



## รายงานการวิจัย

การใช้ X-ray จากแสงซินโครตรอนเพื่อสร้างโครงสร้างสำหรับสวิตช์ลำแสง  
จากสายไฟเบอร์ออฟติก  
(Using X-ray from the Synchrotron Light Source for  
Development of Optical Fiber Switch)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



## รายงานการวิจัย

การใช้ X-ray จากแสงซินโครตรอนเพื่อสร้างโครงสร้างสำหรับสวิตช์ลำแสง  
จากสายไฟเบอร์ออฟติก  
(Using X-ray from the Synchrotron Light Source for  
Development of Optical Fiber Switch)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รังสรรค์ ทองทา  
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2557-2558

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

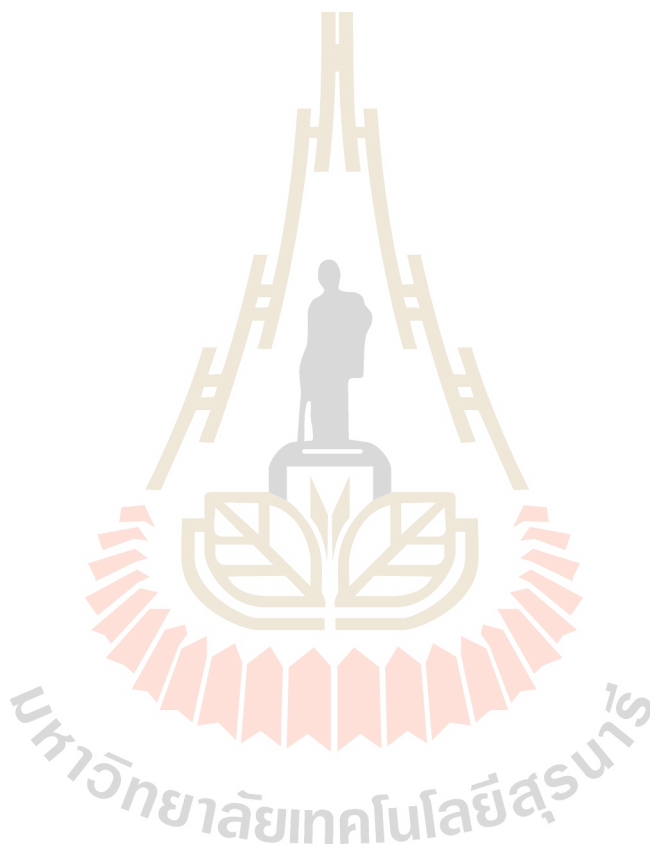
พฤศจิกายน 2561

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีในการสนับสนุนงบประมาณวิจัย ปีงบประมาณ 2557-2558 และขอขอบคุณสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และเครื่องมือต่างๆ ในการทำวิจัย บัดนี้งานวิจัยได้สำเร็จลุล่วงแล้ว คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัย

พฤศจิกายน 2561



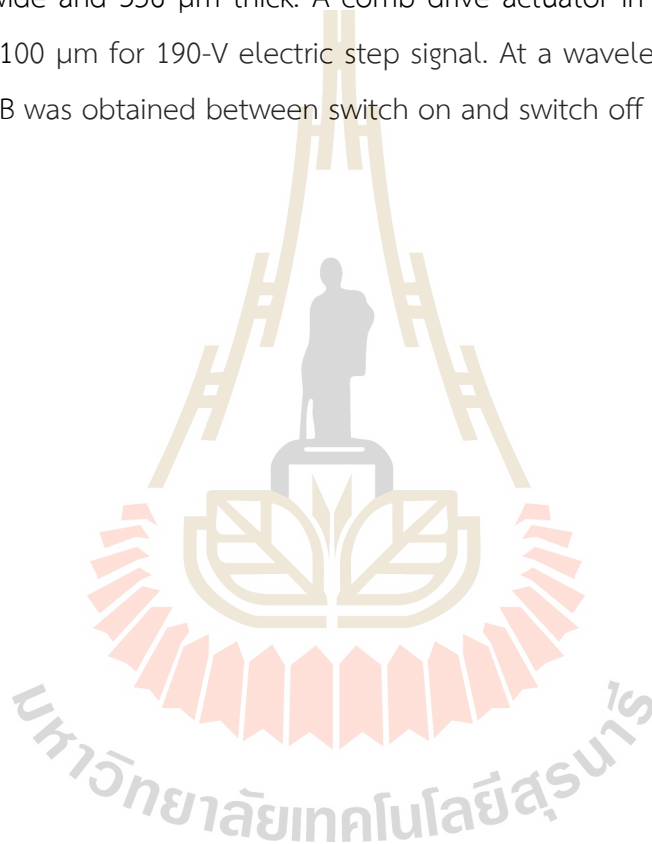
## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการออกแบบ สร้าง และทดสอบอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงสำหรับประยุกต์ใช้งานกับสายใยแก้วนำแสงแบบโหมดเดี่ยว โครงสร้างของอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงสร้างจากวัสดุพอลิเมอร์ที่เป็นสารไวแสงชนิดลบ SU-8 ด้วยเทคนิคเอกซ์เรย์ลิโธกราฟีจากระบบลำแสง 6a: DXL ของสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) จากนั้นทำการเคลือบโพลีเอไมน์และทองคำลงบนโครงสร้างเพื่อให้เกิดการนำไฟฟ้าและสามารถสะท้อนแสงได้ อุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงของงานวิจัยนี้จะมีกระจกจุลภาคและตัวขับเร้าทางไฟฟ้าสถิตแบบซีวีวีเป็นส่วนประกอบหลักที่เคลื่อนที่ได้ 128 ซีวีวี เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้า 190 V ส่วนที่สามารถเคลื่อนที่ได้จะสามารถเคลื่อนที่ได้ในระยะ 100  $\mu\text{m}$  โดยส่วนปลายของชุดซีวีวีที่เคลื่อนที่ได้จะมีกระจกจุลภาคขนาดความกว้าง 22.91  $\mu\text{m}$  และหนา 356  $\mu\text{m}$  ติดอยู่ เมื่อส่งสัญญาณแสงที่มีความยาวคลื่น 1310 nm การสูญเสียทางแสงเนื่องจากการสวิตซ์ที่น้อยที่สุดในขณะที่สวิตซ์เปิดและสวิตซ์ปิดมีค่าต่างกัน 16.20 dB



## Abstract

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  $\mu\text{m}$  wide and 356  $\mu\text{m}$  thick. A comb drive actuator in moving path has 128 fingers. It can travel 100  $\mu\text{m}$  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.



# สารบัญ

## หน้า

กิตติกรรมประกาศ .....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ข
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
สารบัญ .....	ง
สารบัญตาราง .....	ฉ
สารบัญภาพ .....	ช
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ .....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของเบื้องต้น .....	2
1.4 ขอบเขตการวิจัย .....	2
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย .....	2
1.5.1 แนวทางการดำเนินงานวิจัย .....	2
1.5.2 สถานที่ทำการวิจัย.....	2
1.5.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย .....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.7 ส่วนประกอบของรายงานการวิจัย .....	3
บทที่ 2 ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	4
2.1 ระบบกลไฟฟ้าจุลภาค .....	4
2.2 อุปกรณ์สวิตช์เชิงแสง.....	4
บทที่ 3 กระบวนการพื้นฐานในการผลิตระบบกลไฟฟ้าจุลภาค .....	11
3.1 กระบวนการลิโธกราฟี .....	11
3.2 การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า.....	12
3.3 การเคลือบโลหะด้วยการสปัตเตอร์ริง .....	13
3.4 การเตรียมสารไวแสง .....	14
3.5 การสร้างหน้ากักกันรังสีเอกซ์.....	18
3.6 การสร้างลวดลายบนแผ่นวงจรมิมพ์ .....	21

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4	ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์..... 24
4.1	ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับสายใยแก้วนำแสง..... 24
4.1.1	โครงสร้างของสายใยแก้วนำแสง..... 25
4.1.2	ชนิดของสายใยแก้วนำแสง..... 26
4.1.3	หัวเชื่อมต่อ (Connector)..... 32
4.2	ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับตัวขับเคลื่อนทางไฟฟ้าสถิตและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์..... 33
4.2.1	ตัวขับเคลื่อนทางไฟฟ้าสถิตแบบซี่หวี (Electrostatic comb-drive actuator)..... 34
4.2.2	ตัวขับเคลื่อนทางไฟฟ้าสถิตแบบแผ่นคู่ขนาน..... 43 (Electrostatic parallel plate actuator)
4.3	การออกแบบโครงสร้างอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสง..... 48
บทที่ 5	กระบวนการพัฒนาอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสง..... 52
5.1	การสร้างอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสง..... 52
5.2	รูปแบบของอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงที่มีการสร้างขึ้นในงานวิจัย..... 61
บทที่ 6	การทดสอบและผลการทดสอบ..... 66
6.1	การเชื่อมต่อสายอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสง..... 66
6.1.1	เชื่อมต่อตัวขับเคลื่อนทางไฟฟ้าสถิตกับแหล่งจ่ายแรงดันสูง..... 66
6.1.2	เชื่อมต่อสายใยแก้วนำแสงกับอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสง..... 67
6.2	การทดสอบการเคลื่อนที่..... 68
6.3	การทดสอบการสวิตช์แสง..... 72
6.4	แนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสง..... 75
บทที่ 7	สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ..... 76
7.1	สรุปงานวิจัย..... 77
7.2	ข้อเสนอแนะ..... 77
ภาคผนวก	โปรแกรมแบบจำลองผลทางคณิตศาสตร์..... 78
รายการอ้างอิง.....	85
ประวัติผู้วิจัย.....	87

# สารบัญตาราง

## หน้า

ตารางที่ 2.1	เปรียบเทียบประสิทธิภาพของอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงของ Raanan กับ DiCon.....	5
ตารางที่ 2.2	ผลการจำลองค่าการสะท้อนแสงของโลหะชนิดต่าง ๆ ที่ความยาวคลื่น 1310 nm .....	6
ตารางที่ 2.3	ค่าคุณลักษณะเฉพาะอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงของ Cornel Marxer .....	6
ตารางที่ 2.4	ค่าคุณลักษณะเฉพาะอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงของ Ho Nam Khon .....	9
ตารางที่ 4.1	โครงสร้างของสายใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียว .....	27
ตารางที่ 4.2	คุณลักษณะเฉพาะของสายใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียว .....	28
ตารางที่ 4.3	โครงสร้างของสายใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมดแบบ Step index.....	29
ตารางที่ 4.4	คุณลักษณะเฉพาะของสายใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมดแบบ Step index.....	29
ตารางที่ 4.5	โครงสร้างของสายใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมดแบบ Graded index.....	31
ตารางที่ 4.6	คุณลักษณะเฉพาะของสายใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมดแบบ Graded index.....	31
ตารางที่ 4.7	คุณสมบัติของหัวเชื่อมต่อชนิดต่าง ๆ .....	32
ตารางที่ 4.8	สัญลักษณ์ของอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสง .....	49
ตารางที่ 5.1	ขนาดพารามิเตอร์ของอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงที่ออกแบบ (ตามตารางที่ 4.8)..... และได้จากการสร้างจริง	59
ตารางที่ 6.1	ค่าการรับส่งแสงผ่านตัวกลางที่เป็นอากาศ หน่วย dBm .....	73
ตารางที่ 6.2	ค่าการสูญเสียของแสงเนื่องจากการส่งแสงผ่านตัวกลางที่เป็นอากาศเทียบกับ .....	74
	การส่งผ่านสายใยแก้วนำแสงโดยตรง หน่วย dB	
ตารางที่ 6.3	ค่าการรับส่งแสงผ่านการสะท้อนจากกระจกจุลภาค หน่วย dBm.....	75
ตารางที่ 6.4	ค่าการสูญเสียของแสงเนื่องจากการสะท้อนของกระจกจุลภาคเทียบกับ .....	75
	การส่งผ่านอากาศ หน่วย dB	



# สารบัญภาพ

## หน้า

รูปที่ 2.1	อุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงของ Koji Akimoto.....	5
รูปที่ 2.2	อุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงของ Raanan A. Miller.....	6
รูปที่ 2.3	อุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงของ Cornel Marxer.....	7
รูปที่ 2.4	อุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงของ Hiroshi Toshiyoshi.....	7
รูปที่ 2.5	อุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงของ Shi-Sheng Lee.....	8
รูปที่ 2.6	อุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงของ Ho Nam Khon.....	9
รูปที่ 2.7	อุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงของ Chang-Hyeon Ji.....	10
รูปที่ 3.1	เปรียบเทียบการใช้สารไวแสงสองชนิดในกระบวนการลิโธกราฟี.....	12
รูปที่ 3.2	การชุบโลหะเงินด้วยไฟฟ้า.....	13
รูปที่ 3.3	เครื่องเคลือบโลหะแบบสปัตเตอร์ริง.....	14
รูปที่ 3.4	การเตรียมสารไวแสงด้วยการหมุนเคลือบ.....	15
รูปที่ 3.5	การเตรียมสารไวแสงด้วยการหยด.....	16
รูปที่ 3.6	กระบวนการหล่อสารไวแสงจากผงแห้งและอุปกรณ์.....	17
รูปที่ 3.7	ชั้นของสารไวแสงหลังจากการเตรียมสารไวแสง.....	17
รูปที่ 3.8	ขั้นตอนการสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์.....	18
รูปที่ 3.9	ฐานรองสำหรับสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์.....	19
รูปที่ 3.10	ลวดลายหลังฉายแสงของหน้ากากกันรังสีเอกซ์สำหรับอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสง.....	20
รูปที่ 3.11	หน้ากากกันรังสีเอกซ์สำหรับอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสง.....	21
รูปที่ 3.12	แผ่นวงจรพิมพ์.....	21
รูปที่ 3.13	ติดแผ่นฟิล์มไวแสงบนแผ่นวงจรพิมพ์.....	22
รูปที่ 3.14	ฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตบนฟิล์มไวแสง.....	22
รูปที่ 3.15	ฐานรองอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสง.....	23
รูปที่ 4.1	สายใยแก้วนำแสง.....	25
รูปที่ 4.2	ส่วนประกอบของสายใยแก้วนำแสง.....	26
รูปที่ 4.3	ขนาดของสายใยแก้วนำแสง.....	26
รูปที่ 4.4	โครงสร้างโดยทั่วไปของสายใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียว.....	27
รูปที่ 4.5	โครงสร้างโดยทั่วไปของสายใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมดแบบ Step index.....	29
รูปที่ 4.6	สเปคตรัมการลดทอนสัญญาณของสายใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมดแบบ Step index.....	30

## สารบัญญภาพ(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.7	โครงสร้างโดยทั่วไปของสายใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมดแบบ Graded index ..... 31
รูปที่ 4.8	ลักษณะของแผ่นตัวนำคู่ขนาน ..... 34
รูปที่ 4.9	โครงสร้างของตัวขับเร้าแบบซีทีวี ..... 35
รูปที่ 4.10	โมเดลของตัวขับเร้าแบบซีทีวี..... 35
รูปที่ 4.11	ลักษณะแรงที่เกิดบนคานสปริงแบบ fixed-fixed beam..... 36
รูปที่ 4.12	คานสปริงแบบ fixed-fixed beams ..... 37
รูปที่ 4.13	คานสปริงแบบ folded beam..... 37
รูปที่ 4.14	คานสปริงแบบ serpentine beam..... 38
รูปที่ 4.15	แรงดันไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ต้องป้อนให้ตัวขับเร้าเมื่อเทียบกับจำนวนซีทีวี ..... 40
รูปที่ 4.16	แรงดันไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ต้องป้อนให้ตัวขับเร้าเมื่อเทียบกับ .....41 ระยะห่างระหว่างซีทีวีทั้งสองขั้ว
รูปที่ 4.17	แรงดันไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ต้องป้อนให้ตัวขับเร้าเมื่อเทียบกับความสูงของซีทีวี ..... 42
รูปที่ 4.18	แรงดันไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ต้องป้อนให้ตัวขับเร้าเมื่อเทียบกับระยะที่ซีทีวีเคลื่อนที่ ..... 43
รูปที่ 4.19	ลักษณะโครงสร้างของตัวขับเร้าแบบแผ่นคู่ขนาน ..... 44
รูปที่ 4.20	โมเดลของตัวขับเร้าแบบแผ่นคู่ขนาน ..... 44
รูปที่ 4.21	แรงดันไฟฟ้าแนบติดที่เกิดขึ้นในตัวขับเร้าเมื่อเทียบกับจำนวนแผ่นตัวนำ ..... 47
รูปที่ 4.22	โครงสร้างด้านบนของอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสง ..... 48
รูปที่ 4.23	โครงสร้างสามมิติของอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสง ..... 48
รูปที่ 4.24	ขนาดพารามิเตอร์ของอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสง ..... 50
รูปที่ 5.1	ขั้นตอนการสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสง ..... 53
รูปที่ 5.2	สารไวแสงบนฐานรองกราไฟต์สำหรับสร้างโครงสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสง ..... 54
รูปที่ 5.3	ฉายรังสีเอกซ์..... 55
รูปที่ 5.4	โครงสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงที่ได้จากการฉายรังสีเอกซ์ ..... 55
รูปที่ 5.4	โครงสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงที่ได้จากการฉายรังสีเอกซ์ ..... 56
รูปที่ 5.6	โครงสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงที่ถูกเคลือบด้วยสารไวแสง ..... 56
รูปที่ 5.7	โครงสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงก่อนและหลังขัดกราไฟต์ ..... 57
รูปที่ 5.8	เชื่อมต่อโครงสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงกับแผ่นวงจรพิมพ์ ..... 58
รูปที่ 5.9	โครงสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงที่ติดอยู่บนแผ่นวงจรพิมพ์ ..... 59
รูปที่ 5.10	ขนาดโครงสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงที่สร้างได้จริง..... 60

# สารบัญภาพ

## หน้า

รูปที่ 5.11	เปรียบเทียบผลการจำลองการตอบสนองของตัวขับเร้าทางไฟฟ้าสถิต..... 61 ที่ออกแบบกับที่สร้างได้จริง	61
รูปที่ 5.12	โครงสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงที่มีตัวขับเร้าทางไฟฟ้าสถิตแบบซี่หวี ..... 62 มีคานสปริงแบบ fixed-fixed beam	62
รูปที่ 5.13	โครงสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงที่มีตัวขับเร้าทางไฟฟ้าสถิตแบบซี่หวี ..... 63 และมีคานสปริงแบบ serpentine 8 ขด วางตัวตั้งฉากกับระจกจุลภาค	63
รูปที่ 5.14	โครงสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงที่มีตัวขับเร้าทางไฟฟ้าสถิตแบบซี่หวี ..... 63 และมีคานสปริงแบบ serpentine 12 ขด วางตัวตั้งฉากกับระจกจุลภาค	63
รูปที่ 5.15	โครงสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงที่มีตัวขับเร้าทางไฟฟ้าสถิตแบบแผ่นคู่ขนาน ..... 64 และมีคานสปริงแบบ serpentine 12 ขด วางตัวขนานกับระจกจุลภาค	64
รูปที่ 5.16	โครงสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงที่มีตัวขับเร้าทางไฟฟ้าสถิตแบบแผ่นคู่ขนาน ..... 65 ละมีคานสปริงแบบ serpentine 12 ขด	65
รูปที่ 5.17	โครงสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงที่มีตัวขับเร้าทางไฟฟ้าสถิตแบบซี่หวี ..... 65 ละมีคานสปริงแบบ serpentine 12 ขด วางตัวตั้งฉากกับระจกจุลภาค	65
รูปที่ 6.1	เชื่อมต่อสายทองแดงกับขั้วตัวขับเร้าทางไฟฟ้าสถิต ..... 67	67
รูปที่ 6.2	เชื่อมต่อสายของอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงกับแหล่งจ่ายแรงดันสูง ..... 67	67
รูปที่ 6.3	เชื่อมต่อสายใยแก้วนำแสงกับอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสง ..... 68	68
รูปที่ 6.4	ผลการจำลองการตอบสนองของโครงสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงที่สร้างได้จริง ..... 69	69
รูปที่ 6.5	ชุดขับอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงในงานวิจัย ..... 70	70
รูปที่ 6.6	ทดสอบการเคลื่อนที่ของตัวขับเร้าทางไฟฟ้าสถิตแบบซี่หวี..... 71	71
รูปที่ 6.7	วัดค่ากำลังของแสงที่ส่งออกมาจากแหล่งจ่ายสัญญาณแสง ..... 72	72
รูปที่ 6.8	เชื่อมต่อสายใยแก้วนำแสงของอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงกับแหล่งจ่ายสัญญาณแสง ..... 73	73
รูปที่ 6.9	ทดสอบการรับส่งแสงผ่านตัวกลางซึ่งเป็นอากาศ ..... 73	73
รูปที่ 6.10	ทดสอบการรับส่งแสงโดยการสะท้อนจากระจกจุลภาค ..... 74	74
รูปที่ 6.11	พื้นผิวบริเวณผนังด้านข้างของระจกจุลภาค ..... 76	76
รูปที่ 6.12	โครงสร้างระจกจุลภาคที่เหมาะสม ..... 77	77

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$F_e$	คือ แรงไฟฟ้าสถิต มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)
$Q_1, Q_2$	คือ ประจุไฟฟ้าแบบจุด มีหน่วยเป็น คูโลมบ์ (C)
$R$	คือ ระยะทางระหว่างประจุ $Q_1$ และ $Q_2$
$\epsilon_0$	คือ ค่า permittivity ของสุญญากาศ มีค่าเท่ากับ $8.85 \times 10^{-12}$ F/m
$\epsilon_r$	คือ ค่า permittivity ของวัสดุฉนวนที่กั้นระหว่างขั้วทั้งสอง
$N$	คือ จำนวนซี่ของตัวขับเคลื่อน
$V$	คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าขับเคลื่อน
$g$	คือ ขนาดระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองขั้ว
$F_s$	คือ แรงปฏิกิริยาหรือแรงดึงกลับของสปริง มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)
$x$	คือ ระยะของการเคลื่อนที่
$E$	คือ ค่าความยืดหยุ่นของวัสดุ (Young's modulus)
$w$	คือ ความกว้างของสปริง
$t$	คือ ความสูงของสปริง
$l$	คือ ความยาวของสปริง
$k$	คือ ค่าคงที่สปริง หน่วยเป็น นิวตันต่อเมตร (N/m)
$G$	คือ ค่ามอดูลัสของการบิด (Torsion modulus)
$J$	คือ ค่าคงที่ของการบิด (Torsion constant)
$l_a$	คือ ความกว้างของสปริง
$l_b$	คือ ความยาวของสปริง
$E$	คือ ค่าความยืดหยุ่นของวัสดุ (Young's modulus)
$I_x$	คือ โมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of inertia) ของสปริง
$n$	คือ จำนวนขดของสปริง
$\mathcal{G}$	คือ ค่าอัตราส่วนของปัวซอง (Poisson's ratio)
$I_x$	คือ โมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of inertia) ของสปริง
$g$	คือ ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าสองขั้ว
$k_x$	คือ ค่าคงที่สปริงที่จำนวนขดของสปริงเพิ่มขึ้นในแนวแกน x
$t$	คือ ความสูงของขั้วไฟฟ้า
$V_{pi}$	คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าแบบติด มีหน่วยเป็น โวลต์ (V)
$A$	คือ พื้นที่ผิวบริเวณที่เกิดประจุไฟฟ้า

# บทที่ 1

## บทนำ

เนื้อหาในบทนี้เป็นกรอธิบายถึงความเป็นมาและเหตุจูงใจสำหรับการทำวิจัยเรื่อง การใช้ X-ray จากแสงซินโครตรอนเพื่อสร้างโครงสร้างสำหรับสวิตช์ลำแสงจากสายไฟเบอร์ออฟติก โดยนำเทคนิคซินโครตรอนเอกซ์เรย์ลิโธกราฟีมาประยุกต์ใช้ในการสร้างอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสง ซึ่งประกอบด้วยความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของงานวิจัย แนวทางการดำเนินงานวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และส่วนประกอบของรายงานการวิจัย

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

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

ระบบกลไฟฟ้าจุลภาค หรือ Micro-Electro-Mechanical System (MEMS) เป็นอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็กระดับไมโครเมตร หรือ 1 ในล้านของเมตร ประกอบด้วยส่วนที่ใช้ไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนและส่วนที่ใช้กลไกบางอย่างทำให้เคลื่อนที่ อาจสร้างขึ้นโดยใช้เทคโนโลยีการผลิตวงจรรวม (Integrated Circuit Technology : IC) เทคโนโลยีการปลูกสาร เทคโนโลยีการกัดกำจัด และเทคโนโลยีการสร้างรูปแบบด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี ระบบกลไฟฟ้าจุลภาคเป็นเทคโนโลยีสมัยใหม่ที่เติบโตอย่างสูงและต่อเนื่อง ในปัจจุบันได้รับความสนใจและก้าวล้ำไปอย่างมากทั่วโลก อันเนื่องมาจากความต้องการอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็ก สมรรถนะสูง และราคาถูก โดยเทคโนโลยีดังกล่าวได้ถูกนำไปใช้ประโยชน์ในสาขาต่าง ๆ มากมายอาทิเช่น เทคโนโลยียานยนต์นำไปผลิตอุปกรณ์วัดความเร่งและอุปกรณ์วัดความดัน เทคโนโลยีการแพทย์และชีวภาพนำไปผลิตตัวตรวจรู้ (Sensors) และตัวขับเคลื่อน (Actuators) ชนิดต่าง ๆ เทคโนโลยีการสื่อสารโทรคมนาคมนำไปผลิตอุปกรณ์ที่ใช้ในการสื่อสารทางแสง ดังนั้นจึงได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการสร้างอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงโดยใช้เทคนิคเอกซ์เรย์ลิโธกราฟีสำหรับใช้เป็นตัวเปลี่ยนทิศทางแสงขึ้น

กระจากแนวตั้งที่วางในแนวตั้งฉากกับพื้นผิวของชิพกำลังเป็นที่น่าสนใจในระบบเชิงแสงจุลภาค การติดตั้งใยแก้วนำแสงและเลเซอร์ไดโอดให้อยู่ในแนวนานกับระนาบของตัวชิพเป็นเรื่องที่ทำได้ง่าย

นอกจากนี้การสร้างกระจกที่วางตัวในแนวตั้งให้มีคุณภาพเชิงแสงที่สูงนั้นยังคงเป็นงานที่ท้าทาย เทคนิคการสร้างมากมายได้ถูกวิจัยขึ้น

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นในเรื่องการพัฒนากระบวนการสร้าง การผลิตอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงแบบไฟฟ้าสถิต ด้วยเทคโนโลยีการผลิตโครงสร้างจุลภาคสัดส่วนสูง โดยใช้รังสีเอกซ์ เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์และใช้ประโยชน์ อีกทั้งเพื่อเป็นการลดต้นทุนในการผลิตอีกด้วย

อุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงของงานวิจัยนี้ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ กระจกจุลภาคทำหน้าที่เป็นตัวเปลี่ยนทิศทางของแสง และส่วนที่สองคือตัวขับเคลื่อนทางไฟฟ้าสถิตทำหน้าที่ขับเคลื่อนกระจกจุลภาคให้สามารถเคลื่อนที่ได้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 นำเทคนิคซินโครตรอนเอกซ์เรย์ลิโธกราฟีมาประยุกต์ใช้ในการสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสง

1.2.2 พัฒนาเทคนิคการเคลือบทองคำลงบนกระจกจุลภาคเพื่อให้เกิดการสะท้อนแสง

1.2.3 พัฒนาคำถามใหม่ในกระบวนการผลิตระบบกลไฟฟ้าจุลภาคเชิงแสง เพื่อลดต้นทุนในการผลิต

## 1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

โครงสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงสร้างจากพอลิเมอร์ซึ่งเป็นสารไวแสงชนิดลบ (SU-8) เคลือบโลหะ

## 1.4 ขอบเขตการวิจัย

สร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงโดยใช้กระบวนการลิโธกราฟี

## 1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

### 1.5.1 แนวทางการดำเนินงานวิจัย

- 1) สำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
- 2) ศึกษากระบวนการผลิตโครงสร้างระบบกลไฟฟ้าจุลภาค
- 3) ออกแบบอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงแบบไฟฟ้าสถิต
- 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) โปรแกรมแมทแลบ (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 พัฒนาคณะความรู้ใหม่ในกระบวนการผลิตระบบกลไฟฟ้าจุลภาค

### 1.7 ส่วนประกอบของรายงานการวิจัย

รายงานการวิจัยฉบับนี้ประกอบด้วย 7 บท ดังนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ขอบเขตงานวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตงานวิจัย วิธีดำเนินงานวิจัยและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

บทที่ 2 กล่าวถึงการปริทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงแบบไฟฟ้าสถิตในระบบกลไฟฟ้า

บทที่ 3 กล่าวถึงกระบวนการทางระบบกลไฟฟ้าจุลภาค ที่เกี่ยวข้องกับการสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสง ได้แก่ กระบวนการลิโธกราฟี กระบวนการเคลือบโลหะ กระบวนการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า กระบวนการเตรียมสารไวแสง การสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์ และการสร้างลวดลายบนแผ่นวงจรพิมพ์

บทที่ 4 กล่าวถึงความรู้พื้นฐานของสายใยแก้วนำแสง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการจำลองพฤติกรรมเคลื่อนที่ของตัวขับเคลื่อนไฟฟ้าสถิตเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าขับเคลื่อน (Driving voltage) และการคำนวณแรงดันไฟฟ้าแนบติด (Pull-in voltage)

บทที่ 5 กล่าวถึงการสร้างและพัฒนากระบวนการผลิตอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสง

บทที่ 6 กล่าวถึงการทดสอบและผลการทดสอบ

บทที่ 7 กล่าวถึงการสรุปผล ข้อเสนอแนะ และแนวทางแก้ไข

นอกจากนี้ยังมีภาคผนวกซึ่งเป็นข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ได้แก่

ภาคผนวก ก. โปรแกรมแบบจำลองผลทางคณิตศาสตร์ของแรงดันทางไฟฟ้าขับเคลื่อนและแรงดันไฟฟ้าแบบติด





## บทที่ 2

### ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 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

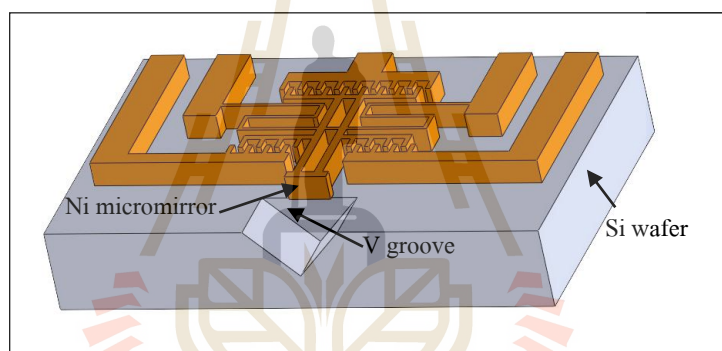
การสร้างหรือผลิตอุปกรณ์ทางระบบกลไฟฟ้าจุลภาคนั้นใช้เทคนิคการสร้างพื้นฐานจากการสร้างวงจรรวม (Integrated Circuit : IC) จึงทำให้ได้ขนาดของอุปกรณ์ที่เล็ก ส่วนระบบการผลิตชิ้นส่วนขนาดใหญ่จะใช้เทคนิคการสร้างที่ได้แก่ การกลึง การหล่อ การเจาะ การฉีดยา การกัด หรือการอัดเพื่อขึ้นรูปชิ้นงาน เทคนิคหรือวิธีการดังกล่าวไม่สามารถสร้างโครงสร้างให้มีขนาดเล็กลงได้เพราะมีขีดจำกัดทางด้านรูปร่าง และสิ่งนี้เองที่เป็นข้อได้เปรียบของระบบกลไฟฟ้าจุลภาค เนื่องจากสามารถสร้างชิ้นงานขนาดเล็กและซับซ้อนได้มากกว่า 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) และการใช้หลักการของฟ้าสถิต (Electrostatic forces) เป็นต้น

