สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การสร้างไมโครฟลูอิดิกสำหรับตัวตรวจวัดทางชีวภาพ

นางสาวกรรณิกา แก้วคง

นายธนพงศ์ ธนะศาล

ปพ
ก1121ก
2550

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 81586
วัน,เดือน,ปี 18 ต.ค. 2551

b 11934921x
i.....

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fabrication of Microfluidic for Biosensor Application

Miss.Kannika Kaewkhong

Mr.Thanapong Thanasarn

A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree of

Bachelor of Science

Department of Applied Physics

Faculty of Science

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Academic Year 2007

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงงานพิเศษเรื่อง การสร้างไมโครฟลูอิดิกสำหรับตัวตรวจวัดทางชีวภาพ

นักศึกษา นางสาวกรรณิกา แก้วคง

นายธนพงศ์ ธนะศาล

ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์

สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.จิติ หนูแก้ว

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร.ศุภนิจ พรธีระภัทร

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม คุณสากล ระหงษ์

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงงานพิเศษฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการตรวจสอบ		ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ	รศ.ดร.วิษณุ เพชรภา	
กรรมการ	ดร.ปิติพร ถนอมงาม	
กรรมการ	อ.เบญจพล ตันสู้	
กรรมการที่ปรึกษา	รศ.ดร.จิติ หนูแก้ว	

.....

(รองศาสตราจารย์วิชาญ เตชิตธีระ)

หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงงานพิเศษเรื่อง การสร้างไมโครฟลูอิดิกสำหรับตัวตรวจวัดทางชีวภาพ
นักศึกษา นางสาวกรรณิกา แก้วคง
นายธนพงศ์ ธนะศาล
ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์ **คณะวิทยาศาสตร์**
สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์
ปีการศึกษา 2550
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.จิติ หนูแก้ว
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร.ศุภนิจ พรธีระภัทร
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม คุณสากล ระหงษ์

บทคัดย่อ

โครงงานพิเศษนี้ เป็นการศึกษาและสร้างอุปกรณ์ทางเดินของของไหลในระดับไมโครเมตร หรือที่เรียกว่าไมโครฟลูอิดิก เพื่อใช้ในการตรวจวิเคราะห์ทางด้านชีวเคมีหรือด้านไบโอเซนเซอร์ ซึ่งมีข้อดีคือ มีขนาดเล็กกะทัดรัด ใช้สารที่ต้องการตรวจวัดในปริมาณน้อยแต่มีความไวในการวัดสูง การสร้างอุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิกอาศัยเทคนิคในการสร้างวงจรไมโครอิเล็กทรอนิกส์บนแผ่นซิลิกอน โดยมีขั้นตอนหลักๆ ได้แก่ การออกแบบ การสร้างลวดลายทางเดินของไหลบนแผ่นซิลิกอนผ่านกระบวนการโฟโตลิโทกราฟฟี ทำให้เกิดลวดลายบนแผ่นซิลิกอนซึ่งจะใช้เป็นแม่พิมพ์ จากนั้นใช้วัสดุโพลิเมอร์ PDMS (Polydimethylsiloxane) ในการลอกลายจากแม่พิมพ์ที่สร้างขึ้น แล้วนำมาทำการประกบติดกับแผ่นแก้วด้วยระบบพลาสมาคลื่นความถี่วิทยุ โดยมีเงื่อนไขกำลังที่เหมาะสมที่สุดคือ 80 วัตต์ ในเวลา 15 วินาที จะได้อุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิกที่สมบูรณ์ เมื่อทดสอบด้วยการป้อนของเหลวเข้าสู่ระบบพบว่า ไม่เกิดการรั่วซึม ไม่เกิดฟองอากาศ และของเหลวสามารถไหลไปสู่เป้าหมายหรือส่วนที่จะกำหนดเป็นส่วนตรวจวัดได้ดี นอกจากนี้อุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิกที่สร้างขึ้นถูกออกแบบให้มีส่วนที่สามารถนำมาประกบร่วมกับไมโครฮีทเตอร์เพื่อใช้เป็นปั๊มขนาดเล็กสำหรับขับเคลื่อนของไหลให้ไหลเข้าสู่ท่อระดับไมโครเมตรนี้ได้โดยไม่ต้องใช้ปั๊มกลภายนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title	Fabrication of Microfluidic for Biosensor Application
Name	Miss.Kanaka Kaewkhong
	Mr.Thanapong Thanasarn
Department	Applied Physics **Faculty of Science**
Program	Applied Physics
Academic Year	2007
Special Project Advisor	Assoc.Prof. Dr. Jiti Nukaew
Special Project co-advisor	Dr. Supanit Porntheeraphat
Special Project co-advisor	Mr. Sakon Rahong

ABSTRACT

This special project is a study and fabrication of microfluidic device for bio-chemical analysis or biosensor applications. This device has advantages in small size, use a little sample, high sensitivity detection and low cost fabrication. The microfluidic fabrication bases on micro-electronic circuit fabrication technique including micro-channel patterning on Si-wafer via photolithography process that is for molding fabrication. The polydimethylsiloxane or PDMS was used as relief material from Si-molding. The RF plasma cleaner system at 80 watts and 15 second was used for surface modification of PDMS and glass before bonding together and then the complete microfluidic device was achieved with no liquid diffusion or leak, no air bubble and good flow to detection area. Otherwise, this microfluidic device can be included with microheater used as micropump for matter transportation control in microchannel without the external pump.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานพิเศษนี้สำเร็จลุลวงไปได้ด้วยดี เนื่องจากความกรุณาของบุคคลหลายท่านที่ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำในเรื่องต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่อการจัดทำโครงงานพิเศษฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ บิดามารดา และสมาชิกในครอบครัวของทางคณะผู้จัดทำที่มีส่วนในการให้กำลังใจและให้การสนับสนุนเป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.จิติ หนูแก้ว และอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร.ศุภนิจ พรธีระภัทร คุณสากล ระหงษ์ ที่ให้ความรู้ คำปรึกษา ข้อแนะนำต่างๆ ตลอดจนแก้ไขปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นในการทำโครงงานพิเศษนี้

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.วิษณุ เพชรภา ดร.ปิติพร ถนอมงาม และอาจารย์เบญจพล ตันสู้ กรรมการสอบโครงงานพิเศษที่ให้คำชี้แนะและตรวจแก้ไข จนทำให้โครงงานพิเศษฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความเรียบร้อย

ขอขอบพระคุณ ทีมนักวิจัย สำนักวิจัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าลาดกระบัง

ขอขอบพระคุณ ทีมนักวิจัยของศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ Thai Microelectronics Center (TMEC)

ขอขอบคุณ เพื่อนๆ ฟิสิกส์-โซลิด รุ่นที่ 23 ทุกคน

สำหรับคุณงามความดีที่เกิดจากโครงงานพิเศษฉบับนี้ คณะผู้จัดทำขอมอบให้กับบิดามารดารวมไปถึงผู้มีพระคุณ และครูบาอาจารย์ทุกท่านที่ให้การสั่งสอนและให้ความรู้เสมอมา

นางสาวกรรณิกา แก้วคง

นายธนพงศ์ ธนะศาล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูป	ฉ
สารบัญตาราง	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของโครงงาน	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตการวิจัย	1
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	4
แนวคิดและทฤษฎี	4
2.1 ไบโอเซนเซอร์	4
2.2 ระบบของไหลจุลภาค (Microfluidic)	6
2.2.1 หลักการทางฟิสิกส์ของระบบของไหลจุลภาค	7
2.2.2 วัสดุที่ใช้ในระบบของไหลจุลภาค	8
2.3 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟฟี	12
2.4 RF Plasma Cleaner	21
2.4.1 หลักการทำงานของ RF Plasma Cleaner	21
2.4.2 หลักการของการประกบติด (Bonding) โดยใช้ RF Plasma Cleaner	22
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงาน	23
3.1 การออกแบบระบบไมโครฟลูอิดิก (Design Microfluidic system)	24
3.2 ขั้นตอนการสร้างแม่พิมพ์ (Mold Fabrication)	25
3.2.1 ขั้นตอนการทำความสะอาดแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ (Silicon Cleaning Process)	25
3.2.2 ขั้นตอนการเคลือบน้ำยาไวแสง (Photoresist Spinning Process)	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.3 ขั้นตอนการฉายแสง (UV Exposure)	26
3.2.4 ขั้นตอนการขึ้นลวดลายของน้ำยาไวแสง (Photoresis Development)	26
3.3 ขั้นตอนการหล่อขึ้นรูปโพลิเมอร์ PDMS (PDMS Fabrication)	28
3.4 ขั้นตอนการประกบติด (Bonding)	30
3.4.1 ขั้นตอนการทำความสะอาดฐานรองรับกระจกสไลด์	30
3.4.2 ขั้นตอนการประกบติด PDMS ลงบนฐานรองกระจกสไลด์	30
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	32
4.1 ระบบไมโครฟลูอิดิกที่ออกแบบ	32
4.2 การสร้างแม่พิมพ์ (Mold Fabrication)	33
4.3 การหล่อขึ้นรูปโพลิเมอร์ PDMS (PDMS Fabrication)	36
4.4 ขั้นตอนการประกบติด (Bonding)	37
4.4.1 การทดสอบการประกบติด(Bonding) ของ PDMS	37
4.4.2 ผลที่ได้จากการประกบติด PDMS ลงบนกระจกสไลด์	44
4.5 การทดสอบไมโครฟลูอิดิก	45
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	46
เอกสารอ้างอิง	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงาน	2
2.1 โครงสร้างและหลักการทำงานของไบโอเซนเซอร์	5
2.2 ห้องปฏิบัติการบนชิป (Lab-on-a-Chip) ที่สร้างด้วยเทคโนโลยีระบบของไหลจุลภาค	6
2.3 ชิปที่สร้างขึ้นด้วยแม่แบบที่ทำจาก PDMS โพลิเมอร์	9
2.4 ลวดลายที่ได้จากน้ำยาไวแสงชนิดลบ และน้ำยาไวแสงชนิดบวก	15
2.5 การเคลือบน้ำยาไวแสงบนแผ่นเวเฟอร์แบบสปินเนอร์	16
(ก) การหยดน้ำยาไวแสงบนแผ่นเวเฟอร์	
(ข) การหมุนแผ่นเวเฟอร์บนแท่นหมุนเพื่อเคลือบน้ำยาไวแสง	
2.6 แสดงแผนผังอุปกรณ์เครื่องปรับซ้อนมาส์ก แบบถ่ายภาพลวดลายแบบสัมผัส	18
2.7 ภาพลวดลายของเครื่องหมายปรับซ้อนมาส์ก	18
(ก) ภาพลวดลายสี่เหลี่ยม และกากบาทบนโฟโตมาส์ก	
(ข) ภาพลวดลายบนแผ่นเวเฟอร์	
(ค) ภาพลวดลายที่รวมกันขณะทำการปรับซ้อนมาส์กแล้ว	
2.8 แสดงการฉายแสงผ่านโฟโตมาส์กลงบนแผ่นเวเฟอร์	20
2.9 กระบวนการสร้างพลาสมาในหลอดสุญญากาศ	21
2.10 การทำความสะอาดผิวหน้า PDMS ด้วยออกซิเจนพลาสมา (O_2Plasma cleaner)	22
3.1 ซอฟแวร์ที่ใช้ในการออกแบบ (L-edit)	24
3.2 แผนผังขั้นตอนการสร้างแม่พิมพ์สำหรับการสร้างไมโครฟลูอิดิก	27
3.3 แผนผังขั้นตอนการหล่อขึ้นรูปโพลิเมอร์ PDMS สำหรับการสร้างท่อไมโครฟลูอิดิก	29
3.4 แผนผังขั้นตอนติดประกบโพลิเมอร์ PDMS ลงบนแผ่นฐานรองกระจกสไลด์	31
4.1 ไมโครฟลูอิดิกที่ได้ออกแบบไว้	33
4.2 แผ่นซิลิกอนเวฟอร์ที่ผ่านการทำความสะอาดแล้ว	33
4.3 แผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ที่มีน้ำยาไวแสง SU-8 เคลือบโดยวางทับด้วย Negative film และ Quartz Plate	34
4.4 แผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ที่ผ่านกระบวนการฉายแสงแล้ว	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 แผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ที่ผ่านกระบวนการ Develop เพื่อล้างน้ำยาไวแสงในส่วนที่ไม่ต้องการออก	35
4.6 ตรวจสอบความสมบูรณ์ของลวดลายด้วยกล้อง Microscope	35
4.7 แม่พิมพ์ที่ใช้ในการหล่อขึ้นรูป PDMS	36
4.8 ทำให้ PDMS แข็งตัวด้วยการอบบน Hot Plate	36
4.9 PDMS ที่ผ่านการขึ้นรูปเป็นท่อไมโครฟลูอิดิก	37
4.10 PDMS และกระจกที่ใช้ในการทดสอบความเป็นไฮโดรฟิลิก	38
4.11 PDMS ที่ทำการทดสอบความเป็นไฮโดรฟิลิก	38
4.12 ประกบติด PDMS ที่เป็นส่วนของไมโครฟลูอิดิกลงบนกระจกสไลด์	44
4.13 ไมโครฟลูอิดิกที่เสร็จสมบูรณ์	44
4.14 ทดสอบด้วยการป้อนของเหลวเข้าสู่ระบบไมโครฟลูอิดิก	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 แสดงการทดสอบการประกบติดของ PDMS โดยกำหนดเวลา 5 วินาที	39
4.2 แสดงการทดสอบการประกบติดของ PDMS ที่ 80 วัตต์	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงงานพิเศษ

การตรวจวิเคราะห์ทางชีวภาพในปัจจุบันนี้ต้องการเครื่องมือที่สามารถตรวจวิเคราะห์เบื้องต้นได้อย่างรวดเร็ว พกพาง่าย และมีขนาดเล็กจึงทำให้มีการวิจัยและพัฒนาเครื่องมือวิเคราะห์ที่มีขนาดย่อส่วนขึ้น ไมโครฟลูอิดิก คือ อุปกรณ์ส่วนหนึ่งของไบโอเซนเซอร์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ประกอบด้วยท่อมีขนาดระดับไมโครเมตรที่สามารถควบคุมปริมาตรของเหลวในระดับไมโครลิตรหรือนาโนลิตร ท่อดังกล่าวมีขนาดตั้งแต่มิลลิเมตรจนถึงไมโครเมตร ระบบไมโครฟลูอิดิกจึงเป็นการย่อส่วนของระบบของไหล โดยมีเทคนิคในการจัดการกับของเหลวปริมาณน้อยเป็นกุญแจสำคัญ ระบบของไมโครฟลูอิดิกไม่เพียงแค่ย่อส่วนอุปกรณ์ต่างๆให้เล็กลงเท่านั้น แต่ต้องการการออกแบบที่แตกต่างจากระบบขนาดใหญ่เพราะเมื่อปริมาตรของไหลมีขนาดเล็กในระดับไมโครลิตรทำให้อุปกรณ์มีคุณสมบัติที่แตกต่างออกไปซึ่งเรียกว่าผลจากการย่อส่วน (Scaling effect)

ขบวนการสร้างส่วนต่างๆ ในระบบของไมโครฟลูอิดิกนั้นอาศัยกระบวนพื้นฐานทางด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์ และที่นิยมมากในปัจจุบันคือกระบวนการสร้างด้วยวัสดุประเภทโพลิเมอร์โดยอาศัยการหล่อแบบขึ้นรูป (Molding) เพื่อให้ได้ต้นแบบที่มีราคาถูกและง่ายในการสร้าง

ระบบไมโครฟลูอิดิกสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างกว้างขวาง เช่น การสร้างห้องปฏิบัติการบนชิป, ชิปสำหรับการตรวจ DNA, ชิปสำหรับการตรวจโปรตีน เป็นต้น เพื่อใช้สำหรับการตรวจวินิจฉัยโรคชนิดต่างๆ การคัดกรองยาหรือการตรวจวัดสภาพแวดล้อม

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาหลักการทำงานของระบบไมโครฟลูอิดิกที่จะใช้ในไบโอเซนเซอร์

1.2.2 เพื่อศึกษาและออกแบบระบบไมโครฟลูอิดิกโดยใช้ซอฟแวร์ในการออกแบบ

1.2.3 เพื่อสร้างต้นแบบระบบไมโครฟลูอิดิก

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 ออกแบบระบบไมโครฟลูอิดิก

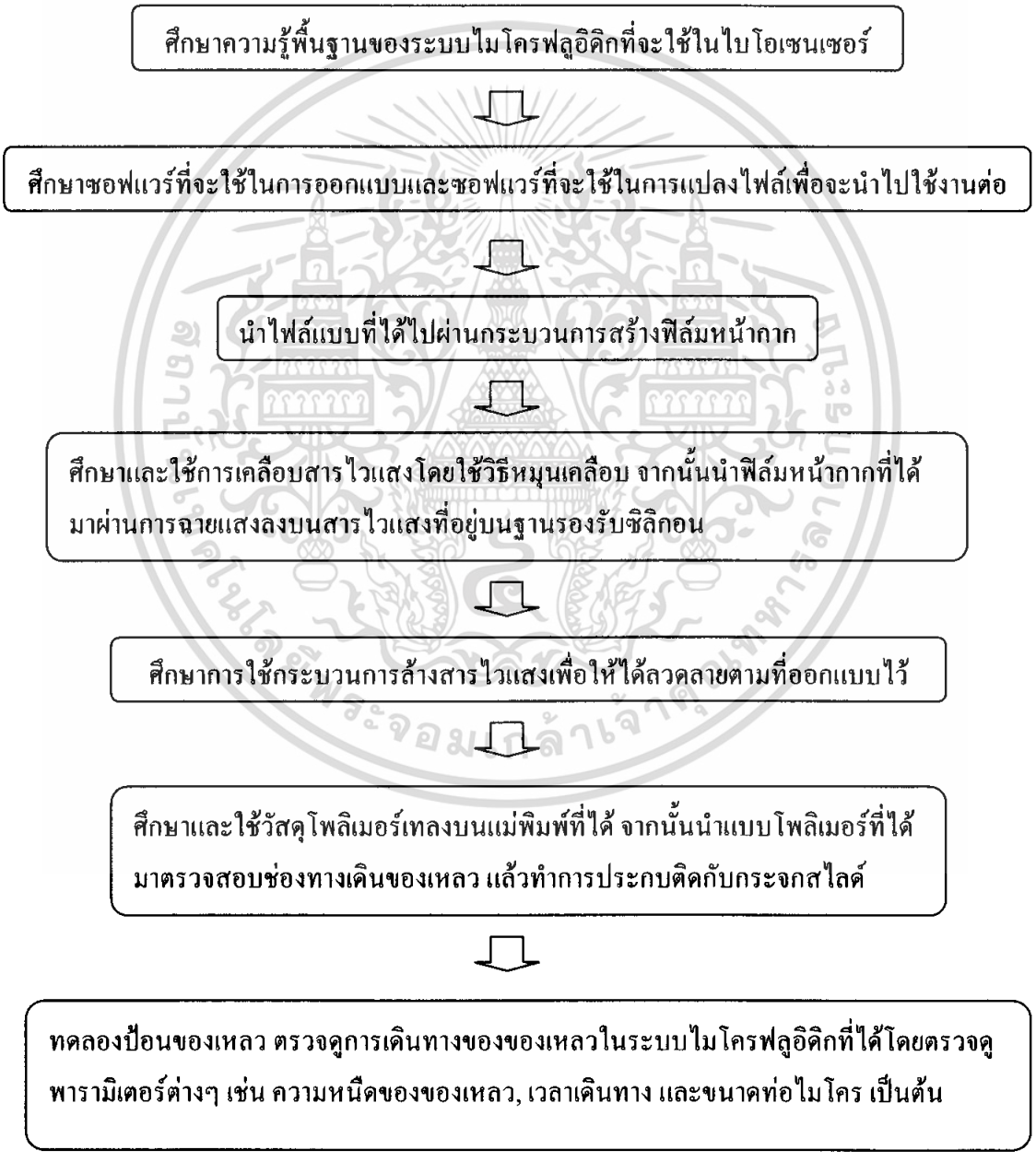
1.3.2 สร้างต้นแบบระบบไมโครฟลูอิดิก โดยผ่านกระบวนการในการสร้างต้นแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3.3 ใช้ต้นแบบสร้างระบบไมโครฟลูอิดิกแบบโพลิเมอร์โดยผ่านกระบวนการสร้างแบบโพลิ-เมอร์

