้างของคานยึด ค่า a คือความยาวของคานยึดช่วง a และค่า b คือความยาวของคานยึดช่วง b



รูปที่ 1 พารามิเตอร์ต่างๆของคานยึดแบบขด

2.2 การออกแบบตัวขับเคลื่อนไฟฟ้าสถิตแบบซีวี

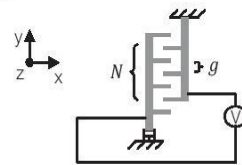
ตัวขับเคลื่อนไฟฟ้าสถิตแบบซีวี หรือ Comb-drive actuator ทำหน้าที่เป็นตัวขับเคลื่อนให้ชิ้นงานสามารถเคลื่อนที่ไปมาได้ ซึ่งประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือส่วนที่สามารถเคลื่อนที่ได้และส่วนที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ โดยส่วนที่เคลื่อนที่ได้นั้นจะมีโครงสร้างที่ลอยอยู่ในอากาศมีคานยึดทำหน้าที่ค้ำยันให้โครงสร้างลอยตัว การทำงานของตัวขับเคลื่อนไฟฟ้าสถิตแบบซีวีจะทำโดยการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับโครงสร้าง เมื่อทำการต่อวงจรจะเกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้นระหว่างทั้งสองขั้ว เกิดเป็นแรงไฟฟ้าสถิตส่งผลให้ชิ้นงานสามารถเคลื่อนที่ได้ สมการที่ใช้ในการออกแบบชิ้นงานเพื่อหาระยะการเคลื่อนที่คือ

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

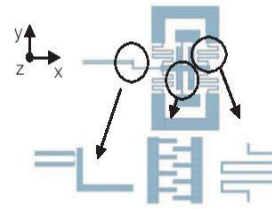
นำสมการที่ 1 มาเทียบกับสมการที่ 6 จะได้ว่า

$$x = \frac{Nt\epsilon_0\epsilon_r V^2}{2gk_x} \quad 7$$

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 พารามิเตอร์ต่างๆของตัวขับเคลื่อนไฟฟ้า



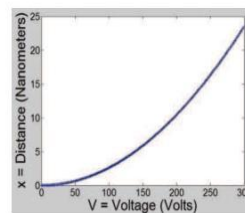
(ก) (ข) (ค)

(ก) ภาพขยายสายใยแก้วนำแสงและตัวสะท้อนแสง

(ข) ภาพขยายตัวขับเคลื่อนไฟฟ้าสถิตแบบซีวี

(ค) ภาพขยายคานยึดแบบขด

รูปที่ 3 ลายหน้ากากดูดซับแสงที่ออกแบบด้วยโปรแกรมเลย์เอาต์อิติเตอร์



รูปที่ 4 ผลการคำนวณระยะการเคลื่อนที่จากสมการที่ 7

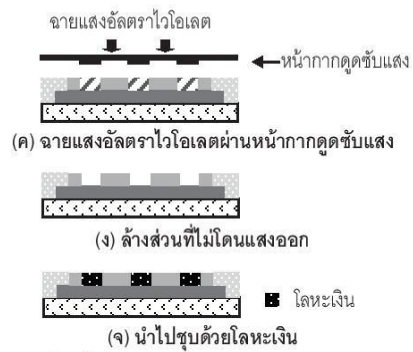
3. ขั้นตอนการสร้าง

ขั้นตอนจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่หนึ่งการสร้างหน้ากากดูดซับรังสีเอกซ์โดยใช้กระบวนการลิโธกราฟีด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต

และส่วนที่สองการสร้างชิ้นงานโดยใช้กระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์

3.1 ขั้นตอนการสร้างหน้ากาคูดซับรังสีเอกซ์ด้วยกระบวนการลิโธกราฟีด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต

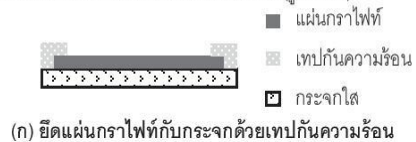
ในบทความนี้ใช้แผ่นกราฟิเป็นฐานรองชิ้นงานเพราะมีคุณสมบัติที่รังสีเอกซ์สามารถทะลุผ่านได้ หารือได้ง่ายสะดวกต่อการใช้งาน ทำการตัดแผ่นกราฟิให้ได้ขนาด 1x1 นิ้ว แล้วยึดติดกับกระจกใสด้วยเทปกั้นความร้อน (Polyimide tape : PI tape) (รูปที่ 5 ก) ทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นกราฟิด้วยสำลีสะอาดชุบไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (IPA) เป่าชิ้นงานให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน (N₂) อบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที เพื่อไล่ความชื้นออกจากแผ่นกราฟิ หน้ากาคูดซับรังสีเอกซ์จะใช้สารไวแสงที่มีความหนา 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 แล้วฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตผ่านหน้ากาคูดซับแสง นำชิ้นงานมาอบอีกครั้งเพื่อให้เกิดลวดลายบนสารไวแสง โดยอบที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที (รูปที่ 5 ค) ต่อจากนั้นทำการล้างสารไวแสงในส่วนที่ไม่โดนแสงออกด้วยน้ำยาล้างสารไวแสง (SU-8 developer) เป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน (รูปที่ 5 ง) ในส่วนที่ถูกล้างออกไปนั้นเติมให้เต็มด้วยการนำไปชุบโลหะเงินด้วยไฟฟ้า (Electroplating) (รูปที่ 5 จ)

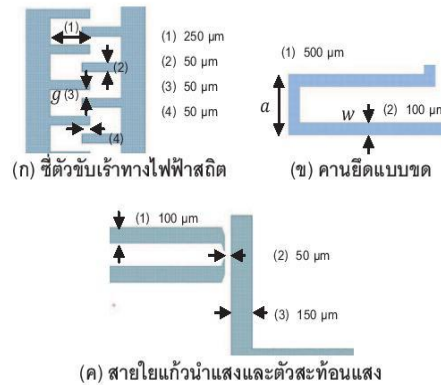
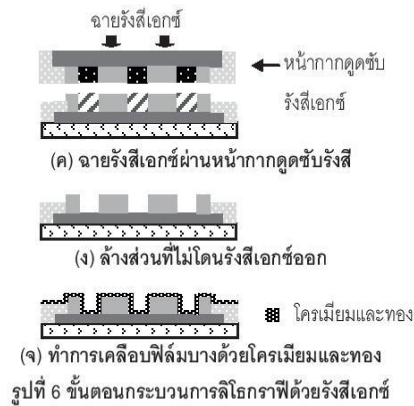


รูปที่ 5 ขั้นตอนการสร้างหน้ากาคูดซับรังสีเอกซ์

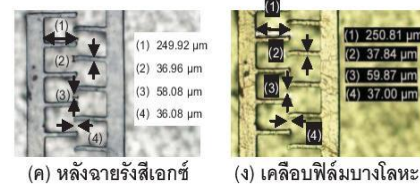
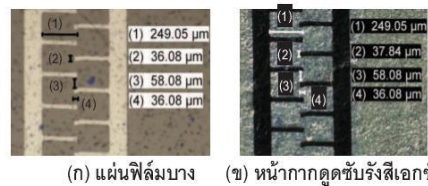
3.2 ขั้นตอนการสร้างชิ้นงานด้วยกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์

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





รูปที่ 7 ลวดลายที่ออกแบบด้วยโปรแกรมเลย์เอาต์อิติเตอร์



รูปที่ 8 ซีตซ์ับร้้าทางไฟฟ้าสติด

4. ผลการทดสอบ

การทดสอบได้ทำการเปรียบเทียบขนาดลายขึ้นงานใน 5 ลักษณะ คือลายขึ้นงานที่ออกแบบด้วยโปรแกรมเลย์เอาต์อิติเตอร์ ลายขึ้นงานบนแผ่นฟิล์มบาง ลายขึ้นงานบนหน้ากากดูดซับรังสีเอกซ์ ลายขึ้นงานหลังจากฉายรังสีเอกซ์ และลายขึ้นงานที่เคลือบฟิล์มบางโลหะด้วยเทคนิคสปีดเครื่อง โดยเปรียบเทียบตำแหน่งที่ทำการวัดลายขึ้นงานทั้งหมด 3 ส่วน คือซีตซ์ับร้้าทางไฟฟ้าสติด คานยัดแบบขุด และสายใยแก้วนำแสงกับตัวสะท้อนแสง ค่าที่ได้จะทำการบันทึกลงในตารางที่ 1 ส่วนตารางที่ 2 จะเป็นค่าความคลาดเคลื่อนในแต่ละตำแหน่งเมื่อทำการถ่ายทอดลวดลายออกไป มีทั้งหมด 4 แบบ โดยยึดลายขึ้นงานที่ออกแบบจากโปรแกรมเลย์เอาต์อิติเตอร์เป็นหลักเปรียบเทียบกับลายขึ้นงานที่ได้สร้างขึ้นมาจริง