## 2.2 อุปกรณ์สวิตช์เชิงแสง

อุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงของงานวิจัยนี้จะสามารถทำงานได้ต้องประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน ส่วนที่หนึ่งคือกระจกจุลภาคทำหน้าที่เป็นตัวเปลี่ยนทิศทางของแสง และส่วนที่สอง คือ ตัวขับเร้า จุลภาคทำหน้าที่ขับเคลื่อนกระจกจุลภาคให้สามารถเคลื่อนที่ได้ ในอดีตที่ผ่านมาได้มีการนำเสนอ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงในงานวิจัยหลายชิ้นดังนี้

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

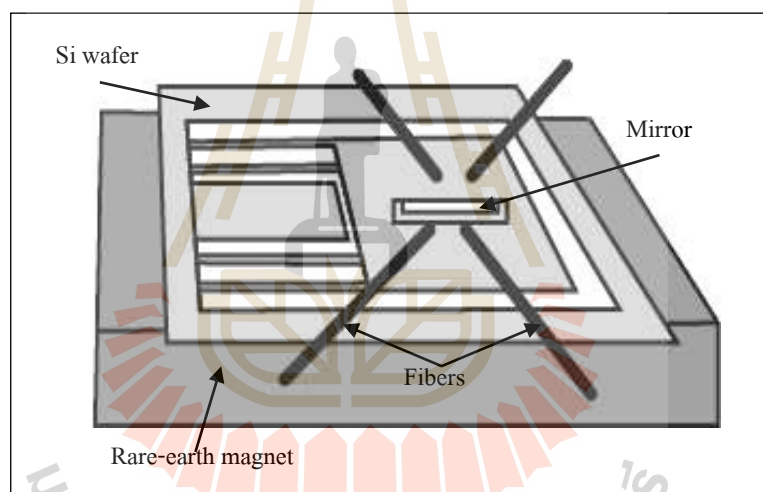


รูปที่ 2.1 อุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงของ Koji Akimoto

Raanan A. Miller (1997) ได้ออกแบบและสร้างอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงแบบ  $2 \times 2$  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 <sup>3</sup>	23 cm <sup>3</sup>
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

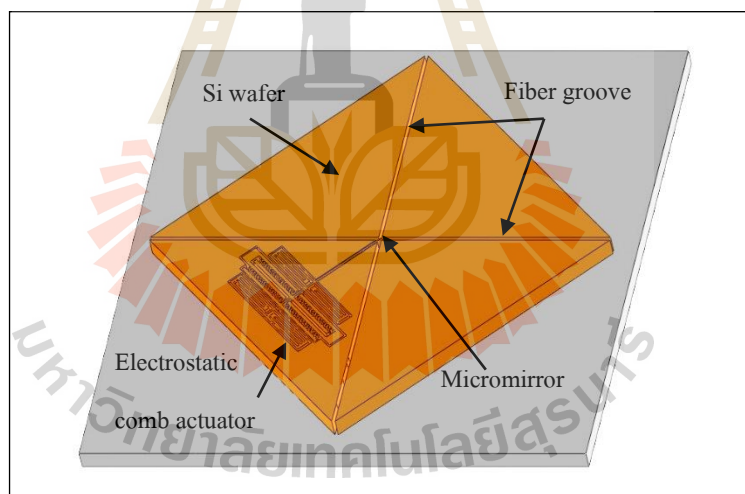
Cornel Marxer (1999) ได้สร้างอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงแบบ 2x2 สำหรับสายใยแก้วนำแสงแบบ โหมดเดียว อุปกรณ์นี้มีส่วนประกอบหลักในการทำงานอยู่สองส่วนได้แก่ กระจกจุลภาคแนวตั้งที่คอย ทำหน้าที่สวิตช์แสง และตัวขับเคลื่อนทางไฟฟ้าสถิตแบบซีหรือทำหน้าที่เป็นตัวขับเคลื่อนกระจกจุลภาคให้ เคลื่อนที่เข้าออกระหว่างทางเดินแสงของสายใยแก้วนำแสงสองคู่ ใช้เทคนิคขึ้นรูปโครงสร้างโดยการ สกัดพื้นผิวซิลิคอนเชิงลึก และมีการเคลือบโลหะหลายชนิดเพื่อให้กระจกจุลภาคเกิดการสะท้อนแสง กระจกจุลภาคนี้มีความสูง 75  $\mu\text{m}$  และมีความกว้างน้อยที่สุด 2.3  $\mu\text{m}$  ตัวขับเคลื่อนสามารถเคลื่อนที่ได้ 20  $\mu\text{m}$  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

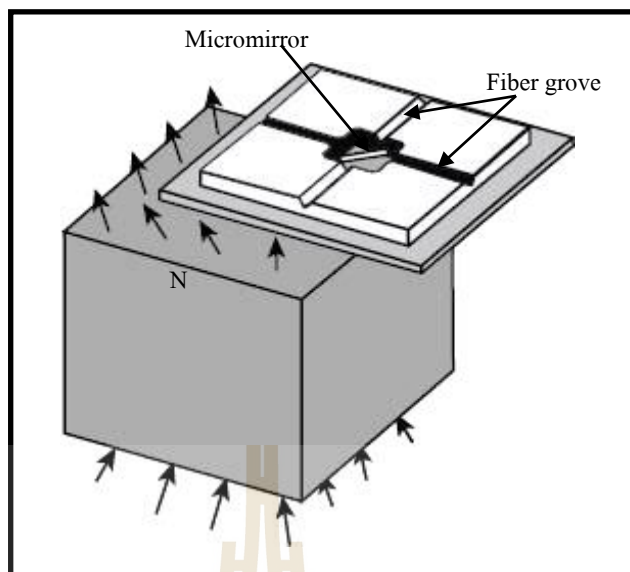
ตารางที่ 2.3 ค่าคุณลักษณะเฉพาะอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงของ Cornell Marxer

	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)	



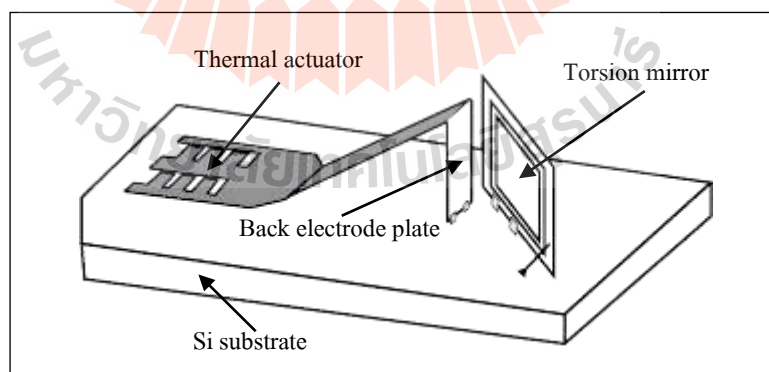
รูปที่ 2.3 อุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงของ Cornell Marxer

Hiroshi Toshiyoshi (1999) ได้สร้างอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงสำหรับสายใยแก้วนำแสงแบบหลายโหมด ที่มีกระจกปิดขนาดเล็กทำหน้าที่เป็นตัวสวิตช์แสงและถูกขับเคลื่อนด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า อาศัยเทคนิคการขึ้นรูปด้วยการสกัดพื้นผิวซิลิคอน กระจกขนาดเล็กนี้เป็นทองคำ ติดอยู่กับคานบิดที่เคลือบฟิล์มแม่เหล็ก FeNiCo คานบิดนี้จะถูกควบคุมการทำงานด้วยสนามแม่เหล็กที่เกิดจากแม่เหล็กไฟฟ้า ทำให้สามารถบิดไปรอบ 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 ด้วยระบบกลไฟฟ้า จุลภาคสำหรับสายใยแก้วนำแสงโหมดเดียว กระจกปิดจุลภาคแนวตั้งถูกสร้างขึ้นจากกระบวนการ สกัดพื้นผิว (Surface-micromachined) ควบคุมการทำงานด้วยตัวขับเคลื่อนที่ใช้หลักการในการ ขยายตัวของโลหะเนื่องจากอุณหภูมิ เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้า 80 V จะทำให้กระจกปิดเป็นมุม 45 องศา เวลาในการสวิตช์น้อยกว่า 400  $\mu$ s ค่าการสูญเสียทางแสงเนื่องจากการแทรกสอดได้ 1.25 dB

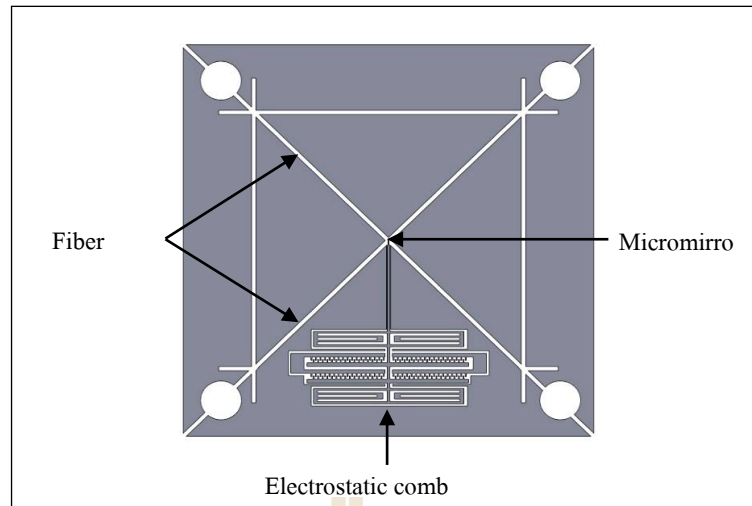


รูปที่ 2.5 อุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงของ Shi-Sheng Lee

Ho Nam Khon (2004) ได้ออกแบบและสร้างอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงแบบ 2x2 สำหรับประยุกต์ในการเพิ่มลดทางแสงที่มีการสูญเสียต่ำ ของสายใยแก้วนำแสงแบบปลายแบน (Flat-ended fiber) และสายใยแก้วนำแสงแบบปลายเฉียง (Beveled-ended fiber) มีระจกจุลภาคเป็นตัวสวิตช์แสง และถูกขับเคลื่อนด้วยตัวขับเร้าทางไฟฟ้าสถิตแบบซีวีวี อุปกรณ์นี้ถูกสร้างขึ้นจากกระบวนการสกัดพื้นผิวซิลิคอนด้วยไอออนเชิงลึก (Silicon deep reactive ion etch : DRIE) เคลื่อนที่ไปได้ระยะทาง 40  $\mu\text{m}$  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

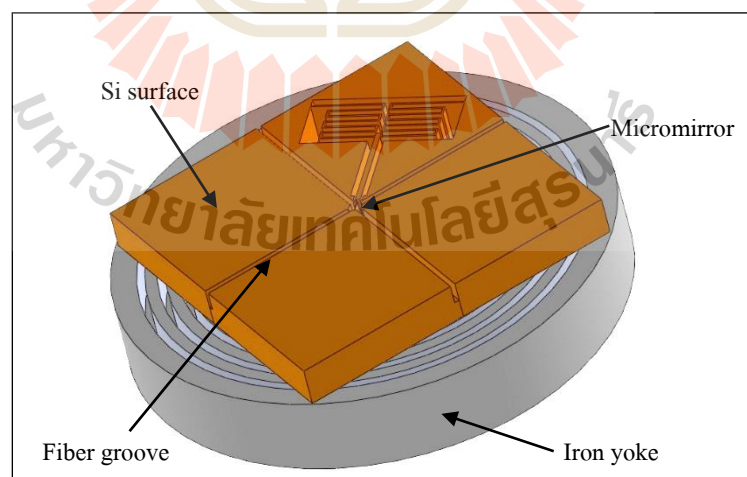
ตารางที่ 2.4 ค่าคุณลักษณะเฉพาะอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงของ Ho Nam Khon

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 ที่อยู่บนส่วนปลายของคานบิต 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

เพิ่ม paper อ้างอิงปีใหม่ๆ อีก 1 ชิ้น

จากงานวิจัยที่ได้ทำการสำรวจพบว่ากระบวนการสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสง มีรูปแบบการสร้างที่หลากหลายได้แก่ การสร้างชิ้นงานด้วยการสกัดฐานรองเป็นโครงสร้างลงไปหรือเรียกว่า Bulk micromachining และสร้างชิ้นงานด้วยงานสร้างลวดลายบนพื้นผิวของฐานรองหรือเรียกว่า Surface micromachining ซึ่งแต่ละวิธีก็มีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน การสร้างชิ้นงานด้วยการสกัดฐานรองส่วนใหญ่แล้วจะเป็นวัสดุประเภทซิลิคอนต้องใช้อุปกรณ์และเครื่องมือราคาสูง แต่มีความแม่นยำในการสร้าง การควบคุมอัตราการเกิดหรือการสกัดค่อนข้างแม่นยำ ส่วนอีกวิธีคือสร้างชิ้นงานบนพื้นผิวซึ่งวัสดุและอุปกรณ์ราคาไม่แพงมาก

สำหรับงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นในเรื่องของการพัฒนากระบวนการสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงด้วยเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค โดยใช้กระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์ เนื่องจากรังสีเอกซ์มีค่าของพลังงานที่สูงกว่ารังสีอัลตราไวโอเล็ตหลายเท่าทำให้ได้ชิ้นงานจากกระบวนการฉายแสงที่มีผนังเรียบตรงและตั้งฉากกับฐานรอง อันเป็นข้อดีของการสร้างโครงสร้างด้วยรังสีเอกซ์ ซึ่งจะช่วยให้สามารถสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงที่มีแรงขับที่สูงขึ้นโดยใช้แรงดันขับเคลื่อนน้อยและมีพื้นผิวสำหรับสวิตซ์แสงที่เรียบขึ้นเมื่อเทียบกับการผลิตด้วยเทคนิคดั้งเดิม โดยในขั้นต้นนี้จะเน้นการแก้ปัญหากระบวนการผลิตให้สามารถผลิตอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงให้สามารถเคลื่อนที่ได้จริงและสวิตซ์แสงได้ก่อนแล้วจึงปรับปรุงคุณลักษณะการทำงานให้ดียิ่งขึ้นในโอกาสต่อไป





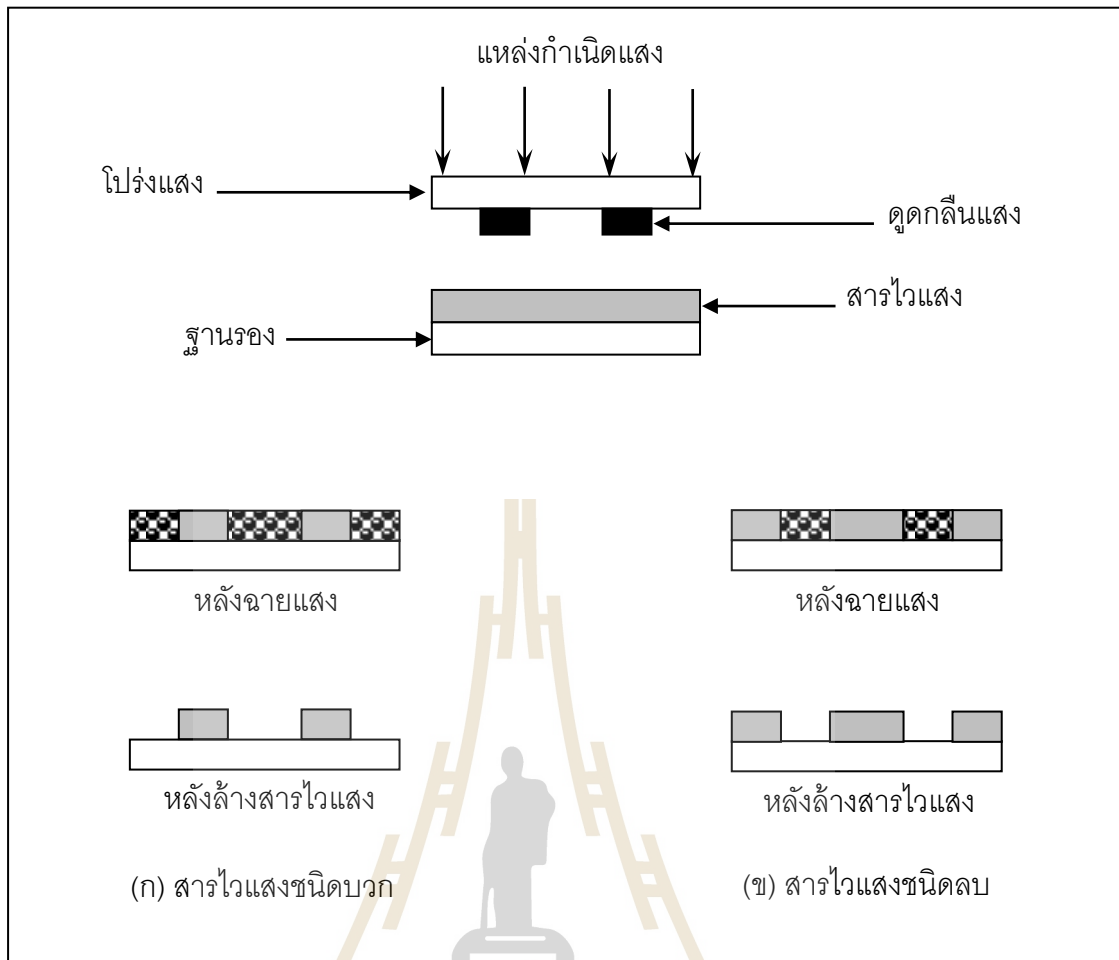
## บทที่ 3

### กระบวนการพื้นฐานในการผลิตระบบกลไฟฟ้าจุลภาค

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

#### 3.1 กระบวนการลิโธกราฟี

กระบวนการลิโธกราฟี (Lithography process) เป็นกระบวนการที่สำคัญในเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค คือการใช้กระบวนการทางเคมีในการถอดแบบลวดลายจากลวดลายต้นแบบที่มีลักษณะเป็นลายเส้นที่บ่งแสงลงบนพื้นผิวเรียบ ซึ่งอาจจะเป็นการสร้างลวดลายลงบนวัสดุต่าง ๆ ที่มีลักษณะเป็นพื้นผิวเรียบ ในกระบวนการถอดแบบจะใช้สารเคมีที่เรียกว่าสารไวแสง (Photoresist) เป็นวัสดุในการถอดแบบ คุณสมบัติทางกายภาพของสารไวแสงคือจะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีแสงมาตกกระทบ สารไวแสงสามารถจำแนกได้เป็นสองชนิด คือ สารไวแสงชนิดบวก (Positive photoresist) จะมีคุณสมบัติที่เมื่อมีแสงมาตกกระทบในบริเวณใดบริเวณนั้นจะสามารถล้างออกได้ด้วยน้ำยาดีเวลอปเปอร์เหลือไว้เฉพาะบริเวณที่ไม่มีแสงมาตกกระทบ และอีกชนิดหนึ่งได้แก่ สารไวแสงชนิดลบ (Negative photoresist) ซึ่งจะมีคุณสมบัติที่ตรงข้ามกับสารไวแสงชนิดบวก กล่าวคือบริเวณใดที่ไม่มีแสงมาตกกระทบจะถูกล้างออกได้ด้วยน้ำยาดีเวลอปเปอร์ เหลือไว้เฉพาะบริเวณที่มีแสงมาตกกระทบเท่านั้น จากคุณสมบัติของสารไวแสงทั้งสองชนิดทำให้สามารถสร้างลวดลายในกระบวนการลิโธกราฟีออกมาได้สองแบบขึ้นอยู่กับเลือกใช้สารไวแสงนั่นเอง ส่วนแสงที่ใช้ในการฉายลงบนสารไวแสงนั้นจะเป็นแสงที่อยู่ในย่านแสงอัลตราไวโอเล็ต (Ultra-violet : UV) ซึ่งกระบวนการลิโธกราฟีทั้งกระบวนการโดยสังเขปสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบให้เห็นข้อแตกต่างระหว่างการใช้สารไวแสงชนิดบวก (ก) และการใช้สารไวแสงชนิดลบ (ข)

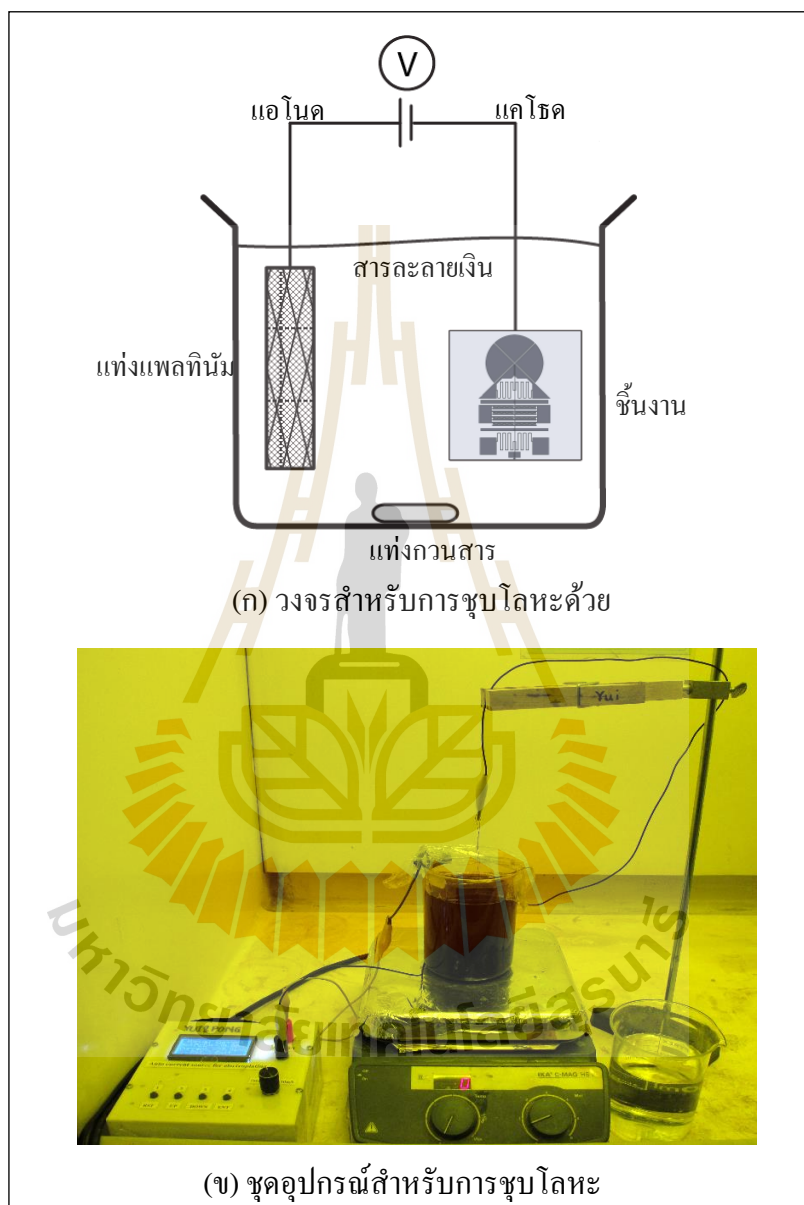


รูปที่ 3.1 เปรียบเทียบการใช้สายใยแสงสองชนิดในกระบวนการลิโธกราฟี

### 3.2 การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

หลังจากสร้างลวดลายลงบนฐานรองด้วยกระบวนการลิโธกราฟีแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการเติมโลหะเข้าไปในช่องว่างของสายใยแสงเพื่อเป็นสำหรับหน้ากากกันรังสีเอกซ์ สำหรับอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงในงานวิจัยนี้จะต้องมีการเติมวัสดุเคลือบกันรังสีเอกซ์ ซึ่งจะใช้โลหะเงินเป็นลวดลายสำหรับเคลือบกันรังสีเอกซ์ อยู่บนแผ่นกราฟไฟต์ซึ่งมีคุณสมบัติโปร่งแสงต่อรังสีเอกซ์ การเติมโลหะเงินลงบนฐานรองเพื่อใช้เป็นลวดลายกันรังสีเอกซ์นั้นจะใช้วิธีการชุบด้วยไฟฟ้า (Electroplating) ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายต่อการสร้างชิ้นงานและราคาถูก โดยใช้กระบวนการไฟฟ้าเคมีซึ่งไอออนของโลหะที่เป็นขั้วแอโนด (Anode) จะผ่านสารละลายมาเคลือบบนชิ้นงานซึ่งเป็นขั้วแคโทด (Cathode) โดยป้อนกระแสไฟฟ้าคงที่ การชุบโลหะด้วยไฟฟ้าให้มีความสม่ำเสมอจะขึ้นอยู่กับการรักษาความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าให้เหมาะสมตลอดกระบวนการ ในรูปที่ 3.2 เป็นตัวอย่างวงจรสำหรับชุบเงินด้วยไฟฟ้าซึ่งในทางปฏิบัติอาจจะมีอุปกรณ์อื่นเข้ามาเสริมเพื่อให้ชิ้นงานมีคุณภาพดีขึ้น เช่น วงจรสร้างสัญญาณพัลส์ (Pulse plating) หรือใช้ปั๊มของเหลวช่วยให้เกิดการหมุนเวียนของสารละลาย หรือแม้แต่อุปกรณ์ทำความร้อนให้

สารละลายมีอุณหภูมิที่เหมาะสม จากรูปที่ 3.2 อุปกรณ์สำหรับชุบโลหะเงิน ประกอบด้วย ชุดแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง สารละลาย และชิ้นงาน การต่อวงจรทำได้โดยนำชิ้นงานต่อเข้ากับแคโทด และแผ่นแพลตตินัมต่อเข้ากับแอโนด เมื่อเกิดกระแสไหลเงินจะก่อตัวที่ผิวของชิ้นงานจนได้ความหนาตามต้องการจึงหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้า

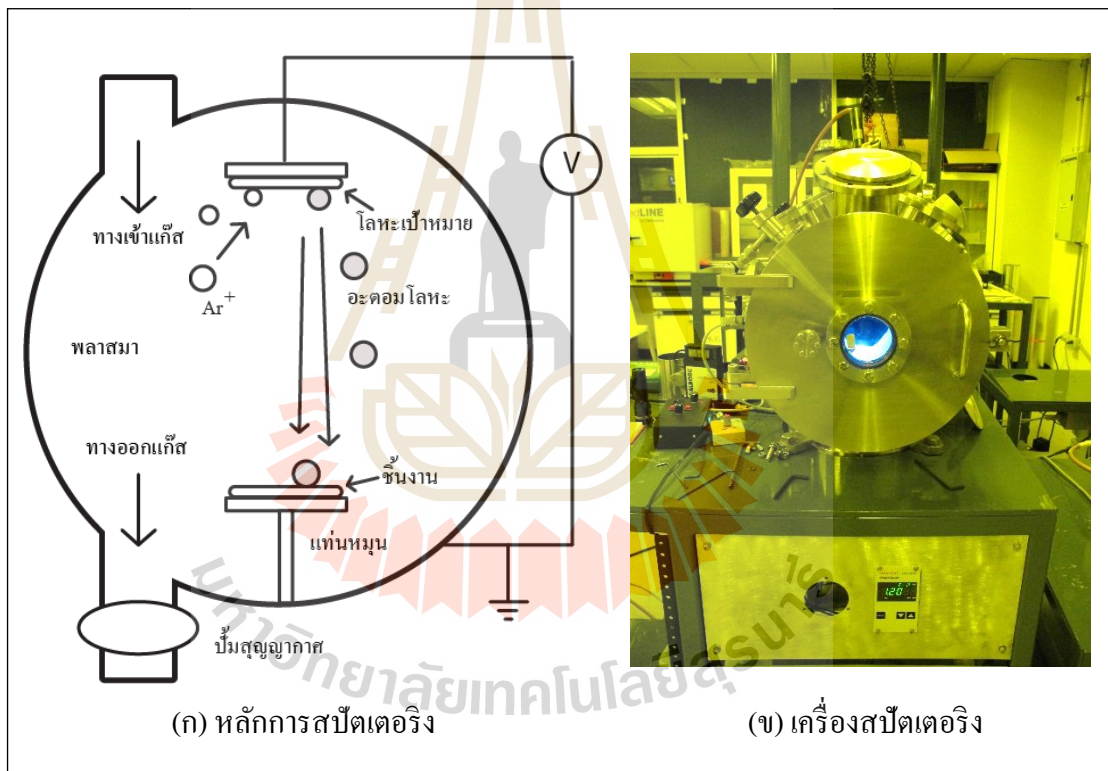


รูปที่ 3.2 การชุบโลหะเงินด้วยไฟฟ้า

### 3.3 การเคลือบโลหะด้วยการสปัตเตอริง

เทคนิคการเคลือบโลหะส่วนใหญ่แล้วเน้นเคลือบวัสดุที่เป็นฉนวนให้สามารถนำไฟฟ้าได้ซึ่งจะได้ความหนาในระดับนาโนเมตร ในงานวิจัยนี้จะเสนอกระบวนการเคลือบโลหะด้วยเทคนิคการสปัตเตอริง มีหลักการดังนี้

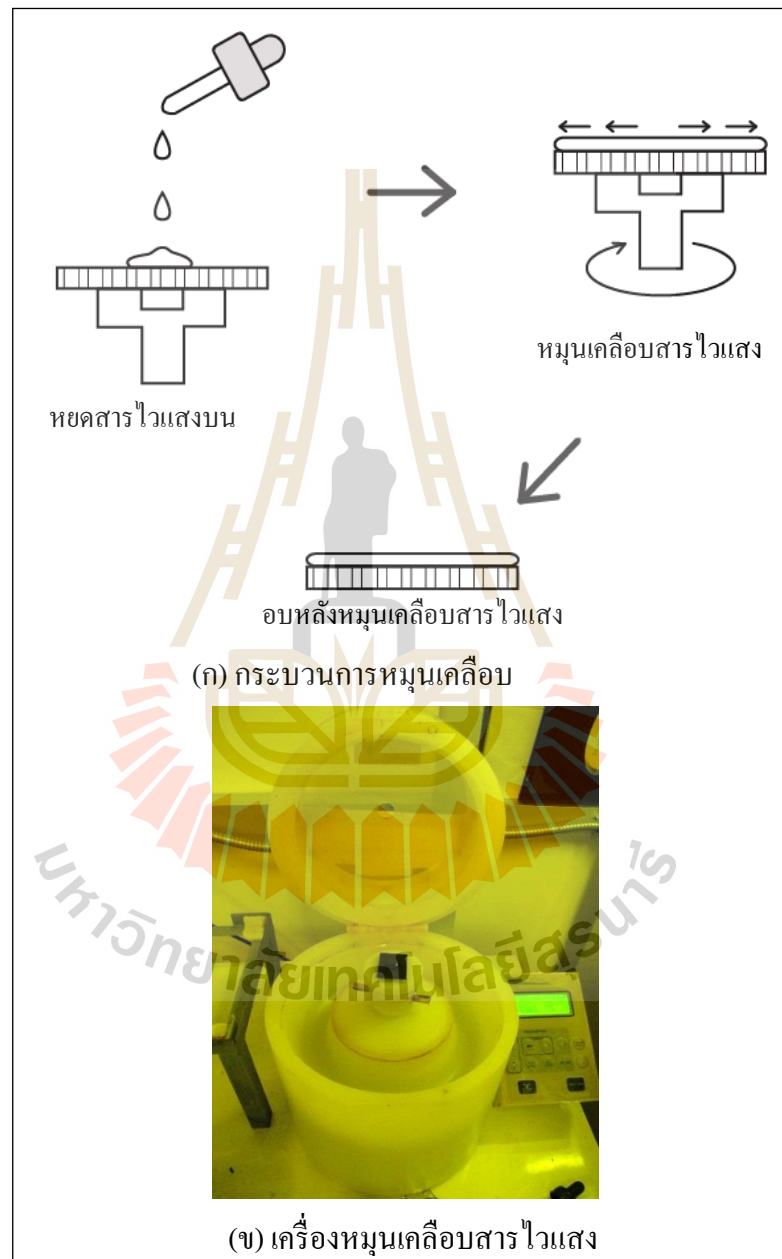
การสปัตเตอริง (Sputtering) อาศัยหลักการสร้างพลาสมาของแก๊สเฉื่อย  $Ar^+$  และเหนี่ยวนำให้พุ่งเข้าชนโลหะเป้าหมาย (พิทยา ตีกล้า, 2009) อะตอมของโลหะเป้าหมายจะกระเจิงออกมาเคลือบบนชิ้นงาน การสปัตเตอริงแบ่งออกเป็น 2 ชนิด การสร้างพลาสมาด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC sputtering) เหมาะสำหรับวัสดุเป้าหมายที่เป็นโลหะและการสร้างพลาสมาด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ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