1.3.4 นำระบบไมโครฟลูอิดิกโพลิเมอร์ทดลองป้อนของเหลวเพื่อตรวจสอบเส้นทางเดินของเหลว

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน



รูปที่ 1.1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 มีความรู้ความสามารถในเรื่องระบบไมโครฟลูอิดิกทั้งการออกแบบและสร้าง

1.5.2 มีความรู้ในเครื่องมือต่างๆ ที่ใช้ในกระบวนการสร้าง Microchannel

1.5.3 มีความรู้และความเข้าใจในเรื่องไบโอเซนเซอร์ที่ใช้ระบบไมโครฟลูอิดิกในการนำพาสารตัวอย่างเพื่อทำการตรวจวัด

1.5.4 สามารถใช้ความรู้ทางด้านฟิสิกส์ เคมี ชีววิทยา มาร่วมกันสร้างชิ้นงานอันจะเป็นพื้นฐานเพื่อประโยชน์ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

โครงงานพิเศษนี้เป็นการพัฒนาและออกแบบเพื่อศึกษาหลักการทำงานของระบบไมโครฟลูอิดิกที่จะใช้ในไบโอเซนเซอร์ ซึ่งมีข้อดีคือ มีขนาดเล็กกะทัดรัด ใช้สารที่ทำการตรวจวัดในปริมาณน้อย ทั้งนี้ก่อนที่จะทำการสร้างอุปกรณ์ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาและทบทวนทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการทดลองทั้งทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสร้างไมโครฟลูอิดิก เพื่อนำมาใช้เป็นแนวทางในการออกแบบระบบที่จะพัฒนาขึ้น การศึกษานี้ได้แบ่งการทบทวนทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องออกเป็นส่วนๆ คือ การศึกษาแนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวกับ หลักการพื้นฐานของอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างไมโครฟลูอิดิก

แนวคิดและทฤษฎี

สำหรับไบโอเซนเซอร์ที่ใช้ระบบไมโครฟลูอิดิกนั้นจะเป็นการนำพาสารตัวอย่างเพื่อทำการตรวจวัดจากจุดเริ่มต้นที่ทำการฉีดสารเข้าไปจนถึงจุดที่สารไหลออกมาแล้วแต่ว่าจะทำการวัดแบบใด ซึ่งในการวัดถ้าต้องการให้เกิดความเร็วในการวัด นอกจากการฉีดสารไปแบบปกติแล้วอาจทำการออกแบบไมโครปั๊มเพื่อช่วยส่งให้สารสามารถไหลผ่านไปในท่อของระบบไมโครฟลูอิดิกที่ทำการสร้างไว้ได้เร็วขึ้น หรือสามารถให้ความร้อนกับสารที่ทำการตรวจวัดได้โดยการติดไมโครฮีทเตอร์ ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงคุณสมบัติพื้นฐานในการสร้างระบบไมโครฟลูอิดิกด้วยวิธีต่างๆ เช่น กระบวนการโฟโตลิโทกราฟฟีและอื่นๆ ดังนี้

2.1 ไบโอเซ็นเซอร์

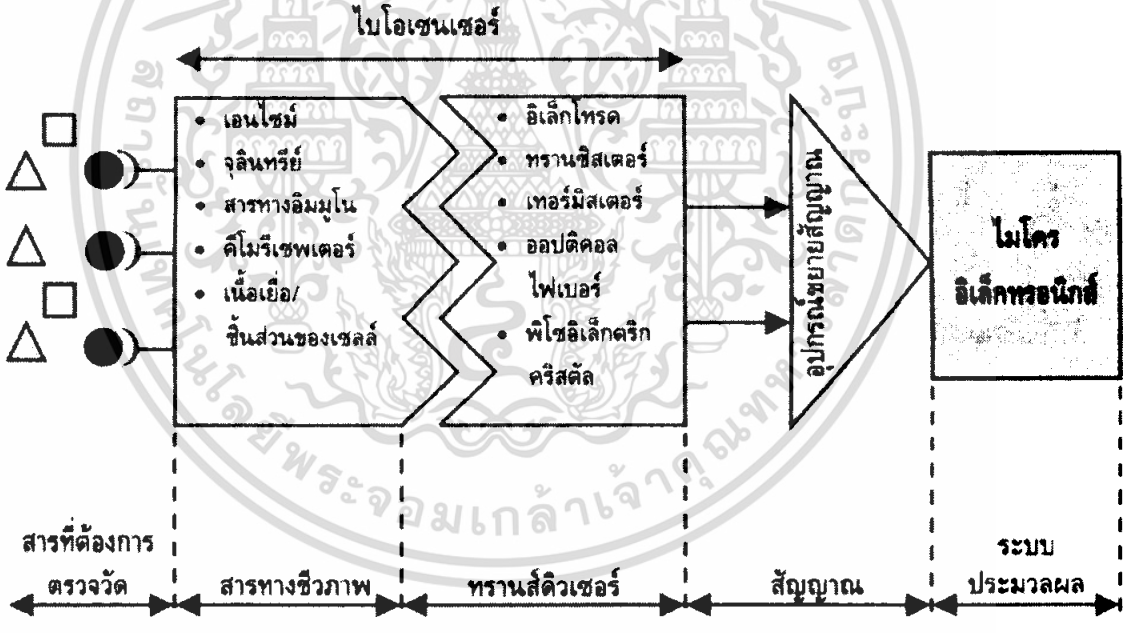
ไบโอเซนเซอร์ หมายถึง อุปกรณ์หรือเครื่องมือสำหรับการตรวจวิเคราะห์ทางชีวภาพ ประกอบด้วย 2 ส่วนที่สำคัญคือ ส่วนของสารชีวภาพ (Biological substance) ทำหน้าที่เป็นตัวรับหรือรีเซ็บเตอร์ (Receptor) และส่วนที่สามารถแปลงสัญญาณทางไฟฟ้า เรียกว่า ทรานส์ดิวเซอร์ (Transducers)

ส่วนของสารชีวภาพ หรือรีเซ็บเตอร์ ทำหน้าที่ทำปฏิกิริยากับสารเป้าหมายในการตรวจวัดซึ่งมีปะปนอยู่ในสารตัวอย่าง โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในขั้นตอนนี้ อาจเป็นปฏิกิริยาทางชีวเคมี หรือปฏิกิริยาทางชีวฟิสิกส์ก็ได้ ซึ่งปฏิกิริยานี้จะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีหรือฟิสิกส์ที่สามารถตรวจวัดชนิดและปริมาณได้ด้วยทรานส์ดิวเซอร์ที่อยู่ในระบบ สารทางชีวภาพที่สามารถนำมาใช้งานสามารถแบ่งออกเป็นสองประเภท ได้แก่ สารชีวภาพที่ทำหน้าที่กระตุ้น เช่น เอนไซม์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุลินทรีย์ เป็นต้นและสารชีวภาพที่ทำหน้าที่จับคู่อย่างเฉพาะเจาะจง เช่น แอนติเจน, แอนติบอดี้, DNA เป็นต้น โดยสารทางชีวภาพเหล่านี้มีความจำเพาะสูงกับสารที่เป็นเป้าหมาย เช่น เอนไซม์ชนิดหนึ่งมีความจำเพาะสูงในการทำปฏิกิริยากับสารตั้งต้นจำเพาะของเอนไซม์นั้น ส่วนแอนติบอดี้ชนิดหนึ่งๆ ก็จะเลือกจับกับแอนติเจนที่มีความจำเพาะต่อกับมันเท่านั้น คล้ายกับลูกกุญแจจะใช้ได้กับแม่กุญแจที่ดอกเหมือนกันเท่านั้น

ส่วนของทรานส์ดิวเซอร์จะแปลงสัญญาณทางฟิสิกส์, เคมีที่ตรวจวัดได้ เช่น ปฏิกิริยาทางไฟฟ้า, เคมี, แสง, อุณหภูมิ, น้ำหนัก หรือคุณสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกเปลี่ยนไปเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าโดยเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณสารที่ต้องการวัด สัญญาณดังกล่าวนี้สามารถถูกดำเนินการต่อไปโดยเครื่องมือทางอิเล็กทรอนิกส์ เช่น นำไปขยาย, เก็บ และแสดงผล ทำให้สามารถบ่งบอกชนิดและปริมาณของสารที่ตรวจวัดได้อย่างแม่นยำ

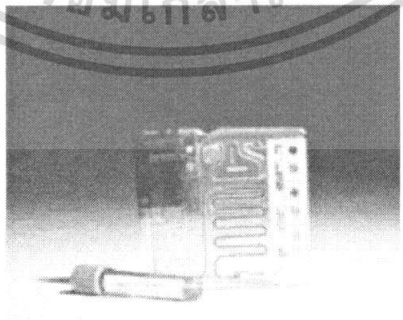


รูปที่ 2.1 โครงสร้างและหลักการทำงานของไบโอเซนเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ระบบของไหลจุลภาค (Microfluidic System)

ทิศทางการพัฒนาในอนาคตอันใกล้นี้ คือเรื่องการตรวจวิเคราะห์ทางการแพทย์ โดยการที่เราสามารถตรวจวิเคราะห์เบื้องต้นนอกห้องปฏิบัติการ ที่เรียกว่า Point of care Diagnostics ด้วยเครื่องมือที่รวดเร็ว พกพาง่าย และมีขนาดเล็ก ดังนั้นแนวโน้มการวิจัยและพัฒนาเครื่องมือวิเคราะห์ที่มีขนาดย่อส่วนจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจของนักวิจัยทั่วโลก เทคโนโลยีหนึ่งที่ได้รับความสนใจและสามารถนำมาใช้สร้างเครื่องมือดังกล่าวก็ คือ เทคโนโลยีระบบเครื่องไฟฟ้าจุลภาค หรือ Micro-Electronic-Mechanical-System (MEMS) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีในการสร้างโครงสร้างที่มีขนาดระหว่าง 100 นาโนเมตร ไปถึง 1000 ไมโครเมตร โดยที่นำเทคนิคในการสร้างวงจรรวมทางอิเล็กทรอนิกส์ (Integrated Circuit หรือเรียกย่อว่า IC) มาใช้ โดยเทคโนโลยีดังกล่าวสร้างอุปกรณ์ที่ประกอบด้วยท่อมีขนาดระดับไมโครเมตรที่สามารถเก็บของเหลวปริมาตรน้อยมากในระดับไมโครลิตรหรือนาโนลิตร เรียกว่าระบบของไหลจุลภาคหรือไมโครฟลูอิดิก (Microfluidics) ท่อดังกล่าวมีขนาดตั้งแต่มิลลิเมตรไปจนถึงไมโครเมตร ระบบไมโครฟลูอิดิกจึงเป็นการย่อส่วนของระบบของไหลตามท่อโดยมีเทคนิคในการจัดการกับของเหลวปริมาณน้อยมากเป็นกุญแจสำคัญ ระบบของไหลจุลภาคไม่เป็นเพียงแค่การย่อส่วนอุปกรณ์ต่าง ๆ ให้เล็กลงเท่านั้นแต่ต้องการการออกแบบที่แตกต่างออกไป เราเรียกว่า ผลจากการย่อส่วน (Scaling Effect) ในโลกของไมโครฟลูอิดิกของเหลวจะไหลในลักษณะเป็นชั้น (Laminar Flow) ไม่ผสมกัน แรงตึงผิว (Surface Tension) ของของเหลวจะมีผลเป็นอย่างมาก ดังนั้นปรากฏการณ์ที่ไม่มีในระบบปกติจะแสดงให้เห็น ในบางครั้งจึงมีการกำหนดความหมายของระบบไมโครฟลูอิดิกให้กว้างครอบคลุมปรากฏการณ์ดังกล่าวจึงไม่เป็นเพียงแต่ระบบย่อส่วนเท่านั้น



รูป 2.2 ห้องปฏิบัติการบนชิป (Lab-on-a-Chip) ที่สร้างด้วยเทคโนโลยีระบบของไหลจุลภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 หลักการทางฟิสิกส์ของระบบของไหลจุลภาค

หลักการทางฟิสิกส์ของระบบของไหลจุลภาคนั้นมีเหมือนกับระบบของไหลปกติเพียงแต่ปรากฏการณ์ที่มีผลนั้นแตกต่างกันเนื่องจากการย่อส่วน (Surface Tension) ที่ชัดเจนได้แก่ การกระจายความร้อน (Thermal Diffusion) ในระบบของไหลจุลภาคเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ลักษณะการไหลก็จะเป็นแบบชั้นไม่ผสมกัน (Laminar Flow) มีผลมากจนเกิดปรากฏการณ์การไหลด้วยแรงตึงผิวไปตามท่อ (Capillary Phenomena) และการเกิดชั้นคู่ของประจุที่ผิวผนัง (Electric Double Layer หรือ EDL) เป็นต้น ข้อแตกต่างของระบบของไหลจุลภาคนี้เองทำให้เราสามารถสร้างอุปกรณ์ที่ไม่เคยมีมาก่อน

ในท่อระดับไมโครเมตรนั้น ของเหลวจะไหลแบบชั้นเนื่องจากค่า Reynolds Number ซึ่งเท่ากับอัตราส่วนระหว่างแรงเฉื่อย (Inertial Fore) กับแรงหนืด (Viscosity) ของของไหลนั้นต่ำกว่า 1500 – 2000 ทำให้ลักษณะการไหลไม่เกิดการกวน (Turbulence) การเกิดชั้นคู่ของประจุ (EDL) นั้นทำให้การไหลของของเหลวในท่อเป็นแบบ Electrokinetic เนื่องจากพื้นผิวของของแข็งมักจะเกิดประจุเมื่อมีการสัมผัสกับสารอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) เช่น น้ำ เป็นต้น ประจุที่เกิดขึ้นที่ผิวมีผลกับสนามไฟฟ้าที่คอยดึงประจุขั้วตรงข้ามกับมันและผลักประจุที่มีขั้วเดียวกับมัน ดังนั้นประจุที่อยู่ใกล้กับผิวจึงเกิดเป็นชั้นที่มีขั้วตรงกันข้ามกัน จึงเรียกว่าชั้นคู่ประจุ

การย่อส่วนไม่เพียงแต่ลดขนาดของท่อเท่านั้นแต่ยังมีอุปสรรคที่ท้าทายรอการแก้ได้แก่ ปัญหาความไม่บริสุทธิ์ของสาร (Impurities) และ ปัญหาเกี่ยวกับฟองอากาศ (Gas Bubble) โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเรานำระบบของไหลจุลภาคไปใช้เป็นเครื่องมือภาคสนาม ต้องมีการนำของเหลวต่างๆ เข้าและออกจากระบบ การออกแบบระบบเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวจึงมีความจำเป็นต้องมีเทคนิคการกรองเพื่อแก้ปัญหาเพราะแม้แต่อนุภาคขนาดปกติและฟองอากาศเพียงฟองเดียวอาจทำให้ระบบทั้งระบบไม่ทำงานตามที่ต้องการ

ปัญหาท้าทายอีกอย่างหนึ่งคือ การลดปริมาตรของสารตัวอย่างซึ่งเป็นผลดีในแง่ของการลดสารเคมีในการทำปฏิกริยา (Reagent) แต่หมายถึงการลดลงของสัญญาณการตรวจจับอีกด้วย ดังนั้นจึงจำเป็นที่ต้องมีการย้อมสี, การติดฉลาก (Labeling), การตรวจวัดที่มีประสิทธิภาพ หรือมีเทคนิคการเตรียมความเข้มข้นของสาร อย่างไรก็ตามในบางกรณีที่มีความเข้มข้นของโมเลกุลเป้าหมายในสารตัวอย่างไม่เพียงพอเมื่อปริมาตรลดลง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีเทคนิคการแยก (Separation) เพื่อที่จะสามารถใช้สารตัวอย่างได้ทั้งหมด

การระเหยเป็นไอ (Liquid Evaporation) จะเกิดขึ้นได้ง่ายเมื่อปริมาตรของของเหลวลดลงเนื่องจากอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรเพิ่มขึ้นอย่างมหาศาล ดังนั้นจึงต้องมีการผนึกท่อและหลุมรับสารให้ดี แต่บางครั้งก็สามารถใช้ประโยชน์ในขั้นตอนการเตรียมความเข้มข้นของสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 วัสดุที่ใช้ในระบบของไหลจุลภาค