ตำแหน่งที่ทำการวัดค่า	ซีตซ์ับร้้าทางไฟฟ้าสติด (ไมโครเมตร)				คานยัด (ไมโครเมตร)		สายใยแก้วนำแสงกับตัวสะท้อนแสง (ไมโครเมตร)		
	ความยาว	ความกว้าง	ระยะห่างซี่	ระยะเหลือมซ้อน	ความยาว	ความกว้าง	สายใยแก้วนำแสง	ระยะห่างระหว่างทั้งสอง	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
หน้ากากดูดซับรังสีเอกซ์	249.05	37.84	58.08	36.08	494.56	93.28	97.68	72.16	126.72
หลังฉายรังสีเอกซ์	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 ขนาดของพารามิเตอร์ในแต่ละตำแหน่งของลวดลายขึ้นงาน

ตำแหน่งที่ทำการวัดค่า ลดสายชิ้นงาน	สี่ตัวชี้วัดทางไฟฟ้าสถิต (%)				ความยืด (%)		สายใยแก้วนำแสงกับตัวสะท้อนแสง (%)		
	ความยาว	ความกว้าง	ระยะห่างซี่	ระยะเหลื่อมซี่	ความยาว	ความกว้าง	สายใยแก้วนำแสง	ระยะห่างระหว่างทั้งสอง	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
หลังจากรายรังสีเอกซ์	-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 ผลในตารางคือค่าผิดพลาดที่ได้มาจากการเปรียบเทียบกับการออกแบบด้วยโปรแกรมเลย์เอาต์อิติเตอร์

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนในแต่ละตำแหน่ง

5. สรุป

ในบทความนี้จะกล่าวถึงการออกแบบโครงสร้างและขั้นตอนการสร้างระบบไฟฟ้าเครื่องกลจุลภาค (MEMS) อุปกรณ์ชนิดเซมิคอนดักเตอร์เพื่อโรบอติกส์เพื่อโรบอติกส์ด้วยเทคนิคเอกซ์เรย์ลิโธกราฟี โครงสร้างจะประกอบด้วยตัวชี้วัดทางไฟฟ้าสถิตแบบซีทีวี ความยืดแบบขด และตัวสะท้อนแสง ใช้โปรแกรมเลย์เอาต์อิติเตอร์เป็นโปรแกรมออกแบบลดสายและทำการสร้างด้วยกระบวนการลิโธกราฟี จากตารางที่ 1 และ 2 การเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนจะเห็นว่าชิ้นงานที่ออกแบบด้วยโปรแกรมเลย์เอาต์อิติเตอร์กับแผ่นฟิล์มบางได้ค่าความคลาดเคลื่อนที่มีเปอร์เซ็นต์มาก เป็นเพราะการพิมพ์ลายลงบนแผ่นฟิล์มยังขาดประสิทธิภาพและความละเอียดในการพิมพ์ ส่งผลให้ลายชิ้นงานมีขนาดคลาดเคลื่อนตามไปด้วย แต่เมื่อนำแผ่นฟิล์มบางมาทำการถ่ายภาพลดสายผ่านกระบวนการลิโธกราฟีด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตเพื่อให้ได้หน้ากากดูดซับรังสีเอกซ์ จะมีค่าความคลาดเคลื่อนที่น้อยลง แต่ค่าความคลาดเคลื่อนจะเพิ่มมากขึ้นในกระบวนการเคลือบฟิล์มบางโลหะ เพราะชิ้นงานได้ถูกทำการเคลือบผิวและทองทำให้ชิ้นงานมีความหนาเพิ่มขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) ที่ช่วยเหลือสนับสนุนทางด้านเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย คุณชานวณศิริมิ่ง 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.

ประวัติผู้เขียน

นางสาวรุ่งลดา ฉิมช้าง เกิดเมื่อวันที่ 26 พฤษภาคม 2529 ที่อำเภอนางรอง จังหวัดบุรีรัมย์ สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้นและตอนปลาย จากโรงเรียนนางรอง จังหวัดบุรีรัมย์ และ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโทรคมนาคม) จาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2551 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในระดับ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี สุรนารี ขณะศึกษาได้ทำงานวิจัยด้านระบบกลไฟฟ้าจุลภาค (MEMS) ทั้งการออกแบบและสร้างตัว ขับเร้าทางไฟฟ้าสถิตแบบชี้หัวเพื่อประยุกต์ใช้ระบบสื่อสารผ่านใยแก้วนำแสง (Fiber optic communication system) โดยใช้กระบวนการลิโธกราฟี ณ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มีผลงานทางด้านวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ ระดับนานาชาติในขณะศึกษาดัง ภาควิชา ก ข.