รูปที่ 3.3 เครื่องเคลือบโลหะแบบสปัตเตอริง

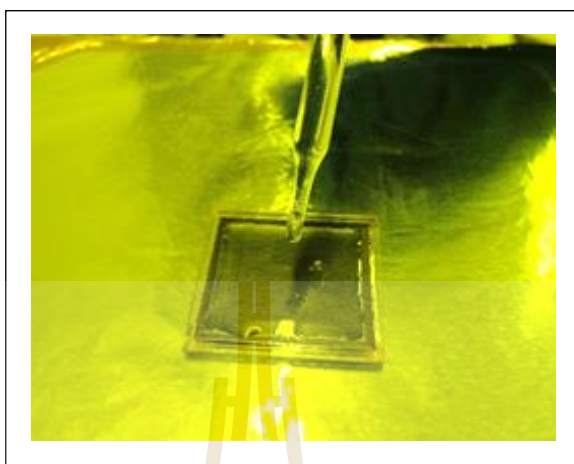
### 3.4 การเตรียมสารไวแสง

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



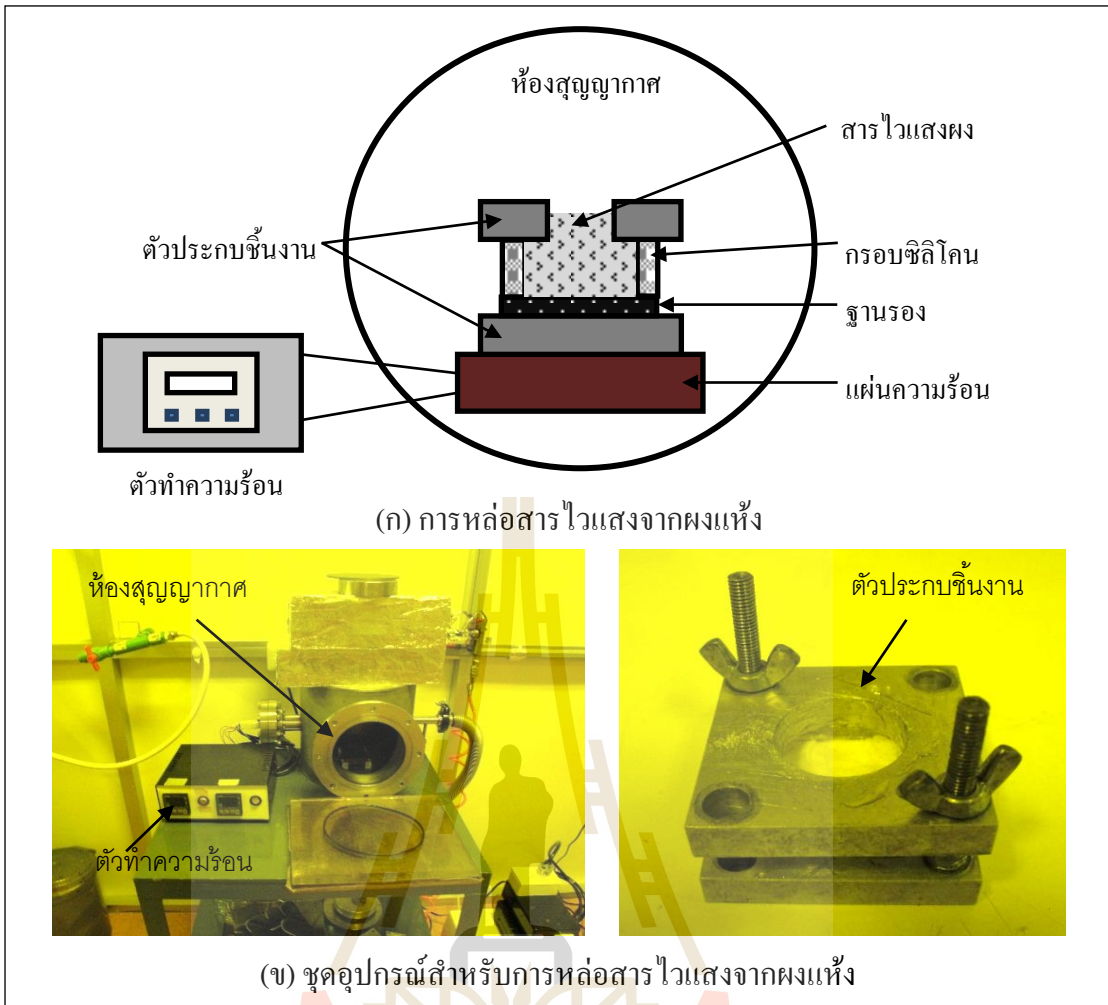
รูปที่ 3.4 การเตรียมสารไวแสงด้วยการหมวนเคลือบ

นอกจากการเตรียมสารไวแสงด้วยวิธีหมุนเคลือบแล้ว ยังสามารถใช้วิธีหยดสารไวแสงได้ด้วย ซึ่งวิธีนี้เป็นการนำสารไวแสงแบบเหลวมาหยดลงบนวัสดุที่ใช้เป็นฐานรอง ดังรูปที่ 3.5 ซึ่งข้อดีของวิธีการนี้คือการเตรียมสารไวแสงไม่ยุ่งยาก

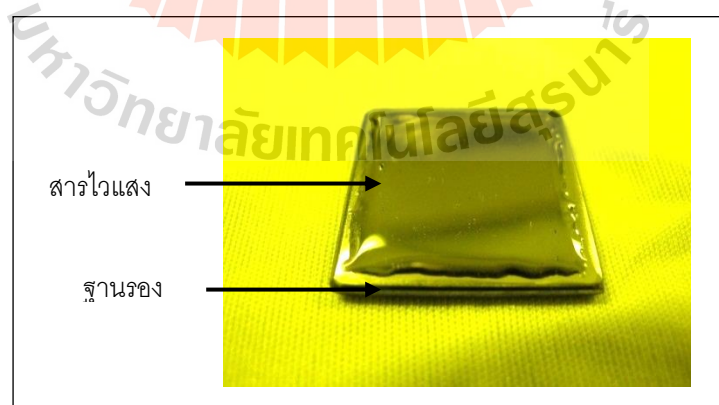


รูปที่ 3.5 การเตรียมสารไวแสงด้วยการหยด

วิธีการเตรียมสารไวแสงอีกวิธีหนึ่งคือ การหล่อสารไวแสงจากผงแห้ง ซึ่งสารไวแสงชนิดผงแห้งนี้ได้มาจากการนำสารไวแสงชนิดเหลวไปผ่านกระบวนการให้ความร้อนแล้วนำมาบดให้เป็นผง จากนั้นนำสารไวแสงผงไปผ่านความร้อนในห้องสุญญากาศ โดยรูปที่ 3.6 เป็นระบบการหล่อสารไวแสงผงเพื่อใช้เป็นวัสดุสำหรับสร้างลวดลายที่เน้นความสูงของโครงสร้างชิ้นงาน เหมาะกับกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์ และรูปที่ 3.7 คือชั้นของสารไวแสงหลังจากการหล่อผงแห้ง



รูปที่ 3.6 กระบวนการหล່อสารไวแสงจากผงแห้งและอุปกรณ์

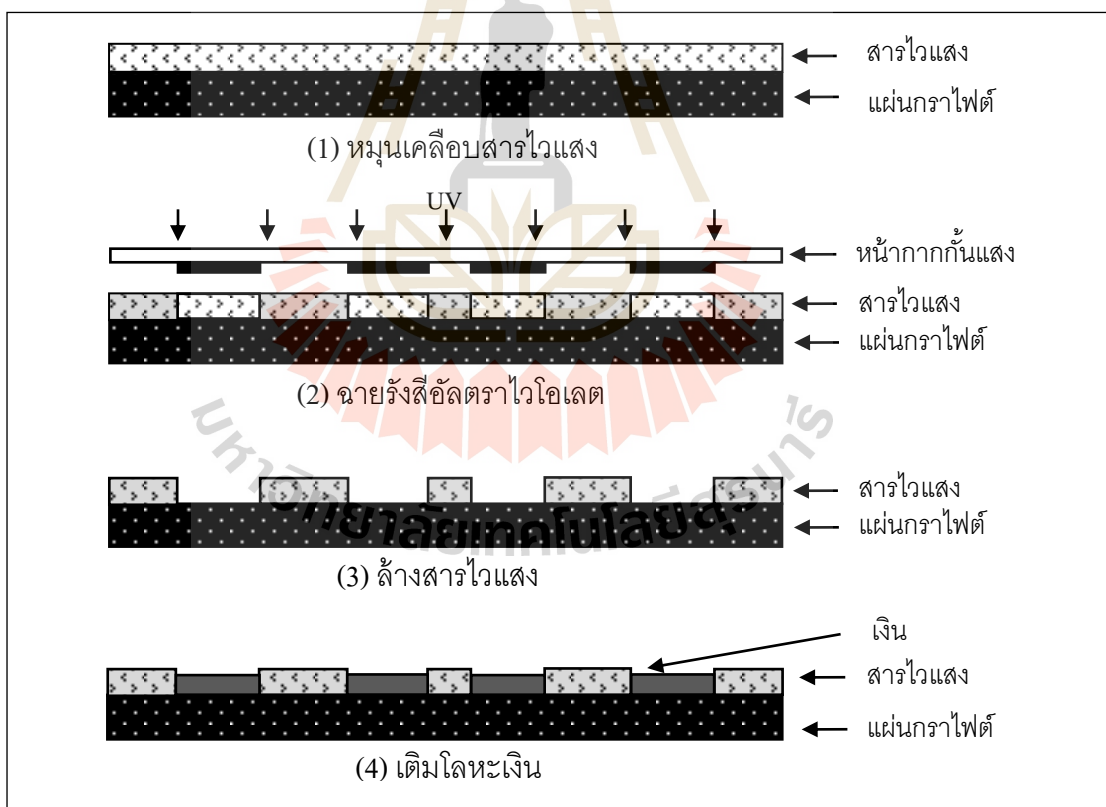


รูปที่ 3.7 ชั้นของสารไวแสงหลังจากการเตรียมสารไวแสง

### 3.5 การสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์

ในกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์นั้น สิ่งหนึ่งที่มีความสำคัญต่อกระบวนการอย่างมากคือ หน้ากากกันรังสีเอกซ์ (วินัย วันบุรี, 2007) ซึ่งทำหน้าที่เป็นลวดลายต้นแบบ ในกรณีการลิโธกราฟีด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต ลวดลายต้นแบบหรือหน้ากากกันแสงจะเป็นลวดลายที่อยู่ในรูปของหมึกที่บแสงที่อยู่บนวัสดุโปร่งแสง อาจจะเป็นลวดลายบนแผ่นใสหรือบนกระจกก็ได้ แต่ในกรณีของหน้ากากกันรังสีเอกซ์นั้น ลวดลายจะต้องเป็นวัสดุที่สามารถดูดกลืนรังสีเอกซ์ได้ดี และอยู่บนวัสดุที่มีความโปร่งแสงได้ดีด้วยเช่นกัน ซึ่งวัสดุที่สามารถดูดกลืนรังสีเอกซ์ได้นั้นก็ได้แก่ทองคำ เงิน อลูมิเนียม เป็นต้น การสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์มีขั้นตอนดังต่อไปนี้ รูปที่ 3.8

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



รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์



การสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำไปสร้างลวดลายของอุปกรณ์ สวิตซ์เชิงแสงให้สามารถขึ้นรูปด้วยสารไวแสงชนิดลบ SU-8 ที่มีอัตราส่วนความสูงต่อความกว้างมาก ๆ ได้ โดยงานวิจัยนี้หน้ากากกันรังสีเอกซ์จะถูกสร้างขึ้นจากสารไวแสงชนิดลบ SU-8 ซึ่งจะอยู่บน ฐานรองกราไฟต์และมีวัสดุสำหรับดูดกลืนรังสีเอกซ์เป็นโลหะเงิน

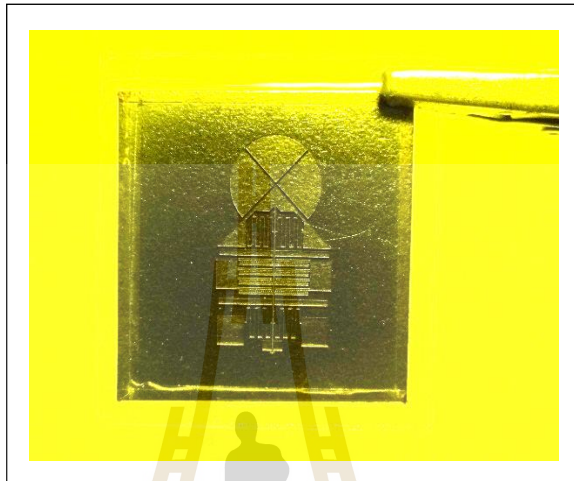
การสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์สำหรับสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงนั้น สามารถแสดงให้เห็นถึง ขั้นตอนและผลการสร้างอย่างละเอียดได้ดังนี้ เริ่มจากยึดแผ่นกราไฟต์กับกระจกด้วยเทปกั้นความร้อน (PI tape) แล้วทำความสะอาดแผ่นกราไฟต์โดยการเช็ดด้วยสำลีชุบไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (Isopropyl alcohol) แล้วเช็ดด้วยสำลีอีกครั้ง หลังจากนั้นเป่าด้วยแก๊สไนโตรเจน แล้วนำไปวางบน แผ่นความร้อน (Hot plate) ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เพื่อไล่ความชื้น ต่อจากนั้นทำการเคลือบสารไวแสงชนิดลบ SU-8 เบอร์ 3050 ลงบนฐานรองกราไฟต์ดังกล่าว ด้วย เครื่องหมุนเคลือบ Laurell รุ่น WS-400B-6NPP/LIT ที่ความเร็ว 500 rpm เป็นเวลา 5 วินาที แล้ว หมุนต่อเนื่องอีกด้วยความเร็ว 2000 rpm เป็นเวลา 30 วินาที ซึ่งจะได้ความหนาประมาณ 60  $\mu\text{m}$  จากนั้นนำไปวางบนแผ่นความร้อนที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เสร็จแล้วปิด สวิตซ์แผ่นความร้อนแล้วปล่อยให้เย็นลงช้า ๆ เย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิห้องที่ประมาณ 26.6 องศา เซลเซียส อีก 1 ชั่วโมง จะได้ฐานรองสำหรับสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์ ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ฐานรองสำหรับสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์

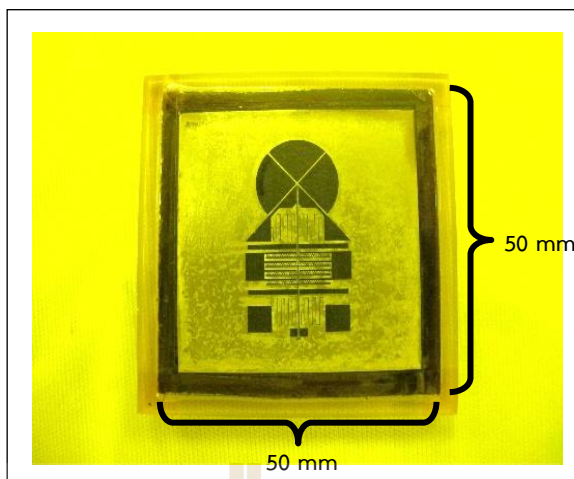
หลังจากหมุนเคลือบสารไวแสงบนแผ่นกราไฟต์เรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อมาคือการฉายแสง อัลตราไวโอเล็ตจากเครื่อง Quintel Q4000 ที่ความเข้มแสง  $19.75 \text{ mw/cm}^2$  ผ่านหน้ากากกันแสงที่ อยู่ในรูปหมึกทึบแสง เป็นเวลา 15 วินาที ซึ่งจะได้พลังงานสะสมตกกระทบเนื้อสารไวแสงเท่ากับ  $296.25 \text{ mJ/cm}^2$  จากนั้นนำมาวางบนแผ่นความร้อนที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้สารไวแสงบริเวณที่ทำปฏิกิริยากับแสงแข็งตัว จากนั้นจึงปิดสวิตซ์แผ่นความร้อนแล้วปล่อยให้ เย็นลงช้า ๆ เย็นตัวลง ต่อจากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ไปแช่สารละลาย SU-8 developer เป็นเวลา

15 นาที เพื่อให้สารไวแสงบริเวณที่ไม่แข็งตัวหลุดออก จากนั้นฉีดล้างชิ้นงานด้วย ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์เพื่อตรวจสอบสารไวแสงที่ยังตกค้างอยู่ ซึ่งหากมีสารไวแสงตกค้างก็จะเกิด คราบขาวขึ้น ก็ให้นำไปแช่ในสารละลาย SU-8 developer ต่อจนกว่าสารไวแสงที่ตกค้างจะ ออกจนหมด จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้มาเป่าด้วยแก๊สไนโตรเจนเบา ๆ จนแห้ง ก็จะได้ชิ้นงานสำหรับ นำไปเติมวัสดุกันรังสีเอกซ์ต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ลวดลายหลังฉายแสงของหน้ากากกันรังสีเอกซ์  
สำหรับอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสง

เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการลิโธกราฟีแล้ว กระบวนการต่อมาคือการเติมวัสดุเคลือบรังสีเอกซ์ โดยการชุบโลหะด้วยไฟฟ้าในสารละลายเงินสำเร็จรูป โดยใช้แท่งแพลทินัม (Platinum) ต่อกับแหล่งจ่าย กระแสไฟฟ้าขั้วบวก (Anode) แล้วจุ่มลงไปนในสารละลายเงินที่เตรียมไว้ และให้ชิ้นงานที่ต้องการเติม โลหะต่อกับขั้วลบ (Cathode) แล้วจุ่มลงไปนในสารละลายเงินที่เตรียมไว้เช่นกัน แต่ก่อนจะจุ่มชิ้นงาน ลงไปในสารละลายนั้นจะต้องนำชิ้นงานไปจุ่มในน้ำสะอาด (DI water) เพื่อให้ชิ้นงานสามารถนำไฟฟ้า ได้ถึงถึงขั้นเสียก่อน จากนั้นจ่ายกระแสไฟฟ้าด้วยความหนาแน่นกระแส  $20 \text{ mA/cm}^2$  เป็นเวลา 10 นาที แล้วลดความหนาแน่นกระแสลงเหลือ  $10 \text{ mA/cm}^2$  และทำการชุบโลหะต่อเนื่องไปอีกเป็นเวลา 5 ชั่วโมง จากนั้นให้ปรับลดกระแสไฟฟ้าลงจนเหลือ  $0 \text{ mA}$  ต่อจากนั้นนำชิ้นงานออกจาก สารละลายแล้วจุ่มล้างด้วยน้ำสะอาด แล้วจึงเป่าชิ้นงานให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน จากนั้นนำชิ้นงาน ดังกล่าวไปวัดความหนาของโลหะเงินด้วยเครื่อง veeco WYKO NT1100 ซึ่งจากกระบวนการ ดังกล่าวจะทำให้ได้หน้ากากกันรังสีเอกซ์ที่มีความหนาของโลหะเงินอยู่ที่  $40 \mu\text{m}$  ดังรูปที่ 3.11



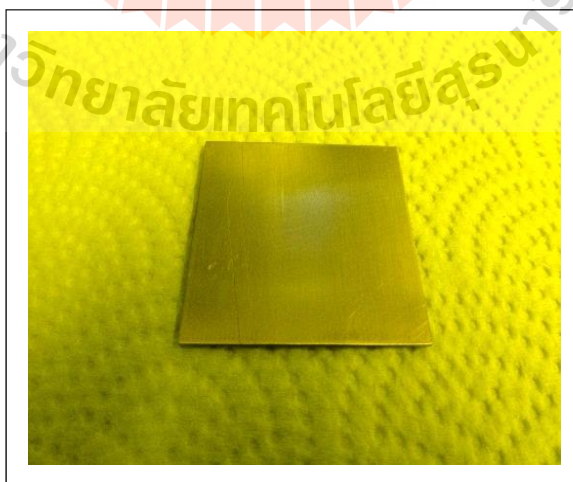
รูปที่ 3.11 หน้ากากกันรังสีเอกซ์สำหรับอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสง

หลังจากได้หน้ากากกันรังสีเอกซ์แล้ว ขั้นตอนต่อไปคือนำหน้ากากเหล่านี้ไปใช้ในกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์ เพื่อเป็นลวดลายต้นแบบสำหรับขึ้นรูปโครงสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสง ซึ่งจะกล่าวถึงกระบวนการสร้างอย่างละเอียดในบทที่ 5 ต่อไป

### 3.6 การสร้างลวดลายบนแผ่นวงจรพิมพ์

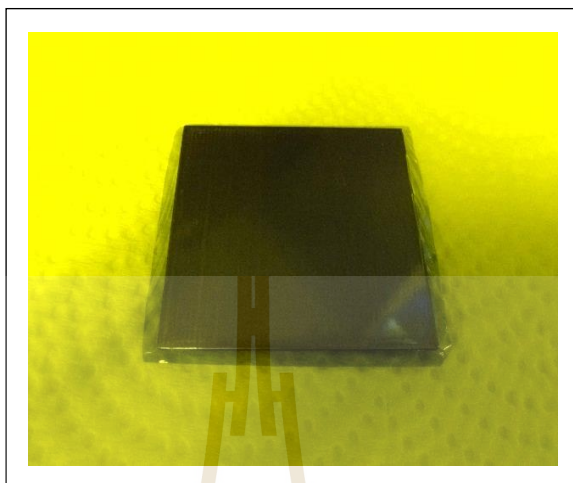
การสร้างลวดลายบนแผ่นวงจรพิมพ์ (PCB) สำหรับใช้เป็นฐานรองโครงสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

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



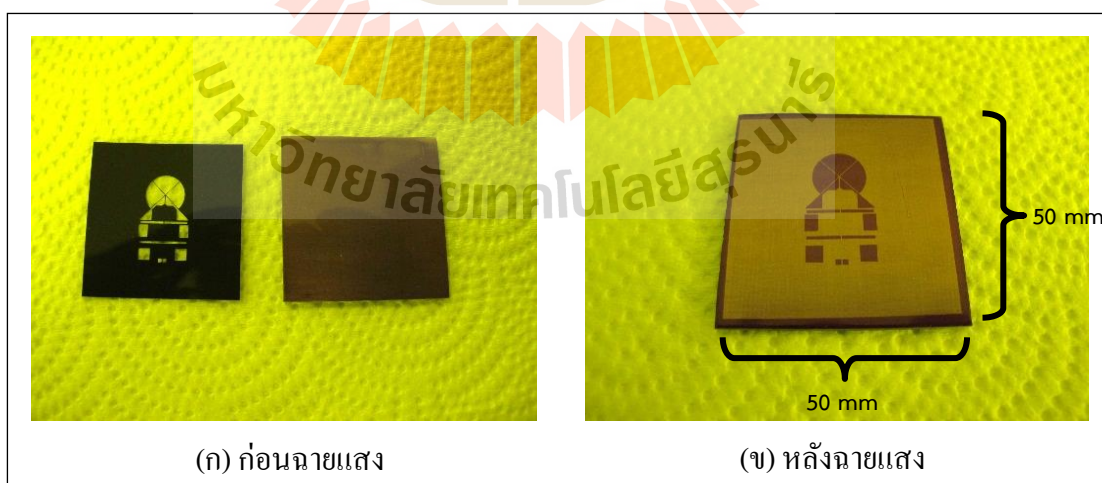
รูปที่ 3.12 แผ่นวงจรพิมพ์

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



รูปที่ 3.13 ติดแผ่นฟิล์มไวแสงบนแผ่นวงจรพิมพ์

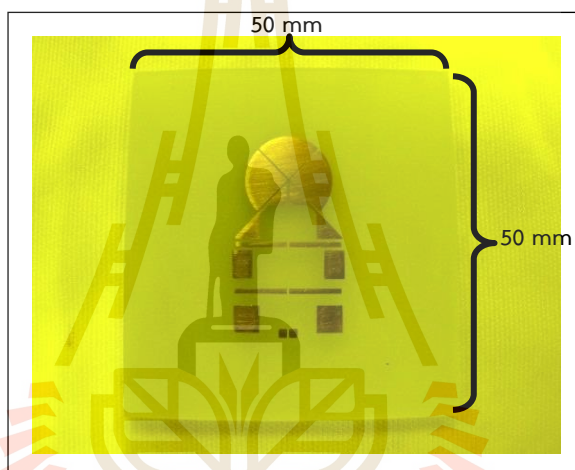
3. ฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตลงบนฟิล์มไวแสงผ่านหน้ากากกันแสงหมึกที่บดด้วยเครื่องฉายแสง หลอดอัลตราไวโอเล็ตเป็นเวลา 2 นาที จากนั้นลอกแผ่นพลาสติกที่ติดอยู่อีกด้านของแผ่นฟิล์มไวแสงออก ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 ฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตบนฟิล์มไวแสง

4. ผสมน้ำยาล้างฟิล์มไวแสงโดยใช้ผงดีVELOPเปอร์ (Developer) 1 กรัม ต่อน้ำสะอาด 100 มิลลิลิตร คนจนผงดีVELOPเปอร์ละลาย จากนั้นนำแผ่นวงจรพิมพ์ที่ผ่านการฉายแสงแล้วลงไปแช่ในน้ำยาล้างฟิล์มไวแสงที่เตรียมไว้ โดยในขณะที่แช่ให้ใช้ฟองน้ำลูบผิวหน้าแผ่นวงจรพิมพ์เบา ๆ จนกระทั่งเห็นลวดลายเด่นชัดไม่มีส่วนของฟิล์มไวแสงที่ไม่ต้องการตกค้างอยู่ หลังจากนั้นนำมาล้างน้ำสะอาดแล้วเป่าด้วยแก๊สไนโตรเจนจนแห้ง

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



รูปที่ 3.15 ฐานรองอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสง

หลังจากได้ฐานรองจากแผ่นวงจรพิมพ์แล้ว ขั้นตอนต่อไปคือนำแผ่นวงจรพิมพ์นี้ไปใช้เป็นฐานรองโครงสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสง ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดต่าง ๆ ในบทที่ 5 ต่อไป

## บทที่ 4

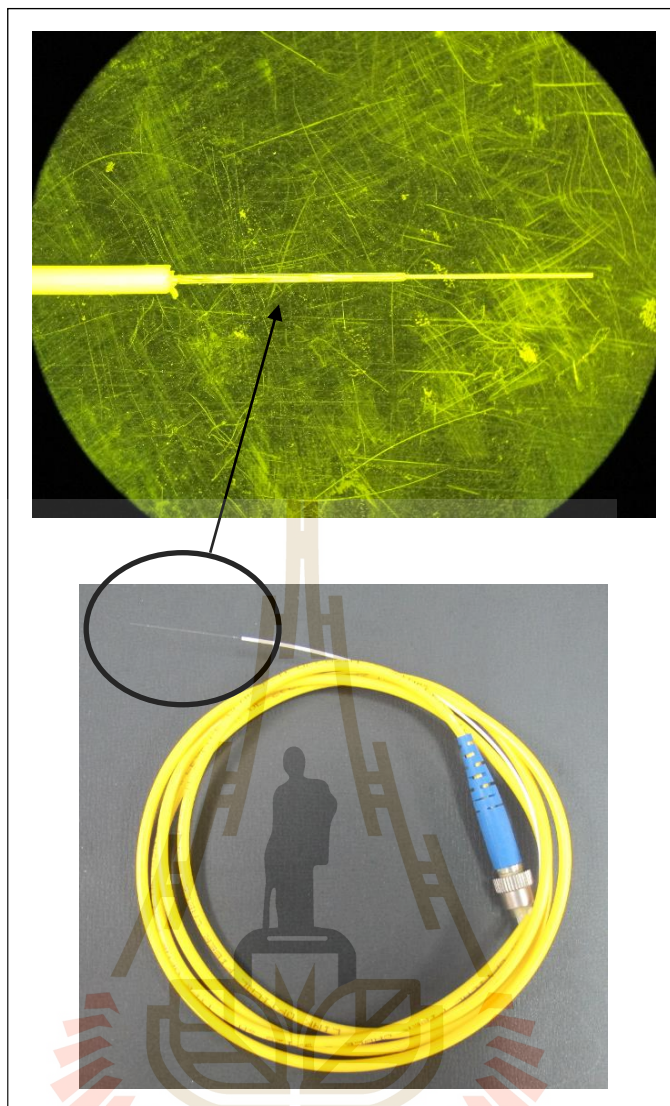
### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model) เป็นสิ่งสำคัญสำหรับการออกแบบอุปกรณ์หรือเครื่องมือ เพื่อจำลองระบบการทำงานของอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นอีกทั้งยังมีประโยชน์ต่อการวิเคราะห์ผล การทดสอบและการควบคุมระบบอีกด้วย แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถหาได้จาก การวิเคราะห์ทฤษฎีซึ่งทำให้ได้มาซึ่งฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) จากนั้นนำฟังก์ชันถ่ายโอนดังกล่าวไปหาค่าพารามิเตอร์ของระบบด้วยการวัดพร้อมก็นำผลที่ได้เปรียบเทียบกับผลการจำลอง เพื่อทำการปรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ให้สอดคล้องกับระบบจริงต่อไป

การออกแบบอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงในงานวิจัยนี้จะเริ่มต้นจากการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและ โครงสร้างที่เหมาะสมจากงานวิจัยต่าง ๆ แล้วทำการปรับปรุงขนาดโครงสร้างตลอดจนกระบวนการ สร้างให้เหมาะสมกับอุปกรณ์และเครื่องมือที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการ

#### 4.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับสายใยแก้วนำแสง

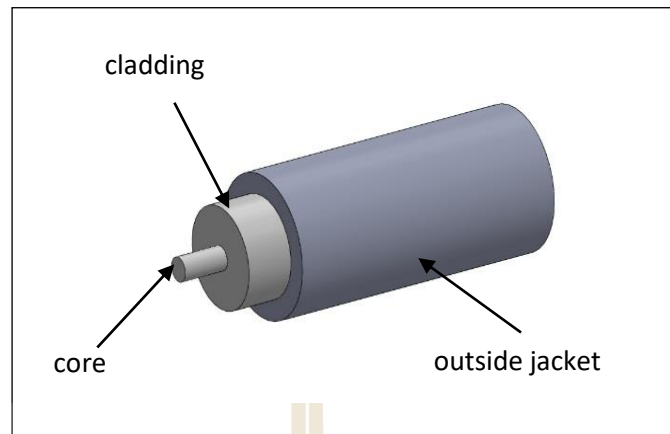
สายใยแก้วนำแสง (Optical fibers) คือ สายนำสัญญาณข้อมูลที่ใช้หลักการทางแสง กล่าวคือ ใช้กับสัญญาณข้อมูลที่อยู่ในรูปของคลื่นแสงเท่านั้น ตัวแก้วนำแสงอาจทำจากแก้วหรือพลาสติก โดย สัญญาณข้อมูลจะถูกเปลี่ยนเป็นคลื่นแสงแล้วส่งให้เดินทางสะท้อนภายในสายใยแก้วเรื่อยไปจนถึง ผู้รับที่ปลายทาง สายใยแก้วนำแสงมีคุณสมบัติที่ดีกว่าสายทั่วไปหลายประการ เช่น มีขนาดเล็ก ส่งผ่านข้อมูลได้ครั้งละมาก ๆ สัญญาณข้อมูลมีโอกาสถูกกลดทอนน้อยมาก ทำให้การสื่อสารมีประสิทธิภาพและมีความปลอดภัย ส่วนข้อจำกัดคือเมื่อสายใยแก้วขาดหรือแตกหักจำเป็นต้องอาศัย อุปกรณ์พิเศษในการซ่อมแซม ซึ่งยุ่งยากและมีค่าใช้จ่ายสูงกว่าแบบอื่น ลักษณะของสายใยแก้วนำ แสงแสดงดังรูปที่ 4.1