ระบบของไหลจุลภาคสามารถสร้างขึ้นด้วยเทคนิคเดียวกันกับการสร้างวงจรรวมไอซี ดังนั้นซิลิกอน (Silicon) จึงเป็นวัสดุแรกๆ ที่มีการนำมาใช้ แต่ต้องมีการศึกษาเรื่องปฏิสัมพันธ์ของพื้นผิว (Surface Interaction) เป็นสำคัญ อย่างไรก็ดีในปัจจุบันวัสดุประเภทแก้วและโพลิเมอร์ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางแทนที่ซิลิกอนเนื่องจากราคาที่ถูกกว่า แนวโน้มการใช้โพลิเมอร์มาทดแทนแก้วซึ่งมีคุณสมบัติทางแสงที่ดีกว่าก็กำลังเป็นที่นิยมนำมาใช้ได้แก่ PMMA (Polymethylmethacylate) หรือที่เรียกว่า Plexiglas หรือ Perspex และ Acrylic, PC (Polycarbonate), PSU (Polyclone), PP (Polypropylene) และ PDMS (Polydimethysiloxance) ปกติแล้ว PMMA PC และ PSU เป็นวัสดุที่ใช้ในขบวนการสร้างแบบ โครงสร้างที่มีความหนามากเป็นพิเศษ (LIGA Process) PDMS เป็น Elastomer ชนิดหนึ่งที่เหมาะสำหรับการสร้างแบบหล่อรูปถึงแม้ว่าจะมีปัญหาเกี่ยวกับการหดตัว วัสดุอื่นๆ ที่ใช้ในระบบของไหลจุลภาคได้แก่ โลหะ เช่น ทองคำ เงิน แพลททินัม ฯลฯ นำมาใช้ในการสร้างขั้วไฟฟ้าหรือเป็นองค์ประกอบของส่วนตรวจวัด วัสดุประเภท Active Material สามารถนำมาใช้สร้างแอกทิวเอเตอร์ต่างๆ เช่น ไมโครปั๊มหรือไมโครวาล์วก็สามารถสร้างขึ้นด้วยวัสดุประเภทเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) ซึ่งจะเกิดการเปลี่ยนแปลงแบบยืดหดเมื่อให้กระแสไฟฟ้าแก่วัสดุ วัสดุอีกวัสดุหนึ่งที่นำมาใช้ในการสร้างโครงสร้างที่เคลื่อนที่ได้ เช่น Diaphragm ของไมโครปั๊มหรือไมโครวาล์ว เรียกว่า Shape Memory Alloy หรือ SMA ซึ่งเป็นวัสดุที่สามารถจดจำรูปร่างเดิมของมัน เมื่อให้ความร้อนโครงสร้างผลึกจะเปลี่ยนแปลงไป เกิดการเปลี่ยนรูปร่าง แต่เมื่ออุณหภูมิลดลง มันจะกลับสู่สภาพรูปร่างเดิมอีกครั้ง

2.2.2.1 การสร้างระบบของไหลจุลภาค

ขบวนการสร้างส่วนต่างๆ ในระบบของไหลจุลภาคนั้นอาศัยเทคนิคในการสร้างวงจรอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งใช้ซิลิกอนหลัก เรียกว่า Silicon Micro fabrication โดยมีขั้นตอนการสร้างลวดลายด้วยการฉายแสง (Photolithography) เป็นขั้นตอนที่สำคัญที่ทำให้เกิดลวดลายตามที่เราออกแบบเอาไว้ และที่นิยมมากในปัจจุบันคือขบวนการสร้างด้วยวัสดุประเภทโพลิเมอร์ที่ต้องอาศัยการหล่อแบบขึ้นรูป (Molding) ทำให้ได้ต้นแบบที่มีราคาถูกกว่าและง่ายกว่าในการสร้าง

ขบวนการสร้างอีกแบบที่ใช้ในขบวนการสร้างโครงสร้างที่มีความหนาและมีความสูงมาก เรียกว่า LIGA ที่มาจากภาษาเยอรมันที่แปลว่า Lithography Electroplating และ Molding อาศัยการใช้แสงที่มีกำลังสูง เช่น รังสีเอ็กซ์ มาสร้างต้นแบบที่มีลวดลายและมีผนังโครงสร้างที่เรียบและตั้งฉากกับแผ่นฐานรอง หลังจากนั้นจึงนำแม่แบบนี้ไปหล่อขึ้นรูปด้วยการเคลือบด้วยไฟฟ้า แล้วจึงถอดแบบนำไปใช้เป็นแม่แบบในการหล่อขึ้นรูปต่อไป การสร้างร่องที่มีผนังที่เรียบและตั้งฉากนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถสร้างขึ้นด้วยขบวนการอีกแบบหนึ่งที่เรียกว่า การกัดแบบลึก (Deep Relative Ion Etching หรือ DRIE) อาศัยการกัดด้วยการประทะของประจุและทำปฏิกริยาเคมีบริเวณผิว นอกจากนี้ยังมีขบวนการสร้างเชิงปริมาณ (Mass Production) โดยใช้การฉีดขึ้นรูปแบบละเอียด (Microinjection Molding) ซึ่งอาศัยการฉีดพลาสติกที่หลอมเหลวเข้าไปในแม่แบบประกบด้วยแรงดันสูง หลังจากนั้นจึงทำให้เย็นลงและแข็งตัว จึงถอดออกจากแบบและประกบเป็นชิปที่สมบรูณ์ และเทคนิคกระบวนการที่นิยมมากที่สุดในปัจจุบันคือ ขบวนการ Soft Lithography เป็นขบวนการหล่อขึ้นรูปด้วย PDMS โพลิเมอร์บนแม่แบบ (Master) ที่ทำจากซิลิกอนเวเฟอร์ หรือการกำหนดลวดลายด้วยการพิมพ์ (Stamping) ด้วยแม่แบบที่ทำจาก PDMS โพลิเมอร์ ขบวนการ Soft Lithography มีหลายเทคนิคคือ การหล่อขึ้นรูปแบบเท, การหล่อขึ้นรูปแบบใช้แรงดึงดูดตามท่อ (Capillary Micro-molding), การถ่ายลวดลายแบบพิมพ์สัมผัส (Micro-contact Printing) เป็นต้น

รูปที่ 2.3 ชิปที่สร้างขึ้นด้วยแม่แบบที่ทำจาก PDMS โพลิเมอร์

2.2.2.2 ส่วนประกอบในระบบของไหลจุลภาค

ในระบบจุลภาคหนึ่งๆ อาจจะประกอบด้วยท่อ หัวฉีด ปั๊ม ช่อง ตัวผสม ส่วนกรอง วาล์ว เว็นเซอร์ ฯลฯ การสร้างชิปของระบบของไหลจุลภาคหนึ่งๆ ต้องอาศัยความรู้อย่างลึกซึ้งเรื่องของผลการย่อส่วน วิทยาศาสตร์เกี่ยวกับพื้นผิว คุณสมบัติของวัสดุ เป็นต้น เพื่อให้ระบบสามารถทำงานได้ตามต้องการและถูกต้อง ส่วนประกอบที่สำคัญที่สุดในระบบของไหลจุลภาคได้แก่เครือข่ายของท่อขนาดเล็กซึ่งทำหน้าที่เชื่อมโยงส่วนต่างๆ ในระบบ ปกติจะเป็นท่อปิดที่มีขนาดตั้งแต่ไมโครเมตรจนกระทั่งขนาดนาโนเมตร ขึ้นอยู่กับการใช้งาน เช่น ในระบบที่มีการปั๊มแบบสนามไฟฟ้า (Electrokinetic Pumping) จะต้องการท่อที่มีความแคบมากกว่า

- ฟิลเตอร์หรือตัวกรอง (Filter) เป็นส่วนสำคัญในช่วงของระบบที่มีการนำของไหลเข้าสู่ระบบ มีหลายเทคนิคที่นำมาใช้ เช่น การสร้างรูพรุน (Sieve) หรือการสร้างช่องด้วยเสา (Poles) เพื่อป้องกันอนุภาคที่มีขนาดใหญ่หรือช่องว่างระหว่างเสาไหลผ่านไปได้ หรือการเปลี่ยนพฤติกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การไหลจากแบบชั้น (Laminar Flow) ไปเป็นแบบกวนวน (Turbulent Flow) ต้องอาศัยตัวขวาง (Obstruction) การไหลเพื่อเกิดการกวนผสมระหว่างการไหล

● ไมโครวาล์ว (Micro-valve) เป็นอุปกรณ์ที่ช่วยควบคุมการไหลในท่อด้วยการปิดเปิดประตูกั้น แบ่งออกเป็นสองชนิดได้แก่ ชนิด Passive และชนิด Active ไมโครวาล์วชนิด Passive นั้นอาศัยความดันที่แตกต่างระหว่างด้านทั้งสองของวาล์วเพื่อควบคุมการปิดเปิด ไม่ต้องมีแอกทิวเอเตอร์มาขับเคลื่อนแต่ไมโครวาล์วแบบ Active นั้นอาศัยอุปกรณ์ขับเคลื่อนเพื่อควบคุมการทำงาน มีอยู่หลายชนิดได้แก่ Pneumatic, Thermopnuematic, Thermo mechanical, Piezoelectric, Electrostatic, Electromagnetic, Electrochemical, Capillary Force เป็นต้น

ของเหลวในระบบสามารถไหลในท่อไปตามส่วนต่างๆ ได้โดยอาศัยปั๊มขนาดเล็กที่เรียกว่า ไมโครปั๊ม ซึ่งมีทั้งแบบชนิด Mechanical และ Non-Mechanical ไมโครปั๊มแบบ Mechanical อาศัยการสร้างแรงดันจากการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของ Chamber ในปั๊มเป็นการถ่ายทอดพลังงานทางกลไปสู่ของไหลโดยตรง ไมโครปั๊มแบบกลมีอยู่หลายชนิด ตัวอย่างเช่น Peristaltic, Reciprocating, Rotary Pumps เป็นต้น ไมโครปั๊มแบบ Non-Mechanical นั้นสามารถเคลื่อนของไหลไปตามท่อโดยไม่อาศัยพลังงานกล ไม่มีส่วนใดๆ เคลื่อนไหว แต่อาศัยพลังงานอื่นๆ เช่น แรงตึงผิว การขยายจากพลังงานความร้อน แรงจากสนามไฟฟ้า หรือสนามแม่เหล็ก เป็นต้น

การสร้างหยด (Droplet) ของเหลวขนาดเล็กที่มีปริมาตรในระดับนาโนลิตรหรือพิโครลิตรเป็นส่วนหนึ่งของระบบที่จำเป็นกับการใช้บางอย่างต้องอาศัยหัวฉีด (Nozzle) ที่ควบคุมด้วยไฟฟ้าโดยสามารถใช้หลักการเดียวกันกับการสร้างหยดหมึกในเครื่องพิมพ์แบบอิงค์เจ็ต

● ไมโครมิกเซอร์ (Micro-mixer) เป็นอุปกรณ์ที่ช่วยผสมสารเคมีเข้าด้วยกันเพื่อให้ปฏิกริยา โดยปกติแล้วการผสมในระดับจุลภาคนั้นอาศัยการแพร่ของสาร เพราะการไหลในระดับจุลภาคเป็นแบบชั้น เวลาที่ใช้ในการผสมหรือเวลาในการแพร่ของสารก็ขึ้นอยู่กับระยะที่สารสองชนิดมาผสมกัน ดังนั้นเพื่อให้เกิดการผสมที่รวดเร็ว จึงต้องออกแบบให้มีพื้นที่สัมผัสของสารสองชนิดให้มากที่สุด ไมโครมิกเซอร์ก็เช่นเดียวกัน แบ่งออกเป็นสองชนิด ได้แก่ แบบ Active และแบบ Passive ไมโครมิกเซอร์แบบ Active นั้นอาศัยการกวนด้วยการปั่นหรือใบพัดขนาดจิ๋ว ในขณะที่ไมโครมิกเซอร์แบบ Passive นั้นไม่มีส่วนใดๆ ที่เคลื่อนที่อาศัยการแพร่ของสารโดยตรง

● ไมโครรีแอคเตอร์ (Micro-reactor) เป็นอีกส่วนที่สำคัญของระบบที่เป็นบริเวณที่เกิดปฏิกริยาทางเคมี มีลักษณะเป็นหลุมหรือช่องที่มีขนาดเล็กที่สารมากกว่าหนึ่งชนิดมาผสมกัน การที่มีขนาดเล็กช่วยทำให้การนำความร้อนเกิดได้รวดเร็วขึ้น การกระจายความร้อนสม่ำเสมอ อัตราส่วนระหว่างพื้นผิวและปริมาตรสูงขึ้น จึงทำให้เกิดปฏิกริยาได้รวดเร็วมากขึ้นด้วย นอกจากนี้ยังช่วยประหยัดสารเคมีและค่าใช้จ่าย และสามารถสร้างเป็นระบบแบบขนานได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

● ไมโครเซ็นเซอร์ (Micro-sensor) เป็นส่วนประกอบที่สำคัญในการตรวจวัดในระบบ เช่น เซ็นเซอร์สำหรับวัดความเข้มข้นของสารละลาย, เซ็นเซอร์สำหรับตรวจวัดทางชีวภาพ (Biosensor), เซ็นเซอร์วัดอัตราการไหล (Flow sensor), เซ็นเซอร์วัดความเป็นกรดหรือด่าง (pH Sensor), เซ็นเซอร์ทางเคมี (Chemical Sensor) เป็นต้น ไมโครเซ็นเซอร์ก็มีมากมายหลายชนิด เช่น เว็นเซอร์แบบเซมิคอนดักเตอร์ เซ็นเซอร์แบบฟิล์มบาง เซ็นเซอร์แบบความต้านทาน เป็นต้น

ส่วนการแยก (Separation) เป็นขั้นตอนสุดท้ายในระบบที่จะบ่งบอกว่าสารนั้นเป็นสารชนิดใด อาศัยเทคนิคต่างๆ มากมาย เช่น Gas Chromatography, Liquid Chromatography, Capillary Electrophoresis, Mass Spectrometry, Flow Injection Analysis เป็นต้น

2.2.2.3 ข้อดีของระบบของไหลจุลภาค

ข้อดีของระบบของไหลจุภาคมีอยู่หลายประการ ได้แก่

- ขนาดเล็กลงของระบบช่วยทำให้เราสามารถพกพาไปติดตั้งหรือทำการทดลองได้
- ราคาถูกเมื่อผลิตจำนวนมากเพราะอาศัยการผลิตแบบ Batch Fabrication คล้ายการสร้างไมโครอิเล็กทรอนิกส์ชิป
- ใช้พลังงานน้อยเนื่องจากการย่อส่วน
- ประหยัดสารเคมี (Reagent) ที่มีราคาแพงและลดค่าใช้จ่าย
- ประสิทธิภาพสูงกว่าเนื่องจากลดการปนเปื้อนและความผิดพลาดของผู้ปฏิบัติงาน
- สามารถใช้ในงานที่ต้องการตรวจซ้ำเป็นจำนวนมาก (High Throughput) โดยอาศัยการสร้างระบบแบบขนาน (Parallel Processing)
- ลดขั้นตอนการทำงาน เช่น ขั้นตอนการเตรียมสารซึ่งสามารถทำได้บนชิป
- เพิ่มความปลอดภัยในการทำงานเนื่องจากใช้สารอันตรายน้อยลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 กระบวนการโฟโตลิโทกราฟฟี

กระบวนการโฟโตลิโทกราฟฟี (Photolithography Process) หมายถึง กระบวนการสร้างลวดลาย และการกัดชั้นสารหรือวัสดุใดๆ ในบางส่วนหรือบริเวณที่ต้องการโดยใช้เทคนิคทางแสง ซึ่งเทคนิคดังกล่าวนี้ถูกนำมาใช้ในการสร้างวงจรรวม เพื่อเปิดชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ในบางบริเวณ เพื่อแพร่อะตอมสารเจือให้เกิดเป็นส่วนต่างๆ ของตัวอุปกรณ์ และนำมาใช้กัดชั้นของโลหะอลูมิเนียมให้เกิดเป็นลวดลายของแถบตัวนำ

กระบวนการโฟโตลิโทกราฟฟีประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลักคือ ขั้นตอนการเคลือบด้วยน้ำยาไวแสง ขั้นตอนการฉายแสง และขั้นตอนการขึ้นลวดลายของน้ำยาไวแสง

ขั้นตอนของกระบวนการโฟโตลิโทกราฟฟี ประกอบด้วยขั้นตอนทั้งหมด 7 ขั้นตอน ดังนี้

1. ขั้นตอนการทำความสะอาดแผ่นเวเฟอร์ (Cleaning Process)
2. การเคลือบด้วยน้ำยาไวแสงบนแผ่นเวเฟอร์
3. ขั้นตอนการอบครั้งแรก (Pre bake)
4. ขั้นตอนการปรับซ้อนมาร์กและการฉายแสง
5. ขั้นตอนการขึ้นลวดลายของน้ำยาไวแสง
6. ขั้นตอนการอบครั้งหลัง (Post bake)
7. ขั้นตอนการตรวจสอบลวดลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1 การเตรียมผิวหน้าแผ่น (Surface Preparation)

เป็นขั้นตอนหนึ่งที่สำคัญ เพราะในกระบวนการต่างๆ สิ่งแปลกปลอมจะเกิดขึ้นได้อย่างง่ายดาย ผลกระทบของสิ่งแปลกปลอมที่อยู่บนผิวหน้าของแผ่นเวเฟอร์ สามารถสร้างความเสียหายให้กับการผลิตวงจรรวม เนื่องจากปัจจุบันนี้สิ่งแปลกปลอมมักมีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับลวดลายวงจรที่มีขนาดเล็กลงเรื่อยๆ

2.3.1.1 ขั้นตอนการทำความสะอาดแผ่นเวเฟอร์ (Cleaning Process)

ก่อนจะนำแผ่นผลึกซิลิกอนเข้าสู่กระบวนการโฟโตลิโทกราฟฟี แผ่นผลึกซิลิกอนมักจะผ่านกระบวนการอื่นมาก่อน เช่น การกัด (Etching) การฝังไอออน (Ion implantation) และออกซิเดชั่น (Oxidation) ซึ่งอาจทำให้มีสิ่งแปลกปลอมตกค้างอยู่บนผิวหน้าของแผ่นผลึกซิลิกอนดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำความสะอาดเพื่อกำจัดสิ่งแปลกปลอมเหล่านั้นให้เรียบร้อยก่อนที่จะนำแผ่นผลึกซิลิกอนเข้าสู่กระบวนการโฟโตลิโทกราฟฟี ถึงแม้ว่าแผ่นผลึกซิลิกอนจะไม่มีสิ่งเจือปนตกค้างอยู่ แต่การทำความสะอาดจะช่วยให้น้ำยาไวแสงเกาะติดบนแผ่นผลึกซิลิกอนได้ดียิ่งขึ้น

ในการทำความสะอาดโดยทั่วไปมักจะใช้วิธีการทางเคมี โดยการใช้สารละลายที่มีฤทธิ์เป็นกรดเพื่อกำจัดสิ่งแปลกปลอมทั้งที่มีองค์ประกอบทางอินทรีย์และอนินทรีย์ หลังจากนั้นจะทำการล้างแผ่นให้สะอาดด้วยน้ำบริสุทธิ์ (De-ionized water: DI Water) ตามด้วยการเป่าด้วยอากาศแห้งหรือก๊าซไนโตรเจนเพื่อทำให้ผลึกซิลิกอนแห้ง

สิ่งแปลกปลอมที่อยู่บนแผ่นผลึกซิลิกอนอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดรูพรุน (Pin Hole) ในชั้นฟิล์มของน้ำยาไวแสง อีกทั้งอาจทำให้เกิดปัญหาการยึดเกาะผิวของน้ำยาไวแสง รวมถึงปัญหาของขนาดลวดลายของตัวอุปกรณ์ที่อาจผิดพลาดไป เป็นผลทำให้อุปกรณ์หรือวงจรไม่สมบูรณ์ ดังนั้นการกำจัดหรือทำให้สิ่งแปลกปลอมมีปริมาณน้อยที่สุดก่อนจะเข้าสู่กระบวนการโฟโตลิโทกราฟฟีจึงถือเป็นเรื่องสำคัญ เพื่อให้มั่นใจได้ว่าลวดลายที่ได้จากกระบวนการโฟโตลิโทกราฟฟีสามารถผ่านกระบวนการตรวจสอบและนำไปสู่กระบวนการอื่นๆ ต่อไปได้

2.3.1.2 ขั้นตอนการอบไล่ความชื้น (Dehydrate bake)

เป็นขั้นตอนการให้ความร้อน เพื่อกำจัดความชื้นบนผิวหน้าของแผ่นผลึกซิลิคอน แผ่นผลึกซิลิคอนที่มีผิวหน้าสะอาดและแห้งจะทำให้น้ำยาไวแสงสามารถยึดเกาะพื้นผิวได้ดี ในการอบจะใช้การอบด้วยแผ่นความร้อน (Hot Plate) ที่อุณหภูมิ 150-200 $^{\circ}C$ ใช้เวลาในการอบ 1-2 นาที

ระยะเวลาและอุณหภูมิที่ใช้มีความสำคัญอย่างมาก ถ้าใช้เวลาน้อยและอุณหภูมิต่ำเกินไปจะทำให้กำจัดความชื้นออกไม่หมด ถ้าใช้เวลานานและอุณหภูมิสูงเกินไปจะทำให้เกิดการแยกออกของชั้นออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 การเคลือบด้วยน้ำยาไวแสงบนแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์

2.3.2.1 น้ำยาไวแสงหรือสารไวแสง (Photo resist)

น้ำยาไวแสงเป็นวัสดุ ที่สามารถทำปฏิกิริยากับแสงได้โดยฟิล์มบางของสารไวแสงจะถูกนำมาใช้ ทำหน้าที่เป็นชั้นป้องกัน ปฏิกิริยาที่จะเกิดขึ้นระหว่างวัสดุใดๆกับสารเคมีที่เป็นตัวสกัด เพราะฟิล์มบางของสารไวแสงนี้ จะไม่ทำปฏิกิริยากับสารเคมีนั้นๆ สมบัติดังกล่าวถูกนำมาใช้กับการเปิดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อการแพร่สารเจือในบางส่วน หากบริเวณใดต้องการให้มีชั้นออกไซด์คงอยู่ ก็ใช้ฟิล์มบางของสารไวแสงนี้ปกคลุมไว้ ส่วนบริเวณใดที่ต้องการสกัดหรือละลายชั้นออกไซด์ออก ก็ไม่ต้องมีชั้นสารไวแสงปิดไว้ การทำหน้าที่ของสารไวแสงเพื่อป้องกันหรือต้านทานปฏิกิริยาเคมี ที่จะเกิดขึ้นกับชั้นฐานรอง (Substrate) นี้ อาจถูกนำมาใช้เรียกชื่อของสารไวแสงนี้ว่า ชั้นต้านทานไวแสงหรือ Photo resist และนิยมเรียกสั้นๆว่า Resist

2.3.2.2 ชนิดของสารไวแสง

ในน้ำยาไวแสงที่นำมาใช้กับกระบวนการโฟโตลิโทกราฟฟีโดยทั่วไป จะประกอบด้วยสิ่งสำคัญต่างๆ คือ วัสดุที่เป็นสารไวแสง ส่วนที่เป็นสารละลายและส่วนที่เป็นสารเพื่อช่วยในการยึดติดกับผิวใดๆ และโดยการพิจารณาปฏิกิริยาทางเคมีและแสงของวัสดุไวแสงที่อยู่ในน้ำยาไวแสง ซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญทำให้เราสามารถจำแนกน้ำยาไวแสง ออกเป็นชนิดใหญ่ๆได้ 2 ชนิด คือ น้ำยาไวแสงชนิดลบ และน้ำยาไวแสงชนิดบวก

- น้ำยาไวแสงชนิดลบ (Negative Photo resist)

หมายถึง น้ำยาไวแสงที่เมื่อถูกฉายด้วยแสง และมีปฏิกิริยาเคมี-แสง เกิดขึ้นแล้ว จะทำให้คุณสมบัติของการละลายในสารตัวทำละลาย ที่เรียกว่า น้ำยาล้างฟิล์ม (Developer) หรือการขึ้นลวดลายเปลี่ยนแปลงไป โดยขณะที่ยังไม่ทำปฏิกิริยากับแสงจะสามารถละลายได้ดีในสารตัวทำละลาย แต่เมื่อถูกแสงแล้ว จะมีสมบัติเปลี่ยนไป คือ ไม่สามารถละลายได้

- น้ำยาไวแสงชนิดบวก (Positive Photo resist)

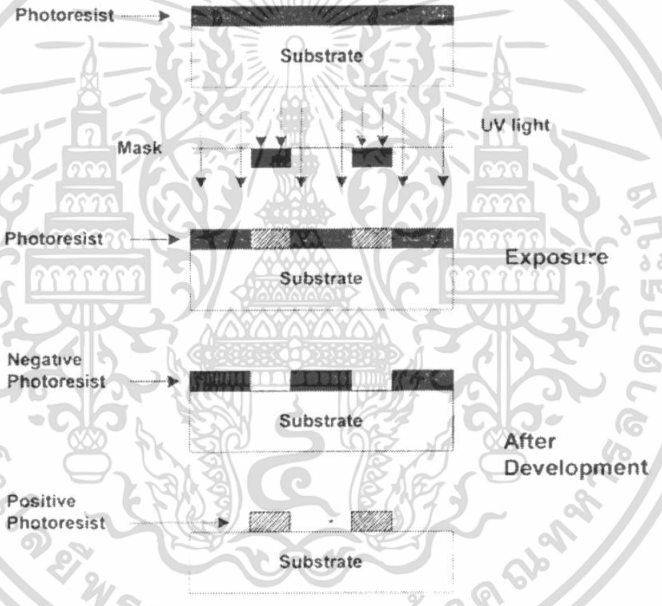
น้ำยาไวแสงชนิดนี้ประกอบด้วนสารไวแสง ซึ่งมีคุณสมบัติปฏิกิริยาเคมี-แสง ที่แตกต่างกับกรณีของน้ำยาไวแสงชนิดลบโดยให้ผลตรงข้าม กล่าวคือ เมื่อยังไม่ถูกแสง หรือเมื่อไม่มีปฏิกิริยาเคมีกับแสง จะมีคุณสมบัติไม่ละลายในสารตัวทำละลาย หรือน้ำยาล้างฟิล์ม แต่เมื่อถูกแสงหรือมีปฏิกิริยาแล้วสมบัติจะเปลี่ยนไป คือสามารถละลายได้ดีในน้ำยาล้าง

ในรูปที่ 2.4 แสดงการสร้างลวดลายของกระบวนการโฟโตลิโทกราฟฟี แสดงให้เห็นความแตกต่างของลวดลายที่ได้จากการใช้น้ำยาไวแสงแต่ละชนิด คือ ลวดลายที่ได้จากการใช้น้ำยาไวแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิดบวกจะเหมือนลวดลายบนกระจกโฟโตมาส์ก ส่วนลวดลายที่ได้จากการใช้น้ำยาไวแสงชนิดลบจะเป็นภาพกลับตรงข้ามกับภาพลวดลายบนกระจกโฟโตมาส์ก

ในการสร้างวงจรรวม สามารถใช้น้ำยาไวแสงได้ทั้งชนิดบวกและชนิดลบ และสมบัติที่สำคัญของน้ำยาไวแสงคือ ความละเอียด ซึ่งอาจหมายถึงความละเอียดของภาพ ที่จะสามารถทำได้สำหรับงานวงจรรวมระดับสูงที่มีขนาดเล็กมากๆ จะต้องมีความละเอียดสูง ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดและคุณภาพของน้ำยาไวแสง นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับ ชนิดของแสงที่ใช้ โดยแสงที่มีความยาวคลื่นสั้นๆ จะทำให้ได้ภาพที่มีความละเอียดสูง



รูปที่ 2.4 ลวดลายที่ได้จากน้ำยาไวแสงชนิดลบ และน้ำยาไวแสงชนิดบวก

2.3.2.3 วิธีเคลือบน้ำยาไวแสงบนแผ่นผลึกซิลิกอน

การเคลือบน้ำยาไวแสงลงบนแผ่นผลึกซิลิกอน ซึ่งมีชั้นซิลิกอนไดออกไซด์หรือชั้นวัสดุอยู่ที่ผิวด้านบนนั้น สามารถกระทำได้หลายวิธี ดังนี้ คือ

- แบบสเปรย์ (Spray Coating)

วิธีการนี้น้ำยาไวแสงจะถูกฉีดหรือพ่นออกมาเป็นละออง แล้วตกลงไปเกาะกับผิวหน้าของแผ่นผลึก และยึดเกี่ยวกันเป็นฟิล์มบาง คล้ายกับการพ่นสีสเปรย์ซึ่งใช้ง่ายและสะดวก แต่เหมาะกับเฉพาะงานบางประเภท การควบคุมความหนาของฟิล์มที่ทำได้ยาก ปกติจะใช้ในบางขั้นตอน ซึ่งไม่สำคัญ เช่น ใช้เคลือบสารไวแสงเพื่อป้องกันชั้นของออกไซด์ด้านล่างของแผ่นผลึก

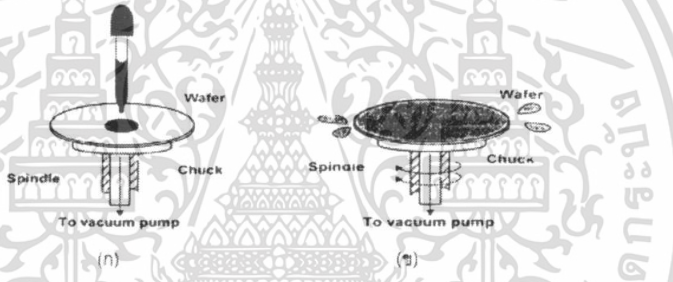
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

• แบบใช้ลูกกลิ้ง (Roller Coating)

จะนิยมทำในขั้นตอนของการตัดแยกแผ่นผลึกซิลิคอนออกเป็นไดซ์ หรือชิป โดยแผ่นผลึกจะถูกเคลือบน้ำยาไวแสงทั้ง 2 ด้าน เพื่อป้องกันฝุ่นละอองหรือสิ่งสกปรกอื่นๆที่จะเกิดขึ้นขณะทำการตัดแยกชิป ด้วยเลื่อยหรือแสงเลเซอร์ ปกติวิธีนี้จะใช้กับน้ำยาไวแสงชนิดบวก

• แบบสปินเนอร์ (Spinner Coating)

เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุดในการเคลือบน้ำยาไวแสง ซึ่งจะใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่าสปินเนอร์ โดยมีแท่นหมุนที่สามารถปรับความเร็วได้ด้วยมอเตอร์ความเร็วสูง บนแท่นหมุนจะมีการยึดด้วยระบบสุญญากาศ ซึ่งจะสามารถยึดแผ่นซิลิกอนไว้ได้ในขณะที่หมุนแผ่นผลึกซิลิกอนด้วยความเร็วสูง แรงเหวี่ยงจากศูนย์กลางที่เกิดขึ้นจากการหมุนจะทำให้น้ำยาไวแสง ซึ่งมีสภานะเป็นของเหลวกระจายออกจนทั่วผิวหน้า ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การเคลือบน้ำยาไวแสงบนแผ่นเวเฟอร์แบบสปินเนอร์
(ก) การหยดน้ำยาไวแสงบนแผ่นเวเฟอร์
(ข) การหมุนแผ่นเวเฟอร์บนแท่นหมุนเพื่อเคลือบน้ำยาไวแสง

โดยความหนาของชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงจะขึ้นอยู่กับความหนืดของน้ำยาไวแสง และความเร็วรอบในการหมุน ถ้าหากใช้ความเร็วรอบต่ำ จะได้ชั้นของน้ำยาไวแสงที่หนา ถ้าเพิ่มความเร็วรอบก็จะได้ชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่บางลง ชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงที่ดีจะต้องมีความหนาสม่ำเสมอเท่ากันทั้งแผ่น ในขั้นตอนนี้จะต้องระมัดระวังเรื่องฝุ่นละอองมากเป็นพิเศษ

2.3.3 ขั้นตอนการอบครั้งแรก (Pre Bake)

หลังจากผ่านกระบวนการเคลือบผิวหน้าของแผ่นผลึกซิลิกอนด้วยน้ำยาไวแสงแล้ว แผ่นผลึกซิลิกอนจะผ่านเข้าสู่กระบวนการให้ความร้อน เพื่อทำให้ตัวทำละลายที่อยู่ในน้ำยาไวแสงระเหยออกไป หลังจากให้ความร้อนแล้วน้ำยาไวแสงที่เคลือบอยู่บนผิวหน้าของแผ่นซิลิกอนจะเปลี่ยนสถานะจากของเหลวเป็นของแข็งและมีสภาพการยึดเกาะของผิวที่ดีขึ้น ซึ่งกระบวนการนี้เรียกว่า กระบวนการอบครั้งแรก (Pre Bake) ซึ่งอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในกระบวนการนี้จะขึ้นอยู่กับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิดของน้ำยาไวแสงที่เลือกใช้ โดยจะใช้อุณหภูมิราว 90-100 °C สำหรับน้ำยาไวแสงชนิดลบ และราว 80-90 °C สำหรับน้ำยาไวแสงชนิดบวก การอบที่ใช้เวลานานเกินไปหรืออุณหภูมิที่สูงเกินไปอาจทำให้เกิดความเสียหายกับชั้นของน้ำยาไวแสง

ในปัจจุบันการอบสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใช้เตาอบแบบพาความร้อน (Convection Oven), เตาอบแบบอินฟราเรด (Infrared Oven), เตาอบแบบไมโครเวฟ (Microwave Oven) และการใช้แผ่นความร้อน (Hot Plate) ซึ่งการใช้แผ่นความร้อนเป็นวิธีที่ง่ายที่สุดและนิยมใช้โดยทั่วไป

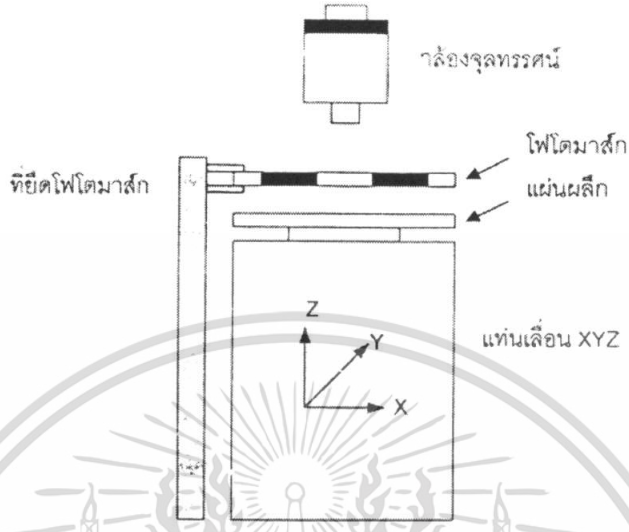
2.3.4 ขั้นตอนการปรับซ้อนมาร์กและการฉายแสง (Mask alignment and Exposure)

การปรับซ้อนมาร์กและการฉายแสง เป็นขั้นตอนที่สำคัญขั้นตอนหนึ่งของกระบวนการโฟโตลิโทกราฟฟี ซึ่งเป็นขั้นตอนการถ่ายลวดลายลงบนกระจกโฟโต้มาส์กลงไปบนชั้นฟิล์มของน้ำยาไวแสงที่ผิวของแผ่นเวเฟอร์

2.3.4.1 ขั้นตอนการปรับซ้อนมาส์ก (Mask alignment)