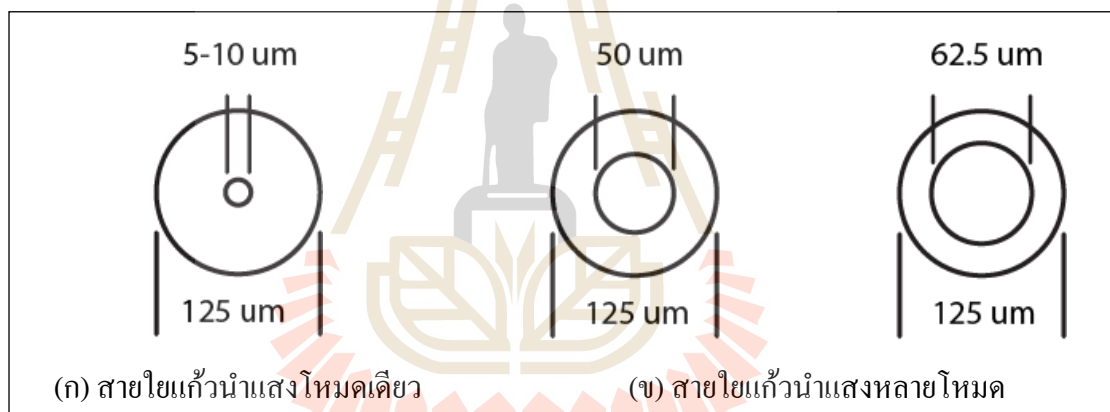
รูปที่ 4.1 สายใยแก้วนำแสง

#### 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 ว่ามีลักษณะการส่องทะลุผ่านของแสงเป็นแบบใด โดยสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบคือ แบบโหมดเดียว และแบบหลายโหมด

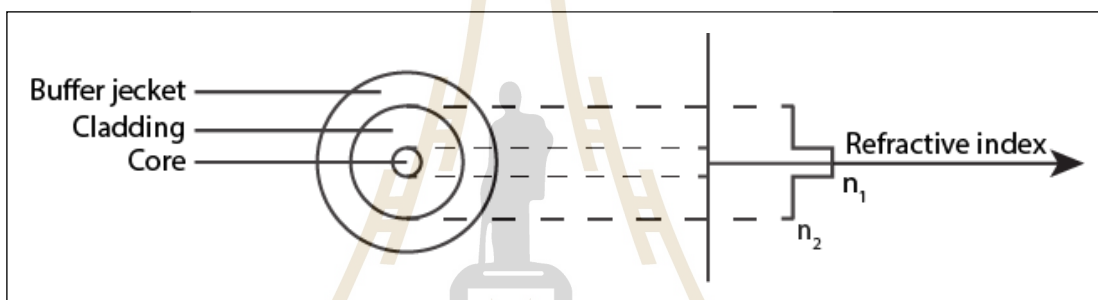
##### 4.1.2.1 สายใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียว (Single mode optical fibers)

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 โครงสร้างโดยทั่วไปของสายใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียวแสดงให้ดูในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 โครงสร้างโดยทั่วไปของสายใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียว

ตารางที่ 4.1 โครงสร้างของสายใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียว

โครงสร้าง	
เส้นผ่านศูนย์กลางของ core	5 ถึง 10 $\mu\text{m}$ โดยปกติอยู่ที่ประมาณ 8.5 $\mu\text{m}$
เส้นผ่านศูนย์กลางของ cladding	โดยทั่วไปมีขนาด 125 $\mu\text{m}$
เส้นผ่านศูนย์กลาง buffer coating	250 ถึง 1000 $\mu\text{m}$
Numerical Aperture	0.08 ถึง 0.15 โดยทั่วไปมีค่าประมาณ 0.1

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติเฉพาะของสายใยแก้วนำแสงชนิดโหมดเดียว

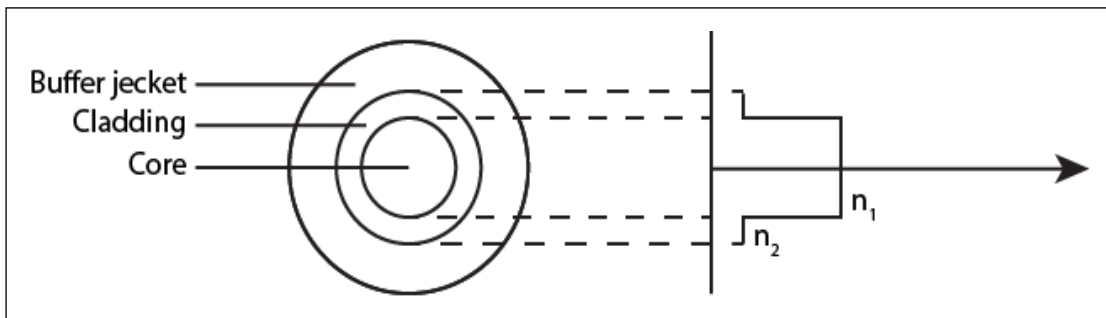
คุณลักษณะทางประสิทธิภาพ	
การลดทอนสัญญาณ	2 ถึง 5 dB/km โดยที่ความยาวคลื่น 850 nm จะมีการลดทอนประมาณ 1 dB/km และมีการลดทอนโดยเฉลี่ย 0.35 และ 0.21 dB/km ที่ความยาวคลื่น 1310 nm และ 1550 nm ตามลำดับ
แบนด์วิดท์	มากกว่า 500 MHz·km ในทางทฤษฎีแบนด์วิดท์ จะถูกจำกัดโดยความยาวคลื่นและ material dispersion โดยจะมีค่าประมาณ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

#### 4.1.2.2 สายใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมด (Multi mode optic fibers)

สายใยแก้วนำแสงชนิดนี้ส่วนใหญ่จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ core ประมาณ 50 หรือ 62.5  $\mu\text{m}$  และเมื่อรวมกับ cladding จะทำให้มีขนาดประมาณ 125  $\mu\text{m}$  เนื่องจากขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของ core มีขนาดใหญ่ ดังนั้นแสงที่ตกกระทบที่ด้านปลาย 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) สัญญาณกับแหล่งกำเนิดแสงแบบ Incoherent เช่น LED คุณลักษณะทางประสิทธิภาพของสายใยแก้วนำแสงชนิดนี้จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามสารที่ใช้สร้างและกระบวนการในการเตรียมสาร ซึ่งโครงสร้างโดยทั่วไปของสายใยแก้วนำแสงชนิดนี้แสดงให้ดูดังรูปที่ 4.5



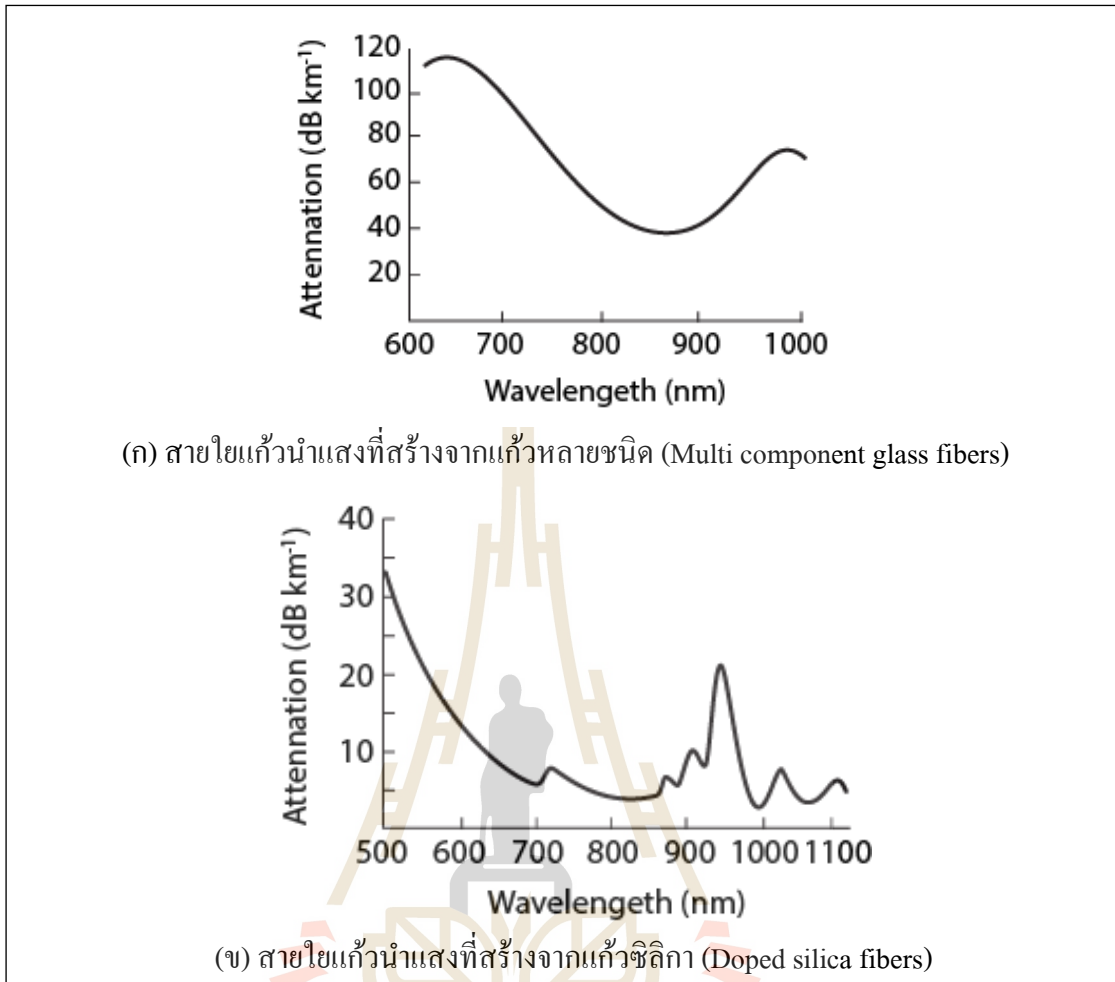
รูปที่ 4.5 โครงสร้างโดยทั่วไปของสายใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมดแบบ Step index

ตารางที่ 4.3 โครงสร้างของสายใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมดแบบ Step index

โครงสร้าง	
เส้นผ่านศูนย์กลางของ core	50 ถึง 400 $\mu\text{m}$ สร้างของเส้นใยแสง
เส้นผ่านศูนย์กลางของ clad	125 ถึง 500 $\mu\text{m}$
เส้นผ่านศูนย์กลางของ buffer coating	250 ถึง 1000 $\mu\text{m}$
Numerical Aperture	0.16 ถึง 0.5

ตารางที่ 4.4 คุณลักษณะเฉพาะของสายใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมดแบบ Step index

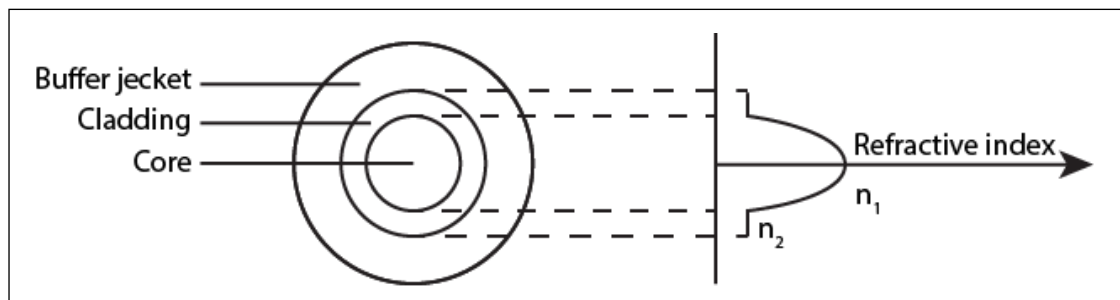
คุณลักษณะทางประสิทธิภาพ	
การลดทอนสัญญาณ	2.6 ถึง 50 dB/km ที่ความยาวคลื่น 850 nm ถูกจำกัดโดยการดูดกลืนและการกระจาย ส่วนการลดทอนที่ความยาวคลื่นอื่นแสดงให้ดูดังรูปที่ 4.6
แบนด์วิดท์	6 ถึง 50 MHz·km
การใช้งาน	เหมาะสมที่สุดสำหรับใช้ในโครงข่ายแบบ Short-Haul ที่มีแบนด์วิดท์จำกัด และใช้กับงานที่ราคาไม่สูง



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 $\mu\text{m}$
เส้นผ่านศูนย์กลางของ clad	100 ถึง 150 $\mu\text{m}$
เส้นผ่านศูนย์กลางของ buffer coating	250 ถึง 1000 $\mu\text{m}$
Numerical Aperture	0.2 ถึง 0.3

ตารางที่ 4.6 คุณลักษณะเฉพาะของสายใยแก้วนำแสงชนิดหลายโหมดแบบ Graded index

คุณลักษณะทางประสิทธิภาพ	
การลดทอนสัญญาณ	2 ถึง 10 dB/km ที่ความยาวคลื่น 850 nm ถูกจำกัดโดยการกระจาย ส่วนการลดทอนสัญญาณโดยเฉลี่ยที่ความยาวคลื่น 1310 nm มีค่าเท่ากับ 0.4 และ 0.25 dB/km ตามลำดับ
แบนด์วิดท์	300 MHz·km ถึง 3 GHz·km
การใช้งาน	เหมาะสมที่สุดสำหรับใช้ในโครงข่ายแบบ Medium-Haul ที่มีแบนด์วิดท์ปานกลางถึงสูง ซึ่งใช้ LED หรือ LD เป็นอุปกรณ์กำเนิดสัญญาณแสง

#### 4.1.3 หัวเชื่อมต่อ (Connector)

การเชื่อมต่อสายใยแก้วนำแสงสามารถทำได้โดยการใช้หัวเชื่อมต่อแบบสำเร็จรูป ซึ่งจะทำให้มีความสะดวกในการถอดได้ตามความจำเป็น หัวเชื่อมต่อสำหรับสายใยแก้วนำแสงมีหลายชนิดดังตารางที่ 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

Connector	Insertion Loss	Repeatability	Fiber Type	Application
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 ได้รับความนิยมมากที่สุดญี่ปุ่นรวมทั้งสหรัฐและยุโรป ส่วนมากหัวต่อแบบนี้จะถูกนำไปใช้งานทางด้านเครือข่ายโทรศัพท์เนื่องจากอาศัยการขันเกลียวเพื่อยึดติดกับหัวปรับ ข้อดีของหัวต่อประเภทนี้ ได้แก่ การเชื่อมต่อที่แน่นหนา แต่ข้อเสียคือการเข้าหัวสายเชื่อมต่ออาจต้องเสียเวลามาก

### 2. หัวต่อแบบเอสที (ST Connector)

หัวต่อชนิดนี้ออกแบบโดย AT&T สำหรับการเชื่อมต่อสายใยแก้วนำแสงภายในอาคารสำนักงาน เครือข่าย LAN หัวต่อแบบเอสทีเหมาะสำหรับงานที่ต้องการถอดเปลี่ยนหัวต่ออย่างรวดเร็ว ถูกนำมาใช้งานสำหรับสายใยแก้วนำแสงชนิดโหมตเดี่ยวและชนิดหลายโหมตมากที่สุด โดยที่หัวต่อประเภทนี้มีอัตราการสูญเสียกำลังแสงเพียงแค่มิเกิน 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 การลดทอนสัญญาณเส้นใยนำแสงแบบโหมตเดี่ยวมีค่าประมาณ 0.25 dB และอาจมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง 0-0.6 dB ขณะที่เอาหัวต่อเสียบต่อกัน หัวต่อแบบเอสซีเป็นของใหม่เพิ่งนำออกมาวางตลาดในอเมริกา มีใช้ประมาณ 1% ของที่ติดตั้งทั้งหมด แต่ขณะนี้ได้รับ

ความนิยมมากขึ้นเนื่องจากใช้งานง่าย เป็นแบบถอดเข้าออกได้ และในขณะที่เอาหัวต่อกันก็ไม่ต้องหมุนหรือบิด แต่ใช้การเสียบต่อตรง ๆ นอกจากนี้หัวต่อแบบเอสซียังเป็นชนิดปรับแกนเส้นใยนำแสงได้ด้วย

#### 4. หัวต่อแบบแอลซี (LC Connector)

หัวต่อแบบนี้เป็นหัวเชื่อมต่อที่ใช้งานง่าย สะดวก ราคาไม่แพง มีทั้งแบบโหมตเดี่ยวและแบบหลายโหมต 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 ซึ่งล้วนแล้วแต่เป็นส่วนหรืออุปกรณ์ที่มีความสำคัญและต้องการความแม่นยำในการทำงานสูง จึงได้มีการนำตัวขับเคลื่อนจุลภาค (Microactuator) ใช้ในการขับเคลื่อนโครงสร้างต่าง ๆ อย่างกว้างขวาง การกระตุ้นตัวขับเคลื่อนจุลภาคสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใช้ฟิล์มเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric films), การใช้หลักการในการขยายตัวของโลหะเนื่องจากอุณหภูมิ (Thermal expansion), การใช้หลักการของโลหะอัลลอยด์ที่คืนรูปได้ (Shape memory alloy) และการใช้หลักการของไฟฟ้าสถิต (Electrostatic forces) เป็นต้น

โครงสร้างพื้นฐานที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบเป็นอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงนั้น จะใช้โครงสร้างตัวขับเคลื่อนแบบไฟฟ้าสถิตที่อาศัยแรงทางไฟฟ้าสถิตในการขับเคลื่อนโครงสร้าง การที่จะหาแรงทางไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นนั้น จะเริ่มโดยอ้างอิงจากกฎของคูลอมบ์ (Coulomb's law) คือ ขนาดของแรงที่เกิดขึ้นแปรผันตรงกับผลคูณของประจุทั้งสอง และแปรผกผันกับกำลังสองของระยะห่างระหว่างประจุทั้งสอง, ประจุชนิดเดียวกันแรงที่เกิดขึ้นคือแรงผลัก ประจุต่างชนิดกันแรงที่เกิดขึ้นคือแรงดึงดูด และทิศของแรงอยู่ในแนวเส้นตรงที่เชื่อมระหว่างประจุทั้งสอง ดังนั้นแรงที่กระทำระหว่างประจุสองประจุในอากาศว่างจึงเป็นดังสมการดังสมการที่ 4.1

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

โดยที่  $F_e$  คือ แรงไฟฟ้าสถิต มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

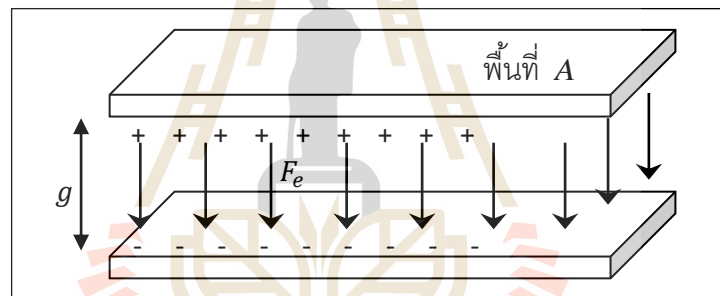
$Q_1, Q_2$  คือ ประจุไฟฟ้าแบบจุด มีหน่วยเป็น คูลอมบ์ (C)

$R$  คือ ระยะทางระหว่างประจุ  $Q_1$  และ  $Q_2$

$\epsilon_0$  คือ ค่า permittivity ของสุญญากาศ มีค่าเท่ากับ  $8.85 \times 10^{-12}$  F/m

$\epsilon_r$  คือ ค่า permittivity ของวัสดุฉนวนที่กั้นระหว่างขั้วทั้งสอง

ในตัวขับเคลื่อนแบบไฟฟ้าสถิตนั้น แรงที่เกิดขึ้นจะอยู่ในลักษณะแรงไฟฟ้าสถิตของแผ่นตัวนำสองแผ่นวางขนานกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.8 โดยมีแผ่นตัวนำที่มีพื้นที่  $A$  วางห่างกันสมมาตรด้วยระยะทาง  $d$  และมีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์อยู่ระหว่างแผ่นตัวนำทั้งสอง

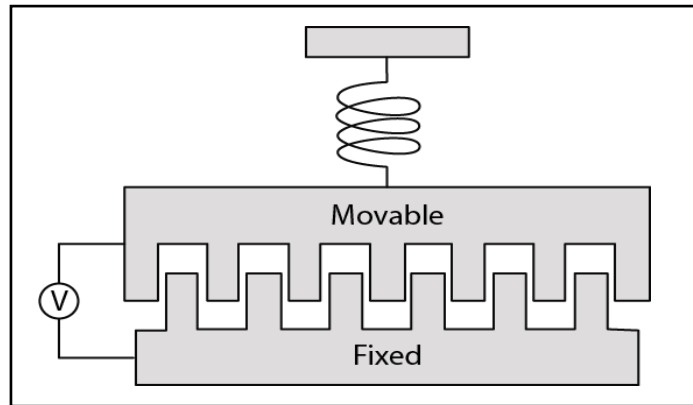


รูปที่ 4.8 ลักษณะของแผ่นตัวนำคู่ขนาน

#### 4.2.1 ตัวขับเคลื่อนทางไฟฟ้าสถิตแบบซี่หวี (Electrostatic comb-drive actuator)

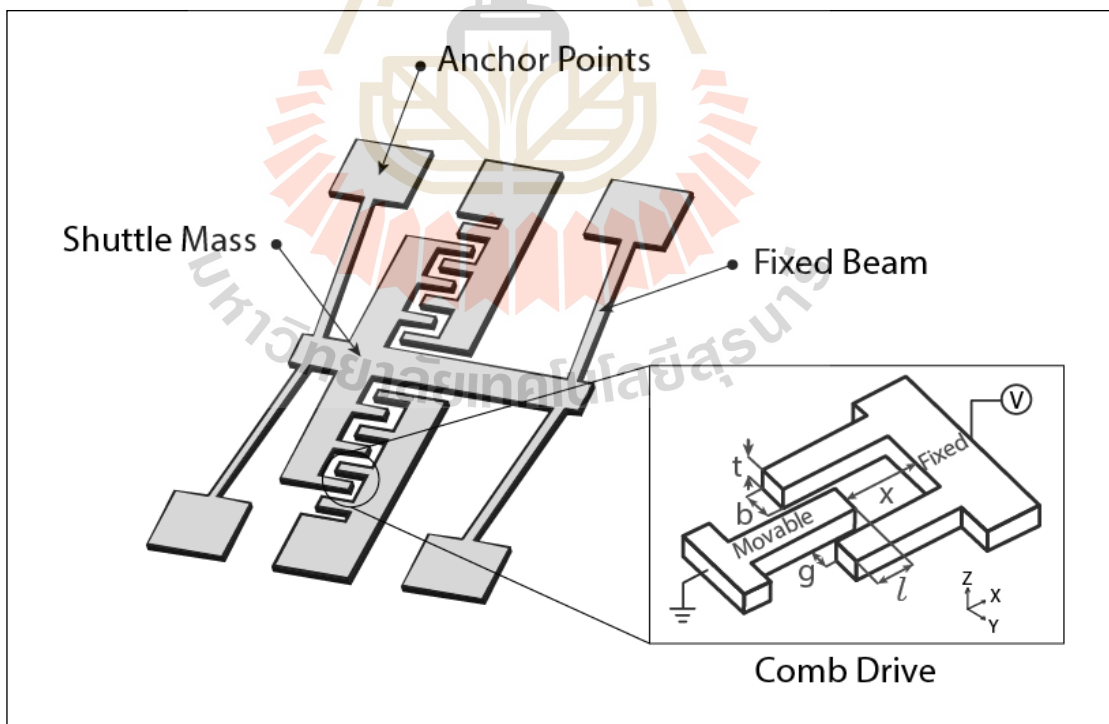
ตัวขับเคลื่อนทางไฟฟ้าสถิตที่ใช้กันอย่างแพร่หลายคือ ตัวขับเคลื่อนแบบซี่หวี โครงสร้างจะประกอบไปด้วยซี่หวีหลายคู่ (Toshiki Hirano, 1992) ซึ่งแต่ละคู่ของซี่หวีจะอยู่ในลักษณะของแผ่นตัวนำคู่ขนาน มีส่วนประกอบหลัก 2 ส่วน คือส่วนที่อยู่กับที่และส่วนที่เคลื่อนที่ได้ โดยส่วนที่เคลื่อนที่นั้นจะมีสปริงติดอยู่ด้วย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





รูปที่ 4.9 โครงสร้างของตัวขับเคลื่อนแบบซี่หวี

ตัวขับเคลื่อนทางไฟฟ้าสถิตแบบซี่หวีจะสามารถทำงานได้เมื่อทำการป้อนแรงดันไฟฟ้าเข้ากับขั้วของส่วนที่อยู่กับที่ (Fixed) และต่อกราวด์เข้ากับขั้วของส่วนที่เคลื่อนที่ได้ (Movable) ซึ่งจะทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วทั้งสองและจะกลายเป็นประจุไฟฟ้า ทำให้เกิดแรงไฟฟ้าสถิตขึ้นในทิศทางแนวแกน  $x$  ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 โมเดลของตัวขับเคลื่อนแบบซี่หวี

แรงไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นระหว่างซีพรีนนั้น สามารถอธิบายได้ดังสมการที่ 4.2

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

โดยที่  $F_e$  คือ แรงไฟฟ้าสถิต มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

$N$  คือ จำนวนซีของตัวซีพรีน

$t$  คือ ความหนาของซีพรีน

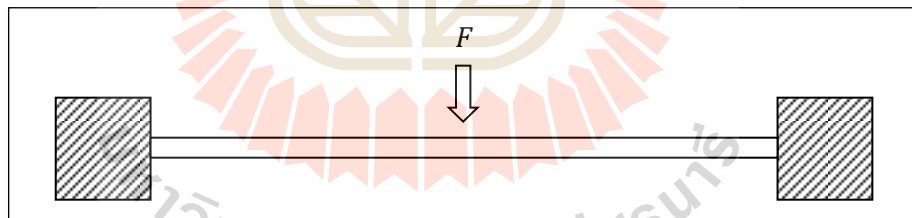
$\epsilon_0$  คือ ค่า permittivity สัมบูรณ์ มีค่าคงที่เท่ากับ  $8.85 \times 10^{-12}$  F/m

$\epsilon_r$  คือ ค่า permittivity ของวัสดุฉนวนที่กั้นระหว่างซีทั้งสอง

$V$  คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าซีเคลื่อน

$g$  คือ ขนาดระยะห่างระหว่างซีไฟฟ้าทั้งสองซี

การเคลื่อนที่ของตัวซีพรีน ในส่วนที่เคลื่อนที่ได้จะถูกทำให้ลอยอยู่ในอากาศโดยมีคานซึ่งทำหน้าที่ค้ำยันให้โครงสร้างลอยตัวได้ ทั้งยังทำหน้าที่เหมือนสปริงคอยดึงส่วนที่เคลื่อนที่ได้ให้กลับมายังตำแหน่งเริ่มต้นเมื่อหยุดการกระตุ้นตัวซีพรีน พิจารณาส่วนของสปริงในโครงสร้าง จากรูปที่ 4.11 สปริงเป็นแบบ fixed-fixed beams และแรงที่กระทำกับสปริงจะอยู่บริเวณจุดกึ่งกลางคานพอดี



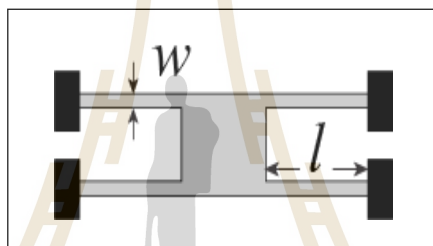
รูปที่ 4.11 ลักษณะแรงที่เกิดบนคานสปริงแบบ fixed-fixed beam

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

$$F_s = k \cdot x \quad (\text{N}) \quad (4.3)$$

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

โดยคานที่ค้ำให้โครงสร้างลอยตัวอยู่บนอากาศนั้น ต้องมีความยืดหยุ่นมากพอที่จะทำให้โครงสร้างสามารถเคลื่อนที่ในทิศทางที่ต้องการได้ หากคานมีความยืดหยุ่นน้อยหรือแข็งเกินไป จะยิ่งทำให้ต้องใช้แรงอย่างมากในการทำให้โครงสร้างนั้นเคลื่อนที่ และจะส่งผลให้ต้องป้อนแรงดันให้กับตัวขับเร้ามากขึ้นอีกด้วย ดังนั้นการออกแบบลักษณะของคานสปริงดังกล่าวจึงมีความสำคัญ (Gabriel M. Rebeize, 2003) ในการออกแบบตัวขับเร้าแบบชี้หัวจะมีคานสปริงที่นิยมใช้อยู่ 3 แบบ ได้แก่ คานสปริงแบบ fixed-fixed beams ดังรูปที่ 4.12, คานสปริงแบบ folded beam ดังรูปที่ 4.13 และคานสปริงแบบ serpentine beam ดังรูปที่ 4.14

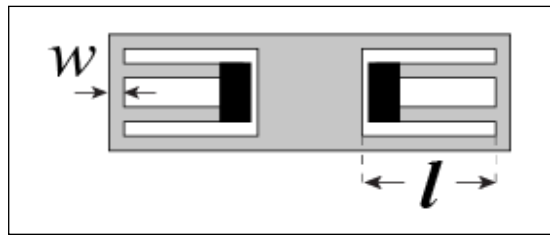


รูปที่ 4.12 คานสปริงแบบ fixed-fixed beams

ซึ่งสามารถหาค่าคงที่สปริงของคานแบบ fixed-fixed beams ได้จากสมการที่ 4.4

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

- 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

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

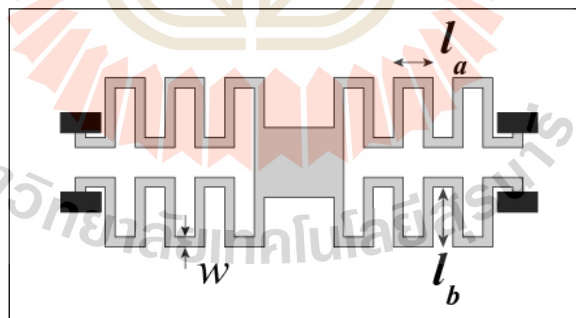
โดยที่  $k$  คือ ค่าคงที่สปริง หน่วยเป็น นิวตันต่อเมตร (N/m)

$E$  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

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

- โดยที่  $k$  คือ ค่าคงที่สปริง หน่วยเป็น นิวตันต่อเมตร (N/m)  
 $G$  คือ ค่ามอดูลัสของการบิด (Torsion modulus)  
 $J$  คือ ค่าคงที่ของการบิด (Torsion constant)  
 $l_a$  คือ ความกว้างของสปริง  
 $l_b$  คือ ความยาวของสปริง  
 $E$  คือ ค่าความยืดหยุ่นของวัสดุ (Young's modulus)  
 $I_x$  คือ โมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of inertia) ของสปริง  
 $n$  คือ จำนวนขดของสปริง