การฉายแสงผ่านกระจกโฟโต้มาส์ก ซึ่งปกติถูกวางทาบทับลงไปบนแผ่นผลึกที่เคลือบน้ำยาไวแสง ในกรณีที่เป็นกระจกโฟโต้มาส์กชิ้นแรก หรือมาส์กที่หนึ่ง สามารถทำได้โดยไม่ต้องมีการปรับซ้อนมาส์ก ทั้งนี้เนื่องจากยังไม่ได้มีการสร้างส่วนหนึ่งส่วนใดของวงจรรวมบนแผ่นเวเฟอร์เลย แต่ในกรณีที่แผ่นเวเฟอร์นั้นได้ผ่านการสร้างส่วนของวงจรรวมมาบ้างแล้ว การจะสร้างส่วนใหม่ต่อไปจำเป็นที่จะต้องสร้างให้อยู่ในตำแหน่งหรือบริเวณที่ถูกต้อง เพื่อให้ได้โครงสร้างของวงจรรวมตามที่ได้ออกแบบไว้ ดังนั้นการใช้กระจกโฟโต้มาส์ก ตั้งแต่มาส์กที่ 2 เป็นต้นไป ก่อนการฉายแสงจะต้องมีการปรับซ้อนมาส์ก (Mask alignment) เพื่อให้ได้ลวดลายบนกระจกมาส์กซ้อนทับกับลวดลายที่มีอยู่บนแผ่นเวเฟอร์อย่างถูกต้อง ในที่สุดของกระบวนการโฟโตลิโธกราฟฟี จะทำให้สามารถเปิดชั้นของออกไซด์ที่ตำแหน่งถูกต้อง โครงสร้างของวงจรรวมจึงเป็นไปตามที่ออกแบบและถูกต้อง เนื่องจากภาพลวดลายของวงจรรวมมีขนาดเล็กมาก ดังนั้นการปรับซ้อนจึงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ช่วย ซึ่งเรียกว่า เครื่องปรับซ้อนมาส์ก (Mask aligner) ซึ่งอาศัยหลักการง่ายๆคือ แผ่นเวเฟอร์จะถูกวางและติดกับแท่นเลื่อน ซึ่งสามารถปรับให้เลื่อนในแนวนอน (x) แนวตั้งฉาก (y) และแนวสูง (z) ได้ การปรับเลื่อนนี้ทำได้ด้วยทั้งแนว x, y และ z นอกจากนี้ยังปรับหมุนแผ่นเวเฟอร์ได้โดยรอบ โดยใช้ไมโครมิเตอร์ที่มีความละเอียดสูง ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ส่วนกระจกโฟโต้มาส์กถูกยึดให้อยู่นิ่งเหนือแผ่นเวเฟอร์เล็กน้อย และการใช้กล้องจุลทรรศน์ ทำการสังเกตภาพลวดลายที่ปรากฏทั้งบนแผ่นเวเฟอร์และโฟโต้มาส์ก พร้อมกับทำการปรับเลื่อนทั้งแกน x, y และ z และมุม θ จนกระทั่งภาพลวดลายที่ปรากฏบนแผ่นผลึก และบนโฟโต้มาส์กซ้อนกันลงตรงตำแหน่งที่ถูกต้อง จากนั้นจึงปรับให้แผ่นเวเฟอร์เลื่อนสูงขึ้นในแนวแกน z จนแนบสนิทกับกระจกโฟโต้มาส์ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
81586



รูปที่ 2.6 แสดงแผนผังอุปกรณ์เครื่องปรับซ้อนมาส์ก แบบถ่ายภาพลวดลายแบบสัมผัส

รูปที่ 2.7 ภาพลวดลายของเครื่องหมายปรับซ้อนมาส์ก

ก) ภาพลวดลายสี่เหลี่ยม และกากบาทบนโฟโตมาส์ก

ข) ภาพลวดลายบนแผ่นเวเฟอร์

ค) ภาพลวดลายที่รวมกันขณะทำการปรับซ้อนมาส์กแล้ว

ในกรณีที่ลวดลายมีขนาดใหญ่พอที่จะสังเกตได้ การปรับซ้อนภาพนี้จะสามารถทำได้โดยสังเกตจากลวดลายของวงจรรวมโดยตรง แต่โดยทั่วไป ภาพลวดลายของวงจรรวมมีขนาดเล็กมาก นอกจากนี้ยังมีจำนวนมากอีกด้วย จึงเป็นการยากที่จะทำการปรับซ้อนโดยสังเกตจากภาพลวดลายของวงจรรวม ในทางปฏิบัติ เพื่อให้การปรับซ้อนทำได้ง่าย จึงมีการใช้ภาพลวดลาย ซึ่งออกแบบขึ้นเพื่อใช้สำหรับการปรับซ้อนมาส์กโดยเฉพาะ และเรียกว่า เครื่องหมายปรับซ้อน (Alignment mark)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งอาจเป็นภาพจัตุรัสในกล่องสี่เหลี่ยม กากบาทในสี่เหลี่ยม หรือสี่เหลี่ยมในกากบาท ดังแสงในรูปที่ 2.7

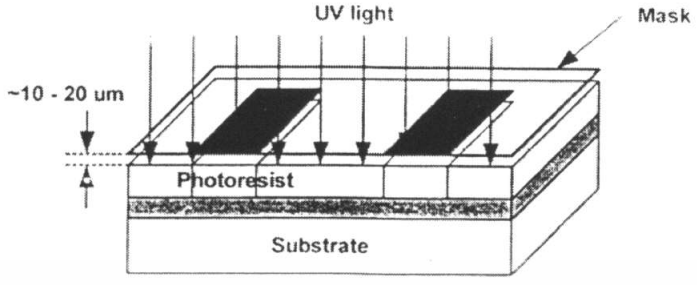
การปรับซ้อนทำได้โดยการปรับเลื่อนแผ่นเวเฟอร์ ให้อยู่ในตำแหน่งที่ภาพลวดลายบนแผ่นเวเฟอร์ และภาพลวดลายบนโฟโตมาส์กซ้อนทับกันพอดี ลวดลายวงจรที่ได้จะตรงตามที่ออกแบบไว้ทุกประการ

2.3.4.2 ขั้นตอนการฉายแสง (Exposure)

เมื่อทำการปรับซ้อนภาพระหว่างกระจกโฟโตมาส์กและแผ่นเวเฟอร์เรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการฉายแสง (Exposure) ผ่านกระจกโฟโตมาส์ก เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมีกับแสงขึ้นที่ชั้นน้ำยาไวแสง ซึ่งการสร้างลวดลายในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการวางทับโฟโตมาส์และแผ่นเวเฟอร์ให้แนบสนิทแล้วฉายแสง (Contact print) ดังแสดงในรูปที่ 2.8

ปกตินำ้ยาไวแสงที่ใช้ในเทคนิคโฟโตลิโทกราฟฟี สำหรับกระบวนการสร้างวงจรรวมจะมีความไวต่อแสง ที่มีความยาวคลื่น (λ) ในช่วง 300-500 nm ซึ่งแสงที่เรามองเห็นเป็นสีม่วงและสีนำ้เงินนั่นเอง ดังนั้นในห้องปฏิบัติการโฟโตลิโธกราฟฟี จึงสามารถใช้แสงสีเหลืองได้ เพราะแสงสีเหลืองมีความยาวคลื่นมากกว่า 500 nm ซึ่งจะไม่ทำปฏิกิริยากับนำ้ยาไวแสง แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้กัน โดยทั่วไปได้จากหลอดไอปรอท (Mercury Vapor Lamp) ให้เส้นสเปกตรัมที่มีความร้อนสูง ที่ความยาวคลื่นยาว 310, 365, 405 และ 440 mm ตามลำดับ นำ้ยาไวแสงชนิดลบจะมีความไวสูงสุดใกล้กับเส้นสเปกตรัม 405 mm และนำ้ยาไวแสงชนิดบวก จะมีความไวสูงสุดใกล้กับเส้นสเปกตรัม 365 mm จากสเปกตรัมแสงความยาวคลื่นประมาณ 400 mm ถูกเรียกว่าความยาวคลื่นใกล้อัตราไวโอเลต (Near ultraviolet wave length หรือ near UV) ซึ่งเป็นแสงสำหรับเทคนิคโฟโตลิโธกราฟฟีโดยทั่วไป สำหรับความยาวคลื่นที่ต่ำกว่านี้ เราเรียกว่า ความยาวคลื่นไกลอัตราไวโอเลต (Far ultraviolet wave length หรือ far UV) การพิมพ์ภาพที่มีขนาดเล็กๆจำเป็นต้องใช้แสงที่มีความยาวคลื่นสั้นๆ เช่น ขนาดราว 2 ไมโครเมตร ต้องใช้คลื่น Far UV ราว 100-200 นาโนเมตร นอกจากนี้ยังสามมารถใช้คลื่นรังสีเอ็กซ์ (X-ray) และลำอิเล็กตรอน (Electron beam) มาใช้แทนแสงได้ด้วย ทำให้สามารถพิมพ์ภาพลวดลายวงจรรวมที่มีขนาดเล็กมากได้ ซึ่งเทคนิคนี้ถูกเรียกว่า เอ็กซ์เรย์โฟโตลิโธกราฟฟี (X-ray photolithography) และลำอิเล็กตรอนลิโธกราฟฟี (Electron beam lithography) แต่นำ้ยาไวแสงที่ใช้จะต้องมีคุณสมบัติแตกต่างจากธรรมดา เพราะรังสีเอ็กซ์และลำอิเล็กตรอนมีพลังงานสูงกว่าแสง Near UV ที่ใช้กับนำ้ยาไวแสงปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 แสดงการฉายแสง ผ่านโฟโตมาส์กลงบนแผ่นเวเฟอร์

2.3.5 ขั้นตอนการขึ้นลวดลายของน้ำยาไวแสง (Development)

แหลังจากผ่านกระบวนการฉายแสงแล้ว จะทำการขึ้นลวดลายของน้ำยาไวแสง ซึ่งจะเป็นการกำจัดน้ำยาไวแสงในส่วนที่ไม่ต้องการออกไปและคงเหลือฟิล์มน้ำยาไวแสงในส่วนที่ต้องการไว้ ลวดลายที่เหลืออยู่บนแผ่นเวเฟอร์ คือลวดลายที่ถูกกำหนดโดยกระจกโฟโตมาส์กนั่นเอง กระบวนการขึ้นลวดลายของน้ำยาไวแสงทำได้โดย การล้างด้วยน้ำยาขึ้นลวดลาย หลังจากนั้นล้างด้วยน้ำบริสุทธิ์ เพื่อหยุดการล้างฟิล์ม แล้วเป่าเพื่อทำแผ่นเวเฟอร์ให้แห้ง

น้ำยาไวแสงชนิดบวกเมื่อผ่านการล้างฟิล์มน้ำยาไวแสงแล้ว บริเวณที่ถูกแสงจะถูกล้างด้วยน้ำยาขึ้นลวดลายออกไป ส่วนน้ำยาไวแสงชนิดลบ บริเวณที่ไม่ได้ถูกแสงจะถูกล้างด้วยน้ำยาขึ้นลวดลายออกไป น้ำยาไวแสงแต่ละชนิดจะต้องใช้น้ำยาขึ้นลวดลายที่แตกต่างกัน

2.3.6 ขั้นตอนการอบครั้งหลัง (Post bake)

เป็นกระบวนการให้ความร้อนเพื่อกำจัดตัวทำละลายหรือโมเลกุลของน้ำที่เหลืออยู่บนชั้นฟิล์มน้ำยาไวแสงออกไป ทำให้ชั้นฟิล์มของน้ำยาไวแสงที่อยู่บนผิวหน้าของแผ่นเวเฟอร์แข็งตัวมากขึ้น และยึดติดกับผิวหน้าของแผ่นเวเฟอร์ดียิ่งขึ้น

ขั้นตอนการอบครั้งหลัง เหมือนกับขั้นตอนการอบครั้งแรก และวิธีที่นิยมใช้คือ การใช้แผ่นความร้อนเช่นเดียวกับการอบครั้งแรก แต่จะแตกต่างกันที่อุณหภูมิที่ใช้ในการอบครั้งหลังจะสูงกว่า คือ อบที่อุณหภูมิประมาณ 100-130 $^{\circ}C$ ซึ่งทั้งอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอบจะขึ้นกับชนิดของน้ำยาไวแสงที่เลือกใช้

การอบครั้งหลัง จะต้องมีการควบคุมอุณหภูมิและเวลา เนื่องจากถ้าใช้อุณหภูมิต่ำและเวลาน้อยเกินไปทำให้ความแข็งของฟิล์มน้ำยาไวแสงไม่เพียงพอ ซึ่งมีผลต่อการยึดเกาะของน้ำยาไวแสงบนผิวหน้าแผ่นเวเฟอร์ ถ้าใช้อุณหภูมิสูงและเวลานานเกินไปจะทำให้น้ำยาไวแสงเสื่อมและไหม้ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.7 ขั้นตอนการตรวจสอบลวดลาย (Final Inspection)

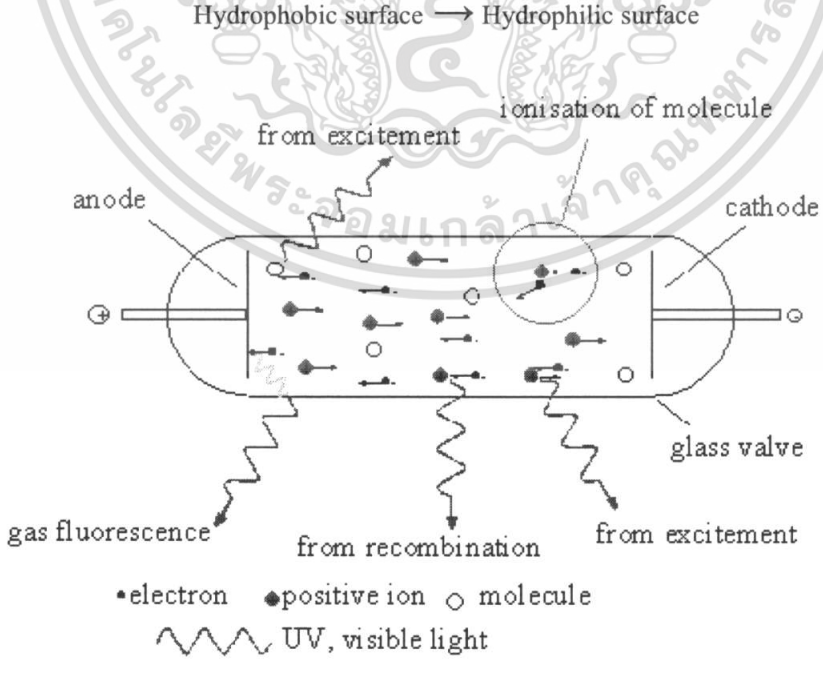
ขั้นตอนนี้เหมือนกับขั้นตอนการตรวจสอบครั้งแรกหลังจากการขึ้นลวดลายน้ำยาไวแสงด้วยกล้องจุลทรรศน์ อาจเกิดความไม่สมบูรณ์ของลวดลาย ที่ได้ผ่านการกัดชั้นฟิล์มบางไปแล้ว สาเหตุของความไม่สมบูรณ์ของลวดลาย อาจเกิดจากการกัดเซาะที่มากเกินไป การอบครั้งหลังไม่เหมาะสม ถ้าลวดลายไม่สมบูรณ์จะต้องทำการกัดชั้นฟิล์มบางทิ้งทั้งหมดและต้องทำการสร้างใหม่

2.4 RF Plasma Cleaner

2.4.1 หลักการทำงานของ RF Plasma Cleaner

เมื่อก๊าซภายในหลอดบรรจุก๊าซถูกกระตุ้นภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าความถี่สูง อิเล็กตรอนจะหลุดออกจากขั้วแคโทด (Cathode) และถูกเร่งไปยังขั้วแอโนด (Anode) ขณะนั้นอิเล็กตรอนก็จะชนกับโมเลกุลของก๊าซทำให้ก๊าซเกิดการแตกตัวเป็นไอออนบวก และอิเล็กตรอนที่อยู่ในสภาวะกระตุ้นจะเข้าไปชนขั้วแอโนด ทำให้เกิดการคายประจุ (Discharge) ออกมาเป็นแก๊สที่มีประจุ หรือพลาสมา (Plasma) ซึ่งจะทำอันตรกิริยา (Interaction) กับ พื้นผิวของชิ้นงาน ที่อยู่ในบรรยากาศของสิ่งแวดล้อมโดยที่

- สิ่งปนเปื้อนจากสารอินทรีย์จะถูกกำจัดออกไป โดยพลาสมาพลังงานสูง
- ทำให้พื้นผิวถูกปรับเปลี่ยนสมบัติทางฟิสิกส์และทางเคมี (Surface modification)

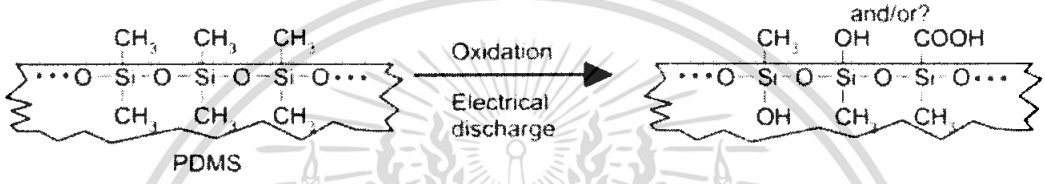


รูปที่ 2.9 กระบวนการสร้างพลาสมาในหลอดสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 หลักการของการประกบติด (Bonding) โดยใช้ RF Plasma Cleaner

โดยทั่วไปแล้วผิวหน้าของ PDMS จะเป็นแบบ hydrophobic เนื่องจากมีกลุ่ม CH_3 อยู่บนผิว ซึ่งสามารถทำการดัดแปลงผิวหน้าของ PDMS ให้เป็นแบบ Hydrophilic ได้โดยอาศัยกระบวนการการทำความสะอาดด้วยออกซิเจนพลาสมา (O_2 Plasma cleaner) โดยพลาสมาจะทำการเปลี่ยนกลุ่ม CH_3ที่อยู่บนผิวของ PDMS ให้เป็นกลุ่มของ OH ทำให้ผิวของ PDMS สามารถสร้างพันธะกับพื้นผิวอื่นได้ เรียกกระบวนการดัดแปลงผิวหน้าของ PDMS นี้ว่า Surface Modification



รูปที่ 2.10 การทำความสะอาดผิวหน้า PDMS ด้วยออกซิเจนพลาสมา (O_2 Plasma cleaner)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
ขั้นตอนการดำเนินงาน

ในการออกแบบเพื่อศึกษาหลักการทำงานของระบบไมโครฟลูอิดิกที่ใช้ในไบโอเซนเซอร์ มีขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัยดังนี้