โดยสามารถหาค่ามอดูลัสของการบิดได้จากสมการที่ 4.7

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

- โดยที่  $E$  คือ ค่าความยืดหยุ่นของวัสดุ (Young's modulus)  
 $\mathcal{G}$  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 แรง  $F_e$  และแรง  $F_s$  จะมีค่าเท่ากัน ซึ่งการเคลื่อนที่ในแนวแกน  $x$  สามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ 4.10

$$x = \frac{F_s}{k_x} \quad (m) \quad (4.10)$$

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

หรือสามารถหาแรงดันไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ป้อนให้ตัวขับเร้าได้จากสมการที่ 4.11

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

โดยที่  $V$  คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าขับเคลื่อน มีหน่วยเป็น โวลต์ (V)

$x$  คือ ระยะของการเคลื่อนที่

$g$  คือ ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าสองขั้ว

$k_x$  คือ ค่าคงที่สปริงที่จำนวนขดของสปริงเพิ่มขึ้นในแนวแกน  $x$

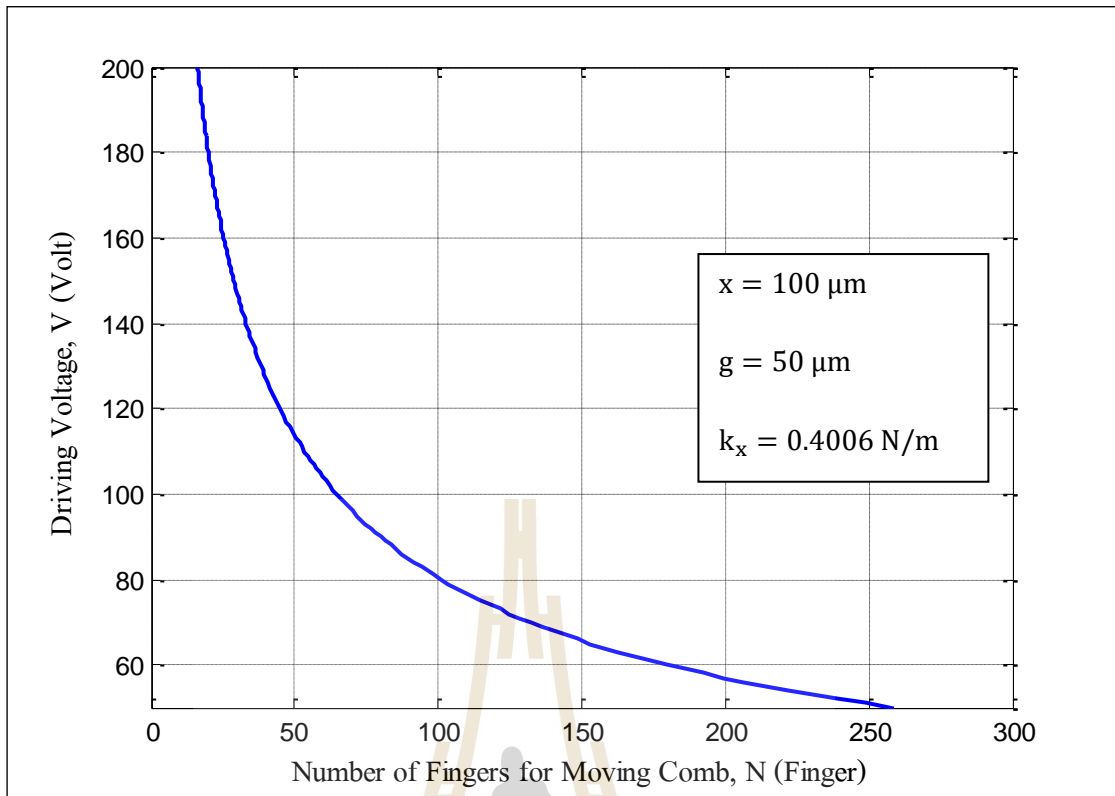
$N$  คือ จำนวนซี่ที่เคลื่อนที่ของตัวขับเร้า

$t$  คือ ความสูงของขั้วไฟฟ้า

$\varepsilon_0$  คือ ค่า permittivity สัมบูรณ์ มีค่าเท่ากับ  $8.85 \times 10^{-12}$  F/m

$\varepsilon_r$  คือ ค่า permittivity ของวัสดุฉนวนที่กั้นระหว่างขั้วทั้งสอง

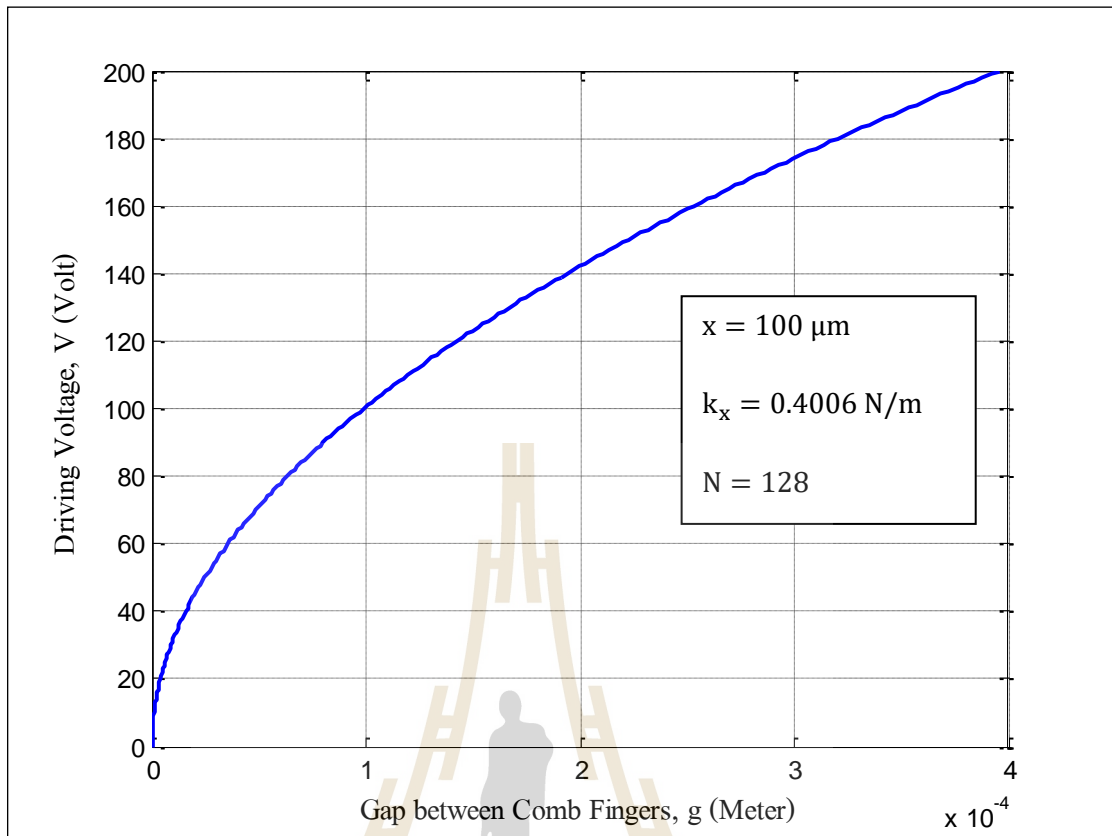
จากสมการที่ 4.11 ที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นว่าเมื่อออกแบบตัวขับเร้าทางไฟฟ้าสถิต ให้เป็นตัวขับเร้าแบบซี่หวีและมีคานสปริงแบบ serpentine beam แล้วกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ให้คงที่ ๆ ค่า ๆ หนึ่ง การเพิ่มจำนวนของซี่หวีนั้นจะทำให้สามารถลดค่าแรงดันไฟฟ้าขับเคลื่อน (driving voltage) ที่ต้องป้อนให้กับตัวขับเร้าได้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



รูปที่ 4.15 แรงดันไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ต้องป้อนให้ตัวขับเคลื่อนเมื่อเทียบกับจำนวนซี่หวี

ในกรณีของรูปที่ 4.15 นั้น ใช้แรงดันไฟฟ้าขับเคลื่อนในการป้อนให้กับอุปกรณ์เพียง 80 V ก็จะสามารถทำให้ซี่หวีเคลื่อนที่ได้ระยะทางถึง  $100 \mu\text{m}$  หากเพิ่มจำนวนซี่หวีในการออกแบบให้มีจำนวน 100 ซี่

เช่นเดียวกัน จากสมการที่ 4.11 จะเห็นว่า หากลดขนาดของระยะห่างระหว่างซี่หวีแต่ละซี่ให้ยิ่งน้อยลง ก็จะสามารถลดแรงดันไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ต้องป้อนให้กับตัวขับเคลื่อนได้น้อยลงไปด้วย ดังแสดงได้ในรูปที่ 4.16 ซึ่งในกรณีนี้ อาจมีข้อจำกัดเรื่องการออกแบบ รวมถึงกระบวนการในการสร้างตัวขับเคลื่อนเองก็มีส่วนในการกำหนดขนาดของช่องว่างที่น้อยสุดที่สามารถสร้างได้ด้วย

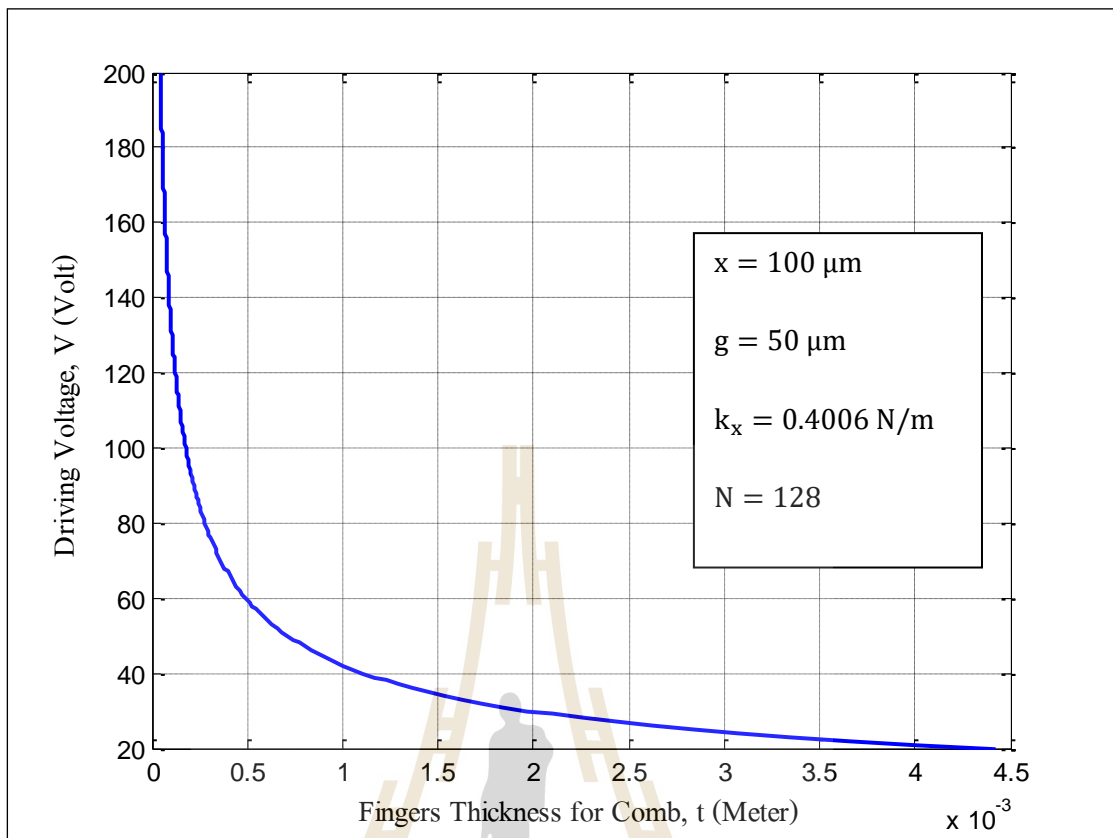


รูปที่ 4.16 แรงดันไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ต้องป้อนให้ตัวขับเร้าเมื่อเทียบกับระยะห่างระหว่างซี่หัวทั้งสองซี่

จากรูปที่ 4.16 นั้นจะเห็นว่า ใช้แรงดันไฟฟ้าขับเคลื่อนในการป้อนให้กับอุปกรณ์เพียง 65 V ก็จะสามารถทำให้ซี่หัวเคลื่อนที่ไปได้ระยะทางถึง 100  $\mu\text{m}$  หากลดระยะห่างระหว่างซี่หัวในการออกแบบให้เหลือเพียง 50  $\mu\text{m}$

เนื่องจากในการสร้างตัวขับเร้าด้วยกระบวนการเอกซ์เรย์ลิโธกราฟีที่พัฒนาขึ้นในสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) นั้น สามารถสร้างโครงสร้างที่มีความหนามากกว่า 500  $\mu\text{m}$  ได้ โดยใช้สารไวแสง SU-8 คู่กับการฉายรังสีเอกซ์ ณ BL6 ของสถาบันวิจัย ซึ่งจะทำให้สามารถเพิ่มความสูงของซี่หัวของตัวขับเร้าขึ้นได้ โดยรูปที่ 4.17 จะแสดงการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ป้อนให้กับตัวขับเร้า เมื่อเทียบกับความสูงของซี่หัวที่เปลี่ยนแปลงไป

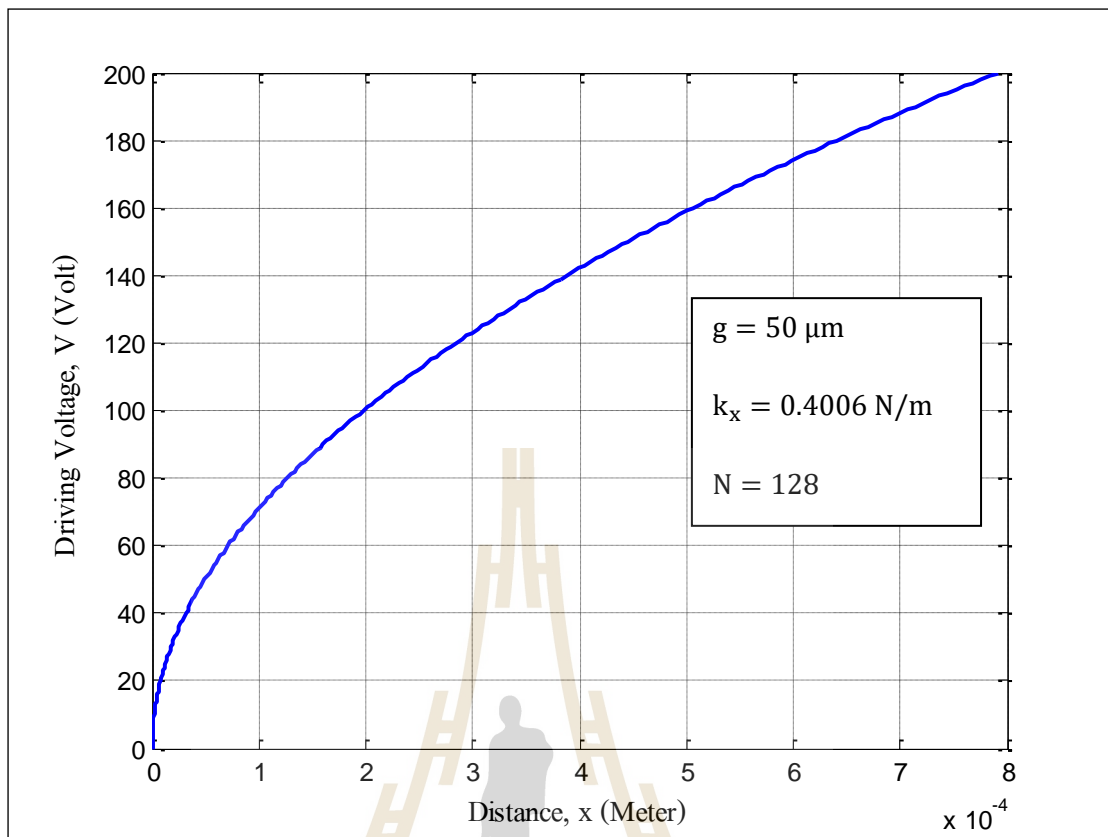




รูปที่ 4.17 แรงดันไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ต้องป้อนให้ตัวขับเคลื่อนเมื่อเทียบกับความสูงของซี่หวี

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

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

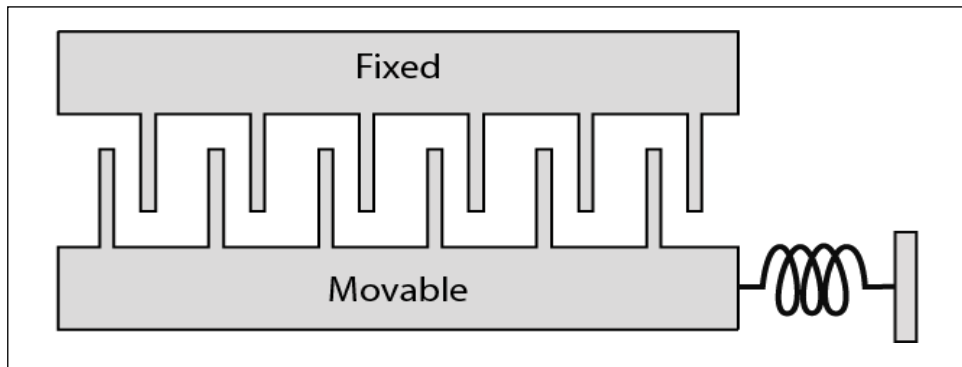


รูปที่ 4.18 แรงดันไฟฟ้าขับเคลื่อนที่ต้องป้อนให้ตัวขับเคลื่อนเมื่อเทียบกับระยะที่ซีพียูเคลื่อนที่

จากรูปที่ 4.18 จะเห็นว่าใช้แรงดันไฟฟ้าขับเคลื่อนในการป้อนให้กับอุปกรณ์ 100 V จะสามารถทำให้ซีพียูเคลื่อนที่ไปได้ระยะทางถึง 200  $\mu\text{m}$  เพียงทีเดียว

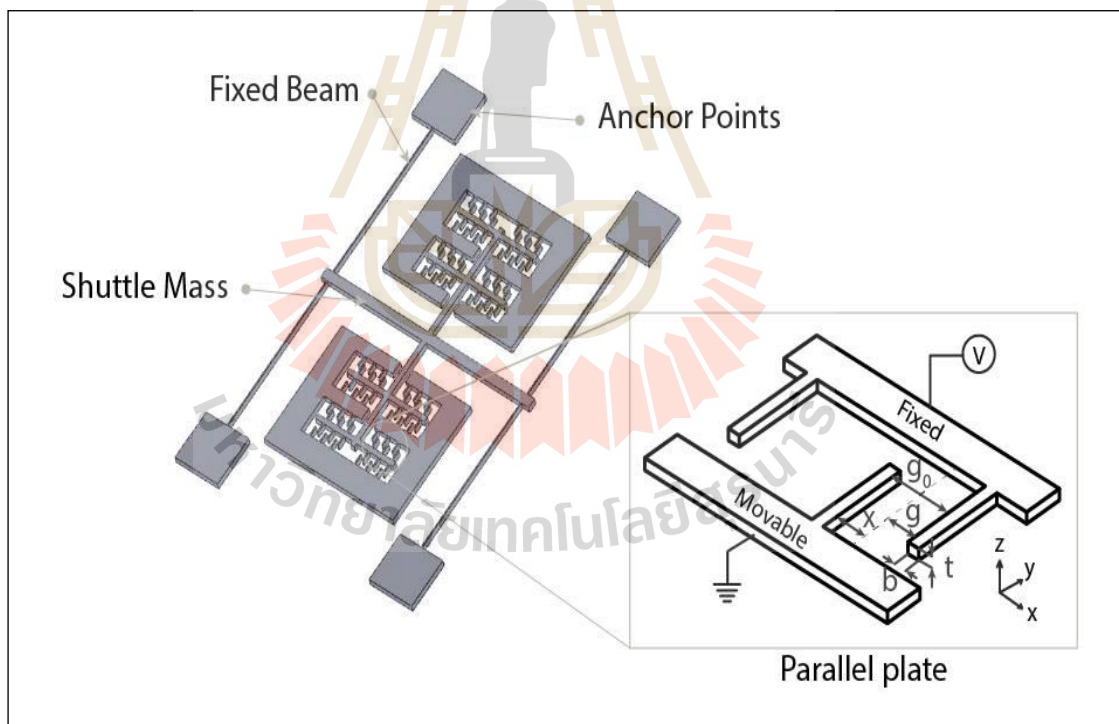
#### 4.2.2 ตัวขับเคลื่อนทางไฟฟ้าสถิตแบบแผ่นคู่ขนาน (Electrostatic parallel plate actuator)

ตัวขับเคลื่อนทางไฟฟ้าสถิตแบบแผ่นคู่ขนาน เป็นตัวขับเคลื่อนทางไฟฟ้าสถิตอีกชนิดหนึ่งที่มีการใช้กันอย่างแพร่หลาย (Gregory N. Nielson, 2006) มีโครงสร้างและหลักการทำงานคล้ายกับตัวขับเคลื่อนแบบซีพียู นั่นก็คือมีส่วนประกอบหลัก 2 ส่วน คือส่วนที่อยู่กับที่และส่วนที่สามารถเคลื่อนที่ได้ โดยส่วนที่เคลื่อนที่ได้จะมีสปริงติดอยู่ด้วย ดังรูปที่ 4.19 ลักษณะการขับเคลื่อนของตัวขับเคลื่อนแบบแผ่นคู่ขนานนี้จะใช้หลักการของไฟฟ้าสถิตเช่นเดียวกับตัวขับเคลื่อนแบบซีพียู เมื่อมีการป้อนไฟฟ้าให้กับระบบ ส่วนที่เคลื่อนที่จะเคลื่อนเข้าหาส่วนคงที่ และเมื่อตัดไฟฟ้าออก สปริงจะทำหน้าที่ดึงส่วนที่เคลื่อนที่ได้กลับมายังจุดเดิม



รูปที่ 4.19 ลักษณะโครงสร้างของตัวขับเคลื่อนแบบแผ่นคู่ขนาน

เมื่อทำการป้อนแรงดันไฟฟ้าเข้ากับขั้วของส่วนที่อยู่กับที่ (fixed) และต่อกราวด์เข้ากับขั้วของส่วนที่เคลื่อนที่ได้ (movable) ซึ่งจะทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วทั้งสอง และจะ



กลายเป็นประจุไฟฟ้า 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 ( $F_s$ )

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

เราจะเห็นว่า  $x$  เป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างแผ่น นั่นคือ

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

ดำเนินการแก้สมการหาแรงดันไฟฟ้าขับเคลื่อนจะได้

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

โดยที่  $V$  คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าขับเคลื่อน มีหน่วยเป็นโวลต์ (V)

$k$  คือ ค่าคงที่สปริง (spring stiffness)

$\epsilon_0$  คือ ค่า permittivity สัมบูรณ์ มีค่าเท่ากับ  $8.85 \times 10^{-12}$  F/m

$\epsilon_r$  คือ ค่า permittivity ของวัสดุฉนวนที่กั้นระหว่างขั้วทั้งสอง

$A$  คือ พื้นที่ผิวบริเวณที่เกิดประจุไฟฟ้า

$N$  คือ จำนวนแผ่นตัวนำที่เคลื่อนที่ของตัวขับเคลื่อน

$g_0$  คือ ระยะห่างเริ่มต้นระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองขั้ว

$x$  คือ ระยะที่แผ่นตัวนำเคลื่อนที่

การเคลื่อนที่ของตัวขั้วเร้าแบบแผ่นคู่ขนานจะมีหลักการทำงานคล้ายกันกับตัวขั้วเร้าแบบซีหวี คือในส่วนของเคลื่อนที่ได้จะถูกทำให้ลอยอยู่ในอากาศ โดยมีคานซึ่งทำหน้าที่ค้ำยันให้โครงสร้างลอยตัวได้ ทั้งยังทำหน้าที่เหมือนสปริงคอยดึงส่วนที่เคลื่อนที่ได้ให้กลับมายังตำแหน่งเริ่มต้นเมื่อหยุดการกระตุ้นตัวขั้วเร้า

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

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

โดยที่  $V_{pi}$  คือ ค่าแรงดันไฟฟ้าแนบติด มีหน่วยเป็นโวลต์ (V)

$k$  คือ ค่าคงที่สปริง

$g_0$  คือ ระยะห่างเริ่มต้นระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองขั้ว

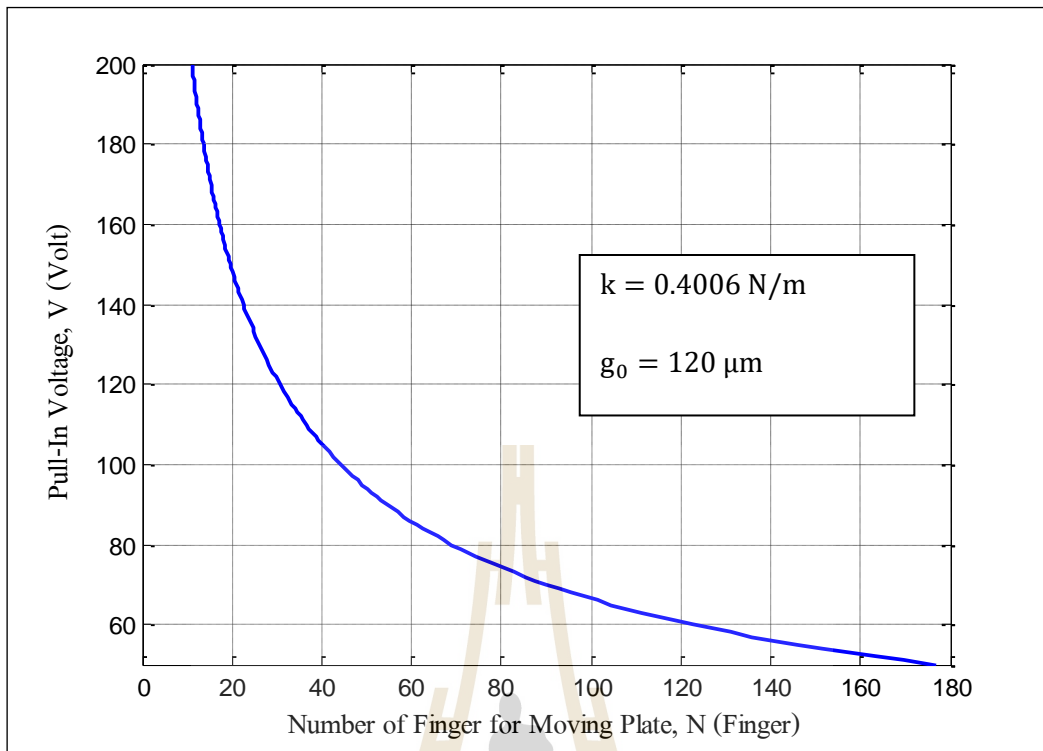
$\epsilon_0$  คือ ค่า permittivity สัมบูรณ์ มีค่าคงที่เท่ากับ  $8.85 \times 10^{-12}$  F/m

$\epsilon_r$  คือ ค่า permittivity ของวัสดุฉนวนที่กั้นระหว่างขั้วทั้งสอง

$N$  คือ จำนวนแผ่นตัวนำที่เคลื่อนที่ของตัวขั้วเร้า

$A$  คือ พื้นที่ผิวบริเวณที่เกิดประจุไฟฟ้า

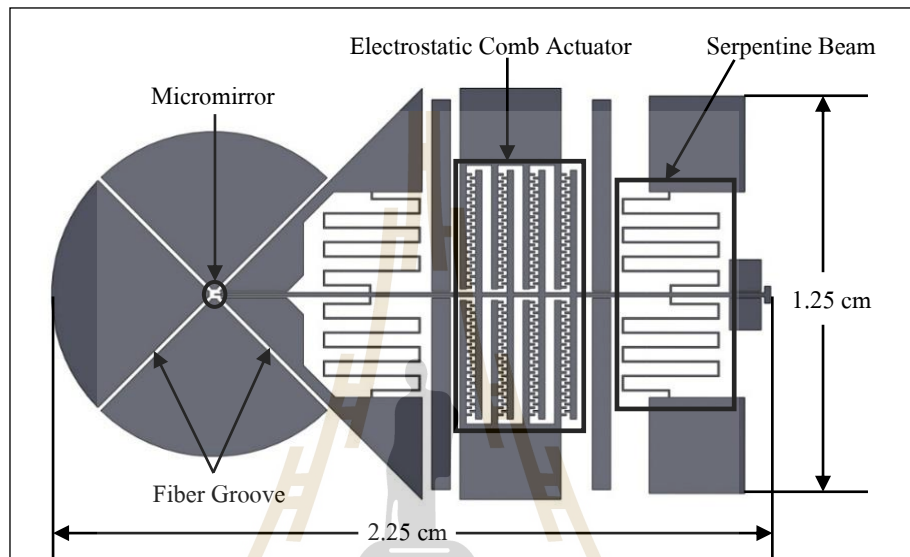
จากสมการที่ 4.16 ที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นว่าเมื่อออกแบบตัวขั้วเร้าทางไฟฟ้าสถิตให้เป็นตัวขั้วเร้าแบบแผ่นคู่ขนานและมีคานสปริงแบบ serpentine beam แล้วกำหนดค่าพารามิเตอร์ค่าต่างๆ ให้คงที่ ๆ ค่า ๆ หนึ่ง การเพิ่มจำนวนของแผ่นตัวนำนั้นจะทำให้แรงดันไฟฟ้าแนบติด ที่ทำให้แผ่นตัวนำทั้งสองถูกดึงมาชนกันมีค่าลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.21 โดยหากระยะห่างเริ่มต้นของแผ่นตัวนำทั้งสองมีค่า  $120 \mu\text{m}$  และออกแบบตัวขั้วเร้าให้มีแผ่นตัวนำที่เคลื่อนที่ได้มีจำนวน 120 แผ่น แรงดันไฟฟ้าแนบติดที่จะทำให้แผ่นตัวนำถูกดึงมาชนกันจะมีค่า 60 V นั่นเอง



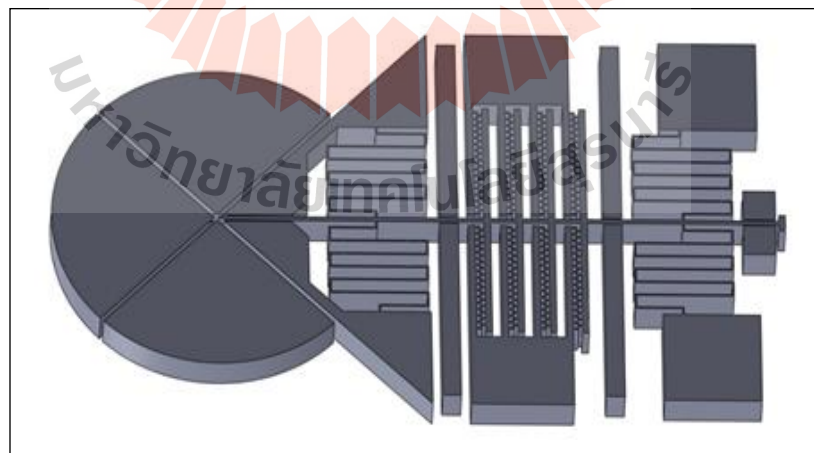
รูปที่ 4.21 แรงดันไฟฟ้าแบบติดที่เกิดขึ้นในตัวขับเคลื่อนเมื่อเทียบกับจำนวนแผ่นตัวนำ