1. ศึกษาความรู้พื้นฐานของระบบไมโครฟลูอิดิกที่จะใช้ในไบโอเซนเซอร์
2. ศึกษาซอฟแวร์ที่จะใช้ในการออกแบบและซอฟแวร์ที่จะใช้ในการแปลงไฟล์เพื่อนำไปใช้งานต่อ
3. นำไฟล์แบบที่ได้ไปผ่านกระบวนการสร้างฟิล์มหน้ากาก
4. ศึกษาและใช้การเคลือบสารไวแสงโดยใช้วิธีหมุนเคลือบ จากนั้นนำฟิล์มหน้ากากที่ได้มาผ่านการฉายแสงลงบนสารไวแสงที่อยู่บนฐานรองรับซิลิกอนเพื่อสร้างแม่พิมพ์
5. ศึกษาการใช้กระบวนการล้างสารไวแสงเพื่อให้ได้ลวดลายตามที่ออกแบบไว้
6. ศึกษาและใช้วัสดุโพลิเมอร์เทลงบนแม่พิมพ์ที่ได้ จากนั้นนำแบบโพลิเมอร์ที่ได้มาตรวจสอบช่องทางเดินของเหลว
7. ทดลองป้อนของเหลว ตรวจดูการเดินทางของของเหลวในระบบไมโครฟลูอิดิกที่ได้โดยตรวจดูพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ความหนืดของของเหลว, เวลาเดินทาง และขนาดท่อไมโคร เป็นต้น

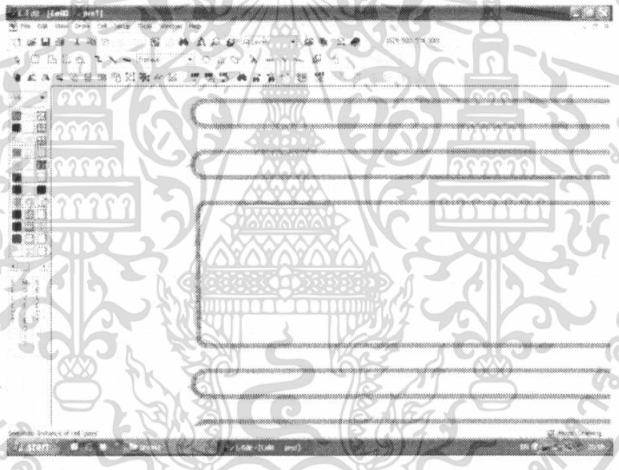
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสร้างไมโครฟลูอิดิก

ในการสร้างไมโครฟลูอิดิกนั้นประกอบด้วยขั้นตอนหลัก 4 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนการออกแบบระบบไมโครฟลูอิดิก (Design Microfluidic system) ขั้นตอนการสร้างแม่พิมพ์ (Mold Fabrication), ขั้นตอนการหล่อขึ้นรูปโพลิเมอร์ PDMS (PDMS Fabrication) และขั้นตอนการประกบติด (Bonding)

3.1 การออกแบบระบบไมโครฟลูอิดิก (Design Microfluidic system)

การออกแบบระบบไมโครฟลูอิดิก สามารถออกแบบได้โดยใช้ซอฟแวร์โปรแกรม L-Edit ซึ่งออกแบบให้มีขนาดความกว้างของท่อไมโครฟลูอิดิกคือ 100 μm



รูปที่ 3.1 ซอฟแวร์ที่ใช้ในการออกแบบ (L-edit)

หลังจากทำการออกแบบเสร็จเรียบร้อยแล้วทำการแปลงไฟล์ให้เป็นไฟล์นามสกุล PDF จากนั้นนำไฟล์ไปให้ร้านรับทำฟิล์ม ทำฟิล์มหน้ากากตามแบบที่ได้ออกแบบไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ขั้นตอนการสร้างแม่พิมพ์ (Mold Fabrication)

ขั้นตอนการสร้างแม่พิมพ์เป็นขั้นตอนที่สร้างแม่พิมพ์ เพื่อที่จะใช้ในการสร้างท่อไมโคร-ฟลูอิดิก โดยมีขั้นตอนดังนี้

3.2.1 ขั้นตอนการทำความสะอาดแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ (Silicon Cleaning Process)

ขั้นตอนการทำความสะอาดแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ เป็นขั้นตอนที่นำแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ที่ใช้เป็นฐานรองมาทำความสะอาดเพื่อกำจัดคราบไขมัน , ฝุ่นผง หรือคราบสกปรกที่เกาะอยู่บนแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ โดยมีกระบวนการทำความสะอาดดังนี้

1. ล้างแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ด้วยสารละลายระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) กับกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ด้วยอัตราส่วน คือ 1: 4 ตามลำดับ เป็นเวลา 10 นาที
2. ล้างด้วยน้ำไร้ประจุ (de-ionized water) 3 ครั้ง ครั้งละ 5 นาที
3. เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
4. อบด้วย hotplate ที่อุณภูมิ 120 °C เป็นเวลานาน 10 นาที
5. นำแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์มาทำความสะอาดด้วยเครื่อง Plasma Cleaner เป็นเวลานาน 3 นาที

3.2.2 ขั้นตอนการเคลือบน้ำยาไวแสง (Photoresist Spinning Process)

การเคลือบน้ำยาไวแสง เป็นขั้นตอนการเคลือบผิวหน้าของแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ด้วยน้ำยาไวแสง ซึ่งในโครงงานพิเศษนี้ใช้น้ำยาไวแสงชนิดลบ SU-8 มีขั้นตอนดังนี้

1. นำ SU 8 หยดลงบนแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ที่ผ่านกระบวนการทำความสะอาดมาแล้วโดยใช้ เครื่อง Spinner ให้น้ำยาไวแสงมีความหนาประมาณ 150 μm
2. ในขั้นตอนการ Spin coat ครั้งแรกให้สปินด้วยความเร็ว 800 rpm เป็นเวลา 20 วินาที เพื่อให้น้ำยาไวแสงเริ่มกระจายตัว
3. ในขั้นตอนการ Spin coat ครั้งที่สองให้สปินด้วยความเร็ว 3000 rpm เป็นเวลา 60 วินาที เพื่อให้น้ำยาไวแสงกระจายตัวทั่วทั้งบริเวณผิวหน้าของแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์
4. หลังจาก Spin coat จะมีคราบน้ำยาไวแสงติดอยู่บริเวณด้านหลังของแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ ให้ทำความสะอาดโดยการเช็ดด้วยอะซิโตน
5. นำแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์มาอบด้วยอุณภูมิ 65 °C เป็นเวลา 5 นาที
6. จากนั้นเพิ่มอุณภูมิเป็น 95 °C เป็นเวลา 55 นาที หรือจนกว่าน้ำยาไวแสงค่อนข้างจะแห้ง
7. หลังจากทำการอบด้วยอุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 55 นาที แล้วลดอุณหภูมิลงอย่างช้าๆ จนกระทั่งอุณหภูมิที่ทำการอบเท่ากับอุณหภูมิห้อง แล้วจึงนำแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 ขั้นตอนการฉายแสง (UV Exposure)

ขั้นตอนการฉายแสงเป็นขั้นตอนที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมี-แสงขึ้นที่ชั้นน้ำยาไวแสง มีขั้นตอนดังนี้

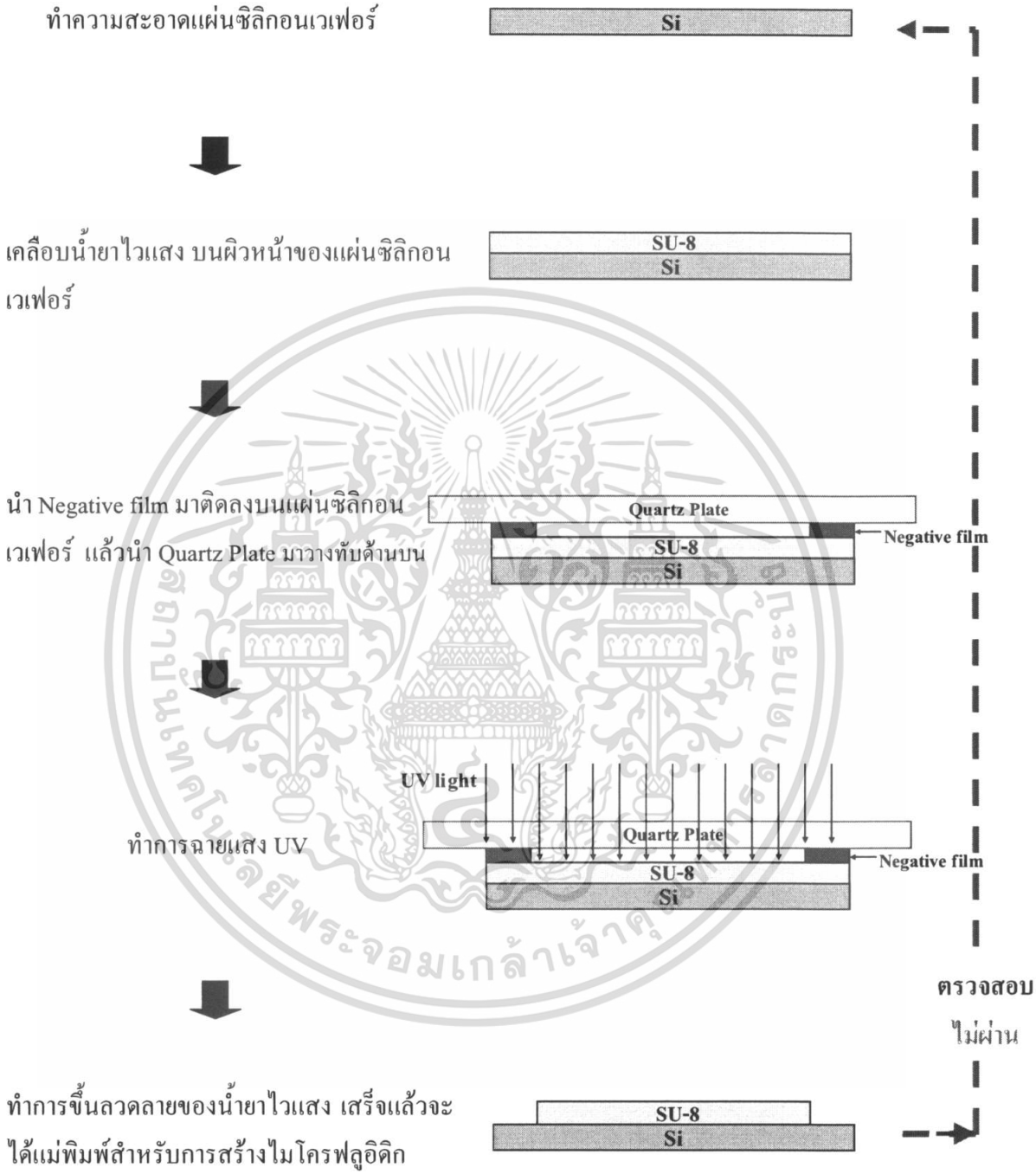
1. ทำความสะอาด Negative film ที่ได้ออกแบบไว้โดยการเช็ดด้วยแอลกอฮอล์ แล้วตรวจดูอย่าให้แผ่นฟิล์มมีคราบแอลกอฮอล์ติดอยู่
2. นำ Negative film มาวางบนชั้นน้ำยาไวแสง SU-8 แล้วทับด้วย Quartz Plate เพื่อให้ฟิล์มกับชั้นน้ำยาไวแสงแนบสนิทกัน
3. ทำการฉายแสงโดยใช้เครื่อง UV Exposure เป็นเวลานาน 12 วินาที

3.2.4 ขั้นตอนการขึ้นลวดลายของน้ำยาไวแสง (Photoresis Development)

ขั้นตอนการขึ้นลวดลายของน้ำยาไวแสง เป็นกระบวนที่ทำหลังจากการฉายแสงแล้ว ซึ่งจะเป็นการกำจัดน้ำยาไวแสงในส่วนที่ไม่ต้องการออกไปและคงเหลือฟิล์มน้ำยาไวแสงในส่วนที่ต้องการไว้ มีขั้นตอนดังนี้

1. นำแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ที่ผ่านการฉายแสงแล้ว มาล้างด้วยน้ำยา Develop เป็นเวลา 30 นาที น้ำยาไวแสงชนิดลบ บริเวณที่ไม่ได้ถูกแสงจะถูกล้างด้วยน้ำยาขึ้นลวดลายออกไป
2. หลังจากนั้นนำแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์มาล้างด้วยน้ำ DI
3. ล้างแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ด้วยไอโซโพรพานอล (isopropanal ; $(CH_3)_2CHOH$)
4. เป่าแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
5. นำแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ที่ผ่านการขึ้นลวดลายแล้ว มาตรวจสอบความสมบูรณ์ของลวดลายด้วยกล้อง Microscope ถ้าลวดลายไม่มีความสมบูรณ์จะต้องเริ่มกระบวนการสร้างแม่พิมพ์ ใหม่ โดยนำแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์มาล้างน้ำยาไวแสงออกด้วยน้ำยา SU 8-Remover แล้วจึงนำไปทำความสะอาดใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แผนผังขั้นตอนการสร้างแม่พิมพ์สำหรับการสร้างไมโครฟลูอิดิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ขั้นตอนการหล่อขึ้นรูปโพลิเมอร์ PDMS (PDMS Fabrication)

ขั้นตอนการหล่อขึ้นรูปโพลิเมอร์ PDMS เป็นขั้นตอนการสร้างในส่วนท่อของไมโครฟลูอิดิก ซึ่งโพลิเมอร์ที่ใช้ในโครงงานนี้คือ PDMS (Polydimethysiloxance) ซึ่ง PDMS เป็น Elastomer ชนิดหนึ่งที่เหมาะสำหรับการสร้างแบบหล่อขึ้นรูป ขั้นตอนการหล่อขึ้นรูปโพลิเมอร์ PDMS มีขั้นตอนดังนี้

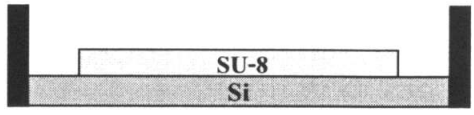
1. ทำขอบกั้นที่แม่พิมพ์โดยนำกระจกสไลด์มาติด เพื่อป้องกันไม่ให้สารละลาย PDMS ที่เตรียมไว้ ไหลออกนอกแผ่นแม่พิมพ์
2. เตรียมสารละลาย PDMS ในอัตราส่วนดังสมการ

   Elastomer + Curing Agent = PDMS

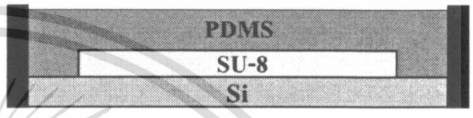
   10 : 1 wt%
3. นำ PDMS ที่เตรียมไว้ มาเทลงบนแม่พิมพ์
4. ทำให้ PDMS แข็งตัวโดยการนำแม่พิมพ์ ที่ทำการเทสารละลาย PDMS ลงไปแล้ว มาอบโดย Hot Plate ที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลานาน 1 ชั่วโมง แล้วปล่อยไว้ให้อุณหภูมิลดลงเองจนเท่ากับอุณหภูมิห้อง เรียกการทำให้ PDMS แข็งตัวนี้ว่า PDMS Curing
5. เมื่อ PDMS แข็งตัวแล้ว จึงทำการแกะ PDMS ออกจากแม่พิมพ์
6. ตัด PDMS ให้มีขนาดเท่ากับกระจกสไลด์ของบริษัท W.Germany รุ่น SUPEORIOR ขนาด 76 X 26 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำขอบกั้นล้อมรอบแม่พิมพ์ เพื่อป้องกันไม่ให้ PDMS ที่เตรียมไว้ ไหลออกนอกแผ่นแม่พิมพ์



นำ PDMS ที่เตรียมไว้ มาเทลงบนแม่พิมพ์ ทำให้ PDMS แข็งตัวโดยอบด้วย Hot Plate ที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลานาน 1 ชั่วโมง



เมื่อ PDMS แข็งตัวจึงทำการแกะ PDMS ออกจากแม่พิมพ์ จะได้ PDMS ที่ผ่านการขึ้นรูปเป็นท่อไมโครฟลูอิดิก

รูปที่ 3.3 แผนผังขั้นตอนการหล่อขึ้นรูปโพลิเมอร์ PDMS สำหรับการสร้างท่อไมโครฟลูอิดิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 ขั้นตอนการประกบติด (Bonding)

ขั้นตอนการประกบติด เป็นขั้นตอนที่นำโพลิเมอร์ PDMS ที่ผ่านการขึ้นรูปเป็นท่อไมโครฟลูอิดิกแล้ว มาประกบติด (Bonding) ลงบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ด้วยเครื่อง RF Plasma Cleaner โดยมีขั้นตอนดังนี้

3.4.1 ขั้นตอนการทำความสะอาดฐานรองรับกระจกสไลด์

ต้องทำความสะอาดฐานรองรับกระจกสไลด์ก่อนที่จะทำการประกบติดกับ PDMS โดยใช้กระบวนการที่เรียกว่า Piranha Process โดยมีกระบวนการคือ

1. นำกระจกสไลด์ไปล้างด้วยน้ำยาล้างคราบไขมัน
2. ล้างกระจกสไลด์ด้วยน้ำไร้ประจุ (de-ionized water) แช่กระจกสไลด์ทิ้งไว้ในน้ำ DI
3. จากนั้นต้มสารละลายระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) กับกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ด้วยอัตราส่วน คือ 1: 4 ตามลำดับ จนถึงอุณหภูมิ 120 °C หรือจนเดือดแล้วจึงนำกระจกสไลด์มาใส่ในสารละลายที่ต้ม เป็นเวลา 15 นาที
4. นำกระจกไปล้างซ้ำด้วยน้ำยาล้างคราบไขมัน
5. ล้างกระจกด้วยน้ำ DI และเป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
6. นำไปอบให้แห้งในเตาอบเป็นเวลา 30 นาที

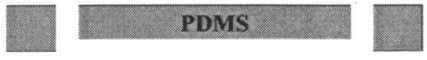
3.4.2 ขั้นตอนการประกบติด PDMS ลงบนฐานรองรับกระจกสไลด์