### 4.3 การออกแบบโครงสร้างอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสง

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



รูปที่ 4.22 โครงสร้างด้านบนของอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสง

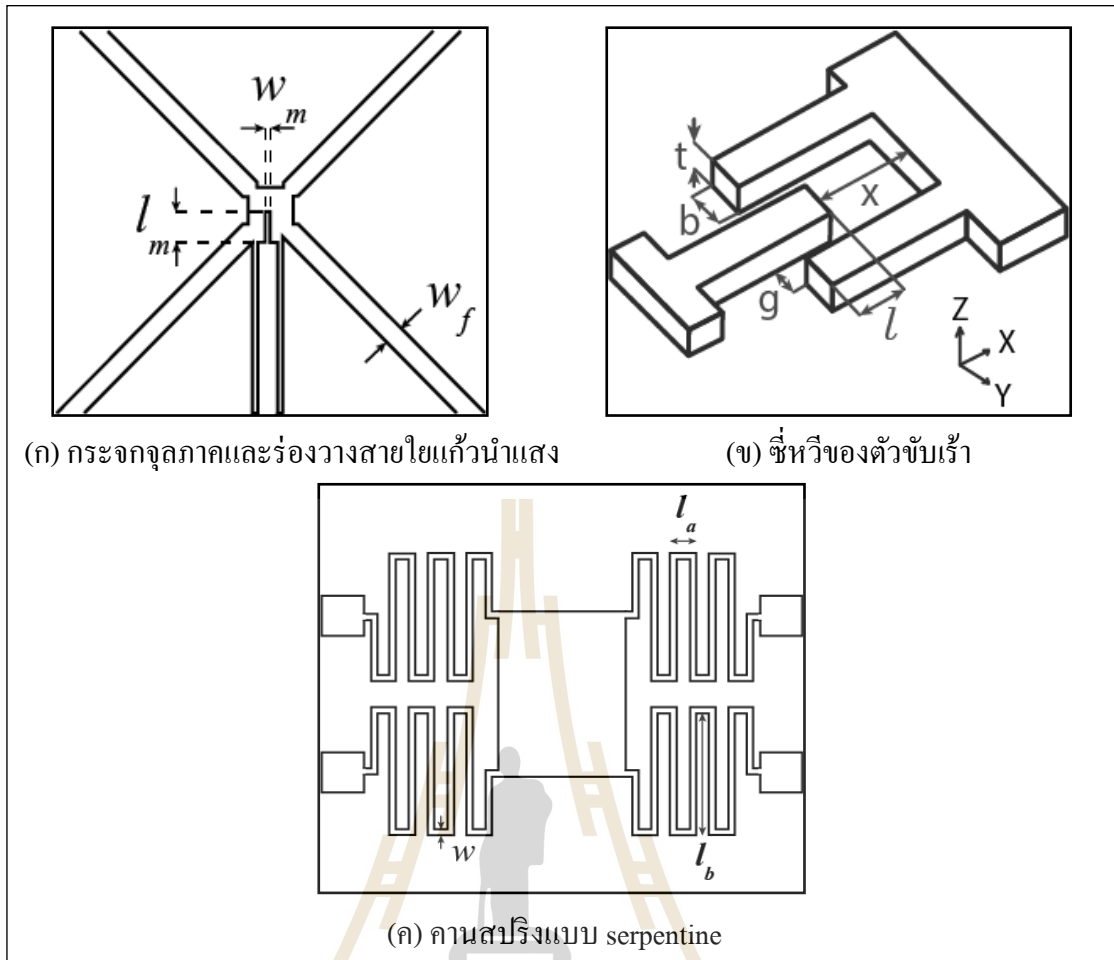


รูปที่ 4.23 โครงสร้างสามมิติของอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสง

ตารางที่ 4.8 สัญลักษณ์ของอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสง

Parameter	Symbol	Size
Spring wide	$w$	50 $\mu\text{m}$
Thickness	$t$	350 $\mu\text{m}$
Gap distance	$g$	50 $\mu\text{m}$
Length ( $a$ )	$l_a$	500 $\mu\text{m}$
Length ( $b$ )	$l_b$	3000 $\mu\text{m}$
Number of meander	$n$	12
Comb wide	$b$	50 $\mu\text{m}$
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 $\mu\text{m}$
Poisson's ratio	$\nu$	0.22
Mirror wide	$w_m$	30 $\mu\text{m}$
Length of mirror	$l_m$	200 $\mu\text{m}$
Groove of optical fiber	$w_f$	130 $\mu\text{m}$
Starting gab of plate	$g_0$	120 $\mu\text{m}$





รูปที่ 4.24 ขนาดพารามิเตอร์ของอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสง

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า การสร้างอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงโดยทั่วไปจะมีขนาดของระยะห่างระหว่างโครงสร้างที่เล็กที่สุดอยู่ในช่วง  $1-10 \mu\text{m}$  อันเนื่องมาจากมีกระบวนการสร้างฟิล์มที่สามารถควบคุมได้อย่างแม่นยำ อีกทั้งยังมีเครื่องมือและอุปกรณ์ที่สามารถกัดเนื้อวัสดุเพื่อขึ้นรูปหรือทำลวดลายให้มีความเที่ยงตรง นั่นก็หมายความว่าค่าใช้จ่ายในการสร้างชิ้นงานก็ต้องสูงตามไปด้วย การออกแบบขนาดโครงสร้างต่าง ๆ ในงานวิจัยนี้มีข้อจำกัดทางด้านการสร้างฟิล์มต้นแบบสำหรับเป็นหน้ากากกันแสง ซึ่งขนาดโครงสร้างที่เล็กที่สุดที่มีความแม่นยำและสามารถสร้างได้นั้นจะอยู่ในช่วง  $30-35 \mu\text{m}$  ทำให้อุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงที่จะออกแบบต้องปรับขนาดโครงสร้างให้ใหญ่ขึ้น โดยมีโครงสร้างส่วนที่เล็กหรือแคบที่สุดอยู่ในช่วง  $30-35 \mu\text{m}$  และเมื่อโครงสร้างมีขนาดใหญ่ขึ้นแล้ว จึงจำเป็นที่จะต้องสร้างโครงสร้างให้สูงขึ้นตามไปด้วย เพื่อเป็นการชดเชยระยะห่างระหว่างโครงสร้าง เนื่องด้วยเหตุผลในเรื่องของแรงขับเคลื่อน (Driving force) เพราะหากซีพียูอยู่ห่างกันเกินไป จะทำให้ต้องใช้แรงในการขับเคลื่อนมาก หมายถึงต้องสามารถหาแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่มีแรงดันสูงมากพอตัวขับเร้าจึงจะเกิดการเคลื่อนที่ได้ ซึ่งเป็นการเพิ่มต้นทุนสำหรับซื้อแหล่งจ่ายดังกล่าว และสิ่ง

สำคัญอีกประการหนึ่งคืออันตรายที่เกิดจากไฟฟ้าแรงสูงต่อผู้ทดลองเอง อีกทั้งอุปกรณ์อาจจะได้รับความเสียหาย ดังนั้นจึงต้องทำการชดเชยโครงสร้างของอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงด้วยการสร้างโครงสร้างให้มีความสูงมากกว่าความกว้าง เรียกว่า กระบวนการสร้างโครงสร้างจุลภาคสัดส่วนสูง (High aspect ratio micromachining) ซึ่งต้องอาศัยกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์ เนื่องจากรังสีเอกซ์มีพลังงานสูงทำให้โครงสร้างที่ได้มีผนังตั้งฉากกับฐานรองและเรียบคม และอีกเหตุผลที่โครงสร้างของอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงมีขนาดใหญ่คือ ปัจจุบันกระบวนการสร้างและพัฒนาอุปกรณ์ต่าง ๆ ยังอยู่ในช่วงเริ่มต้นของการพัฒนา ดังนั้นจึงจำเป็นต้องสร้างโครงสร้างที่มีขนาดใหญ่เนื่องจากสามารถสร้างได้ง่ายกว่าโครงสร้างขนาดเล็ก เพื่อเป็นการเรียนรู้และฝึกฝนให้เกิดความเข้าใจและหาแนวทางการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ให้เป็นมาตรฐานสำหรับการรองรับการสร้างอุปกรณ์ที่ต้องการโครงสร้างที่ขนาดเล็กต่อไป



## บทที่ 5

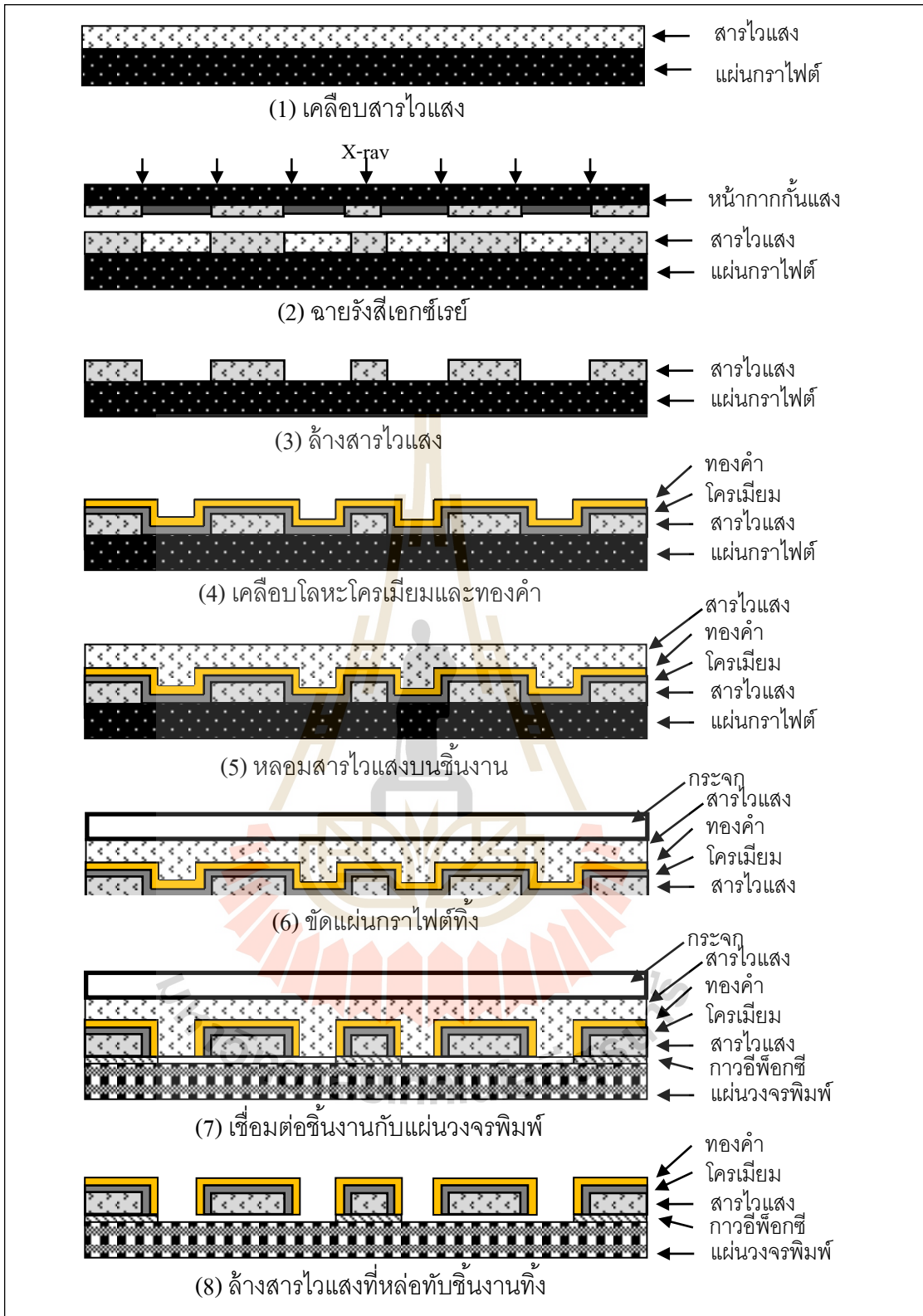
### กระบวนการพัฒนาอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสง

หลังจากได้ศึกษากระบวนการพื้นฐานจากบทที่ 3 และ ในบทที่ 4 เป็นเรื่องเกี่ยวกับการออกแบบอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงพร้อมกันได้ทำการจำลองระบบพลวัต ในบทนี้จะนำเสนอการผลิต การพัฒนา และการแก้ปัญหาระหว่างการสร้างอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงด้วยเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้า จุลภาค โดยใช้กระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์ รวมถึงกระบวนการอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับระบบ กลไฟฟ้าจุลภาค

#### 5.1 การสร้างอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสง

ในงานวิจัยนี้ได้มีการออกแบบและสร้างอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงขึ้นหลากหลายรูปแบบ มีทั้งการปรับเปลี่ยนชนิดของตัวขับเร็ว เพิ่มลดขนาดของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ปรับเปลี่ยนลักษณะการวางตัวของสปริง ตลอดจนเพิ่มลดจำนวนขดของสปริงเพื่อให้ได้มาซึ่งอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงที่มีโครงสร้างที่เหมาะสมและสามารถทำงานได้อย่างสมบูรณ์ที่สุด

อุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงของงานวิจัยนี้ จะมีโครงสร้างเป็นพอลิเมอร์ซึ่งเป็นสารไวแสงแบบลบ SU-8 ที่ผ่านกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอกซ์จนเกิดลวดลายเป็นโครงสร้างอยู่บนแผ่นกราฟาइट จากนั้นทำการเคลือบโลหะโครเมียมและทองคำเพื่อให้โครงสร้างดังกล่าวเกิดการนำไฟฟ้าและสามารถสะท้อนแสงได้ การสร้างอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงมีขั้นตอนการสร้างดังนี้ รูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ขั้นตอนการสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสง

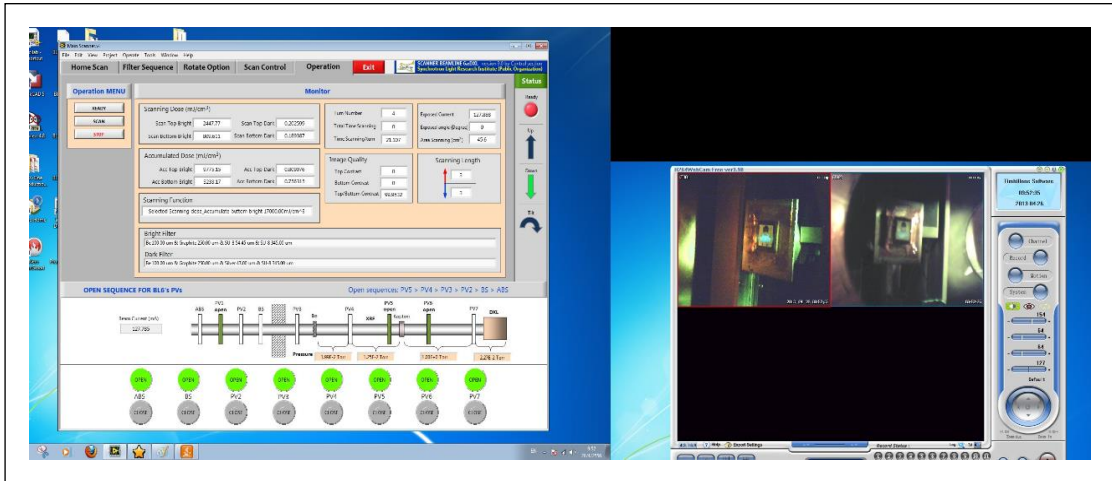
สำหรับขั้นตอนการสร้างอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสง สามารถอธิบายได้โดยละเอียดดังต่อไปนี้

1. ยึดแผ่นกราฟไฟต์กับกระจกด้วยเทปกั้นความร้อน แล้วทำความสะอาดแผ่นกราฟไฟต์โดยการเช็ดด้วยสำลีชุบไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ จากนั้นเช็ดด้วยสำลีอีกครั้ง หลังจากนั้นเป่าด้วยแก๊สไนโตรเจน แล้วนำไปวางบนแผ่นความร้อนเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นจะทำการเคลือบสารไวแสงชนิดลบ SU-8 เบอร์ 2100 ด้วยการหยดสารไวแสงลงบนฐานรองกราฟไฟต์ที่ยังวางอยู่บนแผ่นความร้อนดังกล่าว จนได้ความหนาของสารไวแสงประมาณ 300-400  $\mu\text{m}$  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 มาฉายรังสีเอกซ์ผ่านหน้ากากกันรังสีเอกซ์ ที่กระแสลำอิเล็กตรอน 116.185 mA จนได้พลังงานสะสม 28000  $\text{mJ}/\text{cm}^2$  (Acc.BottomBright) ซึ่งจะใช้เวลาในการฉายรังสีเอกซ์ 10 นาที ดังรูปที่ 5.3 จากนั้นนำชิ้นงานดังกล่าวมาวางบนแผ่นความร้อนที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้สารไวแสงบริเวณที่ทำปฏิกิริยากับแสงแข็งตัว



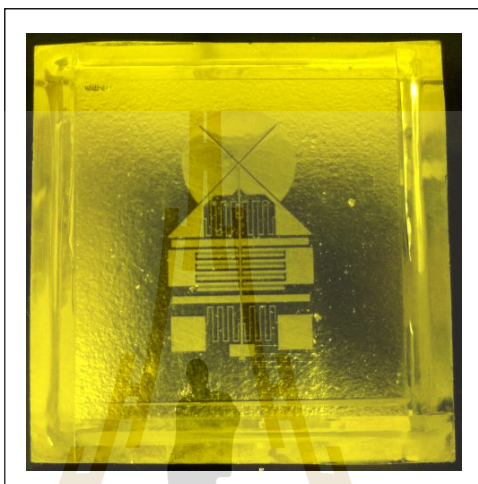
รูปที่ 5.3 ฉายรังสีเอกซ์

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



รูปที่ 5.4 โครงสร้างอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงที่ได้จากการฉายรังสีเอกซ์

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



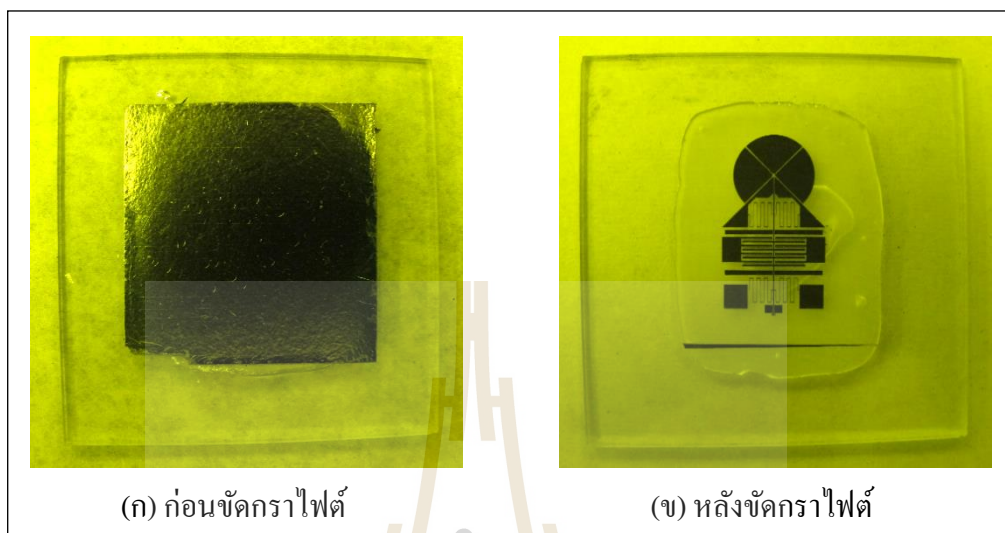
รูปที่ 5.4 โครงสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงที่ได้จากการฉายรังสีเอกซ์

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



รูปที่ 5.6 โครงสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงที่ถูกเคลือบด้วยสารไวแสง

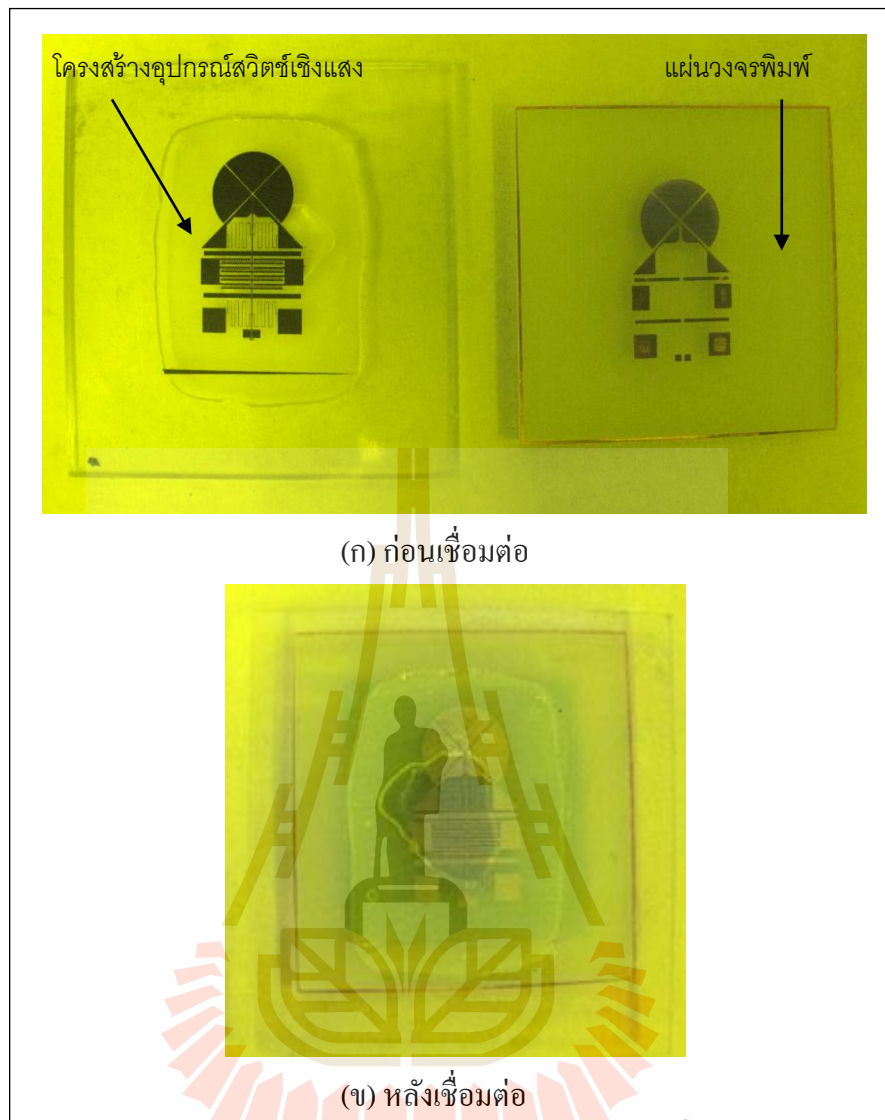
6. ประกอบสารไวแสงที่เคลือบโครงสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงดังกล่าวกับกระจกให้แนบสนิทด้วยการให้ความร้อน หลังจากนั้นขัดกราไฟต์ด้วยกระดาษทรายเบอร์ 400 และ 800 ตามลำดับ จนแผ่นกราไฟต์หลุดออกหมดและพื้นผิวโครงสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงเรียบ ซึ่งจะได้ชิ้นงานตามรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 โครงสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงก่อนและหลังขัดกราไฟต์

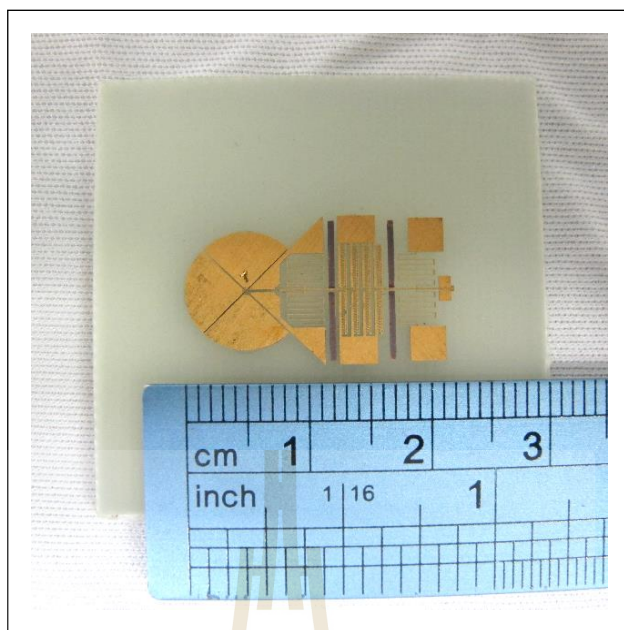
7. เชื่อมต่อโครงสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงที่ขัดกราไฟต์ออกแล้วลงบนฐานรองแผ่นวงจรพิมพ์ด้วยกาวอีพ็อกซี (Epoxy) โดยผสมกาวอีพ็อกซีในอัตราส่วน 1 : 1 แล้วทำโครงสร้างของอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงบริเวณที่ต้องการให้ติดอยู่กับแผ่นวงจรพิมพ์ จากนั้นประกอบโครงสร้างของชิ้นงานกับแผ่นวงจรพิมพ์ดังกล่าวให้ลวดลายตรงกันที่สุด เสร็จแล้วปล่อยให้กาวแข็งตัว จะได้ชิ้นงานตามรูปที่ 5.8





รูปที่ 5.8 เชื่อมต่อโครงสร้างอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงกับแผ่นวงจรมพิมพ์

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



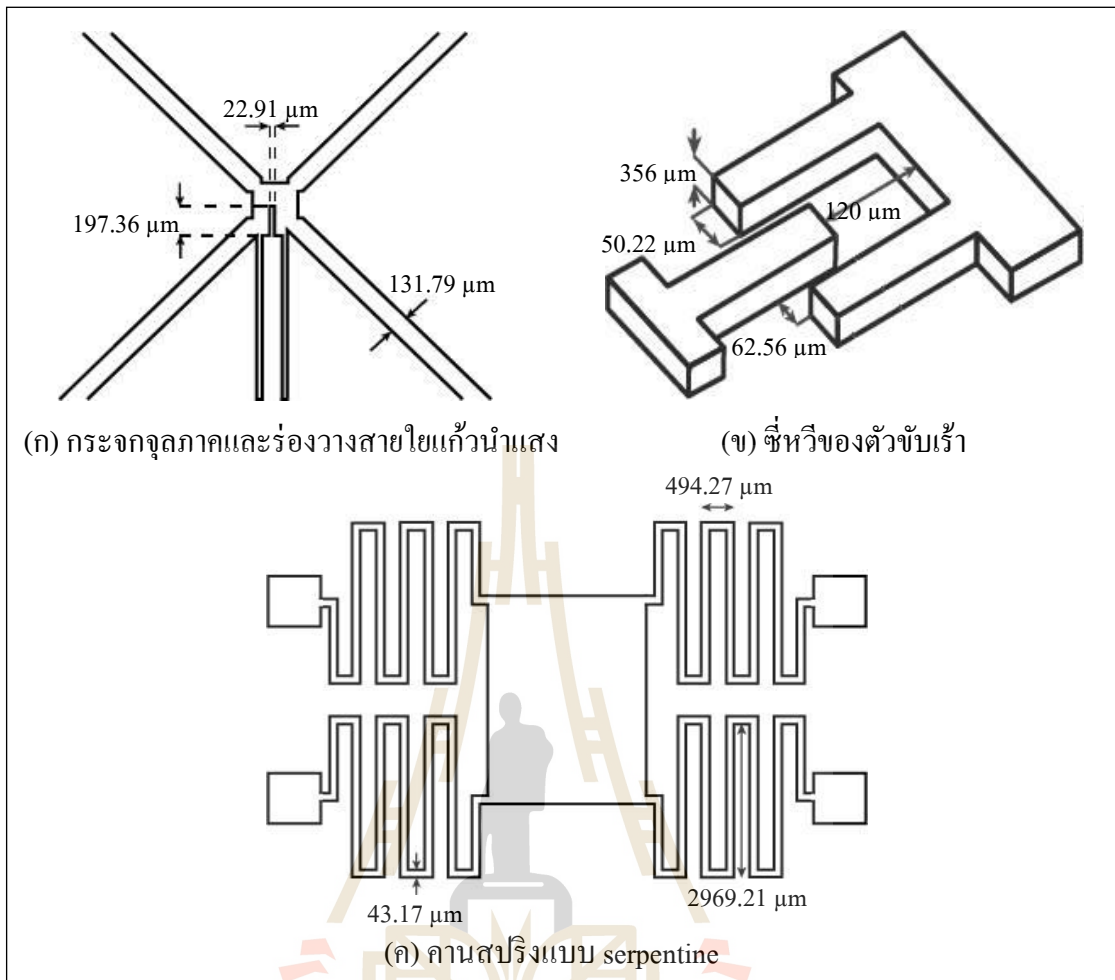
รูปที่ 5.9 โครงสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงที่ติดอยู่บนแผ่นวงจรพิมพ์

หลังจากได้โครงสร้างของอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงที่สมบูรณ์แล้วได้ จึงนำโครงสร้างดังกล่าวไปวัดขนาดจริงที่สร้างได้ด้วยกล้อง JEM 2010 light microscope ซึ่งจะได้ขนาดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ขนาดพารามิเตอร์ของอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงที่ออกแบบ (ตามตารางที่ 4.8) และได้จากการสร้างจริง

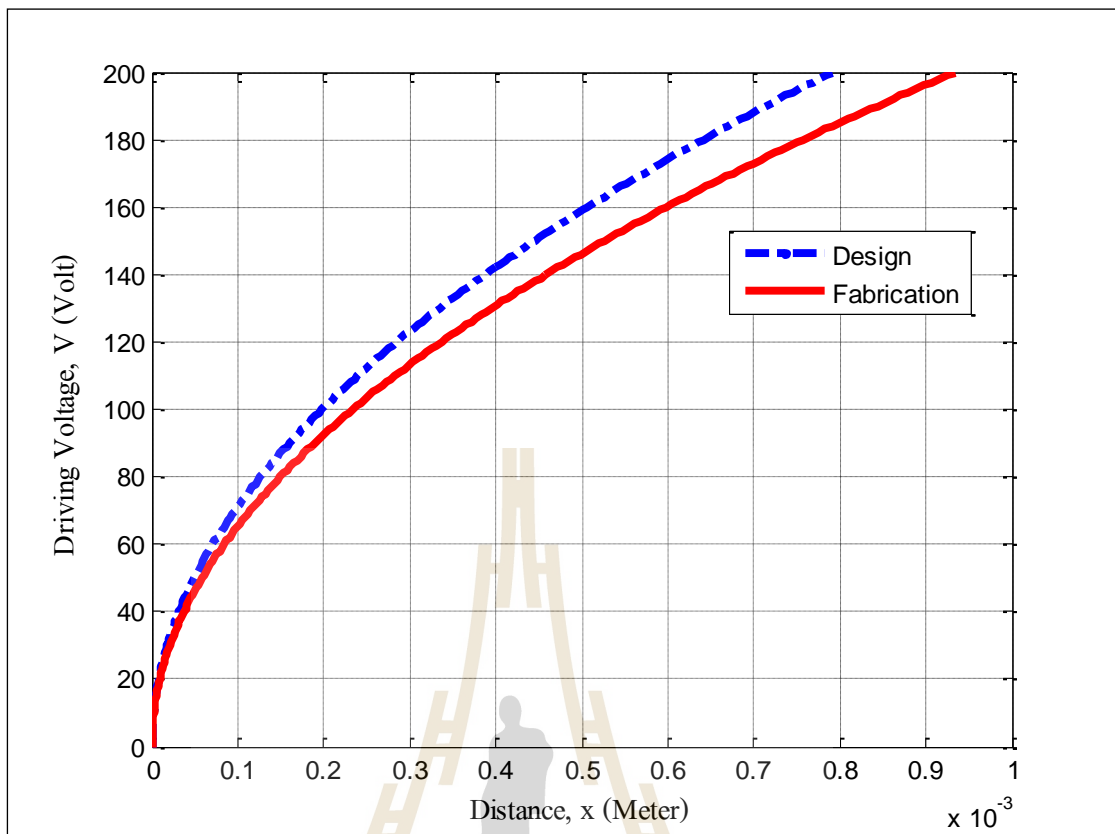
พารามิเตอร์	$w_m$	$l_m$	$w_f$	$l_a$	$l_b$	$w$	$g$	$b$	$t$
ออกแบบ ( $\mu\text{m}$ )	30	200	130	500	3000	50	50	50	350
สร้างจริง ( $\mu\text{m}$ )	22.91	197.36	131.79	494.27	2969.21	43.17	62.56	50.22	356