ขั้นตอนการประกบติด PDMS ลงบนฐานรองรับกระจกสไลด์มีขั้นตอนดังนี้

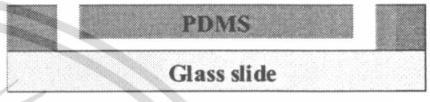
1. ทำการเจาะรูอินพุทและเอาท์พุตของ PDMS ที่ผ่านการขึ้นรูปเป็นท่อไมโครฟลูอิดิก
2. นำกระจกสไลด์ และ PDMS ที่ได้ มาทำความสะอาดด้วยออกซิเจนพลาสมา โดยใช้เครื่อง RF Plasma Cleaner ซึ่งเงื่อนไขที่เหมาะสมในการประกบติดคือ RF Power เท่ากับ 80 วัตต์ และเวลาที่ใช้ในการ Surface Modification เท่ากับ 15 วินาทีทำให้ผิวหน้าของ PDMS สามารถสร้างพันธะกับพื้นผิวอื่นได้
3. จากนั้นนำกระจกสไลด์ และ PDMS มาประกบติดกัน แล้วจึงต่อท่อสายยาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

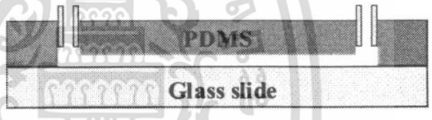
เจาะรูอินพุทและเอาท์พุตของ PDMS ที่
ผ่านการขึ้นรูปเป็นท่อไมโครฟลูอิดิก



นำกระจกสไลด์ และ PDMS ที่ผ่านการขึ้นรูปเป็นท่อ
ไมโครฟลูอิดิกแล้ว มาทำความสะอาดด้วยเครื่อง RF
Plasma Cleaner จากนั้นนำมาประกบติดกัน (Bonding)



ทำการต่อท่อที่รูอินพุทและเอาท์พุต



รูปที่ 3.4 แผนผังขั้นตอนติดประกบโพลิเมอร์ PDMS ลงบนแผ่นฐานรองกระจกสไลด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการทดลองและอภิปรายผล

ในการสร้างไมโครฟลูอิดิกนั้นประกอบด้วยขั้นตอนหลัก 4 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนการออกแบบระบบไมโครฟลูอิดิก (Design Microfluidic system), ขั้นตอนการสร้างแม่พิมพ์ (Mold Fabrication), ขั้นตอนการหล่อขึ้นรูปโพลิเมอร์ PDMS (PDMS Fabrication) และขั้นตอนการประกบติด (Bonding) ได้ผลจากการสร้างดังนี้

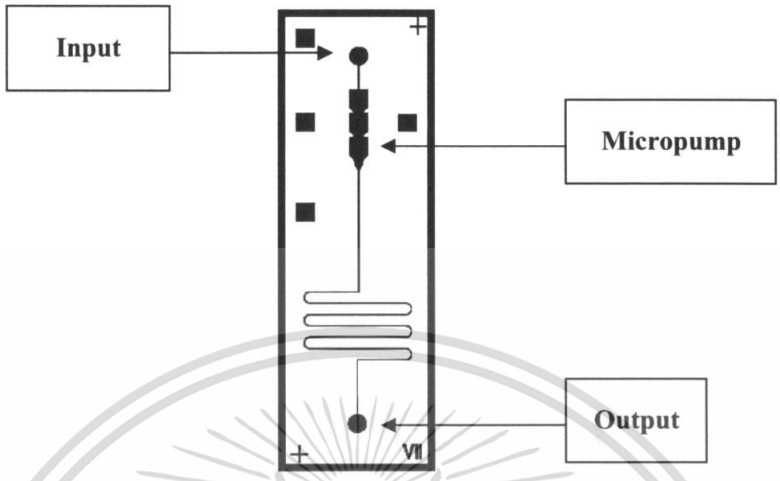
4.1 ระบบไมโครฟลูอิดิกที่ออกแบบ

ขนาดความกว้างของท่อไมโครฟลูอิดิกที่ได้ออกแบบไว้คือ 100 μm โดยจะประกอบไปด้วย 4 ส่วนที่สำคัญดังนี้

1. ท่ออินพุท
2. ส่วนที่ต่อจากท่ออินพุทได้ทำการออกแบบไว้สำหรับใส่ไมโครฮีทเตอร์และไมโครปั๊มพ์
3. ส่วนของท่อที่เป็นขด
4. และส่วนสุดท้ายคือท่อเอาท์พุท

ด้านบนของอุปกรณ์จะเป็นด้านอินพุท สำหรับใส่ของไหล โดยของไหลจะถูกดูดผ่านบริเวณของไมโครปั๊มพ์ที่อยู่ถัดลงมาจากอินพุท ซึ่งไมโครปั๊มพ์จะมีลักษณะเป็นแผ่น Diaphragm เคลื่อนที่ขึ้นลงตามการขยายตัวจากความร้อนของไมโครฮีตเตอร์ ซึ่งจะทำงานเป็นจังหวะทำให้ของไหลเคลื่อนที่ผ่านไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 ไมโครฟลูอิดิกที่ได้ออกแบบไว้

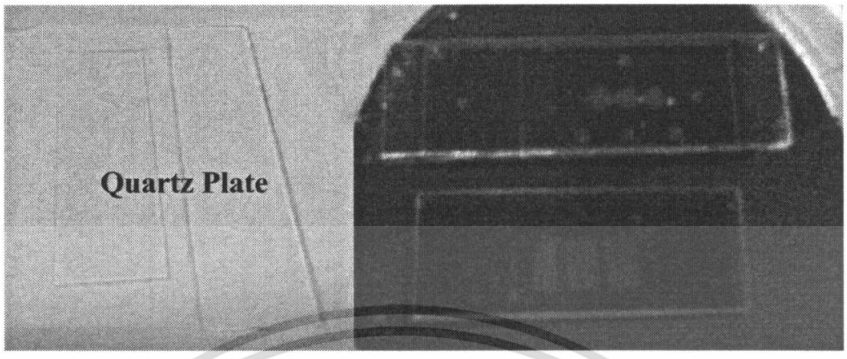
4.2 การสร้างแม่พิมพ์ (Mold Fabrication)

ในการสร้างแม่พิมพ์ต้องนำแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์มาทำความสะอาดก่อนเข้าสู่กระบวนการโฟโตลิโทกราฟฟี ดังแสดงในรูปที่ 4.2

รูปที่ 4.2 แผ่นซิลิกอนเวฟอร์ที่ผ่านการทำความสะอาดแล้ว

จากนั้นทำการเคลือบน้ำยาไวแสงชนิดลบ SU-8 ลงบนผิวหน้าของแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ด้วยเครื่องสปินเนอร์ แล้วนำไปอบ ต่อไปนำ Negative film มาวางบนชั้นน้ำยาไวแสง SU-8 แล้วทับด้วย Quartz Plate เพื่อให้ฟิล์มกับชั้นน้ำยาไวแสงแนบสนิทกัน แล้วทำการฉายแสงโดยใช้เครื่อง UV Exposure ดังแสดงในรูปที่ 4.3 และ รูปที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

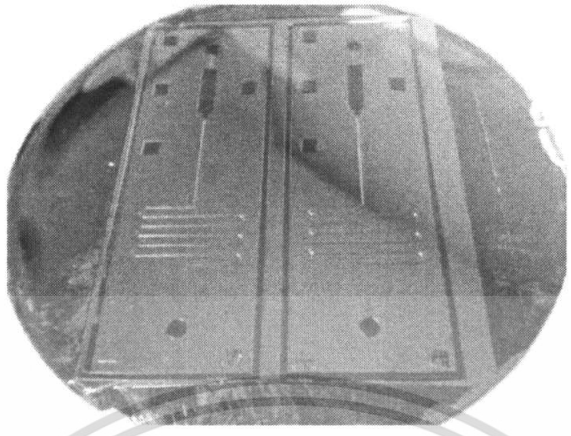


รูปที่ 4.3 แผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ที่มีน้ำยาไวแสง SU-8 เคลือบโดยวางทับด้วย Negative film และ Quartz Plate

รูปที่ 4.4 แผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ที่ผ่านกระบวนการฉายแสงแล้ว

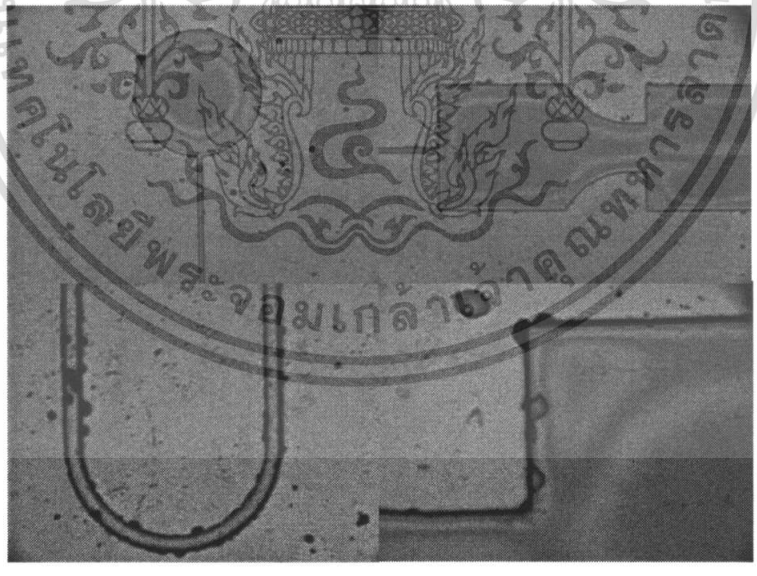
ขั้นตอนต่อไปนำแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ที่ผ่านการฉายแสงมาทำการ Develop ล้างน้ำยาไวแสงในส่วนที่ไม่ต้องการออกไปก็จะได้ลวดลายแม่พิมพ์ตามที่ได้ออกแบบไว้ ดังแสดงในรูปที่ 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 แผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ที่ผ่านกระบวนการ Develop เพื่อล้างน้ำยาไวแสง ในส่วนที่ไม่ต้องการออก

สุดท้ายนำแผ่นซิลิกอนเวเฟอร์ที่ผ่านการขึ้นลวดลายแล้ว มาตรวจสอบความสมบูรณ์ของลวดลายด้วยกล้อง Microscope ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ถ้าลวดลายไม่สมบูรณ์จะต้องเริ่มกระบวนการสร้างแม่พิมพ์ใหม่

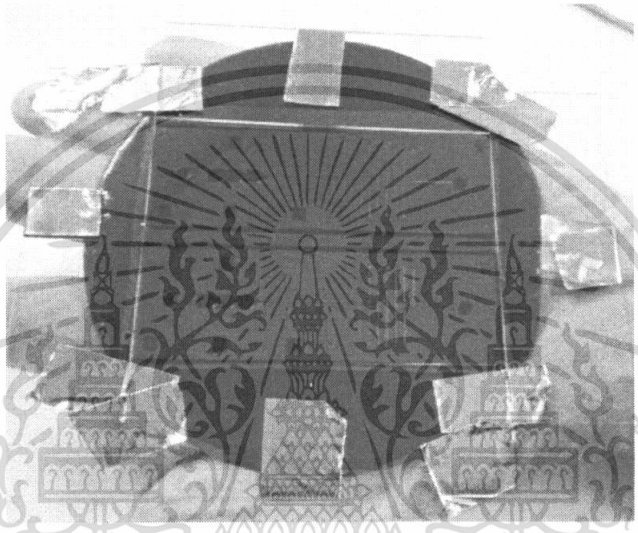


รูปที่ 4.6 ตรวจสอบความสมบูรณ์ของลวดลายด้วยกล้อง Microscope

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

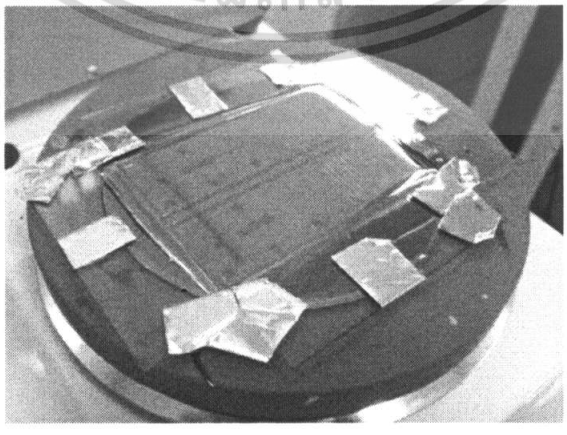
4.3 การหล่อขึ้นรูปโพลิเมอร์ PDMS (PDMS Fabrication)

ในขั้นตอนการหล่อขึ้นรูปโพลิเมอร์ PDMS เป็นขั้นตอนการสร้างในส่วนท่อของไมโครฟลูอิดิก โดยนำกระจกสไลด์มาติดที่แม่พิมพ์เพื่อทำเป็นขอบกั้นป้องกันไม่ให้สารละลาย PDMS ที่เตรียมไว้ ไหลออกนอกแผ่นแม่พิมพ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 แม่พิมพ์ที่ใช้ในการหล่อขึ้นรูป PDMS

จากนั้นนำ PDMS ที่เตรียมไว้ตามกระบวนการที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 มาเทลงบนแม่พิมพ์ แล้วทำให้ PDMS แข็งตัวโดยนำไปอบบน Hot Plate ดังแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ทำให้ PDMS แข็งตัวด้วยการอบบน Hot Plate

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ PDMS แข็งตัวแล้วทำการแกะ PDMS ออกจากแม่พิมพ์โดยใช้มีคัตเตอร์กรีดแล้วลอกออกจะได้ส่วนของไมโครฟลูอิดิกตามที่ได้ออกแบบไว้ ดังแสดงในรูปที่ 4.9

รูปที่ 4.9 PDMS ที่ผ่านการขึ้นรูปเป็นท่อไมโครฟลูอิดิก

4.4 ขั้นตอนการประกบติด (Bonding)

ขั้นตอนการประกบติด เป็นขั้นตอนที่นำโพลิเมอร์ PDMS ที่ผ่านการขึ้นรูปเป็นท่อไมโครฟลูอิดิกแล้ว มาประกบติด (Bonding) ลงบนฐานรองรับที่เป็นกระจกสไลด์ด้วยเครื่อง RF Plasma Cleaner โดยหลักการในการประกบติดนั้นได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 ผู้วิจัยได้ทำการทดลองเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการประกบติดดังนี้

4.4.1 การทดสอบการประกบติด(Bonding) ของ PDMS

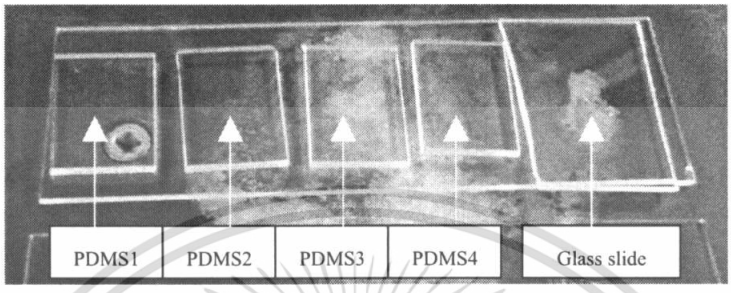
การทดสอบการประกบติดของ PDMS เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการประกบติดระหว่าง PDMS กับ กระจกสไลด์ และ PDMS กับ PDMS โดยใช้เครื่อง RF Plasma Cleaner ซึ่งในการทดสอบแต่ละครั้งจะประกอบไปด้วย

- กระจกสไลด์ 1 ชิ้น เพื่อเป็นการทำความสะอาดผิวหน้าก่อนการประกบติดกับ PDMS
- PDMS 4 ชิ้น ชิ้นแรกเพื่อทดสอบความเป็นไฮโดรฟิลิก ชิ้นที่สองเพื่อประกบติดกับกระจกและสองชิ้นที่เหลือนำมาประกบติดกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดสอบการประกบติดของ PDMS มีวิธีการทดลองดังนี้

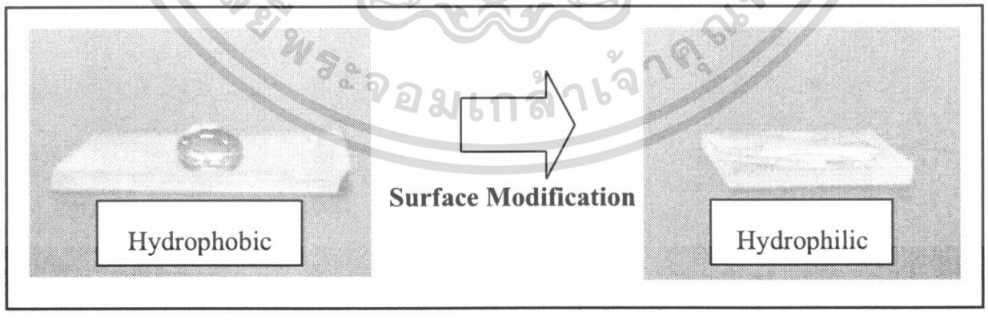
ตอนที่ 1



รูปที่ 4.10 PDMS และกระจกที่ใช้ในการทดสอบความเป็นไฮโดรฟิลิก

เตรียม PDMS และกระจกสไลด์ดังรูปที่ 4.10 แล้วนำมาเข้าเครื่อง RF Plasma Cleaner ด้วยเงื่อนไขว่า กำหนดเวลาของการ Surface Modification ด้วยเครื่อง RF Plasma Cleaner ไว้ที่ 5 วินาที แล้วกำหนดค่า RF Power ดังนี้คือ 50, 60, 70, 80, 90, 100, 120, 140, 180 และ 220 วัตต์ เมื่อทำการ Surface Modification เสร็จแล้ว นำชิ้นงานทั้ง 5 ชิ้นออกจากเครื่อง RF Plasma Cleaner แล้วทำการทดสอบดังนี้

1. ทดสอบความเป็น Hydrophilic กับ PDMS1 โดยการหยดน้ำลงบน PDMS ดังแสดงในรูปที่ 4.10 แล้วบันทึกผลลงในตารางที่ 4.1