จากตารางที่ 5.1 จะเห็นได้ว่าขนาดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้จากการออกแบบและจากการสร้างโครงสร้างจริง มีค่าใกล้เคียงกันมาก แสดงให้เห็นว่าการสร้างโครงสร้างจากกระบวนการ เอกซ์เรย์ลิโธกราฟี ทำให้ได้โครงสร้างที่มีขนาดใกล้เคียงกับการออกแบบสูงมากนั่นเอง



รูปที่ 5.10 ขนาดโครงสร้างอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงที่สร้างได้จริง

เมื่อได้ขนาดพารามิเตอร์ของอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงที่สมบูรณ์แล้ว ต่อไปเป็นการจำลองการตอบสนองต่อแรงดันอินพุต โดยเปรียบเทียบการจำลองผลการตอบสนองระหว่างโครงสร้างที่ออกแบบและโครงสร้างที่สร้างสำเร็จ ดังรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.11 เปรียบเทียบผลการจำลองการตอบสนองของตัวขับเคลื่อนไฟฟ้าสถิต  
ที่ออกแบบกับที่สร้างได้จริง

จากผลการจำลองพบว่า แรงดันขับเคลื่อนของตัวขับเคลื่อนทั้งที่ได้จากการออกแบบ และที่ได้จากการสร้างโครงสร้างจริงมีค่าต่างกันเล็กน้อย โดยหากต้องการให้หัวเคลื่อนที่ได้ระยะทางที่เท่ากัน แรงดันขับเคลื่อนที่ต้องป้อนให้กับโครงสร้างของตัวขับเคลื่อนที่สร้างจริงจะมีค่าต่ำกว่าโครงสร้างตัวขับเคลื่อนที่ได้จากการออกแบบ จากรูปที่ 5.11 ถ้าต้องการให้หัวของตัวขับเคลื่อนที่ได้ระยะทาง  $200 \mu\text{m}$  โครงสร้างตัวขับเคลื่อนที่ออกแบบจะต้องป้อนแรงดันขับเคลื่อน  $100 \text{ V}$  ส่วนโครงสร้างตัวขับเคลื่อนที่สร้างจริงจะต้องป้อนแรงดันขับเคลื่อน  $90 \text{ V}$  จึงจะเคลื่อนที่ได้ตามระยะที่กำหนด

## 5.2 รูปแบบของอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงที่มีการสร้างขึ้นในงานวิจัย

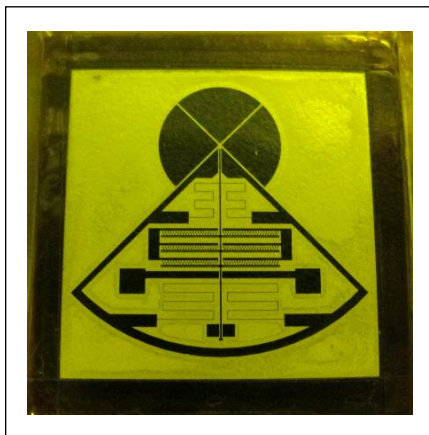
หลังจากการนำเสนอโครงสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงที่มีความสมบูรณ์ที่สุดไปแล้ว ในหัวข้อนี้จะเป็นการนำเสนอลักษณะโครงสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงรูปแบบต่าง ๆ ที่ได้มีการออกแบบและสร้างขึ้นในงานวิจัยนี้



รูปที่ 5.12 โครงสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงที่มีตัวขับเร้าทางไฟฟ้าสถิตแบบซีหวี  
มีคานสปริงแบบ fixed-fixed beam

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

อุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงรูปแบบต่อมาเป็นอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงที่มีตัวขับเร้าทางไฟฟ้าสถิตเป็นแบบซีหวี และมีสปริงเป็นแบบ serpentine ซึ่งวางตัวตั้งฉากกับระจกจุดภาค ดังรูปที่ 5.13 โดยโครงสร้างแบบนี้มีจำนวนซีตัวขับเร้าทั้งหมด 180 คู่ มีขนาดความกว้างของซี  $30\ \mu\text{m}$  มีขนาดของช่องว่างระหว่างซี  $30\ \mu\text{m}$  และมีสปริงทั้งหมด 6 ชุด โดยที่สปริงส่วนบนกับส่วนล่างจะมีขนาดไม่เท่ากัน เมื่อทำการสร้างและทดสอบการทำงานของอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงแบบนี้ ผลปรากฏว่าตัวขับเร้าสามารถเคลื่อนที่ได้ แต่เคลื่อนที่ได้ระยะทางเพียงเล็กน้อยก็เกิดการลัดวงจรของซีหวีซีที่อยู่ติดกัน จึงไม่สามารถใช้งานได้



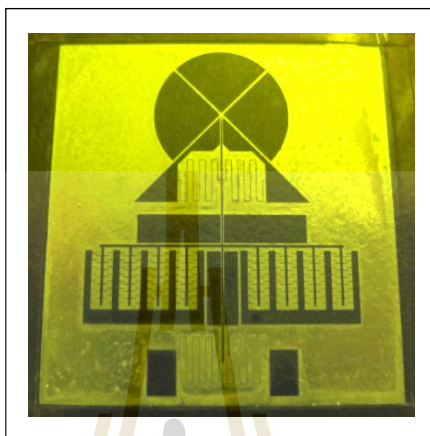
รูปที่ 5.13 โครงสร้างอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงที่มีตัวขับเร้าทางไฟฟ้าสถิตแบบซี่หวี และมีคานสปริงแบบ serpentine 8 ขด วางตัวตั้งฉากกับระจกจุลภาค

โครงสร้างแบบต่อมา มีลักษณะตัวขับเร้าทางไฟฟ้าสถิตเป็นแบบซี่หวีเช่นกัน และมีสปริงเป็นแบบ serpentine ซึ่งวางตัวตั้งฉากกับระจกจุลภาค โดยโครงสร้างแบบนี้มีจำนวนซี่หวีของตัวขับเร้าที่สามารถเคลื่อนที่ได้ทั้งหมด 180 ซี่ มีขนาดความกว้างของซี่  $30\ \mu\text{m}$  มีขนาดของช่องว่างระหว่างซี่  $30\ \mu\text{m}$  และมีสปริงทั้งหมด 12 ขด ดังรูปที่ 5.14 สปริงส่วนบนกับส่วนล่างของโครงสร้างนี้มีขนาดไม่เท่ากัน เมื่อทำการสร้างและทดสอบการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงแบบนี้ ผลปรากฏว่าตัวขับเร้าสามารถเคลื่อนที่ได้ แต่เคลื่อนที่ได้ระยะทางเพียงเล็กน้อยก็เกิดการลัดวงจรของซี่หวีซี่ที่อยู่ติดกัน จึงไม่สามารถใช้งานได้เช่นเดียวกับโครงสร้างในรูปที่ 5.13



รูปที่ 5.14 โครงสร้างอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงที่มีตัวขับเร้าทางไฟฟ้าสถิตแบบซี่หวี และมีคานสปริงแบบ serpentine 12 ขด วางตัวตั้งฉากกับระจกจุลภาค

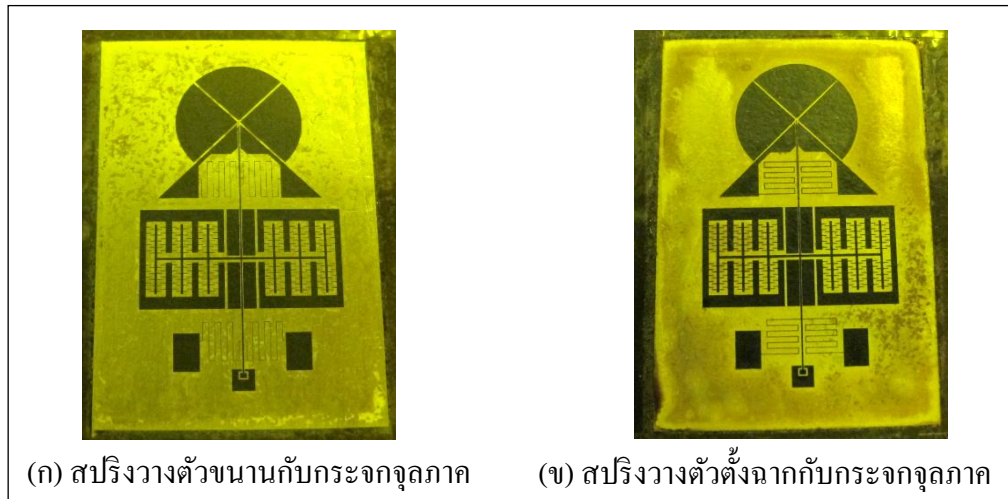
จากปัญหาการเคลื่อนที่ที่ได้ระยะทางน้อยเกินไปของโครงสร้างอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงที่มีตัวขับ  
 รั้วแบบซี่หวีดังรูปที่ 5.13 และ 5.14 ทำให้ต้องออกแบบโครงสร้างอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงใหม่ โดย  
 เปลี่ยนตัวขับรั้วทางไฟฟ้าสถิตจากแบบซี่หวีเป็นแบบแผ่นคู่ขนาน ซึ่งจากผลการจำลองทาง  
 คณิตศาสตร์ของตัวขับรั้วทางไฟฟ้าสถิตแบบแผ่นคู่ขนานในบทที่ 4 จะเห็นได้ว่า ยิ่งตัวขับรั้วมีจำนวน  
 แผ่นตัวนำที่เคลื่อนที่ได้มาก แรงดันไฟฟ้าแบบติดที่จะดึงให้แผ่นตัวนำเคลื่อนที่มาชนกันก็จะยิ่งต่ำ



รูปที่ 5.15 โครงสร้างอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงที่มีตัวขับรั้วทางไฟฟ้าสถิตแบบแผ่นคู่ขนาน  
 และมีคานสปริงแบบ serpentine 12 ชุด วางตัวขนานกับกระจกจุลภาค

จากรูปที่ 5.15 ตัวขับรั้วทางไฟฟ้าสถิตจะเป็นแบบแผ่นคู่ขนาน มีแผ่นตัวนำที่สามารถเคลื่อนที่  
 ได้จำนวน 112 แผ่น มีสปริงเป็นแบบ serpentine วางตัวขนานกับกระจกจุลภาคทั้งหมด 12 ชุด  
 โดยที่สปริงส่วนบนและส่วนล่างมีขนาดเท่ากัน เมื่อนำมาสร้างและทดสอบการทำงานผลปรากฏว่า ตัว  
 ขับรั้วไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ และโครงสร้างบริเวณแผ่นตัวนำมีการโก่งตัวขึ้นมาอย่างชัดเจน เนื่องจาก  
 โครงสร้างบริเวณดังกล่าวมีน้ำหนักมากกว่าบริเวณอื่น

สำหรับโครงสร้างอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงที่มีตัวขับรั้วเป็นแบบแผ่นคู่ขนานที่มีการสร้างขึ้นใน  
 งานวิจัยนี้อีกสองแบบก็คือ ตัวขับรั้วแบบแผ่นคู่ขนานที่มีแผ่นตัวนำ 120 คู่ โดยมีสปริงแบบ  
 serpentine วางตัวขนานกับกระจกจุลภาค ดังรูป 5.16(ก) และอีกแบบหนึ่งคือ ตัวขับรั้วแบบแผ่น  
 คู่ขนานที่มีแผ่นตัวนำ 120 คู่ โดยมีสปริงแบบ serpentine วางตัวตั้งฉากกับกระจกจุลภาค ดังรูปที่  
 5.16(ข) ซึ่งปัญหาของโครงสร้างแบบนี้ก็เหมือนกันกับโครงสร้างในรูป 5.15 นั่นคือ เกิดการโก่ง  
 ตัวอย่างชัดเจนบริเวณโครงสร้างแผ่นตัวนำ ทำให้ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้



รูปที่ 5.16 โครงสร้างอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงที่มีตัวขับเคลื่อนไฟฟ้าสถิตแบบแผ่นคู่ขนาน และมีคานสปริงแบบ serpentine 12 ชุด

โครงสร้างแบบสุดท้ายที่มีการพัฒนาในงานวิจัยนี้คือ อุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงที่มีตัวขับเคลื่อนไฟฟ้าสถิตเป็นแบบซี่หริซึ่งมีซี่หริที่เคลื่อนที่ได้ 128 ซี่ และมีสปริงแบบ serpentine 12 ชุด วางตัวตั้งฉากกับกระจกจุลภาค ดังรูปที่ 5.17 เมื่อทำการทดสอบการทำงานของโครงสร้างแบบนี้ผลที่ได้คือ เมื่อทำการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับตัวขับเคลื่อน ตัวขับเคลื่อนสามารถเคลื่อนที่ไปข้างหน้าได้ แต่เมื่อหยุดป้อนแรงดันไฟฟ้า ตัวขับเคลื่อนไม่กลับมาอยู่ในตำแหน่งเริ่มต้น เนื่องจากสปริงอาจมีความอ่อนตัวเกินไป



รูปที่ 5.17 โครงสร้างอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงที่มีตัวขับเคลื่อนไฟฟ้าสถิตแบบซี่หริ และมีคานสปริงแบบ serpentine 12 ชุด วางตัวตั้งฉากกับกระจกจุลภาค

เมื่อได้โครงสร้างอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงที่เสร็จสมบูรณ์แล้ว ต่อไปก็จะเป็นการทดสอบการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสง โดยรายละเอียดต่าง ๆ เกี่ยวกับการทดลองจะกล่าวถึงในบทต่อไป



## บทที่ 6

### การทดสอบและผลการทดสอบ

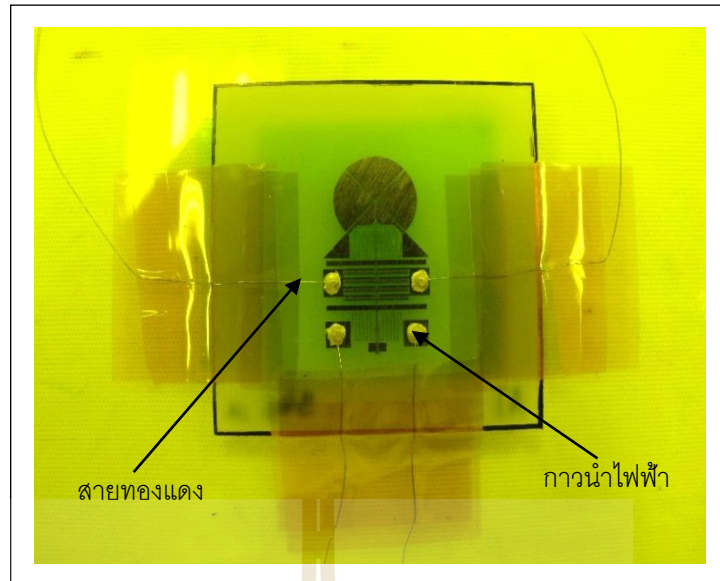
หลังจากได้ทำการสร้างและพัฒนาโครงสร้างอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงจนได้รูปแบบที่เหมาะสม พร้อมทั้งจำลองผลเพื่อศึกษาพฤติกรรมการทำงานของระบบ ต่อไปจะเป็นการนำเสนอวิธีการทดสอบอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงที่ได้จากการสร้าง โดยจะเริ่มต้นจากการการเชื่อมต่อสายไฟกับโครงสร้างอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงและแหล่งจ่ายแรงดันสูง จากนั้นป้อนแรงดันไฟฟ้าเข้าที่ขั้วของตัวขับเร้าเพื่อเป็นการกระตุ้นตัวขับเร้า แล้วปรับแรงดันเพิ่มขึ้นไปเรื่อย ๆ จนตัวขับเร้าสามารถเคลื่อนที่ได้ ต่อจากนั้นจะเป็นการทดสอบการสวิตช์แสงจากกระจกจุลภาคของแสงที่เดินทางจากสายใยแก้วนำแสงแบบโหมดเดียว

#### 6.1 การเชื่อมสายอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสง

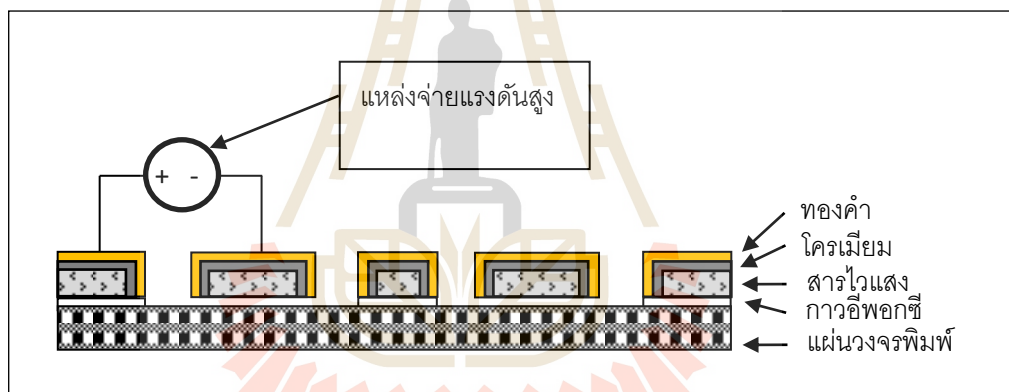
##### 6.1.1 เชื่อมต่อตัวขับเร้าทางไฟฟ้าสถิตกับแหล่งจ่ายแรงดันสูง

เมื่อสร้างโครงสร้างอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงจนเสร็จสมบูรณ์ และนำโครงสร้างดังกล่าวยึดติดบนแผ่นวงจรพิมพ์เรียบร้อยแล้ว สิ่งที่ต้องดำเนินการต่อไปคือ การเชื่อมต่อตัวขับเร้าทางไฟฟ้าสถิตกับแหล่งจ่ายแรงดันสูง เนื่องจากอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงที่สร้างขึ้นมีโครงสร้างเป็นพอลิเมอร์เคลือบโลหะนำไฟฟ้าและมีขนาดของจุดเชื่อมต่อค่อนข้างเล็ก หากจะทำการบัดกรีหรือใช้เครื่องเชื่อมสายมาเชื่อมต่อโดยตรงนั้นเป็นสิ่งที่ค่อนข้างลำบาก อีกทั้งโครงสร้างยังไม่แข็งแรงนัก ดังนั้นการเชื่อมต่อตัวขับเร้าทางไฟฟ้าสถิตกับแหล่งจ่ายแรงดันสูงจึงต้องใช้การเชื่อมต่อสายทองแดงกับขั้วของตัวขับเร้าด้วยกาวนำไฟฟ้า

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



รูปที่ 6.1 เชื่อมต่อสายทองแดงกับขั้วตัวขับเร้าทางไฟฟ้าสถิต



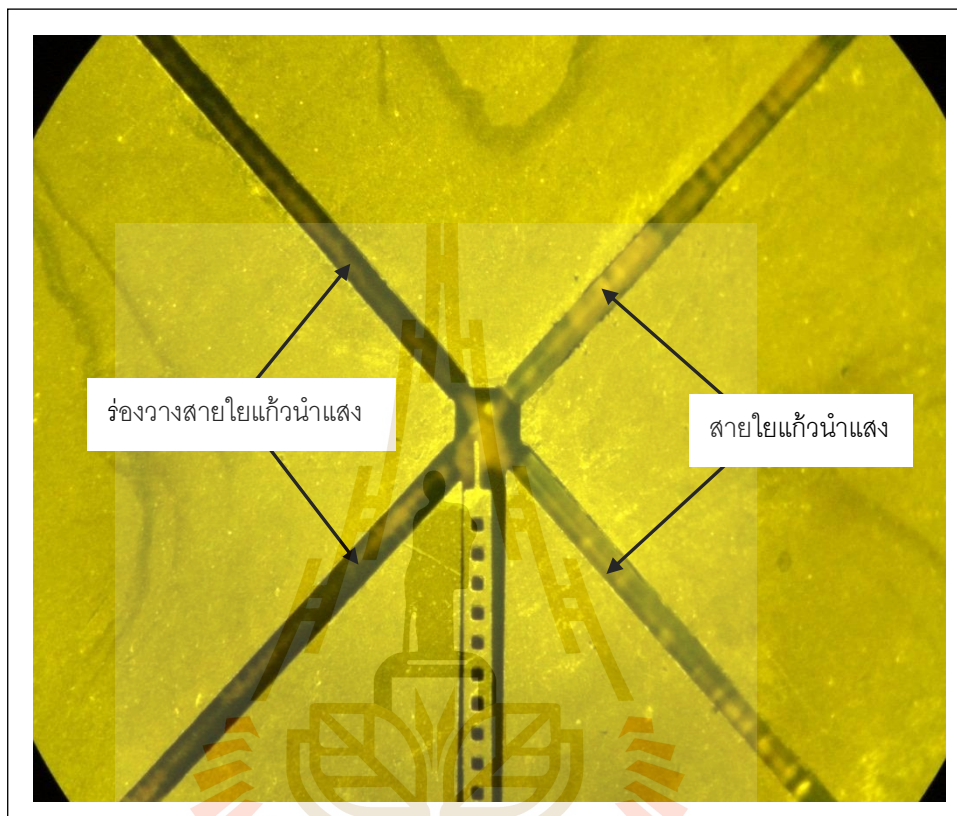
รูปที่ 6.2 เชื่อมสายของอุปกรณ์สวิทซ์เชิงแสงกับแหล่งจ่ายแรงดันสูง

รูปที่ 6.2 เป็นการแสดงภาพตัดขวางการเชื่อมต่อตัวขับเร้าทางไฟฟ้าสถิตกับแหล่งจ่ายแรงดันสูง โดยต่อไฟบวกเข้าที่ขั้วของตัวขับเร้าในส่วนที่ติดอยู่บนแผ่นวงจรพิมพ์ และต่อไฟลบเข้าที่ขั้วของตัวขับเร้าในส่วนที่ลอยอยู่ในอากาศ

### 6.1.2 เชื่อมต่อสายใยแก้วนำแสงกับอุปกรณ์สวิทซ์เชิงแสง

อุปกรณ์สวิทซ์เชิงแสงมีหน้าที่เปลี่ยนทิศทางการของแสง ดังนั้นหัวใจหลักอีกอย่างหนึ่งของอุปกรณ์นี้คือกระจกจุลภาค ซึ่งทำหน้าที่สะท้อนแสงที่เดินทางจากสายใยแก้วนำแสงเส้นหนึ่งด้วยมุม 90 องศา เพื่อไปเข้าสายใยแก้วนำแสงอีกเส้นหนึ่ง งานวิจัยนี้ได้ออกแบบให้มีร่องสำหรับวางสาย

ใยแก้วนำแสงขึ้นด้วย เพื่อเป็นแนวทางในการจัดวางสายใยแก้วนำแสงให้วางท่ามุมที่เหมาะสมกับ  
 กระจกจุลภาค การวางสายใยแก้วนำแสงลงในร่องที่เตรียมไว้จะต้องอาศัยตัวเชื่อมต่อที่จะยึดให้สาย  
 อยู่ในร่อง ดังรูปที่ 6.3 โดยในที่นี้จะใช้กาวอีพ็อกซีไซมาเป็นตัวเชื่อม เนื่องจากกาวอีพ็อกซีมีความ  
 แข็งแรงแต่ก็มีความยืดหยุ่นมากกว่ากาวชนิดอื่น อีกทั้งหาซื้อได้ง่าย

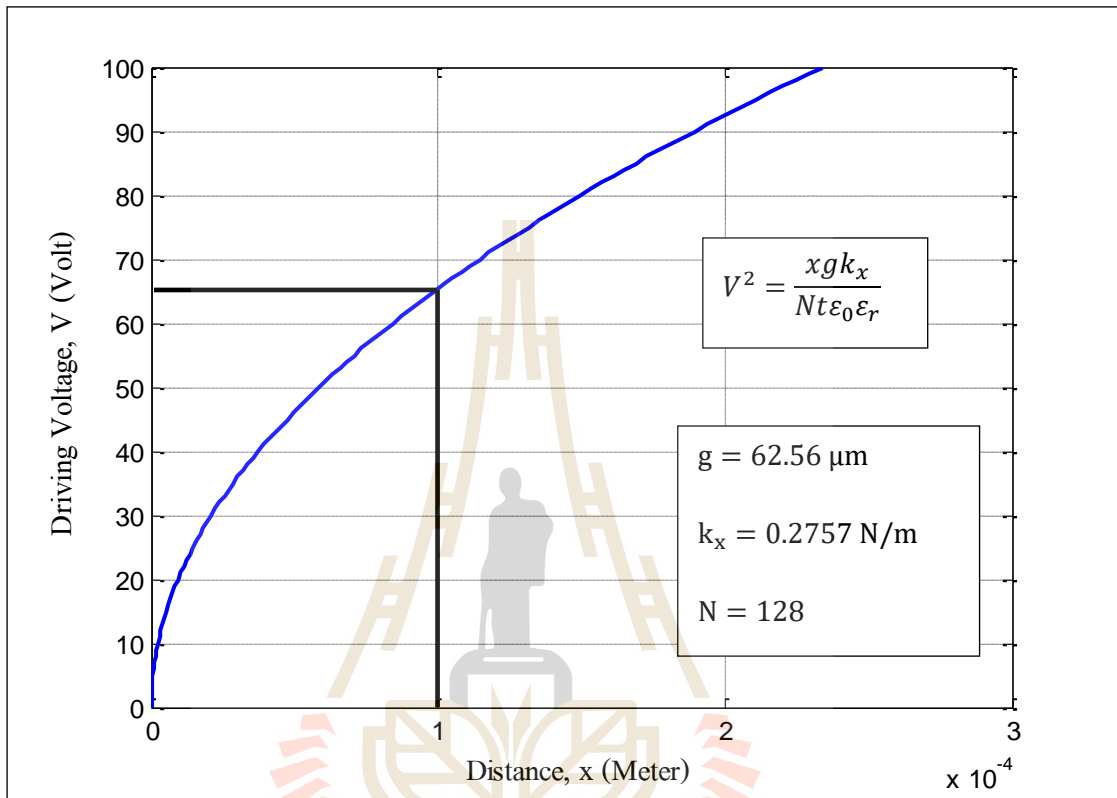


รูปที่ 6.3 เชื่อมต่อสายใยแก้วนำแสงกับอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสง

## 6.2 การทดสอบการเคลื่อนที่

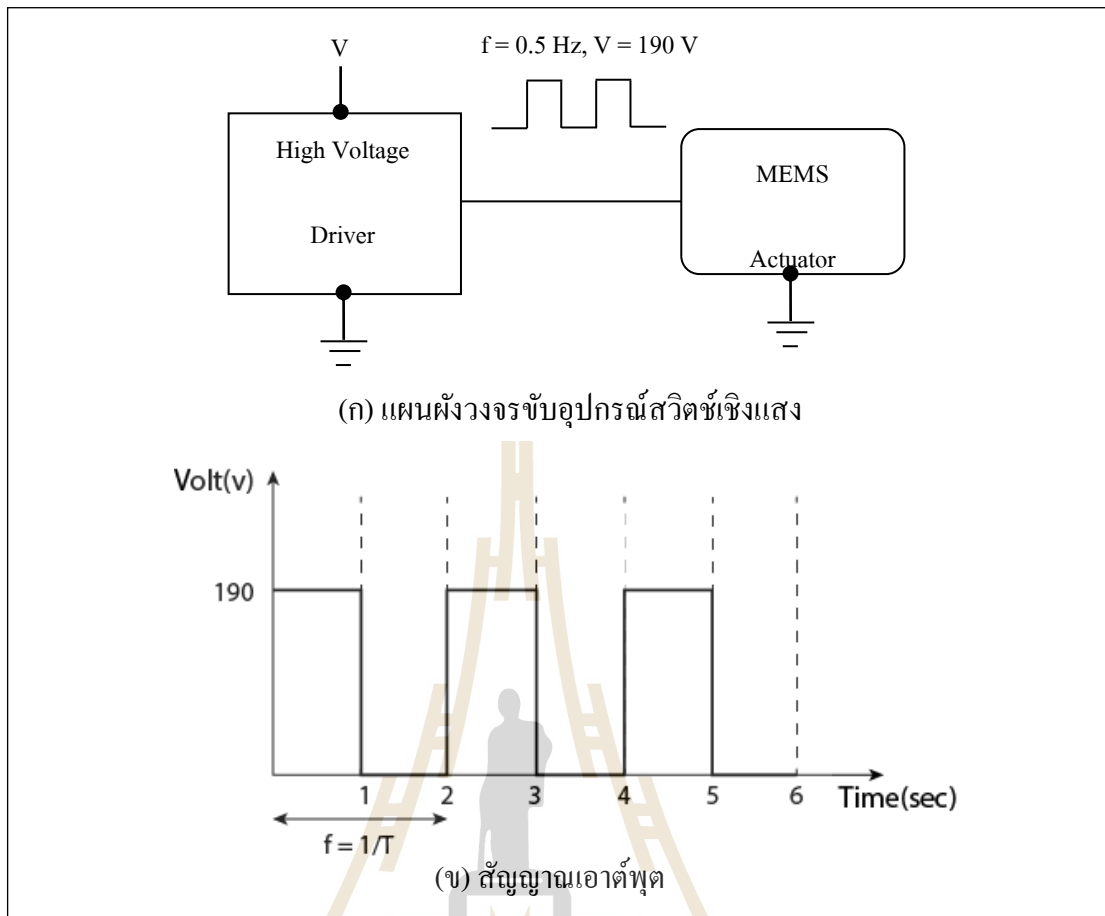
การกระตุ้นอุปกรณ์ประเภทไฟฟ้าสถิตโดยทั่วไปแล้วจะใช้แรงดันสำหรับควบคุมที่มีค่าสูงแต่มี  
 ค่ากระแสที่ต่ำ โดยมากอุปกรณ์ประเภทนี้จะมีลักษณะเป็นตัวเก็บประจุ การทดสอบการทำงานของ  
 อุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงจะเริ่มจากการป้อนแรงทางกล ด้วยการใช้อุปกรณ์ปลายแหลมสะกิดที่ชี้หัวของ  
 ตัวขับเร้าส่วนที่ลอยจากฐาน ให้เกิดการเคลื่อนไปมาเพื่อสังเกตดูว่าชี้หัวสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ  
 ไม่สัมผัสกับชี้หัวส่วนที่ติดกับฐาน ผลการทดสอบดังกล่าวพบว่าชี้หัวของตัวขับเร้าของงานวิจัยนี้  
 สามารถขยับได้อย่างอิสระ จากนั้นทำการทดสอบขั้นที่สองด้วยการใช้แก๊สไนโตรเจนความดัน  
 ประมาณ 1.5 psi เป่าบริเวณชี้หัวของตัวขับเร้าจนเกิดการเคลื่อนที่