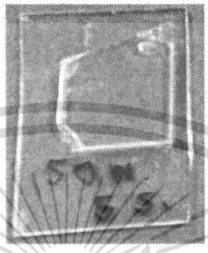
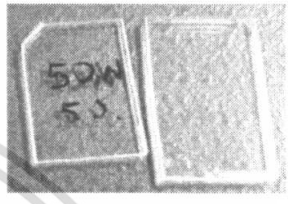
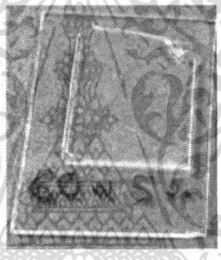
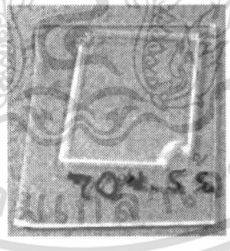
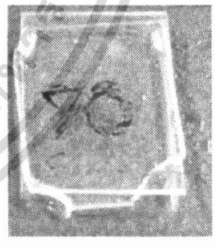
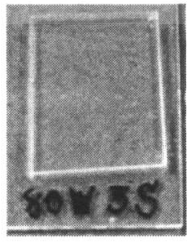
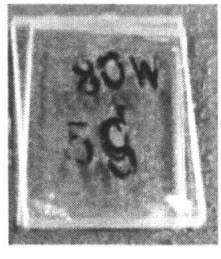


รูปที่ 4.11 PDMS ที่ทำการทดสอบความเป็นไฮโดรฟิลิก

2. นำ PDMS2 และ PDMS3 มาประกบติดกัน แล้วนำ PDMS4 มาประกบติดกับกระจกสไลด์ (ต้องกระทำทันทีที่นำออกจากเครื่อง RF Plasma Cleaner)
3. ทดสอบความติดแน่นของการประกบติดโดยการดึงทั้งสี่มุม ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.1

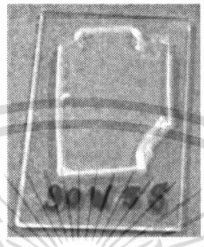
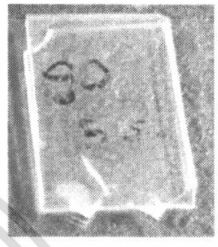
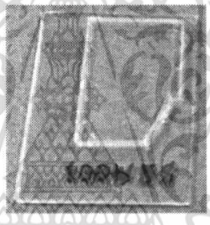
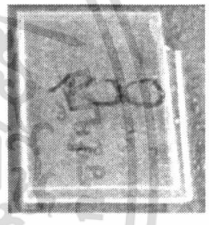
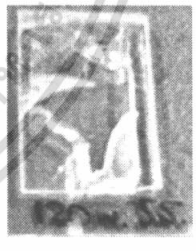
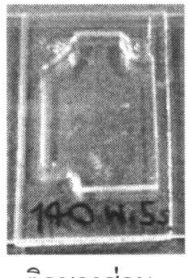
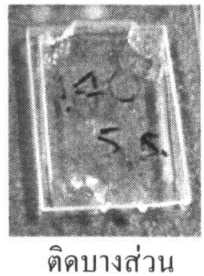
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แสดงการทดสอบการประกบติดของ PDMS โดยกำหนดเวลา 5 วินาที

RF Power (watt)	**ความเป็น Hydrophilic**	**การประกบติดของ PDMS กับ กระจกสไลด์**	**การประกบติดของ PDMS กับ PDMS**
50	ยังมีความเป็น Hydrophobic	 ติดบางส่วน	 ไม่ติดเลย
60	ยังมีความเป็น Hydrophobic	 ติดบางส่วน	ไม่ติดเลย
70	เป็น Hydrophilic	 ติดบางส่วน	 ติดบางส่วน
80	เป็น Hydrophilic	 ติดทุกส่วน	 ติดบางส่วน

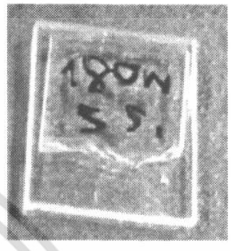
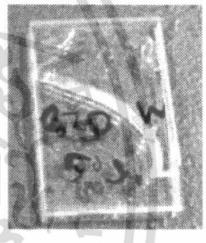
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 (ต่อ) แสดงการทดสอบการประกบติดของ PDMS โดยกำหนดเวลา 5 วินาที

RF Power (watt)	ความเป็น Hydrophilic	การประกบติดของ PDMS กับ กระจกสไลด์	การประกบติดของ PDMS กับ PDMS
90	เป็น Hydrophilic	 ติดบางส่วน	 ติดบางส่วน
100	เป็น Hydrophilic	 ติดบางส่วน	 ติดบางส่วน
120	เป็น Hydrophilic	ติดบางส่วน	 ติดบางส่วน
140	เป็น Hydrophilic	 ติดบางส่วน	 ติดบางส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 (ต่อ) แสดงการทดสอบการประกบติดของ PDMS โดยกำหนดเวลา 5 วินาที

RF Power (watt)	ความเป็น Hydrophilic	การประกบติดของ PDMS กับ กระจกสไลด์	การประกบติดของ PDMS กับ PDMS
180	เป็น Hydrophilic	ติดบางส่วน	 ติดบางส่วน
220	เป็น Hydrophilic	ติดบางส่วน	 ติดบางส่วน

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าที่ RF Power ต่ำๆ 50 และ 60 วัตต์ การประกบติดของ PDMS กับกระจกสไลด์นั้นติดบ้างเป็นบางส่วน และการประกบติดของ PDMS กับ PDMS นั้นไม่ติดเลย ส่วนที่ RF Power สูงๆ ตั้งแต่ 90 ไปจนถึง 220 วัตต์ การประกบติดของ PDMS กับกระจกสไลด์ติดบ้างเป็นบางส่วน และการประกบติดของ PDMS กับ PDMS นั้นก็เหมือนกันคือ ติดบ้างเป็นบางส่วน ส่วนที่ RF Power เท่ากับ 80 วัตต์ การประกบติดของ PDMS กับกระจกสไลด์นั้นติดได้ทุกส่วน แต่การประกบติดของ PDMS กับ PDMS นั้นติดบ้างเป็นบางส่วน

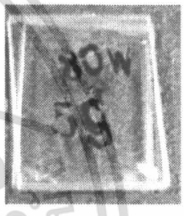
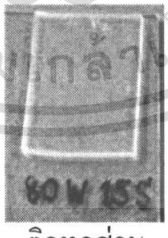
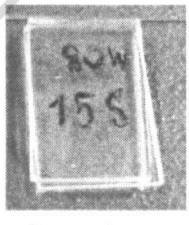
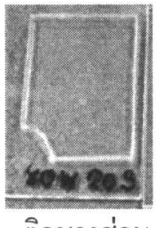
ดังนั้นจากการทดลองในตอนที่ 1 สรุปได้ว่า RF Power ที่ 80 วัตต์ เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการประกบติดระหว่าง PDMS กับกระจกสไลด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอนที่ 2

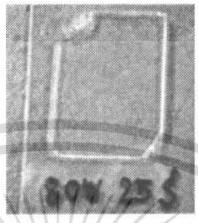
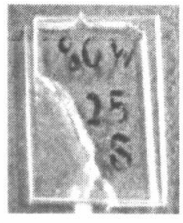
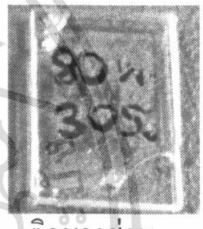
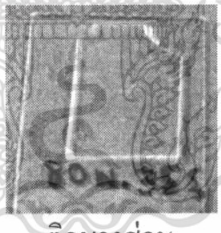
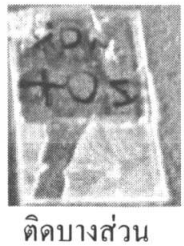
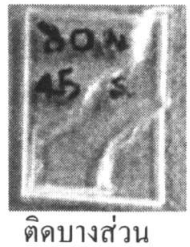
จากตอนที่ 1 ทำให้ทราบค่า RF Power ที่เหมาะสมในการประกบติด คือ 80 วัตต์ ดังนั้นจึงทำการทดลองโดยกำหนด RF Power ไว้ที่ 80 วัตต์ แล้วปรับค่าเวลาเป็น 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 และ 45 วินาที ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงการทดสอบการประกบติดของ PDMS ที่ 80 วัตต์

เวลา (วินาที)	ความเป็น Hydrophilic	การประกบติดของ PDMS กับ กระจกสไลด์	การประกบติดของ PDMS กับ PDMS
5	เป็น Hydrophilic	ติดทุกส่วน	 ติดบางส่วน
10	เป็น Hydrophilic	ติดทุกส่วน	ติดบางส่วน
15	เป็น Hydrophilic	 ติดทุกส่วน	 ติดทุกส่วน
20	เป็น Hydrophilic	 ติดบางส่วน	ติดบางส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 (ต่อ) แสดงการทดสอบการประกบติดของ PDMS ที่ 80 วัตต์

เวลา (วินาที)	ความเป็น Hydrophilic	การประกบติดของ PDMS กับ กระจกสไลด์	การประกบติดของ PDMS กับ PDMS
25	เป็น Hydrophilic	 ติดบางส่วน	 ติดบางส่วน
30	เป็น Hydrophilic	ติดบางส่วน	 ติดบางส่วน
35	เป็น Hydrophilic	 ติดบางส่วน	ติดบางส่วน
40	เป็น Hydrophilic	ติดบางส่วน	 ติดบางส่วน
45	เป็น Hydrophilic	ติดบางส่วน	 ติดบางส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองในตอนที่ 2 การประกบติดกันของ PDMS กับกระจกสไลด์ ผลที่ได้คือ ที่เวลา 5, 10 และ 15 วินาที สามารถประกบติดกันได้ทุกส่วน แต่การประกบติดระหว่าง PDMS กับ PDMS มีกรณีเดียวที่สามารถประกบติดกันได้ทุกส่วนคือ 15 วินาที

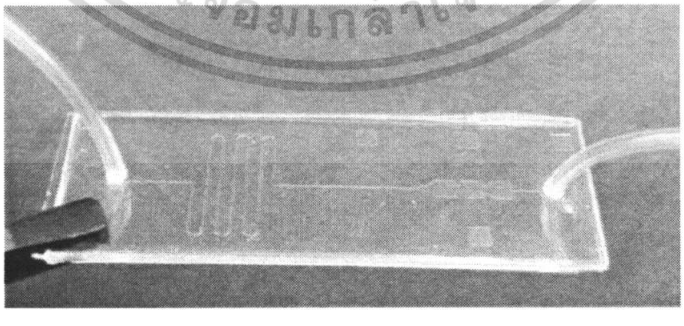
ดังนั้นจากผลการทดลองทั้งตอนที่ 1 และ ตอนที่ 2 สรุปได้ว่าเงื่อนไขที่เหมาะสมในการประกบติดระหว่าง PDMS กับกระจกสไลด์ และ PDMS กับ PDMS คือ RF Power เท่ากับ 80 วัตต์ และเวลาที่ใช้ในการ Surface Modification เท่ากับ 15 วินาที ทำให้ได้ชิ้นงานที่สามารถยอมรับได้

4.4.2 ผลที่ได้จากการประกบติด PDMS ลงบนกระจกสไลด์

เมื่อทราบเงื่อนไขที่เหมาะสมในการประกบติดแล้ว จึงทำการประกบติด PDMS ที่เป็นส่วนของไมโครฟลูอิดิกลงบนกระจกสไลด์ ได้ผลดังรูปที่ 4.11

รูปที่ 4.12 ประกบติด PDMS ที่เป็นส่วนของไมโครฟลูอิดิกลงบนกระจกสไลด์

จากนั้นทำการต่อท่อสายยางที่ด้านอินพุทและเอาท์พุต เสร็จแล้วจะได้ไมโครฟลูอิดิกที่เสร็จสมบูรณ์

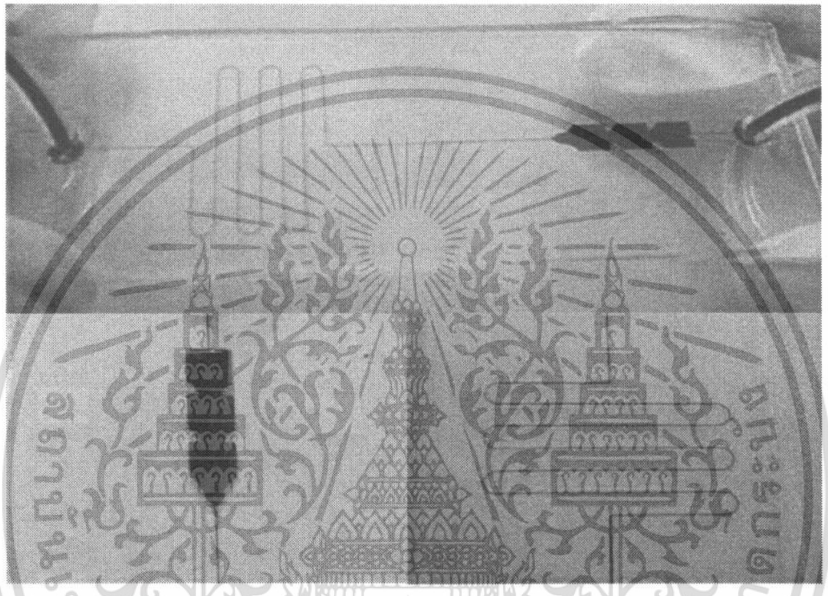


รูปที่ 4.13 ไมโครฟลูอิดิกที่เสร็จสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 การทดสอบไมโครฟลูอิดิก

หลังจากสร้างไมโครฟลูอิดิกได้เสร็จสมบูรณ์แล้ว ได้ทำการทดสอบด้วยการป้อนของเหลวเข้าสู่ระบบพบว่า ไม่เกิดการรั่วซึม ไม่เกิดฟองอากาศ และของเหลวสามารถไหลไปสู่เป้าหมายหรือส่วนที่จะกำหนดเป็นส่วนตรวจวัดได้ดี ดังแสดงในรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 ทดสอบด้วยการป้อนของเหลวเข้าสู่ระบบไมโครฟลูอิดิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปและข้อเสนอแนะ

โครงงานพิเศษนี้ เป็นการศึกษาและสร้างอุปกรณ์ทางเดินของของไหลในระดับไมโครเมตร หรือที่เรียกว่าไมโครฟลูอิดิก เพื่อใช้ในการตรวจวิเคราะห์ทางด้านชีวเคมีหรือด้านไบโอเซนเซอร์ ซึ่งมีข้อดีคือ มีขนาดเล็กกะทัดรัด ใช้สารที่ต้องการตรวจวัดในปริมาณน้อยแต่มีความไวในการวัดสูง การสร้างอุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิกอาศัยเทคนิคในการสร้างวงจรไมโครอิเล็กทรอนิกส์บนแผ่นซิลิกอน โดยมีขั้นตอนหลักๆ ได้แก่ การออกแบบ ซึ่งได้มีการออกแบบความกว้างของไมโครแชลเนลให้มีขนาดเท่ากับ 100 μm การสร้างลวดลายทางเดินของไหลบนแผ่นซิลิกอนผ่านกระบวนการโฟโตลิโทกราฟฟี ทำให้เกิดลวดลายบนแผ่นซิลิกอนซึ่งจะใช้เป็นแม่พิมพ์ จากนั้นใช้วัสดุโพลิเมอร์ PDMS (Polydimethylsiloxane) ในการลอกลายจากแม่พิมพ์ที่สร้างขึ้นแล้วนำมาทำการประกบติดกับแผ่นแก้วด้วยระบบพลาสมาคลื่นความถี่วิทยุ ซึ่งในการประกบติดนั้นผู้วิจัยยังไม่ทราบเงื่อนไขในการประกบติดจึงได้ทำการทดลองเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการประกบติดกันระหว่าง PDMS กับกระจกสไลด์ และจากผลการทดลองเงื่อนไขที่เหมาะสมในการประกบติดกันใช้ กำลังเท่ากับ 80 วัตต์ และเวลาที่ใช้ในการ Surface Modification เท่ากับ 15 วินาที จากตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2 ผู้วิจัยได้กล่าวถึงการประกบติดระหว่าง PDMS กับ PDMS เพื่อประโยชน์ในการสร้างไมโครปั๊มพ์เพราะในการประกบติดไมโครฮีทเตอร์เข้ากับไมโครฟลูอิดิกเพื่อสร้างไมโครปั๊มพ์นั้นจะต้องสร้างชั้น PDMS ที่เรียกว่าชั้นเมมเบรนเพื่อเชื่อมระหว่างชั้นของไมโครฟลูอิดิกกับไมโครฮีทเตอร์จึงต้องมีการประกบติดกันระหว่าง PDMS ที่เป็นท่อไมโครฟลูอิดิกและ PDMS ที่เป็นชั้นเมมเบรน

ในทดสอบด้วยการป้อนของเหลวเข้าสู่ระบบพบว่า ไม่เกิดการรั่วซึม ไม่เกิดฟองอากาศ และของเหลวสามารถไหลไปสู่เป้าหมายหรือส่วนที่จะกำหนดเป็นส่วนตรวจวัดได้ดี

ข้อเสนอแนะ

1. อุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิกที่สร้างขึ้นสามารถนำไปพัฒนาและประยุกต์ใช้กับการตรวจวิเคราะห์ทางด้านชีวเคมีหรือด้านไบโอเซนเซอร์ได้
2. อุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิกที่สร้างขึ้นถูกออกแบบให้มีส่วนที่สามารถนำมาประกบร่วมกับไมโครฮีทเตอร์เพื่อใช้เป็นปั๊มขนาดเล็กสำหรับขับเคลื่อนของไหลให้ไหลเข้าสู่ท่อระดับไมโครเมตรนี้ได้โดยไม่ต้องใช้ปั๊มกลภายนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ. 2550. **องค์ความรู้ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทยสำหรับจัดการกับโรคติดต่ออุบัติใหม่.** ปทุมธานี: ฝ่ายวิจัยกลยุทธ์และดัชนีอุตสาหกรรม. ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ.

ชลิดา คูหาเรือง. 2547. "กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีสำหรับสร้างลวดลายขนาด 5 ไมครอนบนซิลิคอนไดออกไซด์และอลูมิเนียม" วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

โสภา กลิ่นจันทร์. 2546. **ไบโอเซนเซอร์เบื้องต้น**. กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

Yoo, Jong-Chul. et.al. 2007. "Polydimethylsiloxane microfluidic system with in-channel structure for integrated electrochemical detector", Sensor and actuators, Elsevier Science.

Yoo, Jong-Chul. et.al. 2007. "A novel polydimethylsiloxane microfluidic system including thermopneumatic-actuated micropump and Paraffin-actuated microvalve", Sensor and actuators, Elsevier Science.

Jeong, Ok-Chan. et.al. 2005. "Fabrication of a peristaltic PDMS micropump", Sensor and actuators, Elsevier Science.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้