วิธีต่อมาเป็นวิธีที่สำคัญที่สุดคือ การป้อนแรงดันไฟฟ้าแก่ตัวขับเคลื่อนเพื่อให้เกิดแรงไฟฟ้าสถิตที่ ซีพียูของตัวขับเคลื่อนเกิดการเคลื่อนที่ รูปที่ 6.4 เป็นการนำขนาดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของอุปกรณ์ สวิตซ์เชิงแสงที่สร้างขึ้นจริง มาจำลองหาผลตอบสนองการทำงานของตัวขับเคลื่อน โดยจากกราฟจะเห็นว่าเมื่อป้อนแรงดันขับเคลื่อน 65 V ซีพียูของตัวขับเคลื่อนจะเคลื่อนที่ได้ 100  $\mu\text{m}$



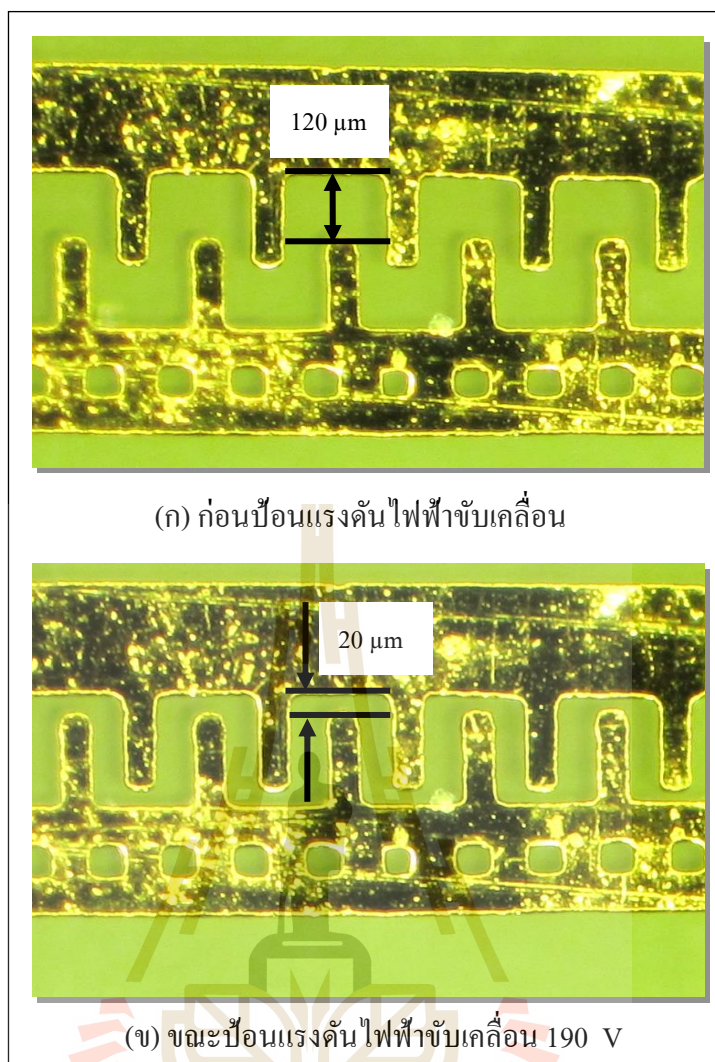
รูปที่ 6.4 ผลการจำลองการตอบสนองของโครงสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงที่สร้างได้จริง

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



รูปที่ 6.5 ชุดขับอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงในงานวิจัย

ในการทดสอบจะทำการปรับค่าแรงดันเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนกว่าตัวขับเร้าจะสามารถเคลื่อนที่ได้ ระยะทางที่ต้องการคือ  $100\ \mu\text{m}$  เมื่อปรับแรงดันเพิ่มขึ้นจนถึง  $190\ \text{V}$  พบว่าตัวขับเร้าสามารถเคลื่อนที่ได้ตามระยะทางที่ต้องการ  $100\ \mu\text{m}$



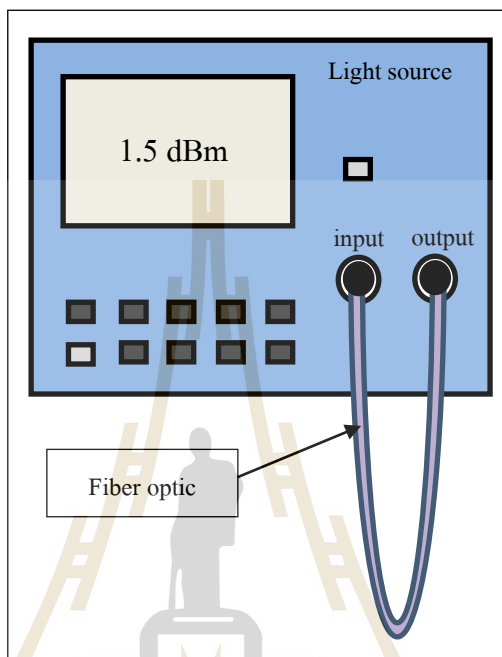
รูปที่ 6.6 ทดสอบการเคลื่อนที่ของตัวขับเคลื่อนทางไฟฟ้าสถิตแบบซี่หริ

โดยรูปที่ 6.6(ก) เป็นลักษณะการวางตัวของซี่หริเมื่อไม่มีการป้อนแรงดันไฟฟ้า ซึ่งระยะห่างระหว่างซี่หริมีขนาด  $120\ \mu\text{m}$  และในรูปที่ 6.6(ข) เป็นลักษณะการเคลื่อนที่ของซี่หริเมื่อมีการป้อนแรงดันไฟฟ้า ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้า  $190\ \text{V}$  ระยะห่างระหว่างซี่หริจะมีขนาดแคบลง โดยมีขนาดเหลือเพียง  $20\ \mu\text{m}$

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

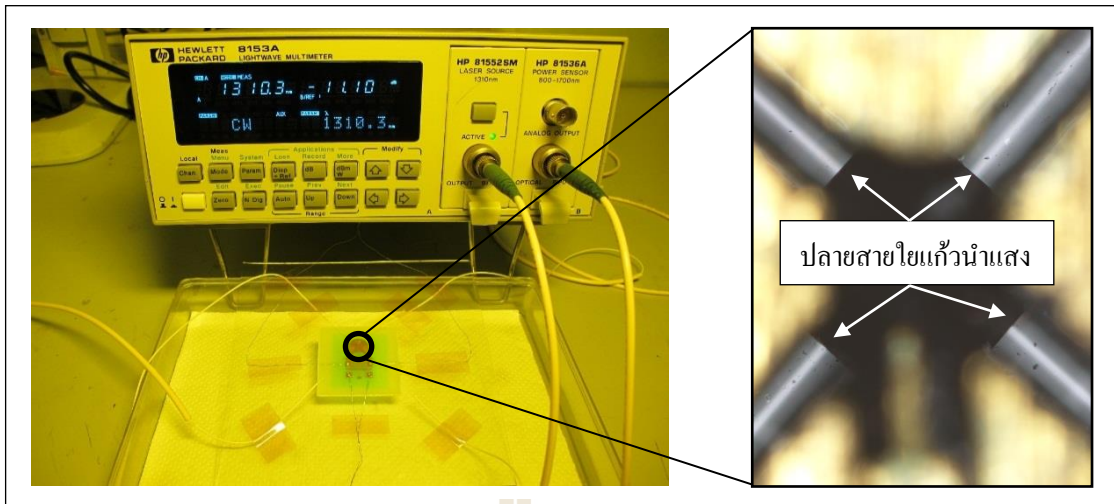
### 6.3 การทดสอบการสวิตช์แสง

ทดสอบการสวิตช์แสงด้วยกระจกจุลภาคของอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงที่มีโครงสร้างเป็นพอลิเมอร์เคลือบโลหะทองคำ โดยใช้แหล่งกำเนิดแสง (Lightwave multimeter) ยี่ห้อ HP รุ่น Hewlett Packard 8153A ความยาวคลื่น 1310 nm เริ่มต้นการทดลองโดยการวัดค่ากำลังของแสงที่เครื่องสามารถส่งได้ด้วยการรับส่งแสงโดยตรงผ่านสายใยแก้วนำแสงเส้นเดียว ดังรูปที่ 6.7 ซึ่งสามารถวัดค่ากำลังแสงได้ 1.5 dBm

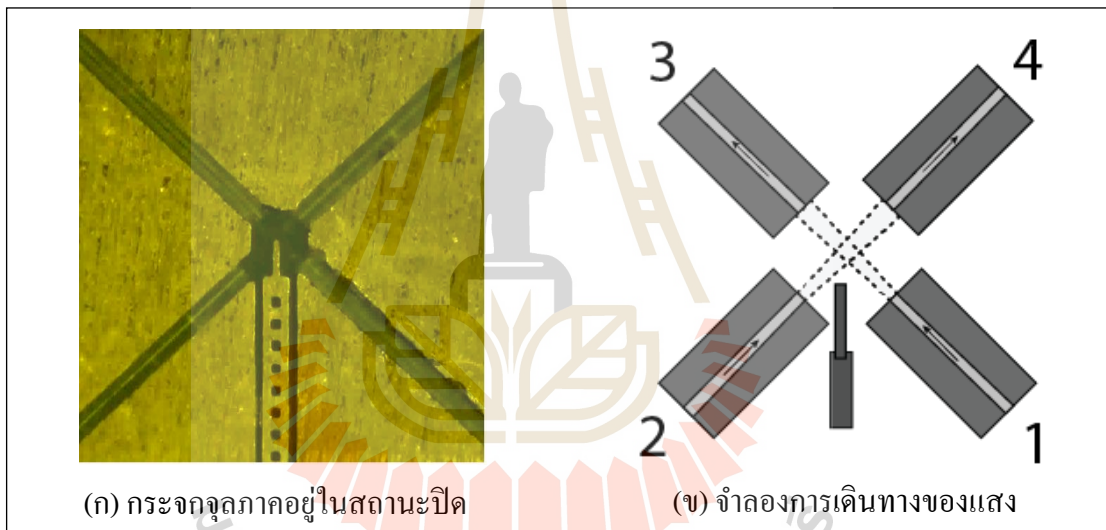


รูปที่ 6.7 วัดค่ากำลังของแสงที่ส่งออกมาจากแหล่งจ่ายสัญญาณแสง

ต่อจากนั้นเชื่อมต่อสายใยแก้วนำแสงของอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงกับแหล่งจ่ายสัญญาณแสง ดังรูปที่ 6.8 แล้วทดลองส่งสัญญาณแสงระหว่างสายใยแก้วนำแสงสองเส้นผ่านตัวกลางซึ่งเป็นอากาศ ดังรูปที่ 6.9 และทำการวัดค่ากำลังของแสงที่สามารถรับส่งได้ ซึ่งจะได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 6.1



รูปที่ 6.8 เชื่อมต่อสายใยแก้วนำแสงของอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงกับแหล่งจ่ายสัญญาณแสง



(ก) กระจกจุดภาคอยู่ในสถานะปิด

(จ) 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

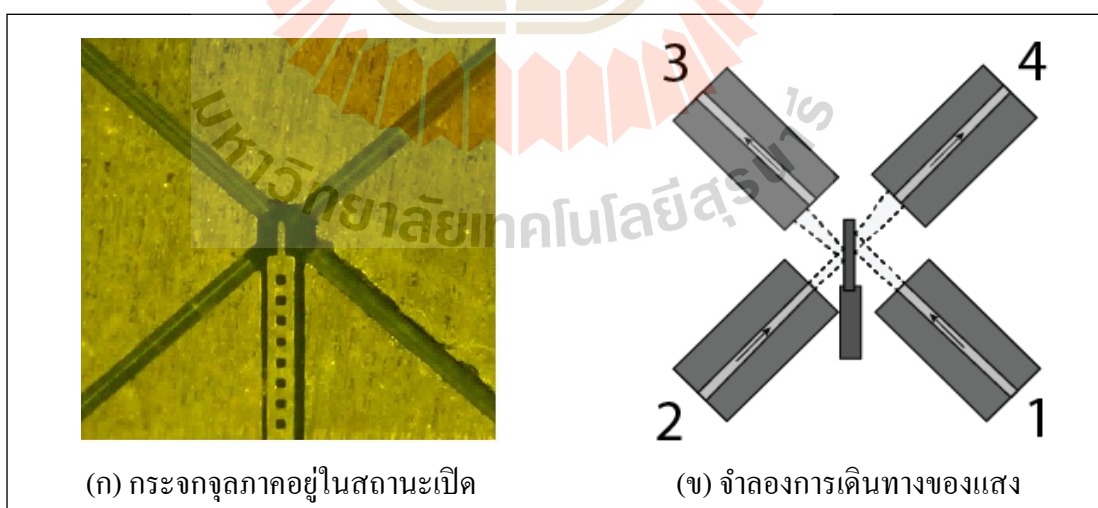


ตารางที่ 6.2 ค่าการสูญเสียของแสงเนื่องจากการส่งแสงผ่านตัวกลางที่เป็นอากาศเทียบกับการส่งผ่านสายใยแก้วนำแสงโดยตรง หน่วย dB

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 ผ่านตัวกลางซึ่งเป็นอากาศพบว่าสายใยแก้วนำแสงเส้นที่ 3 สามารถวัดค่าแสงที่รับได้ดีที่สุด  $-11.17$  dBm โดยคิดเป็นค่าการสูญเสียของแสงเนื่องจากการส่งผ่านอากาศเมื่อเทียบกับการส่งผ่านสายใยแก้วนำแสงโดยตรงได้  $-12.67$  dB และเมื่อส่งสัญญาณแสงจากสายใยแก้วนำแสงเส้นที่ 2 ผ่านตัวกลางซึ่งเป็นอากาศนั้นพบว่าสายใยแก้วนำแสงเส้นที่ 4 สามารถวัดค่าของแสงที่รับได้ดีที่สุด  $-17.81$  dBm คิดค่าการสูญเสียของแสงเนื่องจากการส่งผ่านอากาศเมื่อเทียบกับการส่งผ่านสายใยแก้วนำแสงโดยตรงได้  $-19.32$  dB

ต่อมาเป็นการทดสอบการรับส่งแสงผ่านการสวิตช์แสงจากกระจกจุลภาค ดังรูปที่ 6.10 โดยให้สายใยแก้วนำแสงเส้นที่ 1 เป็นตัวส่งสัญญาณแสง และวัดค่าแสงที่รับได้ของสายใยแก้วนำแสงเส้นที่ 2, 3 และ 4 จากนั้นให้สายใยแก้วนำแสงเส้นที่ 2 เป็นตัวส่งสัญญาณแสง และวัดค่าแสงที่รับได้ของสายใยแก้วนำแสงเส้นที่ 1, 3 และ 4 ตามลำดับ โดยการทดสอบจะแบ่งออกเป็นเมื่อกระจกจุลภาคอยู่ในสถานะเปิดและกระจกจุลภาคอยู่ในสถานะปิด ซึ่งจะได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 6.3



รูปที่ 6.10 ทดสอบการรับส่งแสงโดยการสะท้อนจากกระจกจุลภาค

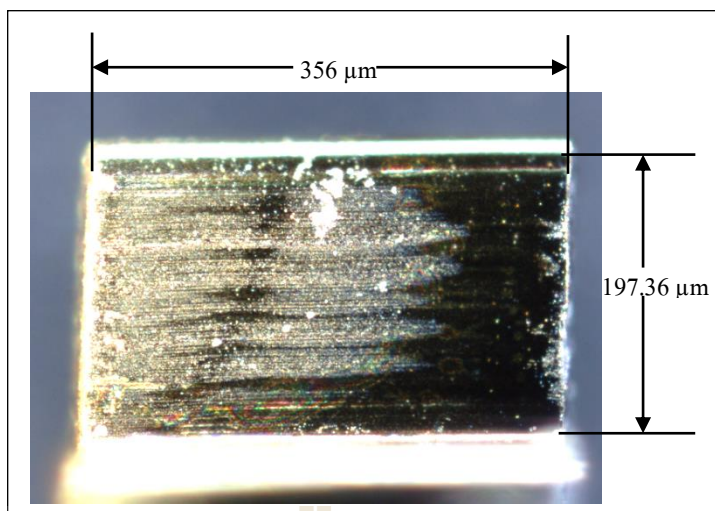
ตารางที่ 6.3 ค่าการรับส่งแสงผ่านการสะท้อนจากกระจกจุลภาค หน่วย dBm

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 สามารถวัดค่าของแสงที่รับได้ดีที่สุด -22.22 dBm โดยคิดค่าการสูญเสียของแสงเนื่องจากการสวิตช์จากกระจกจุลภาคเทียบกับการส่งผ่านอากาศได้ -11.05 dB และเมื่อส่งสัญญาณแสงจากสายใยแก้วนำแสงเส้นที่ 2 แล้วแสงเกิดการสะท้อนจากกระจกจุลภาคพบว่าไม่มีสายใยแก้วนำแสงที่สามารถรับแสงที่สะท้อนจากกระจกจุลภาคได้เลย จากค่าการสูญเสียของแสงเนื่องจากการสวิตช์ของการรับส่งแสงระหว่างสายใยแก้วนำแสงเส้นที่ 1 กับ 4 จะเห็นว่ามียาค่าค่อนข้างสูง น่าจะมีสาเหตุมาจากผนังด้านข้างของกระจกจุลภาคบริเวณที่เกิดการสะท้อนแสงมีผิวค่อนข้างขรุขระ ดังรูปที่ 6.11 จึงทำให้เมื่อแสงเดินทางมาตกกระทบบที่ผิวของกระจกจุลภาค มุมของแสงที่สะท้อนจากกระจกจุลภาคจึงอาจมีขนาดไม่ตรงกับ core ของสายใยแก้วนำแสงเส้นที่ 4 จึงทำให้สายใยแก้วนำแสงเส้นที่ 4 รับแสงได้น้อยนั่นเอง



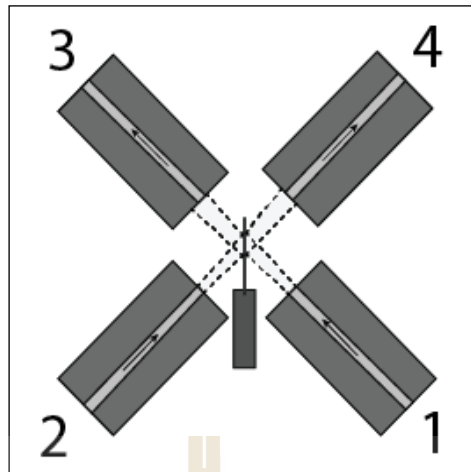
รูปที่ 6.11 พื้นผิวบริเวณผนังด้านข้างของกระจกจุลภาค

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

จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงของงานวิจัยนี้สามารถสวิตช์แสงได้เพียงด้านเดียว เนื่องจากกระจกจุลภาคที่สร้างขึ้นมีขนาดความกว้างถึง  $22.91$  μm ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่า core ของสายใยแก้วนำแสงแบบโหมดเดี่ยว ที่มีขนาดเพียง  $9$  μm ทำให้เมื่อกระจกจุลภาคเคลื่อนที่เข้าไปขวางทางเดินของแสง แสงที่เดินทางจากสายใยแก้วนำแสงเส้นที่ 2 แล้วสะท้อนกับกระจกจุลภาคจึงมีขนาดของมุมไม่ตรงกับ core ของสายใยแก้วนำแสงเส้นที่ 3 ทำให้สายใยแก้วนำแสงเส้นที่ 3 ไม่สามารถรับแสงที่สะท้อนจากกระจกจุลภาคได้นั่นเอง

#### 6.4 แนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสง

เนื่องจากกระจกจุลภาคของงานวิจัยนี้มีขนาดใหญ่ ทำให้ไม่สามารถสวิตช์แสงพร้อมกันทั้งสองทางได้ ดังนั้นหากต้องการให้อุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงแบบ  $2 \times 2$  สามารถทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพจะต้องสร้างโครงสร้างของกระจกจุลภาคให้มีขนาดความกว้างน้อยกว่า  $10$  μm อุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงก็จะสามารถสวิตช์แสงได้พร้อมทั้งสองทางได้ ดังรูปที่ 6.12 ซึ่งจะเห็นว่ากระจกจุลภาคมีขนาดความกว้างน้อยกว่า core ของสายใยแก้วนำแสง ทำให้แสงที่สะท้อนจากกระจกจุลภาคมีขนาดของมุมที่พอดีในการสวิตช์แสงพร้อมกันทั้งสองทาง



รูปที่ 6.12 โครงสร้างกระจกจุลภาคที่เหมาะสม

และหากต้องการให้การสูญเสียของแสงเนื่องจากการสวิตช์มีค่าลดลง ก็ต้องสร้างกระจกจุลภาคให้พื้นผิวของผนังด้านข้างบริเวณที่ใช้ในการสะท้อนแสงมีความเรียบมากกว่านี้

## บทที่ 7

### สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 7.1 สรุปงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาการสร้างอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงสำหรับใช้งานกับเส้นใยนำแสงแบบโหมดเดี่ยวที่มีขนาดของ core  $9\ \mu\text{m}$  และมีขนาดของ core เมื่อรวมกับ cladding เท่ากับ  $125\ \mu\text{m}$  อุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงถูกสร้างขึ้นจากกระบวนการลิโธกราฟีด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตและรังสีเอกซ์จากระบบลำเลียงแสง 6a : DXL ของสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) เพื่อเป็นต้นแบบสำหรับองค์ความรู้ใหม่ในการพัฒนาการสร้างอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสง ตัวขับเร้าทางไฟฟ้าสถิตหรือแม้แต่อุปกรณ์ในระบบกลไฟฟ้าจุลภาคให้ดียิ่งขึ้น โดยเริ่มตั้งแต่การศึกษาลักษณะโครงสร้าง วัสดุที่ใช้ในการสร้างจนถึงกระบวนการสร้าง พร้อมทั้งทำการออกแบบ สร้างและพัฒนาารูปแบบโครงสร้างอย่างต่อเนื่อง อุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงของงานวิจัยนี้มีโครงสร้างเป็นสารไวแสงแบบลบ SU-8 เคลือบด้วยโลหะโครเมียมและทองคำ มีตัวขับเร้าทางไฟฟ้าสถิตแบบซีวีซีซึ่งมีจำนวนซีวีซีที่สามารถเคลื่อนที่ได้ทั้งหมด 128 ซีวีซี ทำหน้าที่ขับเคลื่อนกระจกจุลภาคขนาดความกว้าง  $22.91\ \mu\text{m}$  สูง  $356\ \mu\text{m}$  ให้เคลื่อนที่เข้าออกระหว่างทางเดินแสงของสายใยแก้วนำแสงสองคู่ อีกทั้งมีสปริงแบบ serpentine ทำหน้าที่ดึงโครงสร้างตัวขับเร้าให้กลับมายังจุดเริ่มต้นเมื่อไม่มีการป้อนแรงดันไฟฟ้า

ทดสอบการทำงานของอุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงพบว่า กระจกจุลภาคสามารถเคลื่อนที่ได้ระยะทาง  $100\ \mu\text{m}$  เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับตัวขับเร้า  $190\ \text{V}$  ทดสอบการรับส่งแสงที่ความยาวคลื่น  $1310\ \text{nm}$  วัดกำลังแสงที่แหล่งกำเนิดแสงส่งผ่านสายใยแก้วนำแสงเส้นเดียวได้  $1.5\ \text{dBm}$  เมื่อทดลองส่งสัญญาณแสงระหว่างสายใยแก้วนำแสงสองเส้น โดยมีตัวกลางเป็นอากาศพบว่าสามารถวัดค่าการรับแสงได้ดีที่สุด  $-11.17\ \text{dBm}$  ซึ่งคิดเป็นค่าการสูญเสียทางแสงผ่านอากาศเมื่อเทียบกับการส่งผ่านสายใยแก้วนำแสงโดยตรงได้  $-12.67\ \text{dB}$  จากนั้นทดสอบการรับส่งแสงผ่านการสวิตช์จากกระจกจุลภาคพบว่า เมื่อกระจกจุลภาคอยู่ในสถานะสวิตช์เปิด (switch on) สามารถวัดค่าการรับแสงที่ดีที่สุดได้  $-22.22\ \text{dBm}$  และเมื่อกระจกจุลภาคอยู่ในสถานะสวิตช์ปิด (switch off) สามารถวัดค่าแสงที่รับได้ดีที่สุดได้เท่ากับ  $-38.42\ \text{dBm}$  ซึ่งค่าการสูญเสียทางแสงผ่านการสวิตช์ด้วยกระจกจุลภาคระหว่างสถานะสวิตช์เปิดกับสวิตช์ปิดมีค่าต่างกัน  $16.20\ \text{dB}$

#### 7.2 ข้อเสนอแนะ

อุปกรณ์สวิตช์เชิงแสงที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้ยังเกิดปัญหาต่าง ๆ ในขณะที่ทำการวิจัยหลายอย่าง ได้แก่ โครงสร้างของชิ้นงานเกิดการหลุดจากฐานเนื่องจากได้รับพลังงานจากการอาบรังสีมากเกินไป ทำให้ต้องปรับค่าพลังงานสะสมในสารไวแสงที่เกิดจากการฉายรังสีเอกซ์ที่เหมาะสม ซึ่งจะไม่ทำให้ชิ้นฐานหลุดออกจากฐาน ปัญหาต่อมาคือปัญหาในการสร้างหน้ากากกันรังสีเอกซ์ ในกระบวนการชุบ

โลหะเงินด้วยไฟฟ้าของขั้นตอนการสร้างหน้ากากกั้นรังสีเอกซ์นั้น มักจะเกิดการแทรกตัวของโลหะ ด้านล่างสารไวแสงทำให้บดบังลวดลายบริเวณฐานของชิ้นงาน หรือโลหะเกิดการก่อตัวบนแผ่น กราไฟต์อย่างไม่สม่ำเสมอ บางพื้นที่เกิดการก่อตัวขึ้นเร็วกว่าพื้นที่อื่น ๆ จนไปปกคลุมลวดลาย บางส่วนของชิ้นงาน ทำให้ลวดลายเกิดการผิดเพี้ยน ทำการแก้ไขโดยปรับหาค่ากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมที่โลหะจะก่อตัวขึ้นได้อย่างสม่ำเสมอ และไม่ควรรใช้กระแสไฟฟ้าในการชุบโลหะสูงเกินไป เนื่องจากจะเกิดฟองขึ้นบริเวณพื้นผิวของแผ่นกราฟิต์ทำให้บริเวณนั้นไม่มีโลหะมาเกาะ

ปัญหาที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งที่เกิดขึ้นในงานวิจัยนี้คือ การบิดเบี้ยว โกง งอของโครงสร้าง เนื่องจากโครงสร้างของอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงในงานวิจัยนี้เป็นพอลิเมอร์ ข้อดีของพอลิเมอร์คือมี น้ำหนักเบา แต่ข้อเสียคือเปราะบางและเสียรูปได้ง่ายเมื่อได้รับอุณหภูมิที่สูงหรือต่ำเกินไป ซึ่งบ่อยครั้งที่เกิดปัญหานี้ขึ้นระหว่างการทำวิจัย วิธีแก้ไขคือพยายามควบคุมอุณหภูมิในทุกขั้นตอนของการสร้าง โครงสร้างอุปกรณ์สวิตซ์เชิงแสงให้มีความเหมาะสมตลอดเวลา คือพยายามไม่ให้อุณหภูมิมีการเพิ่มขึ้น หรือลดลงเร็วเกินไป เพื่อลดโอกาสที่โครงสร้างชิ้นงานจะเกิดการผิดรูป เสียหาย



โปรแกรมจำลองผลระบบพลวัตของตัวขับเคลื่อนไฟฟ้าสถิตด้วยการคำนวณเชิงวิเคราะห์

close all

clear all

clc

%-----Comb-Drive Actuator-----

w = 50e-6; //ความกว้างของซี่หวี

t = 350e-6; //ความสูงของซี่หวี

n = 12; //จำนวนชุดของสปริง

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

lx = (w\*(t^3))/12; //โมเมนต์ความเฉื่อยของสปริง

K = (48\*G\*J)/(La^2\*(((G\*J\*La)/(E\*lx))+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; //ระยะเคลื่อนที่ของซี่หรี
t = (K*X*g) ./ (N*Eo*Er.*(V.^2)); //ความสูงของซี่หรี
%-----figure-----
figure(1) //กราฟที่ 1
plot(N,V) //แสดงจำนวนซี่หรีกับขนาดแรงดันไฟฟ้า
xlabel('Number of Fingers for Moving Comb, N'); //แสดงชื่อแกน
ylabel('Driving Voltage, V (Volt)'); //แสดงชื่อแกน
figure(2) //กราฟที่ 2
plot(g,V) //แสดงระยะห่างระหว่างซี่หรีกับขนาดแรงดันไฟฟ้า
xlabel('Gap between Comb Fingers, g (um)'); //แสดงชื่อแกน
ylabel('Driving Voltage, V (Volt)'); //แสดงชื่อแกน
figure(3) //กราฟที่ 3
plot(t,V) //แสดงความสูงของซี่หรีกับขนาดแรงดันไฟฟ้า
xlabel('Fingers Thickness for Comb, t (Meter)'); //แสดงชื่อแกน
ylabel('Driving Voltage, V (Volt)'); //แสดงชื่อแกน
Figure(4) //กราฟที่ 4
plot(X,V) //แสดงระยะการเคลื่อนที่ของซี่หรีกับขนาดแรงดันไฟฟ้า
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

```

```

% -----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
lx = (w*(t^3))/12; //โมเมนต์ความเฉื่อยของสปริง
K = (48*G*J)/(La^2*(((G*J*La)/(E*lx))+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 designs with fabrication-----
n = 12; //จำนวนขดของสปริง
N = 128; //จำนวนซี่ของตัวขับเคลื่อน
E = 2e9; //ค่าความยืดหยุ่นของวัสดุ
v = 0.22; //ค่าอัตราส่วนของนิ้วของ
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
lxd = (wd*(td^3))/12; //โมเมนต์ความเฉื่อยของสปริง
Kd = (48*G*Jd)/(Lad^2*(((G*Jd*Lad)/(E*lxd))+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
lxf = (wf*(tf^3))/12; //โมเมนต์ความเฉื่อยของสปริง
Kf = (48*G*Jf)/(Laf^2*(((G*Jf*Laf)/(E*lxf))+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; //จำนวนซี่ของตัวขับเคลื่อน
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
lxf = (wf*(tf^3))/12; //โมเมนต์ความเฉื่อยของสปริง
Kf = (48*G*Jf)/(Laf^2*(((G*Jf*Laf)/(E*lxf))+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

```

## บรรณานุกรม

- พิทยา ตีกล้า. 2552. การพัฒนามอเตอร์จุลภาคแบบไฟฟ้าสถิต. วิทยานิพนธ์ มหาบัณฑิต สาขาวิชาไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 169 น.
- วินัย วันบุรี. 2550. การพัฒนากระบวนการผลิตโครงสร้างจุลภาคโดยวิธีการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอ็กซ์. วิทยานิพนธ์ มหาบัณฑิต สาขาวิชาไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 96 น.
- Steiner, H., Hortschitz, W., Stifter, M., & Keplinger, F. (2014, May). Thermal actuated passive bistable MEMS switch. In Microelectronic Systems Symposium (MESS), 2014 (pp. 1-5). IEEE.
- Plander, I., & Stepanovsky, M. (2017, November). MEMS technology in optical switching. In Informatics, 2017 IEEE 14th International Scientific Conference on (pp. 299-305). IEEE.
- 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 Furuhata, 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.

## ประวัติผู้วิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รังสรรค์ ทองทา สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมไฟฟ้าจากมหาวิทยาลัยขอนแก่น เมื่อปี พ.ศ. 2531 และ MS และ PH.D. จาก Florida Institute of Technology, USA เมื่อปี 1993 และ 1998 ตามลำดับ เริ่มงานในตำแหน่งวิศวกรที่บริษัท Elcom Research เมื่อปี พ.ศ. 2531 และบริษัท การบินไทย จำกัด ในปี พ.ศ. 2532 เมื่อปี พ.ศ. 2533 ได้เริ่มในตำแหน่งอาจารย์ที่ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยขอนแก่น และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีในปี พ.ศ. 2536

